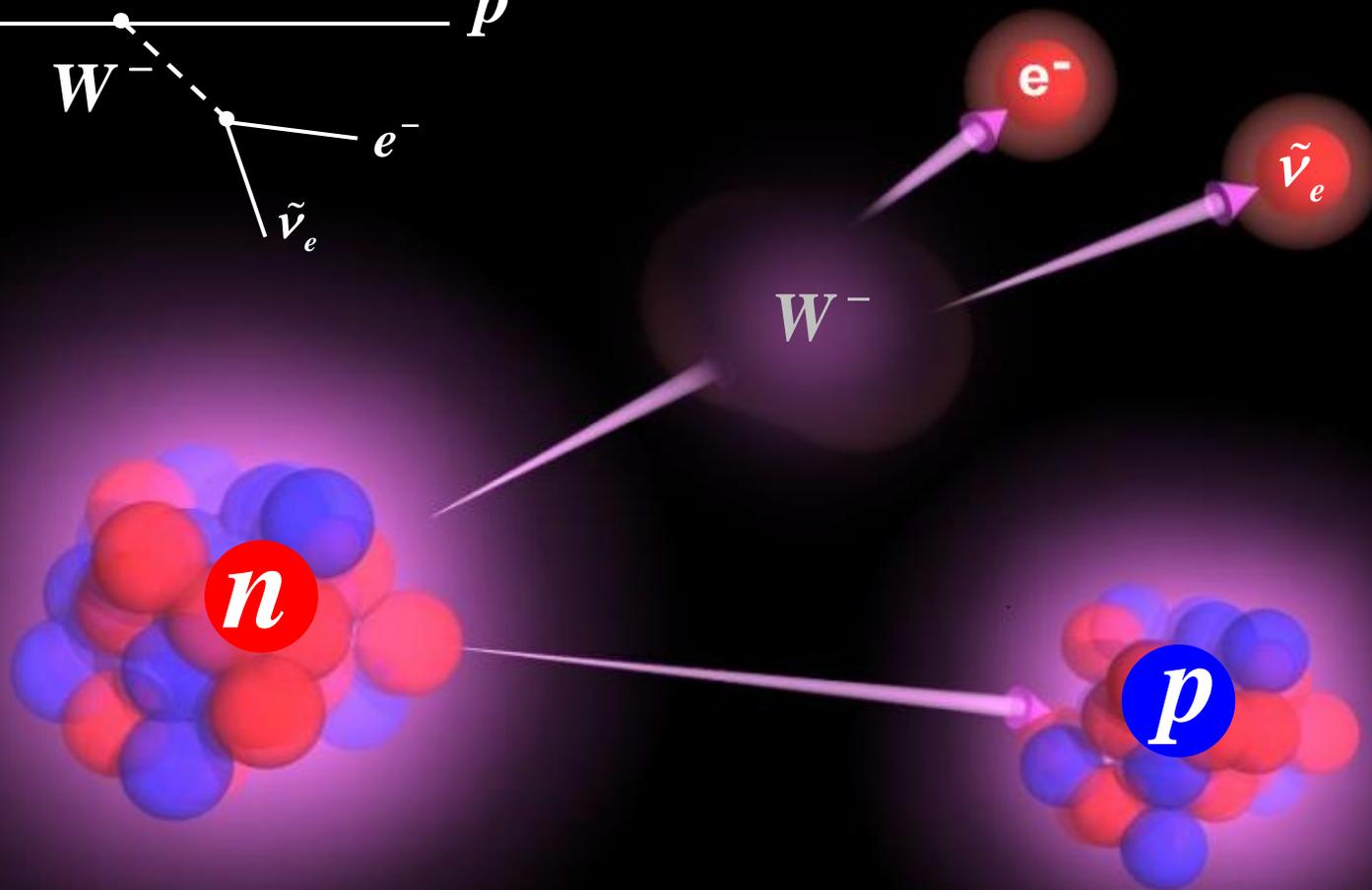
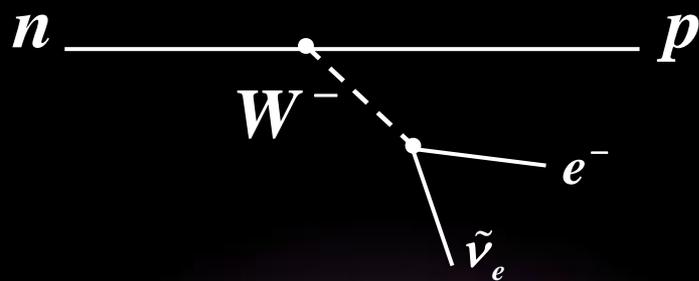


# Рождение и жизнь атомных ядер



# АТОМНАЯ ЭНЕРГЕТИКА

# Ядерная физика

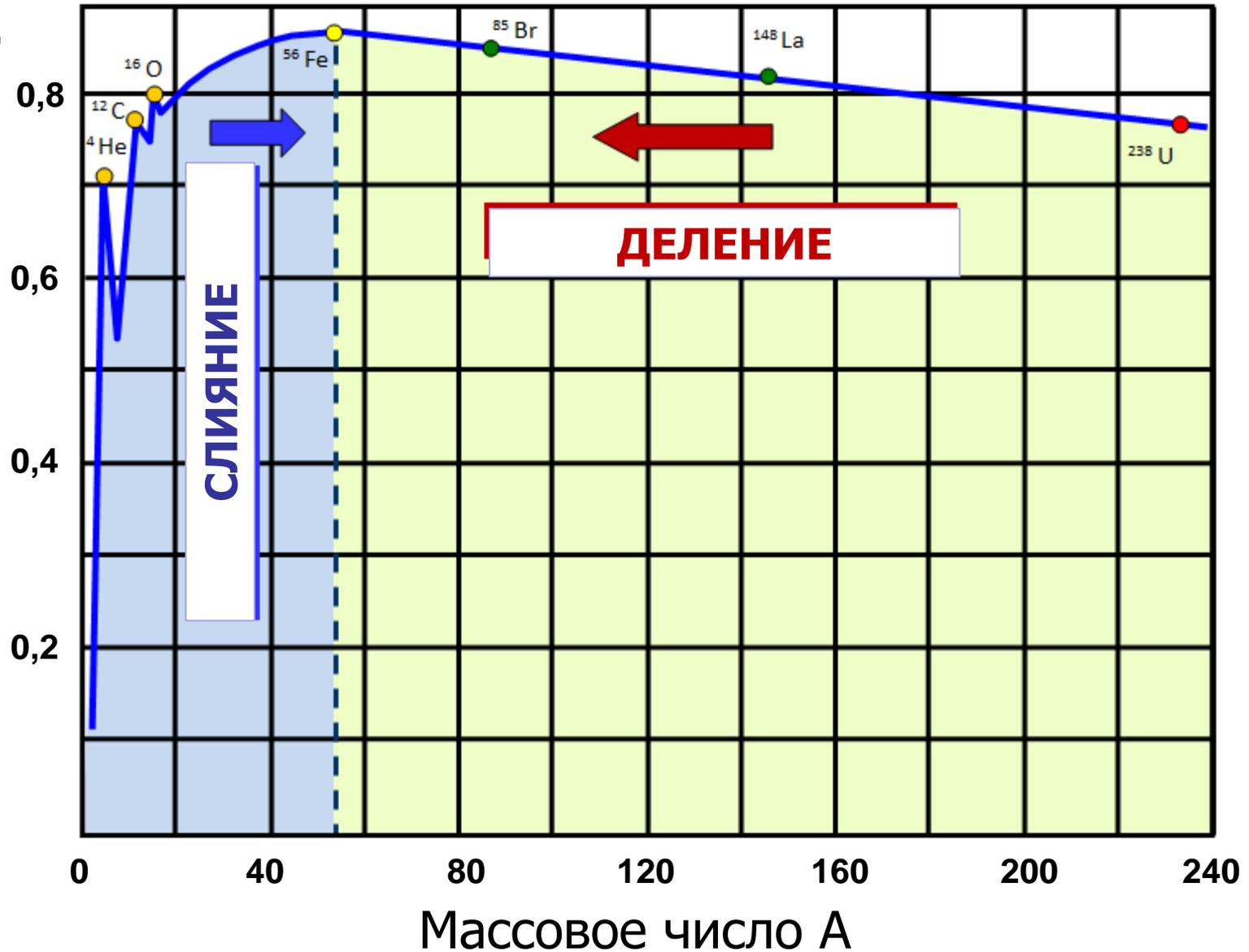
Энергия связи ядра  $W(A,Z)$

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

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

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

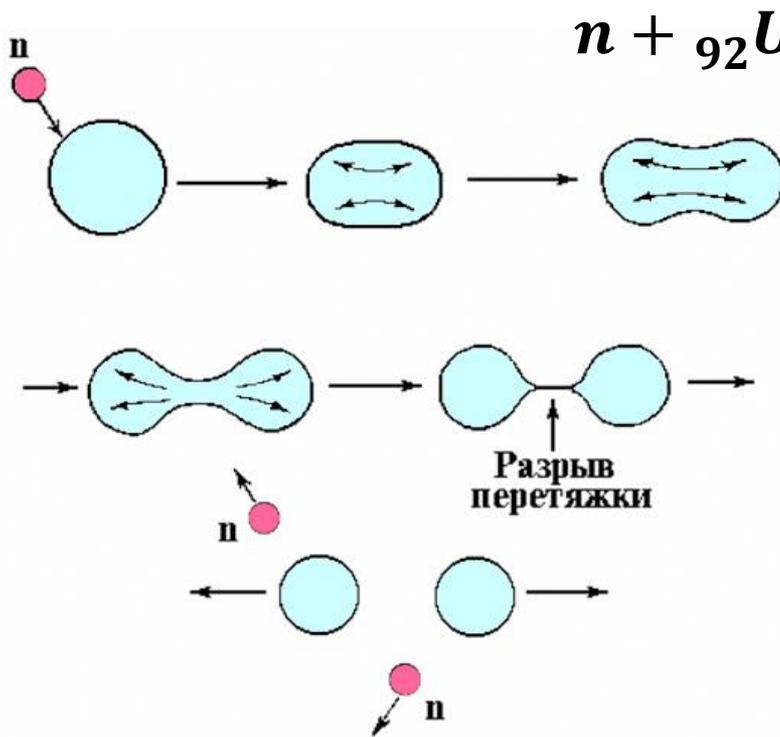
$$\frac{W(A, Z)}{M_{\text{яд}}} \cdot 100\%$$



# 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.

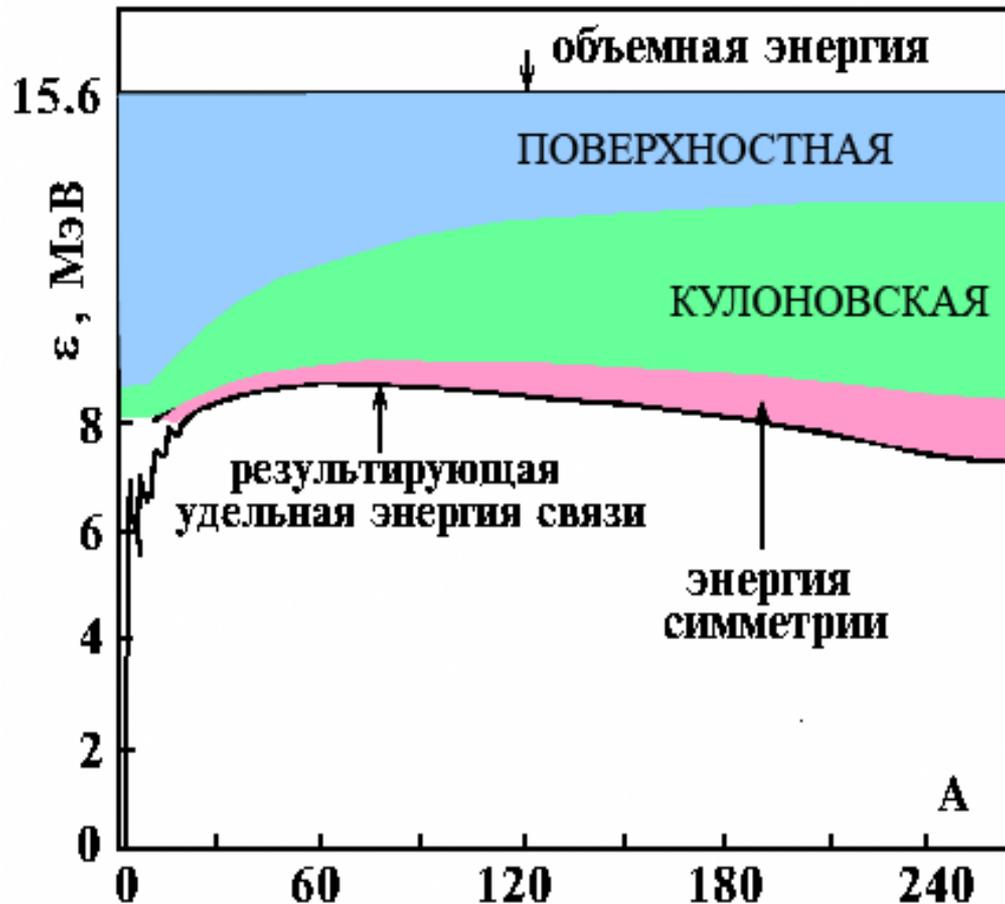
$$\tilde{E}_{\text{пов}} = E_{\text{пов}} \left(1 + \frac{2}{5} \varepsilon^2\right)$$

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

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

# Формула Бете-Вайцзеккера

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



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

# Формула Бете-Вайцзеккера

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

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

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

$$(A, Z) \rightarrow 2(A/2, Z/2)$$

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

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

# Параметр делимости

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

Я. Френкель развил капельную теорию деления ядер медленными нейтронами.

