Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Томский государственный университет систем управления
и радиоэлектроники
(ТУСУР)

Кафедра физики

А.В. Лячин

ФИЗИКА

Часть 2

Учебно-методическое пособие для студентов всех специальностей

2023

УДК 531.1
ББК 22.3

Рецензент:
Климов А.С., профессор кафедры физики ТУСУР, д.т.н.

Лячин, Александр Владимирович

Физика. Учебно-методическое пособие для студентов ТУСУР всех направлений подготовки. Часть 2 / Под редакцией А.В. Лячина. Томск, ТУСУР, 2023, 48 с.

Учебно-методическое пособие представляет собой краткое изложение курса физики, изучаемого школьниками 10 и 11 класса. Даны основные определения физических величин, формулировки законов и расчётные формулы.

Весь материал пособия разбит на 2 раздела «Волновая и квантовая оптика» и «Атомная и ядерная физика». Каждый из разделов сопровождается краткой теорией по рассматриваемой теме. Также приводится подробный разбор решений нескольких задач и тестовых заданий каждой темы.

Пособие предназначено для проведения выравнивающих курсов по физике для студентов ТУСУР всех направлений подготовки.

Одобрено на заседании каф. физики протокол № 109 от 24.11.2023

УДК 531.1
ББК 22.3

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ

Настоящее пособие предназначено для проведения выравнивающих курсов по физике со студентами-первокурсниками ТУСУР, и для преподавателей, осуществляющих их подготовку. Первостепенное значение имеет умение студента анализировать физические явления и процессы, происходящие в различных системах, адекватно понимать условия задач по физике, уверенно решать задачи и грамотно оформлять их решение. Поэтому основная цель данного пособия – способствовать приобретению этих навыков. Пособие призвано помочь лучше усвоить курс при самостоятельной работе или при обучении на выравнивающих курсах.

Весь материал пособия разбит на 2 раздела по тематическому принципу. Каждый из разделов предваряется кратким обзором теоретических положений по рассматриваемой теме. Следует иметь в виду, что этот обзор преследует, в основном, справочные цели и не может заменить углубленное, систематическое изучение материала физики по учебникам и учебно-методическим пособиям для студентов. Применение изложенных сведений демонстрируется на примерах решения нескольких характерных задач и тестовых заданий, охватывающих содержание рассматриваемой темы.

В приложении 1 приведены константы, которые могут пригодиться при решении задач.

РАЗДЕЛ 1. ВОЛНОВАЯ И КВАНТОВАЯ ОПТИКА

1.1. ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ СВЕТА

Скорость света в вакууме c является максимально возможной скоростью распространения света. Она связана с длиной волны λ_0 света в вакууме и с его частотой ν соотношением

$$c = \lambda_0 \nu . \tag{1.1}$$

Скорость света в оптической среде υ всегда меньше скорости света в вакууме: $\upsilon < c$. Она определяется выражением

$$\upsilon = \lambda \nu , \tag{1.2}$$

где λ – длина света в данной оптической среде (при той же частоте ν).

Абсолютный показатель преломления среды n – это оптическая характеристика среды, равная отношению скорости света в вакууме к скорости света в этой среде:

$$n = \frac{c}{\upsilon}; \; n > 1. \tag{1.3}$$

Так как скорости света в вакууме и в воздухе различаются всего лишь на 0,03%, абсолютный показатель преломления воздуха принято считать равным единице: $n = 1$. Если абсолютные показатели преломления двух сред удовлетворяют неравенству $n_1 > n_2$, то первую среду называют ***оптически более плотной***, а вторую – ***оптически менее плотной***.

Интерференция – явление наложения волн, вследствие которого наблюдается устойчивое во времени усиление или ослабление результирующих колебаний в различных точках пространства.

Устойчивая во времени интерференционная картина может наблюдаться только при сложении коррелированных (взаимосвязанных) колебаний, называемых ***когерентными волнами*** (от лат. cohaerens – находящийся в связи, согласованный).

Когерентные волны – волны с одинаковой частотой, поляризацией и постоянной разностью фаз.

Разность фаз двух когерентных волн

$$\delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda_0} \cdot \left(L_2 - L_1\right) = \frac{2\pi}{\lambda_0} \cdot \Delta , \tag{1.4}$$

где $L = r \cdot n$ – оптическая длина пути (r – геометрическая длина пути) световой волны в среде; n – абсолютный показатель преломления этой среды; $(L_2 - L_1) = \Delta$ – оптическая разность хода световых волн от двух точечных источников S_1 и S_2 (см. рисунок 1.1); λ_0 – длина световой волны в вакууме.

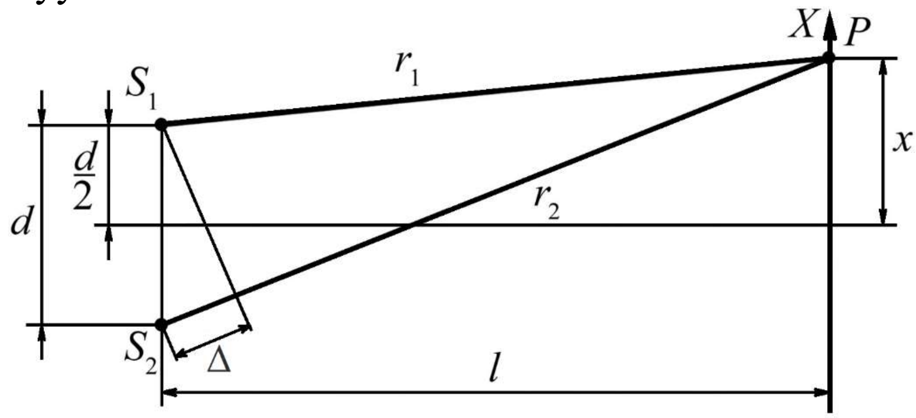


Рисунок 1.1 – Иллюстрация к определению оптической разности хода.
На рисунке: x – положение точки наблюдения P от центра интерференционной картины; d – расстояние между точечными источниками S_1 и S_2;
r_1 и r_2 – геометрическая длина пути световых волн от источников S_1 и S_2 до точки P; Δ – разность хода волн

Условия максимумов и минимумов интенсивности света при интерференции волн

$$\Delta_{\max} = \pm 2m\frac{\lambda}{2}, (m = 0,1,2,\ldots), \tag{1.5}$$

$$\Delta_{\min} = \pm(2m+1)\frac{\lambda}{2}, (m = 0,1,2,\ldots). \tag{1.6}$$

Ширина интерференционной полосы (расстояние между соседними максимумами) при интерференции света от двух точечных источников

$$\Delta x = \frac{\lambda l}{d}, \tag{1.7}$$

где d – расстояние между двумя точечными когерентными источниками, находящимися на расстоянии l от экрана, параллельного прямой линии, соединяющей источники (при условии $l >> d$).

Интерференция световых волн на тонких плёнках (плоскопараллельных пластинах) в отражённом свете

– условие максимумов

$$\begin{gathered} 2d\sqrt{n^2 - \sin^2\alpha} \pm \frac{\lambda_0}{2} = m\lambda_0, \\ 2d\sqrt{n^2 - \sin^2\alpha} = \pm(2m+1)\frac{\lambda_0}{2}, (m = 0,1,2,\ldots), \end{gathered} \tag{1.8}$$

– условие минимумов

$$2d\sqrt{n^2-\sin^2\alpha}\pm\frac{\lambda_0}{2}=\pm(2m+1)\frac{\lambda_0}{2},$$
$$2d\sqrt{n^2-\sin^2\alpha}\pm\frac{\lambda_0}{2}=\pm m\lambda_0,(m=0,1,2,\ldots). \qquad (1.9)$$

Здесь d – толщина плёнки; n – её показатель преломления; α – угол падения света на поверхность плёнки. Второе слагаемое $\lambda_0/2$ в левой части этих выражений учитывает изменение фазы световой волны скачком на π при её отражении от оптически более плотной среды.

При нормальном падении света на соприкасающиеся толстую плоскопараллельную стеклянную пластинку и плоско-выпуклую линзу с большим радиусом кривизны R (см. рисунок 1.2) возникает интерференционная картина в виде светлых и темных колец с общим центром в точке соприкосновения. Их называют ***кольцами Ньютона.*** На рисунке h_m – толщина зазора между плоскопараллельной пластинкой и выпуклой частью линзы (выполняет роль тонкой плёнки, на которой происходит интерференция)

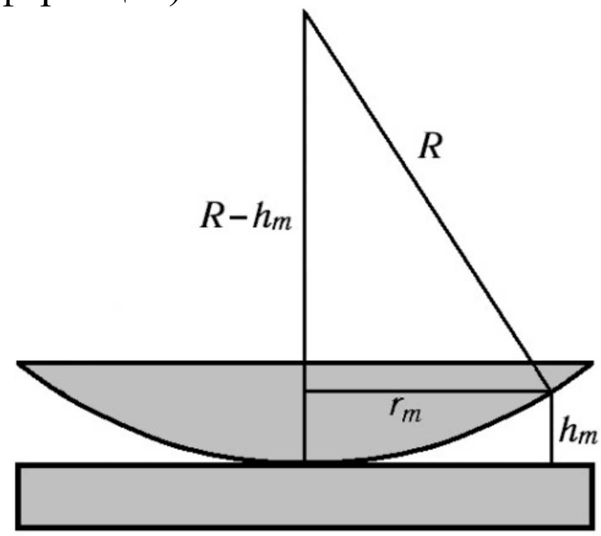


Рисунок 1.2 – Установка для наблюдения колец Ньютона

Радиусы светлых колец Ньютона в отражённом свете (тёмных в проходящем свете)

$$r_m=\sqrt{(2m+1)\frac{\lambda}{2}R},(m=0,1,2,\ldots), \qquad (1.10)$$

где m – порядковый номер кольца; R – радиус кривизны выпуклой поверхности линзы.

Радиусы тёмных колец Ньютона в отражённом свете (светлых в проходящем свете)

$$r_m=\sqrt{m\lambda R},(m=0,1,2,\ldots). \qquad (1.11)$$

1.2. ДИФРАКЦИЯ СВЕТА. ДИФРАКЦИОННАЯ РЕШЕТКА

Дифракция света – это явление отклонения светового луча от геометрических законов распространения и попадание, вследствие этого, в область геометрической тени при прохождении мимо края непрозрачного препятствия. Дифракционные явления хорошо наблюдаются, когда размеры препятствий (отверстий), стоящих на пути у световой волны, составляют несколько длин волн.

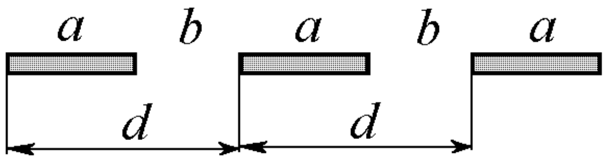


Рисунок 1.3 – Дифракционная решётка

Дифракционная решетка – это оптический прибор для получения дифракционных спектров, представляющий собой систему параллельных щелей (рис. 1.3).

Период (постоянная) дифракционной решетки d – это сумма ширины щели b и ширины a непрозрачного промежутка между щелями: $d = a + b$.Период дифракционной решётки так же можно определить через число щелей N_0, приходящихся на единицу длины, или общее число щелей N и ширину решётки l:

$$d = \frac{l}{N} = \frac{1}{N_0}. \qquad (1.12)$$

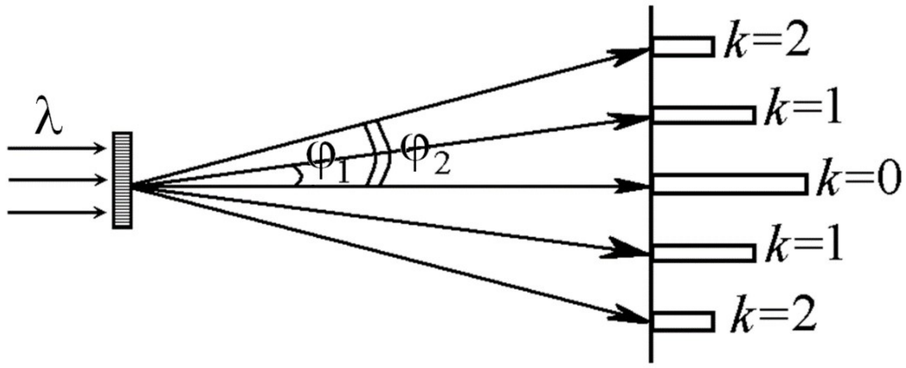


Рисунок 1.4 – Дифракция света на решётке

При падении параллельного пучка света на дифракционную решетку на экране наблюдается ***дифракционная картина***, представляющая собой совокупность резких максимумов освещённости, чередующихся с тёмными областями (рис. 1.4).

