ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ВОЗДУШНОГО ТРАНСПОРТА

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ» (МГТУ ГА)

Кафедра физики

М.А. Бутюгин, А.А. Куколева, Т.Ю. Истомина

ФИЗИКА

ЧАСТЬ VI

ЭЛЕМЕНТЫ КВАНТОВОЙ МЕХАНИКИ. ФИЗИКА АТОМНОГО ЯДРА И ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ

Учебно-методическое пособие
по изучению дисциплины и контрольные задания

для студентов
всех направлений и специальностей
заочной формы обучения

Москва
ИД Академии Жуковского
2020

УДК 530.145
ББК 53
Б93

Рецензент:
Новиков С.Н. – канд. техн. наук, профессор

Бутюгин М.А.
Б93 Физика. Часть VI. Элементы квантовой механики. Физика атомного ядра и элементарных частиц [Текст] : учебно-методическое пособие по изучению дисциплины и контрольные задания / М.А. Бутюгин, А.А. Куколева, Т.Ю. Истомина. – М.: ИД Академии Жуковского, 2020. – 32 с.

Данное учебно-методическое пособие издается в соответствии с рабочей программой учебной дисциплины «Физика» по учебному плану для студентов всех направлений и специальностей заочной формы обучения.

В учебно-методическом пособии в соответствии с рабочей программой курса физики изложены ключевые вопросы и основные законы раздела «Квантовая механика». Каждая тема снабжена подробными примерами решения задач. Приведены списки основной и дополнительной литературы, рекомендуемой для самостоятельного изучения. Сформулированы требования, предъявляемые к студенту ЗО при выполнении контрольного домашнего задания, а также дана информация для обратной связи с обучающей кафедрой. В пособии представлен полный набор задач для всех вариантов контрольного домашнего задания по разделу.

Рассмотрено и одобрено на заседаниях кафедры 31.08.2020 г. и методического совета 31.08.2020 г.

УДК 530.145
ББК 53

В авторской редакции

Подписано в печать 13.11.2020 г.
Формат 60x84/16 Печ. л. 2 Усл. печ. л. 1,86
Заказ № 665/0818-УМП20 Тираж 100 экз.

Московский государственный технический университет ГА
125993, Москва, Кронштадтский бульвар, д. 20

Издательский дом Академии имени Н. Е. Жуковского
125167, Москва, 8-го Марта 4-я ул., д. 6А
Тел.: (495) 973-45-68
E-mail: zakaz@itsbook.ru

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ

В процессе заочного обучения выполнение домашних контрольных заданий является необходимой практической основой при изучении курса физики. Решение: задач способствует выработке навыков самостоятельной работы, формированию компетенций, используемых в творческой работе, учит анализировать физические явления, отвлекаясь от случайных и несущественных деталей, развивая абстрактное мышление.

Предлагаемое издание содержит методические указания к решению типовых задач по шестой части курса «Элементы квантовой механики. Физика твердого тела. Физика атомного ядра и элементарных частиц». При составлении вариантов заданий не преследовалась цель полного охвата всех типов задач по той или иной теме. Распределение задач по вариантам обеспечивает студентам индивидуальные наборы наиболее типичных для каждой темы задач. Пособие содержит краткие теоретические сведения, основные расчетные формулы и справочные материалы. Кроме того, приводятся примеры решения задач по всем разделам изучаемого курса.

При оформлении контрольных работ студенту-заочнику необходимо руководствоваться следующими правилами:

1.Контрольные работы выполняются шариковой ручкой с черной или синей пастой в обычной школьной тетради (12 страниц, в клетку), на обложке которой приводятся сведения по следующему образцу:

Контрольная работа по физике № 6
Вариант № 54

Студентки заочного факультета МГТУ ГА
Савичевой Е.Д.
Шифр АК – 037345

Адрес: г. Москва, ул. Багрицкого,
дом 8, кв.7

2. Выбор варианта задания осуществляется в соответствии с присвоенным студенту на период обучения номером **Шифра**.

3. Студент-заочник должен решить **задачи** того варианта, номер которого совпадает с последними **двумя** цифрами его **Шифра**. Задачи варианта выбираются по **таблицам, размещенным на вкладке заочного факультета на сайте**

университета («контрольные задания и консультации»), где они представлены для каждого направления и семестра обучения в отдельных файлах:

4. Условия задач переписываются в тетрадь **полностью, без сокращений**. Для замечаний преподавателя на страницах тетради обязательно оставляются поля шириной 4-5 см.

5. Решение: задач и используемые формулы должны сопровождаться пояснениями.

6. Решение: задач рекомендуется сначала сделать в общем виде, а затем произвести численные расчеты.

7. В конце контрольной работы указывается, какими учебными пособиями студент пользовался при выполнении контрольной работы (название, авторы, год издания).

Задания, оформленные с нарушением этих требований или содержащие ошибки, возвращаются на доработку, которая производится в той же тетради.

Для самостоятельного изучения курса Физики ниже приводится список литературы.

Рекомендуемая литература

Основная:

1. Трофимова Т.И. **Курс физики.** – М.: Высш. шк., 2010-2019. 405 с.

Дополнительная:

1. Савельев И.В. **Курс общей физики**.Т. 3: Квантовая оптика. Атомная физика. Физика твердоготела. Физика атомного ядра и элементарных частиц.-М.: Наука, 2006-2019.

2. Новиков С.М. Сборник заданий по общей физике: Учебное пособие для студентов вузов. – М.: ООО «Издательство «Мир и образование», 2016. - 512 с.

Электронный адрес кафедры физики МГТУ ГА: kf@mstuca.ru

ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ И ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

Тема 1. ЭЛЕМЕНТЫ КВАНТОВОЙ МЕХАНИКИ

1.1. Корпускулярно-волновой дуализм

Корпускулярно-волновой дуализм - это теоретическое положение, предполагающее, что все материальные объекты природы обладают одновременно корпускулярными и волновыми свойствами.

А. Эйнштейн ввел понятие частиц света - ***фотонов***, несущих ***квант*** (порцию) энергии $\varepsilon_ф$ и обладающих импульсом $p_ф$. Эти характеристики фотонов связаны с волновыми характеристиками электромагнитного излучения - частотой ν и длиной волны λ формулами

$$\varepsilon_ф = h\nu \quad \text{и} \quad p_ф = \frac{h}{\lambda}\vec{n}, \tag{1.1}$$

где $h = 6{,}63\cdot 10^{-34}$Дж·с - ***постоянная Планка***, $\vec{n}$ - единичный вектор в направлении движения фотона.

Наличие у электромагнитных волн свойств частиц побудило ***Луи де Бройля*** высказать обратную ***гипотезу*** о том, что любая движущаяся частица с энергией E и импульсом $\vec{p}$ обладает волновыми свойствами, которые соответствуют длине волны и частоте, определяемым по формулам

$$\lambda_Б = \frac{h}{p} \quad \text{и} \quad \nu_Б = \frac{E}{h}. \tag{1.2}$$

Особенности поведения микрочастиц, в отличии от классических объектов, описывают ***соотношения неопределенностей***, установленные ***В. Гейзенбергом***. Математически соотношения неопределенностей имеют вид неравенств, например

$$\Delta x \Delta p_x \geq \frac{\hbar}{2}, \tag{1.3}$$

где $\hbar = \dfrac{h}{2\pi}$, Δx и Δp_x - неопределенности измерений значений координаты x и сопряженной с ней компоненты импульса p_x. Аналогичные соотношения справедливы и для других пар – y и p_y, z и p_z, энергии E и времени t.

Примеры решения задач

Задача 1. Сравните длину волны де Бройля молекулы водорода с ее диаметром. Считайте, что молекула имеет скорость, равную средней квадратичной скорости молекул газообразного водорода при температуре 0 °С. Диаметр молекулы водорода d = 0,27нм.

Решение:

Из молекулярно–кинетической теории следует, что средняя квадратичная скорость молекул газа определяется по формуле

$$v_{\text{ср.кв}} = \sqrt{\frac{3kT}{m}},$$

где $k = 1{,}38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – постоянная Больцмана, $T = 273$ К – абсолютная температура газа, m – масса молекулы газа. С учетом этого формулу де Бройля (1.2) запишем в виде

$$\lambda_Б = \frac{h}{mv_{ср.кв.}} = \frac{h}{\sqrt{3mkT}} = h\sqrt{\frac{N_A}{3MRT}}$$

где $N_A = 6{,}02 \cdot 10^{23}$ моль$^{-1}$ – число Авогадро, $M = 0{,}002$ кг/моль – молярная масса водорода.

После подстановки этих величин и расчета получим $\lambda_Б \approx 0{,}11$ нм. Эта величина одного порядка с размерами молекулы водорода.

Задача 2. Электрон локализован в области бесконечного плоского слоя, толщина которого $l = 25$ нм. Используя соотношение неопределенностей, оцените кинетическую энергию электрона, при которой ее относительная неопределенность будет порядка $\eta = 0{,}01$.

