

«Радиологические измерения»

Лекция 4. Ядерные реакции.

*и.о. доцента кафедры
теоретической и ядерной физики
PhD Зарипова Ю.А.*

ЯДЕРНЫЕ РЕАКЦИИ

Ядерными реакциями называются превращения атомных ядер, вызванные их взаимодействием с элементарными частицами или друг с другом.

В общем виде ядерное взаимодействие можно записать в форме:

$$a_1 + a_2 \rightarrow b_1 + b_2 + \dots$$

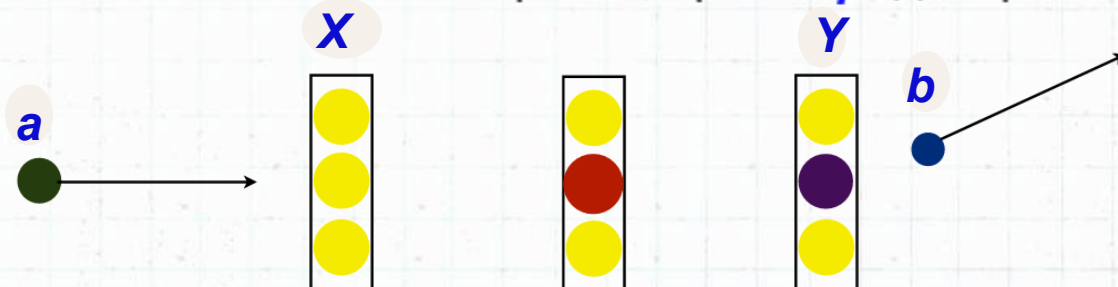
Наиболее распространённым типом ядерной реакции является взаимодействие лёгкой частицы a с ядром X , в результате чего образуется частица b и ядро Y . Символически это можно записать так:



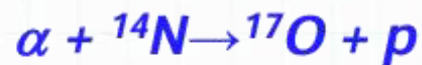
или в сокращённом виде:



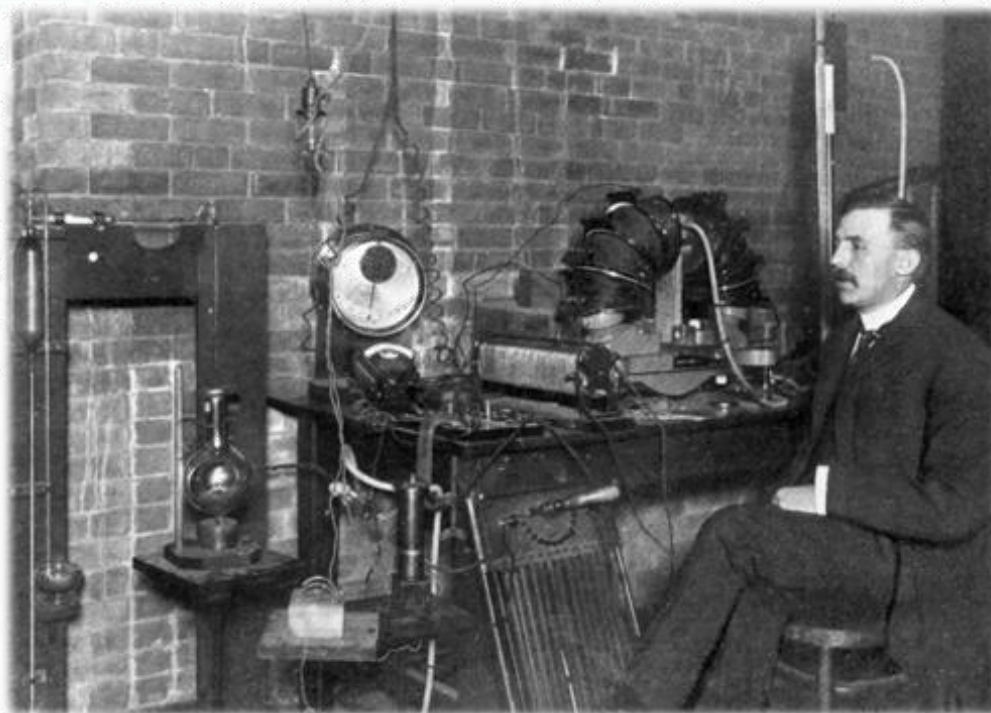
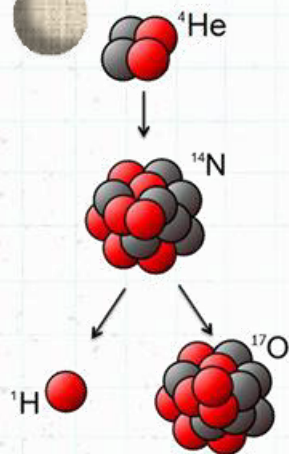
Роль частиц a и b чаще всего выполняют нейтрон n , протон p , дейтрон d , α -частица и γ -квант.



