

МЕЖГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра «Физические методы контроля»

# ФИЗИКА

*Методические рекомендации к самостоятельной работе  
для студентов всех специальностей и направлений подготовки  
заочной формы обучения*

**ОПТИКА. ОСНОВЫ ФИЗИКИ ТВЕРДОГО ТЕЛА.  
ЭЛЕМЕНТЫ КВАНТОВОЙ МЕХАНИКИ,  
АТОМНОЙ И ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ**



Могилев 2024

УДК 531  
ББК 22.31  
Ф55

Рекомендовано к изданию  
учебно-методическим отделом  
Белорусско-Российского университета

Одобрено кафедрой «Физические методы контроля» «17» апреля 2024 г.,  
протокол № 9

Составители: д-р физ.-мат. наук, доц. А. В. Хомченко;  
ст. преподаватель В. В. Глущенко;  
ст. преподаватель Е. В. Пивоварова

Рецензент канд. техн. наук, доц. М. Н. Миронова

В методических рекомендациях представлен краткий теоретический материал для самостоятельной подготовки к практическим занятиям по разделам физики «Оптика», «Основы физики твердого тела» и «Элементы квантовой механики, атомной и ядерной физики». Приводятся примеры решения задач и задания для самостоятельного выполнения. В приложении указаны некоторые физические величины и постоянные.

Учебное издание

ФИЗИКА

Ответственный за выпуск	А. В. Хомченко
Корректор	А. А. Подошевка
Компьютерная верстка	Н. П. Полевничая

Подписано в печать . Формат 60×84/16. Бумага офсетная. Гарнитура Таймс.  
Печать трафаретная. Усл. печ. л. . Уч.-изд. л. . Тираж 36 экз. Заказ №

Издатель и полиграфическое исполнение:  
Межгосударственное образовательное учреждение высшего образования  
«Белорусско-Российский университет».

Свидетельство о государственной регистрации издателя,  
изготовителя, распространителя печатных изданий  
№ 1/156 от 07.03.2019.

Пр-т Мира, 43, 212022, г. Могилев.

© Белорусско-Российский  
университет, 2024

## Содержание

1 Программа курса физики.....	4
2 Общие указания к решению задач.....	5
3 Учебные материалы по разделу «Волновая оптика».....	6
3.1 Основные понятия и формулы.....	6
3.2 Примеры решения задач.....	10
3.3 Задачи для самостоятельного решения.....	16
4 Учебные материалы по разделу «Квантовая природа излучения».....	17
4.1 Основные формулы.....	17
4.2 Примеры решения задач.....	19
4.3 Задачи для самостоятельного решения.....	23
5 Учебные материалы по разделу «Элементы атомной физики, квантовой механики и физики твердого тела».....	24
5.1 Основные понятия и формулы.....	24
5.2 Примеры решения задач.....	26
5.3 Задачи для самостоятельного решения.....	31
6 Учебные материалы по разделу «Элементы физики атомного ядра и элементарных частиц».....	31
6.1 Основные понятия и формулы.....	31
6.2 Примеры решения задач.....	32
6.3 Задачи для самостоятельного решения.....	35
Список литературы .....	36
Приложение А .....	37

## 1 Программа курса физики

*Волновая оптика.* Интерференция света. Когерентность и монохроматичность световых волн. Расчет интерференционной картины от двух когерентных источников. Оптическая длина пути. Интерференция света в тонких пленках. Интерферометры. Дифракция света. Принцип Гюйгенса – Френеля. Метод зон Френеля. Прямолинейное распространение света. Дифракция Френеля на круглом отверстии и диске. Дифракция Фраунгофера на одной щели и дифракционной решетке. Разрешающая способность оптических приборов. Дифракция на пространственной решетке. Формула Вульфа – Брэгга. Принцип голографии. Исследование структуры кристаллов. Оптически неоднородная среда. Дисперсия света. Области нормальной и аномальной дисперсии. Электронная теория дисперсии света. Эффект Доплера. Поляризация света. Естественный и поляризованный свет. Поляризация света при отражении. Закон Брюстера. Двойное лучепреломление. Одноосные кристаллы. Поляроиды и поляризационные призмы. Закон Малюса.

*Квантовая природа излучения.* Тепловое излучение. Черное тело. Закон Кирхгофа. Закон Стефана – Больцмана. Распределение энергии в спектре абсолютно черного тела. Закон смещения Вина. Квантовая гипотеза и формула Планка. Оптическая пирометрия. Внешний фотоэффект и его законы. Фотоны. Уравнение Эйнштейна для внешнего фотоэффекта. Масса и импульс фотона. Давление света. опыты Лебедева. Квантовое и волновое объяснение давления света. Эффект Комптона и его теория. Диалектическое единство корпускулярных и волновых свойств электромагнитного излучения.

*Элементы атомной физики и квантовой механики.* Опытное обоснование корпускулярно-волнового дуализма свойств вещества. Формула де Бройля. Соотношение неопределенностей как проявление корпускулярно-волнового дуализма свойств материи. Волновая функция и ее статистический смысл. Ограниченность механического детерминизма. Принцип причинности в квантовой механике. Стационарные состояния. Уравнение Шредингера для стационарных состояний. Свободная частица. Туннельный эффект. Частица в одномерной прямоугольной «потенциальной яме». Квантование энергии и импульса частицы. Понятие о линейном гармоническом осцилляторе. Атом водорода. Главное, орбитальное и магнитное квантовые числа.

Опыт Штерна и Герлаха. Спин электрона. Спиновое квантовое число. Фермионы и бозоны. Принцип Паули. Распределение электронов в атоме по состояниям. Понятие об энергетических уровнях молекул. Спектры атомов и молекул. Поглощение, спонтанное и вынужденное излучения. Лазеры.

*Элементы квантовой статистики и физики твердого тела.* Фазовое пространство. Элементарная ячейка. Плотность состояний. Понятие о квантовой статистике Бозе – Эйнштейна. Фотонный и фононный газы. Распределение фононов по энергиям. Теплоемкость кристаллической решетки. Сверхтекучесть. Понятие о квантовой статистике Ферми – Дирака. Распределение

электронов проводимости в металле по энергиям при абсолютном нуле температуры. Энергия Ферми. Внутренняя энергия и теплоемкость электронного газа в металле. Электропроводность металлов. Сверхпроводимость. Магнитные свойства сверхпроводника.

Энергетические зоны в кристаллах. Распределение электронов по энергетическим зонам. Валентная зона и зона проводимости. Металлы, диэлектрики и полупроводники. Собственная проводимость полупроводников. Квазичастицы – электроны проводимости и дырки. Эффективная масса электрона в кристалле. Примесная проводимость полупроводников. Электронный и дырочный полупроводники. Контактные явления. Контакт электронного и дырочного полупроводника ( $p$ – $n$ -переход) и его вольт-амперная характеристика. Фотоэлектрические явления в полупроводниках. Люминесценция твердых тел.

*Элементы физики атомного ядра и элементарных частиц.* Заряд, размер и масса атомного ядра. Массовое и зарядовое числа. Момент импульса ядра и его магнитный момент. Состав ядра. Работы Д. Д. Иваненко и В. Гейзенберга. Нуклоны. Взаимодействие нуклонов и понятие о свойствах и природе ядерных сил. Дефект массы и энергия связи ядра. Закономерности и происхождение альфа-, бета- и гамма-излучений атомных ядер. Ядерные реакции и законы сохранения. Реакция деления ядер. Цепная реакция деления. Понятие о ядерной энергетике. Реакция синтеза атомных ядер. Проблема управляемых термоядерных реакций. Элементарные частицы. Их классификация и взаимная превращаемость. Четыре типа фундаментальных взаимодействий: сильные, электромагнитные, слабые и гравитационные. Понятие об основных проблемах физики и астрофизики.

## 2 Общие указания к решению задач

Решения задач следует начинать с краткой записи условия с приведением его к СИ, а далее сопровождать краткими, но исчерпывающими пояснениями; в тех случаях, когда это возможно, дать чертеж, выполненный с помощью чертежных принадлежностей.

Решать задачу надо в общем виде, т. е. выразить искомую величину в буквенных обозначениях величин, заданных в условии задачи. При таком способе решения не производятся вычисления промежуточных величин.

После получения расчетной формулы для проверки ее правильности следует подставить в правую часть формулы вместо символов величин обозначения единиц этих величин, произвести с ними необходимые действия и убедиться в том, что полученная при этом единица соответствует искомой величине. Если такого соответствия нет, то это означает, что задача решена неверно.

Числовые значения величин при подстановке их в расчетную формулу следует выражать только в единицах СИ. Значения физических величин и постоянных указаны в таблицах А.1–А.13. В виде исключения допускается

выражать в любых, но одинаковых единицах числовые значения однородных величин, стоящих в числителе и знаменателе дроби и имеющих одинаковые степени.

При подстановке в расчетную формулу, а также при записи ответа, числовые значения величин следует записывать как произведение десятичной дроби с одной значащей цифрой перед запятой на соответствующую степень десяти. Например, вместо 3520 надо записать  $3,52 \cdot 10^3$ , вместо 0,00129 –  $1,29 \cdot 10^{-3}$  и т. п.

Вычисления по расчетной формуле необходимо проводить с соблюдением правил приближенных вычислений [6]. Как правило, окончательный ответ следует записывать с тремя значащими цифрами. Это относится и к случаю, когда результат получен с применением калькулятора.

### 3 Учебные материалы по разделу «Волновая оптика»

#### 3.1 Основные понятия и формулы

*Скорость света в среде*

$$v = c/n,$$

где  $c$  – скорость света в вакууме;  
 $n$  – показатель преломления среды.

*Оптическая длина пути световой волны*

$$L = nl,$$

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

*Оптическая разность хода двух световых волн*

$$\Delta = L_1 - L_2.$$

*Взаимосвязь разности фаз и оптической разности хода*

$$\Delta\varphi = (2\pi/\lambda)\Delta,$$

где  $\lambda$  – длина световой волны.

*Закон отражения света*  $\alpha = \beta$  (рисунок 1).

*Закон преломления света* (см. рисунок 1)

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = \frac{n_2}{n_1}.$$

*Полное внутреннее отражение* (при  $n_2 < n_1$  и  $\gamma = 90^\circ$ )

$$\sin \alpha_{np} = \frac{n_2}{n_1}.$$

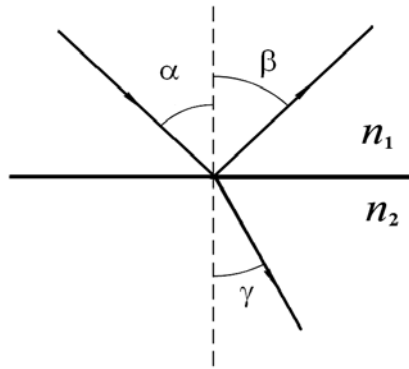


Рисунок 1 – Преломление света на границе раздела двух сред

### *Интерференция света:*

– условие максимального усиления света при интерференции

$$\Delta = \pm k\lambda \quad (k = 0, 1, 2, \dots);$$

– условие максимального ослабления света

$$\Delta = \pm (2k + 1)\lambda/2.$$

### *Интерференция в тонких пленках*

$$2d\sqrt{n^2 - \sin^2 i} + \frac{\lambda}{2} = 2m\frac{\lambda}{2} \quad \text{или} \quad (2m + 1)\frac{\lambda}{2}, \quad m = 0, 1, 2, \dots,$$

где  $d$  – толщина пленки;

$i$  – угол падения.

