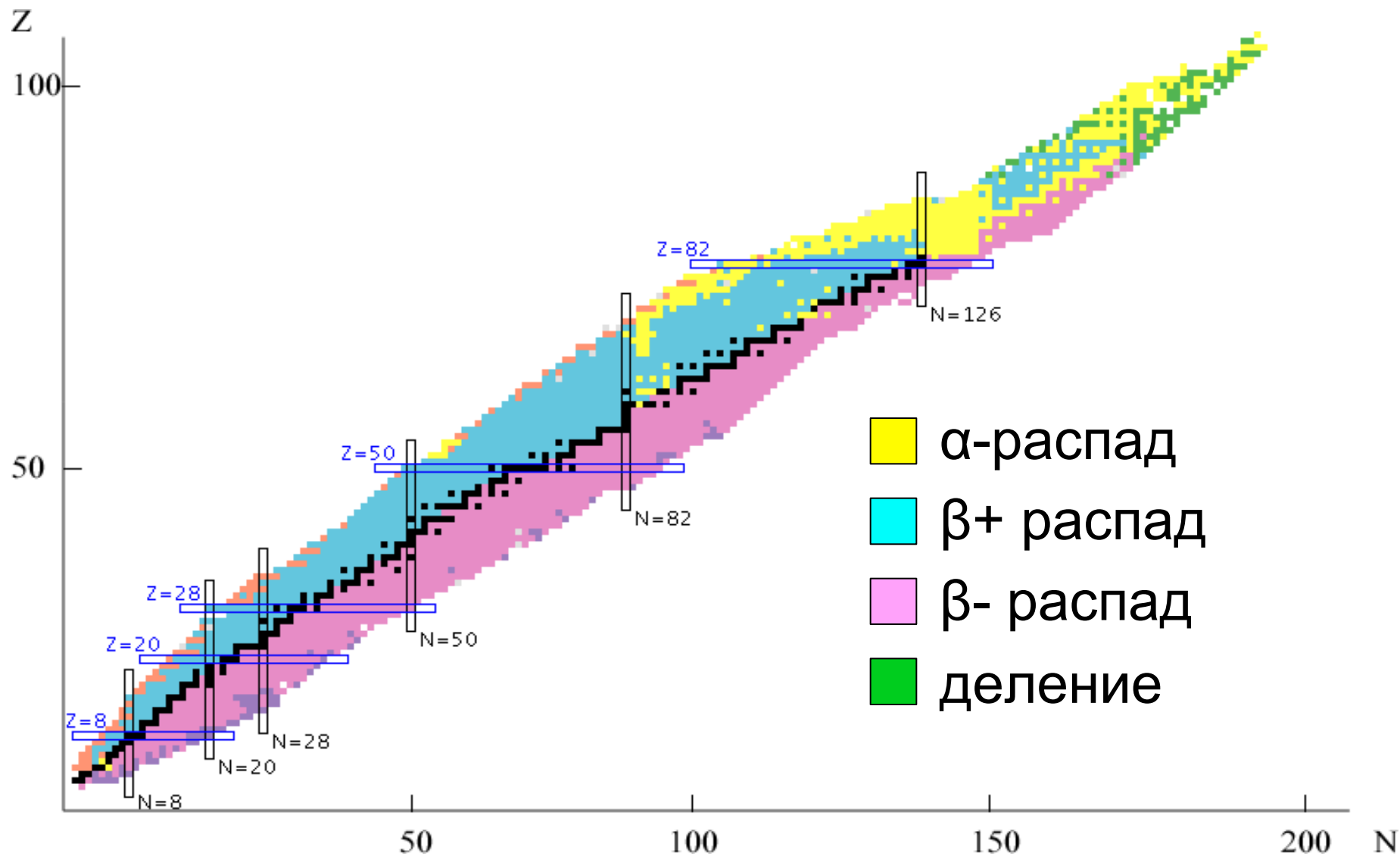


# Микромир и Вселенная 2018

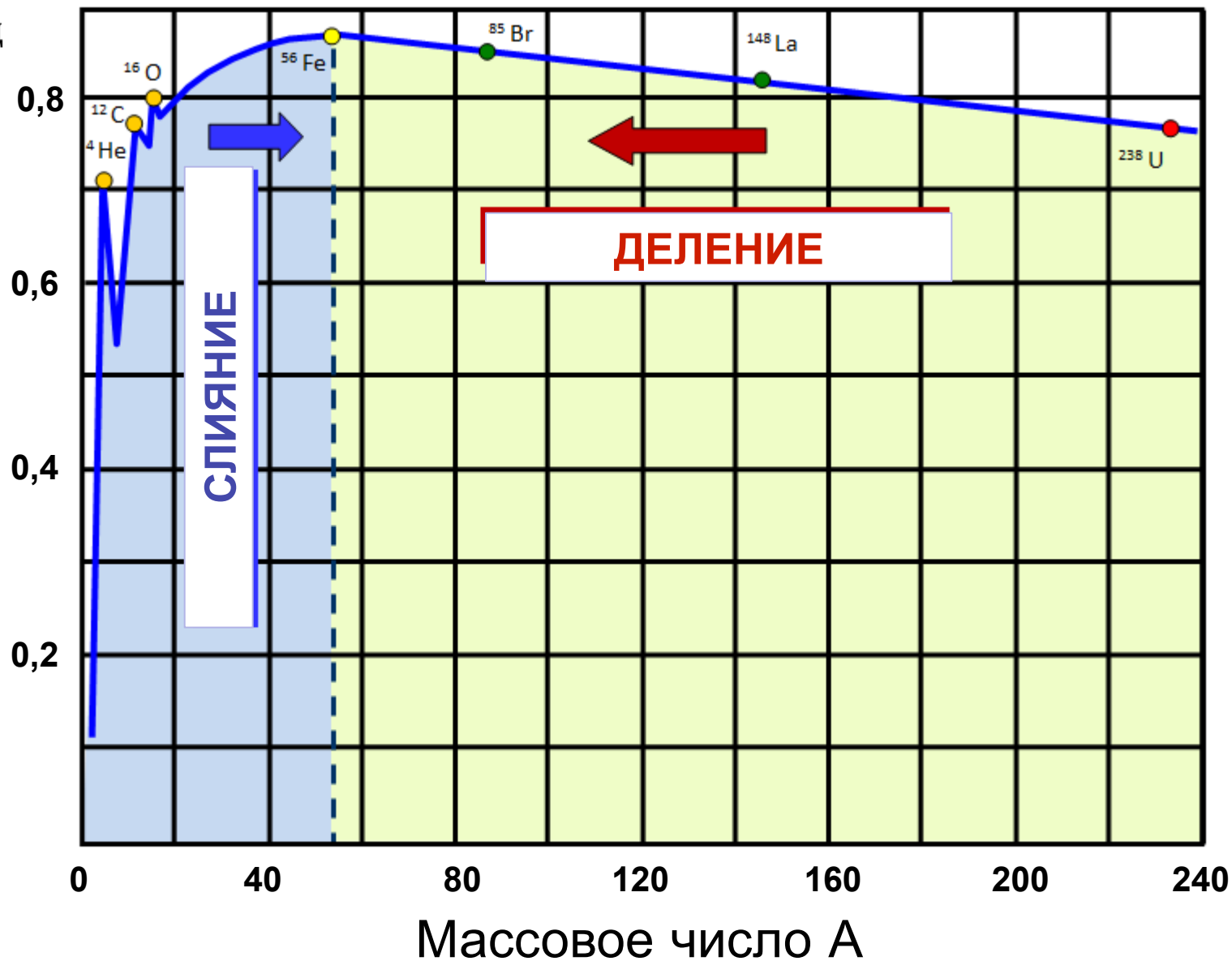
# ДЕЛЕНИЕ

# N-Z диаграмма атомных ядер



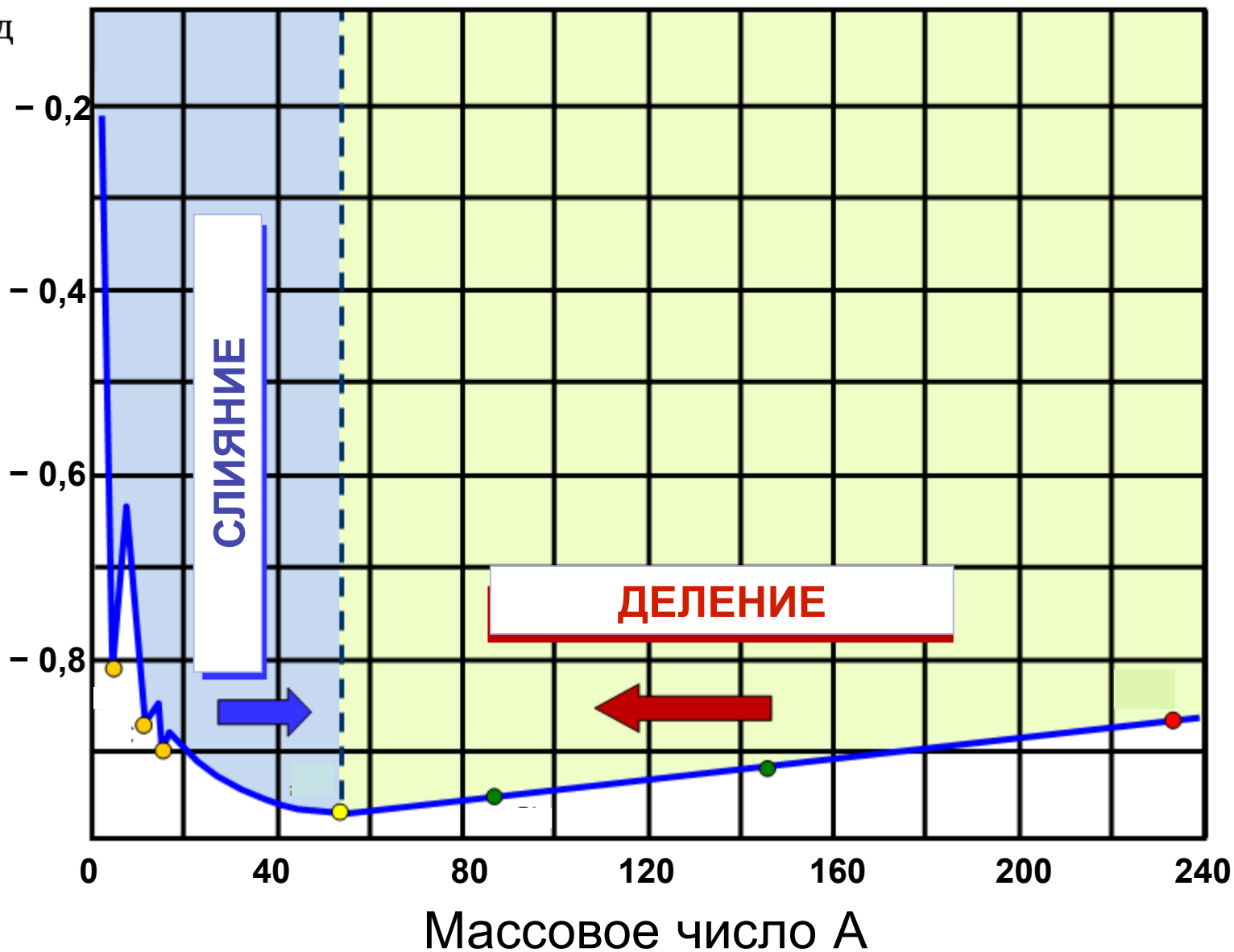
# Удельная энергия связи ядра $\epsilon(A, Z)$