Впервые ядерную реакцию наблюдал Э. Резерфорд в 1919 году, бомбардируя α -частицами ядра атомов азота, в результате чего появились другие частицы с большим пробегом в газе, которые были идентифицированы как протоны.



Впоследствии с помощью камеры Вильсона были получены фотографии этого процесса.



Классификация ядерных реакций

$$a + A = b + B$$

$$A(a,b)B$$



Классификация по энергии:

1. малые (низкие) энергии $1 \div 10$ МэВ;
2. средние энергии $10 \div 200$ МэВ;
3. высокие энергии >200 МэВ.

Классификация по типу налетающих частиц:

1. ядерные реакции, вызванные гамма-квантами;
2. ядерные реакции, вызванные электронами;
3. ядерные реакции, вызванные нейтронами;
4. ядерные реакции, вызванные заряженными частицами;
5. ядерные реакции, вызванные тяжелыми ионами.

Классификация по массе ядра-мишени:

1. легкие ядра с $Z = 3 \div 20$;
2. средние ядра с $Z = 21 \div 40$;
3. тяжелые ядра с $Z = 41 \div 100$;
4. сверхтяжелые ядра с $Z > 101$.

Классификация по механизмам ядерной реакции:

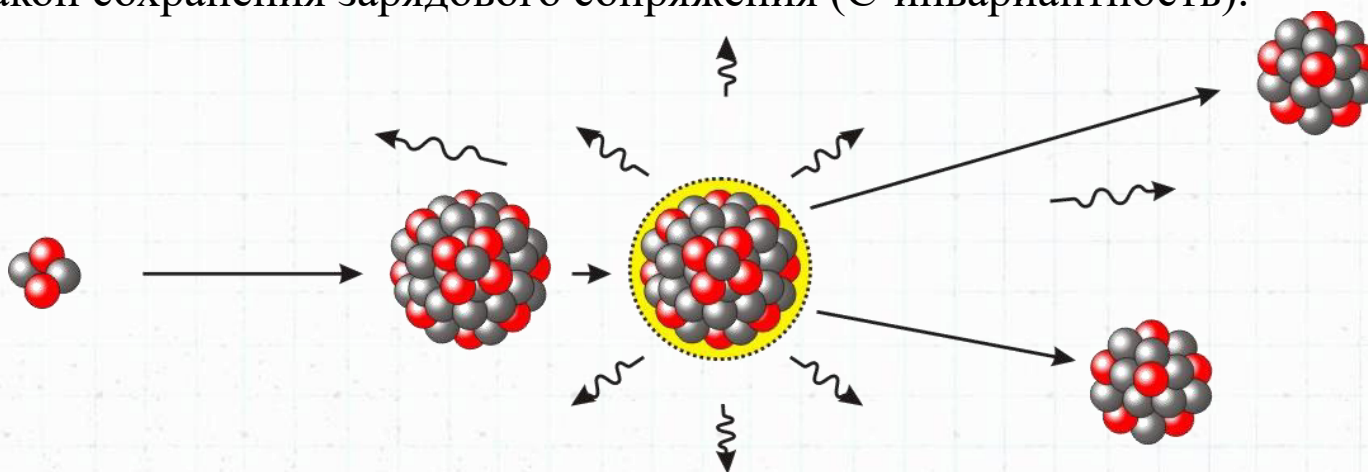
1. реакция упругого рассеяния;
2. реакция неупругого рассеяния;
3. ядерная реакция срыва;
4. ядерная реакция подхвата;
5. ядерная реакция деления;
6. ядерная реакция синтеза;
7. ядерная реакция с вылетом нуклонного кластера.

Классификация по механизмам образования составной ядерной системы:

1. ядерные реакции, идущие через стадию образования составного ядра;
2. предравновесные ядерные реакции;
3. прямые ядерные реакции.

