

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ**

**«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ПРОМЫШЛЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И ДИЗАЙНА»**

-----  
**ВЫСШАЯ ШКОЛА ТЕХНОЛОГИИ И ЭНЕРГЕТИКИ**

**Кафедра физики**

**ФИЗИКА**

**ЧАСТЬ 3**

**ОПТИКА. КВАНТОВО-ОПТИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ.  
ЭЛЕМЕНТЫ АТОМНОЙ И ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ**

**Учебно-методическое пособие  
для студентов Института безотрывных форм обучения**

**Санкт-Петербург  
2019**

УДК 53(075)  
ББК 22.3.я7  
Ф 503

ФИЗИКА. Часть 3. Оптика. Квантово-оптические явления.  
Элементы атомной и ядерной физики: учебно-методическое  
пособие для студентов Института безотрывных форм обучения /  
сост. Е.А. Яшкевич, В.О. Кабанов, Т.С. Гусарова; ВШТЭ  
СПбГУПТД.- СПб., 2019.- 44 с.

Пособие содержит программу, методические указания, примеры  
решения задач и контрольные задания по двум разделам курса  
физики, посвященным оптическим, квантово-оптическим явлениям,  
элементам атомной и ядерной физики.

Предназначено для студентов Института безотрывных форм  
обучения.

Рецензент: доцент кафедры физики ВШТЭ СПбГУПТД,  
канд. физ.-мат. наук М.Н. Полянский

Подготовлено и рекомендовано к печати кафедрой физики  
ВШТЭ СПбГУПТД (протокол № 5 от 11.02.2019 г.).

Утверждено к изданию методической комиссией института  
энергетики и автоматизации ВШТЭ СПбГУПТД (протокол № 7 от  
04.04.2019 г.).

Рекомендовано к изданию Редакционно-издательским советом  
СПбГУПТД в качестве учебно-методического пособия.

© Высшая школа технологии  
и энергетики СПбГУПТД, 2019

## ОБЩИЕ МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

Настоящее пособие содержит материалы по пятому и шестому разделам курса физики: «Оптика» и «Квантово-оптические явления. Элементы атомной и ядерной физики». Дана таблица вариантов контрольной работы № 3, которая состоит из шести задач: три задачи - по пятому и три – по шестому разделам. Контрольная работа предоставляется для проверки согласно учебному плану. Номер варианта контрольной работы выбирается по последней цифре шифра студента.

Таблица 1

Вариант	Номера задач в контрольной работе № 3					
1	1	51	61	71	81	131
2	2	52	62	72	82	132
3	3	53	63	73	83	133
4	4	54	64	74	84	134
5	5	55	65	75	85	135
6	6	56	66	76	86	136
7	7	57	67	77	87	137
8	8	58	68	78	88	138
9	9	59	69	79	89	139
10	10	60	70	80	90	140

При выполнении контрольных работ необходимо соблюдать следующие правила:

- 1) каждую контрольную работу выполнять в отдельной тетради;

2) на титульном листе нужно указать номер контрольной работы, наименование дисциплины, фамилию и инициалы студента, шифр и домашний адрес;

3) контрольную работу следует выполнять аккуратно, писать разборчиво, оставляя поля для замечаний рецензента;

4) условие задачи с указанием номера переписывать полностью, а заданные числовые значения выписывать отдельно «в столбик», переводя их в систему СИ;

5) там, где это необходимо для решения, сделать чертеж или рисунок;

6) решение задачи должно сопровождаться необходимыми пояснениями;

7) в пояснениях к задаче необходимо указать основные законы и формулы, на которых базируется решение данной задачи;

8) при получении расчетной формулы, которая нужна для решения конкретной задачи, приводить ее вывод с указанием, что значит каждая используемая буква;

9) основные законы и формулы, приведенные в данном пособии, выводить не надо;

10) не рекомендуется в решении одной задачи использовать одну и ту же букву для обозначения различных величин;

11) рекомендуется решение задачи сначала сделать в общем виде, то есть в буквенных обозначениях;

12) вычисления следует проводить подстановкой заданных числовых значений в расчетную формулу. Все числовые значения величин должны быть выражены в СИ;

13) проверить единицы измерения полученных величин по расчетной формуле и тем самым подтвердить правильность расчетной формулы;

14) в контрольной работе следует указать учебники и учебные пособия, которые использовались при решении задач.

*Контрольные работы, выполненные без соблюдения указанных правил, а также работы, в которых номера задач не соответствуют нужному варианту, рецензироваться не будут.*

При повторном рецензировании обязательно представлять первоначальный вариант с первой рецензией.

## РАБОЧАЯ ПРОГРАММА

**Оптика.** Волновая и корпускулярная теория света. Интерференция света. Когерентность и монохроматичность световых волн. Временная и пространственная когерентность. Расчет интерференционной картины от двух когерентных волн. Оптическая длина пути. Интерференция света в тонких пленках. Интерферометры.

Принцип Гюйгенса-Френеля. Метод зон Френеля. Прямолинейное распространение света. Дифракция Френеля на круглом отверстии. Дифракция в параллельных лучах на одной щели; на дифракционной решетке. Разрешающая способность оптических приборов. Дифракция на пространственной решетке. Формула Вульфа-Брэгга. Исследование структуры кристаллов. Понятие о голографии.

Естественный и поляризованный свет. Поляризация света при отражении. Закон Брюстера. Двойное лучепреломление. Закон Малюса. Оптически активные вещества. Искусственная оптическая анизотропия. Эффект Керра. Дисперсия света. Области нормальной и аномальной дисперсии. Электронная теория дисперсии света. Излучение Вавилова-Черенкова.

**Квантовая природа излучения.** Тепловое излучение. Испускательная и поглощательная способность. Закон Кирхгофа. Абсолютно черное тело. Распределение энергии в спектре излучения абсолютно черного тела. Квантовая гипотеза и формула Планка. Закон Стефана-Больцмана. Законы Вина. Оптическая пирометрия. Внешний фотоэффект и его законы. Несостоятельность классической теории. Фотоны. Уравнение Эйнштейна для внешнего фотоэффекта.

Эффект Комптона и его теория. Давление света. Опыты Лебедева. Квантовое и волновое объяснения давления света. Диалектическое единство корпускулярных и волновых свойств электромагнитного излучения.

**Основы физики атома.** Теория атома водорода по Бору. Опытное обоснование корпускулярно-волнового дуализма свойств веществ. Гипотеза де Бройля. Соотношение неопределенностей как проявление корпускулярно-волнового дуализма свойств материи.

Волновая функция и ее статистический смысл. Ограниченность механического детерминизма. Уравнение Шредингера для

стационарных состояний. Частица в одномерной прямоугольной потенциальной яме. Линейный гармонический осциллятор. Атом водорода. Главное, орбитальное и магнитное квантовые числа.

Опыты Штерна и Герлаха. Спин электрона. Спиновое квантовое число. Фермионы. Бозоны. Принцип Паули. Распределение электронов в атоме по состояниям. Рентгеновские лучи. Характеристическое и тормозное рентгеновское излучение. Закон Мозли. Поглощение, спонтанное и вынужденное излучение. Лазер.

**Основы физики атомного ядра и элементарных частиц.** Заряд, размер и масса атомного ядра. Массовое и зарядовое числа. Состав ядра по Иваненко-Гейзенбергу. Нуклоны. Изотопы. Механический момент количества движения ядра и его магнитный момент. Дефект массы и энергия связи ядра. Взаимодействие нуклонов и понятие о свойствах и природе ядерных сил. Капельная модель ядра.

Естественная радиоактивность. Закономерности и происхождение  $\alpha$ -,  $\beta$ - и  $\gamma$ -излучений атомного ядра. Закон радиоактивного распада. Период полураспада. Активность радиоактивного вещества. Объяснение  $\alpha$ -распада на основе корпускулярно-волновых свойств  $\alpha$ -частицы. Теория  $\beta$ -распада. Нейтрино.  $\gamma$ -излучение. Механизм взаимодействия  $\gamma$ -излучения с веществом.

Ядерные реакции и законы сохранения. Искусственная радиоактивность. Реакция деления тяжелых ядер. Цепная реакция. Понятие о ядерной энергетике. Реакция синтеза легких атомных ядер. Проблема управляемых термоядерных реакций. Элементарные частицы. Их классификация и взаимопревращаемость.

## V. ОПТИКА

### Основные законы и формулы

Таблица 2

Величина или физический закон	Формула
Показатель преломления среды	$n = v / c$
Оптическая длина пути	$L = nl$
Условие максимального усиления света при интерференции (условие максимумов)	$\Delta = \pm 2k \frac{\lambda}{2}, k = 1, 2, 3, \dots$
Условие максимального ослабления света при интерференции (условие минимумов)	$\Delta = \pm (2k + 1) \frac{\lambda}{2}, k = 1, 2, 3, \dots$
Линейное и угловое расстояния между соседними интерференционными полосами на экране, расположенными параллельно двум когерентным источникам света	$\Delta l = L\lambda / d;$ $\Delta \alpha = \lambda / d$
Оптическая разность хода в тонких пленках в отраженном и проходящем свете (показатель преломления пленки больше показателя преломления окружающей среды)	$\Delta = 2d \sqrt{n^2 - \sin^2 i} + \frac{\lambda}{2};$ $\Delta = 2d \sqrt{n^2 - \sin^2 i};$ $\Delta = 2dn \cos r$
Радиусы зон Френеля для сферического и плоского фронта волны	$\rho_k = \sqrt{k\lambda r R / (R + r)};$ $\rho_k = \sqrt{k\lambda r}$

Величина или физический закон	Формула
Условие дифракционных максимумов от одной щели	$\alpha \sin \varphi = (2k + 1) \frac{\lambda}{2}$
Условие дифракционных минимумов от одной щели	$\alpha \sin \varphi = 2k \frac{\lambda}{2}$
Условие главных максимумов дифракционной решетки	$c \sin \varphi = k\lambda$
Разрешающая сила дифракционной решетки	$R = \lambda / (\Delta\lambda) = kN$
Формулы Френеля для отраженного естественного света от диэлектриков	$I_{\perp} = 0.5I_0 \left[ \frac{\sin(i-r)}{\sin(i+r)} \right]^2 ;$ $I_{\parallel} = 0.5I_0 \left[ \frac{\operatorname{tg}(i-r)}{\operatorname{tg}(i+r)} \right]^2$
Степень поляризации луча	$\rho = (I_{\perp} - I_{\parallel}) \cdot 100\% / (I_{\perp} + I_{\parallel})$
Степень поляризации частично поляризованного света	$\rho = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} \cdot 100\%$
Закон Брюстера	$\operatorname{tgi}_0 = n_2 / n_1 = n_{21}$
Закон Малюса	$I_2 = I_1 \cos^2 \alpha$
Разность хода лучей, прошедших пластинку исландского шпата (или кварца), вырезанную параллельно оптической оси, для нормального падения света	$\Delta = d(n_0 - n_e) = d\Delta n$

Величина или физический закон	Формула
Угол вращения плоскости поляризации в кристаллах и растворах	$\varphi = [\varphi]l;$ $\varphi = [\varphi]lc$
Эффект Доплера	$\nu' = \nu \sqrt{\frac{c \pm v}{c \mp v}}$
Групповая скорость	$u = v - \lambda \frac{dv}{d\lambda};$ $u = v \left( 1 + \frac{\lambda}{n} \frac{dn}{d\lambda} \right)$
Условие возникновения излучения Вавилова-Черенкова	$\nu > c/n$
Закон Стефана-Больцмана	$R = \sigma T^4$
Закон Вина	$\lambda_{\max} = C_1/T$
Для абсолютно черного тела (косинусный излучатель) связь между энергетической светимостью и энергетической яркостью	$B_{\vartheta} = R/\pi$
Энергия фотона	$\varepsilon = h\nu = hc/\lambda$
Масса фотона	$m_{\phi} = \frac{\varepsilon}{c^2} = \frac{h\nu}{c^2} = \frac{h}{c\lambda}$

Величина или физический закон	Формула
Импульс фотона	$p_{\phi} = m_{\phi}c = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda}$
Давление света при нормальном падении на поверхность с коэффициентом отражения $\rho$	$p = \omega(1 + \rho);$ $p = \frac{E}{c}(1 + \rho)$
Давление равновесного теплового излучения	$p = \omega/3$
Уравнение Эйнштейна для внешнего фотоэффекта:	$h\nu = A + T$
при $T < 5$ кэВ	$T = m_0\nu^2/2$
при $T > 5$ кэВ	$T = E - E_0 = mc^2 - m_0c^2 =$ $= E_0 \left( \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}} - 1 \right)$
Изменение длины волны при эффекте Комптона	$\Delta\lambda = \frac{h}{m_0c}(1 - \cos \vartheta) =$ $= \Lambda(1 - \cos \vartheta) = 2\Lambda \sin^2(\vartheta/2)$

## Примеры решения задач

### Пример 1

Найти угловое расстояние между соседними светлыми полосами в опыте Юнга, если известно, что экран отстоит от когерентных источников света на 1 м, а пятая светлая полоса на экране расположена на расстоянии 1,5 мм от центра интерференционной картины.

