

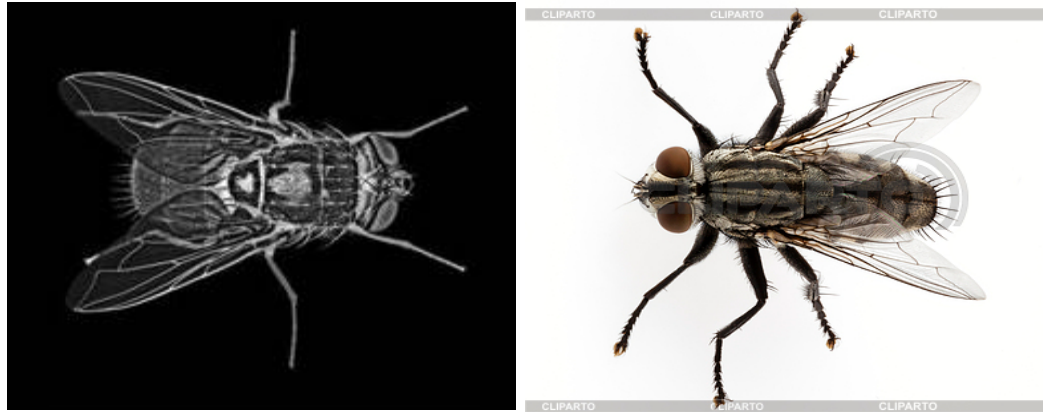


Ядерная физика и Человек

ДЕЛЕНИЕ ЯДЕР

ЭНЕРГИЯ

АННИГИЛЯЦИЯ



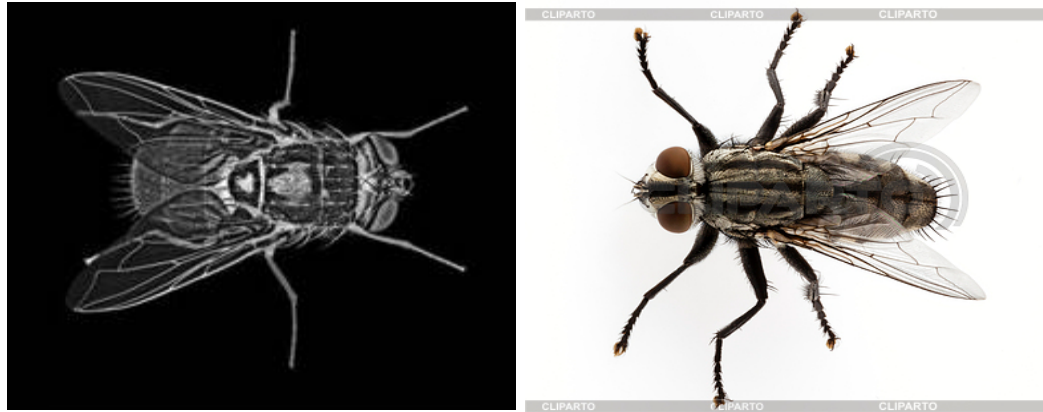
$$2mc^2 = E$$

$$m_p = 938 \cdot 10^6 \text{ эВ} / c^2 = 1,7 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$$

$$m_{\text{мухи}} = \frac{10^{-3}}{70} \text{ кг} = 8 \cdot 10^{30} \text{ эВ} / c^2$$

$$E = 2,6 \cdot 10^{12} \text{ Дж}$$

АННИГИЛЯЦИЯ



$$E = 2,6 \cdot 10^{12} \text{ Дж}$$



= 100 тонн угля

Механика

$$E = E_{\text{кин}} + E_{\text{пот}} \quad E_{\text{пот}} \sim 10^{-16} \cdot Mc^2$$

$$\sum m = \text{Const}$$

ХИМИЯ

$$Q = \sum m_i - \sum m_f \quad Q \sim 10^{-8} \cdot Mc^2$$

$$\sum m \approx \text{Const}$$

Ядерная физика

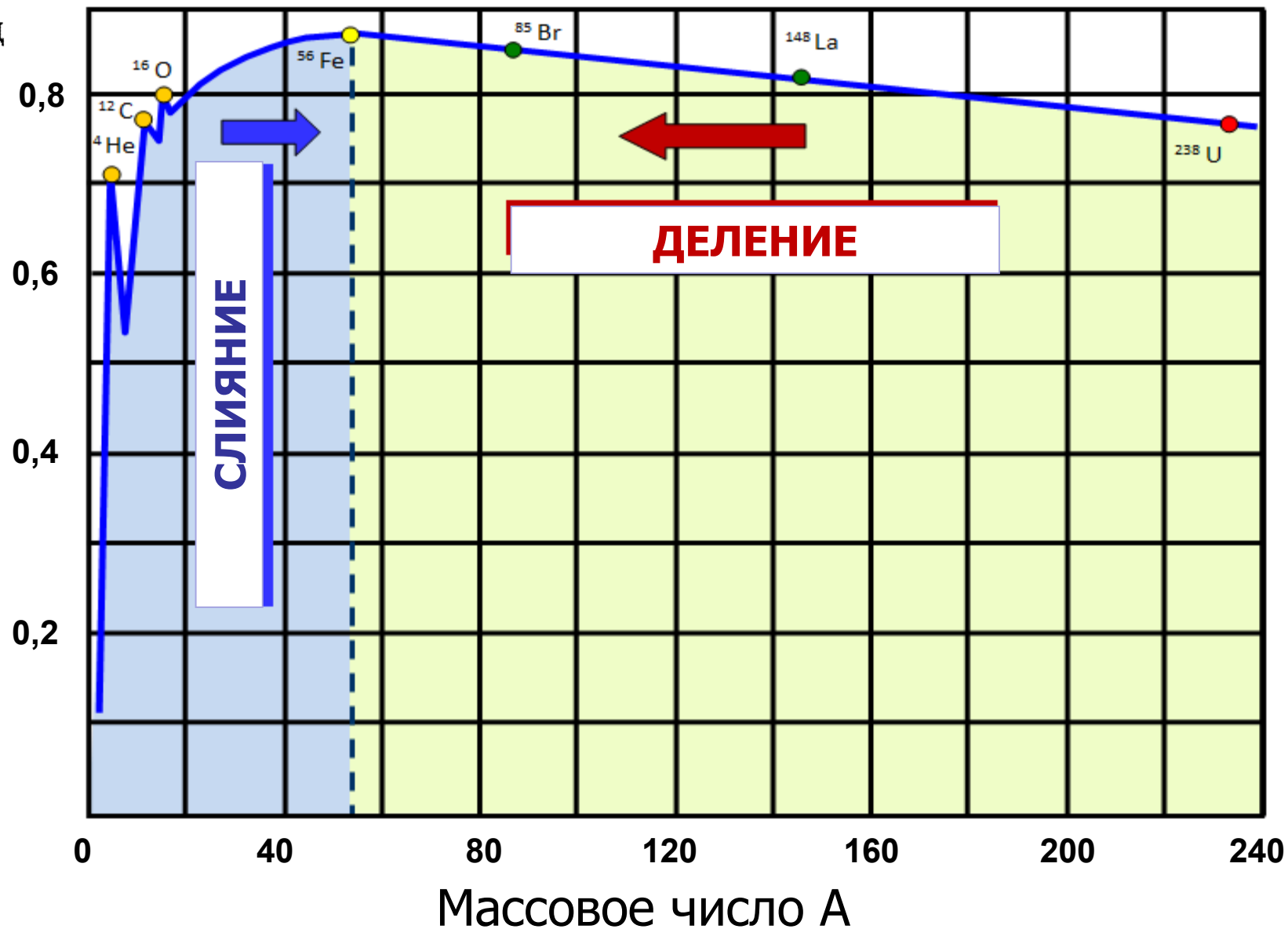
Энергия связи ядра $W(A,Z)$

$$\begin{aligned} M(A,Z)c^2 + W(A,Z) &= \\ &= Z \cdot m_p c^2 + (A - Z)m_n c^2 \end{aligned}$$

$$W(A,Z) \sim 10^{-2} \cdot Mc^2$$

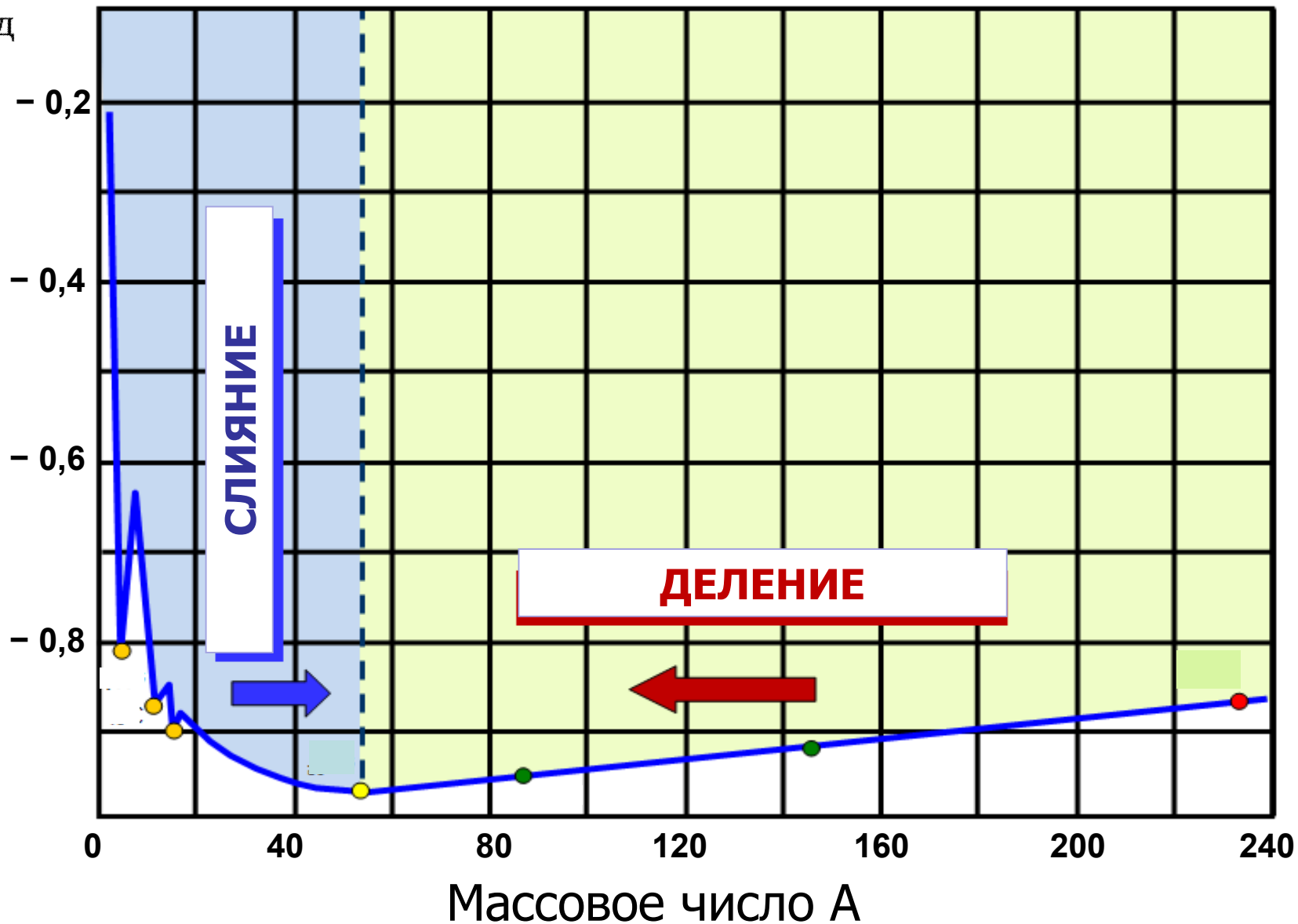
Удельная энергия связи ядра $\varepsilon(A, Z)$

$$\frac{W(A, Z)}{M_{\text{яд}}} \cdot 100\%$$



Удельная энергия связи ядра $\varepsilon(A, Z)$

$$\frac{W(A, Z)}{M_{\text{яд}}} \cdot 100\%$$



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}U .

