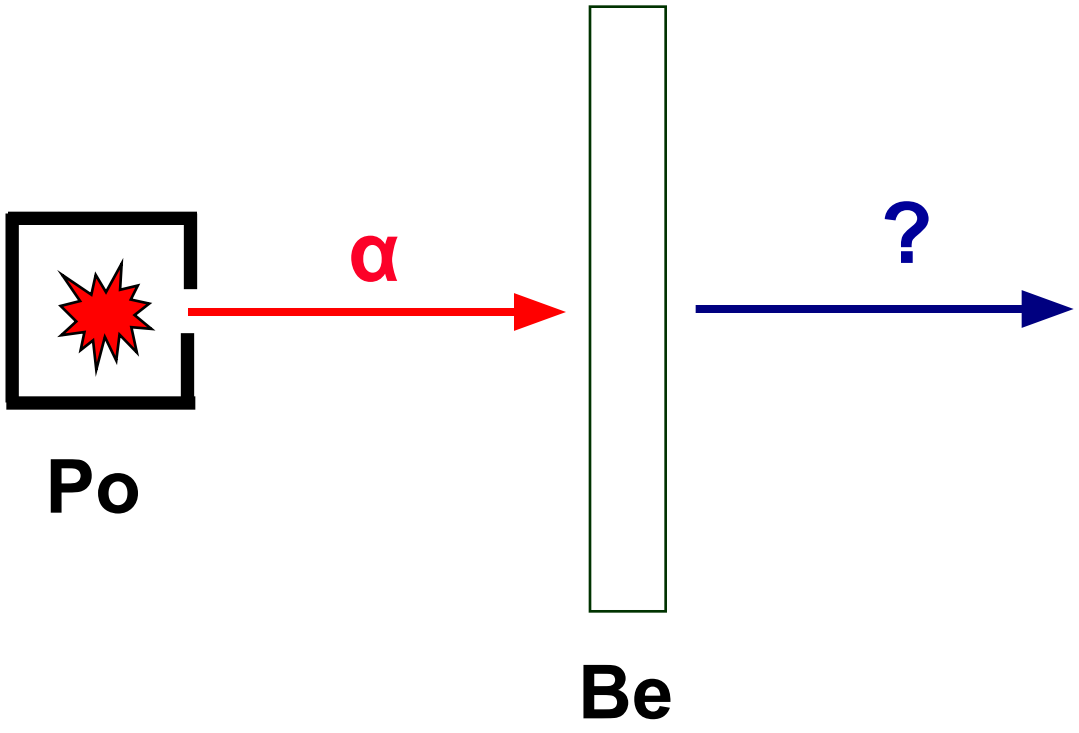
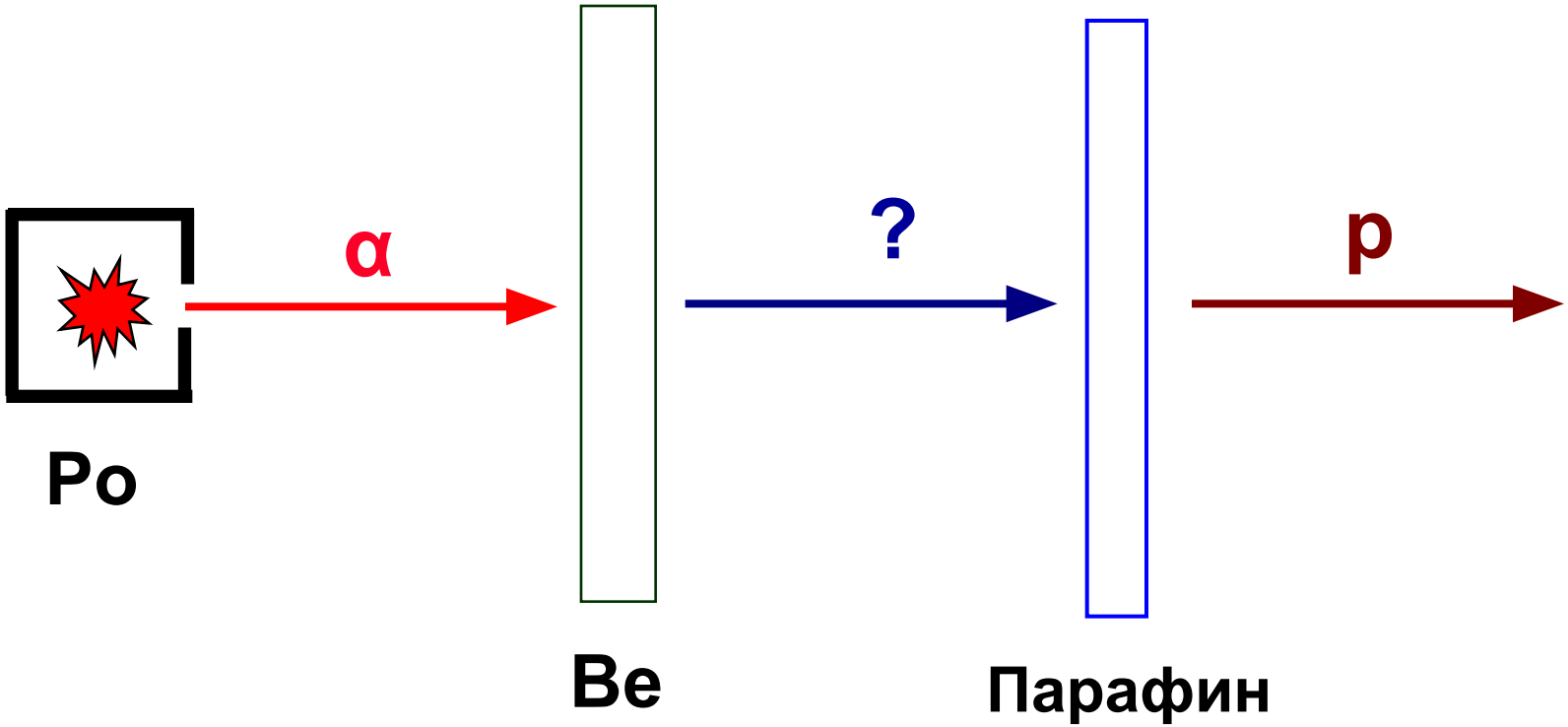
Нейтронная физика

Открытие нейтрона



Опыт Боте и Беккера. 1930 год.

