

Рождение и жизнь атомных ядер

ДЕЛЕНИЕ ЯДЕР

Деление ядер. История

1934 г. — Э. Ферми, облучая уран тепловыми нейтронами, обнаружил среди продуктов реакции радиоактивные ядра.

1939 г. — О. Ган и Ф. Штрасман обнаружили среди продуктов реакций барий.

Л. Мейтнер и О. Фриш впервые объявили, что под действием нейтронов происходило деление урана.

Н. Бор и Дж. Уилер дали количественную интерпретацию деления ядра, введя параметр деления.

Я. Френкель развел капельную теорию деления ядер медленными нейтронами.

Л. Сцилард, Э. Вигнер, Э. Ферми, Дж. Уилер, Ф.Жолио-Кюри, Я.Зельдович, Ю.Харитон обосновали возможность протекания в уране цепной ядерной реакции деления.

1934 г. — Л. Сцилард выдвинул идею цепной ядерной реакции.

1940 г. — Г. Флеров и К. Петржак открыли явление спонтанного деления ядер ^{235}U .

1942 г. — Э. Ферми. Первый ядерный реактор.

1946 г. — И. Курчатов. Реактор в СССР.

1945 г. — Ядерный взрыв. Хиросима.

1954 г. — Первая атомная электростанция. Обнинск.

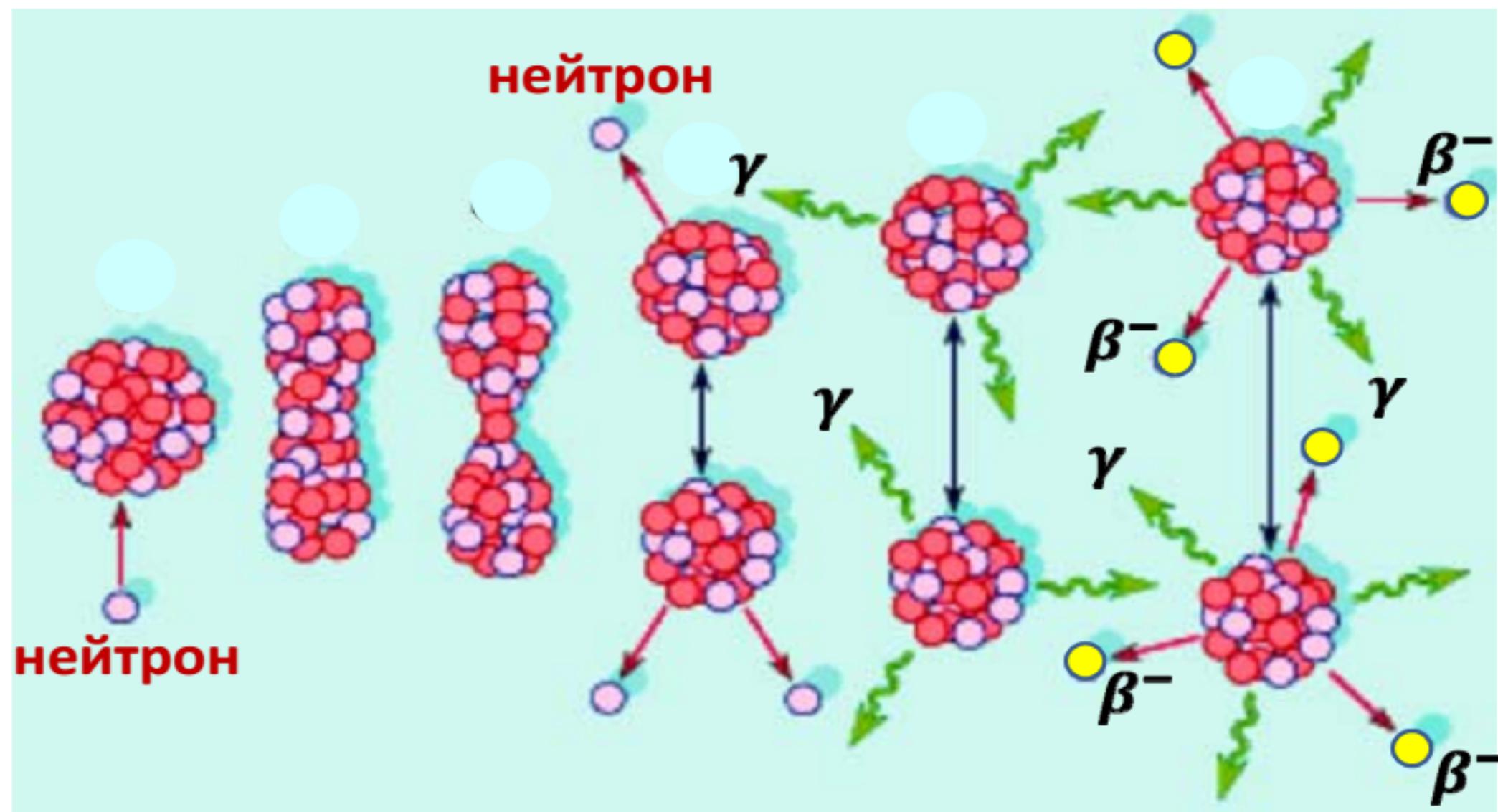
Деление ядра

0

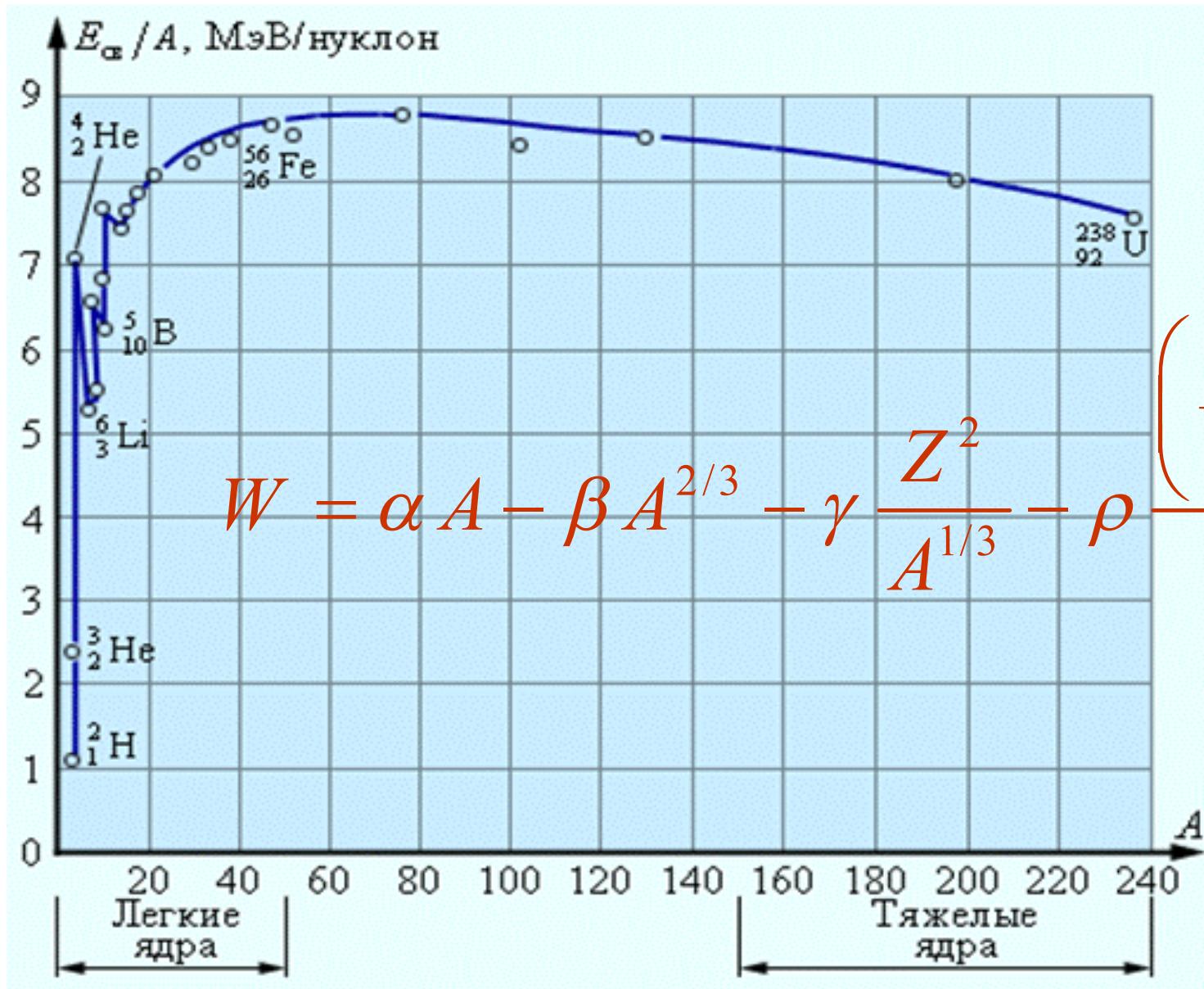
10^{-14} сек

10^{-12} сек

секунды - годы



Удельная энергия связи ядра

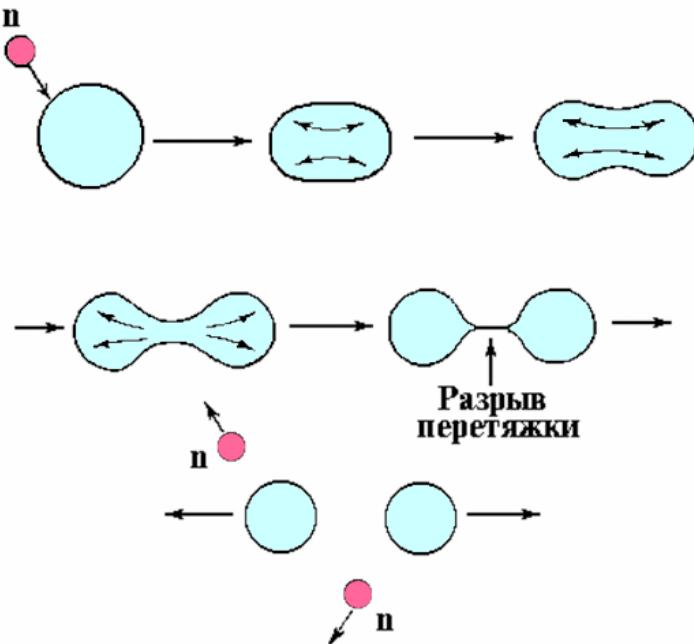


$$W = \alpha A - \beta A^{2/3} - \gamma \frac{Z^2}{A^{1/3}} - \rho$$

$$\left(\frac{A}{2} - Z \right)^2 + \frac{\delta}{A^{3/4}}$$

$$\varepsilon = W / A$$

$$Q_f = 238(8.45 - 7.6) \approx 200 \text{ МэВ}$$



Механизм деления

В процессе деления форма ядра изменяется, последовательно проходя несколько стадий — шар → эллипсоид → гантель → два грушевидных осколка → два сферических осколка.