Дано:  $L = 1\text{ м}$ ;  $k = 5$ ;  $x = 1,5\text{ мм} = 1,5 \cdot 10^{-3}\text{ м}$ .

Найти:  $\Delta\alpha_{\text{max}}$ .

Решение. В точке  $O$  на экране (центр интерференционной картины) (рис. 1) будет максимальная освещенность, так как она равноудалена от источников света  $S_1$  и  $S_2$  и разность хода волн  $|S_1O| - |S_2O|$  равна нулю. В произвольной точке экрана  $P$  максимум освещенности будет наблюдаться, если разность хода волн  $S_1P - S_2P$  равна целому числу длин волн:

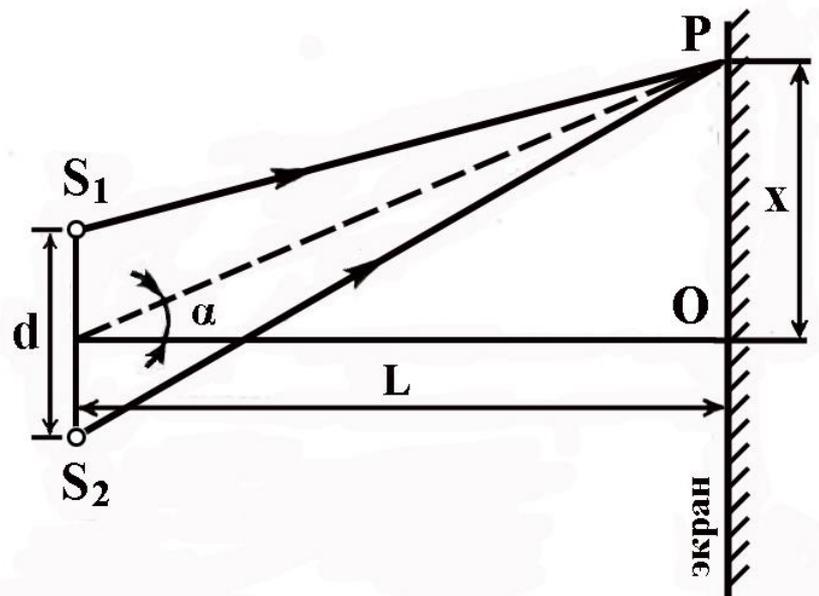


Рис. 1

$$\Delta = k\lambda, \quad (1)$$

где  $\Delta$  - разность хода когерентных лучей;  $\lambda$  - длина световой волны;  $k$  - номер светлой полосы (центральная светлая полоса принята за нулевую). Разность хода лучей

$$\Delta = xd/L, \quad (2)$$

где  $d$  - расстояние между источниками света;  $L$  - расстояние от источников света до экрана.

Приравниваем формулы (1) и (2):  $xd/L = k\lambda$ , откуда

$$x = kL\lambda/d. \quad (3)$$

Угловое положение интерференционной полосы на экране определяется углом  $\alpha$ . Из рисунка видно, что  $\operatorname{tg}\alpha = x/L$ , или ввиду малости  $\alpha$

$$\alpha \approx x/L. \quad (4)$$

Решая (3) и (4), находим

$$\alpha_{\max} = k\lambda/d.$$

Угловое расстояние между соседними светлыми полосами

$$\Delta\alpha_{\max} = k\frac{\lambda}{d} - (k-1)\frac{\lambda}{d} = \frac{\lambda}{d}. \quad (5)$$

Определяя  $x/d$  из уравнения (3) и подставляя это отношение в (5), получаем

$$\begin{aligned} \Delta\alpha_{\max} &= x/(kL); \\ \Delta\alpha_{\max} &= 1,5 \cdot 10^{-3} \text{ м} / (5 \cdot 1 \text{ м}) = 3 \cdot 10^{-4} \text{ рад}. \end{aligned}$$

*Ответ:*  $\Delta\alpha_{\max} = 3 \cdot 10^{-4} \text{ рад}$ .

### **Пример 2**

На дифракционную решетку с периодом 2 мкм нормально падает пучок света от разрядной трубки, наполненной гелием.

1) какую разность длин волн может разрешить эта решетка в области красных лучей ( $\lambda_1 = 0,7$  мкм) в спектре второго порядка, если ширина решетки - 2,5 см?

2) на какую длину волны в спектре второго порядка накладывается синяя линия ( $\lambda_2 = 0,447$  мкм) спектра третьего порядка?

*Дано:*  $k_2 = 3$ ;  $k_3 = 2$ ;  $x = 2,5 \text{ см} = 2,5 \cdot 10^{-2} \text{ м}$ ;  $d = 2 \text{ мкм} = 2 \cdot 10^{-6} \text{ м}$ ;  $\lambda_1 = 0,7 \text{ мкм} = 7 \cdot 10^{-7} \text{ м}$ ;  $\lambda_2 = 0,447 \text{ мкм} = 4,47 \cdot 10^{-7} \text{ м}$ .

*Найти:*  $\Delta\lambda$ ,  $\lambda_3$ .

*Решение.* Разрешающая способность дифракционной решетки

$$R = \lambda/(\Delta\lambda) = kN, \quad (1)$$

где  $N$  – общее число щелей решетки;  $k$  – порядок спектра.

Период решетки  $d = x/N_0$ , где  $N_0$  – число щелей на 1 м длины. Зная ширину  $x$  дифракционной решетки, находим общее число щелей решетки:

$$N = N_0 x = x/d. \quad (2)$$

Из формулы (1) с учетом (2) находим:

$$\Delta\lambda = \lambda / (kN) = \lambda d / (kx); \quad (3)$$

$$\Delta\lambda = 7 \cdot 10^{-7} \text{ м} \cdot 2 \cdot 10^{-6} \text{ м} / (2 \cdot 2,5 \cdot 10^{-2} \text{ м}) = 0,28 \cdot 10^{-10} \text{ м}.$$

Направления на главные максимумы дифракционной решетки определяются условием  $d \sin \varphi = k\lambda$ , где  $k = 0, 1, 2, 3, \dots$  – порядок спектра;  $\varphi$  – угол между направлением на дифракционный максимум и нормалью к решетке. При наложении спектральных линий выполняется условие:  $d \sin \varphi = k_2 \lambda_2$ ,  $d \sin \varphi = k_3 \lambda_3$  или  $k_2 \lambda_2 = k_3 \lambda_3$ , откуда:

$$\lambda_3 = k_2 \lambda_2 / k_3, \quad \lambda_3 = 3 \cdot 4,47 \cdot 10^{-7} \text{ м} / 2 = 0,67 \cdot 10^{-6} \text{ м}.$$

Ответ:  $\Delta\lambda = 0,28 \cdot 10^{-10} \text{ м}$ ;  $\lambda_3 = 0,67 \cdot 10^{-6} \text{ м}$ .

### Пример 3

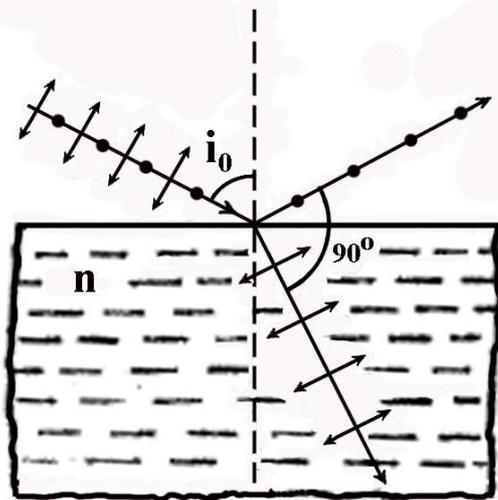


Рис. 2

Естественный свет падает на диэлектрик с показателем преломления 1,54. Найти угол полной поляризации и степень поляризации отраженного и преломленного света для этого угла падения.

Дано:  $n = 1,54$ .

Найти:  $i_0, P_1, P_2$ .

Решение. По закону Брюстера тангенс угла полной поляризации равен относительному показателю преломления диэлектрика

(рис. 2):

$$\operatorname{tg} i_0 = n, \quad i_0 = \operatorname{arctg} n = 57^\circ.$$

Степень поляризации отраженной волны

$$\rho = (I_{\perp} - I_{\parallel}) \cdot 100\% / (I_{\perp} + I_{\parallel}).$$

Согласно формулам Френеля (см. табл. 2), интенсивность составляющих отраженной волны, поляризованных перпендикулярно и параллельно плоскости падения,

$$I_{\perp} = 0.5I_0 \left[ \frac{\sin(i-r)}{\sin(i+r)} \right]^2; \quad (1)$$

$$I_{\parallel} = 0.5I_0 \left[ \frac{\operatorname{tg}(i-r)}{\operatorname{tg}(i+r)} \right]^2, \quad (2)$$

где  $I_0$  - интенсивность естественного света;  $i$  - угол падения;  $r$  - угол преломления.

Если свет падает на диэлектрик под углом полной поляризации ( $i = i_0$ ), то, учитывая, что  $i_0 + r = 90^\circ$ ,  $\sin(i_0 + r) = \sin 90^\circ = 1$ ,  $\operatorname{tg} 90^\circ \rightarrow \infty$ .

Подставим значения синуса и тангенса в формулы (1) и (2) и получим  $I_{\perp} = 0,5I_0 \sin^2(i-r)$ ;  $I_{\parallel} = 0$ .

Степень поляризации отраженной волны

$$\rho = I_{\perp} \cdot 100\% / I_{\perp} = 100\%,$$

т.е. луч максимально поляризован.

Найдем значения интенсивности составляющих с перпендикулярной и параллельной поляризацией в преломленном луче:  $I'_{\perp} = 0,5I_0 - I_{\perp} = 0,5I_0 - 0,5I_0 \sin^2(i-r)$ ;  $I'_{\parallel} = 0,5I_0$ .

