

0171

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ

«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ РАСТИТЕЛЬНЫХ
ПОЛИМЕРОВ»

Кафедра физики

Ф И З И К А

ЧАСТЬ 3

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

Программа, методические указания
и контрольные задания

Для студентов заочной формы обучения
всех специальностей

**Санкт-Петербург
2015**

Физика. Часть 3. Оптика. Квантово-оптические явления. Элементы атомной и ядерной физики: программа, методические указания и контрольные задания для студентов заочной формы обучения всех специальностей/ Сост. А.Л.Ашкалунин, В.О.Кабанов, С.А.Поржецкий; СПбГТУРП. – СПб., 2015. -48 с.

Часть 3 содержит материалы по пятому и шестому разделам курса физики: «Оптика» и «Квантово-оптические явления. Элементы атомной и ядерной физики». Предназначено для студентов-заочников всех специальностей высших учебных заведений.

Рецензент: кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физики СПбГТУРП А.А.Абрамович

Подготовлены и рекомендованы к печати кафедрой физики СПбГТУРП (протокол № 8 от 26.05.15 г.).

Утверждены к изданию методической комиссией института безотрывных форм обучения СПбГТУ РП (протокол № 5а от 27 мая 2015г.).

Редактор Т.А.Смирнова.

Техн. редактор Л.Я.Титова

Подп. к печати 08.06.15. Бумага тип № 1. Печать офсетная. Объем 2,5 печ.л. Уч.-изд.л. 2,5. Тираж 100 экз. Изд № 51. Цена «С». Заказ 3252.

Ризограф Санкт-Петербургского государственного технологического университета растительных полимеров,
198095, СПб., ул.Ивана Черных, 4.

© Санкт-Петербургский
государственный технологический
университет растительных
полимеров, 2015

ПРЕДИСЛОВИЕ

Часть третья настоящих методических указаний содержит материал по пятому и шестому разделам курса физики: «Оптика» и «Квантово-оптические явления. Элементы атомной и ядерной физики». Даны две таблицы вариантов контрольных работ: одна - для студентов-технологов, выполняющих две контрольные работы, и вторая - для студентов-экономистов, выполняющих одну контрольную работу.

ОБЩИЕ МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

Студенты технологических специальностей выполняют две контрольные работы (контрольная работа № 5 и № 6) по пятому и шестому разделам курса и представляют их на рецензию в течение четвертого семестра.

Каждая контрольная работа включает в себя семь задач. Определение варианта задания проводится по единой для всех шести контрольных работ таблице вариантов в соответствии с последней цифрой шифра. Если, например, последняя цифра шифра студента-технолога 7, то в каждой контрольной он решает задачи 7, 17, 27, 37, 47, 57, 67.

Таблица вариантов для технологов

Вариант	Номера задач в каждой контрольной работе						
1	1	11	21	31	41	51	61
2	2	12	22	32	42	52	62
3	3	13	23	33	43	53	63
4	4	14	24	34	44	54	64
5	5	15	25	35	45	55	65
6	6	16	26	36	46	56	66
7	7	17	27	37	47	57	67
8	8	18	28	38	48	58	68
9	9	19	29	39	49	59	69
10	10	20	30	40	50	60	70

Студенты-экономисты выполняют одну контрольную работу по третьему и четвертому разделам курса и представляют ее на рецензию в течение второго семестра.

Контрольная работа содержит по три задачи из двух разделов, всего шесть задач. Определение варианта задания в соответствии с последней цифрой шифра проводится по таблице вариантов.

Таблица вариантов для экономистов

№ вариантов	Номера задач в каждой контрольной работе					
	из контрольной работы № 5			из контрольной работы № 6		
1	1	51	61	1	11	61
2	2	52	62	2	12	62
3	3	53	63	3	13	63
4	4	54	64	4	14	64
5	5	55	65	5	15	65
6	6	56	66	6	16	66
7	7	57	67	7	17	67
8	8	58	68	8	18	68
9	9	59	69	9	19	69
10	10	60	70	10	20	70

При выполнении контрольных работ необходимо выполнять следующие правила:

1) контрольную работу следует выполнять аккуратно, оставляя поля для замечаний рецензента;

2) задачу своего варианта переписывать полностью, а заданные физические величины выписывать отдельно, при этом все числовые величины должны быть переведены в одну систему единиц;

3) для пояснения решения задачи, где это нужно, аккуратно сделать чертеж;

4) решения задач и используемые формулы должны сопровождаться пояснениями;

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

6) в пояснениях к задаче необходимо указывать те основные законы и формулы, на которых базируется решение данной задачи;

7) при получении расчетной формулы, которая нужна для решения конкретной задачи, приводить ее вывод;

8) рекомендуется решение задачи сначала сделать в общем виде, т. е. только в буквенных обозначениях, поясняя применяемые при написании формул буквенные обозначения;

9) вычисления следует проводить путем подстановки заданных числовых величин в расчетную формулу. Все числовые значения величин, необходимые для решения данной задачи, должны быть выражены в СИ (см. справочные данные);

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

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

Контрольные работы, представленные без соблюдения указанных правил, а также работы, выполненные не по своему варианту, зачитываться не будут.

При повторном рецензировании обязательно представлять работу с первой рецензией.

Во время экзаменационно-лабораторных сессий проводятся лабораторные работы. Цель лабораторного практикума - не только изучить те или иные физические явления, убедиться в правильности теоретических выводов, приобрести соответствующие навыки в обращении с физическими приборами но и более глубоко овладеть теоретическим материалом.

На экзаменах и зачетах в первую очередь выясняется усвоение основных теоретических положений программы и умение творчески применять полученные знания к решению практических задач. Физическая сущность явлений, законов, процессов должна излагаться четко и достаточно подробно; решать задачи необходимо без ошибок и уверенно. Любая графическая работа должна быть выполнена аккуратно и четко. Только при выполнении этих условий знания по курсу физики могут быть признаны удовлетворительными.

ЛИТЕРАТУРА

Савельев И.В. Курс общей физики. - М.: Наука, 1982. Т. 3.

Зисман Г.А., Тодес О.М. Курс общей физики. - М.: Наука, 1977. Т. 3.

Шубин А.С. Курс общей физики: Учебное пособие для инженерно-экономических специальных вузов. - М.: Высшая школа, 1975.

Волькенштейн В.С. Сборник задач по общему курсу физики. - М.: Наука, 1978.

Фирганг Е.В. Руководство к решению задач по курсу общей физики. - М.: Высшая школа, 1978.

