МЕЖГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра «Физика»



# ФИЗИКА

***Методические рекомендации к самостоятельной работе студентов всех специальностей заочной формы обучения***

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


Могилев 2019

УДК 531
ББК 22.31
Ф55

Рекомендовано к изданию
учебно-методическим отделом
Белорусско-Российского университета

Одобрено кафедрой «Физика» «9» октября 2019 г., протокол № 3

Составители: д-р физ.-мат. наук, доц. А. В. Хомченко;
канд. физ.-мат. наук, доц. И. В. Терешко;
канд. физ.-мат. наук, доц. П. Я. Чудаковский;
канд. физ.-мат. наук, доц. А. В. Шульга

Рецензент канд. техн. наук, доц. А. П. Прудников

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



Учебно-методическое издание

ФИЗИКА

Ответственный за выпуск А. В. Хомченко

Редактор А. А. Подошевко

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 76 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, Могилев.

# Содержание

# 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 Иваненко и 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. 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 $3{,}52\cdot10^{3}$, вместо 0,00129 – $1{,}29\cdot10^{-3}$ 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.

При решении задач использовать таблицы А.1–А.13.

# 3 Учебные материалы по разделам курса физики

## *3.1 Волновая оптика*

*3.1.1 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).

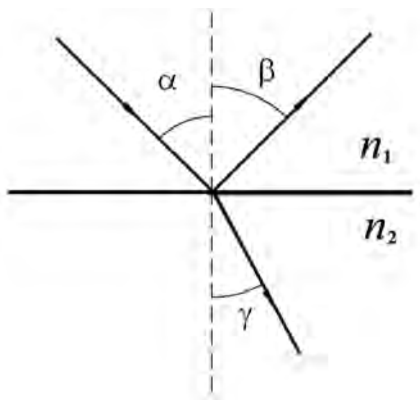


Рисунок 1 – Преломление света на границе раздела двух сред

*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 $\gamma = 90°$)

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

*Интерференция света:*

– условие максимального усиления света при интерференции

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

– условие максимального ослабления света

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

*Интерференция в тонких пленках*

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

где $d$ – толщина пленки;

$i$ – угол падения.

*Кольца Ньютона*:

– радиус светлых колец Ньютона в отраженном свете

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

– радиус темных колец

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

*Дифракция Фраунгофера*:

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

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

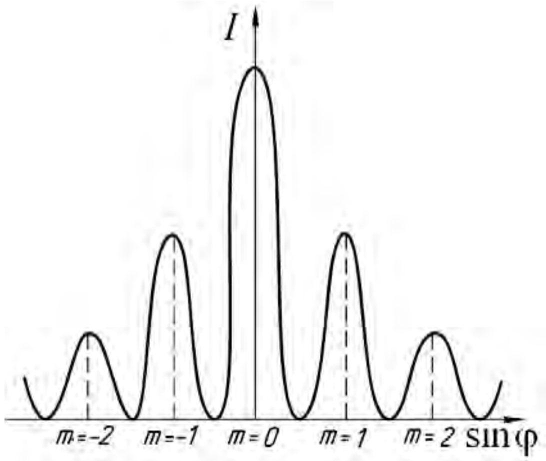


Рисунок 2 – Дифракция света на щели

– условие дифракционных минимумов для одной щели

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

– условие главных максимумов для дифракционной решетки

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

– условие дополнительных минимумов для дифракционной решетки

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

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

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

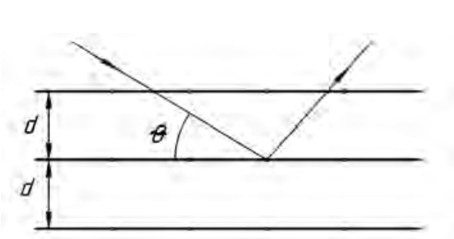


Рисунок 3 – Дифракция света на пространственной решетке

*Дифракция Френеля*:

– на круглом отверстии:

а) в центре экрана наблюдается максимум $A=\dfrac{A_1}{2}+\dfrac{A_m}{2}$, если $m$ – нечетное, и минимум $A=\dfrac{A_1}{2}-\dfrac{A_m}{2}$, если $m$ – четное;

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*).

