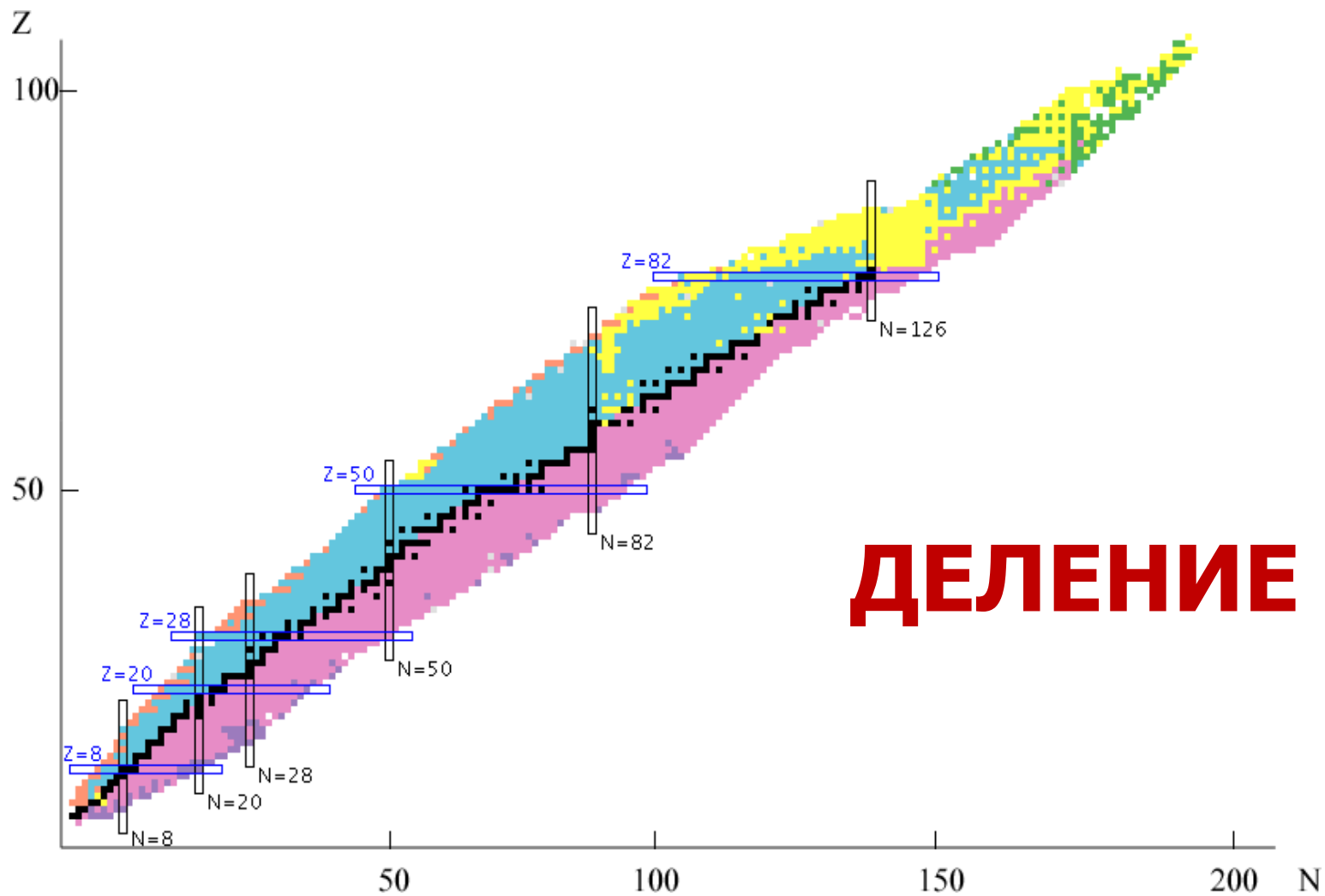




# Ядерная физика и Человек



# 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

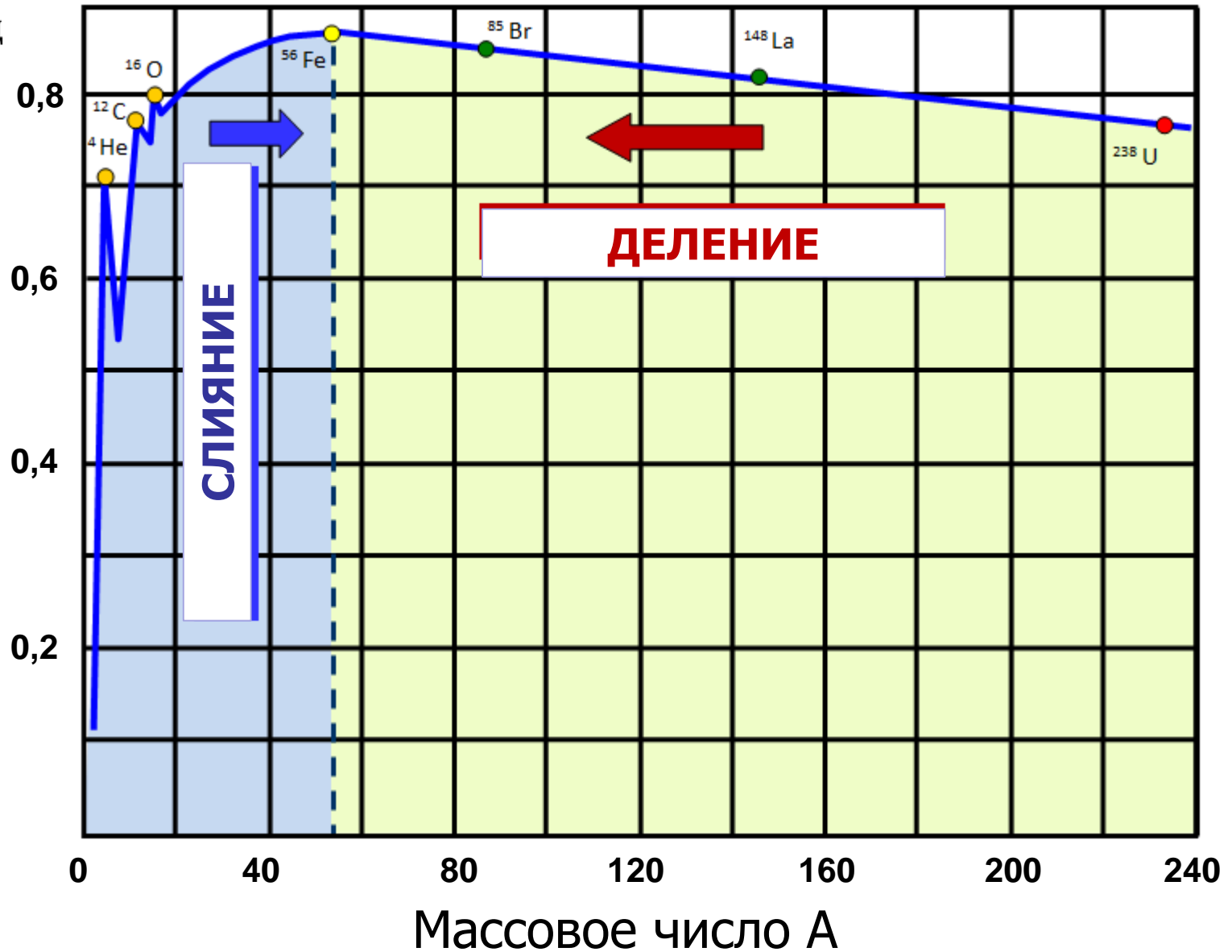
Энергия связи ядра  $W(A,Z)$

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

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

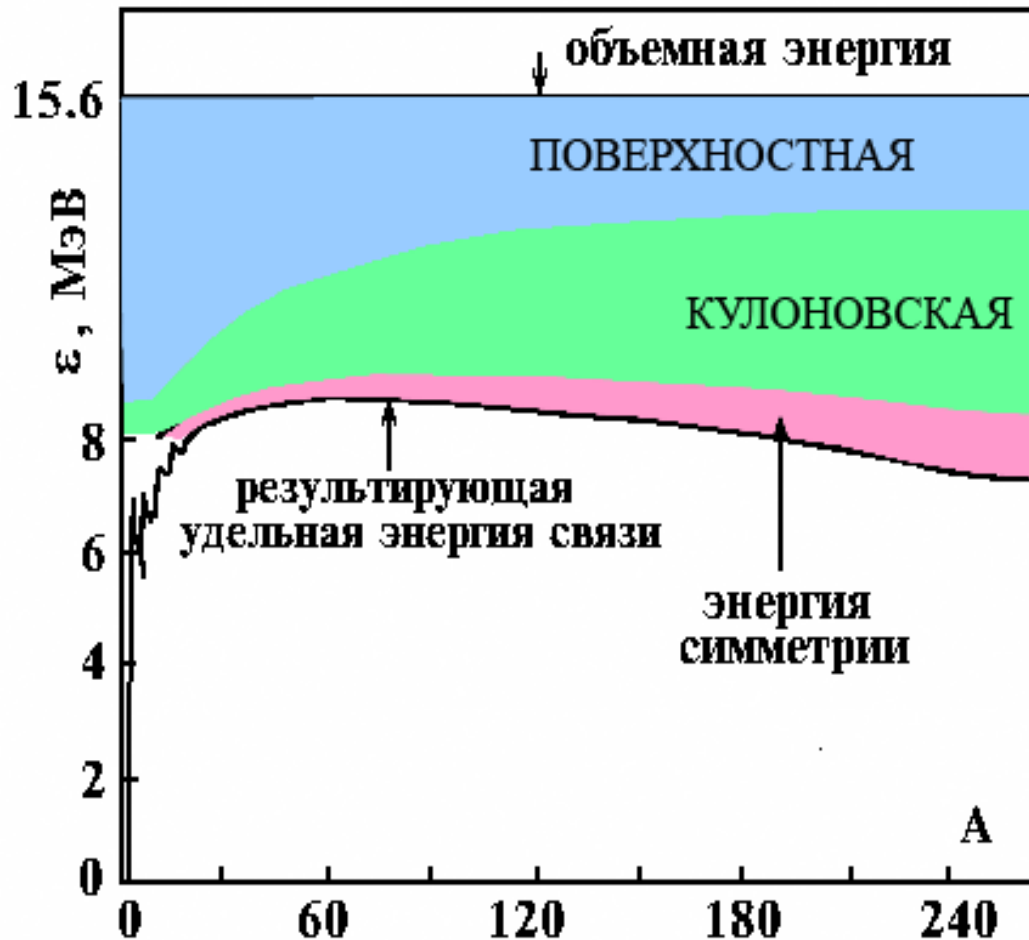
# Удельная энергия связи ядра $\epsilon(A, Z)$

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



# Формула Бете-Вайцзеккера

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



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

Энергия деления ядра на два равных осколка

$$\begin{aligned}
 Q &= M(A, Z) - 2M(A/2, Z/2) = \\
 &= 2W(A/2, Z/2) - W(A, Z) = \\
 &= (A=200, Z=90) = \\
 &= \mathbf{216 \text{ МэВ}}
 \end{aligned}$$

# Параметр делимости

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

Я. Френкель развил капельную теорию деления ядер медленными нейтронами.

