

Рекомендовано Министерством образования и науки  
Республики Казахстан

Н.А. Закирова  
Р.Р. Аширов

# ФИЗИКА

Учебник для 11 класса  
общественно-гуманитарного направления  
общеобразовательной школы

11



УДК 373.167.1  
ББК 22.3я72  
3-18

3-18      Н.А. Закирова, Р.Р. Аширов.  
**Физика.** Учебник для 11 кл. общественно-гуманитарного направления общеобразоват. школы. / Н.А. Закирова, Р.Р. Аширов. – Нур-Султан: Издательство «Арман-ПВ», 2020. – 240 с.

ISBN 978-601-318-314-5

Учебник разработан в соответствии с Типовой учебной программой по предмету «Физика» для 11 класса уровня общего среднего образования по обновленному содержанию.

В изложении материала учтены возрастные особенности учащихся, соблюдены принципы научности и доступности, логика раскрытия учебного материала.

УДК 373.167.1  
ББК 22.3я72

ISBN 978-601-318-314-5

© Закирова Н.А.,  
Аширов Р.Р., 2020  
© Издательство «Арман-ПВ», 2020

Репродуцирование (воспроизведение) любым способом данного издания  
без договора с издательством запрещено

# Условные обозначения

## Определения, которые нужно запомнить

### Контрольные вопросы

Вопросы для самоконтроля теоретического материала

### Упражнение

Задания для выполнения в классе

### Экспериментальное задание

Задания для исследовательской работы

### Творческое задание

Задания на реализацию творческих способностей

### Физика в нашей жизни

Задачи в формате международных исследований (TIMSS, PISA)



#### Ответьте на вопросы

Вопросы, требующие пояснения сущности физического явления



#### Задание

Задания для выполнения в классе



#### Эксперимент

Экспериментальные задания для выполнения в классе



#### Запомните!

Информация, которую нужно выучить



#### Возьмите на заметку

Памятка для учащихся



#### Интересно знать!

Дополнительная информация, относящаяся к содержанию темы. Научно-познавательные факты



#### Кусочки науки

Информация из естественных и точных наук



#### Вспомните!

Сведения для повторения изученного материала



#### Обратите внимание!

Учебный материал, вызывающий затруднения при выполнении упражнений



### Внимание

При необходимости вы всегда сможете найти CD с электронным приложением на сайте [arman-rv.kz](http://arman-rv.kz) и загрузить его на свой компьютер для дальнейшей работы

## Предисловие

*Основная философская ценность физики в том, что она дает мозгу нечто определенное, на что можно положиться.*

*Если вы окажетесь где-то не правы, природа сама сразу же скажет вам об этом*

*Дж. Максвелл*

Дорогие учащиеся!

Вы завершаете изучение курса физики для средней школы. Физика – одна из самых интересных наук о природе, знание ее законов необходимо не только специалисту, но и каждому человеку в повседневной жизни. Физика – одна из самых сложных наук, она учит мыслить, развивает логику. Изучив ее основы, вы сможете решить множество проблем, найти ответы к определенным загадкам природы.

Значительная часть курса 11 класса посвящается современной физике – физике XXI века. Здесь дается представление о теории относительности, квантовой теории, физике атомного ядра и элементарных частиц. Современная физика отличается от классической тем, что в ней много гипотез, постулатов, которые со временем могут измениться. Вы столкнетесь со многими вопросами, на которые еще не найдены ответы. Много тайн таит в себе Вселенная, приоткрыть которые вы сможете, изучив последнюю главу учебника «Космология».

Физика как наука о неживой природе продолжает развиваться, поскольку ее цель – объяснить явления, происходящие в природе, и выявить их закономерности. Все, что нас окружает, находится в постоянном движении, меняется и ставит перед нами новые загадки и проблемы.

После каждого параграфа включены контрольные вопросы, расчетные задачи, экспериментальные и творческие задания. Экспериментальные задания в основном потребуют от вас наблюдательности и умения объяснить наблюдаемые явления. Современную физику невозможно раскрыть в рамках одного учебника, она требует изучения дополнительного материала. С этой целью и введены творческие задания, сообщения по заданным темам желательно представить в виде мультимедийной или обычной презентации. В текст параграфа включены рубрики: «Ответьте на вопросы», «Задание», «Эксперимент», «Запомните!», «Возьмите на заметку», «Интересно знать!», «Кусочки науки», «Вспомните!», «Обратите внимание!», которые позволят осмысливать текстовый материал.

Также в учебнике имеются лабораторные работы, выполнение которых поможет вам закрепить полученные знания.

Ответы к упражнениям вы найдете в конце учебника.

Желаем вам успехов в изучении физики!

Авторы



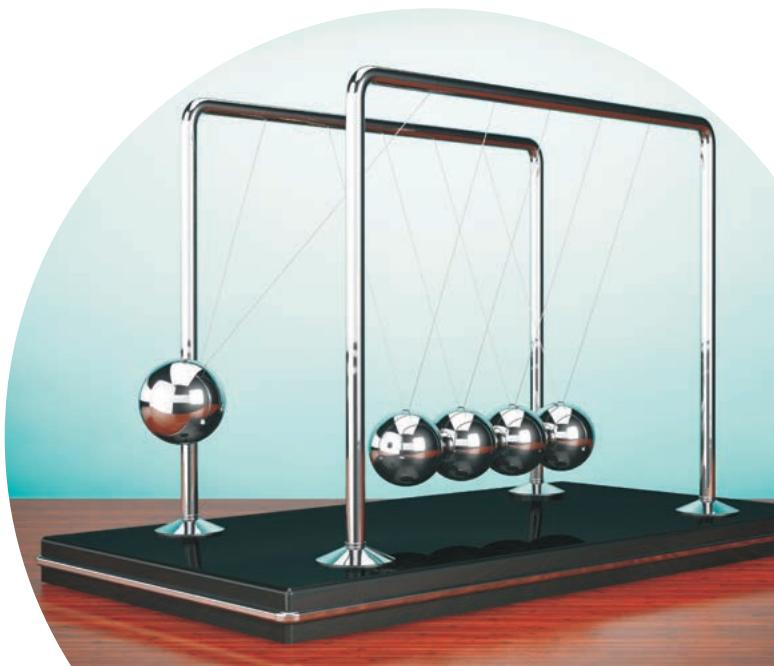
## ГЛАВА 1

# МЕХАНИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ

Колебательное движение – одно из наиболее распространенных движений в природе. Изучение колебаний – это мощный инструмент познания микромира и космических процессов. К числу самых распространенных механических движений в природе относятся повторяющиеся движения, примерами которых являются вращательные движения Земли вокруг своей оси и вокруг Солнца, вращение стрелок часов, функциональная активность живых организмов.

**Изучив главу, вы сможете:**

исследовать гармонические колебания ( $x(t)$ ,  $v(t)$ ,  $a(t)$ )  
экспериментально, аналитически и графически.



# §1. Уравнения и графики гармонических колебаний

## Ожидаемый результат

Прочитав параграф, вы сможете:

- исследовать гармонические колебания:  $x(t)$ ,  $v(t)$ ,  $a(t)$  экспериментально, аналитически и графически.

## I. Условия возникновения свободных гармонических колебаний

Тело совершает свободные гармонические колебания в том случае, когда при его смещении от положения равновесия возникает равнодействующая сила, пропорциональная смещению и направленная к положению равновесия.

**Положением равновесия называют положение тела, в котором векторная сумма сил, действующих на тело равна нулю.**

На тело пружинного маятника, выведенного из состояния равновесия, действует сила упругости, которая удовлетворяет условиям возникновения гармонических колебаний (рис. 1):

$$F_x = -kx. \quad (1)$$

### Задание 1

- Приведите примеры тел, совершающих колебательное движение.
- Из приведенных ниже примеров выберите тела, совершающие свободные колебания: поршень в цилиндре ДВС, маятник механических часов, ветка дерева под порывистым ветром, детские качели, руки человека при ходьбе.

### Задание 2

Колебания математического маятника происходят под действием равнодействующей силы, которая пропорциональна смещению и направлена к положению равновесия (рис. 2):  $F_R = -kx$ . Используя рисунок 2, докажите, что коэффициент пропорциональности равнодействующей силы, действующей на математический маятник, и смещением равен:  $k = \frac{mg}{l}$ . (2)

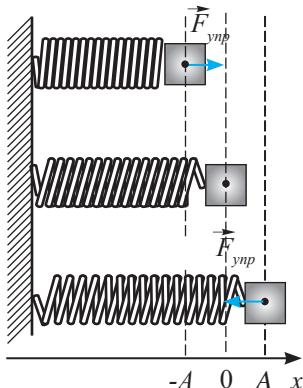


Рис. 1. Сила, вызывающая колебания пружинного маятника

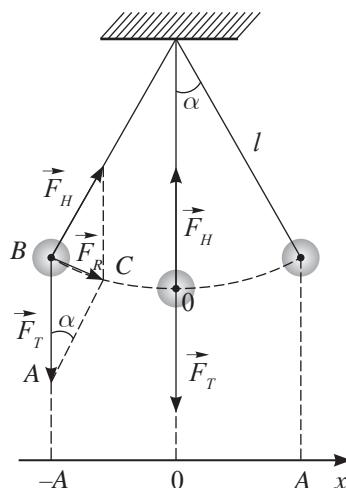


Рис. 2. Силы, вызывающие колебания математического маятника

## II. Законы гармонических колебаний

В пружинном и математическом маятниках могут совершаться свободные гармонические колебания, которые происходят по закону косинуса или синуса.

Без учета сил трения и сопротивления законы гармонических колебаний примут вид:

$$x = A \cos \omega_0 t \quad (3)$$

$$x = A \sin \omega_0 t, \quad (4)$$

где  $A$  – амплитудное значение смещения,

$\omega_0$  – собственная циклическая частота.

Закон движения (3) используют, если тело начинает свое движение из положения максимального отклонения  $x = A$ . Если тело начинает движение из положения равновесия  $x = 0$ , применяют закон движения (4).

### Возьмите на заметку

В общем случае законы гармонических колебаний имеют вид:

$$x = A \cos(\omega_0 t + \varphi_0);$$

$$x = A \sin(\omega_0 t + \varphi_0),$$

где  $\varphi_0$  – начальная фаза,  $\omega_0$  – собственная циклическая частота.

## III. Фаза колебаний. Связь фазы гармонических колебаний с периодом

Аргумент функции косинуса или синуса  $\varphi$  в законах движения (3) и (4) называют *фазой колебаний*:

$$\varphi = \omega_0 t. \quad (5)$$

Единица измерения фазы – радиан,  $[\varphi] = 1 \text{ rad}$ .

Если колебание системы наблюдают с произвольного момента времени, то начальная фаза колебаний отличается от нуля. В этом случае фазу колебаний определяют по формуле:

$$\varphi = \omega_0 t + \varphi_0, \quad (6)$$

где  $\varphi_0$  – начальная фаза колебаний. При  $t = 0$  фаза колебаний равна начальной  $\varphi = \varphi_0$ .

Учитывая связь циклической частоты с периодом колебаний  $\omega_0 = \frac{2\pi}{T}$ , из формулы (5) получим:

$$\varphi = 2\pi \frac{t}{T}. \quad (7)$$

**Фаза колебаний – это угловая мера времени, выраженная в долях периода, и которая характеризует колебание в данный момент времени.**

### Задание 3

Определите зависимость коэффициента пропорциональности силы, приводящей в колебательное движение деревянного кубика, от смещения.

### Возьмите на заметку

Собственная частота колебаний, циклическая частота и период системы зависят, от величин, характеризующих ее: массы груза  $m$  и жесткости пружины  $k$  – для пружинного маятника, длины нити  $l$  и ускорении свободного падения – для математического маятника.

Собственная частота колебаний не зависит от амплитуды колебаний.

### Вспомните!

$$T = \frac{1}{\nu}; \quad T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}};$$

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}; \quad \nu_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}},$$

$$\nu_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{l}}; \quad \omega_0 = \frac{2\pi}{T};$$

$$\omega_0 = 2\pi\nu; \quad \omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}};$$

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{g}{l}}.$$

### Задание 4

Используя формулу (7), определите фазу колебаний, соответствующих следующим промежуткам времени:

$$t = \frac{T}{4}; \quad t = \frac{T}{2}; \quad t = \frac{3T}{4};$$

$$t = T.$$

## IV. Уравнения гармонических колебаний

При ускоренном движении тела применим второй закон Ньютона:

$$ma = F. \quad (8)$$

С учетом формул расчета сил, приводящих маятники в движение (1) и (2), второй закон Ньютона для пружинного маятника примет вид:

$$ma = -kx, \quad (9)$$

для математического маятника:

$$ma = -\frac{mg}{l}x. \quad (10)$$

Нам известно, что скорость тела, движущегося вдоль одной прямой, – это быстрота изменения координаты тела:  $v = \frac{\Delta x}{\Delta t}$ , а ускорение – быстрота изменения скорости тела:  $a = \frac{\Delta v}{\Delta t}$ , тогда при малых значениях  $\Delta t$  скорость можно принять за первую производную от координаты тела  $v = x'$ , а ускорение за первую производную от его скорости:  $a = v'$ . Следовательно, ускорение является второй производной координаты тела:

$$a = x''. \quad (11)$$

Формулы (9) и (10) с учетом (11) примут вид:

$$x'' = -\frac{k}{m}x, \quad (12)$$

$$x'' = -\frac{g}{l}x. \quad (13)$$

Запишем уравнения (12) и (13) в виде:

$$x'' = -\omega_0^2 x. \quad (14)$$

Полученные выражения (12), (13) и (14) называют *уравнениями колеблющегося тела под действием сил упругости и тяжести*.

## V. Скорость и ускорение при колебательном движении

Формулы расчета ускорения и скорости, легко получить из законов движения:

$$v = x' = (A \cos \omega_0 t)' = -A \omega_0 \sin \omega_0 t \quad (15)$$

или  $v = x' = (A \sin \omega_0 t)' = A \omega_0 \cos \omega_0 t,$  (16)

где  $v_{\max} = A \omega_0$  (17) – амплитудное значение скорости.

$$a = x'' = -A \omega_0^2 \cos \omega_0 t \quad (18)$$

или  $a = x'' = -A \omega_0^2 \sin \omega_0 t,$  (19)

$$a_{\max} = A \omega_0^2 \quad (20)$$

где  $a_{\max}$  – амплитудное значение ускорения.

### Задание 5

Используя формулы (17) и (20) запишите формулы зависимости максимальной скорости и максимального ускорения от периода и частоты колебаний.



### Ответьте на вопросы

1. Почему в момент максимального отклонения от положения равновесия, скорость колеблющегося тела равна нулю?
2. Почему при положительных значениях смещения ускорение отрицательное?
3. Почему при нулевом значении смещения ускорение тоже принимает нулевое значение?



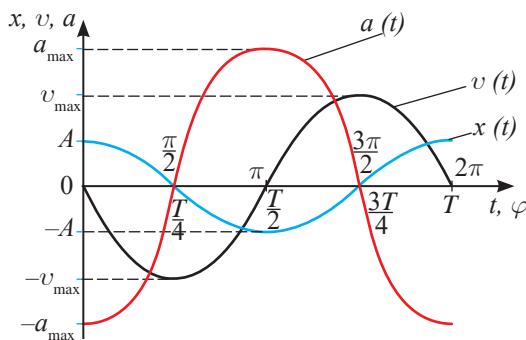
### Запомните!

Для определения разности фаз необходимо выразить зависимость величин от времени через одну и ту же тригонометрическую функцию, используя формулы приведения.

## VI. Графики гармонических колебаний. Сдвиг фаз

Приняв значение начальной фазы равным нулю  $\varphi_0 = 0$ , построим графики колебаний  $x(t)$ ,  $v(t)$ ,  $a(t)$  в пределах одного периода, используя полученные зависимости (3, 15, 18).

Из рисунка 3 видно, что колебания величин происходят со смещением по фазе. Колебания скорости опережают колебания координаты на  $\varphi = \frac{\pi}{2}$ . Колебания ускорения происходят в противофазе с колебаниями координаты тела.



**Рис. 3. Графики зависимости координаты, скорости, ускорения от времени и фазы колебаний**

### Эксперимент

Определите амплитуду и период колебаний пружинного маятника, максимальные значения скорости и ускорения, максимальное значение силы, действующей на тело.

По полученным значениям постройте графики зависимости координаты, скорости и ускорения от времени для маятника.

Для ускорения, применяя соотношения из формулы (18) с учетом (20) при  $\varphi_0 = 0$ , получим:

$$a = -a_{\max} \cos \omega_0 t = a_{\max} \cos(\omega_0 t + \pi).$$

Колебание ускорения опережает колебание координаты тела на  $\pi$ :

$$\Delta\varphi = (\omega_0 t + \pi) - \omega_0 t = \pi.$$

Результаты, полученные нами алгебраическим и графическим методом, совпадают.

**Разность фаз гармонических колебаний одной и той же частоты выраженных через одну тригонометрическую функцию, называют сдвигом фаз.**

### ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Уравнение колебаний математического маятника имеет вид:  $x = 0,02 \sin\left(3\pi t + \frac{\pi}{2}\right)$ .

Определите смещение груза относительно положения равновесия при  $t = \frac{3T}{4}$  и амплитуду скорости.

**Дано:**

$$\begin{aligned}x &= 0,02 \sin\left(3\pi t + \frac{\pi}{2}\right) \\t &= \frac{3T}{4}\end{aligned}$$

$x - ?$

$v_{\max} - ?$

**Решение:**

Заменим в уравнении циклическую частоту  $\omega_0 = 3\pi$  через период колебаний:

$\omega_0 = \frac{2\pi}{T}$  и подставим данное в условии задачи значение времени, получим:

$$x = 0,02 \sin\left(\frac{2\pi}{T} \cdot \frac{3T}{4} + \frac{\pi}{2}\right) = 0,02 \sin\left(\frac{3\pi}{2} + \frac{\pi}{2}\right) = 0.$$

Максимальную скорость колебаний определим по формуле  $v_{\max} = A\omega_0$ ,

$$v_{\max} = 0,02 \cdot 3\pi = 0,06\pi \approx 0,18 \frac{m}{c}.$$

**Ответ:**  $x = 0$ ;  $v_{\max} \approx 0,18 \frac{m}{c}$ .

## Контрольные вопросы

1. Какие колебания называют гармоническими?
2. При каком условии колебания совершаются по закону косинуса, при каком – по закону синуса?
3. Что называют фазой колебаний, что – сдвигом фаз?
4. При каком условии определяют сдвиг фаз колебаний рассматриваемых величин?



## Упражнение

1

1. Чему равна фаза гармонических колебаний для момента времени  $t = \frac{T}{2}$ ? Начальная фаза колебания равна  $180^\circ$ . Ответ представьте в радианах.
2. Математический маятник длиной 0,1 м, совершает гармонические колебания с амплитудой 0,5 см. Определите максимальное значение скорости маятника.
3. Уравнение колебаний пружинного маятника имеет вид:  $0,05 \sin\left(10\pi t + \frac{\pi}{4}\right)$ . Определите смещение груза относительно положения равновесия при  $t = \frac{T}{4}$  и амплитуду скорости.
4. Математический маятник совершает колебания по закону  $x = 0,02 \sin\left(\frac{\pi}{2}t\right)$ . Определите смещение точки от положения равновесия при  $t = \frac{T}{4}$  и амплитуду ускорения.
5. Груз массой 200 г, подвешенный на пружине, колеблется с той же частотой, что и математический маятник длиной 0,2 м. Определите коэффициент жесткости пружины.

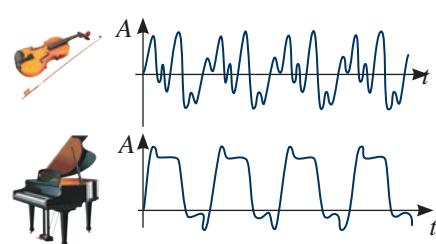
## Экспериментальное задание

Определите амплитуду и период колебаний маятника часов.

По полученным значениям постройте графики зависимости координаты, скорости и ускорения от времени для маятника.

## Творческое задание

Подготовьте сообщение на тему:  
Гармонические колебания и музыка.



Музыкальные инструменты  
и их звуковые колебания

В энциклопедическом словаре дано следующее определение пульса:

Пульс – (от лат. *pulsus* – удар, толчок), периодическое толчкообразное расширение стенок артерий, синхронное с сокращением сердца. Пульс взрослого человека в покое 60–80 ударов в 1 минуту.

На рисунках 4–6 даны кардиограммы нормального, ускоренного и замедленного ритма сердцебиения. Оцените период и частоту сердцебиения при тахикардии и брадикардии, полагая, что пульс нормального ритма равен 60 ударов в минуту.

Являются ли сокращения сердца гармоническими колебаниями?

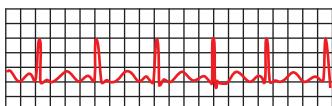


Рис. 4. Нормальный сердечный ритм

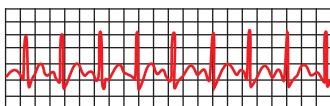


Рис. 5. Тахикардия, ускоренный ритм

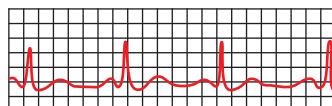


Рис. 6. Брадикардия, замедленный ритм

### Интересно знать

Колебания земной коры

1. Землетрясение 1887 года магнитудой 7,3 разрушило строения на площади порядка 2000 км<sup>2</sup> (рис. 7). Эпицентр колебаний находился южнее г. Верного (ныне Алматы) на 10–12 км.
2. Выбор нового места для строительства г. Верного было поручено профессору Петербургского горного института И. В. Мушкетову.
3. Алматы и ее окрестности относятся к Алматинскому сейсмоактивному району.
4. Научным центром, занимающимся прогнозированием и изучением землетрясений, является Институт сейсмологии МОН РК, расположенный в г. Алматы.
5. Согласно статистике Института сейсмологии МОН РК в 2015 году было зарегистрировано 11,5 тысячи землетрясений. В 2016 году на тысячу меньше.



Рис. 7. Виды города Верного после землетрясения, 1887 год

## Итоги главы 1

Механические колебания	
Уравнение движения	$x'' = -\omega_0^2 x; \quad x'' = -\frac{k}{m} x; \quad x'' = -\frac{g}{l} x$
Закон движения	$x = A \cos(\omega_0 t + \varphi_0);$ $x = A \sin(\omega_0 t + \varphi_0)$
Скорость колебательного движения.	$v = x' = -A\omega_0 \sin(\omega_0 t + \varphi_0);$ $v = x' = A\omega_0 \cos(\omega_0 t + \varphi_0)$
Максимальная скорость.	$v_m = A\omega_0$
Ускорение колебательного движения.	$a = x'' = -A\omega_0^2 \cos(\omega_0 t + \varphi_0);$ $a = x'' = -A\omega_0^2 \sin(\omega_0 t + \varphi_0)$
Максимальное ускорение.	$a_{\max} = A\omega_0^2$

Обозначение физических величин, единицы измерения в СИ

Обозначение	Физическая величина	СИ	Обозначение	Физическая величина	СИ
$a$	Ускорение	м/с <sup>2</sup>	$v$	Скорость	м/с
$a_{\max}$	Максимальное ускорение	м/с <sup>2</sup>	$v_{\max}$	Максимальная скорость	м/с
$x$	Смещение	м	$A$	Амплитуда	м
$k$	Коэффициент жесткости	Н/м	$\varphi_0$	Начальная фаза	рад
$m$	Масса груза	кг	$\varphi = \omega_0 t + \varphi_0$	Фаза	рад
$l$	Длина нити	м	$\omega_0$	Собственная-циклическая частота	рад/с
$T$	Период	с	$\nu$	Частота	Гц

### Глоссарий

**Положение равновесия** – положение тела, в котором векторная сумма сил, действующих на тело равна нулю.

**Сдвиг фаз** – разность фаз колебаний одной частоты, выраженных через одну тригонометрическую функцию.

**Фаза колебаний** – угловая мера времени, выраженная в долях периода.



## ГЛАВА 2

# ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ КОЛЕБАНИЯ

Электромагнитные колебания имеют много общего с механическими колебаниями: они подчиняются одинаковым количественным законам. Электромагнитные колебания – это периодические изменения заряда, силы тока и напряжения.

**Изучив главу, вы сможете:**

- описывать условия возникновения свободных и вынужденных колебаний;
- проводить аналогии между механическими и электромагнитными колебаниями.



## § 2. Свободные и вынужденные электромагнитные колебания. Аналогии между механическими и электроомагнитными колебаниями

### Ожидаемый результат

Прочитав параграф, вы сможете:

- описывать условия возникновения свободных и вынужденных электромагнитных колебаний;
- проводить аналогии между механическими и электроомагнитными колебаниями.

### Вспомните!

- Конденсатор и катушка индуктивности, соединенные между собой в замкнутую цепь, представляют собой колебательный контур, в котором могут происходить электромагнитные колебания.
- Сила тока – это заряд, прошедший в единицу времени через поперечное сечение проводника:  
 $i = \frac{\Delta q}{\Delta t}$ . При малых значениях  $\Delta t$  сила тока является первой производной от заряда:  $i = q'$ .

### Задание 1

- Сравните уравнение (14) из § 1 описывающее механическое колебание, с уравнением (6) для электромагнитных колебаний.
- На основе аналогии величин запишите законы изменения заряда на обкладках конденсатора.

### I. Свободные электромагнитные колебания. Уравнение свободных колебаний

Создать свободные электромагнитные колебания в контуре можно двумя способами: зарядить конденсатор (рис. 8) или создать внешним переменным магнитным полем ЭДС индукции в катушке.

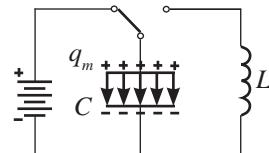


Рис. 8. Зарядка конденсатора колебательного контура

**Свободные электромагнитные колебания** – периодически повторяющиеся изменения силы тока в катушке и напряжения между обкладками конденсатора без потребления энергии от внешних источников.

Запишем закон Ома для колебательного контура:

$$u + iR_L = e_{is}, \quad (1)$$

где  $u$  – переменное напряжение на обкладках конденсатора,  $e_{is}$  – ЭДС самоиндукции катушки,  $i$  – сила тока в замкнутом контуре,  $R_L$  – активное сопротивление катушки.

Если колебательный контур считать идеальным, т.е.  $R_L \rightarrow 0$ , напряжение выразить через заряд, переданный конденсатору:  $u = \frac{q}{C}$ , а ЭДС самоиндукции через изменение тока в катушке  $e_{is} = -L \frac{\Delta i}{\Delta t} = -Li'$ , то выражение (1) примет вид:

$$\frac{q}{C} = -Li'. \quad (2)$$

**Идеальный колебательный контур** – контур, активное сопротивление которого равно нулю, в конденсаторе нет токов проводимости и других эффектов, приводящих к потерям энергии.

При малых значениях изменения аргумента, которым является промежуток времени,  $i = q'$ , тогда

$$i' = q''. \quad (3)$$

Подставив (3) в (2), получим уравнение, которое описывает процессы, происходящие в идеальном колебательном контуре или закон Ома для колебательного контура:

$$q'' = -\frac{1}{LC}q. \quad (4)$$

Введем понятие «собственная циклическая частота колебаний»:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{LC}}, \quad (5)$$

тогда формула (4) примет вид:

$$q'' = -\omega_0^2 q. \quad (6)$$

Получено уравнение (6), описывающее электромагнитные колебания в контуре.

## II. Величины, характеризующие свободные колебания в колебательном контуре

Процессы, происходящие в колебательном контуре, характеризуются такими величинами, как: период, собственная частота, циклическая частота, заряд, сила тока и напряжение.

Мгновенное значение силы тока в колебательном контуре определим из уравнений (7) и (8), взяв первую производную от заряда:

$$i = q' = -q_m \omega_0 \sin \omega_0 t = -I_m \sin \omega_0 t$$

$$\text{или } i = q' = -q_m \omega_0 \cos \omega_0 t = -I_m \cos \omega_0 t. \quad (10)$$

Из полученных выражений следует, что максимальное значение силы тока в контуре зависит от максимального значения заряда:

$$I_m = q_m \omega_0. \quad (11)$$

Чем больше заряд на обкладках конденсатора, тем выше напряжение между ними:  $u = \frac{q}{C}$ . В колебательном контуре напряжение и заряд меняются по одному и тому же закону:

$$u = \frac{q_m}{C} \cos \omega_0 t \text{ или } u = \frac{q_m}{C} \sin \omega_0 t. \quad (12)$$

В колебательном контуре заряд, сила тока и напряжения меняются по закону синуса или косинуса

**Электромагнитные колебания – периодические изменения заряда, тока и напряжения электрического и магнитного полей.**

### Задание 2

Используя формулу собственной циклической частоты (5), запишите формулы расчета периода и частоты для электромагнитных колебаний.

### Ответьте на вопросы

1. При каком условии изменение заряда на обкладках конденсатора описывается законом  $q = q_m \cos \omega_0 t?$  (7)
2. При каком условии необходимо использовать закон  $q = q_m \sin \omega_0 t?$  (8)
3. При каком условии законы примут вид:  
 $q = q_m \cos(\omega_0 t + \varphi_0)$  или  
 $q = q_m \sin(\omega_0 t + \varphi_0)?$  (9)

### Возьмите на заметку

Период и собственная частота электромагнитных колебаний зависят только от емкости конденсатора С и индуктивности катушки L. Они не зависят от заряда, силы тока и напряжения.

### III. Аналогия величин, характеризующие механические и электромагнитные колебания

Всем величинам, характеризующим механические колебания, можно найти аналоги среди величин, характеризующих электромагнитные колебания (таблица 1).

Таблица 1. Аналогия величин, характеризующих механические и электромагнитные колебания

Механические колебания	Электромагнитные колебания
Смещение $x$	Заряд $q$
Амплитуда колебаний $A$	Максимальный заряд $q_m$
Скорость $v = x'$	Сила тока $i = q'$
Ускорение $a = v' = x''$	Скорость изменения силы тока $\frac{\Delta I}{\Delta t}$
Масса $m$	Индуктивность $L$
Коэффициент жесткости $k$	Величина, обратная емкости $\frac{1}{C}$
Сила $F = ma$	Напряжение $u = e_i = Li'$

### IV. Энергии колебательных систем

Аналогия величин позволяет по формулам для механических колебаний записать формулы для электромагнитных колебаний. Например, кинетическая энергия пружинного маятника определяется массой и скоростью тела:  $W_k = \frac{mv^2}{2}$ . Для электромагнитных волн, получим:  $W_{m.n.} = \frac{Li^2}{2}$ . Потенциальная энергия пружинного маятника определяется смещением от положения равновесия  $W_p = \frac{kx^2}{2}$ . На основе аналогии величин для электромагнитных колебаний будем иметь  $W_{e.n.} = \frac{q^2}{2C}$ . Следовательно, аналогом потенциальной энергии является энергия электрического поля заряженного конденсатора, аналогом кинетической энергии – энергия магнитного поля катушки индуктивности.



#### Запомните!

Автоколебательные системы – это системы, в которых совершаются незатухающие колебания за счет поступления энергии от источника внутри системы.

### V. Автоколебательные системы.

#### Вынужденные колебания

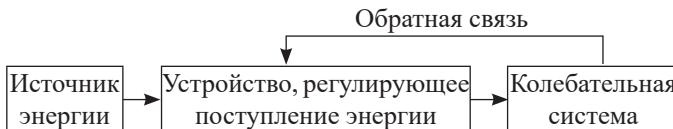
Автоколебательные системы позволяют получить незатухающие колебания различных частот. В этих системах есть свой источник, который компенсирует потери энергии в определенные моменты времени.

Основные элементы автоколебательной системы изображены на рисунке 9.



#### Задание 3

Рассмотрите на рисунке 9 принципиальную схему устройства автоколебательной системы. Поясните принцип действия автоколебательной системы.



**Рис. 9.** Принципиальная схема устройства автоколебательной системы

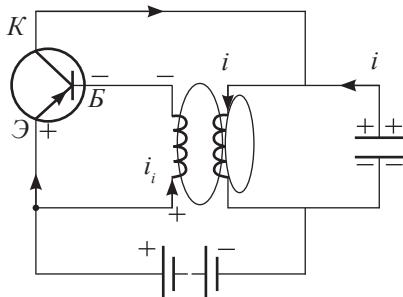
### Вспомните!

Вынужденные колебания – это колебания, происходящие под воздействием внешней периодически действующей силы.

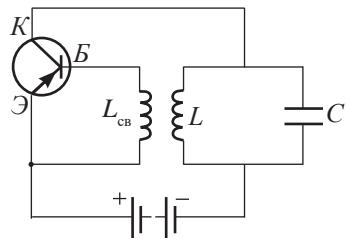
## VI. Генератор на транзисторе

На рисунке 10 изображена схема автоколебательной электрической системы, получившей название «генератор на транзисторе». Роль клапана в нем выполняет транзистор. Обратную связь осуществляет катушка связи  $L_{cb}$ .

Если на эмиттер  $p-n-p$  транзистора подать положительный потенциал, то переход эмиттер – база ( $p-n$ ) будет прямым, а переход база – коллектор ( $n-p$ ) – обратным. Если потенциал на базе отрицательный, то в цепи возникает ток (рис. 11). Ток прекращается, если потенциал на базе становится положительным. Отрицательный потенциал на базе создает индукционный ток катушки связи (рис. 12).



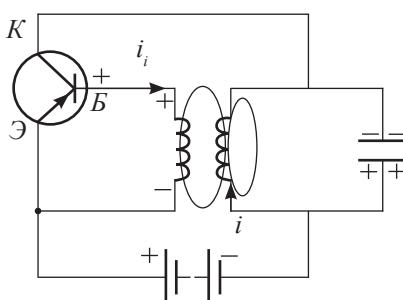
**Рис. 11.** Переход эмиттер – база открыт. Происходит подзарядка конденсатора



**Рис. 10.** Схема автоколебательной электрической системы

### Вспомните!

Транзистор – это полупроводниковый прибор с двумя  $p-n$  переходами. Транзистор обладает свойством близнерционности, используется для работы с сигналами высокой частоты от кГц до ТГц.



**Рис. 12.** Переход эмиттер – база закрыт. Подзарядка конденсатора прекращается

### Задание 4

На основе правила Ленца объясните изменение потенциала на базе транзистора (рис. 11 и 12).

### Вспомните!

Индукционный ток всегда имеет такое направление, при котором его магнитное поле противодействует изменению магнитного потока, вызывающему этот ток.



### Ответьте на вопросы

- Можно ли автоколебания считать свободными колебаниями? Почему?
- Можно ли автоколебания считать вынужденными колебаниями? Почему?
- Почему при увеличении силы тока в колебательном контуре направление индукционного тока в катушке связи имеет противоположное значение?
- Почему в автоколебательных системах подача энергии от источника тока должна происходить в строго определенный момент времени?



### Задание 5

Определите частоту колебаний, созданного генератором на транзисторе. Колебательный контур состоит из конденсатора емкостью  $C = 0,1 \text{ мкФ}$  и катушки индуктивностью  $L = 10^{-10} \text{ Гн}$ .

### ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Определите период и частоту колебаний, если максимальный заряд на обкладках конденсатора  $6 \text{ мкКл}$ , амплитуда силы тока  $2 \text{ мА}$ .

**Дано:**

$$\begin{aligned} q_{\max} &= 6 \text{ мкКл} \\ I_{\max} &= 2 \text{ мА} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} T - ? \\ \nu - ? \end{aligned}$$

**СИ**

$$\begin{aligned} 6 \cdot 10^{-6} \text{ Кл} \\ 2 \cdot 10^{-3} \text{ А} \end{aligned}$$

**Решение:**

Максимальные значения силы тока и заряда связаны формулой:

$$I_{\max} = q_{\max} \cdot \omega = q_{\max} \cdot \frac{2\pi}{T}.$$

Выразим из полученной формулы период:

$$T = \frac{q_{\max} \cdot 2\pi}{I_{\max}}.$$

Частота колебаний является обратной величиной периода:  $\nu = \frac{1}{T}$ .

Выполним вычисления:

$$T = \frac{6 \cdot 10^{-6} \text{ Кл} \cdot 2 \cdot 3,14}{2 \cdot 10^{-3} \text{ А}} = 18,82 \text{ мс};$$

$$\nu = \frac{1}{18,82 \cdot 10^{-3} \text{ с}} \approx 53 \text{ Гц}.$$

**Ответ:**  $T = 18,82 \text{ мс}; \nu \approx 53 \text{ Гц}$ .

### Контрольные вопросы

- Какие колебания называют электромагнитными?
- Назовите величины, характеризующие электромагнитные колебания.
- Какие законы используют для описания процессов в колебательной системе?
- Что называют автоколебательной системой?
- Укажите основные элементы автоколебательной системы.
- Какова роль транзистора в электрической автоколебательной системе?
- Каким образом осуществляется обратная связь в генераторе на транзисторе?



## Упражнение

2

- При индуктивности колебательного контура 100 мГн частота свободных электрических колебаний равна 2 МГц. Какой должна быть индуктивность контура при неизменной электроемкости, чтобы частота колебаний в контуре стала равной 4 МГц?
- Колебательный контур состоит из катушки индуктивности и двух одинаковых конденсаторов, включенных параллельно. Во сколько раз увеличится частота свободных электрических колебаний в контуре, если конденсаторы включить последовательно?
- Колебания электрического заряда в колебательном контуре происходят по закону  $q = 10 \cos 20\pi t$  мкКл. Определите период колебаний и максимальное значение напряжения на обкладках конденсатора емкостью 2 мкФ.
- Заряд на пластинах конденсатора в колебательном контуре изменяется по закону  $q = 10^{-6} \cdot \sin\left(100\pi t + \frac{\pi}{2}\right)$  Кл. Запишите закон, по которому изменяется сила тока в контуре, и определите период колебаний.
- Максимальный заряд на обкладках конденсатора 1 мкКл, амплитуда силы тока 1 мА. Определите период колебаний.
- Изменение заряда конденсатора идеального колебательного контура происходит по закону  $q = 10^{-3} \sin 100\pi t$  Кл. Определите максимальную энергию электрического поля конденсатора, если его электроемкость равна 10 мкФ.

## Творческое задание

Подготовьте сообщение по темам (на выбор):

- Практические применения колебательного контура и генератора на транзисторе.
- Электромагнитные колебания в живой природе.

## Транзисторный радиопередатчик

Самым простым устройством, создающим незатухающие электромагнитные колебания, является генератор на транзисторе. Он используется в качестве радиопередающего устройства. В таблице представлены частоты, на которых работают некоторые радиоканалы РК.



<b>QAZAQ RADIOSY</b> 	<b>Казахское радио</b> г. Нур-Султан 106,8 МГц	<b>АСТАНА РАДИОСЫ</b> 	<b>Радио Астана</b> г. Нур-Султан 101,4 МГц
	<b>Ретро FM</b> г. Алматы 107 МГц		<b>DALA FM</b> г. Алматы 100,2 МГц



### Задание

Рассчитайте емкость конденсаторов, которые необходимо соединить с катушкой индуктивностью 1 мГн для получения указанных частот.



### Интересно знать

#### «Человек – колебательный контур»

1. Живую клетку можно представить в виде колебательного контура с электрической емкостью и сопротивлением, емкость клетки определяется свободно радикальными реакциями и системой антиоксидантной защиты, а сопротивление – ферментативным окислением.
2. В виде колебательного контура можно представить не только клетку, но и печень, а также систему кровообращения – каскад замкнутых проводников от петель капилляров до большого и малого кругов кровообращения (рис. 13).
3. Нервная система координирует работу всего организма.
4. Ритмы электрического потенциала органов человека: желудка и кишечника – 0,01...0,05 Гц; легких – 0,2...0,3 Гц; сердца – около 1,2 Гц; нервной системы – 10...1000 Гц; ритм электрической активности головного мозга – 8... 100 Гц.



*Рис. 13. Колебания системы кровообращения*

## Итоги главы 2

Свободные электромагнитные колебания	
Уравнение свободных колебаний	$q'' = -\omega_0^2 q$ ; $q'' = -\frac{1}{LC} q$
Закон электромагнитных колебаний	$q = q_m \cos(\omega t + \varphi_0)$ ; $q = q_m \sin(\omega t + \varphi_0)$
Сила тока	$i = -I_m \sin \omega t$ ; $I_{\max} = q_{\max} \omega$
Период	$T = 2\pi\sqrt{LC}$
Собственная частота	$\nu_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$
Собственная циклическая частота	$\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{LC}}$
Полная энергия колебательного контура	$W = \frac{q^2}{2C} + \frac{Li^2}{2}$
Закон сохранения энергии	$W_{\text{з.п.}} + W_{\text{м.п.}} = \text{const}$

Обозначение физических величин, единицы измерения в СИ

Обозначение	Физическая величина	СИ	Обозначение	Физическая величина	СИ
$q$	Мгновенное значение заряда	Кл	$I_{\max}$	Максимальное значение силы тока	А
$i$	Мгновенное значение силы тока	А	$\varphi_0$	Начальная фаза	рад
$\frac{\Delta I}{\Delta t}$	Скорость изменения силы тока	А/с	$\varphi = \omega_0 t + \varphi_0$	Фаза	рад
$q_{\max}$	Максимальный заряд	Кл	$\omega$	Циклическая частота	рад/с
$L$	Индуктивность катушки	Гн	$\omega_0$	Собственная циклическая частота	Гц
$C$	Емкость конденсатора	$\Phi$	$W_{\text{з.п.}}$	Энергия электрического поля	Дж

Обозначение	Физическая величина	СИ	Обозначение	Физическая величина	СИ
$T$	Период	с	$W_{m.p.}$	Энергия магнитного поля	Дж
$\pi$	Постоянная $\pi = 3,14$	$\pi = 3,14$	$\nu_0$	Собственная частота	Гц

## Глоссарий

**Автоколебательные системы** – системы, в которых совершаются незатухающие колебания за счет поступления энергии от источника внутри системы.

**Вынужденные колебания** – колебания, происходящие под воздействием внешней периодически действующей силы.

**Идеальный колебательный контур** – контур, активное сопротивление которого равно нулю, в конденсаторе нет токов проводимости и других эффектов, приводящих к потерям энергии.

**Свободные электромагнитные колебания** – периодически повторяющиеся изменения силы тока в катушке и напряжения между обкладками конденсатора без потребления энергии от внешних источников.

**Электромагнитные колебания** – периодические изменения заряда, тока и напряжения электрического и магнитного полей.



## ГЛАВА 3

# ПЕРЕМЕННЫЙ ТОК

Под воздействием переменного электрического поля, созданного генератором, в промышленной сети возникает переменный ток, он представляет собой колебательное движение заряженных частиц.

### Изучив главу, вы сможете:

- исследовать принцип работы генератора переменного тока, используя модель генератора;
- характеризовать переменный ток, используя такие физические величины как период, частота, максимальное и эффективное/ действующее значения напряжения, сила тока, электродвижущая сила;
- объяснять условие резонанса и называть сферы его применения;
- рассчитывать резонансную частоту;
- объяснять экономические преимущества переменного тока высокого напряжения при передаче электрической энергии;
- экспериментально определять число витков в обмотках трансформатора;
- оценивать преимущества и недостатки источников электроэнергии в Казахстане.



## § 3. Генератор переменного тока

### Ожидаемый результат

Прочитав параграф, вы сможете:

- исследовать принцип работы генератора переменного тока, используя модель генератора.

### Эксперимент

Проведите наблюдение работы модели индукционного генератора переменного и постоянного тока (рис. 14).

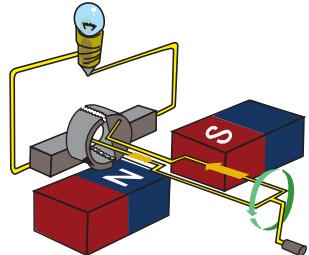
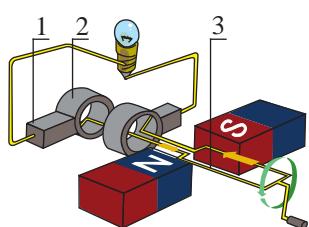
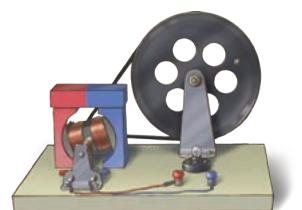


Рис. 14. Модели индукционных генераторов постоянного и переменного тока (динамомашин): 1) щетки; 2) кольца; 3) рамка

### I. Роль индукционного генератора переменного тока в промышленной сети

В быту и на производстве используют электрические приборы различной мощности, для питания которых создана промышленная сеть переменного тока с частотой 50 Гц.

**Переменный ток – это вынужденные колебания заряженных частиц в проводнике под воздействием внешней периодически изменяющейся электродвижущей силы.**

Источниками тока в этой сети являются индукционные генераторы переменного тока, расположенные на электростанциях. Переменный ток поступает по проводам линий электропередач к потребителям.

Индукционный генератор – это устройство, преобразующее механическую энергию в электрическую.

### Задание 1

- Укажите на рисунке 14 модели постоянного и переменного тока. Назовите основное различие моделей.
- Назовите основные части генератора индукционного тока.
- Поясните принцип действия генератора индукционного тока.

### Вспомните!

При изменении магнитного потока, пронизывающего замкнутый проводящий контур, в нем возникает индукционный ток.

Магнитный поток  $\Phi$ , пронизывающий поверхность площадью  $S$ , равен  $\Phi = BS\cos\varphi$  (1), где  $\varphi$  – угол между нормалью к плоскости рамки  $\vec{n}$  и вектором магнитной индукции  $\vec{B}$  (рис. 15).

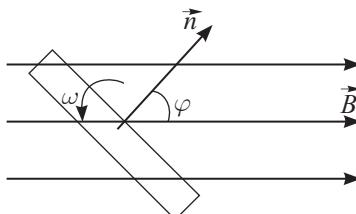


Рис. 15. Изменение магнитного потока, пронизывающего замкнутый контур,  $\vec{n}$  – нормаль к плоскости рамки



### Ответьте на вопросы

- Какой метод изменения магнитного потока используют в индукционных генераторах?  
Назовите способы изменения магнитного потока, пронизывающего замкнутый контур.
- Почему в технике используют только один из названных методов изменения магнитного потока?
- Какой метод изменения магнитного потока изображен на рисунке 15?



### Вспомните!

Закон электромагнитной индукции для замкнутого контура:

$$\varepsilon_i = -\frac{\Delta \Phi}{\Delta t}. \text{ Для контура}$$

$$\text{из } N \text{ витков } \varepsilon_i = -N \frac{\Delta \Phi}{\Delta t},$$

где  $\Delta \Phi = \Phi_2 - \Phi_1$  – изменение магнитного потока.



### Возьмите на заметку

Значение угла поворота при вращении рамки с угловой скоростью  $\omega$  будет определяться формулой:  $\varphi = \omega t$ , с учетом которой, формула расчета магнитного потока (1) примет вид:  $\Phi = BS \cos \omega t$ . (2)

## II. ЭДС индукции, созданная генератором переменного тока

Действие генератора переменного тока основано на законе электромагнитной индукции: переменный магнитный поток, пронизывающий замкнутую проводящую рамку, создает вихревое электрическое поле, в рамке возникает индукционный ток.

При очень малом значении промежутка времени  $\Delta t$  закон электромагнитной индукции для замкнутого контура примет вид:

$$e_i = -\frac{d\Phi}{dt} = -\Phi', \quad (3)$$

где  $e_i$  – мгновенное значение ЭДС индукции.

Определим производную от магнитного потока:

$$e_i = -\Phi' = -(BS \cos \omega t)' = BS \omega \sin \omega t \quad (4)$$

или

$$e_i = \varepsilon_{im} \sin \omega t, \quad (5)$$

где  $\varepsilon_{im}$  – максимальное значение ЭДС.

$$\varepsilon_{im} = BS\omega. \quad (6)$$

Ротор генератора состоит из большого количества рамок. Если число рамок в роторе  $N$ , то максимальное значение ЭДС генератора равно:

$$\varepsilon_m = N\varepsilon_1 \text{ или } \varepsilon_m = NB\omega. \quad (7)$$



### Задание 2

- Запишите уравнение зависимости мгновенного значения ЭДС индукционного генератора от времени. Формула зависимости магнитного потока, пронизывающего рамку, имеет вид:  $\Phi = 0,5 \cdot \cos 100\pi t$  (мВб).
- Определите максимальное значение ЭДС в рамке.
- Сколько рамок должно быть в роторе, чтобы максимальное значение ЭДС достигло 30 В?



### Ответьте на вопрос

Почему ЭДС индукции ротора из  $N$  витков определяют как произведение ЭДС одного витка на число витков?

### III. Устройство индукционного генератора переменного тока

Генератор состоит из: 1) индуктора – устройства, создающего магнитное поле; 2) якоря – обмотки, в которой индуцируется ЭДС; 3) колец со щетками – устройства, при помощи которого снимается или подводится ток к вращающейся части генератора (рис. 16).

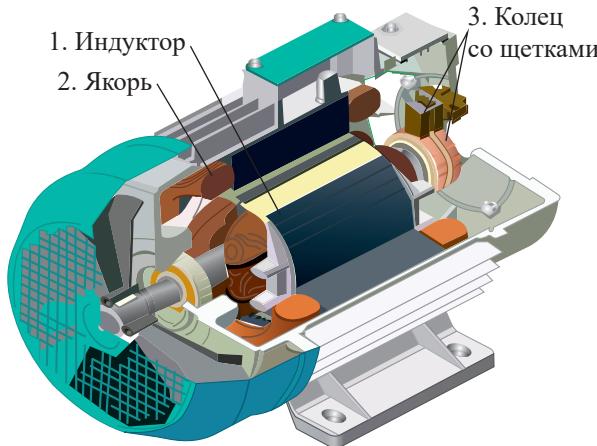


Рис. 16. Основные части индукционного генератора переменного тока

Вращающуюся часть генератора называют ротором, неподвижную часть – статором. В мощных генераторах ротор используется в качестве индуктора, а статор – в качестве якоря. Это обусловлено тем, что допустимая сила тока в роторе ограничивается нагреванием скользящих контактов, а ток высоких значений, созданный на якоре, удобнее снимать с неподвижной обмотки. Для увеличения ЭДС индукции используется обмотка статора с большим количеством витков. Для увеличения магнитного потока обмотки индуктора и якоря наматывают на стальные сердечники, между которыми оставляют небольшой зазор, необходимый для вращения. При вращении ротора магнитный поток, пронизывающий якорь, меняется, возникает ЭДС индукции (рис. 17).

### IV. Напряжение на выходе генератора

Напряжение можно считать равным по числовому значению ЭДС индукции, если сопротивление обмотки статора значительно меньше в сравнении с сопротивлением внешней цепи:  $u = e_i$ , тогда

$$u = e_i = NBS \omega \sin \omega t. \quad (8)$$

Из (8) следует, что максимальные значения ЭДС индукции и напряжения на выходе генератора равны:

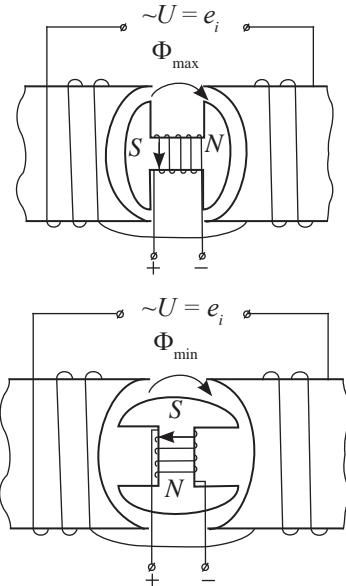


Рис. 17. Возникновение ЭДС индукции в результате изменения магнитного потока, пронизывающего якорь



#### Ответьте на вопросы

- Почему напряжение на выходе генератора можно принять равным значению ЭДС индукции в нем?
- Почему индукторы генераторов переменного тока имеют несколько пар полюсов?

$$U_m = \varepsilon_m = NBS\omega, \quad (9)$$

где  $N$  – число витков якоря.

Генераторы электростанций создают напряжение в несколько тысяч вольт.

## V. Частота вращения ротора генератора

Для получения переменного тока частотой 50 Гц ротор с одной парой полюсов должен вращаться с частотой 50 об/с, или 3000 об/мин. Такую скорость вращения могут придать ротору паровые и газовые турбины. На гидроэлектростанциях используют тихоходные водяные турбины, поэтому для получения стандартной частоты переменного тока применяют генераторы с роторами, имеющими большое число пар полюсов. Ротор с 24 парами полюсов вращается с частотой 125 об/мин или около 2 об/с:

$$\nu_p = \frac{50 \text{ Гц}}{n},$$

где  $n$  – число пар полюсов в индукторе.

### Задание 3

Определите частоту вращения ротора генератора с 12 парами полюсов. Генератор создает колебания промышленной частоты 50 Гц.

## ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

**Задача 1.** Рамка площадью 200 см<sup>2</sup> имеет 160 витков и вращается в магнитном поле с индукцией  $2 \cdot 10^{-2}$  Тл. Определите частоту вращения рамки, если максимальная ЭДС индукции 16 В.

**Дано:**

$$S = 200 \text{ см}^2$$

$$N = 160$$

$$B = 2 \cdot 10^{-2} \text{ Тл}$$

$$\varepsilon_{\max} = 16 \text{ В}$$

$$\nu - ?$$

**СИ**

$$2 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2$$

**Решение:**

Максимальное значение ЭДС генератора равно:

$$\varepsilon_{\max} = NBS\omega = NBS \cdot 2\pi\nu.$$

Выразим из полученной формулы частоту:

$$\nu = \frac{\varepsilon_{\max}}{2\pi NBS};$$

$$\nu = \frac{16 \text{ В}}{2 \cdot 3,14 \cdot 160 \cdot 2 \cdot 10^{-2} \text{ Тл} \cdot 2 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2} = 39,8 \text{ Гц}.$$

**Ответ:**  $\nu \approx 39,8 \text{ Гц}$ .

**Задача 2.** Рамку с площадью  $S = 200 \text{ см}^2$  врачают с частотой  $\nu = 8 \text{ с}^{-1}$  магнитном поле с индукцией  $B = 0,2 \text{ Тл}$ . Напишите: а) закон изменения магнитного потока, пронизывающего рамку; б) закон изменения ЭДС индукции, возникающий в рамке. В начальный момент времени, рамка перпендикулярна магнитному полю (рис. 18).

**Дано:**

$$S = 200 \text{ см}^2$$

$$\nu = 8 \text{ с}^{-1}$$

$$B = 0,2 \text{ Тл}$$

$$\Phi(t) - ?$$

$$e(t) - ?$$

**СИ**

$$0,02 \text{ м}^2$$

**Решение:**

При  $\vec{B} \parallel \vec{n}$  начальная фаза

$$\varphi_0 = 0.$$

Магнитный поток меняется по закону:

$$\Phi = BScos2\pi\nu t.$$

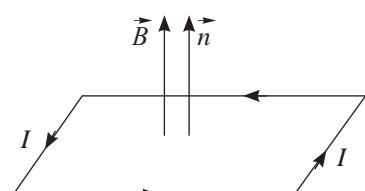


Рис. 18.

$$\Phi = 0,2 \text{ Тл} \cdot 0,02 \text{ м}^2 \cos 16\pi t; \Phi = 4 \cdot 10^{-3} \cos 16\pi t \text{ (Вб).}$$

Определим закон изменения ЭДС, взяв производную от магнитного потока:

$$e(t) = -\Phi' = -(4 \cdot 10^{-3} \cos 16\pi t)';$$

$$e(t) = 64\pi \cdot 10^{-3} \sin 16\pi t.$$

$$e(t) = 0,2 \sin 16\pi t = -0,2 \cos \left( 16\pi t + \frac{\pi}{2} \right).$$

**Ответ:**  $\Phi = 4 \cdot 10^{-3} \cos 16\pi t \text{ (Вб); } e(t) = 0,2 \sin 16\pi t.$

### Контрольные вопросы

- Назовите основные части индукционного генератора переменного тока и их назначение?
- На каком явлении основан принцип работы генератора переменного тока?
- Каким способом уменьшают частоту вращения ротора генератора? Для чего это необходимо?



### Упражнение

3

- Мгновенное значение ЭДС переменного тока меняется по закону  $e = 100 \sin \left( \frac{2\pi}{T} \cdot t \right)$  (В). Определите максимальное значение ЭДС и мгновенное значение ЭДС в момент времени, равный половине периода  $t = \frac{T}{2}$ .
- Рамка площадью  $300 \text{ см}^2$  имеет  $200$  витков и вращается в магнитном поле с индукцией  $1,5 \cdot 10^{-2} \text{ Тл}$ . Определите период вращения рамки, если максимальная ЭДС индукции  $14,4 \text{ В}$ .
- По графику (рис. 19) определите амплитудное значение переменной ЭДС, ее период и частоту. Запишите закон изменения ЭДС с течением времени.
- Контур сечением  $S = 400 \text{ см}^2$ , состоящий из  $N = 100$  витков провода, равномерно вращают с угловой скоростью  $\omega = 1 \text{ рад/с}$  в однородном магнитном поле индукцией  $B = 0,01 \text{ Тл}$ , силовые линии которого перпендикулярны оси вращения. Определите максимальное значение ЭДС.
- Генератор переменного тока имеет на роторе восемь пар полюсов  $n = 8$ . Какой должна быть частота вращения ротора, чтобы генератор вырабатывал ток стандартной частоты  $\nu = 50 \text{ Гц}$ ?

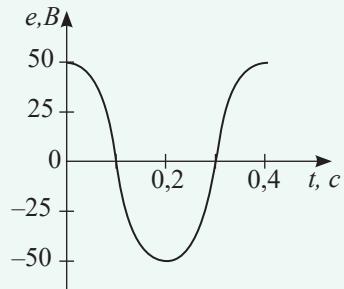


Рис. 19. График изменения ЭДС с течением времени

## Экспериментальное задание

На основе двигателя игрушечной машины создайте индукционный генератор для светодиодной лампы.

## Творческое задание

Подготовьте сообщение на тему:  
Альтернативные источники электроэнергии (рис. 20, 21).



*Рис. 20. Автобусная остановка с солнечными батареями г. Нур-Султан*



*Рис. 21. Уличные фонари с солнечными батареями*

## § 4. Вынужденные электромагнитные колебания

### Ожидаемый результат

Прочитав параграф, вы сможете:

- характеризовать переменный ток, используя такие физические величины как период, частота, максимальное и эффективное/ действующие значения напряжения, сила тока, электродвижущая сила.



### Ответьте на вопросы

- Какой ток используется в работе бытовых приборов (рис. 22)?
- На какое напряжение рассчитаны бытовые приборы?



Рис. 22. Бытовые электроприборы



### Задание 1

Определите период колебаний заряженных частиц в сети промышленного тока.

### I. Переменный ток как пример вынужденных электромагнитных колебаний

Под воздействием переменного электрического поля, созданного генератором переменного тока с ЭДС, равным:

$$e_i = \varepsilon_{im} \sin \omega t \text{ или } e_i = \varepsilon_{im} \cos \omega t \quad (1)$$

в цепи возникает переменный ток. Он представляет собой колебательное движение заряженных частиц.

Частота промышленного тока в РК 50 Гц, циклическая частота, равная  $\omega = 2\pi\nu$ , составляет  $\omega = 100\pi \frac{\text{рад}}{\text{с}}$ , следовательно, колебание напряжения на участках цепи происходит по закону:

$$u = U_m \sin 100\pi t \text{ или } u = U_m \cos 100\pi t \quad (2)$$

где  $u$  - мгновенное значение напряжения,  $U_m$  - максимальное значение напряжения.

Если колебания напряжения рассматриваются с момента времени, соответствующего начальной фазе  $\varphi_0$ , то формулы (2) примут вид:

$$\begin{aligned} u &= U_m \sin(100\pi t + \varphi_0) \\ \text{или} \quad u &= U_m \cos(100\pi t + \varphi_0). \end{aligned} \quad (3)$$

Зависимость силы тока от времени выразим на основе закона Ома, она представляет собой гармоническую функцию:

$$i = I_m \sin(100\pi t + \varphi_c) \quad (4)$$

или  $i = I_m \cos(100\pi t + \varphi_c)$ ,

где  $i$  – мгновенное значение силы тока,

$I_m$  – максимальное значение силы тока,

$\varphi_c$  – сдвиг фаз между колебаниями силы тока и напряжения.



### Обратите внимание!

Обозначение величин: ЭДС, силы тока и напряжения:

$e, i, u$  – мгновенные значения;

$\varepsilon, I, U$  – действующие значения;

$\varepsilon_m, I_m, U_m$  – максимальные значения.



### Задание 2

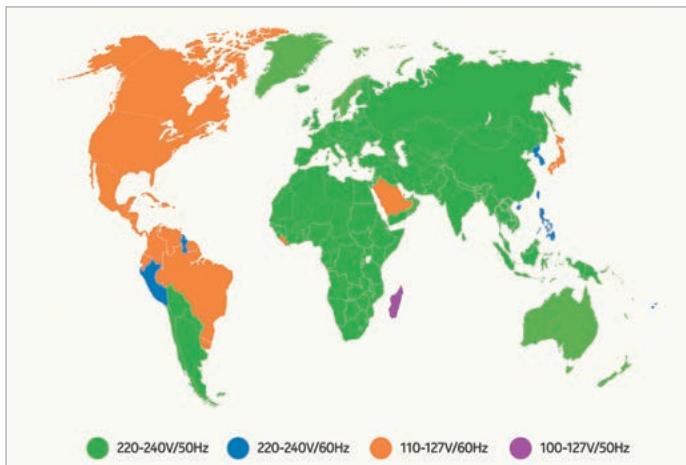
Определите мгновенные значения напряжения, изменяющегося по закону  $u = 308 \cos 100\pi t$  через промежутки времени, равные  $t_1 = 0,25$  с и  $t_2 = 1$  с после начала колебаний.

Чему равно максимальное значение напряжения? В какие моменты времени напряжение достигает максимального значения?



### Интересно знать

В мире наиболее распространены два основных стандарта напряжения и частоты. Один из них — американский стандарт 110–127 В, 60 Гц. Другой стандарт — европейский, 220–240 В, 50 Гц (рис. 23).

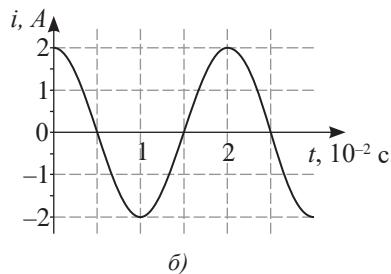
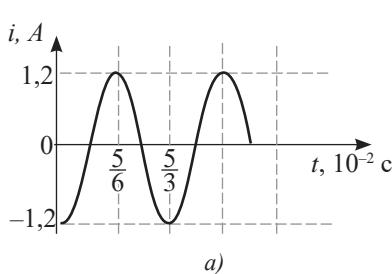


*Рис. 23. Стандарты напряжения и частоты в различных странах*



### Задание 3

По графикам зависимости силы тока от времени (рис. 24 а, б), определите: период, частоту, циклическую частоту, максимальное значение силы тока. Запишите уравнение зависимости силы тока от времени. Определите силу тока в момент времени, равный 25 мс для графика 24 б.



*Рис. 24. Графики зависимости силы тока от времени.*

## II. Измерение величин, характеризующих переменный ток

Измерительные приборы, рассчитанные на постоянный ток, нельзя использовать для измерения величин, характеризующих переменный ток. Это вызвано тем, что стрелка на шкале прибора должна



### Задание 4

1. Определите действующее значение напряжения в сети, в которой максимальное значение достигает 308 В.
2. Каким будет максимальное значение силы тока в цепи переменного тока, если амперметр показал значение 2 А?

смещаться от нуля то в одну, то в другую сторону. Приборы для переменного тока предполагают отклонение стрелки только в одну сторону. Стрелка прибора вследствие своей инерционности не может совершать колебания с частотой 50 Гц, она «дрожит» на месте. Было решено, что показание стрелки прибора для переменного тока должно соответствовать показанию измерительного прибора для постоянного тока, если действия токов в цепи одинаковы. Например, тепловое действие постоянного тока в 1 А должно быть идентичным тепловому действию переменного тока, если на шкале амперметра для переменного тока стрелка указывает 1 А. Такое эквивалентное значение переменного тока называют эффективным или действующим значением тока. Можно показать, что действующие значения связаны с максимальными следующими соотношениями:

$$U = \frac{U_m}{\sqrt{2}}, \quad (5)$$

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}}, \quad (6)$$

где  $U, I$  – действующие значения напряжения и силы тока.

### Эксперимент

«Измерение силы тока и напряжения мультиметром» (рис. 25).

Соберите две цепи: с источником постоянного тока и источником переменного тока.

Определите напряжение и силу тока на участке цепи с активным сопротивлением с использованием цифрового мультиметра, установив необходимый режим его работы.

### Обратите внимание!

На панели мультиметра размещены дисплей (у аналогового мультиметра – измерительная шкала), переключатель режимов работы, гнезда для подключения шнуров со щупами (рис. 26).

Режимы работы прибора:

OFF – прибор выключен;

ACV – измерение переменного напряжения;

DCV – измерение постоянного напряжения;

ACA – измерение переменного тока;

DCA – измерение постоянного тока;

$\Omega$  – измерение сопротивления;

hFE – измерение параметров транзисторов.

Переключение режимов происходит за счет поворота переключателя в нужную позицию. В нижней правой части расположены три разъема, которые используются для подключения измерительных щупов.



### Ответьте на вопросы

- Почему стрелка измерительных приборов для переменного тока не достигает максимального угла отклонения при максимальном значении силы тока?
- Почему амперметры и вольтметры для измерения силы тока и напряжения в цепях постоянного тока нельзя использовать в цепи переменного тока?



Рис. 25. Измерение ЭДС источника постоянного тока мультиметром



*Рис. 26. Панель мультиметра с указанием режимов работы*

### Контрольные вопросы

- Что такое переменный ток?
- Назовите основные физические величины, характеризующие колебания в цепи переменного тока.
- Как взаимосвязаны величины, характеризующие цепь переменного тока?
- Какие колебания называют гармоническими?



### Упражнение

4

- Сила тока в цепи меняется по закону  $i = 8,5 \sin(314t + 0,661)$ . Определите амплитудное значение силы тока, его начальную фазу и частоту.
- Сила тока в цепи изменяется со временем по закону  $i = 4 \sin\left(314t + \frac{\pi}{6}\right)$ . Определите: действующее значение силы тока, его начальную фазу и период колебаний тока. Чему будет равна сила тока в моменты времени:  $t_1 = 0,01$  с,  $t_2 = 0,04$  с?
- Определите максимальные значения напряжения и силы тока в сети, если при измерении вольтметр показал 127 В, амперметр – 10 А.
- Запишите закон изменения напряжения с течением времени для промышленной сети РК. Как изменится закон в применении к странам, промышленная частота тока в которых 60 Гц, максимальное напряжение 127 В?

### Творческое задание

- Используя материалы сети Интернет, изучите правила пользования мультиметром. Составьте памятку по измерению напряжения, силы тока, сопротивления.
- Составьте задачу по теме: «Вынужденные электромагнитные колебания».

## § 5. Резонанс напряжений в электрической цепи

### Ожидаемый результат

Прочитав параграф, вы сможете:

- объяснять условие резонанса и называть сферы его применения;
- рассчитывать резонансную частоту.

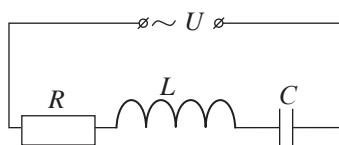


Рис. 27. Схема последовательной цепи переменного тока

### Вспомните!

Резонанс в цепи переменного тока проявляется в резком увеличении амплитуды колебаний силы тока.

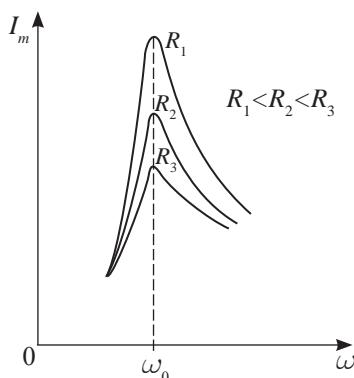


Рис. 28. Резонансные кривые амплитудных значений силы тока

### I. Условие резонанса. Резонансная частота

Катушка индуктивности и конденсатор в цепи переменного тока обладают сопротивлением, которое зависит от циклической частоты тока:

$$X_L = \omega L, X_C = \frac{1}{\omega C}, \quad (1)$$

где  $X_L$  – индуктивное сопротивление,  $X_C$  – емкостное сопротивление.

Катушка индуктивности и конденсатор способны накапливать энергию электромагнитного поля, не превращая ее в другие виды энергии, поэтому их сопротивление называют реактивным и обозначают буквой  $X$ . Полное сопротивление цепи, состоящей из катушки индуктивности, конденсатора и резистора (рис. 27), обладающего активным сопротивлением  $R$ , равно:

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}, \quad (2)$$

где  $Z$  – полное сопротивление цепи переменного тока. Оно имеет наименьшее значение при равенстве емкостного и индуктивного сопротивлений:

$$X_L = X_C. \quad (3)$$

В этом случае полное сопротивление цепи становится равным активному сопротивлению  $Z = R$ , амплитудное значение силы тока достигает максимального значения:

$$I_m = \frac{U_m}{R}. \quad (4)$$

Определим частоту вынуждающих колебаний, при которой сила тока достигает максимального значения. Из равенства (1) следует, что:

$$\omega L = \frac{1}{\omega C}$$

$$\text{или} \quad \omega^2 = \frac{1}{LC}.$$

Выразим циклическую частоту из полученного соотношения:

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}. \quad (5)$$

Из формулы (5) следует, что резонанс в последовательной цепи, состоящей из резистора, конденсатора и катушки, наступает при равенстве частоты внешнего напряжения с собственной частотой цепи:

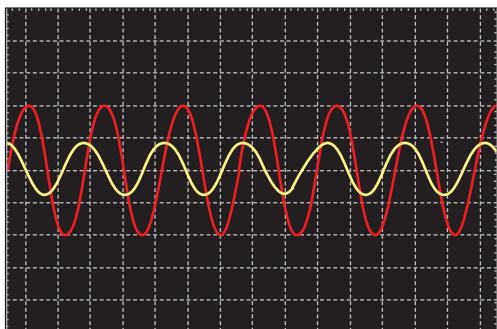
$$\omega = \omega_0. \quad (6)$$

На рисунке 28 изображены резонансные кривые амплитудных значений силы тока. Чем меньше активное сопротивление цепи, тем ярче выражен резонанс.

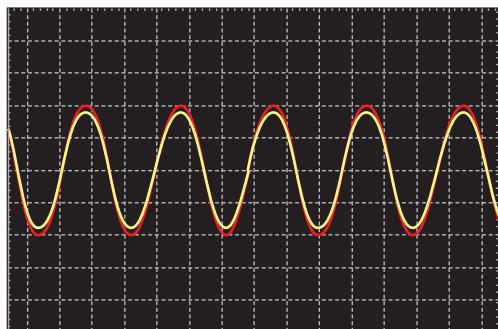
### Эксперимент

Соберите последовательную цепь, состоящую из генератора переменной частоты (4 В), резистора, катушки индуктивности (1 мГн) и конденсатора (1 мкФ). Параметры деталей цепи определяются диапазоном частот источника. Снимите осциллограмму с резистора и генератора сигнала переменной частоты. Напряжение, снятое с резистора дает информацию об изменении силы тока в цепи, так как на резисторе напряжение и сила тока изменяются синфазно.

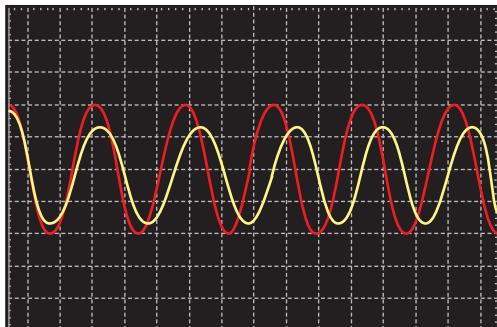
На рисунках 29 а, б, в изображены осциллограммы красного цвета, которые представляют сигнал, снятый с генератора переменной частоты, и желтого цвета – сигнал с резистора. На рисунке 29 г изображена осциллограмма напряжения, снятого с конденсатора в режиме резонанса.



