

# ОСНОВЫ ФИЗИКИ ДЕЛЕНИЯ ЯДЕР

кафедра

«Теоретическая и экспериментальная  
физика ядерных реакторов»

доцент

Савандер В.И.

# Состав атомного ядра

- атомное ядро состоит из протонов и нейтронов
- количество протонов в ядре определяет электрический заряд ядра  $Z$  и порядковый номер элемента в периодической системе элементов
- суммарное количество нейтронов и протонов определяют массовое число ядра  $A$

# Дефект массы и энергия связи

Дефект массы

$$\Delta m = Z \cdot m_p + (A - Z) \cdot m_n - M(A, Z)$$

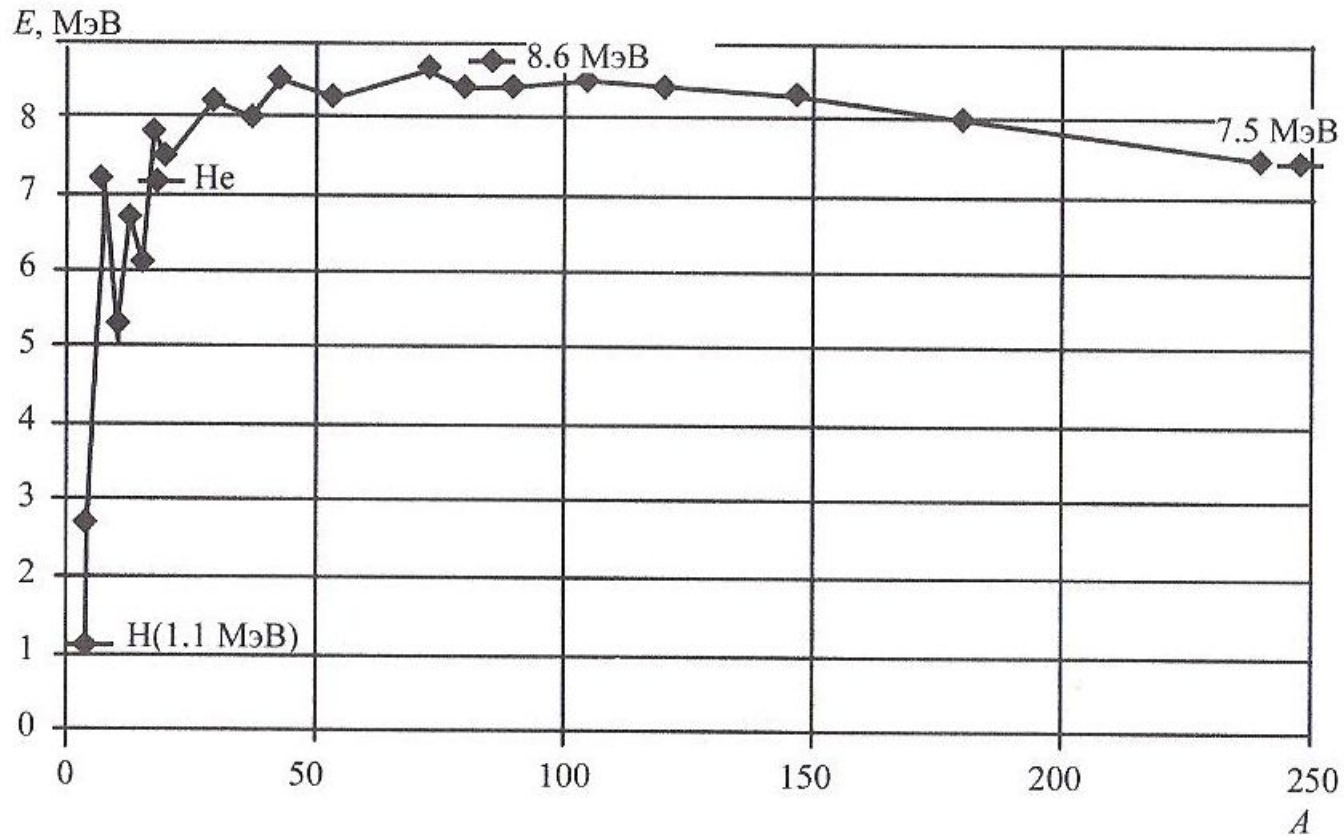
Энергия связи

$$E_{св} = \Delta m \cdot c^2$$

Удельная энергия связи

$$\varepsilon = \frac{E_{св}}{A}$$

# Зависимость удельной энергии связи от массового числа



# Деление тяжелых ядер

- Следовательно, состояние системы нуклонов, образующих тяжелые ядра  $(A, Z)$  обладает большей энергией, чем состояние этих же нуклонов, но в двух ядрах меньшей массы  $(A_1, Z_1)$  и  $(A_2, Z_2)$
- при этом суммарное число протонов и нейтронов в ядрах должно быть одинаковым
- $A_1 + A_2 = A$  и  $Z_1 + Z_2 = Z$
- .

# Потенциальный барьер

- Самопроизвольному распаду тяжелого ядра на два более прочных препятствует сила притяжения нуклонов в ядре.
- Для преодоления сил притяжения необходимо затратить работу, минимальное значение которой называется потенциальным барьером ядра  $E_{\text{пот.}}$ .
- если сообщить тяжелому ядру энергию, величина которой больше потенциального барьера  $E > E_{\text{пот.}}$ , то можно ожидать деление исходного ядра на два осколка, для каждого из которых энергия связи на один нуклон выше, чем для исходного ядра.

# Делящиеся и делимые ядра

- При попадании в ядро нейтрон передает ему не только свою кинетическую энергию, но и энергию связи  $E_{\text{возб}} = E_{\text{кин}} + \varepsilon$
- Если  $\varepsilon > E_{\text{пот}}$  то эти ядра могут делиться под действием нейтронов любой кинетической энергии.
- Если энергии связи недостаточно для преодоления потенциального барьера

$$E_{\text{кин}} > E_{\text{пор}}$$

$$E_{\text{пор}} = E_{\text{пот}} - \varepsilon$$

