



ДОНСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
УПРАВЛЕНИЕ ЦИФРОВЫХ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Кафедра «Физика»

Задачи по физике для бакалавров ч.2

**Электромагнетизм.
Электромагнитные колебания.
Оптика, атомная физика,
физика атомного ядра
и элементарных частиц**

«ФИЗИКА»

**Авторы
Егорова С.И.,
Жданова Т.П.,
Лемешко Г.Ф.,
Пруцакова Н.В.**

Ростов-на-Дону, 2022

Аннотация

Цель пособия – обеспечение лично-ориентированного подхода к практическим занятиям по общему курсу физики с учетом степени подготовки студентов и количества аудиторных часов, выделяемых на лекционные и практические занятия. Пособие предназначено для обучения и контроля работы студентов на практических занятиях по разделам электромагнетизм, электромагнитные колебания, оптика, атомная физика, физика атомного ядра и элементарных частиц в течение второго семестра обучения.

Авторы

Егорова С.И. – д.т.н., профессор кафедры
«Физика»

Жданова Т.П. - к.ф.-м.н., доцент кафедры
«Физика»

Лемешко Г.Ф. - к.ф.-м.н., доцент кафедры
«Физика»

Пруцакова Н.В. - к.ф.-м.н., доцент кафедры
«Физика»



Оглавление

Общие методические указания.....	4
1. Электромагнетизм	5
Основные формулы и законы.....	5
Задания	8
2. Электромагнитные колебания. Переменный ток. Электромагнитные волны.....	16
Основные формулы и законы.....	16
Задания	18
3. Интерференция света	22
Основные формулы и законы.....	22
Задания	23
4. Дифракция и поляризация света.....	28
Основные формулы и законы.....	28
Задания	30
5. Квантовая природа излучения	37
Основные формулы и законы.....	37
Задания	39
6. Элементы квантовой физики атомов, молекул и твёрдых тел	43
6.1 Теория атома водорода по Бору.....	43
Основные формулы и законы.....	43
Задания	45
6.2 Элементы квантовой механики.....	46
Основные формулы и законы.....	46
Задания	48
6.3 Квантовые свойства атомов, молекул и твёрдых тел.....	51
Основные формулы и законы.....	51
Задания	54
7. Элементы физики атомного ядра и элементарных частиц.....	58
Основные формулы и законы.....	58
Задания	59
Литература	65

Общие методические указания

При решении и оформлении задач необходимо соблюдать следующие требования:

1. Записать краткое условие задачи, выразить все известные величины в одной и той же системе единиц (как правило, в СИ). При необходимости ввести дополнительные постоянные физические величины.
2. Решение задач следует сопровождать краткими, но исчерпывающими объяснениями. При необходимости дать чертеж или график.
3. Решать задачу надо в общем виде, выразив искомую величину в буквенных обозначениях, заданных в условии задачи.
4. Произвести вычисления.

В течение семестра студенты выполняют две контрольные работы: первую - по магнетизму, вторую – по оптике и атомной физике.

Результаты контроля аудиторной и самостоятельной работы студентов на практических занятиях учитываются лектором при приеме экзаменов и дифференцированных зачетов.

1. ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ

Основные формулы

- Сила взаимодействия между двумя прямолинейными параллельными бесконечно длинными проводниками с токами I_1 и I_2 , приходящаяся на единицу длины

$$F = \frac{\mu_0 \mu I_1 I_2}{2\pi r},$$

где r – расстояние между проводниками, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$ – магнитная постоянная, μ – магнитная проницаемость изотропной среды (для вакуума $\mu = 1$).

- Связь магнитной индукции \vec{B} с напряженностью \vec{H} магнитного поля

$$\vec{B} = \mu_0 \mu \vec{H}.$$

- Принцип суперпозиции магнитных полей

$$\vec{B} = \sum_i \vec{B}_i, \quad \vec{H} = \sum_i \vec{H}_i,$$

где \vec{B}_i (\vec{H}_i) – магнитная индукция (напряжённость), создаваемая каждым током или движущимся зарядом в отдельности.

- Магнитная индукция поля, создаваемая бесконечно длинным прямолинейным проводником с током,

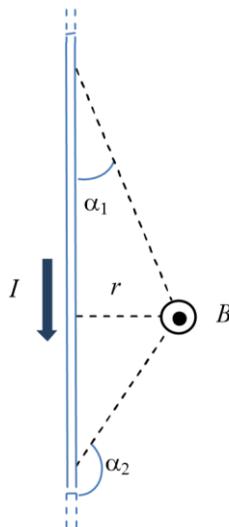
$$B = \frac{\mu_0 \mu}{2\pi} \cdot \frac{I}{r},$$

где r – расстояние от проводника с током до точки, в которой определяется магнитная индукция.

- Магнитная индукция поля, создаваемого прямолинейным проводником с током конечной длины

$$B = \frac{\mu_0 \mu}{4\pi} \cdot \frac{I}{r} (\cos \alpha_1 - \cos \alpha_2),$$

где α_1, α_2 – углы между элементом тока и радиус-вектором, проведенным из рассматриваемой точки к концам проводника (рис).



Физика

- Магнитная индукция поля в центре кругового проводника с током

$$B = \frac{\mu_0 \mu I}{2R},$$

где R – радиус кругового витка.

- Магнитная индукция поля на оси кругового проводника с током

$$B = \frac{\mu_0 \mu IR^2}{2(R^2 + a^2)^{3/2}},$$

где R – радиус кругового витка, a – расстояние от центра витка до точки, в которой определяется магнитная индукция.

- Магнитная индукция поля внутри тороида

$$B = \mu_0 \mu n \frac{R}{r},$$

где n – число витков на единицу длины, $I \cdot n$ – число ампер-витков, R – радиус тороида, r – радиус витка.

- Магнитная индукция поля бесконечно длинного соленоида и внутри тороида, радиус которого значительно больше радиуса витка,

$$B = \mu_0 \mu n I.$$

- Магнитная индукция поля на оси соленоида конечной длины

$$B = \frac{\mu_0 \mu I n}{2} (\cos \beta_1 - \cos \beta_2),$$

где β_1, β_2 – углы между осью катушки и радиус-вектором, проведенным из данной точки к концам катушки.

- Сила Ампера, действующая на элемент dl проводника с током I в магнитном поле,

$$dF = BI \sin \alpha \cdot dl,$$

где α – угол между направлениями тока и магнитной индукции поля.

- Магнитный момент контура с током

$$\vec{p}_m = IS \vec{n} \quad \text{или} \quad p_m = IS,$$

где S – площадь контура, \vec{n} – единичный вектор нормали (положительный) к плоскости контура.

- Вращающий момент, действующий на контур с током, помещенный в однородное магнитное поле,

$$M = p_m B \sin \alpha,$$

где α – угол между направлением нормали к плоскости контура и

магнитной индукцией поля.

- Магнитный поток через площадку dS

$$d\Phi = B_n dS,$$

где $B_n = B \cos \alpha$, α – угол между направлениями вектора магнитной индукции и нормалью к площадке dS .

- Магнитный поток неоднородного поля через произвольную поверхность.

$$\Phi = \int_s B_n dS,$$

где интегрирование ведется по всей поверхности.

- Магнитный поток однородного поля через плоскую поверхность

$$\Phi = BS \cos \alpha.$$

- Работа перемещения проводника с током в магнитном поле

$$dA = I \cdot d\Phi,$$

где $d\Phi$ – поток магнитной индукции, пересеченный проводником при его движении.

- Работа перемещения контура с током в магнитном поле

$$A = I \cdot \Delta\Phi,$$

где $\Delta\Phi$ – изменение магнитного потока через поверхность, ограниченную контуром при его движении.

- Сила Лоренца, действующая на движущуюся заряженную частицу в магнитном поле,

$$F = qBv \sin \alpha,$$

где q – заряд частицы, v – скорость частицы, α – угол между направлениями скорости частицы и магнитной индукции поля.

- Радиус окружности и период вращения частицы, влетевшей в магнитное поле под углом 90° к линиям индукции,

$$R = \frac{mv}{qB}, \quad T = \frac{2\pi R}{qB}, \quad m - \text{масса частицы, } q - \text{заряд частицы.}$$

- Шаг винтовой траектории, по которой движется заряженная частица, влетевшая в магнитное поле под углом α к линиям магнитного поля

$$h = T \cdot v \cos \alpha.$$

- ЭДС индукции в контуре при изменении магнитного потока $d\Phi$

$$\mathcal{E} = -\frac{d\Phi}{dt}, \quad \text{или} \quad \mathcal{E} = -N \frac{d\Phi}{dt},$$

где N – общее число витков в контуре.

- Разность потенциалов на концах проводника, движущегося в магнитном поле,

$$U = Blv \sin \alpha,$$

где v – скорость движения проводника, l – длина проводника, α – угол между направлениями скорости движения проводника и магнитной индукцией поля.

- ЭДС индукции, возникающая в рамке, содержащей N витков площадью S , при вращении рамки с угловой скоростью ω в однородном магнитном поле

$$\mathcal{E} = BNS\omega \sin \alpha.$$

- Заряд, протекающий в контуре при изменении потока, пронизывающего поверхность, ограниченную контуром

$$q = -\frac{\Delta\Phi}{R}.$$

- ЭДС самоиндукции

$$\mathcal{E} = -L \frac{dI}{dt},$$

где $L = \Phi / I$ – индуктивность контура.

- Индуктивность соленоида

$$L = \mu_0 \mu n^2 l S = \mu_0 \mu \frac{N^2}{l} S,$$

где S – площадь поперечного сечения соленоида, l – длина соленоида, N – полное число витков.

- Энергия магнитного поля контура с током

$$W = \frac{LI^2}{2}.$$

- Объемная плотность энергии магнитного поля

$$w = \frac{BH}{2} = \frac{\mu_0 \mu H^2}{2} = \frac{B^2}{2\mu_0 \mu}.$$

Задания

1.1. На рис. 1.1 изображено сечение двух прямолинейных бесконечно длинных проводников с током. Расстояние AC между проводниками равно 10 см, $I_1=20$ А, $I_2 = 30$ А. Найдите магнитную индукцию поля, вызванного токами I_1 и I_2 в точках M_1 , M_2 и M_3 . Расстояния $M_1A=2$ см, $AM_2 =4$ см и $CM_3 =3$ см. [0,15мТл; 0,20 мТл; 0,17 мТл].

Физика

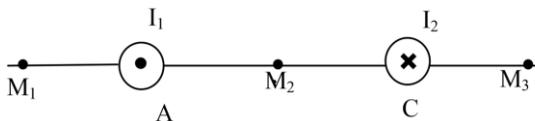


Рис. 1.1.

1.2. Решите предыдущую задачу при условии, что токи текут в одном направлении. [0,25 мТл; 0; 0,23 мТл].

1.3. Два прямолинейных бесконечно длинных проводника расположены перпендикулярно друг к другу и находятся в одной плоскости (рис. 1.2). Найдите магнитную индукцию поля в точках M_1 и M_2 , если $I_1=2$ А и $I_2=3$ А. Расстояния $AM_1=AM_2= 1$ см, $DM_1=CM_2=2$ см. [10^{-5} Тл; $7 \cdot 10^{-5}$ Тл] .

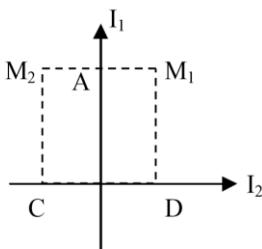


Рис. 1.2.

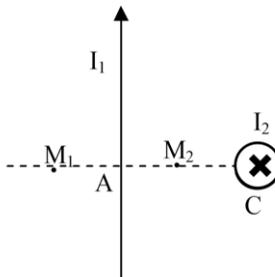


Рис. 1.3.

1.4. Два прямолинейных бесконечно длинных проводника расположены перпендикулярно друг к другу и находятся во взаимноперпендикулярных плоскостях (рис. 1.3). Найдите магнитную индукцию поля в точках M_1 и M_2 , если $I_1=2$ А и $I_2=3$ А. Расстояния $AM_1=AM_2= 1$ см и $AC=2$ см. [$4,5 \cdot 10^{-5}$ Тл; $7,2 \cdot 10^{-5}$ Тл] .

1.5. На рис. 1.4 изображено сечение трёх прямолинейных бесконечно длинных проводников с током. Расстояния $AC=CD=5$ см; $I_1=I_2=I$; $I_3=2I$. Найдите точку на прямой AD, в которой индукция магнитного поля, вызванного токами I_1, I_2, I_3 , равна нулю. [3,3 см от I_1 вправо].

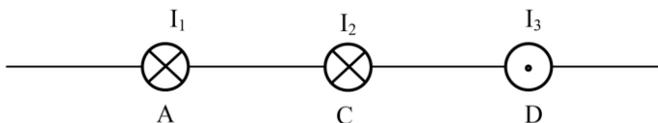


Рис. 1.4.

1.6. Решите предыдущую задачу при условии, что все токи текут в одном направлении. [1,8 см и 6,96 см от точки A вправо].

1.7. Расстояние между двумя длинными параллельными проводниками 5 см. По проводам текут токи в одном направлении 30

А каждый. Найдите индукцию магнитного поля в точке, находящейся на расстоянии 4 см от одного и 3 см от другого провода. [$2,5 \cdot 10^{-4}$ Тл].

1.8. Расстояние между двумя длинными параллельными проводниками 5 см. По проводам текут токи в противоположных направлениях 10 А каждый. Найдите индукцию магнитного поля в точке, находящейся на расстоянии 2 см от одного и 3 см от другого провода. [$1,66 \cdot 10^{-4}$ Тл].

1.9. По двум бесконечно длинным прямым параллельным проводникам, расстояние между которыми равно 10 см, текут токи 20 и 30 А в одном направлении. Определите магнитную индукцию поля в точке, удаленной на одинаковое расстояние 10 см от обоих проводников. [872 мТл].

1.10. По двум бесконечно длинным прямым параллельным проводникам, расстояние между которыми равно 25 см, текут токи 20 и 30 А в противоположных направлениях. Определите магнитную индукцию поля в точке, удаленной на расстояние 30 см от первого и 40 см от второго проводника. [9,5 мкТл].

1.11. Определите магнитную индукцию поля на оси тонкого проволочного кольца радиусом 10 см, по которому течет ток 10 А, в точке, расположенной на расстоянии 15 см от центра кольца. [10,7 мкТл].

1.12. Два круговых витка радиусом 4 см каждый расположены в параллельных плоскостях на расстоянии 0,1 м друг от друга. По виткам текут токи $I_1 = I_2 = 2$ А. Найдите магнитную индукцию поля на оси витков в точке, находящейся на равном расстоянии от них. Токи в витках текут в одном направлении. [$1,5 \cdot 10^{-5}$ Тл].

1.13. Решите предыдущую задачу при условии, что токи текут в противоположных направлениях. [0].

1.14. Два круговых витка радиусом 2 см расположены в двух взаимно перпендикулярных плоскостях так, что центры этих витков совпадают. Радиус каждого витка 2 см, токи, текущие по виткам, $I_1 = I_2 = 5$ А. Найдите индукцию магнитного поля в центре этих витков. [$2,2 \cdot 10^{-4}$ Тл].

1.15. По проводу, согнутому в виде квадрата со стороной, равной 60 см, течет постоянный ток 3 А. Определите магнитную индукцию поля в центре квадрата. [5,66 мкТл].

1.16. По проводнику, изогнутому в виде окружности, течет ток. Магнитное поле в центре окружности $B = 6,28$ мкТл. Не изменяя силу тока в проводнике, ему придали форму квадрата. Определите магнитную индукцию поля в точке пересечения диагоналей этого квадрата. [7,2 мкТл].

1.17. По контуру в виде равностороннего треугольника идет ток 40 А. Сторона треугольника 30 см. Определите магнитную индукцию в точке пересечения высот. [$1,2 \cdot 10^{-4}$ Тл].

1.18. По проводнику, согнутому в виде прямоугольника со сторонами $a = 8$ см и $b = 12$ см, течет ток силой $I = 50$ А. Определите магнитную индукцию поля в точке пересечения диагоналей

прямоугольника. [0,6 мТл].

1.19. По проволочной рамке, имеющей форму правильного шестиугольника, течет ток силой $I = 2$ А. При этом в центре рамки образуется магнитное поле $B = 41,4$ мкТл. Найдите длину проволоки, из которой сделана рамка. [0,2 м].

1.20. Бесконечно длинный прямой проводник согнут под прямым углом. По проводнику течет ток 100 А. Вычислите индукцию магнитного поля в точке, лежащей на биссектрисе угла на расстоянии 10 см от вершины угла. [$4,82 \cdot 10^{-4}$ Тл].

1.21. Ток в 2А течет по длинному проводнику, согнутому под углом 120° . Найдите магнитную индукцию поля в точке, лежащей на биссектрисе этого угла и отстоящей от вершины угла на расстоянии 10 см. [6,9 мкТл].

1.22. Ток 2 А, протекая по катушке длиной 30 см, создает внутри нее магнитную индукцию поля 8,38 мТл. Сколько витков содержит катушка? Диаметр катушки считать малым по сравнению с ее длиной. [1000].

1.23. Соленоид длиной 0,5 м содержит 1000 витков. Определите магнитную индукцию поля внутри соленоида, если сопротивление его обмотки 120 Ом, а напряжение на её концах 60 В. [1,26 мТл].

1.24. Обмотка соленоида содержит два слоя плотно прилегающих друг к другу витков провода диаметром $d = 0,2$ мм. Определите магнитную индукцию поля на оси соленоида, если по проводу течет ток $I = 0,5$ А. [6,28 мТл].

1.25. Тонкое кольцо массой 15 г и радиусом 12 см несет заряд, равномерно распределенный с линейной плотностью 10 нКл/м. Кольцо равномерно вращается с частотой 8 с^{-1} относительно оси, перпендикулярной плоскости кольца и проходящей через ее центр. Определите отношение магнитного момента кругового тока, создаваемого кольцом, к его моменту импульса. [251 нКл/кг].

1.26. Ток, протекая по проволочному кольцу из медной проволоки сечением $1,0 \text{ мм}^2$, создает в центре кольца магнитную индукцию поля 0,224 мТл. Разность потенциалов, приложенная к концам проволоки, образующей кольцо, равна 0,12 В. Какой ток течет по кольцу? [20 А].

1.27. Бесконечно длинный провод образует круговую петлю, касательную к проводу. Радиус петли равен 8 см. По проводу течет ток силой 5А. Найдите индукцию магнитного поля в центре петли. [51,8 мкТл].

1.28. Сила тока в горизонтально расположенном проводнике длиной 20 см и массой 4 г равна 10 А. Найдите индукцию магнитного поля (модуль и направление), в которое нужно поместить проводник, чтобы сила тяжести уравновесилась силой Ампера. [20 мТл].

