Федеральное агентство по образованию Российской Федерации
Архангельский государственный технический университет

АТОМНАЯ ФИЗИКА

*Методические указания
к выполнению контрольной работы № 5
для студентов – заочников
инженерно – технических специальностей*

Архангельск
2007

Рассмотрены и рекомендованы к изданию методической комиссией
факультета промышленной энергетики
Архангельского государственного технического университета
29 ноября 2006 года

Составитель:
А.И. Аникин, доц., канд. техн. наук

Рецензент
А.В. Соловьев, доц., канд. техн. наук

УДК 539.1

Аникин А.И. Атомная физика: Методические указания к выполнению контрольной работы № 5 для студентов-заочников инженерно-технических специальностей. – Архангельск: Изд-во АГТУ, 2007. – 38 с.

Подготовлены кафедрой физики АГТУ.

В методических указаниях приведены основные формулы по атомной физике, примеры решения задач, варианты контрольных заданий, а также необходимый справочный материал.

Предназначены для студентов-заочников инженерно-технических специальностей.

Ил. 5. Табл. 8. Библиогр. 5 назв.

ВВЕДЕНИЕ

Контрольные работы по физике предусматривают решение задач и помогают закрепить усвоение теоретической части курса. Чтобы научиться решать задачи и подготовиться к выполнению контрольной работы, следует разобрать помещенные в настоящем пособии примеры решения задач с подробными пояснениями, а также самостоятельно решить ряд задач из задачников по физике.

При решении задач следует руководствоваться такими правилами.

1. Внимательно прочитать условие задачи, уяснить, какой физический процесс или явление в ней рассматриваются.

2. Записать условие задачи в сокращенном виде, применяя общепринятые обозначения физических величин. При решении задач следует пользоваться Международной системой единиц (СИ). Все числовые величины должны быть приведены к этой системе. Следует проанализировать, все ли данные, необходимые для решения задачи, приведены в условии. Недостающие данные надо взять из справочных таблиц. Необходимо записывать также и те величины, числовые значения которых не задаются, но о них можно судить по условию задачи. Например, если тело начинает двигаться из состояния покоя, то следует записать, что начальная скорость $\upsilon_0 = 0$, если в задаче сказано, что какой-то величиной x можно пренебречь, обязательно следует записать, что $x = 0$ и т. д.

3. Задачу следует обязательно пояснять чертежом или рисунком (если это возможно), выполняя их аккуратно с помощью чертежных принадлежностей. Обозначения на чертеже и в решении должны быть одинаковыми. Не следует обозначать одну и ту же величину разными буквами, а также обозначать различные величины одними и теми же символами.

4. Решение задачи должно сопровождаться пояснениями. В пояснениях необходимо указывать те основные законы и формулы, на которых базируется решение задачи.

5. Как правило, задача по физике решается сначала в общем виде, то есть выводится формула, в которой искомая величина выражена через величины, заданные в условии задачи. При таком решении не происходит накопления погрешностей, неизбежных при промежуточных расчетах.

6. Получив решение в общем виде, сделать анализ его размерности. Для этого подставить в правую часть полученной рабочей формулы вместо символов величин обозначения единиц измерений, провести с ними необ-

ходимые действия и убедиться в том, что полученная при этом единица соответствует искомой величине.

7. Произвести вычисления путем подстановки заданных числовых величин в расчетную формулу. Все вычисления рекомендуется выполнять с помощью микрокалькулятора. При вычислениях соблюдать правила приближенных вычислений и округлений.

8. Оценить правдоподобность ответа. Такая оценка в ряде случаев позволяет обнаружить ошибочность ответа.

9. Ответ должен быть записан с определенной степенью точности, соответствующей точности исходных данных.

ОСНОВЫ АТОМНОЙ ФИЗИКИ И КВАНТОВОЙ МЕХАНИКИ

1. Обобщенная формула Бальмера для атома водорода

$$\nu = Rc\left(\frac{1}{k^2} - \frac{1}{n^2}\right),$$

где ν – частота излучения, соответствующая переходу электрона с одной стационарной орбиты на другую; R – постоянная Ридберга; c – скорость распространения света в вакууме.

В этой формуле $k = 1$ для серии Лаймана, $k = 2$ для серии Бальмера, $k = 3$ для серии Пашена, $k = 4$ для серии Брэкета и т.д. При заданном k число n может принимать все целочисленные значения, начиная с $k + 1$.

2. Частота излучения водородоподобных ионов, состоящих из ядра и одного электрона:

$$\nu = Rcz^2\left(\frac{1}{k^2} - \frac{1}{n^2}\right),$$

где z – порядковый номер элемента в таблицах Менделеева.

3. Энергия ионизации атома водорода (водородоподобного иона) – минимальная энергия, которую необходимо затратить, чтобы удалить электрон из атома (водородоподобного иона) в бесконечность.

4. Первый постулат Бора

$$m\upsilon_n r_n = n\frac{h}{2\pi} \qquad (n = 1, 2, 3, \ldots),$$

где m – масса электрона; υ_n – скорость электрона на n – й орбите; r_n – радиус n – й стационарной орбиты; n – главное квантовое число; h – постоянная Планка.

5. Второй постулат Бора

$$\nu = \frac{E_n - E_k}{h},$$

где ν – частота излучения, соответствующая переходу атома из одного стационарного состояния в другое; E_n, E_k – значения энергии стационарных состояний атома.

6. Соотношение де Бройля, определяющее длину волны микрочастицы, движущейся со скоростью υ:

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{m\upsilon} \quad \text{или} \quad \lambda = \frac{h\sqrt{1-\upsilon^2/c^2}}{m_0\upsilon},$$

где h – постоянная Планка, p – импульс микрочастицы; $m = \dfrac{m_0}{\sqrt{1-\upsilon^2/c^2}}$ – релятивистская масса частицы; m_0 – масса покоя частицы; c – скорость света в вакууме.

Если $\upsilon << c$, то допустимо принимать $m = m_0$, тогда $\lambda = h/p_0 = = h/(m_0\upsilon)$.

7. Связь импульса p с кинетической энергией E_k микрочастицы:
кинетическая энергия частицы меньше ее энергии покоя –

$$p = \sqrt{2m_0 E_k};$$

кинетическая энергия частицы соизмерима или больше энергии покоя –

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

где $E_0 = m_0 c^2$ – энергия покоя микрочастицы.

8. Полная энергия микрочастицы

$$E = h\nu,$$

где ν – частота волны де Бройля.

9. Соотношение неопределенностей Гейзенберга для координат и импульса

$$\Delta x \Delta p_x \geq \hbar; \quad \Delta y \Delta p_y \geq \hbar; \quad \Delta z \Delta p_z \geq \hbar,$$

где Δx, Δy, Δz – неопределенности координат; Δp_x, Δp_y, Δp_z – неопределенности проекций импульса на оси x, y, z; $\hbar$ – постоянная Планка h, деленная на 2π.

10. Соотношение неопределенностей для энергии E и времени t

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

где ΔE – неопределенность энергии; Δt – интервал времени.

11. Уравнение Шредингера для стационарных состояний, когда потенциальная энергия частицы не зависит от времени:

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

где ψ – волновая функция, зависящая только от координат x, y, z; m – масса микрочастицы; E – полная энергия микрочастицы; U – потенциальная энергия микрочастицы.

Квадрат модуля волновой функции $|\Psi|^2$ определяет вероятность нахождения микрочастицы в единичном объеме (плотность вероятности)

$$w=\frac{dW}{dV}=|\psi|^2,$$

где w – плотность вероятности; dW – вероятность нахождения микрочастицы в элементе объема dV.

Уравнение Шредингера для микрочастицы, находящейся в одномерной прямоугольной «потенциальной яме» шириной l с бесконечно высокими «стенками», имеет следующее решение:

$$\psi_n=A\sin\frac{\pi x n}{l}\qquad(n=1,2,3,\ldots),$$

где A – нормирующий множитель; n – квантовое число.

Частица, находящаяся в «потенциальной яме», может иметь только квантованные значения энергии

$$E_n=\frac{\pi^2\hbar^2}{2ml^2}n^2\qquad(n=1,2,3,\ldots).$$

12. Уравнение Шредингера для стационарных состояний в сферических координатах r, ϑ, φ

$$\frac{1}{r^2}\frac{\partial}{\partial r}\left(r^2\frac{\partial\psi}{\partial r}\right)+\frac{1}{r^2\sin\vartheta}\frac{\partial}{\partial\vartheta}\left(\sin\vartheta\frac{\partial\psi}{\partial\vartheta}\right)+\frac{1}{r^2\sin^2\vartheta}\frac{\partial^2\psi}{\partial\varphi^2}+\frac{2m}{\hbar^2}(E-U)\psi=0.$$

Пример 1. Определить длину волны, соответствующую третьей спектральной линии в серии Бальмера.

Дано: k = 2 – номер орбиты, на которую перешел электрон; n = 5 – номер орбиты, с которой перешел электрон; $R=1{,}097\cdot10^7$ м$^{-1}$.

Найти: λ.

Решение. Третья спектральная линия в серии Бальмера соответствует переходу электрона с пятой орбиты на вторую. Частота излучения ν, возникающего при переходе электрона с одной стационарной орбиты на другую (рис.1), определяется обобщенной формулой Бальмера для водорода

$$\nu = Rc\left(1/k^2 - 1/n^2\right),$$

где R – постоянная Ридберга; c – скорость распространения света в вакууме.

Так как $\lambda = c/\nu$, то, делая подстановку, получим

$$\lambda = \frac{1}{R(1/k^2 - 1/n^2)}.$$

Выполним анализ размерности полученного выражения

$$[\lambda] = \frac{1}{[R]} = \frac{1}{\text{м}^{-1}} = \text{м}.$$

Анализ размерности показывает, что полученная единица является единицей длины.