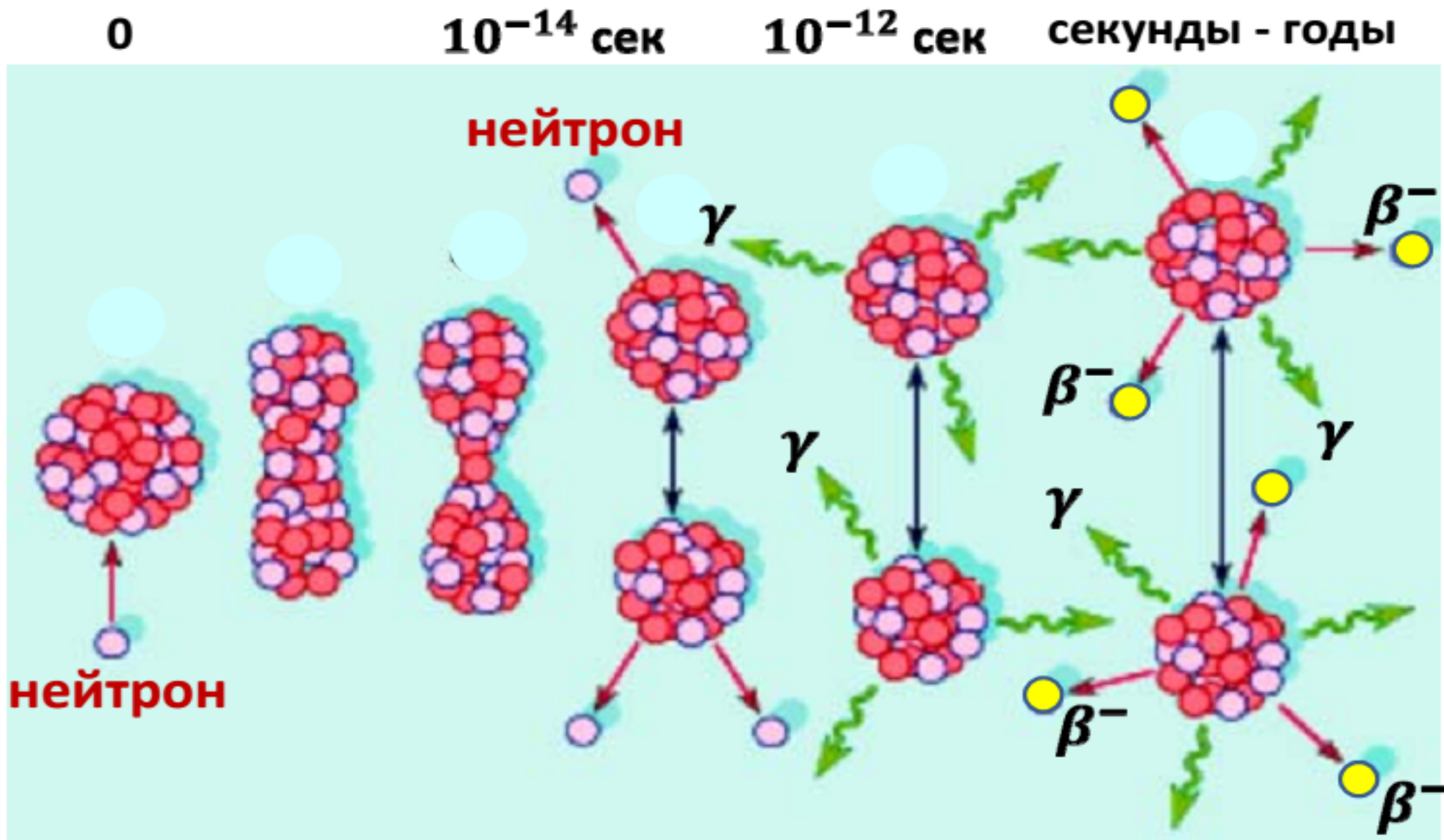
1942 г. — Э. Ферми. Первый ядерный реактор.

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

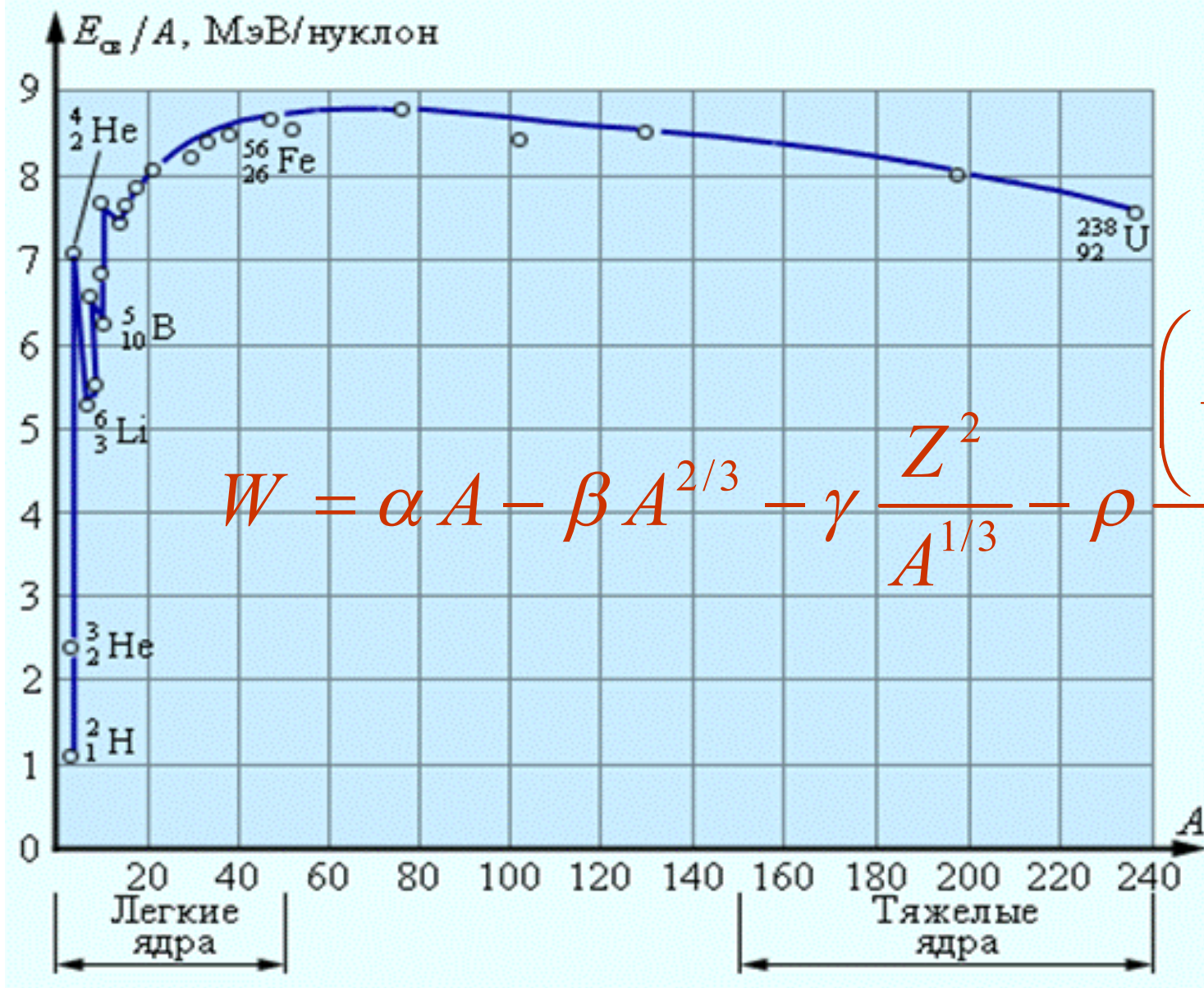
1945 г. — Ядерный взрыв. Хиросима.

1954 г. — Первая атомная электростанция. Обнинск.

Деление ядра



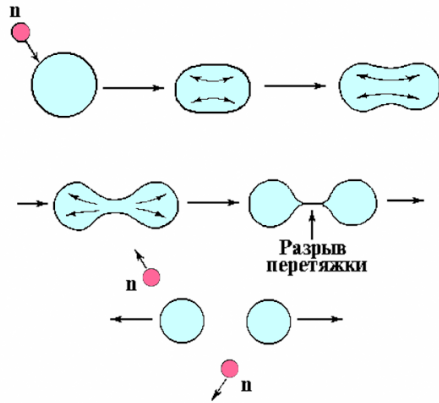
Удельная энергия связи ядра



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

$$\varepsilon = W / A$$

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



Механизм деления

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

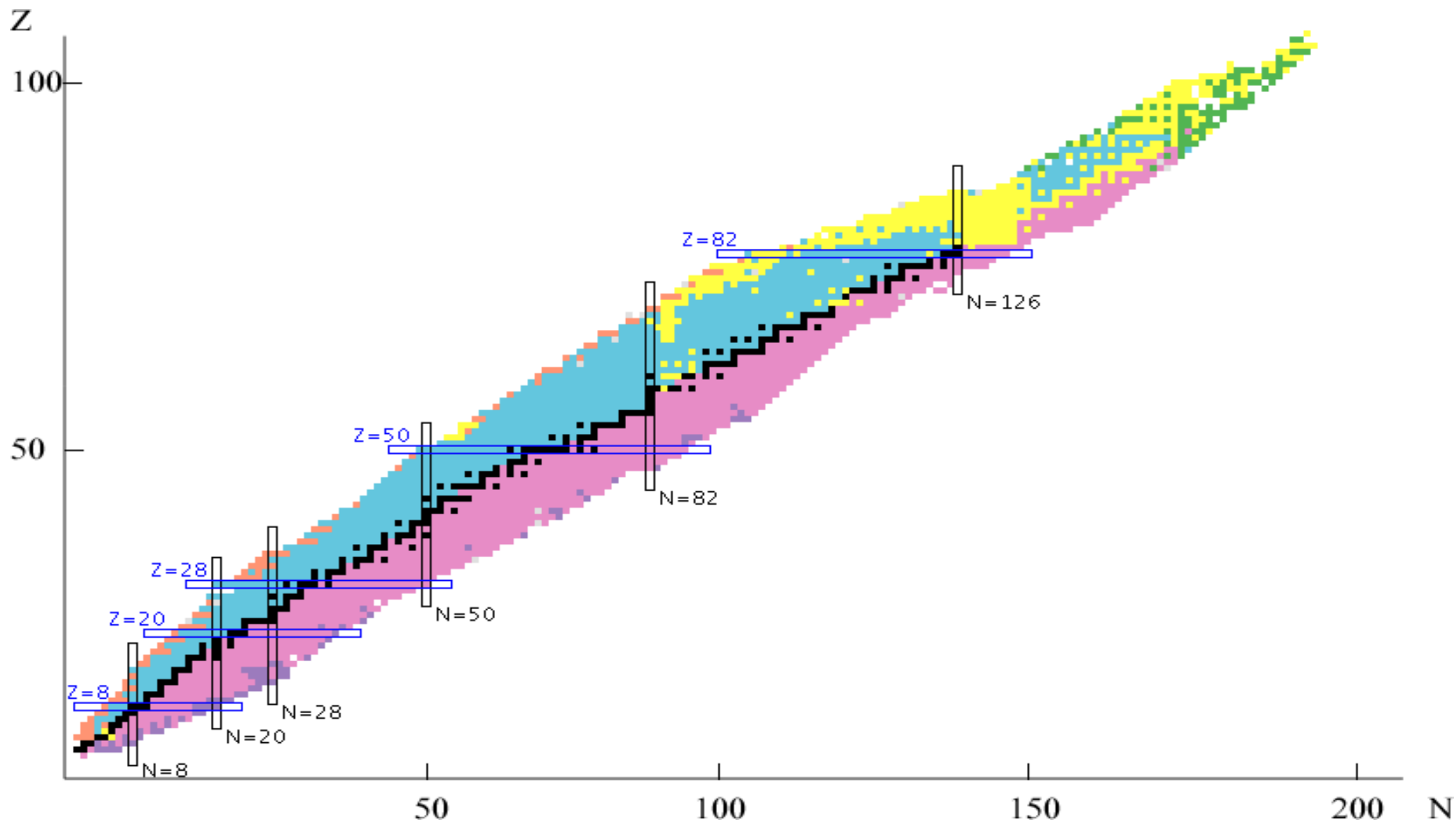
Изменение энергии ядра в процессе деления определяется изменением суммы поверхностной и кулоновской энергий $E_{пов} + E_{кул}$ начального ядра.

