

# Мир 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  $^{235}\text{U}$ .

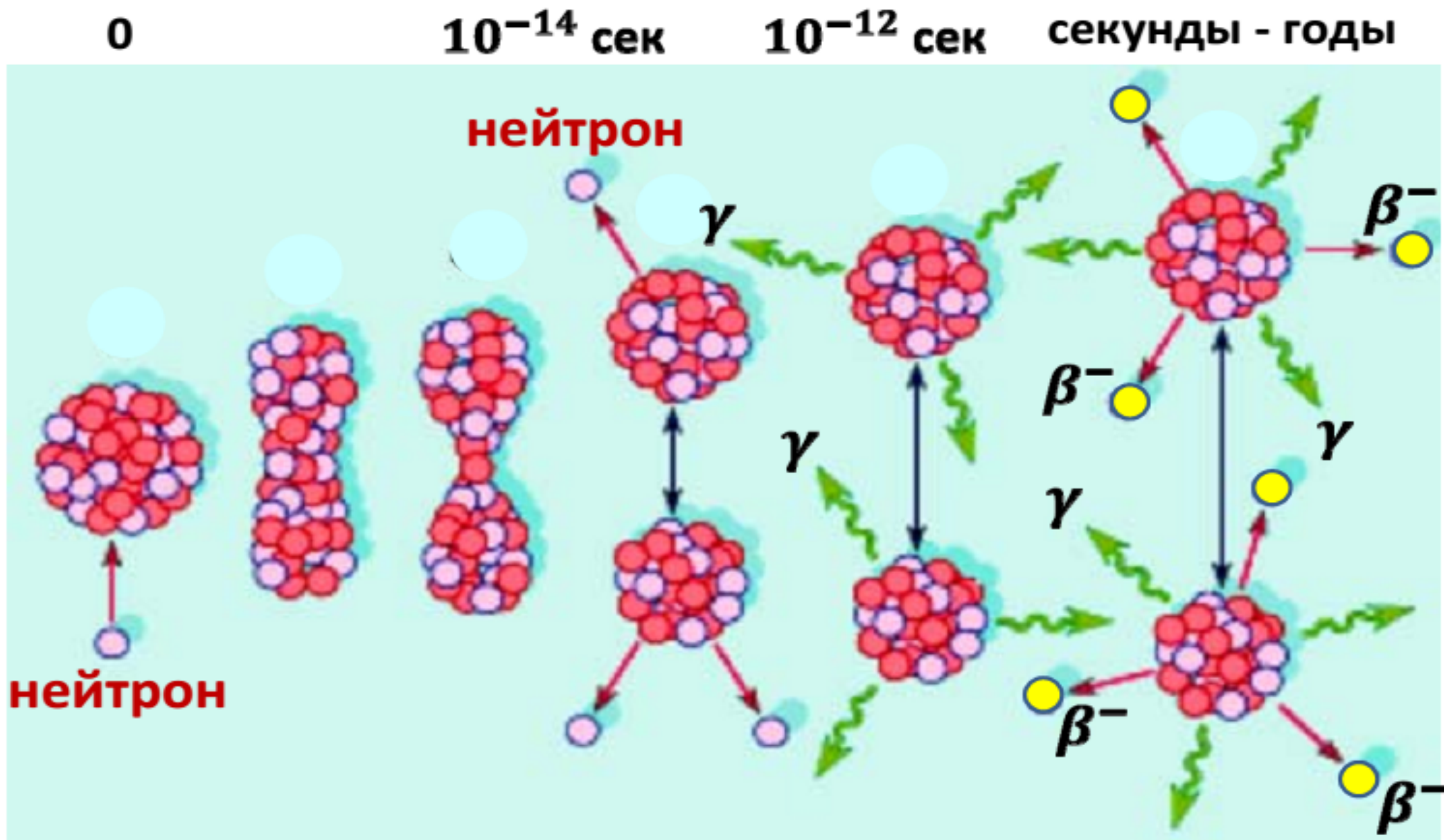
**1942 г. — Э. Ферми.** Первый ядерный реактор.

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

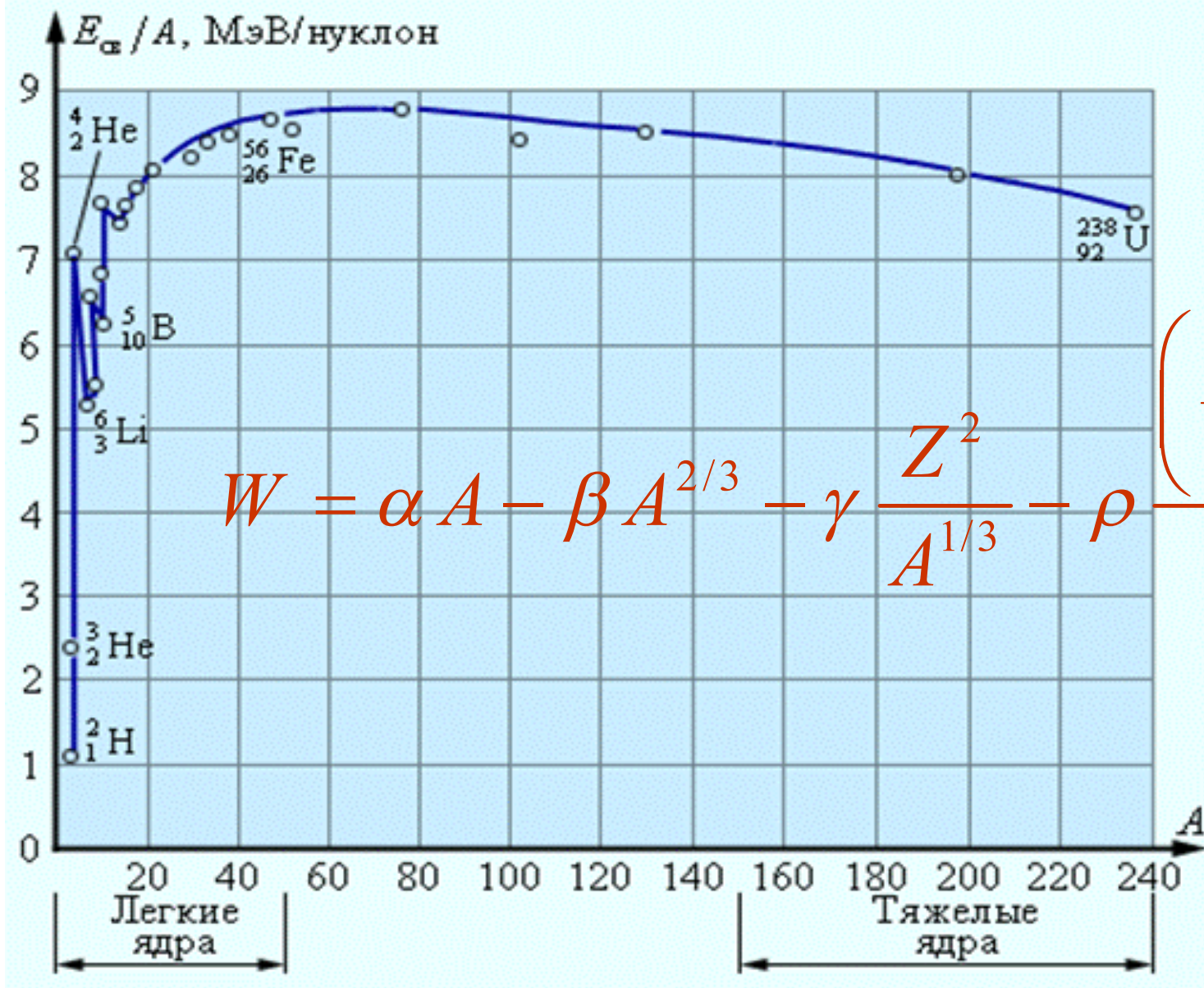
**1945 г. —** Ядерный взрыв. Хиросима.

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

# Деление ядра



# Удельная энергия связи ядра

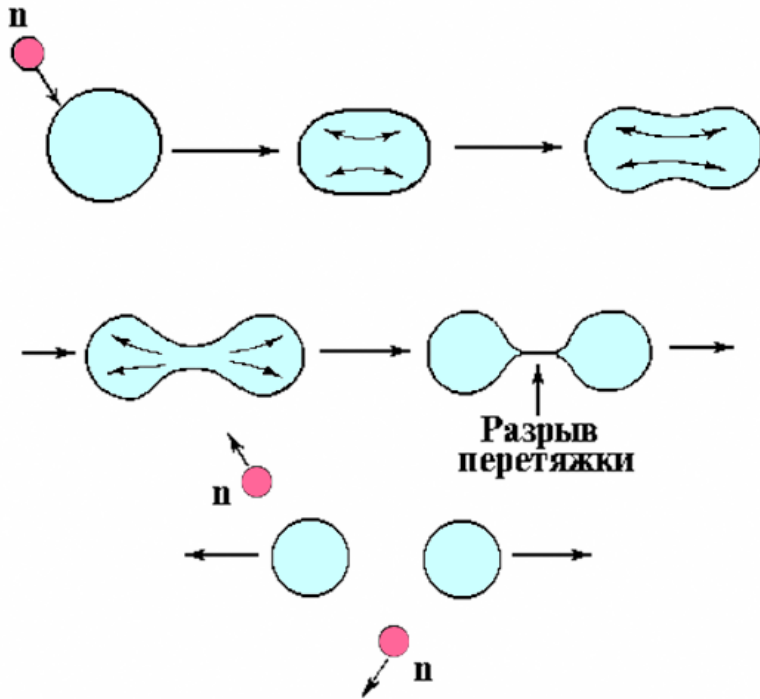


$$W = \alpha A - \beta A^{2/3} - \gamma \frac{Z^2}{A^{1/3}} - \rho \frac{\left(\frac{A}{2} - Z\right)^2}{A} + \frac{\delta}{A^{3/4}}$$

