

§ 33. Физика атомного ядра

Радиус атомного ядра R определяется массовым числом изотопа A

$$R = R_0 \sqrt[3]{A},$$

где $R_0 \approx 1,5 \cdot 10^{-15}$ м.

Дефект массы атомного ядра

$$\Delta m = Zm_p + (A - Z)m_n - m_{\text{я}},$$

где Z – порядковый номер элемента в таблице Менделеева, m_p – масса протона, A – массовое число изотопа, m_n – масса нейтрона, $m_{\text{я}}$ – масса ядра.

Энергия связи атомного ядра

$$E_{\text{св}} = \Delta mc^2, \text{ или } E_{\text{св}} = k\Delta m,$$

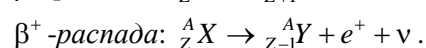
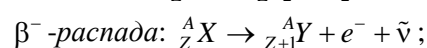
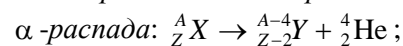
где $k = 931,5$ МэВ/а. е. м. – энергетический эквивалент.

Атомная единица массы 1а. е. м. = $1,660 \cdot 10^{-27}$ кг.

Удельная энергия связи атомного ядра

$$E_{\text{уд}} = \frac{E_{\text{св}}}{A}.$$

Схемы радиоактивных распадов:



Законы сохранения числа нуклонов

$$A_1 + A_2 = A_3 + A_4$$

и электрического заряда при ядерных реакциях

$$Z_1 + Z_2 = Z_3 + Z_4.$$

Закон радиоактивного распада в дифференциальной форме

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

где λ – постоянная радиоактивного распада.

Закон радиоактивного распада в интегральной форме

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

где N_0 – количество радиоактивных ядер в препарате в начальный момент времени ($t = 0$); N – количество атомов, не распавшихся к моменту времени t .

Связь между периодом полураспада и постоянной радиоактивного распада

$$T = \frac{\ln 2}{\lambda}.$$

Среднее время жизни радиоактивных ядер

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

Активность радиоактивного препарата

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

Закон изменения активности радиоактивного препарата

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

где $A_0 = \lambda N_0$ – активность препарата в начальный момент времени ($t = 0$).

Удельная активность радиоактивного препарата

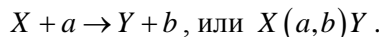
$$A_{\text{уд}} = \frac{A}{m},$$

где m – масса препарата.

Условие радиоактивного равновесия для смеси радиоактивных изотопов, возникающих последовательно один из другого

$$\lambda_1 N_1 = \lambda_2 N_2 = \dots = \lambda_n N_n.$$

Схема ядерной реакции



Энергия излучения (поглощения) при ядерной реакции

$$E = (\sum m_1 - \sum m_2)c^2, \text{ или } E = k(\sum m_1 - \sum m_2),$$

где $k = 931,5$ МэВ/а. е. м. – энергетический эквивалент.

Энергия ядерной реакции, выраженная через кинетические энергии частиц, участвующих в реакции

$$E = \sum E_{k1} - \sum E_{k2}.$$

Пороговая (минимальная) кинетическая энергия бомбардирующей частицы массой m , налетающей на ядро-мишень массой m_0

$$E_{п} = \frac{m + m_0}{m_0} |E|,$$

где E – энергия ядерной реакции.

Полная энергия и импульс элементарной частицы

$$E = mc^2, \quad p = mv,$$

где $m = m_0 / \sqrt{1 - (v^2/c^2)}$ – масса частицы, v – ее скорость, m_0 – масса покоя, $c = 3 \cdot 10^8$ м/с – скорость света в вакууме.

Кинетическая энергия частицы

$$E_k = E - E_0,$$

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

Связь импульса, кинетической энергии и энергии покоя частицы

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

Инвариантная величина

$$E^2 - p^2 c^2 = m_0^2 c^4.$$

Сила Лоренца

$$F_{Л} = qBv \sin \alpha,$$

где α – угол между направлением индукции магнитного поля и скоростью движения заряженной частицы.