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



# Удельная энергия связи ядра $\epsilon(A, Z)$

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



# 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  $W(A,Z)$

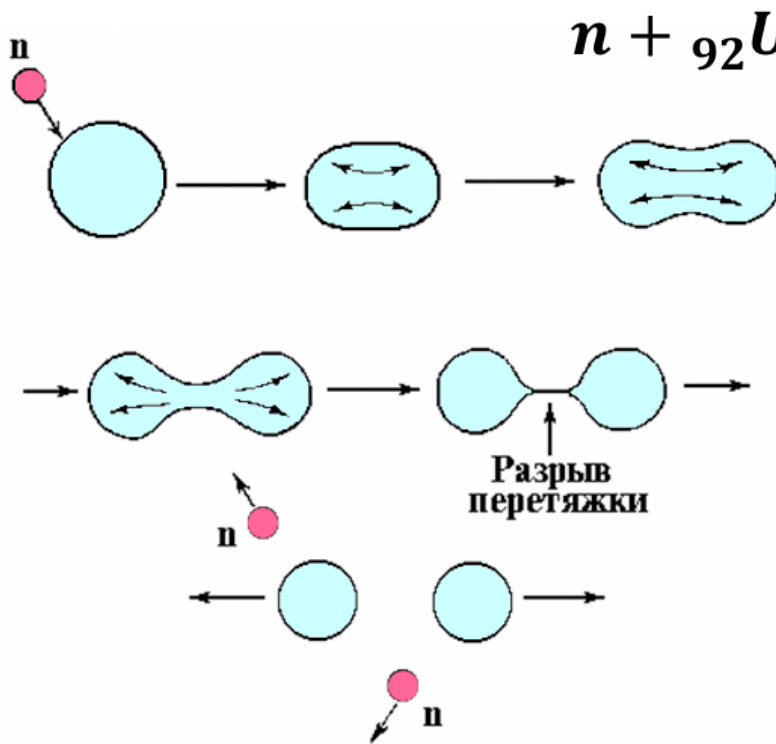
$$\begin{aligned} M(A,Z)c^2 + W(A,Z) &= \\ &= Z \cdot m_p c^2 + (A - Z)m_n c^2 \end{aligned}$$

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

# Деление ядер

1934 г. — Э. Ферми Опыты по синтезу трансуранов (облучение урана тепловыми нейтронами).

1938 г. — О. Ган и Ф. Штрассман обнаружили при облучении урана нейтронами среди продуктов реакции барий.



1939 г. — Л. Мейтнер и О. Фриш объяснение процесса деления урана под действием нейтронов.

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

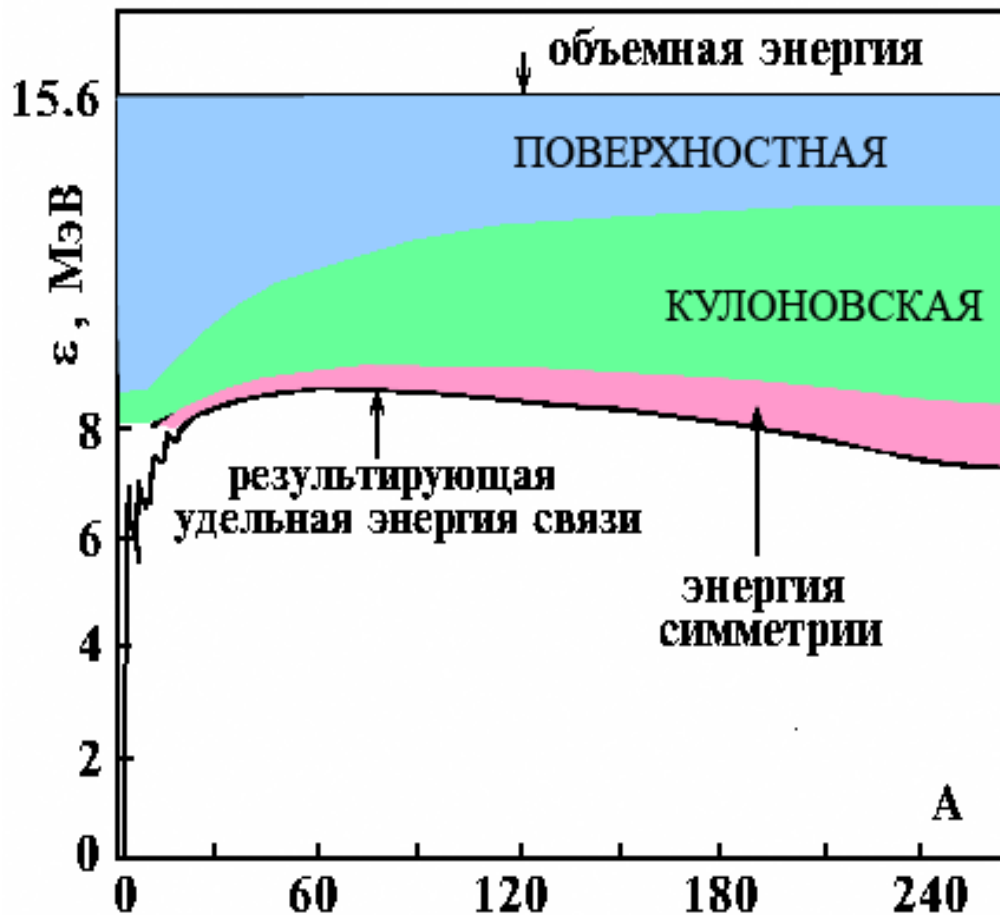
$$\tilde{E}_{\text{кул}} = E_{\text{кул}} \left(1 - \frac{1}{5} \varepsilon^2\right)$$

$$\tilde{E}_{\text{пов}} + \tilde{E}_{\text{кул}} \approx E_{\text{пов}} + E_{\text{кул}} + \varepsilon^2/5 (2E_{\text{пов}} - E_{\text{кул}})$$



# Формула Бете-Вайцзеккера

$$W(A, Z) = \alpha A - \beta A^{2/3} - \gamma \frac{Z(Z-1)}{A^{1/3}} - \delta \frac{(A-2Z)^2}{A}$$



$\alpha = 15.6$  МэВ,  
 $\beta = 17.2$  МэВ,  
 $\gamma = 0.72$  МэВ,  
 $\delta = 23.6$  МэВ.

# Формула Бете-Вайцзеккера

$$W(A, Z) = \alpha A - \beta A^{2/3} - \gamma \frac{Z(Z-1)}{A^{1/3}} - \delta \frac{(A-2Z)^2}{A}$$

Деление ядра  $(A, Z)$   
на два равных осколка  $2(A/2, Z/2)$



$$\begin{aligned}\alpha &= 15.6 \text{ МэВ,} \\ \beta &= 17.2 \text{ МэВ,} \\ \gamma &= 0.72 \text{ МэВ,} \\ \delta &= 23.6 \text{ МэВ.}\end{aligned}$$

$$Q = M(A, Z) - 2M(A/2, Z/2) = 2W(A/2, Z/2) - W(A, Z)$$

$$\begin{aligned}Q &= \beta A^{2/3} (1 - 2^{1/3}) + \gamma \frac{Z^2}{A^{1/3}} (1 - 2^{-2/3}) = \\ &= (A = 200, Z = 90) = 216 \text{ МэВ}\end{aligned}$$

# Параметр делимости

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

**Я. Френкель** развил капельную теорию деления ядер медленными нейтронами.

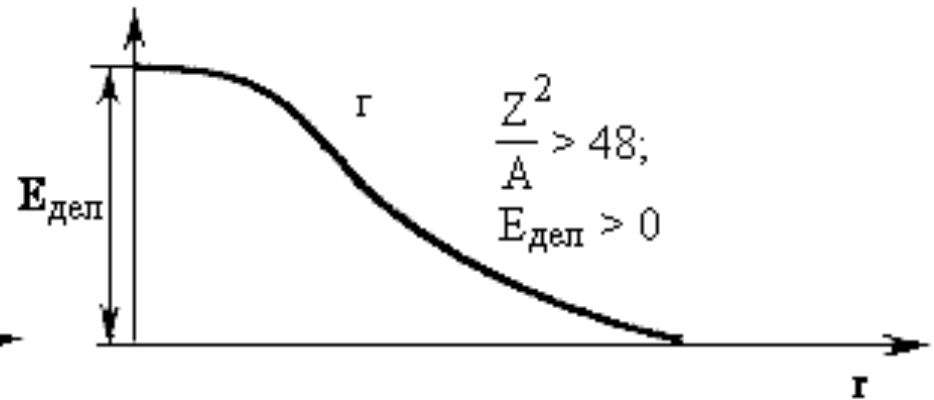
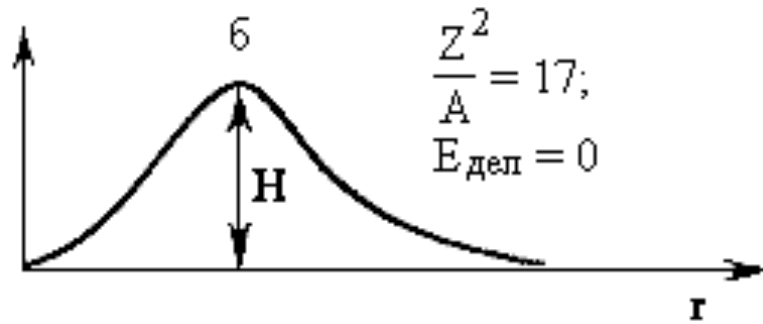
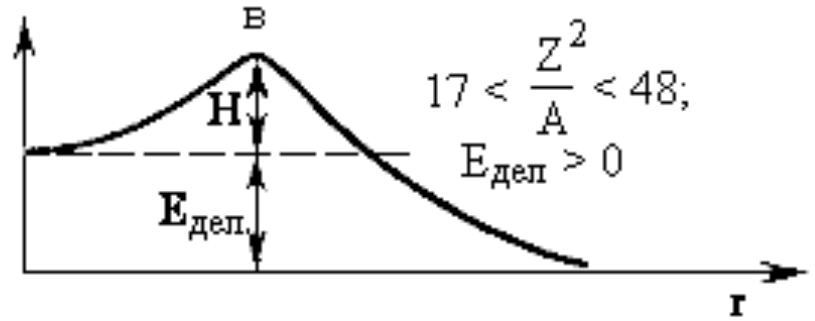
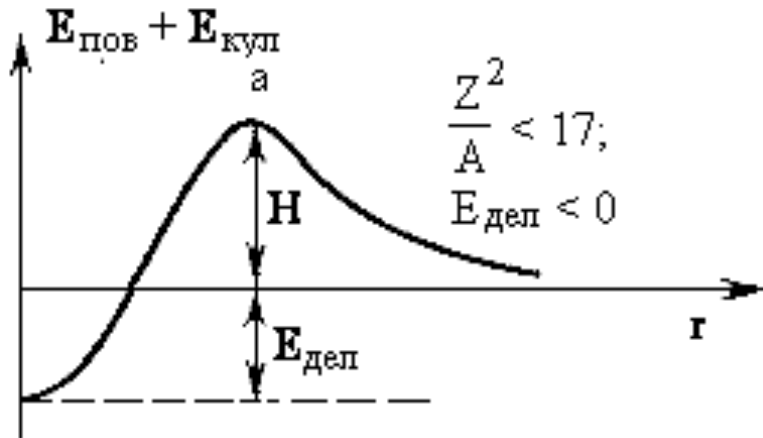
$$Q = \beta A^{2/3} (1 - 2^{1/3}) + \gamma \frac{Z^2}{A^{1/3}} (1 - 2^{-2/3}) > 0$$

