МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ТВЕРСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

Кафедра физики

ОПТИКА,
АТОМНАЯ И ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА,
ФИЗИКА ТВЕРДОГО ТЕЛА

Методические указания
по выполнению контрольных заданий
для студентов заочного факультета ТГТУ

Тверь 2004

УДК 531.(075.8)

ББК 22.3.я7

Представлены требования к выполнению и оформлению контрольных работ студентами заочного факультета, выписка из рабочей программы курса физики по разделу «Оптика, атомная и ядерная физика. Физика твердого тела», список рекомендуемой литературы. Приведены основные законы и формулы, необходимые для выполнения пятой и шестой контрольных работ, а также примеры решения задач и справочные материалы.

Обсуждены на заседании кафедры физики и рекомендованы к печати (протокол № _4_ от _3 марта 2004 г.)

Составители: В.М. Алексеев, А.Н. Болотов, О.О. Новикова.

ОПТИКА, АТОМНАЯ И ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА,
ФИЗИКА ТВЕРДОГО ТЕЛА
Методические указания по выполнению контрольных заданий
для студентов заочного факультета ТГТУ

Редактор Е.В. Маняшина
Корректор
Технический редактор Г.В. Комарова

Подписано в печать		
Формат 60х84 1/16		Бумага писчая
Физ. печ. л. 2,75	Усл. печ. л. 2,56	Уч.- изд. л. 2,39
Тираж 300 экз.	Заказ № 82	Цена 18 руб.15 коп.

Издательство ТГТУ

ОБЩИЕ МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

Цель методических указаний – оказать помощь студентам заочного факультета ТГТУ в выполнении контрольных заданий по разделу «Оптика, атомная и ядерная физика. Физика твердого тела» общего курса физики.

В соответствии с учебным планом в процессе изучения этого раздела студенты выполняют две контрольные работы: № 5 – «Оптика» и № 6 – «Элементы атомной физики и квантовой механики. Физика твердого тела».

Задание для каждой контрольной работы включает в себя 8 задач, выбранных случайным образом из общего банка задач. Каждый студент получает свой индивидуальный набор задач.

При выполнении контрольной работы студенту необходимо руководствоваться следующим:

1. Контрольные работы выполняются чернилами в обычной школьной тетради, на обложке которой приводятся сведения по образцу:

Контрольная работа № *по физике* *Студента(ки) заочного факультета* *специальности ЭС* *Иванова(ой) П.М.* *Номер зачетной книжки 000124* *Адрес: 170026 Тверь, ул. Горького, 4, кв. 16*

2. Листок контрольного задания, заверенный секретарем кафедры, приклеивается на первой странице работы. Условие задачи переписывать не нужно. Следует ограничиться записью «Дано:» в сокращенной форме. Каждую задачу рекомендуется начинать с новой страницы. Для замечаний преподавателя на страницах тетради оставляются поля шириной 4 см.

3. Решение задачи должно сопровождаться кратким текстовым пояснением, раскрывающим физический смысл процесса, указанного в задаче, применяемых в решении физических законов и каждой величины, входящей в формулы. Пояснения студента не должны быть более краткими, чем пояснения, данные в примерах решения задачи. Рекомендуется весь ход решения задачи с необходимыми преобразованиями формул провести в аналитическом

виде до получения формулы в удобном для расчета виде. Следует убедиться в правильности расчетной формулы методом анализа наименований физических величин, сделать подстановку и вычисление, рекомендуется использовать СИ. При подстановке числовых данных в расчетные формулы целесообразно опустить размерности. Результат расчета должен обязательно сопровождаться указанием размерности. Решение задачи при необходимости следует пояснять схемой или графиком, которые выполняются аккуратно карандашом с использованием тех же обозначений, что и в тексте решения задачи.

4. В конце контрольной работы указывается, каким учебником или учебным пособием студент пользовался при изучении физики (название учебника, автор, год издания). Это делается для того, чтобы рецензент в случае необходимости мог указать, что следует студенту изучить для завершения контрольной работы.

5. Выполненную контрольную работу студент высылает по адресу деканата ФЗВО ТГТУ или приносит туда лично, не позднее чем за 10 дней до начала сессии.

6. Если работа не зачтена, студент обязан в кратчайший срок выполнить все требования рецензента и представить работу на повторное рецензирование. Доработка выполняется в той же тетради, где находятся задачи, решения которых оказались неверными. Если характер доработки требует выполнения всей работы заново, то исправленную работу необходимо выслать вместе с незачтенной.

7. Зачтенные контрольные работы предъявляются экзаменатору*. Студенты с незачтенными контрольными работами к экзамену не допускаются.* Во время экзамена студент должен быть готов дать пояснения по существу решения задач, входящих в контрольные работы.

8. Если в процессе изучения теоретического материала и при решении задач у студента возникают вопросы, на которые он не может найти ответа, он должен обратиться на кафедру физики ТГТУ или в учебно-консультационный пункт (УКП).

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА

Элементы волновой теории света. Интерференция света. Электромагнитная природа света. Когерентность и монохроматичность световых волн. Способы получения когерентных источников света. Оптическая длина пути и оптическая разность хода лучей. Интерференция световых волн. Интерференция в тонких пленках и пластинках.

Дифракция света. Дифракция световых волн. Принцип Гюйгенса – Френеля. Метод зон Френеля. Дифракция Френеля и дифракция Фраунгофера. Дифракция световых волн на узкой щели. Дифракционная решетка. Дифракция рентгеновских лучей на кристаллах.

Поляризация света. Естественный и поляризованный свет. Закон Малюса. Поляризация света при отражении и преломлении. Двойное лучепреломление. Поляризация света при двойном лучепреломлении. Методы получения линейно поляризованного света.

Элементы специальной теории относительности. Принцип относительности Галилея. Постоянство скорости света. Постулаты теории относительности Эйнштейна. Преобразования Лоренца. Эффекты сокращения длины и замедления времени при движении частиц с субсветовыми скоростями. Релятивистский закон сложения скоростей. Релятивистская динамика. Релятивистские законы сохранения импульса и энергии. Связь между массой и полной энергией тела.

Тепловое излучение тел. Тепловое равновесное излучение. Модель абсолютно черного тела. Закон Кирхгофа для равновесного теплового излучения. Закон Стефана – Больцмана. Распределение энергии в спектре теплового излучения нагретых тел. Закон смещения Вина. Квантовая теория теплового излучения.

Квантовая природа света. Фотоэмиссия электронов проводимости из металла, фотоэффект. Основные законы фотоэффекта. Корпускулярные свойства света. Фотоны. Энергия, импульс, масса фотона. Опыты Лебедева. Давление света. Эксперименты по рассеянию рентгеновского излучения веществом. Эффект Комптона.

Элементы квантовой механики. Гипотеза де Бройля. Опыты Дэвиссона и Джермера по дифракции электронов. Границы применимости классической механики Ньютона. Соотношение неопределенностей Гейзенберга – Вейля. Вероятностная гипотеза Борна о волновой ψ–функции микрочастицы. Уравнение Шредингера для волновой ψ–функции микрочастицы. Стационарные состояния. Уравнение Шредингера для волновой функции микрочастицы в бесконечно глубокой одномерной потенциальной яме. Энергетический спектр частицы в потенциальной яме.

Строение атома. Теория Бора. Опыты Резерфорда по рассеянию α - частиц атомами вещества. Модель атома по Резерфорду. Спектры излучения атомов. Формула Бальмера. Постулаты Бора. Теория Бора. Опыты Франка и Герца. Теория излучения света водородоподобными атомами по Бору. Уравнение Шредингера для волновой функции электрона в атоме водорода. Спин электрона. Магнитные свойства атомов. Понятие о спине электрона. Полный момент импульса электрона в атоме. Полный магнитный момент атома.

Принцип Паули. Электронные оболочки в атомах. Таблица химических элементов Менделеева.

Строение и свойства атомных ядер. Протоны и нейтроны (нуклоны) – составные части атомных ядер. Основные характеристики нуклонов и ядер. Изотопы. Понятие о ядерных силах. Дефект массы и энергия связи ядер. Средняя энергия нуклонов в ядре и ее зависимость от массового числа. Неустойчивость тяжелых ядер.

Радиоактивность и ядерные реакции. Сущность явления радиоактивности. Закон радиоактивного распада. Период полураспада. Типы радиоактивного распада. Основные характеристики α и β - распадов. Нейтрино. Гамма-излучение радиоактивных ядер. Понятие о ядерных реакциях. Законы сохранения в ядерных реакциях. Деление тяжелых ядер. Реакции слияния ядер. Понятие об элементарных частицах.

Элементы квантовой теории твердых тел. Кристаллическая решетка твердых тел. Квантовая теория теплоемкости по Эйнштейну. Тепловые колебания кристаллической решетки. Фононы. Теория теплоемкости твердых тел по Дебаю.

Диэлектрики и металлы. Диэлектрики, проводники и полупроводники. Зонная теория энергетических уровней электронов в твердых телах. Энергетическая зонная структура диэлектриков, проводников и полупроводников. Квантовая теория электропроводности металлов. Сверхпроводимость как макроскопический квантовый эффект.

Полупроводники. Особенности структуры энергетических зон твердых полупроводников. Электронная и дырочная проводимость в полупроводниках. Примесная проводимость. Доноры и акцепторы. Контакт двух полупроводников с различным типом проводимости ($p - n$ – переходы). Полупроводниковые диоды и транзисторы. Внутренний фотоэффект в полупроводниках.

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

Геворкян Р.Г. Курс физики: Учебн. пособие. М.: Высш. школа, 1979.

Детлаф А.А. Яворский Б.М. Курс физики: Т. 2. М.: Высш. школа, 1979.

Зисман Г. А., Тодес О. М. Курс общей физики. Т. 2. М., 1972—1974.

Савельев И. В. Курс общей физики. Т. 2. М., 1970—1979.

Трофимова Т.И. Курс физики: Учебн. пособие для вузов. 2-е изд. М.: Высш. школа., 1990.

Волькенштейн В. С. Сборник задач по общему курсу физики, М,, 1980.

Чертов А. Г., Воробьев А. А. Задачник по физике. М., 1981.

ОПТИКА

Основные формулы

Плоская электромагнитная волна, распространяющаяся вдоль оси x изображена на рис.1.

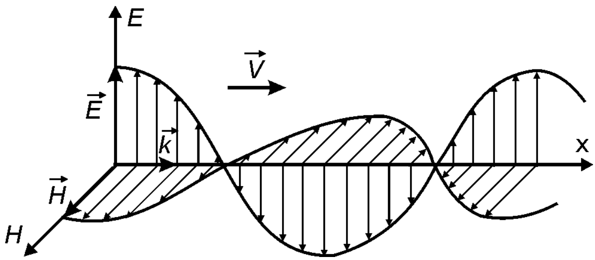

Рис. 1

Здесь $\vec{E}$ – световой вектор (электрическая составляющая электромагнитной волны); $\vec{H}$ – магнитная составляющая электромагнитной волны; $\vec{k}$ – волновой вектор, задающий направление распространения волны.

• Уравнения магнитной и электрической составляющих электромагнитной волны

$$E = E_o \cdot cos(\omega \cdot t - k \cdot x), \qquad H = H_o \cdot cos(\omega \cdot t - k \cdot x),$$

где E_o и H_o амплитуды электрической и магнитной составляющих электромагнитной волны; $\omega = 2\pi / T$ – циклическая частота колебаний поля волны; $k = 2\pi / \lambda$ – волновое число; λ – длина волны; T –период колебаний.

• Соотношения между электрической и магнитной составляющими плоской электромагнитной волны

$$\sqrt{\varepsilon \cdot \varepsilon_o} \cdot E = \sqrt{\mu \cdot \mu_o} \cdot H,$$

где ε и μ – диэлектрическая и магнитная проницаемости среды; ε_o – электрическая постоянная; μ_o – магнитная постоянная.

• Скорость света в среде

$$v_c = \frac{c}{n},$$

где $c = \dfrac{1}{\sqrt{\varepsilon_o \cdot \mu_o}}$ – скорость света в вакууме; $n = \sqrt{\varepsilon \cdot \mu}$ – показатель преломления среды.

• Длина световой волны в среде

$$\lambda_c = v_c \cdot T = \frac{c \cdot T}{n} = \frac{\lambda_o}{n}, \ \Delta = m \cdot \lambda,$$

где λ_c – длина световой волны в вакууме.

• Оптическая длина пути луча света:

$$L_o = n\,L\,.$$

где L – геометрическая длина пути луча в среде с показателем преломления n .