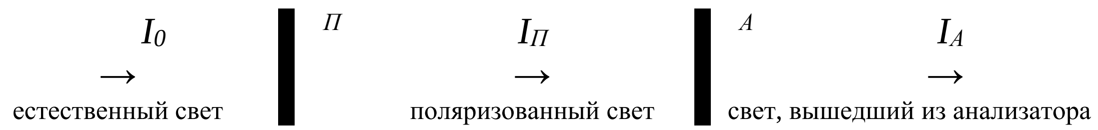


Рисунок 4 – Распространение света через систему «поляризатор-анализатор»

*Поляризация*:

– закон Малюса (рисунок 4)

$$I_A = I_П \cos^2\alpha \qquad (I_П = \frac{1}{2} I_0);$$

– степень поляризации

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

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

– закон Брюстера (рисунок 5) определяет угол падения света, при котором отраженный луч является плоско поляризованным:

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

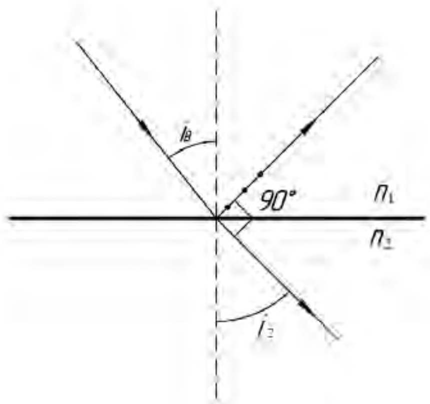


Рисунок 5 – Распространение света через границу раздела двух сред

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

а) в твердых телах

$$\varphi = \alpha d,$$

где α – постоянная вращения;

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

б) в растворах

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

где $\alpha_p$ – удельное вращение;

ρ – массовая концентрация оптически активного вещества в растворе.

*3.1.2 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*:
$n = 1{,}3$
$\lambda = 0{,}55 \cdot 10^{-6}$ 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).

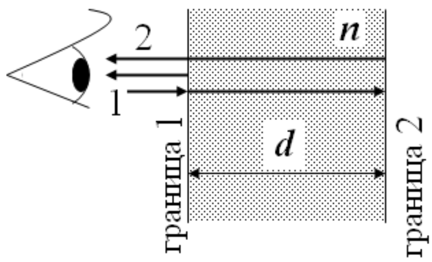


Рисунок 6 – Отражение света от пленки

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 π рад при отражении от оптически более плотной среды (граница воздух–пленка, отражение идет от пленки). Вторая волна 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 мкм = $8 \cdot 10^{-7}$ 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 пучков световых волн до внесения пленки;

$\Delta_2$ – оптическая разность хода тех же пучков после внесения пленки; $k = 0, \pm1, \pm2, \pm3, \ldots$ .

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 $\Delta_1$.

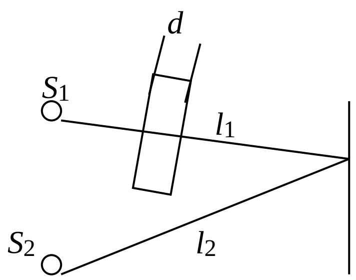


Рисунок 7 – Оптическая схема

Из рисунка 7 следует, что

$$\Delta_1 = l_1 - l_2;$$

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

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 у которой меньше показателя преломления стекла. Радиус $r_8^{min}$ восьмого темного кольца Ньютона при наблюдении в отраженном свете ($\lambda$ = 700 нм) равен 2 мм; радиус кривизны $R$ выпуклой поверхности линзы – 1 м. Найти показатель преломления $n$ жидкости.

*Дано*:

$r_8^{min} = 2 \cdot 10^{-3}$ м
$\lambda = 7 \cdot 10^{-7}$ м
$R = 1$ м
$k = 8$

$n$ – ?

*Решение*

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

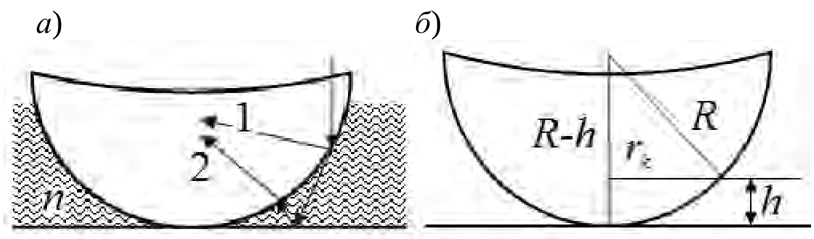


Рисунок 8 – Ход интерферирующих лучей (*а*) и геометрия эксперимента (*б*)

Если обозначить усредненное значение зазора между линзой и пластиной через $h$, то геометрическая разность хода между лучами 1 и 2 $\Delta r = 2h$ . Оптическая разность хода с учетом показателя преломления жидкости и изменения фазы на границе «жидкость–пластина» $\Delta = 2hn + \dfrac{\lambda}{2}$.

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

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

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

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

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? Темное или светлое пятно получится в центре дифракционной картины, если в месте наблюдения поместить экран?

*Дано*:

$d = 4\cdot 10^{-3}$ м

$b$ = 1 м

$\lambda = 0{,}5\cdot 10^{-6}$ м

$k$ – ?

