



Микромир и Вселенная 2019

АТОМНАЯ ЭНЕРГИЯ

(ядерная энергия)

Механика

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

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

Химия

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

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

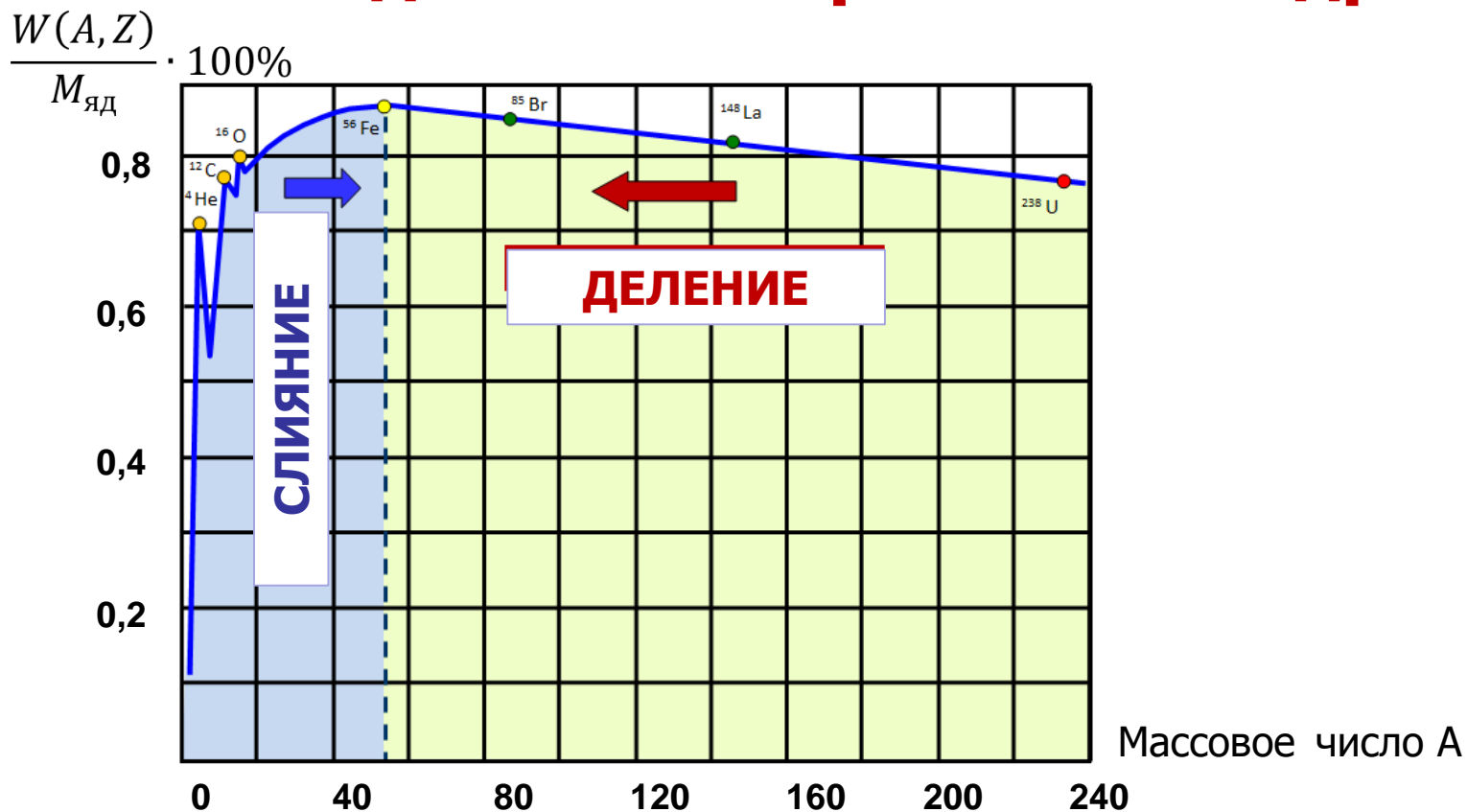
Ядерная физика

Энергия связи ядра $W(A,Z)$

$$M(A,Z)c^2 + W(A,Z) = \\ = Z \cdot m_p c^2 + (A - Z)m_n c^2$$

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

Удельная энергия связи ядра



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

$$\begin{aligned}
 Q &= M(A, Z) - 2M(A/2, Z/2) = \\
 &= 2W(A/2, Z/2) - W(A, Z) > 0
 \end{aligned}$$

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

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

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

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

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

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 Ва ($Z = 56$).