Условия дифракционных максимумов и минимумов имеют следующий вид, соответственно:

$$d \cdot \sin\varphi_k = k\lambda_0, (k = 0,1,2,...), \qquad (1.13)$$

$$d \cdot \sin \varphi_k = (2k+1)\frac{\lambda_0}{2}, (k = 0,1,2,\ldots), \qquad (1.13')$$

где d – период решетки; λ – длина волны света в среде, окружающей решетку; k – номер максимума (порядок дифракции); φ_k – угол дифракции, определяющий направление на максимум с номером k. Дифракционный максимум нулевого порядка ($k = 0$) носит название главного (центрального) максимума.

1.3. СВЯЗЬ МАССЫ С ЭНЕРГИЕЙ

Энергия покоя E_0 тела (частицы) определяется формулой Эйнштейна:

$$E_0 = m_0 c^2, \tag{1.14}$$

где m_0 – масса покоя тела, c – скорость света в вакууме.

Этот закон пропорциональности массы и энергии отражает возможность взаимного превращения двух видов материи – вещества массой m и поля с энергией E_0. Полная энергия E тела (частицы) складывается из энергии покоя E_0 и кинетической энергии T: $E = E_0 + T$. Полная энергия следующим образом зависит от скорости υ движения тела:

$$E = E_0 \Big/ \sqrt{1 - \upsilon^2 / c^2}\,. \tag{1.15}$$

Релятивистское соотношение между энергией и импульсом тела

$$E = c\sqrt{p^2 + m_0^2 c^2}\,. \tag{1.16}$$

1.4. ФОТОНЫ

Монохроматический свет с частотой ν (с длиной волны λ) представляет собой, с точки зрения микрофизики, совокупность квантов света – фотонов. ***Энергия фотона*** ε определяется выражениями:

$$\varepsilon = h\nu = \frac{hc}{\lambda}, \qquad (1.17)$$

где h – постоянная Планка, $c = 3 \cdot 10^8$ м/с – скорость света в вакууме. ***Импульс фотона*** $p_ф$ и ***масса*** $m_ф$ связаны с его энергией ε соотношениями:

$$p_ф = \frac{\varepsilon}{c} = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda}, \; m_ф = \frac{\varepsilon}{c^2} = \frac{p_ф}{c}. \qquad (1.18)$$

1.5. ВНЕШНИЙ ФОТОЭФФЕКТ

Внешний фотоэффект – это явление вырывания электронов из вещества под действием квантов света с энергией ε. Уравнение для внешнего фотоэффекта называется формулой Эйнштейна и записывается в виде:

$$\varepsilon = A_{\text{вых}} + T_{\max}. \tag{1.19}$$

Здесь $A_{\text{вых}}$ – ***работа выхода*** электрона из вещества, $T_{\max} = m_e v_{\max}^2/2$ – максимальная кинетическая энергия фотоэлектрона, где m_e – масса электрона, $v_{\max}$ – его скорость в момент вылета из вещества. Это уравнение отражает закон сохранения энергии в элементарном акте взаимодействия света с веществом. Фотоэффект является пороговым явлением, так как возможен лишь при условии $\varepsilon \geq A_{\text{вых}}$.

Красная граница фотоэффекта соответствует ситуации, когда скорость фотоэлектрона равна нулю, и вся энергия фотона уходит на совершение работы выхода. Условие красной границы имеет вид:

$$A_{\text{вых}} = \varepsilon_{\min} = h\nu_{\min} = \frac{hc}{\lambda_{\max}}. \tag{1.20}$$

Упорядоченное движение электронов от фотокатода к аноду фотоэлемента образует ***фототок***. Его можно обратить в нуль, приложив к фотоэлементу задерживающее (запирающее) напряжение $U_з$. В этом случае работа электрического поля по торможению фотоэлектрона численно равна его кинетической энергии в момент вылета из вещества:

$$T_{\max} = eU_з. \tag{1.21}$$

1.6. ЭФФЕКТ КОМПТОНА

Эффект Комптона заключается в том, что при падении рентгеновского излучения на вещество, в спектре рассеянного излучения появляются компоненты с большей длиной волны, чем у падающего.

На рисунке 1.5 показана установка для наблюдения эффекта Комптона. Рентгеновская трубка РТ является источником монохроматического рентгеновского излучения. Узкий пучок рентгеновского излучения, выделяемого диафрагмой Д, направляется на рассеивающее вещество РВ. Спектральный состав рассеянного излучения исследуется с помощью рентгеновского спектрографа РС.

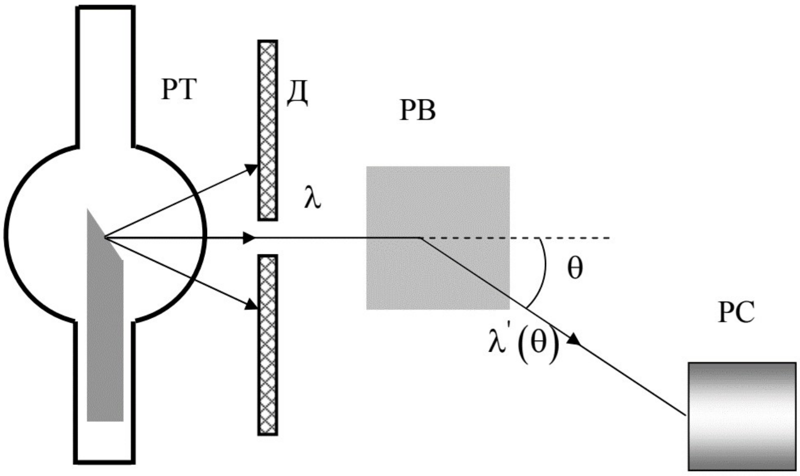


Рисунок 1.5 – Установка для наблюдения эффекта Комптона

Разность длин волн рассеянного и падающего на вещество рентгеновского излучения зависит, только от угла рассеяния, и не зависит от природы рассеивающего вещества или длины волны излучения:

$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = \frac{h}{m_e c}(1 - \cos\theta) = \lambda_c(1 - \cos\theta) = 2\lambda_c \sin^2\left(\frac{\theta}{2}\right), \qquad (1.22)$$

где λ', λ – длины волн, соответственно, рассеянного и падающего рентгеновского излучений; m_e – масса покоя электрона; c – скорость света; h – постоянная Планка; $\lambda_c = \dfrac{h}{m_e c} = 2{,}42 \cdot 10^{-12}$ м – комптоновская длина волны.

1.7. ДАВЛЕНИЕ СВЕТА

При нормальном падении каждый фотон, поглощаясь или отражаясь от поверхности, будет передавать этой поверхности соответственно свой импульс или свой удвоенный импульс. Импульс, полученный поверхностью за единицу времени по второму закону Ньютона это сила, действующая на эту поверхность. Сила, приходящаяся на единицу площади поверхности, есть давление на поверхность.

Давление света, падающего нормально на некоторую поверхность, зависит от светового потока и отражающей способности поверхности:

$$P = \frac{N \cdot h\nu}{S \cdot t \cdot c}(1+\rho) = \frac{nh\nu}{c}(1+\rho), \text{ или } P = \frac{I}{c}(1+\rho), \tag{1.23}$$

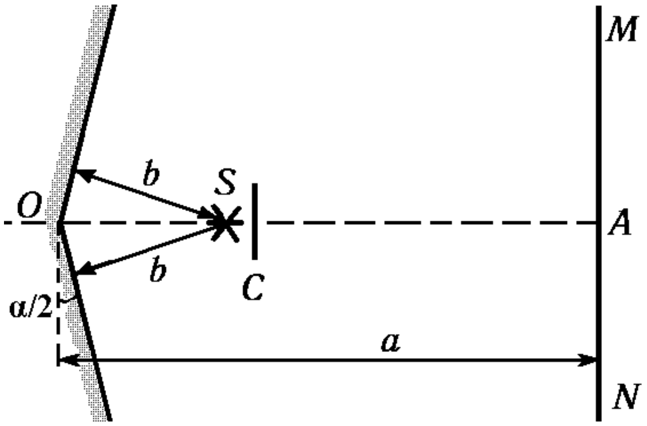
где c – скорость света; $n = \dfrac{N}{S \cdot t}$ – число фотонов N, падающих на единицу площади S поверхности за единицу времени t; I – интенсивность света, ρ – коэффициент отражения поверхности.

Если пучок света падает на поверхность под некоторым углом α к нормали, проведённой к поверхности, то давление света на эту поверхность можно определить:

$$P = \frac{N \cdot h\nu}{S \cdot t \cdot c}(1+\rho) \cdot \cos\alpha, \text{ или } P = \frac{I}{c}(1+\rho) \cdot \cos\alpha. \tag{1.24}$$

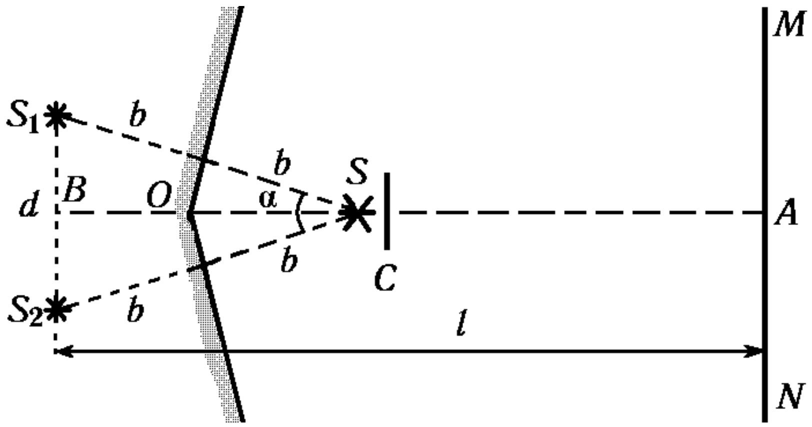
1.8. ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

1. Два плоских зеркала образуют между собой малый угол $\alpha = 5 \cdot 10^{-3}$ рад. На равных расстояниях b = 10 см от зеркал расположен монохроматические точечный источник света S. Определите в мм расстояние между двумя соседними интерференционными полосами на экране MN, расположенном на расстоянии $OA = a$ = 90 см от линии пересечения зеркал. Длина световой волны равна λ = 450 нм. Малый непрозрачный диск C препятствует прямому попаданию света от источника на экран.



<u>Дано:</u> a = 0,1 м b = 0,9 м $\lambda = 4{,}5 \cdot 10^{-7}$ м $\alpha = 5 \cdot 10^{-3}$ рад <u>Найти:</u> Δx = ? (мм)

Решение:



Расстояние между интерференционными полосами можно определить по формуле (1.7): $\Delta x = \dfrac{\lambda l}{d}$, где d – расстояние S_1S_2 между мнимыми изображениями источника света S в плоских зеркалах; l – расстояние от плоскости источников S_1 и S_2 до плоскости экрана MN: $l = a + b$. Расстояние $d = S_1S_2$ определим из треугольника S_1BS:

$$\frac{d}{2} = 2b \sin\frac{\alpha}{2} \approx 2b\frac{\alpha}{2}, \quad d \approx 2b\alpha.$$

Здесь мы учли, что синус малого угла приблизительно равен самому углу в радианах, а косинус – приблизительно равен единице.