1.29. Два длинных горизонтальных проводника расположены параллельно друг другу на расстоянии 8 мм. Верхний проводник закреплен неподвижно, а нижний висит свободно под ним. Какой ток

нужно пропустить по верхнему проводу для того, чтобы нижний мог висеть, не падая? По нижнему течет ток в 1А и масса каждого сантиметра длины проводника равна 2,55 мг. [100А].

1.30. Два прямолинейных длинных проводника находятся на расстоянии 10 см друг от друга. По проводникам текут токи 20А и 30А. Какую работу на единицу длины проводников надо совершить, чтобы раздвинуть эти проводники до расстояния 20 см? [83 мкДж].

1.31. Два бесконечных прямолинейных параллельных проводника с одинаковыми токами, текущими в одном направлении, находятся друг от друга на расстоянии R. Чтобы их раздвинуть до расстояния 3R, на каждый сантиметр длины проводника затрачивается работа 220 нДж. Определите силу тока в проводниках. [10А].

1.32. Прямой проводник длиной 20 см, по которому течет ток 40А, находится в однородном магнитном поле с индукцией 0,5 Тл. Какую работу совершают силы поля, перемещая проводник на 20 см, если направление движения перпендикулярно линиям магнитной индукции и проводнику. [0,8 Дж].

1.33. В однородном магнитном поле, индукция которого 0,5 Тл, движется равномерно проводник со скоростью 20 см/с перпендикулярно полю. Длина проводника 10 см. По проводнику течет ток 2А. Найдите мощность, затрачиваемую на перемещение проводника. [20 мВт].

1.34. Магнитная индукция однородного поля 0,4 Тл. В этом поле равномерно со скоростью 15 см/с движется проводник длиной 1 м так, что угол между проводником и индукцией поля равен 30° . По проводнику течет ток 1А. Найдите работу перемещения проводника за 10 с движения. [0,3 Дж].

1.35. Проводник длиной 1 м расположен перпендикулярно однородному магнитному полю с индукцией 1,3 Тл. Определите ток в проводнике, если при движении его со скоростью 10 см/с в направлении, перпендикулярном полю и проводнику, за 4 с на перемещение проводника совершается работа 10 Дж. [19А].

1.36. В однородном магнитном поле с индукцией 18 мкТл в плоскости, перпендикулярной линиям индукции, расположена плоская круговая рамка, состоящая из 10 витков площадью 100 см^2 каждый. В обмотке рамки течет ток 3А. Рамку поворачивают на 180° вокруг одного из диаметров. Какая работа при этом совершается? [1,08 мкДж].

1.37. Квадратный контур со стороной 20 см, по которому течет ток 20А, свободно установился в однородном магнитном поле с индукцией 10 мТл. Определите работу, совершаемую при повороте контура вокруг оси, лежащей в плоскости контура, на угол 180° . [16 мДж].

1.38. По круговому витку радиусом 15 см течет ток силой 10А. Виток расположен в однородном магнитном поле с индукцией 40 мТл так, что нормаль к плоскости контура составляет угол 30° с вектором

магнитной индукции. Определите изменение потенциальной энергии контура при его повороте на угол 90° в направлении увеличения угла. [0,04 Дж].

1.39. Круглая рамка с током площадью 20 см^2 закреплена параллельно магнитному полю с индукцией $0,2 \text{ Тл}$, и на нее действует вращающий момент $0,6 \text{ мН}\cdot\text{м}$. Когда рамку освободили, она повернулась на 90° , и ее угловая скорость стала 20 с^{-1} . Определите силу тока, текущего в рамке. [1,5А].

1.40. Круговой контур помещен в однородное магнитное поле так, что плоскость контура перпендикулярна силовым линиям поля. Магнитная индукция поля $0,2 \text{ Тл}$. По контуру течет ток 2 А . Радиус контура 2 см . Какая работа совершится при повороте контура на 90° ? [50,24 мДж].

1.41. Поток магнитной индукции сквозь площадь поперечного сечения соленоида (без сердечника) 5 мкВб . Длина соленоида 35 см . Определите магнитный момент этого соленоида. [$1 \text{ А}\cdot\text{м}^2$].

1.42. Заряженная частица движется в магнитном поле по окружности со скоростью 1 Мм/с . Магнитная индукция поля равна $0,3 \text{ Тл}$. Радиус окружности 4 см . Найдите заряд частицы, если известно, что ее кинетическая энергия равна 12 кэВ . [$3,2 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$].

1.43. Электрон движется по окружности в однородном магнитном поле с индукцией $31,4 \text{ мТл}$. Определите период обращения электрона. [1,1 нс].

1.44. Определите частоту обращения электрона по круговой орбите в магнитном поле с индукцией 1 Тл . [28 ГГц].

1.45. Протон, ускоренный разностью потенциалов $0,5 \text{ кВ}$, влетая в однородное магнитное поле с индукцией $0,1 \text{ Тл}$, движется по окружности. Определите радиус этой окружности. [3,23 см].

1.46. Серпуховской ускоритель протонов ускоряет эти частицы до энергии 76 ГэВ . Ускоренные протоны движутся по окружности радиуса 236 м и удерживаются на ней магнитным полем, перпендикулярным к плоскости орбиты. Найдите необходимое для этого магнитное поле. [1,07 кТл].

1.47. Протон и альфа-частица, ускоренные одинаковой разностью потенциалов, влетают в однородное магнитное поле. Во сколько раз радиус кривизны траектории протона меньше радиуса кривизны траектории альфа-частицы? [1,4].

1.48. Частица, несущая один элементарный заряд, влетела в однородное магнитное поле с индукцией $0,05 \text{ Тл}$. Определите момент импульса, которым обладала частица при движении в магнитном поле, если траектория ее представляла дугу окружности радиусом $0,2 \text{ мм}$. [$3,2 \cdot 10^{-28} \text{ Н}\cdot\text{м}\cdot\text{с}$].

1.49. Найдите отношение q/m для заряженной частицы, если она, влетая со скоростью 10^8 см/с в однородное магнитное поле напряженностью в $2 \cdot 10^5 \text{ А/м}$, движется по дуге окружности радиусом $8,3 \text{ см}$. Направление скорости движения частицы перпендикулярно направлению магнитного поля. [48 МКл/кг].

1.50. Альфа-частица со скоростью 2Мм/с влетает в магнитное поле с индукцией 1 Тл под углом 30° . Определите радиус витка винтовой линии, которую будет описывать альфа-частица. [2,1 см].

1.51. Электрон, ускоренный разностью потенциалов 6 кВ, влетает в однородное магнитное поле под углом 30° к направлению поля и начинает двигаться по винтовой линии. Магнитная индукция поля равна 130 мТл. Найдите шаг винтовой линии. [11 см].

1.52. Протон влетел в однородное магнитное поле под углом 60° к направлению линий поля и движется по спирали, радиус которой 2,5 см. Магнитная индукция поля равна 0,05 Тл. Найдите кинетическую энергию протона. [$1,6 \cdot 10^{-17}$ Дж].

1.53. Электрон, ускоренный разностью потенциалов 3 кВ, влетает в магнитное поле соленоида под углом 30° к его оси. Число ампер-витков соленоида равно 5000. Длина соленоида 26 см. Найдите шаг винтовой траектории электрона в магнитном поле соленоида. [3,94 см].

1.54. Магнитное поле с индукцией 126 мкТл направлено перпендикулярно электрическому полю, напряженность которого 10 В/м. Ион, летящий с некоторой скоростью, влетает в эти скрещенные поля. При какой скорости он будет двигаться прямолинейно? [79 км/с].

1.55. Заряженная частица прошла ускоряющую разность потенциалов 104 В и влетела в скрещенные под прямым углом электрическое ($E = 100$ В/м) и магнитное ($B = 0,1$ Тл) поля. Определите отношение заряда частицы к ее массе, если, двигаясь перпендикулярно обоим полям, частица не испытывает отклонений от прямолинейной траектории. [4,8 кКл/кг].

1.56. В однородном магнитном поле с индукцией 0,1 Тл равномерно вращается рамка, содержащая 1000 витков. Площадь рамки 150 см². Рамка делает 10 об/с. Определите максимальную ЭДС индукции в рамке. Ось вращения лежит в плоскости рамки и перпендикулярна направлению поля. [94,2 В].

1.57. Проволочный виток расположен перпендикулярно магнитному полю, индукция которого изменяется по закону $B = B_0(1 + e^{kt})$, где $B_0 = 0,5$ Тл, $k = 1$ с⁻¹. Найдите величину ЭДС, индуцируемой в витке в момент времени, равный 2,3 с. Площадь витка 0,04 м². [2 мВ].

1.58. Кольцо из алюминиевого провода помещено в магнитное поле перпендикулярно линиям магнитной индукции. Диаметр кольца 20 см, диаметр провода 1 мм. Определите скорость изменения магнитного поля, если сила индукционного тока в кольце 0,5А. Удельное сопротивление алюминия 26 нОм·м. [0,33 Тл/с].

1.59. В магнитном поле, индукция которого 0,25 Тл, вращается стержень длиной 1 м с постоянной угловой скоростью 20 рад/с. Ось вращения проходит через конец стержня параллельно силовым линиям поля. Найдите ЭДС индукции, возникающую на концах стержня. [2,5 В].

1.60. В магнитном поле с индукцией 0,1 Тл помещена квадратная рамка из медной проволоки. Площадь поперечного сечения проволоки 1 мм², площадь рамки 25 см². Нормаль к плоскости рамки параллельна

Физика

силовым линиям поля. Какой заряд пройдет по рамке при исчезновении магнитного поля? Удельное сопротивление меди $17 \text{ нОм}\cdot\text{м}$. [74 мКл].

1.61. Кольцо из проволоки сопротивлением 1 МОм находится в однородном магнитном поле с индукцией $0,4 \text{ Тл}$. Плоскость кольца составляет с линиями индукции угол 90° . Определите заряд, который протечет по кольцу, если его выдернуть из поля. Площадь кольца равна 10 см^2 . [0,4 Кл].

1.62. Медный обруч, имеющий массу 5 кг , расположен в плоскости магнитного меридиана. Какой заряд индуцируется в нем, если его повернуть около вертикальной оси на 90° ? Горизонтальная составляющая земного магнитного поля 20 мкТл . Плотность меди 8900 кг/м^3 , удельное сопротивление меди $17 \text{ нОм}\cdot\text{м}$. [5,26 мКл].

1.63. Катушка, содержащая 10 витков, каждый площадью 4 см^2 , находится в однородном магнитном поле. Ось катушки параллельна линиям индукции поля. Катушка присоединена к баллистическому гальванометру с сопротивлением 1000 Ом , сопротивлением катушки можно пренебречь. Когда катушку выдернули из поля, через гальванометр протекло 2 мКл . Определите индукцию поля. [0,5 Тл].

1.64. На стержень из немагнитного материала длиной 50 см и сечением 2 см^2 намотан в один слой провод так, что на каждый сантиметр длины стержня приходится 20 витков. Определите энергию магнитного поля соленоида, если сила тока в обмотке $0,5 \text{ А}$. [20 мкДж].

1.65. Найдите разность потенциалов на концах оси автомобиля, возникающую при горизонтальном движении его со скоростью 120 км/ч , если длина оси $1,5 \text{ м}$ и вертикальная составляющая напряженности земного магнитного поля равна 40 А/м . [2,5 мВ].

1.66. На соленоид длиной 20 см и площадью поперечного сечения 30 см^2 надет проволочный виток. Обмотка соленоида имеет 320 витков и по ней течет ток 3 А . Какая ЭДС индуцируется в надетом на соленоид витке, когда ток в соленоиде исчезает в течение $0,001 \text{ с}$? [18 мВ].

1.67. Катушка диаметром 10 см , имеющая 500 витков, находится в магнитном поле. Ось катушки параллельна линиям магнитной индукции поля. Чему равно среднее значение ЭДС индукции в катушке, если магнитная индукция поля увеличивается в течение $0,1 \text{ с}$ от нуля до 2 Тл ? [78,5 В].

1.68. Маховое колесо диаметром 3 м вращается вокруг горизонтальной оси со скоростью 3000 об/мин . Определите ЭДС, индуцируемую между ободом и осью колеса, если плоскость колеса составляет с плоскостью магнитного меридиана угол 60° . Горизонтальная составляющая земного магнитного поля равна 20 мкТл . [3,5 мВ].

1.69. В однородном магнитном поле, индукция которого $0,5 \text{ Тл}$, равномерно с частотой 300 мин^{-1} вращается катушка, содержащая 200 витков, плотно прилегающих друг к другу. Площадь поперечного сечения катушки 100 см^2 . Ось вращения перпендикулярна оси катушки и направлению магнитного поля. Определите максимальную ЭДС, индуцируемую в катушке. [31,4В].

2. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ КОЛЕБАНИЯ. ПЕРЕМЕННЫЙ ТОК.

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ВОЛНЫ

Основные формулы и законы

- Связь периода T , частоты ν и циклической частоты ω колебаний

$$T = 1/\nu, \quad T = 2\pi/\omega, \quad \omega = 2\pi\nu.$$

- Период электромагнитных колебаний в идеальном колебательном контуре

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

где L – индуктивность катушки, C – электроёмкость конденсатора.

- Зависимость заряда на пластинах конденсатора, разности потенциалов между ними и силы тока от времени в идеальном контуре:

$$q = q_m \cos(\omega t + \alpha),$$

$$U = \frac{q}{C} = \frac{q_m}{C} \cos(\omega t + \alpha) = U_m \cos(\omega t + \alpha),$$

$$I = \frac{dq}{dt} = -q_m \omega \sin(\omega t + \alpha) = -I_m \sin(\omega t + \alpha),$$

где q_m – амплитуда заряда, $U_m = q_m/C$ – амплитуда напряжения, $I_m = q_m \omega$ – амплитуда силы тока, α – начальная фаза колебаний.

- Период электромагнитных колебаний в колебательном контуре при наличии сопротивления

$$T = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{1}{LC} - \left(\frac{R}{2L}\right)^2}},$$

где L – индуктивность катушки, C – электроёмкость конденсатора, R – сопротивление контура.

- Зависимость заряда на пластинах конденсатора, разности потенциалов между ними и силы тока от времени в колебательном контуре при наличии сопротивления (затухающие колебания)

$$q = q_m e^{-\beta t} \cos(\omega t + \alpha),$$

$$U = U_m e^{-\beta t} \cos(\omega t + \alpha),$$

$$I = I_m e^{-\beta t} \cos(\omega t + \alpha + \psi)$$

$\beta = R/2L$ - коэффициент затухания, α - начальная фаза колебаний, ψ - разность фаз между током и напряжением в контуре.

- Логарифмический декремент затухания

$$\chi = \beta \cdot T.$$

• Полное сопротивление цепи переменного тока, содержащей последовательно включённые резистор сопротивлением R , катушку индуктивностью L и конденсатор ёмкостью C , на концы которой подаётся переменное напряжение $U = U_m \cos \omega t$

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

где R – активное сопротивление, ωL – реактивное индуктивное сопротивление, $1/(\omega C)$ – реактивное ёмкостное сопротивление цепи.

- Разность фаз между напряжением и силой тока

$$\operatorname{tg} \psi = \frac{\omega L - 1/(\omega C)}{R}.$$

- Действующие (эффективные) значения силы тока и напряжения

$$I_{\text{д}} = \frac{I_m}{\sqrt{2}}, \quad U_{\text{д}} = \frac{U_m}{\sqrt{2}},$$

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

- Средняя мощность в цепи переменного тока

$$\langle P \rangle = \frac{1}{2} I_m U_m \cos \psi,$$

где

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

- Скорость электромагнитной волны в среде

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

где $c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$ – скорость электромагнитной волны в вакууме, ε – диэлектрическая проницаемость среды, μ – магнитная проницаемость среды.

- Длина электромагнитной волны

$$\lambda = v \cdot T .$$

• Плотность энергии электромагнитной волны равна сумме плотностей энергий электрического и магнитного полей

$$w = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 E^2}{2} + \frac{\mu \mu_0 H^2}{2} ,$$

где $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$ – электрическая постоянная, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$ – магнитная постоянная, E – напряжённость электрического поля, H – напряжённость магнитного поля.

• Связь между мгновенными значениями напряжённостей электрического и магнитного полей электромагнитной волны

$$\sqrt{\varepsilon \varepsilon_0} E = \sqrt{\mu \mu_0} H .$$

• Энергия, переносимая волной за единицу времени через единичную площадку, расположенную перпендикулярно к направлению распространения волны,

$$S = w \cdot v = E \cdot H .$$

Задания

2.1. Колебательный контур состоит из катушки индуктивностью 0,2 мГн и конденсатора, площадь пластин которого 155 см² и расстояние между ними 1,5 мм. Определите диэлектрическую проницаемость диэлектрика, расположенного между пластинами, если длина волны, соответствующая резонансу в контуре, равна 630 м. [6,1].

2.2. Колебательный контур содержит катушку индуктивности в

виде соленоида длиной 5 см, площадью поперечного сечения $1,5 \text{ см}^2$ и числом витков 500. Определите собственную частоту электрических колебаний, если воздушный конденсатор в контуре имеет площадь пластин 100 см^2 , а расстояние между пластинами 1,5 мм. [$0,67 \cdot 10^6 \text{ Гц}$].

2.3. Колебательный контур состоит из катушки индуктивностью 0,1 Гн и конденсатора ёмкостью 39,5 мкФ. Запишите уравнения зависимости силы тока в контуре и напряжения на конденсаторе от времени, если максимальное значение заряда на конденсаторе равно 3 мкКл.

2.4. Максимальное значение энергии в идеальном колебательном контуре равно 0,2 мДж. При медленном увеличении расстояния между пластинами частота колебаний увеличилась в 2 раза. Определите работу, совершённую при перемещении пластин. [0,6 мДж].

2.5. Колебательный контур содержит катушку, индуктивность которой 10 мкГн, и конденсатор ёмкостью 1 нФ. Определите максимальный магнитный поток, пронизывающий катушку, если общее число витков её равно 100, а максимальное напряжение равно 100 В. [0,1 мкВб].

2.6. Через какое время (в долях периода t/T) на конденсаторе идеального колебательного контура заряд будет равен половине амплитудного значения. [$t/T=6$].

2.7. В идеальном колебательном контуре в начальный момент времени ток равен нулю, а заряд имеет максимальное значение, равное q_m . Через какую долю периода, начиная от начального значения, энергия в контуре распределится поровну между катушкой и конденсатором? [$T/8$].