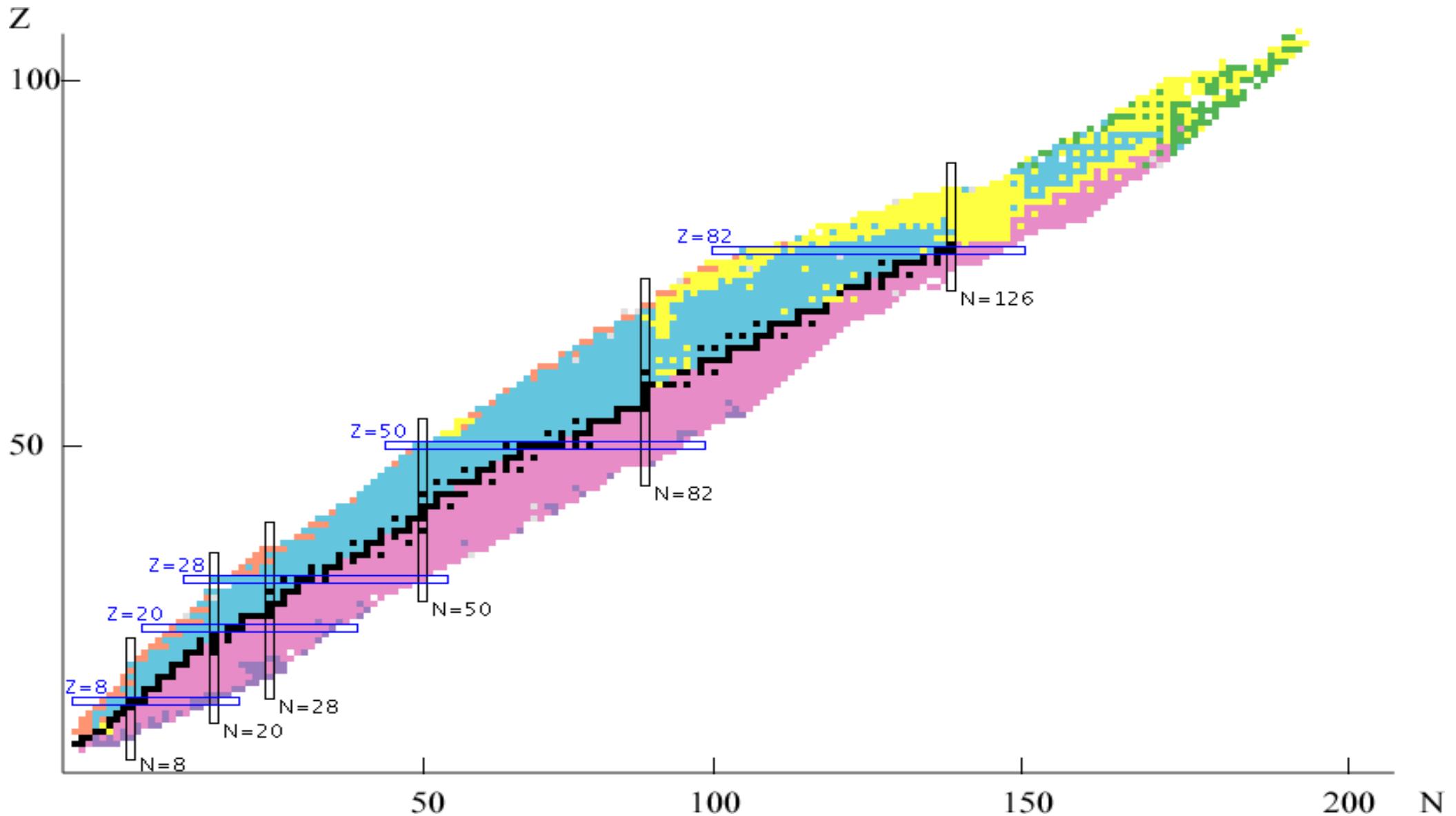
Изменение энергии ядра в процессе деления определяется изменением суммы поверхностной и кулоновской энергий $E_{пов} + E_{кул}$ начального ядра.

Изменение поверхностной $\tilde{E}_{пов}$ и кулоновской $\tilde{E}_{кул}$ энергий исходного сферически симметричного ядра зависит от величины параметра деформации ε

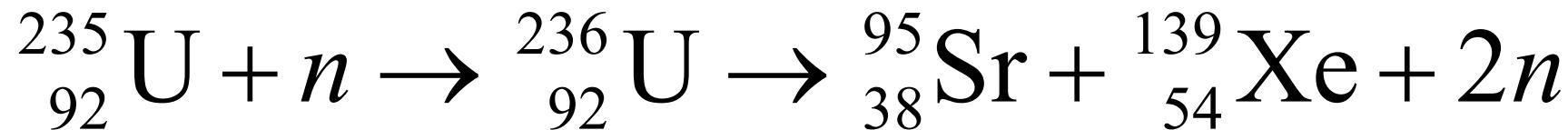
$$\tilde{E}_{пов} = E_{пов} \left(1 + \frac{2}{5} \varepsilon^2\right)$$

