

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

С.И. Кузнецов

Краткий справочник по физике

Часть III

Оптика.

Квантовая природа излучения.

Основы атомной физики и квантовой механики.

Физика атомного ядра и элементарных частиц

2-е издание, переработанное и дополненное

Рекомендовано в качестве учебного пособия

Редакционно-издательским советом

Томского политехнического университета

Издательство

Томского политехнического университета

2013

УДК 53(075.8)

ББК 22.3я73

К 891

Кузнецов С.И.

К 891

Краткий справочник по физике. Часть 3. Оптика. Квантовая природа излучения. Основы атомной физики и квантовой механики. Физика атомного ядра и элементарных частиц: учебное пособие / С.И. Кузнецов, – Томск: Изд-во ТПУ, 2013. – 109 с.

Краткий справочник по физике разработан на базе лекций по общей физике, более 20 лет читаемых авторами студентам технических вузов, в полном соответствии с требованиями образовательного Госстандарта.

В пособии приведены основные законы и формулы по всем разделам третьей части физики с пояснениями, схемами, диаграммами, графиками и рисунками. Цель пособия – помочь студентам освоить материал программы, научить активно применять теоретические основы физики как рабочий аппарат, позволяющий решать конкретные задачи, приобрести уверенность в самостоятельной работе.

Пособие подготовлено по программе курса физики высших технических учебных заведений. Соответствует инновационной политике ТПУ, направлено на активизацию научного мышления и познавательной деятельности студентов.

Предназначено для межвузовского использования студентами технических специальностей очной и дистанционной форм обучения.

УДК 53(075.8)

ББК 22.3я73

Рецензенты

Доктор физико-математических наук, профессор,
заведующий кафедрой теоретической физики ТГУ

А.В. Шаповалов

Доктор физико-математических наук, профессор,
заведующий кафедрой общей информатики ТГПУ

А.Г. Парфенов

© Томский политехнический университет, 2013

© Оформление. Издательство ТПУ, 2013

© Кузнецов С.И., 2013

ОГЛАВЛЕНИЕ

ОГЛАВЛЕНИЕ	3
ВВЕДЕНИЕ.....	4
1. КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ.....	5
1.1. Гармонические колебания.....	5
1.2. Сложение гармонических колебаний.....	10
1.3. Влияние внешних сил на колебательные процессы.....	12
1.4. Электрические колебания	15
1.5. Упругие волны.....	21
1.6. Электромагнитные волны.....	26
2. ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ И ВОЛНОВАЯ ОПТИКА.....	30
2.1. Геометрическая оптика.....	30
2.2. Волновая оптика. Интерференция света.....	34
2.3. Дифракция света	37
2.4. Взаимодействие света с веществом.....	41
2.5. Поляризация света	43
3. КВАНТОВАЯ ОПТИКА.	47
3.1. Квантовая природа излучения	47
3.2. Квантовые явления в оптике.....	49
3.3. Волновые свойства микрочастиц вещества.....	54
3.4. Элементы квантовой механики.....	56
3.5. Движение частицы в одномерной потенциальной яме.....	58
4. ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ	62
5. АТОМНАЯ ФИЗИКА.	67
5.1. Модели атомов. Атом водорода по теории Бора	67
5.2. Водородоподобные системы в квантовой механике.....	70
6. ФИЗИКА АТОМНОГО ЯДРА И ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ.....	75
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	84
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	85
ПРИЛОЖЕНИЕ.....	87

*Дорога к мудрости проста,
найди её без толстых книжек:
мимо, и мимо, и мимо опять,
но ближе, и ближе, и ближе.*

Пит Хайн. Грузи

ВВЕДЕНИЕ

«Справочник по физике» ставит своей целью дать студентам высших технических учебных заведений, преподавателям вузов, техникумов и средних школ краткое пособие, охватывающее все основные разделы третьей части современной физики: колебания и волны, волновую и квантовую оптику, элементы физики атомов, атомного ядра и элементарных частиц.

Учебное пособие подготовлено в соответствии с программой, связанной с переходом на многоуровневую систему подготовки специалистов и является результатом опыта чтения курса общей физики автором на протяжении 20 лет. Многолетний опыт чтения лекций по системе изложения, принятой в пособии, позволяет заключить, что избранный путь повышения уровня знаний будущих инженеров и специалистов в области физики дает положительные результаты.

Пособие не заменяет учебники, но является «путеводителем» по ним, что позволяет более рационально организовать изучение курса общей физики. Задача книги – помочь студентам освоить материал программы, научиться активно применять теоретические основы физики как рабочий аппарат, позволяющий решать конкретные задачи и приобрести уверенность в самостоятельной работе.

Материал пособия основан на содержании учебных пособий «Курс лекций по физике», электронные версии которых размещены на сайте научно-технической библиотеки ТПУ <http://www.lib.tpu.ru>.

Для настоящего курса физики реализовано его мультимедийное сопровождение и создан электронный учебник, размещенный в электронном читальном зале НТБ ТПУ, в среде дистанционного обучения "MOODLE" <http://mdl.lcg.tpu.ru> и в корпоративной сети ТПУ WEB СТ <http://e-le.lcg.tpu.ru>. Наиболее полно материал курса изложен на персональном сайте <http://portal.tpu.ru/SHARED/s/SMIT>.

Авторы считают приятным долгом выразить свою благодарность коллективу кафедр физики ТПУ и АлтГТУ за помощь в составлении и оформлении учебного пособия.

Авторы с благодарностью примут все замечания и пожелания читателей, способствующие улучшению курса по адресам: smit@tpu.ru; krogozi@mail.ru.

1. КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ

1.1. Гармонические колебания

Колебанием называются процессы, отличающиеся той или иной степенью повторяемости во времени. Простейшим типом периодических колебаний являются так называемые *гармонические колебания*.

Простейшим примером периодического движения служат *колебания груза массой m на конце пружины* (рис. 1.1, а) или колебания маятника в поле тяжести Земли (рис. 1.1, б).

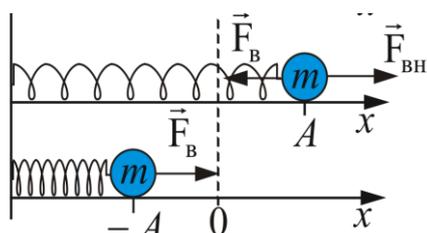


рис. 1.1, а

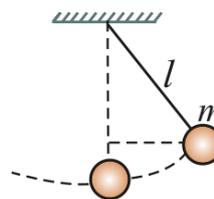


рис. 1.1, б

1.1.1. Возвращающая сила – сила возвращающая груз массой m в положение равновесия. Примером таких сил являются *упругие силы* или *квазиупругие силы*, удовлетворяющие уравнению:

$$F_x = -m\omega_0^2 x,$$

где ω_0 – циклическая частота колебаний; x – смещение колеблющейся величины от положения равновесия за время t .

Из этого уравнения следует, что сила F пропорциональна x и всегда направлена к положению равновесия. Силы, удовлетворяющие этому уравнению, называются *квазиупругими силами*.

$$F_x = -kx,$$

где k – коэффициент упругой силы.

1.1.2. Дифференциальное уравнение динамики гармонических колебаний материальной точки под действием упругих или квазиупругих сил:

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + kx = 0 \text{ или } \frac{d^2 x}{dt^2} + \omega_0^2 x = 0.$$

1.1.3. Уравнение гармонических колебаний:

$$x = A \cdot \cos(\omega_0 t + \varphi) = A \cdot \sin(\omega_0 t + \varphi'),$$

где A – амплитуда колебаний, φ – начальная фаза колебаний, $\varphi' = \varphi + \frac{\pi}{2}$.

1.1.4. Гармонические колебания в графическом виде (рис 5.2):

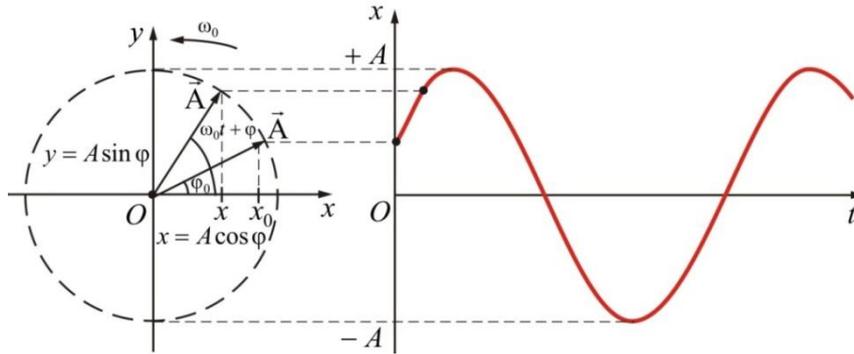


Рис. 1.2

1.1.5. Скорость колебаний:

$$v_x = \frac{dx}{dt} = -\omega_0 A \sin(\omega_0 t + \varphi).$$

1.1.6. Ускорение колебаний:

$$a_x = \frac{dv_x}{dt} = -\omega_0^2 A \cos(\omega_0 t + \varphi).$$

Графики смещения скорости и ускорения гармонических колебаний приведены на рис. 1.3. Из графиков видно, что *скорость опережает смещение по фазе на $\pi/2$* , а *ускорение, в свою очередь, опережает скорость по фазе на $\pi/2$* .

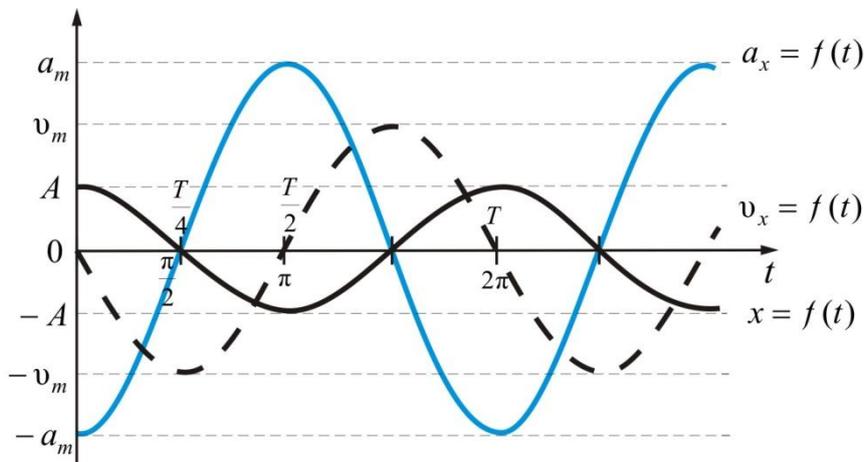


Рис. 1.3

1.1.7. Амплитуда скорости: $v_m = \omega_0 A$.

1.1.8. Амплитуда ускорения: $a_m = \omega_0^2 A$.

1.1.9. Частота колебаний – число последовательных колебаний в одну секунду:

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

1.1.10. Циклическая (круговая) частота колебаний – число полных колебаний за 2π секунд (для пружинного маятника рис. 1.1 а):

$$\omega_0 = 2\pi v = \frac{2\pi}{T} = \sqrt{\frac{k}{m}}.$$

1.1.11. Период колебаний – минимальный промежуток времени, по истечению которого повторяются значения всех физических величин, характеризующих колебания:

$$T = \frac{2\pi}{\omega_0} = \frac{1}{v} = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}.$$

1.1.12. Потенциальная энергия $E_{\text{п}}$ тела, смещенного на расстояние x от положения равновесия, измеряется работой, которую произведет возвращающая сила $F_x = -kx$, перемещая тело в положение равновесия (рис. 1.1).

$$E_{\text{п}} = \frac{kx^2}{2} = \frac{1}{2}kA^2 \cos^2(\omega_0 t + \varphi).$$

1.1.13. Кинетическая энергия – энергия тела массой m , движущегося со скоростью v :

$$E_{\text{к}} = \frac{mv^2}{2} = \frac{1}{2}m\omega_0^2 A^2 \sin^2(\omega_0 t + \varphi).$$

1.1.14. Колебания грузов под действием силы тяжести (рис. 1.4). Запасенная потенциальная энергия переходит в кинетическую и наоборот, но их сумма в любой момент времени постоянна

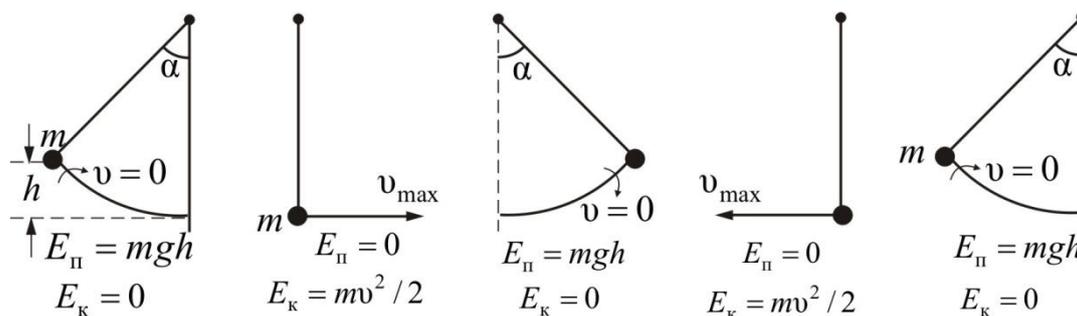


Рис. 1.4

1.1.15. Полная механическая энергия материальной точки, совершающей гармонические колебания, пропорциональна квадрату амплитуды колебания A^2 .

$$E = E_{\text{п}} + E_{\text{к}} = \frac{mv^2}{2} + \frac{kx^2}{2} = \text{const.}$$

1.1.16. Переход потенциальной энергии в кинетическую и наоборот происходит при колебаниях, совершающихся под действием потенциальных сил (рис. 1.5).

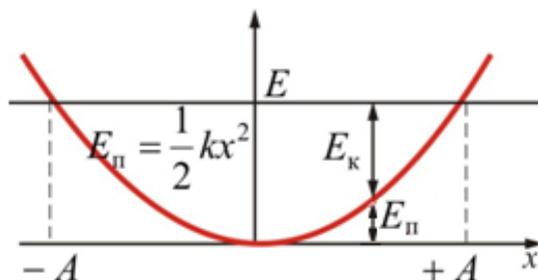


Рис. 1.5

1.1.17. Гармонический осциллятор (в классической механике) — это система, которая при смещении из положения равновесия испытывает действие возвращающей силы, пропорциональной смещению. Примерами могут служить: *пружинный* (рис. 1.1 а), *математический* (рис. 1.1 б, 1.6) и *физический* (рис. 1.7) маятники, а так же колебательный контур.

1.1.18. Математический маятник — идеализированная система, состоящая из невесомой нерастяжимой нити (рис. 1.6), на которую подвешена масса, сосредоточенная в одной точке (шарик на длинной тонкой нити).

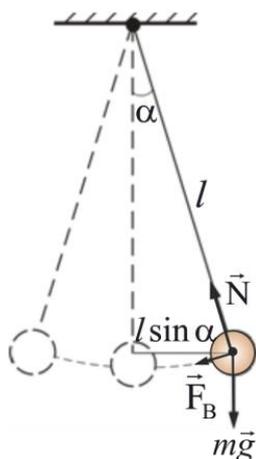


Рис. 1.6

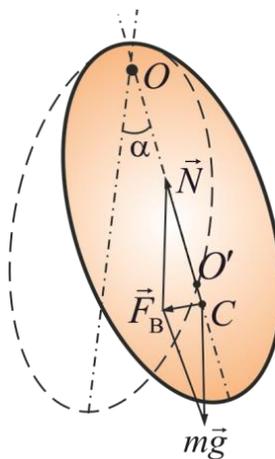


Рис. 1.7

1.1.19. Уравнение динамики вращательного движения математического маятника:

$$M = J\varepsilon.$$

1.1.20. Вращающий момент стремится вернуть маятник в положение равновесия, он возникает при отклонении тела от положения равновесия на угол α :

$$\vec{M} = [m\vec{g}, \vec{l}], \quad M = -mgl \sin \alpha.$$

где l – расстояние между точкой подвеса и центром масс маятника C .

1.1.21. Момент инерции маятника:

$$J = ml^2.$$

1.1.22. Угловое ускорение математического маятника:

$$\varepsilon = \frac{d^2\alpha}{dt^2}.$$

1.1.23. Дифференциальное уравнение маятника:

$$\frac{d^2\alpha}{dt^2} + \omega_0^2\alpha = 0;$$

• *решение данного уравнения:*

$$\alpha = \alpha_m \cos(\omega_0 t + \varphi).$$

При малых колебаниях угловое отклонение математического маятника изменяется во времени по гармоническому закону.

1.1.24. Циклическая частота математического маятника:

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

1.1.25. Период колебаний математического маятника:

• *в инерциальной системе отсчета:*

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

• *в неинерциальной системе отсчета:*

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

1.1.26. Физический маятник – это твердое тело, совершающее под действием силы тяжести колебания вокруг неподвижной горизонтальной оси, проходящей через точку O , не совпадающие с центром масс C (рис. 1.7).

1.1.27. Циклическая частота физического маятника:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{mgl}{J}}.$$

1.1.28. Период колебаний физического маятника:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{J}{mgl}} = 2\pi\sqrt{\frac{l_{\text{пр}}}{g}}.$$

1.1.29. Приведенная длина физического маятника – длина такого математического маятника, период колебания которого совпадает с периодом колебаний данного физического маятника:

$$l_{\text{пр}} = \frac{J}{ml}.$$

1.2. Сложение гармонических колебаний

При всех сложениях колебаний различают сложение колебаний, совершающихся в *одном направлении* и сложение колебаний, совершающихся во *взаимно перпендикулярных направлениях*.

1.2.1. Сложение двух одинаково направленных гармонических колебаний (рис. 1.8):

$$x_1 = A_1 \cos(\omega_0 t + \varphi_1) \text{ и } x_2 = A_2 \cos(\omega_0 t + \varphi_2).$$

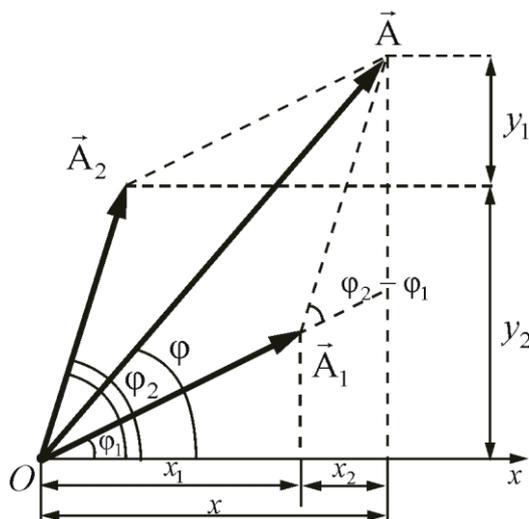


Рис. 1.8

1.2.2. Результирующая амплитуда при сложении колебаний:

$$A^2 = A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2 \cos(\varphi_2 - \varphi_1),$$

где A_1 и A_2 – амплитуды складываемых колебаний; φ_1 и φ_2 – их начальные фазы.

Амплитуда A результирующего колебания зависит от разности начальных фаз $\varphi_2 - \varphi_1$.

1.2.3. Начальная фаза колебаний:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{A_1 \sin \varphi_1 + A_2 \sin \varphi_2}{A_1 \cos \varphi_1 + A_2 \cos \varphi_2}.$$

Таким образом, тело, участвуя в двух гармонических колебаниях одного направления и одинаковой частоты, совершает также гармоническое колебание.

ческие колебания в том же направлении и с той же частотой, что и складываемые колебания.

1.2.4. Модулированные колебания – колебания, параметры которых (амплитуда, фаза, частота, длительность и т. п.) изменяются во времени:

$$x = A(t) \cos[\omega_0 t + \varphi(t)].$$

1.2.5. Биения – это периодические изменения амплитуды колебания, возникающие при сложении двух гармонических колебаний с близкими частотами. Биение является простейшим видом модулированных колебаний (рис. 1.9).

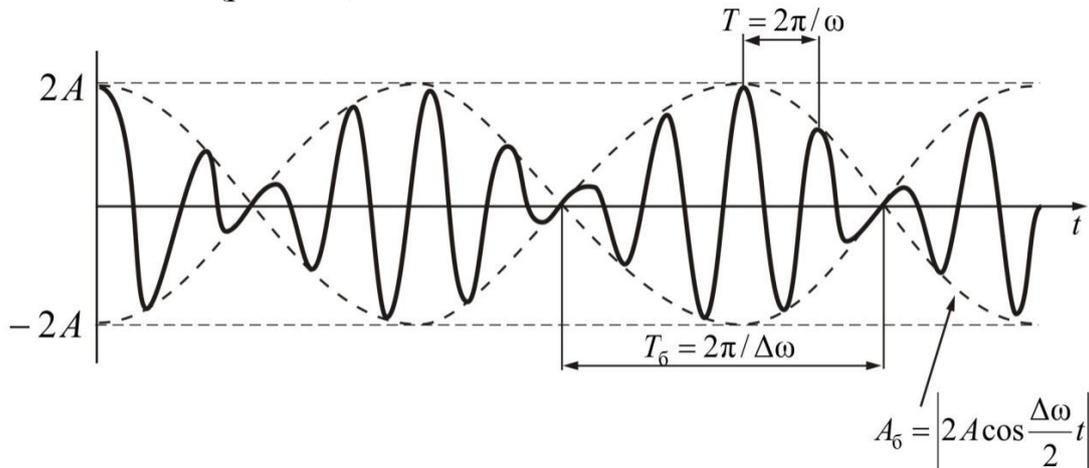


Рис. 1.9

Результирующее колебание: $x = A_b \cos \omega t$

Амплитуда биения изменяется по закону: $A_b = \left| 2A \cos \frac{\Delta\omega}{2} t \right|$.

1.2.6. Сложение двух взаимно перпендикулярных колебаний:

$$x = A_1 \cos(\omega_0 t + \varphi_1) \quad \text{и} \quad y = A_2 \cos(\omega_0 t + \varphi_2).$$

1.2.7. Уравнение результирующего колебания – уравнение эллипса, оси которого ориентированы относительно x и y произвольно:

$$\frac{y^2}{A_2^2} + \frac{x^2}{A_1^2} - \frac{2xy}{A_1 A_2} \cos(\varphi_2 - \varphi_1) = \sin^2(\varphi_2 - \varphi_1).$$

Некоторые частные случаи решений уравнений:

- **Начальные фазы колебаний одинаковы:** $\varphi_2 - \varphi_1 = 0$.

Уравнение результирующего колебания – это уравнение прямой, проходящей через начало координат (рис. 1.10а, б):

$$y = \frac{A_2}{A_1} x \quad \text{или} \quad y = -\frac{A_2}{A_1} x.$$

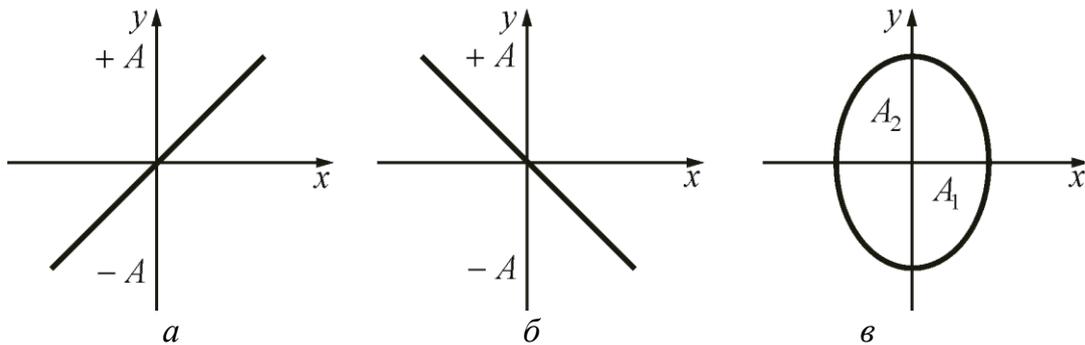


Рис. 1.10

- **Начальная разность фаз равна $\pi/2$** (рис. 1.10, в). Уравнение результирующего колебания – уравнение эллипса с полуосями A_1 и A_2 (случай эллиптически поляризованных колебаний):

$$\frac{x^2}{A_1^2} + \frac{y^2}{A_2^2} = 1.$$

- **Фигуры Лиссажу** – фигуры, получаемые при сложении взаимно перпендикулярных колебаний разных частот. В табл.1 приведены несколько фигур Лиссажу для разных соотношений частот колебаний и заданной разности фаз $\Delta\phi$.

Таблица 1

$\frac{\omega_1}{\omega_2}$	Угол сдвига фаз $\Delta\phi$				
	0°	45°	90°	135°	180°
1:1					
1:2					

1.3. Влияние внешних сил на колебательные процессы

Все реальные колебания являются затухающими. Энергия механических колебаний постепенно расходуется на работу против сил трения, и амплитуда колебаний постепенно уменьшается (затухает).

Свободными затухающими колебаниями называются колебания, механическая энергия которых расходуется на работу против диссипативных сил (сил трения).

Во многих случаях в первом приближении можно считать, что при небольших скоростях силы, вызывающие затухание колебаний, пропорциональны величине скорости (например, маятник).

1.3.1. Сила трения (сопротивления):

$$\vec{F}_{\text{тр}} = -r\vec{v},$$

где r – коэффициент сопротивления, \vec{v} – скорость движения

1.3.2. Второй закон Ньютона для затухающих прямолинейных колебаний:

$$ma_x = -kx - rv_x,$$

где $-kx$ возвращающая сила, rv_x – сила трения.

1.3.3. Дифференциальное уравнение свободных затухающих колебаний:

$$\frac{d^2x}{dt^2} + 2\beta \frac{dx}{dt} + \omega_0^2 x = 0;$$

- *решение уравнения:*

$$x = A_0 \exp(-\beta t) \cos(\omega t + \varphi),$$

где $A_0 \exp(-\beta t)$ – амплитуда затухающих колебаний, ω_0 – круговая частота собственных колебаний, ω – круговая частота свободных затухающих колебаний (рис.1.11, 1.12).

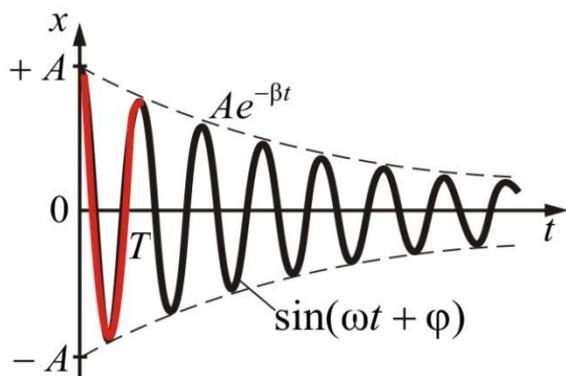


Рис. 1.11

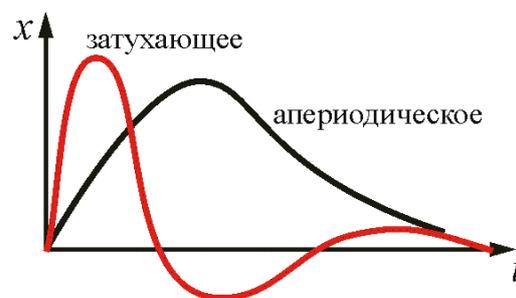


Рис. 1.12

1.3.4. Коэффициент затухания β – физическая величина, обратная времени, в течение которого амплитуда уменьшается в e раз:

$$\beta = \frac{r}{2m} = \frac{1}{\tau},$$

где $\tau = NT$ – время релаксации – время, в течении которого амплитуда A уменьшится в e раз.

1.3.5. Логарифмический декремент затухания χ – физическая величина, обратная числу колебаний, по истечении которых амплитуда A уменьшается в e раз:

$$\chi = \ln \frac{A(t)}{A(T+t)} = \beta T = \frac{1}{N}.$$

1.3.6. Частота затухающих колебаний:

$$\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}.$$

1.3.7. Условный период затухающих колебаний:

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2\pi}{\sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}}.$$

1.3.8. Вынужденные механические колебания – колебания, происходящие под действием внешней периодической силы.

Внешняя периодическая сила, называемая **вынуждающей**, сообщает колебательной системе дополнительную энергию, которая идет на восполнение энергетических потерь, происходящих из-за трения. Если вынуждающая сила изменяется во времени по закону синуса или косинуса, то вынужденные колебания будут гармоническими и незатухающими.

1.3.9. Второй закон Ньютона для вынужденных колебаний, происходящих вдоль оси x :

$$ma_x = -kx - r\dot{x} + F_x,$$

где F_x – вынуждающая сила.

1.3.10. Дифференциальное уравнение вынужденных колебаний:

$$\frac{d^2x}{dt^2} + 2\beta \frac{dx}{dt} + \omega_0^2 x = F_0 \cos \omega t.$$

1.3.11. Уравнение установившихся вынужденных колебаний:

$$x = A \sin(\omega t + \varphi).$$

1.3.12. Амплитуда вынужденных колебаний:

$$A = \frac{F_0}{m \sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4\beta^2 \omega^2}}.$$

Таким образом, $A \sim F_0/m$ и $\sim 1/\beta$.

При постоянных F_0 , m и β амплитуда зависит только от соотношения круговых частот вынуждающей силы ω и свободных незатухающих колебаний системы ω_0 .

1.3.13. Резонанс – явление возрастание амплитуды вынужденных колебаний при приближении частоты вынуждающей силы к $\omega_{\text{рез}}$ (рис.5.13).

