

**МИНИСТЕРСТВО ПО РАЗВИТИЮ ИНФОРМАЦИОННЫХ  
ТЕХНОЛОГИЙ И КОММУНИКАЦИЙ РЕСПУБЛИКИ УЗБЕКИСТАН**

**ТАШКЕНТСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ИНФОРМАЦИОННЫХ  
ТЕХНОЛОГИЙ ИМЕНИ МУХАММЕДА АЛ ХАРАЗМИЙ**

**Кафедра физики**

**Сборник задач и методическое  
пособие к практическим занятиям по  
физике**

**(Часть 6)**

**ФИЗИКА ТВЁРДОГО ТЕЛА  
АТОМНАЯ И ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА**

**ТАШКЕНТ-2021**

Авторы: Э.З.Имамов, М.А.Рахматуллаева, Л.М.Мухамедаминова,  
Ф.Х.Хасанов, Н.М.Насимова

«Физика твердого тела. Атомная и ядерная физика» VI-часть.  
Сборник задач и методическое пособие к практическим занятиям  
по физике. – Ташкент: ТУИТ имени Мухаммада аль-Хорезми.  
2019, 60 страниц.

Этот сборник был составлен на основе учебной программы предмета «Физика», преподаваемого на 1-ом курсе для всех направлений кредитной системы обучения Ташкентского университета информационных технологий имени Мухаммада аль-Хорезми. В нем приведены все основные законы и формулы необходимые для решения задач, примеры решений задач, а также варианты задач, предназначенных для самостоятельной работы. По каждой теме также приведены теоретические вопросы для самостоятельной подготовки студентов.

Сборник предназначен для студентов всех направлений, обучающихся на 1-ом курсе бакалавриатуры ТУИТ имени Мухаммада аль-Хорезми.

Этот сборник был рекомендован к публикации по решению научно-методического Совета Ташкентского университета информационных технологий имени Мухаммада аль-Хорезми (2019 год 23-июня протокол №3 (100)).

Ташкентский университет информационных технологий имени  
Мухаммада аль-Хорезми, 2019 год

## ВВЕДЕНИЕ

Знание законов физики, означает не только знание их определений, но и умение применять их при решении определенных задач. Умение решать задачи помогает студентам заниматься самостоятельными творческими работами, учить, анализировать исследуемые физические явления и определять основные причины (факторы) данных явлений.

Когда процесс решения задач выполняется самостоятельным образом, он становится эффективнее. Данный сборник нацелен на достижение этой цели.

Задачи для самостоятельного решения разделены по вариантам из 4-ех задач. Перед каждой темой даны методические указания и советы по решению задач. В каждой теме приведены примеры решения задач разного типа.

Решить задачи можно лишь поняв соответствующую тему. Для этого, в процессе подготовки к занятию по каждой теме приведены контрольные вопросы, нацеленные понять тему и ее правильному осмыслению.

Используя это методическое пособие студент должен:

- целесообразно изучить данный раздел, используя контрольные вопросы и указанные литературы;
- самостоятельно выполнять задания по заданному преподавателем варианту на основе теории, методических указаний и примеров решения проблем.

**Студентам рекомендуется выполнить следующие правила при решении задач:**

1. Необходимо ознакомиться с условиями задачи и понять её содержание по мере её решения. В зависимости от условия задачи, студент должен рисовать чертежи и графики.
2. После того, как студент понял условие задачи необходимо определить, о каком объекте или процессе идет речь, какая величина определяется и каким физическим явлениям подчиняются эти явления.
3. При решении задачи необходимо выбрать лучший (оптимальный) из нескольких методов.
4. Решение сначала должно быть принято в общем виде, причём нужные единицы должны быть выражены в единицах, указанных в условии задачи.
5. Эти значения должны быть сведены в одну систему, например, в систему СИ.
6. В конце процесса решения задачи следует проверить совпадают ли единицы измерения.
7. При подготовке самостоятельной работы используемые законы и формулы должны быть краткими, но подробными.
8. Законы и формулы, используемые для самостоятельной работы, должны быть изложены кратко, но должны быть полностью пояснены.
9. По возможности оценить правильность числового значения полученного ответа.

## 6.1-ТЕМА СВОЙСТВА ТВЁРДЫХ ТЕЛ

### Контрольные вопросы

1. Что представляет собой модель твёрдого (кристаллического) тела? Что называется элементарной ячейкой? Какие типы кристаллических решёток вы знаете? Что называется периодом решётки?
2. Как классифицируются кристаллы по типам связей?
3. Что показывает функция распределения? Чем определяется выбор той или иной функции распределения? Какой вид имеют функции распределения Максвелла-Больцмана, Ферми-Дирака, Бозе-Эйнштейна?
4. Что показывает уровень Ферми? Какое толкование имеет энергия Ферми?
5. Как объясняется теплоёмкость твёрдых тел с помощью фононов? Какой смысл характеристической температуры Дебая?
6. В чём заключаются недостатки классической теории электропроводности металлов? Объясните движение электрона в металле, как движение в периодическом потенциальном поле.
7. Как зависит удельная теплопроводность металлов от температуры?
8. Что такое сверхпроводимость и как она объясняется с квантовомеханической точки зрения?
9. В чём различие между электроном проводимости в полупроводниках и свободным электроном в металле?
10. Как происходит генерация носителей тока в собственном полупроводнике? Найдите концентрацию собственных носителей заряда и положение уровня Ферми.
11. В чём заключается примесная проводимость полупроводников? Где расположен уровень Ферми в примесном полупроводнике и как он смещается при изменении температуры?
12. Как определяется результирующий магнитный момент атома? Как он выражается через магнетон Бора? Как, в

зависимости от величины и взаимодействия магнитных моментов атомов различаются магнитные свойства тел?

13. В чём идея квантовой теории парамагнетизма? Дайте объяснение диамагнетизму. Чем обусловлены особые свойства ферромагнетиков?

## Основные физические формулы

Концентрация электронов  $n$  в зоне проводимости

$$n = \frac{2}{(2\pi)^3} \int dk f_n(E_n(k)).$$

Концентрация дырок  $p$  в валентной зоне

$$p = \frac{2}{(2\pi)^3} \int dk f_p(E_p(k)).$$

Функция распределения электронов

$$f_n(E) = \frac{1}{1 + e^{\beta(E - \mathcal{E})}}$$

здесь  $\beta = 1/kT$ ,  $k$ -вектор квазиволны.

Функция распределения дырок

$$f_p(E) = 1 - f_n(E).$$

Энергия электронов в зоне проводимости

$$E_n(k) = E_c + \frac{\hbar^2 k^2}{2m_n}$$

Энергия электронов в возбужденной зоне проводимости

$$E_{n, \alpha}(k) = E_c + \sum_{i=x, y, z} \frac{\hbar^2 (k_i - k_i^\alpha)^2}{2m_i}, \quad m_i \neq 0.$$

Энергия электронов в валентной зоне изотропного состояния

$$E_p(k) = E_v - \frac{\hbar^2 k^2}{2m_p}$$

Энергия электронов в валентной зоне анизотропного состояния

$$E_{p\alpha}(k) = E_v - \sum_{i=x, y, z} \frac{\hbar^2 (k_i - k_i^\alpha)^2}{2m_i}$$

Концентрация электронов

$$n = N_c F_{1/2}(\eta), \quad \eta = \frac{F - E_c}{kT}$$

Эффективная плотность в зоне проводимости

$$N_c = 2 \left( \frac{m_n kT}{2\pi\hbar^2} \right)^{3/2}$$

Степень заполнения примесной зоны

$$\frac{N_d^0}{N_d^+} = g_d e^{\frac{F - E_d}{kT}}; \quad \frac{N_a^-}{N_a^0} = \frac{1}{g_a} e^{\frac{F - E_a}{kT}}$$

Прямая рекомбинация между зонами

$$u_n = u_p = a(np - n_0 p_0)$$

Прямая рекомбинация между зонами для стационарного состояния

$$u_n = u_p = u = N_t \frac{\alpha_n \alpha_p (pn - p_0 n_0)}{\alpha_n (n + n_1) + \alpha_p (p + p_1)}$$

Концентрация электронов, концентрация

$$n_1 = N_c \exp \frac{E_t - E_c}{kT}; \quad p_1 = \frac{p_0 n_0}{n_1} = \frac{n_i^2}{n_1}$$

Поверхностное сечение для захвата электронов и дырок

$$S_n = \frac{\alpha_n}{v_t}; \quad S_p = \frac{\alpha_p}{v_t}$$

“Тепловая” скорость свободных электронов

$$v_t = \sqrt{\frac{3kT}{m_0}}$$



## Примеры решения задач

**Задача 1.** Определить параметр  $a$  решётки и плотность  $\rho$  кристалла кальция, если расстояние  $d$  между ближайшими соседними атомами равно 0,393 нм. Решётка кубическая, гранецентрированная.

**Решение.** Параметр  $a$  решётки и расстояние  $d$  между ближайшими соседними атомами связаны простым геометрическим соотношением, ясным из рисунка.

$$a = d\sqrt{2}$$

Подставляя в это выражение численные значения расстояния  $d$ , получим:

$$a = 0,393\sqrt{2} \text{ нм} = 0,556 \text{ нм} = 5,56 \cdot 10^{-10} \text{ м.}$$

Плотность  $\rho$  кристалла связана с массой  $A$  килоатома и объёмом  $V_0$  килоатома соотношением:

$$\rho = \frac{A}{V_0} \quad (1)$$

Объём  $V_0$  найдём как произведение объёма  $a^3$  одной элементарной ячейки на число  $l_0$  элементарных ячеек в одном килоатоме:

$$V_0 = Z_0 a^3$$

Учитывая, что число элементарных ячеек для кристалла, состоящего из одинаковых атомов, можно найти, разделив число Авогадро  $N_A$  на число  $n$  атомов, приходящихся на 1 элементарную ячейку, последнее равенство можно написать в виде:

$$V_0 = a^3 \frac{N_A}{n} \quad (2)$$

Подставив в (1) выражение  $V_0$ , получим:

$$\rho = \frac{nA}{N_A a^3}$$

Подставим данные, учтя, что число  $n$  в случае кубической гранецентрированной решётки равно 4:

$$\rho = \frac{k^2}{m^3} = 1,55 \cdot 10^3 \frac{k^2}{m^3}$$

**Задача 2.** Определить теплоту  $\Delta Q$ , необходимую для нагревания кристалла  $NaCl$  массой  $m=20$  г от температуры  $T_1=2$  К до температуры  $T_2=4$  К. Характеристическую температуру Дебая  $\theta_D$  для  $NaCl$  принять равной 320 К и условие  $T \ll \theta_D$  считать выполненным.

**Решение.** Теплота  $\Delta Q$  подводимая для нагревания тела от температуры  $T_1$  до  $T_2$ , может быть вычислена по формуле:

$$\Delta \theta = \int_{T_1}^{T_2} C_T dT \quad (1)$$

где  $C_T$  - теплоёмкость тела.

Теплоёмкость тела связана с молярной теплоёмкостью соотношением:

$$C_T = \frac{m}{M} C \quad (2)$$

где  $m$  - масса тела;  $M$  - молярная масса.

Подставив выражение  $C_T$  по формуле (2) в формулу (1), получим:

$$\Delta \theta = \frac{m}{M} \int_{T_1}^{T_2} C dT \quad (3)$$

В общем случае теплоёмкость  $C$  есть сложная функция температуры, поэтому выносить её за знак интеграла нельзя. Однако, если выполнено условия  $T \ll \theta_D$ , то нахождение  $\Delta Q$  облегчается тем, что можно воспользоваться предельным законом Дебая, в соответствии с которым теплоёмкость пропорциональна кубу абсолютной температуры:

$$C = \frac{12}{5} R \left( \frac{T}{\theta_D} \right)^3 \quad (4)$$

Подставляя киломолярную теплоёмкость (4) в формулу (3), получим:

$$\Delta \theta = \frac{12\pi^2}{5} \frac{mR}{M\theta_D^3} \int_{T_1}^{T_2} T^3 dT$$

Выполним интегрирование и переписав полученную формулу в виде

$$\Delta\theta = \frac{12\pi^2 m}{5M} \left( \frac{T_2^3}{4} - \frac{T_1^3}{4} \right)$$

произведём вычисления:

$$\Delta\theta = \frac{12\pi^2 mR}{5M\theta_D^3} (T_2^4 - T_1^4)$$

$$\Delta\theta = \frac{3(3,14)^2 \cdot 2 \cdot 10^{-2}}{5 \cdot 58,5} \cdot 8,31 \cdot 10^3 (4^4 - 2^4) \text{ J} = 1,22 \cdot 10^{-3} \text{ J}$$

**Задача 3.** Вычислить максимальную энергию (энергию Ферми), которую могут иметь свободные электроны в меди при температуре  $T=0$  К. Принять, что на каждый атом меди приходится по одному валентному электрону.

**Решение.** Максимальная энергия  $E_F$ , которую могут иметь электроны в металле при  $T=0$  К, связана с концентрацией свободных электронов соотношением:

$$E_F = \frac{\hbar^2}{2m} (3\pi^2 n)^{2/3} \quad (1)$$

где  $\hbar$  – постоянная Планка;  $m$  – масса электрона.

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

$$n = \frac{\rho N_A}{\mu} \quad (2)$$

где  $\rho$  – плотность меди;  $N_A$  – постоянная Авогадро;  $M$  – молекулярная масса.

Подставляя выражение  $n$  в формулу (1), получаем:

$$E_F = \frac{\hbar^2}{2m} \left( 3\pi^2 \rho \frac{N_A}{M} \right)^{2/3}$$

Произведём вычисления:

$$\varepsilon_F = \frac{(1,05 \cdot 10^{-34})^2}{2 \cdot 9,1 \cdot 10^{-31}} \left( 3 \cdot (3,14)^2 \cdot 8,9 \cdot 10^9 \frac{6,02 \cdot 10^{23}}{64 \cdot 10^{-3}} \right)^{2/3} = 1,18 \cdot 10^{18} \text{ J} = 7,4 \text{ эВ.}$$

**Задача 4.** Кремниевый образец нагревают от температуры  $t_1 \approx 0^\circ\text{C}$  до температуры  $t_2 = 10^\circ\text{C}$ . Во сколько раз возрастает его удельная проводимость?

**Решение.** Удельная проводимость  $\gamma$  собственных полупроводников связана с температурой  $T$  соотношением:

$$\gamma = \gamma_0 I \frac{\Delta E}{2kT}$$

где  $\gamma_0$  – константа;  $\Delta E$  – ширина запрещённой зоны. Следовательно,

$$\frac{\gamma_1}{\gamma_2} = \frac{e^{-\frac{\Delta E}{2kT_1}}}{e^{-\frac{\Delta E}{2kT_2}}} = \exp \left[ \frac{\Delta E}{2k} \left( \frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right) \right]$$

Полагая, что для кремния  $\Delta E = 1,1$  эВ, произведём вычисления:

$$\frac{\gamma_1}{\gamma_2} = \exp \left[ \frac{1,76 \cdot 10^{-19}}{2 \cdot 1,38 \cdot 10^{-23}} \left( \frac{1}{273} - \frac{1}{283} \right) \right] = 2,28$$

**Задача 5.** Молярная магнитная восприимчивость  $\chi_m$  окиси хрома равна  $5,8 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3/\text{моль}$ . Определить магнитный момент  $P_m$  молекулы  $\text{Cr}_2\text{O}$  в магнетонах Бора, если температуры  $T = 300 \text{ K}$ .