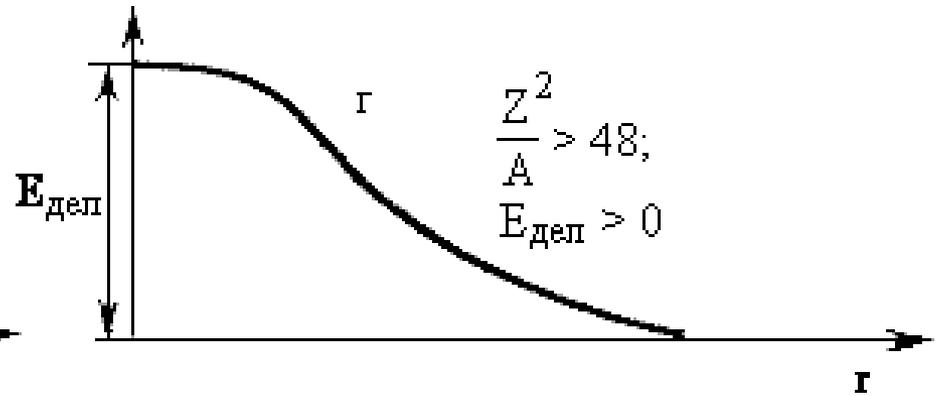
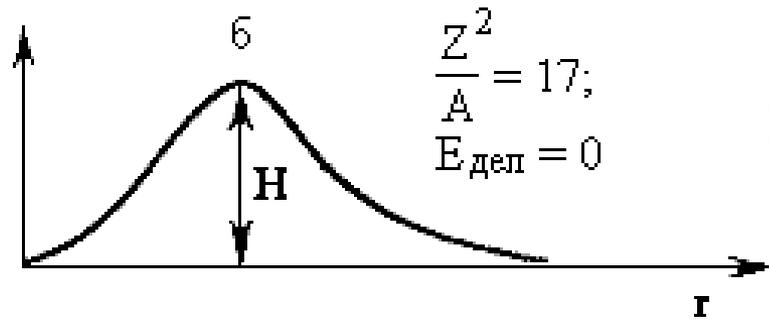
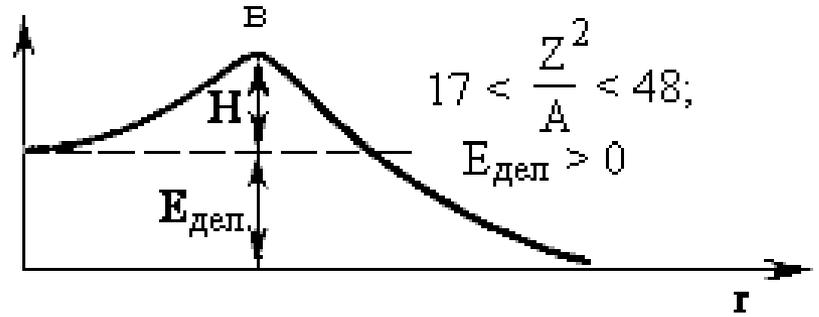
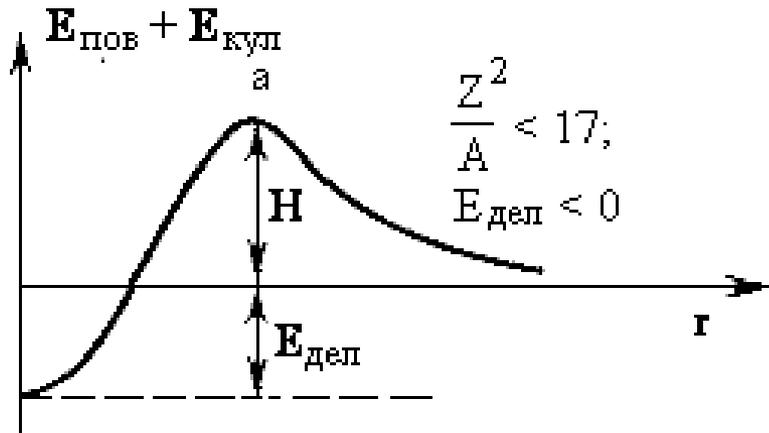
$$Q = \beta A^{2/3} (1 - 2^{1/3}) + \gamma \frac{Z^2}{A^{1/3}} (1 - 2^{-2/3}) > 0$$

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

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

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

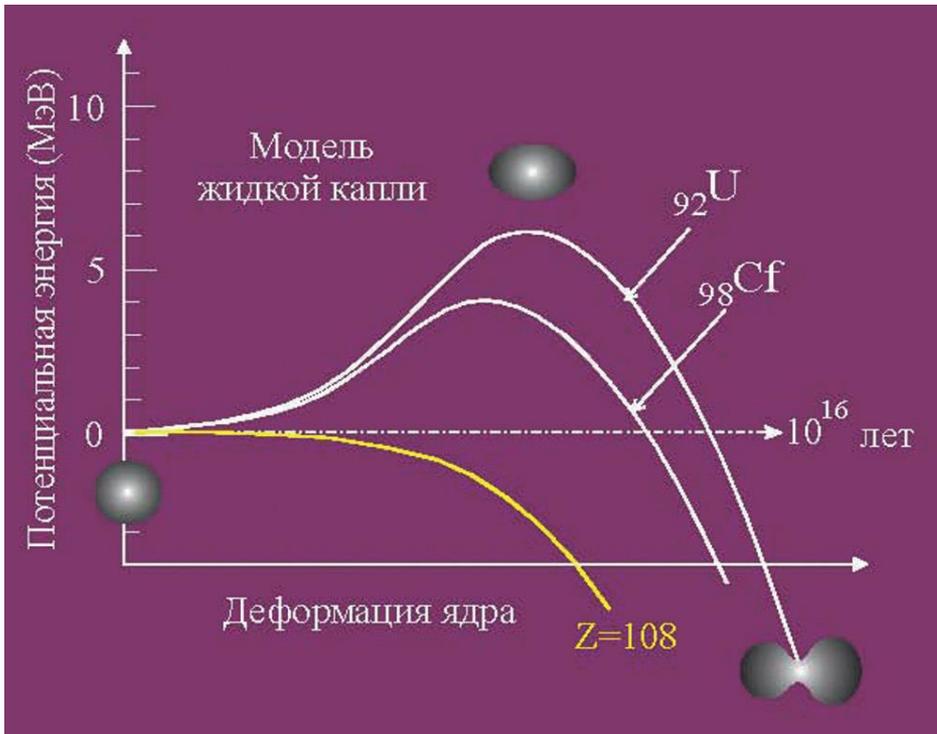
# Барьер деления



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

$$Z = 120 \div 125$$

# 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

$$B_n \geq H$$

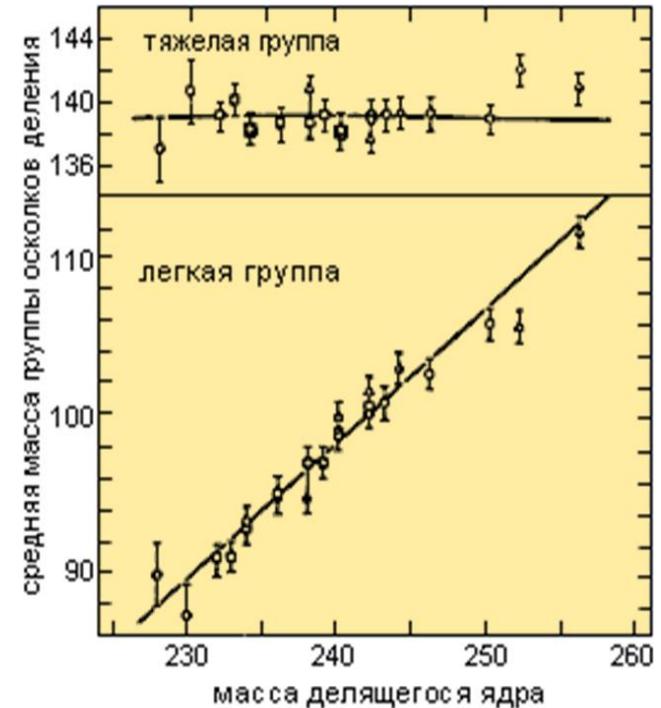
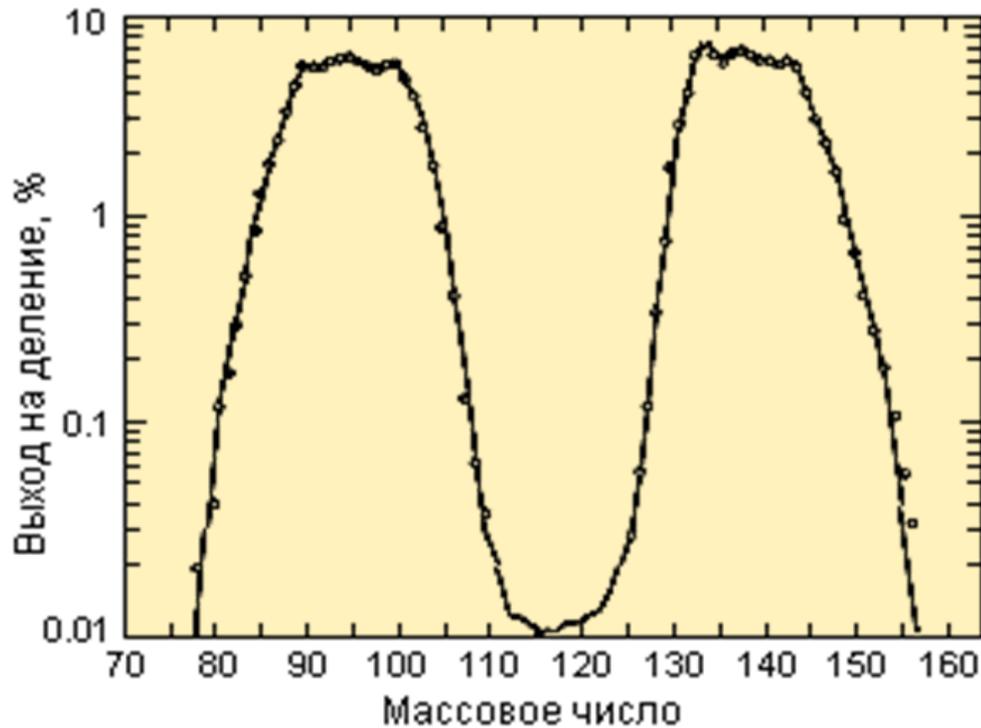
$$T_n \cong 0$$

