МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Рубцовский индустриальный институт (филиал)
федерального государственного бюджетного образовательного
учреждения высшего образования
«Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова»
(РИИ АлтГТУ)

В.И. БАХМАТ

АТОМНАЯ ФИЗИКА. ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА

**Методические указания и варианты заданий по физике
для студентов направления подготовки
13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника» очной формы обучения**

Рубцовск 2023

ББК 530.1

Бахмат В.И. Атомная физика. Ядерная физика: Методические указания и тестовые задания по физике для студентов направления подготовки 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника» очной формы обучения / В.И. Бахмат; Рубцовский индустриальный институт. – Рубцовск, 2023. – 30 с.

Методические указания предназначены для самостоятельной работы студентов очной формы обучения при изучении данного курса физики. Указания содержат краткую теорию, примеры решения задач и тестовые задания для самостоятельной работы студентов. Примеры решения задач позволяют закрепить теоретический материал и подготовиться к тестовым заданиям.

Рассмотрено и одобрено на заседании каф. «Электроэнергетика» РИИ.
Протокол № 2 от 28.02.23.

Рецензент: к.ф.-м.н., доцент Кириллова Г.А.

СОДЕРЖАНИЕ

1. АТОМНАЯ ФИЗИКА……………………………………………………….. 4
1.1. Рассеяние частиц кулоновским полем. Формула Резерфорда………... 4
1.1.1. Основные формулы……………………………………………….. 4
1.1.2. Решение задач……………………………………………………... 5
1.2. Атом Бора………………………………………………………………… 6
1.2.1. Основные формулы……………………………………………….. 6
1.2.2. Решение задач……………………………………………………... 7
2. КВАНТОВАЯ МЕХАНИКА……………………………………………… 9
2.1. Соотношение неопределенностей……………………………………… 9
2.1.1. Основные формулы……………………………………………… 9
2.1.2. Решение задач…………………………………………………….. 9
2.2. Волны де Бройля……………………………………………………….. 10
2.2.1. Основные формулы……………………………………………… 10
2.2.2. Решение задач…………………………………………………….. 10
2.3. Уравнение Шредингера………………………………………………… 11
2.3.1 Основные формулы………………………………………………... 11
2.3.2. Решение задач…………………………………………………….. 12
2.4. Рентгеновские лучи……………………………………………………… 14
2.4.1. Основные формулы……………………………………………….. 14
2.4.2. Решение задач……………………………………………………... 14
3. ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА………………………………………………………. 16
3.1. Радиоактивность………………………………………………………… 16
3.1.1. Основные формулы……………………………………………….. 16
3.1.2. Решение задач……………………………………………………… 17
3.2. Ядерные реакции………………………………………………………… 17
3.2.1. Основные формулы……………………………………………….. 17
3.2.2. Решение задач……………………………………………………... 18
4. ВАРИАНТЫ ТЕКУЩЕГО КОНТРОЛЯ ЗНАНИЙ……………………… 21

1. АТОМНАЯ ФИЗИКА

Изучение основных закономерностей атомной и ядерной физики представляет собой сложную методическую задачу, так как при этом приходится не только формировать новые закономерности, но и пересматривать многие устоявшиеся положения и понятия классической физики. Решение конкретных физических задач является необходимой практической основой для понимания основных законов атомной и ядерной физики.

1.1. Рассеяние частиц кулоновским полем. Формула Резерфорда

1.1.1. Основные формулы

1. Угол Θ, на который заряженная частица рассеивается кулоновским полем неподвижного ядра, определяется формулой:

$$ctg\left(\frac{\Theta}{2}\right)=\frac{mV^2}{k\,Z_1\,Z_2\,e^2}b,$$

где m – масса частицы;

b – прицельный параметр, расстояние от ядра до первоначального направления полета частицы;

$k=\dfrac{1}{4\pi\varepsilon_0}$;

Z_1 – зарядовое число частицы;

Z_2 – зарядовое число ядра.

2. Соотношение между db и $d\Theta$:

$$-\frac{1}{sin^2\left(\frac{\Theta}{2}\right)}\frac{d\Theta}{2}=\frac{mV^2}{k\,Z_1\,Z_2 e}db.$$

3. Относительное количество частиц, пролетающих вблизи одного из ядер по траектории с прицельным периметром от b до $b + db$ (и следовательно, отклоняющихся в пределах от Θ до $\Theta + d\Theta$), будет равно:

$$\frac{dN_\Theta}{N}=n\,a2\pi\,b\,d\,b=na\left(\frac{k\,Z_1\,Z_2 e^2}{mV^2}\right)^2\frac{2\pi\,sin\,\Theta\,d\Theta}{4\,sin^4\left(\frac{\Theta}{2}\right)},$$

или, учтя $2\pi\,sin\,\Theta d\Theta=d\Omega$,

$$\frac{dN_\Theta}{N}=na\left(\frac{k\,Z_1\,Z_2 e^2}{mV^2}\right)^2\frac{d\Omega}{4\,sin^4\left(\frac{\Theta}{2}\right)},$$

где dN_Θ – поток частиц, рассеиваемых в пределах углов от Θ до $\Theta + d\Theta$;

N – полный поток частиц в пучке.

4. Модуль приращения вектора импульса частицы, возникающего в результате рассеяния:

$$|\Delta p| = 2p_0 \sin\frac{\Theta}{2} = 2m\upsilon\sin\frac{\Theta}{2}.$$

1.1.2. Решение задач

Задача №1. Частица с зарядом Z_1e рассеивается на неподвижном ядре с зарядом Z_2e. Известны кинетическая энергия частицы T_∞ на бесконечности и прицельный параметр b. Определить расстояние r_{min} между центрами частицы и ядра в момент их наибольшего сближения. Проанализировать полученный результат для случая $b = 0$.

Решение: Из закона сохранения энергии:

$$T_\infty = T_{\min} + U_{\min},$$

где T_{min} – кинетическая и

U_{min} – потенциальная энергии в момент наибольшего сближения;

$T_{min} = \dfrac{mV_{min}^2}{2}$, где V_{min} – скорость в момент наибольшего сближения.

V_{min} найдём из закона сохранения момента импульса:

$$M_\infty = M_{min},$$

$$mV\infty b = mV_{min}\cdot r_{min} \Rightarrow V_{min} = V_\infty\frac{b}{r_{min}} \Rightarrow T_{min} = \frac{mV_\infty^2}{2}\left(\frac{b}{r_{min}}\right)^2 = T_\infty\left(\frac{b}{r_{min}}\right)^2,$$

Потенциальная энергия равна:

$$U_{min} = T_\infty - T_{min},$$

$$\frac{kZ_1Z_2e^2}{r_{min}} = T\left[1-\left(\frac{b}{r_{min}}\right)^2\right],$$

где $k = 9\cdot10^9\ \dfrac{Н\cdot м^2}{Кл^2}$.

Решаем квадратное уравнение относительно r_{min}:

$$T_\infty r_{min}^2 - kZ_1Z_2e^2r_{min} - T_\infty b^2 = 0,$$

$$D = \left(kZ_1Z_2e^2\right)^2 + 4T^2b^2,$$

$$r_{min\ 1,2} = \frac{kZ_1Z_2e^2 \pm \sqrt{\left(kZ_1Z_2e^2\right)^2 + 4T_\infty^2b^2}}{2T_\infty}.$$

Отрицательный ответ отбрасываем, как не имеющий физического смысла. Следовательно:

$$r_{min} = \frac{kZ_1Z_2e^2}{2T_\infty} + \left[\left(\frac{kZ_1Z_2e^2}{2T_\infty}\right)^2 + b^2\right]^{1/2}.$$

При $b = 0$: если частицы отталкиваются, то

$$\frac{kZ_1Z_2e^2}{r_{min}} = T_\infty \Rightarrow r_{min} = \frac{kZ_1Z_2e^2}{T_\infty};$$

если частицы притягиваются, то $r_{min} = 0$.