# Энергия связи парного и непарного нейтрона в ядре

Таблица №1  
Энергия связи нейтрона для  
некоторых тяжелых ядер

Элемент	Характер ядра	Энергия связи (Мэв)
$^{233}\text{Th}$	четно-нечетный	4.79
$^{234}\text{U}$	четно-четный	6.84
$^{236}\text{U}$	четно-четный	6.55
$^{239}\text{U}$	четно-нечетный	4.80
$^{240}\text{Pu}$	четно-четный	6.53



# Реакция деления

В результате реакции деления

- выделяется энергия в количестве приблизительно 200 МэВ на один акт деления;
- появляются новые нейтроны, в количестве 2-3 нейтронов на один акт деления
- появляются два радиоактивных осколка деления.

# Распределение энергии деления ядер урана

1	Кинетическая энергия осколков деления	165 МэВ
2	Мгновенное $\gamma$ -излучение	7.8 МэВ
3	Кинетическая энергия нейтронов деления	5 МэВ
4	$\gamma$ -излучение продуктов деления	6 МэВ
5	$\beta$ -излучение продуктов деления	5 МэВ
6	Нейтрино	11 МэВ

# Нейтроны деления

- Энергетический спектр нейтронов деления слабо зависит от делящегося нуклида и энергии нейтрона, вызвавшего деление.
- Средняя энергия нейтронов деления  $\sim 2$  МэВ
- Спектр деления

$$\chi(E) = 0.77 \cdot \sqrt{E} \cdot e^{-E/1.29}$$

# Среднее число нейтронов деления

- Среднее число нейтронов на один акт деления, обозначаемое как  $\nu_f$ , зависит от типа ядра и энергии налетающего нейтрона.

Среднее число нейтронов на одно деление

$^{235}\text{U}$	$\nu_f = 2.42$
$^{233}\text{U}$	$\nu_f = 2.48$
$^{239}\text{Pu}$	$\nu_f = 2.86$

# Осколки деления

- В результате процесса деления ядер образуются два осколка деления разной массы
- Число различных осколков деления более 300 различных ядер
- Наибольший выход  $\sim 6\%$  относится к ядрам с массовыми числами 95 и 139.
- деление ядра на две равные части с  $A=118$  маловероятно

# Продукты деления

- После торможения в среде осколки деления превращаются в нейтральные атомы с ядрами в основных энергетических состояниях и называются продуктами деления.
- продукты деления пересыщены нейтронами и являются  $\beta$ -активными
- каждый из них в среднем претерпевает по три  $\beta$ -распада, прежде чем он становится стабильным.

