

# 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. Штрассман** 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** развил 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  $^{235}\text{U}$ .

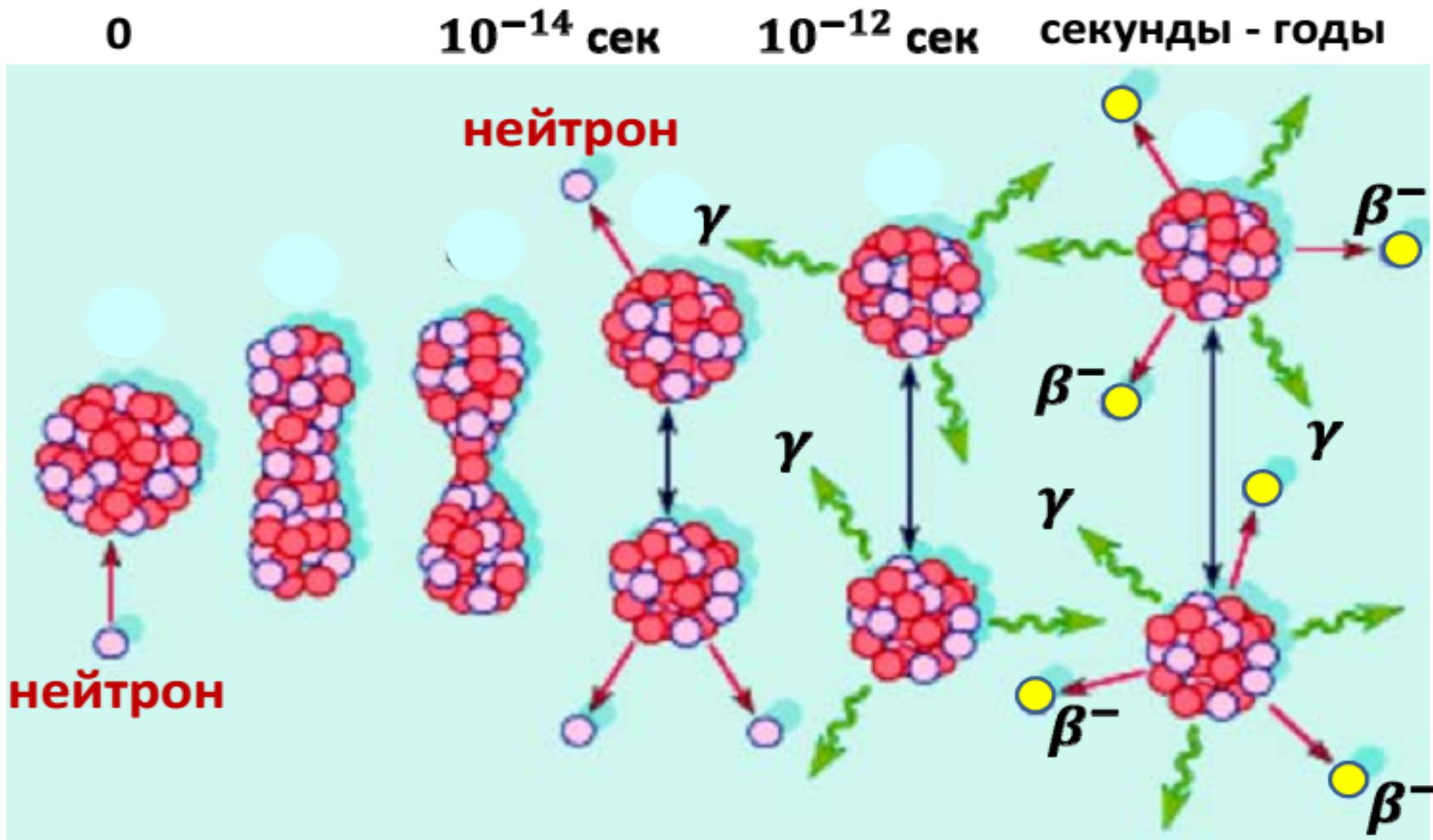
**1942 г. — Э. Ферми.** Первый ядерный реактор.

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

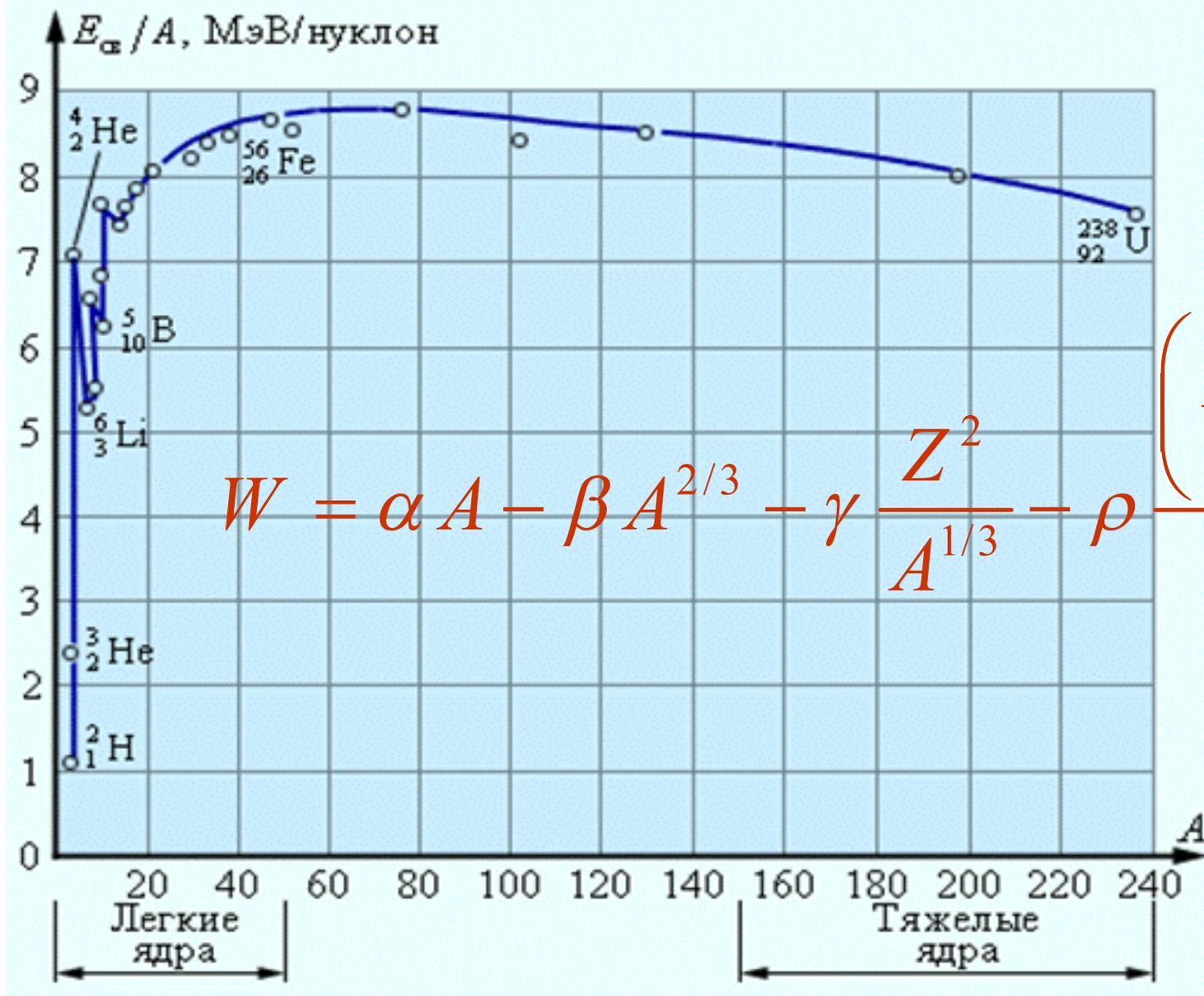
**1945 г. —** Ядерный взрыв. Хиросима.

**1954 г. —** Первая атомная электростанция. Обнинск.

# Деление ядра



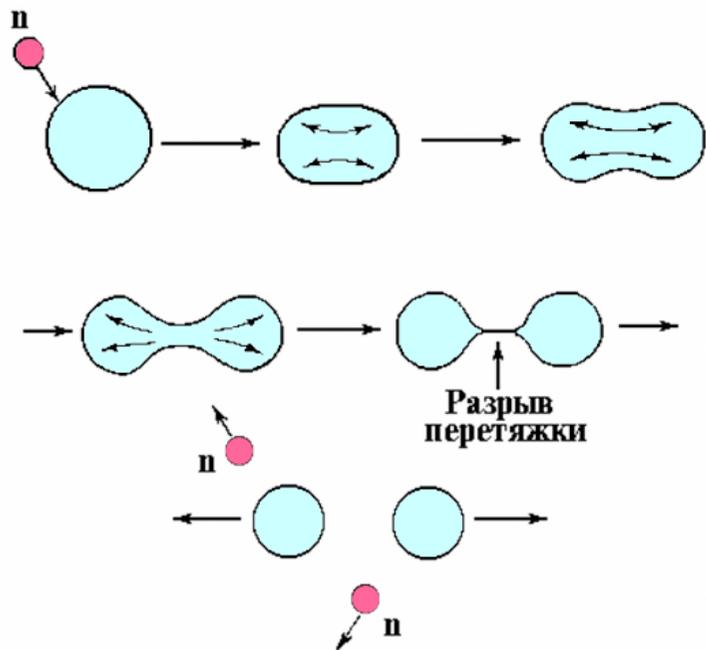
# Удельная энергия связи ядра



$$W = \alpha A - \beta A^{2/3} - \gamma \frac{Z^2}{A^{1/3}} - \rho \frac{\left(\frac{A}{2} - Z\right)^2}{A} + \frac{\delta}{A^{3/4}}$$