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

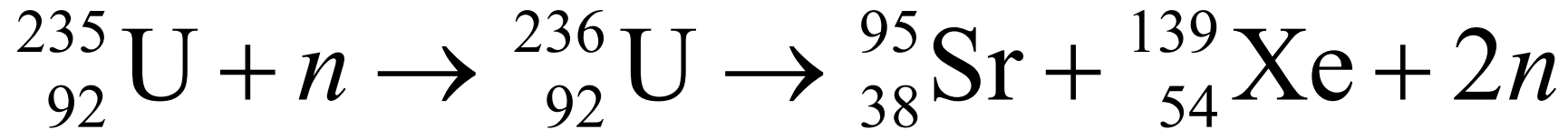
$$\tilde{E}_{пов} = E_{пов} \left(1 + \frac{2}{5} \varepsilon^2\right)$$

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

N-Z диаграмма атомных ядер

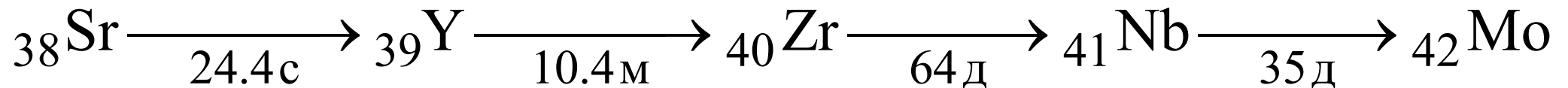


Радиоактивность осколков деления

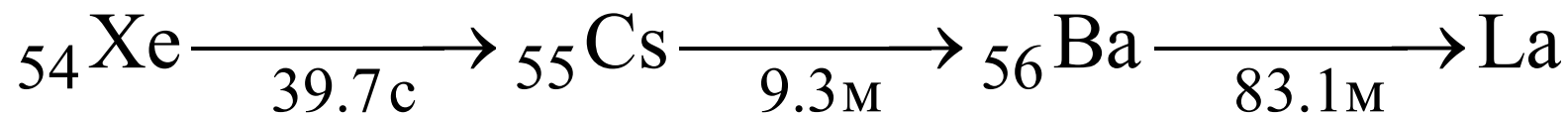


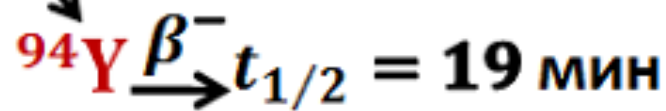
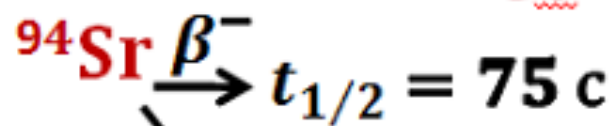
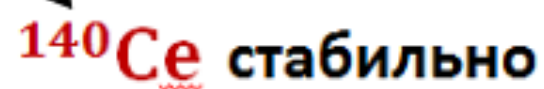
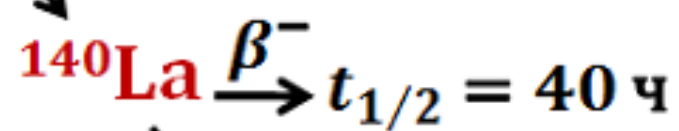
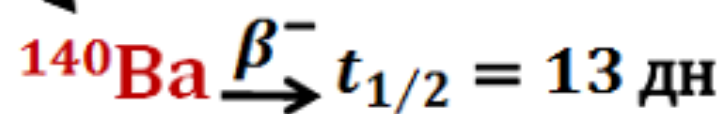
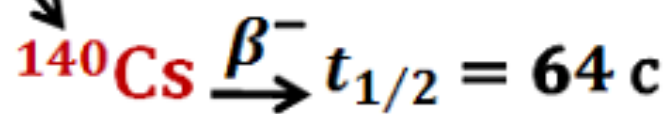
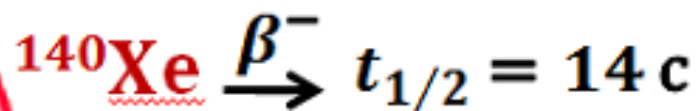
$$\frac{N}{Z} = 1 + 0.015A^{2/3}$$

$$A = 95$$

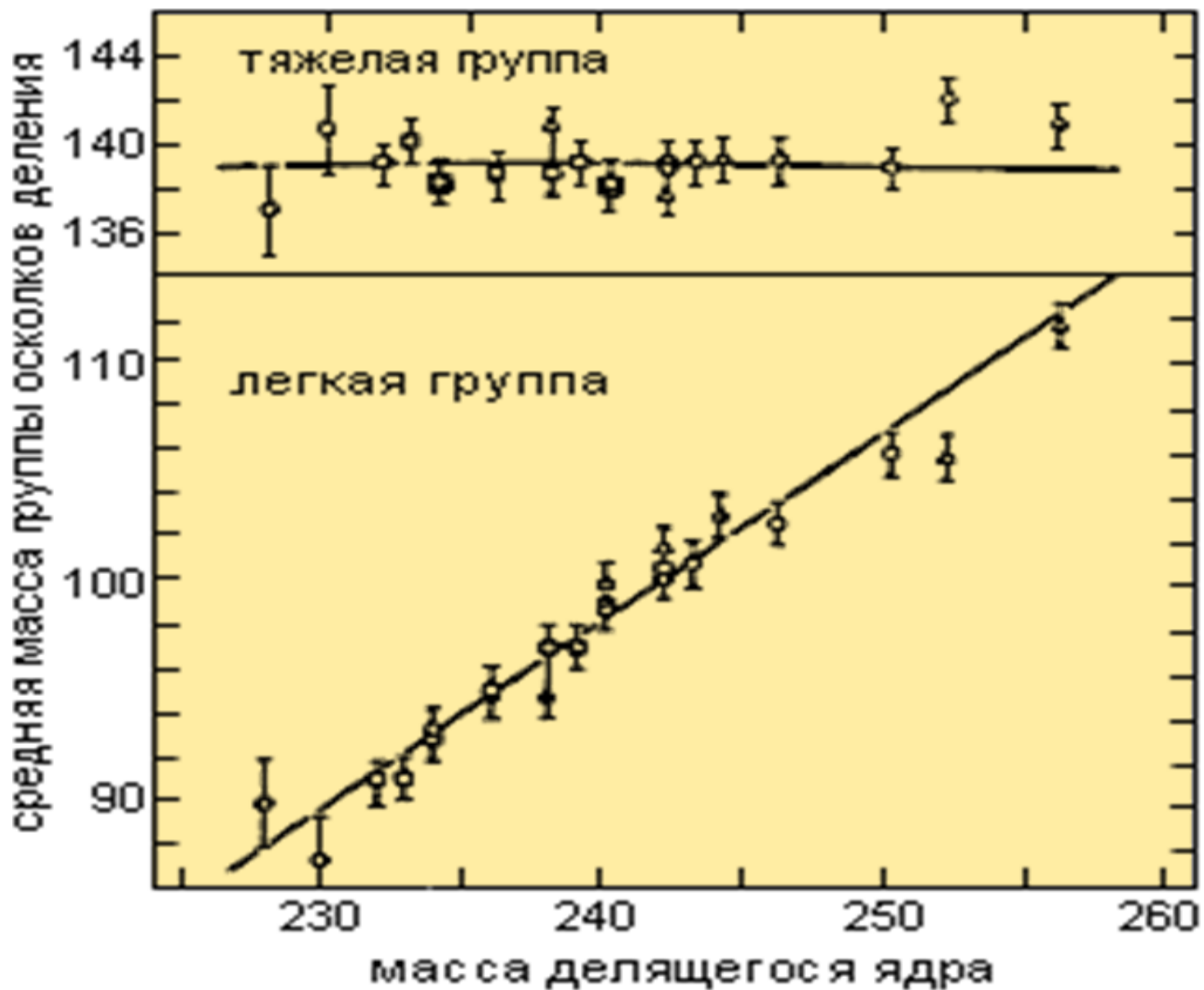


$$A = 139$$





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



Параметр делимости

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

Я. Френкель развил капельную теорию деления ядер медленными нейтронами.