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

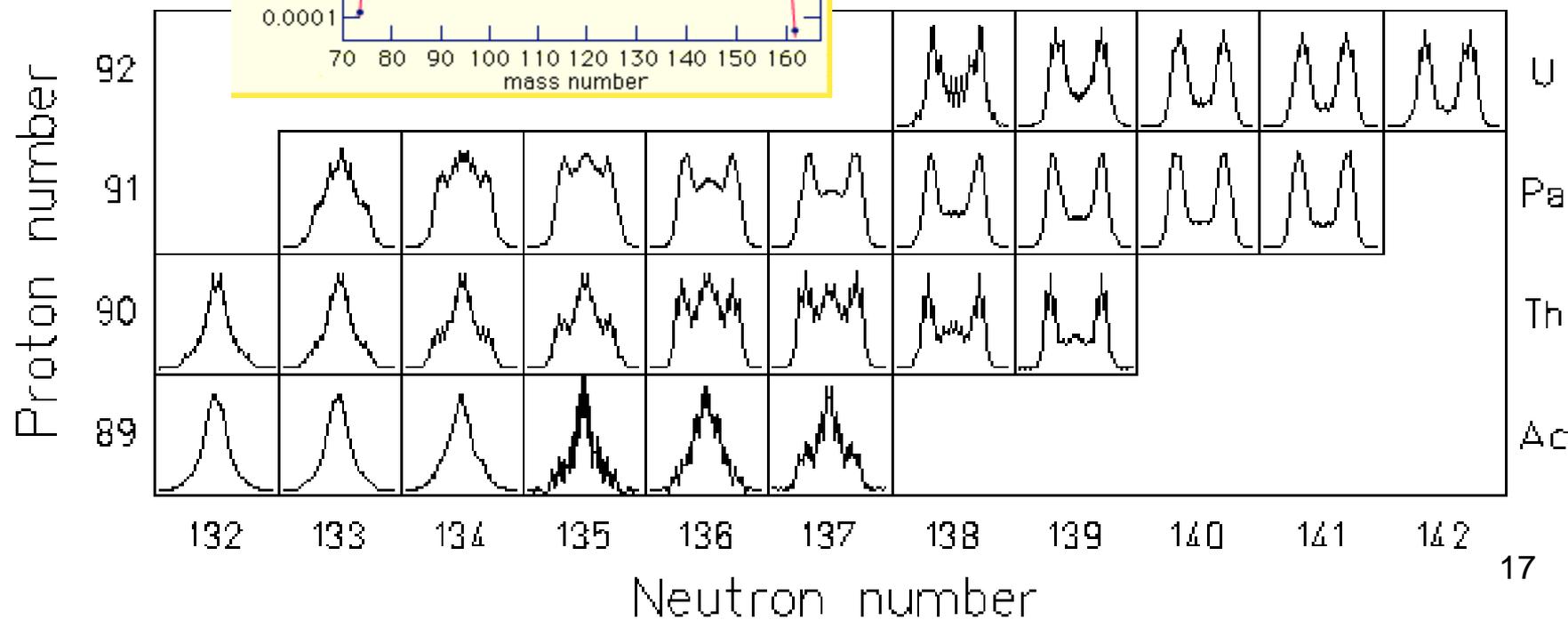
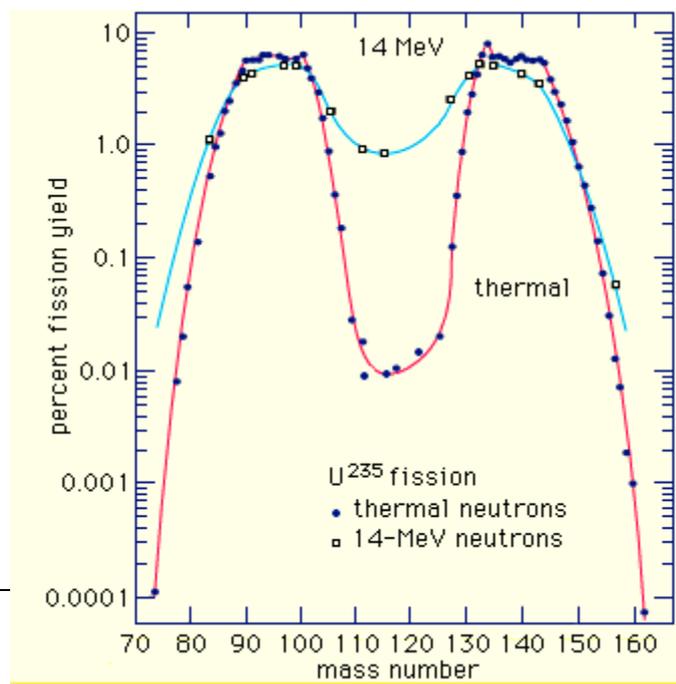
# Массовое распределение осколков деления

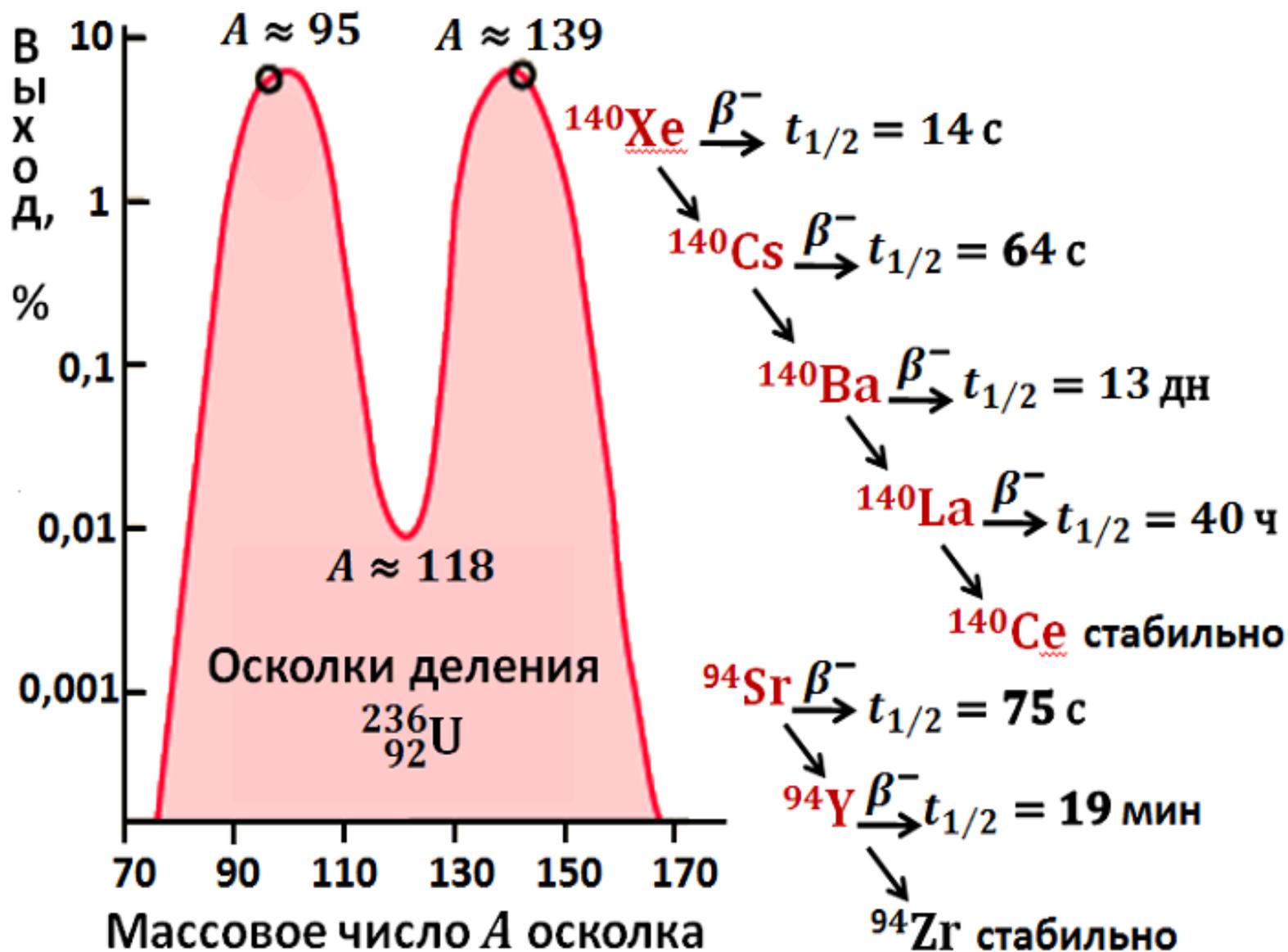


Осколки деления образуются в широком диапазоне  $A = 72-161$  и  $Z = 30-65$ .

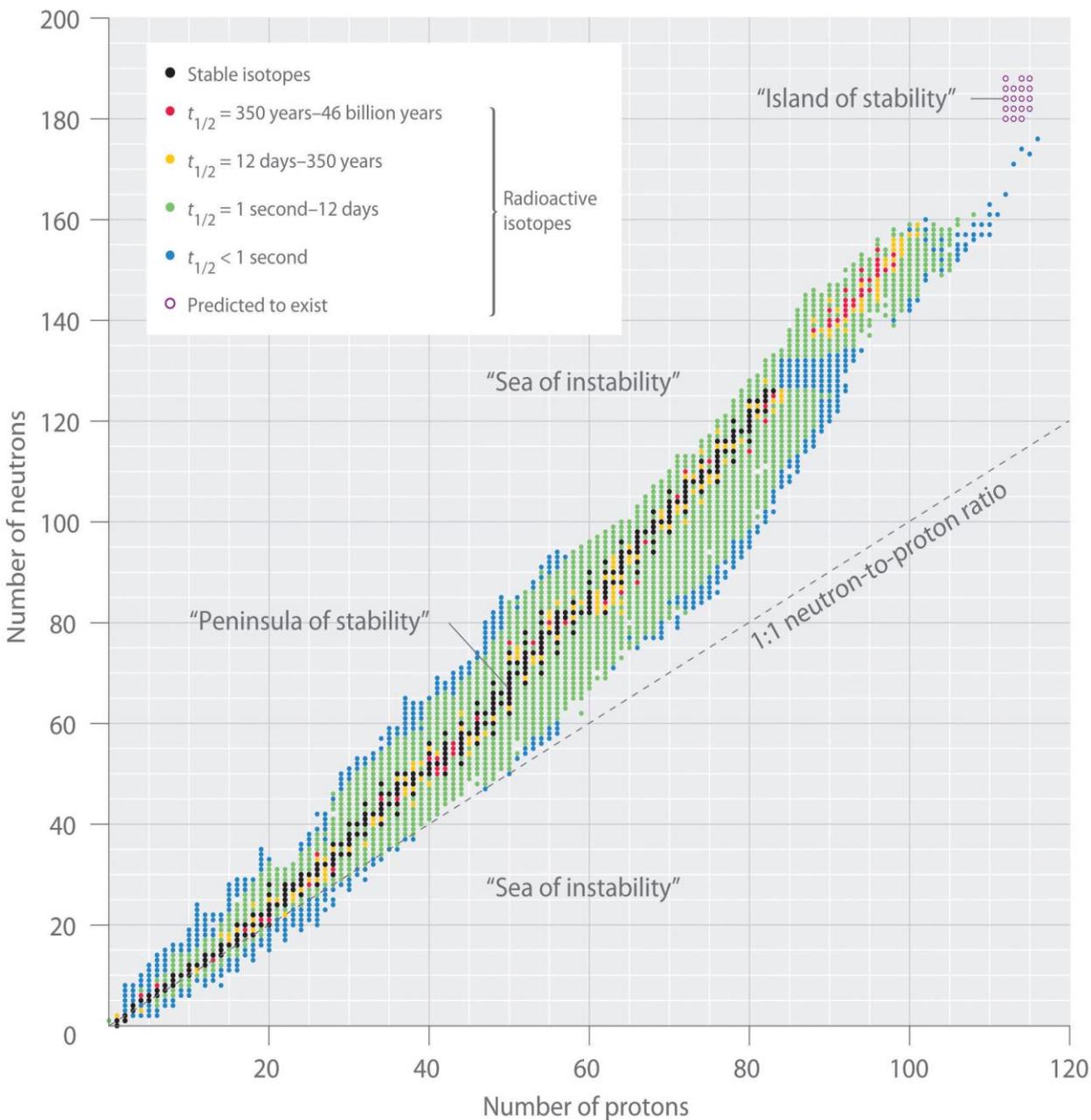
$$\frac{A_{\text{Л}}}{A_{\text{Т}}} \approx \frac{2}{3}, \quad \frac{Z_{\text{Л}}}{Z_{\text{Т}}} \approx \frac{2}{3}.$$