Задача №2. α-частица с кинетической энергией T рассеялась под углом Θ неподвижным атомом. Найти: а) прицельное расстояние; б) минимальное расстояние между атомом и α-частицей; в) наименьший радиус кривизны траектории. Заряд α-частицы $2e$.

Решение:

а) прицельное расстояние находим из формулы:

$$ctg\frac{\Theta}{2} = \frac{m_\alpha V^2}{2kZe^2}\cdot b,$$

$$\frac{m_\alpha V^2}{2} = T, \quad b = \frac{kZe^2 ctg\frac{\Theta}{2}}{T};$$

б) находим минимальное расстояние (см. предыдущую задачу):

$$r_{min} = \frac{kZe^2}{T} + \left[\left(\frac{kZe^2}{T}\right)^2 + b^2\right]^{1/2};$$

в) радиус кривизны R найдем из II закона Ньютона:

$$\frac{m_\alpha V_{min}^2}{R} = \frac{2kZe^2}{r_{min}^2},$$

$$V_{min} = V\frac{b}{r_{min}} = \sqrt{\frac{2T}{m_\alpha}}\cdot\frac{b}{r_{min}},$$

$$\frac{m_\alpha\cdot 2T\cdot b^2}{R\cdot m_\alpha r_{min}^2} = \frac{2kZe^2}{r_{min}^2},$$

$$R = \frac{Tb^2}{kZe^2} = \frac{T\cdot\left(kZe^2 ctg\frac{\Theta}{2}\right)^2}{kZe^2T^2} = \frac{kZe^2 ctg^2\frac{\Theta}{2}}{T}.$$

1.2. Атом Бора

1.2.1. Основные формулы

1. Первый постулат Бора: электроны могут двигаться в атоме только по определенный орбитам, находясь на которых они не излучают энергии. Эти орбиты определяются условием:

$$mV_nr_n = n\hbar,$$

где mV_nr_n – момент импульса электрона на n-ой орбите;

r_n – радиус этой орбиты;

n – главное квантовое число (n = 1,2,3...).

2. Второй постулат Бора: при переходе электрона с одной орбиты на другую атом излучает или поглощает квант энергии, равный

$$\hbar\omega_{ik} = W_k - W_i ,$$

где W_k и W_i – энергии электрона на соответствующих орбитах.

3. Формула Бальмера-Ритца для длин волн линий спектра водорода:

$$\frac{1}{\lambda} = R\left(\frac{1}{n_i^2} - \frac{1}{n_k^2}\right),$$

где n_i и n_k – целые числа ($n_k > n_i$);

число n_i определяет серию, n_k – отдельную линию этой серии;

если n_i = 1 – серия Лаймана,

n_i = 2 – серия Бальмера,

n_i =3 – серия Пашена,

n_i = 4 – серия Брэкета,

n_i = 5 – серия Пфунда,

n_i = 6 – серия Хэмфри.

$R = 1{,}097 \cdot 10^7\ м^{-1}$ – постоянная Ридберга.

Для длин волн линий спектра водородоподобных атомов:

$$\frac{1}{\lambda} = Z^2 R\left(\frac{1}{n_i^2} - \frac{1}{n_k^2}\right),$$

если n_i – номер серии, то $n_k = n_i + N$, где N – номер спектральной линии в данной серии.

Постоянная Ридберга $R = R_\infty = 1{,}097 \cdot 10^7\ м^{-1}$ в том случае, когда масса ядра велика по сравнению с массой электрона. В этом случае электрон вращается вокруг неподвижного ядра. В действительности электрон и ядро вращаются вокруг их общего центра масс, что приводит к несколько иному значению для постоянной Ридберга:

$$R = \frac{R_\infty}{1 + \frac{m}{M}},$$

где M – масса ядра;

m – масса электрона.

1.2.2. Решение задач

Задача №3. Вычислить для атома водорода радиус первой боровской орбиты и скорость электрона на ней.

Решение:

Радиус n-й боровской орбиты r_n и скорость V_n электрона на ней связаны между собой уравнением:

$$mV_n r_n = n\hbar. \qquad \textbf{(1)}$$

Чтобы иметь еще одно уравнение, связывающее величины r_n и V_n, запишем второй закон Ньютона для электрона, движущегося под действием кулоновской силы притяжения ядра по круговой орбите.

$$\frac{ke^2}{r_n^2} = m\frac{V_n^2}{r_n}, \qquad \textbf{(2)}$$

где m – масса электрона.

Решаем совместно (1) и (2) уравнения, получим:

$$r_n = \frac{\hbar^2 n^2}{mke^2}; \quad V_n = \frac{ke^2}{n\hbar}.$$

Взяв $n = 1$, получим $r_1 = 0{,}53 \cdot 10^{-10}$ м, $V_1 = 2{,}2 \cdot 10^6$ м/с.

Задача №4. Электрон в атоме водорода перешел с четвёртого энергетического уровня на второй. Определить энергию испущенного при этом фотона.

Решение:

Для водородоподобных атомов:

$$\frac{1}{\lambda} = RZ^2\left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2}\right), \qquad \textbf{(3)}$$

где n_1 – номер орбиты, на которую перешел электрон;
n_2 – номер орбиты, с которой перешел электрон.

Энергия фотона $E = h\nu = h\dfrac{c}{\lambda}$.

Умножим уравнение (3), правую и левую части, на hc и получим выражение для энергии фотона:

$$E = RhcZ^2\left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2}\right).$$

Взяв $Z = 1$; $n_1 = 2$; $n_2 = 4$; получим:

$$E = 4{,}1 \cdot 10^{-19} \text{ Дж} = 2{,}55 \text{ эВ}.$$

2. КВАНТОВАЯ МЕХАНИКА

Изучение основных закономерностей атомной и ядерной физики представляет собой сложную методическую задачу, так как при этом приходится не только формировать новые закономерности, но и пересматривать многие устоявшиеся положения и понятия классической физики. Решение конкретных физических задач является необходимой практической основой для понимания основных законов атомной и ядерной физики.

2.1. Соотношение неопределенностей

2.1.1. Основные формулы

1. $\Delta P_x \Delta x \geq \hbar$ (для координаты и импульса), где ΔP_x – неопределенность проекции импульса на ось x; Δx – неопределенность координаты.

2. Соотношение неопределенности для энергии и времени:

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

где ΔE – неопределенность энергии;

Δt – время жизни квантовой системы в данном энергетическом состоянии.

2.1.2. Решение задач

Задача №5. Средняя кинетическая энергия электрона в невозбужденном атоме водорода 13,6 эВ. Исходя из соотношения неопределенностей, найти наименьшую неточность, с которой можно вычислить координату электрона в атоме.

Решение: Из соотношения неопределенностей

$$\Delta x\, \Delta P \geq \hbar \text{ следует } \Delta x \geq \frac{\hbar}{\Delta P_x}.$$

Величина ΔP_x неизвестна, но сам импульс P можно найти, так как известна средняя кинетическая энергия электрона. Так как $T << m_0c^2$, то электрон рассмотрим как нерелятивистскую частицу.

$$T = \frac{mV^2}{2} = \frac{P^2}{2m} \Rightarrow P = \sqrt{2mT}.$$

Так как импульс – векторная величина и направление нам неизвестно, то его величина лежит в пределах от $-P$ до $+P$, то есть $\Delta P_x = 2P$, или $\Delta P_x = P$. Величины ΔP_x и P одного порядка.