$$\varepsilon = W / A$$

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

## Механизм деления



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

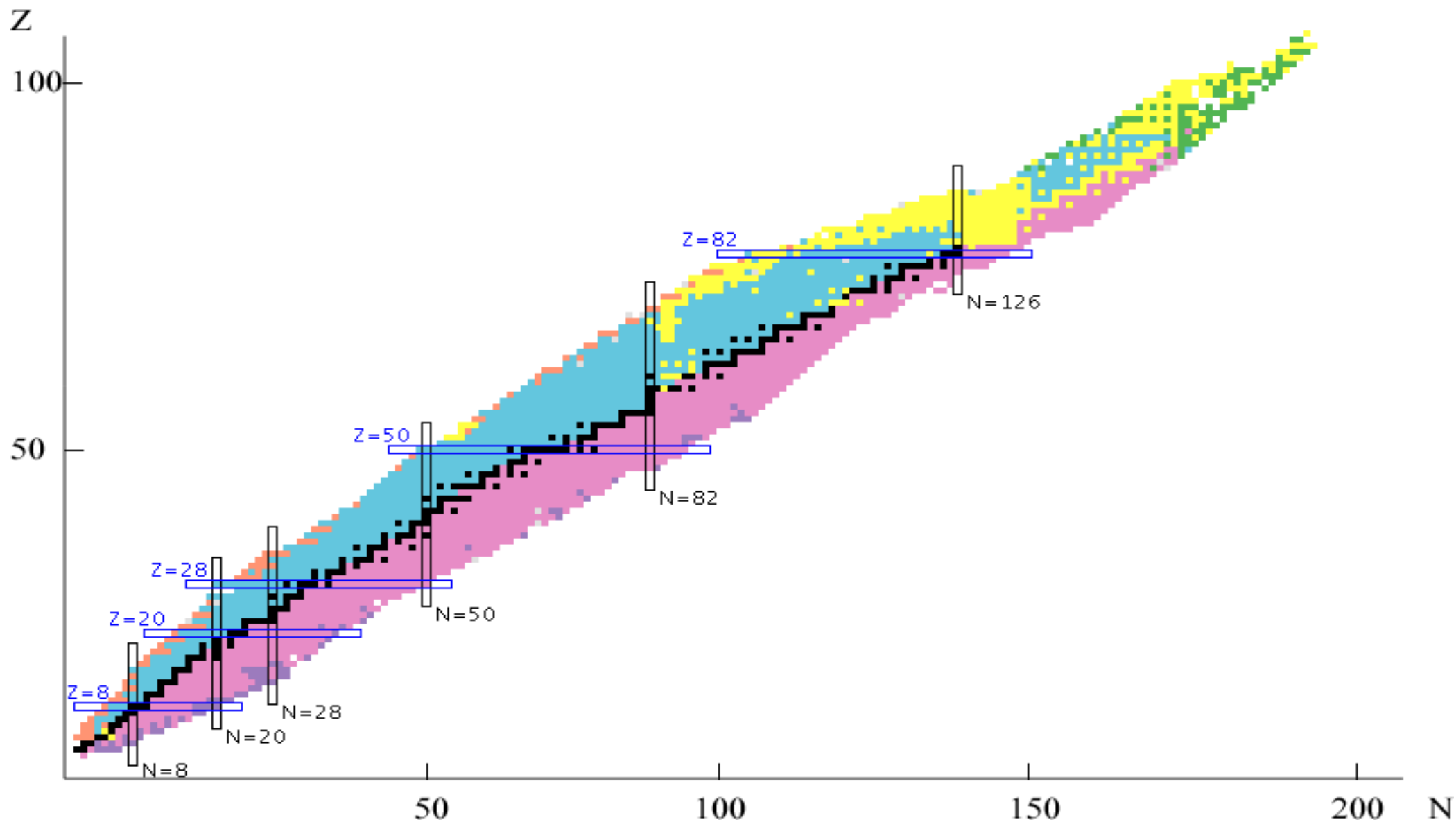
Изменение энергии ядра в процессе деления определяется изменением суммы поверхностной и кулоновской энергий  $E_{пов} + E_{кул}$  начального ядра.

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

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

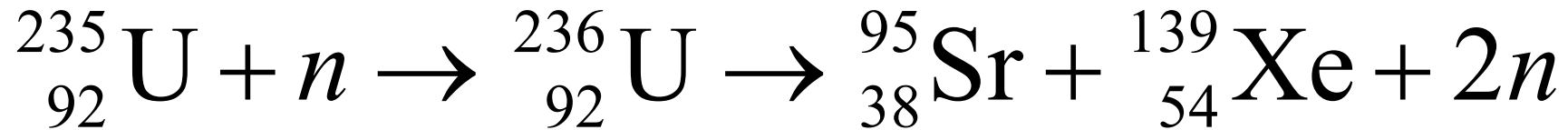
$$\tilde{E}_{кул} = E_{кул} \left(1 - \frac{1}{5} \varepsilon^2\right)$$

# N-Z диаграмма атомных ядер



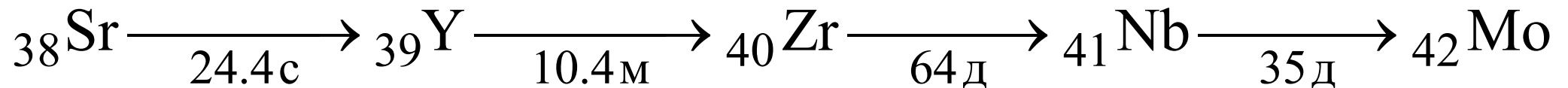


# Радиоактивность осколков деления

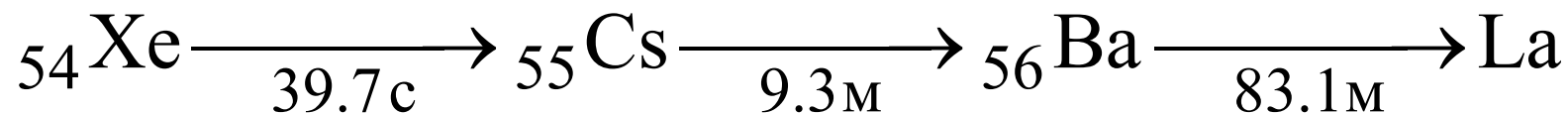


$$\frac{N}{Z} = 1 + 0.015A^{2/3}$$

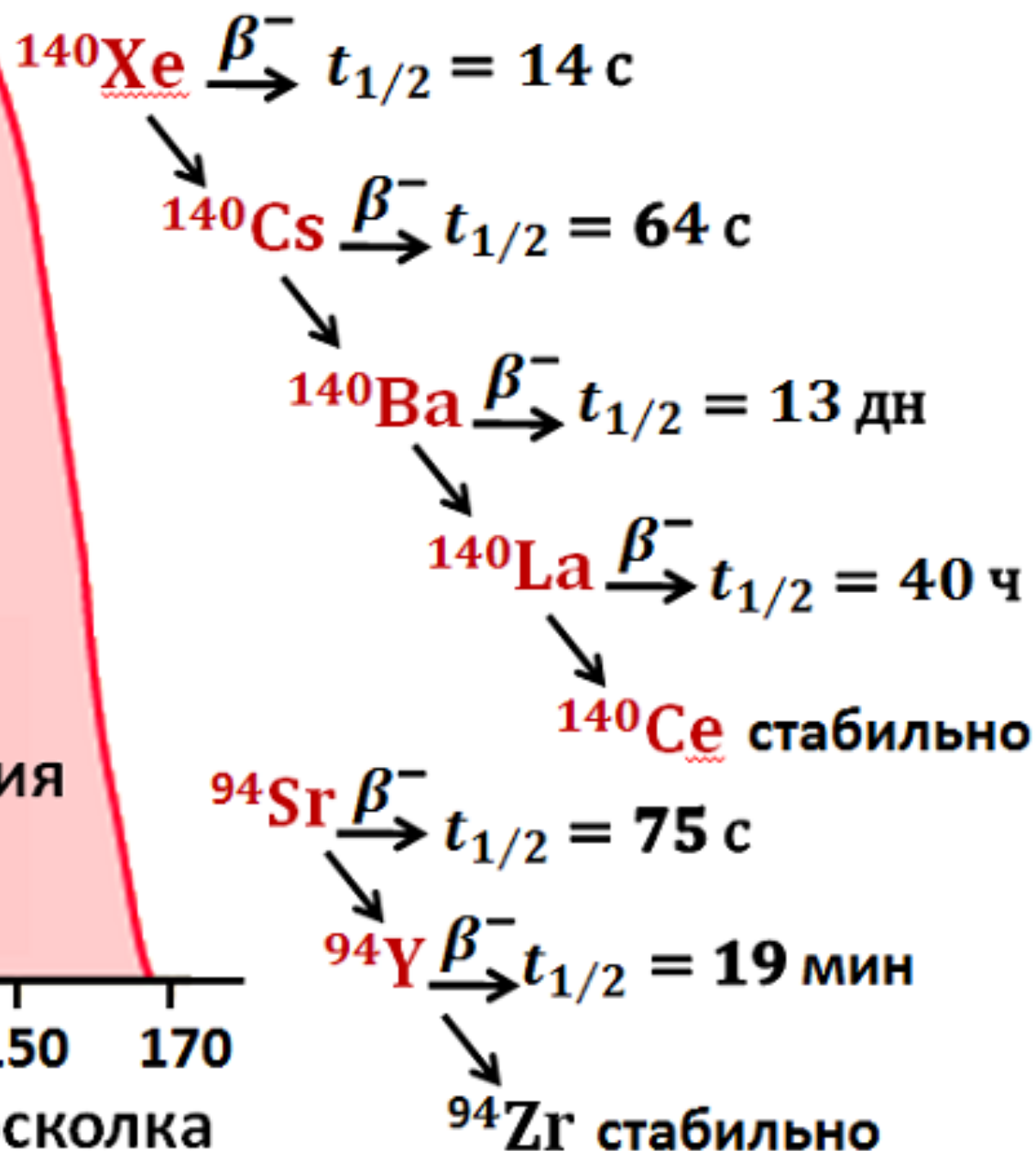
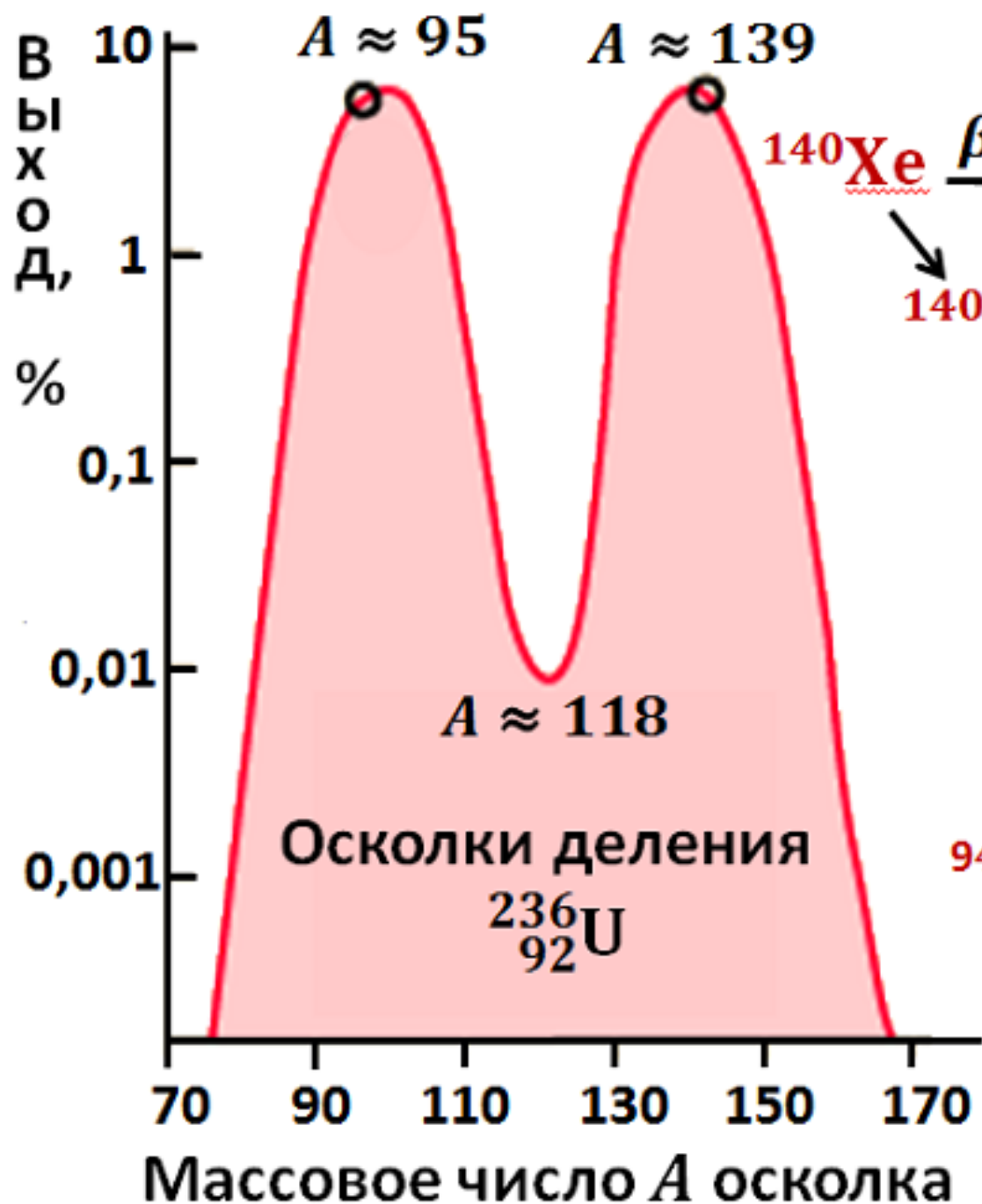
$$A = 95$$



