

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО
ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ЯДЕРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ «МИФИ»

Сборник задач по курсу “Ядерная физика”

Учебное пособие

Москва 2019

УДК 539.1(075.8)
ББК 22.383 Я7
С23

Сборник задач по курсу “Ядерная физика”: Учебное пособие // И.И. Астапов, Н.С. Барбашина, А.Н. Дмитриева, Е.А. Задеба, С.С. Хохлов, И.И. Яшин. М.: НИЯУ МИФИ, 2019. 64 с.

В сборнике собраны задания по основным темам курса ядерной физики, рассматриваемые со студентами первого курса магистратуры на семинарах, а также предназначенные для самостоятельной работы студентов (в качестве домашнего задания).

Составлен в соответствии с образовательными стандартами НИЯУ МИФИ: 03.04.02 “Физика”, 14.04.01 “Ядерная энергетика и теплофизика”, 14.04.02 “Ядерные физика и технологии”, 22.04.01 “Материаловедение и технологии материалов”, 11.04.04 “Электроника и нанoeлектроника”.

Рецензент: д-р физ.-мат. наук, проф. В.В. Борог

ISBN 978-5-7262-2591-3 ©Национальный
исследовательский ядерный
университет “МИФИ”

Содержание

Рекомендации студентам	4
Рекомендуемый список литературы	5
Рекомендуемый список интернет-источников	5
1. Кинематика	6
2. Свойства ядер	11
3. Модели ядер	14
4. Взаимодействие заряженных частиц с веществом	18
5. Взаимодействие γ -квантов с веществом	25
6. Радиоактивность	28
Ответы	34
Приложение 1	50
Приложение 2	62

Рекомендации студентам

В силу большого объема изучаемого материала и ограниченного количества занятий по курсу “Ядерная физика” работа студента над заданиями во многом должна быть самостоятельной. Допускается использование любой литературы и интернет-ресурсов. Настоятельно рекомендуется обращаться к преподавателю за консультациями.

Перед выполнением домашнего задания следует сначала прочитать рекомендованную литературу и при необходимости составить краткий конспект основных положений, терминов, сведений, требующих запоминания и являющихся основополагающими в этой теме и для освоения последующих разделов курса.

Решение задач не следует откладывать на последний вечер перед занятием. Решение задач и используемые формулы должны сопровождаться пояснениями. В пояснениях необходимо указывать те основные законы и формулы, на которых базируется решение данной задачи. Задачу рекомендуется сначала решить в общем виде, т.е. только в буквенных обозначениях, поясняя применяемые при написании формул буквенные обозначения. Полученное решение в общем виде нужно проверить на правильную размерность. В числовом ответе также обязательно указать размерность рассчитанной величины.

Необходимые для решения справочные материалы приведены в приложении в конце сборника.

Рекомендуемый список литературы

1. Мухин К.Н. Экспериментальная ядерная физика: учебник. СПб.: Лань. Т. 1: Физика атомного ядра. 2009.
2. Мухин К.Н. Экспериментальная ядерная физика: учебник. СПб.: Лань. Т. 2: Физика ядерных реакций. 2008.
3. Мухин К.Н. Экспериментальная ядерная физика: учебник. СПб.: Лань. Т. 3: Физика элементарных частиц. 2008.
4. Ишханов Б.С., Капитонов И.М., Юдин Н.П. Частицы и атомные ядра. М.: ЛКИ. 2007.

Рекомендуемый список интернет-источников

1. www.library.mephi.ru
2. <http://elibrary.ru/>
3. <http://www.sciencedirect.com/science/journals/>
4. <http://www.nature.com/>
5. <http://link.springer.com/>
6. <http://pdg.lbl.gov/>
7. <http://pdg.lbl.gov/2009/AtomicNuclearProperties/>
8. <http://periodictable.com/index.html>
9. <https://www.nndc.bnl.gov/chart/>
10. <https://www-nds.iaea.org/>
11. <https://www.nist.gov/pml/productsservices/physical-reference-data>

1. Кинематика

Относительная скорость частицы

$$\beta = \frac{v}{c}, \quad (1.1)$$

где v – скорость частицы, c – скорость света в вакууме.

Импульс релятивистской частицы

$$\vec{p} = m\vec{v} = \frac{m_0\vec{v}}{\sqrt{1 - \beta^2}}, \quad (1.2)$$

где m – релятивистская масса частицы, m_0 – масса покоя частицы:

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \beta^2}}. \quad (1.3)$$

Полная энергия релятивистской частицы

$$E = \frac{m_0c^2}{\sqrt{1 - \beta^2}} = T + m_0c^2. \quad (1.4)$$

Кинетическая энергия релятивистской частицы

$$T = E - m_0c^2. \quad (1.5)$$

Связь между импульсом и энергией

$$E^2 = (pc)^2 + (m_0c^2)^2, \quad (1.6)$$

$$pc = \sqrt{T(T + 2m_0c^2)}, \quad (1.7)$$

$$\beta = \frac{pc}{E} = \frac{pc}{\sqrt{(pc)^2 + (m_0c^2)^2}} = \frac{\sqrt{T(T + 2m_0c^2)}}{T + m_0c^2}. \quad (1.8)$$

Дейбройлевская длина волны частицы с импульсом p :

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{hc}{pc}, \quad \chi = \frac{\hbar c}{pc}, \quad (1.9)$$

$\hbar c$ – конверсионная константа.

Время жизни нестабильной частицы в лабораторной системе координат

$$\tau = \frac{\tau_0}{\sqrt{1 - \beta^2}}, \quad (1.10)$$

где τ_0 – собственное время жизни частицы.

1.1. Как Дж перевести в эВ? Как эВ перевести в Дж? Как Дж перевести в эрг?

1.2. Зная массу нейтрона, протона и электрона в кг (см. справочные материалы в приложении), рассчитать их энергию покоя в МэВ.

1.3. Получить из перечисленных выше формул частный случай для расчета кинетической энергии в нерелятивистском случае $T = mv^2/2$ (случай $T \ll m_0c^2$).

1.4. Доказать, что массивная частица ($m_0 \neq 0$) всегда движется со скоростью $\beta < 1$, а γ -квант (в вакууме) – с $\beta = 1$.

1.5. Скорость протона $V_p = 2.9 \cdot 10^8$ м/с. Найти полную E и кинетическую T энергию протона и его импульс p (в эВ и эВ/ c).

1.6. Кинетическая энергия электрона $T = 3$ МэВ. Найти его скорость V_e .

1.7. Рассчитать кинетические энергии частиц, рождающихся в распаде покоящегося π^+ -мезона: $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$.

1.8. Рассчитать кинетические энергии частиц, рождающихся в распаде покоящегося π^0 -мезона: $\pi^0 \rightarrow e^+ + e^-$.

1.9. Рассчитать кинетические энергии частиц, рождающихся в распаде покоящегося K^- -мезона: $K^- \rightarrow e^- + \tilde{\nu}_e$.

1.10. Рассчитать кинетические энергии частиц, рождающихся в распаде покоящегося K^- -мезона: $K^- \rightarrow \pi^- + \pi^0$.

1.11. π_0 -мезон, кинетическая энергия которого равна энергии покоя, распадается на два γ -кванта, энергии которых равны. Каков угол между направлениями движения γ -квантов?

1.12. Во сколько раз увеличится время жизни пиона π , если его кинетическая энергия $T_\pi = 10m_\pi c^2$?

1.13. Рассчитать значение конверсионной константы $\hbar c$ в МэВ·фм.

1.14. Протон, электрон и фотон имеют одинаковую длину волны $\lambda = 100$ фм. Какое время t им необходимо для пролета расстояния $L = 10$ м?

1.15. Свободный электрон движется с кинетической энергией 1 ГэВ. Оценить волну де-Бройля λ .

1.16. Свободный электрон движется с кинетической энергией $T_e = 10$ кэВ, 1 МэВ, 1 ГэВ. Оценить волну де-Бройля.

1.17. Оценить полную E и кинетическую T энергию протона, если его длина волны де-Бройля $\lambda = 10^{-2}$ фм.

1.18. Найти скорость электрона для нескольких значений кинетической энергии: $T = 5$ кэВ, 50 кэВ, 0.25 МэВ, 3 МэВ. На сколько процентов для перечисленных энергий будет отличаться расчет по формуле для нерелятивистского случая?

1.19. Рассчитать скорость протона, чья кинетическая энергия равна: а) 0.01 его массы, б) 0.1, в) 1, г) 10. Сравнить полученный результат со значениями, получающимися при использовании нерелятивистских формул.

1.20. Рассчитать по релятивистским и классическим формулам энергию, которую необходимо передать протону, чтобы разогнать его до скорости: а) 0.01 от скорости света, б) 0.1, в) 0.5, г) 0.9. Потерями протона пренебречь.

1.21. Максимальная возможная энергия частиц в космических лучах оценивается в $5 \cdot 10^{19}$ эВ, это обусловлено так называемым реликтовым обрезанием спектра в области предельно высоких энергий (предел Грайзена – Зацепина – Кузьмина). Пересчитать эту энергию в Дж и определить скорость, с которой летит пуля (массой 3.4 г), обладающая такой же энергией, или шарик для пинг-понга (массой 2.5 г).

1.22. На рис. 1.1 приведена схема эксперимента по определению импульса позитронов, испускаемых монохроматическим источником. Позитроны, вышедшие из коллиматора, попадают в магнитное поле, направленное перпендикулярно направлению их движения, в результате, описав полукруг, частицы попадают в детектор, расположенный на расстоянии 20 см от выхода коллиматора. Определить импульс и кинетическую энергию позитронов, если поле, при котором наблюдается наибольшая интенсивность срабатывания детектора, составляет 0.044 Тл.

1.23. Методом размерностей получить формулу для циклической частоты ω колебания натянутой струны, которая зависит от силы натяжения F , массы струны m и длины струны l . Сравнить с точным ответом.

1.24. Методом размерностей получить формулу для длины свободного пробега L частицы радиусом r в среде с концентрацией таких же частиц n .

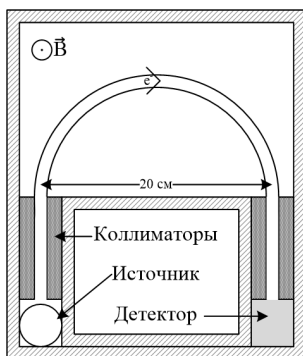


Рис. 1.1. Схема эксперимента по определению импульса позитронов

1.25. Методом размерностей получить формулу для циклической частоты ω колебания падающей из крана капли, которая зависит от поверхностного натяжения σ [Н/м], плотности жидкости ρ и радиуса крана (среднего радиуса капли) r .

1.26. Наноспутник 1 движется со скоростью $v_1 = c - 1$ м/с, наноспутник 2 движется в том же направлении со скоростью $v_2 = c - 2$ м/с. Найти скорость спутника 1 относительно спутника 2.

1.27. Протон с энергией $E_1 = 10^{17}$ эВ налетает на покоящееся ядро ^{14}N . Найти в с.ц.м. суммарную энергию частиц и энергию каждой частицы.

1.28. Определить пороги реакций (первая частица движется, вторая покоится):

а) $\gamma + e^- \rightarrow e^- + e^- + e^+$;

б) $\gamma + X \rightarrow e^- + e^+ + X$ (X – ядро атома);

в) $p + p \rightarrow p + p + p + \tilde{p}$;

- г) $e^- + p \rightarrow n + \nu_e$;
 д) ${}^4\text{He} + {}^3\text{H} \rightarrow {}^7\text{Li} + n$;
 е) ${}^4\text{He} + {}^7\text{Li} \rightarrow {}^{10}\text{B} + n$;
 ж) ${}^4\text{He} + {}^{222}\text{Rn} \rightarrow {}^{226}\text{Ra}$.

2. Свойства ядер

Энергия связи ядра

$$W = Z \cdot m_{{}_1\text{H}}c^2 + (A - Z) \cdot m_n c^2 - M(A, Z)c^2, \quad (2.1)$$

где $m_{{}_1\text{H}}$ – масса атома водорода, m_n – масса нейтрона, $M(A, Z)$ – масса атома с порядковым числом Z и массовым числом A .

Удельная энергия связи

$$\varepsilon = W/A. \quad (2.2)$$

Энергия отделения нейтрона

$$\varepsilon_n = m_n c^2 + M(A - 1, Z)c^2 - M(A, Z)c^2. \quad (2.3)$$

Энергия отделения протона

$$\varepsilon_p = m_{{}_1\text{H}}c^2 + M(A - 1, Z - 1)c^2 - M(A, Z)c^2. \quad (2.4)$$

Энергия отделения α -частицы

$$\varepsilon_\alpha = m_{{}_2\text{He}}c^2 + M(A - 4, Z - 2)c^2 - M(A, Z)c^2. \quad (2.5)$$

Дефект масс

$$\Delta(A, Z) = M(A, Z)c^2 - A \cdot m_{\text{a.e.m.}}c^2, \quad (2.6)$$

где $m_{\text{а.е.м.}}$ – атомная единица массы.