2.8. Зависимость тока от времени в колебательном контуре задана уравнением: $I = -0,02 \sin(400\pi t)$ А. Индуктивность катушки 1 Гн. Определите: 1) период колебаний, 2) электроёмкость конденсатора, 3) максимальное напряжение на конденсаторе, 4) максимальную энергию электрического и магнитного полей. [1) $5 \cdot 10^{-3}$ с; 2) 6,3·10⁻⁷Ф; 3) 25,2 В; 4) 0,2 мДж; 0,2 мДж].

2.9. Колебательный контур состоит из катушки, индуктивность которой 0,1 Гн, конденсатора электроёмкостью 0,405 Ф и сопротивления в 2 Ом. Во сколько раз уменьшится напряжение на конденсаторе за время, равное одному периоду колебаний? [в 1,04].

2.10. Колебательный контур состоит из конденсатора ёмкостью 2,22 нФ и катушки из медной проволоки длиной 20 см и радиусом поперечного сечения 0,25 мм. Определите логарифмический декремент затухания колебаний. Удельное сопротивление меди $1,7 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$. [0,018].

2.11. Колебательный контур имеет конденсатор ёмкостью 1,1 нФ и катушку индуктивностью 5 мГн. Логарифмический декремент затухания равен 0,005. Определите время, в течение которого потеряется 99% энергии в контуре. [6,8 мс].

2.12. Колебательный контур содержит катушку индуктивностью 0,1 мГн, резистор сопротивлением 3 Ом и конденсатор ёмкостью 10 нФ. Определите среднюю мощность, необходимую для поддержания

незатухающих колебаний с амплитудным значением напряжения на конденсаторе 2 В. [0,6мВт].

2.13. В цепь колебательного контура, содержащего катушку индуктивностью 0,2 Гн, конденсатор ёмкостью 40 мкФ и резистор сопротивлением 9,7 Ом подключено внешнее переменное напряжение амплитудой 180 В и циклической частотой 314 рад/с. Определите: 1) амплитудное значение силы тока в цепи, 2) разность фаз между током в контуре и внешним напряжением, 3) амплитудное значение напряжения на катушке, 4) амплитудное значение напряжения на конденсаторе. [1) 9,27 А; 2) $\psi = -\pi / 3$ (ток опережает напряжение); 3) 589 В; 4) 738 В].

2.14. В цепь переменного тока частотой 50 Гц включена катушка длиной 0,2 м и диаметром 0,05 м, содержащая 500 витков медного провода площадью поперечного сечения 0,6 мм². Определите, какая доля полного сопротивления катушки приходится на реактивное сопротивление. Удельное сопротивление меди 17 нОм .м. [40%].

2.15. В цепь переменного тока частотой 50 Гц последовательно включены резистор сопротивлением 100 Ом и конденсатор ёмкостью 22 мкФ. Определите, какая доля напряжения, приложенного к этой цепи, приходится на напряжение на конденсаторе. [0,823].

2.16. Последовательно соединённые резистор сопротивлением 110 Ом и конденсатор подключены к источнику внешнего переменного напряжения с амплитудой 110 В. Амплитудное значение установившегося тока в цепи равно 0,5 А. Определите разность фаз между током в цепи и внешним сопротивлением. [$\psi = -\pi / 3$ (ток опережает напряжение)].

2.17. К генератору переменного тока частотой 5 кГц подключён конденсатор ёмкостью 0,15 мкФ. Определите амплитудное напряжение на зажимах генератора, если амплитудное значение тока равно 3,3 А. [0,7 кВ].

2.18. В цепь переменного тока напряжением 220 В и частотой 50 Гц последовательно включены резистор сопротивлением 100 Ом, катушка индуктивностью 0,5 Гн и конденсатор ёмкостью 10 мкФ. Определите амплитудные значения: 1) силы тока в цепи, 2) напряжения на активном сопротивлении, 3) напряжения на конденсаторе, 4) напряжения на катушке. [1) 1,16 А; 2) 116 В; 3) 369 В; 4) 182 В].

2.19. Конденсатор ёмкостью в 1 мкФ и реостат с активным сопротивлением в 3000 Ом включены в цепь переменного тока частотой 50 Гц. Индуктивность реостата ничтожно мала. Найдите полное сопротивление цепи, если конденсатор и реостат включены: 1) последовательно, 2) параллельно. [1) 4380 Ом; 2) 2180 Ом].

2.20. В цепь переменного тока напряжением 220 В и частотой 50 Гц включены последовательно ёмкость 35,4 мкФ, активное сопротивление 100 Ом и индуктивность 0,7 Гн. Найдите силу тока в цепи и падение напряжения на ёмкости, омическом сопротивлении и индуктивности. [$I=1,34$ А, $U_C=121$ В, $U_R=134$ В, $U_L=295$ В].

2.21. Катушка индуктивностью 22,6 мГн и активное сопротивление

включены параллельно в цепь переменного тока частотой 50 Гц. Найдите активное сопротивление, если известно, что сдвиг фаз между напряжением и током равен $\pi/3$. [12,3 Ом].

2.22. Активное сопротивление и индуктивность соединены параллельно в цепь переменного тока напряжением 127 В и частотой 50 Гц. Найдите активное сопротивление и индуктивность, если мощность, поглощаемая в этой цепи, равна 404 Вт и сдвиг фаз между напряжением и током равен $\pi/3$. [R=40 Ом, L=0,074 Гн].

2.23. В цепь переменного тока напряжением 220 В включены последовательно ёмкость, активное сопротивление и индуктивность. Найдите падение напряжения UR на омическом сопротивлении, если известно, что падение напряжения на конденсаторе UC=2UR, а падение напряжения на индуктивности UL=3UR. [156 В].

2.24. В вакууме вдоль оси X распространяется плоская электромагнитная волна. Средняя энергия, переносимая через единицу площади поверхности за единицу времени (интенсивность) равна 21,2 мкВт/м². Определите амплитудное значение напряжённости электрического поля волны. [126 мВ/м].

2.25. Радиолокатор обнаружил в море подводную лодку, отражённый сигнал от которой дошёл до места излучения за 36 мкс. Определите расстояние от локатора до лодки, считая, что диэлектрическая проницаемость воды равна 81. [600 м].

2.26. В вакууме распространяется плоская электромагнитная волна. Определите амплитуду напряжённости магнитного поля волны, если амплитуда напряжённости электрического поля равна 10 В/м. [26,5А/м].

2.27. Электромагнитная волна с частотой 5 МГц переходит из немагнитной среды с диэлектрической проницаемостью 2 в вакуум. Определите приращение её длины волны. [17,6 м].

2.28. После того как между внутренним и внешним проводниками кабеля поместили диэлектрик, скорость распространения электромагнитных волн в кабеле уменьшилась на 63%. Определите диэлектрическую восприимчивость вещества прослойки. [6,3].

2.29. Определите длину электромагнитной волны в вакууме, на которую настроен колебательный контур, если максимальный заряд на обкладках конденсатора 50 нКл, а максимальная сила тока в контуре 1,5 А. Активным сопротивлением контура пренебречь. [62,8 м].

2.30. Длина электромагнитной волны в вакууме, на которую настроен колебательный контур, равна 12 м. Пренебрегая активным сопротивлением контура, определите максимальный заряд на обкладках конденсатора, если максимальная сила тока в контуре 1 А. [6,37 нКл].

3. ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ СВЕТА

Основные формулы и законы

- Скорость света и длина волны в среде

$$v = \frac{c}{n}, \quad \lambda = \frac{\lambda_0}{n},$$

где $c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$ – скорость света в вакууме; n – абсолютный показатель преломления среды, который показывает, во сколько раз скорость света в среде меньше, чем в вакууме; λ_0 – длина волны в вакууме.

- Оптическая длина пути световой волны

$$L = nl,$$

где l – геометрическая длина пути световой волны в среде с показателем преломления n .

- Оптическая разность хода двух световых волн

$$\Delta = L_2 - L_1.$$

• Зависимость разности фаз δ от оптической разности хода Δ световых волн:

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

где λ – длина световой волны.

- Условие интерференционных максимумов

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

- Условие интерференционных минимумов

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

• Координаты максимумов и минимумов интенсивности в опыте Юнга

$$x_{\max} = \pm m \frac{L}{d} \lambda; \quad x_{\min} = \pm \left(m + \frac{1}{2} \right) \frac{L}{d} \lambda,$$

где $m = 0, 1, 2, \dots$ – номер интерференционной полосы; d – расстояние между двумя когерентными источниками, находящимися на расстоянии L от экрана ($L \gg d$).

- Ширина интерференционной полосы

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

• Оптическая разность хода при интерференции в тонких плёнках в проходящем свете:

$$\Delta = 2dn \cos r \quad \text{или} \quad \Delta = 2d\sqrt{n^2 - \sin^2 i},$$

в отражённом свете:

$$\Delta = 2dn \cos r + \frac{\lambda}{2} \quad \text{или} \quad \Delta = 2d\sqrt{n^2 - \sin^2 i} + \frac{\lambda}{2},$$

где d – толщина пленки; n – ее показатель преломления; i – угол падения; r – угол преломления.

• Радиусы светлых колец Ньютона в отраженном свете (или темных в проходящем свете)

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

где m – номер кольца; R – радиус кривизны линзы.

• Радиусы темных колец Ньютона в отраженном свете (или светлых в проходящем свете)

$$r_m = \sqrt{m\lambda R} \quad (m = 1, 2, \dots).$$

• В случае «просветления оптики» интерферирующие лучи в отраженном свете гасят друг друга при условии

$$n = \sqrt{n_c},$$

где n_c – показатель преломления стекла; n – показатель преломления пленки.

Задания

Опыт Юнга

3.1. Расстояние от щелей до экрана в опыте Юнга равно 1 м. Определить расстояние между щелями, если на отрезке длиной 1 см укладывается 10 темных интерференционных полос. Длина волны равна 0,7 мкм. [0,63 мм].

3.2. Две когерентные световые волны приходят в некоторую точку пространства с разностью хода 2,25 мкм. Каков результат интерференции в этой точке, если свет: а) красный ($\lambda = 750$ нм), б) зеленый ($\lambda = 500$ нм)? [а) усиление; б) ослабление].

3.3. Разность хода двух интерферирующих лучей монохроматического света $0,3\lambda$. Определить разность фаз колебаний. [108°].

3.4. Расстояние между двумя щелями в опыте Юнга равно 1 мм, расстояние от щелей до экрана 3 м, расстояние между максимумами яркости смежных интерференционных полос на экране 1,5 мм. Определить длину волны источника монохроматического света.

[500 нм].

3.5. В опыте Юнга расстояние между щелями равно 1 мм, а расстояние от щелей до экрана равно 3 м. Определить: 1) положение первой светлой полосы; 2) положение третьей темной полосы, если щели освещать монохроматическим светом с длиной волны 0,5 мкм. [1) $\pm 1,5$ мм; 2) $\pm 5,25$ мм].

3.6. Расстояние между двумя щелями в опыте Юнга равно 0,5 мм. Длина волны света равна 0,6 мкм. Определить расстояние от щелей до экрана, если ширина интерференционных полос равна 1,2 мм. [1 м].

3.7. Во сколько раз изменится ширина интерференционных полос на экране в опыте с зеркалами Френеля, если фиолетовый светофильтр (0,4 мкм) заменить красным (0,7 мкм). [1,75].

3.8. Во сколько раз увеличится расстояние между соседними интерференционными полосами на экране в опыте Юнга, если зеленый светофильтр ($\lambda=0,5$ мкм) заменить красным ($\lambda=0,65$ мкм)? [В 1,3 раза].

3.9. В опыте Юнга отверстия освещались монохроматическим светом длиной волны 600 нм, расстояние между отверстиями 1 мм и расстояние от отверстий до экрана 3 м. Найти положение трех первых полос. [1,8 мм; 3,6 мм; 5,4 мм].

3.10. В опыте с зеркалами Френеля расстояние между мнимыми изображениями источника света равно 0,5 мм, расстояние от них до экрана равно 5 м. В желтом свете ширина интерференционных полос равна 6 мм. Определить длину волны света. [0,6 мкм].

3.11. Если в опыте Юнга на пути одного из интерферирующих лучей поместить перпендикулярно этому лучу тонкую стеклянную пластинку ($n=1,5$), то центральная светлая полоса смещается в положение, первоначально занимаемое пятой светлой полосой. Длина волны света равна 0,5 мкм. Определить толщину пластины [5 мкм].

3.12. В опыте Юнга расстояние от щелей до экрана равно 3 м. Определить угловое расстояние между светлыми соседними полосами, если третья светлая полоса на экране отстоит от центра интерференционной картины на 4,5 мм. [$5 \cdot 10^{-4}$ рад].

Интерференция в плоскопараллельной пластине

3.13. На мыльную пленку с показателем преломления $n=1,33$ падает по нормали монохроматический свет с длиной волны 0,6 мкм. Отраженный свет в результате интерференции имеет наибольшую яркость. Какова возможная наименьшая толщина пленки? [0,113 мкм].

3.14. На тонкую пленку в направлении нормали к ее поверхности падает монохроматический свет с длиной волны 500 нм. Отраженный от нее свет максимально усилен вследствие интерференции. Определить минимальную толщину пленки, если показатель преломления материала

пленки равен 1,4. [89 нм].

3.15. На тонкую глицериновую пленку толщиной 1,5 мкм нормально к ее поверхности падает белый свет. Определить число длин волн лучей видимого участка спектра ($0,4 \leq \lambda \leq 0,8$ мкм), которые будут ослаблены в результате интерференции в проходящем свете. Показатель преломления глицерина равен 1,47. [5].

3.16. На стеклянную пластинку нанесен тонкий слой прозрачного вещества с показателем преломления $n=1,3$. Пластинка освещена параллельным пучком монохроматического света с длиной волны 640 нм, падающим на пластинку нормально. Какую минимальную толщину должен иметь слой, чтобы отраженный пучок имел наименьшую яркость? [0,123 мкм].

3.17. Пучок параллельных лучей с длиной волны 0,6 мкм падает под углом 30° на мыльную пленку с показателем преломления $n=1,33$. При какой возможной наименьшей толщине пленки отраженные лучи будут максимально ослаблены интерференцией? [0,243 мкм].

3.18. Пучок параллельных лучей с длиной волны 0,6 мкм падает под углом 30° на мыльную пленку с показателем преломления $n=1,33$. При какой возможной наименьшей толщине пленки отраженные лучи будут максимально усилены интерференцией? [0,122 мкм].

3.19. Пучок белого света падает нормально на стеклянную пластинку, толщина которой равна 0,4 мкм. Показатель преломления стекла равен 1,5. Какие длины волн, лежащие в пределах видимого спектра ($0,4 \leq \lambda \leq 0,7$ мкм), усиливаются в отраженном пучке? [0,48 мкм].

3.20. На мыльную пленку с показателем преломления $n=1,33$ падает белый свет под углом 45° . При какой наименьшей толщине пленки отраженные лучи будут окрашены в желтый цвет ($\lambda=6 \cdot 10^{-7}$ м)? [0,13 мкм].

3.21. Темной или светлой будет в отраженном свете мыльная пленка толщиной $d = 0,1\lambda$? Пленка находится в воздухе, показатель преломления пленки равен 1,3. Считать, что пучок света падает на пленку нормально. [темной].

3.22. Зимой на стеклах трамваев и автобусов образуются тонкие пленки наледи, окрашивающие все видимое сквозь них в зеленоватый цвет. Оценить, какова наименьшая толщина этих пленок (показатель преломления наледи принять равным 1,33). [$\sim 0,5$ мкм].

3.23. На поверхность стеклянного объектива ($n_1=1,5$) нанесена тонкая пленка, показатель преломления которой $n_2=1,2$ («просветляющая» пленка). При какой наименьшей толщине этой пленки произойдет максимальное ослабление отраженного света в средней части видимого спектра? [0,115 мкм].

3.24. На линзу с показателем преломления $n = 1,58$ нормально падает монохроматический свет с длиной волны 0,55 мкм. Для устранения потерь света в результате отражения на линзу наносится тонкая пленка.

Определить: 1) оптимальный показатель преломления для пленки; 2) толщину пленки. [1] 1,26; 2) 109 нм].

3.25. Тонкая пленка с показателем преломления $n=1,5$ освещается светом с длиной волны 600 нм. При какой минимальной толщине пленки исчезнут интерференционные полосы? [100 нм].

Интерференция в клине

3.26. На стеклянный клин ($n=1,5$) с малым углом нормально к его грани падает параллельный пучок лучей монохроматического света с длиной волны 0,698 мкм. Определить угол между поверхностями клина, если расстояние между двумя соседними интерференционными минимумами в отраженном свете равно 2 мм. [24°].

3.27. На тонкий стеклянный клин ($n=1,5$) нормально падает монохроматический свет. Угол клина равен $4'$. Определить длину световой волны, если расстояние между двумя соседними интерференционными максимумами в отраженном свете равно 0,2 мм. [698 нм].

3.28. На стеклянный клин ($n=1,5$) падает нормально пучок света с длиной волны 0,582 мкм. Угол клина равен $20'$. Какое число темных интерференционных полос приходится на единицу длины клина? [5 полос на 1 см].

3.29. Между двумя плоскопараллельными стеклянными пластинками ($n=1,5$) положили очень тонкую проволочку. Проволочка находится на расстоянии 75 мм от линии соприкосновения пластинок и ей параллельна. В отраженном свете с длиной волны 0,5 мкм на верхней пластинке видны интерференционные полосы. Определить толщину проволочки, если на протяжении 30 мм насчитывается 16 светлых полос. [10 мкм].

3.30. Между двумя плоскопараллельными стеклянными пластинками ($n=1,5$) на расстоянии 10 см от границы их соприкосновения находится проволока диаметром 0,01 мм, образуя воздушный клин. Пластины освещаются нормально падающим светом с длиной волны 0,6 мкм. Определить ширину интерференционных полос, наблюдаемых в отраженном свете. [3 мм].

3.31. Монохроматический свет падает нормально на поверхность воздушного клина, причем расстояние между интерференционными полосами равно 0,4 мм. Определить расстояние между интерференционными полосами, если пространство между пластинами, образующими клин, заполнить прозрачной жидкостью с показателем преломления $n=1,33$. [0,3 мм].

Кольца Ньютона

3.32. Радиус второго темного кольца Ньютона в отраженном

свете равен 0,4 мм. Определить радиус кривизны плосковыпуклой линзы, взятой для опыта, если она освещается светом с длиной волны 0,64 мкм. [125 мм].

3.33. Между стеклянной пластинкой и лежащей на ней плосковыпуклой линзой находится жидкость. Найти показатель преломления жидкости, если радиус третьего темного кольца Ньютона при наблюдении в отраженном свете с длиной волны 0,6 мкм равен 0,82 мм. Радиус кривизны линзы равен 0,5 м. [1,34].