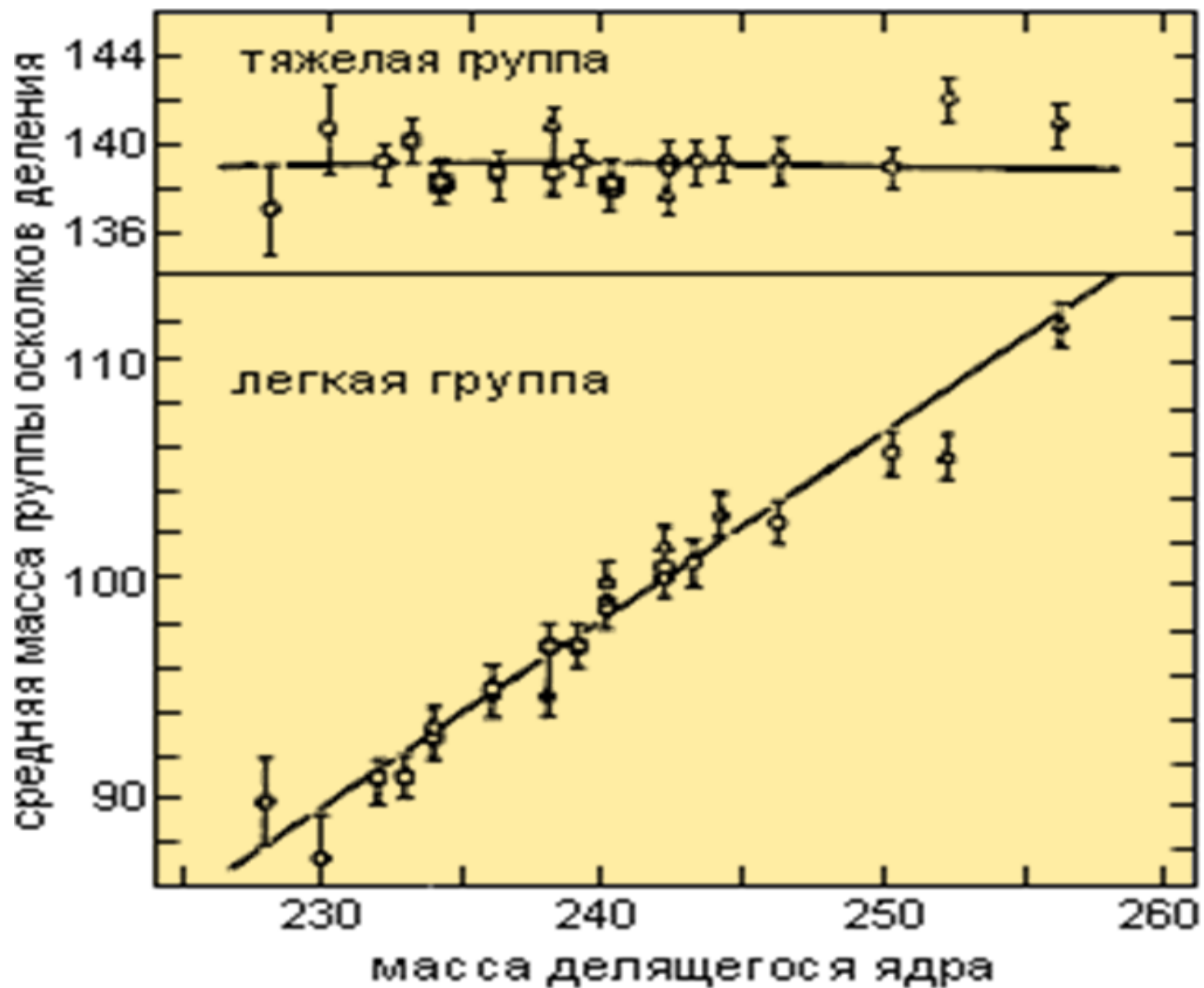
$$A = 139$$







## 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

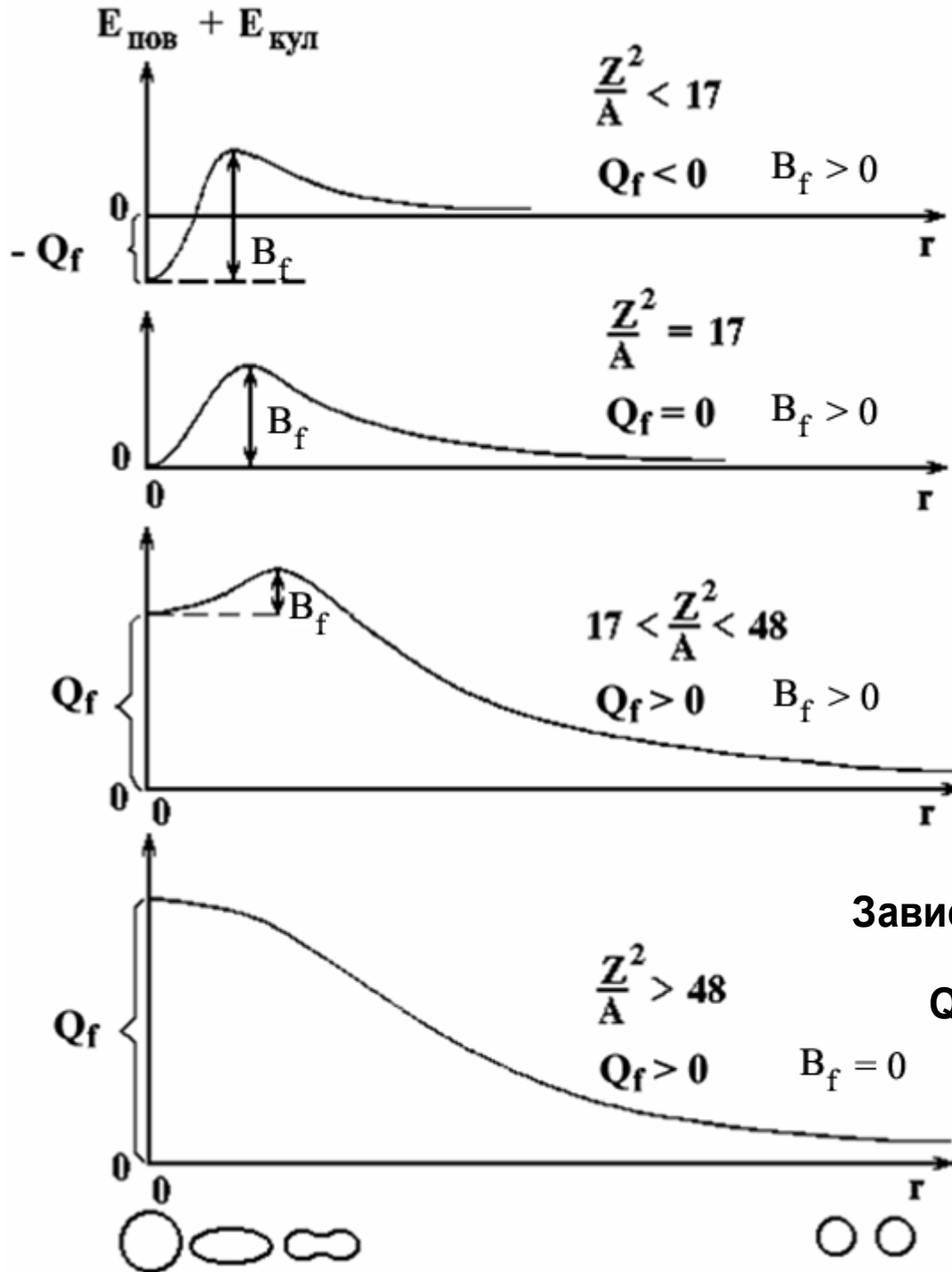
$$\begin{aligned} (0,37 \cdot \beta \frac{Z^2}{A^{1/3}} - 0,26 \cdot \gamma A^{2/3}) &> 0, \\ \frac{Z^2}{A} &> \frac{0,26 \beta}{0,37 \gamma} = \frac{0,26}{0,37} \cdot \frac{17,2}{0,72} \approx 17. \end{aligned}$$

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

$Z^2 / A = 17$  для ядер с  $A > 90$ .

Деление энергетически выгодно для тяжелых ядер.

# Барьер деления



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

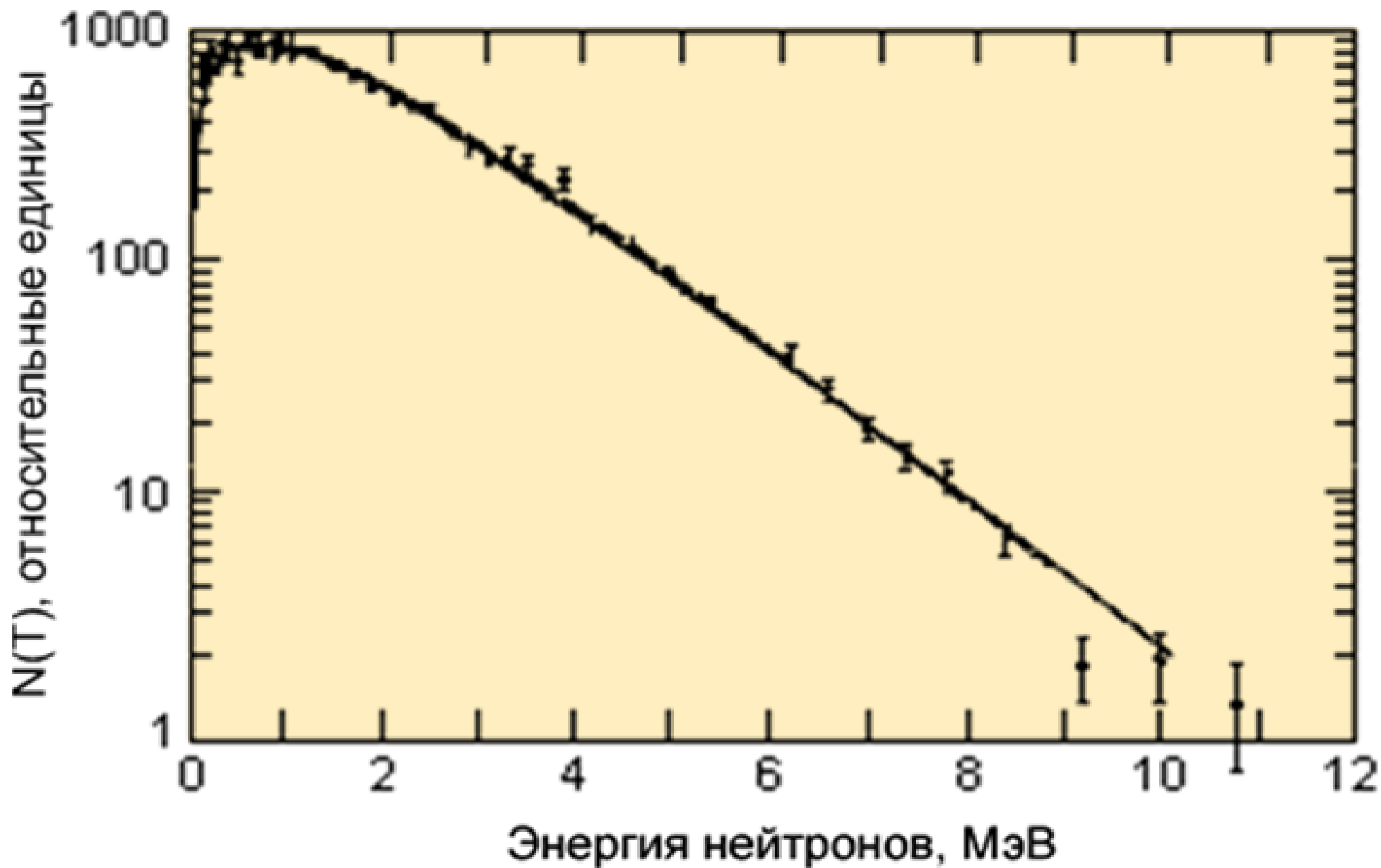
$^{235}\text{U}$       0,72%       $T_{1/2} = 7,0 \cdot 10^8$  лет,  $\alpha$

