

Михай **МАРИНЧУК** | Ион **НАКУ**  
Спиридон **РУСУ** | Штефан **ТИРОН**

# Физика

---

# Астрономия

Учебник для **XII** класса

CZU 53+52 (075.3)

Φ 50

Manualul este elaborat conform Curriculumului disciplinar în vigoare, aprobat prin Ordinul ministrului educației (nr. 510 din 13 iunie 2011) și finanțat din *Fondul special pentru manuale*.

**Contribuția autorilor:**

*Mihai Marinciuc* – cap. 1 (temele 1.1–1.5), cap. 4–6, 7 (temele 7.1–7.6), cap. 9 (tema 9.1);

*Spiridon Rusu* – cap. 1 (temele 1.6–1.8), cap. 2, 3, 7 (temele 7.7, 7.8);

*Ion Nacu* – cap. 8 (temele 8.1–8.3 (a, b, c), 8.4);

*Ștefan Tiron* – cap. 8 (temele 8.3 (d), 8.5–8.7), cap. 9 (tema 9.2)

**Comisia de evaluare:** *Viorel Dușciac*, doctor conferențiar, USM; *Tatiana Comerzan*, șefa Centrului metodic DGÎTS Cimișlia, prof. școlar (gr. did. superior); *Ion Albu*, prof. școlar (gr. did. superior), Liceul Teoretic „Mihai Eminescu”, Drochia; *Efim Lungu*, prof. școlar (gr. did. superior), Liceul Teoretic „Mihai Corlăteanu”, Glinjeni, Fălești; *Pavel Stratan*, prof. școlar (gr. did. I), Liceul Teoretic „Onisifor Ghibu”, Orhei

**Acest manual este proprietatea Ministerului Educației al Republicii Moldova.**

Liceul _____				
Manualul nr. _____				
Anul de folosire	Numele de familie și prenumele elevului	Anul școlar	Aspectul manualului	
			la primire	la restituire
1				
2				
3				
4				
5				

Dirigintele controlează dacă numele elevului este scris corect.

Elevul nu trebuie să facă niciun fel de însemnări în manual.

Aspectul manualului (la primire și la restituire) se va aprecia cu calificativele: *nou, bun, satisfăcător, nesatisfăcător*.

**Responsabil de ediție:** *Larisa Dohotaru*

**Redactor:** *Valentina Ribalchina*

**Lector:** *Maria Volcovscaia*

**Corectori:** *Tatiana Bolgar, Mariana Belenciuc, Maria Cornesco*

**Redactor tehnic:** *Nina Duduciuc*

**Machetare computerizată:** *Olga Ciuntu, Valentin Vărtosu jr.*

**Copertă:** *Romeo Șveț*

**Întreprinderea Editorial-Poligrafică Știința,**

str. Academiei, nr. 3; MD-2028, Chișinău, Republica Moldova;

tel.: (+373 22) 73-96-16; fax: (+373 22) 73-96-27;

e-mail: prini\_stiinta@yahoo.com; prini@stiinta.asm.md;

www.editurastiinta.md

**DIFUZARE:**

**ÎM Societatea de Distribuție a Cărții PRO-NOI,**

str. Alba-Iulia, nr. 75, MD-2051, Chișinău, Republica Moldova;

tel.: (+373 22) 51-68-17, 71-96-74; fax: (+373 22) 58-02-68;

e-mail: info@pranoi.md; www.pranoi.md

Toate drepturile asupra acestei ediții aparțin Întreprinderii Editorial-Poligrafice Știința.

**Descrierea CIP a Camerei Naționale a Cărții**

**Физика. Астрономия:** Учебник для 12 кл./Михай Маринчук, Спиридон Русу, Ион Наку [и др.]; trad. din lb. rom.: Anatol Homenco, Claudia Șerban; Min. Educației al Rep. Moldova. – Ch.: Î.E.P. Știința, 2017 (Tipogr. „BALACRON” SRL). – 168 p.

ISBN 978-9975-85-075-9

53+52 (075.3)

© *Mihai Marinciuc, Spiridon Rusu, Ion Nacu, Ștefan Tiron*. 2011, 2017

© Traducere din limba română: *Anatol Homenco, Claudia Șerban*. 2011, 2017

© Î.E.P. Știința. 2011, 2017

ISBN 978-9975-85-075-9

# СОДЕРЖАНИЕ<sup>1</sup>

## Глава 1. ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ

- 1.1. Магнитное поле. Линии магнитного поля . . . . 5
- 1.2. Магнитная индукция. Электромагнитная сила . . 7
- 1.3. Действие магнитного поля на движущиеся электрические заряды. Сила Лоренца . . . . . 9
- 1.4. Движение заряженных частиц в магнитном поле . . . . . 11
- 1.5.\*Магнитные свойства вещества. Относительная магнитная проницаемость . . . . 13
- 1.6. Электромагнитная индукция . . . . . 15
  - а. Явление электромагнитной индукции. Практические применения . . . . . 15
  - б. Магнитный поток. Правило Ленца . . . . . 17
  - в. Закон электромагнитной индукции. Электродвижущая сила индукции . . . . . 19
- 1.7. Самоиндукция. Индуктивность контура . . . . 21
  - а. Явление самоиндукции . . . . . 21
  - б. Индуктивность. ЭДС самоиндукции . . . . . 22
- 1.8. Энергия магнитного поля . . . . . 23

## Глава 2. ПЕРЕМЕННЫЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК

- 2.1. Генерирование переменной электродвижущей силы . . . . . 24
- 2.2. Действующие значения переменного тока и напряжения . . . . . 26
- 2.3.\*Цепи переменного тока . . . . . 27
  - а. Особенности цепей переменного тока . . . . 27
  - б. Идеальный резистор в цепи переменного тока . . . . 28
  - в. Идеальная катушка в цепи переменного тока . . . . . 28
  - г. Идеальный конденсатор в цепи переменного тока . . . . . 30
  - д. Последовательная цепь переменного тока *RLC*. Закон Ома . . . . . 30
  - е. Резонанс напряжений. Добротность . . . . . 33
- 2.4.\*Мощность в цепи переменного тока . . . . . 35
- 2.5. Передача электрической энергии на большие расстояния . . . . . 38
  - а. Генератор переменного тока . . . . . 38
  - б. Коэффициент полезного действия линии электропередачи. Воздействие на живые организмы . . . . . 39
  - в. Трансформатор . . . . . 40

## Глава 3. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ

- 3.1. Электромагнитные колебания . . . . . 42
  - а. Идеальный колебательный контур . . . . . 42
  - б.\*Аналогия между механическими и электрическими колебаниями. Период и частота электромагнитных колебаний . . . 43
  - в.\* Затухающие и вынужденные электромагнитные колебания . . . . . 44
- 3.2.\*Электромагнитное поле . . . . . 45
- 3.3. Электромагнитные волны . . . . . 47
  - а.\*Существование электромагнитных волн . . . . 47
  - б. Распространение электромагнитных волн . . . 47
- 3.4. Шкала электромагнитных волн . . . . . 49
- 3.5. Практические применения радиоволн . . . . . 50
  - а. Принципы радиосвязи . . . . . 50
  - б. Радиолокация . . . . . 51
- 3.6. Развитие взглядов на природу света . . . . . 52
- 3.7. Интерференция света . . . . . 53
  - а. Когерентность световых волн. Условия наблюдения интерференции света . . . . . 54
  - б.\* Установка Юнга . . . . . 55
  - в.\* Плоскопараллельная пластинка . . . . . 56
  - г.\* Кольца Ньютона . . . . . 57
  - д. Применения интерференции света . . . . . 58
- 3.8. Дифракция света . . . . . 60
  - а. Изучение дифракции света на качественном уровне . . . . . 60
  - б. Дифракция света от щели. Дифракционная решетка . . . . . 61
- 3.9.\* Поляризация света . . . . . 65
  - а. Механическая модель поляризованного состояния. Плоскость поляризации . . . . . 65
  - б. Степень поляризации света. Поперечность световых волн . . . . . 65
  - в. Поляризация света при отражении . . . . . 67
- 3.10.\* Рассеяние света . . . . . 68

## Глава 4. ЭЛЕМЕНТЫ СПЕЦИАЛЬНОЙ ТЕОРИИ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

- 4.1.\* Принцип относительности в физике. Постулаты Эйнштейна . . . . . 69
- 4.2.\*Пространство и время в специальной теории относительности . . . . . 71

<sup>1</sup> Темы, задания, задачи, отмеченные знаком \*, предназначены только для реального профиля.

а.	Относительность одновременности . . . . .	71
б.	Относительность промежутков времени . . . . .	72
в.	Относительность продольных размеров . . . . .	73
4.3.*	Преобразования Лоренца и следствия из них . . . . .	75
а.	Преобразования Лоренца . . . . .	75
б.	Релятивистское сложение скоростей . . . . .	76
4.4.*	Основные понятия релятивистской динамики . . . . .	77

## Глава 5. ЭЛЕМЕНТЫ КВАНТОВОЙ ФИЗИКИ

5.1.	Тепловое излучение. Квантовая гипотеза . . . . .	79
5.2.	Внешний фотоэлектрический эффект . . . . .	81
а.	Фотоэлектрический эффект. Экспериментальные законы . . . . .	81
б.	Фотоны. Квантовая теория внешнего фотоэлектрического эффекта . . . . .	83
в.	Фотоэлементы . . . . .	85
5.3.*	Давление света . . . . .	86
5.4.*	Волновые свойства микрочастиц. Корпускулярно-волновой дуализм . . . . .	88
а.	Волны де Бройля. Дифракция электронов . . . . .	88
б.	Электронный микроскоп . . . . .	89

## Глава 6. ЭЛЕМЕНТЫ ФИЗИКИ АТОМА

6.1.	Явления, доказывающие сложную структуру атома . . . . .	91
6.2.	Опыт Резерфорда. Планетарная модель атома . . . . .	93
6.3.	Модель атома Бора . . . . .	95
а.	Постулаты Бора . . . . .	95
б.*	Теория атома водорода Бора . . . . .	95
6.4.*	Вынужденное излучение. Лазер . . . . .	99

## Глава 7. ЭЛЕМЕНТЫ ФИЗИКИ АТОМНОГО ЯДРА. ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ЧАСТИЦЫ

7.1.	Атомное ядро: структура и физические характеристики . . . . .	102
7.2.*	Ядерные силы. Энергия связи ядра . . . . .	105
7.3.	Радиоактивность . . . . .	107
а.	Открытие радиоактивности. Радиоактивные превращения . . . . .	107
б.*	Закон радиоактивного распада . . . . .	109
7.4.*	Ядерные реакции . . . . .	111
а.	Ядерные реакции. Общие характеристики . . . . .	111
б.	Деление ядер урана . . . . .	111
в.	Цепная реакция. Ядерный реактор . . . . .	112
г.	Термоядерный синтез . . . . .	113
7.5.*	Детекторы ионизирующих излучений . . . . .	115
7.6.*	Биологическое действие ядерных излучений . . . . .	118
7.7.*	Элементарные частицы . . . . .	119
а.	Открытие элементарных частиц . . . . .	119
б.	Частицы и античастицы . . . . .	120
7.8.*	Фундаментальные взаимодействия. Классификация элементарных частиц . . . . .	121

## Глава 8. ЭЛЕМЕНТЫ АСТРОНОМИИ

8.1.	Астрономия среди физических наук . . . . .	123
а.	Цели и основные задачи астрономии . . . . .	123
б.	Методы астрофизических исследований . . . . .	124
8.2.	Элементы практической астрономии . . . . .	125
а.	Видимое движение звезд. Созвездия . . . . .	125
б.	Небесная сфера и ее элементы . . . . .	127
в.	Видимое годовичное движение Солнца. Эклиптика . . . . .	127
г.	Системы небесных координат. Кульминация светил. Равноденствия и солнцестояния . . . . .	128
д.	Периодическое движение Земли и Луны. Фазы Луны. Солнечные и лунные затмения . . . . .	130
е.	Время и его измерение. Календарь . . . . .	133
8.3.	Солнечная система . . . . .	135
а.	Планеты земной группы и планеты-гиганты. Спутники планет. Карликовые планеты . . . . .	135
б.	Малые тела Солнечной системы . . . . .	139
в.	Земля. Внутреннее строение, гидросфера, атмосфера и магнитосфера Земли. Луна. Приливы и отливы . . . . .	142
г.	Понятие о космогонии. Возникновение и эволюция Солнечной системы . . . . .	145
8.4.	Элементы небесной механики . . . . .	146
а.	Видимое движение планет. Гелиоцентрическая система мира . . . . .	146
б.	Сидерический и синодический периоды обращения планет. Законы Кеплера . . . . .	148
8.5.	Солнце . . . . .	149
а.	Внутреннее строение и атмосфера Солнца . . . . .	149
б.	Солнечная активность и солнечно-земные связи . . . . .	150
8.6.	Звезды . . . . .	151
а.	Классификация звезд . . . . .	151
б.	Диаграмма «спектр-светимость». Эволюция звезд. Переменные и нестационарные звезды . . . . .	152
8.7.	Элементы космологии . . . . .	154
а.	Наша Галактика. Звездные скопления. Собственное движение звезд и Солнечной системы. Вращение Галактики . . . . .	154
б.	Классификация галактик. Галактики с активными ядрами. Квазары. Расширение Вселенной. Большой Взрыв . . . . .	155

## Глава 9. НАУЧНАЯ КАРТИНА МИРА

9.1.	Этапы создания физической картины мира . . . . .	158
9.2.	Астрономия и научная картина мира . . . . .	161
	Цветная вкладка . . . . .	162
	Тесты для итоговой оценки знаний . . . . .	164
	Ответы к заданиям . . . . .	168



## 1.1. МАГНИТНОЕ ПОЛЕ. ЛИНИИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

### Вспоминаем

Вспомним магнитные явления, изученные в предыдущих классах. Тела, обладающие свойством притягивать железо, называют **магнитами**. Они бывают **естественными** и **искусственными**. Области магнита, к которым железные предметы притягиваются сильнее всего, называют **магнитными полюсами**.

**Магнитные полюсы невозможно отделить один от другого.**

Маленький полосовой магнит, который может свободно вращаться вокруг вертикальной оси, перпендикулярной прямой, проходящей через его полюсы, называется **магнитной стрелкой**. Он устанавливается определенным образом, а именно, в направлении, примерно совпадающим с земным направлением юг–север. Полюс магнита, ориентированный на север, называется **северным полюсом** (обозначается N), противоположный полюс называется **южным** (обозначается S).

**Одноименные магнитные полюсы отталкиваются, а разноименные притягиваются.**

Приняв во внимание ориентацию магнита, свободно вращающегося вокруг вертикальной оси, перпендикулярной прямой, проходящей через его полюсы, а также характер их взаимодействия, приходим к выводу, что в области *географического Северного полюса Земли находится южный геомагнитный полюс, а в области географического Южного полюса – северный геомагнитный полюс.*

Магнитное взаимодействие осуществляется посредством **магнитного поля**, существующего вокруг магнитов.

Магнитные поля исследуются с помощью магнитных стрелок. Для наглядного изображения полей используются **магнитные линии**.

**Линии магнитного поля** – это линии, касательные к которым в каждой точке совпадают с направлением магнитной стрелки, помещенной в эту точку.

На *рисунке 1.1* показаны магнитные линии – **спектр магнитного поля** – полосового магнита. Они выходят из северного полюса и входят в южный. Можно заметить, что вблизи полюсов, в областях наибольшего магнитного действия, магнитные линии расположены наиболее густо. И наоборот, в областях слабого магнитного действия густота линий меньше. Это подобно тому, что наблюдается в электростатических полях. Спектр магнитного поля вместо магнитных стрелок может быть получен с помощью железных опилок.

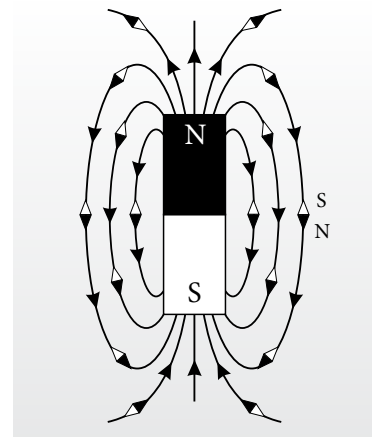


Рис. 1.1

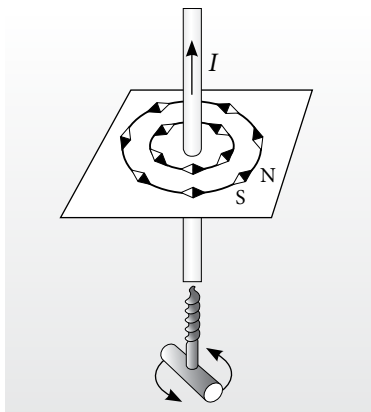


Рис. 1.2

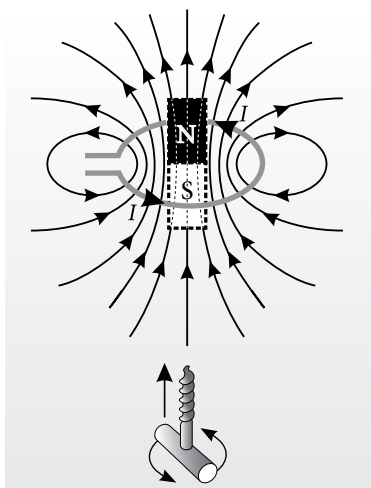


Рис. 1.3

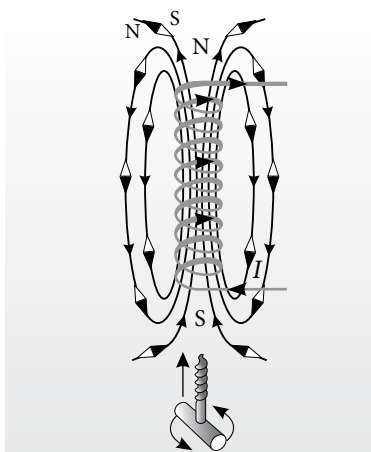


Рис. 1.4

В 1820 году датский физик Ханс Кристиан Эрстед (1777–1851) обнаружил действие электрического тока на магнитную стрелку. Так было установлено, что **вокруг проводника с электрическим током существует магнитное поле.**

Электрический ток представляет собой упорядоченное движение носителей электрического заряда, следовательно, источником **магнитного поля являются движущиеся электрические заряды.** Неподвижные электрические заряды создают только электрическое поле, а, находясь в движении, они создают не только электрическое, но и магнитное поле.

Чтобы установить направление линий магнитного поля, создаваемого протекающим по прямолинейному проводнику электрическим током, пропустим проводник через отверстие в куске картона. Проводник расположим вертикально, картон – горизонтально, на него поместим побольше маленьких магнитных стрелок, которые могут вращаться вокруг вертикальных осей. В отсутствие тока стрелки параллельны друг другу и северным концом направлены к геомагнитному южному полюсу. Если же по проводнику течет ток, то они изменяют свое направление, образуя окружности (рис. 1.2). Делаем вывод, что **магнитные линии поля, создаваемого прямолинейным проводником с током, имеют форму окружностей, лежащих в плоскостях, перпендикулярных проводнику; центры этих окружностей – это точки пересечения плоскостей с проводником.**

Направление магнитных линий показывают северные полюсы магнитных стрелок. Между направлением магнитных линий и направлением электрического тока существует определенная связь, которая может быть выражена несколькими правилами. Чаще всего применяют **правило буравчика:**

При вращении **буравчика (винта) с правой резьбой** так, что его поступательное движение происходит в направлении протекания электрического тока, направление вращения рукоятки буравчика показывает направление магнитных линий.

На рисунке 1.2 видна важная особенность поля: **магнитные линии замкнуты.** У полосового магнита линии, показанные на рисунке 1.1 вне его, замыкаются внутри магнита. Таким образом, магнитные линии существенно отличаются от линий напряженности электростатического поля, которые разомкнуты, они заканчиваются либо на зарядах, либо в бесконечности. Сравнение характера магнитных и электрических линий приводит к выводу об отсутствии в природе магнитных зарядов, которые вели бы себя подобно электрическим зарядам в электростатическом взаимодействии.

С помощью маленьких магнитных стрелок можно установить направление линий поля кругового тока, как называют кольцевой проводник, по которому течет ток (рис. 1.3). Сравнив рисунки 1.3 и 1.1, констатируем, что линии магнитного поля кругового тока подобны линиям магнитного поля короткого полосового магнита (на рисунке 1.3 он показан штриховой линией). Для определения направления магнитных линий кругового тока можно применить другой вариант **правила буравчика:**

Направление магнитных линий совпадает с направлением поступательного движения буравчика при вращении его рукоятки в направлении электрического тока в кольце.

Это правило применимо и для определения направления магнитных линий внутри длинной катушки с током, обычно называемой **соленоидом** (рис. 1.4). Магнитное поле соленоида подобно полю полосового магнита (см. рис. 1.1). Отметим, что внутри соленоида линии поля параллельны, поле **однородно**.

Подобие магнитных полей кругового тока и полосового магнита было установлено в 1820 году

Андре Мари Ампером (1775–1836) до введения понятий поля и его линий. Оно использовалось для объяснения магнитных свойств вещества.

Чтобы объяснить земной магнетизм, Ампер предположил, что внутри Земли также существуют круговые токи. В настоящее время считается, что эти токи циркулируют в жидкой части металлического ядра Земли.

## ➔ Проверьте свои знания

1. Что называют магнитными полюсами? Как взаимодействуют одноименные магнитные полюсы? Разноименные?
2. Какие свойства магнитной стрелки позволяют использовать ее в компасе?
3. Что представляют собой магнитные линии? Как определяется их направление?
4. Как связаны характер магнитного действия и густота магнитных линий?
5. Какой главный вывод следует из опытов Эрстеда?
6. Что является источником магнитного поля?
7. В чем состоит главное отличие характера магнитных линий и линий напряженности электростатического поля?

## 1.2. МАГНИТНАЯ ИНДУКЦИЯ. ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СИЛА

### Вспоминаем

Чтобы определить физическую величину, характеризующую магнитное поле, вспомним соответствующие величины, введенные при изучении гравитационного и электростатического полей. В обоих случаях рассматривается действие поля на внесенное в него соответствующее **пробное тело**.

В случае гравитационного поля пробным телом является материальная точка массой  $m$ . На пробные тела различной массы  $m$ , внесенные в одну и ту же точку поля, действуют различные силы  $\vec{F}$ . Однако опыты показали, что отношение  $\frac{\vec{F}}{m}$  остается постоянным. Именно эта величина  $\vec{G} = \frac{\vec{F}}{m}$ , называемая **напряженностью гравитационного поля**, является его силовой характеристикой.

Пробным телом в случае электростатического поля служит точечное заряженное тело, несущее заряд  $q$ . Пробные тела с различными зарядами  $q$  в одной и той же точке поля испытывают действие различных сил  $\vec{F}$ , но отношение  $\frac{\vec{F}}{q}$  одинаково для всех зарядов. Отношение  $\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}$  является силовой характеристикой и называется **напряженностью электрического поля**.

Для изучения свойств магнитного поля проведем следующий опыт.

К чувствительному динамометру подвесим рамку в форме равнобедренного треугольника, состоящую из большого числа проводящих витков, изолированных между собой. Нижняя сторона рамки находится между полюсами подковообразных магнитов (рис. 1.5). Динамометр показывает вес рамки. Собираем цепь, состоящую из рамки, источника тока, амперметра и реостата (на рисунке не показаны). Если сила тока через один виток равна  $I$ , то через сторону рамки она будет  $NI$ , где  $N$  – число витков.

При протекании электрического тока, на сторону рамки, находящуюся между полюсами магнитов, действует **электромагнитная сила**  $F_m$ , а показания динамометра увеличиваются или уменьшаются в зависимости от направления тока в рамке. Вычисляя разность показаний динамометра, определяем величину электромагнитной силы.

Изменяя силу тока  $I$  с помощью реостата, устанавливаем, что  $F_m \sim I$ . Чтобы изменить длину участка проводника  $l$ , находящегося в магнитном

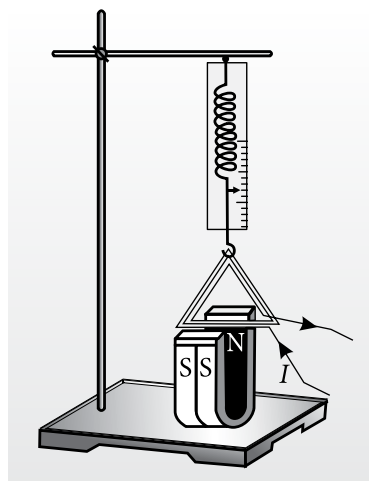


Рис. 1.5

поле, используем разное количество одинаковых магнитов. Устанавливаем, что при использовании двух магнитов электромагнитная сила вдвое больше, чем при использовании одного магнита, т.е.  $F_m \sim l$ . Вращая магниты вокруг вертикальной оси, изменяем угол  $\alpha$  между проводником с током и вектором магнитной индукции  $\vec{B}$ . Заметим, что уменьшение этого угла сопровождается уменьшением электромагнитной силы.

Введем силовую характеристику магнитного поля. Для простоты допустим, что это поле однородно. Магнитное поле действует на проводник с током, поэтому в качестве пробного тела возьмем прямолинейный участок проводника, называемый **элементом тока**. Он характеризуется как силой тока  $I$ , протекающего через него, так и длиной участка проводника  $l$ , то есть произведением  $Il$ .

Как уже отмечалось, электромагнитная сила, действующая на элемент с током, зависит не только от произведения  $Il$ , но и от ориентации элемента тока относительно магнитного поля. Сила максимальна ( $F = F_{\max}$ ), если проводник перпендикулярен магнитным линиям, и равна нулю ( $F = 0$ ), если проводник расположен вдоль его линий.

Было установлено, что в данном месте магнитного поля сила  $F_{\max}$  принимает различные значения для различных величин произведения  $Il$ , но отношение  $\frac{F_{\max}}{Il}$  остается постоянным. Эта величина и считается силовой характеристикой магнитного поля и называется **индукцией магнитного поля** или просто **магнитной индукцией**; ее обозначают  $\vec{B}$ . Таким образом, согласно определению, величина магнитной индукции

$$B = \frac{F_{\max}}{Il}. \quad (1.1)$$

**Магнитная индукция равна отношению максимальной силы, действующей со стороны однородного магнитного поля на участок прямолинейного проводника с током, к произведению силы тока в проводнике на его длину.**

Единица магнитной индукции называется **тесла** (Тл) – в честь сербского ученого Николы Тесла (1856–1943), который считается основателем современной электротехники. В соответствии с определением (1.1), получаем:

$$[B] = \frac{[F_{\max}]}{[I][l]} = \frac{\text{Н}}{\text{А} \cdot \text{м}} = \text{Тл},$$

то есть  $1 \text{ Тл} = 1 \text{ Н}/(\text{А} \cdot \text{м})$ .

**Один тесла (Тл) – это индукция однородного магнитного поля, в котором на каждый метр длины достаточно длинного прямолинейного проводника с током 1 А действует максимальная сила 1 Н.**

Направление вектора магнитной индукции  $\vec{B}$  указывается направлением юг–север (S–N) магнитной стрелки, помещенной в соответствующую точку поля.

Введение вектора индукции  $\vec{B}$  требует уточнения некоторых понятий, рассмотренных ранее. **Магнитной линией** (п. 1.1) была названа линия, в каждой точке которой направление касательной совпадает с направлением магнитной стрелки, следовательно, в каждой точке этой линии направление вектора  $\vec{B}$  совпадает с направлением касательной к ней. Это позволяет уточнить и дополнить название магнитной линии – она называется **линией магнитной индукции**. В соответствии с отмеченным в п. 1.1, линии индукции замкнуты. Поле, линии которого замкнуты, называется **вихревым**. Следовательно, **магнитное поле является вихревым**. Еще одно уточнение: **однородным является поле, в каждой точке которого магнитная индукция  $\vec{B}$  одна и та же**.

Из определения (1.1) выразим максимальную величину электромагнитной силы:

$$F_{\max} = IlB. \quad (1.2)$$

Как было отмечено выше, электромагнитная сила максимальна, если прямолинейный проводник перпендикулярен вектору магнитной индукции  $\vec{B}$ . Кроме того, установлено, что электромагнитная сила  $\vec{F}_{\max}$  в свою очередь, перпендикулярна как проводнику, так и вектору  $\vec{B}$ . Направление этой силы чаще всего определяется с помощью **правила левой руки**:

Если раскрытую ладонь левой руки расположить таким образом, чтобы линии магнитной индукции перпендикулярно входили в ладонь, а четыре вытянутых пальца показывали направление электрического тока, то большой палец, отставленный под прямым углом к остальным, укажет направление электромагнитной силы (рис. 1.6 а).

Это правило было сформулировано английским физиком Джоном А. Флемингом (1849–1945) и носит его имя.

Если магнитная индукция  $\vec{B}$  образует произвольный угол  $\alpha$  с проводником, то вектор  $\vec{B}$  раскладывается на две составляющие:  $\vec{B}_{\parallel}$  – параллельную проводнику и  $\vec{B}_{\perp}$  – перпендикулярную ему (рис. 1.6 б). Из вышесказанного ясно, что маг-



нитное действие на проводник оказывает только составляющая  $\vec{B}_\perp$ .

В этом случае электромагнитная сила  $F_m = IlB_\perp$ . Из рисунка 1.6 б видно, что  $B_\perp = B \sin \alpha$ . Таким образом, общее выражение для электромагнитной силы имеет вид:

$$F_m = IlB_\perp = IlB \sin \alpha. \quad (1.3)$$

Для определения направления силы  $\vec{F}_m$  в данном случае используем правило левой руки с одним отличием: в ладонь входит составляющая  $\vec{B}_\perp$  (а не  $\vec{B}$ !).

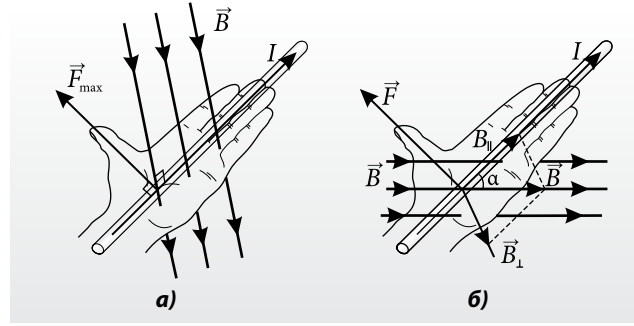


Рис. 1.6

### ➔ Проверьте свои знания

1. Как определяется модуль индукции магнитного поля? А ее единица?
2. Как можно определить направление электромагнитной силы?
3. Какие факторы определяют величину силы, действующей со стороны магнитного поля на участок проводника с током?
4. Прямолинейный проводник длиной 0,6 м находится в однородном магнитном поле перпендикулярно линиям его индукции. Чему равна индукция этого поля, если при протекании по проводнику тока 2,5 А на него действует сила 0,15 Н?
5. Участок проводника с током находится в однородном магнитном поле. При протекании через проводник тока 2,4 А на этот участок действует сила 0,48 Н. Какая сила будет действовать на него, если, не изменяя положения участка проводника, увеличить ток до 3,6 А?
6. Через проводник, образующий угол  $30^\circ$  с линиями индукции магнитного поля, протекает ток 1,2 А. Найдите величину электромагнитной силы, действующей на участок проводника длиной 0,75 м, если магнитная индукция равна 0,8 Тл.
- 7\*. Проводник массой 8 г и длиной 20 см, подвешенный горизонтально на двух тонких металлических нитях, помещен в горизонтальное магнитное поле перпендикулярно линиям магнитной индукции. Определите силу натяжения каждой нити, возникающей при пропускании через проводник тока 3 А. Индукция магнитного поля равна 0,05 Тл. Проанализируйте все возможные случаи.
8. По проведению опыта (рис. 1.5) составьте инструкцию к лабораторной работе «Изучение действия магнитного поля на проводник с током» и выполните ее. Сделайте вывод.

## 1.3. ДЕЙСТВИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ДВИЖУЩИЕСЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЗАРЯДЫ. СИЛА ЛОРЕНЦА

На проводник с током в магнитном поле действует электромагнитная сила  $F_m = IlB \sin \alpha$  (1.3). Электрический ток – это упорядоченное движение заряженных частиц (электрических зарядов). Очевидно, что электромагнитная сила, действующая на проводник с током, является результирующей сил, действующих на заряженные частицы, которые движутся упорядоченно по соответствующему участку проводника.

Выразим силу электрического тока в проводнике, используя характеристики движущихся в нем направленно со скоростью  $\vec{v}$  электрических зарядов. Выделим участок проводника длиной  $l$  и площадью поперечного сечения  $S$  (рис. 1.7). Обозначим через  $n$  концентрацию носителей заряда и через  $q_0$  величину одного электрического заряда. Число носителей заряда участка  $N = nV = nlS$ , а их общий электрический заряд  $q = q_0N = q_0nlS$ . Носители заряда проходят участок за время  $t = \frac{l}{v}$  и переносят через поперечное сечение проводника заряд  $q$ . Сила тока в проводнике

$$I = \frac{q}{t} = q_0nvS. \quad (1.4)$$

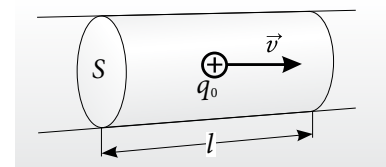


Рис. 1.7

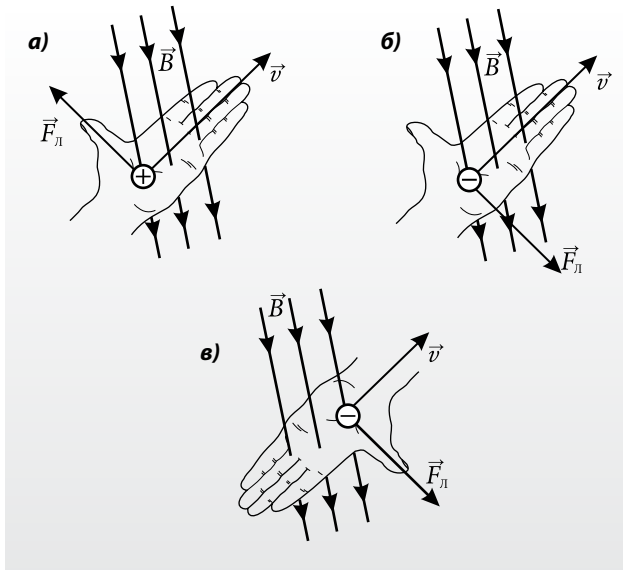


Рис. 1.8



ХЕНДРИК АНТОН ЛОРЕНЦ  
(1853–1928)

нидерландский физик-теоретик

Развил теорию электромагнитного поля Максвелла, положив в основу корпускулярный характер заряженных частиц, и записал уравнения Максвелла-Лоренца для электромагнитного поля в веществе. Установил зависимость показателя преломления вещества от его плотности и от частоты падающего света. Вывел формулу для силы, действующей на заряженную частицу, которая движется в электромагнитном поле, получившей название *силы Лоренца*.

Предсказал влияние магнитного поля на излучение атомов, открытое экспериментально (1896) Питером Зееманом (1865–1943), одним из его учеников, известное как «эффект Зеемана». За эти работы им была присуждена Нобелевская премия в 1902 году. Лоренц вывел (1904) формулы, связывающие между собой пространственные координаты и моменты времени одного и того же события в двух различных инерциальных системах отсчета, названные позднее *преобразованиями Лоренца*. В 1918 году возглавил научный комитет, разработавший проект конструкции дамбы в Зейдерзе, что впоследствии позволило осушить большую территорию, что очень важно для Нидерландов.

Подставив (1.4) в (1.3), получим:  $F_m = q_0 v n S l B \sin \alpha$ .  
Число заряженных частиц этого участка  $N = nSl$ .  
Итак,  $F_m = q_0 v NB \sin \alpha$ .

**Сила, действующая на частицу со стороны магнитного поля, в котором она движется, называемая силой Лоренца, равна**

$$F_L = \frac{F_m}{N} = q_0 v B \sin \alpha. \quad (1.5)$$

В формуле (1.3)  $\alpha$  – это угол между направлением электрического тока и вектором магнитной индукции  $\vec{B}$ . Если электрический заряд частицы положителен, то направление тока совпадает с направлением скорости  $\vec{v}$  зарядов. Следовательно, для положительных зарядов  $\alpha$  – это угол между векторами  $\vec{v}$  и  $\vec{B}$ . Электромагнитная сила  $F_m$  перпендикулярна проводнику и вектору  $\vec{B}$ , то есть сила Лоренца перпендикулярна обоим векторам:  $\vec{v}$  и  $\vec{B}$ .

Направление силы можно легко определить, применяя правило левой руки:

Располагаем раскрытую ладонь так, чтобы линии магнитной индукции перпендикулярно входили в нее, а четыре вытянутых пальца показывали направление вектора скорости. Тогда большой палец, отставленный под прямым углом к остальным, покажет направление силы Лоренца (рис. 1.8 а).

Если же заряд частицы отрицателен, то направление силы Лоренца может быть определено двумя способами: опираясь на то же правило, располагаем ладонь так же, как и в случае положительного заряда, и считаем направление силы противоположным тому, которое указывает большой палец (рис. 1.8 б), или направляем вытянутые пальцы противоположно скорости, тогда отогнутый большой палец покажет направление силы (рис. 1.8 в).

Сила Лоренца все время перпендикулярна скорости заряженной частицы, значит, и направлению ее перемещения. Поэтому механическая работа равна нулю. Из механики известно, что изменение кинетической энергии тела равно работе действующих на него сил. В нашем случае работа равна нулю и изменение кинетической энергии равно нулю. **Кинетическая энергия, а следовательно, и модуль скорости движущейся в магнитном поле заряженной частицы, остаются неизменными.** Магнитное поле не изменяет значение скорости частицы, оно изменяет только ее направление. Итак, *движение электрического заряда в магнитном поле является равномерным.*

## ➔ Проверьте свои знания

1. Какие факторы определяют величину силы, которая действует на движущийся в магнитном поле электрический заряд?
2. Как определяется направление силы Лоренца?
3. Какова главная особенность движения заряженных частиц в магнитном поле?
4. Протон со скоростью  $5 \cdot 10^6$  м/с движется в однородном магнитном поле, магнитная индукция которого равна 0,04 Тл. Определите максимальное значение силы, действующей на протон со стороны

поля. Чему равна величина силы, если скорость протона образует угол  $60^\circ$  с вектором магнитной индукции? Заряд протона  $q_p = 1,60 \cdot 10^{-19}$  Кл.

- 5.\* Электрон с кинетической энергией, равной  $4,55 \cdot 10^{-19}$  Дж, влетает в однородное магнитное поле с индукцией 0,3 Тл перпендикулярно магнитным линиям. Определите ускорение электрона, приобретенное в магнитном поле. Масса электрона  $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31}$  кг, электрический заряд  $|q_e| = 1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл.

## 1.4. ДВИЖЕНИЕ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Рассмотрим частицу, несущую электрический заряд  $q$ , которая со скоростью  $\vec{v}$  попадает в *однородное магнитное поле* индукцией  $\vec{B}$ . Исследуем конкретные случаи ориентации вектора  $\vec{v}$  относительно индукции  $\vec{B}$ .

Если при попадании в поле вектор скорости  $\vec{v}$  образует с вектором  $\vec{B}$  угол  $\alpha = 0$  или  $180^\circ$ , то  $\sin \alpha = 0$ . Из выражения (1.5) следует, что сила Лоренца  $F_L = 0$ , то есть магнитное поле не действует на заряженную частицу, ее скорость  $\vec{v}$  не изменяется, частица движется равномерно вдоль линии магнитной индукции в прежнем направлении.

Пусть заряженная частица попадает в однородное поле со скоростью  $\vec{v}$ , перпендикулярной вектору магнитной индукции  $\vec{B}$ . В этом случае  $\alpha = 90^\circ$  и  $\sin \alpha = 1$ . Сила Лоренца максимальна  $F_L = qvB$ , она сообщает заряженной частице ускорение

$$a = \frac{F_L}{m} = \frac{q}{m} vB. \quad (1.6)$$

Как было отмечено в п. 1.3, сила Лоренца перпендикулярна как вектору  $\vec{B}$ , так и вектору скорости  $\vec{v}$ , следовательно, и ускорение перпендикулярно этим векторам.

Траектория частицы представляет собой плоскую кривую, перпендикулярную вектору магнитной индукции  $\vec{B}$ .

Единственным движением, в котором скорость и ускорение обладают такими свойствами, является равномерное движение по окружности. При этом ускорение характеризует быстроту изменения направления скорости, оно направлено к центру окружности, по которой движется материальная точка (рис. 1.9), называется **центро-**

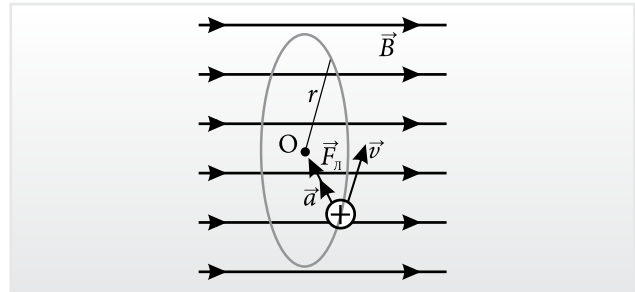


Рис. 1.9

**стремительным ускорением** и равно  $a = v^2/r$ , где  $r$  – радиус окружности.

Приравняв это значение выражению (1.6), для радиуса окружности получим:

$$r = \frac{mv}{qB}. \quad (1.7)$$

Период обращения заряженной частицы в магнитном поле равен:

$$T = \frac{2\pi r}{v} = \frac{2\pi m}{qB}. \quad (1.8)$$

Замечаем, что период обращения  $T$  зависит только от природы частицы (от ее массы  $m$  и электрического заряда  $q$ ) и магнитной индукции  $B$ , но не зависит от скорости заряженной частицы: чем больше ее скорость, тем больше радиус окружности, которую частица описывает за то же время. Это свойство сохраняется только при скоростях, много меньших скорости света в вакууме:  $c = 3 \cdot 10^8$  м/с. При приближении скорости  $v$  к  $c$  масса частиц уже не остается постоянной, она зависит от скорости, увеличиваясь при ее возрастании. (*Движение при скоростях  $v \rightarrow c$  будет детальнее рассмотрено в главе 4.*) Очевидно, в этих условиях период обращения не остается постоянным, он изменяется в зависимости от скорости.

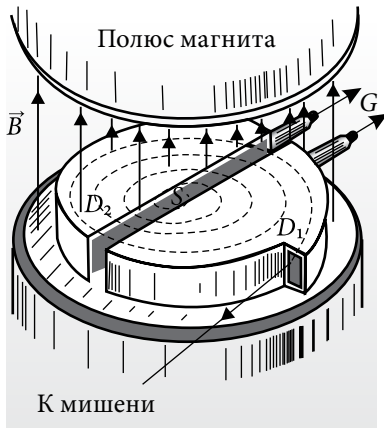


Рис. 1.10

Движение заряженных частиц в магнитном поле по круговым траекториям находит различное применение на практике. Проанализируем самые важные из них.

1. **Циклотрон** – это циклический ускоритель, используемый в исследованиях в области ядерной физики для разгона до высоких скоростей тяжелых заряженных частиц (протонов, ядер атомов гелия и др.) с целью изучения их взаимодействия с веществом. Был изобретен в 1930 году американским ученым Эрнестом Орландо Лоуренсом (1901–1958).

Принципиальная схема циклотрона представлена на рисунке 1.10. Через  $D_1$  и  $D_2$  обозначены дуанты – две полуцилиндрические полости в форме буквы  $D$ , откуда и произошло их название. Дуанты соединены с генератором  $G$  переменного электрического тока высокой частоты. Таким образом, в пространстве между дуантами на заряженные частицы действует электрическое поле (внутри дуанта это поле отсутствует). Между дуантами, вблизи центра, находится источник заряженных частиц  $S$ . Эта часть установки находится в откачанной коробке (на рисунке не показана), чтобы избежать столкновения заряженных частиц и молекул воздуха. Коробка помещена между полюсами мощного электромагнита.

Рассмотрим заряженную частицу, испущенную источником, которая под действием электрического поля в зазоре между дуантами попадает в дуант  $D_1$ . На заряженную частицу действует только магнитное поле, заставляющее ее двигаться по дуге окружности. К моменту ее выхода из дуанта  $D_1$  направление электрического поля изменяется на противоположное так, что частица ускоряется и входит в дуант  $D_2$  с большей скоростью. Радиус полуокружности, описываемой ею в этом дуанте больше, чем в предыдущем. К моменту выхода из дуанта  $D_2$  направление электрического поля между дуантами опять меняется на противоположное, частица продолжает ускоряться и в дуант  $D_1$  попадает с еще большими величинами скорости и радиуса полуокружности, описываемой ею под действием магнитного поля и т.д. В результате заряженная частица движется по «спирали» со все возрастающей скоростью при переходе из одного дуанта в другой. Очевидно, что процесс непрерывного ускорения будет происходить только в том случае, если выходящая из дуанта заряженная частица каждый раз будет попадать в электрическое поле, ускоряющее ее движение к другому дуанту. Для этого необходимо, чтобы период обращения заряженной частицы в магнитном поле был равен периоду колебаний переменного электрического тока, питающего дуанты. Пучок ускоренных частиц выводится из циклотрона и направляется к нужной цели, взаимодействие с которой исследуется учеными.

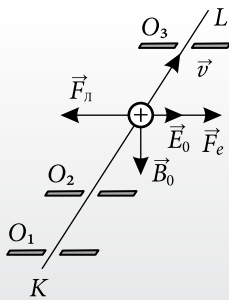


Рис. 1.11

2. **Масс-спектрограф** – это прибор для определения масс заряженных частиц, если известен радиус дуги, описываемой ими при движении в магнитном поле. Из формулы (1.7) находим выражение для массы

$$m = \frac{qBr}{v}. \quad (1.9)$$

Для определения скорости заряженных частиц они пропускаются через специальный фильтр скоростей, в котором движутся через взаимно перпендикулярные электрические и магнитные поля (рис. 1.11).

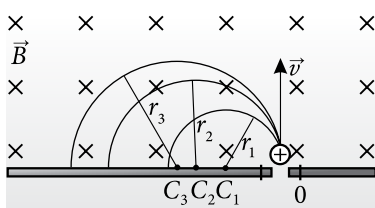


Рис. 1.12

Отверстия  $O_1$  и  $O_2$  выделяют пучок заряженных частиц, которые движутся с разными скоростями в направлении  $KL$ . В пространстве между отверстиями  $O_2$  и  $O_3$  на них действуют: электрическое поле напряженностью  $\vec{E}_0$  с силой  $\vec{F}_e = q\vec{E}_0$  и магнитное индукцией  $\vec{B}_0$  с силой Лоренца, равной  $F_L = qvB_0$ .

Как видно из рисунка, векторы  $\vec{v}$ ,  $\vec{E}_0$  и  $\vec{B}_0$  направлены таким образом, что силы  $\vec{F}_e$  и  $\vec{F}_L$  направлены вдоль одной прямой, но в противоположные стороны. Через отверстие  $O_3$  проходят частицы, движущиеся прямолинейно и равномерно, а именно те, скорость которых  $v$  соответствует равенству модулей сил, то есть  $F_L = F_e$ ,

следовательно  $qvB_0 = qE_0$ . Таким образом, через отверстие  $O_3$  проходят частицы с определенной скоростью

$$v = \frac{E_0}{B_0}. \quad (1.10)$$

Заряженные частицы с такими скоростями попадают в магнитное поле перпендикулярно вектору индукции  $\vec{B}$  и движутся по полуокружностям радиусов  $r$  (рис. 1.12). Их значения зависят от масс частиц: чем масса больше, тем больше радиус полуокружности. Попадая на фотопленку, они оставляют соответствующие следы.

Зная индукцию  $\vec{B}_0$  и заряд частицы  $q$ , измеряя радиус  $r$ , из формул (1.9) и (1.10) определяем ее массу.

### ➔ Проверьте свои знания

1. Может ли заряженная частица двигаться равномерно и прямолинейно в однородном магнитном поле? При каких условиях?
2. Какие параметры определяют величину радиуса окружности, описываемой заряженной частицей в однородном магнитном поле? А период обращения?
3. Какое условие нужно выполнить, чтобы обеспечить непрерывное ускорение заряженных частиц в циклотроне?
4. Электрон влетел в однородное магнитное поле со скоростью  $2 \cdot 10^6$  м/с, перпендикулярной линиям магнитной индукции, и движется по окружности радиуса 4,55 мм. Определите индукцию магнитного поля. Известны:  $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31}$  кг,  $|q_e| = 1,60 \cdot 10^{-19}$  Кл.
5. Чему должен быть равен минимальный радиус дуантав циклотрона, позволяющего ускорять протоны до кинетической энергии  $8 \cdot 10^{-13}$  Дж? Индукция магнитного поля равна 0,26 Тл. Массу протона считать неизменной в процессе ускорения и равной  $1,67 \cdot 10^{-27}$  кг.

## 1.5.\* МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА ВЕЩЕСТВА. ОТНОСИТЕЛЬНАЯ МАГНИТНАЯ ПРОНИЦАЕМОСТЬ

### Вспоминаем

До изучения поведения вещества в магнитном поле вспомним, что происходит при внесении диэлектриков в электрическое поле. Пусть в вакууме (воздухе) находится плоский конденсатор с зарядом  $q_0$ . Обозначим через  $\vec{E}_0$  напряженность электрического поля между его пластинами. Введем в конденсатор диэлектрик, заполняющий все пространство между пластинами. В диэлектрике есть только **связанные заряды**, которые могут перемещаться лишь в пределах молекул (атомов). Под действием внешнего электрического поля происходит перераспределение связанных электрических зарядов и они смещаются к противоположно заряженным пластинам конденсатора. Это явление называют **поляризацией диэлектрика**. На поверхности диэлектрика появляются связанные электрические заряды со знаком, противоположным зарядам на соседних пластинах, что уменьшает напряженность электрического поля в конденсаторе. Напряженность электрического поля в диэлектрике  $E$  становится меньше, чем в вакууме ( $E_0$ ).

Физическая величина  $\epsilon_r$ , показывающая, во сколько раз напряженность электрического поля в вакууме больше, чем в том же месте после внесения диэлектрика, называется **относительной диэлектрической проницаемостью вещества**  $\epsilon_r = \frac{E_0}{E}$  или  $E = \frac{E_0}{\epsilon_r}$ . В векторной форме

$$\vec{E} = \frac{\vec{E}_0}{\epsilon_r}. \quad (1.11)$$

Ясно, что безразмерная величина  $\epsilon_r > 1$ .

Теперь рассмотрим влияние вещества на магнитное поле, в которое оно внесено. Первым его стал изучать Ампер. Он исходил из того, что вещество состоит из молекул (атомов) и предположил, что в них существуют круговые электрические токи – **молекулярные токи**, магнитные поля которых похожи на поля маленьких магнитов (см. рис. 1.3).

Гипотеза Ампера была очень смелой для своего времени, опередив примерно на 90 лет создание планетарной модели атома. Согласно этой модели в центре атома находится положительно заряженное ядро, в котором сосредоточена практически вся масса атома, а вокруг него обращаются электроны. Круговое движение электронов вокруг ядра аналогично существованию круговых токов.

Для простоты предположим существование в молекуле (атоме) только одного кругового тока, магнитное поле которого эквивалентно полю, созданному всеми движущимися в молекуле электронами. Величину этого молекулярного тока обозначим через  $I_{\text{мол}}$ . Так как вокруг ядра движется несколько электронов, то возможны случаи, когда сила молекулярного тока равна нулю:  $I_{\text{мол}} = 0$ .

Вещества, состоящие из молекул (атомов), в которых есть молекулярные токи ( $I_{\text{мол}} \neq 0$ ), назвали **парамагнетиками**, а вещества, в которых  $I_{\text{мол}} = 0$ , назвали **диамагнетиками**.

Рассмотрим влияние этих веществ на магнитные поля, в которые они внесены. Пусть по виткам соленоида протекает ток  $I_0$ . Индукцию магнитного поля внутри соленоида обозначим через  $\vec{B}_0$ , ее направление определим с помощью правила буравчика (см. рис. 1.4). В центральной части соленоида магнитное поле практически однородно (рис. 1.13). Введем внутрь соленоида параллельно его оси цилиндр из парамагнитного вещества. Магнитное поле соленоида повернет первоначально беспорядочно ориентированные магнетики–молекулы вещества в направлении магнитной индукции  $\vec{B}_0$ , направления молекулярных токов  $I_{\text{мол}}$  совпадут с направлением тока  $I_0$  в соленоиде (рис. 1.14). Распределение токов в поперечном сечении соленоида и цилиндра из парамагнетика показано на рисунке 1.15.

Видно, что внутри цилиндра молекулярные токи текут навстречу друг другу, а по его поверхности – в направлении, совпадающем с направлением тока в соленоиде. Поэтому направления магнитных полей соленоида и цилиндра совпадают, и в итоге магнитная индукция  $\vec{B}$  в парамагнетике по модулю больше, чем магнитная индукция в вакууме  $\vec{B}_0$ , то есть.

$$\vec{B} = \mu_r \vec{B}_0, \quad (1.12)$$

где  $\mu_r \equiv \mu_r^{\text{пара}} > 1$ .

Безразмерная величина  $\mu_r$ , показывающая, во сколько раз магнитная индукция в веществе больше по модулю, чем магнитная индукция в вакууме до введения в него вещества, называется **относительной магнитной проницаемостью вещества**. Парамагнетики усиливают первоначальное магнитное поле.

Иначе ведут себя диамагнетики. В отсутствие внешнего магнитного поля молекулярные токи в них равны нулю:  $I_{\text{мол}} = 0$ . При внесении диамагнетика в катушку с током движение электронов в его молекулах изменяется так, что появляются молекулярные токи, циркулирующие в направлении, противоположном току в витках катушки.

Магнитная индукция в диэлектрике становится меньше, чем она была в этом месте до его внесения. Итак, для диамагнетиков относительная магнитная проницаемость  $\mu_r \equiv \mu_r^{\text{диа}} < 1$ .

Ниже приведены примеры относительной магнитной проницаемости некоторых веществ.

#### Относительная магнитная проницаемость

Парамагнетик	$\mu_r$	Диамагнетик	$\mu_r$
Алюминий	1,000023	Висмут	0,999824
Воздух	1,00000038	Вода	0,999991
Кислород	1,0000019	Медь	0,999990
Вольфрам	1,000176	Стекло	0,999987

Видно, что относительная магнитная проницаемость этих веществ очень мало отличается от 1, их магнитные свойства слабо выражены.

Существует несколько металлов, например, железо (Fe), кобальт (Co), никель (Ni), гадолиний (Gd) и их сплавов с сильно выраженными магнитными свойствами. Они получили название **ферромагнетики**, так как у самого распространенного из них – железа – эти свойства выражены сильнее всего. Относительная магнитная проницаемость ферромагнетиков достигает  $\mu_r = 8\ 000$ , во столько раз они усиливают магнитное поле.

Ферромагнетики применяют в **электромагнитах** – катушках из изолированной проволоки, надетых на ферромагнитные сердечники. Сплавы для сердечников выбирают такие, чтобы после отключения тока они теряли способность магнитного притяжения.

Электромагниты широко применяются в технике, в частности, в **электромагнитных реле**. (Некоторые из применений электромагнитов вам знакомы из курса физики VIII класса.)

Часть ферромагнитных сплавов остается намагниченной и при отсутствии внешнего магнитного поля. В таком случае говорят, что они обладают **остаточным магнетизмом**. Таким свойством

обладают все постоянные магниты. Вам хорошо известны полосовые, подковообразные магниты, магнитные стрелки в компасах.

Постоянные магниты являются важной деталью в **магнитоэлектрических электроизмерительных приборах**. На *рисунке 1.16* показана схема такого прибора с подковообразным магнитом. В узких зазорах между полюсными наконечниками (1) и железным цилиндром (2) вращается легкая рамка (катушка) (3) с измеряемым током. Катушка и стрелка прибора (4) жестко связаны одной осью. К катушке подводится ток по спиральным пружинам (5), создающим момент сил упругости. Он уравнивает момент пары сил электромагнитной природы, действующих на проводник в противоположных направлениях в зазорах. При возрастании силы тока в катушке прибора, силы, а значит и угол поворота катушки со стрелкой, возрастут. Приборы такого типа используют только для измерений в цепях постоянного тока.

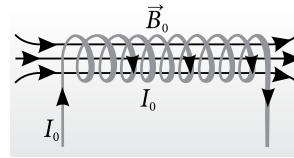


Рис. 1.13

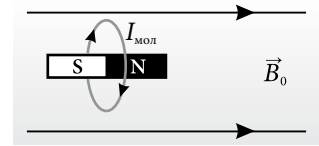


Рис. 1.14

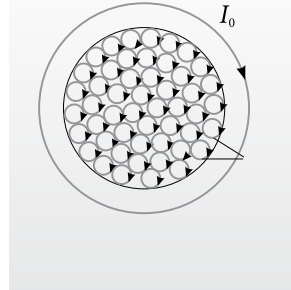


Рис. 1.15

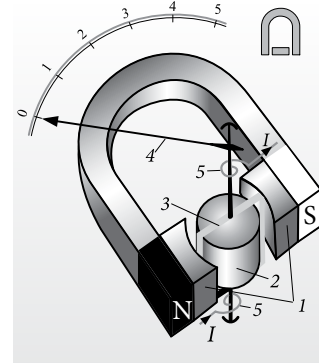


Рис. 1.16

## ➔ Проверьте свои знания

1. Каков физический смысл относительной магнитной проницаемости вещества? Какие значения она принимает у парамагнетиков? Диамагнетиков? Ферромагнетиков?
2. Что такое остаточный магнетизм?
3. Какими свойствами должен обладать сердечник электромагнита?
4. Придумайте электромагнитный прибор, в котором бы использовалось притяжение ферромагнетика к катушке с током.
5. Напишите реферат на тему: «Применение электромагнитов».

## 1.6. ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ИНДУКЦИЯ

Открытие Эрстедом в 1820 году существования магнитного поля вокруг проводников с током сделало очевидной связь между электрическими и магнитными явлениями. Если проводник с током создает вокруг себя магнитное поле, то нельзя ли получить электричество с помощью магнитного поля? Эта проблема впервые была сформулирована Майклом Фарадеем в 1821 году. После проведения многочисленных опытов с магнитами и катушками (в течение десяти лет!) его исследования увенчались успехом. В 1831 году Фарадей открыл явление **электромагнитной индукции**.

### а. Явление электромагнитной индукции. Практические применения

На *рисунке 1.17* показана схема опыта, в котором Фарадей получил электрический ток с помощью

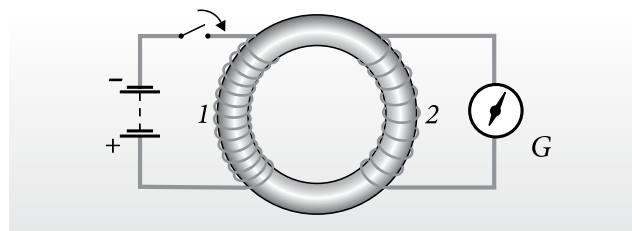


Рис. 1.17

магнитного поля. Он изготовил железное кольцо толщиной примерно 2 см и диаметром 15 см и намотал на него две катушки из медного провода. Подсоединил катушку (1) к источнику постоянного тока, создающего в ней магнитное поле, которое усиливалось благодаря железному сердечнику, а цепь катушки (2) замкнул на чувствительный гальванометр G, способный регистрировать слабые токи. В результате этого опыта Фарадей заметил, что при замыкании цепи катушки (1) стрелка гальванометра в цепи катушки (2) резко отклонялась,



МАЙКЛ ФАРАДЕЙ  
(1791–1867)  
английский физик  
и химик

Первые его научные исследования выполнены в области химии, среди которых самыми важными являются опыты по сжижению газов. В 1821 году он сделал свое первое открытие в области электромагнетизма, создав модель первого электродвигателя. В 1831 году Фарадей открыл явление электромагнитной индукции, а в 1833 году – законы электролиза, имеющие не только важное практическое значение, но и подтвердившие концепцию дискретного характера количества электричества. Ввел в физику ряд новых понятий: подвижность носителей заряда (1827), катод, анод, ионы, электролиз, электролиты, электроды (1834). Открыл поляризацию диэлектриков и ввел понятие диэлектрической проницаемости (1837). В 1843 году экспериментально доказал закон сохранения электрического заряда. Заложил основы теории диамагнетизма (1845) и парамагнетизма (1847). В честь Фарадея названа единица емкости в СИ – *фарад*.

а затем быстро возвращалась в первоначальное положение. Такое же поведение стрелки обнаружилось и при размыкании цепи катушки (1), однако скачок стрелки происходил в направлении, противоположном предыдущему. Так как при замыкании (размыкании) цепи катушки (1) сила тока увеличивается (уменьшается) до установления максимального (нулевого) значения, то и индукция магнитного поля в катушке (2) изменяется также, то есть увеличивается до максимального значения или уменьшается до нуля. Таким образом, Фарадей пришел к выводу, что для наличия тока в цепи катушки (2) необходимо изменяющееся магнитное поле. Этот ток был назван **индукционным** или **индуцированным**, а явление генерирования электрического тока с помощью магнитного поля – **электромагнитной индукцией**.

Чтобы определить условия появления индукционного тока, Фарадей выполнил ряд других опытов, которые мы проанализируем ниже.

К катушке с большим количеством витков, подсоединенной к гальванометру  $G$ , приближается или удаляется от нее различными способами полюсовой магнит (рис. 1.18 а, б). Обнаруживается, что стрелка гальванометра отклоняется только во время движения магнита вдоль оси катушки и возвращается к нулю, если он останавливается. Чем больше скорость движения магнита, тем больше отклонение стрелки гальванометра, то есть сила индукционного тока больше. Однако при движении магнита в плоскости, перпендикулярной оси катушки, гальванометр не регистрирует наличие индукционного тока (рис. 1.18 в). Такие же результаты получаются, если в опытах, схематически показанных на рисунке 1.18, магнит неподвижен, а двигается только катушка. Приходим к выводу, что **индукционный ток возникает только при относительном движении магнита и катушки**.

Постоянный магнит во всех предыдущих опытах можно заменить катушкой с постоянным током  $I$ .

Кроме чисто научного, явление электромагнитной индукции имеет и большое практическое значение. Это явление лежит в основе работы генераторов переменного и постоянного токов, электродвигателей, трансформаторов, различных электротехнических и радиотехнических устройств. Их можно встретить везде, начиная от бытовых приборов и кончая самыми совершенными промышленными установками. Рассмотрим устройство и принцип действия некоторых из них.

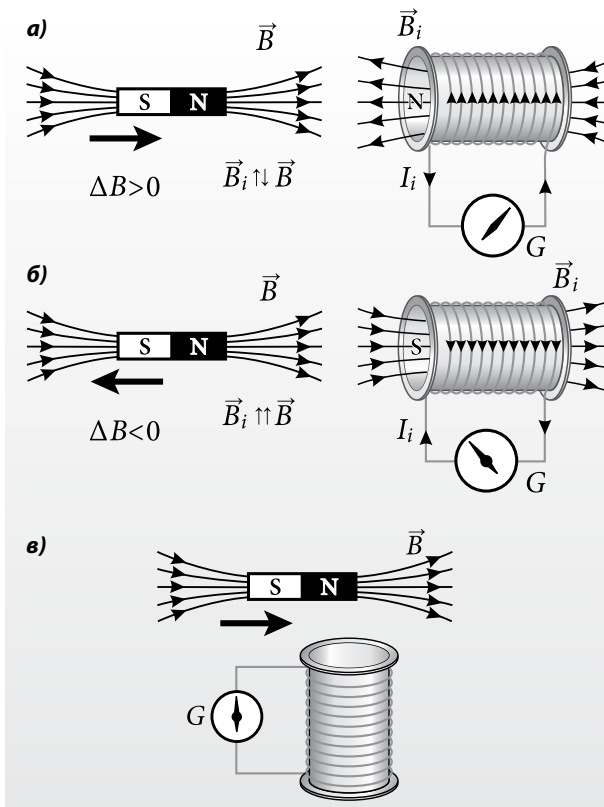


Рис. 1.18



**Электродинамический (катушечный) микрофон** (рис. 1.19) преобразует звуковые колебания в электрические. Он состоит из постоянного магнита (1) цилиндрической формы с сердечником в середине. В узком кольцевом зазоре (2) между ними в сильном магнитном поле может свободно двигаться катушка (3), приклеенная к гофрированной по краям, для большей подвижности, диафрагме (4). Когда вызванные звуковыми колебаниями изменения давления в воздухе достигают диафрагмы, то вместе с ней начинает колебаться катушка. Чем больше амплитуда звуковых колебаний, тем больше и амплитуда колебаний ЭДС индукции.

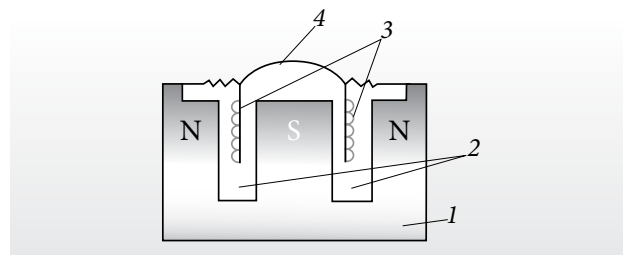


Рис. 1.19

Токи, возникающие в массивных металлических деталях, находящихся в переменном магнитном поле, называются **вихревыми** или **токами Фуко** (в честь обнаружившего их французского физика Ж.Б.Л. Фуко (1819–1868)). Так как электрическое сопротивление деталей мало, то вихревые токи могут достигать очень больших значений и сильно их нагревать. Это явление используют в **индукционных печах**. Нагревательным элементом в такой печи служит катушка с переменным током, называемая **индуктором**. Для термической обработки в переменное магнитное поле индуктора помещают металлическую деталь. В ней возникают вихревые токи, деталь нагревается до очень высокой температуры. Изменяя частоту магнитного поля, можно регулировать глубину проникновения в деталь вихревых токов.

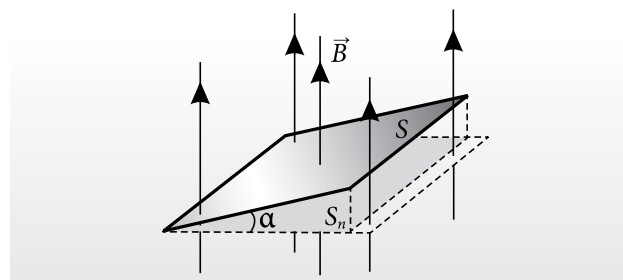


Рис. 1.20

## 6. Магнитный поток. Правило Ленца

Для количественного описания явления электромагнитной индукции обратим внимание на одну общую деталь во всех опытах, приведенных в п. 1.6 а – число линий индукции магнитного поля, пересекающих поверхность, ограниченную витками катушки, менялось. И если густота линий индукции магнитного поля пропорциональна магнитной индукции  $\vec{B}$ , то числом линий магнитного поля, охваченных каким-либо контуром, можно характеризовать новую физическую величину – **магнитный поток**.

Пусть плоская поверхность площадью  $S$  находится в однородном магнитном поле с индукцией  $\vec{B}$ . Очевидно, что число линий магнитной индукции, проходящих через поверхность  $S$ , зависит от ее положения. Это число будет наибольшим, если линии поля перпендикулярны поверхности, и становится равным нулю, если линии поля парал-

лельны плоскости поверхности  $S$ . В произвольном положении поверхности  $S$  число пересекающих ее линий равно числу линий, пересекающих ее проекцию  $S_n$  на плоскость, перпендикулярную этим линиям (рис. 1.20). Тогда для угла  $\alpha$  между поверхностями  $S$  и  $S_n$  верно равенство:

$$S_n = S \cos \alpha.$$

**Магнитным потоком** ( $\Phi$ ) называется физическая величина, равная произведению модуля вектора магнитной индукции  $B$  на площадь проекции  $S_n$  исследуемой поверхности:

$$\Phi = BS_n \quad (1.13)$$

или

$$\Phi = BS \cos \alpha. \quad (1.14)$$

Единица магнитного потока в СИ была названа **вебер** (**Вб**) в честь немецкого физика Вильгельма Вебера (1804–1891). Один вебер – это магнитный поток однородного магнитного поля с индукцией 1 Тл через поверхность площадью 1 м<sup>2</sup>, расположенную перпендикулярно линиям магнитного поля:

$$1 \text{ Вб} = 1 \text{ Тл} \cdot \text{м}^2.$$

Если в однородном магнитном поле находится катушка, состоящая из  $N$  одинаковых витков с поперечным сечением  $S$ , то магнитный поток через нее будет в  $N$  раз больше, чем через один виток, то есть

$$\Phi = NBS \cos \alpha. \quad (1.15)$$

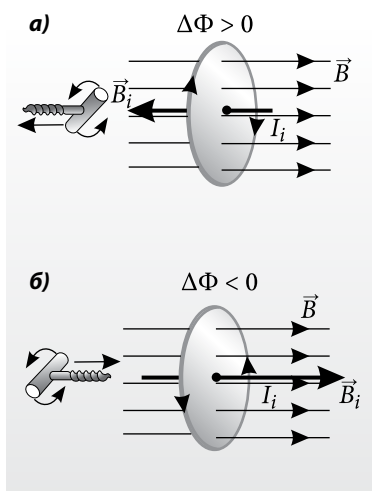


Рис. 1.21

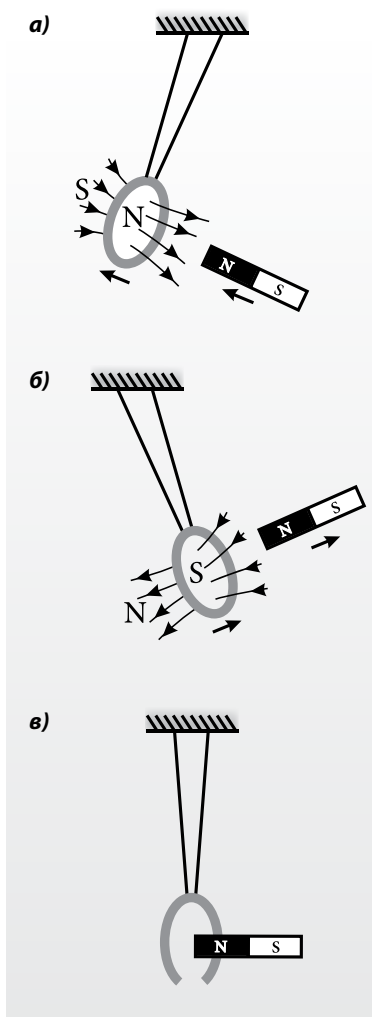


Рис. 1.22

В 1833 году, анализируя эксперименты по изучению электромагнитной индукции, выполненные Фарадеем, Ленц заметил, что изменения магнитного потока  $\Delta\Phi$  поля, вызывающего появление индукционного тока, и потока поля этого тока  $\Delta\Phi$ , всегда имеют противоположные знаки. Например, при приближении магнита к катушке (рис. 1.18) увеличение индукции  $\vec{B}$  магнитного поля магнита определяет возрастание  $\Delta\Phi > 0$  его магнитного потока.

Одновременно индукционный ток, появившийся в катушке, создает свое магнитное поле индукцией  $\vec{B}_i$ , направленное таким образом, что его магнитный поток противодействует изменению магнитного потока поля магнита.

Если магнит приближают и  $\Delta\Phi > 0$ , то  $\vec{B}_i \uparrow \vec{B}$ , а если его удаляют, и  $\Delta\Phi < 0$ , то  $\vec{B}_i \uparrow \vec{B}$ . Зная направление вектора  $\vec{B}_i$  и применив правило буравчика, легко найти направление индукционного тока.

Обобщая свои наблюдения, Ленц сформулировал правило для определения направления индукционного тока, названное его именем:

Индукционный ток всегда имеет такое направление, что индуцированный магнитный поток препятствует любым изменениям магнитного потока, вызвавшего его появление.

На рисунке 1.21 а, б показано, как применяется правило Ленца. Для этого:

- устанавливается причина появления индукционного тока и знак изменения вызвавшего его магнитного потока  $\Delta\Phi$ ;
- определяется направление вектора  $\vec{B}_i$ : если  $\Delta\Phi > 0$ , то  $\vec{B}_i \uparrow \vec{B}$ , а если  $\Delta\Phi < 0$ , тогда  $\vec{B}_i \uparrow \vec{B}$ ;
- с помощью правила буравчика с правой резьбой устанавливается направление индукционного тока.

Правило Ленца отражает фундаментальное свойство любой физической системы:

**При внешнем действии на любую систему в ней возникают процессы, стремящиеся ослабить результаты этого действия.**

В самом деле, в опытах, показанных на рисунке 1.18, внешнее действие на систему (катушку) – изменение магнитного потока путем совершения работы по перемещению магнита – вызывает появление индукционного тока и обусловленного им индуцированного магнитного поля. Взаимодействие полюсов этого поля с полюсами магнита всегда препятствует его движению. При приближении магнита взаимодействуют N–N полюсы и появляется сила отталкивания (см. рис. 1.18 а), а при его удалении сила взаимодействия N–S полюсов является силой притяжения (см. рис. 1.18 б).

Именно существованием этих сил объясняется следующий опыт, подтверждающий правило Ленца. Легкое медное или алюминиевое кольцо подвешено на двух тонких нитях. Если мы пытаемся ввести магнит внутрь сплошного кольца, то оно начинает двигаться в том же направлении, что и магнит (рис. 1.22 а), а при выдвигании магнита кольцо следует за ним (рис. 1.22 б). Этот результат объясняется просто, принимая во внимание взаимодействие магнита с индукционным током, возникающим в кольце. Если кольцо имеет прорез (рис. 1.22 в), то индукционный ток не течет и кольцо не движется. При протекании через кольцо индукционного тока появляется индуцированное магнитное поле – кольцо как бы становится магнитом, взаимодействующим с движущимся магнитом.

## в. Закон электромагнитной индукции. Электродвижущая сила индукции

Существование индукционного тока в замкнутом контуре, как и любого электрического тока, означает, что в этом контуре действует **электродвижущая сила**.

Обобщая результаты опытов, подобных описанным в п. 1.6 а, Фарадей установил, что эта электродвижущая сила, сокращенно называемая *ЭДС индукции*, тем больше, чем быстрее изменяется магнитный поток через поверхность, ограниченную замкнутым контуром. Если за интервал времени  $\Delta t$  магнитный поток изменяется на  $\Delta\Phi$ , то ЭДС индукции

$$\mathcal{E}_i = - \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}. \quad (1.16)$$

Отношение  $\Delta\Phi/\Delta t$  в этом выражении показывает, как быстро изменяется магнитный поток, и называется **скоростью изменения магнитного потока**, а знак «-» соответствует правилу Ленца. Электродвижущая сила индукции порождает индукционный ток, магнитное поле которого препятствует изменению магнитного потока, его вызвавшего, то есть при  $\Delta\Phi/\Delta t > 0$  имеем  $\mathcal{E}_i < 0$  и наоборот.

Соотношение (1.16) представляет собой универсальный закон, называемый **законом электромагнитной индукции (законом Фарадея)**. Он выполняется всегда, независимо от формы контура, пронизываемого магнитным потоком, и от способа изменения этого потока.

**Электродвижущая сила индукции ( $\mathcal{E}_i$ ) в замкнутом контуре равна по величине и противоположна по знаку скорости изменения магнитного потока через поверхность, ограниченную этим контуром.**

Появление ЭДС индукции и индукционного тока означает наличие электрического поля, приводящего носители заряда в упорядоченное движение.

ЭДС индукции не локализована, то есть не сконцентрирована в определенном месте контура. Она может быть обнаружена между любыми двумя точками, ограничивающими участок проводника в контуре, который пронизывается переменным магнитным потоком. Итак,

**изменение магнитного потока, пронизывающего замкнутый контур, приводит к появлению электрического поля с замкнутыми линиями – вихревого поля.**

Из закона Фарадея запишем:

$$\Delta\Phi = - \mathcal{E}_i \Delta t.$$

Эта формула позволяет дать еще одно определение единицы магнитного потока в СИ:

**Один вебер (Вб) – это магнитный поток, пронизывающий замкнутый контур, в котором при его уменьшении до нуля за 1 с возникает ЭДС индукции, равная 1 В:**

$$1 \text{ Вб} = 1 \text{ В} \cdot \text{с}.$$

Рассмотрим движение прямолинейного проводника длиной  $l$  в плоскости, перпендикулярной линиям однородного магнитного поля с индукцией  $\vec{B}$ . Скорость  $\vec{v}$  постоянна и перпендикулярна проводнику (рис. 1.23). Вместе с проводником со скоростью  $\vec{v}$  движутся находящиеся в нем свободные электроны и положительные ионы. На каждый носитель электрического заряда действует сила Лоренца  $F_L = qvB \sin 90^\circ = qvB$ , направленная так, как показано на рисунке 1.23. В проводнике происходит разделение зарядов и возникает электрическое поле напряженностью  $\vec{E}$ . Движение носителей заряда к концам проводника продолжается до тех пор, пока сила, действующая на них со стороны электрического поля  $F_e = qE$ , не станет равной по модулю силе Лоренца (рис. 1.23), т.е.  $F_e = F_L$  или  $qE = qvB$ , откуда получим:

$$E = vB. \quad (1.17)$$

Разность потенциалов на концах проводника, равная ЭДС индукции, находится из соотношения  $U = \mathcal{E}_i = E \cdot l$ . Используя выражение (1.17), получим

$$\mathcal{E}_i = vBl. \quad (1.18)$$

Если же проводник, перпендикулярный линиям магнитного поля, движется со скоростью  $\vec{v}$  относительно индукции магнитного поля  $\vec{B}$  под некоторым углом  $\alpha$ , то ЭДС индукции вычисляются по формуле

$$\mathcal{E}_i = Blv \sin \alpha. \quad (1.19)$$

Направление индукционного тока и ЭДС индукции находится с помощью правила Ленца. В случае прямолинейного проводника связь

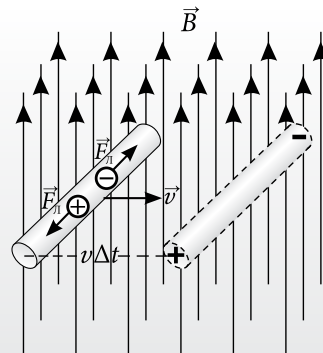


Рис. 1.23

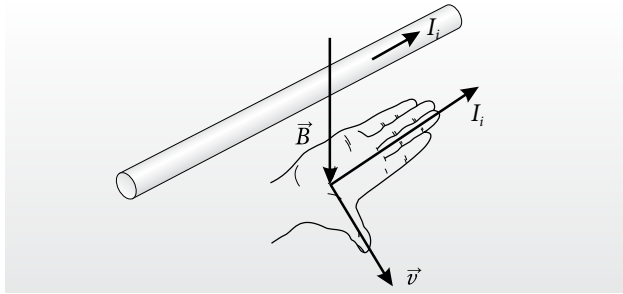


Рис. 1.24

между направлениями индукции магнитного поля, скоростью проводника и направлением индукционного тока легко запомнить с помощью правила правой руки (рис. 1.24):

Если правую руку расположить так, чтобы вектор магнитной индукции  $\vec{B}$  входил в ладонь, отставленный большой палец показывал направление скорости проводника  $\vec{v}$ , то четыре вытянутых пальца укажут направление индукционного тока  $I_i$  в проводнике.

### Пример решения задачи

Катушка, имеющая форму квадрата со стороной 10 см, изготовлена из провода длиной 100 м и сопротивлением  $R = 10$  Ом, ее концы соединены между собой. Катушка расположена на столе таким образом, что вертикальная составляющая магнитного поля Земли с индукцией  $B_{\perp} = 50$  мкТл перпендикулярна ее плоскости. Какой заряд пройдет через катушку при повороте ее до положения, при котором линии поля параллельны плоскости катушки?

#### Дано:

$a = 0,1$  м,  
 $l = 100$  м,  
 $R = 10$  Ом,  
 $B_{\perp} = 5 \cdot 10^{-5}$  Тл

$\Delta q - ?$

#### Решение

Из закона Ома и (1.16) получим:

$$I_i = \frac{|\mathcal{E}_i|}{R} = \frac{1}{R} \cdot \frac{|\Delta\Phi|}{\Delta t}.$$

За интервал времени  $\Delta t$  через цепь катушки пройдет заряд  $\Delta q = I_i \Delta t$ , следовательно

$$\Delta q = \frac{|\Delta\Phi|}{R}. \quad (1.20)$$

Отметим, что величина заряда  $\Delta q$  зависит только

от изменения магнитного потока независимо от скорости этого процесса.

Магнитный поток через каждый виток катушки один и тот же, он определяется по формуле (1.14), полный поток через катушку имеет значение  $\Phi_{\text{полн}} = NB_{\perp}S \cos \alpha$ , где  $N = l/(4a)$  – это число витков, а  $S = a^2$  – площадь поперечного сечения катушки. В первоначальном положении угол между нормалью к поверхности  $S$  и направлением линий индукции равен нулю, а магнитный поток

$$\Phi_{\text{полн.1}} = NB_{\perp}S \cos 0^\circ = \frac{l}{4a} B_{\perp} a^2 = \frac{1}{4} B_{\perp} la.$$

После поворота соответствующий угол становится равным  $90^\circ$ , а магнитный поток

$$\Phi_{\text{полн.2}} = NB_{\perp}S \cos 90^\circ = 0.$$

Подставляя эти значения в (1.20), получим:

$$\begin{aligned} \Delta q &= \frac{|\Phi_{\text{полн.2}} - \Phi_{\text{полн.1}}|}{R} = \frac{\Phi_{\text{полн.1}}}{R} = \frac{B_{\perp} la}{4R} = \\ &= 1,25 \cdot 10^{-5} \text{ Кл} = 12,5 \text{ мкКл}. \end{aligned}$$

### ⇒ Проверьте свои знания

- В чем состоит явление электромагнитной индукции?
- Как устроен электродинамический микрофон? Объясните принцип его работы.
- Что вы знаете о назначении, устройстве и работе индукционной печи?
- Что называется магнитным потоком и что является его единицей в СИ?
- Сформулируйте правило Ленца. Как оно применяется?
- Сформулируйте закон электромагнитной индукции. Напишите его математическое выражение.
- Определите магнитный поток через плоскую поверхность площадью  $S = 100$  см<sup>2</sup>, помещенную в магнитное поле с индукцией  $B = 0,6$  Тл, образующей угол  $30^\circ$  с поверхностью.
- \*. Проводящий виток площадью  $S = 50$  см<sup>2</sup>, замкнутый на конденсатор емкостью  $C = 200$  мкФ, находится в однородном магнитном поле, перпендикулярном плоскости витка. Определите заряд на обкладках конденсатора, если скорость изменения магнитной индукции равна 1 000 Тл/с.
- \*. Проводник в форме равностороннего треугольника со стороной 4 см и сопротивлением  $R = 0,5$  Ом находится в однородном магнитном поле с индукцией  $B = 0,05$  Тл. Линии индукции поля перпендикулярны плоскости проводника. Какой заряд пройдет через проводник, если его в той же плоскости трансформировать в окружность?

## 1.7. САМОИНДУКЦИЯ. ИНДУКТИВНОСТЬ КОНТУРА

### а. Явление самоиндукции

Важный частный случай явления электромагнитной индукции наблюдается при изменении магнитного потока, происходящего при протекании по контуру изменяющегося электрического тока. В самом деле, если через витки катушки протекает изменяющийся ток, то он возбуждает внутри нее магнитное поле, поток которого также изменяется. Таким образом, в соответствии с законом Фарадея (1.16), в витках катушки появляется собственная ЭДС индукции, обусловленная изменением тока, текущего по ней. Это явление было открыто американским физиком Джозефом Генри, оно называется **самоиндукцией**.

**Самоиндукция** – это явление возникновения ЭДС индукции в контуре при изменении в нем силы тока.

На рисунке 1.25 показано условное обозначение катушек, используемых в электрических цепях: а) без сердечника, б) с железным сердечником.

Явление самоиндукции экспериментально можно наблюдать с помощью цепи, представленной на рисунке 1.26. Она состоит из источника постоянного тока, к которому параллельно подключены две ветви, одна из которых содержит катушку  $L$  и лампочку  $L_1$ , соединенные последовательно, а другая – реостат  $R$  и лампочку  $L_2$ , идентичную первой. С помощью реостата регулируется сопротивление ветви, пока оно не станет равным сопротивлению ветви  $LL_1$ . Таким образом, обе лампочки будут одинаково питаться от источника: по ним будет течь один и тот же ток, яркость свечения будет одинаковой.

При замыкании ключа  $Kл$  наблюдается, что свечение лампочки  $L_1$  становится нормальным с некоторым запозданием по сравнению с лампочкой  $L_2$ . Причина этого запаздывания – явление самоиндукции. При замыкании ключа сила тока в цепи быстро возрастает от нуля до постоянного значения  $I$ . В то же самое время увеличивается и индукция магнитного поля, создаваемого этим током. Следовательно, катушку пронизывает **возрастающий магнитный поток** и, согласно закону электромагнитной индукции, в ее ветвях возбуждается электродвижущая сила, в данном случае **ЭДС самоиндукции**.

В соответствии с правилом Ленца полярность ЭДС самоиндукции на зажимах катушки противоположна ЭДС источника питания (рис. 1.26). ЭДС самоиндукции тормозит упорядоченное движение электронов через проводник, из которого изготовлена катушка, сила тока уменьшается. Таким образом, ток в ветви  $LL_1$  меньше, чем в ветви  $RL_2$ . Поэтому накал лампочки  $L_1$  увеличивается медленнее, чем лампочки  $L_2$ . Однако, как только ток в цепи достигает своего постоянного значения  $I$ , ток самоиндукции исчезает и лампочки, находясь в равных условиях, светятся одинаково.

Очевидно, явление самоиндукции происходит и при размыкании цепи, когда сила тока питания быстро уменьшается от постоянного значения до нуля. В этом случае катушку пронизывает **убывающий магнитный поток**. На ее зажимах возникает ЭДС самоиндукции той же полярности, что у ЭДС источника питания. В результате ток в цепи



Рис. 1.25

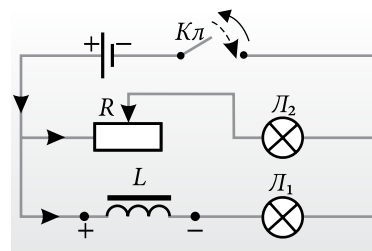


Рис. 1.26

убывает медленнее, при отключении источника гаснут обе лампочки, но с некоторым запаздыванием. Существование тока самоиндукции можно легко обнаружить с помощью цепи, изображенной на рисунке 1.27. При размыкании ключа Кл источник тока отключается от цепи, однако лампочка Л продолжает короткое время светиться достаточно ярко.

Явление самоиндукции в электрических цепях подобно инерции тел в механике. Точно так же, как скорость тела не может внезапно увеличиться до определенной величины, так и сила тока при замыкании цепи не может мгновенно стать максимальной, а возрастает постепенно. Движущееся тело не может мгновенно остановиться, то есть не может внезапно уменьшить свою скорость до нуля. Аналогично при размыкании цепи сила тока не уменьшается скачком до нуля, а убывает в течение некоторого времени.