$$\varepsilon = W / A$$

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



## Механизм деления

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

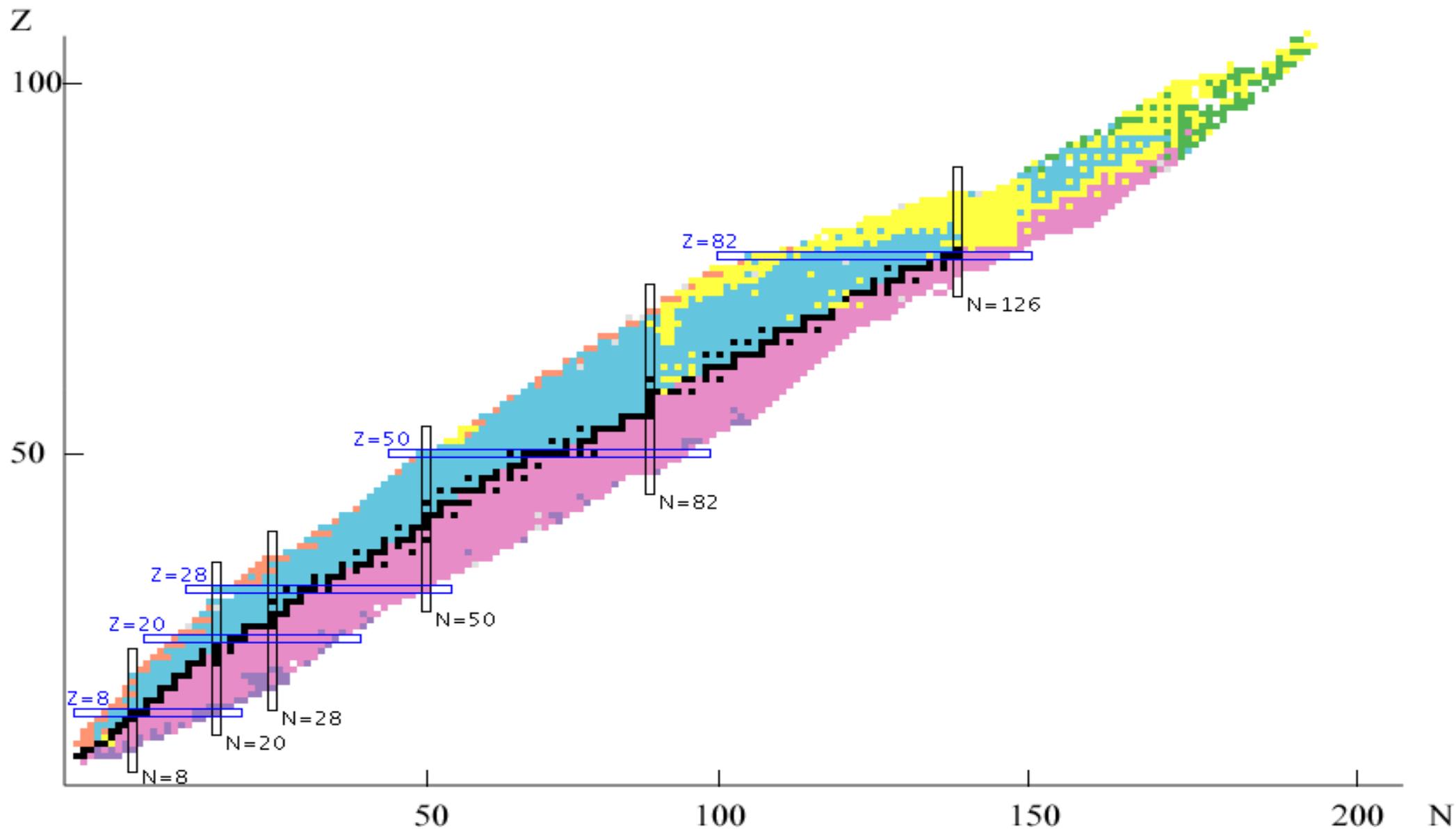
Изменение энергии ядра в процессе деления определяется изменением суммы поверхностной и кулоновской энергий  $E_{пов} + E_{кул}$  начального ядра.

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

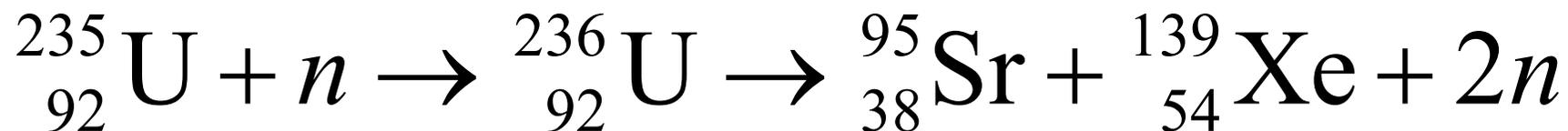
$$\tilde{E}_{пов} = E_{пов} \left(1 + \frac{2}{5} \varepsilon^2\right)$$

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

# N-Z диаграмма атомных ядер

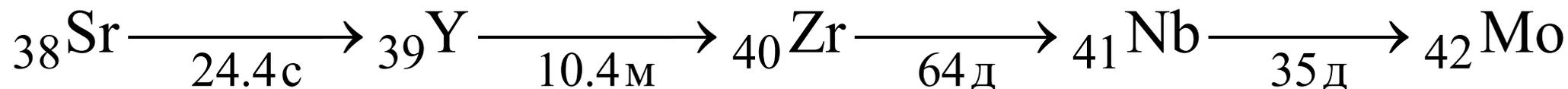


# Радиоактивность осколков деления

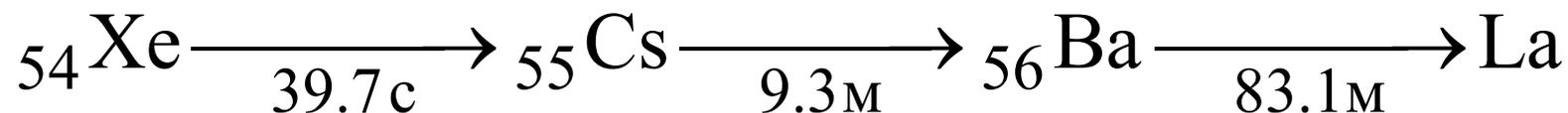


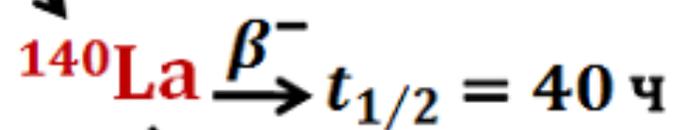
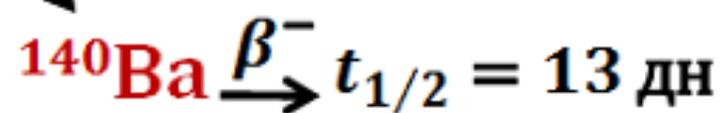
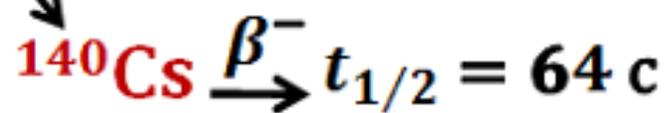
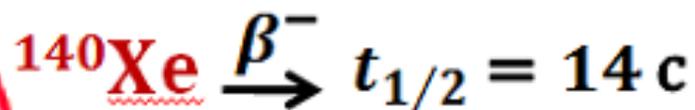
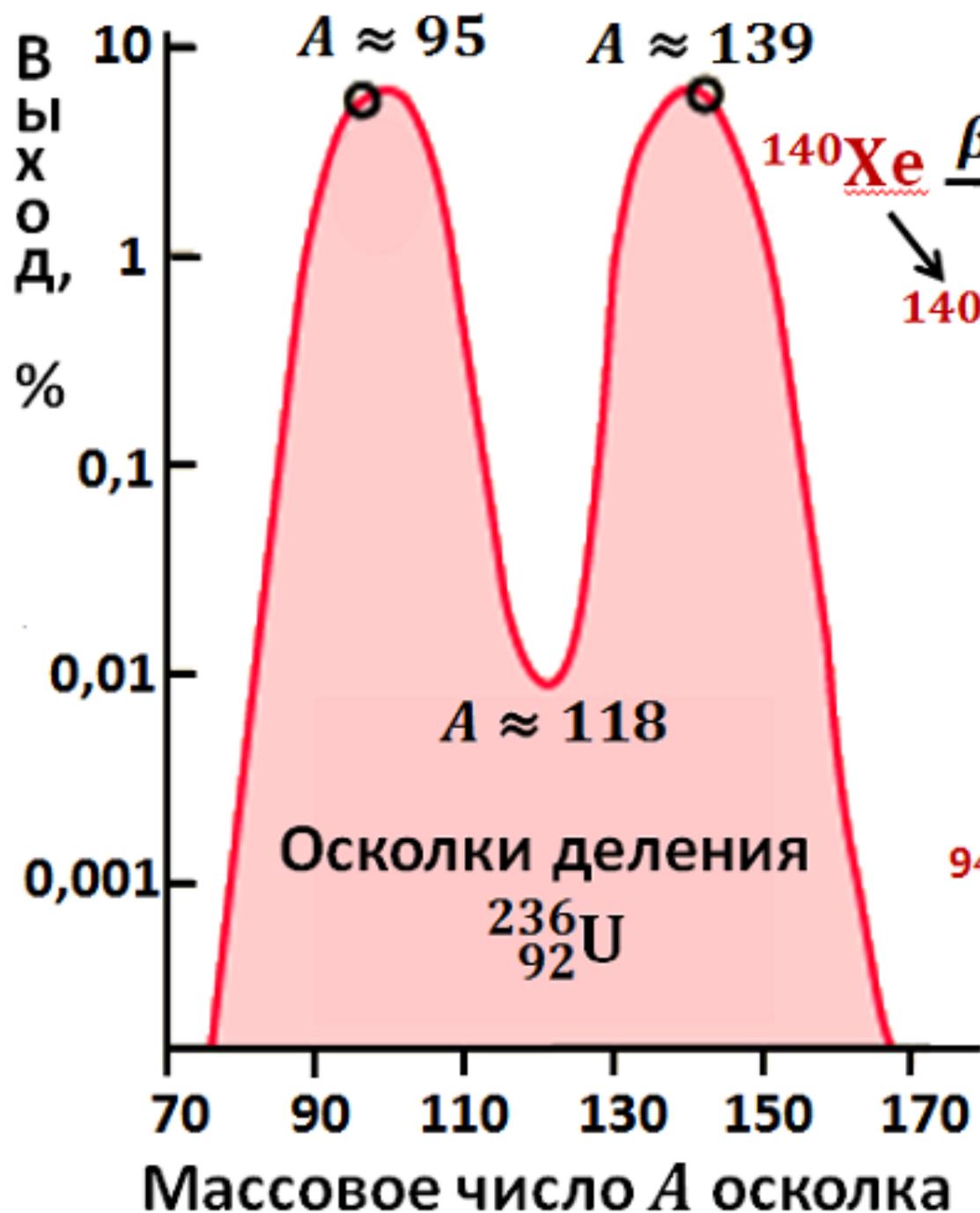
$$\frac{N}{Z} = 1 + 0.015A^{2/3}$$

$$A = 95$$

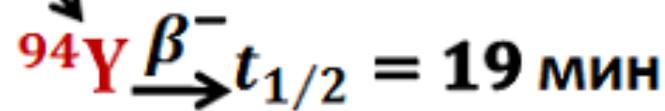
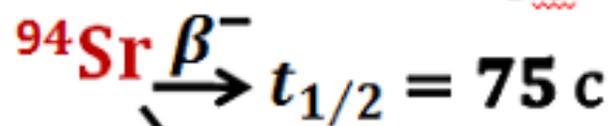