Решение:

При локализации частицы неопределенность ее координаты примерно равна размерам области локализации. Будем считать, что $\Delta x \approx l/2$, $\Delta y \to \infty$, $\Delta z \to \infty$, а соотношение неопределенностей (1.3) для оценочных расчетов запишем со знаком приблизительного равенства:

$$\Delta x \Delta p_x \approx \frac{\hbar}{2}. \quad \text{Тогда } \Delta p_x \approx \frac{\hbar}{2\Delta x} = \frac{\hbar}{l}, \;\; \Delta p_y \approx 0 \;\text{ и }\; \Delta p_z \approx 0.$$

Для определения взаимосвязи неопределенности кинетической энергии ΔT с неопределенностью импульса возьмем дифференциалы от левой и правой частей нерелятивистской формулы для кинетической энергии $T = p^2/2m$ (считая, что $p \equiv p_x$)

$$\mathrm{d}T = \frac{p_x \,\mathrm{d}\, p_x}{m}.$$

В приближенных расчетах можно считать, что

$$\Delta T = \frac{p_x \Delta p_x}{m}.$$

Тогда относительную неопределенность кинетической энергии запишем в виде

$$\eta = \frac{\Delta T}{T} = \frac{p_x \Delta p_x 2m}{m p_x^{\;2}} = \frac{2\Delta p_x}{p_x}.$$

После подстановки в эту формулу значения неопределенности импульса получим $\eta \approx \dfrac{2\hbar}{p_x l}$.

Отсюда определим импульс $p_x \approx \dfrac{2\hbar}{\eta l}$ и искомое значение кинетической энергии

$$T = \frac{p_x^{\,2}}{2m} \approx \frac{4\hbar^2}{2m\eta^2 l^2} = \frac{2\hbar^2}{m\eta^2 l^2}\ .$$

Где масса электрона $m = 9{,}1 \cdot 10^{-31}$ кг. Произведем расчет

$$T \approx \frac{8 \cdot (1{,}05 \cdot 10^{-34})^2}{9 \cdot 10^{-31} \cdot 10^{-4} \cdot 625 \cdot 10^{-18}}\ Дж \approx 3{,}9 \cdot 10^{-19}\ Дж \approx 2{,}4\ \ эВ\,.$$

1.2. Квантовые состояния частиц

В классической механике состояние частицы задается радиус-вектором $\vec{r}$ и импульсом $\vec{p}$, изменение которых определяется с помощью второго закона Ньютона. Каждая частица имеет вполне определённую траекторию. В физике микромира, соотношения неопределенностей ограничивают классическое определение состояния, понятие траектории частицы утрачивает смысл, и можно говорить лишь о ***вероятности*** обнаружения частицы в той или иной области пространства. Эта вероятность рассчитывается через ***волновую функцию*** (пси-функцию) $\Psi(x,y,z,t)$, которая является решением уравнения Шредингера и задает квантовое ***состояние микрочастицы***. Для стационарных (не зависящих от времени) состояний ***уравнение Шредингера*** имеет вид

$$-\frac{\hbar^2}{2m}\nabla^2\psi + U\psi = E\psi \quad \text{или} \quad \nabla^2\psi + \frac{2m}{\hbar^2}\left(E - U\right)\psi = 0\,, \tag{1.4}$$

где E – полная энергия, а U – потенциальная энергия микрочастицы, и

$$\nabla^2\psi = \Delta\psi = \frac{\partial^2\psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2\psi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2\psi}{\partial z^2}\,.$$

Вероятность $\mathrm{d}W$ обнаружения частицы в элементе объема $\mathrm{d}V$ в окрестности некоторой точки с координатами $\{x,y,z\}$ равна

$$\mathrm{d}W = |\Psi(x,y,z,t)|^2\mathrm{d}V = |\psi(x,y,z)|^2\,\mathrm{d}V = \rho(x,y,z)\mathrm{d}V, \tag{1.5}$$

где величина $\rho(x,y,z) = |\psi(x,y,z)|^2$ называется плотностью вероятности.

Для определения вероятности W обнаружения частицы в объеме V_0 необходимо проинтегрировать это выражение:

$$W = \int\limits_{V_0} \left|\psi\left(x,y,z\right)\right|^2 \mathrm{d}V\,. \tag{1.6}$$

Соответственно, в одномерном случае, вероятность обнаружения частицы в пределах области $[x_1,x_2]$ равна

$$W = \int_{x_1}^{x_2} \left|\psi(x)\right|^2 \mathrm{d}\,x, \tag{1.7}$$

а в случае сферической симметрии задачи вероятность обнаружения частицы в сферическом слое в пределах значений расстояний от центра $r_1 \div r_2$.

$$W = \int_{r_1}^{r_2} \left|\psi(r)\right|^2 4\pi r^2 \,\mathrm{d}\,r. \tag{1.8}$$

Учитывая, что вероятность достоверного события равна 1, можно написать ***условие нормировки*** для ψ функции

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \left|\psi(x)\right|^2 \mathrm{d}\,x = 1. \tag{1.9}$$

Таким образом, физический смысл нормировки отражает реальность существования частицы во всей области, где она может находиться.

Вид волновой функции в конкретной задаче находится с помощью стационарного уравнения Шредингера по заданной зависимости потенциальной энергии U от координат и граничным условиям для Ψ-функции, с учетом свойств самой Ψ-функции:

В частности, уравнения Шредингера для частицы массой m, локализованной в ***одномерной прямоугольной потенциальной яме*** шириной l и с абсолютно непроницаемыми (бесконечно высокими) стенками, дает набор собственных функций ψ_n и собственных значений полной энергии E_n:

$$\psi_n = \sqrt{\frac{2}{l}} \sin\frac{\pi n x}{l}, \qquad E_n = \frac{\pi^2 \hbar^2}{2ml^2} n^2, \tag{1.10}$$

где n = 1, 2, 3,...∞ .

Пример решения задачи

Задача 3. Поток электронов проходит через две узкие щели А и В, образуя на экране Э дифракционную картину. Интенсивность ее в минимуме равна I_0. Какова интенсивность в максимуме, если щель В пропускает в 4 раза больше электронов, чем щель А.

Решение:

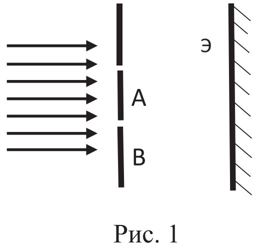

Рис. 1

Так как щель А пропускает в 4 раза больше электронов, то $\psi_B^2 = 4\psi_A^2$ или $\psi_B = 2\psi_A$. Интенсивность пропорциональна плотности вероятности обнаружения электронов, которая в максимуме равна квадрату суммы волновых функций, а в минимуме – квадрату их разности:

$$I_{\max} \sim (\psi_{\text{A}} + \psi_{\text{B}})^2 = 9\psi_A^2,$$

$$I_{\min} \sim (\psi_{\text{A}} - \psi_{\text{B}})^2 = \psi_A^2.$$

Сравнивая эти соотношения, получим $I_{\max} = 9I_0$.

Тема 2. ФИЗИКА АТОМОВ

2.1. Атом водорода

Атом является наименьшей частью химического элемента, в которой сохраняется его индивидуальность. Опыты Э. Резерфорда доказали, что атом состоит из положительно заряженного ядра, в котором сосредоточена почти вся масса, и движущихся вокруг него электронов.

Решение уравнения Шредингера с учетом взаимодействия в такой системе зарядов дает собственные функции, содержащие целочисленные параметры n, l, m, *называемые* ***квантовыми числами*****:**

$$\psi = \psi_{n,l,m}\,(r, \theta, \varphi),$$

где r, θ, φ – сферические координаты.

Квантовые числа могут принимать следующие значения:

- ***главное*** квантовое число $n = 1, 2, 3, \ldots \infty$;
- ***азимутальное (орбитальное)*** квантовое число $l = 0, 1, 2, \ldots, n\text{-}1$; (2.1)
- ***магнитное*** квантовое число $m = 0, \pm 1, \pm 2, \ldots, \pm l$.

В атоме водорода эти числа определяют, соответственно, значение энергии электрона E_n, модуля момента импульса M и проекции момента импульса электрона на физически выделенную ось (например, 0Z) M_z:

$$E_n = -\left(\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\right)^2 \frac{m_e e^4}{2\hbar^2} \frac{1}{n^2}\ ; \tag{2.2}$$

$$M = \hbar\sqrt{l(l+1)}\ ; \tag{2.3}$$

$$M_z = m\hbar. \tag{2.4}$$

Из экспериментальных фактов следует, что у электрона имеется также собственный момент импульса – ***спин***, проекция которого M_{sz} на физически выделенную ось определяется формулой

$$M_{sz} = m_s\hbar, \tag{2.5}$$

где $m_s = \pm s$, $s = \dfrac{1}{2}$ – спиновое квантовое число.

Набор из четырех квантовых чисел $\{n, l, m, m_s\}$ задает одно состояние электрона с определенными значениями энергии, орбитального момента импульса, его проекции и проекции спина (см. формулы 2.2-2.5).

