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

«Основы производства радиоактивных изотопов»

Лекция 4. Основы ядерных реакций.

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

Цель лекции: сформировать представление о физических основах, механизмах и основных типах ядерных реакций, раскрыть законы сохранения и характеристики ядерных взаимодействий, а также показать их значение в процессах получения и использования радионуклидов.

Результаты обучения:

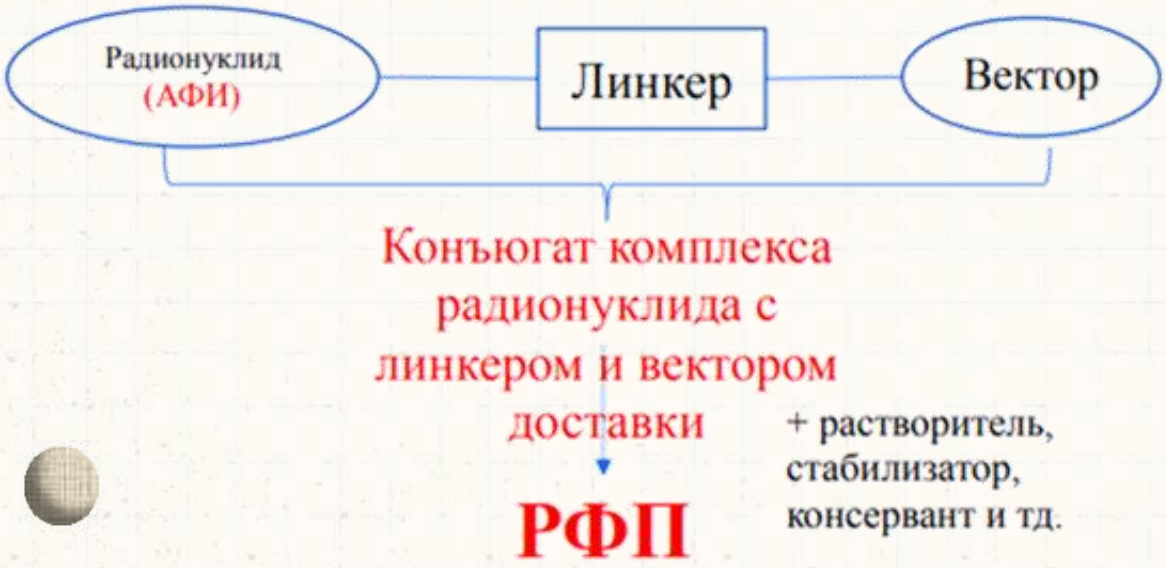
По завершении лекции обучающийся будет способен:

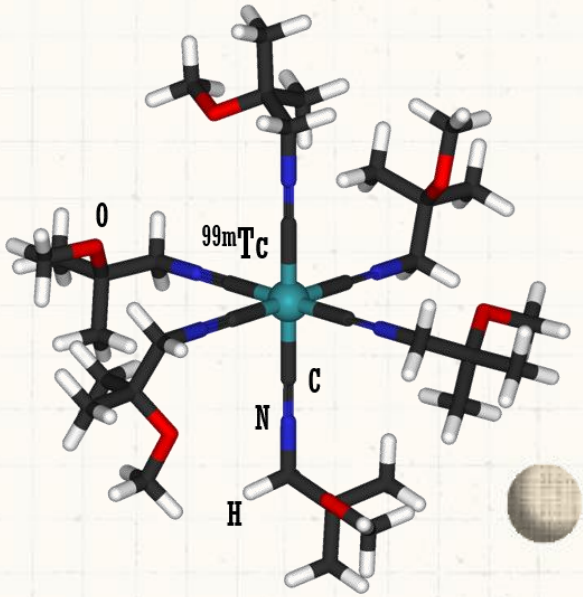
1. Объяснять физическую сущность ядерных реакций и характеризовать основные механизмы ядерных взаимодействий.
2. Формулировать основные законы сохранения, выполняющиеся при ядерных реакциях.
3. Различать основные типы ядерных реакций, включая упругое и неупругое рассеяние, радиационный захват, деление и синтез ядер.
4. Объяснять физический смысл энергии, порога и сечения ядерной реакции, а также факторы, влияющие на вероятность её протекания.
5. Характеризовать основные ядерные реакции, используемые для получения радионуклидов.

Ядерная медицина – направление современной медицины, использующее радиоактивные вещества – радиофармпрепараты (РФП) и радионуклиды (РН) для диагностики и терапии в различных областях научной и практической медицины.