*Решение*

Граница $k$-й зоны Френеля, укладывающейся на отверстии (рисунок 9), ограничена прямой ($b$+$k\cdot\lambda$/2).

По теореме Пифагора

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

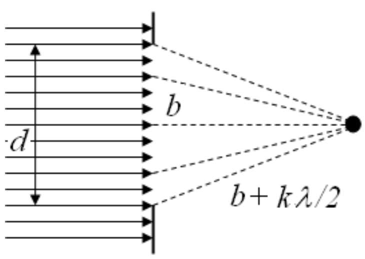


Рисунок 9 – Дифракция Френеля на круглом отверстии

откуда

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

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

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*:

$\varphi = 41$
$\lambda_1 = 656{,}3 \cdot 10^{-9}$ м
$\lambda_2 = 410{,}2 \cdot 10^{-9}$ м

$d$ – ?

*Решение*

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

Для двух случаев нашей задачи

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

или

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

Определим отношение длин волн и подберем 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 условию $k_2 = 8$, $k_1 = 5$. 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°. Чему равен для этого вещества угол полной поляризации?

*Дано*:

$i_{кр} = 45^{\circ}$

$i_Б$ – ?

*Решение*

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

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

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*)

$$\frac{\sin i_{кр}}{\sin 90°} = \frac{n_1}{n_2}.$$

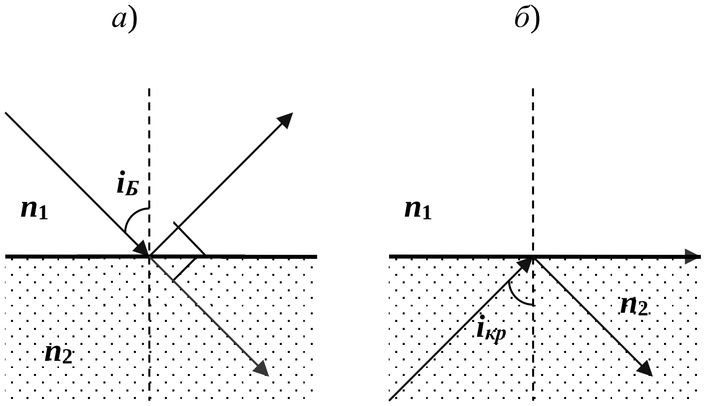


Рисунок 10 – Преломление света на границе раздела двух сред

Так как sin 90° = 1, то

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

$$i_Б = \operatorname{arctg}\left(\frac{1}{\sin i_{кр}}\right) = \operatorname{arctg}\left(\frac{1}{\sin 45°}\right) = 54{,}74°.$$

Ответ: 54,74°.

***Задача 7.*** Никотин (чистая жидкость), содержащийся в стеклянной трубке длиной $l$ = 8 см, поворачивает плоскость поляризации желтого света натрия на угол $\varphi$ = 137°. Плотность никотина $\rho = 1{,}01\cdot10^{-3}$ кг/м$^3$. Определить удельное вращение $\alpha_p$ никотина.

*Дано*:

$l = 8\cdot10^{-2}$ м
$\beta = 1{,}01\cdot10^{-3}$ м/м$^3$
$\varphi$ = 137° = 2,39 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: $29,6 \cdot 10^{-3}$ (рад·м$^3$)/(м·кг).

*3.1.3 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 мкм. Число $m$ возникающих при этом интерференционных полос, приходящихся на 1 см, равно 10. Определить угол клина ($\alpha = 2 \cdot 10^{-4}$ рад).

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

3 На диафрагму с круглым отверстием падает нормально параллельный пучок монохроматического света $\lambda = 6 \cdot 10^{-7}$ 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 мм ($L_{max}$ = 0,8 м).

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

5 Два николя $N_1$ и $N_2$ расположены так, что угол между их плоскостями пропускания составляет $\alpha$ = 60°. 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 к = 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° с падающим пучком. Определить показатель преломления $n_1$ жидкости, если отражённый свет максимально поляризован ($n_1$ = 1,33).

## *3.2 Квантовая природа излучения*

*3.2.1 Основные формулы.*

*Тепловое излучение и его характеристики:*

– спектральная плотность энергетической светимости (испускательной способности)

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

– 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

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

С ростом температуры максимум смещается в коротковолновую область (рисунок 11).