Поэтому $\Delta x \geq \frac{\hbar}{P} = \frac{\hbar}{\sqrt{2mT}}; \quad \Delta x \geq 10^{-10}$ м.

Задача №6. Полагая, что в атоме водорода электрон обращается вокруг ядра по круговой орбите, оценить радиус этой орбиты.

Решение: Запишем уравнение движения:

$$\frac{ke^2}{r^2} = \frac{mV^2}{r}.$$

Отсюда следует, что кинетическая энергия:

$$T = \frac{mV^2}{2} = \frac{ke^2}{2r}. \qquad \textbf{(4)}$$

Запишем соотношение неопределенностей:

$$\Delta x \, \Delta P_x \geq \hbar,$$

где $\Delta x \sim r$,

r – радиус орбиты.

$\Delta P \sim P = \sqrt{2mT}$, отсюда получаем

$$r\sqrt{2mT} \geq \hbar \Rightarrow r^2 2mT \geq \hbar^2 \Rightarrow T \geq \frac{\hbar^2}{2mr^2}. \qquad \textbf{(5)}$$

Сравним выражения (4) и (5) $\Rightarrow$

$$\frac{ke^2}{2r} \geq \frac{\hbar^2}{2mr^2} \Rightarrow r \geq \frac{\hbar^2}{mke^2} \approx 0{,}5 \cdot 10^{-10} \text{ (м).}$$

2.2. Волны де Бройля

2.2.1. Основные формулы

1. Длина волны де Бройля.

$$\lambda = \frac{2\pi\hbar}{P} = \frac{h}{P},$$

где P – импульс частицы.

2. Связь импульса частицы с кинетической энергией T:

а) для нерелятивистской частицы $T << m_0c^2$

$$p = m_0\upsilon; \quad p = \sqrt{2m_0T};$$

б) для релятивистской частицы

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

где m_0 – масса покоя частицы;

m – релятивистская масса;

V – скорость частицы;

c – скорость света в вакууме;

$E_0 = m_0c^2$ – энергия покоя частицы.

2.2.2. Решение задач

Задача №7. Найти длину волны де Бройля для электрона, обладающего кинетической энергией: а) Т = 100 эВ; б) Т = 3 МэВ.

Решение: Задача сводится к выражению импульса P через кинетическую энергию T. Решение зависит от того, классической или релятивистской частицей следует считать электрон.

а) $T << m_0c^2$,

где m_0c^2 = 0,5 МэВ – энергия покоя электрона, т.е. в этом случае электрон является классической частицей.

$$T = \frac{mV^2}{2} = \frac{m^2V^2}{2m} = \frac{P^2}{2m} \Rightarrow P = \sqrt{2mT},$$

$$\lambda_1 = \frac{2\pi\hbar}{P} = \frac{2\pi\hbar}{\sqrt{2mT}} \Rightarrow \lambda_1 = 1{,}23 \cdot 10^{-10} \text{ м.}$$

б) Теперь $T > m_0c^2$, то есть электрон является релятивистской частицей, поэтому

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

$$\lambda_2 = \frac{2\pi\hbar}{P} = \frac{2\pi\hbar c}{\sqrt{(2E_0 + T)T}},$$

$$\lambda_2 = 0{,}62 \cdot 10^{-10} \text{ м.}$$

2.3. Уравнение Шредингера

2.3.1. Основные формулы

1. Одномерное уравнение Шредингера для стационарных состояний:

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

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

m – масса частицы;

E – полная энергия;

$U = U(x)$ – потенциальная энергия частицы.

2. Плотность вероятности:

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

где $dP(x)$ – 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: $$P = \int_{x_1}^{x_2} |\psi(x)|^2 dx.$$

3. Решение уравнения Шредингера для одномерного, бесконечно глубокого, прямоугольного потенциального ящика:

а) $\psi_n(x) = \sqrt{\frac{2}{\ell}} \sin\frac{\pi n}{\ell} x$ (собственная нормированная волновая функция);

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

где n = 1, 2, 3, ... – квантовое число;

l – ширина ящика;

x – координата $0 < x < \ell$.

4. Коэффициент отражения волн де Бройля от низкого (U < E) потенциального барьера бесконечной ширины определяется формулой:

$$R = \frac{(k_1 - k_2)^2}{(k_1 + k_2)^2},$$

где k_1 и k_2 – значения волнового числа в областях I и II $\left(k = \dfrac{2\pi}{\lambda} \right)$.

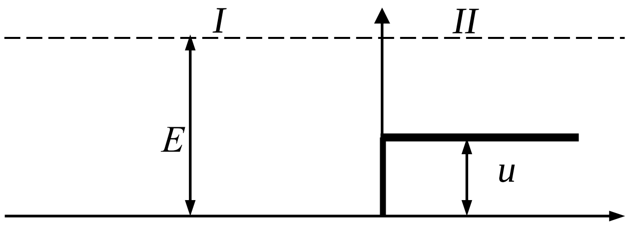


Рис. 1

5. Коэффициент прохождения (коэффициент прозрачности):

$$D = \frac{4k_1k_2}{(k_1 + k_2)^2}; \quad R + D = 1.$$

6. Коэффициент прозрачности для высокого потенциального барьера (туннельный эффект):

$$D = D_0 \exp\left(-\frac{2}{\hbar}\sqrt{2m(U - E)}\ell \right).$$

7. Коэффициент преломления волн на границе низкого потенциального барьера бесконечной ширины:

$$n = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} = \frac{k_2}{k_1}.$$

2.3.2. Решение задач

Задача №8. Частица находится в основном состоянии (n = 1) в одномерном потенциально» ящике шириной ℓ с абсолютно непроницаемыми стенками. Найти вероятность пребывания частицы в области $\dfrac{\ell}{3} < x < \dfrac{2\ell}{3}$.

Решение:

$$dP = |\psi(x)|^2 dx,$$

$$P=\int\limits_{\frac{\ell}{3}}^{\frac{2\ell}{3}}|\psi(x)|^2dx; \qquad \psi(x)=\sqrt{\frac{2}{1}}\sin\frac{\pi n x}{\ell}, \text{ берём } n = 1,$$

$$P=\frac{2}{\ell}\int\limits_{\frac{\ell}{3}}^{\frac{2\ell}{3}}\sin^2\frac{\pi x}{\ell}dx.$$

Используем соотношение $\sin^2\alpha=\frac{1-\cos 2\alpha}{2}$,

$$P=\frac{1}{\ell}\left[\int\limits_{\frac{\ell}{3}}^{\frac{2\ell}{3}}dx-\int\limits_{\frac{\ell}{3}}^{\frac{2\ell}{3}}\cos\frac{2\pi x}{\ell}dx\right]=0{,}61.$$

Задача №9. Пучок электронов с энергией E = 25 эВ встречает на своем пути потенциальной барьер высотой U = 9 эВ. Определить коэффициент отражения R и коэффициент пропускания D волн де Бройля для данного барьера (рис. 3.1).