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

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

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

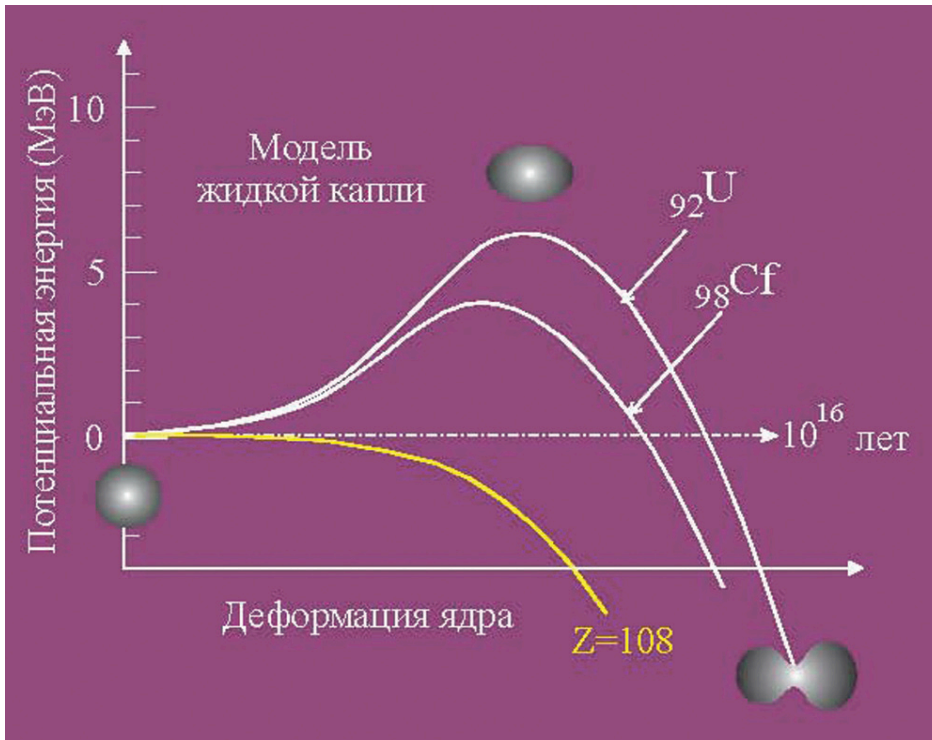
# Барьер деления



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

$$Z = 120 \div 125$$

# 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

$$B_n \geq H$$

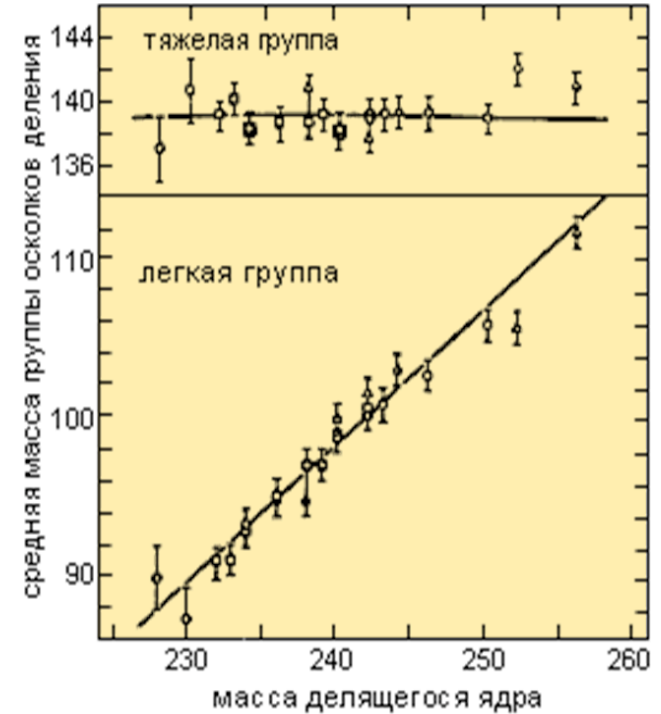
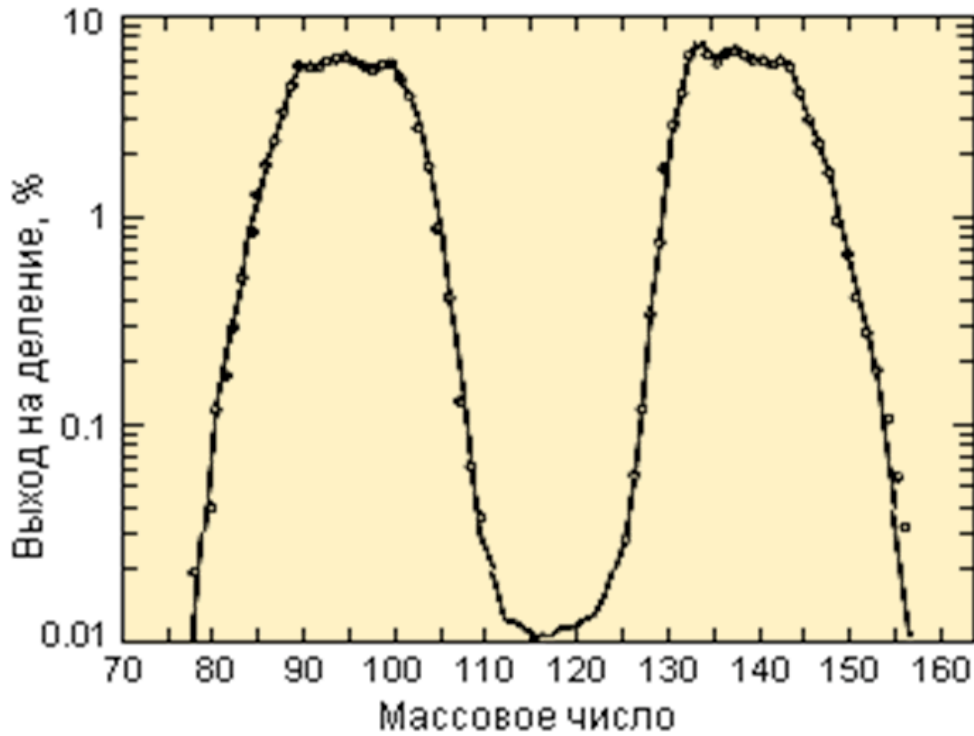
$$T_n \cong 0$$

(медленные нейтроны)

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

**1939 г. — К. Петржак и Г. Флеров** открыли спонтанное деление ядер урана  ${}^{235}\text{U}$ .

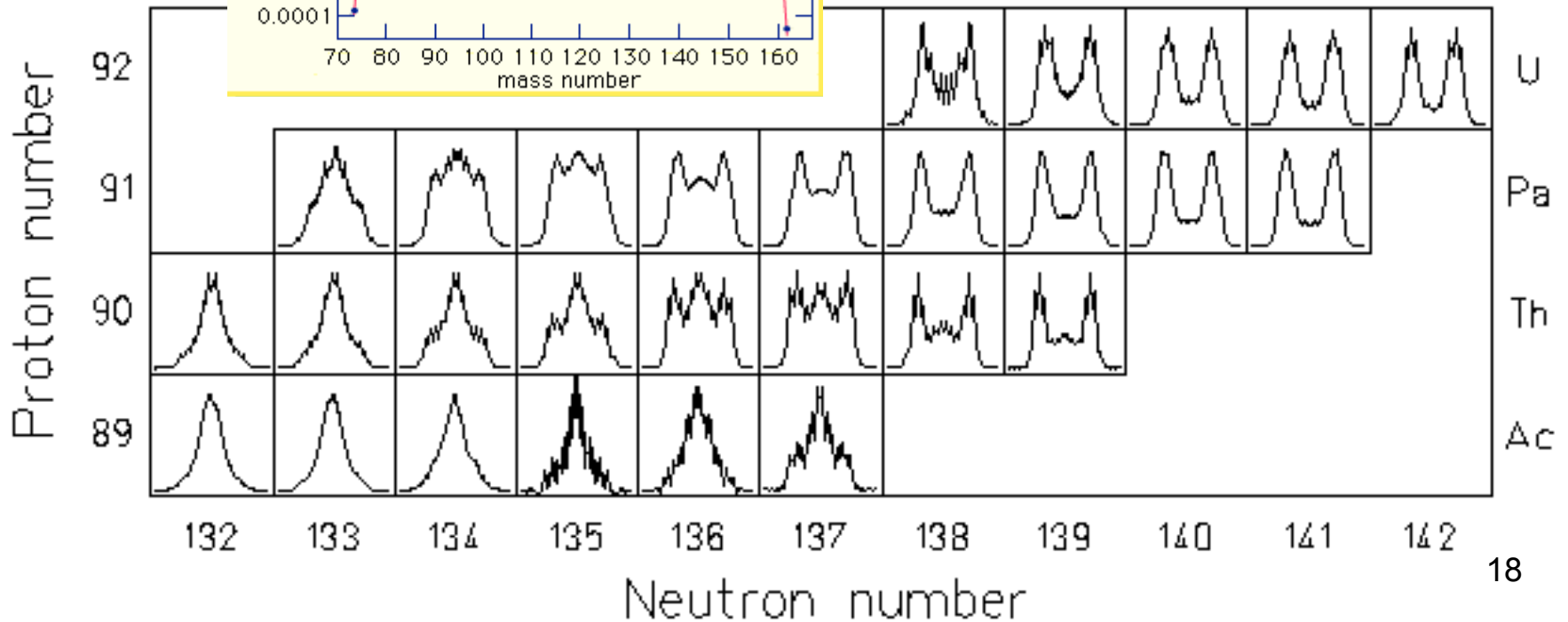
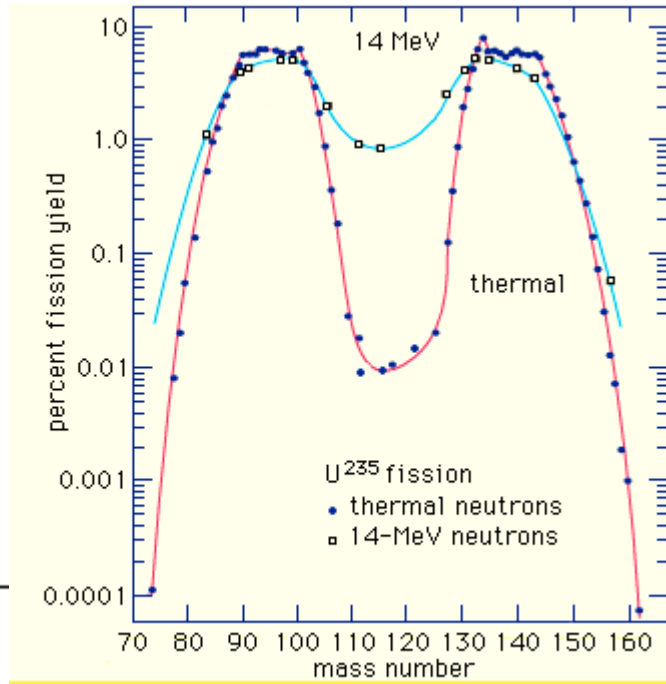
# Массовое распределение осколков деления