# Продукты деления

- Энергия радиоактивных распадов  $E_{\beta}$  распределяется между  $\beta$ -частицами, нейтрино, но также заметная ее часть уносится  $\gamma$ -квантами, сопровождающими  $\beta$ -распад
- В редких случаях  $\beta$ -распада продуктов деления испускаются запаздывающие нейтроны

# Остаточное энерговыделение

- Освобождение 6.5% тепловой энергии со сдвигом во времени относительно момента деления приводит к энерговыделению после прекращения процесса деления.
- Обилие радиоактивных продуктов деления приводит к сложной зависимости от времени запаздывающего энерговыделения.
- Основное количество энергии  $\beta$ -распада выделяется довольно быстро.
- Примерно треть всего запаса выделяется за 1 мин.,
- 60% за один час,
- около трех четвертей за одни сутки.
- последующее энерговыделение идет все медленнее.



# Запаздывающие нейтроны

- при  $\beta$ -распаде некоторых продуктов деления испускаются запаздывающие нейтроны ( $\beta=0,65\%$ )
- они играют определяющую роль в управлении цепной реакцией в ядерных реакторах
- запаздывающие нейтроны разбиваются на группы с усредненными периодами и выходами
- Начальные кинетические энергии запаздывающих нейтронов значительно ниже энергий мгновенных нейтронов.

# *Преимущества и проблемы ядерной энергетики*

*Основным преимуществом ядерного способа производства энергии перед органическими энергоносителями является высокая калорийность топлива.*

1. Малые затраты на транспортировку топлива — так называемая топливная составляющая.
2. Малые затраты на транспортировку топлива — так называемая топливная составляющая.
3. Для ядерного топлива не нужен окислитель
4. В процессе работы реактора происходит воспроизводства ядерного топлива

# *Преимущества и проблемы ядерной энергетики*

- Гарантированная безопасность ядерных реакторов – исключение возможности возникновения тяжелых радиационных аварий.
- Проблема длительного хранения радиоактивных отходов.
- Проблема захоронения или трансмутации долгоживущих радиоактивных ядер.
- Немаловажное значение имеет проблема нераспространения ядерных делящихся материалов военного применения

# Взаимодействие нейтронов с ядрами

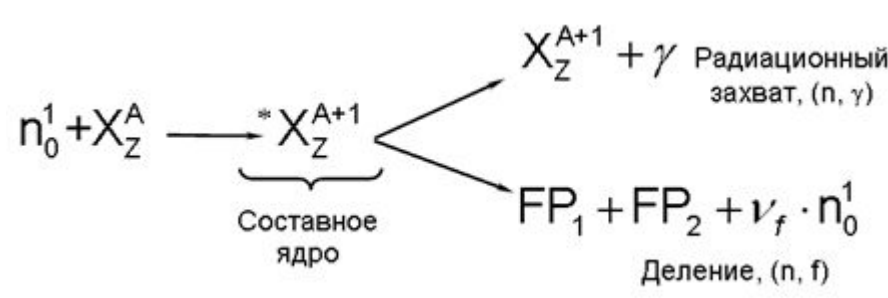
- Ядерные реакции происходят в две стадии
- На первой стадии реакции образуется составное (компаунд) ядро в возбужденном состоянии.
- Атомное ядро имеет набор возбужденных уровней энергии
- Условие образования составного ядра

$$E_{кин} + \varepsilon = E^*$$

$$\tau \Gamma \approx \hbar$$

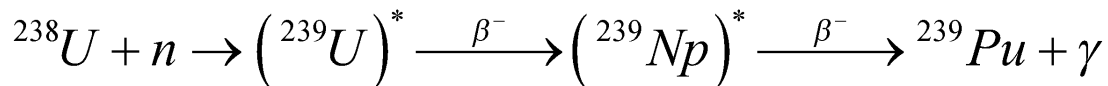
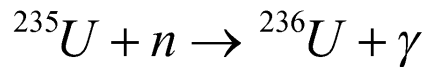
# Каналы распада возбужденного состояния