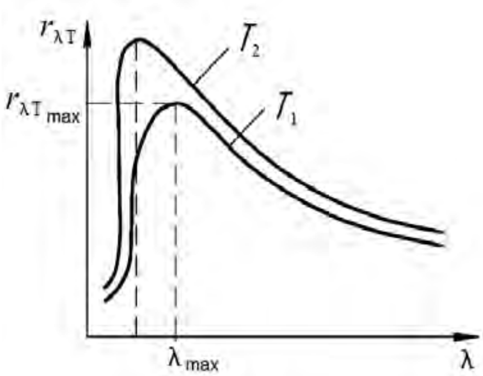


Рисунок 11 – Распределение энергии в спектре излучения АЧТ ($T_2 > T_1$)

*Фотоэффект:*

– уравнение Эйнштейна для внешнего фотоэффекта

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

– 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

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

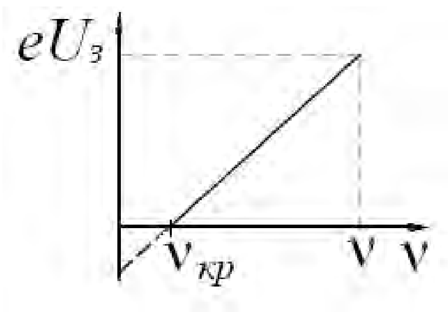


Рисунок 12 – Зависимость задерживающего потенциала от частоты света

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

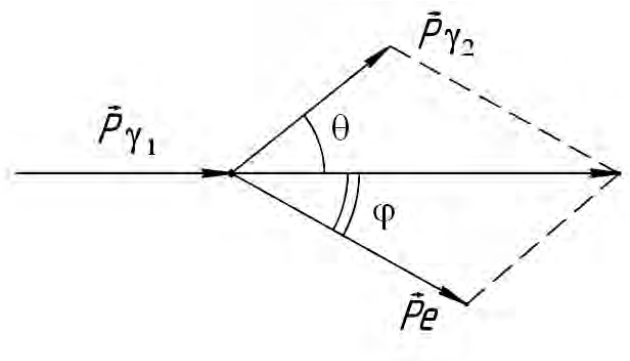


Рисунок 13 – Схема комптоновского рассеяния

Изменение длины волны фотона при комптоновском рассеянии

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

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

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, $w = E_e / c$;

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

*3.2.2 Примеры решения задач.*

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

*Дано*:

$S$ = 2 см$^2$ = 2·10$^{-4}$ м
$T$ = 400 К
$t$ = 300 с
$W$ = 83 Дж

α – ?

*Решение*

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

$$R_э = W/(S \cdot t).$$

Излучательность серого тела

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

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 $R_э$ тела?

*Дано*:

$\lambda_1 = 2{,}4 \cdot 10^{-6}$ м
$\lambda_2 = 0{,}8 \cdot 10^{-6}$ м

$R_2/R_1$ – ?

*Решение*

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

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

а их отношение:

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

Согласно закона 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 разность потенциалов $U_з$ не менее 1,7 В. Определить работу выхода $A_{вых}$.

*Дано*:

$\lambda = 310 \cdot 10^{-9}$ м
$U_з$ = 1,7 В

$A_{вых}$ – ?

*Решение*

Из уравнения Эйнштейна для фотоэффекта следует

$$h \cdot \frac{c}{\lambda} = A_{вых} + E_{\max}.$$

Максимальная энергия электрона равна работе тормозящего электрического поля $E_{\max} = e \cdot U_з$.

Откуда

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

$A_{вых} = 6{,}625 \cdot 10^{-34} \cdot (3 \cdot 10^{-8})/(310 \cdot 10^{-9}) - 1{,}6 \cdot 10^{-19} \cdot 1{,}7 = 3{,}69 \cdot 10^{-19}$ Дж = 2,31 эВ.

Ответ: $3{,}69 \cdot 10^{-19}$ Дж.

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

*Дано*:

$\lambda = 310 \cdot 10^{-9}$ м

$\varepsilon$ – ?

$m$ – ?

$p$ – ?

$m/m_e$ – ?

*Решение*

Энергия фотона

$$\varepsilon = h\,c/\lambda = 6{,}625 \cdot 10^{-34} \cdot (3 \cdot 10^{8})/(380 \cdot 10^{-9}) = 5{,}23 \cdot 10^{-19} \text{ Дж.}$$

Масса фотона

$$m = h/(c \cdot \lambda) = (6{,}625 \cdot 10^{-34})/(3 \cdot 10^{8} \cdot 380 \cdot 10^{-9}) = 5{,}8 \cdot 10^{-36} \text{ кг.}$$

Импульс фотона

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

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

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

*Дано*:

$\lambda = 600 \cdot 10^{-9}$ м

$p = 0.1 \cdot 10^{-6}$ Па

$t = 1$ с

$S = 10^{-4}$ м$^2$

$N$ – ?