Решение: Так как $U < E$, данный потенциальны барьер является низким:

$$R=\frac{(k_1-k_2)^2}{(k_1+k_2)^2};$$

$$k_1=\frac{2\pi}{\lambda_1}; \quad k_2=\frac{2\pi}{\lambda_2};$$

$$\lambda_1=\frac{2\pi\hbar}{P_1}=\frac{2\pi\hbar}{\sqrt{2mE}}; \quad \lambda_2=\frac{2\pi\hbar}{P_2}=\frac{2\pi\hbar}{\sqrt{2m(E-U)}};$$

$$k_1=\frac{\sqrt{2mE}}{h}; \quad k_2=\frac{\sqrt{2m(E-U)}}{h}; \quad R=\frac{\left(\sqrt{E}-\sqrt{E-U}\right)^2}{\left(\sqrt{E}+\sqrt{E-U}\right)^2}=\frac{1}{81}.$$

Так как $R + D = 1$, то $D = 1 – R = \frac{80}{81}$.

Задача №10. Протон с энергией E = 5 эВ движется в положительном направлении оси x, встречая на своём пути прямоугольный потенциальный барьер высоты U = 10 эВ и шириной l = 0,1 нм. Определите вероятность прохождения протоном этого барьера. Во сколько раз надо сузить барьер, чтобы вероятность прохождения его протоном была такой же, как для электрона при вышеприведённых условиях.

Решение:

$$W_\text{p}=D=\exp\left[-\frac{2l}{\hbar}\sqrt{2m_\text{p}(U-E)}\right], \quad W_\text{e}=\exp\left[-\frac{2l}{\hbar}\sqrt{2m_\text{e}(U-E)}\right],$$

$$W'_\text{p}=W_\text{e}=\exp\left[-\frac{2l}{\hbar}\sqrt{2m_\text{p}(U-E)}\right], \quad -\frac{2l'}{\hbar}\sqrt{2m_\text{p}(U-E)}=-\frac{2l}{\hbar}\sqrt{2m_\text{e}(U-E)},$$

$$\frac{l}{l'} = \sqrt{\frac{m_{\text{р}}}{m_{\text{е}}}}\,.$$

Ответы: $W_p = 1{,}67 \cdot 10^{-43}$; $\dfrac{l}{l'} = 42{,}8$.

2.4. Рентгеновские лучи

2.4.1. Основные формулы

1. Длина волны рентгеновских характеристических лучей может быть найдена по формуле Мозли:

$$\nu = \frac{c}{\lambda} = Rc(Z - \sigma)^2 \left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right),$$

где Z – порядковый номер элемента, из которого сделан антикатод;
σ – постоянная экранирования. Последняя формула может быть переписана так:

$$\sqrt{\nu} = a(Z - \sigma), \quad \text{где } a = \sqrt{Rc\left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right)}\,.$$

2. Коротковолновая граница $\lambda_{\min}$ сплошного рентгеновского спектра:

$$\lambda_{\min} = \frac{2\pi\hbar c}{|e|\,U},$$

где e – заряд электрона;
U – разность потенциалов, приложенная к рентгеновской трубке;
$\hbar$ – постоянная Планка.

2.4.2. Решение задач

Задача №11. Определите порядковый номер элемента в периодической системе элементов Д.И. Менделеева, если длина волны λ линии K_a характеристического рентгеновского излучения составляет 72 пм.

Решение:

$$\frac{1}{\lambda} = R'(Z - \sigma)^2 \left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right), \quad R' = 1{,}1 \cdot 10^7 \text{ м}^{-1},$$

$$m = 1, \quad n = 2, \quad \frac{1}{\lambda} = R'(Z - 1)^2 \left(\frac{1}{1^2} - \frac{1}{1^2} \right),$$

$$(Z - 1)^2 = \frac{4}{3R'\lambda}, \quad Z = \sqrt{\frac{4}{3R'\lambda}} + 1\,.$$

Z = 42, молибден.

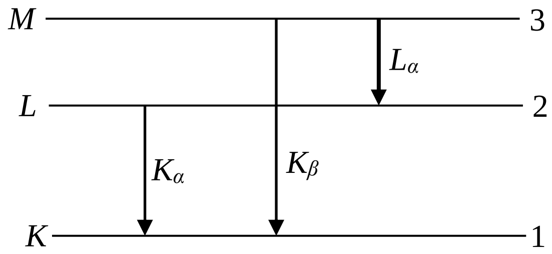
Задача №12. Определите постоянную экранирования σ для L-серии рентгеновского излучения, если при переходе электрона в атоме вольфрама с

M-оболочки на L-оболочку длина волны λ испущенного фотона составляет 140 пм.

Решение:

L_α-линия:

$m = 2$, $n = 3$,



$$\frac{1}{\lambda} = R'(Z - \sigma)^2 \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{3^2}\right),$$

$$(Z - \sigma)^2 = \frac{36}{5R'\lambda}, \quad \sigma = Z - \sqrt{\frac{36}{5R'\lambda}}.$$

$$\sigma = 5{,}63.$$

3. ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА

Изучение основных закономерностей атомной и ядерной физики представляет собой сложную методическую задачу, так как при этом приходится не только формировать новые закономерности, но и пересматривать многие устоявшиеся положения и понятия классической физики. Решение конкретных физических задач является необходимой практической основой для понимания основных законов атомной и ядерной физики.

3.1. Радиоактивность

3.1.1. Основные формулы

1. Число радиоактивных ядер dN, распадающихся за промежуток времени между t и $t + dt$ пропорционально dt и числу ядер N ещё не распавшихся к моменту t.

$$dN = -\lambda N dt,$$

где λ – постоянная радиоактивного распада.

2. Закон радиоактивного распада:

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

где N_0 – число радиоактивных ядер в момент $t = 0$.

3. Период полураспада и постоянная распада λ связаны соотношением:

$$T\lambda = ln2 = 0{,}693.$$

4. Число ядер, распавшихся за время t.

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

Если интервал времени Δt, за который определяется число распавшихся ядер, много меньше периода полураспада $T_{1/2}$ то $\Delta N = \lambda N \Delta t$.

5. Среднее время τ жизни радиоактивного ядра:

$$\tau = \frac{1}{\lambda}.$$

Число N_0 атомов, содержащихся в радиоактивном изотопе:

$$N_0 = \frac{m}{\mu} N_A.$$

6. Активность A радиоактивного изотопа:

$$А = -\frac{dN}{dt} = \lambda N, \quad \text{или} \quad A = \lambda N_0 e^{-\lambda t} = A_0 e^{-\lambda t},$$

где A_0 – активность изотопа в начальный момент времени.

Удельная активность изотопа $a = \dfrac{A}{m}$.

7. Если радиоизотоп 1 с постоянной распада λ_1, превращается в радиоизотоп 2 с постоянной распада λ_2, то число ядер радиоизотопа 2 изменяется со временем по закону:

$$N_2(t) = N_1(O)\frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1}\left(e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t}\right),$$

где $N_1(O)$ – число ядер радиоизотопа 1 в момент $t = 0$.

3.1.2. Решение задач

Задача №13. Определить начальную активность A_0 радиоактивного препарата ^{27}Mg массой m = 0,2 мкг, а также его активность A через время t = 6 ч. Период полураспада $T_{1/2}$ = 10 минут.

Решение: Активность:

$$A = -\frac{dN}{dt}. \qquad \textbf{(6)}$$

Величину $\frac{dN}{dt}$ найдем, воспользовавшись законом радиоактивного распада:

$$N = N_0 e^{-\lambda t}.$$

Продифференцируем это выражение:

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N_0 e^{-\lambda t}. \qquad \textbf{(7)}$$

Приравняем (6) и (7) => $A = \lambda N_0 e^{-\lambda t}$.

Начальная активность $A_0 = \lambda N_0$.

Постоянная радиоактивного распада λ связана с периодом полураспада $T_{1/2}$ соотношением $\lambda = \frac{ln 2}{T_{1/2}}$.