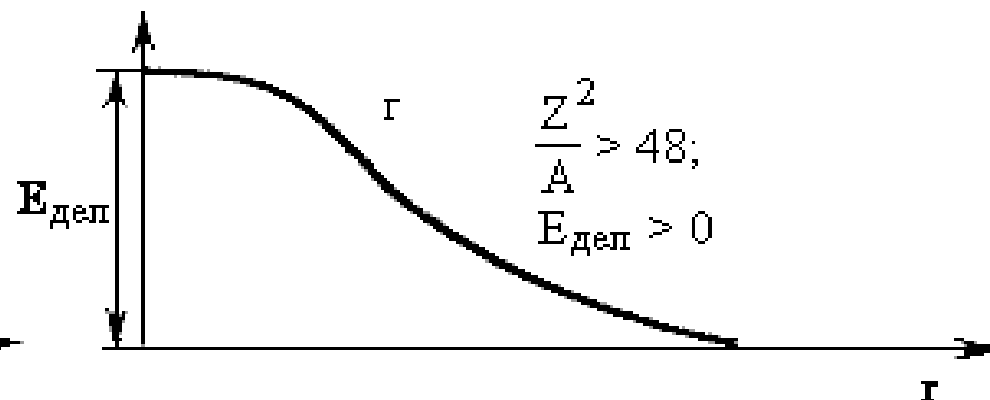
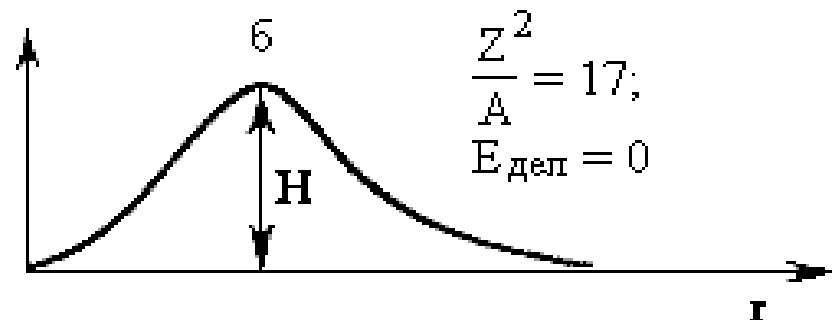
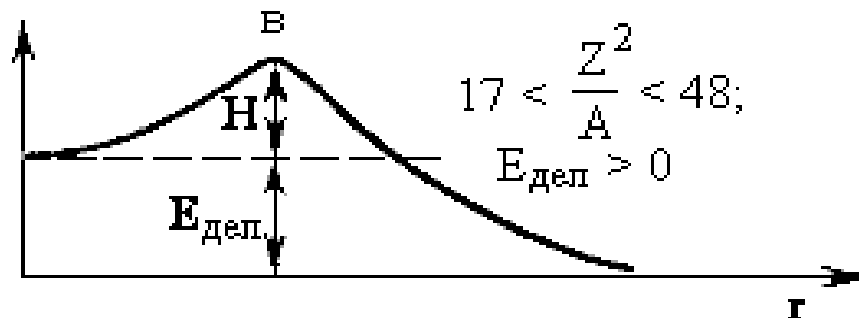
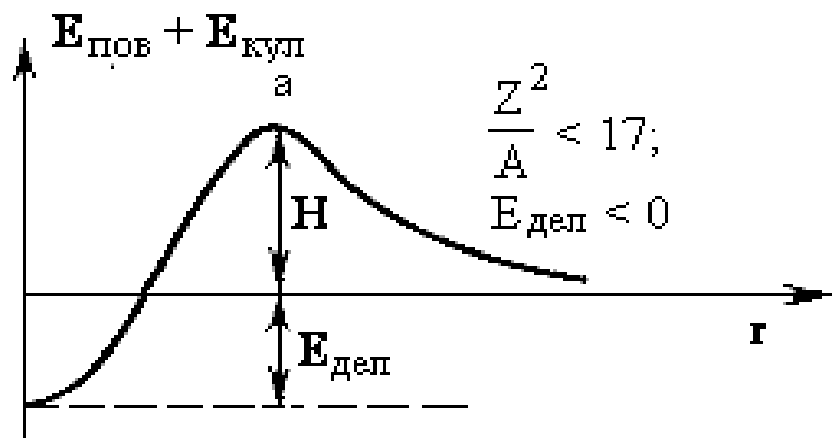
$$Q = \beta A^{2/3} (1 - 2^{1/3}) + \gamma \frac{Z^2}{A^{1/3}} (1 - 2^{-2/3}) > 0$$

$$\frac{Z^2}{A} > \frac{0,26 \beta}{0,37 \gamma} \approx 17$$

$\frac{Z^2}{A} = 17$ для иттрия ${}_{39}^{89}\text{Y}$

Деление энергетически выгодно для тяжелых ядер с $A > 90$.

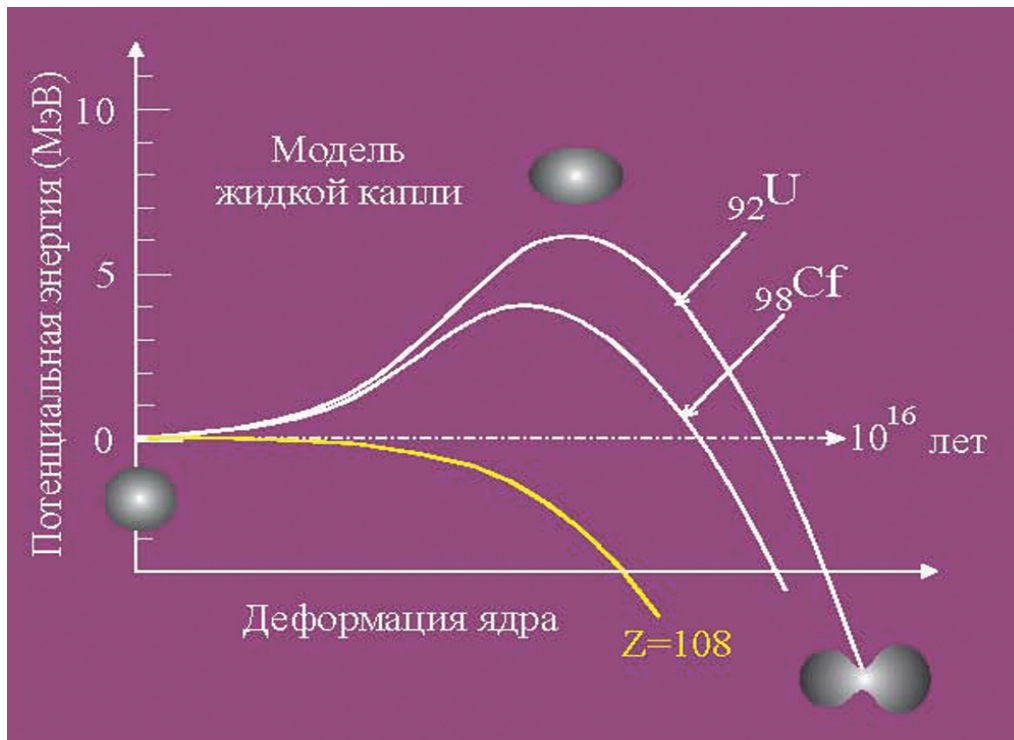
Барьер деления



$$2E_{\text{пов}} - E_{\text{кул}} > 0 \Rightarrow \frac{Z^2}{A} < 48$$

$$Z = 120 \div 125$$

Барьер деления



Энергия возбуждения E :

$$E \geq H$$

$$\frac{Z^2}{A} \geq 36, T_n > 1 \text{ МэВ}$$

(тепловые нейтроны)

Если высота барьера меньше энергии отделения нейтрона

$$B_n \geq H$$

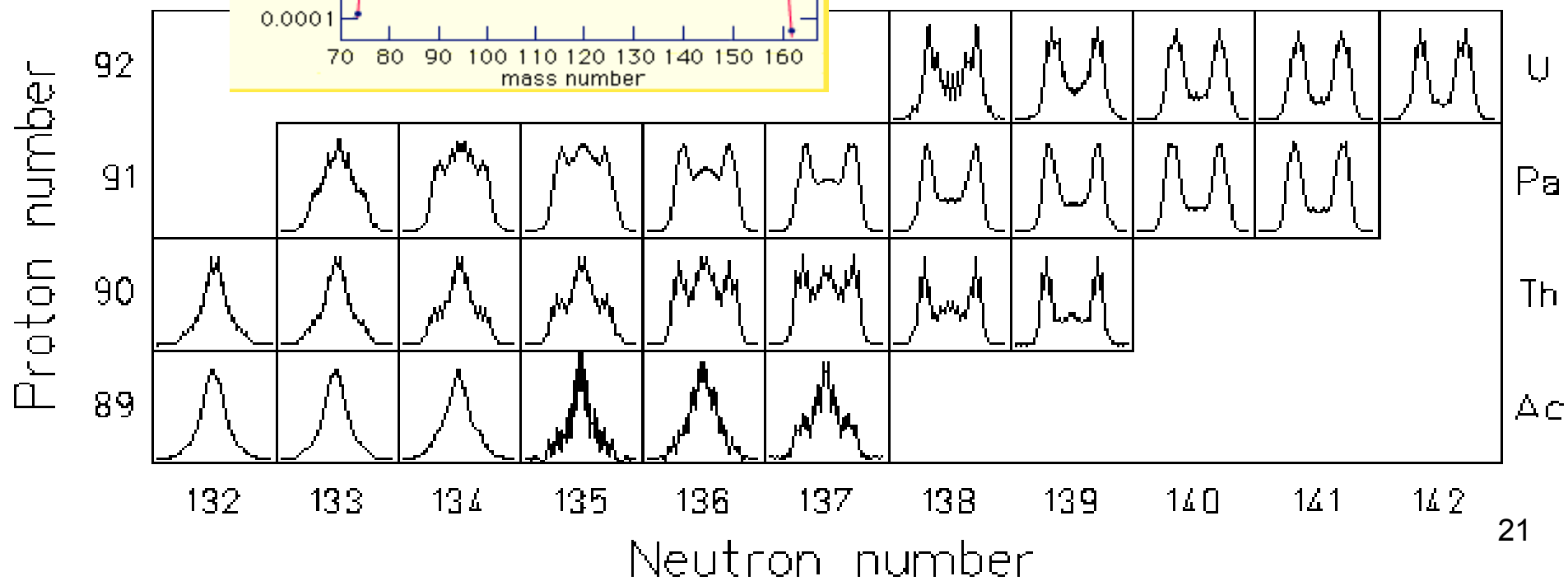
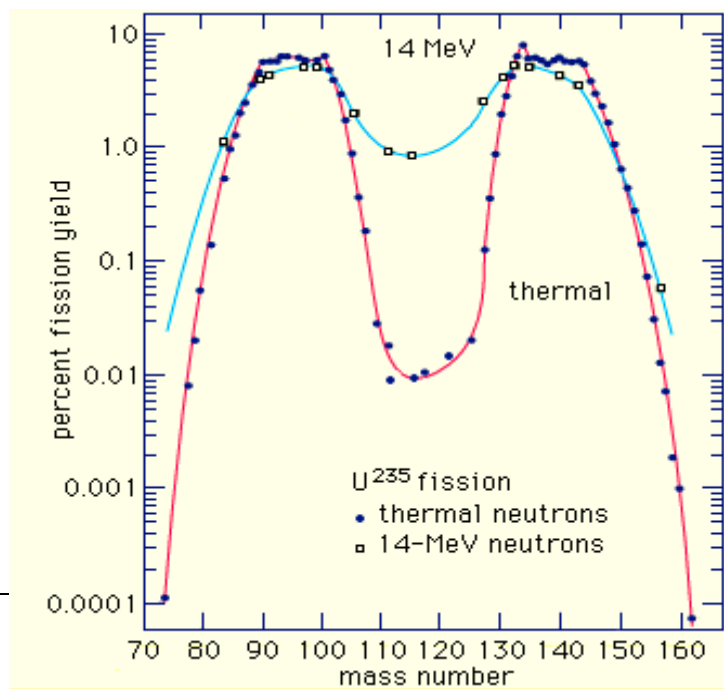
$$T_n \cong 0$$

(медленные нейтроны)

Z^2/A	Элемент	H (МэВ)	$T_{1/2}$
32	⁷⁹ Au - ⁸² Pb	40 - 50	
35	⁹⁰ Th - ⁹² U	8 - 6	10 ¹⁶ лет
45	¹⁰⁸ Hs	0	10 ⁻²² с

1939 г. — К. Петржак и Г. Флеров открыли спонтанное деление ядер урана ²³⁵U.