### *Кольца Ньютона:*

– радиус светлых колец Ньютона в отраженном свете

$$r_m = \sqrt{\left(m - \frac{1}{2}\right)\lambda_0 R} \quad (m = 1, 2, 3, \dots);$$

– радиус темных колец

$$r_m = \sqrt{m\lambda_0 R} \quad (m = 0, 1, 2, \dots).$$

### *Дифракция Фраунгофера:*

– условие наблюдения дифракционных максимумов при дифракции света на щели шириной  $a$  (рисунок 2)

$$a \sin \varphi = \pm (2m + 1)\frac{\lambda}{2} \quad (m = 0, 1, 2, 3, \dots);$$

– условие дифракционных минимумов для одной щели

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

– условие главных максимумов для дифракционной решетки

$$d \sin \varphi = \pm m \lambda \quad (m = 0, 1, 2, \dots);$$

– условие дополнительных минимумов для дифракционной решетки

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

– формула Вульфа – Брэггов – дифракция на пространственной решетке (рисунок 3)

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

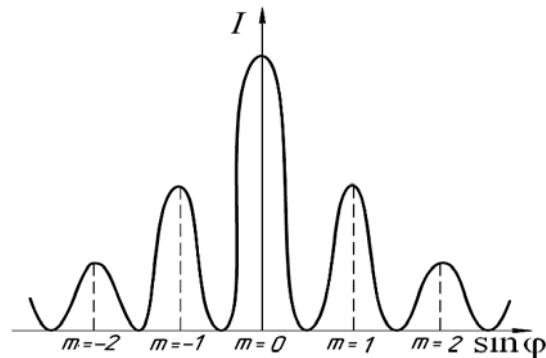


Рисунок 2 – Дифракция света на щели

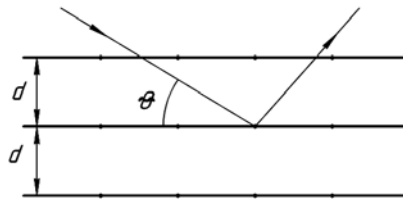


Рисунок 3 – Дифракция света на пространственной решетке

*Дифракция Френеля:*

– на круглом отверстии:

а) в центре экрана наблюдается максимум  $A = \frac{A_1}{2} + \frac{A_m}{2}$ , если

$m$  – нечётное, и минимум  $A = \frac{A_1}{2} - \frac{A_m}{2}$ , если  $m$  – чётное;

б) если открыты все зоны, то  $A = A_1/2$ , если открыта одна зона –  $A = A_1$ ;

– на круглой преграде в центре экрана всегда наблюдается максимум

$$A = \frac{A_{m+1}}{2}.$$

*Дисперсия* – зависимость показателя преломления  $n$  от частоты света. Следствие дисперсии – разложение в спектр пучка белого света. Показатель



преломления обычно уменьшается с ростом длины волны (*красные* лучи отклоняются *слабее*, чем *фиолетовые*).

*Поляризация.*

Закон Малюса (рисунок 4)

$$I_A = I_{\Pi} \cos^2 \alpha \quad \left( I_{\Pi} = \frac{1}{2} I_0 \right),$$

величины  $I_A$ ,  $I_{\Pi}$  и  $I_0$  смотри на рисунке 4.

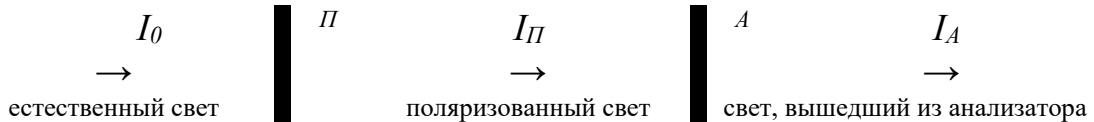


Рисунок 4 – Распространение света через систему «поляризатор – анализатор»

Степень поляризации

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

где  $I_{\max}$ ,  $I_{\min}$  – максимальная и минимальная интенсивности частично поляризованного света.

Закон Брюстера (рисунок 5) определяет угол падения света, при котором отраженный луч является плоскополяризованным:

$$\operatorname{tg} i_B = n_{21}.$$

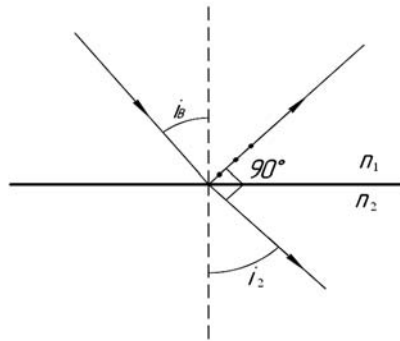


Рисунок 5 – Распространение света через границу раздела двух сред

Угол поворота плоскости поляризации монохроматического света при прохождении через оптически активное вещество:

а) в твердых телах

$$\varphi = \alpha d,$$

где  $\alpha$  – постоянная вращения;

$d$  – длина пути, пройденного светом в оптически активном веществе;

б) в растворах

$$\varphi = \alpha_p \rho d,$$

где  $\alpha_p$  – удельное вращение;

$\rho$  – массовая концентрация оптически активного вещества в растворе.

### 3.2 Примеры решения задач

**Задача 1.** На мыльную пленку ( $n = 1,3$ ), находящуюся в воздухе, падает нормально пучок лучей белого света. При какой наименьшей толщине  $d$  пленки отраженный свет с длиной волны  $\lambda = 0,55$  мкм окажется максимально усиленным в результате интерференции?

Дано:

$$n = 1,3$$

$$\lambda = 0,55 \cdot 10^{-6} \text{ м}$$

$$d_{\min} = ?$$

Решение

При нормальном падении на пленку световые лучи не преломляются. Рассмотрим интерференцию двух лучей, отраженных от границ 1 (воздух–пленка) и 2 (пленка–воздух), имеющих максимальную интенсивность (рисунок 6).

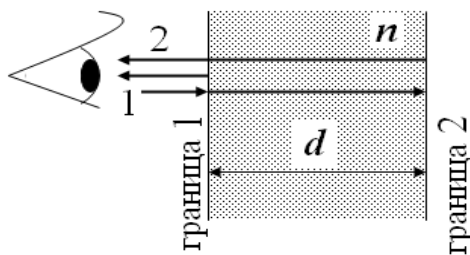


Рисунок 6 – Отражение света от пленки

Геометрическая разность хода между первым и вторым лучами  $\Delta r = 2d$ . При переходе к оптической разности хода учтем, что дополнительный путь, пройденный вторым лучом, проходил в пленке:

$$\Delta = 2dn + \frac{\lambda}{2}.$$

Появление слагаемого  $\lambda/2$  обусловлено учетом изменения фазы первой волны на  $\pi$  рад при отражении от оптически более плотной среды (граница «воздух – пленка», отражение идет от пленки). Второй луч фазу не меняет – отражение идет от воздуха (менее плотной среды).

Учитывая условие наблюдения интерференционного максимума  $\Delta = 2k\lambda / 2$ , получим

$$2dn + \frac{\lambda}{2} = 2k \frac{\lambda}{2},$$

откуда

$$d = \frac{(2k-1)\lambda}{4n}.$$

Минимальной толщина будет при  $k = 1$ .

$$d_{\min} = \frac{\lambda}{4n} = \frac{0,55 \cdot 10^{-6}}{4 \cdot 1,3} = 1,06 \cdot 10^{-7} \text{ м} = 106 \text{ нм}.$$

Ответ: 106 нм.

**Задача 2.** От двух когерентных источников  $S_1$  и  $S_2$  ( $\lambda = 0,8$  мкм) лучи попадают на экран. На экране наблюдается интерференционная картина. Когда на пути одного из лучей перпендикулярно ему поместили мыльную пленку ( $n = 1,33$ ), интерференционная картина изменилась на противоположную. При какой наименьшей толщине  $d_{\min}$  пленки это возможно?

Дано:

$$\lambda = 0,8 \text{ мкм} = 8 \cdot 10^{-7} \text{ м}$$

$$n = 1,33$$

$$d_{\min} = ?$$

Решение

Изменение интерференционной картины на противоположную означает, что на тех участках экрана, где наблюдались интерференционные максимумы, стали наблюдаться минимумы.

Такой сдвиг интерференционной картины возможен при изменении оптической разности хода пучков световых волн на нечетное число половин длин волн, т. е.

$$\Delta_2 - \Delta_1 = (2k + 1)\lambda/2,$$

где  $\Delta_1$  – оптическая разность хода световых пучков до внесения пленки;

$\Delta_2$  – оптическая разность хода для тех же пучков после внесения пленки;

$$k = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$$

Наименьшая толщина  $d_{\min}$  пленки соответствует  $k = 0$ . При этом формула принимает вид:

$$\Delta_2 - \Delta_1 = \lambda/2.$$

Оптическая схема приведена на рисунке 7. Выразим оптические разности хода  $\Delta_2$  и  $\Delta_1$ .

Из рисунка 7 следует, что

$$\Delta_1 = l_1 - l_2;$$

$$\Delta_2 = [(l_1 - d_{\min}) + nd_{\min}] - l_2 = (l_1 - l_2) + d_{\min}(n - 1).$$

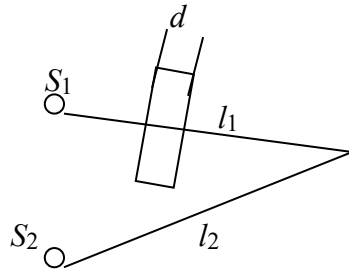


Рисунок 7 – Оптическая схема

Решая совместно систему уравнений, получим

$$(l_1 - l_2) + d_{\min}(n - 1) - (l_1 - l_2) = \lambda/2$$

или

$$d_{\min}(n - 1) = \lambda/2.$$

Отсюда

$$d_{\min} = \lambda/[2(n - 1)].$$

Произведем вычисления:

$$d_{\min} = \frac{8 \cdot 10^{-7}}{2(1,33 - 1)} = 1,21 \cdot 10^{-6} \text{ м.}$$

**Задача 3.** Между стеклянной пластиной и лежащей на ней плосковыпуклой стеклянной линзой налита жидкость, показатель преломления  $n$  которой меньше показателя преломления стекла. Радиус  $r_8^{\min}$  восьмого темного кольца Ньютона при наблюдении в отраженном свете ( $\lambda = 700 \text{ нм}$ ) равен  $2 \text{ мм}$ ; радиус кривизны  $R$  выпуклой поверхности линзы –  $1 \text{ м}$ . Найти показатель преломления жидкости.

Дано:

$$r_8^{\min} = 2 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

$$\lambda = 7 \cdot 10^{-7} \text{ м}$$

$$R = 1 \text{ м}$$

$$k = 8$$

$$n = ?$$

Решение

Ход интерферирующих лучей при наблюдении в отраженном свете показан на рисунке 8.

Если обозначить усредненное значение зазора между линзой и пластиной через  $h$ , то геометрическая разность хода между лучами 1 и 2  $\Delta r = 2h$ .