Подставим числовые значения и выполним вычисления

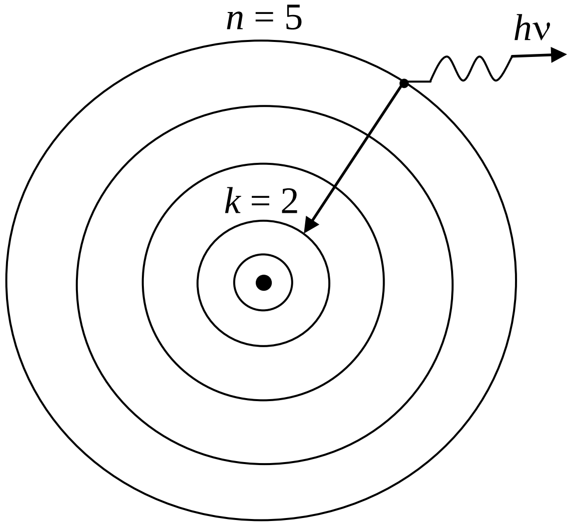

Рис. 1

$$\lambda = \frac{1}{1{,}097\cdot 10^{7}\left(\frac{1}{4} - \frac{1}{25}\right)}\ \text{м} \approx 4{,}341\cdot 10^{-7}\ \text{м} = 434{,}1\ \text{нм}.$$

Ответ: $\lambda = 434{,}1$ нм.

Пример 2. Энергия возбужденного атома водорода 0,85 эВ. Вычислить длину волны де Бройля для электрона в этом состоянии атома.

Дано: $|E| = 0{,}85$ эВ* $= 1{,}36\cdot 10^{-19}$ Дж; $m = 9{,}11\cdot 10^{-31}$ кг;

$h = 6{,}63\cdot 10^{-34}$ Дж $\cdot$ с.

Найти: λ.

Решение. Электрон в атоме водорода движется по круговой орбите. В соответствии со вторым законом Ньютона

$$\frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0 r^2} = \frac{m\upsilon^2}{r},$$

где e – элементарный заряд; r – радиус орбиты электрона; υ – скорость движения электрона по орбите; m – масса покоя электрона; ε_0 – электрическая постоянная.

---

* Электрон-вольт – внесистемная единица измерения энергии и работы; $1\ \text{эВ} = 1{,}6\cdot 10^{-19}$ Дж.

Кинетическая энергия электрона

$$E_k = \frac{mv^2}{2} = \frac{e^2}{8\pi\varepsilon_0 r}.$$

Потенциальная энергия отрицательно заряженного электрона в поле положительно заряженного ядра является отрицательной и равна

$$E_p = -\frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0 r} = -2E_k,$$

где E_k – кинетическая энергия.

Полная механическая энергия электрона определяется выражением

$$E = E_k + E_p = E_k - 2E_k = -E_k.$$

Таким образом, $E_k = |E|$. Так как кинетическая энергия электрона во много раз меньше его энергии покоя $(E_0 = 0{,}511\ \text{МэВ})$, то можем использовать уравнение классической механики, определяющее связь импульса p с кинетической энергией

$$p = \sqrt{2mE_k} = \sqrt{2m|E|}.$$

Найдем длину волны де Бройля

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{\sqrt{2m|E|}},$$

где h – постоянная Планка.

Выполним проверку размерности

$$[\lambda] = \frac{\text{Дж}\cdot\text{с}}{\text{кг}^{1/2}\cdot\text{Дж}^{1/2}} = \frac{\text{Дж}^{1/2}\cdot\text{с}}{\text{кг}^{1/2}} = \frac{\text{Н}^{1/2}\cdot\text{м}^{1/2}\cdot\text{с}}{\text{кг}^{1/2}} = \frac{\text{кг}^{1/2}\cdot\text{м}^{1/2}\cdot\text{м}^{1/2}\cdot\text{с}}{\text{с}\cdot\text{кг}^{1/2}} = \text{м}.$$

Полученная единица измерения соответствует искомой величине.

Подставив числовые значения, получим

$$\lambda = \frac{6{,}63\cdot 10^{-34}}{\sqrt{2\cdot 9{,}11\cdot 10^{-31}\cdot 1{,}36\cdot 10^{-19}}} \approx 1{,}33\cdot 10^{-9}\ \text{м} = 1{,}33\ \text{нм}.$$

Ответ: $\lambda = 1{,}33$ нм.

Пример 3. Электрон обладает кинетической энергией $E_k = 1{,}02$ МэВ. Во сколько раз изменится длина волны де Бройля, если кинетическая энергия электрона уменьшится вдвое?

Дано: $E_{k1} = 1{,}02$ МэВ $= 1{,}63\cdot 10^{-13}$ Дж; $E_{k2} = 0{,}5E_{k1} = 0{,}51$ МэВ $=$ $= 8{,}16\cdot 10^{-14}$ Дж; $m_0 = 9{,}11\cdot 10^{-31}$ кг; $c = 3{,}00\cdot 10^8$ м/с.

Найти: λ_2 / λ_1.

Решение. Длина волны де Бройля для микрочастицы определяется по формуле

$$\lambda = h/p,$$

где h – постоянная Планка; p – импульс микрочастицы.

Пусть p_1 – импульс электрона в начальном состоянии, p_2 – импульс электрона в конечном состоянии. Тогда

$$\lambda_1 = \frac{h}{p_1}, \ \lambda_2 = \frac{h}{p_2}, \text{ а } \frac{\lambda_2}{\lambda_1} = \frac{p_1}{p_2}.$$

Найдем энергию покоя электрона

$$E_0 = m_0 c^2 = 9{,}11 \cdot 10^{-31} \cdot (3{,}00 \cdot 10^8)^2 \text{ Дж} \approx 8{,}20 \cdot 10^{-14} \text{ Дж},$$

где m_0 – масса покоя электрона; c – скорость света в вакууме.

Так как кинетическая энергия соизмерима с энергией покоя электрона, то при решении задачи необходимо учитывать релятивистские эффекты. В этом случае связь импульса с кинетической энергией частицы определяется формулой

$$p = \frac{1}{c}\sqrt{E_k(E_k + 2E_0)}.$$

Импульсы электрона в начальном и конечном состояниях равны соответственно

$$p_1 = \frac{1}{c}\sqrt{E_{k1}(E_{k1} + 2E_0)} \quad \text{и} \quad p_2 = \frac{1}{c}\sqrt{E_{k2}(E_{k2} + 2E_0)}.$$

Вычисления показали, что практически $E_0 = E_{k2} = 0{,}5E_{k1}$. Учитывая это, найдем отношение длин волн де Бройля

$$\frac{\lambda_2}{\lambda_1} = \frac{p_1}{p_2} = \frac{\sqrt{E_{k1}(E_{k1} + E_{k1})}}{\sqrt{E_{k2}(E_{k2} + 2E_{k2})}} = \sqrt{\frac{2}{3} \cdot \frac{E_{k1}}{E_{k2}}}.$$

Анализ размерности полученного выражения показывает, что отношение λ_2/λ_1 величина безразмерная, и убеждает в правдоподобности ответа.

Выполним вычисления

$$\frac{\lambda_2}{\lambda_1} = \sqrt{\frac{2}{3} \cdot \frac{1{,}63 \cdot 10^{-13}}{8{,}16 \cdot 10^{-14}}} \approx 1{,}63.$$

Ответ: $\lambda_2/\lambda_1 = 1{,}63$.

Пример 4. Используя соотношение неопределенностей, оценить минимальную энергию электрона E_{min}, находящегося в бесконечно глубокой одномерной прямоугольной «потенциальной яме» шириной $l = 5$ Å.

Дано: $l = 5$ Å $= 5 \cdot 10^{-10}$ м; $\hbar = 1{,}05 \cdot 10^{-34}$ Дж · с; $m_0 = 9{,}11 \cdot 10^{-31}$ кг.

Найти: E_{min}.

Решение. Соотношение неопределенностей Гейзенберга для координаты и импульса в случае одномерной задачи $\Delta x \Delta p_x \geq \hbar$ позволяет оценить неопределенность импульса электрона

$$\Delta p_x \geq \frac{\hbar}{\Delta x}, \qquad (1)$$

где Δp_x – неопределенность импульса; Δx – неопределенность координаты; $\hbar$ – постоянная Планка h, деленная на 2π.

Так как ширина «потенциальной ямы» равна l, и электрон находится в этой «яме», то неопределенность его координаты равна $\Delta x = l/2$ (рис. 2). Потенциальная энергия электрона E_p внутри «ямы» равна нулю, следовательно, его полная механическая энергия E равна кинетической E_k. За пределами «ямы», ограниченной бесконечно высокими «стенками», $E_P \to \infty$.

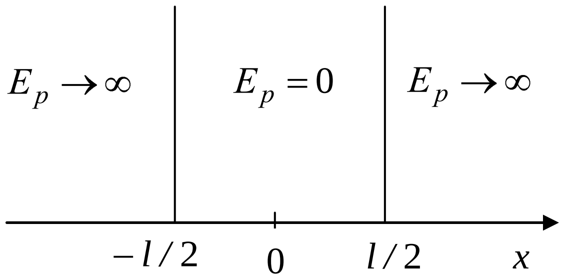

Рис. 2

Связь импульса p с кинетической энергией электрона для нерелятивистского случая имеет вид (учитываем, что по условию задачи $E_k = E$)

$$p = \sqrt{2m_0 E_k} = \sqrt{2m_0 E},$$

где m_0 – масса покоя электрона.

Выразим полную энергию E в виде

$$E = \frac{p^2}{2m_0}.$$

Из этого уравнения видно, что энергия электрона тем меньше, чем меньше его импульс. Неопределенность значения импульса равна Δp_x. Минимальное значение импульса электрона p_{min} должно быть не меньше Δp_x, то есть $p_{min} \geq \Delta p_x$. Учитывая это, можем записать

$$E \geq \frac{(\Delta p_x)^2}{2m_0}.$$

Сделав подстановку Δp_x из уравнения (1) с учетом того, что $\Delta x = l/2$, придем к уравнению

$$E \geq \frac{2\hbar^2}{m_0 l^2}.$$

Следовательно, минимальная энергия электрона

$$E_{min} = \frac{2\hbar^2}{m_0 l^2}.$$

Анализ размерности убеждает, что ответ правдоподобен, так как энергия действительно измеряется в джоулях:

$$[E] = \frac{[\hbar]^2}{[m_0][l]^2} = \frac{\text{Дж}^2 \cdot \text{с}^2}{\text{кг} \cdot \text{м}^2} = \frac{\text{Дж}^2}{\text{Н} \cdot \text{м}} = \text{Дж}.$$

Подставим числовые значения в конечную формулу и выполним вычисления (оцениваем лишь порядок вычисляемой величины)

$$E_{min} = \frac{2 \cdot (1{,}05 \cdot 10^{-34})^2}{9{,}11 \cdot 10^{-31} \cdot (5 \cdot 10^{-10})^2} \approx 10^{-19}\ \text{Дж}.$$

Ответ: $E_{min} = 10^{-19}$ Дж.