*Решение*

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

$$p = E_э/c.$$

Облученность поверхности

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

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

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

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

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 θ.

| *Дано*: | *Решение* |
|---|---|
| $\varepsilon = 4\cdot10^{-14}$ Дж<br>$\varepsilon^1 = 3{,}2\cdot10^{-14}$ Дж | Согласно формуле Комптона, |
| $\theta$ – ? | $$\lambda = \lambda^1 - \lambda = 2\cdot\frac{h}{m_0\cdot c}\cdot\sin^2\frac{\Theta}{2}.$$ |

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

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

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

$$\sin^2\frac{\Theta}{2} = \frac{m_0\cdot c^2}{2}\cdot\left(\frac{1}{\varepsilon_1} - \frac{1}{\varepsilon}\right).$$

Проведем вычисление:

$$\sin^2\frac{\Theta}{2} = \frac{9{,}1\cdot10^{-31}\cdot(3\cdot10^8)^2}{2}\cdot\left(\frac{1}{3{,}2\cdot10^{-14}} - \frac{1}{4\cdot10^{-14}}\right) = 0{,}256,$$

откуда $\Theta = 60{,}78^0$.

Ответ: $\Theta = 60{,}78^0$.

*3.2.3 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, причем 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 λ = 0,331 мкм. Работа выхода для цезия $A_в$ = 1,89 эВ. Найти импульс вылетающего электрона $p_e$ и импульс $p_к$, получаемый катодом при вылете одного электрона. Электроны вылетают навстречу

падающему свету нормально к поверхности катода ($p_e = 7{,}4 \cdot 10^{-25}$ кг$\cdot$м/с, $p_к = 7{,}33 \cdot 10^{-25}$ кг$\cdot$м/с).

4 Для прекращения фотоэффекта, вызванного облучением ультрафиолетовым светом платиновой пластинки, нужно приложить задерживающую разность потенциалов $U_з = 3{,}7$ В. Если платиновую пластинку заменить другой пластинкой, то задерживающую разность потенциалов придется увеличить до 6 В. Определить работу $A_{вых}$ выхода электронов с поверхности этой пластинки ($A_{вых}$ = 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$^2$ падает нормально свет от электрической дуги. Определить импульс $p$, полученный зеркальцем, если поверхностная плотность потока излучения $\varphi$, падающего на зеркальце, равна 0,1 мВт/м$^2$. Продолжительность облучения $t$ = 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 электроне под углом $\theta$ = 60°. 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, $\varphi = 35^0$).

### *3.3 Элементы атомной физики, квантовой механики и физики твердого тела*

*3.3.1 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;

$h$ – постоянная Планка, $\hbar = h / 2\pi$;

$n$ – главное квантовое число, $n$ = 1, 2, 3, … .

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 $n_1$ и $n_2$ – 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 $T$:

$$p = m_0 V; \quad p = \sqrt{2m_0 T};$$

$$p = mV = \frac{m_0 V}{\sqrt{1-(V/c)^2}}; \quad p = \frac{1}{c}\sqrt{(2E_0 + T)T},$$

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

$$\Delta E \Delta t \geq h\,,$$

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 $E_n = \dfrac{\pi^2\hbar^2 n^2}{2ml^2}$). Здесь $n$ – квантовое число ($n$ = 1, 2, 3, …), 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

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

где $n$ – концентрация электронов в металле.

*3.3.2 Примеры решения задач.*

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

| *Дано*: | *Решение* |
|---|---|
| $n_1 = 2$<br>$n_2 = 4$ | Для определения энергии фотона воспользуемся сериальной формулой для водородоподобных ионов |
| $\varepsilon$ – ? | |

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

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 ($n_1$ и $n_2$ – 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; $Z = 1$; $n_1 = 2$; $n_2 = 4$):

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

***Задача 2.*** Электрон, начальной скоростью которого можно пренебречь, прошел ускоряющую разность потенциалов $U$. Найти длину волны де Бройля электрона для двух случаев: 1) $U_1 = 51$ В; 2) $U_2 = 510$ кВ.

| *Дано*: | *Решение* |
|---|---|
| $U_1 = 51$ В<br>$U_2 = 510 \cdot 10^3$ В | Длина волны де Бройля для частицы зависит от ее импульса $p$ и определяется формулой |
| $\lambda$ – ? | |

$$\lambda = h/p,$$

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 = $0{,}51\cdot10^{-4}$ 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

$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{2m_0\cdot10^{-4}\cdot m_0c^2}} = \frac{10^2}{\sqrt{2}}\cdot\frac{h}{m_0c}.$$