• Оптическая разность хода двух лучей

$$\Delta = \left| n_1 \cdot L_1 - n_2 \cdot L_2 \right|,$$

где L_1, $\cdot L_2$ – расстояния от источников до точки наблюдения; n_1, n_2·- показатели преломления сред; в которых распространяются лучи.

• Зависимость оптической разности фаз с оптической разностью хода:

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

где λ – длина световой волны.

• Условие максимального усиления света при интерференции:

$$\Delta = m \cdot \lambda \qquad (m = 0,\ 1,2,...).$$

• Условие максимального ослабления света при интерференции:

$$\Delta = (m + \frac{1}{2}) \cdot \lambda \qquad (m = 0,\ 1,2,...).$$

• Оптическая разность хода лучей, возникающая при отражении монохроматического света от тонкой пленки:

$$\Delta = 2 \cdot d \cdot \sqrt{n^2 - \sin^2 i}\ + \frac{\lambda}{2},$$

или

$$\Delta = 2 \cdot d \cdot n \cdot \cos r + \frac{\lambda}{2},.$$

где d – толщина пленки; n – показатель преломления пленки; i – . угол падения; r – угол преломления света в пленке.

• Радиус светлых колец Ньютона в отраженном свете

$$r_c = \sqrt{\frac{(2 \cdot m - 1)R\lambda}{2}}\ .$$

где m – номер кольца $(m = 0,\ 1,\ 2,\ 3,...)$; R – радиус кривизны линзы, λ - длина волны.

• Радиус темных колец Ньютона в отраженном свете

$$r_c = \sqrt{m \cdot R \cdot \lambda}\ .$$

• Угол φ отклонения лучей, соответствующий максимуму (светлая полоса) при дифракции на одной щели, определяется из условия

$$b \cdot \sin\varphi\ =\ \pm\,(2 \cdot m + 1) \cdot \frac{\lambda}{2} \qquad (m = 0,\ 1,\ 2,\ 3,...),$$

где b – ширина щели; m – порядковый номер максимума.

• Угол φ отклонения лучей, соответствующий минимуму (темная полоса) при дифракции на одной щели, определяется из условия

$$b \cdot \sin\varphi = \pm\, m \cdot \lambda \qquad (m = 0,\ 1,\ 2,\ 3,...),$$

где b – ширина щели; m – порядковый номер минимума.

• Угол φ отклонения лучей, соответствующий максимуму (светлая полоса) при дифракции света на дифракционной решетке, определяется из условия

$$d \cdot \sin\varphi = \pm m \cdot \lambda \quad (m = 0, 1, 2, 3, \ldots),$$

где d – период дифракционной решетки; λ – длина волны; m – порядок максимума.

• Длина дифракционной решетки $L_{реш} = d \cdot N$, где N – полное число щелей решетки.

• Разрешающая способность дифракционной решетки

$$R = \frac{\lambda}{\Delta\lambda} = m \cdot \lambda,$$

где $\Delta\lambda$ – наименьшая разность длин волн двух соседних спектральных линий (λ и $\lambda + \Delta\lambda$), при которой эти линии могут быть видны раздельно в спектре, полученном посредством данной решетки; N – полное число щелей решетки.

• Направление лучей, при которых возникает максимум при дифракции рентгеновских лучей на кристаллах, определяется из условия (формула Вульфа – Брэгга)

$$2 \cdot d \cdot \sin\theta = \pm m \cdot \lambda \quad (m = 0, 1, 2, 3, \ldots),$$

где θ – угол скольжения (угол между направлением пучка параллельных рентгеновских лучей, падающих на кристалл, и гранью кристалла); d – расстояние между атомными плоскостями кристалла.

• Степень поляризации света

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

где J_{max} и J_{min} – максимальная и минимальная интенсивности света, соответствующие двум взаимноперпендикулярным составляющим вектора напряженности световой волны.

• Закон Брюстера:

$$tg\, i_Б = n_{21},$$

где $i_Б$ – угол падения, при котором отразившийся от диэлектрика луч полностью поляризован; n_{21} – относительный показатель преломления второй среды относительно первой.

• Закон Малюса:

$$J = J_o \cos^2 \alpha,$$

где J_o – интенсивность плоскополяризованного света, падающего на анализатор; J – интенсивность этого света после анализатора; α – угол между направлением колебаний света, падающего на анализатор, и плоскостью пропускания анализатора (если колебания падающего света совпадают с этой плоскостью, то анализатор пропускает длинный свет без ослабления).

• Релятивистская масса

$$m = \frac{m_0}{(1-\frac{v^2}{c^2})^{0,5}}, \qquad \text{или} \qquad m = \frac{m_0}{\sqrt{(1-\beta^2)}},$$

где m_o – масса покоя частицы; v – ее скорость; c – скорость света в вакууме; $\beta = v/c$ – относительная скорость частицы, выраженная в долях скорости света.

• Взаимосвязь массы и энергии релятивистской частицы

$$E = m{\cdot}c^2, \text{ или } E = \frac{m_0 \cdot c^2}{\sqrt{(1-\beta^2)}} = \frac{E_0}{\sqrt{(1-\beta^2)}},$$

где $E_o = m_o{\cdot}c^2$ – энергия покоя частицы.

• Полная энергия свободной частицы

$$E = E_o + T,$$

где T – кинетическая энергия релятивистской частицы.

• Кинетическая энергия релятивистской частицы

$$T = (m - m_o)\, c^2, \quad \text{или} \quad T = E_o{\cdot}\left(\frac{1}{\sqrt{(1-\beta^2)}} - 1\right).$$

• Импульс релятивистской частицы:

$$p = mv \qquad \text{или} \qquad p = mc{\cdot}\frac{\beta}{\sqrt{(1-\beta^2)}}.$$

• Связь между полной энергией и импульсом релятивисткой частицы:

$$E^2 = E_o^2 + (pc)^2$$

• Закон Стефана – Больцмана:

$$R_e = \sigma{\cdot}T^4,$$

где R_e – излучательность (энергетическая светимость) абсолютно черного тела; σ – постоянная Стефана – Больцмана; T – термодинамическая температура Кельвина,

• Закон смещения Вина:

$$\lambda_м = b / T,$$

где $\lambda_м$ – длина волны, на которую приходится максимум спектральной плотности энергии излучения; b – постоянная Вина ($b = 2{,}90{\cdot}10^{-3}$ м·К).

• Квантовые свойства света:

энергия фотона

$$\varepsilon_ф = \hbar{\cdot}, \text{ или } \varepsilon_ф = h{\cdot}\nu = \frac{h \cdot c}{\lambda};$$

масса фотона

$$m_ф = \frac{\varepsilon_ф}{c^2} = \frac{h \cdot \nu}{c^2} = \frac{h}{\lambda \cdot c};$$

импульс фотона:

$$p_ф = m_ф \cdot c = \frac{h}{\lambda};$$

где $h = 6{,}6 \cdot 10^{-34}$ Дж·с - постоянная Планка; $\hbar = h/2\pi$ – постоянная Планка с чертой; ν – частота фотона; ω – циклическая частота; λ – длина световой волны; c –скорость света в вакууме.

• Формула Эйнштейна для фотоэффекта

$$\varepsilon_ф = A_в + T = A_в + \frac{m_e \cdot v_{max}^2}{2},$$

где $\varepsilon_ф$ – энергия фотона, падающего на поверхность металла; $A_в$ – работа выхода электрона; T – кинетическая энергия фотоэлектрона.

• Красная граница фотоэффекта:

$$\nu_{кр} = \frac{A_в}{h}, \quad \text{или} \quad \lambda_{кр} = \frac{h \cdot c}{A_в},$$

где $\nu_{кр}$ – минимальная частота света, при которой еще возможен фотоэффект; $\lambda_{кр}$ – максимальная длина волны света, при которой еще возможен фотоэффект; h – постоянная Планка; c – скорость света в вакууме.

• Формула Комптона:

$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = \frac{h}{m_o c}(1 - \cos\theta) = 2 \cdot \lambda_k \sin^2 \cdot \frac{\theta}{2},$$

где λ – длина волны фотона, встретившегося со свободным или слабо связанным электроном; λ' – длина волны фотона, рассеянного на угол θ после столкновения с электроном; m_o – масса покоящегося электрона; λ_k - комптоновская длина волны

$$\lambda_k = \frac{h}{m_o c} = 2{,}436 \text{ пм}$$

• Давление света при нормальном падении на поверхность

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

где E – облученность поверхности (лучистая энергия, падающая на единицу поверхности в единицу времени); w – объемная плотность лучистой энергии; ρ – коэффициент отражения света поверхностью.

Примеры решения задач

Пример 1*. От двух когерентных источников S_1 и S_2 (λ = 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?*

Решение

Дано: λ = 0,8 мкм = $8\cdot10^{-7}$ м, n = 1,33.	Изменение интерференционной картины на противоположную означает, что на тех участках экрана, где наблюдались интерференционные максимумы, стали наблюдаться интерференционные минимумы. Это возможно, если один из лучей меняет фазу на противоположную, что приводит к изменению оптической разности хода лучей на нечетное число половин длин волн, т. е.
Найти: d_{min} = ? м.	

$$\Delta_2 - \Delta_1 = (2m + l)\cdot\frac{\lambda}{2}, \qquad (1)$$

где Δ_1 – оптическая разность хода лучей до внесения пленки; Δ_2 – оптическая разность хода тех же лучей после внесения пленки, $m = 0, \pm1, \pm2, ...$

Наименьшей толщине d_{min} пленки соответствует $m = 0$. Тогда формула (1) примет вид

$$\Delta_2 - \Delta_1 = \frac{\lambda}{2}. \qquad (2)$$

Из чертежа (рис. 2)

$$\Delta_1 = L_2 - L_1,$$

$$\Delta_2 = L_2 - [\cdot(L_1 - d_{min}) + n\cdot d_{min}] = (L_2 - L_1) + d_{min}(n - 1).$$

Подставим выражения для Δ_1 и Δ_2 в формулу (2):

$$(L_2 - L_1) + d_{min}\cdot(n - 1) - (L_2 - L_1) = \frac{\lambda}{2}, \text{ или}$$

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

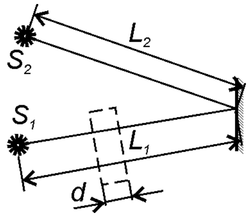

Рис. 2.

Отсюда получим

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

Подставив сюда числовые значения, найдем

$$d_{min} = \frac{0,8}{2(1,33-1)} = 1,.21 \text{ мкм} = 1,21\cdot10^{-6} \text{ м}.$$

Ответ: $d_{min} = 1,21\cdot10^{-6}$ м.

Пример 2. *На стеклянный клин с малым углом нормально к его грани падает параллельный пучок лучей монохроматического света с длиной волны λ = 0,6 мкм. Число N возникающих при этом интерференционных полос, приходящихся на 1 см, равно 10. Определить угол α клина.*

Решение

Дано: λ = 0,6 мкм = $6\cdot10^{-7}$ м, n = 1,5, $N = 10$, L = 1 см = 0,01 м.	Лучи, падая нормально к грани клина, отражаются как от верхней, так и от нижней грани. Эти лучи когерентны, поэтому на поверхности клина будут наблюдаться интерференционные полосы. Так как угол клина мал, то отраженные лучи 1 и 2 (рис. 3) будут практически параллельны.
Найти: α = ? °.	

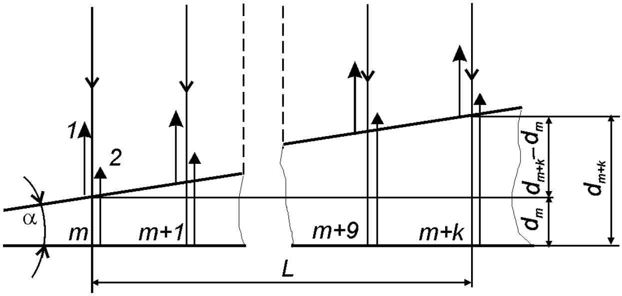

Рис. 3.

Темные полосы видны на тех участках клина, для которых разность хода лучей кратна нечетному числу половин длин волн:

$$\Delta = (m + \frac{1}{2})\cdot \lambda\ , \qquad (1)$$

где $m = 0,\ \pm l,\ \pm 2,....$

Разность хода Δ двух лучей складывается из разности оптических длин путей $2\cdot d\cdot n\cdot \cos r$ этих лучей и половины длины волны λ/2. Величина λ/2 представляет собой добавочную разность хода, возникающую при отражении луча от оптически более плотной среды. Подставляя в формулу (1) значение разности хода Δ лучей, получим

$$\Delta = 2\cdot d\cdot n\cdot \cos r + \frac{\lambda}{2}\ , \qquad (2)$$

где n – показатель преломления стекла; d – толщина клина в том месте, где наблюдается темная полоса, соответствующая номеру m ; r – угол преломления.