Радиус ядра (в приближении сферического ядра однородной плотности)

$$R \approx r_0 \cdot A^{1/3}, \quad (2.7)$$

где $r_0 \approx 1.4$ фм.

2.1. Оценить плотность вещества в ядре.

2.2. Оценить объемную плотность электрического заряда в ядре.

2.3. Оценить концентрацию нуклонов в ядре.

2.4. Оценить среднее расстояние между нуклонами в ядре.

2.5. Исходя из определения атомной единицы массы, найти величину $m_{\text{а.е.м.}}c^2$ в МэВ.

2.6. Получить формулу для расчета энергии, которая необходима – E (или которая выделится – Q) при делении ядра (A, Z) на два осколка (a, z) и $(A - a, Z - z)$, если известны избытки масс исходного ядра и осколков.

2.7. Найти энергию связи и энергию связи на нуклон для ядер: ${}^4\text{He}$, ${}^5\text{He}$, ${}^9\text{B}$, ${}^{12}\text{C}$, ${}^{27}\text{Al}$, ${}^{56}\text{Fe}$, ${}^{107}\text{Ag}$, ${}^{236}\text{U}$.

2.8. Рассчитать в МэВ энергию связи нейтрона ε_n в ядрах: ${}^4\text{He}$, ${}^5\text{He}$, ${}^9\text{B}$, ${}^{12}\text{C}$, ${}^{27}\text{Al}$, ${}^{56}\text{Fe}$, ${}^{107}\text{Ag}$, ${}^{236}\text{U}$.

2.9. Рассчитать в МэВ энергию связи протона ε_p в ядрах: ${}^4\text{He}$, ${}^5\text{He}$, ${}^9\text{B}$, ${}^{12}\text{C}$, ${}^{27}\text{Al}$, ${}^{56}\text{Fe}$, ${}^{107}\text{Ag}$, ${}^{236}\text{U}$.

2.10. Рассчитать в МэВ энергию связи α -частицы ε_α в ядрах: ${}^{12}\text{C}$, ${}^{27}\text{Al}$, ${}^{56}\text{Fe}$, ${}^{107}\text{Ag}$, ${}^{236}\text{U}$, ${}^{210}\text{Po}$, ${}^{226}\text{Ra}$.

2.11. Рассчитать в МэВ энергию, которая выделится при делении ядра ^{236}U на ^{143}Ba , ^{90}Kr и 3 нейтрона. Посчитать количество теплоты, которое выделится при делении 1 кг урана. Определить количество антрацита (удельная теплота сгорания равна 34 МДж/кг), которое необходимо сжечь для получения такого же количества тепла.

2.12. Рассчитать энергию, необходимую для разделения ядра ^{16}O на два одинаковых осколка.

2.13. Рассчитать энергию, необходимую для разделения ядра ^8Be на два одинаковых осколка.

2.14. Рассчитать энергию, необходимую для разделения ядра ^{12}C на три α -частицы.

2.15. Рассчитать энергию возбуждения, которое приобретет ядро ^{235}U после поглощения им нейтрона с пренебрежимо малой кинетической энергией. Рассчитать энергию возбуждения, которое приобретет ядро ^6Li после поглощения им теплового нейтрона с пренебрежимо малой кинетической энергией.

2.16. Объекты какого размера могли быть исследованы Резерфордом, если он рассеивал на них α -частицы с энергией $T = 5$ МэВ?

2.17. При рассеянии электронов с $T_e = 750$ МэВ на ядрах ^{40}Ca в дифракционной картине наблюдались минимумы при углах рассеяния $\theta_{\text{мин}} = 18, 31$ и 48° . Определить радиус ядра ^{40}Ca .

2.18. По разнице энергии связи зеркальных ядер ^3H и ^3He оценить расстояние между протонами в ядре ^3He .

2.19. По таблице с энергиями связи вычислить выделяемую энергию в каждой реакции протон-протонного цикла:

- 1) $p + p \rightarrow {}^2\text{H} + e^+ + \nu_e$;
- 2) ${}^2\text{H} + p \rightarrow {}^3\text{He}$;
- 3) ${}^3\text{He} + {}^3\text{He} \rightarrow {}^4\text{He} + 2p$.

3. Модели ядер

Энергия связи ядра (формула Вайцзеккера)

$$W(A, Z) = \alpha A - \beta A^{2/3} - \gamma \frac{Z(Z-1)}{A^{1/3}} - \delta \frac{(A-2Z)^2}{A} + \zeta A^{-3/4}. \quad (3.1)$$

Значения параметров: $\alpha = 15.6$ МэВ, $\beta = 17.2$ МэВ, $\gamma = 0.72$ МэВ, $\delta = 23.6$ МэВ,

$$\zeta = \begin{cases} +34 \text{ МэВ} & \text{— чётно-чётные ядра,} \\ 0 & \text{— нечётные ядра,} \\ -34 \text{ МэВ} & \text{— нечётно-нечётные ядра.} \end{cases}$$

Собственный квадрупольный момент однородно заряженного эллипсоида

$$Q = \frac{2}{5} Z(b^2 - a^2), \quad (3.2)$$

где a и b — длинная и короткая полуоси эллипсоида;

$$Q \approx \frac{4}{5} Z \bar{R}^2 \beta, \quad (3.3)$$

где \bar{R} — средний радиус ядра, β — параметр деформации ядра.

$$\bar{R} = \frac{b+a}{2}, \quad \beta = \frac{b-a}{\frac{1}{2}(b+a)} = \frac{1}{2} \frac{b^2 - a^2}{\bar{R}^2}.$$

Соотношение между наблюдаемым $\langle Q \rangle$ и собственным Q квадрупольными моментами ядра:

$$\langle Q \rangle = \frac{J(2J - 1)}{(J + 1) \cdot (2J + 3)} Q. \quad (3.4)$$

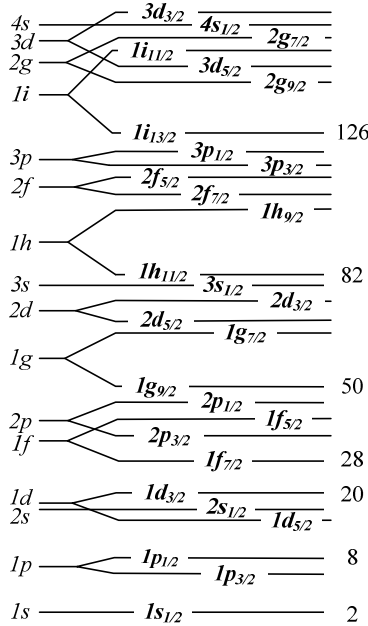


Рис. 3.1. Схематическое изображение одночастичных уровней в сферически-симметричном потенциале

Оболочечная модель ядра показана на рис. 3.1. Правила для спинов J и четностей P в основном состоянии ядра:

$$\begin{aligned} \text{чет.-чет. ядро} & \quad J^P = 0^+; \\ \text{неч. ядро} & \quad J = j, \quad P = (-1)^l; \\ \text{неч.-неч. ядро} & \quad \begin{aligned} |j_p - j_n| \leq J \leq j_p + j_n, \\ P = (-1)^{l_p+l_n}, \end{aligned} \end{aligned} \quad (3.5)$$

где j, l, j_p, l_p, j_n, l_n относятся к полному и орбитальному моменту нечетного нуклона (нейтрона, протона).

Магнитный момент ядра (максимальная проекция)

$$\mu = gJ\mu_N, \quad (3.6)$$

где g – гиромангнитный множитель, J – спин ядра, μ_N – ядерный магнетон.

Гиромангнитный множитель нуклона, находящегося в состоянии j, l ,

$$g = g_l \pm \frac{g_s - g_l}{2l + 1}, \quad (3.7)$$

где знак плюс для $j = l + 1/2$; знак минус для $j = l - 1/2$; g_s, g_l – спиновый и орбитальный гиромангнитные множители. Для протона $g_s = 2 \cdot 2.793$, $g_l = 1$. Для нейтрона $g_s = 2 \cdot (-1.913)$, $g_l = 0$.

3.1. Найти условие, связывающее A и Z для β -стабильных ядер.

3.2. Предсказать с помощью формулы, полученной в задаче 3.1, характер активности (позитронная или электронная) следующих β -активных ядер: ^{107}Cd , ^{133}Xe , ^{141}Ce , ^{163}Er .

3.3. Для ядер с $A = 20, 21, 116, 117, 123, 124, 128$ и 129 определить $Z_{\text{опт}}$, при котором достигается минимальная масса ядра.

3.4. Построить графики вида Mc^2 для ядер с $A = 116$ и 117 в диапазоне $[Z_{\text{опт}} - 5; Z_{\text{опт}} + 5]$.

3.5. С помощью формулы Вайцзеккера вычислить энергию, высвобождаемую при делении ядра ^{238}U на два одинаковых осколка.

3.6. Найти критическое значение Z^2/A , при котором становится энергетически возможным деление ядра на два одинаковых осколка. Пренебречь в третьем слагаемом формулы (3.1) единицей.

3.7. Найти критическое значение Z^2/A , при котором ядро становится нестабильным. Пренебречь в третьем слагаемом формулы (3.1) единицей.

3.8. Сравнить значения энергии связи и энергии связи на нуклон, рассчитанные по капельной модели для ядер ${}^4\text{He}$, ${}^{12}\text{C}$, ${}^{27}\text{Al}$, ${}^{56}\text{Fe}$, ${}^{107}\text{Ag}$, ${}^{236}\text{U}$, с табличными значениями (см. ответ к задаче 2.7).

3.9. Получить формулу для расчета энергии кулоновского отталкивания протонов $W(Z, R)$, где Z – заряд ядра, R – радиус ядра. Распределение заряда по объему ядра считать равномерным, само ядро считать сферическим.

3.10. Считая, что разность энергий связи зеркальных ядер определяется только различием энергий кулоновского отталкивания в этих ядрах (см. ответ к задаче 3.9), вычислить радиусы зеркальных ядер ${}^{23}\text{Na}$, ${}^{23}\text{Mg}$.

3.11. Рассчитать спин, четность и магнитный момент ядер: ${}^3\text{H}$, ${}^7\text{Li}$, ${}^{13}\text{C}$, ${}^{25}\text{Mg}$. Сравнить получившиеся результаты с табличными значениями.

3.12. Рассчитать спин, четность и магнитный момент ядер: ${}^{29}\text{Si}$, ${}^{39}\text{K}$, ${}^{45}\text{Sc}$, ${}^{63}\text{Cu}$. Сравнить получившиеся результаты с табличными значениями.

3.13. Оценить возможные значения спинов и четность ядер: ${}^2\text{D}$, ${}^6\text{Li}$, ${}^{10}\text{B}$, ${}^{14}\text{N}$, ${}^{22}\text{Na}$, ${}^{26}\text{Al}$. Сравнить получившиеся результаты с табличными значениями.

3.14. Вывести формулу 3.2 для расчета электрического квадрупольного момента однородно заряженного эллипсоида.

3.15. Наблюдаемые электрические квадрупольные моменты ядер ^{36}Cl и ^{55}Mn равны -0.018 и $+0.33$ б. Какую форму имеют эти ядра? Чему равны собственные электрические квадрупольные моменты этих ядер?

3.16. Наблюдаемые электрические квадрупольные моменты ядер ^{39}K и ^{63}Cu равны $+0.0585$ и -0.211 б. Чему равны параметры деформации этих ядер?

3.17. В модели Ферми-газа предполагается, что плотность состояния нуклонов $dN/dp = 2 \cdot 4\pi p^2 V / (2\pi\hbar)^3$, где p – импульс нуклона, $V = 4\pi r_0^3 A / 3$ – объем ядра. Вычислить максимально возможный импульс.

3.18. В модели Ферми-газа вычислить максимальную кинетическую энергию нуклонов и оценить глубину потенциальной ямы для нуклонов в ядре.

3.19. В модели Ферми-газа вычислить среднюю кинетическую энергию нуклонов в ядре.