Массовое распределение осколков деления



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

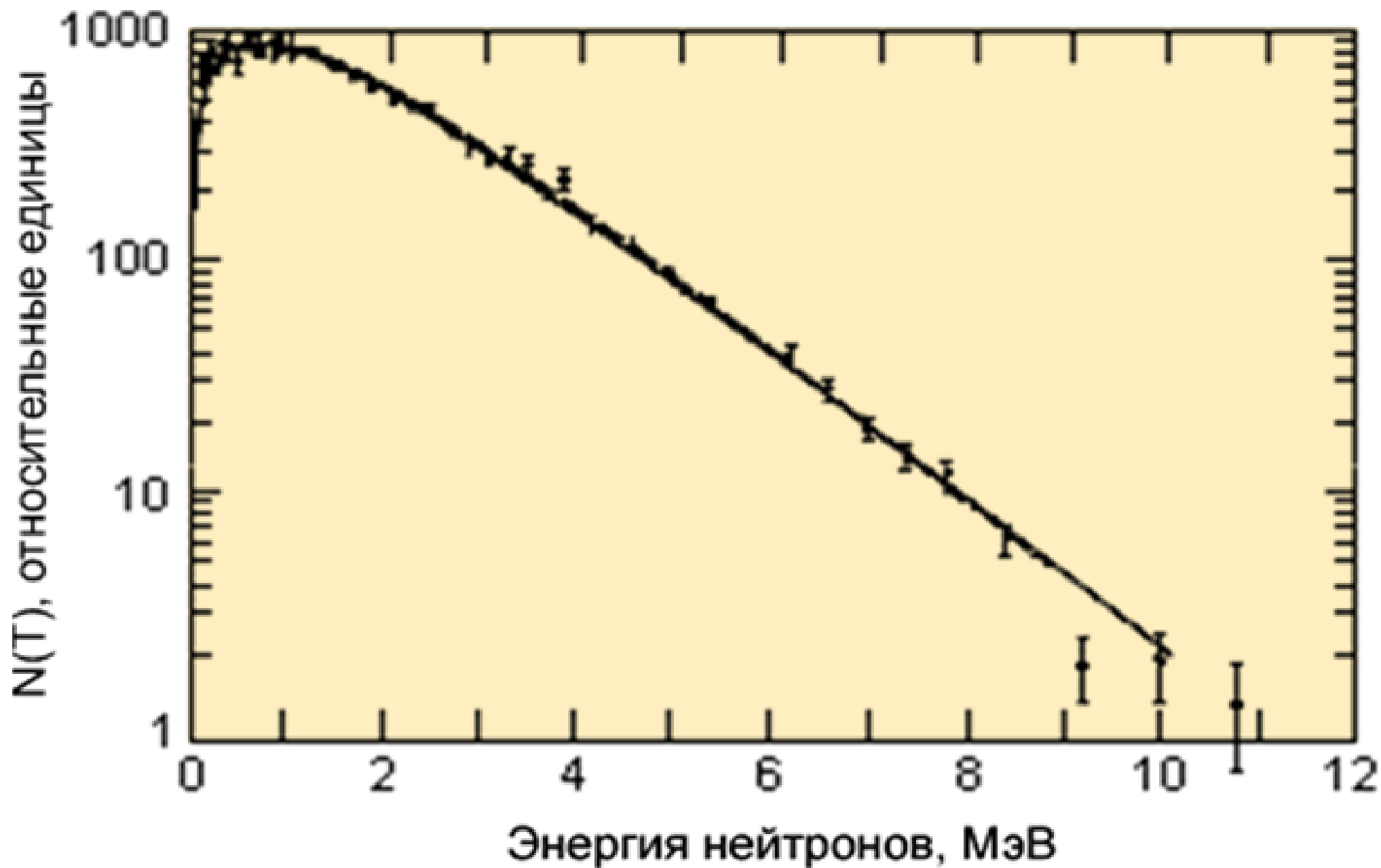
ДЕЛЕНИЕ ЯДЕР НЕЙТРОНАМИ

Изотопы U

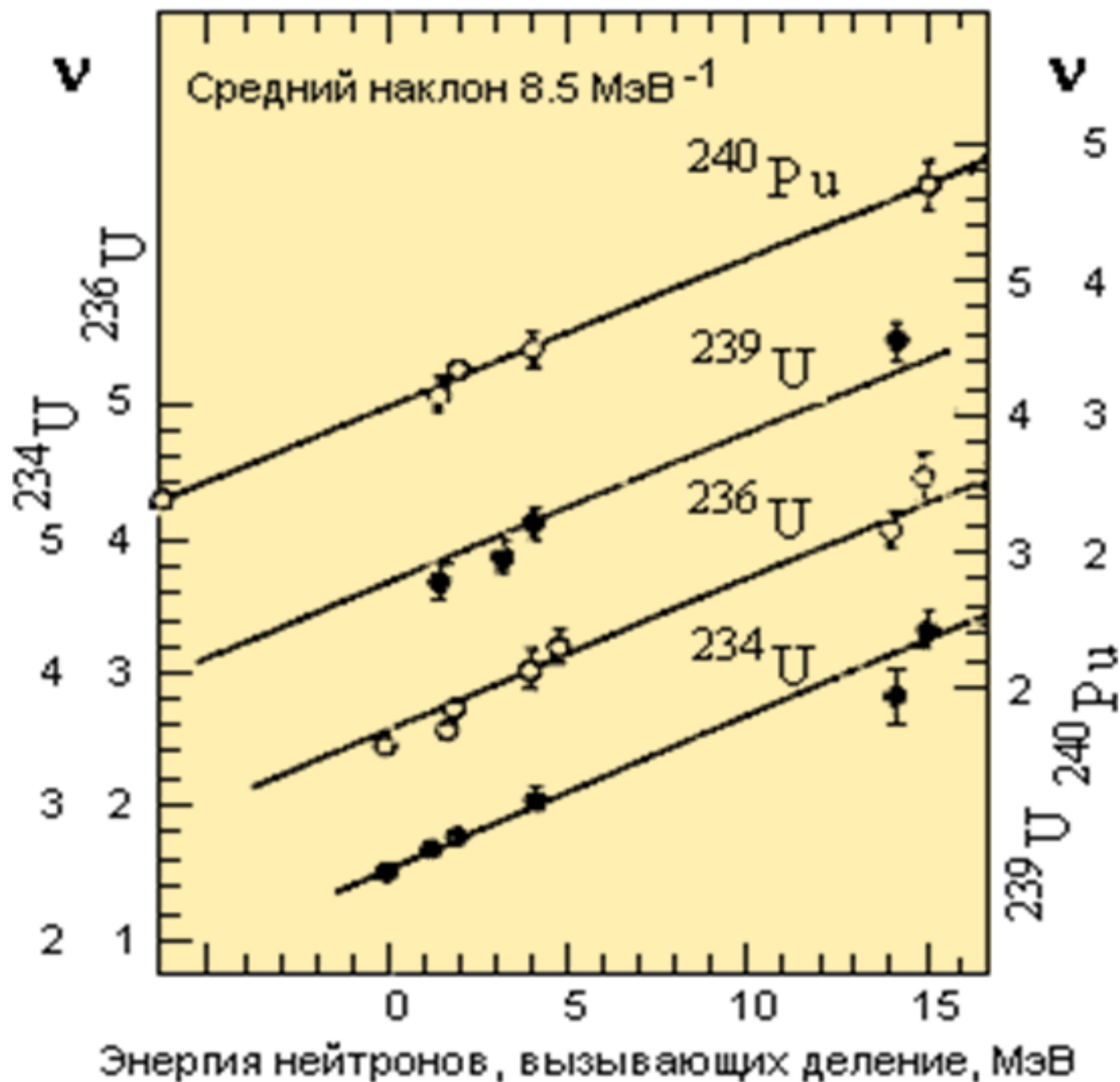
^{235}U 0,72% $T_{1/2} = 7,0 \cdot 10^8$ лет, α
 ^{238}U 99,28% $T_{1/2} = 4,5 \cdot 10^9$ лет, α