# Массовое распределение осколков деления





# Нейтроны деления



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

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

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

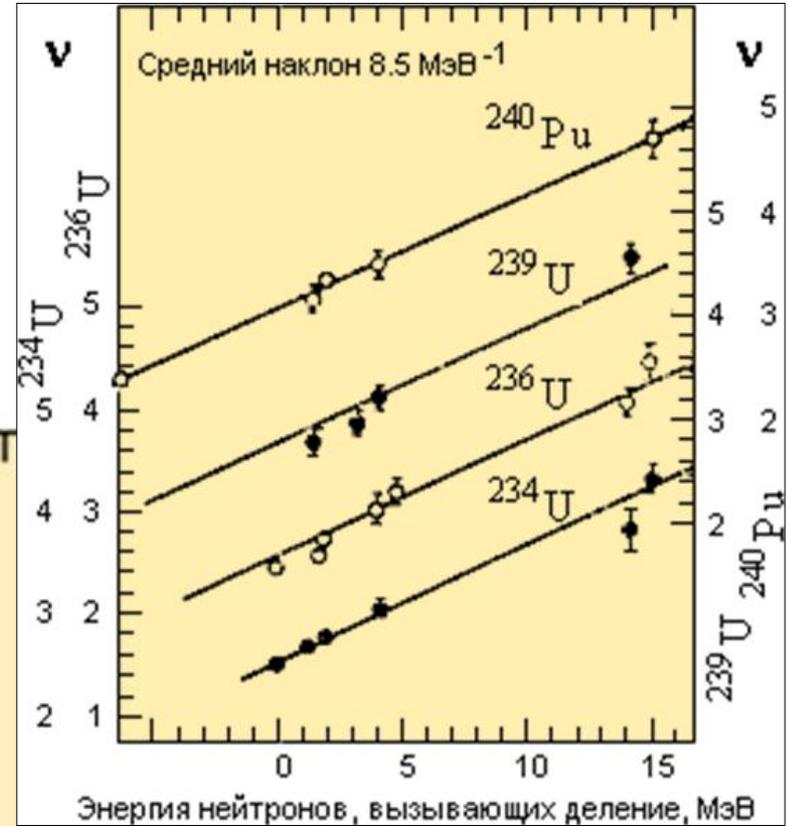
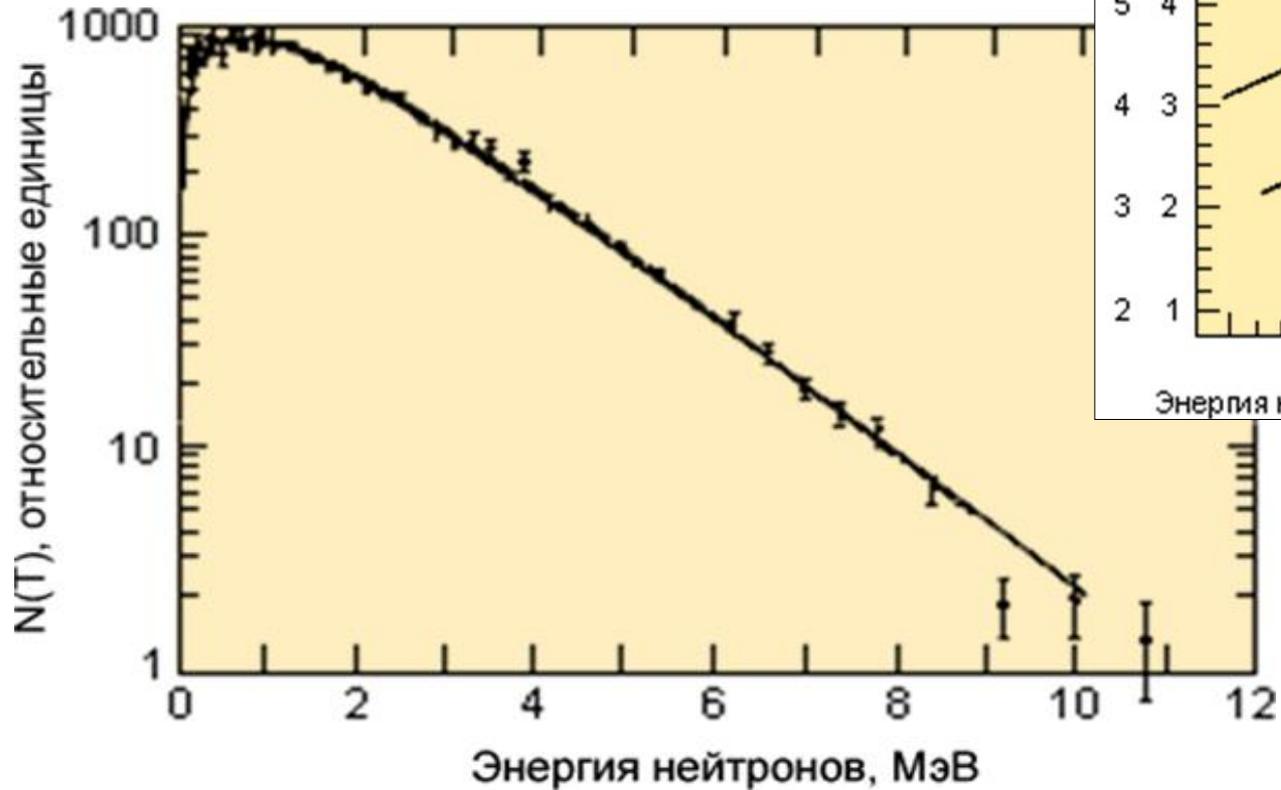
**Вторичные нейтроны**

$$\nu_n = 2,5$$

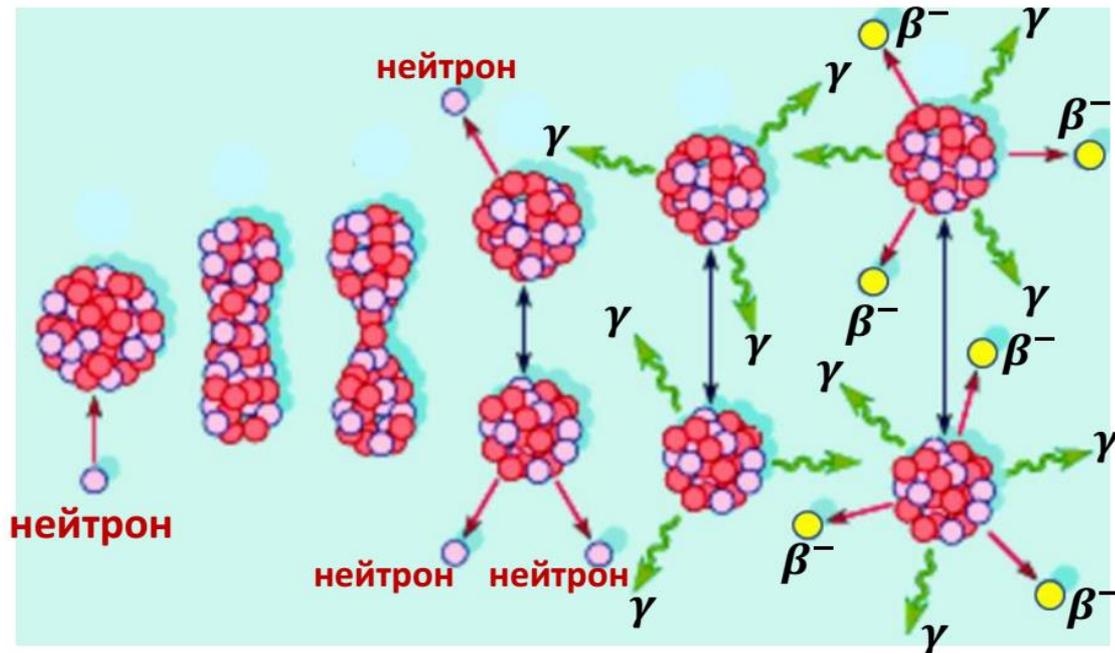
$$\bar{T}_n \cong 2 \text{ МэВ}$$

# Нейтроны деления

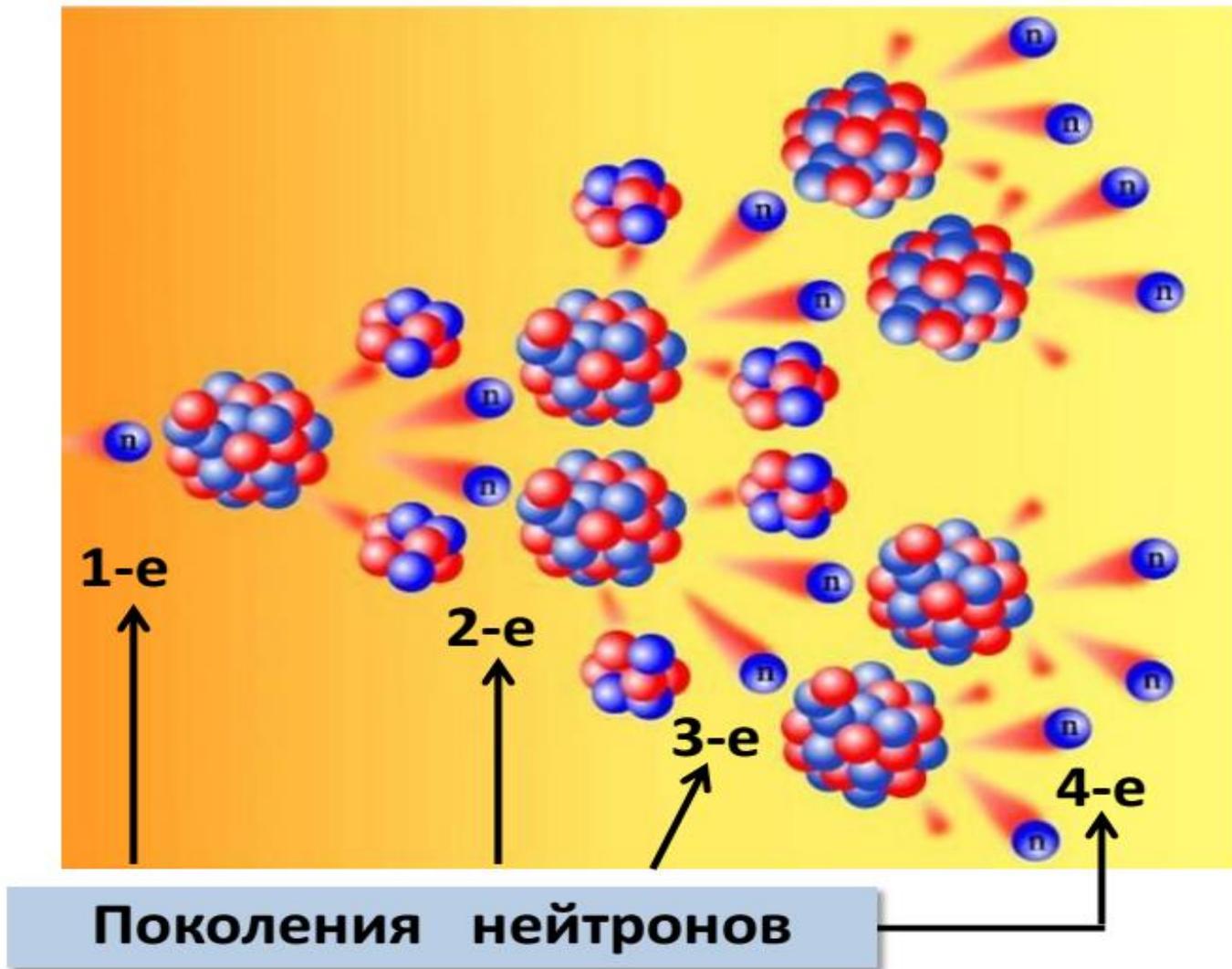
## Спектр нейтронов деления



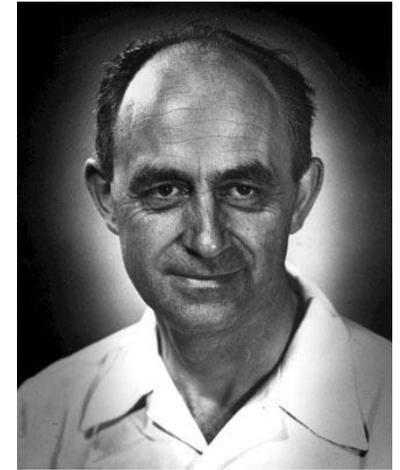
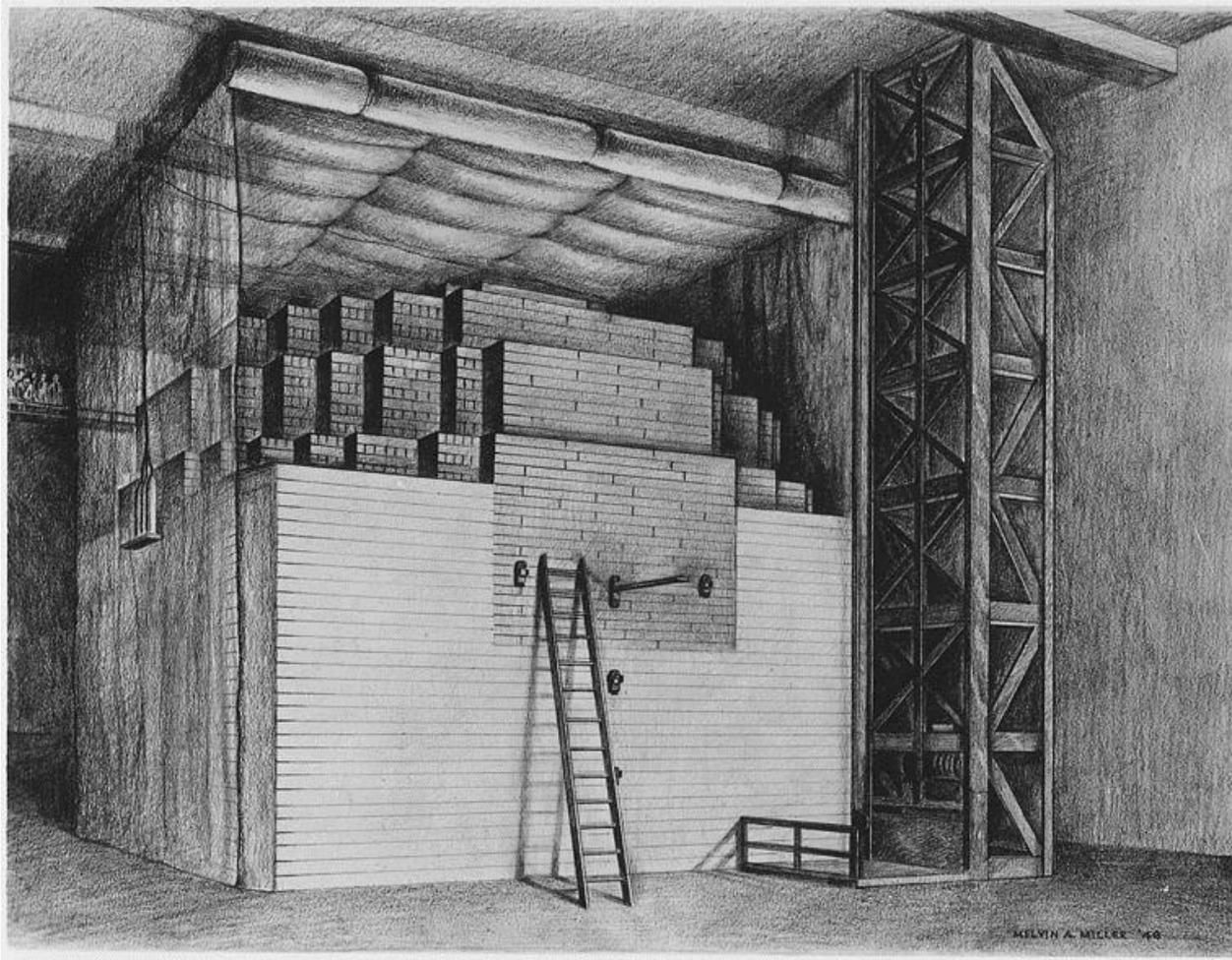
Продукты распада	Энергия деления, МэВ
Кинетическая энергия осколков	167
Мгновенные нейтроны	5
Электроны $\beta$ -распада	5
Антинейтрино $\beta$ -распада	10
Мгновенное $\gamma$ -излучение	7
$\gamma$ -излучение продуктов распада	6
<b>Полная энергия деления</b>	<b>200</b>