Направленность излучения Вавилова – Черенкова

$$\cos \Theta = \frac{c}{vn},$$

где Θ – угол между направлением излучения и скоростью частицы, движущейся в среде с показателем преломления n .

Энергия связи атомных ядер. Радиоактивность

33.1. Оцените радиус ядра изотопа свинца ${}_{82}^{207}\text{Pb}$.

33.2. Определите дефект массы изотопа гелия ${}_{2}^4\text{He}$.

33.3. Определите энергию связи ядра изотопа бора ${}_{5}^{11}\text{B}$.

33.4. Определите удельную энергию связи ядра изотопа кислорода ${}_{8}^{16}\text{O}$.

33.5. Определите энергию связи нейтрона в ядре изотопа бериллия ${}_{4}^9\text{Be}$.

33.6. Определите энергию связи α -частицы в ядре изотопа бора ${}_{5}^{11}\text{B}$.

33.7. Удельная энергия связи ядра изотопа кислорода ${}_{8}^{18}\text{O}$ равна $E_{уд1} = 7,767$ МэВ, ядра изотопа фтора ${}_{9}^{19}\text{F}$ – $E_{уд2} = 7,779$ МэВ. Определите минимальную энергию, необходимую для отрыва протона от ядра фтора.

33.8. В результате распада из ядра изотопа радия $^{226}_{88}\text{Ra}$ вылетает α -частица с энергией $E_{\alpha} = 28,3$ МэВ. Определите скорость α -частицы, если энергия связи этого изотопа радия $E_{\text{св}1} = 1731,6$ МэВ, а изотопа радона $^{222}_{86}\text{Rn}$ $E_{\text{св}2} = 1708,2$ МэВ.

33.9. Ядра изотопов висмута $^{210}_{83}\text{Bi}$ при радиоактивном распаде выбрасывают β -частицы. Определите скорость этих β -частиц, соответствующую их предельной кинетической энергии.

33.10. Оцените диаметр шара, который при ядерной плотности вещества имел бы массу, равную массе Солнца.

33.11. Ядро изотопа натрия $^{22}_{11}\text{Na}$ выбрасывает γ -квант с энергией 20 кэВ и в результате отдачи приобретает энергию, составляющую 5,5 % энергии γ -кванта. Определите скорость ядра отдачи.

33.12. Определите разность энергий связи нейтрона и протона в ядре изотопа азота $^{14}_7\text{N}$.

33.13. Ядро изотопа кобальта $^{60}_{27}\text{Co}$ выбрасывает электрон. Какой новый изотоп возникает в результате этого распада?

33.14. Сколько α - и β^{-} -распадов совершается при превращении изотопа нептуния $^{237}_{93}\text{Np}$ в стабильный изотоп висмута $^{209}_{83}\text{Bi}$?

33.15. Ядро изотопа радона $^{220}_{86}\text{Rn}$ находилось в состоянии покоя. В результате распада ядро радона выбрасывает α -частицу со скоростью 20 Мм/с. Определите скорость образовавшегося ядра.

33.16. Препарат из урана $^{238}_{92}\text{U}$ массой 1,5 г излучает $1,86 \cdot 10^4$ α -частиц за 1,0 с. Определите период полураспада этого изотопа урана.

33.17. Определите удельную активность изотопа урана $^{235}_{92}\text{U}$, период полураспада которого равен $7,1 \cdot 10^8$ лет.

33.18. Сколько ядер радиоактивного изотопа кальция $^{45}_{20}\text{Ca}$ ($T = 164$ сут) массой 1,0 мг распадается за сутки?

33.19. Период полураспада изотопа радия $^{226}_{88}\text{Ra}$ $T = 1600$ лет. Какая доля радиоактивных ядер препарата из радия распадется за $\Delta t = 4800$ лет?

33.20. Активность препарата тория $^{232}_{90}\text{Th}$ массой $m = 2,0$ г равна $A = 822$ Бк. Определите период полураспада этого изотопа тория.