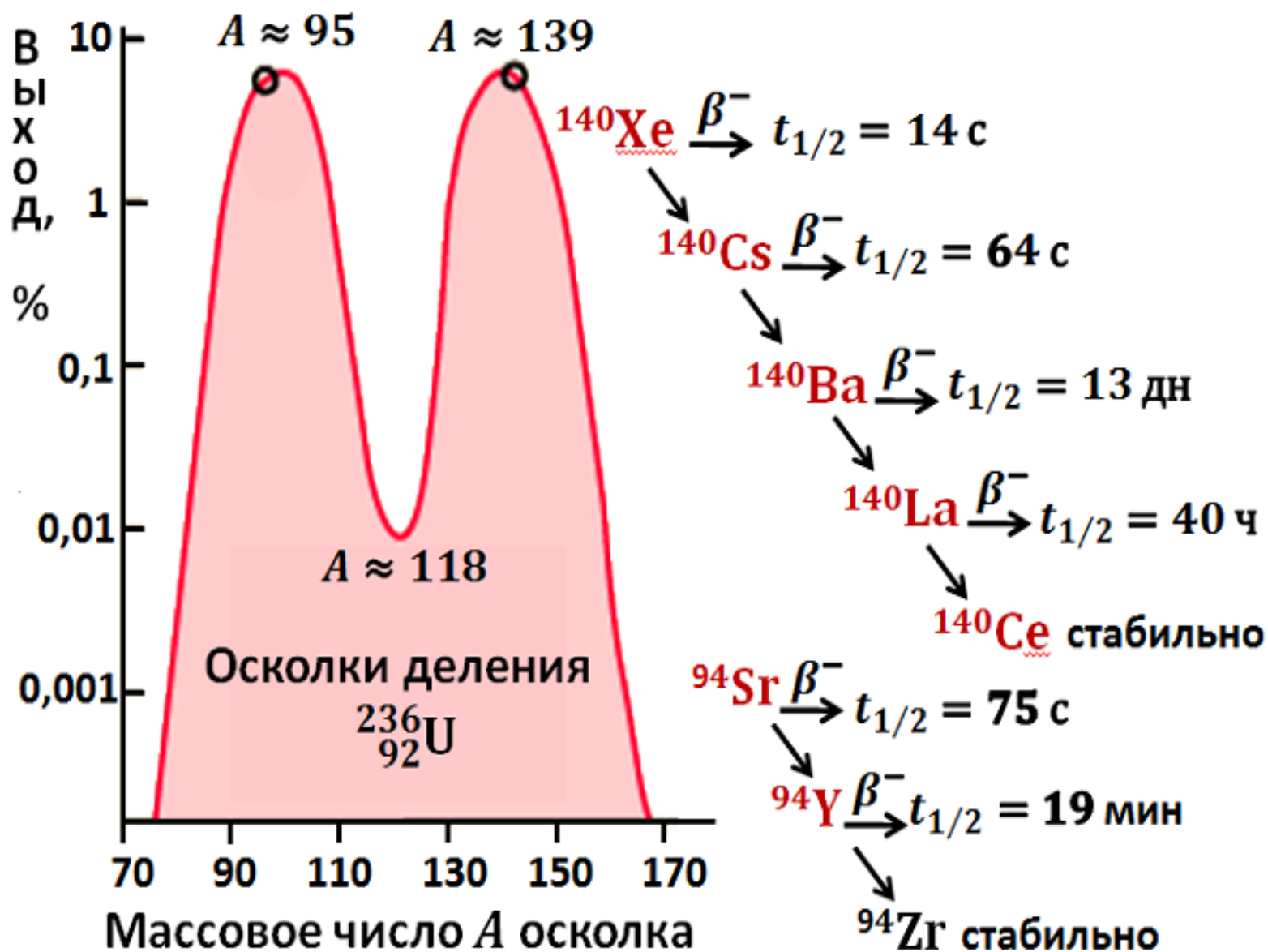


$$A = 72-161 \quad Z = 30-65.$$

$$\frac{A_{\text{Л}}}{A_{\text{Т}}} \approx \frac{2}{3}, \quad \frac{Z_{\text{Л}}}{Z_{\text{Т}}} \approx \frac{2}{3}.$$

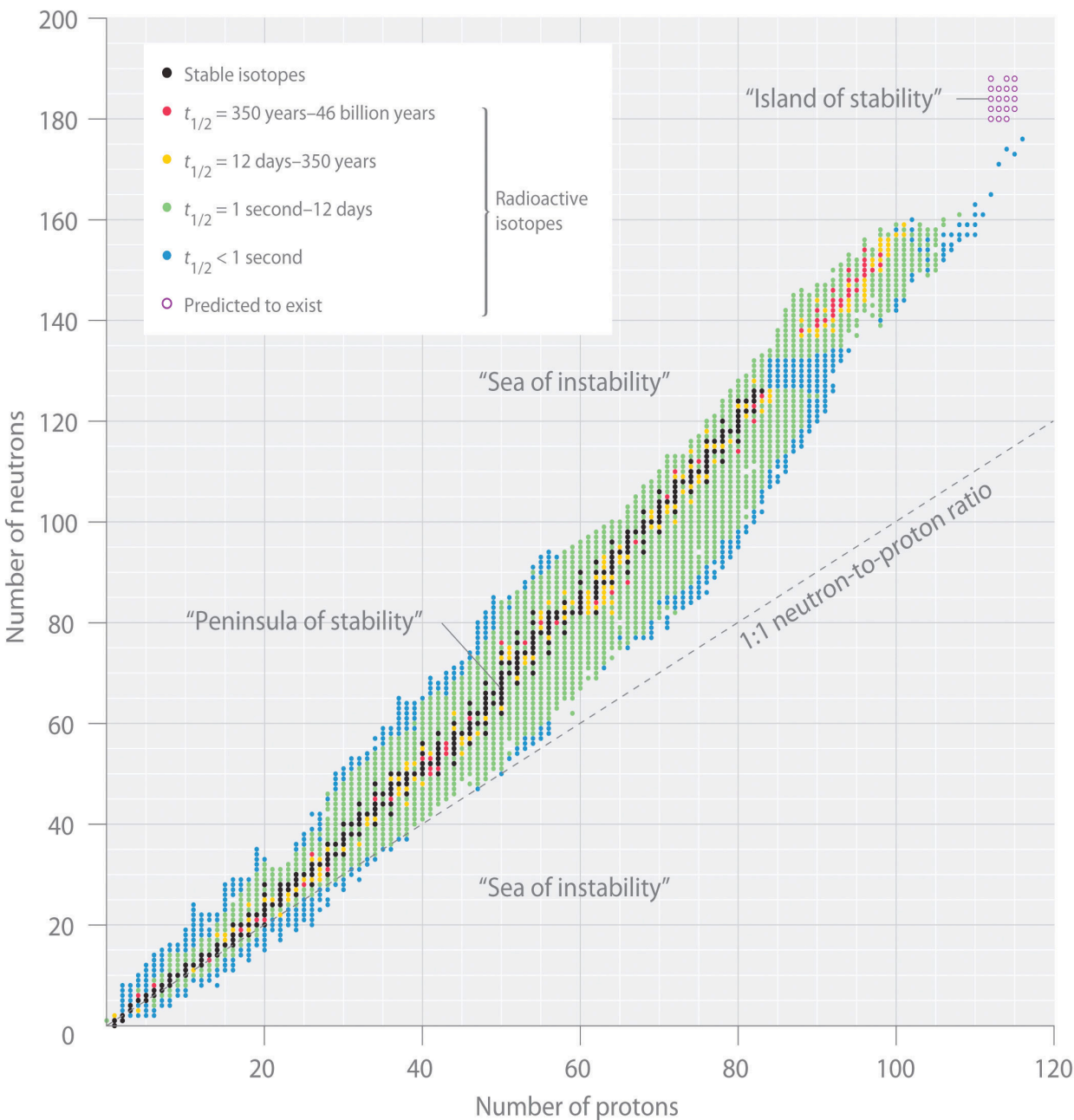
# Массовое распределение осколков деления







# Нейтроны деления



**1939 г.** — Л. Мейтнер  
и О. Фриш  
объяснение процесса  
деления урана под  
действием нейтронов.

$$\frac{N_{\text{оск}}}{Z_{\text{оск}}} = \frac{N_U}{Z_U} = \frac{146}{92} = 1,6$$