# Цепная реакция деления



# Первый ядерный реактор Чикагская Поленица



Энрико  
Ферми

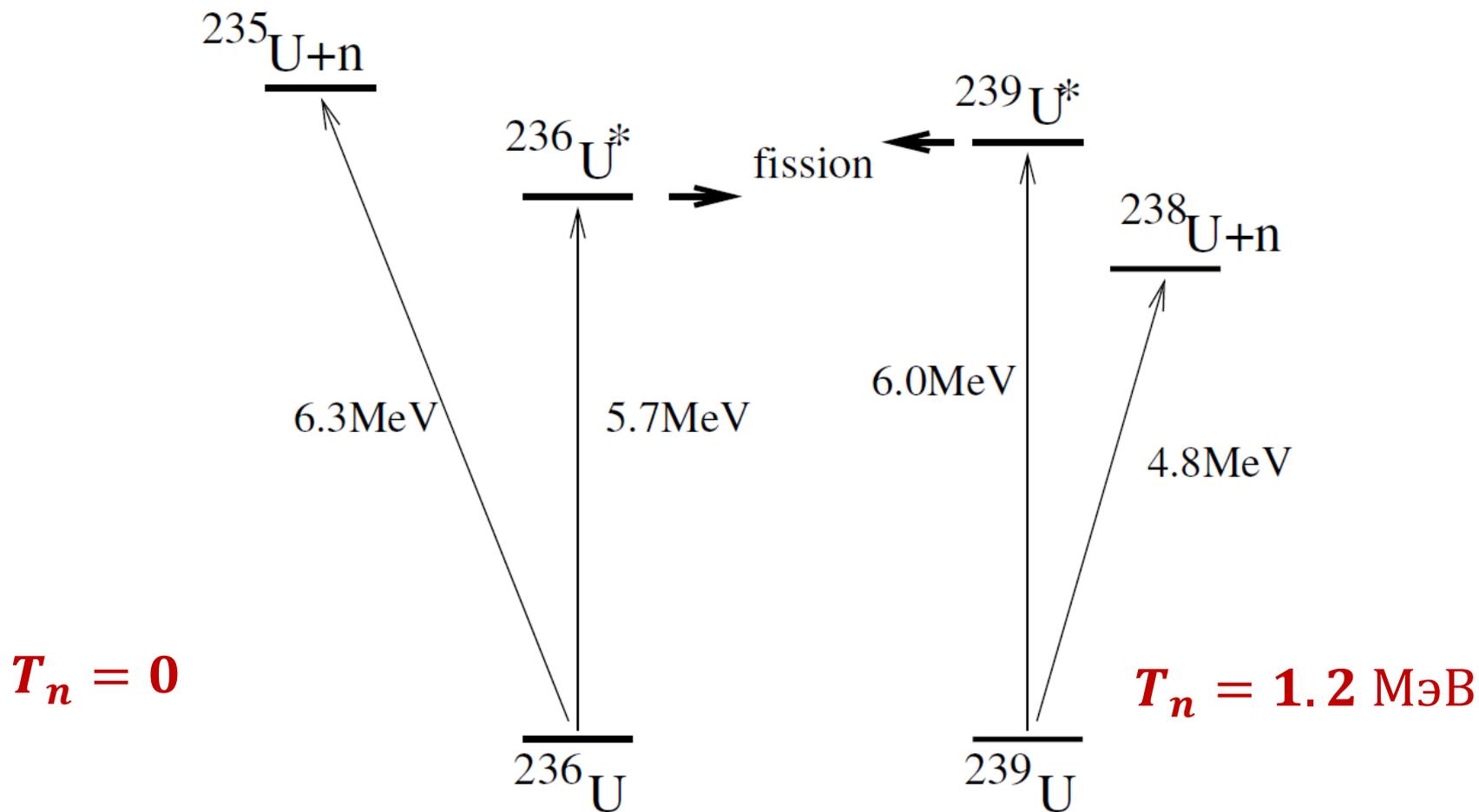
2 .12. 1942

стадион  
Универстета  
Чикаго

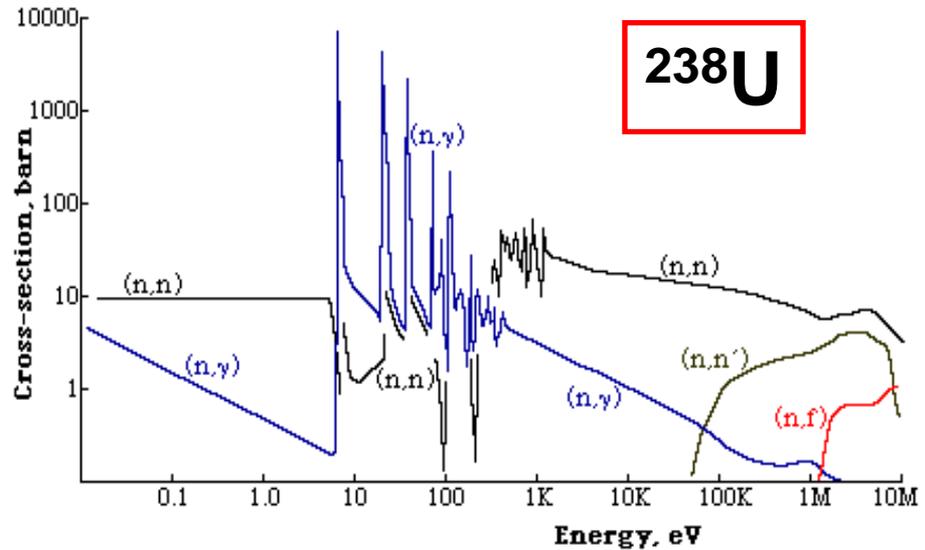
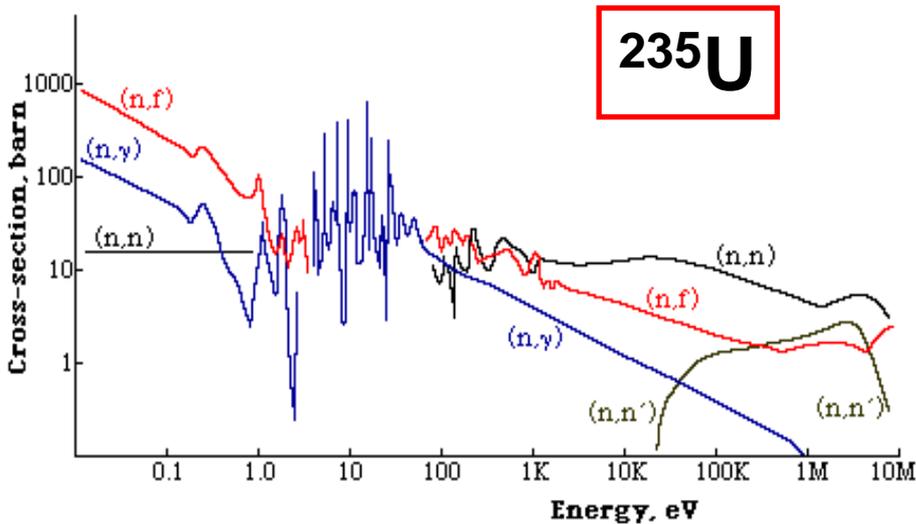
# ИЗОТОПЫ U

$^{235}\text{U}$       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 $(n,f)$ , $(n,\gamma)$ 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

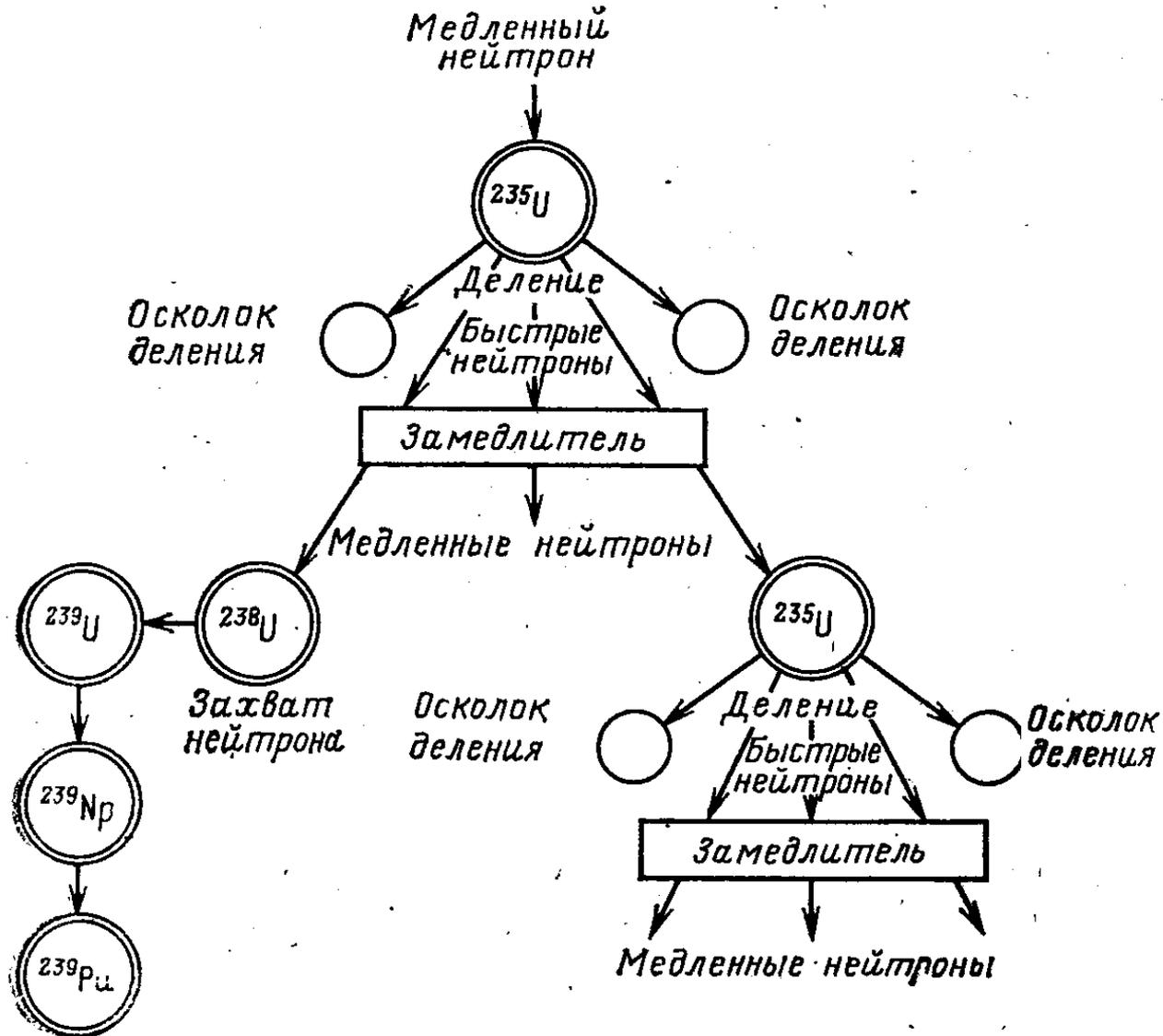
$$\frac{\sigma_{nf}}{\sigma_{nf} + \sigma_{n\gamma}}$$

# Цепная реакция деления

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

$E_n$	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.

