КАЗАХСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ АЛЬ-ФАРАБИ
Физико-технический факультет
Кафедра теоретической и ядерной физики

«Радиологические измерения»

Лекция 4. Ядерные реакции.

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

Цель лекции: сформировать у обучающихся представление о физической сущности и классификации ядерных реакций, их энергетических и вероятностных характеристиках, а также основных законах сохранения, определяющих протекание ядерных превращений.

Результаты обучения:

По завершении лекции обучающийся будет способен:

1. Объяснять физическую сущность ядерных реакций и классифицировать их по основным признакам.
2. Характеризовать основные механизмы ядерных реакций, включая упругое и неупругое рассеяние, деление и синтез ядер.
3. Применять законы сохранения энергии, импульса, электрического заряда и числа нуклонов при анализе ядерных реакций.
4. Определять энергетический выход и порог ядерной реакции, различать экзотермические и эндотермические процессы.
5. Объяснять физический смысл сечения и выхода ядерной реакции как характеристик вероятности ядерного взаимодействия.

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:

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

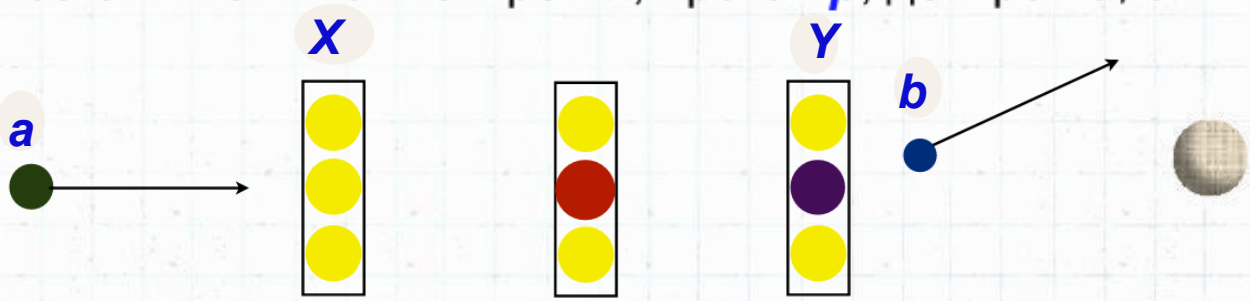
Наиболее распространённым типом ядерной реакции является взаимодействие лёгкой частицы ***a*** с ядром ***X***, в результате чего образуется частица ***b*** и ядро ***Y***. Символически это можно записать так:

$$a + X \rightarrow Y + b$$

или в сокращённом виде:

$$X\,(a,b)\,Y$$

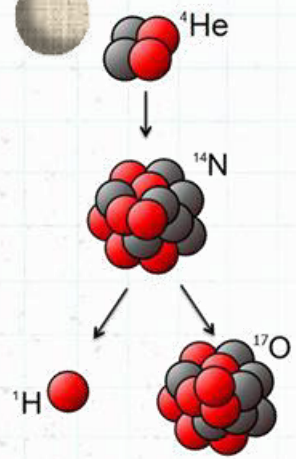
Роль частиц ***a*** и ***b*** чаще всего выполняют нейтрон ***n***, протон ***p***, дейтрон ***d***, ***α***-частица и ***γ***-квант.