Подставим l и d в формулу для Δx, и произведём вычисления:

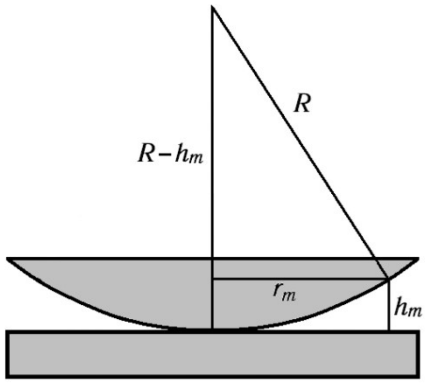
$$\Delta x = \lambda\frac{a+b}{2b\alpha} = 4{,}5 \cdot 10^{-7} \cdot \frac{0{,}1+0{,}9}{2 \cdot 0{,}9 \cdot 5 \cdot 10^{-4}} = 5 \cdot 10^{-4} \text{ м} = 0{,}5 \text{ мм}.$$

$\boxed{\text{Ответ: } \Delta x = 0{,}5 \text{ мм.}}$

2. В установке для наблюдения колец Ньютона пространство между плоско-выпуклой стеклянной линзой и пластиной заполнено водой (n = 1,33). Свет длиной волны 500 нм падает нормально. Радиус кривизны выпуклой части линзы 1 м. Определить: радиус третьего светлого кольца Ньютона в отраженном свете и толщину клина в том месте, где наблюдается третье светлое кольцо.

<u>Дано:</u> $n = 1,33$ $R = 1$ м $\lambda = 5\cdot10^{-7}$ м $m = 3$ <u>Найти:</u> $r_{\max 3} = ?$ $h_3 = ?$

Решение:



Радиусы светлых колец Ньютона в отражённом свете определяются формулой (1.10):

$$r_m = \sqrt{(2m+1)\frac{\lambda}{2}R}, (m = 0,1,2,\ldots),$$

где m – порядковый номер кольца; R – радиус кривизны выпуклой поверхности линзы. Т.к. нам все величины известны, то сразу произведём вычисления:

$$r_{\max 3} = \sqrt{(2\cdot3+1)\frac{5\cdot10^{-7}}{2}\cdot1} \approx 1{,}32\cdot10^{-3} \text{ м} \approx 1{,}32 \text{ мм}.$$

Определим толщину зазора h_m между выпуклой частью линзы и плоскопараллельной пластиной. По рисунку видно, что мы можем воспользоваться теоремой Пифагора:

$$R = \sqrt{r_m^2 + (R-h_m)^2}, \quad R^2 = r_m^2 + R^2 - 2h_mR + h_m^2$$

$$h_m^2 - 2h_mR + r_m^2 = 0, \qquad h_m^2 - 2h_mR + r_m^2 = 0.$$

Можно найти корни квадратного уравнения, либо использовать следующее приближение. Т.к. $h_m << R$, то h_m^2 можно пренебречь, по сравнению с $2h_mR$. Тогда,

$$-2h_mR + r_m^2 = 0, \quad h_m = \frac{r_m^2}{2R}.$$

Решая любым из двух способов, мы получим один и тот же числовой ответ:

$$h_3 = \frac{\left(1{,}32 \cdot 10^{-3}\right)^2}{2 \cdot 1} = 8{,}712 \cdot 10^{-7} \text{ м.}$$

$\boxed{\text{Ответ: } r_{\max 3} \approx 1{,}32 \cdot 10^{-3} \text{ м; } h_3 = 8{,}712 \cdot 10^{-7} \text{ м.}}$

3. На дифракционную решётку, имеющую одинаковую ширину непрозрачных промежутков и прозрачных щелей, равную 1200 нм, нормально падает свет с длиной волны 500 нм. Определить наибольший порядок максимума, который наблюдается для данной длины волны.

Дано:
$a = b$
$a = 1{,}2 \cdot 10^{-6}$ м
$\lambda = 5 \cdot 10^{-7}$ м
Найти:
$k_{\max} = ?$

Решение:

Запишем условие максимумов для дифракции света на решётке: $d \cdot \sin\varphi_k = k\lambda$. Величина левой части ограничена, так как максимальное значение функции $\sin\varphi_k = 1$. Следовательно, ограничена по величине и правая часть этого равенства: $d \cdot 1 = k_{\max}\lambda$, откуда $k_{\max} = d/\lambda$. Учитывая, что период дифракционной решётки $d = a + b = 2a$, в итоге получаем:

$$k_{\max} = 2a/\lambda = 2 \cdot 1{,}2 \cdot 10^{-6} / 5 \cdot 10^{-7} = 4{,}8.$$

Порядок максимума должен быть целым числом. Однако полученное численное значение $k_{\max}$ нельзя округлять в б***о***льшую сторону, чтобы исходное равенство не нарушалось. Отбрасывая дробную часть, получаем окончательный ответ $k_{\max} = 4$.

$\boxed{\text{Ответ: } k_{\max} = 4.}$

4. На дифракционную решетку падает нормально поток белого света. В направлении, определяемом углом 30°, для длины волны 450 нм наблюдается максимум пятого порядка. Определить синус угла, в направлении которого для длины волны 600 нм наблюдается максимум третьего порядка.

Дано:
$\varphi_1 = 30°$
$\lambda_1 = 4{,}5\cdot10^{-7}$ м
$k_1 = 5$
$\lambda_2 = 6\cdot10^{-7}$ м
$k_2 = 5$
Найти:
$\sin\varphi_{k2} = ?$

Решение:

Запишем условие максимумов для дифракции на решётке двух световых волн с длинами λ_1 и λ_2:

$$d \cdot \sin\varphi_{k1} = k_1\lambda_1 \qquad \text{и} \qquad d \cdot \sin\varphi_{k2} = k_2\lambda_2 .$$

Поделив одно уравнение на другое, получаем отношение: $\sin\varphi_{k1}/\sin\varphi_{k2} = k_1\lambda_1/k_2\lambda_2$.

Отсюда следует выражение для синуса угла, под которым наблюдается максимум с $k_2 = 3$:

$$\sin\varphi_{k2} = \sin\varphi_{k1} \cdot \left(k_2\lambda_2/k_1\lambda_1\right).$$

Численный расчет даёт следующий результат:

$$\sin\varphi_{k2} = 0{,}5 \cdot \left(3 \cdot 6 \cdot 10^{-7}/5 \cdot 4{,}5 \cdot 10^{-7}\right) = 0{,}4 .$$

Ответ: $\sin\varphi_{k2} = 0{,}4$.

5. Определить в нм длину волны излучения и импульс фотона, если каждый квант этого излучения обладает энергией 1,5 эВ.

Дано:
$\varepsilon = 1{,}5$ эВ $= 2{,}4\cdot10^{-19}$ Дж
Найти:
$\lambda = ?$ (нм)
$p_ф = ?$

Решение:

Связь энергии фотона с длиной волны излучения определяется формулой (1.17), а с импульсом формулой (1.18):

$$\varepsilon = \frac{hc}{\lambda}, \qquad p_ф = \frac{\varepsilon}{c}.$$

Выразим λ и произведём вычисления:

$$\lambda = \frac{hc}{\varepsilon} = \frac{6{,}6 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^{8}}{2{,}4 \cdot 10^{-19}} = 8{,}75 \cdot 10^{-7} \text{ м} = 875 \text{ нм},$$

$$p_ф = \frac{2{,}4 \cdot 10^{-19}}{3 \cdot 10^{8}} = 8 \cdot 10^{-28} \text{ кг·м/с}.$$

Ответ: $\lambda = 875$ нм, $p_ф = 8\cdot10^{-28}$ кг·м/с.

6. Во сколько раз масса покоя электрона больше массы фотона видимого излучения с длиной волны 660 нм?

Дано:
$\lambda = 6{,}6 \cdot 10^{-7}$ м
$m_e = 9{,}11 \cdot 10^{-31}$ кг
Найти:
$m_e / m_ф = ?$

Решение:

По определению масса фотона связана с его энергией и длиной волны формулами (1.17) и (1.18):

$$m_ф = \frac{\varepsilon}{c^2} = \frac{h}{\lambda c}.$$

Найдём отношение массы покоя электрона к массе фотона:

$$\frac{m_e}{m_ф} = \frac{\lambda c \cdot m_e}{h}.$$

Воспользуемся табличными данными (Приложение 1) и произведём расчёты:

$$\frac{m_e}{m_ф} = \frac{6{,}6 \cdot 10^{-7} \cdot 3 \cdot 10^{8} \cdot 9{,}1 \cdot 10^{-31}}{6{,}6 \cdot 10^{-34}} = 2{,}73 \cdot 10^{5}$$

Ответ: $m_e / m_ф = 2{,}73 \cdot 10^5$.

7. Два образца из цезия облучаются светом от двух разных источников света (частота падающих квантов света 600 ТГц и 500 ТГц). Максимальные кинетические энергии фотоэлектронов при этом отличаются в два раза. Определить работу выхода электрона из цезия. Ответ дать в электронвольтах.

Дано:
$\nu_1 = 6 \cdot 10^{14}$ Гц
$\nu_2 = 5 \cdot 10^{14}$ Гц
$\eta = T_1/T_2 = 2$
Найти:
$A = ?$ (эВ)

Решение:

Запишем уравнение фотоэффекта для двух случаев: $h\nu_1 = A + T_1$ и $h\nu_2 = A + T_2$. Из каждого уравнения находим максимальную кинетическую энергию фотоэлектрона:

$$T_1 = h\nu_1 - A \quad \text{и} \quad T_2 = h\nu_2 - A.$$

Составив отношение этих энергий, приходим к уравнению относительно неизвестной величины – работы выхода A:

$$\eta = \frac{T_1}{T_2} = \frac{h\nu_1 - A}{h\nu_2 - A}.$$

Решив его, получаем: $$A = \frac{h(\eta\nu_2 - \nu_1)}{(\eta - 1)} = h(2\nu_2 - \nu_1).$$

При вычислениях переводим работу в эВ:

$$A = 6{,}6 \cdot 10^{-34}(2 \cdot 5 - 6) \cdot 10^{14} / 1{,}6 \cdot 10^{-19} = 1{,}65 \text{ эВ}.$$

$\boxed{\text{Ответ: } A = 1{,}65 \text{ эВ.}}$

8. Излучение с частотой 2000 ТГц падает на вещество, для которого частота красной границы фотоэффекта равна 1000 ТГц. Определить максимальную кинетическую энергию фотоэлектронов. Ответ дать в электронвольтах.

$\nu = 2 \cdot 10^{15}$ Гц
$\nu_{кр} = 1 \cdot 10^{15}$ Гц
Найти:
$T_{max} = ?$ (эВ)

Решение:

Для того, чтобы найти максимальную кинетическую энергию фотоэлектрона, одного лишь уравнения фотоэффекта $h\nu = A + T_{max}$ недостаточно. Необходимо учесть, что работа выхода A связана с частотой красной границы соотношением $h\nu_{кр} = A$. Подставив это выражение в уравнение фотоэффекта, получаем:

$$T_{max} = h(\nu - \nu_{кр}).$$

Выполняя вычисления, находим:

$$T_{max} = 6{,}6 \cdot 10^{-34} \cdot (2 - 1) \cdot 10^{15} / 1{,}6 \cdot 10^{-19} = 4{,}125 \text{ эВ}.$$

$\boxed{\text{Ответ: } T_{max} = 4{,}125 \text{ эВ.}}$

9. При освещении фотоэлемента светом с длиной волны 500 нм фотоэлектроны полностью задерживаются напряжением 1,125 В. Определить величину задерживающего напряжения при облучении фотоэлемента светом с длиной волны 250 нм. Ответ дать в единицах СИ.

Дано:
$\lambda_1 = 5 \cdot 10^{-7}$ м
$U_{з1} = 1{,}125$ В
$\lambda_2 = 2{,}5 \cdot 10^{-7}$ м
Найти:
$U_{з2} = ?$

Решение:

Запишем формулу Эйнштейна для внешнего фотоэффекта $\frac{hc}{\lambda} = A + T_{max}$.