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

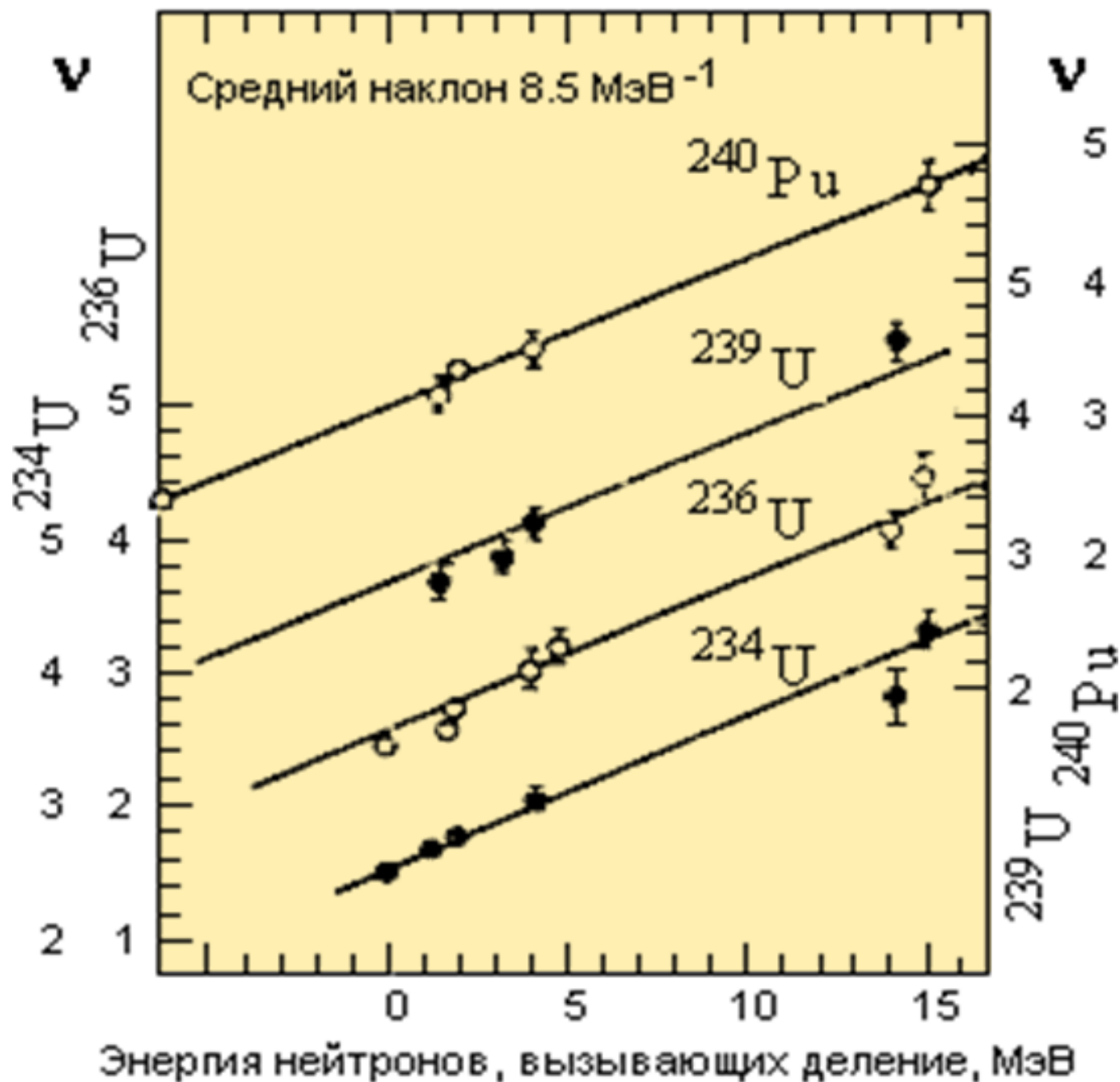
Энергия присоединения нейтрона	Барьер деления
$^{235}\text{U}$ 6.5 МэВ	$^{236}\text{U}$ 6.0 МэВ
$^{238}\text{U}$ 6.0 МэВ	$^{239}\text{U}$ 7.0 МэВ