Чертов А.Г., Воробьев А.А. Задачник по физике / Под ред. А.Г. Чертова. - М.: Высшая школа, 1981.

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 дина 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. Несоостоятельность классической теории. Фотоны. Уравнение Эйнштейна для внешнего фотоэффекта. Многофотонный фотоэффект.

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 вещества. 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 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. Изобары. 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 α -, β - и γ -излучений атомных ядер. Закон радиоактивного распада. Период полураспада. Активность радиоактивного вещества. Объяснение α -распада на основе корпускулярно-волновых свойств α -частицы. Теория β -распада. Нейтрино. γ -излучение. Механизм взаимодействия γ -излучения с веществом.

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

РАЗДЕЛ V. ОПТИКА

Основные законы и формулы

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	$I_{\perp} = 0.5 I_0 \left[\frac{\sin(i - r)}{\sin(i + r)} \right]^2;$ $I_{\parallel} = 0.5 I_0 \left[\frac{\operatorname{tg}(i - r)}{\operatorname{tg}(i + r)} \right]^2$
Степень поляризации луча	$p = (I_{\perp} - I_{\parallel}) \cdot 100\% / (I_{\perp} + I_{\parallel})$
Закон Брюстера	$\operatorname{tg} i_0 = n_2 / n_1 = n_{21}$
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	$\Delta = d(n_o - n_e) = d\Delta n$
Угол вращения плоскости поляризации в кристаллах и растворах	$\varphi = [\varphi]l;$ $\varphi = [\varphi]lc$
Эффект Доплера	$v' = v \sqrt{\frac{c \pm v}{c \mp v}}$
Групповая скорость	$u = v - \lambda \frac{dv}{d\lambda};$

Величина или физический закон	Формула
	$u = v \left(1 + \frac{\lambda}{n} \frac{dn}{d\lambda} \right)$
Условие возникновения излучения Вавилова-Черенкова	$v > c/n$
Закон Стефана-Больцмана	$R = \sigma T^4$
Закон Вина	$\tau_{\lambda_{\text{мин}}} = C_1/T$
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	$m_\phi = \frac{\varepsilon}{c^2} = \frac{h\nu}{c^2} = \frac{h}{c\lambda}$
Импульс фотона	$p_\phi = m_\phi c = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda}$
Давление света при нормальном падении на поверхность с коэффициентом отражения ρ	$p = \omega(1 + \rho);$ $p = \frac{E}{c}(1 + \rho)$
Давление равновесного теплового излучения	$p = \omega/3$
Уравнение Эйнштейна для внешнего фотоэффекта:	$h\nu = A + T$
при $T < 5 \text{ кэВ}$	$T = m_0 v^2/2$
при $T > 5 \text{ кэВ}$	$T = E - E_0 = mc^2 - m_0 c^2 =$ $= E_0 \left(1/\sqrt{1 - \beta^2} - 1 \right)$
Изменение длины волны при эффекте Комптона	$\Delta\lambda = \frac{h}{m_0 c} (1 - \cos \vartheta) =$ $= \lambda (1 - \cos \vartheta) = 2\lambda \sin^2 (\vartheta/2)$

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 1.5 мм от центра интерференционной картины.

Дано: $L = 1 \text{ м}; \quad k = 5;$
 $l = 1.5 \text{ мм} = 1.5 \cdot 10^{-3} \text{ м}.$

Найти: $\Delta\alpha_{\text{макс.}}$

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 O_k максимум освещенности будет наблюдаться, если разность хода волн $S_1O_k - S_2O_k$ равна целому числу длин волн:

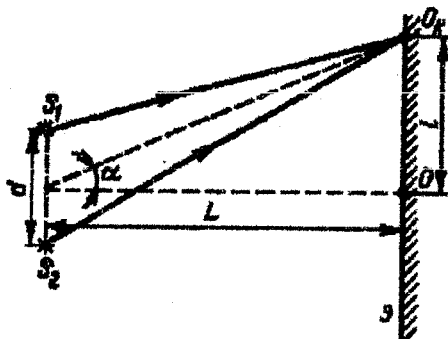


Рис. 1

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

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

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

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

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

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

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

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

Решая (3) и (4), находим

$$\alpha_{\text{макс}} = k\lambda/d.$$

Угловое расстояние между соседними светлыми полосами

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

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

$$\Delta\alpha_{\text{макс}} = l/(kL);$$

$$\Delta\alpha_{\text{макс}} = 15 \cdot 10^{-3} \text{ м} / (5 \cdot 1 \text{ м}) = 3 \cdot 10^{-4} \text{ рад.}$$

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

Пример 2.

На дифракционную решетку с периодом 2 мкм нормально падает пучок света от разрядной трубки, наполненной гелием. Найти: 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: $k_2 = 2$; $k_3 = 3$; $l = 2.5 \text{ см} = 2.5 \cdot 10^{-2} \text{ м}$; $c = 2 \text{ мкм} = 2 \cdot 10^{-6} \text{ м}$; $\lambda_1 = 0.7 \text{ мкм} = 7 \cdot 10^{-7} \text{ м}$; $\lambda_2 = 0.447 \text{ мкм} = 4.47 \cdot 10^{-7} \text{ м}$.

Найти: $\Delta\lambda$, λ_3 .

Решение. Разрешающая способность дифракционной решетки

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

где N - общее число щелей решетки; k - порядок спектра.

Период решетки $c = 1/N_0$, где N_0 - число щелей на 1 м длины. Зная ширину l дифракционной решетки, находим общее число щелей решетки:

$$N = N_0 l = l/c. \quad (2)$$

Из формулы (1) с учетом (2) находим

$$\Delta\lambda = \lambda / (kN) = \lambda c / (kl); \quad (3)$$

$$\Delta\lambda = 7 \cdot 10^{-7} \text{ м} \cdot 2 \cdot 10^{-6} \text{ м} / (2 \cdot 2.5 \cdot 10^{-2} \text{ м}) = 0.28 \cdot 10^{-10} \text{ м}.$$

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

$$\lambda_3 = k_2 \lambda_2 / k_3, \quad \lambda_3 = 2 \cdot 4.47 \cdot 10^{-7} \text{ м} / 3 = 2.98 \cdot 10^{-6} \text{ м}.$$

Ответ: $\Delta\lambda = 0.28 \cdot 10^{-10} \text{ м}$; $\lambda_3 = 2.98 \cdot 10^{-6} \text{ м}$.

Пример 3.