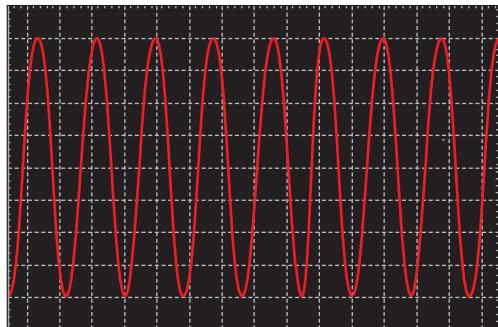
а) Частота сигнала 2 кГц. Колебания силы тока опережают колебания напряжения. При низких частотах в цепи преобладает емкостное сопротивление



б) Частота сигнала 4,78 кГц. Индуктивное сопротивление равно емкостному, наблюдается резонанс. Колебания напряжения и силы тока совпадают по фазе, амплитуда силы тока возрастает



в) Частота сигнала 7,2 кГц. Колебания напряжения опережают колебания силы тока. При высоких частотах в цепи преобладает индуктивное сопротивление



г) Напряжение на конденсаторе и катушке индуктивности в режиме резонанса составляет 10 В, что превышает входное напряжение.

Рис. 29. Резонанс напряжений в последовательной цепи переменного тока

## II. Почему усиление амплитудного значения силы тока названо резонансом напряжений

Колебание напряжений на катушке индуктивности и конденсаторе происходит в противофазе. В режиме резонанса, когда  $X_L = X_C$  напряжения на катушке и конденсаторе равны:  $U_{L\text{рез}} = U_{C\text{рез}}$ .

При векторном сложении их общее напряжение равно нулю и все напряжение подается полностью на активное сопротивление  $U_{\text{ак}} = U_R$ . В результате ток в цепи возрастает. Вместе с этим возрастает напряжение на катушке и на конденсаторе:

$$U_{L\text{рез}} = I_{\text{рез}} X_L = \frac{U_{\text{ак}}}{R} \omega_{\text{рез}} L = U_{\text{ак}} \frac{L}{\sqrt{LC} \cdot R} = U_{\text{ак}} \frac{\sqrt{L}}{R\sqrt{C}};$$

$$U_{C\text{рез}} = I_{\text{рез}} X_C = \frac{U_{\text{ак}}}{R\omega_{\text{рез}} C} = \frac{U_{\text{ак}}}{R} \frac{\sqrt{LC}}{C} = U_{\text{ак}} \frac{\sqrt{L}}{R\sqrt{C}}.$$

Увеличение напряжения на реактивном сопротивлении можно рассчитать по величине  $\frac{\sqrt{L}}{R\sqrt{C}}$ , которая, как правило, всегда больше единицы.

В цепях с большим активным сопротивлением резонанс возникнуть не может.

## III. Использование резонанса в цепи переменного тока

Радиоприемник. Входная цепь любого радиоприемника представляет собой регулируемый колебательный контур. Его резонансная частота, изменяемая с помощью регулировки емкости конденсатора, совпадает с частотой сигнала радиостанции, которую необходимо принять (рис. 30).

Электрические фильтры (рис. 31).

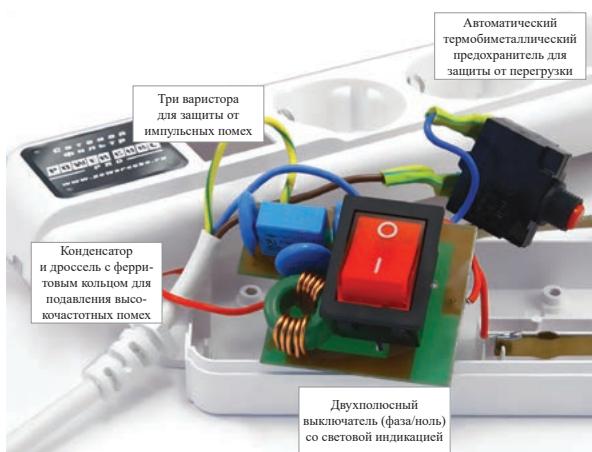


Рис. 31. Сетевой фильтр для компьютера

Явление резонанса напряжений используют в электрических фильтрах. Если необходимо устранить из передаваемого сигнала составляющую тока определенной частоты, то параллельно приемнику ставят цепочку из конденсатора и катушки



Рис. 30. Настстройка радиоприемника на резонансную частоту

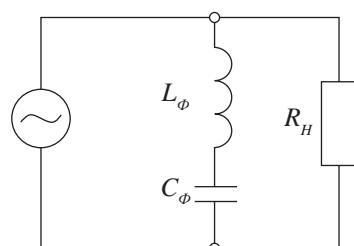


Рис. 32. Фильтр, задерживающий сигнал резонансной частоты

индуктивности, соединенных между собой последовательно (рис. 32). Ток резонансной частоты проходит через  $LC$ -цепочку, токи других частот через приемник.

Если через приемник необходимо пропустить только ток определенной частоты, то  $LC$ -цепочку включают последовательно с приемником (рис. 33). В этом случае составляющие сигнала на резонансной частоте пройдут к нагрузке практически без потерь, сигналы других частот будут значительно ослаблены.

#### IV. Негативные проявления резонанса

При малом значении активного сопротивления напряжение на катушке и конденсаторе в режиме резонанса может превысить входное напряжение в несколько раз. Это необходимо учитывать, чтобы избежать пробоя диэлектрика и прогорания изоляции катушки.

В электроэнергетике возникновение резонанса напряжений возможно в случае подключения к генератору длинной кабельной линии без нагрузки – потребителя электроэнергии. Такая ситуация предотвращается применением вспомогательной нагрузки.

#### ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Конденсатор емкостью  $C = 0,1 \text{ мкФ}$ , катушка с индуктивностью  $L = 6 \text{ мГн}$  и реостат с активным сопротивлением  $R = 20 \Omega$  соединены последовательно. Вычислите резонансную частоту, максимальные значения напряжения на конденсаторе и катушке при резонансной частоте. Максимальное значение напряжения приложенного к цепи  $U_{\max} = 4 \text{ В}$ .

**Дано:**

$$C = 0,1 \text{ мкФ}$$

$$L = 6 \text{ мГн}$$

$$R = 20 \Omega$$

$$U_{\max} = 4 \text{ В}$$

$$\nu_{\text{рез}} - ?$$

$$U_{C \max} - ?$$

$$U_{L \max} - ?$$

**СИ**

$$0,1 \cdot 10^{-6} \Phi$$

$$6 \cdot 10^{-3} \text{ Гн}$$

**Решение:**

Резонансная частота колебаний равна:

$$\nu_{\text{рез}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}.$$

Максимальные значения напряжения на конденсаторе и катушке при резонансной частоте равны:

$$U_{L \max} = U_{C \max} = U_{\max} \cdot \frac{\sqrt{L}}{R\sqrt{C}}.$$

Вычислим неизвестные величины:

$$\nu_{\text{рез}} = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot \sqrt{6 \cdot 10^{-3} \text{ Гн} \cdot 0,1 \cdot 10^{-6} \Phi}} \approx 6,5 \text{ кГц};$$

$$U_{L \max} = U_{C \max} = 4 \text{ В} \cdot \frac{\sqrt{6 \cdot 10^{-3} \text{ Гн}}}{20 \Omega \sqrt{0,1 \cdot 10^{-6} \Phi}} \approx 49 \text{ В}.$$

**Ответ:**  $\nu_{\text{рез}} \approx 6,5 \text{ кГц}$ ;  $U_{L \max} = U_{C \max} \approx 49 \text{ В}$ .

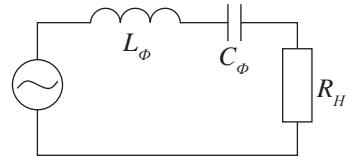


Рис. 33. Фильтр, выделяющий сигнал резонансной частоты

## Контрольные вопросы

- Где и в каких цепях наблюдается явление резонанса?
- Какие условия возникновения резонанса токов и напряжений?
- Как найти резонансную частоту?
- Как устранить явление резонанса напряжений?



## Упражнение

5

- Конденсатор и катушка соединены последовательно. Емкостное сопротивление равно  $X_C = 5000 \text{ Ом}$ . Какой индуктивности подключена в сеть катушка, если резонанс напряжений наступает при  $\nu = 20 \text{ кГц}$ ?
- Резонанс в колебательном контуре с конденсатором  $C_1 = 1 \text{ мкФ}$  наступает при частоте колебаний  $400 \text{ Гц}$ . Когда вместо конденсатора  $C_1$  подключают конденсатор емкостью  $C_2$ , резонансная частота становится равной  $100 \text{ Гц}$ . Определите емкость второго конденсатора.
- Реостат с активным сопротивлением  $R = 100 \text{ Ом}$ , катушка с индуктивностью  $L = 5 \text{ мГн}$  и конденсатор емкостью  $C = 0,05 \text{ мкФ}$  соединены последовательно. Вычислите резонансную частоту, максимальные значения напряжения на конденсаторе и катушке при резонансной частоте. Действующее напряжение во всех участках цепи, равно  $U = 10 \text{ В}$ .
- Катушка с активным сопротивлением  $R = 2 \text{ Ом}$  и индуктивностью  $L = 75 \text{ мГн}$  включена последовательно с конденсатором переменной емкости в сеть с действующим напряжением  $U = 50 \text{ В}$  и частотой  $\nu = 50 \text{ Гц}$ . Определите емкость конденсатора  $C$  при резонансе напряжений и значения напряжений на катушке  $U_L$  и конденсаторе  $U_C$  в этот момент.

## Творческое задание

Подготовьте сообщение по темам (на выбор):

- В чем отличие резонанса токов от резонанса напряжений
- Применение резонанса напряжений и токов в электротехнике и радиотехнике.

## § 6. Производство, передача и использование электрической энергии. Трансформатор

### Ожидаемый результат

Прочитав параграф, вы сможете:

- объяснять экономические преимущества переменного тока высокого напряжения при передаче электрической энергии.



### Ответьте на вопросы

1. Для чего необходимы трансформаторы?
2. Почему до линии электропередач напряжение в сети повышают?
3. Каково назначение инвертора?



### Обратите внимание!

В быту и на производстве используют электрические приборы различной мощности, для питания которых создана промышленная сеть переменного тока с частотой 50 Гц. Источниками тока в этой сети являются индукционные генераторы переменного тока, расположенные на электростанциях. Переменный ток поступает по проводам к потребителям.

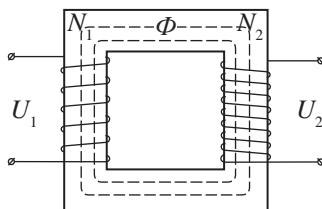


Рис. 35. Принципиальная схема устройства трансформатора

### I. Устройство трансформатора, коэффициент трансформации

Потребители электроэнергии рассчитаны на разные значения напряжения, поэтому возникает потребность в его преобразовании.

Прибор, с помощью которого производится преобразование напряжения переменного тока, называют трансформатором (рис. 34).



Рис. 34. Силовой трансформатор, произведен в г. Кентай PK

Трансформатор состоит из замкнутого стального сердечника – магнитопровода и двух или нескольких обмоток с разным количеством витков (рис. 35). Работа трансформатора основана на явлении электромагнитной индукции. При подключении первичной обмотки трансформатора к сети переменного тока напряжением  $u_1$  по обмотке протекает ток  $i_1$ , который создает в магнитопроводе переменный магнитный поток  $\Phi$ . Этот поток индуцирует в обмотках трансформатора вихревые поля с электродвижущими силами:

$$e_1 = -N_1 \Phi' \text{ и } e_2 = -N_2 \Phi', \quad (1)$$

где  $N_1$  – число витков в первичной обмотке,  $N_2$  – число витков во вторичной обмотке трансформатора. Отношение ЭДС в обмотках трансформатора определяется числом витков:

$$\frac{e_1}{e_2} = \frac{-N_1 \Phi'}{-N_2 \Phi'} = \frac{N_1}{N_2}. \quad (2)$$

Полученное соотношение справедливо для действующих значений ЭДС, поскольку поток в сердечниках обмоток меняется синфазно:

$$\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} = \frac{N_1}{N_2}. \quad (3)$$

На основании закона Ома мгновенное напряжение, приложенное к первичной катушке с малым активным сопротивлением, равно ЭДС индукции, взятым со знаком «минус»:

$$u_1 + e_{i1} = 0 \text{ или } u_i = -e_{i1}.$$

Действующие значения напряжения и ЭДС равны:

$$U_1 = \varepsilon_1. \quad (4)$$

Для вторичной катушки ЭДС индукции  $\varepsilon_2$  равно напряжению на выходе  $U_2$  в том случае, когда к катушке не подключена нагрузка:

$$\varepsilon_2 = U_2. \quad (5)$$

Трансформатор в этом случае находится в режиме холостого хода. С учетом (4) и (5) уравнение (3) примет вид:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2}. \quad (6)$$

Отношение числа витков в первичной обмотке трансформатора к числу витков во вторичной обмотке называют коэффициентом трансформации:

$$k = \frac{N_1}{N_2}. \quad (7)$$



### Возьмите на заметку

Если активным сопротивлением катушки пренебречь нельзя и к вторичной обмотке подключена нагрузка, то напряжение, приложенное к первичной обмотке, равно:

$$U_1 = \varepsilon_1 + I_1 R_{L1}, \quad (8)$$

ЭДС на вторичной обмотке

$$\varepsilon_2 = U_2 + I_2 R_{L2}, \quad (9)$$

где  $U_2 = I_2 R_2$  – напряжение на нагрузке,  $I_2$  – действующее значение тока во вторичной обмотке трансформатора. Тогда формула (3) примет вид:

$$\frac{U_1 - I_1 R_{L1}}{U_2 + I_2 R_{L2}} = \frac{N_1}{N_2}. \quad (10)$$



### Задание 1

Рассмотрите схему подачи электроэнергии, изображенных на рисунках 36 и 37. В чем их различие, в чем схожесть?



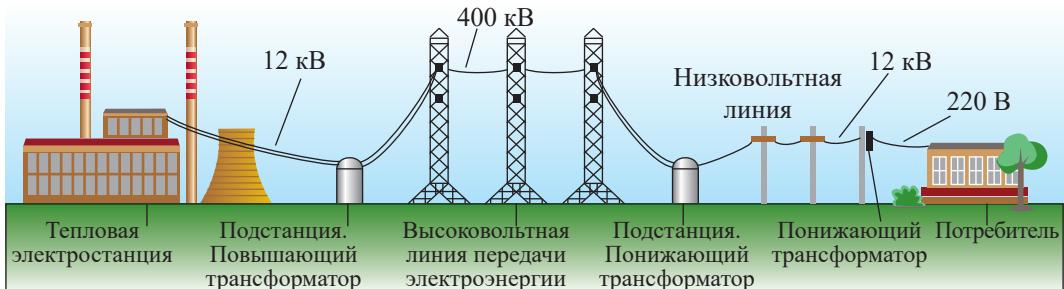
### Запомните!

Если коэффициент трансформации больше единицы  $k > 1$ , то трансформатор понижающий:  $U_2 < U_1$ . При  $k < 1$ , трансформатор повышающий:  $U_2 > U_1$ .

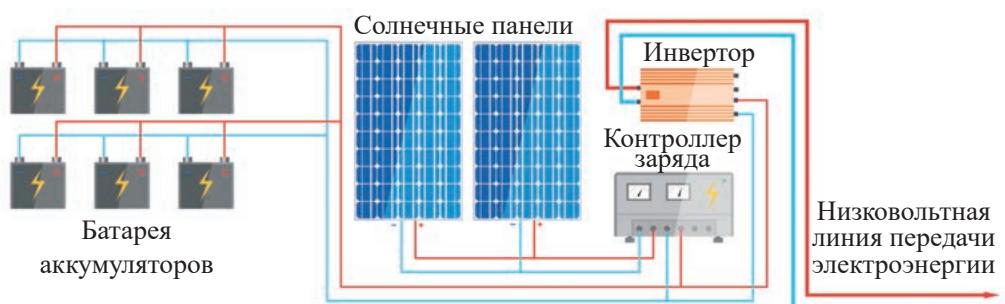


### Ответьте на вопрос

Можно ли повышающий трансформатор использовать в качестве понижающего, и, наоборот?



*Рис. 36. Производство и передача электроэнергии потребителям от индукционного генератора*



*Рис. 37. Производство и передача электроэнергии потребителям от солнечной батареи через промышленную сеть*

## II. Мощность тока и сила тока в трансформаторе

При трансформации напряжения частота колебаний сохраняется. Мощность тока практически не меняется. КПД трансформатора достигает 99 %. Небольшие потери энергии происходят при нагревании обмотки и перемагничивании сердечника. Считая, что  $P_1 \approx P_2$  не сложно доказать, что:

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1}. \quad (11)$$

При трансформации напряжения происходит трансформация силы тока.

## III. Линии электропередачи

Все электростанции расположены вблизи природных энергоресурсов, которые расположены на Земле неравномерно, поэтому полученная электроэнергия из одних регионов передается в другие по многокилометровым линиям электропередачи – ЛЭП. Не смотря на то, что провода линий электропередачи изготавливают из металла с малым удельным электрическим сопротивлением, их сопротивление остается значительным.

При передаче электроэнергии на сотни и тысячи километров, тепловые потери энергии могут стать настолько значительными, что электроэнергия до потребителя

не дойдет. Уменьшение потерь энергии при ее передаче имеет практическую значимость. Из закона Джоуля – Ленца:

$$Q = I^2 R t, \quad (12)$$

следует, что уменьшение силы тока в ЛЭП является наиболее эффективным методом решения этой проблемы. Снижение силы тока в десять раз позволит уменьшить потери энергии в сто раз.



### Ответьте на вопрос

Почему потери энергии в ЛЭП не понижают, увеличивая толщину провода?

### Задание 2

- Докажите, что сопротивление каждого километра ЛЭП, состоящего из двух алюминиевых проводов диаметром 1 мм имеет сопротивление порядка 20 Ом.
- Во сколько раз уменьшаются потери электроэнергии при повышении напряжения от 12 кВ до 400 кВ.
- Поясните принципиальную схему линии электропередач, изображенную на рисунке 38.

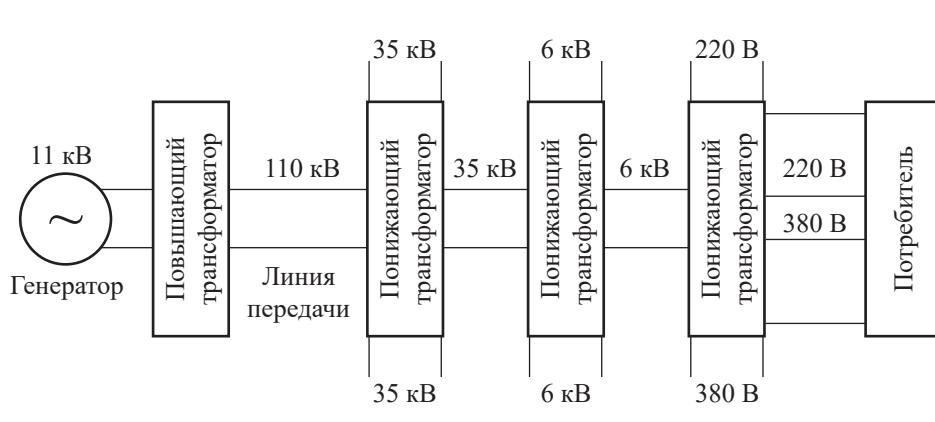


Рис. 38. Принципиальная схема линии электропередачи

### Контрольные вопросы

- Что такое трансформатор? Из чего он состоит?
- Для чего используют трансформатор?
- Как происходит передача энергии от источника в цепи первичной обмотки трансформатора к нагрузке в его вторичной обмотке?
- Каково назначение ЛЭП?



### Упражнение

6

- Вторичная обмотка трансформатора, имеющая  $N = 200$  витков, пронизывается магнитным потоком, изменяющимся со временем по закону

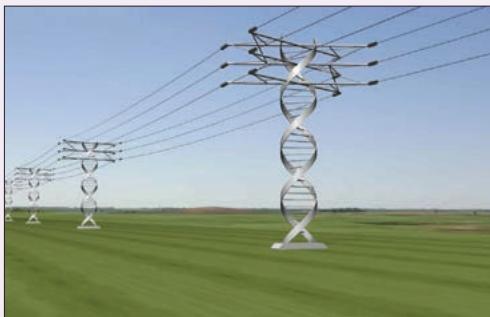
$\Phi = 0,02 \cos 100\pi t$ . Напишите формулу, выражающую зависимость ЭДС во вторичной обмотке от времени и определите действующее значение этой ЭДС.

2. Ток в первичной обмотке трансформатора 0,5 А, напряжение на ее концах 220 В. Ток во вторичной обмотке 11 А, напряжение на ее концах 9,5 В. Определите коэффициент полезного действия трансформатора.
3. При включении первичной обмотки трансформатора в сеть переменного тока на клеммах вторичной обмотки возникает напряжение 30 В. При включении в эту же сеть вторичной обмотки на клеммах первичной обмотки возникает напряжение 120 В. Во сколько раз число витков первичной обмотки больше числа витков вторичной обмотки трансформатора?
4. Мощность трансформатора 132 Вт. Первичная обмотка содержит 60 витков и на нее подано напряжение, действующее значение которого 12 В. Сколько витков имеет вторичная обмотка, если по ней протекает ток, действующее значение которого 0,6 А? Потерями энергии пренебречь.
5. Во сколько раз уменьшится потеря электроэнергии на линиях электропередач, если силу тока уменьшить в 20 раз? Какое устройство используют для уменьшения силы тока в ЛЭП?

### Творческое задание

Подготовьте сообщение по темам (на выбор):

1. Из истории создания трансформатора. Виды трансформаторов. Производство трансформаторов в РК.
2. Основные характеристики линий электропередач в РК и мире (рис. 39).



*Рис. 39. Электрические опоры линий электропередачи*

## § 7. Производство и использование электрической энергии в Казахстане и в мире

### Ожидаемый результат

- Прочитав параграф, вы сможете:
- оценивать преимущества и недостатки источников электроэнергии в Казахстане.

### Интересно знать!

Производство электроэнергии человеком началось в конце 1870-х гг., когда баварский инженер З. Шуккерт построил в г. Этталь первую электростанцию. Местом ее расположения стал дворцовой сад Линдерхофа. Там находился грот, который необходимо было осветить. Свеч для этого было недостаточно, и Шуккерт решился на эксперимент. Его электростанция состояла из 24 динамоэлектрических генераторов, соединенных между собой приводом от парового двигателя.

### I. Технологии производства электроэнергии в различных странах мира и Казахстане. Лидеры производства электроэнергии

До конца XX столетия в большинстве стран производство электроэнергии происходило с использованием генераторов переменного тока. В генераторах энергия падающей воды, энергия органического топлива: дров, торфа, угля, нефти, газа, атомная энергия превращаются в электроэнергию. В XXI в. страны переходят на использование альтернативных возобновляемых источников энергии. Статистический обзор мировой энергетики показал, что странами – лидерами по производству электроэнергии являются Китай, США и Индия. На рисунке 40 даны результаты статистики по технологиям производства в лидирующих странах 2016 г.



Рис. 40. Технологии производства электроэнергии в странах-лидерах



### Задание 1

- Составьте таблицу «Традиционные и нетрадиционные источники электроэнергии».
- В чем преимущество традиционных способов получения электроэнергии? В чем их недостаток?
- Какие технологии получения электроэнергии используют в Казахстане?



### Задание 2

- На основе представленного рейтинга производства электроэнергии в 2016 г. составьте диаграммы «Преимущественные технологии производства электроэнергии в Японии, Германии и Казахстане».
- В сети Интернет найдите статистические данные прошлого года. Сравните со статистикой 2016 г. Какие изменения произошли по объему и технологиям производства электроэнергии в этих странах?

№	Страна	млн кВт · час	№	Страна	млн кВт · час	№	Страна	млн кВт · час
<b>Горючее топливо</b>			<b>Гидроэлектростанции</b>			<b>Ядерная энергия</b>		
1	Китай	3942347	1	Китай	1208383	1	Франция	449263
2	Индия	1110531	2	Канада	342427	2	Япония	288230
3	Япония	765570	3	Бразилия	333763	3	Россия	189006
4	Россия	640390	4	Россия	169984	4	Южная Корея	174030
5	Германия	347000	5	Норвегия	140698	5	Китай	153463
6	Южная Корея	334942	6	Индия	116980	6	Канада	11917
7	Иран	262934	7	Япония	71909	7	Германия	96968
8	Мексика	193012	8	Италия	64991	8	Индия	37976
9	Австралия	190406	9	Франция	60528	9	Чехия	29905
10	Египет	164662	10	Парагвай	50175	10	Бельгия	24762
17	Казахстан	98233	35	Казахстан	8795		Казахстан	Не производит

Солнечная энергия			Энергия ветра			Геотермальная энергия		
1	Германия	41102	1	Китай	170959	1	Филиппины	11012
2	Китай	24814	2	Германия	63006	2	Индонезия	9357
3	Италия	23023	3	Канада	26875	3	Новая Зеландия	8043
4	Индия	6491	4	Индия	18911	4	Италия	5231
5	Греция	3936	5	Бразилия	17840	5	Мексика	4054
6	Франция	3291	6	Франция	17064	6	Исландия	2402
7	Южная Корея	2960	7	Италия	15459	7	Кения	1559
8	Чехия	2213	8	Дания	15035	8	Япония	1556
9	Румыния	2181	9	Австралия	12544	9	Коста-Рика	645
10	Канада	2013	10	Португалия	12208	10	Сальвадор	466
	Казахстан	Не производит	54	Казахстан	21		Казахстан	Не производит

Производство электроэнергии в Казахстане в 2016 г. составило 92 млрд кВт · ч, в рейтинге Казахстан занял 35 место.

На энергетическом форуме «Стратегия долгосрочного развития электроэнергетической отрасли Казахстана» озвучены основные вызовы, влияющие на отрасль энергетики: растущие требования к надежности и качеству электроснабжения со стороны потребителей, требования к экологической и промышленной безопасности, развитие возобновляемых источников энергии, глобализация энергетических систем. Председатель Правления АО «Казахстанская компания по управлению электрическими сетями» отметил, что ответом на эти вызовы является новая концепция развития мировой электроэнергетики – концепция Smart Grid, интеллектуальная энергосистема. Основой для интеллектуальной энергосистемы являются современные цифровые технологии и силовые управляемые элементы энергосистемы. На XI Евразийский форуме KAZENERGY, 2017 г., министр энергетики РК заявил, что в стратегии Казахстана делается акцент не только на высокие показатели традиционной энергетики, но и на поэтапное развитие альтернативных, в том числе возобновляемых источников энергии. По его данным, Казахстан активно вовлекает в энергобаланс альтернативные и возобновляемые источники, доля которых должна составить 3 % в общем объеме к 2020 году, 10 % – к 2030 и 50 % – к 2050 г. Вопросами перехода к зеленому бизнесу займется Международный центр зеленых технологий, который будет создан на базе ЭКСПО-2017.



### Ответьте на вопрос

Какие страны наиболее активно внедряют «зеленые технологии» в производство электроэнергии?

## II. Успешные технологии производства электроэнергии из ВИЭ (возобновляемых источников энергии) в мире

Наиболее привлекательным ВИЭ является энергия Солнца. Если КПД первых солнечных батарей составлял 1–2 %, то к началу XXI века их КПД достигло порядка 30 %.

В Европе активнее всего развиваются ветро- и солнечная энергетика. Ветроустановки и гелиоустановки не могут стать основными источниками энергии для крупных электросетей из-за нестабильности выработки ими энергии. Если их доля начинает превышать 20 % мощности энергосистем, возникает необходимость ввода дополнительных регулирующих мощностей. На современном этапе с задачей регулирования мощности энергосети справляются крупные ГЭС. Евросоюзу удалось частично решить проблему регулирующих и накопительных мощностей в «зеленой энергетике»: «аккумуляторной батареей» Западной Европы стала Норвегия, имеющая в достаточном количестве гидроаккумулирующие станции (ГАЭС). Когда возникают излишки электроэнергии, насосы на ГАЭС качают воду из нижнего бьефа водохранилища в верхний. В моменты пика электропотребления воду вновь сбрасывают, и она приводит в движение генераторы. Норвегия соединена высоковольтными ЛЭП со Швецией, Данией и Нидерландами. С 2020 года к этой системе будет подключена Германия. Соглашение о прокладке подводной ЛЭП длиной 623 км. и мощностью в 1400 МВт было подписано в феврале 2015 года. Эта ЛЭП покроет 3 % потребления электроэнергии в Германии. В Исландии электроэнергетика по большей своей части питается от геотермальных источников. В целом по Европейскому союзу согласно Статистическому энергетическому ежегоднику (Global Energy Statistical

Yearbook 2015) доля ВИЭ, включая ГЭС, в 2014 году составляла 30 %, в некоторых странах, например Норвегии, она доходила до 98 %.

Самый используемый возобновляемый ресурс из всех видов ВИЭ в США и Бразилии – это биомасса. Эти страны являются основными производителями 2/3 потребляемого в мире биотоплива – биоэтанола. США, специализируется на переработке в топливо кукурузы, а Бразилия, выращивающая для этого сахарный тростник. Объем вредных выбросов в атмосферу у биоэтанола существенно меньше, чем у обычного бензина. Этанол из сахарного тростника сокращает выбросы парниковых газов примерно на 80 % по сравнению с ископаемыми видами топлива, произведенной из кукурузы на 30 %.



### Задание 3

Приведите примеры известных вам успешных технологий производства электроэнергии из ВИЭ в странах мира.

### III. Прогноз развития энергетики Азии до 2040 года

В Азии, на которую приходится большинство угольных ТЭЦ в мире, уголь до сих пор остается основным источником энергии. В 2016 году доля угольных станций составило 54 % (рис. 41). К 2040 году планируется снизить инвестиции в производство электроэнергии на угольных станциях до 10 %, увеличив расходы на получение электроэнергии с использованием возобновляемых источников электроэнергии: энергии Солнца и ветра (рис. 42). Китай, являясь лидером по выбросам парниковых газов за счет сжигания на своих тепловых станциях преимущественно угля, тем не менее, в 2013 году он впервые стал лидером по объему инвестиций в «зеленую энергетику». Благодаря таким активным действиям Китая рост мировой экономики в 2014 году впервые не сопровождался ростом выбросов углекислого газа. Это свидетельствует из отчета, представленного организацией «Сеть по политике возобновляемой энергии для XXI века», которая работает под эгидой ООН. Сегодня не только развитые, но и многие развивающиеся страны имеют в своих планах энергетического развития обязательный пункт об увеличении доли ВИЭ.

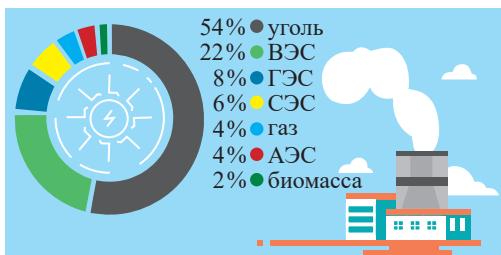


Рис. 41. Структура получаемой электроэнергии в странах Азии, 2016 г.



Рис. 42. Доля планируемых инвестиций в развитие различных технологий производства электроэнергии

### IV. Проблемы производства и передачи электроэнергии в Казахстане

Развитие экономики Казахстана требует дополнительных объемов производства электроэнергии. Потребление электроэнергии в Казахстане в последние годы увеличивается на 4–5 % ежегодно. При сохранении положительной динамики развития

экономики страны к 2030 г. потребление электроэнергии по оценкам KazEnergy составит 144,7 млрд кВт · ч, возрастет в сравнении с 2015 г. на 58 %. Растущую потребности в электроэнергии к 2030 г. планируется обеспечить за счет технического перевооружения оборудования, приращение мощностей действующих электростанций и строительства новых электростанций, в том числе базовых: Балхашской ТЭС, Тургайской ТЭС, АЭС.

Эффективность использования электроэнергии во многом зависит от эффективности системы передачи электрической энергии. Большая часть ЛЭП в Казахстане построена еще в советское время и сильно изношена, возросло сопротивление от коррозии, ухудшилась электроизоляция. При передаче и распределении электроэнергии потери составляют 21,5 %, а для сельских линий уровень потерь достигает 25–50 %. К основным вопросам по Национальной энергетической системе (НЭС), которые требуют решения, относятся ограниченная пропускная способность сетей по основным направлениям: Север-Юг и Север-Восток, отсутствие связи Западного Казахстана с ЕЭС РК, недостаточная техническая оснащенность. В 2017–2018 г.г. завершено строительство линий электропередачи «Екибастуз – Семей – Усть-Каменогорск», протяженностью 678 км (рис. 43), а также «Семей – Актогай – Талдыкорган – Алматы», протяженностью 883 км (рис. 44).



**Рис. 43. ЛЭП «Екибастуз – Семей – Усть-Каменогорск»**

— Существующие ЛЭП,  
- - - Построенные ЛЭП к 2018 г.



Рис. 44. ЛЭП «Семей – Актогай – Талдыкорган – Алматы»

— Существующие ЛЭП,

===== Построенные ЛЭП к 2018 г.



### Интересно знать

- С 2010 года Казахстан потребляет больше электроэнергии, чем производит. Север Казахстана экспортирует в Россию электроэнергию, производимую на Екибастузской ГРЭС-1, а юг покупает ее у Киргизии и Узбекистана. В 2010 году Казахстаном было импортировано 6,2 млрд кВт · ч электроэнергии, экспортировано около 4,7 млрд кВт · ч.
- В самую уникальную высоковольтную линию электропередачи «Сибирь-Центр» с проектным напряжением 1150 кВ входит линия электропередачи Екибастуз – Кокшетау (рис. 45). Ни одна другая линия в мире не способна работать под столь высоким напряжением. ЛЭП Екибастуз – Кокчетав – Костанай проработала на номинальном напряжении 1150 кВ с 1988 по 1991 год. В настоящий момент она работает под напряжением 500 кВ. Протяженность участка – 432 км, она установлена на электрических опорах со средней высотой 45 метров. Вес проводов приблизительно 50 тыс. тонн. Линия была задействована после аварии на Саяно-Шушенской ГЭС в 2009 году для компенсации выпадения сибирских мощностей.



*Рис. 45. ЛЭП «Екибастуз – Кокшетау» с проектным напряжением 1150 кВ*

### Контрольные вопросы

- Какие виды энергии используют в странах мира для получения электроэнергии?
- Почему использование ВИЭ стало актуальным в XXI веке?
- Какие глобальные изменения происходят в мире по производству электроэнергии?
- Как решаются проблемы производства и потребления электроэнергии в Казахстане?



### Упражнение

7

- По таблице, данной в параграфе, определите долю электроэнергии, полученной из ВИЭ от всей произведенной энергии в Германии, Южной Корее, Мексике, Казахстане.
- По полученным результатам составьте диаграмму.

### Творческое задание

Подготовьте сообщение по темам (на выбор):

- Производство и потребление электроэнергии в Казахстане.
- Альтернативные источники электроэнергии и перспектива их развития в РК.
- Атомная энергетика в странах мира. Перспективы развития атомной энергетики в РК.

**Таблица 1.** Выход биотоплива-этанола по видам сырья и странам

С/х культура	Общемировые оценки/оценки по странам	Биотопливо	Урожайность культуры (тонны/га)	Эффективность преобразования (литры/тонны)	Выход биотоплива (литры/га)
Сахарный тростник	Бразилия	Этанол	73,5	74,5	5476
Сахарный тростник	Индия	Этанол	60,70	74,5	4522
Кукуруза	США	Этанол	9,4	399	3751
Кукуруза	Китай	Этанол	5,0	399	1995
Маниока	Бразилия	Этанол	13,6	137	1863
Маниока	Нигерия	Этанол	10,8	137	1480

**Таблица 2.** Численность населения и автопарк легковых автомобилей в ряде стран, производящих биотопливо

№	Страна	Авто/1000 чел.	Год	Население страны
1	США	809	2018	327 631 340
2	Бразилия	249	2016	206 081 432
3	Китай	154	2016	139 500 000 000

### Задание

Определите годовую потребность топлива при полном переходе машин на этанол для США, Бразилии и Китая. Какая площадь необходима для выращивания культур? Какой расход воды необходим для полива всех площадей? В расчетах примите средний расход этанола равным 8 л на 100 км, средний пробег одного автомобиля 17 тыс км в год. Для обеспечения высокой урожайности сезонная потребность растений в воде составляет около 1100–1500 мм/га.

### Ответьте на вопросы

1. Из какого сырья производят этанол?
2. В какой стране эффективность преобразования сырья в этанол выше?  
С чем это связано?

### Интересно знать



**Рис. 46.**

В 1998 г. в Алматы был построен завод LG Electronics, который сегодня является первым и единственным предприятием в Центральной Азии по производству электроники мирового класса. На фотографиях линии по сборке телевизоров и печатных плат (рис. 46).

## Итоги главы 3

*Производство и трансформация переменного тока*

ЭДС генератора	$e_i = \varepsilon_{\max} \sin \omega t ;$ $\varepsilon_{\max} = BS\omega N$	Действующие значения напряжения и силы тока	$U = \frac{U_m}{\sqrt{2}} ; I = \frac{I_m}{\sqrt{2}}$
Частота вращения ротора генератора	$\nu_p = \frac{50 \text{ Гц}}{n}$	Индуктивное сопротивление	$X_L = \omega L$
Мгновенное значение напряжения в цепи переменного тока	$u = U_m \sin(100\pi t + \varphi_0) ;$ $u = U_m \cos(100\pi t + \varphi_0)$	Емкостное сопротивление	$X_C = \frac{1}{\omega C}$
Мгновенное значение силы тока в цепи переменного тока	$i = I_m \sin(100\pi t + \varphi_c) ;$ $i = I_m \cos(100\pi t + \varphi_c)$	Условие резонанса	$X_L = X_C ;$ $\omega = \omega_0$
Максимальное значение силы тока в режиме резонанса	$I_m = \frac{U_m}{R}$	Коэффициент трансформации	$k = \frac{N_1}{N_2} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{I_2}{I_1}$

*Обозначение физических величин, единицы измерения в СИ*

Обозначение	Физическая величина	СИ	Обозначение	Физическая величина	СИ
$e_i$	Мгновенное значение ЭДС индукции	В	$U, I$	Действующие значения напряжения и силы тока	В, А
$\varepsilon_{\max}$	Максимальное значение ЭДС	В	$u, i$	Мгновенные значения напряжения и силы тока	В, А
$B$	Магнитная индукция	Тл	$U_m, I_m$	Максимальные значения напряжения и силы тока	В, А
$S$	Площадь рамки	$\text{м}^2$	$R_L$	Активное сопротивление катушки	Ом
$N$	Число витков в рамке, обмотке трансформатора		$R$	Активное сопротивление	Ом
$\omega$	Циклическая частота	рад/с	$X_L$	Индуктивное сопротивление	Ом
$\nu_p$	Частота вращения ротора генератора	Гц	$X_C$	Емкостное сопротивление	Ом
$n$	Число пар полюсов		$k$	Коэффициент трансформации	

### Глоссарий

**Индукционный генератор** – устройство, преобразующее механическую энергию в электрическую.

**Коэффициент трансформации** – величина, равная отношению числа витков в первичной обмотке трансформатора к числу витков во вторичной обмотке.

**Переменный ток** – вынужденные колебания заряженных частиц в проводнике под воздействием внешней периодически изменяющейся электродвижущей силы.

## ГЛАВА 4

# ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ВОЛНЫ

В главах «Электромагнитные колебания» и «Переменный ток» представлены низкочастотные электромагнитные колебания, созданные индукционным генератором. Они получили широкое применение в электротехнике: созданы устройства для получения, передачи и использования энергии электромагнитных колебаний низкой частоты. В данной главе будут рассмотрены основы радиотехники. В радиотехнике осуществляется беспроводная связь источника высокочастотных колебаний с приемником посредством электромагнитных волн.

### **Изучив главу, вы сможете:**

- объяснять условия возникновения электромагнитных волн и описывать их свойства;
- описывать модуляцию и детектирование высокочастотных электромагнитных колебаний;
- объяснять принцип работы радиосвязи;
- объяснять преимущества передачи сигнала в цифровом формате в сравнении с аналоговым сигналом;
- систематизировать средства связи и предлагать возможные пути их совершенствования.

## § 8. Излучение и прием электромагнитных волн

### Ожидаемый результат

Прочитав параграф, вы сможете:

- объяснять условия возникновения электромагнитных волн и описывать их свойства.



### Задание 1

На основе правила Ленца докажите, что при уменьшении магнитной индукции вектор напряженности вихревого электрического поля образует с вектором магнитной индукции правый винт (рис. 47).



### Вспомните!

Вокруг наэлектризованных тел создается электростатическое поле, вокруг проводника с током – магнитное поле.

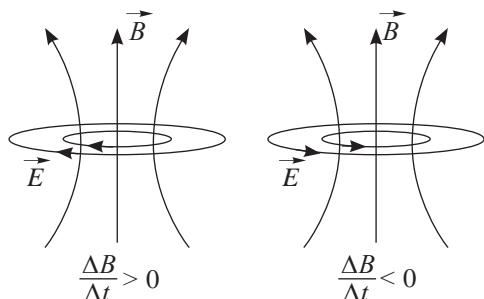


Рис. 47. Силовые линии вихревого электрического поля

### I. Вихревое поле. Гипотеза Максвелла

Наблюдая явление электромагнитной индукции, М. Фарадей установил, что при изменении магнитного поля возбуждается вихревое электрическое поле, силовые линии которого замкнуты. У них нет ни начала, ни конца, они охватывают линии магнитной индукции. Направление силовых линий вихревого поля определяют по правилу Ленца. При возрастании магнитной индукции вектор напряженности  $\vec{E}$  образует с вектором магнитной индукции  $\vec{B}$  левый винт, при уменьшении – правый винт (рис. 47).

Изучив свойства электрического и магнитного полей, Максвелл предположил, что во всех случаях, когда электрическое поле меняется, оно порождает переменное магнитное поле. Согласно гипотезе Максвелла при зарядке конденсатора магнитное поле создается не только вокруг проводника с током, но и между обкладками конденсатора (рис. 48). При этом вектор магнитной индукции  $\vec{B}$  созданного поля образует с вектором напряженности  $\vec{E}$  правый винт, если напряженность электрического поля возрастает  $\frac{\Delta E}{\Delta t} > 0$ , и левый винт, если напряженность убывает  $\frac{\Delta E}{\Delta t} < 0$ .

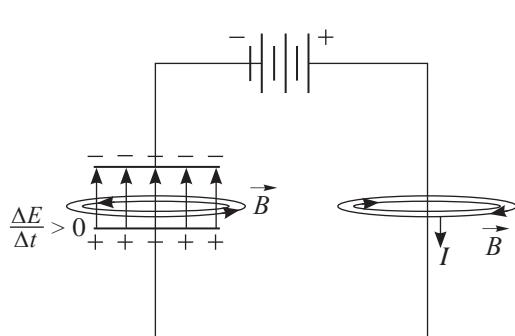


Рис. 48. Силовые линии магнитного поля, созданного переменным электрическим полем между обкладками конденсатора



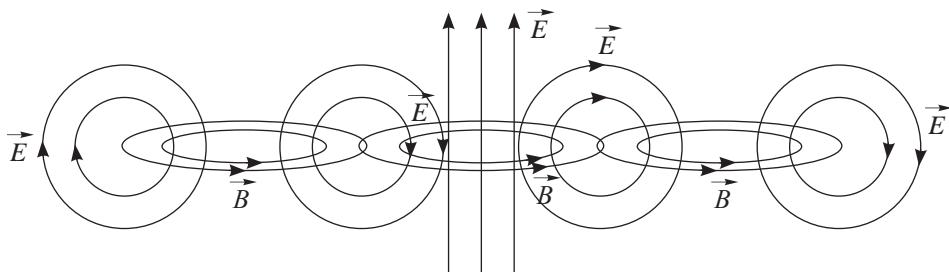
### Ответьте на вопросы

1. При каком условии возникает электромагнитное поле?
2. Почему утверждение о том, что в данной точке пространства существует только электрическое поле или только магнитное поле, не является вполне определенным?

## II. Электромагнитные волны.

### Условия излучения электромагнитных волн

В 1865 г. Максвелл теоретически предсказал, что переменное электромагнитное поле должно распространяться в пространстве в виде электромагнитных волн. Всякое изменение напряженности электрического поля в некоторой точке пространства вызывает появление переменного магнитного поля, которое в свою очередь порождает вихревое электрическое поле. Происходит передача колебаний напряженности электрического поля и индукции магнитного поля из одних точек пространства в другие, создается электромагнитная волна (рис. 49).



*Рис. 49. Распространение электромагнитной волны*

Напряженность электрического поля меняется при ускоренном движении заряженных частиц, следовательно, переменный ток мог бы стать источником электромагнитной волны. Но стандартная частота колебаний переменного тока 50 Гц недостаточна для создания волны высокой энергии, интенсивность колебаний заряженных частиц ничтожно мала. Одним из необходимых условий для создания электромагнитных волн является высокая частота электромагнитных колебаний, порядка десятка мегагерц. Колебания такой частоты происходят в колебательном контуре, но закрытый колебательный контур не излучает энергию и не создает волну.

Для создания волны необходимо освободиться от участков цепи с противофазными колебаниями тока в катушке, и увеличить расстояние между обкладками конденсатора. Для этого необходимо расправить витки катушки и раскрыть обкладки конденсатора, т.е. необходимо создать открытый колебательный контур (рис. 50). При этом условии энергия электромагнитного поля,

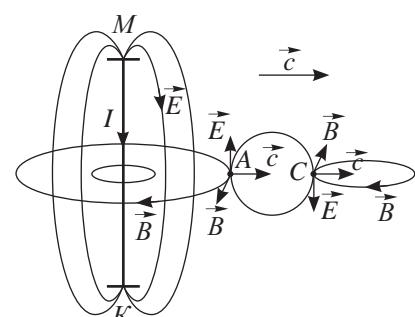
### Задание 2

Изобразите силовые линии электрического и магнитного поля в момент зарядки и момент разрядки конденсатора. Укажите их направление.



### Ответьте на вопрос

Почему свободные электрические колебания в открытом контуре затухают быстрее, чем в закрытом контуре?

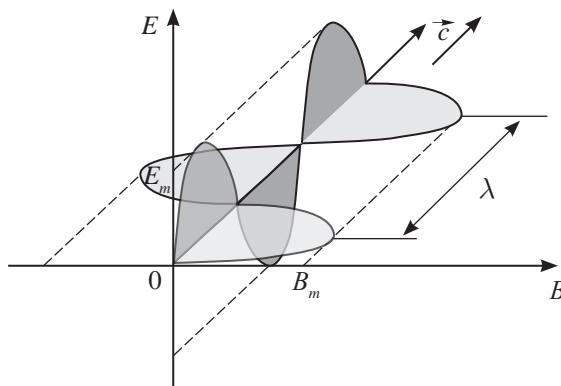


*Рис. 50. Распределение силовых линий электрического и магнитного полей вокруг открытого колебательного контура МК*

созданного высокочастотными колебаниями, будет распространяться в окружающем открытый контур пространстве.

### III. Электромагнитная волна – поперечная волна. Скорость волны

На рисунке 50 изображены направления векторов напряженности  $\vec{E}$  электрического поля, индукции магнитного поля  $\vec{B}$  и скорости распространения волны  $\vec{c}$  в точках  $A$  и  $C$ . Направление распространения волны определяют по правилу буравчика. Если вращать буравчик с правой нарезкой от вектора  $\vec{E}$  к вектору  $\vec{B}$ , то поступательное движение буравчика будет совпадать с вектором скорости  $\vec{c}$ . Направления колебаний векторов напряженности и магнитной индукции перпендикулярны направлению распространения волны. Электромагнитная волна является поперечной волной (рис. 51).



#### Ответьте на вопрос

Почему электромагнитная волна распространяется во всех направлениях перпендикулярных открытому контуру?

Рис. 51. Электромагнитная волна

Максвелл установил связь скорости распространения волны с напряженностью и магнитной индукцией:

$$c = \frac{E}{B}. \quad (1)$$

Скорость электромагнитной волны равна отношению напряженности электрического поля к индукции магнитного поля.

В своих расчетах он получил значение скорости электромагнитных волн в вакууме:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с.} \quad (2)$$

Согласно его расчетам скорость электромагнитных волн в других средах уменьшается в  $n$  раз:

$$v = \frac{c}{n} = \frac{c}{\sqrt{\epsilon \mu}}, \quad (3)$$

где  $\epsilon$  – диэлектрическая проницаемость среды;  $\mu$  – магнитная проницаемость среды;  $n$  – показатель преломления среды.

### IV. Связь длина волны с длиной антенны. Частота колебаний

В открытом колебательном контуре, который принято называть вибратором или антенной, плотность зарядов максимальная на его концах и всегда равна нулю в середине. Сила тока, напротив, максимальная в середине вибратора и равна нулю на его

концах. Перезарядка концов антенны происходит за половину периода  $t = \frac{T}{2}$ , следовательно, длина излучаемой волны превышает длину антенны вдвое:

$$\lambda = 2l, \quad (4)$$

где  $\lambda$  – длина излучаемой волны;  $l$  – длина антенны.

При известном значении длины волны не сложно рассчитать собственную частоту колебаний антенны, излучающей волну:

$$\nu = \frac{c}{2l}. \quad (5)$$

## V. Силовые характеристики электромагнитной волны

Электромагнитные волны, распространяющиеся в пространстве, являются бегущими волнами. Следовательно, колебания напряженности или магнитной индукции в какой-либо точке пространства, расположенной по направлению выбранной оси, можно определить по формуле бегущей волны:

$$E = E_m \sin \omega(t - \Delta t), \quad (6)$$

$$B = B_m \sin \omega(t - \Delta t), \quad (7)$$

где  $\Delta t = \frac{l}{c}$  – время, за которое волна достигнет точки пространства А, находящейся на расстоянии  $l$  от источника электромагнитных колебаний по направлению выбранной оси (рис. 53).

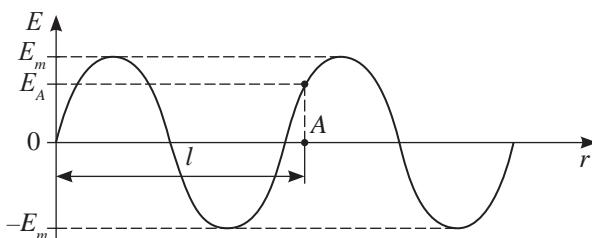


Рис. 53. График бегущей электромагнитной волны

## VI. Энергия, плотность энергии и интенсивность электромагнитной волны

Интенсивность волны определяется энергией волны.

Интенсивность волны  $I$ , или поверхностная плотность потока энергии – это физическая величина, равная энергии переносимой волнами через единичную поверхность, расположенную перпендикулярно направлению распространения волн, в единицу времени.

$$I = \frac{W}{S t}. \quad (8)$$

### Задание 3

Определите длину антенны мобильного телефона (рис. 52). Частотные диапазоны 3G сотовых операторов Билайн и Kcell/Activ в Казахстане 2100 МГц.



Рис. 52. Внешние антенны мобильных телефонов

### Задание 4

Запишите уравнение бегущей волны, которая распространяется в направлении, противоположном выбранной оси.

### Обратите внимание!

В электромагнитной волне плотность энергии магнитного поля равна плотности энергии электрического поля

$$\frac{\varepsilon \varepsilon_0 E^2}{2} = \frac{B^2}{2\mu\mu_0} \text{ или}$$

$w_{э.п.} = w_{м.п.}$  следовательно, выполняются следующие равенства:  $w = 2 w_{э.п.}$ ,  $w = 2 w_{м.п.}$ .

Единица измерения интенсивности [ $I$ ] – 1 Вт/м<sup>2</sup>.

Выразим энергию волны через объемную плотность энергии  $w$ :

$$W = w \cdot V, \quad (9)$$

где  $V$  – объем пространства, в котором сосредоточена энергия, переносимая через поверхность площадью  $S$  за время  $t$  (рис. 54). Выразим объем пространства через скорость распространения волны:  $V = Sl = Sct$  (10). С учетом (9) и (10) из формулы (8) получим:

$$I = w c. \quad (11)$$

Интенсивность электромагнитной волны равна произведению плотности электромагнитной энергии на скорость распространения волны.

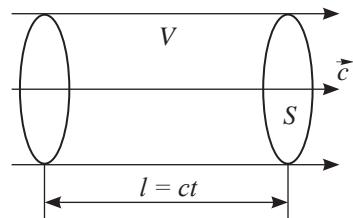


Рис. 54. Поток  
электромагнитной волны,  
пронизывающей поверхность  $S$

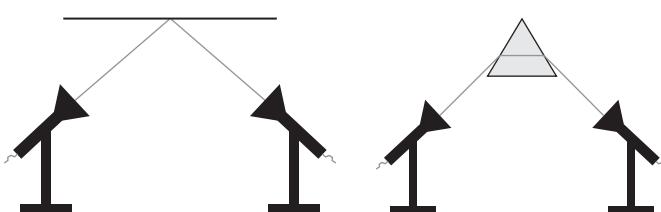
## VII. Свойства электромагнитных волн

Из курса 9 класса известно, что электромагнитные волны отражаются, преломляются,гибают препятствия. Генератор электромагнитных волн высокой частоты и приемник с рупорными антennами позволяют исследовать свойства электромагнитных волн. Не сложно убедиться в том, что проводники отражают электромагнитные волны (рис. 55 а), диэлектрики поглощают их и преломляют (рис. 55 б), когерентные электромагнитные волны создают устойчивую интерференционную картину (рис. 55 в).



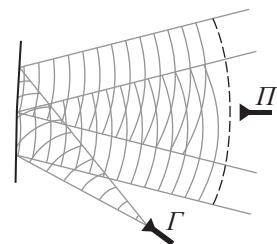
### Ответьте на вопрос

Почему для устойчивого приема сигнала приемную антенну необходимо устанавливать параллельно передающей антенне?



а) Отражение

б) Преломление



в) Интерференция

Рис. 55. Свойства электромагнитных волн



### Эксперимент

- Повторите опыты, изображенные на рисунках 55 а, б, в. Сформулируйте законы отражения и преломления для электромагнитных волн. Как с помощью рупорной антенны  $\Pi$  (рис. 55 в) доказать, что волны от генератора  $\Gamma$ , отраженные двумя металлическими пластинами создают интерференционную картину?
- Продумайте постановку эксперимента для наблюдения дифракции волн и доказательства их поперечности.



### Задание 5

Заполните таблицу, используя текст параграфа:

Свойства электромагнитных волн	Величины, характеризующие электромагнитную волну

## ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

**Задача 1.** Радиоприемник настроен на частоту  $\nu = 2 \text{ ГГц}$ . Определите длину волны излучаемых передатчиком радиоволн и длину передающей антенны.

<b>Дано:</b> $\nu = 2 \text{ ГГц}$ $\lambda - ?$ $l - ?$	<b>СИ</b> $2 \cdot 10^9 \text{ Гц}$	<b>Решение:</b> В воздухе скорость электромагнитной волны равна скорости света, длина волны равна: $\lambda = \frac{c}{\nu}$ . Длина антенны равна половине длины волны:
---	--	--

$$l = \frac{\lambda}{2}.$$

$$\lambda = \frac{3 \cdot 10^8 \text{ м/с}}{2 \cdot 10^9 \text{ Гц}} = 0,15 \text{ м}; l = 0,075 \text{ м.}$$

**Ответ:**  $\lambda = 0,15 \text{ м}$ ;  $l = 0,075 \text{ м}$ .

**Задача 2.** Плотность энергии электромагнитной волны в определенной точке пространства в заданный момент времени  $w = 5,2 \text{ мкДж/м}^3$ . Оцените значение модулей векторов магнитной индукции и напряженности, в тот же момент времени и в той же точке.

<b>Дано:</b> $w = 5,2 \text{ мкДж/м}^3$ $\epsilon = 1$ $\mu = 1$ $B - ? E - ?$	<b>СИ</b> $5,2 \cdot 10^{-6} \text{ Дж/м}^3$	<b>Решение:</b> Плотность энергии электромагнитной волны равна сумме плотностей энергии электрического и магнитного полей: $w = w_{\text{э.п.}} + w_{\text{м.п.}}$ ; Плотности энергий магнитного и электрического полей равны: $w_{\text{э.п.}} = w_{\text{м.п.}}$ .
--	---	---

Выполняются соотношения  $w = 2 w_{\text{э.п.}}$ ;  $w = 2 w_{\text{м.п.}}$ .

Выразим плотность энергии электромагнитного поля, через плотность энергии, электрического поля:

$$w = \frac{2\epsilon\epsilon_0 E^2}{2} = \epsilon\epsilon_0 E^2, \text{ откуда } E = \sqrt{\frac{w}{\epsilon\epsilon_0}}.$$

$$E = \sqrt{\frac{5,2 \cdot 10^{-6} \text{ Дж/м}^3}{8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}}} \approx 767 \text{ В/м.}$$

Выразим плотность энергии электромагнитного поля через плотность энергии магнитного поля:

$$w = \frac{2B^2}{2\mu\mu_0} = \frac{B^2}{\mu\mu_0}, \text{ откуда } B = \sqrt{\mu_0 w}.$$

$$B = \sqrt{1,26 \cdot 10^{-6} \text{ Гн/м} \cdot 5,2 \cdot 10^{-6} \text{ Дж/м}^3} = 2,56 \cdot 10^{-6} \text{ Тл.}$$

**Ответ:**  $E = 767 \text{ В/м}$ ;  $B = 2,56 \text{ мкТл}$ .

## Контрольные вопросы

1. Какое поле называют вихревым?
2. В чем различие между электростатическим и вихревым электрическим полем?
3. В чем заключается основная идея теории электромагнитного поля Мак-свелла?
4. При каком условии возникает электромагнитная волна?
5. Как определяют направление распространения электромагнитной волны?
6. Какими свойствами обладает электромагнитная волна?
7. Назовите величины, характеризующие волну.



## Упражнение

8

1. Передатчик, установленный на борту космического корабля «Восток», работал на частоте  $\nu = 20 \text{ МГц}$ . Определите длину волны, период излучаемых передатчиком радиоволн и длину передающей антенны.
2. Сила тока в открытом колебательном контуре зависит от времени по закону  $I = 0,1 \cos 6 \cdot 10^5 \pi t$ . Определите длину излучаемой волны.
3. Электромагнитные волны в некоторой среде распространяются со скоростью  $2 \cdot 10^8 \text{ м/с}$ . Какую длину волны создают электромагнитные колебания в этой среде, если в вакууме их частота равна 1 МГц?
4. Определите, на каком расстоянии от источника излучения плотность потока уменьшится в 100 раз по сравнению с плотностью потока излучения на расстоянии 100 м от источника.
5. Определите модуль максимального значения вектора магнитной индукции электромагнитной волны в момент, когда вектор напряженности имеет максимальное значение равное 0,6 кВ/м.

## Творческое задание

Подготовьте сообщение по темам (на выбор):

1. Встроенные и внешние антенны для мобильных телефонов разного поколения.
2. Влияние электромагнитных волн на организм человека и живые организмы.

## § 9. Радиосвязь. Детекторный радиоприемник

### Ожидаемый результат

Прочитав параграф, вы сможете:

- описывать модуляцию и детектирование высокочастотных электромагнитных колебаний;
- объяснять принцип работы радиосвязи.



### Ответьте на вопросы

- Почему в открытом пространстве громкость звука от одного и того же источника меньше, чем в комнате?
- Почему звуковые волны не распространяются на большие расстояния?



### Задание 1

Определите, во сколько раз отличаются максимальные расстояния от источников колебаний до приемника, на которые распространяются сигналы частотой 100 Гц и 100 МГц.

### I. Интенсивность и частота волн

Звук человеческого голоса не может распространяться на большие расстояния. Следовательно, волны, в диапазоне частот от баса (80 Гц) до сопрано (1400 Гц) являются волнами низкой интенсивности. Для увеличения дальности передачи сигнала необходимы волны с высокой плотностью энергии.

Не сложно доказать, что интенсивность сферической волны, созданного точечным источником, убывает пропорционально квадрату расстояния:

$$I = \frac{W}{t S} = \frac{W}{t 4\pi} \cdot \frac{1}{R^2}, \quad (1)$$

где  $S = 4\pi R^2$  – площадь поверхности фронта волны.

Для решения проблемы передачи на далекие расстояния проведем следующие рассуждения: плотность энергии, пропорциональная квадрату напряженности электрического поля  $w_{e.n.} = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 E^2}{2}$

и квадрату магнитной индукции  $w_{m.n.} = \frac{B^2}{2\mu\mu_0}$ . Напряженность  $\vec{E}$  и магнитная индукция  $\vec{B}$  электромагнитного поля являются силовыми характеристиками волны. На основании второго закона Ньютона они зависят от ускорения заряженных частиц, создавших волну:  $a = \omega^2 A \cos \omega t$ , которая в свою очередь зависит от квадрата частоты колебаний. Очевидно, что плотность энергии пропорциональна частоте колебаний в четвертой степени:

$$w \sim \omega^4, \quad (2)$$

интенсивность электромагнитной волны прямо пропорциональна плотности энергии  $I = wc$ , следовательно, она пропорциональна четвертой степени частоты:

$$I \sim \omega^4. \quad (3)$$

С повышением частоты сигнала радиус действия передающей антенны возрастает. При увеличении частоты колебаний в 2 раза, интенсивность электромагнитной волны увеличивается в 16 раз, увеличение частоты в 4 раза приведет к повышению интенсивности в 256 раз.

### II. Модуляция сигнала несущей частоты.

#### Принцип действия радиопередатчика

В радиотелефонной связи информацию передают на большие расстояния наложением колебаний звуковой частоты на высокочастотный сигнал генератора на транзисторе.

Частоту колебаний, созданых генератором высокой частоты, называют несущей частотой.

Наложение колебаний звуковой частоты на высокочастотный сигнал называют модуляцией.

Модуляцию можно осуществить изменением амплитуды (АМ) или частоты (FM) колебаний несущей частоты. Принципиальная схема радиопередатчика, излучающего амплитудно-модулированные сигналы, изображена на рисунке 56.

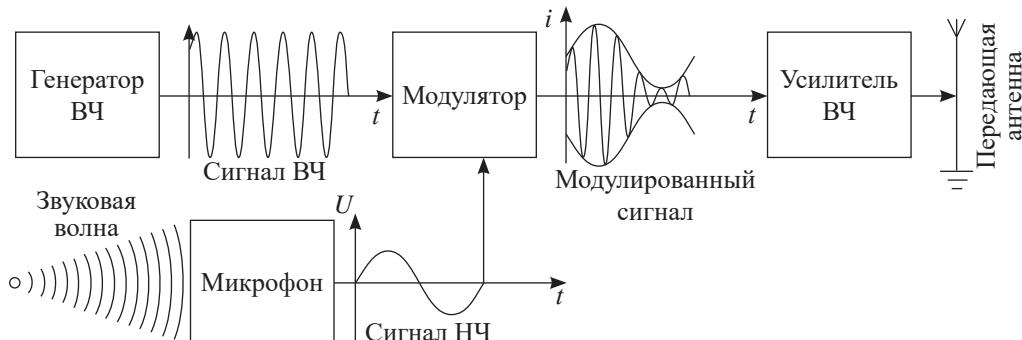
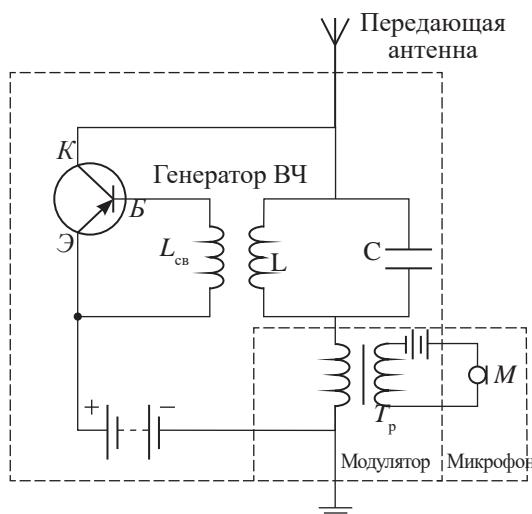


Рис. 56. Принципиальная схема радиопередатчика

Схема устройства простейшего радиопередатчика на транзисторе без усилителей представлена на рисунке 57. В изображенном радиопередатчике модулятором служит трансформатор. Одна из его обмоток подключается последовательно с колебательным контуром генератора. На вторую обмотку подается напряжение звуковой частоты с выхода микрофона. Переменный ток во второй катушке трансформатора индуцирует переменное напряжение на концах первой катушки. Изменение напряжения между эмиттером и коллектором, приводит к изменению амплитуды силы тока в цепи с частотой звуковой волны. Модулированные колебания тока высокой частоты в передающей антенне создают электромагнитную волну.



### Задание 2

1. Рассмотрите принципиальную схему аналогового радиопередатчика. Объясните принцип его действия.
2. Сравните принципиальную схему со схемой устройства транзисторного радиопередатчика, изображенного на рисунке 57. Назовите приборы, из которых состоит каждый блок радиопередатчика.

Рис. 57. Схема устройства транзисторного радиопередатчика

### III. Детекторный радиоприемник. Принцип его действия

Из множества сигналов одновременно работающих станций антenna радиоприемника выделяет один с резонансной частотой (рис. 58). Осуществить прием сигнала в режиме резонанса позволяет конденсатор переменной емкости колебательного контура в радиоприемнике. Принятый сигнал проходит через усилитель высокой частоты (УВЧ) и поступает в детектор, который из высокочастотных модулированных колебаний выделяет низкочастотные. После усилителя низкой частоты (УНЧ) колебания преобразуются в телефоне или динамике в звуковые колебания.

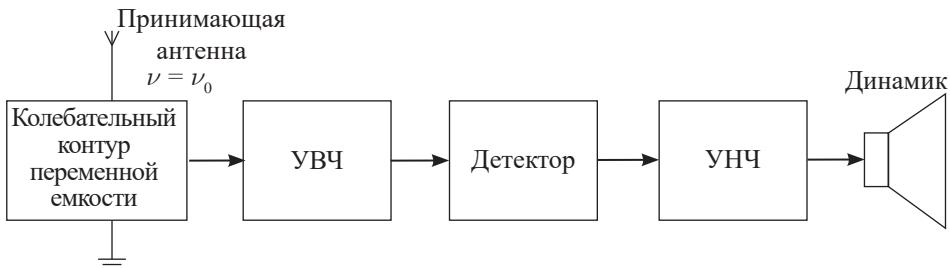


Рис. 58. Принципиальная схема радиоприемника

Схема простейшего радиоприемника без усилителей изображена на рисунке 59. Детектором в радиоприемнике служит диод, через который в силу односторонней проводимости этого прибора протекает пульсирующий ток. Конденсатор, подключенный к телефону параллельно, полпериода заряжается, затем полпериода разряжается через телефон или динамик, тем самым сглаживает пульсирующий сигнал. Через телефон проходит ток той же частоты, что и в микрофоне радиопередатчика. Таким образом, телефон преобразует электрические колебания в механические и воспроизводит переданные звуки.

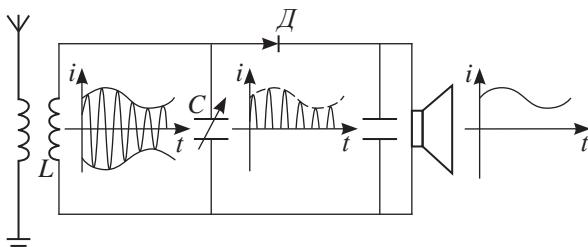


Рис. 59. Схема простейшего радиоприемника



#### Ответьте на вопросы

- Почему в колебательном контуре радиоприемника конденсатор переменной емкости?
- Какой прибор в цепи простейшего радиоприемника выполняет роль детектора?
- Почему после прохождения через диод сигнал становится пульсирующим?
- Какова роль конденсатора, подключенного к динамику?

#### ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Колебательный контур принимающей антенны состоящей из катушки индуктивностью  $L = 2$  мГн настроен на сигнал длиной волны 30 см. Определите емкость конденсатора.

<p><b>Дано:</b></p> <p><math>\lambda = 30 \text{ см}</math>  <math>L = 2 \text{ мкГн}</math></p> <p><math>C - ?</math></p>	<p><b>СИ</b></p> <p><math>0,3 \text{ м}</math>  <math>2 \cdot 10^{-6} \text{ Гн}</math></p>	<p><b>Решение:</b></p> <p>Длину волны выразим через период колебаний:  <math>\lambda = c \cdot T = c \cdot 2\pi\sqrt{LC}</math>.</p> <p>Выразим емкость конденсатора, освободившись от иррациональности:</p> $C = \frac{\lambda^2}{4\pi^2 \cdot c^2 \cdot L};$ $C \approx \frac{0,09 \text{ м}^2}{40 \cdot 9 \cdot 10^{16} \text{ м}^2/\text{с}^2 \cdot 2 \cdot 10^{-6} \text{ Гн}} \approx 1,25 \cdot 10^{-14} \text{ Ф}.$ <p><b>Ответ:</b> <math>C \approx 1,25 \cdot 10^{-14} \text{ Ф}.</math></p>
--	---	--

### Контрольные вопросы

1. Каким способом можно увеличить дальность распространения радиоволн?
2. Каков принцип действия радиопередатчика?
3. Как осуществляется амплитудная модуляция колебаний несущей частоты в транзисторном радиопередатчике?
4. Поясните принцип действия радиоприемника.



### Упражнение

9

1. Во сколько раз увеличится интенсивность электромагнитной волны, если частоту сигнала увеличить в 10 раз?
2. Во сколько раз увеличится интенсивность волны и радиус действия передающей антенны, если частоту сигнала увеличить в 3 раза?
3. Во сколько раз уменьшается интенсивность сигнала при увеличении расстояния до точечного источника электромагнитной волны в 4 раза? Во сколько раз необходимо увеличить частоту колебаний источника сигнала для повышения интенсивности сигнала до первоначального значения?
4. Определите частотный диапазон радиоприемника, принимающего передачи с длиной волны от 24 до 26 м.
5. Приемный контур состоит из катушки индуктивностью  $L = 2 \text{ мкГн}$  и конденсатора емкостью  $C = 1800 \text{ пФ}$ . На какую длину волны рассчитан контур?
6. Катушка приемного контура радиоприемника имеет индуктивность  $L = 1 \text{ мкГн}$ . Какова емкость конденсатора, если сигнал принимается от станции, работающей на длине волны  $\lambda = 1000 \text{ м}$ ?

### Творческое задание

Подготовьте сообщение по темам (на выбор):

1. Первые устройства беспроводной связи.
2. Сеть связи для чрезвычайных ситуаций.
3. Принципы радиорелейной связи.

## § 10. Аналого-цифровой преобразователь. Каналы связи

### Ожидаемый результат

Прочитав параграф, вы сможете:

- объяснять преимущества передачи сигнала в цифровом формате в сравнении с аналоговым сигналом.

### I. Каналы радиосвязи

Диапазоны частот сигналов радиостанций не должны быть близкими, иначе при осуществлении приема сигнала одной станции будут помехи от сигналов других станций. Поэтому число каналов аналоговой радиосвязи было ограниченным.

Частотным каналом радиосвязи называют частоту радиоволн, выделенную и используемую для радиосвязи между конкретными пользователями.

Ширина частотного канала определяется объемом передаваемой информации. Наиболее широкие сигналы необходимы в телевидении для передачи звука, изображения и сигнала синхронизации звука с изображением. Ширина канала при неизменном объеме информации сужается, если использовать ультракороткие волны (УКВ), передача и прием которых возможен только в пределах прямой видимости. С появлением спутниковой связи этот недостаток УКВ стал их преимуществом. Радиосигналы на УКВ, направленные к спутнику усиливаются бортовым ретранслятором и передаются в нужный участок планеты на сотни и тысячи километров от места передачи.

УКВ благодаря ограниченности радиуса действия в наземных условиях получили широкое применение в сотовой связи. Одни и те же частотные каналы используются не только на территории различных стран, но и внутри одной страны.