$$A = 139$$



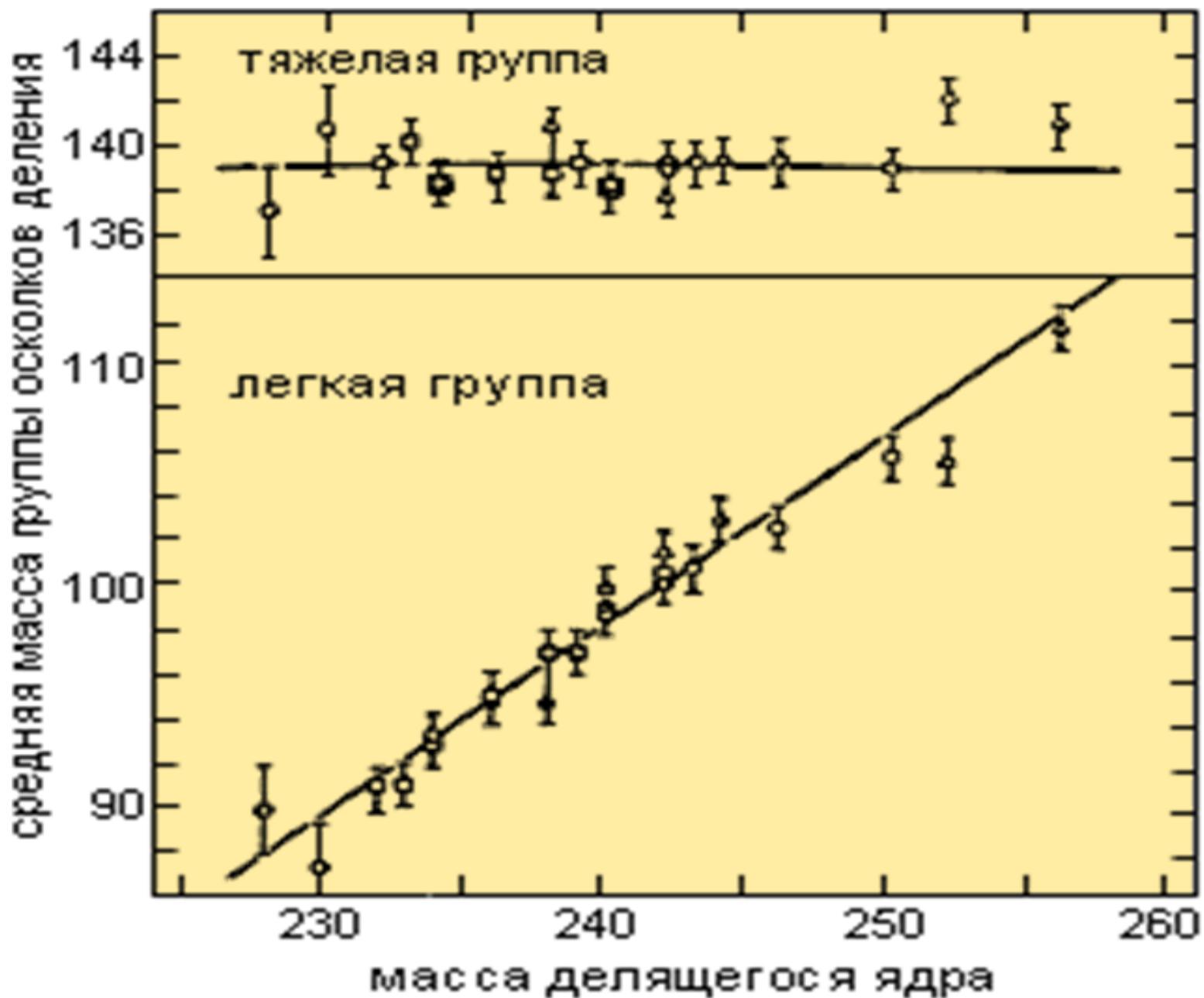


$^{140}\text{Ce}$  стабильно



$^{94}\text{Zr}$  стабильно

## 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  $E_{нов}$  и кулоновской  $E_{кул}$  энергий

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

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

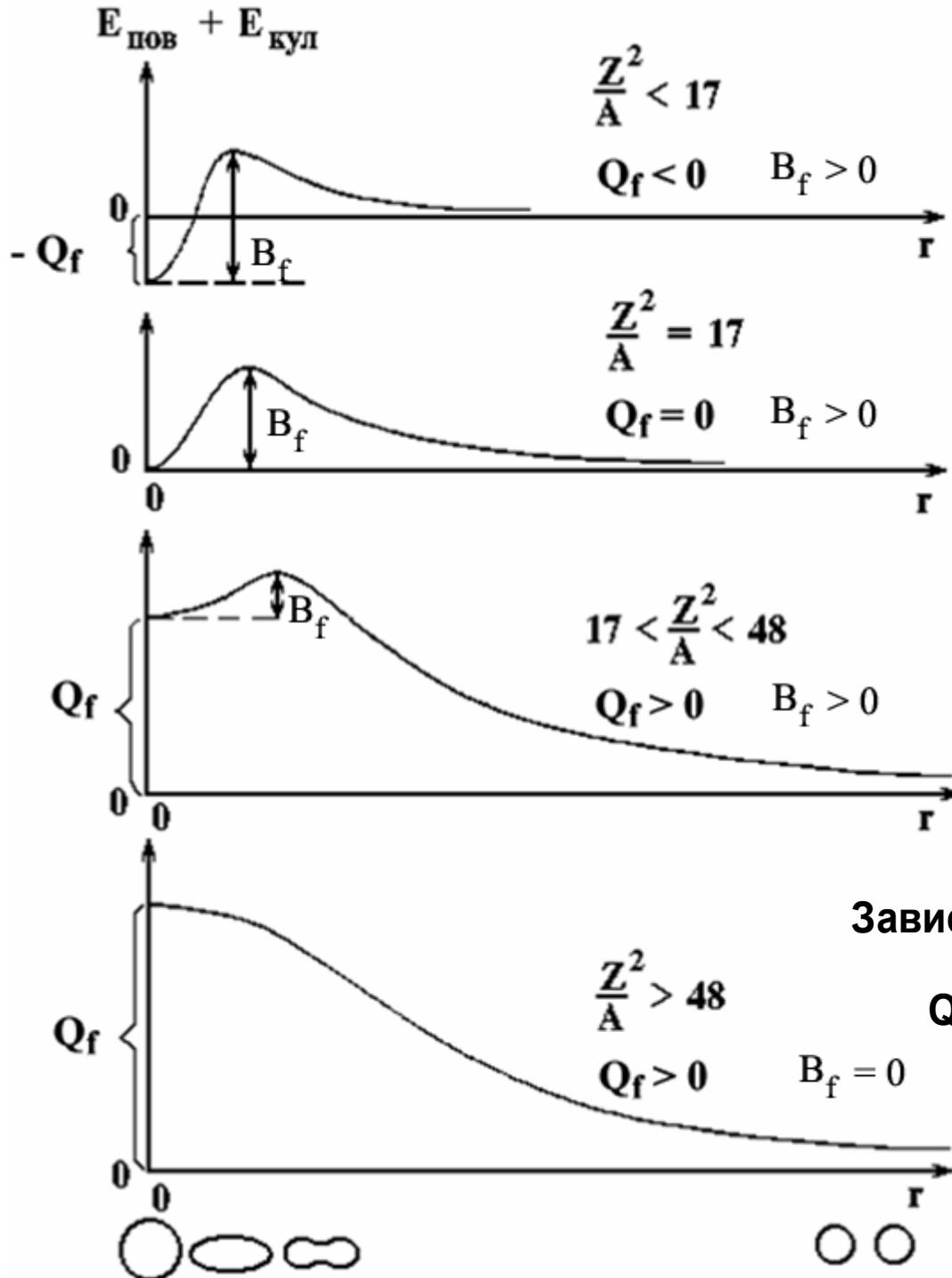
$$\begin{aligned} (0,37 \cdot \beta \frac{Z^2}{A^{1/3}} - 0,26 \cdot \gamma A^{2/3}) &> 0, \\ \frac{Z^2}{A} &> \frac{0,26 \beta}{0,37 \gamma} = \frac{0,26}{0,37} \cdot \frac{17,2}{0,72} \approx 17. \end{aligned}$$

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 $\beta$ -распада	5
Антинейтрино $\beta$ -распада	10
Мгновенное $\gamma$ -излучение	7
$\gamma$ -излучение продуктов распада	6
Полная энергия деления	200