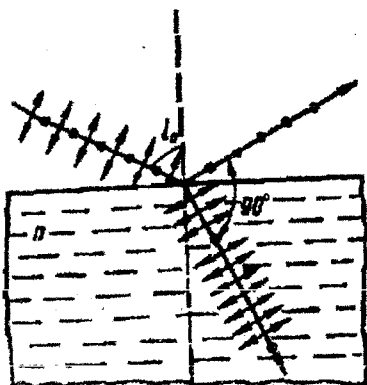


Рис. 2

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): $\operatorname{tg} i_0 = n$, $i_0 = \operatorname{arctg} n = 57^\circ$. Степень поляризации отраженного луча

$$P_1 = (I_{\perp} - I_{\parallel}) \cdot 100\% / (I_{\perp} + I_{\parallel}).$$

Здесь

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

$$I_{\parallel} = 0.5I_0 \left[\frac{\operatorname{tg}(i - r)}{\operatorname{tg}(i + r)} \right]^2 \quad (1)$$

интенсивности колебаний луча, совершающихся в направлениях, перпендикулярных и параллельных плоскости падения, 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 $i_0 + r = 90^\circ$, для отраженного луча из (1), получим $I_{\perp} = 0.5I_0 \sin^2(i_0 - r)$; $I_{\parallel} = 0$, так как $\sin(i_0 + r) = \sin 90^\circ = 1$, $\operatorname{tg} 90^\circ \rightarrow \infty$.

Степень поляризации отраженного луча

$$P_1 = I_{\perp} \cdot 100\% / I_{\perp} = 100\%,$$

т. е. луч максимально поляризован.

Найдем интенсивности колебаний в преломленном луче: $I'_{\perp} = 0.5I_0$; $I'_{\parallel} = 0.5I_0 - I_{\perp} = 0.5I_0 - 0.5I_0 \sin^2(i_0 - r)$; $I'_{\parallel} = 0.5I_0$. Степень поляризации преломленного луча

$$P_2 = \frac{(I'_{\perp} - I'_{\parallel})}{(I'_{\perp} + I'_{\parallel})} 100\% = \frac{0.5I_0 - 0.5I_0 [1 - \sin^2(i_0 - r)]}{0.5I_0 + 0.5I_0 [1 - \sin^2(i_0 - r)]} 100\% = \frac{\sin^2(i_0 - r)}{2 - \sin^2(i_0 - r)} 100\%;$$

$$P_2 = \frac{\sin^2(57^\circ - 33^\circ)}{2 - \sin^2(57^\circ - 33^\circ)} 100\% = \frac{0.407^2}{2 - 0.407^2} 100\% = 9\%.$$

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

Пример 4.

Пластинка кварца, вырезанная параллельно оптической оси, помещена между скрещенными николями так, что ее оптическая ось составляет угол 45° с главными направлениями николей. Найти минимальную толщину пластинки, при которой одна линия телия ($\lambda_1 = 447.1$ нм) будет максимально усилена, а другая ($\lambda_2 = 667.8$ нм) максимально ослаблена. Двупреломление для обеих длин волн 0.009.

Дано: $\lambda_1 = 447.1$ нм $= 0.4471 \cdot 10^{-6}$ м; $\lambda_2 = 667.8$ нм $= 0.6678 \cdot 10^{-6}$ м;
 $\Delta n = 0.009$; $\alpha = 45^\circ$.

Найти: d .

Решение. Разность хода лучей, прошедших пластинку кварца, вырезанную параллельно оптической оси, для нормального падения света

$$\Delta = d(n_o - n_e) = d\Delta n, \quad (1)$$

где d - толщина пластинки; n_o и n_e - показатели преломления обыкновенного и необыкновенного лучей. В данном случае пластинка установлена между николями так, что свет падает на нее нормально.

Когда пластинка помещена между параллельными николями, то дополнительной разности фаз николи не вносят, а разность хода лучей определяется выражением (1). Если же пластинка помещена между скрещенными николями, то амплитуды колебаний необыкновенного и обыкновенного лучей после второго николя будут направлены вдоль одной прямой в противоположенных направлениях, т. е. появляется еще дополнительная разность фаз, равная π . Тогда суммарная разность хода обоих лучей

$$\Delta = d\Delta n + \lambda/2,$$

где λ - длина волны падающего света. При интерференции этих лучей усиление и ослабление происходит, если $\Delta = k\lambda$; $\Delta = (2k-1)\lambda/2$. Таким образом,

$$d\Delta n + \lambda_1/2 = k\lambda_1; \quad (2)$$

$$d\Delta n + \lambda_2/2 = (2k-1)\lambda_2/2. \quad (3)$$

Из (3) находим $k = d\Delta n/\lambda_2 + 1$ и подставляем в (2): $d\Delta n + \lambda_1/2 = d\Delta n\lambda_1/\lambda_2 + \lambda_1$, откуда

$$d = \frac{\lambda_1\lambda_2}{2\Delta n(\lambda_2 - \lambda_1)};$$

$$d = \frac{0.4471 \cdot 10^{-6} \text{ м} \cdot 0.6678 \cdot 10^{-6} \text{ м}}{2 \cdot 9 \cdot 10^{-3} \cdot 10^{-6} (0.6678 - 0.4471) \text{ м}} = 75.2 \text{ мкм}.$$

Ответ: $d = 75.2 \text{ мкм}$.

Пример 5.

Дисперсия показателя преломления кварца представлена таблицей

λ , нм	586.3	486.1	410.0
n	1.5442	1.5497	1.5565

Найти отношение фазовой и групповой скоростей света вблизи $\lambda = 486.1 \text{ нм}$.

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 таблицы для $\lambda = 486.1 \text{ нм}$ и $n = 1.5497$ находим относительную дисперсию:

$$\frac{\lambda}{n} \frac{\Delta n}{\Delta \lambda} = \frac{486.1(1.5565 - 1.5442)}{1.5497(410.0 - 589.3)} = -0.0215.$$

Тогда из (2) получим

$$u = v \left(1 + \frac{\lambda}{n} \frac{\Delta n}{\Delta \lambda} \right) = v(1 - 0.0215) = 0.9785v,$$

$$u/v = 0.9785.$$

Ответ: $u/v = 0.9785$.

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 $E_0 = 938 \text{ МэВ}$ - 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: $T_{\text{ч}} > 263 \text{ МэВ}$.

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: $\lambda_{\text{к}} = 0.76 \text{ мкм}$; $\lambda_{\text{ф}} = 0.38 \text{ мкм}$.

Найти: $n = N_{\text{ф}}/N_{\text{к}}$.

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

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

где T - температура излучателя; $C_1 = 2.89 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К}$ - постоянная закона смещения Вина.