### II. Международная классификация электромагнитных волн по частотам

В зависимости от частоты (длины) волны свойства распространения, отражения, преломления, дифракции проявляются по-разному, поэтому на международном уровне была принята классификация радиоволн (таблица 2):

Таблица 2

Наименование частотного диапазона	Границы диапазона	Наименование волнового диапазона	Границы диапазона
Крайние низкие, КНЧ	3–30 Гц	Декаметровые	100–10 Мм
Сверхнизкие, СНЧ	30–300 Гц	Мегаметровые	10–1 Мм
Инфразвуковые, ИНЧ	0,3–3 кГц	Гектокилометровые	1000–100 км
Очень низкие, ОНЧ	3–30 кГц	Сверхдлинные мириаметровые	100–10 км
Низкие частоты, НЧ	30–300 кГц	Длинные километровые	10–1 км
Средние, СЧ	0,3–3 МГц	Средние гектометровые	1–0,1 км
Высокие частоты, ВЧ	3–30 МГц	Короткие декаметровые	100–10 м
Очень высокие, ОВЧ	30–300 МГц	Ультракороткие метровые	10–1 м
Ультравысокие, УВЧ	0,3–3 ГГц	Дециметровые	1–0,1 м
Сверхвысокие, СВЧ	3–30 ГГц	Сантиметровые	10–1 см
Крайне высокие, КВЧ	30–300 ГГц	Миллиметровые	10–1 мм
Гипервысокие, ГВЧ	300–3000 ГГц	Децимиллиметровые	1–0,1 мм

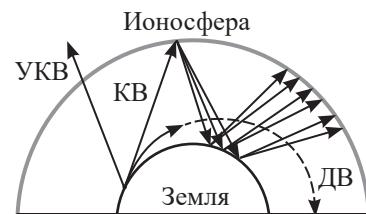
Сверхдлинные, длинные и средние волны огибают Землю и препятствия, хорошо отражаются от ионосферы и распространяются на большие расстояния (рис. 60). Прием сигнала зависит от состояния ионосферы и может значительно измениться в течение суток. Ионизация верхних слоев атмосферы происходит под действием излучения Солнца, концентрация ионов в атмосфере с дневной стороны Земли превышает в 20 раз концентрацию ионов в ее тени.

Ультракороткие волны не огибают препятствий, не отражаются от ионосферы, проходят ее беспрепятственно. Установить радиосвязь в диапазоне УКВ возможно только в пределах прямой видимости. Ультракороткие волны обладают большим преимуществом, они способны нести большую информацию.

Сантиметровые, миллиметровые и децимиллиметровые волны называют микроволнами, для их использования созданы антенны с параболическими отражателями.

### III. Цифровые технологии. Аналого-цифровой преобразователь

Распределение частотных каналов между радио- и телевизионными станциями ограничивало число радио- и телепередач. С появлением цифровой технологии ситуация изменилась. Цифровое кодирование сигнала в аналого-цифровых преобразователях (рис. 61) позволило работать нескольким станциям на один и тех же частотах, число передач возросло в десятки раз. Звуковой и телевизионный сигнал с помощью цифровых технологий кодируется в двоичной системе (рис. 62) и передается пакетом, который меньше подвержен различным помехам. Качество сигнала после раскодировки в принимающем устройстве значительно превышает качество сигнала при осуществлении аналоговой радиосвязи.



**Рис. 60.** Распространение радиоволн



#### Ответьте на вопросы

1. Почему короткие волны не могут обеспечить уверенного приема радиосигнала?
2. Почему аналоговая связь ограничивает число каналов связи?



**Рис. 61.** АЦП – аналого-цифровой преобразователь



**Рис. 62.** Кодирование аналогового сигнала для компьютерной обработки



### Задание 1

Рассмотрите рисунок 62. Поясните принцип кодирования аналогового сигнала в двоичной системе. Какое значение напряжения соответствует кодам: 0001, 0010, 0011?

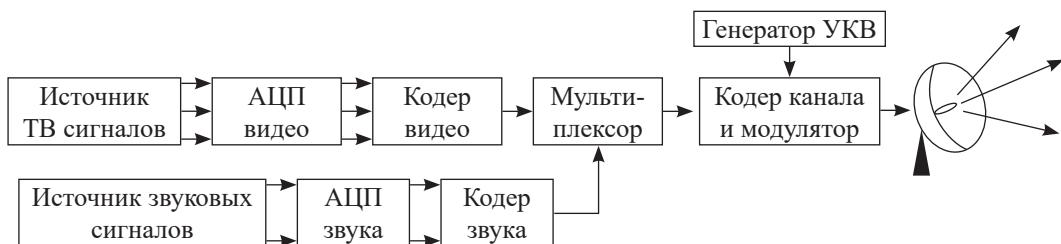


### Задание 2

Изучив материалы сети Интернет выясните, во сколько раз повышается точность передачи данных при использовании 8-битного АЦП в сравнении с 4-битным АЦП?

## IV. Принцип цифрового телевидения

Современное телевидение основано на цифровой технологии. Структурная схема цифровой телевизионной системы показана на рисунке 63. Рассмотрим назначение основных частей системы.



*Рис. 63. Структурная схема цифровой передающей телевизионной системы*

Источник аналоговых телевизионных сигналов формирует цветное изображение, которое поступает в аналого-цифровой преобразователь. В следующей части системы, называемой кодером изображения или кодером видео, осуществляется кодирование видеинформации для передачи сигналов по стандартным каналам связи. Сигналы звукового сопровождения также преобразуются в цифровую форму. Звуковая информация сжимается в кодере звука. Кодированные данные изображения и звука, а также различная дополнительная информация объединяются в мультиплексоре в единый поток данных. В кодере канала выполняется еще одно кодирование передаваемых данных для повышения помехоустойчивости. Цифровым сигналом, полученным в результате нескольких этапов кодирования, модулируют несущую частоту используемого канала связи.

В приемной части системы (рис. 64) все процессы осуществляются в обратном порядке: осуществляется демодуляция принятого высокочастотного сигнала и декодирование канального кодирования.



*Рис. 64. Структурная схема цифровой принимающей телевизионной системы*

Затем в демультиплексоре поток данных разделяется на данные изображения, звука и дополнительную информацию. После этого выполняется декодирование данных. В результате на выходе декодера изображения получаются сигналы в цифровой форме, которые преобразуются в аналоговую форму в аналого-цифровом преобразователе (АЦП) и подаются на монитор, на экране которого воспроизводится цветное изображение. На выходе декодера звука получают сигналы звукового сопровождения, также преобразованные в аналоговую форму. Эти сигналы поступают на усилители звуковой частоты и далее на динамики.

### Интересно знать!

Изображение на экране представляет собой совокупность точек, пикселей, разных цветов. Для черно-белого изображения информационный объем одной точки равен одному биту: или черная – 1, или белая – 0. Цветное изображение на экране монитора формируется за счет смешивания трех базовых цветов: красного, зеленого, синего. Для получения богатой палитры базовым цветам могут быть заданы различные интенсивности. Для 256 цветов объем информации 8 бит или 1 байт, для 4 294 967 296 цветов – 32 бита или 4 байта.

## V. Принцип цифрового радиовещания

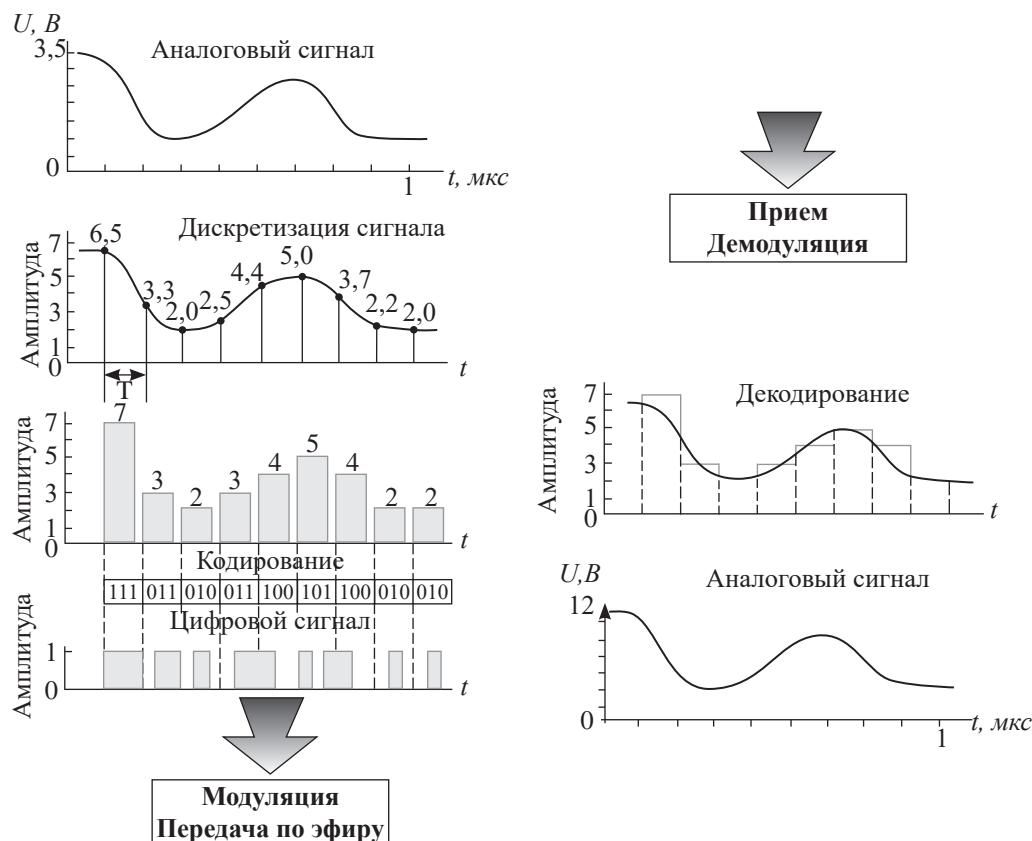


Рис. 65. Принцип преобразования звукового сигнала

для цифрового радиовещания



### Задание 3

Рассмотрите рисунок 65. Поясните принцип преобразования звукового сигнала для цифрового радиовещания. Сколько битов было использовано для кодирования сигнала?



### Обратите внимание!

Аудиокарта АЦП разделяет звук на очень мелкие временные участки и кодирует степень интенсивности каждого из них в двоичный код. Такое деление называют *дискретизацией*. Чем выше частота дискретизации, тем качественней получается запись. Если звуковая карта АЦП – устройства для раскодирования отцифрованного сигнала не поддерживает высокий уровень дискретизации, то сигнал не будет воспроизведен.

### Контрольные вопросы

- Что называют каналом радиосвязи?
- Как распространяются радиоволны различной длины? Какие проблемы необходимо учитывать в радиосвязи на длинных, коротких, ультракоротких волнах?
- Какие процессы происходят в АЦП?
- В чем преимущество цифровой технологии радио- и телевещания?



### Упражнение

10

- Частотные диапазоны операторов связи РК представлены в таблице. Определите длины волн, на которых осуществляется связь. Укажите диапазон волн, на которых работают операторы связи, согласно Международной классификации электромагнитных волн.

Торговые марки операторов связи	2G	3G
<b>ALTEL</b>	900 МГц	850 МГц, 900 МГц*
 <b>Beeline™</b>	900 МГц	2100 МГц
 <b>Kcell</b>	900 МГц	2100 МГц

### Творческое задание

Подготовьте сообщение по темам (на выбор):

- Аналоговые и цифровые стандарты сотовой связи.
- Системы спутниковой связи.
- Коммуникационное развитие Республики Казахстан.

## § 11. Средства связи

### Ожидаемый результат

Прочитав параграф, вы сможете:

- систематизировать средства связи и предлагать возможные пути их совершенствования



### Обратите внимание!

Министерством транспорта и коммуникаций в 2012 г. была разработана программа «Информационный Казахстан – 2020». Основная цель программы – создание информационного общества. Основные задачи: обеспечение эффективности системы государственного управления; доступности информационно-коммуникационной инфраструктуры; создание информационной среды для социально-экономического и культурного развития общества; развитие отечественного информационного пространства. Реализация программы требовала развития современных средств связи, повышения уровня компьютерной грамотности населения, освоения сетевых технологий.



### Ответьте на вопрос

Какая технология используется в вашем доме для осуществления широкополосного доступа к сети Интернет?

### I. Развитие современных средств связи. Сеть Интернет

Реализация в РК проекта «Строительство и перевод сети телекоммуникаций на технологии NGN позволяет через одну сеть предоставить все услуги одновременно для телефонной связи, для доступа в Интернет, для кабельного телевидения, для проводного радиовещания. Основной тенденцией отрасли телекоммуникаций являются внедрение и развитие цифровых технологий телерадиовещания. В Республике Казахстан развивается сеть широкополосного доступа к сети Интернет с использованием современных технологий: ADSL, CDMA/EVDO, FTTH; 3G, 4G.

Строительство универсальной волоконно-оптической сети FTTH начато в 2011 году с целью удовлетворения растущего спроса на услуги высокоскоростного широкополосного доступа к Интернету и расширения спектра предоставляемых услуг. Проект предусматривает 100 %-ный охват много квартирных домов и коттеджных застроек в городах Нур-Султан, Алматы и во всех областных центрах РК. Волоконно-оптические линии связи обладают рядом преимуществ:

- высокая пропускная способность в сочетании с большими расстояниями;
- защита от несанкционированного доступа: информацию невозможно «прослушать», не нарушив волоконно-оптический кабель;
- возможность объединения территориально удаленных офисов корпорации.



### Возмите на заметку

NGN (Next Generation Network) – сеть связи следующего поколения;

ADSL (Asymmetric Digital Subscriber Line) – асимметричная цифровая абонентская линия;

CDMA (Code Division Multiple Access) – множественный доступ с кодовым разделением;

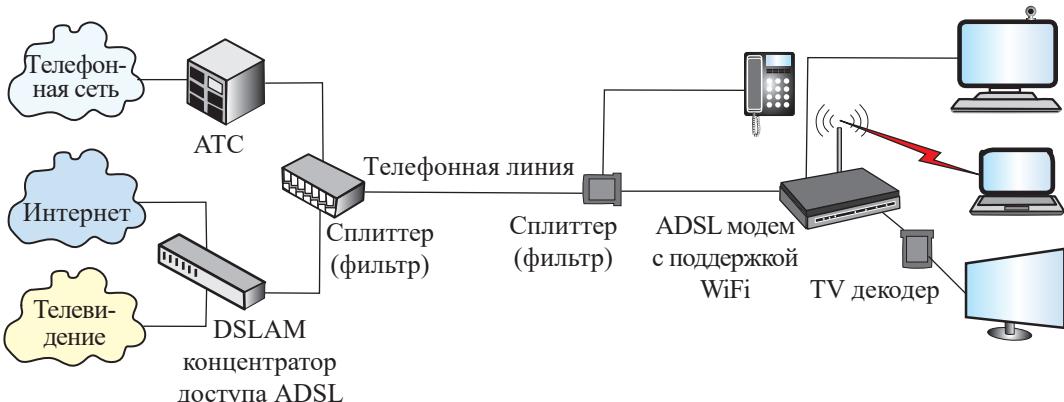
EVDO (Evolution Data Optimized) – улучшенная, оптимизированная;

FTTH (Fiber to the Home) – оптоволоконный кабель в дом).

Для предоставления сельскому населению РК услуги широкополосного доступа к сети Интернет используется технология CDMA – это технология связи, при которой каналы передачи имеют общую полосу частот, но разную кодовую модуляцию. Начиная с 2011 г., она усовершенствуется благодаря дооборудованию платами EVDO. Высокая скорость передачи данных по технологии CDMA 450/EVDO достигается за счет применения новых алгоритмов сжатия цифровых данных.

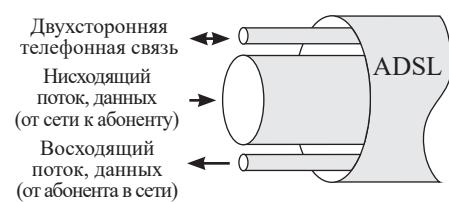
## II. Цифровое телерадиовещание

Технология ADSL разработана для быстрой передачи информации, она основана на использовании телефонных проводов в качестве линии высокоскоростной передачи данных. Два модема подключают к концам телефонного кабеля (рис. 66). Для одновременной передачи нескольких сигналов по одной линии используют сплиттер – электрический фильтр для частотного разделения каналов. Каждый пользователь имеет специальный преобразователь, декодирующий сигнал и позволяющий видеть на экране телевизора разные передачи.



*Рис. 66. Предоставление услуг Интернет, телевидения и телефонии с помощью ADSL технологии*

Скорость передачи данных зависит от диаметра проводов и ее протяженности. Затухание сигнала в линии увеличивается при увеличении длины линии и уменьшается с увеличением диаметра провода. Функциональным пределом для ADSL является абонентская линия длиной 3,5–5,5 км при толщине проводов 0,5 мм. В настоящее время ADSL обеспечивает скорость «нисходящего» потока данных от сети к абоненту в пределах от 1,5 Мбит/с до 8 Мбит/с. Скорость «восходящего» потока данных от абонента в сеть составляет от 640 Кбит/с до 1,5 Мбит/с. ADSL может обеспечить одновременную высокоскоростную передачу видеосигнала без прерывания обычной телефонной связи, для которой используется та же телефонная линия (рис. 67).



*Рис. 67. Деление потока информации в телефонной линии*



### Задание 1

Рассмотрите рисунок 67. Как осуществляется передача информации по технологии ADSL? Какой пакет услуг предоставлен клиенту? Какие виды услуг связи предоставлены вам, вашей школе?

### **III. Сотовая связь**

Все сотовые операторы Казахстана до 2012 года использовали сеть третьего поколения 3G. Технология 3G обладает рядом преимуществ: благодаря высокой скорости передачи сигнала, загрузка и пересылка мультимедиа происходит за считанные секунды. Собеседника можно не только слышать, но и видеть, возможны режимы видеоконференции и видеотрансляции. Благодаря технологии 3G инвалиды по слуху впервые получили возможность общаться посредством видеозвонков.

С 2012 года началась реализация проекта по строительству сетей четвертого поколения стандарта 4G. Технология 4G обеспечивает возможность создания систем мобильной связи, оптимизированных для пакетной передачи данных.

### **IV. Сетевые технологии. Дата-центр**

Отрасль телекоммуникаций и связи является растущим и связующим сегментом казахстанской экономики, она оказывает влияние на увеличение производительности труда и создание условий для прогрессивного развития отечественных предприятий и их интеграции в мировую экономику.

В Павлодаре в декабре 2012 года запущен в эксплуатацию первый крупнейший в СНГ дата-центр, представляющий собой комплекс сетевого и вычислительного оборудования и специализированного программного обеспечения. На базе созданного Дата-центра малому и среднему бизнесу предоставлены ИТ-услуги: облачная система хранения данных, виртуальный резервный центр обработки данных, программное обеспечение для бизнеса, система интерактивного общения и обмена информацией, облачная серверная платформа. Проект был реализован АО «Казахтелеком» совместно с компанией из Калифорнии Hewlett-Packard, которая является мировым лидером в строительстве дата-центров. Сеть из 16 дата-центров АО «Казахтелеком» охватывает всю республику. На рисунке 68 изображена серверный дата-центр Алматы.



*Рис. 68. Дата-центр. г. Алматы*

## V. Облачные технологии

Над внедрением облачных технологий в Казахстане активно работает ведущий оператор связи АО «Казахтелеком». В июне 2011 года подписан меморандум о сотрудничестве с компанией Microsoft. В первом квартале 2012 года запущены такие облачные решения, как Microsoft Hosted Exchange и Microsoft Share Point Hosting.

Основные функции Microsoft Hosted Exchange – обработка и пересылка почтовых сообщений, поддержка мобильных устройств и веб-доступ, интеграция с системами голосовых сообщений, а также поддержка систем обмена мгновенными сообщениями.

Share Point Hosting – техническая платформа компании Microsoft для создания внутренних корпоративных ресурсов для обмена информацией и совместной работы. Платформа Share Point дает возможность создавать документы Office с возможностями отслеживания изменений, блоги, форумы, опросы, wiki-страницы, шаблоны страниц.

## VI. Сетевые социальные проекты

Рост компьютерной грамотности населения и вовлеченность в сетевые социальные проекты приводят к более интенсивному использованию услуг связи. Происходит развитие электронного документооборота, подача через Интернет заявлений в различные государственные учреждения, осуществление коммунальных платежей и интернет-торговля.

На портале egov.kz граждане могут бесплатно получить доступ ко всей информации о государственных органах, в том числе имеется доступ к законодательной базе Казахстана. Посредством портала решены задачи предоставления информации и услуг гражданам, бизнесу и государственным органам.



### Ответьте на вопросы

1. Какие изменения в использовании современных средств связи внедрены в вашем регионе?
2. Какие изменения вы хотели бы внести и с какой целью? Что для этого необходимо сделать? Есть ли возможности для осуществления ваших предложений?



### Ответьте на вопросы

1. Почему аналитики уверены в том, что малый и средний бизнес предпочтут IT-услуги Дата-центра?
2. Как воспользоваться облаком электронной почты?
3. Как создать свой блог?



### Ответьте на вопросы

1. Почему вопросу о создании информационного общества в РК уделяется большое внимание?
2. Почему правительство стремится подключить к порталу egov.kz большую часть населения РК?



### Задание 2

1. Сопоставьте информацию, данную в параграфе, с целью и задачами программы «Информационный Казахстан – 2020». Все ли поставленные цели и задачи достигнуты?

## Контрольные вопросы

1. Какую цель преследует программа «Информационный Казахстан – 2020»?
2. Как обеспечивают широкополосный доступ к сети Интернет в РК?
3. В чем преимущество оптово-волоконных линий связи?
4. Каковы возможности сотовой связи третьего поколения 3G? В чем преимущество связи 4G?
5. С какой целью созданы Дата-центры?
6. Какие облачные технологии и сетевые социальные программы доступны в РК?



## Упражнение

11

1. Владелец сотового телефона за месяц расходует 320 минут на разговоры и отправляет 450 SMS. Сотовый оператор предлагает на выбор три тарифных плана, условия которых перечислены в таблице.

Тарифный план	Абонентная плата, тенге	Стоимость 1 мин, тенге	Стоимость 1 SMS, тенге	Примечание
Стандарт	Нет	8,5	7,5	Нет
Гостевой	1000	6 за каждую минуту свыше 150	9	Первые 150 минут бесплатно
Безлимитный	3500	4 за каждую минуту свыше 300	12,5	Первые 300 минут и первые 300 SMS бесплатно

Сколько тенге заплатит владелец телефона за месяц, если выберет самый выгодный тариф?

## Творческое задание

Подготовьте сообщение с ppt-презентациями по темам (на выбор):

1. Возможности технологии ADSL.
2. О перспективах деятельности специальной экономической зоны «Парк инновационных технологий» СЭЗ «Алматы» по цифровизации и проекту Smartcity.
3. История создания сотовых телефонов.
4. Средства подвижной связи.

### XVII чемпионат мира по спортивной радиопеленгации

В 2014 г. в поселке Бурабай Акмолинской области состоялся XVII чемпионат мира по спортивной радиопеленгации. На соревнования прибыли 300 человек из 25 стран мира. Самые представительные делегации из Китая – 64 участника, России – 40, Чехии – 37, Казахстана – 30, Японии – 25.

Спортивная радиопеленгация, известная как «Охота на лис», – это дисциплина в радиоспорте. Она зародилась в Дании и Англии после завершения Второй мировой войны. Данный вид спорта представляет собой состязание между спортсменами, которые с помощью карты местности, компаса и радиоприемника с направленной антенной должны за наименьшее время найти определенное число радиопередатчиков «Лис» (от 3 до 5). Соревнования проходят на гористой, болотистой, труднопроходимой пересеченной местности. «Лисы» передают сигнал с интервалом 4 минуты. Участие в соревнованиях требует не только значительной физической подготовки, но и умения ориентироваться на местности, работать с картой и пользоваться радиоприемником.

Диапазон используемых волн для передачи сигнала: 3,5 МГц, 28 МГц и 144 МГц (рис. 69, 70).



*Рис. 69. Забег спортсмена с радиопеленгатором диапазона 144 МГц*



*Рис. 70. Радиопеленгатор диапазона 3,5 МГц.*

#### Задание 1

Определите длину волны, на которой передаются сигналы «лис». Почему «лис», передающих сигнал на частоте 144 МГц обнаружить сложнее, чем «лис» с частотой сигнала 3,5 МГц? Как спортсмены определяют расположение передатчика? Сколько пеленгов необходимо снять, чтобы указать на карте расположение «лисы»?



## Задание 2

Операторы сотовой связи

- Сравните тарифы услуг, предложенных операторами сотовой связи. Какие преимущества каждого предложения?

Тарифы операторов сотовой связи в Казахстане				
Услуги	TELE2 «Супер +»	ALTEL «Супер SMART +»	BEELINE «Все включено М»	ACTIV «Алло, Казахстан 2»
Абонентская плата	800 тг/мес	990 тг/мес	1470 тг/мес	1490 тг/мес
Лимит SMS внутри сети	9000 SMS/мес	9000 SMS/мес	3000 SMS/мес	500 SMS/мес
Мобильный интернет в месяц	5 ГБ	безлимит	450 ГБ	10 ГБ (5 ГБ ночью и 5 ГБ днем)
Стоимость звонков внутри сети, после лимита	0 тг/мин	0 тг/мин	8 тг/мин	5 тг/мин
Стоимость звонков на других операторов, после лимита	11 тг/мин.	10 тг/мин	18 тг/мин	5 тг/мин
Лимит звонков внутри сети	безлимит	безлимит	3000 в мес	1490 мин/мес (общий лимит на звонки внутри и вне сети)
Лимит звонков на других операторов	90 мин/мес	100 мин/мес	—	

- Какие изменения внесены в услуги операторов сотовой связи?
- Какие операторы сотовой связи, не внесенные в таблицу, предлагают свои услуги на территории Казахстана? Какие виды услуг они предлагают?



## Задание 3

Изучите историю развития связи в Казахстане, от 1990 г. до наших дней. Какие виды связи не востребованы в наше время? Какие виды связи наиболее популярные?

## Итоги главы 4

### Уравнение электромагнитной волны

$$E = E_m \sin \omega(t - \Delta t);$$

$$B = B_m \sin \omega(t - \Delta t);$$

$$E = E_m \sin \omega(t + \Delta t);$$

$$B = B_m \sin \omega(t + \Delta t)$$

### Величины, характеризующие электромагнитную волну

Скорость

$$c = \frac{E}{B};$$

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с};$$

$$v = \frac{c}{n} = \frac{c}{\sqrt{\epsilon \mu}}$$

Длина волны

$$\lambda = cT;$$

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

Интенсивность

$$I = \frac{W}{St};$$

$$I = w c$$

Плотность энергии

$$w = w_{\text{э.н.}} + w_{\text{м.н.}}$$

$$w = 2w_{\text{э.н.}}$$

$$w = 2w_{\text{м.н.}}$$

### Соотношение длины волны с длиной антенны

$$\lambda = 2l$$

*Обозначение физических величин, единицы измерения в СИ*

Обозна- чение	Физическая величина	СИ	Обозна- чение	Физическая величина	СИ
$E$	Напряженность электромагнитной волны	В/м	$n$	Показатель преломления	
$B$	Магнитная индукция	Тл	$\lambda$	Длина волны	м
$c$	Скорость света	$3 \cdot 10^8$ м/с	$I$	Интенсивность волн	Вт/м <sup>2</sup>
$\epsilon$	Дизэлектрическая проницаемость среды		$W$	Энергия волны	Дж
$\epsilon_0$	Электрическая постоянная	$8,85 \cdot 10^{-12}$ Кл <sup>2</sup> /Н · м <sup>2</sup>	$\omega$	Плотность энергии	Дж/м <sup>3</sup>

Обозна- чение	Физическая величина	СИ	Обозна- чение	Физическая величина	СИ
$\mu$	Магнитная проница- емость среды		$\omega_{\text{э.п.}}$	Плотность энергии электрического поля	$\text{Дж}/\text{м}^3$
$\mu_0$	Магнитная посто- янная	$4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Н}/\text{А}^2$	$\omega_{\text{м.п.}}$	Плотность энергии магнитного поля	$\text{Дж}/\text{м}^3$
$T$	Период	с	$\nu$	Частота	Гц

### Гипотеза Максвелла:

Всякое переменное магнитное поле возбуждает в окружающем пространстве вихревое электрическое поле. Всякое изменение электрического поля вызывает появление в окружающем пространстве вихревого магнитного поля.

### Глоссарий

**Интенсивность волны** – физическая величина, равная энергии переносимой волнами через единичную поверхность, расположенную перпендикулярно направлению распространения волн, в единицу времени.

**Модуляция** – наложение колебаний звуковой частоты на высокочастотный сигнал.

**Несущая частота** – частота колебаний, созданных генератором высокой частоты.

**Частотный канал радиосвязи** – частота радиоволн, выделенных и используемых для радиосвязи между конкретными пользователями.

## ГЛАВА 5

# ВОЛНОВАЯ ОПТИКА

Волновая оптика – это раздел оптики, объясняющий явления на основе волновой природы света. Световые волны по своей природе являются электромагнитными волнами видимого диапазона частот. Они обладают всеми свойствами электромагнитных волн. В волновой оптике рассматриваются такие явления, как интерференция, дифракция и поляризация.

**Изучив главу, вы сможете:**

- описывать условия необходимые для наблюдения интерференции и дифракции световых волн;
- описывать применение дифракционной решетки для определения длины волны;
- экспериментально исследовать поляризацию света.



## § 12. Интерференция света. Дифракция света

### Ожидаемый результат

Прочитав параграф, вы сможете:

- описывать условия необходимые для наблюдения интерференции и дифракции световых волн.



### Ответьте на вопросы

- Почему мыльные пузыри имеют причудливую окраску?
- Почему CD-диски переливаются в солнечных лучах?



### Эксперимент

Пронаблюдайте волны на воде, созданные одним колеблющимся телом и двумя, совершающими колебания с одной частотой и амплитудой. Это могут быть шарики, закрепленные на одном стержне (рис. 71). Почему в области наложения волн на поверхности воды наблюдается неизменная картина: часть точек выше уровня жидкости в сосуде, часть – ниже (рис. 72)?

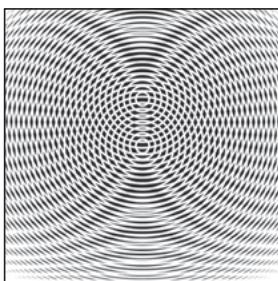


Рис. 72. Результат наложения волн от когерентных источников

### I. Интерференция механических волн

Если в некоторой среде несколько источников возбуждают механические волны, то они распространяются независимо друг от друга. Все точки среды принимают участие в колебаниях, вызванных каждой волной в отдельности. Наложение волн, в результате которой появляется устойчивая картина чередующихся максимумов и минимумов колебаний частиц среды, называют интерференцией.

Интерферировать могут только волны, имеющие одинаковую частоту и постоянный сдвиг фаз. Такие волны называют *когерентными*, их создают источники, колеблющиеся с одинаковой частотой и постоянным значением сдвига фаз.

**Интерференция волн – взаимное увеличение или уменьшение результирующей амплитуды двух или нескольких когерентных волн при их наложении друг на друга.**



Рис. 71. Наблюдение наложения волн от двух источников



### Запомните!

Волны называют когерентными, если их источники совершают колебания одной частоты с постоянным сдвигом фаз.

### II. Условие максимума и минимума при интерференции двух волн

Амплитуда колебаний при наложении волн определяется в соответствии с принципом суперпозиции (рис. 73). Если в некоторой точке среды накладываются гребни когерентных волн, то происходит усиление колебаний, амплитуда принимает значение, равное сумме амплитуд. Если накладывается гребень одной волны с впадиной другой волны, то при

равенстве амплитуд отдельно взятых волн данная точка пространства не совершает колебания. Если амплитуды отличаются, то колебания в этой точке совершаются с амплитудой равной разности амплитуд распространяющихся волн.

Для определения результата интерференции волн, распространяющихся от двух источников А и В, находящихся на расстоянии  $l_1$  и  $l_2$  от точки С, достаточно определить разность хода волн и сравнить с длиной волны. Если разность хода равна целому числу длин волн, то в точке С произойдет наложение гребней или впадин, амплитуда колебаний возрастет (рис. 74). Выполняется условие максимума:

$$\Delta l = l_1 - l_2 = k\lambda, \quad (1)$$

где  $\Delta l$  – разность хода волн,  $k$  – натуральное число, равное 0, 1, 2, 3 ...

*Разность хода лучей соответствует разности фаз колебаний:*

$$\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2 = k \cdot 2\pi, \quad (2)$$

так как волна за период пробегает расстояние равное длине волны  $\lambda$ , периоду  $T$  соответствует фаза  $\varphi = \frac{2\pi}{T} \cdot t = \frac{2\pi}{T} \cdot T = 2\pi$ .

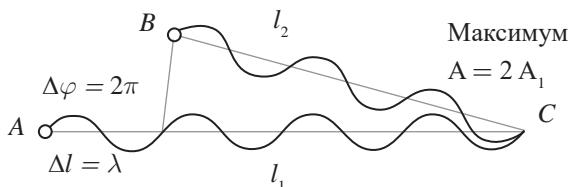


Рис. 74. Условие максимума колебаний в точке С

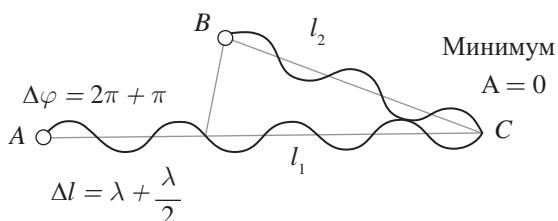
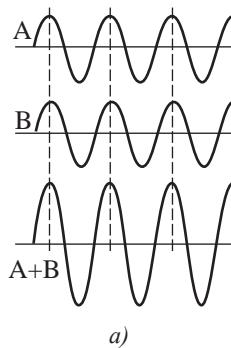
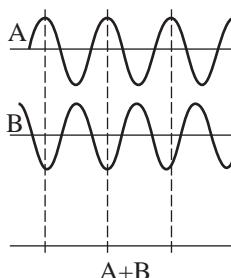


Рис. 75. Условие минимума колебаний в точке С

Минимум колебаний в рассматриваемой точке среды наблюдается в том случае, если от двух когерентных источников распространяются волны со сдвигом фаз, равным нечетному числу  $\pi$ , а разность хода лучей равна нечетному числу длин полуволны. В этом случае колебания происходят в противофазе (рис. 75).



а)



б)

Рис. 73. а) Усиление амплитуды при наложении волн с одинаковой фазой; б) гашение волн, колебания частиц в которых происходит в противофазе



### Возьмите на заметку

Интерференция волн приводит к перераспределению энергии колебаний между частицами среды. Это не противоречит закону сохранения энергии, так как в среднем, для большой области пространства, энергия результирующей волны равна сумме энергий интерферирующих волн.

**Условие минимума:**

$$\Delta l = l_1 - l_2 = (2k + 1) \frac{\lambda}{2} \quad (3)$$

или

$$\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2 = (2k + 1)\pi. \quad (4)$$

### III. Распространение волн.

#### Принцип Гюйгенса – Френеля

На основе принципа Х. Гюйгенса: *каждая точка среды, до которой дошло возмущение, является источником вторичных волн*, невозможно объяснить, почему источники вторичных волн создают фронт только по направлению распространения волны. Для объяснения явлений распространения волны французский физик О. Френель в 1815 г. дополнил принцип Х. Гюйгенса представлениями о когерентности и интерференции вторичных волн. При наложении вторичных когерентных волн происходит *интерференция*, в результате которой амплитуда колебаний в различных точках пространства становится разной: по направлению распространения волны усиливается, в обратном направлении – уменьшается. Огибающая фронты вторичных волн является *фронтом результирующей волны* (рис. 76).



#### Задание

Поясните на основе принципов Гюйгенса и Френеля распространение сферической и плоской волны по рисунку 76. Основываясь на тех же принципах, изобразите модель распространения цилиндрической волны.

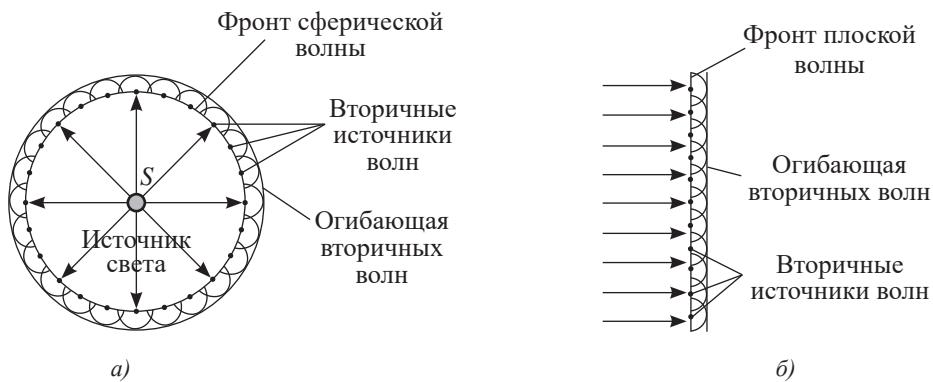


Рис. 76. Фронт волны: а) сферической; б) плоской

#### Возмите на заметку

Используемые для освещения источники излучают не когерентные волны, в них присутствуют волны различной частоты и разности фаз. Источник света излучает видимые волны в диапазоне от 400 нм до 750 нм с частотами от  $4 \cdot 10^{14}$  Гц до  $7,5 \cdot 10^{14}$  Гц. Излучение атома представляет собой «обрывок» волны, который называют цугом. Переход атома из возбужденного в невозбужденное состояние происходит за малый промежуток времени, порядка 10 нс спонтанно, следовательно, длина цуга достигает около  $l = ct \approx 3 \cdot 10^8 \text{ м/с} \cdot 10 \cdot 10^{-9} \text{ с} = 3 \text{ м}$ , а разность фаз между цугами может иметь произвольное значение.

## IV. Опыт Т. Юнга по наблюдению интерференции световых волн

Английский физик Т. Юнг в 1802 г. наблюдал интерференцию света от одного монохроматического источника, используя две преграды с одним и двумя небольшими отверстиями (рис. 77). На экране он увидел чередование светлых и темных полос. Усиление света происходило в том случае, если к данной точке экрана обе волны достигали синфазными колебаниями. В этом случае гребень одной волны накладывается на гребень другой.

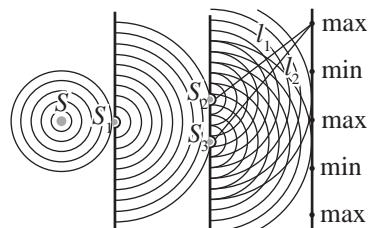


Рис. 77. Опыт Т. Юнга по наблюдению интерференции световых волн

## V. Условия максимума и минимума освещенности

Условия максимума и минимума интерференции световых волн аналогичны механическим волнам.

Максимум освещенности наблюдается в том случае, если разность хода когерентных лучей в однородной среде кратна целому числу длин волн.

$$\Delta l = k \lambda, \quad (5)$$

где  $\Delta l = l_2 - l_1$  – разность хода лучей,  $\lambda$  – длина волны,  $k = 0, 1, 2, 3 \dots$

Разность фаз таких колебаний кратна  $2\pi$ .

Минимум освещенности наблюдается, если разность хода когерентных лучей в однородной среде кратна нечетному числу полудлин волн.

$$\Delta l = (2k + 1) \frac{\lambda}{2}. \quad (6)$$

Минимальная разность фаз таких колебаний составляет  $\pi$ .

### Ответьте на вопрос

Почему в помещении, при подключении второго источника максимумы и минимумы освещенности не наблюдаются, освещение усиливается во всем пространстве?

### Ответьте на вопрос

Можно ли опыт Т. Юнга, (рис. 77) по наблюдению интерференции света привести в качестве примера дифракции света?

Томас Юнг (1773–1829) – английский физик, механик, врач, астроном и востоковед, один из создателей волновой теории света. С ранних лет обнаружил необыкновенные способности и феноменальную память: в два года бегло читал, к 14 годам познакомился с дифференциальным исчислением. Наиболее важные направления его работ – оптика, механика, физиология зрения. Юнг впервые рассмотрел проблему суперпозиции волн; дальнейшим развитием этой проблемы явилось открытие Юнгом принципа интерференции. Он описал первые опыты по определению длин волн света. Высказал гипотезу о поперечности световых волн, разработал теорию цветного зрения.



### Ответьте на вопросы

- Почему, при малых размерах препятствий, в центральной части тени может оказаться светлое пятно (полоса)?
- Почему, при малых размерах отверстий, в центральной части пятна на экране могут появиться темное пятно (полоса)?
- Почему, при увеличении размеров препятствий все полосы исчезают?



### Эксперимент

1. Расположив тела и отверстия малых размеров (рис. 78) на расстояние нескольких метров до экрана, получите на нем:
  - светлые и темные кольца от шарика и отверстия (рис. 78 а, б);
  - светлые и темные полосы от тонкого стержня и щели (рис. 78 в, г).
 Используйте источник монохроматического света.
2. Меняя расстояние от препятствия до экрана, добейтесь появления светлого пятна (полосы) в центральной части тени от шарика (стержня), а также темного пятна (полосы) в центральной части светлого пятна от малого отверстия (щели).

## VI. Дифракция света

Согласно геометрической оптике, на экране в результате прохождения световых лучей через отверстие диаметром  $d$ , появляется изображение в виде яркого круглого пятна большего диаметра  $D$  (рис. 79).

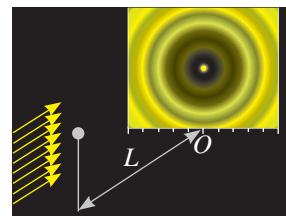
При уменьшении диаметра отверстия  $d$  и увеличении расстояния до экрана  $l$ , изображение меняется. Оно представляет собой чередующиеся темные и светлые кольца, в центре которых может быть как светлое, так и темное пятно. При освещении малых по размеру тел наблюдается такая же картина (рис. 78 а, б).

**Дифракция света – это явление огибания светом препятствий малых размеров и попадание его в область геометрической тени.**

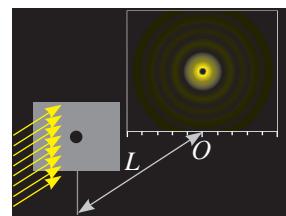
Различают два случая дифракции света: дифракцию Френеля в сходящихся лучах, и дифракцию Фраунгофера в параллельных лучах.

### Интересно знать!

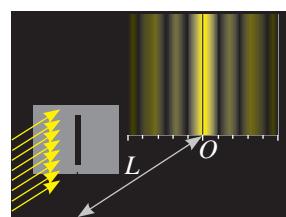
Впервые изображение чередующихся колец в тени круглого диска, наблюдал итальянский физик Франческо Гриимальди и описал его в своем сочинении «Физическое учение о свете, цветах и радуге». Ф. Гриимальди объяснил наблюдаемое явление огибанием световыми волнами препятствий подобно волнам на воде и назвал его дифракцией (от лат. *diffractus* – огибание, разбиение).



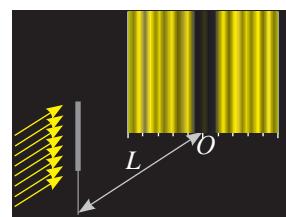
а) Шарик



б) Круглое отверстие

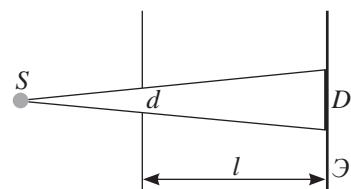


в) Щель



г) Тонкий стержень

**Рис. 78. Распределение максимумов и минимумов освещения на экране**



**Рис. 79. Образование светлого пятна на экране при освещении круглого отверстия**

## ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Два когерентных источника испускают световые волны, частота которых равна  $5 \cdot 10^{14}$  Гц. Усиление или ослабление света будет наблюдаться в точке с разностью хода, равной 1,5 мкм?

<b>Дано:</b>	<b>СИ</b>	<b>Решение:</b>
$\nu = 5 \cdot 10^{14}$ Гц		Выясним сколько длин волн вмещается в разность хода когерентных волн: $\Delta l = k\lambda$ (1), где $\lambda = \frac{c}{\nu}$ (2). Из (1)
$\Delta l = 1,5$ мкм	$1,5 \cdot 10^{-6}$ м	и (2), получим: $k = \frac{\Delta l \nu}{c}$ ; $k = \frac{1,5 \cdot 10^{-6} \text{ м} \cdot 5 \cdot 10^{14} \text{ Гц}}{3 \cdot 10^8 \text{ м/с}} = 2,5$ .
$k - ?$		В результате хода лучей вмещается нечетное число – 5 полудлин волн.

**Ответ:** полное гашение.

## Контрольные вопросы

1. Какое явление называют интерференцией?
2. При каком условии наблюдается устойчивая интерференционная картина?
3. При каких условиях наблюдаются максимум и минимум освещенности?
4. Какое явление называют дифракцией?
5. При каком условии дифракция наблюдается?



## Упражнение

12

1. Оптическая разность хода двух интерферирующих волн равна  $0,2 \lambda$ . Определите разность фаз, выражите в градусах.
2. Разность хода двух волн от когерентных источников составляет  $0,5 \lambda$ . Определите соответствующую разность хода волн разность фаз колебаний.
3. Определите минимальное значение разности фаз волн от когерентных источников в некоторой точке пространства, в которой происходит усиление колебаний.
4. Определите минимальную разность хода двух когерентных волн до точек упругой среды, в которых наблюдается максимальное ослабление волн в результате их наложения. Источники волн колеблются синфазно с частотой 0,4 кГц. Скорость распространения волны в данной среде 240 м/с.
5. Определите результат интерференции двух когерентных волн в точке среды, находящейся в 16 м от первого источника волны и в 31 м от другого. Источники колеблются синфазно с периодом 20 мс. Скорость распространения волны 1,5 км/с.

## § 13. Дифракционные решетки

### Ожидаемый результат

Прочитав параграф, вы сможете:

- описывать применение дифракционной решетки для определения длины волны.



Рис. 80. Прозрачная и отражательная дифракционные решетки

### I. Дифракционная решетка

Существуют прозрачные и отражательные дифракционные решетки (рис. 80). Одномерная дифракционная решетка представляет собой систему из большого числа  $N$  одинаковых по ширине и параллельных друг другу щелей в экране, разделенных также одинаковыми по ширине непрозрачными промежутками.

Специальная делительная машина наносит на стеклянную пластину равноудаленные параллельные непрозрачные штрихи, число которых достигает порядка 3600 на 1 мм. Качество прибора характеризуют постоянной решетки  $d$ , которая равна сумме ширины прозрачной щели  $a$ , и ширины нанесенного штриха  $b$  (рис. 81):

$$d = a + b. \quad (1)$$

Дифракционная решетка

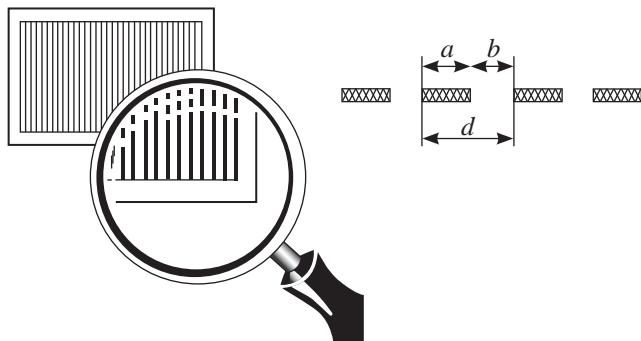


Рис. 81. Штрихи на прозрачной дифракционной решетке

Постоянную решетки, при известном значении ширины стеклянной пластины  $L$  и нанесенном количестве полос  $N$ , определяют по формуле:

$$d = \frac{L}{N}. \quad (2)$$

В отражательных дифракционных решетках полосы наносятся резцом на отшлифованной металлической пластине.

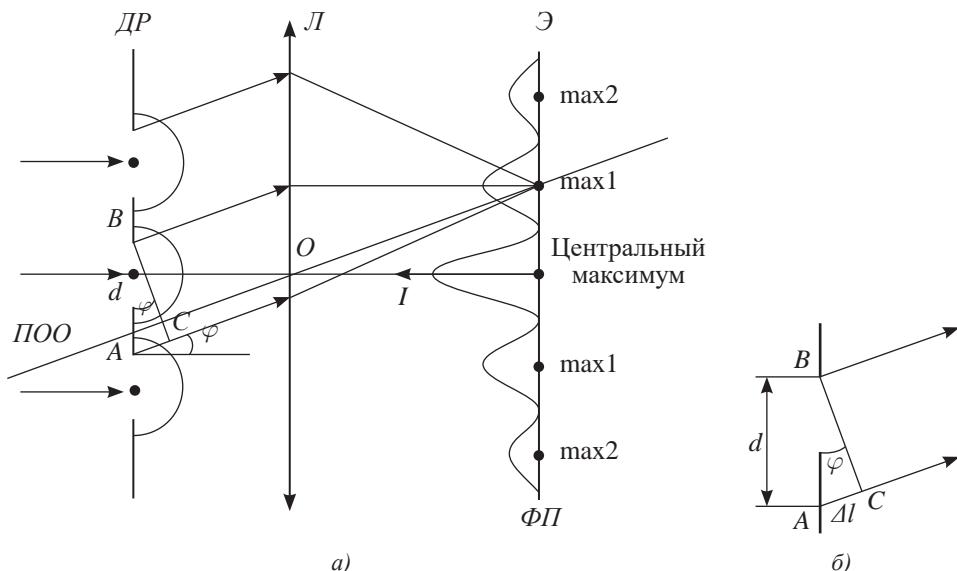
► Дифракционная решетка представляет собой совокупность большого числа узких щелей, разделенных непрозрачными промежутками.

## II. Условие максимума для дифракционной решетки

В дифракционной решетке осуществляется многолучевая интерференция параллельных когерентных пучков света, идущих от всех щелей.

Рассмотрим ход лучей через дифракционную решетку ДР в проходящем свете. Пусть на решетку падает плоская монохроматическая волна (*рис. 82 а*). Согласно принципу Гюйгенса вторичные источники в щелях решетки создают сферические волновые поверхности, огибающие препятствия и распространяющиеся по всем направлениям. Если за решеткой поставить собирающую линзу Л, то параллельные лучи от всех щелей собираются в фокальной плоскости линзы в одну полосу. Определим разность хода лучей от двух соседних щелей из  $\Delta ABC$  (*рис. 82 б*):

$$\Delta l = d \sin \varphi, \quad (3)$$



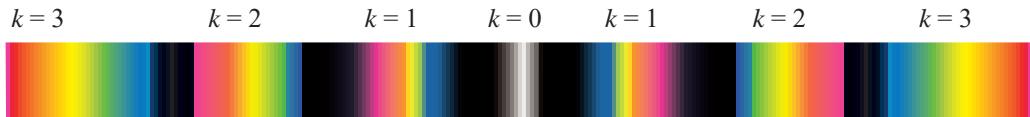
*Рис. 82. Дифракционная решетка (ДР):  
а) ход лучей через ДР; б) разность хода лучей*

где  $\varphi$  – угол отклонения световых лучей от перпендикуляра к плоскости решетки. Если разность хода лучей кратна целому числу длин волн, то на экране наблюдается максимум освещенности, выполняется соотношение:

$$ds \sin \varphi = k \lambda, \quad (4)$$

где  $k$  – порядок дифракционного максимума.

Из полученного уравнения следует, что для различных длин волн условие максимума выполняется при определенном значении угла дифракции. Чем больше длина волны, тем больше угол отклонения. При освещении дифракционной решетки белым светом максимумы освещения на экране окрашиваются в радужные цвета от фиолетового до красного, центральный максимум остается белым. Интенсивность света с увеличением порядка спектра ослабевает (*рис. 83*).



*Рис. 83. Дифракционные спектры при освещении ДР белым светом*

### Ответьте на вопросы

1. Как изменится дифракционная картина, если увеличить общее число штрихов решетки, не меняя постоянной решетки?
2. Как определить наибольший порядок спектра дифракционной решетки?
3. Как изменится дифракционная картина при удалении экрана от решетки?
4. Почему штрихи на дифракционной решетке должны быть тесно расположены друг к другу?

### Интересно знать!

1. Простейшей отражательной дифракционной решеткой является компакт-диск. (рис. 84). На поверхность диска по спирали нанесено углубление шириной 0,5 мкм, рассеивающее падающий свет. Нетронутая подложка шириной 1,1 мкм отражает лучи. Компакт-диск является отражательной дифракционной решеткой с периодом 1,6 мкм. Другим примером дифракционной решетки являются голограммы различного вида.
2. Для получения качественной дифракционной решетки необходимо соблюдать очень высокую точность изготовления. Ошибка при нанесении хоть одного штриха или щели приводит к моментальной выбраковке изделия. Для процесса изготовления применяется особая делительная машина с алмазными резцами, крепящаяся к специальному массивному фундаменту. До начала процесса нарезки решетки это оборудование должно проработать от 5 до 20 часов в холостом режиме, чтобы стабилизировать все узлы. Изготовление одной дифракционной решетки занимает почти 7 суток. Несмотря на то, что нанесение каждого штриха происходит всего лишь за 3 секунды.
3. Дифракционная решетка является важным и незаменимым инструментом в спектроскопии, так с ее помощью можно узнать, например, химический состав далекой звезды.



*Рис. 84.*

### Контрольные вопросы

1. Что представляет собой дифракционная решетка?
2. Какие виды дифракционных решеток существует?
3. Что такое «постоянная решетки»?
4. Укажите для дифракционной решетки условие максимума.



## Упражнение

13

1. Дифракционная решетка, постоянная которой равна 0,004 мм, освещается светом с длиной волны 687 нм. Под каким углом к решетке нужно проводить наблюдение, чтобы видеть изображение спектра второго порядка?
2. Дифракционная решетка расположена параллельно экрану на расстоянии 0,7 м от него. Определите количество штрихов на 1 мм для этой дифракционной решетки, если при нормальном падении на нее светового пучка с длиной волны 430 нм первый дифракционный максимум на экране находится на расстоянии 3 см от центральной светлой полосы. Считать, что  $\sin\varphi \approx \operatorname{tg}\varphi$ .
3. Определите длину волны нормально падающего на решетку света, для которой линия, соответствующая максимуму четвертого порядка в дифракционном спектре, совпадает с линией, соответствующей максимуму пятого порядка для света с длиной волны  $\lambda = 440$  нм.
4. Определите наибольший порядок  $k$  спектра для желтого цвета с длиной волны  $\lambda = 589$  нм, если постоянная дифракционной решетки  $d = 2$  мкм.
5. Чему равна ширина всего спектра первого порядка, полученного при помощи дифракционной решетки с периодом  $d = 0,01$  мм? Длины волн заключены в пределах от 0,38 до 0,76 мкм. Расстояние от дифракционной решетки до экрана  $L = 0,5$  м.

## Экспериментальное задание

Пронаблюдайте дифракционные картины, полученные на капроновой ткани, на компакт-диске. К какому виду дифракционной решетки относится компакт-диск?

## Творческое задание

Подготовьте сообщение по темам (на выбор):

1. Устройство и принцип действия дифракционного спектрографа, спектроскопа, спектрометра.
2. Двумерные и пространственные дифракционные решетки.

## § 14. Поляризация света

### Ожидаемый результат

Прочитав параграф, вы сможете:

- экспериментально исследовать поляризацию света.



### Возьмите на заметку

Т. Юнг и О. Френель долгое время считали световые волны продольными, которые подобно звуковым волнам распространяются в упругом эфире, пронизывающем окружающие нас пространство и тела.



Рис. 85. Кристаллы турмалина

### I. Поляризация света

Явление поляризации впервые было обнаружено при прохождении пучка световых лучей сквозь пластины турмалина. Турмалин – это прозрачный кристалл красного, синего или зеленого цвета с сильно выраженной одноосной оптической анизотропией (рис. 85). Границы пластин в проведенном опыте параллельны этой оси. Вращение одной пластины в плоскости, перпендикулярной направлению распространения света, не влияет на его интенсивность (рис. 86). При вращении двух пластин турмалина в той же плоскости относительно друг друга интенсивность световых лучей уменьшается, в момент перпендикулярного расположения осей пластин свет полностью гасится. Обыкновенный луч света полностью поглощается пластиной турмалина толщиной около 1 мм.

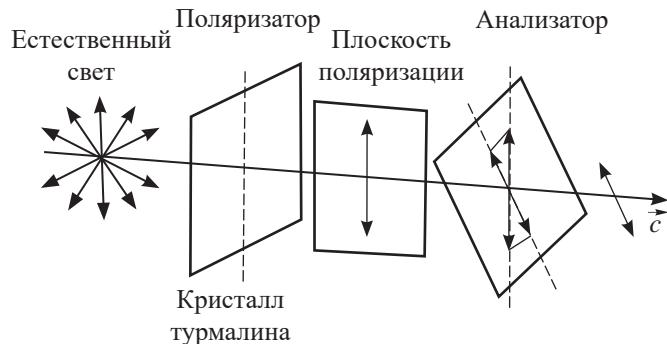


Рис. 86. Поляризация света

Явление поляризации можно объяснить, предположив, что свет является поперечной волной.

При прохождении естественного света через кристалл из всех направлений колебаний выделяется только одно, параллельное оси кристалла, происходит поляризация света. Кристалл турмалина в этом случае называют поляризатором. Если при прохождении второй пластины колебания происходят вдоль оси кристалла, то амплитуда и интенсивность колебаний поляризованного света не меняются. При повороте второй пластины относительно первой на угол  $\alpha$  амплитуда колебаний напряженности уменьшится до значения:

$$E = E_{\max} \cos \alpha.$$

При повороте на угол  $\alpha = 90^\circ$  напряженность световой волны станет равной нулю  $E = 0$ , такие поляризатор и анализатор называются скрещенными. Вторая пластина турмалина позволяет отличить поляризованный свет от естественного, поэтому она названа анализатором.

Опыт с турмалином показал, что световая волна является поперечной и симметричной относительно направления распространения, поскольку ее интенсивность не зависит от вращения пластины турмалина.



*Рис. 87. Оптическая скамья с источником поляризованного света, анализатором, экраном и устройством для измерения интенсивности света*

### Эксперимент

Проведите опыт с поляризатором и анализатором с использованием оптической скамьи (рис. 87). Как меняется освещенность экрана от угла поворота осей анализатора и поляризатора относительно друг друга?

### Ответьте на вопрос

Почему продольная волна не может быть поляризованной?

## II. Поляризаторы и поляроиды

Поляризатор – это устройство для получения полностью или частично поляризованного света. Свойством поляризации обладают полимерные пленки с длинными молекулами, ориентированными в одном направлении, призмы и пластинки, обладающие оптической анизотропией из кристаллов турмалина, исландского шпата, кварца. Тонкую поляризационную пленку, вклеенную между двумя прозрачными пленками для защиты от влаги и механических повреждений, называют поляроидом.

Явление поляризации света имеет большое практическое применение. Поляроид широко используется для разнообразных целей, например: для устранения бликов при фотографировании, для создания 3D изображения, для изготовления жидкокристаллических экранов, для устранения ослепляющего действия света на водителей автомобилей от фар встречных машин. Используя явление поляризации, можно плавно регулировать интенсивность светового излучения. Два поляризатора позволяют плавно изменять интенсивность освещения в 100 000 раз.

## III. Применение поляризаторов

Поляризованный свет используют для гашения света, зеркально отраженного от гладких поверхностей. На этом принципе устроены, например, *поляроидные солнечные очки*. Когда естественный неполяризованный свет падает на поверхность водоема, часть его зеркально отражается и при этом поляризуется. Отраженный свет мешает видеть предметы, расположенные под водой. Если смотреть на воду через ориентированный соответствующим образом поляризатор, то большая часть зеркально отраженного света будет поглощаться, и видимость подводных объектов значительно улучшится. Этот принцип используется при фотосъемке. Поляризационные фильтры для фото- и видеосъемки (рис. 88) удаляют блики и отражения

с отражающих поверхностей за исключением металлических. В солнечный день он так же может «притемнить» небо, делая его более фактурным (рис. 89).



*Рис. 88. Поляризационные фильтры для фото- и видеосъемки*



*Рис. 89. Фотография пейзажа, снятая с поляроидным фильтром и без фильтра*

Поляризационные очки используют в стереокино 3D, дающем иллюзию объемности (рис. 90). В основе иллюзии лежит создание стереопары: двух изображений, снятых под разными углами, соответствующими углам зрения правого и левого глаза. Их рассматривают так, чтобы каждый глаз видел только предназначенный для него снимок. Изображение для левого глаза проецируют на экран через поляроид с вертикальной осью пропускания, а для правого – с горизонтальной осью и точно совмещают их на экране (рис. 91). Для стереоскопического телевидения применяется способ быстрого попеременного затемнения стекол очков, синхронизированного со сменой изображений на экране. За счет инерции зрения возникает объемное изображение, предметы выстраиваются в перспективе от зрителя в глубину экрана в зависимости от их взаимного расположения. Без очков такое изображение выглядит двоящимся и размытым.

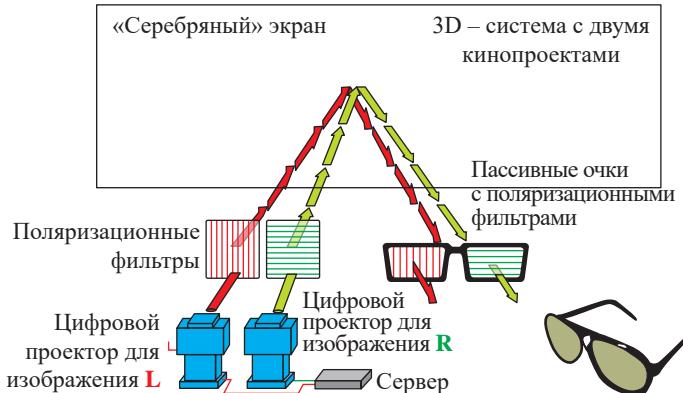


*Рис. 90. Иллюзия объемного изображения в очках с поляроидами*



#### **Ответьте на вопросы**

1. На каких свойствах глаз основано получение объемного изображения?
2. Почему изображение на экране становится размытым, если на него смотреть без очков?
3. Что необходимо изменить в конструкции очков для просмотра 3D фильма в режиме 2D?
4. Какие недостатки в данном способе получения объемного изображения?
5. Почему частота смены кадров на экране возрастает в 2 раза и достигает 48 кадров в секунду?



### Задание

Рассмотрите рисунок 91. Поясните принцип действия 3D системы с двумя кинопроекторами.

*Рис. 91. Принцип создания 3D изображения с использованием поляризационных фильтров*

### Контрольные вопросы

- Чем отличается поляризованный свет от естественного?
- Почему интенсивность света при вращении поляризатора не меняется?
- Какие вещества называют поляризаторами, какое применение они получили?
- Как создают 3D-изображение?

### ★ Упражнение

14

- Свет, отраженный от поверхности воды, является частично поляризованным. Как убедиться в этом, имея поляроид?
- Естественный свет падает на два поляроида, ориентированные так, что свет полностью гасится. Что произойдет, если между этими поляроидами поместить третий?
- Во сколько раз изменится амплитуда колебаний напряженности поляризованного света, если ось анализатора будет составлять с осью поляризатора угол  $\alpha = 45^\circ$ ?
- При каком значении угла между осью анализатора и поляризатора интенсивность света уменьшается в 2 раза?

### Творческое задание

Подготовьте сообщение по темам (на выбор):

- Поляризационная микроскопия глаза.
- Поляризации света в машиностроении и строительной индустрии.

## Жидкокристаллический экран

В жидкокристаллическом экране два поляризатора располагают взаимно перпендикулярно, так, чтобы свет через них не проходил. Между поляризаторами размещают жидкий кристалл (рис. 92). Молекулы в жидкокристаллах не закреплены кристаллической решеткой и могут вращаться под действием электрического поля. При этом молекулы кристалла организованы в четкую структуру, они располагаются слоями, каждый слой закручивается по отношению к предыдущему. Закрученные слои молекул меняют направление поляризации проходящего света. В ЖК-дисплеях используют структуру, закрученную на  $90^\circ$ . Молекулы меняют направление поляризации света на  $90^\circ$ , и он полностью проходит через второй поляризационный фильтр. На электроды, расположенные с двух сторон от поляризаторов, подается напряжение, под действием которого меняется расположение молекул жидкого кристалла. Поляризованный свет падает на световой фильтр, состоящий из трехцветных ячеек – пикселей (рис. 93). В зависимости от напряжения, каждый цвет в отдельности может менять свою прозрачность, от сочетания яркости синего, красного и зеленого цвета, на экране получают цветное изображение.

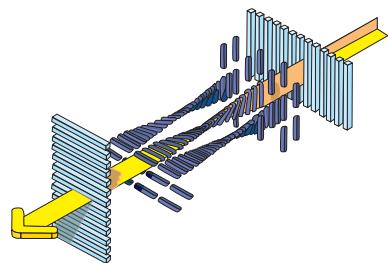


Рис. 92. Молекулы жидкого кристалла между двумя поляризаторами

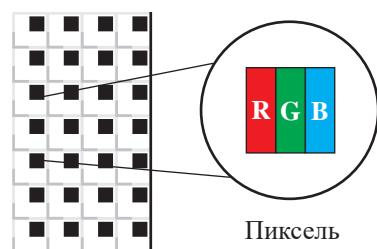


Рис. 93. Структура светового фильтра

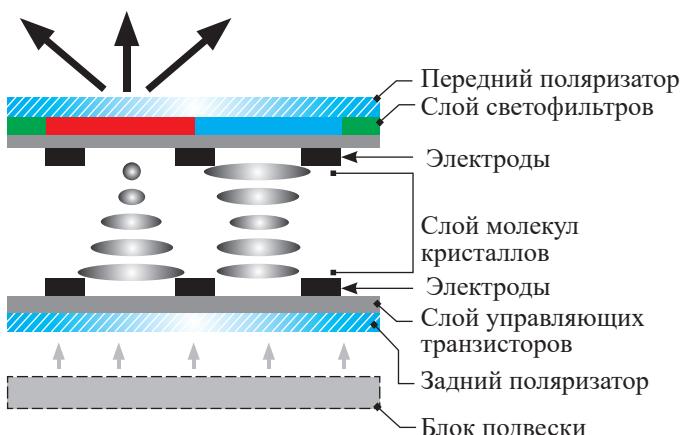


Рис. 94. Устройство жидкокристаллического дисплея



### Задание 1

Рассмотрите схему устройства ЖК дисплея на рисунке 94. Поясните принцип его действия.

## Волновые явления

### Задание 2

1. Назовите явления, изображенные на рисунках 95.
2. Приведите примеры проявления в природе, быту, технике волновых свойств света в результате интерференции, дифракции, поляризации и дисперсии.

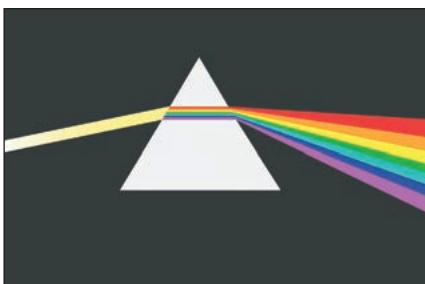


Рис. 95.

## Итоги главы 5

<b>Интерференция света в однородной среде</b>	Условие максимума $\Delta l = k \lambda$ Условие минимума $\Delta l = (2k + 1) \frac{\lambda}{2}$
<b>Дифракция на решетке</b>	Условие максимума $d \sin \varphi = k \lambda$ Постоянная решетки $d = \frac{L}{N}$
<b>Поляризация</b>	$E = E_{\max} \cos \alpha$

*Обозначение физических величин, единицы измерения в СИ*

Обозначение	Физическая величина	СИ	Обозначение	Физическая величина	СИ
$\Delta l$	Разность хода лучей	м	$L$	Ширина решетки	м
$k$	Целое число 0, 1, 2 ...		$N$	Число штрихов	
$\lambda$	Длина волны	м	$E$	Напряженность поляризованного света	В/м
$d$	Постоянная решетки	м	$E_{\max}$	Напряженность неполяризованного света	В/м
$\varphi$	Угол отклонения лучей	рад, °	$\alpha$	Угол поворота поляризатора	рад, °

### Глоссарий

**Дифракция** – явление огибания светом препятствий малых размеров и попадание его в область геометрической тени.

**Интерференция света** – усиление или ослабление света при наложении световых волн;

**Когерентные волны** – волны одной частоты с постоянным сдвигом фаз.



## ГЛАВА 6

# ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИКА

Под световыми волнами или светом понимают не только видимый свет, но и примыкающие к нему широкие области инфракрасного и ультрафиолетового излучения благодаря сходству методов и приборов, применяющихся для их исследования. Для фокусировки излучения, при изучении видимого света используют линзы и зеркала. Изобретение телескопа и спектроскопа открыло перед человеком удивительнейший и богатейший мир явлений, происходящих в необъятной Вселенной; изобретение микроскопа произвело революцию в биологии. Одним из важнейших элементов научной аппаратуры является линза, без которой не было бы микроскопа, телескопа, спектроскопа, фотоаппарата, проектора и т.п. На основе оптических исследований зародились и в значительной степени развились основные физические теории XX столетия: теория относительности и квантовая физика. Изобретение лазеров открыло новые возможности в оптике и в различных отраслях науки и техники. Практическое значение оптики и ее влияние на другие отрасли знаний исключительно велики.

**Изучив главу, вы сможете:**

- экспериментально определять показатель преломления стекла;
- объяснять преимущества оптоволоконной технологии при передаче световых сигналов;
- строить и объяснять ход лучей в лупе, телескопе и микроскопе.



## § 15. Законы геометрической оптики. Преломление в плоскопараллельной пластине, полное внутреннее отражение, световод

### Ожидаемый результат

Прочитав параграф, вы сможете:

- экспериментально определять показатель преломления стекла;
- объяснять преимущества оптоволоконной технологии при передаче световых сигналов.

### Интересно знать!

Закон преломления света открыт экспериментально голландским математиком В. Снеллиусом в начале XVII в. Произведение абсолютного показателя преломления на синус угла падения остается постоянной величиной, являясь «оптическим инвариантом» при переходе света из одной среды в другую:

$$n_1 \sin \alpha = n_2 \sin \gamma, \quad (2)$$

где  $n_1, n_2$  – абсолютные показатели сред,  $\alpha$  – угол падения,  $\gamma$  – угол преломления.

### Вспомните!

Законы геометрической оптики.

**Закон отражения:** Угол падения равен углу отражения  $\angle \alpha = \angle \beta$ . Луч падающий, луч отраженный и перпендикуляр, восстановленный в точку падения луча к границе раздела двух сред, лежат в одной плоскости.

**Закон преломления света:** Отношение синуса угла падения к синусу угла преломления для двух сред есть величина постоянная:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = \frac{v_1}{v_2} \text{ или } \frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = \frac{n_2}{n_1}$$

или

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = n_{21}. \quad (5)$$

Луч падающий, луч преломленный и перпендикуляр, восстановленный в точку падения луча к границе раздела двух сред, лежат в одной плоскости.

### I. Абсолютный и относительный показатели преломления

Закон преломления связан с абсолютным и относительным показателями преломления. Абсолютный показатель преломления зависит от магнитной и диэлектрической проницаемости среды  $n = \sqrt{\epsilon \cdot \mu}$  (1), он характеризует способность среды препятствовать распространению световой волны.

**Абсолютный показатель преломления** – это физическая величина, показывающая во сколько раз скорость распространения света в вакууме больше скорости распространения света в данной среде.

$$n = \frac{c}{v}, \quad (3)$$

где  $n$  – абсолютный показатель преломления среды,  $c$  – скорость света в вакууме,  $v$  – скорость света в среде. Оптически менее плотная среда обладает меньшим абсолютным показателем преломления.

**Относительный показатель преломления** – это физическая величина, которая показывает во сколько раз скорость распространения света в первой среде больше скорости распространения света во второй среде.

$$n_{21} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{v_1}{v_2}. \quad (4)$$



### Эксперимент

- Соберите установку, изображенную на рисунке 96. Примечание: Опыт можно провести с помощью двух транспортиров и лазерной указки.
- Определите показатель преломления стекла, используя закон преломления. Показатель преломления воздуха примите равным единице  $n_1 = 1$ .
- Определите среднее значение показателя преломления стекла по полученным результатам в каждой группе.
- Выясните, из какого сорта стекла изготовлена призма (изделие, использованное в работе).