Радиофармацевтический препарат (РФП) (Radiopharmaceutical) – лекарственный препарат, который в готовой для использования лекарственной форме содержит один или несколько радионуклидов (радиоактивных изотопов), имеющих качественные характеристики, пригодные для диагностического и/или терапевтического применения. К РФП относят препараты, зарегистрированные в реестре ЛС и удовлетворяющие требованиям фармакопейной статьи или, в случае ее отсутствия, требованиям нормативной документации.





Радионуклиды для ядерной медицины

Тип излучения:
Альфа-частицы
Бета-частицы
Гамма-кванты
Рентген
Нейтроны

Химический тип:
Синтез, реакции, встраиваемость в молекулу, токсичность

Биологические свойства:
Участие в обменных процессах органов и тканей

Производство:
Ядерно-физические методы
Радиохимия
Химия

Стоимость

Радионуклидов > 50



В медицинской физике ядерные реакции лежат в основе:

- производства радионуклидов для ПЭТ и ОФЭКТ-диагностики;
- создания терапевтических изотопов (например, ^{177}Lu, ^{131}I, ^{90}Y);
- контроля дозы и радиационной безопасности в ядерной медицине.

Понимание механизмов ядерных реакций позволяет медицинскому физику:

- выбирать оптимальный способ получения нужного изотопа;
- рассчитывать активность и время облучения мишени;
- оценивать изотопные примеси и радиационные потоки;
- обеспечивать качество и безопасность радиофармпрепаратов.

Ядерная реакция – это процесс, при котором атомное ядро взаимодействует с другим ядром или элементарной частицей, приводя к изменению состава, энергии или состояния исходного ядра.

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

где a – налетающая частица (нейтрон, протон, α-частица, γ-квант и др.); A – исходное (мишенное) ядро; B – продукт реакции (новое ядро); b – вылетающая частица.



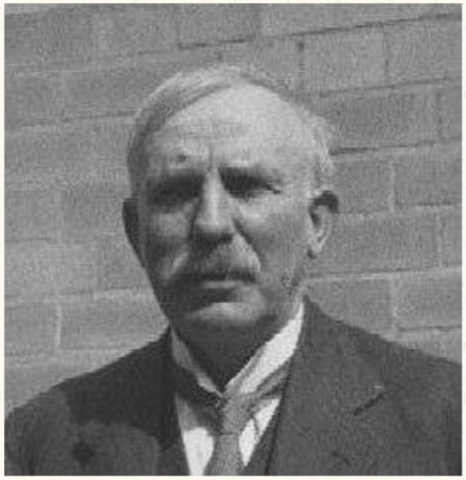
$$p + {}^{7}_{3}\mathrm{Li} \rightarrow {}^{4}_{2}\mathrm{He} + {}^{4}_{2}\mathrm{He} \quad \text{или} \quad {}^{7}_{3}\mathrm{Li}(p, 2\alpha),$$

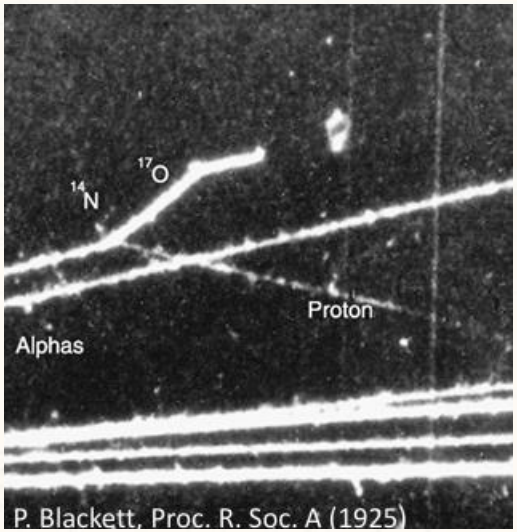
$$p + {}^{17}_{8}\mathrm{O} \rightarrow {}^{17}_{9}\mathrm{F} + n \quad \text{или} \quad {}^{17}_{8}\mathrm{O}(p, n)$$

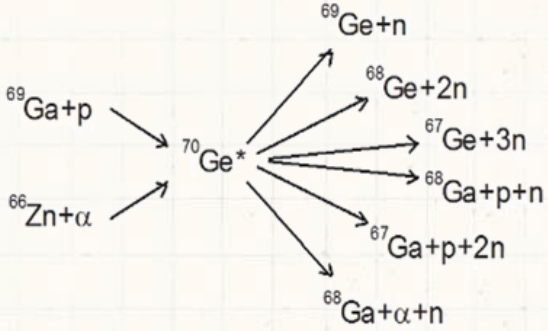
$$\gamma + {}^{40}_{20}\mathrm{Ca} \rightarrow {}^{38}_{19}\mathrm{K} + p + n \quad \text{или} \quad {}^{40}_{20}\mathrm{Ca}(\gamma, pn){}^{38}_{19}\mathrm{K}.$$