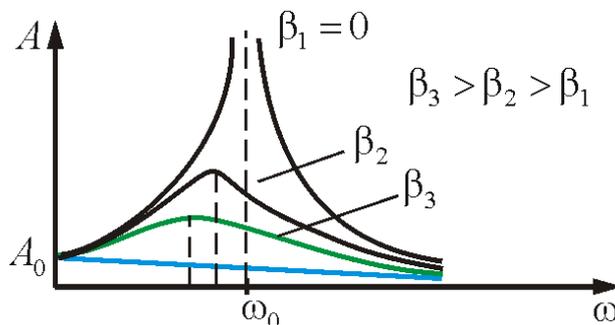


Рис. 1.13

1.3.14. Резонансная частота – частота вынужденных колебаний, при которых наблюдается резкое возрастание амплитуды:

$$\omega_{\text{рез}} = \sqrt{\omega_0^2 - 2\beta^2}.$$

1.3.15. Резонансная амплитуда:

$$A_{\text{рез}} = \frac{F_0}{2\beta\sqrt{\omega_0^2 + \beta^2}}.$$

1.4. Электрические колебания

Электрические колебания – электромагнитные колебания в квазистационарных цепях, размеры которых малы по сравнению с длиной электромагнитной волны. Это позволяет не учитывать волнового характера процессов и описывать их как колебания электрических зарядов q (в ёмкостных элементах цепи).

1.4.1. Переменный ток – электрический ток, изменяющийся во времени:

$$I = I_0 \sin \omega t.$$

1.4.2. Напряжение:

$$U = I_0 R \sin \omega t$$

1.4.3. Сопротивление R в цепи переменного тока (рис.1.14): Векторные диаграммы тока и напряжения показаны на рис 1.15. *Колебания тока происходят в одной фазе с напряжением.*

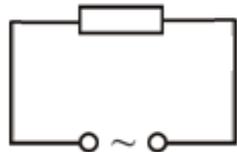


Рис. 1.14



Рис. 1.15

$$I = I_0 \sin \omega t$$

$$U = I_0 R \sin \omega t = U_0 \sin \omega t$$

1.4.4. Емкость C в цепи переменного тока (рис. 1.16).

Векторные диаграммы тока и напряжения показаны на рис 1.17.

Амплитуда напряжения на конденсаторе отстает по фазе от амплитуды тока на $\pi/2$.

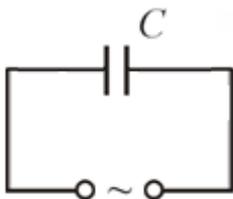


Рис. 1.16

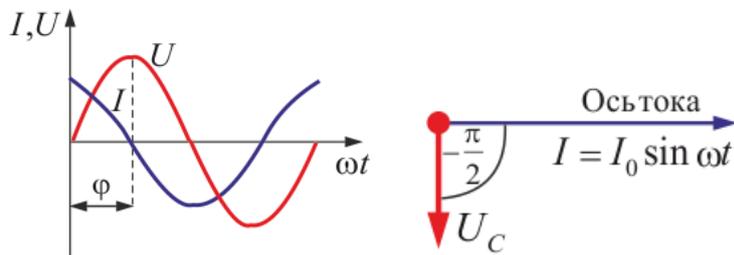


Рис. 1.17

- реактивное емкостное сопротивление: $R_C = 1/C\omega$;
- изменение напряжения: $U_C = I_0 R_C \sin(\omega t - \pi/2)$;
- ток: $I = I_0 \sin \omega t$.

1.4.5. Индуктивность C в цепи переменного тока (рис. 1.18).

Векторные диаграммы тока и напряжения показаны на рис 1.19.

Амплитуда напряжения на индуктивности $U_L = IR_L$ опережает по фазе амплитуду тока на $\pi/2$.

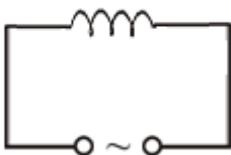


Рис. 1.18

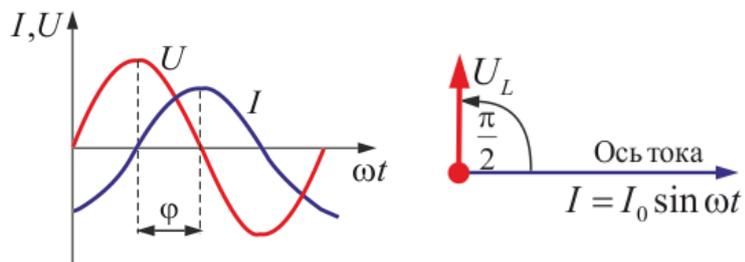


Рис. 1.19

- реактивное индуктивное сопротивление: $R_L = L\omega$;
- изменение напряжения: $U_L = I_0 R_L \sin(\omega t + \pi/2)$;
- ток: $I = I_0 \sin \omega t$.

1.4.6. Сопротивление, емкость и индуктивность при последовательном соединении в цепи переменного тока (рис 1.20).

Общее напряжение $U = U_R + U_C + U_L$. Так как U_R, U_C, U_L отличаются по фазе, то складывать их надо при помощи векторной диаграммы (рис 1.21).

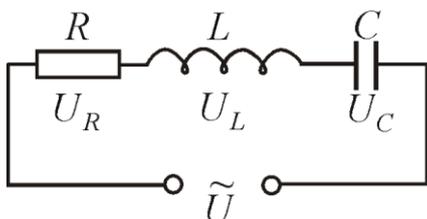


Рис. 1.20

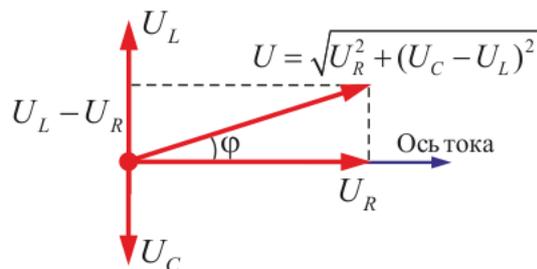


Рис. 1.21

- Полное сопротивление цепи (комплексное сопротивление) Z ;
- изменение напряжения $U = IZ$ (закон Ома для переменных токов);
- ток: $I = I_0 \sin \omega t$.

1.4.7. Полное сопротивление цепи или импеданс – представляет комплексное сопротивление для гармонических процессов (рис. 1.22):

$$Z = R + iX,$$

где R – активное сопротивление, отвечающее за потерю мощности в цепи, X – реактивное сопротивление, определяющие величину энергии пульсирующей в цепи с частотой 2ω .

$$Z = \frac{U_0}{I_0} = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}.$$

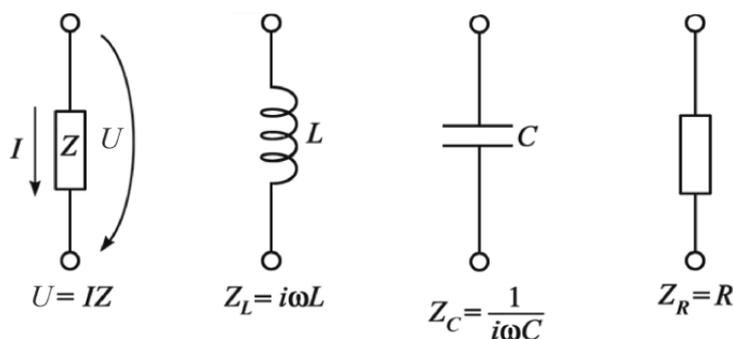


Рис. 1.22

1.4.8. Реактивное сопротивление:

$$X = R_L - R_C = \omega L - \frac{1}{\omega C}.$$

1.4.9. Закон Ома для цепи переменного тока:

$$U_0 = I_0 \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right)^2}.$$

1.4.10. Закон Ома в комплексной форме:

$$I = \frac{\mathcal{E}}{Z} = \frac{\mathcal{E}}{R + i \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right)}.$$

1.4.11. Дифференциальное уравнение свободных (незатухающих) колебаний в контуре (рис. 1.23):

$$\frac{d^2 q}{dt^2} + \omega_0^2 q = 0;$$

- *решение уравнения:*

$$q = q_m \cos(\omega_0 t + \varphi).$$

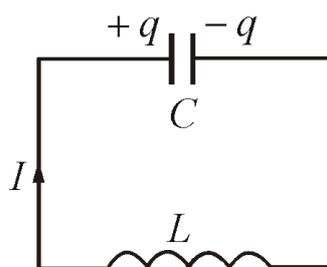


Рис. 1.23

1.4.12. Собственная частота контура:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}.$$

1.4.13. Формула Томсона – формула, выражающая зависимость периода незатухающих собственных колебаний, возникающих в колебательном контуре, от индуктивности и емкости этого контура:

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

1.4.14. Закон Ома для контура:

$$U_m = I_m \sqrt{\frac{L}{C}}.$$

1.4.15. Затухающие колебания. В реальном колебательном контуре свободные электромагнитные колебания будут затухающими из-за потерь энергии на нагревание проводов (рис. 1.24). На рис. 1.25 показан вид затухающих колебаний заряда q и силы тока I .

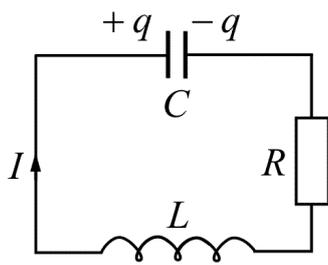


Рис. 1.24

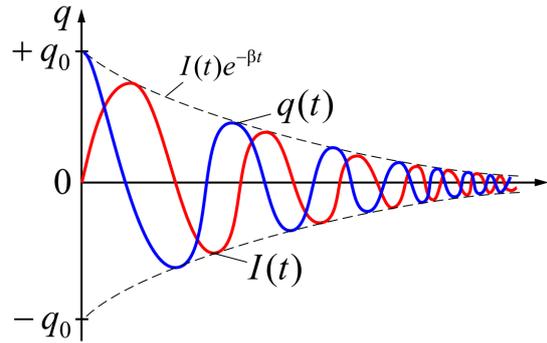


Рис. 1.25

1.4.16. Уравнение затухающих колебаний в колебательном контуре:

$$\frac{d^2 q}{dt^2} + 2\beta \frac{dq}{dt} + \omega_0^2 q = 0;$$

- *решение уравнения:*

$$q = q_0 \exp(-\beta t) \cos(\omega t + \varphi).$$

1.4.17. Частота затухающих колебаний контура:

$$\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \beta^2} = \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}},$$

где $\beta = \frac{R}{2L}$ – коэффициент затухания.

1.4.18. Логарифмический декремент затухания – безразмерная характеристика затухающих колебаний, измеряемая натуральным логарифмом отношения двух последовательных максимальных отклонений колеблющейся величины в одну и ту же сторону:

$$\chi = \ln \frac{A(t)}{A(t+T)} = \beta T = \frac{\pi R}{L\omega} = \pi R \sqrt{\frac{C}{L}}.$$

1.4.19. Добротность контура – характеристика колебательной системы, определяющая остроту резонанса и показывающая, во сколько раз запасы энергии в реактивных элементах контура больше, чем потери энергии на активных элементах за один период колебаний:

$$Q = 2\pi \frac{W}{\Delta W} = \frac{\pi}{\chi} = \pi N_e.$$

Чем выше добротность контура, тем больше система совершит колебаний, прежде чем амплитуда колебаний уменьшится в e раз.

1.4.20. Число колебаний за время затухания:

$$N_e = \frac{\tau}{T} = \frac{1}{\beta T},$$

где $\tau = 1/B$ – время затухания.

1.4.21. Аперриодический процесс (рис. 5.26) происходит при

$$\beta^2 \geq \omega_0^2, \text{ т.е. при } \frac{R^2}{4L^2} \geq \frac{1}{LC}.$$

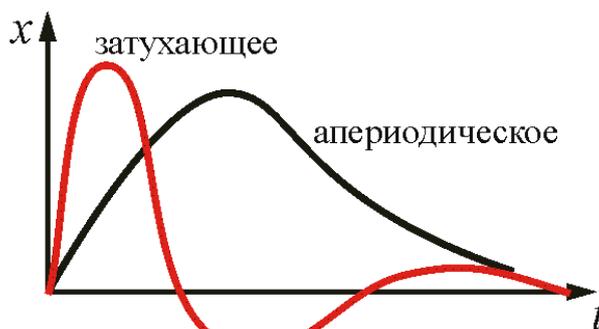


Рис. 1.26

1.4.22. Критическое сопротивление – сопротивление контура, при котором колебательный процесс переходит в аперриодический:

$$R_k = 2\sqrt{\frac{L}{C}} = 2R_{\text{вол}},$$

где $R_{\text{вол}}$ – волновое сопротивление, определяемое параметрами L и C .

1.4.23. Вынужденными электромагнитными колебаниями называют периодические изменения силы тока и напряжения в электрической цепи, происходящие под действием переменной ЭДС от внешнего источника. Внешним источником ЭДС в электрических цепях являются генераторы переменного тока, работающие на электростанциях.

1.4.24. Дифференциальное уравнение вынужденных колебаний:

$$\frac{d^2x}{dt^2} + 2\beta \frac{dx}{dt} + \omega_0^2 x = \frac{U_m}{L} \cos \omega t;$$

• решение данного уравнения:

$$q = q_m \cos(\omega t + \varphi).$$

1.4.25. Амплитуда колебаний заряда:

$$q_m = \frac{U_m}{\omega \sqrt{R^2 + (R_L - R_C)^2}}.$$

1.4.26. Последовательный резонанс или резонанс напряжений (рис. 5.27) наблюдается когда:

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

1.4.27. Резонансная частота при последовательном резонансе:

$$\omega_{\text{рез}} = \sqrt{\omega_0^2 - 2\beta^2}.$$

1.4.28. Параллельный резонанс или резонанс токов (рис. 1.28):

$$\omega = \omega_{\text{рез}} = \frac{1}{\sqrt{LC}}.$$

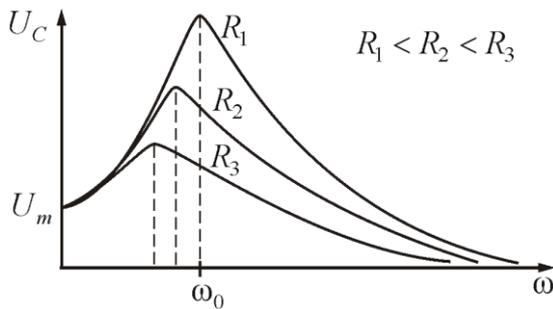


Рис. 1.27

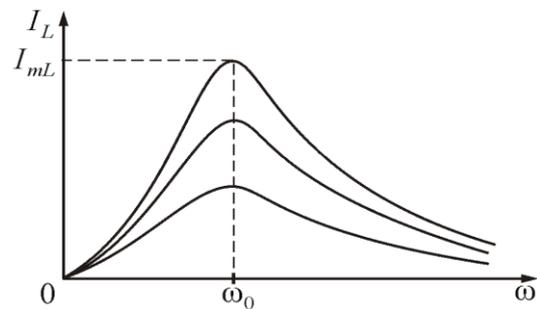


Рис. 1.28

1.4.29. Работа переменного тока за dt :

$$A = P_i dt = U_m I_m \sin \omega t dt,$$

где I_m и U_m – амплитудные значения силы тока и напряжения.

1.4.30. Работа за период T :

$$A = \frac{1}{2} I_m U_m T.$$

1.4.31. Средняя мощность:

$$\langle P \rangle = I_m U_m = \frac{1}{2} R I_m^2.$$

1.4.32. Действующие (эффективные) значения тока и напряжения:

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}}; U = \frac{U_m}{\sqrt{2}}.$$

1.5. Упругие волны

Колеблющееся тело, помещенное в упругую среду, является источником колебаний, распространяющихся от него во все стороны.

Процесс распространения колебаний в среде называется волной.

Волны переносят из одного места в другое. Импульс, энергию и фазу. Вещество не переносится.

Для существования волнового движения необходимы:

- источник колебаний;
- вещество или поле, через которые передаются колебания.

1.5.1. Длина волны – расстояние между ближайшими частицами, колеблющимися в одинаковой фазе (рис. 1.29):

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

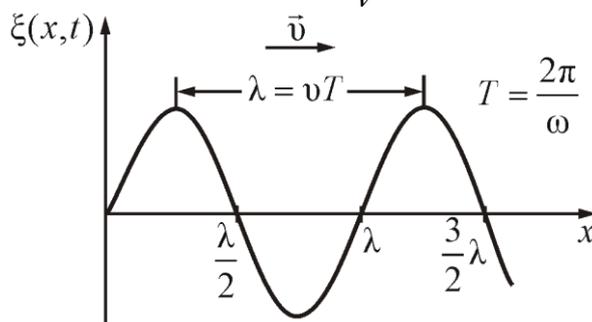


Рис. 1.29

1.5.2. Волновое уравнение – выражение, которое дает смещение ξ колеблющейся точки как функцию её координат и времени:

$$\nabla^2 \xi = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2}.$$

1.5.3. Уравнение плоской волны – смещение любой из точек с координатой x в момент времени t (рис. 1.30):

$$\xi = A \cos \omega \left(t - \frac{r}{v} \right) \text{ или } \xi = A \cos \omega (\omega t - kx);$$

- при затухании волны в среде:

$$\xi = A \exp(-\beta t) \cos \omega (\omega t - kx),$$

где β – коэффициент затухания.

1.5.4. Волновой вектор – вектор, направление которого перпендикулярно фазовому фронту бегущей волны, а абсолютное значение равно волновому числу:

$$\vec{k} = \frac{2\pi}{\lambda} \vec{n}.$$

1.5.5. Волновое число – число длин волн, укладывающихся на отрезке 2π метров, т.е. это пространственный аналог круговой частоты ω :

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{\omega}{v} = \frac{2\pi\nu}{v} = \frac{2\pi}{vT}.$$

1.5.6. Уравнение сферической волны (рис.1.31):

$$\xi = \frac{A}{r} \cos \omega \left(t - \frac{r}{v} \right) \text{ или } \xi = \frac{A}{r} \cos \omega (t - kr);$$

- при затухании волны в среде:

$$\xi = \frac{A}{r} \exp(-\beta t) \cos \omega(t - kr).$$

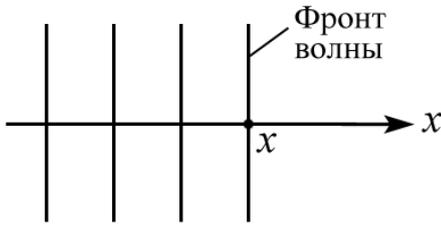


Рис. 1.30

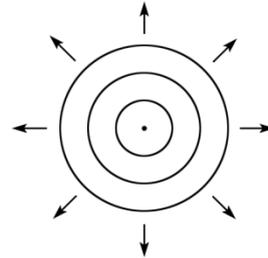


Рис. 1.31

1.5.7. Фазовая скорость – это скорость распространения фазы ВОЛНЫ:

$$v = \frac{dx}{dt} = \frac{\omega}{k} = \lambda v.$$

1.5.8. Дисперсия – это зависимость фазовой скорости в среде от частоты.

1.5.9. Групповая скорость – скорость, с которой перемещается центр пакета (точка с максимальным значением A):

$$u = \frac{d\omega}{dk} = v + k \frac{\partial v}{\partial k} = v - \lambda \frac{dv}{d\lambda}.$$

1.5.10. Разность фаз колебаний двух точек среды:

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

1.5.11. Волновой пакет или группа волн – это суперпозиция волн, мало отличающихся друг от друга по частоте (рис. 1.32):

$$\xi = \left[2A_0 \cos\left(\frac{\Delta\omega}{2}t - \frac{\Delta k}{2}x\right) \right] \cos(\omega t - kx)$$

Чтобы суперпозицию можно было считать группой волн, необходимо условие: $\Delta\omega \ll \omega_0$.

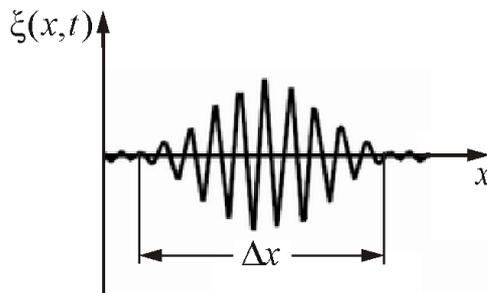


Рис. 1.32

1.5.12. Стоячей волной называется колебательный процесс, возникающей при наложении двух встречных плоских волн с одинаковой амплитудой (рис. 1.26)

1.5.13. Уравнение стоячей волны:

$$\xi = 2A \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda} x\right) \cos \omega t \quad \text{или} \quad \xi = 2A \cos kx \cos \omega t.$$

1.5.14. Координаты пучностей стоячей волны (рис. 1.33,а):

$$x_{\text{пучн}} = \pm \frac{n\lambda}{2}.$$

1.5.15. Координаты узлов стоячей волны (рис. 1.33,б):

$$x_{\text{узн}} = \pm \left(n + \frac{1}{2}\right) \frac{\lambda}{2}.$$

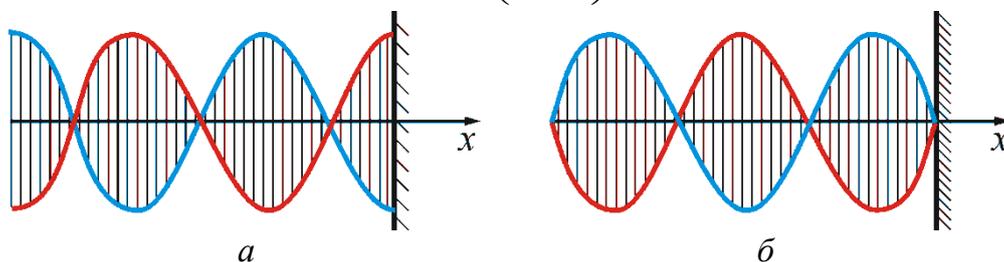


Рис. 1.33

1.5.16. Фазовая скорость продольных волн в упругой среде:

- в твердых телах: $v = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$ или $v = \sqrt{\frac{G}{\rho}}$;
- в газах: $v = \sqrt{\frac{\gamma RT}{\mu}}$ или $v = \sqrt{\frac{\gamma P}{\rho}}$,

где P – давление; ρ – плотность газа; γ – постоянная адиабаты.

1.5.17. Амплитуда звукового давления:

$$P_0 = 2\pi P \rho v A.$$

1.5.18. Средняя объемная плотность энергии звукового поля:

$$\langle w \rangle = \frac{1}{2} \rho \xi_0^2 = \frac{1}{2} \frac{P_0^2}{\rho v^2} = \rho \omega^2 A^2.$$

1.5.19. Энергия звукового поля, заключенного в объеме V :

$$W = \omega V.$$

1.5.20. Поток звуковой энергии - количество энергии, переносимое любой волной, через некоторую поверхность в единицу времени.

$$\Phi = \frac{W}{t}.$$

1.5.21. Интенсивность звука (плотность потока звуковой энергии) – средняя по времени энергия, которую звуковая волна переносит в единицу времени через единицу площади поверхности, расположенной перпендикулярно к направлению распространения волны:

$$I = \frac{\Phi}{S} = \langle w \rangle v.$$

1.5.22. Связь интенсивности с мощностью звука:

$$I = \frac{N}{4\pi r^2}.$$

1.5.23. Эффект Доплера – это изменение частоты волн, регистрируемых приемником, которое происходит вследствие движения источника этих волн и приемника (рис. 1.34):

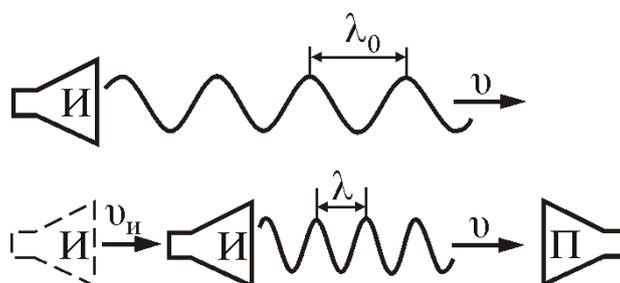


Рис. 1.34

- в акустике: $v = \frac{v \pm v_{\text{пр}}}{v \mp v_{\text{ист}}} v_0$;
- для электромагнитных волн в вакууме: $v = \frac{v_0 \sqrt{1 - v^2/c^2}}{1 + (v/c) \cos \theta}$;
- продольный оптический эффект Доплера: $v = v_0 \sqrt{\frac{1 \pm v/c}{1 \mp v/c}}$;
- поперечный оптический: $v = v_0 \sqrt{1 - (v/c)^2}$,

где v_0 – частота колебаний источника; v – фазовая скорость волн в среде.

1.5.24. Закон Хаббла – эмпирический закон, связывающий красное смещение галактик и расстояние до них линейным образом (рис. 1.35):

$$v \cos \theta \approx cz = Hr.$$

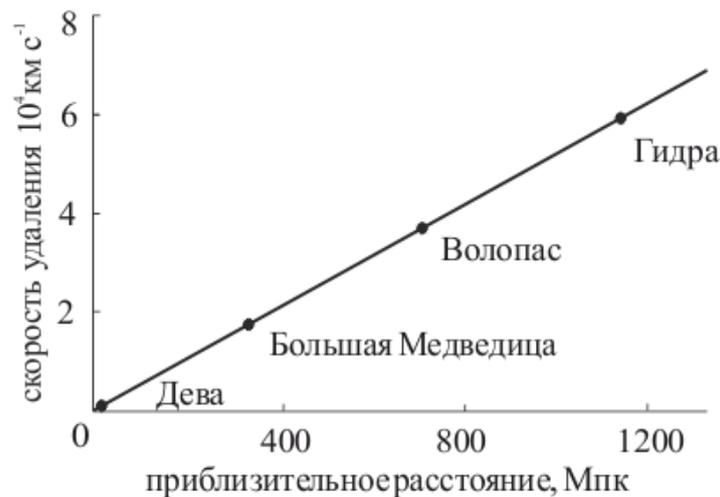


Рис. 1.35

Чем дальше находится галактика, тем больше её красное смещение, а поэтому, тем больше скорость её удаления.

1.5.25. Постоянная Хаббла – коэффициент, который связывает расстояние до внегалактического объекта (галактики, квазара) со скоростью его удаления. Наиболее точная оценка постоянной Хаббла на 2010 год составляет $70,4 \text{ (км/с)/Мпк}$, таким образом, в современную эпоху две галактики, разделённые расстоянием в 1 Мпк, в среднем разлетаются со скоростью $\sim 70 \text{ км/с}$.

1.5.26. Время расширения Вселенной – величина, обратная постоянной Хаббла. Для указанного значения постоянной Хаббла время жизни Вселенной составляет около $4,38 \times 10^{17} \text{ с}$ или $13,9 \times 10^9 \text{ лет}$.

1.6. Электромагнитные волны

Из теории Максвелла следует, что изменяющееся электрическое поле порождает в пустом пространстве магнитное поле. Изменяющееся магнитное поле приводит, в свою очередь, к появлению изменяющегося электрического поля и т.д. Анализируя свои уравнения, Максвелл пришел к заключению, что конечным итогом подобной связи изменяющихся полей будет появление волны, которая содержит электрическое и магнитное поля и способна распространяться в пустом пространстве.

Впервые электромагнитные волны были обнаружены и исследованы в 1887 г. Генрихом Герцем, который в качестве источника электромагнитных колебаний использовал колебательный контур.

1.6.1. Дифференциальное уравнение электромагнитных волн:

$$\nabla^2 \vec{E} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2}; \quad \nabla^2 \vec{H} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial t^2};$$

- решения данных уравнений:

$$E_y = E_0 \cos(\omega t - kr); \quad H_z = H_0 \cos(\omega t - kr),$$

где \vec{E} и \vec{H} – вектор напряженности электромагнитного поля.

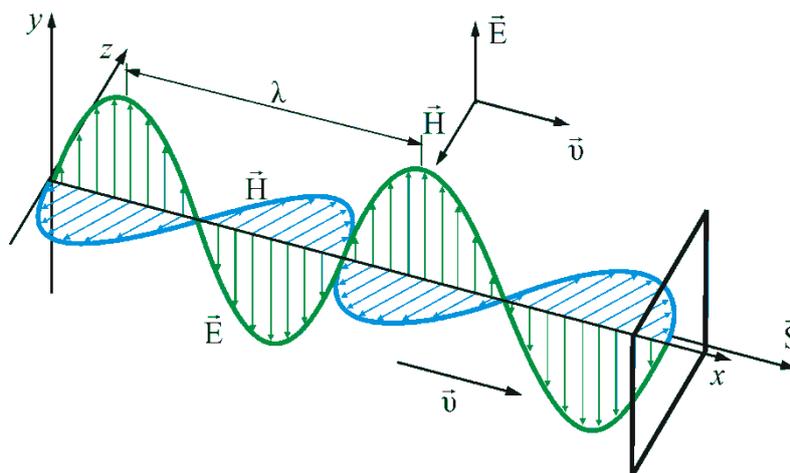


Рис. 1.36

1.6.2. Скорость распространения электромагнитных волн в среде:

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

где $c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0\mu_0}}$ – скорость света в вакууме; ϵ – электрическая проницаемость среды; μ – магнитная проницаемость среды.

1.6.3. Абсолютный показатель преломления среды – величина, равная отношению фазовых скоростей света (электромагнитных волн) в вакууме и в данной среде:

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

1.6.4. Объемная плотность энергии электромагнитных волн – энергия в единице объема $w = \frac{W}{V} = \frac{W_э + W_м}{V}$;

$$w = w_э + w_м = \frac{\epsilon_0 \epsilon E^2}{2} + \frac{\mu \mu_0 H^2}{2}.$$

Отсюда следует, что электромагнитная волна переносит энергию.

1.6.5. Плотность потока энергии – поток энергии через единичную площадку, перпендикулярную направлению распространения волны в единицу времени (рис. 1.36):

$$S = wv = EH.$$

1.6.6. Вектор Умова – Пойнтинга – это вектор плотности потока энергии электромагнитного поля:

$$\vec{S} = [\vec{E}, \vec{H}].$$

Этот вектор по модулю равен количеству энергии, переносимой через единичную площадь, нормальную к \vec{S} , в единицу времени (рис. 5.36). Своим направлением вектор определяет направление переноса энергии.

1.6.7. Интенсивность электромагнитных волн – это среднее по времени от модуля вектора Умова – Пойнтинга ($J \sim E^2$):

$$J = \left| \langle \vec{S} \rangle \right| \quad \text{или} \quad J = \frac{\sin^2 \theta}{r^2}.$$

1.6.8. Давление света – давление, которое оказывает световое (и вообще электромагнитное) излучение, падающее на поверхность тела:

$$P = F/S, \quad \text{или} \quad P = \frac{E_{\text{ед}}}{c} (1 + K),$$

где $E_{\text{ед}} = Nh\nu$ – энергия всех фотонов, падающих на единицу поверхности в единицу времени, т.е. энергетическая освещенность поверхности, K – коэффициент отражения.