$$\tilde{E}_{кул} = E_{кул} \left(1 - \frac{1}{5} \varepsilon^2\right)$$

N-Z диаграмма атомных ядер

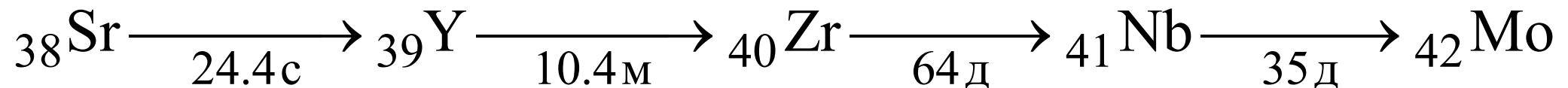


Радиоактивность осколков деления

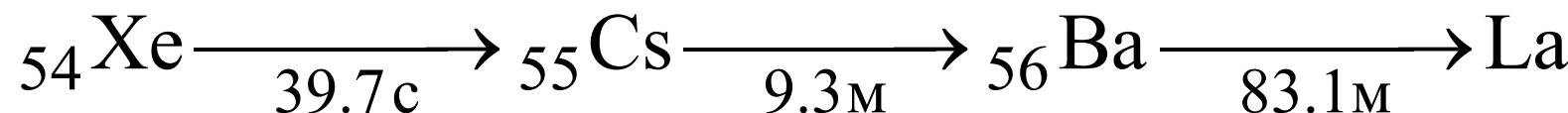


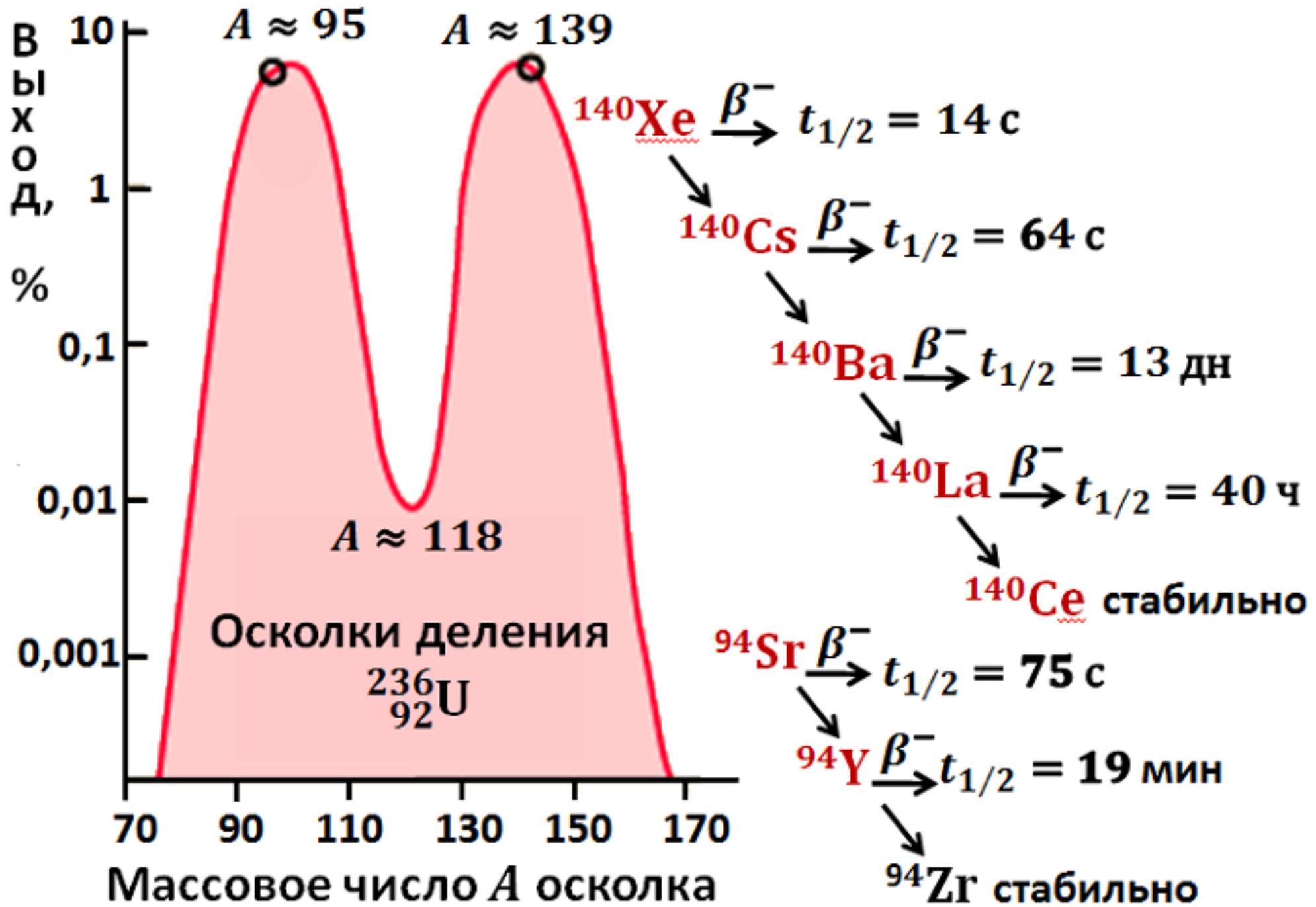
$$\frac{N}{Z} = 1 + 0.015A^{2/3}$$

$$A = 95$$

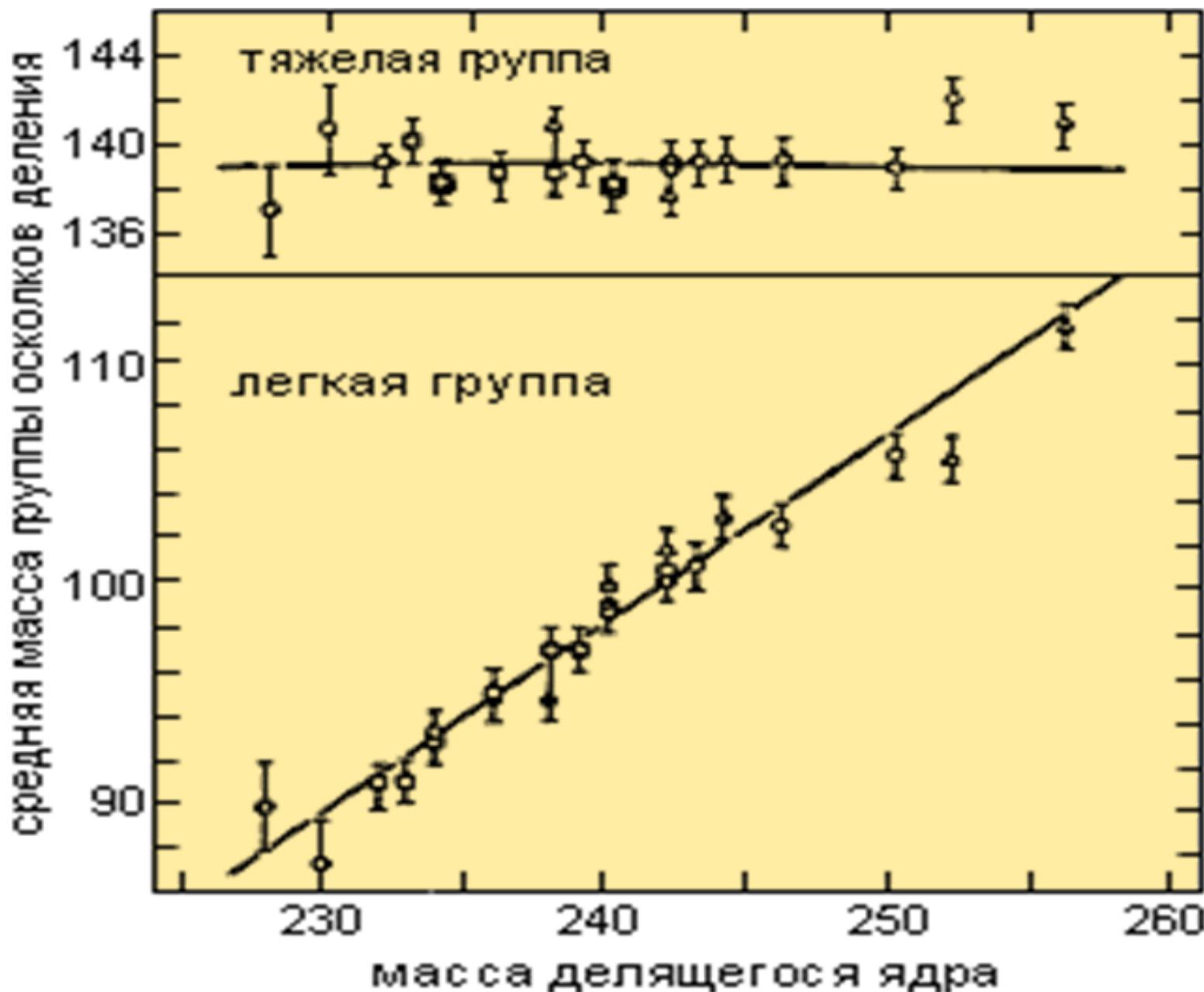


$$A = 139$$





Зависимость средних масс легкой и тяжелой групп осколков от массы делящегося ядра.



Симметричное деление

В случае, когда ядро делится на два равных осколка, $A_1 = A_2 = A/2$ и $Z_1 = Z_2 = Z/2$. Энергия деления определяется изменением поверхностной $E_{\text{пов}}$ и кулоновской $E_{\text{кул}}$ энергий

$$\begin{aligned} Q_f &= 2W(A/2, Z/2) - W(A, Z) \approx [E_{\text{пов}}(A, Z) + E_{\text{кул}}(A, Z)] - 2[E_{\text{пов}}(A/2, Z/2) + E_{\text{кул}}(A/2, Z/2)] = \\ &= \beta \left[A^{2/3} - 2 \left(\frac{A}{2} \right)^{2/3} \right] + \gamma \left[\frac{Z^2}{A^{1/3}} - 2 \frac{(Z/2)^2}{(A/2)^{1/3}} \right] = \beta A^{2/3} \left(1 - \sqrt[3]{2} \right) + \gamma \frac{Z^2}{A^{1/3}} \left(1 - \frac{1}{\sqrt[3]{4}} \right) \approx \\ &\approx 0,37\beta \frac{Z^2}{A^{1/3}} - 0,26\gamma A^{2/3} \end{aligned}$$

Деление энергетически выгодно ($E_{\text{дел}} > 0$) в случае, когда

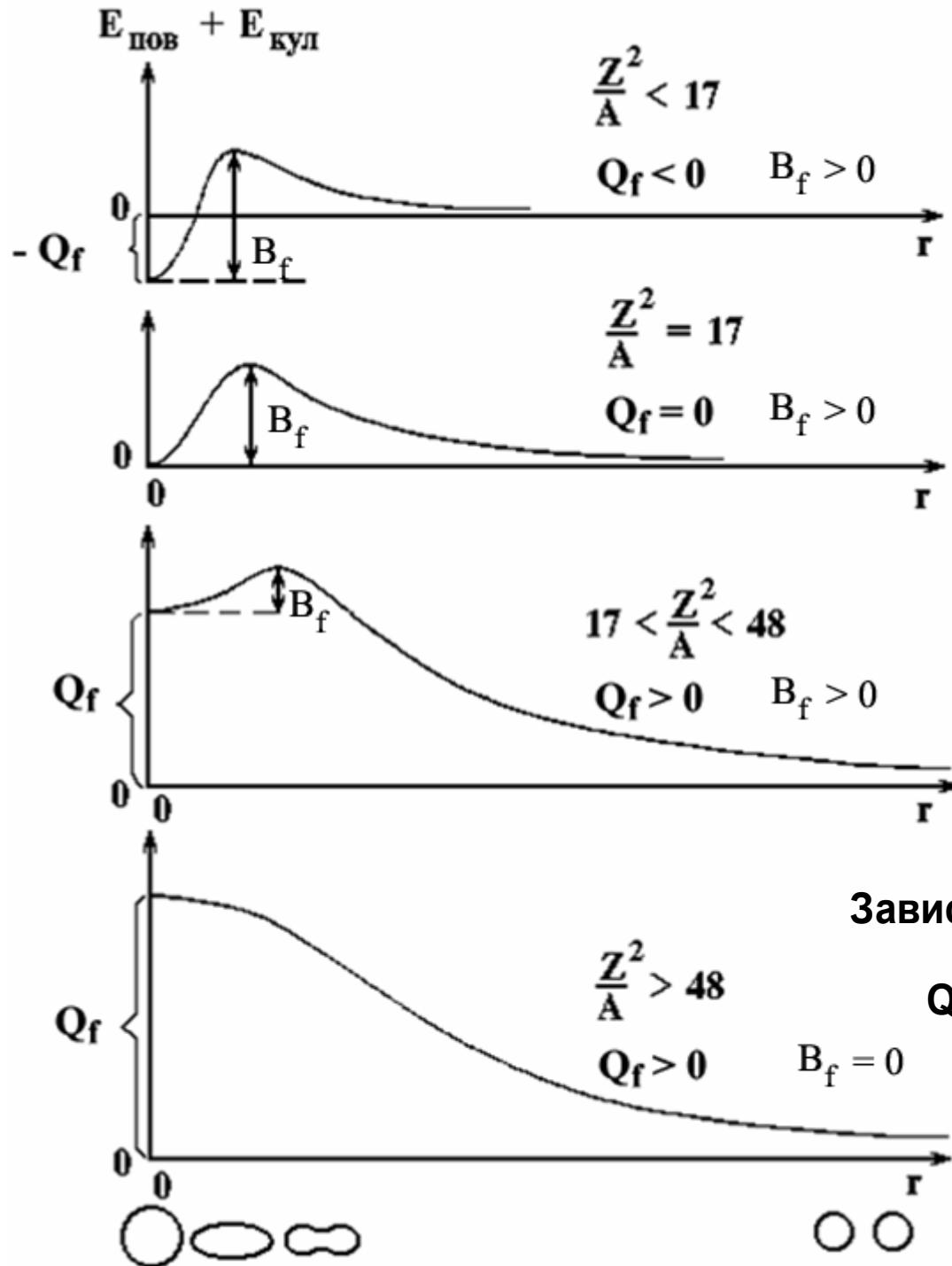
$$(0.37 \cdot \beta \frac{Z^2}{A^{1/3}} - 0.26 \cdot \gamma A^{2/3}) > 0,$$

$$\frac{Z^2}{A} > \frac{0.26}{0.37} \frac{\beta}{\gamma} = \frac{0.26}{0.37} \cdot \frac{17.2}{0.72} \approx 17.$$

Величина Z^2 / A называется **параметром деления**.

$Z^2 / A = 17$ для ядер с $A > 90$.

Деление энергетически выгодно для тяжелых ядер.



Барьер деления и параметр деления

Зависимость барьера деления и энергии деления

Q_f от величины параметра делимости $\frac{Z^2}{A}$.