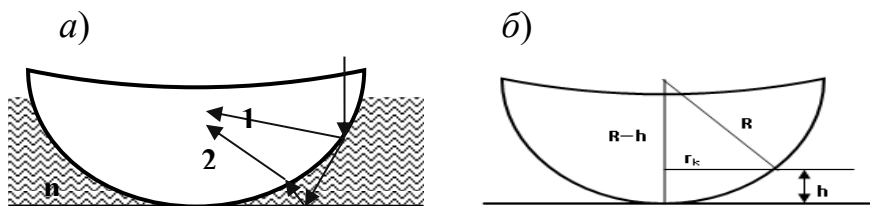


Рисунок 8 – Ход интерферирующих лучей (а) и геометрия эксперимента (б)

Оптическая разность хода с учетом показателя преломления жидкости и изменения фазы на границе «жидкость – пластина»  $\Delta = 2hn + \frac{\lambda}{2}$ .

По условию кольцо темное, т. е. в месте зазора выполняется условие интерференционного минимума  $\Delta = (2k + 1)\frac{\lambda}{2}$ . Тогда из рисунка 8, б находим толщину зазора  $h$ :

$$R^2 = r_k^2 + (R - h)^2; \quad 2h = \frac{r_k^2}{R} + \frac{h^2}{R}.$$

Пренебрегая вторым слагаемым ввиду его малости по сравнению с первым, получаем

$$2h = \frac{r_k^2}{R}; \quad \Delta = \frac{r_k^2}{R}n + \frac{\lambda}{2} = (2k + 1)\frac{\lambda}{2}.$$

Откуда

$$n = \frac{k\lambda R}{r_k^2} = \frac{8 \cdot 7 \cdot 10^{-7} \cdot 1}{(2 \cdot 10^{-3})^2} = 1,4.$$

Ответ: 1,4.

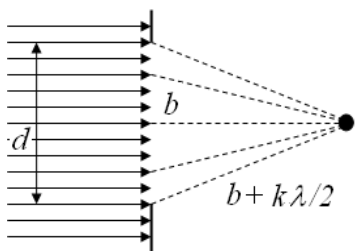
**Задача 4.** На диафрагму с круглым отверстием диаметром  $d = 4$  мм падает нормально пучок параллельных лучей монохроматического света ( $\lambda = 0,5$  мкм). Точка наблюдения находится на оси отверстия на расстоянии  $b = 1$  м от него. Сколько зон Френеля укладывается в отверстии? Тёмное или светлое пятно получится в центре дифракционной картины, если в месте наблюдения поместить экран?

Дано:

$$\begin{array}{l} d = 4 \cdot 10^{-3} \text{ м} \\ b = 1 \text{ м} \\ \lambda = 0,5 \cdot 10^{-6} \text{ м} \\ \hline k - ? \end{array}$$

Решение

Граница  $k$ -й зоны Френеля, укладываемой на отверстии (рисунок 9), ограничена прямой  $(b + k\lambda/2)$ . По теореме Пифагора



откуда

$$(b + k\frac{\lambda}{2})^2 = b^2 + \frac{d^2}{4},$$

$$k = \frac{2}{\lambda} \left[ \sqrt{b^2 + \frac{d^2}{4}} - b \right];$$

$$k = \frac{2}{0,5 \cdot 10^{-6}} \left[ \sqrt{1^2 + \frac{(4 \cdot 10^{-3})^2}{4}} - 1 \right] = 8.$$

Рисунок 9 – Дифракция Френеля на круглом отверстии

Таким образом, на отверстии укладывается чётное число зон Френеля, а следовательно, центр картины будет темным.

Ответ: 8 зон, в центре регистрируется минимум.

**Задача 5.** На дифракционную решётку нормально падает пучок немонохроматического света. Чему должна быть равна постоянная дифракционной решётки, чтобы в направлении  $\varphi = 41^\circ$  совпадали максимумы двух линий:  $\lambda_1 = 656,3$  нм и  $\lambda_2 = 410,2$  нм?

Дано:

$$\varphi = 41$$

$$\lambda_1 = 656,3 \cdot 10^{-9} \text{ м}$$

$$\lambda_2 = 410,2 \cdot 10^{-9} \text{ м}$$

---


$$d - ?$$

Решение

Положение максимумов при дифракции на решётке определяется выражением  $d \sin \varphi = k\lambda$ .

Для двух случаев нашей задачи:

$$d \sin \varphi = k_1 \lambda_1, \quad d \sin \varphi = k_2 \lambda_2$$

или

$$k_1 \lambda_1 = k_2 \lambda_2; \quad \frac{\lambda_1}{\lambda_2} = \frac{k_2}{k_1}.$$

Определим отношение длин волн и подберём целочисленные значения  $k_1$  и  $k_2$ , удовлетворяющие этому отношению:

$$\frac{\lambda_1}{\lambda_2} = \frac{656,3 \cdot 10^{-9}}{410,2 \cdot 10^{-9}} = 1,6.$$

Целочисленные значения  $k$ , удовлетворяющие этому условию:  $k_2 = 8$  и  $k_1 = 5$ . Вычисляем период решётки:

$$d = \frac{k_1 \lambda_1}{\sin \varphi} = \frac{5 \cdot 656,3 \cdot 10^{-9}}{\sin 41^\circ} = 5 \cdot 10^{-6} \text{ м.}$$

Ответ:  $5 \cdot 10^{-6}$  м.

**Задача 6.** Предельный угол полного внутреннего отражения для некоторого вещества (на границе с воздухом) равен  $45^\circ$ . Чему равен для этого вещества угол полной поляризации?

Дано:

$$i_{кр} = 45^\circ$$

---


$$i_B - ?$$

Решение

Для определения угла Брюстера (рисунок 10, а) воспользуемся законом

$$\operatorname{tg} i_B = n_{21} = \frac{n_2}{n_1},$$

где  $n_2$  – показатель преломления вещества;

$n_1$  – показатель преломления воздуха.

Эффект полного внутреннего отражения можно наблюдать при переходе света из оптически более плотной среды в менее плотную. Из закона преломления света следует (см. рисунок 10, б), что

$$\frac{\sin i_{\text{кр}}}{\sin 90^\circ} = \frac{n_1}{n_2}.$$

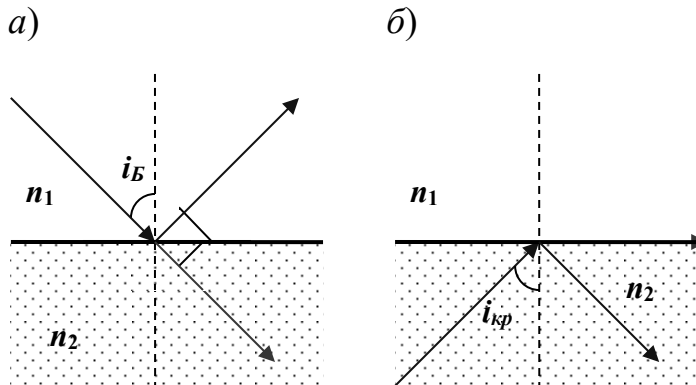


Рисунок 10 – Преломление света на границе раздела двух сред

Так как  $\sin 90^\circ = 1$ , то

$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{1}{\sin i_{\text{кр}}} \quad \text{или} \quad \text{tg } i_B = \frac{1}{\sin i_{\text{кр}}};$$

$$i_B = \arctg\left(\frac{1}{\sin i_{\text{кр}}}\right) = \arctg\left(\frac{1}{\sin 45^\circ}\right) = 54,74^\circ.$$

Ответ:  $54,74^\circ$ .

**Задача 7.** Никотин (чистая жидкость), содержащийся в стеклянной трубке длиной  $l = 8$  см, поворачивает плоскость поляризации желтого света натрия на угол  $\varphi = 137^\circ$ . Плотность никотина  $\rho = 1,01 \cdot 10^{-3}$  кг/м<sup>3</sup>. Определить удельное вращение  $\alpha_p$  никотина.

Дано:

$$l = 8 \cdot 10^{-2} \text{ м}$$

$$\rho = 1,01 \cdot 10^{-3} \text{ кг/м}^3$$

$$\varphi = 137^\circ = 2,39 \text{ рад}$$

$$\alpha_p - ?$$

Решение

Угол поворота плоскости поляризации оптически активными жидкостями определяется как

$$\varphi = \alpha_p \cdot \rho \cdot l.$$

Откуда

$$\alpha_p = \varphi / (\rho \cdot l).$$

$$\alpha = \frac{2,39}{1,01 \cdot 10^3 \cdot 8 \cdot 10^{-2}} = 29,6 \cdot 10^{-3} \text{ рад} \cdot \text{м}^3 / (\text{м} \cdot \text{кг}).$$

Ответ:  $29,6 \cdot 10^{-3} \text{ (рад} \cdot \text{м}^3) / (\text{м} \cdot \text{кг})$ .

### 3.3 Задачи для самостоятельного решения

1 На стеклянный клин с малым углом нормально к его грани падает параллельный пучок лучей монохроматического света с длиной волны  $0,6 \text{ мкм}$ . Число  $m$  возникающих при этом интерференционных полос, приходящихся на  $1 \text{ см}$ , равно  $10$ . Определить угол клина ( $\alpha = 2 \cdot 10^{-4} \text{ рад}$ ).

2 В опыте Юнга отверстия освещались монохроматическим светом с длиной волны  $6 \cdot 10^{-7} \text{ м}$ . Расстояния между отверстиями –  $1 \text{ мм}$  и расстояние от отверстия до экрана –  $3 \text{ м}$ . Найти положение трёх первых светлых полос ( $y_1 = 1,8 \text{ мм}$ ,  $y_2 = 3,6 \text{ мм}$ ,  $y_3 = 5,4 \text{ мм}$ ).

3 На диафрагму с круглым отверстием падает нормально параллельный пучок монохроматического света  $\lambda = 6 \cdot 10^{-7} \text{ м}$ . На экране наблюдается дифракционная картина. При каком наибольшем расстоянии между диафрагмой и экраном в центре дифракционной картины ещё будет наблюдаться дифракционное пятно? Диаметр отверстия равен  $1,96 \text{ мм}$  ( $L_{\max} = 0,8 \text{ м}$ ).

4 Найти наибольший порядок в дифракционном спектре для желтой линии натрия  $\lambda = 5890 \text{ \AA}$ , если постоянная дифракционной решетки равна  $2 \text{ мкм}$  ( $k_{\max} = 3$ ).

5 Два николя  $N_1$  и  $N_2$  расположены так, что угол между их плоскостями пропускания составляет  $\alpha = 60^\circ$ . Определить, во сколько раз уменьшится интенсивность  $I_0$  естественного света: при прохождении через оба николя; при прохождении через один николь  $N_1$ . Коэффициент поглощения света в николе  $k = 0,05$ . Потери на отражение света не учитывать ( $I_0/I_1 = 2,1$ ;  $I_0/I_2 = 8,86$ ).

6 Пучок естественного света падает на полированную поверхность стеклянной пластины, погруженной в жидкость. Отраженный от пластины пучок света образует угол  $\varphi = 97^\circ$  с падающим пучком. Определить показатель преломления  $n_1$  жидкости, если отражённый свет максимально поляризован ( $n_1 = 1,33$ ).