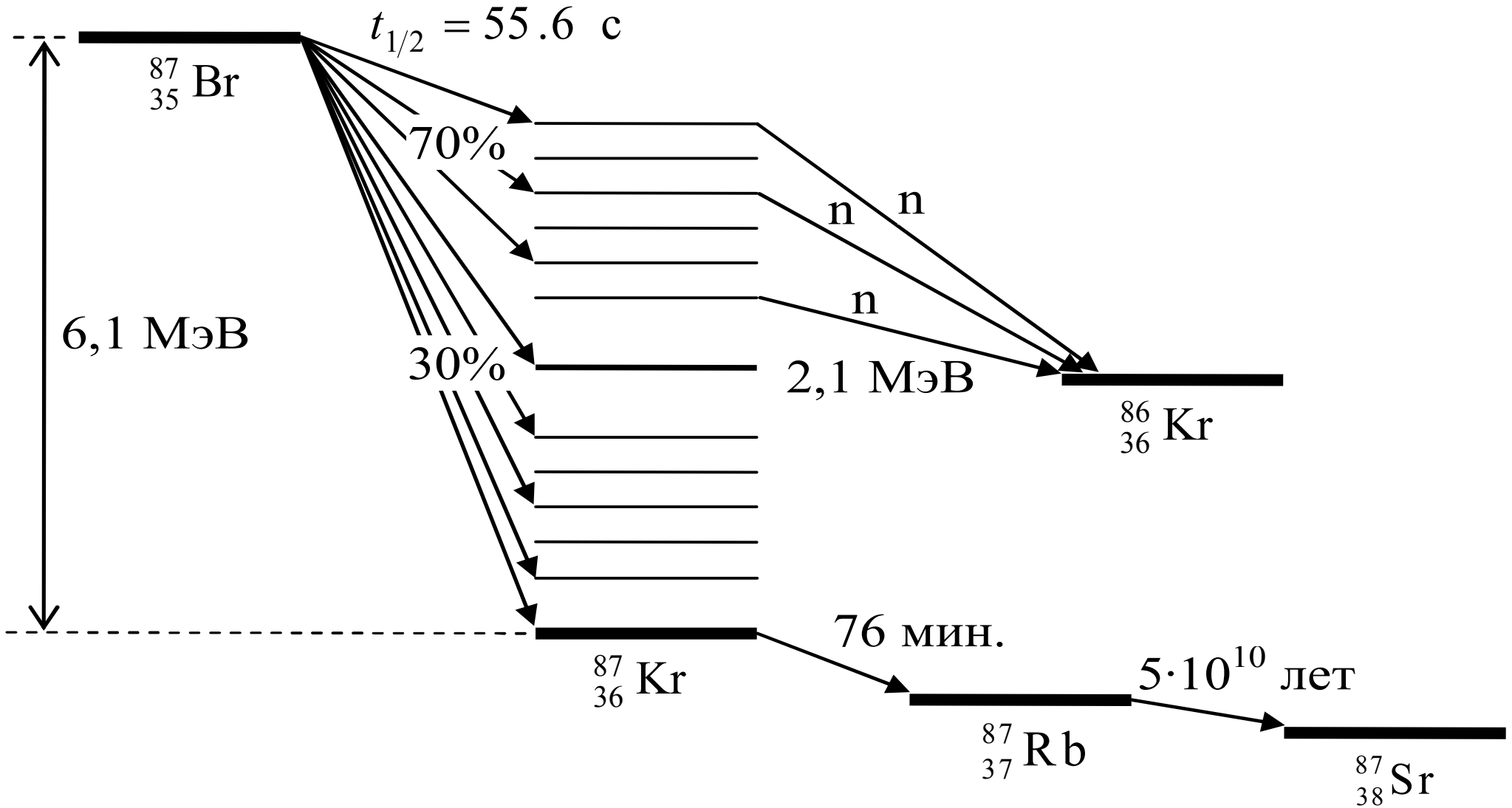
## Спектр нейтронов деления



# Число нейтронов деления



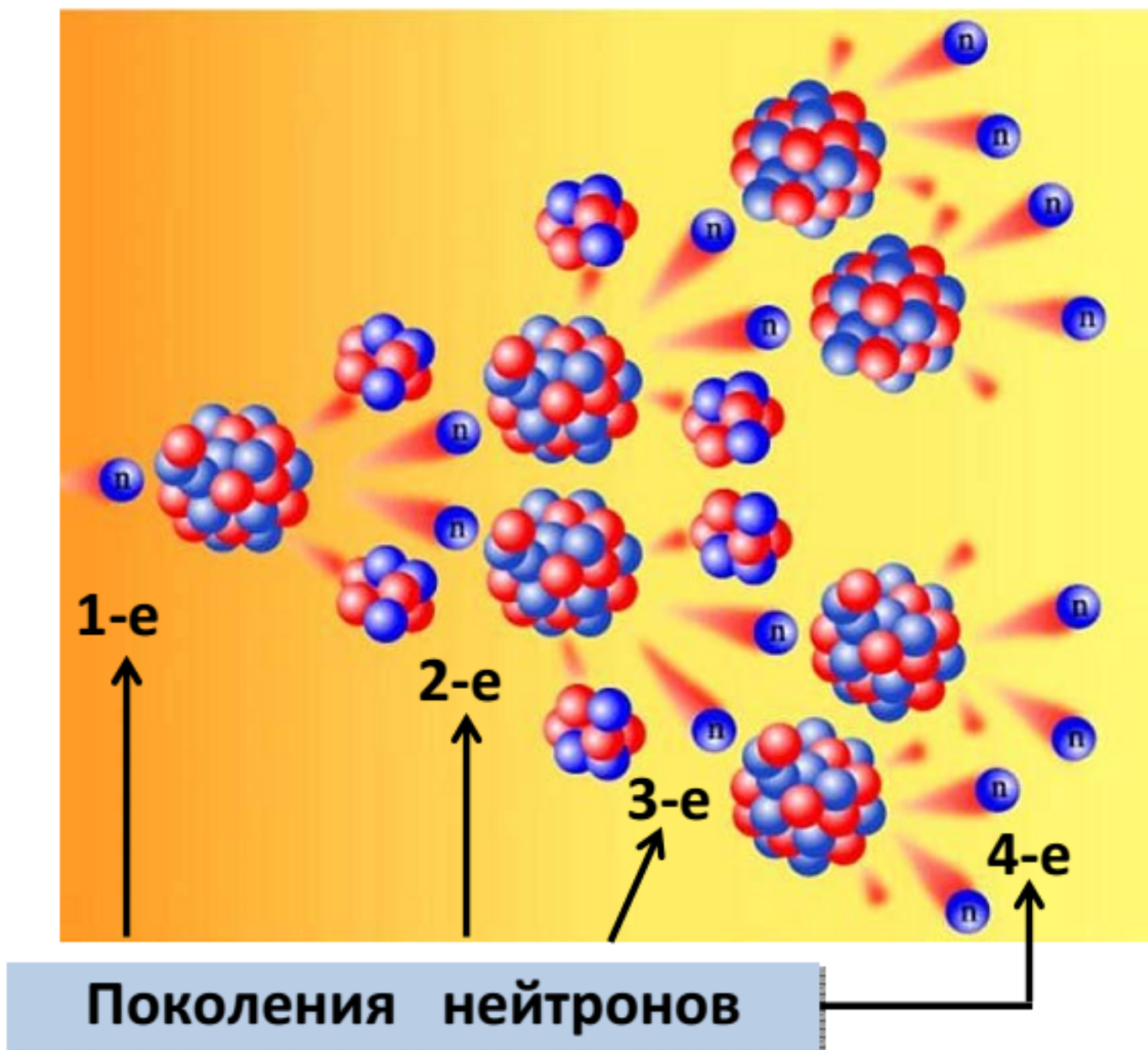
# Запаздывающие нейтроны



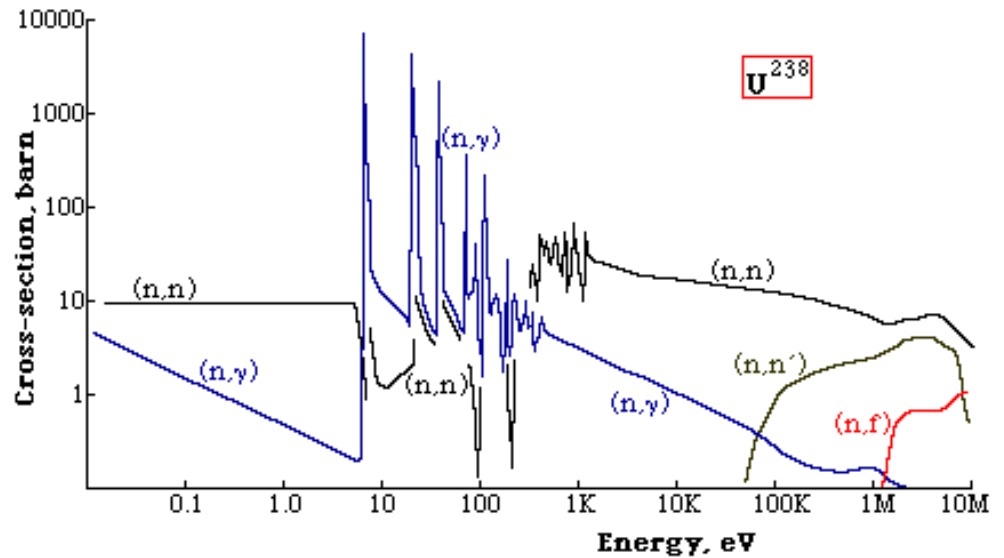
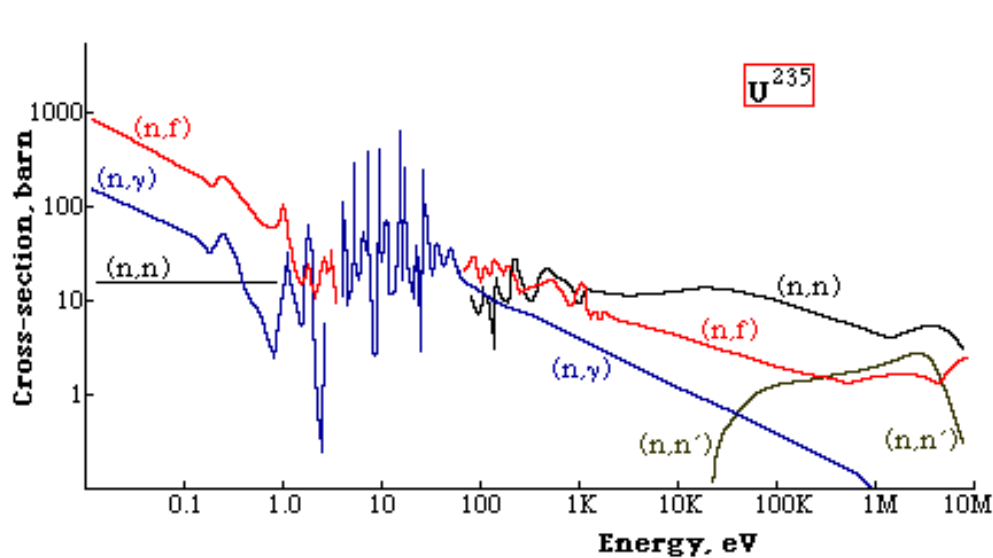
Запаздывающие нейтроны деления  $^{87}\text{Kr}$

# ЦЕПНАЯ РЕАКЦИЯ ДЕЛЕНИЯ

# Цепная реакция деления



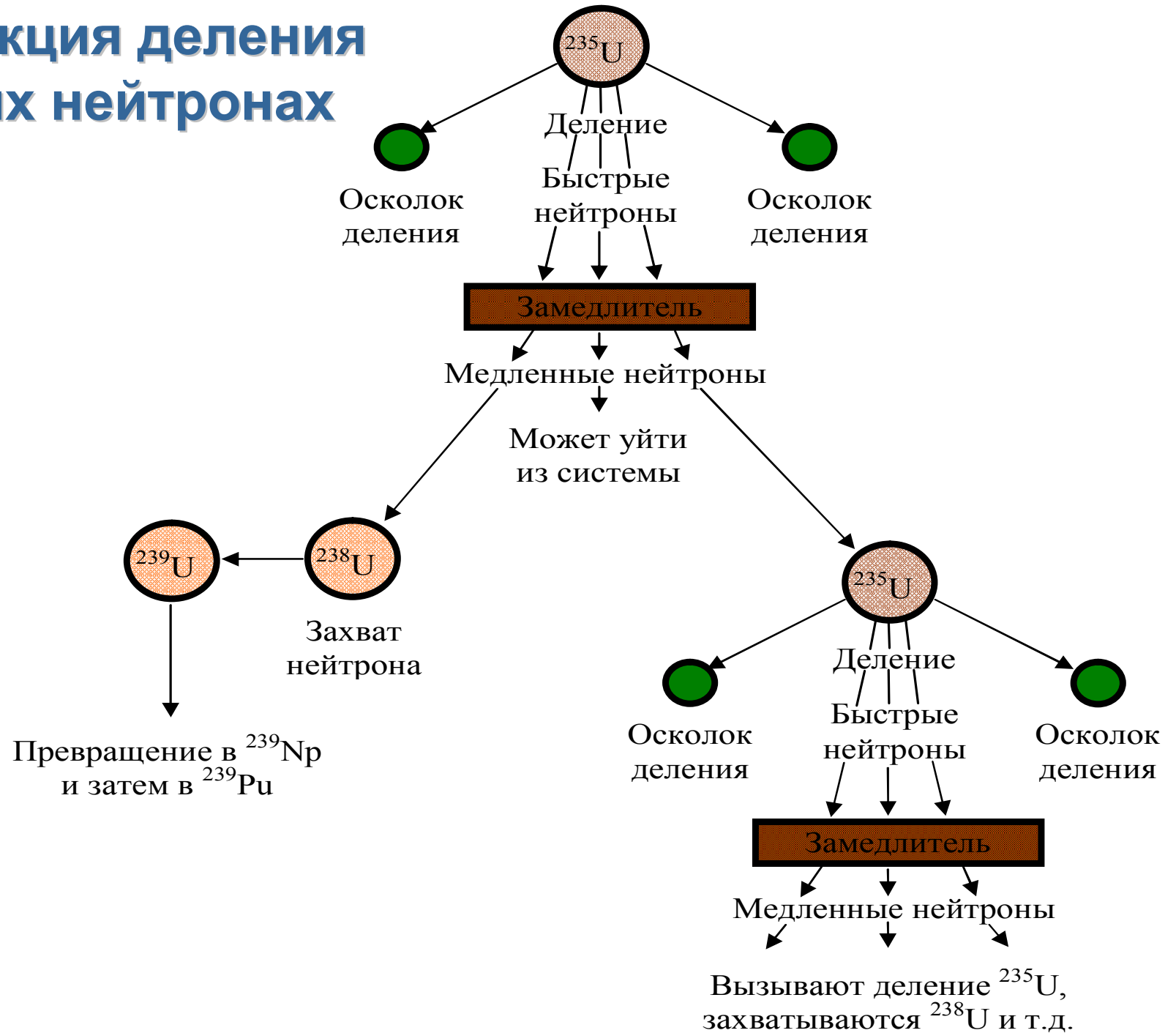
## Реакции (n,f), (n,γ), (n,n), (n,n') на <sup>235</sup>U, <sup>238</sup>U



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

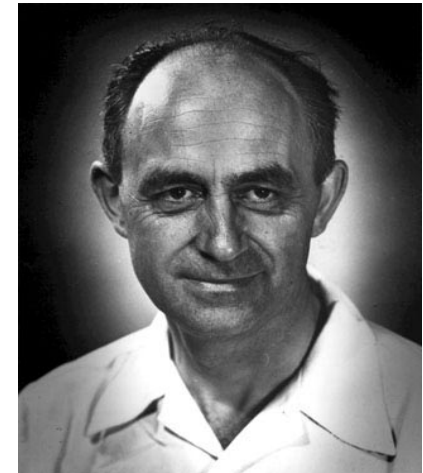
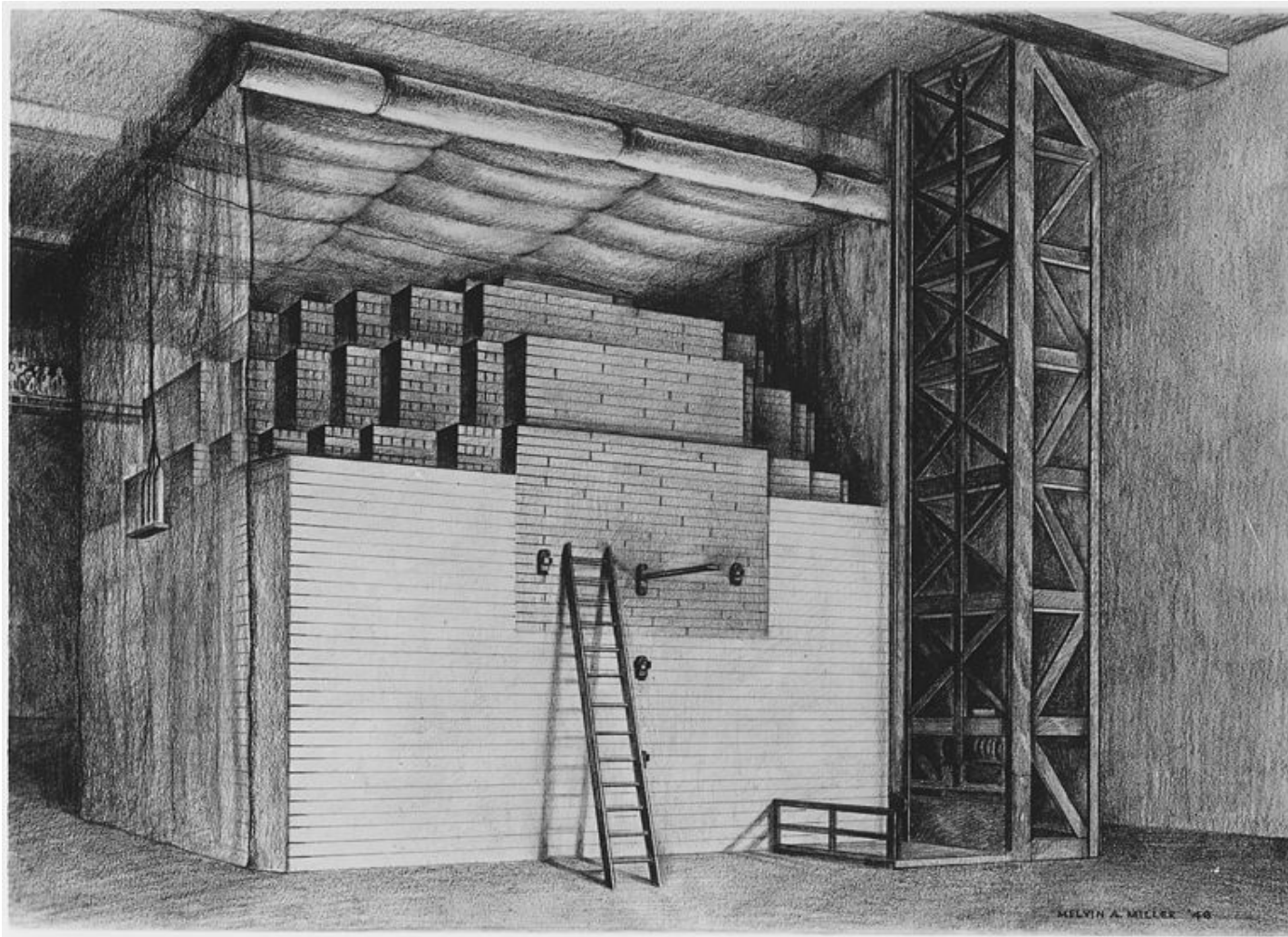
Величина  $T$  лежит в пределах  $10^{-4}$ - $10^{-5}$  с для медленных реакций и  $10^{-7}$ - $10^{-8}$  с для быстрых. Видно, что даже в самом благоприятном для управления случае ( $T=10^{-4}$  с) количество нейтронов возрастет в 100 раз при  $k-1 = 10^{-3}$  за 0.46 с.