**Решение.** Магнитная восприимчивость  $\chi$  парамагнитных веществ выражается по теории Ланжевена формулой:

$$\chi = \mu_0 n \frac{P_m^2}{3kT} \quad (1)$$

Где  $n$  – концентрация молекул;  $P_m$  – магнитный момент молекулы.

И формулу  $n = \frac{pN_A}{M}$  (1), получим

Учитывая, что

$$\chi = \mu_0 P \frac{N_A P_m^2}{m 3kT} \quad (2)$$

Выразив магнитную восприимчивость  $\chi$  через молярную магнитную

$$\chi_m = \frac{\mu_0 N_A P_m^2}{3kT}$$

Восприимчивость  $\chi_m$ , найдём Отсюда

$$P_m = \sqrt{\frac{3kT\chi_m}{\mu_0 N_A}} \quad (3)$$

Произведя вычисления по формуле (3), получим:

$$P_m = 3,09 \cdot 10^{-23} \text{ А м}^2$$

Выразим ответ в магнетонах Бора. Так как  $\mu_B = 0,927 \cdot 10^{-3} \text{ А м}^2$ , то

$$P = 3,4 \mu_B$$

**Задача 6.** Железная линейка при  $T_1 = 15^\circ$  имеет длину 1 м. На сколько изменится длина линейки при охлаждении до  $T_2 = -35^\circ$ ?

**Решение.** По закону линейного расширения

$$l_1 = l_0 [1 + \alpha(T_1 - T_0)] \quad (1)$$

$$l_2 = l_0 [1 + \alpha(T_2 - T_0)] \quad (2)$$

где  $l_2$  — длина линейки после ее охлаждения до температуры  $T_2$ ,  
 $\alpha$  — коэффициент линейного расширения железа.

Тогда изменения длины линейки

$$\Delta l = l_1 - l_2 = l_0 [1 + \alpha(T_1 - T_0)] - l_0 [1 + \alpha(T_2 - T_0)] = l_0 \alpha (T_1 - T_2) \quad (3)$$

Найдя  $l_0$  из уравнение (1) и подставляя его в выражение (3) получаем

$$\Delta l = \frac{\alpha(T_1 - T_2) l_1}{1 + \alpha(T_1 - T_0)} \quad (4)$$

Учитывая  $\alpha(T_1 - T_0) \ll 1$

$$\Delta l = \alpha l_1 (T_1 - T_2) [1 - \alpha (T_1 - T_0)] = 6 \cdot 10^{-4} \text{ м}$$

**Задача 7.** На нагревание железного бруска израсходовано 1,68 МДж теплоты. Как изменился объем бруска?

**Решение.** По закону объемного расширения  $V = V_0(1 + \beta \Delta T)$ , откуда

$$\Delta V = V - V_0 = V_0 \beta \Delta T = 3\alpha V_0 \Delta T$$

Здесь  $\beta = 3\alpha$  — объемного расширения железа, где  $\alpha$  — линейного расширения железа.

Количество теплоты необходимое для нагревания бруска на  $\Delta T$ , равно

$$Q = cm\Delta T$$

$$\Delta T = Q/cm$$

Масса бруска  $m = \rho V_0$

$$\Delta T = Q/c(\rho V_0)$$

Изменения объем бруска

$$\Delta V = \frac{V_0 \alpha Q}{c\rho V_0} = \frac{\alpha Q}{c\rho} = 1,69 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3$$

**Задача 8.** Разность длин алюминиевого и медного стержней при любой температуре составляет 15 см. Какую длину при 0°C будут иметь эти стержни?

**Решение.** По закону линейного расширения,

$$l_{ал} = l_{0ал}(1 + \alpha_{ал}\Delta T) \quad (1)$$

$$l_{м} = l_{0м}(1 + \alpha_{м}\Delta T) \quad (2)$$

где  $\alpha_{ал}$ ,  $\alpha_{м}$  — коэффициенты линейного расширения алюминия и меди. По условию задачи,

$$l_{ал} - l_{м} = \Delta l, \quad l_{0ал} - l_{0м} = \Delta l. \quad (3)$$

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

$$l_{ал} - l_{м} = l_{0ал}(1 + \alpha_{ал}\Delta T) - l_{0м}(1 + \alpha_{м}\Delta T) = l_{0ал} - l_{0м} + l_{0ал} \alpha_{ал}\Delta T - l_{0м} \alpha_{м}\Delta T \quad (4)$$

Переобразуем выражение (4) с учетом (3):

$$-\Delta l = -\Delta l + l_{0ал} \alpha_{ал}\Delta T - l_{0м} \alpha_{м}\Delta T \quad (5)$$

откуда

$$l_{0ал} \alpha_{ал} - l_{0м} \alpha_{м} = 0 \quad (6)$$

Найдя  $l_{0ал}$  из уравнения (3) и подставляя его в выражение (6), получаем  $l_{0ал} \alpha_{ал} - \alpha_{ал} \Delta l - l_{0м} \alpha_m = 0$ , откуда

$$l_{0м} = \Delta l \alpha_{ал} \alpha_{ал} / (\alpha_{ал} - \alpha_m) = 0$$

Аналогично находим, что

$$l_{0ал} = \Delta l \alpha_m / (\alpha_{ал} - \alpha_m).$$

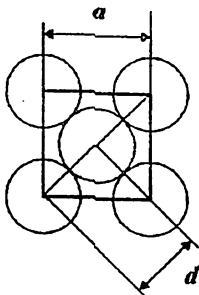
Тогда

$$l_{0м} = \frac{0,15 \cdot 2,4 \cdot 10^{-5}}{2,4 \cdot 10^{-5} - 1,7 \cdot 10^{-5}} = 0,51 \text{ м}$$

$$l_{0ал} = \frac{0,15 \cdot 1,7 \cdot 10^{-5}}{2,4 \cdot 10^{-5} - 1,7 \cdot 10^{-5}} = 0,37 \text{ м}$$

**Задача 9.** Определите параметр  $a$  решётки и расстояние  $d$  между ближайшими соседними атомами кристалла кальция (решётка гранецентрированная кубической симгонии). Плотность кристалла кальция равна  $1,55 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ . Молярная масса кальция равна  $40 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$ .

**Решение:**



$$\rho = \frac{m_0}{V_0} = \frac{m_0 N}{V} = \frac{N \mu}{a^3 N a}; N = 4; a = \sqrt[3]{\frac{N \mu}{\rho N a}}; N - \text{число атомов}$$

приходящих на простую ячейку (в ГЦК  $N=4$ ).

$$\text{Найдём } d: (2d)^2 = a^2 + a^2 = 2a^2; 2d^2 = a^2; d = \frac{a}{\sqrt{2}} = \frac{a\sqrt{2}}{2}$$

**Задача 10.** 40) Из резинового шнура длиной  $l = 42$  см и радиусом  $r = 3$  мм

сделана рогатка. Мальчик, стреляя из рогатки, растянул резиновый шнур на  $\Delta l = 20$  см. Найдите модуль Юнга для этой резины, если известно, что камень массой  $m = 0,02$  кг, пущенный из рогатки, полетел со скоростью  $v = 20$  м/с. Изменением сечения шнура при растяжении пренебреж.

**Решение:**

По закону сохранения энергии потенциальная энергия упругого взаимодействия переходит в кинетическую энергию камня, т.е.

$$W_{\text{п}} = W_{\text{к}}$$

Потенциальная энергия  $W_{\text{п}} = \frac{k\Delta l^2}{2}$ , кинетическая энергия  $W_{\text{к}} = \frac{mv^2}{2}$ .

Тогда  $\frac{k\Delta l^2}{2} = \frac{mv^2}{2}$ . Отсюда коэффициент жесткости резины  $k = \frac{mv^2}{\Delta l^2}$ . По

закону Гука сила упругости резины  $F = k\Delta l = \frac{mv^2}{\Delta l}$ . Предел упругости

$\sigma = \frac{F}{S} = \frac{mv^2}{\pi r^2 \Delta l}$  (1). Из закона Гука  $\sigma = \frac{E\Delta l}{l}$  (2). Приравняем (1) и (2), тогда

$\frac{mv^2}{\pi r^2 \Delta l} = \frac{E\Delta l}{l}$ . Модуль Юнга  $E = \frac{mv^2 l}{\pi r^2 \Delta l^2} = 2,97 \text{ (МПа)}$ .



Таблица вариантов

№ вар	Номера задач				№ вар	Номера задач			
1	4	26	33	53	26	3	40	77	39
2	5	25	32	54	27	4	41	78	38
3	6	24	31	55	28	5	42	79	37
4	7	23	30	52	29	6	43	80	36
5	8	22	29	56	30	7	44	81	35
6	9	21	28	57	31	8	45	82	34
7	10	20	27	58	32	9	46	83	33
8	11	19	50	59	33	10	47	84	32
9	12	18	51	60	34	11	48	85	31
10	13	17	34	61	35	12	49	86	30
11	14	16	35	62	36	13	50	87	90
12	15	3	36	63	37	14	51	88	104
13	1	2	37	64	38	15	52	89	103
14	2	1	38	65	39	16	53	90	102
15	3	4	39	66	40	25	54	65	101
16	16	15	40	67	41	24	55	66	100
17	17	14	41	68	42	23	56	67	99
18	18	13	42	69	43	22	57	68	98
19	19	12	43	76	44	21	58	69	97
20	20	11	44	70	45	20	59	70	96
21	21	10	45	75	46	19	60	71	95
22	22	9	46	74	47	18	61	72	94
23	23	8	47	73	48	17	62	73	93
24	24	7	48	72	49	1	63	74	92
25	25	6	49	71	50	2	64	75	91

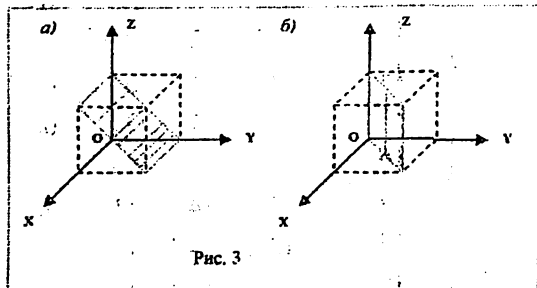
MUHAMMAD AL-YORALMIY NOMIDAGI  
TOSHKENT AXBOROT  
TEXNOLOGIYALARI UNIVERSITETI

### Задачи для самостоятельного решения

1. Если расстояние между ближайшими атомами  $d=0,393$  нм, определить плотность  $\rho$  кальция (решётка гранецентрированная, кубическая).
2. Никель имеет гранецентрированную кубическую решётку. Определить параметр  $a$  решётки и расстояние  $d$  между ближайшими соседними атомами. Плотность никеля  $\rho=8800$  кг/м<sup>3</sup>.
3. Ванадий имеет объёмно-центрированную кубическую решётку. Определить параметр  $a$  решётки и расстояние между ближайшими соседними атомами. Плотность ванадия  $\rho=5600$  кг/м<sup>3</sup>.
4. Написать индексы направления прямой, проходящей через 2 узла с кристаллографическими индексами  $[(111)]$  и  $[(111)]$ .
5. Плоскость проходит через узлы  $[(100)]$ ,  $[(010)]$ ,  $[(001)]$  кубической решётки. Написать индексы Миллера для этой плоскости.
6. Система плоскостей кубической решётки задана индексами Мюллера

$[(121)]$ . Найти

наименьшие отрезки, отсекаемые плоскостью графически.



7. Расстояние между ближайшими соседними атомами

кристаллической решётки золота  $d$  равно  $0,288$  нм.

Определить параметр  $a$  решётки, если решётка гранецентрированная кубическая.

8. Найти плотность  $\rho$  кристалла неона, если известно, что решётка гранецентрированная кубическая. Постоянная решётки  $a=0,452$  нм.
9. Найти плотность  $\rho$  кристалла стронция, если известно, что решётка гранецентрированная кубическая, расстояние между ближайшими атомами  $d=0,43$  нм.
10. Расстояние между ближайшими соседними атомами объёмноцентрированной кубической решётки  $d=0,304$  нм. Плотность кристалла  $\rho=534$  кг/м<sup>3</sup>. Определить относительную атомную массу  $A$  кристалла.

Найти постоянную  $a$  решётки для кристалла алюминия (решётка гранецентрированная кубическая). Плотность алюминия  $\rho=2700$  кг/м<sup>3</sup>.

11. Использую метод упаковки шаров, найти отношение  $c/a$  параметров в гексагональной решётке с плотнейшей упаковкой. Указать причины отклонения этой величины в реальном кристалле от вычисленного.

12. Определить постоянные  $a$  и  $c$  решётки кристалла магния, который представляет собой гексагональную структуру с плотной упаковкой. Плотность  $\rho$  кристалла магния равна  $1,74 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>.

13. Вычислить постоянную  $a$  решётки кристалла бериллия, который представляет собой гексагональную структуру с плотной упаковкой. Параметр  $a$  решётки равен 0,359 нм. Плотность  $\rho$  кристалла бериллия равна  $1,82 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>.

14. Найти плотность  $\rho$  кристалла гелия (при температуре  $T=2$  К), который представляет собой гексагональную структуру с плотной упаковкой. Постоянная  $a$  решётки, определённая при той же температуре, равна 0,357 нм.

15. Стронций имеет гранецентрированную кубическую решётку. Определить расстояние  $d$  между ближайшими соседними атомами, если параметр решётки  $a=0,605$  нм.

16. Определить число  $z$  элементарных ячеек в единице объёма кристалла бария (решётка объёмно-центрированная кубическая). Плотность бария  $\rho=3600$  кг/м<sup>3</sup>.

17. Определить число  $z$  элементарных ячеек в единице объёма кристалла меди (решётка гранецентрированная кубическая). Плотность меди  $\rho=8900$  кг/м<sup>3</sup>.

18. Найти плотность кристалла неона, если известно, что решётка гранецентрированная кубическая, постоянная решётки  $a=4,51$  А.

19. Определить частоту  $\nu$  колебаний атомов серебра по теории теплоёмкости Эйнштейна, если характеристическая температура серебра  $\Theta_E=165$  К.

20. Определить теплоту  $Q$ , необходимую для нагревания кристалла меди массой  $m=100$  г от  $T_1=10$  к до  $T_2=20$  к. Характеристическая температура Дебая для меди  $\Theta_D=320$  К. Считать условие  $T_2 \ll \Theta_D$  выполненным.