Степень поляризации преломленной волны

$$\rho_2 = \frac{I'_{\perp} - I'_{\parallel}}{I'_{\perp} + I'_{\parallel}} 100\% = \frac{0,5I_0 - 0,5I_0(1 - \sin^2(i_0 - r))}{0,5I_0 + 0,5I_0(1 - \sin^2(i_0 - r))} 100\% = \frac{\sin^2(i_0 - r)}{2 - \sin^2(i_0 - r)} 100\% ;$$

$$\rho_2 = \frac{\sin^2(57^\circ - 33^\circ)}{2 - \sin^2(57^\circ - 33^\circ)} 100\% = \frac{0,407^2}{2 - 0,407^2} 100\% = 9\% .$$

Ответ:  $i_0 = 57^\circ$ ;  $P_1 = 100\%$ ;  $P_2 = 9\%$ .

#### **Пример 4**

Естественный свет проходит через два поляризатора с коэффициентами пропускания  $k_1 = 0,9$  и  $k_2 = 0,8$ . Плоскости поляризаторов составляют угол  $45^\circ$ . Определить, во сколько раз ослабляется свет после прохождения обоих поляризаторов.

Дано:  $k_1 = 0,9$ ;  $k_2 = 0,8$ ;  $\varphi = 45^\circ$ .

Найти:  $I_0/I_2$ .

Решение. В первом поляризаторе естественный свет  $I_0$  будет разделен на два пучка, поляризованных во взаимно

перпендикулярных плоскостях, и один пучок будет пропущен через поляризатор. С учетом коэффициента пропускания интенсивность вышедшего пучка будет равна  $I_1 = 0,5 \cdot I_0 \cdot k_1$ . Этот плоскополяризованный свет попадет на второй поляризатор, и по закону Малюса после прохождения второго поляризатора его интенсивность будет равна

$$I_2 = I_1 \cdot \cos^2 \varphi.$$

С учетом коэффициента пропускания второго поляризатора

$$I_2 = I_1 \cdot k_2 \cdot \cos^2 \varphi = 0,5 I_0 \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot \cos^2 \varphi.$$

Отсюда получаем коэффициент ослабления света

$$I_0/I_2 = 1/(0,5 \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot \cos^2 \varphi) = 5,6$$

*Ответ:*  $I_0/I_2 = 5,6$ .

### **Пример 5**

Дисперсия показателя преломления кварца представлена Табл. 3:

Таблица 3

$\lambda$ , нм	586,3	486,1	410,0
$n$	1,5442	1,5497	1,5565

Найти отношение фазовой и групповой скоростей света вблизи длины волны  $\lambda = 486,1$  нм.

*Решение.* Групповая скорость  $u$  связана с фазовой скоростью  $v$  света в среде отношением:

$$u = v - \lambda \frac{dv}{d\lambda}. \quad (1)$$

Учитывая, что  $v = c/n$ , из (1) получаем:

$$u = v \left( 1 + \frac{\lambda}{n} \frac{dn}{d\lambda} \right)$$

или для средней дисперсии вещества:

$$u = v \left( 1 + \frac{\lambda}{n} \frac{\Delta n}{\Delta \lambda} \right), \quad (2)$$

где  $\frac{\Delta n}{\Delta \lambda}$  - средняя дисперсия показателя преломления среды. Из Табл. 3 для  $\lambda = 486,1$  нм и  $n = 1,5497$  находим относительную дисперсию:

$$\frac{\lambda \Delta n}{n \Delta \lambda} = \frac{486,1(1,5565 - 1,5442)}{1,5497(410,0 - 586,3)} = -0,022.$$

Тогда из (2) получим:

$$u = v \left( 1 + \frac{\lambda \Delta n}{n \Delta \lambda} \right) = v(1 - 0,022) = 0,978v,$$

$$u/v = 0,978.$$

Ответ:  $u/v = 0,978$ .

### **Пример 6**

При каких значениях кинетической энергии протона будет наблюдаться черенковское излучение, если протон движется с постоянной скоростью в среде с показателем преломления 1.6 ?

Дано:  $n = 1,6$

Найти:  $T_{\text{ч}}$ .

Решение. Для возникновения черенковского излучения необходимо, чтобы скорость движения заряженной частицы в среде была больше фазовой скорости света в этой среде  $v > c/n$ .

Выразим кинетическую энергию протона через показатель преломления среды:

$$T = E - E_0 = m_0 c^2 \left( \frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} - 1 \right) = E_0 \left( \frac{n}{\sqrt{n^2 - 1}} - 1 \right),$$

где  $E_0 = 938$  МэВ – энергия покоя протона;  $m_0$  – масса протона.

Черенковское излучение возникает при

$$T_{\text{ч}} > T = E_0 \left( \frac{n}{\sqrt{n^2 - 1}} - 1 \right).$$

Тогда:

$$T_{\text{ч}} = 938 \text{ МэВ} \left( \frac{1,6}{\sqrt{1,6^2 - 1}} - 1 \right) = 262,64 \text{ МэВ}.$$

Ответ:  $T_{\text{ч}} > 263$  МэВ.

### Пример 7

Во сколько раз увеличится мощность излучения абсолютно черного тела, если максимум энергии излучения передвинется от красной границы видимого спектра к его фиолетовой границе?

Дано:  $\lambda_k = 0,76$  мкм;  $\lambda_\phi = 0,38$  мкм.

Найти:  $n = N_\phi / N_k$ .

Решение. Длина волны, на которую приходится максимум энергии излучения абсолютно черного тела, определяется из закона смещения Вина:

$$\lambda_{\max} = C_1 / T, \quad (1)$$

где  $T$  – температура излучателя;  $C_1 = 2,89 \cdot 10^{-3}$  м·К – постоянная закона смещения Вина.

По формуле (1) определяем температуру, соответствующую красной и фиолетовой границам видимой области спектра:

$$T_k = C_1 / \lambda_k; \quad T_\phi = C_1 / \lambda_\phi.$$

Мощность излучения абсолютно черного тела

$$N = R_\varepsilon S,$$

где  $R_\varepsilon$  – энергетическая светимость абсолютно черного тела;  $S$  – площадь поверхности излучающего тела. В соответствии с законом Стефана-Больцмана

$$R_\varepsilon = \sigma T^4, \quad (2)$$

где  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$  Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>) – постоянная Стефана-Больцмана, для красной и фиолетовой границ видимой области спектра

$$N_k = \sigma T_k^4 S; \quad N_\phi = \sigma T_\phi^4 S.$$

Из формул (1) и (2) следует:

$$\frac{N_\phi}{N_k} = \frac{\sigma S (C_1 / \lambda_\phi)^4}{\sigma S (C_1 / \lambda_k)^4} = \frac{(C_1 / \lambda_\phi)^4}{(C_1 / \lambda_k)^4} = \left( \frac{\lambda_k}{\lambda_\phi} \right)^4.$$

Отношение  $n = N_\phi / N_k$  показывает, во сколько раз увеличивается мощность излучения абсолютно черного тела:

$$n = (0,76 \text{ мкм} / 0,38 \text{ мкм})^4 = 2^4 = 16.$$

Ответ: Мощность излучения увеличится в 16 раз.

### Пример 8

Угол рассеяния фотона с энергией 1,2 МэВ на свободном электроне -  $60^\circ$ . Найти длину волны рассеянного фотона, энергию и импульс электрона отдачи (кинетической энергией электрона до соударения пренебречь).

Дано:  $\varepsilon = 1,2 \text{ МэВ} = 1,92 \cdot 10^{-13} \text{ Дж}$ ;  $\theta = 60^\circ$ .

Найти:  $\lambda_2$ ,  $T_e$ ,  $p_e$ .

Решение. Изменение длины волны фотона при комптоновском рассеянии

$$\Delta\lambda = \lambda_2 - \lambda_1 = \frac{h}{m_0 c} (1 - \cos\theta) = \lambda_c (1 - \cos\theta), \quad (1)$$

где  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  – длина волн падающего и рассеянного фотонов;  
 $h = 6,62 \cdot 10^{-34} \text{ Дж}\cdot\text{с}$  – постоянная Планка;  $m_0 = 9,11 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$  – масса покоя электрона;  $c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$  – скорость света в вакууме;  
 $\lambda_c = 2,43 \cdot 10^{-12} \text{ м}$  – комптоновская длина волны.

Из формулы (1) находим  $\lambda_2 = \lambda_1 + \Delta\lambda = \lambda_1 + \lambda_c (1 - \cos\theta)$ .

Выражая  $\lambda_1$  через энергию фотона  $\varepsilon_1 = hc/\lambda_1$ , получаем

$$\lambda_2 = hc/\varepsilon_1 + \lambda_c (1 - \cos\theta). \quad (2)$$

Подставим числовые значения

$$\lambda_2 = \frac{6,62 \cdot 10^{-34} \text{ Дж}\cdot\text{с} \cdot 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}}{1,92 \cdot 10^{-13} \text{ Дж}} + 2,43 \cdot 10^{-12} \text{ м} (1 - 0,5) = 2,25 \cdot 10^{-12} \text{ м};$$

Вычислим энергию рассеянного фотона

$$\varepsilon_2 = hc/\lambda_2$$

$$\varepsilon_2 = 6,62 \cdot 10^{-34} \text{ Дж}\cdot\text{с} \cdot 3 \cdot 10^8 \text{ м/с} / 2,25 \cdot 10^{-12} \text{ м} = 8,83 \cdot 10^{-14} \text{ Дж}.$$

Энергия электрона отдачи по закону сохранения энергии

$$T_e = \varepsilon_1 - \varepsilon_2;$$

$$T_e = 1,92 \cdot 10^{-13} \text{ Дж} - 0,883 \cdot 10^{-13} \text{ Дж} = 1,037 \cdot 10^{-13} \text{ Дж}$$

Зная энергию электрона, найдем его импульс

$$p_e = \frac{1}{c} \sqrt{T_e (T_e + 2E_0)}, \quad (3)$$

где  $E_0 = 0,511 \text{ МэВ} = 0,82 \cdot 10^{-13} \text{ Дж}$  – энергия покоя электрона.

Подставим числовые значения:

$$p_e = \frac{1}{3 \cdot 10^8 \text{ м/с}} \sqrt{1,037 \cdot 10^{-13} \text{ Дж} (1,037 \cdot 10^{-13} \text{ Дж} + 2 \cdot 0,82 \cdot 10^{-13} \text{ Дж})} =$$

$$= 9,25 \cdot 10^{-15} \text{ кг} \cdot \text{м/с}$$

Ответ:  $\lambda_2 = 2,25 \cdot 10^{-12} \text{ м}$ ;  $T_e = 1,037 \cdot 10^{-13} \text{ Дж}$ ;  $p_e = 9,25 \cdot 10^{-15} \text{ кг} \cdot \text{м/с}$ .