3.34. На стеклянную пластинку положена выпуклой стороной плосковыпуклая линза. Сверху линза освещена монохроматическим светом длиной волны 500 нм. Найти радиус кривизны линзы, если радиус четвертого темного кольца Ньютона в отраженном свете равен 2 мм. [2 м].

3.35. Плосковыпуклая стеклянная линза с радиусом кривизны 0,5 м лежит выпуклой стороной на стеклянной пластинке. Радиус пятого темного кольца Ньютона в отраженном свете равен 1,1 мм. Определить длину световой волны. [0,484 мкм].

3.36. Установка для наблюдения колец Ньютона освещается нормально падающим монохроматическим светом с длиной волны 600 нм. Определить толщину воздушного промежутка в том месте, где в отраженном свете наблюдается первое светлое кольцо. [0,15 мкм].

3.37. Расстояние между вторым и первым темными кольцами Ньютона в отраженном свете равно 1 мм. Определить расстояние между десятым и девятым темными кольцами. [0,39 мм].

3.38. Диаметр второго светлого кольца Ньютона при наблюдении в отраженном свете с длиной волны 0,6 мкм равен 1,2 мм. Определить радиус кривизны плосковыпуклой линзы, взятой для опыта. [0,4 м].

3.39. Плосковыпуклая линза с радиусом кривизны 0,3 м выпуклой стороной лежит на стеклянной пластинке. Радиус четвертого темного кольца Ньютона в проходящем свете равен 0,7 мм. Определить длину световой волны. [0,47 мкм].

3.40. Плосковыпуклая линза с радиусом кривизны 4 м выпуклой стороной лежит на стеклянной пластинке. Определить длину волны падающего монохроматического света, если радиус пятого светлого кольца в отраженном свете равен 3 мм. [0,5 мкм].

3.41. Установка для наблюдения колец Ньютона освещается нормально падающим монохроматическим светом с длиной волны 550 нм. Определить толщину воздушного промежутка в том месте, где в отраженном свете наблюдается четвертое темное кольцо. [1,1 мкм].

3.42. Установка для наблюдения колец Ньютона освещается нормально падающим монохроматическим светом с длиной волны 600 нм. Пространство между линзой и стеклянной пластинкой заполнено жидкостью, и наблюдение ведется в проходящем свете. Радиус кривизны

линзы равен 4 м. Определить показатель преломления жидкости, если радиус второго светлого кольца равен 1,8 мм. [1,48].

3.43. Плосковыпуклая линза выпуклой стороной лежит на стеклянной пластинке. Радиус третьего светлого кольца в проходящем свете с длиной волны 0,6 мкм равен 0,9 мм. Определить радиус кривизны линзы. [0,45 м].

3.44. Плосковыпуклая линза с радиусом сферической поверхности 12,5 см прижата к стеклянной пластинке. Диаметр десятого темного кольца Ньютона в отраженном свете равен 1 мм. Определите длину волны света. [0,2 мкм].

3.45. Установка для наблюдения колец Ньютона освещается монохроматическим светом, падающим нормально. При заполнении пространства между линзой и стеклянной пластинкой прозрачной жидкостью радиусы темных колец в отраженном свете уменьшились в 1,21 раза. Определить показатель преломления жидкости. [1,46].

3.46. Найти радиус центрального темного пятна колец Ньютона, если между линзой и пластинкой налит бензол ($n=1,5$). Радиус кривизны линзы равен 1 м. Показатели преломления линзы и пластинки одинаковы. Наблюдение ведется в отраженном свете с длиной волны 589 нм. [0,63 мм].

4 . ДИФРАКЦИЯ И ПОЛЯРИЗАЦИЯ СВЕТА

Основные формулы и законы

- Радиус внешней границы m - й зоны Френеля для сферической волны

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

где m – номер зоны Френеля; λ – длина волны; a и b – расстояния от волновой поверхности соответственно до точечного источника и до экрана, на котором дифракционная картина наблюдается.

- Радиус внешней границы m - й зоны Френеля для плоской волны

$$r_m = \sqrt{b m \lambda},$$

где m – номер зоны Френеля; λ – длина волны; b – расстояние от диафрагмы с круглым отверстием до экрана, на котором дифракционная картина наблюдается.

- Условия дифракционных максимумов и минимумов от одной щели, на которую свет падает нормально:

$$a \sin \varphi = \pm(2m + 1) \frac{\lambda}{2} - \text{условие максимума}$$

$$a \sin \varphi = \pm 2m \frac{\lambda}{2} - \text{условие минимума}$$

$$(m = 1, 2, 3, \dots),$$

где a – ширина щели; φ – угол дифракции; m – порядок спектра;
 λ – длина волны.

• Условия главных максимумов и минимумов, а также дополнительных минимумов дифракционной решетки, на которую свет падает нормально:

$$d \sin \varphi = \pm 2m \frac{\lambda}{2} \quad (m = 0, 1, 2, \dots) - \text{условие максимума}$$

$$a \sin \varphi = \pm 2k \frac{\lambda}{2} \quad -(k = 1, 2, 3, \dots) - \text{условие минимума}$$

$$d \sin \varphi = \pm m' \frac{\lambda}{N} \quad (m' = 1, 2, 3, \dots, \text{кроме } 0, N, 2N, \dots) -$$

условие добавочных минимумов, где d – период (постоянная) дифракционной решетки; N – число штрихов решетки.

• Период дифракционной решетки

$$d = \frac{1}{N_0},$$

где N_0 – число щелей, приходящихся на единицу длины решетки.

• Условие дифракционных максимумов от пространственной решетки (формула Вульфа – Брэггов)

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

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

• Угловая дисперсия дифракционной решетки

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

• Разрешающая способность дифракционной решетки

$$R = \frac{\lambda}{\delta \lambda} = mN,$$

где $\lambda, (\lambda + \delta \lambda)$ – длины волн двух соседних спектральных линий, разрешаемых решеткой; m – порядок спектра; N – общее число штрихов решетки.

- Закон Малюса

$$I = I_0 \cos^2 \varphi,$$

где I – интенсивность плоскополяризованного света, прошедшего через анализатор; I_0 – интенсивность плоскополяризованного света, падающего на анализатор; φ – угол между главными плоскостями поляризатора и анализатора.

Если в анализаторе часть (k) световой энергии поглощается и отражается (теряется на поглощение и отражение), то закон Малюса выглядит так:

$$I = I_0 (1 - k) \cos^2 \varphi.$$

- Закон Брюстера

$$\operatorname{tg} i_B = n_{2,1},$$

где i_B – угол падения, при котором отраженный от диэлектрика луч является плоскополяризованным; $n_{2,1}$ – относительный показатель преломления второй среды относительно первой.

- 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 – постоянная вращения; $[\alpha]$ – удельная постоянная вращения; C – массовая концентрация оптически активного вещества в растворе.

Задания

Дифракция Френеля

4.1. Посередине между точечным источником монохроматического света ($\lambda = 550$ нм) и экраном находится диафрагма с круглым отверстием. Дифракционная картина наблюдается на экране, расположенном на расстоянии 5 м от источника. Определить радиус отверстия, при котором центр дифракционных колец, наблюдаемых на экране, будет наиболее темным. [1,17 мм].

4.2. Определить радиус третьей зоны Френеля, если расстояния от точечного источника света ($\lambda = 0,6$ мкм) до волновой поверхности и от волновой поверхности до точки наблюдения равны 1,5 м. [1,16 мм].

4.3. На диафрагму с круглым отверстием диаметром 5 мм падает нормально параллельный пучок света с длиной волны 0,6 мкм. Определить расстояние от точки наблюдения до отверстия, если

отверстие открывает: 1) две зоны Френеля; 2) три зоны Френеля. [1) 5,21 м; 2) 3,47 м].

4.4. Определить радиус третьей зоны Френеля для случая плоской волны. Расстояние от источника до волновой поверхности и от волновой поверхности до точки наблюдения равно 1,5 м. Длина волны 0,6 мкм. [1,64 мм].

4.5. Определить радиус четвертой зоны Френеля, если радиус второй зоны Френеля для плоского волнового фронта равен 2 мм. [2,83 мм].

4.6. Определить радиус первой зоны Френеля, если расстояния от точечного источника света ($\lambda = 0,5$ мкм) до зонной пластинки и от пластинки до места наблюдения 1 м. [0,5 мм].

4.7. На зонную пластинку падает плоская монохроматическая волна ($\lambda = 0,5$ мкм). Определить радиус первой зоны Френеля, если расстояние от зонной пластинки до места наблюдения 1 м. [707 мкм].

4.8. Дифракция наблюдается на расстоянии l от точечного источника монохроматического света ($\lambda = 0,5$ мкм). Посередине между источником света и экраном находится непрозрачный диск диаметром 5 мм. Определить расстояние l , если диск закрывает только центральную зону Френеля. [50 м].

Дифракция Фраунгофера на одной щели

4.9. Какой должна быть ширина щели, чтобы первый дифракционный минимум наблюдался под углом 30° при освещении: 1) красным светом ($\lambda_1 = 760$ нм)? 2) синим светом ($\lambda_2 = 440$ нм)? [1) $1,52 \cdot 10^{-3}$ мм; 2) $8,8 \cdot 10^{-4}$ мм].

4.10. На щель падает нормально монохроматический свет. Угол отклонения лучей, соответствующих второму минимуму, равен $2^\circ 18'$. Скольким длинам волн падающего света равна ширина щели? [50λ].

4.11. Длина волн падающего на щель нормально монохроматического света укладывается в ширине щели 6 раз. Под каким углом будет наблюдаться третий дифракционный минимум света? [30°].

4.12. На щель шириной 0,1 мм падает нормально монохроматический свет ($\lambda = 0,6$ мкм). Экран, на котором наблюдается дифракционная картина, расположен параллельно щели на расстоянии 1 м. Определить расстояние между первыми дифракционными минимумами, расположенными по обе стороны центрального максимума. [1,2 см].

Дифракция Фраунгофера на дифракционной решетке

4.13. На дифракционную решетку нормально падает монохроматический свет с длиной волны 600 нм. Определить наибольший порядок спектра, полученный с помощью этой решетки, если ее постоянная равна 2 мкм. [3].

4.14. На дифракционную решетку длиной 1,5 см, содержащую 3000 штрихов, падает нормально монохроматический свет с длиной волны 550 нм. Определить число максимумов, наблюдаемых в спектре дифракционной решетки. [19].

4.15. Определить число штрихов на 1 мм дифракционной решетки, если углу $\varphi=30^\circ$ соответствует максимум четвертого порядка для монохроматического света с длиной волны 0,5 мкм. [250 мм⁻¹].

4.16. Период дифракционной решетки 0,005 мм. Определить число наблюдаемых главных максимумов в спектре дифракционной решетки для: 1) $\lambda = 760$ нм; 2) $\lambda = 440$ нм. [1) 13; 2) 23].

4.17. Сколько штрихов на 1 мм должна иметь дифракционная решетка, чтобы углу $\varphi = 90^\circ$ соответствовал максимум 5-го порядка для света с длиной волны $\lambda = 500$ нм? [400].

4.18. На дифракционную решетку с периодом 0,004 мм падает нормально монохроматический свет. При этом главному максимуму четвертого порядка соответствует отклонение от первоначального направления на $\varphi = 30^\circ$. Определить длину волны света. [0,5 мкм].

4.19. Длина волны красной линии кадмия равна 6438 Å. Каков угол отклонения линии в спектре первого порядка, если дифракционная решетка имеет 5684 штриха на 1 см? Сколько добавочных минимумов образуется между соседними главными максимумами? Ширина решетки 5 см. [21°28', 28419].

4.20. Монохроматический свет ($\lambda=0,6$ мкм) падает нормально на дифракционную решетку, содержащую 400 штрихов на 1 мм. Определить угол отклонения, соответствующий максимуму наивысшего порядка. Найти общее число дифракционных максимумов, которые дает эта решетка. [73,7°; 9].

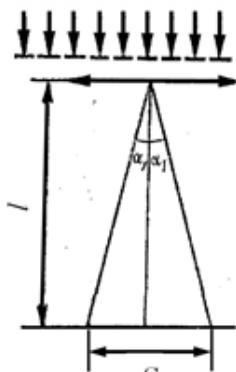


Рис.4.1

4.21. На дифракционную решетку нормально к ее поверхности падает параллельный пучок лучей ($\lambda=0,5$ мкм). Помещенная вблизи решетки линза проектирует дифракционную картину на плоский экран, удаленный от линзы на $l = 1$ м (рис. 4.1). Расстояние между двумя максимумами первого порядка, наблюдаемыми на экране, $s = 20,2$ см. Определить: а) постоянную дифракционной решетки; б) число штрихов на 1 см; в) теоретически возможное число максимумов, которые способна дать решетка; г) угол отклонения лучей, соответствующий последнему дифракционному максимуму. [а) 4,95 мкм; б) 2020

см⁻¹; в) 19; г) 65°24'.

4.22. На дифракционную решетку нормально падает монохроматический свет с длиной волны 0,5 мкм. На экран, находящийся от решетки на расстоянии 1 м, с помощью линзы, расположенной вблизи решетки, проецируется дифракционная картина, причем первый главный максимум наблюдается на расстоянии 15 см от центрального. Определить число штрихов на 1 см дифракционной решетки. [30 см⁻¹].

4.23. На дифракционную решетку нормально к ее поверхности падает монохроматический свет с длиной волны 550 нм. На экран, находящийся от решетки на расстоянии 1 м, с помощью линзы, расположенной вблизи решетки, проецируется дифракционная картина, причем первый главный максимум наблюдается на расстоянии 12 см от центрального. Определить: 1) период дифракционной решетки; 2) число штрихов на 1 см ее длины; 3) общее число максимумов, даваемых решеткой; 4) угол дифракции, соответствующий последнему максимуму. [1) 4,58 мкм; 2) $2,18 \cdot 10^3$ см⁻¹; 3) 17; 4) 73,9°].

4.24. На дифракционную решетку падает нормально свет. При этом максимум второго порядка для линии $\lambda_1 = 0,65$ мкм соответствует углу $\varphi_1 = 45^\circ$. Найти угол, соответствующий максимуму третьего порядка для линии $\lambda_2 = 0,50$ мкм. [54°40'].

4.25. Имеется дифракционная решетка с 500 штрихами на 1 мм, освещаемая фиолетовым светом ($\lambda = 0,4$ мкм). Определить угловое расстояние между максимумами первого порядка. [23°6'].

4.26. Определить длину волны монохроматического света, падающего нормально на дифракционную решетку, имеющую 300 штрихов на 1 мм, если угол между направлениями на максимумы первого и второго порядков составляет 12°. [644 нм].

4.27. Дифракционная решетка, имеющая 500 штрихов на 1 мм, дает на экране, отстоящем от линзы на 1 м, спектр. Определить, на каком расстоянии друг от друга будут находиться фиолетовые границы ($\lambda = 0,435$ мкм) спектров второго порядка. [0,87 м].

4.28. На решетку с постоянной, равной 0,006 мм, нормально падает монохроматический свет. Угол между соседними спектрами первого и второго порядков $\Delta\varphi = 4^\circ 36'$. Определить длину световой волны. При решении использовать приближенное равенство $\sin\varphi \approx \varphi$. [0,48 мкм].

4.29. Найти наибольший порядок дифракционного спектра желтой линии натрия ($\lambda = 5890 \text{ \AA}$) в дифракционной решетке, содержащей 200 штрихов на 1 мм. [8].

4.30. При освещении дифракционной решетки белым светом спектры второго и третьего порядков отчасти накладываются друг на друга. На какую длину волны в спектре второго порядка накладывается фиолетовая граница ($\lambda = 0,4$ мкм) спектра третьего порядка? [0,6 мкм].

4.31. На дифракционную решетку нормально падает пучок света от газоразрядной трубки, наполненной гелием. На какую линию в спектре четвертого порядка накладывается красная линия гелия

($\lambda_{кр} = 6,7 \cdot 10^{-5}$ см) спектра третьего порядка? [$5,02 \cdot 10^{-5}$ см].

4.32. Дифракционная решетка длиной 5 мм может разрешить в первом порядке две спектральные линии натрия ($\lambda_1 = 589,0$ нм и $\lambda_2 = 589,6$ нм). Определить, под каким углом в спектре третьего порядка будет наблюдаться свет с $\lambda_3 = 600$ нм, падающий на решетку нормально. [$20^\circ 42'$].

4.33. Монохроматический свет нормально падает на дифракционную решетку. Определить угол дифракции, соответствующий максимуму четвертого порядка, если максимум третьего порядка отклонен на 18° . [$24^\circ 20'$].

4.34. Определить постоянную дифракционной решетки, если она в первом порядке разрешает две спектральные линии калия ($\lambda_1 = 578$ нм и $\lambda_2 = 580$ нм). Длина решетки 1 см. [$34,6$ мкм].

4.35. Постоянная дифракционной решетки длиной 2,5 см равна 5 мкм. Определить разность длин волн, разрешаемую этой решеткой, для света с длиной волны $\lambda = 0,5$ мкм в спектре второго порядка. [50 пм].

4.36. Две дифракционные решетки имеют одинаковую ширину 3 мм, но разные периоды: $d_1 = 3 \cdot 10^{-3}$ мм и $d_2 = 6 \cdot 10^{-3}$ мм. Определить их наибольшую разрешающую способность для желтой линии натрия с длиной волны 5896 Å. [5000 ; 5000].

4.37. Дифракционная решетка имеет 1000 штрихов и постоянную 10 мкм. Определить: 1) угловую дисперсию для угла дифракции 30° в спектре третьего порядка; 2) разрешающую способность дифракционной решетки в спектре пятого порядка. [1) $3,46 \cdot 10^5$ рад/м; 2) 5000].

4.38. Определить длину волны, для которой дифракционная решетка с постоянной 3 мкм в спектре второго порядка имеет угловую дисперсию $7 \cdot 10^5$ рад/м. [457 нм].

4.39. На дифракционную решетку падает свет, длина волны которого $\lambda = 500$ нм. Угловая дисперсия дифракционной решетки в спектре второго порядка равна $4,08 \cdot 10^5$ рад/м. Определить постоянную дифракционной решетки. [5 мкм].

4.40. Определить угловую дисперсию дифракционной решетки для $\lambda = 5890$ Å в спектре первого порядка. Постоянная решетки $2,5 \cdot 10^{-4}$ см. [$4,16 \cdot 10^5$ рад/м].

4.41. Под углом 30° наблюдается четвертый максимум для красной линии кадмия ($\lambda_{кр} = 0,644$ мкм). Определить постоянную дифракционной решетки и ее ширину, если она позволяет в условиях задачи различить $\Delta\lambda = 0,322$ нм. [$5,15$ мкм; $3,57$ мм].