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

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

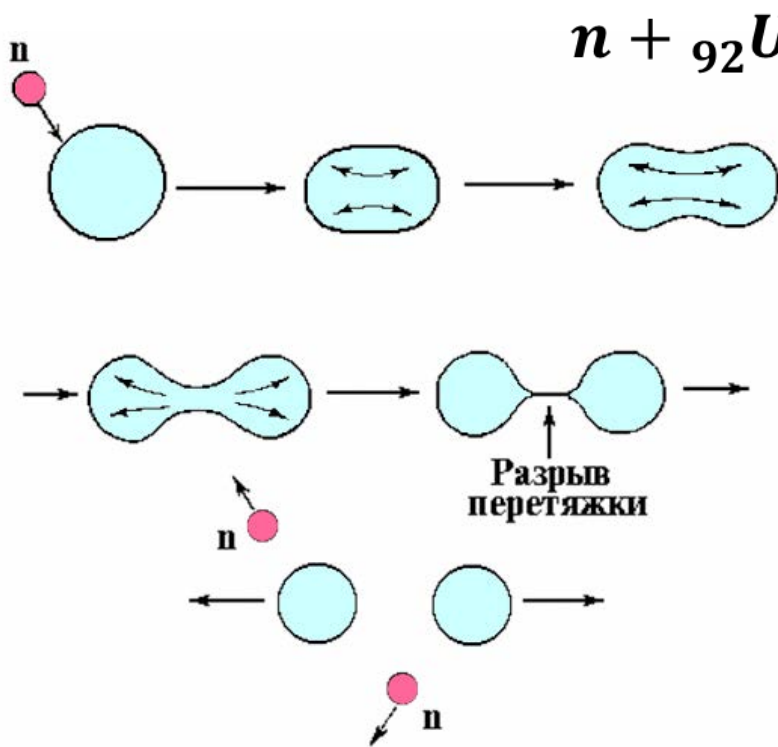
$$\frac{Z^2}{A} = 17 \text{ для иттрия } {}_{39}^{89}\text{Y}$$

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

# Деление ядер

1934 г. — Э. Ферми Опыты по синтезу трансуронов (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.

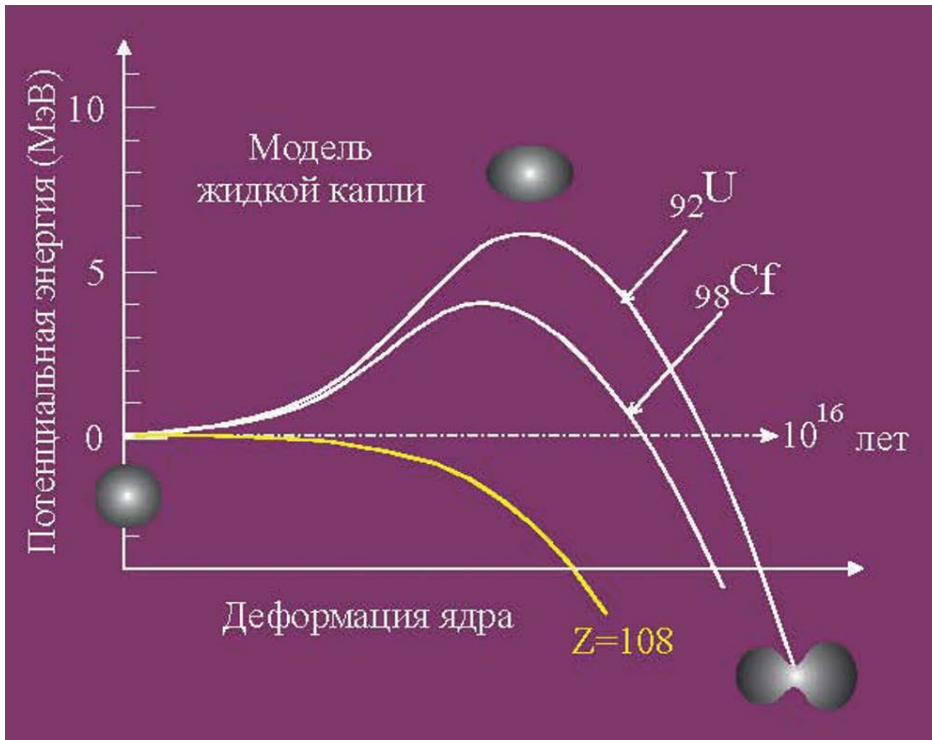
$$\tilde{E}_{\text{пов}} = E_{\text{пов}} \left(1 + \frac{2}{5} \varepsilon^2\right)$$

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

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



# 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

$$B_n \geq H$$

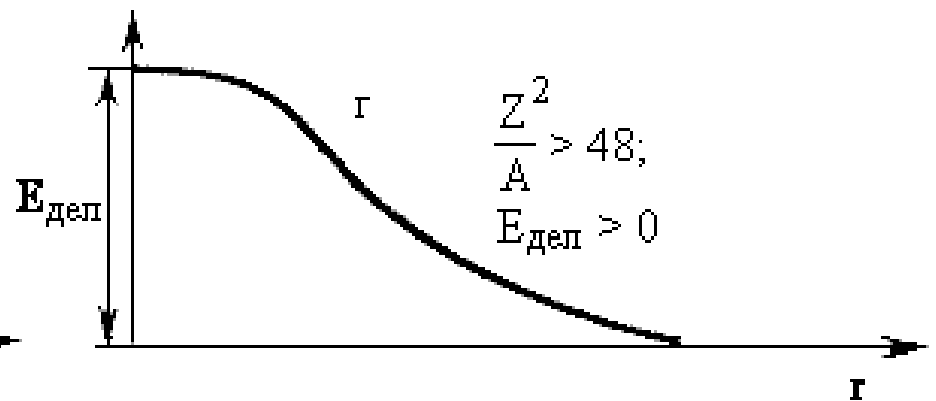
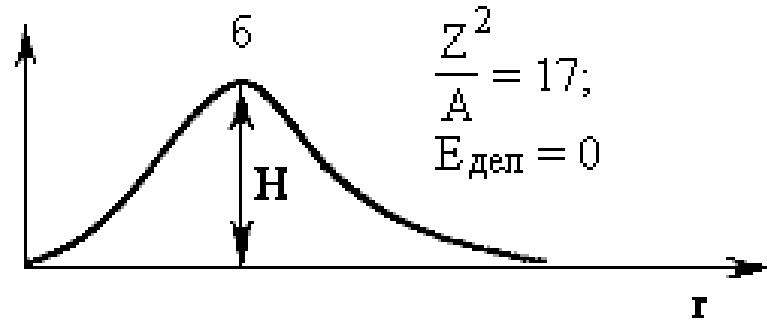
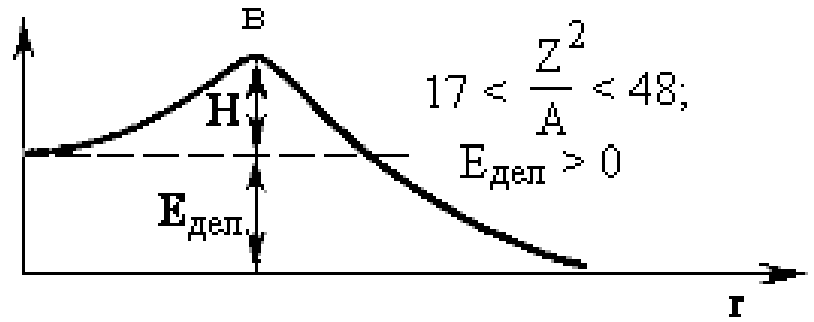
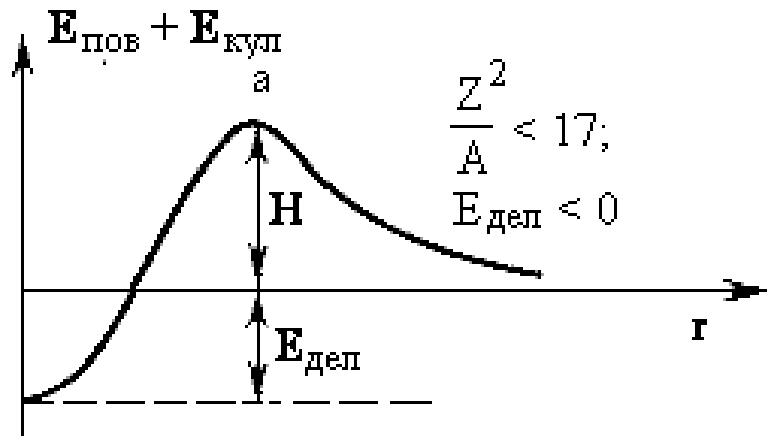
$$T_n \cong 0$$

(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  $^{235}\text{U}$ .

# Барьер деления



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

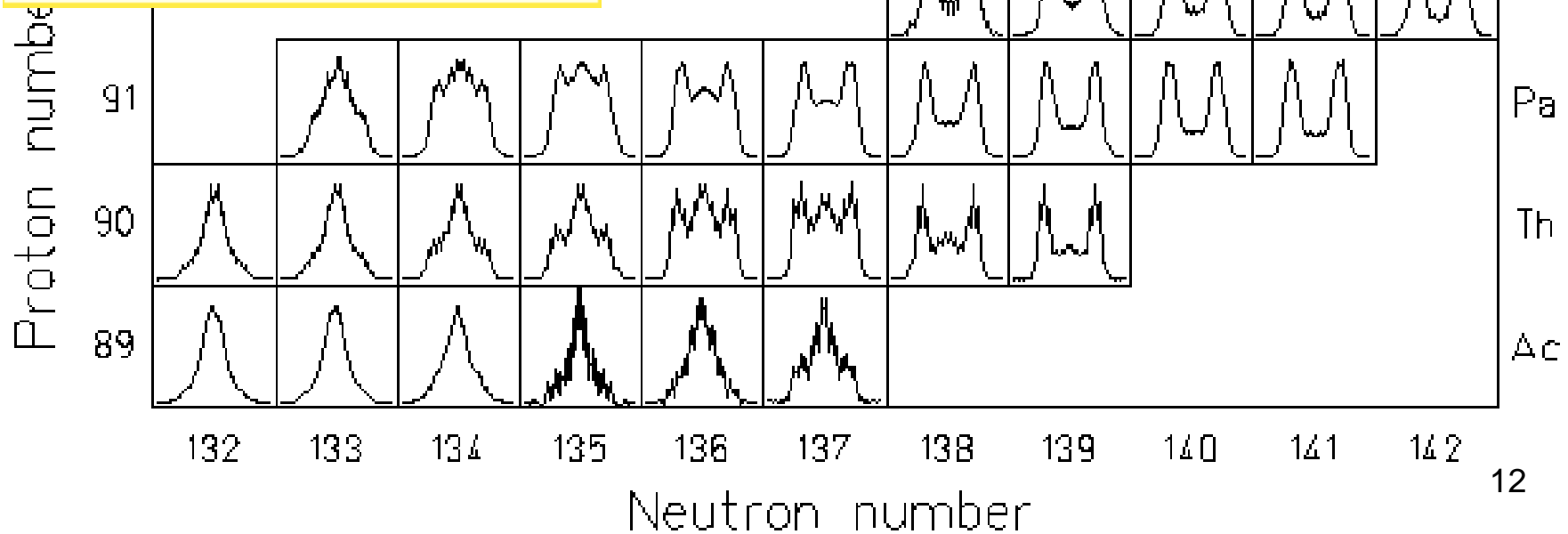
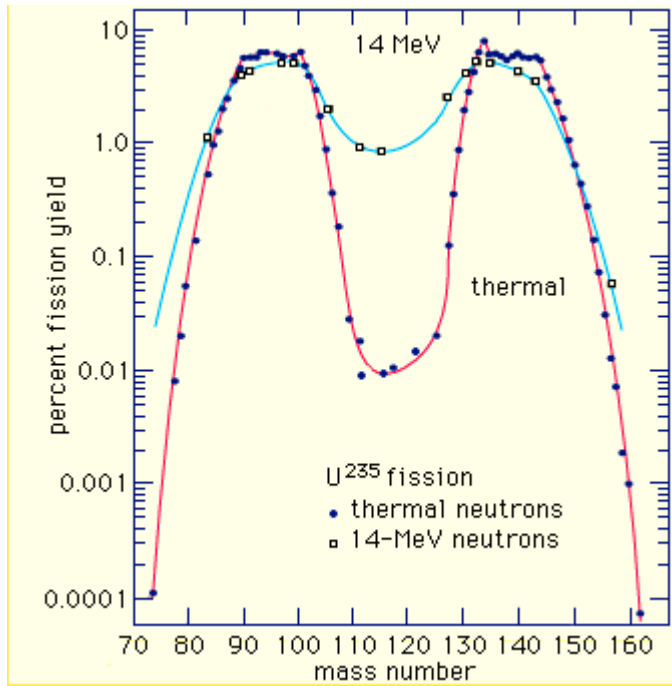
$$Z = 120 \div 125$$