Согласно условию угол падения равен нулю, следовательно, и угол преломления равен нулю, а $\cos r = 1$. Раскрыв скобки в правой части равенства (2), после упрощения получим

$$2d\cdot n = m\,\lambda. \qquad (3)$$

Пусть произвольной темной полосе номера m соответствует толщина клина d_m, а темной полосе номера $m + k$ – толщина клина d_{m+k}. Тогда (см. рис. 2), учитывая, что m полос укладывается на расстоянии·L, найдем

$$\sin\alpha = \frac{d_{m+k} - d_m}{L}\ . \qquad (4)$$

Выразим d_{m+k} и d_m из (3) и подставим их в формулу (4). Тогда, учитывая, что из-за малости угла α $\sin\alpha \approx \alpha$, получим

$$\alpha = \frac{\frac{m+k}{2n}\lambda - \frac{m}{2n}\lambda}{L} = \frac{m\lambda}{2nL}\ .$$

Подставляя числовые значения физических величин, найдем

$$\alpha = \frac{10\cdot 0{,}6\cdot 10^{-6}}{2\cdot 1{,}5\cdot 0{,}01} = 2.\ 10^{-4}\ рад\ или\ 41{,}2''..$$

Ответ: α = 41,2".

Пример 3. *На дифракционную решетку в направлении нормали к ее поверхности падает монохроматический свет. Период решетки d = 2 мкм. Какого наибольшего порядка дифракционный максимум дает эта решетка в случае красного света (λ_1 = 0,7 мкм) и в случае фиолетового (λ_2 = 0,41 мкм)?*

Решение

Дано:
λ_1 = 0,7 мкм = $7\cdot10^{-7}$ м,
λ_2 = 0,41 мкм = $4{,}1\cdot10^{-7}$ м,
d = 2 мкм= $2\cdot10^{-7}$ м.

Найти: m = ?.

Из формулы главных максимумов дифракционной решетки для порядка дифракционного максимума можно записать

$$m = \frac{d \cdot \sin\varphi}{\lambda}, \qquad (1)$$

где d – период решетки; φ – угол между направлением на дифракционный максимум и нормалью к решетке; λ – длина волны монохроматического света.

Так как $\sin\varphi$ не может быть больше 1, то из формулы (1) следует что число m не может быть больше d/λ, т. е.

$$m \le d/\lambda. \qquad (2)$$

Подставив в формулу (2) числовые значения и учитывая, что m - целое, получим: для красных лучей $m_{кр} = 2$, а для фиолетовых лучей $m_c = 4$.

Ответ: наибольший порядок дифракционного максимума для красного света равен 2, а для фиолетового света – 4.

Пример 4. *Естественный луч света падает на полированную поверхность стеклянной пластины, погруженной в жидкость. Отраженный от пластины луч образует угол φ = 97° с падающим лучом (рис. 3). Определить показатель преломления жидкости, если отраженный свет максимально поляризован.*

Решение

Дано:
$\varphi = 97°$,
$n_2 = 1{,}5$.

Найти: n_1 = ?.

Согласно закону Брюстера луч света, отраженный от диэлектрика (рис. 4), максимально поляризован в том случае, если тангенс угла падения численно равен относительному показателю преломления: $tg\, i_Б = n_{21}$, где n_{21} – показатель преломления второй среды (стекла) относительно первой (жидкости).

Относительный показатель преломления равен отношению абсолютных показателей преломления. Следовательно, $tg\, i_Б = n_2 / n_1$. Так как угол падения равен углу отражения, то $i_Б = \varphi / 2$ и следовательно, $tg\, \varphi/2 = n_2 / n_1$, откуда $n_1 = n_2 / tg\,\varphi/2$.

Подставляя исходные данные, получим

$$n_1 = 1{,}5 / tg\, 48{,}5^o = 1{,}5 / 1{,}13 = 1{,}33.$$

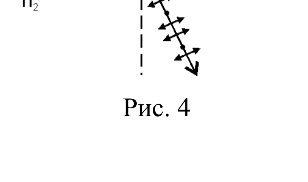

Рис. 4

Ответ: $n_1 = 1{,}33$.

Пример 5. *Два николя N_1 и N_2 расположены так, что угол между плоскостями поляризаторов составляет $\alpha = 60°$. Определить, во сколько раз уменьшится интенсивность J_o естественного света при прохождении через один николь N_1 и при прохождении через оба николя N_1 и N_2. Коэффициент поглощения света в николях равен 0,05. Потери на отражение света не учитывать.*

Решение

Дано:
$\alpha = 60°$,
$k = 0{,}05$.
Найти: $J_o / J_1 = ?$.
$J_o / J_2 = ?$.

Естественный свет, падая на грань призмы Николя (рис. 5), расщепляется вследствие двойного лучепреломления на два луча: обыкновенный и необыкновенный. Оба луча одинаковы по интенсивности и полностью поляризованы.

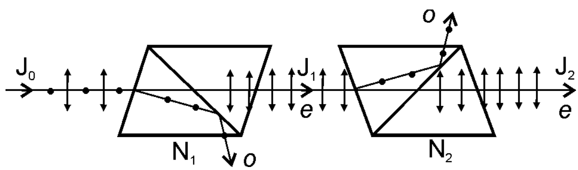

Рис. 5

Плоскость колебаний необыкновенного луча лежит в плоскости чертежа (плоскость главного сечения). Плоскость колебаний обыкновенного луча перпендикулярна плоскости чертежа. Обыкновенный луч *o* вследствие полного внутреннего отражения от границы раздела призм отбрасывается на зачерненную поверхность призмы и поглощается ею. Необыкновенный, луч *e* проходит через призму, уменьшая свою интенсивность вследствие поглощения. Так как интенсивность падающего луча распределяется между обыкновенным и необыкновенным лучами поровну, то интенсивность света, прошедшего через первую призму,

$$J_1 = 0{,}5 \cdot J_0 (1 - k).$$

Относительное уменьшение интенсивности света получим, разделив интенсивность J_0 естественного света, падающего на первый николь, на интенсивность J_1 поляризованного света:

$$\frac{J_o}{J_1} = \frac{J_o}{0{,}5 \cdot J_o \cdot (1-k)} = \frac{2}{1-k}. \qquad (1)$$

Подставив в (1) числовые значения, найдем

$$\frac{J_o}{J_1} = \frac{2}{(1-0{,}05)} = 2{,}1.$$

Плоскополяризованный луч света интенсивности J_1 падает на второй николь N_2 и также расщепляется на два луча различной интенсивности: обыкновенный и необыкновенный. Обыкновенный луч полностью поглощается призмой, поэтому его интенсивность нас не интересует. Интенсивность необыкновенного луча J_2, вышедшего из призмы N_2, определяется законом Малюса (без учета поглощения света во втором николе):

$$J_2 = J_1 \cos^2 \alpha,$$

где α – угол между плоскостью колебаний в поляризованном луче и плоскостью колебаний, пропускаемых николем без ослабления.

Учитывая потери интенсивности на поглощение во втором николе, подучим

$$J_2 = J_1 (1 - k) \cdot \cos^2 \alpha.$$

Искомое уменьшение интенсивности при прохождении света через оба николя найдем, разделив интенсивность J_o естественного света на интенсивность J_2 света, прошедшего систему из двух николей:

$$\frac{J_o}{J_2} = \frac{J_o}{J_1 \cdot (1 - k) \cdot \cos^2 \alpha} = \frac{2}{1 - k}.$$

Заменяя отношение J_o / J_1 его выражением по формуле (1), тогда

$$\frac{J_o}{J_2} = \frac{2}{(1 - k)^2 \cdot \cos^2 \alpha}.$$

Подставляя исходные данные и произведя вычисления, получим:

$$\frac{J_o}{J_2} = \frac{2}{(1 - 0{,}05)^2 \cdot \cos^2 60^\circ} = 8{,}86.$$

Ответ: после прохождения через один поляризатор интенсивность уменьшается в 2,1 раза, после прохождения через два поляризатора свет уменьшает интенсивность в 8,86 раз.

Пример 6. *Определить импульс p и кинетическую энергию T электрона, движущегося со скоростью v = 0,9 c, где c – скорость света в вакууме.*

Решение

Дано:
$v = 0{,}9\ c$,
$m_o = 9{,}1 \cdot 10^{-31}$ кг,
$E_o = 0{,}51$ МэВ,
$c = 3 \cdot 10^8$ м/с.
Найти: p = ? кг·м/с.
T = ? Дж, T = ? эВ,

Импульсом частицы называется произведение массы частицы на ее скорость:

$$p = m \cdot v. \qquad (1)$$

Так как скорость электрона близка к скорости света, то необходимо учесть зависимость массы от скорости, определяемую по формуле

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{(1 - \beta^2)}}, \qquad (2)$$

где m_o – масса покоя частицы; v – ее скорость; c – скорость света в вакууме; $\beta = v / c$ – относительная скорость частицы, выраженная в долях скорости света.

Заменив в формуле (1) массу m ее выражением (2) с учетом того, что $v = \beta \cdot c$, получим

$$p = m_o c \cdot \frac{\beta}{\sqrt{(1-\beta^2)}}. \qquad (3)$$

Подставив числовые значения величин, входящих в формулу (3):

$$p = \frac{9{,}1 \cdot 10^{-31}}{\sqrt{(1-0{,}9^2)}} \cdot 0{,}9 \cdot 3 \cdot 10^8 = 5{,}6 \cdot 10^{-22} \text{ кг·м/с}.$$

Кинетическая энергия T релятивистской частицы определяется как разность между полной энергией E и энергией покоя E_o этой частицы, т. е. $T = = E - E_o$. Так как $E = m \cdot c^2$ и $E_o = m_o \cdot c^2$, то, учитывая зависимость массы от скорости, получим

$$T = \frac{m_0 \cdot c^2}{\sqrt{(1-\beta^2)}} - m_o \cdot c^2,$$

или окончательно

$$T = E_o \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{(1-\beta^2)}} - 1\right). \qquad (4)$$

Подставив числовые данные, выраженные в единицах СИ, найдем:

$$T = 9.1 \cdot 10^{-31} \cdot (3 \cdot 10^8)^2 \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{(1-0{,}9^2)}} - 1\right) =$$

$$= 8{,}18 \cdot 10^{-14} \cdot (2{,}29 - 1) \text{ Дж} = 1{,}06 \cdot 10^{-13} \text{ Дж}.$$

Во внесистемных единицах энергия покоя электрона E_o = 0,51 МэВ, тогда из формулы (4) получим

$$T = 0{,}51 \cdot 1{,}29 = 0{,}66 \text{МэВ}.$$

Ответ: p = $5{,}6 \cdot 10^{-22}$ кг·м/с, T = $06 \cdot 10^{-13}$ Дж = 0,66МэВ.

Пример 7. *Определить релятивистский импульс электрона, обладающего кинетической энергией, равной энергии покоя электрона.*

Решение

Дано: $T = E_o$.	
Найти: p = ? °.	

Решение задачи сводится к установлению соотношения между релятивистским импульсом p частицы и ее кинетической энергией T. Сначала установим связь между релятивистским импульсом и полной энергией частицы.

Полная энергия E частицы прямо пропорциональна ее массе m, т.е.

$$E = m \cdot c^2. \qquad (1)$$

Зависимость массы от скорости определяется формулой

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{(1-\beta^2)}}, \qquad (2)$$

где m_o – масса покоя частицы; v – ее скорость; c – скорость света в вакууме; $\beta = v / c$ – относительная скорость частицы, выраженная в долях скорости света.

Заменив массу m в формуле (1) ее выражением (2) и приняв во внимание, что $E_o = m_o \cdot c^2$, получим

$$E = \frac{E_0}{\sqrt{(1-\beta^2)}} . \tag{3}$$

Возведем обе части равенства (3) в квадрат, тогда

$$E^2 = \frac{E_0{}^2}{(1-\beta^2)}, \tag{4}$$

откуда

$$E^2 - (\beta \cdot E)^2 = E_o{}^2.$$

Так как

$$\beta \cdot E = (v/c)mc^2 = m \cdot v \cdot c = p \cdot c,$$

то равенство (4) можно представить в виде

$$E^2 - p^2 \cdot E^2 = E_o{}^2,$$

откуда релятивистский импульс

$$p = \frac{1}{c}\sqrt{E^2 - E_o{}^2} = \frac{1}{c}\sqrt{(E - E_o)\cdot(E + E_o)} .$$

Величина $E - E_o$ (разность между полной энергией и энергией покоя) представляет собой кинетическую энергию частицы T. Тогда, учитывая, что $E + E_o = T + 2 \cdot E_o$, связь между импульсом и кинетической энергией релятивистской частицы представим в виде

$$p = \frac{1}{c}\sqrt{T \cdot (T + 2E_o)} .$$

По условию $T = E_o$, тогда

$$p = \frac{1}{c}\sqrt{E_o \cdot (E_o + 2E_o)} = \frac{E_o}{c}\sqrt{3} = m_o \cdot c\sqrt{3} .$$

Подставляя исходные данные и произведя вычисления получим:

$$p = 9{,}1 \cdot 10^{-31} \cdot 3 \cdot 10^{8} \cdot 1{,}73 = 47{,}2 \cdot 10^{-23}\ Дж$$

Ответ: $p = 47{,}2 \cdot 10^{-23}$ Дж.