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

$$\lambda_1 = 10^2\cdot2{,}43/\sqrt{2} = 171\ \text{пм}.$$

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

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

или

$$\lambda_2 = \lambda_k/\sqrt{3}\,.$$

Подставим значение $\lambda_K$ и проведем вычисления:

$$\lambda_2 = 2{,}43/\sqrt{3} = 1{,}40 = 1{,}4\cdot10^{-12}\ \text{м}.$$

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*: | *Решение* |
|---|---|
| T = 10 эВ = $1{,}6\cdot10^{-18}$ Дж<br>$m = 9{,}1\cdot10^{-31}$ кг | Соотношение неопределенностей для координаты и им пульса имеет вид: |
| $l_{\min}$ – ? | $$\Delta x\Delta p_x \ge \hbar\,,$$ |

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, описывающая 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*:

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

$n = 1$

$l/3 \le x \le 2l/3$

$W$ – ?

*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

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

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

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

Проинтегрируем выражение:

$$w=\frac{2}{l}\int_{l/3}^{2l/3}\sin^2\left(\frac{\pi x}{l}\right)dx=\frac{2}{l}\int_{l/3}^{2l/3}\frac{1}{2}\left(1-\cos\left(\frac{2\pi x}{l}\right)\right)dx=\frac{1}{l}\left\{\left[x\right]_{l/3}^{2l/3}-\left[\frac{l}{2\pi}\sin\left(\frac{2\pi x}{l}\right)\right]_{l/3}^{2l/3}\right\}=$$

$$=\frac{1}{l}\left\{\frac{2l}{3}-\frac{l}{3}-\frac{l}{2\pi}\left[\sin\frac{4\pi}{3}-\sin\frac{2\pi}{3}\right]\right\}=\left\{\frac{1}{3}-\frac{1}{2\pi}\left[-\frac{\sqrt{3}}{2}-\frac{\sqrt{3}}{2}\right]\right\}=\frac{1}{3}+\frac{\sqrt{3}}{2\pi}.$$

Вычисляем

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

Ответ: $w$ = 0,609.

*3.3.3 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 ε фотона, испускаемую при переходе электрона в атоме водорода с третьего энергетического уровня на основной.

3 Фотон с энергией ε = 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 α-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 α-частицы.

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

### *3.4 Элементы физики атомного ядра и элементарных частиц*

*3.4.1 Основные понятия и формулы.*

*Ядерная физика*. Энергия связи атомного ядра

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

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

Спин ядра – векторная сумма спинов нуклонов и орбитальных моментов импульса нуклонов: $L_я = \hbar\sqrt{I(I+1)}$, 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: ${}^{A}_{Z}X = {}^{A-4}_{Z-2}Y + {}^{4}_{2}He$ ($Z$ – зарядовое число (число протонов); $A$ – массовое число (число протонов и нейтронов));

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

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

*3.4.2 Примеры решения задач.*

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

*Дано*:

$^{233}_{92}\mathrm{U}$ , $^{209}_{83}\mathrm{Bi}$

$N_\alpha$ – ?

$N_\beta$ – ?

*Решение*

Запишем реакцию превращения ядра при радиоактивном распаде:

$$^{233}_{92}\mathrm{U} \to {}^{209}_{83}\mathrm{Bi} + N_\alpha\,{}^{4}_{2}\alpha + N_\beta\,{}^{0}_{-1}e$$

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*:

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

$T_{1/2} = 24$ 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 $\lambda = \dfrac{\ln 2}{T_{1/2}}$, 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 $^{27}_{13}\mathrm{Al}$ α-частицами получается радиоактивный изотоп фосфора $^{30}_{15}\mathrm{P}$, 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*: | *Решение* |
|---|---|
| $^{27}_{13}\mathrm{Al}$, $^{30}_{15}\mathrm{P}$ <br> $T_{1/2}$ = 130 с | Запишем уравнение ядерной реакции |
| $a$ – ? | $^{27}_{13}\mathrm{Al}+{}^{4}_{2}\mathrm{He}\to{}^{30}_{15}\mathrm{P}+{}^{1}_{0}n$ (нейтрон). |

Самопроизвольный $\beta^+$ распад

$$^{30}_{15}\mathrm{P} \to {}^{0}_{+1}\beta + {}^{30}_{14}\mathrm{Si} + {}^{0}_{0}\nu \ .$$

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, $\mu = 30\cdot10^{-3}$ кг/моль;
$N_A$ – число Авогадро, $N_A = 6{,}02\cdot10^{23}$ моль$^{-1}$.
После подстановки получим

$$a=\frac{\ln 2\cdot N_A}{T_{1/2}\mu}=\frac{\ln 2\cdot 6{,}02\cdot 10^{23}}{130\cdot 30\cdot 10^{-3}}=1{,}07\cdot 10^{23}\ \text{Бк/кг} = 2{,}89\ \text{Кл/кг}.$$