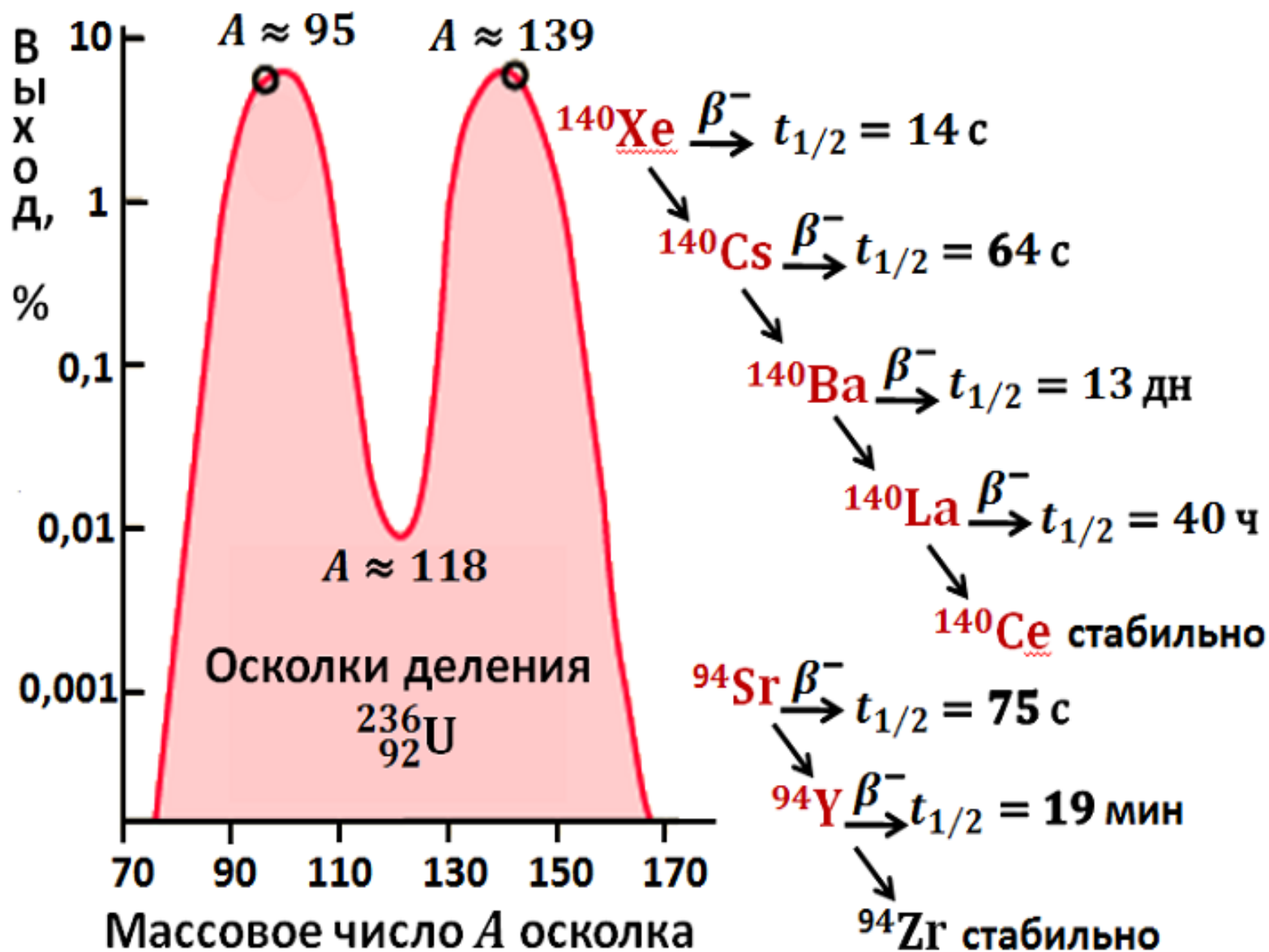
# Массовое распределение осколков деления



Осколки деления образуются в широком диапазоне  $A = 72-161$  и  $Z = 30-65$ .

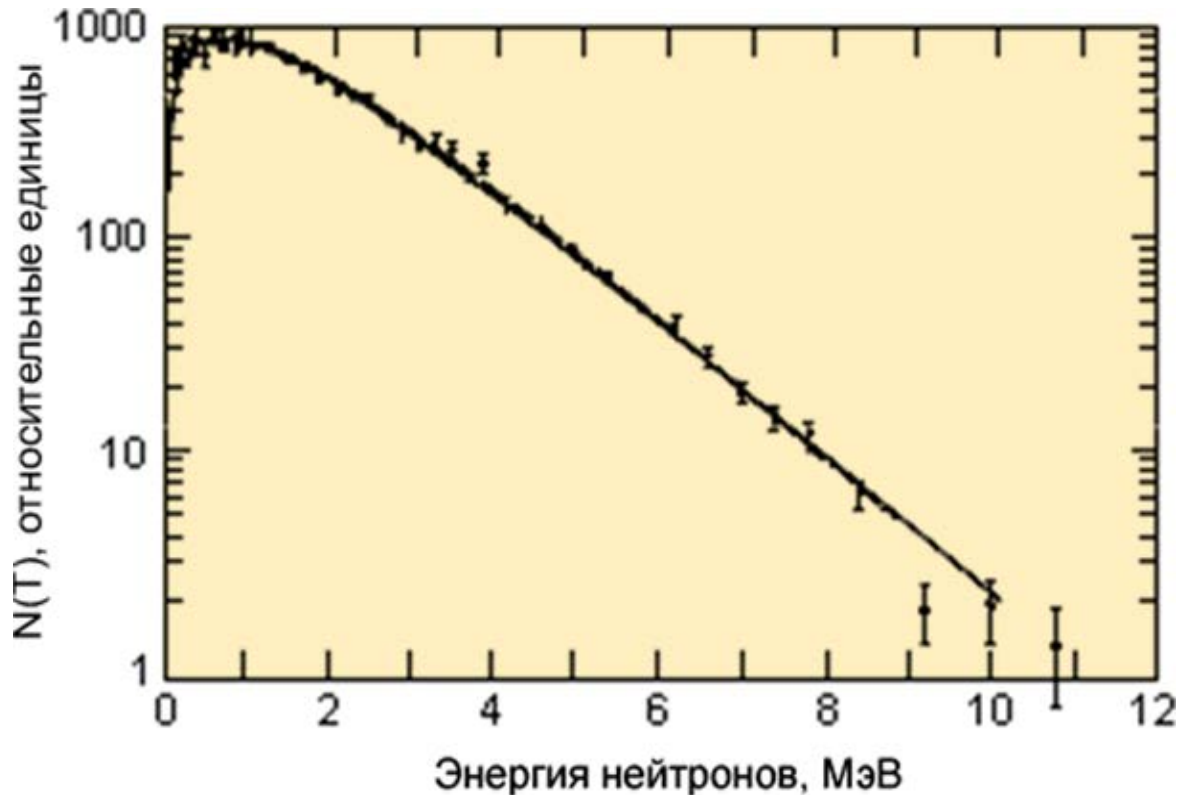
$$\frac{A_{\text{II}}}{A_{\text{T}}} \approx \frac{2}{3}, \quad \frac{Z_{\text{II}}}{Z_{\text{T}}} \approx \frac{2}{3}.$$





# Нейтроны деления

## Спектр нейтронов деления



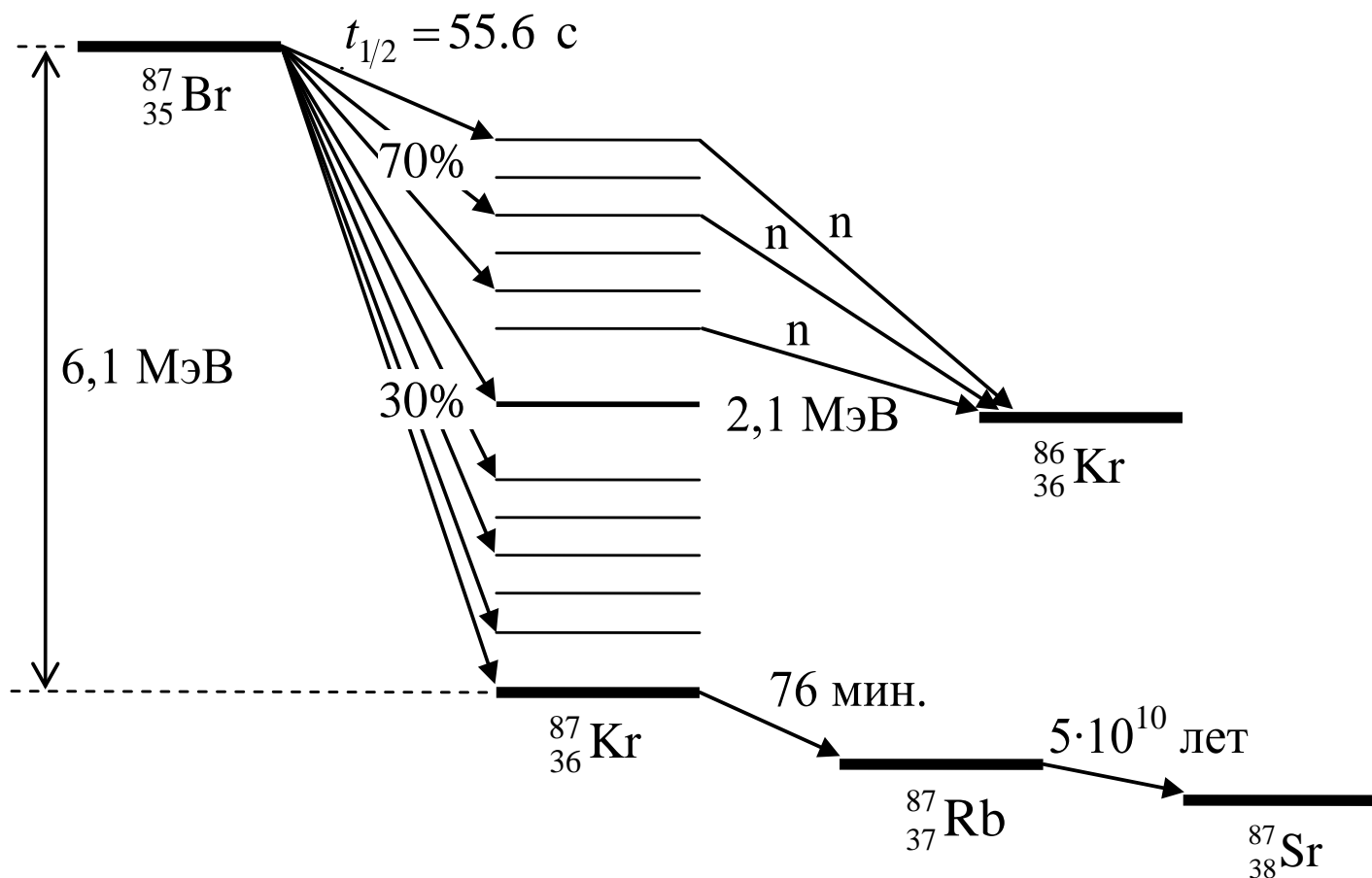
$$\frac{N_{\text{оск}}}{Z_{\text{оск}}} = \frac{N_U}{Z_U} = \frac{146}{92} = 1,6$$