$$N/Z({}_{56}\text{Ba}) = \mathbf{1,45}$$

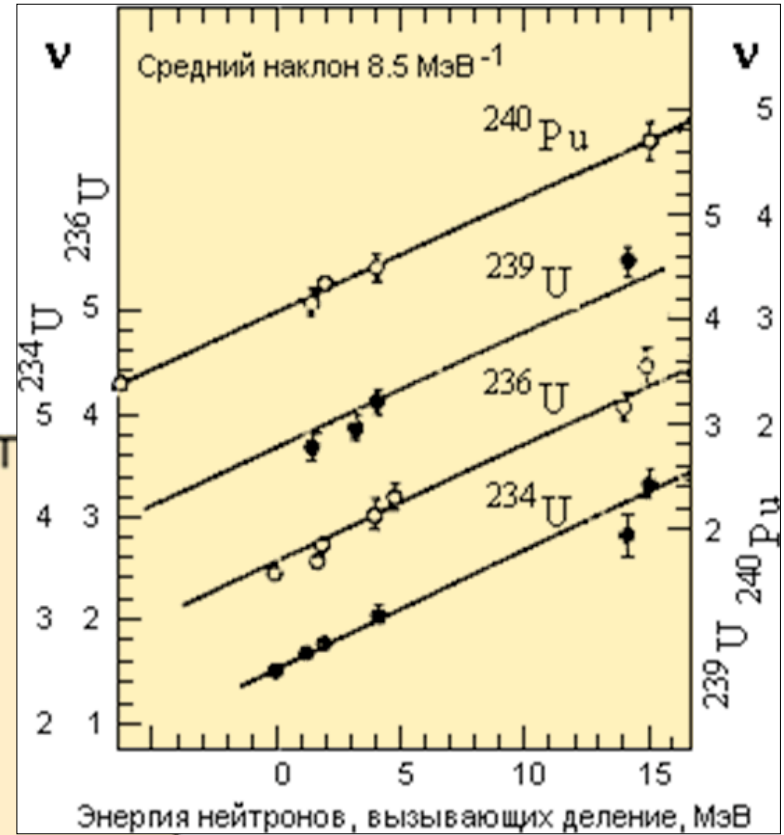
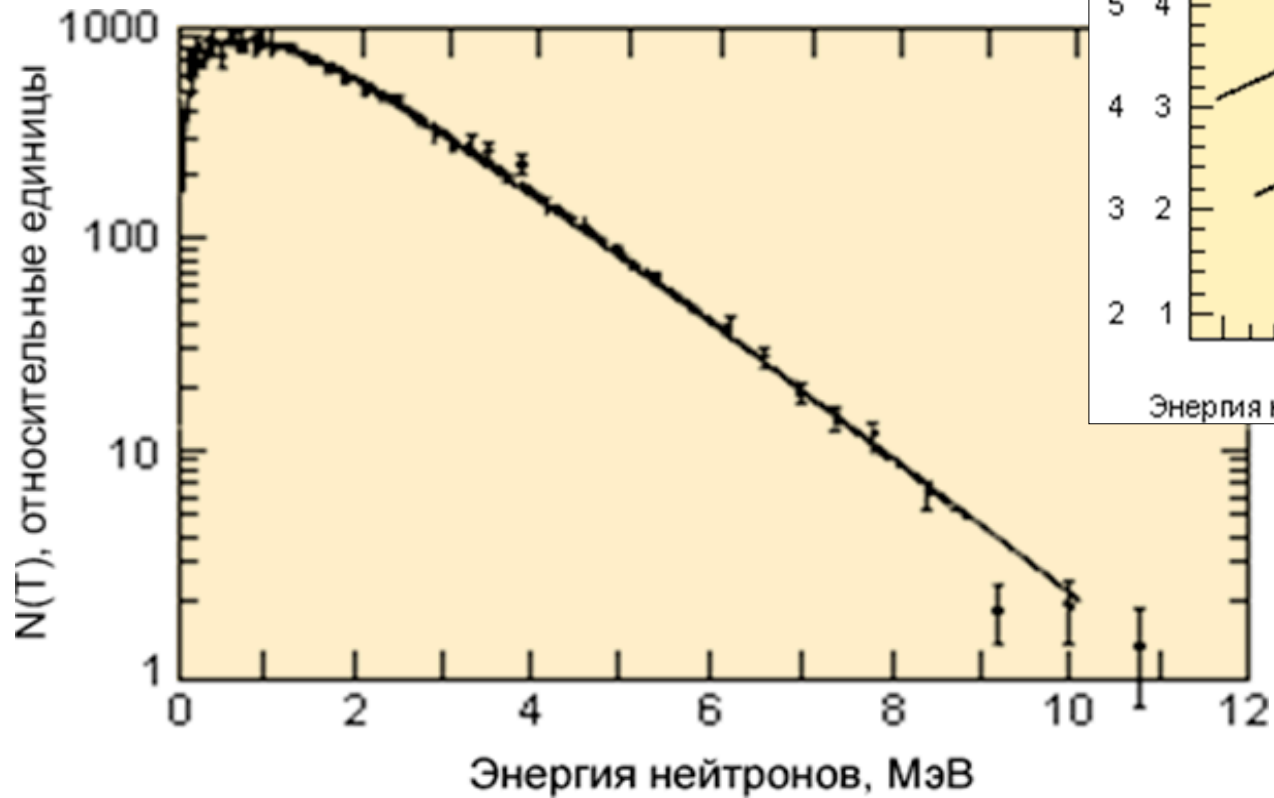
**Вторичные нейтроны**

$$\nu_n = 2,5$$

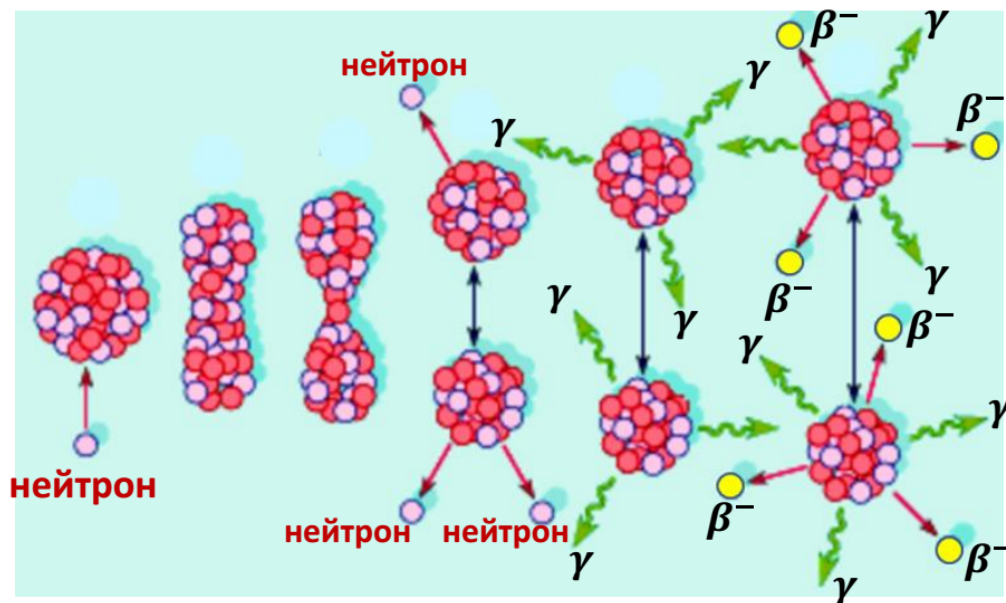
$$\bar{T}_n \cong 2 \text{ МэВ}$$

# Нейтроны деления

## Спектр нейтронов 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	<b>200</b>

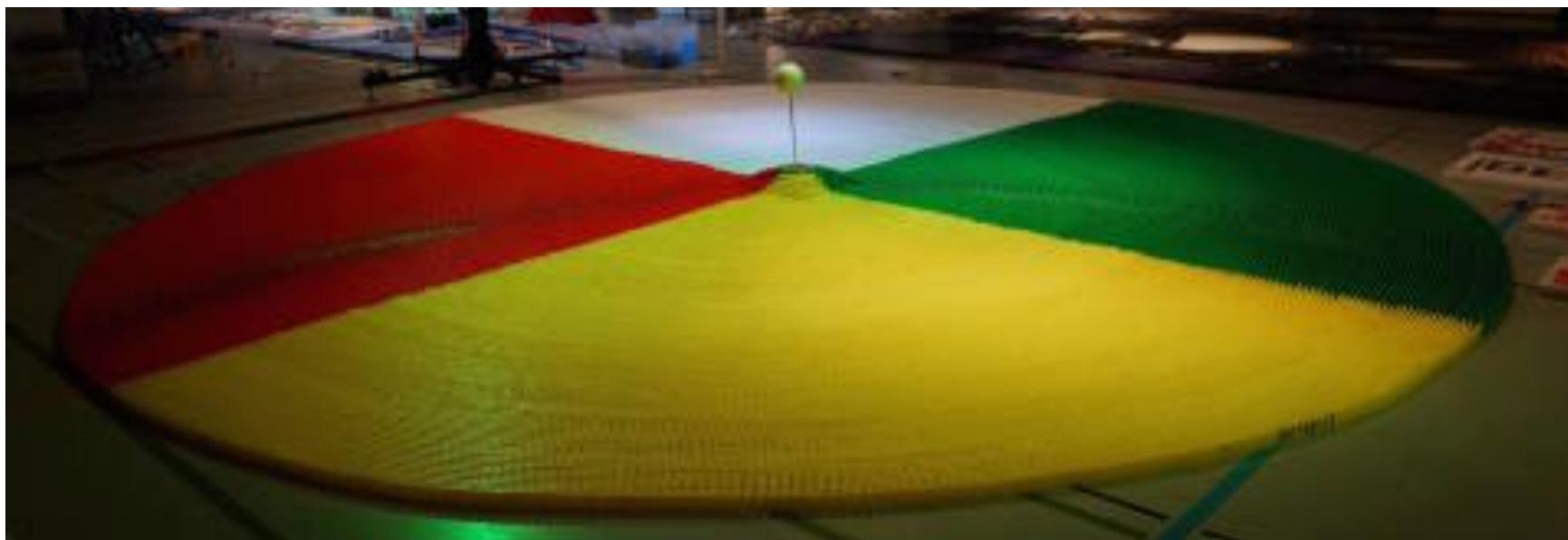
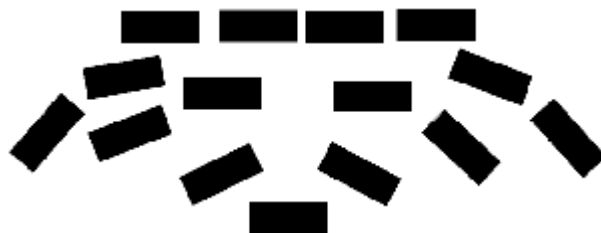


# Цепная реакция



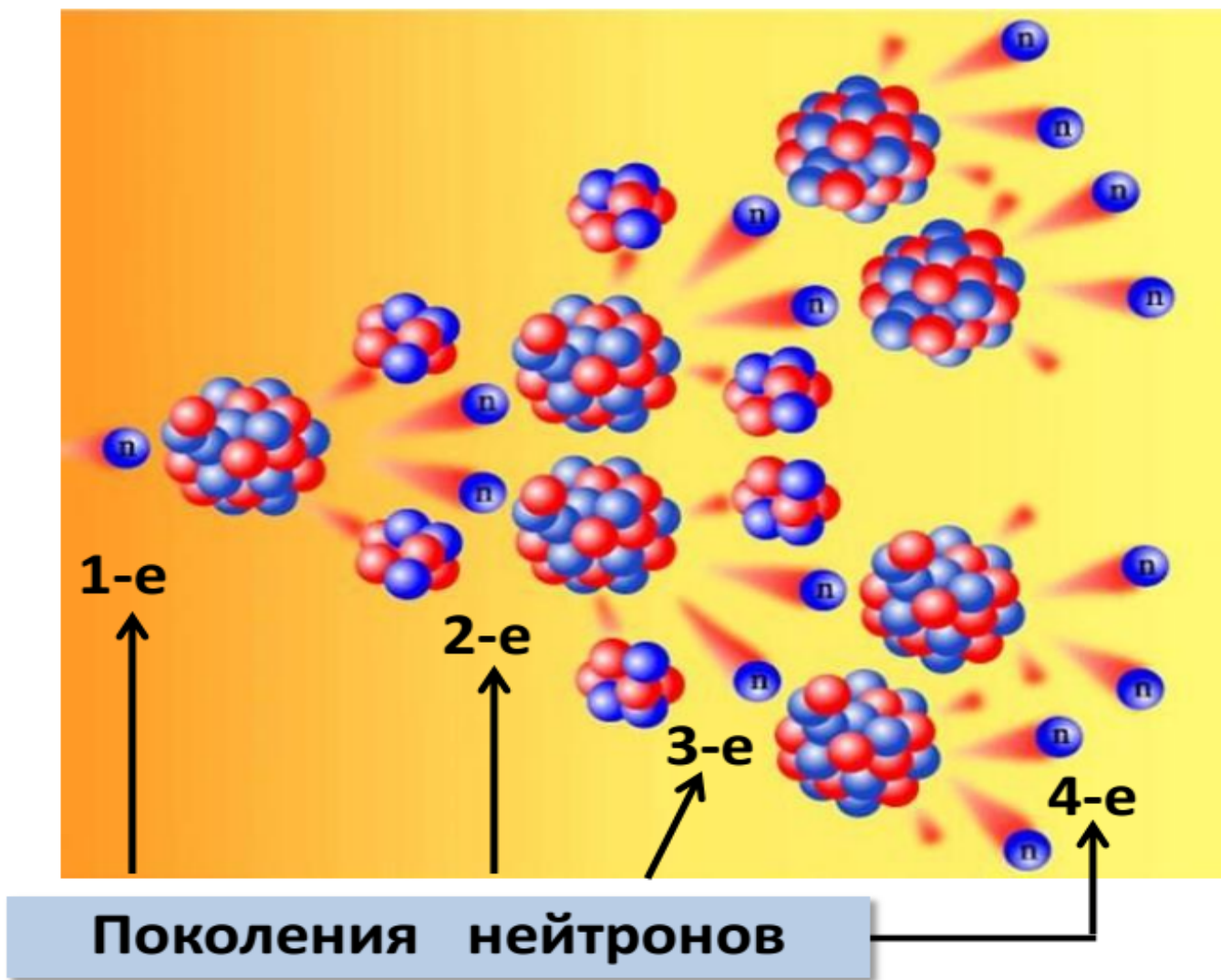
1913 г. – Макс Боденштейн. Неразветвленная цепная реакция