В атомной физике принята система условных обозначений состояния электрона с различными значениями орбитального квантового числа l:

$l = 0$ – *s*-состояние,

$l = 1$ – *p*-состояние,

$l = 2$– d-состояние,

$l = 3$ – *f*-состояние,

$l = 4$ – *g*-состояние и далее по алфавиту.

Значение главного квантового числа n указывается цифрой перед условным обозначением квантового числа l. Например, состояние электрона с $n = 4$ и $l = 2$ обозначается 4*d*. С учетом этих обозначений уровни энергии в атоме водорода удобно изображать в виде схемы, приведенной на рис. 2.

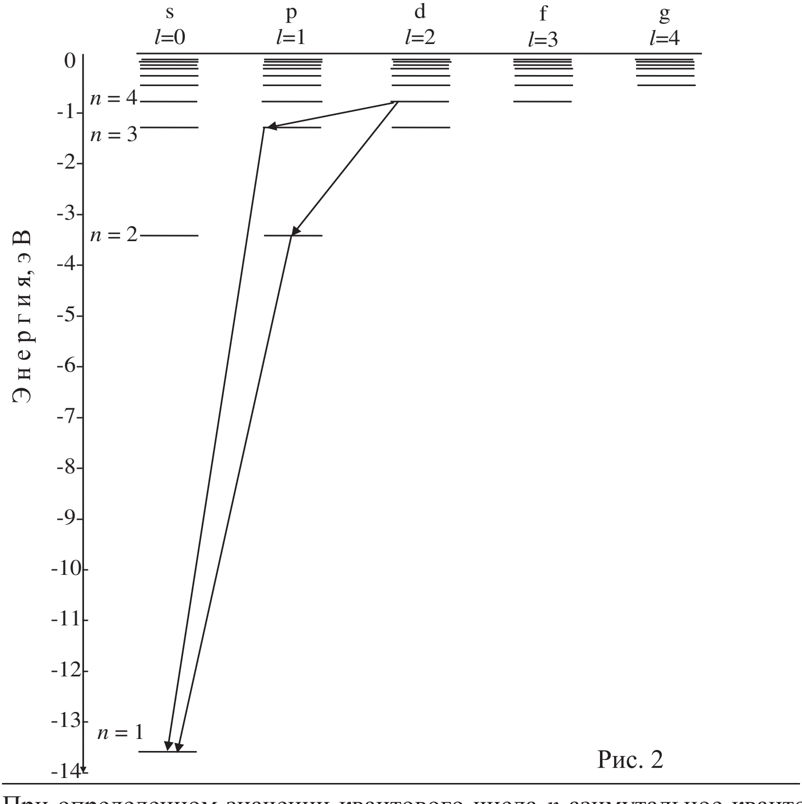

Рис. 2

При определенном значении квантового числа n азимутальное квантовое число l может принимать n значений от 0 до $(n - 1)$, а при каждом значении l квантовое число m может принимать $2l+1$ значение: $0, \pm 1, \pm 2, \ldots, \pm l$.

Кратностью вырождения называется число различных состояний электрона с одинаковым значением энергии. В атоме водорода энергия зависит только от n. Поэтому с учетом спинового квантового числа (для него 2 варианта значений), кратность вырождения состояния с квантовым числом n равна

$$\sum_{l=0}^{n-1} 2(2l+1) = 2n^2. \qquad (2.6)$$

При переходе электрона с одного уровня энергии на другой происходит испускание или поглощение кванта энергии в виде фотона, энергия которого согласно постулату Бора равна разности энергий уровней, между которыми произошел переход:

$$h\nu = E_i - E_j. \qquad (2.7)$$

Фотон также обладает собственным моментом импульса, или спином, равным 1. Закон сохранения момента импульса накладывает ограничения на переходы электронов между состояниями в виде ***правила отбора***: возможны только переходы между состояниями, для которых выполняется условие:

$$\Delta l = \pm 1. \qquad (2.8)$$

На рис. 2 в качестве примера показаны разрешенные переходы из $4d$ в $1s$ состояние.

Пример решения задач

Задача 4. Электрон в атоме водорода находится в $4d$- состоянии. Какой максимальный квант энергии может выделиться при его самопроизвольном переходе в основное состояние?

Решение:

Правило отбора (2.8) накладывает ограничение на прямой переход из $4d$ в $1s$-состояние, т.к. при этом $\Delta l = 2$. Поэтому переход возможен только в два этапа: из $4d$ в какое-либо p-состояние, а затем в основное $1s$. Соответственно при переходе будет выделено два кванта энергии. Возможными являются переходы (рис. 2) $4d \to 3p \to 1s$ и $4d \to 2p \to 1s$.

Энергия перехода (фотона) согласно (2.7) определяется с помощью формулы (2.1)

$$\Delta E = -\left(\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\right)^2 \frac{me^4}{2\hbar^2}\left(\frac{1}{n_j^2} - \frac{1}{n_i^2}\right).$$

Ее величина будет максимальной при переходе 3p→1s (n_i=1, n_j=3). Произведем расчет

$$\Delta E = -9^2 \cdot 10^{18} \cdot \frac{9{,}1\cdot 10^{-31} \cdot 1{,}6^4 \cdot 10^{-76}}{2\cdot 1{,}05^2 \cdot 10^{-68}}\left(\frac{1}{3^2} - \frac{1}{1^2}\right) Дж \approx 19{,}3\cdot 10^{-19}\ Дж \approx 12{,}1\ эВ.$$

Тема 3. ФИЗИКА АТОМНОГО ЯДРА И ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ

3.1. Характеристики атомных ядер

Атомные ядра состоят из протонов (заряд протона положительный и равен заряду электрона) и нейтронов. Общее название этих частиц – ***нуклоны*** (от лат. *nucleus* – «ядро»). Они имеют почти равные массы и одинаковый спин $\hbar/2$.

Физические свойства ядра определяются ***зарядовым числом*** (***порядковым номером в таблице Менделеева***) Z, равным числу протонов в атомном ядре, и числом нейтронов N. Число A всех нуклонов в ядре называется ***массовым числом***. Очевидно, что $A = Z + N$. Для обозначения ядра принято слева от символа химического элемента указывать число нуклонов A (верхний индекс) и заряд ядра Z (нижний индекс). Например, ${}^{27}_{13}Al$ – ядро атома алюминия, имеющего число протонов $Z = 13$ и массовое число $A = 27$.

В первом приближении форму атомного ядра можно считать шаром, радиус которого определяется эмпирической формулой

$$R = 1{,}3 \cdot 10^{-15} \cdot A^{1/3}\ \text{м}. \tag{3.1}$$

Объединение нуклонов в ядро атома осуществляется посредством ядерных сил. Это взаимодействие между нуклонами в ядре получило название ***сильного взаимодействия***. Для разрушения ядра на составляющие его нуклоны необходимо затратить энергию, равную ***энергии связи*** $E_{св}$. Согласно уравнению эквивалентности массы-энергии, энергия покоя ядра $E_я = M_я c^2$, а энергия покоя составляющих его нуклонов равна $(Zm_p + Nm_n)c^2$. Следовательно:

$$E_{св} = (Zm_p + Nm_n - M_{яд})c^2 = \Delta m\, c^2, \tag{3.2}$$

где m_p - масса протона, m_n - масса нейтрона, $M_{яд}$ - масса ядра атома, $c = 3 \cdot 10^8$ м/с – скорость света.

Разность масс между суммарной массой отдельных нуклонов и массой ядра атома называется ***дефектом масс***

$$\Delta m = Z \cdot m_p + N \cdot m_n - M_{яд} = \frac{E_{св}}{c^2}. \tag{3.3}$$

3.2. Радиоактивность

Радиоактивностью называется свойство атомных ядер самопроизвольно (спонтанно) изменять свои характеристики (заряд, массовое число). При этом испускаются элементарные частицы или ядерные фрагменты. К числу радиоактивных процессов относят: испускание ядром электрона (β^- – распад), испускание позитрона (β^+ – распад), захват ядром электрона из оболочки атома (K – захват), спонтанное деление ядра, самопроизвольный вылет ядра гелия из материнского ядра (α – распад) и другие виды распадов. Радиоактивный распад может происходить, если превращение является энергетически выгодным, т. е. разность между массой исходного ядра и суммарной массой продуктов распада положительна. Распад часто сопровождается излучением γ-квантов. В процессе радиоактивного распада выполняются ***законы сохранения*** энергии, электрического заряда и другие (импульса, момента импульса и т.п.).

При α - распаде из ядра спонтанно вылетает α - частица (ядро атома гелия $^4_2\mathrm{He}$). В результате зарядовое и массовое числа ядра уменьшаются соответственно на две и четыре единицы, и образуется новый элемент, который в периодической системе находится на две позиции левее исходного элемента. При β^- –распаде из ядра вылетает электрон (и антинейтрино). Массовое число ядра не изменяется, а зарядовое возрастает на единицу. Поэтому образуется ядро следующего по порядку элемента в периодической системе.