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

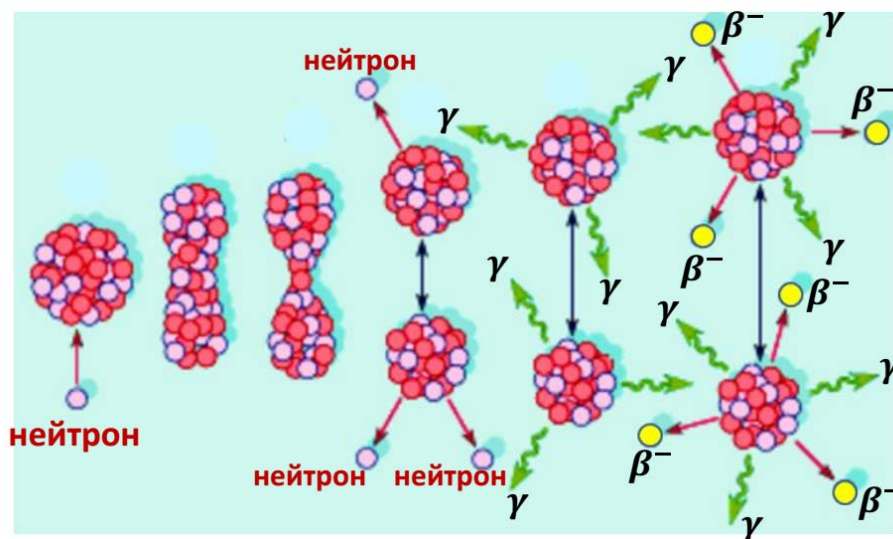
## Вторичные нейтроны

$$\nu_n = 2,5$$
$$\bar{T}_n \cong 2 \text{ МэВ}$$

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



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
<b>Полная энергия деления</b>	<b>200</b>



# **АТОМНАЯ ЭНЕРГЕТИКА**

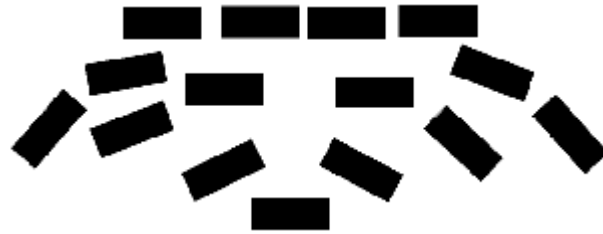


# Цепная реакция



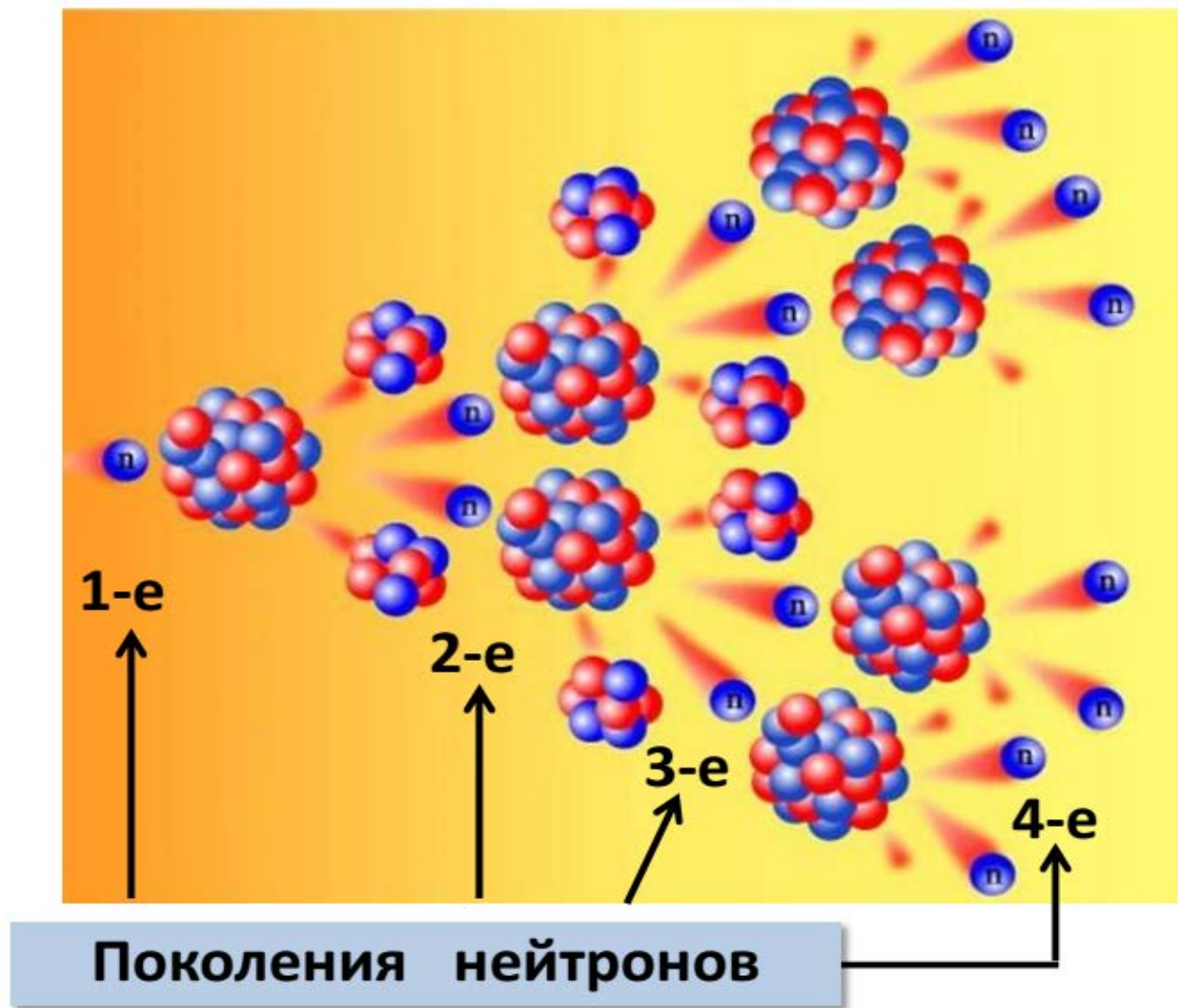
1913 г. – Макс Боденштейн. Неразветвленная цепная реакция