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

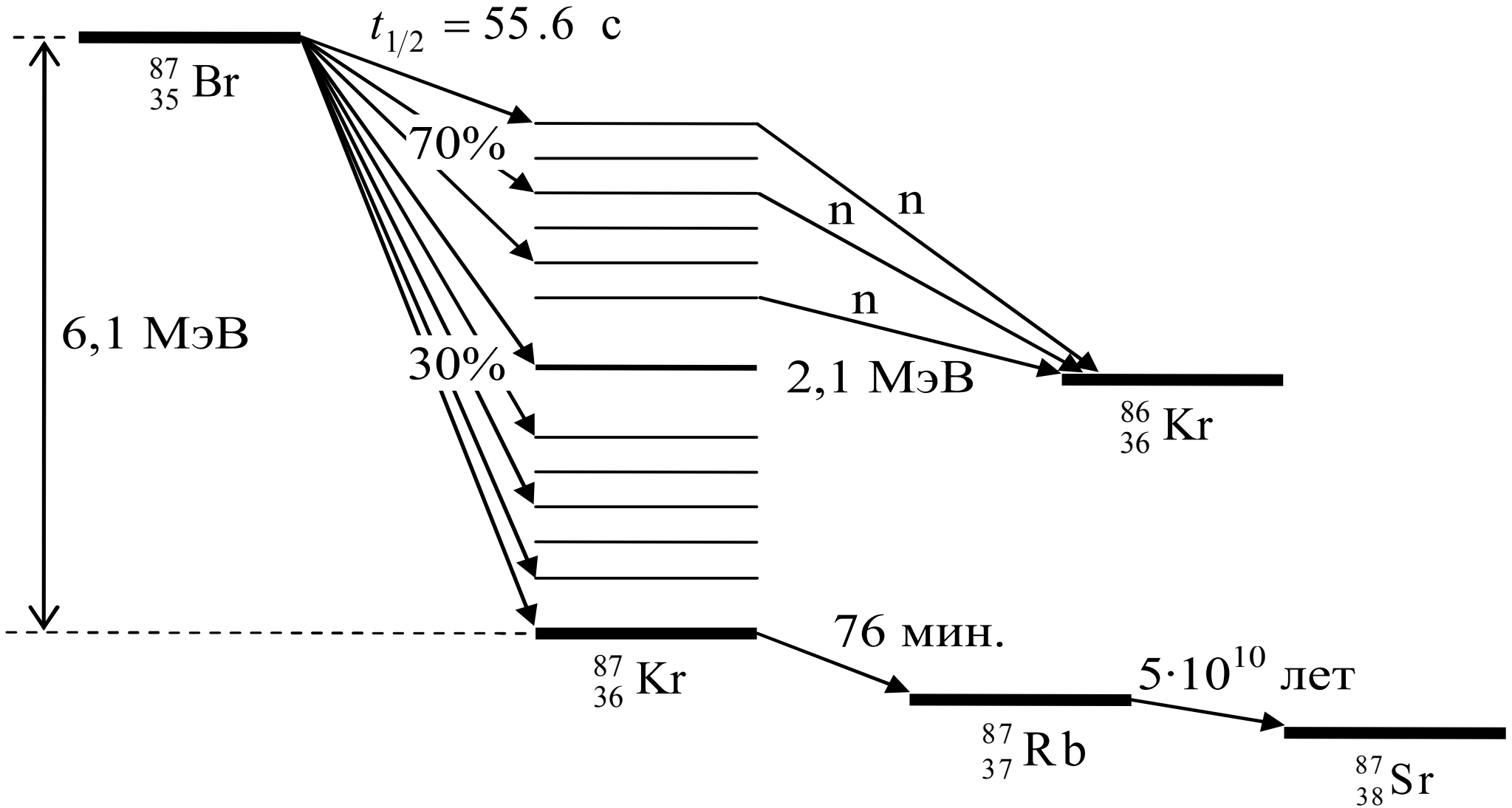
Спектр нейтронов деления



Число нейтронов деления



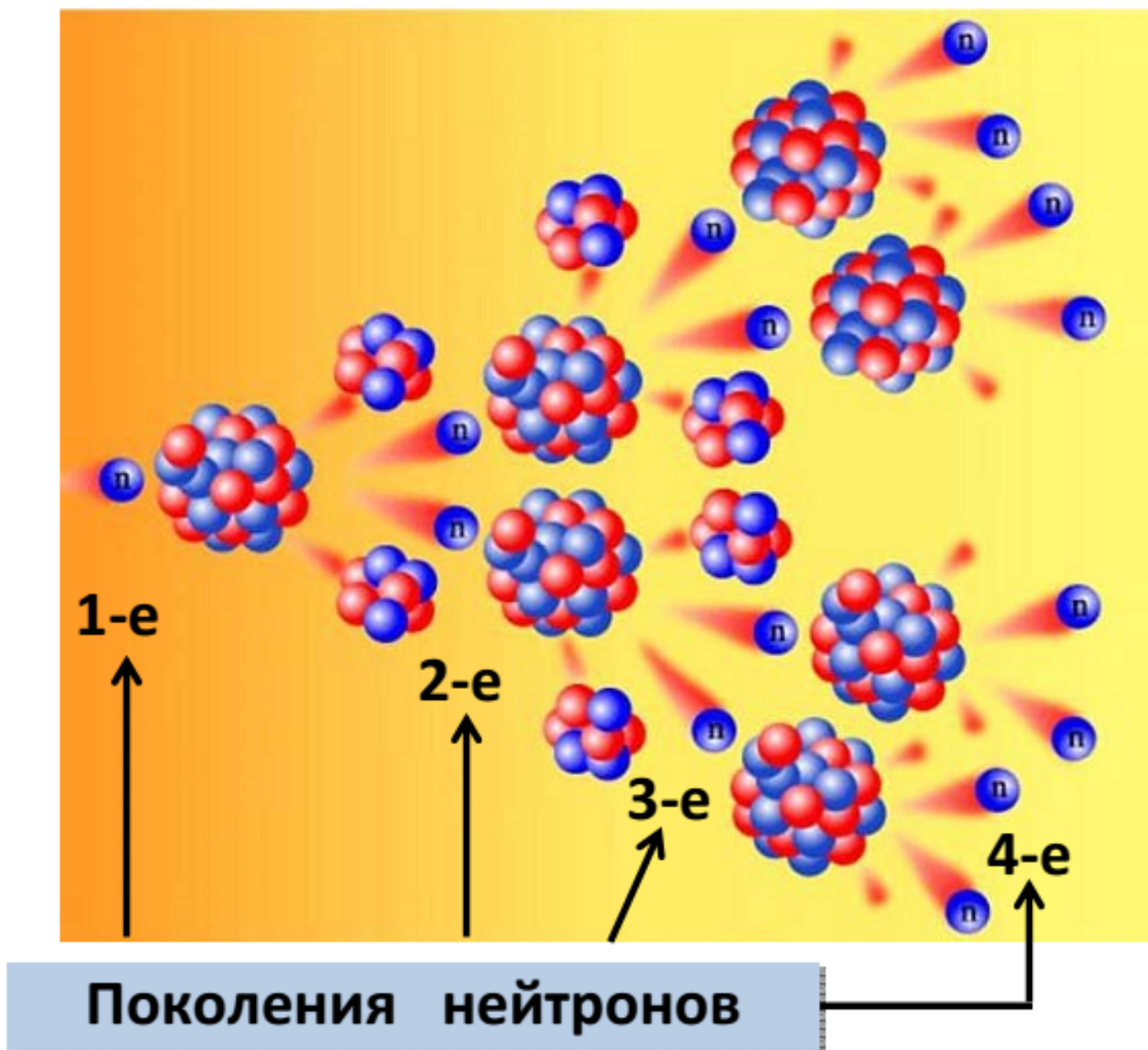
Запаздывающие нейтроны



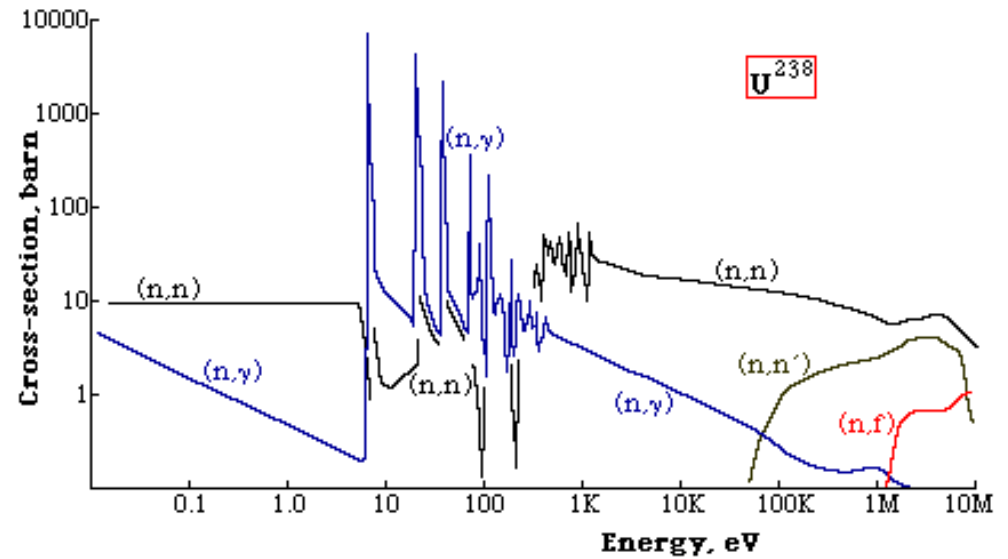
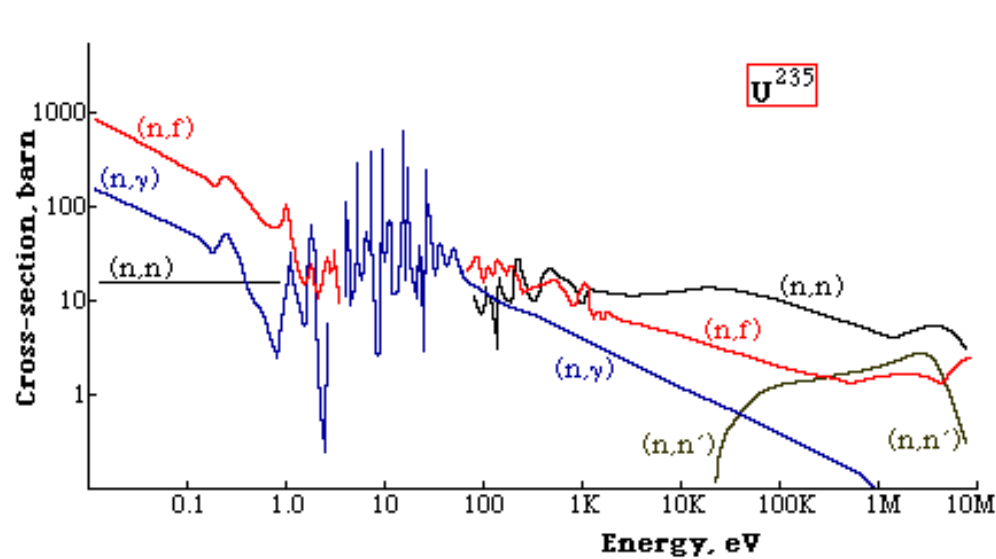
Запаздывающие нейтроны деления ^{87}Kr

ЦЕПНАЯ РЕАКЦИЯ ДЕЛЕНИЯ

Цепная реакция деления



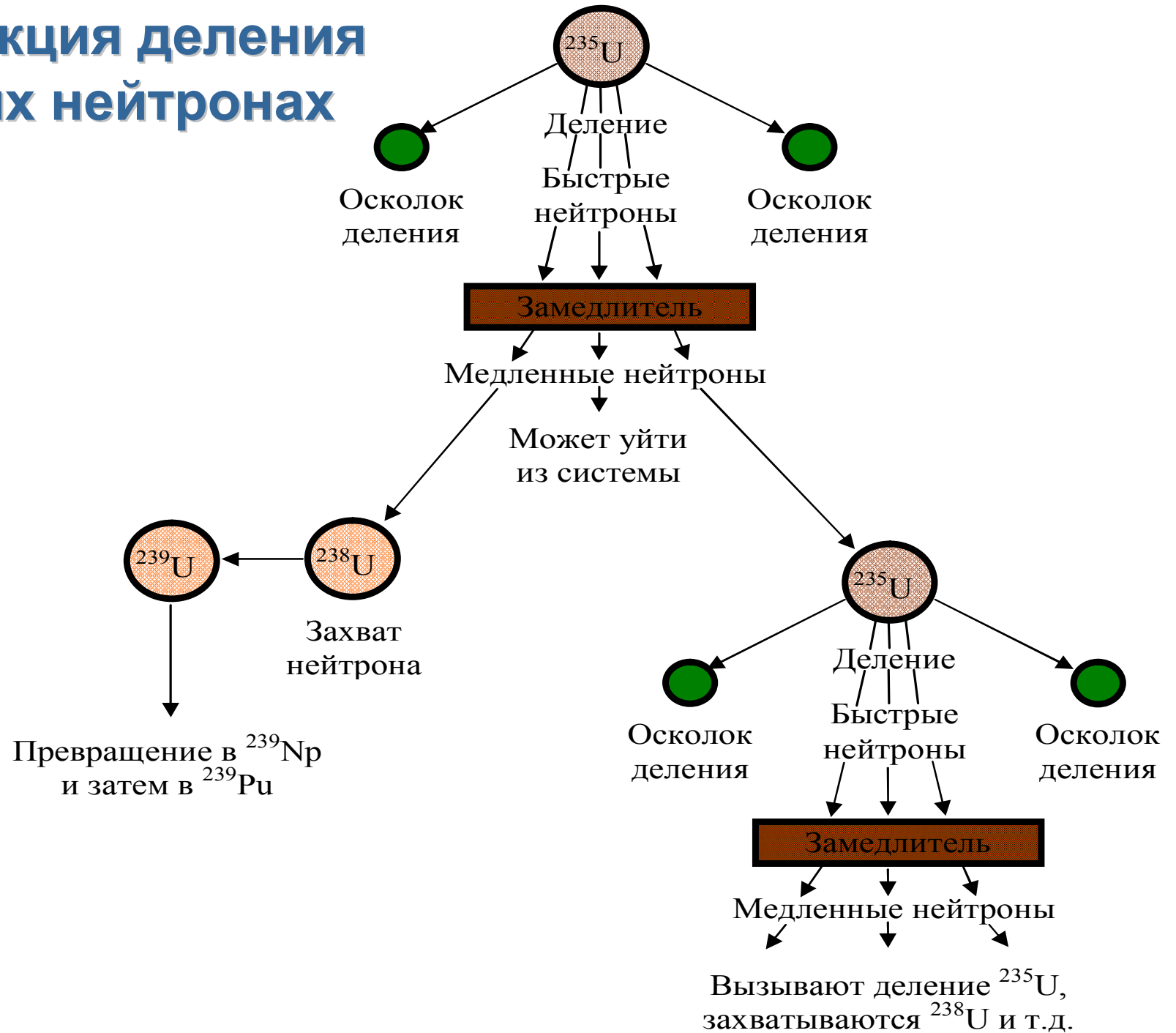
Реакции (n,f), (n, γ), (n,n), (n,n') на ^{235}U , ^{238}U



