

## ВВЕДЕНИЕ В ЯДЕРНУЮ ФИЗИКУ

1. Предмет «Ядерная физика».
2. Основные свойства атомных ядер.
3. Модели атомных ядер.
4. Радиоактивность.
5. Взаимодействие излучения с веществом.
6. Ядерные реакции. Законы сохранения в ядерных реакциях.
7. Взаимодействие ионизирующего излучения с веществом. Тяжелые заряженные и легкие заряженные частицы. Гамма-кванты.
8. Деление ядер.

### 1. ПРЕДМЕТ «ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА».

1.1. Объекты микромира (с которого как правило начинается изучение ЯФ). Частица, античастица, виртуальная частица, аннигиляция, нуклид, ядро, изотоп ... (знать определения).

#### Пример 1:

Квантом гравитационного взаимодействия является:

- - гамма-квант
- - мезон
- - гравитон
- - лептон
- - бозон

1.2. Свойства нуклонов, стабильных ядер и их взаимодействий (фундаментальные взаимодействия).

Элементарные частицы, фундаментальные частицы, переносчики взаимодействия.

#### Пример 2:

Верно/неверно

По современным представлениям вещество нашей Вселенной построено из фундаментальных частиц, число типов которых невелико и которые взаимодействуют между собой посредством четырех видов сил (взаимодействий): гравитационное, слабое, электромагнитное и сильное (ядерное) взаимодействия.

По современным представлениям вещество нашей Вселенной построено из виртуальных частиц, число типов которых невелико (электроны, кварки, глюоны, фотоны и бозоны Хиггса – Стандартная Модель) и которые взаимодействуют между собой посредством четырех видов сил (взаимодействий): гравитационное, слабое, электромагнитное и сильное (ядерное) взаимодействия.

ВИРТУАЛЬНЫЕ ЧАСТИЦЫ, частицы, которые непосредственно не наблюдаются, поскольку существуют чрезвычайно короткое время.

### 1.3. «Новая физика»: специальная теория относительности и квантовая теория.

Посмотрите общие положения этих теорий. Большинство вопросов по этому разделу - это тип верно/неверно.

Для задач:

1. Соотношению Эйнштейна, каждому значению массы в кг соответствует определенное количество энергии в Дж -  $E = mc^2$ .

2. Соотношение СТО, связывающее  $E$ ,  $m$  и импульс свободной частицы  $p$ :  
 $E^2 = p^2 c^2 + m^2 c^4$ .

3. Полная энергия релятивистской частицы:

$$E = T + mc^2 = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}.$$

4. Соотношение де Бройля:  $\lambda p = \hbar$ . Луи де Бройль выдвигает гипотезу, согласно которой каждой частице с импульсом  $p$  можно поставить в соответствие некоторую волну с длиной  $\lambda$ , частотой  $\nu$  и волновым числом  $k = 2\pi / \lambda$ .

5. Соотношение неопределенности Гейзенберга:

$$\Delta x \cdot \Delta p \geq \hbar. \quad \Delta E \cdot \Delta t \geq \hbar.$$

Это соотношение показывает, что в квантовой механике утрачивается привычное представление о траектории. Согласно принципу неопределенности у частицы не могут быть одновременно точно измерены положение и скорость (импульс).

## 2. ОСНОВНЫЕ СВОЙСТВА АТОМНЫХ ЯДЕР.

2.1. Модели атомов: Атом Бора, Томсона.

2.2. Опыт Резерфорда.

2.3. Структура атомов, ядер и нуклонов.

2.4. Основные определения физики атомного ядра.

**Пример:**

Какая часть атома вносит основной вклад в рассеяние альфа-частиц в опытах Резерфорда?

- атомное ядро
- нуклон
- протон
- нейтрон.

### 3. МОДЕЛИ АТОМНЫХ ЯДЕР.

#### 3.1. Свойства стабильных и радиоактивных ядер.

Стабильные и радиоактивные ядра. Их характеристики.