Число N радиоактивных ядер убывает со временем t по закону ***радиоактивного распада***.

$$N = N_0 e^{-\lambda t}, \tag{3.4}$$

где N_0 – первоначальное число радиоактивных атомов, λ – постоянная радиоактивного распада, имеющая смысл вероятности распада ядра за единицу времени. На практике используется понятие периода полураспада – времени, в течение которого количество нераспавшихся ядер уменьшается в два раза. Период полураспада связан с постоянной распада соотношением

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0,693}{\lambda}. \tag{3.5}$$

С учетом этого основной закон радиоактивного распада (3.4) записывается в виде:

$$N = N_0 \mathrm{e}^{-\frac{t}{T_{1/2}}\ln 2} = \left(\mathrm{e}^{\ln 2}\right)^{-\frac{t}{T_{1/2}}} = N_0 2^{-\frac{t}{T_{1/2}}}. \tag{3.6}$$

Число распадов радиоактивных ядер за единицу времени называется активностью. ***Активность*** можно представить следующим образом:

$$A = \frac{dN}{dt} = \lambda N. \tag{3.7}$$

В системе СИ единицей активности является ***беккерель*** (Бк) - 1 распад в секунду.

При прохождении радиоактивного излучения через вещество плотность его потока уменьшается.

Закон ослабления пучка моноэнергетического γ-излучения или β-частиц имеет вид

$$j = j_0 \mathrm{e}^{-\mu x}, \tag{3.8}$$

где j_0 – плотность потока частиц, падающих на поверхность вещества (число частиц, пересекающих единичную площадку за единицу времени), *j*– плотность потока на глубине *x* в веществе, μ – ***линейный коэффициент ослабления***.

Интенсивностью излучения *I* называется энергия, переносимая через единичную площадку за единицу времени. Соответственно, интенсивность γ-излучения *I* после прохождения слоя вещества толщиной *x* рассчитывается по формуле

$$I = I_0 e^{-\mu x}, \tag{3.9}$$

где I_0 – интенсивность γ-излучения, падающего на поверхность вещества.

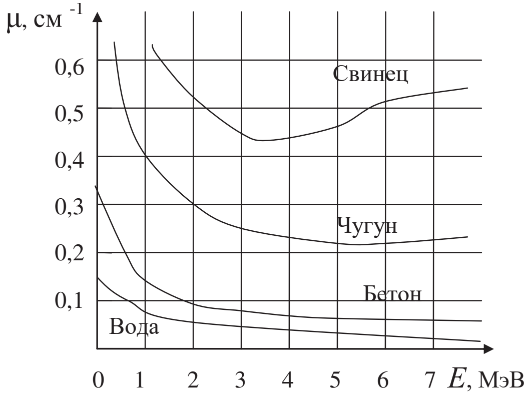

Рис. 3

На рис. 3 приведена зависимость линейного коэффициента ослабления от энергии γ-квантов для разных веществ.

Ядерной реакцией называется процесс, идущий при столкновении ядра или элементарной частицы с другим ядром, в результате которого изменяется нуклонный состав исходного ядра, а также появляются новые частицы среди продуктов реакции. При записи ядерной реакции слева пишется сумма исходных частиц, затем ставится стрелка, а за ней сумма конечных продуктов, например:

$$^1_1p + {}^7_3\text{Li} \rightarrow {}^1_0n + {}^7_4\text{Be}.$$

При расчетах ядерных реакций используются ***законы сохранения:*** энергии, импульса, момента импульса, электрического заряда и другие. Если в качестве элементарных частиц в ядерной реакции фигурируют только нейтроны, протоны и γ–кванты, то в процессе реакции сохраняется и число нуклонов. Тогда должны соблюдаться баланс нейтронов и баланс протонов в начальном и конечном состояниях. Для реакции из примера, получим:

- число протонов 3 + 1 = 0 + 4;
- число нейтронов 4 + 0 = 1 + 3

Пользуясь этим правилом можно найти один из участников реакции, зная остальные: полное массовое число и полный заряд *Z* слева и справа от равенства должны быть равны.

Разность энергий покоя начальных и конечных частиц определяет энергетический выход реакции. В более полной форме рассмотренная выше реакция записывается так:

$$p + {}^{7}\mathrm{Li} \to n + {}^{7}\mathrm{Be} + Q,$$

где Q –энергетический выход реакции (может быть отрицательным, если энергия в ходе реакции поглощается). Для его расчета сравнивают суммарную массу исходных участников реакции с суммарной массой продуктов реакции и, используя уравнение эквивалентности массы и энергии, находят Q (см. задачу 8).

Примеры решения задач

Задача 5.Оцените расстояние между центрами нуклонов в ядрах атомов.

Решение:

Используя формулу (3.1), определим объем ядра атома с массовым числом A:

$$V \approx 4/3\pi R^3 = 4/3\pi\ (1{,}3\cdot10^{-15})^3\mathrm{A} = 9{,}2\cdot10^{-45}\mathrm{A}\ (\text{м}^3).$$

Тогда на каждый нуклон приходится объем, равный

$$v = \frac{V}{A} = 9{,}2\cdot10^{-45}\ \ (\text{м}^3).$$

Принимая для простоты, что каждый нуклон занимает в ядре кубическую ячейку, оценим расстояние между центрами нуклонов, считая его равным стороне куба:

$$l \approx \sqrt[3]{v} = 2{,}1\cdot10^{-15}\ \text{м}.$$

Задача 6. В хорошо откачанную вакуумную камеру объёмом V = 1 л поместили 1 кг радиоактивного полония ${}^{210}\mathrm{Po}$. В результате α-распада полония в камере появляется газообразный гелий. Определите его давление через час, если температура стенок камеры равна 300 К.

Решение:

Для определения давления гелия используем уравнением состояния идеального газа

$$pV = \nu RT\ ,$$

где ν – число молей образовавшегося гелия. При каждом акте α-распада ядра атома полония образуется один атом гелия. Поэтому число молей образовавшегося гелия соответственно равно числу молей распавшегося полония, которое связано с числом распавшихся атомов ΔN известным соотношением

$$\nu = \frac{\Delta N}{N_A},$$

где N_A - число Авогадро.

Используя формулу (3.6) получим:

$$\Delta N = N_0 - N = N_0(1 - \exp(-\frac{t}{T_{1/2}}\ln 2))$$

Период полураспада полония ^{210}Po равен 138 суткам, что значительно превышает время эксперимента, т.е. выполняется условие $t \ll T_{1/2}$. Тогда из выражения для ΔN (используя приближенную формулу $e^{-x} \approx 1-x$ при $x \to 0$) получим

$$\Delta N \approx N_0 \frac{t}{T_{1/2}} \ln 2.$$

Число радиоактивных атомов полонияN_0 определим по формуле

$$N_0 = \frac{m}{M} N_A,$$

где M – молярная масса полония (M = 0,210 кг/моль). Таким образом, искомое давление определим по формуле:

$$p = \frac{\nu RT}{V} = \frac{RT\Delta N}{VN_A} = \frac{RTN_0 t \ln 2}{N_A VT_{1/2}} = \frac{mRTt\ln 2}{MVT_{1/2}}.$$

После подстановки значений величин и расчета получим p = 2,5 кПа.

Задача 7. Точечный радиоактивный источник $^{60}_{27}$Co находится в центре свинцового контейнера с толщиной стенок x = 1см и наружным радиусом R = 20 см. Определите максимальную активность источника, который можно хранить в контейнере, если допустимая плотность потока γ квантов при выходе из контейнера равна $8 \cdot 10^6$ с$^{-1}\cdot$м$^{-2}$. Считайте, что при каждом акте распада ядра $^{60}_{27}$Co испускается два γ-кванта, средняя энергия которых $\left\langle E_\gamma \right\rangle$ = 1,25 МэВ.

Решение:

Так как при каждом акте распада испускается 2γ-кванта, то полный поток излучения связан с активностью соотношением $\Phi = 2A$. Плотность потока на расстоянии R от точечного источника излучения (без защитного слоя) равна:

$$j_0 = \frac{\Phi}{S} = \frac{\Phi}{4\pi R^2}.$$

Эта величина связана с допустимой плотностью потока снаружи контейнера формулой (3.8)

$$j = j_0 e^{-\mu x}.$$

Тогда искомая величина максимальной активности источника равна

$$A_{max} = \frac{\Phi}{2} = \frac{4\pi R^2 j_0}{2} = 2\pi R^2 j e^{\mu x}.$$

По графику на рис. 3.1 находим, что линейный коэффициент ослабления μ для γ-квантов с энергией 1,25 МэВ равен 0,64 см$^{-1}$. После вычислений получим A_{max}= 3,8 МБк.

Задача 8. При бомбардировке нейтронами ядер изотопа бора $^{10}\mathrm{B}$ наблюдается испускание α-частиц. Какое ядро получается в результате реакции? Рассчитайте энергетический выход реакции.