Число N_0 радиоактивных ядер:

$$N_0 = \nu N_A = \frac{m}{\mu} N_A,$$

где μ – молярная масса.

$$A_0 = \frac{m}{\mu}\frac{ln 2}{T_{1/2}} N_A = 5{,}13 \cdot 10^{12}\ \text{Бк},$$

$$A = \frac{m}{\mu}\frac{ln 2}{T_{1/2}} N_A e^{-\frac{ln 2}{T_{1/2}} \cdot t} = 81{,}3\ \text{Бк}.$$

3.2. Ядерные реакции

3.2.1. Основные формулы

1. Дефект массы ядра:

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

где Z – порядковое число;

A – массовое число;

$(A - Z)$ – число нейтронов в ядре;

$m_р$ – масса протона;

$m_п$ – масса нейтрона;

$m_я$ – масса ядра.

2. Энергия связи, т.е. энергия, которую необходимо затратить, чтобы разделить ядро на составляющие его частицы без сообщения им кинетической энергии, вычисляется по формуле:

$$\Delta E = c^2 \Delta m = c^2 \left[Z m_p + (A - Z) m_n - m_я \right].$$

3. Энергия ядерной реакции (тепловой эффект реакции):

$$Q = c^2 \left(\sum m - \sum m' \right),$$

где $\sum m$ – сумма масс покоя частиц до реакции;

$\sum m'$ – сумма масс покоя частиц после реакции.

3.2.2. Решение задач

Решение задач на ядерные реакции основано на применении законов сохранения 1) электрического заряда; 2) суммарного числа нуклонов; 3) энергии; 4) импульса.

Первые два закона позволяют правильно записывать ядерные реакции даже в тех случаях, когда одна из частиц (продуктов или участников реакции) не дана. С помощью вторых двух законов находят кинетические энергии частиц – продуктов реакции, а также направление их разлета.

Процесс столкновения бомбардирующей частицы с ядром, при котором частица поглощается ядром, рассматривают как неупругий удар и применяют при этом закон сохранения импульса.

В законе сохранения энергии под энергией подразумевается полная релятивистская энергия:

$$\sum m_0 c^2 + \sum T = \sum m_0' c^2 + \sum T'.$$

Слева стоят величины, относящиеся к частицам до реакции, справа – после реакции.

Так как в справочниках даны значения масс атомов, то энергию удобно вычислять по формуле:

$$\Delta E = c^2 \left[Z m_H + (A - Z) m_n - m_a \right].$$

Если нужно получить значение энергии в мегаэлектровольтах (МэВ), то из справочника берут значения масс, выраженные в атомных единицах массы (а.е.м.), а вместо c^2 пишут $c^2 = 931\ \dfrac{\textbf{МэВ}}{\textbf{а.е.м.}}$.

Если частицы являются продуктами реакции, вызванной столкновением медленных частиц, то пользуются классическими формулами.

Задача №14. 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 запись ядерной реакции и определить ее энергетический эффект.

Решение: $^{4}_{2}He + ^{10}_{5}B \rightarrow ^{1}_{1}H + ^{A}_{Z}X$ **.**

Из закона сохранения нуклонов: 4 + 10= 1 + A => A = 13. Из закона сохранения заряда: 2 + 5 = 1 + Z => 2 = 6, т.е. неизвестное ядро является ядром изотопа углерода

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

Энергетический эффект:

$$Q = 931[(m_{\mathrm{He}} + m_{\mathrm{B}}) - (m_{\mathrm{H}} + m_{\mathrm{C}})].$$

При числовых подсчетах массы ядер заменяют массами нейтральных атомов: Q = 931[(4,00260 + 10,01294) – (1,00783 + 13,00335)] МэВ = 4,06 МэВ.

Задача №15. Определите, какую долю кинетической энергии теряет нейтрон при упругом столкновении с покоящимся ядром углерода $^{12}_{6}C$, если после столкновения частицы движутся вдоль одной прямой. Массу нейтрального атома углерода принять равной $19{,}9272 \cdot 10^{-27}$ кг.

Решение:

$$m_{\mathrm{n}}\upsilon_{\mathrm{n}} = m_{\mathrm{n}}\upsilon'_{\mathrm{n}} + m_{\mathrm{C}}\upsilon'_{\mathrm{C}},$$

$$\frac{m_{\mathrm{n}}\upsilon_{\mathrm{n}}^2}{2} = \frac{m_{\mathrm{n}}(\upsilon'_{\mathrm{n}})^2}{2} + \frac{m_{\mathrm{C}}(\upsilon'_{\mathrm{C}})^2}{2},$$

Удар упругий $\upsilon'_{\mathrm{n}} = \dfrac{(m_{\mathrm{n}} - m_{\mathrm{C}})\upsilon_{\mathrm{n}}}{m_{\mathrm{n}} + m_{\mathrm{C}}}, \quad \upsilon'_{\mathrm{C}} = \dfrac{2m_{\mathrm{n}}\upsilon_{\mathrm{n}}}{m_{\mathrm{n}} + m_{\mathrm{C}}},$

$$\Delta T = \frac{(m_{\mathrm{C}}\ \upsilon'_{\mathrm{C}})^2}{2}, \quad T = \frac{m_{\mathrm{n}}\,\upsilon_{\mathrm{n}}^2}{2},$$

$$\frac{\Delta T}{T} = \frac{m_{\mathrm{C}}}{m_{\mathrm{n}}}\left(\frac{\upsilon'_{\mathrm{C}}}{\upsilon_{\mathrm{n}}}\right)^2 = \frac{m_{\mathrm{C}}}{m_{\mathrm{n}}}\left(\frac{2m_{\mathrm{n}}}{m_{\mathrm{n}} + m_{\mathrm{C}}}\right)^2 = \frac{4m_{\mathrm{n}}m_{\mathrm{C}}}{(m_{\mathrm{n}} + m_{\mathrm{C}})^2}.$$

$$\frac{\Delta T}{T} = 0{,}286.$$

Задача №16. Свободное покоившееся ядро $^{191}_{77}\mathrm{Ir}$ (m = $317{,}10953 \cdot 10^{-27}$ кг) с энергией возбуждения E = 129 кэВ перешло в основное состояние, испустив γ – квант. Определите изменение энергии γ – кванта, возникающее в результате отдачи ядра.

Решение:

$$m\upsilon = m_{\gamma}c, \quad p = m\upsilon = \frac{Ec}{c^2} = \frac{E}{c},$$

$$\Delta\varepsilon = \frac{m\,\vartheta^2}{2} = \frac{p^2}{2m} = \frac{E^2}{2mc^2}.$$

$\Delta\varepsilon = 0{,}047$ эВ.

Задача №17. Определите, какие из приведённых ниже процессов разрешены законом сохранения лептонного числа: 1) $\mathrm{p} \rightarrow \mathrm{n} + \mathrm{e}^{+} + \nu_e$; 2)

$K^{-} \to \mu^{-} + \tilde{\nu}_{\mu}$;

3) $\pi^{+} \to \mu^{+} + e^{-} + e^{+}$; 4) $K^{+} \to e^{+} + \pi^{0} + \nu_{e}$.

Решение:

1) $p \to n + e^{+} + \nu_{e}$;

(0) = (0) + (–1) + (+1) разрешён;

2) $K^{-} \to \mu^{-} + \tilde{\nu}_{\mu}$;

(0) = (+1) + (–1) разрешён;

3) $\pi^{+} \to \mu^{+} + e^{-} + e^{+}$;

(0) $\neq$ (–1) + (+1) + (–1) запрещён;

4) $K^{+} \to e^{+} + \pi^{0} + \nu_{e}$;

(0) = (–1) + (0) + (+1) разрешён.