При остановке фотоэлектрона его кинетическая энергия полностью переходит в потенциальную энергию заряда в электрическом поле:

$$T_{max} = eU_з.$$

Таким образом, уравнение фотоэффекта перепишется так:

$$\frac{hc}{\lambda} = A + eU_з.$$

Применим эту формулу для указанных в условии случаев:

$$\frac{hc}{\lambda_1} = A + eU_{з1} \quad \text{и} \qquad \frac{hc}{\lambda_2} = A + eU_{з2}.$$

Вычитая одно уравнение из другого, мы приходим к выражению для напряжения
$$U_{з2} = U_{з1} + \frac{hc}{e}\left(\frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1}\right).$$

Численный расчет дает следующее значение:

$$U_2 = 1{,}125 + 6{,}6\cdot10^{-34}\cdot3\cdot10^{8}\cdot(4\cdot10^{6} - 2\cdot10^{6})/1{,}6\cdot10^{-19} =$$
$$= 1{,}125 + 2{,}475 = 3{,}6 \text{ В}.$$

Ответ: $U_2 = 3{,}6$ В.

10. Фотон с импульсом $p = 5{,}44\cdot10^{-22}$ кг·м/с рассеялся на покоившемся свободном электроне, в результате чего импульс фотона стал равен $p' = 1{,}36\cdot10^{-22}$ кг·м/с. Определите угол, под которым рассеялся фотон.

Дано:
$p = 5{,}44\cdot10^{-22}$ кг·м/с
$p' = 1{,}36\cdot10^{-22}$ кг·м/с
Найти:
$\theta = ?$

Решение:

Изменение длины волны при эффекте Комптона определяется по формуле (1.22):
$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = \lambda_c(1 - \cos\theta),$$
где $\lambda_c = 2{,}42\cdot10^{-12}$ м – комптоновская длина волны. Импульсы фотона до и после столкновения равны соответственно:
$$p = \frac{h}{\lambda}, \qquad p' = \frac{h}{\lambda'}.$$

Выражая длины волн и подставляя в первое уравнение, получим:
$$\frac{h}{p'} - \frac{h}{p} = \lambda_c(1 - \cos\theta), \quad \cos\theta = 1 - \frac{h\cdot(p - p')}{p\cdot p'\cdot\lambda_c}.$$

Подставим числовые данные и произведём вычисления:
$$\cos\theta = 1 - \frac{6{,}6\cdot10^{-34}\cdot(5{,}44 - 1{,}36)\cdot10^{-22}}{5{,}44\cdot10^{-22}\cdot1{,}36\cdot10^{-22}\cdot2{,}42\cdot10^{-12}} =,$$
$$= 1 - \frac{6{,}6\cdot(5{,}44 - 1{,}36)}{5{,}44\cdot1{,}36\cdot2{,}42} = 1 - 1{,}5 = -0{,}5$$
$$\theta = \arccos(-0{,}5) = 120^\circ.$$

Ответ: $\cos\theta = 1 - \frac{h\cdot(p - p')}{p\cdot p'\cdot\lambda_c}$, $\theta = 120^\circ$

11. Определите энергию (в кэВ), которую рентгеновский фотон передаёт неподвижному электрону при их столкновении, если начальная энергия фотона ε = 10 кэВ, угол рассеяния фотона θ = 60°.

<u>Дано:</u> $\varepsilon = 10^4$ эВ $\theta = 60°$ <u>Найти:</u> $\Delta\varepsilon$ = ? (кэВ)

Решение:

Изменение длины волны при эффекте Комптона определяется по формуле (1.22):

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

где m_e – масса покоя электрона, c – скорость света, h – постоянная Планка (см. приложение 1).

Длина волны фотона до столкновения и после столкновения равна соответственно:

$$\lambda = \frac{hc}{\varepsilon}, \qquad \lambda' = \frac{hc}{(\varepsilon - \Delta\varepsilon)}.$$

Подставляя длины волн в первое уравнение, получим:

$$\frac{hc}{(\varepsilon - \Delta\varepsilon)} - \frac{hc}{\varepsilon} = \frac{h}{m_e c}(1 - \cos\theta), \quad \Delta\varepsilon = \frac{\varepsilon^2}{\left(\varepsilon + \dfrac{m_e c^2}{(1 - \cos\theta)}\right)}.$$

Переведём все энергии в электронвольты. Для этого, поделим второе слагаемое в знаменателе на элементарный заряд. После этого, можно подставлять числовые значения и производить расчёты:

$$\Delta\varepsilon = \frac{\varepsilon^2}{\left(\varepsilon + \dfrac{m_e c^2}{e \cdot (1 - \cos\theta)}\right)} = \frac{10^8}{\left(10^4 + \dfrac{9{,}1 \cdot 10^{-31} \cdot 9 \cdot 10^{16}}{1{,}6 \cdot 10^{-19} \cdot (1 - 0{,}5)}\right)} = 96{,}7 \text{ эВ}.$$

Ответ: $\Delta\varepsilon \approx 0{,}1$ кэВ

12. Луч лазера мощностью 51 мВт падает на поглощающую поверхность. Определить силу светового давления луча на поверхность. Ответ дать в пиконьютонах.

<u>Дано:</u> $P = 5{,}1 \cdot 10^{-2}$ Вт <u>Найти:</u> F = ? (пН)

Решение:

Применяя второй закон Ньютона, заключаем, что сила давления света на поверхность определяется скоростью изменения импульса лазерного излучения: $F = \Delta p / \Delta t$, где Δp – изменение импульса света за время Δt.

Поскольку фотоны полностью поглощаются (конечный импульс равен нулю), для изменения импульса света получаем: $\Delta p = \Delta N \cdot p_{\text{ф}}$, где ΔN – число фотонов с импульсом $p_{\text{ф}}$, приходящих на поглощающую поверхность за время Δt.

Импульс фотона связан с его энергией: $p_{\text{ф}} = \varepsilon / c$. Собирая вместе эти выражения, имеем для силы давления:

$$F = \Delta N \cdot p_{\text{ф}} / \Delta t = \varepsilon \Delta N / (c \cdot \Delta t).$$

Мощность излучения выражается через энергию фотонов:

$$P = \varepsilon \Delta N / \Delta t.$$

Итак, сила светового давления на поглощающую поверхность:

$$F = P / c.$$

Проведём расчёты: $F = 5{,}1 \cdot 10^{-2}/3 \cdot 10^{8} = 1{,}7 \cdot 10^{-10}$ Н = 170 пН.

Ответ: F = 170 пН.

13. Монохроматический параллельный пучок фотонов, падающий нормально на чёрную пластинку, оказывает на нее давление 0,4 мкПа. Энергия каждого фотона в пучке 10 эВ, коэффициент поглощения света пластинкой равен 100%. Определить в СИ число фотонов, пролетающих в единицу времени через единицу площади поперечного сечения пучка.

Дано:
P = 0,4 мкПа = $4 \cdot 10^{-7}$ Па
ε = 10 эВ = $1{,}6 \cdot 10^{-18}$ Дж
$\sigma = 1$ ($\rho = 0$)
Найти:
$N/(S \cdot t) = n = ?$

Решение:

Воспользуемся формулой (1.23) для давления света, падающего нормально на некоторую поверхность:

$$P = \frac{N \cdot h\nu}{S \cdot t \cdot c}(1 + \rho) = \frac{nh\nu}{c}(1 + \rho).$$

Выразим n и учтём, что $h\nu = \varepsilon$:

$$n = \frac{Pc}{\varepsilon(1 + \rho)}.$$

Произведём вычисления: $n = \dfrac{4 \cdot 10^{-7} \cdot 3 \cdot 10^{8}}{1{,}6 \cdot 10^{-18} \cdot (1 + 0)} = 7{,}5 \cdot 10^{19}$.

Ответ: $n = 7{,}5 \cdot 10^{19}$ фотонов.

1.9. ПРИМЕРЫ ОТВЕТОВ НА ТЕСТОВЫЕ ЗАДАНИЯ

1. Разность хода волн от двух когерентных источников света в данной точке пространства составляет 1,5 длины волны. Каким будет результат интерференции света в данной точке?

1) максимум; 2) минимум;

3) интерференции в таких условиях не наблюдается;

4) промежуточное значение между максимумом и минимумом.

Решение: По условию интерференции разность хода лучей должна быть связана с длиной волны соотношением:

$$\Delta = k\frac{\lambda}{2}, (k = 0,1,2,\ldots).$$

Если k равно целому чётному числу, то получим максимум интенсивности. Если k равно целому нечётному числу, то получим минимум интенсивности. Если k равно нецелому числу, то промежуточное значение между максимумом и минимумом

Выразим k и подставим значение разности хода:

$$k = \frac{2\Delta}{\lambda} = \frac{2 \cdot 1{,}5\lambda}{\lambda} = 3.$$

Т.к. k получилось целым нечётным, то правильный ответ **2) минимум** интенсивности.

2. Что произойдёт с расстоянием между дифракционными максимумами при дифракции на решётке, если длина световой волны, падающей на решётку, увеличится?

1) увеличится; 2) уменьшится;

3) не изменится; 4) предсказать это не возможно.

Решение: Согласно формуле (1.13) для дифракционных максимумов: $d \cdot \sin\varphi_k = k\lambda, (k = 0,1,2,\ldots)$, при наблюдении за дифракционным максимумом с порядковым номером k, с увеличением длины волны λ, растёт значение $\sin\varphi_k$, а значит и сам угол дифракции φ_k. Это означает, что расстояние между максимумами будет увеличиваться. Правильный вариант ответа: **1) увеличится**.

3. Если импульсы двух световых квантов (фотонов) отличаются в 3 раза ($p_1/p_2 = 3$) то, как при этом относятся длины волн этих фотонов?

1) у первого в 3 раза больше;

2) у первого в 3 раза меньше;

3) у первого в 9 раз больше;

4) у первого в 9 раз меньше.

Решение: Импульс фотона определяется формулой (1.18) $p_ф = \frac{h}{\lambda}$. Видно, что чем больше длина волны, тем меньше импульс фотона (и наоборот). Следовательно, у первого фотона длина волны будет меньше в 3 раза. Правильный вариант ответа: **2) у первого в 3 раза меньше**.

4. С уменьшением длины волны монохроматического света, падающего на катод и вызывающего фотоэффект, задерживающий потенциал...

1) увеличивается; 2) уменьшается;
3) не изменяется; 4) предсказать это не возможно.

Решение: Уравнение Эйнштейна для внешнего фотоэффекта имеет вид: $\frac{hc}{\lambda} = A + eU_з$.

Отсюда, $U_з = \frac{hc}{e\lambda} - \frac{A}{e}$. Очевидно, что при уменьшении длины волны излучения λ, задерживающий потенциал будет увеличиваться. Правильный вариант ответа: **1) увеличивается**.

5. Фотон рентгеновского излучения рассеялся на слабосвязанном покоящемся электроне. От чего зависит изменение длины волны при комптоновском рассеянии?

1) от первоначальной энергии фотона;
2) от угла рассеяния электрона отдачи;
3) от угла рассеяния фотона;
4) от химической природы вещества, в котором находится слабосвязанный электрон.

Решение: Согласно формуле (1.22):

$$\Delta\lambda = \lambda_c(1 - \cos\theta) = 2\lambda_c \sin^2\left(\frac{\theta}{2}\right),$$

где $\lambda_c = 2{,}42 \cdot 10^{-12}$ м – комптоновская длина волны. Единственной величиной, влияющей на изменение длины волны при комптоновском рассеянии, является угол θ – угол рассеяния фотона. Правильный вариант ответа: **3) от угла рассеяния фотона**.

РАЗДЕЛ 2. АТОМНАЯ И ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА

2.1. ТЕОРИЯ АТОМА (ВОДОРОДА).

Первый постулат Бора (постулат существования стационарных состояний): Атом или атомная система может находиться только в особых стационарных (квантовых) состояниях, каждому из которых соответствует определённое значение энергии E_1, E_2, E_3, …, E_n, где $n = 1, 2, 3,…$ – главное квантовое число.