- Л. Мейтнер и О. Фриш впервые объявили, что под действием нейтронов происходило деление урана на сравнимые по массе осколки.
- 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 U.

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

1946 г. — И. Курчатов. Реактор СССР.

1945 г. — Ядерный взрыв. Хиросима. Нагасаки.

1954 г. — Первая атомная электростанция. Обнинск.

Параметр делимости

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

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

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

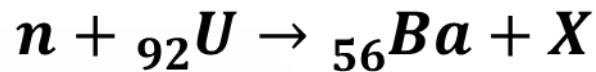
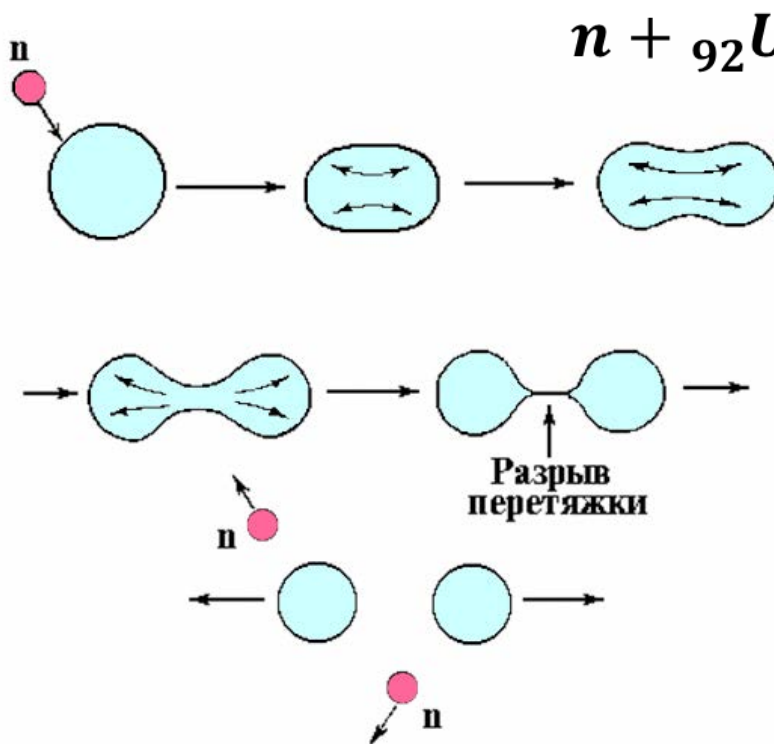
$$\frac{Z^2}{A} = 17 \text{ для иттрия } {}_{39}^{89}\text{Y}$$