Энергия деления

Продукты распада	Энергия деления, МэВ
Кинетическая энергия осколков	167
Мгновенные нейтроны	5
Электроны β -распада	5
Антинейтрино β -распада	10
Мгновенное γ -излучение	7
γ -излучение продуктов распада	6
Полная энергия деления	200

**ДЕЛЕНИЕ ЯДЕР
НЕЙТРОНАМИ**

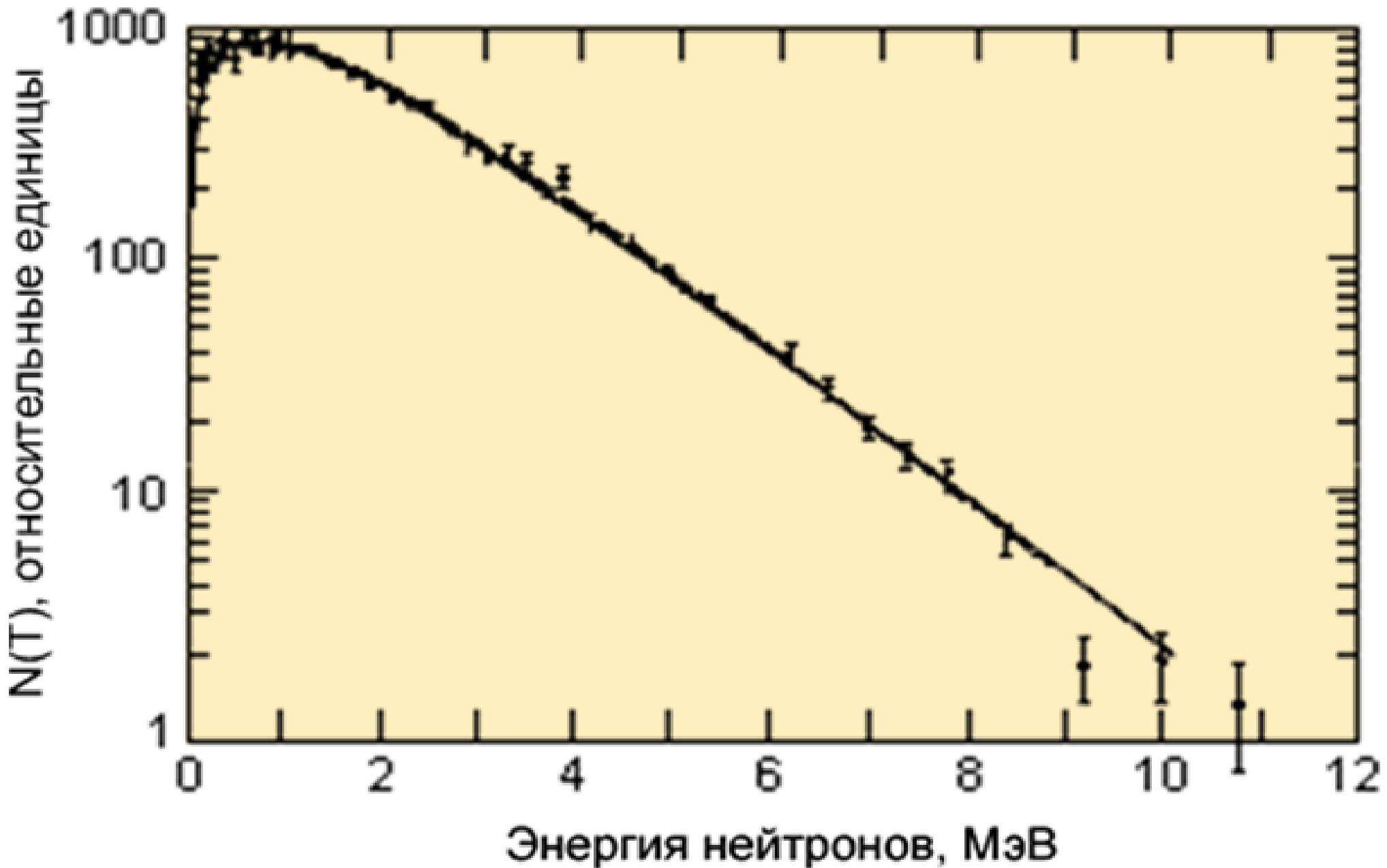
Изотопы U

^{235}U 0,72% $T_{1/2} = 7,0 \cdot 10^8$ лет, α

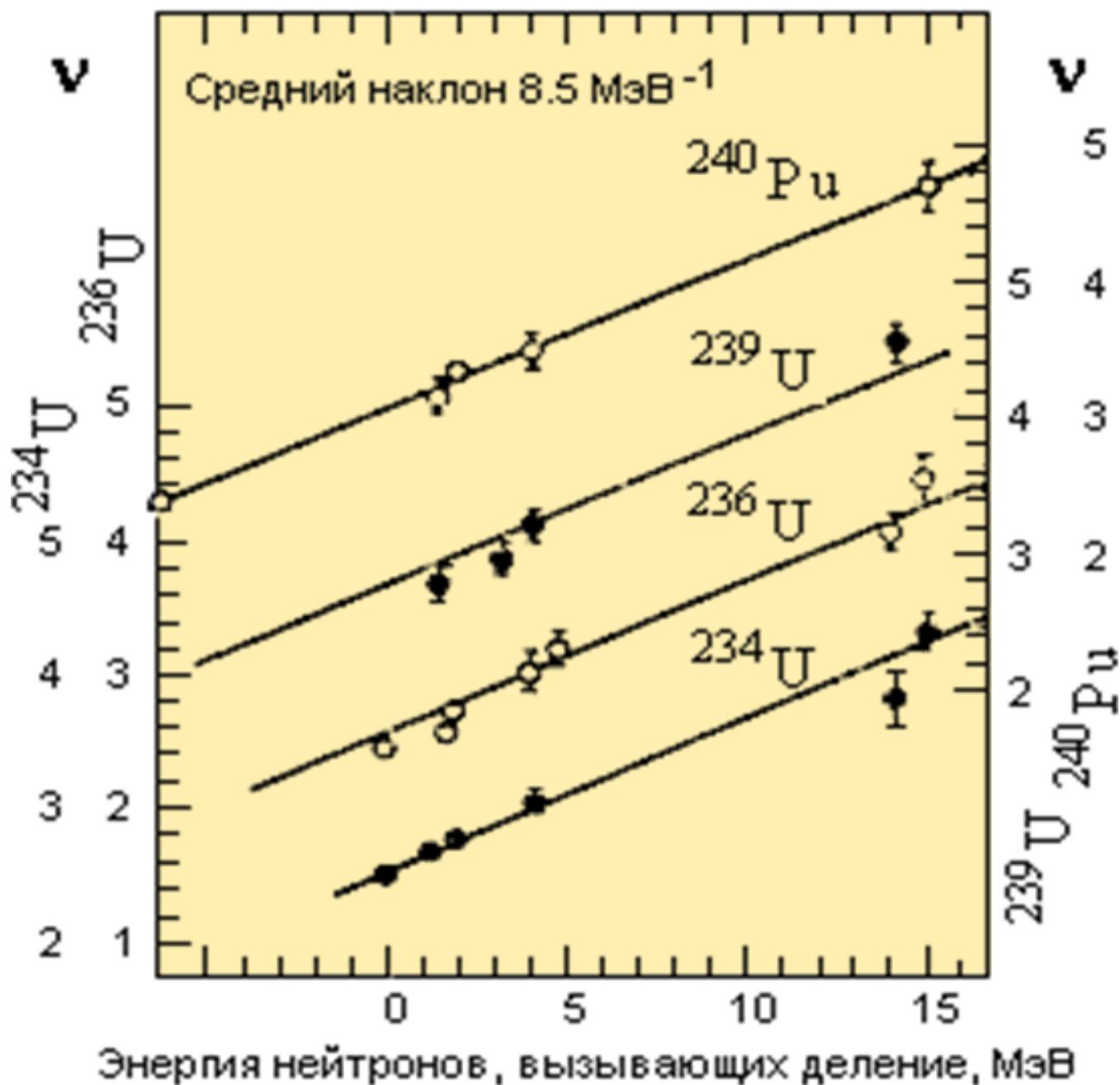
^{238}U 99,28% $T_{1/2} = 4,5 \cdot 10^9$ лет, α

Энергия присоединения нейтрона	Барьер деления
^{235}U 6.5 МэВ	^{236}U 6.0 МэВ
^{238}U 6.0 МэВ	^{239}U 7.0 МэВ