21. Выразить среднюю квадратичную скорость  $\langle v_{\text{кв}} \rangle$  через максимальную скорость  $v_{\text{max}}$  электронов в металле при абсолютном нуле.
22. Металл находится при абсолютном нуле. Определить относительное число электронов, энергии которых отличаются от энергии Ферми не более, чем на 2%.
23. Определить концентрацию свободных электронов в металле при температуре  $T=0$ , при которой уровень Ферми  $E_F=1$  эВ.
24. Определить максимальную скорость  $V_{\text{max}}$  электронов в металле при абсолютном нуле, если уровень Ферми  $E_F=5$  эВ.
25. Полагая, что на каждый атом меди в кристалле приходится по одному свободному электрону, определить максимальную энергию  $E_{\text{max}}$  электронов при абсолютном нуле.
26. Определить долю свободных электронов в металле при абсолютном нуле, энергии которых меньше  $1/2 E_{\text{max}}$ .
27. Найти характеристическую температуру для железа, если максимальная частота упругих колебаний атомов кристаллической решётки  $\nu_{\text{max}}=8,75 \cdot 10^{12}$  Гц.
28. Концентрация свободных электронов натрия  $n=3,0 \cdot 10^{28} \text{ м}^{-3}$ . Найти скорость электронов на уровне Ферми при абсолютном нуле.
29. Найти теплоёмкость электронов проводимости для натрия при  $T_1=2$  К и  $T_2=1000$  К. Концентрация свободных электронов  $n=2,5 \cdot 10^{28} \text{ м}^{-3}$ . Энергия Ферми  $E_F=7$  эВ.
30. Найти теплоёмкость электронов проводимости в единице объёма меди при температуре  $T=200$  К. Значение энергии Ферми для меди  $E_F=7$  эВ. Принять, что концентрация электронов равна числу атомов в единице объёма.
31. Вычислить минимальную длину волны Дебая в титане, если его характеристическая температура  $\Theta_D=5^\circ\text{C}$ , а скорость распространения звука  $v=6 \cdot 10^3$  м/с.
32. Определить концентрацию  $n$  свободных электронов в металле при температуре  $T=0$  К. Энергию Ферми принять равной 1 эВ.
33. Определить отношение концентраций  $n_1/n_2$  свободных электронов при  $T=0$  К в литии и цезии, если известно, что уровни Ферми в этих металлах соответственно равны  $E_{F1}=4,72$  эВ,  $E_{F2}=1,53$  эВ.

34. Определить число свободных электронов, которое приходится на 1 атом натрия при температуре  $T=0$  К. Уровень Ферми для натрия  $E_F=3,12$  эВ. Плотность натрия  $\rho=970$  кг/м<sup>3</sup>.
35. Во сколько раз число свободных электронов, приходящихся на 1 атом металла при  $T=0$  К, больше в алюминии, чем в меди, если уровни Ферми соответственно равны  $E_{F1}=11,7$  эВ,  $E_{F2}=7$  эВ?
36. Выразить среднюю квадратичную скорость  $\langle v_{\text{кв}} \rangle$  через максимальную скорость  $v_{\text{max}}$  в металле при температуре  $T=0$  К.
37. Металл находится при температуре  $T=0$  К. Определить относительное число электронов, энергии которых отличаются от энергии Ферми не более чем на 2%.
38. Определить долю свободных электронов в металле при температуре  $T=0$  К, энергии  $E$  которых заключены в интервале значений от  $1/2 E_{\text{max}}$  до  $E_{\text{max}}$ .
39. Определить вероятность того, что электрон в металле займёт энергетическое состояние, находящееся в интервале  $\Delta E=0,05$  эВ ниже уровня Ферми.
40. Какова вероятность того, что электрон в металле при температуре  $t=27^\circ\text{C}$  займёт состояние, лежащее на  $\Delta E=0,1$  эВ выше уровня Ферми.
41. Показать, что вероятность того, что электрон в металле будет иметь энергию, равную энергии Ферми равна 0,5.
42. Найти энергию ферми для свободных электронов калия при абсолютном нуле. Считать, что на один атом приходится 1 свободный электрон.
43. Энергия Ферми при абсолютном нуле для натрия  $E_F=3,15$  эВ. Найти число свободных электронов, приходящихся на 1 атом натрия.
44. Концентрация свободных электронов проводимости в металлах  $n=5 \cdot 10^{22}$  см<sup>-3</sup>. Найти среднее значение энергии свободных электронов при абсолютном нуле.
45. Найти максимальную скорость электронов в металле при абсолютном нуле, если уровень Ферми  $E_F=5$  эВ.
46. Концентрация свободных электронов натрия  $n=3 \cdot 10^{28}$  м<sup>-3</sup>. Найдите скорость электронов на уровне Ферми  $E_F=5$  эВ.
47. Вычислить среднюю кинетическую энергию  $\langle E \rangle$  электронов в металле при температуре  $T=0$  К, если уровень Ферми  $E_F=7$  эВ.

48. Найти среднюю энергию электронов при абсолютном нуле, если их концентрация в металле  $n=10^{29} \text{ м}^{-3}$ .
49. Вычислить энергию электрона на уровне Ферми, если концентрация электронов в металле  $n=10^{28} \text{ м}^{-3}$ .
50. Сравнить максимальную энергию электрона для верхнего заполненного при абсолютном нуле энергетического уровня металла с энергией электрона на уровне Ферми при обычной температуре.
51. Металл находится при температуре  $T=0 \text{ К}$ . Определить, во сколько раз число электронов с кинетической энергией от  $E_F/2$  до  $E_F$  больше числа электронов с энергией от 0 до  $E_F/2$ .
52. Оценить температуру  $T_{\text{Ф}}$  вырождения для калия, если принять, что на каждый атом приходится по одному свободному электрону. Плотность калия  $\rho=860 \text{ кг/м}^3$ .
53. Вычислить параметр вырождения электрических уровней в металле при температуре  $T=300 \text{ К}$ , если концентрация электронов  $n=10^{28} \text{ м}^{-3}$ .
54. Полагая, что на каждый атом алюминия в кристалле приходится по три свободных электрона, определить максимальную энергию при абсолютном нуле.
55. Металл находится при температуре  $T=0 \text{ К}$ . Определить, во сколько раз число электронов со скоростями от  $v_{\text{max}}/2$  до  $v_{\text{max}}$  больше числа электронов со скоростями от 0 до  $v_{\text{max}}/2$ .
56. Найти число свободных электронов, приходящихся на 1 атом натрия при  $T=0$ , если уровень Ферми  $E_F=3,07 \text{ эВ}$ . Плотность натрия считать известной.
57. До какой температуры надо было нагреть классический электронный газ, чтобы средняя энергия его электронов оказалась равной средней энергии свободных электронов в меди при температуре 0? Считать, что на каждый атом меди приходится 1 свободный электрон.
58. Вычислить интервал (в эВ) между соседними уровнями свободных электронов в металле при  $T=0$  вблизи уровня Ферми, если концентрация свободных электронов  $n=2 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-3}$  и объем металла  $V=1 \text{ см}^3$ .
59. Найти среднее значение кинетической энергии  $\langle E \rangle$  электронов в металле при абсолютном нуле, если уровень Ферми  $E_F=8 \text{ эВ}$ .

60. Полагая, что на каждый атом меди в кристалле приходится по 1 свободному электрону, определить максимальную энергию  $E_{max}$  электронов при абсолютном нуле.

61. Выразить среднюю квадратичную скорость  $\langle v_{ка} \rangle$  через максимальную скорость  $v_{max}$  электронов в металле при температуре  $T=0$  К.

62. Каково значение энергии Ферми  $E_F$  у электронов проводимости двухвалентной меди? Выразить энергию Ферми в джоулях и электронвольтах.

63. Вычислить давление электронного газа в металлическом натрии при температуре 0 К, если концентрация свободных электронов в нём  $n=2,6 \cdot 10^{22}$  см<sup>-3</sup>. Воспользоваться уравнением для давления идеального газа.

64. Собственный полупроводник (германиевый) имеет при определённой температуре удельное сопротивление  $\rho=0,50$  Ом·м. Определить концентрацию  $n$  носителей тока, если подвижность электронов  $b_n=0,38$  В·с и дырок  $b_p=0,18$  В·с.

65. Удельное сопротивление  $\rho$  кремния с примесями равно  $10^{-2}$  Ом·м. Определить концентрацию  $n$  дырок и их подвижность  $b_p$ . Принять, что полупроводник обладает только дырочной проводимостью и постоянная Холла  $R_H=4 \cdot 10^{-4}$  м<sup>3</sup>/к.

66. Тонкая пластинка из кремния шириной  $b=2$  см помещена перпендикулярно линиям индукции однородного магнитного поля ( $B=0,5$  Тл). При плотности тока  $\delta=2$  мкА/мм<sup>2</sup>, направленной вдоль пластины, холловская разность потенциалов  $U_H=2,8$  В. Определить концентрацию  $n$  носителей тока.

67. Подвижности электронов и дырок в кремнии равны соответственно  $b_n=1,5 \cdot 10^3$  В·с и  $b_p=5 \cdot 10^2$  В·с. Вычислить постоянную Холла  $R_H$  для кремния, если удельное сопротивление кремния  $\rho=6,2 \cdot 10^2$  Ом·м.

68. Перпендикулярно однородному магнитному полю, индукция которого равна  $B=0,1$  Тл, помещена тонкая пластинка из германия. Ширина пластинки  $b=4$  см. Определить плотность тока  $\delta$ , при которой холловская разность потенциалов  $U_H=0,5$  В. Постоянную Холла  $R_H$  для германия принять равно  $0,3$  м<sup>3</sup>/к.

69. Удельная проводимость кремния с примесями  $\gamma=112$  См/м. Определить подвижность  $b_p$  дырок и их концентрацию  $n$ , если постоянная Холла  $R_H=3,66 \cdot 10^{-4}$  м<sup>3</sup>/К. Принять, что полупроводник обладает только дырочной проводимостью.
70. Определить уровень Ферми  $E_F$  в примесном полупроводнике, если энергия активации  $\Delta E_B=0,1$  эВ. За нулевой уровень отсчёта кинетической энергии электронов принять низший уровень зоны проводимости.
71. Полупроводник в виде тонкой пластины шириной  $b=1$  см и длиной  $l=10$  см помещён в однородное магнитное поле с индукцией  $B=0,2$  Тл. Вектор магнитной индукции перпендикулярен плоскости пластины. К концам пластины (по направлению  $L$ ) приложено постоянное напряжение  $U=300$  В. Определить холловскую разность потенциалов  $U_H$  на гранях пластины, если постоянная Холла  $R_H=0,1$  м<sup>3</sup>/Кл, удельное сопротивление  $\rho=0,5$  Ом·м.
72. Подвижность электрона германия  $n$ -типа  $b_n$  равна  $3,7 \cdot 10^3$  В·с. Определить постоянную Холла  $R_H$ , если удельное сопротивление проводника  $\rho=1,6 \cdot 10^{-2}$  Ом·м.
73. Германиевый кристалл ширина запрещённой зоны  $\Delta E$  которого равна  $0,72$  эВ, нагревают от температуры  $t_1=0^\circ\text{C}$  до температуры  $t_2=15^\circ\text{C}$ . Во сколько раз возрастёт его удельная проводимость?
74. При нагревании кремниевого кристалла от температуры  $t_1=0^\circ\text{C}$  до температуры  $t_2=10^\circ\text{C}$  его удельная проводимость возрастёт в  $2,28$  раза. Определить ширину  $\Delta E$  запрещенной зоны кристалла.
75. Тонкая пластина из кремния шириной  $b=2$  см помещена перпендикулярно линиям индукции однородного магнитного поля ( $B=0,1$  Тл). При плотности тока  $\delta=0,5$  А/мм<sup>2</sup>, направленного вдоль пластины, холловская разность потенциалов оказалась  $U_H=0,368$  В. Определить концентрацию  $n$  носителей тока.
76. Собственный полупроводник (германий) имеет при некоторой температуре удельное сопротивление  $\rho=0,48$  Ом·м. Определить концентрацию  $n$  носителей заряда, если подвижности электронов  $b_n=0,36$  В·с и дырок  $b_p=0,16$  В·с. Найти удельное сопротивление германиевого полупроводника  $p$ -типа при плотности дырок  $n_p=3 \cdot 10^{20}$  м<sup>-3</sup> и сравнить его с сопротивлением полупроводника  $n$ -типа при той же концентрации в электронах.
77. Подвижность дырок в германии  $b_p=0,18$  В·с, электронов  $b_n=0,38$  В·с. Какова концентрация носителей зарядов собственного



германия при температуре  $t=27^{\circ}\text{C}$ , если удельное сопротивление его  $\rho=0,47 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ , а подвижности электронов  $b_n=0,38 \text{ В}\cdot\text{с}$ ,  $b_p=0,18 \text{ В}\cdot\text{с}$ .

78. Ширина запрещённой зоны алмаза  $\Delta E=6 \text{ эВ}$ . Найти длинноволновую границу поглощения света алмазом.

79. Во сколько раз изменится электропроводимость чистого германия при повышении температуры от  $t_1=-23^{\circ}\text{C}$  до  $t_2=+27^{\circ}\text{C}$ ?

Ширина запретной зоны для германия  $\Delta E=0,74 \text{ эВ}$ .

80. Удельное сопротивление германия при  $t=27^{\circ}\text{C}$   $\rho=0,47 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ .

Найти концентрацию носителей заряда в германии. Принять для германия подвижности электронов и дырок  $b_n=0,38 \text{ В}\cdot\text{с}$  и  $b_p=0,18 \text{ В}\cdot\text{с}$ . Во сколько раз концентрация носителей тока в чистом сплаве  $\text{InSb}$  при температуре  $T_2=400 \text{ К}$  больше концентрации при  $T_1=300 \text{ К}$ . Ширина запрещённой зоны для индия  $\text{InSb}$   $\Delta E=0,18 \text{ эВ}$ .

81. Найти электропроводность германия, если известно, что в нём содержится индия в концентрации  $n_1=10^{22} \text{ м}^3$  и сурьмы в концентрации  $n_2=10^{21} \text{ м}^3$ . Принять подвижность в германии электронов  $b_n=0,38 \text{ м}^2/\text{в}\cdot\text{с}$  и в  $\text{см}^2$  дырок  $b_p=0,18 \text{ В}\cdot\text{с}$ .

82. Сравните электропроводность чистого германия при  $t_1=-40^{\circ}\text{C}$  и  $t_2=100^{\circ}\text{C}$ . Энергия активации для германия  $\Delta E=0,72 \text{ эВ}$ .

83. Собственная электропроводность германия при  $t=27^{\circ}\text{C}$  равна  $2,13 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ . Подвижности электронов  $b_n=0,38 \text{ В}\cdot\text{с}$  и дырок  $b_p=0,18 \text{ В}\cdot\text{с}$ . Вычислить плотность носителей тока и постоянную Холла.

84. Определить примесную электропроводность германия, который содержит индий в концентрации  $n_1=2\cdot 10^{22} \text{ м}^3$ , сурьму в концентрации  $n_2=5\cdot 10^{21} \text{ м}^3$ .