## 4 Учебные материалы по разделу «Квантовая природа излучения»

### 4.1 Основные формулы

*Тепловое излучение и его характеристики:*

– спектральная плотность энергетической светимости (испускательной способности)

$$r_{\nu,T} = \frac{dW_{\nu,\nu+d\nu}}{dSdt d\nu} \left( r_{\nu,T} = \frac{\lambda^2}{c} r_{\lambda,T} \right);$$

– интегральная энергетическая светимость

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

*Законы теплового излучения:*

– формула Планка обобщает все законы теплового излучения

$$r_{\nu,T} = \frac{2\pi\nu^2}{c^2} \frac{h\nu}{e^{h\nu/(kT)} - 1};$$

– закон Кирхгофа для теплового излучения определяет соотношение между поглощательной  $A_{\nu,T}$  и испускательной способностью  $R_{\nu,T}$  тел

$$r_{\nu,T} = \frac{R_{\nu,T}}{A_{\nu,T}};$$

– закон Стефана – Больцмана

$$R_e = \sigma T^4 \text{ или } R = \alpha \sigma T^4;$$

где  $\alpha$  – коэффициент нечерноты;

– формула Рэлея – Джинса

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

– закон смещения Вина

$$\lambda_{\max} = \frac{b}{T}; r(\lambda,T)_{\max} = cT^5; b = 2,9 \cdot 10^3 \text{ м} \cdot \text{К}; c = 1,3 \cdot 10^{-5} \text{ Вт}/(\text{м}^3 \cdot \text{К}^5).$$

С ростом температуры максимум смещается в коротковолновую

область (рисунок 11).

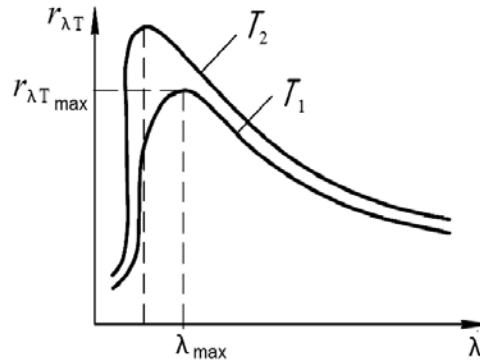


Рисунок 11 – Распределение энергии в спектре излучения АЧТ ( $T_2 > T_1$ )

**Фотоэффект:**

– уравнение Эйнштейна для внешнего фотоэффекта

$$h\nu = A + \frac{m v_{\max}^2}{2} \text{ или } h\nu = A + eU_3; \quad h(\nu - \nu_{кр}) = eU_3 \quad \left( \nu = \frac{c}{\lambda} \right);$$

– красная граница фотоэффекта

$$\nu_{кр} = \frac{A}{h} \text{ или } \lambda = \frac{hc}{A}.$$

На основе анализа зависимости задерживающего потенциала от частоты света (рисунок 12) можно определить постоянную Планка, используя выражение

$$\frac{\Delta(eU_3)}{\nu - \nu_{кр}} = h.$$

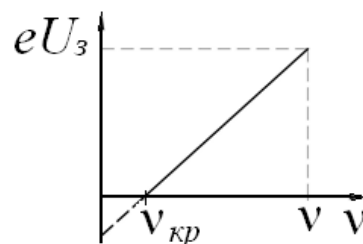


Рисунок 12 – Зависимость задерживающего потенциала от частоты света

Эффект Комптона – упругое рассеяние коротковолнового электромагнитного излучения на слабосвязанных электронах (рисунок 13).

Изменение длины волны фотона при комптоновском рассеянии

$$\lambda' - \lambda = \frac{h}{m_e c} (1 - \cos \theta) \text{ или } \lambda' - \lambda = 2 \frac{h}{m_e c} \sin^2 \frac{\theta}{2}, \text{ или } \Delta \lambda = 2 \Lambda_K \sin^2 \frac{\theta}{2},$$

где  $\Lambda_K = 2,43 \cdot 10^{-12}$  м.

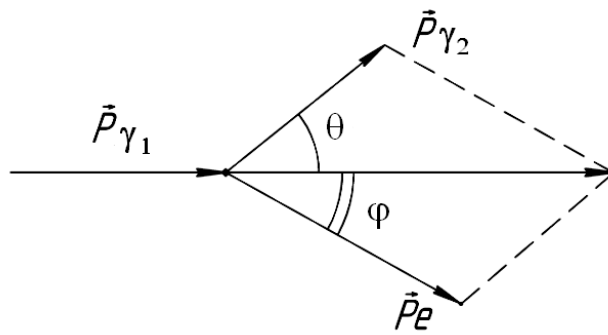


Рисунок 13 – Схема комптоновского рассеяния

В процессе столкновения выполняются законы сохранения энергии и импульса. Этот эффект не может наблюдаться в видимой области спектра, т. к. энергия фотона сравнима с энергией электрона в атоме.

*Давление света.*

При нормальном падении на поверхность давление света

$$p = \frac{E_e}{c}(1 + \rho) = w(1 + \rho),$$

где  $E_e$  – энергетическая освещенность (энергия фотонов, падающих на единицу поверхности в единицу времени);

$w$  – объемная плотность энергии излучения,  $w = \frac{E_e}{c}$ ;

$\rho$  – коэффициент отражения ( $\rho_{\text{зерк}} = 1$ ;  $\rho_{\text{защер}} = 0$ ).

#### 4.2 Примеры решения задач

**Задача 1.** С поверхности сажи площадью  $S = 2 \text{ см}^2$  при температуре  $T = 400 \text{ К}$  за время  $t = 5 \text{ мин}$  излучается энергия  $W = 83 \text{ Дж}$ . Определить коэффициент черноты сажи  $\alpha$ .

Дано:

$$S = 2 \text{ см}^2 = 2 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$$

$$T = 400 \text{ К}$$

$$t = 300 \text{ с}$$

$$W = 83 \text{ Дж}$$

$$\alpha = ?$$

Решение

Интегральная энергетическая светимость (излучательность) – энергия, излучаемая с единицы площади тела за единицу времени во всем диапазоне длин волн

$$R_s = W/(S \cdot t).$$

Излучательность серого тела

$$R_3 = \alpha \cdot \sigma \cdot T^4,$$

где  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$  Вт/К.

Откуда

$$\alpha = \frac{W}{S \cdot t \cdot \sigma \cdot T^4} = \frac{83}{2 \cdot 10^{-4} \cdot 300 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot 400^4} = 0,953.$$

Ответ: 0,953.

**Задача 2.** Вследствие изменения температуры абсолютно черного тела максимум спектральной плотности испускательной способности сместился с  $\lambda_1 = 2,4$  мкм на  $\lambda_2 = 0,8$  мкм. Как и во сколько раз изменилась излучательность  $R_3$  тела?

Дано:

$$\lambda_1 = 2,4 \cdot 10^{-6} \text{ м}$$

$$\lambda_2 = 0,8 \cdot 10^{-6} \text{ м}$$

$$R_2/R_1 - ?$$

Решение

Излучательность абсолютно чёрного тела пропорциональна  $T^4$  (закон Стефана – Больцмана), тогда:

$$R_2 = \sigma \cdot T_2^4; \quad R_1 = \sigma \cdot T_1^4,$$

а их отношение

$$\frac{R_2}{R_1} = \left( \frac{T_2}{T_1} \right)^4.$$

Согласно закону Вина длина волны, соответствующая максимуму спектральной плотности излучательной способности,

$$\lambda_1 = \frac{b}{T_1}; \quad \lambda_2 = \frac{b}{T_2}.$$

Откуда

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \quad \text{и} \quad \frac{R_2}{R_1} = \left( \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \right)^4 = \left( \frac{2,4 \cdot 10^{-6}}{0,8 \cdot 10^{-6}} \right)^4 = 81.$$

Ответ: увеличится в 81 раз.

**Задача 3.** На поверхность лития падает монохроматический свет ( $\lambda = 310$  нм). Чтобы прекратить эмиссию электронов, нужно приложить задерживающую резкость потенциалов  $U$  не менее 1,7 В. Определить работу выхода  $A_{\text{вых}}$ ?

<p><i>Дано:</i></p> $\lambda = 310 \cdot 10^{-9} \text{ м}$ $U_3 = 1,7 \text{ В}$ <hr/> $A_{\text{вых}} - ?$	<p><i>Решение</i></p> <p>Из уравнения Эйнштейна для фотоэффекта следует</p> $h \cdot \frac{c}{\lambda} = A_{\text{вых}} + E_{\text{max}}.$
--	--

Максимальная энергия электрона равна работе тормозящего электрического поля  $E_{\text{max}} = e \cdot U_3$ , поэтому

$$A_{\text{вых}} = h \cdot \frac{c}{\lambda} - e \cdot U_3;$$

$$A_{\text{вых}} = 6,625 \cdot 10^{-34} \cdot (3 \cdot 10^8) / (310 \cdot 10^{-9}) - 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 1,7 = 3,69 \cdot 10^{-19} \text{ Дж.}$$

Ответ:  $3,69 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$ .

**Задача 4.** Определить энергию  $\epsilon$ , массу  $m$  и импульс  $p$  фотона, которому соответствует длина волны  $\lambda = 380 \text{ нм}$  (фиолетовая граница видимого спектра). Сравнить массу фотона с массой покоя электрона.

<p><i>Дано:</i></p> $\lambda = 310 \cdot 10^{-9} \text{ м}$ <hr/> $\epsilon - ?$ $m - ?$ $p - ?$ $m/m_e - ?$	<p><i>Решение</i></p> <p>Энергия фотона</p> $\epsilon = h c / \lambda = 6,625 \cdot 10^{-34} \cdot (3 \cdot 10^8) / (380 \cdot 10^{-9}) = 5,23 \cdot 10^{-19} \text{ Дж.}$ <p>Масса фотона</p> $m = h / (c \cdot \lambda) = (6,625 \cdot 10^{-34}) / (3 \cdot 10^8 \cdot 380 \cdot 10^{-9}) = 5,8 \cdot 10^{-36} \text{ кг.}$
--	---

Импульс фотона

$$p = h / \lambda = (6,625 \cdot 10^{-34}) / (380 \cdot 10^{-9}) = 1,74 \cdot 10^{-27} \text{ кг} \cdot \text{м/с.}$$

Сравним массу фотона с массой покоя электрона:

$$m/m_e = (5,8 \cdot 10^{-36}) / (9,1 \cdot 10^{-31}) = 6,37 \cdot 10^{-6}.$$

Ответ:  $5,23 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$ ;  $5,8 \cdot 10^{-36} \text{ кг}$ ;  $1,74 \cdot 10^{-27} \text{ кг} \cdot \text{м/с}$ ;  $6,37 \cdot 10^{-6}$ .

**Задача 5.** Давление  $p$  монохроматического света ( $\lambda = 600 \text{ нм}$ ) на чёрную поверхность, расположенную перпендикулярно падающим лучам, равно  $0,1 \text{ мкПа}$ . Определить число  $N$  фотонов, падающих за время  $t = 1 \text{ с}$  на поверхность площадью  $1 \text{ см}^2$ .

Дано:

$$\begin{aligned} \lambda &= 600 \cdot 10^{-9} \text{ м} \\ p &= 0,1 \cdot 10^{-6} \text{ Па} \\ t &= 1 \text{ с} \\ S &= 10^{-4} \text{ м}^2 \\ \hline N &= ? \end{aligned}$$

Решение

Давление света на чёрную поверхность ( $\rho = 0, k = 0$ )

$$p = E_3/c.$$

Облучённость поверхности

$$E_3 = \frac{W}{S \cdot t} = \frac{N \cdot \varepsilon}{S \cdot t} = \frac{N \cdot h \cdot \frac{c}{\lambda}}{S \cdot t},$$

где  $\varepsilon$  – энергия фотона,  $\varepsilon = h\nu$ .