Пример 5. Электрон находится в бесконечно глубокой одномерной прямоугольной «потенциальной яме» с непроницаемыми «стенками». Ширина «ямы» l = 37,8 эВ. Определить, на каком энергетическом уровне находится электрон. Чему равна плотность вероятности обнаружения электрона в середине «ямы»?

Дано: $l = 0{,}2$ нм $= 0{,}2 \cdot 10^{-9}$ м; $E_n = 37{,}8$ эВ $= 6{,}06 \cdot 10^{-18}$ Дж; $m_0 = 9{,}11 \cdot 10^{-31}$ кг; $\hbar = 1{,}05 \cdot 10^{-34}$ Дж $\cdot$ с.

Найти: n; w.

Решение: Запишем уравнение Шредингера для стационарных состояний. Для рассматриваемой одномерной задачи это уравнение имеет вид

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{2m_0}{\hbar^2}(E - U)\psi = 0,$$

где ψ – координатная часть волновой функции, зависящая только от x; E – полная энергия электрона; U – потенциальная энергия электрона; $\hbar$ – постоянная Планка h, деленная на 2π.

Электрон находится в «яме», где его потенциальная энергия $U = 0$ (рис. 3). За пределами «ямы», ограниченной бесконечно высокими «стенками», $U \to \infty$. Электрон не может проникнуть за пределы «ямы», поэтому вероятность его обнаружения (а, следовательно, и волновая функция) за пределами «ямы» равна нулю. Из условия непрерывности волновой функции следует, что ψ должна быть равна нулю и на границах «ямы»:

$$\psi_{x=0} = \psi_{x=l} = 0.$$

В пределах «ямы» $(0 \le x \le l)$ уравнение Шредингера имеет вид

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{2m_0}{\hbar^2} E\psi = 0. \qquad (1)$$

Это уравнение, описывающее движение электрона в одномерной «потенциальной яме», удовлетворяется при дискретных значениях энергии электрона

$$E_n = \frac{\pi^2 \hbar^2}{2m_0 l^2} n^2 \qquad (n = 1, 2, 3 \ldots),$$

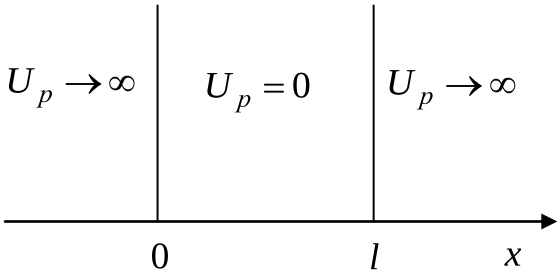

Рис. 3

где n – квантовые числа, определяющие энергетические уровни электрона.

Выразим из этой формулы n:

$$n = \sqrt{\frac{2E_n m_0 l^2}{\pi^2 \hbar^2}} = \frac{l}{\pi\hbar}\sqrt{2E_n m_0}.$$

Анализ размерности правой части полученного выражения показывает, что n – величина безразмерная, и это соответствует действительности.

После подстановки числовых значений, данных в условии задачи, получим

$$n = \frac{0{,}2 \cdot 10^{-9}}{3{,}14 \cdot 1{,}05 \cdot 10^{-34}} \sqrt{2 \cdot 6{,}06 \cdot 10^{-18} \cdot 9{,}11 \cdot 10^{-31}} = 2.$$

Решение дифференциального уравнения (1) для рассматриваемой задачи имеет вид

$$\psi = A \sin\frac{\pi x n}{l}.$$

Коэффициент A находим из условия нормировки

$$A^2 \cdot \int_0^l \sin^2 \frac{\pi x n}{l}\, dx = 1 .$$

В результате интегрирования получаем $A = \sqrt{\dfrac{2}{l}}$, следовательно:

$$\psi = \sqrt{\frac{2}{l}} \sin \frac{\pi x n}{l} \qquad (n = 1, 2, 3, \ldots).$$

Плотность вероятности обнаружения электрона на различных расстояниях x от стенок «ямы» для рассматриваемой задачи равна

$$w = |\psi|^2 = \frac{2}{l} \sin^2 \frac{\pi x n}{l} .$$

Выполним анализ размерности (выражение под знаком sin безразмерное):

$$[w] = \frac{1}{[l]} = \frac{1}{\text{м}} .$$

Полученная единица соответствует искомой величине.

Вычислим значение w при $n = 2$ для $x = l/2$:

$$w = \frac{2}{l} \sin^2 \pi = 0 .$$

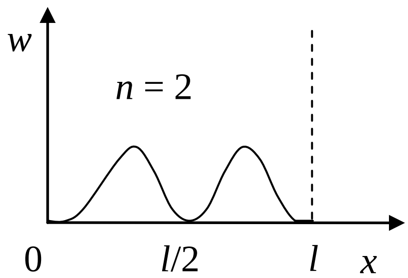

Рис. 4

Такой результат означает, что в состоянии с $n = 2$ электрон не может находиться в середине «ямы». Зависимость плотности вероятности обнаружения электрона на различных расстояниях от стенок «ямы» приведена на рис. 4.

Ответ: $n = 2$; $w = 0$.

Пример 5. Пси-функция некоторой частицы имеет вид $\psi = A \exp\left[-r^2/(2a^2)\right]$, где r – расстояние частицы от силового центра, $a = 1{,}0 \cdot 10^{-10}$ м – константа. Найти значение коэффициента A и наиболее вероятное расстояние $r_{\text{вер}}$ частицы от центра.

Дано: $\psi = A \exp\left[-r^2/(2a^2)\right]$; $a = 1{,}0 \cdot 10^{-10}$ м.

Найти: A; $r_{\text{вер}}$.

Решение. Движение микрочастицы в центральном силовом поле (например, движение электрона в поле положительно заряженного ядра) описывается уравнением Шредингера в сферических координатах. По условию задачи функция ψ зависит только от r и не зависит от углов ϑ и φ. В этом случае уравнение Шредингера для стационарных состояний принимает вид

$$\frac{1}{r^2}\cdot\frac{d}{dr}\left(r^2\frac{d\psi}{dr}\right)+\frac{2m_0}{\hbar^2}(E-U)\psi=0,$$

где r – расстояние микрочастицы от силового центра; m_0 – масса покоя микрочастицы; $\hbar$ – постоянная Планка h, деленная на 2π; E – полная энергия микрочастицы; U – потенциальная энергия микрочастицы.

Перепишем уравнение Шредингера, выполнив дифференцирование в первом слагаемом:

$$\frac{d^2\psi}{dr^2}+\frac{2}{r}\frac{d\psi}{dr}+\frac{2m_0}{\hbar^2}(E-U)\psi=0\,.$$

Решение этого дифференциального уравнения по условию задачи имеет вид

$$\psi=A\exp\left[-r^2/(2a^2)\right].$$

Коэффициент A найдем из условия нормировки пси-функции, которое для рассматриваемой задачи запишем в виде

$$1=\int\limits_V\psi^2dV=\int\limits_0^\infty\psi^2r^2dr\int\limits_0^\pi sin\,\vartheta\,d\vartheta\int\limits_0^{2\pi}d\varphi=4\pi\int\limits_0^\infty\psi^2r^2dr=4\pi A^2\int\limits_0^\infty e^{-r^2/a^2}\cdot r^2dr\,,$$

где dV – элемент объема в сферических координатах $(dV=r^2\,sin\,\vartheta\,d\vartheta\,d\varphi\,dr)$.

Интеграл в полученном выражении равен $\frac{a^3}{4}\sqrt{\pi}$ (табл. 6 приложения), следовательно:

$$1=\pi A^2a^3\sqrt{\pi}\quad\text{ и }\quad A=\frac{1}{\sqrt{\pi a^3\sqrt{\pi}}}\,.$$

Выполним анализ размерности полученного выражения

$$[A]=\frac{1}{[r]^{3/2}}=\text{м}^{-3/2}.$$

Анализ размерности подтверждает правдоподобность ответа. Действительно, квадрат модуля волновой функции имеет смысл плотности вероятности обнаружения микрочастицы

$$w=\frac{dW}{dV}=|\psi|^2=A^2\exp\left(-r^2/a^2\right),$$

где dW – вероятность нахождения частицы в элементе объема dV.

Так как размерность $[w]=\text{м}^{-3}$, то размерность $[A]=\text{м}^{-3/2}$.

Выполним вычисления

$$A = \frac{1}{\sqrt{3{,}14\,(1{,}0\cdot 10^{-10})^3\sqrt{3{,}14}}}\ \text{м}^{-3/2} \approx 4{,}2\cdot 10^{14}\,\text{м}^{-3/2}.$$

Вероятность нахождения микрочастицы на расстоянии между r и $r+dr$ от силового центра в любом направлении определяется формулой

$$dW = w_r\,dr = 4\pi\psi^2 r^2 dr.$$

Следовательно, плотность вероятности

$$w_r = 4\pi\psi^2 r^2 = \frac{4r^2}{a^3\sqrt{\pi}}\exp\left(-r^2/a^2\right).$$

Из формулы видно, что плотность вероятности w_r обращается в нуль при $r = 0$ и асимптотически стремится к нулю при $r \to \infty$. Наиболее вероятное расстояние $r_{\text{вер}}$ частицы от силового центра найдем из условия, что при $r = r_{\text{вер}}$ плотность вероятности должна быть максимальна. Для этого исследуем функцию $w_r = f(r)$ на экстремум. Найдем первую производную $\dfrac{dw_r}{dr}$ и приравняем ее к нулю

$$\frac{8r}{a^3\sqrt{\pi}}\,e^{-r^2/a^2} - \frac{2r}{a^2}\,e^{-r^2/a^2}\,\frac{4r^2}{a^3\sqrt{\pi}} = 0; \quad \frac{8r}{a^3\sqrt{\pi}}\,e^{-r^2/a^2}\left(1-\frac{r^2}{a^2}\right) = 0.$$

Это равенство выполняется при $r = 0$; $r \to \infty$; $r = a$. Первые два решения соответствуют минимумам функции $w_r = f(r)$. Следовательно, наиболее вероятное расстояние микрочастицы от силового центра $r_{\text{вер}} = a = 1{,}0\cdot 10^{-10}\,\text{м}$.