# Цепная реакция



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

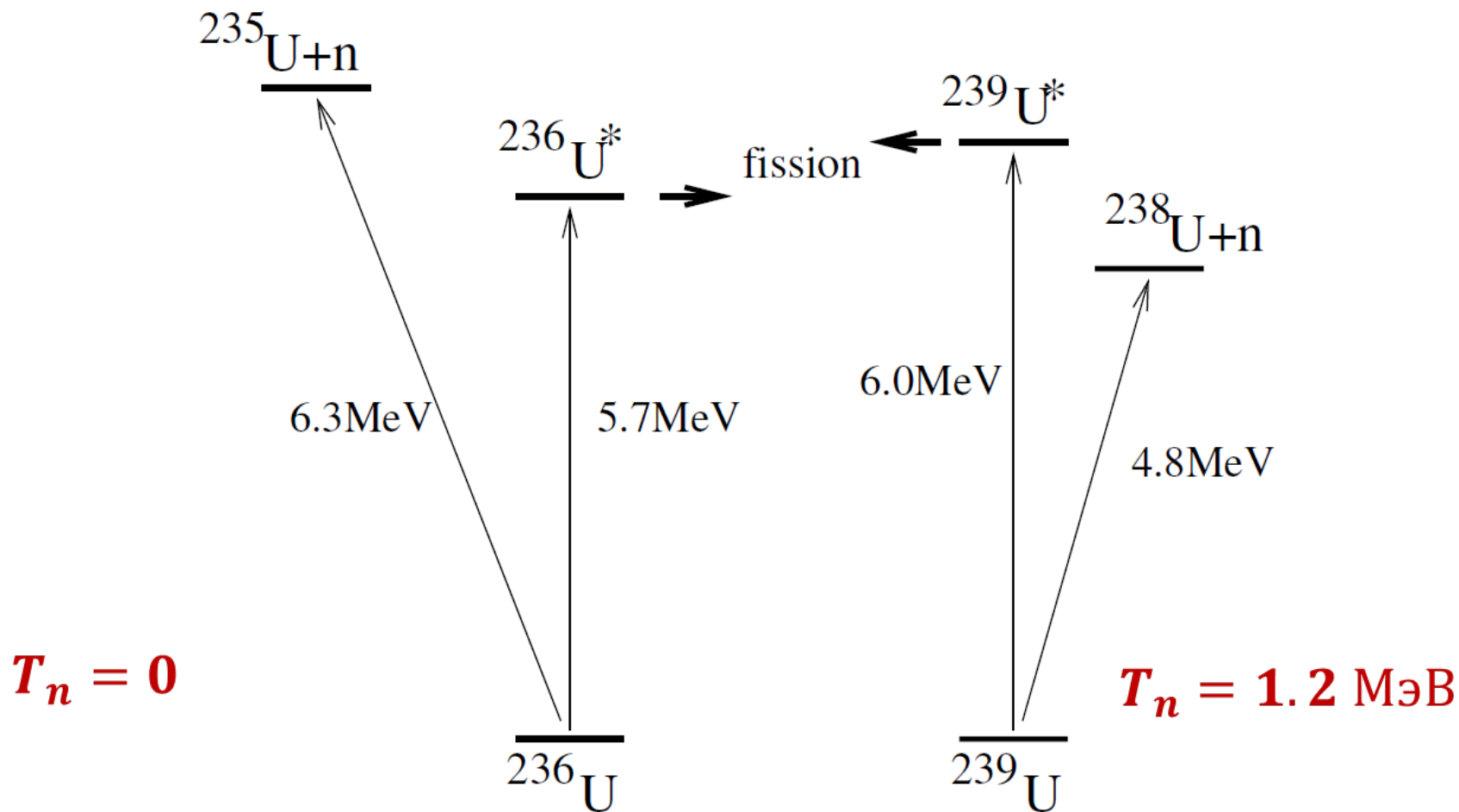
# Цепная реакция деления



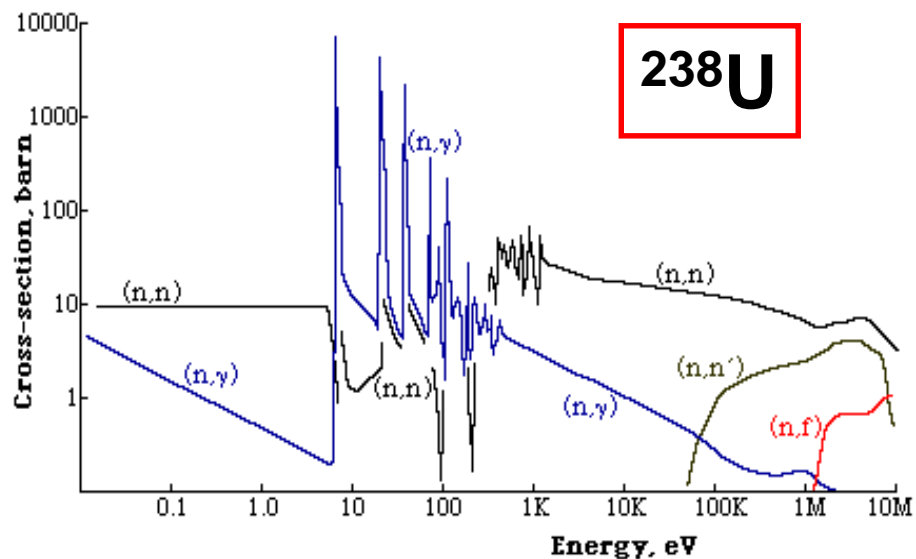
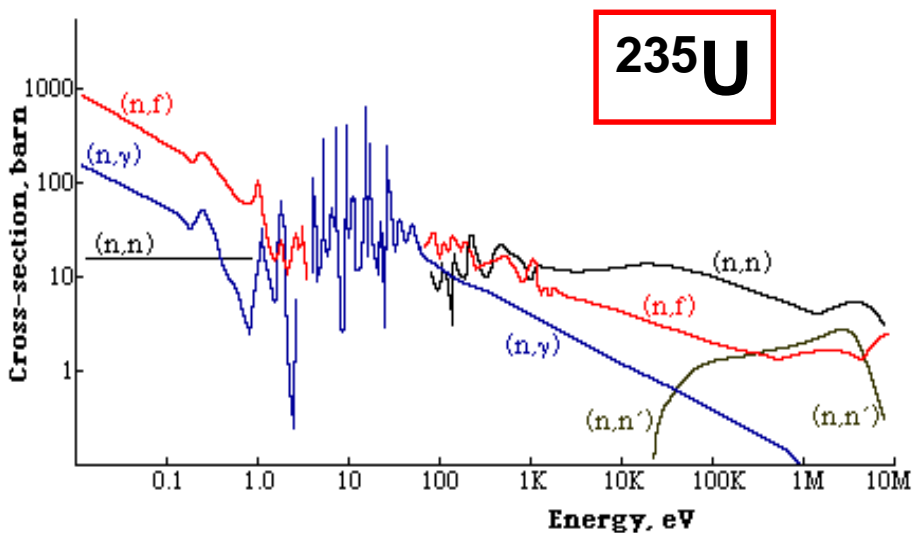
# ИЗОТОПЫ U

$^{235}\text{U}$       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,  $\alpha$



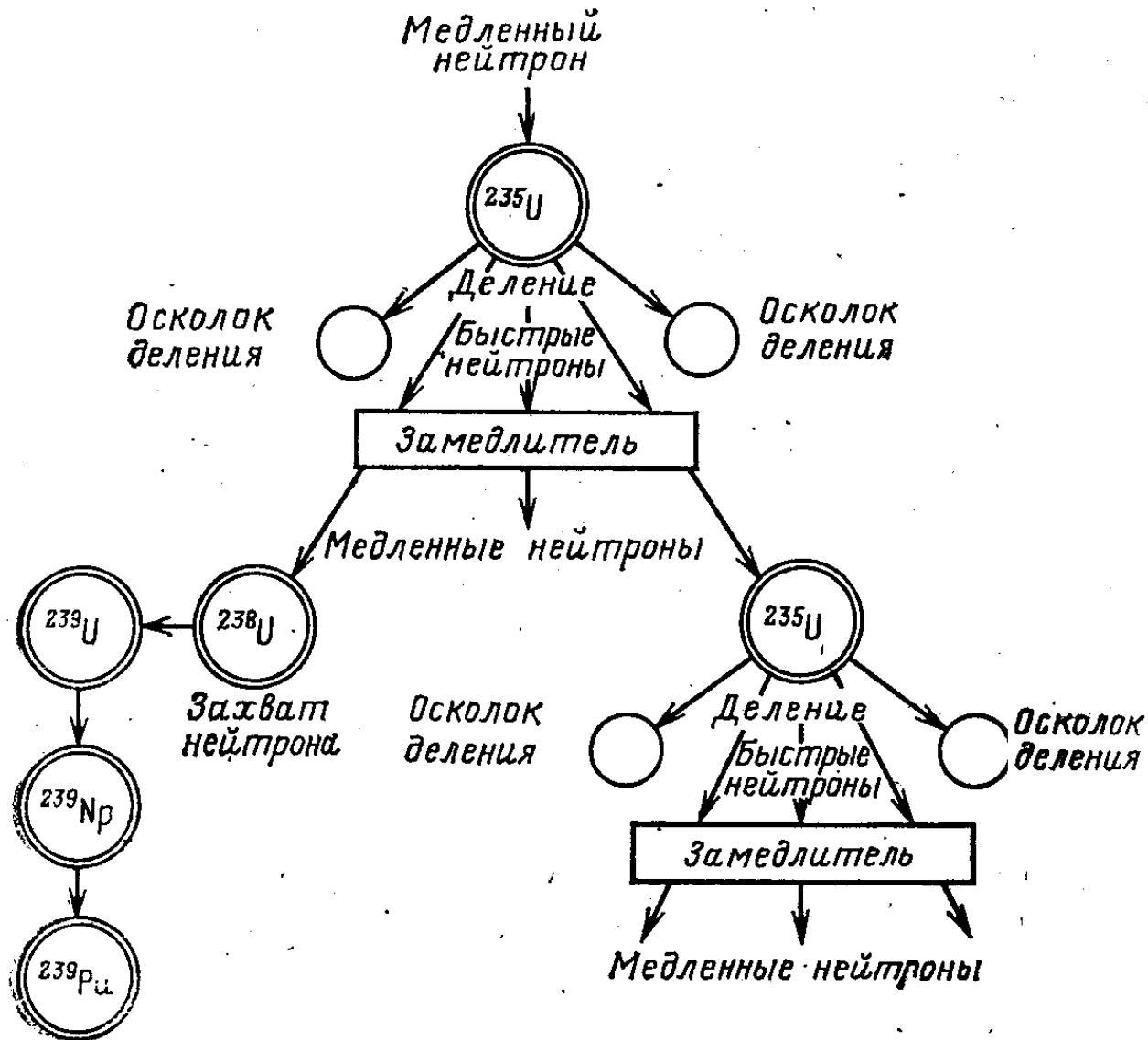
# Реакции $(n,f)$ , $(n,\gamma)$ на $^{235}\text{U}$ , $^{238}\text{U}$



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 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.

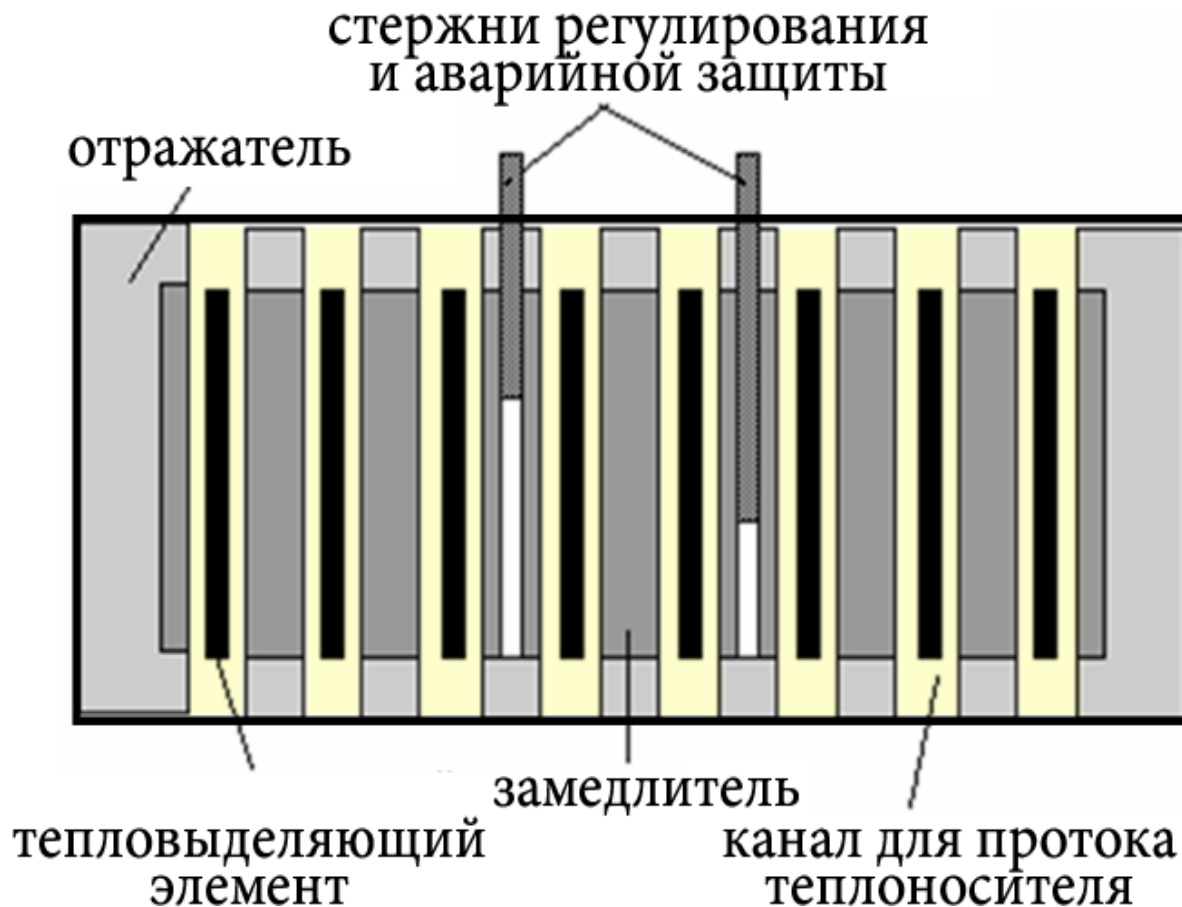
$f$  – вероятность поглощения теплового нейтрона ядром горючего, а не замедлителя.

$\varepsilon$  – коэффициент размножения на быстрых нейтронах.