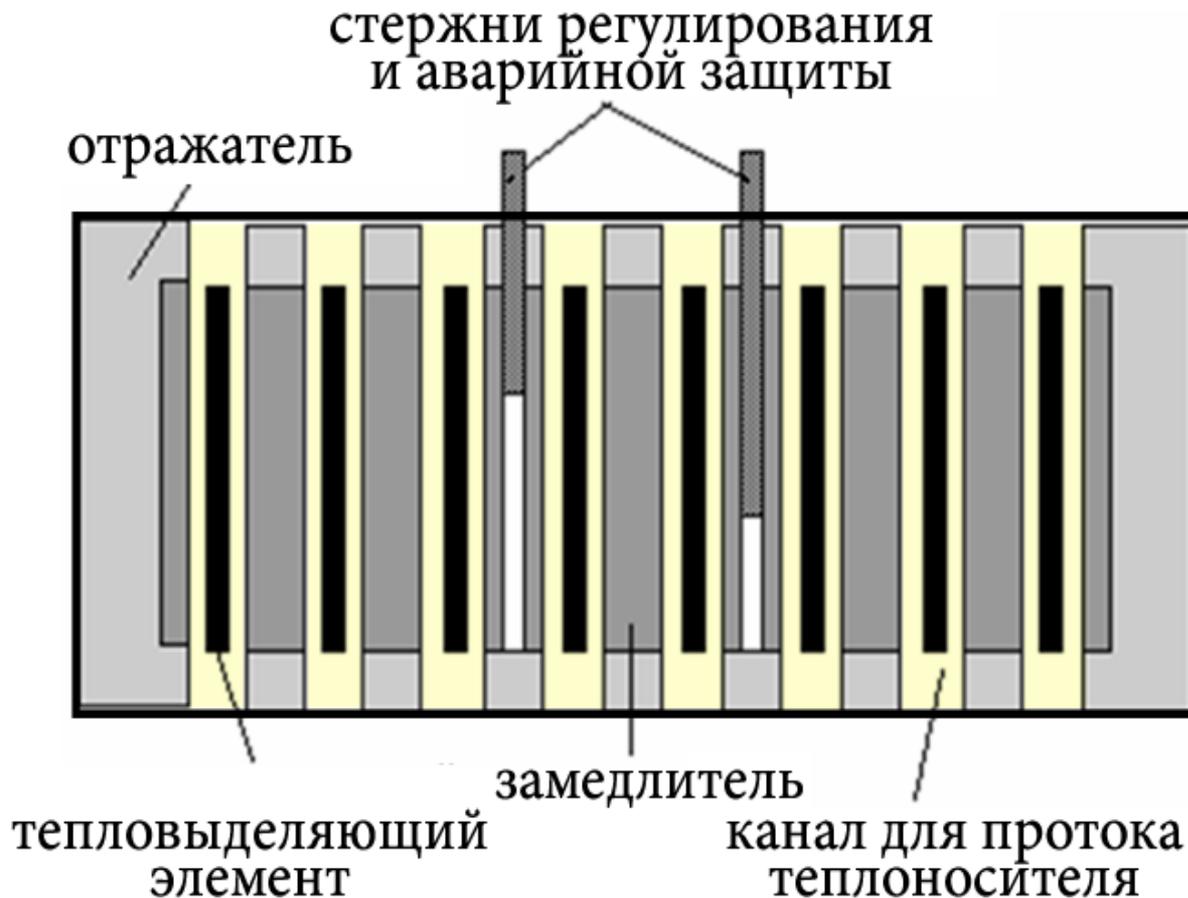
$f$  – вероятность поглощения теплового нейтрона ядром горючего, а не замедлителя.

$\varepsilon$  – 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 (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.