Инерция тела зависит от его массы: чем больше масса, тем инерция тела сильнее выражена. Другими словами, масса является мерой инерции тела. Подобным образом, для электрических цепей должна существовать физическая величина, которая является их характеристикой и мерой самоиндукции. Эта величина называется **индуктивностью**.

## 6. Индуктивность. ЭДС самоиндукции

Явление самоиндукции, будучи частным случаем электромагнитной индукции, проявляется тем сильнее, чем больше скорость изменения собственного магнитного потока через исследуемый контур. Магнитный поток, пронизывающий кон-

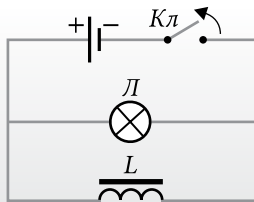


Рис. 1.27

тур, пропорционален индукции магнитного поля  $\Phi \sim B$ . При отсутствии тока в витках катушки ( $I = 0$ ) магнитного поля не существует ( $B = 0$ ). Следовательно, индукция  $B$  является функцией силы тока  $I$ . Установлено, что  $B \sim I$ . Тогда

$$\Phi = LI, \quad (1.21)$$

где  $L$  – коэффициент пропорциональности, характерный для каждой катушки. Он зависит как от формы и размеров катушки, так и от магнитных свойств ее сердечника.

**Физическая величина, равная отношению магнитного потока, пронизывающего контур, к силе тока в нем, называется индуктивностью этого контура.**

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

Единица индуктивности в СИ называется **генри (Гн)**. Индуктивность контура равна 1 Гн, если при силе тока в нем 1 А магнитный поток через поверхность, ограниченную контуром, равен 1 Вб:

$$1 \text{ Гн} = 1 \frac{\text{Вб}}{\text{А}}.$$

Если через катушку течет изменяющийся ток  $I$ , то и магнитный поток изменяется и согласно закону электромагнитной индукции получаем:

$$\mathcal{E}_a = - \frac{\Delta(LI)}{\Delta t} = - L \frac{\Delta I}{\Delta t}. \quad (1.22)$$

Электродвижущая сила (1.22) называется **ЭДС самоиндукции**, а отношение  $\Delta I/\Delta t$  – **скоростью изменения силы тока в цепи**. Таким образом:

**ЭДС самоиндукции в цепи прямо пропорциональна скорости изменения силы тока в ней; коэффициентом пропорциональности является индуктивность цепи.**

Из выражения (1.22) можно получить еще одну формулировку единицы индуктивности. Индуктивность цепи или какого-либо ее элемента равна 1 Гн, если при равномерном изменении силы тока со скоростью 1 А/с в этой цепи возбуждается ЭДС самоиндукции, равная 1 В, то есть  $1 \text{ Гн} = 1 \text{ В} \cdot \text{с}/\text{А}$ .

## ➔ Проверьте свои знания

1. Что представляет собой явление самоиндукции?
2. В каких опытах обнаруживается явление самоиндукции?
3. Что называется индуктивностью цепи и что является ее единицей в СИ?
4. Чему равно ЭДС самоиндукции и от чего она зависит?
5. Через катушку с индуктивностью 50 мГн течет постоянный ток 2 А. Какая ЭДС самоиндукции появится на зажимах катушки, если при размыкании ее цепи сила тока равномерно убывает до нуля за 1 мс?

## 1.8. ЭНЕРГИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Рассмотрим явление самоиндукции с точки зрения превращений энергии, к примеру, в цепи на рисунке 1.27. Нам уже известно, что при размыкании цепи лампочка  $L$  короткое время испускает достаточно яркий свет. Очевидно, что необходимая для этого энергия не была взята от источника тока, так как он был отключен от лампочки. Но лампочка осталась подключенной к зажимам катушки. Следовательно, катушка сыграла роль нового источника энергии. В самой катушке это могла быть только энергия магнитного поля. Действительно, при замыкании цепи часть энергии источника тока пошла на создание магнитного поля в катушке и осталась накопленной в ней в виде энергии магнитного поля. Вернуть эту энергию обратно в цепь можно только при исчезновении магнитного поля, то есть при размыкании цепи, когда сила тока в витках катушки уменьшится до нуля.

Вычислим энергию магнитного поля катушки индуктивностью  $L$ . После отключения источника тока механическая работа по перемещению электрического заряда  $q$  по замкнутой цепи, состоящей из лампочки  $L$  и катушки  $L$ , совершается за счет энергии магнитного поля, уменьшающейся до нуля. Так как работа тока в этом случае равна произведению ЭДС самоиндукции  $\mathcal{E}_a$  на переносимый заряд  $q$ , то энергия магнитного поля катушки

$$W_m = \mathcal{E}_a q. \quad (1.23)$$

Для упрощения вывода формулы будем считать, что сила тока убывает равномерно, то есть зависит линейно от времени. Тогда за интервал времени  $\Delta t$  сила тока уменьшится от начального значения  $I$  до конечного, равного нулю, и по цепи пройдет заряд

$$q = I_{\text{сред}} \Delta t = \frac{I+0}{2} \Delta t = \frac{1}{2} I \Delta t, \quad (1.24)$$

а ЭДС самоиндукции, как следует из (1.22), будет постоянной и равной

$$\mathcal{E}_a = -L \frac{0-I}{\Delta t} = \frac{LI}{\Delta t}. \quad (1.25)$$

Подставив (1.24) и (1.25) в (1.23), получим энергию магнитного поля катушки

$$W_m = \frac{LI^2}{2}. \quad (1.26)$$

Выражение (1.26) для энергии магнитного поля очень похоже на известную из механики формулу для кинетической энергии  $E_k = mv^2/2$ . Из сравнения формул видно, что индуктивность  $L$  катушки при изменении силы тока в цепи играет ту же роль, что и масса тела  $m$  при изменении его скорости, а сила тока  $I$ , характеризующая движение электрических зарядов, аналогична скорости  $v$  этого тела.

Учитывая (1.21), энергию магнитного поля катушки можно выразить и через магнитный поток в катушке:

$$W_m = \frac{\Phi I}{2} = \frac{\Phi^2}{2L}. \quad (1.27)$$

### ➔ Проверьте свои знания

1. Как объяснить явление самоиндукции с энергетической точки зрения?
2. Чему равна энергия магнитного поля катушки?
3. Найдите энергию магнитного поля катушки индуктивностью 80 мГн, если сила тока в ней равна 0,5 А.
4. Энергия магнитного поля в катушке индуктивностью 8 мГн равна 1 мДж. Определите: а) силу тока в витках катушки; б) магнитный поток, пронизывающий катушку.



# ПЕРЕМЕННЫЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК

## 2.1. ГЕНЕРИРОВАНИЕ ПЕРЕМЕННОЙ ЭЛЕКТРОДВИЖУЩЕЙ СИЛЫ

### Вспоминаем

В уравнении гармонического (синусоидального) движения материальной точки:

$$x = A \sin(\omega t + \varphi_0), \quad (2.1)$$

величина  $\omega t + \varphi_0$  называется фазой колебания;  $\varphi_0$  – начальной фазой;  $A$  – амплитудой колебаний (наибольшее смещение от положения равновесия);  $x$  – смещением (отклонение от положения равновесия в момент времени  $t$ ). Из того, что колебательное движение периодическое, то есть  $x(T + t) = x(t)$ , следует:  $A \sin[\omega(t + T) + \varphi_0] = A \sin(\omega t + \varphi_0)$ . Значения периодической функции «sin» повторяются через  $2\pi$  радиан и за интервал времени от  $t$  до  $t + T$ , равный периоду колебаний  $T$ , фаза колебаний возрастает на  $2\pi$ , то есть  $\omega(t + T) + \varphi_0 = \omega t + \omega T + \varphi_0 = \omega t + \varphi_0 + 2\pi$ , откуда  $\omega T = 2\pi$ . Циклическая частота колебаний

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi\nu, \quad (2.2)$$

где  $\nu$  – частота колебаний – это число полных колебаний, совершаемых в единицу времени.

В XI классе вы изучали законы постоянного электрического тока, не меняющего своей величины и направления. Существуют и токи, меняющие за определенные промежутки времени свою величину и направление на обратные.

В данной главе мы изучим простейший случай **переменного тока**, величина которого меняется по гармоническому (синусоидальному) закону:

$$i = I_m \sin(\omega t + \varphi_0), \quad (2.3)$$

где  $I_m$  – максимальное значение или амплитуда силы тока;  $i$  – его мгновенное значение;  $\varphi_0$  – начальная фаза колебаний;  $\omega$  – циклическая частота колебаний.

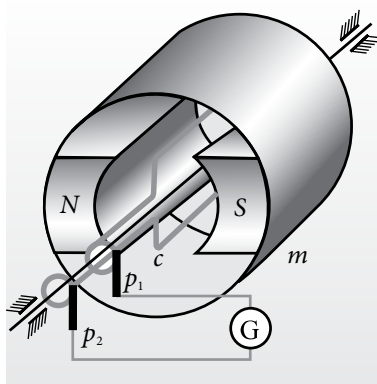


Рис. 2.1

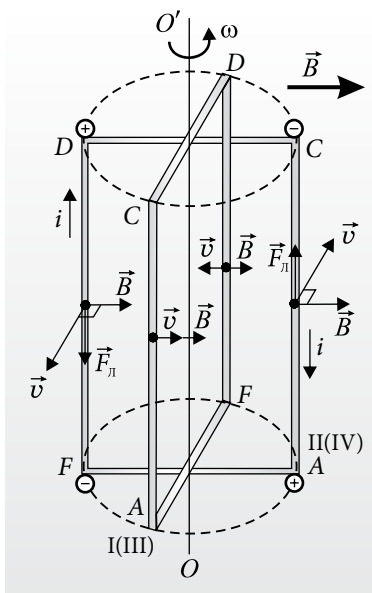


Рис. 2.2



Сравнивая выражения (2.1) и (2.3), приходим к выводу, что значение силы тока совершает колебания, описываемые так же, как и колебания материальной точки. Поэтому при изучении переменного тока можно использовать тот же математический аппарат и ту же логику определений.

**Период колебаний переменного тока – это интервал времени, в течение которого сила тока  $i$  совершает одно полное колебание, то есть последовательно принимает одно и то же числовое значение, а частота переменного тока – это число полных колебаний, совершаемых током в секунду.**

Циклическая частота переменного тока выражается через его **частоту**  $\nu$  и **период**  $T$  с помощью формул (2.2).

Частота переменного тока в СИ измеряется в **герцах** (Гц). В большинстве стран мира его стандартное значение, называемое **промышленной частотой**, равно 50 Гц (в США, Канаде – 60 Гц).

Самый простой метод получения переменного электрического тока – это создание изменяющегося со временем магнитного потока, который пронизывает поверхность, ограниченную металлической рамкой (рис. 2.1). Такого изменения можно добиться двумя способами: либо равномерным вращением металлической рамки  $s$  в постоянном магнитном поле, либо вращением магнитного поля, то есть цилиндра  $t$  с укрепленным на нем вокруг неподвижной рамки постоянным магнитом. В обоих случаях, согласно закону электромагнитной индукции, в металлической рамке возбуждается индукционный ток, сила которого тем больше, чем больше скорость изменения магнитного потока. Если концы рамки припаять к двум кольцам и с помощью скользящих по ним щеткам  $p_1$  и  $p_2$  присоединить к гальванометру  $G$ , то электрический ток, возникший под действием ЭДС индукции, будет измеряться этим гальванометром. В дальнейшем все переменные электрические величины будем обозначать маленькими буквами ( $i$ ,  $u$ ,  $e$ ), а их максимальные значения, соответственно, большими ( $I_m$ ,  $U_m$ ,  $\mathcal{E}_m$ ).

Проанализируем детальнее процесс возникновения переменной электродвижущей силы. Для этого исследуем вращательное движение рамки  $ACDF$  в постоянном магнитном поле индукцией  $\vec{B}$ , происходящее с угловой скоростью  $\omega$  (рис. 2.2). Замечаем, что стороны  $AC$  и  $DF$  длиной  $l$  дви-

жутся с линейной скоростью  $\vec{v}$ , описывая цилиндрическую поверхность радиусом, равным половине длины сторон  $AC$  и  $CD$  рамки. На свободные электроны металлической рамки, движущиеся с такой же скоростью в магнитном поле индукцией  $\vec{B}$ , действует сила Лоренца и происходит разделение положительных и отрицательных электрических зарядов, то есть появляется некая разность потенциалов. Поскольку вращательное движение является периодическим, то достаточно рассмотреть этот процесс на протяжении одного периода, то есть одного полного оборота.

В момент времени  $t = 0$ , когда линии магнитного поля перпендикулярны плоскости рамки (положение I на рис. 2.2), векторы  $\vec{v}$  и  $\vec{B}$  коллинеарны и сила Лоренца  $F_L = |e| v B \sin \alpha$  равна нулю. При вращении рамки угол  $\alpha = \omega t$  между  $\vec{v}$  и  $\vec{B}$  увеличивается, одновременно увеличивается и сила Лоренца, действующая на свободные электроны, становясь максимальной в момент  $t = \pi/(2\omega)$ , для которого  $\alpha = \pi/2$ . Направление этой силы устанавливается с помощью правила левой руки. Таким образом, на концах  $C$  и  $F$  (положение II на рис. 2.2) накапливается отрицательный заряд, а на концах  $A$  и  $D$  – положительный. Поэтому, через стороны  $AC$  и  $DF$  течет ток  $i$ , имеющий направление, указанное на рисунке 2.2. Для значений угла  $\alpha$  в интервале  $\pi/2 < \alpha < \pi$  сила Лоренца, действующая на свободные электроны рамки, уменьшается. В момент времени  $t = \pi/\omega$  значение  $\alpha = \pi$  (положение III на рис. 2.2) и на концах сторон  $AC$  и, соответственно,  $DF$  разность потенциалов становится равной нулю, и ток через рамку не течет. Продолжающееся вращение рамки ( $\pi < \alpha < \pi/2$ ) ведет к появлению в сторонах  $AC$  и  $DF$  тока, направленного противоположно тому, которое наблюдалось при  $0 < \alpha < \pi$ . Этот ток имеет максимальное по модулю значение в момент времени  $t = 3\pi/(2\omega)$  (положение IV на рис. 2.2.), когда стороны  $AC$  и  $DF$  меняются местами.

Согласно выражению (1.19) ЭДС индукции в сторонах  $AC$  и  $DF$  в произвольный момент времени  $e_{AC} = Bvl \sin \alpha$  и  $e_{DF} = Bvl \sin (\pi - \alpha) = Bvl \sin \alpha$  и складываются, как ЭДС последовательно соединенных источников. Таким образом, в металлической рамке индуцируется ЭДС, равная

$$e = e_{AC} + e_{DF} = 2Bvl \sin \alpha = \mathcal{E}_m \sin \omega t, \quad (2.4)$$

где  $\mathcal{E}_m = 2Bvl$  – максимальное значение ЭДС индукции в рамке.

С учетом связи между линейной  $v$  и угловой  $\omega$  скоростями (Физика, X класс)  $v = 2\pi r \nu = \omega r = \omega d/2$

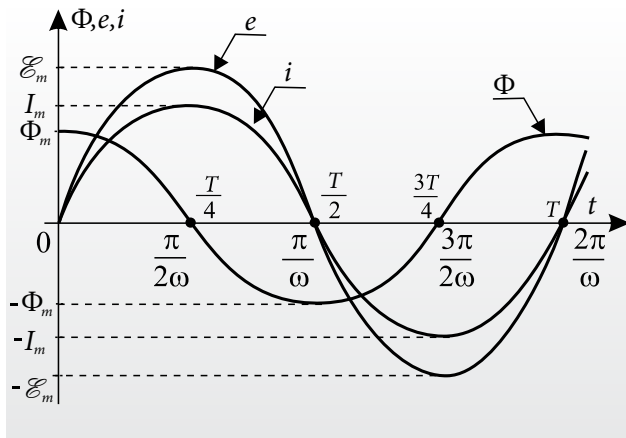


Рис. 2.3

( $d$  — это длина сторон  $AF$  и  $CD$ , перпендикулярных оси вращения) для максимального значения ЭДС в рамке получим:

$$\mathcal{E}_m = 2Bl \cdot \omega \frac{d}{2} = \omega BS = \omega \Phi_m, \quad (2.5)$$

где  $S = ld$  — площадь поверхности, охватываемой рамкой, а  $\Phi_m$  — максимальное значение магнитного потока через эту поверхность. Отметим, что максимальное значение ЭДС  $\mathcal{E}_m$  может быть увеличено не только за счет величин, входящих в (2.5), но и если возьмем рамку с большим числом витков. Если рамка содержит  $N$  витков, тогда:

$$\mathcal{E}_m = N\omega BS = N\omega \Phi_m.$$

При равномерном вращении металлической рамки вокруг оси симметрии, перпендикулярной линиям однородного поля, возбуждается переменная ЭДС, изменяющаяся по закону синуса.

ЭДС индукции (2.4) обуславливает возникновение в рамке синусоидального индукционного тока, который можно обнаружить с помощью гальванометра (см. рис. 2.1). Согласно закону Ома сила этого тока  $i = e/R_{\text{полн}}$ , где  $R_{\text{полн}}$  — полное сопротивление цепи. Получаем:

$$i = I_m \sin \omega t, \quad (2.6)$$

где  $I_m = \mathcal{E}_m/R_{\text{полн}}$ .

На рисунке 2.3 представлены графики зависимости от времени ЭДС  $e$  (2.4), силы тока  $i$  (2.6) и магнитного потока  $\Phi$  (1.14). Констатируем, что ЭДС  $e$  и сила тока  $i$  достигают предельных значений ( $\pm \mathcal{E}_m$  и  $\pm I_m$ ) тогда, когда магнитный поток через рамку равен нулю. Это происходит в моменты времени  $t = (2k + 1)\pi/2\omega = (2k + 1)T/4$  ( $k \in \mathbb{N}$ ), когда скорость изменения магнитного потока максимальна, то есть, когда стороны  $AC$  и  $DF$ , называемые **активными**, *пересекают* наибольшее число линий поля за единицу времени. Видно также, что за один период знаки ЭДС  $e$  и силы тока  $i$  меняются дважды: они положительны в интервале  $0 < t < T/2$  при убывании магнитного потока через рамку и отрицательны — в интервале  $T/2 < t < T$  при его возрастании.

Рассмотренный выше способ получения переменного тока используется в **генераторе переменного тока**.

## ➔ Проверьте свои знания

1. Что называется периодом и частотой переменного синусоидального тока?
2. На каком законе основано получение переменного электрического тока?
3. Опишите процесс разделения положительных и отрицательных зарядов. Как направлен индукционный ток?
4. Как можно увеличить максимальную ЭДС, полученную при вращении металлической рамки в магнитном поле?
5. Объясните, почему ЭДС  $e$  и сила тока  $i$  достигают предельных значений, если магнитный поток, пронизывающий рамку, равен нулю.
6. Промышленная частота электрического тока равна 50 Гц. Сколько раз в 1 секунду ток меняет свое направление?

## 2.2. ДЕЙСТВУЮЩИЕ ЗНАЧЕНИЯ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА И НАПРЯЖЕНИЯ

В цепи переменного синусоидального тока средние значения ЭДС и силы тока за период равны нулю. Если же в такой цепи включить измерительный прибор, то он регистрирует определенные значения. Что представляет собой это

показание измерительного прибора и каков его физический смысл?

Экспериментальное изучение теплового действия электрического тока показывает, что количество джоулевой теплоты, выделяющееся в проводнике сопротивлением  $R$ , не зависит от его направления. Следовательно, существует такое значение силы постоянного тока, при котором за один и тот же интервал времени среднее значение

количества теплоты  $\overline{Q}_{\text{пер}} = i^2 R \cdot \Delta t$ , выделяющегося в цепи переменного тока, равно количеству теплоты  $Q_{\text{пост}} = I^2 R \cdot \Delta t$ , выделяющемуся в цепи постоянного тока. С учетом (2.6) для количества теплоты, выделяющегося за интервал времени  $\Delta t \ll T$ , получим:

$$Q_{\text{пер}} = I_m^2 R \Delta t \sin^2 \left( \frac{2\pi}{T} t \right).$$

Среднее значение этой величины может быть вычислено, но проще для этого использовать графический метод. Из рисунка 2.4, на котором показана зависимость от времени мгновенной мощности, выделяющейся в проводнике сопротивлением  $R$ , видно, что за интервал времени  $\Delta t = T$  площадь фигуры, ограниченной графиком  $Q_{\text{пер}}/\Delta t$ , равна площади прямоугольника  $OMNT$  (закрашенные части, расположенные выше средней линии  $I_m^2 R/2$ , дополняются незакрашенными частями, расположенными между абсциссой и этой линией). Таким образом, за один период в проводнике, по которому течет переменный ток, выделяется количество теплоты  $\overline{Q}_{\text{пер}} = \frac{1}{2} I_m^2 R T$ , а в том же проводнике при протекании постоянного тока выделяется количество теплоты  $Q_{\text{пост}} = I^2 R T$ . Из равенства этих соотношений получаем:

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}}. \quad (2.7)$$

Величина  $I$  в выражении (2.7) называется **действующим значением** силы переменного тока, что в  $\sqrt{2}$  раз меньше максимального значения.

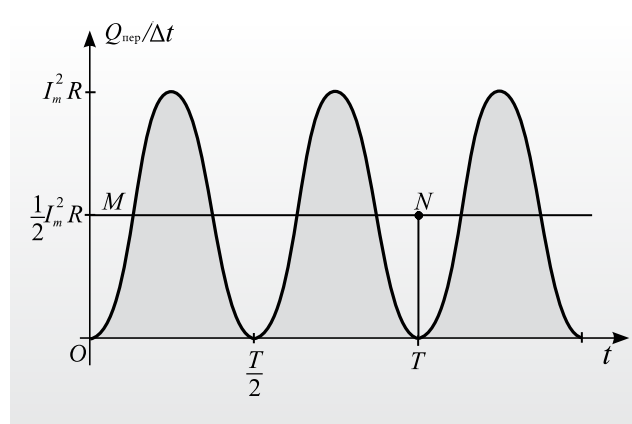


Рис. 2.4

**Действующее значение силы переменного тока  $i$  равно силе такого постоянного тока  $I$ , при протекании которого количество теплоты, выделяющееся в проводнике, равно количеству теплоты, выделяющемуся в том же проводнике в цепи переменного тока за одинаковый интервал времени.**

Поскольку  $U = IR$ , то и напряжение в цепи переменного тока также характеризуется действующим значением:

$$U = \frac{U_m}{\sqrt{2}}. \quad (2.8)$$

Отметим, что измерительные приборы, используемые в цепях переменного тока, всегда показывают действующие значения измеряемых электрических величин.

## ➔ Проверьте свои знания

1. Что называется действующим значением силы переменного тока?
2. Как выражаются действующие значения силы переменного тока и напряжения через соответствующие максимальные значения?
3. Определите максимальное значение напряжения

в цепи переменного тока, если вольтметр показывает значение 220 В.

4. При протекании переменного тока частотой  $\nu = 50$  Гц через проводник сопротивлением 400 Ом за каждый период в нем выделяется количество теплоты, равное 16 Дж. Чему равны максимальное и действующее значения силы тока?

## 2.3.\* ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Основные элементы электрической цепи – резистор, конденсатор и катушка характеризуются соответственно сопротивлением  $R$ , емкостью  $C$  и индуктивностью  $L$ . Один элемент превращает электрическую энергию во внутреннюю, второй накапливает ее в виде энергии электрического поля, третий – в виде энергии магнитного поля. Реальные элементы цепи кроме своего основного свой-

ства в большей или меньшей степени обладают и остальными свойствами. Элементы цепи называют идеальными, если они обладают только одним из свойств. В дальнейшем, для простоты, будем считать, что изучаемые нами цепи переменного тока состоят только из идеальных элементов.

### а. Особенности цепей переменного тока

Свойства переменного тока существенно отличаются от свойств постоянного тока. Во-первых,

цепи переменного тока представляют собой колебательные системы. Напряжение

$$u = U_m \sin \omega t, \quad (2.9)$$

приложенное к зажимам цепи, задает источник энергии. Он и поддерживает колебания силы тока и напряжения в цепи с циклической частотой  $\omega$ .

Закон Ома, установленный для постоянного тока, справедлив и для мгновенных значений напряжения и силы переменного тока. Для этого только необходимо, чтобы сила тока была практически одинакова в любых сечениях проводника. Для электрического тока промышленной частоты ( $\nu = 50$  Гц) это условие выполняется с высокой степенью точности, поэтому он называется **квазистационарным**.

Поведение конденсаторов и катушек в цепях переменного и постоянного тока различно. В случае постоянного тока конденсатор размыкает цепь, а в цепи переменного тока он подвергается непрерывной зарядке–разрядке, происходящей тем интенсивнее, чем больше частота тока  $\nu$ . И во всей цепи возникает ток этой частоты. Реальная катушка в случае постоянного тока ведет себя как резистор, на котором, благодаря эффекту Джоуля, выделяется количество теплоты, пропорциональное ее сопротивлению, а переменный ток приводит к появлению в ней ЭДС самоиндукции, изменяющей силу тока в цепи.

Так как законы переменного тока сложнее законов постоянного тока, рассмотрим вначале, по очереди, простейшие цепи, содержащие только один идеальный элемент. В цепях переменного тока очень удобно представлять колеблющиеся физические величины с помощью **векторных диаграмм**.

### Вспоминаем

При изучении механических колебаний (Физика, X класс) было введено понятие **вращающегося вектора**. Например, колебание (2.1) в начальный момент времени представляется вектором, имеющим длину, пропорциональную амплитуде  $A$ , и составляющим с выбранным направлением (например, осью  $Ox$ ) в начальный момент времени  $t = 0$  угол, равный начальной фазе  $\varphi_0$  (рис. 2.5). Так как угол между вектором и осью  $Ox$  растет линейно со временем, то вектор равномерно вращается в плоскости  $xOy$  в тригонометрическом направлении с угловой скоростью  $\omega$ , численно равной циклической частоте рассматриваемого колебания.

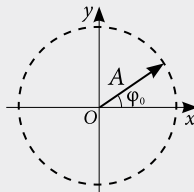


Рис. 2.5

## б. Идеальный резистор в цепи переменного тока

Простейшая электрическая цепь получится при подаче некоторого напряжения на зажимы резистора сопротивлением  $R$  (рис. 2.6 а). Если напряжение постоянно, то в цепи, согласно закону Ома, установится постоянный ток

$$I = \frac{U}{R}, \quad (2.10)$$

а в резисторе будет выделяться определенное количество теплоты.

Если же питать цепь переменным напряжением (2.9), то через резистор будет течь переменный (квазистационарный) ток, мгновенное значение которого, опять же по закону Ома, равно:

$$i = \frac{u}{R} = \frac{U_m}{R} \sin \omega t = I_m \sin \omega t,$$

где  $I_m = U_m/R$ . Используя (2.7) и (2.8) для действующих значений, получим:

$$I = \frac{U}{R}. \quad (2.11)$$

Соотношение (2.11) по форме совпадает с законом Ома (2.10), но сила тока и напряжение представляют собой действующие значения соответствующих переменных величин, поэтому выделившееся в резисторе при прохождении переменного тока количество теплоты совпадает с количеством теплоты, выделившимся в цепи с постоянным током.

На рисунке 2.6 б показаны графики зависимости от фазы  $\omega t$  напряжения и силы тока. Видно, что сила тока и напряжение достигают максимальных значений в один и тот же момент времени. В таком случае говорят, что эти величины колеблются в одинаковой фазе или сдвиг по фазе между колебаниями равен нулю.

Векторная диаграмма для этого случая очень проста (рис. 2.6 в). Вдоль выбранного направления (прерывистая линия) откладывается вектор силы тока, модуль которого равен максимальному значению силы тока  $I_m$ . Так как напряжение  $u$  и сила тока  $i$  колеблются в одинаковой фазе (рис. 2.6 б), то вектор напряжения, равный по модулю максимальному значению напряжения  $U_{m,R}$ , направляют вдоль этого же направления.

## в. Идеальная катушка в цепи переменного тока

Идеальную катушку индуктивностью  $L$  подключим к источнику переменного напряжения. В цепи (рис. 2.7 а) появится ток  $i$ , тоже переменный, при прохождении которого по виткам

катушки в результате явления самоиндукции возникнет ЭДС самоиндукции (1.22), то есть:

$$e_a = -L \frac{di}{dt}.$$

Здесь выражение  $di/dt$  означает производную силы тока  $i$  по времени  $t$ . Заметим, что используемый в математике знак  $y'$  соответствует выражению  $dy/dx$  и обозначает производную функции  $y$  от координаты  $x$ . Взяв производную по времени выражения (2.6) и используя из курса математики выражение  $\cos \omega t = \sin(\omega t + \frac{\pi}{2})$ , получим:

$$e_a = -I_m \omega L \cos \omega t = -I_m \omega L \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right). \quad (2.12)$$

Из формул (2.9) и (2.12) следует, что:

**В цепи переменного тока катушка ведет себя как генератор напряжения, фаза которого опережает на  $\pi/2$  колебания в источнике тока.**

По аналогии с (2.10) закон Ома для исследуемой цепи можно записать в виде

$$i = \frac{u + e_a}{R} \quad \text{или} \quad u + e_a = iR.$$

Так как сопротивлением катушки можно пренебречь (катушка идеальная), то можно записать:

$$u + e_a = 0. \quad (2.13)$$

Подставив (2.12) в (2.13), получим мгновенное значение напряжения в цепи, а значит и на зажимах катушки:

$$u = u_L = -e_a = I_m \omega L \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) = U_m \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right), \quad (2.14)$$

где

$$U_m = I_m \omega L$$

означает наибольшее значение (амплитуду) напряжения на зажимах катушки. Последнее соотношение верно и для действующих значений:

$$\frac{U}{I} = \omega L. \quad (2.15)$$

Из сравнения (2.15) с законом Ома для постоянного тока (2.10) следует, что произведение индуктивности на циклическую частоту имеет смысл сопротивления. Действительно, в СИ получим:

$$[\omega L] = \text{с}^{-1} \cdot \text{Гн} = \frac{\text{В} \cdot \text{с}}{\text{А}} = \frac{\text{В}}{\text{А}} = \text{Ом}.$$

**Катушка вводит в цепь переменного тока дополнительное сопротивление  $X_L$ , называемое индуктивным сопротивлением:**

$$X_L = \omega L. \quad (2.16)$$

Из (2.15) и (2.16) следует:

$$I = \frac{U}{X_L}. \quad (2.17)$$

Это закон Ома для цепи переменного тока, содержащей идеальную катушку.

Из анализа формул (2.6), (2.14) и графиков (рис. 2.7 б) следует, что фаза напряжения  $\varphi_u$  опережает фазу силы тока  $\varphi_i$  на  $\pi/2$ . Действительно,

$$\Delta\varphi = \varphi_u - \varphi_i = \omega t + \frac{\pi}{2} - \omega t = \frac{\pi}{2}.$$

**Катушка вносит в цепь переменного тока сдвиг по фазе: колебания напряжения опережают колебания силы тока на  $\pi/2$ .**

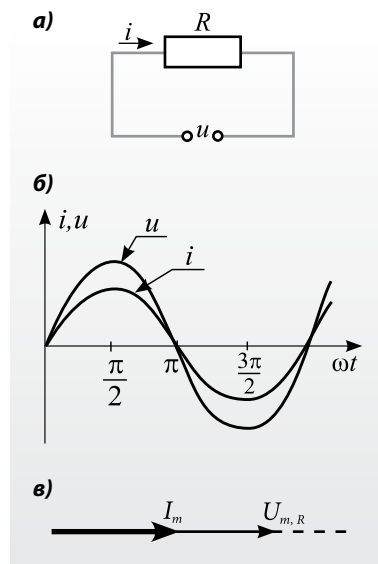


Рис. 2.6

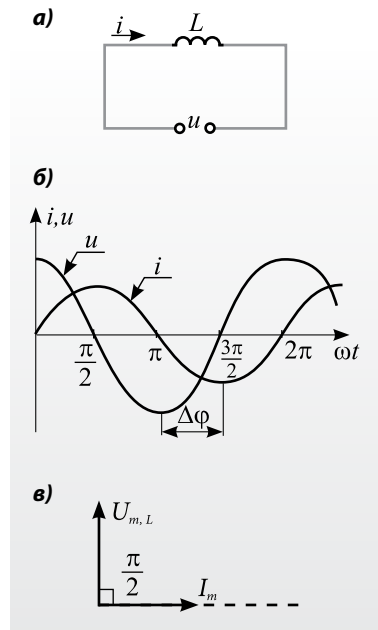


Рис. 2.7

На векторной диаграмме (рис. 2.7 в) вектор силы тока совпадает с выбранным направлением (прерывистая линия), а вектор напряжения повернут на угол  $90^\circ$  ( $\pi/2$  радиан) в тригонометрическом направлении относительно вектора силы тока.

### г. Идеальный конденсатор в цепи переменного тока

Рассмотрим цепь, показанную на рисунке 2.8 а. Напомним, что при подключении конденсатора к цепи постоянного тока он заряжается до напряжения источника тока. Понятно, что при зарядке (разрядке) конденсатора в цепи короткое время существует ток, исчезающий после окончания процесса зарядки (разрядки). Следовательно, для поддержания тока в исследуемой цепи необходим непрерывный процесс зарядки-разрядки конденсатора, то есть изменение величины заряда на обкладках конденсатора. Чем быстрее происходит это изменение, тем больше сила тока в цепи.

Пусть на обкладках конденсатора в некоторый момент времени его зарядки (разрядки) находится заряд  $q$ . Учитывая, что заряд на обкладках конденсатора равен произведению напряжения между обкладками на его емкость ( $q = uC$ ), сила тока

$$i = \frac{dq}{dt} = \frac{d(uC)}{dt} = C \frac{du}{dt}. \quad (2.18)$$

**Сила тока в цепи с конденсатором равна произведению его емкости на скорость изменения приложенного напряжения.**

Из (2.18) следует, что в случае постоянного напряжения на зажимах конденсатора его производная равна нулю, соответственно и сила тока  $i = 0$ , то есть **конденсатор разрывает цепь постоянного тока**. Если же подать на конденсатор изменяющееся во времени напряжение, например, по закону (2.9), то, согласно (2.18), в цепи появится сила тока

$$\begin{aligned} i &= U_m \omega C \cos \omega t = U_m \omega C \sin \left( \omega t + \frac{\pi}{2} \right) = \\ &= I_m \sin \left( \omega t + \frac{\pi}{2} \right), \end{aligned} \quad (2.19)$$

где

$$I_m = U_m \omega C$$

максимальное значение (амплитуда) колебаний силы тока в цепи. Выразив максимальные зна-

чения через действующие, представим предыдущее выражение в виде:

$$\frac{U}{I} = \frac{1}{\omega C}, \quad (2.20)$$

откуда следует, что величина, обратная произведению циклической частоты переменного тока на емкость конденсатора имеет размерность сопротивления. В самом деле, в СИ получим:

$$\left[ \frac{1}{\omega C} \right] = \frac{1}{\text{с}^{-1} \cdot \text{Ф}} = \frac{\text{с} \cdot \text{В}}{\text{Кл}} = \frac{\text{В}}{\text{А}} = \text{Ом}.$$

**Конденсатор в цепи переменного тока представляет собой емкостное сопротивление  $X_c$ :**

$$X_c = \frac{1}{\omega C}. \quad (2.21)$$

Закон Ома для цепи переменного тока имеет такой же вид, как и для постоянного тока, но с другим смыслом соответствующих величин:

$$I = \frac{U}{X_c}. \quad (2.22)$$

Из анализа формул (2.9), (2.19) и графиков (рис. 2.8 б) следует, что между колебаниями напряжения и силы тока есть сдвиг фаз:

$$\Delta\varphi = \varphi_u - \varphi_i = \omega t - \omega t - \frac{\pi}{2} = -\frac{\pi}{2}.$$

**Конденсатор вносит в цепь переменного тока сдвиг по фазе: колебания напряжения отстают от колебаний силы тока на  $\pi/2$ .**

Итак, если в цепи (рис. 2.8 а) течет ток  $i = I_m \sin \omega t$ , то напряжение на входе цепи и на зажимах конденсатора с отставанием на  $\pi/2$  от колебаний силы тока будет изменяться по закону:

$$u = u_c = U_m \sin \left( \omega t - \frac{\pi}{2} \right) = \frac{I_m}{\omega C} \sin \left( \omega t - \frac{\pi}{2} \right).$$

Векторная диаграмма (рис. 2.8 в) для цепи с идеальным конденсатором отличается от диаграммы для идеальной катушки только направлением вектора напряжения  $U_{m,c}$ . Он повернут относительно вектора силы тока  $I_m$  на угол  $90^\circ$  в направлении, противоположном тригонометрическому.

### д. Последовательная цепь переменного тока RLC. Закон Ома

Из рассмотренных выше элементов цепи можно получить различные комбинации последовательного, параллельного или смешанного соединений проводников. Рассмотрим цепь, представленную на рисунке 2.9, состоящую из

последовательно соединенных резистора сопротивлением  $R$ , катушки индуктивностью  $L$  и конденсатора емкостью  $C$ . Если к зажимам этой цепи приложить переменное напряжение циклической частоты  $\omega$ , то во всех элементах цепи установится одинаковый переменный ток  $i = I_m \sin \omega t$ .

На каждом элементе цепи появится падение напряжения, пропорциональное его сопротивлению. При последовательном соединении сумма этих падений напряжений должна быть равна напряжению на зажимах цепи. В любой момент времени для мгновенных значений напряжений выполняется равенство:

$$u_R + u_L + u_C = u, \quad (2.23)$$

где  $u_R$ ,  $u_L$ ,  $u_C$  – напряжения на соответствующих участках цепи. Из предыдущего пункта мы знаем, что:

$$\begin{aligned} u_R &= I_m R \sin \omega t, \\ u_L &= I_m \omega L \sin \left( \omega t + \frac{\pi}{2} \right), \\ u_C &= \frac{I_m}{\omega C} \sin \left( \omega t - \frac{\pi}{2} \right). \end{aligned} \quad (2.24)$$

Графики зависимостей  $u(t)$  показаны на рисунках 2.6 б; 2.7 б и 2.8 б. Так как фазы этих напряжений различны, между напряжением на зажимах цепи и силой тока в цепи возникнет сдвиг фаз  $\phi$ , который может принимать положительные, отрицательные и равные нулю значения. Если фаза силы тока равна  $\omega t$ , то фаза напряжения будет  $\omega t + \phi$ , то есть

$$u = U_m \sin (\omega t + \phi). \quad (2.25)$$

Подставив (2.24) и (2.25) в (2.23), получим:

$$U_m \sin (\omega t + \phi) = R I_m \sin \omega t + X_L I_m \sin \left( \omega t + \frac{\pi}{2} \right) + X_C I_m \sin \left( \omega t - \frac{\pi}{2} \right) \quad (2.26)$$

или

$$U_m \sin (\omega t + \phi) = U_{m,R} \sin \omega t + U_{m,L} \sin \left( \omega t + \frac{\pi}{2} \right) + U_{m,C} \sin \left( \omega t - \frac{\pi}{2} \right), \quad (2.27)$$

где

$$U_{m,R} = R I_m, \quad U_{m,L} = X_L I_m = \omega L I_m, \quad U_{m,C} = X_C I_m = I_m / \omega C \quad (2.28)$$

представляют собой амплитудные значения напряжений соответственно на резисторе, катушке и конденсаторе.

Для сложения слагаемых в правой части уравнения (2.26) или (2.27) можно использовать аналитический метод, но гораздо проще и нагляднее метод векторных диаграмм.

Вдоль выбранного направления откладывается вектор силы тока  $I_m$  и напряжения на резисторе  $U_{m,R}$ . Векторы  $U_{m,L}$  и  $U_{m,C}$  проводят из той же точки под углом  $\pi/2$  относительно силы тока в тригонометрическом направлении и, соответственно, в противоположном (рис. 2.10). Так как угол между векторами  $U_{m,L}$  и  $U_{m,C}$  равен  $\pi$  и они в противофазе, то возможны три случая:

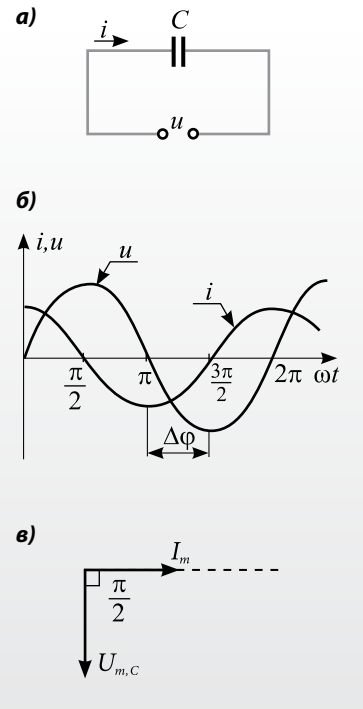


Рис. 2.8

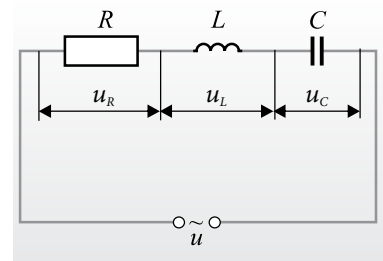


Рис. 2.9

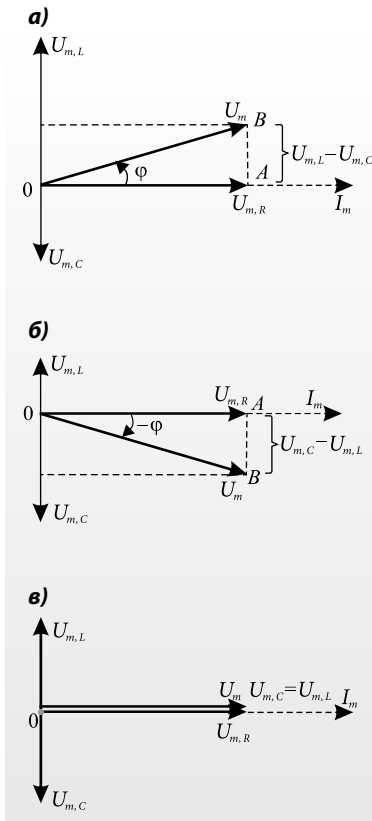


Рис. 2.10

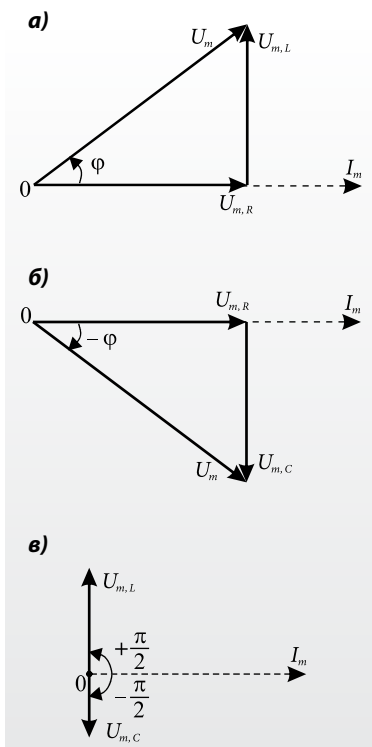


Рис. 2.11

1)  $U_{m,L} > U_{m,C}$ , то есть  $\omega L > 1/\omega C$ . В этом случае говорят, что цепь имеет **преимущественно индуктивный характер**. На векторной диаграмме (рис. 2.10 а) видно, что результирующий вектор  $U_m$  опережает по фазе на угол  $\varphi$  вектор силы тока, то есть  $\varphi > 0$ .

2)  $U_{m,C} > U_{m,L}$ , то есть  $1/\omega C > \omega L$  – цепь имеет **преимущественно емкостный характер**. На векторной диаграмме (рис. 2.10 б) видно, что результирующий вектор  $U_m$  отстает по фазе на угол  $\varphi$  от вектора силы тока, то есть  $\varphi < 0$ .

Из  $\triangle AOB$  векторной диаграммы (рис. 2.10 а), называемого треугольником напряжений, следует:

$$U_m = \sqrt{U_{m,R}^2 + (U_{m,L} - U_{m,C})^2}.$$

Используя соотношения (2.28) и переходя к эффективным значениям силы тока  $I$  (2.7) и напряжения  $U$  (2.8), можно записать:

$$I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}} \quad \text{или} \quad I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}}. \quad (2.29)$$

Формулы (2.29) выражают закон Ома для последовательной цепи переменного тока  $RLC$ . В знаменателе – полное сопротивление цепи переменного тока, называемое **импедансом**. Обозначив импеданс через

$$Z = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2} \quad \text{или} \quad Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}, \quad (2.30)$$

запишем закон Ома в простой форме:

$$I = \frac{U}{Z}. \quad (2.31)$$

Сдвиг по фазе между напряжением и силой тока в цепи легко находится из треугольника напряжений (рис. 2.10 а):

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{U_{m,L} - U_{m,C}}{U_{m,R}}$$

или, подставив напряжения из (2.28):

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{X_L - X_C}{R}. \quad (2.32)$$

3)  $U_L = U_C$ , то есть  $\omega L = 1/\omega C$ . В этом случае индуктивные и емкостные эффекты взаимно компенсируются, сдвиг фаз между напряжением и силой тока  $\varphi = 0$  (рис. 2.10 в).

Добавляя или удаляя (см. задачу 3, стр. 34) элементы цепи на рисунке 2.9, можно собрать и другие последовательные цепи. Так, из (2.29) и (2.32) получим следующие частные случаи:

для цепи  $RL$  ( $X_C = 0$ )

$$I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + X_L^2}}, \quad \operatorname{tg} \varphi = \frac{X_L}{R}, \quad (2.33)$$



для цепи RC ( $X_L = 0$ )

$$I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + X_C^2}}, \quad \operatorname{tg} \varphi = -\frac{X_C}{R}, \quad (2.34)$$

для цепи LC ( $R = 0$ )

$$I = \frac{U}{|X_L - X_C|}, \quad X_L \neq X_C, \quad \operatorname{tg} \varphi \rightarrow \pm\infty, \quad \varphi \rightarrow \pm\frac{\pi}{2}. \quad (2.35)$$

Векторные диаграммы для этих последовательных цепей показаны на рисунке 2.11 а–в. Если в диаграммах на рисунке 2.10 для сложения векторов воспользовались правилом параллелограмма, то в диаграммах на рисунке 2.11 – правилом треугольника.

### е. Резонанс напряжений. Добротность

Посмотрим, к каким последствиям в законе Ома (2.29) приведет изменение циклической частоты  $\omega$  или частоты  $\nu = \omega/2\pi$  при постоянной амплитуде колебаний напряжения. Независимо от значений индуктивности  $L$  и емкости  $C$  всегда можно найти такую частоту, при которой индуктивное сопротивление станет равным емкостному. На рисунке 2.12 показана зависимость силы тока  $I$  (2.29) от циклической частоты  $\omega$ . Видно, что вблизи частоты  $\omega_r$  сила тока резко возрастает и при  $\omega = \omega_r$  она достигает максимума. Это явление называется **резонансом**, а частота, при которой амплитуда колебаний силы тока достигает максимальных значений – **резонансной частотой**.

Из равенства сопротивлений  $X_L = X_C$ , следует, что  $\omega^2 = 1/LC$ , откуда резонансная частота

$$\omega_r = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad \text{или} \quad \nu_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}. \quad (2.36)$$

Подставив в закон Ома (2.29) резонансную циклическую частоту  $\omega$ , из (2.36), получим значение резонансного тока:

$$I_r = \frac{U}{R}. \quad (2.37)$$

Итак, чем меньше активное сопротивление  $R$  цепи, тем острее резонансная кривая, а сила тока при резонансе – больше.

Из рисунка 2.10 видно, что для резонанса необходимо равенство напряжений на катушке и конденсаторе. Найдем эти напряжения. Подставив (2.36) и (2.37) в (2.28), получим оба напряжения при резонансе:

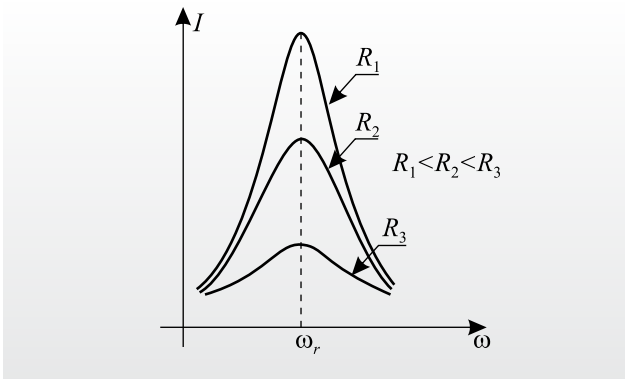


Рис. 2.12

$$U_{L,r} = \omega_r L I_r = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}} U, \quad (2.38)$$

$$U_{C,r} = \frac{I_r}{\omega_r C} = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}} U.$$

Из формул видно, что значения напряжений на зажимах катушки и конденсатора становятся тем больше, чем меньше активное сопротивление цепи, поэтому они могут быть во много раз больше напряжения, приложенного к цепи. Резонанс в последовательной цепи называют **резонансом напряжений**.

Отношение

$$Q = \frac{U_{L,r}}{U} = \frac{U_{C,r}}{U} = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (2.39)$$

показывает, во сколько раз напряжение на зажимах катушки или конденсатора в режиме резонанса больше напряжения, приложенного к последовательной цепи, и называется **добротностью**.

Явление резонанса в последовательной цепи RLC имеет большое значение в радиотехнике. Если в цепи использовать конденсатор переменной емкости или/и катушку переменной индуктивности, то, согласно формуле (2.36), можно настроить цепь на различные резонансные частоты. Таким способом настраиваются радиоприемники и телевизоры на понравившуюся станцию.

Бывает, что необходимо принимать меры, чтобы избавиться от резонанса. Например, если в установках по передаче и использованию электроэнергии возникнет перенапряжение, то это может привести к пробое изоляции между витками катушек или между обкладками конденсаторов и вывести их из строя.

## Примеры решения задач

**1** К источнику переменного напряжения  $u = 60 \sin 100\pi t$  (В) подключена катушка. Сила тока в цепи  $i = 5 \sin 2\pi(50t + 1/8)$  (А). Определите: а) частоту и сдвиг фаз между колебаниями силы тока и напряжения, а также их действующие значения; б) активное сопротивление и индуктивность катушки.

**Дано:**

$$u = 60 \sin 100\pi t \text{ (В)},$$

$$i = 5 \sin 2\pi(50t + 1/8) \text{ (А)}$$

а)  $\nu$  - ?,  $\varphi$  - ?,  $I$  - ?,  $U$  - ?;  
б)  $R$  - ?,  $L$  - ?

**Решение:**

а) Сравним уравнения в общем виде с уравнениями в задаче, запишем:  $U_m = 60$  В,  $I_m = 5$  А,  $\omega = 100\pi$  с<sup>-1</sup>,  $\varphi = \pi/4$ .

Действующие значения  $U_m$  и  $I_m$  найдем из (2.7) и (2.8), а  $\omega = 2\pi\nu$ . Тогда

$$\nu = 50 \text{ Гц}, \varphi = \frac{\pi}{4}, U = \frac{60}{\sqrt{2}} \approx 42,4 \text{ (В)}, I = \frac{5}{\sqrt{2}} \approx 3,5 \text{ (А)}.$$

б) Из векторной диаграммы цепи с резистором и катушкой (рис. 2.11 а), видно, что  $U_R = U \cos \varphi$  и  $U_L = U \sin \varphi$ . Так как  $U_R = IR$ , а  $U_L = I\omega L$ , из предыдущих соотношений получим:

$$R = \frac{U}{I} \cos \varphi \quad \text{и} \quad L = \frac{U}{I} \sin \varphi.$$

Подставив численные значения, получим:  $R \approx 8,6$  Ом и  $L \approx 27,3$  мГн.

**2** В последовательной цепи из резистора  $R$  и конденсатора емкостью 100 мкФ при частоте тока 50 Гц сдвиг по фазе между колебаниями силы тока и напряжения  $\varphi = -60^\circ$ . Найти: а) емкостное сопротивление; б) величину сопротивления  $R$ ; в) величину индуктивности катушки, подключение которой последовательно в цепь ликвидировало бы сдвиг по фазе.

**Дано:**

$$C = 10^{-4} \text{ Ф},$$

$$\nu = 50 \text{ Гц},$$

$$\varphi = -60^\circ$$

а)  $X_C$  - ?;  
б)  $R$  - ?;  
в)  $L$  - ?

**Решение:**

а) Учитывая, что  $\omega = 2\pi\nu$ , из определения емкостного сопротивления получим:

$$X_C = \frac{1}{2\pi\nu C}; \quad X_C \approx 31,8 \text{ (Ом)}.$$

б) Для последовательной цепи RC связь между  $X_C$ ,  $R$  и  $\varphi$  дана формулой (2.34), из которой получим:

$$R = -\frac{X_C}{\operatorname{tg} \varphi} = \frac{31,8}{\sqrt{3}} \approx 18,4 \text{ (Ом)}.$$

в) Из (2.32) следует, что если при подключении катушки в цепь сдвиг по фазе станет равным нулю, то  $X_L = X_C$  или  $2\pi\nu L = X_C$ . Тогда получим:

$$L = \frac{X_C}{2\pi\nu} = \frac{31,8}{100\pi} \approx 0,1 \text{ (Гн)}.$$

**3** На рисунке 2.13 а показана последовательная цепь, подключенная к источнику переменного тока. Известно, что  $X_L = 60$  Ом,  $X_{C1} = 30$  Ом,  $R_1 = 120$  Ом,  $X_{C2} = 90$  Ом,  $R_2 = 60$  Ом, а напряжение на резисторе  $R_2$  равно 90 В. Постройте векторную диаграмму цепи и найдите: а) импеданс цепи; б) силу тока в цепи и напряжение на входе; в) сдвиг фаз между колебаниями силы тока и напряжения.

**Дано:**

$$X_L = 60 \text{ Ом},$$

$$X_{C1} = 30 \text{ Ом},$$

$$R_1 = 120 \text{ Ом},$$

$$X_{C2} = 90 \text{ Ом},$$

$$R_2 = 60 \text{ Ом},$$

$$U_{R2} = 90 \text{ В}$$

а)  $Z$  - ?;  
б)  $I$  - ?,  $U$  - ?;  
в)  $\varphi$  - ?

**Решение:**

Так как сила тока одинакова на всех участках цепи, то построение векторной диаграммы начнем с вектора силы тока. Направим его вдоль выбранного направления из точки  $O$  (рис. 2.13 б). От той же точки отложим векторы напряжений на всех элементах цепи с учетом сдвига фаз (на катушке  $+\pi/2$ , на конденсаторе  $-\pi/2$ ). Сначала сложим векторы вдоль каждого из направлений, затем по правилу параллелограмма получим вектор  $U$ .

а) Из векторной диаграммы (рис. 2.13 б) следует:

$$U = \sqrt{(U_{R1} + U_{R2})^2 + (U_L - U_{C1} - U_{C2})^2}.$$

Выразив напряжение через произведения силы тока на сопротивления, получим:

$$U = I\sqrt{(R_1 + R_2)^2 + (X_L - X_{C1} - X_{C2})^2} = IZ.$$

Тогда

$$Z = \sqrt{(R_1 + R_2)^2 + (X_L - X_{C1} - X_{C2})^2} \approx 190 \text{ Ом}.$$

б) Сила тока во всей цепи равна и силе тока в резисторе  $R_2$ :

$$I = \frac{U_{R2}}{R_2} = 1,5 \text{ А},$$

а напряжение на входе цепи  $U = IZ \approx 285$  В.

в) Из векторной диаграммы получим выражение:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{U_L - U_{C1} - U_{C2}}{U_{R1} + U_{R2}} = \frac{X_L - X_{C1} - X_{C2}}{R_1 + R_2} = -\frac{1}{3}.$$

Тогда  $\varphi = -\operatorname{arctg}(\frac{1}{3}) \approx -0,32$  рад.

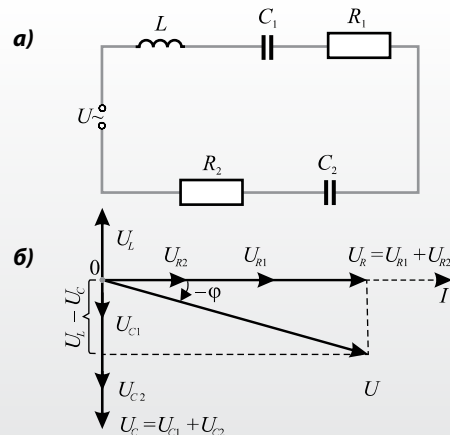


Рис. 2.13

1. При каких условиях для переменного тока будет выполняться закон Ома?
2. Чем отличается поведение резисторов, конденсаторов и катушек в цепях переменного тока от их поведения в цепях постоянного тока?
3. Какой сдвиг по фазе вносит в цепь переменного тока каждый из элементов этой цепи?
4. Что такое *индуктивное сопротивление*? Как оно обозначается?
5. Объясните, как строится векторная диаграмма цепи с идеальной катушкой.
6. Что называют емкостным сопротивлением? Как строится векторная диаграмма цепи с емкостным сопротивлением?
7. Как строится векторная диаграмма последовательной цепи *RLC*? Рассмотрите случаи цепей, имеющих индуктивный, емкостный характер.
8. Запишите закон Ома для цепи переменного тока.
9. Что называется *импедансом цепи*? Каков его смысл?
10. Как найти сдвиг по фазе между колебаниями приложенного напряжения и силы тока в последовательной цепи *RLC*?
11. Что вы знаете о резонансе напряжений в последовательной цепи *RLC*? Когда он возникает? Чему равен сдвиг фаз в этом режиме?
12. По какой формуле находится резонансная частота? От каких параметров она зависит?
13. Чему равна сила тока при резонансе? Как распределяются напряжения на элементах цепи при резонансе?
14. Что называется добротностью цепи? Что она показывает?
15. К источнику переменного тока с действующим напряжением 220 В подключен резистор сопротивлением 11 кОм. Чему равны действующее и максимальное значения силы тока в нем?
16. Найдите индуктивное сопротивление катушки с индуктивностью 20 мГн в цепи переменного тока частотой 50 Гц.
17. Чему равна частота переменного тока в конденсаторе емкостью 250 мкФ, если его емкостное сопротивление равно 40 Ом?
18. Последовательная цепь *RL* сопротивлением  $R = 10$  Ом подключена к сети напряжением 36 В и частотой 50 Гц. Напряжение на резисторе равно 20 В. Найдите импеданс цепи, индуктивность катушки и сдвиг по фазе между колебаниями силы тока и напряжения в цепи.
19. В последовательной цепи *RC* с частотой переменного тока 50 Гц действующие напряжения на резисторе и конденсаторе равны соответственно 90 и 120 В. Зная, что действующее значение силы тока в цепи равно 0,5 А, найдите емкость конденсатора, сдвиг фаз в цепи и напряжение питания.
20. Последовательная цепь *RLC* с параметрами  $R = 100$  Ом,  $L = 25$  мГн,  $C = 50$  мкФ подключена к сети напряжением 220 В и частотой 50 Гц. Чему равна сила тока в цепи?

## 2.4.\* МОЩНОСТЬ В ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Пусть к последовательной цепи *RLC* приложено напряжение  $u = U_m \sin(\omega t + \varphi)$ . В цепи установится переменный ток  $i = I_m \sin \omega t$ , где  $\varphi$  – сдвиг по фазе между колебаниями силы тока и напряжения. Он может быть как положительным, так и отрицательным.

Мгновенная мощность в цепи равна произведению мгновенных значений напряжения и силы тока:

$$p = ui = U_m I_m \sin \omega t \cdot \sin(\omega t + \varphi).$$

Используя формулу

$$\sin \alpha \cdot \sin \beta = \frac{1}{2} [\cos(\alpha - \beta) - \cos(\alpha + \beta)],$$

для произведения двух синусов запишем:

$$p = \frac{1}{2} I_m U_m \cos \varphi - \frac{1}{2} I_m U_m \cos(2\omega t + \varphi). \quad (2.40)$$

Из (2.40) видно, что выражение для мгновенной мощности состоит из двух частей: первая постоянна во времени, а вторая меняется со временем с удвоенной частотой. Благодаря переменной части уравнения мгновенная мощность может принимать как положительные, так и отрицательные значения, но за некоторый промежуток времени в цепи будет развиваться определенная средняя мощность. Другими словами, мгновенная мощность в цепи переменного тока представляет собой периодические изменения своей величины по отношению к некоторому среднему значению. Это легко увидеть на *рисунке 2.14*, где показаны колебания силы тока, напряжения и мощности переменного тока в зависимости от времени. За период участки I и II, находящиеся над линией  $P = \frac{1}{2} I_m U_m \cos \varphi$ , дополняют такие же по площади участки между этой линией и абсциссой, а участки,

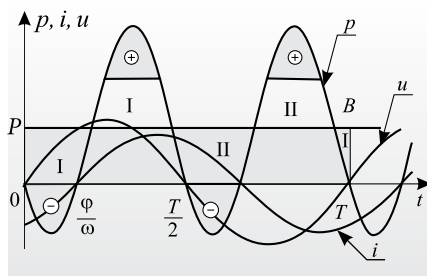


Рис. 2.14

отмеченные знаком «+», компенсируют участки, отмеченные знаком «-» под осью абсцисс (рис. 2.14). Площадь прямоугольника  $OPBT$  представляет собой энергию, полученную цепью переменного тока за один период:

$$W = \frac{1}{2} I_m U_m \cos \varphi \cdot T.$$

Среднее значение мощности в цепи переменного тока, называемое **и активной мощностью**, равно

$$P_a \equiv \bar{p} = \frac{W}{T} = \frac{1}{2} I_m U_m \cos \varphi$$

или, перейдя к действующим значениям силы тока и напряжения:

$$P_a = UI \cos \varphi. \quad (2.41)$$

Множитель  $\cos \varphi$  из (2.41) называют **коэффициентом мощности**. Так как  $0 \leq |\varphi| \leq \pi/2$ , то он всегда положителен и меньше единицы.

С уменьшением сдвига фаз между напряжением и силой тока увеличивается активная мощность. Максимального значения – единицы – коэффициент мощности достигает при сдвиге фаз равном нулю, то есть при резонансе.

**Коэффициент мощности** характеризует эффективность передачи мощности от источника энергии к потребителю.

Из (2.41) и из рисунка 2.15 а следует, что активная мощность максимальна для чисто резистивных цепей (без катушек и конденсаторов). Действительно, если  $\varphi = 0$ , активная мощность

$$P_a = \frac{1}{2} P_m = \frac{1}{2} I_m U_m = \frac{1}{2} I_m^2 R = I^2 R.$$

В случае идеальной цепи, состоящей только из катушки индуктивностью  $L$  ( $\varphi = \pi/2$ ) или только из конденсатора емкостью  $C$  ( $\varphi = -\pi/2$ ), для рассеиваемой мгновенной мощности из (2.40) получим:

$$p_L = -\frac{1}{2} I_m U_{m,L} \cos \left( 2\omega t + \frac{\pi}{2} \right) = \frac{1}{2} I_m U_{m,L} \sin 2\omega t = I^2 X_L \sin 2\omega t,$$

$$p_C = -\frac{1}{2} I_m U_{m,C} \cos \left( 2\omega t - \frac{\pi}{2} \right) = -\frac{1}{2} I_m U_{m,C} \sin 2\omega t = -I^2 X_C \sin 2\omega t.$$

Средние значения этих величин в течение периода равны нулю, то есть в таких цепях активная мощность равна нулю. Этот результат хорошо виден на рисунке 2.15 б, в. Сдвиг по фазе в  $\pi/2$  между силой тока и напряжением приводит к чередованию четвертей периодов, в течение которых поступление энергии в цепь будет или положительным, или отрицательным. Это означает, что энергия, полученная катушкой или конденсатором во время одной четверти периода, будет полностью возвращена генератору во время следующей четверти периода. Ясно, что в реальных цепях (каждая катушка или конденсатор обладают и некоторым активным сопротивлением) энергия не возвращается полностью источнику питания, а только частично, в зависимости от величины активного сопротивления цепи.

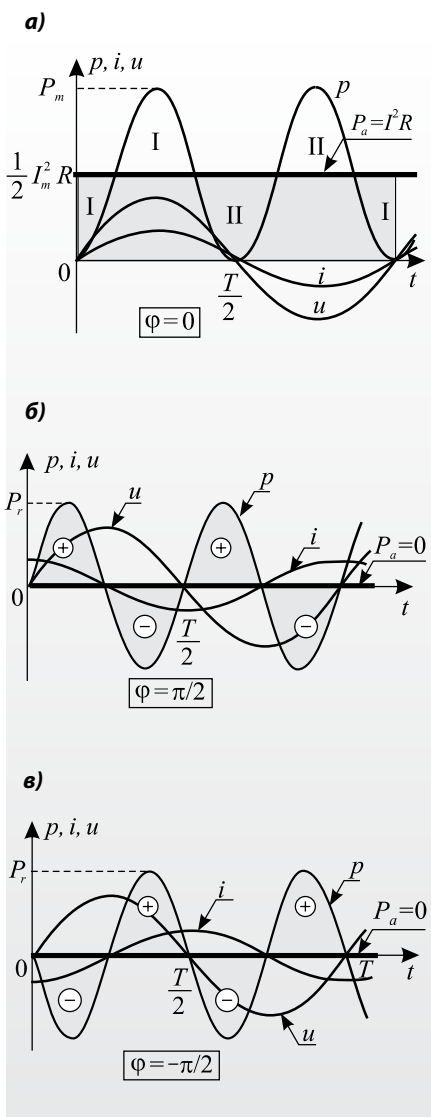


Рис. 2.15

Величина, характеризующая скорость обмена электрической энергией между генератором и реактивными элементами цепи (конденсатором и катушкой) называется **реактивной мощностью**.

На векторной диаграмме последовательной цепи  $RLC$  (см. рис. 2.10 а) изображен треугольник напряжений со сдвигом фаз  $\varphi$ . Если стороны этого треугольника умножить на  $I$ , то получится **треугольник мощностей**. На рисунке 2.16 показан треугольник мощностей для последовательной цепи  $RLC$ , имеющей преимущественно индуктивный характер. Из треугольника видно, что реактивная мощность находится по формуле:

$$P_r = UI \sin \varphi, \quad (2.42)$$

а максимально возможная мощность, отдаваемая источником питания в цепь и называемая **полной мощностью**, – по формуле

$$P = UI. \quad (2.43)$$

Полная, активная и реактивная мощности связаны между собой легко получаемыми из треугольника мощностей соотношениями (рис. 2.16):

$$P^2 = P_a^2 + P_r^2; P_r = P_a \operatorname{tg} \varphi; P_a = P \cos \varphi; P_r = P \sin \varphi. \quad (2.44)$$

Из (2.41)–(2.43) видно, что размерности всех мощностей одинаковы –  $[U] \cdot [I] = \text{В} \cdot \text{А}$ , но чтобы точно знать, о какой мощности идет речь, были приняты разные названия. Так, в СИ для активной мощности используется традиционная единица – **ватт (В)**:  $[P_a] = [U] \cdot [I] = \text{В} \cdot \text{А} \equiv \text{Вт}$ . Единицей реактивной мощности является **вольт-ампер реактивный (ВАр)**:  $[P_r] = [U] \cdot [I] = \text{В} \cdot \text{А} \equiv \text{ВАр}$ , а полной мощности – **вольт-ампер (ВА)**:  $[P] = [U] \cdot [I] = \text{В} \cdot \text{А} \equiv \text{ВА}$ .

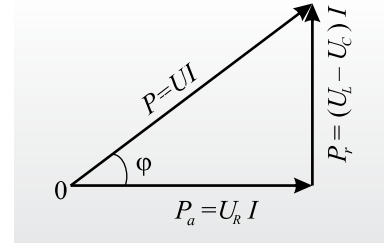


Рис. 2.16

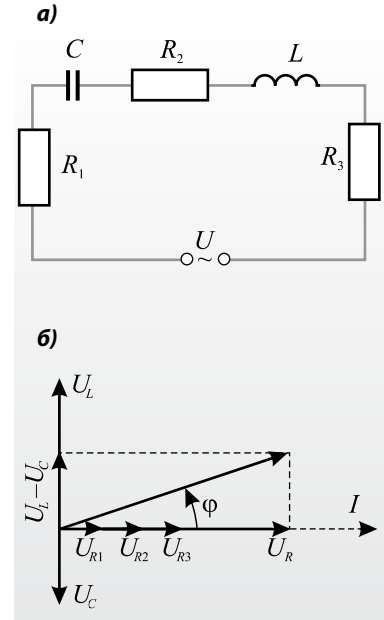


Рис. 2.17

### Пример решения задачи

Сила тока в последовательной цепи (рис. 2.17 а)  $I = 10 \text{ А}$ , частота  $\nu = 50 \text{ Гц}$ . Зная, что  $R_1 = 2 \text{ Ом}$ ,  $R_2 = 6 \text{ Ом}$ ,  $L = (0,3/2\pi) \text{ Гн}$  и  $C = (1/\pi) \cdot 10^{-3} \text{ Ф}$ , найдите: а) коэффициент мощности цепи; б) полную, активную и реактивную мощности в цепи.

#### Дано:

$I = 10 \text{ А}$ ,  
 $\nu = 50 \text{ Гц}$ ,  
 $R_1 = 2 \text{ Ом}$ ,  
 $R_2 = 4 \text{ Ом}$ ,  
 $R_3 = 6 \text{ Ом}$ ,  
 $L = (0,3/2\pi) \text{ Гн}$ ,  
 $C = (1/\pi) \cdot 10^{-3} \text{ Ф}$

а)  $\cos \varphi - ?$ ;  
 б)  $P_a - ?$ ,  $P_r - ?$ ,  
 $P - ?$

#### Решение:

а) Зная соотношения (2.16), (2.21), а также связь между частотой и циклической частотой  $\omega = 2\pi\nu$ , вычислим:

$$X_L = 2\pi\nu L = 15 \text{ Ом и}$$

$$X_C = 1/(2\pi\nu C) = 10 \text{ Ом.}$$

Видно, что у цепи преимущественно индуктивный характер, ее векторная диаграмма изображена на рисунке 2.17 б. Из диаграммы ясно, что коэффици-

ент мощности можно найти по формуле с неизвестными напряжениями:

$$\cos \varphi = \frac{U_{R_1} + U_{R_2} + U_{R_3}}{U}.$$

Так как  $U_{R_1} = IR_1$ ,  $U_{R_2} = IR_2$ ,  $U_{R_3} = IR_3$  и  $U = IZ$ , где

$$Z = \sqrt{(R_1 + R_2 + R_3)^2 + (X_L - X_C)^2}$$

– это импеданс цепи, то для коэффициента мощности получим рабочую формулу:

$$\cos \varphi = \frac{R_1 + R_2 + R_3}{Z} = \frac{12}{\sqrt{12^2 + 5^2}} \approx 0,92.$$

б) Напряжение на зажимах источника тока  $U = IZ = 130 \text{ В}$ . Подставив численные значения в формулы (2.41) и (2.43) для активной и полной мощностей, получим:  $P_a \approx 1,2 \text{ кВт}$  и  $P = 1,3 \text{ кВА}$ . Реактивная мощность находится из (2.44):

$$P_r = \sqrt{P^2 - P_a^2} \approx 500 \text{ ВАр.}$$

## ➔ Проверьте свои знания

1. Каков смысл активной мощности в цепи переменного тока и чему она равна?
2. Что представляет собой коэффициент мощности и какие значения он может принимать?
3. Почему в цепях, составленных только из реактивных элементов, активная мощность равна нулю?
4. Что такое реактивная мощность цепи переменного тока и чему она равна?
5. Как получить треугольник мощностей?
6. Что представляет собой полная мощность в цепях переменного тока?
7. Как называются принятые в СИ производные единицы величин активной, реактивной и полной мощности?
8. Цепь, состоящая из последовательно соединенных конденсатора емкостью  $(5/9\pi) \cdot 10^{-3}$  Ф и катушки индуктивностью  $(0,3/\pi)$  Гн и сопротивлением 16 Ом подключена к генератору переменного тока с напряжением  $U = 120$  В и частотой  $\nu = 50$  Гц. Вычислите: а) импеданс цепи; б) силу тока; в) коэффициент мощности в цепи; г) активную, реактивную, полную мощности.
9. Идеальная катушка и резистор соединены последовательно. Если эту цепь питать переменным током напряжением 240 В, то сдвиг фаз между колебаниями силы тока и напряжения равен  $\varphi_1 = \pi/3$ . Если последовательно в цепь добавить конденсатор с емкостным сопротивлением  $X_C = 8\sqrt{3}$  Ом, сдвиг фаз станет равным  $\varphi_2 = \pi/6$ . Определите: а) сопротивление резистора; б) индуктивное сопротивление катушки; в) активную, реактивную, полную мощности цепи, содержащей конденсатор, если известно, что цепь имеет преимущественно индуктивный характер.

## 2.5. ПЕРЕДАЧА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ НА БОЛЬШИЕ РАССТОЯНИЯ

### а. Генератор переменного тока

**Генератор переменного тока** превращает механическую энергию в электрическую.

Основные части генератора переменного тока (рис. 2.18 а): 1) создающий магнитное поле постоянный магнит или электромагнит – **индуктор**; 2) сердечник с обмоткой, в которой индуцируется переменная ЭДС – **якорь**; 3) металлические **контактные кольца** и прижатые к ним графитовые **щетки**, соединяющие вращающиеся проводники с неподвижными. Вращающаяся часть генератора называется **ротор**, неподвижная – **статор**.

Индуктор и якорь изготавливают из тонких, изолированных друг от друга пластин стали. Так уменьшают потери на нагрев сердечников возникающими в них вихревыми токами. В сердечниках индуктора и якоря сделаны пазы, в которые уложены витки обмоток. Для увеличения магнитного потока зазор между индуктором и якорем делают минимальным (рис. 2.18 а). Вектор магнитной индукции  $\vec{B}$  в зазоре становится перпендикулярным линейной скорости  $\vec{v}$  поверхности ротора, обеспечивая вместе с другими мерами получение синусоидальной ЭДС индукции.

Частота полученной ЭДС зависит от скорости вращения ротора. Для получения переменного тока промышленной частоты (50 Гц) ротор (электромагнит с двумя полюсами) должен совершать 50 об/с (3 000 об/мин). Но это не всегда возможно. Чтобы снизить скорость вращения ротора без уменьшения частоты переменного тока, применяют электромагниты с большим количеством полюсов: 4, 6, 8, ... (В схеме генератора на рис. 2.18 б есть 4 полюса). Период колебаний переменного тока в каждом таком случае будет равен времени, необходимому для поворота ротора на  $1/2$ ,  $1/3$ ,  $1/4$  часть окружности. Соответственно скорость вращения ротора будет в 2, 3, 4, ... раза меньше.

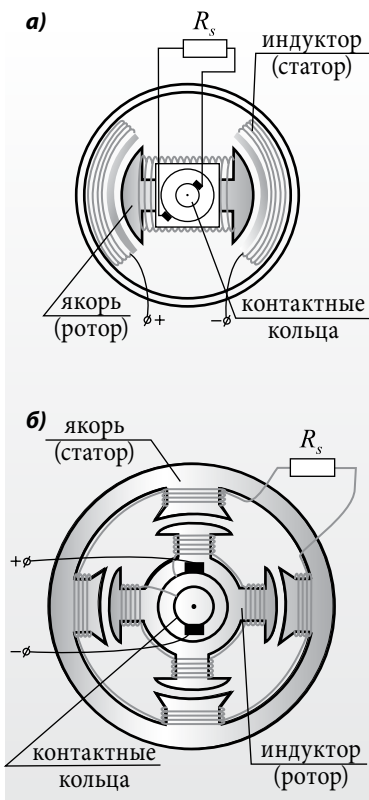


Рис. 2.18

## 6. Коэффициент полезного действия линии электропередачи. Воздействие на живые организмы

Электрическая энергия производится с помощью генераторов на **больших электрических станциях**, расположенных, как правило, вблизи естественных энергетических ресурсов, а потребители находятся на некотором расстоянии от них. Таким образом, использование электрической энергии требует определенных конструкций **линий электропередачи**.

В любой линии электропередачи имеются потери энергии в виде выделяющейся джоулевой теплоты:  $Q = I^2 R t$ . Эти потери могут быть сокращены либо уменьшением сопротивления проводов линии электропередачи, либо уменьшением силы тока. Если длина проводов линии равна  $l$ , а поперечное сечение –  $S$ , то  $R = \rho (2l/S)$  и тепловые потери в двухпроводной линии характеризуются отношением:

$$\Delta P = \frac{Q}{t} = \rho \frac{2l}{S} I^2,$$

где  $\rho$  – удельное сопротивление проводов. Так как длина линии электропередачи определяется расстоянием между потребителем и электростанцией, то сопротивление линии может быть уменьшено только за счет увеличения поперечного сечения проводов, то есть увеличения массы используемого металла. Однако это нерентабельно с экономической и технической точек зрения. Остается единственный способ уменьшения потерь – уменьшение силы тока.

Мощность электрического тока равна произведению силы тока на напряжение и для поддержания постоянной мощности электрического тока в линии электропередачи необходимо увеличить напряжение во столько раз, во сколько раз уменьшается сила тока.

Высокие напряжения, необходимые для передачи электроэнергии, не могут быть получены непосредственно на генераторах переменного тока, да они и не нужны потребителям, использующим много меньшие напряжения. Поэтому важным элементом линии электропередачи является устройство для повышения (понижения) напряжения, называемое **трансформатором**. На *рисунке 2.20* схематически показана высоковольтная линия электропередачи. В каждом отдельном случае напряжение в линии электропередачи определяется передаваемой мощностью и расстоянием, на которое передается электрическая энергия, но всегда это величина порядка сотен тысяч вольт.

Поскольку запросы потребителей различны, то станции понижения напряжения осуществляют

### РАСШИРЬТЕ СВОИ ЗНАНИЯ

*Генератор постоянного тока* отличается от генератора переменного тока наличием коллектора (*рис. 2.19*) вместо колец (*рис. 2.1*). Неподвижные графитовые щетки  $p_1$  и  $p_2$  скользят по двум полукольцам (пластинам) коллектора (*рис. 2.19 а*), соединенным с обмоткой ротора. Через каждые полпериода направление индукционного тока в обмотке вращающегося якоря меняется на обратное, и в то же самое время меняются местами полукольца. Таким образом на щетке  $p_1$  все время поддерживается отрицательный потенциал, а на щетке  $p_2$  – положительный. Коллектор является механическим выпрямителем переменного тока, индуцируемого в якоре, так как во внешней цепи возникает ток постоянного направления. Каждые полпериода значения ЭДС и силы тока на мгновение становятся равными нулю, поэтому такой ток называют *пульсирующим* (*рис. 2.19 а*). Чтобы уменьшить пульсации тока, изготавливают якоря с большим количеством катушек, соединенных с таким же количеством узких пластин коллектора. На *рисунке 2.19 б* показан коллектор с четырьмя пластинами. На графике видно, что пульсации силы тока стали меньше и минимальные значения силы тока отличаются от нуля.

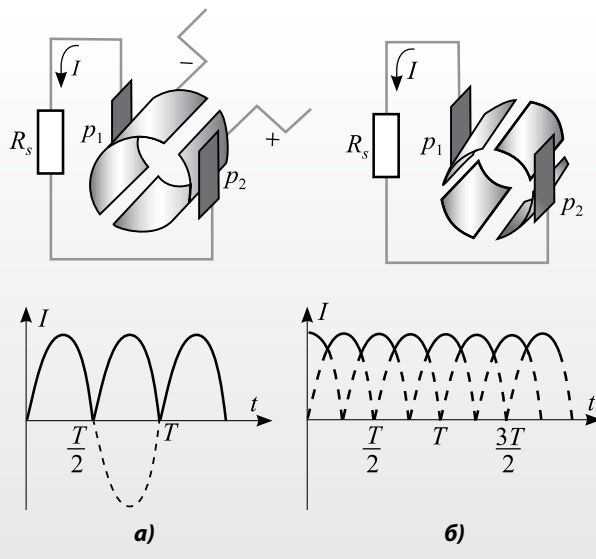


Рис. 2.19



Рис. 2.20

это поэтапно. Так, для крупных потребителей строят линии электропередачи с напряжением порядка десятков тысяч вольт, а рядовые потребители питаются от линий с напряжением 220 В.

Кроме рассмотренных выше технических проблем, необходимо обратить внимание на влияние линий электропередачи на окружающую среду и особенно на живые организмы. Загрязнение окружающей среды: *звуковое загрязнение* (шум, производимый проводами линий электропередачи и трансформаторами, коронным разрядом в линиях высокого напряжения); *электромагнитное загрязнение* (помехи радио и телепередачам, влияние электрических и магнитных полей на живые организмы); *экологическое загрязнение* (отчуждение территорий, вырубка леса и т.д.).

Исследования влияния электрических и магнитных полей на живые организмы начали проводиться сравнительно недавно. Выяснилось, что электрические поля вызывают у человека усталость, слабость, снижение внимания, головокружение и сонливость. В настоящее время считается, что человеку не опасны электрические поля напряженностью до 5 кВ/м. Влияние магнитных полей на живые организмы еще недостаточно изучено, поэтому пока не установлены ни предельно допустимые нормы, ни конкретные эффекты воздействия полей.

## в. Трансформатор

Очень важное практическое применение явление электромагнитной индукции находит в трансформаторе. На *рисунке 2.21* показаны: а) конструкция трансформатора; б) его символическое обозначение в электрических схемах. Самый простой трансформатор состоит из двух катушек с различным числом витков  $N_1$  и  $N_2$ , надетых на один железный сердечник, образующий замкнутый магнитный контур. Цепь, образованная источником питания и одной из катушек трансформатора, называется **первичной**, а цепь, состоящая из второй катушки и потребителя, – **вторичной**. При необходимости на один и тот же сердечник

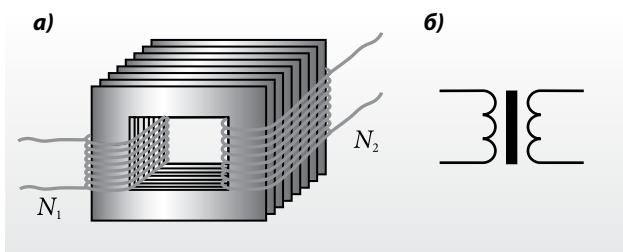


Рис. 2.21

может быть надето несколько катушек. В таких случаях трансформатор имеет одну первичную и несколько вторичных цепей. Если трансформатор не соединен с потребителем, то есть вторичная цепь разомкнута, то говорят, что трансформатор работает в режиме холостого хода.

Допустим, что катушка с количеством витков  $N_1$  подсоединена к источнику переменного напряжения  $u_1$  и трансформатор работает в режиме холостого хода. В первичной цепи появляется ток силой  $i_1$ , который создает переменный магнитный поток  $\Phi = \Phi_m \cos \omega t$ . Этот поток пронизывает витки обеих катушек независимо от наличия железного сердечника. Его роль состоит в увеличении амплитудного значения магнитного потока и в концентрации линий индукции магнитного поля. Таким образом, как катушка в первичной цепи, так и катушка вторичной цепи пронизываются одинаковым магнитным потоком и магнитная связь катушек более эффективна. Согласно закону электромагнитной индукции в первичной и вторичной катушках трансформатора появляются ЭДС самоиндукции  $e_1$  и индукции  $e_2$  соответственно:

$$e_1 = -N_1 \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \quad \text{и} \quad e_2 = -N_2 \frac{\Delta\Phi}{\Delta t},$$

где  $\Delta\Phi$  – это изменение магнитного потока, пересекающего один виток, одинаковое для обеих катушек.

Разделив первое выражение на второе, видим, что отношение ЭДС самоиндукции в первичной катушке к ЭДС индукции во вторичной равно отношению соответствующего числа витков:

$$\frac{e_1}{e_2} = \frac{N_1}{N_2}. \quad (2.45)$$

При работе трансформатора в режиме холостого хода ток через вторичную катушку  $i_2 = 0$ , поэтому ЭДС  $e_2$  равна напряжению  $u_2$  на его зажимах. Через первичную катушку течет малый ток (называемый током холостого хода) силой  $i_1$  и так как сопротивление первичной катушки  $R_1$ , как правило, очень мало, то падение напряжения  $i_1 R_1 = e_1 + u_1 \approx 0$ . Поэтому величина ЭДС  $e_1$  приблизительно равна напряжению питания  $u_1$ , то есть

$$e_1 \approx -u_1. \quad (2.46)$$

Знак «минус» показывает, что ЭДС  $e_1$  и напряжение питания  $u_1$  находятся в противофазе. Используя соотношение (2.45), получаем:

$$\frac{u_1}{u_2} \approx \frac{e_1}{e_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

или для действующих значений:

$$\frac{U_1}{U_2} \approx \frac{\mathcal{E}_1}{\mathcal{E}_2} = \frac{N_1}{N_2} = K. \quad (2.47)$$



Отношение напряжений на зажимах катушек трансформатора в режиме холостого хода называется **коэффициентом трансформации** ( $K$ ).

Если  $K < 1$ , то из (2.47) следует, что  $U_2 > U_1$  и трансформатор называется **повышающим**, а при  $K > 1$  получаем  $U_2 < U_1$  и трансформатор называется **понижающим**. Трансформаторы с коэффициентом  $K \approx 1$  используются для электрического разделения цепей, связь между которыми осуществляется посредством электромагнитной индукции. Обычно такие трансформаторы используются в радиотехнике для согласования цепей.

Если к концам вторичной катушки подсоединен потребитель с сопротивлением  $R_2$ , то во вторичной цепи возникает ток  $i_2$ , который создает изменяющийся магнитный поток  $\Phi_2$ . Этот поток изменяет величину полного магнитного потока в сердечнике трансформатора и примерное равенство (2.46) не выполняется. Поэтому действующее значение силы тока в первичной цепи  $I_1$  возрастает, создавая магнитный поток  $\Phi_1$  через витки первичной катушки, который согласно правилу Ленца находится примерно в противофазе потоку  $\Phi_2$ . Чем меньше сопротивление потребителя  $R_2$  (а сила тока  $I_2$  больше), тем больше сила тока  $I_1$  через первичную цепь. В условиях нормальной работы трансформатора в его сердечнике устанавливается состояние равновесия между магнитными потоками  $\Phi_1$  и  $\Phi_2$ :

$$\Phi_1 \approx \Phi_2. \quad (2.48)$$

В соответствии с (1.21) магнитный поток пропорционален силе тока в катушке и числу витков  $\Phi_1 \sim N_1 I_1$  и  $\Phi_2 \sim N_2 I_2$ . Подставив эти соотношения

в (2.48) для коэффициента трансформации (2.47), получим:

$$\frac{I_2}{I_1} \approx \frac{N_1}{N_2} = \frac{U_1}{U_2} = K. \quad (2.49)$$

Из (2.49) следует, что при  $U_2 \ll U_1$  во вторичной обмотке трансформатора (понижающего) текут очень большие токи. Такие трансформаторы используются в установках для электрической сварки.