4. ВАРИАНТЫ ТЕКУЩЕГО КОНТРОЛЯ ЗНАНИЙ

Вариант № 1

1. Исходя из теории Бора, сравнить орбитальную скорость электрона на наинизшем энергетическом уровне со скоростью света.

2. Определить длину волны λ, соответствующую третьей спектральной линии в серии Бальмера.

3. Оценить с помощью соотношения неопределенностей минимальную кинетическую энергию электрона, движущегося внутри сферической области диаметром d = 0,1 нм.

4. Электрон движется со скоростью 200 Мм/с. Определить длину волны де Бройля, учитывая изменение массы электрона в зависимости от скорости.

5. Коэффициент прохождения электронов через низкий потенциальный барьер равен коэффициенту отражения. Определить, во сколько раз кинетическая энергия электронов больше высоты потенциального барьера.

6. Определить число атомов радиоактивного препарата йода ${}^{131}_{53}\mathrm{I}$ массой $m = 0{,}5 \cdot 10^{-9}$ кг, распавшихся в течение t = 1 мин.

7. Вычислить энергию ядерной реакции

$$ {}^{9}_{4}Be + {}^{2}_{1}H \rightarrow {}^{10}_{5}B + {}^{1}_{0}n . $$

Вариант №2

1. Вычислить энергию фотона, соответствующего первой линии в ультрафиолетовой серии водорода (серия Лаймана).

2. Вычислить радиусы r_2 и r_3 второй и третьей орбит в атоме водорода.

3. Какую кинетическую энергию нужно сообщить электрону, чтобы он мог проникнуть в ядро? Размер ядра порядка 10^{-15} м.

4. Определить длину волны де Бройля электрона, находящегося на второй орбите атома водорода.

5. Частица находится в потенциальном ящике. Найти отношение разности соседних энергетических уровней $\Delta E_{n+1,\,n}$ к энергии E_n частицы.

6. На сколько процентов уменьшится активность изотопа иридия ${}^{192}_{77}\mathrm{Ir}$ за время 15 суток?

7. Определить энергию, которая освобождается при термоядерной реакции:

$$ {}^{6}_{3}\mathrm{Li} + {}^{2}_{1}\mathrm{H} \rightarrow 2\,{}^{4}_{2}\mathrm{He} . $$

Расчет произвести на ядро и на один нуклон.

Вариант №3

1. Невозбужденный атом водорода поглощает квант излучения с длиной волны λ = 102,6 нм. Вычислить, пользуясь теорией Бора, радиус электронной орбиты возбужденного атома водорода.

2. Определить скорость υ электрона на второй орбите атома водорода.

3. Определить неточность Δx в определении координаты электрона, движущегося в атоме водорода со скоростью $V = 1{,}5 \cdot 10^6$ м/с, если допустимая неточность ΔV в определении скорости составляет 10% от её величины.

4. Электрон движется по окружности радиусом 0,5 см в однородном магнитном поле с индукцией 8 мТл. Определить длину волны де Бройля электрона.

5. Частица в бесконечной, глубокой, одномерной, прямоугольной потенциальной яме шириной ℓ находится в возбужденном состояние (n = 4). Определить, в каких точках интервала $0<x<\ell$ плотность вероятности нахождения частица имеет максимальное и минимальное значение.

6. Определить, какая доля радиоактивного изотопа $^{225}_{89}Ac$ распадается в течении t = 6 суток.

7. Какое количество энергии освободится, если разлетятся все ядра, содержащиеся в 1 г урана 235?

Вариант №4

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

2. Вычислить энергию фотона, испускаемого при переходе электрона в атоме водорода с третьего энергетического уровня на первый.

3. Электрон с кинетической энергией T = 15 эВ находится в металлической пылинке диаметром d = 1 мкм. Оценить относительную неточность $\frac{\Delta V}{V}$, с которой может быть определена скорость электрона.

4. Какую ускоряющую разность потенциалов должен пройти электрон, чтобы его дебройлевская длина волны стала $\lambda = 10^{-10}$ м.

5. Частица с массой m и энергией E налетает на потенциальный барьер высотой U_0($E > U_0$). Найти вероятность отражения частицы от барьера.

6. Определить массу m изотопа $^{131}_{53}\mathrm{I}$, имеющего активность A = 37 ГБк.

7. Определить суточный расход ядерного горючего ^{235}U в ядерном реакторе атомной электростанции. Тепловая мощность электростанции 10000 кВт. Принять энергию, выделившуюся при одном акте деления, равной 200 МэВ и к.п.д. электростанции 20%.

Вариант № 5

1. Электрон в невозбужденном атоме водорода получил энергию 12,1 эВ. На какой энергетический уровень он перешёл?

2. Определить частоту вращения электрона на второй орбите атома водорода.

3. Используя соотношение неопределенностей, оценить наименьшую ошибку ΔE в определении энергии электрона, если координата центра масс этой частицы может быть установлена с неопределенностью $\Delta x = 0{,}01$ мм.

4. Определить длину волны де Бройля для частицы массой 1 г, движущейся со скоростью $V = 10$ м/с. Нужно ли учитывать в этом случае волновые свойства частицы?

5. Волновая функция $\psi(x) = \sqrt{\frac{2}{\ell}} \sin \frac{\pi}{\ell} x$ описывает основное состояние частицы в бесконечно глубоком прямоугольном ящике шириной ℓ. Вычислить вероятность нахождения частицы в малом интервале $\Delta l = 0{,}01\ell$ вблизи стенки.

6. Активность A некоторого изотопа за время $t = 10$ суток уменьшилась на 20%. Определить период полураспада этого изотопа.

7. Покоившееся ядро полония ${}^{210}_{84}Po$ выбросило α-частицу с кинетической энергией 5,3 МэВ. Определить кинетическую энергию ядра отдачи и полную энергию, выделившуюся при α-распаде.

Вариант 6

1. Определить частоту вращения электрона на первой орбите атома водорода.

2. Вычислить длину волны λ, которую испускает ион гелия He^{+} при переходе со второго энергетического уровня на первый. Сделать такой же подсчёт для иона лития Li^{++}.

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

4. Вычислить длину волны де Бройля для протона, движущегося со скоростью $V = 0{,}6C$ (C – скорость света в вакууме).

5. Электрон находится в бесконечно глубоком, одномерном прямоугольном потенциальном ящике шириной ℓ. В каких точках в интервале $0 < x < \ell$ плотности вероятности нахождения электрона на втором и третьем энергетических уровнях одинаковы? Вычислить плотность вероятности для этих точек. Решение пояснить рисунком.

6. Как изменится активность препарата кобальта в течение двух лет? Период полураспада 5,2 года.

7. Вычислить энергию ядерной реакции:

$$ {}^{2}_{1}H + {}^{3}_{1}H \rightarrow {}^{4}_{2}He + {}^{1}_{0}n . $$

Освобождается или поглощается эта энергия?

Вариант №7

1. Найти наибольшую и наименьшую длины волн в ультрафиолетовой серии водорода (серия Лаймана).

2. Атом водорода в основном состоянии поглотил квант света а длиной волны λ = 121,5 нм. Определить радиус r электронной орбиты возбуждённого атома водорода.

3. Используя соотношение неопределенностей, найти минимальное значение энергии частицы массой m, находящейся в потенциальной яме с бесконечно высокими стенками шириной ℓ.