85. При измерении эффекта Холла пластинку из полупроводника  $p$ -типа ширины  $b=10 \text{ мм}$  и длины  $l=40 \text{ мм}$  поместили в магнитное поле с индукцией  $B=5\cdot 10^{-4} \text{ Тл}$ . К концам пластинки приложили разность потенциалов  $U=10 \text{ В}$ , при этом холловская разность потенциалов  $U_H=50 \text{ эВ}$  и удельное сопротивление  $\rho=2,5 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ . Найти концентрацию дырок и их подвижность.

86. Найти минимальную энергию, необходимую для образования пары электрон-дырка в кристалле  $\text{CaAs}$ , если его удельная проводимость изменяется в 10 раз при изменении температуры  $T_1=20^{\circ}\text{C}$  до  $T_2=3^{\circ}\text{C}$ .

87. Определить намагниченность  $J_{нас}$  тела при насыщении, если магнитный момент каждого атома равен магнетону Бора  $\mu_B$  и концентрации атомов  $n=6\cdot 10^{28} \text{ м}^3$ .

88. Удельная магнитная восприимчивость висмута  $\chi_{уд} = 1,3 \cdot 10^{-9}$  м<sup>3</sup>/кг. Определить магнитную восприимчивость  $\chi$  и килоатомную восприимчивость  $\chi_{ат}$ .
89. Молярная магнитная восприимчивость алюминия  $\chi_m = 1,65 \cdot 10^{-5}$  см<sup>3</sup>/моль. Определить магнитную восприимчивость  $\chi$  и магнитную проницаемость  $\mu$  для алюминия.
90. Молекула NO имеет магнитный момент  $p_m = 1,8 \mu_B$  (где  $\mu_B$  – магнетон Бора). Определить удельную парамагнитную восприимчивость газообразной окиси азота при нормальных условиях.
91. Вычислить среднее число магнетонов Бора, приходящихся на 1 атом железа, если при насыщении намагниченность железа  $J_{маг} = 1,85 \cdot 10^6$  А/м.
92. Найти магнитную восприимчивость  $\chi$  AgBr, если его молярная магнитная восприимчивость  $\chi_m = 7,5 \cdot 10^{-10}$  м<sup>3</sup>/моль.
93. Определить намагниченность  $J_{маг}$  тела при насыщении. Если магнитный момент каждого атома равен двум магнетонам Бора  $\mu_B$  и концентрация атомов  $n = 10^{23}$  см<sup>-3</sup>.
94. Определить удельную парамагнитную восприимчивость  $\chi_{уд}$  газообразного кислорода при нормальных условиях, если известно, что молекулы кислорода обладают магнитным моментом  $p_m = 2,8 \mu_B$  ( $\mu_B$  магнетон Бора).
95. При температуре  $T_1 = 200$  К и магнитной индукции  $B_1 = 0,5$  Гн была достигнута определённая намагниченность парамагнетика. Определить магнитную индукцию  $B_2$ , при которой сохранится та же намагниченность, если температуру повысить до  $T_2 = 400$  К.
96. Молекула O<sub>2</sub> имеет магнитный момент  $p_m = 2,8 \mu_B$ . Определить молярную парамагнитную восприимчивость  $\chi_m$  кислорода.
97. \*Магнитная восприимчивость алюминия  $\chi = 2,1 \cdot 10^{-5}$ . Определить его удельную магнитную восприимчивость  $\chi_{уд}$  и молярную восприимчивость  $\chi_m$ .
98. \*Висмутовый шарик радиусом  $R = 1$  см помещён в однородной магнитное поле с индукцией  $B = 0,5$  Тл. Определить магнитный момент  $p_m$ , приобретённый шариком, если магнитная восприимчивость  $\chi$  висмута равна  $-1,5 \cdot 10^{-4}$ .
99. \*Напряжённость магнитного поля в меди  $H = 1$  МА/м. Определить намагниченность  $J$  меди и магнитную индукцию  $B$ , если известно, что удельная магнитная восприимчивость  $\chi_{уд} = -1,1 \cdot 10^{-2}$

м<sup>3</sup>/кг.

100. Вычислите угол  $\langle \rho \rangle$  между нормальными к плоскостям (в кубической решетке), заданные индексами Миллера (111) и (123).

101. Рассчитайте постоянную Авогадро по результатам исследований дифракции рентгеновских лучей от плоскости (111) алюминия, если эти лучи имеют длину волны  $\lambda = 1,540 \text{ \AA}$ , а первый дифракционный максимум наблюдается под углом  $\varphi = 19,2^\circ$ . Плотность алюминия  $\rho = 2699 \text{ кг/м}^3$ , молярная масса  $\mu = 26,98 \text{ г/моль}$ . Алюминий имеет ГЦК структуру.

## 6.2 – ТЕМА

### ФИЗИКА АТОМНОГО ЯДРА

#### Основные формулы

Ядро обозначается тем же символом, что и нейтральный атом:

${}^Z_X A$ , где  $X$  - символ химического элемента;  $Z$  - зарядовое число (атомный номер; число протонов в ядре);

$A$  - массовое число (число нуклонов в ядре).

Число  $N$  нейтронов в ядре равно разности  $N = A - Z$ .

Радиус ядра определяется соотношением  $r = r_0 \cdot A^{1/3}$ , где  $r_0$  — коэффициент пропорциональности, который можно считать для всех ядер постоянным и равным  $1,4 \cdot 10^{-15}$  м

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

- основной закон радиоактивного распада, где  $N$  — число нераспавшихся атомов в момент времени  $t$ ;  $N_0$  — число нераспавшихся атомов в момент, принятый за начальный (при  $t = 0$ );  $e$  — основание натурального логарифма;  $\lambda$  — постоянная радиоактивного распада;

$$T_{1/2} = \ln 2 / \lambda = 0,693 / \lambda$$

– период полураспада.

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

- число атомов, распавшихся за время  $t$ . Если промежуток времени  $\Delta t \ll T_{1/2}$ , то

$$\Delta N \approx \lambda \cdot N \cdot \Delta t$$

определяет приближенно число распавшихся атомов.

Среднее время жизни  $\tau$  радиоактивного ядра - промежуток времени, за который число нераспавшихся ядер уменьшается в  $e$  раз:

$$\tau = 1/\lambda$$

Число атомов, содержащихся в радиоактивном изотопе:

$$N = (m/M) \cdot N_A$$

где  $m$  - масса изотопа;  $M$  - его молярная масса;  $N_A$  — постоянная Авогадро.

$$A = -dN/dt = \lambda \cdot N$$

-активность нуклида в радиоактивном источнике (активность изотопа). Его можно представить в виде (с помощью основного закона радиоактивного распада:

$$A = \lambda \cdot N_0 e^{-\lambda t}, \text{ где } A_0 = \lambda \cdot N_0$$

- активность изотопа в начальный момент времени ( $t=0$ ):

$$A = A_0 \cdot e^{-\lambda t}$$

Видно, что активность изотопа изменяется со временем по тому же закону, что и число нераспавшихся ядер. Массовая активность  $a$  радиоактивного источника

$$a = A/m$$

Если имеется смесь ряда радиоактивных изотопов, образующихся один из другого, и если постоянная распада  $\lambda$  первого члена ряда много меньше постоянных всех остальных членов ряда, то в смеси устанавливается состояние радиоактивного равновесия, при котором активности всех членов ряда равны между собой:

$$\lambda_1 \cdot N_1 = \lambda_2 \cdot N_2 = \dots = \lambda_k \cdot N_k$$

Согласно релятивистской механике, масса покоя  $m$  устойчивой системы взаимосвязанных частиц меньше суммы масс покоя  $m_1 + m_2 + \dots + m_k$  тех же частиц, взятых в свободном состоянии. Дефект массы системы частиц определяется разностью:

$$\Delta m = (m_1 + m_2 + \dots + m_k) - m \quad (1)$$

разность называется дефектом масс систем частиц.

Энергия связи прямо пропорциональна дефекту массы системы частиц, где  $c$  - скорость света в вакууме

$$E_{св} = c^2 \cdot \Delta m$$

$$(c^2 = 8,987 \cdot 10^{16} \text{ м}^2/\text{с}^2 = 8,987 \cdot 10^{16} \text{ Дж/кг}).$$

Если энергия выражена в мегаэлектронвольтах (МэВ), а масса в атомных единицах (а.е.м.), то  $c^2 = 931,4 \text{ МэВ/а.е.м.}$

Дефект массы  $\Delta m$  атомного ядра есть разность между суммой масс свободных протонов и нейтронов и массой образовавшегося из них ядра:

$$\Delta m = (Z \cdot m_p + N \cdot m_n) - m_{я},$$

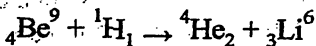
где  $Z$ —зарядовое число (число протонов в ядре);  $m_p$  и  $m_n$ —массы протона и нейтрона соответственно;  $m_{я}$  - масса ядра. Если учесть, что  $m_{я} = m_{\alpha} - Z \cdot m_e$ ;  $m_p + m_e = m({}_1^1\text{H}_1)$ ;  $N = (A - Z)$ , то формулу дефекта массы ядра можно представить в виде

$$\Delta m = Z \cdot m({}_1^1\text{H}_1) + (A - Z) \cdot m_n - m_{\alpha}.$$

Удельная энергия связи (энергия связи на нуклон):

$$E_{уд} = E_{св}/A.$$

Символическая запись ядерной реакции может быть дана или в развернутом виде, например:



и сокращенно  ${}_4^9\text{Be}(p, \alpha){}_3^6\text{Li}$ .

Для обозначения частиц приняты следующие символы: p — протон, n — нейтрон, d — дейтрон, t — тритон,  $\alpha$  — альфа-частица,  $\gamma$  — гамма-фотон.

Законы сохранения:

а) числа нуклонов

$$A_1 + A_2 = A_3 + A_4;$$

б) заряда

$$Z_1 + Z_2 = Z_3 + Z_4;$$

в) релятивистской полной энергии  $E_1 + E_2 = E_3 + E_4$ ;

г) импульса

$$p_1 + p_2 = p_3 + p_4.$$

Энергия ядерной реакции:

$$Q = c^2[(m_1 + m_2) - (m_3 + m_4)],$$

где  $m_1$  и  $m_2$  — массы покоя ядра-мишени и бомбардирующей частицы;  $m_3 + m_4$  — сумма масс покоя ядер продуктов реакции.

Если  $m_1 + m_2 > m_3 + m_4$ , то энергия освобождается, энергетический эффект положителен, реакция экзотермическая. Если  $m_1 + m_2 < m_3 + m_4$  то энергия поглощается, энергетический эффект отрицателен, реакция эндотермическая.

Другой вид энергии ядерной реакции  $Q = (T_1 + T_2) - (T_3 + T_4)$ , где  $T_1$  и  $T_2$  — кинетические энергии соответственно ядра-мишени и бомбардирующей частицы;  $T_3$  и  $T_4$  — кинетические энергии вылетающей частицы и ядра — продукта реакции. При экзотермической реакции  $T_3 + T_4 > T_1 + T_2$ , при эндотермической реакции  $T_3 + T_4 < T_1 + T_2$ .

## Примеры решения задач

**Задача 1.** Ядро нейтрония  $^{234}\text{Np}_{93}$  захватило электрон из К-оболочки атома (К-захват) и испустило  $\alpha$ -частицу. Ядро какого элемента получилось в результате этих превращений?

**Решение.** При К-захвате из ближайшей к ядру электронной оболочки (К-оболочки) атома электрон захватывается ядром. В результате этого протон в ядре превращается в нейтрон \*. Общее число нуклонов в ядре не изменяется, а зарядовое число уменьшится на единицу. Поэтому промежуточное ядро будет иметь зарядовое число  $93 - 1 = 92$ ; массовое число останется прежним—234. По таблице Д. И. Менделеева определяем, что промежуточным ядром является изотоп урана  $^{234}\text{U}_{92}$ .

Промежуточное ядро испустило  $\alpha$ -частицу. Так как  $\alpha$ -частица (ядро атома изотопа гелия  $^4\text{He}_2$ ) содержит два протона и два нейтрона, то промежуточное ядро  $^{234}\text{U}_{92}$  при акте испускания  $\alpha$ -частицы уменьшит зарядовое число на две единицы и массовое число на четыре единицы. Таким образом, конечное ядро будет иметь  $Z=90$  и  $A=230$ , что соответствует изотопу тория  $^{230}\text{Th}_{90}$ .

**Ответ.** Изотоп тория  $^{230}\text{Th}_{90}$ .

**Задача 2.** Определить начальную активность  $A_0$  радиоактивного магния  $^{27}\text{Mg}$  массой  $m=0,2$  мкг, а также активность  $A$  по истечении времени  $t=1$  ч. Предполагается, что все атомы изотопа радиоактивны.

**Решение.** Начальная активность изотопа  $A_0 = \lambda \cdot N_0$  (1)

где  $\lambda$  — постоянная радиоактивного распада;  $N_0$  — количество атомов изотопа в начальный момент ( $t=0$ ).

Если учесть, что  $\lambda = \ln 2 / T_{1/2}$  и  $N_0 = (m/M) \cdot N_A$ , то формула (1) примет вид

$$A_0 = (m \cdot N_A / M \cdot T_{1/2}) \cdot \ln 2 \quad (2)$$

Выразим входящие в эту формулу величины в СИ и произведем вычисления:



$$A_0 = 5,15 \cdot 10^{12} \text{ Бк} = 5,15 \text{ ТБк.}$$

Активность изотопа уменьшается со временем по закону

$$A = A_0 e^{-\lambda t} \quad (3)$$

Заменив в формуле (3) постоянную распада  $\lambda$  ее выражением, получим

$$A = A_0 e^{-\ln 2 \cdot t / T_{1/2}} = A_0 (e^{-\ln 2})^{-t / T_{1/2}} = A_0 / 2^{t / T_{1/2}}$$

Численное значение равно  $A = 8,05 \cdot 10^{10} \text{ Бк} = 80,5 \text{ ГБк.}$

Ответ.  $A = 8,05 \cdot 10^{10} \text{ Бк} = 80,5 \text{ ГБк.}$

**Задача 3.** При определении периода полураспада  $T_{1/2}$  короткоживущего радиоактивного изотопа использован счетчик импульсов. За время  $\Delta t = 1$  мин в начале наблюдения ( $t=0$ ) было насчитано  $\Delta n_1 \approx 250$  импульсов, а по истечении времени  $t=1$  ч —  $\Delta n_2 = 92$  импульса. Определить постоянную радиоактивного распада  $\lambda$  и период полураспада  $T_{1/2}$  изотопа.

**Решение.** Число импульсов  $\Delta n$ , регистрируемых счетчиком за время  $\Delta t$ , пропорционально числу распавшихся атомов  $\Delta N$ .

Таким образом, при первом измерении

$$\Delta n_1 = k \Delta N_1 = k N_1 (1 - e^{-\lambda \Delta t}), \quad (1)$$

где  $N_1$  — количество радиоактивных атомов к моменту начала отсчета;  $k$  — коэффициент пропорциональности (постоянный для данного прибора и данного расположения прибора относительно радиоактивного изотопа).