4.42. Длины волн дублета желтой линии в спектре натрия равны 5889,95 и 5895,92 Å. Какую ширину должна иметь решетка, содержащая 600 штрихов на 1 мм, чтобы различить эти линии в спектре первого порядка? [$1,65$ мм].

4.43. Рентгеновское излучение с длиной волны $\lambda = 1,63$ Å падает на кристалл каменной соли. Найти межплоскостное расстояние кристаллической решетки каменной соли, если дифракционный максимум

первого порядка наблюдается при угле скольжения 17° . [2,79 Å].

4.44. Рентгеновское излучение с длиной волны 2 \AA падает на монокристалл. Чему равен угол скольжения, если в спектре второго порядка получен максимум? Межплоскостное расстояние кристаллической решетки $0,3 \text{ нм}$. [$41^\circ 49'$].

Поляризация света

4.45. 1. Определить угол полной поляризации отраженного света для воды ($n = 1,33$), стекла ($n = 1,6$) и алмаза ($n = 2,42$); 2. Как поляризован падающий луч, если в этом случае отраженные лучи отсутствуют? [1] $i_{\text{АВ}}^{\text{АВ}} = 53^\circ$, $i_{\text{НОАЕЕА}} = 58^\circ$, $i_{\text{АЕВ}}^{\text{АВ}} = 67^\circ 30'$; 2) плоско поляризован].

4.46. Угол преломления луча в жидкости 35° . Определить показатель преломления жидкости, если известно, что отраженный луч максимально поляризован. [1,4].

4.47. Свет падает под углом полной поляризации на границу раздела двух сред. Какой угол образуют между собой отраженный и преломленный лучи? [90°].

4.48. Предельный угол полного внутреннего отражения для некоторого вещества равен 60° . Чему равен для этого вещества угол полной поляризации? Какова скорость света в этом веществе? [$49^\circ 6'$; $2,6 \cdot 10^8 \text{ м/с}$].

4.49. Пучок естественного света падает на стекло с показателем преломления $1,73$. Определить, при каком угле преломления отраженный от стекла пучок света будет полностью поляризован. [30°].

4.50. Два николя расположены так, что угол между их главными плоскостями составляет 60° . 1. Во сколько раз уменьшится интенсивность естественного света при прохождении его через один николю? 2. Во сколько раз уменьшится интенсивность света при прохождении через оба николя? При прохождении каждого из николей потери на отражение и поглощение составляют 5% . [1) 2,1; 2) 9,1].

4.51. Чему равен угол между главными плоскостями поляризатора и анализатора, если интенсивность естественного света, прошедшего через эти призмы, уменьшилась в 4 раза? Поглощением света пренебречь. [45°].

4.52. Главные плоскости двух призм Николя, поставленных на пути луча, образуют между собой угол 60° . Как изменится интенсивность света, прошедшего через эти призмы, если угол между их плоскостями поляризации станет равным 30° ? [Увеличится в 3 раза].

4.53. Во сколько раз ослабляется естественный свет, проходя через два николя, главные плоскости которых составляют угол 30° , если в каждом из николей на отражение и поглощение теряется 10% падающего на него светового потока? [3,3].

4.54. Между двумя скрещенными поляроидами размещается третий поляроид так, что его главная плоскость составляет угол 45° с главной плоскостью первого поляроида. Как изменится интенсивность

естественного света, проходящего через такое устройство? Поглощением света в поляроидах пренебречь. [Уменьшится в 8 раз].

4.55. Пучок естественного света падает на систему из четырех николей, главная плоскость каждого из которых повернута на угол 60° относительно главной плоскости предыдущего николя. Во сколько раз уменьшится интенсивность света, проходящего через эту систему? Поглощением света пренебречь. [В 128 раз].

4.56. Угол между главными плоскостями поляризатора и анализатора составляет 30° . Определить изменение интенсивности прошедшего через них света, если угол между главными плоскостями равен 45° . [Уменьшится в 1,5 раза].

4.57. Интенсивность естественного света, прошедшего через два николя, уменьшилась в 8 раз. Пренебрегая поглощением света, определить угол между главными плоскостями николей. [60°].

4.58. Определить, во сколько раз ослабится интенсивность света, прошедшего через два николя, расположенные так, что угол между их главными плоскостями 60° , а в каждом из николей теряется 8% интенсивности падающего на него света. [В 9,45 раза].

4.59. Определить, во сколько раз уменьшится интенсивность естественного света, прошедшего через два николя, главные плоскости которых образуют угол в 60° , если каждый из николей как поглощает, так и отражает 5% падающего на них света. [В 9,88 раза].

4.60. Естественный свет проходит через поляризатор и анализатор, угол между главными плоскостями которых равен φ . Поляризатор и анализатор как поглощают, так и отражают 10% падающего на них света. Определить угол, если интенсивность света, вышедшего из анализатора, равна 12% интенсивности света, падающего на поляризатор. [$52^\circ 14'$].

4.61. Узкий параллельный пучок рентгеновского излучения с длиной волны $\lambda = 245$ нм падает на естественную грань монокристалла каменной соли. Определить расстояние между атомными плоскостями монокристалла, если дифракционный максимум второго порядка наблюдается при падении излучения к поверхности монокристалла под углом скольжения 61° . [0,28 пм].

4.62. Узкий параллельный пучок монохроматического рентгеновского излучения падает на грань кристалла с расстоянием между его атомными плоскостями 0,3 нм. Определить длину волны рентгеновского излучения, если под углом 30° к плоскости грани наблюдается дифракционный максимум первого порядка. [300 пм].

4.63. Кварцевая пластинка освещена монохроматическим светом определенной длины волны. Определить толщину кварцевой пластинки, для которой угол поворота плоскости поляризации $\varphi = 180^\circ$. Удельная постоянная вращения в кварце для данной длины волны $[\alpha] = 0,52$ рад/мм. [6,04 мм].

4.64. Раствор глюкозы с массовой концентрацией $0,21$ г/см³, находящийся в стеклянной трубке, поворачивает плоскость поляризации монохроматического света, проходящего через раствор, на угол 24° . Определить массовую концентрацию глюкозы в другом растворе в трубке

такой же длины, если он поворачивает плоскость поляризации на угол 18° . [157 кг/м^3].

4.65. Определить толщину кварцевой пластинки, для которой угол поворота плоскости поляризации света с длиной волны $\lambda=500 \text{ нм}$ равен 48° . Постоянная вращения кварца для этой длины волны $\alpha = 30^\circ/\text{мм}$. [$1,6 \text{ мм}$].

4.66. Определить удельное вращение раствора сахара, концентрация которого $0,33 \text{ г/см}^3$, если при прохождении монохроматического света через трубку с раствором угол поворота плоскости поляризации 22° . Длина трубки 10 см . [$6,67^\circ \cdot \text{см}^2/\text{г}$].

5. КВАНТОВАЯ ПРИРОДА ИЗЛУЧЕНИЯ

Основные формулы и законы

• Поток энергии Φ_e , т.е. энергия, излучаемая (или поглощаемая) телом за единицу времени:

$$\Phi_e = \frac{dW}{dt},$$

где dW – энергия, излучаемая (или поглощаемая) телом во всем диапазоне частот (длин волн) за время dt .

• Энергетическая светимость тела:

$$R_e = \frac{d\Phi_e}{ds} = \frac{dW}{ds dt},$$

где $d\Phi_e$ – поток излучения с участка поверхности тела площадью ds .

• Закон Стефана-Больцмана

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

где R_e – энергетическая светимость (излучательность) чёрного тела;

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

T – абсолютная температура.

• Энергетическая светимость серого тела

$$R_T^c = a_T \sigma T^4,$$

где a_T – поглощательная способность серого тела.

• Спектральная плотность энергетической светимости

$$r_{\lambda,T} = \frac{dW}{ds dt d\lambda}.$$

• Связь энергетической светимости и спектральной плотности энергетической светимости чёрного тела

$$R_e = \int_0^{\infty} r_{\nu,T} d\nu = \int_0^{\infty} r_{\lambda,T} d\lambda.$$

- Закон смещения Вина

$$\lambda_{\max} = \frac{b}{T},$$

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

- Зависимость максимальной спектральной плотности энергетической светимости чёрного тела от температуры

$$(r_{\lambda,T})_{\max} = CT^5,$$

где $C = 1,3 \cdot 10^{-5} \text{ Вт} / (\text{м}^3 \text{К}^5)$.

- Формула Рэлея-Джинса для спектральной плотности энергетической светимости чёрного тела

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

где $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж} / \text{К}$ – постоянная Больцмана;

$c = 3 \cdot 10^8 \text{ м} / \text{с}$ – скорость света в вакууме; ν – частота излучения.

- Энергия кванта света (фотона)

$$\varepsilon = h\nu = h \frac{c}{\lambda},$$

где $h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$ – постоянная Планка.

- Импульс и масса фотона

$$p = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda}, \quad m = \frac{h\nu}{c^2}.$$

- Формула Эйнштейна для внешнего фотоэффекта

$$h\nu = A + \frac{m\nu_m^2}{2},$$

где A – работа выхода электрона из металла; $\frac{m\nu_m^2}{2}$ – максимальная кинетическая энергия фотоэлектрона, $m = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$ – масса электрона.

Если $\nu = 0$, то $h\nu_0 = A$ или $hc / \lambda_0 = A$, где ν_0, λ_0 – «красная граница» фотоэффекта, т.е. минимальная частота или максимальная длина волны, при которой возможен фотоэффект.

- Связь между максимальной кинетической энергией электрона и задерживающим напряжением

$$\frac{m v_m^2}{2} = e U_3,$$

где $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$ – заряд электрона.

- Давление света при нормальном падении на поверхность

$$P = \varpi (1 + \rho),$$

где ρ – коэффициент отражения (для зеркальной поверхности

$\rho_3 = 1$, для чёрной поверхности $\rho_4 = 0$); $\varpi = \frac{E}{V} = \frac{E}{Stc}$ – объёмная

плотность энергии излучения; $E = N h \nu$ – энергия всех фотонов; S – площадь поверхности, на которую падает свет; c – скорость света в вакууме; t – время воздействия света; N – число фотонов; $V = stc$ – объём.

- Изменение длины волны рентгеновского излучения при комптоновском рассеянии

$$\Delta \lambda = \lambda' - \lambda = \frac{h}{mc} (1 - \cos \theta),$$

где λ и λ' – длина волны падающего и рассеянного излучения соответственно, m – масса электрона, θ – угол рассеяния.

Задания

Законы теплового излучения

5.1. Максимум спектральной плотности энергетической светимости Солнца приходится на длину волны 0,48 мкм. Считая, что Солнце излучает как чёрное тело, определить температуру его поверхности и мощность, излучаемую его поверхностью. [6,04 кК; $4,58 \cdot 10^{26}$ Вт].

5.2. Определить количество теплоты, теряемой 50 см² поверхности расплавленной платины за 1 мин, если поглощательная способность платины 0,8. Температура плавления платины равна 1770°C. [237 кДж].

5.3. Определить, во сколько раз необходимо уменьшить температуру чёрного тела, чтобы его энергетическая светимость ослабилась в 16 раз. [В 2 раза].

5.4. Энергетическая светимость чёрного тела равна 10 кВт/м². Определить длину волны, соответствующую максимуму спектральной плотности энергетической светимости этого тела. [4,47 мкм].

5.5. Определить, как и во сколько раз изменится мощность излучения чёрного тела, если длина волны, соответствующая максимуму его спектральной плотности энергетической светимости, сместилась с

720 нм до 400 нм. [Увеличится в 10,5 раз].

5.6. Чёрное тело находится при температуре 3000 К. При остывании тела длина волны, соответствующая максимуму энергетической светимости, изменилась на 8 мкм. Определить температуру, до которой тело охладилося. [323 К].

5.7. Чёрное тело нагрели от температуры 600 К до 2400 К. Определить: 1) во сколько раз увеличилась его энергетическая светимость; 2) на сколько уменьшилась длина волны, соответствующая максимуму спектральной плотности энергетической светимости. [1) в 256 раз; 2) на 3,62 мкм].

5.8. В результате нагревания чёрного тела длина волны, соответствующая максимуму спектральной плотности энергетической светимости, сместилась с 2,7 мкм до 0,9 мкм. Определить, во сколько раз увеличилась: 1) энергетическая светимость тела; 2) максимальная спектральная плотность энергетической светимости тела. [1) в 81 раз; 2) в 243 раза].

5.9. Считая никель чёрным телом, определить мощность, необходимую для поддержания температуры расплавленного никеля 1453 °С неизменной, если площадь его поверхности равна 0,5 см². Потерями энергии пренебречь. [25,2 Вт].

5.10. Металлическая поверхность площадью 15 см², нагретая до температуры 3000 К, излучает в одну минуту 100 кДж. Определить: 1) энергию, излучаемую этой поверхностью, считая её чёрной; 2) отношение энергетических светимостей этой поверхности и чёрного тела при данной температуре. [1) 413 кДж; 2) 0,242].

5.11. Принимая Солнце за чёрное тело и учитывая, что его максимальной спектральной плотности энергетической светимости соответствует длина волны 500 нм, определить: 1) температуру поверхности Солнца; 2) энергию, излучаемую Солнцем в виде электромагнитных волн за 10 мин; 3) массу, теряемую Солнцем за это время вследствие излучения. [1) 5,8 кК; 2) $2,34 \cdot 10^{29}$ Дж; 3) $2,6 \cdot 10^{12}$ кг].

5.12. Мощность излучения чёрного тела равна 34 кВт. Найти температуру этого тела, если его поверхность равна 0,6 м². [1000 К].

5.13. Температура вольфрамовой спирали в 25-ваттной электрической лампочке равна 2450 К. Отношение энергетической светимости лампочки и черного тела при данной температуре равно 0,3. Найти величину излучающей поверхности спирали. [$4 \cdot 10^{-5}$ м²].

5.14. Мощность излучения чёрного тела равна 10⁵ кВт. Найти величину излучающей поверхности тела, если известно, что длина волны, на которую приходится максимум спектральной плотности энергетической светимости, равна 700 нм. [14,4 см²].

5.15. Найти, какое количество энергии с одного квадратного сантиметра поверхности в одну секунду излучает чёрное тело, если известно, что максимум спектральной плотности энергетической светимости приходится на длину волны 4840 Å. [7350 Дж].

5.16. В каких областях спектра лежат длины волн, соответствующие максимуму спектральной плотности энергетической светимости, если в качестве источника света взять: 1) спираль электрической лампочки (T=3000 К); 2) поверхность Солнца (T=6000

К); 3) атомная бомба, имеющая в момент взрыва около 10 млн. градусов. Излучение считать близким к излучению чёрного тела. [1) 1 мкм; 2) 500 нм; 3) 2,9 Å].

5.17. На сколько процентов увеличится энергетическая светимость чёрного тела, если его температура увеличится на 1%? [На 4%].

Внешний фотоэффект

5.18. Красная граница фотоэффекта для цезия 6530 Å. Определить скорость фотоэлектронов при облучении цезия светом длиной волны 4000 Å. [$6,5 \cdot 10^5$ м/с].

5.19. Определить работу выхода электронов из натрия, если «красная граница» фотоэффекта равна 5000 Å. [2,49 эВ].

5.20. Определить максимальную скорость фотоэлектронов, вырываемых с поверхности металла, если фототок прекращается при задерживающем напряжении 3,7 В. [1,14 Мм/с].

5.21. «Красная граница» фотоэффекта для некоторого металла равна 500 нм. Определить минимальное значение энергии фотона, вызывающего фотоэффект. [2,49 эВ].

5.22. Калий освещается монохроматическим светом с длиной волны 400 нм. Определить наименьшее задерживающее напряжение, при котором фототок прекратится. Работа выхода электронов из калия равна 2,2 эВ. [0,91 В].

5.23. «Красная граница» фотоэффекта для некоторого металла равна 500 нм. Определить: 1) работу выхода электронов из этого металла; 2) максимальную скорость электронов, вырываемых из этого металла светом с длиной волны 400 нм. [1) 2,49 эВ; 2) 468 км/с].

5.24. Длина волны падающего света 400 нм, задерживающее напряжение равно 1,2 В. Определить «красную границу» фотоэффекта. [652 нм].

5.25. Задерживающее напряжение для платиновой пластины (работа выхода 6,3 эВ) составляет 3,7 В. При тех же условиях для другой пластины задерживающее напряжение равно 5,3 В. Определить работу выхода электронов из этой пластины. [4,7 эВ].

5.26. Фотоны с энергией 5 эВ вырывают фотоэлектроны из металла с работой выхода 4,7 эВ. Определить максимальный импульс, передаваемый поверхности этого металла при вылете электрона. [$2,96 \cdot 10^{-25}$ кг·м/с].

5.27. Определить максимальную скорость фотоэлектронов, вырываемых с поверхности цинка (работа выхода 4 эВ), при облучении светом длиной волны 2,47 пм. [259 Мм/с].

5.28. Фотоэффект для некоторого металла начинается при частоте падающего света $6 \cdot 10^{14}$ Гц. Задерживающее напряжение равно 3 В. Определить: 1) работу выхода электронов из этого металла; 2) частоту применяемого излучения. [1) 2,48 эВ; 2) $1,32 \cdot 10^{15}$ Гц].

5.29. Определить постоянную Планка, если известно, что фотоэлектроны, вырывающиеся с поверхности некоторого металла светом с частотой $2,2 \cdot 10^{15}$ Гц, полностью задерживаются напряжением 6,6 В, а

вырывааемые светом с частотой $4,6 \cdot 10^{15}$ Гц – напряжением 16,5 В. [$6,6 \cdot 10^{-34}$ Дж·с].

5.30. При освещении катода вакуумного фотоэлемента светом с длиной волны 310 нм фототок прекращается при некотором задерживающем напряжении. При увеличении длины волны на 25% задерживающее напряжение оказывается меньше на 0,8 В. Определить по этим данным постоянную Планка. [$6,61 \cdot 10^{-34}$ Дж·с].

Давление света

5.31. Давление света с длиной волны 500 нм на зачернённую поверхность, расположенную перпендикулярно падающим лучам, равно 0,12 мкПа. Определить число фотонов, падающих каждую секунду на 1 м² поверхности. [$9,05 \cdot 10^{19}$].

5.32. На идеально отражающую поверхность площадью 5 см² за время 3 мин нормально падает монохроматический свет, энергия которого 9 Дж. Определить световое давление, оказываемое на поверхность. [667 нПа].

5.33. Определить давление света на стенки электрической 150-ваттной лампочки, принимая, что вся потребляемая мощность идёт на излучение и стенки лампочки отражают 15% падающего на них света. Считать лампочку сферическим сосудом радиусом 4 см. [28,6 мкПа].