Пример 8. *Длина волны, на которую приходится максимум энергии в спектре излучения абсолютно черного тела, $\lambda_m = 0{,}58$ мкм. Определить энергетическую светимость (излучательность) R_e поверхности тела.*

Решение

Дано:	
λ_m = 0, 58 мкм = $5{,}8\cdot10^{-7}$ м, b = $2{,}90\cdot10^{-3}$ м·К. σ = $5{,}67\cdot10^{-8}$ Вт/(м^{2}К^4).	Энергетическая светимость R_e абсолютно черного тела в соответствии с законом Стефана – Больцмана пропорциональна четвертой степени термодинамической температуры и выражается формулой
Найти: R_e = ? Вт/м^2.	

$$R_e = \sigma\cdot T^4, \qquad (1)$$

где σ – постоянная Стефана – Больцмана; T – термодинамическая температура.

Температуру T можно выразить с помощью закона смещения Вина:

$$\lambda_м = b / T, \qquad (2)$$

где $\lambda_м$ – длина волны, на которую приходится максимум энергии излучения; b – постоянная Вина.

Используя формулы (2) и (1), получаем

$$R_e = \sigma\left(\frac{b}{\lambda_m}\right)^4. \qquad (3)$$

Подставляя исходные данные и произведя вычисления, получим

$R_e = 5{,}67\cdot10^{-8}\cdot(2{,}90\cdot10^{-3} / 5{,}8\cdot10^{-6}) = 3{,}54\cdot10^7$ Вт/м^2 = 35,4 МВт/м^2.

Ответ: R_e = 35,4 МВт/м^2.

Пример 9. *Определить максимальную скорость V_{max} фотоэлектронов, вырываемых с поверхности серебра: 1) ультрафиолетовым излучением с длиной волны λ_1 = 0,155 мкм; 2) γ-излучением с длиной волны λ_2 = 1 пм.*

Решение

Дано:	
λ_1 = 0,155 мкм = = $1{,}55\cdot10^{-7}$ м, λ_2 = 1 пм = 10^{-12} м, h = $6{,}63\cdot10^{-34}$Дж·с.	Максимальную скорость фотоэлектронов можно определить из уравнения Эйнштейна для фотоэффекта
Найти: v_{max1} = ? м/с, v_{max2} = ? м/с.	

$$\varepsilon_ф = A + T_{max}, \qquad (1)$$

где $\varepsilon_ф$ – энергия фотонов, падающих на поверхность металла; A – работа выхода; T_{max} – максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов. Энергия фотона вычисляется также по формуле

$$\varepsilon_ф = \frac{h\cdot c}{\lambda}, \qquad (2)$$

где h - постоянная Планка; λ – длина световой волны; c –скорость света в вакууме.

Кинетическая энергия электрона может быть выражена или по классической формуле

$$T_{max} = \frac{m_e\cdot v_{max}^2}{2}, \qquad (3)$$

или по релятивистской формуле

$$T = E_o \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{(1-\beta^2)}} - 1\right), \qquad (4)$$

в зависимости от того, какая скорость сообщается фотоэлектрону.

Скорость фотоэлектрона зависит от энергии фотона, вызывающего фотоэффект. Если энергия фотона $\varepsilon_{ф}$ много меньше энергии покоя E_o электрона, то может быть применена формула (3), если же $\varepsilon_{ф}$ сравнима по величине с E_o, то вычисление по формуле (3) приводит к ошибке, поэтому нужно пользоваться формулой (4).

1. Вычислим энергию фотона ультрафиолетового излучения по формуле (2):

$$\varepsilon_{ф1} = \frac{6{,}63 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^{8}}{1{,}55 \cdot 10^{-7}} = 1.28 \cdot 10^{-18}\text{Дж},$$

или

$$\varepsilon_{ф1} = \frac{1{,}28 \cdot 10^{-18}}{1{,}6 \cdot 10^{-19}} = 8 \text{ эВ}.$$

Полученная энергия фотона (8 эВ) много меньше энергии покоя электрона (0,51 МэВ), поэтому в данном случае кинетическую энергию фотоэлектрона в формуле (1) можно выразить по классической формуле (3), тогда

$$\varepsilon_{ф1} = A + \frac{m_e \cdot v_{max}^2}{2},$$

откуда

$$v_{max} = \sqrt{\frac{2(\varepsilon_{ф1} - A)}{m_o}}.$$

Подставляя исходные данные и произведя вычисления, получим:

$$v_{max1} = \sqrt{\frac{2(1{,}28 \cdot 10^{-18} - 4{,}7 \cdot 1{,}6 \cdot 10^{-19})}{9{,}1 \cdot 10^{-31}}} = 1{,}08 \cdot 10^{6} \text{ м/с}.$$

2. Вычислим энергию фотона γ - излучения

$$\varepsilon_{ф2} = \frac{6{,}63 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^{8}}{10^{-12}} = 1.28 \cdot 10^{-18}\text{Дж},$$

или

$$\varepsilon_{ф2} = \frac{1{,}99 \cdot 10^{-13}}{1{,}6 \cdot 10^{-19}} = \text{эВ} = 1{,}24 \cdot 10^{6} \text{ эВ} = 1{,}24 \text{ МэВ}.$$

Работа выхода электрона (A = 4,7 эВ) пренебрежимо мала по сравнению с энергией фотона ($\varepsilon_{ф2}$ = 1,24 МэВ), поэтому можно принять, что максимальная кинетическая энергия электрона равна энергии фотона: $T_{max} = \varepsilon_{ф2}$ = 1,24 МэВ. Так как в данном случае кинетическая энергия электрона больше его энергии покоя, то для вычисления скорости электрона следует взять релятивистскую формулу кинетической энергии (4). Из этой формулы найдем

$$\beta = \sqrt{\frac{(2E_o + T)T}{E_o + T}}.$$

Учитывая, что $v = c\cdot\beta$ и $T_{max} = \varepsilon_{ф2}$, получим

$$v_{max} = c\sqrt{\frac{(2E_o + \varepsilon_{ф2})\varepsilon_{ф2}}{E_o + \varepsilon_{ф2}}}.$$

Подставляя исходные данные и произведя вычисления, получим:

$$v_{max2} = 3\cdot 10^8\sqrt{\frac{(2\cdot 0{,}51 + 1{,}24)1{,}24}{0{,}51 + 1{,}28}} = 2{,}85\cdot 10^8 \text{ м/с}.$$

Ответ: $v_{max1} = 1{,}08\cdot 10^6$ м/с, $v_{max2} = 2{,}85\cdot 10^8$ м/с.

Пример 10. *В результате эффекта Комптона фотон при соударении с электроном был рассеян на угол $\theta = 90°$. Энергия рассеянного фотона $\varepsilon' = 0{,}4$ МэВ. Определить энергию фотона ε до рассеяния.*

Решение

Дано:
$\varepsilon' = 0{,}4$ МэВ,
$\theta = 90°$,
$E_o = 0{,}511$ МэВ.
Найти: ε = ? МэВ.

Для определения энергии первичного фотона воспользуемся формулой Комптона:

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

где λ – длина волны фотона, встретившегося со свободным или слабо связанным электроном; λ' – длина волны фотона, рассеянного на угол θ после столкновения с электроном; m_o – масса покоя электрона; h – постоянная Планка; c – скорость света в вакууме.

По определению энергия фотона

$$\varepsilon_ф = h\cdot\nu = \frac{h\cdot c}{\lambda}.$$

Тогда длины волн рассеянного λ' и исходного фотона λ можно выразить через величины их энергий ε' и ε:

$$\lambda' = \frac{h\cdot c}{\varepsilon'} \quad \text{и} \quad \lambda = \frac{h\cdot c}{\varepsilon},$$

и формулу (1) можно представить в виде

$$\frac{h\cdot c}{\varepsilon'} - \frac{h\cdot c}{\varepsilon} = \frac{hc}{m_o c^2}(1 - \cos\theta).$$

Откуда, учитывая, что $m_o\cdot c^2 = E_o$, искомая энергия

$$\varepsilon = \frac{\varepsilon \cdot E_o}{E_o - \varepsilon' \cdot (1 - \cos\theta)} . \qquad (2)$$

Вычисления по формуле (2) удобнее вести во внесистемных единицах. Так как для электрона E_o = 0,511 МэВ, то

$$\varepsilon = \frac{0{,}4 \cdot 0{,}511}{0{,}511 - 0{,}4 \cdot (1 - \cos 90°)} = 1{,}85 \text{ МэВ}.$$

Ответ: ε = 1,85 МэВ.

Пример 11. *Пучок монохроматического света с длиной волны λ = 663 нм падает нормально на зеркальную плоскую поверхность. Поток энергии излучения Φ_e = 0,6 Вт. Определить силу давления F, испытываемую этой поверхностью, и число фотонов n_1, ежесекундно падающих на поверхность.*

Решение

Дано:
λ = 663 нм = $6{,}63 \cdot 10^{-7}$ м,
Φ_e = 0,6 Вт,
t = 1 с, ρ = 1.
Найти: F = ? Н,
n_1 = ?.

Сила светового давления на поверхность равна произведению светового давления p на площадь S поверхности:

$$F = pS. \qquad (1)$$

Световое давление p может быть найдено по формуле

$$p = E_e \cdot (\rho + 1) / c, \qquad (2)$$

где E_e – энергетическая освещенность (облученность); c – скорость света в вакууме; ρ – коэффициент отражения.

Подставляя правую часть выражения (2) в формулу (1), получаем

$$F = E_e \cdot S \cdot (\rho + 1) / c.$$

Поскольку E_eS представляет собой поток излучения Φ_e, то

$$F = \Phi_e \cdot (\rho + 1) / c.$$

Произведем вычисления, учитывая, что для зеркальной поверхности ρ = 1:

$$F = \frac{0{,}6}{3 \cdot 10^8} (1 + 1) = 4 \cdot 10^{-9} H.$$

Произведение энергии ε одного фотона на число фотонов n_1, ежесекундно падающих на поверхность, равно мощности излучения, т.е. потоку излучения: $\Phi_e = \varepsilon \cdot n_1$, а так как энергия фотона $\varepsilon = hc/\lambda$, то

$$\Phi_e = \frac{h \cdot c}{\lambda} \cdot n_1.$$

Откуда

$$n_1 = \frac{\Phi_e \cdot \lambda}{h \cdot c} .$$

Подставляя исходные данные и произведя вычисления, получим:

$$n_1 = \frac{0{,}6 \cdot 6{,}63 \cdot 10^{-7}}{6{,}63 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^{8}} = 2 \cdot 10^{18}\ c^{-1}.$$

Ответ: $F = 4 \cdot 10^{-9}$ Н, $n_1 = 2 \cdot 10^{18}$ с$^{-1}$.