Неизвестное проникающее излучение.



Неизвестное излучение из водородосодержащих веществ выбивает **протоны**.

В 1932 г. Джеймс Чедвик измерял **длины пробега протонов**, выходящих из мишеней, изготовленных из различных материалов, при облучении их **неизвестным излучением**. Также в газовой камере измерялись длины пробегов **ядер отдачи**.

По рассчитанным энергиям этих протонов Чедвик доказал, что исследуемое излучение представляет собой поток **массивных нейтральных частиц** с массой примерно равной массе протона.

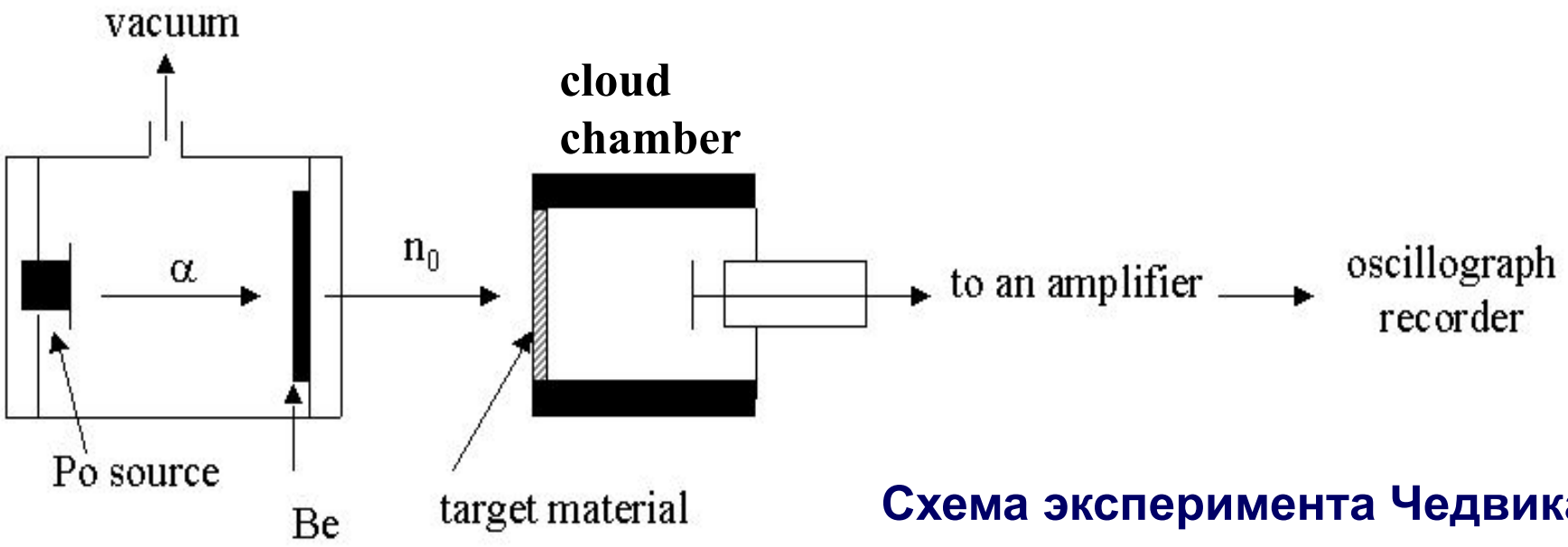


Схема эксперимента Чедвика

Результаты были опубликованы в издании:

Nature, *february* **17**, 1932.

Так был открыт **нейтрон**, который радикально изменил развитие человеческой цивилизации.

Джеймс Чедвик (1891 – 1974), английский физик. Лауреат Нобелевской премии 1935 г.

Характеристики нейтрона

Масса $1{,}6749272 \cdot 10^{-24}$ **г = 1,008665 а.е.м.**

Энергия покоя 939,565 МэВ

Спиновое квантовое число 1/2

Магнитный момент: $\mu_n = -1{,}913\ \mu_N$

где μ_N – ядерный магнетон:

$$\mu_N = \frac{e\hbar}{2m_p c} = 5{,}0508 \cdot 10^{-24}\ \text{эрг/Гс}$$

Свободный нейтрон нестабилен.

Период полураспада: **614 сек.**

Реакция :

$$n^0 \rightarrow p^+ + e^- + \tilde{\nu}_e$$

Реакция **экзоэнергетическая**, так как

$$m_n > m_p + m_e$$

Нейтронные реакции

Ядерные реакции вида:

$$n + A \rightarrow B + b + \ldots \qquad (5.1)$$

Нейтронные реакции являются многоканальными. Вероятность реакции пропорциональна

интегральному сечению σ данной реакции.

Сечения **σ** нейтронных реакций сильно зависят от энергии нейтрона E_n и нерегулярно меняются при увеличении числа **протонов** и **нейтронов** в ядре.

Классификация нейтронов по энергии

Классификация базируется на различии характеристик взаимодействий нейтронов с ядрами.

Прежде всего, нейтроны разделяются на 3 группы.

Медленные.

Промежуточные.

Быстрые.

Медленные нейтроны подразделяются на

Ультрахолодные $E < 3 \cdot 10^{-7}$ эВ

Холодные $3 \cdot 10^{-7}$ эВ $< E <$ 0,025 эВ

Тепловые 0,025 эВ $< E <$ 0,5 эВ

Резонансные 0,5 эВ $< E <$ 1 кэВ

Промежуточные 1 кэВ $< E <$ 100 кэВ

Быстрые 100 кэВ $< E$

Основные типы нейтронных реакций

Радиационный захват

Упругое рассеяние

Неупругое рассеяние

Реакции с выходом заряженных частиц

Реакция (n, 2n)