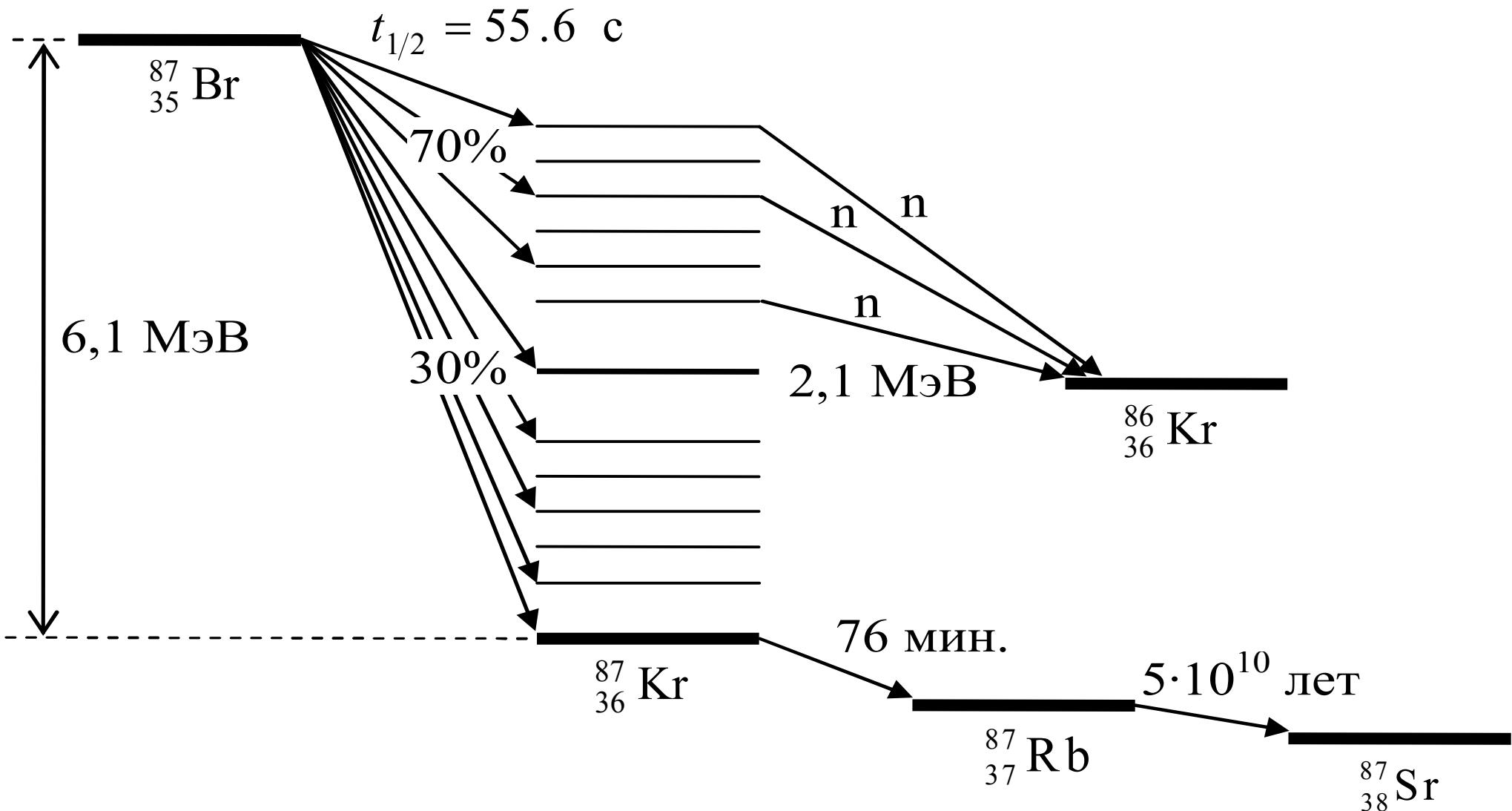
Спектр нейтронов деления



Число нейтронов деления



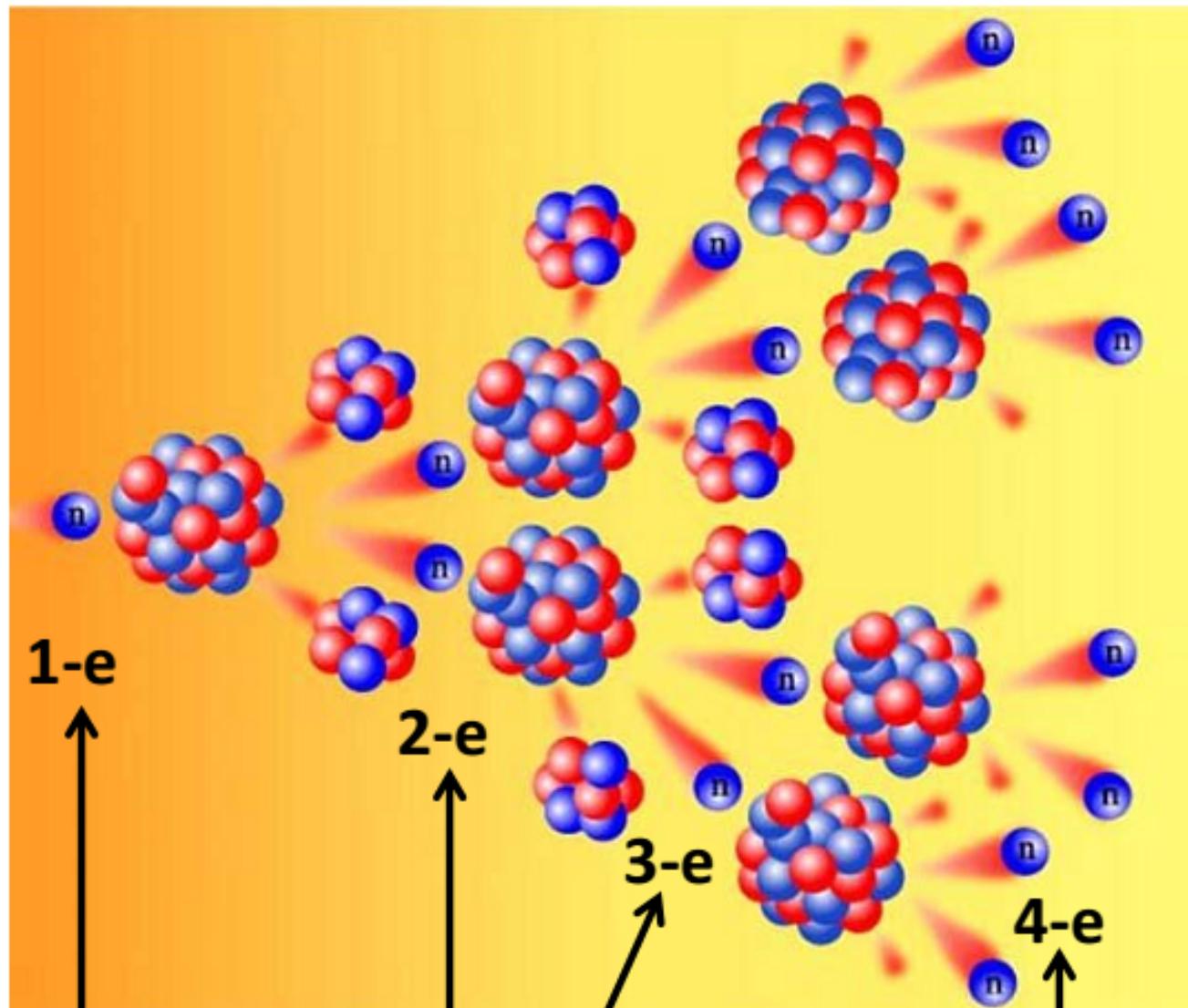
Запаздывающие нейтроны



Запаздывающие нейтроны деления ^{87}Kr

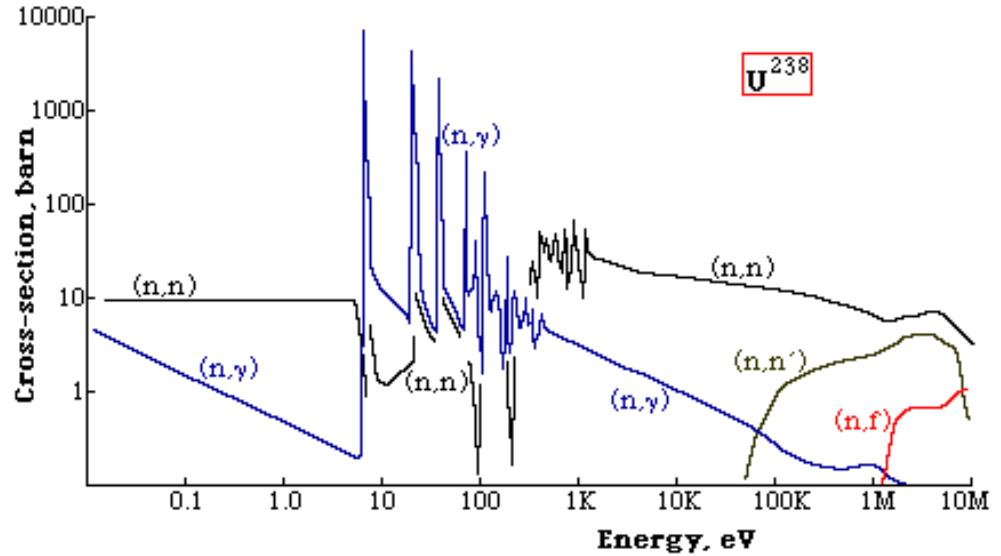
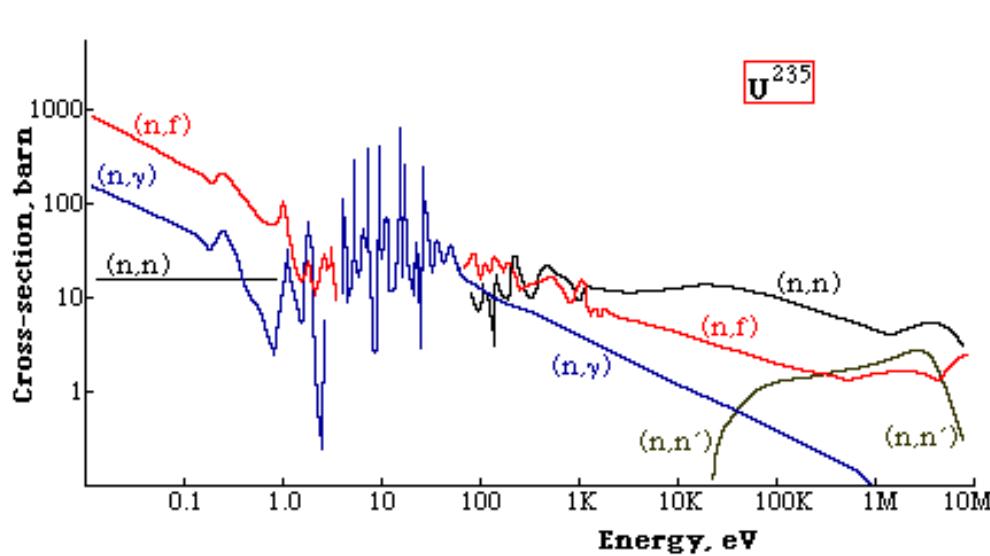
**ЦЕПНАЯ РЕАКЦИЯ
ДЕЛЕНИЯ**

Цепная реакция деления



Поколения нейтронов

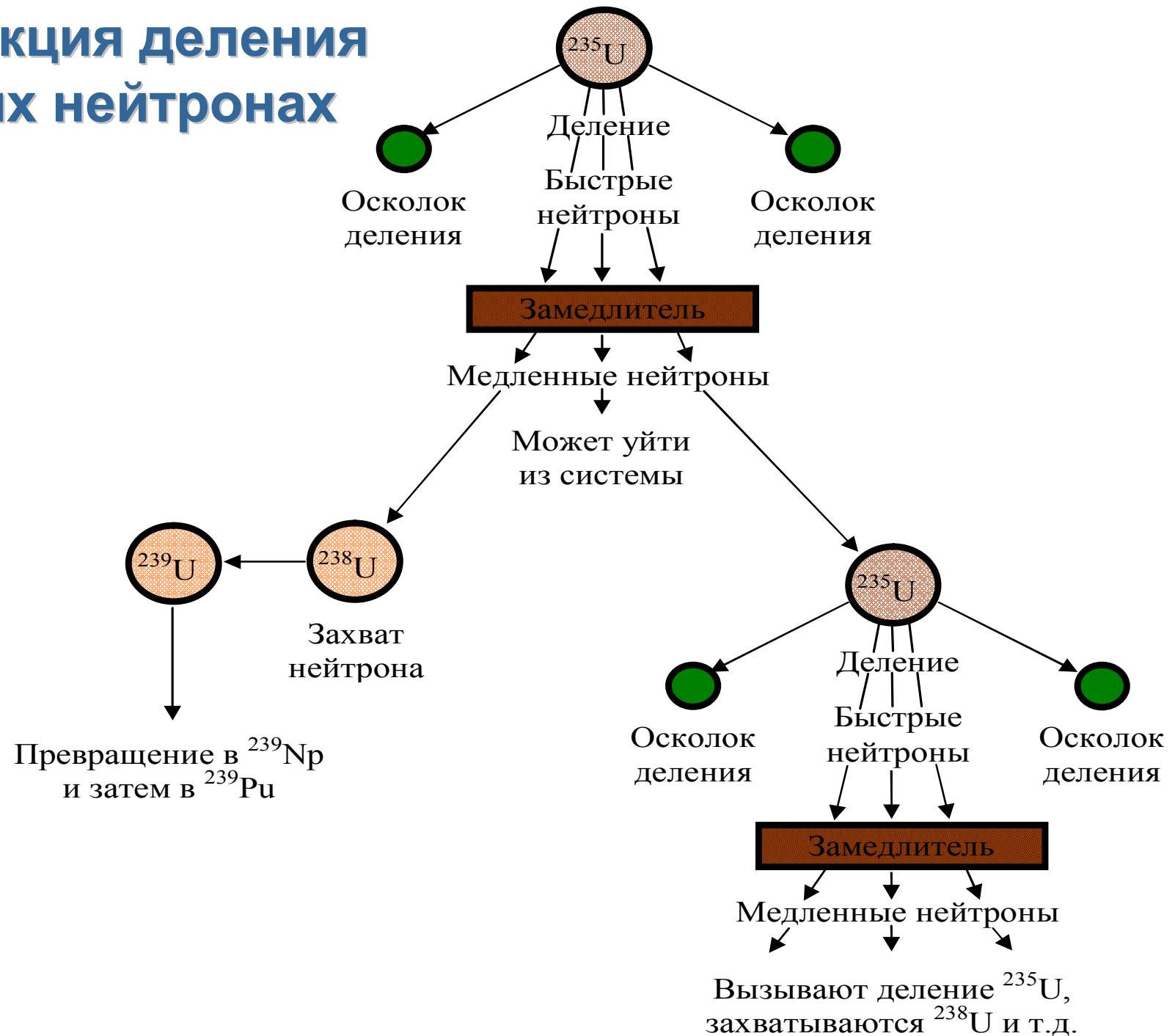
Реакции (n,f) , (n,γ) , (n,n) , (n,n') на ^{235}U , ^{238}U



При столкновении нейтрона с тяжелым ядром возможен радиационный захват нейтрона — реакция (n,γ) . Этот процесс будет конкурировать с делением и, следовательно, уменьшать коэффициент размножения. Вероятность деления для моноэнергетических нейтронов определяется соотношением

$$\frac{\sigma_{nf}}{\sigma_{nf} + \sigma_{n\gamma}}$$

Цепная реакция деления на тепловых нейтронах



Формула четырех сомножителей

$$K_{\infty} = \eta \cdot p \cdot f \cdot \varepsilon$$

η – число быстрых нейтронов, образующихся на 1 акт деления.

p – вероятность избежать резонансного захвата ядрами ^{238}U в процессе замедления нейтрона.

f – вероятность поглощения теплового нейтрона ядром горючего, а не замедлителя.