Поскольку произведение напряжения на силу тока равно электрической мощности, то из (2.49) следует также, что мощность в первичной цепи примерно равна мощности во вторичной цепи  $P_1 \approx P_2$ . Следовательно, энергия, потребляемая во вторичной цепи, примерно равна энергии, потребляемой из сети первичной катушкой. Очевидно, примерное равенство мощностей первичной и вторичной цепей обусловлено потерями  $\Delta P = P_1 - P_2$  в трансформаторе. Чем они меньше, тем выше его коэффициент полезного действия  $\eta$ :

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_1 - \Delta P}{P_1}.$$

Для уменьшения потерь, описанных выше, при изготовлении трансформаторов предпринимаются определенные меры. Катушки низкого напряжения, по которым текут большие токи, изготавливают из провода большого диаметра, тем самым уменьшаются потери, связанные с выделением джоулевой теплоты. Сердечник трансформатора изготавливают из специального сплава – **электротехнической стали** – в виде тонких, изолированных между собой с помощью лака, пластин.

Действуя в номинальных условиях, трансформаторы имеют очень высокий коэффициент полезного действия, достигающий 98%.

## ➔ Проверьте свои знания

1. Что представляет собой генератор переменного тока? Из каких основных частей он состоит?
2. Как можно получить переменный ток промышленной частоты при медленном вращении ротора?
3. Почему нерентабельно снижение энергетических потерь в линиях электропередачи путем уменьшения сопротивления проводов?
4. Почему передача электроэнергии на большие расстояния осуществляется при больших напряжениях?
5. Из каких основных частей состоит линия передачи энергии электростанции до потребителя?
6. Что такое трансформатор и какова его конструкция? Каков принцип действия трансформатора?
7. Что называется коэффициентом трансформации и как классифицируются трансформаторы в зависимости от его значения?
8. Чему равен коэффициент полезного действия трансформатора?
9. Первичная катушка трансформатора, содержащая 1 000 витков, подключена к источнику питания напряжением 220 В. Определите коэффициент трансформации и число витков вторичной катушки, если напряжение на ее зажимах равно 1,1 кВ.
10. Понижающий трансформатор подсоединен к источнику напряжения 220 В. Чему равна сила тока в первичной цепи, если во вторичной течет ток 22 А при напряжении 36 В?
11. Трансформатор потребляет мощность 45 Вт. Определите силу тока в цепи вторичной катушки, если напряжение на ее зажимах равно 9 В, а коэффициент полезного действия трансформатора равен 95%.

# ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ

## 3.1. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ КОЛЕБАНИЯ

### а. Идеальный колебательный контур

При изучении механических колебаний было установлено, что они сопровождаются непрерывным превращением потенциальной энергии осциллятора в кинетическую энергию и обратно. Как будет показано далее, замкнутый контур, состоящий из конденсатора и катушки, называемый **колебательным контуром**, также является источником колебаний, но сопровождаемых превращениями энергии электрического поля в энергию магнитного поля и обратно. Такие колебания называются **свободными электромагнитными колебаниями**. Отметим, что в действительности колебательный контур обладает определенным электрическим сопротивлением.

Для простоты рассмотрим идеальный колебательный контур, элементы которого имеют пренебрежимо малые сопротивления. Проследим за возникновением в нем электромагнитных колебаний, сравнивая их с возникновением механических колебаний пружинного маятника (рис. 3.1). Если в колебательном контуре конденсатор не заряжен, то система находится в состоянии равновесия.

Пусть в момент времени  $t = 0$  конденсатор емкостью  $C$ , предварительно заряженный до напряжения  $U_m$  так, что его заряд  $q_m = CU_m$ , подключают к зажимам катушки с индуктивностью  $L$ . Таким образом, колебательному контуру передана энергия, равная энергии электрического поля между обкладками конденсатора  $q_m^2/(2C)$ . Это состояние колебательного контура эквивалентно состоянию пружинного маятника, который вывели из положе-

ния равновесия на расстояние  $-x_m$ , то есть сообщили потенциальную энергию  $kx_m^2/2$ , где  $k$  – жесткость пружины (рис. 3.1 а). Одновременно с началом разрядки конденсатора через катушку начинает течь ток, сила которого постепенно увеличивается так же, как в случае пружинного маятника возрастает его скорость. Уменьшение заряда и, соответственно, возрастание тока не происходят мгновенно из-за явления самоиндукции, вызванного изменением со временем тока, текущего через катушку. В самом деле, увеличение силы тока в катушке приводит к изменению со временем магнитного поля. Оно, в свою очередь, создает вихревое электрическое поле и, соответственно, индукционный ток. Этот ток, по правилу Ленца, направлен таким образом, что его магнитный поток препятствует увеличению магнитного потока, его создавшего, поэтому конденсатор не разряжается мгновенно.

В момент времени  $t = T/4$  (рис. 3.1 б) пружинный маятник возвращается в положение равновесия, где скорость максимальна, а потенциальная энергия полностью превращается в кинетическую  $mv_m^2/2$ . Аналогично в этот же момент конденсатор полностью разряжен (заряд на обкладках и напряжение равны нулю), сила тока максимальна  $i = I_m$ , а энергия электрического поля конденсатора полностью превратилась в энергию магнитного поля катушки  $LI_m^2/2$ . Также замечаем, что за промежуток времени от  $T/4$  до  $T/2$  шарик маятника, двигаясь по инерции, сжимает пружину до деформации, равной первоначальной, но с обратным знаком, то есть  $+x_m$ . Соответственно, кинетическая энергия маятника превращается в потенциальную. В колебательном контуре уменьшение силы тока за этот интервал времени ведет к появлению

индукционного тока, а его магнитный поток, согласно правилу Ленца, противодействует уменьшению магнитного потока, его создавшего. Как следствие, благодаря электродвижущей силе самоиндукции  $e_a = -L\Delta i/\Delta t$  на зажимах катушки, конденсатор заряжается зарядом, знак которого противоположен тому, который был первоначально на его пластинах. В момент  $t = T/2$  напряжение в колебательном контуре достигает максимальной отрицательной величины  $-U_m$ , а сила тока  $i = 0$  (рис. 3.1 в).

В интервале времени  $(T/2, T)$ , как в случае пружинного маятника, так и в колебательном контуре, в том же порядке, но в противоположном направлении, происходят явления, которые наблюдались в интервале  $(0, T/2)$ . Начиная с момента  $t = T/2$ , конденсатор разряжается и энергия электрического поля колебательного контура, равная  $q_m^2/(2C)$ , уменьшается. Напряжение и, соответственно, заряд на обкладках конденсатора уменьшаются, а сила тока через катушку увеличивается. В момент  $t = 3T/4$  заряд и напряжение равны нулю, а  $i = -I_m$ , то есть ток максимален, но противоположен по направлению тому, который протекал по контуру в первую четверть периода. Энергия колебательного контура равна энергии магнитного поля  $LI_m^2/2$  (рис. 3 з). После перезарядки конденсатора за интервал времени  $(3T/4, T)$  энергия магнитного поля вновь полностью превращается в энергию электрического поля, и колебательный контур возвращается в первоначальное состояние (рис. 3.1 д), затем повторяется та же последовательность явлений.

Из проведенного анализа следует, что процесс зарядки-разрядки конденсатора является периодическим, а величины, которые его характеризуют, колеблются. Как следует из рисунка 3.1, в колебательном контуре зависимости напряжения  $u$ , и силы тока  $i$  от времени описываются функциями «синус» или «косинус», то есть являются гармоническими функциями. Это позволяет утверждать, что в колебательном контуре так же, как и в случае пружинного маятника, происходят свободные гармонические колебания. Таким образом,

**идеальный колебательный контур является электромагнитным аналогом линейного гармонического осциллятора.**

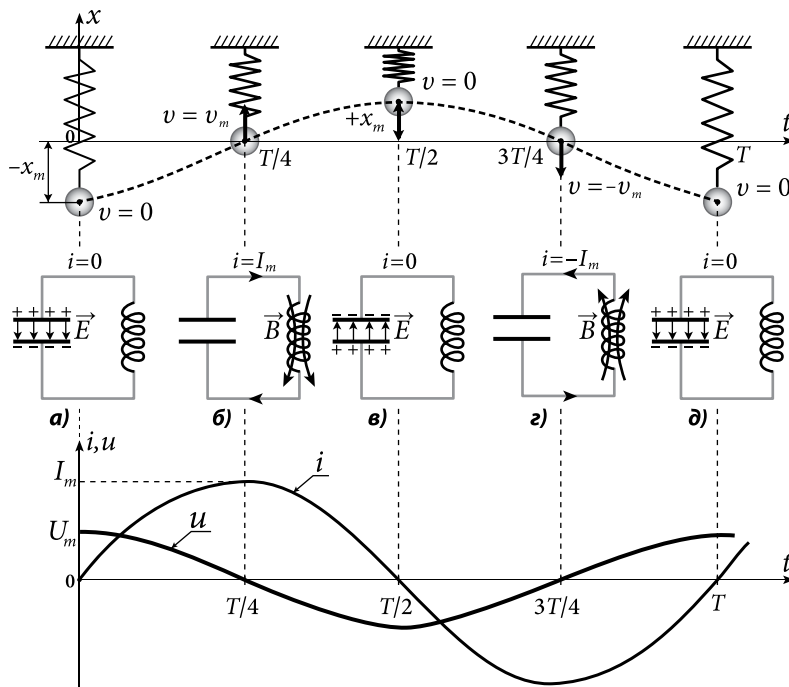


Рис. 3.1

### б.\* Аналогия между механическими и электрическими колебаниями. Период и частота электромагнитных колебаний

Схожесть электромагнитных и механических колебаний заключается в едином характере изменения величин, их описывающих, и объясняется аналогичностью условий, необходимых для их возникновения. Возвращение к положению равновесия пружинного маятника определяется действием силы упругости  $F_x = -kx$ , линейно зависящей от смещения  $x$  из этого положения. В колебательном контуре возвращение в состояние равновесия соответствует процессу разрядки конденсатора, определяемого напряжением  $u = q/C$ , линейно зависящего от заряда  $q$ .

Итак, коэффициенту упругости  $k$  для механических колебаний соответствует величина, обратная емкости конденсатора  $1/C$  для электромагнитных колебаний. Подобно тому, как инертность тела массой  $m$  пружинного маятника препятствует мгновенному возрастанию его скорости, так и электрический ток в колебательном контуре постепенно растет, благодаря явлению самоиндукции в катушке с индуктивностью  $L$ . То есть роль индуктивности  $L$  в электромагнитных колебаниях такова же, что и массы  $m$  в механических. Подобная аналогия может быть установлена и для других физических величин. В таблице 1 представлены механические и электрические физические величины, а также соответствие между ними для изучаемых колебаний.

Таблица 1

Механические колебания		Электромагнитные колебания
Смещение $x = A \cos \omega t$	$\longleftrightarrow$	Заряд $q = q_m \cos \omega t$
Скорость $v = \frac{\Delta x}{\Delta t}$	$\longleftrightarrow$	Сила тока $i = \frac{\Delta q}{\Delta t}$
Ускорение $a = \frac{\Delta v}{\Delta t}$	$\longleftrightarrow$	Скорость изменения силы тока $\frac{\Delta i}{\Delta t}$
Сила $F$	$\longleftrightarrow$	Напряжение $U$
Масса $m$	$\longleftrightarrow$	Индуктивность $L$
Жесткость $k$	$\longleftrightarrow$	Величина, обратная емкости $1/C$
Потенциальная энергия $kx^2/2$	$\longleftrightarrow$	Энергия электрического поля $q^2/(2C)$
Кинетическая энергия $mv^2/2$	$\longleftrightarrow$	Энергия магнитного поля $Li^2/2$

Используя таблицу 1, любое соотношение (полученное при изучении механических колебаний) может быть написано на языке электромагнитных колебаний. Например, формула, выражающая закон сохранения механической энергии линейного гармонического осциллятора,

$$\frac{kA^2}{2} = \frac{mv_m^2}{2} = \frac{kx^2}{2} + \frac{mv^2}{2}$$

для колебательного контура принимает вид:

$$\frac{q_m^2}{2C} = \frac{LI_m^2}{2} = \frac{q^2}{2C} + \frac{Li^2}{2}. \quad (3.1)$$

Поскольку в идеальном колебательном контуре нет потери энергии, то в нем электромагнитные колебания происходят за счет внутренних энергетических превращений и называются **собственными**. Формулу для собственной циклической частоты таких колебаний можно получить теоретически, но проще использовать таблицу 1 и формулу  $\omega = \sqrt{k/m}$  для собственной циклической частоты колебаний пружинного маятника. Таким образом, для собственной частоты электромагнитных колебаний получим:

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}, \quad (3.2)$$

а для величин периода и собственной частоты  $\nu$  соответственно:

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = 2\pi \sqrt{LC} \quad (3.3)$$

и

$$\nu = \frac{1}{T} = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC}}. \quad (3.4)$$

Выражение (3.3) впервые было выведено в 1853 году английским физиком Уильямом Томсоном (1824–1907) и называется **формулой Томсона**.

Собственная частота (период) колебательного контура зависит только от его параметров и при малых значениях емкости и индуктивности могут возникать колебания очень высокой частоты.

### в.\* Затухающие и вынужденные электромагнитные колебания

Изучение идеального колебательного контура показало, что процесс превращения энергии электрического поля конденсатора в энергию магнитного поля катушки и обратно может длиться бесконечно. Поскольку элементы идеального контура не обладают сопротивлением, то нет и джоулевых потерь энергии. Однако в действительности любой колебательный контур имеет определенное сопротивление. Поэтому энергия, первоначально запасенная конденсатором, частично превращается в энергию магнитного поля, а частично, благодаря тепловому действию тока – во внутреннюю, которая выделяется в форме теплоты. После каждого периода заряд на обкладках конденсатора становится меньше, чем был в предыдущий период, значит, амплитуда электромагнитных колебаний уменьшается и по прошествии какого-то времени колебания прекратятся. Такие колебания называются **затухающими** (рис. 3.2). И так,

**в реальном колебательном контуре возможны только затухающие электромагнитные колебания.**

Для поддержания колебаний электрических величин в контуре необходимо компенсировать потери энергии за счет внешнего источника питания. Если эта компенсация происходит периодически, то в контуре устанавливаются колебания тока и напряжения с постоянной амплитудой и частотой, равной частоте источника питания. Колебательному контуру извне передается энергия. Такие колебания называются **вынужденными электромагнитными колебаниями**.

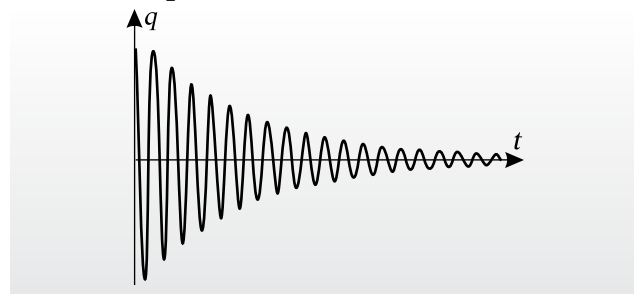


Рис. 3.2

## Пример решения задачи

Сила тока в идеальном колебательном контуре, состоящем из катушки с индуктивностью  $L = 10$  Гн и конденсатора, изменяется со временем по закону  $i = 0,1 \sin 100 \pi t$  (А). Определите: а) период электромагнитных колебаний; б) емкость конденсатора; в) максимальные энергии электрического и магнитного полей.

### Дано:

$L = 10$  Гн,  
 $i = 0,1 \sin 100 \pi t$  (А)

- а)  $T$  – ?;  
б)  $C$  – ?;  
в)  $W_{m,E}$  – ?,  $W_{m,B}$  – ?

### Решение

а) Из сравнения закона изменения силы тока, данного в условии задачи, с общей формой закона  $i = I_m \sin \omega t$  следует, что  $I_m = 0,1$  А и  $\omega = 2\pi\nu = 100\pi$ , частота  $\nu = 50$  Гц, а период  $T = 1/\nu = 0,02$  с.

б) Емкость конденсатора определяется из формулы Томсона (3.3). Получим:

$$C = \frac{T^2}{4\pi^2 L} \approx 10^{-6} \text{ Ф} = 1 \text{ мкФ}.$$

в) Поскольку контур идеальный, то согласно закону сохранения энергии (3.1) максимальные значения энергий электрического и магнитного полей равны:

$$W_{m,E} = \frac{q_m^2}{2C} = \frac{1}{2C} \cdot \frac{I_m^2}{\omega^2} = \frac{I_m^2}{2C} \cdot LC = \frac{LI_m^2}{2} = W_{m,B},$$

подставляя численные значения, получаем:

$$W_{m,E} = W_{m,B} = 0,05 \text{ Дж}.$$

## Проверьте свои знания

1. Что называется колебательным контуром?
2. Какие энергетические превращения возможны в колебательном контуре и что называется электромагнитными колебаниями?
3. Благодаря какому явлению возможна перезарядка конденсатора в колебательном контуре? Опишите процессы, происходящие в контуре и сравните их с процессами, происходящими при колебаниях пружинного маятника.
- 4\*. Какое соответствие наблюдается между физическими величинами, описывающими механические и электромагнитные колебания?
- 5\*. Напишите формулу Томсона для периода собственных электромагнитных колебаний.
- 6\*. Как называются электромагнитные колебания, происходящие в реальном колебательном контуре?
- 7\*. Какие колебания колебательного контура называются вынужденными?
- 8\*. Определите емкость конденсатора идеального колебательного контура, если индуктивность его катушки равна 10 мГн, а период электромагнитных колебаний – 4 мс.
- 9\*. Как и во сколько раз изменится частота электромагнитных колебаний в контуре, если его катушку заменить другой, индуктивностью в 16 раз большей?
- 10\*. Колебательный контур состоит из катушки с индуктивностью  $L = 5$  мГн и плоского воздушного конденсатора, площадь обкладок которого равна  $S = 100$  см<sup>2</sup>. Определите расстояние между обкладками, если период электромагнитных колебаний равен 3 мкс.

## 3.2.\* ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ПОЛЕ

Изученные в предыдущих главах электрические и магнитные явления доказывают существование связи между ними. Так, опыты Эрстеда привели к мысли, что вокруг любого проводника с током существует вихревое магнитное поле (его линии замкнуты). С другой стороны, явление электромагнитной индукции показывает, что изменение индукции магнитного поля приводит к появлению вихревого электрического поля, то есть тоже с замкнутыми линиями, благодаря чему в витках катушек возникает индукционный ток.

Обобщив известные в то время опыты по электричеству и магнетизму, английский физик Д.К. Максвелл разработал теорию **электромагнитного поля и электромагнитных волн**.

Основа этой теории – две очень важные гипотезы. Из открытого Фарадеем закона электромагнитной индукции следует, что из-за изменения индукции магнитного поля в проводящем витке под воздействием вихревого электрического поля появляется индукционный ток (рис. 3.3 а). Максвелл обобщил этот закон, предположив, что электрическое поле возникает и без проводящего витка (рис. 3.3 б), то есть без вещества. Итак,

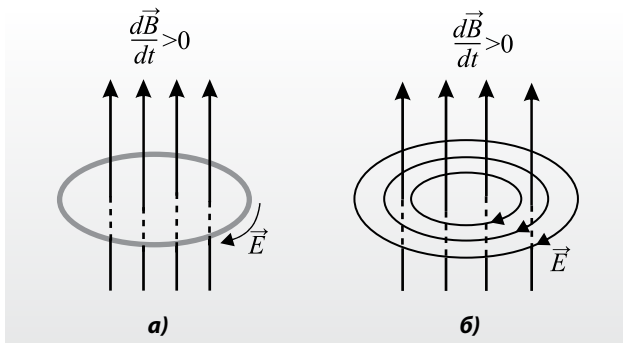


Рис. 3.3

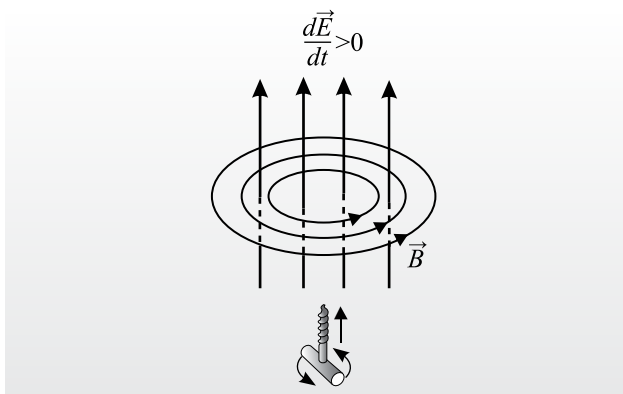


Рис. 3.4



ДЖЕЙМС КЛЕРК  
МАКСВЕЛЛ  
(1831–1879)  
английский физик

Наряду с Ньютоном и Эйнштейном он признан одним из самых выдающихся физиков всех времен. Известен своими работами в различных областях физики: электродинамике, молекулярной физике, статистической физике, оптике, механике, теории упругости. Один из основателей молекулярно-кинетической теории газов. Важнейшие результаты им были получены в электродинамике. В 1860–1865 годах разработал теорию электромагнитного поля, включающую все закономерности электромагнитных явлений. Ввел понятие тока смещения, теоретически доказал существование электромагнитного поля, распространяющегося в пространстве со скоростью света. Выдвинул гипотезу об электромагнитной природе света.

**всякое изменение магнитного поля порождает вихревое электрическое поле (с замкнутыми силовыми линиями).**

Напряженность электрического поля тем больше, чем быстрее изменяется магнитное поле, а направление вектора  $\vec{E}$  определяется по правилу Ленца (рис. 3.3 б).

Проанализировав процесс зарядки-разрядки конденсатора в колебательном контуре, Максвелл выдвинул вторую гипотезу:

**всякое изменение электрического поля порождает вихревое магнитное поле (с замкнутыми линиями).**

Магнитная индукция поля тем больше, чем быстрее изменяется электрическое поле, а направление вектора  $\vec{B}$  определяется по правилу буравчика с правой резьбой (рис. 3.4). Согласно этой гипотезе магнитное поле порождается не только током в проводниках, но и меняющимся электрическим полем, например, между пластинами конденсатора. Следовательно, если в какой-то области пространства есть периодически изменяющееся электрическое поле, то одновременно существует и периодически изменяющееся магнитное поле, так как эти поля не могут существовать раздельно. Вместе они формируют **электромагнитное поле**.

**Электромагнитное поле** – особая форма существования материи. Оно характеризуется вектором напряженности электрического поля  $\vec{E}$  и вектором магнитной индукции  $\vec{B}$ , изменяющихся одновременно во взаимно перпендикулярных плоскостях.

Согласно теории Максвелла постоянные электрические и магнитные поля являются частным случаем единого электромагнитного поля.

### ➔ Проверьте свои знания

1. Какие гипотезы предложил Максвелл? Объясните их смысл.
2. Как определяется направление векторов напряженности электрического поля и магнитной индукции, возникающих при изменении магнитного и, соответственно, электрического полей?
3. Как вы понимаете взаимозависимость электрического и магнитного полей?
4. Что представляет собой электромагнитное поле?

### 3.3. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ВОЛНЫ

#### а.\* Существование электромагнитных волн

Из теории Максвелла для электромагнитного поля и его распространения в пространстве следует несколько важных свойств электромагнитных волн, которые мы сформулируем без доказательства:

**В плоской электромагнитной волне векторы  $\vec{E}$  и  $\vec{B}$  всегда взаимно перпендикулярны:  $\vec{E} \perp \vec{B}$  (рис. 3.5).** Связь между направлениями векторов и скоростью волны находится по правилу буравчика с правой резьбой. Волна распространяется в направлении движения буравчика, если его вращать от вектора  $\vec{E}$  к вектору  $\vec{B}$  (рис. 3.5). Даже если направления векторов  $\vec{E}$  и  $\vec{B}$  непрерывно меняются, электромагнитная волна всё время имеет одно и то же направление распространения.

**Электромагнитные волны поперечны.** Из рисунка 3.5 видно, что векторы  $\vec{E}$  и  $\vec{B}$  перпендикулярны направлению распространения волны и не содержат составляющих, параллельных этому направлению.

**Скорость распространения электромагнитных волн конечна.** Максвелл доказал, что в однородной среде эта скорость находится по формуле

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \epsilon_r \mu_0 \mu_r}}, \quad (3.5)$$

где  $\epsilon_0 = 1/(4\pi \cdot 9 \cdot 10^9) \frac{\Phi}{\text{М}}$  и  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Гн}}{\text{М}}$  – электрическая и магнитная постоянные вакуума, а  $\epsilon_r$  и  $\mu_r$  – относительные электрическая и магнитная проницаемости среды. Из (3.5) следует, что в вакууме электромагнитная волна распространяется со скоростью

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} = \sqrt{\frac{4\pi \cdot 9 \cdot 10^9}{4\pi \cdot 10^{-7}} \frac{\text{М}^2}{\Phi \cdot \text{Гн}}} = 3 \cdot 10^8 \frac{\text{М}}{\text{с}} \equiv c. \quad (3.6)$$

Итак, скорость распространения электромагнитных волн в вакууме равна скорости света. Получив этот результат, Максвелл пришел к выводу о электромагнитной природе света.

Из (3.5) и (3.6) следует, что скорость распространения электромагнитной волны в какой-либо среде равна:

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r \mu_r}}. \quad (3.7)$$

**Электромагнитные волны переносят энергию.** Это энергия электрического и магнитного полей электромагнитной волны и переносится она в направлении распространения волны.

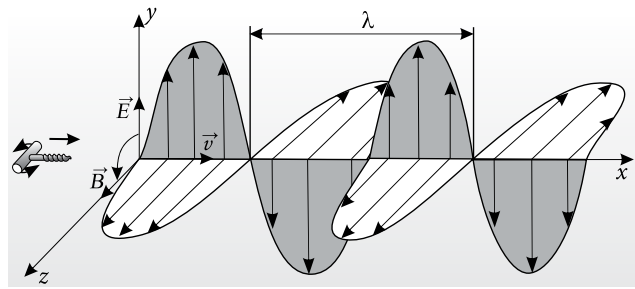


Рис. 3.5

#### б. Распространение электромагнитных волн

Взаимозависимость переменных электрических и магнитных полей обуславливает не только существование электромагнитного поля, но и его основное свойство – распространяться в пространстве со временем. Периодически изменяющееся электрическое поле порождает в окружающем пространстве переменное магнитное поле. Оно, в свою очередь, порождает другое переменное вихревое электрическое поле и т.д. Так процесс изменения электромагнитного поля распространяется в окружающем пространстве.

**Распространяющееся в пространстве переменное электромагнитное поле называется электромагнитной волной.**

**Расстояние, на которое волна распространяется за один период ( $T$ ), называется длиной волны ( $\lambda$ ).**

Если скорость распространения волны равна  $v$ , то

$$\lambda = vT = \frac{v}{\nu}, \quad (3.8)$$

где  $\nu = 1/T$  – частота колебаний. Важно отметить, что скорость распространения электромагнитных волн очень большая. В воздухе она практически равна скорости света в вакууме  $c$ . В таком случае длина волны выражается формулой

$$\lambda = cT = \frac{c}{\nu}. \quad (3.9)$$

Существование электромагнитных волн было экспериментально подтверждено в 1888 году, примерно через 10 лет после смерти Максвелла немецким физиком Г. Герцем (1857–1894).

Для получения электромагнитных волн Герц использовал изобретенный им **вибратор**, состоящий из двух кусков провода, в промежутке между которыми проскакивала электрическая искра и возникало переменное электрическое поле. Вибратор Герца представляет собой **открытый колебательный контур**. В изученном ранее колебательном контуре (рис. 3.6 а) переменные электрическое и магнитное поля не распространялись

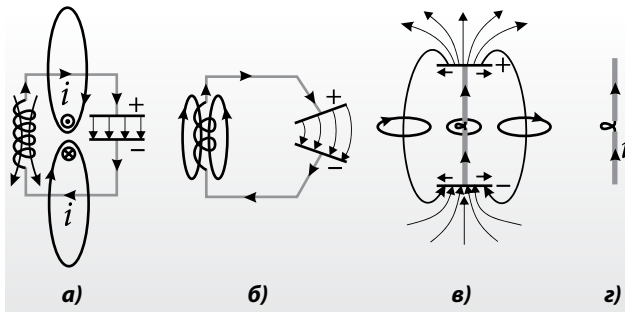


Рис. 3.6

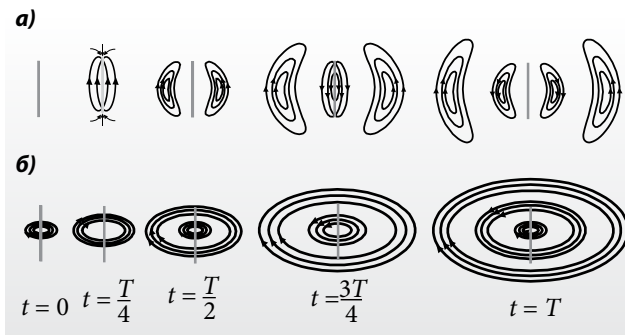


Рис. 3.7

в пространстве, так как они в основном сосредоточены между пластинами конденсатора и внутри катушки. Кроме того, контур представляет собой замкнутую цепь, в которой недалеко от любого участка цепи с током находится участок, в котором ток течет в обратном направлении. Рядом с заряженной пластиной находится такая же, с противоположным по знаку зарядом. В итоге поля почти компенсируются даже вблизи от колебательного контура. Такую цепь называют **закрытым колебательным контуром**. Если же постепенно раздвигать пластины конденсатора, удалять витки катушки, то разноименно заряженные пластины окажутся далеко одна от другой, уменьшится длина участков цепи с противоположно направленными токами и поля расфокусируются в пространстве вокруг колебательного контура (рис. 3.6 б, в). Наконец, получится открытый колебательный контур в виде куска прямого провода – **диполь**,

ток в котором в данный момент времени будет течь в одном направлении вдоль всего проводника (рис. 3.6 з).

Вибратор Герца и есть диполь, в котором оба куска провода подключаются к источнику высокого напряжения. Возникающие при искровом разряде затухающие электрические колебания высокой частоты приводят к испусканию диполем электромагнитных волн.

Диполь – это один из видов **антенны** – устройства, используемого для испускания или приема электромагнитных волн.

Процесс распространения электромагнитного поля вокруг диполя показан отдельно с помощью силовых линий электрического поля (рис. 3.7 а) и линий магнитного поля (рис. 3.7 б) в различные моменты времени в течение одного периода  $T$ . Понятно, что в электромагнитной волне оба рисунка надо совместить.

В момент времени  $t = 0$  ток в диполе максимален и вблизи от него существует только магнитное поле. За первую четверть периода колебаний сила тока в диполе уменьшится до нуля, изменение магнитного поля приведет к появлению вихревого электрического поля. В момент времени  $t = T/4$  напряженность электрического поля максимальна, а во время своего роста оно создало и свое вихревое магнитное поле. Как видно из рисунка 3.7, в этот момент магнитное поле полностью отрывается от диполя и начинает распространяться в пространстве.

В следующую четверть периода напряженность электрического поля, связанного с диполем, уменьшается до нуля, создавая растущее вихревое магнитное поле с направлением, противоположным первоначальному. Это, в свою очередь, приводит к появлению вихревого электрического поля. К моменту времени  $t = T/2$  обе составляющие первого «всплеска» электромагнитного поля покидают диполь. В следующие полпериода процесс повторяется с обратным направлением полей.

### ➔ Проверьте свои знания

- \* Какими свойствами обладают электромагнитные волны согласно теории Максвелла?
- Что называют электромагнитной волной?
- Как связаны между собой длина волны, частота и скорость ее распространения?
- Что собой представляет вибратор Герца? Что такое открытый колебательный контур?
- Как объясняется процесс распространения электромагнитной волны?
- \* Чему равна длина волны, испускаемой открытым колебательным контуром индуктивностью  $0,2 \text{ мГн}$  и емкостью  $5 \text{ нФ}$ ?



### 3.4. ШКАЛА ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН

Обнаруженные в опытах Герца электромагнитные волны принципиально не отличались свойствами от световых, но имели меньшую частоту (большую длину волны).

Впоследствии были получены электромагнитные волны с большими и с меньшими частотами. С точки зрения законов физики нет ограничений на частоту электромагнитных волн, нужен только генератор с соответствующей частотой.

Диапазон электромагнитных волн очень широк, поэтому требует классификации. Чаще всего ее проводят по частоте (длине волн) в вакууме. Шкала электромагнитных волн на *рисунке 3.8* условно разделена на восемь участков, между которыми нет резких границ.

**1. Волны звуковой частоты.** Это волны самой низкой частоты: от нескольких герц до  $2 \cdot 10^4$  Гц (самой большой длины волны:  $\lambda \in [1,5 \cdot 10^4 \text{ м}; \infty]$ ). Источник таких волн – переменный ток соответствующей частоты.

**2. Радиоволны.** Частота от  $2 \cdot 10^4$  Гц до  $10^9$  Гц ( $\lambda \in [0,3 \text{ м}; 1,5 \cdot 10^4 \text{ м}]$ ). Источник радиоволн – переменный ток высокой частоты. Используются для передачи информации (радио, телевидение).

**3. Микроволны.**  $\nu \in [10^9 \text{ Гц}; 3 \cdot 10^{11} \text{ Гц}]$  ( $\lambda \in [1 \text{ мм}; 30 \text{ см}]$ ). Обладают хорошей направленностью, с помощью параболических антенн осуществляется спутниковая связь, радиолокация.

**4. Инфракрасное излучение (ИК).**  $\nu \in [3 \cdot 10^{11} \text{ Гц}; 3,85 \cdot 10^{14} \text{ Гц}]$  ( $\lambda \in [780 \text{ нм}; 1 \text{ мм}]$ ). Чаще всего испускается возбужденными атомами и молекулами нагретого вещества, поэтому называется и **тепловым излучением**. Зависимость свойств излучения от температуры позволяет измерять температуру тел на расстоянии. Например, в медицине с помощью тепловизора можно увидеть больные ткани человека, температура которых выше, чем у здоровых. Для управления телевизорами и дру-

гой бытовой техникой мы применяем пульты с ИК излучателями.

**5. Видимое излучение** занимает узкий участок шкалы:  $\nu \in [3,85 \cdot 10^{14} \text{ Гц}; 7,89 \cdot 10^{14} \text{ Гц}]$  ( $\lambda \in [380 \text{ нм}; 780 \text{ нм}]$ ). Этот воспринимаемый человеческим глазом единственный интервал электромагнитных волн является главным источником информации об окружающем мире. Видимое излучение испускается при переходах атомов с высших на низшие энергетические уровни. Весь видимый спектр разделен на следующие цвета: красный (780–620 нм); оранжевый (620–590 нм); желтый (590–560 нм); зеленый (560–500 нм); голубой (500–480 нм); синий (480–450 нм); фиолетовый (450–380 нм).

**6. Ультрафиолетовое излучение (УФ).**  $\nu \in [8 \cdot 10^{14} \text{ Гц}; 3 \cdot 10^{16} \text{ Гц}]$  ( $\lambda \in [10 \text{ нм}; 380 \text{ нм}]$ ). Испускается при переходе атомов с высших на низшие энергетические уровни (например, при электрических разрядах в газах). Солнце – мощный источник УФ излучения, в значительной степени поглощаемого озоновым слоем в атмосфере Земли. Большие дозы УФ излучения опасны для живых организмов, вызывая ожоги и рак кожи. Малые дозы полезны человеку, они стимулируют некоторые процессы в организме – образование витаминов группы D, создают защитную пигментацию (загар).

**7. Рентгеновское излучение** (Рентген назвал его «икс-лучи»).  $\nu \in [3 \cdot 10^{16} \text{ Гц}; 3 \cdot 10^{20} \text{ Гц}]$  ( $\lambda \in [1 \text{ пм}; 10 \text{ нм}]$ ). Возникает при торможении ускоренных очень высоким напряжением электронов в металлах. Обладает высокой проникающей способностью и поэтому используется при изучении строения кристаллических решеток, в медицине (флюорография, лечение некоторых форм рака) и в других областях.

**8.  $\gamma$ -излучение.**  $\nu > 3 \cdot 10^{20} \text{ Гц}$  ( $\lambda < 1 \text{ пм}$ ). Это излучение самой высокой частоты (и наименьшей длины волны) сопровождает распад ядер, ядерные реакции и т.д. Проникающая способность  $\gamma$ -излучения выше, чем у рентгеновских лучей, поэтому оно опаснее.

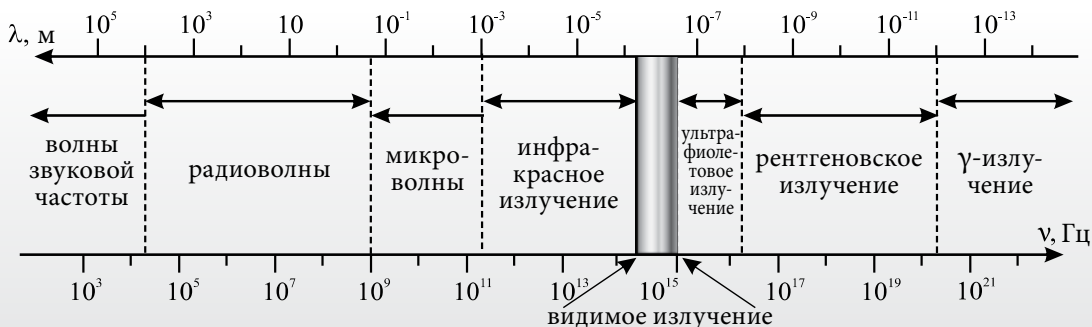


Рис. 3.8

1. На какие участки условно делят шкалу электромагнитных волн?
2. Что является источником излучения электромагнитных волн звуковой частоты, радиоволн, микроволн? Инфракрасного излучения? Как используются эти излучения?
3. Слышит ли человек электромагнитные волны звуковой частоты?
4. На какие участки поделен спектр видимого излучения, и каковы пределы длин волн каждого из них?
5. Что является источником ультрафиолетового, рентгеновского,  $\gamma$ -излучения? Как действует каждое из них на живые ткани?

### 3.5. ПРАКТИЧЕСКИЕ ПРИМЕНЕНИЯ РАДИОВОЛН

Опыты Герца с электромагнитными волнами привели к мысли о возможности использования их для кодирования и передачи информации. Примерно через восемь лет после их открытия с помощью электромагнитных волн провели первую беспроводную связь на расстоянии.

Так, в 1896 году итальянский физик и инженер Гульельмо Маркони (1874–1937) получил патент на изобретение способа передачи сигналов с помощью радиопередатчика и радиоприемника и осуществил эту связь на расстоянии 3 км. Усовершенствовав приемно-передающую аппаратуру, в 1901 году он установил первую беспроводную связь через Атлантический океан. За развитие радиотехники и «создание беспроволочного телеграфа» в 1909 году Г. Маркони получил Нобелевскую премию.

В то же время, независимо от Маркони, приборы для передачи и приема электромагнитных волн были изобретены русским инженером и физиком А.С. Поповым (1859–1906). К сожалению, первая радиопередача, проведенная Поповым на расстоянии 250 м, не была документально зарегистрирована, а свидетельства очевидцев события были противоречивы.

#### а. Принципы радиосвязи

В зависимости от способа кодирования передаваемого сигнала различают несколько типов радиосвязи: **радиотелеграф, радиотелефон и радиовещание, телевидение, радиолокацию.**

Первая приемопередающая аппаратура работала в телеграфном режиме. Кодирование сигналов в этом случае проводилось очень просто: включая и выключая передающую антенну, пере-

давались длинные и короткие сигналы азбуки Морзе (каждой букве, цифре, знаку препинания соответствовал определенный набор коротких и длинных сигналов – точек и тире). Мощность излучения электромагнитных волн быстро растет с увеличением частоты колебаний, поэтому уже в первых радиостанциях использовали высокочастотные колебания – сотни кГц, так как колебания низкой частоты практически не излучались.

Следующий этап развития радиосвязи – передача звуковых и видеосигналов. Эти сигналы накладывают на колебания гораздо более высокой частоты, называемой **несущей частотой**. Такой процесс называют **модуляцией**, он заключается в изменении какой-либо характеристики несущей частоты передаваемым сигналом.

Простейшими являются **амплитудная модуляция (АМ)** – от английского *amplitude modulation*) и **частотная модуляция (FM)** – *frequency modulation*). В первом случае, в соответствии с изменениями передаваемого сигнала, меняется амплитуда колебаний несущей частоты, во втором случае – частота. На *рисунке 3.9* показаны графики колебаний: несущей частоты (*а*); звуковой частоты (*б*); АМ (*в*) и FM (*г*). Принцип передачи звуковых и видеосигналов одинаков, различаются только сложностью устройства по преобразованию сигналов.

В радиоприемнике из модулированных высокочастотных колебаний выделяют колебания низкой (звуковой) частоты.

Процесс выделения колебаний низкой частоты из модулированных колебаний высокой частоты называется **демодуляцией** или **детектированием**, а устройство, реализующее этот процесс – **детектором**.

Для качественного приема радиосигналов различной мощности в радиоприемниках имеются чувствительные усилители.

В зависимости от особенностей устройств, используемых для передачи и приема радиоволн, а также свойств самих волн, их разделили условно на несколько диапазонов: **длинные** волны ( $\lambda > 1$  км); **средние** ( $100 \text{ м} < \lambda < 1$  км); **короткие** ( $10 \text{ м} < \lambda < 100 \text{ м}$ ) и **ультракороткие** ( $\lambda < 10 \text{ м}$ ).

## б. Радиолокация

Свойство отражения электромагнитных волн применяется для обнаружения различных объектов в пространстве.

**Определение положения тела в пространстве с помощью электромагнитных волн называется радиолокацией, а устройство, используемое для этой цели, – радаром или радиолокатором.**

Радар состоит из генератора электромагнитных волн, приемника и остронаправленной антенны, излучающей очень короткие импульсы волн, разделенные кратковременными паузами. Острую направленность сигнала получают, например, помещая антенну в фокус вогнутого металлического зеркала. Во время пауз радар работает в режиме приема, регистрируя отраженные от препятствий радиоволны. Зная интервал времени  $t$  от момента посылки сигнала до приема отраженного сигнала и скорость распространения электромагнитной волны  $c$  (она же и скорость света в вакууме), можно легко найти расстояние  $d$  до препятствия. Действительно, так как путь радиоволн от радара до препятствия и обратно  $2d = ct$ , то расстояние

$$d = \frac{ct}{2}.$$

Так как из электромагнитных волн сверхвысоких частот легко сформировать узкий пучок и они хорошо отражаются от небольших тел, то в радиолокации используют волны с частотами  $\nu \in [10^8; 10^{11}]$  Гц.

Для увеличения поля обзора, антенны могут вращаться в горизонтальной и вертикальной плоскости. Дальность действия радиолокационных станций – до нескольких сотен километров.

С помощью современных локаторов можно определить скорость, размеры, форму объекта. Для навигационных целей они установлены на кораблях и самолетах, а также в аэропортах для обеспечения безопасных полетов, взлета, посадки

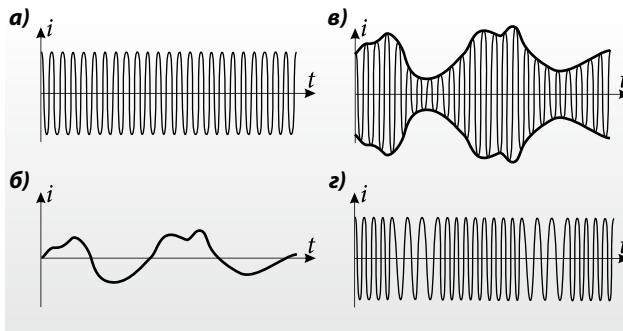


Рис. 3.9

## РАСШИРЬТЕ СВОИ ЗНАНИЯ

Демодуляция осуществляется полупроводниковым диодом или другим устройством с односторонней проводимостью (транзистором, вакуумным диодом или триодом). Рассмотрим этот процесс на примере простейшего радиоприемника (рис. 3.10 а). Высокочастотные модулированные сигналы (рис. 3.9 в) создают в цепи антенна–катушка–заземление высокочастотные колебания. Благодаря резонансу в колебательном контуре LC высокочастотные колебания только одной избранной нами частоты достигнут максимального значения и создадут в диоде D заметный выпрямленный пульсирующий с высокой частотой ток (рис. 3.10 б), амплитуда которого меняется со звуковой частотой. Следующий этап демодуляции – сглаживание высокочастотных пульсаций. Простейшим сглаживающим фильтром служит подключенный параллельно нагрузке – телефонным наушникам – конденсатор  $C_1$ , через который протекает высокочастотная составляющая пульсаций. Через катушки телефонов протекает ток, величина которого меняется со звуковой частотой. Другими словами, это происходит так: ток, проходящий первую половину периода в прямом направлении через диод, делится на две составляющие – ток  $i_1$ , проходит через телефоны, а ток  $i_2$

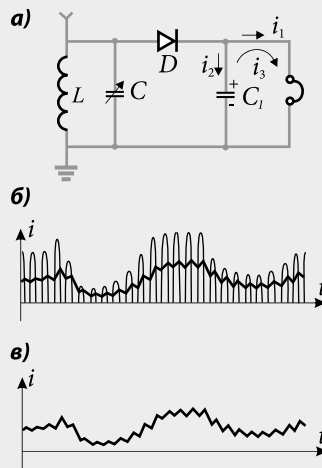


Рис. 3.10

подзаряжает конденсатор  $C_1$ . Вторую половину периода ток через диод падает до нуля, конденсатор разряжается через телефоны током  $i_3$ , совпадающим по направлению с током  $i_1$  (рис. 3.10 а). В итоге через наушники протекает ток звуковой частоты (рис. 3.10 в), амплитуда которого меняется почти так же, как и в передатчике. Небольшие пульсации высокой частоты почти не влияют на качество звука.

самолетов в любую погоду и время суток. Для обеспечения безопасности дорожного движения радаром проверяют скорость автомобилей.

Радары используются в метеорологии – с их помощью определяют количество, положение и скорость облаков, что важно для предсказания погоды.

Радиолокаторы устанавливают и на космических кораблях, с их помощью изучают астеро-

иды, метеориты, ближайшие к Земле планеты. **Радиоастрономия** изучает космические тела с помощью испускаемых ими радиоволн, используя приемные устройства, схожие с радиолокаторами – **радиотелескопы**. С их помощью узнали много нового о известных космических телах, а также исследовали объекты, недоступные оптическим телескопам, что способствует изучению строения и эволюции Вселенной.

### ➔ Проверьте свои знания

1. Какие типы радиосвязи вы знаете? Что такое радиотелеграф?
2. Что такое модуляция сигналов и в чем разница между АМ и FM модуляцией?
3. Что называют демодуляцией и как ее осуществляют?
4. Что такое радиолокация? Радар?
5. Как с помощью радара определяется расстояние до предмета?
6. Где применяют радиолокаторы? Что такое радиоастрономия?

## 3.6. РАЗВИТИЕ ВЗГЛЯДОВ НА ПРИРОДУ СВЕТА

Первые представления о теории света возникли в древности. В VI веке до н.э. Пифагор и его ученики предполагали, что из глаз человека выходит нечто невидимое, способное «ощупать» исследуемый предмет и предмет становится видимым. Демокрит (IV век до н.э.) объяснял зрительные ощущения действием на сетчатку глаза испущенных светящимися телами атомов. Аристотель в IV веке до н.э. считал, что свет представляет собой особые «зрительные лучи», выходящие из глаз. Наконец, к концу XVII века, под сильным влиянием механических взглядов, сложились две теории природы света: **корпускулярная**, разработанная Ньютоном, и **волновая**, сформулированная Гюйгенсом (1629–1695).

Корпускулярная теория опиралась на подтвержденное опытом прямолинейное распространение света в однородной среде. Согласно этой теории **свет представляет собой поток частиц (световых корпускул), испускаемых или отражаемых телами и распространяющихся с огромной скоростью вдоль прямых линий согласно законам классической механики**. Предполагалось, что существуют световые частицы (корпускулы) различных размеров и масс. Самые

крупные считались частицами темно-красного цвета, а самые маленькие – фиолетового. Согласно учению Ньютона солнечный свет представляет собой смесь различных частиц. На границе двух различных сред направление распространения частиц менялось тем сильнее, чем меньше были размеры и масса частиц.

Волновая теория света была предложена современником Ньютона голландским физиком Гюйгенсом. Согласно этой теории **свет – это волновой процесс, распространяющийся в некоей гипотетической среде, заполнившей всё пространство и проникшей во все тела**. Гюйгенс не считал световые волны периодическими, не использовал для них понятие *длины волны*. Он полагал, что свет распространяется прямолинейно даже через очень маленькое отверстие, то есть исключал возможность явления дифракции.

Впечатляющие успехи в механике привели к механическому пониманию природы света обеими теориями. Теории находились в противоречии, и только благодаря огромному авторитету Ньютона в научном мире, приоритет был отдан корпускулярной теории, главенствовавшей на протяжении всего XVIII века.

В начале XIX века усилились дискуссии относительно волновой и корпускулярной теории света. Результаты исследований Т. Юнга (1773–1829) и

А.Ж. Френеля (1788–1827) опровергли корпускулярную теорию и создали основу **волновой оптики**.

Исследования оптических явлений с начала XIX века, особенно результаты, полученные Юнгом и Френелем, не только подтвердили волновую природу света, но и показали, что световые волны не обладают упругими свойствами. Таким образом, эпоха «механической» оптики закончилась.

Во второй половине XIX века знаменитый английский физик Джеймс Клерк Максвелл разработал теорию электромагнитного поля, теоретически доказав существование в природе электромагнитных волн и сформулировал очень важный вывод:

**свет имеет электромагнитную природу и распространяется в пространстве в виде электромагнитных волн.**

Свет представляет собой электромагнитные волны с длиной волны (частотой), занимающей очень узкий участок, – от  $7,8 \cdot 10^{-7}$  м ( $4 \cdot 10^{14}$  Гц) для красного цвета до  $3,9 \cdot 10^{-7}$  м ( $7,7 \cdot 10^{14}$  Гц) для фиолетового цвета, – называемого **видимым** участком. Кроме того, оптика изучает участки, примыкающие к видимому. От  $7,8 \cdot 10^{-7}$  м ( $4 \cdot 10^{14}$  Гц) до  $10^{-3}$  м ( $3 \cdot 10^{11}$  Гц) – **инфракрасный** участок, а между  $3,9 \cdot 10^{-7}$  м ( $7,7 \cdot 10^{14}$  Гц) и  $6 \cdot 10^{-10}$  м ( $5 \cdot 10^{17}$  Гц) – **ультрафиолетовый**.

Разработанная Максвеллом электромагнитная теория света была подтверждена в 1887–1888 годах немецким физиком Г. Герцем, доказавшим на опыте существование электромагнитных волн. Были подтверждены и другие выводы теории Максвелла. К примеру, русский физик П. Лебедев в 1899 году экспериментально обнаружил давление света на освещаемые тела.

## ➔ Проверьте свои знания

1. Какие представления о природе света были у ученых античной Греции?
2. Что представляет собой свет согласно представлениям Ньютона?
3. Как трактуется свет по волновой теории Гюйгенса?
4. К какому выводу пришел Максвелл относительно природы света?
5. Какой интервал длин волн и частот занимает видимый свет, инфракрасное и ультрафиолетовое излучение?
6. Какие опыты подтверждают электромагнитную теорию Максвелла?

## 3.7. ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ СВЕТА

### Вспоминаем

При распространении света (то есть электромагнитных волн) в определенных условиях наблюдаются те же явления, что и при распространении упругих волн, изученных в X классе: интерференция и дифракция. Рассмотрим явление интерференции света, вспомнив вначале условия ее возникновения в случае механических волн.

**Волны одинаковой частоты и с постоянной во времени разностью фаз называются когерентными волнами.**

При сложении когерентных волн их энергия перераспределяется так, что формируются

максимумы и минимумы амплитуд волн. Если разность хода  $\Delta x$  двух волн при их сложении содержит четное число полуволен:

$$\Delta x = \pm 2m \cdot \frac{\lambda}{2}, \quad (3.10)$$

где  $m = 0, 1, 2, \dots$ , то в точке сложения волны находятся в одной фазе и наблюдается интерференционный максимум, а если

$$\Delta x = \pm (2m + 1) \cdot \frac{\lambda}{2}, \quad (3.11)$$

то волны находятся в противофазе и наблюдается интерференционный минимум. Целое число  $m$  – порядок интерференционного максимума или минимума.

## а. Когерентность световых волн. Условия наблюдения интерференции света

Благодаря низкой частоте механических волн сравнительно легко изготовить два источника когерентных волн. Намного сложнее добиться этого в случае световых волн.

Чтобы понять, как можно получить когерентные световые волны, рассмотрим сначала процесс излучения света. Источники света, в том числе и точечные, состоят из огромного количества атомов. У части атомов, получивших энергию извне, есть ее избыток. Такое состояние атома называют **возбужденным**, оно нестабильно. В определенный момент возбужденный атом испускает световую волну, называемую **волновым пучком**. Этот переход атома в состояние с минимальной энергией, называемое **основным состоянием**, длится примерно  $10^{-8}$  с. Затем другой возбужденный атом испускает волновой пучок с другой фазой и т.д. Атомы в основном состоянии, получив энергию, к примеру, от источника электрического тока, снова переходят в возбужденное состояние и повторяют процесс испускания световых волн. Фазы световых волн, пришедшие в некоторую точку среды от различных атомов, различны. Различны фазы волн, попавших в эту точку и от других источников волн.

Разность фаз непрерывно меняется, волны не когерентны. Невозможно получить интерференционную картину от двух источников света, хотя бы и идентичных. Из сказанного следует:

световые волны могут быть когерентными, если они исходят от одной группы атомов, принадлежащей одному источнику.

Это условие можно выполнить, если волновые пучки от какой-либо группы атомов разделить на два пучка, которые, пройдя различные пути до какой-то точки, будут там складываться с какой-то постоянной во времени разностью фаз. Для этого надо реализовать еще одно условие: время, называемое **временем когерентности**  $\tau_k$ , за которое волновой пучок проходит разность хода, должно быть меньше времени его излучения, то есть  $\tau_k \leq 10^{-8}$  с. В противном случае в исследуемой точке сложатся волны, принадлежащие разным пучкам, разность фаз не будет постоянной во времени. Хотя время когерентности очень мало, это условие выполняется благодаря огромной скорости распространения света и, как правило, малой

разности хода волн. За время когерентности  $\tau_k$  волновой пучок распространяется примерно на расстояние  $l_k \approx c\tau_k \approx 3 \cdot 10^8 \cdot 10^{-8} \approx 3$  м, называемое **длиной когерентности**. Интерференция света возникает, если разность хода волн меньше длины когерентности.

Условия (3.10) и (3.11) образования интерференционных максимумов и минимумов механических волн справедливы и для световых волн. Скорость света в некоторой среде в  $n$  раз меньше, чем в вакууме ( $n$  – показатель преломления среды). В результате, за одно и то же время в среде свет распространяется на расстояние  $x$ , а в вакууме – на расстояние в  $n$  раз больше.

**Произведение пройденного световой волной пути в прозрачной среде, то есть геометрической длины пути  $x$ , и абсолютного показателя преломления этой среды  $n$  называется оптической длиной пути:**

$$L = nx.$$

В вакууме  $n = 1$ , оптическая длина пути совпадает с геометрической. В прозрачных средах условия образования интерференционных максимумов и минимумов света (3.10) и (3.11) тоже выполняются, но **разность хода  $\Delta x$  заменяется на оптическую разность хода  $\Delta$** . Условие формирования интерференционных максимумов примет вид:

$$\Delta = \pm 2m \cdot \frac{\lambda}{2}, \quad (3.12)$$

а минимумов:

$$\Delta = \pm (2m + 1) \cdot \frac{\lambda}{2}, \quad (3.13)$$

где целое число  $m$  называется **порядком** интерференционного максимума или минимума,  $\lambda$  – длина световой волны, а оптическая разность хода волн вычисляется по формуле:

$$\Delta = L_2 - L_1 = n_2 x_2 - n_1 x_1. \quad (3.14)$$

Для двух сред с показателями преломления  $n_1$  и  $n_2 > n_1$  говорят, что первая – **менее плотная с оптической точки зрения**, а вторая – **более плотная с оптической точки зрения**.

Явление интерференции света изучалось еще во времена Ньютона, но ее правильное объяснение дал Т. Юнг (1773–1829) в 1802 году. Понимание механизма образования когерентных волн позволило сконструировать много устройств для

наблюдения интерференции, принцип действия основных из них приведен ниже.

### б.\* Установка Юнга

На *рис. 3.11 а* показана схема установки, использованной Юнгом, для получения когерентных световых волн и их интерференции. Мощный пучок света от источника  $S_0$  проходит сквозь фильтр  $F$ , пропускающий свет только определенной частоты, то есть **монохроматический**, и попадает на экран  $E_1$  с малым отверстием  $S$ . От точечного источника  $S$  распространяются сферические волны, фронт волны которых достигает экрана  $E_2$  с двумя отверстиями  $S_1$  и  $S_2$  как можно меньшего диаметра, расположенных на очень малом расстоянии одно от другого и симметрично относительно отверстия  $S$ . Отверстия  $S_1$  и  $S_2$  играют роль вторичных источников света с одинаковыми частотами и фазой, то есть когерентных. Когерентные волны от  $S_1$  и  $S_2$  попадают на экран  $E_3$ , параллельный экрану  $E_2$ , и формируют там максимумы и минимумы – светлые и темные полосы монохроматического света (*рис. 1* на цветной вкладке, с. 162). Интерференция возникает в любой точке пространства после экрана  $E_2$ , где складываются когерентные волны. Поэтому говорят, что возникла **интерференция с полосами, нелокализованными в пространстве**.

Определим положение светлых и темных полос в опыте Юнга по *рисунку 3.11 б*. Будем считать источники света  $S_1$  и  $S_2$ , находящиеся на расстоянии  $d$  один от другого, когерентными. На расстоянии  $D \gg d$  находится экран, середина которого – точка  $O$  и середина отрезка  $d$  – точка  $O'$  находятся на перпендикуляре к плоскости экрана и отрезку  $d$ . Интерференционная картина будет симметрична относительно этого перпендикуляра. На *рисунке 3.11 б* представлена также и зависимость интенсивности света (световой энергии)  $I$  на экране от величины расстояния  $y$  до его центра.

Результат интерференции в точке  $P$  (или  $P'$ ) зависит от разности хода  $\Delta = L_2 - L_1 = S_2M$  (*рис. 3.11 б*). Из  $\Delta S_1S_2M$  и  $\Delta O'O'P$  имеем соответственно:  $\sin \alpha = \Delta/d$  и  $\operatorname{tg} \alpha = y_m/D$ , где  $y_m$  – координата точки  $P$ . Так как  $D \gg d$ , то угол  $\alpha$  мал и  $\sin \alpha \approx \operatorname{tg} \alpha$ . Поэтому  $\frac{\Delta}{d} = \frac{y_m}{D}$ , откуда

$$\Delta = \frac{y_m d}{D} \quad \text{или} \quad y_m = \frac{D}{d} \Delta. \quad (3.15)$$

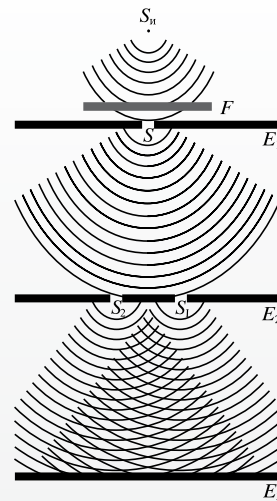
Если в точке  $P(P')$  выполняется условие интерференционного максимума, то, подставив (3.12) в (3.15), получим его координату:

$$y_m^{\max} = \pm \frac{mD\lambda}{d}, \quad (3.16)$$

а если удовлетворяется условие минимума, то из (3.13) и (3.15) получим:

$$y_m^{\min} = \pm (2m+1) \frac{D\lambda}{2d}. \quad (3.17)$$

а)



б)

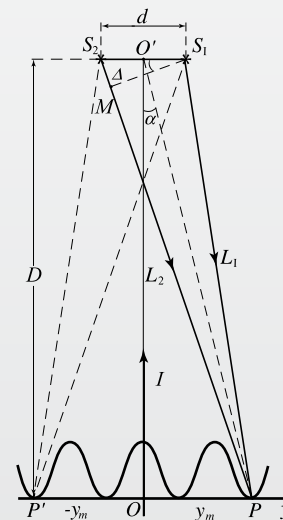


Рис. 3.11

Из (3.16) и (3.17) видно, что при  $m = 0$  в точке  $O$  образуется максимум, называемый **центральный максимумом**, и два минимума, расположенные симметрично по обе стороны от него. При  $m = 1$  образуются два максимума, называемые **максимумами первого порядка**, и два минимума, расположенные симметрично относительно одной и той же точки  $O$ , при  $m = 2$  – два **максимума второго порядка** и так далее. Эти минимумы и максимумы образуют темные и светлые интерференционные полосы (см. рис. 1 на цветной вкладке, с. 162).

**Расстояние ( $i$ ) между двумя темными или светлыми соседними полосами согласно (3.16) и (3.17) равно:**

$$i = y_{m+1}^{\max} - y_m^{\max} = \frac{D\lambda}{d}. \quad (3.18)$$

Для некоторой длины волны  $\lambda$  расстояние  $i$  тем больше, чем меньше расстояние  $d$  между источниками  $S_1$  и  $S_2$  и чем больше расстояние  $D$  от них до экрана, и при этом не зависит от порядка  $m$  (рис. 1 на цветной вкладке, с. 162). Зная расстояние между соседними полосами  $i$  из (3.18), легко найти длину световой волны:

$$\lambda = \frac{d}{D}i. \quad (3.19)$$

Без фильтра  $F$  (рис. 3.11 а) в установке Юнга можно наблюдать и интерференцию в белом (сложном) свете. Так как координаты максимумов (3.16) прямо пропорциональны длине волны, то максимумы, соответствующие разным монохроматическим излучениям не складываются, а располагаются рядом по мере возрастания длины волны. За исключением центрального, остальные интерференционные полосы окрашены – возникает **интерференционный спектр**. Центральный максимум, при  $m = 0$ , в результате сложения всех излучений окрашивается в белый цвет. По обе стороны от центрального максимума сначала формируется максимум фиолетового цвета, затем, в известном порядке, максимумы остальных цветов.

### в.\* Плоскопараллельная пластинка

Явления интерференции света возникают и при частичном отражении и преломлении света

на тонких прозрачных пленках (пластинках). При отражении от обеих поверхностей пленки образуются волны от одного и того же источника. Они когерентны и интерferируют. Такие ситуации возникают в случаях постоянной и переменной толщины пластины.

Пусть имеется тонкая плоскопараллельная пластинка толщиной  $d$  с показателем преломления  $n$ . Плоская монохроматическая волна, представленная лучом  $I$ , падающим на переднюю поверхность пластинки под углом  $i$ , частично отражается (луч  $I'$ ) и частично преломляется (рис. 3.12 а). Преломленный луч достигает нижней поверхности, опять частично преломляется (луч  $I''$ ) и отражается и так далее. В результате повторяющихся отражений и преломлений на двух параллельных поверхностях пластинки возникнут параллельные лучи  $I', 2'$  над пластинкой,  $I'', 2''$  – под пластинкой. Следующие за ними лучи, получившиеся в результате отражений и преломлений, будут очень слабой интенсивности и ими можно пренебречь. Даже лучи  $I''$  и  $2''$  имеют интенсивность намного меньше, чем интенсивность лучей  $I'$  и  $2'$ , и их можно наблюдать только при очень малых толщинах пластинки. Эти лучи будут когерентны, так как исходят из одного и того же источника, а поскольку они проходят разные расстояния, то обладают определенной оптической разностью хода  $\Delta$ . Необходимые для интерференции условия выполняются, но соответствующая картина не наблюдается, потому что лучи параллельны. Интерференционную картину можно локализовать с помощью собирающей линзы, поместив экран в ее фокальной плоскости (рис. 3.12 а). В таких случаях имеет место **интерференция, локализованная в пространстве**.

Результат интерференции в какой-либо точке экрана зависит от оптической разности хода складывающихся волн. Рассчитаем оптическую разность хода в простейшем случае, когда световая волна падает на поверхность пластинки нормально. Из рисунка 3.12 б следует, что

$$\Delta = (AB + BA) \cdot n - \left(-\frac{\lambda}{2}\right) = 2dn + \frac{\lambda}{2}, \quad (3.20)$$

где  $\lambda/2$  вводится из-за отражения луча  $I'$  от оптически более плотной среды. В этом случае отраженная волна будет в противофазе падающей



волне, что приводит к уменьшению оптической длины пути на полволны.

Если свет падает на пластинку под углом  $i$  (рис. 3.12 а), то для оптической разности хода можно получить

$$\Delta = 2d\sqrt{n^2 - \sin^2 i} + \frac{\lambda}{2}, \quad (3.21)$$

которая при  $i = 0$  переходит в (3.20).

Таким образом, на экране  $E$  (рис. 3.12 а) получатся светлые полосы при выполнении условия:

$$2d\sqrt{n^2 - \sin^2 i} + \frac{\lambda}{2} = \pm 2m\frac{\lambda}{2}, \quad (3.22)$$

и темные полосы, когда:

$$2d\sqrt{n^2 - \sin^2 i} + \frac{\lambda}{2} = \pm(2m + 1)\frac{\lambda}{2}. \quad (3.23)$$

Так как для каждого определенного угла падения (наклона) получается своя определенная интерференционная картина, то ее интерференционные полосы называются **полосами равного наклона**.

Если пластинка освещена белым светом (содержащим весь диапазон длин волн видимого света), то для определенного угла падения оптическая разность хода (3.21) удовлетворяет условию максимумов (3.22) только для одного значения длины волны. Для наблюдателя пластинка будет казаться одного какого-то цвета, но при изменении угла падения условие максимума выполнится для другой длины волны и пластинка уже будет казаться окрашенной в другой цвет.

### г.\* Кольца Ньютона

Первые экспериментальные исследования интерференции света были выполнены Ньютоном с помощью устройства, схема которого дана на рисунке 3.13. Плоско-выпуклая линза расположена выпуклой стороной на плоскую поверхность стеклянной пластинки. Если радиус кривизны  $R$  линзы велик, то между линзой и стеклянной пластинкой образуется **воздушный клин** переменной толщины. При освещении полученного устройства нормально падающим монохроматическим пучком света лучи, отраженные от верхней и нижней поверхностей раздела воздух–стекло, дают интерференционную картину. Поскольку точки, которым соответствует одна и та же толщина воздушного клина, расположены на концентрических окружностях с центром в точке  $C$  касания линзы и пластинки (рис. 3.13), светлые и темные полосы имеют форму концентрических колец, называемых **кольцами Ньютона**.

Рассчитаем радиусы колец Ньютона в отраженном свете с помощью рисунка 3.13. Предположим, что кольцо порядка  $m$  образуется

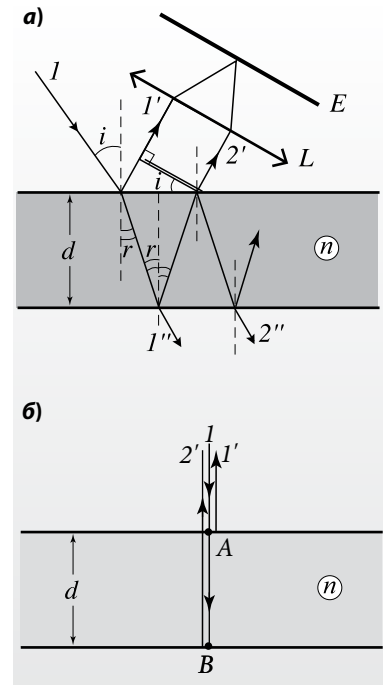


Рис. 3.12

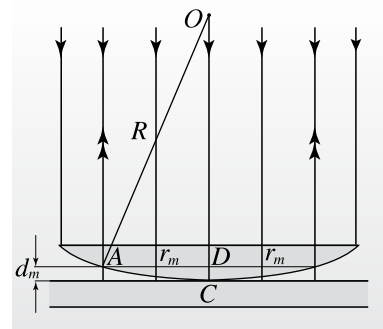


Рис. 3.13

на расстоянии  $r_m$  от точки  $C$ , где толщина воздушного клина  $d_m \ll R$ . Из прямоугольного треугольника  $ODA$  имеем:

$$r_m^2 = R^2 - (R - d_m)^2 = 2Rd_m - d_m^2 \approx 2Rd_m,$$

откуда

$$r_m = \sqrt{2Rd_m}. \quad (3.24)$$

Там, где толщина воздушного клина равна  $d_m$ , оптическая разность хода находится по формуле (3.20) с учетом того, что  $n \approx 1$  (для воздуха). Если разность хода содержит четное число полуволн, то есть

$$2d_m + \frac{\lambda}{2} = 2m \frac{\lambda}{2},$$

то кольцо светлое. Если же выполняется условие минимума интерференции

$$2d_m + \frac{\lambda}{2} = (2m + 1) \frac{\lambda}{2},$$

то кольцо темное. Найдя из этих условий толщину воздушного клина  $d_m$  для радиуса светлого кольца, из (3.24) получим:

$$r_m^{\max} = \sqrt{\left(m - \frac{1}{2}\right) R \lambda}, \quad (3.25)$$

а для темного кольца:

$$r_m^{\min} = \sqrt{m R \lambda}. \quad (3.26)$$

Видно, что радиус первого светлого кольца  $r_1^{\max} = \sqrt{R\lambda/2}$ , а в центре колец образуется темное пятно. С ростом числа  $m$  радиусы соседних колец медленно увеличиваются, то есть расстояние между кольцами уменьшается.

Эти особенности хорошо видны на рисунке II (см. цветную вкладку, с. 162). Так как  $r_m \sim \sqrt{\lambda}$ , у колец Ньютона красного цвета (рис. II б на цветной вкладке) радиусы больше, чем у соответствующих зеленого цвета (рис. II а на цветной вкладке). Если установка освещается белым светом, кольца окажутся окрашенными: внутренняя часть каждого кольца будет фиолетовой, а наружная – красной. Наблюдаемая окраска будет сложной из-за наложения спектров разного порядка.

#### д. Применения интерференции света

Явление интерференции света широко применяется в технике и науке. Интерференция используется для измерений с большой точностью длин, толщин, удлинений (при тепловом расширении), показателей преломления и др. С этой целью были сконструированы **интерферометры**, а вся система методов измерений называется **интерферометрией**. С помощью интерферометра Майкельсона была определена длина эталона – метра, выраженная в длинах волн излучения криптона. Интерферометры часто используются для оптического контроля качества обработки поверхностей, точного измерения углов, температурных коэффициентов расширения, сохранения различных эталонов размеров, контролируемых методами интерферометрии и т.д. В научных исследованиях интерферометрия используется при изучении структуры атомов, атомных ядер, для анализа различных физических процессов внутри тел.

Одним из самых важных применений интерференции в тонких пленках является **просветление оптики**. Известно, что в объективах и окулярах оптических устройств, состоящих из нескольких линз, свет отражается от поверхностей линз, что приводит к ухудшению качества изображения. Чтобы избежать этого, поверхности линз покрываются тонкой прозрачной пленкой с такой толщиной и показателем преломления, что отраженные от обеих поверхностей световые волны, будучи в противофазе, «гасят» друг друга. В результате интерференции энергия волн не исчезает, а только перераспределяется в пространстве, и наличие интерференционного минимума в отраженном свете приводит к появлению интерференционного максимума в проходящем свете. Так как глаза человека наиболее чувствительны к желто-зеленому участку спектра, то параметры пленки выбирают такими, чтобы свет именно этого участка проходил сквозь нее без потерь. В отраженных лучах преобладают красные и фиолетовые цвета, получается сиреневый оттенок. Первые пленки давали голубоватый оттенок, поэтому просветленную оптику когда-то называли **голубой оптикой**.

## Примеры решения задач

1 С помощью установки Юнга получили интерференционную картину, используя монохроматическое излучение с длиной волны  $\lambda = 0,6$  мкм. На пути одного излучения, перпендикулярно ему, поместили стеклянную пластинку толщиной  $d = 6$  мкм, с показателем преломления  $n = 1,5$ . На сколько полос сместится интерференционная картина после внесения пластинки?

Дано:	СИ:	Решение:
$\lambda = 0,6$ мкм, $d = 6$ мкм, $n = 1,5$	$6 \cdot 10^{-7}$ м, $6 \cdot 10^{-6}$ м	Предположим, что без пластинки в некоторой точке $P$ экрана получили интерференционный максимум порядка $m_1$ . Согласно (3.12) условием его возникновения будет:
$\Delta m - ?$		

$$\Delta_1 = m_1 \lambda,$$

где  $\Delta_1 = l_2 - l_1$  оптическая разность хода, совпадающая в этом случае и с геометрической, а  $l_2$  и  $l_1$  – это расстояния от источников  $S_2$  и  $S_1$  до точки  $P$  (рис. 3.14). Введение стеклянной пластинки приводит к увеличению оптической разности хода на  $d(n - 1)$ . В самом деле:

$$\Delta_2 = [(l_2 - d) + nd] - l_1 = l_2 - l_1 + (n - 1)d = \Delta_1 + (n - 1)d.$$

Так как оптическая разность хода возросла, в точке  $P$  будет наблюдаться максимум порядка  $m_2 > m_1$ , если выполняется условие:

$$\Delta_2 = m_2 \lambda.$$

Разность между  $m_2$  и  $m_1$

$$\Delta m = \frac{(n - 1)d}{\lambda} = 5,$$

то есть интерференционная картина смещается на 5 полос.

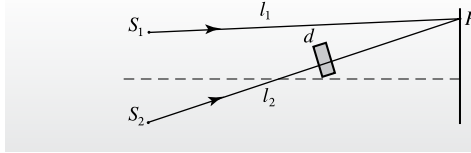


Рис. 3.14

2 Радиусы двух светлых колец Ньютона равны соответственно 2 мм и 2,4 мм. Чему равен радиус кривизны плоско-выпуклой линзы, если полученные кольца видны в отраженном свете ( $\lambda = 0,5$  мкм) и между ними есть еще 2 светлых кольца?

Дано:	СИ:	Решение:
$r_m = 2$ мм, $r_{m+3} = 2,4$ мм, $\lambda = 0,5$ мкм	$2 \cdot 10^{-3}$ м, $2,4 \cdot 10^{-3}$ м, $5 \cdot 10^{-7}$ м	Так как между двумя светлыми кольцами известных радиусов находятся еще два светлых кольца, то порядок меньшего кольца удобно обозначить через $m$ , а большего – через $m + 3$ . Согласно (3.25) квадраты радиусов колец равны соответственно:
$R - ?$		

$$r_m^2 = \left(m - \frac{1}{2}\right) R \lambda, \quad r_{m+3}^2 = \left(m + 3 - \frac{1}{2}\right) R \lambda.$$

Разность этих выражений

$$r_{m+3}^2 - r_m^2 = 3R\lambda,$$

откуда

$$R = \frac{r_{m+3}^2 - r_m^2}{3\lambda}.$$

Подставив численные значения, найдем радиус кривизны линзы:  $R \approx 1,2$  м.

## Проверьте свои знания

- В чем особенности когерентных световых волн?
- Что называют временем когерентности? Длиной когерентности?
- Что называется оптической длиной пути? Что представляет собой оптическая разность хода?
- При каких условиях возникают интерференционные максимумы и минимумы световых волн и чем они отличаются от условий для возникновения интерференции механических волн?
- \* Опишите установку Юнга для наблюдения интерференции света. Опишите интерференционную картину, полученную на этой установке.
- \* Как, зная расстояние между соседними интерференционными полосами, найти длину световой волны в опыте Юнга?
- \* В чем особенности интерференционной картины, полученной от белого (сложного) света?
- \* Чему равна оптическая разность хода лучей, отраженных от плоскопараллельной пластинки? Почему полосы интерференционной картины в этом случае называют полосами равного наклона?
- \* Как объяснить окрашивание тонких пленок?
- \* Как объясняется образование колец Ньютона?
- Приведите примеры применения интерференции.
- \* Для определения длины волны источника монохроматического света использовали установку Юнга, в которой расстояние между щелями равно 1 мм, а от них до экрана – 2 м. Чему равна длина волны, если расстояние между двумя соседними максимумами на экране равно 1,2 мм?
- \* Плоско-выпуклая линза выпуклой стороной касается стеклянной пластинки и освещается светом с длиной волны 0,6 мкм, падающим перпендикулярно к поверхности пластинки. Чему равна толщина воздушной прослойки в месте, где наблюдается четвертый минимум в отраженном свете?

## 3.8. ДИФРАКЦИЯ СВЕТА

### а. Изучение дифракции света на качественном уровне

#### Вспомним

Как известно (см. *Физика*, X класс), дифракция механических волн представляет собой проникновение волн в тень различных встречающихся на их пути препятствий. Повторим это явление на примере волн на поверхности воды.

Явление дифракции проявляется, когда размеры препятствий на пути распространения волн сравнимы или меньше длины волны.

Распространение волн вблизи препятствий и их проникновение в область тени объясняется на основе принципа Гюйгенса:

Каждая точка среды, до которой дошла волна, становится источником вторичных сферических волн, а их огибающая в следующий момент времени представляет новый фронт волны.

Из рисунка 3.15, иллюстрирующего явления дифракции волн на поверхности воды в волновой ванне видно, что в случае размеров отверстия, сравнимом с длиной волны, дифракция ярче выражена (рис. 3.15 а), чем в случае отверстия с размерами, намного большими длины волны (рис. 3.15 б). Чем дальше от такого отверстия, тем заметнее становится искажение формы фронта волны.

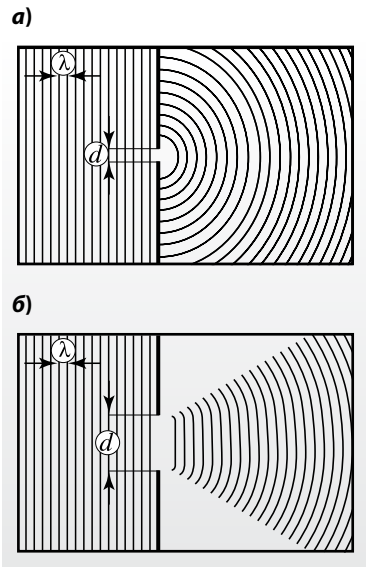


Рис. 3.15

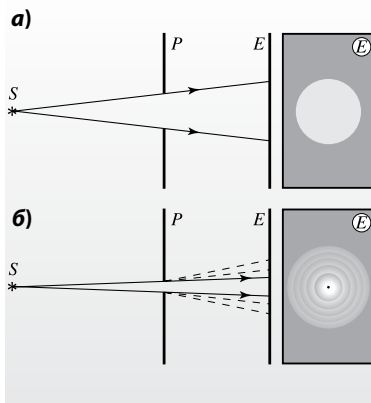


Рис. 3.16

Если свет представляет собой волновой процесс, то должна существовать и дифракция света, а условия ее проявления должны быть похожими с условиями в случае механических волн. К примеру, размеры препятствий (отверстий) должны быть соизмеримы с длиной световой волны, быть порядка микрометра ( $10^{-6}$  м).

Проанализируем процесс распространения света, если на его пути находится ширма  $P$  с диафрагмой, регулирующей размер круглого отверстия (рис. 3.16). Если радиус отверстия большой, на экране  $E$  наблюдается световое пятно с четким контуром (рис. 3.16 а). Размеры светового пятна легко определяются геометрическим методом, считая лучи света прямыми линиями. Если по аналогии с волнами на поверхности воды отодвинуть экран от ширмы с отверстием на расстояние значительно большее диаметра отверстия, станет заметным проникновение света в область тени: исчезнет четкий контур светового пятна. Дифракция заметнее в том случае, когда размеры препятствий во много раз меньше расстояния до экрана.

При уменьшении диаметра диафрагмы в ширме  $P$  на экране  $E$  образуется серия светлых и темных колец (рис. 3.16 б). На экране возникает **дифракционная картина**. Это означает, что вблизи препятствия (края отверстия) свет не распространяется прямолинейно, он проникает в область тени. Дифракционная картина зависит от размеров препятствий. Если изменять размеры диафрагмы, поддерживая их соизмеримыми с длиной волны, то видно, как в дифракционной картине светлые кольца заменяются на темные и наоборот, темные – на светлые. Форма дифракционной картины всегда повторяет форму препятствия.

Иногда дифракционная картина видна и в обычных условиях: например, окрашенные кольца видны вокруг источников света сквозь туман или запотевшие стекла. Дифракция возникает на мельчайших капельках воды, сравнимых по размеру с длиной световой волны.

Впервые на дифракцию света обратил внимание итальянский ученый Франческо Гримальди (1618–1663), но объяснение явлению дал французский физик А.Ж. Френель (1788–1827) лишь в 1818 году. Для этого он дополнил принцип Гюйгенса положением об интерференции вторичных волн (названным позже принципом Гюйгенса–Френеля):

**Точки среды, до которых дошел фронт световой волны, ведут себя как источники сферических когерентных вторичных волн, в результате интерференции которых возникает новый фронт волны.**

На основе этого принципа Френель теоретически рассчитал перераспределение освещенности в виде максимумов и минимумов в случае дифракции, а также прямолинейное распространение световой волны в однородной среде. Работы Френеля содержат убедительные аргументы, подтверждающие волновую природу света.

## 6. Дифракция света от щели. Дифракционная решетка

Принцип Гюйгенса–Френеля позволяет понять, как формируется дифракционная картина. Пусть источник света  $S$  находится в фокусе собирающей линзы  $L_1$ . Тогда ширмы  $P$ , с узкой щелью и шириной, сравнимой с длиной световой волны, достигает плоский фронт волны (рис. 3.17). Согласно принципу Гюйгенса–Френеля каждая точка в щели представляет собой источник когерентных вторичных волн. (На рисунке 3.17 из бесконечного множества показаны только три таких точки.) Отсюда волны распространяются под различными углами  $\varphi \leq \pi/2$  относительно нормали к плоскости щели. Ясно, что от каждой точки – источника вторичных волн из множества направлений – можно выделить направления, ориентированные под одним и тем же углом: например, лучи (1) под углом  $\varphi = 0$  и лучи (2) под одинаковым каким-то углом  $\varphi$ . Так как световые волны после щели когерентны и проходят разные пути, то они характеризуются определенной оптической разностью хода и, в зависимости от выполне-

ния условия максимума или минимума в точке наблюдения, возникает светлая или темная полоса. Так как исследуемые лучи параллельны, для наблюдения дифракционной картины используется линза  $L_2$ , в фокальной плоскости которой находится экран  $E$  (рис. 3.17). На рисунке III (см. цветную вкладку, с. 162) показана дифракционная картина, полученная освещением узкой щели красным светом.

Наблюдение дифракции света от одной щели затруднено из-за слабой освещенности полос. Для получения более яркой картины свет надо пропустить через систему щелей. Действительно, чем больше щелей, тем больше света проходит сквозь них. С другой стороны, полоса, наблюдаемая на экране, есть результат не только дифракции (интерференции множества вторичных сферических волн), но и интерференции волн, попавших в эту точку экрана от различных щелей.

Этот метод усиления яркости дифракционной картины используется в **дифракционной решетке**. Она состоит из большого числа узких параллельных щелей, прямолинейных, одинаковой ширины, расположенных на очень малом одинаковом расстоянии друг от друга. Есть дифракционные решетки прозрачные и отражательные (зеркальные).

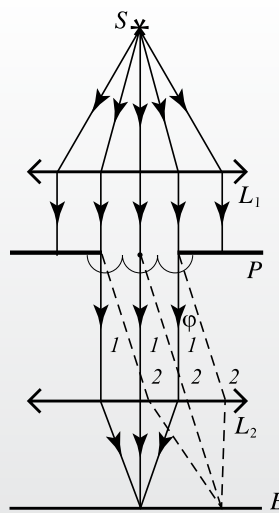


Рис. 3.17

В обоих случаях на рабочую поверхность наносится  $N$  равноудаленных штрихов. У лучших решеток более 1 000 штрихов на 1 мм, а общее число штрихов достигает сотен тысяч. Штрихи не отражают и не пропускают свет, а промежутки между ними, прозрачные или отражающие, играют роль щелей решетки.

Важной характеристикой дифракционной решетки является **постоянная решетки** или ее **период** (рис. 3.18), равный  $d = a + b$ , где  $a$  – ширина щели, а  $b$  – ширина непрозрачного или не отражающего штриха. Если известно число штрихов (щелей) на единицу длины  $l$ , то есть  $n = N/l$ , то период решетки:

$$d = \frac{l}{N} = \frac{1}{n}. \quad (3.27)$$

Рассмотрим процесс формирования дифракционной картины. Пусть на дифракционную решетку падает нормально плоская монохроматическая волна длиной  $\lambda$ . Пройдя решетку благодаря дифракции, свет распространяется во всех возможных направлениях в виде когерентных волн, а интерференция волн усилит яркость только в определенных направлениях. Эти направления определяются из условия оптической разности хода когерентных волн, идущих от двух соседних щелей, которая должна быть равной четному числу полуволн (условие интерференционного максимума (3.12)), то есть:

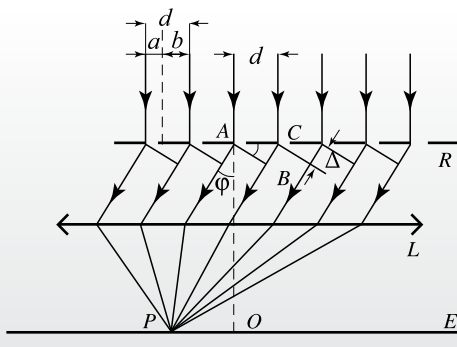


Рис. 3.18

$$\Delta = \pm 2m \cdot \frac{\lambda}{2}.$$

Оптическую разность хода  $\Delta$  можно выразить и через постоянную решетки  $d$  (рис. 3.18). Из прямоугольного треугольника  $ABC$  имеем:

$$\Delta = d \sin \varphi$$

и из последних двух формул получим:

$$d \sin \varphi = \pm m \lambda. \quad (3.28)$$

Это выражение называется **формулой дифракционной решетки**. Она выражает условие получения светлых полос (**главных максимумов**) в результате прохождения света через дифракционную решетку.

В формуле (3.28)  $\varphi$  – **угол дифракции**, а  $m = 1, 2, 3, \dots$ . Для  $m = 0$  получится полоса с наибольшей яркостью. Это **центральный максимум** или **максимум нулевого порядка**. Если  $m \geq 1$ , то на экране будут наблюдаться по два максимума одинаковой яркости, симметричных относительно центрального, называемых **максимумами  $m$ -го порядка**.

На рисунке IV а, б (см. цветную вкладку, с. 162) показаны спектры, полученные на одной и той же решетке для фиолетового и красного света. Опыт показывает, что с ростом порядка максимумов их яркость уменьшается (рис. 3.18), а увеличение числа щелей на единицу длины (уменьшение периода  $d$ ) приводит к увеличению расстояния между максимумами на экране.