Задачи для самостоятельного решения

1. На пути пучка света поставлена стеклянная пластина толщиной $d = 1$ мм так, что угол падения луча $\alpha = 30°$. Насколько изменится оптическая длина пути светового пучка? [на 550 мкм]

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

3. Радиус второго тёмного кольца Ньютона в отраженном свете $r_2 = 0{,}4$ мм. Определить радиус R кривизны плосковыпуклой линзы, взятой для опыта, если она освещается монохроматическим светом с длиной волны $\lambda = 0{,}64$ мкм. [125 мм]

4. На пластину с щелью, ширина которой $a = 0{,}05$ мм, падает нормально монохроматический свет с длиной волны $\lambda = 0{,}7$ мкм. Определить угол φ отклонения лучей, соответствующих первому дифракционному максимуму. [1°12']

5. Дифракционная решетка, освещенная нормально падающим монохроматическим светом, отклоняет спектр третьего порядка на угол $\varphi_1 = 30°$. На какой угол φ_2 отклоняет она спектр четвертого порядка? [41° 50']

6. Угол преломления луча в жидкости $r = 35°$. Определить показатель преломления n жидкости, если известно, что отраженный пучок света максимально поляризован. [1,43]

7. На сколько процентов уменьшается интенсивность света после прохождения через призму Николя, если потери света составляют 10 %? [на 55%]

8. При какой скорости v релятивистская масса частицы в 3 раза больше массы покоя этой частицы? [$2{,}83 \cdot 10^8$ м/с]

9. Определить скорость v электрона, имеющего кинетическую энергию $T = 1{,}53$ МэВ. [$2{,}91 \cdot 10^8$ м/с]

10. Электрон движется со скоростью $v = 0{,}6c$, где c – скорость света в вакууме. Определить релятивистский импульс p электрона. [$2{,}0 \cdot 10^{-22}$ кг ·м/с]

11. Вычислить энергию, излучаемую за время $t = 1$ мин с площади $S = 1$ см^2 абсолютно черного тела, температура которого $T = 1000$ К. [340Дж]

12. Длина волны, на которую приходится, максимум энергии излучения

абсолютно черного тела, λ = 0,6 мкм. Определить температуру T тела. [4,82 кК]

13. Определить максимальную спектральную плотность $r_{(\lambda,T)max}$ энергетической светимости (излучательности), рассчитанную на 1 нм в спектре излучения абсолютно черного тела. Температура тела T = 1 К. [13 Вт/(м^2·им)]

14. Определить энергию ε, массу m и импульс p фотона с длиной волны λ = 1,24 нм. [1,60·10^{-16} Дж; 1,78·10^{-33} кг; 5,35·10^{-25} кг·м/с]

15. На пластину падает монохроматический свет (λ = 0,42 мкм). Фототок прекращается при задерживающей разности потенциалов U = 0,95 В. .Определить работу A выхода электронов с поверхности пластины. [2 эВ]

16. На цинковую пластину падает пучок ультрафиолетового излучения (λ = 0,2 мкм). Определить максимальную кинетическую энергию K_{max} и максимальную скорость V_{max} фотоэлектронов. [2,2 эВ; 8,8·10^5 м/с]

17. Определить максимальную скорость V_{max} фотоэлектрона, вырванного с поверхности металла γ– квантом с энергией ε = 1,53 МэВ. [2,91·10^8 м/с]

18. Определить угол рассеяния фотона θ, испытавшего соударение со свободным электроном, если изменение длины волны при рассеянии $\Delta\lambda$ = = 3,63пм. [120°]

19. Фотон с энергией ε_1, равной энергии покоя электрона, рассеялся на свободном электроне на угол θ = 120°. Определить энергию ε_2 рассеянного фотона и кинетическую энергию T электрона отдачи (в единицах m_oc^2). [0,4·m_oc^2 ; 0,6 m_oc^2]

20. Поток энергии, излучаемой электрической лампой, Φ_e = 600 Вт. На расстоянии r = 1 м от лампы перпендикулярно падающим лучам расположено круглое плоское зеркальце диаметром d = 2 см. Определить силу F светового давления на зеркальце. Лампу рассматривать как точечный изотропный излучатель. [0,1 нН]

21. Параллельный пучок монохроматического света с длиной волны λ = = 0,663 мкм падает на зачернённую поверхность и производит на нее давление p = 0,3 мкПа. Определить концентрацию n фотонов в световом пучке. [10^{13} фотонов/м^3]

ЭЛЕМЕНТЫ АТОМНОЙ ФИЗИКИ И КВАНТОВОЙ МЕХАНИКИ. ФИЗИКА ТВЕРДОГО ТЕЛА

Основные формулы

Элементы квантовой механики

• Длина волны де Бройля:

$$\lambda_Б = \frac{h}{p},$$

где p – импульс частицы.

• Импульс частицы и его связь с кинетической энергией T:

а) в нерелятивистском случае

$$p = m_o \cdot v\,, \qquad p = \sqrt{2 \cdot m_o T}\,,$$

б) в релятивистском случае

$$p = mv = \frac{m_o v}{\sqrt{(1-(v/c)^2)}}\,, \qquad p = \frac{1}{c}\sqrt{(2E_o + T)\cdot T}\,,$$

где m_o – масса покоя частицы; m – релятивистская масса; v – скорость частицы; c – скорость света в вакууме; $E_o = m_o c^2$ – энергия покоя частицы.

• Соотношение неопределенностей:

а) $\Delta p_x \cdot \Delta x > h$ (для координаты и импульса), где Δp_x – неопределенность проекции импульса на ось х; Δx – неопределенность координаты;

б) $\Delta E \cdot \Delta t > h$ (для энергии и времени), где ΔE – неопределенность энергии; Δt – время жизни квантовой системы в данном энергетическом состоянии.

• Одномерное уравнение Шредингера для стационарных состояний

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

где $\psi(x)$ – волновая функция, описывающая состояние частицы; m – масса частицы; E – полная энергия; $U = U(x)$ - 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 участке dx.

• Вероятность обнаружения частицы в интервале от x_1 до x_2

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

• Решение уравнения Шредингера для одномерного бесконечно глубокого, прямоугольного потенциального ящика: $0 < x < L$:

а) $\psi_n(x) = \sqrt{\frac{2}{L}} \cdot \sin\frac{\pi n}{L}x$ (собственная нормированная волновая функция при $0 \le x \le L$),

б) $E_n = \frac{\pi^2\hbar^2}{2mL^2}n^2$ (собственное значение энергии),

где n – квантовое число (n = 1, 2, 3,...); L – ширина ящика.

В области $x < 0\,,\ x > L\ \ U = \infty\ ,\ \psi_n(x) = 0.$

Теория атома водорода по Бору

• Момент импульса электрона (второй постулат Бора)

$$m_e \cdot v_n \cdot r_n = n \cdot \frac{h}{2\pi},$$

где m_e – масса электрона; v_n и r_n – скорость и радиус орбиты электрона в стационарном состоянии, $(n = 1, 2, 3, ...)$ – номер состояния (главное квантовое число); h – постоянная Планка.

• Радиус n - й стационарной орбиты:

$$r_n = a \cdot n^2,$$

где $a =$ 52,9 пм – радиус первой боровской орбиты.

Энергия электрона в атоме водорода

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

где E_i = 13,6 эВ - энергия ионизации атома водорода.

• Энергия, излучаемая или поглощаемая атомом водорода

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

или

$$\varepsilon = E_i \cdot \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2}\right),$$

где n – квантовое число, соответствующее энергетическому уровню, на который переходит электрон; m – квантовое число, соответствующее энергетическому уровню, с которого совершается переход электрона в атоме.

• Спектроскопическое волновое число

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

где λ – длина волны излучения или поглощения атомом; $R = 1{,}097 \cdot 10^7$ м$^{-1}$ – постоянная Ридберга.

Атомное ядро. Радиоактивность

• Массовое число ядра (число нуклонов в ядре)

$$A = Z + N,$$

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

• Закон радиоактивного распада:

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

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

• Число ядер, распавшихся за время t

$$\Delta N = N_o - N = N_o(l - e^{-\lambda \cdot t}).$$

В случае если интервал времени Δt, за который определяется число распавшихся ядер, много меньше периода полураспада $T_п$, то число распавшихся ядер можно определить по формуле

$$\Delta N = \lambda N_o \Delta t.$$

• Зависимость периода полураспада от постоянной радиоактивного распада

$$T_п = \ln 2 / \lambda = 0{,}693 / \lambda .$$

• Среднее время τ жизни радиоактивного ядра, т. е. интервал времени, за который число нераспавшихся ядер уменьшается в e раз

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

• Число N атомов, содержащихся в радиоактивном изотопе:

$$N = \frac{m}{\mu} N_A ,$$

где m – масса изотопа; μ – молярная масса; N_A – постоянная Авогадро.

• Активность радиоактивного изотопа

$$A = -\frac{dN}{dt} = \lambda \cdot N , \qquad \text{или}$$

$$A = \lambda \cdot N_o e^{-\lambda \cdot t} = A_o \cdot e^{-\lambda \cdot t} ,$$

где dN – число ядер, распадающихся за интервал времени dt ; A_o – активность изотопа в начальный момент времени.

• Удельная активность изотопа

$$a = A/m.$$

• Дефект массы ядра

$$\Delta m = Z \cdot m_p + (A - Z) \cdot m_n - m_A ,$$

где Z – зарядовое число (число протонов в ядре); A – массовое число (число нуклонов в ядре); $(A - Z)$ – число нейтронов в ядре; m_p – масса протона; m_n – масса нейтрона, m_A – масса ядра.

• Энергия связи ядра

$$E_{св} = \Delta m \cdot c^2 ,$$

где Δm – дефект массы ядра; c – скорость света в вакууме.

• Во внесистемных единицах энергия связи ядра

$$E_{св} = 931 \cdot \Delta m ,$$

где Δm – дефект массы в а. е. м.; 931 – коэффициент пропорциональности (1 а. е. м.~931 МэВ).

Теплоемкость кристалла

• Средняя энергия квантового одномерного осциллятора

$$< \varepsilon > = h\nu + \frac{h\nu}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1} ,$$

где $\varepsilon_0 = h\nu$ – нулевая энергия осциллятора; h – постоянная Планка; ν – частота колебаний осциллятора; k – постоянная Больцмана; T – термодинамическая температура.

• Молярная внутренняя энергия системы, состоящей из невзаимодействующих квантовых осцилляторов

$$U = U_o + 3 \cdot R \frac{\Theta_E}{e^{\frac{\Theta_E}{T}} - 1},$$

где R – молярная газовая постоянная; $\Theta_E = h\nu / k$ – характеристическая температура Эйнштейна; $U_o = \frac{2}{3} R \cdot \Theta_E$ - нулевая энергия (по Эйнштейну).

• Молярная теплоемкость кристаллического твердого тела до Дебаю:
а) в области низких температур $T \ll \Theta_D$

$$C\mu = \frac{12\pi^4}{5} \cdot R \left(\frac{T}{\Theta_D} \right)^3,$$

б) в области высоких температур $T \gg \Theta_D$

$$C\mu = 3 \cdot R,$$

где $\Theta_D = h\nu_{max} / k$ – характеристическая температура Дебая.

• Теплота, необходимая для нагревания тела:

$$Q = \frac{m}{\mu} \int_{T_1}^{T_2} C_\mu dT,$$

где m – масса тела; μ – молярная масса; T_1 и T_2 – начальная и конечная температуры тела.

• Распределение свободных электронов в металле по энергиям при 0 K

$$dn(\varepsilon) = \frac{1}{2\pi^2} \left(\frac{2m}{\hbar^2} \right)^{3/2} \varepsilon^{0,5} d\varepsilon,$$

где $dn(\varepsilon)$ – концентрация электронов, энергии которых заключены в пределах от ε до $\varepsilon + d\varepsilon$; m – масса электрона.

Это выражение справедливо при $\varepsilon < E_f$ (где E_f – энергия или уровень Ферми).

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

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

где n – концентрация электронов в металле.

Полупроводники

• Удельная проводимость собственных полупроводников

$$\sigma = e\,(b_n + b_p),$$

где e – элементарный заряд; n – концентрация носителей заряда (электронов и дырок); b_n и b_p – подвижности электронов и дырок.

• Напряжение на гранях прямоугольного образца при эффекте Холла, холловская разность потенциалов,

$$U_H = R_H B \cdot j \cdot a \cdot,$$

где R_H – постоянная Холла; B – магнитная индукция; j – плотность тока; a – ширина пластины (образца).

• Постоянная Холла для полупроводников типа алмаз, германий, кремний и др., обладающих носителями заряда одного вида (n или p):

$$R_H = \frac{3\pi}{8} \cdot \frac{1}{en},$$

где n – концентрация носителей заряда.

Примеры решения задач

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

Решение

Дано:
U_1 = 51 В,
U_2=510 кВ,
$e = 1{,}6\cdot10^{-19}$ *Кл,*
$h = 6{,}63\cdot10^{-34}$Дж·с,
$m_o = 9.1\cdot10^{-31}$·кг,
$c = 3\cdot10^8$ м/с.
Найти: $\lambda_{Б1}$ *и* $\lambda_{Б2}$ = ? м.

Согласно гипотезе де Бройля электрону можно поставить в соответствие длину волны

$$\lambda_Б = \frac{h}{p}, \qquad (1)$$

где p – импульс частицы; h – постоянная Планка.