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

$$T_{\text{кр}} = C_1/\lambda_{\text{кр}}; \quad T_{\text{ф}} = C_1/\lambda_{\text{ф}}.$$

Мощность излучения абсолютно черного тела

$$N = R_s S,$$

где R_s - энергетическая светимость абсолютно черного тела; S - площадь поверхности излучающего тела. В соответствии с законом Стефана-Больцмана

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

где $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$ - постоянная Стефана-Больцмана.

Для красной и фиолетовой границ видимой области спектра

$$N_{кр} = \sigma T_{кр}^4 S; N_{\phi} = \sigma T_{\phi}^4 S.$$

Из формул (1) и (2) следует:

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

Отношение $N_{\phi}/N_{кр} = n$ 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° . 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: λ_2 , T_e , p_e .

Решение. Изменение длины волны фотона при комптоновском рассеянии

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

где λ_1 и λ_2 - длины 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 дина волны.

Из формулы (1) находим $\lambda_2 = \lambda_1 + \Delta\lambda = \lambda_1 + \lambda_c (1 - \cos\theta)$. Выражая λ_1 через энергию фотона $\varepsilon_1 = hc/\lambda_1$, получаем

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

Энергия электрона отдачи по закону сохранения энергии

$$T_e = \varepsilon_1 - \varepsilon_2.$$

Выразим изменение длины волны через изменение частоты:

$$\Delta\lambda = \frac{c}{\nu_2} - \frac{c}{\nu_1} = \frac{c(\nu_1 - \nu_2)}{\nu_1 \nu_2}.$$

С учетом (1) можно написать:

$$\nu_1 - \nu_2 = \frac{h\nu_1 \nu_2}{m_0 c^2} (1 - \cos\theta). \quad (3)$$

Умножая формулу (3) на h и учитывая, что $h\nu_1 = \varepsilon_1$; $h\nu_2 = \varepsilon_2$; $m_0c^2 = E_0$; $\varepsilon_1 - \varepsilon_2 = T_e$, получаем

$$T_e = \frac{\varepsilon_1^2(1 - \cos\theta)}{E_0 + \varepsilon_1(1 - \cos\theta)}, \quad (4)$$

где $E_0 = 0.511 \text{ МэВ} = 0.82 \cdot 10^{-13} \text{ Дж}$ - энергия покоя электрона. Зная энергию электрона, найдем

$$p_e = \frac{1}{c} \sqrt{T_e(T_e + 2E_0)}. \quad (5)$$

Подставляя числовые значения в формулы (2), (4) и (5), получаем

$$\lambda_2 = \frac{6.62 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с} \cdot 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}}{1.92 \cdot 10^{-13} \text{ Дж}} + 2.43 \cdot 10^{-12} \text{ м}(1 - 0.5) = 2.25 \cdot 10^{-12} \text{ м};$$

$$T_e = \frac{(1.2 \text{ МэВ})^2 \cdot 0.5}{0.511 \text{ МэВ} + 1.2 \text{ МэВ} \cdot 0.5} = 0.648 \text{ МэВ} = 1.04 \cdot 10^{-13} \text{ Дж};$$

$$p_e = \frac{1}{3 \cdot 10^8 \text{ м/с}} \sqrt{1.04 \cdot 10^{-13} \text{ Дж} (1.04 \cdot 10^{-13} \text{ Дж} + 2 \cdot 0.82 \cdot 10^{-13} \text{ Дж})} = 5.55 \cdot 10^{-22} \text{ кг} \cdot \text{м/с}$$

Ответ: $\lambda_2 = 2.25 \cdot 10^{-12} \text{ м}$; $T_e = 0.648 \text{ МэВ}$; $p_e = 5.55 \cdot 10^{-22} \text{ кг} \cdot \text{м/с}$.

Контрольная работа №5

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 светлыми полосами $3 \cdot 10^{-4} \text{ рад}$, 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° 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° .

15. На щель шириной 0.1 мм падает нормально параллельный пучок белого света (0.4–0.8 мкм). Найти ширину третьего максимума 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 длин волн 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. 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.

22. Естественный свет падает на диэлектрик под углом полной поляризации. Найти показатель преломления диэлектрика, если интенсивность преломленного луча составляет 91.7 % интенсивности естественного света.

23. Найти степень поляризации преломленного луча, если интенсивность отраженного луча составляет 9.6 % интенсивности естественного света, падающего на диэлектрик под углом полной поляризации.

24. 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.

25. 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° ? Коэффициент поглощения света в обоих поляризаторах одинаковый.

26. 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.

27. Угол между плоскостями поляризации двух поляризаторов 35° . Как изменится интенсивность прошедшего через них света, если этот угол увеличить вдвое?

28. Пластинка из исландского шпата, вырезанная параллельно оптической оси, помещена между параллельными николями так, что ее оптическая ось составляет угол 45° 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. Двупреломление для этих линий $\Delta n_1 = 0.172$ и $\Delta n_2 = 0.176$.

29. Пластинка из кварца, вырезанная параллельно оптической оси, расположена между скрещенными николями так, что ее оптическая ось

составляет угол 45° с главными направлениями николей. Сколько темных полос будет наблюдаться в спектре между длинами волн 0.527 и 0.431 мкм, если толщина пластинки 2 мм? Система освещается белым светом. Двупреломление для этих длин волн 0.09 и 0.01.

30. Между скрещенными николями установлена кристаллическая пластинка толщиной 0.01 мм с двупреломлением 0.06. В какой цвет будет окрашено поле зрения? В какой цвет оно окрасится, если николи поставить параллельно?

31. α -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 черенковское излучение при движении их в среде с показателем преломления 1.6 возникает тогда, когда их кинетическая энергия превышает 263 МэВ?

36. Отдаленная туманность имеет скорость 0.4 с (отдаленные космические объекты движутся от 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. Каков средняя скорость пучка водородных канальных лучей, 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. Коэффициент линейного поглощения вещества 0.3 м^{-1} . Определить толщину слоя этого вещества, ослабляющего интенсивность монохроматического света в четыре раза.

42. Найти коэффициент линейного поглощения вещества, для которого толщина половинного слоя ослабления интенсивности света 3.46 м.

43. Необходимо установить толщину слоя вещества, ослабляющего интенсивность монохроматического света в два раза. Коэффициент линейного поглощения данного вещества 0.69 м^{-1} .

44. Перед пучком лучей установлена преграда, уменьшающая интенсивность света. Коэффициент линейного поглощения вещества равен 0.25 м^{-1} . Во сколько раз уменьшится интенсивность света при прохождении слоя вещества толщиной 2.77 м ?