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

Деление ядер

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

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



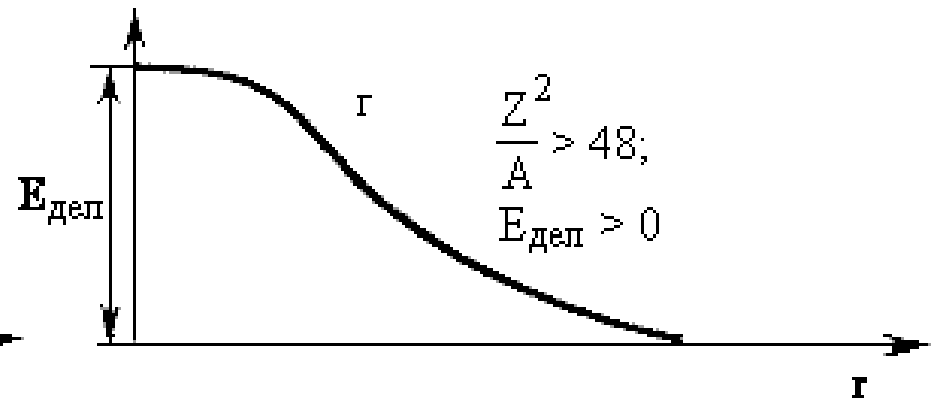
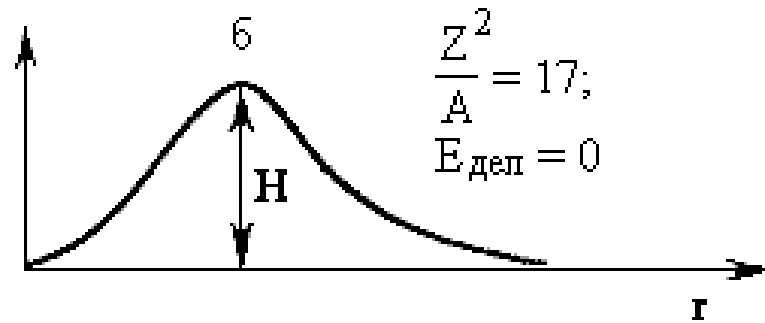
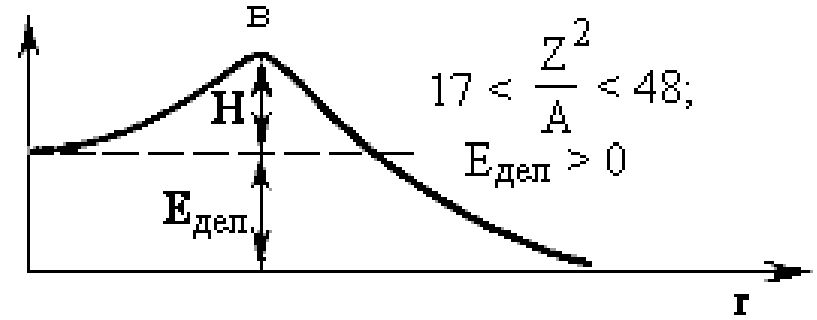
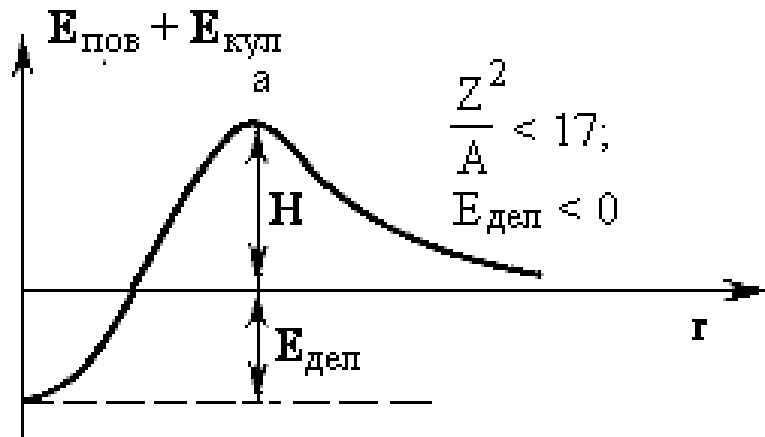
1939 г. — **Л. Мейтнер** и **О. Фриш** объяснение процесса деления урана под действием нейтронов.