$$pf \sim 0.5 - 0.7$$

$$\varepsilon \sim 1.03$$

# Схема гетерогенного теплового реактора



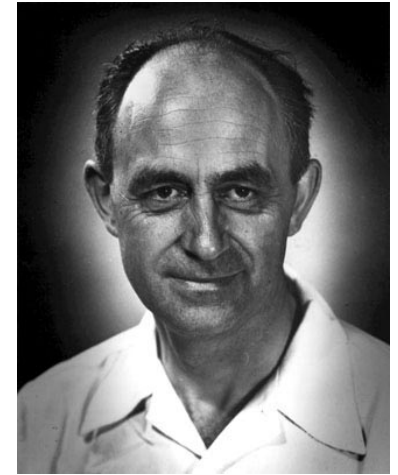
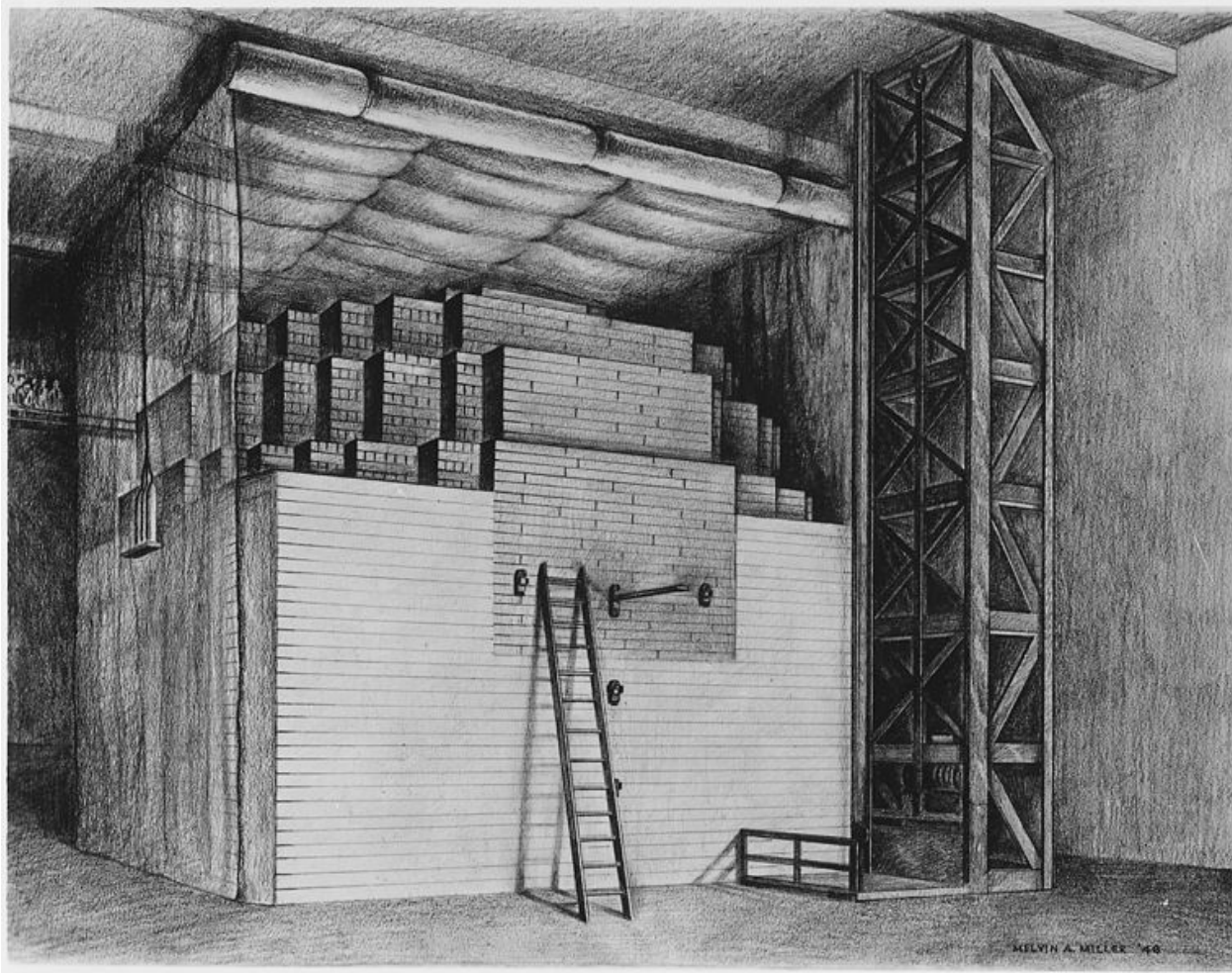
Активная зона (выделение энергии):

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

Активная зона реактора окружается отражателем.



# Первый ядерный реактор Чикагская Поленица



Энрико  
Ферми

2 .12. 1942

стадион  
Универстета  
Чикаго

# Обнинск 1954

Активная зона

Диаметр = 1.5 м

Высота = 1.7 м

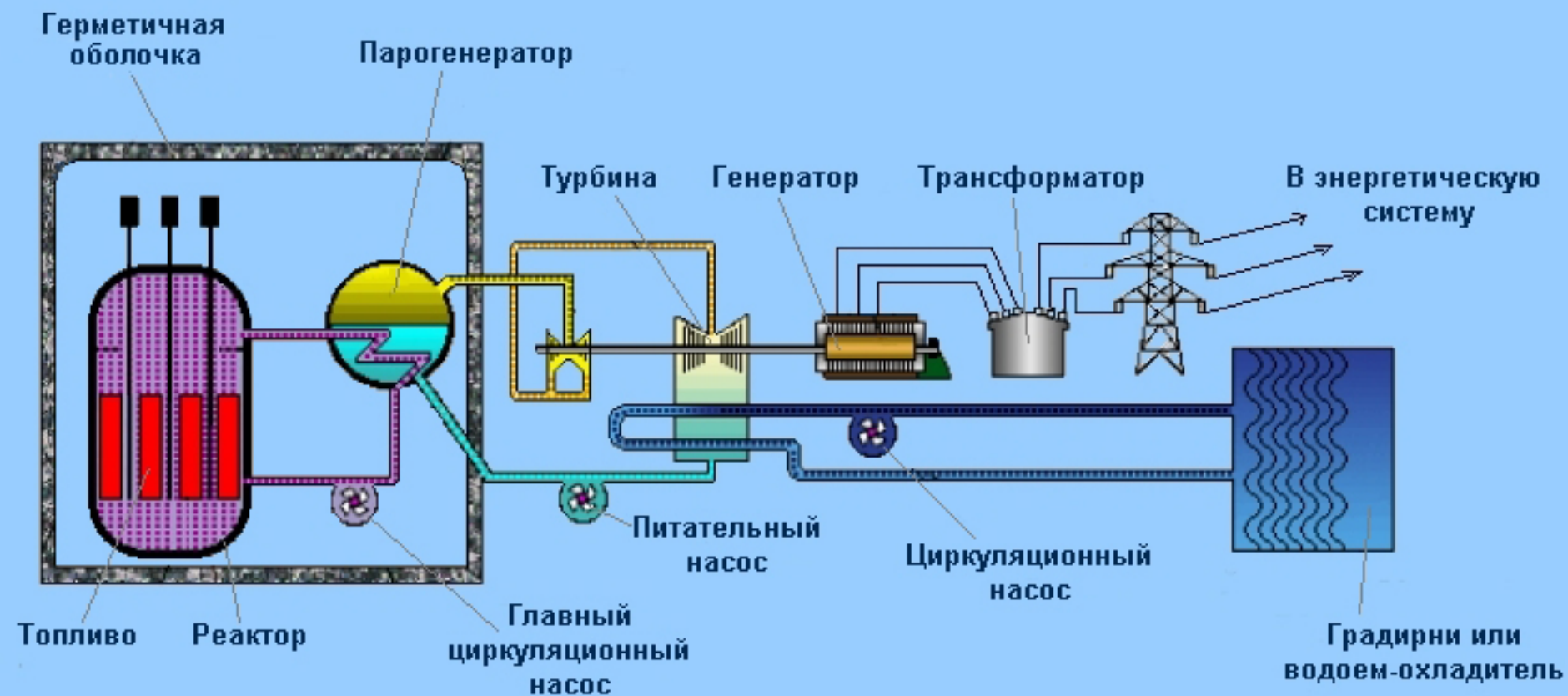
Графитовый замедлитель

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

Мощность реактора 5 МВт

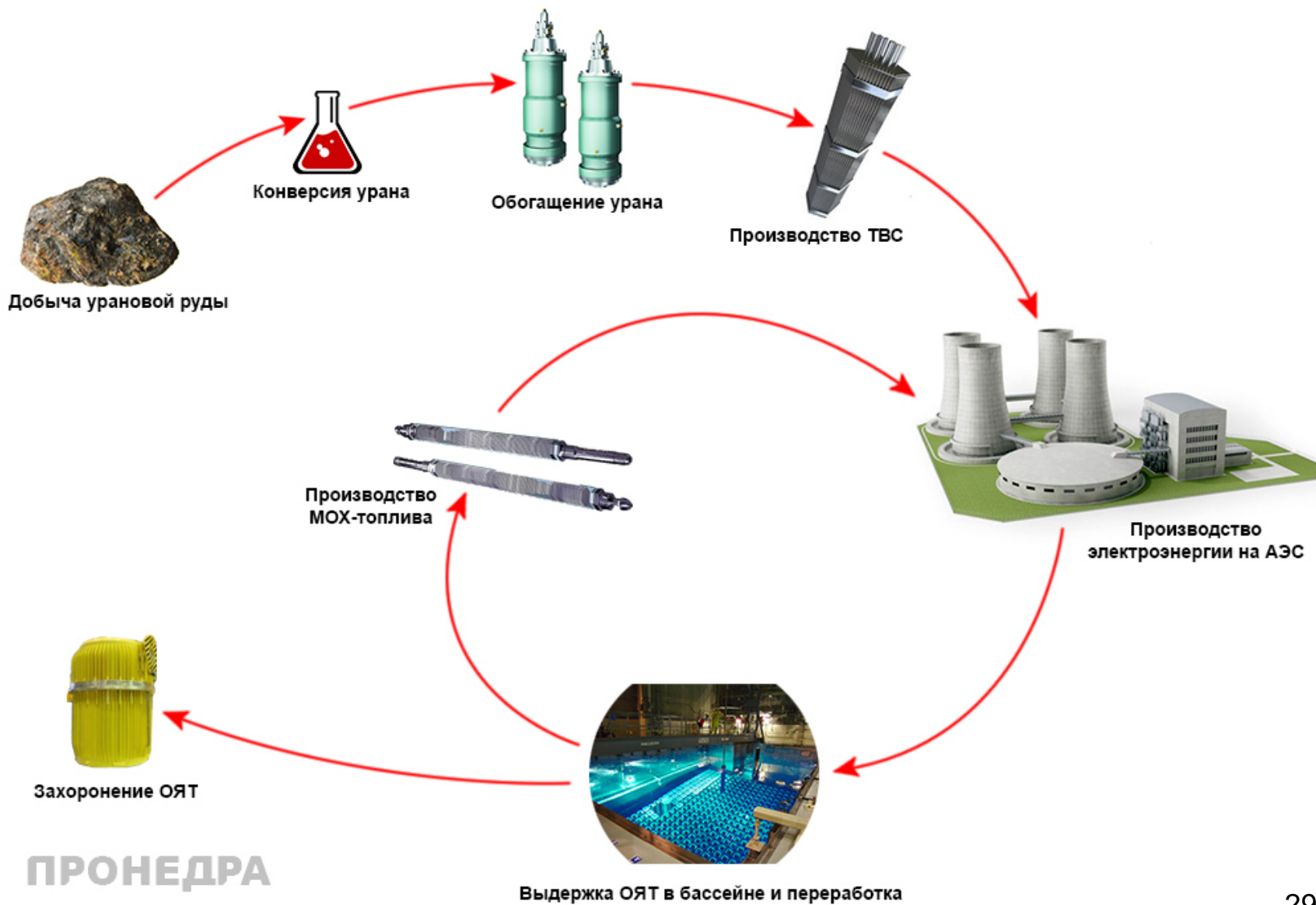


# Схема работы АЭС



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

# Ядерное топливо



# Ядерное топливо



Урановая руда



Захисьокись урана  $U_3O_8$

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

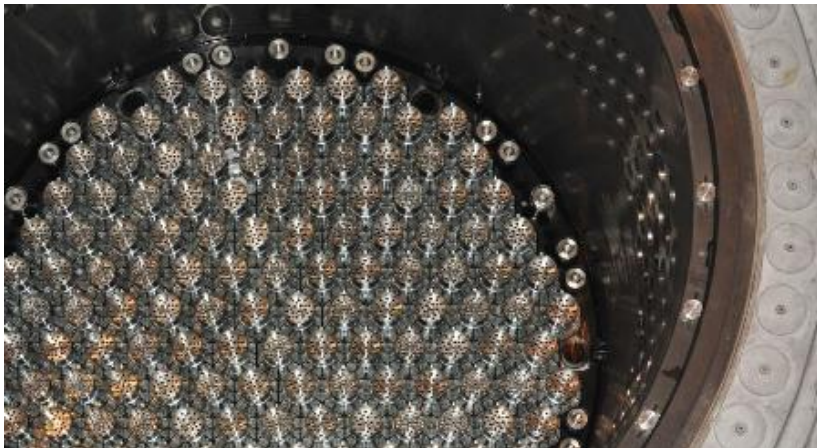
**Газовые центрифуги (65%)**  
**Газовые диффузоры (35%)**