Давление света на различные поверхности (рис. 1.37) можно считать:

- если тело зеркально отражает, то $K = 1$ и $P = \frac{E_{\text{ед}}}{c} (1 + K)$;
- если полностью поглощает (абсолютно черное тело), то $K = 0$ и $P = \frac{E_{\text{ед}}}{c}$, т.е. *световое давление на абсолютно черное тело в два раза меньше, чем на зеркальное.*

Давление света открыто русским ученым П.Н. Лебедевым в 1901 г. Впервые гипотеза о световом давлении была высказана в 1619 г. немецким ученым И. Кеплером (1571–1630) для объяснения отклонения хвостов комет, пролетающих вблизи Солнца (рис. 1.38).

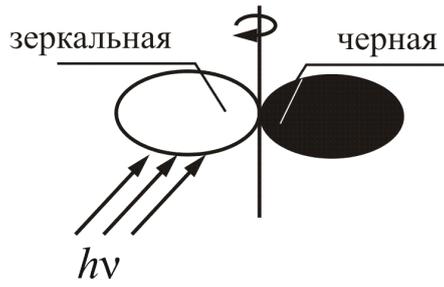


Рис. 1.37

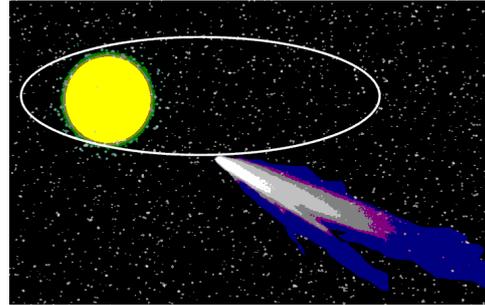


Рис. 1.38

1.6.9. Электромагнитная масса:

$$m_{\text{эл}} = \frac{2}{3} \frac{e^2}{ac^2 4\pi\epsilon_0},$$

где e – заряд движущейся частицы; a – её радиус.

1.6.10. Электромагнитный импульс:

$$\vec{p} = \frac{2}{3} \frac{e^2}{ac^2 4\pi\epsilon_0} \frac{\vec{v}}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}.$$

2. ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ И ВОЛНОВАЯ ОПТИКА

2.1. Геометрическая оптика

Геометрическая оптика – раздел оптики, изучающий законы распространения света в прозрачных средах и принципы построения изображений при прохождении света в оптических системах без учёта его волновых свойств.

2.1.1. Световой луч – воображаемая линия, вдоль которой переносится световая энергия. Менее чётко, но более наглядно, можно назвать световым лучом пучок света малого поперечного размера.

2.1.2. Закон прямолинейного распространения света: в однородной оптической среде свет распространяется по кратчайшей линии (прямой) (рис. 2.1).

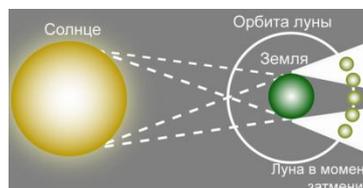


Рис. 2.1

2.1.3. Закон обратимости световых лучей: если луч из точки A в точку B идет по какой то линии, то из точки B в точку A должен идти по той же самой линии (рис. 2.2).



Рис. 2.2

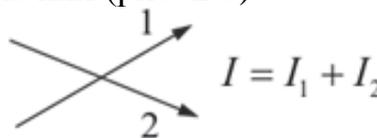


Рис. 2.3

2.1.4. Закон независимости световых пучков: суммарное действие лучей равно сумме действия каждого из них (рис. 2.3).

$$I = I_1 + I_2.$$

Эффект производимый отдельным пучком не зависит от того, действуют ли одновременно остальные пучки.

2.1.5. Закон отражения света – отраженный и падающий лучи лежат в плоскости, содержащей перпендикуляр к отражающей поверхности в точке падения, и угол падения равен углу отражения (рис. 2.3):

$$\alpha = \gamma.$$

2.1.6. Закон преломления света или закон Снелиуса (рис. 2.4):

- падающий луч, луч преломленный и перпендикуляр, восстановленный в точке падения луча к границе раздела двух сред, лежат в одной плоскости;
- отношение синуса угла падения к синусу угла преломления есть величина постоянная для заданной пары двух сред:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{c}{v} = n_{21}.$$

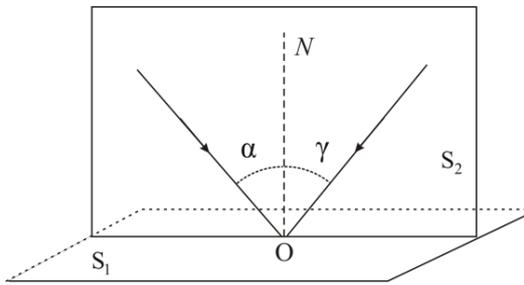


Рис. 2.3

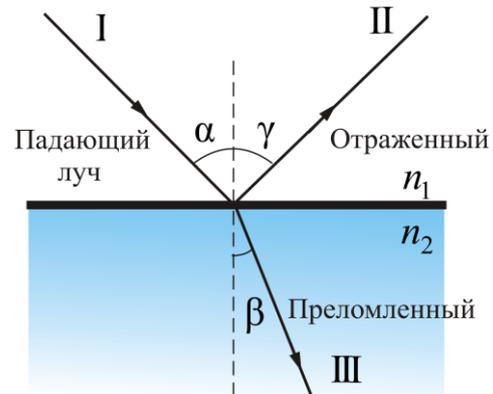


Рис. 2.4

2.1.7. Показатель преломления света – мера оптической плотности среды, равная отношению скорости света в вакууме к скорости света в среде. Абсолютный показатель преломления $n = c/v$

2.1.8. Полным отражением называется явление, при котором падающий луч не преломляется, а полностью отражается, причем интенсивности отраженного и падающего лучей одинаковы (рис. 2.5)

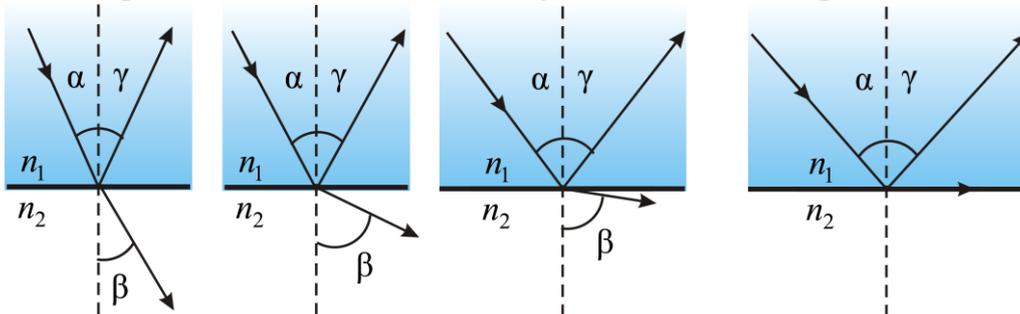


Рис. 2.5

2.1.9. Предельный угол – угол падения света на границу раздела двух сред, соответствующий углу преломления $\beta = 90^\circ$ (рис. 2.5):

$$\alpha_{\text{пр}} = \arcsin \frac{n_2}{n_1}.$$

При углах падения $\alpha > \alpha_{\text{пр}}$ весь падающий свет полностью отражается.

Явление полного отражения используется в призмах полного отражения и в **световодах**, представляющих собой тонкие произвольным образом изогнутые нити (волокна) из оптически прозрачного материала (рис. 2.6).

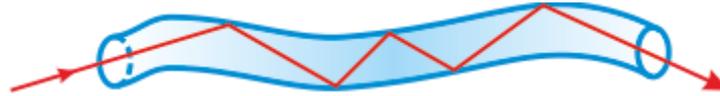


Рис. 2.6

2.1.10. Ход лучей в выпуклой (рис.2.7, а) и вогнутой (рис.2.7, б) линзах.

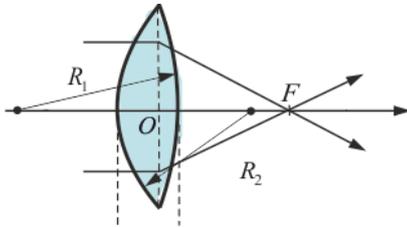


Рис. 2.7а

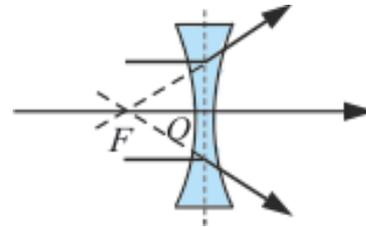


Рис. 2.7 б

2.1.11. Формула тонкой линзы – соотношение, связывающее оптическую силу линзы с расстоянием от оптического центра линзы до предмета и с расстоянием от оптического центра линзы до изображения предмета:

$$\frac{1}{d} \pm \frac{1}{f} = \pm \frac{1}{F} = D,$$

где f – расстояние от изображения до линзы; d – расстояние от предмета до линзы (рис. 2.8):

2.1.12. Оптическая сила толстой линзы:

$$D = \frac{1}{F} = \left(\frac{n_l}{n_{cp}} - 1 \right) \left(\pm \frac{1}{R_1} \pm \frac{1}{R_2} \right),$$

где F – фокусное расстояние линзы; n_l – абсолютный показатель преломления вещества линзы; n_{cp} – абсолютный показатель преломления окружающей среды (одинаковой с обеих сторон линзы); R_1 и R_2 – радиусы кривизны поверхностей линзы.

2.1.13. Увеличение линзы – отношение линейных размеров изображения к линейным размерам предмета (рис. 2.8):

$$\Gamma = \frac{h}{H} = \frac{f}{d},$$

где H – размер предмета; h – размер изображения.

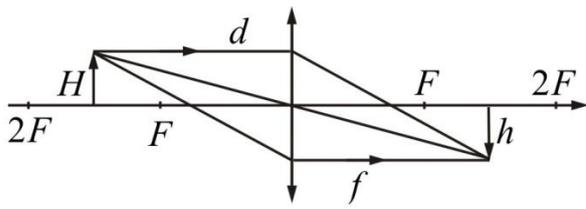


Рис. 2.8

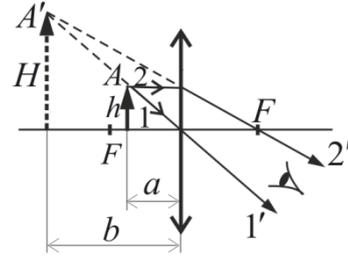


Рис. 2.9

2.1.14. Увеличение лупы (короткофокусной собирающей линзы):

$$\Gamma = \frac{d_0}{F},$$

где $d_0 = 25$ см – расстояние наилучшего зрения (рис.2.9).

2.1.15. Увеличение микроскопа:

$$\Gamma = d_0 a D_1 D_2,$$

где a – расстояние между фокусами объектива и окуляра; D_1 и D_2 – оптические силы объектива и окуляра.

2.1.16. Увеличение телескопа:

$$\Gamma = \frac{F_1}{F_2},$$

где F_1 и F_2 – фокусные расстояния объектива и окуляра.

2.1.17. Фокусное расстояние сферического зеркала:

$$F = \frac{R}{2}.$$

2.1.18. Оптическая сила сферического зеркала:

$$D = \frac{1}{F}.$$

2.1.19. Формула сферического зеркала – формула, связывающая параметры зеркала с расстоянием до него предмета и изображения:

$$\pm \frac{1}{F} = \frac{1}{d} \pm \frac{1}{f},$$

где F – фокусное расстояние сферического зеркала; d – расстояние от предмета до зеркала; f – расстояние от изображения до зеркала.

2.1.20. Поток излучения – световой поток Φ определяется энергией W , переносимой световыми волнами через данную площадь в единицу времени t :

$$\Phi = \frac{dW}{dt}.$$

2.1.21. Энергетическая сила света численно равна световому потоку, приходящемуся на единицу телесного угла:

$$I = \frac{d\Phi}{d\omega}.$$

2.1.22. Энергетическая яркость (лучистость) – отношение энергетического потока излучения, испускаемого с бесконечно малой площадки источника и распространяющегося в бесконечно малом телесном угле, к площади проекции этой площадки на плоскость, перпендикулярную направлению распространения, и величине телесного угла:

$$B = \frac{dI}{dS \cos\theta}.$$

2.1.23. Освещенность – величина, равная отношению светового потока, падающего на поверхность, к площади освещаемой поверхности:

$$E = \frac{d\Phi}{dS} \quad \text{или} \quad E = \frac{I}{r^2} \cos\alpha,$$

где α – угол падения лучей.

2.1.24. Энергетическая светимость R (излучательность) численно равна световому потоку, испускаемому единицей площади светящегося тела:

$$R = \frac{d\Phi}{dS}.$$

- Если светимость тела обусловлена его освещенностью, то

$$R = \rho E,$$

где ρ – коэффициент отражения.

2.2. Волновая оптика. Интерференция света

Волновые свойства света наиболее отчетливо обнаруживают себя в *интерференции* и *дифракции*. Эти явления характерны для волн любой природы и сравнительно просто наблюдаются на опыте для волн на поверхности воды или для звуковых волн.

2.2.1. Амплитуда результирующего колебания при сложении двух колебаний (рис. 5.8):

$$A^2 = A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2 \cos(\varphi_2 - \varphi_1).$$

2.2.2. Интенсивность результирующей световой волны

$$J = J_1 + J_2 + 2\sqrt{J_1J_2} \cos(\varphi_2 - \varphi_1),$$

где $2\sqrt{J_1J_2} \cos(\varphi_2 - \varphi_1)$ – интерференционный член.

2.2.3. Видность – величина, характеризующая контраст интерференционных полос:

$$V = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}},$$

где I_{\max} и I_{\min} – соответственно максимальное и минимальное значения интенсивности в интерференционной картине.

- видность при интерференции монохроматических волн:

$$V = \frac{2\sqrt{I_1 I_2}}{I_1 + I_2}.$$

2.2.4. Оптическая длина пути – произведение геометрической длины пути l световой волны на показатель преломления среды n :

$$L = nl.$$

2.2.5. Оптическая разность хода – это разность оптических длин путей световых волн, имеющих общие начальную и конечную точки:

$$\Delta = L_2 - L_1.$$

2.2.6. Опыт Юнга – опыт по наблюдению интерференции света методом деления волнового фронта: когерентные пучки получаются разделением и последующим сведением световых лучей, исходящих из одного и того же источника (рис. 2.10).

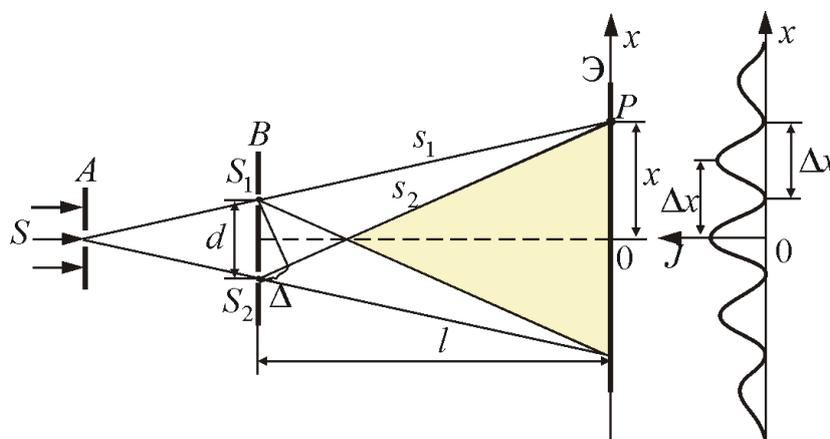


Рис. 2.10

Здесь: d – промежуток между щелями S_1 и S_2 ; l – расстояние от щелей до экрана ($l \gg d$); Δ – оптическая разность хода, $\Delta = s_2 - s_1$.

2.2.7. Условия интерференционных максимумов:

$$\Delta = \pm m\lambda_0, \quad (m = 0, 1, 2, \dots).$$

2.2.8. Условия интерференционных минимумов:

$$\Delta = \pm(2m + 1)\frac{\lambda_0}{2}, \quad (m = 0, 1, 2, \dots).$$

2.2.9. Координаты максимумов интенсивности:

$$x_{\max} = \pm m \frac{l}{d} \lambda_0, \quad (m = 0, 1, 2, \dots).$$

2.2.10. Координаты минимумов интенсивности:

$$x_{\min} = \pm (m + \frac{1}{2}) \frac{l}{d} \lambda_0, \quad (m = 0, 1, 2, \dots).$$

2.2.11. Время когерентности $\tau_{\text{ког}}$ (когерентность – скоррелированность (согласованность) нескольких колебательных или волновых процессов во времени, проявляющаяся при их сложении) – время, по истечению которого разность фаз волны в некоторой, но одной и той же точке пространства изменяется на π :

$$\tau_{\text{ког}} = \frac{\pi}{\Delta\omega},$$

где $\Delta\omega$ – ширина спектра частот реальной волны.

2.2.12. Критический максимум:

$$m_{\text{кр}} = \frac{\lambda}{2\Delta\lambda}.$$

2.2.13. Ширина интерференционных полос:

$$\Delta x = \frac{\lambda l}{d}.$$

2.2.14. Оптическая разность хода при интерференции в тонких пленках (рис. 2.11):

$$\Delta = 2nh \cos\beta \pm \frac{\lambda_0}{2} = 2h\sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha} \pm \frac{\lambda_0}{2}.$$

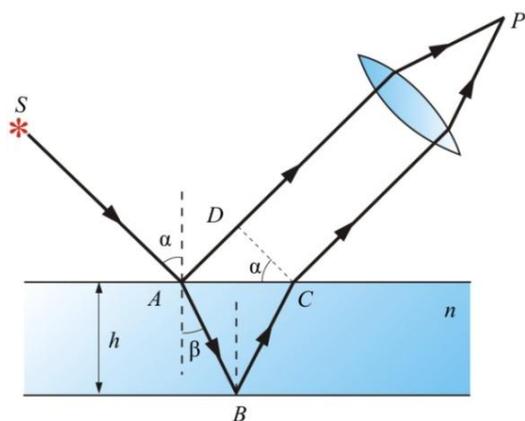


Рис. 2.11

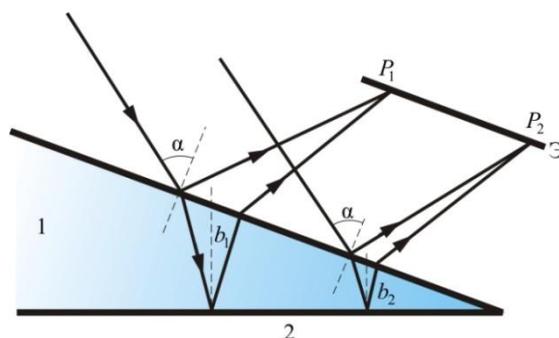


Рис. 2.12

2.2.15. Оптическая разность хода при интерференции на клине (рис. 2.12):

$$\Delta = 2b\sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha} \pm \frac{\lambda_0}{2}.$$

2.2.16. Кольца Ньютона – кольцевые полосы равной толщины, наблюдаемые в воздушном зазоре между соприкасающимися выпуклой сферической поверхностью линзы малой кривизны и плоской поверхностью стекла (рис. 2.13).

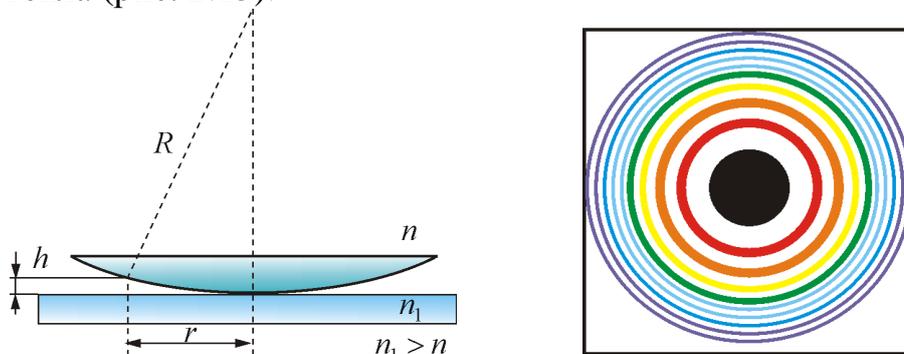


Рис. 2.13

2.2.17. Радиус m -го светлого кольца Ньютона в отраженных лучах или темного в проходящих:

$$r_m = \sqrt{\left(m - \frac{1}{2}\right)R\lambda_0}$$

2.2.18. Радиус m -го темного кольца Ньютона в отраженных лучах или светлого в проходящих (рис. 2.13):

$$r_m = \sqrt{mR\lambda_0}.$$

2.3. Дифракция света

Дифракцией называется совокупность явлений, наблюдаемых при распространении света в среде с резкими неоднородностями, размеры которых сравнимы с длиной волны, и связанных с отклонениями от законов геометрической оптики.

Между интерференцией и дифракцией нет существенных физических различий. Оба явления заключаются в перераспределении светового потока в результате суперпозиции волн.

2.3.1. Принцип Гюйгенса состоит в том, что каждая точка, до которой доходит волна, служит **центром вторичных волн**, а огибающая этих волн задает положение волнового фронта в следующий момент времени (рис. 2.14).

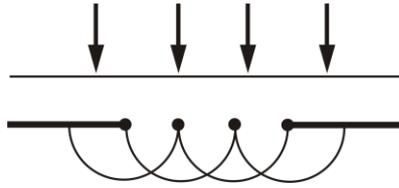


Рис. 2.14

Построив огибающую вторичных волн для некоторого момента времени, видно, что фронт волны заходит в область геометрической тени, т.е. волна огибает края отверстия.

2.3.2. Принцип Гюйгенса-Френеля:

- каждую *точку фронта* волны можно рассматривать как источник вторичных волн;
- все вторичные источники фронта волны, исходящей из одного источника, **когерентны** между собой;
- равные по площади участки волновой поверхности излучают **равные интенсивности** (мощности);
- каждый вторичный источник излучает свет преимущественно в направлении **внешней нормали** к волновой поверхности в этой точке. Амплитуда вторичных волн в направлении, составляющем угол α с нормалью, тем меньше, чем больше угол α , и равна нулю при $\alpha \geq \pi/2$;
- для вторичных источников справедлив принцип суперпозиции: **излучение одних участков волновой поверхности не влияет** на излучение других.

2.3.3. Метод зон Френеля – метод разбиения волновой поверхности S на зоны, позволяющий сильно упростить количественные расчеты дифракционной картины (рис. 2.15).

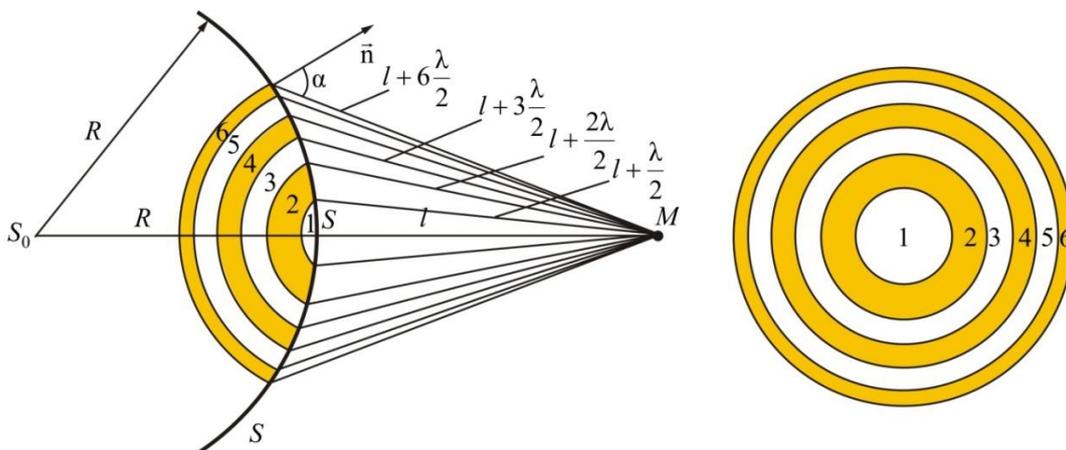


Рис. 2.15

2.3.4. Площадь одной зоны Френеля:

$$\Delta S_i = S_i - S_{i-1} = \frac{\pi R l \lambda}{R + l},$$

где λ – длина волны; l – расстояние от волнового фронта до экрана M .

2.3.5. Радиусы зон Френеля:

$$r_m = \sqrt{\frac{ab}{a+b} m \lambda},$$

где m – номер зоны Френеля.

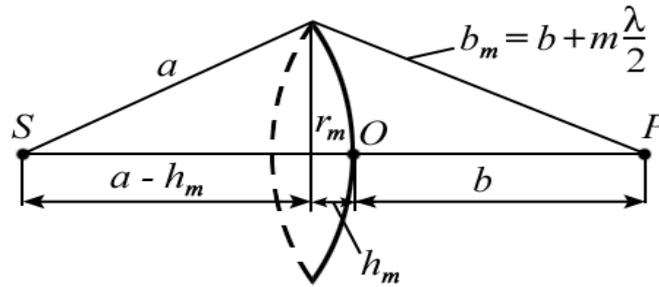


Рис. 2.16

2.3.6. Дифракция Френеля – дифракция сферических волн (непараллельные, сходящиеся пучки).

2.3.7. Дифракция Фраунгофера – дифракция в параллельных пучках (источник и экран находятся в бесконечности).

2.3.8. Дифракция на одной щели (рис. 2.17).

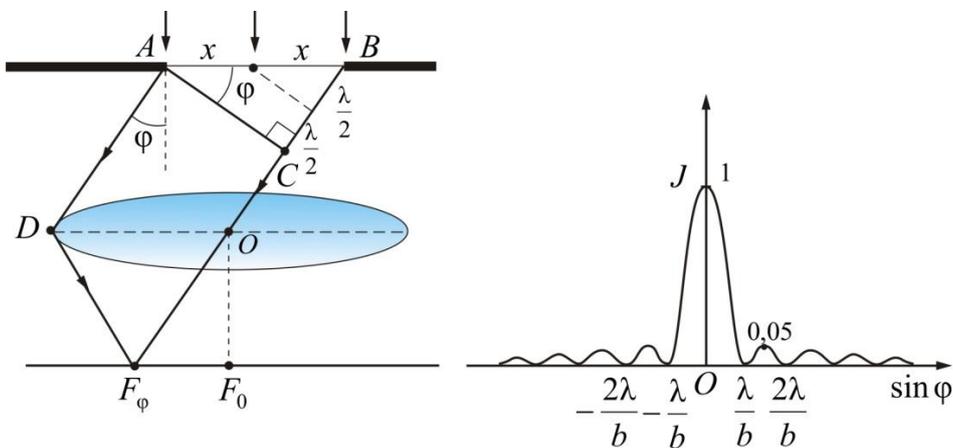


Рис. 2.17

- **Условия дифракционных максимумов от одной щели:**

$$a \sin \varphi = \pm (2m + 1) \frac{\lambda}{2}, \quad (m = 1, 2, 3, \dots).$$

- **Условие дифракционных минимумов от одной щели:**

$$a \sin \varphi = \pm m \frac{\lambda}{2}, \quad (m = 1, 2, 3, \dots).$$

- **Интенсивность света** при дифракции на одной щели

$$I_{\varphi} = I_0 \frac{\sin^2 \left(\pi \frac{b \sin \varphi}{\lambda} \right)}{\left(\pi \frac{b \sin \varphi}{\lambda} \right)^2},$$

где I_{φ} – интенсивность в точке, определяемой углом φ ; I_0 – интенсивность в центре дифракционной картины ($\varphi = 0$).

2.3.9. Дифракция на решетке (рис. 2.18).

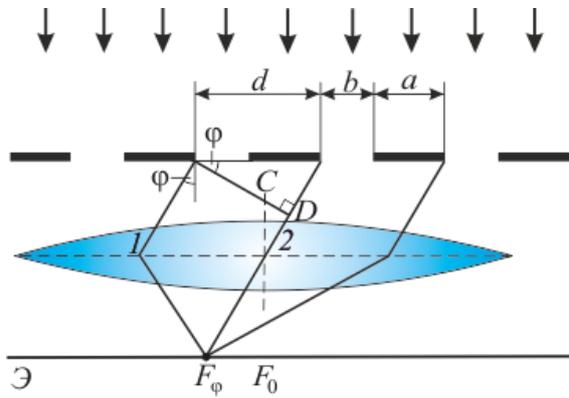


Рис. 2.18

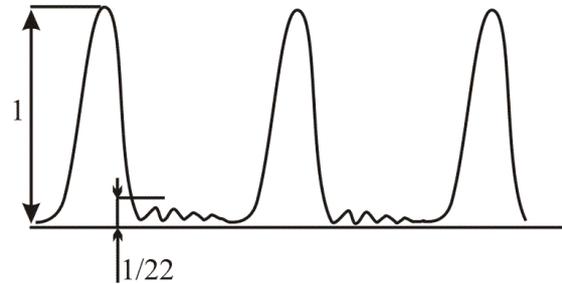


Рис. 2.19

- **Условие максимума** для дифракционной решетки (рис. 2.19):

$$d \sin \varphi = \pm m \lambda, \quad (m = \pm 1, \pm 2, \pm 3 \dots),$$

где φ – угол дифракции, d – период решетки.

- **Условие минимума** для дифракционной решетки:

$$b \sin \varphi = \pm m \lambda,$$

где N – число штрихов решетки.

2.3.10. Угловая дисперсия дифракционной решетки:

$$D_{\varphi} = \frac{\delta \varphi}{\delta \lambda} = \frac{m}{d \cos \varphi}.$$

2.3.11. Пространственной, или трехмерной, дифракционной решеткой называется такая оптически неоднородная среда, в которой неоднородности периодически повторяются при изменении всех трех пространственных координат.