При повторном измерении (предполагается, что расположение приборов осталось прежним)

$$\Delta n_2 = k \Delta N_2 = k N_2 (1 - e^{-\lambda \Delta t}), \quad (2)$$

где  $N_2$  — количество радиоактивных атомов к моменту начала второго измерения.

Разделив соотношение (1) на выражение (2) и приняв во внимание, что по условию задачи  $\Delta t$  одинаково в обоих случаях, а также что  $N_1$  и  $N_2$  связаны между собой соотношением  $N_2 = N_1 e^{-\lambda t}$ , получим

$$\Delta n_1 / \Delta n_2 = e^{\lambda t} \quad (3)$$

где  $t$  — время, прошедшее от первого до второго измерения. Для вычисления  $\lambda$  выражение (3) следует прологарифмировать:  $\ln(\Delta n_1 / \Delta n_2) = \lambda t$ , откуда

$$\lambda = (1/t) \cdot \ln(\Delta n_1 / \Delta n_2).$$

Подставив числовые данные, получим постоянную радиоактивного распада, а затем и период полураспада:

$$\lambda = (1/1) \cdot \ln(250/92) \text{ч}^{-1} = 1 \text{ч}^{-1};$$
$$T_{1/2} = \ln 2 / \lambda = 0,693/1 = 0,693 \text{ч} = 41,5 \text{ мин.}$$

Ответ.  $T_{1/2} = 41,5 \text{ мин.}$

**Задача 4.** Определить начальную активность  $A_0$  радиоактивного магния  $^{27}\text{Mg}$  массой  $m=0,2 \text{ мкг}$ , а также активность  $A$  по истечении времени  $t=1 \text{ ч}$ . Предполагается, что все атомы изотопа радиоактивны.

**Решение.** Начальная активность изотопа  $A_0 = \lambda \cdot N_0$  (1)

где  $\lambda$  — постоянная радиоактивного распада;  $N_0$  — количество атомов изотопа в начальный момент ( $t=0$ ).

Если учесть, что  $\lambda = \ln 2 / T_{1/2}$  и  $N_0 = (m/M) \cdot N_A$ , то формула (1)

примет вид

$$A_0 = (m \cdot N_A / M \cdot T_{1/2}) \cdot \ln 2 \quad (2)$$

Выразим входящие в эту формулу величины в СИ и произведем вычисления:

$$A_0 = 5,15 \cdot 10^{12} \text{ Бк} = 5,15 \text{ ТБк.}$$

Активность изотопа уменьшается со временем по закону

$$A = A_0 e^{-\lambda t} \quad (3)$$

Заменив в формуле (3) постоянную распада  $\lambda$  ее выражением, получим

$$A = A_0 e^{-\ln 2 \cdot t / T_{1/2}} = A_0 (e^{\ln 2})^{-t / T_{1/2}} = A_0 / 2^{t / T_{1/2}}$$

Численное значение равно  $A = 8,05 \cdot 10^{10} \text{ Бк} = 80,5 \text{ ГБк.}$

Ответ.  $A = 8,05 \cdot 10^{10} \text{ Бк} = 80,5 \text{ ГБк.}$

**Задача 5.** Определить энергию  $E$ , которую нужно затратить для отрыва нейтрона от ядра  $^{23}\text{Na}_{11}$

**Решение.** После отрыва нейтрона число нуклонов  $A$  в ядре уменьшится на единицу, а число протонов  $Z$  останется неизменным; получится ядро  $^{22}\text{Na}$ . Ядро  $^{23}\text{Na}$  можно рассматривать как устойчивую систему, образовавшуюся в результате захвата свободного

нейтрона ядром  $^{22}\text{Na}$ . Энергия отрыва нейтрона от ядра  $^{23}\text{Na}$  равна энергии связи нейтрона с ядром  $^{22}\text{Na}$  ( $E = E_{\text{св}}$ ).

Выразив энергию связи нейтрона через дефект массы системы, получим

$$E = E_{\text{св}} = c^2 \Delta m = c^2 (m_{^{22}\text{Na}} + m_n - M_{^{23}\text{Na}})$$

При подстановке числовых значений заменяем массы ядер массами нейтральных атомов. Так как число электронов в оболочках атомов  $^{23}\text{Na}$  и  $^{22}\text{Na}$  одинаково, то разность масс атомов  $^{23}\text{Na}$  и  $^{22}\text{Na}$  от такой замены не изменится:

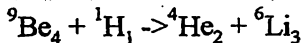
$$E = 931,4 \text{ МэВ/а. е. м.} \cdot 0,01334 \text{ а. е. м.} \approx 12,42 \text{ МэВ.}$$

После округления

$$E = 12,4 \text{ МэВ.}$$

Ответ.  $E = 12,4 \text{ МэВ.}$

**Задача 6.** Найти энергию реакции



если известно, что кинетические энергии протона  $T_{\text{H}} = 5,45 \text{ МэВ}$ , ядра гелия  $T_{\text{He}} = 4 \text{ МэВ}$  и что ядро гелия вылетело под углом  $90^\circ$  к направлению движения протона. Ядро-мишень  ${}^9\text{Be}_4$  неподвижно.

**Решение.** Энергия реакции  $Q$  есть разность между суммой кинетических энергий ядер-продуктов реакции и кинетической энергией налетающего ядра:

$$Q = T_{\text{Li}} + T_{\text{He}} - T_{\text{H}} \quad (1)$$

В этом выражении неизвестна кинетическая энергия  $T_{\text{Li}}$  лития. Для ее определения воспользуемся законом сохранения импульса:

$$p_{\text{H}} = p_{\text{He}} + p_{\text{Li}} \quad (2)$$

Векторы  $p_{\text{H}}$  и  $p_{\text{He}}$ , по условию задачи, взаимно перпендикулярны и, следовательно, вместе с вектором  $p_{\text{Li}}$  образуют прямоугольный треугольник. Поэтому

$$(p_{\text{H}})^2 = (p_{\text{He}})^2 + (p_{\text{Li}})^2 \quad (3)$$

Выразим в этом равенстве импульсы ядер через их кинетические энергии. Так как кинетические энергии ядер, по условию задачи, много меньше энергий покоя этих ядер, то можно воспользоваться классической формулой

$$p^2 = 2 m T \quad (4)$$

Заменив в уравнении (3) квадраты импульсов ядер их выражениями (4), после упрощения получим

$$m_{Li} T_{Li} = m_{He} T_{He} + m_H T_H$$

откуда

$$T_{Li} = (m_{He} T_{He} + m_H T_H) / m_{Li} = 3,58 \text{ МэВ}$$

Подставив числовые значения в формулу (1), найдем

$$Q = T_{Li} + T_{He} - T_H = 2,13 \text{ МэВ.}$$

*Ответ.*  $Q = 2,13 \text{ МэВ.}$

Вычислить дефект массы  $\Delta m$  и энергию связи  $E_{св}$  ядра  $^{11}_5\text{B}$ .

**Решение.** Дефект массы ядра определим по формуле

$$\Delta m = Zm_{^1_1\text{H}} + (A - Z)m_n - m_a, \quad (1)$$

Вычисление дефекта массы выполним во внесистемных единицах (а. е. м.). Для ядра  $^{11}_5\text{B}$   $Z=5$ ,  $A=11$ . Массы нейтральных атомов водорода ( $^1_1\text{H}$ ) и бора ( $^{11}_5\text{B}$ ), а также нейтрона ( $n$ ) найдем из табл. Подставим найденные массы в выражение (1) и произведем вычисления:

$$\Delta m = [5 \cdot 1,00783 + 11 - 5] \cdot 1,00867 - 11,00931 \text{ а. е. м., или}$$

$$\Delta m = 0,08186 \text{ а. е. м.}$$

Энергия связи ядра определяется соотношением

$$E_{св} = \Delta m c^2. \quad (2)$$

Энергию связи ядра также найдем во внесистемных единицах (МэВ).

Для этого дефект массы подставим в выражение (2) в а. е. м., а коэффициент пропорциональности ( $c^2$ ) — в МэВ/(а. е. м.), т. е.

$E_{св} = 931,4 \cdot 0,08186 \text{ МэВ} = 76,24 \text{ МэВ}$ , и округлим полученный результат до трех значащих цифр:

$$E_{св} = 76,2 \text{ МэВ.}$$

*Ответ.*  $E_{св} = 76,2 \text{ МэВ.}$

**Задача 7.** Решить задачу предыдущего примера, считая, что кинетические энергии и направления движения ядер неизвестны.

**Решение.** Применим закон сохранения релятивистской полной энергии

$$E_{Be} + E_H = E_{He} + E_{Li} \quad (1)$$

Релятивистская полная энергия ядра равна сумме энергии покоя и кинетической энергии:

$$E = mc^2 + T. \quad (2)$$

В формуле (2) для упрощения записи масса покоя обозначена не через  $m_0$ , а через  $m$ . Так как ядро-мишень  ${}^9\text{Be}$  неподвижно, то на основании формулы (2) уравнение (1) примет вид

$$m_{\text{Be}}c^2 + m_{\text{H}}c^2 + T_{\text{H}} = m_{\text{He}}c^2 + T_{\text{He}} + m_{\text{Li}}c^2 + T_{\text{Li}} \quad (3)$$

Определим энергию реакции:

$$Q = T_{\text{He}} + T_{\text{Li}} - T_{\text{H}} = c^2[(m_{\text{Be}} + m_{\text{H}}) - (m_{\text{He}} + m_{\text{Li}})]. \quad (4)$$

При числовом подсчете массы ядер заменим массами нейтральных атомов. Легко убедиться, что такая замена не повлияет на результат вычисления. В самом деле, так как масса  $m$  ядра равна разности между массой  $m_a$  нейтрального атома и массой  $Zm_e$  электронов, образующих электронную оболочку, то

$$Q = c^2 [(m_{\text{Be}} + 4m_e + m_{\text{H}} - m_e) - (m_{\text{He}} - 2m_e + m_{\text{Li}} - 3m_e)]. \quad (5)$$

Упростив уравнение (5), найдем

$$Q = c^2 [(m_{\text{Be}} + m_{\text{H}}) - (m_{\text{He}} + m_{\text{Li}})]. \quad (6)$$

Подставив числовые значения коэффициента пропорциональности  $c^2$  (МэВ/а. е. м.) и масс нейтральных атомов (а. е. м.), получим  $Q = 2,13$  МэВ, что совпадает с результатом, полученным в предыдущем примере 1.

Ответ.  $Q = 2,13$  МэВ.

**Задача 8.** Определить энергию  $E$ , которую нужно затратить для отрыва нейтрона от ядра  ${}^{23}\text{Na}_{11}$ .

**Решение.** После отрыва нейтрона число нуклонов  $A$  в ядре уменьшится на единицу, а число протонов  $Z$  останется неизменным; получится ядро  ${}^{22}\text{Na}$ . Ядро  ${}^{23}\text{Na}$  можно рассматривать как устойчивую систему, образовавшуюся в результате захвата свободного нейтрона ядром  ${}^{22}\text{Na}$ . Энергия отрыва нейтрона от ядра  ${}^{23}\text{Na}$  равна энергии связи нейтрона с ядром  ${}^{22}\text{Na}$  ( $E = E_{\text{св}}$ ).

Выразив энергию связи нейтрона через дефект массы системы, получим

$$E = E_{\text{св}} = c^2 \Delta m = c^2 (m_{22\text{Na}} + m_n - M_{23\text{Na}})$$

При подстановке числовых значений заменяем массы ядер массами нейтральных атомов. Так как число электронов в оболочках атомов  $^{23}\text{Na}$  и  $^{22}\text{Na}$  одинаково, то разность масс атомов  $^{23}\text{Na}$  и  $^{22}\text{Na}$  от такой замены не изменится:

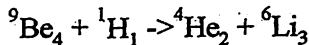
$$E = 931,4 \text{ МэВ/а. е. м.} \cdot 0,01334 \text{ а. е. м.} = 12,42 \text{ МэВ.}$$

После округления

$$E = 12,4 \text{ МэВ.}$$

Ответ.  $E = 12,4 \text{ МэВ}$

**Задача 9.** Найти энергию реакции если известно, что кинетические энергии протона  $T_H = 5,45 \text{ МэВ}$ , ядра гелия  $T_{He} = 4 \text{ МэВ}$  и что ядро гелия вылетело под углом  $90^\circ$  к направлению движения протона.



Ядро-мишень  ${}^9\text{Be}_4$  неподвижно.

**Решение.** Энергия реакции  $Q$  есть разность между суммой кинетических энергий ядер-продуктов реакции и кинетической энергией налетающего ядра:

$$Q = T_{Li} + T_{He} - T_H \quad (1)$$

В этом выражении неизвестна кинетическая энергия  $T_{Li}$  лития. Для ее определения воспользуемся законом сохранения импульса

$$p_H = p_{He} + p_{Li} \quad (2)$$

Векторы  $p_H$  и  $p_{He}$ , по условию задачи, взаимно перпендикулярны и, следовательно, вместе с вектором  $p_{Li}$  образуют прямоугольный треугольник. Поэтому

$$(p_H)^2 = (p_{He})^2 + (p_{Li})^2 \quad (3)$$

Выразим в этом равенстве импульсы ядер через их кинетические энергии. Так как кинетические энергии ядер, по условию задачи, много меньше энергий покоя этих ядер, то можно воспользоваться классической формулой

$$p^2 = 2mT \quad (4)$$

Заменив в уравнении (3) квадраты импульсов ядер их выражениями (4), после упрощения получим

$$m_{Li} T_{Li} = m_{He} T_{He} + m_H T_H$$

откуда

$$T_{Li} = (m_{He} T_{He} + m_H T_H) / m_{Li} = 3,58 \text{ МэВ}$$

Подставив числовые значения в формулу (1), найдем

$$Q = T_{\text{Li}} + T_{\text{He}} - T_{\text{H}} = 2,13 \text{ МэВ}$$

Ответ.  $Q = 2,13 \text{ МэВ}$ .

**Задача 10.** Решить задачу предыдущего примера, считая, что кинетические энергии и направления движения ядер неизвестны.