Если дифракционная решетка освещена белым светом, то дифракционная картина образует два симметричных спектра для каждого порядка (рис. IV в на цветной вкладке, с. 162). Отметим, что в этом случае использовалась дифракционная решетка более высокого качества, чем для получения спектров на рисунке IV а и б (см. цветную вкладку).

## Примеры решения задачи

Пучок монохроматического света с длиной волны  $\lambda = 0,6$  мкм падает нормально к поверхности дифракционной решетки. Дифракционная картина проектируется на экран, находящийся от решетки на расстоянии  $D = 1$  м. Расстояние от центрального максимума до первого главного максимума равно  $l = 15$  см. Определите: а) период дифракционной решетки; б) общее число возможных главных максимумов; в) угол между нормалью и направлением на последний главный максимум.

<b>Дано:</b> $\lambda = 0,6$ мкм, $D = 1$ м, $m = 1$ , $l = 15$ см	<b>СИ:</b> $6 \cdot 10^{-7}$ м          $0,15$ м
$d - ?$ , $N - ?$ , $\varphi_m - ?$	

**Решение:**  
**а)** Период дифракционной решетки находится из формулы для главных максимумов (3.28):

$$d = \frac{m\lambda}{\sin \varphi}.$$

Из рисунка 3.19 видно, что  $\operatorname{tg} \varphi = l/D$ , а так как  $D \gg l$  угол  $\varphi$  мал и  $\operatorname{tg} \varphi \approx \sin \varphi$ . Тогда для периода решетки получим:

$$d = \frac{m\lambda D}{l} = 4 \text{ мкм}.$$

**б)** Главные максимумы расположены симметрично слева и справа от центрального максимума, поэтому общее число максимумов:

$$N = 2m_{\max} + 1,$$

где  $m_{\max}$  – порядок последнего максимума, который можно получить с помощью данной решетки. Прошедший сквозь дифракционную решетку свет распространяется в пространстве под углом от  $0$  до  $\pm\pi/2$ . Тогда из (3.28), когда  $\sin \varphi = 1$ , получим:

$$m_{\max} \leq \frac{d}{\lambda} \approx 6,67.$$

Порядок максимума должен быть целым числом, поэтому  $m_{\max} = 6$ , а общее число максимумов  $N = 13$ .

**в)** Угол между нормалью и направлением на последний главный максимум вычисляется тоже из (3.28), но записанного для этого направления:

$$d \sin \varphi_m = m_{\max} \lambda.$$

откуда

$$\varphi_m = \arcsin \left( \frac{m_{\max} \lambda}{d} \right),$$

и численно равен  $\varphi_m \approx 64^\circ$ .

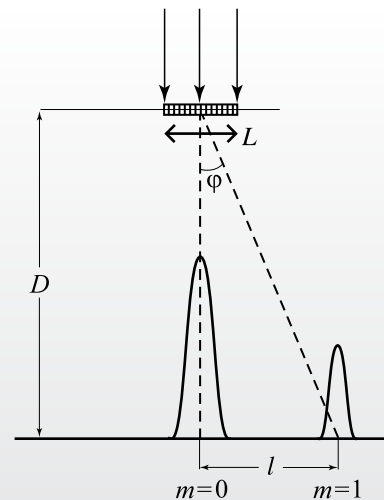


Рис. 3.19

## ➔ Проверьте свои знания

- В чем сущность явления дифракции механических волн?
- Каким должен быть порядок размеров препятствий на пути световых волн, чтобы наблюдалось явление дифракции? Почему?
- Что представляет собой дифракционная картина света? Объясните, как она формируется на различных препятствиях.
- Сформулируйте принцип Гюйгенса–Френеля. Что можно объяснить с помощью этого принципа?
- Объясните, как образуется дифракционная картина от узкой щели.
- Что представляет собой дифракционная решетка? Что называется периодом решетки?
- Запишите формулу дифракционной решетки. Что означают входящие в нее величины?
- Охарактеризуйте дифракционную картину, полученную с помощью решетки. Как она зависит от периода дифракционной решетки?
- Свет с длиной волны  $\lambda = 0,6$  мкм падает нормально на прозрачную дифракционную решетку. Определите период решетки и максимальный угол дифракции, если известно, что максимум 4 порядка формируется под углом дифракции в  $30^\circ$ , а порядок последнего максимума  $m_{\max} = 7$ .
- \* На дифракционную решетку нормально падает монохроматический свет с длиной волны  $\lambda = 0,41$  мкм. Угол  $\Delta\varphi$  между направлениями на главные максимумы первого и второго порядков составляет  $2,35^\circ$ . Определите число штрихов на миллиметр длины дифракционной решетки.

### Определение длины световой волны с помощью дифракционной решетки

Цель работы:	Определение границ видимой части спектра
Необходимые приборы и материалы:	штатив, дифракционная решетка, установка для определения длины световой волны, источник белого света.

#### Предварительные замечания

Установка для определения длины световой волны состоит из миллиметровой линейки, на одном конце которой есть рамка с дифракционной решеткой, а на втором – подвижный экран со шкалой. Ноль шкалы находится в середине экрана под щелью, а справа и слева от него отмечены деления для отсчета максимумов соответствующего цвета.

Глядя на источник света сквозь щель и решетку (рис. 3.20), наблюдатель увидит по обе стороны от нуля окрашенные дифракционные спектры 1-го, 2-го, ... порядка. На рисунке схематически показаны направления на спектры 1-го порядка фиолетового и красного цвета. Они видны наблюдателю на фоне экрана на расстояниях  $l_\phi$  и  $l_k$  от нуля под щелью.

Положение максимумов первого порядка находят из формулы (3.28):  $d \sin \varphi = m\lambda$ , где  $\lambda$  – длина световой волны,  $d$  – период дифракционной решетки,  $\varphi$  – угол, под которым виден соответствующий максимум. Так как угол  $\varphi$  в наших опытах мал ( $\varphi < 5^\circ$ ), то  $\sin \varphi \approx \operatorname{tg} \varphi = l/L$  (рис. 3.20). Подставив выражение для  $\sin \varphi$  в приведенную выше формулу, получим:

$$\lambda = \frac{ld}{L}, \quad (3.29)$$

где  $L$  – расстояние от решетки до экрана.

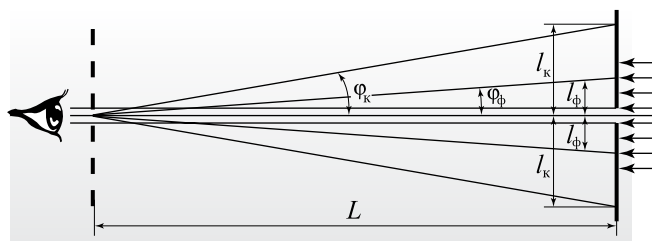


Рис. 3.20

#### Ход работы:

1. Поместите дифракционную решетку в рамку установки и укрепите ее в муфте штатива (рис. 3.21).

2. Направьте установку на источник света так, чтобы он был виден сквозь решетку и щель в экране. Справа и слева от щели на фоне экрана будут видны дифракционные спектры.

3. Отсчитайте по шкале экрана расстояния до видимых с двух сторон от щели положений красного  $l_k$  и фиолетового  $l_\phi$  краев спектра первого порядка. Определите средние значения расстояний  $l_k$  и  $l_\phi$  и впишите их в таблицу.

4. Измерьте миллиметровой линейкой расстояние  $L$  от решетки до экрана и впишите его в таблицу.

5. Повторите измерения (пункты 3, 4) для двух других положений экрана относительно решетки и впишите результаты в таблицу.

№ опыта	$d$ ( $10^{-5}$ м)	$L$ (см)	$l_k$ (см)	$l_\phi$ (см)	$\lambda_k$ ( $10^{-6}$ м)	$\lambda_\phi$ ( $10^{-6}$ м)
1						
2						
3						
Среднее значение						

6. По формуле (3.29) вычислите длину волн  $\lambda_k$  и  $\lambda_\phi$ , представляющие собой края спектра, затем найдите средние значения длин волн для каждого цвета.

7. Оцените относительную и абсолютную погрешность определения длины световой волны двух цветов с помощью следующих выражений:

$$\varepsilon = \frac{\Delta \bar{\lambda}}{\bar{\lambda}} = \frac{\Delta l}{l} + \frac{\Delta L}{L}, \quad \Delta \bar{\lambda} = \varepsilon \cdot \bar{\lambda}.$$

В расчетах для  $\Delta l$  и  $\Delta L$  надо взять абсолютные погрешности используемых измерительных приборов.

8. Представьте окончательные результаты в виде:

$$\lambda_k = (\bar{\lambda}_k \pm \Delta \bar{\lambda}_k) \cdot 10^{-6} \text{ м}; \quad \varepsilon_k = \dots \%,$$

$$\lambda_\phi = (\bar{\lambda}_\phi \pm \Delta \bar{\lambda}_\phi) \cdot 10^{-6} \text{ м}; \quad \varepsilon_\phi = \dots \%.$$

9. Сделайте вывод относительно точности полученных результатов.



Рис. 3.21



### 3.9.\* ПОЛЯРИЗАЦИЯ СВЕТА

Интерференция и дифракция света убедительно демонстрируют его волновую природу без уточнения – поперечными или продольными являются световые волны. Существуют, однако, случаи, когда процессы распространения света можно объяснить только тогда, когда рассматривается световая поперечная волна.

Чтобы понять явление поляризации света, рассмотрим сначала поляризацию упругих волн.

**Поляризованной** называется волна, в которой направление колебаний частиц среды изменяется со временем по определенному закону.

#### а. Механическая модель поляризованного состояния. Плоскость поляризации

Если упругий шнур заставить колебаться в определенной плоскости, называемой **плоскостью колебаний**, то по нему будет распространяться поперечная волна. Если колебания совершаются в одной и той же плоскости ( $xOy$  на рисунке 3.22), вдоль  $AB$ , то волна называется **линейно-поляризованной** или **плоскополяризованной**.

Плоскость, образованная направлениями колебаний частиц среды и распространения волны, называется **плоскостью поляризации**.

Состояние поляризации поперечной волны зависит от природы препятствий (отверстий), встречаемых волной при распространении. Если на пути волны находится щель, параллельная плоскости колебаний шнура, то волна, пройдя сквозь щель, сохраняет все свои свойства (рис. 3.23 а). Если щель повернется на угол  $\varphi$ , то амплитуда колебаний уменьшается (рис. 3.23 б). Если щель будет перпендикулярна плоскости колебаний шнура ( $\varphi = 90^\circ$ ), то сквозь щель волна не пройдет (рис. 3.23 в).

Иначе ведет себя падающая на щель продольная волна. Колебания в ней происходят вдоль направления распространения, и волна всегда проходит сквозь щель, независимо от ее ориентирования.

Итак,

состояние поляризации возможно только у поперечных волн.

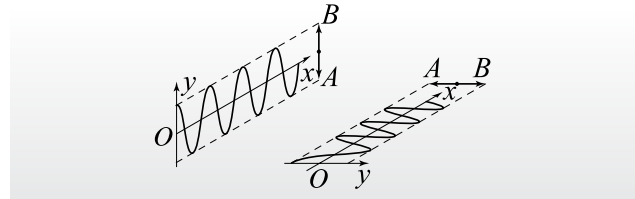


Рис. 3.22

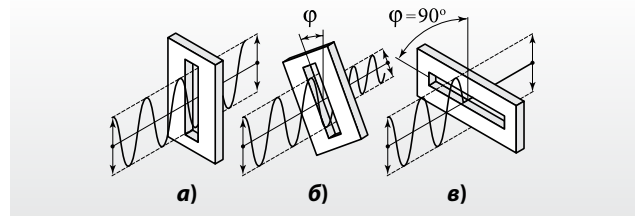


Рис. 3.23

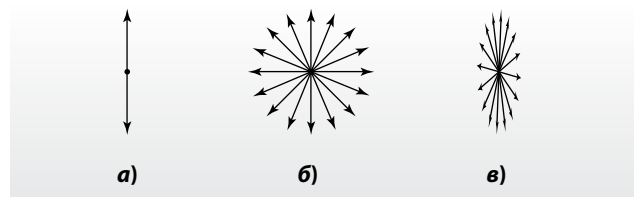


Рис. 3.24

#### б. Степень поляризации света. Поперечность световых волн

Испущенный атомом свет представляет собой электромагнитную волну, характеризующуюся колебаниями двух взаимно перпендикулярных векторов: напряженности электрического поля  $\vec{E}$  и индукции магнитного поля  $\vec{B}$ , распространяющихся вдоль направления, называемого **световым лучом**. Ясно, что в этом случае свет **плоскополяризован**: взаимно перпендикулярные  $\vec{E}$  и  $\vec{B}$  колеблются каждый в своей фиксированной плоскости.

Исследования показали, что действие света на вещество определяется в основном колебаниями электрической составляющей электромагнитной волны – вектором  $\vec{E}$ . Именно она создает зрительные ощущения в сетчатке глаза и воздействует на фотопластинку. Вектор напряженности электрического поля  $\vec{E}$  называют и **световым вектором**. Схематически в пространстве его значение изображается кривой, которую описывает конец вектора  $\vec{E}$  в плоскости колебаний вдоль светового луча. На рисунке 3.24 а показаны направления максимальных значений напряженности электрического поля  $\vec{E}$  световой волны,

излученной одним атомом. Световой луч перпендикулярен плоскости рисунка.

Реальные источники света состоят из огромного числа атомов, беспорядочно излучающих свет в различных плоскостях. Следовательно, любому направлению распространения света от реального (природного) источника, соответствует множество плоскостей колебаний, ориентированных в различных направлениях (рис. 3.24 б). Такой неполяризованный свет называют **естественным светом**.

Интенсивности излучения атомов источника примерно одинаковы, поэтому у естественного света и амплитуды вектора  $\vec{E}$  во всех плоскостях примерно одинаковы. Иногда в одной из плоскостей величина светового вектора больше, чем в остальных. В таких случаях говорят, что свет **частично поляризован** (рис. 3.24 в).

Частичная поляризация света характеризуется **степенью поляризации**. Если  $I_{\max}$  и  $I_{\min}$  – максимальная и минимальная интенсивности света, соответствующие проекциям светового вектора  $\vec{E}$  на два взаимно перпендикулярных направления, то степень поляризации света

$$P = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}. \quad (3.30)$$

Степень поляризации – величина безразмерная, принимающая значения от 0 до 1. У полностью поляризованного света  $I_{\min} = 0$  и  $P = 1$ , а у естественного света  $I_{\min} = I_{\max}$ , поэтому  $P = 0$ .

Известны и другие случаи поляризации света. Если световой вектор  $\vec{E}$  описывает в плоскости, перпендикулярной направлению распространения света, эллипс (рис. 3.25), то это **эллиптическая поляризация**. Если же световой вектор описывает круг, то это **круговая поляризация**.

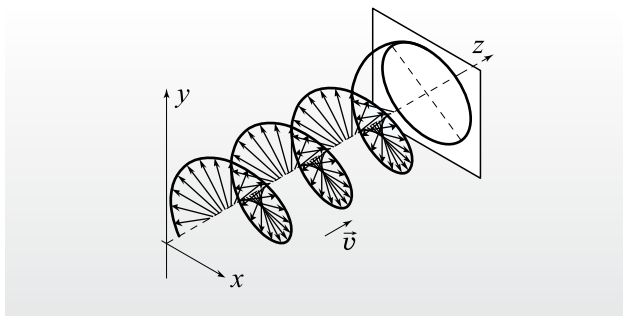


Рис. 3.25

Изучение степени поляризации света стало возможным с начала XIX века после исследований, проведенных независимо друг от друга физиками Т. Юнгом и А.Ж. Френелем, выдвинувшим идею **поперечности световых волн**. Существование электромагнитных волн и их поперечность Максвелл доказал теоретически полвека спустя, когда поперечность световых волн уже была известна из многих опытов. Поэтому поперечность электромагнитных волн послужила Максвеллу важнейшим аргументом, подтверждающим справедливость электромагнитной теории света.

Устройство, с помощью которого естественный свет можно преобразовать в поляризованный, называется **поляризатором**.

В случае линейной поляризации эти устройства пропускают колебания светового вектора в направлении  $OO'$  (рис. 3.26). Действие поляризатора  $P$  аналогично действию щели на рисунке 3.23. Человеческий глаз не может отличить поляризованный свет от естественного, а отмечает только уменьшение интенсивности света  $I_n$ , прошедшего сквозь поляризатор в сравнении с интенсивностью  $I_e$  естественного света, падающего на поляризатор ( $I_n < I_e$ ).

Для установления степени поляризации света используют второе устройство для поляризации, называемое **анализатором**  $A$ . Он пропускает колебания светового вектора только вдоль направления  $BB'$ , в общем случае находящимся под углом  $\varphi$  относительно  $OO'$ . При вращении анализатора на  $360^\circ$  вокруг оси, совпадающей с направлением распространения света, интенсивность света  $I_a$  после анализатора изменяется, дважды достигая максимального  $I_{\max}$  и минимального  $I_{\min}$  значений, позволяющих вычислить степень поляризации  $P$  (3.30). В качестве поляризаторов используют различные природные кристаллы с оптической анизотропией: турмалин, исландский шпат, кварц и др. Анизотропия проявляется в сильном поглощении света кристаллом в одной плоскости и в способности пропускать свет практически без поглощения в другой плоскости, перпендикулярной ей. Существуют и искусственные поляризаторы из пленок, покрытых тонким слоем одинаково ориентированных мельчайших кристалликов или длинных сложных молекул. Такие пленки называют **поляроидами**. Их впервые получил в 1928 году Эдвин Лэнд (1909–1991), разработавший позже основы моментальной фотографии.

## в. Поляризация света при отражении

Поляризованный свет можно получить и другими способами, например, отражением света от диэлектрика. Если естественный солнечный свет падает под углом  $i$  на поверхность шоссе или озера, то, в зависимости от величины угла падения, отраженный свет будет более или менее ярким. Сквозь поляроид с вертикальной осью такой отраженный свет практически не виден. Это означает, что отраженный свет частично поляризован преимущественно в плоскости, параллельной отражающей поверхности. Степень поляризации отраженного света зависит от угла падения. При нормальном падении естественного света на поверхность диэлектрика ( $i = 0$ ) отраженный свет не будет поляризованным, а для углов в интервале  $0 < i < \pi/2$ , как отраженный луч, так и преломленный, будут частично поляризованными во взаимно перпендикулярных плоскостях (рис. 3.27). Существует угол падения  $i_B$ , для которого отраженный луч будет полностью поляризован, а преломленный максимально поляризован (но не полностью). При таком угле  $i_B$  отраженный и преломленный лучи взаимно перпендикулярны. Из 9-го класса мы знаем закон преломления света:

$$\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{n_2}{n_1},$$

где  $n_1$  – абсолютный показатель преломления среды, в которой распространяется падающий луч, а  $n_2$  – абсолютный показатель преломления среды, в которой распространяется преломленный луч. В этом случае  $r + i_B = 90^\circ$  (рис. 3.27).

Тогда:

$$\frac{\sin i_B}{\sin(90^\circ - i_B)} = \frac{n_2}{n_1}$$

или

$$\operatorname{tg} i_B = \frac{n_2}{n_1}. \quad (3.31 \text{ а})$$

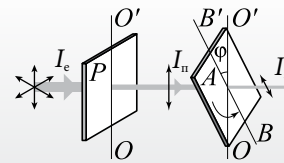


Рис. 3.26

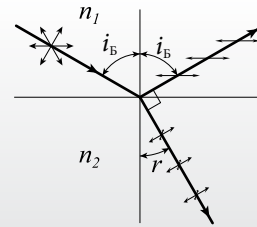


Рис. 3.27

Итак, **угол полной поляризации**  $i_B$  выражается через абсолютные показатели преломления обеих сред.

Выражение  $n_2/n_1 = n_{21}$  называется относительным показателем преломления второй среды относительно первой. Тогда

$$\operatorname{tg} i_B = n_{21}. \quad (3.31 \text{ б})$$

Угол полной поляризации  $i_B$  называется еще и **углом Брюстера**, в честь шотландского физика Дэвида Брюстера (1781–1868), а выражение (3.31), полученное экспериментально в 1815 году, законом Брюстера:

**Угол полной поляризации определяется относительным показателем преломления отражающей среды.**

### Примеры решения задач\*

Под каким углом к горизонту должно находиться Солнце, чтобы отраженные от поверхности озера солнечные лучи стали полностью поляризованными? Показатель преломления воды равен 1,33.

**Дано:**  
 $n = 1,33$   
 $\alpha = ?$

**Решение:**  
 Отраженные от поверхности озера лучи стали полностью поляризованы при падении под углом Брюстера. Его легко найти из соотношения (3.31 б):

$$i_B = \operatorname{arctg}(n).$$

Так как угол отражения равен углу падения  $i_B$ , то для угла  $\alpha$  между солнечными лучами и горизонтом получим

$$\alpha = 90^\circ - i_B = 90^\circ - \operatorname{arctg}(n) \approx 36,93^\circ \approx 36^\circ 56'.$$

## ⇒ Проверьте свои знания

1. Какие волны называют поляризованными?
2. Что называют плоскостью поляризации?
3. Объясните механическую модель поляризации волн. Почему поляризация возможна только у поперечных волн?
4. Дайте определение степени поляризации. Какие значения она может принимать?
5. Как явление поляризации доказывает поперечность световых волн?
6. Что из себя представляет поляризатор и анализатор? Есть ли различие в их устройстве?
7. Сформулируйте закон Брюстера. Какому условию подчиняется угол Брюстера и угол преломления?
8. Определите угол полной поляризации при отражении света от стеклянной пластины с абсолютным показателем преломления  $n_2 = 1,515$ , если падающий луч распространяется в воде. Абсолютный показатель преломления воды  $n_1 = 1,333$ .

## 3.10.\* РАССЕЯНИЕ СВЕТА

При взаимодействии световых волн с веществом электрические заряды в его атомах и молекулах, под воздействием переменного электрического поля  $\vec{E}$  электромагнитной волны, совершают вынужденные колебания с той же частотой, что и вектор  $\vec{E}$ . Поэтому заряженные частицы вещества становятся центрами вторичных сферических волн, распространяющихся во всех направлениях. Таким образом, часть энергии световой волны поглощается веществом, а затем испускается его частицами, рассеиваясь во всех возможных направлениях.

Рассеивание света происходит и в случае отражения и преломления света на очень мелких частицах (с размерами, сравнимыми с длиной волны) среды, в которой он распространяется. Если прозрачная среда однородна, рассеивание света практически не наблюдается. Это объясняется тем, что испущенные заряженными частицами среды когерентные вторичные волны в этом случае интерферируют так, что во всех направлениях, кроме первоначального, они взаимно гасятся.

Рассеивание света легко заметить на простом опыте. В длинный стеклянный сосуд с водой добавим несколько капель молока и направим на него узкий пучок света. Сбоку видно, что рассеянный свет приобретает голубоватый оттенок, а свет, прошедший сквозь сосуд, – красноватый.

Это объясняется тем, что свет с разной длиной волны рассеивается по-разному. Английский физик и математик Джон Уильям Стретт (лорд Рэлей) (1842–1919) показал, что интенсивность рассеянного света обратно пропорциональна четвертой степени длины волны:

$$I = \frac{C}{\lambda^4}. \quad (3.32)$$

Из (3.32) следует, что световые волны видимого спектра с меньшими длинами волн рассеиваются сильнее, чем волны с большими длинами волн.

*Рэлеевское рассеяние* наблюдается в прозрачных твердых и жидких средах, а еще лучше – в газах. Благодаря Рэлеевскому рассеянию солнечного света, на молекулах земной атмосферы небо наблюдается голубого цвета. Действительно, длинноволновая часть солнечного спектра рассеивается слабее и достигает поверхности Земли, а коротковолновая, в основном голубого цвета, сильно рассеивается и попадает в глаз наблюдателя из любого участка неба.

Рэлеевским рассеянием объясняется и цвет солнечного диска. В полдень практически не рассеивается в атмосфере длинноволновая часть спектра, и белый солнечный свет воспринимается почти без искажений. Во время восхода и захода Солнца свет проходит сквозь толстый слой атмосферы, солнечный диск приобретает красно-оранжевую окраску, так как остальные цвета сильно рассеиваются в атмосфере.

## ⇒ Проверьте свои знания

1. Объясните, почему происходит рассеяние света.
2. Почему в однородных прозрачных средах нет рассеяния света?
3. Как зависит интенсивность рассеянного света от длины волны?
4. Как объясняется голубой цвет неба? А цвет солнечного диска в разное время дня?

# ЭЛЕМЕНТЫ СПЕЦИАЛЬНОЙ ТЕОРИИ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

## 4.1.\* ПРИНЦИП ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ В ФИЗИКЕ. ПОСТУЛАТЫ ЭЙНШТЕЙНА

### Вспоминаем

Для описания механического движения тела – изменения его положения относительно других тел – необходима система отсчета. Она представляет собой систему координат, связанную с телом отсчета, относительно которого рассматривается движение. Для измерения расстояний и времени необходимы также линейка и часы.

**Движение тела** зависит от выбранной системы отсчета, то есть оно **относительно** (см. *Физика*, X класс). В кинематике используют любые, произвольно выбранные системы отсчета, а в динамике отдают предпочтение **инерциальным системам отсчета**.

Механическое движение тел происходит в пространстве и во времени. В классической механике **пространство и время считаются абсолютными, не зависящими ни друг от друга, ни от тел, которые находятся и движутся в пространстве**. Расстояние между двумя точками (длина отрезка) и промежуток времени между двумя событиями одинаковы в различных системах отсчета.

Особая роль в классической механике отводится **преобразованиям Галилея и принципу относительности Галилея** (см. *Физика*, X класс).

Выберем **инерциальную систему отсчета**  $S$  с системой координат  $Oxyz$ , которую условно будем считать неподвижной, и систему отсчета  $S'$  с системой координат  $O'x'y'z'$ . Допустим, что система  $S'$  движется относительно системы  $S$  с постоянной скоростью  $\vec{u}$ , параллельной оси  $Ox$ , и в начальный момент времени  $t_0 = t'_0 = 0$ , одинаковый для обеих систем отсчета, оси соответствующих координат систем совпадают. При движении ось  $O'x'$  скользит вдоль оси  $Ox$ , ось  $O'y'$  остается параллельной  $Oy$ , а  $O'z'$  – параллельной  $Oz$  (рис. 4.1). Система  $S'$  движется поступательно.

Рассмотрим материальную точку  $M$ , положение которой в системе отсчета  $S$  в момент времени  $t$  определяется радиус-вектором  $\vec{r}$ . В системе  $S'$  положение этой точки определяется радиус-вектором  $\vec{r}'$ , а момент времени равен  $t'$ . Начала отсчета времени в  $S$  и  $S'$  совпадают:  $t_0 = t'_0 = 0$ .

С учетом того, что скорость  $\vec{u}$  постоянна и в момент  $t = 0$  начала координат  $O$  и  $O'$  совпадают, расстояние  $OO' = ut$  или в векторной форме  $\vec{OO'} = \vec{u}t$ , получаем (рис. 4.1):

$$x = x' + ut', \quad y = y', \quad z = z', \quad t = t', \quad (4.1)$$

или в векторной форме:

$$\vec{r} = \vec{r}' + \vec{u}t', \quad t = t'. \quad (4.2)$$

Соотношения (4.1) или (4.2) называются **преобразованиями Галилея**.

Из (4.2) получаем выражения для скоростей  $\vec{v}$  и  $\vec{v}'$  относительно выбранных систем отсчета:

$$\vec{v} = \vec{v}' + \vec{u} \quad \text{или} \quad \vec{v}' = \vec{v} - \vec{u}, \quad (4.3)$$

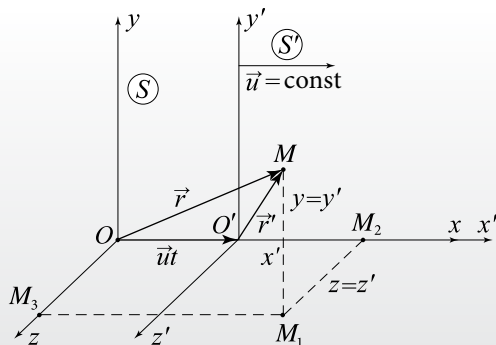


Рис. 4.1

которые представляют собой **классический закон сложения скоростей**. Согласно этому закону **скорость – величина относительная**.

Если  $\vec{u} = \text{const.}$ , то из (4.3) следует:

$$\vec{a} = \vec{a}', \quad (4.4)$$

то есть ускорение материальной точки в системах отсчета  $S$  и  $S'$  одинаково. Из выражения (4.4) вытекает доказательство того, что любая система отсчета, движущаяся поступательно с постоянной скоростью относительно некоторой инерциальной системы отсчета, также является инерциальной. Согласно соотношению (4.4) ускорение не изменяется при переходе от одной инерциальной системы отсчета к другой.

**Физические величины или соотношения между ними, не изменяющиеся при переходе от одной инерциальной системы отсчета к другой, называются инвариантными.** Так как переход осуществляется в соответствии с преобразованиями Галилея, то уточняют, что эти величины **инвариантны относительно преобразований Галилея**.

Учитывая, что масса тела  $m$  – величина постоянная, одна и та же в  $S$  и  $S'$ , приходим к выводу:

**Уравнения классической (ньютоновской) механики инвариантны относительно преобразований Галилея, то есть имеют одинаковый вид во всех инерциальных системах отсчета. Другими словами, равномерное прямолинейное движение инерциальной системы отсчета не влияет на происходящие в ней явления.**

Эти утверждения являются эквивалентными формулировками **принципа относительности Галилея – принципа относительности в классической механике**.

Согласно этому принципу, никакими механическими опытами, проведенными в данной инерциальной системе отсчета, нельзя установить, покоится она или движется равномерно и прямолинейно, а, тем более, определить ее скорость.

Проанализируем проблему относительности в электродинамике. Важным результатом, достигнутым в области электромагнетизма, явилась **теория электромагнитного поля** – электродинамика, разработанная Максвеллом в 1860–1865 годах. Ее основу составляет система из четырех уравнений, известных в настоящее время под названием **уравнений Максвелла**.

Перед физиками возникла проблема применимости уравнений электродинамики Максвелла для движущихся сред, то есть для движущихся инерциальных систем отсчета. Было установлено, что **уравнения Максвелла неинвариантны относительно преобразований Галилея**, то есть они изменяют свой вид при переходе от инерциальной системы отсчета, которая считается неподвижной, к системе, движущейся с постоянной скоростью относительно первой.

Таким образом, в физике создалась неопределенная ситуация: с одной стороны, законы механики одинаковы во всех инерциальных системах отсчета, а с другой стороны, законы электродинамики различны в разных инерциальных системах. Эта противоречивая ситуация была разрешена в 1905 году А. Эйнштейном на основе двух постулатов.

**Первый постулат** представляет собой распространенный на все физические явления, в том числе и электромагнитные, принцип относительности Галилея:

законы физики формулируются одинаково во всех инерциальных системах отсчета.

Это – **принцип относительности Эйнштейна**.

Согласно ему, никакими физическими экспериментами, проведенными в инерциальной системе отсчета, нельзя установить, движется ли она равномерно и прямолинейно и чему равна ее скорость.

**Второй постулат** касается скорости света в вакууме:

скорость света в вакууме одинакова во всех инерциальных системах отсчета и не зависит от скорости источника света или наблюдателя.

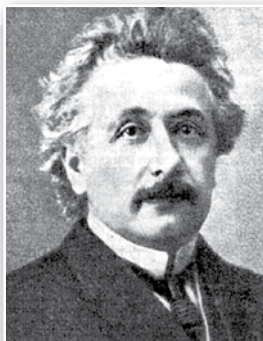
Этот постулат, называемый также **постулатом постоянства скорости света**, отводит особую роль скорости света в вакууме  $c$ , которая представляет собой предельную скорость распространения любых физических воздействий в природе.

Аргументом в пользу второго постулата послужили результаты экспериментов, выполненных в 1881 году американским физиком и астрономом Альбертом А. Майкельсоном (1852–1931), а затем,

в усовершенствованном варианте в 1887 году, им же вместе с Эдвардом В. Морли (1838–1923). В этих экспериментах было убедительно показано, что движение Земли не влияет на распространение света и что скорость света одинакова в любых направлениях относительно скорости Земли.

Второй постулат не согласуется с законом сложения скоростей в ньютоновской механике – скорость источника или наблюдателя не складывается со скоростью света в вакууме и не вычитается из нее. Следовательно, преобразования Галилея не соответствуют второму постулату и их следует заменить другими. А поскольку они были установлены на основе представления об абсолютном пространстве и времени, то это представление следует пересмотреть.

Теория, развитая Эйнштейном, согласно рассмотренным двум постулатам и получившая название **специальной теории относительности**, применима только к инерциальным системам отсчета. Скорость света в вакууме  $c$  была названа **релятивистской константой**. Теория, рассматривающая физические явления, происходящие в неинерциальных системах отсчета, а также гравитационные явления, стала называться **общей теорией относительности** (Эйнштейн, 1916).



АЛЬБЕРТ ЭЙНШТЕЙН  
(1879–1955)  
немецкий физик

Объяснил фотоэлектрический эффект, исходя из квантовой теории, допустив существование материального носителя кванта энергии – частицы, впоследствии названной *фотон*. Является основателем молекулярно-кинетической теории броуновского движения. В работе «К электродинамике движущихся сред» изложил основы специальной теории относительности. Сформулировал теорию теплоемкости твердых тел (1907) и общую теорию относительности (1916), которая распространила теорию относительности на неинерциальные системы отсчета. Изложил законы поглощения и излучения света, предсказал явление индуцированного излучения света (1917), на основе его идей впоследствии был сконструирован лазер. Получил Нобелевскую премию за объяснение законов фотоэлектрического эффекта (1921).

## ➔ Проверьте свои знания

1. Как можно установить, является ли система отсчета инерциальной или нет?
2. Какие физические величины, инвариантные относительно преобразований Галилея, известны вам?
3. В чем состоит, согласно принципу относительности

- сти Галилея, эквивалентность всех инерциальных систем отсчета? А согласно принципу относительности Эйнштейна?
4. Соотнесите постулат постоянства скорости света в вакууме с законом сложения скоростей в классической механике. Ответ аргументируйте.

## 4.2.\* ПРОСТРАНСТВО И ВРЕМЯ В СПЕЦИАЛЬНОЙ ТЕОРИИ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

### а. Относительность одновременности

Важным понятием теории относительности является *событие*. Любое физическое явление происходит в какой-либо области пространства в некоторый промежуток времени. Если область пространства и промежуток времени очень малы, то явление называется **событием**. Это идеализированная модель, допускающая, что явление происходит в одной точке пространства в некоторый момент времени.

**События, происходящие в один и тот же момент времени, называются *одновременными*.**

Проанализируем понятие одновременности в рамках специальной теории относительности.

Рассмотрим две системы координат (рис. 4.2): систему  $Oxyz$  (неподвижную) и систему  $O'x'y'z'$ , которые являются частями инерциальных систем отсчета  $S$  и  $S'$ . Допустим, что система  $O'x'y'z'$  движется относительно системы  $Oxyz$  с постоянной скоростью  $\vec{v}$ , параллельной оси  $Ox$ , и в начальный момент времени, одинаковый для обеих систем, их оси совпадают. Во время движения ось  $O'x'$  скользит вдоль оси  $Ox$ , ось  $O'y'$  остается параллельной  $Oy$ , а  $O'z'$  – параллельной  $Oz$ . В дальней-

шем мы будем иметь в виду именно такие инерциальные системы отсчета.

Рассмотрим в системе  $S'$  стержень  $AD$ , параллельный оси  $O'x'$ , а значит, и  $Ox$ . В этой системе стержень находится в покое, а относительно системы  $S$  движется с постоянной скоростью  $\vec{u}$ , направленной вдоль  $Ox$ . Посередине стержня находится лампочка накаливания  $B$ , движущаяся вместе с ним (рис. 4.2 а).

Допустим, что в какой-то момент лампочка  $B$  загорается на очень короткий промежуток времени и испускает световой импульс. Согласно второму постулату Эйнштейна свет распространяется во всех направлениях с одинаковой относительно обеих систем отсчета скоростью  $c$ . Событиями  $a$  и  $d$  будем считать достижение светом концов  $A$  и  $D$  стержня. События  $a$  и  $d$  происходят в различных точках пространства, то есть они **пространственно разобщены**.

Проанализируем события  $a$  и  $d$  с точки зрения наблюдателя, находящегося в состоянии покоя

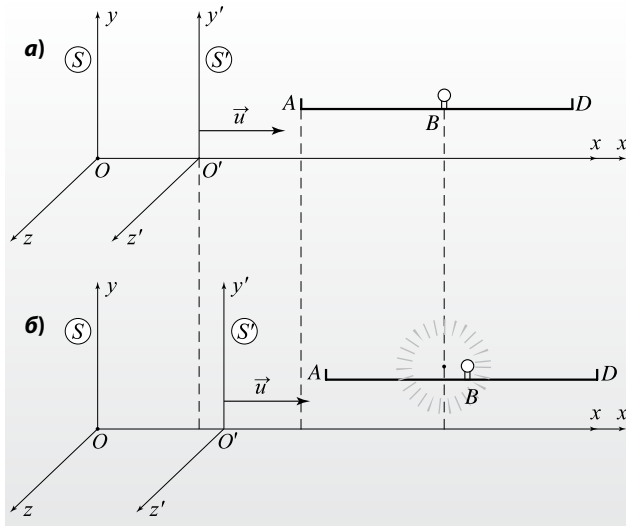


Рис. 4.2

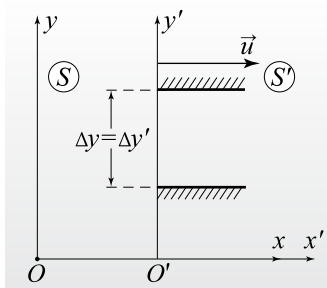


Рис. 4.3

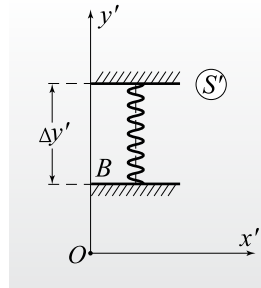


Рис. 4.4

в системе  $S'$ . Лампочка находится посередине покоящегося стержня, а свет проходит до его концов одинаковый путь. Скорость распространения света в обоих направлениях одинакова, поэтому промежутки времени, за которые свет проходит путь до концов стержня, одинаковы. Следовательно, в инерциальной системе отсчета  $S'$  события  $a$  и  $d$  происходят в один и тот же момент времени, то есть они **одновременны**.

Рассмотрим события  $a$  и  $d$  с точки зрения наблюдателя, находящегося в состоянии покоя в инерциальной системе отсчета  $S$ . Относительно этой системы стержень перемещается со скоростью  $\vec{u}$ , то есть его конец  $A$  приближается к месту, где лампочка испустила импульс света, а конец  $D$  удаляется от этого места (рис. 4.2 б). Поскольку скорость света в обоих направлениях одинакова, то промежуток времени, за который свет достигает конца стержня  $A$ , меньше того, за который он достигает его конца  $D$ . Следовательно, для наблюдателя в системе  $S$  событие  $a$  происходит раньше события  $d$ , и эти события **неодновременны**. Рассмотренный пример показывает:

**происходящие в одной из инерциальных систем отсчета, одновременные, но пространственно разобщенные события, в других инерциальных системах неодновременны, то есть одновременность относительна.**

Относительный характер **одновременности** событий означает, что в теории относительности **время не абсолютно**.

## 6. Относительность промежутков времени

Для установления связи между промежутками времени в различных инерциальных системах отсчета рассмотрим две инерциальные системы  $S$  и  $S'$ , где система  $S$  неподвижна, а система  $S'$  движется относительно  $S$  с постоянной скоростью  $\vec{u}$ , параллельной оси  $Ox$ . Допустим, что в системе  $S'$  закреплены часы, конструкция которых включает два зеркала (рис. 4.3), обращенные отражающими поверхностями друг к другу, параллельные между собой и плоскости координат  $O'x'z'$  (на рисунке не показаны перпендикулярные ей оси  $Oz$  и  $O'z'$ ). Некоторым образом из какой-то точки нижней поверхности зеркал испускается кратковременный световой импульс.

Проанализируем работу часов в системе  $S'$ , в которой они находятся в покое. Световой импульс, падающий перпендикулярно на верхнее зеркало, отражается от него и падает на нижнее зеркало, от которого опять отражается вверх и т.д. (рис. 4.4).



Импульс совершает периодическое движение между зеркалами подобно маятнику настенных часов. Допустим, что  $\tau'$  – период «колебаний» светового импульса относительно наблюдателя, находящегося в системе  $S'$ . За этот промежуток времени световой импульс проходит со скоростью  $c$  расстояния  $\Delta y'$  между зеркалами дважды. Следовательно,  $\tau' = \frac{2 \cdot \Delta y'}{c}$ , откуда выводим:

$$\Delta y' = \frac{1}{2} c \tau'. \quad (4.5)$$

Исследуем действие этих часов с точки зрения наблюдателя, находящегося в системе  $S$ , относительно которой часы движутся с постоянной скоростью  $\vec{u}$ , параллельной оси  $Ox$  и зеркалам. Пусть  $\tau$  – промежуток времени, за который свет распространяется от нижнего зеркала до верхнего и обратно. Учтем, что за промежуток времени  $\tau/2$ , пока свет распространяется от нижнего зеркала до верхнего, часы перемещаются на расстояние  $u\tau/2$  в направлении оси  $Ox$ . На рисунке 4.5 показаны три последовательных положения часов, соответствующих времени, когда свет достигает каждый раз противоположного зеркала, проходя за время  $\tau/2$  расстояние  $c\tau/2$ . Как видно из рисунка, квадрат расстояния между зеркалами равен:

$$(\Delta y)^2 = \left( c \frac{\tau}{2} \right)^2 - \left( u \frac{\tau}{2} \right)^2,$$

откуда следует:

$$\Delta y = \frac{1}{2} \tau \sqrt{c^2 - u^2}. \quad (4.6)$$

Поперечные размеры (в направлении, перпендикулярном скорости  $\vec{u}$ ) не изменяются при переходе от одной инерциальной системы к другой, то есть  $\Delta y = \Delta y'$ . Приравняв правые части выражений (4.5) и (4.6), получим:

$$\tau = \frac{\tau'}{\sqrt{1 - u^2/c^2}}. \quad (4.7)$$

Полученный результат показывает, что **промежуток времени между двумя событиями относительно**, он имеет различные значения в разных инерциальных системах. Очевидно, что  $\tau' < \tau$ , а значит промежуток времени минимален в системе отсчета  $S'$ , относительно которой место, где происходят события, фиксировано, то есть для наблюдателя, относительно которого они происходят в одной точке (после каждого периода  $\tau'$  световой импульс возвращается в исходную точку). Относительно неподвижной системы отсчета  $S$  эти два события происходят в разных точках пространства.

Таким образом,

промежуток времени между двумя событиями минимален в системе отсчета, относительно которой они происходят в одной точке.

Для наблюдателя, относительно которого место, где происходят события, движется, промежуток времени  $\tau$  между теми же событиями больше, время течет медленнее, имеет место **замедление времени**. Это замедление свойственно всем процессам, происходящим в системе  $S'$ , включая живые организмы.

## в. Относительность продольных размеров

Выше было отмечено, что поперечные размеры тел (перпендикулярные скорости движения) остаются неизменными при переходе от одной инерциальной системы отсчета к другой. Чтобы выяснить, как обстоят дела с продольными размерами, проанализируем следующий мысленный эксперимент.

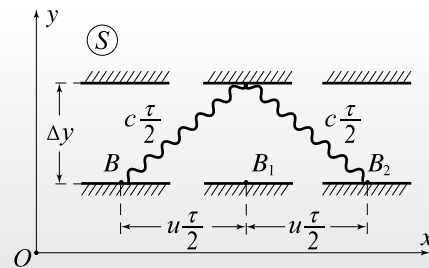


Рис. 4.5

### РАСШИРЬТЕ СВОИ ЗНАНИЯ

Реальное существование замедления хода времени получило экспериментальное подтверждение при изучении элементарных частиц. В природе существует элементарная частица *мюон*, масса которой примерно в 207 раз больше массы электрона. Она нестабильна и ее среднее время жизни в системе отсчета, относительно которой она находится в покое, равно  $2,2 \cdot 10^{-6}$  с (по истечении этого времени мюон превращается в другие элементарные частицы). Если бы мюон двигался со скоростью, примерно равной скорости света в вакууме ( $3 \cdot 10^8$  м/с), то за это время он прошел бы расстояние около 660 м. Было установлено, что мюоны возникают в верхних слоях атмосферы под действием космического излучения, непрерывно бомбардирующего Землю. При этом мюоны проходят до поверхности Земли расстояния, равные толщине атмосферы, то есть десятки километров, что много больше расстояния, вычисленного выше. Этому может быть дано объяснение только с точки зрения замедления времени: так как длительность среднего времени жизни мюонов в системе отсчета, связанной с Землей (относительно которой они движутся с огромными скоростями), много больше, чем  $2,2 \cdot 10^{-6}$  с, то за это время мюоны и проходят расстояния порядка десятков километров.

Вновь представим себе уже рассмотренные ранее две инерциальные системы отсчета  $S$  и  $S'$ : система  $S$  неподвижна, а система  $S'$  движется относительно  $S$  с постоянной скоростью  $\vec{u}$ , параллельной осям  $Ox$  и  $O'x'$ . Допустим, что в системе  $S'$  закреплена линейка  $BD$ , параллельная оси  $O'x'$ . На конце  $B$  линейки укреплена электрическая лампочка, а на конце  $D$  – маленькое зеркало, отражающая поверхность которого перпендикулярна оси  $O'x'$  и отражает по направлению к лампочке на конце  $B$  испущенный ею свет (рис. 4.6).

Пусть  $l$  – длина линейки, измеренная наблюдателем в неподвижной системе отсчета  $S$ , и  $l'$  – длина линейки, измеренная наблюдателем в системе  $S'$ , в которой линейка находится в покое. Предположим, что в некоторый момент времени лампочка на конце  $B$  линейки испускает кратковременный импульс света. Определим относительно систем  $S$  и  $S'$  промежутки времени  $\tau$  и  $\tau'$ , за которые световой импульс распространяется от лампочки до зеркала на конце  $D$  линейки и обратно. Примем во внимание второй постулат Эйнштейна.

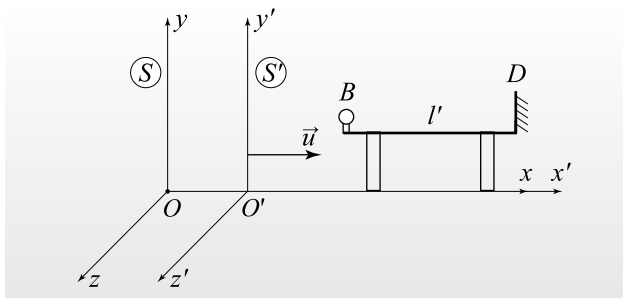


Рис. 4.6

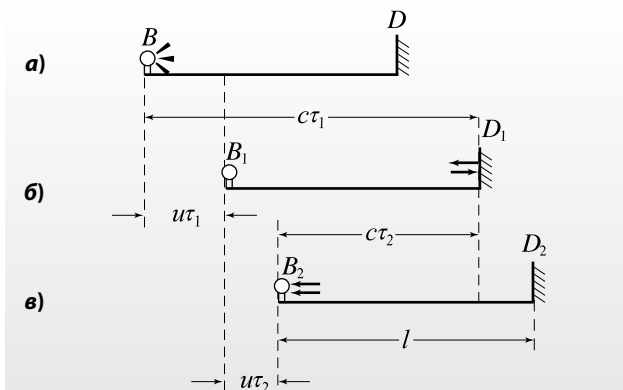


Рис. 4.7

Относительно наблюдателя, находящегося в системе  $S'$ , линейка покоится, и световой импульс проходит расстояние  $2l'$  за промежуток времени

$$\tau' = \frac{2l'}{c}. \quad (4.8)$$

Вычислим промежуток времени  $\tau$  относительно неподвижной системы отсчета  $S$ . Пусть  $\tau_1$  – промежуток времени, за который импульс света распространяется от лампочки до зеркала,  $\tau_2$  – время, за которое импульс возвращается от зеркала до лампочки. Искомый промежуток времени  $\tau = \tau_1 + \tau_2$ . За промежуток времени  $\tau_1$  свет проходит расстояние  $c\tau_1$ , равное длине линейки  $l$  плюс расстояние  $u\tau_1$ , на которое перемещается линейка за этот промежуток времени (на рисунке 4.7 показаны положения  $a$  и  $b$  линейки в начале и конце промежутка). Получаем:  $c\tau_1 = l + u\tau_1$ , следовательно,

$$\tau_1 = \frac{l}{c-u}.$$

За промежуток времени  $\tau_2$  свет проходит расстояние  $c\tau_2$ , равное длине линейки  $l$  минус расстояние  $u\tau_2$ , проходимое лампочкой навстречу световому импульсу (на рисунке 4.7 положение  $b$  линейки соответствует началу этого промежутка времени, а положение  $в$  – моменту времени, когда свет достигает лампочки). Следовательно,

$$c\tau_2 = l - u\tau_2, \text{ то есть } \tau_2 = \frac{l}{c+u}.$$

Для промежутка времени  $\tau$  получаем:

$$\tau = \tau_1 + \tau_2 = \frac{l}{c-u} + \frac{l}{c+u} = \frac{2lc}{c^2 - u^2} = \frac{2l}{c(1 - u^2/c^2)}. \quad (4.9)$$

Промежутки времени  $\tau$  и  $\tau'$  удовлетворяют соотношению (4.7), из которого следует связь между длинами линейки  $l$  и  $l'$  в инерциальных системах отсчета  $S$  и  $S'$ :

$$l = l' \sqrt{1 - u^2/c^2}. \quad (4.10)$$

Этот результат означает, что **продольные размеры относительны**, они изменяются при переходе от одной инерциальной системы отсчета к другой.

Из выражения (4.10) следует, что  $l < l'$ , то есть длина линейки, а значит, и любой продольный размер имеют наибольшую величину в системе отсчета, относительно которой тело находится в покое. Это значение  $l'$  называется **собственной длиной**.

Продольные размеры тел в системах отсчета, относительно которых они движутся, меньше собственных размеров. Это явление называется **сокращением длины**.

Данный результат так же, как и полученный ранее относительно промежутка времени, находится в полном согласии с первым постулатом Эйнштейна.

Подводя итог вышеизложенному, заключаем, что

в специальной теории относительности пространство и время не являются абсолютными: промежутки времени и размеры тел изменяются при переходе от одной инерциальной системы отсчета к другой.

Количественные соотношения (4.7) и (4.10) содержат выражение  $\sqrt{1-u^2/c^2}$ , из которого видно, что отмеченная относительность проявляется при скоростях  $u$ , сравнимых со скоростью света

в вакууме  $c$ . Эффекты, наблюдаемые при таких скоростях, называются **релятивистскими**.

Из формул (4.7) и (4.10) следует также, что при малых скоростях  $u \ll c$ , с большой степенью точности  $\tau = \tau'$  и  $l = l'$ , то есть при малых скоростях пространство и время абсолютны, а значит, справедливы законы ньютоновской механики.

Физические величины, такие как промежуток времени и длина, являются реальными, а поэтому выражение под корнем  $\sqrt{1-u^2/c^2}$  не может быть отрицательным, то есть скорость  $u$  может принимать только значения, не превышающие скорость света в вакууме  $c$ . Следовательно, **скорость  $c$  является максимально возможной скоростью распространения любых физических взаимодействий в природе и движения тел**.

### ➔ Проверьте свои знания

1. Каков физический смысл понятия *событие*?
2. В мысленном эксперименте, представленном на рисунке 4.2, наблюдатель в системе  $S$  замечает, что свет, испускаемый лампочкой  $B$ , достигает вначале конца  $A$  стержня, а затем конца  $D$ . Допустим, что система  $S'$  движется относительно системы  $S$  со скоростью  $(-\vec{u})$ . Что в этом случае заметит наблюдатель, находящийся в системе  $S'$ ?
3. В чем состоит замедление времени?
4. Какие размеры тела называются продольными и какие – поперечными? Какие из этих размеров

одинаковы в различных инерциальных системах отсчета?

5. Длина покоящегося стержня равна 25 см. Какова длина стержня в системе отсчета, относительно которой он движется со скоростью  $u = 0,6 c$ , направленной вдоль него? ( $c$  – скорость света в вакууме.)
6. Ромб с диагоналями 15 и 9 см покоится в движущейся системе отсчета. В каком направлении и с какой скоростью должен двигаться ромб, чтобы находящийся в состоянии покоя наблюдатель видел его квадратом?

## 4.3.\* ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЛОРЕНЦА И СЛЕДСТВИЯ ИЗ НИХ

### а. Преобразования Лоренца

Результаты, полученные в предыдущем параграфе, позволяют установить связь между координатами места и времени некоторого события  $(x, y, z, t)$  в инерциальной системе отсчета  $S$ , если известны соответствующие величины  $(x', y', z', t')$  этого события в инерциальной системе  $S'$  (рис. 4.8). Система  $S'$  движется относительно неподвижной системы  $S$  с постоянной скоростью  $\vec{u}$ , параллельной оси  $Ox$ , и в начальный момент времени начала координат  $O$  и  $O'$  совпадают.

Координаты  $y'$  и  $z'$  являются поперечными размерами, которые одинаковы в обеих системах отсчета, то есть  $y = y'$  и  $z = z'$ .

Длина отрезка  $O'M_2$  в системе отсчета  $S'$  равна  $x'$ , а в системе  $S$ , согласно (4.10), равна  $x'\sqrt{1-u^2/c^2}$ . Как видно из рисунка 4.8, координата  $x$  равна:

$$x = ut + x'\sqrt{1-u^2/c^2}, \quad (4.11)$$

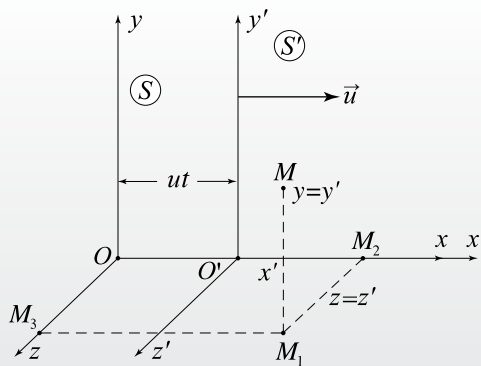


Fig. 4.8

Откуда получаем:

$$x' = \frac{x - ut}{\sqrt{1 - u^2/c^2}}. \quad (4.12)$$

Эта формула позволяет вычислять координату  $x'$  в системе  $S'$ , если известны координаты  $x$  и время  $t$  в системе  $S$ .

Получим выражение для координаты  $x$ . Допустим, что система  $S'$  неподвижна, тогда система  $S$  движется относительно  $S'$  со скоростью  $(-u^-)$ . Координату  $x$  можно получить из формулы (4.12), заменив величины  $x$  и  $t$  на  $x'$  и  $t'$  и наоборот, а также изменив на противоположный знак перед скоростью  $u$ . Получаем:

$$x = \frac{x' + ut'}{\sqrt{1 - u^2/c^2}}. \quad (4.13)$$

Приравняв правые части выражений (4.11) и (4.13) для времени  $t$  в неподвижной системе отсчета  $S$ , получим:

$$t = \frac{t' + \frac{x'u}{c^2}}{\sqrt{1 - u^2/c^2}}. \quad (4.14)$$

Сведем вместе полученные результаты:

$$x = \frac{x' + ut'}{\sqrt{1 - u^2/c^2}}, \quad y = y', \quad z = z', \quad t = \frac{t' + x'u/c^2}{\sqrt{1 - u^2/c^2}}. \quad (4.15)$$

Эти соотношения называются **преобразованиями Лоренца**. Они были выведены в 1904 году (прежде, чем была опубликована работа Эйнштейна) как формулы, которые не изменяют уравнения электродинамики при переходе от одной инерциальной системы отсчета к другой.

Основные уравнения электродинамики (уравнения Максвелла) инвариантны относительно преобразований Лоренца

в соответствии с первым постулатом Эйнштейна. Из формул для времени и координаты видно, что в специальной теории относительности пространство и время не являются независимыми.

Для скоростей, много меньших скорости света в вакууме, то есть для  $u \ll c$ , — членами, содержащими  $u/c$ , можно пренебречь, тогда преобразования Лоренца (4.15) переходят в преобразования Галилея (4.1). Таким образом, была установлена граница применимости преобразований Галилея, понятий и законов классической механики: скорости, много меньшие скорости света в вакууме.

Основное уравнение классической (ньютоновской) механики инвариантно относительно преобразований Галилея, значит, неинвариантно относительно преобразований Лоренца. Отсюда следует,

что при скоростях, сравнимых со скоростью света в вакууме  $c$ , в механике действуют иные закономерности, которые при скоростях  $u \ll c$  переходят в закономерности классической механики.

## 6. Релятивистское сложение скоростей

Установим связь между скоростями материальной точки относительно инерциальных систем отсчета  $S$  и  $S'$ . Их можно выразить через координаты и время в соответствующих системах. Так, в системе  $S$  проекция скорости на  $Ox$  равна  $v_x = \frac{dx}{dt}$ , а в системе  $S'$  —  $v'_x = \frac{dx'}{dt'}$ .

С учетом того, что скорость  $u$  постоянна, из (4.15) получаем:

$$dx = \frac{dx' + u dt'}{\sqrt{1 - u^2/c^2}}, \quad dt = \frac{dt' + dx' \cdot u/c^2}{\sqrt{1 - u^2/c^2}}. \quad (4.16)$$

Возьмем соответствующее отношение:

$$v_x = \frac{dx}{dt} = \frac{dx' + u dt'}{dt' + dx' \cdot u/c^2}.$$

Разделив числитель и знаменатель на  $dt'$  с учетом того, что  $\frac{dx'}{dt'} = v'_x$ , получим искомое соотношение:

$$v_x = \frac{v'_x + u}{1 + v'_x \cdot u/c^2}. \quad (4.17)$$

Оно представляет собой **релятивистский закон сложения скоростей**.

Проанализируем несколько примеров.

Пусть световой луч распространяется в положительном направлении оси  $Ox'$  системы  $S'$ , то есть скорость  $v'_x = c$ . Скорость распространения данного луча света относительно системы  $S$  равна  $v_x = \frac{c + u}{1 + c \cdot u/c^2} = c$ , что соответствует второму постулату Эйнштейна.

Допустим, что элементарная частица перемещается относительно системы  $S'$  со скоростью  $v'_x = 0,9 c$ , при этом скорость системы  $S'$  относительно  $S$  равна  $u = 0,8 c$ . Подставив эти значения в закон (4.17) для скорости частицы относительно неподвижной системы  $S$ , получим  $v_x = 0,988 c$ . Подставив эти же значения  $v'_x$  и  $u$  в выражение для классического закона сложения скоростей (4.3), получим  $v_x = v'_x + u = 1,7 c$ , что существенно превышает скорость света в вакууме.

При скоростях, много меньших скорости света в вакууме  $u \ll c$ , в соответствующих формулах членами, содержащими  $u/c$ , можно пренебречь, и релятивистские выражения переходят в выражения классической механики. В этом случае из (4.17) получаем  $v_x = v'_x + u$ , то есть классический закон сложения скоростей (4.3).

## → Проверьте свои знания

1. Некоторое событие произошло в движущейся системе отсчета  $S'$  в точке с координатами  $x' = 3 \cdot 10^4$  м,  $y' = 2 \cdot 10^4$  м,  $z' = 0$  в момент времени  $t' = 7 \cdot 10^{-5}$  с. Скорость этой системы относительно неподвижной равна 0,8 с и направлена вдоль оси  $Ox$ . Определите координаты и время, когда это событие произошло в системе  $S$ .

### 4.4.\* ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ РЕЛЯТИВИСТСКОЙ ДИНАМИКИ

Большинство задач классической динамики решается, исходя из основного уравнения динамики в виде  $m\vec{a} = \vec{F}$ . Оно противоречит второму постулату специальной теории относительности. В самом деле, тело массой  $m$ , на которое действует постоянная сила  $\vec{F}$ , движется из состояния покоя равноускоренно с постоянным ускорением  $a$ . Скорость тела увеличивается с течением времени и может достичь величин, превышающих скорость света в вакууме  $c$ , что не согласуется со специальной теорией относительности.

Известен и другой вид основного уравнения динамики в классической механике. Если ввести понятие импульса тела

$$\vec{p} = m\vec{v}, \quad (4.18)$$

использовать определение ускорения  $\vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt}$  и учесть, что в классической механике масса тела постоянна, то получим закон изменения импульса:

$$\frac{d\vec{p}}{dt} = \vec{F}. \quad (4.19)$$

В рамках классической механики формулировки  $m\vec{a} = \vec{F}$  и (4.19) эквивалентны, но первая непригодна в специальной теории относительности.

Эйнштейн установил, что основной закон релятивистской динамики выражается соотношением (4.19), в котором импульс тела определяется формулой (4.18), но существенно отличается от классической динамики:

**масса тела не является постоянной величиной, она зависит от скорости. А именно:**

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}, \quad (4.20)$$

где  $m_0$  – масса покоя тела, масса в системе отсчета, в которой тело покоится. Масса  $m$  называется **релятивистской массой**<sup>1</sup>.

2. С космического корабля, скорость которого относительно радиолокационной станции равна 0,6 с, испускаются электроны со скоростью 0,9 с относительно корабля, совпадающей с направлением движения корабля. Вычислить скорость электронов относительно радиолокационной станции по формулам: а) специальной теории относительности; б) классической механики.

Подставив (4.20) в (4.19), получим выражение для **релятивистского импульса**:

$$\vec{p} = \frac{m_0 \vec{v}}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}, \quad (4.21)$$

а введя (4.21) в (4.19), получим **основной закон релятивистской динамики**:

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{m_0 \vec{v}}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \right) = \vec{F}. \quad (4.22)$$

Воспользовавшись этим законом, можно показать, что скорость частицы с массой покоя  $m_0$  может увеличиваться до значений, достаточно близких к скорости света в вакууме  $c$ , но не может стать равной  $c$ , так как это означало бы неограниченное возрастание массы  $m$ .

При малых скоростях  $v \ll c$ , пренебрегая  $v^2/c^2$  по сравнению с единицей в (4.20), получим  $m = m_0$ , то есть при таких скоростях масса тела постоянна, и релятивистский закон (4.22) переходит в привычное выражение основного закона классической динамики.

Эйнштейн установил также универсальную связь между полной энергией тела  $E$  и его массой  $m$  – **взаимосвязь между массой и энергией**:

$$E = mc^2. \quad (4.23)$$

Если тело находится в состоянии покоя, то его энергия

$$E_0 = m_0 c^2 \quad (4.24)$$

называется **энергией покоя**.

Эти выражения указывают на то, что **изменению массы  $\Delta m$  обязательно соответствует изменение энергии  $\Delta E$ , связанное с изменением массы соотношением:**

$$\Delta E = \Delta m \cdot c^2. \quad (4.25)$$

Особое значение этого выражения будет проиллюстрировано позднее при использовании его в физике атомного ядра и элементарных частиц.

<sup>1</sup> В настоящее время в теоретической физике наблюдается тенденция не использовать понятие релятивистской массы  $m$ , а называть массой тела его массу покоя  $m_0$ , имеющую одно и то же значение во всех инерциальных системах отсчета, то есть величину инвариантную.

Из формул (4.18) и (4.23), исключив массу, получим важную связь между релятивистским импульсом и полной энергией:

$$\vec{p} = \frac{E}{c^2} \vec{v}. \quad (4.26)$$

Скорость тела, полная энергия и релятивистский импульс являются величинами относительными, они изменяются при переходе от одной инерциальной системы отсчета к другой. Покажем, что всё же существует абсолютная (инвариантная) величина, одинаковая во всех инерциальных системах отсчета.

Возведя выражение (4.20) в квадрат, получим:

$$m^2 (1 - v^2 / c^2) = m_0^2.$$

После умножения на  $c^4$  следует:

$$m^2 c^4 - c^2 m^2 v^2 = m_0^2 c^4.$$

С учетом соотношений (4.23) и (4.18) имеем:

$$E^2 - c^2 p^2 = m_0^2 c^4. \quad (4.27)$$

Правая часть равенства представляет собой постоянную величину, не зависящую от выбора системы отсчета, следовательно, величина в левой части равенства также одинакова в различных инерциальных системах отсчета, то есть это инвариантная величина:

$$E^2 - c^2 p^2 = \text{inv}. \quad (4.28)$$

Проанализируем следующий случай: движение со скоростью, равной скорости света в вакууме ( $v = c$ ). Тогда (4.26) принимает вид:  $p = \frac{E}{c}$ . Подставив это значение в соотношение (4.27), получаем  $m_0^2 c^4 = 0$ , откуда следует, что  $m_0 = 0$ .

А это означает, что **со скоростью, равной  $c$ , могут двигаться только частицы с нулевой массой покоя**. Позднее мы познакомимся с такими частицами.

Выведем **релятивистское выражение для кинетической энергии**. Покоящаяся частица обладает энергией покоя  $E_0 = m_0 c^2$ , а движущаяся – полной энергией  $E = mc^2$ . Таким образом, ее кинетическая энергия равна разности этих энергий:

$$E_k = E - E_0 = (m - m_0) c^2 = m_0 c^2 \left( \frac{1}{\sqrt{1 - v^2 / c^2}} - 1 \right). \quad (4.29)$$

При малых скоростях выражение для релятивистской кинетической энергии (4.29) переходит в хорошо известную формулу  $E_k = \frac{m_0 v^2}{2}$ .

Таким образом, мы установили, что при скоростях  $v \ll c$  формулы специальной теории относительности переходят в соответствующие формулы классической механики. Другими словами, классическая механика является частным случаем релятивистской механики. Этот пример служит иллюстрацией **принципа соответствия**, согласно которому любая новая теория, более глубокая, общая, с более обширной областью применения, чем старая, должна включать старую теорию как предельный, частный случай.

В заключение отметим отличительную особенность электрического заряда: его значение не изменяется при переходе от одной системы отсчета к другой, оно не зависит от скорости. Таким образом, **электрический заряд – величина инвариантная**.

## ➔ Проверьте свои знания

- Основной закон классической динамики имеет два эквивалентных выражения:  $m\vec{a} = \vec{F}$  и  $\frac{d\vec{p}}{dt} = \vec{F}$ . Какое из них не соответствует постулатам Эйнштейна? Ответ аргументируйте.
- Какой из импульсов частицы больше: релятивистский или вычисленный по формуле классической механики? В обоих случаях скорость частицы одна и та же.
- Какова универсальная связь между массой и энергией?
- Как определяется кинетическая энергия в рамках специальной теории относительности?
- Каков смысл принципа соответствия?
- Какое количество угля, удельная теплота сгорания которого равна  $2 \cdot 10^7$  Дж/кг, нужно сжечь, чтобы получить количество теплоты, равное энергии, соответствующей массе покоя, равной 1 г?
- Какое количество воды можно нагреть от 20 до 100 °С, используя для этого количество теплоты, равное энергии покоя тела с массой 1 мг? Удельная теплоемкость воды равна 4 200 Дж/(кг · К).
- При каком значении скорости частицы ее кинетическая энергия вдвое больше энергии покоя?

# ЭЛЕМЕНТЫ КВАНТОВОЙ ФИЗИКИ

## 5.1. ТЕПЛОВОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ. КВАНТОВАЯ ГИПОТЕЗА

Уточним два важных понятия. Под **электромагнитным излучением** или просто **излучением** понимается совокупность электромагнитных волн, испускаемых определенными телами, а под **эмиссией** – явление «создания» излучения.

Вы знаете, что **свет имеет электромагнитную природу**. Световые волны – это электромагнитные волны, которые, попадая в человеческий глаз, вызывают зрительные ощущения.

**Источниками света** являются тела, создающие свет, то есть испускающие электромагнитные волны. Тела, в свою очередь, состоят из атомов, которые и испускают эти волны. Выявляя общие черты явления эмиссии, учтем, что электромагнитные волны переносят энергию. Например, Земля получает теплоту, излучаемую Солнцем (см. *Физика*, VIII класс). Следовательно, атом, испуская электромагнитные волны, передает им энергию, уменьшая свою на соответствующую величину, согласно закону сохранения и превращения энергии.

В устойчивом состоянии, называемом **основным состоянием**, энергия атома минимальна. Атом может излучать энергию, если предварительно ему извне была передана определенная энергия, и он перешел из основного состояния в другое, с большей энергией. Такие состояния атома называются **возбужденными**, а процесс перехода в них – **возбуждением атома**. Возбужденный атом нестабилен, он испускает электромагнитные волны, которые уносят энергию, переданную атому, его энергия уменьшается, и он переходит в основное состояние. Существуют различные способы возбуждения атомов, а значит, и виды излучения.

Излучение, испускаемое атомами, возбужденными за счет внешних источников энергии (за исключением нагревания), называется **люминесцентным излучением**.

Излучение, испускаемое за счет внутренней энергии тел, называется **тепловым излучением**.

Проанализируем тепловое излучение, учитывая, что атомы (молекулы) тела находятся в непрерывном тепловом движении. Скорости атомов при комнатной температуре различны: у одних – больше, у других – меньше. В результате столкновений между движущимися атомами одни получают от других энергию и переходят в возбужденные состояния. Таким образом, возбуждение атомов происходит за счет внутренней энергии тела. Переход возбужденных атомов в состояние с меньшей энергией сопровождается испусканием электромагнитных волн с различной длиной волны. В результате **спектр электромагнитного излучения нагретых тел является сплошным**.

При повышении температуры тепловое движение становится более интенсивным, атомы обладают большей кинетической энергией. Энергии возбужденных атомов растут, испускание электромагнитных волн усиливается. Одновременно происходит расширение диапазона длин волн испускаемого теплового излучения. Если при комнатной температуре тела испускают невидимое инфракрасное электромагнитное излучение, при 500–600 °С красного цвета, то при повышении температуры цвет излучения изменяется до оранжевого, затем желтого и так далее до белого.

Тела не только испускают, но и поглощают падающее на них излучение, при этом доля поглощенной энергии зависит от природы вещества.

**Тело, полностью поглощающее падающее на его поверхность излучение, называется абсолютно черным.**

Тепловое излучение существенно отличается от люминесцентного тем, что оно может находиться в тепловом равновесии с телами, с которыми взаимодействует. Представим себе полость внутри тела  $A$ , заключенного в адиабатную оболочку (рис. 5.1). Оно не обменивается энергией с окружающей средой. Допустим, что внутри поло-

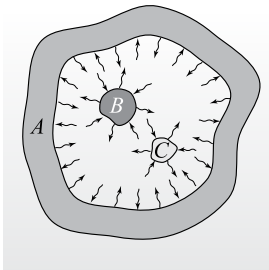


Рис. 5.1

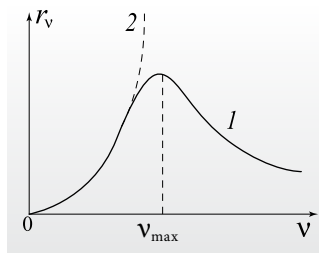
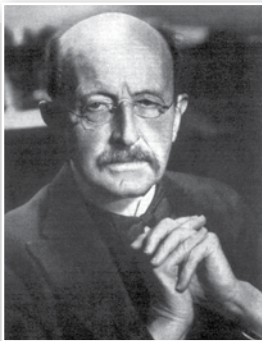


Рис. 5.2



МАКС КАРЛ ЭРНСТ  
ЛЮДВИГ ПЛАНК  
(1858–1947)

немецкий физик-теоретик

Первые исследования провел в области термодинамики, изучал различные приложения второго закона термодинамики, отметив значение этого закона для необратимых процессов. Получил самый важный результат в теории равновесного теплового излучения абсолютно черного тела (1900). Выдвинул квантовую гипотезу, позволившую ему вывести корректную формулу для спектральной плотности излучательности, а исходя из нее, получить экспериментальные законы теплового излучения, установленные ранее. За эти работы был удостоен Нобелевской премии (1918). Верный сторонник теории относительности (название предложено Планком), вывел уравнения релятивистской динамики (1906), получил релятивистское выражение для энергии и импульса электрона. Провел исследования в области релятивистской статистической термодинамики, ввел в научный оборот две универсальные постоянные: постоянную  $h$ , названную позднее *постоянной Планка*, и *постоянную Больцмана* –  $k$ . Автор книг в области истории и методологии физики и философии.

Макс Планк считается основателем современной физики. Его работы были высоко оценены Альбертом Эйнштейном.

сти находятся два тела  $B$  и  $C$ , имеющие разные температуры, отличные и от температуры тела  $A$ . Все они испускают тепловое излучение внутрь полости и частично поглощают падающее на них излучение. Происходит непрерывный обмен энергией: более нагретые тела испускают больше энергии, чем поглощают, а менее нагретые, наоборот, поглощают больше, чем испускают. В результате первые тела охлаждаются, а вторые нагреваются. Этот обмен теплом продолжается до выравнивания температуры тел. Они переходят в состояние теплового равновесия как между собой, так и с тепловым излучением внутри полости, их температуры равны.

После установления теплового равновесия процессы испускания и поглощения излучения продолжают; каждый участок поверхности тела за единицу времени испускает и поглощает одинаковую энергию. Ситуация аналогична той, которая наблюдается при динамическом равновесии между жидкостью и ее насыщенным паром – количество молекул, переходящих из жидкого состояния вещества в газообразное, равно числу молекул, совершающих обратный переход. В состоянии теплового равновесия тело, испускающее больше энергии, и поглощает больше. Этот вывод, сформулированный в виде строгого количественного закона, известен как **закон Кирхгофа для теплового излучения**.

В результате многочисленных опытов в 1893 году были сформулированы основные законы равновесного теплового излучения и его поведения при изменении температуры. Возникла необходимость их теоретического обоснования. Было установлено, что физической величиной, детально описывающей равновесное тепловое излучение, является **спектральная плотность излучательности  $r_\nu$** . Она численно равна энергии, испускаемой единицей поверхности тела за единицу времени в единичном интервале частот, содержащем данную частоту  $\nu$ . Эта величина зависит от частоты и температуры, а знание соответствующего выражения позволяет вывести экспериментальные законы.

Экспериментально был получен график зависимости спектральной плотности излучательности абсолютно черного тела от частоты (рис. 5.2, кривая 1). Наличие максимума указывает на то, что абсолютно черное тело почти не испускает электромагнитные волны очень маленьких и очень больших частот. Большинство испущенных волн имеют частоту вблизи частоты  $\nu_{\max}$ , соответствующей максимуму спектральной плотности  $r_\nu$ .



Были сделаны попытки вывести теоретически, исходя из представлений и закономерностей классической физики, формулу для  $r_{\nu}$ , соответствующую экспериментальной кривой 1 на рисунке 5.2. По полученной формуле была построена кривая 2 (прерывистая линия). Она согласуется с экспериментом (кривая 1) только в области малых частот теплового излучения. Формула, правильно описывающая зависимость спектральной плотности испускательности от частоты и температуры, была получена Планком. Он выдвинул необычную гипотезу, названную позднее **квантовой гипотезой**:

**Тела излучают и поглощают энергию не непрерывно, в каком угодно количестве, а дискретными порциями, кратными некоторой минимальной энергии.**

Эта минимальная порция энергии была названа **квантом энергии** (от лат. *quantum* – сколько). Планк установил, что величина кванта энергии  $\varepsilon$  пропорциональна частоте излучения  $\nu$ :

$$\varepsilon = h\nu, \quad (5.1)$$

где  $h$  – универсальная постоянная, получившая название **постоянной Планка**. Ее значение  $h = 6,625 \cdot 10^{-34}$  Дж·с.

Планк сообщил полученные им результаты на заседании Немецкого физического общества, состоявшегося в Берлине 14 декабря 1900 года. Эта дата считается «днем рождения» квантовой физики, которая определила развитие физики и ее приложений на протяжении всего XX века.

## ➔ Проверьте свои знания

1. Какое состояние атома называется основным? Возбужденным?
2. Чем отличается возбуждение атомов в случае люминесценции и теплового излучения?
3. В чем состоит динамическое равновесие между равновесным тепловым излучением и телами, с которыми оно взаимодействует?
4. Какое из тел испускает больше энергии за один и тот же промежуток времени: черное или белое?
5. В освещенной комнате мы видим фаянсовую чашку с нарисованной черной розой. Чашку нагрели до высокой температуры (порядка 1 000 °С) и внесли в темную комнату. Какой ее будет видеть наблюдатель в этой комнате?
6. Каков характер изменения энергии атома с точки зрения квантовой гипотезы Планка?
7. Определите энергию кванта для света с длиной волны 693 нм.
- 8.\* Найдите частоту кванта, энергия которого равна средней кинетической энергии атома гелия при температуре 527 °С.

## 5.2. ВНЕШНИЙ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ

### а. Фотоэлектрический эффект. Экспериментальные законы

В 1887 году Г. Герц, изучая электромагнитные волны, полученные в результате искрового электрического разряда между двумя электродами, установил, что облучение отрицательного электрода ультрафиолетовым светом облегчает разряд – при одном и том же напряжении на электродах он происходит на больших расстояниях между ними, чем в отсутствие освещения. В том же году обнаруженное явление было описано им в работе «О влиянии ультрафиолетового света на электрический разряд». В 1887 году Вильгельм Гальвакс (1859–1922), по совету Герца, провел эксперимент, в котором установил, что при падении ультрафиолетового излучения на отрицательно заряженное металлическое тело последнее разряжается.

Для объяснения этих опытов Гальвакс в 1888 году выдвинул гипотезу: **под действием ультрафиолетового излучения из металла освобождаются отрицательно заряженные частицы, которые облегчают электрический разряд**. Для наблюдаемого явления было предложено название – **внешний фотоэлектрический эффект**. В 1899 году Филипп Ленард (1862–1947), бывший ассистент Герца, установил природу этих отрицательных частиц – это были *электроны* (их открытие в 1897 году принадлежит Дж.Дж. Томсону).

**Эмиссия электронов твердыми и жидкими телами под действием электромагнитного излучения называется внешним фотоэлектрическим эффектом. Испускаемые электроны называются фотоэлектронами, подчеркивая таким образом способ их получения.**

Законы внешнего фотоэффекта изучали уже упомянутые немецкие ученые, а также итальянский ученый Аугусто Риги (1850–1920) и русский –

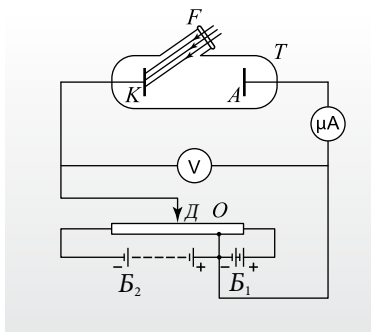


Рис. 5.3

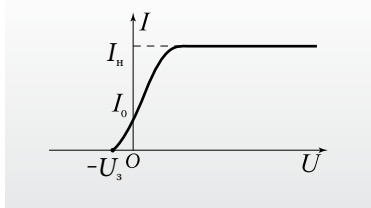


Рис. 5.4

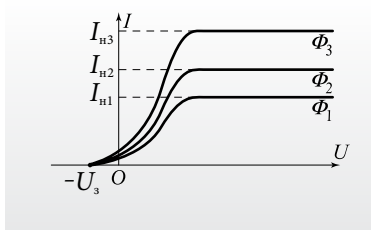


Рис. 5.5

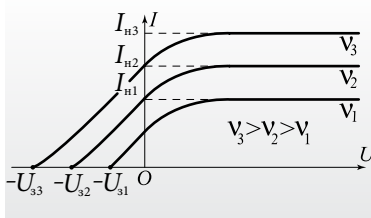


Рис. 5.6

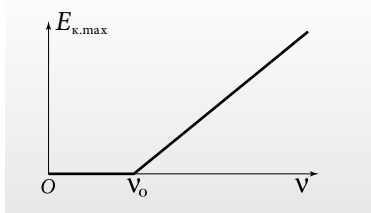


Рис. 5.7

Александр Столетов (1839–1896). Принципиальная схема установки, используемой с этой целью, показана на рисунке 5.3. Внутри трубки  $T$  расположены два электрода: катод  $K$  и анод  $A$ . Электромагнитное излучение падает на катод через кварцевое окошечко  $F$  (кварц прозрачен для ультрафиолетового излучения, а обычное стекло его задерживает). Воздух из трубки был откачан с целью исключения его влияния на движение фотоэлектронов.

Электрическая часть установки позволяет изменять как величину напряжения между электродами, так и его полярность. В положении  $O$  движка  $D$  напряжение между катодом и анодом равно нулю. При перемещении движка  $D$  из положения  $O$  влево потенциал анода  $A$  становится выше потенциала катода  $K$ , электроны в трубке ускоряются электрическим полем. Ускоряющее (положительное) напряжение увеличивается по мере смещения движка от положения  $O$  влево. Если же движок  $D$  перемещается вправо от положения  $O$ , потенциал анода становится меньше потенциала катода; электроны, движущиеся от катода к аноду, тормозятся электрическим полем. Задерживающее (отрицательное) напряжение  $U_3$  увеличивается по мере перемещения движка вправо.

Напряжение  $U$  между катодом и анодом изменяется, его значения измеряются вольтметром  $V$ . Микроамперметр  $\mu A$  регистрирует соответствующие значения силы тока  $I$ , часто называемого **фототоком**. На протяжении каждого опыта поток падающего на катод монохроматического излучения поддерживается неизменным. По полученным данным строят вольт-амперную характеристику (рис. 5.4).

Проанализируем подробнее характер зависимости силы электрического тока через трубку от напряжения между электродами. Видно, что электрический ток течет через трубку и в отсутствие напряжения между катодом и анодом: при  $U = 0$  имеем  $I = I_0$ . Это указывает на то, что электроны, испущенные катодом под действием падающего электромагнитного излучения, обладают кинетической энергией, которая позволяет им достигать анода, хотя он их и не притягивает.

Повышение положительного напряжения  $U$  (участок правее  $O$ ) вначале сопровождается медленным ростом силы тока  $I$ , которое объясняется тем, что при увеличении напряжения фотоэлектроны все сильнее притягиваются анодом. Однако повышение напряжения ограничено максимальным значением  $I_n$  – **силой тока насыщения**. В этих условиях все электроны ( $N_{0e}$ ), испущенные катодом за единицу времени, достигают анода. Каждый электрон переносит электрический заряд, по модулю равный элементарному заряду  $e$ , то есть ежесекундно через трубку переносится заряд  $N_{0e}e$ . Следовательно, сила тока насыщения

$$I_n = N_{0e}e. \quad (5.2)$$

В области отрицательных напряжений потенциал катода выше потенциала анода, поэтому электроны, которые движутся от катода к аноду, тормозятся электрическим полем, существующим в трубке. Всё меньшее число электронов (только имеющие достаточную кинетическую энергию) достигает анода, сила тока уменьшается. При значении обратного напряжения  $U_3$ , называемого **задерживающим** или **тормозящим напряжением**, ток становится равным нулю: электроны, имеющие максимальную кинетическую энергию  $E_{к. max}$ , тормозятся и останавливаются в непосредственной близости от анода. В этих условиях работа электрического поля  $eU_3$  равна максимальной кинетической энергии фотоэлектронов:

$$E_{к. max} = eU_3. \quad (5.3)$$

Были построены вольт-амперные характеристики при разных значениях **потока энергии**  $\Phi$  падающего электромагнитного излучения – энергии, падающей на катод за единицу времени, – для одной и той же частоты  $\nu$  (рис. 5.5). Было установлено, что сила тока насыщения  $I_n$  прямо пропорциональна потоку энергии:  $I_n \sim \Phi$ . Этот результат известен как

**первый закон фотоэлектрического эффекта:** сила фотоэлектрического тока насыщения прямо пропорциональна потоку энергии падающего на катод электромагнитного излучения, если его частота неизменна.

Согласно выражению (5.2) этот закон можно сформулировать таким же образом и для числа электронов  $N_{0\phi}$ , испускаемых катодом за единицу времени.

Вольт-амперные характеристики, соответствующие разным частотам  $\nu$  падающего излучения при одном значении потока падающей энергии, представлены на рисунке 5.6. Определив задерживающие напряжения из графиков на рисунках 5.5 и 5.6, по формуле (5.3) можно вычислить максимальные кинетические энергии фотоэлектронов. Используя полученные данные, был построен график зависимости максимальной кинетической энергии фотоэлектронов от частоты падающего излучения (рис. 5.7). При частотах, меньших  $\nu_0$ , фотоэлектрический эффект отсутствует. Эта частота называется **граничной** или **красной границей фотоэлектрического эффекта**. Она зависит от природы вещества.

Обобщая отмеченные результаты, можно сформулировать следующие законы фотоэлектрического эффекта (Ленард, 1902):

**второй закон внешнего фотоэлектрического эффекта:** максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов линейно зависит от частоты падающего электромагнитного излучения и не зависит от его потока энергии;

**третий закон внешнего фотоэлектрического эффекта:** внешний фотоэффект наблюдается только при частотах падающего излучения, не меньших граничной частоты  $\nu_0$ , характерной для каждого металла.

Есть еще одна особенность этого эффекта – фототок начинает течь сразу после падения электромагнитного излучения на катод, то есть электрон из металла мгновенно получает энергию, необходимую для выхода из металла, а не аккумулирует ее в течение некоторого промежутка времени. Это позволяет сформулировать

**четвертый закон фотоэффекта:** внешний фотоэлектрический эффект безынерционен.

Изложенные законы кажутся простыми. Но в рамках классической физики может быть объяснен только первый из них: чем больше интенсивность излучения, вызывающего внешний фотоэффект, тем больше фотоэлектронов покидает металл. Однако остальные законы не согласуются с классическими закономерностями физики и не могут быть объяснены в ее рамках.

## б. Фотон. Квантовая теория внешнего фотоэлектрического эффекта

С целью объяснения закономерностей фотоэлектрического эффекта Эйнштейн, обратившись к квантовой гипотезе (1905), допустил, что квантовые свойства присущи самому электромагнитному излучению. Он писал: «... я думаю, что явления, в которых наблюдается эмиссия или преобразование света, можно лучше объяснить в предположении, что световая энергия распределена в пространстве дискретно... Энергия пучка света, распространяющегося от какой-либо точки, не распределяется непрерывно во все увеличивающемся объеме, а состоит из конечного числа неделимых квантов энергии, локализованных в пространстве, испускаясь и поглощаясь только целиком».

Таким образом, Эйнштейн пришел к выводу, что существуют неделимые световые частицы, энергия которых равна энергии светового кванта (5.1). Эти частицы впоследствии (1929) были названы **фотонами** (от греч. *photos* – свет). В процессе эмиссии (поглощения) испускается (поглощается) целое число фотонов.

Отметим физические характеристики фотона.

**Энергия фотона** равна энергии кванта (5.1):

$$\epsilon_\phi = h\nu. \quad (5.4)$$

Из формулы (4.23) взаимосвязи массы и энергии  $E = mc^2$  выразим **массу фотона**:

$$m_\phi = \frac{\epsilon_\phi}{c^2} = \frac{h\nu}{c^2}. \quad (5.5)$$

**Скорость фотона** в вакууме равна скорости света:

$$v_\phi = c. \quad (5.6)$$

Из выражения для массы в зависимости от скорости  $m = \frac{m_0}{\sqrt{1-v^2/c^2}}$  запишем массу покоя

$m_0 = m\sqrt{1-v^2/c^2}$ . Подставив сюда скорость фотона  $v_\phi = c$ , для **массы покоя фотона** получим:

$$m_{0\phi} = 0. \quad (5.7)$$

Фотон существует только в движении со скоростью света, его нельзя остановить, он не существует в покое.