## VI. КВАНТОВО-ОПТИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ ЭЛЕМЕНТЫ АТОМНОЙ И ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ

### Основные законы и формулы

Таблица 4

Величина или физический закон	Формула
Правило квантования электронных орбит	$m v r_n = n h / (2\pi)$
Второй постулат Бора (условие частот)	$h \nu = E_n - E_i$
Радиус n-й стационарной орбиты ( $r_B$ – радиус первой боровской орбиты)	$r_n = r_B n^2$
Энергия электрона в атоме водорода ( $E_i$ – энергия ионизации атома водорода)	$E_n = \frac{E_i}{n^2}$
Сериальная формула для спектральных линий водорода	$\nu = R c \left( \frac{1}{i^2} - \frac{1}{n^2} \right)$
Сериальная формула для водородоподобных атомов	$\nu = R c Z^2 \left( \frac{1}{i^2} - \frac{1}{n^2} \right)$
Длина волны де Бройля	$\lambda = h / p = h / (m v)$
Соотношение неопределенностей Гейзенберга	$\Delta x \Delta p \geq h / (2\pi);$ $\Delta E \Delta t \geq h / (2\pi)$

<b>Величина или физический закон</b>	<b>Формула</b>
Коротковолновая граница сплошного рентгеновского спектра	$\lambda = hc/(qU)$
Формула Мозли	$\frac{1}{\lambda} = R(Z - a)^2 \left( \frac{1}{i^2} - \frac{1}{n^2} \right)$
Формула Вульфа-Брегга для дифракции рентгеновских лучей	$2d \sin \varphi = k\lambda$
Закон поглощения излучения веществом (формула Бугера)	$I = I_0 e^{-\mu x}$
Закон радиоактивного распада	$N = N_0 e^{-\lambda t}$
Зависимость периода полураспада от постоянной радиоактивного распада	$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0,693}{\lambda}$
Активность радиоактивного изотопа	$A = \frac{dN}{dt} = \lambda N;$ $A = \lambda N_0 e^{-\lambda t} = A_0 e^{-\lambda t}$
Дефект массы	$\Delta m = [Zm_{1H} + (A - Z)m_n - m_a]$
Энергия связи ядра	$\Delta E = \Delta mc^2;$ $\Delta E = 931\Delta m(\text{МэВ})$

## Примеры решения задач

### Пример 1

Определить частоту света, излучаемого двукратно ионизированным атомом лития при переходе электрона на уровень с главным квантовым числом 2, если радиус орбиты электрона изменился в 9 раз.

*Дано:*  $r_2 / r_1 = 9$ ;  $n_1 = 2$ .

*Найти:*  $\nu$ .

*Решение.* Порядковый номер лития  $Z = 3$ . Поэтому двукратно ионизированный атом лития имеет один электрон, вращающийся вокруг ядра, и атом является водородоподобным.

Радиус  $k$ -ой стационарной орбиты для водородоподобных атомов задается формулой (табл. 4):

$$r_k = r_B \cdot k^2,$$

поэтому  $r_2 / r_1 = (n_2 / n_1)^2 = 9$ . Следовательно,  $n_2 / n_1 = 3$  и  $n_2 = 3n_1 = 6$ .

Частота излучения света для водородоподобных атомов определяется формулой:

$$\nu = R c Z^2 \left( \frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right), \quad (1)$$

где  $R$  – постоянная Ридберга;  $c$  – скорость света;  $Z$  – порядковый номер элемента;  $n$  – номер орбиты, с которой переходит электрон;  $i$  – номер орбиты, на которую переходит электрон. Подставим числовые значения:

$$\nu = 1,097 \cdot 10^7 \text{ 1/м} \cdot 3 \cdot 10^8 \text{ м/с} \cdot 3^2 \cdot \left( \frac{1}{4} - \frac{1}{36} \right) = 6,58 \cdot 10^{15} \text{ 1/с}.$$

*Ответ:*  $\nu = 6,58 \cdot 10^{15} \text{ 1/с}$ .

### Пример 2

Вычислить длину волны де Бройля электрона, движущегося со скоростью  $\nu = 0,75 c$  ( $c$  – скорость света в вакууме).

*Дано:*  $\nu = 0,75 c$ .

*Найти:*  $\lambda$ .

*Решение.* Длина волны де Бройля для частиц определяется формулой:

$$\lambda = \frac{h}{p}, \quad (1)$$

где  $h$  – постоянная Планка;  $p$  – импульс частицы.

При движении частиц со скоростями, близкими к скорости света в вакууме, масса частицы зависит от скорости. Поэтому, в выражении для импульса

$$p = m v, \quad (2)$$

где  $m$  – масса движущейся частицы. Зависимость массы от скорости выражается соотношением:

$$m = m_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}, \quad (3)$$

где  $m_0$  – масса покоя частицы;  $v$  – скорость движения частицы.

Подставив в выражение (1) значения  $p$  и  $m$  из соотношений (2) и (3), получим:

$$\lambda = \frac{h}{m_0 v} \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}. \quad (4)$$

По условию задачи скорость электрона равна  $0,75 c$ . Подставив это значение в формулу (4), имеем:

$$\lambda = \frac{h}{m_0 0,75 c} \sqrt{1 - \frac{0,75^2 c^2}{c^2}} = \frac{h}{m_0 c} \cdot \frac{1}{0,75} \sqrt{1 - 0,75^2},$$

где  $h/(m_0 c)$  – комптоновская длина волны  $\Lambda$ . Учитывая это, получим:

$$\lambda = 0,88 \Lambda.$$

Находим  $\Lambda$  из таблиц или вычисляем, зная массу покоя электрона:

$$\Lambda = 0,88 \cdot 2,42 \text{ нм} = 2,13 \text{ нм}.$$

*Ответ:*  $\lambda = 2,13 \text{ нм}$ .

### **Пример 3**

Используя соотношение неопределенностей Гейзенберга, показать, что ядра атомов не могут содержать электронов. Считать радиус ядра равным  $10^{-13}$  см.

*Дано:*  $R_{\text{я}} = 10^{-13} \text{ см} = 10^{-15} \text{ м}$ ;  $h = 6,62 \cdot 10^{-34} \text{ Дж}\cdot\text{с}$ .

*Решение.* Соотношение неопределенностей Гейзенберга выражается формулой:

$$\Delta x \Delta p_x \geq h/(2\pi),$$

где  $\Delta x$  – неопределенность в координате;  $\Delta p_x$  – неопределенность в импульсе;  $h$  – постоянная Планка.

Если неопределенность в координате принять равной радиусу ядра, т.е.  $\Delta x = R_{\text{я}}$ , то неопределенность импульса электрона определим следующим образом:

$$\Delta p_x = h/(2\pi\Delta x).$$

Так как  $\Delta p_x = m\Delta v_x$ ; то  $m\Delta v_x = h/(2\pi\Delta x)$  и  $\Delta v_x = h/(2\pi\Delta x m)$ . Вычислим неопределенность скорости электрона:

$$\Delta v_x = \frac{6,62 \cdot 10^{-34}}{9,1 \cdot 10^{-31} \cdot 10^{-15} \cdot 6,28} = 1,158 \cdot 10^{11} \text{ м/с}.$$

Видно, что  $\Delta v_x \gg c$ . Следовательно, ядра атомов не могут содержать электронов.

Проверяем единицу:

$$[\Delta v_x] = \left[ \frac{\text{Дж} \cdot \text{с}}{\text{кг} \cdot \text{м}} \right] = \left[ \frac{\text{кг} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{с}}{\text{с}^2 \cdot \text{кг} \cdot \text{м}} \right] = [\text{м/с}].$$

#### **Пример 4**

Найти частоту и энергию фотона линии  $K_{\alpha}$  характеристического рентгеновского излучения от платинового антикатада.

*Дано:*  $Z = 78$ ;  $n_1 = 1$ ;  $a = 1$ ;  $n_2 = 2$ .

*Найти:*  $\nu$ ,  $\varepsilon$ .

*Решение.* Линия  $K_{\alpha}$  возникает в характеристическом рентгеновском спектре при переходе электрона с уровня  $n_2 = 2$  на уровень

$n_1 = 1$  в атоме платины после того, как на первом уровне возникнет свободное место – ‘дырка’.

По формуле Мозли  $1/\lambda = R(Z-a)^2 (1/n_1^2 - 1/n_2^2)$ , где  $\lambda$  – длина волны характеристического излучения, равная  $\lambda = c/\nu$ ;  $c$  – скорость света;  $\nu$  – частота, соответствующая длине волны;  $R$  – постоянная Ридберга;  $Z$  – порядковый номер элемента антикатада, для платины  $Z = 78$ ;  $a$  – постоянная экранирования;  $n_1$  – номер терма, на который переходит электрон, для  $K_{\alpha}$  - серии  $n_2 = 2$ .

Заменяя в формуле Мозли  $\lambda$  через  $\nu$ , получаем:

$$\nu = cR(Z-a)^2 \left( \frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right),$$

$$\nu = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с} \cdot 1,097 \cdot 10^7 \text{ м}^{-1} (78-1)^2 \left( \frac{1}{1^2} - \frac{1}{2^2} \right) = 14,6 \cdot 10^{18} \text{ Гц}.$$

Энергию фотона определим по формуле Планка  $\varepsilon = h\nu$ , где  $h$  – постоянная Планка:

$$\begin{aligned}\varepsilon &= 6,62 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с} \cdot 14,6 \cdot 10^{18} \text{ 1/с} = 96,8 \cdot 10^{-16} \text{ Дж} = \\ &= 96,8 \cdot 10^{-16} \cdot 6,25 \cdot 10^{18} \text{ эВ} = 60500 \text{ эВ} = 60,5 \text{ кэВ}.\end{aligned}$$

Ответ:  $\nu = 14,6 \cdot 10^{18}$  Гц;  $\varepsilon = 60,5$  кэВ.

### Пример 5

Пучок  $\gamma$ -лучей с длиной волны  $0,0069 \cdot 10^{-10}$  м падает на поверхность воды. На какой глубине интенсивность лучей уменьшится в 90 раз?

Дано:  $\lambda = 0,0069 \cdot 10^{-10}$  м =  $6,9 \cdot 10^{-13}$  м;  $k = 90$ .

Найти:  $x$ .

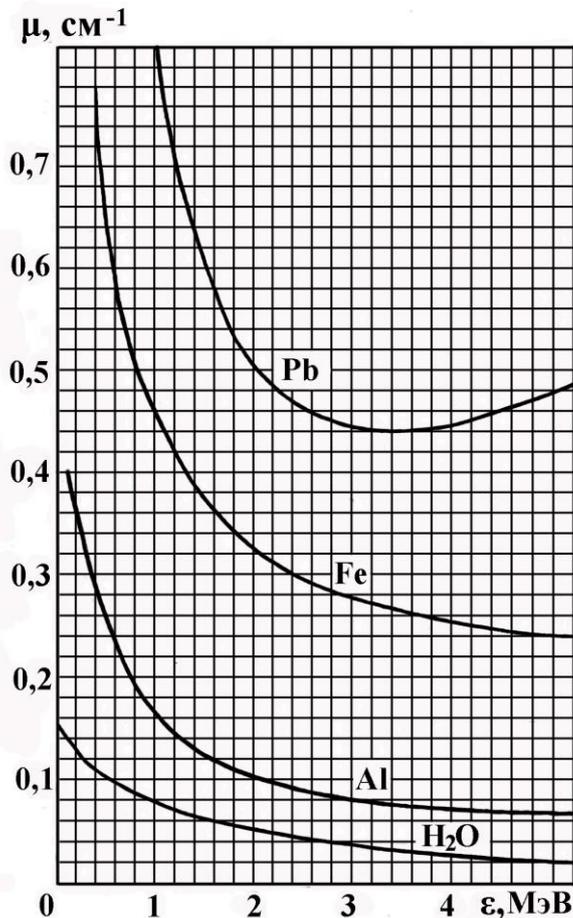


Рис. 3

*Решение.* Ослабление интенсивности определяется из формулы  $I = I_0 e^{-\mu x}$ , откуда  $I_0/I = e^{\mu x}$ , где  $I_0$  – интенсивность падающего пучка лучей;  $I$  – интенсивность лучей на глубине  $x$ ;  $\mu$  – коэффициент линейного ослабления.