**Решение.** Применим закон сохранения релятивистской полной энергии

$$E_{\text{Be}} + E_{\text{H}} = E_{\text{He}} + E_{\text{Li}} \quad (1)$$

Релятивистская полная энергия ядра равна сумме энергии покоя и кинетической энергии:

$$E = mc^2 + T. \quad (2)$$

В формуле (2) для упрощения записи масса покоя обозначена не через  $m_0$ , а через  $m$ . Так как ядро-мишень  ${}^9\text{Be}$  неподвижно, то на основании формулы (2) уравнение (1) примет вид

$$m_{\text{Be}}c^2 + m_{\text{H}}c^2 + T_{\text{H}} = m_{\text{He}}c^2 + T_{\text{He}} + m_{\text{Li}}c^2 + T_{\text{Li}} \quad (3)$$

Определим энергию реакции:

$$Q = T_{\text{He}} + T_{\text{Li}} - T_{\text{H}} = c^2[(m_{\text{Be}} + m_{\text{H}}) - (m_{\text{He}} + m_{\text{Li}})]. \quad (4)$$

При числовом подсчете массы ядер заменим массами нейтральных атомов. Легко убедиться, что такая замена не повлияет на результат вычисления. В самом деле, так как масса  $m$  ядра равна разности между массой  $m_a$  нейтрального атома и массой  $Zm_e$  электронов, образующих электронную оболочку, то

$$Q = c^2 [(m_{\text{Be}} + 4m_e + m_{\text{H}} - m_e) - (m_{\text{He}} - 2m_e + m_{\text{Li}} - 3m_e)]. \quad (5)$$

Упростив уравнение (5), найдем

$$Q = c^2 [(m_{\text{Be}} + m_{\text{H}}) - (m_{\text{He}} + m_{\text{Li}})]. \quad (6)$$

Подставив числовые значения коэффициента пропорциональности  $c^2$  (МэВ/а. е. м.) и масс нейтральных атомов (а. е. м.), получим

$Q = 2,13 \text{ МэВ}$ , что совпадает с результатом, полученным в предыдущем примере 1.

Ответ.  $Q = 2,13 \text{ МэВ}$

Таблица вариантов

№ вар	Номера задач				№ вар	Номера задач			
1	4	26	41	92	26	25	66	91	116
2	5	25	42	93	27	24	65	90	117
3	6	24	43	94	28	23	64	89	118
4	7	23	44	95	29	22	63	88	119
5	8	22	45	96	30	21	62	87	120
6	9	21	46	97	31	20	61	86	121
7	10	20	47	98	32	19	60	85	122
8	11	19	48	99	33	18	59	84	123
9	12	18	49	100	34	17	58	83	124
10	13	17	50	101	35	16	57	82	125
11	14	1	51	102	36	15	56	81	126
12	15	27	52	103	37	14	55	80	127
13	1	28	53	104	38	13	54	79	128
14	2	29	54	105	39	12	53	78	129
15	3	30	55	106	40	11	52	77	130
16	16	31	56	107	41	10	51	76	131
17	17	32	57	108	42	9	50	75	132
18	18	33	58	109	43	8	49	74	133
19	19	34	59	110	44	7	48	73	39
20	20	35	60	111	45	6	47	72	38
21	21	36	61	112	46	5	46	71	37
22	22	37	62	113	47	4	45	70	36
23	23	38	63	114	48	3	44	69	35
24	24	39	64	115	49	2	43	68	34
25	25	40	65	105	50	1	42	67	134



### Задачи для самостоятельного решения

1. Укажите, сколько нуклонов, протонов, нейтронов содержат ядра  ${}^3_2\text{He}$ ;
2. Укажите, сколько нуклонов, протонов, нейтронов содержат ядра  ${}^{10}_5\text{B}$ ;
3. Укажите, сколько нуклонов, протонов, нейтронов содержат ядра  ${}^{23}_{11}\text{Na}$ ;
4. Укажите, сколько нуклонов, протонов, нейтронов содержат ядра  ${}^{54}_{26}\text{Fe}$ ;
5. Укажите, сколько нуклонов, протонов, нейтронов содержат ядра  ${}^{104}_{47}\text{Ag}$ ;
6. Укажите, сколько нуклонов, протонов, нейтронов содержат ядра  ${}^{238}_{92}\text{U}$ .
7. Ядро радия  ${}^{226}_{88}\text{Ra}$  выбросило  $\alpha$ -частицу (ядро атома гелия  ${}^4_2\text{He}$ ). Найти массовое число  $A$  и зарядовое число  $Z$  вновь образовавшегося ядра. По таблице Д. И. Менделеева определить, какому элементу это ядро соответствует.
8. Ядро азота  ${}^{14}_7\text{N}$  захватило  $\alpha$ -частицу и испустило протон. Определить массовое число  $A$  и зарядовое число  $Z$  образовавшегося в результате этого процесса ядра. Указать, какому элементу это ядро соответствует.
9. Ядро цинка  ${}^{65}_{30}\text{Zn}$  захватило электрон из К-оболочки атома (К-захват). Указать, в ядро какого элемента превратилось ядро цинка (написать химический символ элемента, массовое и зарядовое число).
10. Ядро бериллия  ${}^7_4\text{Be}$  захватило электрон из К-оболочки атома. Какое ядро образовалось в результате К-захвата?
11. В ядре изотопа углерода  ${}^{14}_6\text{C}$  один из нейтронов превратился в протон ( $\beta^-$ -распад). Какое ядро получилось в результате такого превращения?
12. Два ядра гелия ( ${}^4_2\text{He}$ ) слились в одно ядро, и при этом был выброшен протон. Укажите, ядро какого элемента образовалось в результате такого превращения (приведите символическую запись ядра).

13. В ядре изотопа кремния  $^{27}_{14}\text{Si}$  один из протонов превратился в нейтрон ( $\beta^+$ -распад). Какое ядро получилось в результате такого превращения?

14. Ядро цинка  $^{62}_{30}\text{Zn}$  захватило электрон из К-оболочки и спустя некоторое время испустило позитрон. Какое ядро получилось в результате таких превращений?

15. Покоившееся ядро радона  $^{220}_{86}\text{Rn}$  выбросило  $\alpha$ -частицу. В какое ядро превратилось ядро радона?

16. Какова вероятность  $W$  того, что данный атом в изотопе радиоактивного йода  $^{131}\text{I}$  распадается в течение ближайшей секунды?

17. Определить постоянные распада  $\lambda$  изотопов радия  $^{219}_{88}\text{Ra}$ .

18. Определить постоянные распада  $\lambda$  изотопов радия  $^{226}_{88}\text{Ra}$ .

19. Постоянная распада  $\lambda$  рубидия  $^{89}\text{Rb}$  равна  $0,00077 \text{ c}^{-1}$ . Определить его период полураспада  $T_{1/2}$ .

20. Какая часть начального количества атомов распадется за один год в радиоактивном изотопе тория  $^{228}\text{Th}$ ?

21. Какая часть начального количества атомов радиоактивного актиния  $^{225}\text{Ac}$  останется через 5 сут?

22. Какая часть начального количества атомов радиоактивного актиния  $^{225}\text{Ac}$  останется через 15 сут?

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

24. За какое время  $t$  распадается  $\frac{1}{4}$  начального количества ядер радиоактивного изотопа, если период его полураспада  $T_{1/2}=24 \text{ ч}$ ?

25. За время  $t=8 \text{ сут}$  распалось  $k=\frac{3}{4}$  начального количества ядер радиоактивного изотопа. Определить период полураспада  $T_{1/2}$ .

26. При распаде радиоактивного полония  $^{210}\text{Po}$  в течение времени  $t=1 \text{ ч}$  образовался гелий  $^4\text{He}$ , который при нормальных условиях занял объем  $V=89,5 \text{ см}^3$ . Определить период полураспада  $T_{1/2}$  полония.

27. Период полураспада  $T_{1/2}$  радиоактивного нуклида равен 1 ч. Определить среднюю продолжительность  $\tau$  жизни этого нуклида.

28. Какая часть начального количества радиоактивного нуклида распадается за время  $t$ , равное средней продолжительности  $\tau$  жизни этого нуклида?

29. Определить число  $N$  атомов, распадающихся в радиоактивном изотопе за время  $t=10$  с, если его активность  $A=0,1$  МБк. Считать активность постоянной в течение указанного времени.
30. Активность  $A$  препарата уменьшилась в  $k=250$  раз. Скольким периодам полураспада  $T_{1/2}$  равен протекший промежуток времени  $t$ ?
31. За время  $t=1$  сут активность изотопа уменьшилась от  $A_1=118$  ГБк до  $A_2=7,4$  ГБк. Определить период полураспада  $T_{1/2}$  этого нуклида.
32. На сколько процентов снизится активность  $A$  изотопа иридия  $^{192}\text{Ir}$  за время  $t=30$  сут?
33. Определить промежуток времени  $t$ , в течение которого активность  $A$  изотопа стронция  $^{90}\text{Sr}$  уменьшится в  $k_1=10$  раз?
34. Определить промежуток времени  $t$ , в течение которого активность  $A$  изотопа стронция  $^{90}\text{Sr}$  уменьшится в  $k_2=100$  раз?
35. Счетчик Гейгера, установленный вблизи препарата радиоактивного изотопа серебра, регистрирует поток  $\beta$ -частиц. При первом измерении поток  $\Phi_1$  частиц был равен  $87$   $\text{с}^{-1}$ , а по истечении времени  $t=1$  сут поток  $\Phi_2$  оказался равным  $22$   $\text{с}^{-1}$ . Определить период полураспада  $T_{1/2}$  изотопа.
36. Определить активность  $A$  фосфора  $^{32}\text{P}$  массой  $m=1$  мг.
37. Вычислить удельную активность  $a$  кобальта  $^{60}\text{Co}$ .
38. Найти отношение массовой активности  $a_1$  стронция  $^{90}\text{Sr}$  к массовой активности  $a_2$  радия  $^{226}\text{Ra}$ .
39. Найти массу  $m_1$  урана  $^{238}\text{U}$ , имеющего такую же активность  $A$ , как стронций  $^{90}\text{Sr}$  массой  $m_2=$  мг.
40. Определить массу  $m_2$  радона  $^{222}\text{Rn}$ , находящегося в радиоактивном равновесии с радием  $^{226}\text{Ra}$  массой  $m_1=1$  г.
41. Уран  $^{234}\text{U}$  является продуктом распада наиболее распространенного изотопа урана  $^{238}\text{U}$ . Определить период полураспада  $T_{1/2}$  урана  $^{234}\text{U}$ , если его массовая доля  $\omega$  в естественном уране  $^{238}\text{U}$  равна  $6 \cdot 10^{-5}$ .
42. Радиоактивный изотоп  $^{22}_{11}\text{Na}$  излучает  $\gamma$ -кванты энергией  $\epsilon=1,28$  МэВ. Определить мощность  $P$  гамма-излучения и энергию  $W$ , излучаемую за время  $t=5$  мин изотопом натрия массой  $m=5$  г. Считать, что при каждом акте распада излучается один  $\gamma$ -фотон с указанной энергией.

43. Точечный изотропный радиоактивный источник создает на расстоянии  $r = 1\text{ м}$  интенсивность  $I$  гамма-излучения, равную  $1,6\text{ мВт/м}^2$ . Принимая, что при каждом акте распада ядра излучается один  $\gamma$ -фотон с энергией  $\epsilon = 1,33\text{ МэВ}$ , определить активность  $A$  источника.

44. Определить интенсивность  $I$  гамма-излучения на расстоянии  $r = 5\text{ см}$  от точечного изотропного радиоактивного источника, имеющего активность  $A = 148\text{ ГБк}$ . Считать, что при каждом акте распада излучается в среднем  $n = 1,8$   $\gamma$ -фотонов с энергией  $\epsilon = 0,51\text{ МэВ}$  каждый.

45. Используя известные значения масс нейтральных атомов  ${}^2_1\text{H}$  электрона, определить массы  $m_p$  протона,  $m_d$  дейтона,  $m_\alpha$  ядра.

46. Используя известные значения масс нейтральные атома  ${}^1_1\text{H}$  и электрона, определить массы  $m_p$  протона,  $m_d$  дейтона,  $m_\alpha$  ядра.

47. Используя известные значения масс нейтральные атома  ${}^{12}_6\text{C}$  и электрона, определить массы  $m_p$  протона,  $m_d$  дейтона,  $m_\alpha$  ядра  ${}^{12}_6\text{C}$ .

48. Масса  $m_\alpha$  альфа-частицы (ядро гелия  ${}^4_2\text{He}$ ) равна  $4,00150\text{ а. е. м}$ . Определить массу  $m_\alpha$  нейтрального атома гелия.

49. Зная массу  $m_\alpha$  нейтрального атома изотопа лития  ${}^7_3\text{Li}$ , определить массы  $m_1$ ,  $m_2$  и  $m_3$  ионов лития: однозарядного ( ${}^7_3\text{Li}^+$ ), двухзарядного ( ${}^7_3\text{Li}^{++}$ ) трехзарядного ( ${}^7_3\text{Li}^{+++}$ ).

50. Определить дефект массы  $\Delta m$  ядра атома тяжелого водорода.

51. Определить энергию связи  $E_{св}$  ядра атома тяжелого водорода.

52. Определить энергию  $E_{св}$ , которая освободится при соединении одного протона и двух нейтронов в атомное ядро.

53. Определить удельную энергию связи  $E_{уд}$  ядра  ${}^{12}_6\text{C}$ .

54. Энергия связи  $E_{св}$  ядра, состоящего из двух протонов и одного нейтрона, равна  $7,72\text{ МэВ}$ . Определить массу  $m_\alpha$  нейтрального атома, имеющего это ядро.

55. Определить массу  $m_\alpha$  нейтрального атома, если ядро этого атома состоит из трех протонов и двух нейтронов и энергия связи  $E_{св}$  ядра равна  $26,3\text{ МэВ}$ .

56. Атомное ядро, поглотившее  $\gamma$ -фотон ( $\lambda = 0,47\text{ пм}$ ), пришло в возбужденное состояние и распалось на отдельные нуклоны, разлетевшиеся в разные стороны. Суммарная кинетическая энергия  $T$  нуклонов равна  $0,4\text{ МэВ}$ . Определить энергию связи  $E_{св}$  ядра.