Деление ядер

Радиационный захват

Реакция типа: $n + {}^{A}_{Z}X \rightarrow {}^{A+1}_{Z}X + \gamma$

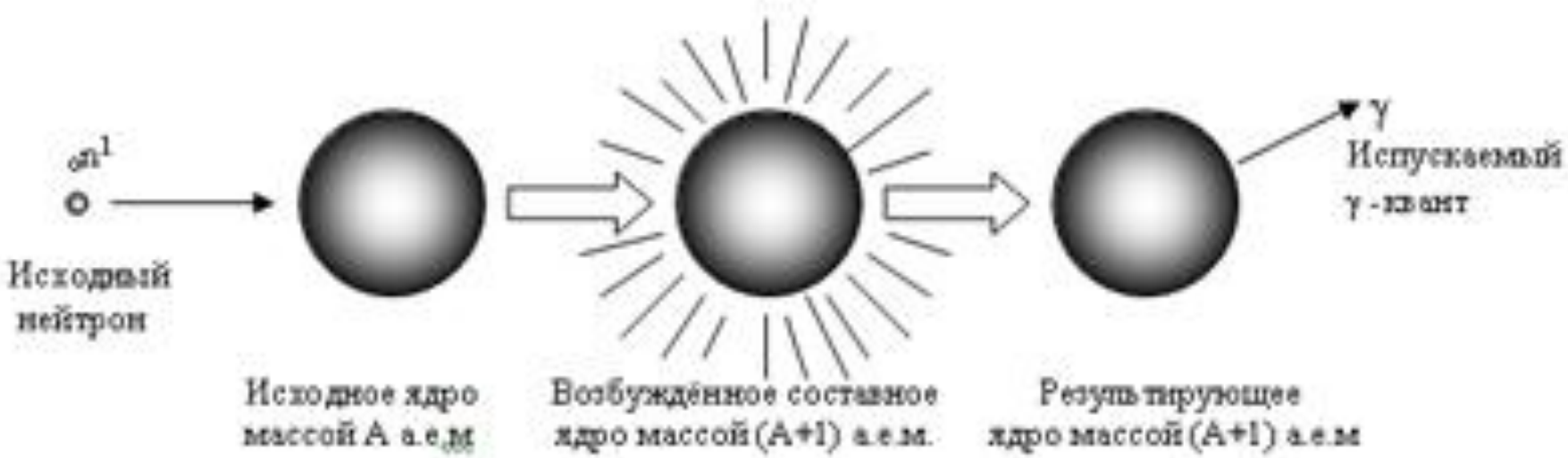
Экзоэнергетическая реакция. Идет на всех ядрах.

Зависимость сечения σ от кинетической энергии нейтрона имеет тенденцию: $\sigma \sim \frac{1}{\sqrt{E_n}}$

Для разных ядер сечение σ варьируется от 10^6 барн до 0,1 барн

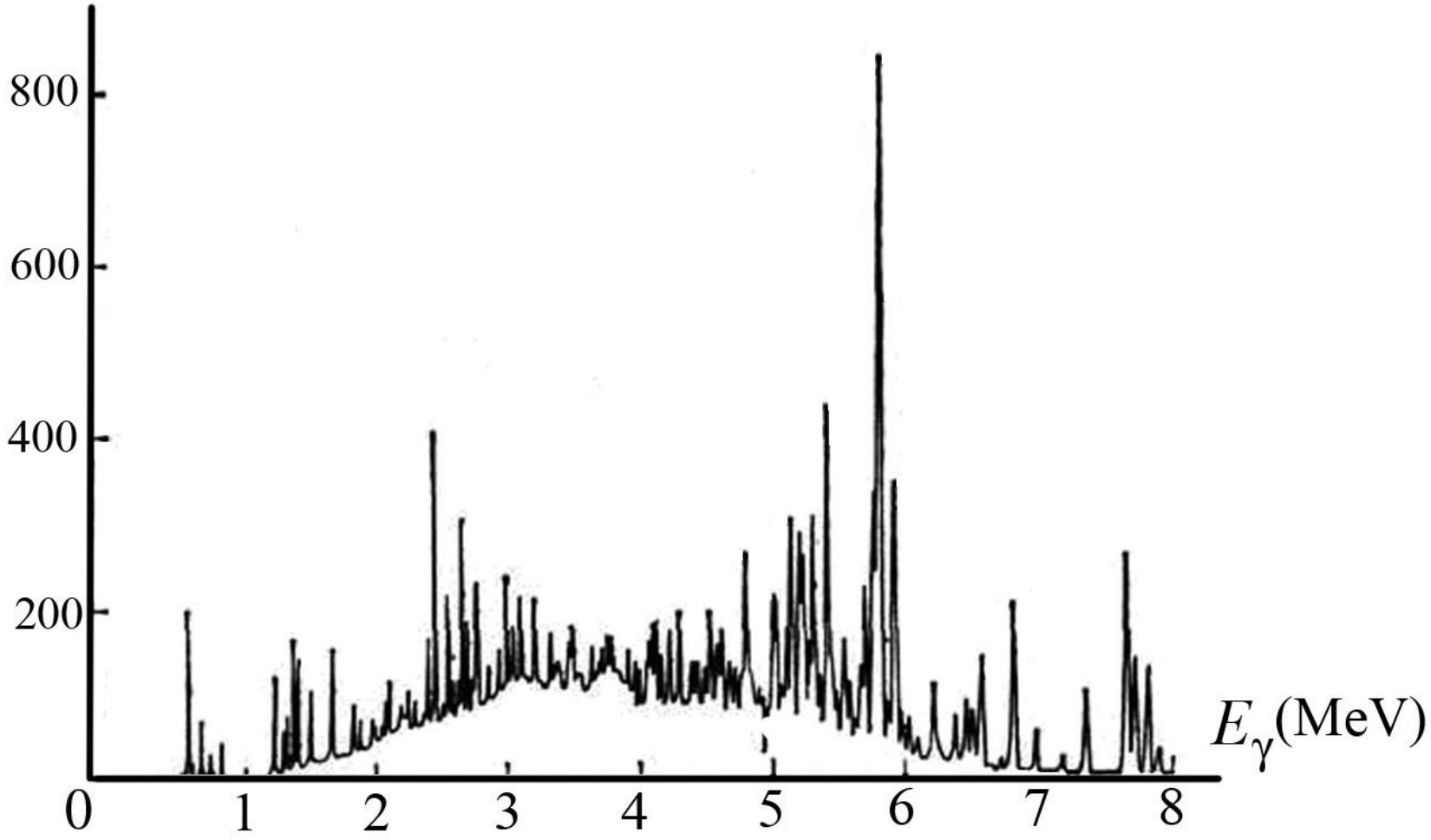
Барн = 10^{-24} см²

Реакция радиационного захвата идет через составное ядро



Характерные энергии гамма-фотонов порядка **МэВ**

Множество дискретных состояний составного ядра обусловливает **резонансный** характер сечений радиационного захвата



Спектр γ-квантов реакции **^{113}Cd (n, γ)^{114}Cd**.