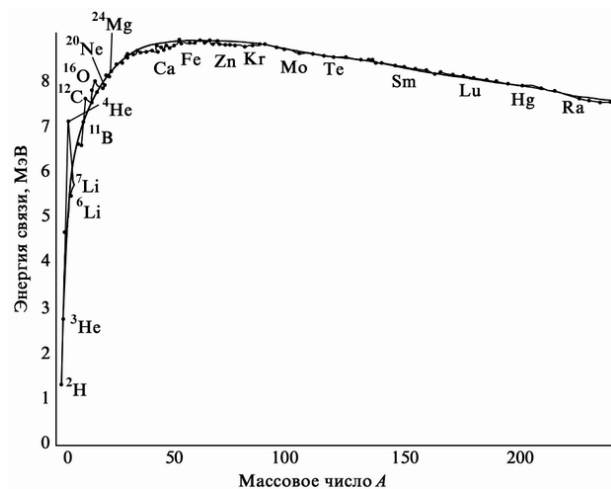
#### 3.2. Ядерные реакции, энергетический баланс ядерной реакции.

Ядерные реакции, энергия ядерной реакции, экзотермические и эндотермические ядерные реакции.

#### 3.3. Энергия связи.

Зависимость удельной энергии связи от массового числа.

$$\Delta E_{\text{св}} = \Delta m \cdot c^2 = Zm_{\text{H}} + (A - Z)m_{\text{n}} - M(A, Z)$$



Зависимость средней энергии связи на нуклон от массового числа A.

#### 3.4. Капельная модель. Полуэмпирическая формула Вейцзеккера.

Согласно капельной модели атомное ядро рассматривается как капля заряженной несжимаемой жидкости с очень высокой плотностью ( $\sim 10^{17} \text{ кг/м}^3$ ). Капельная модель позволила вывести полуэмпирическую формулу для энергии связи ядра и помогла объяснить ряд других явлений, в частности процесс деления тяжелых ядер.

$$\Delta E_{\text{св}} = 15,75A - 17,8A^{2/3} - 0,71 \frac{Z^2}{A^{1/3}} - 94,8 \frac{\left(\frac{A}{2} - Z\right)^2}{A} + \frac{34}{A^{3/4}} \delta.$$

Свойства ядерных сил, способы определения размеров ядер. Основная классификация моделей ядер и зачем эти модели создавались.

Дополнительно знать определения: Волновая функция, квантовые числа, ур-ие Шредингера, корпускулярные и волновые свойства объектов микромира.

#### Пример:

Сопоставьте величину ядерных сил, действующих внутри ядра между двумя протонами (Fpp), двумя нейтронами (Fnn), протоном и нейтроном (Fpn)

- 1)  $F_{pp} < F_{nn} < F_{pn}$
- 2)  $F_{pp} = F_{nn} > F_{pn}$

$$3) (F_{pp}) = (F_{nn}) = (F_{pn})$$

$$4) (F_{pp}) > (F_{nn}) < (F_{pn})$$

## 4. РАДИОАКТИВНОСТЬ

### 4.1. Радиоактивные ядра. Радиоактивность.

Что такое радиоактивность, основной закон радиоактивного распада, простой и сложный распад. Виды излучения.

### 4.2. Активность радионуклида. Единицы измерения.

Активность – определение. Знать, как активность образца связана с потоком частиц испускаемым образцом.

### 4.3. Радиация, радиометрия, радиоактивный распад, туннельный эффект (определения).

Дополнительно – метастабильный уровень, потенциальный барьер, радиационный фон, трек. Стабильные и радиоактивные ядра – основной критерий.

## 5. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ИЗЛУЧЕНИЯ С ВЕЩЕСТВОМ

### 5.1. Виды излучения (определения).

### 5.2. Аннигиляция, ионизация, сцинтилляция, поток частиц, плотность потока частиц и т.п. (определения).

В основном вопросы типа верно/верно.