# Цепная реакция

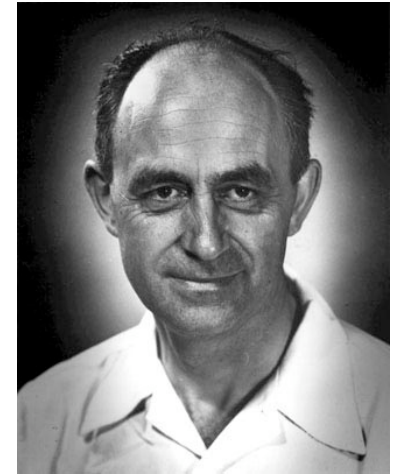
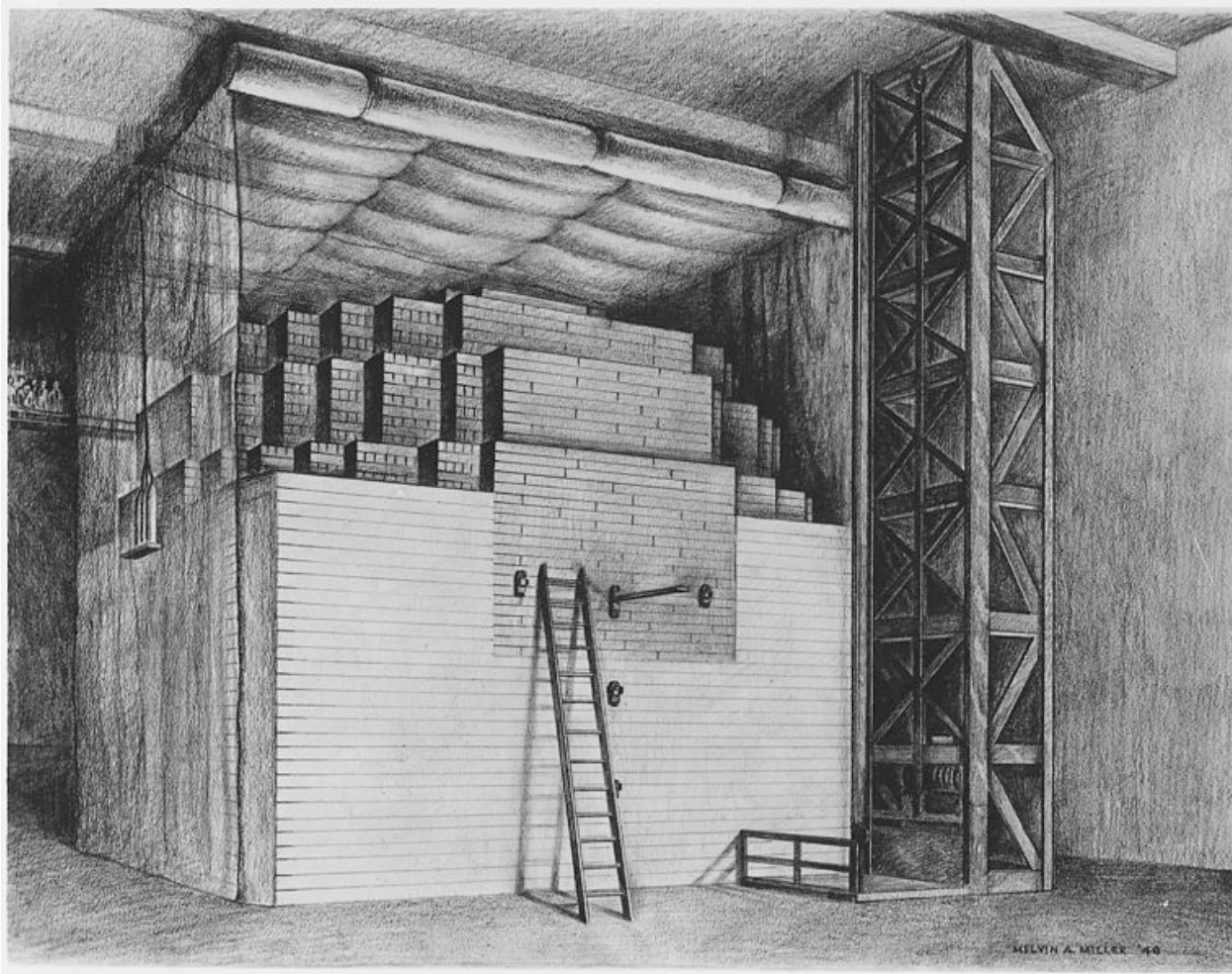


1928 г. – Н.Н. Семенов. Разветвленная цепная реакция

# Цепная реакция деления



# Первый ядерный реактор Чикагская Поленица



Энрико  
Ферми

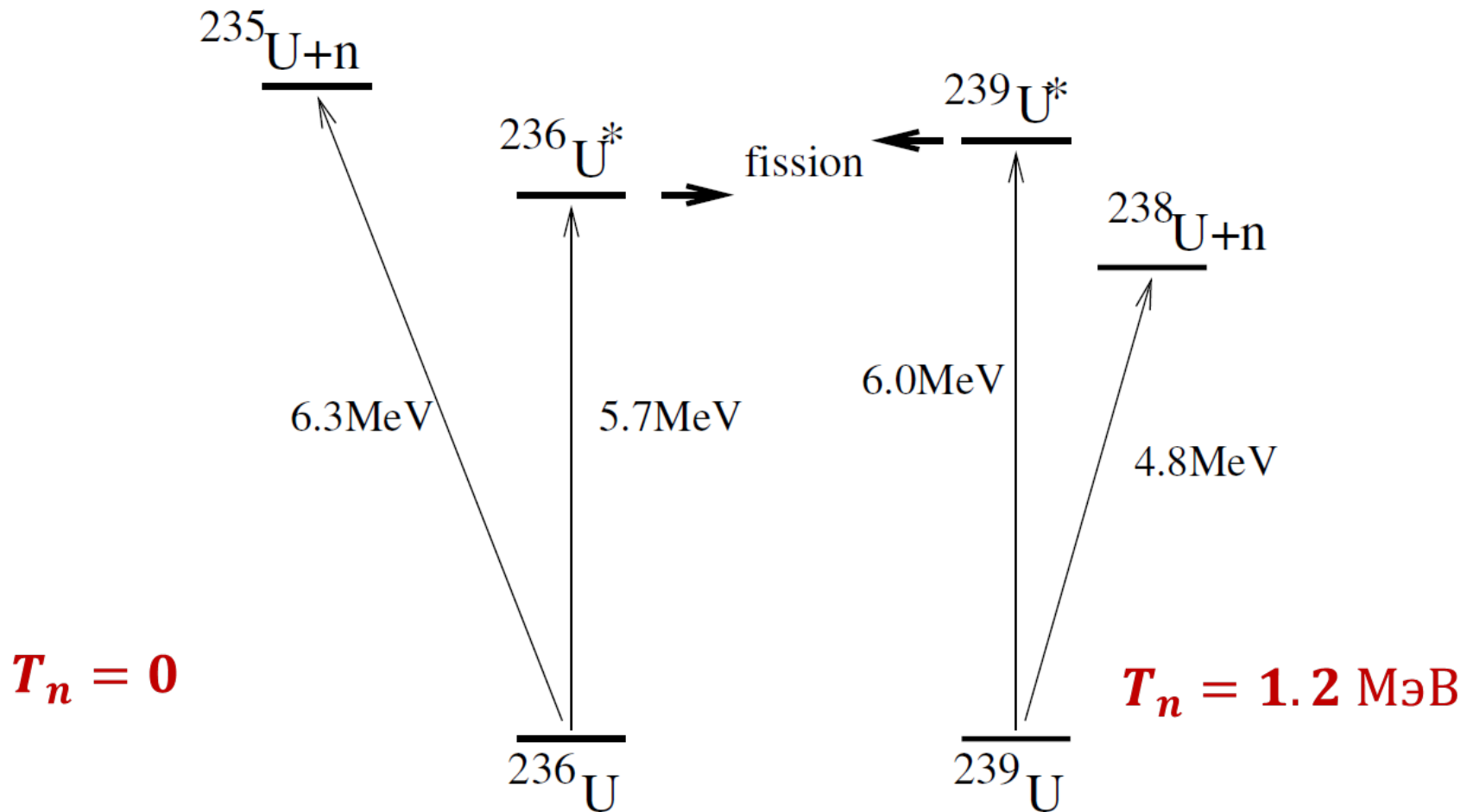
2 .12. 1942

стадион  
Универстета  
Чикаго

# ИЗОТОПЫ U

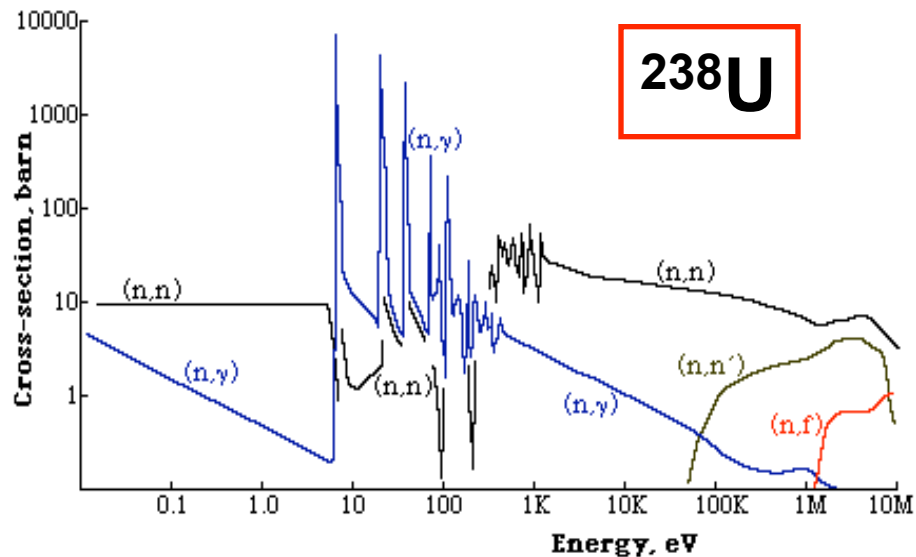
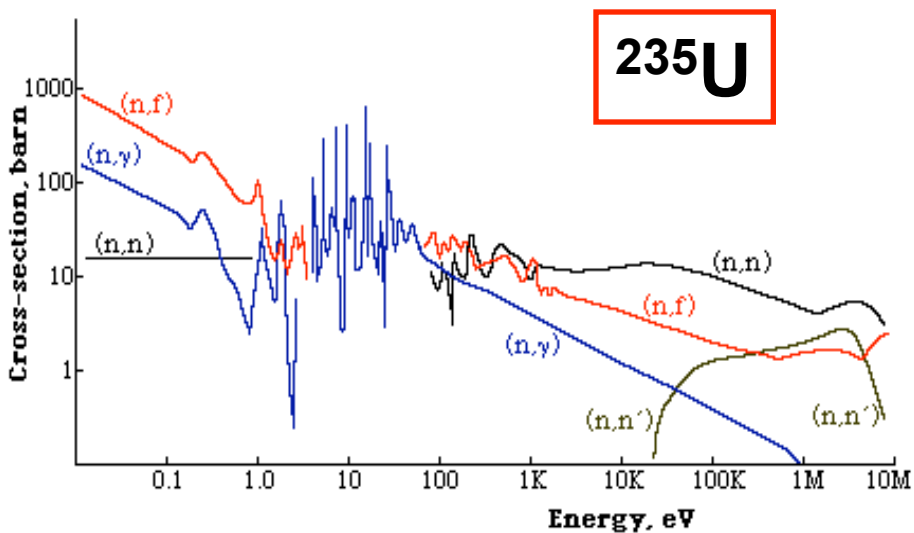
$^{235}\text{U}$       0,72%       $T_{1/2} = 7,0 \cdot 10^8$  лет,  $\alpha$