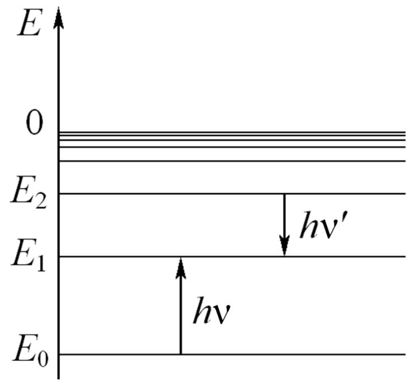


Рисунок 2.1 – Схема энергетических уровней атома

Энергия атомов может принимать только строго определенные значения (***квантование энергии***). Разрешенные энергии принято изображать на энергетической диаграмме (рис. 2.1.) в виде горизонтальных линий – ***уровней***. Самое низкое стационарное состояние с энергией E_0 называется ***основным***. Выше находятся первое возбужденное, состояние с энергией E_1, второе возбужденное состояние с энергией E_2 и тд. Следует помнить, что дискретные энергии уровней E_0, E_1, E_2, ... являются отрицательными. Предел сходимости энергетических уровней для водородоподобных атомов называется ***границей ионизации*** ($E_\infty \to 0$).

Второй постулат Бора (правило частот): При переходе атома или атомной системы из одного стационарного состояния с энергией E_m в другое с энергией E_n испускается или поглощается квант электромагнитной энергии с частотой $\nu_{mn}(\omega_{mn})$, которая определяется:

$$\nu_{mn} = \frac{E_m - E_n}{h}, \quad \omega_{mn} = \frac{E_m - E_n}{\hbar}, \tag{2.1}$$

где $h = 6{,}63\cdot10^{-34}$ Дж·с, $\hbar = h/2\pi = 1{,}05\cdot10^{-34}$ Дж·с – постоянная Планка.

Излучение и поглощение фотонов происходит при переходах электронов в атомах с одного энергетического уровня на другой. Энергия испущенного (поглощенного) кванта света определяется по ***правилу Бора*** разностью энергий стационарных состояний, между которыми совершается переход:

$$\varepsilon = h\nu_{mn} = \hbar\omega_{mn} = E_m - E_n. \tag{2.2}$$

Излучение фотона происходит при переходе атома из более высокого стационарного состояния в более низкое ($E_m > E_n$); при обратном переходе имеет место поглощение кванта света ($E_m < E_n$).

Постулаты Бора дополняются ***правилом квантования момента импульса электронов***:

$$m_e v_n \cdot r_n = n\hbar, \quad (n = 1, 2, 3, ...), \tag{2.3}$$

где m_e – масса электрона; v_n – скорость электрона на орбите радиуса r_n.

Радиусы орбит электрона в водородоподобном атоме с зарядовым числом Z, соответствующие главному квантовому числу n:

$$r_n = \frac{4\pi\varepsilon_0}{Z}\frac{\hbar^2}{m_e e^2}n^2 = \frac{r_1 \cdot n^2}{Z}, \tag{2.4}$$

где $e = -1{,}6 \cdot 10^{-19}$ Кл – электрический заряд электрона (см. приложение); $r_1 = 0{,}52 \cdot 10^{-10}$ м – радиус первой орбиты электрона в атоме водорода (боровский радиус).

Энергия стационарных состояний водородоподобного атома:

$$E_n = -\frac{Z^2 m_e e^4}{32\pi^2\varepsilon_0^2\hbar^2} \cdot \frac{1}{n^2} = -Z^2\frac{E_1}{n^2}, \tag{2.5}$$

где $E_1 = 13{,}6$ эВ – энергия электрона в основном состоянии ($n = 1$) атома водорода.

Энергия ионизации атома водорода ($Z = 1$) численно равна энергии атома водорода в основном состоянии ($n = 1$):

$$E_i = \frac{m_e e^4}{32\pi^2\varepsilon_0^2\hbar^2} = E_1, \tag{2.6}$$

Потенциальная энергия взаимодействия электрона, находящегося на орбите радиуса r_n, ***с ядром*** в водородоподобном атоме:

$$U(r_n) = -\frac{Ze^2}{4\pi\varepsilon_0 r_n} = -\frac{Z^2 m_e e^4}{(4\pi\varepsilon_0)^2\hbar^2} \cdot \frac{1}{n^2}, \tag{2.7}$$

Обобщённая формула Бальмера, описывающая серии спектральных линий в спектре атома водорода:

$$\nu_{mn} = R\left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2}\right), \tag{2.8}$$

где ν_{mn} – частота спектральных линий в спектре атома водорода; $R = \frac{m_e e^4}{8\varepsilon_0{}^2(2\pi\hbar)^3} = \frac{m_e e^4}{8\varepsilon_0^2 h^3} = 3{,}29 \cdot 10^{15}$ с$^{-1}$ – постоянная Ридберга; m и n – номера энергетических уровней (орбит).

Частоты, соответствующие ***серии Лаймана***, возникают при переходе электрона в состояние $m = 1$ со всех вышележащих энергетических уровней.

Серии Бальмера соответствуют переходы в состояние с квантовым числом $m = 2$ из состояний $n = 3, 4, 5 \ldots$.

Серия Пашена соответствует переходам электрона в состояние с квантовым числом $m = 3$ из состояний $n = 4, 5, 6 \ldots$.

2.2. РАДИОАКТИВНОСТЬ.

Закон радиоактивного распада:

$$N = N_0 e^{-\lambda t}, \tag{2.9}$$

где N – число не распавшихся ядер в момент времени t; N_0 – число не распавшихся ядер в начальный момент времени ($t = 0$); λ – постоянная радиоактивного распада.

Число распавшихся ядер за время t:

$$\Delta N = N_0 - N = N_0\left(1 - e^{-\lambda t}\right). \tag{2.10}$$

Время, за которое распадается половина имеющихся ядер, носит название ***периода полураспада. Связь периода полураспада T с постоянной радиоактивного распада***:

$$T = \frac{\ln 2}{\lambda}. \tag{2.11}$$

Активность нуклида в радиоактивном источнике $[A]$ = распад/с = Бк (Беккерель):

$$A = -\frac{dN}{dt} = \lambda N. \tag{2.12}$$

Доза излучения $[D]$ = Дж/кг = Гр (Грэй):

$$D = \frac{\Delta W}{\Delta m}, \tag{2.13}$$

где ΔW – энергия ионизирующего излучения, переданная элементу облучаемого вещества; Δm – масса этого элемента.

2.3. СТРОЕНИЕ АТОМНЫХ ЯДЕР. ЯДЕРНЫЕ РЕАКЦИИ

Атомное ядро любого химического элемента состоит из нуклонов. ***Нуклоны*** – это общее наименование протонов и нейтронов. ***Протон*** – элементарная частица, имеющая положительный заряд, по абсолютной величине равный заряду электрона. ***Нейтрон*** – элементарная частица, не имеющая электрического заряда. Для характеристик атомных ядер общеприняты следующие обозначения:

Z – порядковый номер данного химического элемента В периодической системе Д.И. Менделеева (он также равен числу протонов в ядре и числу электронов в оболочке атома);

N – число нейтронов в ядре;

$A = Z + N$ – массовое число, равное числу нуклонов в ядре.

Изотопы – это ядра с одинаковым числом протонов Z, но различным числом нейтронов N.

${}_{Z}^{A}X$ – символ ядра некоторого химического элемента X.

Ниже приведены обозначения для нуклонов и некоторых ядер:

${}_{1}^{1}H = {}_{1}^{1}p$ – ядро водорода (протон); ${}_{0}^{1}n$ – нейтрон;

${}_{1}^{2}D$ – дейтерий, ${}_{1}^{3}T$ – тритий (изотопы водорода);

${}_{2}^{4}He={}_{2}^{4}\alpha$ – ядро атома гелия (α – частица).

Ядерная реакция – это взаимодействие атомного ядра с другим атомным ядром или элементарной частицей, в результате которого происходит преобразование (превращение) ядер. Поскольку в ядерных реакциях кроме нуклонов участвуют и другие элементарные частицы, на них также распространяются обозначения, принятые для ядер: ${}_{-1}^{0}e$ – электрон (отрицательная β^- – частица); ${}_{1}^{0}e^+$ – позитрон (положительная β^+ – частица); ${}_{0}^{0}\gamma$ – гамма-квант (фотон большой энергии).

Однако нижний индекс Z для элементарных частиц не обозначает теперь число протонов, а приобретает смысл так называемого зарядового числа.

Ядерные реакции принято записывать в виде

$$ {}_{Z1}^{A1}X+{}_{Z2}^{A2}Y\rightarrow{}_{Z3}^{A3}U+{}_{Z4}^{A4}V. \qquad (2.14)$$

Кроме фундаментальных законов сохранения энергии и импульса в ядерных реакциях имеют место:

– ***закон сохранения нуклонов*** ($A_1 + A_2 = A_3 + A_4$);

– ***закон сохранения электрического заряда*** ($Z_1 + Z_2 = Z_3 + Z_4$).

Ядра некоторых химических элементов могут самостоятельно распадаться на продукты деления. Ниже приводится запись некоторых ***реакций ядерного распада***:

$^{A}_{Z}X \rightarrow ^{A-4}_{Z-2}Y + ^{4}_{2}He$, (α – распад);

$^{A}_{Z}X \rightarrow _{Z+1}^{A}Y + _{-1}^{0}e$, (электронный β^{-} – распад);

$^{A}_{Z}X \rightarrow _{Z-1}^{A}Y + _{1}^{0}e^{+}$, (позитронный β^{+} – распад).

Масса ядра $m_{яд}$ всегда меньше суммы масс входящих в его состав нуклонов: $m_{яд} < (Z \cdot m_p + N \cdot m_n)$, где m_p и m_n – массы протона и нейтрона соответственно (см. приложение 1).

Дефект масс Δm – это разница между суммой масс всех нуклонов, содержащихся в ядре, и массой ядра:

$$\Delta m = \left(Z \cdot m_p + Z \cdot m_n\right) - m_{яд}. \qquad (2.15)$$

Для характеристики масс элементарных частиц, ядер, атомов используется понятие атомной единицы массы.

Атомная единица массы (а.е.м.) – это величина, равная 1/12 массы атома углерода $^{12}_{6}C$. Атомную единицу массы можно перевести в единицу массы СИ – килограмм (см. приложение 1).

Из (2.15) следует, что энергия покоя свободных нуклонов всегда больше энергии покоя составленного из них ядра.

Энергия связи ядра – это величина

$$\Delta E_{св} = \Delta m c^{2}, \qquad (2.16)$$

представляющая собой работу по расщеплению ядра на образующие его нуклоны. Энергия связи также численно равна энергии, которая высвобождается в процессе образования из нуклонов атомного ядра.

Удельная энергия связи $\Delta E_{уд}$ – это энергия связи ядра, приходящаяся на один наклон:

$$\Delta E_{уд} = \frac{\Delta E_{св}}{A} = \frac{\Delta E_{св}}{(N+Z)}. \qquad (2.17)$$

Энергия ядерной реакции вида (2.14) определяется выражением:

$$W = c^{2} \cdot \left[\left(m_X + m_Y\right) - \left(m_U + m_V\right)\right], \qquad (2.18)$$

где m_X и m_Y – массы частиц до реакции, а m_U и m_V – массы частиц после реакции. Если $(m_X + m_Y) > (m_U + m_V)$, то реакция происходит с выделением энергии; если $(m_X + m_Y) < (m_U + m_V)$, то энергия поглощается.

2.4. ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

1. Электрон в атоме находится в возбужденном состоянии с энергией, равной –2,35 эВ. Чему станет равной энергия электрона, если атом испустит фотон частотой 400 ТГц? Ответ дать в электронвольтах.

Дано:
$E_n = -2{,}35$ эВ
$\nu = 4\cdot10^{14}$ Гц
Найти:
$E_m = ?$ (эВ)

Решение:

В соответствии с правилом Бора энергия испущенного фотона ε определяется разностью энергий атомных уровней E_n и E_m между которыми происходит переход: $\varepsilon = E_n - E_m$.

Подставляя сюда выражение для энергии кванта света $\varepsilon = h\nu$, находим энергию электрона $E_m = E_n - h\nu$ после перехода. Удобнее сначала вычислить энергию фотона в электронвольтах:

$$h\nu = 6{,}6\cdot10^{-34}\cdot4\cdot10^{14}/1{,}6\cdot10^{-19} = 1{,}65 \text{ эВ}.$$

Окончательно получим: $E_m = -2{,}35 - 1{,}65 = -4$ эВ.