## 6. ЯДЕРНЫЕ РЕАКЦИИ. ЗАКОНЫ СОХРАНЕНИЯ В ЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЯХ

### 6.1. Ядерная реакция. Энергия реакции. Экзотермические и эндотермические реакции.

Определения и основные соотношения позволяющие рассчитать, потенциальный барьер и порог реакции:

Кулоновский барьер:

$$B_k = \frac{zZe^2}{R} = \frac{zZe^2}{1,4 \cdot 10^{-13} (A_1^{1/3} + A_2^{1/3})} \approx \frac{Z \cdot z}{A_1^{1/3} + A_2^{1/3}},$$

Центробежный барьер:

$$B_l = \frac{\hbar^2 l(l+1)}{2\mu R^2} \approx \frac{10l(l+1)}{A_1 A_2^{2/3}},$$

Проницаемость кулоновского барьера:

$$D = e^{-2C_l} = e^{-2\sqrt{\frac{2\mu}{\hbar}} \int_R^{r_e} \sqrt{V(r)-E} dr},$$

$$C_l = g \left( \frac{1}{\sqrt{x}} (\arccos(\sqrt{x})) - \sqrt{1-x} \right).$$

$$x = \frac{E}{B_l} = 0,2.$$

$$g = \sqrt{\frac{2zZe^2 R\mu}{\hbar^2}} = 1,9.$$

**Пример:**

Для реакции  $^{19}\text{F}(\alpha, n)^{22}\text{Na}$  найти энергию реакции (МэВ).

1)-1

2)1,92

3)-1,92

4)2,1

6.2. Эффективное сечение ядерной реакции. Единицы измерения.

6.3. Законы сохранения в ядерных реакциях.

## 7. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ С ВЕЩЕСТВОМ

7.1. Тяжелые заряженные и легкие заряженные частицы.

7.2. Гамма-кванты.

7.3. Виды ионизирующих излучений, дозиметрическая аппаратура.

В основном все вопросы типа: верно/верно.

И определения, которые вам нужно посмотреть в учебниках по дозиметрии: Гамм-излучение, ионизирующее излучение, тормозное или корпускулярное.

**Пример:**

Верно/неверно

Рентгеновское излучение – фотонное излучение, состоящее из тормозного и (или) характеристического излучений.

Рентгеновское излучение – фотонное излучение, состоящее из тормозного излучений.

Рентгеновское излучение – фотонное излучение, состоящее из характеристического излучений.

Рентгеновское излучение – фотонное излучение, состоящее из тормозного и характеристического излучений.

## 8. ДЕЛЕНИЕ ЯДЕР

8.1. Активная зона, ядерный реактор (реакторная установка), системы управления и защиты, энергоблок, атомная станция (определения).

8.2. Ядерная и термоядерная энергия (определения).

8.3. Условия осуществления и управления ядерной реакцией.

8.4. Критическая масса, коэффициент размножения нейтронов (определения).

8.5. Самоподдерживающаяся цепная ядерная реакция (определения).

8.6. Ядерный делящийся материал, ядерное топливо, ядерное горючее (определения).

Вопросы этого раздела в основном состоят из вопросов типа верно/верно.

**Пример 1:**

верно/неверно

Коэффициент размножения – главный показатель, характеризующий цепную ядерную реакцию; определяется как отношение числа нейтронов данного поколения к числу нейтронов предыдущего поколения.

Коэффициент размножения – главный показатель, характеризующий цепную ядерную реакцию; определяется как отношение числа запаздывающих нейтронов данного поколения к числу запаздывающих нейтронов предыдущего поколения.

**Пример 2:**

верно/неверно

Самоподдерживающаяся цепная ядерная реакция (сцр) – управляемая цепная ядерная реакция, которая характеризуется  $K_{эф} \geq 1$ .

Самоподдерживающаяся цепная ядерная реакция (сцр) – управляемая термоядерная реакция, которая характеризуется  $K_{эф} \geq 1$ .