33.21. Определите возраст деревянного изделия, если известно, что активность образца из этого изделия по изотопу углерода $^{14}_6\text{C}$ ($T = 5730$ лет) составляет 1/3 активности свежей древесины.

33.22. Известно, что ториевый ряд заканчивается изотопом свинца $^{208}_{82}\text{Pb}$. Сколько свинца на 1,0 кг исходного тория $^{232}_{90}\text{Th}$ будет в ториевой руде, если ее возраст $5,0 \cdot 10^9$ лет?

33.23. Сколько энергии излучает при α -распаде 1,0 мг полония $^{210}_{84}\text{Po}$ за время, равное среднему времени жизни этих ядер? Кинетическая энергия α -частиц 5,5 МэВ.

33.24. Определите активность препарата радия $^{226}_{88}\text{Ra}$, который испытывает α -распад, в результате которого за 1 час излучается 533 Дж энергии. Энергия α -частиц равна 5 МэВ.

33.25. Определите интенсивность γ -излучения на расстоянии 1,0 м от точечного изотропного радиоактивного источника, активность которого равна 95 ГБк. Энергия γ -кванта 0,80 МэВ.

33.26. За сутки активность радиоактивного препарата уменьшилась от 120 ГБк до 8 ГБк. Определите период полураспада изотопа, из которого изготовлен данный препарат.

33.27. Определите массу радиоактивной пылинки радия $^{226}_{88}\text{Ra}$, которая за 30 с на площади $0,50 \text{ см}^2$ флуоресцирующего экрана создает 60 вспышек. Экран находится на расстоянии 1,0 м от пылинки.

33.28. Допишите обозначения, которых не хватает в следующих ядерных реакциях:
 $X(p, n)_4^7\text{Be}$; ${}_4^9\text{Be}(\alpha, x)_6^{12}\text{C}$; ${}_5^{10}\text{B}(x, \alpha)_4^8\text{Be}$; ${}_{17}^{17}\text{O}(d, n)X$.

33.29. При делении одного ядра урана-235 излучается 200 МэВ энергии. Какую долю энергии покоя ядра урана составляет эта энергия?

33.30. Определите энергию первой искусственной ядерной реакции ${}^{14}_7\text{N} + {}^4_2\text{He} \rightarrow {}^{17}_8\text{O} + p$, осуществленной Э. Резерфордом.

33.31. Определите удельную энергию следующей ядерной реакции: ${}^{10}_5\text{B} + {}^2_1\text{H} \rightarrow 3{}^4_2\text{He}$.

33.32. Определите минимальную энергию γ -кванта, необходимую для осуществления следующей фотоядерной реакции: ${}^2_1\text{H} + \gamma \rightarrow {}^1_1\text{H} + n$.

33.33. Определите массу изотопа азота ${}^{17}_7\text{N}$, если известно, что энергия ядерной реакции ${}^{17}_8\text{O} + n \rightarrow {}^{17}_7\text{N} + p$ равна $-7,9$ МэВ.

33.34. Определите энергию следующей термоядерной реакции: ${}^2_1\text{H} + {}^3_1\text{H} \rightarrow {}^4_2\text{He} + n$.

33.35. Определите массу льда, взятого при температуре 273 К, который можно превратить в водяной пар за счет энергии, выделяющейся при делении 1,0 г урана-235.

33.36. Электрическая мощность атомной электростанции 500 МВт при КПД 20 %. Сколько урана-235 потребляет станция за год? Сравните (m_2/m_1) этот расход урана с годовым расходом мазута на тепловой электростанции такой же мощности при КПД 75 %. Удельная теплота сгорания мазута 40 МДж/кг.

33.37. Определите электрическую мощность атомной электростанции, потребляющей $m = 0,15$ кг урана-235 за сутки, при КПД $\eta = 25$ %. Если при делении каждого ядра урана излучается $E' = 200$ МэВ энергии.

33.38. При взрыве урановой бомбы реагирует 1,5 кг урана-235. Определите эквивалентную массу тротила, теплотворная способность которого 4,1 МДж/кг.