Ответ: $A = 4{,}2\cdot 10^{14}\,\text{м}^{-3/2}$; $r_{\text{вер}} = 1{,}0\cdot 10^{-10}\,\text{м}$.

ЭЛЕМЕНТЫ КВАНТОВОЙ СТАТИСТИКИ И ФИЗИКИ ТВЕРДОГО ТЕЛА

1. Распределение свободных электронов в металле по состояниям с различной энергией при $T = 0$ К

$$dn_E = \frac{1}{2\pi^2}\left(\frac{2m_0}{\hbar^2}\right)^{3/2}\sqrt{E}\,dE,$$

где dn_E – количество свободных электронов в единице объема металла (концентрация электронов), энергии которых заключены в пределах от E до $E + dE$; m_0 – масса покоя электрона.

2. Энергия Ферми в металле при $T = 0$ К

$$E_{F_0} = \frac{\hbar^2}{2m_0}\left(3\pi^2 n\right)^{2/3},$$

где n – концентрация электронов проводимости в металле.

3. Температура вырождения (температура Ферми)

$$T_F = E_{F_0} / k,$$

где E_{F_0} – энергия Ферми при $T = 0$ К; k – постоянная Больцмана.

Температурой вырождения T_F называют температуру, ниже которой проявляются квантовые свойства электронного газа. Если $T >> T_F$, то поведение системы частиц подчиняется классической статистике.

4. Температурная зависимость удельной электрической проводимости собственных полупроводников

$$\gamma = \gamma_0 \exp\left[-\Delta E / (2kT)\right],$$

где γ_0 – множитель, мало изменяющийся с изменением температуры; ΔE – ширина запрещенной зоны.

Пример 7. Определить отношение концентраций свободных электронов при $T = 0$ К в литии n_1 и цезии n_2, если известно, что уровни Ферми в этих металлах соответственно равны $E_{F_1} = 4{,}72$ эВ и $E_{F_2} = 1{,}53$ эВ.

Дано: $E_{F_1} = 4{,}72\ \text{эВ} = 7{,}55 \cdot 10^{-19}$ Дж; $E_{F_2} = 1{,}53\ \text{эВ} = 2{,}45 \cdot 10^{-19}$ Дж.

Найти: n_1/n_2.

Решение. Уровень Ферми при абсолютном нуле определяется выражением

$$E_{F_0} = \frac{\hbar^2}{2m_0}\left(3\pi^2 n\right)^{2/3},$$

где $\hbar$ – постоянная Планка h, деленная на 2π; m_0 – масса покоя электрона; n – количество свободных электронов в единице объема металла.

Используя эту формулу, запишем соотношения, определяющие концентрации n_1 и n_2 свободных электронов в литии и цезии:

$$n_1 = \left(\frac{2E_{F_1} m_0}{\hbar^2}\right)^{3/2} \cdot \frac{1}{3\pi^2}; \quad n_2 = \left(\frac{2E_{F_2} m_0}{\hbar^2}\right)^{3/2} \cdot \frac{1}{3\pi^2}.$$

Выполним анализ размерности

$$[n] = \frac{[E_F]^{3/2}[m_0]^{3/2}}{[\hbar]^3} = \frac{\text{Дж}^{3/2}\cdot\text{кг}}{\text{Дж}^3\cdot\text{с}^3} = \frac{\text{кг}^{3/2}}{\text{Дж}^{3/2}\cdot\text{с}^3} = \frac{\text{кг}^{3/2}}{\text{Н}^{3/2}\cdot\text{м}^{3/2}\cdot\text{с}^3} =$$

$$= \frac{\text{кг}^{3/2}}{\text{кг}^{3/2}\cdot\text{м}^{3/2}\cdot\text{с}^{-3}\cdot\text{м}^{3/2}\cdot\text{с}^3} = \text{м}^{-3}.$$

Полученный результат соответствует действительности.

Найдем отношение концентраций свободных электронов

$$\frac{n_1}{n_2} = \left(\frac{E_{F_1}}{E_{F_2}}\right)^{3/2}.$$

Подставим в это выражение числовые значения и выполним вычисления

$$\frac{n_1}{n_2} = \left(\frac{7{,}55\cdot 10^{-19}}{2{,}45\cdot 10^{-19}}\right)^{3/2} \approx 5{,}41.$$

Ответ: $n_1 / n_2 = 5{,}41$.

Пример 8. Найти относительное количество $\Delta N/N$ свободных электронов в металле, кинетическая энергия которых отличается от энергии Ферми не более, чем на η = 2,0%. Температура металла T = 0 К.

Дано: T = 0 К; η = 0,02 (2,0%).

Найти: $\Delta N/N$.

Решение. Распределение свободных электронов в металле по состояниям с различной энергией при T = 0 К имеет вид

$$dn_E = \frac{1}{2\pi^2}\left(\frac{2m_0}{\hbar^2}\right)^{3/2} E^{1/2} dE,$$

где dn_E – концентрация свободных электронов, энергии которых заключены в пределах от E до $E + dE$; m_0 – масса покоя электрона; $\hbar$ – постоянная Планка h, деленная на 2π.

Концентрацию свободных электронов в металле найдем путем интегрирования

$$n = \int_0^{E_{F_0}} A E^{1/2} dE,$$

где E_{F_0} – энергия Ферми при T = 0 К; $A = \dfrac{1}{2\pi^2}\left(\dfrac{2m_0}{\hbar^2}\right)^{3/2}$.

Если образец металла имеет объем V, то количество свободных электронов в этом образце

$$N = nV = AV\int\limits_{0}^{E_{F_0}} E^{1/2}dE\,.$$

Концентрация свободных электронов, энергии которых отличаются от энергии Ферми не более, чем на 2%, равна

$$\Delta n = \int\limits_{0{,}98E_{F_0}}^{E_{F_0}} AE^{1/2}dE\,.$$

Количество таких электронов в образце металла объемом V

$$\Delta N = \Delta nV = AV\int\limits_{0{,}98E_{F_0}}^{E_{F_0}} E^{1/2}dE\,.$$

Найдем относительное количество свободных электронов, кинетическая энергия которых отличается от энергии Ферми не более, чем на 2%:

$$\frac{\Delta N}{N} = \frac{\int\limits_{0{,}98E_{F_0}}^{E_{F_0}} E^{1/2}dE}{\int\limits_{0}^{E_{F_0}} E^{1/2}dE}\,.$$

Произведя вычисления, получим

$$\frac{\Delta N}{N} = \frac{E_{F_0}{}^{3/2} - 0{,}98^{3/2}E_{F_0}{}^{3/2}}{E_{F_0}{}^{3/2}} = 1 - 0{,}98^{3/2} \approx 0{,}03\,.$$

Ответ: $\Delta N / N = 0{,}03$ (или 3%).

ФИЗИКА АТОМНОГО ЯДРА И ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ

1. Закон радиоактивного распада

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

где N_0 – количество нераспавшихся ядер в начальный момент времени ($t = 0$); N – количество нераспавшихся ядер по истечении времени t; λ – постоянная радиоактивного распада.

2. Зависимость периода полураспада $T_{1/2}$ (промежуток времени, в течение которого количество нераспавшихся ядер уменьшается в 2 раза) от постоянной распада

$$T_{1/2} = \ln 2/\lambda\,.$$

3. Активность радиоактивного вещества

$$A = \left|\frac{dN}{dt}\right| = \lambda N\,,$$

где N – количество ядер, содержащихся в радиоактивном веществе.

4. Удельная активность радиоактивного вещества

$$a = \frac{A}{m} = \frac{\lambda N}{m},$$

где m – масса распадающегося вещества.

5. Среднее время жизни радиоактивного ядра (время, в течение которого количество нераспавшихся ядер уменьшается в e раз)

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

6. Массовое число ядра (количество нуклонов в ядре)

$$A = N + Z,$$

где Z – зарядовое число ядра, равное количеству протонов в ядре; N – количество нейтронов в ядре.

7. Дефект массы ядра (разность между массой частиц, составляющих ядро, и массой самого ядра)

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

где m_p – масса покоя протона; m_n – масса покоя нейтрона; $m_я$ – масса покоя ядра.

8. Энергия связи нуклонов в ядре

$$E_{св} = \Delta m c^2 = [Zm_H + (A - Z)m_n - m_a]c^2,$$

где Δm – дефект массы ядра; c – скорость света в вакууме; m_H – масса покоя изотопа водорода ${}_1^1H$; m_a – масса покоя атома.

9. Энергия ядерной реакции

$$Q = c^2(\sum m_1 - \sum m_2) = \sum E_{k2} - \sum E_{k1},$$

где $\sum m_1$ – сумма масс покоя частиц до реакции; $\sum m_2$ – сумма масс покоя частиц после реакции; $\sum E_{k1}$ – сумма кинетических энергий частиц до реакции; $\sum E_{k2}$ – сумма кинетических энергий частиц после реакции.

Если $\sum m_1 > \sum m_2$, то реакция идет с выделением энергии (экзотермическая реакция), если $\sum m_1 < \sum m_2$, то реакция идет с поглощением энергии (эндотермическая реакция).

10. В ядерных реакциях выполняются законы сохранения:
суммарного количества нуклонов

$$\sum A_1 = \sum A_2;$$

зарядовых чисел

$$\sum Z_1 = \sum Z_2;$$

релятивистской полной энергии

$$\sum E_1 = \sum E_2;$$

импульса

$$\sum \vec{p_1} = \sum \vec{p_2},$$

где индекс 1 обозначает частицы до реакции, индекс 2 – частицы после реакции.

11. Решение задач по физике элементарных частиц основано на закономерностях, рассмотренных в предыдущих разделах курса. При решении некоторых задач необходимо использовать формулы специальной теории относительности.