ε – коэффициент размножения на быстрых нейтронах.

$$pf \sim 0,5 \div 0,7$$

$$\varepsilon \sim 1,03$$

Отношение количества ядер замедлителя и урана

$$N_C/N_U \approx (2 \div 4) \cdot 10^2$$

Роль запаздывающих нейтронов в управлении цепной реакцией

В системе с коэффициентом размножения k среднее время жизни одного поколения равно T . Тогда за единицу времени число нейтронов N изменится в $(k-1)/T$ раз, т. е.

$$\frac{dN}{dt} = \frac{N(k-1)}{T},$$

откуда $N = N_0 e^{t/\tau_0}$

где N_0 — начальное число нейтронов и $\tau_0 = \frac{T}{k-1}$

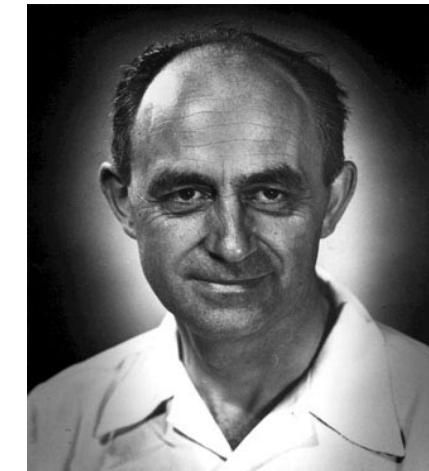
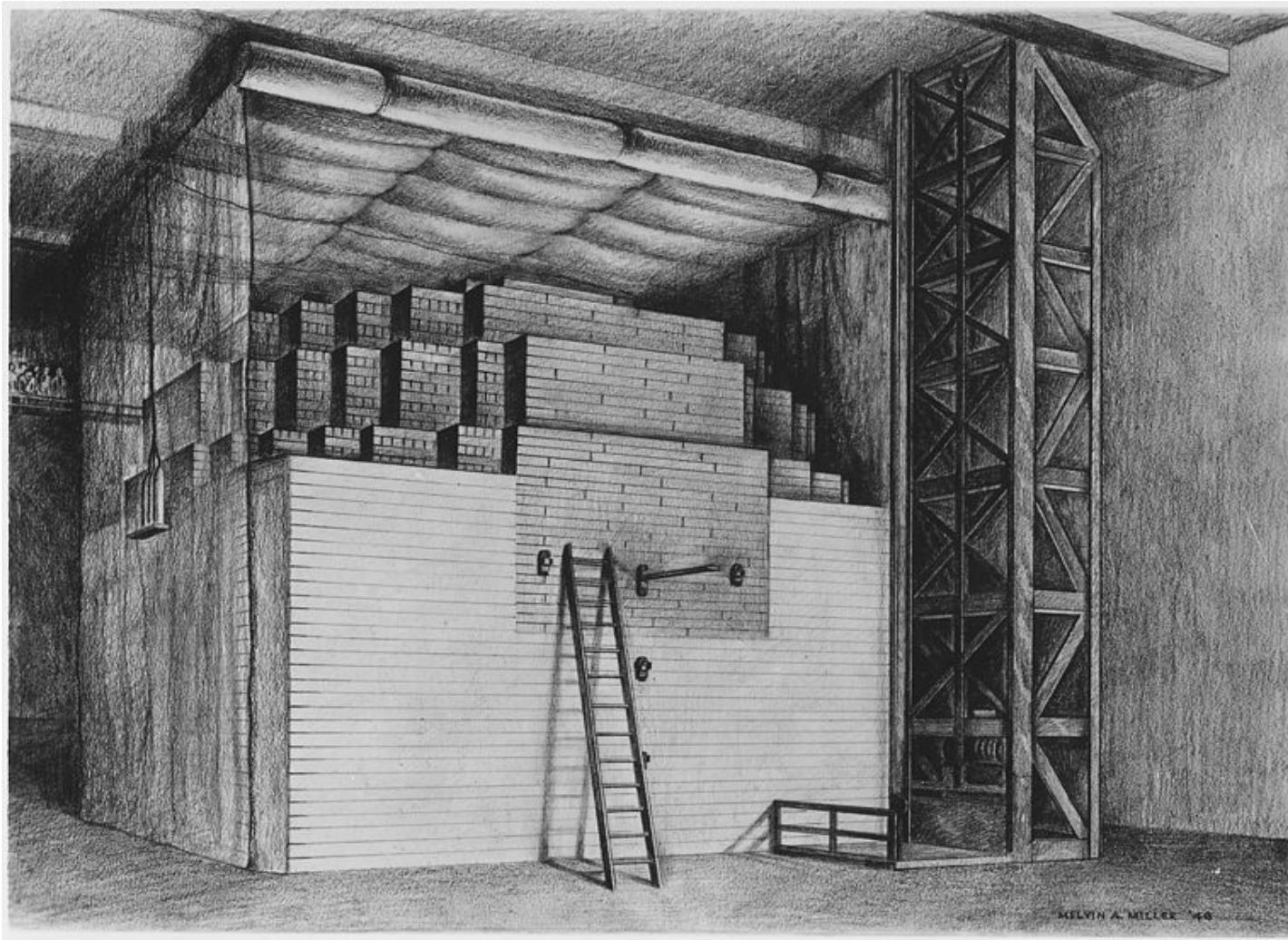
Величина T лежит в пределах $10^{-4}\text{-}10^{-5}$ с для медленных реакций и $10^{-7}\text{-}10^{-8}$ с для быстрых. Видно, что даже в самом благоприятном для управления случае ($T=10^{-4}$ с) количество нейтронов возрастет в 100 раз при $k-1 = 10^{-3}$ за 0.46 с.

**Управлять цепной реакцией на основе мгновенных нейтронов
технически очень сложно.**

Наличие запаздывающих нейтронов со средним временем жизни ~ 10 с по крайней мере на два порядка снижает скорость нарастания интенсивности деления ядер.

ЯДЕРНЫЕ РЕАКТОРЫ

Чикагская Поленница – первый ядерный реактор, созданный человечеством



Энрико Ферми
стадион
Универстета
Чикаго
2 декабря 1942 г.

Обнинск 1954

Активная зона Диаметр = 1.5 м Высота = 1.7 м

Графитовый замедлитель

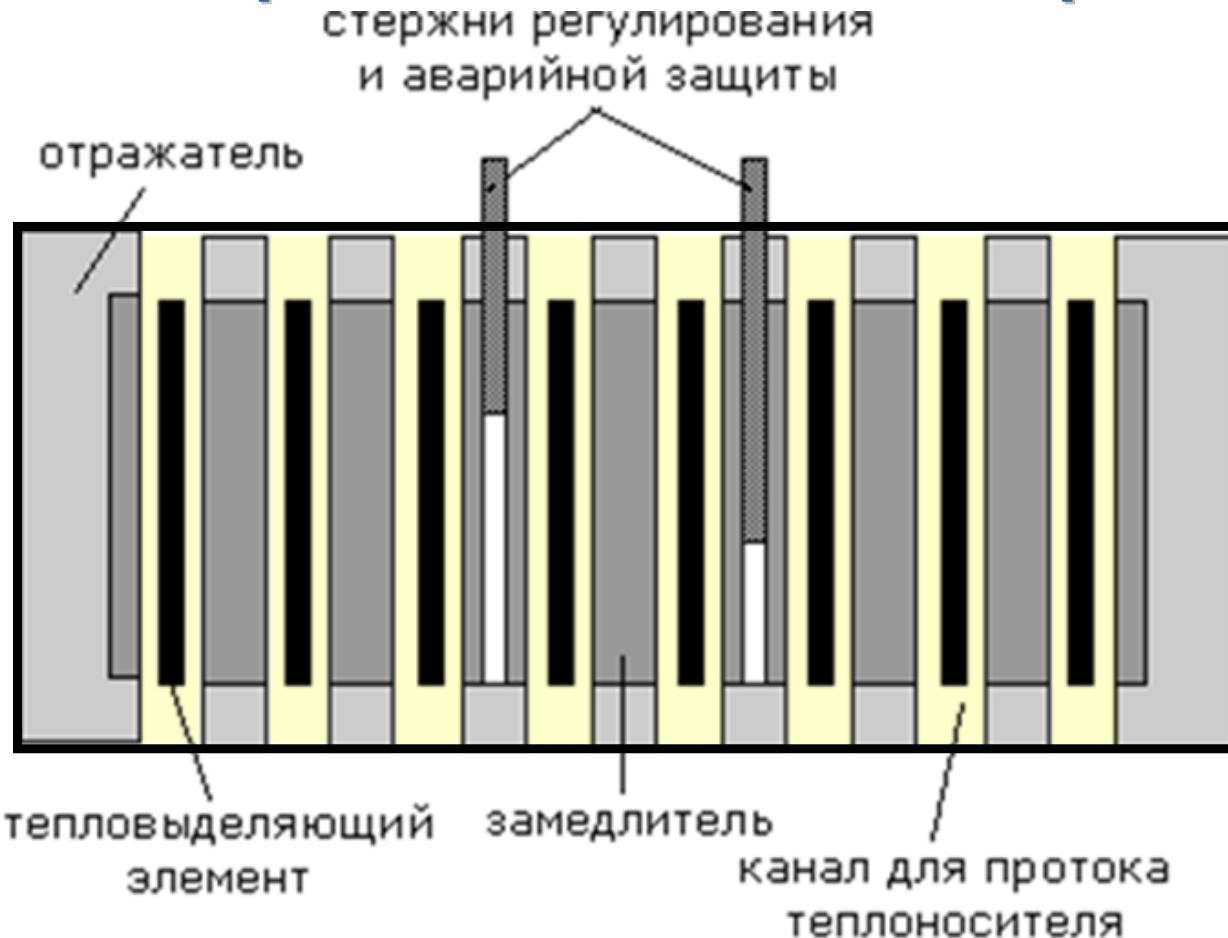
Горючее 130 твэлов 550 кг обогащенного ^{235}U - 5%

Мощность реактора 5 Мвт



$$1.5 \cdot 10^{17} \frac{\text{делений}}{\text{с}}$$

Схема гетерогенного теплового реактора



Основной частью реактора является активная зона, в которой происходит реакция деления и выделяется энергия. В гетерогенных тепловых реакторах активная зона состоит из замедлителя, в котором помещаются кассеты, в которых находится делящееся вещество. Т.к. энергия выделяется в этих кассетах, их обычно называют твэлами — тепловыделяющими элементами. Расстояние между твэлами не должно превышать суммарную длину замедления и диффузии нейтронов. Активная зона реактора обычно окружается отражателем. Для управления реактором в активной зоне также располагаются стержни регулирования мощности реактора и аварийной защиты.