**Рис. 96. Определение показателя преломления стекла с помощью оптического диска**

## II. Преломление в плоскопараллельной пластине

Пусть на плоскопараллельную пластину толщиной  $d$  и показателем преломления  $n_2$ , из среды с показателем преломления  $n_1$ , падает луч  $AB$  (рис. 97). Луч при прохождении пластины преломляется дважды в точках  $B$  и  $C$  на границах раздела двух сред. Запишем закон преломления для первой границы:

$$\frac{\sin \alpha_1}{\sin \gamma_1} = \frac{n_2}{n_1}. \quad (6)$$

Для второй границы раздела сред закон примет вид:

$$\frac{\sin \alpha_2}{\sin \gamma_2} = \frac{n_1}{n_2}. \quad (7)$$

Из формул (6) и (7) следует, что

$$\frac{\sin \alpha_1}{\sin \gamma_1} = \frac{\sin \gamma_2}{\sin \alpha_2}. \quad (8)$$

Углы  $\gamma_1$  и  $\alpha_2$  равны по построению, как внутренние накрест лежащие углы. Учитывая равенство этих углов, из (8) получим:

$$\alpha_1 = \gamma_2, \quad (9)$$

следовательно, лучи  $AB$  и  $CD$  параллельные.

*Плоскопараллельная пластина смещает луч света, не изменяя его направления распространения.*

Выразим смещение луча  $x$  через толщину пластины. Рассмотрим прямоугольные треугольники  $\Delta BKC$  и  $\Delta BCM$ , в которых отрезок  $BC$  является гипотенузой. Из треугольника  $\Delta BKC$  на основании соотношений сторон и углов треугольника запишем:

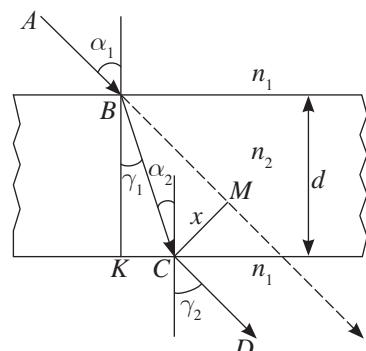
$$BC = \frac{d}{\cos \gamma_1}, \quad (10)$$

из  $\Delta BCM$ :  $BC = \frac{x}{\sin(\alpha_1 - \gamma_1)}.$  (11)



### Эксперимент

Измените направление луча на противоположный (рис. 96). Определите при каком значении угла исчезает преломленный луч. По результатам эксперимента определите показатель преломления стекла.



**Рис. 97. Ход лучей в плоскопараллельной пластине**



### Задание 1

Приведите примеры использования смещения луча на плоскопараллельной пластине. Предложите практическое применение смещения луча.

Решая совместно уравнения (10) и (11), выразим смещение луча:

$$x = \frac{d \sin(\alpha_1 - \gamma_1)}{\cos \gamma_1}. \quad (12)$$

Из полученного соотношения следует, что чем больше толщина пластины, тем больше смещение луча.

### III. Полное внутреннее отражение света

Если направить луч света из оптически более плотной среды в менее плотную среду, то угол преломления будет больше угла падения. Наибольшему значению угла преломления, равному  $90^\circ$ , соответствует угол падения  $\alpha_0$ , он назван *предельным углом полного внутреннего отражения*.

При падении луча на границу сред под углом, превышающим угол полного внутреннего отражения  $\alpha > \alpha_0$ , преломленный луч исчезает, происходит полное отражение света (рис. 98).

Закон преломления для предельного угла примет вид:

$$\frac{\sin \alpha_0}{\sin 90^\circ} = \frac{n_2}{n_1}. \quad (13)$$

Из полученного равенства следует, что предельный угол отражения определяется показателем преломления среды в том случае, если второй средой является вакуум или воздух:

$$\sin \alpha_0 = \frac{1}{n_1}. \quad (14)$$

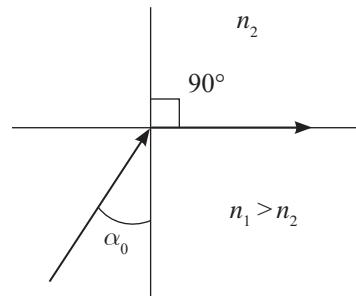


Рис. 98. Полное отражение света

#### Задание 2

- Объясните причину возникновения миража в пустыне (рис. 99).
- Изобразите ход световых лучей для миража в пустыне.



Рис. 99. Мираж в пустыне



### Задание 3

Рассмотрите рисунки в таблице «Виды оптических кабелей». Назовите основное различие в их строении, прохождении светового сигнала, в виде и качестве полученного сигнала. В каком кабеле искажение сигнала наиболее значительное?

«Виды оптических кабелей»

Одножильный, диаметр 125 мкм	Многомодовый, диаметр 125 мкм	Многожильный, диаметр 125 мкм
<b>Распространение сигнала в оптоволоконном кабеле</b>		
<b>Качество полученного сигнала</b>		



### Ответьте на вопросы

- Почему в жаркие летние дни, водители на разогретом асфальте видят «лужи» воды, которые исчезают при приближении к ним?
- Почему пловец видит дно водоема под ногами, и не видит его на некотором расстоянии?

## IV. Световод. Преимущества оптоволоконной технологии при передаче световых сигналов

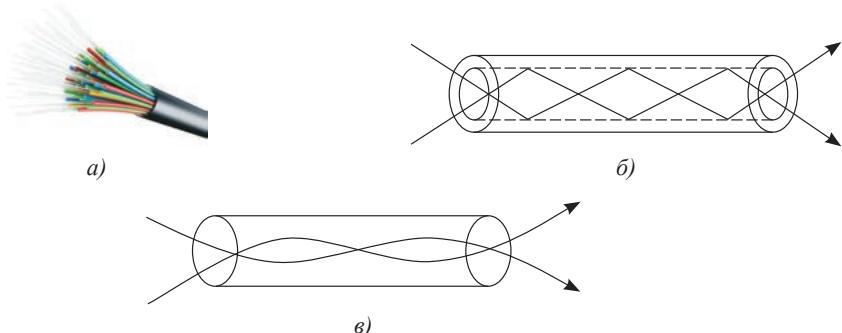
Простейшая оптоволоконная система передачи информации между двумя точками состоит из трех основных элементов: оптического передатчика, оптоволоконного кабеля и оптического приемника.

*Оптический передатчик* преобразует электрический сигнал в модулированный световой поток, предназначенный для передачи по оптоволокну. В качестве источника света используются светодиоды и полупроводниковые лазеры. Длина волны излучения выбрана с учетом максимальной прозрачности материала волокна и наивысшей чувствительности фотодиодов. Оптические передатчики работают в диапазоне инфракрасных лучей с длиной волны 850, 1300 и 1550 нм.

*Оптический приемник* преобразует световой сигнал в копию исходного электрического сигнала. В качестве чувствительного элемента оптического приемника используется фотодиод.

*Световод* (оптоволоконный кабель) – закрытое устройство для направленной передачи света.

*Оптоволоконный кабель* состоит из одного или нескольких стеклянных волокон со ступенчатым или плавным изменением показателя преломления вдоль радиуса (рис. 100 а). Волокно со ступенчатым профилем показателя преломления состоит из сердцевины, изготовленной из стекла с малыми оптическими потерями, окруженной стеклянной оболочкой с более низким показателем преломления (рис. 100 б). Оптоволокно с плавным профилем состоит из стекла только одного сорта, но оно обработано так, что его показатель преломления плавно уменьшается от центра к поверхности волокна. Такой световод постоянно отклоняет распространяющийся по нему свет к центру (рис. 100 в).



**Рис. 100.** Распространение света по оптоволокну: а) оптоволоконный кабель; б) со ступенчатым; в) с плавным профилем показателя преломления

В зависимости от числа волокон различают кабели одножильные, многожильные и многомодовые, которые позволяют распространяться световым волнам по нескольким различным путям, которые называют *модами*.

В многомодовых волокнах каждая световая волна распространяется под своим углом. Волны по-разному отражаются от оболочки и поступают в приемник в разное время. В одном многомодовом кабеле может быть порядка 80–100 мод. В многожильных кабелях возможно использование нескольких отдельных волокон, диаметр которых колеблется от 8 мкм до 10 мкм, соответствует диаметру одножильных кабелей. Многомодовые и многожильные кабели в сравнении с одножильными кабелями обеспечивают большую пропускную способность на малые расстояния, около 2 метров, на больших дистанциях возникают помехи. Одножильное оптоволокно чаще всего применяется в телекоммуникационных системах большой протяженности.

*Оптические кабели* имеют ряд преимуществ над обычными проводами и кабелями:

- могут с высокой скоростью передать значительно большее количество информации;



#### Ответьте на вопросы

1. На каком явлении основан принцип действия оптического волокна?
2. Из каких материалов его изготавливают?
3. Почему при прокладке оптического волокна нельзя допускать сильные загибы (радиус загиба не должен быть меньше 2,5 см)?

- тоньше и легче медных кабелей с такой же пропускной способностью;
- не подвержены внешним помехам, включая грозовые разряды,
- практически не взаимодействуют с агрессивными химическими веществами, вызывающими коррозию;
- не проводят электричество, могут находиться в прямом контакте с высоковольтным электрооборудованием, не несут опасности поражения электрическим током при ремонте;
- не создают вокруг себя электромагнитного излучения;
- обеспечивают защиту передаваемой информации, несанкционированное подключение к кабелю легко обнаруживается.



### Интересно знать!

В настоящее время используются оптоволоконные кабели, позволяющие передавать данные на большие расстояния с пропускной способностью до 100 Гбит/с. Максимальная пропускная способность оптоволоконного кабеля со спектральным уплотнением каналов WDM достигает 9,6 Тбит/с, так как он способен передать данные одновременно по 96 каналам.

### ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Предельный угол полного отражения для стекла, помещенного в жидкость с показателем преломления 1,25, равен  $30^\circ$ . Определите скорость света, в этом стекле.

**Дано:**

$$\begin{aligned}n_2 &= 1,25 \\ \alpha_0 &= 30^\circ \\ \gamma &= 90^\circ\end{aligned}$$

$v - ?$

**Решение:**

$$\text{Запишем закон преломления: } \frac{\sin \alpha_0}{\sin \gamma} = \frac{n_2}{n_1}.$$

$$\text{Выразим показатель преломления стекла } n_1 = \frac{n_2 \sin \gamma}{\sin \alpha_0};$$

$$n_1 = \frac{1,25 \sin 90^\circ}{\sin 30^\circ} = \frac{1,25 \cdot 1}{0,5} = 2,5.$$

$$\text{Скорость света в стекле } v = \frac{c}{n_1}; \quad v = \frac{3 \cdot 10^8 \text{ м/с}}{2,5} = 1,2 \cdot 10^8 \text{ м/с}.$$

**Ответ:**  $v = 1,2 \cdot 10^8 \text{ м/с.}$

### Контрольные вопросы

- Что происходит с лучом при прохождении через плоскопараллельную пластину?
- В чем заключаются закон преломления света?
- Что называют абсолютным показателем преломления, что называют относительным показателем преломления?
- При каком условии происходит полное внутреннее отражение света? Какое применение получило это явление?
- В чем преимущество оптоволоконной технологии при передаче световых сигналов?



## Упражнение

15

- Свет переходит из жидкости с показателем преломления 1,5 в стекло. При этом скорость волны уменьшается в 1,2 раза. Определите абсолютный показатель преломления стекла.
- Определите длину волны света в жидкости с показателем преломления 1,4. Длина волны в вакууме равна 602 нм.
- Луч света, распространяющийся в жидкости с абсолютным показателем преломления 1,2 падает на плоскую поверхность стекла. Синус угла падения равен 0,8. Угол между отраженным от стекла и преломленным в стекле лучами прямой. Определите абсолютный показатель преломления стекла.

## Экспериментальное задание

Пронаблюдайте за всплывающими пузырьками воздуха в аквариуме (рис. 101). При каком условии поверхность пузырьков становится зеркальной? Какое явление вы наблюдаете в этот момент? (Пузырьки воздуха можно создать, используя стакан с водой и трубку для продувания воздуха).



*Рис. 101. Всплывающие пузырьки воздуха в аквариуме*

## Творческое задание

Подготовьте сообщение по темам (на выбор):

- Виды модуляции светового сигнала в оптических системах передачи информации.
- Технология MIMO для оптического волокна.
- Реализации проекта 5G посредством оптических систем связи.

## §16. Оптические приборы

### Ожидаемый результат

Прочитав параграф, вы сможете:

- строить и объяснять ход лучей в лупе, телескопе, микроскопе.



### Вспомните!

Изображение, полученное на сетчатке глаза, всегда действительное, уменьшенное, перевернутое. Роль собирающей линзы выполняет хрусталик. Резкость изображения обеспечивается способностью глаза к аккомодации – изменению кривизны поверхностей хрусталика.

### I. Угловое увеличение оптического прибора

Основное назначение лупы, микроскопа и телескопа – увеличение угла зрения на рассматриваемые объекты.

**Угловое увеличение оптического прибора** – это отношение тангенса угла зрения при рассмотрении предмета через оптический прибор к тангенсу угла зрения при рассмотрении предмета невооруженным глазом на расстоянии **наилучшего зрения**.

$$\gamma = \frac{\tan \varphi}{\tan \varphi_0}. \quad (1)$$

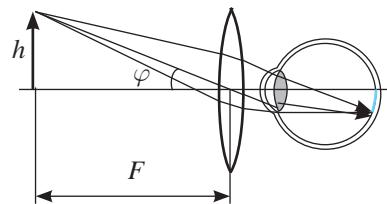
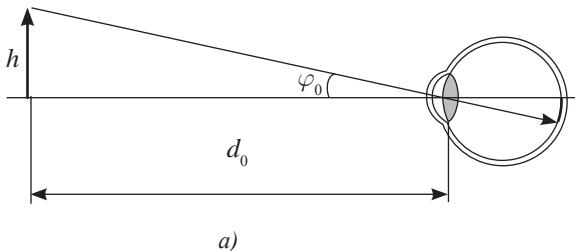
**Разрешающей способностью оптической системы** называют наименьшее расстояние между элементами наблюдаемого объекта, при котором эти элементы еще могут быть отличены один от другого.

Оптический прибор и глаз наблюдателя составляют единую оптическую систему. Оптическая сила системы определяется суммой оптических сил приборов, входящих в систему.

### II. Глаз, как оптический прибор

Нормальный глаз в спокойном состоянии дает изображение удаленных предметов. При приближении предметов к глазу наблюдателя кривизна хрусталика увеличивается, фокусное расстояние уменьшается, возрастает угол зрения – угол  $\varphi$ , под которым виден предмет. Для нормального глаза благоприятным расстоянием является  $d_0 = 25$  см. Угол зрения невооруженного глаза определяется расстоянием наилучшего зрения (*рис. 102 а)*:

$$\varphi_0 = \tan \varphi_0 = \frac{h}{d_0}. \quad (2)$$



*Рис. 102. Изменение угла зрения в лупе*

Способность глаза к аккомодации ограничена, поэтому приблизить предмет непосредственно к глазу невозможно, в таком случае используют оптические приборы.

### III. Лупа

Если предмет расположить в фокусе линзы  $d = F$ , то после прохождения через нее лучи попадают в глаз человека параллельным пучком. При таком условии нормальный глаз сводит пучок в точку на сетчатке без аккомодации, глаз не утомляется. При этом изображение на сетчатке и угол зрения  $\varphi$  увеличается, угол зрения станет равным (рис. 102 б):

$$\varphi = \operatorname{tg} \varphi = \frac{h}{F}. \quad (3)$$

Подставим (2) и (3) в формулу (1). Тогда формула углового увеличения лупы примет вид:

$$\gamma = \frac{\operatorname{tg} \varphi}{\operatorname{tg} \varphi_0} = \frac{\varphi}{\varphi_0} \quad \text{или} \quad \gamma = \frac{d_0}{F}. \quad (4)$$

*Угловое увеличение лупы определяется отношением расстояния наилучшего зрения к фокусу линзы.*

### IV. Микроскоп

Оптическая система микроскопа состоит из объектива  $O_1$  и окуляра  $O_2$  (рис. 103). Наиболее благоприятное условие для нормального глаза осуществляется в том случае, когда промежуточное изображение  $h'$  находится в передней фокальной плоскости окуляра  $O_2$ . В этом случае изображение предмета удаляется в бесконечность, глаз фокусирует лучи на сетчатке без аккомодации.

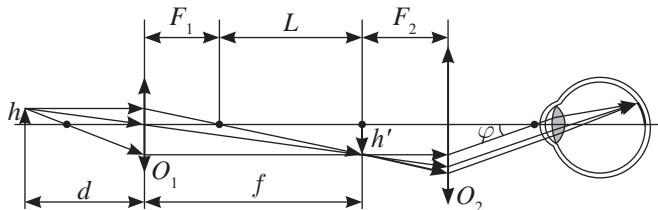


Рис. 103. Ход лучей в микроскопе

Определим угловое увеличение по известной формуле:

$$\gamma = \frac{\varphi}{\varphi_0}, \quad (5)$$

где  $\varphi_0 = \frac{h}{d_0}$  (6) – угол зрения для невооруженного глаза,

$\varphi = \frac{h'}{F_2}$  (7) – угол зрения через микроскоп при условии, что изображение объектива лежит в фокальной плоскости окуляра.



#### Ответьте на вопрос

Почему линзы с линейным увеличением более 40 не получили практического применения?



#### Интересно знать!

Оптический микроскоп дает возможность различать структуры с расстоянием между элементами до 0,20 мкм, т.е. разрешающая способность такого микроскопа составляет около 0,20 мкм или 200 нм. Предельная разрешающая способность микроскопа имеет предел, обусловленный волновыми свойствами света, она достигается при тысячекратном линейном увеличении.

Подставим (6) и (7) в (5), получим:

$$\gamma = \frac{h'd_0}{F_2 h}. \quad (8)$$

В формуле (8) отношение  $\frac{h'}{h}$  является линейным увеличением объектива, представим его как отношение расстояний от линзы до изображения и предмета:

$$\Gamma_{ob} = \frac{h'}{h} = \frac{f}{d} \approx \frac{F_1 + L}{F_1}, \quad (9)$$

где  $L$  – расстояние между фокусами объектива и окуляра.

Поскольку в микроскопах объектив короткофокусный, то  $F_1 \ll L$ , формула (9) примет вид:

$$\Gamma_{ob} = \frac{L}{F_1}. \quad (10)$$

Подставив (10) в (8), получим:

$$\gamma = \frac{Ld_0}{F_1 F_2}, \quad (11)$$

где  $d_0$  – расстояние наилучшего видения;  $F_1, F_2$  – фокусные расстояния объектива и окуляра;  $L$  – расстояние между фокусами объектива и окуляра – оптическая длина тубуса микроскопа.

Из формулы (11) с учетом (10) и (4) получим:

$$\gamma = \Gamma_{ob} \cdot \Gamma_{ok}. \quad (12)$$

Угловое увеличение оптического микроскопа определяется произведением линейных увеличений объектива и окуляра.

Несложно доказать, что линейное увеличение микроскопа также равно произведению линейных увеличений окуляра и объектива:  $\Gamma = \Gamma_{ob} \cdot \Gamma_{ok}$ .

## V. Телескоп

Телескоп – это оптический прибор, предназначенная для наблюдения небесных тел. Телескоп, изготовленный из линз, называют рефрактором. Телескоп, в котором объектив заменен на вогнутое зеркало, называют рефлектором.

Зрительная труба – это оптический прибор, предназначенный для рассмотрения удаленных предметов.

Объектив и окуляр прибора располагаются в тубусе таким образом, чтобы задний фокус объектива  $O_1$  совпадал с передним фокусом окуляра  $O_2$ . При совмещении фокусов лучи из окуляра выходят параллельным пучком, что позволяет наблюдать за объектом без аккомодации, т.е. без напряжения глазных мышц (рис. 104). Объектив дает уменьшенное изображение удаленного предмета  $h'$ , который рассматривают через окуляр, как в лупу.

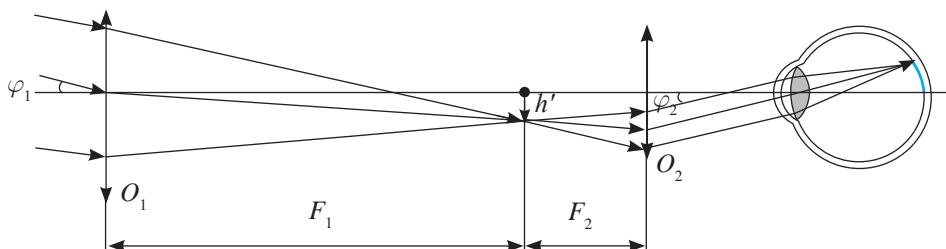


Рис. 104. Ход лучей в зрительной трубе

Угол  $\varphi_1$  можно считать равным углу зрения невооруженного глаза ввиду значительной удаленности предмета. Выразим углы зрения  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  через высоту изображения объектива  $h'$ :  $\varphi_1 = \operatorname{tg} \varphi_1 = \frac{h'}{F_1}$  и  $\varphi_2 = \operatorname{tg} \varphi_2 = \frac{h'}{F_2}$ .

Угловое увеличение оптического прибора определяется отношением тангенса угла зрения через оптический прибор к тангенсу угла зрения невооруженного глаза:

$$\gamma = \frac{\operatorname{tg} \varphi_2}{\operatorname{tg} \varphi_1} = \frac{\varphi_2}{\varphi_1} = \frac{h'}{F_2} \cdot \frac{F_1}{h'} \quad \text{или} \quad \gamma = \frac{F_1}{F_2}. \quad (13)$$

*Угловое увеличение зрительной трубы равно отношению фокусных расстояний объектива и окуляра.*



### Ответьте на вопросы

- Почему невозможно достичь бесконечно большого увеличения в оптических приборах?
- Почему объектив в микроскопе короткофокусный, а в зрительной трубе – длиннофокусный?

### ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

**Задача 1.** Мальчик, сняв очки, читает книгу, держа ее на расстоянии  $d = 16$  см от глаз. Какова оптическая сила его очков?

<b>Дано:</b> $d = 16$ см $D_{\text{очки}} - ?$	<b>СИ</b> $0,16$ м	<b>Решение:</b> Для невооруженного глаза: $D_{\text{зр}} = \frac{1}{d} + \frac{1}{f},$ где $f$ – расстояние от хрусталика глаза до сетчатки.
--	-----------------------	--

Если надеть очки, то:

$$D_{\text{очки}} + D_{\text{зр}} = \frac{1}{d_0} + \frac{1}{f}, \quad (2)$$

где  $d_0 = 25$  см – расстояние наилучшего зрения.

Решая совместно уравнения (1) и (2), для оптической силы очков получим:

$$D_{\text{очки}} = \frac{d - d_0}{dd_0}; \quad D_{\text{очки}} = \frac{0,16 \text{ м} - 0,25 \text{ м}}{0,16 \text{ м} \cdot 0,25 \text{ м}} = -2,25 \text{ дптр.}$$

**Ответ:**  $D_{\text{очки}} = -2,25$  дптр.

**Задача 2.** Какие линзы нужно взять, чтобы построить зрительную трубу с двенадцатикратным увеличением и длиной 26 см?

<b>Дано:</b> $\gamma = 12$ $l = 26$ см $F_1 - ?$ $F_2 - ?$	<b>Решение:</b> Для зрительной трубы выполняется соотношение фокусов линз: $\frac{F_1}{F_2} = \gamma.$
--	--

По условию задачи:

$$F_1 + F_2 = l. \quad (2)$$

Выразим из уравнения (1) фокус первой линзы:  $F_1 = \gamma \cdot F_2$ . (3)

Подставим (3) в (2):  $\gamma \cdot F_1 + F_2 = l$ .

Решим полученное уравнение относительно  $F_2$ :

$$F_2(\gamma + 1) = l; F_2 = \frac{1}{\gamma + 1}; F_2 = \frac{26 \text{ см}}{12 + 1} = 2 \text{ см}.$$

Из уравнения (2) выразим фокус первой линзы:

$$F_1 = l - F_2;$$

$$F_1 = 26 \text{ см} - 2 \text{ см} = 24 \text{ см}.$$

**Ответ:**  $F_1 = 24 \text{ см}$ ;  $F_2 = 2 \text{ см}$ .

### Контрольные вопросы

- Что представляет собой оптическая система?
- В чем различие углового увеличения от линейного увеличения?
- Чему равно угловое увеличение лупы, микроскопа, телескопа?



### Упражнение

16

- В качестве лупы использована линза с оптической силой +8 дптр. Определите увеличение этой лупы.
- Фокусное расстояние объектива микроскопа  $F_{об} = 0,5 \text{ см}$ , а расстояние между объективом и окуляром микроскопа  $L = 16 \text{ см}$ . Увеличение микроскопа  $\Gamma = 200$ . Определите увеличение окуляра.
- \*. Человек с нормальным зрением смотрит через очки с оптической силой, равной  $D = +5 \text{ дптр}$ . На каком расстоянии расположен объект, если человек видит его четким?

### Творческое задание

Подготовьте сообщение по темам (на выбор):

- Зрительные трубы Галилея и Кеплера: различие и сходство.
- Виды телескопов.

## Зрительные эффекты на границе двух сред



Рис. 105. Рыбалка с копьем

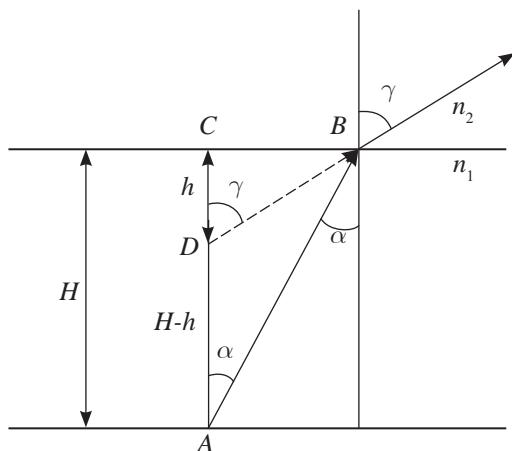


Рис. 106. Кажущаяся глубина водоема

### Ответьте на вопросы

Можно ли утверждать,

- 1) что кажущаяся глубина водоема становится меньше истинной в 1,33 раза?
- 2) что летящая птица для водолаза кажется удаленной от поверхности воды на высоту, превышающую истинную в 1,33 раза?



### Ответьте на вопросы

1. Почему глубина водоема кажется нам меньше истинной глубины?
2. Почему на рыбалке с копьем новичку сложно попасть в рыбу (рис. 105)?



### Задание

1. Рассмотрите рисунок 106. Объясните ход изображенных на рисунке лучей.
2. Выясните, во сколько раз отличаются истинная глубина  $H$  от кажущейся глубины  $h$  водоема.  
Рекомендации:
  1. Рассмотрите полученные в результате построения треугольники  $\Delta ACB$  и  $\Delta DCB$ .
  2. Выразите общую сторону треугольников  $CB$  через катеты  $H$  и  $h$ .
  3. Приравняйте правые части полученных уравнений, запишите соотношение глубин:  $\frac{h}{H}$ .
  4. Полагая, что наблюдение dna водоема происходит под малым углом преломления, докажите, что  $\frac{h}{H} = \frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = \frac{n_2}{n_1} = n_{21}$ .

## Итоги главы 6

Оптические приборы		Основные формулы	
Увеличение оптических систем приборов			
		Угловое	Линейное
Оптические приборы	$\gamma = \frac{\operatorname{tg} \varphi}{\operatorname{tg} \varphi_0}$		$\Gamma = \frac{H}{h} = \frac{f}{d}$
Лупа	$\gamma = \frac{d_0}{F}$		$\Gamma = \frac{H}{h} = \frac{f}{d}$
Микроскоп	$\gamma = \frac{Ld_0}{F_1 F_2}$		$\Gamma = \Gamma_{\text{ок}} \cdot \Gamma_{\text{об}}$
Телескоп	$\gamma = \frac{F_1}{F_2}$		
Явления		Законы и формулы	
Преломление		$\frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = \frac{v_1}{v_2};$ $\frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = \frac{n_2}{n_1};$ $n = \frac{c}{v};$ $n_{21} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{v_1}{v_2}$	
Отражение, полное отражение		$\angle \alpha = \angle \beta, \quad \sin \alpha_0 = \frac{1}{n_1}$	

Обозначение физических величин, единицы измерения в СИ

Обозначение	Физическая величина	СИ	Обозначение	Физическая величина	СИ
$\varphi$	Угол зрения на предмет через оптический прибор	рад, $^{\circ}$	$f$	Расстояние от линзы до изображения	м
$\varphi_0$	Угол зрения на предмет невооруженным глазом	рад, $^{\circ}$	$d$	Расстояние от линзы до предмета	м

Обозначение	Физическая величина	СИ	Обозначение	Физическая величина	СИ
$\gamma$	Угловое увеличение		$\alpha$	Угол падения	рад, °
$d_0$	Расстояние наилучшего зрения, 25 см	м	$\alpha_0$	Предельный угол полного отражения	рад, °
$F$	Фокус линзы	м	$\beta$	Угол отражения	рад, °
$L$	Расстояние между фокусами объектива и окуляра микроскопа	м	$\gamma$	Угол преломления	рад, °
$\Gamma$	Линейное увеличение		$n, n_2$	Абсолютные показатели преломления	
$H$	Высота изображения	м	$n_{21}$	Относительный показатель преломления	
$h$	Высота предмета	м	$v_1, v_2$	Скорость света в различных средах	м/с

## Глоссарий

**Абсолютный показатель преломления** – физическая величина, равная отношению скорости распространения света в вакууме к скорости распространения света в данной среде.

**Оптическая длина тубуса микроскопа** – расстояние между фокусами объектива и окуляра.

**Относительный показатель преломления** – физическая величина, равная отношению скорости распространения света в первой среде к скорости распространения света во второй среде.

**Телескоп** – прибор, предназначенный для наблюдения небесных тел.

**Увеличение линейное** – физическая величина, равная отношению высоты изображения к высоте предмета.

**Угловое увеличение оптического прибора** – отношение тангенса угла зрения при рассмотрении предмета через оптический прибор к тангенсу угла зрения при рассмотрении предмета невооруженным глазом на расстоянии наилучшего зрения.

## ГЛАВА 7

# АТОМНАЯ И КВАНТОВАЯ ФИЗИКА

Квантовая теория возникла в связи с трудностями, которые испытывала классическая электродинамика при попытке объяснить тепловое излучение твердого тела. Согласно теории Максвелла нагретое тело, непрерывно теряя энергию, должно охладиться до абсолютного нуля. Планк выдвинул гипотезу, что атомы излучают электромагнитную энергию порциями-квантами. Квантовые представления о свете развил А. Эйнштейн: свет распространяется и поглощается веществом в виде квантов.

### Изучив главу, вы сможете:

- приводить доказательные примеры проявления корпускулярной и волновой природы электромагнитного излучения (волновой природы элементарных частиц);
- описывать метод спектрального анализа и область его применения;
- различать электромагнитные излучения по их природе возникновения и взаимодействию с веществом;
- объяснять природу фотоэффекта и приводить примеры его применения;
- описывать химическое действие света на примере фотосинтеза и процессов в фотографии;
- сравнивать компьютерную и магниторезонансную томографии;
- объяснять принцип действия и применение лазера;
- обсуждать перспективы развития голограммии.

## § 17. Единство корпускулярно-волновой природы света

### Ожидаемый результат

Прочитав параграф, вы сможете:

- приводить доказательные примеры проявления корпускулярной и волновой природы электромагнитного излучения (волновой природы элементарных частиц).

### I. Природа света

Первые научные взгляды на природу света были высказаны в XVII в. Рассматривались две гипотезы, которые долгое время вызывали споры ученых. В одной из них предполагалось, что свет – это вещество, которое представляет собой поток корпускул; в другой, что свет – это волна. И. Ньютон, основываясь на свойствах механических волн огибать препятствия и распространяться в упругой среде, остановился на вещественной теории света, отбросив волновую. Согласно теории Ньютона, созданной в 1672 г., свет состоит из малых частиц, испускаемых светящимся телом. Подобно макроскопическим телам частицы света движутся прямолинейно и не огибают препятствий, за ними образуются тени. Частицы света не нуждаются в упругой среде так же, как брошенный мяч.

Христиан Гюйгенс разработал волновую теорию света. Он считал, что световые волны не способны огибать препятствия аналогично тому, как короткие волны, ударяясь о борт корабля, не могут обогнуть его. Он предположил, что существует упругая среда – эфир, заполняющая все пространство и проникающая внутрь всех тел. Впервые процессы распространения, отражения и преломления света с точки зрения волновой теории Х. Гюйгенс изложил в сочинении «Трактат о свете», опубликованном в 1690 г.

Корпускулярная и волновая теории существовали параллельно длительное время. Известные в то время законы оптики объяснялись более или менее успешно обеими теориями. На основе корпускулярной теории сложно было объяснить, почему частицы света пересекаясь в пространстве, не рассеиваются, тогда как волновая теория это легко объясняла. На основе волновой теории в начале XIX в. были объяснены такие явления, как: *интерференция света – усиление или ослабление света при наложении световых волн; дифракция – огибание светом препятствий*, а также поляризация света.

Во второй половине XIX в. Дж. Максвелл создал теорию электромагнитных волн. Совпадение скорости световой волны со скоростью электромагнитных подтвердило, что световые волны являются частным случаем электромагнитных волн. Казалось

### Задание

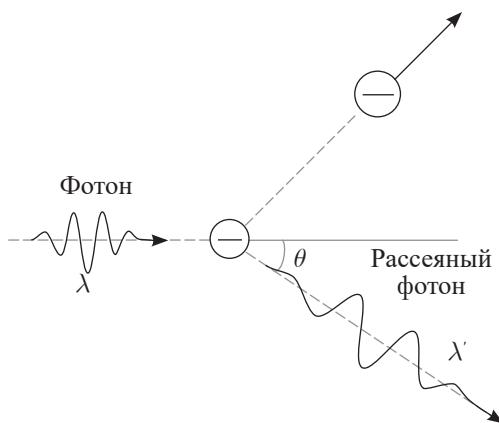
1. Распределите перечисленные явления в три группы:
  - Явления, в которых свет проявляется как электромагнитная волна;
  - Явления, которые легко объяснить, предположив, что свет – поток частиц;
  - Явления, которые легко объяснить с любой точки зрения: свет – поток частиц, свет – электромагнитная волна.  
Отражение света, преломление, распространение, поляризация, интерференция, давление света, дифракция, поглощение, фотосинтез, фотографирование.
2. Дайте обоснование вашему распределению.

бы, волновая теория одержала победу над корпускулярной, но в начале XX в. ученые обнаружили, что свет при излучении и поглощении ведет себя подобно потоку частиц.

## II. Эффект Комптона – явление, подтверждающее квантовую природу света

Рассеяние электромагнитного излучения на свободном электроне, сопровождающееся уменьшением частоты излучения, открыто А. Комптоном в 1923 г. В этом процессе электромагнитное излучение ведет себя как поток отдельных частиц – корпускул, с точки зрения классической электродинамики рассеяние излучения с изменением частоты невозможно.

Фотон, рассеиваясь на покоящемся электроне, передает ему часть своей энергии и импульса и меняет направление движения, электрон в результате рассеяния начинает двигаться (*рис. 107*).



*Рис. 107. Эффект Комптона*

Фотон после рассеяния имеет меньшую энергию и частоту в сравнении с его энергией и частотой до рассеяния, следовательно, после рассеяния длина волны фотона увеличивается. Комптоном было установлено, что разность длин волн не зависит ни от природы рассеивающего вещества, ни от длины волны падающих лучей, а зависит только от угла рассеяния  $\theta$ , образующегося между направлениями падающих и рассеянных лучей. Эта экспериментально найденная зависимость имеет следующий вид:

$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = 2\lambda_k \sin^2 \frac{\theta}{2} = \lambda_k (1 - \cos \theta), \quad (1)$$

где  $\lambda$  – длина волны падающего света;  $\lambda'$  – длина волны рассеянного света;  $\theta$  – угол рассеяния фотона на электроне;  $\lambda_k = 2,43 \cdot 10^{-12}$  м – комптоновская длина волны для частицы рассеивания – электрона:

$$\lambda_k = \frac{h}{m_e c}. \quad (2)$$



Артур Комптон (1892–1962 гг.) – американский физик. В 1922 г. обнаружил и дал теоретическое обоснование эффекту изменения длины волны рентгеновского излучения вследствие рассеяния его электронами вещества. Лауреат Нобелевской премии по физике 1927 г. Член более двадцати иностранных научных обществ.

### III. Единство корпускулярно-волновой теории света

Развитие оптики показало, что свойства непрерывности, характерные для электромагнитного поля, не следует противопоставлять свойствам дискретности, характерным для фотонов. Свет обладает двойственной корпускулярно-волновой природой. По современным взглядам, свет обладает как волновыми, так и корпускулярными свойствами. Корпускулярные характеристики фотона: энергия, масса, импульс, связаны с волновой характеристикой – частотой (длиной волны).

$$E = h\nu = h\frac{c}{\lambda}; \quad (3)$$

$$m = \frac{h\nu}{c^2} = \frac{h}{c\lambda}; \quad (4)$$

$$p = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda}. \quad (5)$$

Свет, обладая одновременно корпускулярно-волновыми свойствами, обнаруживает определенные закономерности в их проявлении. Так, волновые свойства света проявляются в его распространении, интерференции, дифракции, поляризации, а корпускулярные – в процессах взаимодействия света с веществом. Чем больше длина волны, тем меньше энергия и импульс фотона и тем труднее обнаруживаются квантовые свойства света. Наоборот, чем меньше длина волны, тем больше энергия и импульс фотона и тем труднее обнаруживаются волновые свойства света.

### IV. Волновые свойства частиц. Волны де Бройля

Французский ученый Луи де Бройль, осознавая существующую в природе симметрию и развивая представления о двойственной корпускулярно-волновой природе света, выдвинул в 1923 г. гипотезу об универсальности корпускулярно-волнового дуализма. Он утверждал, что не только фотоны, но и электроны и любые другие частицы материи наряду с корпускулярными обладают также волновыми свойствами. Согласно де Бройлю, с каждым микрообъектом связываются, с одной стороны, корпускулярные характеристики: энергия и импульс, а с другой стороны – волновые характеристики: частота и длина волны. Все частицы, имеющие конечный импульс, обладают волновыми свойствами, в частности, подвержены интерференции и дифракции. Луи де Бройль установил зависимость длины волны  $\lambda$ , связанной с движущейся частицей вещества, от импульса частицы  $p$ :

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv}, \quad (6)$$

где  $m$  – масса частицы,  $v$  – ее скорость,  $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$  Дж · с – постоянная Планка.

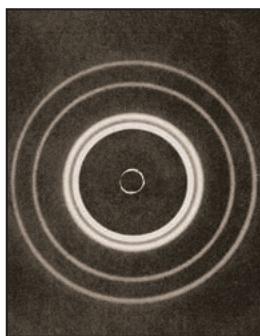
Волны, о которых идет речь, называют волнами де Бройля. Формула де Бройля экспериментально подтверждается опытами по рассеянию электронов и других частиц на кристаллах и по прохождению частиц сквозь вещества.

### V. Опытное подтверждение волновых свойств частиц

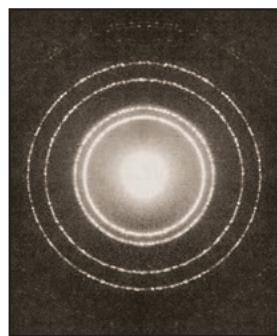
В 1927 г. американские ученые К. Дэвиссон и Л. Джермер впервые наблюдали дифракцию электронов на монокристалле никеля. В 1928 г. английский физик

Дж. Томсон и советский физик П. Тартаковский независимо друг от друга провели опыты с использованием тонкой поликристаллической пленки. В 1937 г. К. Дэвиссон получили Нобелевскую премию по физике «за экспериментальное открытие дифракции электронов на кристалле». Сравнение дифракционных картин, полученных в результате рентгенографии и электрографии, показало их сходство (*рис. 108, 109*).

Волновые свойства проявляются в том, что вероятность отклонения частиц в результате взаимодействия с объектом различна: наиболее вероятно попадание частиц в область, которая соответствует максимумам дифракции, менее вероятно в область минимумов дифракции.



*Рис. 108. Рентгенограмма*



*Рис. 109. Электронограмма порошка MgO*

**Дифракция частиц – это процесс рассеяния частиц на молекулах (атомах) вещества, при котором частицы проявляет волновые свойства.**

### ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

При облучении парафина рентгеновскими лучами длина волны излучения, рассеянного под углом  $60^\circ$ , оказалась равной 10 пм. Определите длину волны падающих лучей.

<b>Дано:</b> $\theta = 60^\circ$ $\lambda' = 10 \text{ пм}$ $\lambda_k = 2,43 \cdot 10^{-12} \text{ м}$	<b>СИ</b> $10 \cdot 10^{-12} \text{ м}$	<b>Решение:</b> Запишем формулу, выражающую эффект Комптона: $\lambda' - \lambda = 2\lambda_k \cdot \sin^2 \frac{\theta}{2}.$ Выразим неизвестную величину и вычислим ее: $\lambda = \lambda' - 2\lambda_k \cdot \sin^2 \frac{\theta}{2}.$
$\lambda - ?$		

$$\lambda = 10 \cdot 10^{-12} \text{ м} - 2 \cdot 2,43 \cdot 10^{-12} \sin^2 \frac{60^\circ}{2} \text{ м} = 8,785 \cdot 10^{-12} \text{ м} = 8,785 \text{ пм}.$$

**Ответ:**  $\lambda = 8,785 \text{ пм}.$

## Контрольные вопросы

1. Приведите примеры явлений, подтверждающих квантовую природу света.
2. В каких явлениях проявляются волновые свойства потока элементарных частиц?



## Упражнение

17

1. При облучении графита рентгеновскими лучами длина волны излучения, рассеянного под углом  $45^\circ$ , оказалась равной  $\lambda' = 10,7$  пм. Определите длину волны падающих лучей.
2. Определите длину волны де Броиля, характеризующую волновые свойства протона. Скорость движения протона  $1\text{ Мм}/\text{с}$ .
3. Определите энергию, массу и импульс фотона, которому соответствует длина волны  $\lambda = 380$  нм. Постоянная Планка  $h = 6,626 \cdot 10^{-34}\text{ Дж} \cdot \text{с}$ , скорость света  $c = 3 \cdot 10^8\text{ м}/\text{с}$ .

## Творческое задание

Подготовьте сообщение на тему:

«Биография А. Комптона»

Составьте кластер: «Корпускулярно-волновой дуализм света и элементарных частиц».

## § 18. Виды излучений, спектры, спектральные аппараты, спектральный анализ

### Ожидаемый результат

Прочитав параграф, вы сможете:

- описывать метод спектрального анализа и область его применения.

### I. Виды излучений. Источники света

Атомы вещества, получив энергию от внешних источников, излучают. Различают тепловое излучение, которое связано с изменением внутренней энергией вещества, и люминесценцию. Люминесценция – это холодное послесвечение. По длительности свечения все виды люминесценции разделили

на флуоресценцию и фосфоресценцию. Флуоресценция – это свечение, мгновенно затухающее после прекращения возбуждения атомов, в течение до  $10^{-8}$  с. Фосфоресценция – это свечение, продолжающееся заметный промежуток времени. Вещества, способные генерировать «холодный свет», называют люминофорами.

Виды люминесценции различают по способу возбуждения люминофора:

- катодолюминесценция, люминофор возбуждается под действием ударов электронов, сформированных в пучок;
- электролюминесценция, люминофор возбуждается под действием постоянного и переменного электрического поля;
- фотолюминесценция, люминофор возбуждается видимым светом (наблюдаются самостоятельное длительное послесвечение), ультрафиолетовыми (наблюдаются флуоресценция в видимом диапазоне) или инфракрасными лучами (наблюдаются фотолюминесцентное свечение в видимом диапазоне);
- хемилюминесценция, люминофор возбуждается в результате химической реакции с выделением энергии.

Биолюминесценция получила свое название не по виду возбуждения, а по самим светящимся объектам. Причина свечения может быть разной. Некоторые типы бактерий светятся за счет хемилюминесценции, отдельные классы обладают фотолюминесценцией, светятся при облучении ультрафиолетовыми лучами.



### Задание 1

Установите соответствие между видом излучения, способом возбуждения атомов вещества и примерами источников света.

Вид излучения	Способы возбуждения	Примеры источников
Тепловое излучение	Энергия электрического поля	Северное сияние, трубы для рекламных надписей
Электролюминесценция	Удары потока электронов	Лампы дневного света, светящиеся краски, приборы ночного видения
Хемилюминесценция	Тепловая энергия	Экраны телевизоров, осциллографов, компьютерных мониторов
Катодолюминесценция	Облучение ультрафиолетовыми и видимыми лучами	Светлячок, кусочки гниющего дерева, бактерии, насекомые, рыбы, обитающие на большой глубине
Фотолюминесценция	Энергия химических реакции	Солнце, лампа накаливания, пламя

## II. Исследование излучений различных источников

Ни один из источников не дает монохроматического света, имеющего строго определенную длину волн. Доказательством сказанного утверждения являются опыты по разложению света в спектр с помощью призмы, а также опыты по интерференции и дифракции. Та энергия, которую несет с собой свет, распределена по волнам всех длин, входящим в состав светового пучка или по частотам, так как скорость света определяется как произведение длины световой волны на частоту излучения. Для исследования излучений используют спектральные аппараты.

## III. Спектральные аппараты

Основными элементами спектроскопа являются: коллиматор – 1, зрительная труба – 2, окуляр – 5, треугольная призма – 3 (рис. 110). В коллиматоре имеется щель – 4, через которую проходит свет от исследуемого источника излучения.

Через щель коллиматорной трубы, расположенной в фокусе линзы  $L_1$ , лучи света падают расходящимся пучком на линзу, преломившись, параллельным пучком попадают на боковую грань призмы  $P$  (рис. 111). Дважды преломившись в призме, пучок света разлагается на параллельные пучки света разного цвета. Объектив зрительной трубы  $L_2$  фокусирует каждый из параллельных пучков в отдельной точке фокальной плоскости, разноцветные изображения щели образуют спектр (рис. 112). Спектр наблюдают через окуляр зрительной трубы, как через лупу. Для получения снимка фоточувствительную пленку или пластину размещают в фокальной плоскости объектива зрительной трубы, прибор в этом случае называют *спектрографом*.



Рис. 110. Спектроскоп

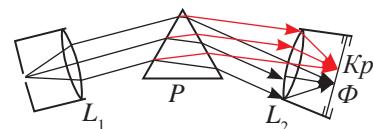


Рис. 111. Ход лучей  
в спектроскопе



Рис. 112. Спектр излучения

### Эксперимент

Пронаблюдайте спектр излучения раскаленной нити накала лампы через призму и через спектроскоп. Сравните наблюдаемые спектры. В чем преимущество спектра, наблюдаемого через спектроскоп?

## IV. Виды спектров

Белый свет при прохождении сквозь призму разлагается в спектр, состоящий из всех цветов радуги от красного до фиолетового цвета, между ними нет разрывов: красный цвет переходит в оранжевый, оранжевый в желтый и т.д (рис. 113). Такую полосу называют *непрерывным* или *сплошным спектром*. Источниками белого света являются раскаленные твердые тела, нагретые жидкости и сжатые газы.

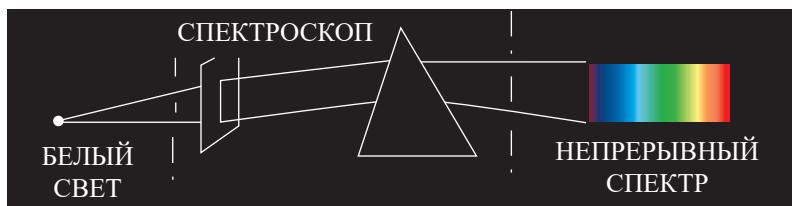


Рис. 113. Непрерывный спектр

При низком давлении нагретый газ в атомарном состоянии и пары различных химических элементов могут светиться, излучая электромагнитные волны видимого диапазона. Спектр излучения разряженного газа отличается от непрерывного спектра, в нем наблюдается только несколько цветных линий (рис. 114). Так, например, раскаленные пары натрия испускают в видимом диапазоне две узкие желтые линии, практически сливающиеся в одну; атомы водорода – четыре линии: красную, зеленую, синюю и фиолетовую. Исследования показали, что разряженные пары всех химических элементов излучают свет, в спектре которых присутствуют отдельные линии, характерные только для этого элемента, поэтому спектр разряженных атомарных газов или паров называют *линейчатым спектром*.

**Линейчатые спектры – это оптические спектры испускания и поглощения атомов, состоящие из отдельных спектральных линий.**

Линейчатыми спектрами являются спектры разряженных газов, звездных атмосфер, туманностей.

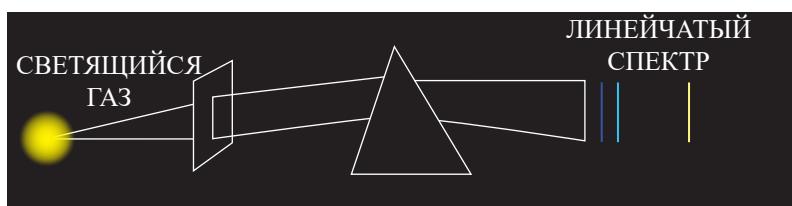


Рис. 114. Линейчатый спектр

Австрийский ученый И. Фраунгофер при наблюдении солнечного спектра с помощью спектроскопа обнаружил, что в действительности он не является непрерывным (рис. 115). Солнечный спектр пересекают темные линии, которые позже получили название «фраунгоферовы». Немецкие ученые Г. Кирхгоф и Р. Бунзен нашли ключ к объяснению этих линий



### Задание 2

Выясните, какой спектр называют полосатым. Какой источник света дает полосатый спектр. В чем различие полосатого спектра от линейчатого.

в солнечном спектре. Экспериментально ими было установлено, что линейчатые спектры, испускаемые атомами нагретых паров различных веществ, совпадают с их спектрами поглощения в холодном состоянии. Фраунгоферовы линии в спектре излучения Солнца являются спектром поглощения атмосферы Солнца, поскольку температура атмосферы ниже, чем температура самого Солнца.

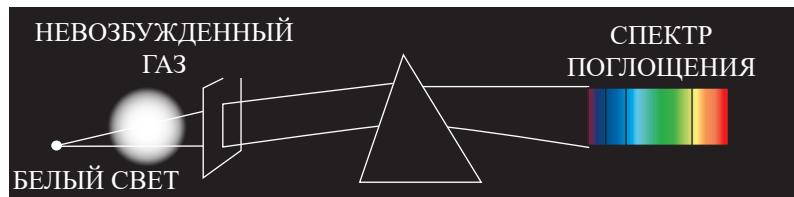


Рис. 115. Спектр поглощения

## V. Спектральный анализ

Открытие Г. Кирхгофа и Р. Бунзена позволило определить состав атмосферы Солнца. В 1859 г. учеными был разработан метод спектрального анализа химического состава вещества. Знание о расположении спектральных линий, характерных для атома данного химического элемента, позволяет определить состав исследуемого вещества, как по спектру излучения, так и по спектру поглощения. Сравнение спектров излучения всех известных элементов с фраунгоферовыми линиями солнечного спектра показало, что многие элементы, обнаруженные в атмосфере Солнца, имеются на Земле. Однако в спектре оставались линии, которые исследователям не были известны, новое вещество было названо гелием (от древнегреч. helios – Солнце). Приблизительно через четверть века этот газ был обнаружен на Земле. Метод спектрального анализа по сей день широко используется в исследовательских лабораториях.

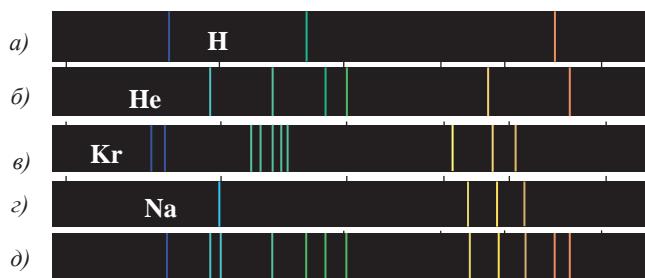


Рис. 116. Спектры водорода, гелия, криптона, паров натрия и смеси газов



### Задание 3

Рассмотрите линейчатые спектры излучения газов, изображенные на рисунке 116 а-г. Определите состав смеси газов, спектр которого изображен на рисунке 116 д.

## Контрольные вопросы

1. Какие виды излучения вам известны? По какому принципу их классифицируют?
2. Назовите источники света для различных видов излучения.
3. Для чего необходимы спектральные аппараты? Как они устроены?

4. Какие виды спектров вам известны? Назовите источники излучения с различными видами спектров.
5. Какой спектр называют линейчатым?
6. В чем заключается метод спектрального анализа?



## Упражнение

18

По спектрам поглощения, изображенных на рисунке 117 а, б, в, определите состав смеси газов, спектр поглощения которого дан на рисунке 117, г.

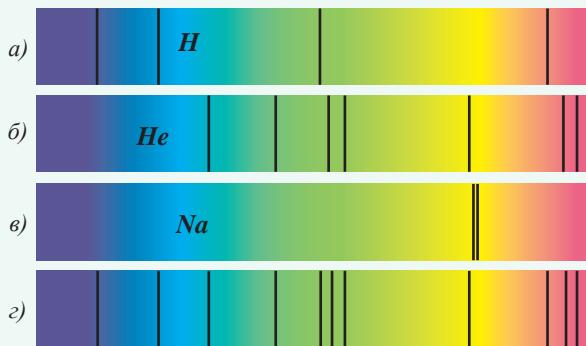


Рис. 117. Спектры поглощения водорода, гелия, натрия и смеси газов

## Творческое задание

Подготовьте сообщение по темам (на выбор):

1. Роль спектроскопии в развитии астрофизики.
2. Спектральный анализ в промышленности.
3. Виды спектрометров, принцип их действия.

## § 19. Инфракрасное и ультрафиолетовое излучение, рентгеновские лучи, шкала электромагнитных излучений

### Ожидаемый результат

Прочитав параграф, вы сможете:

- различать электромагнитные излучения по их природе возникновения и взаимодействию с веществом.

### Задание 1

Используя текст учебника, составьте сравнительную таблицу инфракрасного, ультрафиолетового и рентгеновского излучений по следующим параметрам: диапазон длин волн (частот), кем и когда излучение было открыто, природа возникновения излучения, источники излучения, взаимодействие с веществом.

### Задание 2

Из рубрик «Интересно знать» запишите в тетрадь примеры использования инфракрасного, ультрафиолетового и рентгеновского излучений, которые вам были не известны. Приведите пример использования излучений, которые не вошли в текст учебника.

### Интересно знать!

#### Инфракрасное излучение в природе и жизни человека.

- Наша Земля – источник инфракрасного излучения, поверхность Земли и облака поглощают солнечное излучение и, превращая его в инфракрасное излучение, передают атмосфере.
- Термография, или тепловидение – это инфракрасное изображение объектов. Термография получила широкое применение в медицине (рис. 118), строительстве, военной технике, промышленности, науке. Интенсивность инфракрасного излучения измеряют пирометром или тепловизором.
- ИК-лазеры используются в качестве источников света в оптоволоконных системах связи.
- Инфракрасное излучение используется в спектроскопии для определения структур и составов органических соединений. Технология основана на свойствах веществ поглощать определенные частоты, которые зависят от растяжения и изгиба внутри молекул образца.

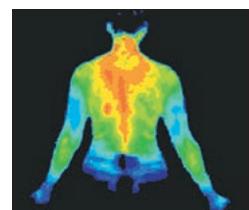


Рис. 118. Термография – один из методов диагностики заболеваний

## II. Ультрафиолетовое излучение

Ультрафиолетовое излучение (УФ-излучение) – это электромагнитные волны, которые занимают спектральный диапазон между видимым и рентгеновским излучениями. Интервал длин волн ультрафиолетового излучения составляет от 10 нм до 400 нм, частотный диапазон от  $7,5 \cdot 10^{14}$  Гц до  $3 \cdot 10^{16}$  Гц. Биологи иногда выделяют, как наиболее важные в их работе, следующие диапазоны: ближний ультрафиолет, УФ-А лучи (UVA, 315–400 нм); средний ультрафиолет УФ-В лучи (UVB, 280–315 нм); дальний ультрафиолет, УФ-С лучи (UVC, 100–280 нм). Солнечная радиация, достигающая поверхности Земли, в значительной степени содержит ближний ультрафиолет УФ-А, остальной диапазон практически полностью поглощается атмосферой.

Ультрафиолетовое излучение было обнаружено немецким физиком В. Риттером. В поставленном им эксперименте невидимое излучение за пределами фиолетовой области видимого спектра ускорило процесс разложения хлорида серебра. Источниками ультрафиолетового излучения являются Солнце, искусственные источники: лазеры, ультрафиолетовые люминесцентные лампы (УФЛЛ) различных видов и назначений, например: лампы полного спектра, кварцевые, «искусственный солярий». Лучи испускают электроны возбужденных атомов вещества.

Ультрафиолетовое излучение поглощается веществом, меняя его химический состав, оно обладает высокой химической активностью. Под действием УФ – излучения разрушаются термопластики: оргстекло, полиэтилен. В результате облучения ультрафиолетовыми лучами погибают микроорганизмы, так как они теряют способность воспроизведения. УФ излучение хорошо поглощается стеклом.

## III. Рентгеновские лучи

В 1895 г. немецкий физик Вильгельм Рентген случайно обнаружил рентгеновские лучи, изучая свойства катодных лучей между электродами газоразрядной трубы при низком давлении и высоком напряжении. Рентген обратил внимание на то, что флуоресцентный экран, находящийся вблизи трубы, светился. Трубка оказалась источником излучения, способного проникать через бумагу, дерево, стекло и даже пластиинку алюминия толщиной в полтора сантиметра. Рентген решил, что газоразрядная трубка является источником нового вида излучения.

### Эксперимент

С помощью призмы разложите световой пучок от нити накала лампы на составляющие. Направьте на черную полосу, закрепленную на экране. Сравните значение температур участков полос на экране в средней части видимого излучения и в области инфракрасного излучения. Рекомендация: для определения температуры используйте электронный термометр.

### Интересно знать!

#### Ультрафиолетовое излучение в природе и жизни человека

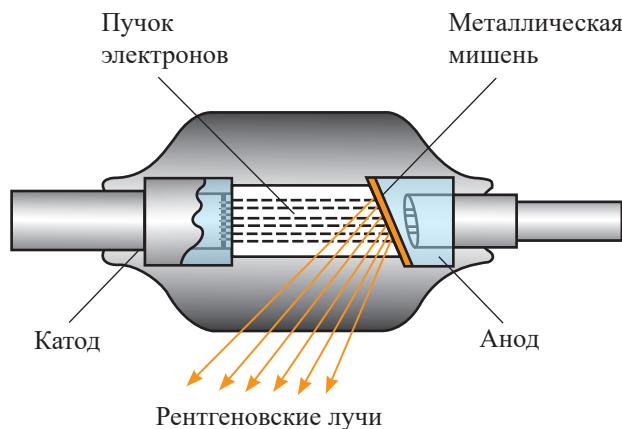
- Для защиты документов от подделки их снабжают люминесцентными метками, которые видны при ультрафиолетовом освещении.
- УФ лампы используются для дезинфекции помещений (рис. 119), воды, воздуха и различных поверхностей.
- Отреставрированные участки картин и кустарно переписанные подписи проступают более темными пятнами в ультрафиолетовых лучах.
- УФ излучение используют в биотехнологии для получения генной мутации, селекции новых растений.



Рис. 119. Кварцевая лампа для больничных палат

Исследования показали, что рентгеновские лучи занимают спектральную область между ультрафиолетовым и гамма-излучением в пределах длин волн  $10^{-3}$  нм – 100 нм, что соответствует излучению с частотой от  $3 \cdot 10^{15}$  Гц до  $3 \cdot 10^{20}$  Гц. В шкале длин волн нет общепризнанного определения нижней и верхней границы диапазона рентгеновских лучей, жесткое ультрафиолетовое излучение можно рассматривать как мягкое рентгеновское. Длину волны мягкого рентгеновского излучения условно принимают большим, чем 0,2 нм, а жесткого рентгеновского излучения меньше, чем 0,2 нм. Фотоны жесткого высокочастотного рентгеновского излучения обладают наибольшей проникающей способностью.

Жесткие лучи представляют собой полноценную ионизирующую радиацию, способную привести к лучевой болезни. Излучение может разрывать молекулы белков, из которых состоят ткани человеческого тела, а также молекулы ДНК генома, они обладают мутагенной и канцерогенной активностью. Лучи обладают высокой проникающей способностью. Рентгеновское излучение, которое возникает на других небесных телах, не достигает поверхности Земли так как полностью поглощается атмосферой.



*Рис. 120. Рентгеновская трубка*

Тормозное рентгеновское излучение определяется разностью потенциалов между электродами рентгеновской трубы. Работа поля по перемещению электронов превращается в кинетическую энергию движущихся электронов, затем, при столкновении с анодом, в энергию фотонов рентгеновского излучения.

$$A = E_k = E_\phi.$$

Максимальная частота фотонов рентгеновского излучения соответствует максимальной кинетической энергии тормозящих электронов, которая определяется разностью потенциалов в рентгеновской трубке:

$$eU = \frac{m_e v_{\max}^2}{2} = h\nu_{\max}.$$



### Вспомните!

Источник рентгеновского излучения представляет собой трубку с катодом и анодом, в которой создан вакуум. Напряжение между ними составляет десятки-сотни киловольт. Электроны вырываются с катода и сталкиваются с анодом. Возникающее при этом рентгеновское излучение называется «тормозным».

Одновременно создается характеристическое излучение, зависящее от материала анода (рис. 120).



### Ответьте на вопросы

- Почему тормозное рентгеновское излучение не является монохроматическим?
- Почему характеристическое рентгеновское излучение зависит от материала анода?

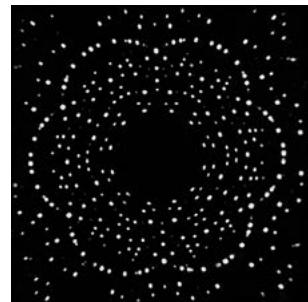


## Интересно знать!

### Рентгеновское излучение в природе и жизни человека.

- Излучение используется в медицине для диагностики посредством флюорографии и рентгенографии, также для лучевой терапии.
- В аэропортах и железнодорожных вокзалах применяется рентгеновское излучение для просмотра содержимого ручной клади и багажа.
- Метод рентгеновской дефектоскопии позволяет выявить микротрешины в изделиях, например, в рельсах или сварочных швах различных конструкций.
- Дифракционное рассеяние излучения получило применение для выяснения структуры веществ в материаловедении, кристаллографии, химии, биохимии.

Дифракционные картины, полученные в результате рассеяния рентгеновских лучей на кристаллах, были названы **лауэграммами** в честь немецкого физика Макса фон Лауз, предложившего в 1912 г. данный метод исследования (рис. 121), а сам метод – **рентгеноструктурным анализом**.

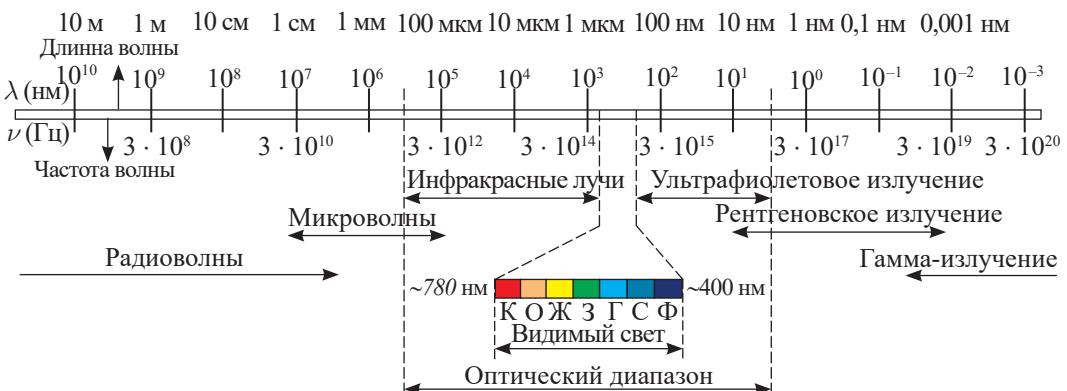


**Рис. 121.** Лауэграмма кристалла берилла

## IV. Шкала электромагнитных колебаний

На рисунке 122 изображена шкала электромагнитных волн с указанием длин волн и частот различных излучений. Длина электромагнитных волн изменяется в широком диапазоне: от  $10^3$  м до  $10^{-10}$  м. Принято выделять: низкочастотное излучение, радиоизлучение, инфракрасные лучи, видимый свет, ультрафиолетовые лучи, рентгеновские лучи,  $\gamma$ -излучение. Принципиального различия между отдельными излучениями нет. В вакууме электромагнитное излучение любой длины волны распространяется со скоростью 300000 км/с. Границы между отдельными областями шкалы излучений весьма условны. Излучения различных длин волн отличаются друг от друга по способам их получения и методам регистрации. Существенные различия наблюдаются, при взаимодействии с веществом: коэффициенты поглощения и отражения зависят от длины волны.

Коротковолновые излучения: рентгеновское и  $\gamma$ -лучи поглощаются слабо. Непрозрачные для волн оптического диапазона вещества прозрачны для этих излучений.



**Рис. 122.** Шкала электромагнитных колебаний

## Контрольные вопросы

1. Какой диапазон длин волн принято считать инфракрасным, ультрафиолетовым, рентгеновским излучением? Какова особенность излучений?
2. Назовите причины возникновения инфракрасного, ультрафиолетового, рентгеновского излучений.
3. Как создать рентгеновское излучение заданного интервала длин волн?
4. Как взаимодействуют с веществом инфракрасное, ультрафиолетовое, рентгеновское излучения?
5. Какое практическое применение получили излучения?



## Упражнение

19

1. Определите минимальные значения длины волны рентгеновского излучения для напряжений между электродами рентгеновской трубы 2 кВ и 20 кВ.
2. Определите минимальное напряжение, при котором в спектре тормозного излучения появятся лучи с длиной волны 0,015 нм.
3. Под каким напряжением работает рентгеновская трубка, если самые жесткие лучи в рентгеновском спектре этой трубы имеют частоту  $10^{19}$  Гц?
4. Изобразите шкалу инфракрасного, видимого, ультрафиолетового и рентгеновского излучений, укажите длину и частоту волн на границе выделенных диапазонов.  
Сравните изображенную шкалу с шкалой электромагнитных излучений. Какую часть шкалы она занимает? Какие излучения вам известны? Какие излучения представляют для живого организма большую опасность?

## Творческое задание

Подготовьте сообщение по темам (на выбор):

1. Применение инфракрасных лучей в технике, промышленности, науке.
2. Мир в инфракрасных и ультрафиолетовых лучах.
3. Роль инфракрасных, ультрафиолетовых и рентгеновских лучей в медицине.
4. Особенности УФ-А (UVA); УФ-В (UVB); УФ-С (UVC) лучей.

## § 20. Фотоэффект. Применение фотоэффекта

### Ожидаемый результат

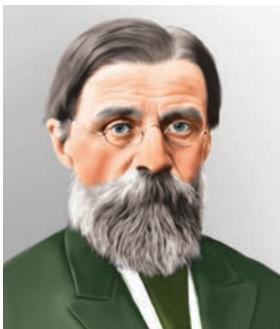
Прочитав параграф, вы сможете:

- объяснять природу фотоэффекта и приводить примеры его применения.



### Вспомните!

Фотоэффект – это испускание электронов веществом под действием света или любого другого электромагнитного излучения.



**Александр Григорьевич Столетов** (1839–1896) – русский физик. Исследовал внешний фотоэффект, открыл первый закон фотоэффекта. Исследовал газовый разряд, критическое состояние, получил кривую намагничивания железа.



### Ответьте на вопрос

Почему из баллона откачивают воздух?

### I. Фотоэффект с точки зрения классической электродинамики

На основе волновой теории света можно предположить, что:

- свет любой длины волны должен вырывать электроны из металла;
- на вырывание электрона из металла требуется определенное время;
- число вырванных электронов и их энергия должны быть пропорциональны интенсивности света.

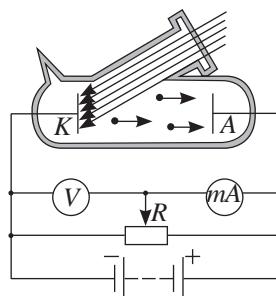


### Задание 1

Поясните предположения о фотоэффекте с использованием представления о свете, как электромагнитной волне, т.е. на основе теории Максвелла.

### II. Современная установка для исследования фотоэффекта

Современная установка для изучения фотоэффекта представляет собой два электрода, помещенных в стеклянный баллон, из которого выкачен воздух (*рис. 123*). На один из электродов через кварцевое «окошко» падает свет. В отличие от обычного стекла кварц пропускает ультрафиолетовое излучение. На электроды подается напряжение, которое можно менять с помощью потенциометра  $R$  и измерять вольтметром  $V$ . К освещаемому электроду  $K$  – катоду подсоединяют отрицательный полюс батареи. Под действием света катод испускает электроны, которые направляются электрическим полем к аноду, создается электрический ток. Значение силы тока фиксируется миллиамперметром.



*Рис. 123. Экспериментальная установка для изучения внешнего фотоэффекта*

### III. Законы фотоэффекта Столетова

Исследования, проведенные русским ученым А.Г. Столетовым и немецким ученым Ф. Ленардом, показали, что законы фотоэффекта не соответствуют классическим представлениям.

На рисунке 124 представлена вольтамперная характеристика, полученная в результате измерений при различных значениях напряжения между электродами.

Из графика следует, что:

- Сила фототока не зависит от напряжения, если оно достигает некоторого значения  $U_n$ .

*Максимальное значение силы тока  $I_n$  называют током насыщения.*

*Сила тока насыщения – это максимальный заряд, переносимый фотоэлектронами за единицу времени:*

$$I_n = \frac{q_m}{t} = \frac{N|e|}{t} = n|e|, \quad (1)$$

где  $n$  – число фотоэлектронов, вылетающих с поверхности освещаемого металла за 1 с,  $e$  – заряд электрона,  $N$  – число фотоэлектронов, вылетающих с поверхности освещаемого металла за время  $t$ .

- Сила фототока отлична от нуля при нулевом значении напряжения.
- Если изменить направление электрического поля, соединив катод с положительным полюсом источника тока, а анод – с отрицательным, то скорость фотоэлектронов уменьшится, об этом можно судить по показаниям миллиамперметра: сила тока уменьшается при увеличении отрицательного значения напряжения. При некотором значении напряжения  $U_s$ , который называют задерживающим напряжением, фототок прекращается.

Согласно теореме об изменении кинетической энергии, работа задерживающего электрического поля равна изменению кинетической энергии фотоэлектронов:

$$A = \Delta E_k \text{ или } eU_s = \frac{mv_m^2}{2}. \quad (2)$$

При известном значении  $U_s$  можно найти максимальную кинетическую энергию фотоэлектронов.

Исследование фотоэффекта при освещении катода световыми потоками равной частоты, но различной интенсивности дал результат, представленный вольтамперными характеристиками, изображенными на рисунке 125.

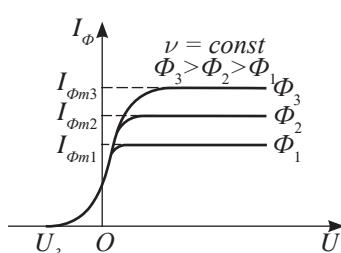


Рис. 125. Вольтамперные характеристики для фотоэффекта при различных световых потоках

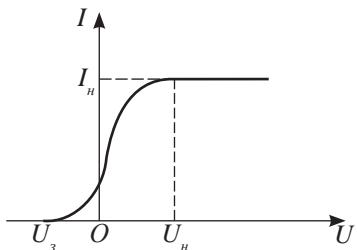


Рис. 124. Зависимость силы фототока от напряжения на электродах вакуумной лампы



#### Ответьте на вопросы

- Почему сила фототока насыщения имеет постоянное значение?
- Почему при нулевом значении напряжения сила фототока отлична от нуля?
- Почему сила фототока уменьшается при изменении направления электрического поля?
- При каком условии фототок прекращается? Почему?