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





# Реакции (n,f), (n,γ) на $^{235}\text{U}$ , $^{238}\text{U}$



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

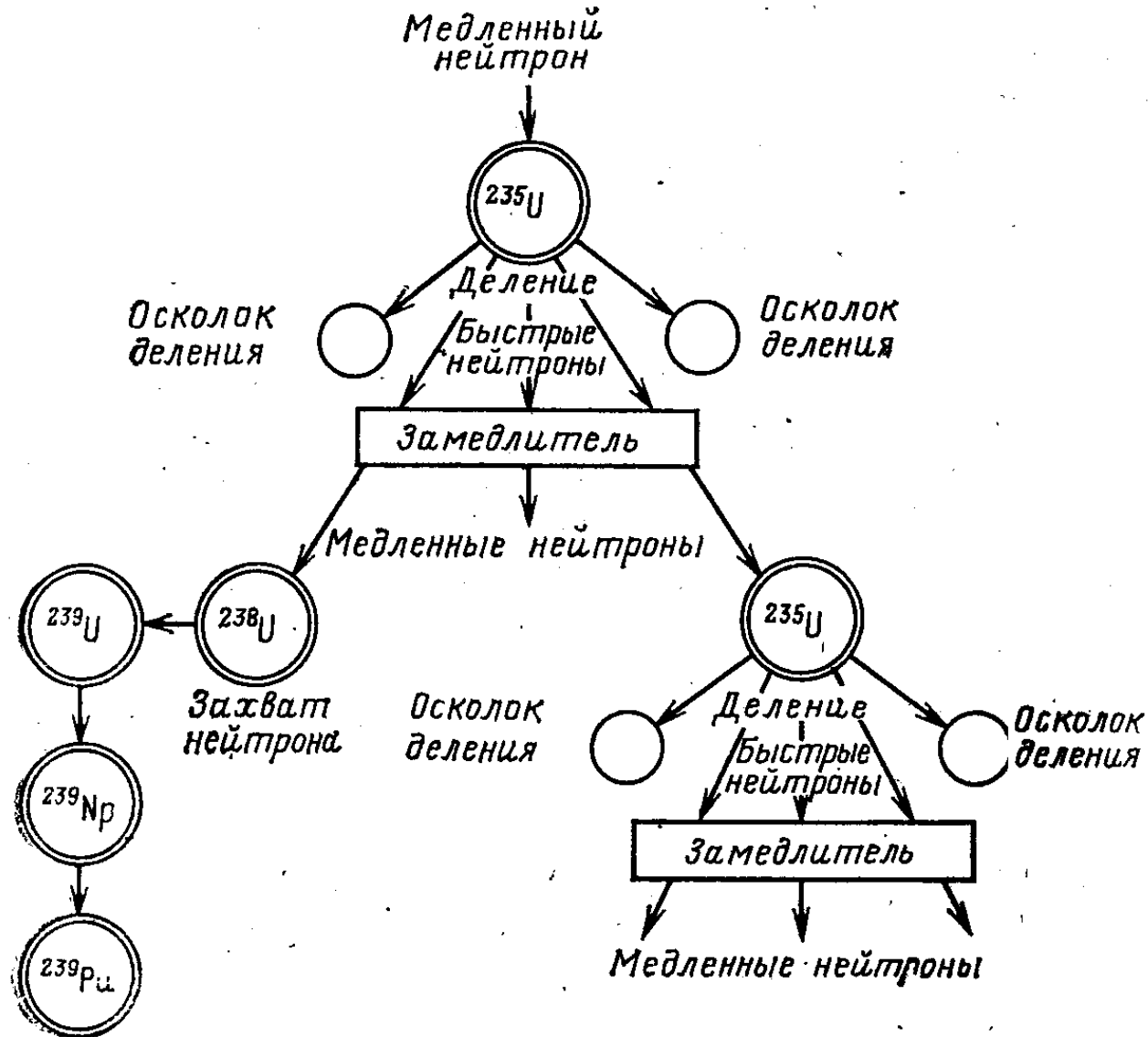
$$\frac{\sigma_{nf}}{\sigma_{nf} + \sigma_{n\gamma}}$$

# Цепная реакция деления

$$\eta = \nu \frac{\sigma_{nf}}{\sigma_{nf} + \sigma_{n\gamma}}$$

$E_n$	fuel	$\sigma_{fis}$	$\sigma_{(n,\gamma)}$	$\bar{\nu}$	$\eta$
$\sim 2 \text{ MeV}$	$^{235}\text{U}$	1.27	0.10	2.46	2.28
	$^{238}\text{U}$	0.52	2.36	2.88	0.52
	$^{239}\text{Pu}$	2	0.10	2.88	2.74
$\sim 0.025 \text{ eV}$	$^{233}\text{U}$	524	69	2.51	2.29
	$^{235}\text{U}$	582	108	2.47	2.08
	$^{238}\text{U}$	0	2.7	0	0
	$^{239}\text{Pu}$	750	300	2.91	2.08
	0.7% $^{235}\text{U}$	4.07	3.5	2.47	1.33
	2.5% $^{235}\text{U}$	14.5	5.4	2.47	1.8

# 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.

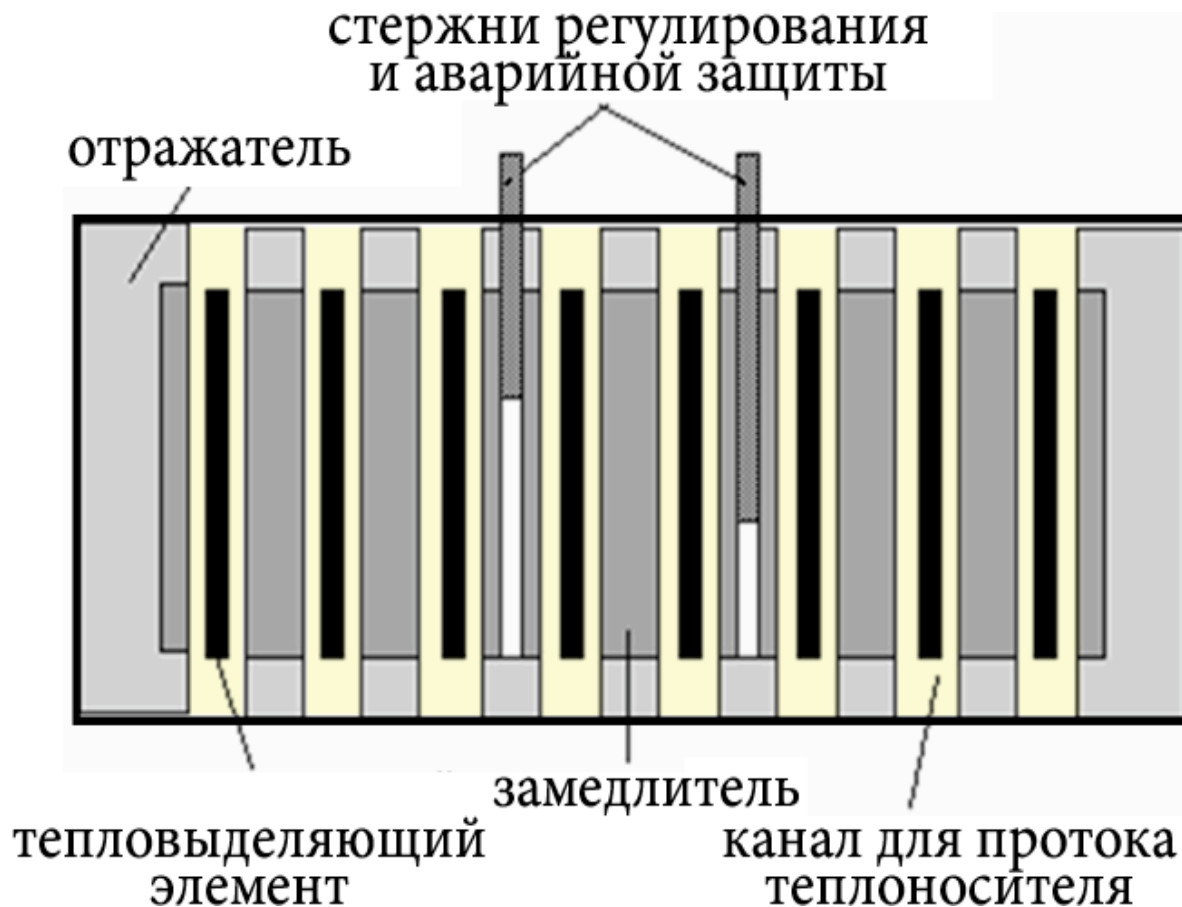
$f$  – вероятность поглощения теплового нейтрона ядром горючего, а не замедлителя.

$\varepsilon$  – коэффициент размножения на быстрых нейтронах.

$$pf \sim 0.5 - 0.7$$

$$\varepsilon \sim 1.03$$

# Схема гетерогенного теплового реактора



Активная зона (выделение энергии):

- замедлитель,
- тепловыделяющие элементы (ТВЭЛ). Расстояние между твэлами не должно превышать суммарную длину замедления и диффузии нейтронов.
- стержни регулирования мощности реактора и аварийной защиты

Активная зона реактора окружается отражателем.