4. Взаимодействие заряженных частиц с веществом

Формула Резерфорда (макроскопическое дифференциальное эффективное сечение рассеяния):

$$d\Sigma = \frac{dN}{N} = an \left(\frac{Zze^2}{4\pi\epsilon_0 4T} \right)^2 \frac{d\Omega}{\sin^4(\theta/2)}, \quad (4.1)$$

где a – толщина мишени, n – концентрация ядер мишени, θ – угол рассеяния (отклонение частицы от первоначального направления), N – общее число падающих частиц, dN – число частиц, рассеянных под углом θ в элемент телесного угла $d\Omega$, T – кинетическая энергия падающих частиц, Z и z – заряд ядер мишени и налетающих частиц (в единицах заряда электрона), соответственно, $\varepsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12}$ Кл²/(Н·м²) – электрическая постоянная.

Ионизационные потери тяжелых частиц в МэВ/(г/см²):

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{4\pi N_A r_e^2 m_e c^2 z^2 Z}{A\beta^2} \times \left[\frac{1}{2} \ln \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2 T_{\max}}{I^2} - \beta^2 - \frac{\delta}{2} \right], \quad (4.2)$$

где N_A – постоянная Авогадро, r_e – классический радиус электрона, z – заряд частицы (в единицах e), Z – заряд ядер вещества (в единицах e), A – атомный номер вещества, $\beta = v/c$, v – скорость налетающей частицы, $\gamma = 1/\sqrt{1-\beta^2}$, I – средний потенциал ионизации (табл. П.1.8), T_{\max} – максимальная энергия, которую можно передать свободному электрону в одном столкновении, δ – слагаемое, учитывающее эффект плотности.

$$T_{\max} = \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2}{1 + 2\gamma m_e/M + (m_e/M)^2}, \quad (4.3)$$

где M – масса налетающей частицы.

Для нерелятивистского случая ($2\gamma m_e/M \ll 1$) $T_{\max} \approx 2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2$, вторым и третьим слагаемыми в квадратных скобках в формуле (4.2) можно пренебречь, и тогда расчет проводится по следующей формуле:

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{Kz^2Z}{A\beta^2} \ln \frac{2m_e c^2 \beta^2}{I}, \quad (4.4)$$

где $K/A = 4\pi N_A r_e^2 m_e c^2 / A = 0.307075$ МэВ/(г/см²) для $A = 1$ г/моль.

Эмпирические зависимости пробега моноэнергетических α -частиц и протонов R' (см) в воздухе от кинетической энергии T (МэВ):

$$\begin{aligned} R'_\alpha(T) &= 0.318 \cdot T^{3/2} && \text{для } 4 < T < 8 \text{ МэВ,} \\ R'_p(T) &= R'_\alpha(4T) - 0.2 \text{ см} && \text{для } T > 0.5 \text{ МэВ.} \end{aligned} \quad (4.5)$$

Средний пробег α -частицы R (мг/см²) в веществе с массовым числом A :

$$R_\alpha(T) = 0.56 A^{1/3} R'_\alpha(T). \quad (4.6)$$

Эмпирические зависимости пробега моноэнергетических электронов R (г/см²) в алюминии (и практически в любом веществе, если потери энергии электрона в основном ионизационные) от кинетической энергии T (МэВ):

$$R(T) = \begin{cases} 0.407 \cdot T^{1.38}, & 0.15 < T < 0.8 \text{ МэВ;} \\ 0.542 \cdot T - 0.133, & 0.8 < T < 3 \text{ МэВ.} \end{cases} \quad (4.7)$$

Пробег электронов R (г/см²) в веществе с зарядом Z и массовым числом A связан с пробегом в алюминии следующим образом:

$$R(A, Z) = R_{\text{Al}} \frac{Z_{\text{Al}}/A_{\text{Al}}}{Z/A}. \quad (4.8)$$

Радиационные потери энергии электронов при $T \gg mc^2$ (МэВ/(г/см²)):

$$-\frac{dE}{dx} = 4\alpha r_e^2 \frac{N_A}{A} T \left(Z(Z+1) \ln \frac{183}{Z^{1/3}} \right), \quad (4.9)$$

где α – постоянная тонкой структуры. Или

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{T}{l_{\text{рад}}}, \quad (4.10)$$

где $l_{\text{рад}}$ – радиационная длина (г/см²):

$$\frac{1}{l_{\text{рад}}} = 4\alpha r_e^2 \frac{N_A}{A} \left(Z(Z+1) \ln \frac{183}{Z^{1/3}} \right). \quad (4.11)$$

Приближенное соотношение между радиационными и ионизационными потерями электронов (T – в МэВ):

$$\frac{(dE/dx)_{\text{рад}}}{(dE/dx)_{\text{ион}}} \approx \frac{TZ}{1600m_e c^2} \approx \frac{TZ}{800}. \quad (4.12)$$

Изменение энергии заряженных частиц после прохождения слоя x за счет радиационных потерь при больших энергиях ($T \gg T_{\text{крит}}$, $T_{\text{крит}}$ – энергия при которой ионизационные и радиационные потери равны):

$$T = T_0 \cdot e^{-x/l_{\text{рад}}}, \quad (4.13)$$

T_0 – первоначальная энергия частицы.

Для среды толщиной меньше максимального пробега ослабление плотности потока β -частиц J приближенно следует экспоненциальному закону:

$$J = J_0 \cdot e^{-\mu_e d}, \quad (4.14)$$

где μ_e – коэффициент поглощения электронов (в см⁻¹), d – толщина мишени (в см).

Зависимость μ_e от максимальной энергии β -частиц $T_{\beta \text{ макс}}$ приближенно аппроксимируется формулой ($0.5 \text{ МэВ} < T_{\beta \text{ макс}} < 7 \text{ МэВ}$, ρ – в г/см³):

$$\mu_e = \rho \cdot 22 \cdot T_{\beta \text{ макс}}^{-4/3}. \quad (4.15)$$

4.1. Легкая частица с зарядом q_1 рассеивается на тяжелом неподвижном ядре с зарядом q_2 . Изобразить примерные траектории частицы в случае: а) $q_1 q_2 > 0$; б) $q_1 q_2 < 0$.

4.2. На какое минимальное расстояние r_{\min} может приблизиться к неподвижному ядру атома золота α -частица при центральном “соударении”, если скорость частицы на большом расстоянии от ядра $v = 2.5 \cdot 10^7$ м/с?

4.3. Пучок α -частиц от источника рассеивается на золотой фольге $^{197}_{79}\text{Au}$ (эксперимент, аналогичный эксперименту Резерфорда). Кинетическая энергия α -частиц $T_\alpha = 5.3$ МэВ, поток α -частиц $J = 2.5 \cdot 10^5$ частиц/с, толщина фольги $a = 5.0$ мкм, расстояние от места пересечения пучком фольги до детектора $l = 25$ см. Рассеянные частицы регистрируются детектором с чувствительной площадью $S = 0.5$ см². Определить число срабатываний детектора за время $\Delta t = 2$ мин, если детектор установлен под углом θ к направлению падающего пучка, равным 15, 45, 75, 105, 135, 165°.

4.4. Как изменится скорость счета α -частиц (см. задачу 4.3) при: а) увеличении скорости налетающих частиц вдвое; б) замене золотой фольги на алюминиевую?

4.5. Найти вероятность того, что α -частица в опыте, описанном в задаче 4.3, будет рассеяна в следующих интервалах зенитного угла: $5 \leq \theta \leq 45$, $45 \leq \theta \leq 90$, $90 \leq \theta \leq 135$, $\theta \geq 135$.

4.6. α -частица с кинетической энергией $T_\alpha = 25$ МэВ пролетела мимо покоящегося свободного электрона, имея прицельный параметр $b = 20$ пм. Найти кинетическую энергию T_e электрона отдачи.

4.7. Изобразить качественно график зависимости ионизационных потерь от кинетической энергии T для протона, α -частицы и мюона.

- 4.8.** Изобразить качественно график зависимости удельных ионизационных потерь от относительной скорости β для протона, α -частицы и мюона.
- 4.9.** Оценить минимальную энергию, необходимую протону для прохождения свинцовой пластины толщиной 10 см.
- 4.10.** Оценить минимальную энергию, необходимую мюону для прохождения через атмосферу для вертикального и горизонтального направлений.
- 4.11.** Рассчитать значение коэффициента K/A в формуле (4.4) (в МэВ/(г/см²)) для $A = 1$ г/моль.
- 4.12.** Вычислить удельные ионизационные потери энергии α -частицы в алюминии ²⁷Al, если ее кинетическая энергия составляет 160 МэВ.
- 4.13.** Вычислить удельные ионизационные потери мюона (в МэВ/(г/см²) и в МэВ/см) с кинетической энергией 10 МэВ в свинце ²⁰⁷Pb и в азоте ¹⁴N (при нормальных условиях).
- 4.14.** Во сколько раз удельные ионизационные потери протона в свинце ²⁰⁷Pb будут отличаться от потерь в железе ⁵⁶Fe, если кинетическая энергия протона 80 МэВ?
- 4.15.** Во сколько раз будут отличаться удельные ионизационные потери α -частицы и дейтона в меди ⁶⁵Cu, если их кинетическая энергия 100 МэВ?
- 4.16.** Оценить минимальную толщину алюминиевой фольги, полностью задерживающую поток α -частиц с энергией 7.5 МэВ.
- 4.17.** Найти отношение потерь энергии α -частиц на первом и последнем сантиметре пути в воздухе, если их кинетическая энергия 6.5 МэВ.

4.18. Найти кинетическую энергию электронов, если их пробег в меди ^{64}Cu составляет 0.13 см.

4.19. Определить среднее число пар ионов на первых 4 см пути при прохождении протонов с энергией 3 МэВ через воздух. На образование одной пары ионов в воздухе затрачивается 35 эв.

4.20. Оценить критическую энергию электронов в азоте (при н.у.), алюминии, меди и свинце.

4.21. Рассчитать значение радиационной длины для электронов (в г/см² и в см) в азоте ^{14}N (при н.у.), алюминии ^{27}Al , меди ^{65}Cu и свинце ^{207}Pb .

4.22. Рассчитать радиационные потери электронов с энергией 70 МэВ при прохождении через медную мишень ^{65}Cu и сравнить их с потерями на ионизацию. Чему будут равны полные потери?

4.23. При какой энергии электронов их ионизационные потери в алюминии будут составлять 30 % от радиационных? Чему будут равны полные потери?

4.24. На железную пластинку (^{56}Fe) толщиной 1 мм падают электроны и протоны с кинетической энергией $T = 100$ МэВ. Оценить их энергии на выходе из пластинки.

4.25. Определить энергию T_0 электронов на входе в свинцовую пластину толщиной $x = 1$ мм, если на ее выходе энергия электронов $T = 350$ МэВ.

4.26. Оценить толщину поглотителя из углерода ^{12}C , необходимую для того, чтобы уменьшить энергию электронов с 300 до 250 МэВ.

4.27. Оценить радиационную длину некоторого элемента, если после прохождения пластинки толщиной 1.8 мм энергия электронов уменьшилась на 20 %. Считать потери в основном радиационными.

4.28. Бета-активный препарат стронция испускает электроны с максимальной энергией 1.1 МэВ. Найти минимальную массовую толщину препарата (в г/см²), при которой дальнейшее увеличение его толщины не приведет к повышению интенсивности испускаемого потока электронов.

4.29. Максимальный пробег электронов от некоторого радиоактивного элемента в алюминии составил 0.53 см. Какой толщины должна быть алюминиевая пластинка, чтобы ослабить поток электронов в 5 раз?

4.30. Слой полуослабления потока электронов от некоторого препарата составил 118.5 мг/см². Оценить массовый коэффициент μ_e/ρ ослабления потока электронов и максимальный пробег частиц.

5. Взаимодействие γ -квантов с веществом

Закон ослабления узкого моноэнергетичного коллимированного пучка γ -квантов слоем однородного вещества толщиной x :

$$I(x) = I_0 \cdot e^{-\mu x}, \quad (5.1)$$

где μ (см⁻¹) – линейный коэффициент ослабления γ -излучения в веществе ($\mu = \tau + \mu_{\text{рассеяния}}$, τ – линейный коэффициент поглощения).

$$\mu = \mu_{\text{Ф}} + \mu_{\text{К}} + \mu_{\text{П}}, \quad (5.2)$$

где μ_{Φ} , $\mu_{\text{К}}$ и $\mu_{\text{П}}$ – макроскопические сечения фотоэффекта, комптоновского рассеяния и образования электрон-позитронных пар соответственно.