Сила фототока насыщения увеличивается с увеличением интенсивности падающего света. Если по этим данным построить график зависимости силы тока насыщения от интенсивности света, то получим прямую линию, которая проходит через начало координат (рис. 126). Следовательно, сила фототока насыщения пропорциональна интенсивности света, падающего на катод:  $I_\phi \sim I$ .

Величина запирающего напряжения от интенсивности света не зависит, для всех потоков она имеет одно и то же значение.

Освещение катода светом одной и той же интенсивности, но разной частоты дало серию вольтамперных характеристик, представленных на рисунке 127. Как следует из графиков, величина задерживающего напряжения  $U_3$  увеличивается с увеличением частоты падающего света, при уменьшении частоты падающего света уменьшается, и при некоторой частоте  $\nu_0$  задерживающее напряжение равно нулю:  $U_3 = 0$ . При меньших частотах  $\nu < \nu_0$  фотоэффект не наблюдается.

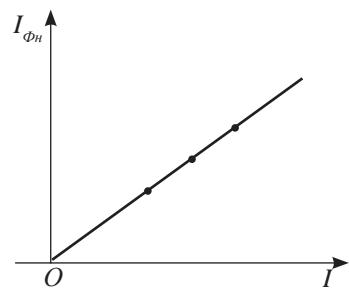


Рис. 126. Зависимость силы фототока от интенсивности светового потока

### Ответьте на вопросы

- Как получить свет различной интенсивности, но равной частоты излучения?
- Как получить свет равной интенсивности, но разной частоты излучения?

**Минимальную частоту падающего света  $\nu_0$ , при которой еще возможен фотоэффект, называют красной границей фотоэффекта.**

На основании данных графика (рис. 127), можно построить график зависимости запирающего напряжения от частоты падающего света  $U_3(\nu)$  (рис. 128).

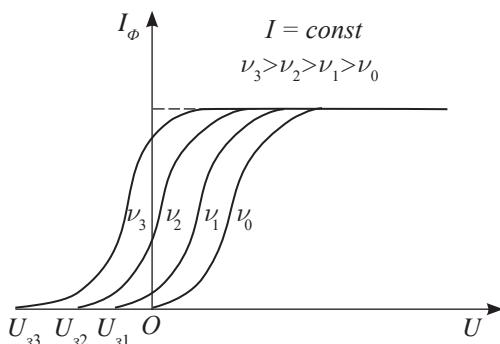


Рис. 127. Вольтамперные характеристики для фотоэффекта при различных частотах падающего света

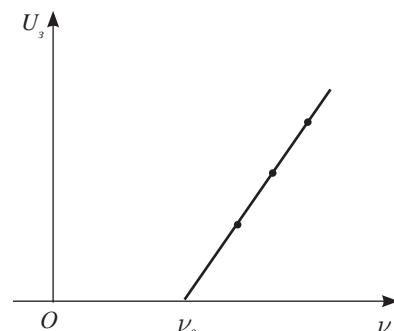


Рис. 128. График зависимости запирающего напряжения от частоты падающего света

На основании экспериментальных данных Столетовым были сформулированы законы фотоэффекта:

- Сила фототока прямо пропорциональна интенсивности светового потока.
- Максимальная кинетическая энергия вырываемых светом электронов линейно возрастает с частотой света и не зависит от интенсивности.

3. Для каждого вещества существует красная граница фотоэффекта, т.е. минимальная частота света  $\nu_0$  (максимальная длина  $\lambda_{\max}$ ), при которой возможен фотоэффект, если  $\nu < \nu_0$ , то фотоэффект не происходит.

## IV. Квантовая теория фотоэффекта

Теоретическое обоснование фотоэффекта было дано в 1905 г. А. Эйнштейном. Он предположил, что свет не только излучается квантами, как утверждал М. Планк, но и распространяется и поглощается порциями, представляет собой поток частиц – *фотонов*, энергия которых равна  $E = h\nu$ .

Сам фотоэффект состоит в том, что световые частицы, сталкиваясь с электронами металла, передают им свою энергию и импульс и сами при этом исчезают. Если энергия квантов падающего света больше той работы, которую электрон должен совершить против сил притяжения к положительно заряженным частицам вещества, то электрон вылетает из металла. Становится понятным смысл красной границы фотоэффекта: для вырывания электрона из металла энергия квантов должна быть не меньше, чем  $E = h\nu_{\min}$ . Эта энергия и равна работе выхода электрона из данного металла. В случае, когда энергия падающих квантов больше работы выхода, максимальная кинетическая энергия электронов равна разности энергии фотона и работы выхода:

$$E_k = E_\phi - A_{\text{вых}}. \quad (3)$$

Это и есть формула Эйнштейна для фотоэффекта. Обычно ее пишут в виде:

$$h\nu = A_{\text{вых}} + \frac{mv_{\max}^2}{2}. \quad (4)$$

## V. Фотоны, энергия, масса и импульс фотона

*Фотон* – это частица света. Он не делится на части: испускается, отражается, преломляется и поглощается целым квантами. У него нет массы покоя, неподвижных фотонов не существует.

**Энергия фотона:**

$$E = h\nu = h \frac{c}{\lambda} = \hbar\omega, \quad (5)$$

где  $\hbar = \frac{h}{2\pi} = \frac{6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}}{6,28} = 1,055 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$  – постоянная Планка,  $\omega$  – циклическая частота.

**Масса фотона.** Массу фотона определяют исходя из закона о взаимосвязи массы и энергии:

$$m = \frac{E}{c^2} = \frac{h\nu}{c^2} = \frac{h}{c\lambda}. \quad (6)$$

Измерить массу фотона невозможно, ее следует рассматривать как полевую массу, обусловленную тем, что электромагнитное поле обладает энергией.

**Импульс фотона.** Фотон – частица света, следовательно, ее импульс равен:

$$p = mc = \frac{E}{c} = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda}. \quad (7)$$



### Задание 2

Сравните выводы Столетова с выводами классической физики (часть I параграфа). В чем различие выводов?



### Задание 3

Докажите, что формула Эйнштейна для фотоэффекта является законом сохранения энергии в применении к данному явлению.



### Обратите внимание!

Постоянную Планка называют квантом действия в соответствии с ее размерностью:  $\hbar = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$ .

## VI. Применение фотоэффекта в технике

### Фотоэлементы.

Приборы, принцип действия которых основан на явлении фотоэффекта, называют фотоэлементами. Устройство фотоэлемента изображено на рисунке 129. Внутренняя поверхность  $K$  (катод) стеклянного баллона, из которого выкачен воздух, покрыта светочувствительным слоем с небольшим прозрачным для света участком для доступа света внутрь баллона. В центре баллона находится металлическое кольцо  $A$  (анод). От электродов сделаны выводы для подключения фотоэлемента к электрической цепи. В качестве светочувствительного слоя обычно используют напыленные покрытия из щелочных металлов, имеющих малую работу выхода, т.е. чувствительных к видимому свету.

Фотоэлементы используют для автоматического управления электрическими цепями с помощью световых пучков.

**Фотореле.** Фотоэлектрическое реле, срабатывает при прерывании светового потока, падающего на фотоэлемент (*рис. 130*). Фотореле состоит из фотоэлемента  $\Phi$ , усилителя фототока, в качестве которого используют полупроводниковый триод, и электромагнитного реле, включенного в цепь коллектора транзистора. Напряжение на фотоэлемент подают от источника тока  $\varepsilon_1$ , а на транзистор – от источника тока  $\varepsilon_2$ . Между базой и эмиттером транзистора включен нагрузочный резистор  $R$ .

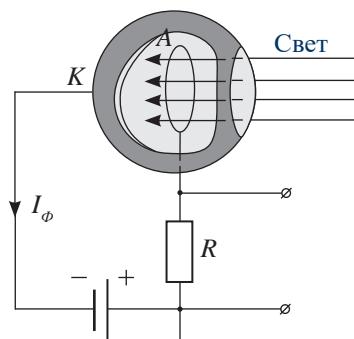


Рис. 129. Устройство фотоэлемента



### Задание 4

Объясните принцип действия фотоэлемента в цепи с автоматическим подключением.

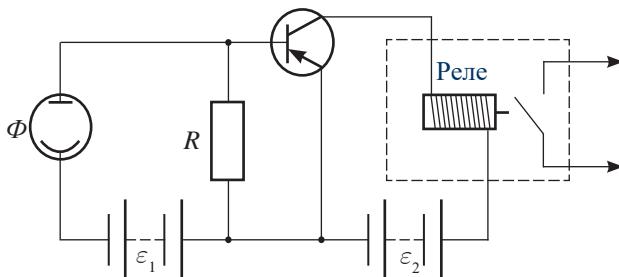


Рис. 130. Схема фотореле

Когда фотоэлемент освещен, в его цепи, содержащей резистор  $R$ , идет слабый ток, потенциал базы транзистора выше потенциала эмиттера, и ток в коллекторной цепи транзистора отсутствует.

Если же поток света, падающий на фотоэлемент, прерывается, ток в его цепи сразу прекращается, переход эмиттер – база открывается для основных носителей, и через обмотку реле, включенного в цепь коллектора, пойдет ток. Реле срабатывает, и его контакты замыкают исполнительную цепь. Ее функциями могут быть остановка пресса, в зону действия которого попала рука человека, выдвижение преграды в турнике метро, автоматическое включение освещения на улицах.

## ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Импульс фотонов света, которыми облучают поверхность палладия, равен  $p = 5,7 \cdot 10^{-27}$  кг · м/с. Определите максимальную скорость фотоэлектронов. Работа выхода для палладия  $A = 2$  эВ.

**Дано:**

$$\begin{aligned} p &= 5,7 \cdot 10^{-27} \text{ кг} \cdot \text{м/с} \\ A_{\text{вых}} &= 2 \text{ эВ} \\ m_e &= 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ кг} \\ c &= 3 \cdot 10^8 \text{ м/с} \end{aligned}$$

$v - ?$

**СИ**

$$3,2 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$$

**Решение:**

Запишем уравнение Эйнштейна, выразив энергию через импульс фотона:

$$pc = A_{\text{вых}} + \frac{m_e v^2}{2}.$$

Решим уравнение относительно скорости:  $v = \sqrt{\frac{2}{m_e}(pc - A_{\text{вых}})}.$

$$v = \sqrt{\frac{2(5,7 \cdot 10^{-27} \text{ кг} \cdot \text{м/с} \cdot 3 \cdot 10^8 \text{ м/с} - 3,2 \cdot 10^{-19})}{9,1 \cdot 10^{-31} \text{ кг}}} = 1,73 \cdot 10^6 \text{ м/с}.$$

**Ответ:**  $v = 1,73 \cdot 10^6$  м/с.

## Контрольные вопросы

- Что называют фотоэффектом?
- Какие представления о явлении фотоэффекта сформировались на основе волновой теории света, квантовой теории света?
- В чем заключаются законы Столетова?
- Как Эйнштейн объяснил явление фотоэффекта?
- Что такое красная граница фотоэффекта?
- Какими свойствами обладают фотоны?
- Какое применение получили фотоэлементы?



## Упражнение

20

- Определите частоту фотона, энергия которого  $E_\phi = 3,2 \cdot 10^{-19}$  Дж.
- Определите массу, импульс и энергию фотона с длиной волны  $\lambda = 5 \cdot 10^{-7}$  м.
- Светом какой частоты требуется облучить поверхность вольфрамовой пластинки, чтобы максимальная скорость фотоэлектронов была  $v = 3000$  км/с?

## Творческое задание

Подготовьте сообщение по темам (на выбор):

- Опыт Столетова.
- КПД солнечной батареи, перспективы ее использования.

## § 21. Давление света. Химическое действие света. Фотография

### Ожидаемый результат

Прочитав параграф, вы сможете:

- описывать химическое действие света на примере фотосинтеза и процессов в фотографии.



### Задание 1

- Докажите, что давление света на белую поверхность равна  $p = \frac{2I}{c}$ , на черную поверхность –  $p = \frac{I}{c}$ .

При доказательстве примите коэффициент отражения белой поверхности равной  $\rho = 1$ , черной поверхности  $\rho = 0$ .  
2. Запишите единицы измерения давления и плотности энергии. Докажите, что они равны.



### Ответьте на вопрос

Можно ли утверждать, что сила Лоренца является силой давления света?



### Интересно знать!

По расчетам Максвелла, солнечный свет производит на черную пластину, расположенную на Земле, давление равное  $p = 4 \cdot 10^{-6}$  Н/м<sup>2</sup>. Давление на светоотражающую поверхность в 2 раза больше.

### I. Давление света с точки зрения квантовой теории

С точки зрения квантовой теории, давление света создается ударами фотонов о поверхность тела. Пусть за 1 секунду  $N$  частиц света падает перпендикулярно на поверхность площадью 1 м<sup>2</sup>. Часть из них поглощается поверхностью тела и передает этой поверхности свой импульс, равный:

$$p = \frac{h\nu}{c}. \quad (1)$$

Отраженные от поверхности фотоны передают импульс вдвое больший:

$$p = \frac{2h\nu}{c}. \quad (2)$$

Давление света на поверхность будет равным импульсу, который передают за 1 с все  $N$  фотонов, падающих на 1 м<sup>2</sup> поверхности тела. Если  $\rho$  – коэффициент отражения света от произвольной поверхности, то  $\rho N$  – это число отраженных фотонов, а  $(1 - \rho)N$  – число поглощенных фотонов. Следовательно, давление света, созданное всеми частицами, будет равным:

$$p = \frac{2h\nu}{c} \cdot \rho N + \frac{h\nu}{c} \cdot (1 - \rho)N = (1 + \rho) \frac{Nh\nu}{c}.$$

Поскольку  $N$  – это число частиц света, перпендикулярно падающих на поверхность площадью 1 м<sup>2</sup> за 1 секунду, то:

$$Nh\nu = \frac{W}{St} = I.$$

Таким образом, давление света равно:

$$p = (1 + \rho)w = (1 + \rho)\frac{I}{c}. \quad (3)$$



### Задание 2

Рассмотрите рисунок

- 131:  $\vec{E}$  и  $\vec{B}$  – вектора напряженности и магнитной индукции падающей на поверхность световой волны. Направление движения отрицательно заряженных частиц под действием вектора напряженности указан вектором  $\vec{v}$ . Используя правило левой руки, определите направление силы Лоренца. Сравните полученный результат с направлением силы Лоренца на рисунке 131.

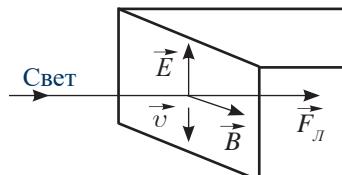


Рис. 131. Направление силы Лоренца, действующей на частицы вещества

## II. Опыт Лебедева

Давление света на твердые тела впервые было измерено русским физиком П.Н. Лебедевым в 1900 г., давление света на газы в 1907–1910 гг.

Лебедевым были созданы чувствительные крутильные весы, подвижной частью которых являлась подвешенная на тонкой нити легкая рамка с укрепленными на ней крыльышками из металлической фольги. Они представляли собой светлые и черные диски диаметром 5 мм и толщиной до 0,01 мм. Из сосуда, внутри которого подвешена рамка на легкой стеклянной нити, был откачен воздух. Свет, падая на крыльышки, оказывал на светлые и черные диски разное давление, в результате на рамку действовал врачающий момент, который закручивал нить подвеса (рис. 132). По углу закручивания нити Лебедев рассчитал давление света. Экспериментальные и теоретические расчеты дали одинаковые результаты.

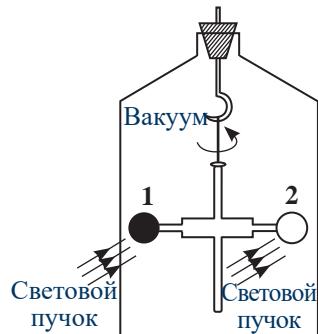
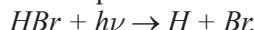


Рис. 132. Подвижная рамка крутильных весов в опыте Лебедева

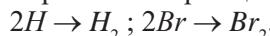
## III. Условие протекания фотохимических реакций

Химические процессы, протекающие под действием видимого света и ультрафиолетовых лучей, называются фотохимическими реакциями.

Химическое взаимодействие происходит, если энергия одного фотона не меньше энергии расщепления молекулы  $E_p$ . Следовательно, наименьшая частота химически активного излучения равна:  $\nu_0 = \frac{E_p}{h}$ , излучение меньших частот химически неактивно. Примером реакции такого типа является разложение светом бромистого водорода:



Свободные атомы водорода и брома после расщепления соединяются в молекулы:



Примерами фотохимических реакций являются: фотосинтез углеводов в растениях, распад бромистого серебра на светочувствительном слое фотопластинки, взаимодействие хлора с водородом на свету с образованием  $HCl$ .

## IV. Фотосинтез

Важнейшей для всего живущего на Земле является фотохимическая реакция образования органических веществ в зеленых листьях растений. Они дают нам пищу и кислород для дыхания. Этот процесс называется фотосинтезом, он происходит в листьях растений при поглощении света с помощью катализатора – хлорофилла. В результате фотосинтеза в недрах и на поверхности Земли накопились органические продукты в виде каменного угля, нефти, горючих газов, сланцев, торфа, а атмосфера обогатилась кислородом.



### Задание 3

Приведите примеры химического действия света.



### Ответьте на вопрос

Можем ли мы утверждать, что органическое топливо – продукт переработки энергии Солнца?

## V. Фотография

Слово «фотография» происходит от греческого «фото» – свет, «графо» – рисую, пишу.

Фотоматериалы (пленка, пластина, бумага) состоят из подложки, на которую наносят желатиновый подслой, светочувствительный эмульсионный, противоореольный, антистатический и защитный слои (рис. 133). Светочувствительный слой содержит микроскопически малые светочувствительные кристаллы соли серебра, равномерно распределенные в желатине. Желатин связывает кристаллы галогенида и крепит их к подложке. Подслой в пленке необходим для удержания эмульсионного слоя на подложке, а в фото-бумаге – для предохранения проникновения эмульсии в пористую структуру бумаги. Противоореольный слой предназначен для поглощения лучей, прошедших через пленку и создающих при отражении от внутренней поверхности подложки ореолы. Пленка подвергается действию света при фотосъемке.

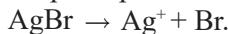
Цветные фотоматериалы в отличие от черно-белых имеют три эмульсионных слоя, каждый из которых чувствителен к части видимого спектра.

Стандартное строение цветной негативной пленки: защитный слой, синечувствительный слой, фильтровой (желтый) слой, промежуточный желатиновый слой, зеленочувствительный слой, красночувствительный слой, подслой, подложка, противоореольный слой.

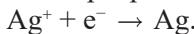
В черно-белых пленках изображение образует *металлическое серебро*, которое образуется в процессе проявления галогенидов серебра, на которые попал свет.

В цветных светочувствительных материалах изображение образуется из окисленной формы проявляющего вещества и половины молекулы, которая находится рядом с галогенидом серебра, на который подействовал свет.

В эмульсионном слое под действием света образуются мельчайшие крупинки ионов, они представляют собой центры скрытого изображения:



Изображение на пленке проявляется с помощью восстановителя, который пре-вращает ионы в чистое металлическое серебро:



На пленке появляется изображение. При фиксировании изображения в закрепителе из эмульсионного слоя в результате химических реакций вымываются остатки солей серебра.

## VI. Применение фотографии

Фотография находит все большее применение в науке, технике. Получены изображения Земли, Луны и других планет; изображения живой клетки и кристаллической решетки минералов. Высокоскоростная фотосъемка с частотой выше 10000 кадров в секунду широко применяется для изучения быстротекущих процессов, например, движение элементарных частиц в ускорителях (рис. 134). И, наоборот, автоматическая регистрация длительного процесса на фотопленку позволяет «сжать»

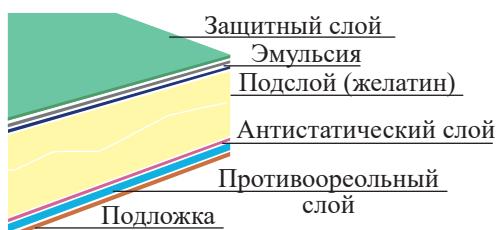


Рис. 133. Строение черно-белой пленки

информацию и наблюдать динамику медленно протекающих процессов, например, рост кристаллов.

Наряду с применением фотографии в науке и технике наиболее давнее и массовое распространение она получила как вид искусства (*рис. 135*).



*Рис. 134. Фотография траектории движения элементарных частиц*



*Рис. 135. Фотография Большого Алматинского озера. Заилийский Алатай*

### Контрольные вопросы

1. Как создается давление света с точки зрения квантовой теории?
2. Какая сила является причиной возникновения давления света с точки зрения волновой теории света?
3. В чем заключался опыт П. Лебедева?
4. При каком условии протекает фотохимическая реакция?
5. Какую реакцию называют фотосинтезом?
6. На каком явлении основан процесс фотографирования?



### Упражнение

21

1. Запишите реакцию фотосинтеза.
2. Приведите примеры солей серебра, которые используются при производстве черно-белой пленки (пластиинки). Запишите реакцию, которая происходит под действием света.

### Творческое задание

Подготовьте сообщение по темам (на выбор):

1. Из истории фотографии: от камеры-обскуры до цифрового фотоаппарата.
2. Технологии получения фотографии.

## § 22. Томография

### Ожидаемый результат

Прочитав параграф, вы сможете:

- сравнивать компьютерную и магниторезонансную томографии.



### Интересно знать!

Метод исследования внутренней структуры объекта предложили в 1972 г. британский инженер-электрик Годфри Хаунсфилд и южноафриканский физик Аллан Кормак, за что в 1979 г. они были удостоены Нобелевской премии.

тели поглощения различных тканей. Записи с использованием томографа первого поколения делают 160 раз, пока рентгеновская трубка перемещается линейно вдоль сканируемой плоскости. Затем рама поворачивается на  $10^\circ$ , и процедура повторяется. Запись продолжается, пока рама не повернется на  $180^\circ$ . Каждый детектор в течение исследования записывает 28 800 кадров. Информация обрабатывается компьютером, и посредством специальной компьютерной программы формируется изображение выбранного слоя.

*Второе поколение компьютерных томографов* использует несколько пучков рентгеновских лучей и до 30 детекторов. Это дает возможность ускорить процесс исследования до 18 с.

*В третьем поколении компьютерных томографов* используется новый принцип. Широкий пучок рентгеновских лучей в форме веера перекрывает исследуемый объект, и прошедшее сквозь тело рентгеновское излучение записывается несколькими сотнями детекторов. Время, необходимое для исследования, сокращается до 5–6 с.

*Четвертое поколение* имеет 1088 люминесцентных датчиков, расположенных по всему кольцу аппарата, вращается только рентгеновская трубка. Благодаря этому методу время вращения сократилось до 0,7 с. Существенного отличия в качестве изображений с компьютерными томографами третьего поколения они не имеют.

### II. Современные методы компьютерной томографии

**1) Спиральная компьютерная томография (КТ).** Спиральная КТ используется в клинической практике с 1988 года, когда компания Siemens Medical Solutions представила первый спиральный компьютерный томограф. Спиральное сканирование заключается в одновременном выполнении двух действий: непрерывного вращения рентгеновской трубки вокруг тела пациента и непрерывного поступательного движения стола вдоль продольной оси сканирования (рис. 136). В этом случае траектория

### I. Компьютерная рентгеновская томография. Томографы

Компьютерная томография – метод рентгенодиагностики, который основан на измерении и компьютерной обработке ослабления рентгеновского излучения различными по плотности тканями. Он характеризуется высоким разрешением, дает возможность различать тонкие изменения мягких тканей, позволяет уменьшить дозу рентгеновского излучения, получаемого в процессе диагностики пациентами.

*Apparat первого поколения* появился в 1973 г., компьютерный томограф состоял из специальной рентгеновской трубки, прикрепленной к цилиндрической раме. На пациента, находящегося в центре рамы, направлялся тонкий пучок рентгеновских лучей. Два детектора крепились к противоположной стороне рамы, которая могла вращаться на  $180^\circ$  вокруг тела человека. Детекторы получали и записывали показа-

тели поглощения различных тканей. Записи с использованием томографа первого поколения делают 160 раз, пока рентгеновская трубка перемещается линейно вдоль сканируемой плоскости. Затем рама поворачивается на  $10^\circ$ , и процедура повторяется. Запись продолжается, пока рама не повернется на  $180^\circ$ . Каждый детектор в течение исследования записывает 28 800 кадров. Информация обрабатывается компьютером, и посредством специальной компьютерной программы формируется изображение выбранного слоя.

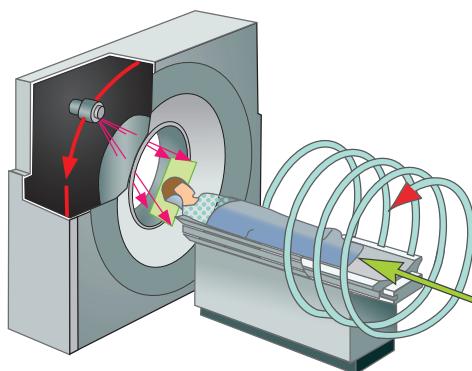
*Второе поколение компьютерных томографов* использует несколько пучков рентгеновских лучей и до 30 детекторов. Это дает возможность ускорить процесс исследования до 18 с.

*В третьем поколении компьютерных томографов* используется новый принцип. Широкий пучок рентгеновских лучей в форме веера перекрывает исследуемый объект, и прошедшее сквозь тело рентгеновское излучение записывается несколькими сотнями детекторов. Время, необходимое для исследования, сокращается до 5–6 с.

*Четвертое поколение* имеет 1088 люминесцентных датчиков, расположенных по всему кольцу аппарата, вращается только рентгеновская трубка. Благодаря этому методу время вращения сократилось до 0,7 с. Существенного отличия в качестве изображений с компьютерными томографами третьего поколения они не имеют.

движения рентгеновской трубки относительно направления движения стола с телом пациента, примет форму спирали.

**2) Многослойная компьютерная томография (МСКТ).** Томографы для МСКТ была впервые представлена компанией Израиля Elscint в 1992 году. Принципиальное отличие томографов в том, что рентгеновское излучение одновременно принимается детекторами, расположенными по окружности генри в два и более ряда. В 1992 году появились первые двухсрезовые томографы с двумя рядами детекторов, а в 1998 году четырехсрезовые, с четырьмя рядами детекторов соответственно (рис. 137).



*Рис. 136. Спиральная компьютерная томография*



*Рис. 137. Мультисрезовый компьютерный томограф*

Кроме выше отмеченных особенностей, было увеличено количество оборотов рентгеновской трубки с одного до двух в секунду. Таким образом, четырехспиральные томографы пятого поколения на сегодняшний день в 8 раз быстрее, чем обычные спиральные КТ-томографы четвертого поколения. В 2004–2005 гг. были представлены 32-, 64- и 128-срезовые многослойные томографы, в том числе с двумя рентгеновскими трубками. Впервые представленные в 2007 г. компанией Toshiba 320-срезовые компьютерные томографы, являются новым витком эволюции рентгеновской компьютерной томографии. Они позволяют не только получать изображения, но и дают возможность наблюдать физиологические процессы, происходящие в головном мозге и в сердце.

### III. Принцип действия и преимущества МРТ как метода диагностики

Магнитно-резонансный томограф по своему внешнему виду похож на компьютерный томограф. Исследование проходит так же, как и компьютерная томография. Стол постепенно продвигается вдоль сканера.

В основе диагностики лежит способность атомов водорода, реагировать на внешнее магнитное поле: протоны в ядрах водорода меняют направление вращения. При отсутствии внешнего магнитного поля протоны вновь принимают исходное состояние. Явление сопровождается выделением энергии, которую фиксирует специальная система. Полученные



#### Ответьте на вопросы

1. Почему МРТ в отличие от флюорографии и рентгена, можно назначать многократно за короткий промежуток времени?
2. Почему точность диагностики МРТ значительно превышает другие методы?

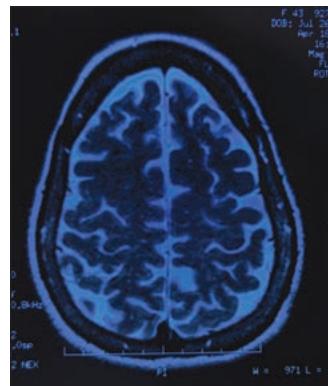
данные обрабатываются компьютерной программой, результатом становятся снимки, на которых исследуемые ткани хорошо видны в нескольких разрезах и в разных плоскостях.

Обнаружено, что отклик на воздействие магнитного поля длится дольше у раковых клеток. Они содержат больше воды, следовательно, больше ядер водорода.

*MРТ изображение – это компьютеризированное изображение радиосигналов, излучаемых человеческим телом.* На рисунке 138 представлены изображения, полученные на экране компьютера МРТ.

МРТ превосходит по своим возможностям компьютерную томографию, так как не используется ионизирующее излучение как при КТ. Его принцип работы основан на использовании безвредных электромагнитных волн.

В настоящее время МРТ стала отдельной областью медицины, без которой сложно представить себе диагностику. Он разрешает обнаружить на самых ранних этапах развития тяжелые заболевания и патологии: новообразования, нарушения сосудов, функций сердца, мозга, внутренних структур организма, изменения позвонков, межпозвоночные грыжи, остеохондроз, переломы, другие травмы, воспалительные и инфекционные процессы. Помимо этого, томография позволяет визуализировать структуру органов и тканей, измерять скорость тока спинномозговой жидкости, крови, оценивать уровень диффузии в тканях, определять активацию коры головного мозга при функционировании органов, за которые отвечает этот участок коры. Функциональная МРТ стала играть важную роль в области визуализации процессов головного мозга с начала 90-х годов прошлого века



*Рис. 138. МРТ изображение головного мозга*

### Интересно знать!

#### **Из истории развития магнитно-резонансной томографии (МРТ).**

- В 1973 г. ученый из США Пол Лотербур изобрел Магнитно-резонансный томограф.
- В 1977 г. в течение почти 5 часов было проведено первое сканирование человеческого тела.
- В 1978 г. были проведены первые сканы пациента с раком груди.
- В 1980 г. было получено изображение организма человека, на съемку которого потратили около 5 минут.
- В 1986 г. длительность отображения было уменьшена до 5 с без потери качества изображений.
- В 1988 г. Думоуллин усовершенствовал метод МРТ-ангиографии, который показывал отображение кровотока без применения рентгеноконтрастных средств.
- В 1989 г. был представлен метод планарной томографии, который применялся для визуализации участков головного мозга, ответственных за двигательную и мыслительную функции.

## IV. Мощность магнитного поля и факторы, влияющие на качество изображения

Современные томографы имеют мощные источники сильного магнитного поля. В качестве таких источников применяются электромагниты, магнитная индукция созданного ими поля достигает от 1 Тл до 3 Тл. Магнитная индукция поля постоянных магнитов достигает до 0,7 Тл.

На оборудовании МРТ ниже 1 Тл нельзя качественно сделать томографию внутренних органов и малого таза, так как мощность таких аппаратов слишком низкая. На низкопольных аппаратах МРТ, напряженностью менее 1 Тл, можно проводить только исследования головы, позвоночника и суставов с получением снимков обычного качества.

Постоянные магниты позволяют создать МРТ не только туннельного-закрытого типа, но и открытого типа, что позволяет проводить исследования в движении, в положении стоя, а также осуществлять доступ врачей к пациенту во время исследования. Появились аппараты для проведения исследований пациента в вертикальном положении или сидя.

Качество МРТ зависит не только от напряженности поля, но и от опыта специалиста, оценивающего полученное изображение и способного определить наличие патологии, от использования контраста, от параметров исследования. В качестве контраста при МРТ исследованиях используется гадолиний.

Своевременность и точность диагностики делает магнитно-резонансную томографию незаменимой и эффективной для назначения лечения, скорейшего выздоровления.



Рис. 139. Лев в МРТ



### Возьмите на заметку

В клинической практике для аппаратов применяют следующую градацию аппаратов по мощности: низкопольные от 0,1 Тл до 0,5 Тл; среднепольные от 0,5 Тл до 0,9 Тл; высокопольные выше 1 Тл; сверх высокопольные 3,0 Тл и 7,0 Тл.



### Задание

Используя сеть Интернет, выясните, какие медицинские учреждения вашего региона оснащены аппаратами КТ и МРТ.



### Интересно знать!

МРТ для животных является сложной процедурой, так как это связано с необходимостью применения общей анестезии (рис. 139). Одно исследование у человека занимает около 15 мин, у животного – 40–60 мин. Количество ветеринарных томографов и врачей, способных расшифровать МРтограммы, пока очень невелико.

## V. Компьютерная томография и МРТ в Казахстане

Компьютерная томография используется в ряде медицинских центров Казахстана. Самым современным оборудованием оснащен Центр Компьютерной и Магнитно-резонансной томографии г. Алматы. Установленный в клинике магнито-резонансный (МР) томограф MAGNETOM Essenza фирмы Siemens на сегодняшний день является единственным аппаратом в Казахстане. Магнитно-резонансная томография (МРТ) позволяет получить изображения органов и систем с высокой разрешающей способностью. Наиболее распространенные типы МРТ: головного мозга, позвоночника, спинного мозга, суставов, органов малого таза, брюшной полости. В Центре для диагностики используют также многосрезовый компьютерный томограф SOMATOM Emotion 16 фирмы Siemens. Компьютерная томография позволяет диагностировать болезни на ранних стадиях. МСКТ получила широкое применение во всех областях медицины: травматологии, хирургии, онкологии, неврологии, пульмонологии и стоматологии.

### ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Оцените ориентировочные значения силы тока и мощности, необходимые для создания поля с индукцией  $B = 0,1$  Тл в МРТ. Для простоты представьте, что магнит выполнен в виде соленоида диаметром  $D = 1$  м и длиной  $L = 1,5$  м. Примите сечение медного провода равным  $S = 100$  мм<sup>2</sup>, а допустимую плотность тока в сечении  $j = 2$  А/мм<sup>2</sup>, удельное сопротивление меди равно  $\rho = 0,056$  Ом · мм<sup>2</sup>/м.

Дано:	СИ	Решение:
$B = 0,1$ Тл		Выразим силу тока через плотность тока: $I = jS$ . (1)
$D = 1$ м		Мощность тока равна: $P = I^2R$ . (2)
$L = 1,5$ м		Сопротивление проводника: $R = \frac{\rho l}{S}$ . (3)
$S = 100$ мм <sup>2</sup>	$10^{-4}$ м <sup>2</sup>	Длина провода равна произведению длины окружности соленоида на число витков:
$j = 2$ А/мм <sup>2</sup>	$2 \cdot 10^6$ А/м <sup>2</sup>	
$\rho = 0,056$ Ом · мм <sup>2</sup> /м	$5,6 \cdot 10^{-8}$ Ом · м	$I = \pi D \cdot N$ . (4)
$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Н/А <sup>2</sup>		
$I - ?$		
$P - ?$		

Число витков определим из формулы магнитной индукции соленоида:  $B = \frac{\mu_0 IN}{L}$ ,

$$\text{откуда } N = \frac{BL}{\mu_0 I} \cdot (5)$$

$$\text{Подставим (3) и (4) в (2), получим: } P = \frac{I \rho \pi D B L}{\mu_0 S} \cdot (6)$$

Вычислим силу тока и мощность:

$$I = 2 \cdot 10^6 \text{ А/м}^2 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 = 200 \text{ А};$$

$$P = \frac{200 \text{ А} \cdot 5,6 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м} \cdot \pi \cdot 1 \text{ м} \cdot 0,1 \text{ Тл} \cdot 1,5 \text{ м}}{4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Н/А}^2 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2} = 42000 \text{ Вт} = 42 \text{ кВт.}$$

**Ответ:**  $I = 200$  А;  $P = 42$  кВт.

## Контрольные вопросы

1. Назовите виды диагностики с использованием рентгеновского излучения. В чем их различие?
2. Объясните принцип работы томографа. Какие виды аппаратов для КТ существуют?
3. В чем преимущество КТ?
4. В чем различие КТ от МРТ?
5. Какие параметры помимо индукции магнитного поля, влияют на качество МРТ?
6. Почему МРТ считают безопасным методом диагностики?



## Упражнение

22

1. Определите количество витков на 1 см длины соленоида, создающего магнитное поле индукцией 0,2 Тл при силе тока в нем 100 А. Магнитная постоянная  $\mu_0 = 12,56 \cdot 10^{-7}$  Н/А<sup>2</sup>.
2. Минимальное значение магнитной индукции магнитного поля МРТ равен 0,1 Тл, максимальное значение магнитной индукции магнитного поля Земли 65 мкТл.
  - a) Во сколько раз магнитное поле МРТ больше магнитного поля Земли?
  - b) Выясните, как длительное действие сильного магнитного поля действует на организм человека?

## Творческое задание

Подготовьте сообщение по темам (на выбор):

1. Современные модели томографов.
2. Преимущества и опасности МРТ как метода диагностики.
3. Магнитная система МРТ из сверхпроводников.

## § 23. Лазеры. Голография

### Ожидаемый результат

Прочитав параграф, вы сможете:

- объяснять принцип действия и применение лазера;
- обсуждать перспективы развития голографии.



### Возьмите на заметку

В 1916 г. А. Эйнштейн предсказал, что излучение может быть вынужденным или индуцированным с высокой степенью когерентности.

Слово «лазер» – аббревиатура слов английской фразы «Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation» – усиление света вынужденным излучением.

### I. Вынужденное излучение

В 1939 году советский физик В.А. Фабрикант предложил метод усиления света на основе использования явления вынужденного излучения. У атомов некоторых веществ имеются возбужденные стационарные состояния, в которых атомы могут находиться до нескольких секунд, эти состояния называют *метастабильными*. Примером такого вещества является рубин – оксид алюминия  $Al_2O_3$ , в котором часть атомов алюминия замещена ионами хрома, имеющими метастабильное состояние. При облучении кристалла ионы хрома возбуждаются и переходят в стационарное состояние с энергией  $E_3$  (рис. 140 а, б). Спустя малый промежуток времени, порядка  $10^{-8}$  с, большинство возбужденных атомов самопроизвольно переходит на метастабильный уровень  $E_2$ , в котором они могут находиться в течение времени, превышающем «время жизни» в возбужденном состоянии в 100 000 раз (рис. 140 в). Таким образом, происходит перенаселенность метастабильного уровня, такой процесс называют *накачкой* (рис. 141 а).

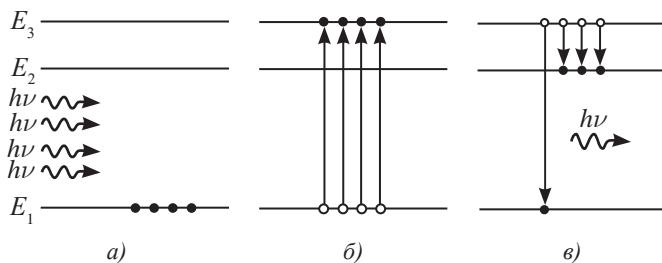


Рис. 140. Переходы атома в возбужденное состояние



### Ответьте на вопросы

1. Почему лазерный пучок света обладает мощностью, значительно превышающей мощность других источников света?
2. Используя рисунки 141 а, б поясните, почему лазерный луч представляет собой пучок когерентного света, в котором частота, фаза и направление движения у всех фотонов одинаковы?

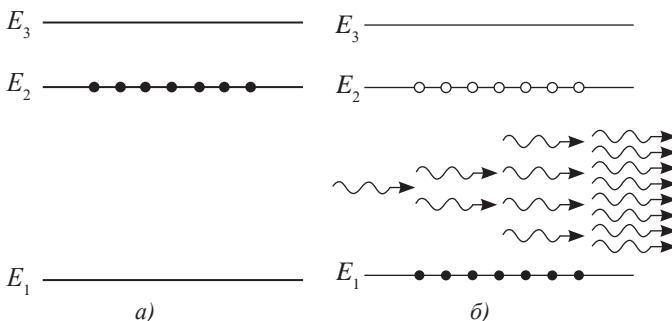


Рис. 141. а) Перенаселенность метастабильного уровня; б) Индуцированное излучение

Переход с уровня  $E_3$  на уровень  $E_2$  не сопровождается излучением; избыток энергии передается кристаллической решетке, в результате чего повышается температура кристалла. Переход с уровня  $E_2$  на уровень  $E_1$  является вынужденным или индуцированным. При освещении рубинового стержня через один его торец слабым пучком света фотоны, энергия которых равна разности энергий иона хрома в метастабильном и основном состояниях, вызывают переходы этих ионов из состояния  $E_2$  в состояние  $E_1$  и испускание фотонов такой же энергии:  $h\nu = E_2 - E_1$ .

## II. Свойства лазерного излучения

Лазерное излучение обладает такими свойствами, как высокая монохроматичность, когерентность, узкая направленность, возможна высокая мощность.

Мощность лазерного излучения в непрерывном режиме может быть порядка  $10^5$ – $10^6$  Вт, в импульсном режиме –  $10^{13}$  Вт, при этом удается достичь интенсивностей порядка  $10^{16}$  Вт/см<sup>2</sup>. Мощности могут быть сконцентрированы в очень узких спектральных и временных интервалах. Длительность импульса излучения в лазерах составляет от  $10^{-12}$  до  $10^{-13}$  с. Высокая монохроматичность и когерентность лазерного излучения определяет *узкую направленность луча*: возможна его фокусировка в пятно малых размеров, порядка длины волны. Благодаря узкой направленности лазерные источники света обладают *очень высокой яркостью*. Интенсивность лазерного излучения может превышать интенсивность солнечного излучения в десятки тысяч раз. Перечисленные свойства делают лазеры уникальными источниками света и определяют возможность их многочисленных применений.

## III. Типы лазеров и их особенности

**Лазеры – это генераторы и усилители когерентного излучения в оптическом диапазоне, действие которых основано на индуцированном излучении квантовых систем: атомов, ионов, молекул.**

Существует большое разнообразие лазеров, которые можно классифицировать по материалу рабочего тела и способу закачки энергии. Перечислим несколько типов лазеров.

**Твердотельные лазеры.** Первой твердой активной средой стал рубин – кристалл корунда  $Al_2O_3$  с небольшой примесью ионов хрома  $Cr^{+++}$ .

Широко применяется также стекло с примесью неодима  $Nd$ , алюмо-иттриевый гранат  $Y_2Al_5O_{12}$  с примесью хрома, неодима и редкоземельных элементов в виде стержней. Накачкой твердотельных лазеров обычно служит импульсная лампа, вспыхивающая примерно на  $10^{-3}$  с.



### Интересно знать!

На установке «Геркулес» центра ультрабыстрых оптических явлений Мичиганского университета США достигнута рекордная в мире интенсивность  $2 \cdot 10^{22}$  Вт/см<sup>2</sup>.



### Задание

Сравните интенсивность установки «Геркулес» с интенсивностью излучения Солнца 63 МВт/м<sup>2</sup>.



### Интересно знать!

Лазеры в природе. Во Вселенной обнаружены лазеры естественного происхождения. Активной средой являются огромные межзвездные облака конденсированных газов. Накачкой служат космические излучения, свет близких звезд. Из-за гигантской протяженности активной среды вынужденное электромагнитное излучение в диапазоне длин волн от нескольких сантиметров до микрона возникает в них при однократном прохождении волны.

*Газовые лазеры.* Активной средой газовых лазеров служат газы низкого давления, от сотых долей до нескольких миллиметров ртутного столба, заполняющие стеклянную трубку с впаянными электродами. Накачкой газовых лазеров служит электрический разряд, питаемый высокочастотным генератором. Генерация излучения происходит так же, как и в твердотельных лазерах, но газовые лазеры дают, как правило, непрерывное излучение. Поскольку плотность газов очень мала, длина трубы с активной средой должна быть достаточно велика, чтобы массы активного вещества хватило для получения излучения высокой интенсивности.

*Жидкостные лазеры или лазеры на красителях.* Активной средой этих лазеров служат различные органические соединения в виде растворов. Генерируют довольно мощное излучение, до 20 Вт, при небольших размерах кюветы с активным веществом. Работают они как в импульсном, так и в непрерывном режиме, накачку осуществляют импульсными лампами. Возбужденные уровни молекул красителей имеют большую ширину. Меняя кюветы с растворами красителей, излучение лазера можно перестраивать в очень широком диапазоне.

*Полупроводниковые лазеры.* Наиболее распространенный лазерный полупроводниковый материал – арсенид галлия *GaAs*. Накачка полупроводникового лазера осуществляется постоянным электрическим током, при этом от 50 % до почти 100 % его энергии превращается в излучение. Полупроводниковые лазеры могут давать мощные лазерные лучи.



### Возьмите на заметку

#### Устройство рубинового лазера

Рубиновый лазер (рис. 142) состоит из кристалла рубина (1) с небольшой примесью хрома, которому придают форму цилиндра. Торцы цилиндра (3) и (4) строго параллельны друг другу, на них нанесен отражающий зеркальный слой, причем один из этих слоев полупрозрачен: около 8 % света проходит через него, а 92 % отражается. Рубиновый стержень помещен внутри импульсной спиральной газоразрядной лампы (2), являющейся источником возбуждающего излучения, или так называемой лампы накачки. Вспышка света в лампе создается батареей конденсаторов (5).

Рубиновый лазер работает в импульсном режиме.

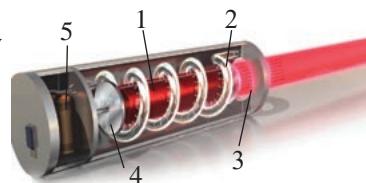


Рис. 142. Устройство рубинового лазера

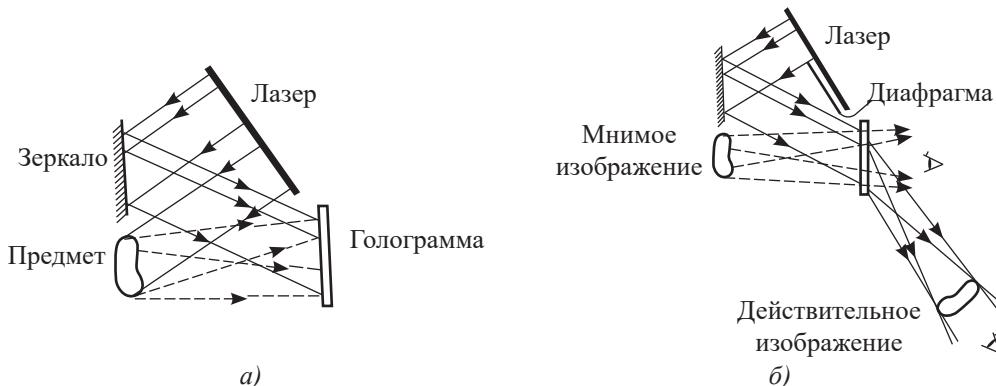
## IV. Физические принципы голограммы

Голограмма (от древнегреч. «holos» – весь и «grapho» – пишу) – фотографический метод записи, воспроизведения и преобразования волновых полей при помощи когерентного излучения.

Голографический метод является двухэтапным: запись голограммы основывается на явлении *интерференции световых волн*, а считывание на явлении *дифракции* волн.

Объект, голограмму которого нужно получить, освещают светом от лазера (рис. 143 а). Рассеянная объектом световая волна или *предметный пучок света*, попадает на фотопластинку. На эту же пластинку падает *опорный пучок* – часть света того же лазера, отраженная от зеркала. На *фотопластинке – голограмме* после проявления и фиксации сохраняется информация, полученная в результате наложения двух пучков света, как амплитудная, так и фазовая. Внешне голограмма не отличается от равномерно засвеченной фотопластинки.

Для того чтобы восстановить волну, рассеянную предметом, объект убирают, а голограмму помещают на то же место, где она находилась при съемке (рис. 143 б). Если включить лазер, то наблюдатель увидит через голограмму, как через окошко, мнимое объемное изображение объекта, которое не отличается от самого предмета. В изображении можно рассмотреть ближние и дальние части предмета.



**Рис. 143.** Этапы получения голограммического изображения: а) запись; б) считывание

Кроме мнимого изображения предмета, существует и действительное изображение. Оно располагается от мнимого изображения по другую сторону голограммы. Если поместить в плоскость, где образуется действительное изображение, фотопластинку или матовое стекло, то можно получить его двухмерную проекцию. Действительное изображение обладает рядом особых свойств. Самое интересное из них – *псевдоскопичность*, оно заключается в том, что действительное изображение имеет рельеф, обратный исходному предмету: выпуклые места заменены вогнутыми, изображение «вывернуто наизнанку».

## V. Основные свойства голограммы

- 1) Любой фрагмент голограммы хранит всю информацию об объекте. Если разрезать пластинку на куски, то каждый из них вновь окажется голограммой всего объекта. Это объясняется тем, что в любой точке пространства, электромагнитное поле является суммой излучений, приходящих от всех видимых точек объекта. Голограмма ведет себя не как картина или обычная фотография, а как окно, через которое мы смотрим на объект.
- 2) Если для записи и восстановления голограмм использовать расходящиеся волновые фронты, то можно получить увеличенное или уменьшенное изображение объекта.
- 3) На одной фотопластинке можно зарегистрировать последовательно несколько объектов, например, до 50 страниц текста. Все они восстанавливаются одновременно. Если их нужно разделить при воспроизведении, то следует слегка изменять направление опорного луча для каждого из объектов.



### Возьмите на заметку

В 1947 г. английским физиком Д. Габором был введен термин «голограмма», Габор дал идею получения объемного изображения и пояснил метод ее осуществления. Изображения были плохого качества ввиду отсутствия источника когерентных волн.

В 1962 г. американскими физиками Э. Лейтом и Ю. Упатником были получены первые лазерные голограммы.

## VI. Применение голограмм

Методы голограммии: запись голограммы в трехмерных средах, цветное и панорамное голографирование находят все большее развитие и применение. Она может применяться в ЭВМ с голографической памятью, голографическом электронном микроскопе, голографическом кино и телевидении, голографической интерферометрии. Трехмерные свойства восстановленных с помощью голограмм изображений могут быть использованы в рекламе, лекционных демонстрациях, при конструировании художественных панорам, создании копий произведений искусств, регистрации голографических портретов. Возможность голографического кодирования информации может быть широко использована в криминалистике.

В ряде технологических процессов можно использовать созданные голограммами действительные изображения. При просвечивании голограмм мощным лазером можно наносить на обрабатываемые поверхности сложные узоры. Голограммы применяются для бесконтактного нанесения микроэлектронных схем.

### Обратите внимание!

#### Голографическое хранение данных

Идея голографических носителей заключается в записи информации с помощью лазерного луча на трехмерную подложку. Новая технология позволяет вести запись не по поверхности, а по объему диска. Вместо нескольких гигабайт, такая подложка сохраняет терабайты данных на носителе, который не больше, чем компакт-диск. Голографические данные могут считываться на очень высоких скоростях.

#### Достиныства голографической записи:

- высокая плотность записи и большая скорость чтения;
- параллельная запись информации (не по одному биту, а целыми страницами);
- высокая точность воспроизведения страницы;
- низкий уровень шума при восстановлении данных;
- неразрушающее чтение;
- длительный срок хранения данных – 30–50 и более лет.

## ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Лазер, работающий в импульсном режиме, потребляет мощность  $P = 1 \text{ кВт}$ . Длительность одного импульса  $\tau = 5 \text{ мкс}$ , а число импульсов за  $t = 1 \text{ с}$  равно  $N = 200$ . Определите излучаемую энергию и мощность одного импульса, если на излучение идет 0,1 % потребляемой мощности.

Дано:	СИ	Решение:
$P = 1 \text{ кВт}$	$10^3 \text{ Вт}$	Коэффициент полезного действия лазера определим как отношение энергии излучения к энергии, потребляемой лазером: $\eta = \frac{E_{\text{изл}}}{E}$ . (1)
$\tau = 5 \text{ мкс}$	$5 \cdot 10^{-6} \text{ с}$	
$t = 1 \text{ с}$		
$N = 200$		
$\eta = 0,1 \%$	0,001	Потребляемая энергия за 1 секунду равна: $E = P \cdot t$ . (2)
$E_1 - ?$		Энергия излучения определяется мощностью одного импульса, его продолжительностью и числом импульсов за время $t$ : $E_{\text{изл}} = P_1 \cdot \tau \cdot N$ . (3)
$P_1 - ?$		

Подставим (2) и (3) в (1), получим:

$$\eta = \frac{P_1 \cdot \tau \cdot N}{P \cdot t}, \text{ откуда } P_1 = \frac{\eta \cdot P \cdot t}{\tau \cdot N}. \quad (4)$$

Энергия одного импульса равна:  $E_1 = P_1 \cdot \tau$ . (5)

Вычислим энергию и мощность одного импульса:

$$P_1 = \frac{0,001 \cdot 10^3 \text{ Вт} \cdot 1 \text{ с}}{5 \cdot 10^{-6} \text{ с} \cdot 200} = 1000 \text{ Вт} = 1 \text{ кВт};$$

$$E_1 = 1000 \text{ Вт} \cdot 5 \cdot 10^{-6} \text{ с} = 5 \cdot 10^{-3} \text{ Дж} = 5 \text{ мДж}.$$

**Ответ:**  $P_1 = 1 \text{ кВт}$ ;  $E_1 = 5 \text{ мДж}$ .

### Контрольные вопросы

- Что называют лазером? Поясните метод усиления света в лазерах.
- Какими свойствами обладает лазерный луч?
- Назовите типы лазеров. По какому принципу классифицируют лазеры?
- Перечислите основные части рубинового лазера.
- Что называют голограммой?
- Поясните метод записи и считывания в голограммии.
- Какими свойствами обладает голограмма?



### Упражнение

23

- Гелий – неоновый газовый лазер, работающий в непрерывном режиме, дает излучение монохроматического света с длиной волны 630 нм, развивая мощность 40 мВт. Сколько фотонов излучает лазер за 1 с?
- Лазер мощностью  $P = 2 \text{ кВт}$  в течение  $t = 2 \text{ с}$  излучает 300 импульсов света. Длительность каждого импульса  $\tau = 4 \text{ мкс}$ . На излучение идет  $\eta = 0,3 \%$  потребляемой энергии. Определить мощность  $P_1$  и энергию  $E_1$  одного импульса.
- Лазер, потребляя мощность 100 Вт, излучает свет с длиной волны 600 нм. Сколько квантов в секунду излучает лазер, если его КПД равен  $\eta = 0,1 \%$ ?

### Творческое задание

Подготовьте сообщение по темам (на выбор):

- Практическое применение лазеров.
- Применение голограммы в криминалистике.
- Голограммическое телевидение, перспективы развития.

## Модели атома

Год	Автор модели	Модель
1903 г.	Д. Томсон	Модель «Пудинг с изюмом» Отрицательно заряженные электроны расположены в облаке положительного заряда, суммарный заряд электронов равен заряду положительно заряженного облака.
1911 г.	Э. Резерфорд	Модель «Планетарная» Весь положительный заряд и практически вся масса атома сосредоточены в ядре. Электроны врачаются вокруг ядра.
1913 г.	Н. Бор	Модель «Планетарная с устойчивыми стационарными орбитами». Весь положительный заряд и практически вся масса атома сосредоточены в ядре. Электроны врачаются вокруг ядра по стационарным орбитам. При переходе электрона со стационарной орбиты с большим квантовым числом на орбиту с меньшим квантовым числом излучается квант энергии.



### Задание 1

- Используя материалы главы и дополнительную литературу приведите примеры физических явлений, который легко объяснить на основе моделей атома Д. Томсона, Э. Резерфорда и Н. Бора.
- Какие устройства созданы на основе знаний о модели атома Н. Бора?



### Задание 2

Составьте сравнительную таблицу различных видов лазеров по физическим характеристикам. Укажите область их применения.



### Задание 3

Составьте цепь с лампой, управляемую фотоэлементом.

## Итоги главы 7

Взаимодействие излучения с веществом		
$\text{Фотоэффект}$ $h\nu = A_{\text{вых}} + \frac{mv_{\text{max}}^2}{2}; eU_3 = \frac{mv_m^2}{2}$		
Волновые свойства фотонов и элементарных частиц		Частота рентгеновского излучения
$m = \frac{E}{c^2} = \frac{h\nu}{c^2} = \frac{h}{c\lambda};$ $p = mc = \frac{E}{c} = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda};$ $E = h\nu = h\frac{c}{\lambda} = \hbar\omega$	Длина волны де Броиля $\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv}$	$eU = \frac{m_e v_{\text{max}}^2}{2} = h\nu_{\text{max}}$

Обозначение физических величин, единицы измерения в СИ

Обозна-чение	Физическая величина	СИ	Обозна-чение	Физическая величина	СИ
$h$	Постоянная Планка $6,626 \cdot 10^{-34}$ Дж · с	Дж · с	$\lambda$	Длина волны рассеянного света	м
$A_{\text{вых}}$	Работа выхода	Дж	$\lambda'$	Длина волны падающего света	м
$m$	Масса частицы или электрона $9,1 \cdot 10^{-31}$ кг	кг	$\lambda_k$	Комптоновская длина волны $2,43 \cdot 10^{-12}$ м	м
$v_{\text{max}}$	Скорость фотоэлектрона	м/с	$\theta$	Угол рассеяния фотона	рад, °
$e$	Заряд электрона $1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл	Кл	$E$	Энергия фотона	Дж
$U_3$	Запирающее напряжение	В	$p$	Импульс фотона	кг · м/с
$c$	Скорость света $3 \cdot 10^8$ м/с	м/с	$\nu$	Частота фотона	Гц

### Глоссарий

**Голография** – фотографический метод записи, воспроизведения и преобразования волновых полей при помощи когерентного излучения.

**Красная граница фотоэффекта** – минимальная частота падающего света  $\nu_0$ , при которой еще возможен фотоэффект.

**Лазеры** – генераторы и усилители когерентного излучения в оптическом диапазоне, действие которых основано на индуцированном излучении квантовых систем: атомов, ионов, молекул.

**Линейчатые спектры** – оптические спектры испускания и поглощения атомов, состоящие из отдельных спектральных линий.

**Спектрограф** – прибор для разложения сложного света и фотографирование спектров.

**Спектроскоп** – прибор для разложения сложного света и наблюдения спектров.

**Фотоэффект** – испускание электронов веществом под действием света или любого другого электромагнитного излучения.

**Эффект Комптона** – рассеяние электромагнитного излучения на свободном электроне, сопровождающееся уменьшением частоты излучения.

## ГЛАВА 8

# ФИЗИКА АТОМНОГО ЯДРА

В связи с открытием естественной радиоактивности Беккерелем и оценкой размеров атомного ядра Резерфордом начались исследования атомных ядер, которые уже с начала XX века привели к ряду открытий. В результате искусственных ядерных реакций были обнаружены частицы ядер: протоны и нейтроны, получены радиоактивные изотопы большинства химических элементов, обнаружены элементарные частицы с различными свойствами. Исследование ядер и внутриядерных процессов привело к практическому использованию ядерной энергии; искусственные радиоизотопы получили широкое применение в различных отраслях деятельности человека.

### Изучив главу, вы сможете:

- объяснять явления радиоактивного распада ( $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ) и термин периода полураспада;
- уметь рассчитывать период полураспада графическим методом;
- объяснять процессы распада и синтеза ядра;
- объяснять природу ионизирующего эффекта и проникающей способности радиоактивных излучений;
- описывать обработку, применение, хранение и технику безопасности радиоактивных материалов;
- описывать устройство и принцип работы ядерных реакторов;
- обсуждать перспективы развития ядерной энергетики.

## § 24. Естественная радиоактивность. Закон радиоактивного распада. Нуклонная модель ядра. Изотопы. Энергия связи нуклонов в ядре

### Ожидаемый результат

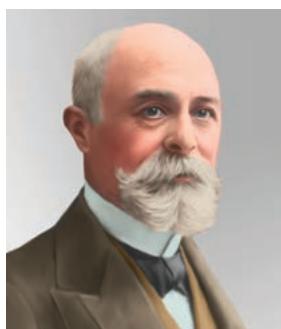
Прочитав параграф, вы сможете:

- объяснять явления радиоактивного распада ( $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ) и термин периода полураспада.

### I. Естественная радиоактивность

Естественная радиоактивность была открыта в 1896 г. французским физиком А.А. Беккерелем, он обнаружил, что соли урана испускают невидимые лучи, способные вызывать холодное свечение – люминесценцию, проникать сквозь слои непрозрачных веществ, ионизировать газы, вызывать почернение фотографической пластиинки. Дальнейшие исследования, проведенные П. Кюри и М. Склодовской-Кюри,

показали, что естественная радиоактивность свойственна не только урану, но и многим тяжелым химическим элементам, в частности, актинию, торию, полонию и радию. Два последних элемента были открыты в 1898 году Пьером и Марией Кюри. Все эти элементы были названы радиоактивными, а испускаемые ими лучи – радиоактивными лучами.



**Антуан Анри Беккерель** (1852–1908) – французский физик, один из первооткрывателей радиоактивности, исследователь спонтанного испускания ядерного излучения. Лауреат Нобелевской премии по физике за 1903 г.



**Мария Склодовская-Кюри** (1867–1934) – польский ученый-экспериментатор, общественный деятель. Дважды лауреат Нобелевской премии: по физике и по химии. Основала Институты Кюри в Париже и в Варшаве.



**Пьер Кюри** (1859–1906) – французский ученый-физик, один из первых исследователей радиоактивности, член Французской Академии наук, лауреат Нобелевской премии по физике за 1903 г.

**Естественная радиоактивность – это самопроизвольное превращение одних ядер в другие, которое сопровождается испусканием радиоактивного излучения.**

## II. Свойства радиоактивных лучей

### Свойства $\alpha$ -лучей

В результате опытов установлено, что  $\alpha$ -частицы вылетают из ядер радиоактивных элементов со скоростями от 14 000 до 20 000 км/с, несут два элементарных положительных заряда  $+2e$ , и обладают массовым числом 4, они представляют собой поток атомных ядер гелия  ${}^4He$ . Путь, пройденный  $\alpha$ -частицей в веществе до остановки, называют *проникающей способностью*, а число пар ионов, созданных на всем пути – *ионизирующей способностью*. Чем больше ионизирующая способность частицы, тем меньше ее пробег. Пробег  $\alpha$ -частицы в воздухе при нормальном давлении составляет от 3 до 9 см, а ионизирующая способность от 100 000 до 250 000 пар ионов.  $\alpha$ -лучи полностью поглощаются обычным листом бумаги.

### Свойства $\beta$ -лучей

$\beta$ -лучи представляют собой поток быстрых электронов, которые называют  $\beta$ -частицами, их масса в 7350 раз меньше массы  $\alpha$ -частицы. Средняя скорость  $\beta$ -частиц составляет около 160 000 км/с. В отличие от  $\alpha$ -излучения, в  $\beta$ -излучении присутствуют электроны со всем возможными значениями энергии. Ядра одного и того же радиоактивного элемента выбрасывают  $\beta$ -частицы как со скоростью, близкой к нулю, так и со скоростью, близкой к скорости света. Пробег электрона высокой энергии достигает в воздухе 40 м, в пластине алюминия – 2 см.

### Свойства $\gamma$ -лучей

$\gamma$ -лучи представляют собой поток фотонов, имеющих очень высокую частоту, порядка  $10^{20}$  Гц, что соответствует очень короткой длине волны, порядка  $10^{-12}$  м. Они не отклоняются электрическими и магнитными полями, распространяются со скоростью света. Ионизирующая способность  $\gamma$ -лучей невелика; в воздухе она имеет порядка 100 пар ионов.  $\gamma$ -лучи являются одним из самых проникающих излучений. Наиболее жесткие  $\gamma$ -лучи проходят через слой свинца толщиной 5 см или через слой воздуха толщиной в несколько сотен метров; тело человека они пронизывают насквозь.

### Ответьте на вопросы

1. Является ли  $\beta$ -излучение потоком орбитальных электронов?
2. Что происходит с ядром радиоактивного элемента при  $\alpha$ -, и  $\beta$ -распадах?
3. Почему частицы с малой проникающей способностью обладают высокой ионизирующей способностью?

### Вспомните!

По своему составу радиоактивное излучение является сложным: в него входят три различных вида излучения, получивших название  $\alpha$ -,  $\beta$ - и  $\gamma$ -лучей. На рисунке 144 изображено разделение радиоактивного излучения в магнитном поле на три составляющие.

### Задание 1

1. Сформулируйте правило левой руки.
2. По направлению отклонения частиц в магнитном поле определите, каким по знаку зарядом обладают  $\alpha$ - и  $\beta$ -лучи (рис. 144).

Фотографическая пластина

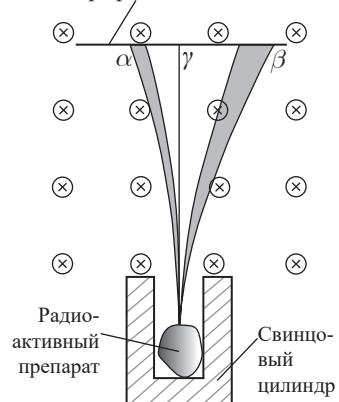


Рис. 144.  $\alpha$ -,  $\beta$ - и  $\gamma$ -лучи в магнитном поле

### Задание 2

Сравните проникающую и ионизирующую способности  $\alpha$ -,  $\beta$ - и  $\gamma$ -лучей.



## Вспомните!

### Правила смещения Содди

$\alpha$ -распад	Электронный $\beta$ -распад	Позитронный $\beta$ -распад
<p>При <math>\alpha</math>-распаде вновь полученный элемент смещается в периодической таблице Менделеева на два номера влево с уменьшением массового числа на четыре единицы:</p> ${}_z^A X \rightarrow {}_{z-2}^{A-4} Y + {}_2^4 He.$ <p>Например:</p> ${}_{84}^{210} Po \rightarrow {}_{82}^{206} Pb + {}_2^4 He.$	<p>При электронном <math>\beta</math>-распаде вновь полученный элемент смещается в периодической таблице Менделеева на один номер к концу таблицы без изменения массового числа:</p> ${}_z^A X \rightarrow {}_{z+1}^{A} Y + {}_{-1}^0 e + {}_0^0 \bar{\nu}.$ <p>Например:</p> ${}_{83}^{210} Bi \rightarrow {}_{84}^{210} Po + {}_{-1}^0 e + {}_0^0 \bar{\nu}.$	<p>Позитронный <math>\beta</math>-распад – это реакция, при которой образуется ядро с порядковым номером на единицу меньше, чем у исходного ядра, элемент смещается к началу таблицы Менделеева на одну клетку:</p> ${}_z^A X \rightarrow {}_{z-1}^{A} Y + {}_{+1}^0 e + {}_0^0 \nu.$ <p>Например: <math>{}_{6}^{11} C \rightarrow {}_{5}^{11} B + {}_{+1}^0 e + {}_0^0 \nu</math></p> <p>Позитронный <math>\beta</math>-распад происходит в результате превращения протона в нейтрон с испусканием позитрона и нейтрино:</p> ${}_1^1 p \rightarrow {}_0^1 n + {}_{+1}^0 e + {}_0^0 \nu.$

### III. Закон радиоактивного распада

Радиоактивный распад ведет к постепенному уменьшению числа атомов радиоактивного элемента. Уменьшение числа атомов  $dN$ , распадающихся за малый промежуток времени  $t$ , пропорционально времени и общему числу атомов  $N$  радиоактивного элемента:

$$dN = -\lambda N \cdot dt, \quad (1)$$

где  $\lambda$  – коэффициент пропорциональности, который назван постоянной распада данного элемента – это величина, которая характеризует вероятность радиоактивного распада за единицу времени. Знак «минус» указывает на уменьшение числа атомов радиоактивного элемента со временем. Разделим переменные в записанном выражении:

$$\frac{dN}{N} = -\lambda dt. \quad (2)$$

Интегрируя уравнение (2) в пределах изменения времени от  $t = 0$  до  $t$  и числа частиц от  $N_0$  до  $N$ , получим:

$$\ln N - \ln N_0 = -\lambda t,$$

откуда

$$N = N_0 e^{-\lambda t}. \quad (3)$$



## Запомните!

В процессах  $\alpha$ - и  $\beta$ -распадов выполняются законы сохранения массы, заряда, энергии.

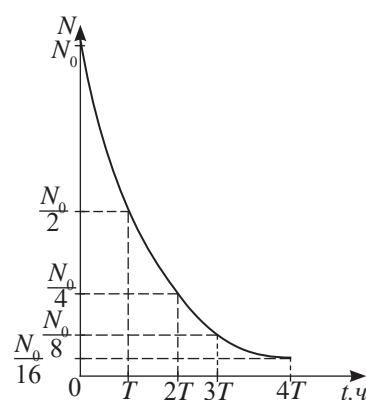


Рис. 145. График закона радиоактивного распада

Полученное выражение является законом радиоактивного распада, в полученном соотношении  $N_0$  – число атомов элемента в начальный момент времени;  $N$  – число атомов этого же элемента, оставшееся по истечении времени  $t$ . Графически закон радиоактивного распада представлен на *рисунке 145*.

#### **IV. Период полураспада. Среднее время жизни радиоактивного атома**

*Периодом полураспада  $T$  называется время, в течение которого количество атомов исходного элемента уменьшается вдвое.*

Из (3) следует, что при  $t = T$  выполняется равенство:

$$e^{-\lambda T} = \frac{1}{2},$$

откуда связь периода полураспада  $T$  с постоянной распада  $\lambda$  имеет вид:

$$T = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0,693}{\lambda}. \quad (4)$$

Выразим постоянную распада  $\lambda$  из соотношения (4) и подставим ее в формулу (3), получим:

$$N = N_0 e^{-\frac{\ln 2}{T} t} = N_0 \cdot 2^{-\frac{t}{T}}. \quad (5)$$

Формула (5) позволяет определить число не распавшихся атомов радиоактивного элемента по значению периода полураспада.

Значения периода полураспада  $T$  у различных радиоактивных элементов различны. Наряду с такими «долгоживущими» радиоактивными элементами, как уран  $^{238}_{92}U$  с периодом полураспада  $T = 4,5 \cdot 10^9$  лет, встречаются и «короткоживущие» элементы. Например, период полураспада полония  $^{214}_{84}Po$  равен  $T = 103$  годам. Период полураспада радона  $^{222}_{86}Rn$  равен 3,8 суток.

Закон имеет случайный характер, нельзя предсказать, когда и какой именно атом распадется. Можно говорить только о вероятности распада каждого атома за определенный промежуток времени.

#### **V. Последствия ядерных испытаний на Семипалатинском ядерном полигоне (СЯП)**

Начиная с 1949 г. на Семипалатинском полигоне было проведено 468 ядерных испытаний. Указом первого президента Республики Казахстан Н.А. Назарбаевым полигон был закрыт 29 августа 1991 г, оставив загрязненные зоны на территории полигона и в близлежащих регионах. Прекращение испытаний ядерных и водородных взрывных устройств вовсе не означает, что разрушающие процессы в окружающей среде прекратились. Ядерный полигон жив, и проживает еще не меньше, чем миллион лет, учитывая, что период полураспада плутония 25 тысяч лет. В первых ядерных и водородных взрывных устройствах срабатывало 30–40 % массы заряда. Остальная часть заряда, а это в основном крайне опасный для всего живого изотоп плутоний, распылялась в окружающей среде. Территория в 300 квадратных километров считается потерянной. В реке Чаган обнаружены очень высокие концентрации трития, которые в 100 раз превышают нормативные значения для питьевой воды. Берега искусственного «атомного озера» из-за уровня излучения фактически приравниваются к радиоактивным отходам. Озеро образовалось в результате подрыва термоядерного боезаряда

мощностью в 140 килотонн в 1965 г. Подобным способом планировали строить водохранилища в засушливых регионах Советского Союза.

При этом Семипалатинский ядерный полигон – единственный из множества ядерных полигонов в мире, на котором живет население и использует его в сельскохозяйственных целях. Каждый двадцатый ребенок в регионе, подверженном радиации, рождается неполноценным. Кроме того, с начала 1990-х г. в 10–20 километрах от места проведения испытаний площадки «Балапан» разрабатывается угольный разрез «Каражыра», продукция которого поставляется на электростанции и предприятия России, Казахстана и Киргизии.

### Контрольные вопросы

1. Что называют естественной радиоактивностью?
2. Назовите основные свойства  $\alpha$ - ,  $\beta$ - и  $\gamma$ -лучей.
3. Сформулируйте закон радиоактивного распада.
4. Что называют периодом полураспада? Как период полураспада связан с постоянной распада?