### ПРИМЕРЫ ТИПОВЫХ ЗАДАЧ:

1. Энергия гамма-кванта, испускаемого атомом при его переходе с одного энергетического уровня на другой определяется выражением  $(E_1 - E_2)$ .
2. Ядро  $B^{10}$  из возбужденного состояния с энергией 0,72 МэВ распадается путем испускания  $\gamma$ -квантов с периодом полураспада  $T_{1/2} = 6,7 \cdot 10^{-10}$  с. Оценить неопределенность в энергии  $\Delta E$  ( $\text{_____} \cdot 10^{-7}$  эВ) испущенного  $\gamma$ -кванта (решение).

*Решение:* известно, что между энергией данного состояния и его временем жизни имеет место соотношение Гейзенберга.

$$\Delta E \cdot \Delta t \approx \hbar,$$

где  $\Delta E$  – ширина соответствующего уровня энергии (неопределенность в энергии);  $\Delta t$  – время жизни возбужденного состояния.

Из соотношения Гейзенберга получим значение для  $\Delta E$ :

$$\Delta E \approx \frac{\hbar}{\tau} = \frac{\hbar \cdot \ln 2}{T_{1/2}} = \frac{0,66 \cdot 10^{-15} \text{эВ} \cdot \text{с} \cdot 0,69}{6,7 \cdot 10^{-10} \text{с}} \approx 7 \cdot 10^{-10} \text{эВ}.$$

*Ответ:*  $\Delta E \approx 7 \cdot 10^{-10}$  эВ.

3. Рассчитать длины волн (в единицах Ферми) протона и электрона с кинетической энергией  $T = 10$  МэВ.

*Решение:* в соответствии с соотношением де Бройля импульс частицы и ее длина волны связаны соотношением:

$$\lambda p = \hbar.$$

Так как протон нерелятивистский ( $T_p \ll m_p c^2$ ), то импульс частицы равен:

$$p = \sqrt{2mT_p}.$$

Тогда

$$\lambda \approx \frac{h}{p} = \frac{hc}{pc} = \frac{hc}{\sqrt{2mTc^2}}.$$

Учитывая, что  $hc = 197 \text{ МэВ} \cdot \text{Фм}$ , получим:

$$\lambda_p = \frac{197 \text{ МэВ} \cdot \text{Фм}}{\sqrt{2 \cdot 938,3 \text{ МэВ} \cdot 10 \text{ МэВ}}} \approx 1,4 \text{ Фм}.$$

Полная энергия релятивистской частицы равна:

$$E = T + m \cdot c^2.$$

Электрон релятивистский. Учитывая, что  $T_e \gg m_e c^2$ , из последнего соотношения получим выражение для импульса:  $E = T = pc$ .

Тогда выражение для длины волны примет вид:

$$\lambda_e \approx \frac{h}{p_e} = \frac{hc}{T_e} = \frac{197 \text{ МэВ} \cdot \text{Фм}}{10 \text{ МэВ}} \approx 20 \text{ Фм}.$$

Ответ:  $\lambda_e \approx 20 \text{ Фм}$ .

4. Длина волны фотона =  $3 \cdot 10^{-11} \text{ см}$ . Вычислить импульс  $p_\gamma$  (\_\_\_\_ МэВ/с) фотона.
5. Какая энергия (МВт \* час) соответствует 1 грамму вещества?

*Решение:* Воспользуемся соотношением Эйнштейна, каждому значению массы в кг соответствует определенное количество энергии в Дж.

$$E = mc^2.$$

Ответ:  $E = 9 \cdot 10^{13} \text{ Дж} = 5,6 \cdot 10^{26} \text{ МэВ} = 25000 \text{ МВт} \cdot \text{ час}$ .

6. Сколько энергии (\_\_\_\_ \*  $10^{17}$  Дж) выделяют при аннигиляции 1 кг вещества и 1 кг антивещества.  
Решается аналогично предыдущей задаче.
7. Используя постоянную Авогадро  $N_A = 6,022 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$  определить массу нейтрального атома  $^{238}\text{U}$  (\_\_\_\_ \*  $10^{-27}$  кг).