Тогда  $p = \frac{N \cdot h}{\lambda \cdot S \cdot t}$ , откуда  $N = \frac{\lambda \cdot S \cdot t \cdot p}{h}$ .

$$N = \frac{0,1 \cdot 10^{-6} \cdot 600 \cdot 10^{-9} \cdot 10^{-4}}{6,625 \cdot 10^{-34}} = 9,06 \cdot 10^{15}.$$

Ответ:  $9,06 \cdot 10^{15}$ .

**Задача 6.** Фотон с энергией  $\varepsilon = 0,25$  МэВ рассеялся на свободном электроне. Энергия  $\varepsilon^1$  рассеянного фотона равна  $0,2$  МэВ. Определить угол рассеяния  $\theta$ .

Дано:

$$\begin{aligned} \varepsilon &= 4 \cdot 10^{-14} \text{ Дж} \\ \varepsilon^1 &= 3,2 \cdot 10^{-14} \text{ Дж} \\ \hline \theta &= ? \end{aligned}$$

Решение

Согласно формуле Комптона

$$\lambda = \lambda^1 - \lambda = 2 \cdot \frac{h}{m_0 \cdot c} \cdot \sin^2 \frac{\Theta}{2}.$$

Определим  $\lambda$  и  $\lambda^1$  через энергию падающего и рассеянного фотонов:

$$\lambda = \frac{h \cdot c}{\varepsilon}; \quad \lambda^1 = \frac{h \cdot c}{\varepsilon^1};$$

$$\frac{h \cdot c}{\varepsilon^1} - \frac{h \cdot c}{\varepsilon} = 2 \cdot \frac{h}{m_0 \cdot c} \cdot \sin^2 \frac{\Theta}{2};$$

$$\sin^2 \frac{\Theta}{2} = \frac{m_0 \cdot c^2}{2} \cdot \left( \frac{1}{\varepsilon^1} - \frac{1}{\varepsilon} \right).$$

Проведем вычисление:

$$\sin^2 \frac{\Theta}{2} = \frac{9,1 \cdot 10^{-31} \cdot (3 \cdot 10^8)^2}{2} \cdot \left( \frac{1}{3,2 \cdot 10^{-14}} - \frac{1}{4 \cdot 10^{-14}} \right) = 0,256,$$

откуда  $\Theta = 60,78^\circ$ .

Ответ:  $\Theta = 60,78^\circ$ .

### 4.3 Задачи для самостоятельного решения

1 Длина волны  $\lambda_m$ , на которую приходится максимум в спектре излучения АЧТ, равна 0,58 мкм. Определить максимальную плотность (спектральную) излучательности  $r_{\lambda,T \max}$ , рассчитанную на интервал длин волн  $\Delta\lambda = 1$  нм вблизи  $\lambda_m$  ( $r_{\lambda,T \max} = 40,6$  кВт/(м·нм)).

2 Вольфрамовая нить диаметром 0,1 мм соединена последовательно с другой вольфрамовой нитью. Нити накаливаются в вакууме током, причём первая нить имеет температуру 2000 К, а вторая – 3000 К. Каков диаметр второй нити ( $d_2 = 0,063$  мм)?

3 Наблюдается внешний фотоэффект на фотоэлементе с цезиевым катодом. Длина волны падающего излучения  $\lambda = 0,331$  мкм. Работа выхода для цезия  $A_e = 1,89$  эВ. Найти импульс вылетающего электрона  $p_e$  и импульс  $p_k$ , получаемый катодом при вылете одного электрона. Электроны вылетают навстречу падающему свету нормально к поверхности катода ( $p_e = 7,4 \cdot 10^{-25}$  кг·м/с,  $p_k = 7,33 \cdot 10^{-25}$  кг·м/с).

4 Для прекращения фотоэффекта, вызванного облучением ультрафиолетовым светом платиновой пластинки, нужно приложить задерживающую разность потенциалов  $U_3 = 3,7$  В. Если платиновую пластинку заменить другой пластинкой, то задерживающую разность потенциалов придётся увеличить до 6 В. Определить работу  $A_{\text{вых}}$  выхода электронов с поверхности этой пластинки ( $A_{\text{вых}} = 4$  эВ).

5 Пучок монохроматического света с длиной волны  $\lambda = 663$  нм падает нормально на зеркальную поверхность. Поток энергии  $\Phi = 0,6$  Вт. Определить силу  $F$  давления, испытываемую этой поверхностью, а также число  $N$  фотонов, падающих на неё за время  $t = 5$  с ( $F = 4$  нН,  $N = 10^{19}$ ).

6 На зеркальце с идеальной отражающей поверхностью площадью  $S = 1,5$  см<sup>2</sup> падает нормально свет от электрической дуги. Определить импульс  $p$ , полученный зеркальцем, если поверхностная плотность потока излучения  $\phi$ , падающего на зеркальце, равна 0,1 мВт/м<sup>2</sup>. Продолжительность облучения 1 с ( $\Delta p = 10^{-7}$  кг·м/с).

7 Энергия рентгеновских лучей равна 0,6 МэВ. Найти энергию электрона отдачи, если известно, что длина волны рентгеновских лучей после комптоновского рассеяния изменилась на 20 % ( $T = 0,1$  МэВ).

8 Фотон с энергией  $\varepsilon = 0,75$  МэВ рассеялся на свободном электроны под углом  $\theta = 60^\circ$ . Принимая, что кинетическая энергия и импульс электрона до соударения с фотоном были пренебрежимо малы, определить: энергию  $\varepsilon'$

рассеянного фотона; кинетическую энергию  $T$  электрона отдачи; направление его движения ( $\varepsilon' = 0,43$  МэВ,  $T = 0,32$  МэВ,  $\varphi = 35^\circ$ ).

## 5 Учебные материалы по разделу «Элементы атомной физики, квантовой механики и физики твердого тела»

### 5.1 Основные понятия и формулы

*Боровская теория водородоподобного атома.* Момент импульса электрона (второй постулат Бора)

$$L_n = \hbar n \text{ или } mV_n r_n = \hbar n,$$

где  $m$  – масса электрона;  
 $V_n$  – скорость электрона на  $n$ -й орбите;  
 $r_n$  – радиус  $n$ -й стационарной орбиты;

$$\hbar = h / 2\pi;$$

$h$  – постоянная Планка;  
 $n$  – главное квантовое число,  $n = 1, 2, 3, \dots$ .  
 Радиус  $n$ -й стационарной орбиты

$$r_n = a_0 n^2,$$

где  $a_0$  – первый боровский радиус.  
 Энергия электрона в атоме водорода

$$E_n = E_i / n^2,$$

где  $E_i$  – энергия ионизации атома водорода.  
 Энергия, излучаемая или поглощаемая атомом водорода,

$$\varepsilon = \hbar\omega = E_{n_2} - E_{n_1}$$

или

$$\varepsilon = E_i \left( 1/n_1^2 - 1/n_2^2 \right),$$

где  $n_1, n_2$  – квантовые числа, соответствующие энергетическим уровням, между которыми совершается переход электрона в атоме.

Спектроскопическое волновое число

$$\tilde{\nu} = 1/\lambda = R \left( 1/n_1^2 - 1/n_2^2 \right),$$

где  $\lambda$  – длина волны излучения или поглощения атомом;  
 $R$  – постоянная Ридберга.



*Волновые свойства частиц. Длина волны де Бройля*

$$\lambda = h/p,$$

где  $p$  – импульс частицы.

*Импульс частицы и его связь с кинетической энергией  $T$ :*

$$p = m_0V; \quad p = \sqrt{2m_0T};$$

$$p = mV = \frac{m_0V}{\sqrt{1-(V/c)^2}}; \quad p = \frac{1}{c}\sqrt{(2E_0 + T)T},$$

где  $m_0$  – масса покоя частицы;

$m$  – релятивистская масса;

$V$  – скорость частицы;

$c$  – скорость света в вакууме;

$E_0$  – энергия покоя частицы,  $E_0 = m_0 c^2$ .

*Соотношение неопределенностей:*

– для координаты и импульса

$$\Delta p_x \Delta x \geq \hbar,$$

где  $\Delta p_x$  – неопределенность проекции импульса на ось  $X$ ;

$\Delta x$  – неопределенность координаты;

– для энергии и времени

$$\Delta E \Delta t \geq \hbar,$$

где  $\Delta E$  – неопределенность энергии;

$\Delta t$  – время жизни квантовой системы в данном энергетическом состоянии.

*Одномерное уравнение Шредингера для стационарных состояний*

$$\frac{d^2\psi}{dx^2} + \frac{2m}{\hbar^2}(E - U)\psi(x) = 0,$$

где  $\psi(x)$  – волновая функция, описывающая состояние частицы;

$m$  – масса частицы;

$E$  – полная энергия;

$U$  – потенциальная энергия частицы.

*Плотность вероятности*

$$\frac{dw(x)}{dx} = |\psi(x)|^2,$$

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

Вероятность обнаружения частицы в интервале от  $x_1$  до  $x_2$

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

Решение уравнения Шредингера для одномерного, бесконечно глубокого, прямоугольного потенциального ящика имеет вид:

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

(собственная нормированная волновая функция) для собственного значения энергии  $E_n = \frac{\pi^2 \hbar^2 n^2}{2ml^2}$ . Здесь  $n$  – квантовое число ( $n = 1, 2, 3, \dots$ ), а  $l$  – ширина ящика. В областях  $x \leq 0$  и  $x \geq l$  функции  $U = \infty$  и  $\Psi(x) = 0$ .

Элементы квантовой статистики. Распределение свободных электронов в металле по энергиям при 0 К имеет вид:

$$dn(\varepsilon) = \frac{1}{2\pi^2} \left( \frac{2m}{\hbar^2} \right)^{3/2} \varepsilon^{1/2} d\varepsilon,$$

где  $dn(\varepsilon)$  – концентрация электронов, энергия которых заключена в пределах от  $\varepsilon$  до  $\varepsilon + d\varepsilon$ ;

$m$  – масса электрона.

Это выражение справедливо при  $\varepsilon < \varepsilon_F$  (где  $\varepsilon_F$  – энергия Ферми).

Энергия Ферми в металле при  $T = 0$  К

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

где  $n$  – концентрация электронов в металле.

## 5.2 Примеры решения задач

**Задача 1.** Электрон в атоме водорода перешел с четвертого уровня на второй. Определить энергию испущенного при этом фотона.

Дано:

$$n_1 = 2$$

$$n_2 = 4$$

$$\varepsilon = ?$$

Решение

Для определения энергии фотона воспользуемся сериальной формулой для водородоподобных ионов

$$1/\lambda = RZ^2 (1/n_1^2 - 1/n_2^2),$$

где  $\lambda$  – длина волны фотона;

$R$  – постоянная Ридберга;

$Z$  – заряд ядра в относительных единицах (при  $Z = 1$  формула переходит в сериальную формулу для водорода);

$n_1$  – номер орбиты, на которую перешел электрон;

$n_2$  – номер орбиты, с которой перешел электрон ( $n_1, n_2$  – главные квантовые числа).