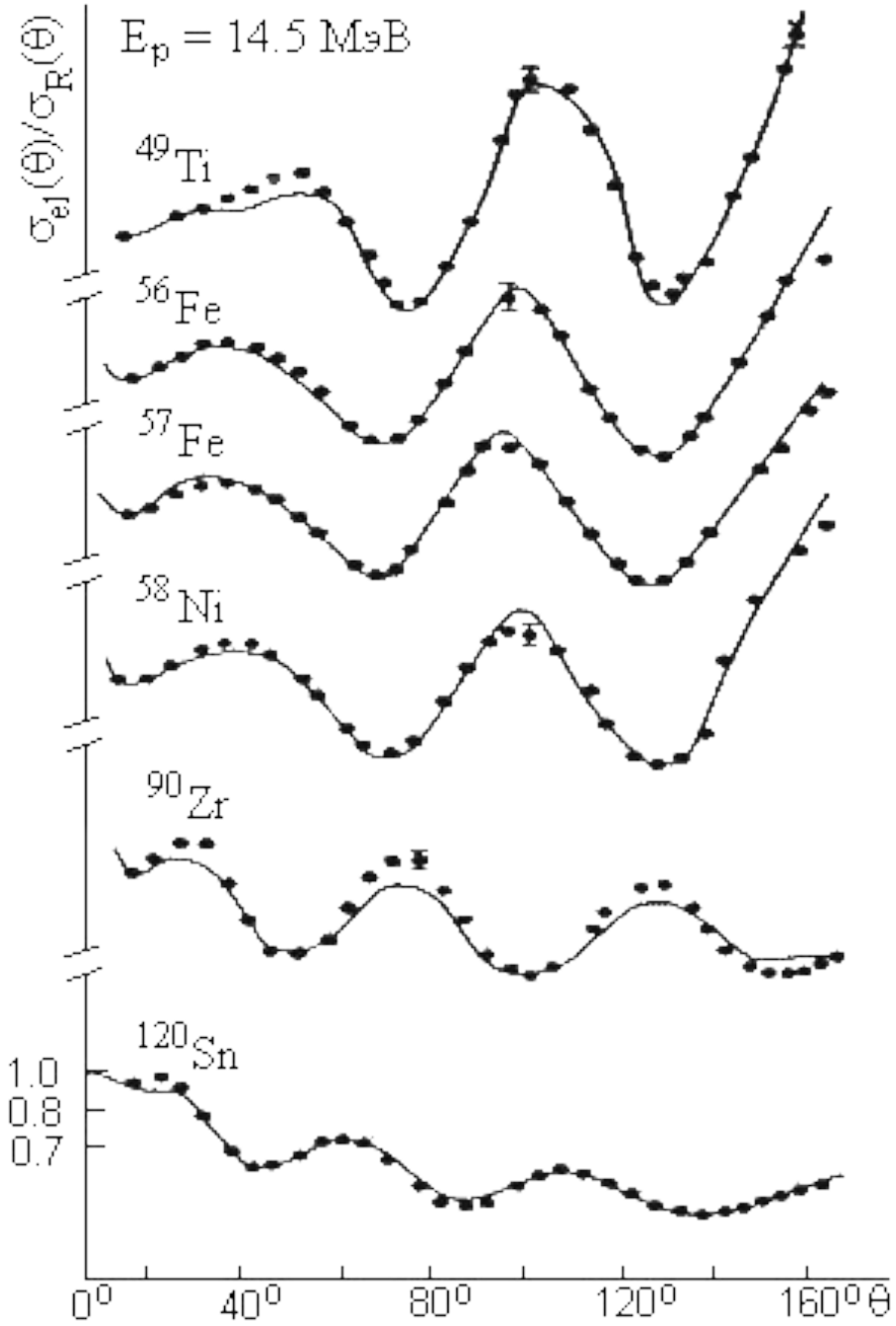
Упругое рассеяние

$$n + {}^{A}_{Z}X \rightarrow {}^{A}_{Z}X + n$$

Ядро не изменяет своего состава и состояния.

Реакция не имеет порога из-за отсутствия кулоновского отталкивания.

Сечения упругого рассеяния имеют порядок нескольких **барн** и имеют резонансную структуру.



Угловое распределение упруго рассеянных нейтронов

Точки – результаты экспериментов, **линии** – расчет по оптической модели

Оптическая модель ядра

Взаимодействие нейтрона с ядром описывается потенциалом рассеяния, который имеет действительную и мнимую часть