**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

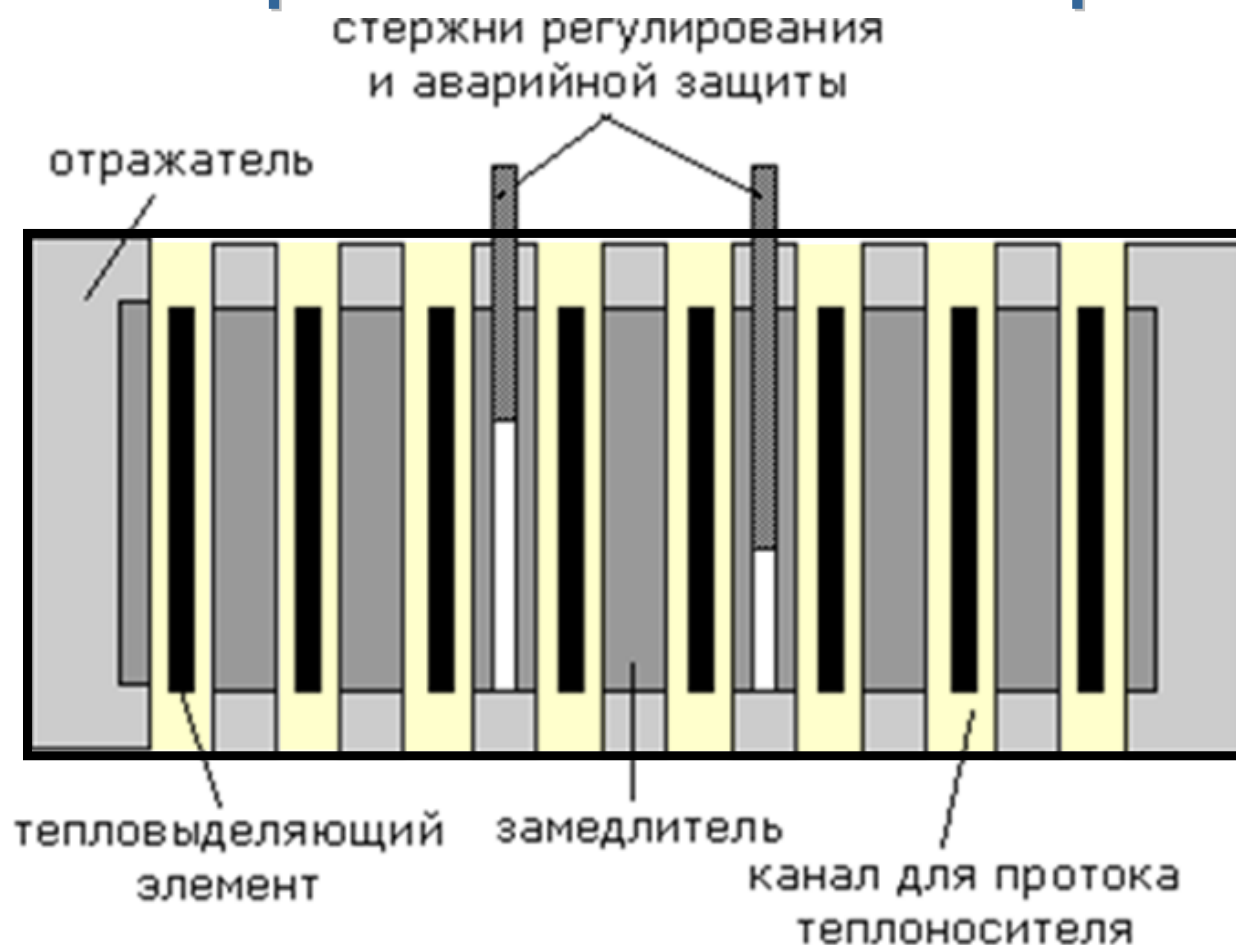
Горючее 130 твелов 550 кг обогащенного  $^{235}\text{U}$  - 5%

Мощность реактора 5 МВт



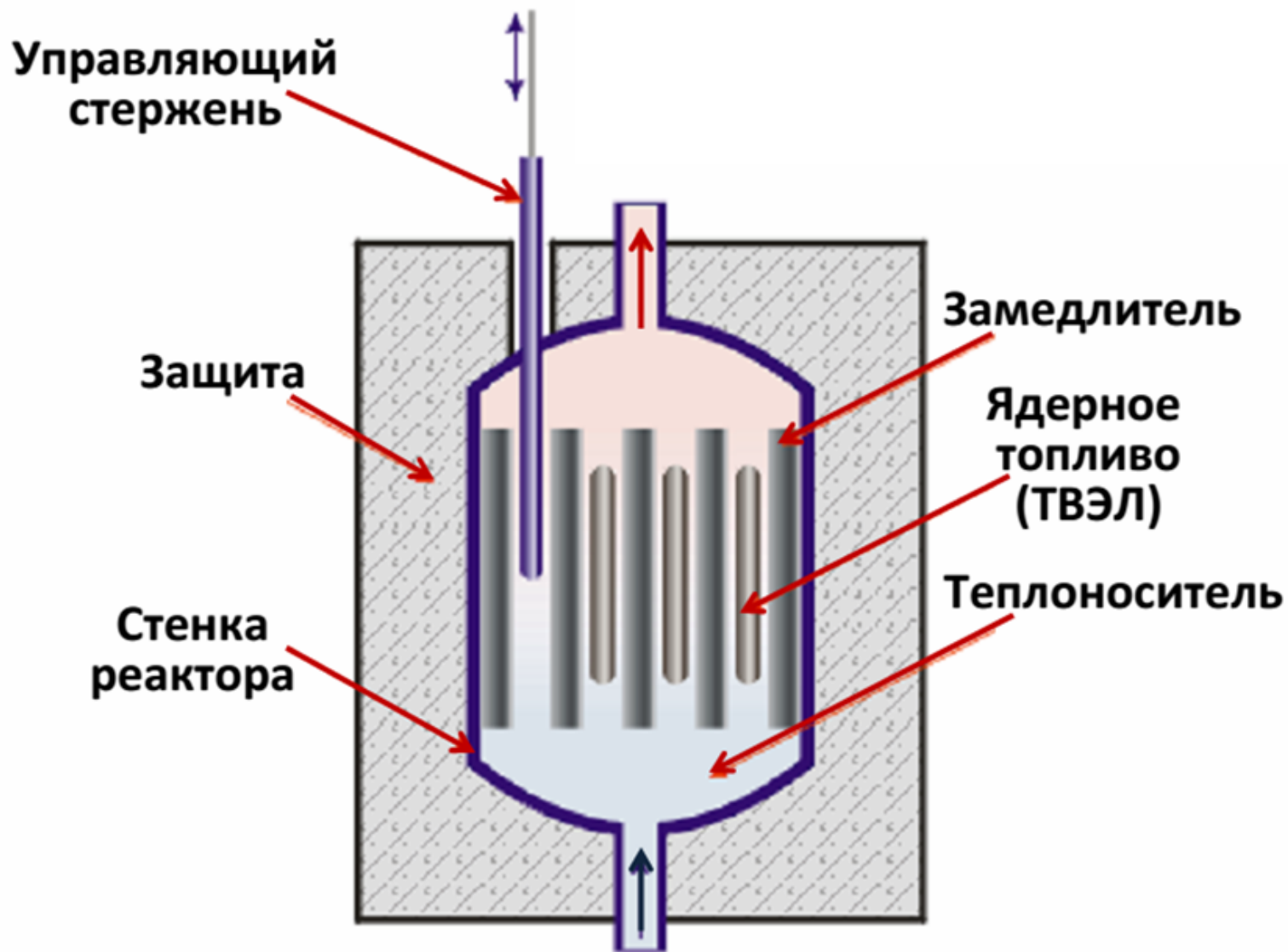
$$1.5 \cdot 10^{17} \frac{\text{делений}}{\text{с}}$$