*Решение.*

Число молекул (атомов) в одном моле вещества называется постоянной Авогадро  $N_A = 6,022 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$ . Согласно определению масса атома  $M(A, Z)$  связана с молярной массой  $\mu$  и постоянной Авогадро  $N_A$  следующим соотношением:

$$M(A, Z) = \frac{\mu}{N_A}, \text{ кг}.$$

8. Естественный уран представляет собой смесь трех изотопов, а именно:  $_{92}\text{U}^{238}$ ,  $_{92}\text{U}^{235}$  и  $_{92}\text{U}^{234}$ . Относительные атомные массы этих элементов соответственно равны:  $A_{r1} = 238,051$ ,  $A_{r2} = 235,044$  и  $A_{r3} = 234,041$ . Вычислить относительную атомную массу элемента урана, если процентное содержание этих изотопов в естественной смеси равно: 99,28 %, 0,714 %, 0,006 %.

9. Бор представляет собой смесь двух изотопов с относительными атомными массами 10,013 и 11,009. Сколько % каждого из этих изотопов содержится в естественном боре? Относительная атомная масса элемента бора равна 10,811 (решение).

*Решение:* Согласно определению, относительная атомная масса смеси определяется соотношением:

$$A_{r1} \cdot \omega_1 + A_{r2} \cdot \omega_2 + \dots = A_r. \quad (1)$$

Используя соотношение (1) и то, что  $\omega_1 + \omega_2 = 1$  получим следующую систему из двух уравнений:

$$\begin{aligned} A_{r1} \cdot \omega_1 + A_{r2} \cdot \omega_2 &= A_r \\ \omega_1 + \omega_2 &= 1 \end{aligned}$$

Из решения данной системы следует, что  $\omega_1 = 79,8\%$ ;  $\omega_2 = 20,2\%$





2)F-20

3)F-21

4)F-22

19. Распад покоящихся ядер  ${}_{84}\text{Po}^{210}$  происходит из основного и сопровождается испусканием двух групп  $\alpha$ -частиц: основной с энергией  $E_{\alpha 1} = 5,30$  МэВ и слабой (по интенсивности) с энергией  $E_{\alpha 2} = 4,50$  МэВ. Найти энергию  $\gamma$ -квантов (МэВ), испускаемых дочерними ядрами (0,82).

20. Изотоп углерода  ${}_{6}\text{C}^{11}$  претерпевает позитронный распад. Найти энергию  $\beta^+$ -распада (МэВ) (0,931).

21. Ядро уран-238 взаимодействует с нейтроном с образованием изотопа, который испытывает последовательно 2 бета-распада, в какое ядро превращается этот изотоп.

Будет задача на альфа-распад, аналогичные задачи с торием-232.

22. Активность препарата  ${}^{32}\text{P}$  равна 2 мКи. Сколько весит ( $\text{_____} \cdot 10^{-12}$  г) такой препарат?

23. Определить проникаемость кулоновского барьера ядра  ${}_{13}\text{Al}^{27}$  по отношению к протону с кинетической энергией 1 МэВ.

**Решение:** Проницаемость определим из соотношения:

$$D = e^{-2C_l} = e^{-2\sqrt{\frac{2\mu}{\hbar}} \int_R^{r_0} \sqrt{V(r)-E} dr},$$

где потенциальная энергия, согласно условию задачи включает в себя только кулоновский барьер, имеет вид:

$$V(r) = \frac{zZe^2}{r} \text{ и } V(r_e) - E = 0; \quad B_l = V(R).$$

Решение для  $C_l$  можно получить положив параметр  $u = 0$  (так как рассматривается только кулоновский барьер) в общем выражении для  $C_l$ :

$$C_l = g \left( \frac{1}{\sqrt{x}} \left( \arccos(\sqrt{x}) \right) - \sqrt{1-x} \right).$$