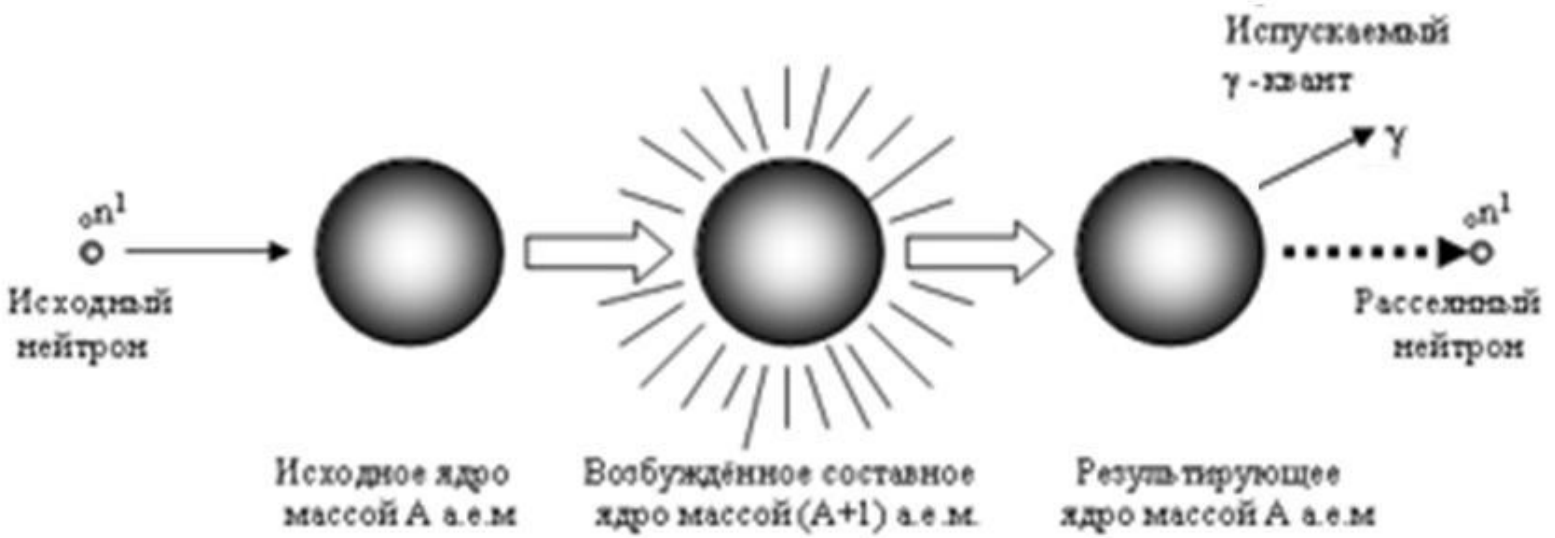
$$U(r) = V(r) + iW(r)$$

Действительная часть характеризует рассеяние, мнимая – поглощение.

Осцилляции сечений объясняются интерференцией падающей и рассеянной дебройлевских волн нейтронов.

Неупругое рассеяние

$$n + {}^{A}_{Z}X \rightarrow {}^{A}_{Z}X^{*} + n$$



Ядро после реакции $(n,\ n')$ остается в возбужденном состоянии.

Возбуждение снимается испусканием **гамма-фотона.**

Неупругое рассеяние

Реакция **эндоэнергетическая**.

Порог реакции определяется величиной энергии **первого возбужденного уровня** ядра.

Сечения неупругого рассеяния имеют порядок нескольких **барн**.

Пример: $^{60}\mathbf{Ni} + \mathrm{n} \longrightarrow {}^{60}\mathbf{Ni}^{*} + \mathrm{n}$

$$^{60}\mathbf{Ni}^{*} \longrightarrow {}^{60}\mathbf{Ni} + \gamma$$

Реакции с выходом заряженных частиц

Реакции с выходом протона:

$$n + {}^{A}_{Z}X \rightarrow {}^{A}_{Z-1}Y + p$$

Реакции с выходом альфа-частицы:

$$n + {}^{A}_{Z}X \rightarrow {}^{A-3}_{Z-2}Y + \alpha$$

Примеры

$$n + {}_{2}He^{3} \rightarrow {}_{1}H^{3} + p + 0{,}76\ MeV \qquad \sigma = 5400 \text{ барн}$$

$$n + {}_{7}N^{14} \rightarrow {}_{6}C^{12} + p + 0{,}63\ MeV \qquad \sigma = 1{,}75 \text{ барн}$$

$$n + {}_{3}Li^{6} \rightarrow {}_{1}H^{3} + \alpha + 4{,}78\ MeV \qquad \sigma = 945 \text{ барн}$$

$$n + {}_{5}B^{10} \rightarrow {}_{3}Li^{7} + \alpha + 2{,}79\ MeV \qquad \sigma = 3840 \text{ барн}$$

Сечения даны для тепловых нейтронов

Реакция $(n, 2n)$

$$n + {}^{A}_{Z}X \rightarrow {}^{A\text{-}1}_{Z}X + 2n$$

Пороговая реакция.

Порог **~ 10 ÷ 15 МэВ**

Сечения порядка нескольких десятых долей **барн**.

Деление ядра

Наблюдается на ядрах с большим количеством нуклонов (на актиноидах и прочих трансуранах).

Ядро поглотив нейтрон делится на два (редко три) **осколка**, обычно неравных. При этом освобождаются два-три **нейтрона**.

В результате реакции деления выделяется энергия около **200 Мэв** в виде **кинетической энергии** продуктов реакции.

Основную часть энергии получают **осколки**, остальное – **нейтроны и гамма-фотоны**.

Примеры ядер с большим сечением реакции деления:

^{233}U, ^{235}U, ^{239}Pu, ^{241}Pu, ^{251}Cf, ...

Реакции деления на некоторых ядрах – пороговые, на других – нет.

Реакции деления ядер **^{235}U** и **^{239}Pu** не имеют порога.

Реакция деления ядер **^{238}U** имеет порог **1,1 МэВ**.

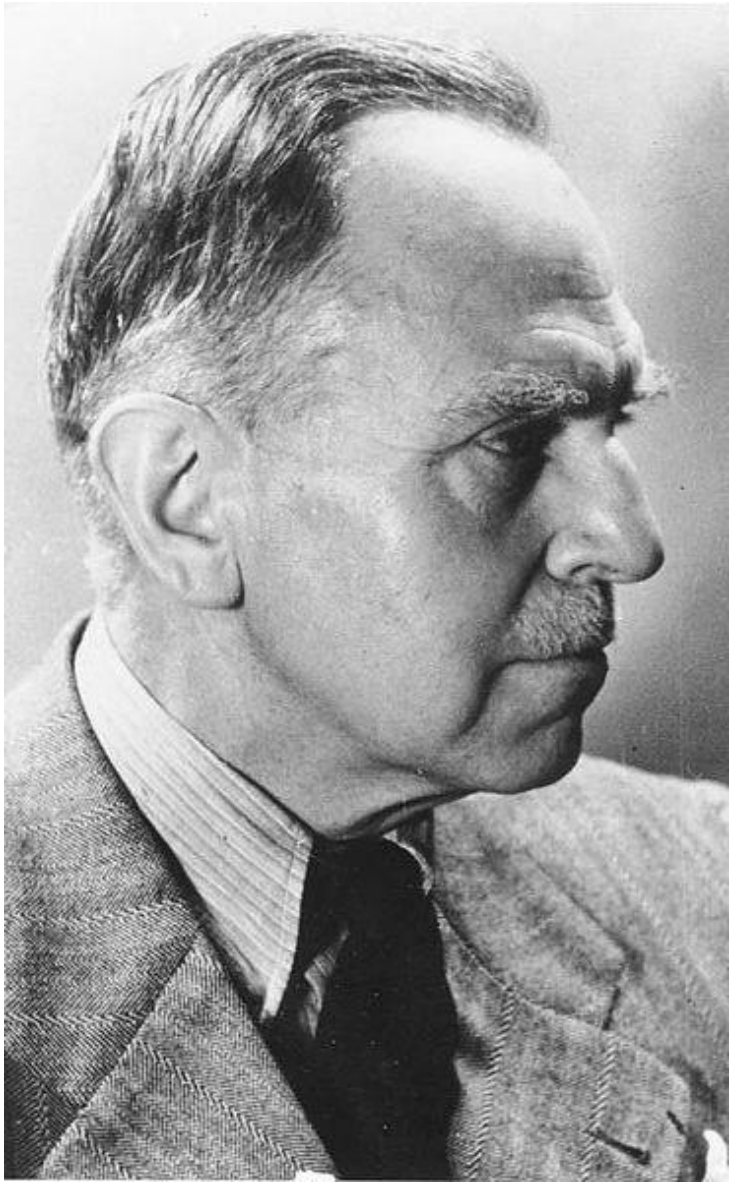
Первая рукотворная реакция деления ядра:

$$^{235}_{92}\mathrm{U}+^{1}_{0}\mathrm{n}\rightarrow{}^{236}_{92}\mathrm{U}\rightarrow{}^{140}_{55}\mathrm{Cs}+^{94}_{37}\mathrm{Rb}+2^{1}_{0}\mathrm{n}$$

Осуществлена в 1938 г. О.Ганом и Ф.Штрассманом.

Объяснена в 1939 г. Л.Мейтнер и О.Фришем.

Отто Ган и Лиза Мейтнер в радиохимической лаборатории



Лиза Мейтнер (1878 — 1968), физик.

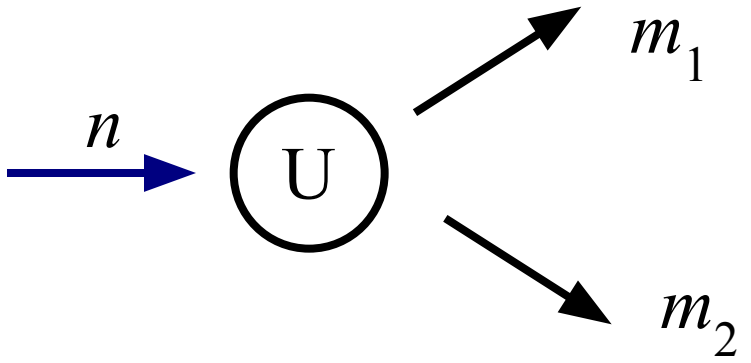
Мейтнерий – химический элемент Z=109, синтезирован в 1982 году

Отто Ган (1879 — 1968), радиохимик. Нобелевская премия по химии за 1944 год.

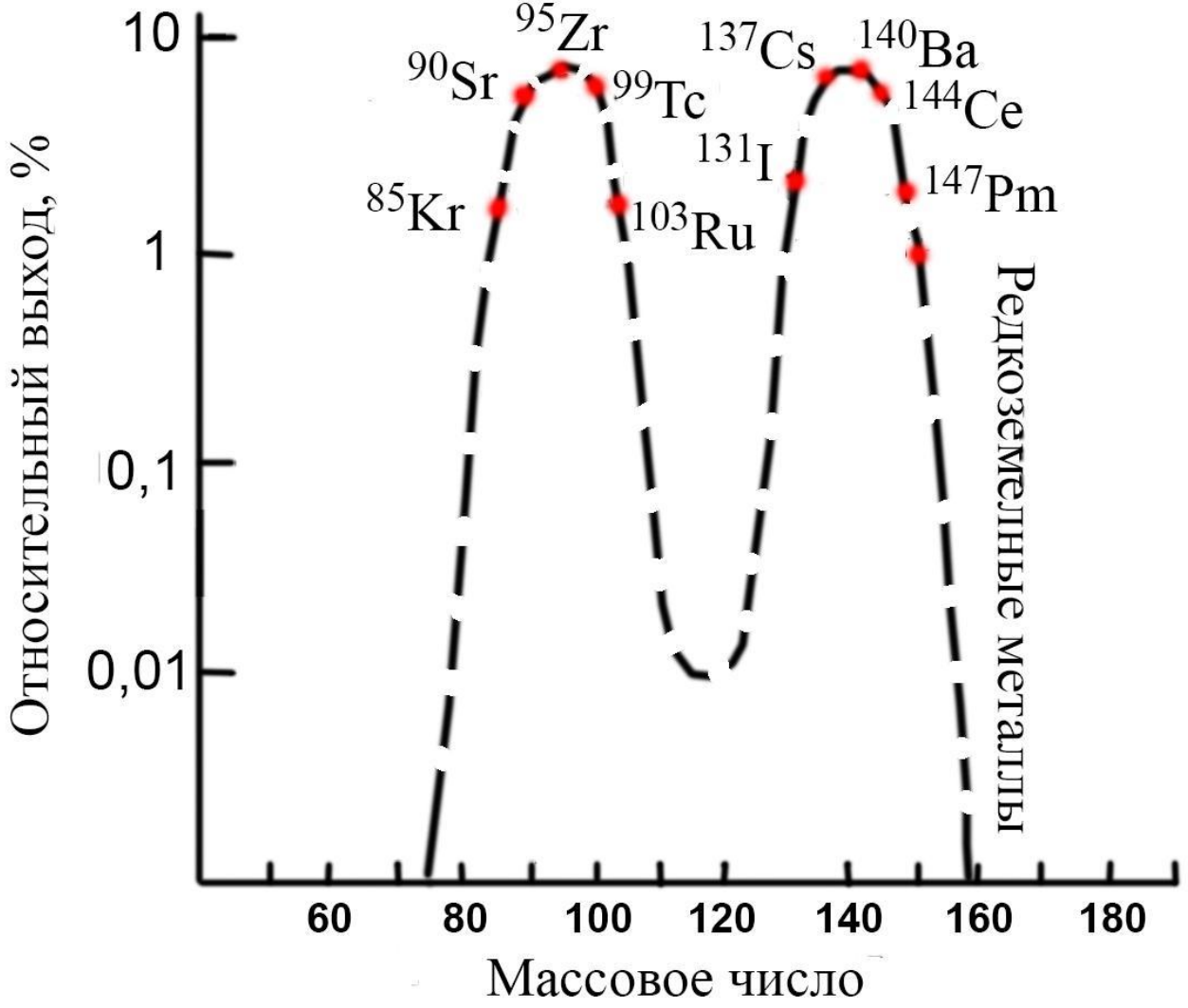
Впоследствии было обнаружено, что при делении ядер урана нейтронами образуются более 80 различных атомных ядер.