# ДЕЛЕНИЕ ЯДЕР НЕЙТРОНАМИ

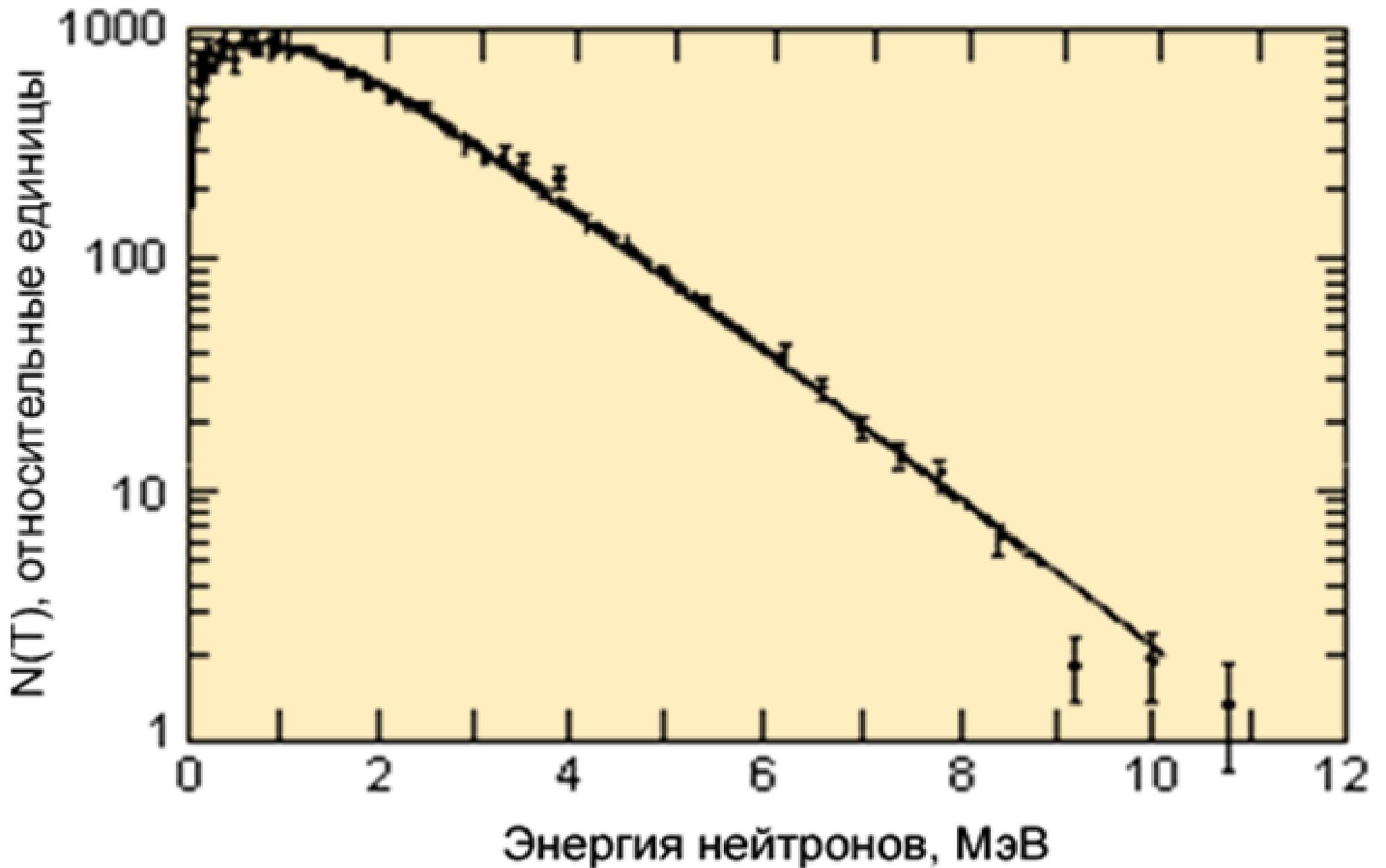
# Изотопы U

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

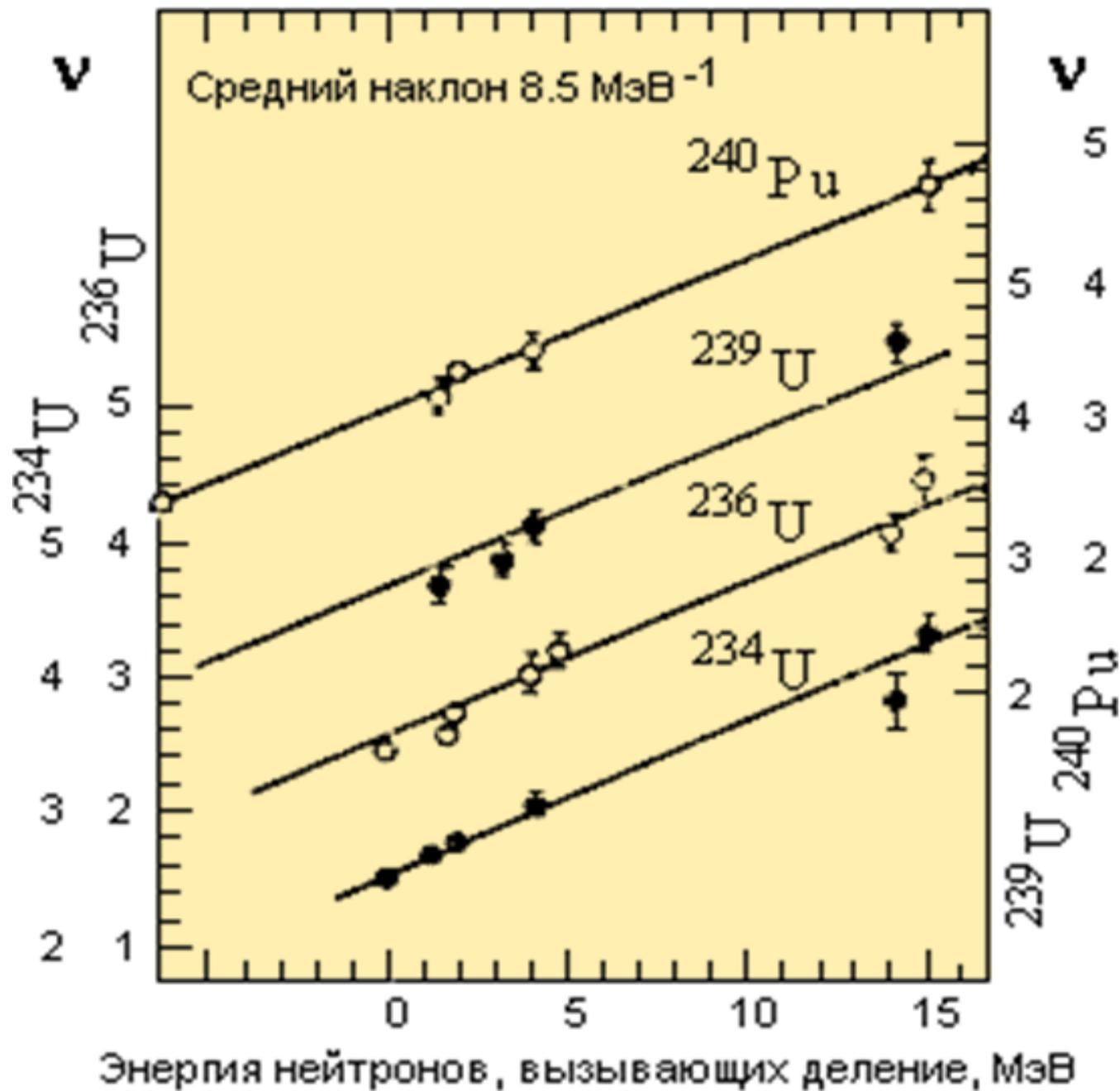
$^{238}\text{U}$       99,28%       $T_{1/2} = 4,5 \cdot 10^9$  лет,  $\alpha$