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

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

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

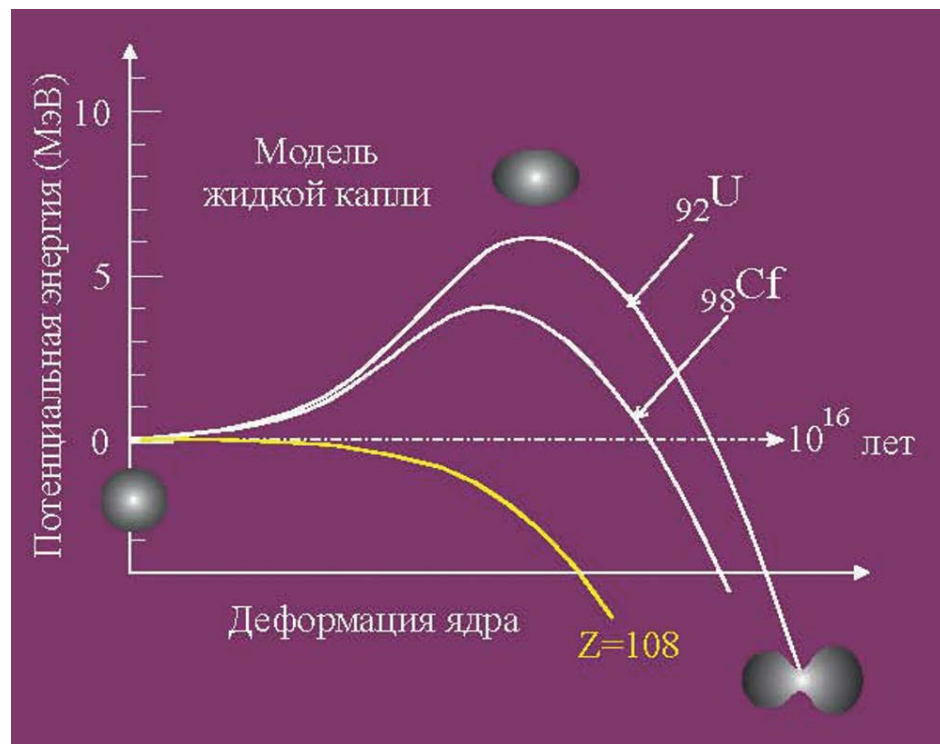
Барьер деления