2.3.12. Условие Вульфа – Брэггов – условие появления интерференционных максимумов рентгеновских лучей на кристаллах (рис. 2.20):

$$2d \sin \theta = m\lambda, \quad (m=1, 2, 3, \dots),$$

где d – расстояние между атомными плоскостями кристалла;
 θ – угол скольжения.

2.3.13. Условия оптической однородности кристалла:

$$\lambda \geq 2d.$$

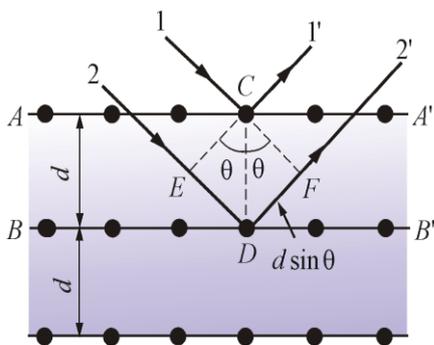


Рис. 2.20

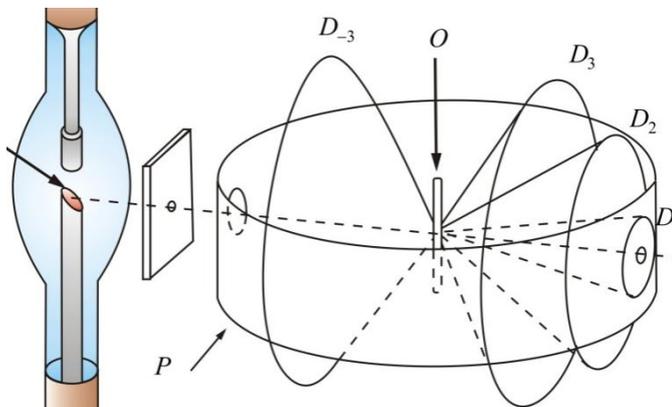


Рис. 2.21

2.3.14. Рентгеноструктурный анализ Дебая – Шеррера – с помощью рентгеновских лучей определяется ориентация атомных плоскостей кристаллов в пространстве и дефекты кристаллической решетки (рис. 2.21).

2.4. Взаимодействие света с веществом

При взаимодействии света с веществом возникают такие явления, как дисперсия, поглощение света, рассеивание света и т.д.

2.4.1. Дисперсия вещества – это зависимость показателя преломления вещества от частоты ν (длины волн λ) света или зависимость фазовой скорости световых волн от их частоты (рис. 2.22):

$$D = \frac{dn}{d\nu} \quad \text{или} \quad D = \frac{dn}{d\lambda}.$$

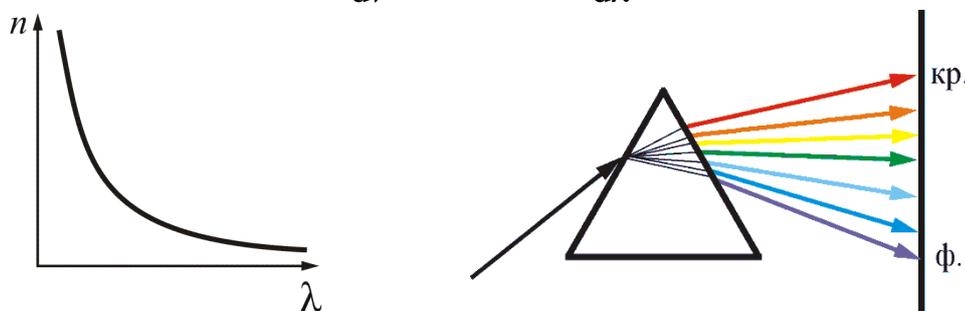


Рис. 2.22

2.4.2. Зависимость угла отклонения лучей призмой φ от преломляющего угла A призмы и показателя преломления n (рис. 2.23):

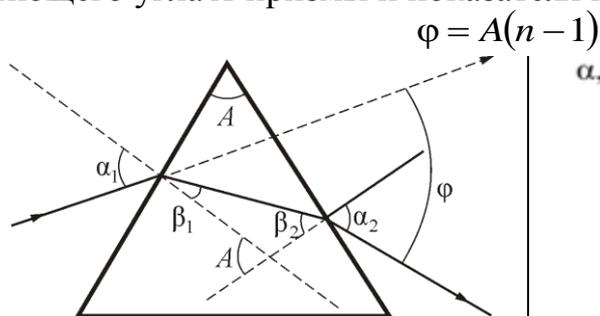


Рис. 2.23

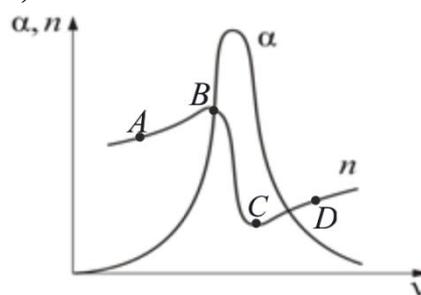


Рис. 2.24

2.4.3. Нормальная дисперсия – с ростом частоты ν показатель преломления n увеличивается (рис. 2.24):

$$\frac{dn}{d\nu} > 0 \quad \text{или} \quad \frac{dn}{d\lambda} < 0.$$

2.4.4. Аномальная дисперсия – с ростом частоты ν показатель преломления n уменьшается:

$$\frac{dn}{d\nu} < 0 \quad \text{или} \quad \frac{dn}{d\lambda} > 0.$$

2.4.5. Поглощение света (абсорбция света) – это явление потери энергии световой волной, проходящей через вещество.

2.4.6. Закон ослабления света в веществе (закон Бугера):

$$J(x) = J_0 \exp(-ax),$$

где J_0 – интенсивность световой волны на входе в среду; a – коэффициент поглощения.

2.4.7. Зависимость коэффициента поглощения α от частоты света ν и зависимость показателя преломления n от ν в области полосы поглощения (рис. 2.13).

2.4.8. Эффект Вавилова-Черенкова – это излучение электрически заряженной частицы, движущейся в среде с групповой скоростью и превышающей фазовую скорость света в этой среде (рис. 2.25):

$$\frac{c}{n} < v < c,$$

где θ – угол между направлением распространения излучения и вектором скорости частицы; n – показатель преломления среды.

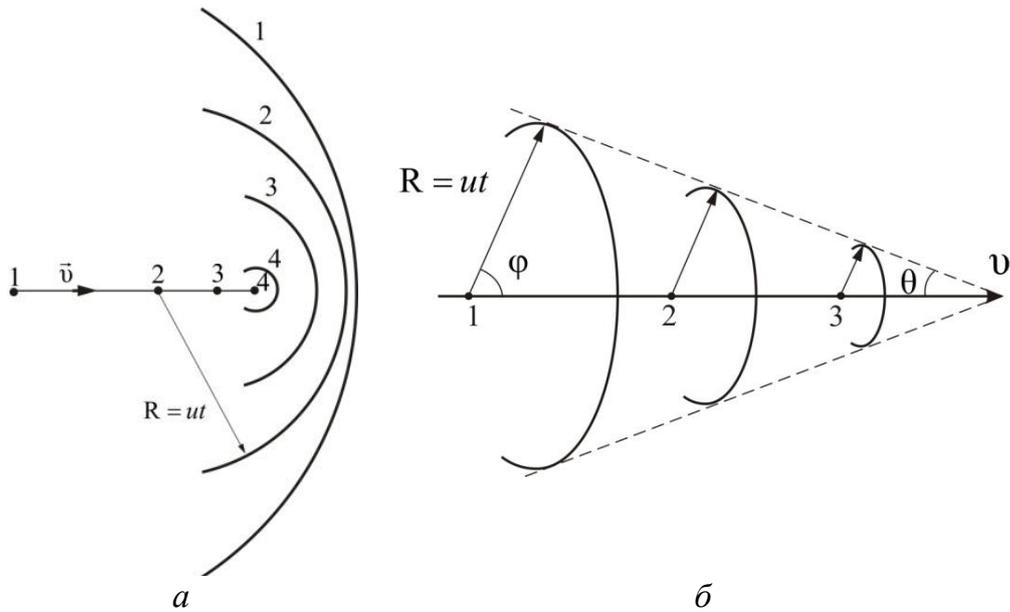


Рис. 2.25

Если частица движется быстрее, чем распространяются волны в среде ($v > u$), то соответствующие элементарным волнам сферы пересекаются и их общая огибающая (волновая поверхность) представляет собой конус с вершиной в точке, совпадающей с мгновенным положением движущейся частицы (рис.5.5.1). В данном случае, в результате интерференции элементарные волны усиливают друг друга. Угол φ , который составляет волновой вектор с направлением движения частицы, удовлетворяет соотношению: $\cos\varphi = \frac{u}{v} = \frac{c}{nv}$.

2.5. Поляризация света

Поляризация – это явление направленного колебания векторов напряженности электрического поля E или напряженности магнитного поля H .

На рис. 5.64 показан *а* – **неполяризованный** (естественный) свет, *б* – **частично поляризованный** свет и *в* – **полностью поляризованный** свет.

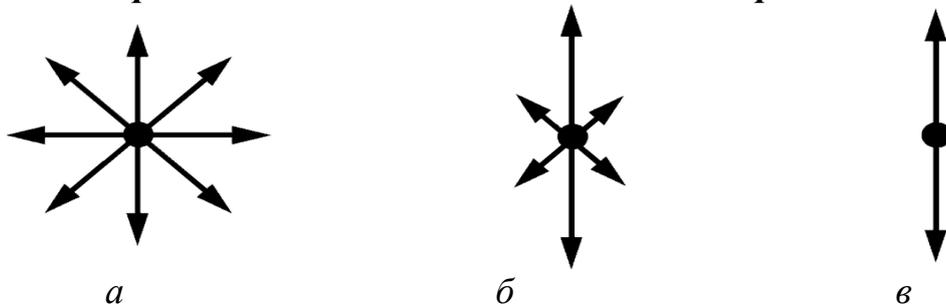


Рис. 2.26

Когерентное электромагнитное излучение может иметь:

- **линейную** поляризацию – в направлении, перпендикулярном направлению распространения волны (рис. 2.26);
- **круговую** поляризацию – правую либо левую, в зависимости от направления вращения вектора индукции;
- **эллиптическую** поляризацию – случай, промежуточный между круговой и линейными поляризациями (рис. 2.27)

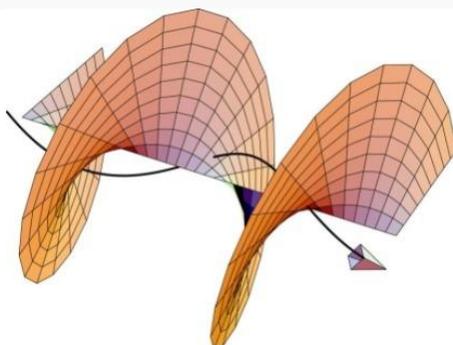


Рис. 2.27

2.5.1. Степень поляризации (формула Френеля):

$$P = \frac{J_{\max} - J_{\min}}{J_{\max} + J_{\min}},$$

где J_{\max} и J_{\min} — соответственно максимальная и минимальная интенсивности частично поляризованного света, пропускаемого анализатором (рис. 2.28).

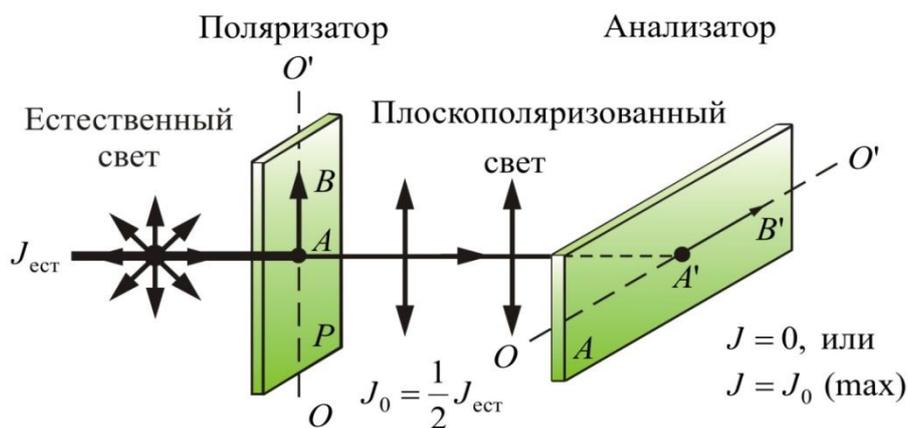


Рис. 2.28

2.5.2. Двойное лучепреломление – явление раздвоения светового луча при прохождении через анизотропный кристалл. Один из них подчиняется закону преломления Снелиуса – **обыкновенный луч** o , а дру-

гой не подчиняется – **необыкновенный** e . Причем, эти лучи полностью поляризованы во взаимно перпендикулярных направлениях (рис. 2.29).

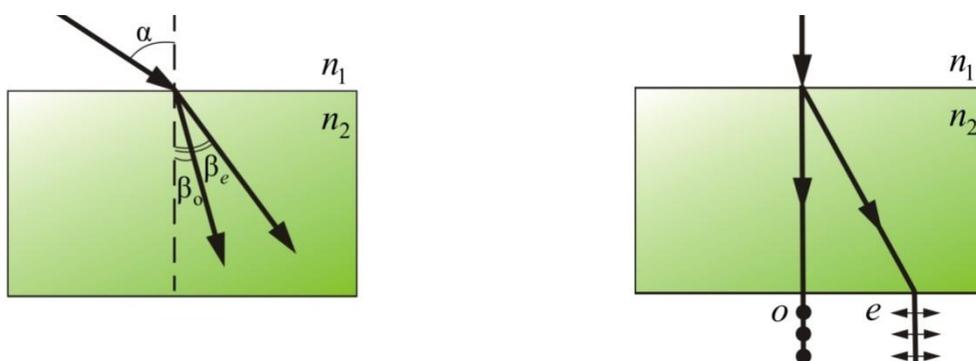


Рис. 2.29

2.5.3. Закон Малюса – закон, согласно которому интенсивность световой волны, прошедшей анализатор, пропорциональна квадрату косинуса угла между плоскостью поляризации световой волны и плоскостью пропускания анализатора (рис. 2.30):

$$J = \frac{1}{2} J_0 \cos^2 \alpha,$$

где J – интенсивность плоскополяризованного света, прошедшего через анализатор; J_0 – интенсивность плоскополяризованного света, падающего на анализатор; α – угол между главными плоскостями поляризатора и анализатора.

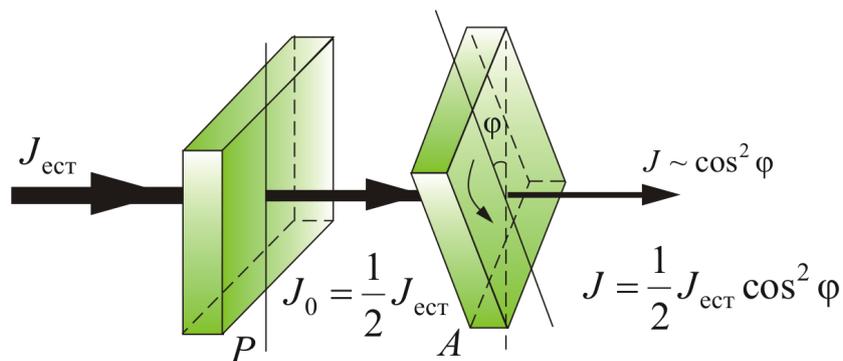


Рис. 2.30

2.5.4. Искусственная анизотропия – возникает при воздействии на изотропное тело *упругими деформациями* (рис. 2.31). Мерой возникающей при этом оптической анизотропии служит разность показателей преломления обыкновенного и необыкновенного лучей:

$$n_o - n_e = k\sigma,$$

где k – коэффициент пропорциональности, зависящий от свойств вещества, $\sigma = dF/dS$ – напряжение в данной точке тела.

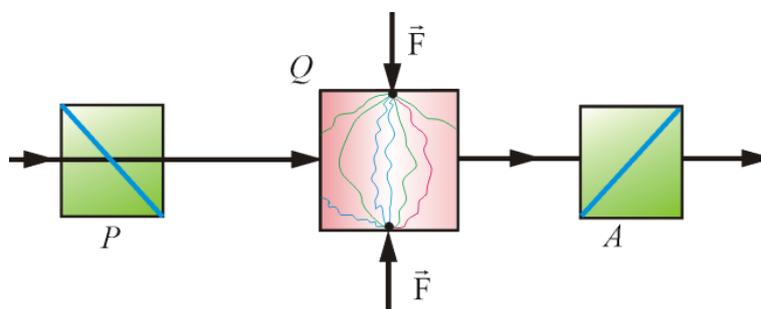


Рис. 2.31

2.5.5. Эффект Керра – явление искусственной анизотропии в изотропных средах под воздействием электрического поля (рис. 2.32):

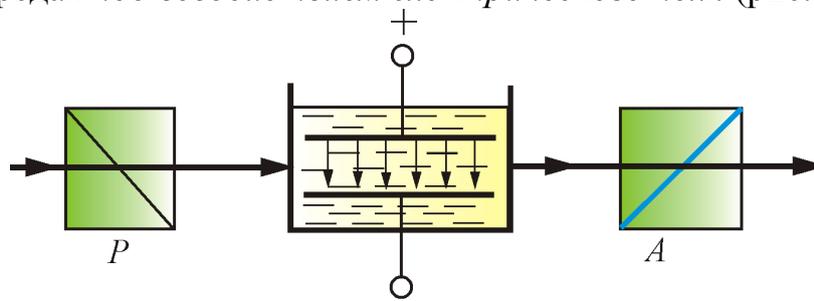


Рис. 2.32

2.5.6. Закон Керра: величина двойного лучепреломления прямо пропорциональна напряженности электрического поля:

$$\Delta n = nkE^2,$$

где n – показатель преломления вещества в отсутствие поля.

2.5.7. Оптическая разность хода в эффекте Керра:

$$\Delta l(n_o + n_e) = k_2 l E^2,$$

где n_o , n_e – показатели преломления соответственно обыкновенного и необыкновенного лучей в направлении, перпендикулярном оптической оси; E – напряженность электрического поля.

2.5.8. Угол поворота плоскости поляризации:

- для оптически активных кристаллов и чистых жидкостей:

$$\varphi = \alpha d;$$

- для оптически активных растворов:

$$\varphi = [\alpha] C d,$$

где d – длина пути, пройденного светом в оптически активном веществе; α_0 и $[\alpha]$ – удельное вращение; C – массовая концентрация оптически активного вещества в растворе.

3. КВАНТОВАЯ ОПТИКА.

3.1. Квантовая природа излучения

Тепловое излучение – практически единственный вид излучения, который может быть равновесным. Предположим, что нагретое (излучающее) тело помещено в полость, ограниченную идеально отражающей оболочкой. С течением времени, в результате непрерывного обмена энергией между телом и излучением, наступит равновесие, т. е. тело в единицу времени будет поглощать столько же энергии, сколько и излучать.

Допустим, что равновесие между телом и излучением по какой-либо причине нарушено и тело излучает энергии больше, чем поглощает. Если в единицу времени тело больше излучает, чем поглощает (или наоборот), то температура тела начнет понижаться (или повышаться). В результате будет ослабляться (или возрастать) количество излучаемой телом энергии, пока, наконец, не установится равновесие. Все другие виды излучения неравновесны.

3.1.1. Тепловое излучение – электромагнитное излучение, испускаемое веществом, возникающее за счет его внутренней энергии – единственный вид излучения, которое может находиться в равновесии с излучающими телами.

3.1.2. Люминесценция – виды свечения (излучения света), возбуждаемые за счет любого другого вида энергии, кроме теплового.

3.1.3. Излучательность тела – поток энергии (любых частот), испускаемый единицей поверхности излучающего тела в единицу времени во всех направлениях (в пределах телесного угла 4π). $[R] = \text{Вт/м}^2$.

$$R = \int_0^{\infty} r_{\nu, T} d\nu,$$

где $r_{\nu, T}$ – *спектральная плотность излучательности*, или *излучательная способность тела*.

3.1.4. Поглощательная способность тела – отношение поглощенного потока лучистой энергии $d\Phi'_\nu$ к падающему $d\Phi_\nu$:

$$\alpha_{\nu, T} = \frac{d\Phi'_\nu}{d\Phi_\nu}.$$

3.1.5. Абсолютно черное тело – тело, полностью поглощающее излучение всех частот (рис.3.1). Поглощательная способность а.ч.т. (рис.3.2, кривая 1)

$$\alpha_{\nu, T} = 1.$$

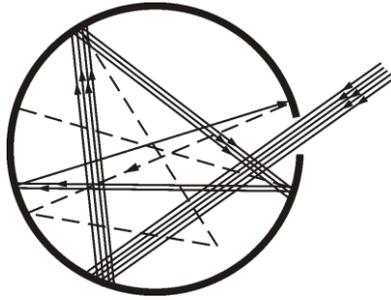


Рис. 3.1

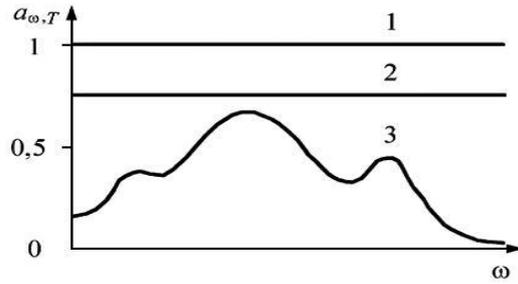


Рис. 3.2

3.1.6. Серое тело – тело, для которого $\alpha = \text{const}$ и меньше единицы для всех частот (рис.3.2, кривая 2). Спектр излучения реальных тел показан на рис.3.2, кривая 3.

3.1.7. Закон Стефана – Больцмана – закон излучения абсолютно чёрного тела, определяющий зависимость между энергетической светимостью тела и его температурой:

$$R = \sigma T^4,$$

где $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^{-4}$ – постоянная Стефана – Больцмана; T – термодинамическая температура.

3.1.8. Энергетическая светимость серого тела:

$$R_{\text{сер}} = \alpha_{\nu, T} \sigma T^4.$$

3.1.9. Универсальная функция Кирхгофа – отношение излучательной способности тела к поглощательной способности:

$$f(\nu, T) = \frac{r_{\nu, T}}{\alpha_{\nu, T}}.$$

Эта функция является для всех тел одной и той же (универсальной) функцией частоты и температуры и имеет абсолютный характер.

Для а.ч.т. универсальная функция Кирхгофа есть излучательная способность абсолютно черного тела $f(\nu, T) = r_{\nu, T}$.

3.1.10. Закон смещения Вина – закон, определяющий положение максимума в распределении энергии в спектре излучения абсолютно черного тела в зависимости от его температуры (рис.3.3):

$$\frac{\nu_{\text{max}}}{T} = \text{const} \quad \text{или} \quad \lambda_{\text{max}} = \frac{b}{T},$$

где ν_{max} и λ_{max} – частота и длина волны соответствующие максимальному значению спектральной плотности энергетической светимости абсолютно черного тела; $b = 2,9 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К}$ – постоянная Вина.

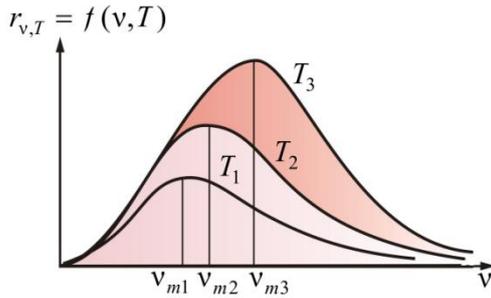


Рис. 3.3



Рис. 3.4

Как видно из рис.3.4, закон Вина дает хорошее согласие с опытом в коротковолновой части спектра и не годится для длинноволновой.

3.1.11. Формула Рэля – Джинса – формула для излучательной способности черного тела

$$r_{v,T} = \frac{2\pi v^2}{c^2} kT.$$

Как видно из рис. 3.4 формула Рэля – Джинса справедлива только в области малых частот и не согласуется с законом Вина на высоких частотах.

3.1.12. Ультрафиолетовая катастрофа – физический термин, описывающий парадокс классической физики, состоящий в том, что полная мощность теплового излучения любого нагретого тела должна быть бесконечной. Название парадокс получил из-за того, что по расчетам Рэля – Джинса спектральная плотность мощности излучения должна была неограниченно расти по мере сокращения длины волны (рис. 3.4):

$$R = \int_0^{\infty} r_{\omega,T} d\omega \approx \int_0^{\infty} \omega^2 d\omega \rightarrow \infty.$$

3.1.13. Формула Планка – формула, описывающая излучательную способность абсолютно чёрного тела и точно согласующаяся с экспериментом:

$$r_{v,T} = \frac{2\pi v^2}{c^2} \frac{hv}{\exp\left(\frac{hv}{kT}\right) - 1} \quad \text{или} \quad r_{\lambda,T} = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{\exp\left(\frac{hc}{kT\lambda}\right) - 1}.$$

3.2. Квантовые явления в оптике

Квантовой оптикой называют раздел оптики, занимающийся изучением явлений, в которых проявляются квантовые свойства света. К таким явлениям относятся: тепловое излучение, фотоэффект, эффект

Комптона, эффект Рамана, фотохимические процессы, вынужденное излучение (и, соответственно, физика лазеров) и др.

Квантовая оптика является более общей теорией, чем классическая оптика. Основная проблема, затрагиваемая квантовой оптикой – описание взаимодействия света с веществом с учётом квантовой природы объектов, а также описания распространения света в специфических условиях. Для того чтобы точно решить эти задачи требуется описывать и вещество (среду распространения, включая вакуум) и свет исключительно с квантовых позиций, однако часто прибегают к упрощениям: одну из компонент системы (свет или вещество) описывают как классический объект. Например, часто при расчётах связанных с лазерными средами квантуют только состояние активной среды, а резонатор считают классическим, однако если длина резонатора будет порядка длины волны, то его уже нельзя считать классическим, и поведение атома в возбуждённом состоянии помещённого в такой резонатор будет гораздо более сложным.

3.2.1. Гипотеза Планка: излучение испускается и поглощается веществом не непрерывно, а конечными порциями энергии, которые Планк назвал квантами энергии. Величина кванта энергии зависит от частоты излучения и определяется формулой

$$E = h\nu = \hbar\omega,$$

где $h = 2\pi\hbar$ – фундаментальная физическая константа, которую называют постоянной Планка.

3.2.2. Фотон – частица, не обладающая массой покоя. Фотон может существовать, только двигаясь со скоростью света $c = 3 \cdot 10^8$ м/с.

3.2.3. Энергия фотона: $E = h\nu = h\left(\frac{c}{\lambda}\right);$

- для видимого света (длина волны $\lambda = 0,5$ мкм) энергия $E = 2,2$ эВ;
- для рентгеновских лучей $\lambda = 10^{-6}$ мкм, $E = 0,5$ эВ.

3.2.4. Масса фотона:

$$m_{\phi} = \frac{h\nu}{c^2} = \frac{h}{c\lambda}.$$

3.2.5. Импульс фотона:

$$\vec{p} = \hbar\vec{k}; \quad p = \frac{E}{c} = \frac{h\nu}{c} = \frac{2\pi\hbar}{\lambda},$$

где $k = \frac{\omega}{c}$ – волновое число.

3.2.6. Связь между энергией и импульсом фотона:

$$E = c\sqrt{p^2 + m_0^2 c^2}.$$

3.2.7. Внешний фотоэффект (фотоэлектронной эмиссией) называется испускание электронов веществом под действием электромагнитных излучений (рис.3.5, 3.7).

3.2.8. Внутренний фотоэффект – это вызванные электромагнитным излучением переходы электронов внутри полупроводника или диэлектрика без вылета наружу.

3.2.9. Вентильный фотоэффект является разновидностью внутреннего фотоэффекта, – это возникновение ЭДС (фото ЭДС) при освещении контакта двух разных полупроводников или полупроводника и металла (при отсутствии внешнего электрического поля).

3.2.10. Многофотонный фотоэффект возможен, если интенсивность света очень большая (например, при использовании лазерных пучков). При этом электрон, испускаемый металлом, может одновременно получить энергию не от одного, а от нескольких фотонов.

3.2.11. Законы внешнего фотоэффекта:

- Количество электронов, вырываемых светом с поверхности металла за 1 с, прямо пропорционально интенсивности света и не зависит от частоты.
- Максимальная кинетическая энергия вырываемых светом электронов линейно возрастает с частотой света и не зависит от его интенсивности (рис. 3.6).
- Для каждого вещества существует *красная граница фотоэффекта*, т.е. минимальная частота $\nu_{кр}$ света (зависящая от химической природы вещества и состояния его поверхности), ниже которой фотоэффект невозможен.

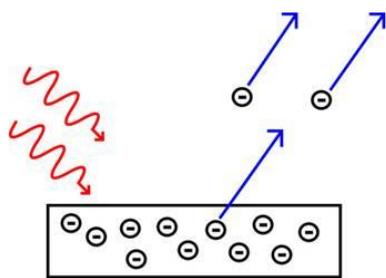


Рис. 3.5

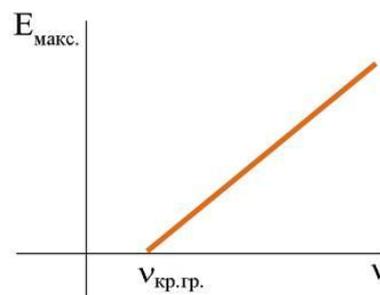


Рис. 3.6

3.2.12. «Красная граница» фотоэффекта – это наименьшая частота излучения, при которой еще возможен внешний фотоэффект (рис. 3.6):

- минимальная частота излучения: $\nu_{кр} = \frac{A}{h}$;

- максимальная длина волны излучения: $\lambda_{\text{кр}} = \frac{hc}{A}$.

3.2.13. Вольт – амперная характеристика (ВАХ) фотоэффекта – зависимость фототока I , образуемого потоком электронов, от напряжения, – приведена на рис.3.7.

3.2.14. Фототок насыщения – максимальный ток, при котором все электроны, испускаемые катодом, достигают анода (рис.3.8):

$$I_{\text{нас}} = en,$$

где n – число электронов, испускаемых катодом в одну секунду $n = N/t$.