Ядерный реактор на тепловых нейтронах

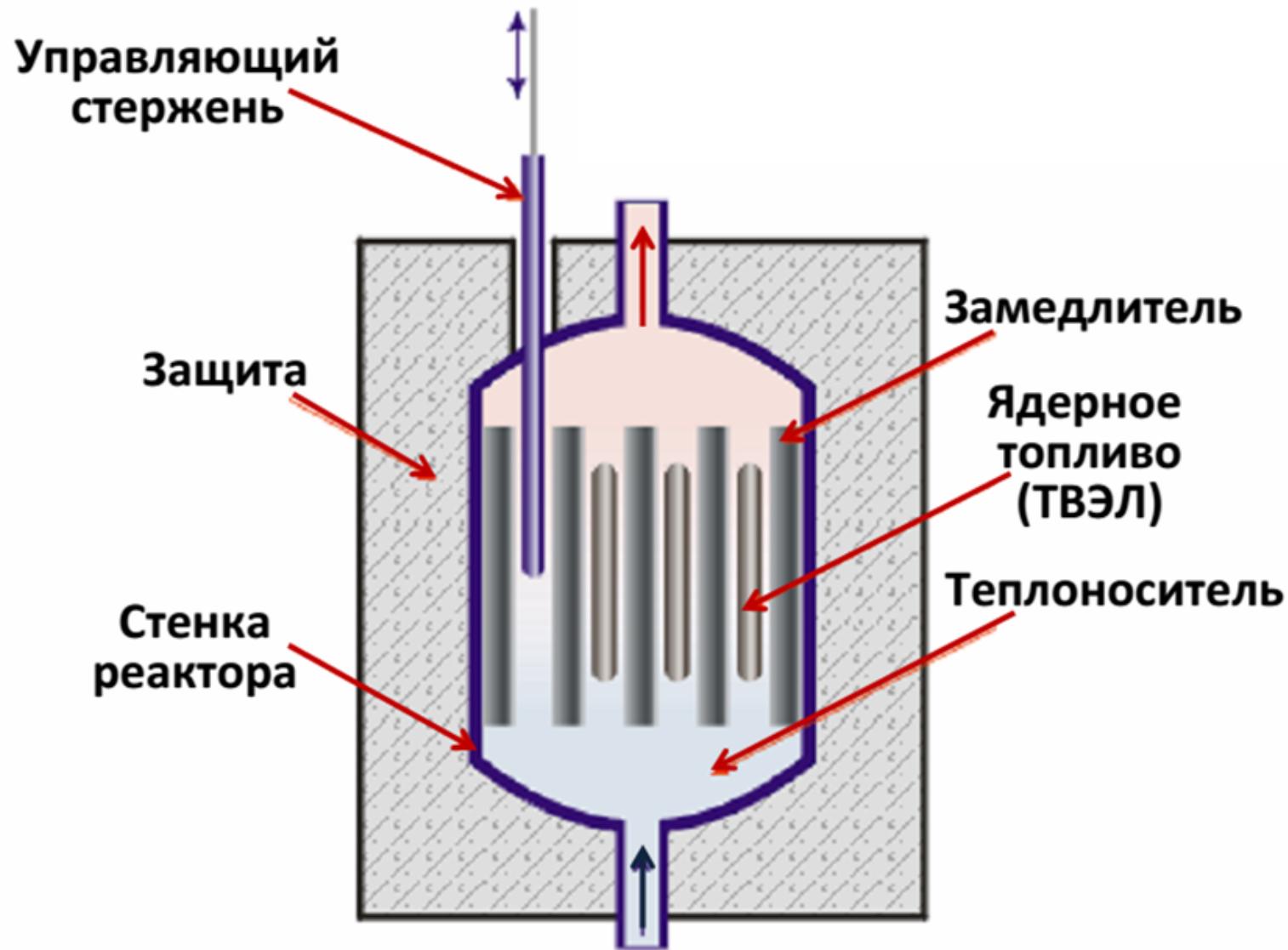
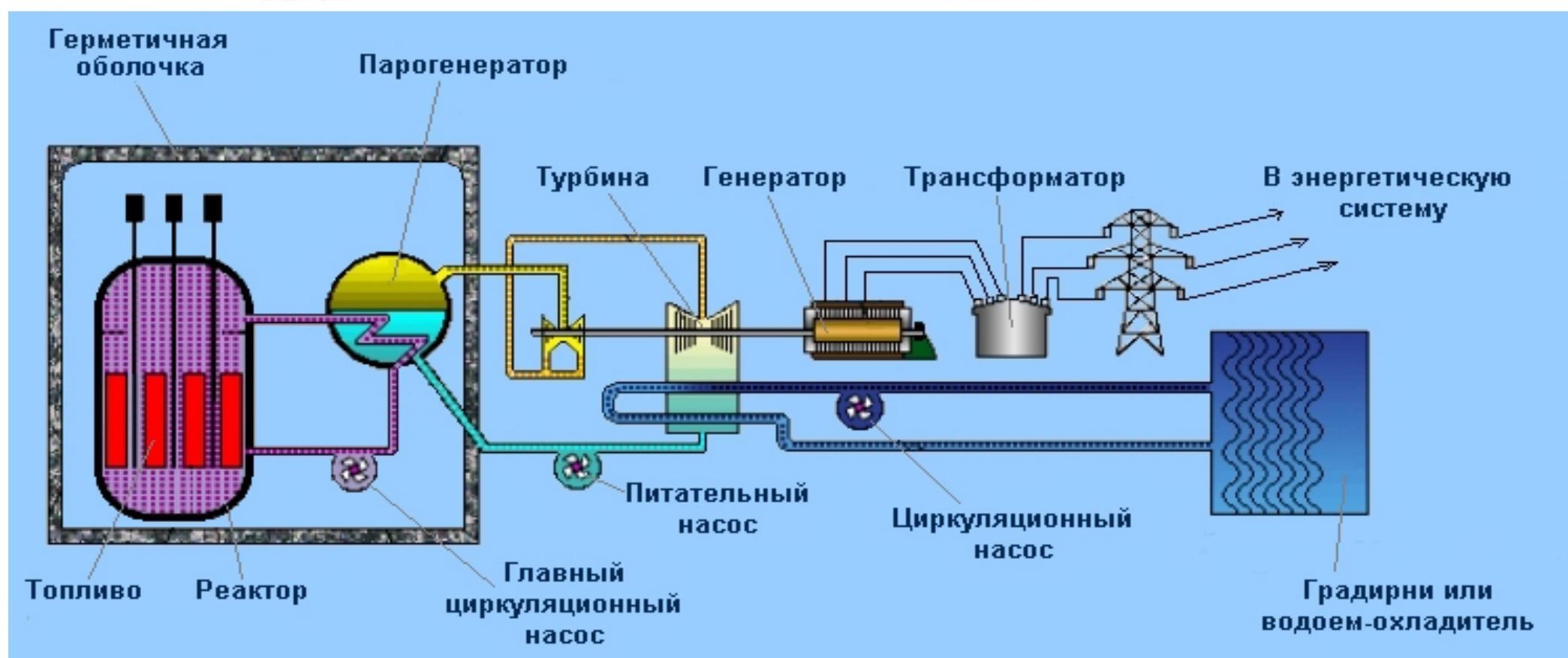