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

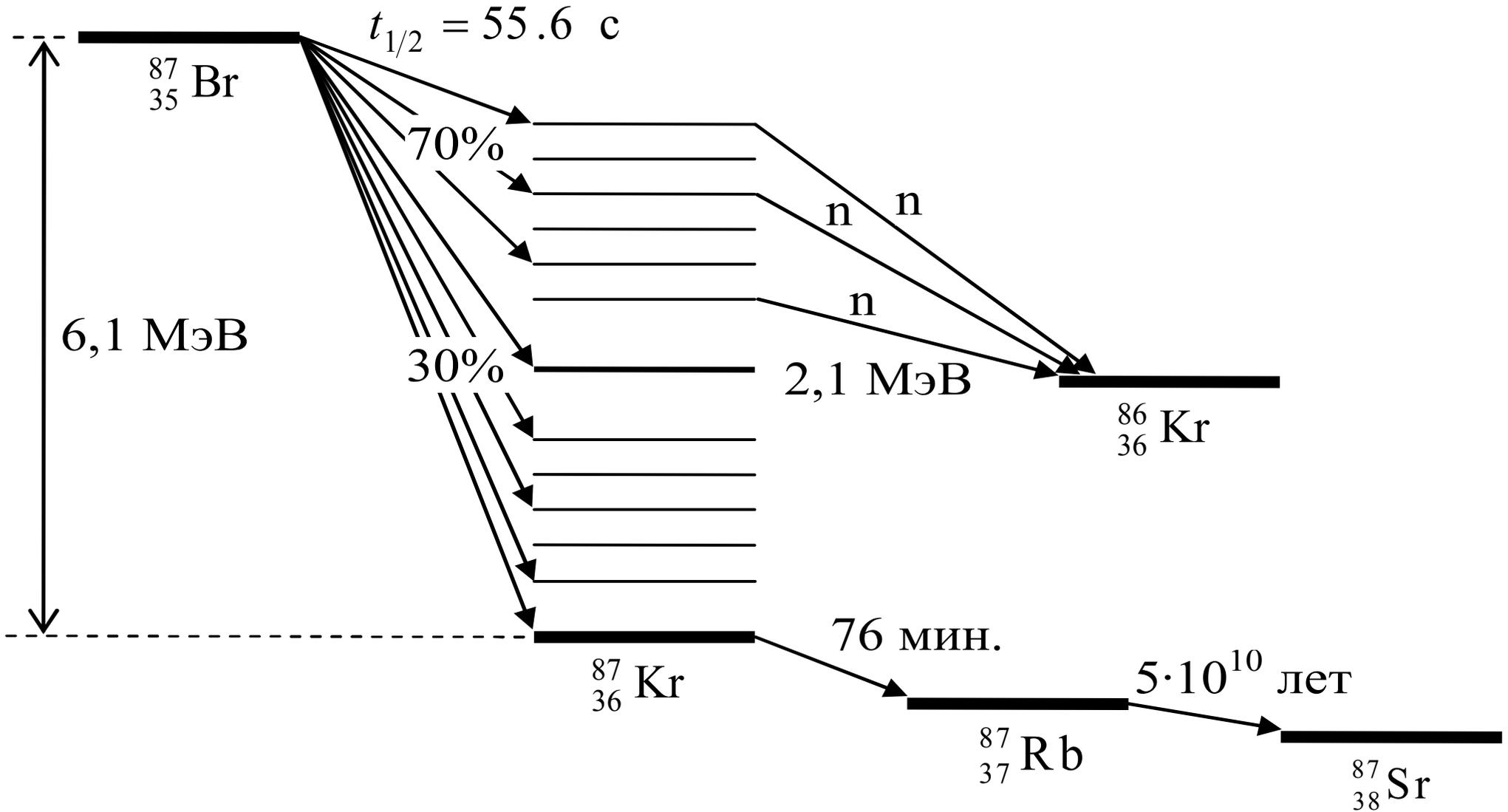
# Спектр нейтронов деления



# Число нейтронов деления



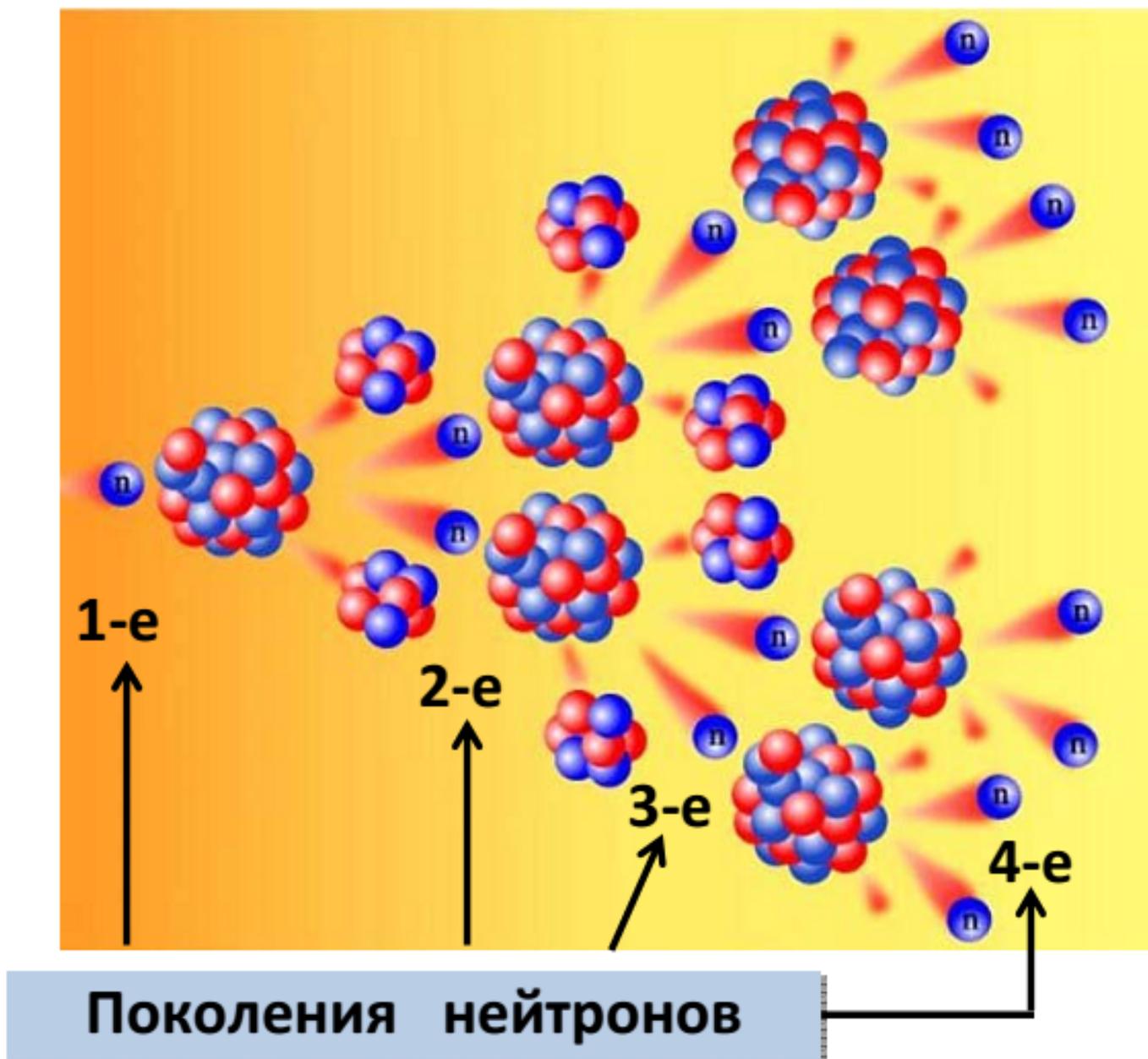
# Запаздываюцце нейтроны



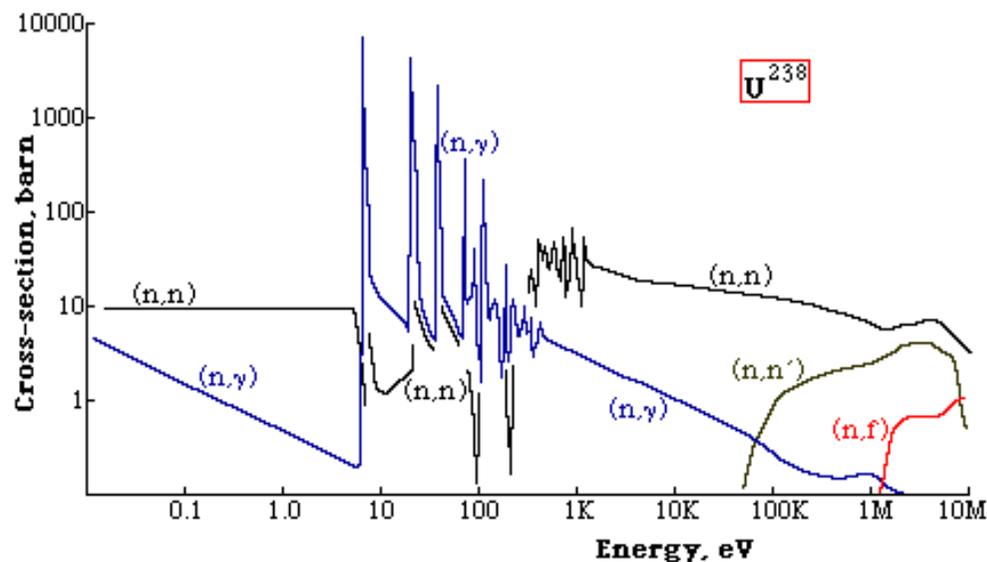
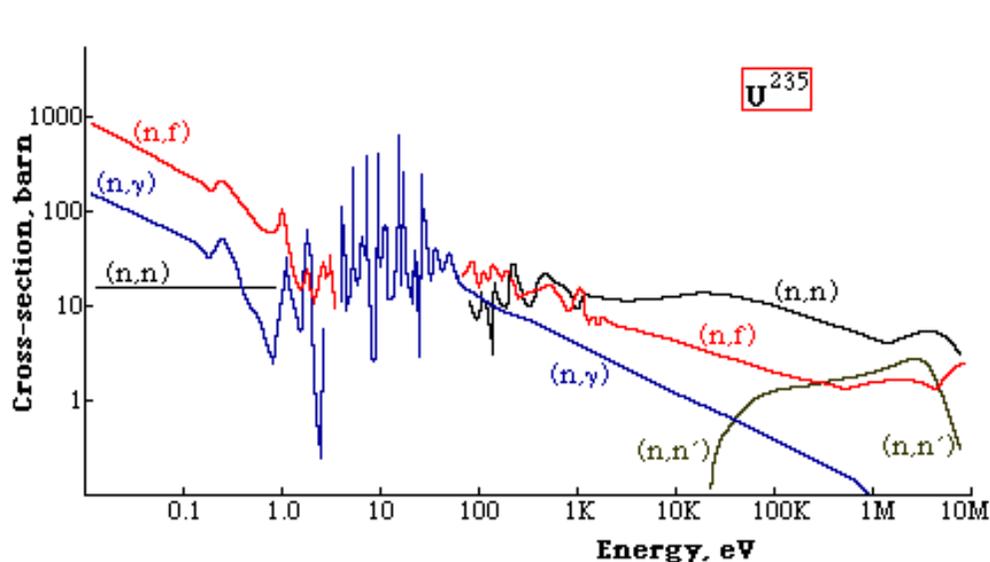
Запаздываюцце нейтроны деления  $^{87}\text{Kr}$

# ЦЕПНАЯ РЕАКЦИЯ ДЕЛЕНИЯ

# Цепная реакция деления



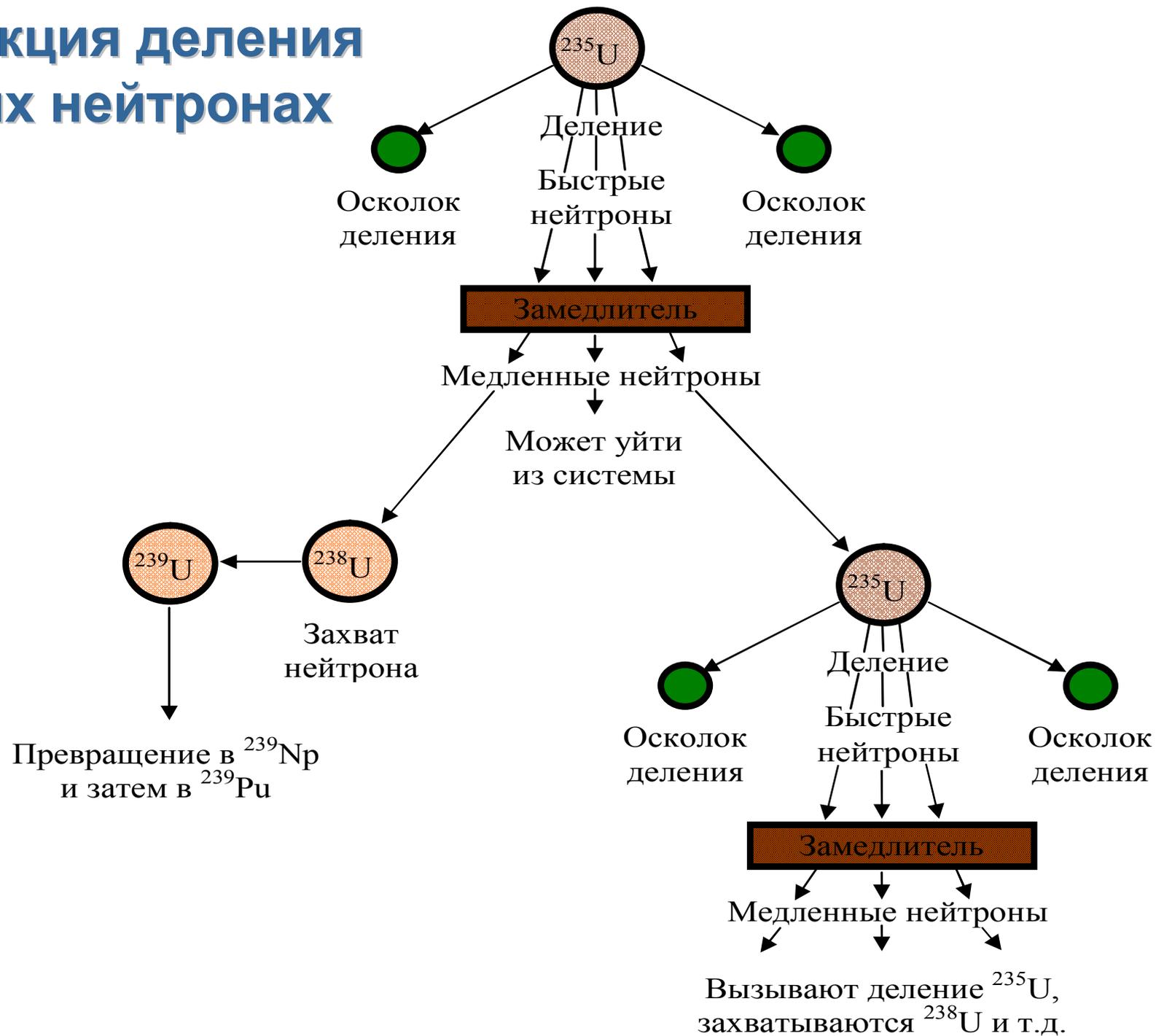
## Реакции (n,f), (n,γ), (n,n), (n,n') на <sup>235</sup>U, <sup>238</sup>U



При столкновении нейтрона с тяжелым ядром возможен радиационный захват нейтрона — реакция  $(n, \gamma)$ . 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

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

$\eta$  – число быстрых нейтронов, образующихся на 1 акт деления.