45. Два защитных слоя одинаковой толщины ослабляют интенсивность монохроматического пучка лучей. Первый слой ослабляет интенсивность лучей в два раза при коэффициенте поглощения 0.05 см^{-1} . Второй слой ослабляет интенсивность в пять раз. Каков коэффициент линейного поглощения этого слоя?

46. Определить установившуюся температуру абсолютно черной пластины, находящейся в вакууме перпендикулярно потоку лучистой энергии, равному $14 \cdot 10^3 \text{ Вт/м}^2$. Определить, на какую длину волны приходится максимум спектральной плотности энергетической светимости при данной температуре.

47. Какая энергия излучается за 1 мин с 1 см^2 абсолютно черного тела, если максимум спектральной плотности энергетической светимости приходится на длину волны 0.6 мкм ?

48. 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.

49. Найти энергетическую яркость абсолютно черного тела, если максимум спектральной плотности энергетической светимости приходится на длину волны 0.5 мкм .

50. При нагревании тела длина волны, на которую приходится максимум излучательной способности, изменилась от 1.45 до 1.16 мкм . На сколько изменилась максимальная спектральная плотность энергетической светимости тела?

51. Температура в центре Солнца порядка $1.3 \cdot 10^7 \text{ К}$. Найти равновесное давление теплового излучения, считая его изотропным.

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

53. Найти первоначальную температуру равновесного теплового излучения, если при повышении температуры вдвое давление изменилось на 7.3 МПа .

54. На зеркальную поверхность площадью 0.8 м^2 нормально падает $14 \cdot 10^{18}$ квантов в секунду. Найти длину волны падающего света, если давление его равно 10^{-8} Па .

55. Поток света ($\lambda = 0.56 \text{ мкм}$) падает нормально на черную поверхность, производя давление 4 мкПа . Определить концентрацию фотонов вблизи поверхности.

56. Определить силу светового давления на черную поверхность площадью 100 см^2 , если интенсивность светового потока, падающего нормально на эту поверхность равна 0.3 Вт/см^2 .

57. Определить световое давление на плоскую поверхность с коэффициентом отражения 0.8 при падении на нее под углом 60° световой волны интенсивностью 0.5 Вт/см^2 .

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

59. 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 канала, определить давление света на поверхность цилиндра. Коэффициент отражения цилиндра 10% .

60. Поток монохроматических лучей с длиной волны 600 нм падает нормально на пластинку с коэффициентом отражения 0.2. Сколько фотонов каждую секунду попадает на пластинку, если давление лучей на пластинку составляет 10^{-7} Па ?

61. Красная граница 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 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 длиной волны 0.48 мкм из него вылетают электроны со скоростью $6.5 \cdot 10^5 \text{ м/с}$. Определить работу выхода электронов из этого металла.

65. Плоская вольфрамовая пластинка освещается светом 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° . Найти энергию, импульс электрона отдачи и длину волны рассеянного фотона.

67. В результате рассеяния фотона с длиной волны 2 нм на свободном электроны комптоновское смещение оказалось равным 1.2 нм . 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 0.4 с . Энергия первичного фотона 0.42 МэВ .

69. Найти отношение максимального комптоновского изменения 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 вдвое при угле рассеяния 60°?

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

Основные законы и формулы

Величина или физический закон	Формула
Первый постулат Бора	$mvr_n = nh/(2\pi)$
Третий 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)	$E_n = \frac{E_i}{n^2}$
Серияльная формула для спектральных линий водорода	$\nu = R c \left(\frac{1}{i^2} - \frac{1}{n^2} \right)$
Серияльная формула для водородоподобных атомов	$\nu = R c Z^2 \left(\frac{1}{i^2} - \frac{1}{n^2} \right)$
Длина волны де Бройля	$\lambda = h/p = h/(mv)$
Соотношение неопределенностей Гейзенберга	$\Delta x \Delta p \geq h/(2\pi);$ $\Delta E \Delta t \geq h/(2\pi)$
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	$2d \sin \varphi = k\lambda$

Величина или физический закон	Формула
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: $r_2/r_1 = 9$; $i = 2$.

Найти: ν .

Решение. Порядковый номер лития $Z = 3$. Поэтому двукратно ионизированный атом лития имеет один электрон, вращающийся вокруг ядра, и атом является водородоподобным. Частота излучения света для водородоподобных атомов определяется формулой

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

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.

Найдем отношение радиусов орбит. При движении электрона по орбите радиуса r_n кулоновская сила притяжения электрона к ядру является центростремительной силой:

$$\frac{q^2}{(4\pi\epsilon_0\epsilon r_n^2)} = \frac{mv^2}{r_n}, \quad (2)$$

где q - заряд электрона; m - масса электрона; ϵ - диэлектрическая постоянная; ϵ_0 - электрическая постоянная; v - скорость движения электрона по орбите.

По первому постулату Бора, $mv r_n = nh/(2\pi)$, откуда $v = nh/(2\pi m r_n)$. Подставив это значение в равенство (2), найдем r_n :

$$\frac{q^2}{(4\pi\epsilon_0\epsilon r_n^2)} = \frac{m n^2 h^2}{4\pi^2 m^2 r_n^2 r_n};$$

$$r_n = \frac{\epsilon\epsilon_0 n^2 h^2}{\pi m q^2}.$$

Из последнего равенства видно, что радиус боровской орбиты пропорционален квадрату главного квантового числа, следовательно, $i^2/n^2 = r_i/r_n = 1/9$. Умножив обе части равенства (1) на i^2 , получим $vi^2 = RcZ^2(1 - i^2/n^2)$, откуда

$$v = RcZ^2 \left(1 - \frac{i^2}{n^2}\right) \left(\frac{1}{i^2}\right),$$

$$v = 1.097 \cdot 10^7 \text{ 1/м} \cdot 3 \cdot 10^8 \text{ м/с} \cdot 3^2 \cdot \left(1 - \frac{1}{9}\right) \cdot \left(\frac{1}{4}\right) = 6.58 \cdot 10^{15} \text{ 1/с}.$$

$$\text{Проверяем единицу } [v] = \left[\frac{\text{м}}{\text{м} \cdot \text{с}} \right] = \left[\frac{1}{\text{с}} \right] = [\text{Гц}].$$

$$\text{Ответ: } v = 6.58 \cdot 10^{15} \text{ 1/с}.$$

Пример 2.

Вычислить длину волны де Бройля электрона, движущегося со скоростью $v = 0.75 c$ (c - скорость света в вакууме).