4. Протон обладает кинетической энергией T = 1 кэВ. Определить дополнительную энергию ΔT, которую необходимо ему сообщить для того, чтобы длина волны уменьшилась в три раза.

5. Электрон с энергией E = 100 эВ падает на потенциальный барьер высотой U = 64 эВ. Определить вероятность того, что электрон отразится от барьера.

6. За два дня радиоактивность препарата радона уменьшилась в 1,45 раза. Определить период полураспада.

7. Ядро углерода ${}^{14}_{6}C$ выбросило отрицательно заряженную β-частицу и антинейтрино. Определить полную энергию β-распада ядра.

Вариант №8

1. Определить максимальную энергию фотона серии Бальмера в спектре излучения атомарного водорода.

2. Вычислить частоты вращения электрона в атоме водорода на второй и третьей орбитах. Сравнить эти частоты с частотой излучения при переходе электрона с третьей на вторую орбиту.

3. Оценить с помощью соотношения неопределенностей скорость электрона в атоме водорода.

4. Кинетическая энергия электрона равна удвоенному значению его энергии покоя. Вычислить длину волны де Бройля для такого электрона.

5. Вывести формулу, связывающую коэффициент преломления волн де Бройля на границе низкого потенциального барьера и коэффициент отражения от него.

6. Определить возраст изделия из дерева, если известно, что активность образца из этого изделия по изотопу C^{14} составляет одну треть активности свежей древесины.

7. Нейтральный пион распадается на два γ-фотона. $\pi^0 \rightarrow \gamma + \gamma$. Почему не может образоваться один фотон? Какому закону сохранения это противоречит? Какова энергия фотонов?

Вариант №9

1. Покоящийся атом водорода в возбужденном состоянии (n = 2) испустил фотон. Какую скорость при этом приобрел атом?

2. Определите длину волны излучения атомов водорода при переходе с четвертой орбиты на вторую. Какому цвету соответствует это излучение?

3. Используя соотношение неопределенностей, оценить ширину одномерного потенциального ящика, в котором минимальная энергия электрона $E_{\min}$ = 10 эВ.

4. При какой скорости электрона его дебройлевская длина волны будет равна 500 нм?

5. Вычислить отношение вероятностей $\frac{P_1}{P_2}$ нахождения электрона на первом и втором энергетических уровнях в интервале $\frac{\ell}{4}$ равноудаленном от стенок одномерной потенциальной ямы. Ширина ямы ℓ.

6. Активность препарата урана с массовым числом 238 равна $2{,}5 \cdot 10^4$ расп/с, масса препарата 2г. Найти период полураспада.

7. Покоящийся пион распадается на мюон и нейтрино: $\pi^+ \to \mu^+ + \nu_\mu$. Найти отношение энергии нейтрино к кинетической энергии мюона.

Вариант №10

1. Определить первый потенциал возбуждения и энергию ионизации атома гелия, находящегося в основном состоянии.

2. Оценить разрешающую способность *R* дифракционной решетки, с помощью которой можно разрешить 30 и 31 по счету линии серии Бальмера атома водорода.

3. Покажите, что принцип неопределенности может быть выражен в виде $\Delta L \Delta\Theta \geq \hbar$, где ΔL – неопределенность в моменте импульса, $\Delta\Theta$ – неопределенность в его угловом положении.

4. Поток летящих параллельно друг другу электронов, имеющих скорость V = 10 м/с, проходит через щель шириной b = 0,1 мм. Найти ширину Δx центрального дифракционного максимума, наблюдаемого на экране, отстоящем от щели на расстоянии l = 10 см.

5. На пути электрона с дебройлевской длиной волны $\lambda_1 = 10^{-10}$ м находится потенциальный барьер высотой U = 120 эВ. Определить длину волны де Бройля λ_2 после прохождения барьера.

6. Определить активность A радиоактивного препарата ${}^{98}_{38}\mathrm{Sr}$ массой $m = 0{,}1 \cdot 10^{-6}$ кг.

7. Может ли ядро кремния превратиться в ядро фосфора? Какие частицы должны при этом выделиться? Какова их суммарная энергия?

Вариант №11

1. Вычислить необходимую минимальную разрешающую силу спектрального прибора, чтобы разрешить первые 20 линий серии Бальмера.

2. При облучении паров ртути электронами энергия атома ртути увеличивается на 4,9 эВ. Какова длина волны излучения, которое испускают пары ртути при переходе атомов в основное состояние?

3. Используя соотношение неопределенностей, оценить наименьшую ошибку ΔE в определении энергии протона, если координата центра масс частицы может быть установлена с неопределенностью Δx = 0,001 мм.

4. Какую ускоряющую разность потенциалов должен пройти протон, чтобы длина волны де Бройля была равна 10^{-12} м?

5. Электрон обладает энергией E = 10 эВ. Определить, во сколько раз изменится его скорость и длина волны де Бройля при прохождении через потенциальный барьер высотой U = 6 эВ.

6. За какое время распадается 1/4 начального количества ядер радиоактивного нуклида, если период полураспада 24 часа?

7. Определить энергию α-распада ядра полония ${}^{210}_{84}Po$.

Вариант №12

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

2. Чему равен потенциал ионизации атома водорода, находящегося в состоянии n = 2?

3. Частица массы m находится в состоянии с минимальной энергией в прямоугольной, бесконечно глубокой потенциальной яме шириной ℓ. Оценить силу давления частицы на стенки ямы.

4. Сравнить длины волн де Бройля для электрона и протона, имеющих одинаковую скорость.

5. Получить оценку разности ΔE_n (эВ) для электрона, локализованного в микроскопической области с линейными размерами порядка a = 10^{-10} м.

6. Из каждого миллиона атомов радиоактивного изотопа каждую секунду распадается 200 атомов. Определить период полураспада изотопа.

7. Определить энергию (МэВ), выделяющуюся в акте синтеза дейтерия: $p + n \rightarrow {}^{2}_{1}H$.

Вариант №13

1. Наибольшая длина волны излучения в видимой части спектра водорода 0,66 мкм. Найти длину волны ближайшей линии в видимой части спектра водорода.

2. Сколько квантов с различной энергией могут испускать атомы водорода, если их электроны находятся на третьем возбужденном уровне?

3. Оценить кинетическую энергию нуклона, используя соотношение неопределенностей.

4. Найти зависимость дебройлевской длины волны от кинетической энергии а) ультрарелятивистской частицы ($T >> m_0c^2$); б) нерелятивистской частицы ($T << m_0c^2$).

5. Коэффициент прохождения протонов через потенциальный барьер D = 0,8. Определить показатель преломления волн де Бройля на границе барьера.

6. За сутки активность нуклида уменьшилась от 3,2 Ки до 0,2 Ки. Определить период полураспада этого нуклида.

7. Покоящееся тяжелое ядро с массовым числом A испускает α-частицу, кинетическая энергия которой оказывается равной $T_а$. Найти энергию ΔE, выделяющуюся в акте α -распада.

Вариант №14

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

2. Определите частоту излучения атомов водорода при переходе электронов со второй орбиты на первую.

3. Оценить с помощью соотношения неопределенностей минимальную кинетическую энергию электрона, локализованного в области пространства с линейными размерами порядка 10^{-10} м.

4. При фиксированной скорости релятивистской частицы изобразить график зависимости ее дебройлевской длины волны от массы частицы. Изменится ли характер кривой в случае нерелятивистской частицы?

5. Вычислить коэффициент прохождения электрона с энергией E = 100 эВ через потенциальный барьер высотой U = 99,75 эВ.

6. Вычислить удельную активность кобальта ^{60}Co.