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

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

$\varepsilon$  – 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  $\tau_0 = \frac{T}{k-1}$

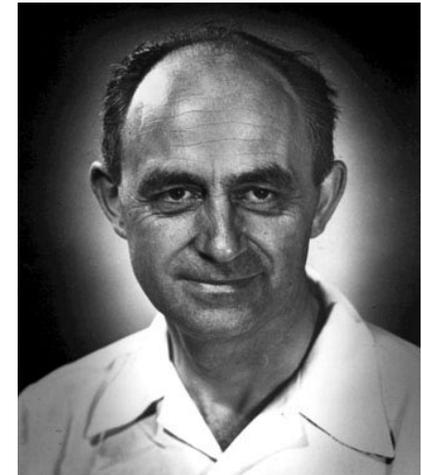
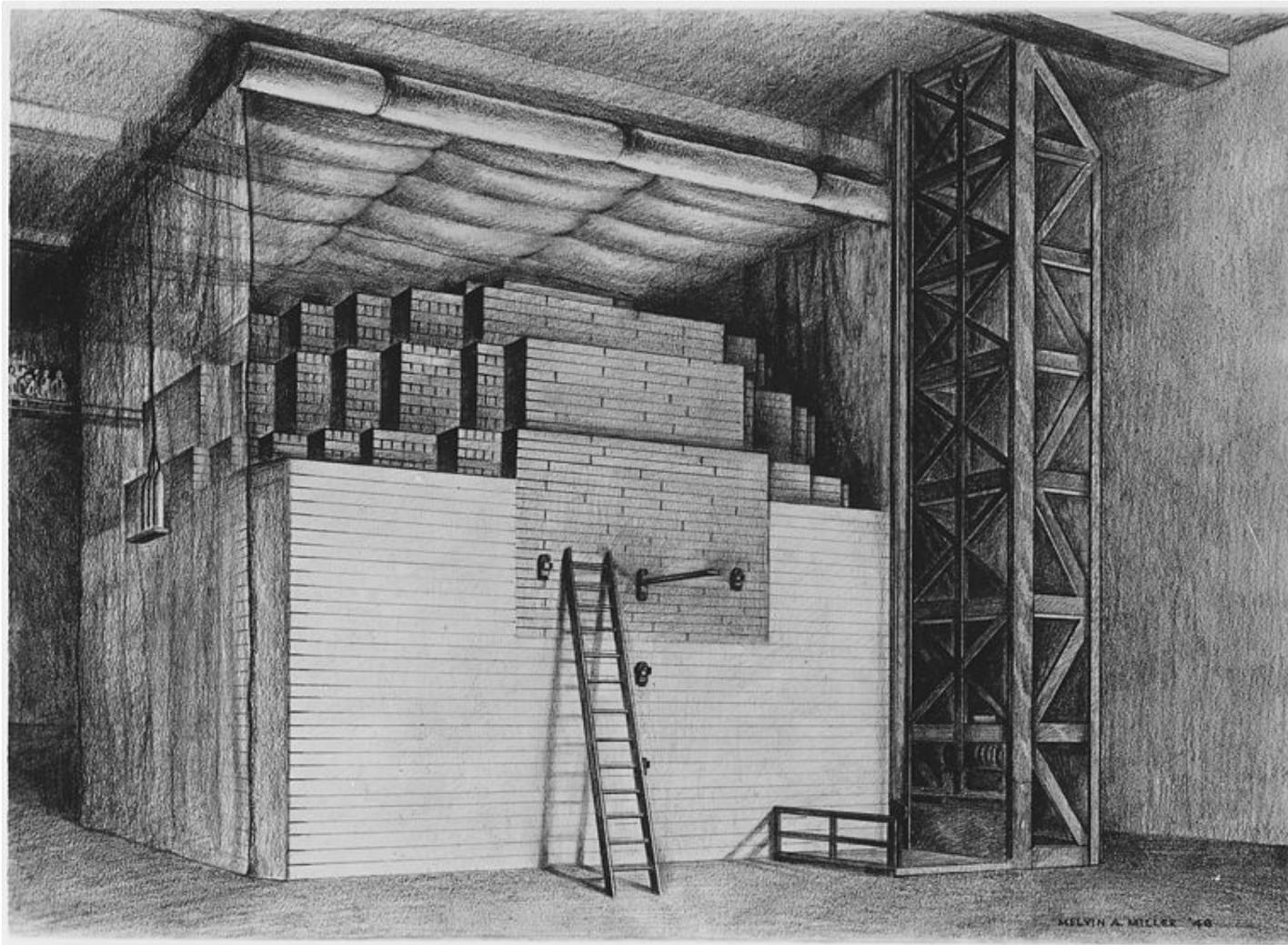
Величина  $T$  лежит в пределах  $10^{-4}$ - $10^{-5}$  с для медленных реакций и  $10^{-7}$ - $10^{-8}$  с для быстрых. Видно, что даже в самом благоприятном для управления случае ( $T=10^{-4}$  с) количество нейтронов возрастет в 100 раз при  $k-1 = 10^{-3}$  за 0.46 с.

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

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

# ЯДЕРНЫЕ РЕАКТОРЫ

# Чикагская Поленница – первый ядерный реактор, созданный человеком



Энрико Ферми

стадион  
Университета  
Чикаго

2 декабря 1942 г.

# Обнинск 1954

Активная зона Диаметр = 1.5 м    Высота = 1.7 м

Графитовый замедлитель

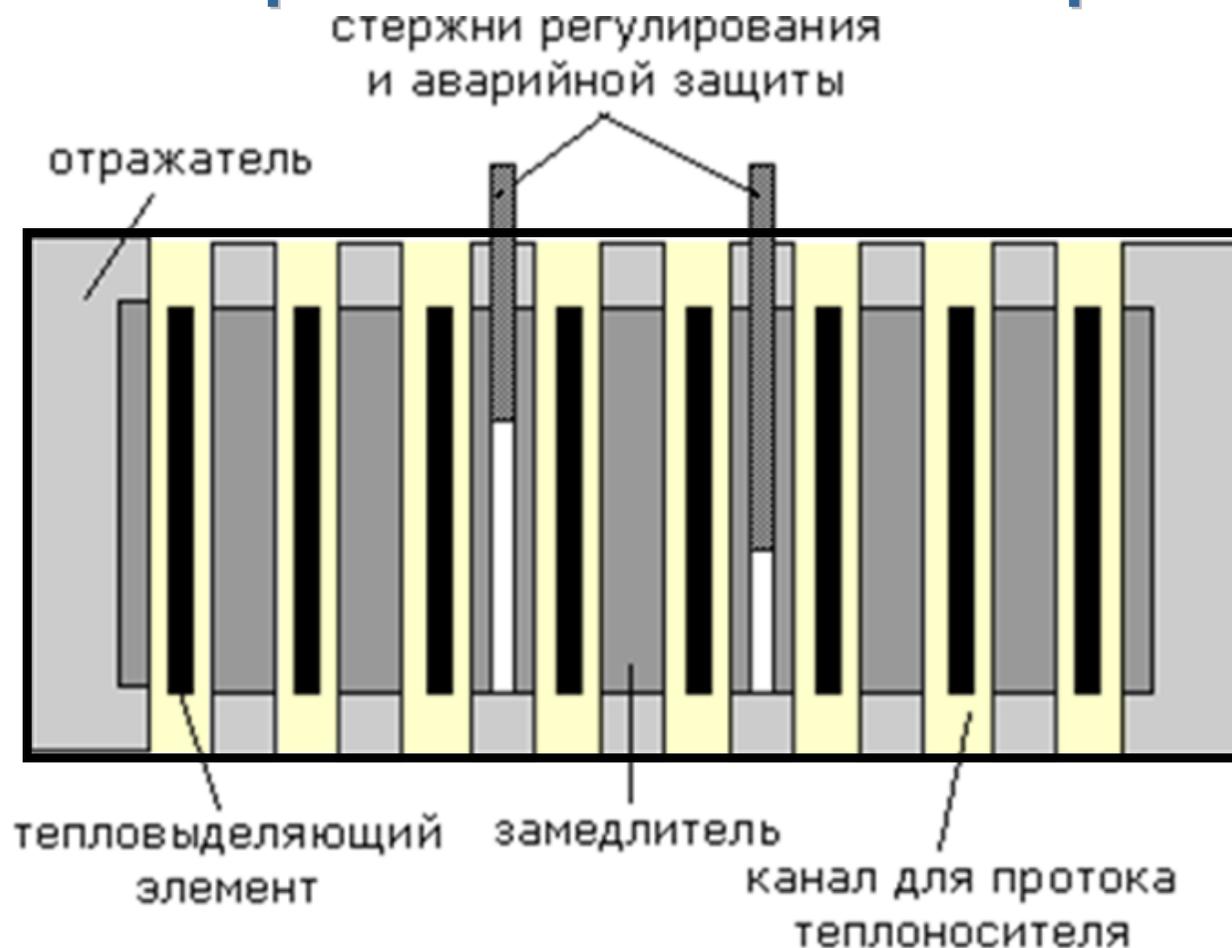
Горючее 130 твелов 550 кг обогащенного  $^{235}\text{U}$  - 5%