57. Какую наименьшую энергию  $E$  нужно затратить, чтобы разделить на отдельные нуклоны ядра  ${}^7_3\text{Li}$  и  ${}^7_4\text{Be}$ ? Почему для ядра бериллия эта энергия меньше, чем для ядра лития?
58. Определить энергию  $E$ , которая выделится при образовании из протонов и нейтронов ядер гелия  ${}^4_2\text{He}$  массой  $m=1$  г.
59. Какую наименьшую энергию  $E$  нужно затратить, чтобы оторвать один нейтрон от ядра азота  ${}^{14}_7\text{N}$ ?
60. Найти минимальную энергию  $E$ , необходимую для удаления одного протона из ядра азота  ${}^{14}_7\text{N}$ .
61. Энергия связи  $E_{св}$  ядра кислорода  ${}^{18}_8\text{O}$  равна 139,8 МэВ, ядра фтора  ${}^{19}_9\text{F}$  — 147,8 МэВ. Определить, какую минимальную энергию  $E$  нужно затратить, чтобы оторвать один протон от ядра фтора.
62. Какую наименьшую энергию связи  $E$  нужно затратить, чтобы разделить ядро  ${}^4_2\text{He}$  на две одинаковые части?
63. Определить наименьшую энергию  $E$ , необходимую для разделения ядра углерода  ${}^{12}_6\text{C}$  на три одинаковые части.
64. Определить порядковый номер  $Z$  и массовое число  $A$  частицы, обозначенной буквой  $x$ , в символической записи ядерной реакции:
65.  ${}^{14}_6\text{C} + {}^4_2\text{He} \rightarrow {}^{17}_8\text{O} + x$
66. То же, для реакции  ${}^{27}_{13}\text{Al} + x \rightarrow {}^1_1\text{H} + {}^{26}_{12}\text{Mg}$ .
67. Определить энергию  $Q$  ядерной реакции: (Освобождается или поглощается энергия в каждой из указанных реакций?)  
 ${}^9_4\text{Be} + {}^2_1\text{H} \rightarrow {}^{10}_5\text{B} + {}^1_0\text{n}$ ;
68. То же, для реакции  ${}^6_3\text{Li} + {}^2_1\text{H} \rightarrow {}^4_2\text{He} + {}^4_2\text{He}$ ;
69. То же, для реакции  ${}^7_3\text{Li} + {}^4_2\text{He} \rightarrow {}^{10}_5\text{B} + {}^1_0\text{n}$ .
70. То же, для реакции  ${}^7_3\text{Li} + {}^1_1\text{H} \rightarrow {}^7_4\text{Be} + {}^1_0\text{n}$ ;
71. То же, для реакции  ${}^{44}_{20}\text{Ca} + {}^1_1\text{H} \rightarrow {}^{41}_{19}\text{K} + {}^4_2\text{He}$ ;
72. Найти энергию  $Q$  ядерных реакций: 1)  ${}^3_1\text{H}(\text{p},\gamma){}^4_2\text{He}$ ;  
 2)  ${}^2_1\text{H}(\text{d},\gamma){}^4_2\text{He}$ ;  
 3)  ${}^2_1\text{H}(\text{n},\gamma){}^3_1\text{H}$ ;  
 4)  ${}^{19}_9\text{F}(\text{p},\alpha){}^{16}_8\text{O}$ .
73. При соударении  $\gamma$ -фотона с дейтоном последний может расщепиться на два нуклона. Написать уравнение ядерной реакции и

определить минимальную энергию  $\gamma$ -фотона, способного вызывать такое расщепление.

74. Определить энергию  $Q$  ядерной реакции  ${}^9\text{Be}(n, \gamma){}^{10}\text{Be}$ , если известно, что энергия связи  $E_{\text{св}}$  ядра  ${}^9\text{Be}$  равна 58,16 МэВ, а ядра  ${}^{10}\text{Be}$  — 64,98 МэВ.

75. Найти энергию  $Q$  ядерной реакции  ${}^{14}\text{N}(n, p){}^{14}\text{C}$ , если энергия связи  $E_{\text{св}}$  ядра  ${}^{14}\text{N}$  равна 104,66 МэВ, а ядра  ${}^{14}\text{C}$  — 105,29 МэВ.

76. Определить суммарную кинетическую энергию  $T$  ядер, образовавшихся в результате реакции  ${}^{13}\text{C}(d, \alpha){}^{11}\text{B}$ , если кинетическая энергия  $T_1$  дейтона равна 1,5 МэВ. Ядро-мишень  ${}^{13}\text{C}$  считать неподвижным.

77. При ядерной реакции  ${}^9\text{Be}(\alpha, n){}^{12}\text{C}$  освобождается энергия  $Q=5,70$  МэВ. Пренебрегая кинетическими энергиями ядер бериллия и гелия и принимая их суммарный импульс равным нулю, определить кинетические энергии  $T_1$  и  $T_2$  продуктов реакции.

78. Пренебрегая кинетическими энергиями ядер дейтерия и принимая их суммарный импульс равным нулю, определить кинетические энергии  $T_1$  и  $T_2$  продуктов реакции  $2{}_1^2\text{H} + 2{}_1^2\text{H} \rightarrow 3{}_2^4\text{He} + 1{}_0^1\text{n}$

79. Пренебрегая кинетическими энергиями ядер дейтерия и принимая их суммарный импульс равным нулю, определить импульсы  $p_1$  и  $p_2$  продуктов реакции  $2{}_1^2\text{H} + 2{}_1^2\text{H} \rightarrow 3{}_2^4\text{He} + 1{}_0^1\text{n}$

80. При реакции  ${}^6\text{Li}(d, p){}^7\text{Li}$  освобождается энергия  $Q=5,028$  МэВ. Определить массу  $m$   ${}^6\text{Li}$ . Массы остальных атомов взять из табл. 21.

81. При реакции  ${}^2\text{H}(d, p){}^3\text{H}$  освобождается энергия  $Q=4,033$  МэВ. Определить массу  $m$  атома  ${}^3\text{H}$ . Массы остальных атомов взять из табл. 21.

82. При ядерной реакции  ${}^3\text{He}(d, p){}^4\text{He}$  освобождается энергия  $Q=18,34$  МэВ. Определить относительную атомную массу  $A_r$  изотопа гелия  ${}^3\text{He}$ . Массы остальных атомов взять из табл. 21.

83. Определить кинетическую энергию  $T$  теплового нейтрона при температуре  $t$  окружающей среды, равной 27 °С.

84. Ядро урана  ${}^{235}\text{U}$ , захватив один нейтрон, разделилось на два осколка, причем освободилось два нейтрона. Одним из осколков оказалось ядро ксенона  ${}^{140}\text{Xe}$ . Определить порядковый номер  $Z$  и массовое число  $A$  второго осколка.

85. При делении одного ядра урана-235 выделяется энергия  $Q=200$  МэВ. Какую долю энергии покоя ядра урана-235 составляет выделившаяся энергия?
86. Определить энергию  $E$ , которая освободится при делении всех ядер, содержащихся в уране-235 массой  $m = 1$  г.
87. Сколько ядер урана-235 должно делиться за время  $t = 1$  с, чтобы тепловая мощность  $P$  ядерного реактора была равной 1 Вт?
88. Определить массовый расход  $m_t$  ядерного горючего  $^{235}\text{U}$  в ядерном реакторе атомной электростанции. Тепловая мощность  $P$  электростанции равна 10 МВт. Принять энергию  $Q$ , выделяющуюся при одном акте деления, равной 200 МэВ. КПД электростанции составляет 20 %.
89. Найти электрическую мощность  $P$  атомной электростанции, расходующей 0,1 кг урана-235 в сутки, если КПД  $\eta$  станции равен 16%.
90. Определить энергию  $Q$  альфа-распада ядра полония  $^{210}_{84}\text{Po}$ .
91. Покоившееся ядро полония  $^{210}_{84}\text{Po}$  выбросило  $\alpha$ -частицу с кинетической энергией  $T = 5,3$  МэВ. Определить кинетическую энергию  $T$  ядра отдачи.
92. Покоившееся ядро полония  $^{210}_{84}\text{Po}$  выбросило  $\alpha$ -частицу с кинетической энергией  $T = 5,3$  МэВ. Определить полную энергию  $Q$ , выделившуюся при  $\alpha$ -распаде.
93. Ядро углерода  $^{14}_6\text{C}$  выбросило отрицательно заряженную  $\beta$ -частицу и антинейтрино. Определить полную энергию  $Q$  бета-распада ядра.
94. Неподвижное ядро кремния  $^{31}_{14}\text{Si}$  выбросило отрицательно заряженную  $\beta$ -частицу с кинетической энергией  $T = 0,5$  МэВ. Пренебрегая кинетической энергией ядра отдачи, определить кинетическую энергию  $T_1$  антинейтрино.
95. Определить энергию  $Q$  распада ядра углерода  $^{10}_6\text{C}$ , выбросившего позитрон и нейтрино.
96. Ядро атома азота  $^{13}_7\text{N}$  выбросило позитрон. Кинетическая энергия  $T_e$  позитрона равна 1 МэВ. Пренебрегая кинетической энергией ядра отдачи, определить кинетическую энергию  $T_\nu$  нейтрино, выброшенного вместе с позитроном.
97. Свободный нейтрон радиоактивен. Выбрасывая электрон и антинейтрино, он превращается в протон. Определить суммарную кинетическую энергию  $T$  всех частиц, возникающих в процессе

превращения нейтрона. Признать, что кинетическая энергия нейтрона равна нулю и что масса покоя антинейтрино пренебрежимо мала.

98. Фотон с энергией  $\epsilon = 3 \text{ МэВ}$  в поле тяжелого ядра превратился в пару электрон — позитрон. Принимая, что кинетическая энергия частиц одинакова, определить кинетическую энергию  $T$  каждой частицы.

99. Электрон и позитрон, имевшие одинаковые кинетические энергии, равные  $0,24 \text{ МэВ}$ , при соударении превратились в два одинаковых фотона. Определить энергию  $\epsilon$  фотона.

100. Электрон и позитрон, имевшие одинаковые кинетические энергии, равные  $0,24 \text{ МэВ}$ , при соударении превратились в два одинаковых фотона. Определить соответствующую ему длину волны  $\lambda$ .

101. Нейтральный  $\pi$ -мезон ( $\pi^0$ ), распадаясь, превращается в два одинаковых фотона. Определить энергию  $\epsilon$  фотона. Кинетической энергией и импульсом мезона пренебречь.

102. Как изменится положение химического элемента в таблице Менделеева после  $\alpha$ -распада ядер его атомов?

103. Происходит перемещение на два места влево.

104. Как изменится положение химического элемента в таблице Менделеева после  $\beta$ -распада ядер его атомов?

105. Происходит перемещение на одно место вправо.

106. Во что превращается изотоп тория ( $^{234}\text{Th}_{90}$ ), ядра которого претерпевают три последовательных  $\alpha$ -распада?

107. Имеется урановый препарат с активностью  $20,7 \text{ МБк}$ . Определить в препарате массу изотопа  $^{235}\text{U}_{92}$  с периодом полураспада  $7,1 \cdot 10^8 \text{ лет}$ .

108. Во что превращается изотоп  $^{238}\text{U}_{92}$  после  $\alpha$ -распада и двух  $\beta$ -распадов?  $^{234}\text{U}_{92}$

109. Во что превращается изотоп  $^{210}\text{Tl}_{81}$  после трех последовательных  $\beta$  распадов и одного  $\alpha$ -распада?

110. За какое время распадется  $80\%$  атомов радиоактивного изотопа хрома ( $^{51}\text{Cr}_{24}$ ), если его период полураспада  $27,8 \text{ сутка}$ ?

111. Ядра изотопа  $^{232}\text{Th}_{90}$  претерпевают  $\alpha$ -распад, два  $\beta$ -распада и еще один  $\alpha$ -распад. Какие ядра после этого получаются?

112.  $^{224}\text{Ra}_{88}$ .

113. Ядро изотопа  $^{211}\text{Bi}_{83}$  получилось из другого ядра после одного  $\alpha$ - и одного  $\beta$ -распада. Что это за ядро?

114. При обстреле ядер бора ( $^{11}\text{B}_5$ ) протонами получается



бериллий ( $^8\text{Be}_4$ ). Какие еще ядра получаются при этой реакции и сколько энергии освобождается?

115. Ядро  $^{216}\text{Po}_{84}$  образовалось после двух последовательных  $\alpha$ -распадов. Из какого ядра получился полоний?

116. При проверки излучения радиоактивного препарата обнаружена  $\alpha$ -частицы с разницей на две длины пробега. Какой вывод можно сделать исходя из этого?

117. Изменяется ли химическая природа элемента при испускании  $\gamma$ -излучения его ядрами?

118. В радиоактивном препарате наблюдается  $6,4 \cdot 10^8$  ядерных распадов за одну минуту. Определить активность препарата в Беккерелях ( $1\text{Бк}=1\text{ расп/с}$ ).

119. Чем обусловлена потеря энергии  $\alpha$ -частицей при ее движении в воздухе?

120. Активность препарата составляет 25 МБк. Сколько ядра распадаются за единицу времени?

121. При исследовании излучения радиоактивного препарата были обнаружены  $\alpha$ -частицы с двумя различными длинами пробега. Какое заключение из этого можно сделать?

122. При обстреле ядер бора ( $^{11}\text{B}_5$ ) протонами получается бериллий ( $^8\text{Be}_4$ ). Какие еще ядра получаются при этой реакции и сколько энергии освобождается?

123. Чем характеризуется быстрота распада радиоактивного вещества?

124. Было установлено, что в радиоактивном препарате происходит  $6,4 \cdot 10^8$  распадов ядер в минуту. Определить активность этого препарата в беккерелях ( $1\text{ Бк}=1\text{ расп/с}$ ).

125. При бомбардировке алюминия ( $^{27}\text{Al}_{13}$ )  $\alpha$ -частицами образуется фосфор ( $^{30}\text{P}_{15}$ ). Записать эту реакцию и подсчитать выделенную энергию.

126. Сколько распадов ядер за минуту происходит в препарате, активность которого составляет 104 МБк?

127. Какая часть атомов радиоактивного изотопа кобальта ( $^{58}\text{Co}_{27}$ ) распадается за 20 суток, если период его полураспада составляет 72 суток? Сколько времени понадобится, чтобы распалась такая же часть атомов изотопа  $^{60}\text{Co}_{27}$ , период полураспада которого составляет 5,3 года?

128. Активность препарата составляет 25 МБк. Сколько ядер распадается при этом в единицу времени?

129. Какие ядерные реакции происходят при облучении  $\alpha$ -

частицами ядер изотопа азота ( $^{14}\text{N}_7$ )? Ядер бериллия ( $^9\text{Be}_4$ )?

130. За какое время в препарате с постоянной активностью 8,2 МБк распадается  $25 \cdot 10^8$  ядер?

131. При обстреле лития ( $^7\text{Li}_3$ ) протонами получается гелий. Записать эту реакцию. Сколько энергии освобождается при такой реакции? Считая, что эта энергия поровну распределяется между двумя  $\alpha$ -частицами, найти их скорость. Начальную кинетическую энергию протонов и ядер лития принять равной нулю.

132. В свинцовой капсуле находится  $4,5 \cdot 10^{18}$  атомов радия. Определить активность радия, если его период полураспада равен 1620 лет.

133. При обстреле ядер фтора ( $^{19}\text{F}_9$ ) протонами образуется кислород ( $^{16}\text{O}_8$ ). Сколько энергии освобождается при этой реакции и какие еще ядра образуются?

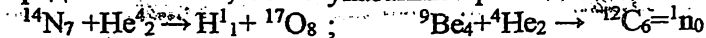
134. В капсуле находится 0,15 моль изотопа плутония ( $^{239}\text{Pu}_{94}$ ). Определить активность этого изотопа, если его период полураспада равен  $2,44 \cdot 10^4$  лет.