Схема работы АЭС

Деление 1 г урана-235 в течение суток даёт мощность в 1 МВт



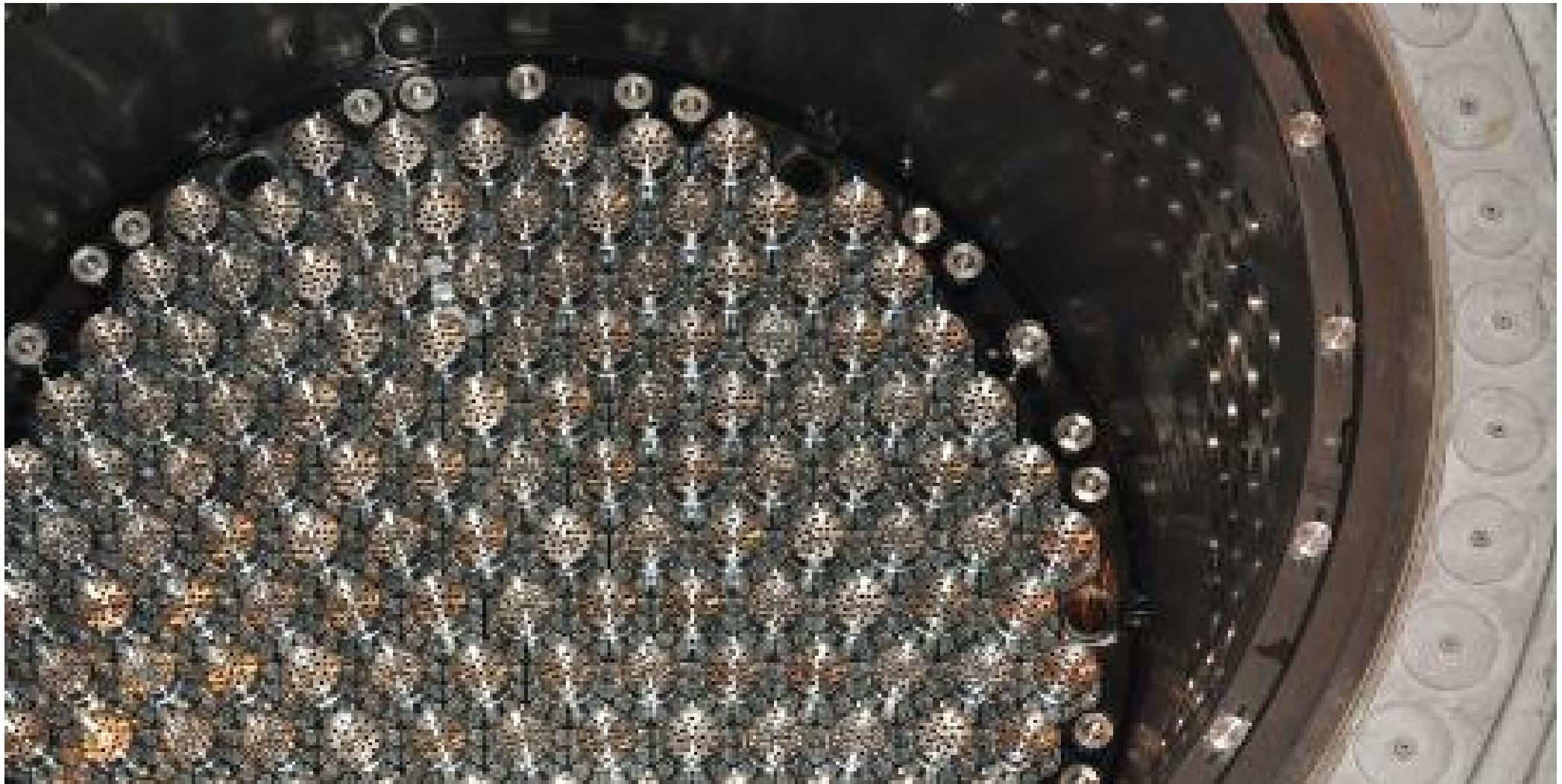
Ядерное топливо



Сборка ТВЭЛ



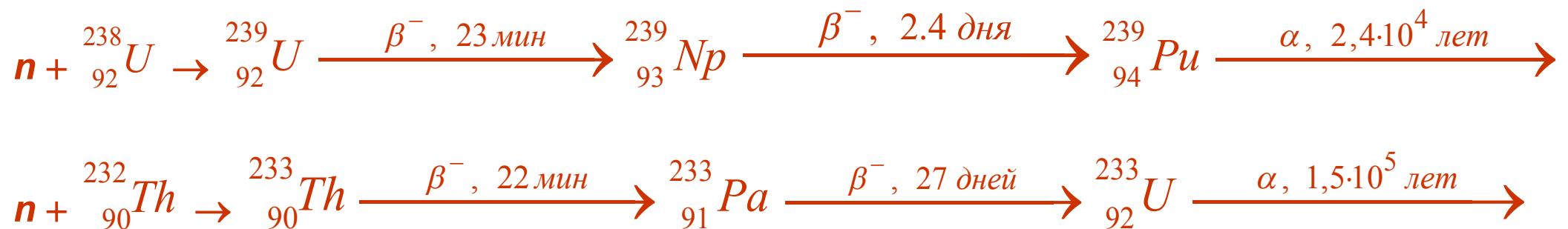
Сборки в корпусе реактора



Корпус реактора ВВЭР



Воспроизведение ядерного горючего

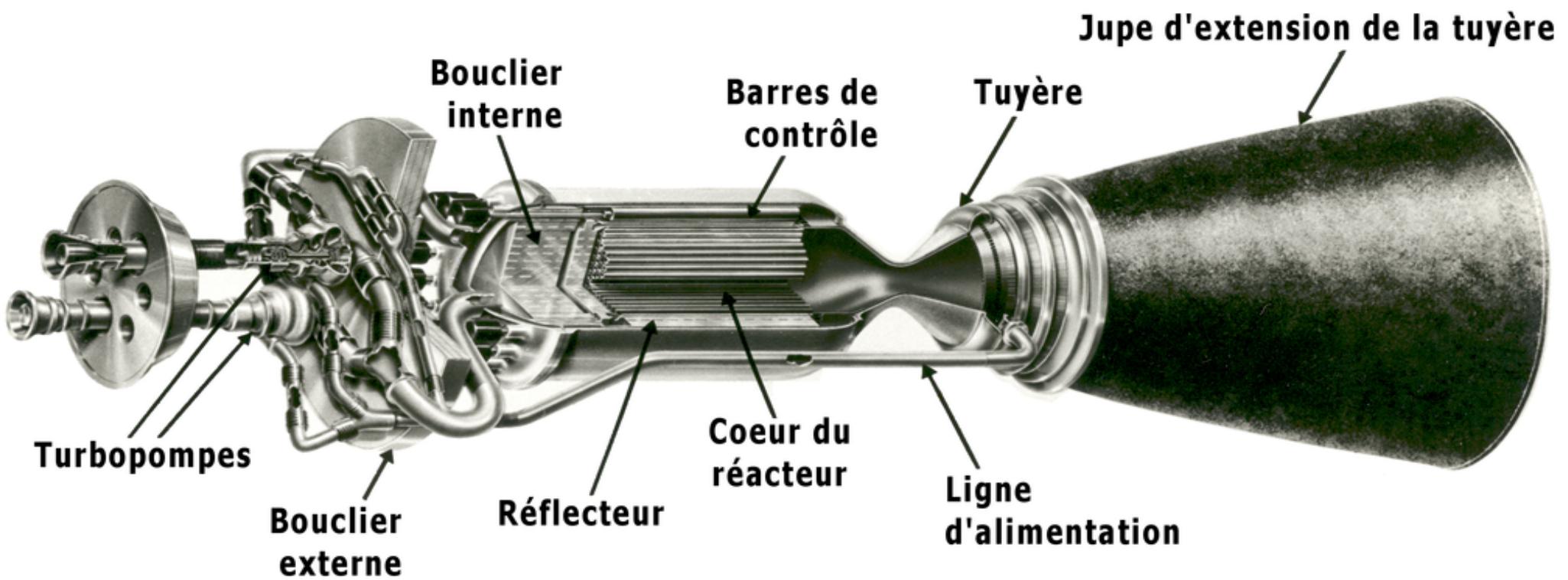


Эти две реакции открывают возможность воспроизведения ядерного горючего в процессе цепной реакции.

ЯДЕРНЫЕ ДВИГАТЕЛИ

Ядерный реактивный двигатель

Схема ЯРД



Двигатель РД-0410

Музей КБ химавтоматики, г.
Воронеж

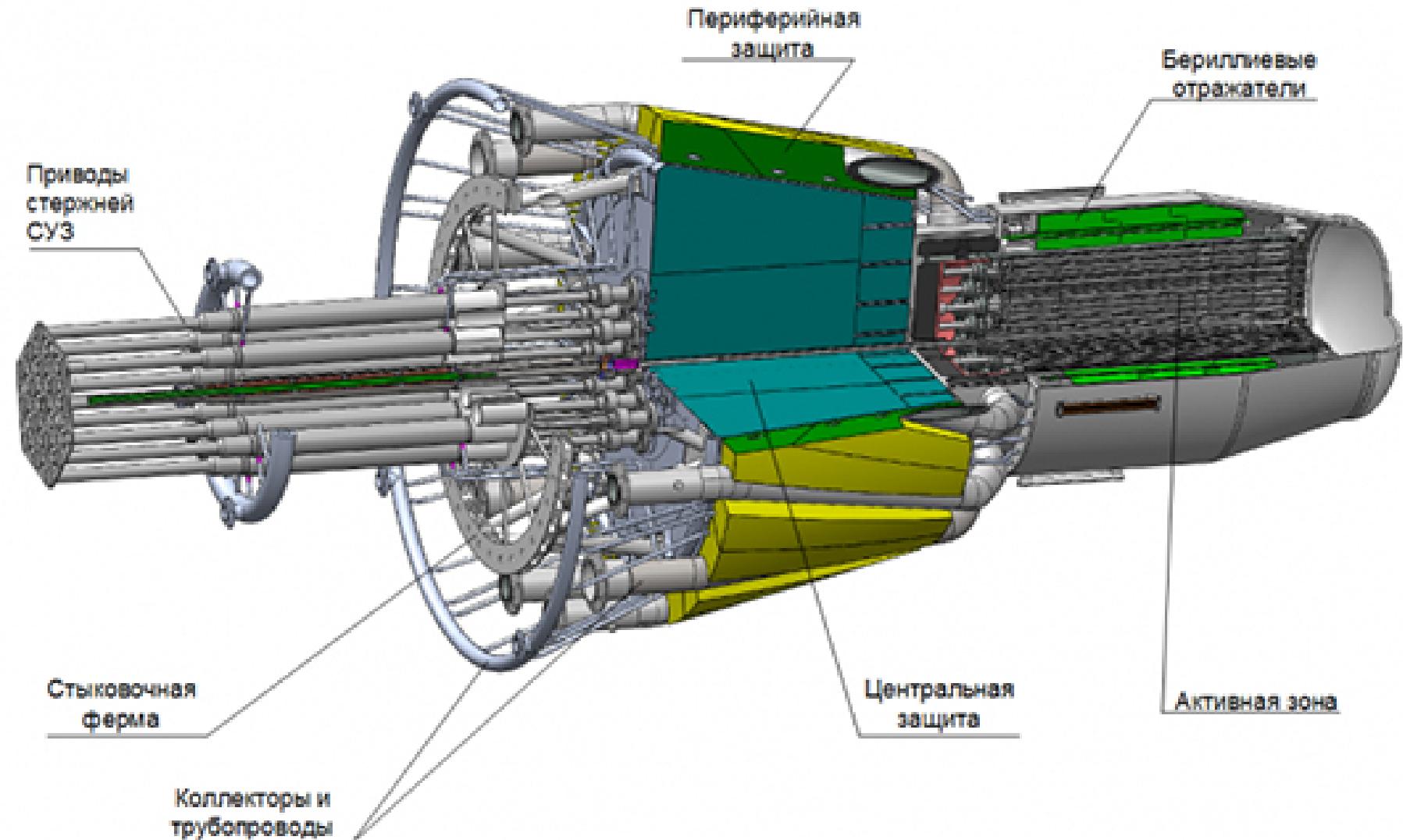
Разработка и испытания
проводились в 1965-1985 гг.



Испытания на Семипалатинском
полигоне в шахте, реактивная струя
водорода бьет вверх.



Современный проект к 2025 году



Характеристики двигателя РД-0410

Тяга в вакууме	35.28 кН
Рабочее тело	смесь водорода и гексана
Удельный импульс	9000 м/с
Средняя температура на входе в сопло	3000 К
Время работы	3600 с
Количество включений	10
Масса с радиационной защитой и адаптером	2000 кг
Тепловая мощность реактора	196 МВт
Размеры реактора:	
— высота	800 мм
— диаметр	500 мм
Размеры двигателя:	
— высота	3700 мм
— максимальный диаметр	1200 мм