### Упражнение

24

1. Какой изотоп образуется из тория  $^{232}_{90}Th$  после четырех  $\alpha$ -распадов и двух электронных  $\beta$ -распадов?
2. Сколько  $\alpha$ - и  $\beta$ -частиц выбрасывается при превращении ядра урана  $^{235}_{92}U$  в ядро висмута  $^{211}_{83}Bi$  ?
3. Некоторый радиоактивный изотоп имеет период полураспада  $T$ . Какая часть ядер распалась за время  $t = 3T$  ?

### Творческое задание

Подготовьте сообщения с ppt-презентацией по темам (на выбор):

1. История Семипалатинского полигона.
2. Движение «Невада – Семипалатинск».
3. Результаты исследований Национального ядерного центра Республики Казахстан последствий ядерных испытаний на территории бывшего полигона.

## § 25. Атомное ядро. Нуклонная модель ядра. Изотопы. Энергия связи нуклонов в ядре

### Ожидаемый результат

Прочитав параграф, вы сможете:

- вычислять энергию связи атомного ядра и объяснять графическую зависимость удельной энергии связи от массового числа ядра.



### Ответьте на вопросы

- Какую модель атома предложил Э. Резерфорд?
- Как Резерфорд распределил массу и заряд в атоме?



### Вспомните!

В 1919 г. Э. Резерфордом был обнаружен протон.

Заряд протона

$$p = |e| = 1,6022 \cdot 10^{-19} \text{ Кл},$$

масса покоя

$$m_p = 1,6726 \cdot 10^{-27} \text{ кг}.$$

В 1932 г. Дж. Чедвиком был открыт нейтрон.

Нейтрон не имеет заряда.

Масса нейтрона:

$$m_n = 1,6749 \cdot 10^{-27} \text{ кг}.$$



### Задание 1

- Выполните перевод масс протона и нейтрона из кг в а.е.м.
- Изобразите ядра атомов  $^{14}_7N$  и  $^{16}_8O$ .

### I. Атомное ядро. Нуклонная модель ядра

Согласно гипотезе, высказанной в 1932 г. советским ученым Д.Д. Иваненко и независимо от него немецким ученым В. Гейзенбергом, в состав всех атомных ядер входит два вида элементарных частиц: протоны –  $p$  и нейтроны –  $n$ ; общее название этих частиц – нуклоны.

Заряд атомного ядра любого химического элемента, выраженный в элементарных зарядах, равен его порядковому номеру  $Z$  в таблице Менделеева. Поскольку заряд ядра складывается из зарядов протонов, то число протонов  $N_p$  в атомном ядре элемента равно атомному номеру  $Z$  этого элемента:

$$N_p = Z. \quad (1)$$

Массу ядер и элементарных частиц с высокой точностью можно определить с помощью масс-спектрометра. В атомной физике массу принято выражать в а.е.м. – атомных единицах массы.

За атомную единицу массы принята  $\frac{1}{12}$  массы атома углерода  $^{12}C$ : 1 а.е.м. =  $1,66 \cdot 10^{-27}$  кг.

Следовательно,  $m_p = 1,00728$  а.е.м.,  
а  $m_n = 1,0086$  а.е.м., таким образом,

$$m_p \approx m_n \approx 1 \text{ а.е.м.} = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ кг}. \quad (2)$$

Поскольку масса ядра слагается из масс всех нуклонов, входящих в ядро, то сумма числа протонов  $N_p$  и нейронов  $N_n$  должна быть равна массовому числу атома, т.е. целому числу  $A$ , ближайшему к атомной массе, выраженной в а.е.м.:

$$N_p + N_n = A,$$

или, учитывая формулу (1):

$$Z + N_n = A. \quad (3)$$

Следовательно, число нейтронов в атомном ядре равно разности между массовым числом и атомным номером элемента:

$$N_n = A - Z. \quad (4)$$

Таким образом, по массовому числу и атомному номеру химического элемента можно непосредственно определять число протонов и число нейтронов, содержащихся в атомном ядре этого элемента.

Атомные ядра химических элементов принято обозначать символом  ${}_Z^AX$ , где  $X$  – символ элемента,  $A$  – массовое число,  $Z$  – порядковый номер.

Например, обозначение ядра атома кислорода –  $^{16}_8O$ , азота –  $^{14}_7N$ . На рисунке 146 схематически изображены ядра атомов гелия  $^4_2He$  и лития  $^7_3Li$ .

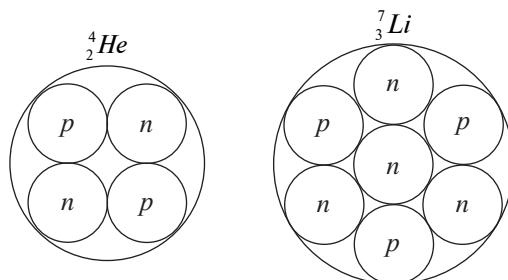


Рис. 146. Ядра атомов гелия  $^4_2He$  и лития  $^7_3Li$

### Задание 2

- Составьте таблицу изотопов для первых десяти элементов таблицы Менделеева. Источник информации подберите самостоятельно.
- У какого элемента число изотопов больше?

## II. Изотопы

Изотопы занимают одну и ту же клетку в таблице Менделеева.

Например, у водорода существует три изотопа: протий  $H$  – легкий водород, дейтерий  $D$  – тяжелый водород, тритий  $T$  – сверхтяжелый водород. Ядро протия  $^1H$  – протон, с массовым числом, равным единице  $A = 1$ , состоит из одного протона; ядро дейтерия  $^2H$  – дейтрон, с массовым числом, равным двум  $A = 2$ , состоит из протона и нейтрана; ядро трития  $^3H$  – тритон, с массовым числом, равным трем  $A = 3$ , состоит из протона и двух нейтронов. В соединении с кислородом дейтерий образует тяжелую воду  $D_2O$ , тритий – сверхтяжелую воду  $T_2O$ .

**Атомы, ядра которых состоят их одинакового числа протонов, но из различного числа нейтронов, называют изотопами.**

Все изотопы одного химического элемента имеют одинаковое строение электронных оболочек. Поэтому у изотопов данного элемента одинаковы как химические свойства, так и те физические свойства, которые обусловлены структурой электронной оболочки. Физические свойства, обусловленные структурой ядра, например, свойство радиоактивности, заметно отличаются.

В настоящее время установлено, что большинство химических элементов, встречающихся в природе, представляют собой смесь изотопов. В частности, природный водород состоит на 99,985 % из протия и на 0,015 % из дейтерия.

## III. Ядерные силы и их свойства

Ядерные силы, удерживающие нуклоны в ядре, обладают рядом свойств. Из курса для 9 класса известно, что они короткодействующие: действуют только внутри ядра, превышают кулоновские силы примерно в сотни раз. За эти свойства ядерные силы называют «богатыри с короткими руками». Они обладают зарядовой независимостью и свойством насыщения, что проявляется во взаимодействии только соседних нуклонов не зависимо от наличия заряда. Необходимо отметить, что в отличие от кулоновских сил и сил гравитации ядерные силы не являются центральными.

Природа ядерных сил и их свойства изучены еще недостаточно. В настоящее время наиболее вероятной считается мезонная или обменная теория ядерных сил,

разработанная японским физиком Х. Юкава. Согласно теории обменных сил нуклоны взаимодействуют друг с другом путем обмена особыми элементарными частицами –  $\pi$ -мезонами.

#### IV. Энергия связи.

##### Дефект массы атомного ядра

Нуклоны в ядре атома прочно связаны ядерными силами. Для разрыва этой связи необходимо затратить некоторое количество энергии, т.е. совершить работу.

**Энергию, необходимую для расщепления ядра на нуклоны, называют энергией связи ядра.**

Согласно закону сохранения энергии, энергия нуклонов, связанных в ядре, должна быть меньше энергии разобщенных нуклонов на значение энергии связи  $E_{\text{св}}$ . Из уравнения Эйнштейна следует, что изменение энергии системы сопровождается пропорциональным изменением массы системы  $\Delta M$ :

$$\Delta E = \Delta M c^2, \quad (5)$$

где  $c$  – скорость света в вакууме. Так как в рассматриваемом случае  $\Delta E$  есть энергия связи  $E_{\text{св}}$  ядра, то масса атомного ядра должна быть меньше суммы масс нуклонов, составляющих ядро, на величину  $\Delta M$ , которую называют дефектом массы ядра:

$$\Delta M = (Z m_p + N_n m_n) - M_{\text{я}}, \quad (6)$$

где  $Z$  – число протонов,  $N_n$  – число нейтронов,  $M_{\text{я}}$  – масса ядра.

**Дефект масс – это разность суммы масс покоя нуклонов, из которых состоит ядро и массы покоя ядра самого атома.**

В настоящее время массы атомных ядер определены с высокой степенью точности посредством масс-спектрометра. Это дает возможность определить дефект масс и энергию связи любого ядра. Формула расчета энергии связи по дефекту масс, выраженного в килограммах, имеет вид:

$$E_{\text{св}} = c^2 [(Z m_p + N_n m_n) - M_{\text{я}}] \quad (7)$$

или  $E_{\text{св}} = c^2 [Z M(^1H) + N_n m_n - M_{\text{ат}}], \quad (8)$

где  $M_{\text{я}}$  – масса ядра,  $M_{\text{ат}}$  – масса атома,  $M(^1H)$  – масса атома водорода.



##### Ответьте на вопрос

- Почему кулоновские силы между протонами ядра не могут нарушить целостность ядра?



##### Задание 3

- Изобразите модель ядра в соответствии с теорией обменных сил Х. Юкава между нуклонами.



##### Ответьте на вопросы

- Почему энергия нуклонов, связанных в ядре, меньше энергии разъединенных нуклонов?
- Почему формулы (9) и (10) необходимо записывать с единицей измерения?
- Как определить массу ядра при известном значении массы атома?



##### Задание 4

Сравните формулы (7)–(10). В чем различие формул (7) и (8)? Формул (7) и (9)? Формул (8) и (10)?

Если дефект масс выражен в атомных единицах массы, то уравнения (7), (8) примут другой вид, для их записи выразим энергию покоя частицы массой 1 а.е.м. в МэВ – мегаэлектронвольтах, учитывая, что 1 эВ =  $1,6 \cdot 10^{-19}$  Дж:

$$E_1 = c^2 \cdot 1 \text{ а.е.м.} = \frac{9 \cdot 10^{16} \frac{\text{М}^2}{\text{с}^2} \cdot 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ кг}}{1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж/эВ}} = 931,5 \text{ МэВ.}$$

Запишем формулы расчета энергии связи нуклонов в ядре в МэВ в следующем виде:

$$E_{cb} = (Z m_p + N_n m_n - M_y) \cdot 931,5 \text{ МэВ} \quad (9)$$

или  $E_{cb} = [Z M(^1H) + N_n m_n - M_{am}] \cdot 931,5 \text{ МэВ.} \quad (10)$

## V. Удельная энергия связи ядер

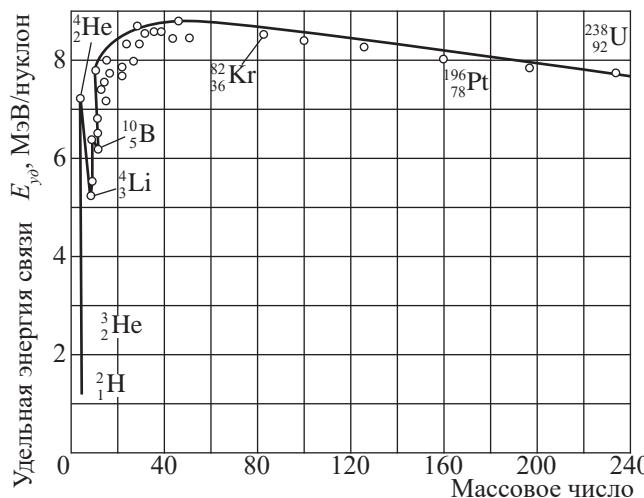
Энергию связи ядра, приходящуюся на один нуклон, называют *удельной энергией связи*  $E_{yo}$ :

$$E_{yo} = \frac{E_{cb}}{A}. \quad (11)$$

Удельная энергия связи характеризует устойчивость атомных ядер: чем больше  $E_{yo}$ , тем более устойчивое ядро. Результаты расчетов удельных энергий связи для ядер представлены графически на *рисунке 147*.

По оси ординат отложены удельные энергии связи, по оси абсцисс – массовые числа  $A$ .

Из графика следует, что удельная энергия связи максимальна у ядер с массовыми числами порядка 30–100, и составляет около  $8,65 \frac{\text{МэВ}}{\text{нуклон}}$ . У тяжелых и легких ядер она несколько меньше, например,  $7,8 \frac{\text{МэВ}}{\text{нуклон}}$  для урана;  $7,2 \frac{\text{МэВ}}{\text{нуклон}}$  для гелия. У атомного ядра водорода  $^1H$  удельная энергия связи равна нулю, поскольку оно состоит только из одного нуклона.



### Задание 5

Определите энергию связи атомов с массовыми числами 40, 160 и 200 а.е.м., используя график на *рисунке 147*.

*Рис. 147. График зависимости удельных энергий связи ядер от массового числа*

Ядра тяжелых элементов менее устойчивые в связи с большим числом протонов в ядре, что приводит к увеличению кулоновских сил отталкивания. В легких ядрах уменьшение удельной энергии связи и, следовательно, устойчивости ядер происходит из-за малого числа нуклонов. Нуклоны, расположенные у поверхности ядра, обладают меньшей удельной энергией связи, поскольку взаимодействуют с меньшим количеством нуклонов. В легких ядрах доля поверхностных нуклонов от общего их числа в ядре возрастает.

### Контрольные вопросы

1. Из каких частиц состоят ядра атома?
2. Что такое изотопы? В чем их различие?
3. Почему химические свойства изотопов одного и того же элемента не отличаются друг от друга?
4. Какие силы связывают нуклоны в ядре? Какими свойствами они обладают?
5. Как определяют энергию связи?
6. Что называют дефектом масс?
7. Укажите величину, характеризующую устойчивость атомных ядер?
8. В каких единицах принято в атомной физике измерять массу, энергию, размеры ядер?



### Упражнение

25

1. Определите количество нуклонов, протонов и нейтронов, входящих в состав следующих ядер:  ${}^7Li$ ,  ${}^{17}O$ ,  ${}^{235}U$ .
2. Сколько протонов и нейтронов содержится в кусочке золота массой  $m = 1 \text{ мг}$ ?
3. Определите дефект массы в атомных единицах массы и килограммах для ядра лития  ${}^7Li$ .
4. Определите дефект массы и энергию связи для ядрадейтерия  ${}^2H$ .
5. Энергия связи атомного ядра, состоящего из трех протонов и двух нейтронов,  $E_{ce} = 26,3 \text{ МэВ}$ . Определите удельную энергию связи и массу ядра.

### Творческое задание

Подготовьте сообщение по темам (на выбор):

1. Из истории открытия нейтрона.
2. Устройство и принцип действия масс-спектрометра.
3. Современные методы определения размеров ядер.
4. Исследования Гейзенберга и Иваненко в ядерной физике.

## § 26. Ядерные реакции. Искусственная радиоактивность. Деление тяжелых ядер. Цепные ядерные реакции. Критическая масса. Термоядерные реакции

### Ожидаемый результат

Прочитав параграф, вы сможете:

- объяснять процессы распада и синтеза ядра.

### Ответьте на вопросы

1. Каким способом один химический элемент можно превратить в другой?
2. Возможно ли превращение одного элемента в другой, в результате химической реакции?

### Запомните!

Ядерную реакцию принято записывать в виде:  $a + A \rightarrow B + b$  или используя более сокращенный способ записи:  $A(a, b)B$ , где  $A$  – начальное ядро,  $a$  – бомбардирующая частица,  $B$  – полученное ядро,  $b$  – вылетевшая из ядра частица.

### Задание

Запишите реакции (3) и (4) в виде:  $A(a, b)B$ .

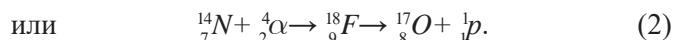
### Ответьте на вопрос

Почему сложно осуществить ядерные реакции в результате столкновения  $\alpha$ -частицы с тяжелыми ядрами химических элементов?

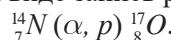
### I. Ядерная реакция

Первая ядерная реакция была осуществлена Э. Резерфордом в 1919 г., в результате которой из ядер азота были получены ядра атома кислорода в качестве бомбардирующих частиц он использовал  $\alpha$ -частицы.

При столкновении  $\alpha$ -частица поглощается ядром азота  $^{14}_7N$ , образуется ядро изотопа фтора  $^{18}_9F$ . Оно неустойчивое, превращается в атомное ядро изотопа кислорода  $^{17}_8O$  в результате мгновенного выброса одного протона. Реакцию, проведенную Резерфордом можно записать в виде:



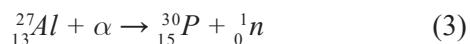
В сокращенном виде запись реакции имеет вид:



Процесс превращения атомных ядер в другие, обусловленный воздействием на них быстрых элементарных частиц или ядер других атомов, называют ядерной реакцией.

### II. Искусственная радиоактивность

Продукты многих ядерных реакций оказываются радиоактивными; их называют искусственно-радиоактивными изотопами. Явление искусственной радиоактивности было открыто в 1934 г. французскими физиками Фредериком и Ирен Жолио-Кюри. Как и естественно-радиоактивным веществам, искусственно-радиоактивным изотопам свойственны  $\alpha$ -,  $\beta$ -,  $\gamma$ -распады. Однако имеются и такие искусственно-радиоактивные изотопы, которые обладают нейтронным и позитронным распадом. Примером распада позитронно-радиоактивного изотопа может служить реакция бомбардировки алюминия  $\alpha$ -частицами, открытая Жолио-Кюри. В данном случае ядро алюминия  $^{27}_1Al$  испускает нейтрон и превращается в ядро радиоактивного изотопа фосфора  $^{30}_{15}P$ , период полураспада которого  $T = 2,5$  мин. Этот изотоп, испуская позитрон  $+1e$ , превращается в стабильный изотоп кремния  $^{30}_{14}Si$ . Реакция идет по схеме:



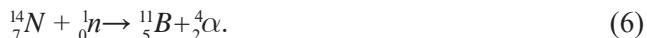


### III. Открытие нейтрона

В 1932 г. английский физик Д. Чедвик провел серию экспериментов, в результате которых был обнаружен нейtron. При бомбардировке бериллиевой пластиинки  $\alpha$ -частицами ядро бериллия  ${}^9Be$  захватывает  $\alpha$ -частицу и, испускает нейtron  $n$ , при этом превращается в ядро углерода  ${}^{12}C$ :



При попадании нейтрона в ядро азота  ${}^7N$  образуется ядро бора  ${}^5B$  и  $\alpha$ -частица:



Свободный нейtron радиоактивен, он превращается в протон, испуская  $\beta$ -частицу и антинейтрино:



Согласно опытным данным, период полураспада нейтрона составляет 11,7 мин.

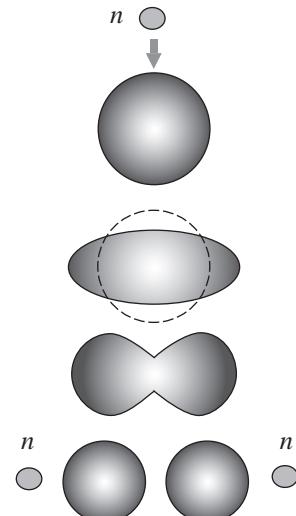
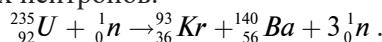
### IV. Механизм деления тяжелых ядер

С открытием нейтрона стали возможны ядерные реакции с тяжелыми ядрами, при которых должна высвобождаться энергия. Тяжелое ядро, поглотив нейtron, переходит в возбужденное состояние, начинает колебаться, периодически принимая вытянутую форму (рис. 148). Если кулоновские силы отталкивания при вытянутом состоянии ядра становятся больше ядерных, то ядро делится на осколки.

В процессе деления тяжелого ядра всегда испускается еще несколько нейтронов, которые могут вызвать деление других ядер, для урана обычно 2–3 нейтрона. Именно эти нейтроны и позволяют реализовать на практике управляемую цепную ядерную реакцию деления, которая сопровождается выделением огромного количества энергии.

Энергетический спектр полученных нейтронов лежит в интервале от 1 эВ до 10 МэВ. Нейтроны, обладающие энергией, большей 1,5 МэВ, называют *быстрыми*. Нейтроны меньшей энергии – *медленными*, нейтроны с очень малыми энергиями, сравнимыми с энергией теплового движения, называют *тепловыми*. Способностью делиться на две части под действием нейтронов обладают ядра всех тяжелых элементов. Наиболее важным в практическом отношении делящимся материалом являются: уран  ${}^{238}_{92}U$ , актиноуран  ${}^{235}_{92}U$ , искусственный изотоп урана  ${}^{233}_{92}U$  и плутоний  ${}^{239}_{94}Pu$ . Ядра  ${}^{235}_{92}U$ ,  ${}^{233}_{92}U$  и  ${}^{239}_{94}Pu$  делятся под действием как быстрых, так и медленных нейтронов, а ядра  ${}^{238}_{92}U$  – только под действием быстрых нейтронов.

Продукты деления тяжелых ядер разнообразны: их массовые числа лежат в пределах от 70 до 160. Однако чаще всего массы осколков данного ядра относятся как 2: 3. Примером такого деления может служить распад урана-235 на изотопы криптона и бария с испусканием трех нейтронов:



*Рис. 148. Механизм деления тяжелого ядра*

## V. Энергия выхода ядерной реакции

Энергию выхода при известных значениях масс ядер, вступающих в реакцию  $m_1$ , и получившихся в результате реакции  $m_2$ , определяют по формуле Эйнштейна:

$$E_{\text{вых}} = (m_1 - m_2) \cdot c^2. \quad (8)$$

Формула (8) справедлива в том случае, когда массы ядер выражены в килограммах, тогда энергия выхода будет рассчитана в Дж (дюйлях). Если массы ядер выражены в атомных единицах массы, то с учетом коэффициентов перевода, энергию выхода рассчитывают в МэВ (мегаэлектронвольтах) по формуле:

$$E_{\text{вых}} = (m_1 - m_2) \cdot 931,5 \text{ МэВ}. \quad (9)$$

## VI. Цепная ядерная реакция

Для получения больших количеств ядерной энергии необходимо, чтобы делению подверглась значительная часть ядер, содержащихся в массе «ядерного горючего». Поэтому ядерная реакция деления должна быть саморазвивающейся, или цепной: при каждом делении ядер должны появляться новые нейтроны, вызывающие последующие деления тяжелых ядер элемента.

Наиболее просто цепная реакция осуществляется под действием медленных нейтронов в уране-235. Попадание случайного теплового нейтрона приводит к делению ядра урана-235 (рис. 149). Возникающие при этом 2–3 нейтрона попадут в 2–3 другие ядра урана, вызывая их деление. В результате появится 4–9 нейтронов, способных вызвать деление следующих 4–9 ядер и т.д. Несмотря на то, что при делении каждого ядра урана возникает 2–3 нейтрона, не все они вызывают деление других ядер; часть нейтронов может быть захвачена ядрами неделяющимися или трудно делящимися примесей, присутствующих в ядерном горючем, часть нейтронов может вылететь через поверхность объема горючего материала, не успев столкнуться с его ядрами.

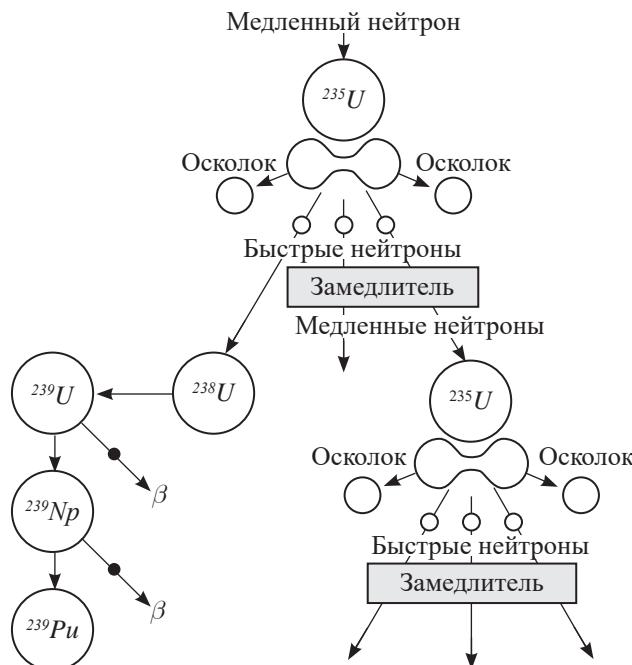


Рис. 149. Деление ядра урана-235

## VII. Коэффициент размножения и критическая масса

Развитие цепной реакции характеризуется коэффициентом размножения нейтронов  $k$ .

Коэффициент размножения нейтронов – это отношение числа нейтронов, вызывающих деление ядер вещества на одном из этапов реакции, к числу нейтронов, вызвавших деление на предыдущем этапе реакции:

$$k = \frac{N_i}{N_{i-1}}.$$

Например, цепная реакция, изображенная на рисунке 149, соответствует размножению нейтронов  $k = 3$ . Коэффициент размножения зависит от природы и количества делящихся веществ, а также от геометрической формы занимаемого им объема.

Массу делящегося вещества, в которой цепная реакция идет с коэффициентом  $k = 1$ , называют критической массой данного вещества. Для чистого актиноурана критическая масса составляет около 40 кг при шарообразной форме объема. Если масса ядерного горючего меньше критической, то  $k < 1$  и реакция деления не будет развиваться, она затухнет. Если масса горючего равна критической, то  $k = 1$  и цепная реакция идет с постоянной интенсивностью; такая реакция происходит в ядерных реакторах. Если же масса горючего больше критической, то  $k > 1$ , в этом случае цепная реакция развивается бурно, взрывообразно.

## VIII. Термоядерная реакция синтеза и условия ее осуществления

Для объединения двух ядер в одно, необходимо преодолев кулоновскую силу, сблизить их на расстояние порядка  $10^{-13}$  см. Тогда дальнейшее их объединение совершают ядерные силы. Это является необходимым условием осуществления реакции синтеза.

Расчеты показывают, что для осуществления реакции синтезадейтерия и трития в гелий дейтроны и тритоны должны обладать кинетической энергией порядка 0,01 МэВ. Это возможно при высокой температуре смеси, при которой средняя кинетическая энергия теплового движения атомов приблизится к значению 0,01 МэВ. Такая температура измеряется десятками миллионов кельвин. Используя формулу расчета средней кинетической энергии  $W$  теплового движения частицы:

$$\langle W \rangle = \frac{3}{2} \cdot kT,$$

где  $k$  – постоянная Больцмана, определим температуру смеси:

$$T = \frac{2}{3} \cdot \frac{W}{k} = \frac{2}{3} \cdot \frac{0,01 \cdot 10^6 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}}{1,38 \cdot 10^{-23}} K = 77000000 K.$$

Реакция синтеза может идти только при температуре в десятки миллионов кельвин, в связи с этим она получила название термоядерной реакции. При этой температуре смесь находится в плазменном состоянии, она состоит из ядер и свободных электронов.



### Ответьте на вопросы

- Почему критическая масса может быть различной для одного и того же ядерного топлива?
- Почему в природных залежах урана не происходят цепные реакции?



### Ответьте на вопрос

Почему в ядре Солнца возможна термоядерная реакция слияния ядер водорода при 15 миллионах кельвинов – при температуре меньше расчетной в 5 раз?

**Термоядерная реакция – это реакция слияния легких ядер при температуре в сотни миллионов кельвин.**

### Контрольные вопросы

1. Какой процесс называют ядерной реакцией?
2. В результате каких ядерных реакций были обнаружены протон и нейtron? Кем были произведены эти реакции?
3. При каком условии происходит реакция деления тяжелых ядер?
4. Какие ядра используют как ядерное топливо?
5. Как рассчитать энергию выхода ядерных реакций?
6. Какая величина характеризует развитие цепной реакции?
7. Что называют критической массой?
8. Какие реакции называют термоядерными?
9. При каком условии происходят ядерные реакции синтеза легких ядер?



### Упражнение

26

1. Считая, что при каждом делении ядра урана  $^{235}U$  освобождается энергия  $E_0 = 200$  МэВ, определите энергию, выделяющуюся при сгорании  $m = 1$  кг урана, массу каменного угля  $m_1$ , эквивалентную в тепловом отношении 1 кг урана.
2. Определите энергию, поглощенную или выделившуюся в результате реакций:  
$$_{\frac{1}{7}}N + _{\frac{2}{2}}He \rightarrow _{\frac{1}{1}}H + _{\frac{17}{8}}O,$$
  
$$_{\frac{9}{4}}Be + _{\frac{1}{1}}H \rightarrow _{\frac{10}{5}}B + _{\frac{1}{0}}n,$$
  
$$_{\frac{7}{3}}Li + _{\frac{1}{1}}H \rightarrow _{\frac{8}{4}}Be + _{\frac{1}{0}}n,$$
  
$$_{\frac{7}{3}}Li + _{\frac{1}{1}}H \rightarrow _{\frac{4}{2}}He + _{\frac{4}{2}}He .$$
3. Рассчитайте энергию, выделившуюся в следующих термоядерных реакциях:  $_{\frac{1}{1}}H + _{\frac{2}{1}}H \rightarrow _{\frac{1}{1}}H + _{\frac{3}{1}}H$ ;  $_{\frac{1}{1}}H + _{\frac{2}{1}}H \rightarrow _{\frac{3}{2}}He + _{\frac{1}{0}}n$ .

### Творческое задание

Подготовьте сообщения по темам (на выбор):

1. Из истории исследований ядерных реакций.
2. Достижения ученых Жолио-Кюри, П. Савич, О. Ганн, Ф. Штрасман, О. Фриш, Л. Мейтнер в исследовании ядерных реакций.
3. Термоядерные реакции синтеза в недрах звезд.

## § 27. Биологическое действие радиоактивных лучей. Защита от радиации

### Ожидаемый результат

Прочитав параграф, вы сможете:

- объяснять природу ионизирующего эффекта и проникающей способности радиоактивных излучений;
- описывать обработку, применение, хранение и технику безопасности радиоактивных материалов.

### I. Источники облучения

Основную часть облучения население земного шара получает от естественных источников радиации. Радиационный фон Земли складывается из космического излучения и излучения природных радионуклидов, рассеянных в земной коре, воздухе, воде, теле человека и других объектах внешней среды. Радиоактивное облучение организма человека может быть внешним и внутренним. При внешнем облучении опасны те виды излучения, которые обладают большой проникающей способностью. При внутреннем облучении наибольшую опасность представляют радиоактивные изотопы с большим периодом полураспада и высокой ионизирующей способностью.

К естественному облучению прибавились антропогенные источники внешнего и внутреннего облучения. Ядерные взрывы, выбросы радионуклидов предприятиями ядерной энергетики и широкое использование источников ионизирующих излучений в различных отраслях промышленности, сельском хозяйстве, медицине и научных исследованиях привели к глобальному повышению облучения населения Земли. Наибольшее радиационное загрязнение местности происходит после ядерных взрывов на полигонах (рис. 150) и аварий на АЭС.



### Ответьте на вопрос

Почему радиоактивное излучение представляет опасность для человека и живых организмов?



### Ответьте на вопросы

1. Почему при внешнем облучении большую опасность представляют частицы с высокой проникающей способностью, при внутреннем облучении – частицы с высокой ионизирующей способностью?
2. Назовите частицы с высокой проникающей способностью и высокой ионизирующей способностью.



Рис. 150. Семипалатинский ядерный полигон

В случае ядерного взрыва на местности возникает очаг ядерного поражения. Радиоактивное заражение местности происходит в результате перемещения радиоактивного облака с воздушными потоками. Наиболее опасным радионуклидом в начальный период заражения является радиоактивный йод, позже – долгоживущие радионуклиды: цезий-137 и стронций-90. Радионуклиды, выпавшие на поверхность земли, становятся источником длительного облучения  $\alpha$ - ,  $\beta$ - и  $\gamma$ - лучами.

## II. Дозы облучения и единицы их измерения

При оценке доз облучения определяющими являются сведения о количественном содержании радиоактивных веществ в теле человека, а не данные о концентрации их в окружающей среде. Даже небольшая радиоактивная загрязненность создает условия для занесения этих веществ внутрь организма. Эффект облучения зависит от величины поглощенной дозы, объема облученных тканей и органов, вида излучения. Снижение дозы облучения уменьшает биологический эффект, в результате появляется возможность восстановления поврежденного облучением организма.

**Доза поглощенного излучения – это величина, равная энергии излучения, поглощенного единицей массы облучаемого тела.**

$$D = \frac{E}{m}.$$

Единицей измерения поглощенной дозы в «СИ» принят 1 Гр (грей):

$$1 \text{ Гр} = 1 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}.$$

Доза в 1 Гр – это очень большое количество поглощенной радиации, намного больше, чем обычно получает человек во время естественного или медицинского облучения. Дозы от 10 до 20 Гр при однократном облучении являются смертельными для взрослого человека.

В практике используют внесистемную единицу измерения 1 рад, приблизительно равному 1 Р (рентгену) – единице измерения экспозиционной дозы облучения:

$$1 \text{ Гр} = 100 \text{ рад} = 100 \text{ Р.}$$

Степень поражения, наносимая тканям и органам тела разными видами ионизирующего излучения, отличается. В связи с этим введена величина «эквивалентная доза облучения». Ее вычисляют с учетом коэффициента относительной биологической эффективности ионизирующих излучений. Например, вред, наносимый гамма-излучением и рентгеновскими лучами в 20 раз слабее, чем вред от облучения альфа-частицами. Эквивалентную дозу облучения вычисляют, умножив поглощенную дозу облучения на коэффициент относительной биологической эффективности радиоактивных частиц (КОБЭ):

$$D_{\text{экв}} = k \cdot D.$$



### Возьмите на заметку

1. Площадь для ядерных испытаний в РК составила 18500 км<sup>2</sup>.
2. Ядерный гриб при взрыве термоядерного заряда в 1953 г. достиг в диаметре 30 км, наблюдался жителями 59 населенных пунктов, взрывная волна выбила стекла в зданиях, расположенных в 200 км от эпицентра.
3. За период действия полигона с 1949 г. по 1989 г. взорвано 616 снарядов общей мощностью 38000 кт.

КОБЭ рентгеновских лучей и  $\gamma$ -излучения принимают равным единице  $k = 1$ , для  $\alpha$ -частиц  $k = 20$ .

Единица измерения эквивалентной дозы радиации в «СИ» – 1 зиверт (Зв), он равен 1 грею, на практике применяют внесистемную единицу измерения – биологический эквивалент рентгена (бэр):

$$1 \text{ Зв} = 1 \text{ Гр} = 100 \text{ бэр}.$$

Интенсивность радиоактивного излучения характеризуют мощностью поглощенной дозы излучения – дозы, поглощенной за единицу времени:

$$P = \frac{D}{t}; \quad P_{\text{зкв}} = \frac{D_{\text{зкв}}}{t}.$$

Единицами мощности поглощенной дозы служат Гр/с, рад/с, для мощности эквивалентной дозы облучения – Зв/с, бэр/с.

Знание дозы облучения человека играет решающую роль в диагностике и раннем прогнозировании течения острой лучевой болезни, в определении терапевтической тактики до развития основных симптомов заболевания.

### III. Воздействие радиационного излучения на живые организмы

Большая опасность радиоактивного излучения заключается в том, что его воздействие не обнаруживается органами чувств человека. Радиоактивные вещества поступают в организм при вдыхании воздуха, загрязненного радиоактивными веществами, через зараженную пищу или воду, через кожу, а также при заражении открытых ран. Альфа-лучи, почти безвредные при наружном облучении, особенно опасны при попадании внутрь.

В результате лучевого поражения нарушается обмен веществ с изменением соответствующих функций органов. Под влиянием радиоактивных излучений в организме происходит торможение функций кроветворных органов, нарушение нормальной свертываемости крови и увеличение хрупкости капилляров; расстройство деятельности желудочно-кишечного тракта и истощение организма; снижение сопротивляемости организма инфекционным заболеваниям.

Увеличение дозы поглощенного излучения приводит к повышению риска развития опухолей, к сокращению продолжительности жизни и нарушениям функции органов. В последующем поколении могут наблюдаться генетические изменения: врожденные уродства, мутации. У людей, получающих малые дозы облучения, наблюдается повышенное содержание клеток крови с хромосомными нарушениями. Исследования показали, что доза в 1 Гр, полученная при низком уровне радиации, индуцирует появление от 1000 до 2000 мутаций, приводящих к серьезным последствиям у новорожденных.

### IV. Средства защиты населения от радиоактивного излучения

Противорадиационная защита населения включает в себя следующие мероприятия:

- оповещение о радиационной опасности;
- использование коллективных и индивидуальных средств защиты;
- соблюдение режима поведения населения на зараженной радиоактивными веществами территории;
- защиту продуктов питания и воды от радиоактивного заражения;
- использование медицинских средств индивидуальной защиты;

- определение уровней заражения территории (рис. 151);
- дозиметрический контроль за облучением населения;
- экспертизу заражения радиоактивными веществами продуктов питания и воды.

Для лиц, работающих на АЭС, в исследовательских лабораториях по изучению радиоактивных препаратов также есть общие методы защиты, такие как:

- увеличение расстояния между оператором и источником;
- сокращение продолжительности работы в поле излучения;
- экранирование источника излучения;
- дистанционное управление;
- использование манипуляторов и роботов;
- полная автоматизация технологического процесса;
- использование средств индивидуальной защиты и предупреждение знаком радиационной опасности;
- постоянный контроль над уровнем излучения и за дозами облучения персонала.

Специалисты, которые во время работы подвергаются воздействию радиации, обычно используют дозиметры – специальные устройства, которые определяют общую суммарную дозу радиации. Это космонавты, работники атомных электростанций, врачи, занимающиеся радиотерапией или радиоизотопной диагностикой, а также те, кто занимается дезактивацией.

### Ответьте на вопросы

1. Какие животные наиболее подвержены действию радиации?
2. Для каких животных опасная доза наиболее высокая?

## V. Роль естественной радиации для организма человека

Радиационное облучение нельзя считать безусловно вредным. До некоторых доз облучение является необходимым условием существования всего живого, в том числе и человека. Данные исследований свидетельствуют, что только при наличии в организме ионов, которые образуются под действием излучения,



*Рис. 151. Дозиметр*



### Ответьте на вопросы

1. Почему по сигналу «Радиационная опасность» население должно укрыться в защитных сооружениях?
2. Почему нельзя приступить к оказанию первой медицинской помощи населению при наличии на местности высоких уровней радиации?
3. Почему нельзя принимать пищу, пить воду из зараженных источников, ложиться на землю?
4. Почему для защиты от радиации используют противогазы и респираторы, специальные костюмы с включением свинца (рис. 152)?



*Рис. 152. Исследование радиационного фона на зараженной местности*

в нем нормально протекают метаболические процессы – процессы обмена веществ и энергии. При отсутствии облучения у человека отключается природный механизм, отвечающий за приспособляемость организма к внешним условиям.

В медицине используют радиационную терапию в лечении онкологических заболеваний, в частности, уничтожении раковой опухоли. Раковые клетки, как правило, активно делятся и быстро растут. Следовательно, повреждающее действие радиационного излучения причиняют им больший вред, чем клеткам здоровой ткани. Современные медицинские установки для лучевой терапии позволяют сфокусировать ионизирующее излучение в патологический очаг и уменьшить поражение здоровых тканей.

### Контрольные вопросы

1. Какие источники излучения вам известны?
2. Что называют дозой поглощенного излучения? В каких единицах ее измеряют?
3. В чем различие дозы излучения от эквивалентной дозы излучения?
4. В чем измеряют эквивалентную дозу излучения?
5. Какое воздействие оказывает радиационное излучение на организм человека?
6. В чем проявляются соматические и генетические изменения в организме?
7. Каковы правила поведения населения на зараженной радиацией территории?



### Упражнение

27

1. Средняя поглощенная доза излучения сотрудником, работающим с рентгеновской установкой, равна 7 мкГр за 1 ч. Опасна ли работа сотрудника в течение 200 дней в году по 6 ч в день, если предельно допустимая доза облучения равна 50 мГр в год?
2. Энергия радиоактивного излучения, поглощенного человеком массой 60 кг, равна 1 Дж. Определите поглощенную дозу излучения. Какому виду излучения он был подвержен, если эквивалентная доза излучения составила 0,051 Зв.

### Творческое задание

Подготовьте сообщение по темам (на выбор):

1. Последствия Чернобыльской аварии: флора и фауна в очаге радиоактивного заражения.
2. Зоны отчуждения в РК: «Опытное поле», площадка «Дегелен», площадка «Балапан», «Сары-Узень», «Актан-Берли», «4», «4А», «Атомное» озеро, «Телькем-1», «Телькем-2». Их настоящее и будущее.
3. Виды радиометрических приборов, их назначение и принцип действия.
4. Самые большие ядерные полигоны мира.
5. Техника безопасности при транспортировке и хранению радиоактивных материалов.

## § 28. Ядерный реактор. Ядерная энергетика

### Ожидаемый результат

Прочитав параграф, вы сможете:

- описывать устройство и принцип работы ядерных реакторов;
- обсуждать перспективы развития ядерной энергетики.

### Ответьте на вопросы

1. Что называют ядерным реактором?
2. С какой целью их используют?
3. В какой стране был построен первый ядерный реактор?

### Задание 1

Используя материал 1 части параграфа, запишите основные части ядерного реактора и материалы для их изготовления. Выясните, какие материалы можно использовать кроме тех, что приведены в тексте.

### Интересно знать!

Идею создания реактора на быстрых нейтронах впервые высказал Э. Ферми в 1942 г. Первый такой реактор появился в США в 1951 году, он показал, что можно одновременно вырабатывать электроэнергию и воспроизводить топливо в одном и том же устройстве.

### I. Устройство и принцип действия ядерного реактора на медленных нейтронах

Первый реактор на медленных нейтронах был создан в США в 1942 г., в СССР – в 1946 г. Основная часть реактора – это активная зона (1), где происходит деление тяжелых ядер и выделяется ядерная энергия (рис. 153). Обычно она имеет форму цилиндра, объем которой в зависимости от назначения реактора колеблется от нескольких см<sup>3</sup> до кубических метров. Активная зона представляет собой совокупность тепловыделяющих элементов (ТВЭЛов) с ураном или плутонием, погруженных в замедлитель (2). В качестве замедлителя используют графит или воду, в том числе и тяжелую D<sub>2</sub>O. Активную зону реактора окружает отражатель (3) из бериллия и материалов, способных хорошо рассеивать нейтроны. Этот слой возвращает вылетающие из активной зоны нейтроны, повышая скорость протекания цепной реакции и снижая критическую массу. Вокруг отражателя размещают радиационную биологическую защиту из бетона (4) для снижения излучения за пределами реактора до допустимого уровня. Энергия, выделяющаяся в результате ядерной реакции, выводится из активной зоны с помощью теплоносителя: газа, воды или другого вещества, которое постоянно прокачивается через активную зону, омывая ТВЭЛы.

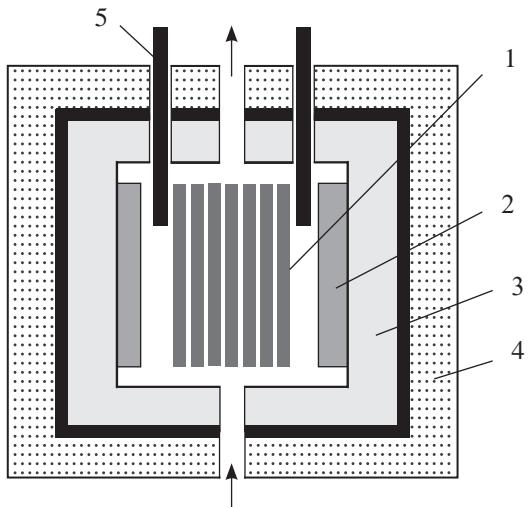


Рис. 153. Ядерный реактор

**Ядерный реактор – это установка, в которой осуществляется управляемая цепная ядерная реакция деления тяжелых ядер.**

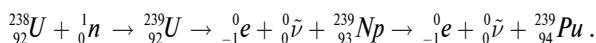
Для управления скоростью протекания цепной реакции деления применяют регулирующие стержни из кадмия или бора (5). Введение их в активную зону снижает скорость цепной реакции и при необходимости полностью останавливает ее. По мере извлечения регулирующих стержней из активной зоны поглощение нейтронов уменьшается, и цепная реакция может быть доведена до стадии самоподдерживающейся.

Ядерные реакторы используются в атомной энергетике и в исследовательских целях.

## II. Особенности в работе реактора на быстрых нейтронах

Преимуществом реактора на быстрых нейтронах является возможность использования урана-238 – основного изотопа, содержащегося в природном уране. Кроме того, реактор позволяет нарабатывать плутоний-239 – топливо для ядерных реакторов на медленных нейтронах.

Ядро  $^{238}_{92}U$ , поглотив быстрый нейtron, превращается, испуская  $\gamma$ -фотон, в ядро радиоактивного изотопа  $^{239}_{92}U$  с периодом полураспада  $T = 23$  мин. В свою очередь это ядро испускает  $\beta$ -частицу и превращается в ядро трансуранового элемента нептуния  $^{239}_{93}Np$  с периодом полураспада  $T = 23$  дня. Ядро нептуния, испуская  $\beta$ -частицу, превращается в ядро трансуранового элемента плутония  $^{239}_{94}Pu$ . Описанная реакция идет по схеме:



Плутоний  $^{239}_{94}Pu$  делится под действием медленных нейтронов подобно ядрам урана  $^{235}_{92}U$ , при делении испускает  $\alpha$ -,  $\beta$ -, и  $\gamma$ -лучи. Период полураспада  $T = 24100$  лет, благодаря чему плутоний в реакторах накапливается в большом количестве.

Ядерные реакторы на быстрых нейтронах используют для изготовления искусственно-радиоактивных изотопов. Вещества, которые надо подвергать облучению, помещаются в специальные каналы, проделанные в защитном корпусе реактора. Они дают возможность расширенного воспроизведения ядерного горючего.

### Обратите внимание!

Внедрение реакторов на быстрых нейтронах могло бы шестидесятикратно увеличить эффективность использования урана. Быстрые реакторы открывают возможность использования не делящихся в реакторах на тепловых нейтронах изотопов тяжелых элементов.

В топливный цикл могут быть вовлечены запасы  $^{238}U$ ,  $^{232}Th$ , которых в природе значительно больше, чем  $^{235}U$  – основного горючего для реакторов на тепловых нейтронах. В том числе может быть использован и так называемый «отвальный уран», оставшийся после обогащения  $^{235}U$ .

### Ответьте на вопросы

1. Почему сегодня получили развитие реакторы на быстрых нейтронах с натриевым, свинцово-висмутовым и свинцовыми теплоносителями?
2. Почему недопустимы вещества с легкими ядрами водорода: вода и углеводороды?

К достоинствам быстрых реакторов можно отнести большую степень выгорания топлива, а к недостаткам – дороговизну, из-за невозможности использования простейшего теплоносителя – воды, а также из-за конструкционной сложности. Массового ввода быстрых реакторов в энергетику не произошло. Во всем мире после 1980 г. было установлено только 3 промышленных реактора на быстрых нейтронах: Superphenix во Франции, Монди в Японии, и БН-600 на Белоярской АЭС в России. Промышленные реакторы на медленных нейтронах экономически более выгодные.

### III. Термоядерные реакторы

Осуществление управляемой термоядерной реакции встречается с большими трудностями. Необходимо обеспечить регулируемое нагревание плазмы до десятков миллионов кельвин и полностью устраниТЬ соприкосновение со стенками сосуда. Одним из способов реализации технологии является использование реактора «Токамак» – реактора, где плазма удерживается магнитным полем в форме тора, и использующего в качестве топлива тритий и дейтерий.

**Токамак (тороидальная камера с магнитными катушками)** – это тороидальная установка для магнитного удержания плазмы с целью достижения условий, необходимых для протекания управляемого термоядерного синтеза.

Первый Токамак был построен в 1956 г. в Институте Атомной Энергии им. И.В. Курчатова в Москве. В настоящее время Токамак считается наиболее перспективным устройством для осуществления управляемого термоядерного синтеза. Всего в мире построено около 300 токамаков, в том числе и в Казахстане. Казахстанский Материаловедческий Токамак (КМТ) – это экспериментальная термоядерная установка. Она запущена 5 сентября 2010 г. в г. Курчатове для исследований и испытаний материалов (рис. 155). В настоящее время рекорд удержания плазмы для Токамаков – 30 секунд был поставлен в Китае в 2013 г.

Ученые-ядерщики рассматривают также возможности проведения термоядерной реакции с помощью лазерного излучения, исследования в этом направлении проводятся пока в лабораторных условиях. Его суть в том, что стеклянную ампулу с очень небольшим количеством смеси дейтерия с тритием со всех сторон облучают мощными лазерными импульсами. Ампула испаряется, а реактивное давление паров

### Интересно знать!

Сравнительно мощные энергетические реакторы БН-350, БН-600, БН-800 с натриевым теплоносителем были построены в СССР в 70-е г. Реактор БН-350, установленный в г. Актау в 1972 г. для орошения морской воды, дал большой опыт промышленного масштаба и явился экспериментальной базой для освоения технологии натриевого теплоносителя, физических исследований и испытаний топливных сборок и других элементов активной зоны (рис. 154). В 2010 г. ядерный реактор был остановлен в связи с истечением срока эксплуатации.



Рис. 154. Реактор на быстрых нейтронах БН-350 г. Актау

сжимает ее содержимое настолько, что в смеси «зажигается» термоядерная реакция. При этом высвобождается энергия, эквивалентная взрыву примерно 100 килограммов тротила. Она выделяется в форме нагретых до высокой температуры продуктов реакции и потока нейтронов.

#### IV. Перспективы ядерной энергетики

Ядерной энергетикой называют осуществляемое в промышленных масштабах преобразование ядерной энергии в другие виды энергии: механическую, электрическую и другие, используемые затем для производственных и бытовых нужд. Возникновение ядерной энергетики следует датировать июлем 1954 г., когда в СССР была введена в эксплуатацию первая атомная электростанция (АЭС) мощностью 5000 кВт. Сейчас в мире построены более мощные АЭС. Согласно имеющимся программам Международного агентства по использованию атомной энергии (МАГАТЭ), общая мощность атомных электростанций во всем мире быстро возрастает. Эксплуатация атомных электростанций целесообразна в тех районах, которые удалены от месторождений органического топлива: угля, нефти, газа, и бедны гидроресурсами.

Многими исследователями энергия синтеза рассматривается в перспективе в качестве основного источника энергии. Сторонники использования термоядерных реакторов для производства электроэнергии приводят следующие аргументы в их пользу:

1. Водород – самый распространенный элемент на Земле и в космосе, запасы топлива практически неисчерпаемые.
2. Топливо можно добывать из морской воды на любом побережье мира, что делает невозможным монополизацию топливных ресурсов одной или группой стран.



*Рис. 155. Казахстанский Материаловедческий Токамак*

#### Задание 2

1. Рассмотрите рисунок 156, поясните схему преобразования ядерной энергии в другие виды энергии.
2. По материалам интернет составьте диаграмму роста мощности АЭС во всем мире с 1954 г. по текущий год.



*Рис. 156. Принципиальная схема АЭС*

3. Отсутствие продуктов сгорания.
4. Нет необходимости использовать материалы, которые могут быть использованы для производства ядерного оружия.
5. По сравнению с ядерными реакторами вырабатываются радиоактивные отходы с коротким периодом полураспада.
6. Малый расход топлива: наперсток, наполненный дейтерием, производит энергию, эквивалентную 20 тоннам угля. Озеро среднего размера в состоянии обеспечить любую страну энергией на сотни лет.
7. Реакция синтеза не производит углекислотных выбросов в атмосферу, являющихся одной из главных причин глобального потепления.
8. В отличие от электростанций на возобновляемых источниках энергии термоядерные реакторы можно устанавливать где угодно, в том числе на транспорте; в каких угодно количествах и без серьезного вреда для окружающей среды: затопления водохранилищ, поражение птиц лопастями ветровых электростанций.
9. В космосе термоядерные реакторы незаменимы, так как дальше пояса астероидов и наочных сторонах планет солнечные батареи неэффективны.

### Контрольные вопросы

1. Для чего созданы ядерные реакторы? Как они устроены?
2. Каким образом осуществляется гашение ядерной реакции в реакторе?
3. Какое применение получила ядерная энергия?
4. Каковы перспективы развития ядерной энергетики?



### Упражнение

28

Определите мощность атомной станции, расходующей в сутки  $m = 220$  г изотопа урана  $^{235}U$  и имеющей  $\eta = 25\%$ . Считать, что при делении одного ядра урана  $^{235}U$  выделяется энергия  $Q = 200$  МэВ.

### Творческое задание

Подготовьте сообщение по темам (на выбор):

1. Проблемы ядерной энергетики.
2. Из истории создания атомных подводных лодок.
3. Виды ядерных реакторов.
4. Перспективы развития ядерной энергетики в Казахстане.
5. ИТЭР – Международный экспериментальный термоядерный реактор.

## Атомная энергетика в Казахстане

«за»	«против»
<p>Казахстан имеет огромные запасы урана. Добыча урана составляет около 22 тысяч тонн, 62% от всех добываемых энергоресурсов.</p> <p>В Казахстане освоено производство урановых таблеток и тепловыделяющих элементов (ТВЭЛ), что позволяет самостоятельно обеспечивать себя ядерным топливом.</p> <p>Страны, имеющие АЭС, собственную добычу урана и производство ядерного топлива, считаются более развитыми, чем страны, базирующиеся только на угольной или газовой энергетике.</p> <p>Износ оборудования на старых электростанциях составляет оценочно 75 %.</p> <p>Резко сокращается загрязнение атмосферы. Сокращается перевозка угля.</p> <p>Казахстан имеет опыт эксплуатации атомной электростанции. С 1972 по 1999 гг. близ Алатау работал реактор на быстрых нейтронах.</p> <p>Отмечается ежегодный рост в динамике потребления электроэнергии по всему Казахстану.</p>	<p>Вероятность крупных радиационных аварий на АЭС.</p> <p>Отсутствие дефицита электроэнергии в Казахстане.</p> <p>Дороговизна строительства, стоимость 1 ГВт установленной мощности АЭС составляет 5-5,5 миллиарда долларов. Стоимость 1 ГВт угольной генерации составляет около одного миллиарда долларов, а газовой генерации – около 900 миллионов долларов.</p> <p>По прогнозу министерства энергетики необходимо ввести, 4,3 ГВт новых мощностей для замены изношенных.</p> <p>Строительство АЭС мощностью 1 ГВт не покрывает целиком замену изношенных энергоблоков. Более целесообразно направить 5 миллиардов долларов на угольную генерацию.</p> <p>Возникает вопрос о сбыте угля и трудоустройстве угольщиков.</p> <p>Замена угля на ядерное топливо требует тщательно продуманного плана.</p>

### Интересно знать!

На базе реактора в Алатау проводятся фундаментальные ядерно-физические и материаловедческие исследования и внутриреакторные испытания, производство радиоизотопов для медицины и промышленности, гамма-источников, нейтронное легирование кремния, а также нейтронно-активационный анализ (рис. 157).



*Рис. 157. Исследовательский реактор  
в Алатау, Казахстан  
(Институт ядерной физики)*

### Задание

Изучив приведенные аргументы «за» и «против» атомной энергетики, напишите эссе «Промышленные АЭС в Казахстане».

## Итоги главы 8

Доза облучения	Закон радиоактивного распада	Энергия выхода
$D = \frac{E}{m}$ ; $D_{\text{экв}} = k \cdot D$	$N = N_0 e^{-\lambda t}$ ; $N = N_0 \cdot 2^{-\frac{t}{T}}$	$E_{\text{вых}} = (m_1 - m_2) \cdot c^2$ ; $E_{\text{вых}} = (m_1 - m_2) \cdot 931,5 \text{ МэВ}$

Обозначение физических величин, единицы измерения в СИ

Обозначение	Физическая величина	СИ	Обозначение	Физическая величина	СИ
$D$	Доза поглощенного излучения	Гр	$N$	Число нераспавшихся частиц	
$D_{\text{экв}}$	Эквивалентная доза облучения	13в	$N_0$	Число частиц в начальный момент времени	
$E$	Энергия излучения	Дж	$\lambda$	Постоянная распада	$\text{с}^{-1}$
$k$	Коэффициент биологической активности		$E_{\text{вых}}$	Энергия выхода	Дж
$T$	Период полураспада	с	$m_1$	Масса ядер до реакции	кг
$t$	Время распада	с	$m_2$	Масса ядер после реакции	кг

### Глоссарий

**Доза поглощенного излучения** – величина, равная энергии излучения, поглощенного единицей массы облучаемого тела.

**Естественная радиоактивность** – самопроизвольное превращение одних ядер в другие, которое сопровождается испусканием радиоактивного излучения.

**Изотопы** – атомы, ядра которых состоят из одинакового числа протонов, но из различного числа нейтронов.

**Период полураспада** – время, в течение которого количество атомов исходного элемента уменьшается вдвое.

**Термоядерная реакция** – реакция слияния легких ядер при температуре в сотни миллионов кельвин.

**Токамак** (тороидальная камера с магнитными катушками) – тороидальная установка для магнитного удержания плазмы с целью достижения условий, необходимых для протекания управляемого термоядерного синтеза.

**Ядерная реакция** – процесс превращения атомных ядер в другие, обусловленный воздействием на них быстрых элементарных частиц или ядер других атомов.

**Ядерный реактор** – установка, в которой осуществляется управляемая цепная ядерная реакция деления тяжелых ядер.



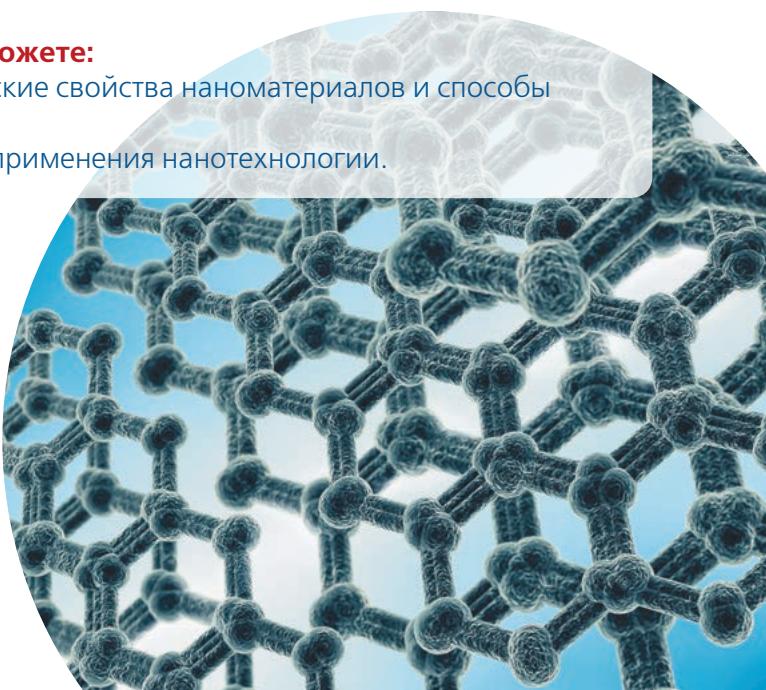
## ГЛАВА 9

# НАНОТЕХНОЛОГИЯ И НАНОМАТЕРИАЛЫ

Достижения в разработке и изготовлении наноматериалов с наперед заданными свойствами различного назначения в наибольшей степени определяются уровнем развития технологий, которые позволяют с атомной точностью получатьnanoструктуры необходимой конфигурации и размера. На основе уже открытых явлений создаются совершенно новые квантовые устройства и системы с широкими функциональными возможностями для опто- и наноэлектроники, измерительной техники, информационных технологий нового поколения, средств связи. В настоящее время перспективы развития в области наноматериалов и нанотехнологий включают в себя целый ряд направлений физики, химии, биологии, электроники, медицины и других наук. По многим прогнозам именно развитие нанотехнологий определит облик XXI века, подобно тому, как открытие атомной энергии, изобретение лазера и транзистора определили облик XX столетия.

**Изучив главу, вы сможете:**

- объяснять физические свойства наноматериалов и способы их получения;
- обсуждать сферы применения нанотехнологии.



## § 29. Основные достижения нанотехнологии, проблемы и перспективы развития наноматериалов

### Ожидаемый результат

Прочитав параграф, вы сможете:

- объяснять физические свойства наноматериалов и способы их получения;
- обсуждать сферы применения нанотехнологии.

### Интересно знать!

Выпускники МФТИ А. Гейм и К. Новоселов получили Нобелевскую премию «за новаторские эксперименты по исследованию двумерного материала графена» в 2010 г. В настоящее время Андрей Гейм занимает пост директора нанотехнологического центра, Константин Новоселов является профессором британского университета Манчестера (рис. 158).



**Рис. 158.** А. Гейм,  
К. Новоселов – лауреаты  
Нобелевской премии

Один из самых перспективных наноматериалов – графен, полученный и исследованный физиками Манчестерского университета А. Геймом и К. Новоселовым. Графен представляет собой сверхтонкий слой из атомов углерода, толщиной в один атом. Атомы образуют гексагональную структуру, состоящую из шестиугольников с общими сторонами (рис. 159). Графен обладает высокой электропроводностью, превышающую электропроводность меди. По сравнению со сталью графен прочнее в сто раз,

### I. Нанотехнологии (НТ)

Нанотехнологии – это совокупность методов манипулирования веществом на атомном или молекулярном уровне с целью получения заранее заданных свойств.

Задача нанотехнологии: получение наноматериалов с заданной структурой и свойствами; применение наноматериалов по определенному назначению с учетом их структуры и свойств; исследование структуры и свойств наноматериалов как в ходе их получения, так и в период их применения.

Основными отраслями нанотехнологий являются: наноматериалы, наноинструменты,nanoэлектроника, микроэлектромеханические системы и нанобиотехнологии.

### II. Наноматериалы.

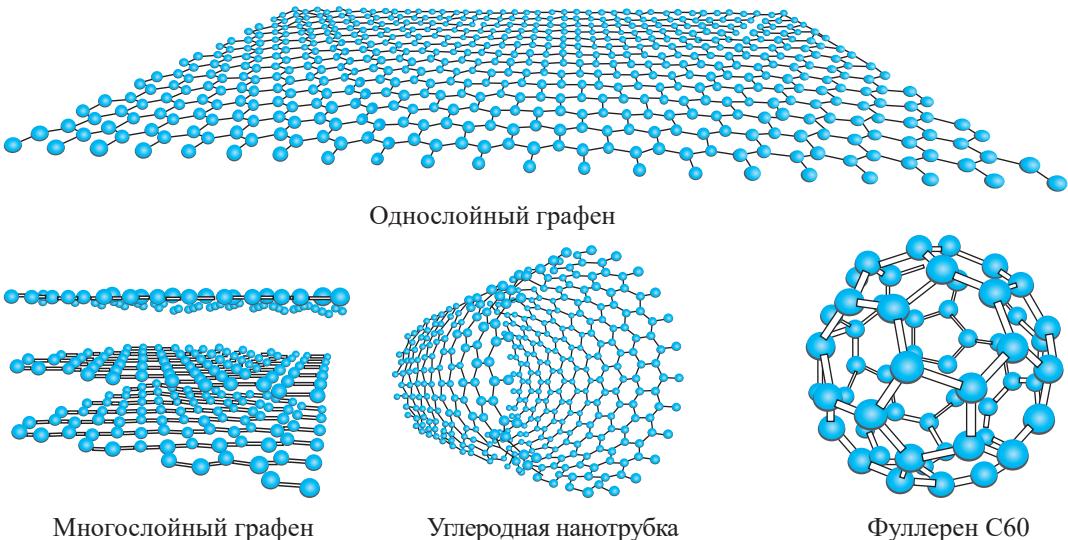
#### Физические свойства наноматериалов

Наноматериалы – это материалы, геометрические размеры которых не превышают 100 нм хотя бы в одном измерении, обладающие качественно новыми свойствами вследствие наномасштабных размеров.

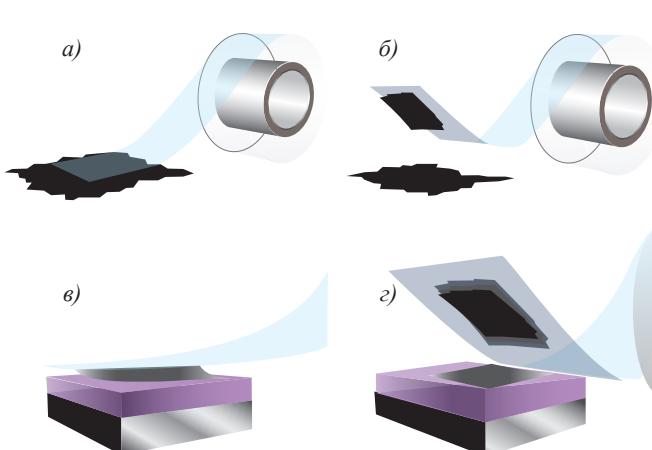
Различают одномерные (1D) и двумерные (2D) наноматериалы. Одномерными наноматериалами называют углеродные нанотрубки и нановолокна, наностержни, нанопровода. Одномерные объекты – это цилиндры длиной в несколько микрон с диаметром, равным нескольким нанометрам. Двумерные – это покрытие или пленки толщиной несколько нанометров на поверхности подложки. Толщина двумерного материала должна иметь нанометровые размеры.

У наноматериалов при переходе от больших размеров к малым, к наномасштабным меняются механические, тепловые и химические свойства. Эти материалы могут быть сверхтвердыми или сверхпластичными, процессы происходят за меньший промежуток времени, меняется цвет, электропроводность, теплопроводность вещества.

обладает прочностью на разрыв 42 Н/м. Лист графена площадью в один квадратный метр и толщиной, всего лишь в один атом, способен удерживать предмет массой 4 килограмма. Он имел бы массу 0,77 мг. Графен, как салфетку, можно сгибать, сворачивать, растягивать. Если бумажная салфетка рвется в руках, то с графеном такого не случится. Практически светопрозрачный материал, он поглощает не более 2 % видимого спектра. Плотность его такова, что даже легкие газы, такие как гелий и водород, не проходят сквозь слой графена.



*Рис. 159. Нанотрубы и наноматериалы*



*Рис. 160. Получение графена с использованием скотча*

### III. Способы получения наноматериалов

Существует два основных подхода в производстве наноматериалов: измельчение материала, имеющего большие размеры до наноразмеров или путем выращивания их из атомов и молекул.



#### Эксперимент

Рассмотрите рисунок 160. Получите графен с использованием скотча и графитового стержня. Для того, чтобы получить тонкий слой графита – графена толщиной в один атом, можно многократно отслаивать графит между полосками скотча. Нанесите тонкий слой, который примет голубоватый оттенок на стеклянную поверхность. С полученным слоем можно провести исследования.



#### Ответьте на вопрос

Для чего была необходима ученым подложка из окисленного кремния, при получении графена?

Методы получения наноматериалов делятся на механические, физические, химические и биологические. В основе данной классификации лежит природа процесса синтеза наноматериалов. В основе механических методов получения лежит воздействие больших деформирующих нагрузок: трения, давления, прессования, вибрации. Физические методы получения основываются на физических превращениях: испарении, конденсации, возгонке, резком охлаждении или нагреве, распылении расплава. К химическим относятся методы, основным диспергирующим этапом которых являются: электролиз, восстановление, термическое разложение. Биологические методы получения основаны на использовании биохимических процессов, происходящих в белковых телах.

При изготовлении двумерного графена К. Новоселов и А. Гейм использовали метод отслаивания или «отщелушивания» на подложке окисленного кремния  $\text{SiO}_2$ . Так им удалось решить проблему стабилизации двумерной пленки. Метод отслаивания позволяет работать со слоистыми материалами. Открытие графена привело к созданию целого класса принципиально новых двумерных материалов с уникальными свойствами: двумерные кристаллы BN,  $\text{MoS}_2$ ,  $\text{NbSe}_2$ .

#### IV. Сфера применения нанотехнологии

Нанотехнологии приобретают все большее значение и могут использоваться во всех промышленных отраслях, в частности в электронике, энергетике, медицине, строительстве, автомобилестроении.

**Электроника.** Развитие нанотехнологического процесса при изготовлении транзисторов для микро-процессоров в компьютерной технике позволило уменьшить их размеры от 90 до 14 нм. При таких размерах на одном сантиметре кремния можно разместить миллиард транзисторов. Благодаря развитию наноэлектроники происходит уменьшение элементарной ячейки запоминающих устройств. Использование наноматериалов позволяет создавать устройства с уникальными гибкими, влаго- и ударопрочными свойствами, которые имеют высокий коэффициент полезного действия и длительный срок службы. Ученые предполагают, что графеновые транзисторы будут работать на порядки быстрее, чем современная кремниевая техника (рис. 161). Графен обладает уникальными физико-химическими свойствами, которые делают его незаменимым в самых разных сферах на его базе можно создавать сенсорные экраны, гибкие электронные приборы (рис. 162). Графен – будущее микроэлектроники, на базе графена будут создавать элементы электронных схем, увеличится объем обрабатываемой информации в компьютерах от гигагерц до терагерц.



#### Задание

Выясните, как ученые-физики отделили слой графена от подложки?



Рис. 161. Транзистор из графена в ладони А. Гейма



Рис. 162. Samsung с гибким экраном из графена

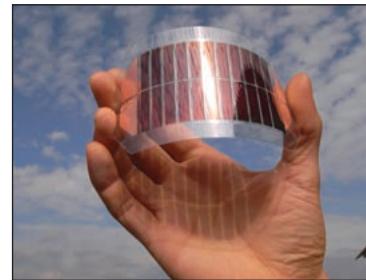
**Энергетика.** На основе нанотехнологий разработаны солнечные элементы, поглощающие энергию в инфракрасной части спектра. Металлические наноантенны в виде крошечных квадратных спиралек наносятся на пластмассовую подложку. КПД такой конструкции достигает 80%, КПД стандартных солнечных батарей только 20%. Часть солнечной энергии, поглощенной землей, интенсивно излучается в течение нескольких часов после захода солнца; наноантенны чувствительны к инфракрасному излучению и действуют дольше, чем обычные солнечные батареи. Изготовлены солнечные батареи из графена, они более эффективны в сравнении с кремниевыми батареями, имеют толщину бумажного листа (*рис. 163*).

Появились большие перспективы в изготовлении накопителей энергии. На несколько порядков увеличились емкости зарядных устройств, изготовленных на основе нановолокон кремния, а также графена. Графеновый аккумулятор позволяет автомобилю без подзарядки преодолевать 1000 км, время зарядки которого не более 16 секунд. Ионная проводимость нанокомпозитов позволяет создавать миниатюрные гибкие батареи. Вновь привлекли внимание ионисторы – суперконденсаторы, благодаря нанотехнологиям ими можно заменить аккумуляторы (*рис. 164*). Суперконденсатор обладают преимуществом: для зарядки нужны считанные секунды, емкость конденсатора значительно превышает емкость аккумулятора.

**Медицина.** Сочетание биологических и медицинских знаний вместе с достижениями электроники позволяют, используя нанотехнологии и наноматериалы, создавать микрэлектронные устройства (чипы) для контроля здоровья человека или животного.

В перспективе наночастицы будут использовать как средство доставки лекарств в пораженный участок организма. В перспективе графен будет широко применяться в таких отраслях, как медицина – суперпрочные имплантаты.

**Строительство.** Покрасочные материалы для фасадов зданий на основе порошка известняка и графена, способны длительное время защищать стены от атмосферных воздействий и перепадов температур. При эксплуатации в экстремальных условиях износ строений будет минимальным. Уникальные по прочности конструкции, тросы, кабеля и балочные элементы зданий в сочетании с классическими строительными материалами позволят создавать сооружения, поражающие воображение.



*Рис. 163. Солнечный элемент из графена*



*Рис. 164. Ионистор – суперконденсатор емкостью 3000 Ф*

### Интересно знать!

Компании *Sunvault Energy* удалось создать крупнейший в мире графеновый суперконденсатор емкостью 10 тысяч фарад. *Графеновые суперконденсаторы – это революционный прорыв в области накопления энергии*. В сочетании с недорогими солнечными панелями графеновые конденсаторы дадут миллионам людей шанс обрести энергетическую независимость от сетей электроснабжения.