Связь с микроскопическими сечениями σ (в б/атом):

$$\begin{aligned}\mu_{\Phi} &= n_{\text{Я}}\sigma_{\Phi}, \\ \mu_{\text{К}} &= n_{\text{Я}}\sigma_{\text{К}}, \\ \mu_{\text{П}} &= n_{\text{Я}}\sigma_{\text{П}},\end{aligned}\tag{5.3}$$

где $n_{\text{Я}} = \rho N_{\text{А}}/M$ – концентрация ядер вещества плотностью ρ и молярной массой M .

5.1. Узкий пучок γ -квантов с энергией 800 кэВ падает на свинцовую пластинку толщиной 0.3 см. Рассчитать, во сколько раз будет ослаблен поток γ -квантов после пластинки.

5.2. Найти толщину алюминиевой пластинки, при которой поток γ -квантов с энергией 300 кэВ ослабляется в три раза.

5.3. Источник γ -квантов с энергией 150 кэВ находится в железном контейнере. Толщина стенок контейнера – 30 мм. Оценить, какая часть γ -квантов (в %) поглотится в стенках контейнера. Какой толщины пришлось бы сделать стенки алюминиевого контейнера, чтобы поглощение было таким же?

5.4. На сколько миллиметров необходимо увеличить толщину железной пластинки, чтобы поток γ -квантов с энергией 500 кэВ уменьшился на 25 %?

5.5. Какой должна быть толщина стеклянного окошка детектора γ -квантов, чтобы в нем поглощалось не более 5 % γ -квантов с энергией 200 кэВ?

5.6. Чему равна длина половинного ослабления для γ -квантов с энергией 600 кэВ в воздухе, стекле, железе и свинце?

5.7. Длина половинного ослабления для γ -квантов в алюминии равна 46.7 мм. Найти энергию γ -квантов.

5.8. Сколько слоев половинного ослабления надо поставить на пути пучка γ -квантов, чтобы его интенсивность уменьшилась не менее чем в 100 раз?

5.9. Чему равна средняя длина свободного пробега для γ -квантов с энергией 1.5 МэВ в воздухе, воде, железе и свинце?

5.10. Средняя длина свободного пробега для γ -квантов в алюминии равна 104.6 мм. Найти длину половинного ослабления. Чему равна энергия γ -квантов?

5.11. Определить сечение взаимодействия в б/атом для γ -квантов с энергией 2 МэВ в железе ^{56}Fe и в свинце ^{206}Pb .

5.12. Зная сечение взаимодействия в б/атом для γ -квантов с энергией 14 МэВ в свинце ^{206}Pb , рассчитать линейный и массовый коэффициенты ослабления.

5.13. Зная сечение взаимодействия в б/атом для γ -квантов с энергией 13 МэВ в алюминии ^{27}Al , рассчитать линейный и массовый коэффициенты.

5.14. Рассчитать, чему равна вероятность комптон-эффекта для γ -квантов с энергией 11 МэВ в железной пластинке толщиной 15 мм.

5.15. Какой должна быть толщина свинцовой пластинки, чтобы для γ -квантов с энергией 3 МэВ вероятность фотоэффекта оказалась равной 0.7 %?

6. Радиоактивность

Основной закон радиоактивного распада ядер:

$$N = N_0 \exp^{-\lambda t} = N_0 2^{-t/T_{1/2}}, \quad (6.1)$$

где N – число радиоактивных ядер в момент времени t , N_0 – первоначальное число радиоактивных ядер, λ – постоянная распада (вероятность распада ядра в единицу времени), $T_{1/2}$ – период полураспада (время, за которое первоначальное количество радиоактивных ядер уменьшится в два раза):

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \tau \ln 2. \quad (6.2)$$

Среднее время жизни

$$\tau = 1/\lambda. \quad (6.3)$$

Активность A (среднее количество ядер распадающихся в единицу времени, Бк)

$$A(t) = -\frac{dN}{dt} = \lambda N(t). \quad (6.4)$$

Удельная активность

$$a = \frac{A}{m}, \quad (6.5)$$

где m – масса радиоактивного образца.

Объемная активность

$$a_V = \frac{A}{V}, \quad (6.6)$$

где V – объем радиоактивного образца.

Энергия, выделяющаяся в процессе,

$$\begin{aligned} \beta^- \text{-распада: } Q_{\beta^-} &= M(A, Z)c^2 - M(A, Z + 1)c^2; \\ \beta^+ \text{-распада: } Q_{\beta^+} &= M(A, Z)c^2 - \\ &\quad - M(A, Z - 1)c^2 - 2m_e c^2; \\ \text{К-захвата: } Q_K &= M(A, Z)c^2 - M(A, Z - 1)c^2. \end{aligned} \quad (6.7)$$

6.1. Рассчитать постоянную распада λ и среднее время жизни τ для ^{22}Na .

6.2. Какая доля ядер ^{37}Ag распадется за 1 г? Какая доля останется через 180 ч?

6.3. Активность некоторого радиоактивного элемента за 51.1 сут уменьшилась в 1.5 раза. Найти его период полураспада $T_{1/2}$, постоянную распада λ и среднее время жизни τ .

6.4. Кинетическая энергия мюона $T_\mu = 4$ ГэВ. Какое расстояние в среднем $\langle L \rangle$ пролетит мюон с такой энергией до распада?

6.5. Определить возраст древнего деревянного предмета, если известно, что его удельная активность ^{14}C уменьшилась на 35 % относительно удельной активности этого же элемента в только что срубленных деревьях.

6.6. Оценить ограничение снизу на время жизни протона, если в водном детекторе массой $m = 10000$ т за $t = 3$ г не было зарегистрировано ни одного распада протона.

6.7. Масса свежеприготовленного радиоактивного препарата ^{59}Fe равна 2 г. Определить: начальную активность; активность через 70 сут.

6.8. Измерение скорости счета распада ^{11}C начали спустя 9 мин после получения препарата и проводили в течение

12 мин. За это время детектором было зарегистрировано 22547 импульсов. Определить активность препарата ^{11}C в начальный момент времени.

6.9. Свежеприготовленный препарат содержит 1 мкг активного ^{23}Mg и 20 мг неактивного ^{24}Mg . Определить удельную активность препарата a .

6.10. Свежеприготовленный препарат ^{24}Na весом m_0 растворили в 7.5 л растворителя. Через время $t = 11$ ч объемная удельная активность препарата a_V составила $3.1 \cdot 10^8$ Бк/см³. Найти первоначальный вес препарата m_0 .

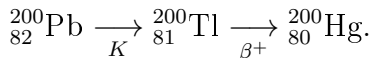
6.11. Измерения активности препарата, содержащего один радиоактивный элемент, дали следующую зависимость от времени $A(t)$:

$t, \text{ч}$	3	6	9	12
$A(t), \text{Бк}$	$4.66 \cdot 10^{15}$	$2.09 \cdot 10^{15}$	$9.41 \cdot 10^{14}$	$4.23 \cdot 10^{14}$

Определить период полураспада элемента $T_{1/2}$ и его первоначальное количество ядер N_0 .

6.12. Радиоактивный элемент ^{24}Na образуется с постоянной скоростью $q = 10^7$ ядер в секунду. Получить зависимость числа ядер ^{24}Na от времени $N(t)$ ($N(0) = 0$). Построить (качественно) график зависимости $N(t)$. Определить активность препарата через 1, 3, 6, 90 ч.

6.13. Происходит распад по следующей радиоактивной цепочке:



В начальный момент препарат весом 2 г содержал только ядра ${}_{82}^{200}\text{Pb}$. Найти время $t_{\text{макс}}$, когда число ядер ${}_{81}^{200}\text{Tl}$ будет максимально, рассчитать это число.

6.14. Первоначальный образец содержал только ядра ^{232}Th , которые испытывают α -распад. Через 200 лет на один атом ^{228}Ra будет приходиться $2.43 \cdot 10^9$ атомов ^{232}Th . Найти период полураспада ^{232}Th , если известно, что $T_{1/2}(^{232}\text{Th}) \gg T_{1/2}(^{228}\text{Ra})$, $T_{1/2}(^{228}\text{Ra}) = 5.75$ лет.

6.15. Исходя из законов сохранения зарядового, лептонного и барионного чисел, определить, возможны ли следующие реакции:

- 1) $^{200}\text{Tl} \rightarrow ^{200}\text{Hg} + \mu^+ + \nu_e$, $^{200}\text{Tl} \rightarrow ^{200}\text{Hg} + e^+ + \nu_e$;
- 2) $\gamma \rightarrow e^+ + e^-$, $\gamma \rightarrow e^+ + \mu^-$;
- 3) $\pi^+ \rightarrow e^+ + \nu_\mu$, $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$;
- 4) $\tilde{\nu}_\mu + p \rightarrow n + \mu^+$, $\nu_e + n \rightarrow n + \mu^-$, $\tilde{\nu}_\mu + n \rightarrow n + \mu^-$;
- 5) $p + p \rightarrow p + p + p + \tilde{p}$, $p + p \rightarrow p + p + p + e^-$;
- 6) $\mu^+ \rightarrow e^+ + \tilde{\nu}_e + \tilde{\nu}_\mu$, $\mu^- \rightarrow e^- + \tilde{\nu}_e + \nu_\mu$.

6.16. Ядро $^{232}_{90}\text{Th}$, испуская α -частицу, переходит в основное (невозбужденное) состояние $^{228}_{88}\text{Ra}$. Определить кинетическую энергию α -частицы и ядра. Какую долю от общей энергии составляет кинетическая энергия дочернего ядра? Какова скорость отдачи дочернего ядра?

6.17. Покоящиеся ядра $^{192}_{84}\text{Po}$ распадаются (из основного состояния) с испусканием трех групп α -частиц: с энергией $T_1^\alpha = 6416$ кэВ (0.7 %), $T_2^\alpha = 6611$ кэВ (1.4 %), $T_3^\alpha = 7167$ кэВ (97.3 %). Найти энергию α -распадов этих ядер и энергию γ -квантов, испускаемых дочерними ядрами.

6.18. Покоящиеся ядра $^{212}_{84}\text{Po}$ распадаются (из основного состояния) с испусканием α -частиц с энергией

$T_\alpha = 8.78$ МэВ. Практически все дочерние ядра образуются непосредственно в основном состоянии. Найти количество тепла, которое выделит 5 мг препарата за время, равное $3T_{1/2}$.

6.19. Вывести формулы (6.7).

6.20. Определить, возможен ли β^- -распад, β^+ -распад и К-захват для ядер: 1) ${}^{64}_{29}\text{Cu}$, 2) ${}^{65}_{29}\text{Cu}$, 3) ${}^{66}_{29}\text{Cu}$.

6.21. Неподвижное ядро ${}^{66}_{29}\text{Cu}$ испытывает β^- -распад, причем дочернее ядро оказывается в основном состоянии. Определить максимальную кинетическую энергию электрона и его скорость. Чему будут равны при этом кинетическая энергия дочернего ядра и его скорость?

6.22. Неподвижное ядро ${}^{66}_{29}\text{Cu}$ испытывает β^- -распад, причем дочернее ядро оказывается в основном состоянии. Чему равны кинетические энергии электрона и антинейтрино, если дочернее ядро не испытывает отдачи?

6.23. Неподвижное ядро ${}^{64}_{29}\text{Cu}$ испытывает β^+ -распад, причем дочернее ядро оказывается в основном состоянии. Определить максимальную кинетическую энергию позитрона и его скорость. Чему будут равны при этом кинетическая энергия дочернего ядра и его скорость?

6.24. Неподвижное ядро ${}^{64}_{29}\text{Cu}$ испытывает β^+ -распад, причем дочернее ядро оказывается в основном состоянии. Чему равны кинетические энергии позитрона и нейтрино, если дочернее ядро не испытывает отдачи?

6.25. Деталь массой 1 кг содержит 0.005 массовых процента стабильного изотопа серебра ${}^{109}\text{Ag}$. Деталь помещают в поток нейтронов $2 \cdot 10^{13}$ н/(см²·с). Найти активность радиоактивного изотопа серебра ${}^{110}\text{Ag}$ через 5 мин после начала облучения, если сечение радиационного захвата изотопа

серебра ^{109}Ag равно 91 барн, а период полураспада изотопа ^{110}Ag равен 25 с.

6.26. Стальной образец массой 2 кг, который содержал 0.5 % марганца ^{55}Mn , поместили в ядерный реактор с тепловым потоком $5 \cdot 10^{13}$ н/(см²·с). В результате радиационного захвата нейтронов образуется радиоактивный изотоп марганца ^{56}Mn . Образец вынули через 10 сут облучения. Какой источник γ -квантов будет в нем через один час после выдержки? Сечение захвата нейтронов для ^{55}Mn составляет 13.4 барн. β^- -распад ^{56}Mn сопровождается испусканием следующих γ -квантов: 0.85 МэВ (в 99 % распадов), 1.81 МэВ (26 %), 2.11 МэВ (15 %).