# 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.

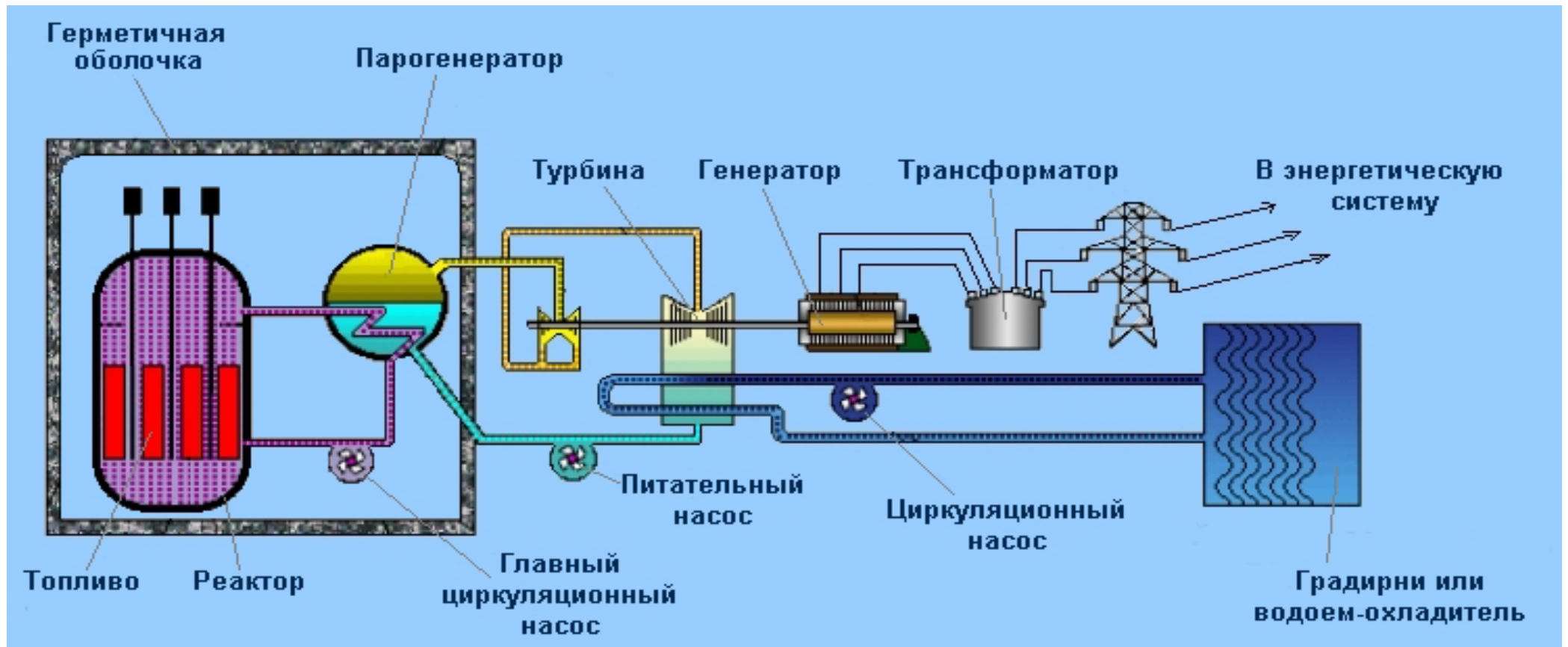
# Ядерный реактор на тепловых нейтронах





# Схема работы АЭС

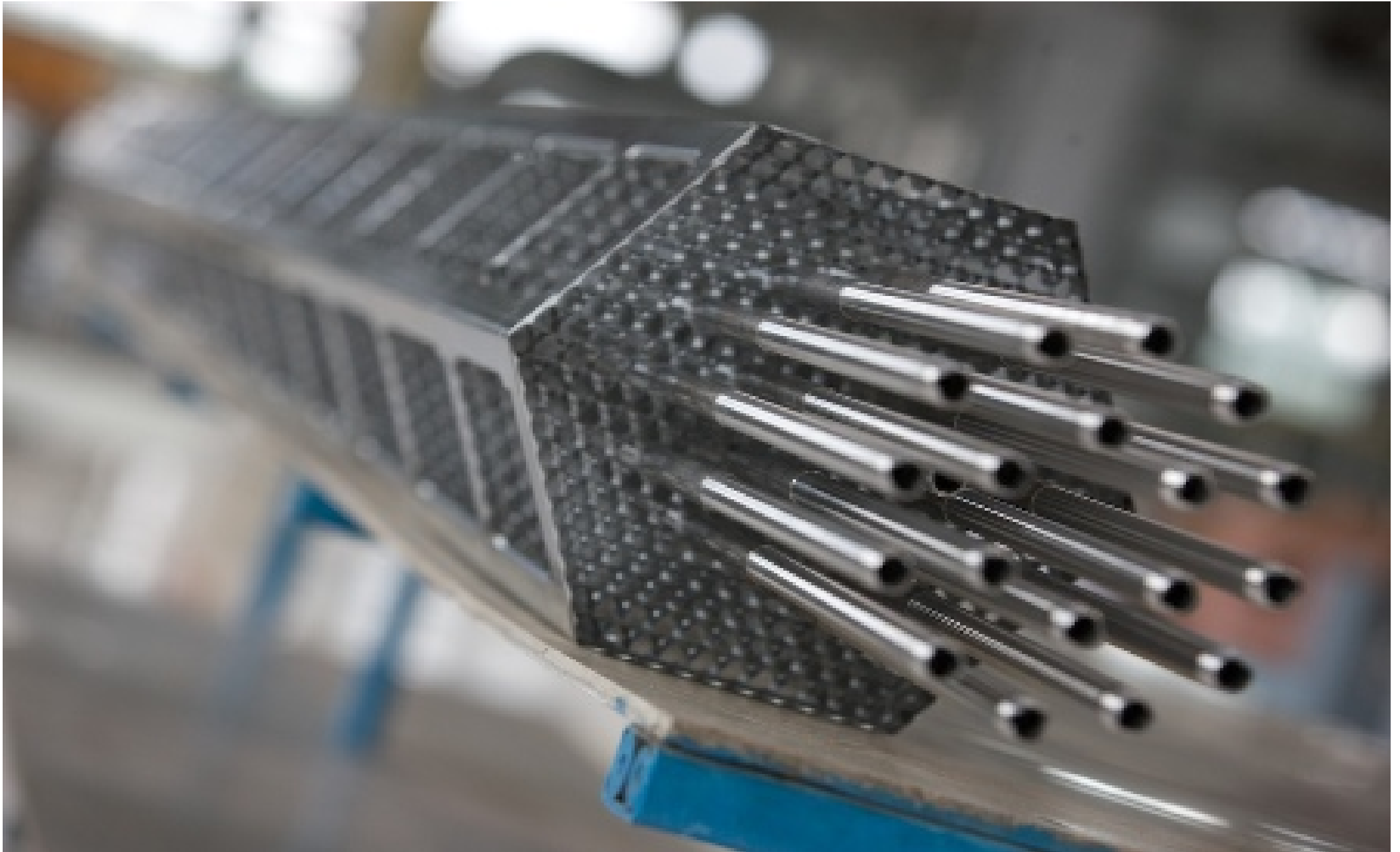
Деление 1 г урана-235 в течение суток даёт мощность в 1 МВт



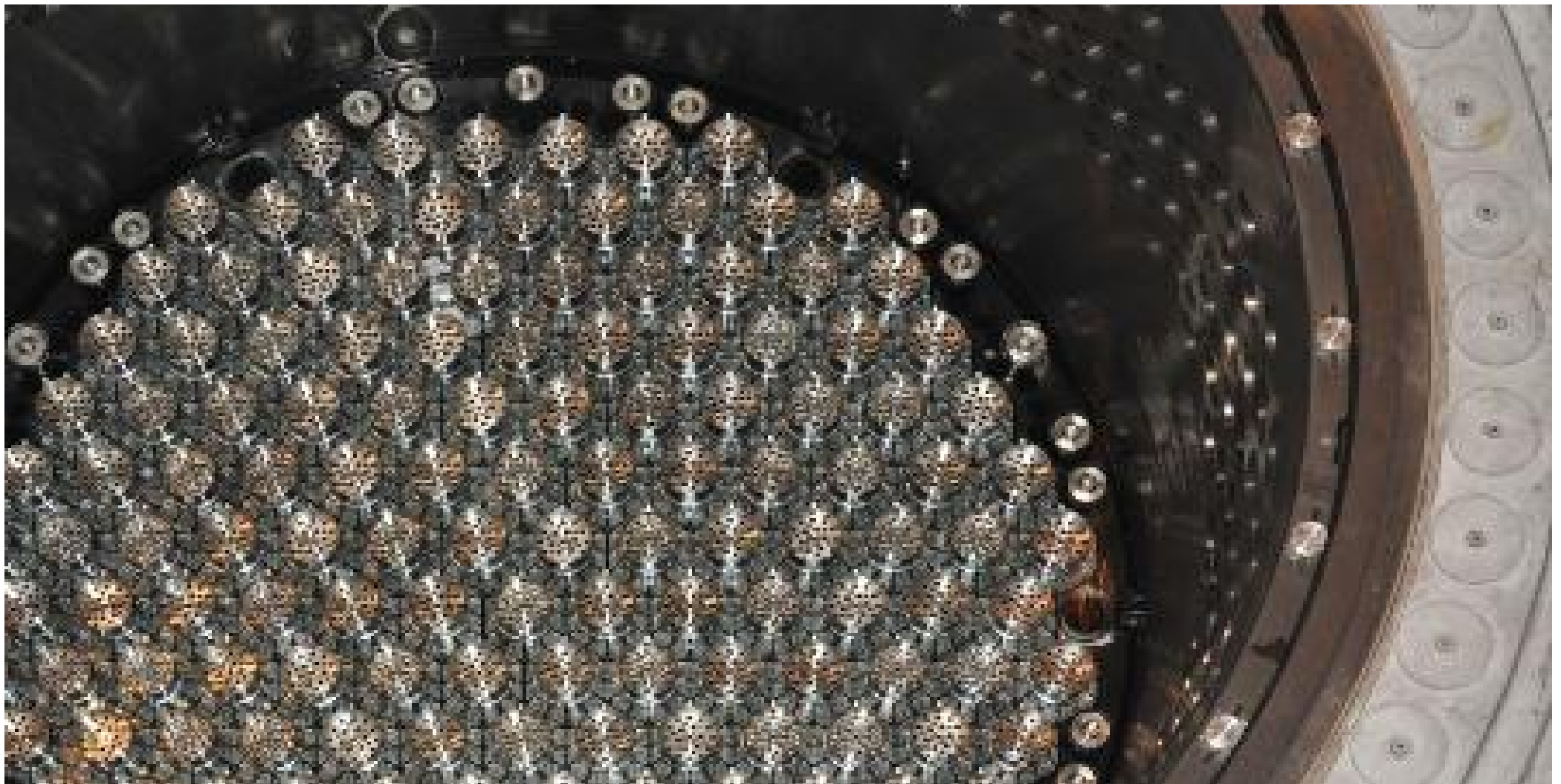
# Ядерное топливо



# Сборка ТВЭЛ



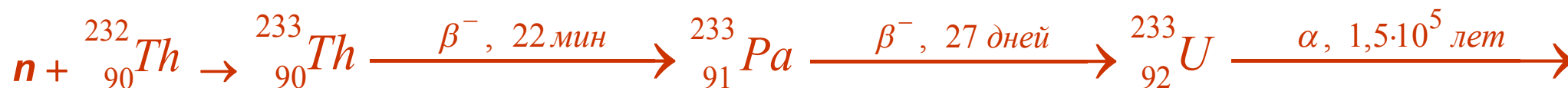
# Сборки в корпусе реактора



# Корпус реактора ВВЭР



# Воспроизводство ядерного горючего



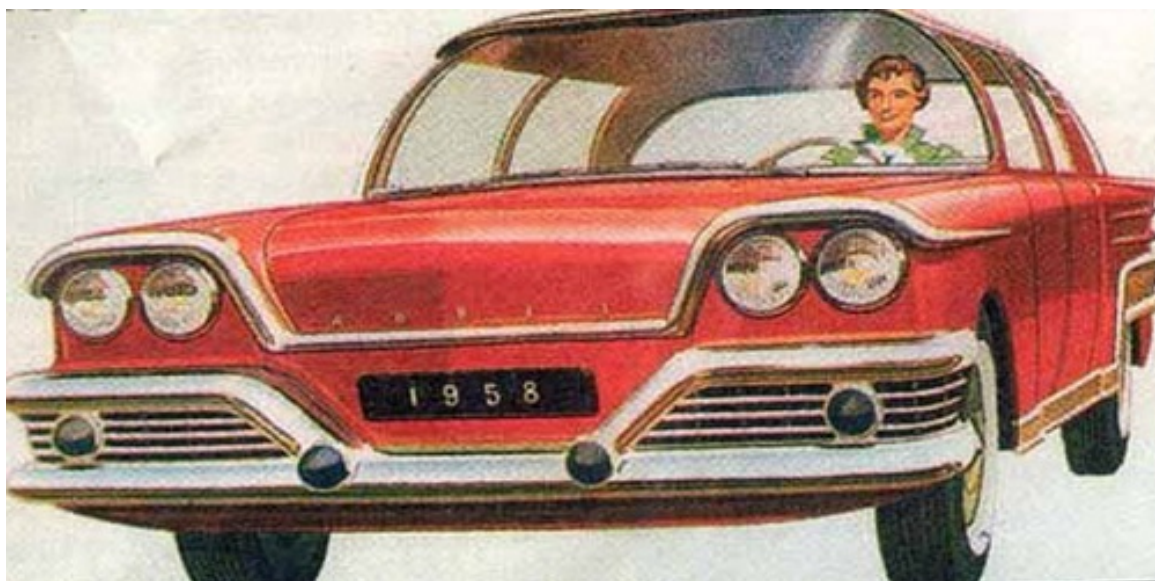
Эти две реакции открывают возможность **воспроизводства ядерного горючего** в процессе цепной реакции.