7. Определить минимальную энергию (МэВ), необходимую для деления ядра ^{12}C на три α -частицы.

Вариант №15

1. Электрон в атоме водорода находится на третьем энергетическом уровне. Определить кинетическую энергию электрона.

2. Найти энергию основного состояния E_1 (эВ) и потенциал ионизации φ_i (В) иона He^+.

3. Частица массы m движется в одномерном потенциальном поле $U = \dfrac{k\,x^2}{2}$. Оценить с помощью соотношения неопределенностей минимальную возможную энергию частицы в таком поле.

4. Оценить длину волны де Бройля движущегося человека.

5. При каком отношении высоты потенциального барьера к энергии электрона, падающего на барьер, коэффициент отражения R = 0,5?

6. Вычислить массу радона ^{222}Rn, находящегося в радиоактивном равновесии с 1 г радия ^{226}Ra.

7. Электрон и позитрон, имевшие одинаковые кинетические энергии, равные 0,24 МэВ, при соударении превратились в два одинаковых фотона. Определить энергию фотона и соответствующую ему длину волны.

Вариант №16

1. Электрон в атоме водорода находится на втором энергетическом уровне. Определить потенциальную энергию электрона.

2. В каких пределах должны лежать длины волн λ монохроматического света, чтобы при возбуждении атомов водорода квантами этого света наблюдались три спектральные линии?

3. Внутри сферической полости радиуса R находится в состоянии с минимальной энергией частица массой m. Используя соотношение неопределенностей, определить давление P, оказываемое частицей на стенки полости.

4. Электрон имеет кинетическую энергию $T = 2E_0$ (E_0 – энергия покоя). Во сколько раз изменится длина волны де Бройля, если кинетическая энергия уменьшится в 3 раза?

5. Вывести формулу, связывающую коэффициент прохождения электронов через потенциальный барьер и коэффициент преломления волн де Бройля.

6. Счетчик α-частиц, установленный вблизи радиоактивного изотопа, при первом измерении регистрировал N_1 = 1400 частиц в минуту, а через время t = 4 ч – только N_2 = 400. Определить период полураспада $T_{1/2}$ изотопа.

7. Свободный нейтрон радиоактивен. Выбрасывая электрон и антинейтрино, он превращается в протон. Определить сумму кинетических энергий всех частиц, возникающих в процессе превращения нейтрона. Принять, что кинетическая энергия нейтрона пренебрежимо мала и что масса покоя антинейтрино равна нулю.

Вариант №17

1. Во сколько раз длина волны излучения атома водорода при переходе электрона с третьей орбиты на вторую больше длины волны, обусловленной переходом электрона со второй на первую?

2. Найти первый потенциал возбуждения U_1: а) однократно ионизованного гелия; б) двукратно ионизованного лития.

3. Оценить с помощью соотношения неопределенностей радиус первой боровской орбиты, если известна скорость движения электрона на орбите.

4. В ходе ядерной реакции нерелятивистский нейтрон с кинетической энергией T налетает на α-частицу, скорость которой пренебрежимо мала. Найти дебройлевские длины волн частиц в системе их центра масс.

5. Волновая функция $\psi(x)=\sqrt{\frac{2}{\ell}}\ \sin\frac{\pi x}{\ell}$ описывает основное состояние частицы в бесконечно глубоком прямоугольном ящике шириной ℓ. Вычислить вероятность нахождения частицы в малом интервале $\frac{\Delta\ell}{\ell} << 1$ в средней части ящика.

6. Определить период полураспада радиоактивного полония ^{210}Po, если 1г этого изотопа образует в год 89,5см^3 гелия при нормальных условиях.

7. Современные ускорители позволяют сообщить протонам энергию порядка 100 ГэВ. С какой скоростью движется такой протон? Сравните полученный результат со скоростью протона, входящего в состав космических лучей и обладающего энергией 10^{20} эВ.

Вариант № 18

1. Для ионизации атома водорода необходима энергия около 14 эВ. Найти первый потенциал возбуждения атома.

2. Позитроний представляет собой связанную водородоподобную систему из электрона и позитрона, вращающихся вокруг общего центра масс. Найти: а) выражение для уровней энергии позитрония; б) потенциал ионизации φ_i (В) из основного состояния.

3. Зная кинетическую энергию электрона в основном состоянии атома водорода и используя соотношение неопределенностей, оценить минимальные размеры атома.

4. Положение бусинки массой 1 г и положение электрона определены с одинаковой погрешностью Δx = 10^{-7} м. Оценить квантово-механическую неопределенность ΔV скорости бусинки и электрона.

5. Частица в потенциальном ящике находится в основном состоянии. Какова вероятность обнаружения частицы в крайней трети ящика?

6. Во сколько раз уменьшится активность препарата $^{32}_{15}P$ через время t = 20 суток?

7. Определить энергию ядерной реакции: $^{44}_{20}Ca+^{1}_{1}H\rightarrow^{41}_{19}K+^{4}_{2}He$. Освобождается или поглощается энергия?

Вариант №19

1. Найти интервал длин волн, в котором заключена спектральная серия Бальмера для атома водорода.

2. Найти потенциал ионизации U_i: а) однократно ионизованного гелия; б) двукратно ионизованного лития.

3. В одномерной прямоугольной потенциальной яме с бесконечно высокими стенками шириной 10^{-10} м находится частица массой 10^{-30}. Оценить с помощью соотношения неопределенностей минимальную силу давления на стенки ямы.

4. Определить длину волны де Бройля электрона, движущегося по круговой орбите атома водорода, находящегося в основном состоянии.

5. Электрон с энергией E = 25 эВ встречает на своем пути потенциальный барьер высотой U = 9 эВ. Определить коэффициент преломления n волн де Бройля на границе барьера.

6. Какая доля начального количества атомов распадется за один год в радиоактивном изотопе?

7. Определить энергию распада ядра углерода ${}^{10}_{6}C$, выбросившего позитрон и нейтрино.

Вариант №20

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

2. При электрическом разряде в трубке, наполненной криитоном-86, излучаются световые кванты, соответствующие разности энергий двух состояний атома E_2 – E_1 = $3{,}278 \cdot 10^{-19}$ Дж. Найдите длину волны этого излучения.

3. α-частица находится в бесконечно глубоком, одномерном, прямоугольном потенциальном ящике. Используя соотношение неопределенностей, оценить ширину ящика, если известно, что минимальная энергия α-частицы 8 МэВ.

4. Написать выражение для дебройлевской длины волны релятивистской частицы массы m через ее скорость и через кинетическую энергию.

5. Частица в потенциальном ящике шириной ℓ находится в возбужденном состоянии (n = 2). Определить, в каких точках интервала (0 < x < 1) плотность вероятности нахождения частицы имеет максимальное и минимальное значения.

6. Найти период полураспада $T_{1/2}$ радиоактивного изотопа, если его активность за время t = 10 суток уменьшилась на 24% по сравнению с первоначальной.

7. Вычислить энергию ядерной реакции: ${}^{6}_{3}Li + {}^{2}_{1}H \rightarrow {}^{7}_{3}Li + {}^{1}_{1}H$. Освобождается или поглощается энергия при этой реакции.

Бахмат Владимир Ильич

АТОМНАЯ ФИЗИКА. ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА

Методические указания и варианты задания по физике
для студентов технических направлений всех форм обучения

Подписано к печати 02.03.23. Формат 60х84/16.
Усл. печ. л. 1,9. Тираж 6 экз. Зак. 231903. Рег. № 4.

Отпечатано в ИТО Рубцовского индустриального института
658207, Рубцовск, ул. Тракторная, 2/6.