ОТВЕТЫ

1.2.

939.6 МэВ, 938.3 МэВ, 0.511 МэВ.

1.5.

3.70 ГэВ, 2.76 ГэВ, 3.58 ГэВ/c.

1.6.

$V_e = 2.97 \cdot 10^8$ м/с.

1.7.

$T_{\mu^+} = 4.1$ МэВ, $T_{\nu_\mu} = 29.6$ МэВ.

1.8.

$T_{e^-} = T_{e^+} = 66.98$ МэВ.

1.9.

$T_{e^-} = 246.3$ МэВ, $T_{\bar{\nu}_e} = 246.8$ МэВ.

1.10.

$T_{\pi^-} = 108.54$ МэВ, $T_{\pi^0} = 110.58$ МэВ.

1.11.

60° .

1.12.

$\tau = 11\tau_0$.

1.13.

$\hbar c = 197.33$ МэВ · фМ ≈ 200 МэВ · фМ.

1.14.

$$t_p = 1.59 \cdot 10^{-5} \text{ с}, t_e = 3.45 \cdot 10^{-8} \text{ с}, t_\gamma = 3.33 \cdot 10^{-8} \text{ с}.$$

1.15.

$$\lambda = 0.2 \text{ фм}.$$

1.16.

$$1969 \text{ фм}, 141 \text{ фм}, 0.2 \text{ фм}.$$

1.17.

$$20 \text{ ГэВ}, 19 \text{ ГэВ}.$$

1.18.

$V_{\text{рел}}$ – скорость электрона при использовании релятивистских формул, $V_{\text{кл}}$ – при использовании нерелятивистских формул:

$$\text{а) } V_{\text{рел}} = 4.16 \cdot 10^7 \text{ м/с}, V_{\text{кл}} = 4.19 \cdot 10^7 \text{ м/с}, 0.7 \%,$$

$$\text{б) } V_{\text{рел}} = 1.24 \cdot 10^8 \text{ м/с}, V_{\text{кл}} = 1.33 \cdot 10^8 \text{ м/с}, 7.2 \%,$$

$$\text{в) } V_{\text{рел}} = 2.22 \cdot 10^8 \text{ м/с}, V_{\text{кл}} = 2.97 \cdot 10^8 \text{ м/с}, 33.5 \%,$$

$$\text{г) } V_{\text{рел}} = 2.97 \cdot 10^8 \text{ м/с}, V_{\text{кл}} = 10.3 \cdot 10^8 \text{ м/с} (> c), 246 \%.$$

1.19.

$V_{\text{рел}}$ – скорость протона при использовании релятивистских формул, $V_{\text{кл}}$ – при использовании нерелятивистских формул:

$$\text{а) } V_{\text{рел}} = 4.21 \cdot 10^7 \text{ м/с}, V_{\text{кл}} = 4.24 \cdot 10^7 \text{ м/с},$$

$$V_{\text{кл}}/V_{\text{рел}} = 1.007,$$

$$\text{б) } V_{\text{рел}} = 1.25 \cdot 10^8 \text{ м/с}, V_{\text{кл}} = 1.34 \cdot 10^8 \text{ м/с}, \\ V_{\text{кл}}/V_{\text{рел}} = 1.07,$$

$$\text{в) } V_{\text{рел}} = 2.60 \cdot 10^8 \text{ м/с}, V_{\text{кл}} = 4.24 \cdot 10^8 \text{ м/с} (> c), \\ V_{\text{кл}}/V_{\text{рел}} = 1.6,$$

$$\text{г) } V_{\text{рел}} = 2.99 \cdot 10^8 \text{ м/с}, V_{\text{кл}} = 13.4 \cdot 10^8 \text{ м/с} (> c), \\ V_{\text{кл}}/V_{\text{рел}} = 4.5.$$

1.20.

$W_{\text{рел}}$ – расчет при использовании релятивистских формул, $W_{\text{кл}}$ – при использовании нерелятивистских формул:

$$\text{а) } W_{\text{рел}} = 4.69 \cdot 10^{-2} \text{ МэВ}, W_{\text{кл}} = 4.69 \cdot 10^{-2} \text{ МэВ}, \\ W_{\text{рел}}/W_{\text{кл}} = 1.00007,$$

$$\text{б) } W_{\text{рел}} = 4.73 \text{ МэВ}, W_{\text{кл}} = 4.69 \text{ МэВ}, W_{\text{рел}}/W_{\text{кл}} = 1.008,$$

$$\text{в) } W_{\text{рел}} = 145 \text{ МэВ}, W_{\text{кл}} = 117 \text{ МэВ}, W_{\text{рел}}/W_{\text{кл}} = 1.24,$$

$$\text{г) } W_{\text{рел}} = 1214 \text{ МэВ}, W_{\text{кл}} = 380 \text{ МэВ}, W_{\text{рел}}/W_{\text{кл}} = 3.2.$$

1.21.

$$68.6 \text{ м/с}, 80 \text{ м/с}.$$

1.22.

$$pc = 1.32 \text{ МэВ}, T = 0.9 \text{ МэВ}.$$

1.23.

Ответ, полученный методом размерности $w = \sqrt{F/ml}$;
точный ответ: $w = \sqrt{2F/ml}$.

1.24.

$$L = 1/(nr^2).$$

1.25.

$w = \sqrt{\sigma/\rho r^3}$, совпадает с точной формулой.

1.26.

$$v_{12} = (v_1 - v_2)/(1 - v_1 v_2/c^2) = c/3.$$

1.27.

$$E^* = \sqrt{(m_p c^2)^2 + (m_N c^2)^2 + 2E_p m_N c^2} = 53 \text{ ТэВ.}$$
$$E_{p,N}^* = (E^{*2} + (m_{p,N} c^2)^2 - (m_{N,p} c^2)^2)/2E^* = 26.5 \text{ ТэВ.}$$

1.28.

$$E_{\text{поп}} = (M^2 - m_1^2 - m_2^2)c^2/2m_2.$$

2.1.

$$\approx 1.45 \cdot 10^{14} \text{ г/см}^3.$$

2.2.

$$\approx 7 \cdot 10^{18} \text{ Кл/см}^3.$$

2.3.

$$\approx 9 \cdot 10^{37} \text{ 1/см}^3.$$

2.4.

$$\approx 2 \text{ фМ.}$$

2.5.

$$m_{\text{a.e.m.}} c^2 = \frac{1}{12} M_{12}^{\text{C}} c^2 = 931.5 \text{ МэВ.}$$

2.6.

$$E = \Delta(A - a, Z - z) + \Delta(a, z) - \Delta(A, Z), Q = -E.$$

2.7.

W – энергия связи в МэВ, ε – энергия связи на нуклон в МэВ/нуклон.

Элемент	${}^4\text{He}$	${}^5\text{He}$	${}^9\text{B}$	${}^{12}\text{C}$
W	28.3	27.6	56.3	92.16
ε	7.07	5.51	6.26	7.68

Элемент	${}^{27}\text{Al}$	${}^{56}\text{Fe}$	${}^{107}\text{Ag}$	${}^{236}\text{U}$
W	224.95	492.26	915.27	1790.4
ε	8.33	8.79	8.55	7.59

2.8.

Элемент	${}^4\text{He}$	${}^5\text{He}$	${}^9\text{B}$	${}^{12}\text{C}$	${}^{27}\text{Al}$	${}^{56}\text{Fe}$	${}^{107}\text{Ag}$	${}^{236}\text{U}$
ε_n , МэВ	20.6	-0.74	18.6	18.7	13.1	11.2	9.5	6.5

2.9.

Элемент	${}^4\text{He}$	${}^5\text{He}$	${}^9\text{B}$	${}^{12}\text{C}$	${}^{27}\text{Al}$	${}^{56}\text{Fe}$	${}^{107}\text{Ag}$	${}^{236}\text{U}$
ε_p , МэВ	19.8	20.7	-0.19	16	8.3	10.2	5.8	7.1

2.10.

Элемент	${}^{12}\text{C}$	${}^{27}\text{Al}$	${}^{56}\text{Fe}$	${}^{107}\text{Ag}$	${}^{236}\text{U}$	${}^{210}\text{Po}$	${}^{226}\text{Ra}$
ε_α , МэВ	7.4	10.1	7.6	2.8	-4.6	-5.4	-4.9

2.11.

$$Q = 167.13 \text{ МэВ}, W = 4.26 \cdot 10^{26} \text{ МэВ} = 68.3 \cdot 10^6 \text{ МДж},$$

$$m = 2 \cdot 10^6 \text{ кг}.$$

2.12.

$$14.6 \text{ МэВ}.$$

2.13.

-0.09 МэВ.

2.14.

7.27 МэВ.

2.15.

6.5 МэВ, 7.3 МэВ.

2.16.

$\lambda = 6.5 \text{ фМ.}$

2.17.

$\sin(\theta_{\text{мин}}) = m2\pi\lambda \cdot 0.61/R, m = 1,2,3, R = 3.3 - 3.9 \text{ фМ.}$

2.18.

1.9 фМ.

2.19.

1. $Q_1 = 0.42 \text{ МэВ.}$ 2. $Q_2 = 5.49 \text{ МэВ.}$ 3. $Q_3 = 12.86 \text{ МэВ.}$
 $Q_{\text{tot}} = 24.68 \text{ МэВ.}$

3.1.

$Z_{\text{опт}} \approx A/(0.015A^{2/3} + 1.973).$

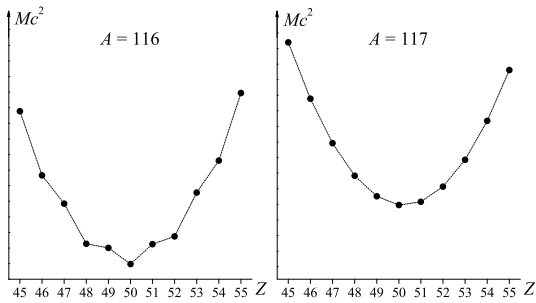
3.2.

$\beta^+, \beta^-, \beta^-, \beta^+.$

3.3.

10, 10, 50, 50, 52, 53, 54, 55.

3.4.



3.5.

$\approx 194 \text{ МэВ}$.

3.6.

≈ 17 .

3.7.

≈ 49 .

3.8.

Элемент	${}^4\text{He}$	${}^{12}\text{C}$	${}^{27}\text{Al}$	${}^{56}\text{Fe}$	${}^{107}\text{Ag}$	${}^{236}\text{U}$
W	30.2	92.9	228.1	494.4	916.4	1779.5
ε	7.54	7.74	8.45	8.83	8.56	7.54

3.9.

$$W = \frac{3}{5} \cdot \frac{Z^2 e^2}{4\pi\varepsilon_0 R}, \text{ Дж.}$$

3.10.

$$E_{\text{св}}(^{23}\text{Na}) = 186.56 \text{ МэВ}, \quad E_{\text{св}}(^{23}\text{Mg}) = 181.73 \text{ МэВ}.$$

$$R = 4.1 \text{ фМ}.$$

3.11.

Элемент	^3H	^7Li	^{13}C	^{25}Mg
J^P	$1/2^+$	$3/2^-$	$1/2^-$	$5/2^+$
μ/μ_N	2.793	3.793	0.638	-1.913

3.12.

Элемент	^{29}Si	^{39}K	^{45}Sc	^{63}Cu
J^P	$1/2^+$	$3/2^+$	$7/2^-$	$3/2^-$
μ/μ_N	-1.913	0.1242	5.793	3.793

3.13.

Элемент	$^2\text{D}, ^{14}\text{N}$	$^6\text{Li}, ^{10}\text{B}$	$^{22}\text{Na}, ^{26}\text{Al}$
J	$0 \leq J \leq 1$	$0 \leq J \leq 3$	$0 \leq J \leq 5$
P	+1	+1	+1

3.15.

Эллипсоид сплюснутый вдоль оси симметрии Z , эллипсоид вытянутый вдоль оси симметрии Z . -0.063 б и 0.92 б.

3.16.

0.09 и -0.15.

3.17.

$$(pc)_{\text{max}} = (\hbar c)/r_0 \cdot (9\pi/8)^{1/3} = 214 \text{ МэВ}.$$

3.18.

$T_{\max} = (pc)_{\max}^2 / 2m_N c^2 = 32 \text{ МэВ}$, $U = T_{\max} + \varepsilon = 40 \text{ МэВ}$
($\varepsilon = 8 \text{ МэВ}$ – средняя удельная энергия связи нуклона).