# ЯДЕРНЫЕ ДВИГАТЕЛИ

реальные, возможные и  
невозможные

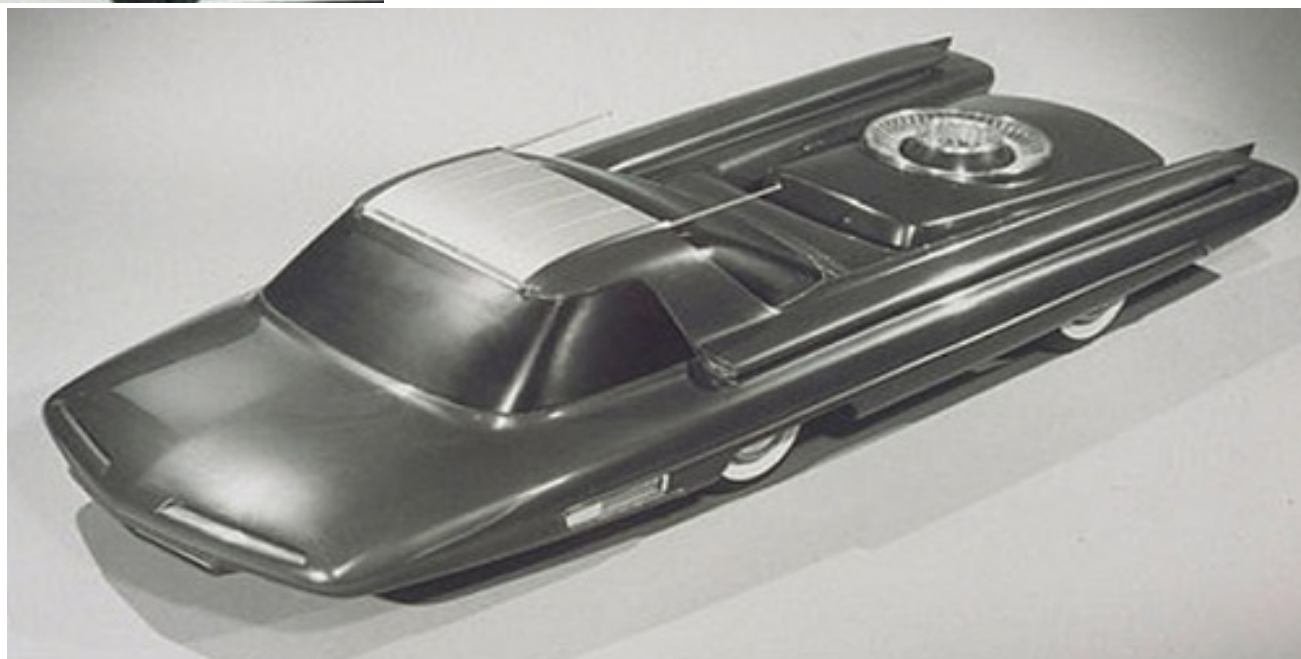


# Проекты 50-60 годов 20-го века



Французская компания "Arbel", предложила в 1958 г. **концепцию** "Arbel Symetric". Предполагалась установка РИТЭГ мощностью 40 кВт в качестве батареи, перезаряжаемой раз в пять лет.

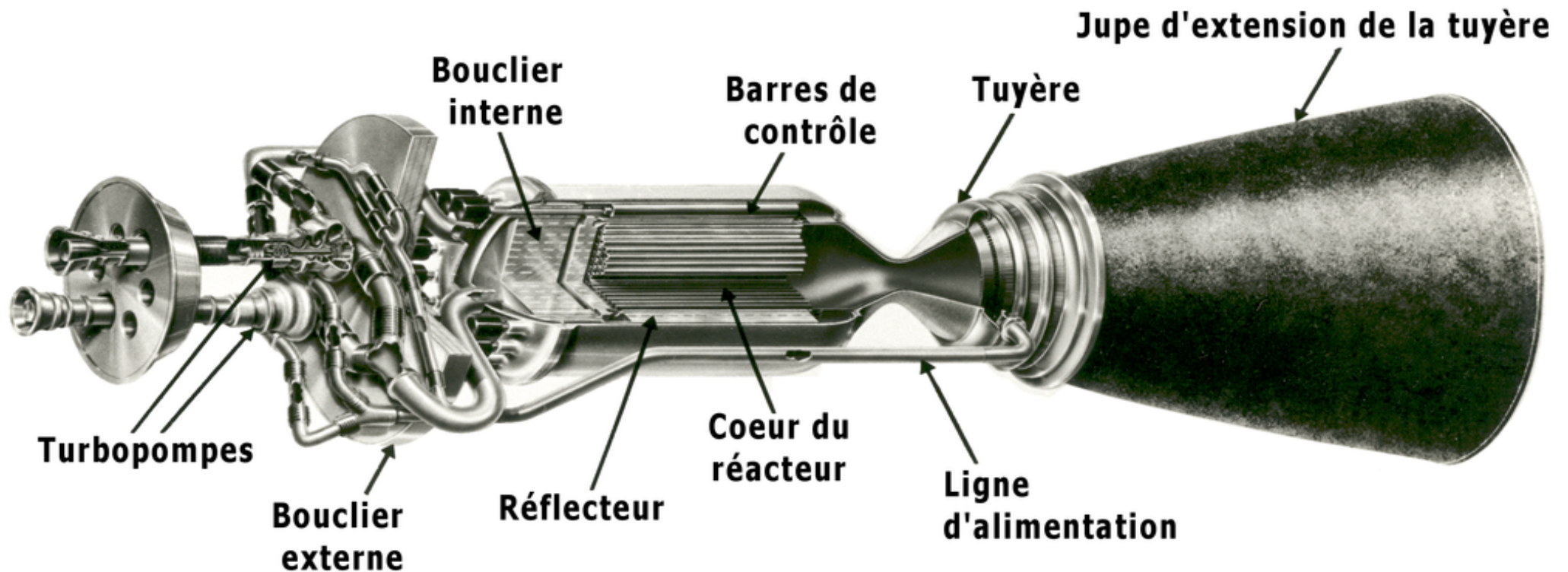
В 1958 году компания "Ford" предложила **концепцию** машины "Ford Nucleon" с полноценным ядерным реактором с запасом энергии на 5000 миль.





# 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.



# 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

# Проект космического корабля для дальнего космоса

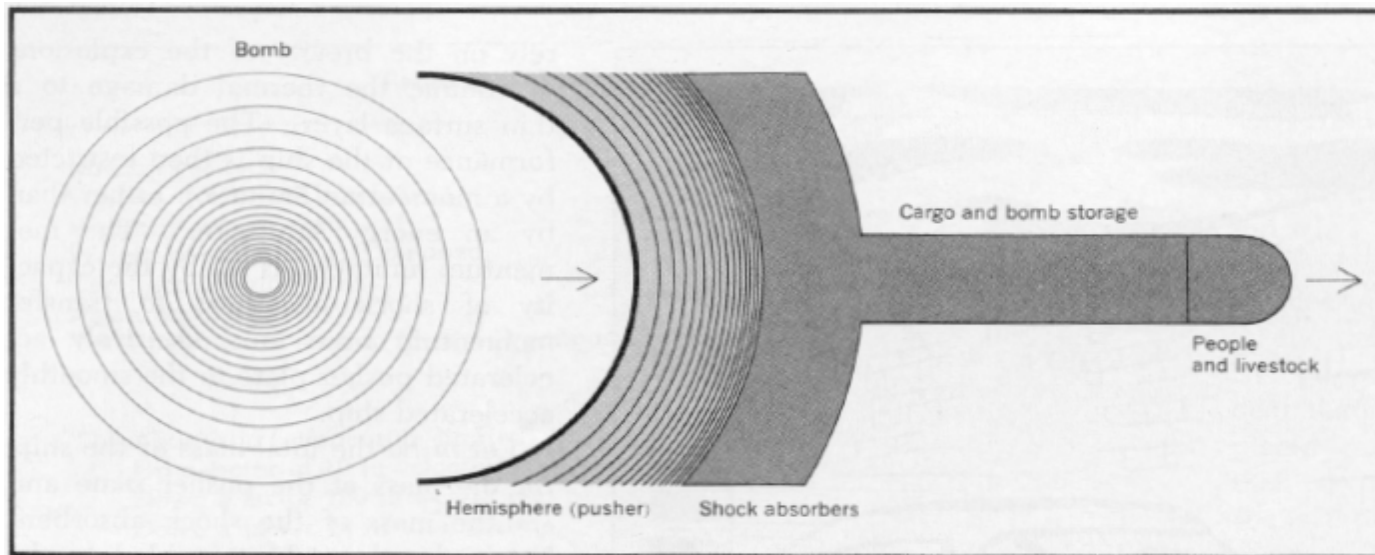
...Lets us explore what kind of trips to Alpha Centauri are possible with present-day technology, how long they would take and how much they would cost...

Журнал

Physics Today, October 1968, pp.41-45.

Статья "Interstellar Transport"

Фримен Дж. Дайсон



Freeman J. Dyson came to the US from England in 1947, with a BA from Cambridge, as a graduate student at Cornell. He became a professor there in 1951 and joined the Institute for Advanced Study at Princeton in 1953. He was elected a Fellow of the Royal Society in 1952. Still at the Institute, his interests have changed from pure mathematics through particle physics to astrophysics.

**BOMB-PROPELLED SPACE SHIP.** Debris from the exploding bombs transfers momentum to the shock absorbers and hence to the payload section of the ship. Mission velocities for this primitive design would be 500–10 000 km/sec; the upper limit is similar to supernova-debris velocities.



# Проект космического корабля для дальнего космоса

Table 1. Conservatively Designed Space Ship

Weight of copper hemisphere	$5 \times 10^6$ tons
Weight of remainder of structure and payload	$5 \times 10^6$ tons
Weight of empty ship	$10 \times 10^6$ tons
Weight of $3 \times 10^7$ bombs	$30 \times 10^6$ tons
Weight of fully loaded ship	$40 \times 10^6$ tons
Mass ratio $R$	4
Energy efficiency	0.75
Mission velocity	1000 km/sec
Total acceleration time	$3 \times 10^9$ sec = 100 years
Mean acceleration	$3 \times 10^{-5} g$
Total fuel cost of mission ( $3 \times 10^9$ pounds deuterium)	$\$6 \times 10^{11}$
	= one Gross National Product

Время полета 1300 лет, экипаж 20000 человек, диаметр  
тяговой плиты 20 км.

# Проект космического корабля для дальнего космоса

Table 2. Ablation Space Ship

Mission velocity	10 000 km/sec
Weight of $3 \times 10^5$ bombs	$3 \times 10^6$ tons
Weight of empty ship	$10^6$ tons
Weight of structure and payload	$5 \times 10^4$ tons
Total acceleration time	$10^6$ sec = 10 days
Mean acceleration	1 g
Total fuel cost of mission ( $3 \times 10^8$ pounds deuterium)	$\$6 \times 10^{10}$ = 0.1 GNP

This optimistic (momentum-limited) design is:

- Up a factor of 10 in velocity

- Down a factor 100 in weight and payload

- Down a factor 10 in total cost

- Up a factor 10 in cost per pound

compared with the conservative (energy-limited) design of Table 1.

# Проект «Орион» (США)

Импульсные технологии движения космических аппаратов за счет внешних взрывов изучались в 1958–1965 году в США по проекту «Орион». Предполагалось, что оснащённая 800 плутониевыми зарядами общей массой в полтонны ракета могла бы забросить на Луну 700 т груза.

Проект был закрыт, но на модели с обычной взрывчаткой показана возможность устойчивого полета по импульсной схеме – 6-ю взрывами по 1кг С4 аппарат поднялся на 100 м.