5.34. Давление света с длиной волны 500 нм на зачернённую поверхность, расположенную перпендикулярно падающему излучению, равно 0,15 мкПа. Определить число фотонов, падающих на поверхность площадью 10 см² за 1 с. [$4,52 \cdot 10^{17}$].

5.35. На поверхность площадью 100 см² каждую минуту падает 63 Дж световой энергии. Определить величину светового давления в случаях, когда поверхность: 1) полностью отражает все лучи; 2) полностью поглощает все падающие на неё лучи. [1) $7 \cdot 10^{-7}$ Па; 2) $3,5 \cdot 10^{-7}$ Па].

5.36. Пучок света с длиной волны 4900 Å, падая нормально на поверхность, производит давление $5 \cdot 10^{-6}$ Па. Сколько квантов света падает каждую секунду на единицу площади этой поверхности? Коэффициент отражения света равен 0,25. [$2,9 \cdot 10^{21}$].

5.37. На идеально отражающую плоскую поверхность нормально падает свет с длиной волны 0,55 мкм. Мощность излучения составляет 0,45 Вт. Определить: 1) число фотонов, падающих на поверхность за время 3 с; 2) силу давления, испытываемую этой поверхностью. [1) $3,73 \cdot 10^{18}$; 2) 3 нН].

5.38. На зеркало с идеально отражающей поверхностью 1,5 см² падает нормально свет от электрической дуги. Определить импульс, полученный зеркалом. Плотность потока световой энергии, падающей на него, равна 10 Вт/см², а продолжительность освещения 1 с. [10^{-7} кг·м/с].

5.39. Поток излучения с длиной волны 5000 Å падает нормально на плоскую зеркальную поверхность и давит на неё с силой 10^{-8} Н. Определить число фотонов, каждую секунду падающих на эту поверхность. [$3,78 \cdot 10^{18}$].

Эффект Комптона

5.40. Рентгеновские лучи с длиной волны $0,708 \text{ \AA}$ испытывают комптоновское рассеяние на парафине. Найти длину волны рентгеновских лучей, рассеянных в направлении: 1) $\theta = \pi/2$; 2) $\theta = \pi$. [1] $0,732 \text{ \AA}$; 2) $0,756 \text{ \AA}$].

5.41. Какова длина волны рентгеновского излучения, если при комптоновском рассеянии этого излучения графитом под углом 60° длина волны рассеянного излучения оказалась равной $2,54 \cdot 10^{-7} \text{ м}$? [$0,242 \text{ \AA}$].

5.42. Рентгеновские лучи с длиной волны $0,2 \text{ \AA}$ испытывают комптоновское рассеяние под углом 90° . Определить: 1) изменение длины волны рентгеновских лучей при рассеянии; 2) энергию электрона отдачи; 3) импульс электрона отдачи. [1] $0,024 \text{ \AA}$; 2) $6,6 \cdot 10^3 \text{ эВ}$; 3) $4,4 \cdot 10^{-23} \text{ кг} \cdot \text{м/с}$].

5.43. В явлении Комптона энергия падающего фотона распределяется поровну между рассеянным фотоном и электроном отдачи. Угол рассеяния равен 90° . Определить энергию и импульс рассеянного фотона. [$2,6 \cdot 10^5 \text{ эВ}$; $9,3 \cdot 10^{-12} \text{ кг} \cdot \text{м/с}$].

5.44. Энергия рентгеновских лучей равна $0,6 \text{ МэВ}$. Определить энергию электрона отдачи, если известно, что длина волны рентгеновских лучей после комптоновского рассеяния изменилась на 20% . [$0,1 \text{ МэВ}$].

5.45. Фотон с энергией $1,025 \text{ МэВ}$ рассеялся на первоначально покоящемся свободном электроне. Определить угол рассеяния фотона, если длина волны рассеянного фотона оказалась равной $2,43 \text{ нм}$. [60°].

6. ЭЛЕМЕНТЫ КВАНТОВОЙ ФИЗИКИ АТОМОВ, МОЛЕКУЛ И ТВЕРДЫХ ТЕЛ

6.1. Теория атома водорода по Бору

Основные формулы и законы

- Первый постулат Бора (постулат стационарных состояний)

$$m_e v r_n = n \hbar = n \frac{h}{2\pi} \quad (n = 1, 2, 3, \dots),$$

где $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$ – масса электрона; v – скорость электрона на n -й орбите, радиус которой равен r_n ; n – номер стационарного состояния; $h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$ – постоянная Планка.

- Второй постулат Бора (правило частот)

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

где E_n, E_m – энергии стационарных состояний атома соответственно

до и после излучения (поглощения); ν – частота излученного (поглощенного) кванта энергии.

• Обобщенная формула Бальмера, описывающая серии линий в спектре атома водорода:

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

где ν – частота спектральных линий в спектре атома водорода;

$R = 3,29 \cdot 10^{15} \text{ с}^{-1}$ – постоянная Ридберга; m – целое число, определяет серию линий в спектре атома водорода: $m = 1$ – серия Лаймана (расположена в ультрафиолетовой части спектра); $m = 2$ – серия Бальмера (расположена в видимой части спектра);

$m = 3$ – серия Пашена;
 $m = 4$ – серия Брэкета;
 $m = 5$ – серия Пфунда;
 $m = 6$ – серия Хэмфри. } расположены в инфракрасной части спектра

$n = m + 1$ – определяет отдельные линии соответствующей серии m .

• Радиус n -й орбиты электрона в атоме водорода

$$r_n = n^2 \frac{\hbar^2 4\pi \varepsilon_0}{m_e e^2},$$

где $\hbar = h / 2\pi = 1,055 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$ – постоянная Планка;

$\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$ – электрическая постоянная;

$e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$ – заряд электрона; m_e – масса электрона.

• Энергия n -го стационарного состояния атома водорода:

$$E_n = -\frac{1}{n^2} \frac{m_e e^4}{8h^2 \varepsilon_0^2},$$

где n – номер стационарной орбиты.

• Энергия электрона в атоме водорода

$$E_n = \frac{E_i}{n^2},$$

где E_i – энергия ионизации атома водорода.

• Потенциал ионизации

$$\varphi_i = E_i / e.$$

• Потенциал возбуждения

Физика

$$\varphi_n = \frac{E_{n+1} - E_1}{e} .$$

Задания

6.1. Определить радиусы первых трех стационарных орбит в атоме водорода. [$0,53 \cdot 10^{-10}$ м; $2,12 \cdot 10^{-10}$ м; $4,77 \cdot 10^{-10}$ м].

6.2. Определить скорости электрона на первых трех стационарных орбитах в атоме водорода. [$2,19 \cdot 10^6$ м/с; $1,1 \cdot 10^6$ м/с; $0,73 \cdot 10^6$ м/с].

6.3. Определить период обращения электрона на первой стационарной орбите в атоме водорода. [$1,43 \cdot 10^{-16}$ с].

6.4. Определить угловую скорость электрона на первой стационарной орбите в атоме водорода. [$4,4 \cdot 10^{16}$ рад/с].

6.5. Определить кинетическую, потенциальную и полную энергии электрона на первой стационарной орбите в атоме водорода. [$21,76 \cdot 10^{-19}$ Дж; $-43,52 \cdot 10^{-19}$ Дж; $-21,76 \cdot 10^{-19}$ Дж].

6.6. Определить наибольшую и наименьшую длину волны в серии Лаймана. [121,6 нм; 91,2 нм].

6.7. Определить наибольшую и наименьшую частоту волны в серии Бальмера. [$0,82 \cdot 10^{15}$ Гц; $0,45 \cdot 10^{15}$ Гц].

6.8. Определить потенциал ионизации и первый потенциал возбуждения атома водорода. [13,6 В; 10,2 В].

6.9. Максимальная длина волны спектральной линии в серии Лаймана равна 0,122 мкм. Полагая, что постоянная Ридберга неизвестна, определить максимальную длину волны в серии Бальмера. [0,656 мкм].

6.10. 1). Какую наименьшую энергию (в электронвольтах) должны иметь электроны, чтобы при возбуждении атомов водорода ударами этих электронов появились все линии всех серий спектра водорода? 2). Какую наименьшую скорость должны иметь эти электроны? [13,6 эВ; $2,2 \cdot 10^6$ м/с].

6.11. Используя теорию Бора, определить орбитальный магнитный момент электрона, движущегося по первой орбите атома водорода. [$0,93 \cdot 10^{-23}$ А·м²].

6.12. Предполагая, что в опыте Франка и Герца вакуумная трубка наполнена не парами ртути, а разреженным атомарным водородом, определить, через какие интервалы ускоряющего потенциала возникнут максимумы на графике зависимости силы анодного тока от ускоряющего потенциала. [10,2 В].

6.13. Атомарный водород освещается ультрафиолетовым излучением с длиной волны 100 нм. Определить, какие спектральные линии появятся в спектре излучения атомарного водорода. [$\lambda_{1,2} = 121,6$ нм; $\lambda_{1,3} = 102,6$ нм; $\lambda_{2,3} = 656,3$ нм].

6.14. В спектре излучения атомарного водорода интервал между

двумя линиями, принадлежащими серии Бальмера, составляет $1,71 \cdot 10^{-7}$ м. Определить с помощью этой величины постоянную Ридберга.

6.15. Основываясь на том, что энергия ионизации атома водорода равна 13,6 эВ, определить в электронвольтах энергию фотона, соответствующую самой длинноволновой линии серии Пашена. [0,48 эВ].

6.2. Элементы квантовой механики

Основные формулы и законы

- Длина волны де Бройля

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

где $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$ Дж·с – постоянная Планка; $p = mv$ – импульс частицы (m – масса частицы; v – её скорость).

- Связь импульса частицы p с её кинетической энергией T :

$$p = \frac{\sqrt{T(T + 2mc^2)}}{c},$$

где m – масса покоя частицы. При малых скоростях $p = \sqrt{2mT}$.

- Соотношение неопределенностей Гейзенберга

$$\begin{cases} \Delta x \Delta p_x \geq \hbar / 2 \\ \Delta y \Delta p_y \geq \hbar / 2 \\ \Delta z \Delta p_z \geq \hbar / 2 \end{cases} \quad \Delta E \Delta t \geq \hbar / 2,$$

где $\Delta x, \Delta p, \Delta E, \Delta t$ – соответственно неопределенности координаты, импульса, энергии и времени, $\hbar = h / 2\pi$.

- Нестационарное уравнение Шредингера

$$i\hbar \frac{\partial \Psi}{\partial t} = -\frac{\hbar^2}{2m} \Delta \Psi + U \Psi .$$

- Уравнение Шредингера для стационарных состояний

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

где $\Psi = \Psi(r, t)$ – волновая функция микрочастицы; E – полная энергия микрочастицы; $U = U(x, y, z)$ – потенциальная энергия частицы; \vec{r} – пространственная координата ($\vec{r} = \vec{r}(x, y, z)$); t – время,

$\Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$ – оператор Лапласа (записан в декартовых

координатах); m – масса микрочастицы; $\hbar = 1,055 \cdot 10^{-34}$ Дж·с – постоянная Планка; $i = \sqrt{-1}$ – мнимая единица.

• Одномерное уравнение Шредингера для стационарных состояний

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

• Условие нормировки волновой функции

$$\int_{-\infty}^{+\infty} |\Psi(x)|^2 dx = 1 \quad \left(\int_{-\infty}^{+\infty} |\Psi(\vec{r})|^2 dV = 1 \right).$$

• Плотность вероятности

$$\frac{dW(x)}{dx} = |\Psi(x)|^2 \quad \left(\frac{dW(\vec{r})}{dV} = |\Psi(\vec{r})|^2 \right),$$

где $dW(x)$ – вероятность того, что частица может быть обнаружена вблизи точки с координатой x на участке dx .

• Вероятность обнаружения частицы в интервале от x_1 до x_2

$$W = \int_{x_1}^{x_2} |\Psi(x)|^2 dx.$$

• Решение уравнения Шредингера для одномерного, бесконечно глубокого, прямоугольного потенциального ящика шириной l ($0 \leq x \leq l$)

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

(собственная нормированная волновая функция)

$$E_n = \frac{\pi^2 \hbar^2 n^2}{2ml^2} \quad (\text{собственное значение энергии}),$$

где n – главное квантовое число ($n = 1, 2, 3, \dots$). В области $0 \leq x \leq l$ $U = \infty$ и $\Psi(x) = 0$.

• Коэффициент прозрачности прямоугольного потенциального барьера

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

где D_0 – постоянный множитель (можно приравнять единице); U –

высота барьера; E – полная энергия частицы; l – ширина барьера.

- Энергия квантового осциллятора

$$E_n = (n + 1/2)\hbar\omega,$$

где n – главное квантовое число ($n=0, 1, 2, \dots$); ω – собственная частота колебаний осциллятора.

• Для частиц с целочисленными спинами (бозонов) справедлива статистика Бозе-Эйнштейна, а для частиц с полуцелыми спинами (фермионов) справедлива статистика Ферми-Дирака. Обобщенное уравнение для квантовых статистик

$$\langle N_i \rangle = \frac{1}{e^{(E_i - \mu)/(kT)} \pm 1},$$

где $\langle N_i \rangle$ – среднее число частиц в состоянии с номером i , E_i – энергия частицы в этом состоянии; μ – так называемый химический потенциал, определяемый из условия $\sum \langle N_i \rangle = N$, т. е. сумма всех частиц равна полному числу N частиц в системе, знак минус (-) перед единицей в знаменателе соответствует статистике бозонов (распределению Бозе-Эйнштейна, а знак плюс (+) соответствует статистике фермионов (распределению Ферми-Дирака).

Задания

Волновые свойства микрочастиц

6.16. Вычислить длину волны де Бройля для протона, прошедшего разность потенциалов $U = 10$ В. [9,1 пм].

6.17. При какой скорости электрона дебройлевская длина волны будет равна: а) 500 нм; б) 0,1 нм? (В случае электромагнитных волн первая длина волны соответствует видимой части спектра, вторая – рентгеновским лучам). [$1,46 \cdot 10^3$ м/с; $0,73 \cdot 10^7$ м/с].

6.18. Кинетическая энергия электрона равна удвоенному значению его энергии покоя. Вычислить длину волны де Бройля для такого электрона. [86 пм].

6.19. На грань кристалла никеля падает под углом 64° к поверхности грани параллельный пучок электронов, движущихся с одинаковой скоростью. Принимая расстояние между атомными плоскостями кристалла равным 200 пм, определить скорость электронов, если они испытывают дифракционное отражение первого порядка. [2 Мм/с].

Соотношение неопределенностей

6.20. Скорость протона составляет $(8,880 \pm 0,012) \cdot 10^5$ м/с. С какой максимальной точностью можно измерить его положение? [13 пм].

6.21. Исходя из того, что радиус атома имеет величину порядка 0,1 нм, оценить скорость движения электрона в атоме водорода. [$\Delta v = 5,8 \cdot 10^5$ м/с; $v \sim 10^6$ м/с].

6.22. Пуля массой 12 г вылетает из ружейного ствола со скоростью 450 м/с. Положение пули известно с точностью до 0,55 см (радиус ствола). Какая длина волны соответствует пуле и чему равна минимальная определенность ее скорости? [$1,2 \cdot 10^{-34}$ м; $8 \cdot 10^{-31}$ м/с].

6.23. Высокая монохроматичность лазерного излучения обусловлена относительно большим временем жизни электронов в метастабильном состоянии $\sim 10^{-3}$ с. Учитывая, что постоянная Планка $\hbar = 0,66 \cdot 10^{-15}$ эВ·с, определить ширину метастабильного уровня. [$0,33 \cdot 10^{-12}$ эВ].

6.24. Длина волны излучаемого атомом водорода фотона равна 121,6 нм. Принимая время жизни возбужденного состояния $\Delta t = 10^{-8}$ с, определить отношение естественной ширины энергетического уровня, на который был возбужден электрон, к энергии, излученной атомом. [$\frac{\Delta E}{E} = 3 \cdot 10^{-9}$].

Волновая функция и уравнение Шредингера

6.25. Волновая функция, описывающая движение электрона в основном состоянии атома водорода, имеет вид: $\Psi(r) = A e^{-r/a_0}$, где A – нормировочный коэффициент волновой функции, r – расстояние электрона от ядра, a_0 – первый борковский радиус. Определить наиболее вероятное расстояние электрона от ядра в основном состоянии. [a_0].

6.26. Волновая функция, описывающая движение микрочастицы, имеет вид $\Psi(r) = \frac{A}{r} e^{-r/a}$, где A – нормировочный коэффициент волновой функции, r – расстояние этой частицы до силового центра, a – некоторая постоянная, имеющая размерность длины. Определить среднее расстояние $\langle r \rangle$ частицы от силового центра. [$\langle r \rangle = \frac{a}{2}$].

6.27. Записать стационарное уравнение Шредингера для свободной частицы массой m , которая движется вдоль оси x , а также определить посредством его решения собственные значения энергии.

Что можно сказать об энергетическом спектре свободной частицы?

[$E = \frac{\hbar^2 k^2}{2m}$, спектр непрерывный].

6.28. Электрон в бесконечно глубоком одномерном прямоугольном потенциальном ящике находится в основном состоянии. Какова вероятность обнаружения электрона в средней трети ящика? [0,609].

6.29. Волновая функция $\Psi(x) = \sqrt{\frac{2}{l}} \sin \frac{\pi x}{l}$ описывает основное состояние частицы в бесконечно глубоком одномерном потенциальном ящике шириной l . Вычислить вероятность нахождения частицы в малом интервале $\Delta l = 0,2l$ в двух случаях: 1) вблизи стенки ($0 \leq x \leq \Delta l$); 2) в средней части ящика ($l/2 - \Delta l/2 \leq x \leq l/2 + \Delta l/2$). [0,052; 0,4].

6.30. Электрон находится в бесконечно глубоком одномерном прямоугольном потенциальном ящике шириной l . Вычислить наименьшую разность энергий двух соседних энергетических уровней (в электронвольтах) электрона в двух случаях: 1) $l = 1$ мкм; 2) $l = 0,1$ нм. [$1,1 \cdot 10^{-12}$ эВ; 110 эВ].

6.31. Вероятность обнаружить частицу на участке (a, b) одномерного потенциального ящика с бесконечно высокими стенками вычисляется по формуле

$$W = \int_a^b |\Psi(x)|^2 dx. \text{ Если } \Psi -$$

функция имеет вид, указанный на рисунке 6.1, то чему равна вероятность обнаружить частицу на участке $l/6 \leq x \leq 5l/6$, где l – ширина ящика. [2/3].