Ответ: $E_m = -4$ эВ.

2. Электрон находится на третьей боровской орбите в атоме водорода. Выведите выражение и определите радиус орбиты, на которой находится электрон.

Дано:
$n = 3$
$Z = 1$
Найти:
$r_3 = ?$

Решение:

На электрон, движущийся по n-той орбите, со стороны ядра действует сила Кулона:

$$F_{\text{кл}} = \frac{Ze^2}{4\pi\varepsilon_0 r_n^2},$$

где Z – порядковый номер элемента (зарядовое число).

Эта сила сообщает электрону нормальное (центростремительное) ускорение:

$$a_{\text{н}} = \frac{\upsilon_n^2}{r_n},$$

где υ_n – скорость электрона на n-той орбите.

По второму закону Ньютона:

$$\frac{Ze^2}{4\pi\varepsilon_0 r_n^2} = m_e\frac{\upsilon_n^2}{r_n}. \qquad (1)$$

Согласно правилу квантования момента импульса электронов:

$$m_e \upsilon_n \cdot r_n = n\hbar, \quad (n = 1,\ 2,\ 3,\ \ldots). \tag{2}$$

Выражая, υ_n из (2) и подставляя в (1) получим

$$\upsilon_n = \frac{n\hbar}{m_e r_n}, \qquad \frac{Ze^2}{4\pi\varepsilon_0 r_n} = m_e \upsilon_n^2 = \frac{n^2\hbar^2}{m_e r_n^2},$$

$$r_n = \frac{4\pi\varepsilon_0 \hbar^2}{m_e Z e^2} n^2.$$

Что совпадает с выражением (2.4) в теории. Проведём расчёты, и получим

$$r_n = \frac{4 \cdot 3{,}14 \cdot 8{,}85 \cdot 10^{-12} \cdot \left(1{,}05 \cdot 10^{-34}\right)^2}{9{,}1 \cdot 10^{-31} \cdot 1 \cdot \left(1{,}6 \cdot 10^{-19}\right)^2} \cdot 3^2 \approx 0{,}4736 \cdot 10^{-9} \text{ м.}$$

$$\boxed{\text{Ответ: } r_n = 0{,}4736 \cdot 10^{-9} \text{ м.}}$$

3. Электрон находится на второй орбите в водородоподобном атоме гелия (He^+). Выведите выражение и определите скорость электрона на этой орбите и частоту его вращения.

Дано:
$n = 2$
$Z = 2$
Найти:
$\upsilon_3 = ?$
$\nu_3 = ?$

Решение:

На электрон, движущийся по n-той орбите, со стороны ядра действует сила Кулона:

$$F_{\text{кл}} = \frac{Ze^2}{4\pi\varepsilon_0 r_n^2},$$

где Z – порядковый номер элемента (зарядовое число).

Эта сила сообщает электрону нормальное (центростремительное) ускорение:

$$a_{\text{н}} = \frac{\upsilon_n^2}{r_n},$$

где υ_n – скорость электрона на n-той орбите.

По второму закону Ньютона:

$$\frac{Ze^2}{4\pi\varepsilon_0 r_n^2} = m_e \frac{\upsilon_n^2}{r_n}. \tag{1}$$

Согласно правилу квантования момента импульса электронов:

$$m_e \upsilon_n \cdot r_n = n\hbar. \tag{2}$$

Выражая, r_n из (2) и подставляя в (1) получим

$$r_n = \frac{n\hbar}{m_e v_n}, \qquad \frac{Ze^2}{4\pi\varepsilon_0 r_n} = m_e v_n^2,$$

$$\frac{Ze^2 m_e v_n}{4\pi\varepsilon_0 \hbar n} = m_e v_n^2, \qquad v_n = \frac{Ze^2}{4\pi\varepsilon_0 \hbar} \cdot \frac{1}{n}.$$

Произведём расчёты,

$$v_n = \frac{2 \cdot \left(1{,}6 \cdot 10^{-19}\right)^2}{4 \cdot 3{,}14 \cdot 8{,}85 \cdot 10^{-12} \cdot 1{,}05 \cdot 10^{-34}} \cdot \frac{1}{2} \approx 2{,}194 \cdot 10^6 \text{ м/с}$$

Частоту вращения электрона по n-той орбите выразим через период:

$$\nu_n = \frac{1}{T} = \frac{v_n}{2\pi r_n} = \frac{m_e v_n^2}{2\pi\hbar} \cdot \frac{1}{n} = \frac{m_e}{2\pi\hbar} \cdot \frac{1}{n} \cdot \left(\frac{Ze^2}{4\pi\varepsilon_0 \hbar} \cdot \frac{1}{n}\right)^2 =$$

$$= \frac{m_e Z^2 e^4}{32\varepsilon_0^2 \pi^3 \hbar^3} \cdot \frac{1}{n^3} = \frac{m_e Z^2 e^4}{4\varepsilon_0^2 h^3} \cdot \frac{1}{n^3}$$

Произведём расчёты,

$$\nu_n = \frac{9{,}1 \cdot 10^{-31} \cdot 2^2 \cdot \left(1{,}6 \cdot 10^{-19}\right)^4}{4 \cdot \left(8{,}85 \cdot 10^{-12}\right)^2 \cdot \left(6{,}63 \cdot 10^{-34}\right)^3} \cdot \frac{1}{2^3} \approx 3{,}266 \cdot 10^{15} \text{ с}^{-1}$$

$\boxed{\text{Ответ: } v_n \approx 2{,}194 \cdot 10^6 \text{ м/с; } \nu_n \approx 3{,}266 \cdot 10^{15} \text{ с}^{-1}.}$

4. Электрон находится на четвёртой орбите в водородоподобном атоме лития (Li^{++}). Выведите выражение и определите (в эВ) потенциальную, кинетическую и полную энергии электрона на этой орбите.

<u>Дано:</u>
$n = 4$
$Z = 3$
<u>Найти:</u>
U_4 = ? (эВ)
$E_{к4}$ = ? (эВ)
E_4 = ? (эВ)

Решение:

Воспользуемся результатами предыдущей задачи (используем формулу для скорости электрона на n-той орбите).

$$v_n = \frac{Ze^2}{4\pi\varepsilon_0 \hbar} \cdot \frac{1}{n}$$

Кинетическая энергия электрона:

$$E_{\text{к}n} = \frac{m_e v_n^2}{2} = \frac{m_e}{2} \cdot \frac{Z^2 e^4}{16\pi^2 \varepsilon_0^2 \hbar^2} \cdot \frac{1}{n^2} = \frac{m_e Z^2 e^4}{32\pi^2 \varepsilon_0^2 \hbar^2} \cdot \frac{1}{n^2}.\ (\text{в Дж}) \qquad (1)$$

$$E_{\text{к}n} = \frac{m_e Z^2 e^3}{32\pi^2 \varepsilon_0^2 \hbar^2} \cdot \frac{1}{n^2}.\ (\text{в эВ})$$

Проведём вычисления:

$$E_{\text{к}4} = \frac{9{,}1 \cdot 10^{-31} \cdot 3^2 \cdot \left(1{,}6 \cdot 10^{-19}\right)^3}{32 \cdot 3{,}14^2 \cdot \left(8{,}85 \cdot 10^{-12}\right)^2 \cdot \left(1{,}05 \cdot 10^{-34}\right)^2} \cdot \frac{1}{4^2} \approx 7{,}69 \text{ эВ}.$$

Определим потенциальную энергию взаимодействия электрона с ядром. Это энергия притяжения. Поэтому, она отрицательная.

$$U_n = -\frac{Ze^2}{4\pi\varepsilon_0 r_n}.$$

Воспользуемся формулой для радиуса n-той орбиты электрона, полученной во второй задаче (или формулой (2.4) из теории):

$$r_n = \frac{4\pi\varepsilon_0\hbar^2}{m_e Z e^2} n^2.$$

Получим

$$U_n = -\frac{Ze^2}{4\pi\varepsilon_0} \cdot \frac{m_e Z e^2}{4\pi\varepsilon_0 \hbar^2} \cdot \frac{1}{n^2} = -\frac{m_e Z^2 e^4}{16\pi^2 \varepsilon_0^2 \hbar^2} \cdot \frac{1}{n^2}.\ (\text{в Дж}) \qquad (2)$$

$$U_n = -\frac{m_e Z^2 e^3}{16\pi^2 \varepsilon_0^2 \hbar^2} \cdot \frac{1}{n^2}.\ (\text{в эВ})$$

Полученное выражение (2) совпадает с формулой (2.7) из теории. Проведём вычисления:

$$U_4 = -\frac{9{,}1 \cdot 10^{-31} \cdot 3^2 \cdot \left(1{,}6 \cdot 10^{-19}\right)^3}{16 \cdot 3{,}14^2 \cdot \left(8{,}85 \cdot 10^{-12}\right)^2 \cdot \left(1{,}05 \cdot 10^{-34}\right)^2} \cdot \frac{1}{4^2} \approx -15{,}38 \text{ эВ}.$$

Определим полную энергию электрона, как сумму потенциальной и кинетической энергий. Обратим внимание на то, что потенциальная энергия (2) отрицательна и в 2 раза больше, чем положительная кинетическая энергия (1). В итоге, получим:

$$E_n = E_{\text{к}n} + U_n = -\frac{m_e Z^2 e^4}{32\pi^2 \varepsilon_0^2 \hbar^2} \cdot \frac{1}{n^2}.\ (\text{в Дж}) \qquad (3)$$

$$E_n = -\frac{m_e Z^2 e^3}{32\pi^2 \varepsilon_0^2 \hbar^2} \cdot \frac{1}{n^2}. \text{ (в эВ)}$$

Полученное выражение (3) совпадает с формулой (2.5) из теории. Проведём вычисления,

$$E_4 = -\frac{9{,}1 \cdot 10^{-31} \cdot 3^2 \cdot \left(1{,}6 \cdot 10^{-19}\right)^3}{32 \cdot 3{,}14^2 \cdot \left(8{,}85 \cdot 10^{-12}\right)^2 \cdot \left(1{,}05 \cdot 10^{-34}\right)^2} \cdot \frac{1}{4^2} \approx -7{,}69 \text{ эВ.}$$

Ответ: $E_{к4} \approx -7{,}69$ эВ; $U_4 \approx -15{,}38$ эВ; $E_4 \approx -7{,}69$ эВ.

5. Найдите (в эВ) энергию связи электрона находящегося в основном состоянии в водородоподобном атоме лития (Li^{++}).

Дано:
$n = 1$
$Z = 3$
Найти:
$E_i = ?$ (эВ)

Решение:

Воспользуемся формулой (2.6) для энергии ионизации атома, но учтём, что зарядовое число у лития равно 3. В предыдущей задаче мы вывели формулу для полной энергии электрона на n-той орбите водородоподобного атома. Энергия ионизации это энергия, которую нужно сообщить атому, чтобы удалить из атома электрон. Эта энергия равна энергии электрона в основном ($n = 1$) состоянии.

$$E_i = \frac{m_e Z^2 e^4}{32\pi^2 \varepsilon_0^2 \hbar^2}, \text{ (в Дж)}$$

$$E_i = \frac{m_e Z^2 e^3}{32\pi^2 \varepsilon_0^2 \hbar^2}. \text{ (в эВ)}$$

Проведём вычисления,

$$E_i = \frac{9{,}1 \cdot 10^{-31} \cdot 3^2 \cdot \left(1{,}6 \cdot 10^{-19}\right)^4}{32 \cdot 3{,}14^2 \cdot \left(8{,}85 \cdot 10^{-12}\right)^2 \cdot \left(1{,}05 \cdot 10^{-34}\right)^2} \cdot \frac{1}{1^2} \approx 1{,}97 \cdot 10^{-17} \text{ Дж,}$$

или в эВ: $E_i \approx 123$ эВ

Ответ: $E_i \approx 123$ эВ.

6. Найдите максимально возможные частоты излучения атома водорода (границы серий спектральных линий) для серий Лаймана, Бальмера и Пашена.