### Ответы задач 6.2-темы

1. 3, 2, 1; 2. 10, 5, 5; 3. 23, 11, 12; 4. 54, 26, 28; 5. 104, 47, 57; 6. 238, 92, 146.  $7.A = 222; Z = 86; {}^{222}_{86}\text{Rn}$ . 8.  $A = 17; Z = 8; {}^{17}_8\text{O}$ . 9.  ${}^{65}_{29}\text{Cu}$ . 10. Образовалось ядро лития  ${}^7_3\text{Li}$ . 11.  ${}^{14}_7\text{N}$ . 12.  ${}^7_3\text{Li}$ . 13.  ${}^{27}_{13}\text{Al}$ . 14.  ${}^{62}_{28}\text{Ni}$ . 15.  ${}^{238}_{94}\text{Pu} \rightarrow {}^{234}_{92}\text{U} \rightarrow {}^{230}_{90}\text{Th} \rightarrow {}^{226}_{88}\text{Ra} \rightarrow {}^{222}_{86}\text{Rn} \rightarrow {}^{218}_{84}\text{Po} \rightarrow {}^{214}_{82}\text{Pb}$ . 16.  $10^{-6}$ . 17.  $700 \text{ с}^{-1}$ ; 18.  $13,6 \text{ пс}^{-1}$ . 19. 15 мин. 20.  $10^{-4}$ . 21. 0,71; 22. 0,36. 23. В 9 раз; 24. 10,5 ч. 25. 4 дня. 26. 138 сут. 27. 1,44 года. 28. 63,3%. 29.  $10^6$  атомов. 30. 8. 31.6 ч. 32. На 24%. 33. 93 года; 34. 186 лет. 35. 0,5 сут. 36. 10,5 ТБк. 37. 40,7 ТБк/г. 38. 145. 39.  $m_2 = m_1 M_2 T_2 / (M_1 T_1) = 425 \text{ кг}$  ( $M_1$  и  $T_1$  – молярная масса и период полураспада  ${}^{90}\text{Sr}$ ;  $M_2$  и  $T_2$  – то же, для  ${}^{238}\text{U}$ ). 40. 6,33 мкг. 41.  $2,7 \cdot 10^5$  лет. 42.  $W = \ln 2 \frac{m N_A}{M T_{1/2}} = 70,6 \text{ кДж}$
- ( $M$  и  $T_{1/2}$  – молярная масса и период полураспада  ${}^{22}\text{Na}$ ). 43.  $A = 4\pi r^2 I / \varepsilon = 94,4 \text{ ГБк}$ . 44.  $I = \frac{n A \varepsilon}{4\pi r^2} = 0,6 \text{ Вт/м}^2$ . 45. 2,01355 а.е.м.; 46. 1,00728 а.е.м.; 47. 11,9967 а.е.м. 48. 4,00260 а.е.м. 49. 7,01546 а.е.м.; 50. 7,01491 а.е.м.; 51. 7,01436 а.е.м. 52. 0,00240 а.е.м.; 53. 2,23 МэВ. 54. 8,49 МэВ. 55. 7,68 МэВ/нуклон. 56. 3,01604 а.е.м. 57. 5,01258 а.е.м. (атом лития  ${}^7_3\text{Li}$ ). 58. 2,2 МэВ. 59. 39,2 МэВ; 37,6 МэВ. 60. 682 ГДж. 61. 10,6 МэВ. 62. 7,55 МэВ. 63. 8,0 МэВ. 64. 23,8 МэВ. 65. 7,26 МэВ. 66.  $A = 1; Z = 0$ ; частица – нейтрон ( ${}^1_0\text{n}$ ). 67.  $A = 0; Z = 0$ ; частица – фотон. 68. 4,36 МэВ, освобождается; 69. 22,4 МэВ, освобождается; 70. 2,80 МэВ, поглощается; 71. 1,64 МэВ, поглощается; 72. 1,05 МэВ, поглощается. 73. 1) 19,8 МэВ, освобождается; 74. 2) 23,8 МэВ, освобождается; 75. 3) 6,26 МэВ, освобождается; 76. 4) 8,12 МэВ, освобождается. 77. 2,23 МэВ. 78. 6,82 МэВ. 79. 0,63 МэВ. 80. 6,7 МэВ. 81. 5,26 МэВ; 044 МэВ. 82. 0,82 МэВ; 2,44 МэВ; 83.  $|p_{He}| = |p_n| = 3,6 \cdot 10^{-20} \text{ кг} \cdot \text{м/с}$ . 84. 6,01514 а.е.м. 85. 3,01604 а.е.м. 86. 3,01604. 87.  $6,22 \cdot 10^{-21} \text{ Дж}$ . 88.  ${}^{94}_{38}\text{Sr}$ . 89. 0,00091. 90. 82 ГДж. 91.  $3,1 \cdot 10^{10}$ . 92. 53 г. 93. 15 МВт. 94. 541 МэВ. 95. 0,104 МэВ; 96. 5,40 МэВ. 97. 0,156 МэВ. 98. 1 МэВ. 99. 26 МэВ. 100. 0,2 МэВ. 101. 0,78 МэВ. 102. 0,99 МэВ. 103. 0,75 МэВ, 104. 1,65 пм. 105. 67,5 МэВ. 106. Перемещается налево на два место. 107. 0,26 кг. 108.  ${}^{222}\text{Po}_{84}$ . 109.  ${}^{234}\text{U}_{88}$ . 110. Через 64,5 сутка. 111.  ${}^{224}\text{Ra}_{88}$ . 112.  ${}^{215}\text{Po}_{84}$ . 113.  ${}^{224}\text{Ra}_{88}$ . 114.  $\text{He}^4_2$ ; 8,6 МэВ. 115. Ионизацией воздуха. 116. 11,25. 117. Периодом полураспада. 118. 10,7 МБк. 119.  $6,2 \cdot 10^9$  расп./мин. 120.  $6,76 \cdot 10^{-4} \text{ Ки}$ . 121. 305 с = 5 мин 5 с. 122. 1 МБк. 123. Периодом полураспада. 124. 0,26 кг. 125. Тогда, когда время

наблюдения менее чем периода полураспада. 126. После 64,5 суток.

127. 17,5%; за 1,5 года. 128.  $H^1$ ,  $H^2$ ,  $H^3$ ; Изотоп  $H^3$  являясь радиоактивным, ниже указанные распадают:  $H^3 \rightarrow He^3 + e^-$ . 129.



130.  $^{14}N_7 + He^4_2 \rightarrow H^1_1 + ^{17}O_8$ ;  $^9Be_4 + ^4He_2 \rightarrow ^{12}C_6 + ^1n_0$  131.  $^7Li_3 + H^1_1 \rightarrow 2He^4_2$ ; 17,4 МэВ;  $2,0 \cdot 10^7$  м/с. 132. 8,15 MeV;  $He^4_2$ . 133.  $^4He_2$ ; 8,6 МэВ. 134.  $Al^{27}_{13} + He^4_2 \rightarrow ^{30}P_{15} + ^1n_0$ ; -3 MeV (Если энергия а-частицы больше 3 MeV, реакция идет).

## Приложения

Удельная плотность -  $\rho$  твердых тел и жидкостей

( $10^3 \text{ кг/м}^3$ , или  $\text{г/см}^3$ )

Алюминий . . . . .	2,70	Марганец . . . . .	7,40
Бисмут . . . . .	9,80	Медь . . . . .	8,93
Вольфрам . . . . .	19,3	Никель . . . . .	8,80
Железо(чугун, сталь) . . . . .	7,87	Платина . . . . .	21,4
Золото . . . . .	19,3	Свинец . . . . .	11,3
Каменная соль . . . . .	2,20	Серебро . . . . .	10,5
Латунь . . . . .	8,55	Уран . . . . .	18,7

### Жидкости (при 288К)

Вода (дистиллированная при 281К) . . . . .	1,00	Масло касторовое . . . . .	0,96
Глицерин . . . . .	1,26	Ртуть . . . . .	13,6
Керосин . . . . .	0,8	Сероуглерод . . . . .	1,26
Масло(оливковое, смазочное). 0,9		Спирт . . . . .	0,8
		Эфир . . . . .	0,7

**Плотность  $\rho$  газов при нормальных условиях (кг/м<sup>3</sup>)**

Азот.....	1,25	Воздух.....	1,29
Аргон.....	1,78	Гелий.....	0,18
Водород.....	0,09	Кислород.....	1,43

**Упругие постоянные твердых тел (округленные значения)**

Вещество	Модуль Юнга E, ГПа	Модуль сдвига G, ГПа
Алюминий	69	24
Вольфрам	380	140
Железо (сталь)	200	76
Медь	98	44
Серебро	74	27

**Эффективный диаметр молекул, динамическая вязкость и теплопроводность газов при нормальных условиях**

Вещество	Эффективный диаметр d, нм	Динамическая вязкость $\eta$ , мкПа·с	Теплопроводность $\lambda$ , мВт/(м·К)
Азот	0,38	16,6	24,3
Аргон	0,35	21,5	16,2
Водород	0,28	8,66	168
Воздух	—	17,2	24,1
Гелий	0,22	—	—
Кислород	0,36	19,8	24,4
Пары воды	—	8,32	15,8

### Масса нейтральных атомов

Элемент	Порядковый номер	Изотоп	Масса, а.е.м.	Элемент	Порядковый номер	Изотоп	Масса, а.е.м.
(Нейтрон) Водород	1	N	1,00867	Магний	12	<sup>23</sup> Mg	22,9941
		<sup>1</sup> H	1,00783				
		<sup>2</sup> H	2,01410				
		<sup>3</sup> H	3,01605				
Гелий	2	<sup>3</sup> He	3,01603	Алюминий	13	<sup>30</sup> Al	29,9981
	<sup>4</sup> He	4,00260					
Литий	3	<sup>6</sup> Li	6,01513	Кремний	14	<sup>31</sup> Si	30,9753
		<sup>7</sup> Li	7,01601				
Бериллий	4	<sup>7</sup> Be	7,01693	Фосфор	15	<sup>31</sup> P	30,9737
		<sup>9</sup> Be	9,01219				
		<sup>10</sup> Be	10,01354				
Бор	5	<sup>9</sup> B	9,01333	Калий	19	<sup>39</sup> K	40,9618
		<sup>10</sup> B	10,01294				
		<sup>11</sup> B	11,00931				
Углерод	6	<sup>10</sup> C	10,00168	Кальций	20	<sup>44</sup> Ca	43,9554
		<sup>12</sup> C	12,00000				
		<sup>13</sup> C	13,00335				
		<sup>14</sup> C	14,00324				
Азот	7	<sup>13</sup> N	13,00574	Свинец	82	<sup>206</sup> Pb	205,974
		<sup>14</sup> N	14,00307				

		$^{15}\text{N}$	15,00011				
Кисло род	8	$^{16}\text{O}$	15,99491	Полоний	84	$^{210}\text{Po}$	209,982
		$^{17}\text{O}$	16,99913				
		$^{18}\text{O}$	17,99916				
Фтор	9	$^{19}\text{F}$	18,99840	Натрий	11	$^{22}\text{Na}$	21,9944
						$^{23}\text{Na}$	22,9897

### Работа выхода электронов из металла

Металл	A, эВ	$A \cdot 10^{-9}$ Дж	Металл	A, эВ	$A \cdot 10^{-19}$ , Дж
Калий	2,2	3,5	Платина	6,3	10,1
Литий	2,3	3,7	Серебро	4,7	7,5
Натрий	2,5	4,0	Цинк	4,0	6,4

### Масса и энергия покоя элементарных частиц и легких ядер

Частица	Масса		Энергия	
	$m_0$ , кг	$m_0$ а.е.м.	$E_0$ , Дж	$E_0$ , МэВ
Электрон	$9,11 \cdot 10^{-31}$	0,00055	$8,161 \cdot 10^{-14}$	0,511
Нейтральный мезон	$2,41 \cdot 10^{-28}$	0,145261		135
Протон	$1,67 \cdot 10^{-27}$	1,00728	$1,50 \cdot 10^{-10}$	938
Нейтрон	$1,68 \cdot 10^{-27}$	1,00867	$1,5 \cdot 10^{-10}$	939
Дейтон	$3,35 \cdot 10^{-27}$	2,01355	$3,00 \cdot 10^{-10}$	1876
$\alpha$ -Частица	$6,64 \cdot 10^{-27}$	4,00149	$5,96 \cdot 10^{-10}$	3733





## Литература

1. А.П.Абдурахманов, У.Эгамов «Курс физики» учебник. Ташкент: «Связист» 2013 г.
2. А.П.Абдурахманов, У.Эгамов, «Курс физики» учебник. Ташкент: «Учебная методичка» 2015 г.
3. Савельев И.В. Курс физики. М. Наука 1989 т. 1 (издательства на русском языке).
4. Савельев И.В. Курс физики. М. Наука 1989 т. 2 (издательства на русском языке).
5. Савельев И.В. Курс физики. М. Наука 1989 т. 3 (издательства на русском языке).
6. А.Тешабаев, С.Зайнабиддинов, И.Каримов, Н.Рахимов, Р.Алиев Приборы физики полупроводников. (учебное пособие). Андижан. Хаят. 2002 г. 261 т.
7. К.П.Абдурахманов. О.Э.Тигай, В.С.Хамидов. Комплекс мультимедийных лекций, на русском и узбекском языках. Электронный ресурс. (<http://elearning.zn.uz/> можно скачать с сайта)
8. О.Ахмаджаново Курс физики. Ташкент. Учитель, 1987 г. 1,2,3-части.
9. К.П.Абдурахманов., С.Бекназарова. Электронный учебник по физике, на русском языке, 2012 г. Электронный ресурс. (<http://elearning.zn.uz/> можно скачать с сайта)

## Интернет сайты

1. [www.ziyonet.uz/](http://www.ziyonet.uz/)
2. [www.my.estudy.uz/](http://www.my.estudy.uz/)
3. [www.fizika.uz/](http://www.fizika.uz/)
4. [www.learning.zn.uz/](http://www.learning.zn.uz/)
5. <https://edx.org>
6. <https://coursera.org/>
7. <https://www.khanacademy.org>
8. <https://phet.colorado.edu/>

## Содержание

Введение .....	3
6.1-тема. Свойства твёрдых тел .....	4
Основные физические формулы .....	7
Примеры решения задач .....	9
Таблица вариантов .....	17
Задачи для самостоятельного решения .....	18
6.2-тема. Физика атомного ядра .....	25
Основные физические формулы .....	26
Примеры решения задач .....	32
Таблица вариантов... .....	40
Примеры для самостоятельного решения задач .....	41
Приложение .....	53
Литература .....	58

Кафедра физики  
Сборник задач и методическое пособие  
к практическим занятиям по физике  
«Физика твёрдого тела, физика атома  
и ядра», часть-б.

Данное методическое пособие  
предназначено для студентов по всем  
направлениям Ташкентского университета  
информационных технологии имени  
Мухаммада ал-Хоразмий.

Рассмотрено и рекомендовано на  
заседании кафедры «Физика», протокол  
№ 35 от 17.04.2019 года.

Рассмотрено и рекомендовано на  
заседании факультета ТТ, протокол № 8 от  
23.04. 2019 г.

Составители: проф. Э.З.Имамов  
доц.М.Ф.Рахматуллаева  
Ассистенты: Л.М.Мухамедаминова  
Ф.Х.Хасанов Н.М.Насимова

Рецензенты: проф. К.П.Абдурахманов  
доц. М.А.Фаттахов

Отв. Редактор: доц. Х.М.Холмедов

**Формат 60x84 1/16. Печ.лист 3,75.**  
**Заказ № 14 . Тираж 10 .**  
**Отпечатано в «Редакционно издательском»**  
**отделе при ТУИТ.**  
**Ташкент ул. Амир Темур, 108.**