Пример 9. Найти постоянную распада радона λ, если известно, что количество атомов радона уменьшается за сутки на 18,2%.

Дано: $\delta N = (N_0 - N)/N_0 = 0{,}182$; $t = 24$ ч $= 8{,}64 \cdot 10^4$ с.

Найти: λ.

Решение. По закону радиоактивного распада

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

где N_0 – количество нераспавшихся ядер радона в момент времени t = 0; N – количество нераспавшихся ядер по истечении времени t.

Количество ядер, распавшихся за время t, равно

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

Так как $(N_0 - N)/N_0 = \delta N$, то $\delta N = 1 - e^{-\lambda t}$. Тогда $e^{-\lambda t} = 1 - \delta N$,

$$\lambda = -\frac{\ln(1 - \delta N)}{t}.$$

Выполним анализ размерности

$$[\lambda] = \frac{1}{[t]} = \frac{1}{\text{с}}.$$

Полученный результат соответствует действительности.

Сделаем подстановку числовых значений и произведем вычисления

$$\lambda = -\frac{\ln(1 - 0{,}182)}{8{,}64 \cdot 10^4}\,\text{с}^{-1} \approx 2{,}33 \cdot 10^{-6}\,\text{с}^{-1}.$$

Ответ: $\lambda = 2{,}33 \cdot 10^{-6}$ с$^{-1}$.

Пример 10. Найти энергию связи, приходящуюся на один нуклон в ядре ${}^{27}_{13}\text{Al}$.

Дано: ${}^{27}_{13}\text{Al}$; Z = 13; A = 27; $m_a = 4{,}4805 \cdot 10^{-26}$ кг; $m_\text{H} = 1{,}6736 \cdot 10^{-27}$ кг; $m_n = 1{,}6750 \cdot 10^{-27}$ кг; $c = 3 \cdot 10^8$ м/с.

Найти: $E_\text{св} / A$.

Решение. Энергия связи нуклонов в ядре определяется выражением

$$E_{\text{св}} = \left[Zm_{\text{H}} + (A - Z)m_n - m_a\right]c^2,$$

где Z – зарядовое число ядра; A – массовое число ядра; m_{H} – масса изотопа водорода ${}_1^1\text{H}$; m_n – масса покоя нейтрона; m_a – масса покоя изотопа ${}_{13}^{27}\text{Al}$; c – скорость света в вакууме.

Найдем удельную энергию связи

$$\frac{E_{\text{св}}}{A} = \frac{\left[Zm_{\text{H}} + (A - Z)m_n - m_a\right]c^2}{A}.$$

Выполним анализ размерности

$$[E_{\text{св}}] = [m][c]^2 = \text{кг} \cdot (\text{м}/\text{с})^2 = \text{Н} \cdot \text{м} = \text{Дж}.$$

Сделав подстановку числовых значений, получим

$$\frac{E_{\text{св}}}{A} = \frac{\left[13 \cdot 1{,}6736 \cdot 10^{-27} + (27 - 13)1{,}6750 \cdot 10^{-27} - 4{,}4805 \cdot 10^{-26}\right] \cdot (3 \cdot 10^8)^2}{27} \approx$$

$\approx 1{,}34 \cdot 10^{-12}$ Дж/нуклон.

В атомной физике при решении задач часто используют внесистемные единицы: массы – атомная единица массы (а.е.м.); энергии – электрон-вольт (эВ) и мегаэлектрон-вольт (МэВ). Эти единицы допускаются к применению наравне с единицами СИ.

При использовании внесистемных единиц энергия связи нуклонов в ядре будет определяться формулой

$$E_{\text{св}} = 931\Delta m,$$

где 931 – размерный коэффициент, МэВ/а.е.м; Δm – дефект массы ядра, а. е. м.

Удельная энергия связи

$$\frac{E_{\text{св}}}{A} = \frac{931\Delta m}{A}.$$

Сделаем подстановку числовых значений и выполним вычисления

$$\frac{E_{\text{св}}}{A} = \frac{\left[13 \cdot 1{,}0078 + (27 - 13)1{,}0087 - 26{,}982\right] \cdot 931}{27} \approx 8{,}32 \text{ МэВ/нуклон}.$$

Ответ: $E_{\text{св}} / A = 1{,}34 \cdot 10^{-12}$ Дж/нуклон (или 8,32 МэВ/нуклон).

Пример 11. Определить энергию Q ядерной реакции ${}^{16}\text{O}(d,\alpha){}^{14}\text{N}$. Выделяется или поглощается энергия в этой реакции?

Дано: ${}_8^{16}\text{O} + {}_1^2\text{H} \rightarrow {}_7^{14}\text{N} + {}_2^4\text{He}$.

Найти: Q.

Решение. В результате взаимодействия ядра кислорода ${}^{16}_{8}\mathrm{O}$ и дейтрона d (ядро атома дейтерия ${}^{2}_{1}\mathrm{H}$) возникает ядро азота ${}^{14}_{7}\mathrm{N}$ и испускается α-частица (ядро атома гелия ${}^{4}_{2}\mathrm{He}$). Энергия ядерной реакции определяется выражением

$$Q = c^2 \left[(m_\mathrm{O} + m_\mathrm{H}) - (m_\mathrm{N} + m_\mathrm{He}) \right], \qquad (1)$$

где m_O – масса покоя ядра кислорода; m_H – масса покоя ядра дейтерия; m_N – масса покоя ядра азота; m_He – масса покоя ядра гелия.

При выполнении расчетов массы ядер можно заменить массами нейтральных атомов. Масса нейтрального атома складывается из массы ядра и массы электронов, образующих электронную оболочку. При подстановке в уравнение (1) масс атомов массы электронов сокращаются

$$(m_\mathrm{O} + 8m_e + m_\mathrm{H} + m_e) - (m_\mathrm{N} + 7m_e + m_\mathrm{He} + 2m_\mathrm{e}) = (m_\mathrm{O} + m_\mathrm{H}) - (m_\mathrm{N} + m_\mathrm{He}).$$

В этом уравнении m_e – масса покоя электрона. Таким образом, замена масс ядер массами атомов не влияет на результат вычислений.

При выполнении расчетов будем использовать внесистемные единицы. В этом случае $c^2 = 931$ МэВ/а.е.м. Массы атомов и частиц, участвующих в реакции, возьмем из таблицы 3 приложения: $m_\mathrm{O} = 15{,}9949$ а.е.м.; $m_\mathrm{H} = 2{,}01410$ а.е.м.; $m_\mathrm{N} = 14{,}0031$ а.е.м.; $m_\mathrm{He} = 4{,}00260$ а.е.м.

Выполним вычисления

$$Q = 931 \left[(15{,}9949 + 2{,}01410) - (14{,}0031 + 4{,}00260) \right] \approx 3{,}1 \text{ МэВ}.$$

Так как $Q > 0$, то энергия в реакции выделяется (экзотермическая реакция).

Ответ: $Q = 3{,}1$ МэВ.

Пример 12. При упругом центральном столкновении нейтрона с неподвижным ядром замедляющего вещества кинетическая энергия нейтрона уменьшилась в 1,4 раза. Найти массу ядер замедляющего вещества. Ответ записать в атомных единицах массы.

Дано: $m_1 = 1{,}0$ а.е.м.; $m_2 / m_1 = k$; $n = 1{,}4$; $\upsilon_2 = 0$.

Найти: m_2.

Решение. Запишем законы сохранения импульса и энергии:

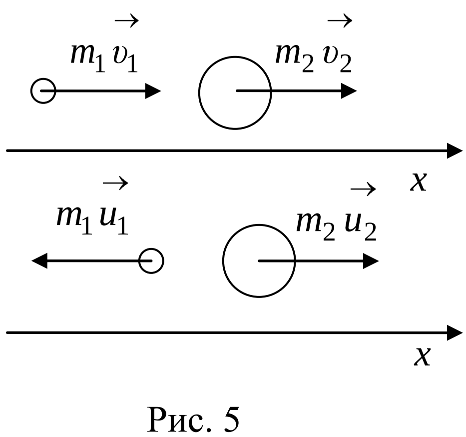

Рис. 5

$$m_1\vec{\upsilon}_1+m_2\vec{\upsilon}_2=m_1\vec{u}_1+m_2\vec{u}_2\,,\quad \frac{m_1\vec{\upsilon}_1^{\,2}}{2}+\frac{m_2\vec{\upsilon}_2^{\,2}}{2}=\frac{m_1\vec{u}_1^{\,2}}{2}+\frac{m_2\vec{u}_2^{\,2}}{2}\,,$$

где m_1, m_2 – массы покоя нейтрона и ядра замедляющего вещества; υ_1, u_1 – скорости нейтрона до и после соударения соответственно; υ_2, u_2 – скорости ядра замедляющего вещества до и после соударения соответственно.