Импульс фотона

$$p_{\phi} = m_{\phi}c = \frac{h\nu}{c}. \quad (5.8)$$

С электрической точки зрения фотон – нейтральная частица. **Электрический заряд фотона равен нулю:**

$$q_{\phi} = 0. \quad (5.9)$$

Используя соотношение между скоростью распространения волны  $c$ , длиной волны  $\lambda$  и частотой  $\nu$ , а именно  $\nu = \frac{c}{\lambda}$ , представим выражения для энергии, массы и импульса фотона через длину волны:

$$\varepsilon_{\phi} = \frac{hc}{\lambda}, \quad m_{\phi} = \frac{h}{c\lambda}, \quad p_{\phi} = \frac{h}{\lambda}. \quad (5.10)$$

Согласно концепции Эйнштейна **свет представляет собой поток фотонов**. Это позволяет сравнительно просто объяснить законы внешнего фотоэлектрического эффекта. Считается, что **каждый электрон испускается в результате поглощения одного единственного фотона**.

При увеличении потока электромагнитного излучения возрастает число падающих на катод фотонов. В результате с катода за единицу времени испускается больше электронов, фототок насыщения увеличивается – **первый закон**.

Фотон, взаимодействуя с электроном вещества вблизи его поверхности, мгновенно передает ему всю свою энергию. Если этот электрон движется в направлении поверхности тела, то он практически сразу выходит из нее. Следовательно, фотоэффект безынерционен – **четвертый закон**.

Чтобы покинуть тело, электрон должен совершить механическую работу  $A_{\text{вых}}$ , называемую **работой выхода**, по преодолению электрических сил, действующих на него со стороны положительных ионов вещества и удерживающих электрон в нем. Ее величина зависит от природы вещества и, как правило, выражается в электронвольтах (эВ). Напомним, что 1 эВ – это энергия, которую приобретает частица, имеющая электрический заряд, равный элементарному ( $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл), при движении между двумя точками электрического поля, потенциал которых отличается на один вольт: 1 эВ =  $1,6 \cdot 10^{-19}$  Дж. Работа выхода для большинства металлов порядка нескольких электронвольт, например, для калия она равна 2,2 эВ, лития – 2,3 эВ, цинка – 4,0 эВ, серебра – 4,3 эВ, платины – 5,3 эВ. Величина работы выхода зависит также от качества обработки поверхности тела.

В результате взаимодействия между падающим фотоном и электроном вещества фотон исчезает,

а электрон получает его энергию  $h\nu$ . Согласно закону сохранения и превращения энергии покинувший металл электрон обладает кинетической энергией  $E_{\text{к}}$ , меньшей  $h\nu$  внутри тела на величину работы выхода  $A_{\text{вых}}$ , то есть

$$E_{\text{к}} = h\nu - A_{\text{вых}}. \quad (5.11)$$

Такой энергией обладают фотоэлектроны, вырванные с поверхности тела. Те же, которые выходят изнутри, при движении к поверхности могут терять часть энергии при столкновении с другими электронами. У таких электронов вне тела кинетическая энергия будет меньше, чем определяемая по формуле (5.11). Делаем вывод, что кинетическая энергия из (5.11) – **максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов**.

Подставив в (5.11) выражение для кинетической энергии  $E_{\text{к}} = \frac{mv_{\text{макс}}^2}{2}$ , перепишем его в виде

$$h\nu = A_{\text{вых}} + \frac{mv_{\text{макс}}^2}{2}. \quad (5.12)$$

Последнее соотношение, так же как и (5.11), называется **уравнением Эйнштейна для внешнего фотоэлектрического эффекта**. Его можно считать математической записью **второго закона фотоэффекта** – максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов зависит только от частоты падающего электромагнитного излучения и природы вещества, испускающего электроны.

Кинетическая энергия тела либо положительна, либо равна нулю, если тело покоится. Из (5.12) следует условие для частоты электромагнитного излучения, приводящего к эмиссии фотоэлектронов:  $h\nu - A_{\text{вых}} \geq 0$ , то есть

$$\nu \geq \frac{A_{\text{вых}}}{h} = \nu_0. \quad (5.13)$$

Таким образом, мы получили **третий закон фотоэффекта**, а также связь между граничной частотой  $\nu_0$  и работой выхода  $A_{\text{вых}}$ .

График зависимости максимальной кинетической энергии фотоэлектронов (определенной экспериментально по формуле (5.3)) от частоты, согласно уравнению Эйнштейна, представляет собой линейную функцию, что соответствует графику, полученному опытным путем (рис. 5.7). Коэффициент пропорциональности  $h$  – это универсальная постоянная, следовательно, графики этой зависимости для различных веществ представляют собой отрезки прямых, параллельных между собой.

Итак, Эйнштейн, развив и дополнив квантовую гипотезу, сумел объяснить закономерности внешнего фотоэлектрического эффекта. Это был еще один успех теории, основанной на квантовой гипотезе. За ним последовали другие достижения квантовой физики, которые предопределили развитие физики XX века.

## в. Фотоэлементы

Применения фотоэлектрического эффекта обусловлены тем, что он позволяет изменять силу тока в цепи, варьируя поток электромагнитного излучения, падающего на катод. Приборы, действующие на основе этого эффекта, называются **фотоэлементами**.

**Вакуумный фотоэлемент** представляет собой стеклянный баллон, часть внутренней поверхности которого покрыта тонким слоем металла, хорошо проводящего электрический ток (рис. 5.8). На этот слой напыляют светочувствительный слой из металла, оксида бария, соединения сурьмы с цезием или другого вещества с малой работой выхода. При этом фотоэффект будет происходить под действием видимого света. Этот двойной слой является катодом (1). В центре фотоэлемента помещают анод (2) в форме кольца. Перед катодом находится прозрачное окошко, через которое свет извне попадает на катод.

Фотоэлемент используют вместе с электромагнитным реле, основным элементом которого является электромагнит, замыкающий или размыкающий (в зависимости от освещенности катода) электрическую цепь управляемого устройства, выполняющего предусмотренные действия (рис. 5.9).

Вакуумные фотоэлементы практически безынерционны, что обуславливает их применение в установках, где необходимо быстрое реагирование. Например, для счета движущихся объектов; для автоматического выключения установок при попадании рабочих в запрещенную зону, опасную для жизни; для автоматического зажигания и гашения морских маяков, уличного освещения и т.д. Недостатком вакуумных фотоэлементов является малый фототок, что требует установки усилителя между фотоэлементом и реле.

Увеличение силы тока достигается в **газовых фотоэлементах**, баллоны которых имеют такую же конструкцию, что и у вакуумных, но заполнены инертным газом, чаще всего аргоном, при низком давлении (порядка 10 Па). При движении фотоэлектронов к аноду происходит ударная ионизация атомов газа, число свободных электронов, а следовательно, и сила тока возрастают. Эти фотоэлементы обладают определенной инерцией, обусловленной необходимостью некоторого промежутка времени для осуществления ударной ионизации.

Из XI класса вам известен принцип действия **фоторезисторов** – полупроводниковых приборов, сопротивление которых уменьшается при освещении. Под действием света часть электронов поки-

дает ковалентные связи между атомами, в результате увеличивается концентрация электронов проводимости и дырок, что приводит к уменьшению сопротивления, однако электроны проводимости остаются внутри полупроводника. Такое явление называется **внутренним фотоэлектрическим эффектом**. Приборы, в которых используется этот эффект, называются **полупроводниковыми фотоэлементами**. Полупроводниковые элементы более чувствительны к электромагнитному излучению, чем вакуумные. Они действуют как в видимой, так и инфракрасной части спектра. Область применимости полупроводниковых и вакуумных фотоэлементов одна и та же.

Внутренний фотоэффект используется также в **фотовольтаических элементах** – источниках электрического тока. Он представляет собой *p-n*-переход, на контактную область которого направлен пучок света (рис. 5.10). Под его действием часть электронов покидает ковалентные связи между атомами, концентрация электронов проводимости и дырок увеличивается. Благодаря электрическому полю контактного слоя дырки из *n*-области переходят в *p*-область, а электроны проводимости – в обратном направлении. В результате потенциал *p*-области становится выше потенциала *n*-области, между ними возникает разность потенциалов. Через нагрузку, подключенную к контактной области, течет электрический ток. Таким образом, фотовольтаический элемент является источником электрического тока, он превращает световую энергию непосредственно в энергию электрического тока. Из фотовольтаических элементов собирают солнечные батареи, которые используют как на космических кораблях, так и в земных условиях.

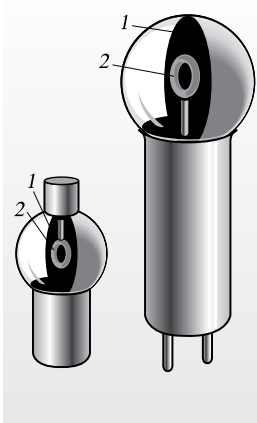


Рис. 5.8

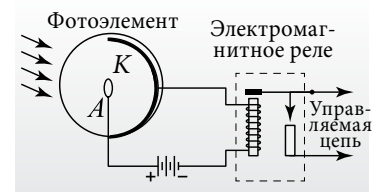


Рис. 5.9

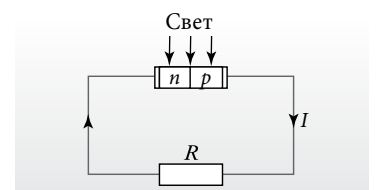


Рис. 5.10

## ➔ Проверьте свои знания

1. В чем состоит внешний фотоэффект?
2. Как объясняется наличие фотоэлектрического тока при нулевом напряжении между электродами?
3. Какой фактор определяет существование тока насыщения? Как можно изменить его величину?
4. Как можно экспериментально определить максимальную кинетическую энергию фотоэлектронов?
5. Найдите энергию фотона, соответствующую зеленому свету с длиной волны 550 нм.
6. Вычислите импульс фотона с энергией  $2,85 \cdot 10^{-19}$  Дж. Свету какой длины волны это соответствует?
7. Определите длину волны, соответствующую красной границе фотоэффекта для серебра.
8. Катод из калия освещается электромагнитным излучением с частотой  $6,3 \cdot 10^{14}$  Гц. Найдите максимальную кинетическую энергию испущенных фотоэлектронов.
9. Вычислите максимальную скорость фотоэлектронов, выбитых из катода под действием электромагнитного излучения с длиной волны 0,475 мкм, если длина волны красной границы фотоэффекта для материала катода равна 0,566 мкм.
10. Каковы преимущества и недостатки вакуумных фотоэлементов по сравнению с газовыми?
11. Чем отличается внутренний фотоэффект от внешнего?

## 5.3.\* ДАВЛЕНИЕ СВЕТА

В своей фундаментальной работе «Трактат об электричестве и магнетизме» (1873) Максвелл изложил теорию электромагнитного поля, в рамках которой предсказал существование электромагнитных волн и описал их свойства. Максвелл показал, что эти волны поперечны, электрический вектор  $\vec{E}$  и магнитный  $\vec{B}$  перпендикулярны как между собой, так и направлению скорости распространения волны  $\vec{v}$ . Направление вектора  $\vec{v}$  совпадает с направлением движения буравчика с правой резьбой при вращении его рукоятки от вектора  $\vec{E}$  к вектору  $\vec{B}$ . Максвелл показал также, что электромагнитные волны, в том числе и световые, оказывают давление на поверхность, на которую падают.

Для объяснения существования светового давления рассмотрим плоскую поверхность некоторого тела  $S$  и электромагнитную волну, падающую на нее нормально (рис. 5.11). На рисунке направление вектора  $\vec{E}$  совпадает с направлением оси  $Ox$ , вектора  $\vec{B}$  – оси  $Oy$ , вектора  $\vec{v}$  – оси  $Oz$ . Через половину периода векторы  $\vec{E}$  и  $\vec{B}$  направлены противоположно соответствующим осям, направление же вектора  $\vec{v}$  осталось прежним.

Под действием электрического поля волны свободные носители электрического заряда тела начинают двигаться упорядоченно. В направлении вектора  $\vec{E}$  течет электрический ток  $I$ , изменяющийся периодически со временем, подобно вектору  $\vec{E}$  волны. На рисунке 5.11 электрический ток  $I$  течет в направлении оси  $Ox$ . Применяя правило левой руки, устанавливаем, что электро-

магнитная сила  $\vec{F}$ , действующая на этот ток со стороны магнитного поля  $\vec{B}$  волны, направлена внутрь тела, в направлении оси  $Oz$ . Через половину периода направления векторов  $\vec{E}$  и  $\vec{B}$  изменятся на противоположные, однако направление силы  $\vec{F}$  остается прежним. Итак,

**световая волна действует перпендикулярно поверхности, на которую падает, с электромагнитной силой  $\vec{F}$  – силой давления света.**

Для давления света Максвелл получил выражение:

$$p = (1 + R) w, \quad (5.14)$$

где  $w$  – объемная плотность энергии электромагнитной волны (энергия электромагнитного поля, приходящаяся на единицу объема), а  $R$  – коэффициент отражения, равный доле отраженной от поверхности тела энергии.

Для абсолютно черного тела  $R = 0$  и  $p_ч = w$ , а для зеркальной поверхности  $R = 1$  и  $p_з = 2w$ . Таким образом, давление, оказываемое на полностью отражающее тело, вдвое больше, чем на черное.

Первые эксперименты по изучению давления света были проведены русским физиком Петром Лебедевым (1866–1912), который в 1900 году измерил давление света, оказываемое на твердые тела. Основной частью установки являлись крутильные весы – подвешенный на тонкой нити легкий стерженек с симметрично закрепленными по краям парами легких крылышек (рис. 5.12). Крылышки с одной стороны подвеса были черными, а с другой – блестящими. Нить с подвесом помещалась в сосуд с откачанным воздухом, чтобы свести к минимуму влияние соударений молекул воздуха с крылышками на результаты эксперимента.

Согласно формуле (5.14) свет, падая на блестящие крылышки, оказывает давление, примерно вдвое большее, чем при падении на черные. В результате подвес поворачивается и закручивает упругую нить подвеса. Измеряя угол вращения нити подвеса и зная параметры установки – длину и диаметр нити, размеры крылышек, расстояние от их центров до оси вращения и т.д., – Лебедев вычислил давление, оказываемое светом. Полученные результаты с точностью порядка 10% совпадают с вычисленными Максвеллом.

Экспериментальное определение давления света явилось мощным аргументом в пользу теории электромагнитного поля Максвелла и следствий из нее.

Существование светового давления объясняется и в рамках фотонной теории. Вычисления выполняются так же, как для определения величины давления газа на стенки сосуда, в котором он находится. В данном случае рассматриваются соударения фотонов с телами, на которые они падают. В результате соударений импульсы фотонов изменяются, то есть на них действуют силы со стороны тел, на которые они падают. В соответствии с третьим законом Ньютона фотоны действуют на тела, на которые падают, и производят давление.

Тот факт, что давление, оказываемое светом на отражающие тела, в два раза больше давления, оказываемого на черные, объясняется довольно просто. Изменение импульса фотона, который отражается от поверхности при нормальном падении, вдвое больше изменения импульса поглощенного фотона (его конечный импульс равен нулю). В рамках фотонной теории для давления света получается такое же выражение (5.14), как и в теории электромагнитного поля.

Следовательно, давление света может быть объяснено с точки зрения, как электромагнитной теории, так и фотонной.

В заключение отметим, что такие явления, как тепловое излучение, фотоэффект могут быть

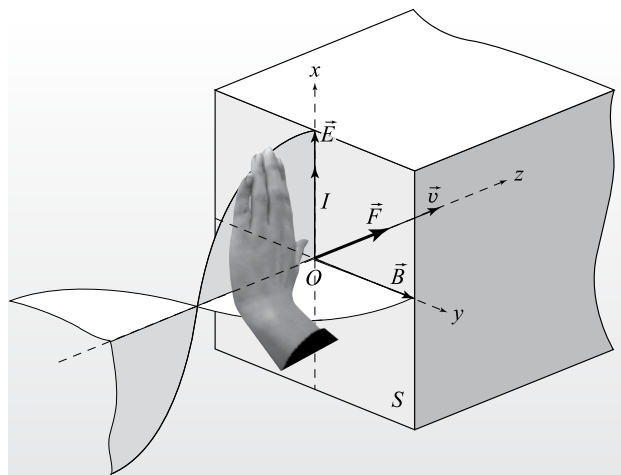


Рис. 5.11

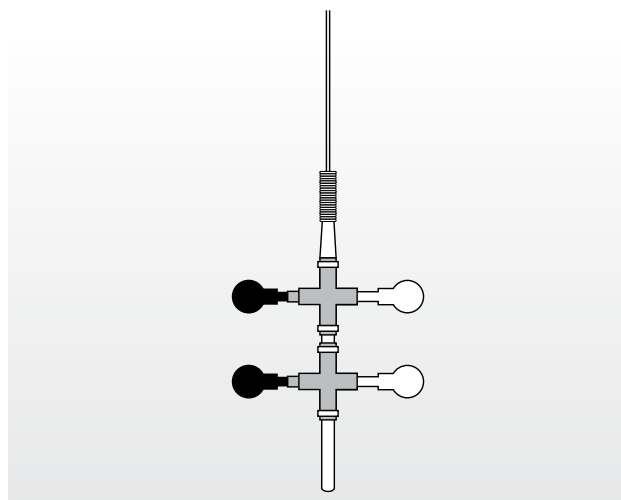


Рис. 5.12

объяснены только в рамках фотонной (корпускулярной) теории света. С другой стороны, интерференция, дифракция, поляризация света объясняются волновой теорией. Из этого следует, что свет обладает как волновыми, так и корпускулярными свойствами. **Таким образом, выяснилось, что свет обладает сложной, корпускулярно-волновой природой.**

### ➔ Проверьте свои знания

1. Как объясняется существование светового давления в рамках электромагнитной теории?
2. Как объясняется давление света с точки зрения фотонной теории?
3. Как объясняет фотонная теория тот факт, что давление на блестящую поверхность в два раза больше, чем на черную?
4. Почему подвижная часть установки Лебедева при падении света на крылышки вращается?
5. Как вы можете объяснить наличие хвоста у комет?

## 5.4.\* ВОЛНОВЫЕ СВОЙСТВА МИКРОЧАСТИЦ. КОРПУСКУЛЯРНО-ВОЛНОВОЙ ДУАЛИЗМ

### а. Волны де Бройля. Дифракция электронов

Выше было показано, что свет сочетает и волновые, и корпускулярные свойства, то есть обладает двойственным характером – **корпускулярно-волновым**. Связь между корпускулярными и волновыми характеристиками, то есть импульсом  $p_\phi$  и энергией  $\varepsilon_\phi$  фотона, с одной стороны, с длиной волны  $\lambda$  и частотой  $\nu$ , с другой, выражается формулами (5.10) и (5.4):

$$p_\phi = \frac{h}{\lambda}, \quad \varepsilon_\phi = h\nu. \quad (5.15)$$

В 1923 году молодой французский физик Луи де Бройль (1892–1987) представил Парижской Академии доклад, в котором изложил смелую гипотезу:

**Частицы вещества обладают волновыми свойствами.**

А именно: движущейся частице, обладающей импульсом  $p = mv$  и энергией  $E$ , соответствует распространение волны, впоследствии названной **волной де Бройля**, длина которой  $\lambda$  и частота  $\nu$  выражаются соотношениями (5.15), установленными для фотонов, то есть:

$$\lambda_b = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv}, \quad \nu = \frac{E}{h}. \quad (5.16)$$

Относительно гипотезы де Бройля Эйнштейн высказался, что она является «первым робким лучом света, пролитым на одну из самых темных загадок физики».

Позднее, в связи со своей гипотезой, Луи де Бройль писал: «В оптике в течение столетия слишком пренебрегали корпускулярными свойствами по сравнению с волновыми: не допускалась ли обратная ошибка в случае вещества? Не ошибались ли мы, слишком обращая внимание на корпускулярный аспект и пренебрегая волновым? После долгих размышлений и умозаключений я внезапно понял в 1923 году, что открытие, сделанное Эйнштейном в 1905 году, следует обобщить и распространить на все материальные частицы, в частности, электроны».

Гипотеза становится по-настоящему научной, если она подтверждена экспериментально. В слу-

чае гипотезы де Бройля эксперимент должен быть таким, чтобы наблюдаемое явление объяснялось только волновой теорией, например, дифракция частиц. Известно, что дифракция света наблюдается, если размеры препятствия, например, ширина щели или постоянная дифракционной решетки, такого же порядка, что и длина волны.

Оценим длину волны де Бройля для электрона, прошедшего ускоряющую разность потенциалов  $U = 100$  В. Приравняем кинетическую энергию электрона к работе электрического поля:  $\frac{m_e v^2}{2} = eU$ , где масса электрона  $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31}$  кг и электрический заряд  $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл. Импульс электрона  $p = m_e v = \sqrt{2em_e U}$ .

Из (5.16) для длины волны де Бройля записываем:

$$\lambda_b = \frac{h}{\sqrt{2em_e U}}. \quad (5.17)$$

В результате вычислений получаем:

$$\lambda_b = 1,2 \cdot 10^{-10} \text{ м.}$$

Дифракционные решетки с таким периодом нельзя изготовить, но они встречаются в природе – это кристаллические решетки, период которых порядка диаметра атома, то есть  $10^{-10}$  м. Для частиц, масса которых много больше массы электрона, длина волны де Бройля еще меньше (см. формулу (5.17)), а значит, дифракцию таких волн еще труднее обнаружить. Поэтому обычно говорят о **волновых свойствах микрочастиц**, у которых их можно обнаружить.

В 1927 году американские физики Клинтон Дж. Дэвиссон (1881–1958) и Лестер Х. Джермер (1896–1971) выполнили эксперимент, в котором пучок электронов направлялся на поверхность монокристалла никеля. Регистрировались отраженные от поверхности электроны. Ускоряющее напряжение было около 50 В, поэтому они не могли проникать вглубь металла и отражались от его поверхностных атомных слоев.

На *рисунке 5.13* условно показаны два атомных слоя на поверхности металла и два электрона, отражающиеся от атомов *A* и *B* этих слоев, а также волны де Бройля, соответствующие этим электронам. Пусть  $\theta$  – угол между направлением падающих электронов и поверхностью металла. Он равен углу между направлением отраженных электронов и той же поверхностью.

Из рисунка видно, что электрон, отраженный от атома *B*, проходит бóльший путь, чем отражен-



ный от атома А. Расстояние между атомными слоями равно  $d$ , разность пройденных путей  $\Delta = CB + BD = 2 CB = 2AB \sin\theta = 2d \sin\theta$ .

С волновой точки зрения отражение максимально в направлениях, для которых разность  $\Delta$  равна целому числу длин волн, то есть выполняется условие:

$$2d \sin\theta = m\lambda_{\text{в}}, \quad (5.18)$$

где  $m = 1, 2, 3, \dots$

Выполнение этого условия было проверено в эксперименте Дэвиссона–Джермера, схема которого представлена на рисунке 5.14. Катодом служит нить  $H$ , которая нагревается при пропускании через нее тока и испускает электроны. Конструкция анода  $A$  такова, что позволяет выделять узкий пучок электронов, которые ускоряются электрическим полем, существующим между катодом  $H$  и анодом  $A$ . Часть установки, называемой *электронной пушкой*, в которой получают пучок электронов, подобна тем, что нашли применение в электронно-лучевых трубках телевизоров, мониторов компьютеров и т.д. Получаемый пучок электронов направляется на поверхность кристалла никеля  $B$ . Отраженные от кристалла  $B$  электроны попадают внутрь цилиндра  $C$ , подсоединенного к гальванометру. Цилиндр может перемещаться и регистрировать электроны, отраженные в разных направлениях.

В результате эксперимента была вычислена длина волны по формулам (5.17) и (5.18). Значения практически совпали. В дальнейшем волновые свойства были обнаружены у заряженных частиц большей массы – протонов, ионов гелия и т.д., а также у нейтральных частиц – нейтронов и атомов.

Подведя итог изложенному выше, приходим к выводу:

**как электромагнитные волны, так и микрочастицы обладают и волновыми, и корпускулярными свойствами. В природе не существует ни волн, ни частиц, но существуют объекты, которые могут в одних условиях проявлять волновые свойства, а в других – корпускулярные. Это универсальное свойство природы называется *корпускулярно-волновым дуализмом*.**

Один из создателей квантовой механики, австрийский физик-теоретик Эрвин Шрёдингер (1887–1961), заметил, что «**волновые**» и «**корпускулярные**» свойства никогда не встречаются **раздельно**; они представляют собой **разные стороны** одних и тех же явлений.

## 6. Электронный микроскоп

Микроскоп, как известно, представляет собой оптический прибор, который используется для наблюдения объектов достаточно малых размеров, невидимых невооруженным глазом. Его важной характеристикой является **разрешающая сила** – величина, обратная минимальному расстоянию между двумя точками плоского предмета, которые видны раздельно. Это минимальное расстояние пропорционально длине волны  $\lambda$  света, используемого для освещения объекта. Таким образом, разрешающая сила обратно пропорциональна длине волны  $\lambda$ , следовательно, чем меньше длина волны – тем больше разрешающая сила.

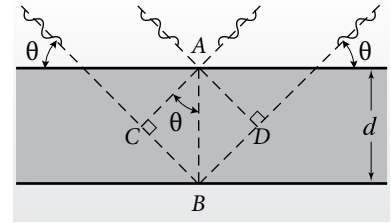


Рис. 5.13

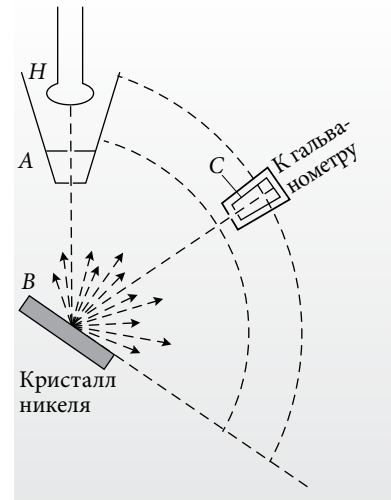


Рис. 5.14

## РАСШИРЬТЕ СВОИ ЗНАНИЯ

Шведский химик, инженер и изобретатель Альфред Бернгард Нобель (1833–1896), известный как изобретатель динамита и других взрывчатых веществ, отдал большую часть своего огромного состояния на учреждение Нобелевских премий. Они стали самыми важными международными премиями. Ежегодно присуждается по одной Нобелевской премии за особые достижения в области физики.

В списке лауреатов этих премий есть и имена ученых, заложивших основы квантовой физики:

(1918 г.) *Макс Планк* – «В знак признания его заслуг в развитии физики, благодаря открытию квантов энергии».

(1921 г.) *Альберт Эйнштейн* – «За достижения в области теоретической физики и особенно за объяснение закона фотоэлектрического эффекта».

(1922 г.) *Нильс Бор* – «За заслуги в исследовании строения атомов и испускаемого ими излучения».

(1929 г.) *Луи де Бройль* – «За открытие волновой природы электронов».

(1932 г.) *Вернер Гейзенберг* – «За создание квантовой механики, применение которой привело, помимо прочего, к открытию аллотропических форм водорода».

(1933 г.) *Эрвин Шрёдингер, Поль Дирак* – «За открытие новых продуктивных форм атомной теории».

(1937 г.) *Клинтон Дэвиссон, Джордж Томсон* – «За экспериментальное открытие дифракции электронов на кристаллах».

(1945 г.) *Вольфганг Паули* – «За открытие принципа, названного его именем (принцип Паули)».

(1954 г.) *Макс Борн* – «За фундаментальные исследования по квантовой механике, особенно за его статистическую интерпретацию волновой функции».

Нобелевские премии были присуждены и за многие другие открытия, в которых проявились закономерности квантовой физики.

Длина волны видимого света лежит в интервале от примерно  $4 \cdot 10^{-7}$  до  $7,5 \cdot 10^{-7}$  м. Длина волны де Бройля существенно меньше. По формуле (5.17) для электрона, ускоренного напряжением 100 В, было получено значение  $\lambda_{\text{Б}} = 1,2 \cdot 10^{-10}$  м, что примерно в тысячу раз меньше длины световой волны. Это навело на мысль о создании **электронного микроскопа**, принцип действия которого был бы основан на использовании волновых свойств электронов и имел бы разрешающую силу в тысячу раз большую, чем оптические микроскопы.

Первый электронный микроскоп был сконструирован в 1928–1931 годах в Германии инженерами Эрнстом Руска (1906–1988) и Максом Кноллом (1897–1969). В 1933 году у них уже был электронный микроскоп, обеспечивающий увеличение в 12 000 раз, абсолютно недостижимое для оптических микроскопов.

Конструкция электронных микроскопов подобна оптическим: электронная пушка – вместо источника света, а оптические линзы заменены электромагнитными, которые управляют движением электронов с помощью электрических и магнитных полей особой конфигурации. Электронный пучок проходит через «цель» – очень тонкую фольгу – сильно увеличенное изображение которой получается в микроскопе.

Электронные микроскопы позволяют получать изображение объектов очень малых размеров, в том числе молекул и даже атомов.

Были сконструированы также ионные микроскопы, дающие увеличение, в десятки раз большее, чем электронные. Дифракция нейтронов используется при исследовании микроструктуры сплавов, магнитных свойств различных веществ, в том числе биологических макромолекул, фазовых переходов и т.д.

## ➔ Проверьте свои знания

1. Какими свойствами света можно объяснить фотоэлектрический эффект? А интерференцию?
2. В чем состоит гипотеза де Бройля?
3. Какие эксперименты подтвердили наличие у электрона волновых свойств?
4. Какие свойства электрона – волновые или корпускулярные – привели к созданию электронного микроскопа?
5. Определите длину волны де Бройля электрона, скорость которого равна  $10^7$  м/с.
6. Как изменится длина волны де Бройля заряженной микрочастицы, если ускоряющее ее напряжение увеличится в 4 раза?



### 6.1. ЯВЛЕНИЯ, ДОКАЗЫВАЮЩИЕ СЛОЖНУЮ СТРУКТУРУ АТОМА

Из гимназического курса физики вы знаете, что при прохождении луча монохроматического света через треугольную прозрачную призму, находящуюся в воздухе, он отклоняется к основанию. Если же на призму падает белый свет, то, вследствие **дисперсии**, он разлагается на цветные лучи, соответствующие различным длинам волн. На экране получается цветная картина, называемая **спектром**.

Таким образом, с помощью треугольной призмы можно анализировать электромагнитное излучение видимого диапазона, определять длины волн, разлагая падающий свет в спектр.

**Прибор, предназначенный для визуального наблюдения спектров, называется спектроскопом.**

Принципиальная оптическая схема прибора представлена на *рисунке 6.1*. Свет от источника  $S$  попадает в коллиматор  $K_1$  через узкую щель  $\Pi$ , находящуюся в фокальной плоскости собирающей линзы  $L_1$ . В результате образуется параллельный пучок лучей, падающий на призму  $\Pi$ . Вследствие дисперсии и преломления в призме распространяется совокупность параллельных пучков. Они падают на линзу  $L_2$  камеры  $K_2$  и после преломления в линзе пересекаются в ее фокальной плоскости. Пучки, соответствующие разным длинам волн, после прохождения через призму распространяются в разных направлениях и пересекаются в соответствующих точках фокальной плоскости линзы  $L_2$ . В ней наблюдается спектр, характеризующий электромагнитное излучение, испущенное источником  $S$ . На *рисунке 6.1* показаны

лучи и полученный спектр в случае трех цветов: красного, зеленого и голубого.

Впервые разложение солнечного света в **сплошной спектр** (*рис. V a* на цветной вкладке, с. 162) наблюдал Исаак Ньютон, направляя его на призму, открыв, таким образом, **дисперсию света**.

Спектры испускания различных тел были подробно изучены в XIX веке. Немецкие ученые – физик Густав Роберт Кирхгоф (1824–1887) и химик Роберт Вильгельм Бунзен (1811–1899) – детально изучили спектры испускания некоторых веществ, вносимых в пламя спиртовки. При соответствующих температурах изучаемые вещества находились в газообразном состоянии с атомами, возбужденными в результате соударений между собой при больших скоростях. Было выяснено, что спектры испускания этих атомов не являются сплошными, они представляют собой ряд цветных линий, соответствующих определенным значениям длин волн.

**Спектры испускания возбужденных атомов являются линейчатými.**

На *рисунке V* (см. цветную вкладку, с. 162) представлены спектры натрия ( $\delta$ ), водорода ( $\zeta$ ), гелия ( $\epsilon$ ).

Кирхгоф и Бунзен в 1859 году установили, что каждому атому соответствует определенный спектр. По виду спектра можно определить атомы, его испустившие. На этом основан **спектральный анализ**. Если в полученном спектре обнаруживаются

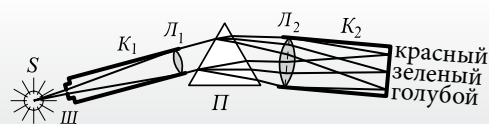


Рис. 6.1

спектральные линии, не принадлежащие известным атомам, значит, в изучаемом веществе содержатся атомы неизвестных химических элементов. Таким способом в 1868 году в спектре Солнца был открыт гелий (от греч. *helios* – солнце), который в 1895 году был обнаружен в земных условиях.

**Спектры, испускаемые молекулярными газами, представляют собой совокупность спектральных линий, объединенных в отдельные полосы, и называются *полосатыми спектрами* (рис. V и на цветной вкладке, с. 162).**

**Рассмотренные выше спектры – сплошной, линейчатый и полосатый – получаются в результате разложения электромагнитного излучения, испускаемого соответствующими телами, при его прохождении через призму. Они называются *спектрами испускания*.**

Если белый свет, испускаемый раскаленным телом, прежде чем попасть на призму, проходит через холодный газ, не испускающий свет, то на фоне сплошного спектра, наблюдаемого в отсутствие газа, появляются темные линии (рис. V на цветной вкладке: спектры *в, д, ж, з*, с. 162).

**Совокупность темных линий на фоне сплошного спектра образует *спектр поглощения*.**

Появление этих линий объясняется поглощением излучения определенных длин волн атомами газа, через который проходит излучение раскаленного тела. Кирхгоф установил (1860), что **газы поглощают излучение тех же длин волн, что и испускают**. При наложении спектров поглощения и испускания одного и того же газа возникает сплошной спектр. Полученный результат известен как **закон обращения спектра** или **закон Кирхгофа**.

Отметим, что первым обратил внимание на темные линии в сплошном спектре Солнца в 1802 году английский физик Уильям Хайд Волластон (1766–1828). В 1814–1815 годах немецкий физик Йозеф Фраунгофер (1787–1826) первый исследо-

вал и объяснил темные линии в солнечном спектре (рис. V з на цветной вкладке, с. 162), идентифицировав порядка 575 линий. В дальнейшем они были названы **линиями Фраунгофера**.

Линейчатым спектром обладают вещества в газообразном состоянии (разложенные на атомы). Их характер, положение линий можно объяснить только исходя из внутренней структуры атомов.

В 1858–1859 годах немецкий физик Юлиус Плюккер (1801–1868), изучая электрический разряд в разреженных газах, обнаружил существование излучения, испускаемого катодом и распространяющегося перпендикулярно к его поверхности. В 1876 году немецкий физик Эуген Гольдштейн (1850–1930) назвал это излучение **катодными лучами**, а в 1895 году французский физик Жан Баптист Перрен (1870–1942) доказал, что катодные лучи являются потоком отрицательно заряженных частиц. Два года спустя, в 1897 году, английский физик Джозеф Джон Томсон (1856–1940) изучил движение этого потока частиц в электрическом и магнитном полях и определил их удельный заряд, то есть отношение электрического заряда  $q$  к их массе  $m$ . Это отношение оказалось в тысячи раз больше, чем соответствующее для ионов. Считая электрический заряд катодной частицы равным по модулю элементарному электрическому заряду  $|q| = e$ , делаем вывод, что ее масса много меньше массы самого легкого атома – водорода. Открытая частица получила название **электрон**. Название было предложено в 1890 году Стонеем для элементарного электрического заряда. Таким образом, был открыт электрон – первый в ряду элементарных частиц, открытых в дальнейшем.

Электрон является частицей вещества, состоящего из атомов, масса которых много больше массы электрона. Делаем вывод, что электроны являются частью структуры атомов, исходя из которой могут быть объяснены линейчатые спектры.

## ➔ Проверьте свои знания

1. Какое оптическое явление лежит в основе принципа действия спектроскопа?
2. Каков характер спектров испускания атомов? Молекул?
3. Как объясняется наличие темных линий в спектрах поглощения?
4. Что общего в спектре испускания и поглощения одного и того же химического элемента?
5. Какие выводы относительно атомов можно сделать, исходя из факта существования электрона?

## 6.2. ОПЫТ РЕЗЕРФОРДА. ПЛАНЕТАРНАЯ МОДЕЛЬ АТОМА

После открытия электрона, частицы с массой, много меньшей массы атома, физик Дж.Дж. Томсон допустил, что электрон входит в состав атома и предложил его модель (1903). Заряд электрона отрицателен, а атом нейтрален. Далее он предположил, что атом имеет форму сферы с равномерно распределенными по ее объему массой атома и положительным зарядом. Внутри сферы находятся точечные отрицательные заряды, электроны, в таком количестве, что атом в целом нейтрален. Эта модель, названная **моделью Томсона**, в истории физики известна как **булка с изюмом**. Попытки объяснить линейчатые спектры, исходя из модели Томсона, не увенчались успехом.

Приняв во внимание отмеченное выше, Резерфорд решил проверить, как распределяются электрические заряды в атомах, чтобы подтвердить или опровергнуть модель Томсона. С этой целью проводилась бомбардировка тонкой металлической фольги  $\alpha$ -частицами, испускаемыми радиоактивным веществом (*радиоактивность будет детально изучаться в главе 7*). Здесь отметим только основные характеристики этих частиц: их масса примерно в 7 300 раз больше массы электрона ( $m_\alpha \approx 7\,300 m_e$ ), а электрический заряд положителен и равен двум элементарным электрическим зарядам ( $q_\alpha = +2e$ ). В опыте использовались  $\alpha$ -частицы, имеющие большую кинетическую энергию.

Схема установки Резерфорда представлена на рисунке 6.2. Источник радиоактивного излучения (1) находился внутри свинцового контейнера (2), имеющего узкий канал (3). Из него выходил узкий пучок  $\alpha$ -частиц. Пучок падал на очень тонкую золотую фольгу (порядка 0,4 мкм) (4). Рассеянные фольгой частицы попадали на прозрачный экран (5), покрытый слоем сульфида цинка. В месте падения  $\alpha$ -частицы на сульфид цинка возникала **вспышка**. Вспышки на экране наблюдались в микроскоп (6). Установка позволяла отмечать вспышки, вызываемые частицами, которые после взаимодействия с золотой фольгой **рассеивались под разными углами  $\theta$**  относительно первоначального направления движения.

В опыте определялась зависимость числа  $\alpha$ -частиц, прошедших через золотую фольгу, от угла рассеяния  $\theta$ . В результате тщательных наблюдений было установлено следующее:

- при прохождении через золотую фольгу большинство  $\alpha$ -частиц отклоняются от первоначального направления на достаточно малые углы;
- тем не менее, небольшая доля частиц испытывала рассеяние на угол, больший  $90^\circ$ , а некоторые – даже близкий к  $180^\circ$ .

Значительное отклонение может происходить только в результате взаимодействия с положительно заряженной частицей, масса которой много больше массы налетающей частицы, и занимающей объем, значительно меньший объема атома. Резерфорд предположил, что масса и положительный заряд атома сосредоточены в очень небольшой центральной части атома, в **ядре**.

Радиус ядра был оценен как минимальное расстояние от центра атома, на котором останавливается  $\alpha$ -частица, движущаяся прямо к ядру, при торможении ее силой отталкивания положительного заряда ядра. Зная кинетическую энергию  $\alpha$ -частицы на больших расстояниях от ядра, Резерфорд установил, что диаметр ядра порядка  $10^{-15}$  м, то есть в несколько десятков тысяч раз меньше диаметра атома (порядка  $10^{-10}$  м). Таким образом, ядро занимает ничтожно малую часть объема атома. Вокруг ядра находятся электроны, несущие отрицательный электрический заряд. Число электронов равно числу элементарных положительных зарядов ядра, обеспечивая нейтральность атома.

Очевидно, электроны атома не могут находиться в покое, так как под действием силы притяжения со стороны ядра они упали бы на него. Под действием этой силы электроны вращаются с центростремительным ускорением вокруг ядра. Это похоже на то, как в Солнечной системе планеты вращаются вокруг Солнца под действием силы гравитационного притяжения с его стороны. Благодаря этой аналогии соответствующая модель атома была названа **планетарной**

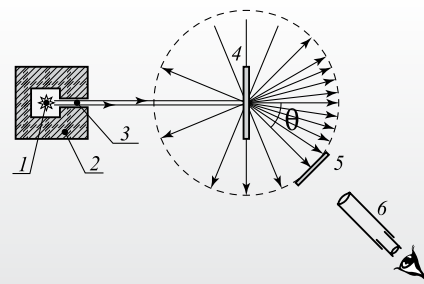


Рис. 6.2

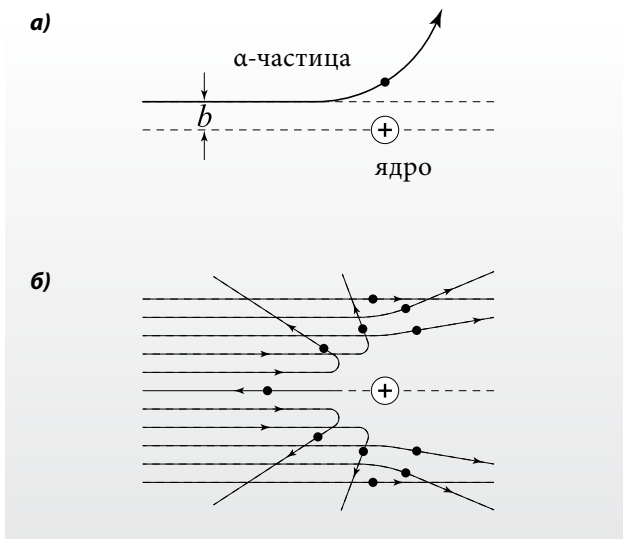


Рис. 6.3



ЭРНЕСТ РЕЗЕРФОРД  
(1871–1937)  
английский физик

Заложил основы современной теории радиоактивности и физики атомного ядра.

В 1899 году открыл две составляющие радиоактивного излучения –  $\alpha$ - и  $\beta$ -частицы. Обнаружил радиоактивность тория и тот факт, что продуктом его распада является новый химический элемент – радон с порядковым номером 86. В 1903 году вместе с Фредериком Содди (1877–1956) разработал теорию радиоактивных превращений элементов, установил закон радиоактивного распада. Доказал, что  $\alpha$ -частицы обладают положительным зарядом, а в 1909 году установил, что это дважды ионизированные атомы гелия.

В 1906 году начал систематическое исследование рассеяния  $\alpha$ -частиц при прохождении через тонкие слои различных металлов. В результате открыл атомное ядро (1911). Открыв протон (1919), доказал наличие протонов в ядре. Резерфорд осуществил первую искусственную ядерную реакцию (1919), в результате которой азот превращается в кислород. Предсказал существование нейтрона (1920), открытого в 1932 году.

В 1908 году за исследования по превращению элементов и химии радиоактивных веществ удостоился Нобелевской премии.

или **ядерной моделью**. Она известна также как **модель Резерфорда**.

Исходя из этой модели, проанализируем рассеяние  $\alpha$ -частиц. Пусть  $b$  – **прицельное расстояние** – минимальное расстояние от ядра, на котором прошла бы частица, двигаясь прямолинейно (рис. 6.3 а). Большинство  $\alpha$ -частиц пролетает мимо ядер на расстояниях, много больших их диаметра. Действие электрических сил на такие частицы несущественно, они продолжают двигаться практически прямолинейно. Значительное отклонение от прямолинейного движения испытывает небольшое число частиц, пролетающих в непосредственной близости от ядра (рис. 6.3 б).

На основе ядерной модели не удалось вычислить длины волн, соответствующие линиям, наблюдаемым в линейчатых спектрах, вопрос их объяснения оставался открытым.

Однако более важной была другая проблема – ядерная модель атома находилась в противоречии с закономерностями классической физики. В рамках теории электромагнитного поля, разработанной Максвеллом, было показано, что заряженная частица, двигаясь ускоренно, испускает электромагнитные волны, а значит, и соответствующую энергию. Движение электрона вокруг ядра не является прямолинейным и равномерным, то есть он обладает ускорением. Следовательно, он испускает электромагнитные волны, постепенно теряет энергию, все больше приближаясь к ядру, в конце концов упадет на него. Вычисления показали, что через  $10^{-8}$  с вращения вокруг ядра электрон должен упасть на ядро. Тем не менее, **атомы стабильны**.

### ➔ Проверьте свои знания

1. Могут ли электроны изменять прямолинейные траектории  $\alpha$ -частиц? Аргументируйте ответ.
2. Что представляет собой модель атома, предложенная в результате изучения рассеяния  $\alpha$ -частиц при взаимодействии их с тонкой металлической фольгой?
3. Какие проблемы не были разрешены в рамках планетарной модели атома?

## 6.3. МОДЕЛЬ АТОМА БОРА

### а. Постулаты Бора

Датский физик Нильс Бор (1885–1962) разработал теорию атома, основанную на двух постулатах.

**Первый постулат (постулат стационарных состояний)** – атом может находиться только в некоторых стационарных состояниях, в которых не происходит излучение или поглощение электромагнитных волн.

Этот постулат противоречит классической электродинамике и отрицает возможность ее применения к атомным системам – электрон в атоме движется с ускорением, но не испускает электромагнитные волны.

В каждом стационарном состоянии атом обладает определенной энергией, обычно называемой **разрешенной энергией**. Эта энергия принимает дискретный ряд значений:  $E_1, E_2, \dots, E_n, \dots$ . Целое число  $n$ , определяющее энергию атома, называется **главным квантовым числом**. Условились значения разрешенной энергии располагать таким образом, чтобы она возрастала по мере того, как увеличиваются значения числа  $n$ :  $E_1 < E_2 < E_3 < \dots$ . Состояние атома, в котором его энергия минимальна ( $E_1$ ), называется **основным** или **нормальным состоянием**, состояния с большими энергиями:  $E_2, E_3, \dots$  называются **возбужденными**. Основное состояние стабильно, то есть первый постулат подтверждает устойчивость планетарной модели атома. Таким образом, впервые в физике было допущено, что энергия, в данном случае, атома – величина дискретная.

**Второй постулат (правило частот):** при переходе из одного стационарного состояния в другое атом излучает или поглощает квант энергии, равный разности энергий атома в этих состояниях:

$$h\nu = E_n - E_m. \quad (6.1)$$

Здесь  $E_n$  и  $E_m$  – энергии атома в двух стационарных состояниях и  $E_n > E_m$ . Если  $E_n$  – энергия начального состояния,  $E_m$  – конечного, то выражение (6.1) определяет энергию (частоту) испущенного фотона (кванта энергии). Если же  $E_n$  – энергия атома в конечном состоянии, то соотношение (6.1) выражает энергию поглощенного фотона.

Модель атома, основанная на этих постулатах, называется **квантовой моделью Бора** или просто **моделью Бора**.

Для наглядного представления, изложенного выше, используются схемы **энергетических уровней**. Условились ось энергии ориентировать вертикально вверх и отмечать на ней значения разрешенных энергий. Вправо от каждого значения проводится горизонтальная линия – **энергетический уровень**. Таким образом, мы получим схему энергетических уровней (рис. 6.4). Нижний уровень – **основной уровень**, остальные уровни – **возбужденные**.

На отмеченной схеме переход атома из одного состояния в другое – **квантовый переход** – представлен вертикальным отрезком, соединяющим соответствующие уровни, стрелка указывает на конечный уровень (состояние). Например, стрелка *a* (рис. 6.4) показывает переход с уровня 2 на уровень 1 (из состояния с энергией  $E_2$  в состояние с энергией  $E_1$ ) с испусканием фотона, энергия которого  $h\nu = E_2 - E_1$ . Стрелка *b* соответствует переходу с уровня 2 на уровень 4 с поглощением фотона, энергия которого  $h\nu' = E_4 - E_2$ . На рисунке 6.4 волнистыми стрелками показаны и соответствующие фотоны (что обычно на рисунках не указывается).

### б.\* Теория атома водорода Бора

Бор применил изложенные выше постулаты при разработке теории самого простого атома – водорода. Для этого он принял следующую модель: в центре атома покоится массивное ядро, имеющее положительный заряд  $+e$ , вокруг которого по круговой орбите вращается электрон с

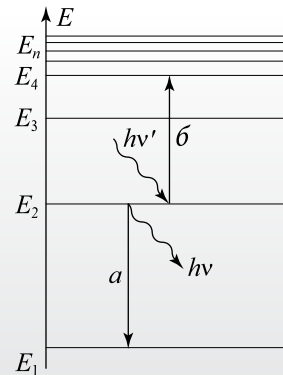


Рис. 6.4

отрицательным зарядом ( $-e$ ). Обозначим радиус орбиты  $r$ , скорость электрона  $-v$  (рис. 6.5).

Исходя из этой модели, Бору предстояло объяснить линейчатый спектр атомарного водорода. При разрешении этой проблемы особую роль сыграло ознакомление с эмпирической формулой, полученной швейцарским ученым Иоганном Якобом Бальмером (1825–1898). Зная экспериментальные значения длин волн, соответствующих

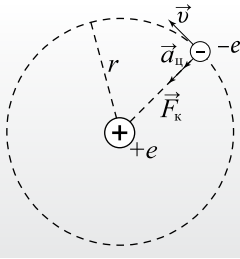
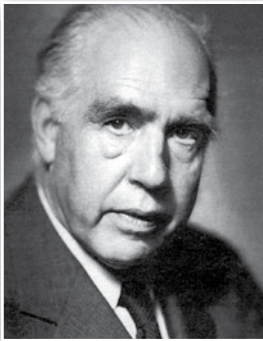


Рис. 6.5



НИЛЬС ХЕНДРИК  
ДАВИД БОР  
(1885–1962)  
*выдающийся датский  
физик-теоретик,  
один из основателей  
современной физики*

Первые исследования были посвящены поведению электронов в металле. После посещения лабораторий Дж.Дж. Томсона и Э. Резерфорда в 1911–1912 годах и ознакомления с их исследованиями в области физики атома сформулировал постулаты, на основе которых разработал теорию атома, позволившую объяснить линейчатый спектр атомарного водорода.

В 1918 году изложил принцип соответствия, определяющий условия, при которых результаты, известные в классической физике, могут быть получены с помощью формул квантовой физики.

Бор получил важные результаты в теории атомного ядра. Он – автор теории составного ядра (1933), один из создателей капельной модели ядра (1936), предложенной Джорджем Энтоном Гамовым (1904–1968). На основе этой модели совместно с Дж.А. Уилером (1911–2008) создал теорию деления ядер и предсказал спонтанное деление ядер урана (1939).

Получил Нобелевскую премию в области физики (1922) за «заслуги в исследовании строения атомов и испускаемого ими излучения».

линиям в спектре атомарного водорода в видимой области, Бальмер сумел (1885) записать общую формулу для соответствующих частот:

$$\nu = R \left( \frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right), \quad n = 3, 4, 5, \dots, \quad (6.2)$$

где  $R$  – постоянная Ридберга:

$$R = 3,29 \cdot 10^{15} \text{ c}^{-1}. \quad (6.3)$$

Бор решил вывести эту формулу в рамках теории атома. Спустя годы после создания теории Бор признался, что «как только я увидел формулу Бальмера, мне все стало ясным». Он уже знал результат, который следовало получить.

Первый постулат утверждает существование стационарных состояний атома. Для разработки теории конкретного атома необходимо было сформулировать правило, определяющее эти состояния.

Соответствующее правило содержало понятие **кинетического момента** или **момента импульса**. Он определяется по аналогии с моментом силы. Если  $F$  – сила, а  $d$  – ее плечо (расстояние между линией действия силы и точкой, относительно которой вычисляется момент), то момент силы  $M = F \cdot d$ . Кинетический момент  $L$  равен произведению импульса тела  $p = mv$  на плечо  $d_0$ . Получаем  $L = p \cdot d_0 = mvd_0$ . Для электрона в атоме водорода плечо импульса равно радиусу орбиты. Таким образом, момент импульса равен:

$$L = m_e v r, \quad (6.4)$$

где  $m_e$  – масса электрона.

Бор допустил, что

момент импульса электрона в атоме водорода может принимать только определенные, дискретные значения, равные целому числу  $n$  постоянной Планка  $h$ , деленной на  $2\pi$ .

А именно:

$$m_e v r = n \cdot \frac{h}{2\pi}, \quad \text{где } n = 1, 2, 3, \dots \quad (6.5)$$

Выражение (6.5) называется **правилом квантования Бора**. Оно выделяет стационарные орбиты из всех воображаемых орбит электрона в атоме водорода.

Наличие волновых свойств у электронов позволяет дать иную интерпретацию правила (6.5).



Выразим из (5.15) импульс электрона  $m_e v = h/\lambda$  и подставим это значение в (6.5). Получим

$$2\pi r = n\lambda, \text{ где } n = 1, 2, 3, \dots \quad (6.6)$$

Таким образом, правило квантования Бора может быть переформулировано так:

**стационарными орбитами электрона в атоме водорода являются круговые орбиты, на длине которых укладывается целое число длин волн де Бройля (рис. 6.6).**

Двигаясь по круговой орбите вокруг ядра, электрон обладает центростремительным ускорением  $a_{ц} = \frac{v^2}{r}$ , которое сообщается ему кулоновской силой притяжения к ядру:  $F_k = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r^2}$ . В соответствии с основным законом динамики  $m_e a_{ц} = F_k$  имеем:

$$m_e \frac{v^2}{r} = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r^2}. \quad (6.7)$$

Из соотношений (6.5) и (6.7) получим формулы для радиусов орбит и скоростей электронов на них:

$$r_n = \frac{\epsilon_0 h^2 n^2}{\pi m_e e^2}, \quad n = 1, 2, 3, \dots, \quad (6.8)$$

$$v_n = \frac{e^2}{2\epsilon_0 h n}, \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (6.9)$$

Заметим, что радиус орбиты (6.8) и скорость электрона (6.9) принимают дискретные значения, определяемые целым числом  $n$ , которое является индексом соответствующей величины.

Радиус первой орбиты ( $n = 1$ ) электрона в атоме водорода, называемый **радиусом Бора**, равен:

$$r_1 = \frac{\epsilon_0 h^2}{\pi m_e e^2} = 5,29 \cdot 10^{-11} \text{ м}. \quad (6.10)$$

Эта величина согласуется с экспериментальными значениями атомных радиусов.

Из выражения (6.9) видно, что скорость электрона меньше при движении по более удаленной от ядра орбите.

Вычислим энергию электрона в атоме водорода. Она складывается из кинетической энергии  $E_k = \frac{m_e v^2}{2}$  и потенциальной  $E_n$  в электрическом

поле ядра, равной произведению заряда электрона ( $-e$ ) на потенциал электрического поля ядра на расстоянии  $r$  от него:  $\varphi = \frac{e}{4\pi\epsilon_0 r}$ , то есть  $E_n = (-e)\varphi = -\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r}$ .

С учетом формул (6.8) и (6.9) для радиуса орбиты и скорости электрона на ней полная энергия  $E = E_k + E_n$  равна:

$$E_n = -\frac{m_e e^4}{8\epsilon_0^2 h^2 n^2}, \text{ где } n = 1, 2, 3, \dots \quad (6.11)$$

Целое число  $n$  определяет значение энергии электрона в атоме водорода и называется **главным квантовым числом**. Как видно из вышенаписанного, оно определяет также орбитальный момент импульса электрона в атоме, радиус орбиты и его скорость на ней.

Из (6.11) видно, что энергия электрона отрицательна. Это отражает то, что электрон связан в атоме. Для ионизации атома, то есть для удаления электрона из него, нужно затратить определенную минимальную энергию. Удаленный из атома электрон больше не взаимодействует с ним, его потенциальная энергия становится равной нулю. Внутри атома энергия электрона меньше, то есть отрицательна.

В основном состоянии ( $n = 1$ ) энергия атома минимальна и равна:

$$E_1 = -\frac{m_e e^4}{8\epsilon_0^2 h^2} = -2,17 \cdot 10^{-18} \text{ Дж} = -13,5 \text{ эВ}. \quad (6.12)$$

**Энергия ионизации атома водорода – это минимальная энергия, необходимая для удаления электрона из атома.**

Вне атома энергия равна нулю, то есть энергия ионизации  $E_{\text{ион}} = 0 - E_1 = |E_1| = 13,5 \text{ эВ}$ , что согласуется с экспериментом.

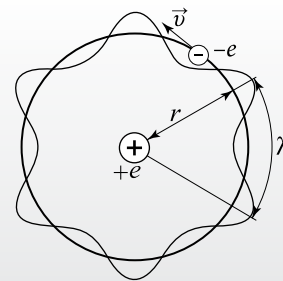


Рис. 6.6

Подставив в правило частот (6.1) выражения (6.11) для энергий  $E_n$  и  $E_m$ , где  $n > m$ , найдем частоту испущенного фотона:

$$\nu_{nm} = \frac{m_e e^4}{8\epsilon_0^2 h^3} \left( \frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right). \quad (6.13)$$

Введем постоянную Ридберга:

$$R = \frac{m_e e^4}{8\epsilon_0^2 h^3} = 3,29 \cdot 10^{15} \text{ с}^{-1}. \quad (6.14)$$

Значение  $R$ , вычисленное на основе теории Бора, совпадает с полученным экспериментально (6.3). Формула (6.13) принимает вид:

$$\nu_{nm} = R \left( \frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right). \quad (6.15)$$

Это **обобщенная формула Бальмера**. При  $m = 2$  она совпадает с (6.2), установленной опытным путем.

Спектральные линии, соответствующие определенным значениям квантового числа  $m$ , то есть переходам из состояний с большей энергией  $E_n$  в

состояние с энергией  $E_m$ , образуют **спектральную серию**. Линии серии получаются для  $n$ , принимающего значения  $(m + 1)$ ,  $(m + 2)$ , ... .

При  $m = 1$  получаем серию Лаймана, расположенную в ультрафиолетовой области спектра, а при  $m = 2$  – уже известную серию Бальмера в видимой области. Следующие серии находятся в красной и инфракрасной областях и носят имена ученых Пашена ( $m = 3$ ), Брэкета ( $m = 4$ ), Пфунда ( $m = 5$ ), Хэмфри ( $m = 6$ ). Как следует из формулы (6.15), частоты каждой следующей серии меньше, чем предыдущей.

Представим схематически полученные результаты. На *рисунке 6.7* обозначены: орбита радиуса  $r_1$  (соответствует нормальному состоянию) и орбиты возбужденных состояний ( $n = 2, 3, 4$ ) в соответствии с формулой (6.9) для радиусов. Стрелками показаны квантовые переходы между орбитами стационарных состояний для первых линий серий Лаймана, Бальмера и Пашена.

На *рисунке 6.8* представлены уровни основного состояния ( $n = 1$ ) и нескольких возбужденных уровней, согласно формуле (6.11). Стрелками показаны квантовые переходы, соответствующие сериям на *рисунке 6.7*.

Таким образом, Бору удалось не только объяснить линейчатый спектр атомарного водорода, но и объединение линий в серии, вычислить соответствующие частоты. Результаты, полученные в рамках теории Бора, прекрасно согласовались с экспериментальными данными. Это был успех первой квантовой теории атома.

Однако теория Бора испытывала и определенные трудности. Так, не удалось вычислить частоты линий спектра гелия, имеющего всего два электрона, не говоря уже о многоэлектронных атомах. Теория, даже для водорода, хотя и позволила найти частоты спектральных линий, но не смогла объяснить их интенсивности.

Неудачи были обусловлены тем, что теория Бора не была ни последовательно классической, ни последовательно квантовой. С одной стороны, в ней использовались основной закон динамики, выражения для центростремительного ускорения и кинетической энергии, а с другой – отрицалась применимость электродинамики Максвелла в атомном мире. Поэтому теория Бора считается **переходной: полуклассической или полуквантовой**.

В 20-х годах прошлого столетия была разработана современная квантовая механика, которая отвечает на вопросы, не нашедшие разрешения в теории Бора.

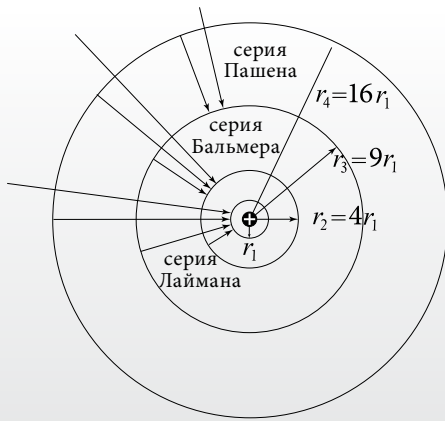


Рис. 6.7

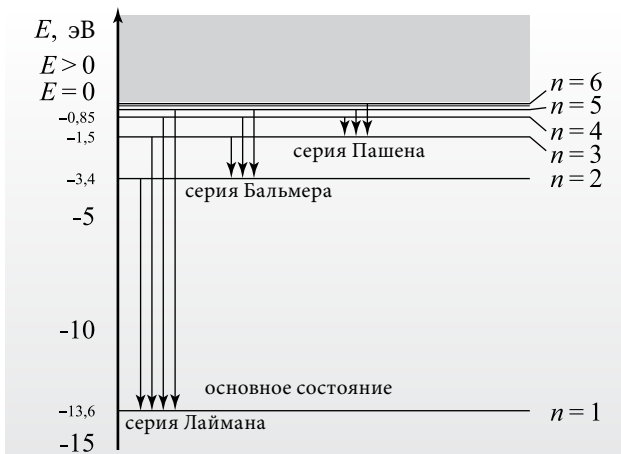


Рис. 6.8

## ➔ Проверьте свои знания

1. Какое следствие электродинамики Максвелла находится в противоречии с теорией Бора?
2. Какое важное изменение представления об энергии следует из первого постулата Бора?
3. Какое состояние атома называется основным?
4. Какие состояния называются возбужденными?
5. Как теория Бора объясняет электромагнитное излучение атомов?
6. Что представляет собой схема энергетических уровней?
7. Какие квантовые переходы сопровождаются поглощением фотонов?
- 8.\* Какие величины, характеризующие состояние электрона в атоме водорода, имеют дискретные значения?
- 9.\* Что представляют собой спектральные серии атомарного водорода? Чем они отличаются друг от друга?
10. Атом переходит из состояния с энергией  $(-1,51)$  эВ в состояние с энергией  $(-3,40)$  эВ. Вычислите частоту и длину волны испущенного фотона.
- 11.\* Определите частоту и длину волны фотона, испущенного атомом водорода при переходе из состояния с квантовым числом  $n = 4$  в состояние с квантовым числом  $m = 2$ .

## 6.4.\* ВЫНУЖДЕННОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ. ЛАЗЕР

Слово **лазер** стало частью нашей разговорной речи. И это благодаря своим многочисленным применениям, от изготовления компакт-дисков и считывания информации с них, создания световых эффектов, сопровождающих концерты музыкальных групп, до использования в качестве скальпеля при проведении тонких хирургических операций и др.

Лазер – это прибор из разряда квантовых генераторов электромагнитного излучения.

Первый квантовый генератор был разработан в 1954 году Николаем Басовым (1922–2001) и Александром Прохоровым (1916–2002) в Советском Союзе независимо и одновременно с Чарльзом Таунсом (1915–2015) в США (в 1964 году все они стали лауреатами Нобелевской премии). Этот прибор генерировал электромагнитные волны с длиной волны, равной 1,27 см (микроволновая область), и был назван **мазер** (слово образовано из начальных букв слов английского выражения *Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation* – усиление микроволн с помощью вынужденной эмиссии излучения). В 1960 году американский физик Теодор Харольд Мейман (1927–2007) создал рубиновый лазер, излучающий красный свет с длиной волны 694,3 нм. Название **лазер** образовано из начальных букв слов выражения *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation* – усиление света с помощью вынужденной эмиссии излучения.

Чтобы изложить принцип действия квантового генератора, вначале рассмотрим процессы испу-

скания и поглощения атомами фотонов (электромагнитных волн). Согласно второму постулату Бора (п. 6.3 а) эти процессы происходят при переходе электрона с одного энергетического уровня на другой (рис. 6.4). Представим на рисунках состояние системы до перехода и после (рис. 6.9–6.11, где электрон изображен черной точкой).

Обозначим через  $E_1$  энергию основного уровня, а через  $E_2$  – возбужденного ( $E_2 > E_1$ ). Квантовому переходу между этими уровнями соответствует фотон с энергией  $h\nu_{21} = E_2 - E_1$ .

Если атом находится в состоянии с энергией  $E_1$  (электрон на уровне  $E_1$ ) и на него падает фотон с энергией  $h\nu_{21}$  (рис. 6.9 а), то атом поглощает фотон и переходит в состояние с энергией  $E_2$  (рис. 6.9 б).

Атом в возбужденном состоянии ( $E_2$ ) нестабилен, его среднее время жизни порядка  $10^{-8}$  с. Он спонтанно, без всякого внешнего воздействия, переходит в основное состояние ( $E_1$ ) и испускает фотон с энергией  $h\nu_{21}$  (рис. 6.10 а, б). Это **спонтанное** (самопроизвольное) **излучение**.

Спонтанное испускание фотонов разными возбужденными атомами (независимо друг от друга) не согласовано ни по направлению распространения, ни по фазе, ни по поляризации. Так оно происходит в обычных источниках некогерентного света.

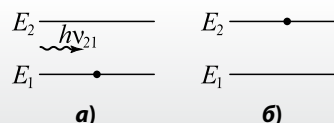


Рис. 6.9

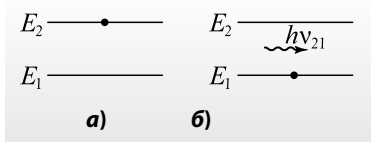


Рис. 6.10

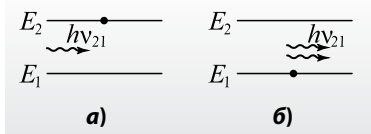


Рис. 6.11

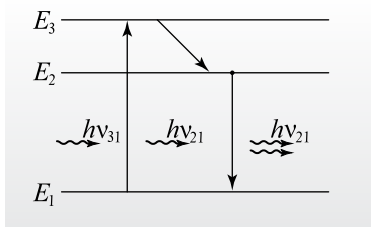


Рис. 6.12

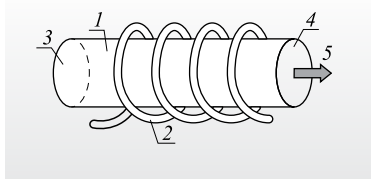


Рис. 6.13

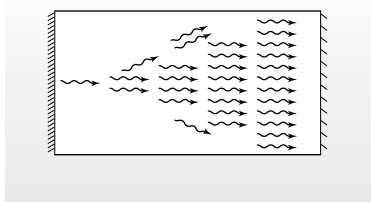


Рис. 6.14

В 1917 году Альберт Эйнштейн доказал существование еще одного вида излучения – **вынужденного (индуцированного)**. Рассмотрим возбужденный атом (электрон на уровне  $E_2$ ) и фотон с энергией  $h\nu_{21}$ , приближающийся к атому (рис. 6.11 а). Фотон воздействует на электрон на возбужденном уровне и стимулирует его переход на основной уровень ( $E_1$ ) с испусканием фотона, энергия которого также равна  $h\nu_{21}$  (рис. 6.11 б). Было установлено, что испущенный таким образом фотон имеет такие же параметры, что и падающий: направление распространения, частоту, фазу, поляризацию. Можно сказать, что испущенный фотон является «клоном» падающего.

В обычном состоянии тел большинство атомов находится в основном состоянии. Если на тело падает пучок фотонов, то часть из них поглощается, атомы переходят в возбужденное состояние и спустя некоторое время спонтанно испускают фотоны в различных направлениях. Происходит рассеяние света, интенсивность пучка уменьшается по мере прохождения через вещество. Благодаря малому времени жизни атомов в возбужденном состоянии, вынужденное излучение наблюдается у незначительного числа атомов и не восполняет потери фотонов пучка в результате поглощения. Вынужденное излучение превышало бы спонтанное, если бы атомы дольше находились в возбужденном состоянии. Такие состояния были открыты и названы **метастабильными**, они характеризуются средним временем жизни порядка  $10^{-3}$  с, что в десятки и сотни тысяч раз больше среднего времени жизни обычных возбужденных состояний. В лазерах используются вещества, частицы которых могут находиться в таких состояниях.

Рассмотрим работу **рубинового лазера**. Рубин – это кристалл окиси алюминия  $Al_2O_3$ , в котором часть атомов алюминия (около 0,05%) замещена атомами хрома (ионы  $Cr^{3+}$ ). Одно из возбужденных состояний хрома метастабильно. Обозначим через  $E_1$  энергию атома хрома в основном состоянии,  $E_2$  и  $E_3$  ( $E_2 < E_3$ ) – энергии в двух возбужденных состояниях, при этом состояние с энергией  $E_2$  метастабильно (рис. 6.12). Эта **трехуровневая система** лежит в основе принципа действия лазера.

На рубиновый цилиндр (1) насажена спиральная газоразрядная лампа (2) (обычно ксеноновая). Основания цилиндра перпендикулярны его оси, одно из них (3) представляет собой зеркало, второе (4) – полупрозрачное зеркало (рис. 6.13). Расстояние между зеркалами равно целому числу полуволн, так что возникают стоячие волны. Система зеркал образует **оптический резонатор**.

Электрический разряд в ксеноновой лампе сопровождается мощным импульсом света, так что часть атомов хрома поглощает фотоны с энергией  $h\nu_{31}$  и переходит в возбужденное состояние с энергией  $E_3$  (рис. 6.12). Эта фаза работы лазера называется **оптической накачкой**.

Из нестабильного состояния с энергией  $E_3$  атом хрома переходит в состояние с меньшей энергией  $E_2$ , разность энергий ( $E_3 - E_2$ ) передается атомам в форме кинетической энергии. В результате внутренняя энергия кристалла увеличивается, он нагревается, поэтому лазеры большой мощности снабжают системами охлаждения.

Благодаря переходам  $E_3 \rightarrow E_2$  в метастабильном состоянии накапливается большое число атомов, откуда они могут переходить в основное состояние. Кристалл готов для вынужденного излучения и представляет собой **активную среду**.

Случайно один атом переходит из метастабильного состояния в основное, испуская фотон с энергией  $h\nu_{21}$  (рис. 6.12). Перемещаясь в кристалле, он вызывает вынужденное излучение одного атома, находящегося в метастабильном состоянии. Теперь через кристалл перемещаются два идентичных фотона. Они вызывают вынужденное излучение еще двух фотонов и т.д. После каждого этапа число фотонов удваивается, в кристалле возникает лавина фотонов с одинаковыми параметрами (рис. 6.14). Если лавина образует угол с осью кристалла, она выходит через его боковую поверхность и прерывается.

Иной будет ситуация при распространении лавины параллельно оси кристалла. Зеркала на его торцах многократно отражают лавину, она проходит большое расстояние, число фотонов в лавине непрерывно растет. Через полупрозрачное зеркало (4) выходит мощный пучок фотонов (рис. 6.13) – лазерный луч (5). Рубиновый лазер работает в импульсном режиме, каждый инициируется электрическим разрядом ксеноновой лампы.

В последующие годы были разработаны новые типы лазеров: **газовые**, действующие в непрерывном режиме, **полупроводниковые лазеры** и **лазеры на органических красителях**, особенностью последних является возможность изменять частоту излучения.

Отметим основные свойства лазерного пучка:

– **монохроматичность**, обусловленная тем, что электромагнитные волны испускаются в результате квантовых переходов между двумя строго определенными энергетическими уровнями атомов;

– **когерентность**, которая является свойством вынужденного излучения;

– **малое угловое расхождение** пучка, то есть высокая степень параллельности лучей, образующих пучок, что обусловлено усилением только тех волн, которые распространяются перпендикулярно зеркалам резонатора; степень параллельности иллюстрирует тот факт, что лазерный пучок,

направленный с Земли, образует на поверхности Луны световое пятно диаметром примерно 3 км (расстояние Земля–Луна равно около 380 000 км);

– **очень большая интенсивность**. Лазеры являются самыми мощными искусственными источниками света. В некоторых типах лазеров получают (в течение малых промежутков времени) мощности излучения порядка  $10^{14}$  Вт/см<sup>2</sup>, много больше, чем мощность солнечного излучения ( $7 \cdot 10^3$  Вт/см<sup>2</sup>).

Применения лазеров весьма разнообразны, некоторые из них мы уже отмечали в начале темы. Лазерные пучки большой интенсивности используются для резки, сверления, сварки и плавления металлов, а путем испарения их в вакууме получают металлы высокой степени чистоты. Эти пучки применяются для передачи информации с помощью оптических волокон: по одному светопроводу одновременно можно передавать до миллиарда телефонных разговоров и музыкальных передач или миллион телевизионных передач. Лазеры используют в геодезии, где с их помощью измеряют расстояния и углы между определенными направлениями, отмечают направление при подземном строительстве. Так, например, был использован лазер при строительстве туннеля под проливом Ла-Манш, соединяющий Францию и Великобританию.

Применение лазеров способствовало расширению знаний об атмосфере и структуре поверхностей некоторых планет, более точному определению характеристик их движения. Лазерные локаторы позволяют устанавливать распределение загрязнений в атмосфере в зависимости от высоты, скоростей воздушных потоков и состава атмосферы. Открытие лазеров привело к появлению некоторых новых областей физики, таких как **голография** и **нелинейная оптика**.

Лазеры все чаще применяют в исследованиях в ядерной физике, в том числе для осуществления управляемой термоядерной реакции, в технике и повседневной жизни.

## ➔ Проверьте свои знания

1. Что представляет собой вынужденное излучение? Чем оно отличается от спонтанного?
2. Какие возбужденные состояния называются метастабильными? Чем они отличаются от других возбужденных состояний?
3. Что такое трехуровневая система?
4. Чем так важна оптическая накачка?
5. Какими свойствами обладают лазерные пучки?
6. Какие свойства лазерного пучка используются в геодезии?
7. Напишите реферат на тему: «Практические применения лазеров в...» (конкретной области – по выбору).

# ЭЛЕМЕНТЫ ФИЗИКИ АТОМНОГО ЯДРА. ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ЧАСТИЦЫ

## 7.1. АТОМНОЕ ЯДРО: СТРУКТУРА И ФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Открытие Дж.Дж. Томсоном электрона в 1897 году развеяло миф о неделимости атома. В 1911 году Э. Резерфорд открыл ядро, и проблема неделимости была перенесена на ядро: это единое целое, без внутренней структуры, или сложная система, состоящая из отдельных частиц?

Рассмотрим физические величины, характеризующие ядро: **электрический заряд, массу и радиус.**

Вы уже знаете (п. 6.2), что атомное ядро заряжено положительно. Величина заряда равна произведению порядкового номера  $Z$  элемента в периодической таблице химических элементов на элементарный электрический заряд  $e$ :

$$Q_{\text{ядр}} = +Ze. \quad (7.1)$$

$Z$  называется **атомным номером** (или **зарядовым числом**).

Справедливость этого соотношения была убедительно подтверждена в 1913 году английским физиком Генри Мозли (1887–1915). Он бомбардировал исследуемое вещество электронами, разогнанными до достаточно больших скоростей так, что они проникали внутрь атома почти до ядра. В результате их взаимодействия с электронами, расположенными вблизи ядра, из атома высвобождались электроны с нижних энергетических уровней. Последующий переход электронов с верхних уровней на освободившиеся нижние сопровождался электромагнитным излучением, частота которого зависела от электрического заряда

ядра. Мозли установил связь между частотой и атомным номером, известную как **закон Мозли**. На его основе был установлен физический смысл порядкового номера  $Z$  элемента в периодической таблице как числа элементарных зарядов, составляющих заряд ядра, и тем самым была подтверждена справедливость соотношения (7.1).

Массы ядер не могут быть определены непосредственно, так как они окружены электронными оболочками. Поэтому экспериментально находят массу ионов, а затем вычисляют массу ядер с учетом количества электронов в соответствующем ионе. Для определения масс ионов обычно используют **масс-спектрографы**, с принципом действия которых вы ознакомились в главе 1, п. 1.4.

Масса ядер выражается в атомных единицах массы (а.е.м.), так же как масса и атомов, и молекул. Эта единица равна  $1/12$  массы атома углерода (позднее определение будет уточнено). Атомная единица массы и 1 кг (основная единица массы в СИ) связаны следующим образом:

$$1 \text{ а.е.м.} = 1,66005656 \cdot 10^{-27} \text{ кг.}$$

В вычислениях будет использоваться приближенная величина  $1 \text{ а.е.м.} = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ кг.}$

**Массовым числом ( $A$ )** называется целое число, ближайшее к численному значению массы ядра, выраженной в атомных единицах массы.

Согласно определению массовое число – величина безразмерная, а масса атома равна  $A \cdot (\text{а.е.м.})$ .

Диаметр атомного ядра был оценен Резерфордом на основе данных, полученных при изучении рассеяния  $\alpha$ -частиц (п. 6.2). Резерфорд установил, что радиусы ядер имеют размеры порядка  $10^{-15}$  –  $10^{-14}$  м.

Между радиусом ядра и его массовым числом существует простая связь. Если считать плотность ядерной материи постоянной, то объем ядра пропорционален его массе:  $V \sim m$ . Полагая, что ядро имеет форму сферы, выразим объем через радиус:  $V = \frac{4}{3}\pi R^3$ . Масса ядра прямо пропорциональна массовому числу  $A$ , то есть  $m \sim A$ . Следовательно,  $\frac{4}{3}\pi R^3 \sim A$ , значит  $R \sim A^{1/3}$ . Переходя к равенству, получим:

$$R = aA^{1/3}. \quad (7.2)$$

Значения  $a$  лежат в интервале  $(1,2-1,4) \cdot 10^{-15}$  м. Оценим плотность ядерной материи. Масса ядра равна  $A \cdot (\text{а.е.м.})$ , объем  $\frac{4}{3}\pi R^3 = \frac{4}{3}\pi a^3 A$ . Для плотности получаем:  $\rho_{\text{ядр}} = \frac{A \cdot (\text{а.е.м.})}{\frac{4}{3}\pi a^3 A} = \frac{3 \cdot (\text{а.е.м.})}{4\pi a^3}$ . С учетом значений (а.е.м.) будем иметь  $\rho_{\text{ядр}} \approx 2 \cdot 10^{17}$  кг/м<sup>3</sup>. Это очень большая величина. Так, масса 1 см<sup>3</sup> ядерной материи равна  $2 \cdot 10^{17}$  кг/м<sup>3</sup>  $\cdot 10^{-6}$  м<sup>3</sup> =  $2 \cdot 10^8$  тонн!

В 1910–1911 годах английский ученый Фредерик Содди (1877–1956) установил, что не все атомы данного химического элемента имеют одинаковую массу. Позднее такие атомы получили общее название **изотоп** (от греч. *isos* – одинаковый, равный + *topos* – место).

**Изотопы** – это атомы одного и того же химического элемента, имеющие одинаковое зарядовое число  $Z$ , но разные массовые числа. Химические свойства изотопов приблизительно одинаковы, а это доказывает, что их электронные оболочки также одинаковы. Следовательно, все изотопы одного элемента занимают в периодической таблице химических элементов одно и то же место.

Чтобы различать изотопы, химический символ  $X$  соответствующего элемента снабжается двумя индексами, расположенными слева: внизу зарядовое число  $Z$ , вверху – массовое число  $A$ , то есть символ изотопа имеет вид  ${}^A_Z X$ . Элементами с большим числом изотопов являются уран, ртуть, стронций, олово, углерод. Например, изотопами углерода являются:  ${}^9_6\text{C}$ ,  ${}^{10}_6\text{C}$ ,  ${}^{11}_6\text{C}$ ,  ${}^{12}_6\text{C}$ ,  ${}^{13}_6\text{C}$ ,  ${}^{14}_6\text{C}$ ,  ${}^{15}_6\text{C}$  и  ${}^{16}_6\text{C}$ . В природном углероде содержится 98,9% изотопа  ${}^{12}_6\text{C}$ , а изотопа  ${}^{13}_6\text{C}$  – только 1,1%, содержание остальных ничтожно мало.

**В определении атомной единицы массы имеется в виду изотоп  ${}^{12}_6\text{C}$ .**

Открытие изотопов показало, что ядра не являются неделимыми и что у них есть опреде-

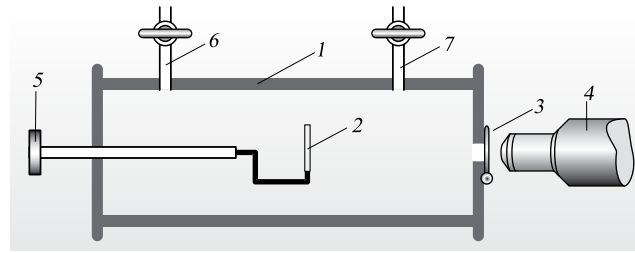


Рис. 7.1

ленная внутренняя структура. Чтобы установить ее, нужно было выяснить, какие частицы входят в состав ядра. Первая частица была открыта в 1919 году Резерфордом. Схема используемой им установки представлена на рисунке 7.1. Внутри герметичного сосуда (1) помещался источник α-частиц (2). Необходимо подчеркнуть, что **α-частицы – это ядра изотопа гелия  ${}^4_2\text{He}$** . На пути α-частиц располагался прозрачный экран (3), покрытый слоем флуоресцирующего вещества. При падении α-частиц на этот слой в соответствующих местах возникали световые вспышки, наблюдаемые в микроскоп (4). Ручка (5) позволяла приближать или удалять источник (2) от экрана (3). Через трубки (6), (7), снабженные кранами, газ из сосуда мог откачиваться и заменяться другим. Во время опыта давление различных газов было постоянным.

Резерфорд установил, что если сосуд был заполнен кислородом, то при увеличении до определенного значения расстояния между источником (2) и флуоресцентным экраном (3) световые вспышки прекращались. То же самое наблюдалось при замене кислорода двуокисью углерода. В обоих случаях α-частицы соударялись с молекулами газа, теряли энергию и не достигали экрана.

Нечто иное наблюдалось при заполнении сосуда воздухом или азотом. При том же расстоянии от источника до экрана на нем изредка появлялись световые вспышки. Их появление могло быть объяснено только тем, что α-частицы, сталкиваясь с ядрами азота, выбивали из них массивные частицы, которые, ударяясь о флуоресцентный экран, вызывали вспышки света. Детальное изучение влияния электрических и магнитных полей на движение частиц, выбитых из атомов азота, показало, что их масса равна массе самого легкого изотопа водорода  ${}^1_1\text{H}$ , а электрический заряд положителен и равен элементарному заряду. Эти частицы – ядра изотопа  ${}^1_1\text{H}$  – были названы **протонами**.

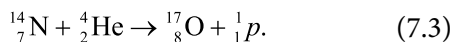
Опыт был повторен с другими веществами – бором, фтором, натрием, алюминием, неоном и т.д.

Резерфорд установил, что во всех этих случаях  $\alpha$ -частицы выбивают из соответствующих ядер протоны. Таким образом, пришли к выводу, что **протоны – это частицы, входящие в состав ядер**. Их обозначают буквой  $p$ .

В результате измерений, выполненных с высокой степенью точности, были определены масса протона  $m_p = 1,6726231 \cdot 10^{-27}$  кг = 1,007276470 а.е.м. и электрический заряд  $q_p = +e = +1,60217733 \cdot 10^{-19}$  Кл. Протон – это ядро с  $Z = 1$  и  $A = 1$ . Его символ, согласно правилу, установленному для других изотопов,  ${}^1_1p$ .

Масса протона в 1 836 раз больше массы электрона:  $m_p = 1\,836 m_e$ . Массовое число электрона равно нулю, электрический заряд равен  $(-e)$ . Электрон обозначают символом  ${}^0_{-1}e$ .

В эксперименте, в котором был открыт протон, Резерфорд осуществил **первую искусственную ядерную реакцию**. Запишем соответствующую ядерную реакцию с учетом того, что  $\alpha$ -частица – это изотоп  ${}^4_2\text{He}$ :



Таким образом, Резерфорду впервые удалось превратить азот в кислород.

Осознавая, что существованием только протонов нельзя объяснить многообразия изотопов в природе, Резерфорд в 1920 году допустил наличие еще одной, нейтральной частицы в составе ядра. На открытие этой частицы понадобилось 12 лет.

Первый шаг был сделан в 1930 году немецким физиком Вальтером Боте (1891–1957) и его сотрудником Г. Беккером. Бомбардируя бериллий  $\alpha$ -частицами, они зарегистрировали появление каких-то частиц неизвестной природы с большой проникающей способностью. В 1932 году французские ученые, супруги Жолио-Кюри, Ирен (1897–1956) и Фредерик (1900–1958), установили, что неизвестное излучение, падающее на слой парафина, выбивает из него протоны.

Решающий шаг был сделан в том же 1932 году английским физиком Джеймсом Чедвиком (1891–1974), который определил, что частицы, испуска-

емые бериллием в результате бомбардировки его  $\alpha$ -частицами, – это нейтральные частицы, масса которых примерно равна массе протона. Они были названы **нейтронами**, их обозначают  $n$ .

В результате достаточно точных измерений установили, что масса  $m_n = 1,6749286 \cdot 10^{-27}$  кг = 1,008664902 а.е.м.  $\approx 1\,838 m_e$ . Масса нейтрона примерно на 0,15% больше массы протона. Массовое число нейтрона равно 1, а зарядовое – 0. Символ нейтрона  ${}^1_0n$ .

Отметим, что нейтрон в свободном состоянии нестабилен, его среднее время жизни около 15 мин. Он стабилен только в составе атомных ядер. Таким образом,

были идентифицированы **частицы, составляющие атомное ядро: протон  ${}^1_1p$  и нейтрон  ${}^1_0n$** . Их общее название – **нуклоны**.

После открытия нейтрона, в 1932 году, немецкий физик Вернер Карл Гейзенберг (1901–1976) и русский физик Дмитрий Иваненко (1904–1994), независимо друг от друга, предложили **протонно-нейтронную модель ядра**. Согласно этой модели атомное ядро состоит из протонов и нейтронов. У каждого из них массовое число равно 1, то есть общее их число (число нуклонов) равно массовому числу  $A$ . Число протонов равно атомному номеру  $Z$ , остальная часть нуклонов  $N = A - Z$  – это нейтроны. Следовательно,

ядро химического элемента  ${}^A_ZX$  состоит из  $A$  нуклонов, из которых  $Z$  протонов и  $N = A - Z$  нейтронов.