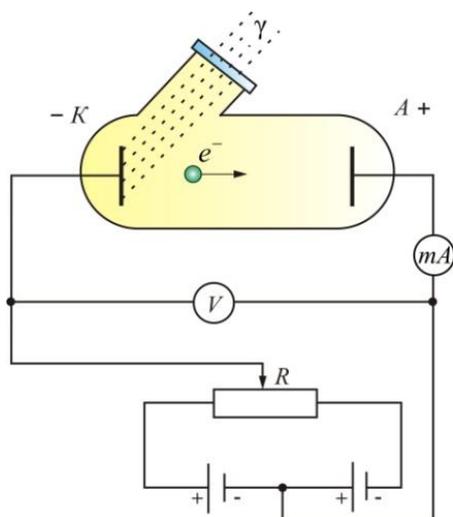


Рис. 3.7

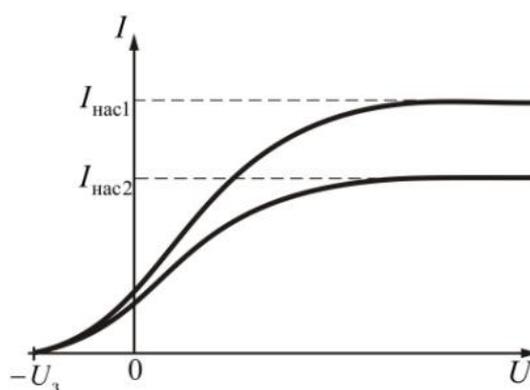


Рис. 3.8

3.2.15. Уравнение Эйнштейна для внешнего фотоэффекта (закон сохранения энергии в фотоэффекте) – соотношение, которое выполняется при взаимодействии квантов света с металлами:

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

где $h\nu = \varepsilon$ – энергия фотона, падающего на поверхность металла; A – работа выхода электрона из металла; $mv^2/2$ – максимальная кинетическая энергия фотоэлектрона.

3.2.16. Эффект Комптона – рассеяние рентгеновского фотона на свободном электроны с увеличением длины волны рассеянного электромагнитного излучения (рис. 3.9):

$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = 2\lambda_c \sin^2 \frac{\varphi}{2}.$$

где λ и λ' – длины волн падающего и рассеянного излучений, φ – угол рассеяния (рис. 3.10).

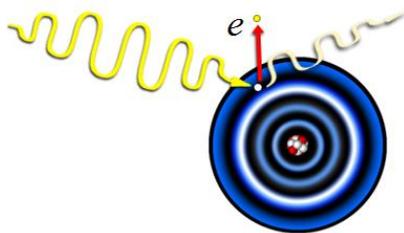


Рис. 3.9

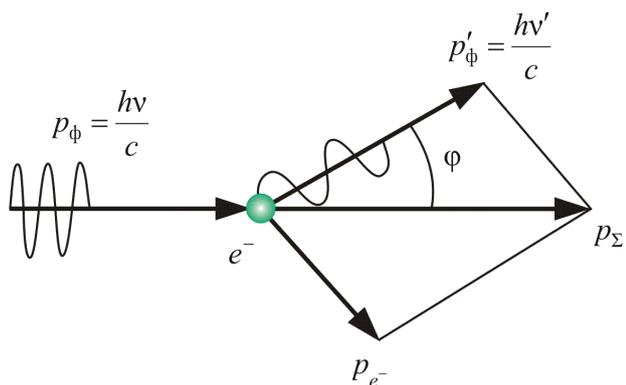


Рис. 3.10

3.2.17. Комптоновская длина волны – величина размерности длины, характерная для релятивистских квантовых процессов:

$$\lambda_c = \frac{h}{mc}.$$

3.2.18. Тормозное рентгеновское излучение возникает при бомбардировке твердых мишеней быстрыми электронами (рис. 3.11).

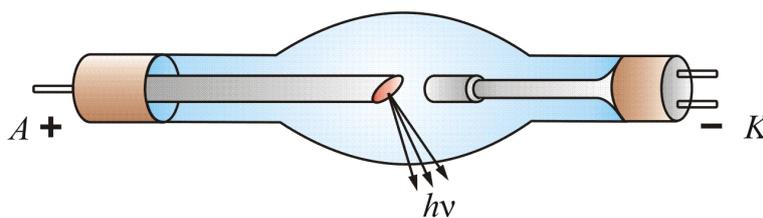


Рис. 3.11

3.2.19. Коротковолновая граница рентгеновского спектра – конечные значения λ_{\min} , при которых нулевые распределения мощности не идут к началу координат, а обрываются (рис.3.12):

$$\lambda_{\min} = \frac{c}{\nu_{\max}} = \frac{ch}{eU},$$

где U – ускоряющее напряжение.

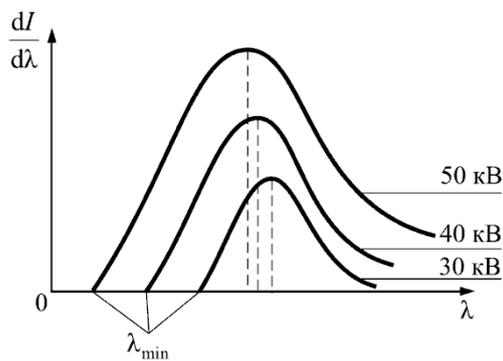


Рис. 3.12

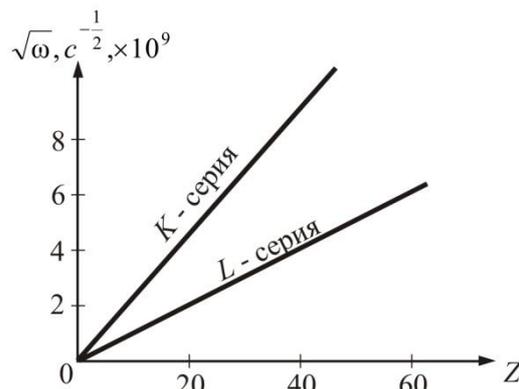


Рис. 3.13

3.2.20. Закон Мозли – закон, связывающий частоту спектральных линий характеристического рентгеновского излучения химического элемента с его порядковым номером Z :

$$\nu = R(Z - \sigma)^2 \left(\frac{1}{k^2} - \frac{1}{n^2} \right),$$

где $k = 3, 4, 5 \dots$; $n = k + 1, k + 2 \dots$; $R = 3,29 \cdot 10^{15} \text{ c}^{-1}$ – постоянная Ридберга, σ – постоянная, учитывающая экранирующую роль окружающих ядро электронов.

Чем дальше электрон от ядра, тем σ больше. На рис. 3.13 показана графическая зависимость закона (переходы электронов на внутренние энергетические уровни): *K-серия* – переход на первый уровень; *L-серия* – переход на второй уровень.

3.3. Волновые свойства микрочастиц вещества

В 1923 году произошло примечательное событие, которое в значительной степени ускорило развитие квантовой физики. Французский физик Л. де Бройль выдвинул гипотезу об **универсальности корпускулярно-волнового дуализма**. Де Бройль утверждал, что не только фотоны, но и электроны и любые другие частицы материи наряду с корпускулярными обладают также и волновыми свойствами.

Согласно де Бройлю, с каждым микрообъектом связаны, с одной стороны, **корпускулярные характеристики** – энергия E и импульс p , а с другой стороны, **волновые характеристики** – частота ν и длина волны λ .

3.3.1. Микрочастицы – это элементарные частицы (электроны, протоны, нейтроны и т.д.), а также сложные частицы, образованные из небольшого числа элементарных (пока неделимых) частиц (атомы, молекулы, ядра атомов).

3.3.2. Гипотеза де Бройля: дуализм не является особенностью только оптических явлений, а имеет универсальный характер. Частицы вещества также обладают волновыми свойствами (рис. 3.14, 3.15).

3.3.3. Длина волны де Бройля (рис. 3.15):

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv}.$$

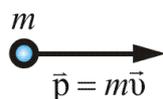


Рис. 3.14

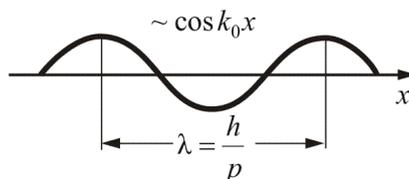


Рис. 3.15

3.3.4. Волновой вектор – вектор \vec{k} , направление которого совпадает с направлением распространения бегущей волны, численно равен волновому числу k :

$$\vec{k} = \frac{2\pi}{h} \vec{p}.$$

Волновой вектор монохроматической волны, связанной со свободно движущейся микрочастицей, пропорционален ее импульсу или обратно пропорционален длине волны.

3.3.5. Фазовая скорость волн де Бройля – скорость перемещения точки, обладающей постоянной фазой колебательного движения, в пространстве вдоль заданного направления:

$$v_{\text{фаз}} = \frac{\omega}{k} = \frac{c^2}{v}.$$

3.3.6. Групповая скорость волн де Бройля – это кинематическая характеристика диспергирующей волновой среды, обычно интерпретируемая, как скорость перемещения максимума амплитудной огибающей узкого квазимонохроматического волнового пакета:

$$u = \frac{d\omega}{dk}.$$

3.3.7. Связь длины волны с кинетической энергией:

$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{2mK}}.$$

3.3.8. Длина волны, соответствующая атому массой m :

$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{3mkT}}.$$

3.3.9. Дифракция частиц – рассеяние микрочастиц (электронов, нейтронов, атомов и т.п.) кристаллами или молекулами жидкостей и газов, при котором из начального пучка частиц данного типа возникают дополнительно отклонённые пучки этих частиц (рис. 3.16).

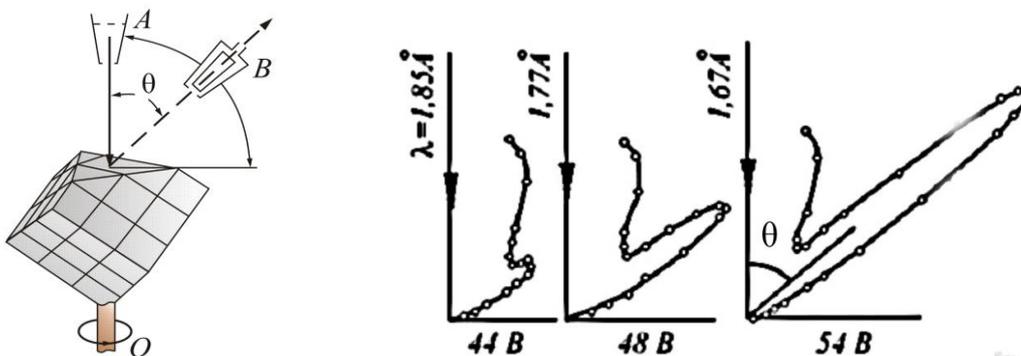


Рис. 3.16

3.4. Элементы квантовой механики

Слово «квант» происходит от латинского *quantum* («сколько, как много») и английского *quantum* («количество, порция, квант»). «Механикой» издавна принято называть науку о движении материи. Соответственно, термин «квантовая механика» означает науку о движении материи порциями (или, выражаясь современным научным языком науку о движении *квантующейся* материи). Термин «квант» ввел в обиход немецкий физик Макс Планк для описания взаимодействия света с атомами.

3.4.1. Соотношение неопределенностей Гейзенберга – произведение неопределенностей значений двух сопряженных переменных не может быть по порядку меньше постоянной Планка h :

$$\Delta x \Delta p \geq h.$$

Энергия и время являются канонически сопряженными величинами, поэтому:

$$\Delta E \Delta t \geq h.$$

3.4.2. Квадрат модуля волновой функции $\Psi(x, y, z, t)$ определяет плотность вероятности того, что в момент времени $t \geq 0$ частица может быть обнаружена в точке пространства $M = M(x, y, z)$ с координатами x, y и z :

$$\frac{dW}{dV} = |\Psi(x, y, z, t)|^2,$$

где $\Psi(x, y, z, t)$ – амплитуда вероятности; Ψ – волновая функция.

3.4.3. Вероятность нахождения частицы в момент времени t в конечном объеме V :

$$W = \int_V |\Psi|^2 dV,$$

где $|\Psi|^2 = \Psi\Psi'$, Ψ' – функция комплексно-сопряженная Ψ .

3.4.4. Условие нормировки вероятностей:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} |\Psi|^2 dV = 1.$$

Условие нормировки говорит об объективном существовании частицы во времени и пространстве.

3.4.5. Среднее расстояние электрона от ядра:

$$\langle r \rangle = \int_{-\infty}^{\infty} r |\Psi|^2 dV,$$

где r – расстояние электрона от ядра. Таким образом, волновая функция Ψ является основной характеристикой состояния микрообъектов.

3.4.6. Общее уравнение Шредингера – уравнение, связывающее пространственно-временное распределение с помощью представлений волновой функции:

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \Delta\Psi + U(x, y, z, t)\Psi = i\hbar \frac{\partial^2\Psi}{\partial t^2},$$

где m – масса частицы; i – мнимая единица;

$\Delta\Psi \equiv \nabla^2\Psi = \frac{\partial^2\Psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2\Psi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2\Psi}{\partial z^2}$ – оператор Лапласа; $U(x, y, z, t)$ – потен-

циальная энергия частицы в силовом поле, в котором она движется; Ψ – искомая волновая функция.

3.4.7. Уравнение Шредингера для стационарных состояний (здесь E – полная энергия частицы, остается постоянной):

$$\nabla^2\Psi + \frac{2m}{\hbar^2}(E - U)\Psi = 0 \quad \text{или} \quad \hat{H}\Psi = E\Psi.$$

3.4.8. Оператор Гамильтона (гамильтониан) – функция, зависящая от обобщённых координат, импульсов и, возможно, времени, описывающая динамику механической системы:

$$\hat{H} = -\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 + U.$$

3.5. Движение частицы в одномерной потенциальной яме

Свободная частица – частица, движущаяся в отсутствие внешних полей. Т.к. на свободную частицу силы не действуют, то полная энергия частицы совпадает с ее кинетической энергией.

В мире микрочастиц взаимодействие протона и нейтрона в ядре тяжелого водорода приближенно описывается прямоугольным потенциалом. Этот же потенциал – чрезвычайно грубое приближение к задаче о движении электрона в атоме. Существенным для всех примеров является ограничение движения некоторой областью значений x . Стенки "ящика" бесконечно круты и бесконечно высоки. Частица не может покинуть такую яму.

3.5.1. Уравнение Шредингера для свободной частицы, движущейся в отсутствии внешних полей:

$$\frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2} + \frac{2m}{\hbar^2} E \Psi = 0.$$

Т.к. на свободную частицу (пусть она движется вдоль оси x) силы не действуют, то потенциальная энергия частицы $U(x) = \text{const}$ и ее можно принять равной нулю. Тогда полная энергия частицы совпадает с ее кинетической энергией.

3.5.2. Энергия свободной частицы:

$$E = \frac{\hbar^2 k^2}{2m}.$$

3.5.3. Связь энергии с импульсом:

$$E = \frac{p^2}{2m}.$$

3.5.4. Плотность вероятности обнаружения частицы в данной точке пространства:

$$|\Psi|^2 = \Psi \Psi^* = |A|^2.$$

Все положения свободной частицы являются равновероятными.

3.5.5. Потенциальная энергия для прямоугольной ямы:

$$U_x = \begin{cases} \infty, & x < 0, \\ 0, & 0 \leq x \leq l, \\ \infty, & x > l, \end{cases}$$

где l – ширина ямы, а энергия отсчитывается от ее дна (рис.3.17).

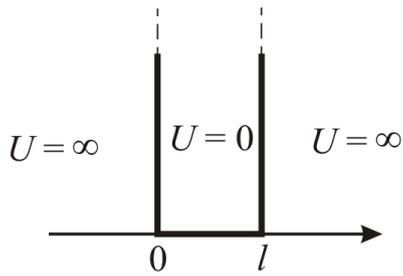


Рис. 3.17

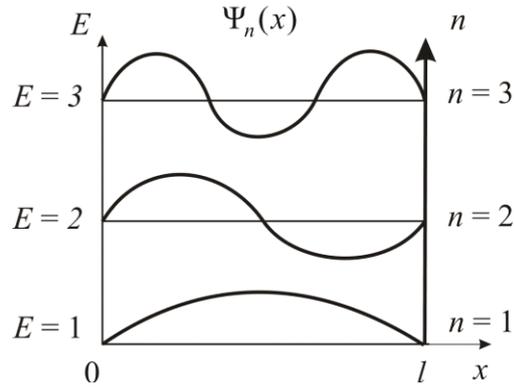


Рис. 3.18

3.5.6. Уравнение Шредингера для частицы в яме:

$$\frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2} + \frac{2m}{\hbar^2} E \Psi = 0 \quad \text{или} \quad \frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2} + k^2 \Psi = 0,$$

где $k = \frac{n\pi}{l}$ – волновое число.

Общее решение уравнения Шредингера: $\Psi(x) = A \sin kx$.

3.5.7. Энергия частицы в яме:

$$E_n = \frac{n^2 \pi^2 \hbar^2}{2ml^2}, \quad (n=1, 2, 3, \dots).$$

3.5.8. Собственные функции частицы в яме (рис.3.18):

$$\Psi_n(x) = \sqrt{\frac{2}{l}} \sin \frac{n\pi}{l} x.$$

3.5.9. Энергетический интервал между соседними уровнями:

$$\Delta E_n = E_{n+1} - E_n = \frac{\pi^2 \hbar^2}{ml^2} n^2.$$

3.5.10. Минимальная энергия частицы в яме:

$$E_{\min} = \frac{\Delta p^2}{2m} = \frac{\pi^2 \hbar^2}{2ml^2}.$$

3.5.11. Гармонический осциллятор – частица, совершающая одномерное движение под действием квазиупругой силы $F = kx$.

Потенциальная энергия частицы $U = \frac{kx^2}{2} = \frac{m\omega^2 x^2}{2}$, где $\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$.

3.5.12. Уравнение Шредингера для квантового осциллятора:

$$\frac{d^2 \Psi}{dx^2} + \frac{2m}{\hbar^2} \left(E - \frac{m\omega^2 x^2}{2} \right) \Psi = 0.$$

3.5.13. Энергия квантового осциллятора (рис.3.19):

$$E_n = \left(n + \frac{1}{2} \right) \hbar \omega,$$

где $n = 0, 1, 2, \dots$

На рис. 3.20 показаны квантовая и классическая вероятности основного состояния осциллятора.

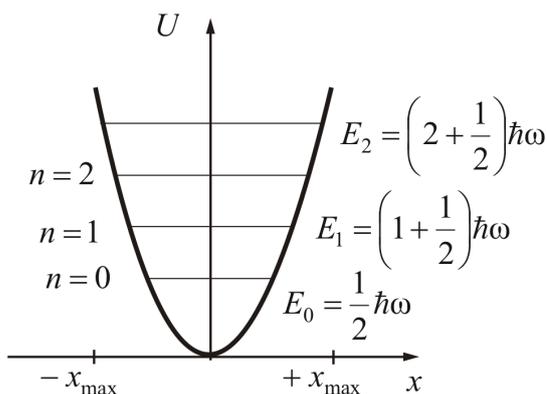


Рис. 3.19

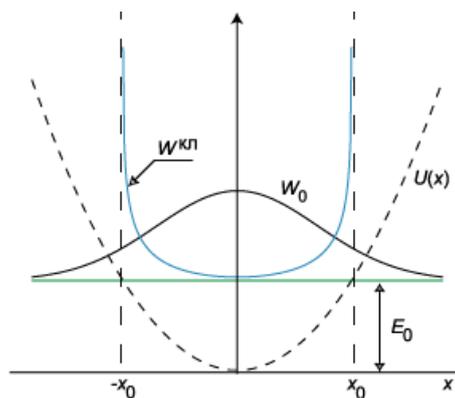


Рис. 3.20

3.5.14. Минимальная (нулевая) энергия квантового осциллятора:

$$E_0 = \frac{1}{2} \hbar \omega,$$

т.е. $T = 0$ колебания атомов K в кристаллической решетке не прекращаются.

3.5.15. Правило отбора – это условия, накладываемые на изменения квантовых чисел при переходах системы из одного состояния в другое:

$$\Delta n = \pm 1.$$

3.5.16. Туннельный эффект – специфический квантовый эффект, в результате которого микробиъект может пройти через барьер (рис. 3.21).

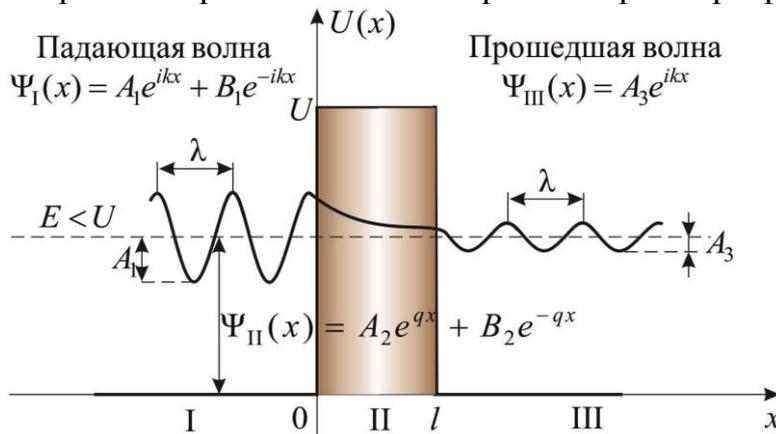


Рис. 3.21

3.5.17. Коэффициент прозрачности прямоугольного прозрачного барьера:

$$D = D_0 \exp\left(\frac{2l\sqrt{2m(U - E)}}{\hbar}\right).$$

4. ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

Физика конденсированного состояния – раздел физики, изучающий поведение сложных систем (то есть систем с большим числом степеней свободы) с сильной связью. Принципиальная особенность эволюции таких систем заключается в том, что её (эволюцию всей системы) не удастся «разделить» на эволюцию отдельных частиц. «Разбираться» приходится со всей системой в целом. Как результат, часто вместо движения отдельных частиц приходится рассматривать коллективные колебания. При квантовом описании, эти коллективные степени свободы становятся квазичастицами.

4.1.1. Молярная внутренняя энергия химически простых твердых тел в классической теории теплоемкости:

$$U_{\mu} = 3RT.$$

4.1.2. Теплоемкость C системы (тела) при постоянном объеме определяется как производная от внутренней энергии U по температуре:

$$C = \frac{dU}{dT}.$$

4.1.3. Закон Дюлонга и Пти – эмпирический закон, согласно которому молярная теплоёмкость твёрдых тел при комнатной температуре близка к $3R$:

$$C_{\mu} = 3R.$$

4.1.4. Закон Неймана – Коппа: молярная теплоемкость химически сложных тел (состоящих из различных атомов):

$$C_{\mu} = n3R,$$

где n – общее число частиц в химической формуле соединения.

4.1.5. Среднее значение энергии $\langle E \rangle$ квантового осциллятора, приходящейся на одну степень свободы, в квантовой теории Эйнштейна:

$$\langle E \rangle = E_0 + \frac{\hbar\omega}{\exp\left(\frac{\hbar\omega}{kT}\right) - 1},$$

где E_0 – нулевая энергия ($E_0 = 1/2\hbar\omega$); ω – круговая частота колебаний осциллятора.

4.1.6. Молярная внутренняя энергия кристалла в квантовой теории теплоемкости Эйнштейна определяется по формуле:

$$U_{\mu} = U_{\mu 0} + 3R \frac{\theta_E}{\exp(\theta_E / T) - 1},$$

где $U_{\mu_0} = 3/2R\theta_E$ – молярная нулевая энергия по Эйнштейну;
 $\theta_E = \hbar\omega/k$ – характеристическая температура Эйнштейна.

4.1.7. Молярная теплоемкость кристалла в квантовой теории теплоемкости Эйнштейна при низких температурах ($T \ll \theta_E$):

$$C_{\mu} = 3R \frac{\theta_E}{T} \exp\left(-\frac{\theta_E}{T}\right).$$

4.1.8. Частотный спектр колебаний в квантовой теории теплоемкости Дебая:

$$dZ = g(\omega)dv,$$

где $g(\omega)$ – функция распределения частот; dZ – число собственных частот тела, приходящихся на интервал частот от ω до $\omega + d\omega$, определяется выражением (для трехмерного кристалла, содержащего N атомов)

$$dZ = \frac{gN}{\omega_{\max}^3} \omega^2 d\omega,$$

где ω_{\max} – максимальная частота, ограничивающая спектр колебаний.

4.1.9. Энергия U твердого тела связана со средней энергией $\langle E \rangle$ квантового осциллятора и функцией распределения частот $g(\omega)$ соотношением:

$$U = \int_0^{\omega_{\max}} \langle E \rangle g(\omega) d\omega.$$

4.1.10. Молярная внутренняя энергия кристалла по Дебаю:

$$U_{\mu} = U_{\mu_0} + 3RT \cdot 3 \left(\frac{T}{\theta_D} \right)^3 \int_0^{\theta_D/T} \frac{x^3}{\exp(x)-1} dx,$$

где $U_{\mu_0} = 9/8R\theta_D$ – молярная нулевая энергия кристалла по Дебаю;

$\theta_D = \hbar\omega_{\max}$ – характеристическая температура Дебая.

4.1.11. Молярная теплоемкость кристалла по Дебаю, при низких температурах ($T \ll \theta_D$):

$$C_{\mu} = \frac{12\pi^3}{5} R \left(\frac{T}{\theta_D} \right)^3.$$

4.1.12. Теплоемкость электронного газа – количество теплоты, которую необходимо передать электронному газу для того, чтобы повысить его температуру на 1 К. Она намного меньше по величине при высоких температурах, чем теплоёмкость кристаллической решётки:

$$C_{\mu_3} = \frac{\pi^2}{2} ZR \frac{T}{\theta_F},$$

где $\theta_F = \frac{E_F}{k}$ – характеристическая температура Ферми.

4.1.13. Энергия фонона E (фонон – квазичастица, являющаяся квантом поля колебаний кристаллической решетки):

$$E = k\theta_D.$$

4.1.14. Квазиимпульс фонона:

$$p = 2\pi\hbar/\lambda.$$

4.1.15. Скорость фонона – групповая скоростью звуковых волн в кристалле:

$$u = \frac{dE}{dp}.$$

- Скорость фонона при малых значениях энергии фонона, когда дисперсией волн можно пренебречь совпадает с групповой скоростью:

$$u = v = E/p.$$

- Скорости продольных (v_l) и поперечных (v_τ) волн в кристалле:

$$v_l = \sqrt{E/\rho} \quad \text{и} \quad v_\tau = \sqrt{G/\rho},$$

где E и G – модули соответственно продольной и поперечной упругости.

4.1.16. Усредненное значение скорости звука v связано с v_l и v_τ соотношением:

$$\frac{3}{v^3} = \frac{2}{v_\tau^3} + \frac{1}{v_l^3}.$$

4.1.17. Распределение Ферми – Дирака по энергиям для свободных электронов в металле:

$$f(E_D) = \frac{1}{\exp\left(\frac{E_i - E_F}{kT}\right) + 1},$$

где E_i – энергия электронов; E_F – уровень (или энергия) Ферми.

4.1.18. Распределение Бозе – Эйнштейна – формула, описывающая распределение по энергетическим уровням тождественных частиц с нулевым или целочисленным спином при условии, что взаимодействие частиц в системе слабо и им можно пренебречь:

$$f(E_E) = \frac{1}{\exp\left(\frac{E_i - E_F}{kT}\right) - 1}.$$

4.1.19. Уровень Ферми в металле при $T = 0$:

$$E_F = \frac{\hbar^2}{2m} (3\pi^2 n)^{\frac{2}{3}}.$$

4.1.20. Температура вырождения T – температура, ниже которой отчётливо проявляются квантовые свойства идеального газа, обусловленные тождественностью частиц:

$$T = \frac{2\pi\hbar^2}{km} n^{\frac{2}{3}}.$$

4.1.21. Удельное сопротивление собственных полупроводников:

$$\rho = \frac{1}{enb},$$

где n – концентрация носителей заряда (электронов и дырок); b – подвижность носителей заряда.

4.1.22. Удельная проводимость собственных полупроводников:

$$\gamma = en(b_n + b_p),$$

где b_n и b_p – подвижности электронов и дырок.

4.1.23. Зависимость электропроводности полупроводника от температуры:

$$\sigma = \sigma_0 \exp(-\Delta E / 2kT).$$

4.1.24. Напряжение U_H на гранях образца при эффекте Холла:

$$U_H = R_H B j h,$$

где R_H – постоянная Холла; B – индукция магнитного поля; h – ширина пластины; j – плотность тока.

4.1.25. Уровень Ферми в собственном полупроводнике:

$$E_F = \frac{\Delta E}{2}.$$

4.1.26. Удельная проводимость собственных полупроводников:

$$\gamma = \gamma_0 \exp\left(-\frac{\Delta E}{2kT}\right).$$

4.1.27. Правило Стокса для люминесцентного излучения – длина волны люминесценции больше длины волны возбуждающего люминесценцию света:

$$h\nu = h\nu_{\text{люм}} + \Delta E.$$

4.1.28. Молярный объем кристалла:

$$V_{\mu} = M / \rho.$$

4.1.29. Объем V элементарной ячейки в кристаллах (рис. 4.1, 4.2):

- при кубической сингонии: $V = a^3$;
- при гексагональной сингонии $V = \sqrt{3}a^2c/2$, где a и c – параметры решетки.
- для гексагональной решетки при теоретическом значении $c = \sqrt{8/3}a$:

$$V = \sqrt{2}a^3.$$

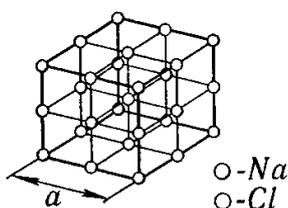


Рис. 4.1

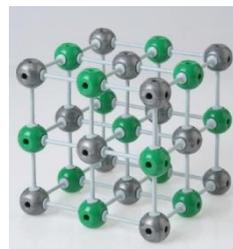


Рис. 4.2

4.1.30. Число элементарных ячеек в одном моле кристалла:

$$Z_{\mu} = V_{\mu} / V, \text{ или } Z_{\mu} = kN_A / n,$$

где k – число одинаковых атомов в химической формуле соединения;
 n – число одинаковых атомов, приходящихся на элементарную ячейку.