Энергия фотона  $\varepsilon$  выражается формулой

$$\varepsilon = hc/\lambda.$$

Поэтому, умножив обе части равенства на  $hc$ , получим выражение для энергии фотона

$$\varepsilon = RhcZ^2(1/n_1^2 - 1/n_2^2).$$

Так как  $Rhc$  есть энергия ионизации  $E_i$  атома водорода, то

$$\varepsilon = E_i Z^2 (1/n_1^2 - 1/n_2^2).$$

Вычисления выполним во внесистемных единицах ( $E_i = 13,6$  эВ;  $Z = 1$ ;  $n_1 = 2$ ;  $n_2 = 4$ ):

$$\varepsilon = 13,6 \cdot 1^2 (1/2^2 - 1/4^2) = 13,6 \cdot 3/16 = 2,25 \text{ эВ}.$$

Ответ: 2,25 эВ.

**Задача 2.** Электрон, начальной скоростью которого можно пренебречь, прошел ускоряющую разность потенциалов  $U$ . Найти длину волны де Бройля электрона для двух случаев:  $U_1 = 51$  В и  $U_2 = 510$  кВ.

<p>Дано:</p> <p><math>U_1 = 51</math> В</p> <p><math>U_2 = 510 \cdot 10^3</math> В</p> <hr style="width: 100%;"/> <p><math>\lambda - ?</math></p>	<p>Решение</p> <p>Длина волны де Бройля для частицы зависит от ее импульса <math>p</math> и определяется формулой</p> $\lambda = h/p,$
---	--

где  $h$  – постоянная Планка.

Импульс частицы можно определить, если известна ее кинетическая энергия  $T$ . Связь импульса с кинетической энергией различна для нерелятивистского случая (когда кинетическая энергия частицы много меньше ее энергии покоя) и для релятивистского случая (когда кинетическая энергия сравнима с энергией покоя частицы).

В нерелятивистском случае

$$p = \sqrt{2m_0T},$$

где  $m_0$  – масса покоя частицы.

В релятивистском случае

$$p = \frac{1}{c} \sqrt{(2E_0 + T)T},$$

где  $E_0$  – масса покоя частицы,  $E_0 = m_0$ .

С учетом формулы для длины волны де Бройля получаем:

– в нерелятивистском случае

$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{2m_0T}};$$

– в релятивистском случае

$$\lambda = \frac{hc}{\sqrt{(2E_0 + T)T}}.$$

Сравним кинетические энергии электрона, прошедшего заданные в условии задачи разности потенциалов  $U_1 = 51$  В и  $U_2 = 510 \cdot 10^3$  В, с энергией покоя электрона и в зависимости от этого решим, какую из формул следует применить для вычисления длины волны де Бройля.

Как известно, кинетическая энергия электрона, прошедшего ускоряющую разность потенциалов  $U$ ,

$$T = eU.$$

В первом случае  $T_1 = eU_1 = 51$  эВ =  $0,51 \cdot 10^{-4}$  МэВ, что много меньше энергии покоя электрона  $E_0 = m_0c^2 = 0,511$  МэВ. Следовательно, можно применить нерелятивистскую формулу. Для упрощения расчетов заметим, что  $T_1 = 10^{-4} m_0c^2$ . Подставив это выражение в формулу для длины волны, перепишем ее в виде

$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{2m_0 \cdot 10^{-4} \cdot m_0c^2}} = \frac{10^2}{\sqrt{2}} \cdot \frac{h}{m_0c}.$$

Учитывая, что  $h/m_0c$  есть комптоновская длина волны  $\lambda_K$ , получаем

$$\lambda_1 = 10^2 \lambda_K / \sqrt{2}.$$

Так как  $\lambda_K = 2,43$  пм, то

$$\lambda_1 = 10^2 \cdot 2,43 / \sqrt{2} = 171 \text{ пм}.$$

Во втором случае кинетическая энергия  $T_2 = eU_2 = 510$  кэВ =  $0,51$  МэВ, т. е. равна энергии покоя электрона. Следовательно, необходимо применить релятивистскую формулу. Учитывая, что  $T_2 = 0,51$  МэВ =  $m_0c^2$ , находим

$$\lambda_2 = \frac{h}{\sqrt{(2m_0c^2 + m_0c^2)m_0c^2} / c} = \frac{h}{\sqrt{3}m_0c},$$

или

$$\lambda_2 = \lambda_K / \sqrt{3}.$$

Подставим значение  $\lambda_K$  и проведем вычисления:

$$\lambda_2 = 2,43 / \sqrt{3} = 1,40 = 1,4 \cdot 10^{-12} \text{ м.}$$

Ответ:  $\lambda_1 = 171$  пм;  $\lambda_2 = 1,40$  пм.

**Задача 3.** Кинетическая энергия электрона в атоме водорода составляет величину около 10 эВ. Используя соотношение неопределенностей, оценить минимальные линейные размеры атома.

Дано:

$$T = 10 \text{ эВ} = 1,6 \cdot 10^{-18} \text{ Дж}$$

$$m = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$$

$$l_{\min} - ?$$

Решение

Соотношение неопределенностей для координаты и импульса имеет вид:

$$\Delta x \Delta p_x \geq \hbar,$$

где  $\Delta x$  – неопределенность координаты электрона;

$\hbar$  – постоянная Планка;

$\Delta p_x$  – неопределенность компоненты импульса частицы (электрона).

Из соотношения неопределенностей следует, что чем точнее определяется положение частицы в пространстве, тем более неопределенным становится ее импульс, а следовательно, и энергия частицы. Пусть атом имеет линейные размеры  $l$ . Тогда электрон атома будет находиться где-то в пределах области с неопределенностью

$$\Delta x = l/2.$$

Соотношение неопределенностей можно записать в виде

$$(l/2) \Delta p_x \geq \hbar,$$

откуда

$$l \geq 2\hbar / \Delta p_x.$$

Физически разумная неопределенность импульса  $\Delta p_x$  во всяком случае не должна превышать значения самого импульса  $p_x$ , т. е.  $\Delta p_x \leq p_x$ . Импульс  $p_x$  связан с кинетической энергией  $T$  соотношением  $p_x = \sqrt{2mT}$ . Заменим  $\Delta p_x$  значением  $\sqrt{2mT}$  (такая замена не увеличит  $l$ ).

Переходя к равенству, получим

$$l_{\min} = 2\hbar / \sqrt{2mT}.$$

Проверим, дает ли полученная формула единицу длины:

$$\frac{[\hbar]}{([m][T])^{1/2}} = \frac{\text{Дж} \cdot \text{с}}{(\text{кг} \cdot \text{Дж})^{1/2}} = \left(\frac{\text{Дж}}{\text{кг}}\right)^{1/2} \cdot \text{с} = \left(\frac{\text{кг} \cdot \text{м}^2 / \text{с}^2}{\text{кг}}\right)^{1/2} \cdot \text{с} = \text{м}.$$

Найденная единица является единицей длины.

Проведем вычисления:

$$l_{\min} = \frac{2 \cdot 1,05 \cdot 10^{-34}}{\sqrt{2 \cdot 9,1 \cdot 10^{-31} \cdot 1,6 \cdot 10^{-18}}} = 1,24 \cdot 10^{-10} \text{ м} = 124 \text{ пм}.$$

Ответ: 124 пм.

**Задача 4.** Волновая функция, описывающее состояние частицы в бесконечно глубокой прямоугольной потенциальной яме шириной  $l$  имеет вид  $\psi_n(x) = \sqrt{\frac{2}{l}} \sin \frac{\pi n x}{l}$ . Вычислить вероятность нахождения частицы, находящейся в основном состоянии, в средней трети потенциальной ямы ( $l/3 \leq x \leq 2l/3$ ).

Дано:

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

$$n = 1$$

$$l/3 \leq x \leq 2l/3$$

$W - ?$

Решение

Так как частица находится в основном состоянии ( $n$  – главное квантовое число), а вероятность обнаружить частицу в интервале от  $x_1$  до  $x_2$  определяется как

$$w = \int_{x_1}^{x_2} |\psi(x)|^2 dx,$$

то в данном случае интегрирование ведется в пределах  $l/3 \leq x \leq 2l/3$ :

$$w = \frac{2}{l} \int_{l/3}^{2l/3} \sin^2 \left( \frac{\pi x}{l} \right) dx.$$

Проинтегрируем выражение

$$\begin{aligned} w &= \frac{2}{l} \int_{l/3}^{2l/3} \sin^2 \left( \frac{\pi x}{l} \right) dx = \frac{2}{l} \int_{l/3}^{2l/3} \frac{1}{2} \left( 1 - \cos \left( \frac{2\pi x}{l} \right) \right) dx = \frac{1}{l} \left\{ \left[ x \right]_{l/3}^{2l/3} - \left[ \frac{l}{2\pi} \sin \left( \frac{2\pi x}{l} \right) \right]_{l/3}^{2l/3} \right\} = \\ &= \frac{1}{l} \left\{ \frac{2l}{3} - \frac{l}{3} - \frac{l}{2\pi} \left[ \sin \frac{4\pi}{3} - \sin \frac{2\pi}{3} \right] \right\} = \left\{ \frac{1}{3} - \frac{1}{2\pi} \left[ -\frac{\sqrt{3}}{2} - \frac{\sqrt{3}}{2} \right] \right\} = \frac{1}{3} + \frac{\sqrt{3}}{2\pi}. \end{aligned}$$

Вычисляем

$$w = \frac{1}{3} + \frac{\sqrt{3}}{2 \cdot 3,14} = 0,609.$$

Ответ:  $w = 0,609$ .

### 5.3 Задачи для самостоятельного решения

1 Электрон в невозбужденном атоме водорода получил энергию 12,1 эВ. На какой энергетический уровень он перешел? Сколько линий спектра могут излучиться при переходе электрона на более низкие энергетические уровни?

2 Определить энергию  $\varepsilon$  фотона, испускаемую при переходе электрона в атоме водорода с третьего энергетического уровня на основной.

3 Фотон с энергией  $\varepsilon = 16,5$  эВ выбил электрон из невозбужденного атома водорода. Какую скорость будет иметь электрон вдали от ядра атома?

4 Атомарный водород, возбужденный светом определенной длины волны, при переходе в основное состояние испускает только три спектральных линии. Определить длины волн этих линий.

5 Во сколько раз увеличится радиус орбиты электрона у атома водорода, находящегося в основном состоянии, при возбуждении его квантом с энергией 12,09 эВ?

6 При каком значении скорости дебройлевская длина волны микрочастицы равна ее комптоновской длине волны?

7  $\alpha$ -частица движется по окружности радиусом 0,83 м в однородном магнитном поле, напряженность которого равна 19,9 кА/м. Найти длину волны де Бройля для этой  $\alpha$ -частицы.

8 Протон обладает кинетической энергией, равной энергии покоя. Во сколько раз изменится длина волны де Бройля протона, если его кинетическая энергия возрастет в 2 раза?

9 Параллельный пучок электронов, разогнанных в электрическом поле с разностью потенциалов 15 В, падает на узкую прямоугольную диафрагму шириной 0,08 мм. Найти ширину главного дифракционного максимума на экране, расположенном на расстоянии 60 см от диафрагмы.

10 Определить относительную неопределенность  $\Delta p/p$  импульса движущейся частицы, если допустить, что неопределенность ее координаты равна длине волны де Бройля.

## 6 Учебные материалы по разделу «Элементы физики атомного ядра и элементарных частиц»

### 6.1 Основные понятия и формулы

*Ядерная физика.*

Энергия связи атомного ядра

$$E_{св} = \Delta mc^2 = [Zm_p + (A - Z)m_n - m_{я}] \cdot c^2 = [Zm_H + (A - Z)m_n - M_A] \cdot c^2.$$

Дефект массы  $\Delta m = E_{св} / c^2$ .