# Обнинск 1954

Активная зона

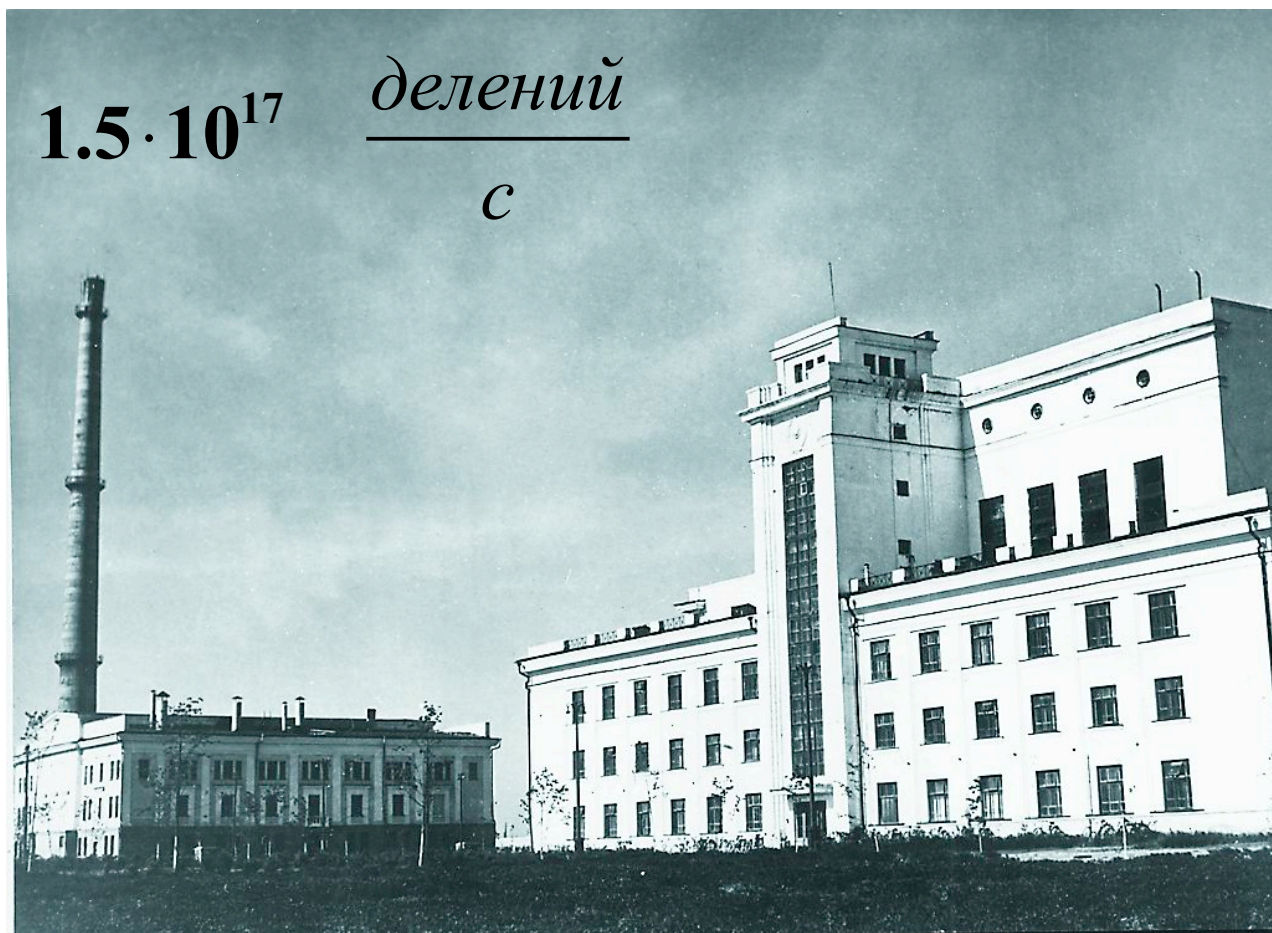
Диаметр = 1.5 м

Высота = 1.7 м

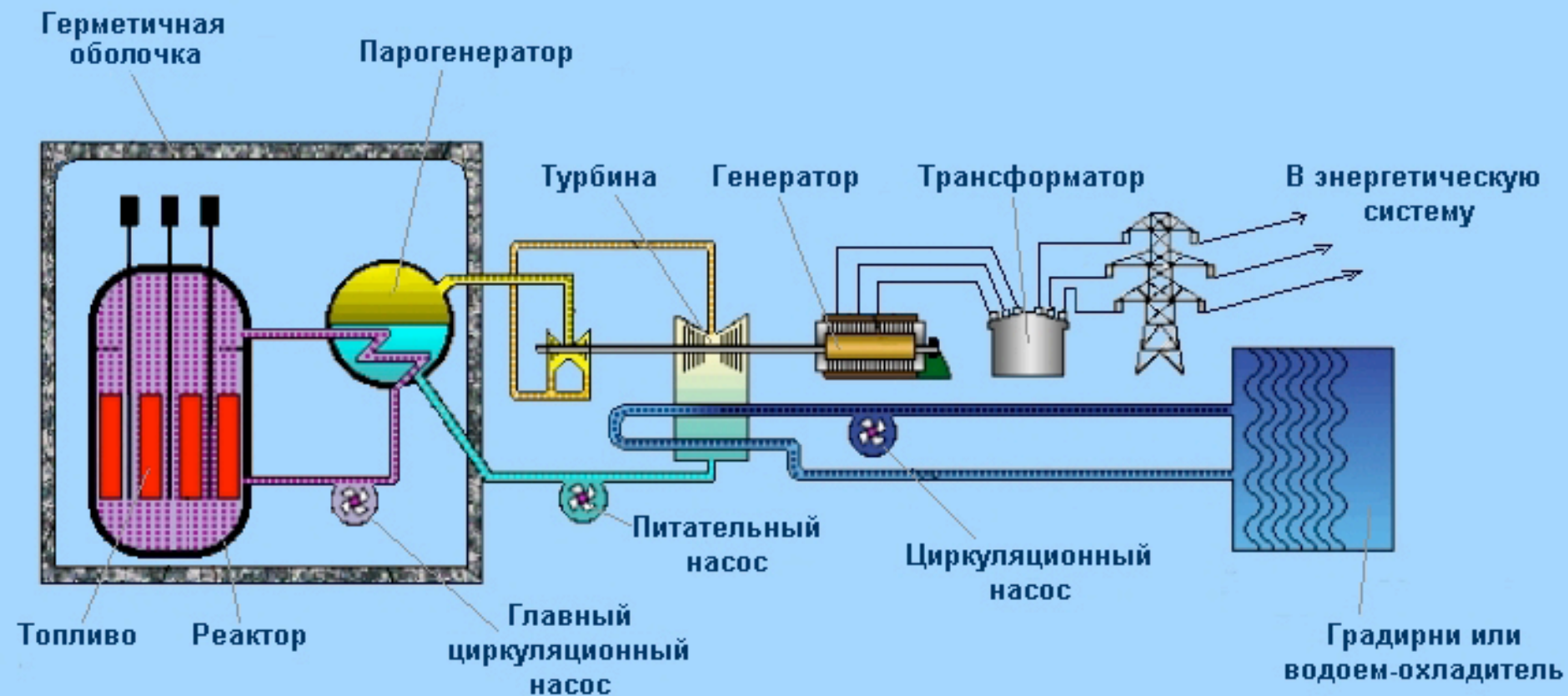
Графитовый замедлитель

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

Мощность реактора 5 МВт



# Схема работы АЭС



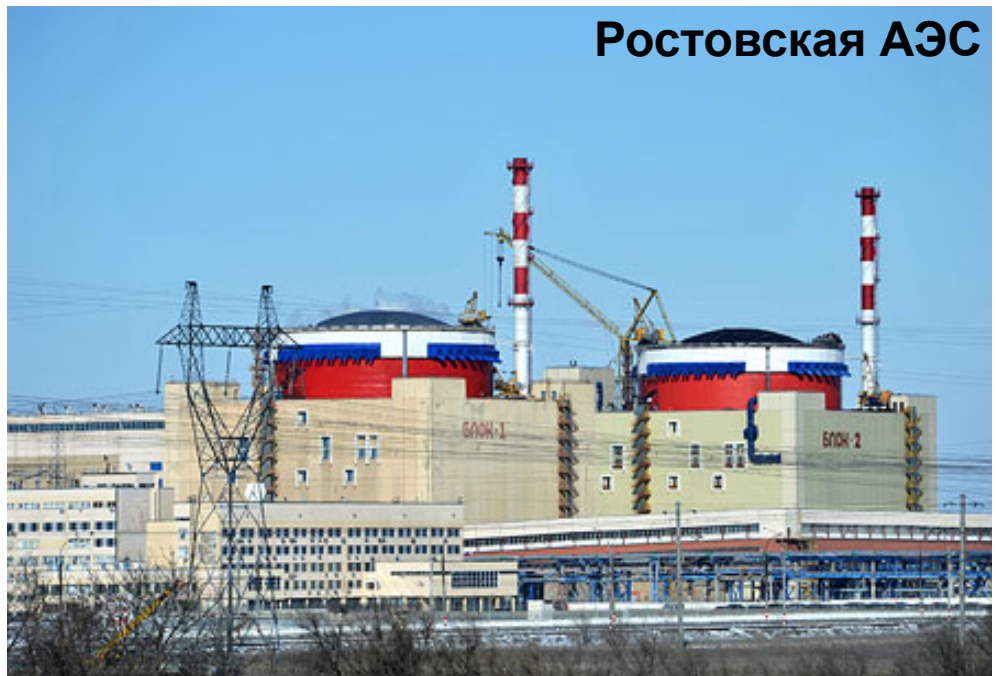
**Деление 1 г урана-235 в течение суток даёт мощность в 1 МВт**



ТВЭЛ



Ростовская АЭС





# Ядерное топливо



Захисьокись урана  $U_3O_8$

Природный уран: 0,72%  $^{235}U$   
Работа реактора: 4 - 5%  $^{235}U$

**Газовые центрифуги (65%)**  
**Газовые диффузоры (35%)**

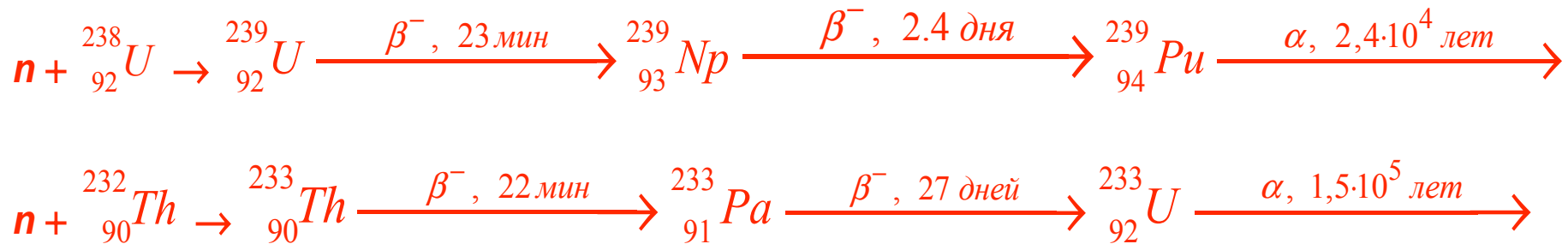
## Мировые мощности по разделению изотопов

Россия	<b>50%</b> ,
США	<b>15%</b> ,
Франция	<b>6%</b>
Европа (Германия-Великобритания- Бельгия)	<b>26%</b>
Остальные	<b>не более 3%.</b>



Тетрафторид урана  $UF_4$

# Воспроизводство ядерного горючего



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