3.19.

$$\langle T \rangle = 3T_{\max} / 5 = 19 \text{ МэВ}.$$

4.2.

$$r_{\min} = 1.7 \cdot 10^{-14} \text{ м}.$$

4.3.

2810, 38, 6, 2, 1.1, 0.8.

4.4.

а) уменьшится в 16 раз; б) уменьшится в 36 раз.

4.5.

0.22, $2.1 \cdot 10^{-3}$, $3.5 \cdot 10^{-4}$, $7.3 \cdot 10^{-5}$.

4.6.

$$T_e = \frac{m_\alpha Z^2 e^4}{(4\pi\varepsilon_0)^2 m_e b^2 T_\alpha} = 6 \text{ эВ}.$$

4.9.

$\sim 226 \text{ МэВ}$.

4.10.

$\sim 2 \text{ ГэВ}$, $\sim 72 \text{ ГэВ}$.

4.11.

$0.307075 \text{ МэВ}/(\Gamma/\text{см}^2)$.

4.12.

45.6 МэВ/(г/см²).

4.13.

3.9 МэВ/(г/см²) и 44.2 МэВ/см; 7.1 МэВ/(г/см²) и 0.009 МэВ/см.

4.14.

$$\frac{(dE/dx)_{\text{нон}}^{\text{Pb}}}{(dE/dx)_{\text{нон}}^{\text{Fe}}} = 0.7.$$

4.15.

$$\frac{(dE/dx)_{\text{нон}}^{\alpha}}{(dE/dx)_{\text{нон}}^2_{\text{H}}} = 6.8.$$

4.16.

40.6 МКМ.

4.17.

$$\frac{\Delta T_{\text{посл}}}{\Delta T_{\text{перв}}} = 2.5.$$

4.18.

2.3 МэВ.

4.19.

18300.

4.20.

114 МэВ, 62 МэВ, 28 МэВ, 10 МэВ.

4.21.

39.3 г/см² и 314 м, 24.4 г/см² и 9 см, 13.1 г/см² и 1.5 см, 5.8 г/см² и 5.2 мм.

4.22.

5.35 МэВ/(г/см²), радиационные потери больше в 2.5 раза, 7.5 МэВ/(г/см²).

4.23.

205 МэВ, 10.9 МэВ/(г/см²).

4.24.

$T_e \approx 93$ МэВ, $T_p \approx 96$ МэВ.

4.25.

425 МэВ.

4.26.

3.5 см.

4.27.

0.8 см.

4.28.

0.46 г/см².

4.29.

1.1 мм.

4.30.

$\mu_e/\rho = 5.85$ (г/см²)⁻¹, 1.33 г/см².

5.1.

В 1.35 раз.

5.2.

3.9 см.

5.3.

84.5 %, 24.4 см.

5.4.

12.7 мм.

5.5.

< 7.4 мм.

5.6.

66.6 м, 3.5 см, 1.2 см, 5 мм.

5.7.

1.25 МэВ.

5.8.

7.

5.9.

149.5 м, 17.4 см, 2.6 см, 1.7 см.

5.10.

72.5 мм, 3 МэВ.

5.11.

3.96 б/атом, 15.75 б/атом.

5.12.

0.63 см⁻¹, 0.0556 г/см².

5.13.

0.06 см⁻¹, 0.0223 г/см².

5.14.

13 %.

5.15.

2.5 мм.

6.1.

$\lambda = 8.45 \cdot 10^{-9} \text{ с}^{-1}$, $\tau = 3.75 \text{ лет}$.

6.2.

99.9 %, 86.2 %.

6.3.

$T_{1/2} = 87.4 \text{ сут}$, $\lambda = 9.2 \cdot 10^{-8} \text{ с}^{-1}$, $\tau = 126.1 \text{ сут}$.

6.4.

$\langle L \rangle = 25.6 \text{ км}$.

6.5.

$\sim 3500 \text{ лет}$.

6.6.

$T_{1/2} > N_0 \cdot t = 10^{34}$ лет, где $N_0 = 10 \cdot N_A m / M(\text{H}_2\text{O})$ – число протонов в воде детектора.

6.7.

$$A_0 = 3.68 \cdot 10^{15} \text{ Бк}, A = 1.24 \cdot 10^{15} \text{ Бк}.$$

6.8.

$$A_0 = 51.9 \text{ Бк}.$$

6.9.

$$a = 8.03 \cdot 10^{16} \text{ Бк/г}.$$

6.10.

$$m_0 = 12 \text{ мкг}.$$

6.11.

$$T_{1/2} = 2.6 \text{ ч}, N_0 = 1.4 \cdot 10^{20}.$$

6.12.

$N(t) = \frac{a}{\lambda}(1 - e^{-\lambda t})$; $4.5 \cdot 10^5$ Бк, $1.3 \cdot 10^6$ Бк, $2.4 \cdot 10^6$ Бк, $9.8 \cdot 10^6$ Бк.

6.13.

$$34.1 \text{ ч}, 2.43 \cdot 10^{21}.$$

6.14.

$$1.4 \cdot 10^{10} \text{ лет}.$$

6.15.

- 1) нет, да;
- 2) да, нет;
- 3) нет, да;
- 4) да, нет, нет;
- 5) да, нет;
- 6) нет, да.

6.16.

$T_\alpha = 4$ МэВ, $T_\gamma = 70$ кэВ, 1.7 %, 244 км/с.

6.17.

$Q_1 = 6553$ кэВ, $Q_2 = 6752$ кэВ, $Q_3 = 7320$ кэВ,
 $E_1^\gamma = 767$ кэВ, $E_2^\gamma = 568$ кэВ.

6.18.

$W = 17.8$ МДж.

6.20.

- 1) да, да, да;
- 2) нет, нет, нет;
- 3) да, нет, нет.

6.21.

$T_e^{\max} = 2.64$ МэВ, $v_e^{\max} = 2.96 \cdot 10^8$ м/с, $T_\gamma = 79$ эВ,
 $v_\gamma = 15.2$ км/с.

6.22.

$$T_e = 1.11 \text{ МэВ}, T_\nu = 1.53 \text{ МэВ}.$$

6.23.

$$T_e^{\max} = 0.65 \text{ МэВ}, v_e^{\max} = 2.69 \cdot 10^8 \text{ м/с}, T_\gamma = 9 \text{ эВ}, \\ v_\gamma = 5.3 \text{ км/с}.$$

6.24.

$$T_e = 0.18 \text{ МэВ}, T_\nu = 0.47 \text{ МэВ}.$$

6.25.

$$A = 5 \cdot 10^{11} \text{ Бк}.$$

6.26.

Активность источника через час выдержки $A = 5.72 \cdot 10^{13}$ распадов/с, средняя энергия γ -квантов на один распад $W_{\text{расп}} = 1.53 \text{ МэВ/распад}$, источник γ -квантов $W = 9.32 \cdot 10^{13} \text{ МэВ/с}$.

Приложение 1

Таблица П.1.1. Физические константы

Величина	Обозначение	Значение
Скорость света в вакууме	c	299 792 458 м/с
Постоянная Планка	h $\hbar \equiv h/2\pi$	$6.626\ 070\ 040 \cdot 10^{-34}$ Дж·с= $= 1.054571800 \cdot 10^{-34}$ Дж·с= $= 6.582119514 \cdot 10^{-22}$ МэВ·с
Заряд электрона	e	$1.602\ 176\ 6208 \cdot 10^{-19}$ Кл
Конверсионная постоянная	$\hbar c$	197.326 9788 МэВ·фм
Масса покоя электрона	m_e	$0.510\ 998\ 9461$ МэВ/ c^2 = $= 9.10938356 \cdot 10^{-31}$ кг
Масса покоя протона	m_p	$938.272\ 0813$ МэВ/ c^2 = $= 1.672621898 \cdot 10^{-27}$ кг
Масса покоя нейтрона	m_n	$939.565\ 379$ МэВ/ c^2 = $= 1.674927351 \cdot 10^{-27}$ кг
Атомная единица массы	$m_{a.e.m.}$	$931.494\ 0954$ МэВ/ c^2 = $= 1.660539040 \cdot 10^{-27}$ кг
Электрическая постоянная	ϵ_0	$8.854\ 187\ 817 \cdot 10^{-12}$ Кл ² /(Н·м ²)
Магнитная постоянная	μ_0	$4\pi \cdot 10^{-7}$ Н/А ²
Постоянная тонкой структуры	$\alpha =$ $= e^2/4\pi\epsilon_0\hbar c$	1/137.035 999 139
Классический радиус электрона	$r_e =$ $= e^2/4\pi\epsilon_0 m_e c^2$	$2.817\ 940\ 3227 \cdot 10^{-15}$ м
Магнетон Бора	$\mu_B = e\hbar/2m_e$	$5.788\ 381\ 8012 \cdot 10^{-11}$ МэВ/Тл
Ядерный магнетон	$\mu_N = e\hbar/2m_p$	$3.152\ 451\ 2550 \cdot 10^{-14}$ МэВ/Тл
Гравитационная постоянная	G_N	$6.674\ 08 \cdot 10^{-11}$ м ³ ·кг ⁻¹ ·с ⁻²
Стандартное ускорение свободного падения	g_N	$9.806\ 65$ м/с ²
Универсальная газовая постоянная	R	8.31441 Дж/(моль·К)
Постоянная Авогадро	N_A	$6.022\ 140\ 857 \cdot 10^{23}$ моль ⁻¹

Таблица П.1.2. Плотность веществ (при нормальных условиях: атмосферное давление 760 мм рт. ст., $T = 0 \text{ }^\circ\text{C}$).

Вещество	Агрегатное состояние	Плотность, г/см ³
Алюминий	Твердое тело	2.7
Золото		19.3
Медь		8.9
Оконное стекло		2.5
Свинец		11.3
Серебро		10.5
Сталь, железо		7.8
Углерод		2.3
Цинк		7.1
Вода чистая	Жидкость	1.0
Азот	Газ	$1.2505 \cdot 10^{-3}$
Воздух сухой		$1.2928 \cdot 10^{-3}$

Таблица П.1.3. Десятичные приставки к названиям единиц

Приставка	Название	Степень	Приставка	Название	Степень
ф	фемто	10^{-15}	г	гекто	10^2
п	пико	10^{-12}	к	кило	10^3
н	нано	10^{-9}	М	мега	10^6
мк	микро	10^{-6}	Г	гига	10^9
м	милли	10^{-3}	Т	тера	10^{12}
с	санти	10^{-2}	П	пета	10^{15}
д	деци	10^{-1}	Э	экса	10^{18}

Таблица П.1.4. Периодическая таблица элементов

1 IA										
1 H hydrogen 1.008		2 IIA								
3 Li lithium 6.94	4 Be beryllium 9.012			3	4	5	6	7	8	9
11 Na sodium 22.9898	12 Mg magnesium 24.305	IIIB	IVB	VB	VIB	VIIIB	VIII			
19 K potassium 39.098	20 Ca calcium 40.078	21 Sc scandium 44.956	22 Ti titanium 47.867	23 V vanadium 50.942	24 Cr chromium 51.996	25 Mn manganese 54.938	26 Fe iron 55.845	27 Co cobalt 58.933		
37 Rb rubidium 85.468	38 Sr strontium 87.62	39 Y yttrium 88.906	40 Zr zirconium 91.224	41 Nb niobium 92.906	42 Mo molybdenum 95.95	43 Tc technetium (97.907)	44 Ru ruthenium 101.07	45 Rh rhodium 102.906		
55 Cs caesium 132.906	56 Ba barium 137.327	57-71 LANTHA- NIDES	72 Hf hafnium 178.49	73 Ta tantalum 180.948	74 W tungsten 183.84	75 Re rhenium 186.207	76 Os osmium 190.23	77 Ir iridium 192.217		
87 Fr francium (223.02)	88 Ra radium (226.03)	89-103 ACTI- NIDES	104 Rf rutherford. (267.12)	105 Db dubnium (268.13)	106 Sg seaborgium (269.13)	107 Bh bohrium (270.13)	108 Hs hassium (269.13)	109 Mt meitnerium (278.16)		

Lanthanide series	57 La lanthanum 138.905	58 Ce cerium 140.116	59 Pr praseodym. 140.908	60 Nd neodymium 144.242	61 Pm promethium (144.913)	62 Sm samarium 150.36	63 Eu europium 151.964
-------------------	-------------------------------	----------------------------	--------------------------------	-------------------------------	----------------------------------	-----------------------------	------------------------------

Actinide series	89 Ac actinium (227.028)	90 Th thorium 232.038	91 Pa protactinium 231.036	92 U uranium 238.029	93 Np neptunium (237.048)	94 Pu plutonium (244.064)	95 Am americium (243.061)
-----------------	--------------------------------	-----------------------------	----------------------------------	----------------------------	---------------------------------	---------------------------------	---------------------------------