Решая уравнение относительно  $x$ , находим:

$$\ln k = \mu x; \quad x = \ln k / \mu.$$

Для определения  $\mu$  вычислим энергию квантов:

$$\varepsilon = h\nu = hc/\lambda,$$

где  $h$  – постоянная Планка;  $c$  – скорость света.

Вычисления:

$$\varepsilon = \frac{6,62 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с} \cdot 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}}{6,9 \cdot 10^{-13} \text{ м}} = 2,88 \cdot 10^{-13} \text{ Дж} =$$

$$= 2,88 \cdot 10^{-13} \text{ МэВ} / (1,6 \cdot 10^{-13}) = 1,8 \text{ МэВ}.$$

По графику зависимости линейного коэффициента ослабления  $\gamma$ -лучей от их энергии (рис. 3) находим  $\mu = 0,061 \text{ см}^{-1}$ .

Вычисляем  $x$ :

$$x = \frac{\ln 90}{0,061 \text{ см}^{-1}} = 4,5 / 0,061 \text{ см}^{-1} = 75 \text{ см}.$$

Ответ:  $x = 75 \text{ см}$ .

### Пример 6

Определить начальную активность  $A_0$  радиоактивного препарата магния  $^{27}\text{Mg}$  массой  $m = 0,2 \text{ мкг}$ , а также его активность  $A$  через время  $t = 6 \text{ ч}$ . Период полураспада  $T_{1/2}$  магния считать известным.

Дано:  $m = 0,2 \text{ мкг}$ ;  $t = 6 \text{ ч} = 6 \cdot 3,6 \cdot 10^3 \text{ с} = 21,6 \cdot 10^3 \text{ с}$ ;

$T_{1/2} = 10 \text{ мин} = 600 \text{ с}$ .

Найти:  $A_0, A$ .

Решение. Активность  $A$  изотопа характеризует скорость радиоактивного распада и определяется отношением числа  $dN$  ядер, распавшихся за интервал времени  $dt$ , к этому интервалу:

$$A = -\frac{dN}{dt}. \quad (1)$$

Знак «-» показывает, что число  $N$  радиоактивных ядер с течением времени убывает.

Для того чтобы найти  $dN/dt$ , воспользуемся законом радиоактивного распада:

$$N = N_0 e^{-\lambda t}, \quad (2)$$

где  $N$  – число радиоактивных ядер, содержащихся в изотопе в момент времени  $t$ ;  $N_0$  – число радиоактивных ядер в момент времени, принятый за начальный ( $t = 0$ );  $\lambda$  – постоянная радиационного распада.

Продифференцируем выражение (2) по времени:

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N_0 e^{-\lambda t}. \quad (3)$$

Исключив из формулы (1) и (3)  $dN/dt$ , находим активность препарата в момент времени  $t$ :

$$A = \lambda N_0 e^{-\lambda t}. \quad (4)$$

Начальную активность  $A_0$  препарата получим при  $t = 0$ :

$$A_0 = \lambda N_0.$$

Постоянная радиационного распада  $\lambda$  связана с периодом полураспада  $T_{1/2}$  соотношением:

$$\lambda = \frac{\ln 2}{T_{1/2}}. \quad (6)$$

Число  $N_0$  радиоактивных ядер, содержащихся в изотопе, равно произведению постоянной Авогадро  $N_A$  на количество вещества  $\nu$  данного изотопа:

$$N_0 = \nu N_A = \frac{m}{M} N_A, \quad (7)$$

С учетом выражений (6) и (7) формулы (5) и (4) принимают вид:

$$A_0 = \frac{m \ln 2}{M T_{1/2}} N_A,$$

$$A = \frac{m \ln 2}{M T_{1/2}} N_A e^{-\frac{\ln 2}{T_{1/2}} t}.$$

Произведем вычисления:

$$A_0 = \frac{0,2 \cdot 10^{-9}}{27 \cdot 10^{-3}} \frac{0,693}{600} \cdot 6,02 \cdot 10^{23} \text{ Бк} = 5,13 \cdot 10^{12} \text{ Бк} = 5,13 \text{ ТБк},$$

$$A = \frac{0,2 \cdot 10^{-9}}{27 \cdot 10^{-3}} \frac{0,693}{600} \cdot 6,02 \cdot 10^{23} \cdot e^{\frac{0,693}{600} \cdot 2,16 \cdot 10^4} \text{ Бк} = 81,3 \text{ Бк}.$$

Ответ:  $A_0 = 5,13 \text{ ТБк}$ ;  $A = 81,3 \text{ Бк}$ .

### Пример 7

Сколько энергии выделяется при образовании одного грамма гелия из протонов и нейтронов?

*Дано:*  $m = 1 \text{ г} = 10^{-3} \text{ кг}$ .

*Найти:*  $E$ .

*Решение.* Выделившуюся энергию найдем по формуле взаимосвязи массы и энергии:  $E = \Delta m c^2 n$ , где  $\Delta m$  – изменение массы при образовании одного ядра атома гелия (дефект массы);  $c$  – скорость распространения света;  $n$  – число атомов гелия массой  $m$ .

Дефект массы определим из равенства:

$$\Delta m = Z m_{1H} + (A - Z) m_n - m_a,$$

где  $Z$  – зарядовое число элемента, равное порядковому номеру элемента в таблице Менделеева, для гелия  $Z = 2$ ;  $m_{1H}$  – масса атома водорода,  $m_{1H} = 1,00783$  а.е.м.;  $m_n$  – масса нейтрона,  $m_n = 1,00867$  а.е.м.;  $A$  – массовое число, для гелия  $A = 4$ ;  $m_a$  – масса атома, для гелия  $m_a = 4,00260$  а.е.м. Подставим эти значения:

$$\begin{aligned} \Delta m &= (2 \cdot 1,00783 + 2 \cdot 1,00867 - 4,00260) \text{ а.е.м.} = 0,0304 \text{ а.е.м.} = \\ &= 5,05 \cdot 10^{-29} \text{ кг.} \end{aligned}$$

Учтем, что  $n = (m/\mu) N_A$ , тогда

$$E = \Delta m c^2 \frac{m}{\mu} N_A.$$

Число атомов в 1 кг равно  $N_A/\mu$ , где  $N_A$  – постоянная Авогадро;  $\mu$  – молярная масса, для гелия  $\mu = 4 \cdot 10^{-3}$  кг/моль. Подставим эти значения в формулу выделившейся энергии:

$$\begin{aligned} E &= 5,05 \cdot 10^{-29} \text{ кг}^2 \cdot 10^{-3} \frac{6,023 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}}{4 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}} \cdot 9 \cdot 10^{16} \text{ м}^2/\text{с}^2 = \\ &= 0,0684 \cdot 10^{13} \text{ Дж} = 4,3 \cdot 10^{30} \text{ эВ.} \end{aligned}$$

*Ответ:*  $E = 4,3 \cdot 10^{30}$  эВ.

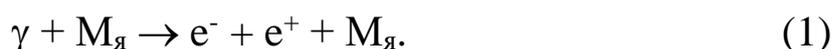
### **Пример 8**

Определить пороговую энергию  $\gamma$ -кванта для образования пары электрон-позитрон в кулоновском поле ядра.

*Дано:*  $m_{0e} = 9,11 \cdot 10^{-31}$  кг.

*Найти:*  $E_{п}$ .

*Решение.* Процесс образования пары электрон-позитрон происходит по схеме:



Пороговая энергия – это минимальная величина энергии  $\gamma$ -кванта, при которой возможно начало этого процесса. На основании закона сохранения импульса можно записать, считая ядро покоящимся,  $|p_\gamma| = |p_{e^-} + p_{e^+}|$ , где  $p_\gamma$  - импульс падающего фотона;  $p_{e^-}$  и  $p_{e^+}$  - импульсы электрона и позитрона. Связь между энергией и импульсом при релятивистском движении частиц выражается формулой:

$$E = \sqrt{(pc)^2 + (m_0c^2)^2},$$

где  $m_0$  – масса покоя частицы;  $c$  – скорость света в вакууме. Учитывая эту связь и применяя закон сохранения энергии (1), получим

$$pc + M_яc^2 = \sqrt{(pc)^2 + [(2m_{0e} + M_я)c^2]^2}, \quad (2)$$

где  $pc$  – пороговая энергия  $\gamma$ -квантов  $E_{п}$ .

Возведем обе части равенства (2) в квадрат:

$$(pc + M_яc^2)^2 = (pc)^2 + [(2m_{0e} + M_я)c^2]^2.$$

После раскрытия скобок и сокращения подобных членов получим:

$$E_{п} = pc = 2m_{0e}c^2 + 2m_{0e}c^2 / M_я.$$

Отношение  $2m_{0e}c^2/M_я \ll 2m_{0e}c^2$ , так что этим членом можно пренебречь. Окончательно получаем:

$$E_{п} = 2m_{0e}c^2; \quad (3)$$

$$m_{0e} = 9,11 \cdot 10^{-31} \text{ кг}; \quad c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}.$$

Подставляя числовые значения в формулу (3), имеем:

$$\begin{aligned} E_{п} &= 2 \cdot 9,11 \cdot 10^{-31} \text{ кг} \cdot (3 \cdot 10^8)^2 \text{ м}^2/\text{с}^2 = \\ &= 1,64 \cdot 10^{-13} \text{ Дж} = 1,02 \text{ МэВ}. \end{aligned}$$

*Ответ:*  $E_{п} = 1,02 \text{ МэВ}$ .

### Контрольная работа № 3

1. Найти длину волны света, освещающего установку в опыте Юнга, если при помещении на пути одного из интерферирующих лучей стеклянной пластинки ( $n = 1,52$ ) толщиной 3 мкм картина интерференции на экране смещается на три светлые полосы.

2. Найти положение пятой светлой полосы в опыте Юнга (т.е. ее расстояние от центра интерференционной картины), если угловое расстояние между соседними полосами -  $3 \cdot 10^{-4}$  рад и экран удален от «мнимых» источников на 1,5 м.

3. Два когерентных источника, расстояние между которыми 0,2 мм, расположены от экрана на 1,5 м. Найти длину световой волны, если третий минимум интерференции расположен на экране на расстоянии 12,6 мм от центра картины.

4. Найти угловое расстояние второго минимума на экране в опыте Юнга, если экран удален от когерентных источников на 1 м, а пятый максимум расположен на расстоянии 2 мм от центра интерференционной картины.

5. Расстояние двух когерентных источников до экрана - 1,5 м, расстояние между ними - 0,18 мм. Сколько светлых полос поместится на отрезке длиной 1 см, считая от центра картины, если длина волны света - 0,6 мкм?

6. Найти расстояние между третьим и пятым минимумами на экране, если расстояние двух когерентных источников ( $\lambda = 0,6$  мкм) от экрана - 2 м, расстояние между источниками - 0,2 мм.

7. На тонкую пленку скипидара ( $n = 1,48$ ) падает белый свет. Под углом зрения  $60^\circ$  она кажется оранжевой ( $\lambda = 0,625$  мкм) в отраженном свете. Каким будет казаться цвет пленки в отраженном свете при вдвое меньшем угле зрения?