4.1.31. Число Z элементарных ячеек в единице объема кристалла:

$$Z = Z_{\mu} / V_{\mu},$$

- в общем случае:

$$Z = \rho \frac{k N_A}{n M};$$

- для кристалла, состоящего из одинаковых атомов ($k = 1$):

$$Z = \rho \frac{N_A}{nM}.$$

4.1.32. Параметр a кубической решетки:

$$a = \sqrt[3]{nM / (k\rho N_A)}.$$

4.1.33. Расстояние d между соседними атомами в кубической решетке:

- в гранецентричной: $d = a / \sqrt{2}$;
- в объемно-центрированной: $d = \sqrt{3}a / 2$.

5. АТОМНАЯ ФИЗИКА.

5.1. Модели атомов. Атом водорода по теории Бора

Развитие исследований радиоактивного излучения, с одной стороны, и квантовой теории – с другой, привели к созданию квантовой модели атома Резерфорда – Бора. Но созданию этой модели предшествовали попытки построить модель атома на основе представлений классической электродинамики и механики. В 1904 г. появились публикации о строении атома, принадлежащие одна японскому физику Х. Нагаока (1865–1950), другая – английскому физику Д. Д. Томсону.

5.1.1 Модели атомов, рассматриваемые в конце XX века Д. Д. Томпсоном, Х. Нагаока и Э. Резерфордом (рис. 5.1).

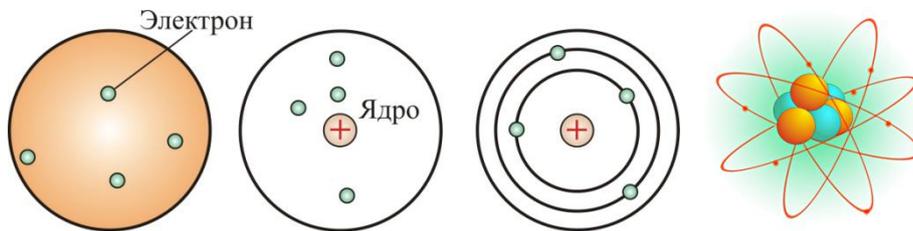


Рис. 5.1

5.1.2 Атом – сложная система, имеющая сложные атомные спектры (рис.5.3, 5.4).

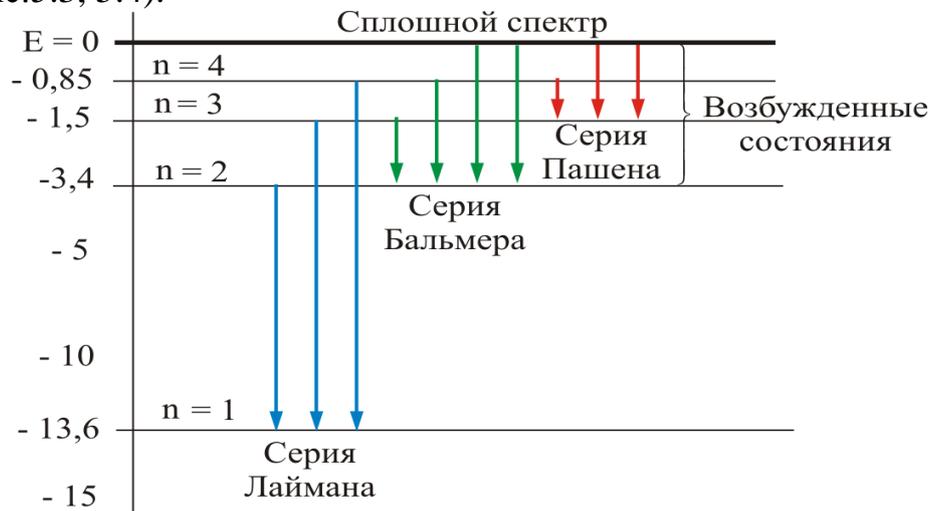


Рис. 5.2

5.1.3 Обобщенная формула Бальмера:

$$\nu = R \left(\frac{1}{k^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad \text{или} \quad \frac{1}{\lambda} = R' \left(\frac{1}{k^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad (k=1, 2, 3, \dots \quad m = k+1, k+2, k+3, \dots),$$

где ν – частота спектральных линий в спектре атома водорода; k определяет серию ($m=1, 2, 3, \dots$); n определяет отдельные линии соответ-

вующей серии ($n=k+1, k+2, \dots$), $R = \frac{m_e e^4}{8\epsilon_0^2 h^3} = 3,29 \cdot 10^{15} \text{ с}^{-1}$; $R' = 1,1 \cdot 10^7 \text{ м}^{-1}$

– постоянные Ридберга (рис. 5.1).

- Серия Лаймана $k = 1$.
- Серия Бальмера $k = 2$.
- Серия Пашена $k = 3$.
- Серия Брэкета $k = 4$.
- Серия Пфунда $k = 5$.
- Серия Хэмфри $k = 6$.

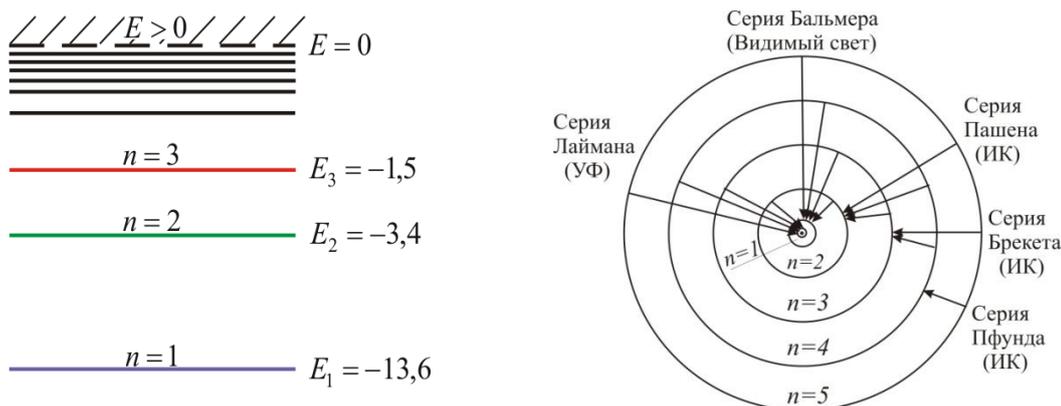


Рис. 5.3

5.1.4 Первый постулат Бора (правило квантования орбит или постулат стационарных состояний): электроны движутся только по определенным (разрешенным) орбитам. При этом, даже двигаясь с ускорением они не излучают энергию:

$$m_e v r = n \hbar,$$

где m_e – масса электрона; v – скорость электрона по n -й орбите радиусом r , $n = 1, 2, 3, \dots$ – главное квантовое число.

Боровский радиус – радиус первой орбиты водородоподобного атома (рис.3.17).

5.1.5 Второй постулат Бора (правило частот): излучение и поглощение энергии в виде кванта света ($h\nu$) происходит лишь при переходе электрона из одного стационарного состояния в другое. Величина светового кванта равна разности энергий тех стационарных состояний, между которыми совершается скачек электрона (рис.5.4):

$$h\nu = E_n - E_m.$$

где E_n и E_m – энергии электрона в двух стационарных состояниях, ν – частота фотона. При $E_m < E_n$ происходит излучение фотона, при $E_m > E_n$ – его поглощение.

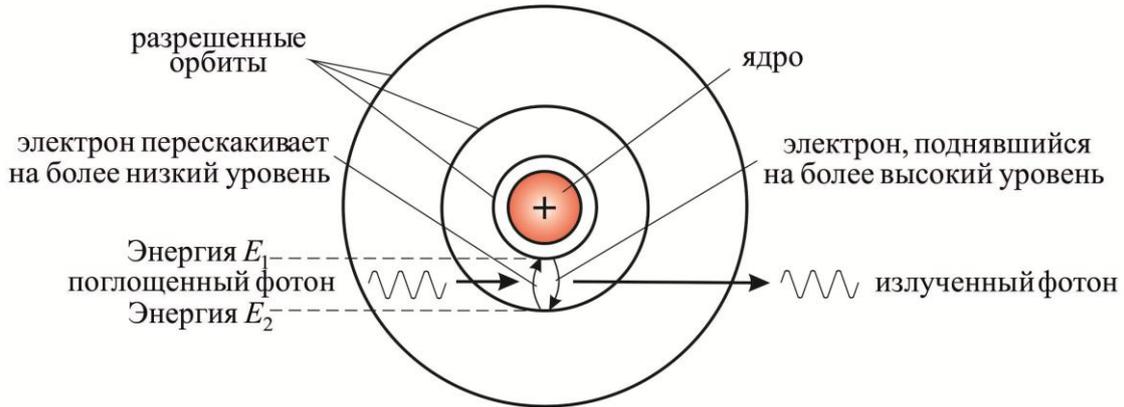


Рис. 5.4

5.1.6 Уравнение Шредингера для электрона в атоме водорода:

$$\Delta\Psi + \frac{2m}{\hbar} \left(E + \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r} \right) \Psi = 0.$$

5.1.7 Радиусы стационарных орбит (рис. 5.5, 5,6):

$$r_n = \frac{4\pi\epsilon_0 \hbar^2 n^2}{k_0 m_e Z e^2}, \quad (n=1, 2, 3, \dots).$$

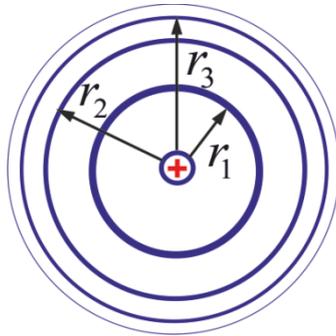


Рис. 5.5

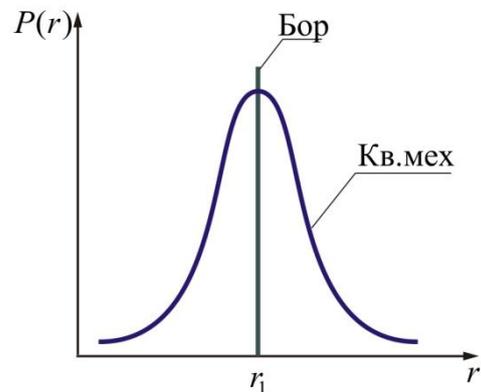


Рис. 5.6

5.1.8 Энергия электрона в водородоподобном атоме:

$$E_n = -\frac{1}{n^2} \frac{m_e Z^2 e^4}{8h^2 \epsilon_0^2}, \quad (n=1, 2, 3, \dots).$$

Энергетическое состояние, соответствующее значению $n=1$ называется основным или нормальным (невозбужденным) состоянием. Все состояния с $n > 1$ называются возбужденными.

5.1.9 Энергия испускаемого кванта:

$$h\nu = E_n - E_m = \frac{m_e e^4}{8h^2 \varepsilon_0^2} \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right).$$

5.1.10 Энергия ионизации атома водорода:

$$E_i = -E_1 = -\frac{m_e e^4}{8h^2 \varepsilon_0^2}.$$

5.2. Водородоподобные системы в квантовой механике

Атомные системы являются важнейшими объектами физики, для описания которых следует обязательно использовать законы квантовой механики. При этом существенно, что для такого описания квантовая механика не требует каких-либо дополнительных предположений, условий и постулатов, аналогичных постулатам в теории Бора.

5.2.1. Волновая функция положения электрона в атоме:

$$\Psi(r) = \sqrt{\frac{1}{\pi r_1^3}} \cdot e^{-\frac{r}{r_1}}.$$

Постоянная r_1 совпадает с радиусом первой боровской орбиты. Следовательно, электронное облако в основном состоянии водорода сферически-симметрично, как показано на рис.5.7.



Рис. 5.7

5.2.2. Потенциальная энергия взаимодействия электрона с ядром, обладающим зарядом Ze (для атома водорода $Z = 1$):

$$U(r) = -k_0 \frac{Ze^2}{r},$$

где r – расстояние между электроном и ядром. Графически функция $U(r)$ изображается на рис.5.8 жирной кривой. $U(r)$ с уменьшением r (при приближении электрона к ядру) неограниченно убывает.

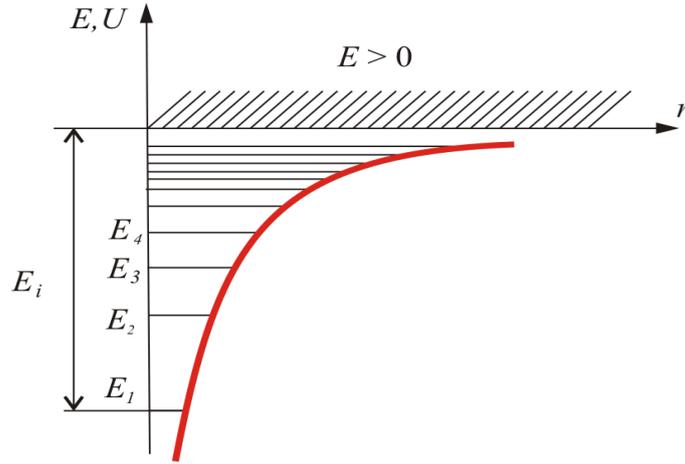


Рис. 5.8

5.2.3. Уравнение Шрёдингера описывает распространение волны вероятности нахождения частицы в заданной точке пространства.

5.2.4. Уравнение Шрёдингера для электрона в атоме:

$$\Delta\Psi + \frac{2m}{\hbar^2}(E - U)\Psi = 0,$$

где m – масса электрона; E – полная энергия электрона в атоме.

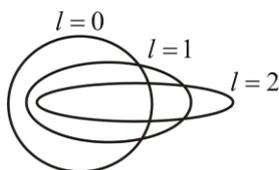
5.2.5. Квантовые числа, определяющие состояние электрона в атоме:

- **главное квантовое число** n определяет энергетический уровень E_n , который состоит из набора энергетических подуровней, характеризует расстояние электрона от ядра – радиус орбиты (рис. 5.9).

n	1	2	3	4
	K	L	M	N

Рис. 5.9

- **орбитальное квантовое число** $l = 0, 1, 2, \dots, n - 1$ характеризует эллиптичность орбиты электрона и определяет момент импульса электрона \vec{L} (рис. 5.10).



l	0	1	2	3
	s	p	d	f

Рис. 5.10

- **магнитное квантовое число** m ($m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm l$) учитывает пространственное квантование состояний атома во внешнем магнитном поле.
- **магнитное спиновое квантовое число** m_s ($m_s = \pm 1/2$) выражает ориентацию собственного момента импульса электрона (спина) относительно орбитального момента электрона.

5.2.6. Орбитальный момент импульса электрона \vec{L}_e и пропорциональный ему **магнитный момент** \vec{P}_m ориентированы перпендикулярно плоскости орбиты электрона и противоположно направлены (рис 5.11).

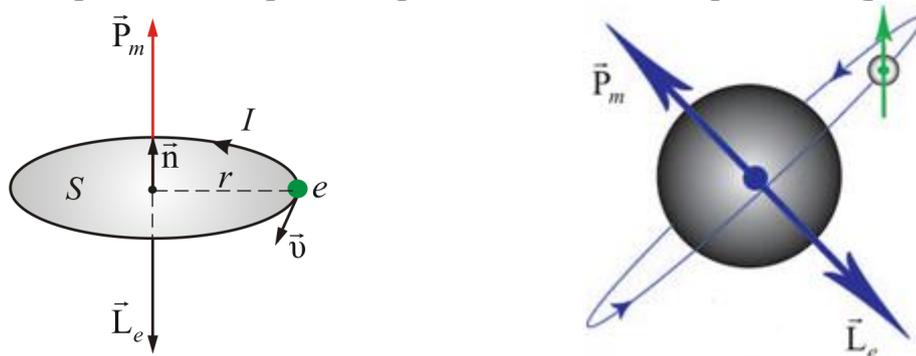


Рис. 5.11

- **Магнитный момент атома** связан с орбитальным моментом:

$$P_m = \frac{e}{2m_e} L_e = \frac{e\hbar}{2m_e} \sqrt{l(l+1)} = \mu_B \sqrt{l(l+1)}.$$

Магнетон Бора $\mu_B = \frac{e\hbar}{2m_e} = 9,27 \cdot 10^{-24} \text{ Дж} \cdot \text{Тл}^{-1}$ – единица элементарного магнитного момента, равная собственному (спиновому) магнитному моменту электрона.

Орбитальное гиромангнитное отношение $\gamma = \frac{e}{2m_e}$.

Орбитальное гиромангнитное отношение $\gamma = \frac{e}{2m_e}$.

- **Орбитальный момент импульса** также имеет квантовый характер:

$$L = \hbar \sqrt{l(l+1)}.$$

5.2.7. Квантование спина электрона:

$$L_s = \hbar \sqrt{s(s+1)},$$

где s – спиновое квантовое число.

Численное значение спина электрона $L_s = \pm \frac{\hbar}{2}$.

5.2.8. Спиновое гиромагнитное отношение:

$$\gamma_s = \frac{P_{msz}}{L_{sz}} = -\frac{e}{m_e},$$

где P_{msz} – проекция спинового магнитного момента на ось z .

5.2.9. Заполнение электронных состояний атома подчиняется двум принципам:

- **Принцип Паули** – фундаментальный закон природы, согласно которому в квантовой системе две или более тождественные частицы с полуцелым спином не могут одновременно находиться в одном и том же состоянии:

$$Z(n, l, m, m_s) = 0 \text{ или } 1.$$

- **Принцип минимума энергии**, согласно которому электрон занимает свободное состояние с наименьшей энергией.

5.2.10. Состояние электрона в атоме однозначно определяется набором *четырёх квантовых чисел*: n, l, m, m_s .

Максимальное число $Z_2(n, l, m_s)$ электронов, находящихся в состояниях, описываемых набором трех квантовых чисел n, l и m , и отличающихся только ориентацией спинов электронов равно:

$$Z_2(n, l, m) = 2.$$

Максимальное число $Z_3(n, l)$ электронов, находящихся в состояниях, определяемых двумя квантовыми числами n и l :

$$Z_3(n, l) = 2(2l + 1).$$

При этом вектор орбитального момента импульса электрона \vec{L}_e может принимать в пространстве $(2l + 1)$ различных ориентаций (рис. 5.9).

Максимальное число электронов, находящихся в состояниях, определяемых значением главного квантового числа n , равно:

$$Z(n) = \sum_{l=0}^{n-1} 2(2l + 1) = 2n^2.$$

5.2.11. Электронной оболочкой или **слоем** называется совокупность электронов в многоэлектронном атоме, имеющих одно и то же главное квантовое число n .

В каждой из оболочек электроны распределяются по **подоболочкам**, соответствующим данному l .

5.2.12. Подоболочкой или **орбиталью** называется область пространства, в которой высока вероятность обнаружить электрон.

5.2.13. Вид основных типов орбиталей показан на рис. 5.13.

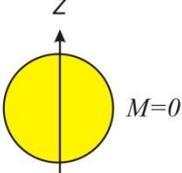
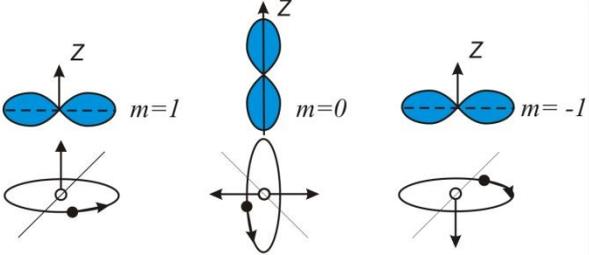
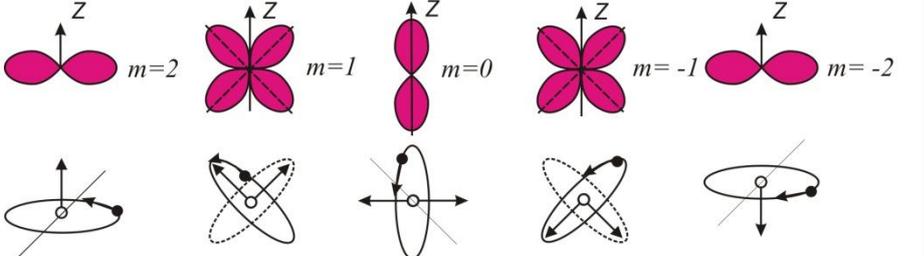
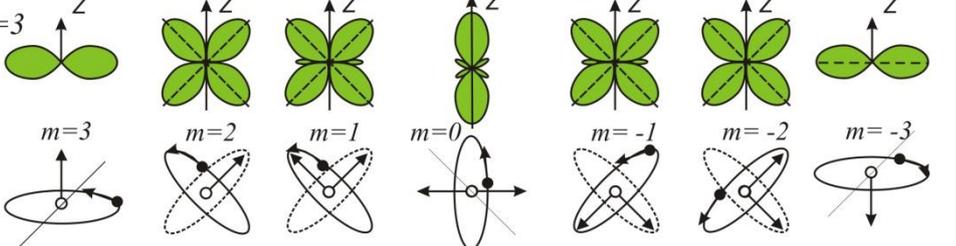
<i>s</i> -электроны	$l=0$  $M=0$	<i>p</i> -электроны	$l=1$ 
<i>d</i> -электроны	$l=2$ 		
<i>f</i> -электроны	$l=3$ 		

Рис. 5.13

6. ФИЗИКА АТОМНОГО ЯДРА И ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ

В теории ядра широко используется модельный подход. Число моделей очень велико. С их помощью описываются свойства ядер и ядерные реакции. Это большое количество моделей ядра атома, носящих часто противоположный характер лежащих в их основе предположений о характере движения нуклонов в ядре, требует создания единой микроскопической теории ядра, на основе которой можно было бы обосновать те или иные ядерные модели и указать области их применения. Однако до сих пор усилия по созданию единой модели ядра, позволяющей объяснить все явления, остаются тщетными.

6.1.1. Ядро – центральная часть атома, в которой сосредоточена практически вся масса атома и его положительный заряд. В состав атомного ядра входят элементарные частицы: *протоны* и *нейтроны* (рис. 6.1).

Протон имеет положительный заряд $e^+ = 1,06 \cdot 10^{-19}$ Кл и массу покоя $m_p = 1,673 \cdot 10^{-27}$ кг = $1836m_e$. Нейтрон (n) – нейтральная частица с массой покоя $m_n = 1,675 \cdot 10^{-27}$ кг = $1839m_e$ (где масса электрона m_e , равна $0,91 \cdot 10^{-31}$ кг).

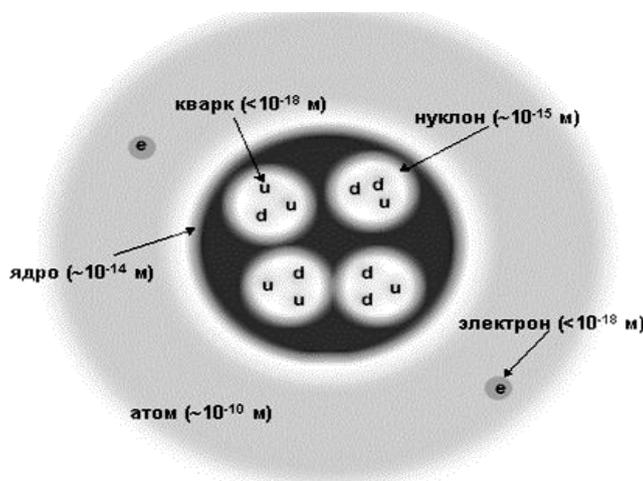


Рис. 6.1

6.1.2. Радиус ядра: $R = R_0 A^{1/3}$, где $R_0 = (1,3 - 1,7) \cdot 10^{-15}$ м.

6.1.3. Обозначение ядра химического элемента – ${}^A_Z X$, где Z – число протонов или заряд ядра, или порядковый номер элемента в периодической системе элементов; A – число нуклонов в ядре (число протонов ${}_1^1 p$ + число нейтронов ${}_0^1 n$).

6.1.4. Заряд ядра: Ze , где e – заряд протона.

6.1.5. Массовое число – число нуклонов в ядре:

$$A = Z + N,$$

где N – число нейтронов в ядре.

Ядра с одинаковым Z , но различными A называются *изотопами*. Ядра, которые при одинаковом A имеют разные Z , называются *изобарами*.

6.1.6. Простейшие частицы и их обозначения:

$${}^1_0n \text{ – нейтрон}; \quad {}^4_2\alpha = {}^4_2\text{He} \text{ – альфа-частица};$$

$${}^1_1p = {}^1_1\text{H} \text{ – протон}; \quad {}^0_{-1}\beta \text{ – электрон};$$

$${}^2_1D = {}^2_1\text{H} \text{ – дейтерий}; \quad {}^0_{+1}\beta \text{ – позитрон};$$

$${}^3_1T = {}^3_1\text{H} \text{ – тритий}; \quad {}^0_0\gamma \text{ – гамма-квант (фотон)}.$$

6.1.7. Спин ядра – собственный момент импульса:

$$L_{\text{яд}} = \hbar\sqrt{I(I+1)},$$

где I – внутренне (полное) спиновое квантовое число.

6.1.8. Связь между магнитным моментом ядра и спином:

$$P_{m_{\text{яд}}} = \gamma_{\text{яд}}L_{\text{яд}},$$

где $\gamma_{\text{яд}}$ – ядерное гиромагнитное отношение.

6.1.9. Ядерный магнетон – единица измерения магнитных моментов ядра:

$$\mu_{\text{яд}} = \frac{e\hbar}{2m_p}.$$

6.1.10. Квадрупольный электрический момент ядра:

$$Q = \frac{2}{5}Z_e(b^2 - a^2),$$

где b – полуось эллипсоида вдоль направления спина; a – полуось в перпендикулярном направлении.

6.1.11. Дефект массы ядра (характеризует уменьшение суммарной массы при образовании ядра из составляющих его нуклонов):

$$\Delta m = Zm_p + (A - Z)m_n - m_{\text{я}} = \frac{W_{\text{св}}}{c^2}.$$

6.1.12. Энергия связи нуклонов в ядре – физическая величина, равная той работе, которую нужно совершить для удаления нуклона из ядра без сообщения ему кинетической энергии (рис. 6.2):

$$W_{\text{св}} = \Delta mc^2 = [Zm_p + (A - Z)m_n - M_{\text{яд}}] \cdot c^2.$$

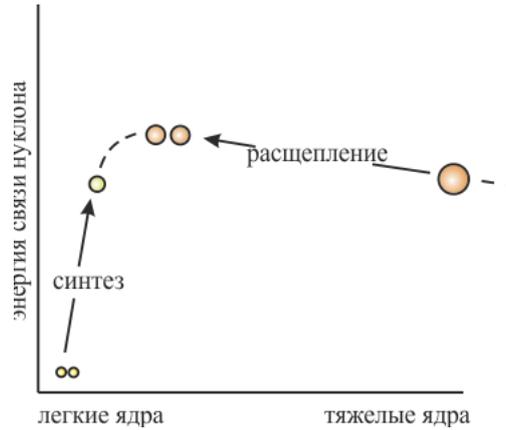


Рис. 6.2

6.1.13. Удельная энергия связи ядра – это энергия связи, приходящаяся на один нуклон:

$$\omega_{\text{св}} = \frac{W_{\text{св}}}{A}.$$

6.1.14. Радиоактивность – превращение неустойчивых изотопов одного химического элемента в изотопы другого элемента, сопровождающееся испусканием некоторых частиц (рис. 6.3).

- *Естественная радиоактивность* – радиоактивность, наблюдающаяся у существующих в природе неустойчивых изотопов.
- *Искусственная радиоактивность* – радиоактивность изотопов, полученных в результате ядерных реакций.

6.1.15. Закон радиоактивного распада – экспоненциальная зависимость, выражающая долю распавшихся радиоактивных изотопов с течением времени (рис. 6.4):

$$N = N_0 e^{-\lambda t},$$

где N_0 – количество ядер в данном объеме вещества в начальный момент времени $t = 0$; N – число ядер в том же объеме к моменту времени t ; λ – постоянная распада, имеющая смысл вероятности распада ядра за 1 секунду и равная доле ядер, распадающихся за единицу времени.

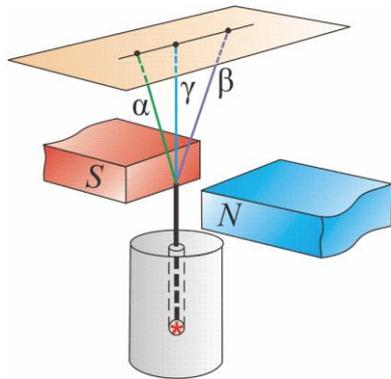


Рис. 6.3

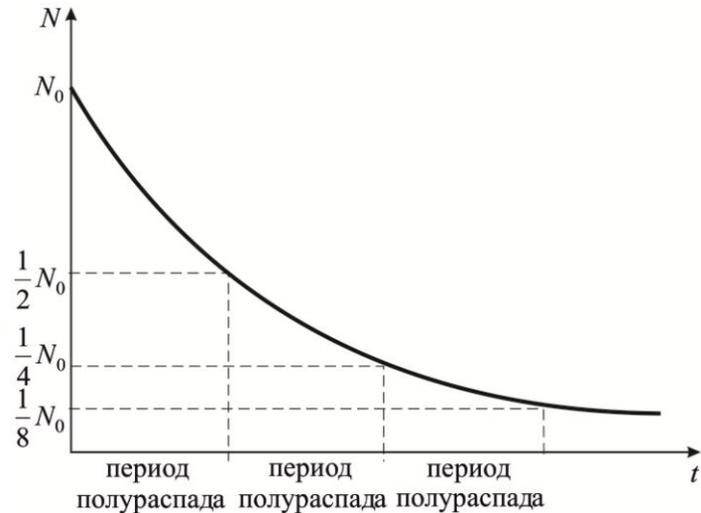


Рис. 6.4

6.1.16. Период полураспада – время, в течение которого первоначальное количество ядер данного радиоактивного вещества уменьшается на половину:

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda}.$$

6.1.17. Среднее время жизни радиоактивного ядра:

$$\tau = \frac{1}{\lambda}.$$

6.1.18. Активность нуклида – величина, равная отношению общего числа распадов радиоактивных ядер нуклида в источнике ко времени распада:

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

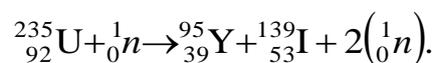
6.1.19. Законы сохранения при ядерных превращениях

- Закон сохранения массы: $A = \text{const}$ (с точностью до целого числа).
- Закон сохранения заряда: $Z = \text{const}$ (точно).