Импульс электрона, прошедшего ускоряющую разность потенциалов U, можно определить через ее кинетическую энергию, которая согласно закону сохранения энергии равна работе ускоряющего поля $e\cdot U$, то есть

$$T = e\cdot U. \qquad (2)$$

Связь импульса с кинетической энергией при малых скоростях движения, когда кинетическая энергия частицы много меньше ее покоя, имеет вид

$$p = \sqrt{2\cdot m_o T}, \qquad (3)$$

где m_o – масса покоя частицы.

В случае, когда кинетическая энергия сравнима с энергией покоя частицы, связь импульса с кинетической энергией определяется соотношением

$$p = \frac{1}{c}\sqrt{(2E_o + T)\cdot T}, \qquad (4)$$

где m – релятивистская масса; $E_o = m_o c^2$ – энергия покоя частицы.

С учетом (3) и (4) формулу (1) перепишем в виде:

при $T \ll E_o$

$$\lambda_{Б1} = \frac{h}{\sqrt{2m_o T}}, \qquad (5)$$

при $T \sim E_o$

$$\lambda_{Б2} = \frac{ch}{\sqrt{(2E_o + T)T}}. \qquad (6)$$

При U_1 = *51 В* кинетические энергии электрона

$$T_1 = e\cdot U_1 = 1{,}6\cdot 10–19\cdot 51 = 81{,}6\ 10^{-19}\ Дж,$$
$$E_o = 9.1\cdot 10^{-31}\cdot(3\cdot 10^8)^2 = 81{,}9\ 10^{-15}\ Дж.$$

Как видно $T_1 << E_o$, поэтому согласно формуле (5)

$$\lambda_{Б1} = \frac{6{,}62\cdot 10^{-34}}{\sqrt{2\cdot 9{,}1\cdot 10^{-31}\cdot 8{,}16\cdot 10^{-18}}} = 1{,}71\cdot 10^{-10}\ м = 171\ пм.$$

При $U_2 = 5{,}1\cdot 10^5\ В$ кинетические энергии электрона
$T_2 = e\cdot U_1 = 1{,}6\cdot 10^{-19}\cdot 5{,}1\cdot 105 = 81{,}6\ 10^{-15}$ Дж $\sim E_o$,
Тогда согласно формуле (6)

$$\lambda_{Б2} = \frac{3\cdot 10^8\cdot 6{,}62\cdot 10^{-34}}{\sqrt{(2\cdot 8{,}19\cdot 10^{-18}+8{,}16\cdot 10^{-18})\cdot 8{,}16\cdot 10^{-18}}} = 1{,}40\cdot 10^{-12}\ м = 1{,}40\ пм.$$

Ответ: $\lambda_{Б1}$ = 171 пм, $\lambda_{Б2}$ = 1,40 пм.

Пример 2. *Кинетическая энергия электрона в атоме водорода составляет величину порядка T=10 эВ. Используя соотношение неопределенностей, оценить минимальные линейные размеры атома.*

Решение

Дано:
T = 10 эВ,
$e = 1{,}6\cdot 10^{-19}$ *Кл,*
$h = h = 6{,}63\cdot 10^{-34}$ Дж·с,
$m_o = 9.1\cdot 10^{-31}$·кг.

Найти: d_{min} = ? м.

Соотношение неопределенностей для координаты и импульса имеет вид

$$\Delta p\cdot\Delta x \le h,. \qquad (1)$$

где Δp – неопределенность импульса частицы (в данном случае электрона); Δx – неопределенность координаты частицы(электрона); h – постоянная Планка.

Пусть атом имеет линейный размер d, тогда электрон атома будет находиться где-то в пределах области с неопределенностью

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

Соотношение неопределенностей (1) можно записать в этом случае в виде

$$\frac{d}{2}\cdot\Delta p \le h,$$

откуда

$$d \ge \frac{2\cdot h}{\Delta p}. \qquad (2)$$

Физически разумная неопределенность импульса Δp во всяком случае не должна превышать значения самого импульса p, т. е.

$$\Delta p \le p.$$

Полагая $\Delta p = p$ и учитывая, что импульс p связан с кинетической энергией T соотношением

$$p = \sqrt{2 \cdot m_o T}\ ,$$

где m_o – масса покоя частицы, из (2) получим

$$d_{min} = \frac{2 \cdot h}{\sqrt{2 m_o T}}\ .$$

Подставляя исходные данные и произведя вычисления, найдем

$$d_{min} = \frac{2 \cdot 6{,}62 \cdot 10^{-34}}{\sqrt{2 \cdot 9{,}1 \cdot 10^{-31} \cdot 1{,}6 \cdot 10^{-19} \cdot 10}} = 1{,}24 \cdot 10\text{-}10 \text{ м} = 124 \text{ пм}.$$

Ответ: d_{min} = 124 пм.

Пример 3. *Волновая функция* $\psi_n(x) = \sqrt{\frac{2}{L}} \cdot sin\frac{\pi m}{L}x$ *описывает основное состояние частицы в бесконечно глубоком прямоугольном ящике шириной* L*. Вычислить вероятность нахождения частицы в малом интервале* ΔL *= 0,01 L в двух случаях: 1) вблизи стенки (*$0 \leq x \leq \Delta L$*); 2) в средней части ящика (*$\frac{L}{2} - \frac{\Delta L}{2} \leq x \leq \frac{L}{2} + \frac{\Delta L}{2}$*).*

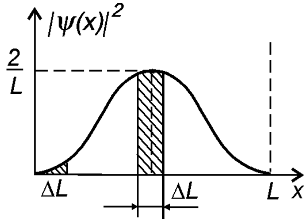

Рис. 6

Дано:
ΔL = 0,01 L.
Найти: w_1, w_2 = ? .

Решение

Вероятность того, что частица будет обнаружена в интервале (от x до $x + dx$), пропорциональна этому интервалу и квадрату модуля волновой функции, описывающей данное состояние, равна

$$dw = |\psi(x)|^2 \cdot dx.$$

В первом случае искомая вероятность найдется интегрированием волновой функции в пределах от 0 до $0{,}01L$ (рис. 6):

$$w = \frac{2}{L}\int_0^{0{,}01L} sin^2\frac{\pi}{L}x \cdot dx. \ (1)$$

Так как x изменяется в интервале $0 \leq x \leq 0{,}01\ L$, следовательно, $\pi x / L << 1$, справедливо приближенное равенство

$$sin^2\frac{\pi}{L}x \approx (\frac{\pi}{L}x)^2\ .$$

С учетом этого выражение (1) примет вид

$$w = \frac{2}{L}\int_0^{0,01L}\left(\frac{\pi}{L}x\right)^2 \cdot dx = \frac{2\pi^2}{L^2}\int_0^{0,01L} x^2 dx .$$

Откуда после интегрирования получим

$$w_1 = \frac{4\pi^2}{3}\cdot 10^{-6} = 6,6\cdot 10^{-6}.$$

Во втором случае можно обойтись без интегрирования, так как квадрат модуля волновой функции вблизи ее максимума в заданном малом интервале ($\Delta L = 0,01\ L$) практически не изменяется. Искомая вероятность во втором случае определяется выражением

$$w_2 = \left|\psi\left(\frac{L}{2}\right)\right|^2 \cdot \Delta x.$$

или

$$w_2 = \frac{2}{L}\left(\sin\frac{\pi}{L}\cdot\frac{L}{2}\right)^2\ \Delta L = \frac{2}{L}\cdot 1\cdot 0.001\ L = 0,02.$$

Ответ: $w_1 = 6,6\cdot 10^{-6}$, $w_2 = 0,02$.

Пример 4. *Электрон в атоме водорода перешел с четвертого энергетического уровня на второй. Определить энергию испущенного при этом фотона.*

Решение

Дано:
$n = 4$,
$m = 1$,
$E_i = 13,6$ эВ.
Найти: $\varepsilon = ?$ эВ.

Согласно постулату Бора энергия, излучаемая при переходе электрона в атоме водорода с уровня m на уровень n,

$$\varepsilon = E_m - E_n, \qquad (1)$$

где E_n – энергия, соответствующая энергетическому уровню, на который переходит электрон; E_m – энергия, соответствующая энергетическому уровню, с которого совершается переход электрона в атоме. Энергия электрона в атоме водорода зависит от главного квантового числа и рассчитывается по формуле

$$E_n = -\frac{E_i}{n^2}, \qquad (2)$$

где E_i - энергия ионизации атома водорода.

Подставляя формулу (2) в формулу (1), для расчета энергии излучения получим выражение

$$\varepsilon = E_i\cdot\left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2}\right),$$

где n – квантовое число, соответствующее энергетическому уровню, на который переходит электрон; m – квантовое число, соответствующее энергетическому уровню, с которого совершается переход электрона в атоме.

Подставив исходные данные и произведя вычисления, получим

$$\varepsilon = 13{,}6 \cdot 1{,}6 \cdot 10^{-19} \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{4^2}\right) = 13{,}6 \cdot \frac{3}{16} = 2{,}65 \text{ эВ}.$$

Ответ: ε = 2,65 эВ.

Пример 5. *Вычислить дефект массы и энергию связи ядра* ${}^{7}_{3}Li$.

Решение

Дано:
$A = 7$, $Z = 3$,
m_H = 1,00783 а.е.м.,
m_n = 1,00867 а.е.м.,
m_A = 7,01601 а.е.м..

Найти: $E_{св}$ = ? МэВ.

Масса ядра всегда меньше суммы масс свободных (находящихся вне ядра) протонов и нейтронов, из которых ядро образовалось. Дефект массы ядра Δm и есть разность между суммой масс свободных нуклонов (протонов и нейтронов) и массой ядра, т. е.

$$\Delta m = Z \cdot m_p + (A - Z) \cdot m_n - m_Я, \qquad (1)$$

где Z – зарядовое число (число протонов в ядре); A – массовое число (число нуклонов в ядре); $(A - Z)$ – число нейтронов в ядре; m_p – масса протона; m_n – масса нейтрона; $m_Я$ – масса ядра.

В справочных таблицах всегда даются массы нейтральных атомов, но не ядер, поэтому массу ядра $m_Я$ выразим через массу m_A нейтрального атома. Можно считать, что масса нейтрального атома равна сумме масс ядра и Z электронов, составляющих электронную оболочку атома, тогда

$$m_A = m_Я + Z \cdot m_e ,$$

откуда

$$m_Я = m_A - Z \cdot m_e . \qquad (2)$$

Поставив (2) в равенство (1), получим:

$$\Delta m = Z \cdot m_p + (A - Z) \cdot m_n - m_A + Z \cdot m_e = Z(m_p + m_e) + (A - Z) \cdot m_n - m_A.$$

Учитывая, что $Z(m_p + m_e) = m_H$, где m_H – масса атома водорода, окончательно имеем

$$\Delta m = Z \cdot m_H + (A - Z) \cdot m_n - m_A. \qquad (3)$$

Подставив в выражение (3) числовые значения масс, получим

$$\Delta m = 3 \cdot 1{,}00783 + (7 - 3) \cdot 1{,}00867 - 7{,}01601 = 0{,}04216 \text{ а. е. м.}$$

В соответствии с законом пропорциональности массы и энергии

$$E_{св} = \Delta m \cdot c^2, \qquad (4)$$

где Δm – дефект массы ядра; c – скорость света в вакууме.

$$E_{св} = 931 \cdot \Delta m,$$

где Δm – дефект массы в а. е. м.

Тогда с учетом вычисленного значения Δm получим

$$E_{св} = 931 \cdot 0{,}04216 = 39{,}2 \text{ МэВ}.$$

Ответ: $E_{св}$ = 39,2 МэВ.

Пример 6. *При соударении α-частицы с ядром бора $^{10}_{5}B$ произошла ядерная реакция, в результате которой образовалось два новых ядра. Одним из этих ядер было ядро атома водорода $^{1}_{1}H$. Определить порядковый номер и массовое число второго ядра, дать символическую запись ядерной реакции и определить ее энергетический эффект.*

Решение

Дано:
m_{He} = 4,00260 а.е.м.,
m_B = 10,01294а.е.м.,
m_H = 1,00783 а.е.м.,
m_C = 13,00335 а.е.м..
Найти: α = ? °.

Обозначим неизвестное ядро символом $^{A}_{Z}X$. Так как α-частица представляет собой ядро гелия He, запись реакции имеет вид

$$^{4}_{2}He + {}^{10}_{5}B \rightarrow {}^{1}_{1}H + X.$$

Применив закон сохранения числа нуклонов, получим уравнение

$$4 + 10 = 1 + A,$$

откуда $A = 13$.

Применив закон сохранения заряда, получим уравнение

$$2 + 5 = 1 + Z,$$

откуда $Z = 6$.

Следовательно, неизвестное ядро является ядром атома изотопа углерода $^{13}_{6}C$.