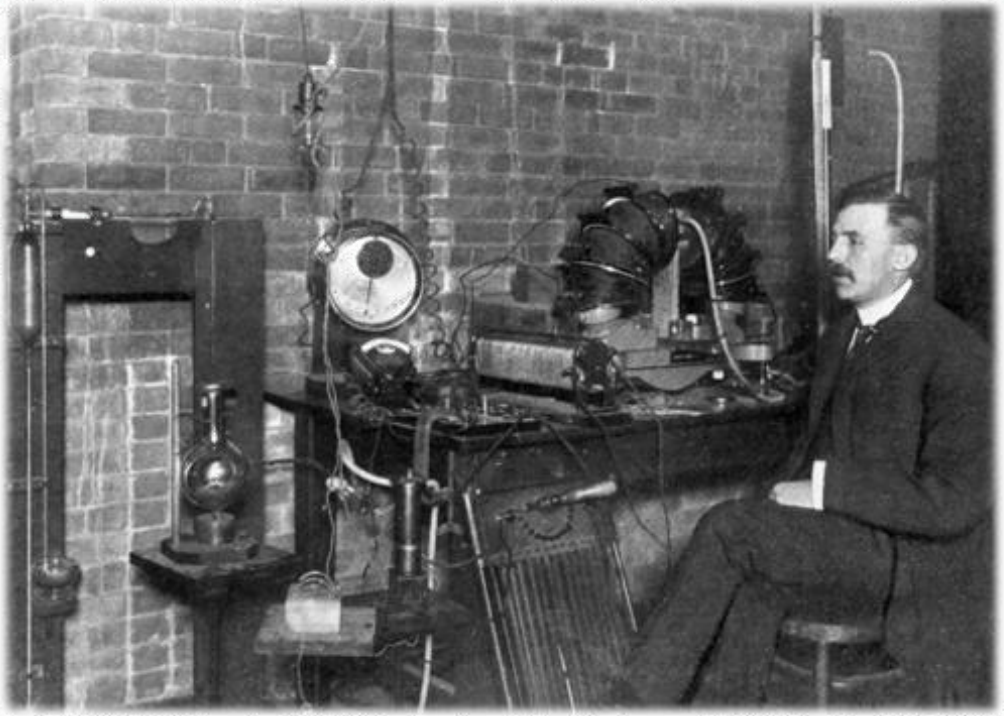


Впервые ядерную реакцию наблюдал Э. Резерфорд в 1919 году, бомбардируя α-частицами ядра атомов азота, в результате чего появились другие частицы с большим пробегом в газе, которые были идентифицированы как протоны.

$$\alpha + {}^{14}N \rightarrow {}^{17}O + p$$

Впоследствии с помощью камеры Вильсона были получены фотографии этого процесса.

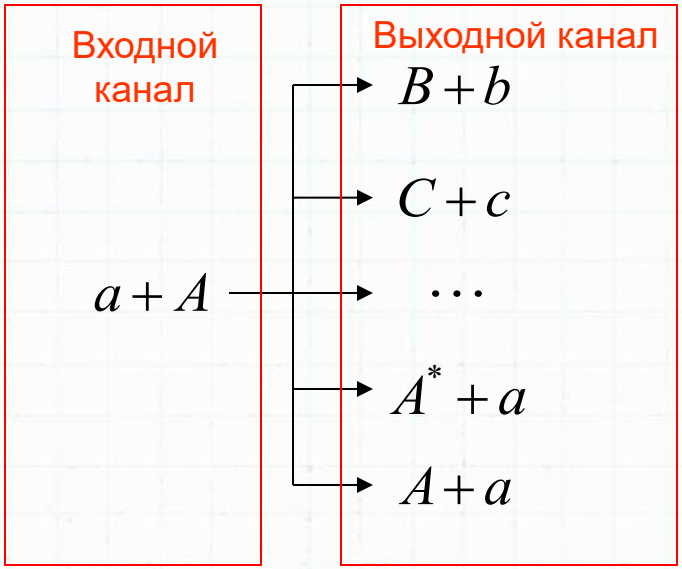




Классификация ядерных реакций

$$a + A = b + B$$

$$A(a,b)B$$



Классификация по энергии:
1. малые (низкие) энергии 1 ÷ 10 МэВ;
2. средние энергии 10 ÷ 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.