6.1.20. Правила смещения (позволяет предсказать место в периодической системе элемента – продукта радиоактивного распада):

- для α -распада: ${}^A_Z X \rightarrow {}^{A-4}_{Z-2} Y + {}^4_2 \text{He}$;
- для γ -распада: ${}^A_Z X \rightarrow {}^A_Z Y + {}^0_0 \gamma$;
- для β^- -распада: ${}^A_Z X \rightarrow {}^A_{Z+1} Y + {}^0_{-1} e$;
- для β^+ -распада: ${}^A_Z X \rightarrow {}^A_{Z-1} Y + {}^0_1 e$.

6.1.21. Ядерная реакция – это превращение атомных ядер при взаимодействии с элементарными частицами или друг с другом (рис. 6.5):



6.1.22. Цепная ядерная реакция – последовательность единичных ядерных реакций, каждая из которых вызывается частицей, появившейся как продукт реакции на предыдущем шаге последовательности (рис. 6.6).

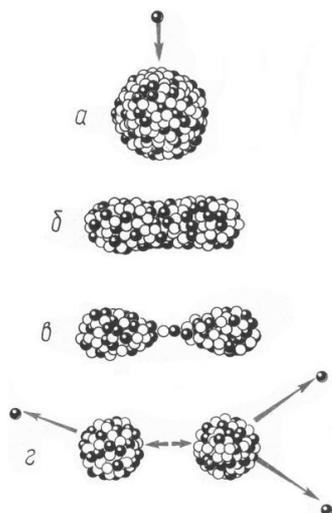


Рис. 6.5

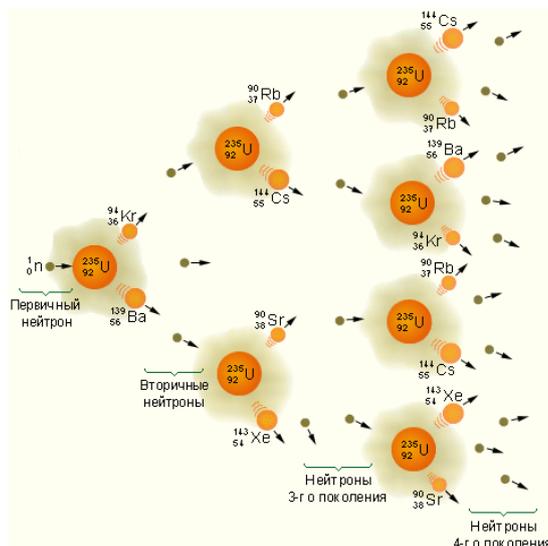


Рис. 6.6

6.1.23. Символическая запись для ядерной реакции:



где X и Y – исходные и конечные ядра; a и b – бомбардирующая и испускаемая (или испускаемые) в ядерной реакции частицы.

6.1.24. Эффективное сечение поглощения ядерной реакции:

$$\sigma = \frac{dN}{nNdx},$$

где N – число частиц, падающих за единицу времени на единицу площади поперечного сечения вещества, имеющего в единице объема n ядер; dN – число этих частиц, вступающих в реакцию в слое толщиной dx .

6.1.25. Формула Вайцзеккера:

$$E_{\text{св}} = \alpha_1 A - \alpha_2 A^{2/3} - \alpha \frac{Z^2}{A^{1/3}} - \alpha_4 \left(\frac{A}{2} - Z \right)^2 A + \alpha_5 A^{-3/4},$$

где $\alpha = \frac{E}{m_0 c^2}$ – константа взаимодействия между элементарными частицами.

6.1.26. Ядерный реактор – это устройство, в котором осуществляется управляемая цепная ядерная реакция, сопровождающаяся выделением энергии (рис. 6.7).

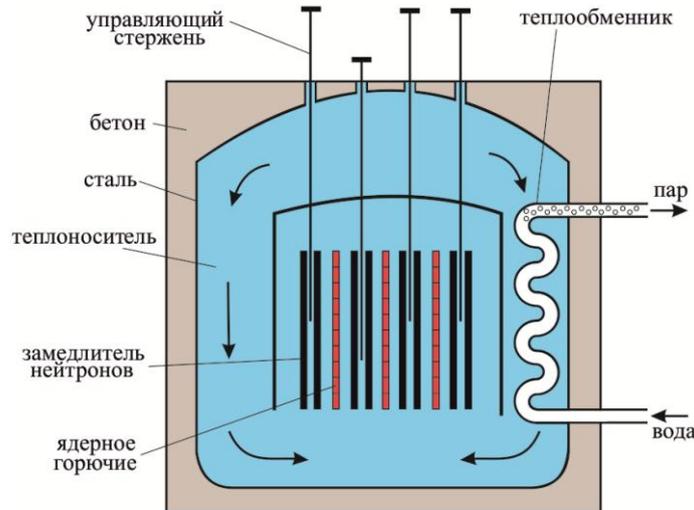
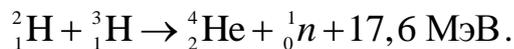


Рис. 6.7

6.1.27. Три уровня микромира и энергии, необходимые для их достижения:

- молекулярно-атомный: $E = 1 - 10$ эВ, $\Delta r \approx 10^{-8} - 10^{-10}$ м;
- ядерный: $E = 10^6 - 10^8$ эВ, $\Delta r \approx 10^{-14} - 10^{-15}$ м;
- элементарные частицы: $E > 10^8$ эВ, $\Delta r < 10^{-15}$ м.

6.1.28. Термоядерная реакция – разновидность ядерной реакции, при которой лёгкие атомные ядра объединяются в более тяжёлые ядра (рис. 6.8):



6.1.29. Управляемый термоядерный синтез – синтез более тяжёлых атомных ядер из более лёгких с целью получения энергии, который, в отличие от взрывного термоядерного синтеза (используемого в термоядерных взрывных устройствах), носит управляемый характер, как например в установке ТОКАМАК (рис. 6.9).

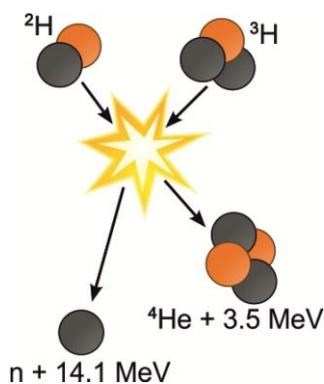


Рис. 6.8

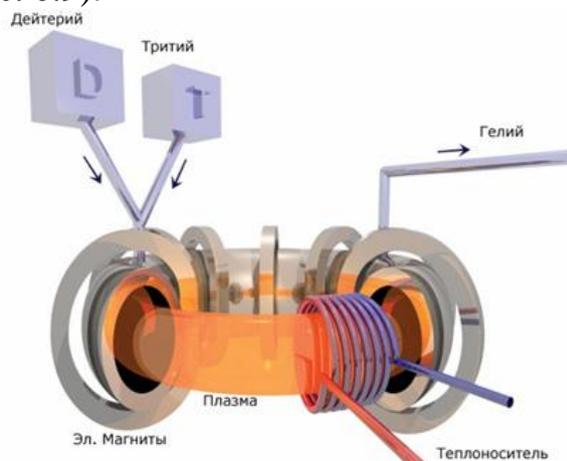


Рис. 6.9

6.1.30. Фундаментальные взаимодействия между материальными объектами разделились на четыре вида: *сильное, электромагнитное, слабое и гравитационное.*

6.1.31. Константы взаимодействия, а также среднее время жизни частиц, распадающихся за счёт данного вида взаимодействия (время распада).

Тип взаимодействий	Механизм обмена	Интенсивность, α	Радиус, r , м	Характерное время жизни, τ , с
Сильное	глюонами	≈ 1	$\approx 10^{-15}$	$\approx 10^{-23}$
Электромагнитное	фотонами	$\approx \frac{1}{137}$	∞	$\approx 10^{-18}$
Слабое	промежуточн. бозонами	$\approx 10^{-10}$	$\approx 10^{-18}$	$\approx 10^{-13}$
Гравитационное	гравитонами	$\approx 10^{-38}$	∞	?

6.1.32. Четыре класса элементарных частиц.

К одному из них относится только одна частица – *фотон.*

Фотоны γ (кванты электромагнитного поля) участвуют в электромагнитных взаимодействиях, но не обладают сильным и слабым взаимодействием.

Второй класс образуют *лептоны*, третий – *адроны* и, наконец, четвертый – *калибровочные бозоны.*

Элементарные частицы			
Лептоны	Калибровочные бозоны	Адроны	
		Барионы (qqq) $B = 1$	Мезоны ($q\bar{q}$) $B = 0$
$e^- \mu^- \tau^-$ $\nu_e \nu_\mu \nu_\tau$	$\gamma, W^+, W^-, Z, 8g$	$n, p,$ гипероны $\lambda, \Sigma, \Xi, \Omega$ и др. Барионные резонансы	$\pi, K, J/\Psi$ и др. Мезонные резонансы

6.1.33. Модель вещества. Вещество состоит из атомов, в состав которых входят нуклоны (простейшие барионы – протоны и нейтроны) и электроны. Протоны и нейтроны состоят из *кварков* (рис. 6.10).

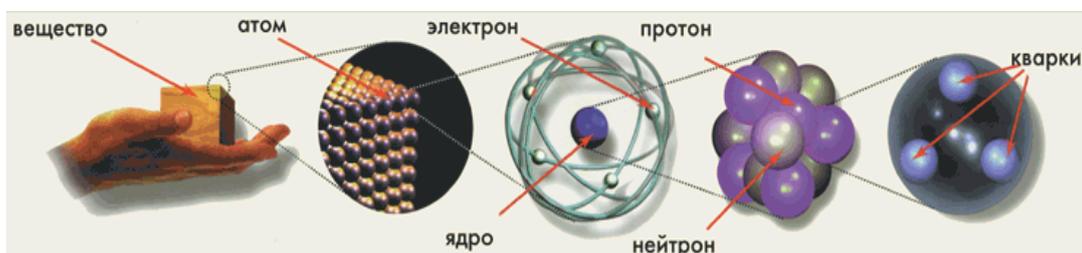


Рис. 6.10

Кварки представляют собой истинно элементарные частицы (рис. 6.11).

Фундаментальные фермионы Электрический заряд	КВАРКИ	
	+2/3	-1/3
Частицы окружающего мира принадлежат этой группе	u-кварк (up - вверх) входит в состав протонов и нейтронов $M = 3 \text{ МэВ}/c^2$	d-кварк (down - вниз) входит в состав протонов и нейтронов $M = 6 \text{ МэВ}/c^2$
Эти частицы существовали в первый момент после "Большого взрыва".	c-кварк (charmed - очарованный) открыт в 1974 г. $M = 1300 \text{ МэВ}/c^2$	s-кварк (strange - странный) открыт в 1964 г. $M = 100 \text{ МэВ}/c^2$
Теперь их можно обнаружить в космосе и на ускорителях частиц	t-кварк (top - верхний) открыт в 1995 г. $M = 175000 \text{ МэВ}/c^2$	b-кварк (beauty - прелестный bottom - нижний) открыт в 1977 г. $M = 4300 \text{ МэВ}/c^2$

Рис. 6.11

Для построения вещества необходимы дополнительные частицы – лептоны, которые на данном этапе развития физики считаются элементарными частицами.

Кварки и лептоны разделились на три семейства, характеристики которых представлены в таблице.

6.1.34. Три семейства фундаментальных частиц вещества

Семейство 1		Семейство 2		Семейство 3	
Частица	Масса, МэВ Заряд	Частица	Масса, МэВ Заряд	Частица	Масса, МэВ Заряд
Электрон	0,00054 - 1	Мюон	0,11 - 1	Таон	1,9 - 1
Электронное нейтрино	$<10^{-8}$ 0	Мюонное нейтрино	0,0003 0	Таонное нейтрино	$<0,033$ 0

<i>u</i> - кварк	0,0047 + 2/3	<i>c</i> - кварк	1,6 + 2/3	<i>t</i> - кварк	189,0 + 2/3
<i>d</i> - кварк	0,0074 - 1/3	<i>s</i> - кварк	0,16 - 1/3	<i>b</i> - кварк	5,2 - 1/3

6.1.35. Стандартная модель физики частиц (СМ). Объединение разнородных явлений в одной теории уже долгое время является центральной темой физики. СМ успешно описывает три (электромагнетизм, слабые и сильные взаимодействия) из четырех известных науке сил, но впереди еще окончательное объединение с общей теорией относительности, которая описывает гравитацию и природу пространства и времени.

электричество	электромагнетизм	электрослабое взаимодействие	Стандартная модель	?
магнетизм				
свет				
бета-распад	слабое взаимодействие			
нейтрино				
протоны	сильное взаимодействие			
нейтроны				
пионы				
земное притяжение	универсальная гравитация		Общая теория относительности	
небесная механика				
	геометрия пространства-времени			

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В последние десятилетия мир переживает невиданную по своим масштабам и скорости осуществления научно-техническую революцию. Современная наука (и техника), развивающаяся необыкновенно быстрыми темпами, приводит к резкому повышению требований, которые предъявляются к современному курсу физики в вузе. Эти требования находят свое выражение в повышении научно-технического уровня курса, внедрении инновационных технологий, направленных на активизацию познавательной деятельности студентов, развитие их творческих способностей, научного мышления.

Данный краткий курс физики охватил все основные разделы классической и современной физики. Мы изучили основы классической механики и, рассмотрев границы ее применимости, перешли к специальной теории относительности. Далее были рассмотрены основы термодинамики и молекулярной физики, учение о электричестве и магнетизме, колебательные, волновые процессы, включая учение об электромагнитных волнах и оптику. Существенное место отведено квантовым свойствам излучения, основам квантовой оптики и элементам квантовой механики.

В конце курса мы разобрали вопросы, посвященные современным достижениям физики XXI века – атомной физики, физики атомного ядра и элементарных частиц. Они стали возможными благодаря быстрому расширению технических возможностей эксперимента и развитию квантовой механики, применению ее к теории твердых тел, расчетам ускорителей, ядерных и термоядерных реакторов, квантовых генераторов, усилителей и т.д.

Наряду с большими достижениями физики, во всех ее разделах остается много вопросов. Например, построение квантовой теории тяготения, проблемы физики плазмы и атомного ядра, построение теории объединяющей все известные силы взаимодействия.

Из сказанного ясно, какое значение имеет для будущего инженера изучение физики.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Основная

1. Тюрин Ю.И. Ч.1. Механика. Молекулярная физика. Термодинамика: учебное пособие для технических университетов / Ю.И. Тюрин, И.П. Чернов, Ю.Ю. Крючков – Томск: Изд-во Томского ун-та, 2002. – 502 с.
2. Тюрин Ю.И., Чернов И.П., Крючков Ю.Ю. Физика. Ч. 2. Электричество и магнетизм: учебное пособие для технических университетов. – Томск: Изд-во Томского ун-та, 2003. – 738 с.
3. Тюрин Ю.И., Чернов И.П., Крючков Ю.Ю. Физика. Ч. 3. Оптика. Квантовая физика: учебное пособие для технических университетов. – Томск: Изд-во Томского ун-та, 2004. – 738 с.
4. Бондарев Б.В. Курс общей физики. В 3 кн.: Учеб пособие/ Б.В. Бондарев, Н.П. Калашников, Г.Г. Спирын – 2-е изд., стер. – М.: Высш. шк., 2005 – 352 с.
5. Калашников Н.П. Основы физики. В 2 т.: учебник для вузов/ Н.П. Калашников, М.А. Смондырев. – 3-е изд., стереотип. – М.: Дрофа, 2007.
6. Савельев И.В. Курс общей физики. В 5 кн.: учебное пособие для втузов/ И.В. Савельев – М.: АСТ Астрель, 2006. – 336 с.

Дополнительная

1. Кузнецов С.И. Физические основы механики: учебное пособие. – 2-е изд., испр., допол. – Томск: Изд-во ТПУ, 2007. – 121 с.
2. Кузнецов С.И. Молекулярная физика. Термодинамика: учебное пособие. – 2-е изд., испр., допол. – Томск: Изд-во ТПУ, 2007. – 113 с.
3. Кузнецов С.И. Электростатика. Постоянный ток: учебное пособие. – 2-е изд., испр., допол. – Томск: Изд-во ТПУ, 2007. – 132 с.
4. Кузнецов С.И. Электромагнетизм: учебное пособие. – 2-е изд., испр., допол. – Томск: Изд-во ТПУ, 2007. – 92 с.
5. Кузнецов С. И. Колебания и волны. Геометрическая и волновая оптика: учебное пособие. – 2-е изд., испр., допол. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2007. – 170 с.
6. Кузнецов С. И. Квантовая оптика. Атомная и ядерная физика. Физика элементарных частиц: учебное пособие. – 2-е изд., испр., допол. – Томск: Изд-во ТПУ, 2007. – 154 с.
7. Кузнецов С.И. Квантовая физика: учебное пособие. – Томск: Изд-во ТПУ, 2006. – 62 с.
8. Кузнецов С.И. Курс физики с решениями задач. Основы механики: учебное пособие / под ред. В.В. Ларионова; Томский политехниче-

ский университет. – 3-е изд., перераб. и доп. – Томск: Изд-во ТПУ, 2011 – 249 с.

9. Кузнецов С.И. Краткий курс физики: учебное пособие / Томский политехнический университет. –Томск: Изд-во ТПУ, 2011. – 187 с.

10. Кузнецов С.И. Курс физики с примерами решения задач. Молекулярная физика и термодинамика: учебное пособие / ТПУ – 3-е изд., перераб. и доп. – Томск: Изд-во ТПУ, 2011. – 178 с.

11. Кузнецов С.И. Физика. Ч. I. Механика. Механические колебания и волны. Молекулярная физика и термодинамика: учебное пособие / С.И. Кузнецов; Э.В. Поздеева; Томский политехнический университет. – 3-е изд., перераб. доп. – Томск: Изд-во ТПУ, 2012. – 234 с.

12. Кузнецов С.И. Физика. Ч II. Электричество и магнетизм. Электромагнитные колебания и волны: учебное пособие / С.И. Кузнецов; ТПУ. – 3-е изд., перераб. и доп. – Томск: Изд-во ТПУ, 2011 – 248 с.

13. Кузнецов С.И. Физика. Ч III. Оптика. Квантовая природа излучения. Основы атомной физики и квантовой механики. Физика атомного ядра и элементарных частиц: учебное пособие / С.И. Кузнецов, Э.В. Поздеева, Э.Б. Шошин; ТПУ. – Томск: Изд-во ТПУ, 2012. 212 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Некоторые математические формулы

$$\begin{aligned} \sin(\alpha \pm \beta) &= \sin \alpha \cos \beta \pm \cos \alpha \sin \beta & \cos(\alpha \pm \beta) &= \cos \alpha \cos \beta \pm \sin \alpha \sin \beta \\ \sin 2\alpha &= 2 \sin \alpha \cos \alpha & \cos 2\alpha &= \cos^2 \alpha - \sin^2 \alpha \\ \sin^2 \alpha &= \frac{1}{2}(1 - \cos 2\alpha) & \cos^2 \alpha &= \frac{1}{2}(1 + \cos 2\alpha) \end{aligned}$$

$\frac{d}{dx}(x^n) = nx^{n-1}$	$\frac{d}{dx}(\ln x) = \frac{1}{x}$	$\int_0^{\infty} \frac{xdx}{e^x - 1} = \frac{\pi^2}{6}$
$\frac{d}{dx}(e^x) = e^x$	$\frac{d}{dx}(\operatorname{tg} x) = \frac{1}{\cos^2 x}$	$\frac{d}{dx}\left(\frac{1}{x^n}\right) = -\frac{n}{x^{n+1}}$
$\frac{d}{dx}(\cos x) = -\sin x$	$\int \frac{dx}{x^2} = -\frac{1}{x}$	$\frac{d}{dx}\left(\frac{1}{x}\right) = -\frac{1}{x^2}$
$\int \frac{dx}{x} = \ln x$	$\int e^x dx = e^x$	$\frac{d}{dx}(\sin x) = \cos x$
$\int \cos x dx = \sin x$	$\int u dv = uv - \int v du$	$\int_0^{\infty} x^n e^{-x} dx = n!$
$\int x^n dx = \frac{x^{n+1}}{n+1} (n \neq -1)$	$\int_0^{\infty} x^n e^{-ax} dx = \frac{n!}{a^{n+1}}$	
$\int \sin x dx = -\cos x$	$\int_0^{\infty} \frac{x^3 dx}{e^x - 1} = \frac{\pi^4}{15}$	

Значения фундаментальных констант

Гравитационная постоянная	$G = 6,6720 \cdot 10^{-11} \text{ Н} \cdot \text{м}^2 / \text{кг}^2$
Скорость света в вакууме	$c = 2,99792458 \cdot 10^8 \text{ м/с}$
Магнитная постоянная	$\mu_0 = 12,5663706144 \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$
Электрическая постоянная	$\varepsilon_0 = 8,85418782 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$
Постоянная Планка	$h = 6,626176 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$
Масса покоя электрона	$m_e = 9,109534 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$
Масса покоя протона	$m_p = 1,6726485 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$
Масса покоя нейтрона	$m_n = 1,6749543 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$
Отношение массы протона к массе электрона	$m_p/m_e = 1836,15152$
Элементарный заряд	$e^- = 1,6021892 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$
Отношение заряда электрона к его массе	$e^- / m_e = 1,7588047 \cdot 10^{11} \text{ Кл/кг}$
Атомная единица массы	$1 \text{ а.е.м.} = 1,6605655 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$

Греческий алфавит

Α α – альфа	Η η – эта	Ν ν – ню	Τ τ – тау
Β β – бета	Θ θ – тэта	Ξ ξ – кси	Υ υ – ипсилон
Γ γ – гамма	Ι ι – йота	Ο ο – омикрон	Φ φ – фи
Δ δ – дельта	Κ κ – каппа	Π π – пи	Χ χ – хи
Ε ε – эпсилон	Λ λ – ламбда	Ρ ρ – ро	Ψ ψ – пси
Ζ ζ – дзета	Μ μ – мю	Σ σ – сигма	Ω ω – омега

Международная система единиц СИ

Величина		Единица			Определение
		Наименование	Обозначение		
наименование	Размерность			русское	международное
Длина	L	метр	м	m	Метр – единица длины равная, расстоянию, проходимому в вакууме плоской электромагнитной волной за 1/299792458 доли секунды.
Масса	M	килограмм	кг	kg	Килограмм – единица массы, равная массе международного прототипа килограмма.
Время	T	секунда	с	s	Секунда – единица времени, равная 9192631770 периодам излучения атома цезия -133.
Сила электр. тока	I	ампер	A	A	Ампер – проходя по двум параллельным прямолинейным проводникам расположенным на расстоянии 1 м один от другого в вакууме, вызывает между этими проводниками силу, равную $2 \cdot 10^{-7}$ Н на каждый метр длины.

Термодинамическая температура	θ	Кельвин	К	К	Кельвин – единица термодинамической температуры, равная 1/273,16 термодинамической температуры тройной точки воды.
Количество вещества	ν	моль	моль	mol	Моль – единица количества вещества, в которой содержится столько же структурных элементов сколько содержится атомов в углероде C^{12} , массой 0,012 кг.
Сила света	J	кандела	кд	cd	Кандела – единица силы света, равная силе света в данном направлении от источника, испускающего монохроматическое излучение частотой 540 ТГц, сила излучения которого в этом направлении составляет 1/683 Вт/ср.

Дополнительные единицы СИ

Величина	Единица	
	Наименование	Обозначение
Плоский угол	радиан	рад
Телесный угол	стерадиан	ср

Производные единицы СИ, имеющие собственные наименования

Величина	Единица		Выражение производной единицы	
	Наименование	Обозначение	Через другие единицы СИ	Через основные единицы СИ
Частота	герц	Гц		s^{-1}

Сила	ньютон	Н		$\text{м} \cdot \text{кг} \cdot \text{с}^{-1}$
Давление	паскаль	Па	$\text{Н}/\text{м}^2$	$\text{м}^{-1} \cdot \text{кг} \cdot \text{с}^{-2}$
Энергия, работа, кол-во теплоты	джоуль	Дж	Н/м	$\text{м}^2 \cdot \text{кг} \cdot \text{с}^{-2}$
Мощность, поток энергии	ватт	Вт	Дж/с	$\text{м}^2 \cdot \text{кг} \cdot \text{с}^{-3}$
Кол-во электричества, электрический заряд	кулон	Кл	А·с	с·А
Электрическое напряжение, электрический потенциал	вольт	В	Вт/А	$\text{м}^2 \cdot \text{кг} \cdot \text{с}^{-3} \cdot \text{А}^{-2}$
Электрическая ёмкость	фарада	Ф	Кл/В	$\text{м}^{-2} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{с}^4 \cdot \text{А}^2$
Электрическое сопротивление	ом	Ом	В/А	$\frac{\text{м}^2 \cdot \text{кг} \cdot \text{с}^{-3}}{\text{А}^2}$
Электрическая проводимость	сименс	См	А/В	$\text{м}^{-2} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{с}^3 \cdot \text{А}^2$
Поток магнитной индукции	вебер	Вб	В·с	$\text{м}^2 \cdot \text{кг} \cdot \text{с}^{-2} \cdot \text{А}^{-1}$
Магнитная индукция	тесла	Т	Вб/м ²	$\text{кг} \cdot \text{с}^{-2} \cdot \text{А}^{-1}$
Индуктивность	генри	Г	Вб/А	$\frac{\text{м}^2 \cdot \text{кг} \cdot \text{с}^{-2} \cdot \text{А}^{-1}}{2}$
Световой поток	люмен	лм		кд·ср
Освещенность	люкс	лк		$\text{м}^{-2} \cdot \text{кд} \cdot \text{ср}$

Таблица производных единиц физических величин

Наименование величины	Единица		
	Определяющее уравнение	обозначения	Наименование и определение
Единицы геометрических и механических величин			
Площадь	$S = l^2$	м^2	<i>Квадратный метр</i> равен площади квадрата со сторонами,

			длины которых равны 1 м
Объем	$V = l^3$	м ³	<i>Кубический метр</i> равен объему куба с ребрами, длины которых равны 1 м
Скорость	$v = \frac{s}{t}$	м/с	<i>Метр в секунду</i> равен скорости равномерного и прямолинейного движения, при котором точка за 1 с перемещается на расстояние 1 м
Ускорение	$a = \frac{\Delta v}{\Delta t}$	м/с ²	<i>Метр на секунду в квадрате</i> равен ускорению прямолинейного движения точки, при котором за 1 с скорость точки изменяется на 1 м/с
Угловая скорость	$\omega = \frac{\varphi}{t}$	рад/с	<i>Радиян в секунду</i> равен угловой скорости равномерно вращающегося тела, все точки которого за 1 с поворачиваются на угол 1 рад
Угловое ускорение	$\varepsilon = \frac{\Delta \varphi}{\Delta t}$	рад/с ²	<i>Радиян на секунду в квадрате</i> равен угловому ускорению равноускоренно вращающегося тела, при котором оно за 1 с изменит угловую скорость на 1 рад/с
Частота периодического процесса	$\nu = \frac{1}{T}$	Гц	<i>Герц</i> равен частоте периодического процесса, при которой за 1 с совершается один цикл процесса
Плотность	$\rho = \frac{m}{V}$	кг/м ³	<i>Килограмм на кубический метр</i> равен плотности однородного вещества, масса которого при объеме 1 м ³ равна 1 кг
Сила	$F = ma$	Н	<i>Ньютон</i> равен силе, сообщающей телу массой 1 кг ускорение 1 м/с ² в направлении действия силы: 1Н=1 кг · м/с ²

Импульс	$p = mv$	кг · м/с	<i>Килограмм- метр на секунду</i> равен импульсу материальной точки массой 1 кг, движущейся со скоростью 1 м/с
Давление	$p = \frac{F}{S}$	Па	<i>Паскаль</i> равен давлению, создаваемому силой 1 Н, равномерно распределенной по нормальной к ней поверхности площадью 1 м ² : 1Па = 1Н/м ²
Работа, энергия	$A = Fs$	Дж	<i>Джоуль</i> равен работе, совершаемой силой 1 Н на пути 1 м: 1Дж = 1Н · м
Мощность	$N = \frac{A}{t}$	Вт	<i>Ватт</i> равен мощности, при которой за время 1 с совершается работа 1 Дж : 1Вт=1Дж/с
Момент инерции	$J = mr^2$	Н · м	<i>Ньютон-метр</i> равен моменту силы, равной 1 Н, относительно точки, расположенной на расстоянии 1 м от линии действия силы
Момент импульса	$L = mvr$	кг · м ² /с	<i>Килограмм-метр в квадрате на секунду</i> равен моменту импульса материальной точки, движущейся по окружности радиусом 1 м и имеющей импульс 1кг · м/с
Градиент скорости	$\left \frac{\Delta v}{\Delta x} \right $	с ⁻¹	<i>Секунда в минус первой степени</i> равна градиенту скорости, при котором скорости слоев жидкости (газа), отстоящих друг от друга на расстоянии 1 м, отличается 1 м/с
Динамическая вязкость	$\eta = \frac{F}{S \left \frac{\Delta v}{\Delta x} \right }$	Па · с	<i>Паскаль – секунда</i> равен динамической вязкости среды, касательное напряжение в которой при ламинарном течении и градиенте скоростей слоев, на-