Теперь можем записать реакцию в окончательном виде:

$$^{4}_{2}He + {}^{10}_{5}B \rightarrow {}^{1}_{1}H + {}^{13}_{6}C.$$

Энергетический эффект Q ядерной реакции определяется по формуле

$$Q = 931 \cdot [(m_{He} + m_B) - (m_H + m_C)].$$

При числовых подсчетах по этой формуле массы ядер заменяют массами нейтральных атомов. Возможность такой замены вытекает из следующих соображений. Число электронов в электронной оболочке нейтрального атома равно его зарядовому числу Z. Сумма зарядовых чисел исходных ядер равна сумме зарядовых чисел ядер – продуктов реакции. Следовательно, электронные оболочки ядер гелия и бора содержат вместе столько же электронов, сколько их содержат электронные оболочки ядер углерода и водорода. Очевидно, что при вычитании суммы масс нейтральных атомов углерода и водорода из суммы масс атомов гелия и бора массы электронов выпадут, и мы получим тот же результат, как если бы брали массы ядер. Подставив массы атомов (см. прил. 5) в расчетную формулу, получим

$$Q = 931 \cdot [(4,00260 + 10,01294) - (1,00783 + 13,00335)] = 4,06 \text{ МэВ}.$$

Ответ: Q = 4,06 МэВ.

Пример *7. Определить начальную активность радиоактивного препарата магния ^{27}Mg массой m = 0,2 мкг, а также активность A через время t = 6 ч. Период полураспада $T_п$ магния считать известным.*

Решение

Дано:
$\mu = 27\cdot10^{-3}$ кг/моль,
$N_A = 6{,}02\cdot1023$ моль$^{-1}$,
$m = 0{,}2$ мкг $= 2\cdot10^{-9}$ кг,
$T_п = 10$ мин $= 600$ с.,
$t = 6$ ч $= 2{,}16\cdot10^4$ с.
Найти: A_o = ? Бк,
A = ? Бк.

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

$$A = \frac{dN_p}{dt}. \qquad (1)$$

Согласно закону радиоактивного распада число ядер, распавшихся за время t:

$$N_p = N_o\cdot(l - e^{-\lambda\cdot t}), \qquad (2)$$

где N_o – число ядер в начальный момент $(t = 0)$; λ – постоянная радиоактивного распада.

Подставляя (2) в (1), для зависимости активности радиоактивного изотопа от времени получим

$$A = \lambda\cdot N_o\, e^{-\lambda\cdot t} = A_o\cdot e^{-\lambda\cdot t}, \qquad (3)$$

где $A_o = \lambda\cdot N_o$ - активность изотопа в начальный момент времени $(t = 0)$,.

Постоянная радиоактивного распада λ связана с периодом полураспада $T_п$ соотношением

$$\lambda = ln2 / T_п = 0{,}693 / T_п. \qquad (4)$$

Число N_o радиоактивных ядер, содержащихся в изотопе, равно произведению постоянной Авогадро N_A на количество вещества ν данного изотопа:

$$N_o = \frac{m}{\mu}\cdot N_A, \qquad (5)$$

где m – масса изотопа; μ – молярная масса.

Тогда начальную активность изотопа можно рассчитать по формуле

$$A_o = \frac{0{,}693\cdot m}{\mu\cdot T_п}\cdot N_A. \qquad (6)$$

Подставляя исходные данные в формулы (4) и (6), получим:

$$\lambda = 0{,}693 / 600 = 1{,}15\cdot10^{-3}\ с^{-1},$$

$$A_o = \frac{0{,}693\cdot 2\cdot 10^{-9}}{27\cdot 10^{-3}\cdot 600}\cdot 6{,}02\cdot10^{23} = 5{,}13\cdot10^{19}\ Бк.$$

По формуле (3) активность препарата через 6 ч = $2{,}16\cdot10^4$ с

$$A = 5{,}13\cdot10^{19}\cdot e^{-1{,}15\cdot10^{-3}\cdot2{,}16\cdot10^{4}} = 81{,}3\ Бк.$$

Ответ: $A_o = 5{,}13\cdot10^{19}$ Бк, $A = 81{,}3$ Бк.

Пример 8. *Используя квантовую теорию теплоемкости Эйнштейна, вычислить удельную теплоемкость с при постоянном объеме алюминия при температуре T = 200 К. Характеристическую температуру Θ_E Эйнштейна принять для алюминия равной 300 К.*

Решение

Дано:
T = 200 К,
Θ_E = 300 К,
R = 8,31 Дж/(моль·К),
$\mu = 27\cdot10^{-3}$ кг/моль.

Найти:
C_μ = ? Дж/(кг·К).

Удельная теплоемкость c вещества может быть выражена через молярную теплоемкость $C\mu$ соотношением

$$c = C\mu/\mu, \qquad (1)$$

где μ – молярная масса.

Молярная теплоемкость при постоянном объеме по теории Эйнштейна выражается формулой

$$C\mu = 3\cdot R\left(\frac{\Theta_E}{T}\right)^2 \frac{e^{\frac{\Theta_E}{T}}}{(e^{\frac{\Theta_E}{T}}-1)^2}, \qquad (2)$$

где R – молярная газовая постоянная; Θ_E – характеристическая температура Эйнштейна; T – температуры тела.

Подставив в (1) выражение теплоемкости C_μ по формуле (2), получим

$$C\mu = \frac{3\cdot R}{\mu}\left(\frac{\Theta_E}{T}\right)^2 \frac{e^{\frac{\Theta_E}{T}}}{(e^{\frac{\Theta_E}{T}}-1)^2}.$$

Подставляя исходные данные и произведя вычисления, получим;

$$C\mu = \frac{3\cdot 8{,}31}{27\cdot10^{-3}}\left(\frac{300}{200}\right)^2 \frac{e^{\frac{300}{200}}}{(e^{\frac{300}{200}}-1)^2} = 770\ Дж/(кг\cdot К).$$

Ответ: C_μ = 770 Дж/(кг·К).

Пример 9. *Определить теплоту* ΔQ *, необходимую для нагревания кристалла NaCI массой* m *= 20 г от температуры* T_1 *= 2 К до температуры* T_2 *= 4 К. Характеристическую температуру Дебая* Θ_D *для NaCI принять равной 320 К и условие* $T \ll \Theta_D$ *считать выполненным.*

Решение

Дано:
$\mu = 58{,}5\cdot10^{-3}$ кг/моль,
R = 8,31 Дж/(моль·К),
m = 20 г = $2\cdot10^{-2}$кг,
T_1 = 2 К,
T_2 = 4 К,
$T \ll \Theta_D$,
Θ_D = 320 К,
t = 6 ч = 360 м.

Найти: ΔQ = ? Дж.

Теплота ΔQ, подводимая для нагревания тела от температуры $T1$ до $T2$, может быть вычислена по формуле

$$\Delta Q = \frac{m}{\mu}\int_{T_1}^{T_2} C_\mu dT, \qquad (1)$$

где m – масса тела; μ – молярная масса; $C\mu$ – молярная теплоемкость.

Молярная теплоемкость кристаллического твердого тела до Дебаю в области низких температур $T \ll \Theta_D$

$$C\mu = \frac{12\pi^4}{5} \cdot R \cdot \left(\frac{T}{\Theta_D}\right)^3, \qquad (2)$$

где R – молярная газовая постоянная; T – температуры тела; Θ_D – характеристическая температура Дебая.

Подставим молярную теплоемкость (2) в формулу (1), тогда

$$\Delta Q = \frac{12\pi^4}{5} \cdot \frac{R}{\Theta_D{}^3} \frac{m}{\mu} \int_{T_1}^{T_2} T^3 dT.$$

Произведя интегрирование, имеем:

$$\Delta Q = \frac{12\pi^4}{5} \cdot \frac{R}{\Theta_D{}^3} \frac{m}{\mu} \left(\frac{T_2{}^4}{4} - \frac{T_1{}^4}{4}\right).$$

Подставив исходные данные и произведя вычисления, получим:

$$\Delta Q = \frac{3 \cdot (3{,}14)^4}{5} \cdot \frac{8{,}31}{320^3} \frac{2 \cdot 10^{-2}}{58{,}5 \cdot 10^{-3}} \left(4^4 - 2^4\right) = 1{,}22 \cdot 10^{-3} \text{ Дж.}$$

Ответ: $\Delta Q = 1{,}22 \cdot 10^{-3}$ Дж.

Пример 10. *Вычислить максимальную энергию E_f (энергию Ферми), которую могут иметь свободные электроны в металле (медь) при абсолютном нуле. Принять, что на каждый атом меди приходится по одному электрону.*

Решение

Дано:
$\mu = 64 \cdot 10^{-3}$ кг/моль,
$e = 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ *Кл,*
$h = 6{,}63 \cdot 10^{-34}$ Дж·с.
$N_A = 6{,}02 \cdot 10^{23}$ *моль*$^{-1}$.
$m_o = 9.1 \cdot 10^{-31}$·кг,
$T = 0$ К.

Найти: E_f = ? эВ.

Максимальная энергия E_f, которую могут иметь электроны в металле при $T = 0$ К, связана с концентрацией n свободных электронов соотношением

$$E_f = \frac{\hbar^2}{2m} \left(3\pi^2 n\right)^{2/3}, \qquad (1)$$

где $\hbar = h/2\pi$ – постоянная Планка; m – масса электрона; n – концентрация электронов в металле.

Концентрация свободных электронов по условию задачи равна концентрации атомов, которая может быть найдена по формуле

$$N_o = \frac{\rho \cdot N_A}{\mu}, \qquad (2)$$

где ρ – плотность меди; N_A – постоянная Авогадро; μ – молярная масса.

Подставляя выражение n в формулу (1), получаем:

$$E_f = \frac{\hbar^2}{2m} \left(3\pi^2 \frac{\rho \cdot N_A}{\mu}\right)^{2/3}. \qquad (3)$$

Подставив исходные данные *и* произведя вычисления, получим:

$$E_f = \frac{(1{,}05\cdot 10^{-34})^2}{2\cdot 9{,}1\cdot 10^{-31}}\left(3\cdot 3{,}14^2\,\frac{8900\cdot 6{,}02\cdot 10^{23}}{64\cdot 10^{-3}}\right)^{2/3} = 7{,}4\ \text{эВ}.$$

Ответ: E_f = 7,4 эВ.

Пример 11. *Удельная проводимость у примесного полупроводника, имеющего решетку типа алмаз, равна 110 См/м. Считая, что полупроводник обладает только дырочной проводимостью, определить концентрацию n_p и подвижность b_p дырок. Постоянную Холла R_H принять равной $3{,}8\cdot 10^{-4}$ м³/Кл.*

Решение

Дано:
σ = 110 См/м,
$R_H = 3{,}8\cdot 10^{-4}$ м³/Кл,
$e = 1{,}6\cdot 10^{-19}$ *Кл*.

Найти: n_p = ? м⁻³,
b_p = ? м²/(В.с).

Концентрация n_p дырок связана с постоянной Холла, которая для полупроводников с решеткой типа алмаза, обладающих носителями только одного знака, выражается формулой

$$R_H = \frac{3\pi}{8}\cdot\frac{1}{en}, \qquad (1)$$

где e – элементарный заряд, n – концентрация носителей заряда.

Откуда

$$n = \frac{3\pi}{8}\cdot\frac{1}{eR_H}. \qquad (2)$$

Удельная проводимость полупроводников выражается формулой

$$\sigma = e\,n\cdot(b_n + b_p), \qquad (3)$$

где e – элементарный заряд; n – концентрация носителей заряда (электронов и дырок); b_n и b_p – подвижности электронов и дырок.

При отсутствии электронной проводимости первое слагаемое в скобках равно нулю и формула (3) примет вид

$$\sigma = e\,n_p\cdot b_p,$$

откуда

$$b_p = \cdot\frac{\sigma}{en_p}. \qquad (4)$$

Подставим в (3) выражение n_p по формуле (1):

$$b_p = \cdot\frac{8}{3\pi}\,\sigma\cdot R_H. \qquad (5)$$

Подставляя исходные данные в формулы (2) и (5) и произведя вычисления, получим:

$$n = \frac{3\cdot 3{,}14}{8}\cdot\frac{1}{1{,}6\cdot 10^{-19}\cdot 3{,}8\cdot 10^{-4}} = 1{,}9\cdot 10^{22}\ м^{-3};$$

$$b_p = \cdot\frac{8}{3\cdot 3{,}14}\cdot 110\cdot 3{,}8\cdot 10^{-4} = 3{,}6\cdot 10^{-2}\ м^2/(В.с).$$

Ответ: n = 1,9·10^{22} м$^{-3}$,.b_p = 3,6·10^{-2} м^2/(В.с).