Преобразуем эти уравнения, учитывая, что по условию задачи $\upsilon_2=0$:

$$m_1\left(\vec{\upsilon}_1-\vec{u}_1\right)=m_2\vec{u}_2\,; \tag{1}$$

$$m_1\left(\vec{\upsilon}_1-\vec{u}_1\right)\left(\vec{\upsilon}_1+\vec{u}_1\right)=m_2\vec{u}_2\vec{u}_2\,.$$

Сопоставление последних двух выражений показывает, что

$$\vec{\upsilon}_1+\vec{u}_1=\vec{u}_2\,.$$

Умножим все члены этого уравнения на m_2

$$m_2\vec{\upsilon}_1+m_2\vec{u}_1=m_2\vec{u}_2 \tag{2}$$

Вычтем почленно из уравнения (1) уравнение (2):

$$m_1\vec{\upsilon}_1-m_1\vec{u}_1-m_2\vec{\upsilon}_1-m_2\vec{u}_1=0\,.$$

Тогда

$$\vec{u}_1=\frac{(m_1-m_2)\vec{\upsilon}_1}{m_1+m_2}\,. \tag{3}$$

Масса ядер замедляющего вещества больше массы нейтрона, то есть $m_2>m_1$. В этом случае, как видно из уравнения (3), вектор $\vec{u}_1$ будет направлен противоположно направлению вектора $\vec{\upsilon}_1$. Запишем выражение (3) в проекциях на ось *x* (см. рис. 5):

$$-u_1=\frac{(m_1-m_2)\upsilon_1}{m_1+m_2}\,.$$

Тогда

$$\frac{\upsilon_1}{u_1}=\frac{m_2+m_1}{m_2-m_1}\,. \tag{4}$$

По условию задачи $\frac{m_1 \upsilon_1^2}{2} \Big/ \frac{m_1 u_1^2}{2} = n$, тогда $\upsilon_1 / u_1 = \sqrt{n}$. Так как $m_2 = km_1$, то, делая подстановку υ_1 / u_1 и m_2 в формулу (4), получим

$$\sqrt{n} = \frac{km_1 + m_1}{km_1 - m_1} = \frac{k+1}{k-1}.$$

Решим это уравнение относительно k:

$$k = \frac{\sqrt{n}+1}{\sqrt{n}-1}.$$

Тогда

$$m_2 = km_1 = \frac{m_1\left(\sqrt{n}+1\right)}{\sqrt{n}-1}.$$

Сделав подстановку числовых значений, получим

$$m_2 = \frac{1\left(\sqrt{1{,}4}+1\right)}{\sqrt{1{,}4}-1} \approx 12 \text{ а.е.м.}$$

Ответ: $m_2 \approx 12$ а.е.м. (графит).

Пример 13. Электрон и позитрон, имевшие одинаковые кинетические энергии, равные 0,24 МэВ, при соударении превратились в два одинаковых фотона. Определить энергию ε каждого фотона и соответствующую ему длину волны λ.

Дано: ${}_{-1}^{0}e$; ${}_{1}^{0}e$; $E_k = 0{,}24$ МэВ $= 3{,}84 \cdot 10^{-14}$ Дж; $m_0 = 9{,}1 \cdot 10^{-31}$ кг; $c = 3{,}0 \cdot 10^{8}$ м/с; $h = 6{,}63 \cdot 10^{-34}$ Дж $\cdot$ с.

Найти: ε; λ.

Решение. Запишем уравнение реакции взаимодействия электрона ${}_{-1}^{0}e$ и позитрона ${}_{1}^{0}e$

$${}_{-1}^{0}e + {}_{1}^{0}e \to 2{}_{0}^{0}\gamma,$$

где ${}_{0}^{0}\gamma$ – фотон (квант электромагнитного излучения).

В ходе этой реакции выполняется закон сохранения релятивистской полной энергии

$$m_0 c^2 + E_k + m_0 c^2 + E_k = 2\varepsilon, \quad (1)$$

где m_0 – масса покоя электрона (позитрона); c – скорость света в вакууме; $m_0 c^2$ – энергия покоя электрона (позитрона); E_k – кинетическая энергия электрона (позитрона).

Выразим из формулы (1) энергию фотона

$$\varepsilon = m_0 c^2 + E_k. \quad (2)$$

Так как $\varepsilon = hc/\lambda$, то

$$\lambda = hc/\varepsilon, \quad (3)$$

где $h-$ постоянная Планка.

Подставим числовые значения физических величин в формулы (2) и (3) и выполним вычисления:

$$\varepsilon = 9{,}1 \cdot 10^{-31} \cdot \left(3{,}0 \cdot 10^8\right)^2 + 3{,}84 \cdot 10^{-14} \approx 1{,}20 \cdot 10^{-13}\,\text{Дж};$$

$$\lambda = 6{,}63 \cdot 10^{-34} \cdot 3{,}0 \cdot 10^8 / 1{,}20 \cdot 10^{-13} \approx 1{,}7 \cdot 10^{-12}\,\text{м}.$$

Ответ: $\varepsilon = 1{,}2 \cdot 10^{-13}$ Дж; $\lambda = 1{,}7 \cdot 10^{-12}$ м.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЫ

При выполнении контрольной работы необходимо соблюдать такие правила.

1. Контрольную работу следует выполнять шариковой ручкой или чернилами в обычной школьной тетради.
2. Каждая работа выполняется в отдельной тетради.
3. Условия задач в контрольной работе необходимо переписывать полностью без сокращений. Для замечаний рецензента следует оставлять поля шириной 3…4 см. Каждую задачу начинать с новой страницы.
4. В конце контрольной работы следует указать учебники и учебные пособия, которыми пользовался студент при решении задач. Это необходимо для того, чтобы рецензент в случае необходимости мог указать, что следует изучить студенту для завершения контрольной работы.
5. В том случае, если при рецензировании работы в решениях задач обнаружены ошибки, контрольная работа возвращается студенту для доработки. Студент должен изучить все замечания рецензента, уяснить свои ошибки и внести исправления. Если повторная работа выполнена в другой тетради, то она обязательно представляется вместе с проверенной работой.
6. Если при решении отдельных задач встречаются затруднения, и вы не можете решить их самостоятельно, оформите работу, изложив ваши соображения и затруднения. Такая работа будет проверена, и письменная консультация рецензента поможет вам найти правильное решение.
7. Зачет по контрольной работе может быть получен только после собеседования с преподавателем по существу решения задач, входящих в контрольную работу. Собеседование проводится на кафедре физики в течение семестра и в период лабораторно-экзаменационной сессии.

8. При оформлении контрольной работы следует руководствоваться правилами, изложенными в стандарте АГТУ СТО 01.04 – 2005 [5].

КОНТРОЛЬНАЯ РАБОТА № 5

Контрольная работа включает решение восьми задач. Вариант контрольной работы выбирается по последней цифре шифра студента, номера задач – по таблице. Справочные данные, необходимые при решении задач, приведены в приложении.

Таблица
Варианты контрольной работы

Вариант	Номера задач							
1	1	11	21	31	41	51	61	71
2	2	12	22	32	42	52	62	72
3	3	13	23	33	43	53	63	73
4	4	14	24	34	44	54	64	74
5	5	15	25	35	45	55	65	75
6	6	16	26	36	46	56	66	76
7	7	17	27	37	47	57	67	77
8	8	18	28	38	48	58	68	78
9	9	19	29	39	49	59	69	79
0	10	20	30	40	50	60	70	80

1. Атом водорода в основном состоянии поглотил квант света с длиной волны $\lambda = 1215\ \overset{o}{A}$. Определить радиус электронной орбиты возбужденного атома водорода.

2. Какую работу следует совершить, чтобы удалить электрон со второй орбиты атома водорода за пределы притяжения электрона ядром?

3. Определить частоту света, излучаемого ионом He^{+} при переходе его на энергетический уровень с главным квантовым числом $n = 2$, если радиус орбиты электрона при этом уменьшился в 9 раз.

4. Найти период T обращения электрона на первой боровской орбите атома водорода и его угловую скорость ω.

5. На какой орбите скорость электрона в атоме водорода равна 734 км/с?

6. Фотон, соответствующий длине волны 0,020 мкм, выбил электрон из невозбужденного атома водорода. Вычислить скорость электрона за пределами атома.

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

8. У какого водородоподобного иона разность длин волн первых линий серий Бальмера и Лаймана равна 59,3 нм?

9. Покоившийся атом водорода испустил фотон, соответствующий первой линии серии Лаймана. Какую скорость приобрел атом?

10. При переходе электрона в атоме водорода из возбужденного состояния в основное радиус орбиты электрона уменьшился в 16 раз. Определить длину волны излученного фотона.

11. Заряженная частица, ускоренная разностью потенциалов $\Delta\varphi = 200$ В, имеет длину волны де Бройля $\lambda = 2{,}02$ пм. Найти массу частицы m, если ее заряд численно равен заряду электрона.

12. Параллельный пучок электронов, прошедших ускоряющую разность потенциалов $\Delta\varphi = 1$кВ, падает на щель шириной $d = 4 \cdot 10^{-5}$ м. Определить ширину Δx изображения щели на люминесцентном экране, находящемся на расстоянии $l = 0{,}5$ м от щели. За ширину изображения щели принять расстояние между дифракционными минимумами первого порядка.

13. Какую энергию необходимо дополнительно сообщить электрону, чтобы его дебройлевская длина волны уменьшилась от 100 до 50 пм?

14. Вычислить длину волны де Бройля для молекулы серебра (Ag), движущейся со скоростью, совпадающей со средней квадратической скоростью молекул при температуре 27 $^{\circ}$С. Будет ли испытывать эта молекула дифракцию при прохождении через щель шириной 1 мм?

15. Протон обладает кинетической энергией 1 кэВ. Определить величину дополнительной энергии, которую необходимо ему сообщить для того, чтобы дебройлевская длина волны уменьшилась в три раза.

16. Электрон движется по окружности радиусом 0,5 см в однородном магнитном поле с индукцией $8 \cdot 10^{-3}$ Тл. Определить длину волны де Бройля электрона.

17. Какую ускоряющую разность потенциалов должен пройти электрон, чтобы длина волны де Бройля была равна 1,0 нм?

18. Вычислить длину волны де Бройля для электрона, движущегося по круговой орбите атома водорода, находящегося в основном состоянии.

19. Параллельный поток электронов, движущихся с одинаковой скоростью, падает нормально на диафрагму с узкой прямоугольной щелью шириной $a = 1{,}0$ мкм. Определить скорость этих электронов, если на экране, отстоящем от щели на расстоянии $l = 50$ см, ширина центрального дифракционного максимума $\Delta x = 0{,}36$ мм.

20. Вычислить длину волны де Бройля протона, прошедшего ускоряющую разность потенциалов $\Delta\varphi = 1000$ В.

21. Используя соотношение неопределенностей, оценить ошибки в определении скоростей α-частицы и шарика массой 0,1 мг, если координаты центров масс этих частиц могут быть установлены с неопределенностью 10 мкм.

22. Найти неопределенность в определении координаты электрона, движущегося в атоме водорода со скоростью $\upsilon = 1{,}5 \cdot 10^6$ м/с, если допускаемая неточность $\Delta\upsilon$ в определении скорости составляет 10% от ее величины. Сравнить полученную неточность с диаметром атома водорода, вычисленным по теории Бора для основного состояния, и указать, применимо ли понятие траектории в данном случае.