Решение:

Запишем уравнение реакции в виде $^{10}_{5}\mathrm{B} + ^{1}_{0}n \rightarrow ?+ ^{4}_{2}\mathrm{He}$. Для нее баланс протонов $5 + 0 = Z + 2$, баланс нейтронов $5 + 1 = N+ 2$. Очевидно, что $Z = 3$ и $N = 4$. Следовательно, остаточное ядро - $^{7}_{3}\mathrm{Li}$. Для расчета энергии реакции сравним суммы масс ядра мишени и нейтрона с суммой масс образовавшихся ядер (в а.е.м). Используя данные таблицы (см. Приложение 2), получим:

$$M(^{10}\mathrm{B}) + m(^{1}n) = 10{,}01294 + 1{,}00867 = 11{,}02161,$$

$$M(^{7}\mathrm{Li}) + M(^{4}\mathrm{He}) = 7{,}01601 + 4{,}00260 = 11{,}01861.$$

Разность масс $\Delta m = 0{,}003$ а.е.м., что в пересчете соответствует высвобождаемой энергии $Q = \Delta mc^2 = 0{,}003 \cdot 931{,}5$ МэВ = 2,7945 МэВ.

Задачи к контрольной работе

Варианты (наборы) задач для решения см. в таблицах, размещенных на сайте университета на вкладке кафедры физики ***(Материалы для студентов заочной формы обучения)***

1.1. Какую длину волны де Бройля имеет электрон, выбитый в результате фотоэффекта с поверхности натрия фотоном, имевшим энергию $E_ф$= 3 кэВ. (Ответ: 22 пм)

1.2. При увеличении энергии электрона на ΔT = 200 эВ его дебройлевская длина волны изменилась в 2 раза. Найдите первоначальную длину волны электрона. (Ответ: 0,15 нм)

1.3. Кинетическая энергия электрона равна удвоенному значению его энергии покоя. Вычислите длину волны де Бройля этого электрона. (Ответ: 0,85 пм)

1.4. Заряженная частица, ускоренная разностью потенциалов U = 200 В, имеет длину волны де Бройля λ = 2,02 пм. Найдите массу частицы, если ее заряд численно равен заряду электрона. (Ответ: $1{,}67\cdot10^{-27}$кг)

1.5. На две очень тонкие щели, расположенные друг от друга на расстоянии d = 10 мкм, падает пучок электронов с энергией T = 1 эВ. Каково расстояние между соседними минимумами в центре интерференционной картины на экране, находящемся в 10 м от щелей? (Ответ: 1,2 мм)

1.6. При какой скорости длина волны де Бройля электрона равна его комптоновской длине волны? (Ответ: $2{,}12\cdot10^{8}$ м/с $\approx$ 0,7 c)

1.7. Попавший в металл нейтрон, находится в тепловом равновесии с окружающей средой при комнатной температуре T = 300 К (такой нейтрон называется тепловым). Следует ли учитывать его волновые свойства при взаимодействии с кристаллической решеткой, если расстояние между узлами решетки равно 0,5 нм? При расчетах примите, что нейтрон имеет среднюю квадратичную скорость. (Ответ: Следует, т.к. $\lambda_{Бр}$=8,2 нм)

1.8. Для исследования строения атомов Резерфорд обстреливал их α - частицами. Допустимо ли не учитывать волновые свойства α - частиц с кинетической энергией T = 7,7 МэВ, если прицельное расстояние (наименьшее расстояние от линии прицела до ядра атома) порядка 0,1 нм?(Ответ: Допустимо, т.к. $\lambda_{Бр}$=0,005 пм)

1.9. Определите дополнительную энергию, которую необходимо сообщить протону с кинетической энергией T = 1 кэВ, чтобы длина волны де Бройля уменьшилась в 3 раза. (Ответ: 8 кэВ)

1.10. Определите радиус окружности, по которой движется протон в однородном магнитном поле с индукцией B = 15 мТл, если его длина волны де Бройля равна 197 нм. (Ответ: 1,4 мкм)

1.11. Определите энергии фотона и электрона, если длина волны того и другого равна 0,1 нм. (Ответ: 12,4 кэВ, 151 эВ)

1.12. В рентгеновской трубке энергия бомбардирующих антикатод электронов вся или частично переходит в энергию излучения рентгеновских квантов. Определите длину волны де Бройля электронов, если минимальная длина волны рентгеновских квантов $\lambda = 3$ нм. (Ответ: 60 пм)

1.13. Протон, электрон и фотон имеют одинаковую длину волны $\lambda = 0{,}1$ нм. Определите соотношение их скоростей. (Ответ: $\upsilon_p : \upsilon_e : \upsilon_ф = 10^{-3} : 2{,}4 : 100$)

1.14. Параллельный поток моноэнергетических электронов падает нормально на диафрагму с узкой прямоугольной щелью ширины $b = 1{,}0$ мкм. Определите скорость этих электронов, если на экране, отстоящем от щели на расстояние $l = 50$ см, ширина центрального дифракционного максимума равна 0,36 мм. (Ответ: $2 \cdot 10^6$ м/с)

1.15. Определите кинетическую энергию электрона, если его длина волны де Бройля равна 1 пм. (Ответ: 1,5 МэВ)

1.16. На какую кинетическую энергию электронов должен быть рассчитан ускоритель, чтобы можно было исследовать структуры с линейными размерами $l \approx 10^{-15}$ м? (Ответ: 1,25 ГэВ)

1.17. Какую разность потенциалов должен пройти электрон из состояния покоя, чтобы его длины волны стала равной 0,16 нм? (Ответ: 59 В)

1.18. В модели Бора электрон движется вокруг ядра атома водорода по круговой орбите. Считая радиус орбиты равным 0,053 нм, определите длину волны де Бройля этого электрона. (Ответ: 0,33 нм)

1.19. Электрон движется по окружности радиусом $r = 0{,}5$ см в однородном магнитном поле с индукцией $B = 8$ мТл. Определите его дебройлевскую длину волны. (Ответ: 0,1 нм)

1.20. Какую энергию необходимо дополнительно сообщить электрону, чтобы его дебройлевская длина волны уменьшилась от 100 до 50 пм? (Ответ: 453 эВ)

1.21. Какую ускоряющую разность потенциалов должен пройти протон, чтобы длина волны де Бройля для него была равна 1 мкм? (Ответ: 822 В)

1.22. Фотоэффект вызывается с поверхности лития фотонами с длиной волны $\lambda = 0{,}3$ нм. Какую длину волны де Бройля имеют фотоэлектроны? (Ответ: 19 пм)

1.23. Чему равна скорость атома гелия, если его длина волны де Бройля равна 0,1 нм? (Ответ: 995 м/с)

1.24. Электрон и фотон имеют каждый энергию равную 1 эВ. Во сколько раз различаются их длины волн? (Ответ: $\lambda_ф/\lambda_e = 6350$)

1.25. Во сколько раз различаются длины волн де Бройля протона и электрона, если они имеют одинаковую кинетическую энергию $T = 0{,}511$ МэВ? (Ответ: $\lambda_e/\lambda_p = 35$)

2.1. Используя соотношение неопределенностей, оцените ширину одномерной потенциальной ямы, в которой минимальная энергия электрона равна 10 эВ. (Ответ: 62 пм)

2.2. Положение свободного электрона определено с точностью до 1мкм. Чему равна неопределенность в его скорости? (Ответ: 116 м/с)

2.3. Поток электронов с дебройлевской длиной волны λ = 11 мкм падает нормально на прямоугольную щель шириной b = 0,1 мм. Оцените с помощью соотношения неопределенностей угловую ширину пучка за щелью (в угловых градусах). (Ответ: 2º)

2.4. Используя соотношение неопределенностей оцените энергию электрона в том случае, если бы он находился внутри ядра. Линейные размеры ядра примите равными $5 \cdot 10^{-15}$ м. Сравните полученное значение с энергией связи, приходящейся на один нуклон в ядре $E_{св}$= 10 МэВ. (Ответ: 78 МэВ)

2.5. Оцените минимальную кинетическую энергию электрона, движущегося внутри сферической области диаметром d = 0,1 нм. (Ответ: 15,3 эВ)

2.6. Свободно движущаяся нерелятивистская частица имеет относительную неопределенность кинетической энергии порядка $1{,}6 \cdot 10^{-4}$. Оцените, во сколько раз неопределенность координаты такой частицы больше ее дебройлевской длины волны. (Ответ: 12,6)

2.7. Оцените наименьшие погрешности, с которыми можно определить скорости электрона и протона, локализованных в области размером 1 мкм. (Ответ: $\Delta\upsilon_e$= 116 м/с, $\Delta\upsilon_p$ = 6 см/с)

2.8. Протон в ядре локализован с точностью до размеров, равных радиусу ядра. Чему равна неопределенность в скорости протона, находящегося в ядре атома железа радиусом $R \approx 6 \cdot 10^{-13}$ см? (Ответ: $1{,}05 \cdot 10^{7}$ м/с.)