Дано: $v = 0.75 c$.

Найти: λ .

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

$$p = mv, \quad (2)$$

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 $0,75c$. Подставив это значение в формулу (4), имеем

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

где $h/(m_0 c)$ - комптоновская длина волны Λ . Учитывая это, получим

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

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

Решение. Соотношение неопределенностей Гейзенберга выражается формулой

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

где Δx - неопределенность в координате; Δp_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_α характеристического рентгеновского излучения от платинового антикатада.

Дано: $Z = 78$; $i = 1$; $a = 1$; $n = 2$.

Найти: ν , ϵ .

Решение. По формуле Мозли $1/\lambda = R(Z-a)^2(1/i^2 - 1/n^2)$, где λ - длина волны характеристического излучения, равная $\lambda = c/\nu$; c - скорость света; ν - частота, соответствующая длине волны; R - постоянная Ридберга; Z - порядковый номер элемента антикатада, для платины $Z = 78$; a - постоянная экранирования; i - номер терма, на который переходит электрон, для K_α -серии $i = 1$; n - номер терма, с которого переходит электрон, для K_α -серии $n = 2$.

Заменяя в формуле Мозли λ через ν , получаем

$$\nu = cR(Z-a)^2(1/i^2 - 1/n^2),$$

$$\nu = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с} \cdot 1.097 \cdot 10^7 \text{ м}^{-1} (78-1)^2 (1/1^2 - 1/2^2) = 14.6 \cdot 10^{18} \text{ Гц}.$$

Энергию фотона определим по формуле Планка $\epsilon = h\nu$, где h - постоянная Планка:

$$\begin{aligned} \epsilon &= 6.62 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с} \cdot 14.6 \cdot 10^{18} \text{ 1/с} = 96.8 \cdot 10^{-16} \text{ Дж} = \\ &= 96.8 \cdot 10^{-16} \cdot 6.25 \cdot 10^{18} \text{ эВ} = 60500 \text{ эВ} = 60.5 \text{ кэВ}. \end{aligned}$$

Ответ: $\nu = 14.6 \cdot 10^{18} \text{ Гц}$; $\epsilon = 60.5 \text{ кэВ}$.

Пример 5.

Пучок γ -лучей с длиной волны $0.0069 \cdot 10^{-10} \text{ м}$ падает на поверхность воды. На какой глубине интенсивность лучей уменьшится в 90 раз?

Дано: $\lambda = 0.0069 \cdot 10^{-10} \text{ м} = 6.9 \cdot 10^{-13} \text{ м}$; $k = 90$.

Найти: x .

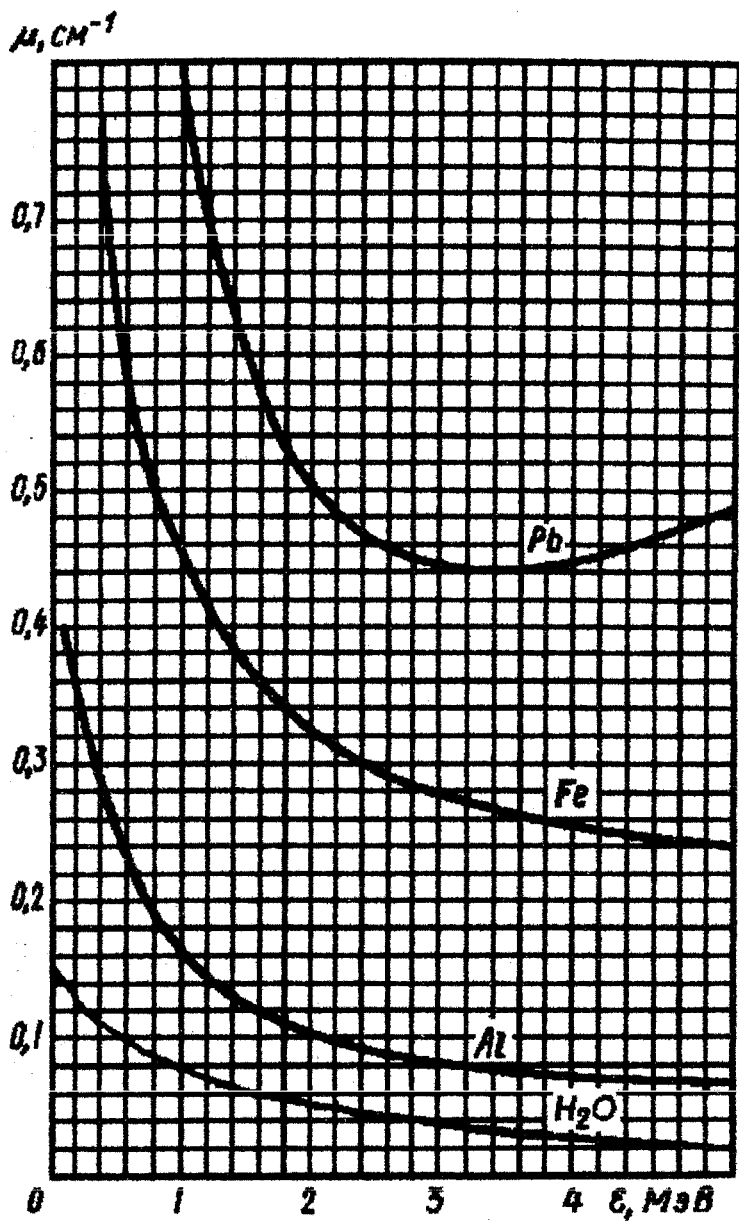


Рис. 3

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 ; μ - коэффициент линейного ослабления

Решая уравнение относительно x , находим

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

Для определения μ вычислим энергию квантов

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

где h - постоянная Планка; c - скорость света.

Вычисления:

$$\begin{aligned}\varepsilon &= \frac{6.62 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с} \cdot 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}}{6.9 \cdot 10^{-13} \text{ м}} = 2.88 \cdot 10^{-13} \text{ Дж} = \\ &= 2.88 \cdot 10^{-13} \text{ МэВ} / (1.6 \cdot 10^{-13}) = 1.8 \text{ МэВ}.\end{aligned}$$

По графику зависимости линейного коэффициента ослабления γ -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}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: $m = 0.2 \text{ мкг}$; $t = 6 \text{ ч} = 6 \cdot 3.6 \cdot 10^3 \text{ с} = 2.16 \cdot 10^4 \text{ с}$; $T_{1/2} = 10 \text{ мин} = 600 \text{ с}$.