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

$$Z = 120 \div 125$$

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

$$B_n \geq H$$

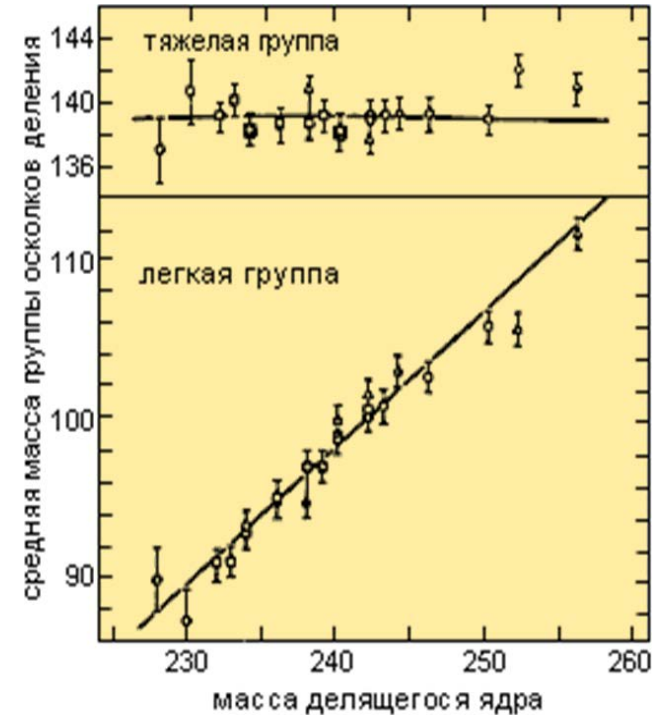
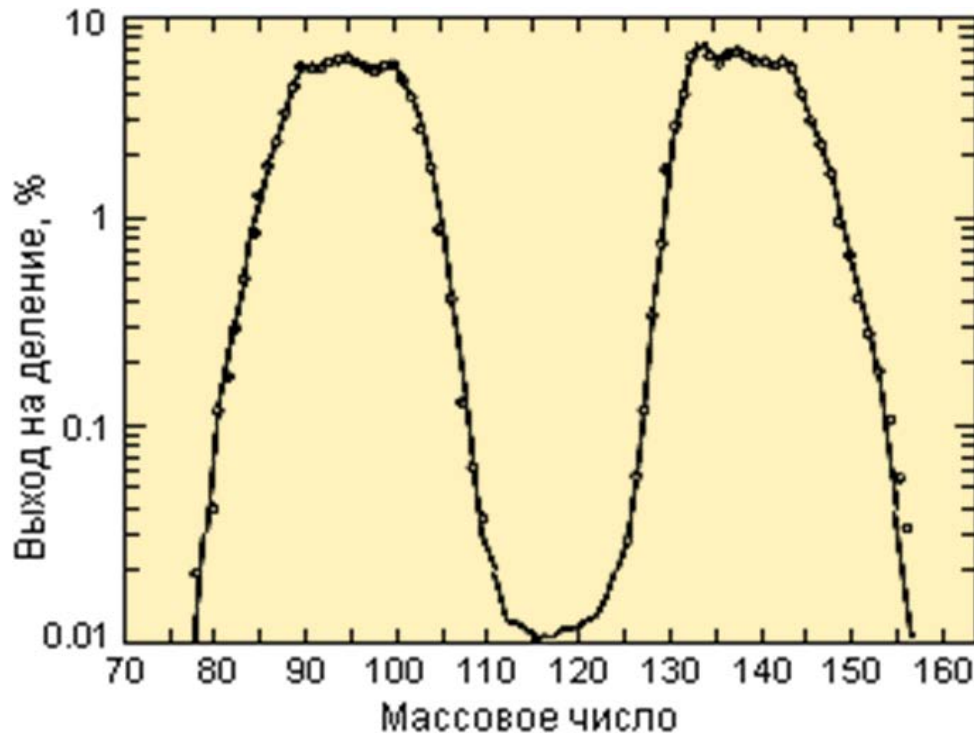
$$T_n \cong 0$$