2.9. Приняв, что минимальная энергия нуклона в ядре равна 10 МэВ, оцените, исходя из соотношения неопределенностей, линейные размеры ядра. (Ответ: 2,5 Фм)

2.10. Определите неточность Δx в определении координаты электрона, движущегося в атоме водорода со скоростью V = 1,5 Мм/с, если допустимая неточность ΔV в определении скорости составляет 10% от ее величины. (Ответ: 0,7 нм)

2.11. Можно считать, что электрон в атоме водорода заключен в сферической области вокруг ядра радиусом r = 0,05 нм. С помощью соотношения неопределенностей оцените кинетическую энергию электрона.(Ответ: 15,3 эВ)

2.12. Минимальная энергия α - частицы, находящейся в бесконечно глубокой потенциальной яме, равна 8 МэВ. Оцените ширину ямы. (Ответ: 1,6 Фм)

2.13. Во сколько раз дебройлевская длина волны частицы меньше неопределенности Δx ее координаты, которая соответствует относительной неопределенности импульса в 1%? (Ответ: 15,9)

2.14. Чему равна неопределенность в энергии нейтрона, находящегося в ядре атома платины, если принять, что нейтрон локализован с точностью до размеров, равных радиусу ядра ($R \approx 9 \cdot 10^{-13}$ см)? (Ответ: 0,5 МэВ)

2.15. Электрон с кинетической энергией T = 10 эВ локализован в области размером l = 1 мкм. Оцените относительную неопределенность скорости электрона. (Ответ: 10^{-4})

2.16. Определите относительную неопределенность импульса $\Delta p/p$ движущейся частицы, если допустить, что неопределенность ее координаты равна длине волны де Бройля. (Ответ: 0,16)

2.17. Измерение относительной неопределенности скорости локализованного в некоторой области электрона, ускоренного напряжением U= 10 В, дало величину 0,01. Оцените размер области локализации. (Ответ: 6 нм)

2.18. Исходя из того, что радиус атома водорода имеет величину порядка 0,1 нм, оцените скорость движения его электрона. (Ответ: 10^6 м/с)

2.19. Оцените с помощью соотношения неопределенностей минимальную кинетическую энергию электрона, локализованного в области размером l = 0,2 нм. (Ответ: 1 эВ)

2.20. Показать, что для частицы, неопределенность местоположения которой $\Delta x = \lambda_Б/2\pi$, где $\lambda_Б$ - ее дебройлевская длина волны, неопределенность скорости равна по порядку величины самой скорости частицы. (Ответ: $\Delta \upsilon/\upsilon \geqslant 1$)

2.21. Пучок моноэнергетических электронов падает на щель шириной a = 10 нм. Можно считать, что если электрон прошел через щель, то его координата в направлении поперек движения известна с неопределенностью $\Delta y = a$. Оцените получаемую при этом относительную неточность в определении импульса, если энергия электрона T = 10 эВ. (Ответ: $9{,}7 \cdot 10^{-3}$)

2.22. При движении вдоль оси x скорость оказывается определенной с точностью ΔV_x = 1 см/с. Оцените неопределенность координаты Δx: а) для электрона, б) для броуновской частицы массы $m \approx 10^{-10}$ г, в) для дробинки массой $m \approx$ 0,1 г. (Ответ: 6 мм, $5 \cdot 10^{-20}$ м, $5 \cdot 10^{-29}$ м)

2.23. Прямолинейная траектория частицы в камере Вильсона представляет собой цепочку малых капелек тумана, поперечный размер которых $d \approx 1$ мкм. Можно ли, наблюдая след электрона с кинетической энергией T = 1 кэВ, обнаружить отклонение в его движении от классических законов? Указание: оцените угловой разброс импульса $\Delta p_y/p_x$. (Ответ: $3 \cdot 10^{-6}$; нет, нельзя.)

2.24. Электрон с кинетической энергией T = 15 эВ находится в металлической пылинке диаметром d = 1 мкм. Определите относительную неточность, с которой может быть определена скорость электрона. (Ответ: 10^{-4})

2.25. Оцените наименьшие ошибки, с которыми можно определить скорости электрона, протона и шарика массы m = 1 мг, если координаты частиц и центра шарика установлены с неопределенностью 1 мкм. ($\Delta\upsilon_e \sim 100$ м/с, $\Delta\upsilon_p \sim 5{,}5$ см/с, $\Delta\upsilon_ш = 10^{-22}$ м/с)

3.1 – 3.25. Поток электронов интерферирует на двух щелях А и В. В точке Р за щелями находится счетчик Гейгера, который регистрирует электроны, попавшие в эту точку. Если открыта щель А, то счетчик регистрирует ежесекундно N_A частиц, а амплитуда волновой функции электронов в точке наблюдения Ψ_A.Если открыта только щель В, то счетчик регистрирует ежесекундно N_B частиц, а амплитуда волновой функции электронов в точке наблюдения Ψ_B. Если открыты обе щели, то количество зарегистрированных электронов может принимать значение от минимального N^*_{AB} (при «деструктивной» интерференции, или - при минимуме интерференции) до максимального N^{**}_{AB} (при максимуме интерференции). В Таблице.1 приведены величины, которые необходимо найти. Амплитуды волновых функций заданы в относительных единицах.

Таблица 1 (к задачам 3.1-3.25)

№ задачи	Ψ_A	Ψ_B	N_A, с$^{-1}$	N_B, с$^{-1}$	N^*_{AB}, с$^{-1}$	N^{**}_{AB}, с$^{-1}$	Найдите	Ответ
3.1	2	6	100				N^*_{AB}	400
3.2	5		25			100	Ψ_B	5
3.3			50	72			N^{**}_{AB}	242
3.4	4	3				500	N_B	45
3.5					40	160	N_A	90; 10
3.6		6	10		40		Ψ_A	2
3.7	1	3			64		N^{**}_{AB}	256
3.8		6	2	72			N^{**}_{AB}	128
3.9			8	18			N^*_{AB}	2
3.10			100			900	N_B	400
3.11	7	2			90		N_A	196
3.12		4	40			200	Ψ_A	2
3.13	1	7	10				N^{**}_{AB}	640
3.14			18	50			N^{**}_{AB}	128
3.15	2	3			250		N_B	2250
3.16					72	200	N_A	8; 128
3.17	9	2				170	N_A	243
3.18	2		40			360	Ψ_B	4
3.19	3	1	27				N^*_{AB}	12
3.20			2	72			N^*_{AB}	50
3.21	5		50			450	Ψ_B	10
3.22	8	2			600		N_A	1280
3.23	2	5		500			N^*_{AB}	180
3.24	3			45		180	Ψ_B	3
3.25			1	25			N^*_{AB}	16

4.1. В атоме водорода электрон находится в возбужденном 4p состоянии. Найдите минимальный квант энергии, который необходим для перевода электрона в одно из состояний с большей энергией. (Ответ: 0,31 эВ)

4.2. Электрон в атоме водорода находится в возбужденном 4f состоянии. Найдите максимальный квант энергии, который может выделиться при переходе электрона в одно из низших состояний. (Ответ: 12,75 эВ)

4.3. Найдите наибольшую и наименьшую длину волны в инфракрасной серии линий спектра излучения атома водорода (серия Пашена). (Ответ: 1.87 мкм, 818 нм)

4.4. В атоме водорода электрон находится в возбужденном 5d состоянии. Найдите минимальный квант энергии, который может выделиться при переходе электрона в одно из низших состояний. (Ответ: 0,31 эВ)

4.5. Найдите минимальный квант энергии, который может выделиться при переходе электрона в атоме водорода в одно из низших состояний, если электрон находился в возбуждённом 5s состоянии. (Ответ: 0,31 эВ)

4.6. Определите наибольшую и наименьшую энергию фотонов в инфракрасной серии линий спектра излучения атома водорода (серия Пашена). (Ответ: 1,51 эВ, 0,66 эВ)

4.7.Определите минимальное значение кванта энергии, который может выделиться при переходе электрона в атоме водорода в одно из низших состояний, если электрон находился в возбуждённом 3d состоянии. (Ответ: 1,89 эВ)

4.8. В атоме водорода электрон находится в возбужденном 4p состоянии. Определите минимальную величину кванта энергии, который необходим для перехода электрона в одно из состояний с большей энергией. (Ответ: 0,31 эВ)

4.9.Определите частоту излучаемого фотона при переходе электрона из 3p в 1s состояние в атоме водорода. (Ответ: $2{,}2 \cdot 10^{15}$ Гц)

4.10. В атоме водорода электрон находится в возбужденном 2p состоянии. Определите минимальную величину кванта энергии, который необходим для перехода электрона в одно из состояний с большей энергией. (Ответ: 1,89 эВ)

4.11. Найдите длину волны фотона, испускаемого при переходе электрона в атоме водорода из 2p в 1s состояние. (Ответ: 121,5нм)

4.12. Определите частоту излучаемого фотона при переходе электрона из 3p в 2s состояние в атоме водорода. (Ответ: $4{,}6 \cdot 10^{14}$ Гц)

4.13. Определите минимальное значение кванта энергии, который может выделиться при переходе электрона в атоме водорода в одно из низших состояний, если электрон находился в возбуждённом 3s-состоянии.(Ответ: 1,89 эВ)

4.14. Найдите наибольшую и наименьшую энергию фотонов в спектре излучения атома водорода для серии Бальмера. (Ответ:3,4 эВ, 1,89 эВ.)