Протонно-нейтронная модель ядра позволяет объяснить существование изотопов, которые имеют одинаковый атомный номер  $Z$  и различные массовые числа  $A$ . Следовательно, соответствующие ядра содержат одинаковое число протонов, но разное – нейтронов.

Таким образом, исследования, выполненные различными учеными на протяжении около 20 лет, позволили установить не только модель атома, но и его ядра.

## ➔ Проверьте свои знания

1. Какая физическая характеристика ядра определяется атомным номером химического элемента?
2. Как определяется массовое число атомного ядра?
3. Что представляют собой изотопы химического элемента?
4. Какое из чисел, характеризующих атомное ядро, одинаково для всех изотопов одного и того же химического элемента?
5. Оцените примерный радиус ядра изотопа йода  ${}^{127}_{53}\text{I}$ .
6. Сколько протонов и сколько нейтронов содержит ядро изотопа тория  ${}^{232}_{90}\text{Th}$ ?



## 7.2.\* ЯДЕРНЫЕ СИЛЫ. ЭНЕРГИЯ СВЯЗИ ЯДРА

Протоны, входящие в состав атомного ядра, заряжены положительно, то есть между ними действуют электростатические силы отталкивания. Если учесть, что расстояния между протонами очень малы, то указанные силы велики. Но протоны не рассеиваются в пространстве, а вместе с нейтронами образуют компактную структуру – ядро. Это может быть объяснено, если считать, что между нуклонами – протонами и нейтронами ядра – действуют также силы иной физической природы, которые превышают электрические силы отталкивания и удерживают их вместе.

**Силы, удерживающие нуклоны вместе в составе ядра, называются ядерными силами.**

Детальные исследования позволили выявить свойства ядерных сил. Проанализируем основные из них.

**1. Ядерные силы являются силами притяжения.** Таким образом, они подобны гравитационным силам и отличаются от электростатических, которые могут быть как силами притяжения, так и отталкивания, в зависимости от знаков взаимодействующих зарядов.

**2. Силы ядерного притяжения не зависят от электрических зарядов нуклонов.** Ядерное притяжение протон–протон, протон–нейтрон или нейтрон–нейтрон одинаково для одного и того же взаимного расположения пар нуклонов.

**3. Ядерные силы являются короткодействующими.** На расстояниях между нуклонами, больших  $1,4 \cdot 10^{-15}$  м, ими можно пренебречь.

**4. Ядерным силам свойственно насыщение.** Так говорят, потому что из-за малого радиуса действия каждый нуклон взаимодействует только с ближайшими соседями, притягивая их и притягиваясь ими.

**5. Ядерные силы – самые мощные из всех известных в природе.** Они примерно в 100 раз больше сил электростатического взаимодействия.

Взаимодействие между нуклонами настолько сложно, что до настоящего времени не разработано полной теории ядерных сил.

Из классической механики нам известно, что

**масса** – аддитивная физическая величина. Масса системы тел равна сумме масс всех тел, ее составляющих.

Высокоточные измерения показали, что в ядерной физике это не так.

Масса ядра меньше суммы масс составляющих его нуклонов.

Ядро элемента  ${}^A_Z X$  содержит  $Z$  протонов и  $N = A - Z$  нейтронов. Если  $m_p$  – масса протона и  $m_n$  – масса нейтрона, то сумма их масс равна  $Zm_p + (A - Z)m_n$ . Масса ядра  $m_{\text{ядр}}$  меньше этой суммы:

$$m_{\text{ядр}} < Z m_p + (A - Z) m_n.$$

**Разность суммы масс протонов и нейтронов, образующих ядро, и массы ядра называется дефектом массы ( $\Delta m$ ):**

$$\Delta m = Z m_p + (A - Z) m_n - m_{\text{ядр}}. \quad (7.4)$$

Экспериментально определяются массы атомов, а не ядер. Поэтому в выражении (7.4) для дефекта массы перейдем к массам атомов, которые больше массы ядер на сумму окружающих их электронов. С учетом того, что масса атома  $m_{\text{ат}} = m_{\text{ядр}} + Zm_e$ , а  $m_p + m_e = m_{\text{H}}$ , – это масса атома водорода, перепишем (7.4) следующим образом:

$$\Delta m = Z m_{\text{H}} + (A - Z) m_n - m_{\text{ат}}. \quad (7.5)$$

Дефект массы обычно выражается, как и массы атомов, в атомных единицах массы (а.е.м.).

Вычислим, например, дефект массы для изотопа кремния  ${}^{31}_{14}\text{Si}$ . Масса этого атома равна 30,9753 а.е.м., а водорода – 1,00783 а.е.м., нейтрона – 1,00866 а.е.м. Таким образом,  $\Delta m = 0,28154$  а.е.м. Дефект массы этого изотопа больше четверти атомной единицы массы.

Знание дефекта массы позволяет определять важную энергетическую характеристику ядра – энергию связи.

**Энергией связи ядра называется физическая величина, равная минимальной работе, необходимой для разделения ядра на составляющие его нуклоны.**

Работа совершается для преодоления ядерных сил, удерживающих протоны и нейтроны в ядре. Аналогичная ситуация имеет место при разложении на молекулы капли воды, доведенной до температуры кипения, – для этого капле воды сообщается некоторая энергия, теплота испарения. В обоих случаях, при разделении ядра или капли, энергия рассматриваемой системы частиц увеличивается.

Чтобы вычислить приращение энергии при разделении ядра, начнем с того, что этот процесс сопровождается увеличением массы системы частиц на величину дефекта массы  $\Delta m$ . Далее воспользуемся формулой (4.25) для связи между изменением массы и соответствующим изменением энергии:  $\Delta E = \Delta m \cdot c^2$ , где  $c$  – скорость света в вакууме. Согласно определению энергии связи  $E_{\text{св}} = \Delta E$ , то есть

$$E_{\text{св}} = \Delta m \cdot c^2, \quad (7.6)$$

где  $\Delta m$  – дефект массы.

Подставив выражение (7.5) в (7.6), получим формулу для вычисления энергии связи ядра:

$$E_{\text{св}} = [Z m_{\text{H}} + (A - Z) m_{\text{n}} - m_{\text{я}}] c^2. \quad (7.7)$$

При образовании ядра из отдельных протонов и нейтронов масса системы частиц уменьшается на  $\Delta m$ , а энергия  $E_{\text{св}}$  выделяется.

Дефект массы выражается в атомных единицах массы (а.е.м.). Если брать как можно точнее значения атомной единицы массы, скорости света в вакууме и электрон-вольта, выраженного в джоулях, то энергия, эквивалентная этой единице, равна:

$$1 \text{ (а.е.м.)} \cdot c^2 \approx 9,315 \cdot 10^8 \text{ эВ} = 931,5 \text{ МэВ}.$$

Для энергии связи изотопа кремния  $^{31}_{14}\text{Si}$ , дефект массы которого был вычислен выше, получаем:  $E_{\text{св}} = 0,28154 \cdot 931,5 \text{ МэВ} \approx 262,2 \text{ МэВ}$ .

Это достаточно большая величина, гораздо большая энергий, встречающихся в мире атомов. Для энергии ионизации водорода (п. 6.3 б) было найдено значение  $E_{\text{ион}} = 13,5 \text{ эВ}$ , примерно

в 20 тысяч раз меньше, чем энергия связи ядра кремния.

Энергия связи  $E_{\text{св}}$  увеличивается по мере роста массового числа  $A$ . Чтобы охарактеризовать стабильность ядер, вводят физическую величину, называемую **удельной энергией связи**:

$$\varepsilon = \frac{E_{\text{св}}}{A}, \quad (7.8)$$

график зависимости которой от массового числа  $A$  представлен на рисунке 7.2.

Более стабильны ядра, у которых удельная энергия связи больше. Самыми стабильными, как видно из графика, являются ядра элементов из средней части периодической таблицы.

В дальнейшем этот график будет использован для выяснения возможности получения ядерной энергии.

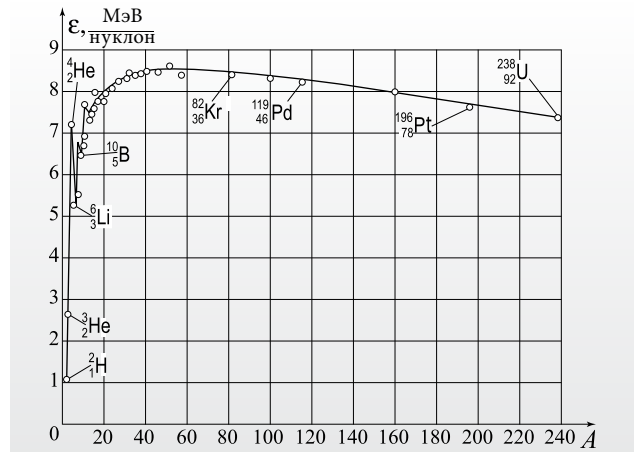


Рис. 7.2

## ➔ Проверьте свои знания

1. Как объяснить, что несмотря на наличие электростатического отталкивания, протоны удерживаются вместе в составе атомного ядра?
2. Зависят ли ядерные силы от электрических зарядов нуклонов?
3. Что означает свойство насыщения ядерных сил?
4. Какой закон классической механики не выполняется при образовании атомных ядер из нуклонов?
5. Что называется дефектом массы ядра?
6. Как определяется энергия связи ядра?
7. Вычислите дефект массы изотопа азота  $^{14}_7\text{N}$ , если его масса равна 14,00307 а.е.м.
8. Определите минимальную энергию, необходимую для разделения ядра  $^7_4\text{Be}$  на отдельные нуклоны. Масса этого изотопа равна 7,01693 а.е.м.
9. Определите дефект массы изотопа  $^{62}_{28}\text{Ni}$ , если удельная энергия связи его ядра равна 8,795 МэВ/нуклон.
10. На основании графика зависимости удельной энергии связи от массового числа  $A$  (рис. 7.2) определите:
  - а) какой из атомов изотопов:  $^{82}_{36}\text{Kr}$ ,  $^{196}_{78}\text{Pt}$  или  $^{238}_{92}\text{U}$  наиболее стабилен;
  - б) величину удельной энергии связи изотопа  $^{119}_{46}\text{Pd}$ ;
  - в) дефект массы изотопа  $^{238}_{92}\text{U}$ ;
  - г) массу атома изотопа  $^{196}_{78}\text{Pt}$ .

## 7.3. РАДИОАКТИВНОСТЬ

### а. Открытие радиоактивности. Радиоактивные превращения

В 1896 году французский физик Антуан Анри Беккерель (1852–1908) обнаружил, что соли **урана** (U) самопроизвольно действуют на фотопластинку, завернутую в черную бумагу (зачерняяют ее). Беккерель установил, что на это действие не влияют такие внешние факторы, как температура, давление, а также химический состав вещества, в котором содержится уран. Таким образом, был открыт новый вид излучения с особыми свойствами. Вещества, испускающие его, были названы **радиоактивными**.

В последующие годы были получены новые результаты. В 1898 году супруги Мария Склодовская-Кюри (1867–1934) и Пьер Кюри (1859–1906), под руководством Беккереля, установили, что **торий** (Th) также радиоактивен, и открыли два новых радиоактивных элемента: **полоний** (Po) и **радий** (Ra), излучение которых намного интенсивнее, чем урана.

В 1899 году Резерфорд осуществил эксперимент, схема которого представлена на рисунке 7.3. В канал внутри свинцового блока (1) вводилось радиоактивное вещество (2). Из канала выходил пучок излучения (3), падающий на фотопластинку (4). При проявлении в ее центре обнаруживалось черное пятно. Картина изменялась, если излучение проходило между полюсами магнита (5). При проявлении фотопластинки на ней обнаруживалось два пятна: первое, ближе к центру, соответствовало каким-то положительно заряженным частицам (6), а второе, более удаленное от центра, было обусловлено отрицательно заряженными частицами (7). Поток положительных частиц назвали **α-лучами**, отрицательных – **β-лучами**. В результате, Резерфорд установил существование двух компонентов излучения радиоактивных веществ. В том же году Резерфорд открыл еще один радиоактивный элемент – **радон** (Rn).

В 1900 году французский физик Поль Виллар (1860–1934) открыл третий компонент излучения, который не отклонялся в магнитном поле и был назван **γ-лучами**. Исследования позволили установить природу отмеченных лучей. Сначала Беккерель доказал, что β-лучи являются пучком электронов с очень большими скоростями, приближающимися к скорости света в вакууме (1900). В 1903 году Резерфорд выяснил, что α-частицы – это ионы гелия  $\text{He}^{2+}$  (ядро еще не было открыто),

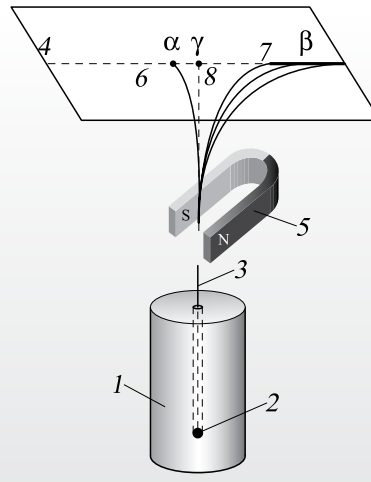


Рис. 7.3

в современной интерпретации – ядра изотопа гелия  ${}^4_2\text{He}$ . Было установлено, что γ-лучи – это электромагнитные волны, частота которых еще больше, чем у рентгеновских лучей. В 1903 году Резерфорд и Содди доказали экспериментально, что радиоактивность сопровождается превращением одних химических элементов в другие, например, радия в радон (Rn), являющийся инертным газом. Таким образом, была установлена суть явления радиоактивности.

**Радиоактивность** – это самопроизвольное превращение ядер одних химических элементов в ядра других элементов с одновременным испусканием некоторых частиц.

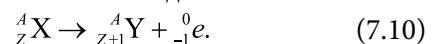
Радиоактивность, сопровождающаяся испусканием α-частиц, называется **α-распадом**, а испусканием β-частиц – **β-распадом**.

Напишем правила, которым подчиняются соответствующие радиоактивные превращения. Учтем, что должны выполняться законы сохранения электрического заряда и массы. При α-распаде исходное ядро  ${}^A_Z\text{X}$  испускает ядро гелия  ${}^4_2\text{He}$ . Следовательно, получившееся ядро Y имеет зарядовое число  $Z - 2$  и массовое  $A - 4$ . Соответствующее правило имеет вид:



При α-распаде радиоактивный элемент превращается в элемент, расположенный на две клетки левее в периодической системе элементов.

При β-распаде испускается электрон  ${}^0_{-1}e$ , а правило превращения имеет вид:



**При  $\beta$ -распаде радиоактивный элемент превращается в элемент, расположенный на одну клеточку правее в периодической системе.**

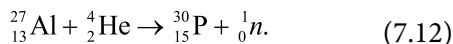
Эти правила, называемые **правилами смещения**, были сформулированы в 1913 году независимо друг от друга физико-химиками Ф. Содди (1877–1956) и К. Фаянсом (1887–1975).

В случае  $\alpha$ -распада компоненты  $\alpha$ -частицы – протоны и нейтроны – являются составляющими ядра. Электроны же, испускаемые при  $\beta$ -распаде, не входят в состав ядра. Анализируя правило превращения (7.10), констатируем, что массовое число  $A$  одно и то же для обоих ядер – исходного и конечного. Следовательно, оба ядра содержат одинаковое число нуклонов, однако в конечном ядре протонов стало на один больше, а нейтронов – на один меньше. Отсюда делаем вывод, что внутри ядра один нейтрон превращается в протон и электрон, который покидает ядро:



Так объясняется вылет электрона из ядра, в состав которого он не входит. Ситуация аналогична эмиссии фотонов из атомов, которые, тем не менее, их не содержат. В обоих случаях испускание частиц происходит в результате неких превращений, происходящих в рассматриваемых физических системах.

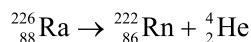
В 1934 году супруги Ирен и Фредерик Жолио-Кюри открыли **искусственную радиоактивность**. Бомбардируя алюминиевую фольгу  $\alpha$ -частицами, они обнаружили, что после удаления источника  $\alpha$ -частиц фольга в течение некоторого времени оставалась радиоактивной. Было установлено, что в результате бомбардировки стабильный изотоп алюминия  ${}^{27}_{13}\text{Al}$  превращался в изотоп фосфора  ${}^{30}_{15}\text{P}$  и нейтрон:



Этот изотоп фосфора, полученный искусственным путем, нестабилен. Будучи радиоактивным, он превращается в изотоп кремния  ${}^{30}_{14}\text{Si}$  с испусканием **позитрона**, являющегося **античастицей**. В дальнейшем было установлено, что при бомбардировке стабильных ядер  $\alpha$ -частицами, протонами, нейтронами и другими быстрыми частицами искусственно можно получить изотопы всех химических элементов. Таким путем были получены и **трансураниевые элементы** с атомным номером  $Z > 92$ . В настоящее время известны примерно 280 стабильных изотопов химических элементов и около 2 000 нестабильных (радио-

активных), причем последние, порядка 85%, получены искусственным путем. У стабильных изотопов атомный номер  $Z \leq 83$ ; все остальные изотопы, атомный номер которых больше, нестабильны. У каждого химического элемента есть нестабильные изотопы. Например, изотоп водорода, тритий  ${}^3_1\text{H}$ , – радиоактивен.

Испускаемые радиоактивным изотопом  $\alpha$ -частицы, обладают определенной кинетической энергией. Например, в результате распада радия:



испускаемые  $\alpha$ -частицы имеют ряд значений энергии: 4,8 МэВ; 4,6 МэВ и 4,3 МэВ. Это доказывает, что образовавшееся ядро радона может иметь только определенные дискретные значения энергии. Она минимальна, если энергия испущенной  $\alpha$ -частицы максимальна (4,8 МэВ). При этом ядро радона находится в основном состоянии. Если же испускается частица с меньшей энергией, например 4,6 МэВ, ядро радона оказывается в возбужденном состоянии, его энергия больше энергии основного состояния на 0,2 МэВ. Переход из возбужденного состояния в основное сопровождается эмиссией  $\gamma$ -кванта с энергией 0,2 МэВ. Установлено, что

$\gamma$ -лучи испускаются при переходах ядер из возбужденных состояний в основное, как при  $\alpha$ -распаде, так и при  $\beta$ -распаде.

В отличие от  $\alpha$ -частиц, электроны, испускаемые радиоактивными изотопами, не имеют строго определенной энергии. Их энергетический спектр непрерывен, с энергией от нуля до максимальной, зависящей от природы изотопа. Это видно из *рисунка 7.3*, где  $\beta$ -частицы на фотопластинке вызывают почернение полоски, а это доказывает, что их скорости различны. Теория  $\beta$ -распада оказалась в затруднительной ситуации. Ведь ядра – и исходное и конечное – имеют определенные энергии, их разность должна быть равна тоже некоей определенной энергии  $\beta$ -частицы. Было неясно, как может выполняться закон сохранения энергии, если энергия  $\beta$ -частиц имеет непрерывный ряд значений.

Исходя из закона сохранения энергии, австрийский физик Вольфганг Паули (1900–1958) в 1930 году предположил, что радиоактивное ядро одновременно с  $\beta$ -частицей испускает и нейтральную частицу с ничтожно малой массой, названную **нейтрино**. Она уносит часть энергии, выделяемой при  $\beta$ -распаде.

## б.\* Закон радиоактивного распада

В результате распада число радиоактивных ядер уменьшается. В 1903 году физики Э. Резерфорд и Ф. Содди сформулировали **закон радиоактивного распада**, который выражает зависимость от времени этого числа, с учетом того, что изучаемое явление является самопроизвольным. Невозможно предсказать, какое именно ядро и когда распадется. Можно только предсказать, какое число ядер распадется за определенный промежуток времени, и тем точнее, чем больше число радиоактивных ядер. Про этот закон говорят, что он имеет **статистический характер**.

Обозначим через  $N_0$  число радиоактивных ядер в момент  $t_0 = 0$ . Определим число радиоактивных ядер  $N$  в произвольный момент времени  $t$ . Пусть  $dN$  – изменение числа ядер за промежуток времени  $dt$ . В результате распада число оставшихся радиоактивных ядер уменьшается, то есть изменение  $dN$  отрицательно,  $dN < 0$ . Число распавшихся за промежуток времени  $dt$  ядер, равно  $|dN|$ , тем больше, чем больше этот промежуток, то есть  $|dN| \sim dt$ . Кроме того, число ядер, распавшихся за одинаковые промежутки времени, тем больше, чем больше число ядер  $N$ , не распавшихся к данному моменту:  $|dN| \sim N$ . В итоге получаем  $|dN| \sim Ndt$ . Переходя к равенству и введя коэффициент пропорциональности  $\lambda$ , называемый **постоянной радиоактивного распада**, запишем:

$$|dN| = \lambda N dt. \quad (7.13)$$

Из этого соотношения определим физический смысл постоянной радиоактивного распада:

$$\lambda = \frac{|dN|}{N \cdot dt}. \quad (7.14)$$

Отношение числа ядер  $|dN|$ , распавшихся за промежуток времени  $dt$ , к числу  $N$  ядер, имевшихся в начале этого промежутка, представляет собой долю распавшихся ядер. Следовательно,

постоянная радиоактивного распада  $\lambda$  равна отношению доли ядер, распавшихся за какой-то промежуток времени, к величине этого промежутка.

Изменение числа радиоактивных ядер  $dN = -|dN|$ , то есть  $dN = -\lambda N dt$ . Разделим переменные и проинтегрируем в пределах от 0 до  $t$  для времени и от  $N_0$  до  $N$  для числа ядер. Число ядер, не распавшихся к моменту времени  $t$ , равно:

$$N = N_0 \cdot e^{-\lambda t}. \quad (7.15)$$

**Число радиоактивных ядер уменьшается со временем экспоненциально.**

Для характеристики радиоактивности изотопов чаще используется другая постоянная – **период полураспада, равный промежутку времени, за который число радиоактивных ядер уменьшается вдвое**.

Согласно этому определению в момент времени  $t = T_{1/2}$  число не распавшихся ядер  $N = N_0/2$ . Подставив это выражение в закон (7.15) и проведя соответствующие преобразования для постоянной радиоактивного распада  $\lambda$ , получим:

$$\lambda = \frac{\ln 2}{T_{1/2}}. \quad (7.16)$$

Подставив (7.16) в (7.15) и приняв во внимание, что  $e^{\ln 2} = 2$  для закона радиоактивного распада, получим эквивалентное выражение:

$$N = N_0 \cdot 2^{-\frac{t}{T_{1/2}}}. \quad (7.17)$$

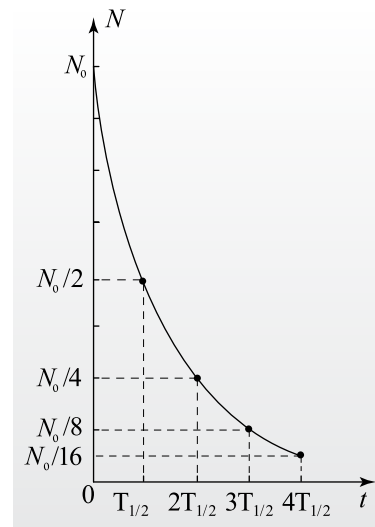


Рис. 7.4

Таблица 1

Радиоактивный изотоп	Вид распада	Период полураспада
${}^{238}_{92}\text{U}$	$\alpha$	$4,5 \cdot 10^9$ лет
${}^{40}_{19}\text{K}$	$\beta^-$	$1,3 \cdot 10^9$ лет
${}^{235}_{92}\text{U}$	$\alpha$	$7 \cdot 10^8$ лет
${}^{234}_{92}\text{U}$	$\alpha$	$2,5 \cdot 10^5$ лет
${}^3_1\text{H}$	$\beta^-$	12,3 лет
${}^{131}_{53}\text{I}$	$\beta^-$	8 дней
${}^{212}_{82}\text{Pb}$	$\beta^-$	10,6 часов
${}^{239}_{92}\text{U}$	$\beta^-$	23 мин.
${}^{215}_{84}\text{Po}$	$\alpha$	$1,8 \cdot 10^{-6}$ с

График зависимости числа радиоактивных ядер от времени представлен на *рисунке 7.4*. В *таблице 1* (с. 109) указаны периоды полураспада для некоторых изотопов. Как видно из таблицы, периоды полураспада находятся в огромном интервале значений: от миллионных долей секунды до миллиардов лет. Разные изотопы одного и того же элемента претерпевают разный распад,  $\alpha$ - или  $\beta$ -, периоды полураспада также различны (см. изотопы урана).

Большинство изотопов, получающихся в результате распадов, также радиоактивны. Они распадаются, и этот процесс продолжается, пока не будет получен стабильный изотоп. **Совокупность изотопов, совершающих радиоактивные превращения, которые заканчиваются стабильным изотопом, называется радиоактивным рядом.** Известны три таких ряда. Они начинаются изотопами урана  ${}^{238}_{92}\text{U}$ ,  ${}^{235}_{92}\text{U}$  и тория  ${}^{232}_{90}\text{Th}$  и заканчиваются различными стабильными изотопами свинца.

### Примеры решения задач

**1** Определите число  $\alpha$ - и  $\beta$ -распадов, произошедших при превращении изотопа  ${}^{238}_{92}\text{U}$  в радон  ${}^{222}_{86}\text{Rn}$ .

**Дано:**

$$\begin{aligned} Z_1 &= 92, \\ A_1 &= 238, \\ Z_2 &= 86, \\ A_2 &= 222 \end{aligned}$$

$$n_\alpha, n_\beta - ?$$

**Решение:**

Массовое число изменяется только при  $\alpha$ -распадах, уменьшаясь при каждом из них на 4. Итак, число этих распадов  $n_\alpha = (A_1 - A_2)/4$ . Получаем  $n_\alpha = 4$ . При каждом  $\alpha$ -распаде зарядовое число уменьшается на 2, а после  $n_\alpha$  распадов оно уменьшается на  $2n_\alpha = 8$ . В рассматриваемом превращении зарядовое число уменьшилось на  $Z_1 - Z_2 = 6$ . Принимая во внимание, что при  $\beta$ -распаде это число увеличивается на 1, делаем вывод: число  $\beta$ -распадов равно  $n_\beta = 2n_\alpha - (Z_1 - Z_2)$ ;  $n_\beta = 2$ .

**Ответ:** число распадов равно:  $n_\alpha = 4$  и  $n_\beta = 2$ .

**2** Живые организмы содержат определенное количество радиоактивного углерода  ${}^{14}_6\text{C}$  (они поглощают его из атмосферы) с периодом полураспада 5 700 лет. При анализе некоторых деревянных предметов, найденных археологами, было установлено, что содер-

жание в них такого углерода составляет только 25% от находящегося в свежесрубленной древесине (для одинаковой массы сухого дерева). Сколько лет назад были изготовлены предметы, обнаруженные археологами?

**Решение:**

После срезания деревьев их древесина больше не поглощает радиоактивный углерод. При этом, вследствие распада, его содержание в древесине уменьшается за каждый период полураспада в два раза. В нашем случае количество радиоактивного углерода уменьшилось в 4 раза, то есть 2 раза по 2. Понадобилось два периода полураспада. Таким образом, предметы, найденные археологами, были изготовлены  $2 \cdot 5\,700$  лет = 11 400 лет назад.

Этот метод, основанный на определении содержания радиоактивного углерода в органических останках, используется для установления их возраста, особенно в археологии. Американский химик Уиллард Фрэнк Либби (1908–1980), предложивший этот метод, в 1960 году был удостоен Нобелевской премии по химии.

### ➔ Проверьте свои знания

1. В чем состоит явление естественной радиоактивности?
2. Как изменяются зарядовое и массовое числа при  $\alpha$ -распаде?
3. Чему равны атомный номер и массовое число ядра, получившегося в результате  $\alpha$ -распада радиоактивного изотопа  ${}^{66}_{29}\text{Cu}$ ?
4. Может ли в результате  $\alpha$ - и  $\beta$ -распадов некоторого радиоактивного изотопа получиться другой изотоп того же элемента? Если да, то чем будут отличаться эти изотопы?
5. Определите зарядовое  $Z$  и массовое  $A$  числа изотопа, полученного из изотопа тория  ${}^{234}_{90}\text{Th}$  после двух  $\beta$ -распадов и четырех  $\alpha$ -распадов.
6. Как объясняется вылет электронов из ядер при  $\beta$ -распаде, если в ядрах нет электронов?
7. Каким является энергетический спектр  $\alpha$ -частиц?
8. Как можно объяснить непрерывный энергетический спектр  $\beta$ -частиц?
9. Каков физический смысл постоянной радиоактивного распада?
10. По какому закону изменяется со временем число радиоактивных ядер?
11. Что называется периодом полураспада?
12. Количество радиоактивного йода  ${}^{131}_{53}\text{I}$  уменьшилось в 16 раз за 32 дня. Чему равен период полураспада этого изотопа йода?
13. Какой процент от первоначального числа радиоактивных ядер распадается за промежуток времени, равный 3 периодам полураспада для этого изотопа йода?
14. Какая часть атомов изотопа  ${}^3_1\text{H}$  осталась радиоактивной через 37 лет? Период полураспада для этого изотопа составляет 12,3 года.

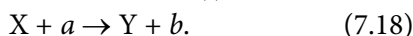
## 7.4.\* ЯДЕРНЫЕ РЕАКЦИИ

### а. Ядерные реакции.

#### Общие характеристики

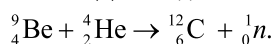
**Ядерными реакциями** называются превращения одних ядер в другие в результате их взаимодействия с различными частицами или ядрами.

Обозначим через  $X$  исходное ядро, называемое также ядром-мишенью, которое сталкивается с частицей-снарядом  $a$ . Продуктами соответствующего взаимодействия являются конечное ядро  $Y$  и частица  $b$  (или частицы), получившаяся (получившиеся) в результате реакции. Обычно уравнение реакции записывают в виде:



Реакция происходит, если частица проникает в область действия ядерных сил ядра-мишени, то есть приближается к нему на расстояние около  $10^{-15}$  м. Если частицы-снаряды заряжены положительно, то они должны обладать кинетической энергией, достаточной для преодоления сил электростатического отталкивания со стороны положительных зарядов ядра и приближения до указанного расстояния. На нейтральные частицы-снаряды не действуют электрические силы отталкивания, поэтому они могут проникать внутрь ядра, даже имея малые скорости.

Первая ядерная реакция (7.3) в лабораторных условиях была осуществлена, как уже отмечалось выше (п. 7.1), Резерфордом в 1919 году. Другая ядерная реакция привела в 1932 году к открытию нейтрона английским физиком Дж. Чедвиком (1891–1974):



В 1934 году супруги Ирен и Фредерик Жолио-Кюри также осуществили ядерную реакцию (7.12), за которой последовало открытие искусственной радиоактивности.

В этих трех реакциях частицами-снарядами являются  $\alpha$ -частицы, испускаемые радиоактивными источниками. В настоящее время ядерные реакции проводят с использованием пучков ускоренных частиц в специально созданных для этих целей установках.

В ядерных реакциях выполняются определенные законы сохранения: электрического заряда, числа нуклонов, импульса, энергии, а также некоторые законы сохранения, свойственные только микромиру. Анализируя уравнения ядерных реакций, легко убеждаемся в сохранении электрического заряда, суммированием нижних индексов

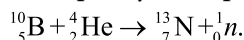
символов по обе стороны стрелки и в сохранении числа нуклонов, суммированием подобным образом верхних индексов.

С энергетической точки зрения ядерные реакции характеризуются **энергией реакции**, которая определяется разностью суммы масс частиц  $X$  и  $a$ , вступающих в реакцию (7.18), и суммы масс частиц  $Y$  и  $b$ , получающихся в результате реакции. Запишем формулу, подобную выражению (7.7), для энергии связи ядра:

$$Q = (m_x + m_a - m_y - m_b)c^2. \quad (7.19)$$

Если энергия реакции положительна,  $Q > 0$ , то реакция протекает с выделением энергии, если же  $Q < 0$ , то энергия поглощается. Таким же образом протекают и химические реакции.

Рассмотрим конкретную ядерную реакцию:



Массы изотопов равны:  $m_{{}^{10}_3\text{B}} = 10,01294$  а.е.м.,  $m_{{}^4_2\text{He}} = 4,00260$  а.е.м.,  $m_{{}^{13}_7\text{N}} = 13,00574$  а.е.м. и масса нейтрона  $m_{{}^1_0n} = 1,00866$  а.е.м. Подставляем в (7.19) и вычисляем:  $Q = 0,00114$  а.е.м.  $\cdot c^2 = 1,062$  МэВ, при этом учтено, что  $1$  а.е.м.  $\cdot c^2 = 931,5$  МэВ. Убеждаемся, что энергия ядерной реакции в миллионы раз больше энергий, выделяемых в химических реакциях, в которых они порядка нескольких электрон-вольт (эВ). Замечаем, что  $Q > 0$ , то есть энергия выделяется.

### б. Деление ядер урана

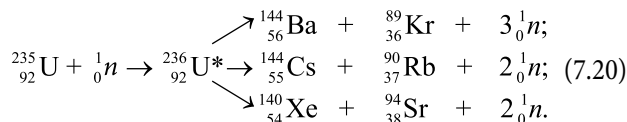
В конце 1938 года немецкие ученые Отто Ганн (1879–1968) и Фриц Штрассман (1902–1980) открыли, что при бомбардировке пучком медленных нейтронов образца изотопа урана  ${}^{235}_{92}\text{U}$  в нем появляются ядра бария – элемента, расположенного в средней части периодической системы.

Правильная интерпретация этих результатов была предложена в начале 1939 года австрийским физиком Лизой Мейтнер (1878–1968) и английским физиком Отто Фришем (1904–1979). Они предположили, что **нейтроны вызывают деление ядер урана** – их расщепление на два осколка, являющихся ядрами более легких элементов.

В том же году Ф. Жолио-Кюри и его сотрудники Л. Коварски и Х. Халбан установили, что деление сопровождается также испусканием 2-3 нейтронов.

Приведем примеры конкретных реакций деления. Исходное ядро  ${}^{235}_{92}\text{U}$ , поглощая медленный нейтрон, превращается в изотоп  ${}^{236}_{92}\text{U}^*$  (звездочка указывает на то, что ядро находится в возбужденном состоянии). В таком состоянии ядро нестабильно

и распадается согласно одной из реакций вида (приведены 3 из большого числа возможных):



Чтобы представить себе, как происходит деление, учтем, что радиус действия ядерных сил мал, а электрических взаимодействий велик. После поглощения медленного нейтрона образуется ядро  ${}_{92}^{236}\text{U}^*$  в возбужденном состоянии, имеющее избыток энергии. Вследствие движения нуклонов ядро деформируется, приобретая удлиненную форму. В середине образуется перешеек с меньшим поперечным сечением (по сравнению с сечением сферы). Это приводит к уменьшению ядерных сил, удерживающих вместе обе части ядра. Под действием электрического отталкивания между протонами этих частей перешеек становится все тоньше и наконец разрывается. Исходное ядро делится на два и испускаются 2-3 нейтрона. Получившиеся

в результате деления ядра радиоактивны и после серии распадов превращаются в стабильные ядра.

Примерный расчет показывает, что энергия, выделяемая при делении одного ядра, составляет около 210 МэВ. Это огромная величина, она в десятки миллионов раз больше той величины, которая выделяется при одной химической реакции (см. *пример решения задачи в конце темы*).

### в. Цепная реакция. Ядерный реактор

Нейтроны, сопровождающие каждый акт деления ядер, могут вызывать, в свою очередь, деление других ядер. Если 2 нейтрона, испущенные в первом акте деления, вызовут следующие 2, то будут получены уже 4 нейтрона. Если каждый из них произведет одно деление, то будет получено 8 нейтронов и т.д. Число нейтронов растет от поколения к поколению (*рис. 7.5*), развивается цепная реакция.

**Цепной реакцией** называется реакция, в которой нейтроны, освобождающиеся при делении ядер, вызывают деление других ядер.

**Минимальная масса вещества, при которой происходит цепная реакция, называется критической массой.**

При массе, меньшей этой, растет доля нейтронов, которые пролетают мимо ядер и покидают радиоактивное вещество, не вызывая деления ядер. Очевидно, изотоп  ${}_{92}^{235}\text{U}$  можно хранить только в количестве, меньшем критической массы. Критическая масса может быть уменьшена при использовании оболочек из вещества, отражающего нейтроны, например, бериллия. В частности, для урана она может стать равной нескольким сотням граммов.

Неуправляемая цепная реакция деления происходит в атомной бомбе (правильное название ядерная бомба), в которой два куса урана  ${}_{92}^{235}\text{U}$  с массой, меньшей критической каждый, но в сумме несколько большей, находятся внутри металлической оболочки. В соответствующий момент куски урана быстро соединяются. Масса становится больше критической и происходит ядерный взрыв.

**Управляемая цепная ядерная реакция** осуществляется в *ядерном реакторе*, схема которого представлена на *рисунке 7.6*. Пространство, в котором происходит цепная реакция, называется *активной зоной*. В природном уране содержится только около 0,7% делимого изотопа  ${}_{92}^{235}\text{U}$ , остальные 99,3% приходится на изотоп  ${}_{92}^{238}\text{U}$ . Разделением изотопов

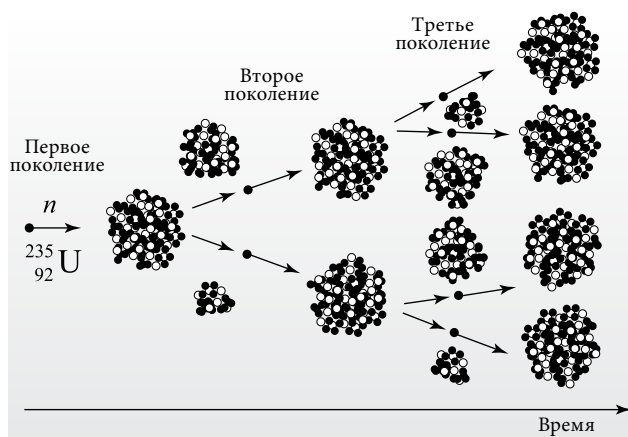


Рис. 7.5

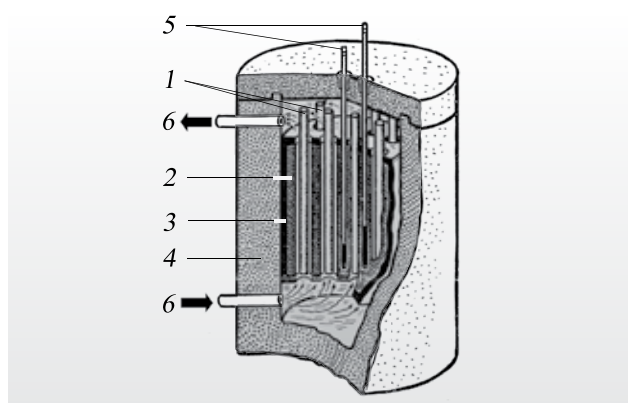


Рис. 7.6



получают уран с гораздо большим количеством делимого урана, так называемый **обогащенный уран**. Деление этого изотопа происходит более эффективно медленными нейтронами со скоростями около  $2 \cdot 10^3$  м/с, а между тем нейтроны, испущенные в результате деления, имеют скорости гораздо большие, порядка  $10^7$  м/с. Для уменьшения их скорости используют *замедлитель* (воду, тяжелую воду, графит или их смесь). При движении через замедлитель быстрые нейтроны, теряя энергию, замедляются. В результате доля нейтронов, делящих ядра, существенно возрастает. Эти факторы определяют структуру активной зоны: она представляет собой систему **урановых блоков** или **стержней** (1) (рис. 7.6), размещенных в объеме **замедлителя** (2).

Активная зона окружена **отражающей оболочкой** (3), чаще всего бериллиевой, которая отражает нейтроны и возвращает их в активную зону, в результате интенсивность деления ядер увеличивается. За отражателем располагается **защитный слой** (4) из армированного бетона.

Работа реактора регулируется с помощью **управляющих стержней** (5) из сплавов кадмия или бора, которые интенсивно поглощают медленные нейтроны. При полном введении стержни поглощают такое большое число нейтронов, что цепная реакция не происходит. Для запуска реактора стержни постепенно вынимают до тех пор, пока реакция не будет происходить в стационарном режиме. При случайном резком увеличении интенсивности реакции управляющие стержни автоматически погружаются вглубь активной зоны и реакция прерывается.

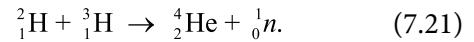
Энергия, выделяемая в активной зоне, отводится **теплоносителем** (6) и затем используется для получения водяного пара, приводящего в действие турбины электростанций, а также для обогрева помещений различного назначения. Ядерные реакторы приводят также в действие ледоколы, субмарины и др.

Первый в мире ядерный реактор был построен в Чикаго (США) под руководством Энрико Ферми (1901–1954) и запущен 2 декабря 1942 года. В Европе первый ядерный реактор был создан в СССР в 1946 году под руководством Игоря Курчатова (1903–1960).

В настоящее время построены и работают более тысячи реакторов, большая часть которых задействована на атомных электростанциях. Они производят около 6% потребляемой в мире электроэнергии, а во Франции и Швеции – более половины потребляемой энергии.

## г. Термоядерный синтез

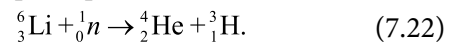
Большое количество энергии выделяется при синтезе ядер элементов, располагающихся в начале периодической системы, путем **слияния** более легких **ядер**. Рассмотрим, например, слияние ядер дейтерия  ${}^2_1\text{H}$  и трития  ${}^3_1\text{H}$ :



Вычислим энергию, выделяемую в этой реакции (в ней участвует 5 нуклонов), исходя из формулы (7.19) и принимая во внимание, что  $1 \text{ а.е.м.} \cdot c^2 = 931,5 \text{ МэВ}$ . Массы участвующих частиц равны:  $m_{{}^2_1\text{H}} = 2,01355 \text{ а.е.м.}$ ,  $m_{{}^3_1\text{H}} = 3,01550 \text{ а.е.м.}$ ,  $m_{{}^4_2\text{He}} = 4,00150 \text{ а.е.м.}$  и  $m_{{}^1_0n} = 1,00866 \text{ а.е.м.}$ . Выполним соответствующие расчеты для энергии, проходящейся на 5 нуклонов, получим значение 17,6 МэВ. Таким образом, в реакции ядерного синтеза (7.21) удельная энергия связи изменяется на 17,6 МэВ : 5 нуклонов  $\approx 3,5 \text{ МэВ/нуклон}$ , эта энергия выделяется.

Сравнивая данное значение удельной энергии связи (3,5 МэВ/нуклон), выделяемой в реакции синтеза, с удельной энергией связи в реакции деления урана (210 МэВ : 235 нуклонов = 0,9 МэВ/нуклон), устанавливаем, что в реакции синтеза на каждый нуклон приходится в 4 раза больше выделяемой энергии, чем при делении урана.

Этот результат демонстрирует эффективность ядерных реакций синтеза как источника энергии. Необходимо также иметь в виду и огромные запасы природного дейтерия в водах морей и океанов. Они могут удовлетворить потребности в энергии жителей Земли на несколько сотен миллионов лет. Тритий не существует в природе, его можно получить в ядерной реакции:



Огромным преимуществом реакций ядерного синтеза является то, что в их результате не получается радиоактивных отходов.

Практически осуществить реакции синтеза гораздо труднее, чем реакции деления, поскольку ядра изотопов водорода заряжены положительно, то есть отталкиваются. Реакция синтеза произойдет, если ядра сблизятся до расстояния порядка радиуса действия ядерных сил (около  $10^{-15}$  м). Поэтому ядра должны обладать кинетической энергией, достаточной для преодоления электростатических сил отталкивания при их сближении. Эти энергии достигаются при нагревании до очень

высоких температур, около  $10^7$  К. Поэтому такие реакции называются **термоядерными реакциями синтеза**.

В природе такую температуру имеют Солнце и звезды. Термоядерные реакции синтеза в них являются источником энергии электромагнитного излучения. Массы ядер-продуктов реакции меньше массы сливающихся ядер. В результате масса Солнца каждую секунду уменьшается на 4 миллиона тонн. На Солнце каждую секунду расходуется около 100 миллионов тонн водорода, его запасы достаточны для поддержания активности Солнца в течение 100 миллиардов лет.

Из-за отмеченного преимущества термоядерных реакций синтеза над реакциями деления проблема практического осуществления управляемого термоядерного синтеза оказалась в цен-

тре внимания ученых. Разрешить ее очень трудно. Для слияния ядер водорода необходима огромная температура. При таких температурах вещество находится в ионизированном состоянии, называемом плазмой.

Проблема, чрезвычайно важная с точки зрения обеспечения человечества энергией, требует концентрации усилий ученых разных стран. С этой целью 28 июня 2005 года Европейский Союз, США, Россия, Китай, Япония и Южная Корея приняли решение совместно построить к 2015 году международный экспериментальный термоядерный реактор в Кадараше (Франция) для исследования и осуществления управляемого термоядерного синтеза. В настоящее время строительные работы реактора продолжаются, а первые эксперименты термоядерного синтеза запланированы на 2025 год.

### Пример решения задачи

Вычислите энергию, выделяемую при делении ядер урана с массой 1 г. Определите массу угля с удельной теплотой сгорания 30 МДж/кг, которую необходимо сжечь для выделения такой же энергии.

**Дано:**

$$A = 235,$$

$$1 \text{ а.е.м.} = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ кг},$$

$$m = 10^{-3} \text{ кг},$$

$$q = 3 \cdot 10^7 \text{ Дж/кг}$$


---


$$E - ?, m_y - ?$$

**Решение:**

Энергия, выделяемая при делении одного ядра урана  $Q = 210$  МэВ, учитывая, что  $1 \text{ МэВ} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$ , получаем  $Q = 210 \cdot 10^6 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж} = 3,36 \cdot 10^{-11} \text{ Дж}$ .

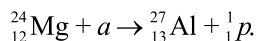
Масса одного ядра урана  $m_0 = A \cdot 1 \text{ а.е.м.} = 235 \times 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ кг} = 3,90 \cdot 10^{-25} \text{ кг}$ . Число ядер урана в массе  $m$  равно  $N = \frac{m}{m_0}$ . При их делении освобождается энергия  $E = NQ = \frac{m}{m_0} \cdot Q = 8,62 \cdot 10^{10} \text{ Дж}$ . Масса угля, которую нужно сжечь для получения такого же количества энергии:

$$m_y = \frac{E}{q} \approx 2,87 \cdot 10^3 \text{ кг} = 2,87 \text{ тонн}.$$

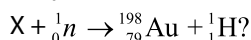
Сравните: 1 г урана и 2,87 тонн угля!

### ⇒ Проверьте свои знания

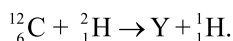
- Используя законы сохранения, установите природу частицы-снаряда  $a$  в следующей ядерной реакции:



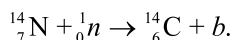
- Из какого вещества  $X$  получается золото в следующей ядерной реакции:



- Определите изотоп  $Y$ , который получается в результате реакции:

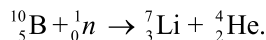


- Установите природу частицы  $b$ , испускаемой в реакции:



- Как можно установить, выделяется или поглощается энергия в ядерной реакции?

- Вычислите энергию, которая выделяется в следующей ядерной реакции:



Массы участвующих частиц равны:

$$m_{{}_5^{10}\text{B}} = 10,01294 \text{ а.е.м.}, m_{{}_0^1n} = 1,00866 \text{ а.е.м.},$$

$$m_{{}_3^7\text{Li}} = 7,01601 \text{ а.е.м.} \text{ и } m_{{}_2^4\text{He}} = 4,00260 \text{ а.е.м.}$$

- Какая реакция деления называется цепной?
- Что такое критическая масса? Как можно объяснить необходимость введения этого понятия?
- Почему необходимо обогащать уран, используемый в ядерных реакторах?
- Какова роль замедлителя в ядерных реакторах?
- В чем состоит реакция ядерного синтеза? Почему она называется термоядерной?
- Каковы преимущества термоядерных реакций над реакциями деления урана?

## 7.5.\* ДЕТЕКТОРЫ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ

На протяжении многих лет было разработано и внедрено множество методов исследования ядерных излучений. Соответствующие методы основаны на способности заряженных частиц ионизировать и возбуждать частицы вещества.

Мы ознакомимся с физическими идеями основных методов. Практическая реализация некоторых из них достаточно трудна, соответствующие установки массивны, сложны и дорогостоящи.

**Фотоэмulsionный метод** позволил Беккерелю открыть в 1896 году естественную радиоактивность. Данный метод основан на ионизирующем действии заряженных частиц. Проходя через фотопластинку, они, подобно свету, производят ионизацию микроскопических кристаллов бромистого серебра ( $\text{AgBr}$ ). При проявлении металлическое серебро образует ряд черных пунктирных линий. Они отмечают треки падающих частиц, места, где произошли ядерные реакции, а также треки образовавшихся частиц. Толщина линий определяется зарядами и массами частиц, а длина – их энергией.

**Сцинтилляционный счетчик** был изобретен в 1903 году английским физиком Уильямом Круксом (1832–1919) после открытия флюоресценции сульфида цинка, вызванной ударами  $\alpha$ -частиц. Вспышки наблюдаются с помощью лупы или микроскопа. Резерфорд использовал этот метод при исследовании рассеяния  $\alpha$ -частиц, открыв в итоге ядро.

В настоящее время сцинтилляции регистрируются с помощью фотоэлементов, превращающих световые сигналы в электрические импульсы. По величинам этих импульсов делают вывод об энергии падающих частиц.

**Газоразрядный счетчик** был изобретен в 1908 году немецким физиком Хансом Вильгельмом Гейгером (1882–1945) в сотрудничестве с Э. Резерфордом. В 1928 году Гейгер и У. Мюллер усовершенствовали счетчик, в настоящее время известный как **счетчик Гейгера–Мюллера**.

Схематическое изображение счетчика представлено на рисунке 7.7. Стеклоцилиндрическая трубка содержит анод (1) в виде тонкой нити, натянутой по оси, и катод (2) – металлическую фольгу, наклеенную на внутреннюю поверхность трубки или металлический цилиндр, коаксиальный с анодом. Трубка заполнена газом, например, смесью аргона и метилового спирта при понижен-

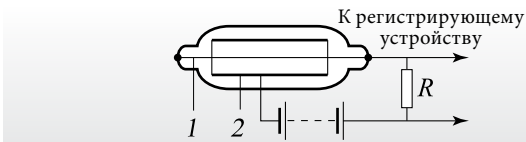


Рис. 7.7

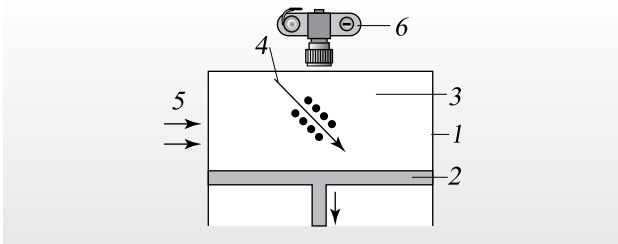


Рис. 7.8

ном давлении (десятые доли атмосферы). Между электродами приложено высокое напряжение, но недостаточное для осуществления электрического разряда. Напряженность электрического поля возле анода гораздо больше, чем возле катода (возле анода густота линий напряженности больше, чем возле катода).

Заряженная частица, проникая с большой скоростью внутрь трубки, производит ионизацию газа. Положительные ионы движутся к катоду, а электроны – к аноду, где напряженность поля больше. Приобретая большую энергию, они ионизируют при соударении нейтральные атомы газа. Образуется лавина электронов и происходит электрический разряд. Сила тока в цепи резко увеличивается, на концах резистора  $R$  возникает импульс напряжения, который передается на регистрирующее устройство. После каждого импульса напряжения на резисторе электрический разряд прерывается и счетчик может регистрировать следующие частицы.

Счетчик Гейгера–Мюллера используется для автоматического счета заряженных частиц и фотонов (квантов). Он может регистрировать до 1 000 частиц в секунду.

**Камера Вильсона** была изобретена в 1912 году и получила свое название в честь создателя – английского физика Чарльза Томаса Вильсона (1869–1959). Она представляет собой (рис. 7.8) стеклянный сосуд (1) с плотно прилегающим подвижным поршнем (2). Сосуд заполнен парами воды или этилового спирта (3), близкими к насыщению.

При быстром перемещении поршня вниз пары расширяются адиабатически (температура резко

понижается) и становятся пересыщенными. Такое состояние нестабильно. Если в камеру попадает заряженная частица и ионизует молекулы, то образовавшиеся ионы становятся центрами конденсации, вокруг них появляются капельки жидкости. Заряженная частица оставляет видимый след (трек) шириной до 1 мм – цепь маленьких капель жидкости (4). Треки освещают сбоку (5) и фотографируют (6).

Полученные с помощью камеры Вильсона фотографии представляют собой светлые треки на темном фоне. По их ширине можно сделать вывод о природе заряженной частицы – следы, оставленные  $\alpha$ -частицами жирнее, чем оставленные электронами. Чем больше энергия частицы, тем длиннее след.

Более обширную информацию можно получить, поместив камеру Вильсона в однородное магнитное поле (см. ниже *Лабораторную работу*).

**Пузырьковая камера.** Была изобретена в 1952 году американским физиком Дональдом Артуром Глезером (1926–2013). Она представляет собой еще один прибор, позволяющий сделать видимым путь заряженной частицы. В сосуде находится

сжиженный газ – водород, дейтерий, ксенон, пропан и др. – при высоком давлении. Вещество находится в жидком состоянии, даже если его температура выше температуры кипения при нормальном атмосферном давлении. Резким сбросом давления (в определенных пределах) жидкость переводится в перегретое состояние. Это состояние нестабильно, поскольку в данных условиях в сосуде должна была бы находиться жидкость и насыщенный пар. Проникшая в сосуд заряженная частица образует цепь ионов. Они служат центрами парообразования, вокруг них образуются маленькие пузырьки пара этой жидкости.

Цепочка этих пузырьков отмечает траекторию частицы в жидкости и может быть сфотографирована, если осветить ее сбоку.

Для увеличения объема информации об изучаемой частице, пузырьковая камера, как и камера Вильсона, помещается в магнитное поле.

О важной роли, которую сыграли эти камеры в ядерных исследованиях, свидетельствует тот факт, что их создатели стали лауреатами Нобелевской премии: Вильсон в 1927 году и Глезер в 1960 году.

## ➔ Проверьте свои знания

1. Какие физические свойства ядерных излучений лежат в основе методов их исследования?
2. В чем состоит метод фотоэмульсий?
3. На каком физическом явлении основан принцип действия сцинтилляционного счетчика?
4. Каков принцип действия счетчика Гейгера–Мюллера?
5. Какие физические величины, характеризующие заряженные частицы, можно определить с помощью камеры Вильсона?
6. Какую дополнительную информацию можно получить об ядерных излучениях помещением камеры Вильсона и пузырьковой камеры в магнитное поле?

## ➔ Лабораторная работа

### Изучение треков элементарных заряженных частиц

<i>Цель работы:</i>	Определение радиуса кривизны траектории элементарных частиц, регистрируемых в камере Вильсона, вычисление их кинетической энергии и удельного заряда.
<i>Приборы и принадлежности:</i>	Фотография следов, оставленных заряженными частицами в камере Вильсона, миллиметровая линейка, калька.

### Краткая теория

Заряженная частица, влетающая в магнитное поле перпендикулярно линиям индукции, движется в нем по окружности радиуса (1.7):

$$r = \frac{mv}{qB}, \quad (7.23)$$

где  $m$ ,  $q$  и  $v$  – масса, заряд и скорость заряженной частицы соответственно, а  $B$  – индукция магнитного поля.

При помещении камеры Вильсона в магнитное поле, вектор индукции которого перпендикулярен направлению движения частиц, траектории частиц будут представлять собой части окружностей.

Имея фотографию этих следов, радиус кривизны траектории можно непосредственно измерить. Пусть  $O$  – центр дуги окружности (рис. 7.9). Проведя хорду  $AB = l$ , получим равнобедренный треугольник  $AOB$ , в котором  $OD$  – это высота и медиана. Обозначив  $CD = h$ , из прямоугольного треугольника  $ODB$  запишем:

$$r^2 = (r - h)^2 + \frac{l^2}{4},$$

из чего следует

$$r = \frac{l^2 + 4h^2}{8h}. \quad (7.24)$$

Если известен трек зарегистрированной частицы (заряд и масса известны), то можно определить и ее кинетическую энергию. Используя соотношение (7.23), получаем:

$$E_k = \frac{mv^2}{2} = \frac{m}{2} \cdot \frac{(qBr)^2}{m^2} = \frac{(qBr)^2}{2m}. \quad (7.25)$$

Для определения удельного заряда неизвестной частицы ее след фотографируется в тех же условиях, что и известной. В этом случае значения  $v$  и  $B$  для обеих частиц одинаковы и для неизвестного удельного заряда из (7.23) находим:

$$\left(\frac{q}{m}\right)_x = \frac{r}{r_x} \cdot \left(\frac{q}{m}\right), \quad (7.26)$$

где  $r$  и  $r_x$  – радиусы кривизны траекторий известной и неизвестной частицы соответственно.

На рисунке 7.10 представлена фотография треков ядра гелия и ядер изотопов водорода, зарегистрированных в камере Вильсона, находящейся в магнитном поле с магнитной индукцией  $B = 2,2$  Тл. Известно, что все частицы попадают в магнитное поле с одинаковой скоростью, направленной перпендикулярно линиям индукции, и след  $l$  принадлежит изотопу водорода  ${}^1_1\text{H}$ , то есть протону.

### Ход работы:

1. На фотографию положите лист кальки (рис. 7.10) и перенесите на него полученные в камере Вильсона следы двух частиц: одной – протона (1) и другой – по указанию преподавателя.

2. Проведите по одной хорде на концах траектории протона. Измерьте длины этих хорд и соответствующие высоты  $h$ , а из выражения (7.24) вычислите радиус кривизны траектории протона в начале движения  $r_{1,н}$  и в конце  $r_{1,к}$ .

3. Используя формулу (7.25), вычислите кинетическую энергию протона в этих двух положениях и определите на сколько уменьшилась его энергия при прохождении этой траектории.

4. Проведите хорду в начале траектории неизвестной частицы. Измерьте ее длину  $l$  и высоту  $h$  полученного сектора круга. Вычислите радиус  $r_x$ .

5. Используя соотношение (7.26), вычислите удельный заряд  $(q/m)_x$  неизвестной частицы. Установите, ядром какого элемента является эта частица.

6. Представьте полученные результаты в виде отчета.

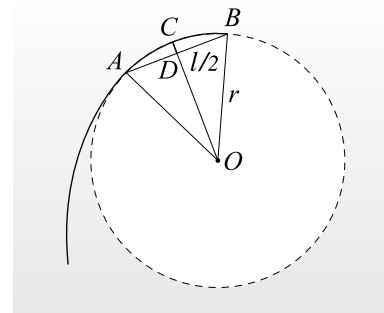


Рис. 7.9

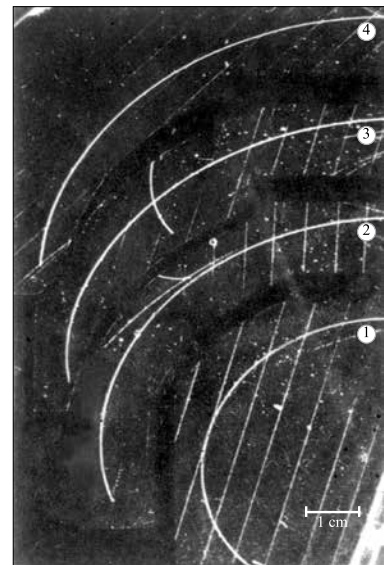


Рис. 7.10

## 7.6.\* БИОЛОГИЧЕСКОЕ ДЕЙСТВИЕ ЯДЕРНЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ

Образно говоря, нас окружает океан излучения разной природы:  $\alpha$ -частицы, протоны, нейтроны,  $\beta$ -частицы (электроны),  $\gamma$ -излучение. Большинство источников излучения является естественным: космические лучи – поток заряженных частиц, преимущественно протонов, которые бомбардируют Землю и генерируют другие частицы в результате взаимодействий с ядрами из атмосферы; радиоактивные изотопы из земной коры; радиоактивный радон из атмосферы, а также изотопы, содержащиеся в пищевых продуктах и воде. К искусственным источникам относятся устройства, используемые в медицине, особенно рентгеновские установки, некоторые промышленные товары, радиоактивные изотопы, используемые в промышленности и сельском хозяйстве, промышленная добыча и переработка урана и радиоактивных отходов и т.д.

Ядерные излучения обладают способностью возбуждать и ионизировать атомы и молекулы. В результате нарушается биохимическая деятельность облученных клеток, образуются новые молекулы, чуждые этим клеткам. После прекращения действия излучения соответствующие изменения не исчезают, некоторые последствия обнаруживаются только спустя некоторое время.

Самыми уязвимыми при облучении в организмах человека и животных являются костный мозг (нарушается процесс кроветворения), лимфатические узлы, селезенка, желудочно-кишечный тракт. В клетках зародышей появляются изменения, которые ведут к генетическим мутациям у потомства.

Сказанное выше означает, что мы должны обладать определенными познаниями относительно ядерных излучений и тех величин, которые их характеризуют, а также способов защиты.

Очевидно, что действие ядерного излучения определяется не только поглощенной телом энергией, но и его массой.

**Поглощенной дозой излучения** называется отношение поглощенной энергии  $E_{\text{полг}}$  к массе облученного тела  $m$ :

$$D = \frac{E_{\text{полг}}}{m}. \quad (7.27)$$

### ➔ Проверьте свои знания

1. Какие свойства ядерных излучений определяют их биологическое действие?
2. Что называется поглощенной дозой излучения?
3. Что является единицей поглощенной дозы излучения?
4. Как нужно действовать в случае происшествий, сопровождаемых радиоактивным излучением?
5. Напишите доклад на тему: «Ядерные катастрофы и их влияние на окружающую природу и жизнь на Земле».

Единица поглощенной дозы излучения, принятая в 1975 году Генеральной конференцией по мерам и весам, называется **грей** (Гр), а именно:  $1 \text{ Гр} = 1 \text{ Дж/кг}$ .

1 Гр – это поглощенная доза излучения, при которой телу массой 1 кг передается энергия ионизирующего излучения 1 Дж.

Эта единица названа в честь английского физика С. Грея (1905–1965), добившегося определенных успехов при использовании ионизирующего излучения в лечении онкологических заболеваний.

Необходимо отметить, что биологическое действие излучения зависит также от его вида. Например, при одной и той же поглощенной дозе излучения  $\alpha$ -частицы оказывают в 20 раз большее действие, чем  $\gamma$ -лучи.

**Большие дозы опасны для здоровья. Поэтому в случае происшествий, которые могут сопровождаться выбросом радиоактивных веществ, необходимо соблюдать определенные правила безопасности: покинуть соответствующее место, удалиться от него как можно дальше; использовать специальные средства защиты; при необходимости проведения работ в пораженной зоне сократить время пребывания в ней. Для определения уровня радиации используются специальные приборы – дозиметры. Меры безопасности принимаются в зависимости от величины этого уровня.**

В настоящее время считается, что наличие естественного фона радиации благотворно повлияло на эволюцию жизни на Земле. Были проведены специальные опыты, в которых группа растений выращивалась в помещениях, практически лишенных радиации. Было обнаружено, что эти растения слабее развивались и давали меньший урожай, чем выращенные в присутствии естественной радиации Земли. Установлено, что без естественного радиационного фона жизни на Земле не было бы в настоящем ее виде.

## 7.7.\* ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ЧАСТИЦЫ

Ученых во все времена занимала проблема первичных составляющих материи.

**Элементарной** называется частица материи, которая не может быть разложена на более простые.

Долгое время атом считался самой маленькой, неделимой частичкой материи, то есть элементарной частицей. Однако открытия электрона Дж.Дж. Томсоном (1897), затем протона Э. Резерфордом (1919) и нейтрона Дж. Чедвиком (1932) показали, что атом обладает сложной структурой. Таким образом, к 1932 году были известны четыре элементарные частицы: электрон, протон и нейтрон – составляющие части атома и фотон – носитель электромагнитного взаимодействия. Считалось, что они являются первозданными частицами, из которых можно построить весь материальный мир: протоны и нейтроны, связанные в ядре, и электроны образуют атомы. Они, в свою очередь, соединяясь в молекулы, образуют вещество.

Однако вскоре выяснилось, что существуют и другие элементарные частицы.

### а. Открытие элементарных частиц

В 1935 году японский физик Х. Юкава (1907–1981) предсказал существование новой элементарной частицы. Согласно его теории эта частица должна осуществлять сильное взаимодействие нуклонов, подобно тому, как фотон осуществляет электромагнитное взаимодействие заряженных частиц. По оценке Юкавы масса новой частицы имеет значение, равное 250 массам электрона, среднее между массой электрона и протона. Поэтому предсказанная частица получила название **мезон** (от греч. *mesos* – средний, промежуточный).

Теоретическое предположение о существовании мезона подстегнуло экспериментальные исследования, которые позднее привели к открытию двух новых элементарных частиц. В 1936 году американские физики К. Андерсон (1905–1991) и С. Неддермейер (1907–1988) открыли в космических лучах (заряженных частицах, попадающих в земную атмосферу из космического пространства) частицу с массой, примерно в 207 раз большей массы электрона  $m_e$ . Это значение отличается от предсказанного теоретически, к тому же было установлено, что эта частица, названная  **$\mu$ -мезоном** или **мюоном**, не участвует во взаимодействии нукло-

нов, то есть не может быть мезоном Юкавы. Мюон может иметь и отрицательный заряд ( $\mu^-$ ), и положительный ( $\mu^+$ ). По своим свойствам – это очень тяжелый электрон, нестабильный, со средним временем жизни примерно  $2,2 \cdot 10^{-6}$  с.

Мезон Юкавы был открыт в космических лучах только в 1947 году английским физиком С. Пауэллом (1903–1969) с сотрудниками. Он был назван  **$\pi$ -мезоном** или **пионом** и существует в трех состояниях: с положительным зарядом ( $\pi^+$ ), отрицательным ( $\pi^-$ ) и нулевым ( $\pi^0$ ). Масса пионов  $\pi^+$  и  $\pi^-$  равна примерно  $273 m_e$ , а  $\pi^0 \approx 264 m_e$ .

Под руководством Пауэлла были открыты и **K-мезоны**, называемые **каонами**, имеющие массу, большую чем пионы, и также участвующие в ядерных взаимодействиях. Важно отметить, что все мезоны являются нестабильными элементарными частицами, они распадаются и превращаются в другие частицы.

За теоретическое предсказание мезонов и их экспериментальное открытие Юкава в 1949 году и Пауэлл в 1950 году были удостоены Нобелевской премии.

Экспериментально была подтверждена и гипотеза Паули (см. п. 7.3 а) о существовании **нейтрино** – незаряженной элементарной частицы с огромной проникающей способностью благодаря очень малой массе (а, возможно, и равной нулю).

Одновременно с развитием техники создания ускорителей частиц высоких энергий расширились экспериментальные возможности изучения элементарных частиц (см. принцип действия ускорителей элементарных частиц в п. 1.4). Были открыты частицы, названные **гиперонами**, массы которых больше массы протонов и нейтронов. Например, масса  $\Omega$ -гиперона равна  $3 \cdot 273 m_e \approx 1,78 m_p$ . Существует несколько типов гиперонов, все они нестабильны и распадаются на нуклоны и более легкие частицы (пионы, электроны, нейтрино и др.).

С помощью ускорителей в 1960–1970 годах было открыто большое число нестабильных элементарных частиц, названных **резонансами**. Их среднее время жизни чрезвычайно мало, порядка  $10^{-24} \div 10^{-23}$  с.

В настоящее время известно около 400 элементарных частиц, из которых большая часть – резонансы. Большинство элементарных частиц нестабильно, стабильных частиц всего несколько: фотон, электрон, нейтрон и протон. Среднее время жизни нейтрона примерно  $10^3$  с.

## 6. Частицы и античастицы

В 1928 году английский физик П. Дирак разработал релятивистскую теорию движения электрона в атоме. Эта теория не только подтвердила известные экспериментальные результаты, но и показала, что существует элементарная частица, с такими же характеристиками, что и у электрона, но заряженная положительно. Обобщая рассуждения, Дирак пришел к выводу, что должны существовать не только положительные электроны, но и протоны с отрицательным зарядом. Эти частицы были названы **античастицами**. В теории физики элементарных частиц считается, что у всех частиц имеются античастицы, даже если в некоторых случаях (например, фотон) частицы и античастицы совпадают.

Первая античастица – положительный электрон, предсказанный Дираком, – была впервые обнаружена в 1932 году американским физиком К. Андерсоном.

Изучая тысячи фотографий траекторий частиц из космических лучей, зарегистрированных в камере Вильсона, Андерсон заметил несколько следов, которые отличались от оставляемых электронами только отклонением в противоположную сторону. Опыт показал, что след, оставленный в камере Вильсона, был траекторией электрона с положительным зарядом, то есть антиэлектрона, названного **позитрон** (от лат. *positivus* – положительный), и обозначаемого символом  $e^+$ .

Позднее были открыты другие античастицы: антимюон  $\mu^+$  (1936), антипион  $\pi^-$  (1947) и электронное антинейтрино  $\bar{\nu}_e$  (1953), антипротон  $\bar{p}$  (1955), антинейтрон  $\bar{n}$  (1956). Часто античастицу обозначают тем же символом, что и частицу, но со значком «тильда».

**Процесс взаимодействия частицы со своей античастицей, в результате которого они превращаются в фотоны (электромагнитное излучение) или в другие элементарные частицы, называется аннигиляцией.**

Процесс аннигиляции при соударении электрона с позитроном вначале был теоретически рассмотрен Дираком. После открытия позитрона аннигиляция электрон–позитрон была обнаружена экспериментально, она сопровождалась появлением двух фотонов (двух  $\gamma$ -квантов):

$$e^- + e^+ \rightarrow 2 \gamma. \quad (7.28)$$

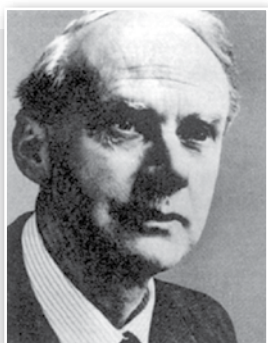
Так как законы сохранения энергии и импульса должны непременно выполняться, то появление одного фотона невозможно, при этом минимальная энергия фотонов, рожденных при аннигиляции, равна:  $E_{\min} = 2 m_e \cdot c^2 = 2 \cdot 0,51 \text{ МэВ} = 1,02 \text{ МэВ}$ .

При изучении взаимодействия  $\gamma$ -излучения определенной энергии с веществом обнаружилось новое явление – **рождение пары**. Например, пара электрон–позитрон рождается, только если  $\gamma$ -излучение имеет минимальную энергию, равную удвоенной энергии покоя электрона, то есть 1,02 МэВ. При этом происходит реакция:

$$\gamma \rightarrow e^- + e^+, \quad (7.29)$$

обнаруженная в 1933 году супругами Ирен и Фредериком Жолио-Кюри.

Из выражений (7.28) и (7.29) следует, что процесс рождения пар обратен аннигиляции. Очевидно, для рождения других пар частиц необходима бóльшая по величине минимальная энергия, равная удвоенной энергии покоя соответствующей частицы. В процессе аннигиляции такая же энергия будет освобождаться в виде  $\gamma$ -излучения. Например, для пары протон–антипротон эта энергия равна 1 867 МэВ, то есть примерно в 2 000 раз больше, чем для пары электрон–позитрон.



ПОЛЬ АДРИЕН  
МОРИС ДИРАК  
(1902–1984)

английский физик

Является одним из создателей квантовой механики. Провел фундаментальные теоретические исследования в квантовой механике и электродинамике, квантовой теории поля и элементарных частиц. В 1926–1927 годах разработал математический аппарат квантовой механики, предложив метод вторичного квантования, применяемого и в настоящее время. Построил релятивистскую теорию движения электрона, предложив волновое уравнение, носящее его имя (уравнение Дирака). На его основе предсказал существование электрона, заряженного положительно – позитрона, обнаруженного в космических лучах. В 1931 году выдвинул гипотезу о существовании античастиц и о рождении и аннигиляции электронно-позитронных пар, а в 1932 году – о существовании антиматерии.

За исследования, заложившие основы квантовой механики, П. Дирак и Э. Шредингер в 1933 году были награждены Нобелевской премией.



1. Что называется элементарной частицей?
2. Существование какой частицы предсказал Юкава? Каковы ее свойства?
3. Каковы свойства мюона и пиона? Чем они отличаются?
4. Что такое каоны?
5. Какая особенность объединяет все мезоны?
6. Что представляют собой гипероны?
7. Какие частицы называются резонансами?
8. Какие элементарные частицы стабильны?
9. Что представляют собой античастицы?
10. Какую частицу назвали позитроном? Чем она отличается от электрона?
11. Что называется аннигиляцией? Напишите реакцию аннигиляции электронно-позитронной пары.
12. Что представляет собой явление *рождение пары*? В каких условиях рождается электрон-позитронная пара? Напишите соответствующую реакцию.

## 7.8.\* ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ. КЛАССИФИКАЦИЯ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ

Свойства и поведение множества элементарных частиц могут быть изучены только в процессах взаимодействия. В природе существует четыре типа взаимодействий, которые нельзя свести к более простым. К ним относятся **сильные** (ядерные) взаимодействия, **электромагнитные**, **слабые** и **гравитационные**. Они называются **фундаментальными взаимодействиями**. По производимым действиям более известны гравитационные и электромагнитные взаимодействия.

**Гравитационные взаимодействия** имеют универсальный характер, в них участвуют все тела Вселенной, они описываются законом всемирного тяготения Ньютона. Величина сил взаимодействия зависит от масс взаимодействующих тел. Поэтому в мире элементарных частиц силами гравитационного взаимодействия пренебрегают. Они играют существенную роль только при взаимодействии массивных объектов – звезд, планет, астероидов и др.

**Электромагнитные взаимодействия** происходят между любыми заряженными частицами в широчайшей области явлений природы. Благодаря им возможно существование атомов и молекул, электромагнитных волн, в частности, света. Электромагнитные взаимодействия определяют многие свойства твердых, жидких и газообразных веществ, обуславливают поглощение и испускание фотонов атомами и молекулами. Действие кулоновских сил ведет к нестабильности ядер с большими массовыми числами из-за отталкивания между протонами и к появлению фотонов в результате аннигиляции электронно-позитронной пары.

**Сильные взаимодействия** – самые мощные из всех известных. Благодаря им осуществляется связь между протонами и нейтронами в ядрах атомов. Все процессы, вызываемые сильными взаимодействиями, происходят с очень большими скоростями, то есть за очень малый промежуток времени, порядка  $10^{-22}$  с. Силы таких взаимодействий проявляются на расстояниях порядка  $10^{-15}$  м и меньше и поэтому называются **короткодействующими**. На таких расстояниях сильные взаимодействия в сотни раз более интенсивны, чем электромагнитные.

**Слабые взаимодействия** являются самыми медленными из всех в мире элементарных частиц, они длятся порядка  $10^{-10}$  с и больше. В них участвуют все элементарные частицы, кроме фотонов. Радиус действия сил слабого взаимодействия очень мал, порядка  $10^{-18}$  м. Слабые взаимодействия происходят в процессах с участием нейтрино и антинейтрино, а также при распаде частиц, у которых среднее время жизни больше, чем  $10^{-10}$  с.

Было установлено, что все фундаментальные взаимодействия осуществляются одинаковым образом: путем обмена определенными частицами – носителями изучаемого взаимодействия. Поэтому они были названы **обменными взаимодействиями**. Например, электромагнитное взаимодействие между заряженными частицами происходит путем обмена фотонами – квантами электромагнитного поля.

Теория обменного взаимодействия была подтверждена открытием  $\pi$ -мезонов (пионов), посредством которых реализуется взаимодействие нуклонов атомных ядер. В 1957 году теоретически было предсказано существование неких тяжелых частиц, названных **векторными бозонами**, играющих роль переносчиков слабого взаимодействия, а в 1983 году они были открыты экспериментально, тем самым подтвердив обменный характер и этого взаимодействия.

В современной теории гравитации доказываются, что и гравитационное взаимодействие имеет обменный характер, носитель которого **гравитон** – квант гравитационного поля – является пока безмассовой частицей. Из-за очень малой интенсивности гравитационного взаимодействия гравитон до настоящего времени еще не обнаружен экспериментально.

Экспериментальные и теоретические исследования в области элементарных частиц выявили возможность их классификации в зависимости от свойств, которыми они обладают.

В зависимости от типа фундаментального взаимодействия, в котором участвуют элементарные частицы, они делятся на три класса: **фотоны, лептоны и адроны**.

Класс фотонов состоит всего из одной элементарной частицы – **фотона**. Он не обладает электрическим зарядом, но является носителем электромагнитного взаимодействия. Фотон стабилен, его время жизни до взаимодействия с другими элементарными частицами неограниченно велико. Посредством фотонов получают наибольшую часть информации о природе: от энергетических состояний атомов и молекул до излучения, испускаемого объектами из космического пространства. Свободный фотон можно считать самой распространенной элементарной частицей Вселенной.

**Лептонами** называются частицы, не участвующие в сильных взаимодействиях.

Класс лептонов состоит из 12 элементарных частиц (6 частиц и 6 античастиц), которые делятся на 3 семейства – электрон  $e^-$  и электронное нейтрино  $\nu_e$ , мюон  $\mu^-$  и мюонное нейтрино  $\nu_\mu$ , таон  $\tau^-$  и его нейтрино  $\nu_\tau$ . Мюон и таон – нестабильные частицы. Обладая большими энергиями покоя, они могут превращаться в другие частицы, с меньшими массами.

Экспериментальные и теоретические исследования, выполненные до настоящего времени, показывают, что у лептонов нет внутренней структуры.

Поэтому все 12 лептонов, 6 частиц (электрон, мюон, таон и их нейтрино) и 6 античастиц соответственно, называются **истинно элементарными частицами**.

Самый многочисленный класс элементарных частиц (более 300) составляют **адроны** (от греч. *hadros* – сильный, мощный). Адроны участвуют во всех фундаментальных взаимодействиях, однако на малых расстояниях преобладают сильные. За исключением протона, являющегося стабильной частицей, все другие адроны распадаются. Если распад происходит за счет электромагнитного или слабого взаимодействия, то период полураспада больше  $10^{-20}$  с, а если за счет сильного, то в результате распада появляются частицы, называемые **резонансами**, с периодом полураспада порядка  $10^{-23}$  с.

Адроны делятся на **мезоны** (от греч. *mesos* – средний) и **барионы** (от греч. *barys* – тяжелый). Барионы, в свою очередь, делятся на **нуклоны** (протоны и нейтроны) и **гипероны** (частицы, более тяжелые, чем нуклоны).

В 1963 году американские физики М. Гелл-Манн (р. 1929) и Дж. Цвейг (р. 1937) выдвинули гипотезу о составном характере адронов. Например, нуклоны состоят из трех, более мелких заряженных частиц, названных **кварками**. Их существование было подтверждено в 1969 году в эксперименте, подобном тому, в котором Резерфорд рассеянием  $\alpha$ -частиц доказал наличие ядра. При бомбардировке протонов и нейтронов электронами, ускоренными до энергий 50 ГэВ, было установлено существование трех точечных зарядов, свободно перемещающихся внутри нуклонов. Этими точечными зарядами (частицами) являются кварки.

Одной из характерных особенностей кварков оказалась дробность электрического заряда.

Хотя теория кварков и была подтверждена экспериментально, кварки в свободном состоянии не обнаружены до сих пор.

## ➔ Проверьте свои знания

1. Какие взаимодействия называются фундаментальными? Перечислите их.
2. Охарактеризуйте каждое из фундаментальных взаимодействий и укажите частицы, участвующие в них.
3. Что представляет собой обменное взаимодействие?
4. Какие частицы являются носителями каждого из фундаментальных взаимодействий?
5. Как классифицируются элементарные частицы в зависимости от типа осуществляемого фундаментального взаимодействия?
6. Каковы характеристики фотона?
7. Какие частицы называются лептонами? Перечислите лептоны трех семейств.
8. Какие элементарные частицы называются адронами?
9. Как классифицируются адроны?
10. Что представляют собой кварки? В чем суть эксперимента, подтверждающего их существование?

## 8.1. АСТРОНОМИЯ СРЕДИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК

### а. Цели и основные задачи астрономии

Астрономия – одна из древнейших наук. Она появилась в ответ на практические потребности пастухов и земледельцев древности. Первые астрономические знания сформировались 4-5 тысяч лет тому назад в Египте, Вавилоне (рис. 8.1, 8.2), Китае и применялись для ориентирования по звездам и для измерения времени. В Европе до наших дней сохранились остатки сооружений, возможно, использовавшихся и для астрономических наблюдений, например, Стоунхендж в Англии (рис. 8.3), святилище Сармизегетуза в Румынии (рис. 8.4). Термин «астрономия» происходит от греческого *astron* – светило, звезда и *nomos* – закон.

**Астрономия изучает движение, строение космических тел и систем, их рождение и эволюцию.**

Основными задачами астрономии являются: **определение положения и движения небесных тел в пространстве, их формы и размеров; изучение строения, физических свойств и химического состава небесных тел; решение проблемы происхождения и эволюции Вселенной, космических тел и Земли.**

Астрономия продолжает играть важную роль в развитии человеческой цивилизации. Методы определения точного времени, географических координат, расстояний до космических тел, их возраст были разработаны в астрономии. Неоспорима первостепенная роль астрономии в исследовании космического пространства.

Астрономия тесно связана с другими науками: физикой, математикой, кибернетикой, химией, биологией, географией, геологией. Благодаря применению методов этих наук в астрономии стало возможным изучение космической материи в условиях, которые невозможно создать в земных лабораториях. Астрономия позволяет изучать физические процессы, происходящие в отдаленнейших областях Вселенной. Вместе с другими науками астрономия дает возможность познать природу во всех ее проявлениях, способствуя формированию научного мировоззрения.



Рис. 8.1. Вавилонские астрологи



Рис. 8.2. Взаимное положение пирамид в Гизе (Египет) копирует положение звезд в «поясе» созвездия Орион (XXV век до н.э.)



Рис. 8.3. Стоунхендж, Англия (2400–2200 до н.э.)



Рис. 8.4. Святилище Сармизегетуза (Румыния) (III–II век до н.э.)

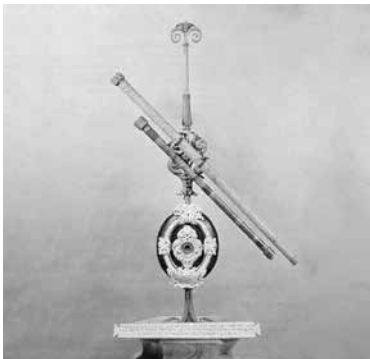


Рис. 8.5. Телескоп Галилео Галилея (1609 г.)



Рис. 8.6. Школьный телескоп-рефлектор

## РАСШИРЬТЕ СВОИ ЗНАНИЯ

В древности еще не было ясного различия между астрономией и астрологией. Астрология достигла наибольшего расцвета в древнем Вавилоне (1900–538 до н.э.), где астрономией и астрологией занимались одни и те же люди. Начиная с XVII века (после изобретения телескопа и открытия законов движения планет) ученые постепенно перестали заниматься астрологией, убедившись в несостоятельности ее положений.

С точки зрения современной науки астрология не считается наукой, так как она не основывается на открытых и проверенных экспериментально законах природы.

Разнообразие решаемых задач привело современную астрономию к делению на много тесно связанных между собой разделов: астрометрия, теоретическая астрономия, небесная механика, астрофизика, звездная астрономия, космогония, космология.

### 6. Методы астрофизических исследований

Одним из важнейших разделов астрономии является **астрофизика**. Эта наука выделилась в отдельный раздел астрономии с открытием в XIX веке спектрального анализа.

**Астрофизика изучает строение, физические свойства и химический состав небесных тел, а также происходящие в них процессы.**

В астрофизике применяются методы исследований современной физики, но есть и некоторые особенности. Во-первых, наблюдатель не может влиять и изменять условия протекания явлений на исследуемых космических телах. Во-вторых, наблюдения за небесными телами проводятся с движущейся Земли, которая вращается вокруг своей оси и обращается вокруг Солнца, что усложняет анализ изучаемых астрономических явлений. В-третьих, космические тела находятся на огромных расстояниях от Земли, интенсивность доходящих до нас излучений очень мала, а это требует применения очень точных и чувствительных инструментов и специальных методов исследований.

Свет (излучение) от небесных тел исследуют с помощью оптических телескопов (рис. 8.5, 8.6, 8.7). Современные оптические телескопы, снабженные спектрометрами или другими приборами, устанавливают как на поверхности Земли, так и на борту космических аппаратов. Масштабные астрофизические наблюдения и исследования проводятся в астрономических обсерваториях (рис. 8.8, 8.9).

В XX веке астрофизика освоила весь диапазон электромагнитных волн – от гамма-лучей до радиоволн. Появились **радиоастрономия, рентгеновская, гамма, нейтринная астрономия, внеатмосферная астрономия**, применяющая искусственные спутники и космические станции. С помощью спектрального анализа излучения, испускаемого небесными телами, можно узнать их *химический состав, скорость, температуру, характеристики магнитного поля, период вращения* и т.д.

Космические источники радиоволн изучаются с помощью радиотелескопов (рис. 8.10). С их помощью было открыто радиоизлучение Солнца, Юпитера, Венеры, Марса, других космических объектов. Используя *радиолокацию* можно определить с большой точностью расстояния до ближайших космических тел.

Применение современных инструментов и методов наблюдения и исследования в астрофизике привело в последние десятилетия к целому ряду таких выдающихся открытий, как *квазары*, *пульсары*, *реликтовое излучение* и др.

## 8.2. ЭЛЕМЕНТЫ ПРАКТИЧЕСКОЙ АСТРОНОМИИ

### а. Видимое движение звезд. Созвездия

• **Видимое движение звезд.** Земля вращается вокруг своей оси с запада на восток, то есть против часовой стрелки, если смотреть с Северного полюса. Поэтому нам кажется, что ночное небо вращается в противоположном направлении вокруг воображаемой оси, проходящей через глаз наблюдателя. Видимое вращение небосвода вместе со светилами называют **суточным движением**. В результате суточного движения звезды и другие небесные тела непрерывно изменяют свое положение относительно горизонта.

Повернувшись лицом к северу, мы замечаем, что одни звезды восходят и заходят, а другие описывают окружности вокруг неподвижной точки, называемой *северный полюс мира*. Совсем недалеко от него находится звезда –  $\alpha$  из созвездия Малая Медведица, называемая **Полярной звездой** (рис. 8.11). Прямую, проходящую через северный полюс мира и глаз наблюдателя, называют **осью мира**. Небосвод вращается вокруг оси мира. Диаметрально противоположную северному полюсу мира точку на небе называют **южным полюсом мира**.