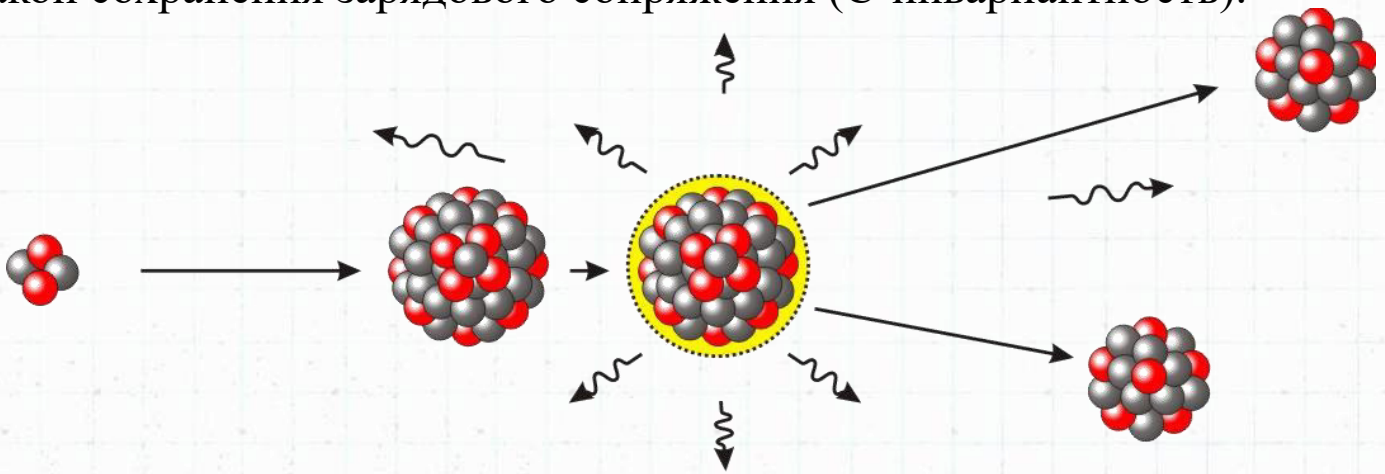
Классификация по массе ядра-мишени:
1. легкие ядра с Z= 3 ÷ 20;
2. средние ядра с Z= 21 ÷ 40;
3. тяжелые ядра с Z= 41 ÷ 100;
4. сверхтяжелые ядра с Z> 101.

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 сохранение 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

$$\sum_i q_i = const$$

$$Z_a + Z_A = Z_b + Z_B$$

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

$$p + {}^7Li \rightarrow {}^4He + x$$

неизвестным продуктом ***x*** является α-частица.

Закон сохранения электрического заряда

$$\sum_i q_i = const$$

$$Z_a + Z_A = Z_b + Z_B$$

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
${}_1H^2 + {}_1H^2 \rightarrow {}_2He^3 + n$	$1+1=2+0$	$2+2=3+1$
$p + {}_3Li^7 \rightarrow {}_4Be^7 + n$	$1+3=4+0$	$1+7=7+1$
$\gamma + {}_4Be^7 \rightarrow 2\,{}_2He^4 + n$	$0+4=2\cdot 2+0$	$0+9=2\cdot 4+1$
$\gamma + {}_1H^2 \rightarrow p + n$	$0+1=1+0$	$0+2=1+1$
$n + {}_{16}S^{32} \rightarrow {}_{15}P^{32} + p$	$0+16=15+1$	$1+32=32+1$
$\alpha + {}_7N^{14} \rightarrow {}_8O^{17} + p$	$2+7=8+1$	$4+14=17+1$

Реакция	Электрический заряд	Число нуклонов
${}_1H^3 \xrightarrow{\beta^-} {}_2He^3 + e^- + \tilde{\nu}$	$1=2-1+0$	$3=3+0+0$
${}_{88}Ra^{226} \xrightarrow{\alpha} {}_{86}Rn^{222} + {}_2He^4$	$88=86+2$	$226=222+4$
${}_4Be^7 + e^- \xrightarrow{K} {}_3Li^7 + \nu$	$4-1=3+0$	$7+0=7+0$

Энергия реакции (энергетический выход реакции) – кинетическая энергия, выделяющаяся или поглощающаяся в ядерной реакции

$$a + X \rightarrow Y + b \qquad X(a,b)Y$$

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

$$Q = T_{final} - T_{initial} = T_Y + T_b - T_X - T_a \quad \Leftrightarrow \quad Q = (m_{initial} - m_{final})c^2 = (m_X + m_a - m_Y - m_b)c^2$$

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

Если $Q<0$ ($m_{initial} < m_{final}$ или $T_{final} < T_{initial}$) , 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.