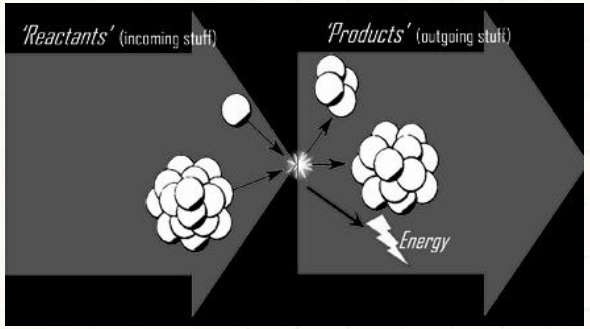
Первая ядерная реакция осуществлена Э. Резерфордом в 1919 г.:

$$\alpha + {}^{14}_{7}\mathrm{N} \rightarrow {}^{17}_{8}\mathrm{O} + p$$

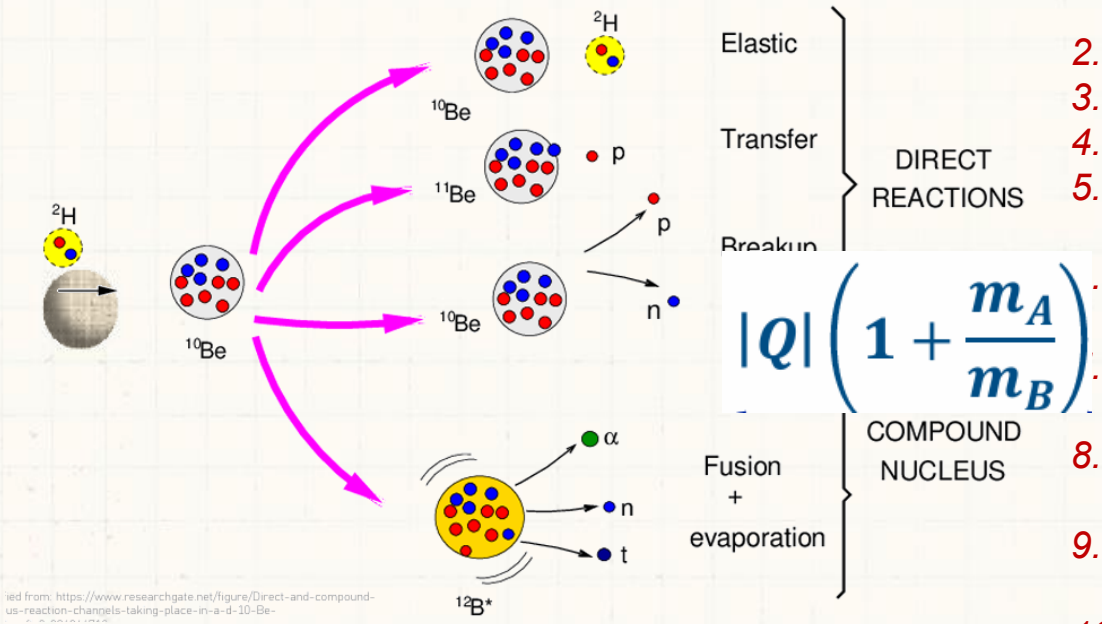








Законы сохранения в ядерных реакциях



$$|Q|\left(1+\frac{m_A}{m_B}\right)$$

1. *Закон сохранения электрического заряда.*
2. *Закон сохранения числа барионов.*
3. *Закон сохранения энергии.*
4. *Закон сохранения импульса.*
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).*

Энергия реакции:

$$Q = (m_A + m_B)c^2 - (m_C + m_D + \ldots)c^2$$

Порог реакции – минимальная величина, при которой эндотермическая реакция возможна

$$E_{tr} = -Q\frac{M_1 + M_2}{M_2} \approx |Q|\left(1+\frac{m_A}{m_B}\right)$$

Виды ядерных реакций

1. **Реакция упругого рассеяния**

$$a + A \rightarrow A + a$$
$$(Q = 0)$$

2. **Неупругое рассеяния**

$$a + A \rightarrow A^* + a' + Q \qquad (Q < 0)$$
$$E_{th} \cong -Q\frac{m_a + m_A}{m_A}$$