23. Электрон с кинетической энергией $E_k = 15$ эВ находится в металлической пылинке диаметром $d = 1$ мкм. Оценить (в процентах) относительную неточность $\Delta\upsilon/\upsilon$, с которой может быть определена скорость электрона.

24. Среднее время жизни атома в возбужденном состоянии $\tau = 1 \cdot 10^{-8}$ с. При переходе в основное состояние атом испустил фотон с длиной волны $\lambda = 0{,}5$ мкм. Оценить энергию фотона и неопределенность его длины волны.

25. Диаметр пузырька в жидководородной пузырьковой камере составляет величину порядка 10^{-7} м. Рассчитать неопределенность в определении скоростей электрона и α-частицы в такой камере, если неопределенность в определении координаты принять равной диаметру пузырька.

26. Оценить с помощью соотношения неопределенностей минимальную кинетическую энергию электрона, движущегося в области пространства размером $l = 0{,}1$ нм.

27. Оценить наименьшие ошибки, с которыми можно определить скорости электрона, протона и шарика массой 1 мг, если координаты частиц и центра тяжести шарика установлены с неопределенностью 1 мкм.

28. Альфа-частица находится в бесконечно глубокой одномерной прямоугольной «потенциальной яме». Используя соотношение неопределенностей, найти ширину «ямы» l, если известна минимальная энергия α-частицы $(E_{min} = 8$ МэВ$)$.

29. Ширина следа электрона по фотографии, полученной с помощью камеры Вильсона, составляет $\Delta x = 1{,}0 \cdot 10^{-3}$ м. Найти неопределенность в определении скорости электрона, если неопределенность в определении координаты принять равной ширине следа на фотографии.

30. В некоторый момент времени область локализации свободного электрона $\Delta x_0 = 0{,}10$ нм. Оценить ширину области локализации этого электрона спустя промежуток времени $t = 1{,}0$ с.

31. Электрон находится в одномерной прямоугольной «потенциальной яме» с бесконечно высокими «стенками». Найти ширину «ямы», если разность энергии между уровнями с $n_1 = 2$ и $n_2 = 3$ составляет $\Delta E = 0{,}30$ эВ.

32. Электрон в одномерной прямоугольной «потенциальной яме» шириной l находится в возбужденном состоянии $(n = 3)$. Определить, в каких точках интервала $0 < x < l$ плотность вероятности нахождения электрона равна 0. Найти вероятность пребывания электрона в области $l/3 < x < 2l/3$. Решение пояснить графиком.

33. Пси-функция основного состояния атома водорода имеет вид $\psi = A\exp(-r/r_0)$, где A – некоторая постоянная, r_0 – радиус первой боровской орбиты. Определить наиболее вероятное расстояние $r_{вер}$ электрона от ядра.

34. Частица находится в основном состоянии в одномерной прямоугольной «потенциальной яме» шириной l с абсолютно непроницаемыми «стенками». Найти вероятность пребывания частицы в области $l/3 < x < 2l/3$.

35. Какова ширина l одномерной «потенциальной ямы» с бесконечно высокими «стенками», если при переходе электрона со второго квантового уровня на первый излучается энергия 1 эВ? Как изменится излучаемая энергия, если l увеличится в 10 раз?

36. Частица в одномерной «потенциальной яме» шириной l находится в возбужденном состоянии $(n = 3)$. Определить, в каких точках в интервале $0 < x < l$ плотность вероятности нахождения частицы имеет минимальное и максимальное значения. Решение задачи пояснить рисунком.

37. Электрон находится в одномерной прямоугольной «потенциальной яме» с бесконечно высокими «стенками». Ширина «ямы» $l = 5\,\mathring{A}$. Определить наименьшую разность ΔE энергетических уровней электрона. Ответ выразить в электрон-вольтах.

38. Волновая функция, описывающая движение электрона в основном состоянии атома водорода, имеет вид $\psi = A\exp(-r/r_0)$, где A – некоторая постоянная, r_0 – радиус первой боровской орбиты. Вычислить вероятность того, что электрон в атоме водорода находится от ядра на расстоянии, превышающем r_0.

39. Электрон находится в одномерной прямоугольной «потенциальной яме» с бесконечно высокими «стенками». Ширина «ямы» $l = 1$ см. В каких точках в интервале $0 < x < l$ плотность вероятности нахождения электрона на первом и втором энергетических уровнях одинакова? Вычислить плотность вероятности для этих точек. Решение задачи пояснить рисунком.

40. Частица находится в одномерной прямоугольной «потенциальной яме» с бесконечно высокими «стенками». Найти массу частицы, если ширина ямы $l = 2{,}5$ нм, а разность энергий 3-го и 2-го энергетических уровней $\Delta E = 0{,}30$ эВ.

41. Определить уровень Ферми при абсолютном нуле E_{F_0} для меди, полагая, что на каждый атом меди приходится один свободный электрон.

42. Во сколько раз увеличится при повышении температуры от 300 до 350 К электропроводность собственного полупроводника, ширина запрещенной зоны которого $\Delta E = 0{,}300$ эВ?

43. Найти число свободных электронов, приходящихся на один атом натрия при $T = 0$ К, если уровень Ферми для натрия $E_{F_0} = 3{,}07$ эВ.

44. Металл находится при температуре $T = 0$ К. Определить, во сколько раз число электронов со скоростями от $0{,}5\upsilon_{max}$ до υ_{max} больше числа электронов со скоростями от 0 до $0{,}5\upsilon_{max}$.

45. При нагревании полупроводника, обладающего собственной проводимостью, от температуры $t_1 = 0$ °С до температуры $t_2 = 10$ °С его сопротивление уменьшается в 2,28 раза. Определить ширину запрещенной зоны полупроводника.

46. Во сколько раз число свободных электронов, приходящихся на один атом металла при $T = 0\,\text{K}$, больше в алюминии, чем в меди, если уровни Ферми соответственно равны $E_{F_{\text{Al}}} = 11{,}7$ эВ и $E_{F_{\text{Cu}}} = 7{,}0$ эВ?

47. Определить долю свободных электронов в металле при температуре T = 0 K, энергии E которых заключены в интервале значений от $0{,}5\,E_{max}$ до E_{max}.

48. Найти температуру вырождения T_F, выше которой квантовые эффекты перестают быть существенными для калия, если принять, что на каждый атом приходится по одному свободному электрону.

49. Найти минимальную энергию образования пары электрон – дырка в чистом беспримесном полупроводнике, удельная электрическая проводимость которого возрастает в $n = 5$ раз при увеличении температуры от $T_1 = 300$ K до $T_2 = 400$ K.

50. Полагая, что на каждый атом алюминия в кристалле приходится по три свободных электрона, определить максимальную энергию E_{max} электронов при температуре $T = 0$ K.

51. Найти постоянную распада и среднее время жизни радиоактивного $^{55}_{27}\text{Cu}$, если известно, что его активность уменьшается на 4,0% за час. Продукт распада нерадиоактивен.

52. Какая доля радиоактивных ядер, период полураспада которых 71,3 дня, распадается за месяц?

53. Определить возраст древних деревянных предметов, если известно, что удельная активность изотопа $^{14}_{6}\text{C}$ в них составляет 3/5 удельной активности этого изотопа в только что срубленных деревьях. Период полураспада ядер $^{14}_{6}\text{C}$ равен 5570 лет.

54. Активность некоторого радиоактивного вещества уменьшается в 2,5 раза за 7,0 суток. Найти период полураспада этого вещества.

55. Некоторый радиоактивный изотоп имеет постоянную распада $\lambda = 4 \cdot 10^{-7}\ \text{с}^{-1}$. Через какое время t распадается 75% первоначальной массы атомов m?

56. Из каждого миллиона атомов радиоактивного изотопа каждую секунду распадается 200 атомов. Определить период полураспада этого вещества.

57. В кровь человека ввели небольшое количество раствора, содержащего $^{24}_{11}\text{Na}$ с активностью $A_0 = 2{,}1 \cdot 10^3$ Бк. Активность 1 см^3 крови, взя-

той через $t = 5{,}0$ ч после этого, оказалась равной $A = 0{,}28$ Бк / см^3. Найти объем крови человека.

58. Счетчик Гейгера, установленный вблизи препарата радиоактивного изотопа серебра, регистрирует поток β- частиц. При первом измерении поток Φ_1 частиц был равен 87 с$^{-1}$, а по истечении суток поток Φ_2 оказался равным 22 с$^{-1}$. Определить период полураспада этого изотопа.

59. За один год начальное количество радиоактивного изотопа уменьшилось в три раза. Во сколько раз оно уменьшится за два года?

60. Найти активность A массы $m = 1$ г радия, период полураспада которого 1620 лет.

61. Сколько теплоты выделяется при образовании одного грамма ${}^{4}_{2}\mathrm{He}$ из дейтерия ${}^{2}_{1}\mathrm{H}$? Какая масса каменного угля с удельной теплотой сгорания 30 кДж/г эквивалентна в тепловом отношении полученной величине?

62. Атомное ядро, поглотившее γ- фотон с длиной волны $\lambda = 0{,}47$ пм, пришло в возбужденное состояние и распалось на отдельные нуклоны, разлетевшиеся в разные стороны. Суммарная кинетическая энергия нуклонов $E_k = 0{,}4$ МэВ. Определить энергию связи $E_{\text{св}}$ ядра.

63. При взрыве водородной бомбы протекает термоядерная реакция образования гелия из дейтерия и трития. Написать уравнение реакции. Найти энергию Q, выделяющуюся при этой реакции. Какую энергию можно получить при образовании 1 г гелия?

64. Найти среднюю энергию связи на один нуклон в ядре ${}^{16}_{8}\mathrm{O}$.

65. Считая, что в одном акте деления ядра ${}^{235}_{92}\mathrm{U}$ освобождается энергия 200 МэВ, определить энергию, выделяющуюся при сгорании одного килограмма изотопа ${}^{235}_{92}\mathrm{U}$, и массу каменного угля с удельной теплотой сгорания 30 кДж/г, эквивалентную в тепловом отношении одному килограмму ${}^{235}_{92}\mathrm{U}$.