<u>Дано:</u>
$Z = 1$
$n = \infty$
$m_1 = 1$
$m_2 = 2$
$m_3 = 3$
<u>Найти:</u>
$\nu_{\max 1} = ?$
$\nu_{\max 2} = ?$
$\nu_{\max 3} = ?$

Решение:

Используя правило частот Бора (2.1) и формулу (2.5) получим формулу (2.8) для частот в сериях спектров излучения.

$$\nu_{mn} = \frac{E_m - E_n}{h} = \frac{1}{2\pi\hbar}\left(E_m - E_n\right),$$

где
$$E_n = \frac{Z^2 m_e e^4}{32\pi^2\varepsilon_0^2\hbar^2}\cdot\frac{1}{n^2}.$$

$$\nu_{mn} = \frac{m_e Z^2 e^4}{64\pi^3\varepsilon_0^2\hbar^3}\cdot\left(\frac{1}{m^2}-\frac{1}{n^2}\right) = R\cdot\left(\frac{1}{m^2}-\frac{1}{n^2}\right).$$

где $R = \dfrac{m_e e^4}{64\pi^3\varepsilon_0^2\hbar^3} = \dfrac{m_e e^4}{8\varepsilon_0^2 h^3} = 3{,}29\cdot 10^{15}\ \text{с}^{-1}$ – постоянная Ридберга; m и n – номера энергетических уровней (орбит).

Для максимальных частот $n = \infty$, поэтому

$$\nu_{\max} = R\cdot\left(\frac{1}{m^2}-\frac{1}{\infty^2}\right) = R\cdot\left(\frac{1}{m^2}-0\right) = \frac{R}{m^2}.$$

Подставим значения:

– для серии Лаймана $m_1 = 1$:

$$\nu_{\max 1} = \frac{3{,}29\cdot 10^{15}}{1^2} = 3{,}29\cdot 10^{15}\ \text{с}^{-1};$$

– для серии Бальмера $m_2 = 2$:

$$\nu_{\max 2} = \frac{3{,}29\cdot 10^{15}}{2^2} = \frac{3{,}29\cdot 10^{15}}{4} = 8{,}225\cdot 10^{14}\ \text{с}^{-1};$$

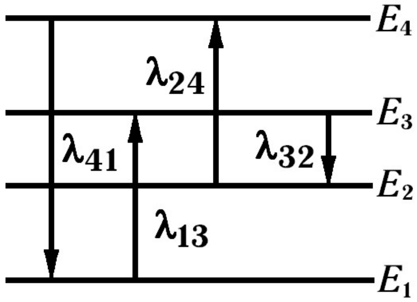
– для серии Пашена $m_3 = 3$:

$$\nu_{\max 3} = \frac{3{,}29\cdot 10^{15}}{3^2} = \frac{3{,}29\cdot 10^{15}}{9} = 3{,}65\cdot 10^{14}\ \text{с}^{-1}.$$

$\boxed{\text{Ответ: } \nu_{\max 1} = 3{,}29\cdot 10^{15}\ \text{с}^{-1}; \nu_{\max 2} = 8{,}225\cdot 10^{14}\ \text{с}^{-1};}$

$\boxed{\nu_{\max 3} = 3{,}65\cdot 10^{14}\ \text{с}^{-1}.}$

7. На рисунке изображены энергетические уровни атома и указаны длины волн фотонов, излучаемых (поглощаемых) при переходах с одного уровня на другой. Определите (в нм) длину волны λ_{41} для фотонов, излучаемых при переходе между уровнями 4 и 1, если λ_{32} = 545 нм, λ_{24} = 400 нм, λ_{13} = 300 нм.



Дано:
λ_{32} = 545 нм
λ_{24} = 400 нм
λ_{13} = 300 нм
Найти:
λ_{13} = ? (нм)

Решение:

Связь длины волны фотона и его энергии определяется формулой (1.17) и вторым постулатом Бора (правилом частот):

$$\varepsilon = E_m - E_n = \frac{hc}{\lambda_{mn}}.$$

Энергию фотона, при переходе с уровня 4 на уровень 1 можно найти как

$$\varepsilon_{41} = E_4 - E_1 = |\varepsilon_{13}| + |\varepsilon_{24}| - |\varepsilon_{32}| =$$

$$= (E_3 - E_1) + (E_4 - E_2) - (E_3 - E_2) =,$$

$$= \frac{hc}{\lambda_{13}} + \frac{hc}{\lambda_{24}} - \frac{hc}{\lambda_{32}} = \frac{hc}{\lambda_{41}}$$

$$\frac{\lambda_{24} \cdot \lambda_{32} + \lambda_{13} \cdot \lambda_{32} - \lambda_{13} \cdot \lambda_{24}}{\lambda_{13} \cdot \lambda_{32} \cdot \lambda_{24}} = \frac{1}{\lambda_{41}},$$

$$\lambda_{41} = \frac{\lambda_{13} \cdot \lambda_{32} \cdot \lambda_{24}}{\lambda_{24} \cdot \lambda_{32} + \lambda_{13} \cdot \lambda_{32} - \lambda_{13} \cdot \lambda_{24}}.$$

Произведём вычисления,

$$\lambda_{41} = \frac{300 \cdot 545 \cdot 400 \cdot 10^{-27}}{(400 \cdot 545 + 300 \cdot 545 - 300 \cdot 400) \cdot 10^{-18}} = 250 \cdot 10^{-9} \text{ м.}$$

Ответ: $\lambda_{41} = 250 \cdot 10^{-9}$ м.

8. Из первоначального числа радиоактивных ядер распались 15/16 имеющихся ядер. Определите число периодов полураспада, которое прошло с начала наблюдения?

Дано:
$\Delta N/N_0 = 15/16$
$t = nT$
Найти:
$n = ?$

Решение:

По закону радиоактивного распада (2.9) и связи периода полураспада с постоянной λ (2.11):

$$N = N_0 e^{-\lambda t}, \; T = \frac{\ln 2}{\lambda},$$

получим

$$N = N_0 \cdot 2^{-\frac{t}{T}}.$$

Число нераспавшихся ядер: $\dfrac{N}{N_0} = \left(1 - \dfrac{\Delta N}{N_0}\right) = \dfrac{1}{16} = \dfrac{1}{2^{\frac{nT}{T}}} = \dfrac{1}{2^n}.$

Отсюда, $2^n = 16$, и $n = 4$.

Ответ: $n = 4$.

9. Радиоактивный изотоп радия $^{226}_{88}Ra$ испытывает α-распад, в результате чего получается радиоактивный радон $^{222}_{86}Rn$. При этом количество радона в пробирке таково, что число его атомов с течением времени остаётся неизменным. Найдите отношение числа частиц радия и радона в пробирке как функцию времени. Периоды полураспада радия и радона равны соответственно T_{Ra} = 1600 лет и T_{Rn} = 3,8 суток.

Дано:
T_{Ra} = 1600 лет = $5{,}84 \cdot 10^5$ суток
T_{Rn} = 3,8 суток
Найти:
$N_{Ra} / N_{Rn} = ?$

Решение:

Пусть в пробирке находится N_{Ra0} атомов радия и N_{Rn0} атомов радона.

В соответствии с законом радиоактивного распада (2.9), число атомов радия и радона через некоторое время t будет равно:

$$N_{Ra}(t) = N_{Ra0} e^{-\lambda t} = N_{Ra0} \cdot 2^{-\frac{t}{T_{Ra}}},$$

$$N_{Rn}(t) = N_{Rn0} e^{-\lambda t} = N_{Rn0} \cdot 2^{-\frac{t}{T_{Rn}}}.$$

Скорость изменения числа ядер каждого изотопа (активность) может быть найдена по формуле (2.12):

$$A_{Ra} = \frac{dN_{Ra}}{dt} = -\frac{N_{Ra0} \cdot \ln 2}{T_{Ra}} \cdot 2^{-\frac{t}{T_{Ra}}} = -\frac{\ln 2}{T_{Ra}} \cdot N_{Ra}(t),$$

$$A_{Rn} = \frac{dN_{Rn}}{dt} = -\frac{N_{Rn0} \cdot \ln 2}{T_{Rn}} \cdot 2^{-\frac{t}{T_{Rn}}} = -\frac{\ln 2}{T_{Rn}} \cdot N_{Rn}(t).$$

Знак «–» означает, что число атомов данного изотопа уменьшается с течением времени из-за радиоактивного распада.

По условию задачи, число атомов радона в пробирке с течением времени остаётся неизменным. Это означает, что скорости распада (активности) радия и радона равны, т.е. за любой промежуток времени убыль атомов радона за счёт распада компенсируется атомами, образовавшимися в результате распада радия. Т.к. периоды полураспада очень сильно отличаются, то можно считать, что число атомов радия тоже остаётся неизменным за время наблюдения.

Следовательно,

$$A_{Ra} = A_{Rn}, \Rightarrow \frac{N_{Ra}(t)}{T_{Ra}} = \frac{N_{Rn}(t)}{T_{Rn}}, \Rightarrow \frac{N_{Ra}(t)}{N_{Rn}(t)} = \frac{T_{Ra}}{T_{Rn}}.$$

В итоге, отношение атомов радия и радона в любой момент времени будет равно:

$$\frac{N_{Ra}(t)}{N_{Rn}(t)} = \frac{T_{Ra}}{T_{Rn}} = \frac{5{,}84}{3{,}8} \cdot 10^5 = 153684{,}2 \approx 1{,}54 \cdot 10^5.$$

$$\boxed{\text{Ответ: } \frac{N_{Ra}(t)}{N_{Rn}(t)} \approx 1{,}54 \cdot 10^5.}$$

10. В результате взаимодействия ядра азота (атомный номер равен 7, массовое число равно 14) с ядром гелия (атомный номер равен 2, массовое число равно 4) образуется изотоп кислорода и протон. Чему равно массовое число образовавшегося изотопа кислорода?

Дано:
$Z_1 = 7$
$A_1 = 14$
$Z_2 = 2$
$A_2 = 4$
Найти:
$A = ?$

Решение:

Эта ядерная реакция записывается в следующем виде:

$$^{A1}_{Z1}N + ^{A2}_{Z2}He \rightarrow ^{A}_{Z}O + ^{1}_{1}p.$$

По закону сохранения нуклонов имеем для массовых чисел участвующих в реакции продуктов:

$$A_1 + A_2 = A + 1.$$

Отсюда находим массовое число изотопа кислорода:

$$A = A_1 + A_2 - 1 = 14 + 4 - 1 = 17.$$

Ответ: $A = 17$.

11. В результате захвата нейтрона ядром изотопа азота (атомный номер 7, массовое число 14) образуется новое ядро и протон. Чему равен атомный номер нового ядра?

Дано:
$Z_1 = 7$
$A_1 = 14$
Найти:
$Z_2 = ?$

Решение:

Запись ядерной реакции в данном случае имеет вид:

$$^{A1}_{Z1}N + ^{1}_{0}n \rightarrow ^{A2}_{Z2}X + ^{1}_{1}p.$$

По закону сохранения заряда для зарядовых чисел имеем:

$$Z_1 + 0 = Z_2 + 1.$$

Отсюда получаем атомный номер нового химического элемента X:

$$Z_2 = Z_1 - 1 = 7 - 1 = 6.$$

Ответ: $Z_2 = 6$.

12. Дефект массы ядра изотопа гелия (число протонов 2, число нейтронов 1) равен 0,005 а.е.м. Определить удельную энергию связи этого ядра. Ответ дать в пикоджоулях на нуклон.

Дано:
$Z = 2$
$N = 1$
$\Delta m = 0{,}005$ а.е.м.
Найти:
$\Delta E_{уд} = ?$ (пДж)

Решение:

Удельная энергия связи ядра определяется выражением:

$$\Delta E_{уд} = \frac{\Delta E_{св}}{A} = \frac{\Delta E_{св}}{Z + N}.$$

Энергия связи ядра $\Delta E_{св}$ связана с дефектом масс: $\Delta E_{св} = \Delta mc^2$. Отсюда получаем формулу для удельной энергии связи:

$$\Delta E_{уд} = \frac{\Delta mc^2}{Z + N}.$$

При численном расчете переводим дефект масс Δm из атомных единиц массы в килограммы:

$$\Delta E_{уд} = 0{,}005 \cdot 1{,}66 \cdot 10^{-27} \cdot 9 \cdot 1016/3 = 2{,}49 \cdot 10^{-13} Дж = 0{,}249 \text{ пДж}.$$

Ответ: $\Delta E_{уд} = 0{,}249$ пДж.