Законы сохранения в ядерных реакциях

1. Закон сохранения импульса;
2. Закон сохранения энергии;
3. Закон сохранения электрического заряда
4. Закон сохранения числа барионов.
5. Закон сохранения лептонного заряда.
6. Закон сохранения полного момента количества движения.
7. Закон сохранения четности в сильных взаимодействиях.
8. Закон сохранения изотопического спина.
9. Закон сохранения квантовых чисел.
10. Закон сохранения зарядового сопряжения (С-инвариантность).



Закон сохранения электрического заряда

$$\sum_i q_i = \text{const}$$

$$Z_a + Z_A = Z_b + Z_B$$

Закон сохранения барионного заряда

В ядерных реакциях обычного типа (без образования античастиц) сохраняется полное число нуклонов. Сохранение числа нуклонов интерпретируется как сохранение барионного числа B

$$B_n = B_p = 1$$

$$A_a + A_A = A_b + A_B$$

Используя законы сохранения электрического заряда и числа нуклонов можно определить неизвестный продукт реакции.

Например, в ядерной реакции



неизвестным продуктом x является α -частица.

Закон сохранения электрического заряда

$$\sum_i q_i = \text{const}$$

$$Z_a + Z_A = Z_b + Z_B$$

Закон сохранения барионного заряда

В ядерных реакциях обычного типа (без образования античастиц) сохраняется полное число нуклонов. Сохранение числа нуклонов интерпретируется как сохранение **барионного числа B**

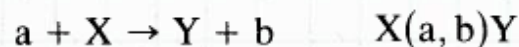
$$B_n = B_p = 1$$

$$A_a + A_A = A_b + A_B$$

Реакция	Электрический заряд	Число нуклонов
${}_1\text{H}^2 + {}_1\text{H}^2 \rightarrow {}_2\text{He}^3 + n$ $p + {}_3\text{Li}^7 \rightarrow {}_4\text{Be}^7 + n$ $\gamma + {}_4\text{Be}^7 \rightarrow 2{}_2\text{He}^4 + n$ $\gamma + {}_1\text{H}^2 \rightarrow p + n$ $n + {}_{16}\text{S}^{32} \rightarrow {}_{15}\text{P}^{32} + p$ $\alpha + {}_7\text{N}^{14} \rightarrow {}_8\text{O}^{17} + p$	$1+1=2+0$ $1+3=4+0$ $0+4=2 \cdot 2+0$ $0+1=1+0$ $0+16=15+1$ $2+7=8+1$	$2+2=3+1$ $1+7=7+1$ $0+9=2 \cdot 4+1$ $0+2=1+1$ $1+32=32+1$ $4+14=17+1$
Реакция	Электрический заряд	Число нуклонов
${}_1\text{H}^3 \xrightarrow{\beta^-} {}_2\text{He}^3 + e^- + \tilde{\nu}$ ${}_{88}\text{Ra}^{226} \xrightarrow{\alpha} {}_{86}\text{Rn}^{222} + {}_2\text{He}^4$ ${}_4\text{Be}^7 + e^- \xrightarrow{\text{K}} {}_3\text{Li}^7 + \nu$	$1=2-1+0$ $88=86+2$ $4-1=3+0$	$3=3+0+0$ $226=222+4$ $7+0=7+0$

Энергия реакции (энергетический выход реакции) –

кинетическая энергия, выделяющаяся или поглощающаяся в ядерной реакции



$$m_X c^2 + T_X + m_a c^2 + T_a = m_Y c^2 + T_Y + m_b c^2 + T_b$$

$$Q = T_{\text{final}} - T_{\text{initial}}$$

$$= T_Y + T_b - T_X - T_a$$



$$Q = (m_{\text{initial}} - m_{\text{final}}) c^2$$

$$= (m_X + m_a - m_Y - m_b) c^2$$

Если $Q > 0$ ($m_{\text{initial}} > m_{\text{final}}$ или $T_{\text{final}} > T_{\text{initial}}$), то реакция сопровождается выделением кинетической энергии за счет уменьшения энергии покоя частиц и называется **экзотерической**.

Если $Q < 0$ ($m_{\text{initial}} < m_{\text{final}}$ или $T_{\text{final}} < T_{\text{initial}}$), то реакция сопровождается возрастанием энергии покоя частиц за счет уменьшения кинетической энергии и называется **эндотерической**.

Порог реакции - минимальная кинетической энергии налетающей частицы в лабораторной системе координат, при котором возможна ядерная реакция.