Наиболее вероятном оказалось деление на осколки с соотношением масс 2/3:

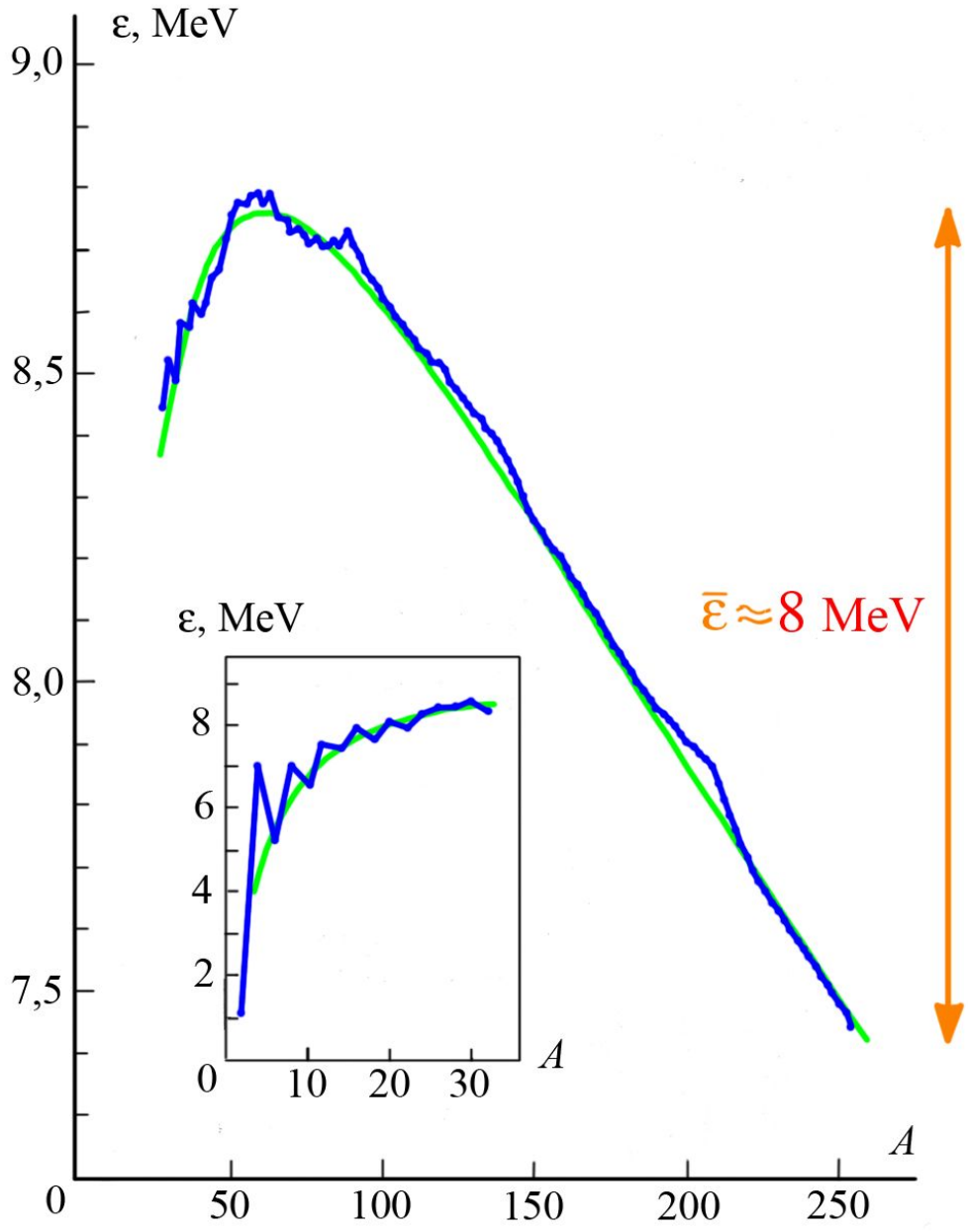
$$^{235}_{92}\mathrm{U} \rightarrow \frac{m_1\left(^{91}_{36}\mathrm{Kr}\right)}{m_2\left(^{142}_{56}\mathrm{Ba}\right)} = \frac{2}{3}$$



Асимметрия осколков деления



Распределение осколков деления ядра ^{235}**U** по массовым числам ***A***.



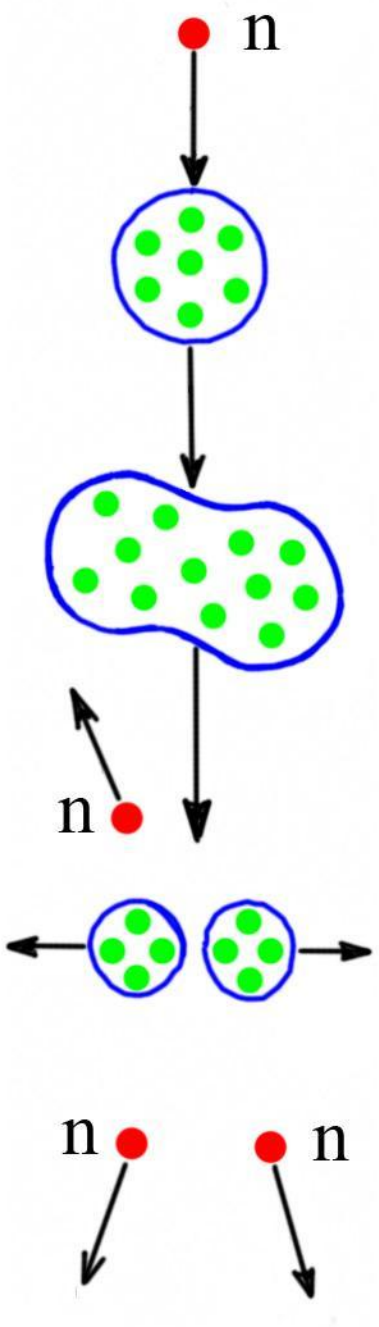
При делении массивного ядра удельная энергия связи уменьшается примерно на 1 МэВ.

Массивное ядро содержит по порядку величины 200 нуклонов, чем обеспечивается выход энергии ~ 200 МэВ.

Приближенная теория деления ядер базируется на капельной модели ядра.