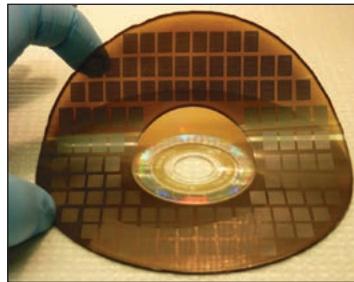
### Обратите внимание!

- Оксид графена быстро удаляет радиоактивные вещества из загрязненной воды. Хлопья оксида графена быстро связываются с естественными и искусственными радиоизотопами и конденсируют их, превращая в твердые вещества.
- Графен можно использовать для фильтрации воды, опреснение морской воды.



### Интересно знать!

В компании Sunvault графен получили с помощью обычного CD-диска, на который налили порцию взвеси графита. Затем диск был вставлен в DVD-привод. Диск прожигли лазером по специальной программе (рис. 165). Фирма работает над тем, чтобы графеновые накопители энергии можно было изготавливать обычной печатью на 3Д-принтере.



*Рис. 165. Производство графена на CD-диске*

### Контрольные вопросы

1. Что такое нанотехнологии?
2. Какова основная задача нанотехнологий?
3. Какие материалы получили название «наноматериалы»?
4. Какими способами можно получить наноматериалы?
5. Что представляет собой графен?
6. Приведите примеры практического применения наноматериалов.



### Упражнение

29

1. Используя материалы сети интернет, составьте «паспорт» графена, указав его свойства и область применения. Какие материалы близки по свойствам графену?
2. Ряд физических свойства графена даны в таблице. Используя необходимые данные, определите: массу нанотрубки диаметром 1 нм, длиной 1 мкм. Оцените силу, которую необходимо приложить, чтобы разорвать трубку.

Постоянная решетки	0,246 нм
Поверхностная плотность	0,77 мг/м <sup>2</sup>
Модуль Юнга	1 ТПа
Теплопроводность	$5,1 \cdot 10^3$ Вт/(м · К)
Оптическая проницаемость	0,977

## Графеновый фильтр для очистки и олпреснения воды

Ряд ученых для изготовления фильтров быстро очищающих воду предполагают использовать графен. Преимущество графеновой мембранны состоят в том, что ее толщина будет порядка 0,3 нм, что позволит ускорить процесс очистки воды. Кроме того, она позволит олпреснить морскую воду. Таким образом, графеновый фильтр – незаменимый атрибут в походных условиях и в морских путешествиях.

Но на пути к широкому применению таких высокотехнологических мембран стоит одно значительное препятствие тонкий материал может порваться, а через образовавшиеся разрывы проникнуть загрязнители. Инженерами Массачусетского технологического института был найден способ восстанавливать разрывы, заполняя их полимерами в результате химического осаждения, но этот метод пока эффективен в лабораторных условиях при постоянном контроле за процессом очистки и состоянием мембранны.

Инженеры из Университета Вашингтона в Сент-Луисе разработали биопленку, состоящую из целлюлозы и оксида графена (*рис. 166*). Покрыв грязные или соленые водоемы, пленка впитывает в себя воду, как губка, и затем испаряется в верхнем слое под воздействием солнечных лучей, оставляя соли и примеси в фильтре – нижнем слое пленки. Для уничтожения бактерий в биопленку инженеры решили включить кроме графена другие наноструктурные материалы. Продолжается работа над улучшением качества пленки для производства безопасной питьевой воды из любого загрязненного источника.



*Рис. 166. Биопленка с содержанием графена для очистки и олпреснения воды*

## Из истории развития нанотехнологии

**1974 г.** Японский физик Норио Танигути ввел термин «нанотехнология», предложив описывать им механизмы размером менее одного микрона.

**1981 г.** Немецкими физиками Гердом Бинниг и Генрихом Рорером был создан сканирующий туннельный микроскоп (СТМ), который позволил манипулировать веществом на атомарном уровне.

**1985 г.** Открыт новый класс соединений – фуллерены, за что американский химик Роберт Керл, британский химик Харольд Крото и американский физик Ричард Смолли получили Нобелевскую премию в 1986 г.

**1986 г.** Сканирующий атомно-силовой (АСМ) микроскоп расширил типы исследуемых материалов.

**1988 г.** Французский и немецкий ученые Альберт Ферт и Петер Грюнберг открыли эффект гигантского магнетосопротивления, после чего магнитные нанопленки и нанопровода стали использоваться для создания устройств магнитной записи

**1991 г.** Японский исследователь Сумио Иидзима открыл углеродные нанотрубки.

**1998 г.** Голландский физик Сиз Деккер создал первый транзистор на основе нанотрубок.

**2004 г.** Сиз Деккер соединил углеродную нанотрубку с ДНК, заложил основу для начала развития бионанотехнологии.

**2004 г.** Российские физики: подданный Нидерландов А.К. Гейм и британский подданный К.С. Новоселов открыли новый материал графен, за исследования свойств которого получили Нобелевскую премию в 2010 г.



### Ответьте на вопрос

Как, на ваш взгляд, могли бы измениться технологии очистки и орошения воды в том случае, если бы процесс производства графеновых мембран стал бы максимально простым?

## Итоги главы 9

### Глоссарий

**Графен** – сверхтонкий слой из атомов углерода, толщиной в один атом.

**Нанотехнологии (НТ)** – совокупность методов манипулирования веществом на атомном или молекулярном уровне с целью получения заранее заданных свойств

**Наноматериалы** – материалы, геометрические размеры которых не превышают 100 нм хотя бы в одном измерении, обладающие качественно новыми свойствами вследствие наномасштабных размеров.

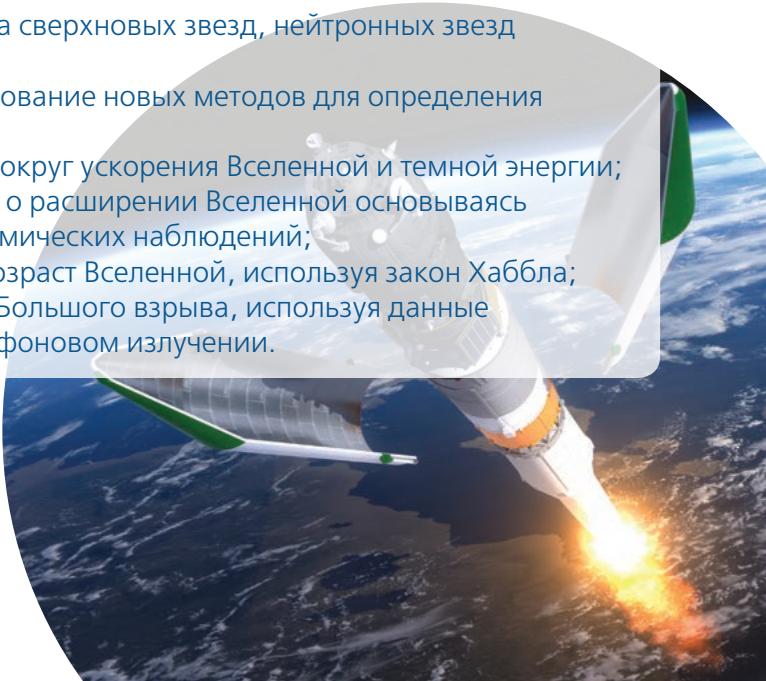
## ГЛАВА 10

# КОСМОЛОГИЯ

Вселенная, как утверждают ученые, появилась 14 миллиардов лет тому назад после Большого взрыва. Год за годом расширяются границы наших знаний о Вселенной. Наземные и космические телескопы регистрируют сигналы, позволяющие разгадывать загадки Вселенной: взрывающиеся звезды, сверх массивные черные дыры и сверхбыстрые потоки газа. С начала XX века телескопы позволили познать мир за пределами Нашей галактики. Познать Вселенную до конца невозможно, ей более миллиарда столетий, она простирается на миллиарды световых лет и наполнена множеством галактик. Космология – это раздел астрономии, изучающий свойства и эволюцию Вселенной.

### Изучив главу, вы сможете:

- объяснять, что звезды классифицируются по яркости света и характеризуются понятиями: видимая звездная величина и абсолютная звездная величина;
- использовать диаграмму Герцшпрunga-Рассела для объяснения эволюции звезд;
- описывать свойства сверхновых звезд, нейтронных звезд и черных дыр;
- описывать использование новых методов для определения расстояний;
- обсуждать споры вокруг ускорения Вселенной и темной энергии;
- осуждать гипотезы о расширении Вселенной основываясь на данных астрономических наблюдений;
- уметь оценивать возраст Вселенной, используя закон Хаббла;
- объяснять теорию Большого взрыва, используя данные о микроволновом фоновом излучении.



## § 30. Мир звезд. Переменные звезды

### Ожидаемый результат

Прочитав параграф, вы сможете:

- объяснять, что звезды классифицируются по яркости света и характеризуются понятиями: видимая звездная величина и абсолютная звездная величина.



### Ответьте на вопросы

1. Какое представление о расположении звезд было в античные времена?
2. Почему для правильной характеристики звезд необходимо знать расстояние до нее?

### I. Мир звезд

К середине XIX века с ростом мощности телескопов лавинообразно нарастало количество вновь открываемых звезд. Звезд до 6-й звездной величины насчитывается около 6000, до 11-й звездной величины примерно миллион, а до 24-й звездной величины около 2 миллиардов. В XIX веке мнения ученых склонились к тому, что истинная яркость звезд того же порядка, что и у Солнца, а наблюдаемая яркость целиком зависит от их удаленности. Эта гипотеза приводила к ошибочным выводам, поскольку светимость большинства ярких звезд на самом деле значительно превышает светимость Солнца (рис. 167). Решение проблемы определения расстояний до звезд стало первой ступенькой в изучении и классификации звезд по основным характеристикам: расстоянию, светимости, цвету, размерам, массе, возрасту, строению.

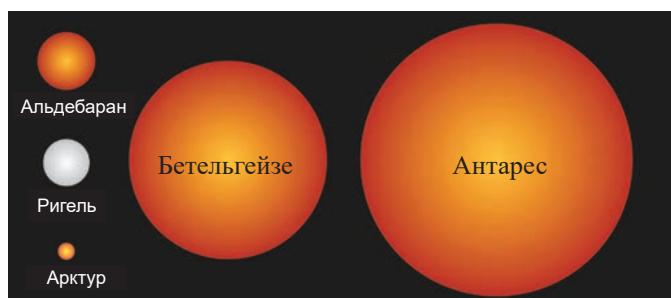


Рис. 167. Размеры и масса звезд значительно отличаются



### Задание 1

1. Выясните, используя Интернет или справочную литературу, во сколько раз Антарес больше по размерам и массе Солнце?
2. На каком расстоянии от Солнца находится Антарес?

### II. Основные характеристики звезд. Видимая и абсолютная звездная величина. Светимость звезд

Звезды отличаются по видимой яркости не только из-за различия расстояния до них, но и вследствие различия их светимости.

**Светимостью звезды  $L$  называют энергию, излученную в единицу времени. Светимость звезды – это мощность излучения световой энергии.**

Светимость измеряется в Вт или в единицах светимости Солнца. Светимость Солнца равна  $3,86 \cdot 10^{26}$  Вт.

Если две звезды имеют одинаковую светимость, то звезда, которая находится дальше от нас, имеет меньшую видимую яркость. Сравнивать звезды по светимости можно лишь в том случае, если рассчитать их видимую яркость, которую принято называть звездной величиной для одного и того же стандартного расстояния. Таким расстоянием принято считать 10 пк.

**Видимая звездная величина, которую имела бы звезда, если бы находилась от нас на расстоянии 10 пк, получила название абсолютной звездной величины  $M$ .**

Принято, что звезды 1-й величины ярче 6-й в 100 раз, тогда при разности в одну звездную величину видимая яркость звезд отличается в  $\sqrt[5]{100} \approx 2,512$  раз. Отношение видимой яркости двух звезд связано с разностью их видимых звездных величин соотношением:

$$\frac{I_1}{I_2} = 2,512^{m_2 - m_1}. \quad (1)$$

где  $m_1$  и  $m_2$  – видимые звездные величины.

Используя формулу (1), запишем отношение для яркости одной и той же звезды, находящейся на расстоянии  $D$  и расстоянии, равном 10 парсек,  $D_0 = 10$  пк:

$$\frac{I}{I_0} = 2,512^{M - m}, \quad (2)$$

где  $M$  – абсолютная звездная величина,  $m$  – видимая звездная величина.

Яркость звезд или интенсивность излучения обратно пропорциональна квадрату расстояния до нее, поэтому справедливо соотношение:

$$\frac{I}{I_0} = \frac{D_0^2}{D^2}. \quad (3)$$

Решая совместно уравнения (2) и (3), получим формулы связи абсолютных и видимых величин с расстоянием до звезды и ее параллаксом:

$$M = m + 5 - 5 \cdot \lg D \quad (4)$$

или

$$M = m + 5 + 5 \cdot \lg p. \quad (5)$$

Для Солнца  $M = 5$ , следовательно, на расстоянии 10 пк Солнце выглядело бы как звезда 5 звездной величины.

По значению абсолютной звездной величины можно рассчитать светимость звезды в единицах светимости Солнца:

$$L = 2,512^{5-M}. \quad (6)$$



### Ответьте на вопрос

Почему в астрономии введена абсолютная звездная величина?



### Задание 2

- Докажите, что абсолютная звездная величина Солнца равна 5. Примите видимую звездную величину равной  $m = -26,6$ .
- Определите светимость  $S$  Золотой Рыбы в ваттах.

Исследование звезд показывает, что по светимости они могут отличаться в десятки миллиардов раз. В звездных величинах это различие достигает 26 единиц.

Абсолютные величины звезд очень высокой светимости отрицательные и достигают  $M = -9$ . Такие звезды называются гигантами и сверхгигантами. Излучение звезды  $S$  Золотой Рыбы мощнее излучения нашего Солнца в 500 000 раз, ее светимость равна  $L = 500\ 000$  светимости Солнца. Наименьшую мощность излучения имеют карлики с абсолютной звездной величиной, равной  $M = +17$  и светимостью  $L = 0,000013$  светимости Солнца.

### Задание 3

Рассмотрите таблицу видимых и абсолютных звездных величин некоторых ярких звезд. Расположите звезды в порядке убывания абсолютной звездной величины. Какое место в последовательности занимает Солнце?

Название звезды	Видимая звездная величина	Абсолютная звездная величина
Солнце	-26,72	+4,83
Сириус А	-1,5	+1,44
Канопус	-0,74	-5,71
Арктур	-0,05	-0,3
Альфа Центавра А	+0,01	+4,38
Вега	+0,03	+0,58
Ригель	+0,13	-7,8
Процион А	+0,34	+2,6
Бетельгейзе	+0,5	-5,47
Альдебаран	+0,86	-0,6
Антарес А	+0,9	-5,15
Поллукс	+1,14	+1,08
Денеб	+1,25	-8,38

### III. Цвет, спектры и температура звезд

Звезды имеют различный цвет. Это дает возможность определить температуру звезд по распределению энергии в спектре излучения. В сравнительно холодных звездах преобладает излучение в красной области спектра. В спектрах холодных красных звезд класса  $M$  с температурой около  $3000\ K$  видны полосы поглощения простейших двухатомных молекул, чаще всего оксида титана. В спектрах других красных звезд преобладают оксиды углерода или циркония. Красные звезды первой величины класса  $M$  – Антарес, Бетельгейзе.

В спектрах желтых звезд класса  $G$ , к которым относится и Солнце с температурой  $6000\ K$  на поверхности, преобладают тонкие линии металлов: железа, кальция, натрия.

Звездой типа Солнца по спектру, цвету и температуре является яркая Капелла в созвездии Возничего.

В спектрах белых звезд класса *A*, как Сириус, Вега и Денеб, наиболее сильны линии водорода. Есть много слабых линий ионизованных металлов. Температура таких звезд около 10 000 *K*.

В спектрах наиболее горячих, голубоватых звезд с температурой около 30 000 *K* видны линии нейтрального и ионизованного гелия.

Температуры большинства звезд заключены в пределах от 3000 до 30 000 *K*. У немногих звезд температура достигает порядка 100 000 *K*.

Таким образом, спектры звезд очень сильно отличаются друг от друга. По спектру можно определить химический состав и температуру атмосферы звезды. Изучение спектров излучения показало, что в атмосферах всех звезд преобладающими элементами являются водород и гелий. Различие звездных спектров объясняется не разнообразием их химического состава, а различием температуры и других физических условий в звездных атмосферах. Путем сравнения интенсивности линий поглощения атомов и ионов одного и того же химического элемента теоретически определяют их относительное количество. По темным линиям спектров звезд можно определить температуру атмосфер.

#### IV. Переменно-двойные звезды.

##### Массы и размеры звезд

Если для двойной звезды удается оценить орбиту каждой звезды и период ее обращения, то используя законы Кеплера и законы сохранения, можно рассчитать массы звезд.

Наиболее изученными системами являются спектрально-двойные звезды, их называют переменно-двойными или Алголями по названию типичного представителя  $\beta$  Персея. Блеск двойной звезды меняется в связи с тем, что при движении звезд вокруг общего центра масс, они поочередно загораживают друг друга. Анализ кривой изменения блеска с течением времени позволяет установить размеры и яркость звезд, размеры орбиты, ее форму и наклон к лучу зрения, а также массы звезд. До сих пор не существует прямого метода определения массы одиночной звезды, как правило, дают аналоговую оценку, сопоставляя объект со звездами того же цвета и спектрального класса.

Другая возможность существует для затменно-двойных звезд. Если удается определить орбитальные скорости компонент, то радиусы оцениваются по длительности затмений. Удобство метода заключается в том, что радиусы звезд можно определить без предварительного выяснения расстояния до звезды.

#### Ответьте на вопросы

- Почему спектры звезд различны?
- Что можно определить по спектрам излучения звезд?

#### Задание 4

- Изучив IV часть параграфа, назовите виды переменных звезд. Почему их называют переменными, какие процессы происходят со звездами (или в звездах)?
- Выясните, существуют ли другие виды звезд, которые можно отнести к переменным? Какова причина изменения светимости этих звезд?

## ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Во сколько раз Сириус ярче, чем Бетельгейзе?

**Дано:**

$$m_1 = -1,5$$

$$m_2 = 0,5$$

$$\frac{I_1}{I_2} = ?$$

**Решение:**

Видимая яркость двух звезд связана с разностью их видимых звездных величин:

$$\frac{I_1}{I_2} = 2,512^{m_2 - m_1}.$$

$$\frac{I_1}{I_2} = 2,512^{0,5 - (-1,5)} = 2,512^2 = 6,31.$$

**Ответ:**  $\frac{I_1}{I_2} = 6,31$ .

## Контрольный вопрос

1. По каким характеристикам классифицируют звезды?
2. Что называют светимостью звезды?
3. В каком случае звездную величину называют видимой? В каком случае абсолютной звездной величиной?
4. Как определяют истинную светимость звезд?



## Упражнение

30

1. Во сколько раз Сириус ярче, чем Альдебаран, Солнце ярче, чем Сириус?
2. Одна звезда ярче другой в 16 раз. Чему равна разность их звездных величин?

## Творческое задание

Подготовьте сообщение с ppt-презентацией по темам (на выбор):

1. Рождение, жизнь и смерть звезды. Тайны белых карликов и черных дыр.
2. Энергия звезд.
3. Новые и сверхновые звезды – переменные звезды.

## § 31. Диаграмма Герцшпрунга – Рассела. Сверхновые, нейтронные звезды. Черные дыры

### Ожидаемый результат

Прочитав параграф, вы сможете:

- использовать диаграмму Герцшпрунга – Рассела для объяснения эволюции звезд;
- описывать свойства сверхновых звезд, нейтронных звезд и черных дыр.



### Ответьте на вопросы

- Могут ли звезды менять свою светимость, размеры, массу? Поясните свой ответ.
- Как образуются звезды?
- Почему в звездах происходят термоядерные реакции, а в планетах нет?



### Задание 1

Рассмотрите диаграмму Герцшпрунга – Рассела. Выясните, как светимость звезд зависит от их температуры? Почему светимость звезд одного спектрального класса значительно отличается? Как диаграмма связана с эволюцией звезды: рождением, жизнью и ее смертью? Можно ли утверждать, что звезды эволюционируют вдоль главной последовательности этой диаграммы от горячих голубых гигантов до красных карликов?

### I. Диаграмма Герцшпрунга – Рассела

Датский астроном Э. Герцшпрунг в 1905 г. установил зависимость между абсолютной звездной величиной и спектральным классом звезд. На графике зависимости светимости звезд от их температуры все звезды разместились в узкой полосе, названной главной последовательностью, на правом конце которой расположились легкие звезды с малой яркостью и температурой, а на левом – массивные звезды с высокой температурой и яркостью (рис. 168).

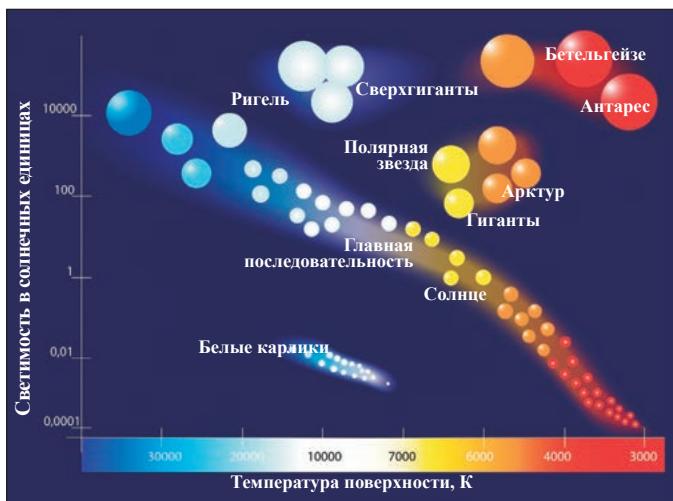


Рис. 168. Диаграмма Герцшпрунга – Рассела

Результат работы Герцшпрунга – разделение звезд по классам светимости на карлики и гиганты. Дело в том, что звезды одного и того же спектрального класса могут обладать отличающейся в тысячи раз светимостью. При одинаковой температуре поверхности объяснить это можно только очень большим различием в радиусах. Идея Герцшпрунга была развита директором обсерватории Принстонского университета в США Генри Норрисом Расселом, который тщательно проанализировал диаграмму «спектр – абсолютная звездная величина», впоследствии названную диаграммой Герцшпрунга – Рассела.

Положение звезды на диаграмме такого типа оказалось не просто наглядной и удобной формой записи информации о ее состоянии. Рассел предположил,

что перед ним какая-то эволюционная последовательность. Звезда, сжимаясь под действием гравитации, разогревается, путешествуя по верхнему краю диаграммы от области красных гигантов до класса голубых сверхгигантов главной последовательности. Затем она спускается в диагональном направлении по главной последовательности, проходя фазу, в которой находится сейчас желтый карлик – Солнце, в фазу красных карликов и, наконец, превращается в невидимый выгоревший объект – белый карлик. Такова была одна из первых попыток создать модель звездной эволюции.

## II. Эволюция звезд

В астрофизике общая картина жизненного цикла звезд давно известна: звезды рождаются, живут и умирают.

*Рождение звезды.* Все начинается с молекулярного облака – плотного межзвездного газа, содержащего молекулы водорода (рис. 169). В облаке под действием сил гравитации формируется центр тяжести. Этот процесс, может быть спровоцирован ударной волной от взорвавшейся рядом сверхновой звезды. Окружающее вещество начинает вращаться вокруг этого центра и наслаждается на его поверхность, образуется сферическое ядро с растущей температурой и светимостью – «протозвезды». Как только внутри ядра температура под давлением огромных масс достигает миллионов градусов, в центре протозвезды происходят термоядерные реакции, энергия которых достигает поверхности протозвезды. Во Вселенной появляется полноценная молодая звезда.

*Жизнь звезды.* Звезда вступает в самый продолжительный период, занимающий 90 % всего времени их существования. Это стабильное состояние, которое соответствует главной последовательности на диаграмме Герцшпрунга – Рассела. На данном этапе, происходит постепенное выгорание водорода в зоне термоядерных реакций.

*Смерть звезды.* Когда в звездах водород полностью выгорает, дальнейшее развитие напрямую зависит от массы светила. Чем меньшей массой обладает звезда, тем более продолжительной будет ее «жизнь».

*Красные карлики,* звезды с массой менее половины массы Солнца, еще ни разу не «умирали» с момента Большого взрыва. Согласно вычислениям и компьютерному моделированию, такие звезды из-за слабой интенсивности термоядерных реакций могут спокойно сжигать водород от десятков миллиардов до десятков триллионов лет, а в конце своего пути, вероятно, просто потухнут.

*Белые карлики* обладают судьбой, схожей с красными карликами – спокойное выгорание в течение миллиардов-триллионов лет, если, конечно, рядом нет звезды-компаньона, за счет которой белый карлик может увеличить свою массу.



Рис. 169. Область активного звездообразования № 44/©ESO, NASA

*Желтые звезды* со средней массой от половины до десяти масс Солнца после выгорания водорода в центре способны сжигать более тяжелые химические элементы в своем составе – сначала гелий, затем углерод, кислород и далее, в зависимости от массы, вплоть до железа-56. Следующая фаза после главной последовательности в диаграмме Герцшprungа – Рассела для таких звезд называется стадией красного гиганта. Смена топлива каждый раз приводит к значительным трансформациям звезды, это предсмертная агония. Звезда то расширяется в сотни раз и краснеет, то снова сжимается. Светимость тоже меняется – то в тысячи раз увеличивается, то снова уменьшается. В конце этого процесса внешняя оболочка красного гиганта сбрасывается, образуя зрелищную планетарную туманность (рис. 170). В центре остается обнаженное ядро – белый карлик с массой приблизительно в половину солнечной и радиусом, примерно равным радиусу Земли.

*Красные гиганты* – звезды с массой равной примерно 12 солнечным и более, и массой ядра, превышающей предел Чандraseкара, равный 1,44 солнечной массы. Такие звезды высвобождает скопившуюся энергию в мощнейшем термоядерном взрыве «сверхновой» звезды (рис. 171). В центре остатков «сверхновой», разбрасывающей звездное вещество с огромной силой на многие световые годы вокруг, остается не белый карлик, а сверхплотная нейтронная звезда, радиусом всего в 10–20 километров.

*Красные сверхгиганты*, масса которых больше 30 солнечных масс, а масса ядра превышает предел Оппенгеймера-Волкова, равный примерно 2,5–3 массам Солнца, оставляет в центре останков сверхновой черную дыру. Ядро взорвавшейся звезды сжимается настолько сильно, что коллапсировать начинают даже нейтроны, и больше уже ничто, включая свет, не может покинуть пределов образовавшейся черной дыры. Впервые снимок черной дыры удалось получить к апрелю 2019 г. в итоге 25-летней работы проекта ЕНТ – Event Horizon Telescope. 8 радиотелескопов, расположенных от Южного полюса до Испании, собрали уникальные данные о черных дырах (рис. 172).



Рис. 170. Планетарная туманность M57 в созвездии Лирь



Рис. 171. Сверхновая SN 1994D на краю галактики NGC 4526 / ©NASA

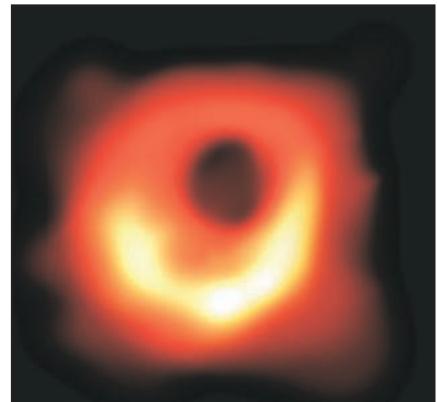


Рис. 172. Снимок «тени» черной дыры в центре галактики M87 созвездия Девы. Фото : Event Horizon Telescope Collaboration



### Ответьте на вопрос

Почему железо иногда называют «пеплом термоядерного горения»?

*Голубые сверхгиганты* – особо массивные звезды, могут миновать стадию красного сверхгиганта и также взорваться «сверхновой» звездой, превратившись в черную дыру.

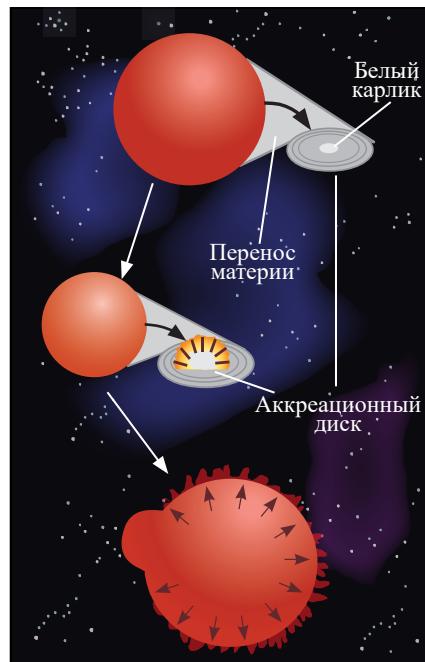
### III. Сверхновые звезды

В 1919 г. известный шведский астроном Лундмарк выдвинул гипотезу, что в галактиках, кроме «обычных новых звезд», частота вспышек которых довольно велика, изредка вспыхивают звезды, светимость которых в максимуме в десятки тысяч раз больше. В 1934 г. американские астрономы Цвики и Бааде предложили такие звезды называть «сверхновыми». Название стало общепринятым для обозначения грандиозного явления взрыва звезд. Работами Лундмарка и его последователей доказано, что в нашей Галактике за последние 1000 лет наблюдались по крайней мере шесть сверхновых: в 1006, 1054, 1181, 1572, 1604 и 1667 годах. Особую роль в истории астрономии сыграла сверхновая 1054 г., на месте которой находится знаменитая Крабовидная туманность.

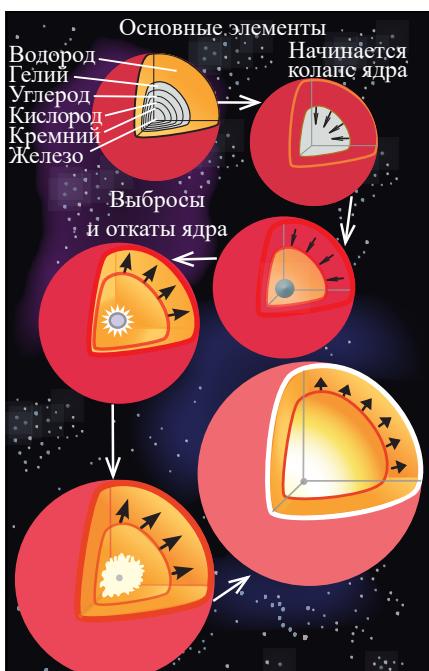
Сверхновые делят на два типа: сверхновые I типа – старые небесные объекты со сравнительно небольшой массой. Это белые карлики, которые увеличивают свою массу переносом энергии от соседней звезды (рис. 173 а). Сверхновые II типа – это молодые объекты, с массой значительно превышающей массу Солнца (рис. 173 б).

Сверхновые II типа вспыхивают только в ветвях спиральных галактик, сверхновые I типа вспыхивают в эллиптических и «неправильных». Дело в том, что в эллиптических галактиках почти нет межзвездной среды, и поэтому процесс звездообразования давно уже прекратился. Следовательно, звездное население таких галактик – это очень старые звезды с малой массой. Сверхновые II типа находятся в спиральных рукавах, где из газово-пылевой среды рождаются звезды. Возраст звезд, вспыхивающих как сверхновые II типа, не превышает нескольких десятков миллионов лет.

Важным отличием спектров сверхновых I типа от спектров сверхновых II типа является отсутствие у первых сколько нибудь



а)



б)

Рис. 173. Сверхновые: а) I типа;  
б) II типа

интенсивных линий водорода в спектре излучения, характерных для сверхновых II типа. Это свидетельствует о том, что звезды, вспыхивающие как сверхновые I типа – объекты, в которых выгорел водород.

#### IV. Нейтронные звезды

Взрывы сверхновых звезд сопровождаются образованием нейтронных звезд – космических объектов, существование которых было предсказано теоретиками. Они были открыты теоретиками «на кончике пера» за треть столетия до того, как их реально обнаружили астрономы. Нейтронные звезды трудно обнаружить астрономическими наблюдениями, так как их размер порядка 10 км. Все попытки обнаружить нейтронные звезды оптическими методами должны были быть обречены на неудачу.

Образовавшаяся в результате гравитационного коллапса нейтронная звезда должна иметь исключительно высокую температуру, порядка нескольких миллионов кельвин. Максимум излучения по закону смещения Вина приходится на область очень жестких рентгеновских лучей. Возникновение рентгеновской астрономии позволило обнаружить нейтронные звезды и тем самым доказать реальность их существования (рис. 174).

#### V. Черные дыры

Черная дыра – область пространства, в которой гравитационное притяжение настолько сильно, что ни вещества, ни излучение не могут эту область покинуть.

Радиус взорвавшегося объекта должен стать меньше «гравитационного радиуса». Значение гравитационного радиуса чрезвычайно мало по сравнению с привычным размером физических тел, например, для Солнца его значение составляет 3 км, а для Земли – 1 см. По этой причине создать и исследовать черную дыру в лаборатории практически невозможно, свойства черных дыр пока изучаются только теоретически. Расчеты показывают, что массивные звезды после истощения в них термоядерного топлива могут под действием собственного тяготения сжиматься до размера своего



#### Интересно знать!

В центральной части нашей Галактики Млечный Путь находится черная дыра Стрелец А\*. Ее масса превышает солнечную в 4,31 миллиона раз. Подобные объекты встречаются в центральных частях наиболее крупных спиральных и эллиптических типах галактик.



Рис. 174. Нейтронная звезда



#### Ответьте на вопросы

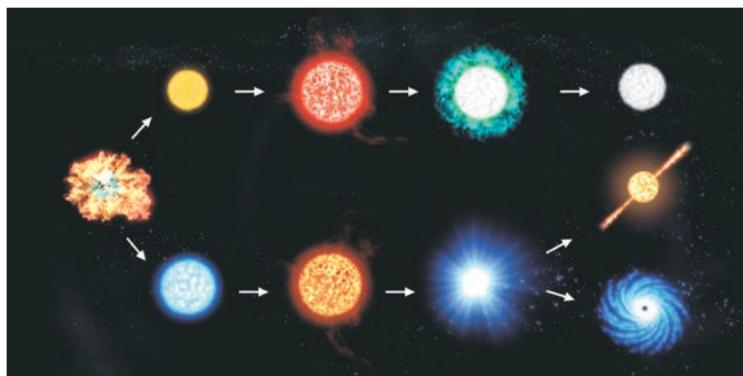
1. Почему не обнаружены планеты у голубых и красных гигантов? У белых карликов?
2. Что произойдет с планетами Солнечной системы в момент превращения Солнца в белый карлик?
3. Какую стадию в своей эволюции должно пройти Солнце до своей смерти?

гравитационного радиуса. Факт существования черных дыр уже трудно подвергать сомнению, практическое изучение их свойств еще впереди.

Доказано несколько математических теорем о черных дырах. Две из них: образовавшаяся черная дыра никогда не может быть разрушена; одна черная дыра никогда не может разделиться на две черные дыры, хотя обратный процесс возможен. Английский теоретик Хоукинг показал, что первая теорема неверна: образовавшиеся каким-либо образом черные дыры очень малой массы с течением времени «испаряются».

### Задание 2

Подпишите рисунок и название небесных объектов, изображенных на рисунке 175.



*Рис. 175. К заданию 2*

### Контрольные вопросы

1. Какую модель эволюции звезд предложил Рассел?
2. От каких величин зависит эволюция звезды?
3. Что называют «сверхновой» звездой?
4. Почему нейтронные звезды можно обнаружить только в рентгеновских лучах?
5. При каком условии образуется «черная дыра»? Что она представляет собой?

### Творческое задание

Подготовьте сообщение с ppt-презентацией по темам (на выбор):

1. Методы определения возраста звезды.
2. Излучение звезд в диапазоне радиоволн.
3. Пульсары.

## § 32. Наша Галактика. Открытие других Галактик. Квазары

### Ожидаемый результат

Прочитав параграф, вы сможете:

- описывать строение различных видов галактик и квазаров.



### Ответьте на вопросы

- Почему нашу Галактику назвали «Млечный путь»?
- Из чего состоят галактики?
- Какие галактики вам известны? Как далеко от Млечного пути они находятся?

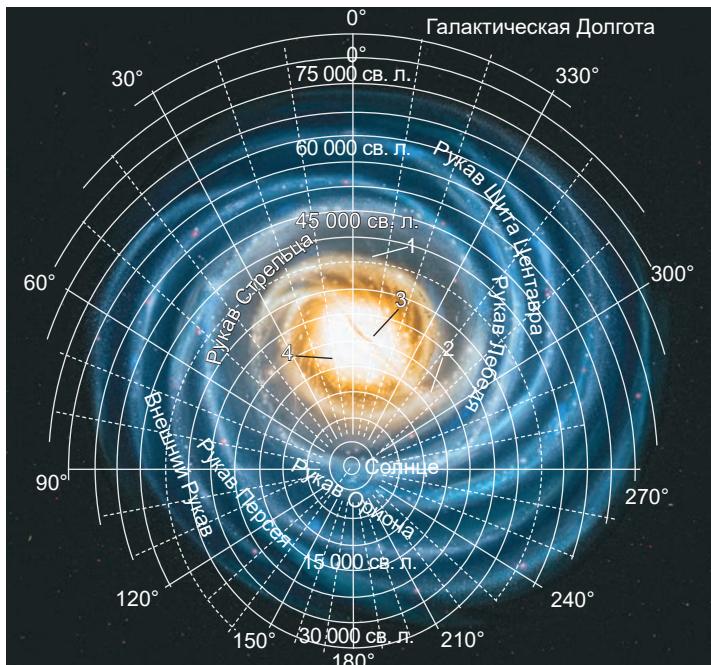


### Задание 1

Составьте характеристику галактике «Млечный путь». Изобразите основные ее части на рисунке.

### I. Наша Галактика

Все видимые на небе звезды образуют звездную систему «Млечный путь», которая представляет собой спиральную галактику с перемычкой. В центре нашей Галактики находится черная дыра, вокруг нее четыре рукава звезд. Межзвездное пространство заполнено космической пылью, газом и темной материией (рис. 176).



1 – Дальний Трехкилопарсековый Рукав; 2 – Ближний Трехкилопарсековый Рукав; 3 – Перемычка; 4 – Длинная Перемычка

Рис. 176. Спиральные рукава Млечного пути

**Галактика** (от древнегреч. *γαλαξίας* – молочный, млечный) – гравитационно-связанная система из звезд и звездных скоплений, межзвездного газа и пыли и темной материи.

Солнечная система находится вблизи плоскости Млечного пути, которую называют галактической. Галактика простирается вдоль этой плоскости на 100000 световых лет. В перпендикулярном направлении от Солнечной системы Галактика простирается на расстояние порядка 1000 световых лет.

Галактика содержит две основных подсистемы: гало и звездный диск (рис. 177).

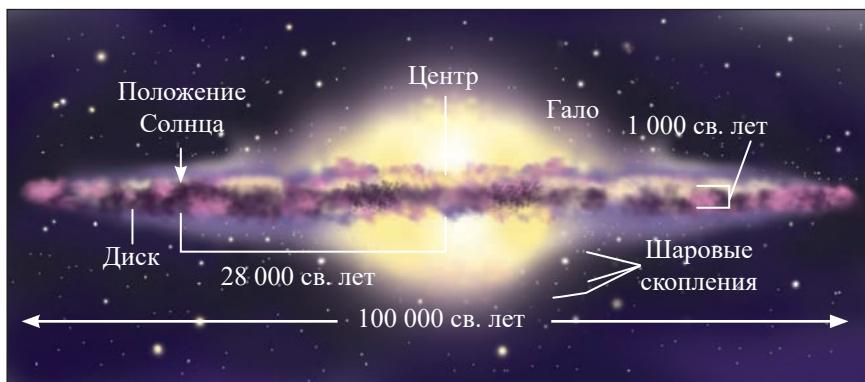


Рис. 177. Строение Нашей Галактики. Положение Солнца в Галактике

Плотность вещества, высокая в центре гало, довольно быстро падает с удалением от него. Центральную, наиболее плотную часть гало в пределах нескольких тысяч световых лет от центра Галактики называют балдж, внутри него находится ядро.

Звезды внутри диска движутся по круговым траекториям вокруг центра Галактики. В звездном диске между спиральными рукавами расположено Солнце, оно находится от ядра Галактики – на расстоянии 8 кпк, около 28 000 световых лет (рис. 177). В области, где расположено Солнце, довольно много межзвездного вещества, поглощающего свет и делающего звездный диск почти непрозрачным для видимого света в некоторых направлениях, особенно в направлении ее ядра.

В ядре высокая концентрация звезд: в каждом кубическом парсеке находятся тысячи звезд. Если бы мы жили на планете около звезды, находящейся вблизи ядра Галактики, то на небе были бы видны десятки звезд, по яркости сопоставимых с Луной. В центре Галактики предполагается существование массивной черной дыры.

Масса Галактики оценивается в 200 миллиардов масс Солнца, порядка  $2 \cdot 10^9$  звезд доступно наблюдениям из-за пыли и газа. Размеры Галактики определены по расположению звезд, которые видны на больших расстояниях – это цефеиды и горячие сверхгиганты. Диаметр нашей Галактики Млечный Путь принято определять в 100 000 световых лет, то есть примерно 30 кпк. Диск и окружающее его гало погружены в корону. В настоящее время считают, что размеры короны Галактики в 10 раз больше, чем размеры диска.

Все звезды Галактики обращаются вокруг ее центра. По сравнению с гало диск вращается заметно быстрее. Скорость вращения диска не одинакова на различных расстояниях от центра. Солнечная система совершает полный оборот вокруг центра Галактики примерно за 200 млн лет со скоростью около 250 км/с.

В диске находятся спиральные ветви – рукава. Молодые звезды и очаги звездообразования расположены в основном вдоль рукавов. Гало составляют объекты, возникшие на ранних стадиях эволюции Галактики: звезды шаровых скоплений, возраст которых превышает 12 млрд лет. Его обычно принимают за возраст самой Галактики.

Наша Галактика Млечный Путь входит в так называемую Местную группу, в которой насчитывается почти 40 галактик. Самые крупные из них – наш Млечный

Путь и несколько более крупная галактика Туманность Андромеды, которая различима на темном небе даже невооруженным глазом.

## II. Открытие других галактик

В 1785 г. Уильям Гершель попытался определить форму и размеры Млечного Пути и положение в нем Солнца, а в 1795 г., наблюдая планетарную туманность NGC 1514, он отчетливо увидел в ее центре одиночную звезду, окруженную туманным веществом. NGC 1514 была примером поздней стадии эволюции, где из первичной туманности образовалась центральная звезда. К концу XVIII столетия Шарль Мессье составил каталог, содержащий 109 ярких туманностей. К середине XIX в. Джон Гершель открыл еще 5000 туманных объектов. Он предположил, что туманности могут быть далекими звездными системами, аналогичными системе Млечного Пути. С момента публикации каталога до 1924 г. продолжались споры о природе этих туманностей.

В 1936 г. Хаббл составил классификацию галактик, которая используется и в настоящее время, ее называют последовательностью Хаббла. Разглядеть на небе невооруженным глазом можно всего лишь три галактики: туманность Андромеды в северном полушарии, Большое и Малое Магеллановы Облака – в южном. Разрешить изображение галактик до отдельных звезд не удавалось вплоть до начала XX века. К началу 1990-х гг. насчитывалось не более 30 галактик, в которых удалось увидеть отдельные звезды. После запуска космического телескопа «Хаббл» и ввода в строй 10-метровых наземных телескопов число разрешенных галактик резко возросло.

Галактики отличаются большим разнообразием: среди них можно выделить эллиптические галактики, дисковые спиральные галактики, галактики с перлычкой, линзовидные, карликовые, неправильные.

*Эллиптические галактики (E) – галактики, у которых дисковой составляющей нет, либо она слабоконтрастна (рис. 178 а).*

*Сpirальные галактики (S) – галактики, обладающие спиральными ветвями. Иногда ветви могут вырождаться в кольца (рис. 178 б).*

*Линзовидные галактики (S0) – галактики, по своей структуре не отличающиеся от спиральных, за исключением отсутствия четкого спирального*



а)



б)



в)



г)

**Рис. 178. Виды галактик**

узора. Объясняется это низким содержанием межзвездного газа, а значит, и низким темпом звездообразования (*рис. 178 в*).

*Неправильные галактики* (Irr) – для них характерна неправильная клочковатая структура. Как правило, в них очень много межзвездного газа, до 50 % от массы галактики (*рис. 178 г*).

Большинство галактик во Вселенной собрано в группы из нескольких десятков галактик, которые связаны между собой силами притяжения. Часто в группе есть самая крупная, доминирующая галактика, которая может втягивать в себя соседние, более мелкие галактики или вытягивать из них межзвездный газ. Группы и отдельные галактики объединены в скопления, состоящие уже из нескольких сотен галактик. Также известны скопления скоплений – сверхскопления из многих тысяч галактик. На этом уровне во Вселенной выделяют протяженные цепочки сверхскоплений галактик. Самые крупные цепочки называют стенами, величайшая из которых – Великая стена Слоуна.

Между цепочками существуют гигантские области, где галактик вообще нет, их называют *войдами*. Это элементы ячеистой структуры Вселенной.

### III. Квазары

Квазар (от англ. *quasar* – сокращение от QUASi stELLAR radio source – «квазизвездный радиоисточник») – тип объектов Вселенной, которые отличаются достаточно высокой светимостью и таким малым угловым размером, что на протяжении нескольких лет после обнаружения их не получалось отличить от «точечных источников» – звезд. Впервые квазар был обнаружен астрономом М. Шмидтом 5 августа 1962 г. За последние 50 лет найдено более чем 5000 квазаров, в спектрах которых наблюдается значительное смещение линий у красного конца, означающее, согласно закону Доплера, что квазары удаляются от нас с колossalной скоростью.

Квазары – достаточно активные объекты, их активность длится не менее нескольких миллионов лет. В большинстве случаев излучение квазаров является настолько сильным, что затмевает собой галактику, в которой находится. Кроме оптического, инфракрасного, ультрафиолетового и рентгеновского излучения, они выбрасывают потоки быстрых элементарных частиц – космических лучей, которые, перемещаясь в магнитных полях, образуют радиоизлучение квазара. Потоки этих лучей в основном покидают квазар в виде двух струй бьющих в двух разных направлениях, создавая два «радиооблака» на противоположных сторонах квазара (*рис. 179*).

Наиболее вероятную модель, которая смогла бы описать его наблюдаемые свойства, можно представить следующим образом: в центре вращающегося газового диска располагается массивный компактный объект, скорее всего, черная дыра. Его центральная горячая часть представляет собой источник электромагнитного излучения и быстрых космических частиц, которые могут распространяться только вдоль оси диска. Эта теория, хотя и не единственная, но наиболее известна в настоящее время. Согласно ей квазар получает свою энергию за счет гравитационного поля массивной черной дыры. Благодаря своему



*Рис. 179. Квазар*

притяжению черная дыра разрушает пролетающие мимо звезды а, возможно, и целые галактики. Появившийся при этом процессе газ формируется в диск, окружающий черную дыру, и со временем стягивается к ней. Из-за сжатия и быстрого вращения центральной части диска, он разогревается и дает достаточно мощное излучение. Вещество диска отчасти «впитывается» черной дырой, увеличивая при этом ее массу, и частично покидает квазар в виде узконаправленных потоков газа и космических лучей. Эта модель квазара изучается все более досконально, но пока не может разъяснить все наблюдаемые свойства. По-прежнему неразгаданными являются формирование и эволюция квазаров.



### Задание 2

1. Систематизируйте информацию о квазарах, данную в параграфе в виде кластера. Дополните материалами из сети Интернет и дополнительной литературы.
2. Предложите свою модель квазара. В чем отличие вашей модели от модели, предложенной астрофизиками?

### Контрольные вопросы

1. Что называют Галактикой?
2. Какое строение имеет наша Галактика? Как ее называют?
3. Как определили размер Галактики?
4. Какие типы галактик существуют?
5. Что называют квазаром? Какими свойствами обладают эти небесные тела?
6. Какую модель квазара представляют астрофизики?

### Творческое задание

Подготовьте сообщение по темам (на выбор):

1. Из истории исследования галактик. Последовательность Хаббла.
2. Движение, взаимодействие и столкновение галактик. Великая стена Слоуна.
3. Квазар – смертоносный объект Вселенной.

## § 33. Расстояние до звезд. Определение расстояний до галактик

### Ожидаемый результат

Прочитав параграф, вы сможете:

- описывать использование новых методов для определения расстояний.

### Интересно знать!

Впервые измерение годичного параллакса звезды Веги удалось осуществить в 1837 г. русскому академику В.Я. Струве. Позже были определены параллаксы еще у двух звезд, одной из которых была  $\alpha$  Центавра. Эта звезда оказалась ближайшей к нам, ее годичный параллакс  $\rho = 0,75''$ . Под таким углом невооруженному глазу видна проволочка толщиной 1 мм с расстояния 280 м.

### Задание 1

- Выразите в угловых секундах значение угла, равного 1 рад.
- Докажите, что свет проходит расстояние от  $\alpha$ -Центавра до Солнца за 4 года.
- Докажите верность соотношений единиц измерений:  
 $1 \text{ пк} = 3,26 \text{ св. г.} =$   
 $= 206\,265 \text{ а.е.} = 3 \cdot 10^{13} \text{ км.}$

### I. Методы определения расстояний до небесных объектов

В зависимости от удаленности космического объекта от Солнечной системы в астрономии используют различные методы определения расстояния (рис. 180). Методы «Цефеиды», «Стандартная свеча», «Сверхновые» принципиально не отличаются, расстояние до источников излучения определяют по их светимости и видимой звездной величине. Выбор объекта в качестве стандартной свечи зависит от измеряемого расстояния.

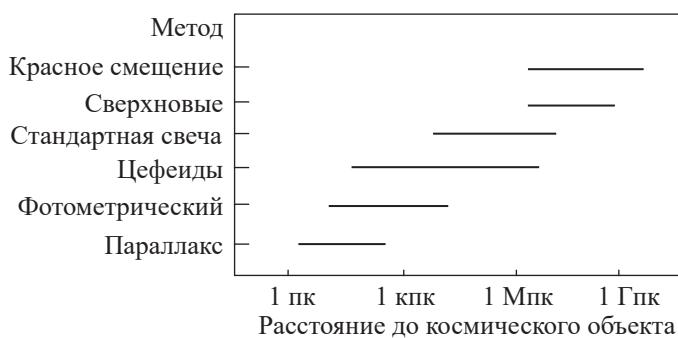


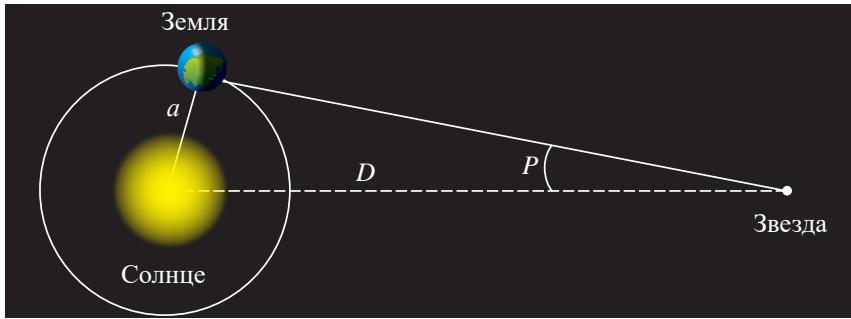
Рис. 180. Зависимость метода определения расстояния до небесных объектов от их удаленности

Стандартными свечами в астрономии являются объекты с фиксированной светимостью. Расстояние до самых дальних объектов определяют по красному смещению в спектре излучения. Метод параллакса и фотометрический можно использовать для определения расстояния до ближайших звезд.

### II. Годичный параллакс и расстояние до звезд

Годичным параллаксом звезды  $r$  называют угол, под которым со звезды можно было бы видеть средний радиус земной орбиты ( $a = 1 \text{ а.е.}$ ), расположенный перпендикулярно лучу зрения.

Чем больше расстояние до звезды, тем меньше ее параллакс. Параллактическое смещение звезды в течение года происходит по маленькоому эллипсу или кругу, если звезда находится в полюсе эклиптики (рис. 181).



*Рис. 181. Годичный параллакс звезды*

Расстояние до звезды при известном параллаксе равно:

$$D = \frac{a}{\sin p}, \quad (1)$$

где  $a$  – большая полуось земной орбиты,  $D$  – расстояние до звезды. При малых углах, если  $p$  выражено в угловых секундах, то синус параллакса равен:

$$\sin p = \frac{p}{206265''}, \quad (2)$$

тогда, приняв  $a = 1$  а.е., получим расстояние до звезды:

$$D = \frac{206265''}{p} \text{ а.е.} \quad (3)$$

Например, расстояние до ближайшей звезды  $\alpha$ -Центавра

$$D = \frac{206265''}{0,75''} \text{ а.е.} = 270000 \text{ а.е.}$$

*Свет проходит это расстояние за 4 года, тогда как от Солнца до Земли он идет только 8 мин, а от Луны около 1 с.*

**Расстояние, которое свет проходит в течение года, называется световым годом.**

Эта единица используется для измерения расстояния наряду с парсеком (пк).

**Парсек – расстояние, с которого большая полуось земной орбиты, перпендикулярная лучу зрения, видна под углом в  $1''$ .**

*Расстояние в парсеках равно обратной величине годичного параллакса, выраженного в секундах дуги.*

Например, расстояние до звезды  $\alpha$ -Центавра равно  $0,75''(3/4'')$  или  $4/3$  пк.

**1 парсек = 3,26 светового года = 206 265 а.е. =  $= 3 \cdot 10^{13}$  км.**

Измерением годичного параллакса можно надежно установить расстояние до звезд, находящихся не далее 100 пк, или 300 световых лет.

#### Ответьте на вопросы

- Почему параллактическое смещение звезд сложно обнаружить?
- Почему не удается измерить годичный параллакс более далеких звезд?

### III. Определения расстояний до далеких звезд методом «Стандартные свечи»

На современном этапе в качестве стандартных свечей используют цефеиды и сверхновые звезды типа Ia, в излучении которых нет линий водорода, так как они имеют примерно одинаковую светимость. Светимость сверхновых звезд сравнивают со светимостью галактики. Определение расстояний по светимости самих галактик дают большую погрешность.

Рассмотрим метод «Стандартные свечи» на основе цефеид, которые получили свое название по своей типичной представительнице звезде  $\delta$  Цефея. Цефеиды характеризуются амплитудами изменения блеска не более 1,5 звездных величин при периодах от десятков минут до нескольких десятков суток. Для определения расстояния до звезды используют зависимость между периодом пульсаций и светимостью звезды. Период изменения блеска  $\delta$  Цефея составляет 5,37 суток, амплитуда изменения блеска колеблется от 3,7 до 4,6 звездной величины. Период изменения блеска определяется прямыми наблюдениями. Зависимость между периодом изменения блеска цефеиды в сутках  $P$  и абсолютной звездной величиной  $M$  имеет вид:

$$M = a \cdot \lg P + b, \quad (4)$$

где  $M$  – абсолютная звездная величина цефеиды,  $a$  и  $b$  зависят от спектрального диапазона, например, в визуальной области спектра  $a = -2,87$  и  $b = -1,01$ .

Американский астроном из Гарварда Генриетта Суон Ливитт, открывшая более 2400 переменных звезд, вывела формулу, связывающую абсолютную звездную величину цефеиды  $M$  с ее периодом  $P$ , измеряемым в днях:

$$M = -2,78 \cdot \lg P - 1,35. \quad (5)$$

Определив по периоду изменения блеска абсолютную звездную величину, можно определить расстояние  $D$  до цефеиды по формуле

$$M = m + 5 - 5 \cdot \lg D, \quad (6)$$

где  $M$  – абсолютная звездная величина,  $m$  – видимая звездная величина.

### IV. Закон Хаббла. Красное смещение

Вывод о том, что Вселенная расширяется, подтверждают наблюдения красного смещения в спектрах галактик. Величина красного смещения определяется как отношение изменения частоты излучения к первоначальной частоте:

$$z = \frac{\nu - \nu_0}{\nu_0}. \quad (7)$$

#### Вспомните!

Сверхновые – взрывающиеся звезды, они бывают двух типов.

I тип – это взрывающиеся белые карлики, II тип – это обычные звезды, которые из-за выгорания ядерного горючего проходят стадию красного гиганта.



#### Ответьте на вопрос

Почему в качестве стандартной свечи используют звезды, в спектре излучения которых нет линий водорода?



#### Задание 2

Определите расстояние до  $\delta$  Цефея, используя формулу Генриетты Суон Ливитт.

Изменение частоты тем больше, чем больше расстояние до наблюдаемой галактики и чем больше ее лучевая скорость (*рис. 182*). По красному смещению можно определить расстояние до удаляющегося небесного объекта по закону Хаббла

$$cz = H_0 D, \quad (8)$$

где  $c$  – скорость электромагнитных волн,  $z$  – красное смещение,  $H_0$  – постоянная Хаббла,  $D$  – расстояние до небесного объекта. При малых значениях красного смещения  $cz = v$ , где  $v$  – лучевая скорость. В этом случае закон Хаббла примет вид:

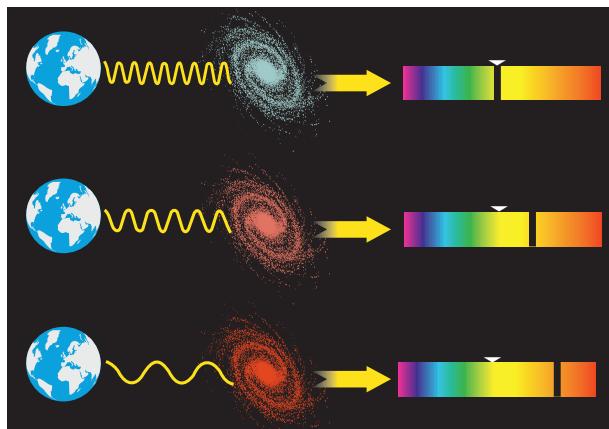
$$v = H_0 D. \quad (9)$$

Скорости галактик связаны с расстояниями до них  $D$ .

Параметр Хаббла зависит от времени: в далеком прошлом Вселенная расширялась гораздо быстрее, чем сейчас, и, соответственно, постоянная Хаббла была гораздо больше. Постоянная Хаббла со временем корректируется: до 2012 г. расстояния до самых дальних объектов Вселенной определяли с использованием значения

$$H_0 = 73,8 \pm 2,4 \text{ км/с} \cdot \text{Мпк} \text{ или } H_0 \approx 2,3 \cdot 10^{-18} \text{ с}^{-1}. \quad (10)$$

С 2013 г. после картографических работ с использованием космического телескопа «Планк» получен результат  $H_0 = 63,15 \text{ км/с} \cdot \text{Мпк}$ .



*Рис. 182. Смещение линий к красному концу спектра*



#### Обратите внимание!

1. При определении расстояний меньших 10–15 млн св. лет закон Хаббла дает большую погрешность.
2. Чем дальше находится космический объект от Нашей Галактики, тем больше скорость удаления от наблюдателя.
3. Поскольку скорость света конечна, конечному возрасту Вселенной соответствует и конечная область Вселенной, которую мы можем наблюдать в настоящее время. При этом наиболее удаленные наблюдаемые части Вселенной соответствуют наиболее ранним моментам ее эволюции.



#### Задание 3

Выразите постоянную Хаббла, равную 70 км/с · Мпк в единицах СИ. Сравните с значением (4).



#### Ответьте на вопрос

Можем ли мы считать, что центром расширения Вселенной является наша Галактика? Объясните почему?

## ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Определите расстояние до Сириуса в астрономических единицах и метрах. Известно, что годичный параллакс звезды равен  $0,375''$ . Сколько времени свет от Сириуса идет до Земли?

**Дано:**

$$p = 0,375''$$

$$c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$$

$$D - ?$$

$$t - ?$$

**Решение:**

Расстояние до звезды при известном параллаксе, выраженном в секундах, определим по формуле:

$$D = \frac{206265''}{p} \text{ а.е.}$$

Время, за которое свет достигнет Земли, равно:  $t = \frac{D}{c}$ .

$$D = \frac{206265''}{0,375''} \text{ а.е.} = 550040 \text{ а.е.} \approx 550040 \cdot 1,5 \cdot 10^{11} \text{ м} \approx$$

$$\approx 8,25 \cdot 10^{16} \text{ м.}$$

$$t = \frac{8,25 \cdot 10^{16} \text{ м}}{3 \cdot 10^8 \text{ м/с}} \approx 2,75 \cdot 10^8 \text{ с} \approx 8,72 \text{ года.}$$

**Ответ:**  $D \approx 550040 \text{ а.е.} \approx 8,25 \cdot 10^{16} \text{ м}; t \approx 8,72 \text{ года.}$

## Контрольные вопросы

1. Какие методы определения расстояний до небесных объектов вам известны?
2. От чего зависит выбор метода измерения расстояний?
3. В чем заключается метод годичного параллакса?
4. Что используют в качестве стандартной свечи при определении расстояния до небесного объекта?
5. В чем заключается закон Хаббла?



## Упражнение

31

1. Параллакс Веги  $0,11''$ . Сколько времени свет от нее идет до Земли?
2. Сколько лет надо было бы лететь по направлению к созвездию Лиры со скоростью  $30 \text{ км/с}$ , чтобы Вега стала вдвое ближе?
3. Определите расстояние до галактики, удаляющейся от Нашей Галактики со скоростью  $8000 \text{ км/с}$

## Творческое задание

Подготовьте сообщения с ppt-презентацией по темам (на выбор):

1. Размеры небесных тел во Вселенной и расстояния между ними.
2. Жизнь и деятельность Э.П. Хаббла

## § 34. Темная материя и энергия. Расширение Вселенной. Модели Вселенной

### Ожидаемый результат

Прочитав параграф, вы сможете:

- обсуждать споры вокруг ускорения Вселенной и темной энергии;
- обсуждать гипотезы о расширении Вселенной основываясь на данных астрономических наблюдений.



### Ответьте на вопросы

1. Как устроена Вселенная?
2. Меняются ли расстояния между космическими объектами?
3. Что такое «темная материя» в вашем понимании?
4. За какое время доходит свет от сверхновых звезд до Земли? Что необходимо знать, чтобы ответить на этот вопрос?



### Интересно знать!

На современном этапе несколько групп исследователей, одна из них в ЦЕРН (использует в исследовании Большой адронный коллайдер) работают над созданием частиц темной материи, чтобы изучить их в лабораторных условиях.

### I. Ускорение расширения Вселенной

В 1998 г. было открыто ускоренное расширение Вселенной при наблюдении за сверхновыми I типа (Ia). За это открытие Сол Перлмуттер, Брайан П. Шмидт и Адам Рисс получили Нобелевскую премию по физике за 2011 г. Наблюдения сверхновых типа Ia позволяют определить темп расширения и проследить зависимость этого темпа от времени. Удаленные сверхновые звезды, которые наблюдают сейчас, взорвались на ранних этапах эволюции Вселенной, несколько млрд. лет назад. Именно это и дало возможность установить, что Вселенная расширяется с ускорением. сила притяжения работает на замедление и однажды может приостановить процесс вселенского расширения. Стало ясно, что на ускорение влияет некая сила. Более того, кажется, чем шире Вселенная, тем больше «власти» получает эта сила.



### Вспомните!

Сверхновые звезды типа Ia – это белые карлики, которые, подпитываясь веществом от звезды-компаньона, достигают чандрасекаровского предела, затем взрываются и превращаются в нейтронные звезды. Предел Чандрасекара для всех белых карликов один, сами белые карлики похожи друг на друга, поэтому и взрывы в определенном смысле одинаковы. Иными словами, сверхновые типа Ia представляют собой «стандартные свечи»: зная абсолютную светимость и измеряя видимую яркость, можно определить расстояние до каждой из них. Одновременно можно установить и скорость удаления от нас каждой из сверхновых, используя эффект Доплера – красное смещение.

### II. Темная материя и темная энергия во Вселенной

Силу, приводящую к ускоренному расширению Вселенной ученые решили назвать «темная энергия».

Темная энергия в космологии – гипотетический вид энергии, введенный в математическую модель Вселенной, для объяснения наблюдаемого ее расширения с ускорением.

Известные свойства темной энергии согласуются с космологической константой, созданной А. Эйнштейном в общей теории относительности. Константа выступает отталкивающей силой, противодействующей гравитации и удерживающей пространство от разрушения.

Измерения гравитационных сил в скоплениях галактик позволили определить массу темной материи в них и в целом во Вселенной. Выяснилось, что 80 % материи не хватает для объяснения измеренного темпа расширения Вселенной. Одно из возможных объяснений этому факту: существование во Вселенной новой формы материи «темной материи» (рис. 183). Предполагают, что темная материя состоит из новых, не открытых пока в земных условиях элементарных частиц, слабо взаимодействующих с веществом, но на равных испытывающих гравитационное взаимодействие.

На современном этапе сторонников существования темной материи среди ученых становится больше. При объяснении ускоренного расширения Вселенной они все чаще опираются на гипотезу существования темной материи, которая занимает около 80 % пространства.



*Рис. 183. Призрачное кольцо темной материи в скоплении галактик Cl 0024 + 17*

### III. Классические модели Вселенной

В основе космологических моделей Вселенной лежат определенные мировоззренческие предпосылки, а сами эти модели имеют большое мировоззренческое значение.

В классической науке существовала так называемая *теория стационарного состояния Вселенной*, согласно которой Вселенная всегда была почти такой же, как сейчас. Астрономия была статичной: изучались движения планет и комет, описывались звезды и космические объекты, но вопрос об эволюции Вселенной не ставился.

Классическая ньютоновская космология строилась на следующих постулатах:

1. Космология познает мир таким, как он существует сам по себе.
2. Пространство и время Вселенной абсолютны, они не зависят от материальных объектов и процессов.
3. Пространство и время бесконечны.
4. Пространство и время однородны и изотропны.
5. Вселенная стационарна, не претерпевает эволюции. Изменяться могут конкретные космические системы, но не мир в целом.

В классической космологии возникали два противоречия, связанные с постулатом бесконечности Вселенной:

1. *Гравитационное*: если Вселенная бесконечна и в ней существует бесконечное количество небесных тел, то под действием сил тяготения Вселенная должна сколапсировать, а не существовать вечно.
2. *Фотометрическое*: если существует бесконечное количество небесных тел, то должна быть бесконечная светимость неба, чего не наблюдается.

Эти противоречия, не разрешимые в рамках ньютоновской космологии, разрешает *современная космология*, в границах которой было введено представление о расширяющейся, эволюционирующей Вселенной.

#### IV. Современные модели Вселенной

Современная релятивистская космология строит модели Вселенной на основе в общей теории относительности А. Эйнштейна. Первая модель была разработана самим А. Эйнштейном в 1917 г. Он предположил, что мировое пространство однородно и изотропно, материя в среднем распределена в ней равномерно, гравитационное притяжение масс компенсируется универсальным космологическим отталкиванием. Модель Эйнштейна согласовывалась со всеми известными фактами того времени.

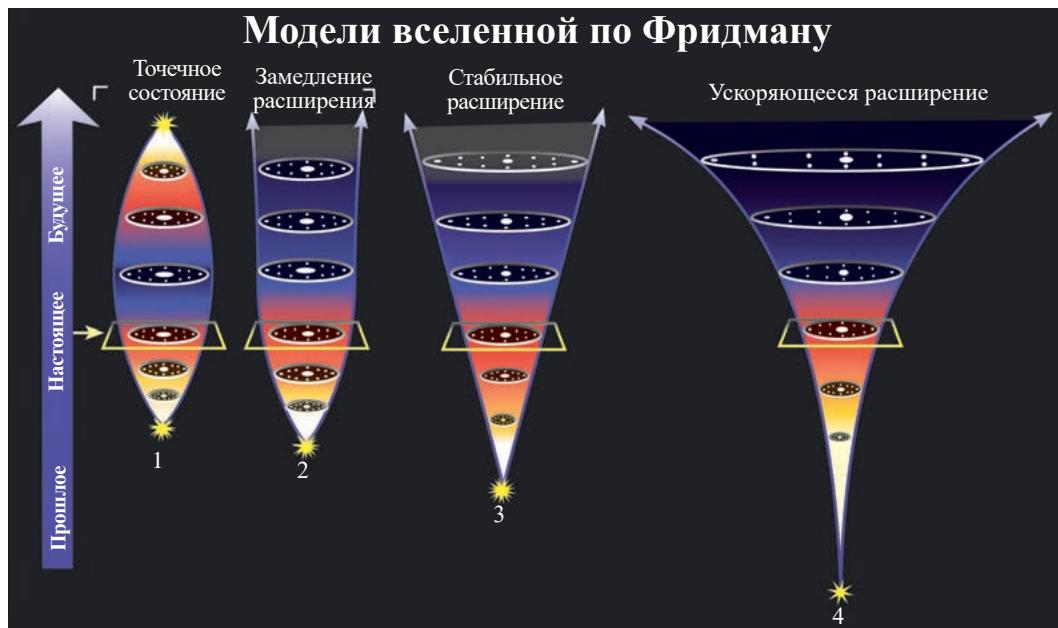
В том же 1917 г. голландский астроном Виллем де Ситтер предложил другую модель, согласно которой появление материи во Вселенной сопровождалось одновременным возникновением сил космического отталкивания между массами, стремящихся удалить их друг от друга и растворить всю систему. Тенденция к расширению, по Ситтеру, становилась заметной лишь на очень больших расстояниях.

Дальнейшие исследования меняли взгляды ученых на строение и развитие Вселенной. В 1922 г. российский математик и геофизик Л.А. Фридман дал принятное в настоящее время решение космологической проблемы происхождения и эволюции Вселенной.

Решение уравнений А.А. Фридмана, допускает три возможности. Если средняя плотность вещества и излучения во Вселенной равна некоторой критической величине, мировое пространство оказывается евклидовым и Вселенная неограниченно расширяется от первоначального точечного состояния (*рис. 184, 2*). Если плотность меньше критической, пространство обладает геометрией Лобачевского и так же неограниченно расширяется (*рис. 184, 3*). И, наконец, если плотность больше критической, пространство Вселенной оказывается римановым, расширение на некотором этапе сменяется сжатием, которое продолжается вплоть до первоначального точечного состояния (*рис. 184, 4*). По современным данным, средняя плотность материи во Вселенной меньше критической, так что более вероятной считается модель Лобачевского – бесконечная расширяющаяся Вселенная. Не исключено, что некоторые виды материи, которые имеют большое значение для величины средней плотности и способствуют ускоренному расширению Вселенной, пока остаются неучтенными. (*рис. 184, 1*). Речь идет о темной материи и темной энергии. В связи с этим делать окончательные выводы о конечности или бесконечности Вселенной пока преждевременно.



**А. А. Фридман** (1888 – 1925) – российский и советский математик, физик и геофизик, основоположник современной физической космологии, автор исторически первой нестационарной модели Вселенной. С 1922 по 1924 г. в ходе научных исследований Фридман получил нестационарные решения уравнений Эйнштейна, что стало основополагающим фактором теории непостоянства Вселенной. Его теория о постоянном расширении Вселенной была подтверждена в 1929 г. Эдвином Хабблом.



*Рис. 184. Ускоренное расширение Вселенной под действием «темной энергии»*



#### Задание

Выясните, чем отличается евклидово пространство от пространства, обладающего геометрией Лобачевского.

#### Контрольные вопросы

1. Какие факты подтверждали концепцию расширения Вселенной?
2. Что называют «темной энергией»?
3. Каким свойством обладает «темная материя»?
4. Какие современные модели эволюции Вселенной вам известны?

#### Творческое задание

Подготовьте сообщение с ppt-презентацией по темам (на выбор):

1. Современные достижения в исследовании «темной материи» и «темной энергии».
2. Современные модели Вселенной. Теория струн, капельная модель Вселенной.
3. Биография А.А. Фридмана.