8. Найти наименьший угол падения монохроматического света ( $\lambda = 0,5$  мкм) на мыльную пленку ( $n = 1,3$ ) толщиной 0,1 мкм, находящуюся в воздухе, при котором пленка в проходящем свете кажется темной.

9. На тонкую мыльную пленку ( $n = 1,3$ ) толщиной 1,25 мкм падает нормально монохроматический свет. В отраженном свете пленка кажется светлой. Какой минимальной толщины надо взять тонкую пленку скипидара ( $n = 1,48$ ), чтобы она в этих же условиях казалась темной?

10. На тонкий стеклянный клин ( $n = 1,52$ ) с углом  $5'$  падает нормально пучок монохроматического света длиной волны 0,591 мкм. Сколько темных полос приходится на 1 см клина?

11. Найти наименьший радиус круглого отверстия на экране, если при освещении его плоской монохроматической волной в центре дифракционной картины наблюдается темное пятно, а радиус третьей зоны Френеля - 2 мм?

12. Определить отношение площадей зон и разность радиусов пятой и шестой зон Френеля для плоского волнового фронта с длиной волны 0,5 мкм, если экран расположен на расстоянии 1 м от фронта волны.

13. На круглое отверстие радиусом 2 мм падает плоская монохроматическая волна. Найти длину волны света, освещающего отверстие, если в нем укладывается пять зон Френеля и из точки наблюдения оно видно под углом 5'.

14. На непрозрачную пластинку с щелью падает нормально плоская волна ( $\lambda = 0,585$  мкм). Найти ширину щели, если угол отклонения лучей, соответствующих второму максимуму, -  $17^\circ$ .

15. На щель шириной 0,1 мм падает нормально параллельный пучок белого света (0,4-0,8 мкм). Найти расстояние между вторыми минимумами для синего (0,45 мкм) и красного (0,70 мкм) света на экране, отстоящем от щели на 2 м.

16. На дифракционную решетку, содержащую 600 штрихов на 1 мм, падает нормально монохроматический свет с длиной волны 0,546 мкм. Определить изменение угла отклонения лучей второго дифракционного максимума, если взять решетку со 100 штрихами на 1 мм.

17. Найти период дифракционной решетки, если в направлении  $\varphi = 35^\circ$  совпадают две линии неона: ярко-красная (0,640 мкм) и зеленая (0,533 мкм).

18. Какую разность значений длины волны может разрешить дифракционная решетка с периодом 2,7 мкм шириной 1,5 см в спектре третьего порядка для зеленых лучей ( $\lambda = 0,5$  мкм)?

19. Монохроматический свет с длиной волны 0,5750 мкм падает нормально на дифракционную решетку с периодом 2,4 мкм. Определить наибольший порядок спектра и общее число главных максимумов в дифракционной картине.

20. Постоянная дифракционной решетки равна 2,8 мкм. Определить наибольший порядок спектра для красной линии с длиной волны  $7 \cdot 10^{-7}$  м, общее число главных максимумов и угол отклонения последнего максимума для полученной дифракционной картины.

21. Определить показатель преломления алмаза, погруженного в воду ( $n = 1,33$ ), если степень поляризации отраженного луча - 100%, интенсивность преломленного луча составляет 85,6 %

интенсивности естественного света. Найти степень поляризации преломленного луча.

22. Интенсивность естественного света, прошедшего через поляризатор, уменьшилась в 4,5 раза. Во сколько раз она уменьшится, если второй такой же поляризатор поставить за первым так, чтобы угол между плоскостями поляризации был  $50^\circ$ ? Коэффициент поглощения света в обоих поляризаторах одинаковый.

23. Найти угол между плоскостями поляризации двух поляризаторов, если интенсивность света, прошедшего оба поляризатора, уменьшилась в 6,5 раз. Коэффициент поглощения света в поляризаторах - 0,3.

24. Угол между плоскостями поляризации двух поляризаторов -  $35^\circ$ . Как изменится интенсивность прошедшего через них света, если этот угол увеличить вдвое?

25. Пластинка из исландского шпата, вырезанная параллельно оптической оси, помещена между параллельными николями так, что ее оптическая ось составляет угол  $45^\circ$  с главными направлениями николей. Найти толщину пластинки, если одна линия натрия ( $\lambda_1 = 0,589$  мкм) сильно ослаблена, а другая ( $\lambda_2 = 0,498$  мкм) максимально усилена.  $n_0 - n_e$  для этих линий  $\Delta n_1 = 0,172$  и  $\Delta n_2 = 0,176$ .

26. Пластинка из кварца, вырезанная параллельно оптической оси, расположена между скрещенными николями так, что ее оптическая ось составляет угол  $45^\circ$  с главными направлениями николей. Сколько темных полос будет наблюдаться в спектре между значениями длины волны 0,527 и 0,431 мкм, если толщина пластинки – 2 мм? Система освещается белым светом.  $n_0 - n_e$  для этих волн - 0,09 и 0,01.

27. Между скрещенными николями установлена кристаллическая пластинка толщиной 0,01 мм с  $n_0 - n_e = 0,06$ . В какой цвет будет окрашено поле зрения? В какой цвет оно окрасится, если николи поставить параллельно?

28. Свет, падая из стекла в жидкость, частично отражается, частично преломляется. Отраженный луч полностью поляризован при угле преломления  $45^\circ 46'$ . Чему равны показатель преломления жидкости и скорость распространения света в ней? Показатель преломления стекла - 1,52.

29. Естественный свет падает на диэлектрик под углом полной поляризации. Найти показатель преломления диэлектрика, если интенсивность преломленного луча составляет 91,7 % интенсивности естественного света.

30. Найти степень поляризации преломленного луча, если интенсивность отраженного луча составляет 9,6 % интенсивности естественного света, падающего на диэлектрик под углом полной поляризации.

31.  $\alpha$ -частица движется в среде с показателем преломления  $n=1,4$ , имея кинетическую энергию 1800 МэВ. Наблюдается ли в этих условиях черенковское свечение?

32. Дейтрон движется в среде с показателем преломления 1,33 с постоянной скоростью. При каком значении кинетической энергии будет наблюдаться черенковское свечение?

33. Какую ускоряющую разность потенциалов должен пройти электрон в сероуглероде ( $n = 1,64$ ), чтобы наблюдалось черенковское свечение?

34. Электрон движется с постоянной скоростью в среде с показателем преломления 1,5. При какой кинетической энергии электрона возникает черенковское свечение?

35. Для каких частиц возникает черенковское излучение при движении их в среде с показателем преломления 1,6, когда их кинетическая энергия превышает 263 МэВ?

36. Отдаленная туманность имеет скорость 0,4 с (отдаленные космические объекты движутся на нас). Какая длина волны света будет наблюдаться в спектре излучения от этой туманности, если в лабораторной системе эта длина волны равна 0,41 мкм?

37. Какова средняя скорость пучка атомов водорода, если при наблюдении вдоль пучка линии водорода ( $\lambda = 0,434$  мкм) она оказалась смещенной на 3 нм?

38. Найти максимальное доплеровское смещение для линии водорода ( $\lambda = 0,434$  мкм), излучаемой движущимися атомами водорода с кинетической энергией 6 МэВ.

39. При наблюдении линии водорода ( $\lambda = 0,434$  мкм) в спектре излучения туманности установили, что она сдвинута и имеет длину волны 0,4460 мкм. В каком направлении и с какой скоростью относительно Земли движется эта туманность? Чему равно «красное смещение» для этой линии водорода?

40. Самолет приближается к антенне радиолокатора, работающего на частоте  $10^{10}$  Гц, со скоростью 3600 км/ч. Определить разность частот, принимаемого на борту самолета и излучаемого локатором сигнала.

41. Какая энергия излучается за 1 мин. с  $1 \text{ см}^2$  абсолютно черного тела, если максимум спектральной плотности энергетической светимости приходится на длину волны 0,6 мкм?

42. При какой температуре максимум спектральной плотности энергетической светимости абсолютно черного тела приходится на длину волны 0,642 мкм. Найти энергетическую светимость абсолютно черного тела при данной температуре.

43. Найти энергетическую светимость абсолютно черного тела, если максимум спектральной плотности энергетической светимости приходится на длину волны 0,5 мкм.

44. При нагревании тела длина волны, на которую приходится максимум излучательной способности, изменилась от 1,45 до 1,16 мкм. Насколько изменилась максимальная спектральная плотность энергетической светимости тела?

45. Коэффициент линейного поглощения вещества -  $0,3 \text{ м}^{-1}$ . Определить толщину слоя этого вещества, ослабляющего интенсивность монохроматического света в четыре раза.

46. Найти коэффициент линейного поглощения вещества, для которого толщина половинного слоя ослабления интенсивности света - 3,46 м.

47. Поток света ( $\lambda = 0,56 \text{ мкм}$ ) падает нормально на черную поверхность, производя давление 4 мкПа. Определить концентрацию фотонов вблизи поверхности.

48. Определить силу светового давления на черную поверхность с площадью  $100 \text{ см}^2$ , если интенсивность светового потока, падающего нормально на эту поверхность, равна  $0,3 \text{ Вт/см}^2$ .

49. Определить световое давление на плоскую поверхность с коэффициентом отражения 0,8 при падении на нее под углом  $60^\circ$  световой волны интенсивностью  $0,5 \text{ Вт/см}^2$ .

50. Определить давление солнечных лучей, падающих перпендикулярно на зеркальную пластинку, находящуюся за пределами земной атмосферы. Температуру поверхности Солнца принять равной 5800 К.

51. Накаленная нить проходит по оси цилиндра длиной 10 см и радиусом 5 см. Нить излучает световой поток мощностью 600 Вт.

Считая световой поток симметричным относительно нити накала, определить давление света на поверхность цилиндра. Коэффициент отражения цилиндра - 10 %.

52. Поток монохроматических лучей с длиной волны 600 нм падает нормально на пластинку с коэффициентом отражения 0,2. Сколько фотонов каждую секунду падает на пластинку, если давление лучей на пластинку составляет  $10^{-7}$  Па?

53. Необходимо установить толщину слоя вещества, ослабляющего интенсивность монохроматического света в два раза. Коэффициент линейного поглощения данного вещества -  $0,69 \text{ м}^{-1}$ .

54. Перед пучком лучей установлена преграда, уменьшающая интенсивность света. Коэффициент линейного поглощения вещества равен  $0,25 \text{ м}^{-1}$ . Во сколько раз уменьшится интенсивность света при прохождении слоя вещества толщиной 2,77 м?

55. Два защитных слоя одинаковой толщины ослабляют интенсивность монохроматического пучка лучей. Первый слой ослабляет интенсивность лучей в два раза при коэффициенте поглощения  $0,05 \text{ см}^{-1}$ . Второй слой ослабляет интенсивность в пять раз. Каков коэффициент линейного поглощения этого слоя?

56. Определить установившуюся температуру абсолютно черной пластины, находящейся в вакууме перпендикулярно потоку лучистой энергии, равному  $1,4 \cdot 10^3 \text{ Вт/м}^2$ . Определить, на какую длину волны приходится максимум спектральной плотности энергетической светимости при данной температуре.

57. Температура в центре Солнца порядка  $1,3 \cdot 10^7 \text{ К}$ . Найти равновесное давление теплового излучения, считая его изотропным.

58. Найти относительное изменение давления равновесного теплового излучения при увеличении его температуры вдвое.

59. Найти первоначальную температуру равновесного теплового излучения, если при повышении температуры вдвое давление изменилось на 7,3 МПа.