4.**15.** В атоме водорода электрон находится в возбужденном 2sсостоянии. Определите минимальную величину кванта энергии, который необходим для перехода электрона в одно из состояний с большей энергией. (Ответ: 1,89 эВ)

4.16. Найдите наибольшую и наименьшую длину волны в ультрафиолетовой серии линий спектра излучения атома водорода (серия Лаймана). (Ответ: 121,5 нм, 91 нм)

4.17. В атоме водорода электрон находится в возбужденном 5dсостоянии. Найдите максимальный квант энергии, который может выделиться при переходе электрона в одно из низших состояний. (Ответ: 13,06 эВ)

4.18. Вычислите наибольшую и наименьшую энергию фотонов в ультрафиолетовой серии линий спектра излучения атома водорода (серия Лаймана). (Ответ: 13,6 эВ, 10,3 эВ)

4.19. Электрон в атоме водорода электрон находится в основном состоянии. Определите минимальную величину кванта энергии, который необходим для перевода электрона в одно из состояний с большей энергией.
(Ответ: 10,2 эВ)

4.20. В атоме водорода электрон находится в возбужденном 3sсостоянии. Найдите минимальный квант энергии, который может выделиться при переходе электрона в одно из низших состояний. (Ответ: 1,89 эВ)

4.21. Найдите наибольшую и наименьшую длину волны в спектре излучения атома водорода для серии Бальмера. (Ответ: 656 нм, 365 нм)

4.22. Определите длину волны фотона, испускаемого при переходе электрона в атоме водорода из 3p в 1sсостояние. (Ответ: 1,21 эВ)

4.23. Найдите минимальный квант энергии, который может выделиться при переходе электрона в атоме водорода в одно из низших состояний, если электрон находился в возбуждённом 5s состоянии. (Ответ: 0,31 эВ)

4.24.В атоме водорода электрон находится в возбужденном 3pсостоянии. Найдите минимальный квант энергии, который необходим для перевода электрона в одно из состояний с большей энергией. (Ответ: 0,66 эВ

4.25. Определите первый потенциал возбуждения атома водорода. (Ответ: 10,2 В)

5.1.Найдите период полураспада радиоактивного изотопа, если его активность за 10 суток уменьшилась на 24% по сравнению с первоначальной. (Ответ: 36,4 суток)

5.2.Определите, какая доля радиоактивного изотопа $^{225}_{89}Ac$ распадается в течение 6 суток. (Ответ: 0,34)

5.3.Определите число атомов радиоактивного препарата йода $^{131}_{53}I$ массой m= 0,5 мкг, распавшихся в течение минуты. (Ответ: $1{,}4\cdot10^{11}$)

5.4.Определите активность радиоактивного препарата $^{90}_{38}Sr$ массой m = 1 мкг. (Ответ: 5,25 МБк)

5.5.Найдите среднюю продолжительность жизни атомов радиоактивного изотопа кобальта $^{60}_{27}Co$. (Ответ: 7,65 лет)

5.6.Определите массу изотопа $^{131}_{53}I$, имеющего активность 37 ГБк. (Ответ: 8 мкг)

5.7. Из каждого миллиона атомов некоторого радиоактивного изотопа каждую секунду распадается 200 атомов. Определите период полураспада этого изотопа. (Ответ: 58 мин)

5.8. Счётчик α - частиц, установленный вблизи радиоактивного изотопа при первом измерении за одну минуту зарегистрировал 1406 частицы, а через 4 часа только 400 частиц за минуту. Определите период полураспада этого изотопа. (Ответ: 2,2 часа)

5.9. Какова вероятность того, что данный атом в изотопе радиоактивного йода $^{131}_{53}I$ распадается в течение ближайшей секунды?(Ответ: 10^{-6})

5.10. Какая часть начального количества радиоактивного изотопа распадается за время, равное средней продолжительности жизни атомов этого изотопа? (Ответ: 63,3%)

5.11. Найдите массу урана $^{238}_{92}U$, имеющего такую же активность, как стронций $^{90}_{38}Sr$ массой 1 мг. (Ответ: 425 кг)

5.12. На сколько процентов снизится активность изотопа иридия $^{192}_{77}Ir$ за 30 суток?(Ответ: 24%)

5.13. За сутки активность изотопа уменьшилась от 118 ГБк до 7,4 ГБк. Определите период полураспада этого изотопа. (Ответ: 6 час)

5.14. Активность препарата уменьшилась в 250 раз. Скольким периодам полураспада равен прошедший промежуток времени? (Ответ: 8)

5.15. Какое количество радиоактивного препарата изотопа радия $^{226}_{88}Ra$ имеет активность 1 кюри? (Ответ: 1 г)

5.16. Чтобы определить возраст древней ткани, найденной в одной из египетских пирамид, была определена концентрация в ней атомов радиоуглерода

${}^{14}_{6}C$. Она оказалась соответствующей 9,2 распадам в минуту на один грамм углерода. Концентрация ${}^{14}_{6}C$ в живых растениях соответствует 14,0 распадам в минуту на один грамм углерода. Оцените возраст ткани. (Ответ: 3400 лет)

5.17. Определите начальную активность радиоактивного препарата магния ${}^{27}_{12}Mg$ массой m = 0,2 мкг, а также его активность через 6 часов. (Ответ: $5\cdot10^{12}$ Бк, $8\cdot10^{10}$ Бк)

5.18. Имеется пучок нейтронов с кинетической энергией 0,025 эВ. Какая доля нейтронов распадается на длине пучка 2м? (Ответ: $9\cdot10^{-7}$)

5.19. В кровь человека ввели небольшое количество раствора, содержащего изотоп ${}^{24}_{11}Na$ активностью A = $2{,}1\cdot10^{3}$ Бк. Активность 1см^3 крови, взятой через 5 часов после этого, оказалась равной 0,28 Бк. Найдите объем крови в организме человека.(Ответ: 6 л)

5.20. Определите массу свинца, который образуется из 1 кг ${}^{238}_{92}U$ за период, равный возрасту Земли ($2{,}5\cdot10^{9}$ лет). (Ответ: 0,28 кг)

5.21. Найдите вероятность распада радиоактивного ядра за время $t = \dfrac{1}{\lambda}$, где λ - его постоянная распада.(Ответ: 0,633)

5.22. За какой промежуток времени из 10^7 атомов ${}^{90}_{38}Sr$ распадается один атом?(Ответ: 2 мин)

5.23. Вычислите постоянную распада радиоактивного нуклида, активность которого уменьшается в 1,07 раза за 100 суток. (Ответ: $7{,}8\cdot10^{-9}$с$^{-1}$)

5.24. Определите возраст древних деревянных предметов, у которых удельная активность радиоуглерода ${}^{14}_{6}C$ в два раза меньше удельной активности этого же нуклида в только что срубленных деревьях. (Ответ: 5570 лет)

5.25. Препарат содержит 1,4 мкг радиоактивного изотопа ${}^{24}_{11}Na$. Какую активность будет иметь препарат через сутки? (Ответ: $15\cdot10^{10}$ Бк)

6.1 - 6.25. В табл. 2 приведены ядерные реакции, соответствующие варианту задания. Определите недостающее в записи ядро или частицу и энергию реакции. Проставьте зарядовые числа у реагирующих ядер и продуктов реакции.

Таблица 2 (к задачам 6.1 - 6.25)

Номер задачи	Ядерная реакция	Ответ (МэВ)
6.1	$^{6}Li + ? \to {}^{8}Be + {}^{4}He$	20,819
6.2	$^{12}C + {}^{2}H \to ? + {}^{11}B$	-10.47
6.3	$^{16}O + {}^{7}Li \to ? + {}^{3}H$	2.264
6.4	$^{14}N + {}^{7}Li \to {}^{18}F + ?$	1,938
6.5	$^{11}B + {}^{7}Li \to ? + {}^{3}H$	8,533
6.6	$^{6}Li + ? \to {}^{8}Be + {}^{1}H$	16,786
6.7	$^{10}B + {}^{6}Li \to ? + {}^{4}He$	23,725
6.8	$^{17}O + {}^{1}H \to ? + {}^{4}He$	1,202
6.9	$^{18}O + {}^{6}Li \to ? + {}^{4}He + n$	4,304
6.10	$? + {}^{4}He \to {}^{14}N + n$	0,158
6.11	$^{6}Li + ? \to {}^{9}Be + {}^{4}He$	15,23
6.12	$^{11}B + {}^{4}He \to ? + {}^{1}H$	0,782
6.13	$^{16}O + ? \to {}^{14}N + {}^{4}He$	3,111
6.14	$^{9}Be + {}^{6}Li \to ? + {}^{4}He$	14,354
6.15	$^{15}N + {}^{7}Li \to ? + {}^{3}H$	1,556
6.16	$^{12}C + {}^{7}Li \to {}^{4}He + ?$	12,389
6.17	$^{11}B + {}^{7}Li \to ? + 2n$	12,175
6.18	$^{16}O + {}^{6}Li \to ? + {}^{4}He$	6,045
6.19	$^{14}N + {}^{6}Li \to {}^{15}O + ? + n$	3,596
6.20	$^{11}B + {}^{3}He \to ? + {}^{6}Li$	4,564
6.21	$^{12}C + {}^{6}Li \to {}^{16}O + ?$	5,701
6.22	$^{10}B + {}^{6}Li \to {}^{13}N + ?$	5,85
6.23	$? + {}^{6}Li \to {}^{17}O + {}^{2}H$	4,89
6.24	$? + {}^{6}Li \to {}^{15}N + {}^{1}H$	18,751
6.25	$^{14}N + {}^{3}H \to ? + {}^{1}H + n$	2,338

7.1 - 7.25. Определите толщину защитного слоя, позволяющего снизить интенсивность узкого пучка γ-излучения до допустимого уровня интенсивности радиоактивного излучения I = 1 мкДж·с$^{-1}$·м^{2}. Интенсивность неослабленного пучка I_0, энергия γ-квантов и вещество защиты приведены в таблице 3. Коэффициенты ослабления см. на рис. 3.