Мощность реактора 5 МВт



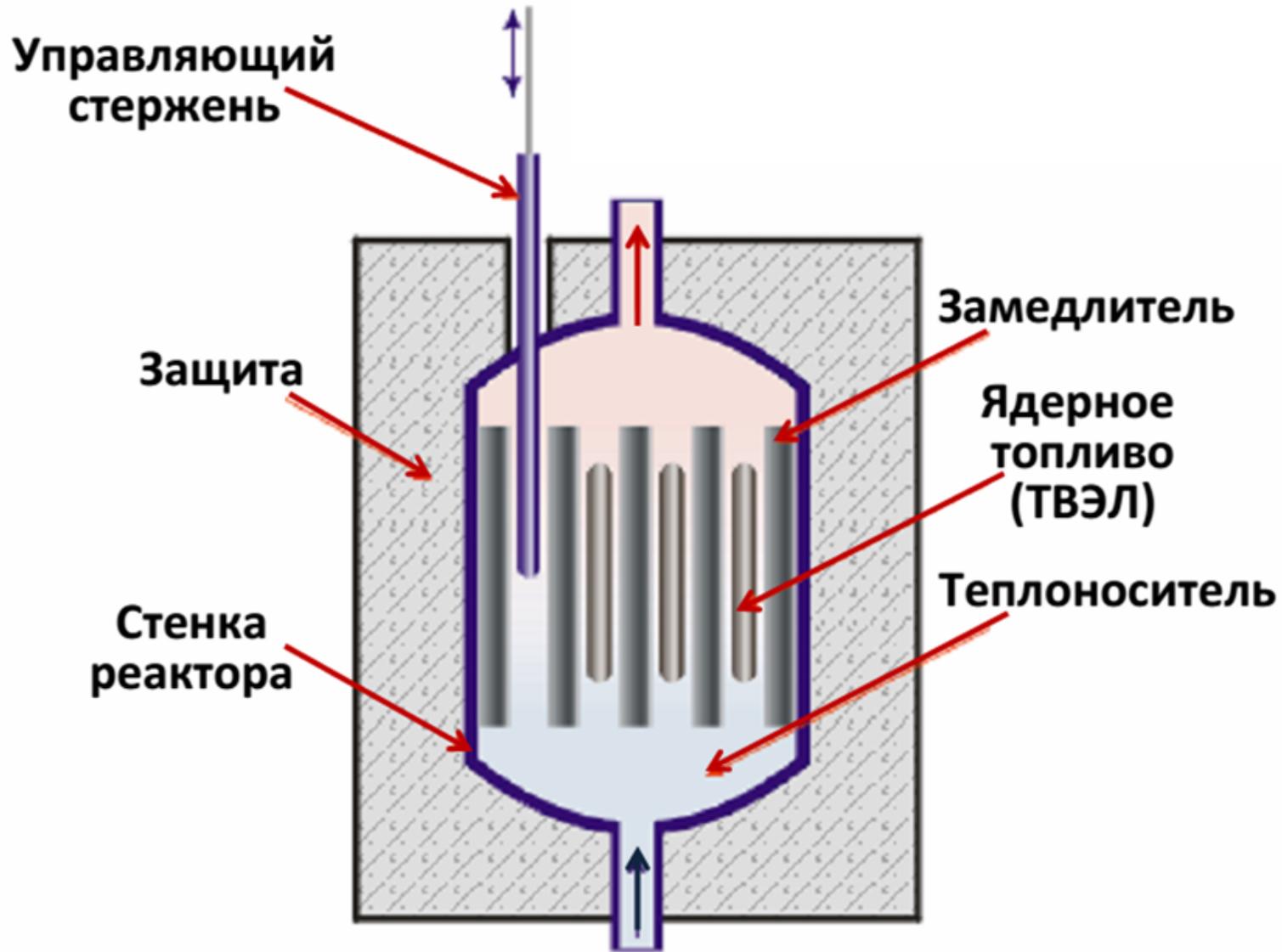
$$1.5 \cdot 10^{17} \frac{\text{делений}}{\text{с}}$$

# Схема гетерогенного теплового реактора



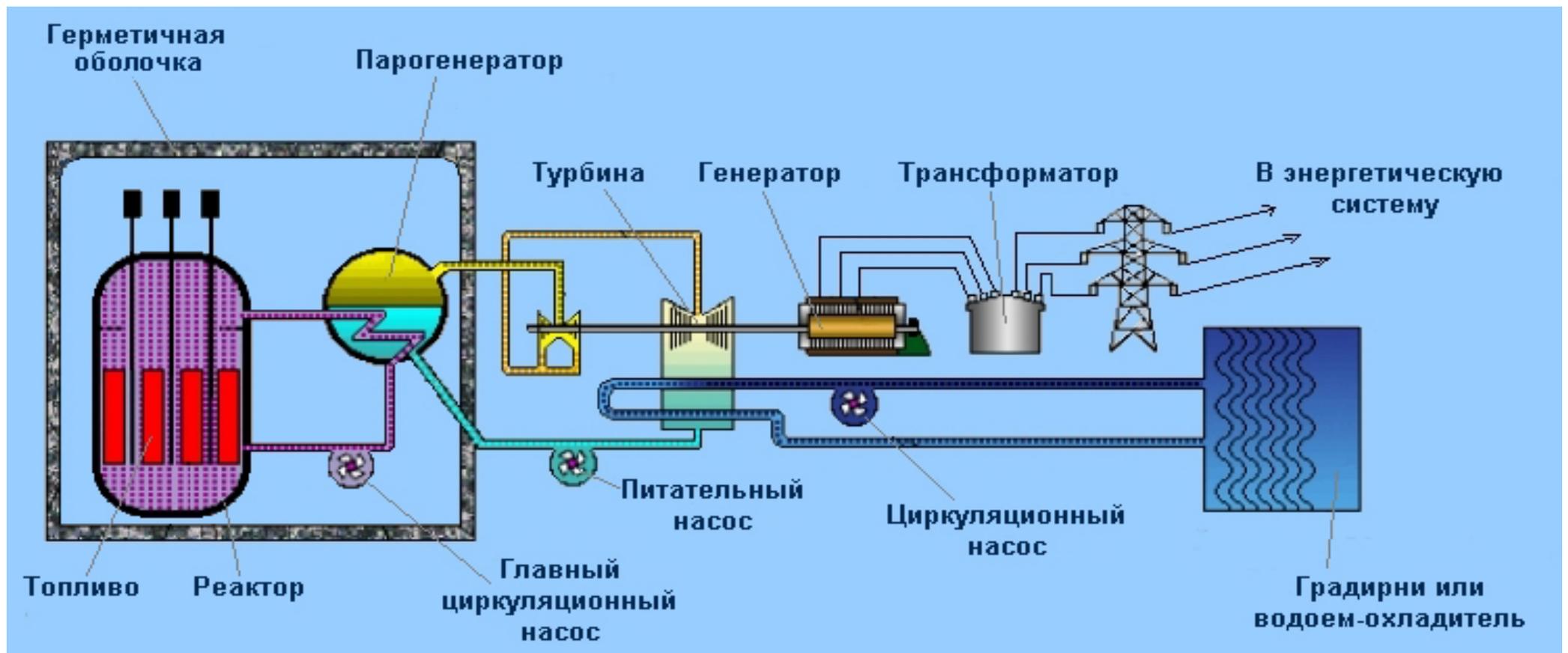
Основной частью реактора является активная зона, в которой происходит реакция деления и выделяется энергия. В гетерогенных тепловых реакторах активная зона состоит из замедлителя, в котором помещаются кассеты, в которых находится делящееся вещество. Т.к. энергия выделяется в этих кассетах, их обычно называют твелями — тепловыделяющими элементами. Расстояние между твелями 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

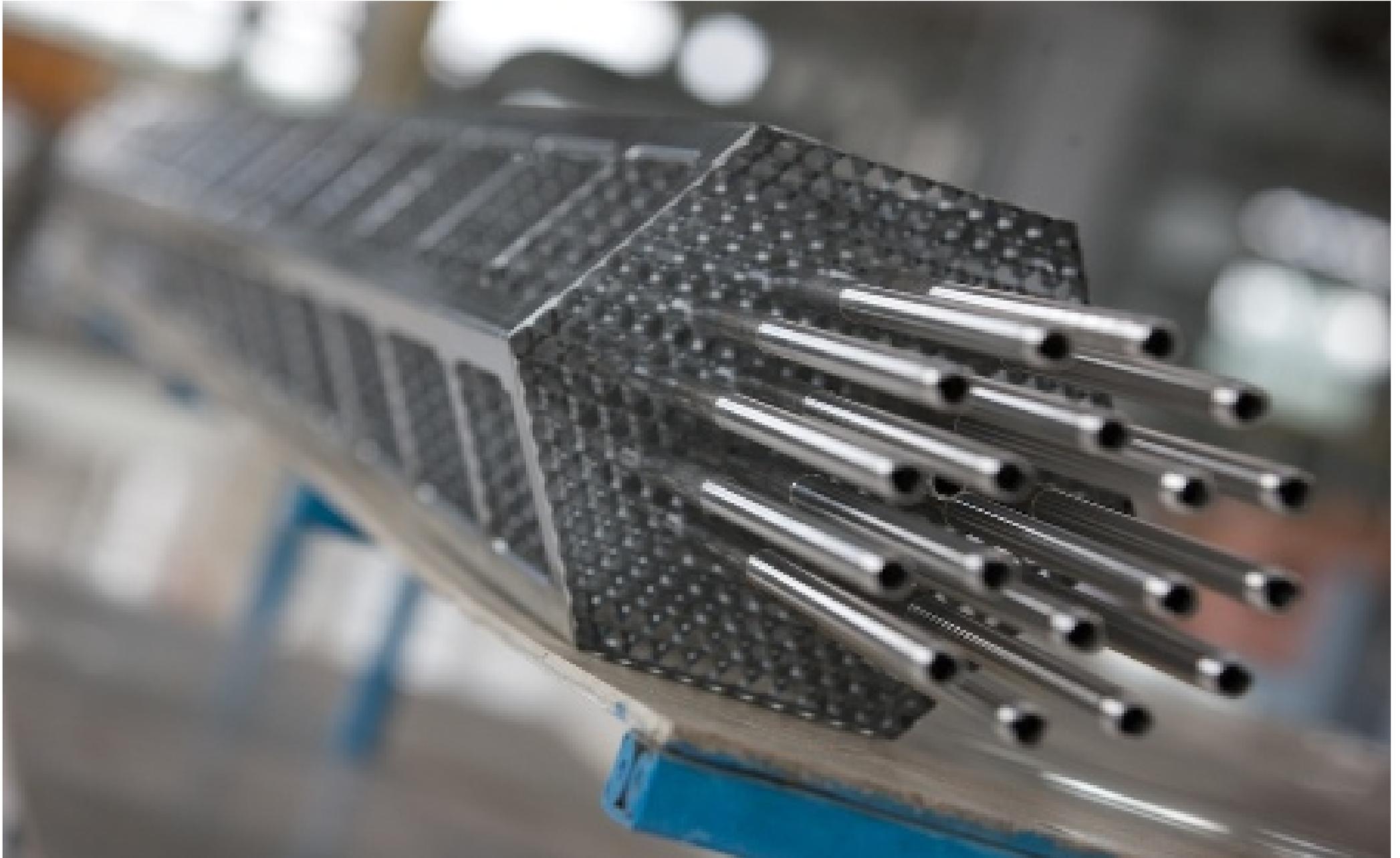
Деление 1 г урана-235 в течение суток даёт мощность в 1 МВт