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

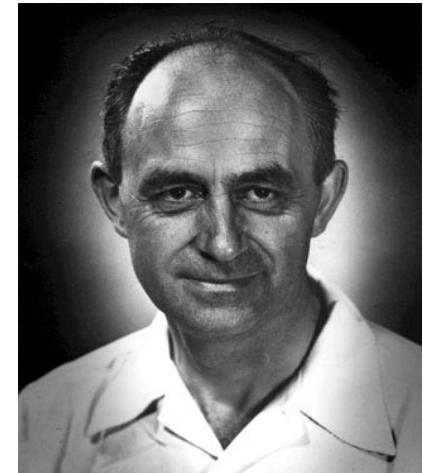
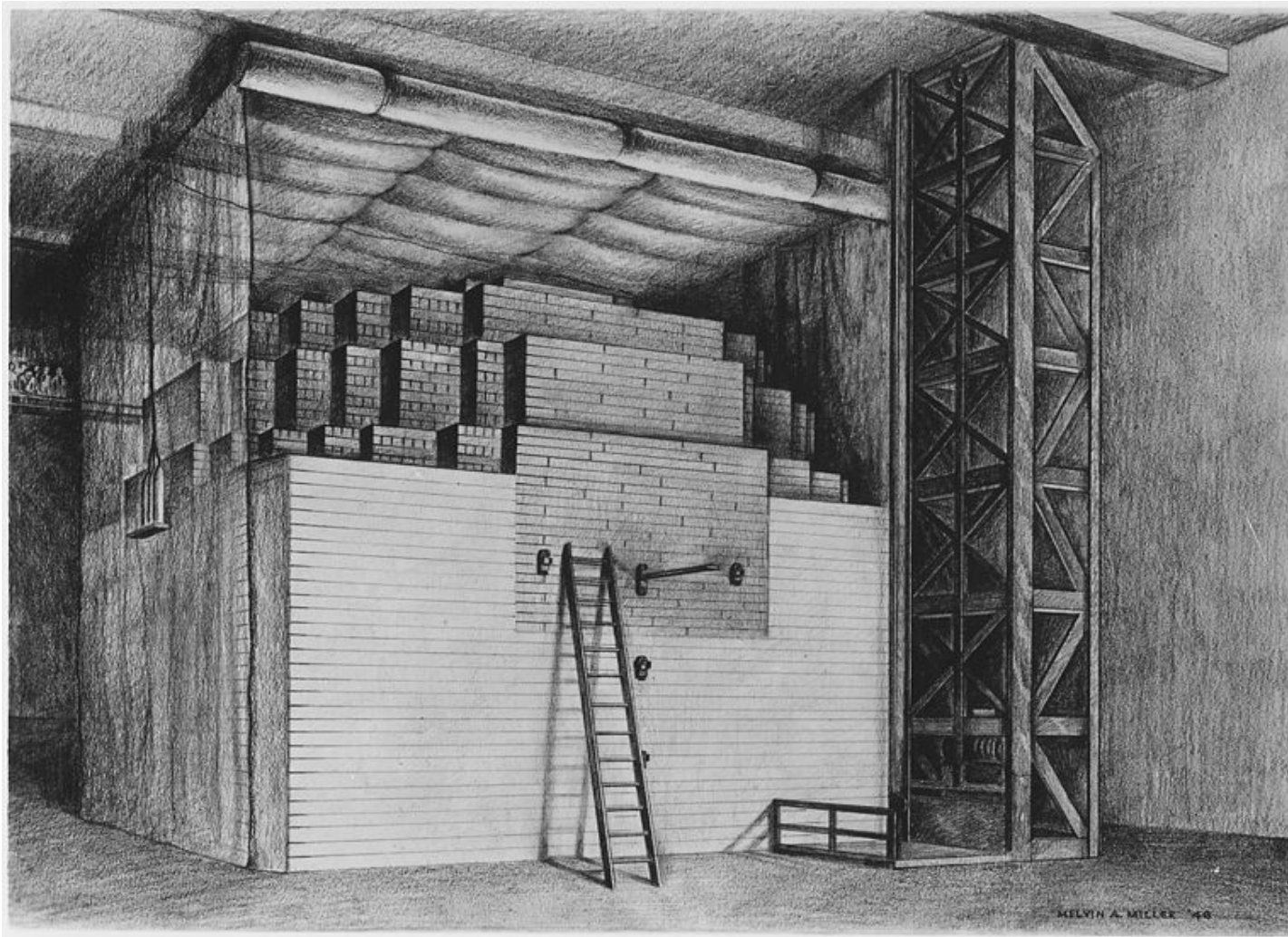
Величина T лежит в пределах 10^{-4} - 10^{-5} с для медленных реакций и 10^{-7} - 10^{-8} с для быстрых. Видно, что даже в самом благоприятном для управления случае ($T=10^{-4}$ с) количество нейтронов возрастет в 100 раз при $k-1 = 10^{-3}$ за 0.46 с.

Управлять цепной реакцией на основе мгновенных нейтронов технически очень сложно.

Наличие запаздывающих нейтронов со средним временем жизни ~ 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

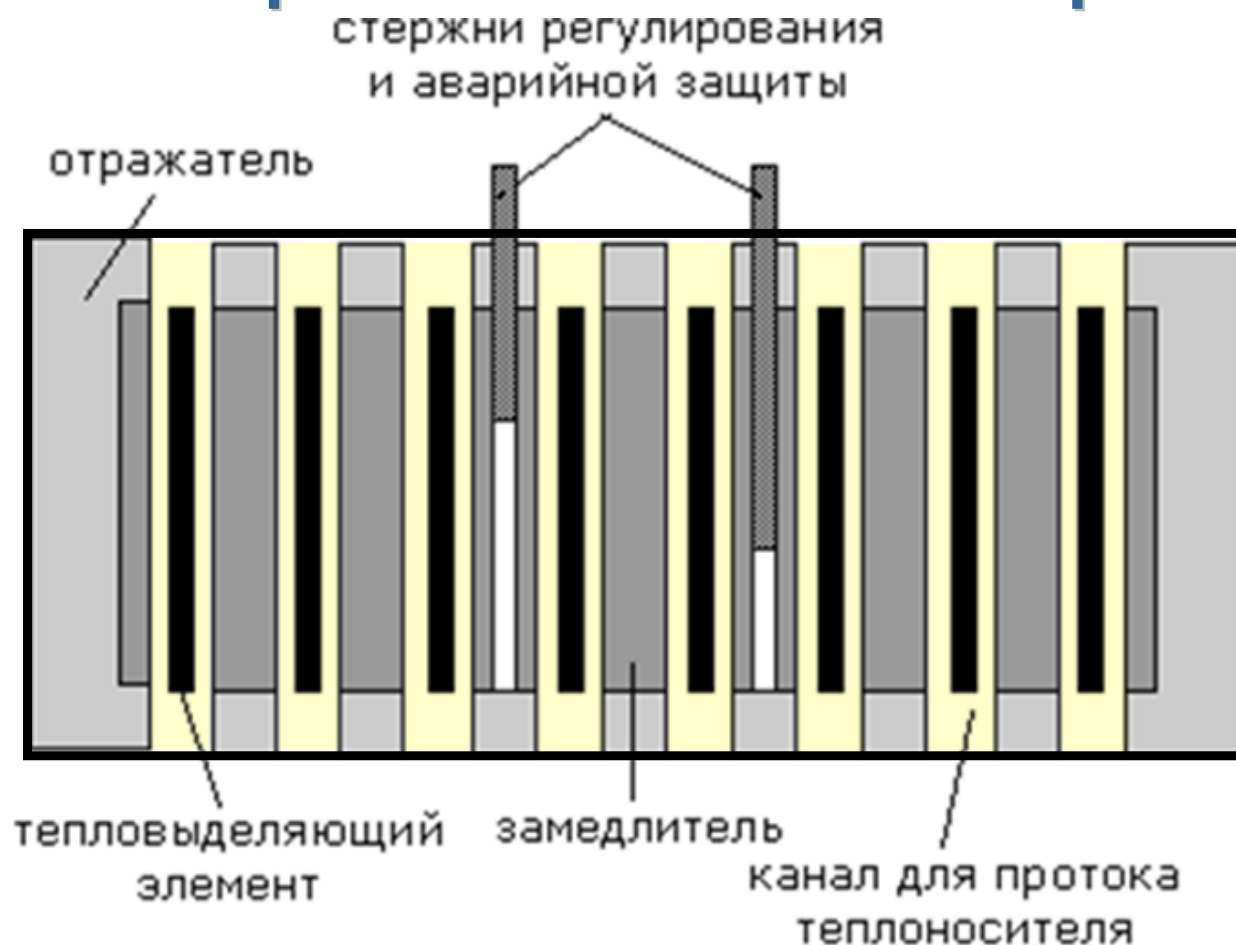
Горючее 130 твелов 550 кг обогащенного ^{235}U - 5%

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

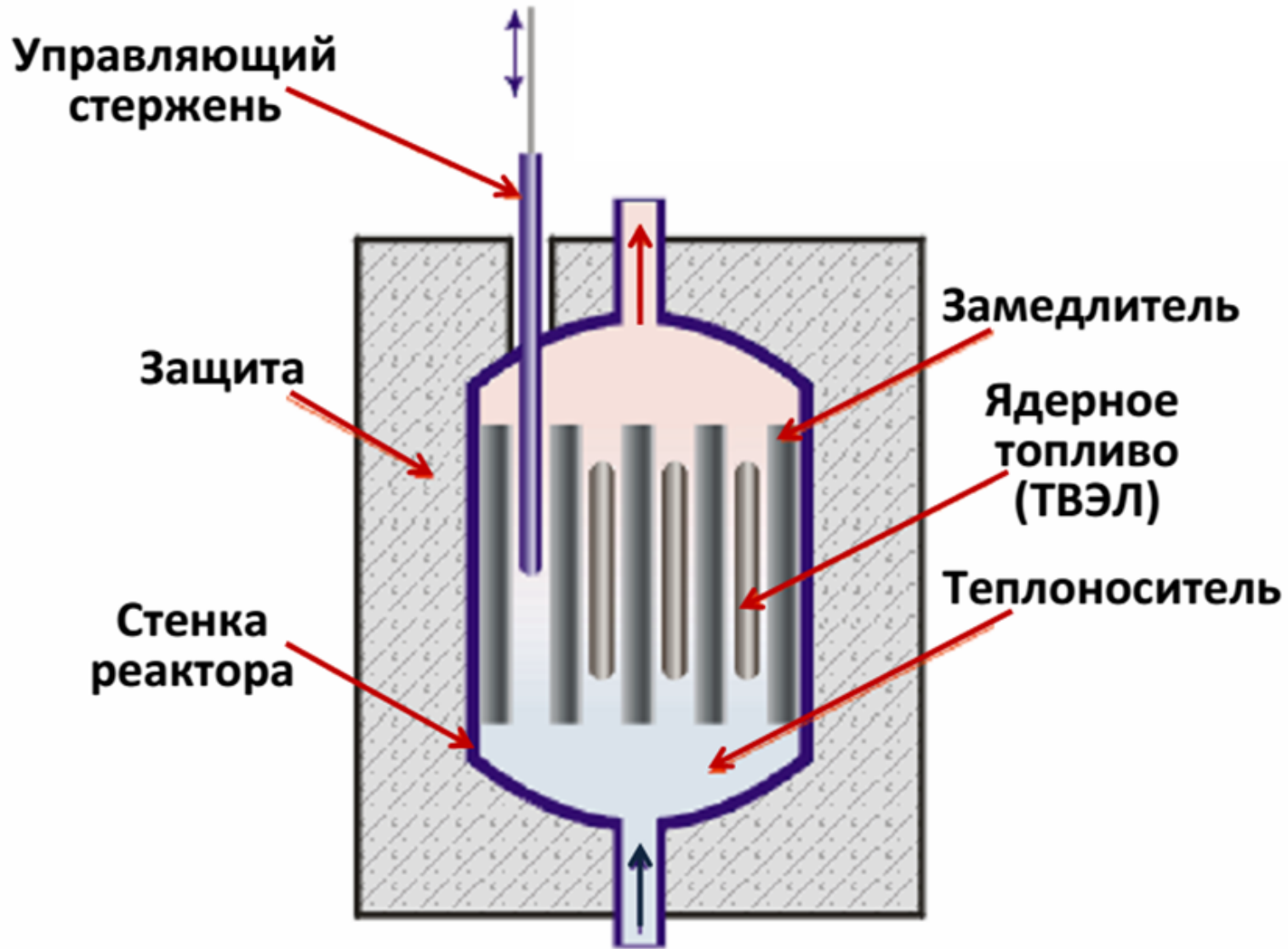
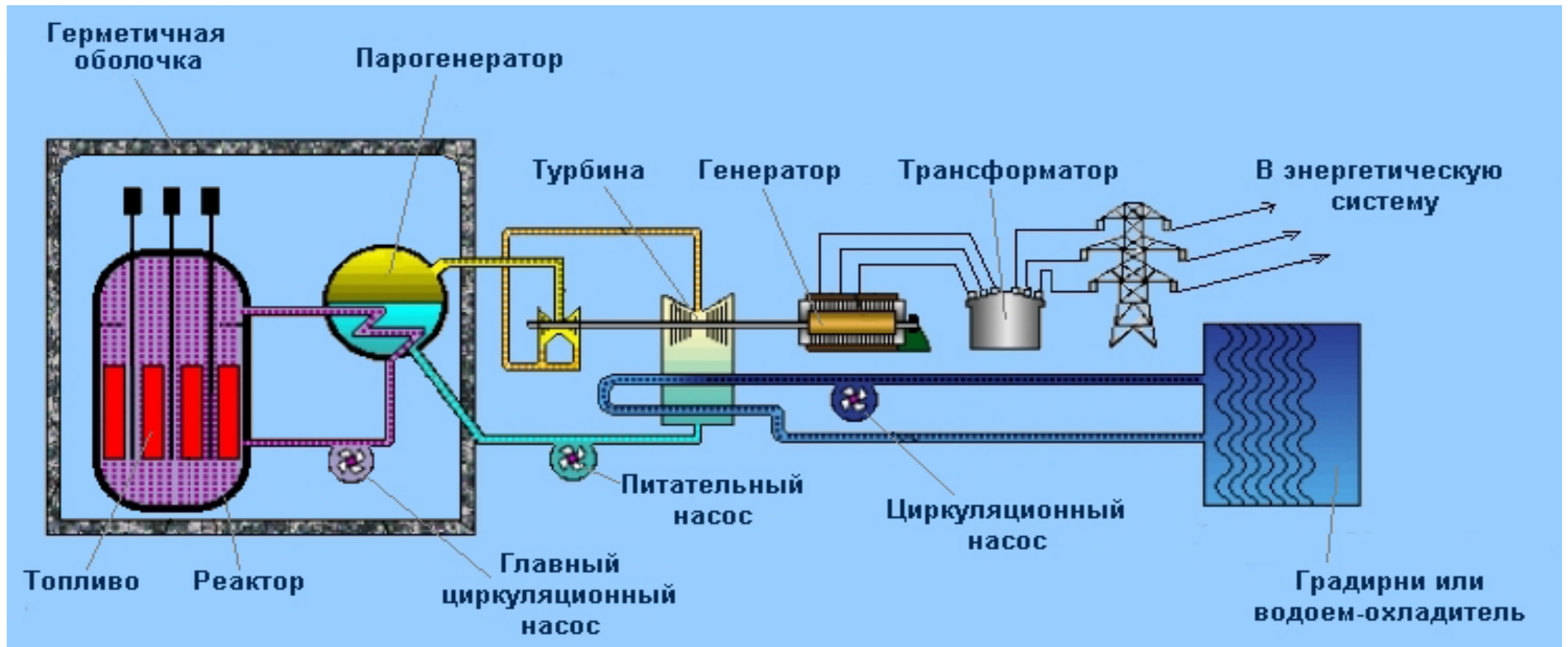