Спин ядра – векторная сумма спинов нуклонов и орбитальных моментов

импульса нуклонов:  $L_{\text{я}} = \hbar \sqrt{I(I+1)}$ , где  $I$  – спиновое квантовое число (0; 1/2; 1; 2/3; ...).

Закон радиоактивного распада

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

где  $N$  – число нераспавшихся к моменту времени  $t$  ядер;

$N_0$  – начальное число ядер;

$\lambda_p$  – постоянная распада.

При радиоактивном распаде выполняются закон сохранения электрических зарядов и закон сохранения масс.

*Виды радиоактивных распадов:*

$\alpha$ -распад:  ${}_Z^A X = {}_{Z-2}^{A-4} Y + {}_2^4 He$  ( $Z$  – зарядовое число (число протонов);

$A$  – массовое число (число протонов и нейтронов));

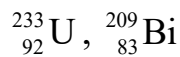
$\beta^-$ -распад:  ${}_Z^A X = {}_{Z-2}^{A-4} Y + {}_2^4 He$  ( ${}_0^1 n \rightarrow {}_1^1 p + {}_{-1}^0 e + \tilde{\nu}$ );

$\beta^+$ -распад:  ${}_Z^A X = {}_{Z-1}^{A-4} Y + {}_1^0 e$  ( ${}_1^1 p \rightarrow {}_0^1 n + {}_{+1}^0 e + {}_0^0 \nu$ ).

## 6.2 Примеры решения задач

**Задача 1.** Сколько  $\alpha$ - и  $\beta$ -частиц выбрасывается при превращении ядра урана  ${}_{92}^{233} U$  в ядро висмута  ${}_{83}^{209} Bi$ ?

Дано:

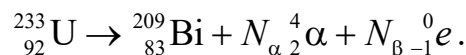


$N_\alpha = ?$

$N_\beta = ?$

Решение

Запишем реакцию превращения ядра при радиоактивном распаде:



Согласно законам сохранения зарядовых и массовых чисел:

$$233 = 209 + 4 N_\alpha;$$

$$92 = 83 + 2N_\alpha + (-1) N_\beta.$$

Решая уравнения совместно, получаем  $N_\alpha = 6$ ,  $N_\beta = 3$ .

Ответ:  $N_\alpha = 6$ ;  $N_\beta = 3$ .

**Задача 2.** За какое время  $t$  распадается 1/4 начального количества ядер радиоактивного изотопа, если период его полураспада  $T_{1/2} = 24$  ч?



Дано:

$$\Delta N = 1/4 N_0$$

$$T_{1/2} = 24 \text{ ч}$$

$$t = ?$$

Решение

Используя закон радиоактивного распада, получаем

$$\Delta N = N_0(1 - e^{-\lambda t}).$$

После подстановки значений имеем

$$\frac{1}{4} N_0 = N_0(1 - e^{-\lambda t}).$$

После логарифмирования

$$e^{-\lambda t} = \frac{3}{4}.$$

Получаем

$$t = \frac{\ln(4/3)}{\lambda}.$$

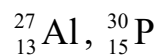
Учитывая, что  $\lambda = \frac{\ln 2}{T_{1/2}}$ , имеем

$$t = \frac{\ln(4/3)}{\ln 2} T_{1/2} = 24 \frac{\ln(4/3)}{\ln 2} = 9,96 \text{ ч}.$$

Ответ: 9,96 ч.

**Задача 3.** При бомбардировке изотопа алюминия  ${}_{13}^{27}\text{Al}$   $\alpha$ -частицами получается радиоактивный изотоп фосфора  ${}_{15}^{30}\text{P}$ , который затем распадается с выделением позитрона. Написать уравнения обеих реакций. Найти удельную активность полученного изотопа, если известно, что период его полураспада равен 130 с.

Дано:

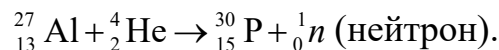


$$T_{1/2} = 130 \text{ с}$$

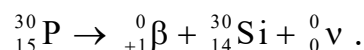
$$A = ?$$

Решение

Запишем уравнение ядерной реакции



Самопроизвольный  $\beta^+$  распад



Активность изотопа фосфора

$$a = \frac{A}{m} = \frac{\lambda N_0}{m};$$

$$N_0 = \frac{m}{\mu} N_A; \quad \lambda = \frac{\ln 2}{T_{1/2}},$$

где  $\mu$  – молярная масса,  $\mu = 30 \cdot 10^{-3}$  кг/моль;  
 $N_A$  – число Авогадро,  $N_A = 6,02 \cdot 10^{23}$  моль $^{-1}$ .  
 После подстановки получим

$$\lambda = \frac{\ln 2 N_A}{T_{1/2} \mu} = \frac{\ln 2 \cdot 6,02 \cdot 10^{23}}{130 \cdot 30 \cdot 10^{-3}} = 1,07 \cdot 10^{23} \text{ Бк/кг.}$$

Ответ:  $1,07 \cdot 10^{23}$  Бк/кг

**Задача 4.** Энергия связи  $E_{св}$  ядра, состоящего из двух протонов и одного нейтрона, равна 7,72 МэВ. Определить массу  $m_a$  нейтрального атома, имеющего это ядро.

Дано:

$$E_{св} = 7,72 \text{ МэВ}$$

$$m_n = 1,00867 \text{ а. е. м.}$$

$$m_p = 1,00783 \text{ а. е. м.}$$

$$Z = 2$$

$$A - Z = 1$$


---


$$m_a - ?$$

Решение

Энергия связи атомных ядер  $E_{св} = \Delta m c^2$ .

С учетом пересчетного коэффициента  
 $c^2 = 931,5 \text{ МэВ/а. е. м.}$

$$E_{св} = \Delta m \cdot 931,5 \text{ ю}$$

Учитывая, что дефект массы ядра

$$\Delta m = (Zm_p + (A - Z)m_n - m_a),$$

получаем

$$E_{св} = 931,5(2m_p + m_n - m_a).$$

Откуда

$$m_a = \frac{E_{св}}{931,5} + 2m_p + m_n = \frac{7,72}{931,5} + 2 \cdot 1,00783 + 1,00867 = 3,03262 \text{ а. е. м.}$$

Масса нейтрального атома будет равна массе ядра (поправка на массу двух электронов сказывается на пятом знаке после запятой).

Ответ: 3,03262 а. е. м.

**Задача 5.** Определить суммарную кинетическую энергию  $T$  ядер, образовавшихся в результате реакции  ${}^{13}_6\text{C} + {}^2_1\text{H} \rightarrow {}^4_2\text{He} + {}^{11}_5\text{B}$ , если кинетическая энергия дейтерия  $T_H = 1,5$  МэВ, а ядро – мишень  ${}^{13}_6\text{C}$  – неподвижно.

<p><i>Дано:</i>  <math>m_C = 13,00335</math> а. е. м.  <math>m_H = 2,01410</math> а. е. м.  <math>m_\alpha = 4,0026</math> а. е. м.  <math>m_B = 11,00931</math> а. е. м.  <math>T_H = 1,5</math> МэВ</p> <hr/> <p><math>T - ?</math></p>	<p><i>Решение</i>  Энергетический выход ядерной реакции</p> $Q = 931,5[(m_C + m_H) - (m_\alpha + m_B)].$ <p>С другой стороны, т. к. масса покоя частиц, входящих в состав продуктов реакции, не меняется:</p> $Q = [(T_\alpha + T_B) - (T_C + T_H)],$
---	---

где  $T_\alpha$ ,  $T_B$ ,  $T_C$ ,  $T_H$  – кинетические энергии ядер, выходящих из реакции и вступающих в нее, при этом  $T_\alpha + T_B = T$ ,  $T_C + T_H = T_H$  ( $T_C = 0$ ).

Тогда  $Q = T - T_H$ , а следовательно,

$$T = T_H + 931,5[(m_C + m_H) - (m_\alpha + m_B)] = 1,5 + 931,5 \times \\ \times (13,00335 + 2,01410 - 4,0026 - 11,00931) = 6,66 \text{ МэВ}.$$

Ответ: 6,66 МэВ.

**Задача 6.** Определить энергию  $E$ , которая освободится при делении всех ядер, содержащихся в уране-235 массой 1 г.

<p><i>Дано:</i>  <math>m = 10^{-3}</math> кг  <math>\mu = 0,235</math> кг/моль</p> <hr/> <p><math>E - ?</math></p>	<p><i>Решение</i>  При делении одного ядра урана-235 (<math>{}^{235}_{92}\text{U}</math>) выделяется энергия <math>Q = 200</math> МэВ. Суммарная энергия</p> $E = N \cdot Q,$
--	---

где  $N$  – число ядер урана в 1 г,  $N = \frac{m}{\mu} N_A$ .

$$E = \frac{m}{\mu} N_A \cdot Q = \frac{10^{-3}}{235 \cdot 10^{-3}} \cdot 6,02 \cdot 10^{23} \cdot 200 = 5,12 \cdot 10^{23} \text{ МэВ} = 8,2 \cdot 10^{10} \text{ Дж}.$$

Ответ:  $8,2 \cdot 10^{10}$  Дж.

### 6.3 Задачи для самостоятельного решения

1 Определить начальную активность  $A_0$  радиоактивного магния  ${}^{27}\text{Mg}$  массой  $m = 0,2$  мкг, а также активность  $A$  по истечении времени  $t = 1$  ч. Предполагается, что все атомы изотопа радиоактивны ( $A_0 = 5,15 \cdot 10^{12}$  Бк,  $A = 8,05 \cdot 10^{10}$  Бк).

2 При определении периода полураспада  $T_{1/2}$  короткоживущего радиоактивного изотопа использован счётчик импульсов. За время  $\Delta t = 1$  мин в начале наблюдения ( $t = 0$ ) было насчитано  $\Delta n_1 = 250$  имп, а в момент времени  $t = 1$  ч – соответственно  $\Delta n_2 = 92$  имп. Определить постоянную радиоактивного распада  $\lambda$  и период полураспада  $T_{1/2}$  изотопа ( $\lambda = 1 \text{ ч}^{-1}$ ,  $T_{1/2} = 41,5$  мин).

3 За какое время  $t$  распадется  $1/4$  начального количества ядер радиоактивного изотопа, если период его полураспада  $T_{1/2} = 24$  ч ( $t = 10,5$  ч).

4 Какая часть начального количества радиоактивного нуклида распадётся за время  $t$ , равное средней продолжительности жизни  $\tau$  этого нуклида ( $\Delta N/N_0 = 63,3 \%$ )?

5 Точечный изотропный радиоактивный источник создаёт на расстоянии  $r = 1$  м интенсивность гамма-излучения, равную  $1,6 \text{ мВт/м}^2$ . Принимая, что при каждом акте распада ядра излучается один  $\gamma$ -фотон с энергией  $E = 1,33 \text{ МэВ}$ , определить активность  $A$  источника ( $A = 9,44 \cdot 10^{10}$  Бк).

6 Вычислить дефект массы  $\Delta m$  и энергию связи  $E_{св}$  ядра  ${}_{5}^{11}\text{В}$  ( $\Delta m = {}_1^1\text{H}0,08186$  а. е. м.,  $E_{св} = 12,2$  пДж).