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 ($t = 0$); λ - 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 $t = 0$

$$A_0 = \lambda N_0. \quad (5)$$

Постоянная радиационного распада λ 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 ν 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: $E = \Delta mc^2 n$, где Δm - 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

$$\Delta m = Zm_{\text{H}} + (A - Z)m_{\text{n}} - m_{\text{a}},$$

где Z - зарядовое число элемента, равное порядковому номеру элемента в таблице Менделеева, для гелия $Z = 2$; m_{H} - масса атома водорода, $m_{\text{H}} = 1.00783$ а. е. м.; m_{n} - масса нейтрона, $m_{\text{n}} = 1.00867$ а. е. м.; A - массовое число, для гелия $A = 4$; m_{a} - масса атома, для гелия $m_{\text{a}} = 4.00260$ а. е. м. Подставим эти значения:

$$\Delta m = (2 \cdot 1.00783 + 2 \cdot 1.00867 - 4.00260) \text{ а. е. м.} = 0.0304 \text{ а. е. м.} = 5.05 \cdot 10^{-29} \text{ кг.}$$

Учтем, что $n = (m/\mu)N_{\text{A}}$, тогда

$$E = \Delta mc^2 \frac{m}{\mu} N_{\text{A}}.$$

Число атомов в 1 кг равно N_{A}/μ , где N_{A} - постоянная Авогадро; μ - 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 γ -кванта для образования пары электрон - позитрон в кулоновском поле ядра.

Дано: $m_{\text{e}}c = 9.11 \cdot 10^{-31}$ кг.

Найти: $E_{\text{п}}$.

Решение. Процесс образования пары электрон - позитрон происходит по схеме



Пороговая энергия - это минимальная величина энергии γ -кванта, при которой возможного начало этого процесса. На основании закона сохранения импульса можно записать, считая ядро покоящимся, $|p_{\gamma}| = |p_{\text{e}^-} + p_{\text{e}^+}|$, где p_{γ} - импульс падающего фотона; p_{e^-} и p_{e^+} - импульсы электрона и позитрона.

Связь между энергией и импульсом при релятивистском движении частиц выражается формулой

$$E = \sqrt{(pc)^2 + (m_0 c^2)^2},$$

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

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

где pc - пороговая энергия γ -квантов E_{π} .

Возведем обе части равенства (2) в квадрат:

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

После раскрытия скобок и сокращения подобных членов получим

$$E_{\pi} = pc = 2m_{0e}c^2 + 2m_{0e}c^2/M_x.$$

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

$$E_{\pi} = 2m_{0e}c^2; \quad (3)$$

$$m_{0e} = 9.11 \cdot 10^{-31} \text{ кг}; \quad c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$$

Подставляя числовые значения в формулу (3), имеем

$$E_{\pi} = 2 \cdot 9.11 \cdot 10^{-31} \text{ кг} \cdot (3 \cdot 10^8)^2 \text{ м}^2/\text{с}^2 = 1.64 \cdot 10^{-13} \text{ Дж} = 1.02 \text{ мэВ}.$$

Ответ: $E_{\pi} = 1.02 \text{ мэВ}$.

Контрольная работа № 6

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

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

3. Вычислить кинетическую энергию электрона, выбитого из второго энергетического уровня атома водорода фотоном, длина волны которого 0.2 мкм.

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

5. 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.

6. Невозбужденный атом водорода поглощает квант излучения с длиной волны 102.6 нм. Вычислить, пользуясь теорией Бора, радиус электронной орбиты возбужденного атома водорода.

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

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

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

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

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

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

13. Вещество $^{23}_{11}\text{Na}$ облучается дейтронами и превращается в радиоактивный изотоп $^{24}_{11}\text{Na}$ с периодом полураспада 11.5 ч. Какая доля радиоактивного натрия остается через сутки после прекращения облучения дейтронами?

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

15. Постоянная радиоактивного распада для элемента $^{228}_{88}\text{Ra}$ равна $3.28 \cdot 10^{-9} \text{ с}^{-1}$. Определить, какая часть ядер этого элемента останется через 5 лет.

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

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

18. Во сколько раз уменьшится активность препарата $^{32}_{15}\text{P}$ через 20 сут? Период полураспада 14.3 сут.

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

20. Определить число ядер, распадающихся в течение времени: 1) $t_1 = 1$ мин; 2) $t_2 = 5$ сут, в радиоактивном изотопе фосфора $^{32}_{15}\text{P}$ массой 1 мг. Период полураспада 14.3 сут.

21. Энергия возбужденного атома водорода 0.85 эВ. Вычислить длину волны де Бройля электрона на этой орбите.

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

23. Дебройлевская длина волны электрона уменьшалась с 1 до 0.5 нм. На сколько изменилась энергия электрона?
24. Найти длину волны де Бройля для протона, прошедшего разность потенциалов 1000 кВ.
25. Вычислить длину волны де Бройля для молекулы азота, движущейся со средней скоростью, соответствующей комнатной температуре.
26. Длина волны де Бройля для электрона равна 1.3 нм. Определить скорость электрона.
27. Скорость электронов равна 0.8 с. Найти длину волны де Бройля электронов.
28. Коротковолновая граница рентгеновского спектра $0.2 \cdot 10^{-10}$ м. Определить длину волны де Бройля для электронов, бомбардирующих антикатод.
29. Вычислить длину волны де Бройля для электрона, обладающего кинетической энергией 1 эВ.
30. Определить длину волны де Бройля для α -частиц, прошедших разность потенциалов: 1) 200 В; 2) 100 кВ.
31. Рентгеновские лучи с длиной волны 0.52 нм выбивают электроны с К-уровня атома молибдена. Какова скорость выбитых электронов?
32. 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° . Найти минимальное напряжение на рентгеновской трубке.
33. Найти наибольшую длину волны К-серии рентгеновского излучения от золотого антикатада.
34. Расстояние между атомными плоскостями кристалла $3 \cdot 10^{-8}$ см. Рентгеновские параллельные лучи, падающие на кристалл, дают при отражении первый максимум под углом 30° . Под каким минимальным напряжением работает рентгеновская трубка?
35. 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.
36. При каком наименьшем напряжении на рентгеновской трубке с железным антикатодом появляются линии K_α ?
37. Какую наименьшую разность потенциалов нужно приложить к рентгеновской трубке с вольфрамовым антикатодом, чтобы в спектре излучения вольфрама были все линии К-серии.
38. При переходе электрона в атоме меди с М-слоя на L-слой испускаются лучи с длиной волны $1.2 \cdot 10^{-10}$ м. Вычислить постоянную экранирования в формуле Мозли.
39. Наибольшая длина волны К-серии рентгеновского излучения равна $1.94 \cdot 10^{-10}$ м. Из какого материала сделан антикатод?