(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}U .

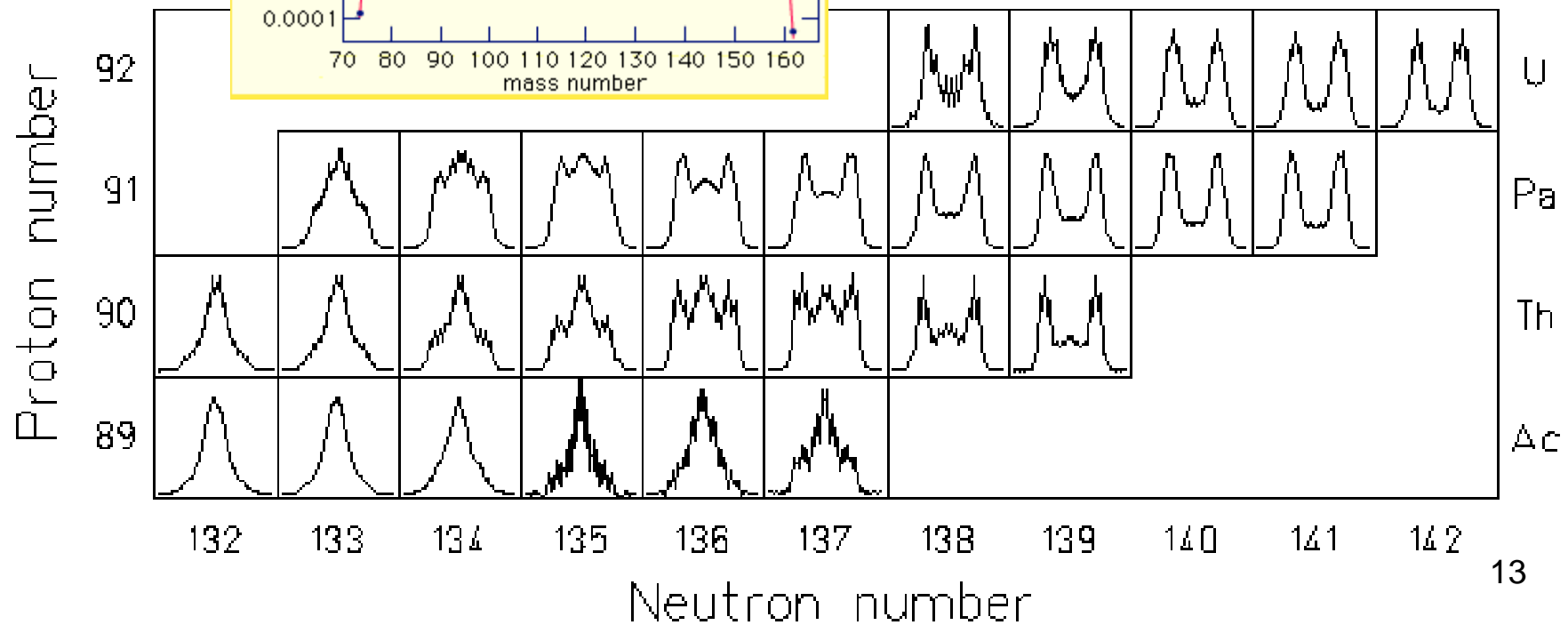
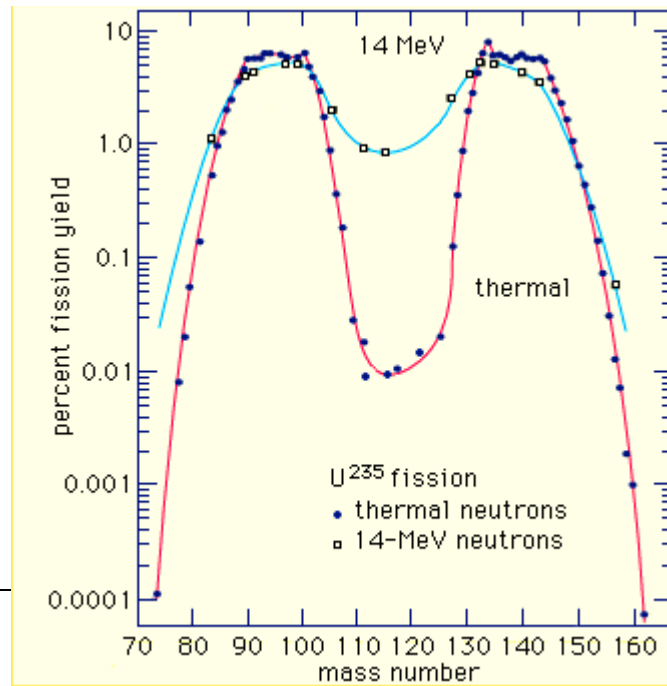
Массовое распределение осколков деления