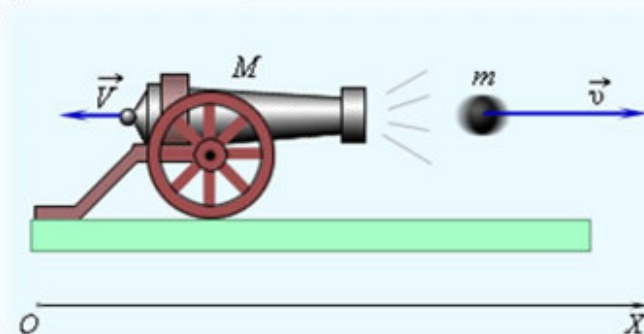
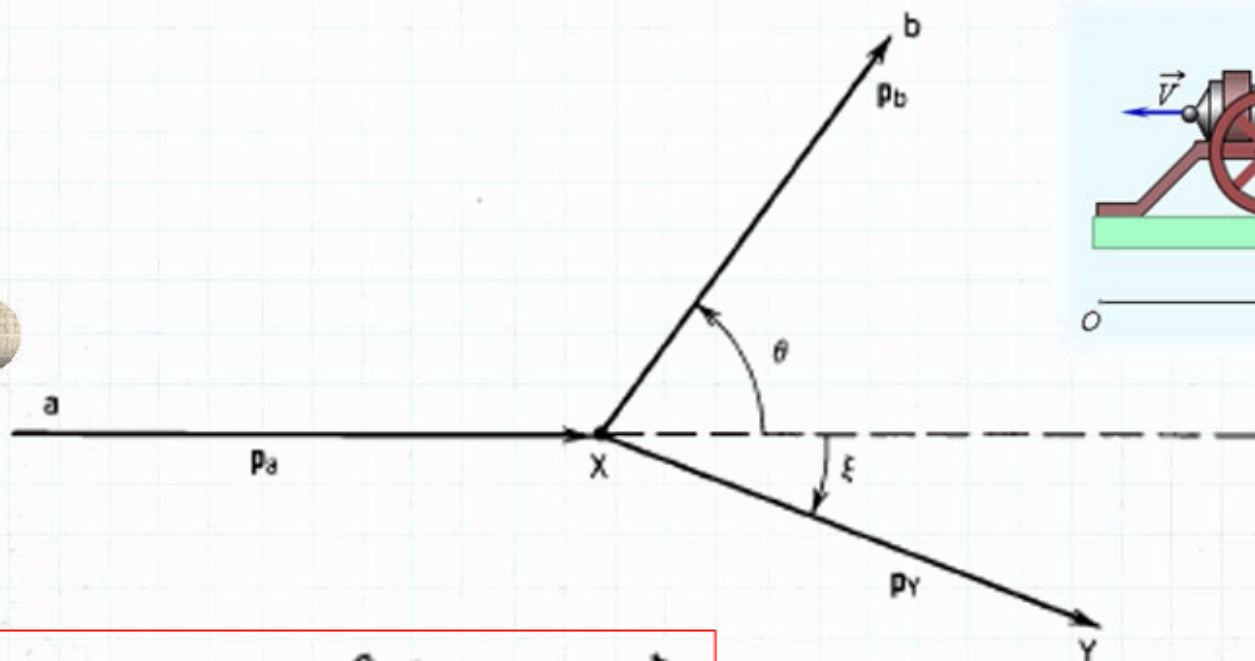
$$T_a^{\text{пор}} = (m_a + m_X + m_Y + m_b) (m_Y + m_b - m_a - m_X) c^2 / 2m_X = |Q| (1 + m_a / m_X + |Q| / 2m_X c^2)$$

Необходимым (но недостаточным!) условием протекания ядерной реакции является

$$Q + E_a > 0$$

Закон сохранения импульса

Полный импульс частиц до реакции равен полному импульсу частиц-продуктов реакции.

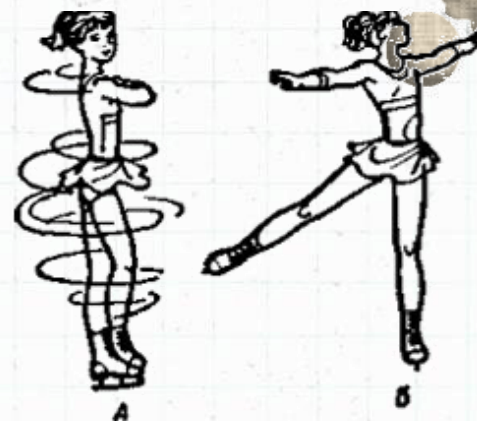


$$p_a = p_b \cos \theta + p_\gamma \cos \xi$$
$$0 = p_b \sin \theta - p_\gamma \sin \xi$$

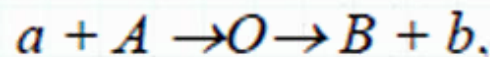
Момент количества движения

В ядерных реакциях сохраняется полный момент количества движения замкнутой системы

$$\vec{J}$$



Рассмотрим реакцию вида



где O – составное (промежуточное, компаунд) ядро.