# 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 работы АЭС



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

# 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>

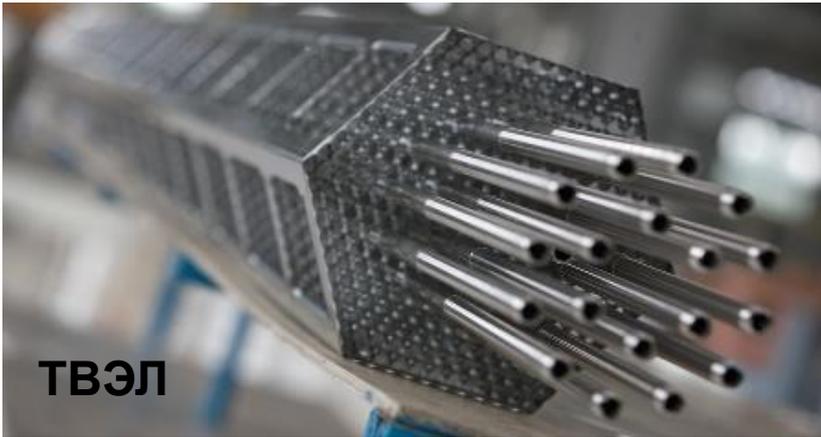


Тетрафторид урана  $UF_4$

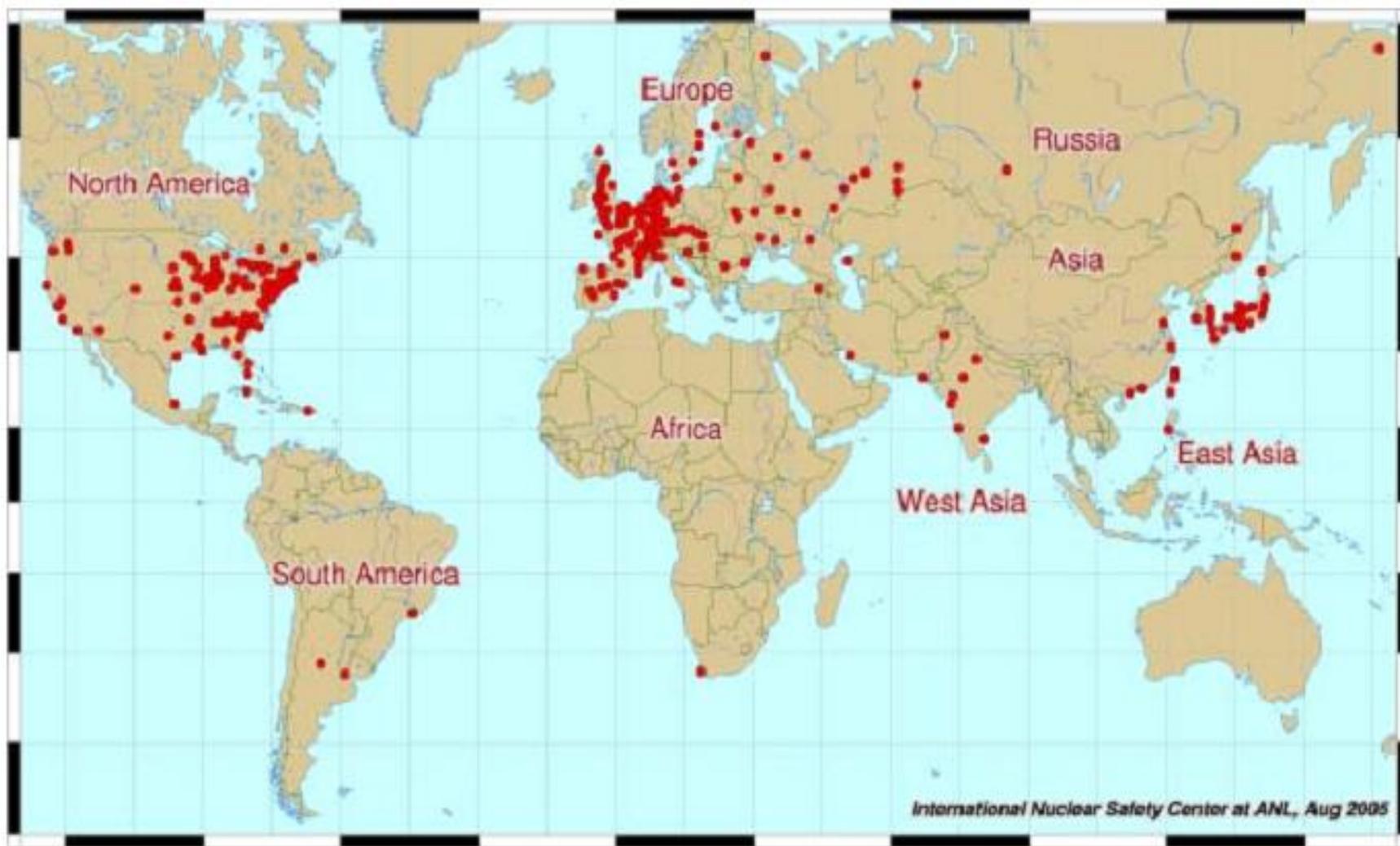
# Воспроизводство ядерного горючего



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

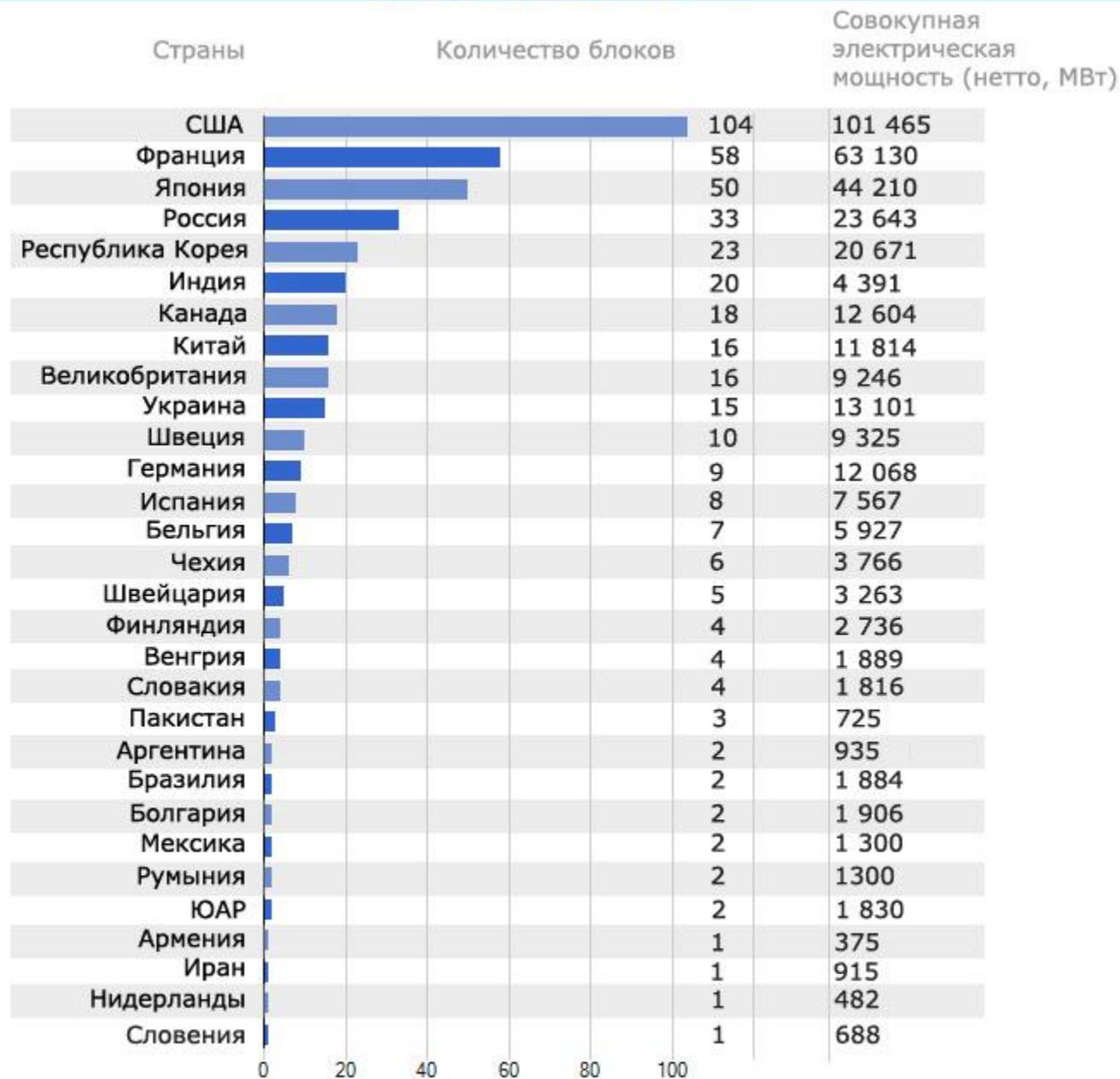


# Атомные реакторы



# Ядерная энергетика мира

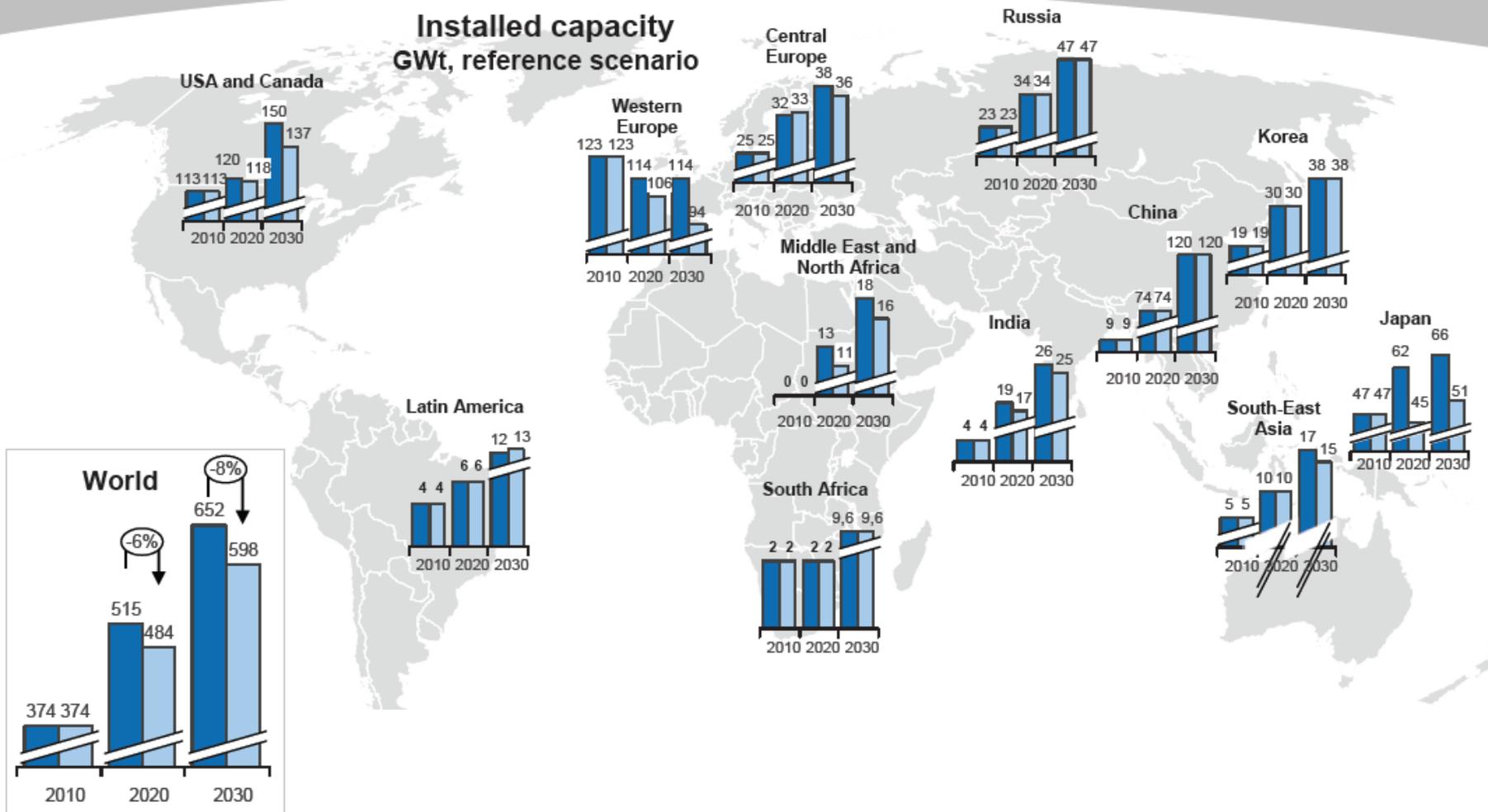
Страна	Число АЭС	Мощность , МВт	Доля, %
США	104	95622	19,6
Франция	59	63113	74,1
Япония	54	44394	29,2
Германия	19	21072	28,4
Россия	30	20739	17,8
Канада	20	13602	15,1
Южная Корея	16	12990	35,5
Англия	32	12427	15,3
Украина	13	11358	48,1
Швеция	11	9401	38,1
Индия	14	2446	2,9



Всего - 435 реакторов, которые производят 370 003 МВт электроэнергии

# Планы строительства АЭС

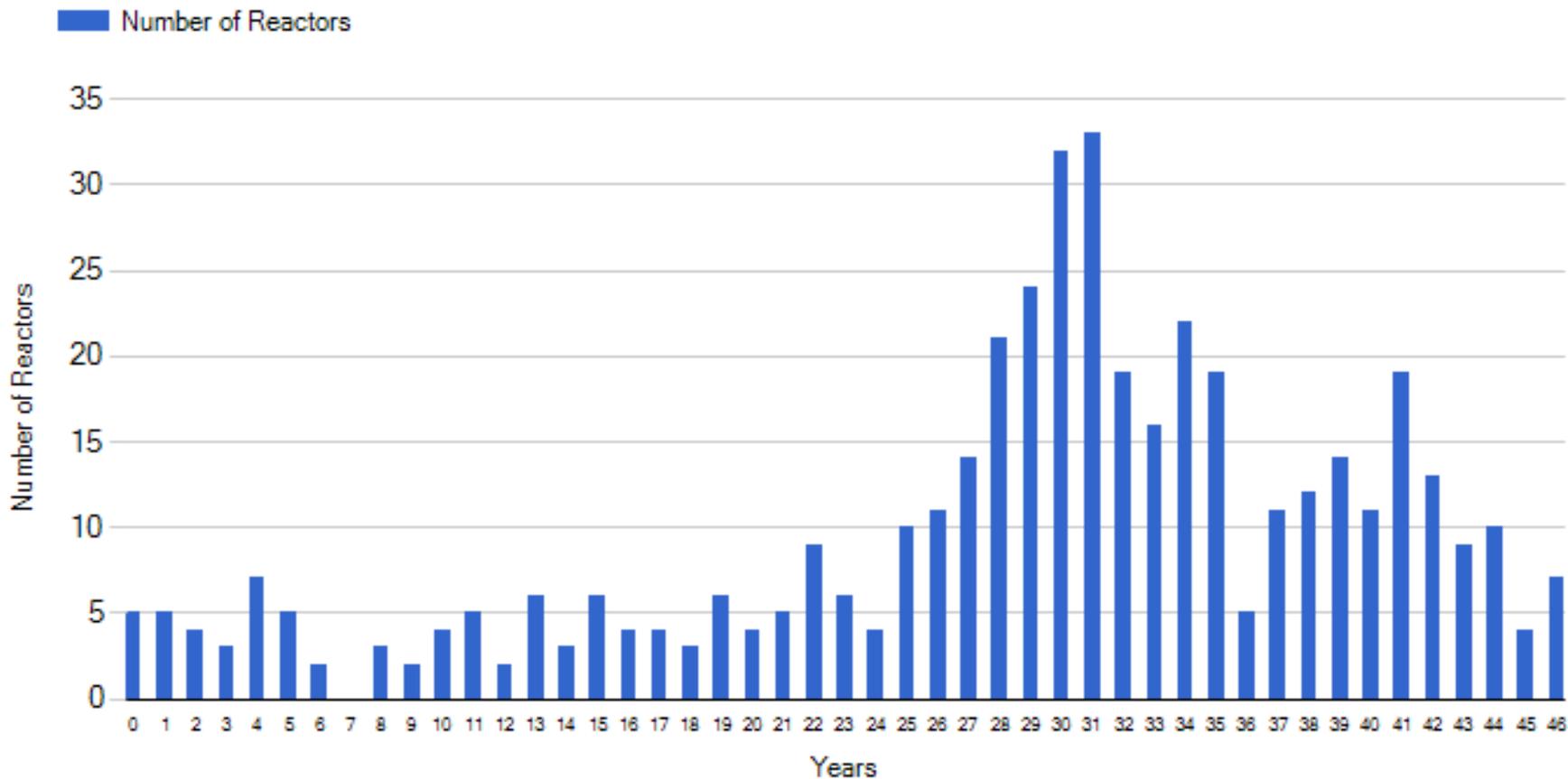
Installed capacity  
GВт, reference scenario



■ Rosatom's scenario before Fukushima  
■ Rosatom's scenario after Fukushima

# Возраст промышленных атомных реакторов в мире (на 2015 г)

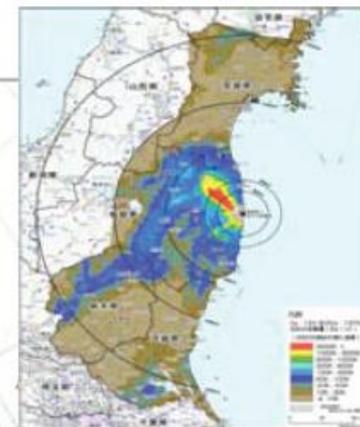
Total Number of Reactors: 443



# Выпадения $^{137}\text{Cs}$ на авариях ЧАЭС и Фукусима

Желтый уровень – от 5 до 40 Ки/км<sup>2</sup>

Красный уровень – более 40 Ки/км<sup>2</sup>



Увеличено  
в 5 раз

Авария	Площадь загрязненной территории Cs-137, тыс.км <sup>2</sup>	
	> 15 Ки/км <sup>2</sup>	> 40 Ки/км <sup>2</sup>
Фукусима-1	0,7	0,26
ЧАЭС	10,3	3,1

Области	Дополнительные к фону накопленные эффективные дозы за 20 лет, мЗв				
	10-20	20-50	50-70	70-100	Выше 100
Брянская (тыс.чел.)	112,6	103,2	18,1	5,1	1,6
Калужская (тыс.чел.)	6,2	0,6	-	-	-
Тульская (тыс.чел.)	34,9	3,7	-	-	-
Орловская (тыс.чел.)	7,7	0,5	-	-	-

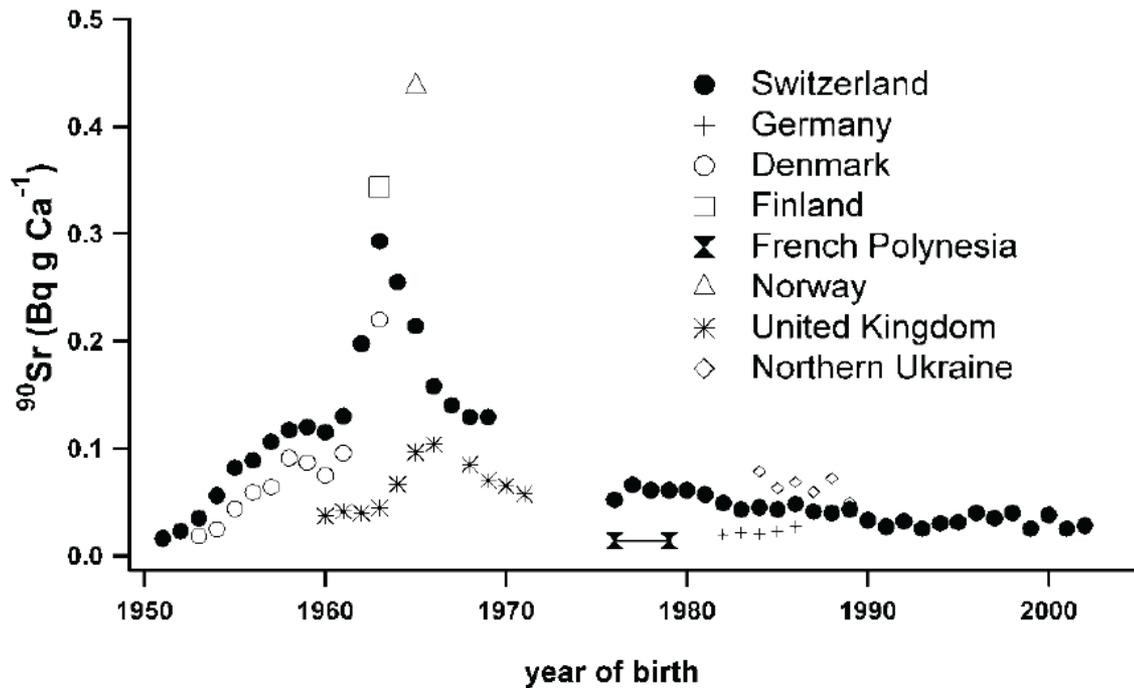
**Итого: 290 тыс. чел.**

В остальных областях с населением 2,3 млн чел. накопленные дозы не превышают 10 мЗв

---

**Допустимая накопленная доза по радону за это же время – 200 мЗв (МКРЗ №103)**

**Фактическая накопленная доза за то же время населения Республики Алтай и Финляндии – 180 мЗв и 150 мЗв соответственно**



Pascal Froidevaux, Max Haldimann and François Bochud (2011). Long-Term Effects of Exposure to Low-Levels of Radioactivity: a Retrospective Study of  $^{239}\text{Pu}$  and  $^{90}\text{Sr}$  from Nuclear Bomb Tests on the Swiss Population, Nuclear Power - Operation, Safety and Environment, Dr. Pavel Tsvetkov (Ed.), ISBN: 978-953-307-507-5

Fig. 1.  $^{90}\text{Sr}$  activities (Bq/gCa) in milk teeth as a function of the year of birth of the children.

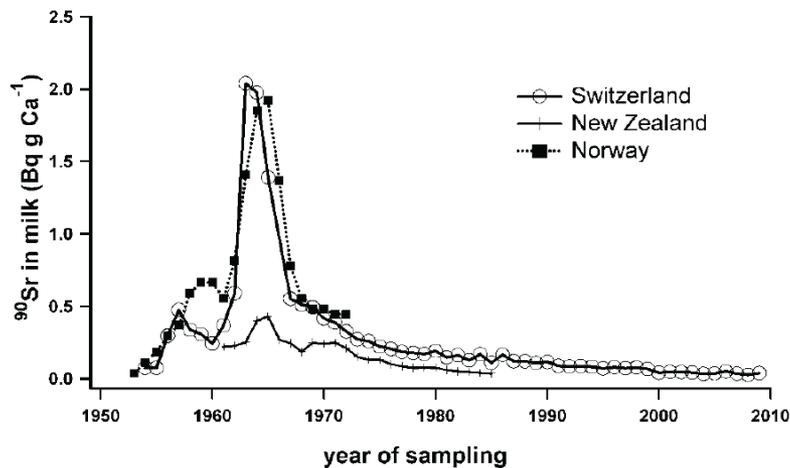


Fig. 2.  $^{90}\text{Sr}$  activities (Bq/gCa) in milk sampled in Switzerland, Norway and New-Zealand.