60. На зеркальную поверхность площадью  $0,8 \text{ м}^2$  нормально падает  $14 \cdot 10^{18}$  квантов в секунду. Найти длину волны падающего света, если давление его равно  $10^{-8}$  Па.

61. Красная граница фотоэффекта для некоторого металла - 0,6 мкм. Металл освещается светом, длина волны которого –

0,4 мкм. Определить максимальную скорость электронов, выбиваемых светом из металла.

62. Выбиваемые светом при фотоэффекте электроны полностью задерживаются обратным потенциалом 4 В. Красная граница фотоэффекта - 0,6 мкм. Определить частоту падающего света.

63. Поверхность цинкового фотокатода освещается монохроматическим светом с длиной волны 0,28 мкм. Определить суммарный импульс, сообщаемый фотокатоду, если известно, что фотоэлектрон вылетает навстречу падающему кванту. Работа выхода электрона для цинка - 3,74 эВ.

64. При освещении металла монохроматическим светом с длиной волны 0,48 мкм из него вылетают электроны со скоростью  $6,5 \cdot 10^5$  м/с. Определить работу выхода электронов из этого металла.

65. Плоская вольфрамовая пластинка освещается светом с длиной волны 0,2 мкм. Найти напряженность однородного задерживающего поля вне пластинки, если фотоэлектрон может удалиться от нее на расстояние 4 см. Работа выхода электронов из вольфрама - 4,5 эВ.

66. Фотон с энергией 1,2 МэВ был рассеян в результате эффекта Комптона на угол  $90^\circ$ . Найти энергию и импульс электрона отдачи и длину волны рассеянного фотона.

67. В результате рассеяния фотона с длиной волны 2 пм на свободном электроны комptonовское смещение оказалось равным 1,2 пм. Найти угол рассеяния. Какая часть энергии фотона передана при этом электрону?

68. Определить изменение длины волны и угол рассеяния фотона при эффекте Комптона, если скорость электрона отдачи - 0,4с. Энергия первичного фотона – 0,42 МэВ.

69. Найти максимальное комptonовское изменение длины волны при рассеянии фотонов на свободных электронах и протонах.

70. На каких частицах произошло рассеяние фотона с энергией 2,044 МэВ, если энергия рассеянного фотона уменьшилась втрое при угле рассеяния  $60^\circ$ ?

71. Вычислить по теории Бора радиус второй стационарной орбиты и скорость электрона на этой орбите для атома водорода.

72. Вычислить по теории Бора период вращения электрона в атоме водорода, находящегося в возбужденном состоянии, определяемом главным квантовым числом 2.

73. Определить энергию фотона, испускаемого атомом водорода при переходе электрона с третьей орбиты на вторую.

74. Фотон выбивает из атома водорода, находящегося в основном состоянии, электрон с кинетической энергией 10 эВ. Определить энергию  $\varepsilon$  фотона.

75. Найти наибольшую и наименьшую длину волны спектра атома водорода серии Бальмера.

76. При переходе электрона в атоме водорода из возбужденного состояния в основное радиус боровской орбиты электрона уменьшился в 25 раз. Определить длину волны излученного фотона.

77. Вычислить кинетическую энергию электрона, выбитого из второго энергетического уровня атома водорода фотоном, длина волны которого - 0,2 мкм.

78. Определить наименьшее и наибольшее значения энергии фотона в инфракрасной серии спектра водорода (серия Пашена).

79. Атом водорода находится в возбужденном состоянии с главным квантовым числом 3. Падающий фотон выбивает из атома электрон, сообщая ему кинетическую энергию 2,5 эВ. Вычислить энергию падающего фотона.

80. Невозбужденный атом водорода поглощает квант излучения с длиной волны 102,6 нм. Вычислить, пользуясь теорией Бора, радиус электронной орбиты возбужденного атома водорода.

81. Вещество  ${}_{11}^{23}\text{Na}$  облучается дейтронами и превращается в радиоактивный изотоп  ${}_{11}^{24}\text{Na}$  с периодом полураспада 11,5 ч. Какая доля радиоактивного натрия остается через сутки после прекращения облучения дейтронами?

82. За полгода распалось 40 % некоторого исходного радиоактивного элемента. Определить период полураспада этого элемента.

83. Постоянная радиоактивного распада для элемента  ${}_{88}^{228}\text{Ra}$  равна  $3,28 \cdot 10^{-9} \text{ с}^{-1}$ . Определить, какая часть ядер этого элемента останется через 5 лет.

84. Активность  $A$  некоторого изотопа за время  $t = 10$  сут. уменьшилась на 20 %. Определить период полураспада этого изотопа.

85. Определить массу изотопа  ${}_{53}^{131}\text{I}$ , имеющего активность 37ГБк. Период полураспада - 8 сут.

86. Во сколько раз уменьшится активность препарата  ${}_{15}^{32}\text{P}$  через 20 сут.? Период полураспада - 14,3 сут.

87. На сколько процентов уменьшится активность изотопа иридия  ${}_{77}^{192}\text{Ir}$  за 15 сут.? Период полураспада - 75 сут.

88. Определить число ядер, распадающихся в течение времени: 1)  $t_1 = 1$  мин.; 2)  $t_2 = 5$  сут., в радиоактивном изотопе фосфора  ${}_{15}^{32}\text{P}$  массой 1 мг. Период полураспада - 14,3 сут.

89. Определить, какая доля радиоактивного изотопа  ${}_{89}^{225}\text{Ac}$  распадается в течение 6 сут. Период полураспада - 10 сут.

90. Период полураспада радиоактивного аргона  ${}_{18}^{41}\text{Ar}$  равен 110 мин. Определить время, в течение которого распадается 25 % начального количества вещества.

91. Энергия возбужденного атома водорода - 0,85 эВ. Вычислить длину волны де Бройля для электрона на этой орбите.

92. Протон движется со скоростью  $1 \cdot 10^7$  м/с. Определить длину волны де Бройля для протона.

93. Длина волны де Бройля для электрона уменьшилась с 1 до 0,5 нм. Насколько изменилась энергия электрона?

94. Найти длину волны де Бройля для протона, прошедшего разность потенциалов 1000 кВ.

95. Вычислить длину волны де Бройля для молекулы азота, движущейся со средней скоростью, соответствующей комнатной температуре.

96. Длина волны де Бройля для электрона равна 1,3 нм. Определить скорость электрона.

97. Коротковолновая граница рентгеновского спектра –  $0,2 \cdot 10^{-10}$  м. Определить длину волны де Бройля для электронов, бомбардирующих антикатод.

98. Скорость электронов равна 0,8 с. Найти длину волны де Бройля для электронов.

99. Вычислить длину волны де Бройля для электрона, обладающего кинетической энергией 1 эВ.

100. Определить длину волны де Бройля для  $\alpha$ -частиц, прошедших разность потенциалов: 1) 200 В; 2) 100 кВ.

101. Рентгеновские лучи с длиной волны 0,52 нм выбивают электроны с К-уровня атома молибдена. Какова скорость выбитых электронов?

102. Межплоскостное расстояние в кристалле марганца равно  $2,4 \cdot 10^{-10}$  м. Определить, при какой длине волны рентгеновских лучей первый максимум при отражении будет наблюдаться под углом  $15^\circ$ . Найти минимальное напряжение на рентгеновской трубке.

103. Найти наибольшую длину волны К-серии рентгеновского излучения от золотого антикатада.

104. Расстояние между атомными плоскостями кристалла –  $3 \cdot 10^{-8}$  см. Рентгеновские параллельные лучи, падающие на кристалл, дают при отражении первый максимум под углом  $30^\circ$ . Под каким минимальным напряжением работает рентгеновская трубка?

105. Рентгеновская трубка работает при напряжении 41 кВ, и излучение трубки падает на кристалл. Угол между плоскостью кристалла и пучком рентгеновских лучей, при котором наблюдается второй максимум отражения, равен  $5^\circ 44'$ . Определить расстояние между атомными плоскостями кристалла.

106. При каком наименьшем напряжении на рентгеновской трубке с железным антикатодом появляются линии  $K_\alpha$ ?

107. Какую наименьшую разность потенциалов нужно приложить к рентгеновской трубке с вольфрамовым антикатодом, чтобы в спектре излучения вольфрама были все линии К-серии.

108. При переходе электрона в атоме меди с М-слоя на L-слой испускаются лучи с длиной волны  $12 \cdot 10^{-10}$  м. Вычислить постоянную экранирования в формуле Мозли.

109. Наибольшая длина волны К-серии рентгеновского излучения равна  $1,94 \cdot 10^{-10}$  м. Из какого материала сделан антикатод?

110. Найти коротковолновую границу рентгеновского спектра при условии, что к рентгеновской трубке приложена разность потенциалов: 1) 20 кВ; 2) 100 кВ.

111. Вычислить толщину слоя половинного ослабления для свинцового экрана, через который проходит монохроматический узкий пучок  $\gamma$ -лучей с длиной волны  $0,006 \cdot 10^{-10}$  м.

112. Какова энергия  $\gamma$ -лучей, если при прохождении через слой железа толщиной в 3,15 см интенсивность излучения ослабляется в 4 раза?

113. Используя соотношение неопределенностей Гейзенберга, вычислить ошибку в изменении скорости электрона,

зарегистрированного в пузырьковой камере. Диаметр пузырька считать равным 1 мкм, а скорость электрона -  $10^7$  м/с.

114. Движение электронов в электронно-лучевой трубке в первом приближении можно рассматривать как движение частиц, происходящее по траектории. След электронного пучка на экране имеет радиус порядка  $10^{-4}$  см. Длина трубки - 15 см, напряжение на ней -  $10^4$  В. Оценить неопределенность в измерении импульса электрона для этого случая.

115. Найти ошибку в определении скорости электрона, протона и пылинки массой 0,1 нг, если их координаты установлены с неопределенностью 1 мкм.

116. Электрон движется в атоме водорода со скоростью  $2,2 \cdot 10^8$  см/с. Показать, что неопределенность в измерении скорости по порядку величины равна самой скорости.

117. Положение молекулы водорода и положение электрона определены с погрешностью  $10^{-7}$  м. Какова будет неопределенность в измерении скорости для молекулы водорода и электрона?

118. Вычислить толщину слоя половинного ослабления при условии, что узкий пучок  $\gamma$ -излучения с энергией 1,25 МэВ проходит через свинцовый экран.

119. Определить, как изменится интенсивность (узкого) пучка  $\gamma$ -лучей при прохождении через экран, состоящий из двух плит: алюминиевой – толщиной 10 см и железной – толщиной 5 см. Коэффициенты линейного ослабления для Al  $\mu = 0,1$  см $^{-1}$ , а для Fe  $\mu = 0,3$  см $^{-1}$ .

120. Во сколько раз будет ослаблен пучок  $\gamma$ -лучей при прохождении через свинцовый экран, если длина волны этих лучей -  $0,0041 \cdot 10^{-10}$  и  $0,0082 \cdot 10^{-10}$  м, толщина экрана - 1 см.

121. Радиоактивное ядро, состоящее из 5 протонов и 5 нейтронов, выбросило  $\alpha$ -частицу. Какое ядро образовалось в результате  $\alpha$ -распада? Определить энергию связи образовавшегося ядра.

122. Вычислить энергию связи ядра и его удельную энергию связи, т.е. энергию, приходящуюся на один нуклон, для элемента  ${}_{14}^{24}\text{Si}$ .

123. Определить энергию связи ядра и его удельную энергию связи для элемента  ${}_{12}^{24}\text{Mg}$ .