## **Мировые мощности по разделению изотопов**

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



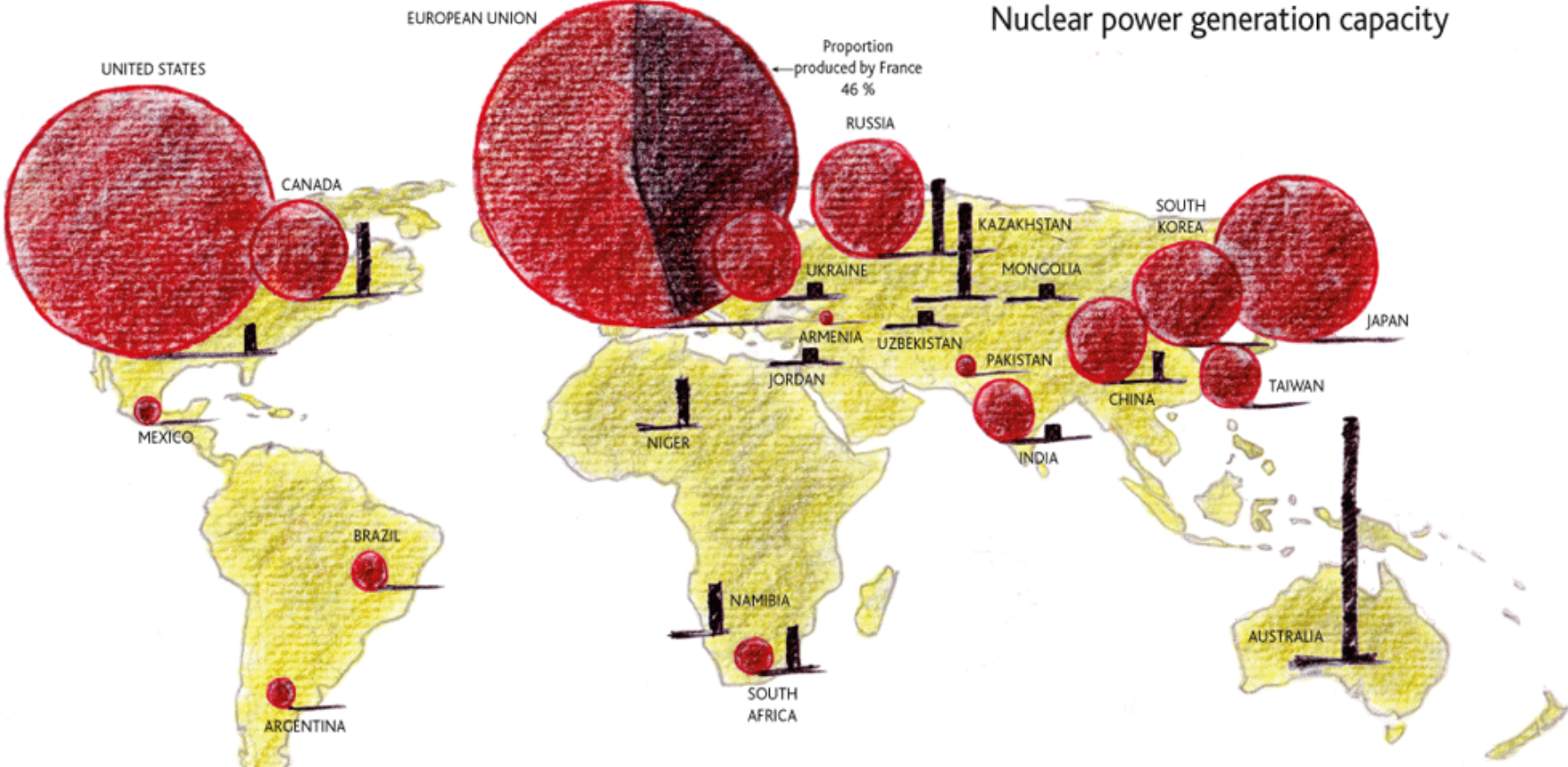
ТВЭЛ



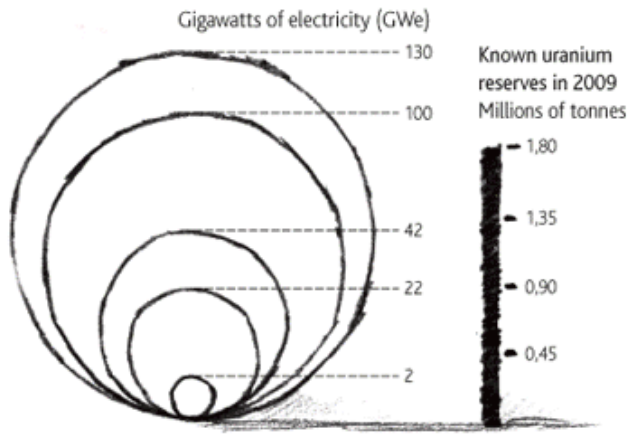
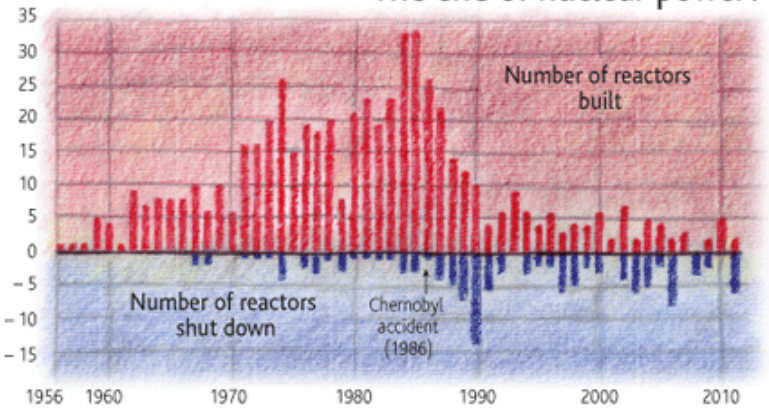
Ростовская АЭС



# Nuclear power generation capacity



## The end of nuclear power?



Sources: World Nuclear Association, 2009; International Atomic Energy Agency (IAEA), Power Reactor Information System (PRIS) database; Mycle Schneider, Antony Froggatt and Steve Thomas, "The World Nuclear Industry Status Report 2010-2011: Nuclear power in a post-Fukushima world; 25 years after the Chernobyl accident", Worldwatch Institute, Washington, DC, 2011.

# NUCLEAR SHARE OF TOTAL ELECTRICITY GENERATION IN 2015

	Блоков	MW	Строятся	
France	58	63130	1	1630
Ukraine	15	13107	2	1900
Slovakia	4	1814	2	880
Hungary	4	1889		
Slovenia	1	688		
Belgium	7	5913		
Armenia	1	375		
Sweden	10	9648		
Finland	4	2752	1	1600
Switzerland	5	3333		
Czech Republic	6	3930		
Korea, Republic of	24	21733	4	5420
Bulgaria	2	1926		
Spain	7	7121		
United States of America	99	99185	5	5633
United Kingdom	15	8918		
Russian Federation	35	25443	8	6582
Romania	2	1300		
Canada	19	13524		
Germany	8	10799		
Mexico	2	1440		
Argentina	3	1632	1	25
South Africa	2	1860		
Pakistan	3	690	2	630
Netherlands	1	487		
India	21	5306	6	3907
China	31	26774	24	24128
Brazil	2	1884	1	1245
Iran, Islamic Republic of	1	915		
Japan	43	40290	2	2650

Nuclear Share (%)

<https://www.iaea.org>

Note: The nuclear share of electricity generation in Taiwan, China was 16.3%.



## Сравнительная статистика видов генерации электроэнергии

Показатель	ТЭС			АЭС	ГЭС	ВЭС	СЭС
	уголь	нефть	газ	уран	гидро	ветер	солнце
Относительная стоимость электроэнергии	2,8	2,3	2,3	2,2	1,0	4,9	10
Продолжительность надежного энергоснабжения, лет	270	45	60	55 (3300*)	неограниченно долго		
Занимаемая площадь (отчуждение земли), км <sup>2</sup> /1000 МВт	2,4	0,87	1,5	0,63	270	170	100
Уровень смертности** (человек/тераватт-час)	100	36	4	0,09	1,4	0,15	0,44
Выбросы углекислого газа при производстве 1 кВт-час****	1290	990	1234	30	410	75	279
Годовые выбросы оксидов серы*** станции	140	98	0,013	0	0	0	0
1000 МВт, тыс. тонн оксидов азота	21	22	12	0	0	0	0

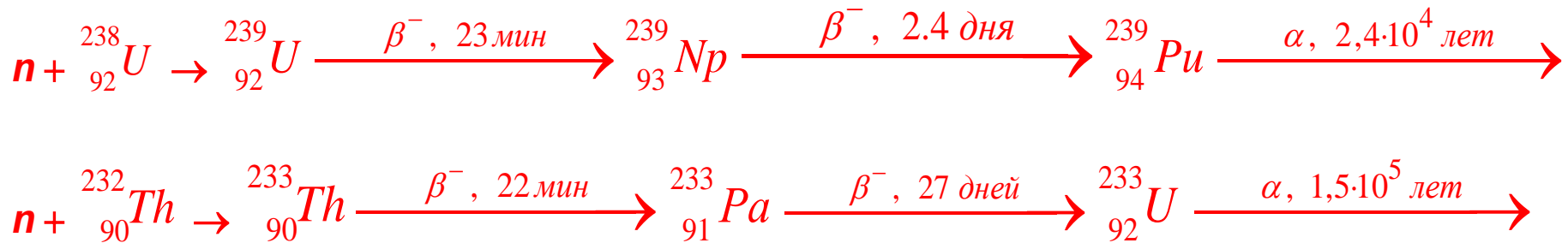
\* При условии использования новых технологий – реакторов на быстрых нейтронах и переработки топлива

\*\* По данным [Forbes](#), 2012

\*\*\* Эти показатели зависят от множества условий, приведены для ориентировки.