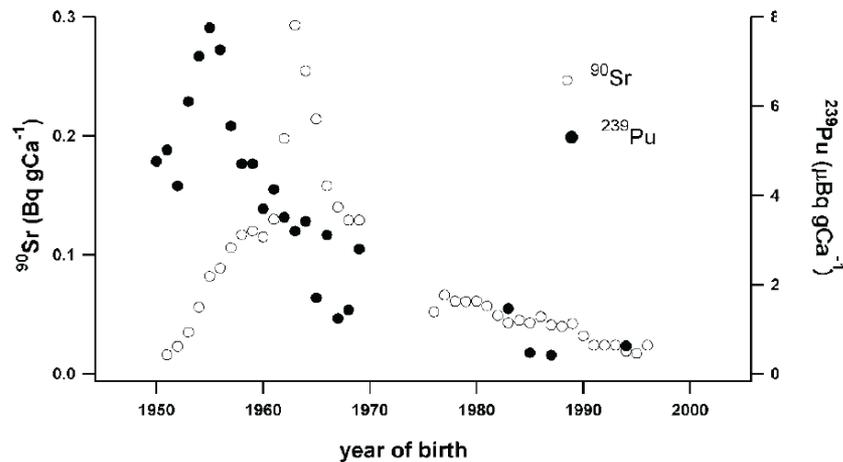
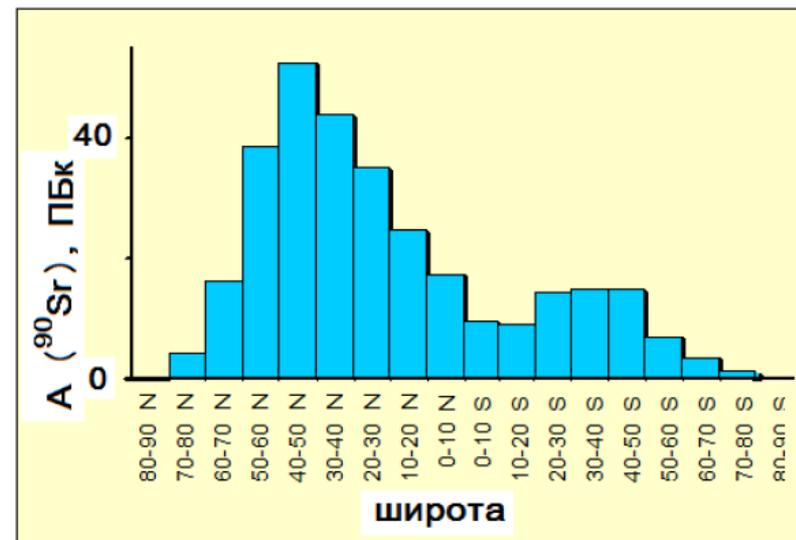
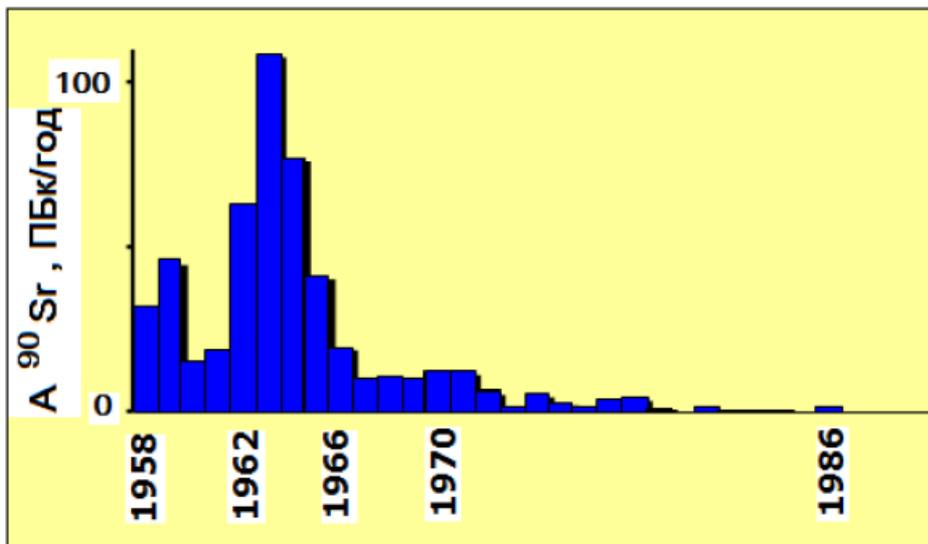
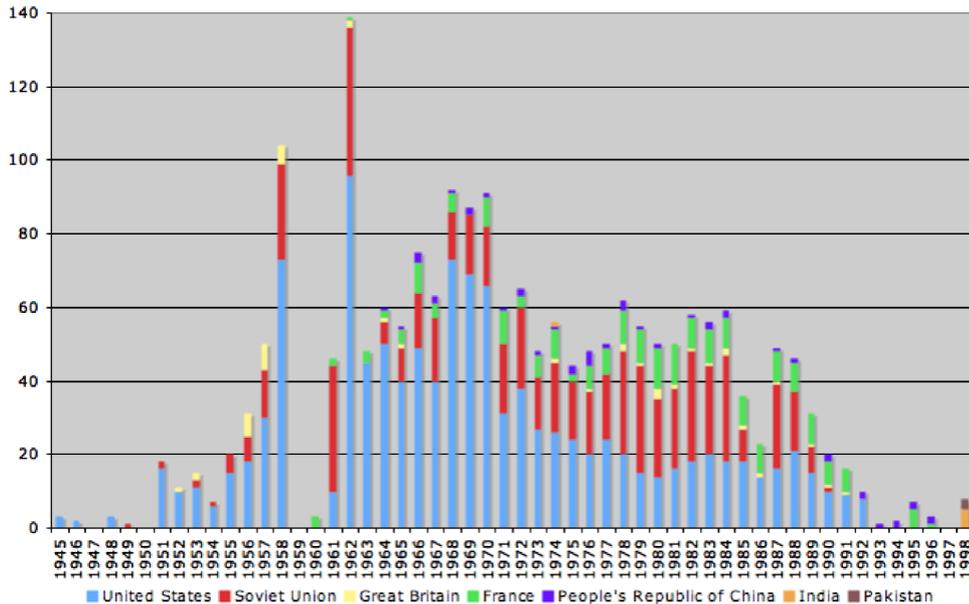


Fig. 4.  $^{239}\text{Pu}$  (mBq/gCa) and  $^{90}\text{Sr}$  (Bq/gCa) activities in milk teeth of children born in Switzerland 1950-1996.

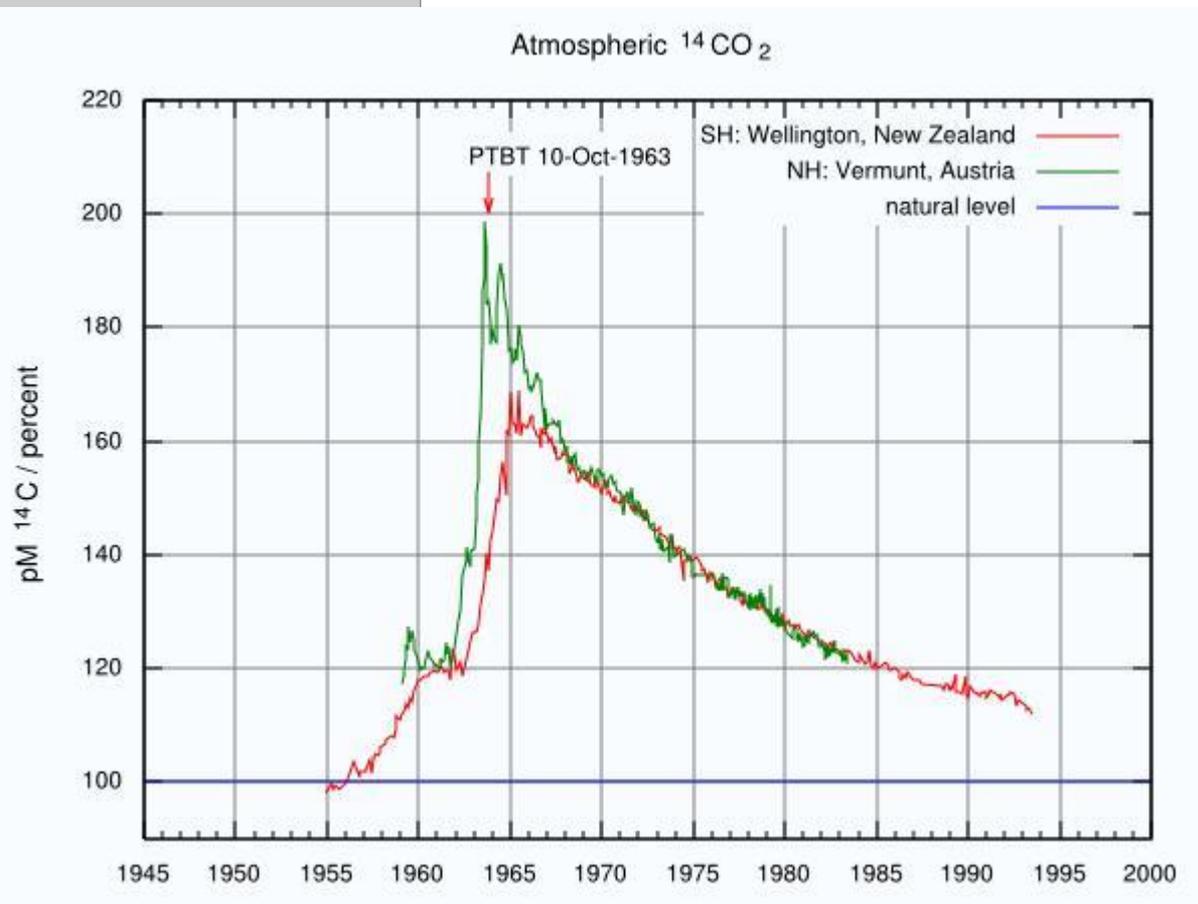
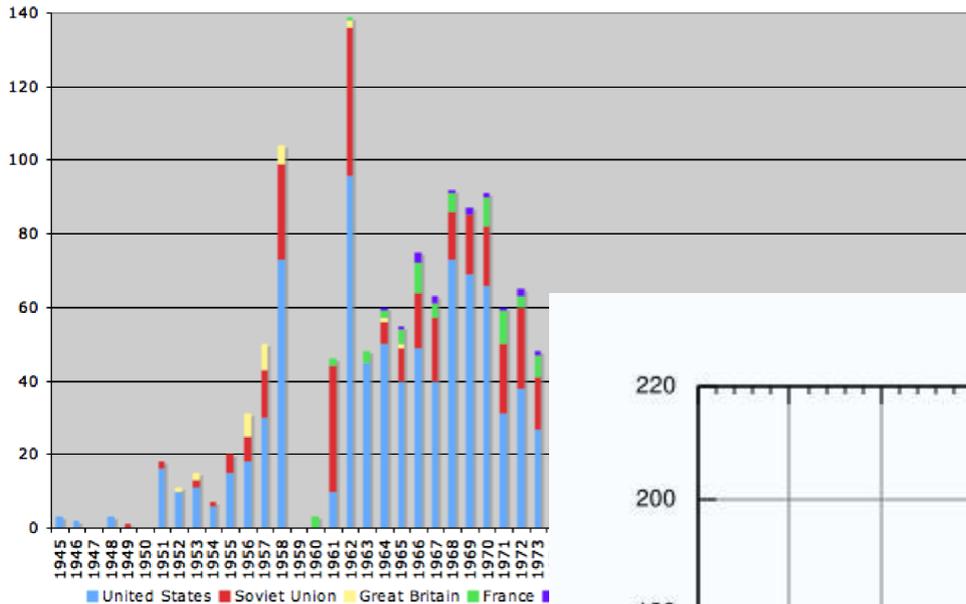
# Ядерные испытания

Worldwide nuclear testing, 1945-1998



# Ядерные испытания

Worldwide nuclear testing, 1945-1998



## Глобальная коллективная доза от различных источников радиации за год (2012 г)

Источник радиации	Глобальная доза, %
Естественные источники	100%
Воздушные перелеты	0,1%
Использование фосфатных удобрений	0,01%
Работа угольных электростанций ( $10^6$ МВт)	0,005%
Потребительские товары	1%
Атомная энергетика ( $10^5$ МВт)	0,2%
Медицинская диагностика	20%