18
VIII A

			13	14	15	16	17	18
			IIIA	IVA	VA	VIA	VIIA	VIIIA
			5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
			boron	carbon	nitrogen	oxygen	fluorine	neon
			10.81	12.0107	14.007	15.999	18.998	20.1797
			13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
			aluminum	silicon	phosphorus	sulfur	chlorine	argon
			26.982	28.085	30.974	32.06	35.45	39.948
10	11	12	13	14	15	16	17	18
VIII	IB	IIB	IIIA	IVA	VA	VIA	VIIA	VIIIA
28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
nickel	copper	zinc	gallium	germanium	arsenic	selenium	bromine	krypton
58.693	63.546	65.38	69.723	72.630	74.922	78.971	79.904	83.798
46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
palladium	silver	cadmium	indium	tin	antimony	tellurium	iodine	xenon
106.42	107.868	112.414	114.818	118.710	121.760	127.60	126.904	131.293
78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
platinum	gold	mercury	thallium	lead	bismuth	polonium	astatine	radon
195.084	196.967	200.592	204.38	207.2	208.98	(208.98)	(209.987)	(222.018)
110 Ds	111 Rg	112 Cn	113 Nh	114 Fl	115 Mc	116 Lv	117 Ts	118 Og
darmstadt.	roentgen.	copernic.	(nihon.)	flerov.	(moscovium)	livermor.	(tennessine)	(oganeson)
(281.17)	(282.17)	(285.18)	(286.18)	(289.19)	(289.19)	(294.21)	(294.21)	(294.21)

64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu
gadolinium	terbium	dysprosium	holmium	erbium	thulium	ytterbium	lutetium
157.25	158.925	162.500	164.930	167.259	168.934	173.054	174.967

96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr
curium	berkelium	californium	einsteinium	fermium	mendelevium	nobelium	lawrencium
(247.070)	(247.070)	(251.080)	(252.083)	(257.095)	(258.098)	(259.101)	(262.110)

Таблица П.1.5. Свойства некоторых частиц

Частица	Заряд (в e)	Энергия покоя	Спин	Среднее время жизни τ
p	+1	938.272 МэВ	1/2	$> 2.1 \cdot 10^{29}$ лет
n	0	939.565 МэВ	1/2	880.1 с
e^\pm	± 1	0.511 МэВ	1/2	$> 6.6 \cdot 10^{28}$ лет
μ^\pm	± 1	105.658 МэВ	1/2	$2.2 \cdot 10^{-6}$ с
τ^\pm	± 1	1776.86 МэВ	1/2	$2.9 \cdot 10^{-13}$ с
$\nu_e, \tilde{\nu}_e$	0	< 3 эВ	1/2	–
$\nu_\mu, \tilde{\nu}_\mu$	0	< 0.19 МэВ	1/2	–
$\nu_\tau, \tilde{\nu}_\tau$	0	< 18.2 МэВ	1/2	–
π^\pm	± 1	139.57 МэВ	0	$2.6 \cdot 10^{-8}$ с
π^0	0	134.98 МэВ	0	$8.5 \cdot 10^{-17}$ с
K^\pm	± 1	493.677 МэВ	0	$1.24 \cdot 10^{-8}$ с

Таблица П.1.1.6. Некоторые квантовые числа

Группа	Частица (античастица)	Заряд, в единицах e	Спин	Изоспин	Лептонное число			Барионное число B	Стран- ность
					L_e	L_μ	L_τ		
Фотоны	γ	0	1	-	0	0	0	0	0
	$e^-(e^+)$	-1(+1)	1/2	-	+1(-1)	0	0	0	0
Лептоны	$\nu_e(\bar{\nu}_e)$	0	1/2	-	+1(-1)	0	0	0	0
	$\mu^-(\mu^+)$	-1(+1)	1/2	-	0	+1(-1)	0	0	0
	$\nu_\mu(\bar{\nu}_\mu)$	0	1/2	-	0	+1(-1)	0	0	0
	$\tau^-(\tau^+)$	-1(+1)	1/2	-	0	+1(-1)	0	0	0
	$\nu_\tau(\bar{\nu}_\tau)$	0	1/2	-	0	0	+1(-1)	0	0
А д р о н ы	π^0	0	0	1	0	0	0	0	0
	$\pi^+(\pi^-)$	+1(-1)	0	1	0	0	0	0	0
	$K^0(\bar{K}^0)$	0	0	1/2	0	0	0	0	+1(-1)
	$K^+(K^-)$	+1(-1)	0	1/2	0	0	0	0	+1(-1)
	η^0	0	0	0	0	0	0	0	0
Бари- оны	$p(\bar{p})$	+1(-1)	1/2	1/2	0	0	0	+1(-1)	0
	$n(\bar{n})$	0	1/2	1/2	0	0	0	+1(-1)	0
	$\Lambda^0(\bar{\Lambda}^0)$	0	1/2	0	0	0	0	+1(-1)	-1(+1)
	$\Sigma^0(\bar{\Sigma}^0)$	0	1/2	1	0	0	0	+1(-1)	-1(+1)
	$\Sigma^+(\bar{\Sigma}^+)$	+1(-1)	1/2	1	0	0	0	+1(-1)	-1(+1)
	$\Sigma^-(\bar{\Sigma}^-)$	-1(+1)	1/2	1	0	0	0	+1(-1)	-1(+1)

Таблица П.1.7. Таблица свойств нуклидов

Z	Нук- лид	J^P	$\frac{M(A, Z)}{m_{a.e.m.}}$	Рас- пад	$T_{1/2}$	$\frac{\mu}{\mu_N}$	
0	n	$1/2^+$	1.008665	β^-	613.9 с	-1.913	
1	${}^1_1\text{H}$	$1/2^+$	1.007825	β^-	12.32 лет $9.9 \cdot 10^{-23}$ с	+2.793	
	${}^2_1\text{H}$	1^+	2.014102			+0.857	
	${}^3_1\text{H}$	$1/2^+$	3.016049			+2.979	
	${}^4_1\text{H}$	2^-	4.026432			n	
2	${}^3_2\text{He}$	$1/2^+$	3.016029	n	$7.04 \cdot 10^{-22}$ с	-2.128	
	${}^4_2\text{He}$	0^+	4.002603				
	${}^5_2\text{He}$	$3/2^-$	5.012057				
3	${}^6_3\text{Li}$	1^+	6.015123			+0.822	
	${}^7_3\text{Li}$	$3/2^-$	7.016004			+3.256	
4	${}^8_4\text{Be}$	0^+	8.005305	2α	$8.2 \cdot 10^{-17}$ с		
	${}^{10}_4\text{Be}$	0^+	10.013535	β^-	$1.5 \cdot 10^6$ лет		
5	${}^8_5\text{B}$	2^+	8.024607	β^+	0.77 с	1.036	
	${}^9_5\text{B}$	$3/2^-$	9.013330	p	$8.4 \cdot 10^{-19}$ с		
	${}^{10}_5\text{B}$	3^+	10.012937				+1.801
	${}^{11}_5\text{B}$	$3/2^-$	11.009305				+2.689
6	${}^{11}_6\text{C}$	$3/2^-$	11.011433	β^+	20.3 мин	-0.964	
	${}^{12}_6\text{C}$	0^+	12.000000	β^-			
	${}^{13}_6\text{C}$	$1/2^-$	13.003355				+0.702
	${}^{14}_6\text{C}$	0^+	14.003242				5700 лет
7	${}^{13}_7\text{N}$	$1/2^-$	13.005739		β^+	9.97 мин	0.322
	${}^{14}_7\text{N}$	1^+	14.003074		+0.404		
	${}^{15}_7\text{N}$	$1/2^-$	15.000109		-0.283		
8	${}^{15}_8\text{O}$	$1/2^-$	15.003066		β^+	2.04 мин	0.719
	${}^{16}_8\text{O}$	0^+	15.994915				
	${}^{17}_8\text{O}$	$5/2^+$	16.999132		-1.894		
10	${}^{19}_{10}\text{Ne}$	$1/2^+$	19.001880		β^+	17.2 с	

Z	Нук- лид	J^P	$M(A, Z)$ $m_{a.e.m.}$	Рас- пад	$T_{1/2}$	$\frac{\mu}{\mu_N}$
11	$^{22}_{11}\text{Na}$	3^+	21.994437	β^+	2.6 лет	+1.746
	$^{23}_{11}\text{Na}$	$3/2^+$	22.989769			+2.218
	$^{24}_{11}\text{Na}$	4^+	23.990963	β^-	15 ч	+1.690
12	$^{22}_{12}\text{Mg}$	0^+	21.999571	β^+	3.9 с	
	$^{23}_{12}\text{Mg}$	$3/2^+$	22.994124	K	11.3 с	
	$^{24}_{12}\text{Mg}$	0^+	23.985042			
	$^{25}_{12}\text{Mg}$	$5/2^+$	24.985837			-0.855
	$^{26}_{12}\text{Mg}$	0^+	25.982593			
	$^{27}_{12}\text{Mg}$	$1/2^+$	26.984341	β^-	9.5 мин	-0.041
13	$^{26}_{13}\text{Al}$	5^+	25.986892	K	$7.2 \cdot 10^5$ лет	+2.804
	$^{27}_{13}\text{Al}$	$5/2^+$	26.981538			+3.642
	$^{28}_{13}\text{Al}$	3^+	27.981910	β^-	2.2 мин	
14	$^{27}_{14}\text{Si}$	$5/2^+$	26.986705	K	4.2 с	0.865
	$^{28}_{14}\text{Si}$	0^+	27.976927			
	$^{29}_{14}\text{Si}$	$1/2^+$	28.976495			-0.555
	$^{31}_{14}\text{Si}$	$3/2^+$	30.975363	β^-	2.6 ч	
15	$^{32}_{15}\text{P}$	1^+	31.973908	β^-	14.3 сут	-0.252
16	$^{33}_{16}\text{S}$	$3/2^+$	32.971459			+0.644
	$^{35}_{16}\text{S}$	$3/2^+$	34.969032	β^-	87.4 сут	+1.00
17	$^{35}_{17}\text{Cl}$	$3/2^+$	34.968853			+0.822
	$^{36}_{17}\text{Cl}$	2^+	35.968307	β^-, β^+	$3 \cdot 10^5$ лет	+1.285
18	$^{36}_{18}\text{Ar}$	0^+	35.967545			
	$^{37}_{18}\text{Ar}$	$3/2^+$	36.966776	K	35 сут	+1.145
	$^{40}_{18}\text{Ar}$	0^+	39.962383			
19	$^{39}_{19}\text{K}$	$3/2^+$	38.963706			+0.391
20	$^{40}_{20}\text{Ca}$	0^+	39.962591			
21	$^{45}_{21}\text{Sc}$	$7/2^-$	44.955908			+4.756
24	$^{52}_{24}\text{Cr}$	0^+	51.940505			

Z	Нук- лид	J^P	$M(A, Z)$ $m_{a.e.m.}$	Рас- пад	$T_{1/2}$	$\frac{\mu}{\mu_N}$
25	$^{55}_{25}\text{Mn}$	$5/2^-$	54.938043			3.453
	$^{56}_{25}\text{Mn}$	3^+	55.938903	β^-	2.6 ч	+3.227
26	$^{55}_{26}\text{Fe}$	$3/2^-$	54.938291	K	2.7 лет	
	$^{56}_{26}\text{Fe}$	0^+	55.934936			
	$^{59}_{26}\text{Fe}$	$3/2^-$	58.934874	β^-	44.5 сут	-0.336
27	$^{60}_{27}\text{Co}$	5^+	59.933816	β^-	5.3 лет	+3.799
28	$^{64}_{28}\text{Ni}$	0^+	63.927966			
	$^{65}_{28}\text{Ni}$	$5/2^-$	64.930085	β^-	2.5 ч	
	$^{66}_{28}\text{Ni}$	0^+	65.929139	β^-	54.6 ч	
29	$^{63}_{29}\text{Cu}$	$3/2^-$	62.929597	K, β^\pm	12.7 ч	+2.223
	$^{64}_{29}\text{Cu}$	1^+	63.929765			-0.217
	$^{65}_{29}\text{Cu}$	$3/2^-$	64.927790		+2.382	
	$^{66}_{29}\text{Cu}$	1^+	65.928869	β^-	5.1 мин	-0.282
30	$^{64}_{30}\text{Zn}$	0^+	63.929142	K	243.9 сут	
	$^{65}_{30}\text{Zn}$	$5/2^-$	64.929241			
	$^{66}_{30}\text{Zn}$	0^+	65.926034			
36	$^{90}_{36}\text{Kr}$	0^+	89.919528	β^-	32.3 с	
45	$^{103}_{45}\text{Rh}$	$1/2^-$	102.905494			-0.088
46	$^{106}_{46}\text{Pd}$	0^+	105.903480			
47	$^{106}_{47}\text{Ag}$	1^+	105.906664	K, β^-	24 мин	+2.85
	$^{107}_{47}\text{Ag}$	$1/2^-$	106.905092			-0.114
56	$^{143}_{56}\text{Ba}$	$5/2^-$	142.920625	β^-	14.5 с	+0.443
59	$^{141}_{59}\text{Pr}$	$5/2^+$	140.907658			+4.275
77	$^{194}_{77}\text{Ir}$	1^-	193.965076	β^-	19.3 ч	+0.39
78	$^{197}_{78}\text{Pt}$	$1/2^-$	196.967343	β^-	19.9 ч	0.51
79	$^{197}_{79}\text{Au}$	$3/2^+$	196.966570			
	$^{198}_{79}\text{Au}$	2^-	197.968244	β^-	2.7 сут	+0.593
80	$^{200}_{80}\text{Hg}$	0^+	199.968327			
81	$^{200}_{81}\text{Tl}$	2^-	199.970964	K	26.1 ч	0.04