\*\*\*\* По данным МАГАТЭ (Nuclear power & Sustainable Development, 2016)

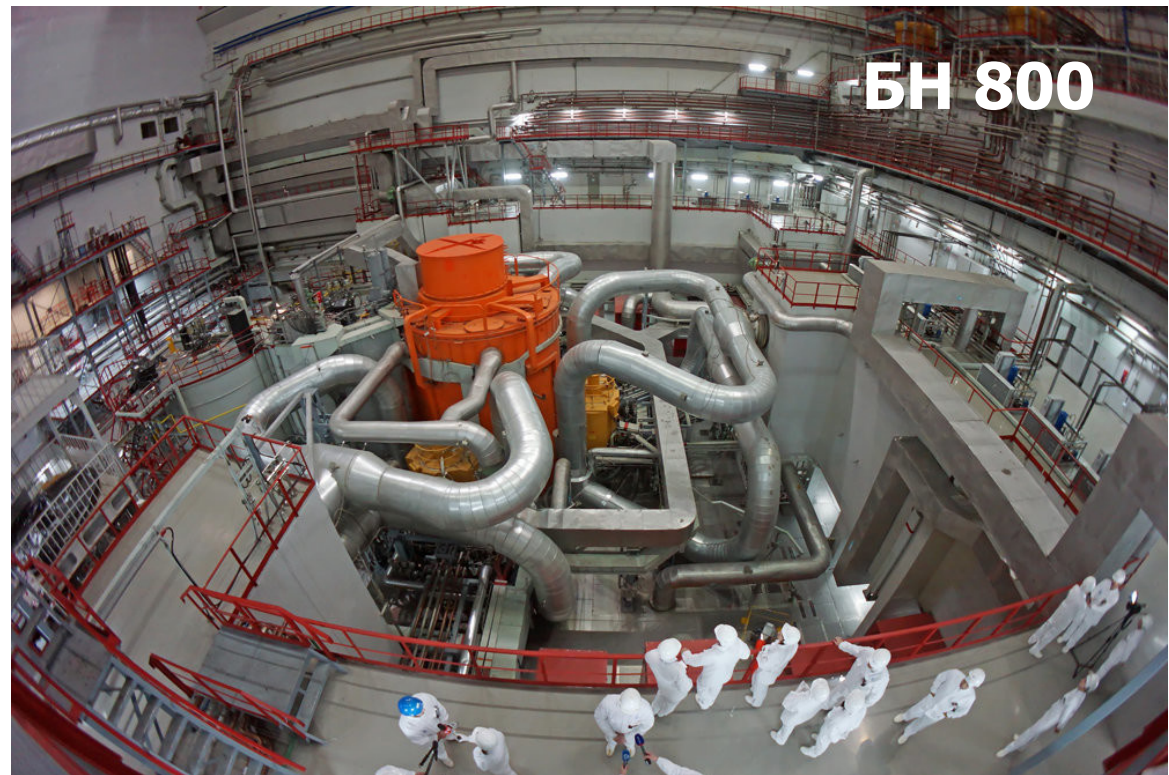
# Воспроизводство ядерного горючего



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

# Реакторы на быстрых нейтронах

Основные параметры энергоблока БН-800	
Тепловая мощность, МВт	2100
Электрическая мощность, МВт	800
Температура, °С первого контура второго контура	547/354 505/310
Расход теплоносителя по первому и второму контурам, т/ч	3000

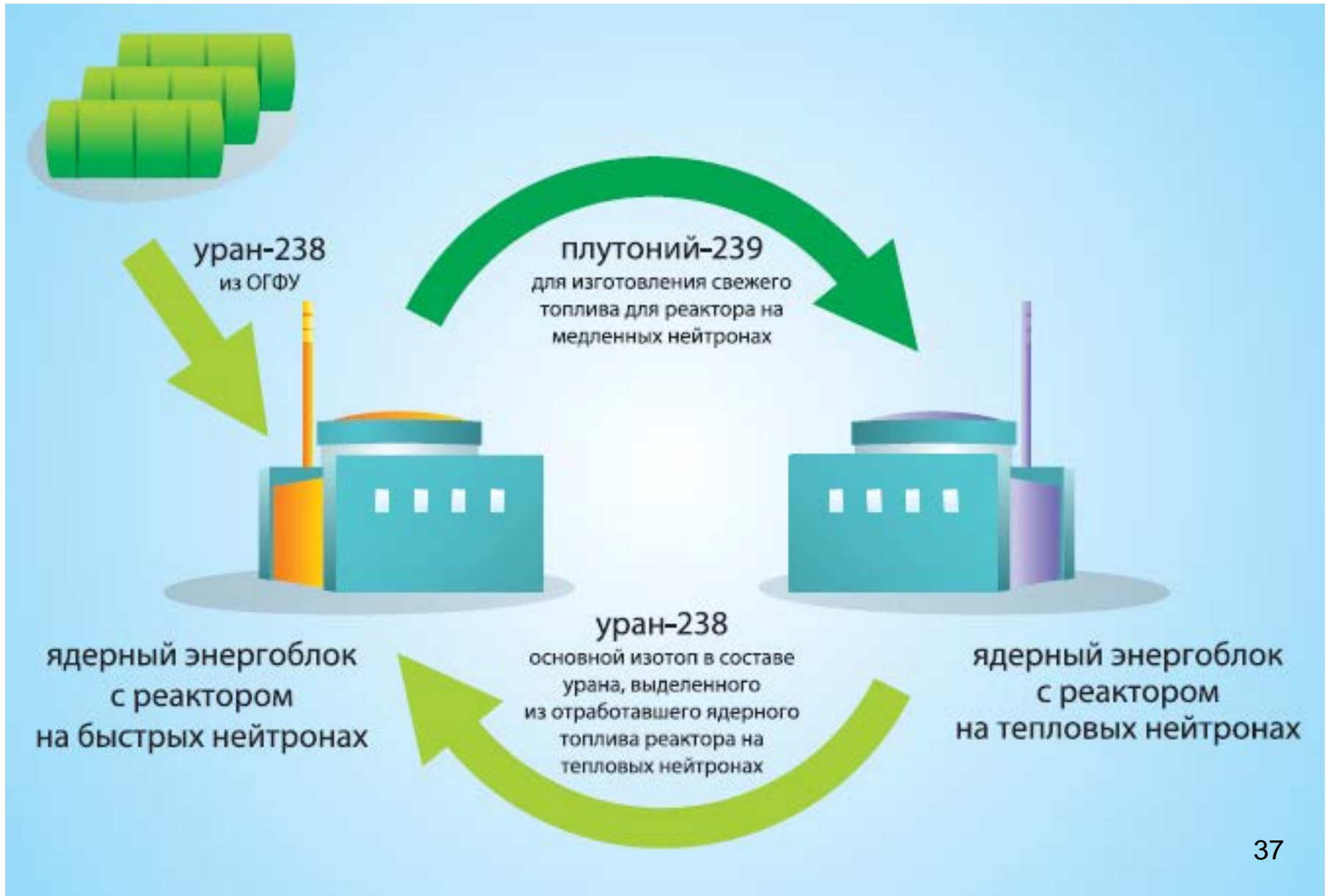


Воспроизводство топлива в уран-плутониевом цикле возможно только с помощью быстрых нейтронов, а в торий-урановом также и с помощью тепловых нейтронов.

Активная зона реактора на быстрых нейтронах существенно компактней, чем объем реактора на тепловых нейтронах.

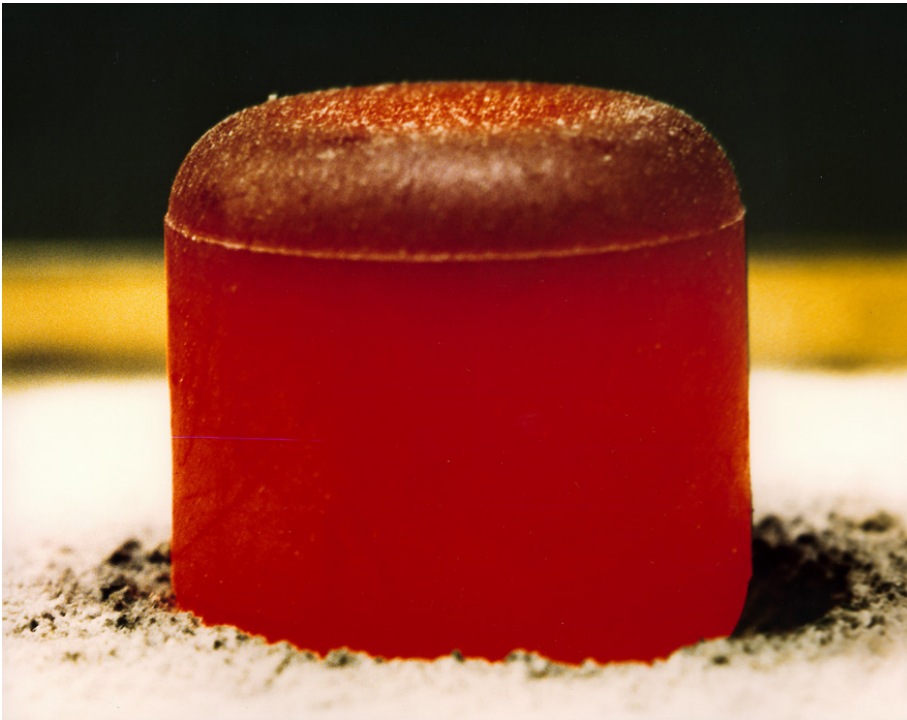
Особые требования на материалы конструкционных элементов реактора, а также на теплоноситель.

# Замыкание топливного цикла



# Радиоизотопные источники энергии

- Используют энергию радиоактивного распада
- Превосходят химические источники (аккумуляторы, топливные элементы и др.) в десятки и сотни тысяч раз по массовой и объёмной энергоёмкости
- Обеспечивают автономность работы оборудования, значительную надёжность, малый вес и габариты



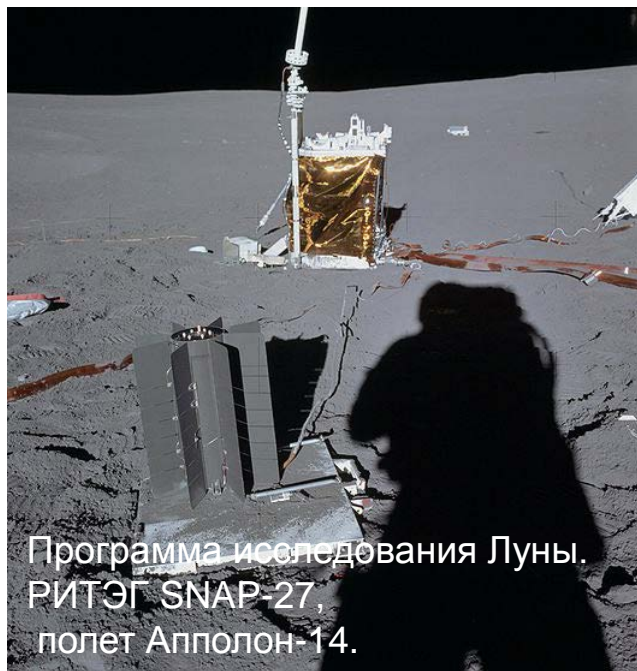
Топливный элемент из оксида  $^{238}\text{Pu}$   
Падение энерговыделения 0,78% в год

## ТРЕБОВАНИЯ К ИЗОТОПАМ

- высокая активность для получения значительного энерговыделения в ограниченном объёме установки (**относительно малый период полураспада**)
- длительный период поддержания мощности (**период полураспада – годы и десятилетия**)
- безопасный вид ионизирующего излучения (**простая и легкая защита от излучения**)
- для изотопов, способных к делению, возможно большая критическая масса
- дешевизна и простота получения изотопа

# Радиоизотопные источники энергии

Изотоп	Получение	Удельная мощность, Вт/г	Температура плавления топлива, °С	$T_{1/2}$	Энергия распада, кВт·ч/г
$^{238}\text{Pu}$	ядерный реактор	0,568	2500	86 лет	608,7
$^{90}\text{Sr}$	осколки деления	0,93	2460 (SrO)	28 лет	162,721
$^{144}\text{Ce}$	осколки деления	2,6	~2600	285 дней	57,439
$^{242}\text{Cm}$	ядерный реактор	121	~2270	162 дня	677,8
$^{210}\text{Po}$	облучение висмута	142	600 (PbPo)	138 дней	677,59
$^{244}\text{Cm}$	ядерный реактор	2,8	~2270	18,1 года	640,6
$^{232}\text{U}$	облучение тория	8,097	2850	68,9 лет	4887,103
$^{106}\text{Ru}$	осколки деления	29,8	2250	371,63 сут	9,854



Программа исследования Луны.  
РИТЭГ SNAP-27,  
полет Апполон-14.



Марсоход Curiosity



Станция «**Новые горизонты**» и  
предназначенная для изучения Плутона, его  
естественного спутника Харона и объектов  
пояса Койпера. Запущена в 2006 г.  
Стартовая мощность РИТЭГ – 228 Вт.