Радиус ядра равен:

$$R = 1,4 \cdot 10^{-13} \cdot A^{1/3} = 1,4 \cdot 10^{-13} \cdot 27^{1/3} = 4,2 \cdot 10^{-13} \text{ см.}$$

Согласно условию задачи необходимо найти проникаемость кулоновского барьера, поэтому высота барьера будет определяться соотношением:

$$B_l = B_K \approx \frac{Z \cdot z}{A^{1/3}} = 4,3 \text{ МэВ.}$$

Приведенная масса системы, равна:

$$\mu = \frac{m_p \cdot M_{Al}}{m_p + M_{Al}} \approx m_p.$$

Величины, входящие в интеграл  $C_l$  соответственно равны:

$$g = \sqrt{\frac{2zZe^2 R \mu}{\hbar^2}} = 1,9;$$
$$x = \frac{E}{B_l} = 0,2.$$

Подставляя найденные значения в выражение для  $C_l$ , получим:

$$C_l = 2,6.$$

Проницаемость кулоновского барьера ядра  ${}^{27}\text{Al}$  по отношению к протону с кинетической энергией 1 МэВ, равна:

$$D = e^{-2C_l} = e^{-5,2} \approx 0,005.$$

24. Точечный радиоактивный источник  ${}^{60}\text{Co}$  находится в центре свинцового сферического контейнера с толщиной стенок  $x = 1$  см и наружным радиусом  $R = 20$  см. Определить максимальную активность  $A_{\text{max}}$  ( $\text{_____} \cdot 10^6$  Бк) источника, который можно хранить в контейнере, если допустимая плотность потока Фдоп  $\gamma$ -квантов при выходе из контейнера

равна  $8 \cdot 10^6$   $1/(с \cdot м^2)$ . Принять, что при каждом акте распада ядра  $^{60}\text{Co}$  испускается  $n = 2$   $\gamma$ -квантов, средняя энергия которых  $E_\gamma = 1,25$  МэВ (3,8).

25. Сколько нейтронов будет в размножающей системе ( $\_\_\_\_\_\_ 10^5$ ) в 100-м поколении, если процесс деления начинается с 1000-го нейтрона,  $k_\infty = 1,05$  (решение).

*Решение.* В идеализированной надкритической размножающей системе, то есть в системе бесконечных размеров, в которой отсутствует поглощение и утечка нейтронов, количество нейтронов в каждом новом поколении растет в соответствии с геометрической прогрессией:

$$N_n = N_1 \cdot q^{n-1},$$

где  $n = 100$ ,  $N_1 = 1000$ ,  $q = k_\infty = n_2 / n_1 = 1,05$ .

Тогда, для  $n = 100$  получим:

$$N_{100} = 1000 \cdot 1,05^{99} = 1,25 \cdot 10^5.$$

26.

27.

28.

29. Определить количество делений и поглощений ( $\_\_\_\_\_\_ \cdot 10^8$   $1/м^3/с$ ) без делений за 1 с в размножающей среде с U-235, где  $n = 10^{12}$  нейтр./ $м^3$ , а концентрация горючего –  $N^0 = 5 \cdot 10^{24}$   $м^{-3}$ . Энергия тепловых нейтронов  $E_{ТН} = 0,025$  эВ, сечение деления при этой энергии, сечение радиационного захвата – известны (Решение-ответ).

Аналогичные задачи найдете в книге Владимирова В.И. «Физика ЯР»

30. Сколько нужно разделить и «сжечь» урана-235 ( $\_\_\_\_\_\_$  гр.), чтобы получить энергию 1МВт\*сут в тепловом реакторе (1,05; 1,23).

Аналогичные задачи найдете в книге Владимирова В.И. «Физика ЯР»

31. Во сколько возрастет плотность нейтронов в размножающей системе за 1 с при кэфф = 1,003 (Ответ). Эта же задача с учетом запаздывающих нейтронов.