3. **Фотоядерная реакция**

$$\gamma + A \rightarrow B + b + Q$$
$$(Q < 0)$$

$$\gamma + {}^{12}C \rightarrow {}^{11}C + n - 18.72\ MeV$$

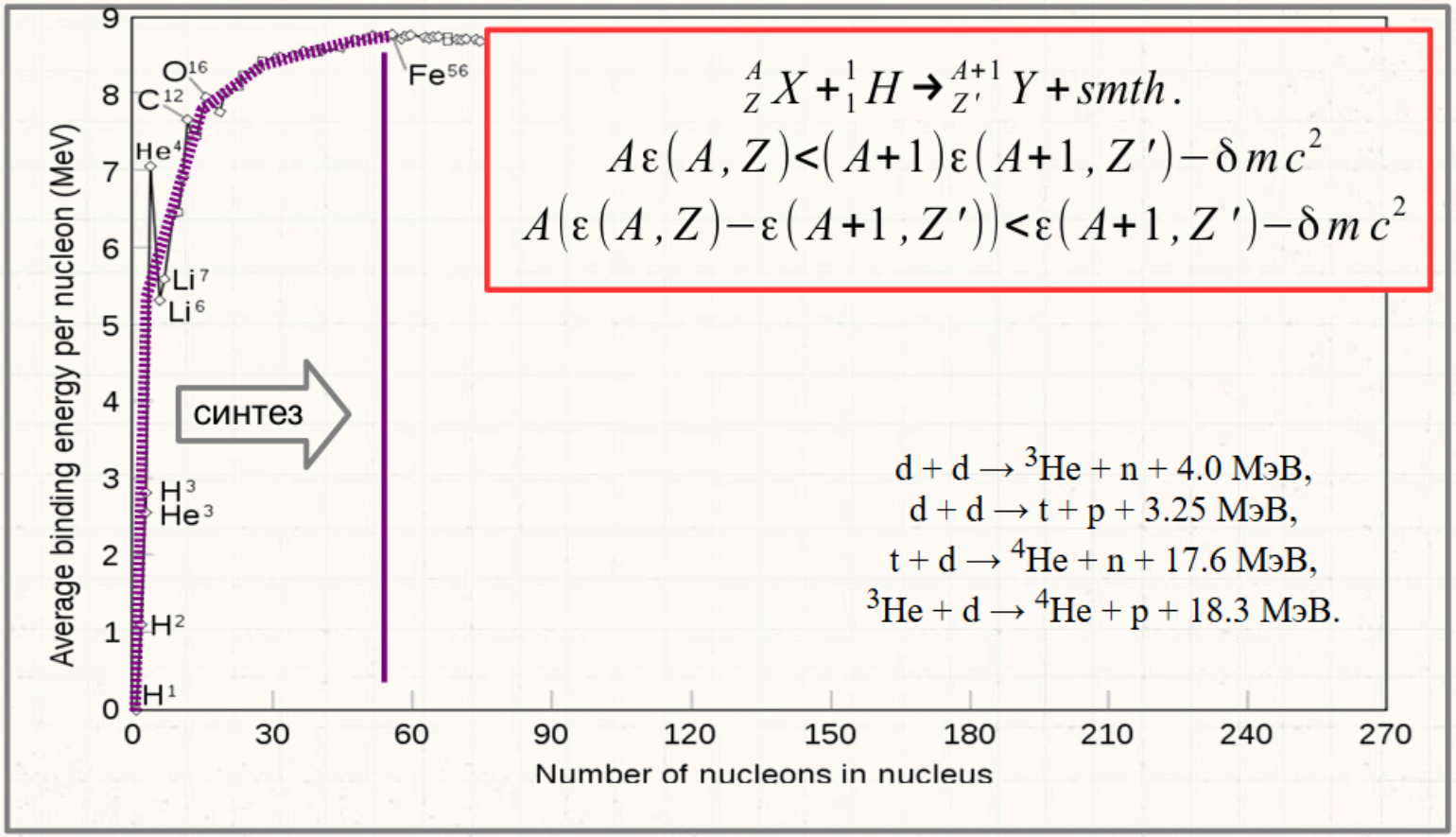
4. **Реакция радиационного захвата**

$$a + A \rightarrow C^* \rightarrow C + \gamma$$
$$(Q > 0)$$

$${}^{27}Al(p,\gamma){}^{28}Si$$

Реакция синтеза

Реакции синтеза – реакции слияния лёгких ядер.



$$ {}^{A}_{Z}X + {}^{1}_{1}H \rightarrow {}^{A+1}_{Z'}Y + smth. $$

$$ A\varepsilon(A,Z) < (A+1)\varepsilon(A+1,Z') - \delta m c^2 $$

$$ A\left(\varepsilon(A,Z) - \varepsilon(A+1,Z')\right) < \varepsilon(A+1,Z') - \delta m c^2 $$

$d + d \rightarrow {}^{3}He + n + 4.0$ МэВ,

$d + d \rightarrow t + p + 3.25$ МэВ,

$t + d \rightarrow {}^{4}He + n + 17.6$ МэВ,

${}^{3}He + d \rightarrow {}^{4}He + p + 18.3$ МэВ.