Тогда

$$\vec{J}_a + \vec{J}_A + \vec{l}_{aA} = \vec{J}_b + \vec{J}_B + \vec{l}_{bB},$$

Здесь $\vec{J}_A, \vec{J}_B, \vec{J}_{aA}$ и $\vec{J}_b$ – спины участвующих в реакции частиц, $\vec{l}$ – относительные орбитальные моменты, характеризующие их относительное движение.

Применение закона сохранения момента количества движения с учётом квантовых особенностей приводит к определённым правилам отбора. Например, процессы с излучением γ -кванта невозможны при переходах ядер между состояниями с нулевыми моментами, так как γ -квант уносит целочисленный момент ($\neq 0$).

Закон сохранения чётности

В сильных и электромагнитных взаимодействиях пространственная чётность P сохраняется.

Применительно к ядерной реакции

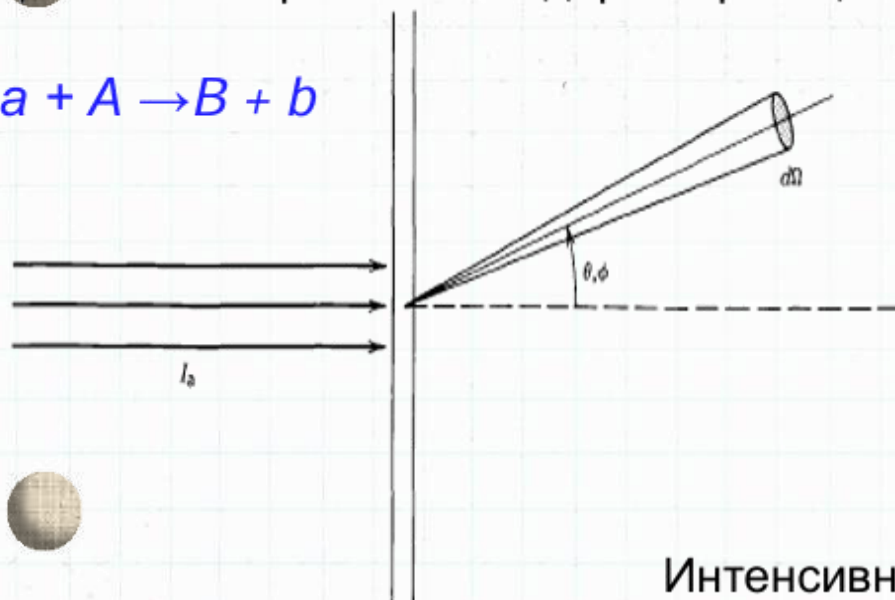


закон сохранения чётности записывается следующим образом:

$$P_a P_A (-1)^{l_{Aa}} = P_B P_b (-1)^{l_{Bb}}$$

Сечение ядерной реакции

Вероятность протекания ядерной реакции характеризуют **эффективным сечением**



Полное сечение

Интенсивность
регистрации
событий

$$\sigma = \frac{R_b}{I_a N}$$

Интенсивность потока
частиц-снарядов

Плотность
ядер-мишеней

Дифференциальное сечение

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{r(\theta, \phi)}{4\pi I_a N}$$

Дважды дифференциальное сечение

$$\frac{d^2\sigma_{ab}}{d\Omega dE_b} = \frac{1}{nN_0} \frac{dN_b}{d\Omega dE_b}$$

$$\frac{d\sigma_{ab}}{d\Omega} = \int \frac{d^2\sigma_{ab}}{d\Omega dE_b} dE_b, \quad \frac{d\sigma_{ab}}{dE_b} = \int \frac{d^2\sigma_{ab}}{d\Omega dE_b} d\Omega, \quad \sigma_{ab} = \iint \frac{d^2\sigma_{ab}}{d\Omega dE_b} d\Omega dE_b$$

**СПАСИБО ЗА
ВНИМАНИЕ!**