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

41. 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.

42. 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 определении импульса электрона для этого случая.

43. Найти ошибку в определении скорости электрона, протона и пылинки массой 0.1 нг, если их координаты установлены с неопределенностью 1 мкм.

44. 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.

45. Положение молекулы водорода и положение электрона определены с ошибкой 10^{-7} м. Какова будет неопределенность в скорости для молекулы водорода и электрона?

46. Вычислить толщину слоя половинного ослабления при условии, что узкий пучок γ -излучения с энергией 1.25 МэВ проходит через свинцовый экран.

47. Определить как изменится интенсивность (узкого) пучка γ -лучей при прохождении через экран, состоящий из двух плит: алюминиевой - толщиной 10 см и железной - толщиной 5 см. Коэффициенты линейного ослабления для $\text{Al } \mu = 0.1 \text{ см}^{-1}$, а для $\text{Fe } \mu = 0.3 \text{ см}^{-1}$.

48. Как изменится степень ослабления γ -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.

49. Вычислить толщину слоя половинного ослабления для свинцового экрана, через который проходит монохроматический узкий пучок γ -лучей с длиной волны $0.006 \cdot 10^{-10}$ м.

50. Какова энергия γ -лучей, если при прохождении через слой железа толщиной в 3.15 см интенсивность излучения ослабляется в 4 раза?

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

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

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

54. В какой элемент превращается ${}^{238}_{92}\text{U}$ после трех α -распадов и двух β -превращений? Решение пояснить схемой.

55. Определить массу нейтрального атома, если ядро этого атома состоит из трех протонов и двух нейтронов и энергия связи ядра равна 26.3 МэВ.

56. Какую наименьшую энергию нужно затратить, чтобы оторвать один нейтрон от ядра азота ${}^{14}_7\text{N}$?

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

58. Под действием γ -лучей идут реакции типа (γ, n) , (γ, p) и (γ, α) , 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 γ -лучей, при которой возможно фоторасщепление дейтрона и энергию связи дейтрона.

59. Считая, что рождение π^+ -мезонов происходит по схеме $p + p \rightarrow p + n + \pi^+$, определить порог рождения π^+ -мезона, т. е. минимальную кинетическую энергию бомбардирующего протона, необходимую для образования π^+ -мезона. Массу π^+ -мезона принять равной 0.150 а. е. м.

60. Рождение π^- -мезонов происходит по схеме $n + n \rightarrow n + p + \pi^-$. Определить порог рождения π^- -мезона, т. е. минимальную кинетическую энергию бомбардирующего нейтрона, необходимую для образования π^- -мезона. Массу π^- -мезона принять равной 0.150 а. е. м.

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

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

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

64. Вычислить энергию ядерной реакции ${}^2_1\text{H} + {}^7_3\text{Li} \rightarrow 2 {}^4_2\text{He} + n$.

65. 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?

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

67. 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?

68. 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?

69. 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?

70. 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)

Физические постоянные	Обозначение	Числовые значения
Скорость света в вакууме	c	$3 \cdot 10^8$ м/с
Постоянная Стефана-Больцмана	σ	$5.67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м ² ·К ⁴)
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 ³ ·К ⁵)
Постоянная Планка	h	$6.62 \cdot 10^{-34}$ Дж·с
Постоянная Ридберга (для атома водорода $\frac{1}{H}$)	R	$1.097 \cdot 10^7$ м ⁻¹
Радиус первой боровской орбиты	r _Б	$0.529 \cdot 10^{-10}$ м
Комптоновская длина волны	λ_C	$2.34 \cdot 10^{-12}$ м
Потенциал ионизации атома водорода (энергия ионизации)	I ₀	$2.18 \cdot 10^{-18}$ Дж = = 13.6эВ
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 m₀ и энергия E₀ покоя некоторых элементарных частиц

Частицы	m ₀		E ₀	
	а. е. м.	кг·10 ²⁷	МэВ	Дж·10 ¹⁰
Электрон	$5.486 \cdot 10^{-4}$	0.00091	0.511	0.00081
Протон	1.00728	1.6724	938.23	1.50
Нейтрон	1.00867	1.6748	939.53	1.51
Дейтрон	2.01355	3.3325	1875.5	3.00
α-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.

Элемент системы	Изо-топ	Масса	Элемент системы	Изо-топ	Масса
Водород H	-	1.00797	Кислород	$^{16}_8\text{O}$	15.99491
	^1_1H	1.00783		$^{18}_9\text{F}$	18.00095
	^2_1H	2.01410	Магний Mg	$^{19}_9\text{F}$	18.99840
	^3_1H	3.01605		$^{24}_{12}\text{Mg}$	23.98504
Гелий He	-	4.00260	Алюминий Al	$^{27}_{12}\text{Mg}$	26.98436
	^3_2He	3.01605		$^{27}_{13}\text{Al}$	26.98135
	^4_2He	4.00260	Кремний Si	$^{24}_{14}\text{Si}$	26.81535
Литий Li	^6_3Li	6.01513	Фосфор P	$^{33}_{15}\text{P}$	32.97174
	^7_3Li	7.01601	Сера S	$^{33}_{16}\text{S}$	32.97146
Бериллий Be	^7_4Be	7.01169	Железо $^{26}_{26}\text{Fe}$	-	55.94700
	^9_4Be	9.01219	Медь $^{29}_{29}\text{Cu}$	-	63.54000
Бор B	$^{10}_5\text{B}$	10.01294	Вольфрам $^{74}_{74}\text{W}$	-	183.8500
Азот N	$^{13}_7\text{N}$	13.00574	Эманация	$^{222}_{86}\text{Em}$	222.01753
	$^{14}_7\text{N}$	14.00307	Радий	$^{226}_{88}\text{Ra}$	226.02536

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 - $0.484 \cdot 10^{-10}$

СОДЕРЖАНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ.....	3
ОБЩИЕ МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ.....	5
РАБОЧАЯ ПРОГРАММА.....	5
РАЗДЕЛ V. ОПТИКА.....	7
Примеры решения задач.....	10
Контрольная работа №5.....	17
РАЗДЕЛ VI. КВАНТОВО-ОПТИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ. ЭЛЕМЕНТЫ АТОМНОЙ И ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ.....	23
Примеры решения задач.....	24
Контрольная работа №6.....	32
СПРАВОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ.....	37