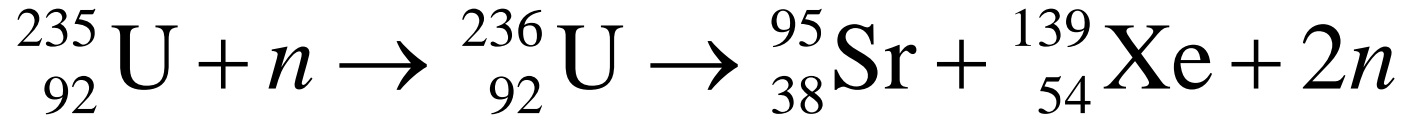
Осколки деления образуются в широком диапазоне $A = 72\text{-}161$ и $Z = 30\text{-}65$.

$$\frac{A_{\text{л}}}{A_{\text{т}}} \approx \frac{2}{3}, \quad \frac{Z_{\text{л}}}{Z_{\text{т}}} \approx \frac{2}{3}.$$

Массовое распределение осколков деления

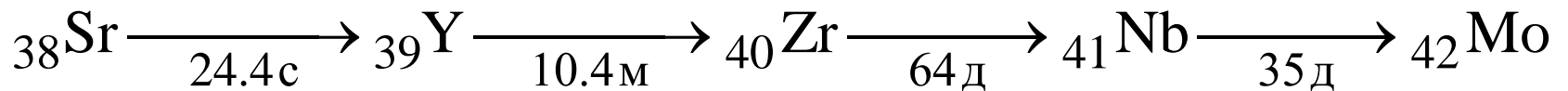


Радиоактивность осколков деления

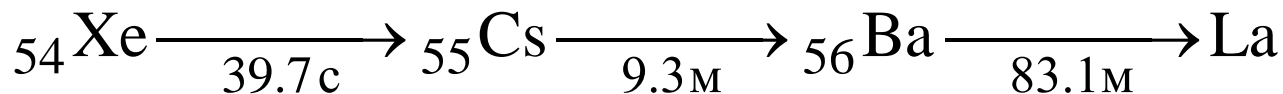