66. При бомбардировке изотопа ${}^{6}_{3}\mathrm{Li}$ дейтронами образуются две α- частицы, при этом выделяется энергия $Q = 22{,}3$ МэВ. Зная массы дейтрона и α- частицы, найти массу изотопа ${}^{6}_{3}\mathrm{Li}$ (в а.е.м.).

67. Найти энергию связи ядер ${}^{3}_{2}\mathrm{He}$ и ${}^{3}_{1}\mathrm{He}$. Какое из этих ядер более устойчиво?

68. Найти минимальную энергию γ- кванта, достаточную для осуществления реакции разложения первоначально покоившегося дейтрона γ- лучами: ${}^{2}_{1}\mathrm{H} + h\nu \to {}^{1}_{1}\mathrm{H} + {}^{1}_{0}n$.

69. Определить суммарную кинетическую энергию E_k ядер, образовавшихся в результате реакции ${}^{13}_{6}\text{C} + {}^{2}_{1}\text{H} \to {}^{11}_{5}\text{B} + {}^{4}_{2}\text{He}$. Кинетическая энергия дейтрона $E_{k\,\text{H}} = 1{,}5$ МэВ. Ядро-мишень ${}^{13}_{6}\text{C}$ считать неподвижным.

70. Найти энергию ядерной реакции ${}^{14}_{7}\text{N} + {}^{4}_{2}\text{He} \to {}^{1}_{1}\text{H} + {}^{17}_{8}\text{O}$. Освобождается или поглощается энергия при этой реакции?

71. Остановившийся π^{+}- мезон распался на мюон и нейтрино. Найти кинетическую энергию мюона и нейтрино.

72. Найти средний путь, проходимый π^{0}- мезонами, кинетическая энергия которых в $\eta = 1{,}2$ раза превышает их энергию покоя. Среднее время жизни очень медленных π^{0}- мезонов $\tau = 25{,}5$ нс.

73. Позитрон с кинетической энергией $E_k = 750$ кэВ налетает на покоящийся свободный электрон. В результате аннигиляции возникают два γ- кванта с одинаковыми энергиями. Определить угол между направлениями их разлета.

74. Ядро изотопа ${}^{13}_{7}\text{N}$ выбросило позитрон с кинетической энергией 1 МэВ. Пренебрегая кинетической энергией ядра отдачи, определить кинетическую энергию нейтрино, выброшенного вместе с позитроном.

75. Фотон с энергией 3 МэВ превратился в пару электрон-позитрон. Принимая, что кинетическая энергия частиц одинакова, определить кинетическую энергию каждой частицы.

76. Покоящийся нейтрон распадается по схеме ${}^{1}_{0}n \to {}^{1}_{1}p + {}^{0}_{-1}e + {}^{0}_{0}\tilde{\nu}_e$. Определить суммарную кинетическую энергию всех частиц, возникающих в процессе распада нейтрона. Массой покоя антинейтрино пренебречь.

77. Отрицательно заряженный мюон испытывает упругое лобовое столкновение с покоящимся электроном. Найти кинетическую энергию электрона отдачи, если кинетическая энергия мюона до столкновения $E_k = 100$ МэВ.

78. Отрицательные π^{-}- мезоны с кинетической энергией $E_k = 100$ МэВ пролетают от места рождения до распада в среднем расстояние $l = 11$ м. Найти собственное время жизни этих мезонов.

79. Нейтрон и антинейтрон соединяются, образуя два одинаковых фотона. Найти энергию $h\nu$ каждого из фотонов, считая, что начальная кинетическая энергия частиц ничтожно мала.

80. Альфа-частица с кинетической энергией $E_k = 7{,}0$ МэВ испытала упругое соударение с первоначально покоившимся ядром ${}^6_3\mathrm{Li}$. Какую кинетическую энергию получило ядро ${}^6_3\mathrm{Li}$, если угол между направлениями разлета обеих частиц $\varphi = 60^{\circ}$?

ПРИЛОЖЕНИЕ

Таблица 1

Некоторые физические постоянные (округленные значения)

Физическая постоянная	Обозначение	Числовое значение	Единица измерения
Скорость света в вакууме	c	$3{,}000 \cdot 10^{8}$	м/с
Постоянная Планка	h	$6{,}626 \cdot 10^{-34}$	Дж·с
Постоянная Больцмана	k	$1{,}381 \cdot 10^{-23}$	Дж/К
Постоянная Авогадро	N_{A}	$6{,}022 \cdot 10^{23}$	моль$^{-1}$
Молярная газовая постоянная	R_0	8,314	Дж/(моль·К)
Постоянная Ридберга	R	$1{,}097 \cdot 10^{7}$	м$^{-1}$
Электрическая постоянная	ε_0	$8{,}854 \cdot 10^{-12}$	Ф/м
Элементарный электрический заряд	e	$1{,}602 \cdot 10^{-19}$	Кл
Радиус первой боровской орбиты	r_0	$0{,}529 \cdot 10^{-10}$	м

Таблица 2

Массы покоя некоторых частиц

Частица	Масса	
	а. е. м.	кг
Электрон	$5{,}48580 \cdot 10^{-4}$	$9{,}10953 \cdot 10^{-31}$
Протон	1,00728	$1{,}67265 \cdot 10^{-27}$
Нейтрон	1,00867	$1{,}67495 \cdot 10^{-27}$
Дейтрон	2,01354	$3{,}34362 \cdot 10^{-27}$
Альфа–частица	4,00149	$6{,}64473 \cdot 10^{-27}$
Положительный π^{+} - мезон	0,1498	$2{,}488 \cdot 10^{-28}$
Отрицательный π^{-} - мезон	0,1498	$2{,}488 \cdot 10^{-28}$
Нейтральный π^{0} - мезон	0,1449	$2{,}406 \cdot 10^{-28}$
Нейтрино	0	0
Мюон	0,1134	$1{,}884 \cdot 10^{-28}$

Таблица 3

Массы некоторых нейтральных атомов

Изотоп	Масса	
	а. е. м.	кг
$^{1}_{1}H$	1,00783	$1{,}67357\cdot10^{-27}$
$^{2}_{1}H$	2,01410	$3{,}34454\cdot10^{-27}$
$^{3}_{1}H$	3,01605	$5{,}00835\cdot10^{-27}$
$^{3}_{2}He$	3,01603	$5{,}00832\cdot10^{-27}$
$^{4}_{2}He$	4,00260	$6{,}64658\cdot10^{-27}$
$^{6}_{3}Li$	6,01512	$9{,}98850\cdot10^{-27}$
$^{13}_{6}C$	13,0033	$2{,}15929\cdot10^{-26}$
$^{13}_{7}N$	13,0057	$2{,}15969\cdot10^{-26}$
$^{14}_{7}N$	14,0031	$2{,}32530\cdot10^{-26}$
$^{16}_{8}O$	15,9949	$2{,}65606\cdot10^{-26}$
$^{17}_{8}O$	16,9991	$2{,}82282\cdot10^{-26}$
$^{27}_{13}Al$	26,9815	$4{,}48047\cdot10^{-26}$
$^{235}_{92}U$	235,044	$3{,}90306\cdot10^{-25}$

Таблица 4

Плотности некоторых твердых тел

Твердое тело	Плотность, кг/м^3
Алюминий	$2{,}70\cdot10^{3}$
Калий	$0{,}87\cdot10^{3}$
Медь	$8{,}93\cdot10^{3}$
Натрий	$0{,}97\cdot10^{3}$

Таблица 5

Коэффициенты перевода некоторых внесистемных единиц в единицы СИ

Величина	Соотношение с единицами СИ
Длина	$1\,\mathring{A} = 10^{-10}$ м
Масса	1 а.е.м. $= 1{,}66057\cdot10^{-27}$ кг
Энергия	1 эВ $= 1{,}602\cdot10^{-19}$ Дж

Таблица 6

Некоторые постоянные числа и математические формулы

Постоянные числа	Математические формулы
$e = 2{,}7183$	$I = \int_0^\infty x^{2k} e^{-\beta x^2} dx = \frac{1 \cdot 3 \cdot 5 \ldots (2k-1)}{2^{(k+1)}} \sqrt{\frac{\pi}{\beta^{(2k+1)}}}$
$\pi = 3{,}1416$	$I = \int_0^\infty x^k e^{-\beta x} dx = \frac{k!}{\beta^{(k+1)}}$
$\sqrt{\pi} = 1{,}7725$	$\int x^2 e^{-\beta x} dx = -e^{-\beta x} \left(\frac{x^2}{\beta} + \frac{2x}{\beta^2} + \frac{2}{\beta^3} \right)$

Примечание. В таблице $k! = 1 \cdot 2 \cdot 3 \cdot \ldots \cdot (k-1)k$; k – любое целое число; β – константа $(\beta > 0)$.

Таблица 7

Множители и приставки для образования кратных и дольных единиц системы СИ и их наименования

Приставка	Множитель	Обозначение приставки
пико	10^{-12}	п
нано	10^{-9}	н
микро	10^{-6}	мк
милли	10^{-3}	м
кило	10^{3}	к
мега	10^{6}	М

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Курс физики [Текст]: Учебник для вузов / Под ред. В.Н.Лозовского – 4 - е изд., стереотипное – СПб.: Лань, 2006. Т.1-2.
2. Савельев И.В. Курс общей физики [Текст]: Учеб. пособие для втузов / И.В.Савельев – М.: Астрель; АСТ, 2001. Т.1-5.
3. Трофимова Т.И. Курс физики [Текст]: Учеб. пособие для вузов / Т.И.Трофимова – 7 - е изд., стереотипное – М.: Высш. шк., 2002. – 542 с.
4. Чертов А.Г. Задачник по физике [Текст]: Учеб. пособие для втузов / А.Г.Чертов, А.А.Воробьев – 7 - е изд., перераб. и доп. – М.: Изд-во физ.-мат. литературы, 2003. – 640 с.
5. СТО АГТУ 01.04 – 2005. Работы студентов. Общие требования и правила оформления [Текст]. – Введ. 11.01.2006. – Архангельск: Изд-во Архан. гос. техн. ун-та, 2006. – 104 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Андрей Иванович Аникин

АТОМНАЯ ФИЗИКА

Методические указания
к выполнению контрольной работы № 5
для студентов-заочников
инженерно-технических специальностей

Компьютерный набор И.М.Филиной