7 Энергия связи  $E_{св}$  электрона с ядром невозбуждённого атома водорода  ${}^1_1\text{H}$  (энергия ионизации) равна  $13,6$  эВ. Определить, на сколько масса атома водорода меньше суммы масс свободных протона и электрона ( $\Delta m = 1,49 \cdot 10^{-8}$  а. е. м.).

8 Определить энергию  $E_{св}$ , которую нужно затратить для отрыва нейтрона от ядра  ${}_{11}^{23}\text{Na}$  ( $E_{св} = 1,99$  пДж).

## Список литературы

1 **Савельев, И. В.** Курс общей физики: учебное пособие: в 3 т. Т. 2: Электричество и магнетизм. Волны. Оптика / И. В. Савельев. – 15-е изд., стер. – Санкт-Петербург; Москва; Краснодар : Лань, 2019. – 500 с.

2 **Савельев, И. В.** Курс общей физики: учебное пособие: в 3 т. Т. 3: Квантовая оптика. Атомная физика / И. В. Савельев. – 13-е изд., стер. – Санкт-Петербург; Москва; Краснодар : Лань, 2019. – 320 с.

3 **Волькенштейн, В. С.** Сборник задач по общему курсу физики / В. С. Волькенштейн. – Москва : Наука, 2003. – 328 с.

4 **Ташлыкова-Бушкевич, И. И.** Физика: учебник: в 2 ч. Ч. 2 : Оптика. Квантовая физика. Строение и физические свойства вещества / И. И. Ташлыкова-Бушкевич. – 2-е изд., испр. – Минск : Вышэйшая школа, 2014. – 232 с.

5 **Трофимова, Т. И.** Курс физики. Задачи и решения : учебное пособие для втузов / Т. И. Трофимова, А. В. Фирсов. – Москва : Академия, 2004. – 592 с.

6 **Сена, Л. А.** Единицы физических величин и их размерность / Л. А. Сена. – Москва : Наука, 1988. – 432 с.

7 **Савельев, И. В.** Сборник вопросов и задач по общей физике / И. В. Савельев. – Москва: Наука, 1982. – 238 с.

8 **Иродов, И. Е.** Задачи по общей физике / И. Е. Иродов. – Москва: Наука, 1988. – 338 с.

## Приложение А (справочное)

Таблица А.1 – Основные физические постоянные (округленные значения)

Физическая постоянная	Обозначение	Значение
Нормальное ускорение свободного падения	$g$	9,81 м/с <sup>2</sup>
Гравитационная постоянная	$\gamma$	6,67·10 <sup>-11</sup> м <sup>3</sup> /(кг·с <sup>2</sup> )
Постоянная Авогадро	$N_A$	6,02·10 <sup>23</sup> моль <sup>-1</sup>
Молярная газовая постоянная	$R$	8,31 Дж/(моль·К)
Постоянная Больцмана	$k$	1,38·10 <sup>-3</sup> Дж/К
Элементарный заряд	$e$	1,60·10 <sup>-19</sup> Кл
Скорость света в вакууме	$c$	3,00·10 <sup>8</sup> м/с
Постоянная Стефана – Больцмана	$\sigma$	5,67·10 <sup>-8</sup> Вт/(м <sup>2</sup> ·К <sup>4</sup> )
Постоянная закона смещения Вина	$b$	2,9·10 <sup>-3</sup> м·К
Постоянная Планка	$h$	6,625·10 <sup>-34</sup> Дж·с
	$\hbar$	1,05·10 <sup>-34</sup> Дж·с
Комптоновская длина волны электрона	$\lambda_0$	2,43·10 <sup>-12</sup> м
Магнетон Бора	$\mu_B$	0,927·10 <sup>-23</sup> А·м <sup>2</sup>
Энергия ионизации атома водорода	$E_i$	2,18·10 <sup>-18</sup> Дж (13,6 эВ)
Атомная единица массы	а. е. м.	1,660·10 <sup>-27</sup> кг
Электрическая постоянная	$\epsilon_0$	8,85·10 <sup>-12</sup> Ф/м
Магнитная постоянная	$\mu_0$	4 $\pi$ ·10 <sup>-7</sup> Гн/м

Таблица А.2 – Плотность твердых тел

Твердое тело	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Твердое тело	Плотность, кг/м <sup>3</sup>
Алюминий	2,70·10 <sup>3</sup>	Медь	8,93·10 <sup>3</sup>
Барий	3,50·10 <sup>3</sup>	Никель	8,90·10 <sup>3</sup>
Ванадий	6,02·10 <sup>3</sup>	Свинец	11,3·10 <sup>3</sup>
Висмут	9,80·10 <sup>3</sup>	Серебро	10,5·10 <sup>3</sup>
Железо	7,88·10 <sup>3</sup>	Цезий	1,90·10 <sup>3</sup>
Литий	0,53·10 <sup>3</sup>	Цинк	7,15·10 <sup>3</sup>

Таблица А.3 – Диэлектрическая проницаемость

Диэлектрик	$\epsilon$	Диэлектрик	$\epsilon$
Вода	81	Слюда	7,5
Воздух	1,00058	Спирт	26
Воск	7,8	Стекло	6,0
Керосин	2,0	Фарфор	6,0
Парафин	2,0	Эбонит	2,7
Плексиглас	3,5	Масло трансформаторное	2,2
Полиэтилен	2,3		

Таблица А.4 – Магнитные восприимчивости пара- и диамагнетиков

Парамагнетики	$(\mu - 1) \cdot 10^{-6}$	Диамагнетики	$(\mu - 1) \cdot 10^{-6}$
Азот	0,013	Водород	-0,063
Воздух	0,38	Бензол	-7,5
Кислород	1,9	Вода	-9,0
Эбонит	14	Медь	-10,3
Алюминий	23	Стекло	-12,6
Вольфрам	176	Каменная соль	-12,6
Платина	360	Кварц	-15,1
Жидкий кислород	3400	Висмут	-176

Таблица А.5 – Энергия ионизации

Вещество	$E_i$ , Дж	$E_i$ , эВ
Водород	$2,18 \cdot 10^{-18}$	13,6
Гелий	$3,94 \cdot 10^{-18}$	24,6
Литий	$1,21 \cdot 10^{-17}$	75,6
Ртуть	$1,66 \cdot 10^{-18}$	10,4

Таблица А.6 – Подвижность ионов в газах

Газ	Положительный ион	Отрицательный ион
Азот	$1,27 \cdot 10^{-4}$	$1,81 \cdot 10^{-4}$
Водород	$5,4 \cdot 10^{-4}$	$7,4 \cdot 10^{-4}$
Воздух	$1,4 \cdot 10^{-4}$	$1,9 \cdot 10^{-4}$

Таблица А.7 – Работа выхода электронов

Металл	$A$ , $10^{-19}$ Дж	$A$ , эВ
Калий	3,5	2,2
Литий	3,7	2,3
Платина	10	6,3
Рубидий	3,4	2,1
Серебро	7,5	4,7
Цезий	3,2	2,0
Цинк	6,4	4,0

Таблица А.8 – Константы двухатомных молекул

Молекула	Межъядерное расстояние $d$ , $10^{-10}$ м	Частота колебаний $\Omega$ , $10^{14} \cdot \text{с}^{-1}$	Молекула	Межъядерное расстояние $d$ , $10^{-10}$ м	Частота колебаний $\Omega$ , $10^{14} \cdot \text{с}^{-1}$
H <sub>2</sub>	0,741	8,279	HF	0,917	7,796
N <sub>2</sub>	1,094	4,445	HCl	1,275	5,632
O <sub>2</sub>	1,207	2,977	HBr	1,413	4,991
F <sub>2</sub>	1,282	2,147	HI	1,604	4,350
S <sub>2</sub>	1,889	1,367	CO	1,128	4,088
Cl <sub>2</sub>	1,988	1,064	NO	1,150	3,590
Br <sub>2</sub>	2,283	0,609	OH	0,971	7,035
I <sub>2</sub>	2,666	0,404			

Таблица А.9 – Показатель преломления

Вещество	Показатель	Вещество	Показатель
Алмаз	2,42	Глицерин	1,47
Вода	1,33	Стекло	1,50

Таблица А.10 – Относительные атомные массы (округленные значения)  $A_r$  и порядковые номера  $Z$  некоторых элементов

Элемент	Символ	$A_r$	$Z$	Элемент	Символ	$A_r$	$Z$
Азот	N	14	7	Марганец	Mn	55	25
Алюминий	Al	27	13	Медь	Cu	64	29
Аргон	Ar	40	18	Молибден	Mo	96	42
Барий	Ba	137	56	Натрий	Na	23	11
Ванадий	V	60	23	Неон	Ne	20	10
Водород	H	1	1	Никель	Ni	59	28
Вольфрам	W	184	74	Олово	Sn	119	50
Гелий	He	4	2	Платина	Pt	195	78
Железо	Fe	56	26	Ртуть	Hg	201	80
Золото	Au	197	79	Сера	S	32	16
Калий	K	39	19	Серебро	Ag	108	47
Кальций	Ca	40	20	Углерод	C	12	6
Кислород	O	16	8	Уран	U	238	92
Магний	Mg	24	12	Хлор	Cl	35	17

Таблица А.11 – Массы покоя некоторых частиц

Частица	$m_0$	
	кг	а. е. м.
Электрон	$9,11 \cdot 10^{-31}$	0,00055
Протон	$1,672 \cdot 10^{-27}$	1,00728
Нейтрон	$1,675 \cdot 10^{-27}$	1,00867
Дейтрон	$3,35 \cdot 10^{-27}$	2,01355
$\alpha$ -частица	$6,64 \cdot 10^{-27}$	4,00149
Нейтральный $\pi$ -мезон	$2,41 \cdot 10^{-28}$	0,14498

Таблица А.12 – Массы атомов легких изотопов

Изотоп	Символ	Масса, а. е. м	Изотоп	Символ	Масса, а. е. м.
Нейтрон	$0n^1$	1,00867	Бериллий	$4Be^7$	7,01693
Водород	$1H^1$	1,00783	Бор	$4Be^9$	9,01219
	$1H^2$	2,01410		$5B^{10}$	10,01294
	$1H^3$	3,01605		$5B^{11}$	11,00930
Гелий	$2He^3$	3,01603	Углерод	$6C^{12}$	12,00000
	$2He^4$	4,00260		$6C^{13}$	13,00335
Литий	$3Li^6$	6,01513		$6C^{14}$	14,00324
	$3Li^7$	7,01601	Азот	$7N^{14}$	14,00307
			Кислород	$8O^{16}$	15,99491
				$8O^{17}$	16,99913

Таблица А.13 – Периоды полураспада радиоактивных изотопов

Изотоп	Символ	Период полураспада
Актиний	${}^{89}\text{Ac}^{225}$	10 сут
Йод	${}^{53}\text{I}^{131}$	8 сут
Кобальт	${}^{27}\text{Co}^{60}$	5,3 г
Магний	${}^{12}\text{Mg}^{27}$	10 мин
Радий	${}^{88}\text{Ra}^{226}$	1620 лет
Радон	${}^{86}\text{Rn}^{222}$	3,8 сут
Стронций	${}^{38}\text{Sr}^{90}$	27 лет
Фосфор	${}^{15}\text{P}^{32}$	14,3 сут
Церий	${}^{58}\text{Ce}^{144}$	285 сут