Нейтрон при поглощении вносит в ядро свою **кинетическую энергию** и **энергию связи ~ 8 ÷ 10 МэВ**.

После деления ядра высвобождается несколько (обычно 2 – 3) нейтронов



Формула Вейцзеккера для энергии связи атомного ядра

$$E_{св} = a_1 A - a_2 A^{2/3} - a_3 Z^2 A^{-1/3} - a_4 \frac{(A-2Z)^2}{A} + \delta$$

Получив энергию ядро деформируется.

Поверхность ядра увеличивается при неизменном объеме.

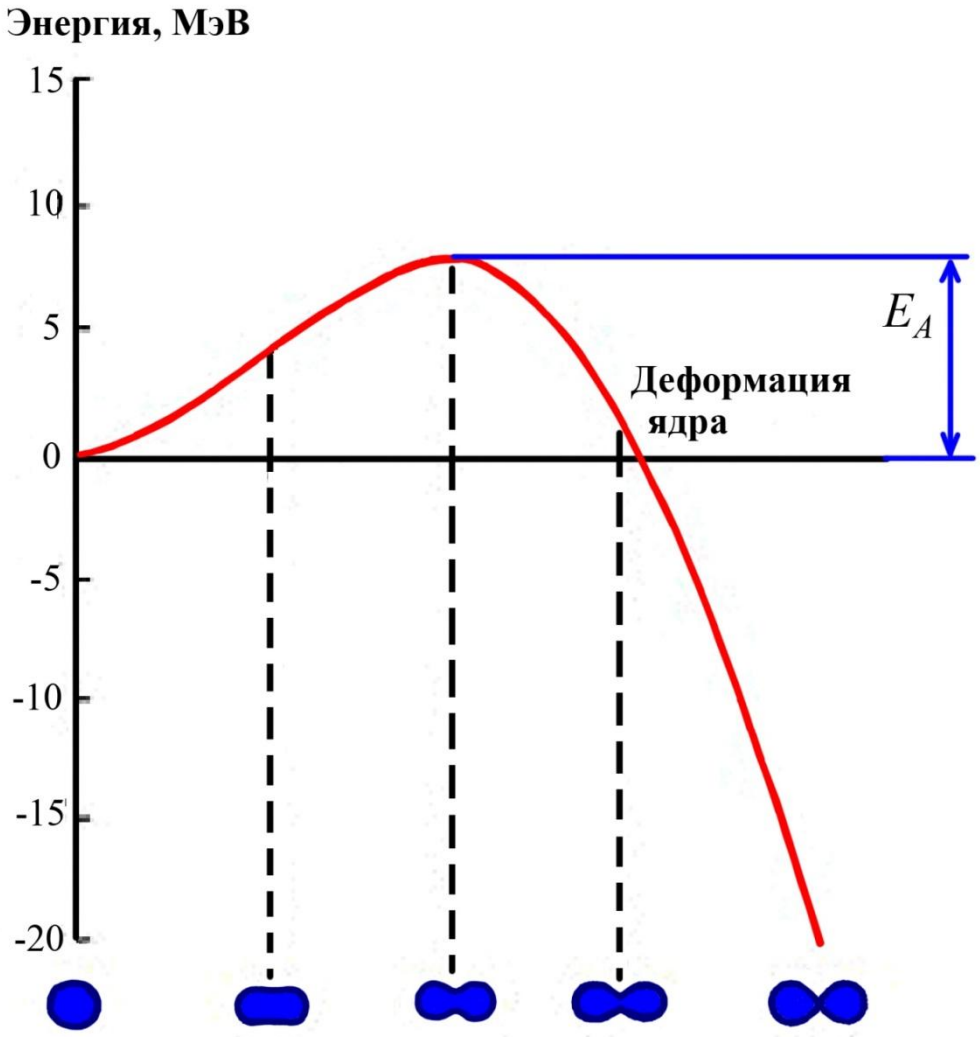
При этом кулоновская энергия уменьшается из-за увеличения среднего расстояния между протонами.

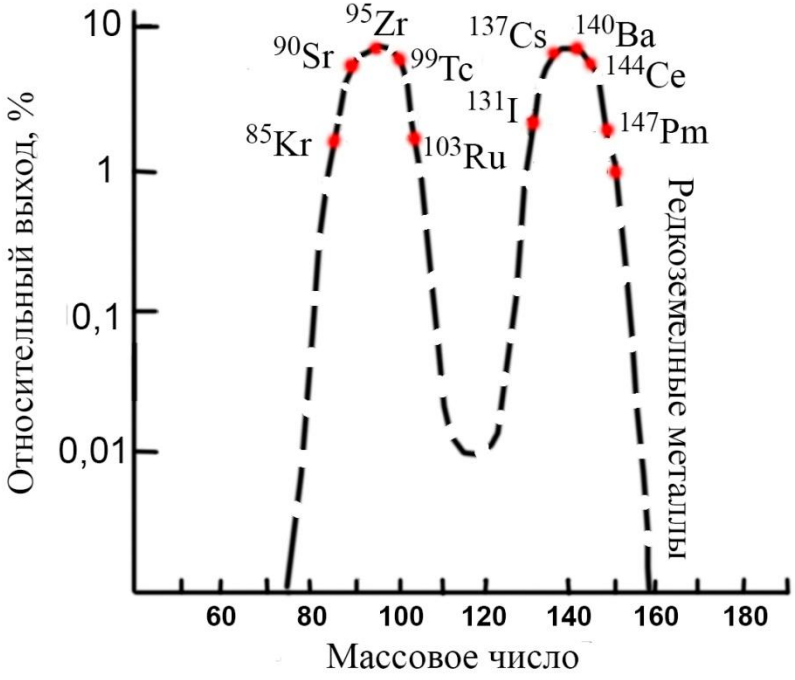
Если $|E_{пов}| > |E_{кул}|$, то ядро вернется в исходное состояние.

Если $|E_{пов}| < |E_{кул}|$, то ядро увеличит свою деформацию и разделится.

Критическое отношение параметров ядра: $Z^2/A = 45$.

При $Z^2/A < 45$ деление возможно после получения **энергии активации** E_A.



Наблюдаемая ***асимметрия*** деления может объясняется влиянием **ядерных нейтронных оболочек**:

массивному ядру энергетически выгоднее делиться так, чтобы число нейтронов в осколке было близко к одному из **магических чисел** (**50** или **82**).