Схема работы АЭС

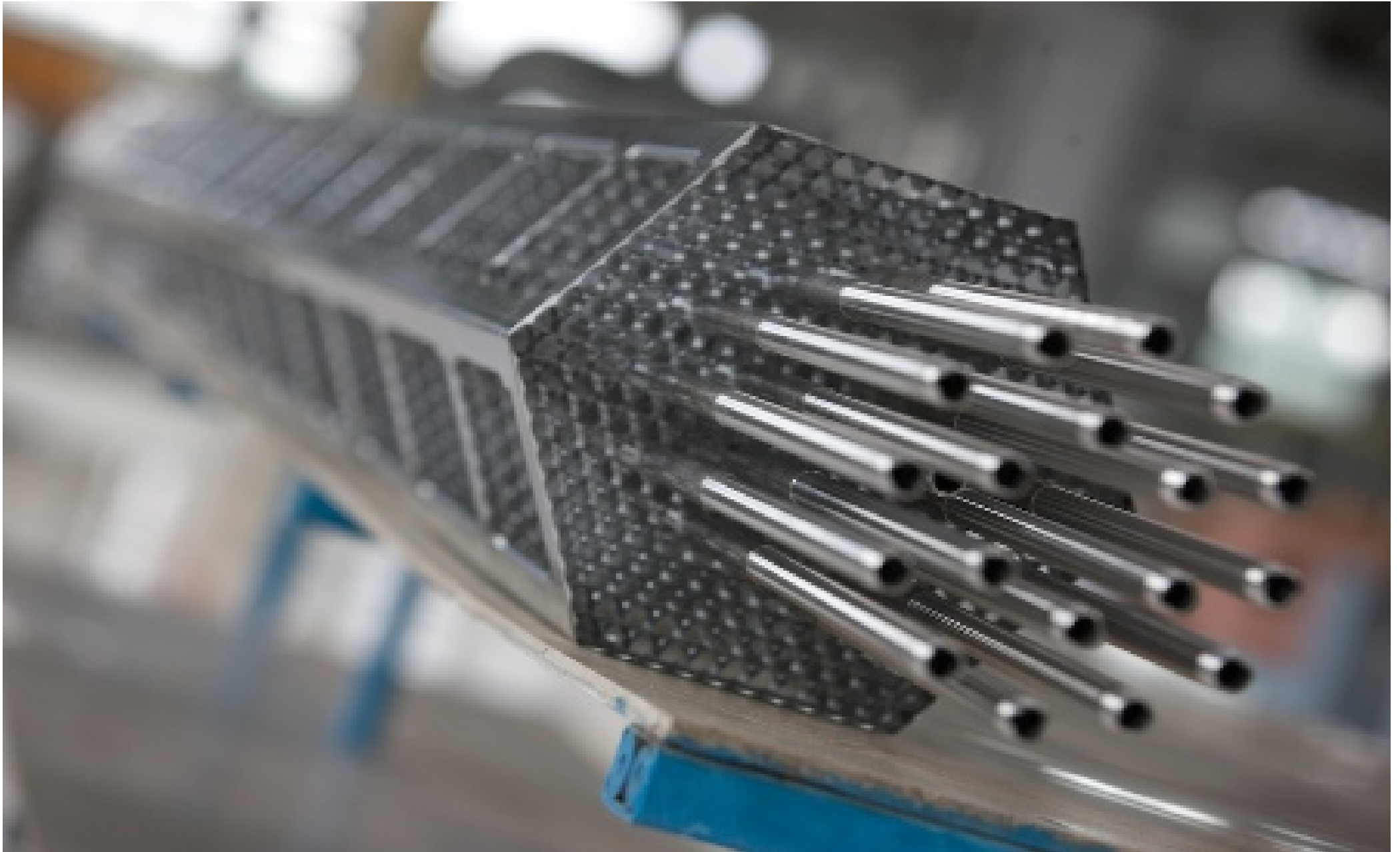
Деление 1 г урана-235 в течение суток даёт мощность в 1 МВт



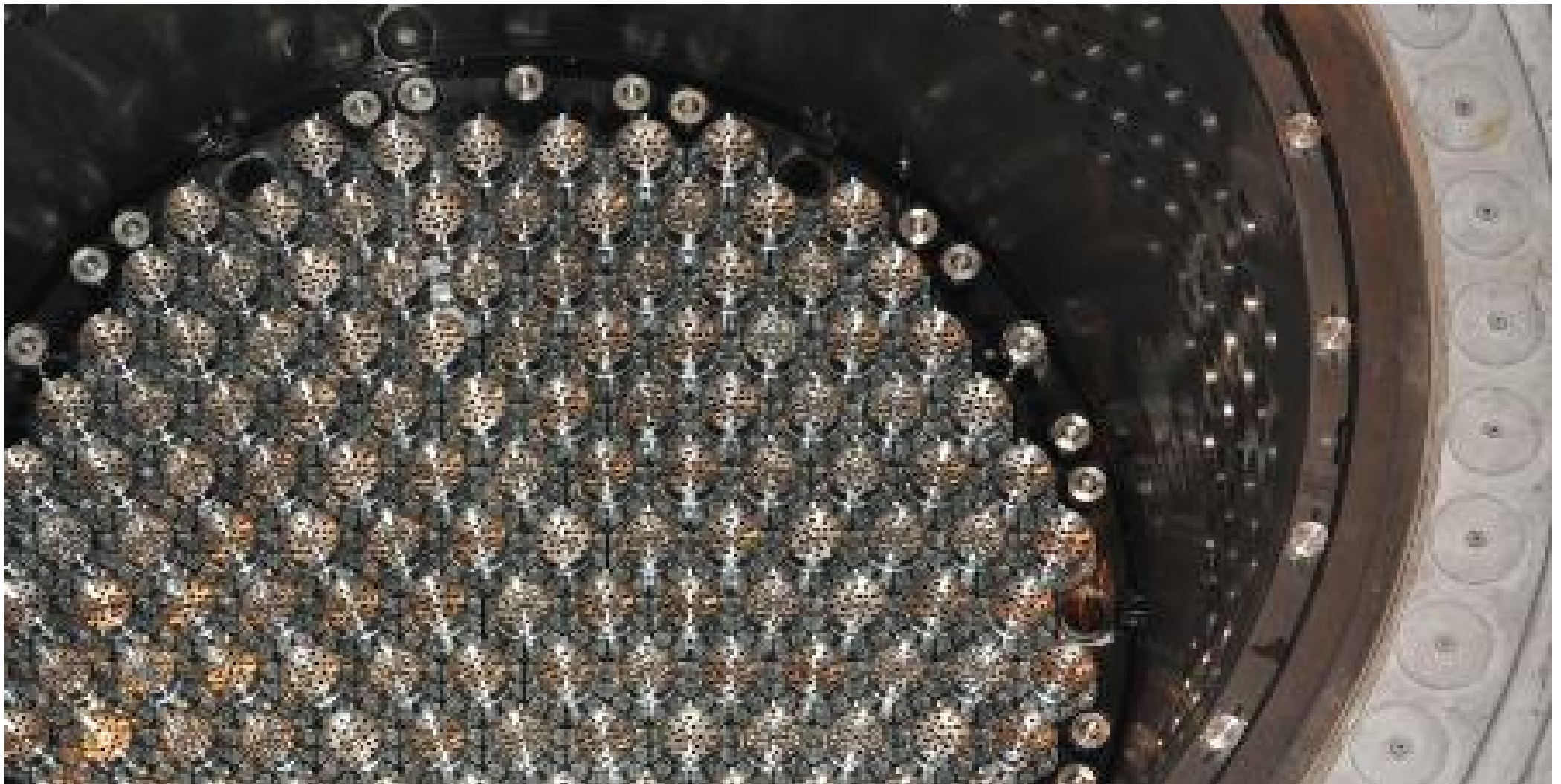
Ядерное топливо



Сборка ТВЭЛ



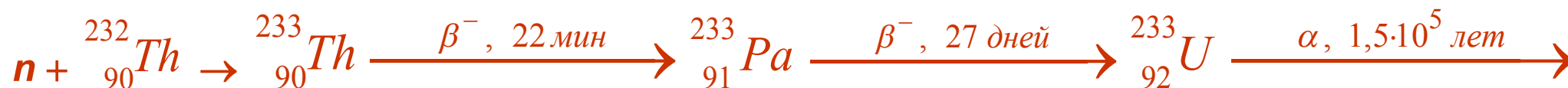
Сборки в корпусе реактора



Корпус реактора ВВЭР



Воспроизводство ядерного горючего



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