Убедиться в видимом суточном движении звезд можно, сфотографировав околополярную область неба (рис. 8.12) в ясную безлунную ночь, установив выдержку фотоаппарата в несколько часов. На снимке звезды оставят следы – дуги окружностей, общим центром которых будет **северный полюс мира** (рис. 8.12).

Как и звезды, Луна и планеты восходят в восточной стороне горизонта, заходят в его западной стороне, выше всего над горизонтом они в южной стороне. Ежедневные наблюдения показывают, что в отличие от звезд, точки и время восхода или захода у них не постоянны.

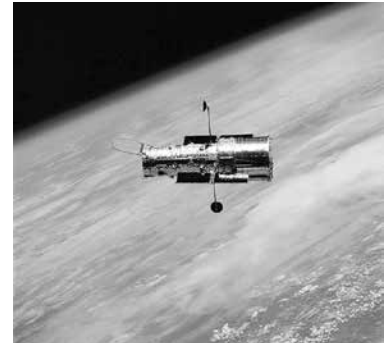


Рис. 8.7. Космический телескоп им. Хаббла



Рис. 8.8. Европейская Южная Обсерватория (гора Паранал, Чили)



Рис. 8.9. Обсерватория Госуниверситета Молдовы (фото Ш. Тирона)



Рис. 8.10. Радиотелескопы



Рис. 8.11. Полярная звезда, созвездия Большая Медведица и Малая Медведица



Рис. 8.12. Околополярная область неба

• **Созвездия.** Невооруженным глазом можно насчитать в обоих полушариях около 6 000 звезд. Нам кажется, что на небосводе светила находятся на одинаковом расстоянии от нас. Взаимное положение звезд на небе меняется очень медленно, практически оно неизменно тысячи лет. Кажущиеся неподвижными звезды довольно легко запомнить несмотря на то, что на первый взгляд они расположены хаотически.



Рис. 8.13. Созвездия и яркие звезды в северном полушарии (Левитан Е.П.)

### РАСШИРЬТЕ СВОИ ЗНАНИЯ

**Зодиакальные созвездия.** Солнце в своем видимом годовом движении по небесной сфере проходит через 13 созвездий, из которых 12 называют **зодиакальными** (от греческого *зоон* – животное): Рыбы, Овен, Телец, Близнецы, Рак, Лев, Дева, Весы, Скорпион, Стрелец, Козерог и Водолей (рис. 8.14). 13-е созвездие, Змееносец, не считается зодиакальным.

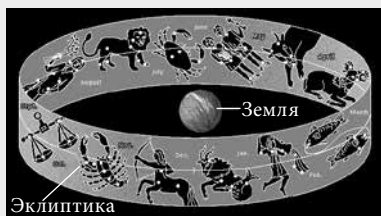


Рис. 8.14. Зодиакальные созвездия

Еще в древности, чтобы легче ориентироваться на небе, выделили группы ярких звезд и назвали их **созвездиями** (рис. 8.13).

**В наше время созвездием** называется участок звездного неба, имеющий строго определенные границы.

Согласно решению I Съезда Международного астрономического союза (Рим, Италия, 1922 г.) всё небо поделено на 88 созвездий.

Названия некоторых созвездий связаны с древнегреческой мифологией (Андромеда, Персей, Пегас, Лев, Рак, ...), со взаимным положением звезд (Треугольник, Северная Корона, Южный Крест,...), с научными инструментами (Телескоп, Секстант,...) и т.д. Созвездия легко узнать на небе по характерным фигурам из мысленно проведенных линий, соединяющих их самые яркие звезды (рис. 8.13).

Начиная с XVII века, звезды каждого созвездия обозначают буквами греческого алфавита в порядке убывания их яркости. После использования всех букв этого алфавита применяют латинский, затем арабские цифры. Самая яркая звезда обозначается, как правило, буквой  $\alpha$ . Звезды менее яркие – буквами  $\beta$ ,  $\gamma$  и т.д. Самые яркие звезды имеют собственные названия. Например, *Вега* – это звезда  $\alpha$  из созвездия *Лиры*, *Бетельгейзе* – звезда  $\alpha$  из созвездия *Орион*. Яркие звезды облегчают ориентирование на небе и поиск неярких звезд или других небесных тел.

### ➔ Проверьте свои знания

1. Используя карту звездного неба (с. 161), найдите на небе и назовите околополярные созвездия.
2. Используя карту звездного неба, найдите созвездия и планеты, видимые сегодня вечером. Запишите дату, время наблюдения, положения нескольких созвездий. Повторите наблюдения в то же время через 2-4-6 недель. Сравните полученные результаты и сделайте вывод.
3. Зная, что на расстоянии вытянутой руки сжатый кулак (от большого пальца до мизинца) закрывает на небе участок примерно в  $10^\circ$ , оцените угловые размеры выбранных созвездий.
4. Проследите и запишите в тетрадь наблюдения созвездия, через которые Луна проходит в весенние месяцы. Что вы заметили?

## б. Небесная сфера и ее элементы

Для изучения движения светил необходимо знать их положение в момент наблюдения. Ночью нам кажется, что все светила находятся на внутренней поверхности огромной сферы, в центре которой – наблюдатель. Положение светила определяется лучом, проведенным из места наблюдения к соответствующему светилу.

**Воображаемая сфера произвольного радиуса, центр которой находится в какой-либо точке на поверхности (или в центре) Земли, на внутреннюю поверхность которой проецируются светила, называется небесной сферой (рис. 8.15).**

Наблюдатель находится в центре небесной сферы. С древних времен небесная сфера применяется для определения положения и движения небесных тел. С этой целью используются несколько линий, точек, плоскостей (рис. 8.15), относительно которых и определяются небесные координаты и проводятся необходимые вычисления.

• **Элементы небесной сферы.** Прямая  $ZZ'$  (рис. 8.15), проходящая через центр небесной сферы  $O$  в направлении силы тяжести, называется **отвесной линией**. Точками ее пересечения с небесной сферой являются: **зенит**  $Z$  и диаметрально противоположная точка – **надир**  $Z'$ .

Большой круг небесной сферы,  $SWNES$ , плоскость которого перпендикулярна отвесной линии  $ZZ'$ , называется **истинным** или **математическим горизонтом**. Он делит небесную сферу на две полушферы: видимую с вершиной в зените  $Z$  и невидимую с вершиной в  $Z'$ . Математический горизонт не совпадает с видимым нами горизонтом. На море видимый горизонт располагается немного ниже математического. Их плоскости параллельны.

Ось  $PP'$ , вокруг которой происходит видимое вращение небесной сферы, называется **осью мира**. Она параллельна оси вращения Земли или совпадает с нею, если центром небесной сферы является центр Земли. Точка  $P$  – **северный полюс мира**, точка  $P'$  – **южный полюс мира**.

Большой круг небесной сферы,  $QWQ'EQ$ , плоскость которого перпендикулярна оси мира, называется **небесным экватором**. Он делит небесную сферу на два полушария: северное с северным полюсом мира  $P$  и южное с южным полюсом мира  $P'$ . Небесный экватор пересекает математический горизонт в двух точках: **востока**  $E$  и **запада**  $W$  (рис. 8.15).

Малый круг небесной сферы  $bMb'b$ , плоскость которого параллельна плоскости экватора, назы-

вается **суточной параллелью** светила  $M$ . Видимое суточное движение звезд происходит по суточным параллелям.

Большой круг небесной сферы  $PZQSP'Z'Q'NP$ , плоскость которого проходит через отвесную линию и ось мира, называется **небесным меридианом**. Он делит небесную сферу на две полушферы: восточную с точкой востока  $E$  и западную с точкой запада  $W$ .

Небесный меридиан пересекает математический горизонт в точках **севера**  $N$  и **юга**  $S$ . Плоскость небесного меридиана пересекает плоскость математического горизонта по прямой  $NS$ , называемой **полуденной линией**.

## в. Видимое годичное движение Солнца. Эклиптика

В отличие от звезд, у Солнца и Луны, для земного наблюдателя, непрерывно меняются место и время восхода и захода, а также наибольшая высота над горизонтом. Положение Солнца и Луны на небосводе меняется из-за наклона земной оси, обращения Земли вокруг Солнца и Луны вокруг Земли.

Вследствие орбитального движения Земли Солнце перемещается на фоне звезд примерно на  $1^\circ$  в сутки к востоку (в направлении, противоположном вращению небосвода).

**Траектория видимого годичного движения Солнца по небесной сфере называется эклиптической.**

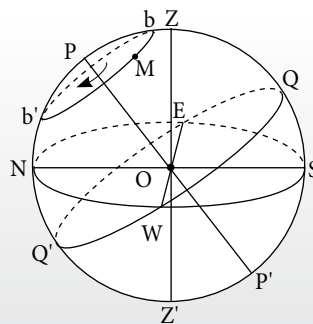


Рис. 8.15. Небесная сфера

### РАСШИРЬТЕ СВОИ ЗНАНИЯ

Прямая, перпендикулярная плоскости эклиптики и проходящая через центр небесной сферы, называется **осью эклиптики** (рис. 8.16). Она пересекает небесную сферу в двух точках: **северном полюсе эклиптики** и **южном полюсе эклиптики**. Эклиптика пересекает небесный экватор в двух точках: **точке весеннего равноденствия**,  $\Upsilon$ , и **точке осеннего равноденствия**,  $\Omega$ .

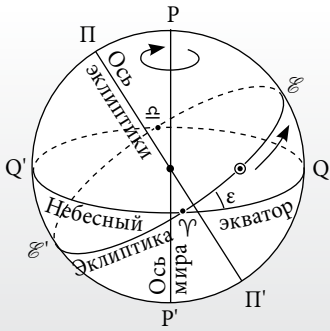


Рис. 8.16. Взаимное расположение небесного экватора и эклиптики

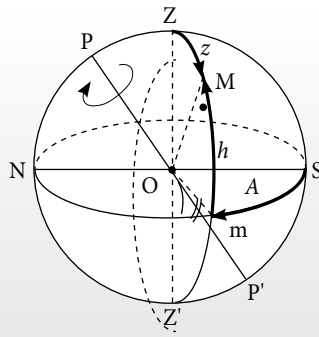


Рис. 8.17. Горизонтальная система координат

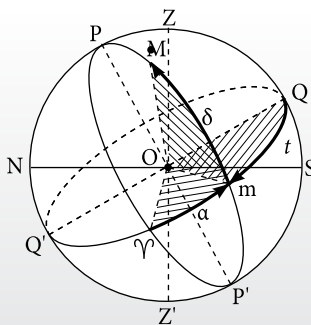


Рис. 8.18. Экваториальные системы координат

Ось вращения Земли составляет с плоскостью своей орбиты угол  $66^{\circ} 34'$ . Следовательно, плоскость эклиптики составляет угол  $\varepsilon = 23^{\circ} 26'$  с плоскостью небесного экватора (рис. 8.16).

### г. Системы небесных координат. Кульминация светил. Равноденствия и солнцестояния

Положение звезд определяется в разных системах координат. Чаще всего в астрономии используются горизонтальная и экваториальные системы координат.

**Горизонтальные координаты.** В этой системе координатами являются высота светила  $h$ , отсчитываемая от плоскости математического горизонта, и азимут  $A$ , отсчитываемый от точки юга (рис. 8.17).

Большой круг небесной сферы  $ZMZ'Z'$ , проходящий через зенит  $Z$ , светило  $M$  и надир  $Z'$ , называется *кругом высоты* или *вертикалом* светила  $M$ .

**Высота  $h$  светила  $M$**  – это угол  $mOM$  между плоскостью математического горизонта и направлением на светило –  $OM$ .

Высота  $h$  принимает значения от  $0^{\circ}$  до  $+90^{\circ}$  для светила над горизонтом и от  $0^{\circ}$  до  $-90^{\circ}$  для светила под горизонтом.

Иногда вместо высоты используется другая координата – *зенитное расстояние*  $z$  светила  $M$ . Это угол  $ZOM$  между отвесной линией и направлением на светило  $OM$ . Зенитное расстояние имеет значения от  $0^{\circ}$  до  $180^{\circ}$ . Между координатами  $z$  и  $h$  светила имеется простая связь:  $z + h = 90^{\circ}$ .

**Азимут светила  $M$**  – это угол  $SOm$  между плоскостью небесного меридиана и плоскостью вертикала светила.

Азимут измеряют в направлении суточного вращения небесной сферы: от точки юга на запад и он может принимать значения от  $0^{\circ}$  до  $360^{\circ}$ .

Горизонтальные координаты определяют видимое положение светил, изменяющееся со временем благодаря суточному вращению небесной сферы. Эти координаты на практике измеряют с помощью теодолита или универсального инструмента.

**Экваториальные координаты.** В астрономии используют две экваториальные системы координат, и в обеих основной плоскостью является плоскость небесного экватора.

В первой **системе экваториальных координат** используют *склонение*  $\delta$  и *часовой угол*  $t$  (рис. 8.18). Большой круг небесной сферы  $PMR'P'$ , проходящий через полюсы мира и светило  $M$ , называется **часовым кругом** или **кругом склонения** светила  $M$ .



**Склонение  $\delta$  светила равно углу между плоскостью небесного экватора и направлением на светило.**

Склонение к северу от небесного экватора считается положительным, а к югу от экватора – отрицательным, то есть меняется от  $0^\circ$  до  $\pm 90^\circ$ . Склонение аналогично географической широте.

Положение часового круга светила определяется второй экваториальной координатой – *часовым углом  $t$* .

**Часовым углом  $t$  называют двугранный угол между плоскостью небесного меридиана и плоскостью часового круга светила.**

Часовой угол принимает значения от  $0^h$  до  $24^h$ . Эта система небесных координат применяется для измерения времени.

Вторая *экваториальная система небесных координат* тоже использует склонение  $\delta$ , а второй координатой является *прямое восхождение  $\alpha$* , аналогичное географической долготе.

**Прямое восхождение  $\alpha$  светила  $M$  равно углу, образованному направлением на точку весеннего равноденствия  $\Upsilon$  и плоскостью часового круга светила.**

Эта координата измеряется от точки весеннего равноденствия  $\Upsilon$  до часового круга светила в направлении, противоположном суточному вращению небесной сферы. Прямое восхождение чаще всего выражают в единицах времени и может принимать значения от  $0^h$  до  $24^h$  (рис. 8.18).

Соответствие между угловыми и временными единицами легко устанавливается, принимая во внимание, что Земля (а для наблюдателей с Земли – небесная сфера со звездами на ней) совершает полный оборот ( $360^\circ$ ) за 24 часа. Это означает, что за час небесная сфера поворачивается на  $15^\circ$ , за 4 мин – на  $1^\circ$  и т.д.

Вторая экваториальная система координат используется в астрометрии при составлении звездных каталогов и карт. Выраженное в единицах времени прямое восхождение обозначено на координатной сетке звездных карт.

• **Кульминация светил.** Явление прохождения светила через небесный меридиан называется **кульминацией светила**. В момент *верхней* кульминации светило пересекает небесный меридиан в наивысшей возможной точке на дуге PZQSP' (рис. 8.15), в *нижней* кульминации – в наинизшей точке (на дуге PNQ'Z'P').

## РАСШИРЬТЕ СВОИ ЗНАНИЯ

*Звездные карты.* Учителям и ученикам, а также любителям астрономии для успешного ориентирования на небе необходимо пользоваться звездными атласами и астрономическими ежегодниками. Звездный атлас состоит из карт со всеми звездами до определенной звездной величины северного и южного полушарий небесной сферы.

Обе кульминации видны у незаходящих звезд. У восходящих и заходящих звезд видна только верхняя кульминация, нижняя кульминация происходит под линией горизонта. У невосходящих звезд обе кульминации не видны; они под линией горизонта. Верхняя кульминация Солнца называется **истинный полдень**, нижняя – **истинная полночь**.

• **Равноденствия и солнцестояния.** 21 марта Солнце в своем видимом движении переходит из южного полушария небесной сферы в северное в **точке весеннего равноденствия  $\Upsilon$**  (рис. 8.16), когда продолжительность дня равна продолжительности ночи. Это день весеннего равноденствия. В день осеннего равноденствия, 23 сентября, Солнце переходит из северного полушария в южное в **точке осеннего равноденствия  $\Omega$** .

Отстоящие от точек равноденствия на  $90^\circ$  точки эклиптики называются **точками солнцестояния  $\mathcal{E}$  и  $\mathcal{S}$** . В северном полушарии Земли Солнце находится в точке *летнего солнцестояния* примерно 21 июня, а в точке *зимнего солнцестояния* – примерно 22 декабря.

## РАСШИРЬТЕ СВОИ ЗНАНИЯ

Измеряя в полдень (в момент верхней кульминации) высоту Солнца в течение всего года можно заметить, что она меняется в определенных пределах.

В дни равноденствий траектория видимого движения Солнца совпадает с небесным экватором. Так как плоскость горизонта делит небесный экватор пополам, в эти дни часть пути, проходимого Солнцем над горизонтом, равна части, проходящей под горизонтом. Поэтому продолжительность дня равна продолжительности ночи.

В дни равноденствия в точке с географической широтой  $\varphi$  высота Солнца в полдень  $h_\odot = 90^\circ - \varphi$ .

В день летнего солнцестояния в месте с географической широтой  $\varphi$  высота Солнца в полдень достигает максимального значения:  $h_{\max} = 90^\circ - \varphi + 23^\circ 26'$ .

Примерно 22 декабря Солнце, двигаясь по эклиптике, опускается под небесный экватор на угол  $23^\circ 26'$ . В день *зимнего солнцестояния* в северном полушарии Земли большая часть суточного пути Солнца проходит под горизонтом, поэтому день самый короткий, а ночь, соответственно, самая длинная. В месте с географической широтой  $\varphi$  в день зимнего солнцестояния высота Солнца в полдень наименьшая:  $h_{\min} = 90^\circ - \varphi - 23^\circ 26'$ . В другие дни года высота Солнца в полдень меняется между  $h_{\min}$  и  $h_{\max}$ .

## ➔ Проверьте свои знания

1. Вычислите высоту Солнца в полдень в Кишинэу в дни равноденствий и солнцестояний. Географическая широта Кишинэу  $\varphi = 47^\circ 05'$ .
2. Выразите  $\alpha = 28^\circ 54' 37''$  в единицах времени.
3. Определите зенитное расстояние северного полюса мира в Кишинэу.
4. Географическая широта города Рио-де-Жанейро  $\varphi = -23^\circ 03'$ . Чему равен угол между плоскостью небесного экватора и плоскостью горизонта в этом городе?
5. Азимут звезды равен  $45^\circ$ , а высота равна  $60^\circ$ . В какой части небосвода надо искать звезду?
6. В каких местах на Земле высота светил над горизонтом в течение суток не меняется?
7. Как можно доказать, что ось вращения Земли не меняет своего направления в пространстве во время годичного движения?
8. В какие дни года Солнце находится на небесном экваторе?
9. Угол между плоскостью круга склонения Солнца и направлением на точку весеннего равноденствия равен  $128^\circ 34' 50''$ . Чему равно прямое восхождение Солнца в единицах времени?
10. В день рождения ученика звезда  $\theta$  Козерога в полночь находилась в верхней кульминации. В каком созвездии в это время было Солнце?

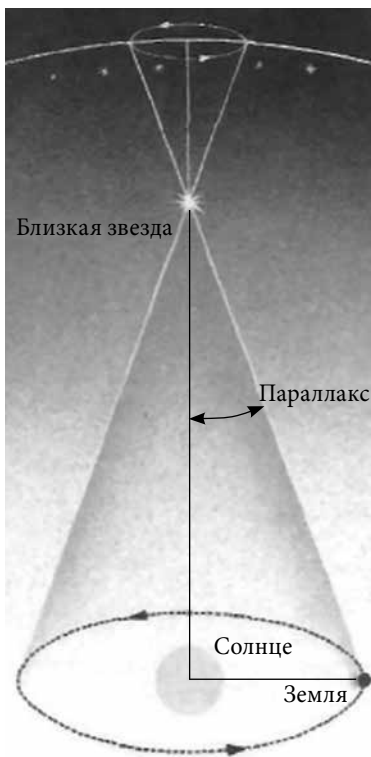


Рис. 8.19. Годичный параллакс



Рис. 8.20. Маятник Фуко (Париж, Франция, 1851 г.)

### д. Периодическое движение Земли и Луны. Фазы Луны. Солнечные и лунные затмения

• **Обращение Земли вокруг Солнца.** Земля движется вокруг Солнца по эллиптической орбите, совершая один оборот за один год. В результате такого движения направление на близкие звезды немного меняется. Для земного наблюдателя звезда описывает на небесной сфере в течение года эллипс (рис. 8.19). Это явление называют **годичный параллакс**.

Годичный параллакс звезд представляет собой одно из доказательств обращения Земли вокруг Солнца.

### Вспоминаем

**Времена года.** Наблюдения показывают, что полюсы мира не меняют своего положения относительно звезд в течение года. Это означает, что ось вращения Земли сохраняет свое направление во время обращения вокруг Солнца.

Движение Земли вокруг Солнца и постоянный наклон оси вращения Земли относительно плоскости орбиты ( $66^\circ 34'$ ) приводят к регулярной смене времен года на Земле.

• **Вращательное движение Земли.** В том, что Земля вращается, можно убедиться и с помощью опыта с математическим (гравитационным) маятником, который впервые провел в 1851 году французский физик Фуко (рис. 8.20).

В поле тяготения плоскость колебаний такого маятника в инерциальной системе отсчета остается неизменной. Если, к примеру, маятник Фуко подвесить на Северном полюсе Земли, то наблюдатель через некоторое время после начала колебаний заметит, что плоскость колебаний маятника поворачивается по часовой стрелке относительно любого выбранного меридиана. Это означает, что на самом деле Земля вращается в противоположном направлении.

Вращение Земли вокруг своей оси проявляется в смене дня и ночи. Вследствие вращения Земли с запада на восток в тропиках дуют

непрерывные ветры – **пассаты**, направленные с северо-востока на юго-запад в северном полушарии и с юго-востока на северо-запад в южном полушарии. Благодаря вращению Земли в северном полушарии правый берег рек подмывается сильнее левого, а в южном полушарии – левый берег подмывается сильнее. Вращением Земли объясняется и отклонение падающих предметов: если уронить с высокой башни предмет, то он отклонится к востоку относительно отвеса.

Многочисленные исследования показали, что скорость вращения Земли непостоянна. Замечено очень медленное замедление вращения Земли из-за приливного трения, вызванного влиянием Луны и Солнца.

• **Движение Луны.** Луна совершает полный оборот вокруг Земли за 27,32 суток, этот интервал времени называется **сидерическим месяцем**. В своем орбитальном движении Луна за сутки перемещается по небу примерно на  $13^\circ$  с запада на восток через зодиакальные созвездия.

Орбита Луны не круговая, а эллиптическая, расстояние от нее до Земли меняется: 356 375 км в перигее и 406 720 км в апогее, среднее расстояние равно 384 400 км. Соответственно меняется и видимый угловой диаметр лунного диска: от  $33' 29''$  до  $29' 22''$ . Все это определяет характер и максимальную продолжительность солнечных затмений.

• **Фазы Луны.** Луна, как и планеты, не является источником света, она видна только благодаря отраженному от ее поверхности солнечному свету.

Обращающаяся вокруг Земли Луна видна на небе по-разному освещенной Солнцем – в разных *фазах*, четыре главных из которых называются: новолуние (1), первая четверть (3), полнолуние (5), последняя четверть (7) (рис. 8.21). Наименьший промежуток времени между двумя одинаковыми фазами Луны, **синодический месяц**, равен 29,53 суток, что на 2,2 суток длиннее сидерического месяца. Эта разница объясняется тем, что за время одного оборота Луны вокруг Земли, та, в свою очередь, смещается по своей орбите примерно на  $27^\circ$  (по  $1^\circ$  в сутки). Чтобы оказаться в той же фазе, что и в начале оборота, Луне требуется еще 2,2 суток для дополнительного поворота на эти  $27^\circ$  (рис. 8.22).

Несколько дней после новолуния Луна видна вечером на западе в виде узкого растущего серпика. На неосвещенной Солнцем части лунного диска виден слабый *пепельный свет*. Это Луну освещает отраженный от Земли солнечный свет (рис. 8.23). Наблюдатель с Луны может видеть фазы Земли.

Из того, что на поверхности Луны все время видны одни и те же детали, можно сделать ошибочный вывод, что Луна не вращается вокруг своей оси. На самом деле Луна повернута к Земле все время одной стороной потому, что период ее вращения вокруг своей оси равен периоду обращения вокруг Земли: 27,32 суток.

• **Солнечные затмения.** Диаметр Солнца примерно в 400 раз больше диаметра Луны, и Солнце примерно в 400 раз дальше от Земли, чем Луна. Когда они находятся на одной прямой, Луна может закрыть частично или весь солнечный диск и тогда наступит солнечное затмение (рис. 8.24). Это возможно только в новолуние.

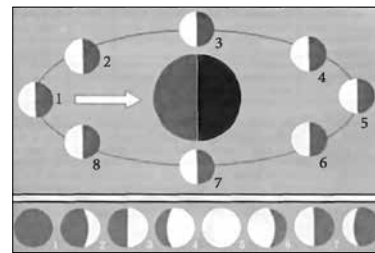


Рис. 8.21. Смена лунных фаз

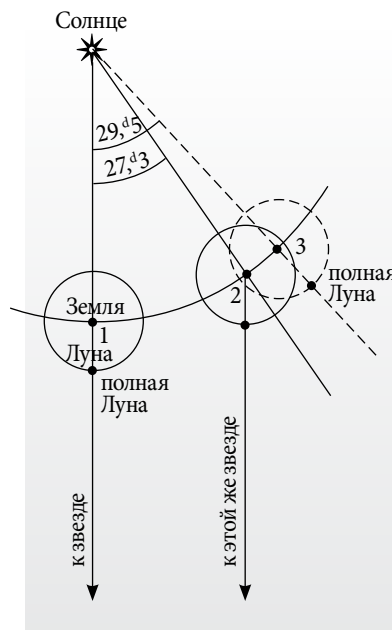


Рис. 8.22. Синодический и сидерический месяцы



Рис. 8.23. Пепельный свет Луны

Если Луна в новолунии находится в перигее своей орбиты, то есть на минимальном расстоянии от Земли, а Земля в афелии (на максимальном расстоянии от Солнца), то может произойти более продолжительное *полное солнечное затмение* (на экваторе продолжительностью до 7 мин. 40 с.) (рис. 8.25). На широте Кишинэу средняя продолжительность полного солнечного затме-

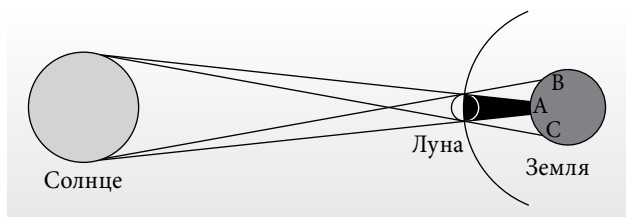


Рис. 8.24. Схема солнечного затмения.



Рис. 8.25. Полное солнечное затмение

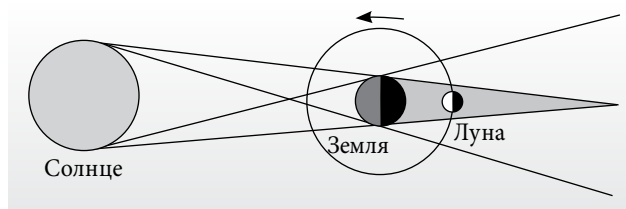


Рис. 8.26. Схема лунного затмения

ния 2-2,5 мин. Максимальный диаметр лунной тени на земной поверхности около 250 км, скорость движения тени около 0,5 км/с, перемещается тень на тысячи километров. Полное солнечное затмение наблюдается только там, где проходит тень Луны (А на рис. 8.24). Во время полного солнечного затмения на небе становятся видны яркие звезды.

В полутени (В и С на рис. 8.24) для наблюдателей с Земли Луна покрывает только часть солнечного диска — это *частное солнечное затмение*.

Если Луна в новолунии находится в апогее орбиты (наибольшее расстояние до Земли), а Земля в перигелии (наименьшее расстояние до Солнца), то лунный диск не покрывает всё Солнце и может произойти *кольцеобразное солнечное затмение*.

За год может быть 2-5 солнечных затмений. В одном и том же месте полное солнечное затмение повторяется примерно один раз в 300 лет.

Полные солнечные затмения позволяют астрономам наблюдать солнечную корону — внешние слои солнечной атмосферы. Среди астрономов, посвятивших себя изучению явлений, связанных с солнечными затмениями, есть и наши земляки: Николае Донич и Александру Дейч.

Астрономы могут наблюдать солнечную корону и без затмений с помощью специального телескопа — *коронोगрафа* (изобрел в 1931 году Бернар Лио), в котором получают «искусственное затмение».

• **Лунные затмения.** Такие затмения видны, когда Луна в фазе полнолуния входит в конус земной тени (рис. 8.26).

Лунные затмения могут быть полные и частные. Диаметр конусообразной тени Земли на орбите Луны примерно в 2,5 раза больше диаметра Луны, поэтому затмения Луны достаточно продолжительны. Так, если Луна находится в перигее своей орбиты, то продолжительность полного лунного затмения может достичь 1 ч 45 мин. Во время полного затмения лунный диск приобретает красноватый оттенок (рис. 8.27). Это происходит потому, что голубые лучи рассеиваются земной атмосферой сильнее, чем красные, которые и попадают в конус земной тени и окрашивают поверхность Луны.

Если Луна только частично входит в земную тень, то наблюдается *частное лунное затмение*.

Лунные затмения видны со всего полушария Земли, где Луна находится над горизонтом. За год можно наблюдать до 3-х лунных затмений. Еще в древности заметили, что затмения повторяются через 223 синодических месяца или 18 лет, 11 суток и 7 часов. Этот промежуток времени именуется **сарос**, за это время происходит 71 затмение, 43 солнечных и 28 лунных. Сарос позволяет приблизительно предсказать затмения.



Рис. 8.27. Полное лунное затмение (фото И. Наку)

## ➔ Проверьте свои знания

1. Можно ли на Северном полюсе наблюдать солнечное/лунное затмение 15 июня? 15 декабря? Объясните ответ.
2. Угловые диаметры Солнца и Луны примерно равны по  $0,5^\circ$ . Среднее расстояние от Земли до Луны составляет 384 400 км, а до Солнца 149 600 000 км. Вычислите, во сколько раз линейный диаметр у Солнца больше, чем у Луны.
3. Перечислите причины, от которых зависит продолжительность солнечных и лунных затмений.
4. Когда наблюдается кольцеобразное солнечное затмение?
5. В каком направлении передвигается тень от Луны по Земле во время солнечных затмений?
6. Чему примерно равна максимальная продолжи-

### е. Время и его измерение. Календарь

Измерение времени в астрономии основано на периодических движениях: вращении Земли вокруг своей оси, обращении Земли вокруг Солнца, Луны вокруг Земли.

• **Среднее солнечное время.** В астрономии и в повседневной жизни используется *среднее солнечное время*.

Единицей среднего солнечного времени являются **средние солнечные сутки**, представляющие собой промежуток времени между двумя последовательными нижними кульминациями среднего экваториального Солнца на одном и том же географическом меридиане.

Средние солнечные сутки начинаются в среднюю полночь и постоянны в течение года. Среднее солнечное время  $T_m$  определяется как время, измеренное от момента нижней кульминации среднего экваториального Солнца до любого другого момента, выраженное в долях среднего солнечного времени. Для данного меридиана среднее солнечное время  $T_m$  равно

тальность полного солнечного затмения, наблюдаемого с поверхности Луны?

7. Почему категорически запрещается наблюдать напрямую в телескоп, бинокль или невооруженным глазом солнечное затмение? Какие меры по защите зрения надо предпринять?
8. В какой фазе должна быть Луна, чтобы кратеры и другие образования на ее поверхности были видны в телескоп лучше всего? Объясните ответ.
9. В какой фазе видна Земля с Луны в новолуние?
10. С каких планет видна невидимая (для землян) сторона Луны? Аргументируйте свой ответ.
11. Объясните возникновение красноватого оттенка поверхности Луны во время полного лунного затмения.

## РАСШИРЬТЕ СВОИ ЗНАНИЯ

*Среднее экваториальное Солнце* – это воображаемая точка, движущаяся равномерно по небесному экватору, а не по эклиптике, положение которой вычисляется теоретически для любого момента времени. Это понятие было введено для того, чтобы получить точную единицу времени, постоянные солнечные сутки, так как истинные солнечные сутки переменны.

сумме часового угла среднего солнца  $t_m$  и  $12^h$ , то есть  $T_m = t_m + 12^h$ .

В полдень часовой угол Солнца  $t_m = 0^h$ , значит среднее солнечное время  $T_m = 12^h$ .

• **Местное время и всемирное время.** Время, измеренное на данном географическом меридиане, называют *местным (гражданским) временем*.

Среднее местное солнечное время на Гринвичском меридиане называется **всемирным временем  $T_0$** .

Местное время на данном меридиане можно выразить через всемирное время и географическую долготу места:  $T_\lambda = T_0 \pm \lambda$ , где «+» берется для восточной долготы и «-» для западной долготы.

В календарях и астрономических ежегодниках моменты астрономических событий указаны во всемирном времени.

• **Поясное время.** Использование в повседневной жизни местного времени очень неудобно, так

### ПРИМЕНЕНИЯ

**Определение географической долготы.** Разность между местным временем на двух меридианах в один и тот же момент равна разности соответствующей географической долготы, выраженной в единицах времени. Например, если у меридианов 1 и 2 долгота равна  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$ , то разность среднего солнечного времени равна:

$$T_{m1} - T_{m2} = \lambda_1 - \lambda_2.$$

С помощью этого выражения можно вычислить географическую долготу в данном месте.



Рис. 8.28. Солнечный календарь Майя

### РАСШИРЬТЕ СВОИ ЗНАНИЯ

**Юлианский календарь (старый стиль).** В 46 году до н.э. император Юлий Цезарь провел реформу римского календаря. Средняя продолжительность года была определена в 365 суток и 6 часов, что очень близко к продолжительности тропического года. Поскольку удобен год с целым числом дней, то три простых года подряд содержало по 365 суток, а четвертый, високосный год – 366 суток. Год считается високосным, если число, которое он представляет, делится на 4 без остатка. Год начинался с января.

Средняя продолжительность года в юлианском календаре на 11 минут и 13,9 секунд длиннее тропического года. Поэтому каждые 128 лет и 68 суток накапливалась ошибка в 1 день. К XVI веку накопилось 10 суток. Это стало приводить к неудобствам в применении правила определения даты Пасхи, установленного на I Вселенском церковном соборе в 325 году в Никее: отмечать ее в первое воскресенье после первого полнолуния, наступающего после дня весеннего равноденствия, 21 марта. Календарное равноденствие сдвигалось от весны к зиме, и стала актуальной реформа юлианского календаря.

как оно непрерывно меняется от одного меридиана к другому. Поэтому в 1884 году была предложена новая система счета времени – с помощью *часовых поясов*.

Земной шар был поделен на 24 часовых пояса шириной в  $15^\circ$  (или 1 час) каждый, пронумерованные от 0 до 23. Основной меридиан начального, нулевого пояса, проходит через Гринвич.

**Местное время основного меридиана часового пояса  $n$  используется для всего пояса и называется *поясным временем  $T_n$* .**

Связь между поясным и всемирным временем простая:  $T_n = T_0 \pm n^h$  («+» – к востоку и «-» – к западу от Гринвича). Географическая широта Кишинэу  $\lambda = 28^\circ 49'$ , он находится во втором часовом поясе, значит поясное время

$$T_2 = T_0 + 2^h.$$

Для экономии электроэнергии и более полного использования светового дня вводится **летнее время**: ежегодно в последнее воскресенье марта стрелки часов переводятся на час вперед. Летнее время равно поясному времени плюс один час:  $T_n = T_n + 1^h$ . Для Кишинэу  $T_n = T_2 + 1^h = T_0 + 3^h$ , то есть летом разница между временем в Кишинэу и всемирным временем равна трем часам. В последнее воскресенье октября летнее время отменяется.

В середине XX века была введена **международная шкала атомного времени**. В ее основе лежит периодический процесс высокой стабильности, не зависящий от внешних воздействий, – резонансный переход между двумя энергетическими состояниями атома цезия. Эталон *атомной секунды*, используемый в СИ, уже не связан с вращением Земли.

• **Календарь.** Система счета длительных промежутков времени – **календарь**, – использовалась на протяжении всей истории цивилизации. Различают три типа календарей: **лунные, солнечные и лунно-солнечные**. Одним из самых точных древних календарей считается календарь Майя (рис. 8.28).

В основу солнечного календаря взят тропический год, равный 365 суток, 5 ч, 48 мин, 46,1 с, в основу лунного – синодический месяц, равный 29,5 суток. В лунно-солнечном календаре согласованы оба периодических процесса. При составлении календарей следят, чтобы календарный год был как можно ближе к продолжительности тро-

пического года. Год в любом календаре содержит целое число солнечных суток.

• **Григорианский календарь (новый стиль).** В 1582 году папа Григорий XIII провел реформу юлианского календаря. Сохранилась последовательность простых годов по 365 суток и високосных по 366 суток, но чтобы сократить разницу между средним юлианским календарным годом и тропическим годом, немного уменьшили количество високосных лет. Годы 1700, 1800, 1900, 2100 и т.д. (не делятся на 400 без остатка) решили считать простыми, а 2000, 2400, 2800 оставить високосными, когда в феврале 29 суток.

Средняя продолжительность года в новом календаре всего на 26 секунд превышает продол-

жительность тропического года, а ошибка в сутки накапливается примерно за 3 300 лет. Календарь назвали *григорианским* или *новым стилем*. С начала XX века по 2100 год разница между новым и старым стилем – 13 суток.

В наше время григорианский календарь принят в большинстве стран мира. Старый стиль используется только в нескольких странах православной церковью. В связи с усилением связей между странами григорианский календарь практически стал международным, а в некоторых странах применяется наряду с традиционными календарями.

### ➔ Проверьте свои знания

1. Для определения координат судна штурман измерил 22 декабря в истинный полдень зенитное расстояние Солнца и получил  $66^{\circ} 34'$ . В момент наблюдения всемирное время (по Гринвичу) было  $10^{\text{h}} 54^{\text{m}}$ . Определите географические координаты судна.
2. Переведите 1 марта 2011 года в дату по старому стилю.
3. Аэробус A340 со скоростью 750 км/ч пролетел 6 400 км от Филадельфии до Франкфурта на Майне. Разница часовых поясов равна 6 ч. Когда он прилетел во Франкфурт, если взлетел из Филадельфии 3 августа в 20 ч 00 мин?
4. Будет ли 2200 год високосным годом по новому стилю? А по старому стилю?

## 8.3. СОЛНЕЧНАЯ СИСТЕМА

### а. Планеты земной группы и планеты-гиганты. Спутники планет. Карликовые планеты

**Общая характеристика.** Солнце и движущиеся вокруг него тела – планеты, их спутники, астероиды, кометы, межпланетное вещество образуют Солнечную систему (*рис. IV* на цветной вкладке, с. 162).

Почти вся масса Солнечной системы (99,87%) сконцентрирована в Солнце. Диаметр Солнца в 109 раз, а масса примерно в 333 000 раз больше, чем у Земли. Вокруг Солнца обращаются планеты (в порядке возрастания расстояния до Солнца): Меркурий, Венера, Земля, Марс, Юпитер, Сатурн, Уран, Нептун (см. *таблицу 1*, с. 157).

Орбиты планет почти совпадают с плоскостью орбиты Земли.

Астероиды обращаются вокруг Солнца между орбитами Марса и Юпитера, образуя главный *пояс астероидов*.

Пояс астероидов разделяет две группы планет: планеты **земной группы** (Меркурий, Венера, Земля, Марс) – внутри пояса и **планеты-гиганты** (Юпитер, Сатурн, Уран и Нептун) – за орбитами астероидов.

Планеты земной группы похожи тем, что у них сравнительно небольшие диаметры, до 13 000 км, у всех есть твердая поверхность, средняя плотность между 3,9 и 5,5 г/см<sup>3</sup>. Все они медленно вращаются вокруг своей оси, у них мало естественных спутников (только у Земли – Луна, а у Марса – Фобос и Деймос). Планеты земной группы в основном состоят из плотного каменистого вещества и металлов.

У планет-гигантов большой диаметр (более 48 000 км), малая плотность (0,7–1,8 г/см<sup>3</sup>), большая скорость вращения, отсутствует твердая поверхность, есть плотная и протяженная атмосфера, богатая водородом и гелием. У этих планет много спутников, есть кольца из пыли и газа.

Вокруг Солнца обращается много комет и многочисленные *метеорные тела*, размером от песчинки до нескольких километров. Астероиды, метеорные тела и кометы называют **малыми**



Рис. 8.29. Поверхность планеты Меркурий



Рис. 8.30. Планета Венера

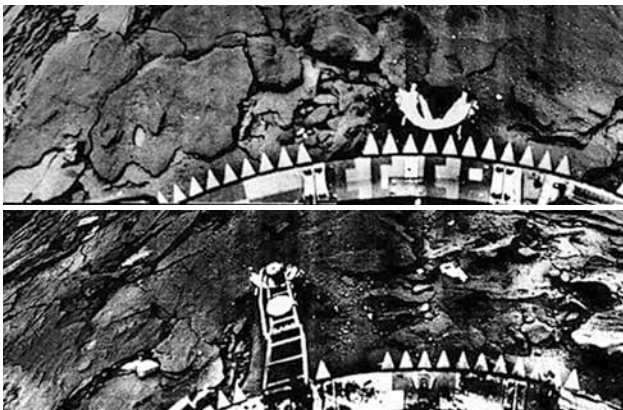


Рис. 8.31. Поверхность Венеры (фото со станции «Венера-14», 1981 г.)

телами Солнечной системы. В межпланетном пространстве имеются сильно разреженный газ и космическая пыль.

### Меркурий

Меркурий – ближайшая к Солнцу планета. Имея радиус 2 439 км, он лишь немного больше Луны. Спутников нет. Средняя плотность планеты почти как у Земли. Ось вращения практически перпендикулярна плоскости его орбиты, поэтому на Меркурии нет времен года. Период обращения – меркурианский год – равен примерно 88 земных суток, а период вращения вокруг своей оси равен 58,6 земных суток.

Магнитное поле Меркурия в 300 раз слабее земного. Меркурий можно наблюдать немногим более часа вечером, после захода Солнца, на западе или утром, до восхода Солнца, на востоке.

Поверхность Меркурия (рис. 8.29) очень похожа на поверхность Луны – также покрыта кратерами разных размеров. У Меркурия практически нет атмосферы. Температура на его экваторе днем достигает 700 К, а ночью падает до 100 К. В таких условиях известные формы жизни на Меркурии невозможны.

### Венера

Это вторая планета от Солнца, не имеет спутников (рис. 8.30). Венеру можно наблюдать, как яркое немерцающее светило, утром до восхода Солнца или вечером после его захода. В школьный телескоп у Венеры хорошо видны фазы, как и у Луны.

Масса, радиус, другие общие характеристики Венеры мало отличаются от Земли. Плотность атмосферы намного больше земной. Физические условия на поверхности планеты сильно отличаются от условий на Земле.

Информация о поверхности Венеры была получена с помощью опускавшихся на нее автоматических станций (рис. 8.31) и радиолокации. Было обнаружено около 1 000 кратеров, горные хребты, аналогичные земным.

Прямые измерения, проведенные зондами «Венера» и «Маринер-2» показали, что в атмосфере преобладает углекислый газ. Средняя температура поверхности достигает 460 °С, а давление 90 атм. Нагрев поверхности вызван парниковым эффектом из-за большого количества углекислого газа в атмосфере.



Год на Венере длится примерно 225 земных суток, а период вращения вокруг своей оси – около 243 земных суток, то есть длиннее года. Венера вращается в направлении, противоположном орбитальному движению. Ось вращения почти перпендикулярна к плоскости орбиты, поэтому нет времен года.

Венера всегда покрыта плотным слоем облаков, не позволяющим увидеть ее поверхность в оптический телескоп. Период и направление вращения, рельеф планеты определили с помощью радара.

Измерения показали, что у Венеры нет своего магнитного поля. Из-за высокой температуры и давления жизнь на планете в любой форме вряд ли возможна.

## Марс

Эта четвертая от Солнца планета обращается вокруг него на расстоянии в 1,52 раза большем, чем Земля. Диаметр Марса в 2 раза, а масса в 9 раз меньше, чем у Земли (*рис. VII* на цветной вкладке, с. 162). Средняя плотность планеты  $3,9 \text{ г/см}^3$ . Плоскость экватора наклонена к плоскости орбиты примерно так, как у Земли, поэтому на Марсе есть смена времен года. Период обращения вокруг Солнца 1,88 земных года.

Исследования показали, что у Марса очень слабое магнитное поле.

В телескоп на Марсе видны красно-оранжевые области, названные *континентами*, темные пятна, названные *морями*, белые пятна на полюсах, названные *полярными шапками* (из кристалликов  $\text{CO}_2$  с примесью  $\text{H}_2\text{O}$ ). Полярные шапки образуются осенью и исчезают к лету. Космические аппараты сфотографировали сухие русла рек, что говорит о том, что миллиарды лет тому назад на Марсе, возможно, была плотная атмосфера и жидкая вода.

Сейчас плотность атмосферы очень мала и воды в жидком состоянии на поверхности Марса нет. Атмосфера состоит в основном из углекислого газа и азота. Атмосферное давление у поверхности в 160 раз меньше земного, средняя температура около  $-70^\circ\text{C}$ .

Спутники Марса, Фобос и Деймос, были открыты в 1877 году. Они неправильной формы, напоминают два астероида. Размеры: у Фобоса 22–25 км (*рис. 8.32*), у Деймоса – около 13 км.

Начиная с 1960 года, к Марсу были запущены десятки космических аппаратов (*рис. 8.33*) с целью сбора информации об эволюции и физических условиях на планете (*рис. VIII* на цветной вкладке, с. 163). Результаты исследований помогут выяснить, как возникла и развивалась наша Земля.

## Юпитер

Самая большая планета в Солнечной системе; масса этого гиганта в 2 раза больше общей массы всех остальных планет (*рис. IX* на цветной вкладке, с. 163).

Из-за быстрого вращения у Юпитера короткие сутки: 9 ч 55 мин 40 с и большое сжатие. Ось планеты почти перпендикулярна к плоскости ее орбиты, поэтому нет смены времен года.

Юпитер находится примерно в пять раз дальше от Солнца, чем Земля, и каждый квадратный метр поверхности получает от Солнца в 27 раз меньше тепла и температура на уровне облаков:  $-145^\circ\text{C}$ .

Магнитное поле Юпитера в 50 раз сильнее, чем у Земли.



Рис. 8.32. Спутник Фобос



Рис. 8.33. Марсоход (НАСА, 2003 г.)

Юпитер – газовая планета. Средняя плотность планеты немного больше, чем у воды. В атмосфере преобладают молекулярный водород и гелий, видны красноватые полосы облаков, параллельные экватору, пятна разных размеров, среди которых и знаменитое *красное пятно*, размерами больше диаметра Земли. Это огромный устойчивый вихрь в атмосфере.

У Юпитера обнаружено 62 спутника (2004), из которых самые крупные, *галилеевы спутники*, – Ио, Европа, Ганимед и Каллисто (*рис. X* на цветной вкладке, с. 163), открыл в 1610 году Галилео Галилей. Остальные спутники намного меньше.

## Сатурн

Вторая по размерам планета Солнечной системы в 95 раз больше Земли по массе. Средняя плотность меньше, чем у воды. Быстрое вращение Сатурна привело к сильному сжатию планеты у полюсов. Облачный покров вращается полосами, как и у Юпитера, период их вращения растет от экватора к полюсам (*рис. XI* на цветной вкладке, с. 163).

Сатурн почти в два раза дальше от Солнца, чем Юпитер, поэтому температура в облаках всего около  $-170\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Атмосфера состоит из водорода и метана и, в отличие от Юпитера, не содержит аммиак.

Характерной особенностью Сатурна являются его хорошо видимые в телескоп кольца, замеченные впервые Галилеем. Они вращаются в плоскости экватора планеты и разделены темными промежутками, которым дали названия: щель Кассини, Энке и др. Ширина колец – десятки тысяч километров, а толщина – от 2 до  $\sim 20$  км. Состоят они из огромного количества твердых частиц, пыли и газа.

У Сатурна обнаружено 62 спутника, самый крупный – Титан. Он второй по величине после Ганимеда, спутника Юпитера, и больше планеты Меркурий.

Титан – единственный спутник в Солнечной системе с плотной атмосферой, состоящей в основном из азота и углеводородов (метан, этан и др.). Особо ценные сведения о Титане были получены с помощью запущенного в 1997 году космического аппарата «Кассини» со спускаемым зондом «Гюйгенс» на борту. В 2005 году зонд «Гюйгенс» достиг поверхности Титана и передал первые изображения его поверхности (*рис. 8.34*), данные о температуре, давлении, составе атмосферы.

## Уран

Планета Уран была открыта в 1781 году английским астрономом Уильямом Гершелем. Она находится на пределе видимости невооруженным глазом и хорошо видна только в телескоп в виде зеленоватого диска. Период обращения Урана 84 года. Масса в 14,6 раз больше массы Земли. Уран, как и остальные планеты-гиганты, быстро вращается вокруг своей оси; период вращения равен 10 ч 49 мин. Плоскость экватора наклонена на  $98^{\circ}$  относительно плоскости орбиты, поэтому Уран, как и Венера, вращается в направлении, противоположном орбитальному движению и вдобавок создается впечатление, что он как бы катится по орбите (*рис. XII* на цветной вкладке, с. 163).

В атмосфере преобладает водород. Температура на видимой поверхности облаков около  $55\text{ K}$  ( $-218\text{ }^{\circ}\text{C}$ ).



*Рис. 8.34.* Поверхность спутника Титан (NASA/ESA, 2005 г.)

Двадцать семь известных спутников Урана обращаются вокруг него в плоскости экватора планеты, как и система тонких колец, – практически перпендикулярно плоскости его орбиты. Самый большой спутник, Титания, имеет диаметр в два раза меньше, чем у Луны.

## Нептун

Существование планеты Нептун теоретически предсказали ученые Леверье и Адамс, а найдена она была в предсказанном участке неба в 1846 году немецким астрономом Галле. Нептун виден только в телескоп. Его масса составляет 17,2 масс Земли. Период обращения вокруг Солнца – 165 лет. Период вращения – 16 ч 6 мин. Внутреннее строение Нептуна подобно строению Урана. Средняя плотность – 1,7 г/см<sup>3</sup>.

Атмосфера Нептуна состоит из водорода, гелия и метана. Метан сильно поглощает красные и желтые лучи, отсюда и голубоватый цвет планеты.

На планете было обнаружено темное пятно (рис. XIII на цветной вкладке, с. 163), напоминающее

красное пятно на Юпитере, которое потом исчезло. Предполагается, что под покровом облаков есть лед и самый большой океан в Солнечной системе.

Магнитное поле немного сильнее земного.

У Нептуна известны 13 спутников. Открытый в 1846 году Тритон превышает по размерам карликовую планету Плутон. Есть у Нептуна и кольца из пыли и газа.

В 2006 году утверждена новая классификация планет и введена категория **карликовых планет**. К ним причислены: Плутон, Хаумеа, Макемаке, Эрида и астероид Церера (см. таблицу 2, с. 157).

### РАСШИРЬТЕ СВОИ ЗНАНИЯ

- В 1986 году космический аппарат «Вояджер-2» передал изображения планеты Уран, ее спутников и колец. Магнитное поле Урана слабее, чем у Земли.
- Большинство наших сегодняшних знаний о планете Нептун основано на данных, полученных «Вояджером-2» в 1989 году.

## ➔ Проверьте свои знания

1. Где нужно искать на небе планеты Меркурий и Венеру?
2. Сколько времени и на какой максимальной высоте можно наблюдать планеты Меркурий и Венеру в Кишинэу?
3. Объясните смену фаз планеты Венера.
4. Почему в атмосфере Венеры возникает парниковый эффект?
5. Что собой представляет «красное пятно» на Юпитере?
6. Опишите природу колец Сатурна.
7. В чем особенность вращательного движения планеты Уран?
8. Как была открыта планета Нептун?

## 6. Малые тела Солнечной системы

• **Астероиды.** В течение XIX века было открыто множество небесных тел, названных *астероидами* или *малыми планетами*. Известно около 18 000 астероидов, в том числе более 3 000 астероидов диаметром более 0,5 км.

Большинство астероидов обращаются вокруг Солнца между орбитами Марса и Юпитера, образуя главный **пояс астероидов** (рис. 8.35). Есть исключения, например, астероид Икарус в перигее находится ближе к Солнцу, чем Меркурий.

Астероиды видны в телескоп как слабые звездочки, очень медленно перемещающиеся по небу, как и планеты. Общая масса известных астероидов

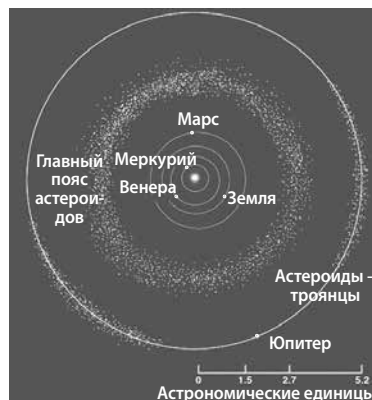


Fig. 8.35. Пояс астероидов

$\sim 4 \cdot 10^{21}$  кг или примерно в 20 раз меньше массы Луны и вместе они могли бы образовать планету диаметром всего около 1 500 км.

У астероидов, за исключением Цереры, неправильная форма и нет атмосферы. Вероятно, астероиды – это обломки, получившиеся при столкновении более крупных тел (рис. 8.36).

Вначале астероидам давали имена из античной мифологии, затем в честь знаменитых людей, географические названия и т.д. Есть астероид Молдавия, Трансильвания, Данубия, Эминеску, Донич и др. Астроном Александр Дейч, работая в Пулковской обсерватории под Санкт-Петербургом (Россия), открыл астероид и назвал его Рени.

• **Кометы.** Эти малые тела Солнечной системы представляют собой глыбы замерзших газов, льда, пыли, песчинок, которые по какой-то причине не стали частью планет при формировании Солнечной системы.

Кометы становятся видны, лишь приблизившись к Солнцу. Тогда у них хорошо различаются ядро, голова (кома), хвост (рис. 8.37).

Твердое, относительно стабильное ядро, размером от нескольких сотен метров до нескольких десятков километров, содержит лед из метана, аммиака, воды, циана, углекислого газа, азота, а также пыль и мелкие твердые частицы.

**Голова** – это облако вокруг ядра, состоящее из разреженных нейтральных газов и др. газов, сублимировавших с поверхности ядра.

**Пылевой хвост**, до 10 миллионов километров в длину, состоит из пыли, содержащейся в ядре.

**Плазменный хвост**, до сотен миллионов километров в длину. Состоит из ионизованного газа, уносимого от ядра солнечным ветром.

Благодаря давлению света и солнечному ветру хвосты комет направлены от Солнца. Хвост может иметь различные формы в зави-

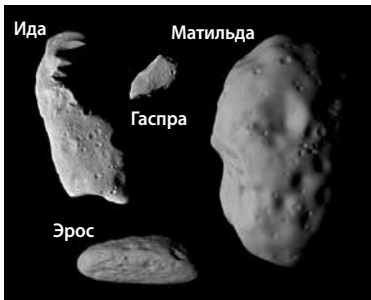


Рис. 8.36. Астероиды



Рис. 8.37. Строение кометы



Рис. 8.38. Комета Галлея, 1986 г.

симости от соотношения между силой притяжения Солнца, направленной к Солнцу, и силой давления света, солнечного ветра, направленных от Солнца.

Большинство комет движется по параболическим или сильно вытянутым эллиптическим орбитам с периодом обращения вокруг Солнца предположительно до миллионов лет. Четвертую часть комет, с периодом обращения менее 200 лет, называют **короткопериодическими**.

Многочисленная группа короткопериодических комет с периодом обращения 3-10 лет, называемая «семейством Юпитера», удаляется от Солнца до орбиты Юпитера.

Из-за своей очень малой массы по сравнению с Землей кометы не представляют для нашей планеты большой опасности. В 1910 году Земля прошла сквозь хвост кометы Галлея (рис. 8.38), но никаких ядовитых газов, таких, как окись углерода, циан, присутствовавших в хвосте кометы, в земной атмосфере не было обнаружено. Столкновение же Земли с ядром кометы может привести к мощному взрыву и разрушительной ударной волне, приводящей к большим разрушениям. Так, в 1908 году в Центральной Сибири упал Тунгусский метеорит, вероятно, ядро небольшой кометы. Ударной волной были повалены деревья в тайге в зоне радиусом 30 км.

• **Транснептуновые объекты.** Космические тела, обращающиеся вокруг Солнца за орбитой Нептуна, названы **транснептуновыми объектами** (рис. 8.39). Первое тело, карликовая планета Плутон, была открыта в 1930 году. Начиная с 1992 года, было открыто около тысячи транснептуновых объектов. Некоторые из них получили собственные имена: Иксион, Варуна, Коаоар, Эрида, Седна и др.

Наблюдение этих объектов возможно только с помощью орбитальных телескопов или самых совершенных наземных.

• **Пояс Койпера.** В зоне влияния тяготения Нептуна на расстоянии от 30 до 80 а.е. от Солнца находится *пояс Койпера*, где по почти круговым орбитам, примерно в одной плоскости с планетами, обращаются вокруг Солнца тысячи глыб из замерзших газов, песка, льда, камней. Известно около 10 000 тел размером более 50 км. Среди них Варуна, диаметром около 500 км, открыта в 2000 году, Коаоар – около 1 250 км (2002 г.), Седна – 1 700 км (2003 г.).

### ➔ Проверьте свои знания

1. Можно ли невооруженным глазом увидеть на небе астероиды?
2. Как на небе можно отличить астероид от звезды?
3. Чему примерно равно общее количество и масса всех известных астероидов?

### РАСШИРЬТЕ СВОИ ЗНАНИЯ

Первым провел расчеты кометных орбит английский астроном Эдмонд Галлей. В 1705 году он определил периодичность в 76 лет одной из изученных им комет, которая теперь носит его имя. Последнее очередное появление кометы около Солнца было в 1986 году (рис. 8.38). Она изучалась с помощью космических зондов. В следующий раз комету можно будет наблюдать в 2061 году.



Рис. 8.39. Транснептуновые объекты

### РАСШИРЬТЕ СВОИ ЗНАНИЯ

- Какие последствия может иметь столкновение кометы с Землей? Комета, орбита которой проходит близко от планеты, может быть или захвачена планетой или выброшена за пределы Солнечной системы. Похожее явление произошло в 1994 году, когда ядро кометы Шумейкеров–Леви-9 распалось на десятки фрагментов, упавших на Юпитер.
- Одна из проблем, волнующих астрономов, – это происхождение комет. Согласно предложенной в 1950 году голландским астрономом Оортом гипотезе, Солнечная система окружена огромным сферическим облаком кометных ядер, названным «облаком Оорта». Оно содержит миллиарды ядер и простирается на 100–150 тысяч а.е.\* от Солнца.

\* 1 а.е. (астрономическая единица) = 149,6 млн. км – среднее расстояние Земля–Солнце.

• Согласно решению Международного Астрономического Союза 2006 года, четыре из транснептуновых объектов – Плутон, Хаумеа, Макемаке и Эрида – названы карликовыми планетами из категории *плутоидов*, то есть не считаются малыми телами Солнечной системы.

## в. Земля. Внутреннее строение, гидросфера, атмосфера и магнитосфера Земли. Луна. Приливы и отливы

• **Земля.** Еще в древнем Вавилоне и Индии, наблюдая за тем, как постепенно скрываются корабли за горизонтом, пришли к выводу, что Земля выпукла. Позже идею шарообразности Земли поддержали в философских школах Пифагора и Платона. Аристотель (384–322 до н.э) обосновал эту идею, используя затмения Луны, во время которых на лунном диске виден край круглой тени Земли. В наше время фотографии, полученные с помощью искусственных спутников Земли из космоса, легко доказывают шарообразность Земли. Измеренный с их помощью экваториальный радиус Земли равен 6 378,14 км.

• **Внутреннее строение.** Как и остальные планеты земной группы, Земля состоит из нескольких слоев: из земной коры, мантии и ядра (рис. XIV на цветной вкладке, с. 163).

**Земная кора** – твердая наружная оболочка Земли. Ее толщина меняется от 5 км под океанами до 30–50 км под континентами. Температура коры растет с глубиной примерно на 20 °С с каждым километром. На глубине 10 км температура достигает 180 °С. Возраст земной коры около 4,5 млрд. лет.

**Мантия** составляет 67% массы и 83% объема Земли; толщина слоя мантии – до 2 890 км. Земная кора и часть верхней мантии образуют наружную твердую оболочку Земли – *литосферу*, средней толщиной около 100 км. Литосфера разделена на твердые платформы, называемые **тектоническими плитами**, перемещающимися независимо одна от другой. В местах разломов

### РАСШИРЬТЕ СВОИ ЗНАНИЯ

Форма и размеры Земли были измерены с большой точностью по методу, который использовал ещё в древности Эратосфен (276–194 до н.э.). Эратосфен знал, что в Сиене (ныне Асуан, Египет), который находится на том же меридиане, что и Александрия, в полдень Солнце находится в зените и освещает дно самых глубоких колодцев. В те же дни в Александрии зенитное расстояние Солнца равно примерно 7,2°. Зная, что от Александрии до Сиены расстояние равно 5 000 египетских стадий, он вычислил радиус Земли. Длина египетской стадии в наши дни точно не известна, поэтому мы не можем судить о точности проведенных Эратосфеном измерений.

между плитами могут возникать землетрясения и действовать вулканы.

Предполагается, что источником земного тепла является радиоактивный распад элементов в ядре Земли.

**Ядро** состоит из сплава железа и никеля с примесью других элементов. Анализ распространения сейсмических волн показал, что у Земли есть *твердое внутреннее ядро*, окруженное *жидким наружным ядром*. Радиус внутреннего ядра около 1 225 км, плотность 12,5 г/см<sup>3</sup>. Толщина жидкого внешнего ядра около 2 245 км, плотность 1 000 кг/м<sup>3</sup>. Его вязкое вещество хорошо проводит электрический ток.

• **Гидросфера.** Вода, покрывающая 71% поверхности Земли, образует гидросферу, сильно влияющую на климат. В Солнечной системе только у Земли есть гидросфера.

• **Атмосфера.** Земная атмосфера состоит из нескольких слоев (рис. 8.40). В состав атмосферы входят: азот, N<sub>2</sub> (78%), кислород, O<sub>2</sub> (21%), и в малых количествах углекислый газ, инертные газы, водород, озон, водяной пар и др.

Атмосфера играет важнейшую роль в существовании жизни на Земле, так как защищает от вредных космических излучений, солнечного ветра, состоящего из протонов высокой энергии, и от микрометеоритов. Изучение земной атмосферы позволяет лучше понять свойства атмосфер на других планетах.

• **Магнитное поле и магнитосфера Земли.** Согласно современным представлениям возникновение магнитного поля Земли связано со сложными физическими процессами в ядре. Земля, вращаясь, увлекает в это движение и ядро, что вызывает появление в нем круговых электрических токов, создающих магнитное поле.

Магнитное поле защищает Землю от космических лучей – частиц высокой энергии (протонов и ядер различных элементов), прилетающих из далекого космоса, и солнечного ветра.

Область околоземного пространства, занимаемую магнитным полем Земли, называют **магнитосферой** (рис. 8.41). Она сильно деформирована со стороны Солнца солнечным ветром – сжата примерно на 70 000 км. С противоположной, ноч-

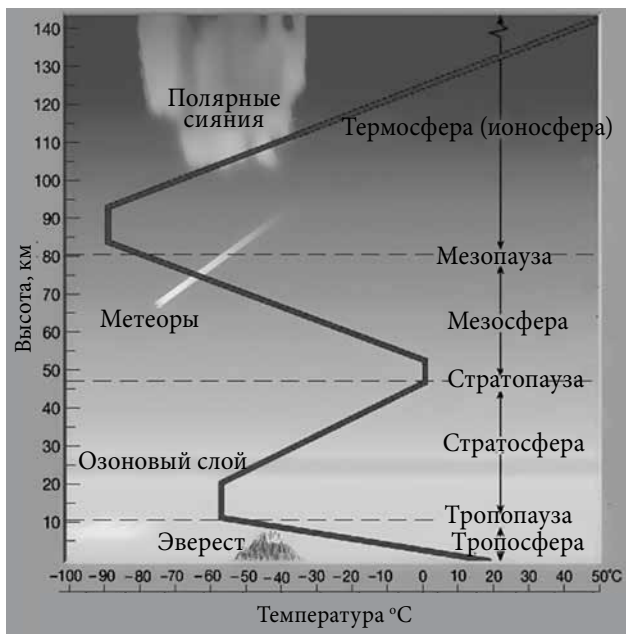


Рис. 8.40. Строение атмосферы Земли и зависимость температуры от высоты

ной стороны, магнитосфера простирается до орбиты Луны. Граница между магнитосферой и космическим пространством называется **магнитопаузой**.

Изучение ближнего космоса с помощью космических аппаратов показало, что в магнитосфере есть две области – *радиационные пояса* в форме колец, окружающих Землю. Они состоят из протонов и электронов, захваченных из солнечного ветра (рис. 8.41).

После вспышек на Солнце поток частиц солнечного ветра, движущихся со скоростью 400–1 000 км/с, достигнув Земли, деформирует ее магнитное поле, вызывая *магнитные бури*. Они могут нарушить радиосвязь в полярных областях, вызвать полярные сияния.

• **Луна.** Это единственный естественный спутник Земли, самый яркий объект на небе после Солнца (рис. 8.42). Масса Луны в 81,3 раза меньше массы Земли. Период ее вращения вокруг своей оси равен периоду обращения вокруг Земли, поэтому Луна все время обращена к Земле одной стороной.

У Луны нет атмосферы. Из-за этого на ее поверхности сильный перепад температур: от +130 °C днем до – 173 °C ночью.

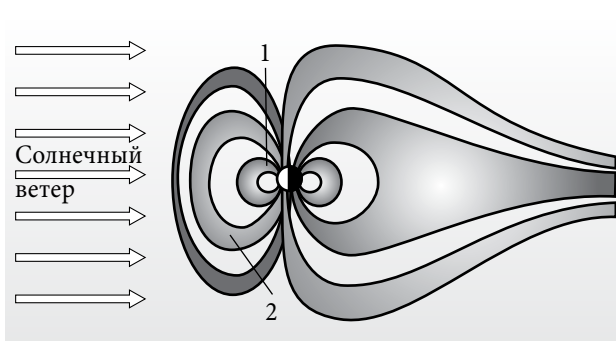


Рис. 8.41. Магнитосфера и радиационные пояса Земли: 1 – внутренний радиационный пояс; 2 – внешний радиационный пояс

### РАСШИРЬТЕ СВОИ ЗНАНИЯ

В настоящее время полярность магнитного поля Земли противоположна географической. Северный магнитный полюс находится в Индийском океане недалеко от Антарктиды, а южный полюс – на севере Канады. Стрелка компаса указывает не на географический Северный полюс, а на южный магнитный. Геомагнитные полюса медленно перемещаются по поверхности Земли со скоростью 55 км в год. Есть археологические доказательства того, что в далеком прошлом магнитное поле Земли меняло свою полярность и это явление периодически повторялось.

Земля на небе Луны видна в виде диска с угловым диаметром в 3,5 раза больше, чем у Солнца, причем в разных фазах, как и Луна с Земли (рис. 8.43).



Рис. 8.42. Луна



Рис. 8.43. Земля на небе Луны (фото с «Аполлона-11»)



Рис. 8.44. Кратеры на Луне

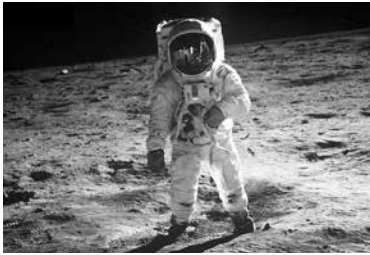


Рис. 8.45. Астронавт на Луне. Экспедиция «Аполлона-11»

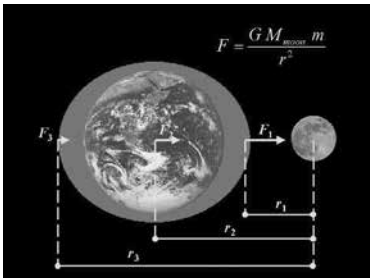


Рис. 8.46. Приливы

Наблюдая Луну невооруженным глазом, мы заметим на ее поверхности темные области, «моря», – огромные низменности глубиной до 3-х км, покрытые вулканической лавой темного цвета, и светлые области – «континенты». На Луне есть цепи гор высотой до 6 км, поверхность Луны покрыта *реголитом*, – смесью пыли с кусочками породы. Луна подвергается непрерывной бомбардировке метеоритами, поэтому вся покрыта *кратерами* разных размеров и формы. Есть и кратеры вулканического происхождения (рис. 8.44).

Вода на поверхности Луны не найдена, но по данным космических зондов есть лед – на дне глубоких кратеров в полярных областях, куда не проникают солнечные лучи.

Первую карту видимой стороны Луны начертил в XVII веке польский астроном Ян Гевелий (1611–1687). Точная карта всей поверхности Луны была изготовлена после того, как в 1959 году советская межпланетная станция «Луна-3» сфотографировала обратную сторону Луны.

Внутреннее строение Луны было определено с помощью сейсмических волн. Толщина *лунной коры* около 60 км на видимой стороне и 100 км на невидимой стороне Луны. Под корой находится *мантия* толщиной до 1 000 км, в центре есть небольшое твердое *ядро* радиусом в несколько сотен километров. У Луны нет общего магнитного поля, но у некоторых пород на поверхности есть следы намагниченности.

Луна активно исследуется с помощью автоматических станций и космических кораблей. 20 июля 1969 года на лунную поверхность ступили первые люди – американские астронавты Нейл Армстронг и Эдвин Олдрин в спускаемом модуле «Аполлона-11» (рис. 8.45).

• **Приливы и отливы.** Силы тяготения со стороны Луны и Солнца действуют на все отдельные части Земли, включая океаны и атмосферу. Так как величина силы тяготения зависит от расстояния, то каждый килограмм вещества Земли, находящийся на ее поверхности со стороны Луны, притягивается к Луне сильнее, чем находящийся с противоположной стороны Земли. Земля не является абсолютно твердым телом, поэтому различное действие сил тяготения в разных ее частях приводит к слабой деформации коры и заметному перемещению воды в океанах – к возникновению приливов. Земля, а в особенности поверхность воды, вытягивается в направлении Земля–Луна, образуя два горба: один со стороны Луны, другой – с противоположной стороны (рис. 8.46). Их называют **приливами**. В перпендикулярном направлении уровень воды снижается – это **отливы**. Благодаря суточному вращению Земли зоны приливов и отливов наступают по очереди в различных точках планеты. В течение 24 ч 50 мин происходит 2 прилива и 2 отлива.

Благодаря явлению приливов земная кора поднимается и опускается примерно 2 раза в сутки на несколько дециметров. В земной атмосфере с такой же периодичностью изменяется атмосферное давление.

Притяжение Солнца тоже вызывает приливы, но в 2,2 раза слабее, чем лунные, из-за большого расстояния до Земли. Приливы приводят к появлению **приливного трения**, тормозящего вращение Земли и удлиняющего сутки.



## ➔ Проверьте свои знания

1. Опишите механизм возникновения магнитного поля Земли.
2. Что представляют собой полярные сияния и от чего зависит их интенсивность?
3. Что произойдет с временами года, если ось вращения Земли будет перпендикулярной плоскости эклиптики?
4. Почему с Земли всегда видна одна и та же сторона Луны?
5. Объясните происхождение пепельного света Луны.
6. Почему на поверхности Луны температура в тени на десятки градусов ниже, чем в освещенных Солнцем местах?

### г. Понятие о космогонии. Возникновение и эволюция Солнечной системы

Раздел астрономии – *космогония* – занимается проблемой происхождения и эволюции небесных тел.

Разобраться в возникновении и эволюции Солнечной системы – очень сложная задача. К ее решению можно подойти чисто теоретически, применив общие законы физики. Это позволяет выяснить необходимые условия для прохождения Солнцем и планетами определенных фаз эволюции и проявления наблюдаемых в наше время характеристик.

Согласно современным космогоническим гипотезам Солнце вместе с планетами сформировались из общей вращающейся газопылевой туманности. Еще не существует завершенной теории, вырисовываются только основные этапы эволюции Солнечной системы (рис. 8.47):

а) Вначале существовало огромное вращающееся облако межзвездной материи, состоявшее из молекул газа ( $H_2$ ,  $H_2O$ ,  $OH$  и др.) и пыли.

б) Кое-где в облаке возникли неоднородности, которые, достигнув некоторой критической массы, начали сжиматься под действием сил тяготения. В итоге облако распалось на несколько фрагментов, один из которых впоследствии стал Солнцем и Солнечной системой.

в) Приблизительно через 10 тысяч–100 тысяч лет от начала сжатия масса ядра фрагмента достигла примерно 0,1 массы современного Солнца и с ростом плотности потеряла прозрачность. За очень короткое время, 10–100 лет, центральное ядро сжалось еще сильнее и образовалась *протозвезда* – будущее Солнце. Вокруг нашей протозвезды вследствие вращения сформировался диск из газа и пыли – *протопланетарная туманность*. Примерно через 100 тысяч лет протосолнце достигло массы современного Солнца, но радиусом примерно в 100 раз больше. На этом этапе начинается интенсивное гравитационное сжатие протосолнца.

Протопланетная туманность разделяется на кольца, из внешних колец начинают формироваться планеты-гиганты. Из газопылевых дисков вокруг планет позже образуются семейства спутников.

г) Еще около 100 миллионов лет продолжалось гравитационное сжатие протосолнца. Его размеры уменьшились почти до современных. Пылинки в протопланетной туманности, слипаясь при столкновении, образовывали в одной общей плоскости всё более крупные частицы, а затем и твердые тела. Масса крупных тел росла за счет меньших. Так возникли массивные тела, напоминающие астероиды –

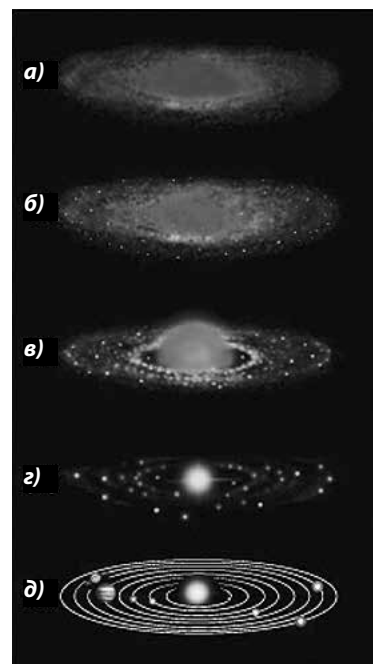


Рис. 8.47. Образование Солнечной системы

## РАСШИРЬТЕ СВОИ ЗНАНИЯ

В 1644 году Декарт впервые предположил, что Солнечная система возникла из облака пыли и газа. Эту гипотезу развил Кант (1755 год), предположивший, что в центре облака сформировалось Солнце, а в остальных местах – планеты.

В 1796 году Лаплас предположил, что в процессе образования планет важную роль сыграло вращение первичного облака в условиях гравитационного сжатия. Туманность сжимается в диск, затем из вещества диска формируются кольца как у Сатурна. Дальнейшая концентрация вещества в этих кольцах приводит к образованию планет (рис. 8.47).

При всей правдоподобности гипотез Канта и Лапласа они не могут объяснить, почему 98% момента импульса Солнечной системы у планет, и только 2% – у Солнца.



Рис. 8.48. Видимое петлеобразное движение планеты Марс



Рис. 8.49. Конфигурации и фазы планет

**планетезимали.** Огромное число их сталкивалось, слипалось или разрушалось, часто образуя метеороиды. Некоторые особо крупные тела становились ядрами будущих планет земного типа.

д) Земля, возраст которой оценивается примерно в 4,5 миллиардов лет, достигла современных размеров в течение периода времени от 100 тысяч до 100 миллионов лет.

## 8.4. ЭЛЕМЕНТЫ НЕБЕСНОЙ МЕХАНИКИ

### а. Видимое движение планет. Гелиоцентрическая система мира

• **Видимое движение планет** по небу отличается от видимого движения Солнца и звезд. Внутри земной орбиты находятся орбиты **нижних планет** (Меркурий и Венера), а вне ее – орбиты **верхних планет** (все остальные). Меркурий и Венера движутся по небу недалеко от Солнца: или к востоку от Солнца, когда они видны вечером после его захода, или к западу от него, когда они видны утром до восхода Солнца. Угол между направлением на Солнце и на нижнюю планету называется **угловой элонгацией** или просто **элонгацией**. Для Меркурия максимальная элонгация достигает 18–28°, а для Венеры 45–48°. В народе самое яркое после Солнца и Луны светило – Венера часто называют «утренней (вечерней) звездой».

Видимое смещение планеты относительно звезд с запада на восток называется **прямым движением**, а с востока на запад – **попятным (ретроградным) движением**. Планеты некоторое время совершают прямое движение, затем «останавливаются» и начинают попятное движение, описывая на небе петли (рис. 8.48).

В своем орбитальном движении вокруг Солнца планеты занимают различные положения – конфигурации относительно Земли и Солнца (рис. 8.49). Если нижняя планета находится между Землей и Солнцем, то говорят, что она в **нижнем соединении** (и ближе всего к Земле). Если нижняя планета, Солнце и Земля находятся на одной прямой, то наблюдается прохождение планеты по диску Солнца – **транзит**. Планета тогда видна как черный кружок на диске Солнца. Если нижняя планета окажется точно за Солнцем, в **верхнем соединении**, она будет дальше всего от Земли и невидима.

В зависимости от положения относительно Солнца у нижних планет видны **фазы**, как и у Луны.

Если Земля находится между верхней планетой и Солнцем, то говорят, что планета находится в **противостоянии** с Солнцем (рис. 8.49), что создает наилучшие условия для наблюдений. В этот период верхние планеты ближе всего подходят к Земле, в верхней кульминации находятся примерно в полночь и видны всю ночь. Если верхняя планета находится за Солнцем, то она не видна, она в **соединении** с Солнцем.

• **Гелиоцентрическая система мира.** Великий астроном древности Аристарх Самосский (320–~250 г. до н.э.) первым выдвинул идею о

том, что в центре мира находится Солнце, а планеты обращаются вокруг него. К сожалению, его современники отдали предпочтение геоцентрической гипотезе Аристотеля.

Представления астрономов античного мира о Вселенной в ~150 году обобщил греческий астроном Клавдий Птолемей (~87–165 г.) из Александрии в трактате по математике и астрономии *Megale Syntaxis* (попавший в Европу на арабском языке как *Альмагест*).

С ростом точности астрономических измерений выяснилось несоответствие между расчетами по Птолемею и наблюдениями. Великий польский астроном Николай Коперник (1473–1543) поставил под сомнение состоятельность основных идей геоцентрической системы Птолемея. В своей работе «Об обращении небесных сфер», опубликованной в 1543 году, Коперник разработал *геоцентрическую систему мира*. Эта система основывалась на следующих принципах: 1) в центре мира находится Солнце; 2) шарообразная Земля вращается вокруг своей оси; 3) Земля, как и остальные планеты, движется вокруг Солнца по круговой орбите, Луна движется вокруг Земли; 4) все движения представляют собой комбинации круговых равномерных движений; 5) видимое прямое и попятное движение планет кажущееся и объясняется движением Земли.

Коперник первый обосновал строение Солнечной системы, вычислив относительные расстояния от Солнца до планет и их периоды обращения. Он правильно объяснил видимое сложное движение планет – прямое и попятное, как комбинацию двух реальных движений вокруг Солнца – планеты и Земли.

Отказавшись от догматического тезиса о неподвижности Земли, столетия господствовавшего в умах людей, Коперник совершил революцию не только в астрономии, но и в научном понимании мира.

### ➔ Проверьте свои знания

1. Планета видна на угловом расстоянии  $110^\circ$  от Солнца. Это нижняя или верхняя планета?
2. Можно ли наблюдать Венеру вечером в восточной стороне неба? Почему?
3. 1 мая Юпитер находился в противостоянии с Солнцем. В каком созвездии можно было его найти?
4. С Земли мы видим петлеобразное движение Марса. А с Марса движение Земли видно тоже как петлеобразное?

• *Геоцентрическая система мира*. В основе птолемеевского понимания строения Вселенной, известного как *геоцентрическая система мира*, лежат четыре положения: 1) Земля шарообразна и находится в центре мира; 2) Земля неподвижна; 3) все небесные тела, включая Солнце, движутся вокруг Земли; 4) планеты движутся равномерно, по эпициклам, центры которых обращаются по деферентам вокруг Земли (рис. 8.50).

Птолемеевская система позволяла астрономам объяснить видимое движение планет и вычислить их положение с точностью, удовлетворительной для наблюдений только невооруженным глазом.

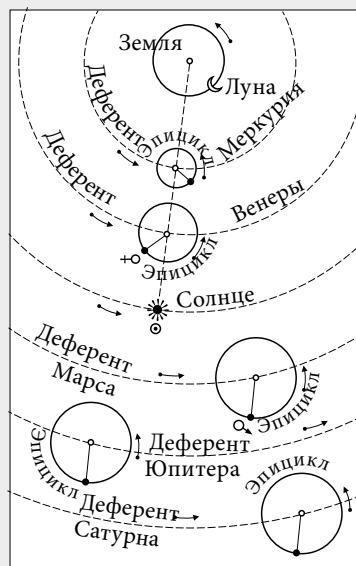


Рис. 8.50. Геоцентрическая система Птолемея

• *Гелиоцентризм* подрывал господство религии, которая поддерживала догму об особом положении неподвижной Земли в центре Вселенной. Поэтому с начала XVII века инквизиция начала беспощадную борьбу против теории Коперника и ее последователей. Так, в 1600 году в Риме был сожжен на костре Джордано Бруно (1548–1600), горячий сторонник идей Коперника, придерживавшийся идеи о множественности цивилизаций во Вселенной.

Другим сторонником концепции Коперника был великий итальянский физик и астроном Галилео Галилей (1564–1642), первый человек, направивший зрительную трубу на небо (1609 г.), чьи открытия подтвердили теорию Коперника. Галилей открыл фазы Венеры, горы на Луне и вычислил их высоту, открыл четыре спутника у Юпитера. Наблюдая перемещение пятен на Солнце, пришел к выводу, что Солнце вращается вокруг своей оси. Наблюдая в телескоп Млечный Путь, Галилей выяснил, что он состоит из множества звезд.

## б. Сидерический и синодический периоды обращения планет. Законы Кеплера

• **Сидерический и синодический периоды планет.** Период обращения планеты вокруг Солнца относительно звезд называется *звездным* или **сидерическим периодом**  $T$ . Сидерический период Земли называется *сидерическим годом* ( $T_{\oplus} = 1$  год).

Промежуток времени между двумя одинаковыми конфигурациями планеты относительно Земли и Солнца называется **синодическим периодом**  $S$  планеты.

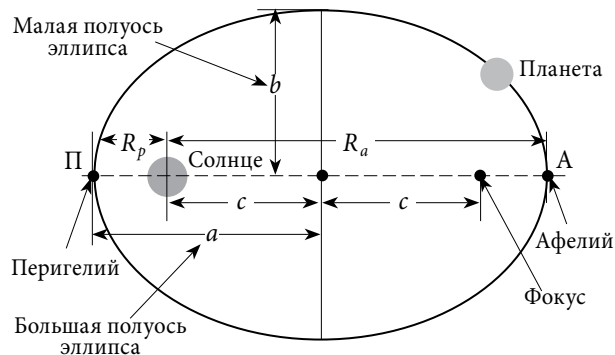
Между синодическим периодом планеты и сидерическими периодами планеты и Земли существует простая связь, называемая **уравнением синодического движения**, которое довольно легко вывести. Для нижних планет оно имеет вид:  $\frac{1}{S} = \frac{1}{T} - \frac{1}{T_{\oplus}}$ , а для верхних:  $\frac{1}{S} = \frac{1}{T_{\oplus}} - \frac{1}{T}$ . Прямыми наблюдениями можно определить только синодический период планет  $S$  и сидерический год  $T_{\oplus}$ . Сидерический период (звездный год) планеты  $T$  можно вычислить с помощью соответствующего уравнения синодического движения.

• **Законы Кеплера.** В гелиоцентрической системе Коперника орбиты планет считались такими же кругами, «идеальными кривыми», как и в системе Птолемея. Изучая движение планеты Марс вокруг Солнца, немецкий астроном Иоганн Кеплер (1571–1630) заметил несоответствие между вычисленными и наблюдаемыми положениями этой планеты. После многих лет упорной работы, утомительных расчетов Кеплер пришел к выводу, что орбиты планет не круговые, их движение не равномерное, и в итоге он установил три закона движения планет, носящих его имя.

**1-й закон: Каждая планета движется по эллиптической орбите, в одном из фокусов которой находится Солнце (закон эллипсов)** (рис. 8.51).

Вид эллипса характеризует его *эксцентриситет*  $e = \frac{c}{a}$ , где  $c$  – расстояние от центра эллипса до его фокуса,  $a$  – большая полуось эллипса. Эксцентриситет показывает степень отличия эллипса от окружности. Если  $c = 0$ , то  $e = 0$  и эллипс превращается в окружность радиусом  $a$ . Эксцентриситет земной орбиты  $e = 0,017$ .

Ближайшая к Солнцу точка орбиты планеты называется *перигелий*, а наиболее удаленная от него – *афелий* (рис. 8.51). Ближайшая к Земле точ-



$$R_a = a(1 + e) \quad R_p = a(1 - e)$$

Рис. 8.51. Первый закон Кеплера

ка лунной или какого-то искусственного спутника орбиты называется *перигей*, наиболее удаленная – *апогей*.

Можно доказать, что большая полуось орбиты планеты  $a$  равна среднему расстоянию планеты от Солнца. Большая полуось земной орбиты (среднее расстояние от Земли до Солнца) принята в астрономии за единицу расстояния, называемую астрономической единицей:

$$a_{\oplus} = 1 \text{ а.е.} = 149,6 \text{ млн. км.}$$

**2-й закон: Радиус-вектор планеты описывает равновеликие площади за равные интервалы времени (закон площадей).**

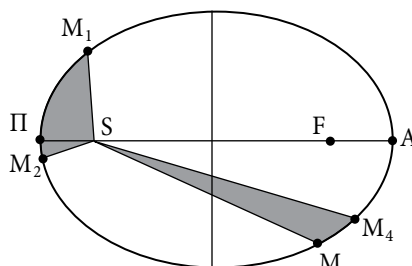


Рис. 8.52. Второй закон Кеплера

Радиус-вектор – это отрезок прямой от центра Солнца (фокус орбиты) до центра планеты. Согласно второму закону Кеплера площади  $M_1SM_2$  и  $M_3SM_4$  равны (рис. 8.52). Дуги  $M_1M_2$  и  $M_3M_4$ , пройденные планетой за равные промежутки времени разной длины:  $M_1M_2 > M_3M_4$ . Следовательно, движение планеты вокруг Солнца неравномерно. Чем ближе планета к Солнцу, тем ее скорость больше. Например, когда Земля находится в перигелии, то есть на минимальном расстоянии от Солнца (примерно 3 января), ее орбитальная скорость максимальна – 30,29 км/с (средняя скорость равна 29,7 км/с).