Таблица 3 (к задачам 7.1 - 7.25)

	Интенсивность I_0, мкДж·с$^{-1}$·м$^{-2}$мкДж	Энергия γ-квантов, Мэв	Вещество защиты	Ответ (см)
7.1	1000	7,0	Свинец	12,8
7.2	100	6,0	Чугун	20,9
7.3	50	6,0	Бетон	65,2
7.4	10	7,0	Вода	92,1
7.5	10 000	1,4	Свинец	15,4
7.6	300	3,0	Бетон	114,1
7.7	3000	1,0	Чугун	20
7.8	100	6,0	Свинец	9
7.9	50	3,0	Вода	78,2
7.10	70	8,8	Чугун	17,7
7.11	100	0,5	Вода	46,1
7.12	500	5,6	Свинец	12,9
7.13	250	2,0	Чугун	18,4
7.14	50	3,6	Чугун	17
7.15	700	5,0	Свинец	14,2
7.16	100	1,7	Бетон	41,9
7.17	250	3,0	Свинец	12,3
7.18	5000	4,0	Свинец	19,4
7.19	500	2,2	Чугун	22,2
7.20	500	1,0	Вода	82,9
7.21	500	0,5	Чугун	11,3
7.22	70	1,0	Бетон	30,3
7.23	300	2,2	Свинец	11,4
7.24	50	0,7	Чугун	8,5
7.25	20	0,5	Бетон	13,6

Приложение 1

Плотность **ρ** и молярная масса ***M*** некоторых металлов

Металл	**ρ**, кг/м^3	***M***, кг/моль
Литий	530	0,0069
Калий	870	0,0391
Рубидий	1530	0,0855
Цезий	1870	0,1329
Медь	8900	0,0635
Серебро	10500	0,1079
Золото	19300	0,1970

Периоды полураспада радиоактивных изотопов

элемент	Символ изотопа	Период полураспада		элемент	Символ изотопа	Период полураспада
Нейтрон	n	11,7 мин		Йод	$^{131}_{53}\mathrm{I}$	8 сут
Углерод	$^{14}_{6}\mathrm{C}$	5570 лет		Иридий	$^{192}_{77}\mathrm{Ir}$	75 сут.
Натрий	$^{24}_{11}\mathrm{Na}$	18 час		Полоний	$^{210}_{84}\mathrm{Po}$	138 дней
Магний	$^{27}_{12}\mathrm{Mg}$	10 мин		Радий	$^{226}_{88}\mathrm{Ra}$	1820 лет
Кобальт	$^{60}_{27}\mathrm{Co}$	5,3 года		Актиний	$^{225}_{89}\mathrm{Ac}$	10 сут
Стронций	$^{90}_{38}\mathrm{Sr}$	28 лет		Уран	$^{238}_{92}\mathrm{U}$	$4{,}5\cdot10^9$ лет

Приложение 2

Массы некоторых нуклидов

Нуклид	Масса (а.е.м.)		Нуклид	Масса (а.е.м.)
n	1,00867		$^{12}_{6}C$	12,00000
$^{1}_{1}H$	1,00783		$^{13}_{6}C$	13,00335
$^{2}_{1}H$	2,01410		$^{14}_{6}C$	14,00324
$^{3}_{1}H$	3,01605		$^{13}_{7}N$	13,00574
$^{3}_{2}He$	3,01603		$^{14}_{7}N$	14,00307
$^{4}_{2}He$	4,00260		$^{15}_{7}N$	15,00011
$^{6}_{3}Li$	6,01513		$^{15}_{8}O$	15,00307
$^{7}_{3}Li$	7,01601		$^{16}_{8}O$	15,99491
$^{7}_{4}Be$	7,01693		$^{17}_{8}O$	16,99913
$^{8}_{4}Be$	8,00531		$^{18}_{8}O$	17,99916
$^{9}_{4}Be$	9,01219		$^{18}_{9}F$	18,00095
$^{9}_{5}B$	9,01333		$^{19}_{9}F$	18,99840
$^{10}_{5}B$	10,01294		$^{20}_{9}F$	19,99998
$^{11}_{5}B$	11,00931		$^{20}_{10}Ne$	19,99244

Приложение 3

Основные физические постоянные

Постоянная величина	Обозначение или формула	Числовое значение
Скорость света в вакууме	c	$2{,}99792458 \cdot 10^{8}$ м/с (точно)
Постоянная Планка	h $\hbar = h/2\pi$	$6{,}62606876(52) \cdot 10^{-34}$ Дж·с $1{,}054571596(82) \cdot 10^{-34}$ Дж·с
Постоянная Больцмана	k	$1{,}3806503(24) \cdot 10^{-23}$ Дж/К
Постоянная Авогадро	N_A	$6{,}02214199(47) \cdot 10^{23}$ моль$^{-1}$
Атомная единица массы	1 а.е.м	$1{,}66053873(13) \cdot 10^{-27}$ кг
Газовая постоянная	$R = kN_A$	$8{,}314472(15)$ Дж/(моль·К)
Гравитационная постоянная	G	$6{,}673(10) \cdot 10^{-11}$ Н · м^2 /кг^2
Постоянная Фарадея	$F = N_A e$	$9{,}6485341(39) \cdot 10^{4}$ Кл/моль
Постоянная Стефана–Больцмана	$\sigma = \pi^2 k^4 / 60\hbar^3 c^2$	$5{,}670400(40) \cdot 10^{-8}$ Вт/(м^2 · К^4)
Постоянная Ридберга	$R_\infty = \mu_0{}^2 m_e c^3 e^4 / 8\hbar^3$	$1{,}0973731568549(83) \cdot 10^{7}$ м$^{-1}$
Постоянная тонкой структуры	$\alpha = \mu_0 c e^2 / 2\hbar$ α^{-1}	$7{,}297352533(27) \cdot 10^{-3}$ $137{,}03599976(50)$
Магнитная постоянная	$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$	$1{,}2566370614... \cdot 10^{-6}$ Гн/м
Электрическая постоянная	$\varepsilon_0 = 1/(\mu_0 c^2)$	$8{,}854187817 \cdot 10^{-12}$ Ф/м
Радиус первой боровской орбиты для атома водорода	$a_0 = a/4_\pi R_\infty$	$0{,}5291772083(19) \cdot 10^{-10}$ м
Радиус электрона классический	$r_e = \mu_0 e^2 / 4_\pi m_e$	$2{,}817940285(31) \cdot 10^{-15}$ м
Элементарный заряд (заряд электрона)	e	$1{,}602176462(63) \cdot 10^{-19}$ Кл $4{,}8032042 \cdot 10^{-10}$ ед. СГСЭ
Удельный заряд электрона	e/m_e	$1{,}758820174(71) \cdot 10^{11}$ Кл/кг
Масса электрона	m_e	$0{,}910938188(72) \cdot 10^{-30}$ кг
Масса протона	m_p	$1{,}67262158(13) \cdot 10^{-27}$ кг
Масса нейтрона	m_n	$1{,}67492716(13) \cdot 10^{-27}$ кг
Магнетон Бора	$\mu_в = e\hbar/(2m_e)$	$9{,}27400899(37) \cdot 10^{-24}$ А · м2
Ядерный магнетон	$\mu_я = e\hbar/(2m_p)$	$5{,}05078317(20) \cdot 10^{-27}$ А · м2
Магнитный момент протона	μ_p	$1{,}410606633(58) \cdot 10^{-26}$ А · м2
Магнитный момент электрона	μ_e	$9{,}28476362(37) \cdot 10^{-24}$ А · м2
Энергия покоя электрона	$m_e c^2$	$0{,}510998902(21)$ МэВ
Энергия покоя протона	$m_p c^2$	$938{,}271998(38)$ МэВ
Энергия покоя нейтрона	$m_n c^2$	$939{,}565330(38)$ МэВ