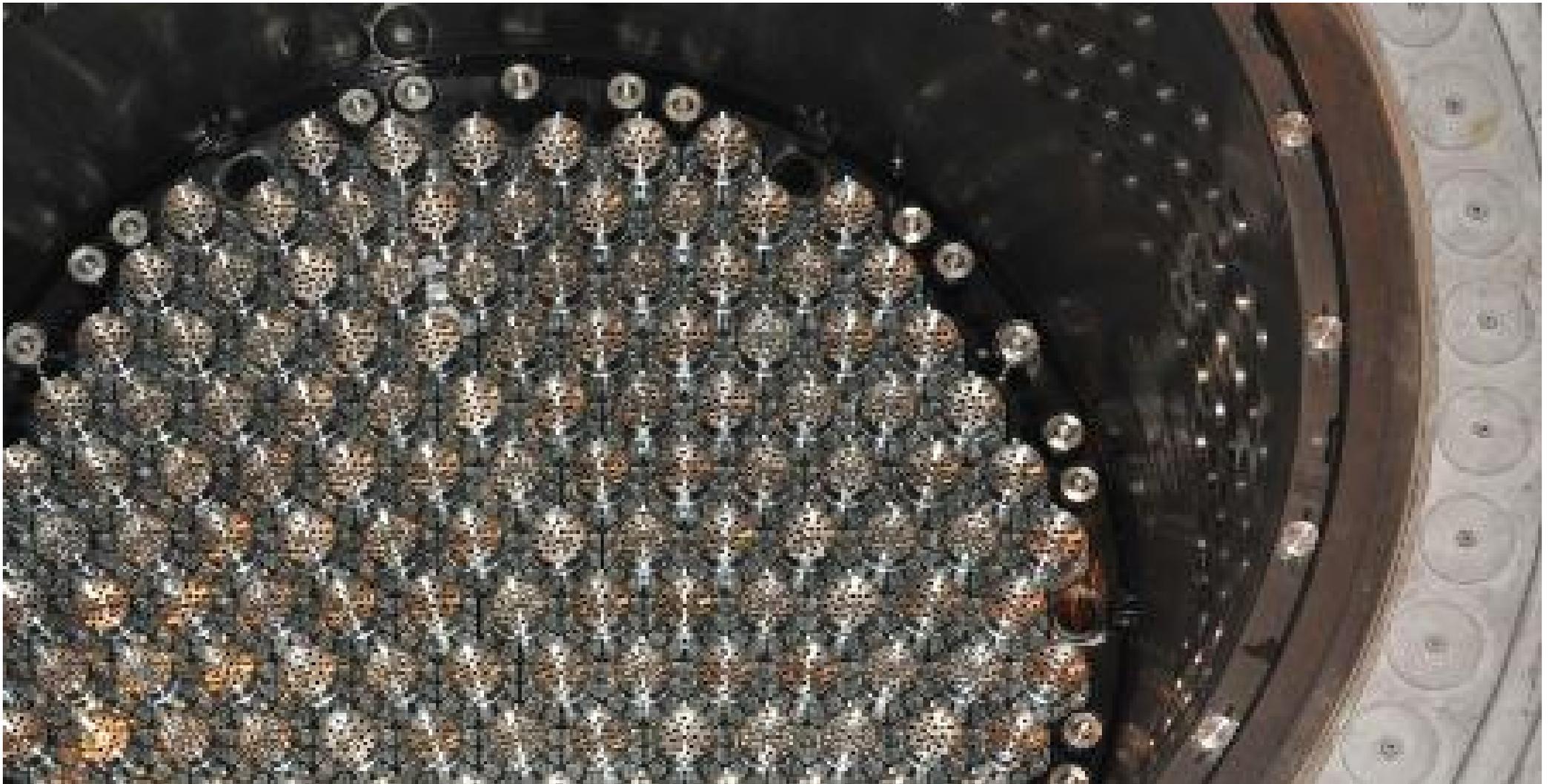
# Ядерное топливо



# Сборка ТВЭЛ



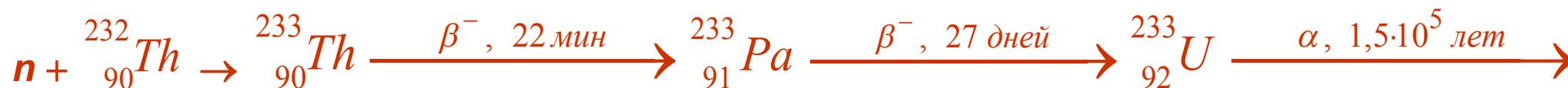
# Сборки в корпусе реактора



# Корпус реактора ВВЭР



# Воспроизводство ядерного горючего

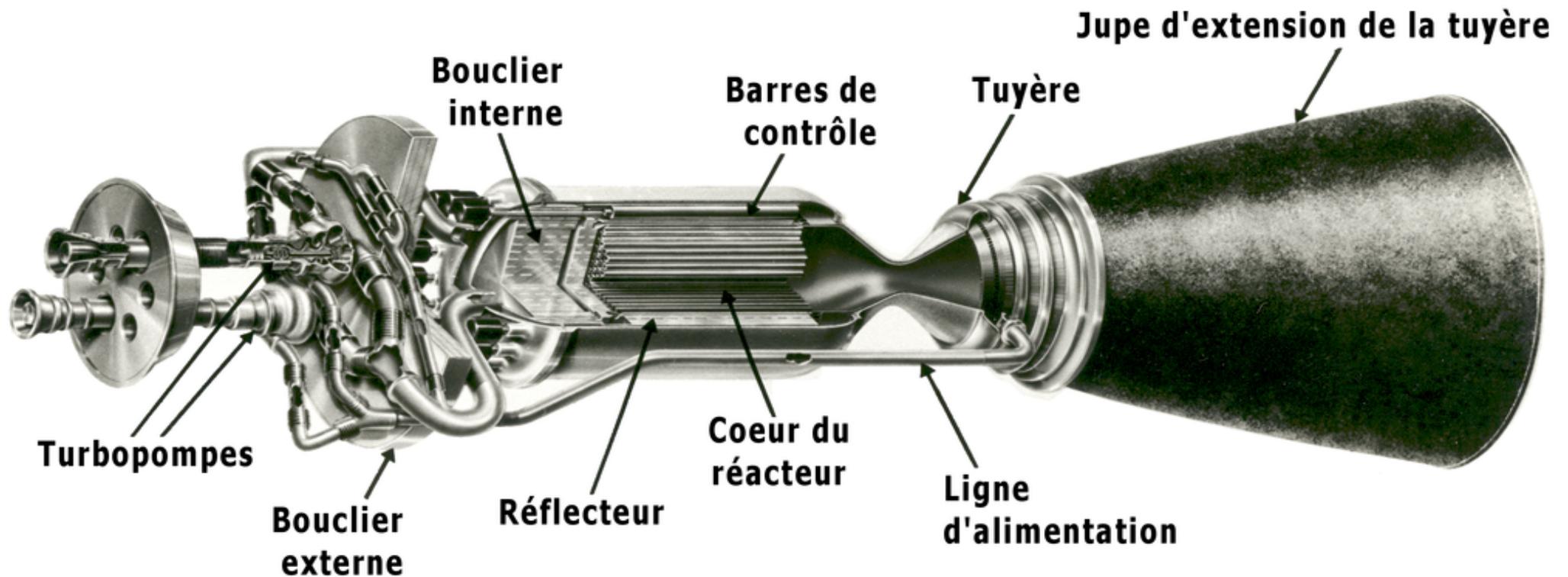


Эти две реакции открывают возможность **воспроизводства ядерного горючего** в процессе цепной реакции.

# ЯДЕРНЫЕ ДВИГАТЕЛИ

# Ядерный реактивный двигатель

## Схема ЯРД



# Двигатель РД-0410

Музей КБ химавтоматики, г.  
Воронеж

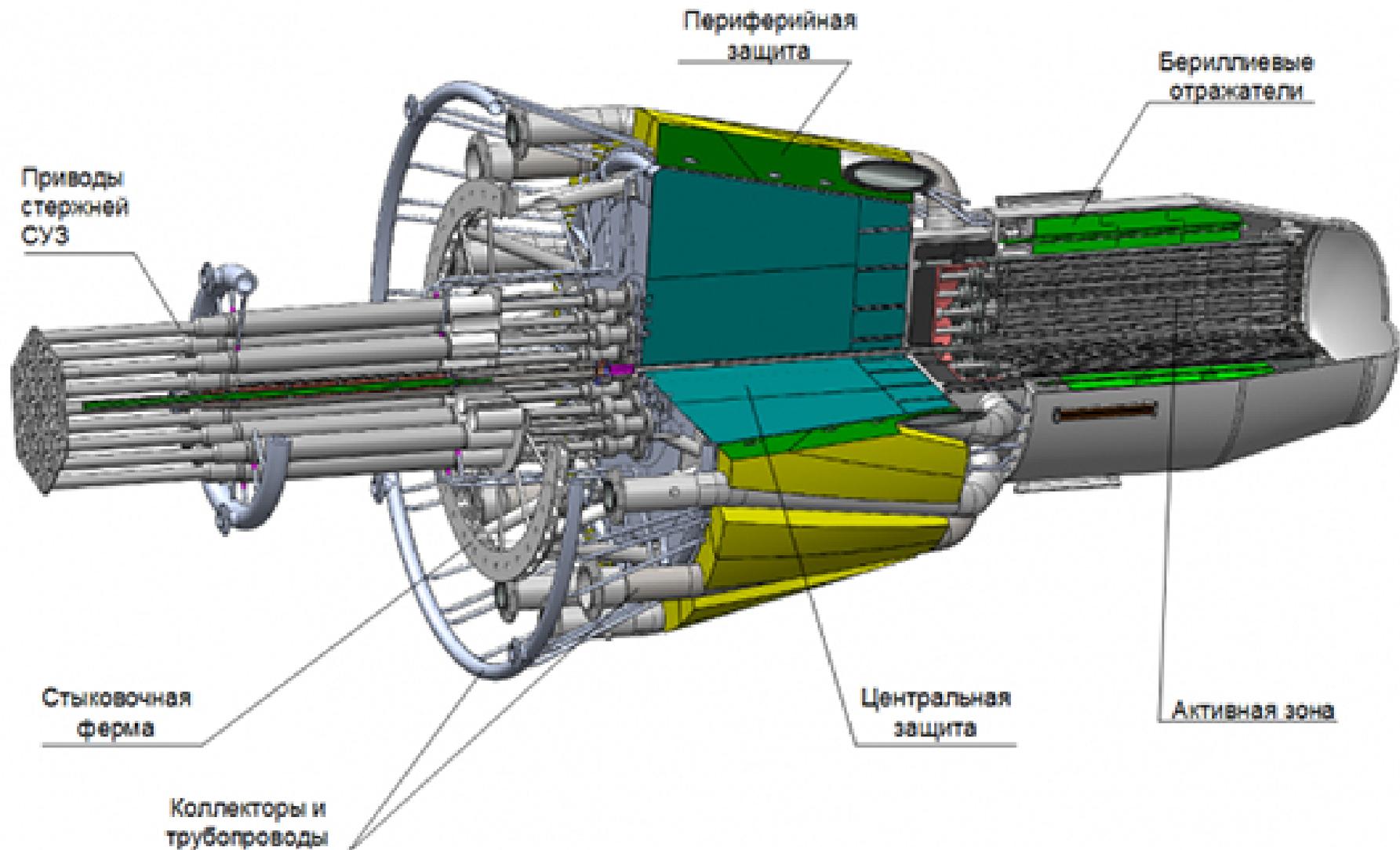
Разработка и испытания  
проводились в 1965-1985 гг.



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