Ядерная реакция деления

Делением атомных ядер называют их распад на два осколка сравнимой массы. Деление может быть самопроизвольным (спонтанным) или вынужденным, вызванным взаимодействием с налетающей частицей.



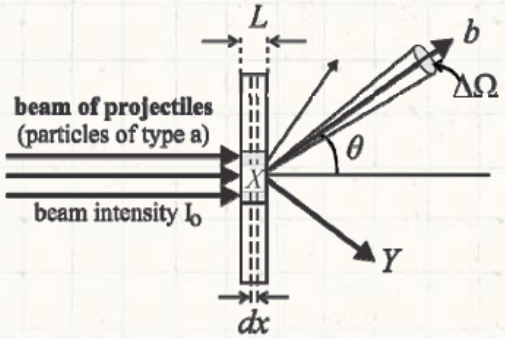


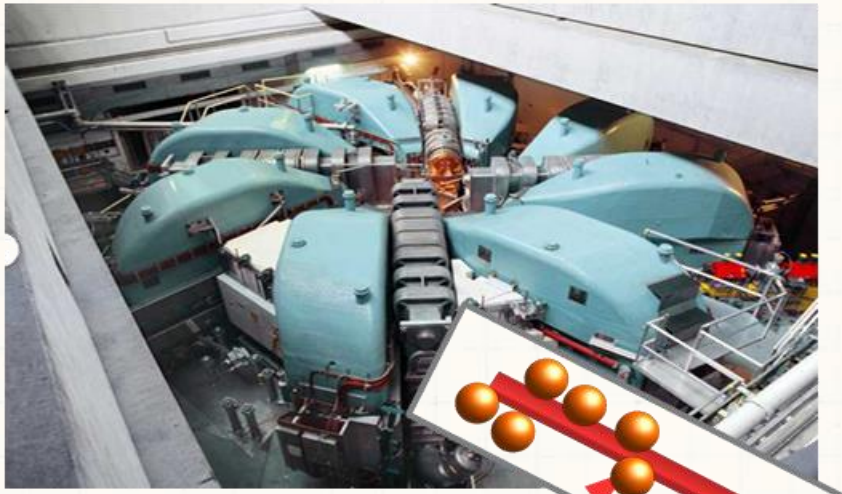
При делении 1-го тяжёлого ядра выделяется энергия

≈ 200·1 МэВ = 200 МэВ

1 г ядерного топлива ≈ 20 тонн тринитротолуола

Сечение ядерной реакции





реакций в секунду, dN/dt

поток частиц j, 1/(см^2 с)

$$\frac{dN}{dt} = j(nS\,dx)\sigma$$

$$N_{\text{реакций}} = \frac{N_A \times N_B}{S_{\text{пучка}}}\sigma$$

$$\sigma = \frac{A\,N_b}{N_a\,N_A\,\rho\,L} = \frac{A\,N_b}{N_A\,N_a\,\xi}$$

A := target's atomic weight (g/mol)
N_A := Avogadro's number (at/mol)
ξ := target radial density (g/cm^2)

N_a := number of projectiles a
N_b := number of ejectiles b

$$1\ barn = 1\ b = 10^{-24} cm^2 = 100\ fm^2$$

Выводы:

1. Ядерные реакции представляют собой процессы взаимодействия атомных ядер с частицами или другими ядрами, сопровождающиеся изменением их состава, энергии или состояния.
2. Протекание ядерных реакций определяется законами сохранения электрического заряда, числа нуклонов, энергии, импульса и других физических величин.
3. Различные типы ядерных реакций характеризуются особенностями механизмов взаимодействия и образования конечных продуктов.
4. Сечение ядерной реакции характеризует вероятность её протекания и зависит от энергии налетающих частиц и свойств взаимодействующих ядер.

Вопросы для самопроверки:

1) Что называется ядерной реакцией?
2) Перечислите основные законы сохранения, выполняющиеся при ядерных реакциях.
3) Что такое сечение ядерной реакции и в каких единицах оно измеряется?
4) От каких факторов зависит величина сечения ядерной реакции?
5) Какие реакции используются для получения радионуклида ^{18}F, применяемого в ПЭТ-диагностике?
6) Почему важно учитывать энергию облучающих частиц при производстве медицинских изотопов?

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!