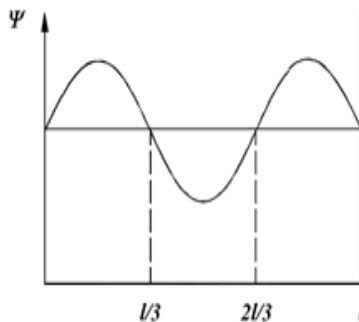


Рис.6.1

6.32. Пучок электронов с энергией $E = 15$ эВ встречает на своем пути потенциальный барьер высотой $U = 20$ В и шириной $l = 0,1$ нм. Определить коэффициент прозрачности потенциального барьера (коэффициент прохождения) D и коэффициент отражения R электронов от барьера ($R + D = 1$). [$D = 0,1$; $R = 0,9$].

6.33. Частица массой m движется в одномерном потенциальном поле $U(x) = \frac{kx^2}{2}$ (гармонический осциллятор). Собственная волновая

функция основного состояния гармонического осциллятора имеет вид $\Psi(r) = Ae^{-ax^2}$, где A – нормировочный коэффициент; a – положительная постоянная. Используя уравнение Шредингера, определить: 1) постоянную a ; 2) энергию частицы в этом состоянии.

$$\left[a = \frac{m\omega}{2\hbar}; E_0 = \frac{\hbar\omega}{2} \right].$$

Квантовые статистики

6.34. Показать, что при $kT \gg E_i$ (малом параметре вырождения) квантовые распределения Бозе-Эйнштейна и Ферми-Дирака переходят в классическое распределение Максвелла – Больцмана, то есть бозонный и фермионный газы приобретают свойства классического идеального газа.

$$\left[e^{\frac{\mu}{kT}} \approx A \ll 1; \langle N_i \rangle = Ae^{-\frac{E_i}{kT}} \right].$$

6.35. Для каких квантовых частиц характерна знаковая неоднозначность волновой функции и какие значения спина имеют эти частицы? [фермионов; имеют полуцелые значения спина].

6.36. Для каких квантовых частиц характерна знаковая однозначность волновой функции и какие значения спина имеют эти частицы? [бозонов; имеют целочисленные значения спина].

6.3. Квантовые свойства атомов, молекул и твердых тел

Основные формулы и законы

• Волновые функции связанных состояний ($E < 0$) атома водорода имеют вид

$$\Psi_{n,l,m}(r, \theta, \varphi) = R_{n,l}(r)Y_{l,m}(\theta, \varphi),$$

где n – главное квантовое число ($n = 1, 2, 3, \dots$); l – орбитальное (азимутальное) квантовое число ($l = 0, 1, 2, \dots, (n - 1)$); m – магнитное квантовое число ($m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm l$); $R_{n,l}(r)$ – радиальные функции, а $Y_{l,m}(\theta, \varphi)$ – сферические функции.

Квантовые числа n, l, m являются характеристиками микросостояния частицы, в том числе и электрона в атоме водорода, и появляются при решении нерелятивистского уравнения Шредингера.

• Квантовое магнитное спиновое число m_s ($m_s = \pm 1/2$) электрона появляется лишь при решении релятивистского уравнения Дирака, т. е. спин является релятивистской характеристикой.

• Принцип Паули: в атоме два электрона не могут находиться в

одном и том же квантовом состоянии (определяемом набором четырех квантовых чисел n, l, m, m_s).

- Электронная конфигурация атома в основном состоянии $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^{10}...$, где числа ($n = 1, 2, 3, ...$) соответствуют главному квантовому числу, которое задает электронные слои (оболочки) K, L, M, N, Буквы латинского алфавита s, p, d, f соответствуют орбитальному квантовому числу ($l = 0, 1, 2, 3$), которое задает s, p, d, f – состояния (электронные подоболочки) атома. Числа над s, p, d, f соответствуют числу электронов в соответствующих состояниях.

- Закон Мозли

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

где ν – характеристические частоты спектра; $R = 3,29 \cdot 10^{15} \text{ c}^{-1}$ – постоянная Ридберга; z – заряд ядра атома в относительных единицах; σ – постоянная экранирования; m и n – квантовые числа, соответствующие энергетическим уровням, между которыми совершается переход электрона в атоме.

- При $\sigma = 0$ формула закона Мозли обращается в формулу, описывающую линейчатые спектры водородоподобных атомов

$$\nu = R z^2 \left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right).$$

При $\sigma = 0$ и $z = 1$ формула закона Мозли совпадает с обобщенной формулой Бальмера для линейчатого спектра атома водорода.

- Частоты излученного или поглощенного электромагнитного кванта молекулярного спектра

$$\nu = \frac{1}{h} (\Delta w_{\text{эл.}} + \Delta w_{\text{кол.}} + \Delta w_{\text{вр.}}),$$

где $\Delta w_{\text{эл.}}$, $\Delta w_{\text{кол.}}$, $\Delta w_{\text{вр.}}$ – разности энергий двух соответственно электронных, колебательных и вращательных уровней.

- Средняя энергия квантового одномерного осциллятора

$$\langle E \rangle = E_0 + \frac{\hbar \omega}{e^{\hbar \omega / (kT)} - 1},$$

где $E_0 = \frac{1}{2} \hbar \omega$ – нулевая энергия; $\hbar = 1,055 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$ – постоянная Планка; ω – циклическая частота колебаний осциллятора; $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/с}$ – постоянная Больцмана;

T – термодинамическая температура.

- Молярная внутренняя энергия системы, состоящей из

невзаимодействующих квантовых осцилляторов

$$E_m^{sh.} = \frac{3}{2} R \Theta_E + \frac{3R\Theta_E}{e^{\frac{\Theta_E}{T}} - 1},$$

где R – молярная газовая постоянная; $\Theta = \frac{\hbar\omega}{k}$ –

характеристическая температура Эйнштейна.

• Молярная теплоемкость кристаллического твердого тела в области низких температур (предельный закон Дебая)

$$C_m = \frac{12\pi^4}{5} R \left(\frac{T}{\Theta_D} \right)^3 = 234R \left(\frac{T}{\Theta_D} \right)^3 \quad (T \ll \Theta_D),$$

где $\Theta = \frac{\hbar\omega_{\max}}{k}$ – характеристическая температура Дебая.

• Распределение свободных электронов в металле по энергиям при 0 К

$$dn(E) = \frac{dV(E)}{V} = \frac{1}{2\pi^2} \left(\frac{2m}{\hbar^2} \right)^{3/2} E^{1/2} dE,$$

где $dn(E)$ – концентрация электронов, энергия которых заключена в пределах от E до $E + dE$; m – масса электрона. Это выражение справедливо при $E < E_F$ (E_F – энергия или уровень Ферми).

• Энергия Ферми в металле при $T = 0$ К

$$E_F(0) = \frac{\hbar^2}{2m} (3\pi^2 n)^{2/3},$$

где n – концентрация электронов в металле.

• Средняя энергия электронов

$$\langle E \rangle = \frac{3E_F}{5}.$$

• Удельная проводимость собственных полупроводников

$$\gamma = \gamma_0 \exp(-\Delta E / 2kT),$$

где ΔE – ширина запрещенной зоны; γ_0 – константа.

• Сила тока в p-n – переходе

$$I = I_0 (\exp(eU/kT) - 1),$$

где I_0 – предельное значение силы обратного тока;

U – внешнее напряжение, приложенное к p-n – переходу.

• Связь между глубиной U потенциальной ямы и работой

выхода A из металла и полупроводника:

$$U = E_{\max} + A,$$

где E_{\max} – максимальная энергия электрона в яме.

- Внутренняя контактная разность потенциалов

$$U_{1,2} = \frac{E_{F_1} - E_{F_2}}{e},$$

где E_{F_1} и E_{F_2} - энергия Ферми соответственно для первого и второго металла или полупроводника; e – заряд электрона.

Задания

Квантовая физика атома

6.37. Уравнение Шредингера для стационарных состояний электрона, находящегося в атоме водорода, задается в декартовых координатах уравнением

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

Представить 1) собственные значения энергии, удовлетворяющие уравнению; 2) график потенциальной энергии взаимодействия электрона с ядром; 3) возможные дискретные значения энергии на этом графике.

$$[1) E_n = \frac{me^4}{32\pi^2\epsilon_0^2\hbar^2}, \quad n=1, 2, 3, \dots$$

2), 3) см. рисунок 6.2].

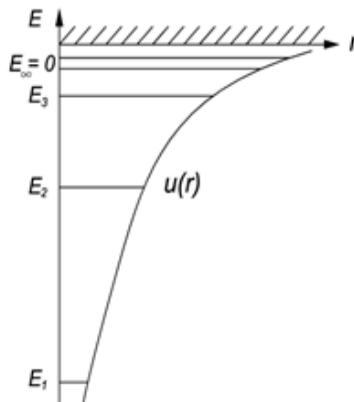


Рис.6.2

6.38. От каких квантовых чисел зависят соответственно радиальная $R(r)$ и сферическая $Y(\theta, \varphi)$ функции, входящие в волновую функцию связанных состояний атома водорода? $[n, l; l, m]$.

Физика

6.39. На рисунке 6.3 схематически представлена система энергетических уровней атома водорода. Какие переходы запрещены правилами отбора? [$3s \rightarrow 2s$].

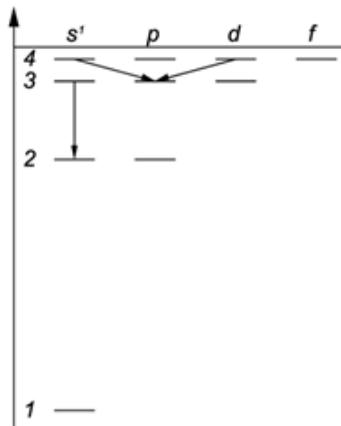


Рис.6.3

6.40. Пользуясь условными обозначениями состояний электрона в атоме водорода, записать переходы, приводящие к возникновению серии Бальмера. [$n s \rightarrow 2 p$; $n d \rightarrow 2 p$] ($n = 3, 4, \dots$).

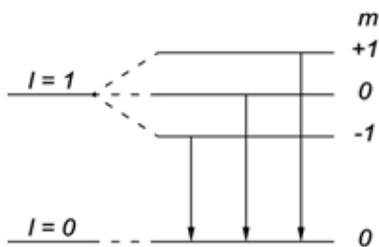


Рис.6.4

6.41. Объяснить диаграмму (рис.6.4), иллюстрирующую расщепление энергетических уровней и спектральных линий (с учетом правил отбора) при переходах между состояниями с $l = 1$ и $l = 2$.
 [р – состояние: $l = 1, m = 0, \pm 1$; s – состояние: $l = 0, m = 0$; $\Delta l = \pm 1, \Delta m = 0, \pm 1$].

6.42. Нормированная волновая функция, описывающая $1s$ – состояние электрона в атоме водорода, имеет вид

$$\Psi_{1,0,0} = \frac{1}{\sqrt{\pi a_0^3}} e^{-r/a_0}, \text{ где } a_0 \text{ – первый борковский радиус. Определить}$$

среднюю потенциальную энергию электрона в поле ядра.

$$[\langle U \rangle = -\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0} \frac{1}{a_0} = -27,2 \text{ эВ}].$$

6.43. Определить, во сколько раз орбитальный момент импульса электрона, находящегося в d – состоянии, больше, чем для электрона в p – состоянии. [1,73].

6.44. Записать электронную конфигурацию атома фосфора с вакансией в $2p$ – подоболочке. [$1s^2 2s^2 2p^5 3s^2 3p^3$].

6.45. Записать квантовые числа, определяющие внешний, или валентный, электрон в основном состоянии атома алюминия. [$n = 3, l = 1, m = 0, \pm 1; m_s = \pm 1/2$].

Закон Мозли

6.46. Определить наименьшую длину волны рентгеновского излучения, если рентгеновская трубка работает при напряжении $U = 30$ кВ. [41,3 пм].

6.47. Считая, что формула закона Мозли с достаточной степенью точности дает связь между характеристическими частотами рентгеновского спектра и порядковым номером элемента, из которого сделан антикатод, найти наибольшую длину волны K-серии рентгеновских лучей, даваемых трубкой с антикатодом из: 1) железа, 2) меди, 3) молибдена, 4) серебра, 5) тантала, 6) вольфрама, 7) платины. Для K – серии постоянная экранирования $\sigma = 1$. [1) 194 пм; 2) 154 пм; 3) 71,2 пм; 4) 56,3 пм; 5) 22 пм; 6) 21,4 пм; 7) 19 нм].

6.48. Определить постоянную экранирования для L – серии рентгеновских лучей, если известно, что при переходе электрона в атоме вольфрама с M- на L-слой испускаются рентгеновские лучи с длиной волны 143 пм. [$\sigma = 5,5$].

6.49. Определить элемент и его порядковый номер в периодической системе элементов Д.И. Менделеева, если граничная (наибольшая) частота K – серии характеристического рентгеновского излучения составляет $5,55 \cdot 10^{18}$ Гц. [$z = 42$, молибден].

6.50. При переходе электрона в атоме с L- на K-оболочку испускаются рентгеновские лучи с длиной волны 78,8 пм. Какой это атом? Для K-серии постоянная экранирования $\sigma = 1$. [$z = 40$, цирконий].

6.51. В излучении звезды обнаружен водородоподобный спектр, длина волны которого в 4 раза меньше, чем у атомарного водорода. Определить элемент, которому принадлежит данный спектр. [$z = 2$, гелий].

6.52. Молекулярные спектры состоят из трех видов полос: 1) вращательных; 2) колебательно-вращательных и 3) электронно-колебательных, которые в свою очередь состоят из большого числа тесно расположенных линий. В эксперименте и в теории проявляется значительное различие в разности энергий двух соответственно электронных, колебательных и вращательных уровней, между которыми разрешены переходы электрона в соответствии с правилами отбора, причем $\Delta W_{эл.} > \Delta W_{кол.} > \Delta W_{вр.}$. Определить, какие полосы будут наблюдаться соответственно на: 1) длинноволновой и 2) коротковолновой границах молекулярного спектра при возбуждении всех приведенных выше полос полосатого спектра молекулы. [1) вращательные; 2) электронно-колебательные].

Элементы квантовой статистики

6.53. Система, состоящая из $N = 10^{20}$ трехмерных осцилляторов, находится при температуре $T = \Theta_E$ ($\Theta_E = 250$ К). Определить энергию системы. [1,49 Дж].

6.54. Используя квантовую теорию теплоемкости Эйнштейна,

определить удельную теплоемкость при постоянном объеме алюминия при температуре 200 К. Характеристическую температуру Эйнштейна принять для алюминия равной 300 К. [770 Дж/кг·К].

6.55. Определить теплоту, необходимую для нагревания кристалла калия массой 200 г от температуры $T_1 = 4$ К до температуры $T_2 = 5$ К. Принять характеристическую температуру Дебая для калия $\Theta_D = 100$ К и считать условие $T \ll \Theta_D$ выполненным. [0,92 Дж].

6.56. Определить в электронвольтах максимальную энергию фонона, который может возбуждаться в кристалле калия, характеризуемом температурой Дебая $\Theta_D = 100$ К. [0,0086 эВ].

6.57. Оценить среднюю энергию свободных электронов в металлах при абсолютном нуле температур, если средняя концентрация электронов проводимости в металлах составляет $5 \cdot 10^{28}$ м⁻³. [3 эВ].

6.58. Металлы литий и цинк приводят в соприкосновение друг с другом при температуре $T = 0$ К. Чему будет равна возникшая контактная разность потенциалов? Какой из этих металлов будет иметь более высокий потенциал? ($\rho_{\text{Li}} = 0,53 \cdot 10^3$ кг/м³; $\rho_{\text{Zn}} = 7,15 \cdot 10^3$ кг/м³). [$U_{12} = 0,8$ В; Li].

6.59. Доказать, что уровень Ферми в собственном полупроводнике действительно расположен в середине запрещенной зоны. [$E_F = \frac{\Delta E}{2}$].

6.60. Кремниевый образец, ширина ΔE запрещенной зоны в котором равна 1,1 эВ, нагревают от температуры $t_1 = 0^\circ\text{C}$ до температуры $t_2 = 10^\circ\text{C}$. Во сколько раз возрастает его удельная проводимость γ ? [В 2,28].

6.61. При нагревании германиевого кристалла от температуры 0 °С до температуры 10 °С его удельная проводимость возрастает в 1,49 раза. По приведенным данным определить ширину запрещенной зоны кристалла германия. [0,72 эВ].

6.62. Предположим, что р – n – переход находится при 0 °С и при прямом напряжении 0,1 В, а его сопротивление равно 10 Ом. Каково сопротивление перехода, если поменять полярность напряжения? [692 Ом].

6.63. Прямое напряжение, приложенное к р – n – переходу, равно 0,1 В. Во сколько раз возрастет сила тока через переход, если изменить температуру от $T_1 = 300$ К до $T_2 = 273$ К? [В 1,1 раза].

6.64. Глубина потенциальной ямы U металла составляет 10 эВ, а максимальная энергия электрона E_{max} , отсчитанная от дна ямы, равна 6 эВ. Определить уровень Ферми E_F и работу выхода A электрона в этом металле. [$E_F = 6$ эВ; $A = 4$ эВ].

7. ЭЛЕМЕНТЫ ФИЗИКИ АТОМНОГО ЯДРА И ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ

Основные формулы и законы

- Массовое число ядра (число нуклонов в ядре)

$$A = Z + N,$$

где Z – зарядовое число (число протонов); N – число нейтронов.

- Радиус ядра с массовым числом A

$$R = 1,23 \cdot 10^{-15} \cdot A^{1/3} \text{ м.}$$

- Дефект массы ядра

$$\Delta m = Zm_p + (A - Z)m_n - {}^A_Z m_{\text{я}},$$

где m_p , m_n и ${}^A_Z m_{\text{я}}$ – соответственно масса протона, нейтрона и ядра.

Если взять не массу ядра ${}^A_Z m_{\text{я}}$, а массу атома (изотопа) ${}^A_Z m$ и вместо массы протона массу атома водорода ${}^1_1 m_{\text{H}}$, то

$$\Delta m = Z {}^1_1 m_{\text{H}} + (A - Z)m_n - {}^A_Z m.$$

- Энергия связи и удельная энергия связи

$$E_{\text{CB}} = \Delta m \cdot c^2, \quad E_{\text{уд}} = E_{\text{CB}} / A.$$

Если массы измерять в а.е.м., то $E_{\text{CB}} = 931,5 \cdot \Delta m$ (МэВ), так как $1 \text{ а.е.м.} \cdot c^2 = 931,5 \text{ МэВ}$.

- Закон радиоактивного распада

$$dN = -\lambda N dt \text{ или } N = N_0 e^{-\lambda t},$$

где dN – число ядер, распадающихся за время dt ; N – число ядер, не распавшихся к моменту времени t ; N_0 – число ядер в начальный момент времени ($t=0$); λ – постоянная радиоактивного распада.