Z	Нук- лид	J^P	$\frac{M(A, Z)}{m_{a.e.m.}}$	Рас- пад	$T_{1/2}$	$\frac{\mu}{\mu_N}$
82	$^{188}_{82}\text{Pb}$	0^+	187.980875	K, α	25.1 с	
	$^{200}_{82}\text{Pb}$	0^+	199.971818	K	21.5 ч	
	$^{206}_{82}\text{Pb}$	0^+	205.974465			
	$^{207}_{82}\text{Pb}$	$1/2^-$	206.975897			
	$^{208}_{82}\text{Pb}$	0^+	207.976652			
84	$^{210}_{84}\text{Po}$	0^+	209.982874	α	138.4 сут	
86	$^{222}_{86}\text{Rn}$	0^+	222.017576	α	3.8 сут	
88	$^{226}_{88}\text{Ra}$	0^+	226.025408	α	$1.6 \cdot 10^3$ лет	
	$^{228}_{88}\text{Ra}$	0^+	228.031069	β^-	5.75 лет	
90	$^{232}_{90}\text{Th}$	0^+	232.038054	α	$1.4 \cdot 10^{10}$ лет	
	$^{233}_{90}\text{Th}$	$1/2^+$	233.041580	β^-	21.8 мин	
91	$^{235}_{91}\text{Pa}$	$3/2^-$	235.045399	β^-	24.4 мин	
92	$^{235}_{92}\text{U}$	$7/2^-$	235.043928	α	$7 \cdot 10^8$ лет	-0.38
	$^{236}_{92}\text{U}$	0^+	236.045566	α	$2.3 \cdot 10^7$ лет	
	$^{238}_{92}\text{U}$	0^+	238.050787	α	$4.5 \cdot 10^9$ лет	
	$^{239}_{92}\text{U}$	$5/2^+$	239.054292	β^-	23.45 мин	
94	$^{238}_{94}\text{Pu}$	0^+	238.049558	α	87.7 лет	+0.203
	$^{239}_{94}\text{Pu}$	$1/2^+$	239.052162	α	$2.4 \cdot 10^4$ лет	

Таблица П.1.8. Средний потенциал ионизации I

Z	Элемент	$I, \text{эВ}$	Z	Элемент	$I, \text{эВ}$
7	N	82	29	Cu	322
13	Al	166	79	Au	790
26	Fe	286	82	Pb	823

Таблица П.1.9. Массовые коэффициенты ослабления μ/ρ и поглощения τ/ρ γ -квантов для воздуха, воды и стекла

E_γ , МэВ	Воздух		Вода		Стекло	
	μ/ρ , см ² /г	τ/ρ , см ² /г	μ/ρ , см ² /г	τ/ρ , см ² /г	μ/ρ , см ² /г	τ/ρ , см ² /г
0.10	0.15410	0.02325	0.1707	0.02546	0.1657	0.03209
0.15	0.13560	0.02496	0.1505	0.02764	0.1389	0.02727
0.20	0.12330	0.02672	0.1370	0.02967	0.1246	0.02757
0.30	0.10670	0.02872	0.1186	0.03192	0.1069	0.02885
0.40	0.09549	0.02949	0.1061	0.03279	0.0954	0.02946
0.50	0.08712	0.02966	0.09687	0.03299	0.08696	0.02957
0.60	0.08055	0.02953	0.08956	0.03284	0.08035	0.02941
0.80	0.07074	0.02882	0.07865	0.03206	0.07052	0.02868
1.00	0.06358	0.02789	0.07072	0.03103	0.06337	0.02774
1.25	0.05687	0.02666	0.06323	0.02965	0.05667	0.0265
1.50	0.05175	0.02547	0.05754	0.02833	0.05160	0.02533
2.00	0.04447	0.02345	0.04942	0.02608	0.04447	0.02337
3.00	0.03581	0.02057	0.03969	0.02281	0.03611	0.02069
4.00	0.03079	0.01870	0.03403	0.02066	0.03140	0.01904
5.00	0.02751	0.01740	0.03031	0.01915	0.02838	0.01795
6.00	0.02522	0.01647	0.02770	0.01806	0.02632	0.01721
8.00	0.02225	0.01525	0.02429	0.01658	0.02373	0.01629
10.0	0.02045	0.01450	0.02219	0.01566	0.02223	0.01579
15.0	0.01810	0.01353	0.01941	0.01441	0.02045	0.01522
20.0	0.01705	0.01311	0.01813	0.01382	0.01982	0.01503

Таблица П.1.10. Массовые коэффициенты ослабления μ/ρ и поглощения τ/ρ γ -квантов для алюминия, железа и свинца

E_γ , МэВ	Алюминий		Железо		Свинец	
	μ/ρ , см ² /Г	τ/ρ , см ² /Г	μ/ρ , см ² /Г	τ/ρ , см ² /Г	μ/ρ , см ² /Г	τ/ρ , см ² /Г
0.10	0.1704	0.03794	0.3717	0.21770	5.549	1.976
0.15	0.1378	0.02827	0.1964	0.07961	2.014	1.056
0.20	0.1223	0.02745	0.1460	0.04825	0.9985	0.587
0.30	0.1042	0.02816	0.1099	0.03361	0.4031	0.2455
0.40	0.09276	0.02862	0.0940	0.03039	0.2323	0.1370
0.50	0.08445	0.02868	0.08414	0.02914	0.1614	0.09128
0.60	0.07802	0.02851	0.07704	0.02836	0.1248	0.06819
0.80	0.06841	0.02778	0.06699	0.02714	0.0887	0.04644
1.00	0.06146	0.02686	0.05995	0.02603	0.07102	0.03654
1.25	0.05496	0.02565	0.05350	0.02472	0.05876	0.02988
1.50	0.05006	0.02451	0.04883	0.02360	0.05222	0.02640
2.00	0.04324	0.02266	0.04265	0.02199	0.04606	0.02360
3.00	0.03541	0.02024	0.03621	0.02042	0.04234	0.02322
4.00	0.03106	0.01882	0.03312	0.01990	0.04197	0.02449
5.00	0.02836	0.01795	0.03146	0.01983	0.04272	0.02600
6.00	0.02655	0.01739	0.03057	0.01997	0.04391	0.02744
8.00	0.02437	0.01678	0.02991	0.02050	0.04675	0.02989
10.0	0.02318	0.01650	0.02994	0.02108	0.04972	0.03181
15.0	0.02195	0.01631	0.03092	0.02221	0.05658	0.03478
20.0	0.02168	0.01633	0.03224	0.02292	0.06206	0.03595

Приложение 2

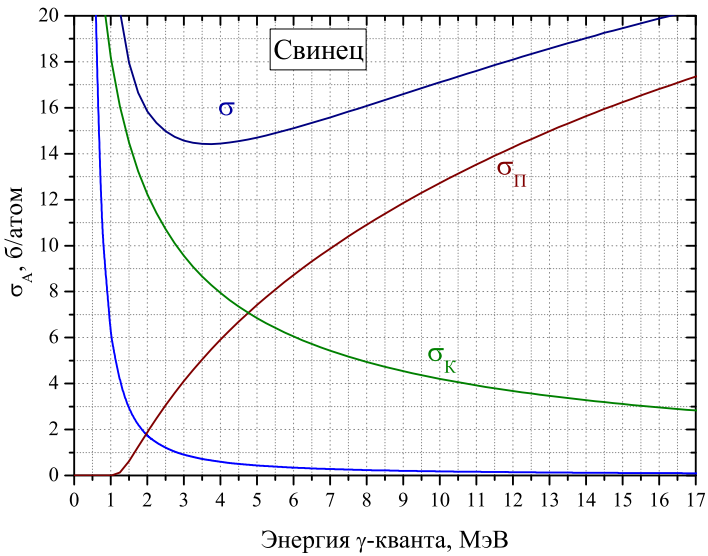


Рис. П.2.1. Сечения взаимодействия γ -квантов в свинце

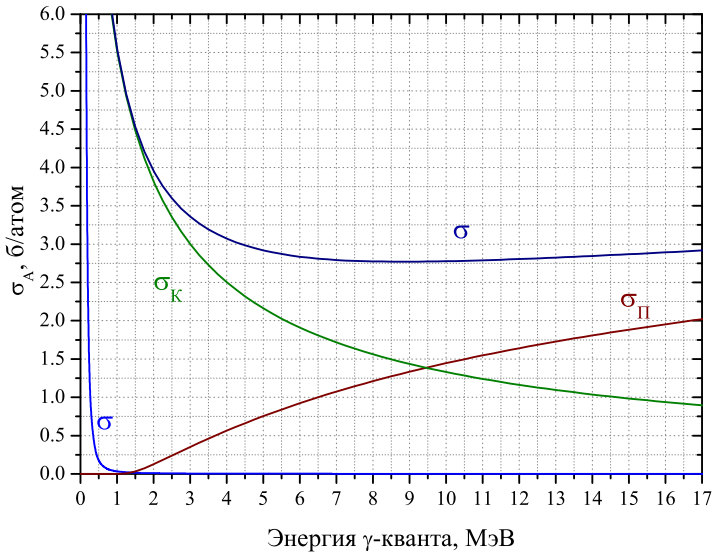


Рис. П.2.2. Сечения взаимодействия γ -квантов в железе

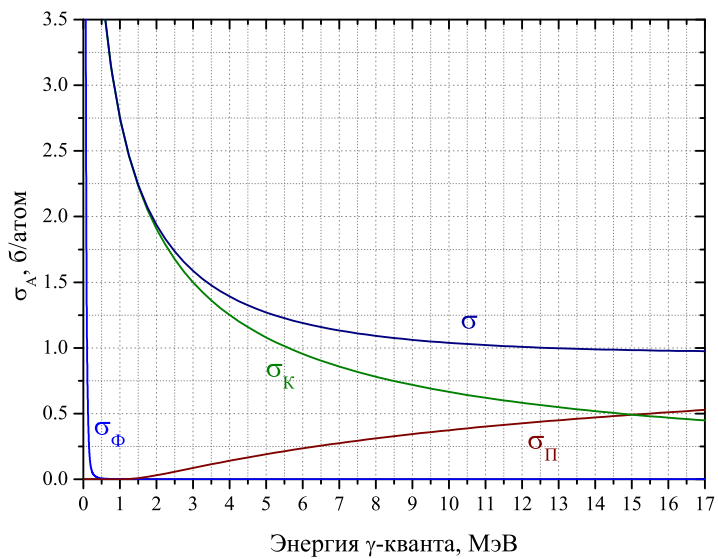


Рис. П.2.3. Сечения взаимодействия γ -квантов в алюминии

Иван Иванович Астапов
Наталья Сергеевна Барбашина
Анна Николаевна Дмитриева
Егор Александрович Задеба
Семен Сергеевич Хохлов
Игорь Иванович Яшин

Сборник задач по курсу “Ядерная физика”

Учебное пособие

Редактор Е.Е. Шумакова

Подписано в печать 29.08.2019. Формат 60×84 1/16.

Печ. л. 4,0. Уч.-изд. л. 4,0. Тираж 200 экз.

Изд. № 039-1. Заказ № .

Национальный исследовательский ядерный
университет “МИФИ”.

Типография НИЯУ МИФИ.

115409, Москва, Каширское ш., д. 31.