Задачи для самостоятельного решения

1. Определить энергию фотона, испускаемого при переходе электрона в атоме водорода с третьего энергетического уровня на основной. [12,1 эВ]

2. Определить первый потенциал возбуждения атома водорода. [10,2 В]

3. Вычислить длину волны де Бройля $\lambda_Б$ для электрона, прошедшего ускоряющую разность потенциалов U = 22,5 В. [0,258 нм]

4. Вычислить длину волны де Бройля $\lambda_Б$ для протона, движущегося со скоростью $v = 0{,}6c$ (c - скорость света в вакууме). [1,76фм]

5. Оценить с помощью соотношения неопределенностей минимальную кинетическую энергию T_{min} электрона, движущегося внутри сферической области диаметром d = 0,1 нм. [15 эВ]

6. Определить относительную неопределенность $\Delta p/p$ импульса движущейся частицы, если допустить, что неопределенность ее координаты равна длине волны де Бройля. [0,16]

7. Электрон находится в прямоугольном потенциальном ящике с непроницаемыми стенками. Ширина ящика L = 0,2 нм, энергия электрона в ящике E = 37,8 эВ. Определить номер n энергетического уровня и модуль волнового вектора k. [2; 3,14·10^{10} м$^{-1}$]

8. Частица в потенциальном ящике находится в основном состоянии. Какова вероятность обнаружения частицы: в средней трети ящика; в крайней трети ящика? [0,609; 0,195]

9. Определить число N атомов радиоактивного препарата йода $^{131}_{53}I$ массой m = 0,5 мкг, распавшихся в течение времени: 1) t = 1 мин; 2) t = 7 сут. [1,38·10^{11}; 1,04·10^{15}]

10. Определить активность A радиоактивного препарата $^{90}_{38}Sr$ массой m = 0,1 мкг. [543 кБк]

11. Определить частоту ν колебаний атомов серебра по теории теплоемкости Эйнштейна, если характеристическая температура серебра $\theta_Э$ =165 К. [3,44·10^{12} Гц]

12. Определить среднюю энергию $\langle\varepsilon\rangle$ линейного одномерного квантового осциллятора при температуре T = 200 К. [1,61·10^{-21} Дж]

13. Определить теплоту Q, необходимую для нагревания кристалла меди массой m = 100 г от T_1 = 10 К до T_2 = 20 К. Характеристическая температура Дебая для меди 320 К. Считать условие $T \ll \theta_D$ выполненным. [3,48 Дж]

14. Выразить среднюю квадратичную скорость $\langle v_{кв}\rangle$ через максимальную скорость v_{max} электронов в металле при абсолютном нуле. [$\sqrt{0{,}6}\ v_{max}$]

15. Металл находится при абсолютном нуле. Определить относительное число электронов, энергии которых отличаются от энергии Ферми не более

чем на 2 %. [0,03]

16. Подвижность электронов в германии n-типа u_n = $3{,}7 \cdot 10^3$ $см^2$ / (В·с). Определить постоянную Холла R_H, если удельное сопротивление полупроводника $\rho = 1{,}6 \cdot 10^{-2}$ Ом·м. [$7 \cdot 10^{-3}$ $м^3$/Кл]

Библиографический список литературы

1. Физика: Методические указания и контрольные задания для студентов–заочников инженерно–технических специальностей вузов / А.А. Воробьев и др. М.: Высш. шк., 1987. – 208с.

2. Чертов А. Г., Воробьев А.А. Задачник по физике: Учеб. пособие для студентов вузов – 5-е изд., перераб. и доп. М.: Высш. шк., 1988. – 527с.: ил.

ПРИЛОЖЕНИЯ

1. Единицы физических величин СИ, имеющие собственные наименования

Величина	Единица наименование	Обозначение
Сила света	кандела	кд
Световой поток	люмен	лм
Освещенность	люкс	лк
Поток излучения	ватт	Вт
Поглощенная доза излучения	грэй	Гр
Активность изотопа	беккерель	Бк

2. Основные физические постоянные

Атомная единица массы – 1 а.е.м. = $1{,}66\cdot10^{-27}$ кг = 931 МэВ
Газовая постоянная – R = 8,31 Дж/моль·К
Комптоновская длина волны – $\lambda_c = 2{,}43\cdot10^{-12}$ м
Магнитная постоянная – $\mu_o = 4\pi\cdot10^{-7}$ Гн/м
Масса покоя электрона – $m_e = 9{,}1\cdot10^{-31}$ кг
Масса покоя протона – $m_p = 1{,}67\cdot10^{-27}$ кг .
Постоянная Авогадро – $N_A = 6{,}03\cdot10^{23}$ моль$^{-1}$
Постоянная Больцмана – $k = 1{,}23\cdot10^{23}$ Дж/К
Постоянная Вина – $2{,}90\cdot10^{-3}$ м/К
Постоянная Планка – $h = 6{,}6\cdot10^{-34}$ Дж·с.
Постоянная Планка – $\hbar = 1{,}05\cdot10^{-34}$ Дж·с
Постоянная Ридберга – $R_\lambda = 1{,}10\cdot10^{7}$ м$^{-1}$
Постоянная Стефана-Больцмана – $5{,}67\cdot10^{-8}$ Bt/(м^2·K^4)
Радиус 1-й боровской орбиты – $0{,}53\cdot10^{-10}$ м
Скорость света в вакууме – с = $3\cdot10^{8}$ м/с.
Ускорение свободного падения – g = 9,81 м/с^2
Электрическая постоянная – $\varepsilon_o = 8{,}85\cdot10^{-12}$ Ф/м
Элементарный заряд – $e = 1{,}6\cdot10^{-19}$ Кл
Электрон–вольт – $1{,}6\cdot10^{-19}$ Дж
Энергия ионизации водорода –13,6 эВ
Энергия покоя электрона 0,511 МэВ

3. Показатели преломления n для некоторых веществ

Вещество	n	Вещество	n
Анилин	1,58	Алмаз	2,42
Бензол	1,50	Лед	1,310
Вода	1,33	Стекло	1,5 –1,9
Глицерин	1,47	Слюда	1.56
Канадский бальзам	1,53	Топаз	1.63

4. Работа выхода электронов из металлов

Металл	Дж	эВ
Алюминий	$6{,}0\cdot10^{-19}$	3,7
Вольфрам	$7{,}2\cdot10^{-19}$	4,5
Германий	$7{,}4\cdot10^{-19}$	4,6
Калий	$3{,}5\cdot10^{-19}$	2,2
Кремний	$6{,}6\cdot10^{-19}$	4,1
Литий	$3{,}7\cdot10^{-19}$	2,3
Медь	$7{,}0\cdot10^{-19}$	4,4
Платина	$3{,}4\cdot10^{-19}$	6,3
Серебро	$7{,}5\cdot10^{-19}$	4,7
Цезий	$3{,}2\cdot10^{-19}$	2,0
Цинк	$6{,}4\cdot10^{-19}$	4,0

6. Массы атомов легких изотопов

Изотоп	Символ	Масса а.е.м.	Изотоп	Символ	Масса а.е.м.
Водород	$^{1}_{1}H$	1,00783	Бор	$^{10}_{5}B$	10,01294
	$^{2}_{1}H$	2,01410		$^{11}_{5}B$	11,00930
	$^{3}_{1}H$	3,01605	Углерод	$^{12}_{6}C$	12,00000
Гелий	$^{3}_{2}He$	3,01603		$^{13}_{6}C$	13,00335
	$^{4}_{2}He$	4,00260		$^{14}_{6}C$	14,00324
Литий	$^{7}_{3}Li$	6,01513	Азот	$^{14}_{7}N$	14,00307
	$^{7}_{4}Li$	7,01601	Кислород	$^{16}_{8}O$	15,99491
Бериллий	$^{7}_{4}Be$	7.01693		$^{17}_{8}O$	16,99913
	$^{9}_{4}Be$	9,01219			

5. Относительные атомные массы (атомные веса, а.е.м.) A и порядковые номера Z некоторых элементов

Элемент	Символ	A а.е.м.	Z	Элемент	Символ	A а.е.м.	Z
Алюминий	*Al*	27	13	Медь	*Cu*	64	29
Азот	*N*	14	7	Молибден	*Mo*	96	42
Аргон	*Ar*	40	18	Натрий	*Na*	23	11
Бериллий	*Be*	9	4	Неон	*Ne*	20	10
Бор	*B*	11	5	Никель	*Ni*	59	28
Водород	*H*	1	1	Олово	*Sn*	119	50
Ванадий	*V*	51	23	Платина	*Pt*	195	78
Вольфрам	*W*	184	74	Ртуть	*Hg*	201	80
Гелий	*He*	4	2	Сера	*S*	32	16
Железо	*Fe*	56	26	Серебро	*Ag*	108	47
Золото	*Au*	197	79	Тантал	*Ta*	181	73
Калий	*K*	39	19	Уран	*U*	238	92
Кальций	*Ca*	40	20	Углерод	*C*	12	6
Кислород	*O*	16	8	Фтор	*F*	19	9
Кремний	*Si*	28	14	Хлор	*Cl*	35	17
Магний	*Mg*	24	12	Цирконий	*Zr*	91	40
Марганец	*Mn*	55	25	Цезий	*Cs*	133	55

7. Энергия ионизации атомов

Вещество	Дж	эВ
Водород	$2{,}18 \cdot 10^{-18}$	13,6
Гелий	$3{,}94 \cdot 10^{-18}$	24,6
Ртуть	$1{,}66 \cdot 10^{-18}$	10,4
Литий	$1{,}21 \cdot 10^{-17}$	75.6
Кислород	$2{,}16 \cdot 10^{-18}$	13,5
Калий	$0{,}69 \cdot 10^{-18}$	4,3
Натрий	$0{,}82 \cdot 10^{-18}$	5,1

8. Масса и энергия покоя некоторых частиц

Частица	m_o		E_o	
	кг	а.е.м.	Дж	МэВ
Электрон	$9{,}11\cdot10^{-31}$	0,00055	$8{,}16\cdot10^{-14}$	0,511
Протон	$1{,}672\cdot10^{-27}$	1,00728	$1{,}50\cdot10^{-10}$	938
Нейтрон	$1{,}675\cdot10^{-27}$	1,00867	$1{,}50\cdot10^{-10}$	939
Дейтрон	$3{,}35\cdot10^{-27}$	2,01355	$3{,}00\cdot10^{-10}$	1876
α– частица	$6{,}64\cdot10^{-27}$	4,00149	$5{,}96\cdot10^{-10}$	3733
π–мезон	$2{,}41\cdot10^{-28}$	0,14498	$2{,}1610^{-11}$	135

9. Периоды полураспада радиоактивных изотопов

Изотоп	Символ	Период полураспада	Изотоп	Символ	Период полураспада
Магний	${}^{27}_{12}Mg$	10 мин	Церий	${}^{144}_{58}Ce$	285 сут
Фосфор	${}^{32}_{15}P$	14,3 сут	Радон	${}^{222}_{86}Rn$	3,8 сут
Кобальт	${}^{60}_{27}Co$	5,3 года	Радий	${}^{226}_{88}Ra$	1620 лет
Стронций	${}^{90}_{38}Sr$	27 лет	Актиний	${}^{225}_{89}Ac$	10 сут
Иод	${}^{131}_{53}I$	8 сут	Иридий	${}^{192}_{77}Ir$	5 сут

10. Кратные и дробные приставки к единицам измерения

Название	Сокращение	Множитель	Название	Сокращение	Множитель
пико	п	10^{-12}	дека	да	10^{1}
нано	н	10^{-9}	гекто	г	10^{2}
микро	мк	10^{-6}	кило	к	10^{3}
милли	м	10^{-3}	мега	М	10^{6}
санти	с	10^{-2}	гига	Г	10^{9}
деци	д	10^{-1}	тера	Т	10^{12}

11. *Греческий алфавит*

Обозначения букв	Название букв	Обозначения букв	Названия букв
Α, α	альфа	Ν,ν	ню
Β,β	бета	Ξ,ξ	кси
Γ,γ	гамма	Ο,ο	омикрон
Δ,δ	дэльта	Π,π	пи
Ε,ε	эпсилон	Ρ,ρ	ро
Ζ,ζ	дзета	Σ,σ	сигма
Η,η	эта	Τ,τ	тау
Θ,θ	тэта	Υ,υ	ипсилон
Ι,ι	иота	Φ, φ	фи
Κ,κ	каппа	Χ,χ	хи
Λ,λ	ламбда	Ψ,ψ	пси
Μ,μ	мю	Ω,ω	омега

ОГЛАВЛЕНИЕ