- Период полураспада

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0,693}{\lambda}.$$

- Среднее время жизни радиоактивного ядра

$$\tau = 1 / \lambda.$$

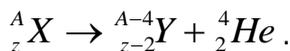
- Активность радиоактивного изотопа – число распадов за 1 с:

$$A = -dN / dt = \gamma N \text{ или } A = \gamma N_0 e^{-\lambda t} = A_0 e^{-\lambda t};$$

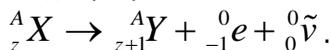
В СИ активность измеряется в беккерелях (Бк), внесистемная

единица активности – кюри (Ки), $1 \text{ Ки} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Бк}$.

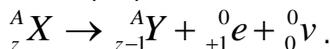
- Правила смещения для α -распада



- Правила смещения для β^- -распада



- Правила смещения для β^+ -распада



- Энергетический эффект ядерной реакции (в МэВ)

$$Q = 931,5 \left[\sum m_i - \sum m_j \right],$$

где $\sum m_i$ – сумма масс (в а.е.м.) исходных реагентов; $\sum m_j$ – сумма масс (в а.е.м.) продуктов реакции.

- Основные дозиметрические величины:

1) поглощенная доза излучения $D_n = \Delta E_{\text{полн}}/m$;

2) экспозиционная доза $D_3 = q/m$ ($1 \text{ р} = 2,58 \cdot 10^{-4} \text{ Кл/кг}$)

3) биологический эквивалент рентгена ($1 \text{ бэр} = 10^{-9} \text{ Дж/кг}$)

4) мощность дозы излучения $P_n = D_n/\Delta t$ или $P_3 = D_3/\Delta t$,

где Δt – длительность облучения.

Задания

Физика атомного ядра

7.1. Определить плотность частиц (нуклонов) ядерного вещества, выражаемую числом нуклонов в 1 см^3 , если в ядре с массовым числом A все нуклоны плотно упакованы в пределах его радиуса. Используя вычисленную плотность частиц ядерного вещества, определить плотность массы нейтронной звезды, если все нейтроны плотно упакованы в пределах всего объема звезды ($m_n = 1,675 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$). [$8,7 \cdot 10^{37} \text{ см}^{-3}$; $1,46 \cdot 10^{17} \text{ кг/м}^3$]

7.2. Определить энергию и удельную энергию связи для ядер изотопов 1) гелия: а) ${}^4_2 \text{He}$; б) ${}^3_2 \text{He}$; 2) урана: а) ${}^{235}_{92} \text{U}$; б) ${}^{238}_{92} \text{U}$. Какие выводы можно сделать на основе вычисленных значений энергии и удельной энергии связи? (см. примечание к п. 5.3).

1) [28,4 МэВ; 7,1 МэВ/нуклон; 7,8 МэВ; 2,6 МэВ/нуклон].

2) [1786 МэВ; 7,6 МэВ/нуклон; 1804 МэВ; 7,58 МэВ/нуклон].

7.3. Определить удельную энергию связи для ядер:

Физика

- 1) дейтерия ${}^2_1\text{D}$; 2) гелия ${}^4_2\text{He}$; 3) лития ${}^7_3\text{Li}$; 4) кислорода ${}^{16}_8\text{O}$;
 5) алюминия ${}^{27}_{13}\text{Al}$; 6) железа ${}^{56}_{26}\text{Fe}$; 7) ксенона ${}^{131}_{54}\text{Xe}$; 8) золота ${}^{198}_{79}\text{Au}$;
 9) урана ${}^{238}_{92}\text{U}$. [1] 0,56 МэВ/нуклон; 2) 7,08 МэВ/нуклон; 3) 5,61 МэВ/нуклон;
 4) 7,98 МэВ/нуклон; 5) 9,34 МэВ/нуклон; 6) 9,30 МэВ/нуклон; 7) 9,40 МэВ/нуклон; 8) 7,92 МэВ/нуклон;
 9) 7,58 МэВ/нуклон].

Примечание: для решения задач 7.2 и 7.3 используйте массы протона и нейтрона (в а.е.м.): $m_p = 1,00728$; $m_n = 1,00867$, а также используйте нижеприведенную таблицу.

Изотоп	Масса (а.е.м.)	Изотоп	Масса (а.е.м.)	Изотоп	Масса (а.е.м.)
${}^1_1\text{H}$	1,00814	${}^7_3\text{Li}$	7,01823	${}^{131}_{54}\text{Xe}$	130,94662
${}^2_1\text{D}$	2,01474	${}^{16}_8\text{O}$	15,99491	${}^{198}_{79}\text{Au}$	198,03048
${}^3_2\text{He}$	3,01699	${}^{27}_{13}\text{Al}$	25,99008	${}^{235}_{92}\text{U}$	235,11750
${}^4_2\text{He}$	4,00387	${}^{56}_{26}\text{Fe}$	5,92264	${}^{238}_{92}\text{U}$	238,12522

7.4. Зная постоянную распада λ ядра, определить вероятность W того, что ядро распадается за промежуток времени от 0 до t . [$W = \Delta N/N_0 = 1 - e^{-\lambda t}$].

7.5. Период полураспада некоторого радиоактивного изотопа $T_{1/2} = 2$ с. Определить вероятность W того, что ядро не распадется на промежутке t , равном 10 с. [$W = \Delta N/N_0 = e^{-\lambda t} = 0,31$].

7.6. Определить, сколько ядер в $m_0 = 5$ мг радиоизотопа церия ${}^{144}_{58}\text{Ce}$ распадается в течение промежутков времени:
 1) $\Delta t = 1$ с; 2) $\Delta t = 1$ год. Период полураспада радиоизотопа церия ${}^{144}_{58}\text{Ce}$ $T = 285$ суток. [1] $6 \cdot 10^{11}$; 2) $1,25 \cdot 10^{19}$].

7.7. Образец содержит 1000 радиоактивных атомов (изотопов) с периодом полураспада $T_{1/2}$, Сколько атомов останется через промежуток $T/2$? [250].

7.8. За какое время произойдет распад 2 мг полония ${}^{210}_{84}\text{Po}$, если в начальный момент его масса 0,2 мг? [28,5 мин].

7.9. Сколько ядер распадается за 1 с в куске урана ${}^{238}_{92}\text{U}$ массой 1 кг? Какая активность этого урана? [$\Delta N = 1,236 \cdot 10^7$ распадов/с; $A = 0,33$ мКи].

7.10. Что больше: среднее время жизни τ радиоактивного ядра

или период полураспада $T_{1/2}$? [τ больше $T_{1/2}$ в 1,44 раза].

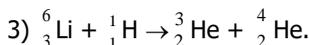
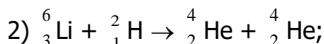
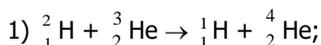
7.11. Чтобы определить возраст древней ткани, найденной в одной из египетских пирамид, была определена концентрация в ней атомов радиоуглерода $^{13}_6\text{C}$. Она оказалась соответствующей 9,2 распадам в минуту на один грамм углерода. Концентрация $^{13}_6\text{C}$ в живых растениях соответствует 14 распадам в минуту на один грамм углерода. Период полураспада $T_{1/2}$ $^{13}_6\text{C}$ равен 5730 лет. Исходя из этих данных, оценить возраст древней ткани. [$3,5 \cdot 10^3$ лет].

7.12. Пользуясь таблицей Менделеева и правилами смещения, определить, в какой элемент превращается радий $^{226}_{88}\text{Ra}$ после пяти α - и четырех β^- -распадов. [$^{206}_{82}\text{Pb}$].

7.13. Определить высоту кулоновского потенциального барьера для α -частицы в ядре полония $^{200}_{84}\text{Po}$. Покоившееся ядро полония испускает α -частицу с кинетической энергией $T_\alpha = 5,77$ МэВ. За счет какого эффекта α -частица вылетает из ядра? [26,6 МэВ; туннельный эффект].

7.14. Используя принцип неопределенности в виде $\Delta r \Delta p \geq \hbar/2$, показать, что электрон не может находиться внутри атомного ядра ($\hbar = 0,66 \cdot 10^{-15}$ эВ·с). [$\Delta r = 0,33$ эВ·с/м; $E = 99$ МэВ ≥ 10 МэВ].

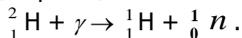
7.15. Определить энергию, выделяющуюся при следующих реакциях:



Примечание: при решении задачи используйте таблицу, приведенную к задаче 5.3; $m_3^6\text{Li} = 6,01703$ а.е.м.

[1] 18,3 МэВ; 2) 22,4 МэВ; 3) 4,02 МэВ].

7.16. Определить наименьшую энергию γ -кванта, необходимую для осуществления следующей реакции:



Примечание: при решении задачи используйте таблицу, приведенную к задаче 7.3.

7.17. Предположим, что для преодоления электростатического отталкивания два дейтрона ${}^2_1\text{H}$ должны сблизиться до 10^{-14} м. Определить высоту электростатического потенциального барьера в МэВ. До какой температуры нужно нагреть дейтрон, чтобы преодолеть потенциальный барьер? [0,14 МэВ; $5,6 \cdot 10^6$ К].

7.18. Ядро урана ${}_{92}^{238}\text{U}$, захватывая быстрый нейтрон, превращается в радиоактивный изотоп урана, который претерпевает β^- -распад, и превращается в трансурановый элемент, который в свою очередь также претерпевает β^- -распад, в результате чего образуется плутоний. Записать все эти процессы в виде ядерных реакций.

7.19. Определить энергию, выделяющуюся в результате реакции ${}_{12}^{23}\text{Mg} \rightarrow {}_{11}^{23}\text{Na} + {}_1^0\text{e} + {}_0^0\nu$. Массы нейтральных атомов магния и натрия соответственно равны $3,8184 \cdot 10^{-26}$ и $3,8177 \cdot 10^{-26}$ кг.

7.20. Ядро урана ${}_{92}^{235}\text{U}$, захватывая тепловой нейтрон, делится на изотопы стронция и ксенона с массовыми числами 95 и 139, второй из которых, являясь радиоактивным, претерпевает $3\beta^-$ -распада. Записать реакцию деления, а также цепочку β^- -распадов.

7.21. Французские ученые Ирэн и Фредерик Жолио-Кюри, открывшие искусственную радиоактивность, подвергли бомбардировке α -частицами бор ${}_{5}^{10}\text{B}$, алюминий ${}_{13}^{27}\text{Al}$ и магний ${}_{12}^{24}\text{Mg}$. Записать соответствующие ядерные реакции. Напомним, что при данных реакциях возникают нейтроны.

7.22. Сколько энергии выделится при ядерном делении 1 кг урана ${}_{92}^{235}\text{U}$ в урановом реакторе (или в атомной бомбе)? Какое количество угля необходимо сжечь для получения такого же количества теплоты (калорийность угля принять равной 29,3 МДж/кг)? Считать, что средняя энергия, выделяющаяся при делении одного ядра урана ${}_{92}^{235}\text{U}$, составляет 200 МэВ. [$5,13 \cdot 10^{26}$ МэВ; $2,8 \cdot 10^6$ кг].

7.23. Энергия излучения Солнца возникает вследствие цепочки термоядерных реакций, конечным результатом которых является превращение четырех ядер водорода в одно ядро гелия. Термоядерные реакции, происходящие в водородной бомбе и в предполагаемых установках по мирному использованию термоядерных реакций, в общем сводятся к тому же. Определить, какое количество воды можно было бы нагреть от 0 °С до кипения за счет превращения в гелий 4 г водорода. [$\approx 1,54 \cdot 10^6$ кг].

7.24. Для сравнения биологического действия различных видов излучения используется коэффициент относительной биологической активности (КОБА). Он показывает, во сколько раз действие данного излучения сильнее биологического действия γ -излучения при равных видах поглощенной энергии. Ниже приведен КОБА для различных видов радиоактивных излучений. Подберите соответствующие значения КОБА для: 1) рентгеновских лучей и β -частиц; 2) α -частиц; 3) нейтронов. [1; 1–10; 10–20 соответственно].

7.25. Какую дозу радиоактивного излучения измеряют соответствующие приборы (поглощенную или экспозиционную)?

7.26. Скорость нарастания цепной реакции задается формулой

Физика

$$\frac{dN}{dt} = \frac{N(k-1)}{T}, \text{ откуда } N = N_0 e^{(k-1)t/T}, \text{ где } N_0 - \text{ число нейтронов в}$$

начальный момент времени; N – число нейтронов в момент времени t ; T – среднее время жизни одного поколения; k – коэффициент размножения нейтронов. Определить, во сколько раз увеличится число нейтронов в цепной ядерной реакции за время $t = 10$ с, если среднее время жизни T одного поколения составляет 80 мс, а коэффициент размножения нейтронов $k = 1,002$. [$N / N_0 = 1,284$].

7.27. Характер зависимости N числа нейтронов в момент t цепной ядерной реакции деления тяжелых ядер, как следует из формулы, приведенной в задаче 7.26, определяется знаком выражения $(k - 1)$. Различают: 1) развивающуюся; 2) затухающую; 3) самоподдерживающуюся реакции. Как называются режимы соответствующих цепных ядерных реакций? Какие значения k им соответствуют? [Надкритический: $k > 1$; критический: $k = 1$; подкритический: $k < 1$].

Физика элементарных частиц

7.28. Из приведенных ниже характеристик элементарных частиц отобрать 1) одинаковые как по величине, так и по знаку характеристики частиц и их античастиц; 2) одинаковые по величине, но противоположные по знаку характеристики частиц и их античастиц. А. [масса]. В. [электрический, барионный и лептонный заряды]. С. [спин]. D. [магнитный момент]. G. [время жизни]. E. [странность, спиральность].

7.29. Электрон и позитрон, имеющие одинаковые кинетические энергии, равные 240 кэВ, при соударении превратились в два одинаковых фотона. Определить энергию фотона и соответствующую ему длину волны. [750 кэВ; 1,65 пм].

7.30. Среди фундаментальных элементарных частиц, указанных в правой колонке таблицы, выбрать частицы, относящиеся к соответствующим классам частиц из приведенных в левой колонке.

<p>1. Лептоны 2. Кварки 3. Кванты фундаментальных полей взаимодействия</p>	<p>А. Электрон. Б. Мюон. В. Фотон. Г. Тау-лептон. Д. Шесть типов кварков по аромату, в каждом из которых различают три цвета. Е. Электронное нейтрино. Ж. Мюонное нейтрино. З. Промежуточные векторные бозоны. И. Гравитон. К. Глюоны. Л. Тау – нейтрино.</p>
--	--

7.31. Из фундаментальных элементарных частиц, указанных в задании 5.30, выбрать частицы, являющиеся: 1) фермионами; 2) бозонами.

7.32. Фундаментальным физическим взаимодействиям: 1) электромагнитному, 2) гравитационному, 3) слабому, 4) сильному – подберите соответствующие кванты фундаментальных полей

взаимодействия, приведенные ниже. А. [Гравитон]. В. [Глюон]. С. [W^\pm – частицы и Z – частицы]. D. [Фотон]].

7.33. На какие подгруппы частиц из приведенных ниже подразделяется многочисленная группа адронов, т. е. частиц, состоящих из кварков и участвующих в сильном взаимодействии? А. [Барионы]. В. [Мезоны]. С. [Гипероны (странные барионы)]. D. [Резонансы]. E. [Лептоны].

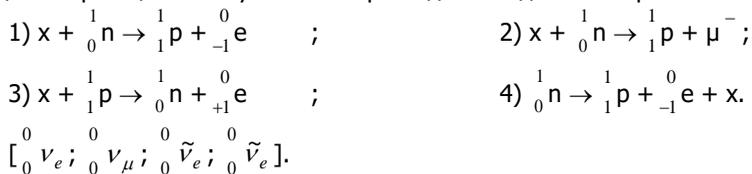
7.34. В приведенной ниже сводке законов сохранения в физике элементарных частиц выберите законы сохранения, справедливые: 1) для всех видов фундаментальных взаимодействий; 2) для электромагнитного; 3) для слабого; 4) для сильного взаимодействия.

Законы сохранения: А. Сохранение полной энергии. Б. Сохранение полного импульса. В. Сохранение полного момента импульса. Г. Сохранение электрического заряда. Д. Сохранение барионов. Е. Сохранение лептонов. Ж. Зарядовая независимость (или сохранение изотопического спина). З. Сохранение странности. И. Симметрия античастиц. К. Сохранение четности. Л. CP – инвариантность. М. CPT – инвариантность. Н. Инвариантность относительно обращения времени. О. Сохранение очарования.

7.35. Радиус действия нуклон – нуклонных сил составляет примерно $1,5 \cdot 10^{-15}$ м. Какую массу должна иметь виртуальная частица, чтобы обеспечить такой радиус действия? Какие частицы являются ее реальным отображением? (при решении задачи используйте принцип неопределенности Гейзенберга в виде $\Delta r \Delta p \geq \hbar$, виртуальную частицу считайте ультрарелятивистской). [$m \approx 0,23 \cdot 10^{-27}$ кг $\geq 250 m_e$; π – мезоны (пионы)].

7.36. Нейтральный π – мезон (π^0), распадаясь, превращается в два одинаковых γ – фотона. Принимая массу пиона равной $264 m_e$, определить энергию каждого из возникших фотонов. Кинетической энергией и импульсом мезона пренебречь. [67,6 МэВ].

7.37. Выбрав из четырех типов нейтрино ($\nu_e, \tilde{\nu}_e, \nu_\mu, \tilde{\nu}_\mu$) правильное, написать недостающие обозначения (х) в каждой из приведенных реакций и в случае бета – распада свободного нейтрона:



7.38. Определить, какие из приведенных ниже процессов разрешены законом сохранения лептонного числа:



7.39. Установить, запрещены или нет перечисленные ниже

реакции. Если есть запрет, то указать, с нарушением какого закона сохранения он связан.

$$1) \Lambda^0 \rightarrow p + \pi^0;$$

$$2) p + \tilde{p} \rightarrow \mu^+ + e^-;$$

$$3) n \rightarrow p + e^- + \nu_e;$$

$$4) p \rightarrow n + e^+ + \nu_e.$$

[Нарушаются законы сохранения: 1) электрического заряда; 2) мюонного и электронного лептонных чисел; 3) электронного лептонного числа; 4) энергии.]

Литература

1. Волькенштейн В.С. Сборник задач по общему курсу физики. Изд. доп. и перераб. – СПб.: Изд-во «Специальная литература»; Изд-во «Лань», 1999. – 328 с.
2. Трофимова Т.И. Сборник задач по курсу физики для вузов. – 3-е изд.- М.: ООО «Издательский дом «ОНИКС 21 век»»; ООО «Издательство «Мир и Образование»», 2013.-384 с.