**3-й закон: Квадрат сидерического (звездного) периода обращения планеты пропорционален кубу большой полуоси ее орбиты (закон гармоний).**

Третий закон Кеплера устанавливает связь между сидерическими периодами и средними расстояниями планет от Солнца.

Обозначим через  $a_1$  и  $a_2$  большие полуоси орбит двух планет с сидерическими периодами обращения  $T_1$  и  $T_2$ , тогда третий закон запишется в виде:

$$\frac{T_1^2}{T_2^2} = \frac{a_1^3}{a_2^3}.$$

Как и остальные два закона, третий закон Кеплера справедлив не только для планет, но и для спутников, естественных и искусственных. В третьем законе все расстояния удобно выражать в астрономических единицах, а периоды обращения в земных годах. Тогда, для Земли,  $a_{\oplus} = 1$  а.е. и  $T_{\oplus} = 1$  год. В этом случае сидерический период

обращения вокруг Солнца какой-либо планеты, выраженный в земных годах, равен:

$$T = \sqrt{a^3}.$$

Законы Кеплера были открыты на основе данных наблюдений, то есть это эмпирические законы. С помощью закона всемирного тяготения Ньютон уточнил и обобщил законы Кеплера. Например, уточненный III закон Кеплера для двух систем, состоящих из массивных тел и их спутников, имеет вид:

$$\frac{T_1^2 \cdot (M_1 + m_1)}{T_2^2 \cdot (M_2 + m_2)} = \frac{a_1^3}{a_2^3}.$$

$M_1$  и  $M_2$  – массы центральных массивных тел, а  $m_1$ ,  $T_1$ ,  $a_1$  и  $m_2$ ,  $T_2$ ,  $a_2$  – массы, периоды и большие полуоси орбит их спутников. Третий закон в таком виде используется и для определения масс небесных тел.

## ➔ Проверьте свои знания

1. Используя уравнение синодического движения, определите звездный период обращения планеты Венера. Известно, что ее синодический период равен 584 дням.
2. Сидерический период обращения астероида Веста вокруг Солнца равен 3,63 года. Во сколько раз Веста находится дальше от Солнца, чем Земля?

## 8.5. СОЛНЦЕ

### а. Внутреннее строение и атмосфера Солнца

**Общая характеристика.** В центре Солнечной системы находится Солнце, обычная звезда, с диаметром в 109 и массой в 333 000 раз больше, чем у Земли. Солнце находится на расстоянии примерно 150 млн. км от Земли и является единственной звездой, диск которой виден с Земли. Остальные звезды, находясь на огромных расстояниях, видны как светящиеся точки даже в лучшие телескопы. Солнце – это шар из плазмы со средней плотностью  $1,41 \text{ г/см}^3$ . Температура видимой поверхности Солнца около 6 000 К.

В состав Солнца входят практически все химические элементы из периодической системы, но преобладают водород (около 70%) и гелий (около 29%). Остальных элементов всего около 1%.

Солнце вращается вокруг своей оси в том же направлении, что и Земля. Угловая скорость вра-

щения экваториальных областей больше, чем полярных; Солнце не является твердым телом, поэтому на экваторе сидерический период вращения длится примерно 25 суток, а около полюсов – около 30 суток.

Согласно современным моделям эволюции звезд возраст Солнца определен в 4,5 миллиардов лет, оно находится в середине своей эволюции.

**• Внутреннее строение и атмосфера Солнца.** Современной астрофизике известно, что основным источником энергии, поддерживающим солнечную активность, является термоядерная реакция синтеза ядер водорода – превращение водорода в гелий. Реакция происходит там, где для нее есть условия: в **ядре** Солнца, занимающего 0,3 радиуса светила при огромном давлении  $2 \cdot 10^{12}$  Па и температуре около  $1,55 \cdot 10^7$  К. При такой температуре и давлении вещество полностью ионизовано. Термоядерная реакция сопровождается выделением огромной энергии. Прежде, чем достичь поверхности, энергия, выделившаяся

в ядре, должна преодолеть огромный слой плотной раскаленной плазмы. В **зоне излучательного переноса** (от 0,3 до 0,7 солнечного радиуса) энергия передается от слоя к слою путем поглощения излучения и последующего переизлучения.

По мере удаления от ядра давление, температура, плотность, вязкость вещества уменьшаются и, начиная с глубины примерно 0,3 радиуса Солнца, энергия переносится к самой поверхности светила *конвекцией*, то есть перемещением огромных масс солнечного вещества. Они видны в хороший телескоп на поверхности Солнца в виде *гранул*.

Вся энергия, выделившаяся в ядре, через зону излучательного переноса энергии и зону конвекции достигает **солнечной атмосферы**, состоящей из фотосферы, хромосферы и солнечной короны (рис. XV на цветной вкладке, с. 163).

Тонкая (около 200 км) непрозрачная газовая оболочка – **фотосфера** – излучает в космическое пространство практически всю энергию в непрерывном спектре. Она воспринимается нами как поверхность Солнца. Плотность газа фотосферы в тысячи раз меньше плотности воздуха у поверхности Земли. В фотосфере видны поднявшиеся из глубин Солнца *гранулы* – нестабильные образования поперечником около 1 000 км, существующие 7-10 мин. После остывания они исчезают, на их место поднимаются новые гранулы. Центр солнечного диска яркий – мы видим глубокие слои горячей фотосферы, края солнечного диска темнее – свет к нам попадает от верхнего слоя фотосферы с меньшей температурой. В фотосфере есть *солнечные пятна* – области с сильным магнитным полем и размером с Землю, они существуют по несколько недель. Центральная часть пятна, *тень*, темнее остальной фотосферы, так как ее температура около 4 100 К. Вокруг пятен интенсивно выделяется энергия в виде ярких *факелов*. Их температура на 200–300 К выше окружающей, они существуют также несколько недель.

Над фотосферой находится **хромосфера** – слой атмосферы толщиной 12 000–15 000 км, плотность которой еще меньше, чем фотосферы. Яркость ее в сотни раз меньше, чем у фотосферы, и видна она только во время полного солнечного затмения в виде блестящего розового кольца.

Неоднородности в хромосфере сильнее выражены, чем в фотосфере. Самые «маленькие» – *спикулы* в виде струй газа и высотой в несколько тысяч километров, хорошо видны у края солнечного диска.

**Солнечная корона** – сильно разреженная внешняя часть солнечной атмосферы, постепенно переходит в солнечный ветер, распространяющийся от Солнца в межпланетное пространство. Корону – в виде серебристого сияния вокруг солнечного диска – видно невооруженным глазом только во время полных солнечных затмений. В солнечной короне видны протуберанцы – огромные дугообразные плотные облака плазмы (рис. XV на цветной вкладке, с. 163). Корона непрерывно испускает в окружающее пространство потоки протонов и электронов – *солнечный ветер*.

## 6. Солнечная активность и солнечно-земные связи

Число солнечных пятен в фотосфере может меняться в очень широких пределах. В иные годы пятен много, а иногда месяцами на поверхности Солнца пятен нет совсем. Так же меняется и площадь, покрытая факелами. Периодический процесс изменения числа солнечных пятен в среднем занимает 11,1 лет и называется **циклом солнечной активности**. В последующем цикле всё повторяется, но магнитная полярность пятен меняется на обратную. Значит, *полный цикл* длится 22,2 года.

Еще одно проявление солнечной активности – **солнечные вспышки**, происходящие сначала в небольшой области между растущими солнечными пятнами, затем в хромосфере и короне. Эти продолжающиеся до двух часов мощные выбросы потоков электронов и протонов достигают Землю через несколько дней.

Происходящие на Солнце процессы влияют на Землю. Частицы **солнечного ветра**, протоны и электроны, летящие со скоростью 400–1 000 км/с, попадают в околоземное пространство после солнечных вспышек и вызывают на Земле различные геофизические явления – полярные сияния, геомагнитные бури и др. (рис. XVI на цветной вкладке, с. 163). Полярные сияния возникают под воздействием заряженных частиц, проникающих в атмосферу в высоких широтах, двигаясь по спирали вдоль линий индукции магнитного поля Земли.

Солнечный ветер, порожденный мощной солнечной вспышкой, возмущает магнитное поле Земли. Это явление, известное как **геомагнитная буря**, может серьезно нарушить радиосвязь, повредить наземные электрические сети и космические аппараты, а также повлиять на здоровье человека.

Благодаря солнечной энергии атмосфера, океаны и континенты Земли нагреваются. Существует прямая связь между циклами солнечной активности и погодой на Земле.

Солнечная энергия является самой экологичной и используется в широких масштабах в гелиотехнических установках (солнечных электростанциях, теплицах, установках для нагрева воды, домов и т.д.). Солнечные батареи служат в качестве источников энергии на борту искусственных спутников Земли и космических станций.

Важную роль играет озоновый слой, возникший в стратосфере в результате фотохимических реакций под воздействием солнечных лучей. Озоновый слой защищает земную жизнь от действия ультрафиолетового излучения. Солнечное тепло и свет обеспечивают жизнь на нашей планете.

### РАСШИРЬТЕ СВОИ ЗНАНИЯ

Яркость Солнца примерно в 1 500 раз превышает допустимую норму для нашего зрения. Поэтому категорически запрещается смотреть на Солнце невооруженным глазом или через оптический прибор. Можно навсегда потерять зрение. Лучший способ наблюдать и изучать Солнце – спроецировать его изображение на экран.

## 8.6. ЗВЕЗДЫ

### а. Классификация звезд

**Общая характеристика.** Звезды на небе кажутся нам блестящими светящимися точками. В школьный телескоп с диаметром линзы объектива 8–10 см можно разглядеть около миллиона звезд. Все они, а это лишь небольшая их часть, принадлежат семье звезд, связанных силами тяготения и составляющих нашу звездную систему, называемую Галактикой (часть ее видна на небе и известна как Млечный Путь).

Невооруженным глазом можно различить блеск звезд, а у самых ярких – еще и цвет.

**Звезды представляют собой такие же испускающие свет тела, как и Солнце.**

Мысль о том, что звезды – это «сестры» Солнца возникла еще в древности. Позже ее отстаивал Джордано Бруно.

Видимый блеск звезд выражается **видимой звездной величиной**. Она характеризует поток излучения (света), падающий на единицу площади поверхности, и обозначается буквой *m* (от лат. *magnitudo* – сила, величина). Условились считать, что блеск ярких звезд первой звездной величины ( $1^m$ ) в 100 раз больше блеска едва различимых невооруженным глазом звезд шестой звездной величины ( $6^m$ ). Звезда первой звездной величины ярче звезды второй звездной величины в 2,512 раз. У самых ярких звезд звездные величины меньше единицы или отрицательны. Например, у Веги видимая звездная величина  $0,03^m$ , а у Солнца  $-26,8^m$ .

**Энергия, испускаемая звездой в единицу времени во всех направлениях и на всех длинах волн, называется светимостью.**

Светимость звезды обычно сравнивают со светимостью Солнца. При этом светимость Солнца считается равной единице.

• **Классификация звезд.** Блеск и цвет звезд различен. Блеск зависит от размеров звезд и расстояния до них, а цвет – от температуры поверхности, которая у разных звезд различна, в основном, от 2500 до 50 000 К. Самые горячие звезды *голубого* цвета, ниже температура у *белых* звезд. Затем идут *желтые*, *оранжевые* и самые холодные – *красные* звезды. Белые звезды – это, например, Вега ( $\alpha$  Лиры) и Альтаир ( $\alpha$  Орла), видимые у нас летом и осенью, Сириус ( $\alpha$  Большого Пса) – самая яркая звезда на небе, видимая зимой. Самые известные красные звезды – это Бетельгейзе ( $\alpha$  Ориона) и Альдебаран ( $\alpha$  Тельца), видимые зимой, Антарес ( $\alpha$  Скорпиона) – виден летом. Голубая звезда Спика ( $\alpha$  Девы) видна весной. Наше Солнце относится к желтым звездам, как и Капелла ( $\alpha$  Возничего), видимая зимой.

В зависимости от спектра звезды делятся на **спектральные классы**: O-B-A-F-G-K-M, а каждый из них разделяется на 10 подклассов (от 0 до 9). У Солнца спектральный класс G2. По спектру можно узнать химический состав атмосферы звезд, период их вращения, величину магнитного поля, давление в атмосфере, лучевую скорость.

## ➔ Проверьте свои знания

1. За пределами земной атмосферы звезды и планеты можно видеть днем. Почему же днем они не видны с поверхности Земли?
2. Во сколько раз Венера (видимая звездная величина равна  $-4,4^m$ ) ярче звезды Сириус ( $-1,58^m$ )?

### б. Диаграмма «спектр-светимость». Эволюция звезд. Переменные и нестационарные звезды

• **Диаграмма «спектр-светимость».** В начале XX века датский астроном Герцшпрунг и американский астрофизик Рассел выяснили, что существует зависимость между спектром звезды (то есть ее температурой) и светимостью. Эту зависимость можно представить в виде диаграммы, где по одной оси – спектральные классы или температуры звезд, а по другой – светимости звезд. Ее так и называют – диаграмма «спектр-светимость» или диаграмма Герцшпрунга–Рессела (рис. XVII на цветной вкладке, с. 163).

Больше всего звезд находится на диагонали – **главной последовательности**, проходящей от левого верхнего угла до нижнего правого. В верхней части главной последовательности находятся самые горячие звезды, а в нижней – самые холодные, **карлики**. Над звездами главной последовательности справа находятся яркие **гиганты** и **супергиганты**. Под главной последовательностью, параллельно ей, расположена последовательность **субкарликов**.

• **Эволюция звезд.** Диаграмма «спектр-светимость» показывает важные закономерности в мире звезд. Положение звезды на диаграмме зависит от ее физических свойств и стадии ее эволюции. Анализ диаграммы показывает, что существуют группы звезд с похожими физическими свойствами. Она позволяет установить связь между характеристиками звезд.

### РАСШИРЬТЕ СВОИ ЗНАНИЯ

То, что цвет звезды, как и любого нагретого тела зависит от температуры, позволяет узнать температуру по распределению энергии в ее спектре. В непрерывном спектре большинства звезд видны темные линии поглощения. Излучение звезды максимально на определенной длине волны, зависящей от температуры. Эта зависимость выражается законом Вина:  $\lambda_{\max} = b/T$ , где  $\lambda_{\max}$  – длина волны в микрометрах, мкм,  $b = 2\,898$  мкм · К,  $T$  – температура в кельвинах, К.

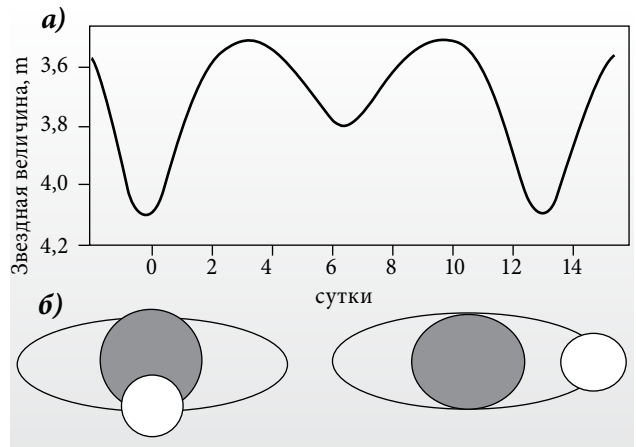


Рис. 8.53. Двойная звезда  $\beta$  Лиры – кривая блеска (а); схема двойной звезды (б)

• **Переменные звезды.** Часто на небе можно наблюдать рядом две или больше звезд. Система из двух звезд, разделенных очень малым угловым расстоянием, называется **двойной звездой** (рис. 8.53). В Млечном Пути около половины звезд образуют двойные или кратные системы.

Одни звезды только видны рядом на небе. А на самом деле они находятся на огромном расстоянии друг от друга и не связаны гравитационным притяжением. Это **оптически двойные звезды**.

Звезды, связанные силами тяготения и вращающиеся вокруг общего центра масс называются **физически двойными звездами**. Если в плоскости орбиты такой звезды находится наблюдатель, то он может видеть поочередные затмения составляющих звезд. Такая двойная звезда называется **затменно-переменной**. Данные, полученные при наблюдении двойных звезд, позволяют найти их массы.

Блеск у некоторых звезд изменяется со временем из-за физических процессов, происходящих внутри звезд или в их атмосфере. Изменяются у таких звезд различные физические параметры: светимость, объем, плотность, температура, спектральный класс и др. Это **физические переменные звезды**.

Различают три типа переменных звезд: **пульсирующие** – радиус звезд периодически увеличивается и уменьшается благодаря естественным процессам эволюции звезд, **эруптивные (вспыхивающие)** – звезды, на поверхности которых происходят мощные вспышки, с возникновением протуберанцев или выбросов материи; **взрывающиеся** – звезды, изменяющие свои свойства в результате разрушительных изменений, что происходит с **новыми** и **сверхновыми**.



**Новые** представляют собой вспыхивающие переменные, на которых хотя бы раз наблюдался резкий неожиданный рост светимости (взрыв). Во время взрыва светимость звезды возрастает в десятки и сотни тысяч раз за 2-3 дня. Спектр новых показывает, что в момент максимальной яркости они похожи на сверхгиганты спектральных классов А-Е, а после взрыва – на горячие карлики. Считается, что новые – это *тесные двойные звезды*, состоящие из пары очень близко расположенных звезд. Большую роль в процессах на них играют приливные силы. Известно более 400 новых: 150 в нашей Галактике, остальные в туманности Андромеды и в галактиках Большое и Малое Магеллановы Облака.

В последней стадии эволюции звезды с массой больше ~ 8 солнечных масс проходят через стадию, называемую вспышкой **сверхновой**, – катастрофическим взрывом, сопровождающимся выделением огромного количества энергии. Всего за несколько часов светимость сверхновой возрастает в десятки миллионов раз, превышая даже светимость галактики, в которой она находится. Вспышка продолжается несколько недель. За это время сверхновая излучает столько энергии, сколько Солнце за все время своего существования. До настоящего времени зарегистрировано около 500 сверхновых в других галактиках и 10 в нашей Галактике. Самым известным был взрыв сверхновой 1054 года в созвездии Тельца, о котором китайские и японские астрономы писали, что звезда видна днем. Сейчас на этом месте можно наблюдать знаменитую Крабовидную туманность (рис. 8.54). Последняя вспышка сверхновой была замечена 24 февраля 1987 года в Большом Магеллановом Облаке.

На последних стадиях эволюции массивных звезд происходит катастрофическое гравитационное сжатие, заканчивающееся термоядерным взрывом всей звезды, после чего она превращается в *нейтронную звезду* или *черную дыру*.

• **Нестационарные звезды.** Итак, на последних стадиях эволюции звезды превращаются в объекты с необычными свойствами: белые карлики, нейтронные звезды и черные дыры.

**Белые карлики** – это очень компактные звезды с массой порядка массы Солнца, но радиусом в сотню раз меньше. Отсюда и огромная плотность, порядка тонн на кубический сантиметр. Температура белых карликов достигает 70 000 К, но светимость очень мала из-за малых размеров. На диаграмме Герцшпрунга–Рессела они нахо-

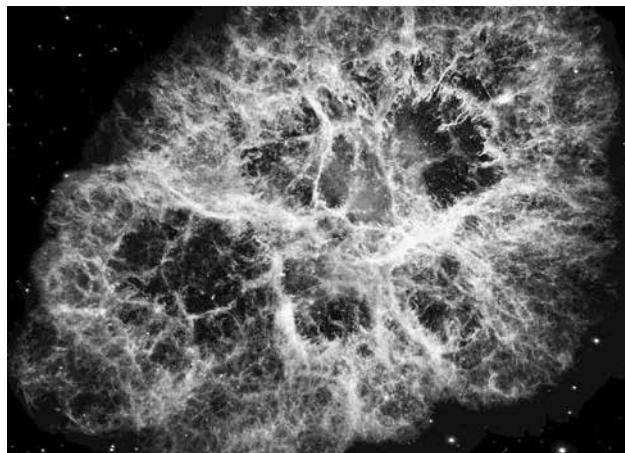


Рис. 8.54. Крабовидная туманность

дятся в нижней части слева (рис. VII, стр. 163). У белых карликов нет источников термоядерной энергии, поэтому они медленно остывают, расходуя внутреннюю энергию, накопленную на предыдущих этапах эволюции.

Масса белых карликов не превышает 1,44 солнечных масс. Если же масса звезды превышает этот предел, то она становится нестабильной, быстро сжимается (*коллапс* звезды) и процесс иногда заканчивается возникновением **нейтронной звезды**.

Превращение звездного вещества в нейтроны происходит при огромных плотностях и сопровождается испусканием нейтрино. При радиусе около 10–15 км плотность звезды достигает  $2 \cdot 10^{17}$  кг/м<sup>3</sup>, что примерно равно плотности ядер атомов. Теоретические расчеты показали, что масса нейтронных звезд не может превышать 2–2,5 масс Солнца.

Когда обычная звезда в результате гравитационного сжатия превращается в нейтронную звезду, ее магнитное поле резко возрастает, достигая значений в тысячи раз больших, чем внутри атома.

В 1967 году было зарегистрировано радиоизлучение космического происхождения от точечного источника в виде коротких импульсов, повторяющихся через равные промежутки времени в 1,34 с. Такие источники назвали **пульсарами**. Доказано, что пульсары – это вращающиеся нейтронные звезды. Известно уже более 1 000 пульсаров с периодами от 1,5 мс до 4,3 с. Радиоизлучение пульсаров сильно поляризовано, нетепловой природы. Пульсары находятся сравнительно близко от нас, в нашей Галактике. Один из таких пульсаров находится в центре Крабовидной туманности (рис. 8.54).

Если масса звезды в несколько раз больше массы Солнца, силы внутреннего давления не смогут противостоять силам гравитационного сжатия и сжатие будет продолжаться, пока радиус звезды не достигнет критической величины, называемой **гравитационным радиусом** Шварцшильда:  $R_{\text{грав}} = 2GM/c^2$ , где  $G$  – гравитационная постоянная,  $M$  – масса звезды,  $c$  – скорость света. Параболическая скорость, при которой можно покинуть звезду (вторая космическая скорость), становится равной скорости света  $c$ . Если радиус звезды становится меньше гравитационного радиуса, свет уже не может ее покинуть. Такое тело не излучает и поэтому невидимо. Существование таких тел – **черных дыр** – было предсказано теоретически.

Для изучения черной дыры классические законы физики неприменимы. В этом случае необходимо применять законы общей теории относительности Эйнштейна.

## 8.7. ЭЛЕМЕНТЫ КОСМОЛОГИИ

### а. Наша Галактика. Звездные скопления. Собственное движение звезд и Солнечной системы. Вращение Галактики

- **Наша Галактика.** Светлая полоса, видимая на небосводе летней ясной безлунной ночью и пересекающая его с северо-востока на юго-запад известна нам под названием Млечный Путь. Млечный Путь – это видимая часть нашей Галактики, включающей в себя все видимые звезды и нашу Солнечную систему. Положение Млечного Пути относительно горизонта меняется из-за вращения небесной сферы (то есть движения Земли).

Галактика представляет собой звездную систему в форме диска (рис. 8.55). Толщина диска около 16 тысяч световых лет, а диаметр – около 100 тысяч световых лет. Солнце находится примерно в 33 тысячах световых лет от ее центра (1 световой год = 63 240 а.е.).

В нашей Галактике около 150 миллиардов звезд. Большинство из них сконцентрировано в *звездном диске Галактики*. Ее состав разнообразен: массивные горячие звезды и молодые белые карлики, красные гиганты и объекты, занимающие промежуточное положение между звездами и планетами – «коричневые карлики», *планетарные* и *диффузные туманности*, облака межзвезд-

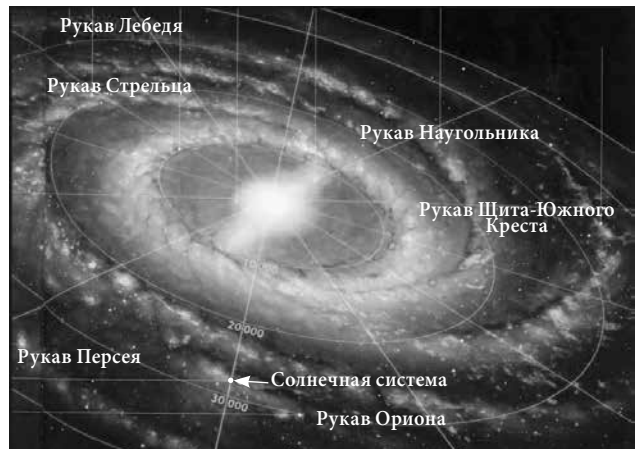


Рис. 8.55. Строение Галактики и положение Солнечной системы в Галактике

ной пыли и газа и т.д. Молодые звезды диска и газ формируют *спиральные рукава*. Такие же рукава есть у других галактик.

В центре Галактики, в направлении созвездия Стрельца, находится ее ядро, испускающее огромный поток энергии, что можно объяснить наличием там сверхмассивной черной дыры, превышающей по массе Солнце в несколько миллионов раз. Это подтверждают рентгеновские орбитальные телескопы, а также регистрируемое радиоизлучение ядра.

- **Звездные скопления.** Большинство звезд входит в звездные системы – группы близко расположенных звезд, связанных взаимным тяготением: двойные, тройные, кратные звезды и звездные скопления. Скопления могут быть рассеянные и шаровые.

*Рассеянные звездные скопления* насчитывают десятки, сотни, иногда тысячи звезд с относительно низкой плотностью звезд. Расположены они в основном вблизи плоскости экватора Галактики. Более 800 скоплений видны в телескопы. Предполагается, что в Галактике может быть несколько десятков тысяч рассеянных скоплений, но невооруженным глазом можно увидеть только два из них: Плеяды (около 120 ярких звезд) (рис. 8.56) и Гиады (около 100 звезд). Оба находятся в созвездии Тельца.

*Шаровые звездные скопления* состоят из десятков и сотен тысяч, а иногда – даже миллионов звезд. Концентрация звезд растет к центру скопления (рис. 8.57). В нашей Галактике известно около 130 шаровых скоплений, но предполагается, что их намного больше. У этих скоплений большая светимость, самое яркое –  $\omega$  Кентавра со звездной величиной  $4^m$ ; его видно невооруженным глазом

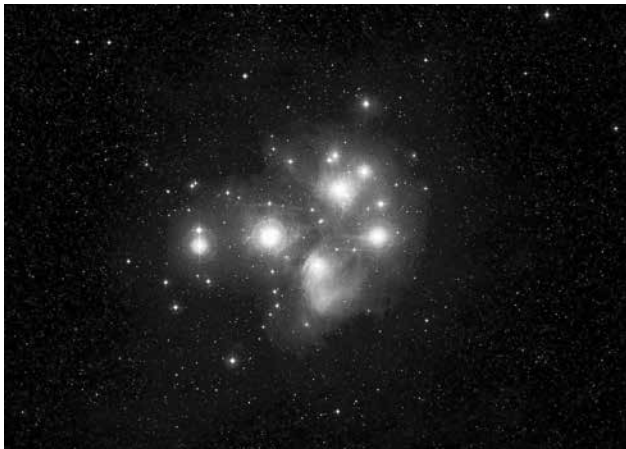


Рис. 8.56. Плеяды

в южном полушарии. В шаровых скоплениях много красных и желтых гигантов возрастом 8–10 миллиардов лет, а также сверхгигантов. Рентгеновское излучение из центров скоплений позволяет предположить, что там находятся черные дыры.

• **Собственное движение звезд.** Сравнивая положения одних и тех же звезд на небесной сфере через значительные интервалы времени, выяснили, что их координаты изменяются со временем. Часть этих изменений вызвана эффектами, связанными с движениями Земли.

Перемещение звезды по небесной сфере в течение года без эффектов движений Земли называется **собственным движением звезды** и выражается в угловых секундах за год.

Собственные движения звезд различаются по величине и направлению и не превышают несколь-



Рис. 8.57. Шаровое скопление звезд

ких угловых секунд за год. Исключение составляет «летающая» звезда Барнарда (созвездие Змееносец) – 10" в год. Собственные движения звезд очень малы и незаметны невооруженным глазом, поэтому и возникло понятие «неподвижных звезд». Проекцию пространственной скорости звезды на луч зрения наблюдателя называют **лучевой скоростью**  $v_r$ .

• **Движение Солнечной системы в Галактике.**

Солнце вместе с обращающимися вокруг него планетами тоже движется в пространстве. Точка на небесной сфере, в направлении которой движется Солнце, называется **апекс Солнца**. Скорость Солнца в этом направлении 20 км/с.

• **Вращение Галактики. Галактический год.**

Изучая собственные движения и лучевые скорости удаленных объектов, можно выяснить, как движется вся Галактика. Измерение скоростей близлежащих звезд показало, что они, как и Солнце, движутся вокруг центра Галактики. Это движение – следствие вращения Галактики (по часовой стрелке, если смотреть с северного полюса Галактики, находящегося в созвездии Волосы Вероники). Солнце и ближайшие звезды совершают один оборот вокруг центра Галактики за 240–250 миллионов лет – **галактический год**.

**б. Классификация галактик. Галактики с активными ядрами. Квазары. Расширение Вселенной. Большой Взрыв**

Происхождение и эволюцию Вселенной изучает раздел астрономии, называемый **космологией**. Космология изучает физические свойства, строение и эволюцию Вселенной в целом, включая и доступную прямым наблюдениям часть Вселенной, называемую иногда **Метагалактикой**.

• **Классификация галактик.** Кроме нашей Галактики существуют и другие гигантские звездные системы, называемые **галактиками**, известное количество которых превышает 100 миллионов. Три из них можно увидеть на небе невооруженным глазом: Большое и Малое Магеллановы Облака в южном полушарии и туманность Андромеды из созвездия с тем же названием (рис. 8.58). Миллиарды других галактик настолько далеки, что их можно увидеть лишь в самые большие современные телескопы. Предполагается, что вокруг галактик преобладает так называемая **темная (невидимая) материя** еще неизвестной

природы, масса которой сравнима или даже превышает массу всех звезд и межзвездного газа галактики.

Галактики сильно отличаются по разным признакам. По внешней форме и блеску их делят на эллиптические, спиральные, линзовидные и неправильные галактики.

У **эллиптических галактик** (E0–E7, рис. 8.59) протяженная форма без четкого контура; внутреннее строение однородно. Четверть всех изученных галактик – эллиптические.

**Спиральные галактики** (Sa–Sc, SBa–SBc, рис. 8.59) составляют около половины всех известных галактик. К ним относится наша Галактика и туманность Андромеды. У галактик есть *спиральные рукава*, состоящие из молодых ярких звезд, звездных скоплений и светящихся газовых туманностей. Во многих спиральных галактиках спиральные рукава выходят из перемычки, состоящей из звезд и проходящей через центр галактики.

**Линзовидные галактики** (S0, рис. 8.59) похожи на эллиптические, но имеют диск из звезд, как спиральные галактики. Спиральных рукавов нет.

**Неправильные галактики** несимметричны, содержат много межзвездного газа и молодых звезд. Нет закономерностей в строении.

• **Галактики с активными ядрами.** Ядра части галактик отличаются особыми свойствами, но явления, происходящие в них, еще недостаточно изучены. В некоторых галактиках ядра выделяют огромное количество энергии, сравнимое или даже больше энергии, выделяемой всеми звездами галактики. Ядра галактик, в которых происходит такое интенсивное выделение энергии, называют **активными ядрами**. Число галак-



Рис. 8.58. Туманность Андромеды

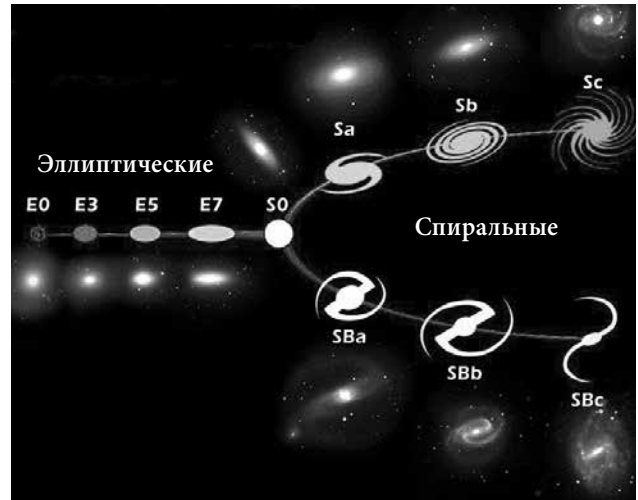


Рис. 8.59. Типы галактик

тик с активными ядрами составляет несколько процентов от общего количества галактик.

Массивные спиральные галактики, в центре которых наблюдаются источники излучения очень малых угловых размеров нетеплового происхождения, называются *галактиками Сейферта*. Особенностью таких галактик является то, что излучение ядер изменяется с периодом в несколько месяцев, недель и даже суток.

**Радиогалактики** составляют часть массивных эллиптических галактик и излучают радиоволны в десятки тысяч раз интенсивнее обычных галактик. Это радиоизлучение, называемое синхротронным, возникает при движении в магнитном поле потоков заряженных частиц с почти световой скоростью. Ближайшая к нам радиогалактика находится в созвездии Центавра (радиоисточник Центавр А).

• **Квazarы.** В 1963 году были открыты новые источники радиоизлучения малых размеров, «подобные звездам». Их так и назвали – *квazarы*, **квазизвездные радиоисточники**. Уже известны тысячи таких объектов. Сильное красное смещение линий излучения в их спектре означает, что квazarы – внегалактические объекты – находятся очень далеко, до них миллиарды световых лет. Один из ближайших квazarов, 3C 273, находится от нас на расстоянии 3 миллиардов световых лет. Квazarы по свойствам похожи на активные ядра галактик. Они сравнительно небольших размеров, с переменным излучением большой интенсивности и нетепловой природы. Механизм выделения огромного количества энергии ядрами галактик и квazarами еще не выяснен до конца.

• **Расширение Вселенной.** В 1920 году американский астроном Эдвин Хаббл доказал, что наблюдаемые в телескоп спиральные туманности на самом деле другие галактики, похожие на нашу. Находятся они на огромных расстояниях от нас – от миллионов до миллиардов световых лет. Он выяснил, что линии в спектрах большинства галактик смещены к красному концу, что бывает только при удалении источника света от наблюдателя, и пришел к выводу, что галактики удаляются друг от друга, то есть Вселенная расширяется. Чем дальше находилась галактика (и ее яркость была меньше), тем больше было красное смещение в спектре, тем больше была ее скорость удаления. Хаббл установил закон:

$$V = H \cdot r,$$

$V$  – относительная лучевая скорость галактики,  $H$  – постоянная Хаббла,  $r$  – расстояние до галактики. Величина, обратная постоянной Хаббла, равна «возрасту» известной нам части Вселенной, примерно равному 13,7 миллиарда лет, что соответствует возрасту галактик и самых старых звезд в нашей Галактике.

• **Большой Взрыв.** Открытие расширения Вселенной приводит к теории Большого Взрыва. Согласно этой теории вначале Вселенная находилась в сверхплотном горячем состоянии, называемом *сингулярностью*, в котором значения давления и плотности вещества стремятся к бесконечности. Состояние вещества вблизи сингулярности невозможно описать с помощью известных сегодня законов физики. Момент начала расширения из этого состояния и назвали **Большой Взрыв** (от англ. – *Big Bang*).

Важную роль в открытии миллионов далеких галактик, возникших на разных этапах эволюции Вселенной, сыграл орбитальный телескоп имени Хаббла.

Подтверждением теории *Большого Взрыва*, разработанной на базе общей теории относительности Эйнштейна, считается открытие в 1965 году *космического фонового радиоизлучения (реликтового)*, соответствующего температуре 2,73 К, испущенного когда-то горячим веществом Вселенной на раннем этапе ее эволюции.

Основные сведения о больших планетах Солнечной системы

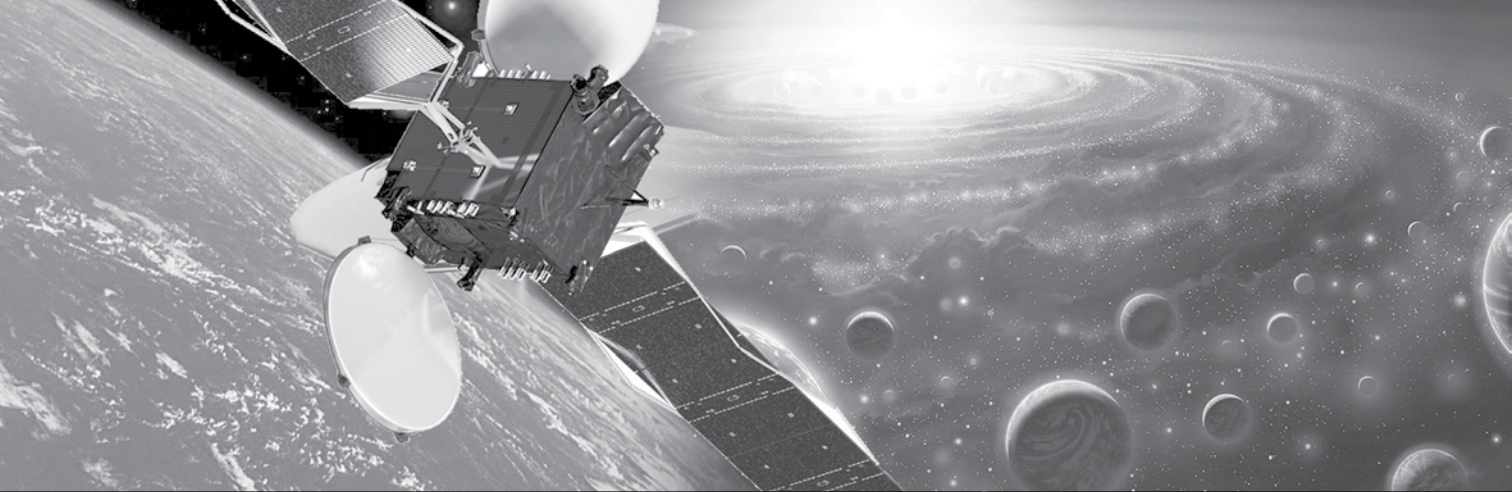
Таблица 1

Планета	Среднее расстояние до Солнца, а.е.	Масса (в массах Земли)	Средний радиус, км	Средняя плотность, кг/м <sup>3</sup> , 10 <sup>3</sup>	Звездный период, годы	Период вращения вокруг оси	Средняя орбитальная скорость, км/с
Меркурий	0,387	0,056	2 437	5,5	0,24	58,7 <sup>d</sup>	47,9
Венера	0,723	0,82	6 052	5,2	0,61	243,1 <sup>d</sup>	35,0
Земля	1,0	1,0	6 370	5,5	1,00	23 <sup>h</sup> 56 <sup>m</sup> 4 <sup>s</sup>	29,8
Марс	1,524	0,107	3 397	3,9	1,88	24 <sup>h</sup> 37 <sup>m</sup> 22 <sup>s</sup>	24,1
Юпитер	5,203	318	71 400	1,3	11,86	9 <sup>h</sup> 50 <sup>m</sup>	13,1
Сатурн	9,539	95,2	60 400	0,7	29,46	10 <sup>h</sup> 14 <sup>m</sup>	9,6
Уран	19,182	14,6	25 400	1,4	84,02	10 <sup>h</sup> 49 <sup>m</sup>	6,8
Нептун	30,07	17,2	24 500	1,6	164,78	15 <sup>h</sup> 48 <sup>m</sup>	5,4

Основные сведения о карликовых планетах Солнечной системы

Таблица 2

Планета	Среднее расстояние до Солнца, а.е.	Масса (в массах Земли)	Средний радиус, км	Средняя плотность, кг/м <sup>3</sup> , 10 <sup>3</sup>	Звездный период, годы	Период вращения вокруг оси	Средняя орбитальная скорость, км/с
Церера	2,766	0,00016	975x909	2,08	4,6	9 <sup>h</sup>	17,88
Плутон	39,4	0,0022	2306±20	2,0	248	6,387 <sup>d</sup>	4,666
Хаумеа	43	0,0007	1960x1518x996	3,5	285	3,9 <sup>h</sup>	
Макемаке	45	0,0005	1500x1420	~2	309,9		4,419
Эрида	67,67	0,0028	2400±300	2,5	557	>8 <sup>h</sup>	3,437



## 9.1. ЭТАПЫ СОЗДАНИЯ ФИЗИЧЕСКОЙ КАРТИНЫ МИРА

Приблизившись к концу лицейского курса физики и астрономии, проанализируем ее развитие от начала и до настоящего времени и проследим за формированием взглядов на мир в соответствующие периоды.

Считается, что первые знания в области физики были получены еще в древности. Фалес Милетский (VI в. до н.э.) знал, что янтарь, потертый о шерсть, притягивает легкие тела, а магнетит притягивает железные предметы. В V–VI веках до н.э. Леквипп и Демокрит высказали мысль о пределе делимости вещества, о существовании неделимых частиц – атомов. Аристотель (IV в. до н.э.) заложил основы механики: описал механическое движение (прямолинейное и криволинейное), предложил правило сложения взаимно перпендикулярных перемещений.

В следующем веке Эвклид сформулировал закон прямолинейного распространения света, установил законы отражения света, а Архимед получил ряд результатов в области механики: ввел понятие центра тяжести и момента силы, сформулировал правило рычага, установил закон гидростатики (известный ныне как закон Архимеда) и условия плавания тел.

В I веке (н.э.) Херон из Александрии описал ряд простых механизмов: блок, клин, винт, ворот, а во II веке Птолемей описал явление преломления света, придал законченный вид геоцентрической системе мира.

Перечень этих открытий показывает, что еще в древности появились те ростки, которые, развиваясь, стали важными разделами физики: механикой, электродинамикой, молекулярной физикой и оптикой.

В середине XVI века Николай Коперник опубликовал свою фундаментальную работу «О вращениях небесных сфер», в которой обосновал гелиоцентрическую концепцию, в соответствии с которой Земля вместе с другими планетами вращается одновременно и вокруг Солнца, и вокруг своей собственной оси. В начале следующего века Иоганнес Кеплер открыл законы движения планет вокруг Солнца, обосновав гелиоцентрическую систему.

XVII век примечателен появлением двух работ, в которых были заложены основы механики. В 1632 году Галилео Галилей опубликовал «Диалог о двух главнейших системах мира», который содержал два фундаментальных принципа механики – принцип относительности и принцип инерции. В 1687 году вышла в свет работа Исаака Ньютона «Математические начала натуральной философии», в которой были изложены основные понятия механики, три фундаментальных закона динамики и закон всемирного тяготения.

На основе этих законов была разработана **механическая картина мира**, согласно которой все природные явления сводятся к механическим движениям, то есть к изменению положения одних тел относительно других. Тела характеризуются своими массами и пространственными размерами, их движение не зависит от внутренней структуры.

В ньютоновской механике пространство и время считаются абсолютными и не зависящими друг

от друга. Тела и их движения не влияют на свойства пространства и времени. Предполагается, что пространство однородно и изотропно (его свойства одинаковы во всех областях пространства и во всех направлениях), а однородное время протекает равномерно во всем пространстве. Взаимодействие между телами передается мгновенно и характеризуется силами, величины которых зависят от размеров тел, взаимного расположения (расстояния между ними), а при контакте тел – от их относительной скорости. Зная силы, действующие на тело, положения и скорости его точек в начальный момент времени, исходя из законов механики, можно определить их положения и скорости в любой последующий момент времени. Таким образом, были решены различные задачи движения тел, начиная с самых простых, как скольжение тела по наклонной плоскости или движение тела, брошенного под углом к горизонту, так и движения планет и их спутников. Хорошо известно предсказание, сделанное Верье на основе законов механики и астрономических наблюдений, о существовании планеты, неизвестной в то время и открытой впоследствии Галле (1846) – планеты Нептун.

Законы механики с успехом были применены и в других областях физики. В молекулярно-кинетической теории идеального газа – совокупности хаотически движущихся молекул – была выведена основная формула этой теории, устанавливающая связь между давлением газа, концентрацией молекул и средней кинетической энергией их поступательного движения.

В оптике Ньютон рассматривал свет как поток частиц. Считая соударения между ними и зеркалом упругими, он вывел закон отражения света. Вывел также закон преломления света, считая, что при прохождении из воздуха в прозрачную среду световые корпускулы притягиваются внутрь последней, где они перемещаются со скоростью, большей чем в воздухе (вакууме).

Успех, достигнутый при объяснении ряда явлений природы на основе законов механики, создал иллюзию, что они являются единственными фундаментальными законами природы.

В связи с этим Эйнштейн отмечал: «...впечатлял факт, что механические методы успешно применялись в областях, не имеющих ничего общего с механикой: в механической теории света...; кинетической теории газов...; теории теплопроводности...».

В первые два десятилетия XIX века были проведены обширные исследования в области опти-

ки. Юнг, Френель, Фраунгофер, Малюс и Брюстер выполнили ряд экспериментов и теоретических исследований, касающихся интерференции, дифракции и поляризации света. Подтверждается волновая теория света, предложенная Гюйгенсом (1678). Установлено, что световые волны поперечны. К середине XIX века волновая природа света считалась установленным фактом.

1820-й год был поворотным для физики электрических и магнитных явлений. Эрстед обнаружил действие электрического тока на магнитную стрелку, расположенную вблизи проводника с током. В том же году Ампер выполнил ряд экспериментов, в которых изучал взаимодействие проводников с током и получил выражение для соответствующей силы, известной в настоящее время как *электродинамическая* или *сила Ампера* (выражение для силы взаимодействия точечных электрических зарядов было получено в 1785 году Шарлем Кулоном). Открытие явления электромагнитной индукции Фарадеем (1831) и самоиндукции Генри (1832) определило широкое использование электрического тока в промышленности, так что XIX век вошел в историю как **«век электричества»**. Эти открытия продемонстрировали наличие неразрывной связи между электрическими и магнитными явлениями. Следует отметить также, что Фарадей сформулировал концепцию поля и ввел понятие «силовых линий», известных теперь как линии напряженности электрического поля и линии магнитной индукции.

Таким образом, в первой половине XIX века был открыт ряд важных явлений в области электромагнетизма, были введены физические понятия, необходимые для их описания и установлены соответствующие экспериментальные закономерности.

Теоретическая интерпретация и обобщение результатов в обсуждаемой области были осуществлены Максвеллом (1860–1865), создавшим **электродинамику** – теорию электромагнитного поля. Ее основу составляет система фундаментальных уравнений, известных как уравнения Максвелла для электромагнитного поля. При применении указанных уравнений к конкретным физическим системам к ним следует добавить уравнения, выражающие определенные связи между параметрами рассматриваемой системы.

В рамках своей теории Максвелл сумел не только объяснить уже известные экспериментальные факты, но, что особенно важно, теоретически предсказать существование электромагнитных волн и описал их свойства. Было установлено,

что световые и электромагнитные волны имеют идентичные свойства, таким образом была подтверждена электромагнитная природа света.

Экспериментально электромагнитные волны были открыты Герцем (1888).

К последнему десятилетию XIX века была очерчена **электромагнитная картина мира**.

Попытки объяснить все явления природы в рамках одной из упомянутых физических картин не увенчались успехом. Было установлено, что эти картины дополняют друг друга, но и вместе не могут объяснить некоторые явления.

В конце XIX века были сделаны три важных открытия: рентгеновские лучи (1895), радиоактивность (1896) и электрон (1897). Оставались, однако, необъясненными экспериментальные закономерности теплового излучения, фотоэффекта и спектров атомов.

Проблема эфира, гипотетической среды – переносчика световых волн – также не была решена. Были предприняты попытки обнаружить его и изучить свойства. Результаты оказались противоречивыми, «эфирный ветер» не был открыт. Предлагались различные гипотезы, на основе которых были получены конкретные результаты, однако они не вписывались в единую систему.

Соответствующая теория была разработана Эйнштейном (1905) – **специальная теория относительности**. В ней эфиру не нашлось места и он был исключен из физики. Пространство и время больше не считаются абсолютными и независимыми, они относительны и взаимосвязаны. Взаимодействие, в частности, электромагнитное, не передается мгновенно, максимальная скорость его передачи равна скорости света в вакууме, между массой и энергией существует определенная связь. Специальная теория относительности указывает границы применимости ньютоновской механики (скорости  $v \ll c$ ).

Планк объяснил закономерности теплового излучения, исходя из квантовой гипотезы. Эта гипотеза была далее развита и использована для объяснения других явлений. К середине 20-х годов XX века на ее основе была построена **квантовая механика**, применяемая для описания свойств микроскопических систем – атомов и молекул. Было установлено, что частицы вещества обладают волновыми свойствами, а электромагнитные волны – корпускулярными. В результате понятие траектории теряет смысл применительно к микрочастице. Невозможно одновременно определить положение и импульс, необходимые

для построения траектории частицы и определения ее точного положения в любой последующий момент времени. В квантовой физике можно только вычислять вероятность нахождения микрочастицы в данный момент времени в той или иной области пространства. Энергия и ряд других ее характеристик могут принимать только определенные, дискретные значения, в отличие от классической физики, в которой те же величины изменяются непрерывно.

Физика XX века характеризуется более глубоким изучением структуры вещества. За открытием электрона (1897) последовало открытие ядра (1911) и установление ядерной модели атома. В 1919 году был открыт протон, в 1932 – нейтрон, в том же году была принята протонно-нейтронная модель ядра. Также в 1932 году Андерсон обнаружил позитрон – первую античастицу, подтвердив гипотезу Дирака относительно существования античастиц. Ферми разработал (1933) теорию  $\beta$ -распада, в которой предполагалось, что одновременно с электроном испускается нейтральная частица – антинейтрино. Таким образом, был создан новый раздел физики – физика элементарных частиц.

Методы квантовой физики с успехом были применены для описания свойств систем, состоящих из большого числа частиц. Были объяснены свойства металлов, включая сверхпроводимость при очень низких температурах.

В рамках квантовой теории удалось описать электрические и оптические свойства полупроводников, влияние на них электрических и магнитных полей. Результатом исследований явилось создание полупроводникового диода ( $p$ - $n$ -перехода), затем транзистора. Это привело к миниатюризации ряда электронных приборов. Еще один успех – осуществление мобильной телефонии. Как известно, создание мазера и лазера оказалось возможным только благодаря квантовой физике. Таким образом,

**физика XX века развивалась под знаком теории относительности и квантовой механики и была отмечена приложениями огромной важности.**

Для данного периода характерна также взаимосвязь физики с другими отраслями науки, в результате чего получили развитие астрофизика, геофизика, биофизика, квантовая химия и др.

Ученые убеждены, что XXI век будет увенчан новыми успехами физики и ее приложений в различных отраслях науки, сегодня неизвестные нам.



## 9.2. АСТРОНОМИЯ И НАУЧНАЯ КАРТИНА МИРА

Фундаментальные открытия и появление новых научных теорий в истории астрономии способствовали смене представлений о строении Вселенной.

Первая научная революция произошла в VI–IV веках до н.э., когда астрономия сформировалась как наука в работах Аристотеля (384–322 до н.э.), Аристарха Самосского (320–250 до н.э.) и Гиппарха (190–125 до н.э.).

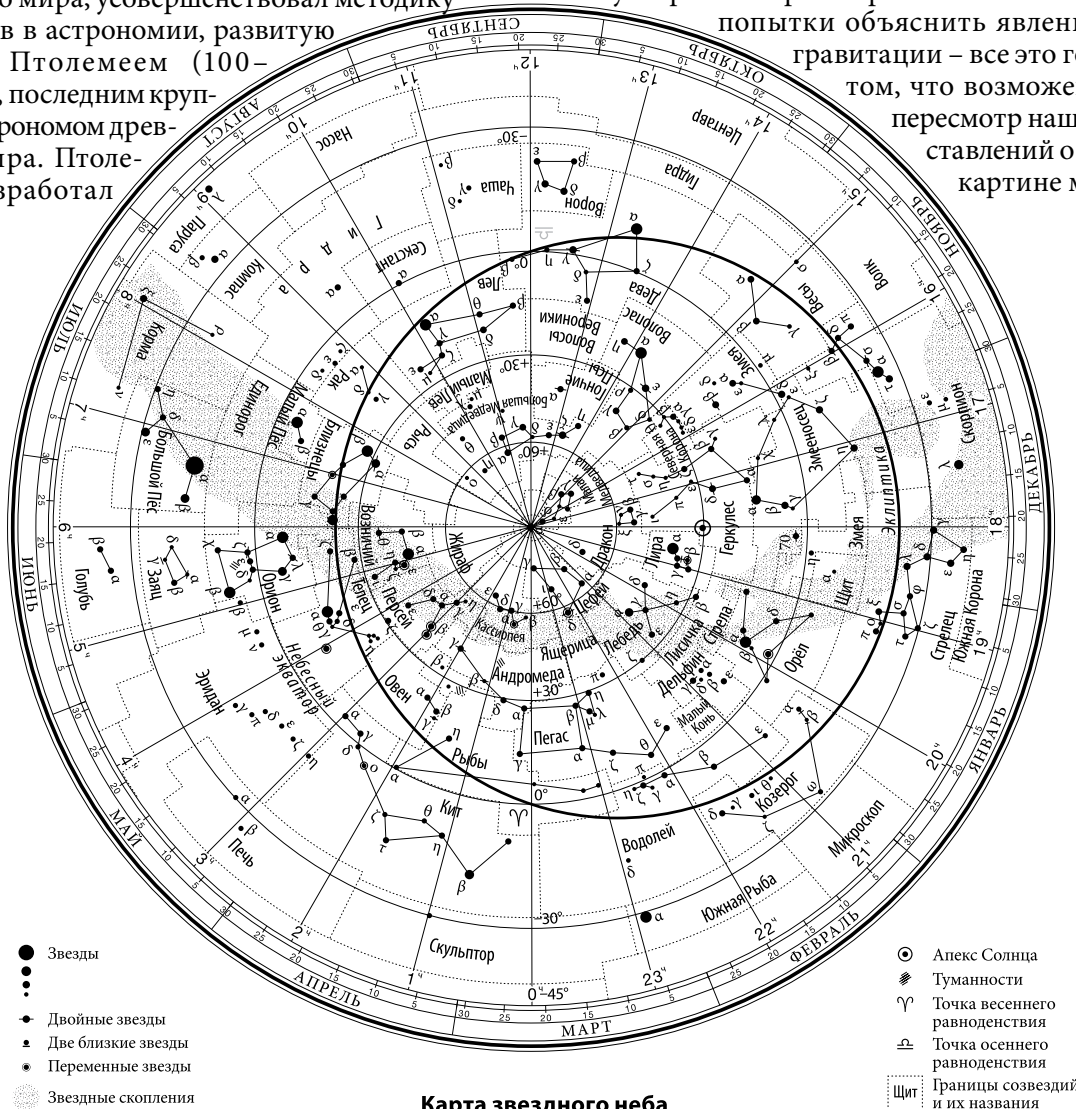
Аристотель составил первую геоцентрическую схему мира, в центр которой он поместил шарообразную Землю. Аристарх Самосский, названный «Коперником античности», предложил первую гелиоцентрическую систему с Солнцем в центре мира, переоткрытую через 18 веков Н. Коперником. Гиппарх, величайший астроном древнего мира, усовершенствовал методику расчетов в астрономии, развитую позже Птолемеем (100–168 н.э.), последним крупным астрономом древнего мира. Птолемей разработал

геоцентрическую систему мира на основе теории эпициклов, применявшуюся еще около 1 500 лет.

Вторая астрономическая революция произошла в XVI–XVIII веках в результате фундаментальных открытий Н. Коперника (гелиоцентрическая система мира), Г. Галилея (первые наблюдения с помощью телескопа), И. Кеплера (законы движения планет) и И. Ньютона (закон всемирного тяготения).

Следующая революция в астрономии связана с открытиями XIX–XX веков: спектральный анализ, фотография, электромагнитные волны, красное смещение в спектрах далеких галактик, квазары, пульсары, реликтовое излучение, подтверждающее теорию Большого Взрыва и др. Современная научная картина мира основывается на теории относительности Эйнштейна, совершившей революцию в космологии.

Загадка темной материи, темной энергии, открытие ускоренного расширения Вселенной (1998), попытки объяснить явление антигравитации – все это говорит о том, что возможен новый пересмотр наших представлений о научной картине мира.



# ЦВЕТНАЯ ВКЛАДКА



Рис. I. Интерференция света от двух когерентных источников (установка Юнга)

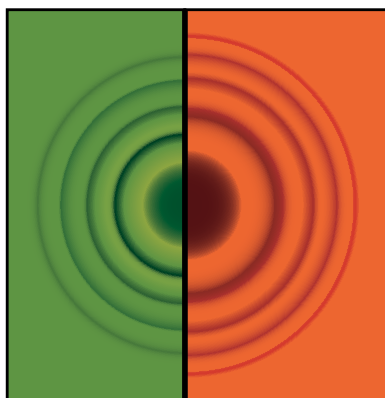


Рис. II. Кольца Ньютона в отраженном свете: а) зеленом; б) красном



Рис. III. Дифракция света от узкой щели. Сравните разницу между дифракционной и интерференционной (рис. I) картинами: при дифракции ширина светлых и темных полос является переменной, а при интерференции – постоянной.



Рис. IV. Дифракция света от дифракционной решетки: а) в фиолетовом свете; б) в красном свете; в) в белом свете

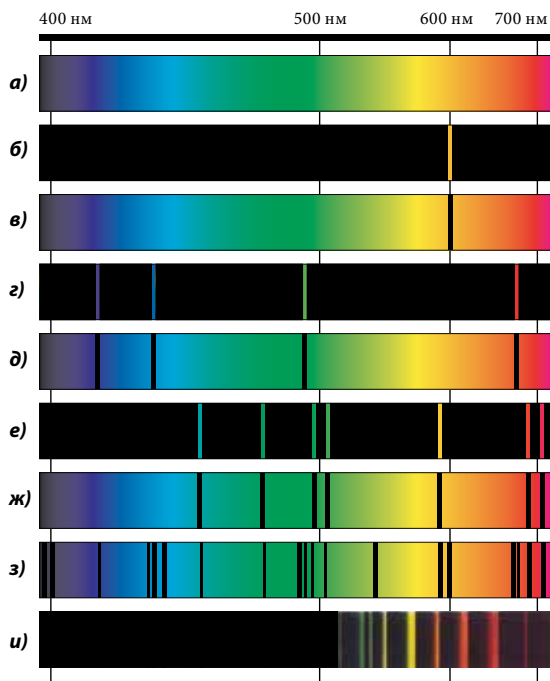


Рис. V. Сплошной спектр испускания (а); спектры натрия: испускания (б); поглощения (в); спектры водорода: испускания (г); поглощения (д); спектры гелия: испускания (е); поглощения (ж); спектры Солнца: поглощения (з); испускания (и)



Рис. VI. Планеты солнечной системы



Рис. VII. Марс (фото с телескопа им. Хаббла)



Рис. VIII. Поверхность планеты Марс



Рис. IX. Планета Юпитер



Рис. X. Галилеевы спутники планеты Юпитер



Рис. XI. Планета Сатурн



Рис. XII. Планета Уран



Рис. XIII. Планета Нептун

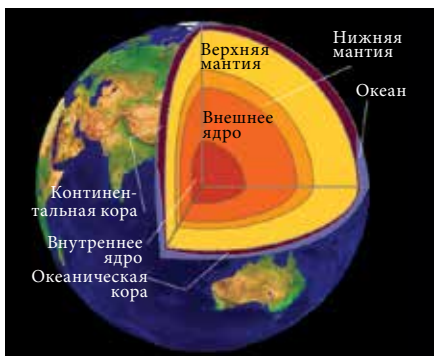


Рис. XIV. Строение Земли



Рис. XV. Внутреннее строение и атмосфера Солнца



Рис. XVI. Полярное сияние



Рис. XVII. Диаграмма «спектр-светимость»

# ТЕСТЫ ДЛЯ ИТОГОВОЙ ОЦЕНКИ ЗНАНИЙ

## ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ

### РЕАЛЬНЫЙ ПРОФИЛЬ

<b>1</b>	<b>Дополните следующие высказывания так, чтобы они были верны:</b>		
	а) Электродинамическая сила максимальна, если прямолинейный проводник с током расположен ... линиям магнитной индукции.		1 б.
	б) Электродвижущая сила самоиндукции в контуре ... скорости изменения силы тока в этом контуре. Коэффициентом пропорциональности является ...		2 б.
<b>2</b>	<b>Установите, истинно (поставив И) или ложно (поставив Л) каждое из следующих утверждений:</b>		
	а) Направление магнитной линии в какой-либо точке поля показывает северный полюс магнитной стрелки, которая помещена в соответствующее место поля и может свободно вращаться.	<input type="checkbox"/>	1 б.
	б) Самоиндукция – это явление электромагнитной индукции в контуре, по которому течет постоянный ток.	<input type="checkbox"/>	1 б.
<b>3</b>	<b>Покажите (с помощью стрелок) соответствие между следующими физическими величинами и их единицами:</b>		
	Магнитная индукция	• Н	1 б.
	Магнитный поток	• $A \cdot m^2$	1 б.
	Индуктивность	• Тл	1 б.
	ЭДС индукции	• мВб	1 б.
	Электромагнитная сила	• В	1 б.
		• Гн	
	Задание 4 состоит из двух утверждений, соединенных союзом <b>так как</b> . Установите, истинно (записывая <b>И</b> ) или ложно (записывая <b>Л</b> ) каждое из утверждений и есть ли между ними <b>причинно-следственная</b> связь (записывая <b>да</b> или <b>нет</b> ).		
<b>4</b>	<b>Величина электромагнитной силы, действующей на прямолинейный проводник с током, помещенный в однородное магнитное поле, зависит от угла между направлением тока в проводнике и магнитной индукции, так как линии магнитной индукции замкнуты.</b>		
	Ответ:	утверждение 1 – <input type="checkbox"/> ; утверждение 2 – <input type="checkbox"/> ; <b>причинно-следственная</b> связь – <input type="checkbox"/> .	3 б.
<b>5</b>	<b>Прямолинейный проводник длиной 0,8 м, по которому протекает ток 2,5 А, помещен в однородное магнитное поле с индукцией 0,6 Тл. Определите:</b>		
	а) максимальное значение электромагнитной силы, действующей на проводник;		2 б.
	б) угол между проводником и вектором магнитной индукции, при котором электродинамическая сила в 2 раза меньше максимальной.		2 б.
<b>6</b>	<b>Протон (<math>m_p = 1,67 \cdot 10^{-27}</math> кг, <math>e = 1,6 \cdot 10^{-19}</math> Кл), ускоренный разностью потенциалов 3,34 кВ, попадает в однородное магнитное поле с индукцией 50 мТл перпендикулярно линиям индукции. Определите:</b>		
	а) силу, действующую на протон со стороны магнитного поля;		4 б.
	б) радиус окружности, описываемой протоном в магнитном поле;		2 б.
	в) период вращения протона по описываемой окружности.		2 б.
<b>7</b>	<b>При изменении магнитного потока, пронизывающего плоскость контура с сопротивлением <math>R = 1</math> Ом, от 0,5 мВб до 5 мВб, ЭДС индукции становится равной 5 В. Определите:</b>		
	а) время $\Delta t$ , за которое происходит изменение магнитного потока;		2 б.
	б) силу индукционного тока.		2 б.
<b>8</b>	<b>Катушку с индуктивностью 100 мГн пронизывает магнитный поток 40 мВб. Определите:</b>		
	а) энергию магнитного поля катушки;		2 б.
	б) силу тока в катушке.		2 б.

### ГУМАНИТАРНЫЙ ПРОФИЛЬ

<b>1</b>	<b>Дополните следующие высказывания так, чтобы они были верны:</b>		
	а) Электромагнитная сила – это сила, действующая на ... со стороны ...		1 б.
	б) На заряженную частицу, которая движется в магнитном поле, действует ..., которая всегда направлена ... скорости частицы.		1 б.
<b>2</b>	<b>Покажите (с помощью стрелок) соответствие между следующими физическими величинами и их единицами:</b>		

	Магнитная индукция	•	• В	1 б.
	Магнитный поток	•	• $A \cdot m^2$	1 б.
	Индуктивность	•	• Тл	1 б.
	ЭДС индукции	•	• мВб	1 б.
			• Гн	
	Задание 3 состоит из двух утверждений, соединенных союзом <b>так как</b> . Установите, истинно (записывая <b>И</b> ) или ложно (записывая <b>Л</b> ) каждое из утверждений и есть ли между ними <b>причинно-следственная</b> связь (записывая <b>да</b> или <b>нет</b> ).			
<b>3</b>	<b>Электрон, попадающий в однородное магнитное поле перпендикулярно линиям его индукции, обладает постоянной кинетической энергией, так как сила Лоренца не совершает механической работы.</b>			
	<b>Ответ:</b> утверждение 1 – <input type="checkbox"/> ; утверждение 2 – <input type="checkbox"/> ; <b>причинно-следственная</b> связь – <input type="checkbox"/> .			3 б.
<b>4</b>	<b>С какой силой действует магнитное поле с индукцией <math>B = 0,2</math> Тл на прямолинейный проводник длиной <math>l = 50</math> см с током <math>4</math> А, если он перпендикулярен линиям поля?</b>			2 б.
<b>5</b>	<b>Проволочный виток сопротивлением <math>0,01</math> Ом, имеющий форму квадрата со стороной <math>10</math> см, находится в однородном магнитном поле с индукцией <math>B = 10</math> мТл. Плоскость витка образует угол <math>30^\circ</math> с линиями индукции поля. Вычислите:</b>			
	а) магнитный поток через виток;			3 б.
	б) полный заряд, прошедший через виток при исчезновении магнитного поля.			3 б.
<b>6</b>	<b>Электрон, с зарядом <math>e = 1,6 \cdot 10^{-19}</math> Кл и массой <math>m = 9,1 \cdot 10^{-31}</math> кг влетает в однородное магнитное поле с индукцией <math>B = 50</math> мТл со скоростью <math>v = 5 \cdot 10^7</math> м/с, перпендикулярно линиям поля. Определите:</b>			
	а) силу, действующую на электрон;			2 б.
	б) радиус окружности, описываемой электроном;			3 б.
	в) период и частоту вращения электрона в магнитном поле.			3 б.

## ПЕРЕМЕННЫЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ РЕАЛЬНЫЙ ПРОФИЛЬ

<b>1</b>	<b>Дополните следующие высказывания так, чтобы они были верны:</b>			
	а) Сила тока и ЭДС индукции во вращающейся металлической рамке становятся максимальными, когда магнитный поток через нее...			1 б.
	б) В цепи переменного тока с последовательным соединением $RLC$ возникает резонанс, когда ее импеданс ...			1 б.
<b>2</b>	<b>Определите, истинно (поставив И) или ложно (поставив Л) каждое из следующих утверждений:</b>			
	а) Величина, обратная емкости в электрических колебаниях, соответствует жесткости (коэффициенту упругости) в механических колебаниях.			<input type="checkbox"/> 1 б.
	б) Электромагнитные волны продольны.			<input type="checkbox"/> 1 б.
	Задание 3 состоит из двух утверждений, соединенных союзом <b>так как</b> . Установите, истинно (записывая <b>И</b> ) или ложно (записывая <b>Л</b> ) каждое из утверждений и есть ли между ними <b>причинно-следственная</b> связь (записывая <b>да</b> или <b>нет</b> ).			
<b>3</b>	<b>Сдвиг фаз между силой тока и приложенным напряжением в цепи переменного тока, содержащей только активное сопротивление, равен <math>\pi/2</math>, так как энергия, потребляемая резистором, превращается в тепловую энергию.</b>			
	<b>Ответ:</b> утверждение 1 – <input type="checkbox"/> ; утверждение 2 – <input type="checkbox"/> ; <b>причинно-следственная</b> связь – <input type="checkbox"/> .			3 б.
<b>4</b>	<b>Конденсатор последовательно соединен с катушкой индуктивности <math>L = 1/\pi</math> мГн. При каком значении емкости конденсатора ток частотой <math>1</math> кГц станет максимальным?</b>			2 б.
<b>5</b>	<b>Параллельный пучок монохроматического света падает нормально на дифракционную решетку с периодом <math>4</math> мкм. Определите длину волны падающего света, если угол между направлениями на два главных максимума 3-го порядка равен <math>60^\circ</math>.</b>			
<b>6</b>	<b>В цепи переменного тока с последовательным <math>RLC</math> соединением сила тока равна: <math>i(t) = 10\sqrt{2} \sin(200\pi t - \varphi)(A)</math>. Реальные элементы цепи имеют параметры: конденсатор – емкость <math>C = \frac{500}{\pi}</math> мкФ и сопротивление <math>R_1 = 3,9</math> Ом; катушка – индуктивность <math>L = \frac{5}{\pi}</math> мГн и сопротивление <math>R_2 = 0,1</math> Ом; резистор – сопротивление <math>R_3 = 8</math> Ом. Определите:</b>			
	а) частоту мгновенного напряжения на зажимах источника;			1 б.
	б) емкостное и индуктивное сопротивления, импеданс цепи;			3 б.
	в) коэффициент мощности и сдвиг фаз между силой тока и напряжением.			2 б.

## ГУМАНИТАРНЫЙ ПРОФИЛЬ

<b>1</b>	<b>Дополните следующие высказывания так, чтобы они были верны:</b>	
	а) Максимальные значения напряжения и силы переменного тока в ..., чем действующие.	1 б.
	б) Постоянной дифракционной решетки называется ...	1 б.
<b>2</b>	<b>Установите, истинно (поставив И) или ложно (поставив Л) каждое из следующих утверждений:</b>	
	а) Ток частотой 60 Гц изменяет свое направление 100 раз каждую секунду. <span style="float: right;"><input type="checkbox"/></span>	1 б.
	б) Расстояние, на которое перемещается электромагнитная волна за один период, называется длиной волны. <span style="float: right;"><input type="checkbox"/></span>	1 б.
	Задание 3 состоит из двух утверждений, соединенных союзом <b>так как</b> . Установите, истинно (записывая <b>И</b> ) или ложно (записывая <b>Л</b> ) каждое из утверждений и есть ли между ними <b>причинно-следственная</b> связь (записывая <b>да</b> или <b>нет</b> ).	
<b>3</b>	<b>Передача электрической энергии на большие расстояния производится при высоких напряжениях, так как потери энергии в линии электропередачи уменьшаются при повышении напряжения.</b>	
	<b>Ответ:</b> утверждение 1 – <input type="checkbox"/> ; утверждение 2 – <input type="checkbox"/> ; <b>причинно-следственная</b> связь – <input type="checkbox"/> .	3 б.
<b>4</b>	<b>Михаил слушает музыку, передаваемую радиостанцией, работающей на частоте 71,57 МГц. Чему равна длина волн, испускаемых этой радиостанцией?</b>	
<b>5</b>	<b>На дифракционную решетку длиной 1,5 см и содержащую 3 000 штрихов нормально падает монохроматический свет с длиной волны 550 нм. Определите:</b>	
	а) постоянную дифракционной решетки;	2 б.
	б) общее число максимумов, даваемых этой решеткой.	2 б.
<b>6</b>	<b>Мгновенное значение силы переменного тока задано уравнением <math>i(t) = 4,2 \sin(100\pi t + \pi/6)</math> (А). Определите:</b>	
	а) действующее значение силы тока;	2 б.
	б) начальную фазу и частоту этого тока;	2 б.
	в) значение силы тока в момент времени $t_1 = 0,02$ с.	3 б.

## ЭЛЕМЕНТЫ СПЕЦИАЛЬНОЙ ТЕОРИИ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ И КВАНТОВОЙ ФИЗИКИ РЕАЛЬНЫЙ ПРОФИЛЬ

<b>1</b>	<b>Дополните следующие высказывания так, чтобы они были верны:</b>	
	а) Согласно первому постулату специальной теории относительности Эйнштейна законы физики ...	1 б.
	б) Изменение массы тела и изменение его энергии ...	1 б.
	в) Внешний фотоэлектрический эффект происходит только в том случае, если энергия падающих фотонов ...	1 б.
<b>2</b>	<b>Определите, истинно (поставив И) или ложно (поставив Л) каждое из следующих утверждений:</b>	
	а) Скорость света в вакууме не зависит от скорости источника, его испускающего. <span style="float: right;"><input type="checkbox"/></span>	1 б.
	б) Максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов, вырванных из металла, пропорциональна потоку энергии падающего излучения. <span style="float: right;"><input type="checkbox"/></span>	1 б.
	Задание 3 состоит из двух утверждений, соединенных союзом <b>так как</b> . Установите, истинно (записывая <b>И</b> ) или ложно (записывая <b>Л</b> ) каждое из утверждений и есть ли между ними <b>причинно-следственная</b> связь (записывая <b>да</b> или <b>нет</b> ).	
<b>3</b>	<b>Величина фототока насыщения не зависит от потока энергии излучения, падающего на катод, так как фотоэффект происходит только в том случае, если частота излучения не меньше пороговой частоты.</b>	
	<b>Ответ:</b> утверждение 1 – <input type="checkbox"/> ; утверждение 2 – <input type="checkbox"/> ; <b>причинно-следственная</b> связь – <input type="checkbox"/> .	3 б.
<b>4</b>	<b>Определите энергию фотона, импульс которого равен <math>1,2 \cdot 10^{-27}</math> кг·м/с.</b>	2 б.
<b>5</b>	<b>При частоте электромагнитного излучения, падающего на металл, равной <math>1,4 \cdot 10^{15}</math> Гц, максимальная кинетическая энергия вырванных фотоэлектронов равна <math>2,875 \cdot 10^{-19}</math> Дж. Определите:</b>	
	а) работу выхода для этого металла;	3 б.
	б) максимальную кинетическую энергию вырванных из металла фотоэлектронов при частоте падающего излучения, равной $1,8 \cdot 10^{15}$ Гц.	3 б.

## ЭЛЕМЕНТЫ ФИЗИКИ АТОМА И ЯДРА

### РЕАЛЬНЫЙ ПРОФИЛЬ

<b>1</b>	<b>Дополните следующие высказывания так, чтобы они были верны:</b>	
	а) Удельная энергия связи равна ...	1 б.
	б) При $\alpha$ -распаде радиоактивный элемент превращается в элемент, расположенный в периодической таблице элементов ...	1 б.
<b>2</b>	<b>Определите, истинно (поставив И) или ложно (поставив Л) каждое из следующих утверждений:</b>	
	а) При наложении спектра испускания газа на его спектр поглощения наблюдается непрерывный спектр.	<input type="checkbox"/> 1 б.
	б) Число электронов в ионизированном атоме равно числу положительных зарядов ядра.	<input type="checkbox"/> 1 б.
	в) Ядро изотопа рубидия ${}_{37}^{90}\text{Rb}$ содержит на 17 протонов больше, чем нейтронов.	<input type="checkbox"/> 1 б.
	Задание 3 состоит из двух утверждений, соединенных союзом <b>так как</b> . Установите, истинно (записывая И) или ложно (записывая Л) каждое из утверждений и есть ли между ними <b>причинно-следственная</b> связь (записывая да или нет).	
<b>3</b>	<b>Между протонами внутри ядра действуют силы электрического отталкивания, однако они и нейтроны не разлетаются, а удерживаются вместе, так как вокруг ядра двигаются электроны – носители отрицательного электрического заряда.</b>	
	Ответ: утверждение 1 – <input type="checkbox"/> ; утверждение 2 – <input type="checkbox"/> ; <b>причинно-следственная</b> связь – <input type="checkbox"/> .	3 б.
<b>4</b>	<b>Определите частоту фотона, испускаемого атомом водорода при переходе электрона из состояния с энергией (–1,51 эВ) в состояние с энергией (–3,39 эВ).</b>	3 б.
<b>5</b>	<b>В результате цепочки радиоактивных превращений изотоп тория <math>{}_{90}^{232}\text{Th}</math> превратился в изотоп свинца <math>{}_{82}^{208}\text{Pb}</math>. Определите:</b>	
	а) число $\alpha$ -распадов в этой цепочке;	2 б.
	б) число $\beta$ -распадов.	3 б.
<b>6</b>	<b>Изотоп урана <math>{}_{92}^{235}\text{U}</math>, поглотив медленный нейтрон, делится на два фрагмента, при этом вылетают 2 нейтрона.</b>	
	а) Зная, что одним из фрагментов является изотоп ${}_{38}^{95}\text{Sr}$ , определите порядковый номер и массовое число второго фрагмента.	3 б.
	б) Вычислите дефект массы (в а.е.м.) для изотопа урана ${}_{92}^{235}\text{U}$ , зная, что масса атома этого изотопа равна 235,04393 а.е.м., масса атома водорода ${}^1_1\text{H}$ – 1,00782 а.е.м., нейтрона – 1,00866 а.е.м.	3 б.

## ЭЛЕМЕНТЫ КВАНТОВОЙ ФИЗИКИ, ФИЗИКИ АТОМА И ЯДРА

### ГУМАНИТАРНЫЙ ПРОФИЛЬ

<b>1</b>	<b>Дополните следующие высказывания так, чтобы они были верны:</b>	
	а) Электроны вырываются из металла только в том случае, если частота падающего света не ... пороговой.	1 б.
	б) В центре атома находится ..., в котором сосредоточена практически вся масса атома и которое заряжено ... электрическим зарядом.	1 б.
	в) При испускании $\beta$ -частиц радиоактивный элемент превращается в элемент, расположенный в периодической таблице элементов в клеточке...	1 б.
<b>2</b>	<b>Определите, истинно (поставив И) или ложно (поставив Л) каждое из следующих утверждений:</b>	
	а) Работа выхода электрона из металла зависит от его химической природы и не зависит от длины волны падающего света.	<input type="checkbox"/> 1 б.
	б) Изотопы – это атомы одного и того же химического элемента, ядра которых содержат одинаковое число нейтронов и разное число протонов.	<input type="checkbox"/> 1 б.
	в) При $\alpha$ -распаде массовое число A уменьшается на 2, а Z уменьшается на 4.	<input type="checkbox"/> 1 б.
	Задание 3 состоит из двух утверждений, соединенных союзом <b>так как</b> . Установите, истинно (записывая И) или ложно (записывая Л) каждое из утверждений и есть ли между ними <b>причинно-следственная</b> связь (записывая да или нет).	

<b>3</b>	<b>Кинетическая энергия фотоэлектронов не зависит от длины волны падающего света, так как работа выхода фотоэлектронов зависит от природы вещества фотокатода.</b>	
	<b>Ответ:</b> утверждение 1 – <input type="checkbox"/> ; утверждение 2 – <input type="checkbox"/> ; <b>причинно-следственная</b> связь – <input type="checkbox"/> .	3 б.
<b>4</b>	<b>Определите энергию фотона, соответствующую желтому свету с длиной волны 560 мкм.</b>	2 б.
<b>5</b>	<b>Атом перешел из состояния с энергией <math>(-5,42 \cdot 10^{-19})</math> Дж в состояние с энергией <math>(-0,87 \cdot 10^{-19})</math> Дж. Определите:</b>	
	<b>а)</b> был испущен или поглощен соответствующий фотон;	3 б.
	<b>б)</b> энергию этого фотона.	3 б.
<b>6</b>	<b>Определите атомный номер Z и массовое число A для:</b>	
	<b>а)</b> ядра-мишени X в ядерной реакции: $X + {}^1_1p \rightarrow {}^{22}_{11}\text{Na} + {}^4_2\text{He}$ ;	2 б.
	<b>б)</b> ядра Y – продукта ядерной реакции ${}^{55}_{25}\text{Mn} + {}^1_1p \rightarrow Y + {}^1_0n$ .	2 б.

## ОТВЕТЫ К ЗАДАНИЯМ

### Глава 1. Электромагнетизм

- стр. 9. **4.** 0,1 Тл; **5.** 0,72 Н; **6.** 0,36 Н; **7.** В зависимости от направления тока через проводник электромагнитная сила складывается с силой тяжести или вычитается из нее; натяжение каждой из нитей равно 0,055 Н и 0,025 Н соответственно.
- стр. 11. **4.**  $3,2 \cdot 10^{-14}$  Н;  $2,77 \cdot 10^{-14}$  Н; **5.**  $5,3 \cdot 10^{16}$  м/с<sup>2</sup>.
- стр. 13. **4.** 2,5 мТл; **5.** 1,25 м.
- стр. 20. **7.** 3 мВб; **8.** 1 мКл; **9.** 45,4 мкКл.
- стр. 22. **5.** 100 В.
- стр. 23. **3.** 10 мДж; **4.** а) 0,5 А; б) 4 мВб.

### Глава 2. Переменный электрический ток

- стр. 26. **6.** 100 раз.
- стр. 27. **3.**  $\approx 311$  В; **4.** 2 А; 1,41 А.
- стр. 35. **15.** 20 мА; 28,3 мА; **16.** 6,28 Ом; **17.** 16 Гц; **18.** 18 Ом; 47,6 мГн; 0,97 рад; **19.** 13,3 мкФ; -0,93 рад; 150 В; **20.** 1,92 А.
- стр. 38. **8.** а) 20 Ом; б) 6 А; в) 0,8; г) 576 Вт; 432 ВАР; 720 ВА; **9.** а) 12 Ом; б)  $12\sqrt{3}$  Ом; в) 3,6 кВт; 2,08 кВАР; 4,16 кВА.
- стр. 41. **9.** 0,2; 5000; **10.** 3,6 А; **11.** 4,75 А.

### Глава 3. Электромагнитные колебания и волны

- стр. 45. **8.** 40 мкФ; **9.** Уменьшается в 4 раза; **10.** 1,97 мм.
- стр. 48. **6.** 1 884 м.
- стр. 59. **12.** 0,6 мкм; **13.** 1,2 мкм.
- стр. 63. **9.** 4,8 мкм, 61°; **10.** 100 штрих./мм.
- стр. 68. **8.** 48,7°.

### Глава 4. Элементы специальной теории относительности

- стр. 75. **5.** 20 см; **6.** В направлении большей диагонали со скоростью  $u = 0,8$  с.
- стр. 77. **1.**  $x = 7,8 \cdot 10^4$  м;  $y = 2 \cdot 10^4$  м;  $z = 0$ ;  $t = 2,5 \cdot 10^{-4}$  с; **2.** а) 0,97 с; б) 1,5 с.
- стр. 78. **6.**  $4,5 \cdot 10^6$  кг = 4500 тонн; **7.**  $2,68 \cdot 10^5$  кг = 268 тонн; **8.**  $2\sqrt{2}$  с/3.

### Глава 5. Элементы квантовой физики

- стр. 81. **4.** Черное тело; **5.** Светлая роза на черной чашке; **7.**  $2,87 \cdot 10^{-19}$  Дж; **8.**  $2,5 \cdot 10^{13}$  Гц.
- стр. 86. **5.**  $3,61 \cdot 10^{-19}$  Дж = 2,26 эВ; **6.**  $9,5 \cdot 10^{-28}$  кг·м/с; красного; **7.** 289 нм; **8.**  $6,6 \cdot 10^{-20}$  Дж = 0,41 эВ; **9.**  $3,85 \cdot 10^5$  м/с.

- стр. 90. **5.**  $\approx 7,3 \cdot 10^{-11}$  м; **6.** Уменьшается в два раза.

### Глава 6. Элементы физики атома

- стр. 99. **10.**  $4,56 \cdot 10^{14}$  Гц;  $0,658 \cdot 10^{-6}$  м; **11.**  $6,17 \cdot 10^{14}$  Гц;  $0,486 \cdot 10^{-6}$  м.

### Глава 7. Элементы физики атомного ядра. Элементарные частицы

- стр. 104. **5.**  $6,5 \cdot 10^{-15}$  м; **6.** 90 протонов; 142 нейтрона.
- стр. 106. **7.** 0,11236 а.е.м.; **8.** 37,60 МэВ; **9.** 0,58539 а.е.м.; **10.** а)  ${}^{238}_{92}\text{U}$ ; б) 980 МэВ; в) 1,9 а.е.м.; г) 196 а.е.м.
- стр. 110. **5.** 84; 218; **12.** 8 дней; **13.** 87,5%; **14.** 1/8 часть.
- стр. 114. **1.**  $\alpha$ -частица; **2.** Изотоп ртути  ${}^{198}_{80}\text{Hg}$ ; **3.** Изотоп углерода  ${}^{13}_6\text{C}$ ; **4.** Протон; **6.** 2,785 МэВ.

### Глава 8. Элементы астрономии

- стр. 130. **1.**  $42^\circ 55'$ ;  $66^\circ 21'$ ;  $19^\circ 29'$ ; **2.**  $1^{\text{h}}54^{\text{m}}37^{\text{s}}$ ; **3.**  $42^\circ 55'$ ; **4.**  $66^\circ 57'$ ; **5.** Ю – 3. **6.** На полюсах; **8.** 21.II; 23.IX; **9.**  $8^{\text{h}}34^{\text{m}}19^{\text{s}}$ ; **10.** Рак, 5 августа.
- стр. 133. **1.** Да/нет; нет/да; **2.** 389,2; **3.** Расстояние Земля–Луна, Земля–Солнце; **4.** Луна в апогее; **5.** С запада на восток; **6.** Равна продолжительности лунного затмения на Земле; **8.**  $\phi = 0,2-0,5$ ; **9.** Земля в фазе  $\phi = 1$ ; **10.** С любой, кроме Земли.
- стр. 135. **1.**  $\phi = 43^\circ 08'$ ;  $\lambda = 1^{\text{h}}06^{\text{m}}$ ; **2.** 16 февраля 2011; **3.** 4 августа, в  $10^{\text{h}}32^{\text{m}}$  (по средневропейскому времени); **4.** Нет; да.
- стр. 139. **1.** Вечером на Западе, утром – на Востоке; **2.** Меркурий  $t \leq 1^\circ$  на  $h \leq 15^\circ$  над горизонтом; Венера:  $t \leq 3^\circ$  на  $h \leq 40^\circ$  над горизонтом; **3.** Венера – внутренняя планета; **4.**  $t \sim 500^\circ\text{C}$ ; **7.** Ось наклонена на  $98^\circ$ ; **8.** По возмущениям Урана.
- стр. 141. **1.** Нет; **2.** Астероиды перемещаются относительно звезд; **3.** 18 000,  $\sim 4 \cdot 10^{21}$  кг.
- стр. 145. **1.** Принцип динамо вращения Земли; **2.** Интенсивность солнечных вспышек; **3.** Не будут существовать; **4.** Период вращения Луны вокруг своей оси равен периоду ее обращения вокруг Земли; **5.** Солнечный свет, отраженный Землей и освещающий поверхность Луны, воспринимается как пепельный свет Луны; **6.** Отсутствие атмосферы на Луне.
- стр. 147. **1.** Верхняя; **2.** Нет; **3.** Весы; **4.** Да.
- стр. 149. **1.** 224,7 дней; **2.** 2,36.
- стр. 152. **1.** Да, из-за рассеяния света в земной атмосфере; **2.** 13,4.