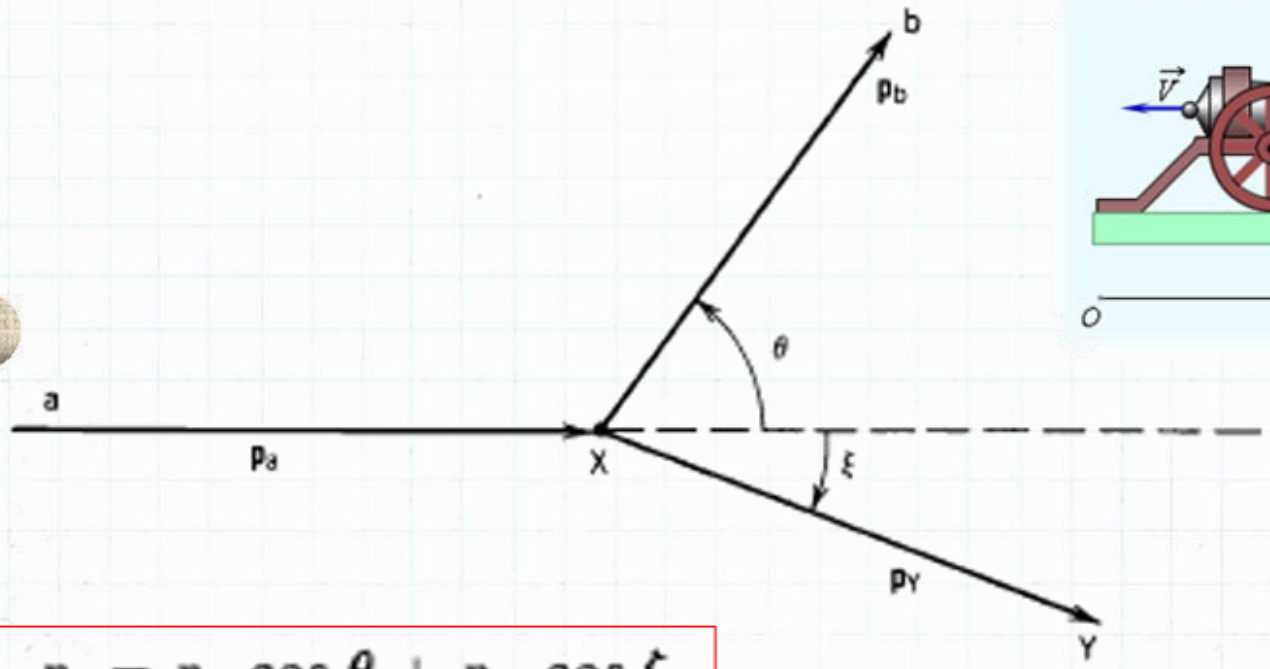
$$T_a^{пор} = (m_a + m_X + m_Y + m_b)(m_Y + m_b - m_a - m_X)c^2 / 2m_X = |Q|(1 + m_a/m_X + |Q|/2m_X c^2)$$

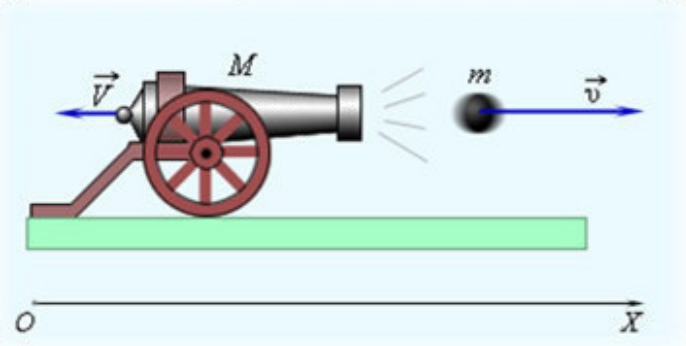
Необходимым (но недостаточным!) условием протекания ядерной реакции является