## § 35. Теория большого взрыва. Основные этапы эволюции Вселенной. Жизнь и разум во Вселенной

### Ожидаемый результат

Прочитав параграф, вы сможете:

- уметь оценивать возраст Вселенной, используя закон Хаббла;
- объяснять теорию Большого взрыва, используя данные о микроволновом фоновом излучении.

### I. Большой взрыв

Концепция Большого взрыва появилась с открытием в 1920 годы закона Хаббла. Этот закон описывает результаты наблюдений, согласно которым видимая Вселенная расширяется и галактики удаляются друг от друга. Нетрудно представить, что в исходный момент, миллиарды лет назад, Вселенная пребывала в сверхплотном состоянии. Такое развитие Вселенной подтверждается двумя важными фактами: космическим микроволновым фоном и изобилием легких элементов.

**Космический микроволновой фон.** В 1964 г. американские физики Арно Пензиас и Роберт Уилсон обнаружили,

что Вселенная наполнена электромагнитным излучением в микроволновом диапазоне частот, оно было названо реликтовым. Последовавшие измерения показали, что это излучение, свойственное объектам с температурой около  $-270^{\circ}\text{C}$  (3 К). Реликтовое излучение аналогично жару от углей в камине, в котором огонь уже потух. Открытие Арно Пензиаса и Роберта Уилсона предопределило выбор теории Большого взрыва из всех существующих моделей Вселенной, которые объясняли только факт расширения Вселенной, но не наличие космического микроволнового фона.

**Изобилие легких элементов.** Ранняя Вселенная была очень горячей, при высокой температуре и давлении происходили реакции синтеза легких ядер. Все более массивные ядра, образовавшиеся в первые три минуты, неизбежно распадались при столкновении друг с другом. В историю ранней Вселенной этот период вошел как «окно возможностей для образования ядер легких элементов». Однако этот период продолжалось недолго. После первых трех минут после «Большого взрыва» частицы разлетелись так далеко друг от друга, что столкновения между ними стали крайне редкими, «окно синтеза ядер» закрылось. В этот краткий период в результате соударений протонов и нейтронов образовались дейтерий, гелий-3, гелий-4 и литий-7. Все более тяжелые элементы образовались позже – при формировании звезд.

Теория Большого взрыва позволила определить температуру ранней Вселенной, соотношение числа различных ядер легких элементов. Сравнение расчетов с реально наблюдаемым соотношением легких элементов подтвердило гипотезу Большого взрыва.

### II. Карта микроволнового фона

На рисунке 185 изображена современная карта микроволнового излучения Вселенной – «эха» Большого взрыва. Карта получена европейским телескопом Планк, запущенным в мае 2009 года. Его главной задачей было дважды просканировать всю небесную сферу. Первое сканирование Планк закончил в июле 2010 года, а полные данные были получены в 2013 году.

По данным Планка нормальная материя составляет 4,9 %. Темная материя, которая обнаружена

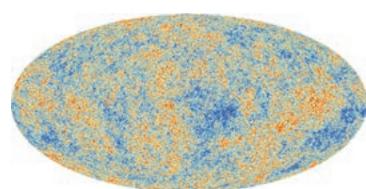


Рис. 185. Реликтовое излучение Вселенной

только по эффектам гравитации, составляет 26,8 %, почти на пятую часть больше, чем по предыдущим оценкам. И наоборот, темная энергия – таинственная сила, считающаяся ответственной за ускорение расширения Вселенной, составляет меньше, чем считалось ранее – 68,3 %.

### III. Расширение Вселенной и кривизна пространства

В процессе расширения Вселенной кривизна пространства уменьшается. Но, чтобы наблюданное расширение Вселенной обеспечивалось наблюдаемой кривизной, необходимо внести поправку в значение радиуса кривизны пространства в прошлом: через секунду после Большого взрыва он должен был быть равен миллиарду радиусов наблюдаемой тогда части Вселенной.

Без такой поправки кривизна сегодня была бы на много порядков больше. Решение этой проблемы привело к представлению об инфляционной стадии эволюции Вселенной. Согласно инфляционной теории, предложенной Алексеем Старобинским и независимо Аланом Гутом и сформировавшейся благодаря работам Андрея Линде, Андреаса Албрехта и Пола Стейнхардта, Вселенная на самом раннем этапе своей эволюции прошла через стадию чрезвычайно быстрого, экспоненциального расширения или раздувания, инфляции (рис. 186). Хотя инфляционная стадия длилась, скорее всего, малую долю секунды, за это время Вселенная растянулась в десятки или сотни раз и кривизна пространства упала практически до нулевого значения. Пространство стало евклидовым. Доказательство тому, что кривизна трехмерного пространства Вселенной мала, было получено путем изучения карты реликтового излучения.

#### Ответьте на вопросы

1. Кривизна какого шара больше: с большим радиусом или с меньшим?
2. Можно ли в бесконечно малом участке шара бесконечного радиуса применять геометрию Евклида и использовать декартовую систему координат? Поясните свой ответ.



Рис. 186. Исследование кривизны пространства привело к выводу о существовании инфляционного периода в развитии Вселенной

## IV. Эволюция Вселенной

В рамках общепризнанной теории Большого взрыва специалисты выделяют четыре основных этапа эволюции Вселенной:

1. **Адронная эра:** при очень высоких температурах и плотности в самом начале существования Вселенной материя состояла из элементарных частиц, прежде всего, из адронов. Этот этап длился одну десятитысячную долю секунды, но именно тогда взаимодействие между частицами было наиболее интенсивным;
2. **Лептонная эра:** в это время температура была достаточно высокой, чтобы обеспечить интенсивное возникновение электронов, позитронов и нейтрино, именно тогда и образовалось так называемое нейтринное море, благодаря которому и началось реликтовое излучение;
3. **Фотонная эра:** с окончанием фотонной эры, когда температура Вселенной снизилась до определенного значения, а вещество было отделено от анти вещества, заканчивается широкая фаза Большого взрыва. В сумме адронная, лептонная и фотонная эры составляют примерно одну тридцатитысячную часть возраста Вселенной;
4. **Звездная эра:** основной этап существования Вселенной, который продолжается и в настоящее время. На этом этапе Вселенная расширяется, вещество образует звезды, планеты, звездные системы, галактики.

Согласно последним исследованиям кривизны пространства введен этап инфляции, который вошел в первые две эры: адронную и лептонную.

## V. «Возраст» Вселенной

Закон Хаббла – закон разбегания галактик выведен на основе наблюдений с Земли, учитывая огромные расстояния между галактиками, можно сказать, из Нашей Галактики. Закон расширения Хаббла указывает на то, что когда-то вещество во Вселенной находилось в условиях очень больших плотностей. Время, отделяющее нас от этого состояния, можно условно назвать «возрастом» Вселенной.

Оно определяется величиной  $t_B = \frac{1}{H_0} \approx 13 \cdot 10^9$  лет.

По снимкам реликтового излучения введены поправки в значение постоянной Хаббла. Уточненное значение повлияло на «возраст» Вселенной. Теперь он оценивается в 13,82 миллиарда лет.

### Контрольные вопросы

1. В чем заключается концепция Большого взрыва? С каким законом она связана?
2. Какие факты подтверждают концепцию расширения Вселенной?
3. Какие изменения внесли в эволюцию Вселенной на основе модели расширяющейся с ускорением Вселенной?
4. На основании каких исследований изменена постоянная Хаббла?

### Творческое задание

Подготовьте сообщение с ppt-презентацией по темам (на выбор):

1. Результаты современных исследований реликтового излучения.
2. Жизнь и разум во Вселенной.

## Космические телескопы

### Телескоп Хаббл

Телескоп «Хаббл» – совместный проект НАСА и Европейского космического агентства и входит в число Больших обсерваторий НАСА. «Хаббл» был выведен на орбиту челночным кораблем «Дискавери» 24 апреля 1990 года. Высота орбиты около 569 км, период обращения 96–97 мин, орбитальная скорость около 7500 м/с.

Размещение телескопа в космосе дает возможность регистрировать электромагнитное излучение в диапазонах, в которых земная атмосфера непрозрачна; в первую очередь – в инфракрасном диапазоне. Данные «Хаббла» сначала сохраняются в бортовых накопителях, затем, через систему коммуникационных спутников TDRSS, расположенных на геостационарной орбите, данные передаются в Центр Годдарда. За 15 лет работы на околоземной орбите «Хаббл» получил 1,022 млн изображений небесных объектов – звёзд, туманностей, галактик, планет (рис. 187). Поток данных, которые он ежеминутно генерирует в процессе наблюдений, составляет около 480 ГБ. Общий их объём, накопленный за всё время работы телескопа, составляет примерно 50 терабайт. Более 3900 астрономов получили возможность использовать его для наблюдений, опубликовано около 4000 статей в научных журналах.

Программа «Хаббл» официально продлена до 30 июня 2021 года, после чего его должен был сменить космический телескоп «Джеймс Уэбб».

### Телескоп Планк

Планк – астрономический спутник Европейского космического агентства (ЕКА), созданный для изучения вариаций космического микроволнового фона – реликтового излучения. Запущен 14 мая 2009 года ракетой-носителем «Ариан-5». В период с сентября 2009 по ноябрь 2010 года «Планк» успешно закончил основную часть своей исследовательской миссии, перейдя к дополнительной. Из центра управления полетами ЕКА была отправлена последняя команда, на выключение телескопа 23 октября 2013 года. На компьютер «Планка» перед выключением была загружена программная «заплатка», которая навсегда блокировала систему управления.

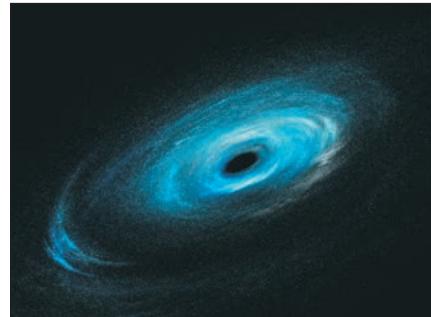


Рис. 187. Чёрная дыра в центре галактики. Снимок телескопа Хаббл

### Задание

Используя материалы сети интернет, выясните:

- Какие космические телескопы и какими организациями запущены для исследования космического пространства?
- Каковы их цели исследования и достижения?

## Итоги главы 10

Расстояние до звезды	
$1 \text{ парсек} = 3,26 \text{ светового года} = 206\,265 \text{ а.е.} = 3 \cdot 10^{13} \text{ км}$	
$D = \frac{a}{\sin p},$	$D = \frac{206265''}{p} \text{ а.е.}$
Звездные величины и расстояние до звезд	
$M = m + 5 - 5 \cdot \lg D$	$M = m + 5 + 5 \cdot \lg p$
Интенсивность излучения звезд и звездные величины	
$\frac{I_1}{I_2} = 2,512^{m_2 - m_1}$	$\frac{I}{I_0} = 2,512^{M - m}$
Закон Хаббла	
$cz = H_0 D$	$v = H_0 D$
	$z = \frac{\nu - \nu_0}{\nu_0}$

Обозначение физических величин, единицы измерения в СИ

Обозна- чение	Физическая величина	СИ	Обозна- чение	Физическая величина	СИ
$I_0$	Интенсивность излучения звезды на расстоянии 10 пк	$\text{Вт}/\text{м}^2$	$m$	Видимая звездная величина	
$I$	Интенсивность излучения	$\text{Вт}/\text{м}^2$	$z$	Красное смещение	
$D$	Расстояние до звезд	м	$\nu$	Частота излучения удаляющегося источника света	Гц
$a$	Большая полуось земной орбиты, 1 а.е. $\approx 150$ млн км	м	$\nu_0$	Частота излучения	Гц
$p$	Параллакс	$1''$	$H_0$	Постоянная Хаббла	$\approx 2,3 \cdot 10^{-18} \text{ с}^{-1}$
$M$	Абсолютная звездная величина		$v$	Лучевая скорость	м/с

## **Глоссарий**

**Абсолютная звездная величина**  $M$  – видимая звездная величина, которую имела бы звезда, если бы находилась от нас на расстоянии 10 пк.

**Галактика** (от древнегреч. Γαλαξίας – молочный, млечный) – гравитационно-связанная система из звезд и звездных скоплений, межзвездного газа и пыли и темной материи.

**Космология** – раздел астрономии, изучающий свойства и эволюцию Вселенной.

**Параллакс годичный** – угол, под которым со звезды можно было бы видеть средний радиус земной орбиты ( $a = 1$  а.е.), расположенный перпендикулярно лучу зрения.

**Парsec** – расстояние, с которого большая полуось земной орбиты, перпендикулярная лучу зрения, видна под углом в  $1''$ .

**Светимость звезды**  $L$  – энергия, излученная в единицу времени.

**Светимость звезды** – мощность излучения световой энергии.

**Световой год** – расстояние, которое свет проходит в течение года.

## ПРИЛОЖЕНИЯ

# ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ И ТАБЛИЦЫ

**Изучив главу, вы сможете:**

- В лабораторных работах указаны цели их проведения, необходимое оборудование, приведено описание хода работы с рисунками, таблицами и расчетными формулами.

# Приложение 1. Лабораторные работы

## Лабораторная работа № 1.

### Определение числа витков в обмотках трансформатора

**Цель работы:** определить число витков в обмотках трансформатора методом двух вольтметров.

**Приборы и материалы:** источник переменного тока, трансформатор, провод сечением  $0,75 \text{ мм}^2 - 1\text{мм}^2$ , два вольтметра для измерения переменного напряжения (мультиметры – приборы для измерения силы тока, напряжения или сопротивления в электрической цепи).

### Краткая теория

При холостом ходе трансформатора вторичная обмотка не нагружена, по первичной проходит небольшой ток намагничивания: несколько процентов от номинального. В этом случае можно считать, что напряжения на выводах трансформатора равны их ЭДС. Тогда отношение ЭДС и напряжений равно отношению числа витков обмоток трансформатора:

$$\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2}. \quad (1)$$

На рисунке 1 дана схема цепи для определения напряжения на обмотках трансформатора, где  $Tp$  – трансформатор,  $N_1$  – число витков в первичной обмотке,  $N_2$  – число витков во вторичной обмотке,  $V_1$ ,  $V_2$  – вольтметры. Измерения необходимо производить приборами классов точности 0,3 и 0,2. При этом показания приборов должны быть в средней части шкалы. Пользоваться предельными участками шкалы не рекомендуется, это может привести к большой погрешности. Для определения числа витков в первичной обмотке поверх вторичной обмотки катушки необходимо намотать произвольное число витков.

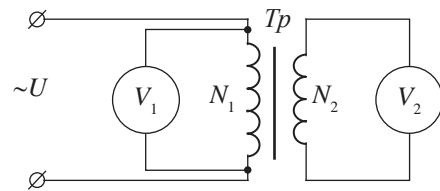


Рис. 1

Определив показания вольтметров, которые присоединены к первичной и временной обмотке, можно рассчитать число витков в первичной обмотке, затем по значению коэффициента трансформации определить число витков во вторичной обмотке.

### Порядок выполнения работы

#### Задание 1. Определение числа витков в первичной обмотке

- Намотайте на вторичную обмотку трансформатора 10 витков провода.
- Подключите к обмоткам вольтметры или мультиметры, установив соответствующий режим работы и диапазон измеряемых величин.
- Подайте напряжение от источника переменного тока на первичную обмотку. Напряжение должно составлять 10–20 % от номинального.
- Запишите показания вольтметров в таблицу.
- Рассчитайте число витков в первичной обмотке, занесите в таблицу 1.

#### Задание 2. Определение числа витков во вторичной обмотке

- Переключите второй вольтметр с временной обмотки к вторичной обмотке трансформатора.

- Снимите показания вольтметров, занесите в таблицу 2.
- Рассчитайте число витков во вторичной обмотке.

*Таблица 1*

Измерено			Вычислено
Число витков на временной обмотке $N_2$	Напряжение на временной обмотке $U_2, \text{ В}$	Напряжение на первичной обмотке $U_1, \text{ В}$	Приближенное число витков в первичной обмотке $N_{1np}$

*Таблица 2*

Измерено			Вычислено
Напряжение на первичной обмотке $U_1, \text{ В}$	Напряжение на вторичной обмотке $U_2, \text{ В}$	Приближенное число витков в первичной обмотке $N_{1np}$	Приближенное число витков во вторичной обмотке $N_{2np}$

**Задание 3.** Оценка погрешности измерений и вычислений, запись результатов с учетом погрешности.

- Определите абсолютную погрешность измерения напряжений  $\Delta_V = \Delta_u + \Delta_o$ , где  $\Delta_u = \frac{\text{предел измерения} \cdot \gamma}{100}$  – погрешность инструментальная,  $\gamma$  – класс точности прибора (указан на панели),  $\Delta_o = \frac{c}{2}$  – погрешность отсчета,  $c$  – цена деления прибора.
- Поскольку число витков  $N_2$  определяется без погрешности, то относительную погрешность расчета числа витков в первичной обмотке определите по формуле  $\varepsilon_{N_1} = \frac{\Delta U_1}{U_1} + \frac{\Delta U_1}{U_2}$ .
- Абсолютную погрешность при определении числа витков рассчитайте по формуле:  $\Delta N_1 = N_{1np} \cdot \varepsilon_{N_1}$ .
- Аналогично определите погрешность в расчетах числа витков во вторичной обмотке. Выполняя расчеты, учтите погрешность определения числа витков в первичной обмотке.
- Запишите значение числа витков в обмотках трансформатора с учетом погрешностей:  $N_1 = N_{1np} \pm \Delta N_1$  при  $\varepsilon_{N_1} = \dots \%$ .  $N_2 = N_{2np} \pm \Delta N_1$  при  $\varepsilon_{N_2} = \dots \%$ .

## Лабораторная работа № 2

### Определение длины световой волны с помощью дифракционной решетки

**Цель работы:** Определить длину световой волны с помощью дифракционной решетки.

**Оборудование:** Дифракционная решетка с периодом  $\frac{1}{100}$  мм или  $\frac{1}{50}$  мм, штатив, подъемный столик с держателем дифракционной решетки и измерительной

линейкой, источник света, черный экран с узкой вертикальной щелью, имеющий миллиметровую шкалу.

### Краткая теория:

На рисунке 2 изображена схема установки:  $DP$  – дифракционная решетка,  $\mathcal{E}$  – экран,  $a$  – расстояние от дифракционной решетки до экрана,  $b$  – расстояние от центрального пятна до первого максимума. Длину волны  $\lambda$  определим из условия максимума дифракционной решетки:

$$\lambda = \frac{d \sin \varphi}{k},$$

где  $d$  – период решетки,  $k$  – порядок спектра,  $\varphi$  – угол, под которым наблюдается максимум света соответствующего цвета. Поскольку углы, под которыми наблюдаются максимумы первого и второго порядка не превышают  $5^\circ$ , то синусы углов можно заменить на их тангенсы. Из рисунка 2 видно, что  $\tan \varphi = \frac{b}{a}$ . Расстояние  $a$  отсчитывают по линейке от решетки до экрана, расстояние  $b$  – по шкале экрана от щели до выбранной линии спектра. Окончательная формула для определения длины волны примет вид:

$$\lambda = \frac{db}{ka}.$$

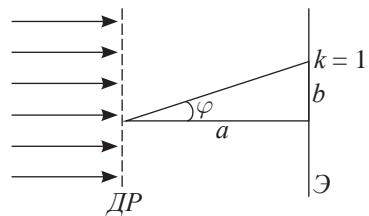


Рис. 2

### Порядок выполнения работы:

- Соберите установку, изображенную на рисунке 3. Закрепите в лапке (7) штатива (8) подъемный столик (6), вставьте в держатель (5) дифракционную решетку (4), установите экран (3) на расстоянии 50 см от решетки.

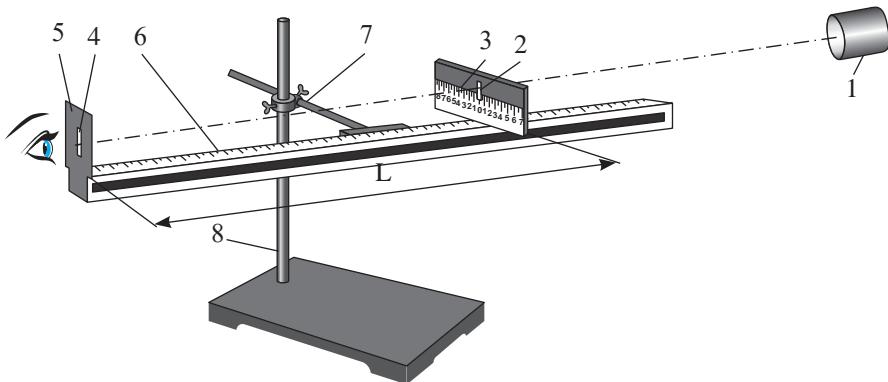
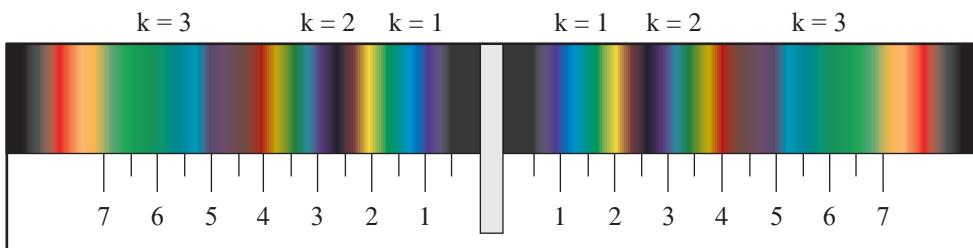


Рис. 3. Установка для определения длины волны

- На некотором расстоянии от установки разместите источник света (1) с нитью накала (можно использовать пламя свечи). Лучи света должны через щель экрана (2) падать на дифракционную решетку.
- Установите решетку в держателе так, чтобы дифракционные спектры располагались вертикально (рис. 4).
- Измерьте расстояние от щели до границы максимума освещенности первого и второго порядка. Результаты занесите в таблицу 3.



*Рис. 4. Дифракционные спектры*

*Таблица 3*

Порядок спектра	Период решетки $d$ , м	Расстояние от решетки до экрана $a$ , м	Расстояние от щели до границы максимума освещенности $b$ , м		Длина волны $\lambda$ , м	
			красного цвета	фиолетового цвета	красного цвета, $\lambda_{\max}$	фиолетового цвета, $\lambda_{\min}$
1 слева						
1 справа						
2 слева						
2 справа						

- Рассчитайте максимальную длину волны красного света. Результаты занесите в таблицу.
- Вычислите минимальную длину волны фиолетового цвета.
- Определите средние значения длин волн для красного и фиолетового цвета.
- Сравните полученные результаты с теоретическими данными: длина волны красного цвета 750 нм, фиолетового 400 нм.
- Сделайте выводы по выполненной работе.

### **Лабораторная работа № 3**

#### **Наблюдение поляризации света**

**Цель работы:** экспериментально доказать электромагнитную природу света путем анализа явлений интерференции, дифракции и поляризации света.

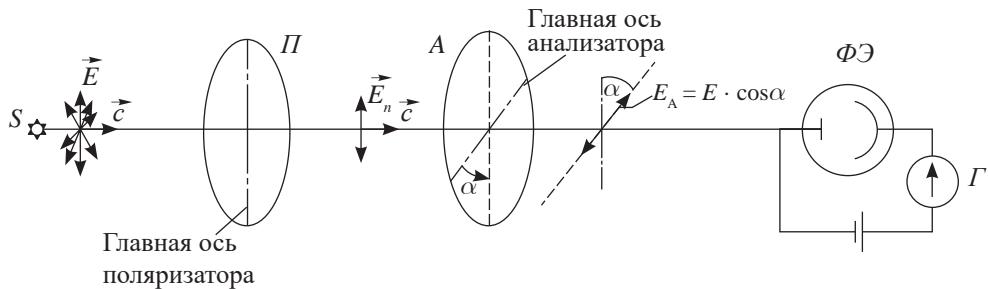
**Оборудование:** Поляризатор, анализатор, фотоэлемент, гальванометр.

Исследование явлений рекомендуется провести на оптической скамье с набором необходимых приборов.

#### **Описание экспериментальной установки**

Экспериментальная установка состоит из источника света  $S$ , двух поляризаторов  $P$  и  $A$  (поляризатор и анализатор взаимозаменяемы); фотоэлемента  $\Phi\mathcal{E}$  с гальванометром  $G$  (*рис. 5*).

Свет от источника  $S$  после прохождения через поляризатор  $P$  становится плоско-поляризованным. Если главные оси  $P$  и  $A$  параллельны, интенсивность света, попадающего на  $\Phi\mathcal{E}$ , максимальная, если перпендикулярны, то интенсивность равна нулю. В других случаях интенсивность принимает промежуточные значения. Об интенсивности света можно судить по значению силы тока в цепи  $\Phi\mathcal{E}$ , который измеряется гальванометром  $G$ . Измерения следует проводить в затемненном помещении.



*Рис. 5. Экспериментальная установка для наблюдения поляризации света*

### Порядок выполнения работы:

- Включите гальванометр  $\Gamma$  в цепь  $\Phi\mathcal{E}$ , установите стрелку гальванометра на ноль.
- Включите источник света.
- Вращением анализатора  $A$  добейтесь максимального показания гальванометра. Оно не должно превышать пределы измерения прибора.
- Повернув анализатор на  $90^\circ$ , определите показание гальванометра. Полученное значение силы тока необходимо вычесть из показания гальванометра, при каждом последующем измерении, так как создано другими источниками света, освещдающих  $\Phi\mathcal{E}$ . В хорошо затемненном помещении показание гальванометра в этом положении равно нулю.
- Проведите измерения силы тока, изменения угол наклона оси анализатора на  $15^\circ$  при каждом измерении. Выполняя замеры для одного полного оборота от  $0^\circ$  до  $360^\circ$ , вносите результаты в таблицу 4.

*Таблица 4*

№ опыта	$\alpha$	$\cos\alpha$	$\cos^2\alpha$	$I$

- По данным таблицы постройте график зависимости силы фототока  $I$  от квадрата косинуса угла поворота.
- Сделайте вывод, ответив на вопрос:  
Как зависит интенсивность света (сила фототока) от угла поворота между осями  $A$  и  $P$ ?

### Лабораторная работа № 4

#### Определение показателя преломления стекла

**Цель работы:** Экспериментально определять показатель преломления стекла и предлагать пути улучшения постановки эксперимента.

Убедиться в том, что показатель преломления не зависит от угла падения луча.

**Оборудование:** стеклянная плоскопараллельная пластина, английская булавка – 4 шт., линейка измерительная, бумага белая, транспортир.

#### Краткая теория:

Для определения показателя преломления стекла воспользуемся законом Снеллиуса:  

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{n_2}{n_1}.$$

Учитывая, что первая среда воздух, для которой  $n_1 = 1$ , и, заменив синусы углов на отношение соответствующих отрезков, получим:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{AD \cdot OB}{AO \cdot CB} = n_2.$$

Если при построении выполнить условие  $AO = OB$ , то  $n = \frac{AD}{CB}$ .

**Задание.** Определить показатель преломления стекла при различных значениях угла падения луча.

### Порядок выполнения работы:

1. Положите на лист бумаги плоскопараллельную пластину, обведите ее.
2. Воткните в бумагу две булавки 1 и 2, одну из них 2 вплотную к пластине, другую произвольно (рис. 6).
3. Воспользовавшись свойством прямолинейного распространения света, определите прямую, вдоль которой пойдет луч после двойного преломления в пластине. Для этого воткните булавки 3 и 4 перед пластиной таким образом, чтобы каждая из них скрывалась за булавкой, находящейся ближе к глазу наблюдателя.
4. Уберите с листа булавки и пластину. Через точки 1 и 2 проведите луч, падающий на пластину. Через точки 3 и 4 проведите луч, вышедший из пластины. Соедините точку падения с точкой выхода луча из пластины. Полученная линия – это луч, преломленный в стекле.
5. Отложите от точки падения луча  $O$  равные отрезки  $AO$  и  $OB$  на падающем и преломленном лучах. Отрезок  $OB$  должен лежать на первом преломленном луче. Из точек  $A$  и  $B$  опустите перпендикуляры – кратчайшие расстояния – на перпендикуляр, восстановленный в точке падения луча  $O$ .
6. Определите показатель преломления, измерив отрезки  $AD$  и  $CB$  в двух опытах с разными углами падения. Результаты занесите в таблицу 5:

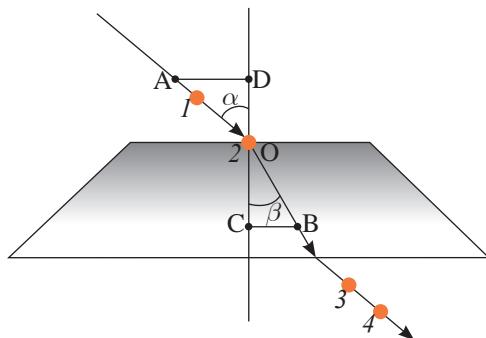


Рис. 6. Построение хода лучей в плоскопараллельной пластине

Таблица 5

№ опыта	Измерено		$n_{np} = \frac{AD}{CB}$
	$AD$ , мм	$CB$ , мм	
1.			
2.			

7. Определите относительную погрешность косвенного измерения показателя преломления для двух опытов по формуле:

$$\varepsilon_n = \frac{\Delta AD}{AD} + \frac{\Delta CB}{CB},$$

где  $\Delta = \Delta_o + \Delta_u$  – абсолютная погрешность при измерении отрезков  $AD$  и  $CB$ .  
 $\Delta_o$  – погрешность отсчета,  $\Delta_u$  – инструментальная погрешность.  
 $\Delta_o$  и  $\Delta_u$  можно принять равными половине цены деления измерительного прибора – линейки, тогда:

$$\Delta = \frac{c}{2} + \frac{c}{2} = c = 1 \text{ мм},$$

$$\varepsilon_n = \frac{1}{AD} + \frac{1}{CB}.$$

8. Определите абсолютную погрешность расчета показателя преломления:

$$\Delta n = n \cdot \varepsilon_n.$$

9. Запишите результат измерения показателя преломления для двух опытов в виде:

$$n = n_{np} \pm \Delta n \text{ при } \varepsilon_n = \dots \%$$

10. Полученные интервалы изобразите на прямой и выясните, имеют ли они область перекрытия. Сделайте вывод о зависимости показателя преломления стекла от угла падения луча.

11. Сделайте вывод по выполненной работе в соответствии с поставленной целью. Предложите способы улучшения постановки эксперимента, повышения точности измерений.

## Лабораторная работа № 5

### Определение периода полураспада

**Цель работы:** Уметь рассчитывать период полураспада графическим методом

**Приборы и материалы:** графики и таблицы зависимости активности радиоактивного препарата от времени.

**Примечание:** при наличии счетчика Гейгера рекомендуется провести исследование активности препаратов с малым значением периода полураспада, соблюдая технику безопасности. При измерении необходимо учесть естественный фон и космическое излучение. Построив график зависимости активности препарата от времени, по графику определить период полураспада.

### Краткая теория

Период полураспада  $T$  – это время, в течение которого количество атомов исходного элемента уменьшается вдвое.

$$N = N_0 \cdot 2^{-\frac{t}{T}}.$$

Активность радиоактивного изотопа – это величина показывающая, сколько ядер распадается в единицу времени, она связана с периодом полураспада формулой:

$$A = \frac{N \ln 2}{T}.$$

Единица измерения активности в СИ – беккерель.

Один беккерель определяется как активность источника, в котором за одну секунду происходит в среднем один радиоактивный распад.

$$1 \text{ Бк} = 1 \text{ с}^{-1}.$$

Для измерения активности используется также внесистемная единицы измерения 1 кюри – это активность одного грамма радия:

$$1 \text{ Ки} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ расп/с.}$$

Связь между величинами:  $1 \text{ Ки} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Бк}$ ,  $1 \text{ Бк} \approx 2,703 \cdot 10^{-11} \text{ Ки}$ .

## Ход работы

**Задание 1.** Определение периода полураспада по графику зависимости числа нераспавшихся ядер от времени

На рисунке 7 дан график зависимости числа  $N$  нераспавшихся ядер эрбия  $^{168}_{68}Er$  от времени. Определите период полураспада в часах. Выясните, для какого изотопа эрбия построен график.

**Задание 2.** Построение графика зависимости числа ядер, образовавшихся в результате радиоактивного распада от времени наблюдения.

Из ядер платины  $^{197}_{78}Pt$  при  $\beta$ -распаде с периодом полураспада 20 часов образуются стабильные ядра золота. В момент начала наблюдения в образце содержится  $8 \cdot 10^{20}$  ядер платины. Через какую из точек, кроме начала координат, пройдет график зависимости числа ядер золота от времени (рис. 8)?

**Задание 3.** Определение периода полураспада по графику зависимости относительного числа нераспавшихся ядер от времени.

На рисунке 9 изображен фрагмент графика зависимости относительного числа  $N/N_0$  нераспавшихся ядер от времени  $t$  для некоторого изотопа ( $N_0$  – начальное число ядер,  $N$  – число ядер, нераспавшихся к моменту времени  $t$ ).

Пользуясь графиком, определите период полураспада этого изотопа.

**Задание 4.** Построение графика зависимости активности радиоактивного препарата от времени. Определение периода полураспада.

В таблице 6 приведены результаты измерения зависимости активности радиоактивного элемента от времени.

Изобразите график зависимости активности радиоактивного препарата.

По графику определите период полураспада.

Запишите вывод по выполненной работе.

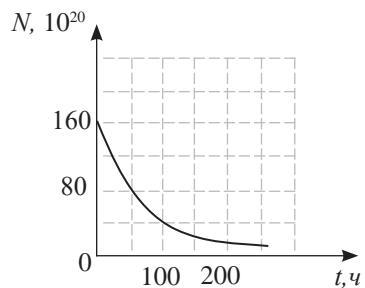


Рис. 7. График зависимости числа нераспавшихся ядер эрбия от времени

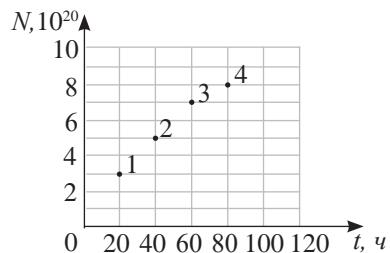


Рис. 8. К заданию 2

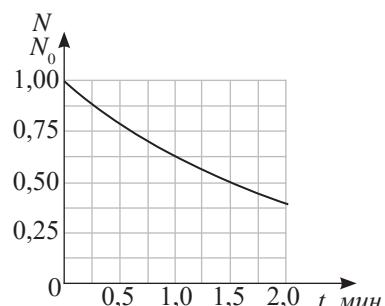


Рис. 9. График зависимости относительного числа нераспавшихся ядер от времени

Таблица 6

t, ч	0	3	6	9	12	15
A · 3,7 · 10 <sup>7</sup> Бк	21,6	12,6	7,6	4,2	2,4	1,8

## Приложение 2. Таблицы

Таблица 1. Значение тригонометрических функций

Величина угла (в градусах)	Синус	Косинус	Тангенс	Величина угла (в градусах)	Синус	Косинус	Тангенс
0	0,000	1,000	0,000	46	0,719	0,695	1,036
1	0,017	1,000	0,017	47	0,731	0,682	1,072
2	0,035	0,999	0,035	48	0,743	0,669	1,111
3	0,052	0,999	0,052	49	0,755	0,656	1,150
4	0,070	0,998	0,070	50	0,766	0,643	1,192
5	0,087	0,996	0,087	51	0,777	0,629	1,235
6	0,105	0,995	0,105	52	0,788	0,616	1,280
7	0,122	0,993	0,123	53	0,799	0,602	1,327
8	0,139	0,990	0,141	54	0,809	0,588	1,376
9	0,156	0,988	0,158	55	0,819	0,574	1,428
10	0,174	0,985	0,176	56	0,829	0,559	1,483
11	0,191	0,982	0,194	57	0,839	0,545	1,540
12	0,208	0,978	0,213	58	0,848	0,530	1,600
13	0,225	0,974	0,231	59	0,857	0,515	1,664
14	0,242	0,970	0,249	60	0,866	0,500	1,732
15	0,259	0,966	0,268	61	0,875	0,485	1,804
16	0,276	0,961	0,287	62	0,883	0,469	1,881
17	0,292	0,956	0,306	63	0,891	0,454	1,963
18	0,309	0,951	0,335	64	0,899	0,438	2,050
19	0,326	0,946	0,344	65	0,906	0,423	2,145
20	0,342	0,940	0,364	66	0,914	0,407	2,246
21	0,358	0,934	0,384	67	0,921	0,391	2,356
22	0,375	0,927	0,404	68	0,927	0,375	2,475
23	0,391	0,921	0,424	69	0,934	0,358	2,605
24	0,407	0,914	0,445	70	0,940	0,342	2,747
25	0,423	0,906	0,466	71	0,946	0,326	2,904
26	0,438	0,899	0,488	72	0,951	0,309	3,078
27	0,454	0,891	0,510	73	0,956	0,292	3,271
28	0,469	0,883	0,532	74	0,961	0,276	3,487
29	0,485	0,875	0,554	75	0,966	0,259	3,732
30	0,500	0,866	0,577	76	0,970	0,242	4,011
31	0,515	0,857	0,601	77	0,974	0,225	4,331
32	0,530	0,848	0,625	78	0,978	0,208	4,705
33	0,545	0,839	0,649	79	0,982	0,191	5,145
34	0,559	0,829	0,675	80	0,985	0,174	5,671
35	0,574	0,819	0,700	81	0,988	0,156	6,314
36	0,588	0,809	0,727	82	0,990	0,139	7,115
37	0,602	0,799	0,754	83	0,993	0,122	8,144
38	0,616	0,788	0,781	84	0,995	0,105	9,514
39	0,629	0,777	0,810	85	0,996	0,087	11,430

Величина угла (в градусах)	Синус	Косинус	Тангенс	Величина угла (в градусах)	Синус	Косинус	Тангенс
40	0,643	0,766	0,839	86	0,998	0,070	14,301
41	0,656	0,755	0,869	87	0,999	0,052	19,081
42	0,669	0,743	0,900	88	0,999	0,035	28,636
43	0,682	0,731	0,933	89	1,000	0,017	57,290
44	0,695	0,719	0,966	90	1,000	0,000	
45	0,707	0,707	1,000				

**Таблица 2.** Множители и приставки для образования десятичных кратных и дольных единиц СИ

Множитель	Приставка		Множитель	Приставка	
	Наимено-вание	Обозначение		Наимено-вание	Обозначение
$10^{18}$	экса	Э	$10^{-1}$	дэци	д
$10^{15}$	пета	П	$10^{-2}$	санти	с
$10^{12}$	тера	Т	$10^{-3}$	милли	м
$10^9$	гига	Г	$10^{-6}$	микро	мк
$10^6$	мега	М	$10^{-9}$	нано	н
$10^3$	кило	к	$10^{-12}$	пико	п
$10^2$	гекто	г	$10^{-15}$	фемто	ф
$10^1$	дека	да	$10^{-18}$	атто	а

**Таблица 3.** Абсолютные показатели преломления веществ

Вещество	Показатель преломления
Алмаз	2,42
Вода (при 20 °C)	1,33
Воздух	1,00029
Глицерин	1,47
Каменная соль	1,54
Кварц	1,54
Кедровое масло (при 20 °C)	1,52
Лед	1,31
Плексиглас	1,5
Сероуглерод (при 20 °C)	1,63
Скипидар	1,47
Спирт этиловый	1,36
Рубин	1,76
Различные сорта стекла	От 1,47 до 2,04

*Таблица 4. Работа выхода металлов*

Вещество	Работа выхода электронов $A_{вых^1}$ эВ	Вещество	Работа выхода электронов $A_{вых^1}$ эВ
Алюминий	4,25	Сталь	4,3
Вольфрам	4,54	Барий	2,49
Золото	3,30	Германий	4,76
Медь	4,40	Кадмий	3,80
Олово	4,38	Калий	2,20
Ртуть	4,52	Литий	2,38
Свинец	4,0	Натрий	2,35
Серебро	4,3	Рубидий	2,16
Цинк	4,24	Цезий	1,81

*Таблица 5. Период полураспада радиоактивных элементов*

Изотоп	Период полураспада	Безопасный период
Водород-3	12,3 года	123 года
Вольфрам-181	145 дней	1450 дней
Вольфрам-185	74,5 дней	745 дней
Вольфрам-187	24 часа	10 суток
Йод-131	8 суток	80 суток
Криптон-94	1,4 с	14 с
Кобальт-60	5,2 года	52 года
Олово-115	9,4 дня	94 дня
Радон-222	3,8 суток	38 суток
Рений-187	70 млрд лет	700 млрд лет
Хлор-38	37,7 мин	6,28 часа
Углерод-14	5730 лет	57300 лет
Уран-235	4,5 млрд лет	45 млрд лет

*Таблица 6. Атомная масса изотопов химических элементов и элементарных частиц*

Элементарные частицы	Масса элементарной частицы, а.е.м.		
${}_{-1}^0 e$	0,00055		
${}_{1}^1 p$	1,00728		
${}_{0}^1 n$	1,00866		
Изотоп	Масса атома, а.е.м.	Изотоп	Масса атома, а.е.м.
${}_{1}^1 H$	1,00783	${}_{6}^{11} C$	11,00788

Изотоп	Масса атома, а.е.м.	Изотоп	Масса атома, а.е.м.
$^3_1H$	3,01543	$^{13}_6C$	13,00335
$^3_2He$	3,01605	$^{14}_6C$	13,99961
$^4_2He$	4,00260	$^{14}_7N$	14,00307
$^6_3Li$	6,01512	$^{15}_7N$	15,00010
$^7_3Li$	7,01600	$^{16}_8O$	15,99491
$^8_3Li$	8,02065	$^{17}_8O$	16,99913
$^6_4Be$	6,01738	$^{17}_9F$	16,99676
$^7_4Be$	7,01457	$^{27}_{13}Al$	27,98154
$^8_4Be$	8,02168	$^{235}_{92}U$	235,04418
$^9_4Be$	9,01219	$^{238}_{92}U$	238,05113
$^9_5B$	9,01038	$^{239}_{93}Np$	239,05320
$^{10}_5B$	10,01294	$^{239}_{94}Pu$	239,05242
$^{11}_5B$	11,00930		

Таблица 7. Коэффициенты относительной биологической активности (КОБЭ)

Вид излучения	КОБЭ, k
Рентгеновское и $\gamma$ – излучение	1
$\beta$ -излучение	1
Тепловые (медленные) нейтроны	3
Быстрые нейтроны	10
Протоны	10
$\alpha$ -излучение	20

Таблица 8.

Греческий алфавит						Латинский алфавит					
<b>A α</b>	альфа	<b>I ι</b>	йота	<b>P ρ</b>	ро	<b>A a</b>	а	<b>J j</b>	жи	<b>S s</b>	эс
<b>B β</b>	бета	<b>K κ</b>	каппа	<b>Σ σ</b>	сигма	<b>B b</b>	бе	<b>K k</b>	ка	<b>T t</b>	тэ
<b>Γ γ</b>	гамма	<b>Λ λ</b>	лямбда	<b>T τ</b>	тай	<b>C c</b>	це	<b>L l</b>	эль	<b>U u</b>	у
<b>Δ δ</b>	дельта	<b>M μ</b>	мю	<b>Y υ</b>	ипсилон	<b>D d</b>	де	<b>M m</b>	эм	<b>V v</b>	вэ
<b>Ε ε</b>	эпсилон	<b>N ν</b>	ню	<b>Φ φ</b>	фи	<b>E e</b>	э	<b>N n</b>	эн	<b>W w</b>	дубль-вэ
<b>Z ζ</b>	дзета	<b>Ξ ξ</b>	кси	<b>X χ</b>	хи	<b>F f</b>	эф	<b>O o</b>	о	<b>X x</b>	икс
<b>Η η</b>	эта	<b>Ο ο</b>	омикрон	<b>Ψ ψ</b>	пси	<b>G g</b>	же	<b>P p</b>	пэ	<b>Y y</b>	игрек
<b>Θ θ</b>	тета	<b>Π π</b>	пи	<b>Ω ω</b>	омега	<b>H h</b>	аш	<b>Q q</b>	ку	<b>Z z</b>	зет
						<b>I i</b>	и	<b>R r</b>	эр		

# ПЕРИОДИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ Д.И. МЕНДЕЛЕЕВА

ПЕРІОДЫ ДІЛ	ГРУППИ	ПОРЯДКОВІ НОМЕРЫ																					
		І	ІІ	ІІІ	ІV	ІVІ	ІVІІ	ІVІІІ	ІVІІІІ	ІVІІІІІ	ІVІІІІІІ	ІVІІІІІІІ	ІVІІІІІІІІ	ІVІІІІІІІІІ	ІVІІІІІІІІІІ	ІVІІІІІІІІІІІ	ІVІІІІІІІІІІІІ	ІVІІІІІІІІІІІІІ	ІVІІІІІІІІІІІІІІ	ІVІІІІІІІІІІІІІІІ			
1	1	Н 1 ВОДОРОД 1,008																					
2	2	Li 3 БЕРІЛІЙ 6,941	Be 4 БЕРІЛІЙ 9,012																				
3	3	Na 11 НАТРИЙ 22,990	Mg 12 МАГНЕЗІЙ 24,305	Al 13 АЛЮМІНІЙ 26,981	Si 14 КРЕМЕЛЬ 28,085																		
4	4	K 19 КАІЙ 39,998	Ca 20 КАЛЬЦІЙ 40,018	Sc 21 СКАНДІЙ 44,956	Sc 20 СКАНДІЙ 44,956	Ti 22 ТИТАН 47,90	V 22 ВАНАДІЙ 50,941	Cr 23 ХРОМ 51,996	Cr 23 ХРОМ 51,996														
5	5	Cu 29 МЕДЬ 63,546	Zn 30 ЦИНК 65,358	Ga 31 ГАЛЬФІЙ 69,72	Ge 32 ГЕРМІАНІЙ 72,59	Nb 40 ІТРИЙ 88,906	Zr 40 ІТРИЙ 88,906	Mo 42 ЦІРКОНІЙ 91,22	Mo 42 ЦІРКОНІЙ 91,22														
6	6	Rb 37 РУДЕЙДІЙ 85,568	Sr 38 СТРОНІЙ 87,62	Y 39 ІТРИЙ 88,906	Y 39 ІТРИЙ 88,906	Ta 72 ІНДІЙ 114,82	Ta 72 ІНДІЙ 114,82	Sn 50 ОЛОВО 118,69	Sn 50 ОЛОВО 118,69	Te 51 СУРЬМА 121,75	Te 51 СУРЬМА 121,75	Re 75 ЧЕЛУР 127,60	Re 75 ЧЕЛУР 127,60	Iod 126 ІОД 126,904	Iod 126 ІОД 126,904	Pd 46 РОДІЙ 102,905	Pd 46 РОДІЙ 102,905	Rh 45 РОДІЙ 101,017	Rh 45 РОДІЙ 101,017	Pt 78 ПЛАДАЙІЙ 106,42	Pt 78 ПЛАДАЙІЙ 106,42	Xe 54 КСЕНОН 131,310	Xe 54 КСЕНОН 131,310
7	7	Ag 47 СЕРБЬО 107,868	Ba 56 КАДMIЙ 112,41	La * 57 ІОНІЙ 114,82	Hf 72 ІНДІЙ 114,82	Ta 73 ГАФІЙ 178,49	Ta 73 ГАФІЙ 178,49	W 74 ТАТАП 180,94	W 74 ТАТАП 180,94	Re 76 ВОЛЬФРАМ 183,85	Re 76 ВОЛЬФРАМ 183,85	Os 76 ЧЕЛУР 186,207	Os 76 ЧЕЛУР 186,207	Ir 77 Іодін 191,2	Ir 77 Іодін 191,2	Pt 78 ПЛАТИНА 192,22	Pt 78 ПЛАТИНА 192,22	Rh 86 РАДОН [222]	Rh 86 РАДОН [222]	Rn 86 РАДОН [222]	Rn 86 РАДОН [222]		
8	8	Cs 55 ЦЕЗІЙ 132,905	Fr 58 БАРІЙ 137,33	La * 57 ІОНІЙ 138,905	La * 57 ІОНІЙ 138,905	Ta 82 ТАІЛІЙ 204,37	Ta 82 ТАІЛІЙ 204,37	Bi 83 СВІНЕЦ 207,72	Bi 83 СВІНЕЦ 207,72	W 84 ВІСМУТ 208,880	W 84 ВІСМУТ 208,880	At 121 АСТАТ 209	At 121 АСТАТ 209										
6	9	Ag 19 ЗОЛОТО 196,966	Au 32 РАДІЙ 226,025	Hg 32 РУТЬ 200,50	Hg 32 РУТЬ 200,50	Tl 82 ТАІЛІЙ 204,37	Tl 82 ТАІЛІЙ 204,37	Bi 83 СВІНЕЦ 207,72	Bi 83 СВІНЕЦ 207,72	Bi 83 СВІНЕЦ 207,72	Bi 83 СВІНЕЦ 207,72	Os 105 ВІСМУТ 210,72	Os 105 ВІСМУТ 210,72	Os 105 ВІСМУТ 210,72	Os 105 ВІСМУТ 210,72	Ir 106 Іодін 212	Ir 106 Іодін 212	Pt 108 Іодін 212	Pt 108 Іодін 212	Ro 4 RO <sub>4</sub>	Ro 4 RO <sub>4</sub>	Ro 4 RO <sub>4</sub>	
7	10	Fr 87 ФРАНЦІЙ [223]	Ra 88 РАДІЙ 226,025	Ac ** 89 АКТИНИЙ [227]	Ku 104 КУРЧАТОВИЙ [261]	Eu 62 САМARIЙ [145]	Eu 62 САМARIЙ [145]	Eu 62 САМARIЙ [145]	Eu 62 САМARIЙ [145]	Eu 62 САМARIЙ [145]	Eu 62 САМARIЙ [145]	Eu 62 САМARIЙ [145]	Eu 62 САМARIЙ [145]	Eu 62 САМARIЙ [145]	Eu 62 САМARIЙ [145]	Eu 62 САМARIЙ [145]	Eu 62 САМARIЙ [145]	Eu 62 САМARIЙ [145]	Eu 62 САМARIЙ [145]	Eu 62 САМARIЙ [145]	Eu 62 САМARIЙ [145]		
ВЫСШИЕ ЛЕТУЧІ ВОДОРОДНІ ОКСИДЫ		R <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	RO	R <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	RH <sub>4</sub>	RH <sub>3</sub>	RH <sub>2</sub>	RO <sub>3</sub>	R <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	RH <sub>3</sub>	RH <sub>2</sub>	RO <sub>3</sub>	R <sub>2</sub> O <sub>7</sub>	R <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	R <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	R <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	R <sub>2</sub> O <sub>1</sub>	R <sub>2</sub> O <sub>0</sub>	R <sub>2</sub> O <sub>-1</sub>	R <sub>2</sub> O <sub>-2</sub>			
Ce 58 ЦЕРІЙ 140,12	Pr 59 ПРАЗЕДІЙ 140,908	Nd 60 НЕДІЙ 144,24	Pm 61 ПРОМЕТІЙ 145	Sm 62 САМАРИЙ 150,4	Eu 63 ЕВРОПІЙ 151,96	Gd 64 ГАДОЛІНІЙ 157,25	Tb 65 ТЕРБІІЙ 158,925	Dy 66 ДІСПРОІЙ 162,50	Ho 67 ГОЛІМІЙ 164,930	Er 68 ЭРБІЙ 167,26	Tm 69 ТУЛІЙ 168,934	Yb 70 ІТЕРІЙ 173,04	Fm 100 ФЕРІЙ 174,967	Md 101 МЕДІЙ 175	Es 99 ІШІТЕЙНІЙ 175	Cf 98 КАІДОРНІЙ [251]	Fr 98 ФЕРІЙ [251]	Ro 103 НОВЕІЙ [258]	Ro 103 НОВЕІЙ [258]	Ro 103 НОВЕІЙ [258]	Ro 103 НОВЕІЙ [258]		
Th 90 ТОРІЙ 237,038	Pa 91 ФРАНЦІЙ [223]	U 92 ПРОАКТИНИЙ [231,036]	U 92 УРАН 238,029	U 92 УРАН 237,048	U 92 УРАН 238,029	U 92 УРАН 238,029	U 92 УРАН 238,029	U 92 УРАН 238,029	U 92 УРАН 238,029	U 92 УРАН 238,029	U 92 УРАН 238,029	U 92 УРАН 238,029	U 92 УРАН 238,029	U 92 УРАН 238,029	U 92 УРАН 238,029	U 92 УРАН 238,029	U 92 УРАН 238,029	U 92 УРАН 238,029	U 92 УРАН 238,029				

Хімічний знак	Горядковий номер	Хімічний знак	Горядковий номер
Sc 21 СКАНДІЙ 44,956	2	He 2 ГЕЛІЙ 4,003	2
На 10 НЕОН 20,179	8	Ne 10 ГЕЛІЙ 4,003	2
Ar 18 АРТОН 39,948	8	Ar 18 АРТОН 39,948	8
Kr 36 КРІПТОН 83,80	8	Kr 36 КРІПТОН 83,80	8
F 9 ФТОР 18,998	7	F 9 ФТОР 18,998	7
Mo 42 МОЛІБДЕН 95,94	2	Mo 42 МОЛІБДЕН 95,94	2
Na 11 НАТРИЙ 22,990	1	Na 11 НАТРИЙ 22,990	1

Опозитна маса	Число энергетичного уровня	Названня елемента
1	1	ГЕЛІЙ
2	2	Р-з'єлементи
3	3	д-з'єлементи
4	4	ф-з'єлементи
5	5	с-з'єлементи
6	6	р-з'єлементи
7	7	к-з'єлементи
8	8	л-з'єлементи
9	9	к-з'єлементи
10	10	л-з'єлементи
11	11	к-з'єлементи

У зваженнях, оскільки у якихсь елементах відсутні записи про їх атомну масу.
--

## Ответы к упражнениям

Упр. 1. 1. 6,28 рад; 2. 0,05 м/с; 3.  $\approx 0,04$  м; 1,57 м/с. 4. 0,02 м; 0,05 м/с<sup>2</sup>. 5. 10 Н/м.

Упр. 2. 1.  $25 \cdot 10^{-6}$  Гн. 2. В 2 раза. 3. 0,1 с; 5 В. 4.  $i = 10^{-4}\pi \cdot \cos(100\pi t + \frac{\pi}{2})$ , А; 0,02 с. 5. 6,28 мс. 6. 0,05 Дж.

Упр. 3. 1. 100 В; 0 В. 2.  $\approx 0,04$  с. 3. 50 В; 0,4 с; 2,5 Гц;  $e(t) = 50\cos 5\pi t$ . 4. 0,04 В. 5. 375 об/мин.

Упр. 4. 1. 8,5 А; 0,661 рад; 50 Гц. 2. 2,8 А;  $\pi/6$ ; 0,02 с. 3. 179 В; 14,1 А. 4.  $u_1(t) = 308\cos 100\pi t$ ;  $u_2(t) = 127\cos 120\pi t$ .

Упр. 5. 1. 0,04 Гн. 2. 16 мкФ. 3. 10 кГц; 44,7 В. 4. 133 мкФ; 593 В.

Упр. 6. 1.  $e(t) = 1256\sin 100\pi t; \approx 891$  В. 2. 95 %. 3. В 2 раза. 4. 1100. 5. В 400 раз, трансформатор.

Упр. 7. 1. 19 %; 0,6 %; 0 %; 0,02 %.

Упр. 8. 1. 15 м;  $5 \cdot 10^{-8}$  с; 7,5 м. 2. 1000 м. 3. 200 м. 4. 1000 м. 5. 2 мкГл.

Упр. 9. 1. В  $10^4$  раз. 2. В 81 раз; в 9 раз. 3. в 16 раз; в 2 раза. 4.  $11,5 \text{ МГц} \leq v \leq 12,5 \text{ МГц}$ . 5. 113,04 м. 6.  $2,8 \cdot 10^{-7}$  Ф.

Упр. 10. 0,33 м; 0,35 м; 0,14 м; УВЧ, дециметровые.

Упр. 11. 5455 тенге, безлимитный

Упр. 12. 1.  $72^\circ$ . 2.  $\pi$ . 3. 0. 4. 0,3 м. 5. Частичное ослабление.

Упр. 13 1.  $20^\circ$ . 2. 100. 3. 550 нм. 4. 3. 5. 19 мм.

Упр. 14. 1. Наблюдать за поверхностью воды, вращая поляроид. 2. Полное гашение не наблюдается.  
3.  $\approx 1,41$ . 4.  $45^\circ$ .

Упр. 15. 1. 1,8. 2. 430 нм. 3. 1,6.

Упр. 16. 1. 2. 2. 6,25. 3. 11 см.

Упр. 17. 1. 10 пм. 2.  $0,396$  пм. 3. 3,27 эВ;  $5,8 \cdot 10^{-36}$  кг;  $1,74 \cdot 10^{-27}$  кг · м/с.

Упр. 18. 1. Н и Не.

Упр. 19. 1. 0,6 нм; 0,06 нм. 2. 80 кВ. 3. 41 кВ.

Упр. 20. 1.  $4,8 \cdot 10^{14}$  Гц. 2.  $4,4 \cdot 10^{-36}$  кг;  $1,32 \cdot 10^{-27}$  кг · м/с;  $4 \cdot 10^{-19}$  Дж. 3.  $7,27 \cdot 10^{15}$  Гц.

Упр. 21. 1.  $6\text{H}_2\text{O} + 6\text{CO}_2 = \text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 + 6\text{O}_2$ . 2.  $\text{AgBr}, \text{AgCl}, \text{AgI}; 2\text{AgCl} \rightarrow 2\text{Ag} + \text{Cl}_2; 2\text{AgI} \rightarrow 2\text{Ag} + \text{I}_2$ .

Упр. 22. 1. 16. 2. 1538.

Упр. 23. 1.  $1,3 \cdot 10^{17}$ . 2. 10 кВт; 0,04 Дж. 3.  $3 \cdot 10^{17}$ .

Упр. 24. 1.  $^{216}_{84}\text{Po}$  2. 6  $\alpha$ -частиц, 3  $\beta$ -частицы. 3. 0,875.

Упр. 25. 1.  $A = 7, Z = 3, N = 4$ ;  $A = 17, Z = 8, N = 9$ ;  $A = 235, Z = 92, N = 143$ . 2.  $2,37 \cdot 10^{20}$ ;  $3,54 \cdot 10^{20}$ .

3.  $\approx 0,042$  а.е.м.;  $\approx 7 \cdot 10^{-29}$  кг. 4. 0,0024 а.е.м.; 2,24 МэВ. 5. 5,26 МэВ/нуклон; 5,046 а.е.м.

Упр. 26. 1.  $8,19 \cdot 10^{13}$  Дж;  $2,7 \cdot 10^6$  кг. 2. 6,1 МэВ; 944 МэВ; 939,34 МэВ; 17,35 МэВ. 3. 4,6 МэВ; 3,25 МэВ.

Упр. 27. 1. 8,4 мГр, нет. 2. 0,017 Гр; 3, тепловые нейтроны.

Упр. 28. 52 МВт.

Упр. 29. 2.  $6 \cdot 10^{-31}$  кг; 2,32 мкН.

Упр. 30. 1. 2,1;  $1,25 \cdot 10^{10}$ . 2.  $\approx 3$ .

Упр. 31. 1. 29,5 лет. 2.  $1,48 \cdot 10^5$  лет. 3.  $3,48 \cdot 10^{24}$  м.

## Список использованной литературы

1. А.А. Ванеев, З.Г. Дубицкая, Е.Ф. Ярунина. Преподавание физики в 10 классе средней школы. – М.: Просвещение, 1978.
2. В.И. Вертельник, Э.В. Позднеева и др. Физика. Тренинговые задания: в 2 ч. – Томск. Том. политехн. ун-т, 2006. – ч. 1. – 170 с.
3. Волькенштейн В.С. Сбор. задач по общему курсу физики – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1976. – 464 с.
4. Р.А. Гладкова, В.Е. Добронравов, Л.С. Жданов, Ф.С. Цодиков. Сбор. задач и вопросов по физике для средних специальных учебных заведений. – 2-е изд. исправл. – М.: Наука, 1974.
5. О.В. Головин, Н.И. Чистяков, В. Шварц, И. Хардон Агиляр. Радиосвязь/Под ред. проф. О.В.Головина. – М.: Горячая линия – Телеком, 2001. – 288 с.
6. Р.И. Грабовский. Курс физики: Учеб. пособие. 11-е изд., стер. – СПб.: Лань, 2009. – 608 с.
7. З.Г. Закиров, А.Ф. Надеев, Р.Р. Файзуллин. Системы сотовой связи стандарта GSM: Современное состояние, переход к сетям третьего поколения – М.: Эко-Трендз, 2004. – 264 с.
8. В.Г. Зубов, В.П. Шальников. Задачи по физике. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1975. – 280 с.
9. О.Ф. Кабардин. Физика: Справ. материалы: Учеб. пособие для учащихся. – 3-е изд. – М.: Просвещение, 1991. – 367 с.
10. Курс общей физики. Оптика и атомная физика. Учеб. пособие для студентов физ.-мат. фак. Пед. ин-тов/Е.М. Гершензон, Н.Н. Малов, В.С. Эткин. – М.: Просвещение, 1981. – 240 с.
11. Н.Н. Малов. Основы теории колебаний. Пособ. для учителей. – М.: Просвещение, 1971, 198 с.
12. Методика преподавания физики в средней школе. Молекуляр. физика. Электродинамика: Пособ. для учителя/С.Я. Шамаш, Э.Е. Эвенчик, В.А. Орлов и др.; Под ред. С.Я. Шамаша. – 2-е изд., перераб. – М.: Просвещение, 1987. – 256 с.
13. Методика преподавания физики в средней школе. Электродинамика нестационарных явлений. Квантовая физика: Пособ. для учителя/А.Т. Глазунов, И.И. Нурминский, А.А. Пинский. Под ред. А.А. Пинского. – М.: Просвещение, 1989. – 270 с.
14. Методика факультативных занятий по физике: Пособие для учителей/ О.Ф. Кабардин, С.И. Кабардина, В.А. Орлов и др. – М.: Просвещение, 1980. – 191 с.
15. Г.Я. Микишев, Б.Б. Буховцев. Физика. Учеб. для 11 класса общеобразоват. учреждений. – М.: Просвещение, 1995.
16. Об особенностях преподавания основ наук в общеобразовательных организациях Республики Казахстан в 2013–2014 учебном году. Инструктивно-методическое письмо. – Астана: Национальная академия образования им. И. Алтынсарина, 2013. – 121 с.
17. В.П. Орехов, А.В. Усова, И.К. Турышев и др. Методика преподавания физики в 8–10 классах средней школы. – М.: Просвещение, 1980.
18. Н.А. Парфентьева. Задачи по физике. Для поступающих в вузы. – М.: Классикс Стиль, 2005. – 480 с.
19. Практикум по физике в средней школе: Дидакт. материал/В.А. Буров, Ю.И. Дик, Б.С. Зворыкин и др. – М.: Просвещение, 1987.
20. А.П. Рымкевич, П.А. Рымкевич. Сборник задач по физике. – М.: Просвещение, 1984.
21. Сборник задач по физике: Для 10–11 кл. общеобразовательных учреждений/Сост. Г.Н. Степанова. М.: Просвещение, 2001.
22. Сборник задач по физике. 10–11 классы: пособ. для учащихся общеобразоват. учреждений: базовый и профильн. уровни/Н.А. Парфентьева. – 3-е изд. – М.: Просвещение, 2010. – 206 с.

23. Сборник задач по физике: Учеб. пособие/ Л.П. Баканина, В.Е. Белонучкин, С.М. Козел, И.П. Мазанько: Под ред. С.М. Козела – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1983. – 288 с.
24. Л.В. Тараков, А.Н. Таракова. Вопросы и задачи по физике (Анализ характерных ошибок поступающих во втузы): Учеб. пособие. – 4-е изд., стереотип. – М.: Высш. ш. 1990. – 256 с.
25. Физика. Учеб. программа для 10–11 классов естественно-математического направления общеобразовательной школы. – Астана: НАО им. И. Алтынсарина, 2013. – 19 с.
26. Физика. Пер. с англ. А.С.Ахматова и др. – М.: Наука, 1965.
27. Физический практикум для классов с углубленным изучением физики: Дидакт. материал: 9–11 кл./ Ю.И. Дик, О.Ф. Кабардин, В.А. Орлов и др. – М.: Просвещение, 1993.
28. Физика в задачах для поступающих в вузы/ Н.В. Турчина – М.: ООО «Издательство «Оникс»; ООО «Издательство «Мир и образование», 2008. – 768 с.
29. Элементарный учебник физики. Учеб. пособие. В 3 т./под ред. Г.С. Ландсберга, Т. З. Колебания. Волны. оптика. Строение атома – 8-е изд. М.: Наука, 1973. – 640 с.
30. Л. Эллиот, У. Уилкокс. Физика. Пер. с англ. под редакцией проф. А.И. Китайгородского. – М.: Главная редакция физико-математической литературы издательства «Наука», 1975.
31. Н.М. Шахмаев и др. Физика. Учеб. для 11 класса средних школ. – М.: Просвещение, 1991.

### Ссылки на иллюстрационные материалы

1. Рис. 7. etoretro.ru; fishki.net
2. Рис. 20. astana.gov.kz
3. Рис. 31. tehnatok.com
4. Рис. 34. v-tehnology.ru
5. Рис. 39. metalloporu.ru
6. Рис. 45. zen.yandex.ru
7. Рис. 46. profit.kz; poligraftorg.ru
8. Рис. 68. wifi.kz
9. Рис. 69. sport@aqmola.gov.kz
10. Рис. 70. www.rstradehouse.com
11. Рис. 80. robraz.ru; rostec.ru
12. Рис. 87. www.resonance-ed.com
13. Рис. 96. shopper.life
14. Рис. 105. www.sanalbasin.com
15. Рис. 108, 109. rkc.org
16. Рис. 121. school-collection.iv-edu.ru
17. Рис. 139. www.catersnews.com
18. Рис. 142. 300experts.ru
19. Рис. 150. yandex.kz
20. Рис. 154. bezrao.ru
21. Рис. 155. factum.kz
22. Рис. 157. vse.kz
23. Рис 158. eht.postimees.ee
24. Рис. 161. rusrep.ru
25. Рис. 163. www.alcimed.com
26. Рис. 165. naked-science.ru
27. Рис. 171. popularastronomy.technicacuriosa.com
28. Рис. 178. www.astronet.ru
29. Рис. 183. www.qwrt.ru
30. Рис. 185. www.physics-astronomy.org

## Содержание

Условные обозначения .....	3
Предисловие .....	4
Глава 1. Механические колебания .....	5
§ 1. Уравнения и графики гармонических колебаний .....	6
Глава 2. Электромагнитные колебания .....	13
§ 2. Свободные и вынужденные электромагнитные колебания .....	
Аналогии между механическими и электроомагнитными колебаниями .....	14
Глава 3. Переменный ток .....	23
§ 3. Генератор переменного тока .....	24
§ 4. Вынужденные электромагнитные колебания .....	30
§ 5. Резонанс напряжений в электрической цепи .....	34
§ 6. Производство, передача и использование электрической энергии .....	
Трансформатор .....	39
§ 7. Производство и использование электрической энергии в Казахстане и в мире .....	44
Глава 4. Электромагнитные волны .....	53
§ 8. Излучение и прием электромагнитных волн .....	54
§ 9. Радиосвязь. Детекторный радиоприемник .....	61
§ 10. Аналогово-цифровой преобразователь. Каналы связи .....	65
§ 11. Средства связи .....	70
Глава 5. Волновая оптика .....	79
§ 12. Интерференция света. Дифракция света .....	80
§ 13. Дифракционные решетки .....	86
§ 14. Поляризация света .....	90
Глава 6. Геометрическая оптика .....	97
§ 15. Законы геометрической оптики. Преломление в плоскопараллельной пластине, полное внутреннее отражение, световод .....	98
§ 16. Оптические приборы .....	105
Глава 7. Атомная и Квантовая физика .....	113
§ 17. Единство корпускулярно-волновой природы света .....	114
§ 18. Виды излучений, спектры, спектральные аппараты, спектральный анализ .....	119
§ 19. Инфракрасное и ультрафиолетовое излучение, рентгеновские лучи, шкала электромагнитных излучений .....	124
§ 20. Фотоэффект. Применение фотоэффекта .....	129
§ 21. Давление света. Химическое действие света. Фотография .....	135
§ 22. Томография .....	139
§ 23. Лазеры. Голография .....	145
Глава 8. Физика атомного ядра .....	153
§ 24. Естественная радиоактивность. Закон радиоактивного распада .....	
Нуклонная модель ядра. Изотопы. Энергия связи нуклонов в ядре .....	154
§ 25. Атомное ядро. Нуклонная модель ядра. Изотопы .....	
Энергия связи нуклонов в ядре .....	159
§ 26. Ядерные реакции. Искусственная радиоактивность. Деление тяжелых ядер .....	
Цепные ядерные реакции. Критическая масса. Термоядерные реакции .....	164
§ 27. Биологическое действие радиоактивных лучей. Защита от радиации .....	169
§ 28. Ядерный реактор. Ядерная энергетика .....	174

Глава 9. Нанотехнология и наноматериалы.....	181
§ 29. Основные достижения нанотехнологии, проблемы и перспективы развития наноматериалов.....	182
Глава 10. Космология .....	189
§ 30. Мир звезд. Переменные звезды .....	190
§ 31. Диаграмма Герцшпрунга - Раселла. Сверхновые, нейтронные звезды. Черные дыры.....	195
§ 32. Наша Галактика. Открытие других Галактик. Квазары.....	201
§ 33. Расстояние до звезд. Определение расстояний до галактик .....	206
§ 34. Темная материя и энергия. Расширение Вселенной. Модели Вселенной.....	211
§ 35. Теория большого взрыва. Основные этапы эволюции Вселенной. Жизнь и разум во Вселенной.....	215
Приложения	
Лабораторные работы и таблицы.....	221
Приложение 1. Лабораторные работы .....	222
Лабораторная работа № 1.	
Определение числа витков в обмотках трансформатора.....	222
Лабораторная работа № 2	
Определение длины световой волны с помощью дифракционной решетки .....	223
Лабораторная работа № 3	
Наблюдение поляризации света .....	225
Лабораторная работа № 4	
Определение показателя преломления стекла.....	226
Лабораторная работа № 5	
Определение периода полураспада .....	228
Приложение 2. Таблицы.....	230
Ответы к упражнениям .....	235
Список использованной литературы .....	236



Электронная версия



### **Внимание**

При необходимости вы всегда сможете найти CD с электронным приложением на сайте [arman-pv.kz](http://arman-pv.kz) и загрузить его на свой компьютер для дальнейшей работы

Учебное издание

**Назифа Анваровна Закирова  
Руслан Рауфович Аширов**

# **ФИЗИКА**

Учебник для 11 класса  
общественно-гуманитарного направления  
общеобразовательной школы

Художники Е. Мищенко, А. Айтжанов / Главный редактор К. Караева  
Редакторы Б. Масакбаева, Г. Маликова / Технический редактор В. Бондарев  
Художественный редактор Е. Мельникова / Бильд-редактор Ш. Есенкулова  
Художник-оформитель О. Подопригора / Дизайн обложки В. Бондарев, О. Подопригора  
Верстка Л. Костина, С. Сулейменова, Т. Макарова

**По вопросам приобретения обращайтесь по следующим адресам:**

г. Нур-Султан, м-н 4, д. 2, кв. 55.  
Тел.: 8 (7172) 92-50-50, 92-50-54. E-mail: [astana@arman-pv.kz](mailto:astana@arman-pv.kz)  
г. Алматы, м-н Аксай 1А, д. 28Б.  
Тел./факс: 8 (727) 316-06-30, 316-06-31. E-mail: [info@arman-pv.kz](mailto:info@arman-pv.kz)

**Книжный магазин «Арман-ПВ»**  
г. Алматы, ул. Алтынсарина, д. 87. Тел.: 8 (727) 303-94-43.

Сдано в набор 06.08.19 Подписано в печать 24.06.20 Формат 70x100  $\frac{1}{16}$ . Бумага офсетная.  
Гарнитура «Times New Roman». Печать офсетная. Объем 19,35 усл. печ. л. Тираж 10000 экз.

**Артикул 811-008-001р-20**