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*: | *Решение* |
|---|---|
| $E_{св}$ = 7,72 МэВ <br> $m_n$ = 1,00867 а. е. м. <br> $m_p$ = 1,00783 а. е. м. <br> $Z$ = 2 <br> $A - Z$ = 1 | Энергия связи атомных ядер $E_{св}=\Delta mc^2$. <br> С учетом пересчетного коэффициента $c^2$ = 931,5 МэВ/а. е. м. <br> $E_{св} = \Delta m\cdot 931{,}5$ <br> Учитывая, что дефект массы ядра |
| $m_a$ – ? | $\Delta m=(Zm_p+(A-Z)m_n-m_я)$, |

получаем

$$E_{св} = 931,5(2m_p + m_n - m_я).$$

Откуда

$$m_я = \frac{E_{св}}{931,5} + 2m_p + m_n = \frac{7,72}{931,5} + 2 \cdot 1,00783 + 1,0867 = 3,03262 \text{ а. е. м.}$$

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 ${}^{13}_{6}\mathrm{C} + {}^{2}_{1}\mathrm{H} \to {}^{4}_{2}\mathrm{He} + {}^{11}_{5}\mathrm{B}$, если кинетическая энергия дейтерия $T_\mathrm{H}$ = 1,5 МэВ, а ядро-мишень ${}^{13}_{6}\mathrm{C}$ неподвижно.

*Дано*:

$m_\mathrm{C}$ = 13,00335 а. е. м.
$m_\mathrm{H}$ = 2,01410 а. е. м.
$m_\alpha$ = 4,0026 а. е. м.
$m_\mathrm{B}$ = 11,00931 а. е. м.
$T_\mathrm{H}$ = 1,5 МэВ

$T$ – ?

*Решение*

Энергетический выход ядерной реакции

$$Q = 931,5\left[(m_\mathrm{C} + m_\mathrm{H}) - (m_\alpha + m_\mathrm{B})\right].$$

С другой стороны, так как масса покоя частиц, входящих в состав продуктов реакции, не меняется, то

$$Q = \left[(T_\alpha + T_\mathrm{B}) - (T_\mathrm{C} + T_\mathrm{H})\right],$$

где $T_\alpha$, $T_\mathrm{B}$, $T_\mathrm{C}$, $T_\mathrm{H}$ – кинетические энергии ядер, выходящих из реакции и вступающих в нее, при этом $T_\alpha + T_\mathrm{B} = T$, $T_\mathrm{C} + T_\mathrm{H} = T_\mathrm{H}$ ($T_C = 0$).

Тогда $Q = T - T_\mathrm{H}$, а следовательно

$$T = T_\mathrm{H} + 931,5\left[(m_\mathrm{C} + m_\mathrm{H}) - (m_\alpha + m_\mathrm{B})\right] = 1,5 + 931,5 \times$$

$$\times\left(13,00335 + 2,01410 - 4,0026 - 11,00931\right) = 6,66 \text{ МэВ}.$$

Ответ: 6,66 МэВ.

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

*Дано*:

$m = 10^{-3}$ кг
$\mu$ = 0,235 кг/моль

$E$ – ?

*Решение*

При делении одного ядра урана 235 (${}^{235}_{92}\mathrm{U}$) выделяется энергия $Q$ = 200 МэВ. Суммарная энергия

$$E = N \cdot Q,$$

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

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

Ответ: $8{,}2 \cdot 10^{10}$ Дж.

*3.4.3 Задачи для самостоятельного решения.*

1 Определить начальную активность $A_0$ радиоактивного магния $^{27}$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 счетчик 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 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 распадется за время $t$, равное средней продолжительности жизни $\tau$ этого нуклида ($\Delta N/N_0$ = 63,3 %)?

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

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

7 Энергия связи $E_{св}$ электрона с ядром невозбужденного атома водорода $^{1}_{1}$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 $^{23}_{11}$Na ($E_{св}$ = 1,99 пДж).

## Список литературы

1 **Савельев, И. В**. Курс общей физики: учебное пособие в 3 т. Т. 3: Квантовая оптика. Атомная физика. Физика твердого тела. Физика атомного ядра и элементарных частиц / И. В. Савельев. – 10-е изд., стер. – Санкт-Петербург; Москва; Краснодар: Лань, 2016. – 320 с.

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

3 **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.

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

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

6 **Савельев, И. В.** Сборник вопросов и задач по общей физике / И. В. Савельев. – Москва: Наука, 1982. – 288 с.