			ходящихся на расстоянии 1 м по нормали направлению скорости, равной 1м/с : $1\text{Па} \cdot \text{с} = 1\text{Н} \cdot \text{с}/\text{м}^2$
Кинематическая вязкость	$\nu = \frac{\eta}{\rho}$	$\text{м}^2/\text{с}$	<i>Квадратный метр на секунду</i> равен кинематической вязкости среды с динамической вязкостью 1Па·с и плотностью 1кг/м ³
Единицы тепловых величин			
Количество теплоты, внутренняя энергия	q	Дж	<i>Джоуль</i> равен количеству теплоты, эквивалентному работе 1 Дж
Тепловой поток (тепловая мощность)	Φ	Вт	<i>Ватт</i> равен тепловому потоку, эквивалентному механической мощности 1 Вт
Градиент температуры	$\left \frac{\Delta T}{\Delta x} \right $	К/м	<i>Кельвин на метр</i> равен температурному градиенту поля, в котором на участке длиной 1 м в направлении градиента температура изменяется на 1 К
Теплопроводность	$\lambda = \frac{q}{S \left \frac{\Delta T}{\Delta x} \right }$	$\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$	<i>Ватт на метр – кельвин</i> равен теплопроводности вещества, в котором при стационарном режиме с поверхностной плотностью потока 1Вт/м ² устанавливается температурный градиент 1 К/м
Теплоемкость системы	$C = \frac{dq}{dt}$	Дж/К	<i>Джоуль на кельвин</i> равен теплоемкости системы, температура которой повышается на 1К при подведении к системе количества теплоты 1Дж
Удельная теплоемкость	$c = \frac{dq}{mdt}$	$\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$	<i>Джоуль на килограмм-кельвин</i> равен удельной теплоемкости вещества, имеющего при массе

			1 кг теплоемкость Дж/К
Молярная теплоемкость	$c_m = \frac{dq}{vdt}$	$\frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}$	<i>Джоуль на моль – кельвин</i> равен молярной теплоемкости вещества, имеющего при количестве вещества 1 моль теплоемкости 1 Дж/К
Энтропия	$\frac{\delta q}{T}$	Дж/К	<i>Джоуль на кельвин</i> равен изменению энтропии системы, которой при температуре n К в изотермическом процессе сообщается количество теплоты n Дж
Поверхностное натяжение	$\sigma = \frac{F}{l}$	$\frac{\text{Н}}{\text{м}} = \frac{\text{Дж}}{\text{м}^2}$	<i>Ньютон на метр</i> равен поверхностному натяжению жидкости, создаваемому силой 1 Н, приложенной к участку контура свободной поверхности длиной 1 м и действующей нормально к контуру и по касательной к поверхности
Единицы электрических и магнитных величин			
Электрический заряд (количество электричества)	$q = It$	Кл	<i>Кулон</i> равен электрическому заряду, проходящему сквозь поперечное сечение проводника при силе постоянного тока 1 А за время 1 с
Объемная плотность электрического заряда	$\rho = \frac{q}{V}$	Кл/м ³	<i>Кулон на кубический метр</i> равен объемной плотности электрического заряда, при которой в объеме 1 м ³ равномерно распределен заряд 1 Кл
Поверхностная плотность электрического заряда	$\sigma = \frac{q}{S}$	Кл/м ²	<i>Кулон на квадратный метр</i> равен поверхностной плотности электрического заряда, при которой заряд, равномерно распределенный по поверхности площадью 1 м ² , равен 1 Кл
Линейная плотность	$\tau = \frac{q}{l}$	Кл/м	<i>Кулон на метр</i> равен линейной плотности электрического за-

электрического заряда			ряда, при которой заряд, равномерно распределенный по нити длиной 1 м, равен 1 Кл
Напряженность электрического поля	$E = \frac{E}{q_0}$	$\frac{\text{Н}}{\text{Кл}} = \frac{\text{В}}{\text{м}}$	<i>Ньютон на кулон</i> равен напряженности электрического поля в точке поля, в которой на точечный электрический заряд 1 Кл поле действует с силой 1 Н <i>Вольт на метр</i> равен напряженности однородного электрического поля, создаваемого разностью потенциалов 1 В между точками, находящимися на расстоянии 1 м на линии напряженности поля
Электрическое смещение	D	Кл/м ²	<i>Кулон на квадратный метр</i> равен электрическому смещению, при котором поток электрического смещения сквозь поперечное сечение площадью 1 м ² равен 1 Кл
Поток электрического смещения	$\oint_S \vec{D} d\vec{S} = \sum_{i=1}^n q_i$	Кл	<i>Кулон</i> равен потоку электрического смещения, связанному с суммарному свободным зарядом 1 Кл
Электрический потенциал	$\varphi = \frac{A}{q_0}$	В	<i>Вольт</i> равен потенциалу такой точки поля, в которой заряд 1 Кл обладает потенциальной энергией 1 Дж: 1В=1Дж/Кл
Электрическая емкость	$C = \frac{q}{\varphi}$	Ф	<i>Фарад</i> равен электрической емкости такого уединенного проводника, потенциал которого изменяется на 1 В при сообщении ему заряда 1 Кл
Электрический момент диполя	$p = q l$	Кл·м	<i>Кулон-метр</i> равен электрическому моменту диполя, заряды которого, равные каждый 1 Кл, расположены на расстоянии 1 м один от другого

Поляризованность	$\vec{P} = \frac{\vec{p}}{V}$	Кл/м ²	<i>Кулон на квадратный метр</i> равен поляризованности диэлектрика, при которой диэлектрик объемом 1 м ³ имеет электрический момент 1 Кл·м
Плотность электрического тока	$j = \frac{I}{S}$	А/м ²	<i>Ампер на квадратный метр</i> равен плотности электрического тока, при которой сила тока, равномерно распределенного по поперечному сечению проводника площадью 1 м ² , равна 1 А
Электрическое сопротивление	$R = \frac{U}{I}$	Ом	<i>Ом</i> равен сопротивлению такого проводника, в котором при напряжении 1 В течет постоянный ток 1 А
Электрическая проводимость	$G = \frac{1}{R}$	См	<i>Сименс</i> равен проводимости участка электрической цепи сопротивлением 1 Ом
Удельное электрическое сопротивление	$\rho = \frac{RS}{l}$	Ом·м	<i>Ом-метр</i> равен удельному электрическому сопротивлению проводника площадью поперечного сечения 1 м ² и длиной 1 м, имеющего сопротивление 1 Ом
Удельная электрическая проводимость	$\sigma = \frac{1}{\rho}$	См/м	<i>Сименс на метр</i> равен удельной электрической проводимости проводника, который при площади поперечного сечения 1 м ² и длине 1 м имеет электрическую проводимость 1 См
Магнитная индукция	$B = \frac{F}{I \cdot l}$	Тл	<i>Тесла</i> равен магнитной индукции такого однородного магнитного поля, которое действует с силой 1 Н на каждый метр длины проводника, расположенного перпендикулярно направлению поля, если по этому проводнику проходит

			$\text{ток } 1\text{Тл} = \frac{1\text{Н}}{\text{Ам}}$
Магнитный поток	$\Phi = BS$	Вб	Вебер равен магнитному потоку, проходящему сквозь плоскую поверхность площадью 1 м^2 , расположенную перпендикулярно однородному магнитному полю, индукция которого равна 1 Тл : $1\text{Вб} = 1\text{Тл} \cdot \text{м}^2$
Напряженность магнитного поля	$H = \frac{B}{\mu_0}$	А/м	Ампер на метр равен напряженности такого поля, магнитная индукция которого в вакууме равна $4\pi \cdot 10^{-7}\text{ Тл}$
Магнитный момент контура с током	$P = IS$	А·м	Ампер-квадратный метр равен моменту контура площадью 1 м^2 , если по нему течет ток 1 А
Индуктивность	$L = \frac{\Phi}{I}$	Гн	Генри равен индуктивности такого контура, магнитный поток которого при токе 1 А равен 1 Вб : $1\text{ Гн} = 1\text{ Вб/А}$
Намагниченность	$J = \frac{\sum P_a}{V}$	А/м	Ампер на метр равен намагниченности, при которой вещество объемом 1 м^3 имеет магнитный момент $\text{А} \cdot \text{м}^2$

Внесистемные единицы измерений и их перевод в единицы СИ

Единица	Обозначение	Перевод в единицы СИ
микрон	мкм	$1 \cdot 10^{-6}\text{ м}$
ангстрем	Å	$1 \cdot 10^{-10}\text{ м}$
световой год	св. год	$9,46 \cdot 10^{15}\text{ м}$
парсек	пк	$3,09 \cdot 10^{16}\text{ м}$
литр	л	$1 \cdot 10^{-3}\text{ м}^3$
атомная единица массы	а.е.м.	$1,66 \cdot 10^{-27}\text{ кг}$
тонна	т	1000 кг
минута	мин	60 с

час	ч	3600 с
сутки	сут	86400 с
секунда	"	$4,85 \cdot 10^{-6}$ рад
минута	'	$2,9 \cdot 10^{-4}$ рад
градус	°	0,017 рад
оборот	об	6,28 рад
полный телесный угол	-	12,57 ср
оборот в секунду	об/с	1 с^{-1}
оборот в минуту	об/мин	$0,0167 \text{ с}^{-1}$
километр в час	км/ч	0,278 м/с
оборот в секунду	об/с	6,28 рад/с
оборот в минуту	об/мин	0,105 рад/с
миллиметр ртутного столба	мм. рт. ст.	133 Па
бар	бар	$1 \cdot 10^5$ Па
киловатт-час	кВт · ч	$3,6 \cdot 10^6$ Дж
электрон-вольт	эВ	$1,6 \cdot 10^{-19}$ Дж
ампер-час.	А · ч	$3,6 \cdot 10^{-3}$ Кл
калория	кал	$4,19 \cdot 10^6$ Дж
рентген	Р	$2,58 \cdot 10^{-3}$ Кл/кг
рад	рад	0,01 Дж/кг
кюри	Ки	$3,7 \cdot 10^{10} \text{ с}^{-1}$
распад в секунду	расп./с	1 с^{-1}

Множители и приставки для образования десятичных кратных и дольных единиц и их наименований

Множитель	Приставка	Обозначение
$1\ 000\ 000\ 000\ 000 = 10^{12}$	тера	Т
$1\ 000\ 000\ 000 = 10^9$	гига	Г
$1\ 000\ 000 = 10^6$	мага	М
$1\ 000 = 10^3$	кило	к
$100 = 10^2$	гекто	г
$10 = 10^1$	дека	да
$0,1 = 10^{-1}$	деци	д
$0,01 = 10^{-2}$	санتي	с
$0,001 = 10^{-3}$	милли	м
$0,000001 = 10^{-6}$	микро	мк
$0,000000001 = 10^{-9}$	нано	н
$0,0000000000001 = 10^{-12}$	пико	п
$0,000000000000001 = 10^{-15}$	фемто	ф
$0,00000000000000001 = 10^{-18}$	атто	а

Упругие постоянные. Предел прочности

Материал	Модуль Юнга E , ГПа	Модуль сдвига G , ГПа	Коэффициент Пуассона μ	Предел прочности на разрыв σ_m , ГПа	Сжимаемость β , ГПа ⁻¹
Алюминий	70	26	0,34	0,10	0,014
Медь	130	40	0,34	0,30	0,007
Свинец	16	5,6	0,44	0,015	0,022
Сталь (железо)	200	81	0,29	0,60	0,006
Стекло	60	30	0,25	0,05	0,025

Астрономические постоянные

Радиус Земли	$6,378164 \cdot 10^6$ м
Средняя плотность Земли	$5,518 \cdot 10^3$ кг/м ³
Масса Земли	$5,976 \cdot 10^{24}$ кг
Радиус Солнца	$6,9599 \cdot 10^8$ м
Средняя плотность Солнца	$1,41 \cdot 10^3$ кг/м ³
Масса Солнца	$1,989 \cdot 10^{30}$ кг
Радиус Луны	$1,737 \cdot 10^6$ м
Масса Луны	$7,35 \cdot 10^{22}$ кг
Среднее расстояние до Луны	$3,844 \cdot 10^8$ м
Среднее расстояние до Солнца (астрономическая единица)	$1,49598 \cdot 10^{11}$ м
Период обращения Луны вокруг Земли	27 сут 7 ч 43 мин

Скорость звука в различных средах

Среда	$t, ^\circ\text{C}$	v , м/с	Среда	$t, ^\circ\text{C}$	v , м/с
Воздух	0	331	Ртуть	20	1451
Азот	0	334	Спирт метиловый	20	1123
Аммиак	0	415	Алюминий	20	5080
Водород	0	1284	Медь	20	3710
Гелий	0	965	Железо	20	5170
Кислород	0	316	Стекло кварцевое	20	5370
Углек. газ	0	259	Дерево ель	0	4800
Ацетон	20	1192	Дерево пробковое	-	430-530
Вода пресная	25	1497	Каучук	-	50
Вода морская	17	1510-1550			

Удельная теплота сгорания

<i>Твердое, Дж/кг</i>		<i>Жидкое, Дж/кг</i>	
Антрацит	$3,03 \cdot 10^7$	Бензин	$4,6 \cdot 10^7$
Бурый уголь	$9,3 \cdot 10^6$	Керосин	$4,31 \cdot 10^7$
Горючие сланцы	$9,6 \cdot 10^6$	Спирт (этиловый)	$2,7 \cdot 10^7$
Древесный уголь	$2,97 \cdot 10^7$	<i>Газообразное, Дж/м³</i>	
Дрова сухие	$1,25 \cdot 10^7$	Водород	$1,05 \cdot 10^7$
Каменный уголь	$2,93 \cdot 10^7$	Коксогаз	$1,64 \cdot 10^7$
Порох	$3 \cdot 10^6$	Окись углерода	$1,3 \cdot 10^7$
Торф	$1,5 \cdot 10^7$	Природный газ	$1,55 \cdot 10^7$
		Светильный газ	$2,1 \cdot 10^7$

Плотности некоторых веществ

Твердые те- ла	$\rho \cdot 10^{-3}$	Жидкости	$\rho \cdot 10^{-3}$	Газы	$\rho \cdot 10^{-3}$
Платина	21,5	Ртуть	13,6	Хлор	3,21
Золото	19,3	Вода	1	Кислород	1,43
Вольфрам	18,8	Масло растительное	0,92	Воздух	1,29
Свинец	11,4	Керосин	0,8	Азот	1,25
Серебро	10,5	Спирт этиловый	0,79	Гелий	0,18
Медь	8,9	Эфир этиловый	0,71	Водород	0,09
Латунь	8,7				
Никель	8,6				
Железо	7,8				
Алюминий	2,7				
Лед	0,9				
Дерево сухое	0,7				

Величина силы звука для основных значений шкалы децибел

Вид звука	дБ	Сила звука, мкВт/м
Предел чувствительности человеческого уха	0	10^{-6}
Шопот на расстоянии 1 м.	10	10^{-5}
Шорох листьев в саду; падение капель воды на расстоянии 1 м.	20	10^{-4}
Средний уровень шума в зрительном зале; негромкий разговор	30	10^{-3}
Негромкая музыка. Шум в жилом помещении	40	10^{-2}

Шум в учреждении с открытыми окнами	50	10^{-1}
Средний уровень разговорной речи на расстоянии 1 м.	60	1
Шум мотора грузового автомобиля	70	10
Симфонический оркестр	80	10^2
Автомобильный гудок	90	10^3
Клепальная машина	100	10^4
Пневмомолот	110	10^5
Сильные удары грома, мотор самолета	120	10^6
Болевой предел. Звук уже не слышен	130	10^7

**Характеристики колебаний в механической системе
и соответствующие им величины в электрической цепи**

Механическая система		Электрическая цепь (контур)	
Масса	m	Индуктивность	L
Упругость (жесткость)	k	Величина	$1/C$
Коэффициент трения	μ	Сопротивление	R
Сила	F	Э.д.с.	\mathcal{E}
Отклонение от положения равновесия	x	Заряд на конденсаторе	q
Скорость	v	Ток	I
Потенциальная энергия	U	Энергия электрического поля	W_e
Кинетическая энергия	K	Энергия магнитного поля	W_m

Названия, символы и атомные массы химических элементов

1. Водород	H	1,0079	32. Германий	Ge	72,59
2. Гелий	He	4,00260	33. Мышьяк	As	74,9216
3. Литий	Li	6,941	34. Селен	Se	78,96
4. Бериллий	Be	9,01218	35. Бром	Br	79,904
5. Бор	B	10,81	36. Криптон	Kr	83,80
6. Углерод	C	12,011	37. Рубиний	Rb	85,467
7. Азот	N	14,0067	38. Стронций	Sr	87,62
8. Кислород	O	15,9994	39. Иттрий	Y	88,9059
9. Фтор	F	18,998403	40. Цирконий	Zr	91,22
10. Неон	Ne	20,179	41. Ниобий	Nb	92,9064
11. Натрий	Na	22,98977	42. Молибден	Mo	95,94
12. Магний	Mg	24,305	43. Технеций	Tc	98,9062

13. Алюминий	Al	26,98154	44. Рутений	Ru	101,07
14. Кремний	Si	28,0855	45. Родний	Rh	102,9055
15. Фосфор	P	30,97376	46. Палладий	Pd	106,4
16. Сера	S	32,06	47. Серебро	Ag	107,868
17. Хлор	Cl	35,453	48. Кадмий	Cd	112,41
18. Аргон	Ar	39,948	49. Индий	In	114,82
19. Калий	K	39,0983	50. Олово	Sn	118,69
20. Кальций	Ca	40,08	51. Сурьма	Sb	121,75
21. Скандий	Sc	44,9559	52. Теллур	Te	127,60
22. Титан	Ti	47,90	53. Иод	I	126,9045
23. Ванадий	V	50,9415	54. Ксенон	Xe	131,30
24. Хром	Cr	51,996	55. Цезий	Cs	132,9054
25. Марганец	Mn	54,9380	56. Барий	Ba	137,33
26. Железо	Fe	55,847	57. Лантан	La	138,9055
27. Кобальт	Co	58,9332	58. Церий	Ce	140,12
28. Никель	Ni	58,71	59. Празеодим	Pr	140,9077
29. Медь	Cu	63,546	60. Неодим	Nd	144,24
30. Цинк	Zn	65,38	61. Прометий	Pm	[145]
31. Галлий	Ga	69,735	62. Самарий	Sm	150,4

Основные характеристики элементарных частиц

Наименование	Обозначение	Масса покоя, m_e	Заряд, e^-	Спин, \hbar	Время жизни, с
Фотон	γ	0	0	1	Стабилен
Лептоны					
Электронное нейтрино	ν_e	$<4 \cdot 10^{-4}$	0	1/2	Стабилен
Электронное анти-нейтрино	$\tilde{\nu}_e$	$<4 \cdot 10^{-4}$	0	1/2	Стабилен
Мюонное нейтрино	ν_μ	<8	0	1/2	Стабилен
Мюонное анти-нейтрино	$\tilde{\nu}_\mu$	<8	0	1/2	Стабилен
Электрон	e^-	1	-1	1/2	Стабилен
Позитрон	e^+	1	+1	1/2	Стабилен
Отрицательный мюон	μ^-	206,77	-1	1/2	$2,21 \cdot 10^{-6}$

Положительный мюон	μ^+	206,77	+1	1/2	$2,21 \cdot 10^{-6}$
Мезоны					
Пи-плюс	π^+	273,18	+1	0	$2,55 \cdot 10^{-8}$
Пи-минус	π^-	273,18	-1	0	$2,55 \cdot 10^{-8}$
Пи-нуль	π^0	264,2	0	0	$2,3 \cdot 10^{-16}$
Ка-плюс	K^+	966,6	+1	0	$1,22 \cdot 10^{-8}$
Ка-минус	K^-	966,6	-1	0	$1,22 \cdot 10^{-8}$
Ка-нуль	K^0	974,2	0	0	$K_1^0 \sim 10^{-10}$
Анти-ка-нуль	\tilde{K}^0	974,2	0	0	$K_2^0 \sim 6.1 \cdot 10^{-8}$
Барионы ну-клоны					
Протон	p	1836,12	-1	1/2	Стабилен
Антипротон	\tilde{p}	1836,12	+1	1/2	Стабилен
Нейтрон	n	1838,65	0	1/2	$1,01 \cdot 10^3$
Антинейтрон	\tilde{n}	1838,65	0	1/2	$1,01 \cdot 10^3$
Барионы гипе-роны					
Ламбда-нуль	Λ^0	2182,8	0	1/2	$2,51 \cdot 10^{-10}$
Анти-ламбда-нуль	$\tilde{\Lambda}^0$	2182,8	0	1/2	$2,51 \cdot 10^{-10}$
Сигма-плюс	Σ^+	2327,7	+1	1/2	$0,81 \cdot 10^{-10}$
Анти-сигма-плюс	$\tilde{\Sigma}^+$	2327,7	-1	1/2	$0,81 \cdot 10^{-10}$
Сигма-минус	Σ^-	2342,6	-1	1/2	$1,6 \cdot 10^{-10}$
Анти-сигма-минус	$\tilde{\Sigma}^-$	2342,6	+1	1/2	$1,6 \cdot 10^{-10}$
Сигма-нуль	Σ^0	2333,4	0	1/2	$<10 \cdot 10^{-14}$
Анти-сигма-	$\tilde{\Sigma}^0$	2333,4	0	1/2	$<10 \cdot 10^{-14}$

нуль					
Кси-минус	Ξ^-	2584,7	-1	1/2	$1,7 \cdot 10^{-10}$
Анти-кси-минус	$\bar{\Xi}^-$	2584,7	+1	1/2	$1,7 \cdot 10^{-10}$
Кси-нуль	Ξ^0	2572	0	1/2	$3,5 \cdot 10^{-10}$
Анти-кси-нуль	$\bar{\Xi}^0$	2572	0	1/2	$3,5 \cdot 10^{-10}$
Омега-минус	Ω^-	3278	-1	1/2	$\sim 0,7 \cdot 10^{-10}$
Анти-омега-минус	$\bar{\Omega}^-$	3278	+1	3/2	$\sim 0,7 \cdot 10^{-10}$

Период полураспада $T_{1/2}$ радиоактивных изотопов

Изотоп	Символ изотопа, номер	Тип распада	Период полураспада
Актиний	$^{225}_{89}\text{Ac}$	α	10 суток
Йод	$^{131}_{53}\text{I}$	β^-, γ	8 суток
Иридий	$^{192}_{77}\text{Ir}$	β^-, γ	75 суток
Кобальт	$^{60}_{27}\text{Co}$	β^-, γ	5,3 года
Магний	$^{27}_{12}\text{Mg}$	β^-	10 мин
Радий	$^{219}_{88}\text{Ra}$	α	10^{-3} с
Радий	$^{226}_{88}\text{Ra}$	α, γ	$1,62 \cdot 10^3$ лет
Радон	$^{222}_{86}\text{Rn}$	α	3,8 суток
Стронций	$^{90}_{38}\text{Sr}$	β^-	28 лет
Торий	$^{229}_{90}\text{Th}$	α, γ	$7 \cdot 10^3$ лет
Уран	$^{238}_{92}\text{U}$	α, γ	$4,5 \cdot 10^9$ лет
Фосфор	$^{32}_{15}\text{P}$	β^-	14,3 суток
Натрий	$^{22}_{11}\text{Na}$	γ	2,6 года

Показатель преломления n

Вещество	Значение
Алмаз	2,42
Вода	1,33
Масло коричное	1,6
Сероуглерод	1,63

Стекло	1,5
--------	-----

Примечание: Показатели преломления стекла зависят от его сорта и длины волны проходящего через него излучения. Поэтому приведенное здесь значение показателя преломления следует рассматривать как условное и использовать его только в том случае, когда оно не указано в условии задачи.

Сопоставление характеристик механических и электромагнитных колебаний

Колебания			
механические		электромагнитные	
Масса	m	Индуктивность	L
Коэффициент жесткости	k	Обратная величина емкости	$\frac{1}{C}$
Собственная частота пружинного маятника	$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$	Собственная частота колебательного контура	$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$
Уравнение гармонических колебаний	$\frac{d^2x}{dt^2} + \frac{k}{m}x = 0$	Уравнение гармонических колебаний	$\frac{d^2q}{dt^2} + \frac{1}{LC}q = 0$
Смещение	$x = x_m \cos(\omega_0 t + \varphi)$	Заряд	$q = q_m \cos(\omega_0 t + \varphi)$
Скорость	$v = x_m \omega \sin(\omega_0 t + \varphi)$	Сила тока	$I = I_m \sin(\omega_0 t + \varphi)$
Ускорение	$a = x_m \omega_0^2 \cos(\omega_0 t + \varphi)$	Напряжение	$U = U_m \cos(\omega_0 t + \varphi)$
Период колебаний	$T = 2\pi\sqrt{m/k}$	Период колебаний Формула Томсона	$T = 2\pi\sqrt{LC}$
Потенциальная энергия	$W = mgh = \frac{kx^2}{2}$	Энергия электрического поля	$W = \frac{q^2}{2C} = \frac{CU^2}{2} = \frac{qU}{2}$
Кинетическая энергия	$K = \frac{mv^2}{2}$	Энергия магнитного поля	$K = \frac{LI^2}{2}$

		ля	
Дифференциальное уравнение затухающих колебаний	$\frac{d^2x}{dt^2} + \frac{r}{m} \frac{dx}{dt} + \frac{k}{m} x = 0$ $\ddot{x} + 2\beta\dot{x} + \omega_0^2 x = 0$	Дифференциальное уравнение затухающих колебаний	$\frac{d^2q}{dt^2} + \frac{R}{L} \frac{dq}{dt} + \frac{1}{LC} q = 0$ $\ddot{q} + 2\beta\dot{q} + \omega_0^2 q = 0$
Решение уравнения	$x = x_m e^{-\beta t} \cos \omega t$	Решение уравнен.	$q = q_m e^{-\beta t} \cos \omega t$
Коэффициент затухания	$\beta = \frac{r}{2m}$	Коэффициент затухания	$\beta = \frac{R}{2L}$
Циклическая частота затухающих колебаний	$\omega = \sqrt{\frac{k}{m} - \frac{r^2}{4m^2}}$	Циклическая частота затухающих колебаний	$\omega = \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}}$
Логарифмический декремент затухания	$\chi = \ln \frac{A(t)}{A(t+T)} = \beta T$	Логарифмический декремент затухания	$\chi = \pi R \sqrt{\frac{C}{L}} = \beta T$
Добротность пружинного маятника	$Q = \frac{\omega_0}{2\beta} = \frac{\pi}{\chi} = \frac{\sqrt{kn}}{r}$	Добротность колебательного контура	$Q = \frac{\omega_0}{2\beta} = \frac{\pi}{\chi} = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}}$
Резонансная частота	$\omega_{\text{рез}} = \sqrt{\omega_0^2 - 2\beta^2}$	Резонансная частота	$\omega_{\text{рез}} = \sqrt{\omega_0^2 - 2\beta^2}$

Система уравнений максвелла. Электродинамика покоящихся сред.

№	Название	Дифференциальная форма	Интегральная форма	Физический смысл
1	Закон индукции Фарадея	$\text{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$	$\oint_L \vec{E} d\vec{l} = -\oint_S \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} d\vec{S}$	Вихревое электрическое поле порождается изменением магнитной индукции и наоборот
2	Обобщенный закон Био-Саварра-Лапласа	$\text{rot} \vec{H} = \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$	$\oint_L \vec{H} d\vec{l} = I_{\text{encl}} + \oint_S \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} d\vec{S}$	Вихревое магнитное поле порождается электрическим током и током смещения

				ком и изменением электрической индукции
3	Теорема Гаусса для вектора \vec{D}	$\text{div}\vec{D} = \rho$	$\oint_S \vec{D}d\vec{S} = q_{\text{encl}}$	Электрический заряд является источником электростатического поля
4	Теорема Гаусса для вектора \vec{B}	$\text{div}\vec{B} = 0$	$\oint_S \vec{B}d\vec{S} = 0$	Магнитная индукция не расходится (магнитных зарядов нет)
5	Электростатическая индукция	$\vec{D} = \epsilon_0\epsilon\vec{E}$		Связь электрической индукции с напряженностью электростатического поля
6	Магнитная индукция	$\vec{B} = \mu_0\mu\vec{H}$		Связь магнитной индукции с напряженностью магнитного поля
7	Плотность тока	$\vec{j} = \sigma\vec{E}$		Связь плотности тока с напряженностью электростат. поля (Закон Ома в диф. форме)

\vec{B} – вектор индукции магнитного поля;

\vec{E} – вектор напряженности электрического поля;

$\vec{D} = \epsilon_0\vec{E} + \vec{P}$ – вектор электрического смещения;

$\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu_0} - \vec{J}$ – напряженности магнитного поля;

\vec{P} – поляризованность;

\vec{J} – намагниченность вещества;

\vec{j} – вектор плотности тока;

ρ – объемная плотность заряда.

Учебное издание

КУЗНЕЦОВ Сергей Иванович

Краткий справочник по физике Часть III Оптика.

**Квантовая природа излучения.
Основы атомной физики и квантовой механики.
Физика атомного ядра и элементарных частиц**

Учебное пособие

Научный редактор
доктор педагогических наук, профессор
В.В. Ларионов

Редактор *Н.Т. Синельникова*

Верстка Л.А. Егорова

**Отпечатано в Издательстве ТПУ в полном соответствии
с качеством предоставленного оригинал-макета**

Подписано к печати Формат 60×84/16.
Бумага «Снегурочка». Печать Хегох.
Усл. печ. л. 13,46. Уч.-изд. л. 12,37.
Заказ . Тираж экз.



Национальный исследовательский
Томский политехнический университет
Система менеджмента качества
Томского политехнического университета сертифицирована
NATIONAL QUALITY ASSURANCE по стандарту ISO 9001:2000



ИЗДАТЕЛЬСТВО  **ТПУ**. 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.
Тел./факс: 8(3822)56-35-35, www.tpu.ru