- возбужденное состояние может сниматься различными способами
- Во-первых, возбужденное состояние может завершиться делением исходного ядра на два осколка, то есть в результате произойдет реакция деления.
- Во-вторых, возбуждение снимается испусканием –  $\gamma$  кванта, энергия которого равна энергии возбужденного состояния
- Эти два исхода связаны с поглощением нейтрона



# Реакция радиационного захвата

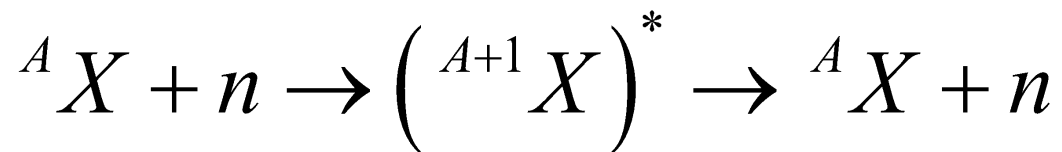
- Реакция радиационного захвата в принципе приводит к потере нейтрона и потому снижает эффективность цепного процесса деления.



- Однако реакция радиационного захвата на изотопе урана-238 приводит к образованию делящегося ядра плутония-239

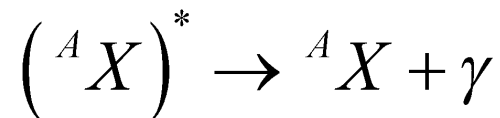
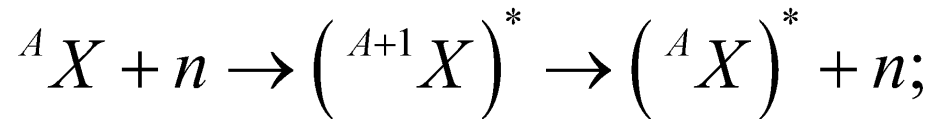
# Реакции упругого и неупругого рассеяние

- ВОЗМОЖНЫ ИСХОДЫ, ПРИ КОТОРЫХ возбужденное ядро испускает нейтрон.
- В первом случае при испускании нейтрона выполняется закон сохранения кинетической энергии. Это так называемая реакция упругого рассеяния нейтрона



# Неупругое рассеяние

- Реакция неупругого рассеяния сопровождается испусканием  $\gamma$ -кванта



- Какого типа ядерная реакция произойдет в каждом конкретном случае заранее предсказать нельзя, а только ее вероятность



# Энергетические интервалы

- Микросечения взаимодействия нейтронов с ядрами довольно сильно зависят от энергии нейтрона. С этой точки зрения, весь диапазон энергий нейтронов в ядерном реакторе разбивают на три области:
- область быстрых, промежуточных и тепловых нейтронов.
- Границы между областями чисто условные и процессы, характерные для каждой области, не исключаются в других.

# Быстрая область 0.1-10 МэВ

- 1. При любой энергии нейтрона возможно образование составного ядра.
- 2. Основной тип взаимодействия – реакция рассеяния нейтронов.
- 3. При поглощении нейтрона тяжелыми ядрами с большой вероятностью произойдет деление.
- 4. Микросечения процессов порядка поперечного размера ядра.
- 5. В этой области делятся все тяжелые ядра.
- 6. Более высокий выход нейтронов деления

## Промежуточная область 0.2 эВ-0.1 МэВ

- 1. Это область изолированных резонансов.
- 2. При энергии нейтронов  $E > 1000$  эВ – резонансы рассеяния, при  $E < 100$  эВ – преимущественно резонансы захвата.
- 3. Высота резонанса захвата растет при уменьшении энергии, а ширина падает.
- 4. Между резонансами – потенциальное рассеяние нейтронов.

# Тепловые нейтроны

- 1. Для неделящихся ядер сечение радиационного захвата изменяется по закону  $1/v$ .
- 2. Делящиеся ядра имеют в этой области резонансы при энергии  $E=0.3$  эВ
- 3. Сечение деления на два порядка выше, чем сечение потенциального рассеяния.
- Доля радиационного захвата составляет от 18% у урана-235 до 40% у плутония-239

**Спасибо за внимание**