124. В какой элемент превращается  ${}_{92}^{238}\text{U}$  после трех  $\alpha$ -распадов и двух  $\beta$ -превращений? Написать уравнения ядерной реакции.

125. Определить массу нейтрального атома, если ядро этого атома состоит из трех протонов и двух нейтронов и энергия связи ядра равна 26,3 МэВ.

126. Какую наименьшую энергию нужно затратить, чтобы оторвать один нейтрон от ядра азота  ${}^1_7\text{N}$ ?

127. Определить пороговую энергию образования электронно-позитронной пары в кулоновском поле электрона, которая происходит по схеме  $\gamma + e^- \rightarrow e^- + e^+ + e^-$ .

128. Под действием  $\gamma$ -лучей идут реакции типа  $(\gamma, n)$ ,  $(\gamma, p)$  и  $(\gamma, \alpha)$ , которые получили название «ядерный фотоэффект». Впервые ядерный фотоэффект наблюдался в 1934 г. Дж. Чедвиком на примере фоторасщепления дейтрона  $\gamma + {}^2_1\text{H} \rightarrow n + p$ . Определить пороговую энергию  $\gamma$ -лучей, при которой возможно фоторасщепление дейтрона, и энергию связи дейтрона.

129. Считая, что рождение  $\pi^+$ -мезонов происходит по схеме  $p + p \rightarrow p + n + \pi^+$ , определить порог рождения  $\pi^+$ -мезона, т.е. минимальную кинетическую энергию бомбардирующего протона, необходимую для образования  $\pi^+$ -мезона. Массу  $\pi^+$ -мезона принять равной 0,150 а.е.м.

130. Рождение  $\pi^-$ -мезонов происходит по схеме  $n + n \rightarrow n + p + \pi^-$ . Определить порог рождения  $\pi^-$ -мезона, т.е. минимальную кинетическую энергию бомбардирующего нейтрона, необходимую для образования  $\pi^-$ -мезона. Массу  $\pi^-$ -мезона принять равной 0,150 а.е.м.

131. Вычислить энергию ядерной реакции  ${}^3_2\text{He} + n \rightarrow {}^3_1\text{H} + {}^1_1\text{p}$ .

132. Вычислить энергию ядерной реакции  ${}^{27}_{13}\text{Al} + n \rightarrow {}^{27}_{12}\text{Mg} + {}^1_1\text{p}$ .

133. Вычислить энергию ядерной реакции  ${}^{33}_{16}\text{S} + n \rightarrow {}^{33}_{15}\text{P} + {}^1_1\text{p}$ .

134. Вычислить энергию ядерной реакции  ${}^2_1\text{H} + {}^7_3\text{Li} \rightarrow 2 {}^3_2\text{He} + n$ .

135. Вычислить энергию ядерной реакции  ${}^9_4\text{Be} + {}^2_1\text{H} \rightarrow {}^{10}_5\text{B} + {}^1_0\text{n}$ . Освобождается или поглощается энергия при этой реакции?

136. Вычислить энергию ядерной реакции  ${}^7_3\text{Li} + {}^4_2\text{He} \rightarrow {}^{10}_5\text{B} + {}^1_0\text{n}$ . Освобождается или поглощается энергия при этой реакции?

137. Вычислить энергию ядерной реакции  ${}^2_1\text{H} + {}^3_1\text{H} \rightarrow {}^4_2\text{He} + {}^1_0\text{n}$ .  
Освобождается или поглощается энергия при этой реакции?

138. Вычислить энергию ядерной реакции  ${}^6_3\text{Li} + {}^2_1\text{H} \rightarrow {}^7_3\text{Li} + {}^1_1\text{p}$ .  
Освобождается или поглощается энергия при этой реакции?

139. Вычислить энергию ядерной реакции  ${}^{16}_8\text{O} + {}^1_1\text{H} \rightarrow {}^{14}_7\text{N} + {}^4_2\text{He}$ .  
Выделяется или поглощается эта энергия?

140. Вычислить энергию ядерной реакции  ${}^{19}_9\text{F} + {}^1_1\text{H} \rightarrow {}^{16}_8\text{O} + {}^4_2\text{He}$ .  
Выделяется или поглощается эта энергия?

## СПРАВОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

### 1. Основные физические постоянные (округленные значения)

Таблица 5

Физические постоянные	Обозначение	Числовые значения
Скорость света в вакууме	$c$	$3 \cdot 10^8$ м/с
Постоянная Стефана-Больцмана	$\sigma$	$5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м <sup>2</sup> ·К <sup>4</sup> )
Постоянная первого закона смещения Вина	$C_1$	$2,89 \cdot 10^{-3}$ м·К
Постоянная второго закона смещения Вина	$C_2$	$1,30 \cdot 10^{-5}$ Вт/(м <sup>3</sup> ·К <sup>5</sup> )
Постоянная Планка	$h$	$6,62 \cdot 10^{-34}$ Дж·с
Постоянная Ридберга (для атома водорода $^1H$ )	$R$	$1,097 \cdot 10^7$ м <sup>-1</sup>
Радиус первой боровской орбиты	$r_B$	$0,529 \cdot 10^{-10}$ м
Комптоновская длина волны	$\lambda_C$	$2,34 \cdot 10^{-12}$ м
Потенциал ионизации атома водорода (энергия ионизации)	$I_0$	$2,18 \cdot 10^{-18}$ Дж = = 13,6 эВ
Атомная единица массы	а.е.м.	$1,660 \cdot 10^{-27}$ кг
Коэффициент пропорциональности между (в мегаэлектрон-вольтах) и массой (в атомных единицах массы)	$k$	$9 \cdot 10^{-16}$ Дж/кг = = 931,44 МэВ/(а.е.м.)

### 2. Потенциал ионизации, эВ

водорода – 13,6; ртути – 10,4

### 3. Показатель преломления

алмаза – 2,42; воды – 1,33; льда – 1,31; стекла – 1,52;  
кварца – 1,55; сероуглерода – 1,63.

#### 4. Масса $m_0$ и энергия $E_0$ покоя некоторых элементарных частиц

Таблица 6

Частицы	$m_0$		$E_0$	
	а.е.м.	кг·10 <sup>27</sup>	МэВ	Дж·10 <sup>10</sup>
Электрон	5,486·10 <sup>-4</sup>	0,00091	0,511	0,00081
Протон	1,00728	1,6724	938,23	1,50
Нейтрон	1,00867	1,00748	939,53	1,51
Дейтрон	2,01355	3,3325	1875,5	3,00
$\alpha$ -частица	4,0015	6,6444	3726,2	5,96

#### 5. Работа выхода электронов из металла, эВ

алюминия – 3,7; вольфрама – 4,5; лития – 2,3; меди – 4,3;  
платины – 6,3; цезия – 1,8; цинка – 4,0

#### 6. Элементы периодической системы и массы нейтральных атомов, а.е.м.

Таблица 7

Элемент системы	Изотоп	Масса	Элемент системы	Изотоп	Масса
Водород Н	-	1,00797	Кислород	<sup>16</sup> <sub>8</sub> O	15,99491
	<sup>1</sup> <sub>1</sub> H	1,00783		Фтор F	<sup>18</sup> <sub>9</sub> F
	<sup>2</sup> <sub>1</sub> H	2,01410	<sup>19</sup> <sub>9</sub> F		18,99840
	<sup>3</sup> <sub>1</sub> H	3,01605	Магний Mg	<sup>24</sup> <sub>12</sub> Mg	23,98504
-	4,00260	<sup>27</sup> <sub>12</sub> Mg		26,98436	
Гелий He	<sup>3</sup> <sub>2</sub> He	3,01605	Алюминий Al	<sup>27</sup> <sub>13</sub> Al	26,98135
	<sup>4</sup> <sub>2</sub> He	4,00260		Кремний Si	<sup>24</sup> <sub>14</sub> Si
Литий Li	<sup>6</sup> <sub>3</sub> Li	6,01513	Фосфор P		<sup>33</sup> <sub>15</sub> P
	<sup>7</sup> <sub>3</sub> Li	7,01601		Сера S	<sup>33</sup> <sub>16</sub> S
Бериллий Be	<sup>7</sup> <sub>4</sub> Be	7,01169	Железо <sup>26</sup> Fe		-
	<sup>9</sup> <sub>4</sub> Be	9,01219		Медь <sup>29</sup> Cu	-
Бор B	<sup>10</sup> <sub>5</sub> B	10,01294	Вольфрам <sup>74</sup> W		-
Азот N	<sup>13</sup> <sub>7</sub> N	13,00574	Эманация	<sup>222</sup> <sub>86</sub> Em	222,01753
	<sup>14</sup> <sub>7</sub> N	14,00307		<sup>226</sup> <sub>88</sub> Ra	226,02536
			Радий		

**7. Граница К-серии рентгеновских лучей для различных материалов антикатада, м**  
вольфрама –  $0,178 \cdot 10^{-10}$ ; золота –  $0,153 \cdot 10^{-10}$ ; меди –  $1,38 \cdot 10^{-10}$ ;  
платины –  $0,158 \cdot 10^{-10}$ ; серебра –  $0,484 \cdot 10^{-10}$

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Зисман, Г.А. Курс общей физики. В 3-х тт. Т. 3. Оптика. Физика атомов и молекул. Физика атомного ядра и микрочастиц [Электронный ресурс]: учебное пособие / Г.А. Зисман, О.М. Тодес. — Санкт-Петербург: Лань, 2007. — 512 с.
2. Савельев, И.В. Курс общей физики. В 3-х тт. Т. 3. Квантовая оптика. Атомная физика. Физика твердого тела. Физика атомного ядра и элементарных частиц [Электронный ресурс]: учебное пособие / И.В. Савельев. — Санкт-Петербург: Лань, 2018. — 320 с.
3. Трофимова Т.И., Фирсов А.В. Курс физики. Задачи и решения. – М.: Академия, 2011. – 592 с.

## СОДЕРЖАНИЕ

ОБЩИЕ МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ.....	3
РАБОЧАЯ ПРОГРАММА.....	5
Оптика.....	5
Основы физики атома.....	5
Основы физики атомного ядра и элементарных частиц.....	6
РАЗДЕЛ V. ОПТИКА.....	7
Основные законы и формулы.....	7
Примеры решения задач.....	11
РАЗДЕЛ VI. КВАНТОВО-ОПТИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ.	
ЭЛЕМЕНТЫ АТОМНОЙ И ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ.....	19
Основные законы и формулы.....	19
Примеры решения задач.....	21
КОНТРОЛЬНАЯ РАБОТА №3.....	28
СПРАВОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ.....	41
Библиографический список.....	43

*Учебное издание*

Екатерина Александровна Яшкевич  
Владимир Олегович Кабанов  
Татьяна Сергеевна Гусарова

Физика  
Часть 3

Оптика. Квантово-оптические явления  
Элементы атомной и ядерной физики

Учебно-методическое пособие  
для студентов Института безотрывных форм обучения

Редактор и корректор В.А. Басова  
Техн. редактор Л.Я. Титова

Темплан 2019 г., поз. 25

-----  
Подп. к печати 10.04.2019. Бумага тип № 1.

Печать офсетная. Объем 2,75 печ. л.; 2,75 уч.-изд. л. Тираж 300 экз.  
Изд. № 25. Цена «С». Заказ

-----  
Ризограф Высшей школы технологии и энергетики СПбГУПТД,  
198095, СПб., ул. И.Черных, 4.