$$Q + E_a > 0$$

Закон сохранения импульса

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



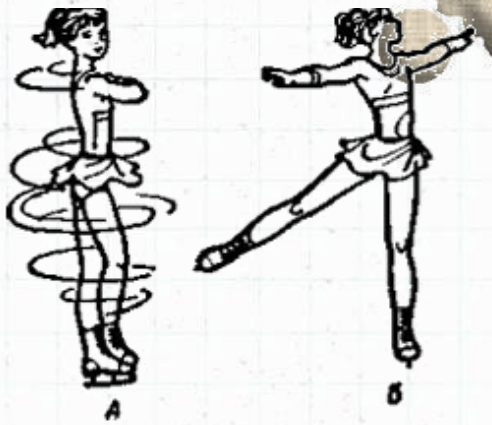


$$p_a = p_b \cos\theta + p_Y \cos\xi$$

$$0 = p_b \sin\theta - p_Y \sin\xi$$

Момент количества движения

В ядерных реакциях сохраняется полный момент количества движения замкнутой системы $\vec{J}$



Рассмотрим реакцию вида

$$a + A \rightarrow O \rightarrow B + b,$$

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 ($I \neq 0$).

Закон сохранения четности

В сильных и электромагнитных взаимодействиях *пространственная чётность P* сохраняется.
Применительно к ядерной реакции

$$a + A \rightarrow B + b$$

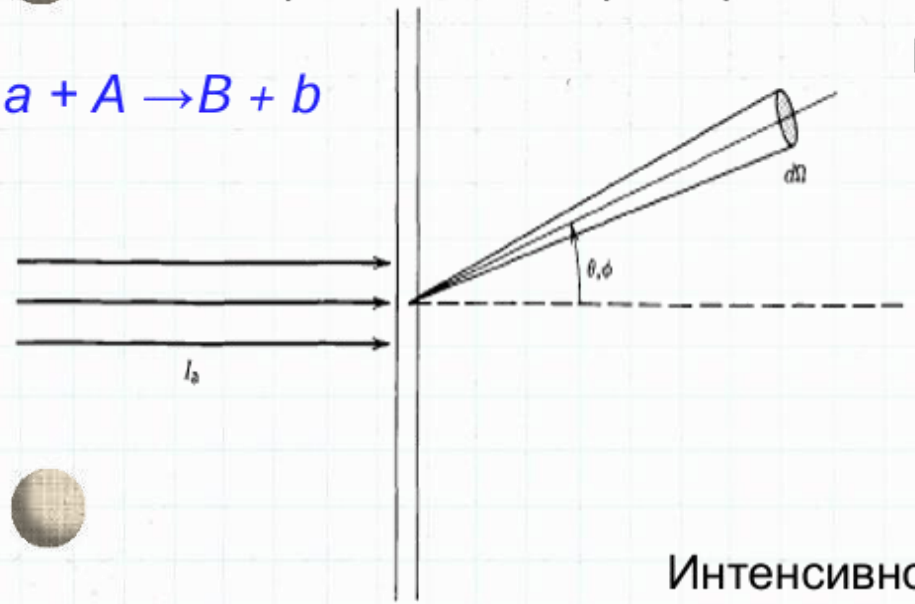
закон сохранения чётности записывается следующим образом:

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

Сечение ядерной реакции

Вероятность протекания ядерной реакции характеризуют эффективным сечением

$a + A \rightarrow B + b$



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

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

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

Выводы:

1. Ядерные реакции представляют собой процессы взаимодействия атомных ядер с частицами или другими ядрами, сопровождающиеся ядерными превращениями.
2. Ядерные реакции классифицируются по энергии, типу налетающих частиц, характеристикам ядра-мишени и механизму взаимодействия.
3. Протекание ядерных реакций определяется законами сохранения энергии, импульса, электрического заряда и других физических величин.
4. Энергетический выход и порог реакции характеризуют энергетические условия её протекания.
5. Сечение и выход ядерной реакции являются важными вероятностными характеристиками, используемыми при экспериментальном исследовании ядерных процессов.

Вопросы для самопроверки:

1) Что называется ядерной реакцией?
2) Классификация ядерных реакций. Приведите примеры.
3) В чем различие между упругим и неупругим рассеянием?
4) Что такое энергия ядерной реакции Q и как она определяется?
5) Что называется порогом ядерной реакции и как он рассчитывается?
6) Каково физическая сущность сечения ядерной реакции?
7) Какие основные законы сохранения выполняются в ядерных реакциях?

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!