7 **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$^2$ |
| Гравитационная постоянная | $\gamma$ | $6{,}67 \cdot 10^{-11}$ м$^3$/(кг·с$^2$) |
| Постоянная Авогадро | $N_A$ | $6{,}02 \cdot 10^{23}$ моль$^{-1}$ |
| Молярная газовая постоянная | $R$ | 8,31 Дж/(моль·К) |
| Постоянная Больцмана | $k$ | $1{,}38 \cdot 10^{-3}$ Дж/К |
| Элементарный заряд | $e$ | $1{,}60 \cdot 10^{-19}$ Кл |
| Скорость света в вакууме | $c$ | $3{,}00 \cdot 10^{8}$ м/с |
| Постоянная Стефана–Больцмана | $\sigma$ | $5{,}67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м$^2$·К$^4$) |
| Постоянная закона смещения Вина | $b$ | $2{,}9 \cdot 10^{-3}$ м·К |
| Постоянная Планка | $h$ | $6{,}625 \cdot 10^{-34}$ Дж·с |
| | $\hbar$ | $1{,}05 \cdot 10^{-34}$ Дж·с |
| Комптоновская длина волны электрона | $\lambda_0$ | $2{,}43 \cdot 10^{-12}$ м |
| Магнетон Бора | $\mu_Б$ | $0{,}927 \cdot 10^{-23}$ А·м$^2$ |
| Энергия ионизации атома водорода | $E_i$ | $2{,}18 \cdot 10^{-18}$ Дж (13,6 эВ) |
| Атомная единица массы | а. е. м. | $1{,}660 \cdot 10^{-27}$ кг |
| Электрическая постоянная | $\varepsilon_0$ | $8{,}85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м |
| Магнитная постоянная | $\mu_0$ | $4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м |

Таблица А.2 – Плотность твердых тел

| Твердое тело | Плотность, кг/м$^3$ | Твердое тело | Плотность, кг/м$^3$ |
|---|---|---|---|
| Алюминий | $2{,}70 \cdot 10^3$ | Медь | $8{,}93 \cdot 10^3$ |
| Барий | $3{,}50 \cdot 10^3$ | Никель | $8{,}90 \cdot 10^3$ |
| Ванадий | $6{,}02 \cdot 10^3$ | Свинец | $11{,}3 \cdot 10^3$ |
| Висмут | $9{,}80 \cdot 10^3$ | Серебро | $10{,}5 \cdot 10^3$ |
| Железо | $7{,}88 \cdot 10^3$ | Цезий | $1{,}90 \cdot 10^3$ |
| Литий | $0{,}53 \cdot 10^3$ | Цинк | $7{,}15 \cdot 10^3$ |

Таблица А.3 – Диэлектрическая проницаемость

| Диэлектрик | ε | Диэлектрик | ε |
|---|---|---|---|
| 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 | $A \cdot 10^{-19}$ 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 $d \cdot 10^{-10}$, м | Частота колебаний $\Omega \cdot 10^{14}$, с$^{-1}$ | Молекула | Межъядерное расстояние $d \cdot 10^{-10}$, м | Частота колебаний $\omega \cdot 10^{14}$, с$^{-1}$ |
|---|---|---|---|---|---|
| $H_2$ | 0,741 | 8,279 | HF | 0,917 | 7,796 |
| $N_2$ | 1,094 | 4,445 | HCl | 1,275 | 5,632 |
| $O_2$ | 1,207 | 2,977 | HBr | 1,413 | 4,991 |
| $F_2$ | 1,282 | 2,147 | HI | 1,604 | 4,350 |
| $S_2$ | 1,889 | 1,367 | CO | 1,128 | 4,088 |
| $Cl_2$ | 1,988 | 1,064 | NO | 1,150 | 3,590 |
| $Br_2$ | 2,283 | 0,609 | OH | 0,971 | 7,035 |
| $I_2$ | 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 |
| α-частица | $6{,}64 \cdot 10^{-27}$ | 4,00149 |
| Нейтральный π-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 | Берилий | $_4Be^7$ | 7,01693 |
| Водород | $_1H^1$ | 1,00783 | | $_4Be^9$ | 9,01219 |
| | $_1H^2$ | 2,01410 | Бор | $_5B^{10}$ | 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 | $_{89}Ac^{225}$ | 10 сут |
| Йод | $_{53}I^{131}$ | 8 сут |
| Кобальт | $_{27}Co^{60}$ | 5,3 г |
| Магний | $_{12}Mg^{27}$ | 10 мин |
| Радий | $_{88}Ra^{226}$ | 1620 лет |
| Радон | $_{86}Rn^{222}$ | 3,8 сут |
| Стронций | $_{38}Sr^{90}$ | 27 лет |
| Фосфор | $_{15}P^{32}$ | 14,3 сут |
| Церий | $_{58}Ce^{144}$ | 285 сут |