13. Вычислить энергию связи ядра атома дейтерия, состоящего из одного протона и одного нейтрона. Масса ядра равна 2,0136 а.е.м. Ответ дать в мегаэлектронвольтах.

Дано:
$Z = 1$
$N = 1$
$m_{яд} = 2{,}0136$ а.е.м.
Найти:
$\Delta E_{св} = ?$ (МэВ)

Решение:

Запишем выражение для энергии связи ядра:

$$\Delta E_{св} = \Delta m c^2.$$

Входящий сюда дефект масс рассчитывается по формуле

$$\Delta m = \left(Z \cdot m_p + N \cdot m_n\right) - m_{яд}.$$

Рассчитываем

$$\Delta m = 1 \cdot 1{,}007 + 1 \cdot 1{,}009 - 2{,}0136 = 0{,}0024 \text{ а.е.м.}$$

Массы протона m_p и нейтрона m_n в атомных единицах взяты из Приложения. Теперь вычисляем (с учетом единиц измерения) энергию связи:

$$\Delta E_{св} = 0{,}0024 \cdot 1{,}66 \cdot 10^{-27} \cdot 9 \cdot 10^{16}/1{,}6 \cdot 10^{-19} = 2{,}241 \cdot 10^{6} \text{ эВ} = 2{,}241 \text{ МэВ}.$$

Ответ: $\Delta E_{св} = 2{,}241$ МэВ.

14. В результате взаимодействия ядра дейтерия, масса которого $m_D = 2{,}014$ а.е.м., с ядром трития ($m_T = 3{,}016$ а.е.м.) образуется ядро атома гелия ($m_{He} = 4{,}001$ а.е.м.) и нейтрон. Какая энергия выделяется при этой термоядерной реакции? Ответ дать в мегаэлектронвольтах. Учесть, что 1 а.е.м. соответствует энергия 931 МэВ.

Дано:
$m_D = 2{,}014$ а.е.м.
$m_T = 3{,}016$ а.е.м.
$m_{He} = 4{,}001$ а.е.м.
1 а.е.м = 931 МэВ
Найти:
$W = ?$ (МэВ)

Решение:

Данная термоядерная реакция записывается в виде:

$${}_1^2D + {}_1^3T \rightarrow {}_2^4He + {}_0^1n.$$

Энергию ядерной реакции можно найти по правилу

$$W = c^2 \cdot \left[\left(m_D + m_T\right) - \left(m_{He} + m_n\right)\right].$$

Однако, в отличие от предыдущих задач, расчет здесь значительно облегчен заданием переводного множителя между атомными единицами массы и мегаэлектронвольтами. Поэтому сначала вычисляем в а.е.м. комбинацию масс продуктов реакции

$$[(m_D + m_T) - (m_{He} + m_n)] =$$
$$= [(2{,}014 + 3{,}016) - (4{,}001 + 1{,}009)] = 0{,}02 \text{ а.е.м.},$$

а затем просто умножаем полученное число на переводной множитель:

$$W = 931 \cdot 0{,}02 = 18{,}62 \text{ МэВ}.$$

$\boxed{\text{Ответ: } W = 18{,}62 \text{ МэВ}}$

2.5. ПРИМЕРЫ ОТВЕТОВ НА ТЕСТОВЫЕ ЗАДАНИЯ

1. Согласно теории Бора, радиус орбит электронов в атоме водорода…

1) может быть любым;

2) пропорционален главному квантовому числу;

3) обратно пропорционален главному квантовому числу;

4) пропорционален квадрату главного квантового числа.

Решение: Согласно первому постулату Бора и правилу квантования момента импульса электрона, радиусы орбит электрона в водородоподобном атоме с зарядовым числом Z, соответствующие главному квантовому числу n определяются по формуле (2.4):

$$r_n = \frac{4\pi\varepsilon_0}{Z}\frac{\hbar^2}{m_e e^2}n^2.$$

Из этой формулы видно, что $r_n = f(n^2)$. Правильный вариант ответа: **4) пропорционален квадрату главного квантового числа.**

2. Спектры излучения или поглощения у атомов …

1) являются непрерывными;

2) являются дискретными;

3) могут быть как непрерывными, так и дискретными в зависимости от зарядового числа ядра;

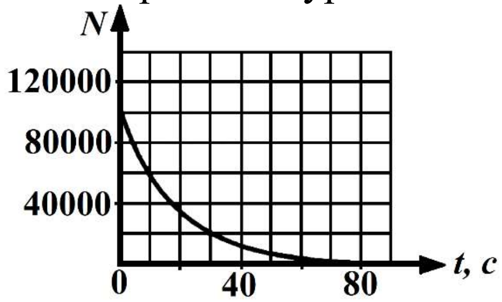
4) могут быть как непрерывными, так и дискретными в зависимости от внешних условий.

Решение: Согласно первому постулату Бора, атомы могут существовать только в особых стационарных (квантовых) состояниях, каждому из которых соответствует определённое значение энергии E_1, E_2, E_3, …, E_n, где n = 1, 2, 3,… – главное квантовое число. Согласно второму постулату Бора (правилу частот): «При переходе атома или атомной системы из одного стационарного состояния с энергией E_m в другое с энергией E_n испускается или поглощается квант электромагнитной энергии с частотой ν_{mn}:

$$\nu_{mn} = \frac{E_m - E_n}{h}.$$

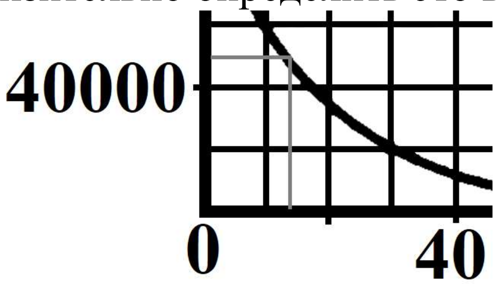
Т.е. частоты спектральных линий атома имеют дискретный набор значений, зависящий от главных квантовых чисел уровней, между которыми происходит переход (обобщённая формула Бальмера (2.8)). Правильный вариант ответа: **2) являются дискретными.**

3. Дан график зависимости числа нераспавшихся ядер изотопа N от времени наблюдения t. Период полураспада этого изотопа равен …



1) 10 с; 2) 15 с; 3) 20 с; 4) 25 с.

Решение: Период полураспада, по определению, время, в течение которого количество нераспавшихся ядер уменьшается в 2 раза. По графику можно приблизительно определить это время как 15 с.



Правильный вариант ответа: **2) 15 с.**

4. Сколько нуклонов содержится в нейтральном атоме ${}^{190}_{76}Os$?

1) 190; 2) 76; 3) 266; 4) 114.

Решение: Нуклоны – это частицы, из которых состоит ядро. Их число равно массовому числу. Правильный вариант ответа: **1) 190.**

5. При α-распаде обязательным продуктом ядерной реакции является:

1) электрон; 2) протон;

3) нейтрон; 4) ядро атома гелия.

Решение: При α-распаде одним из продуктов ядерной реакции является α-частица, которая представляет собой ядро атома гелия: ${}^{4}_{2}\alpha={}^{4}_{2}He$. Правильный вариант ответа: **4) ядро атома гелия.**

6. Какая частица является одним из продуктов реакции

$$ {}_1^2H + {}_1^3H \rightarrow {}_2^4He + X $$

1) электрон; 2) протон;

3) нейтрон; 4) ${}_1^1H$.

Решение: В данной реакции образуется частица массовое число которой: $A = 2 + 3 - 4 = 1$, а зарядовое число: $Z = 1 + 1 - 2 = 0$. Такими значениями массового и зарядового чисел обладает только нейтрон (${}_0^1X = {}_0^1n$). Правильный вариант ответа: **3) нейтрон.**

7. Полная энергия нескольких свободных покоящихся протонов и нейтронов в результате соединения в одно атомное ядро…

1) уменьшается при образовании любого ядра;

2) увеличивается при образовании любого ядра;

3) увеличивается, если образуется радиоактивное ядро и уменьшается, если образуется стабильное ядро;

4) не изменяется.

Решение: Так как часть массы нуклонов (протонов и нейтронов) при образовании ядра уходит в энергию связи, то масса образовавшегося ядра оказывается меньше, чем суммарная масса покоя свободных протонов и нейтронов. А, следовательно, и полная энергия уменьшится. Правильный вариант ответа: **1) уменьшается при образовании любого ядра.**

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мякишев Г.Я. Физика: Оптика. Квантовая физика. 11 кл.: Учеб. для углубленного изучения физики / Г.Я. Мякишев, А.З. Синяков. – 2-е изд., стереотип. –М.: Дрофа, 2002, – 464 с.

2. Мякишев Г.Я. Физика. 11 класс: учеб. для общеобразоват. учреждений: базовый и профил. уровни / Г.Я. Мякишев, Б.Б. Буховцев, В.М. Чаругин; под ред. В.И. Николаева, Н.А. Парфентьевой. – 19-е изд. –М.: Просвещение, 2010, – 399 с.

3. Касьянов В.А. Физика. 11 кл.: учебник. для общеобразоват. учреждений: базовый уровень. – 7-е изд., переработанное. –М.: Дрофа, 2019, – 288 с.

4. Касьянов В.А. Физика. 11 кл.: учеб. для общеобразоват. учреждений: углубленный уровень. – 8-е изд., стереотип. –М.: Дрофа, 2020, – 415 с.

5. Касьянов В.А. Физика. 11 кл.: учеб. для общеобразоват. учреждений. – 4-е изд., стереотип. –М.: Дрофа, 2004, – 416 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Некоторые физические постоянные и единицы

№	Название	Значение
1	Ускорение свободного падения	$g = 9{,}8$ м/с^2
2	Плотность воды	$\rho = 10^3$ кг/м^2
3	Давление при нормальных условиях	$P_0 = 10^5$ Па
4	Температура при нормальных условиях	$T_0 = 273$ К
5	Число Авогадро	$N_A = 6{,}022 \cdot 10^{23}$ моль$^{-1}$
6	Молярная масса кислорода	$\mu_{02} = 0{,}032$ кг/моль
7	Молярная масса водорода	$\mu_{H2} = 0{,}002$ кг/моль
8	Молярная масса азота	$\mu_{N2} = 0{,}028$ кг/моль
9	Постоянная Больцмана	$k = 1{,}38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К
10	Универсальная газовая постоянная	$R = 8{,}31$ Дж/(моль ·К)
11	Элементарный заряд	$e = 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ Кл
12	Коэффициент пропорциональности в законе Кулона	$k = 9 \cdot 10^9$ Н·м^2/Кл^2
13	Электрическая постоянная	$\varepsilon_0 = 8{,}85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м
14	Скорость света в вакууме	$c = 3 \cdot 10^8$ м/с
15	Масса покоя электрона	$m_e = 9{,}1 \cdot 10^{-31}$ кг
16	Масса покоя протона	$m_p = 1{,}007$ а.е.м.
17	Масса покоя нейтрона	$m_n = 1{,}009$ а.е.м.
18	Атомная единица массы	1 а.е.м. = $1{,}66 \cdot 10^{-27}$ кг
19	Электронвольт	1 эВ = $1{,}6 \cdot 10^{-19}$ Дж

Значения приставок единиц измерения

Наименование	Обозначение	Множитель
пико	п	10^{-12}
нано	н	10^{-9}
микро	мк	10^{-6}
милли	м	10^{-3}
кило	к	10^3
мега	М	10^6
гига	Г	10^9
тера	Т	10^{12}

Кроме того:

$$\pi = 3{,}14$$

$$\pi^2 = 10$$

$$\sqrt{2} = 1{,}41$$

$$\frac{6{,}6}{1{,}6} = 4{,}125$$