$$\frac{N}{Z} = 1 + 0.015A^{2/3}$$

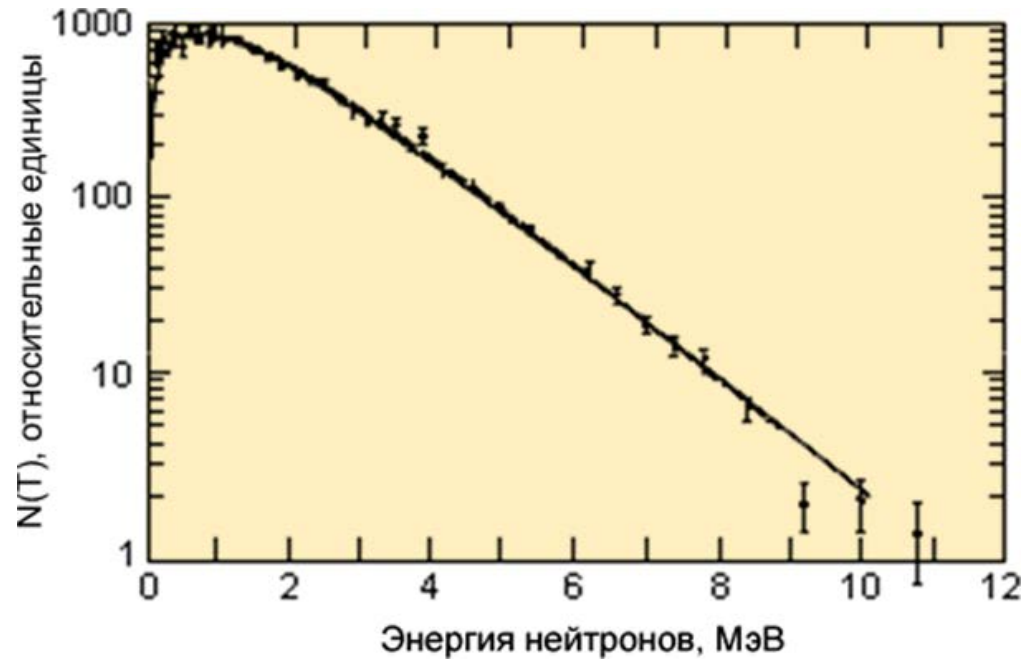
$$A = 95$$



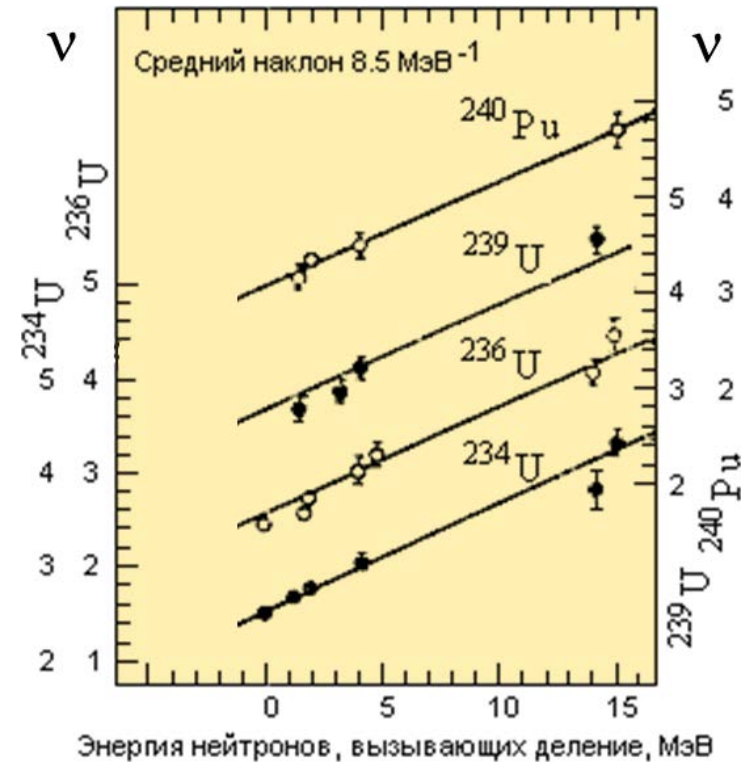
$$A = 139$$



Нейтроны деления

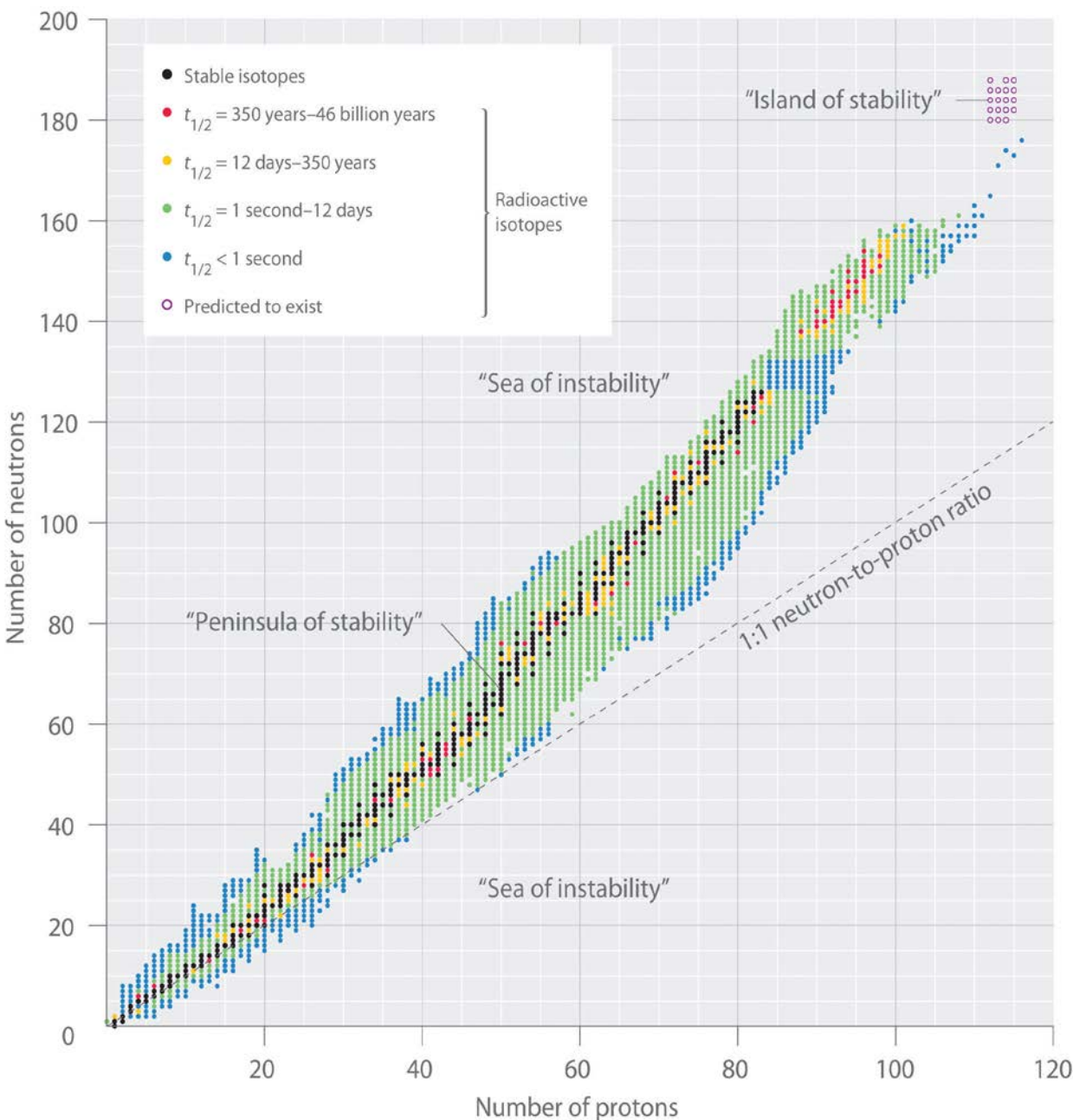


Спектр нейтронов деления



Число нейтронов деления

Нейтроны деления



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

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

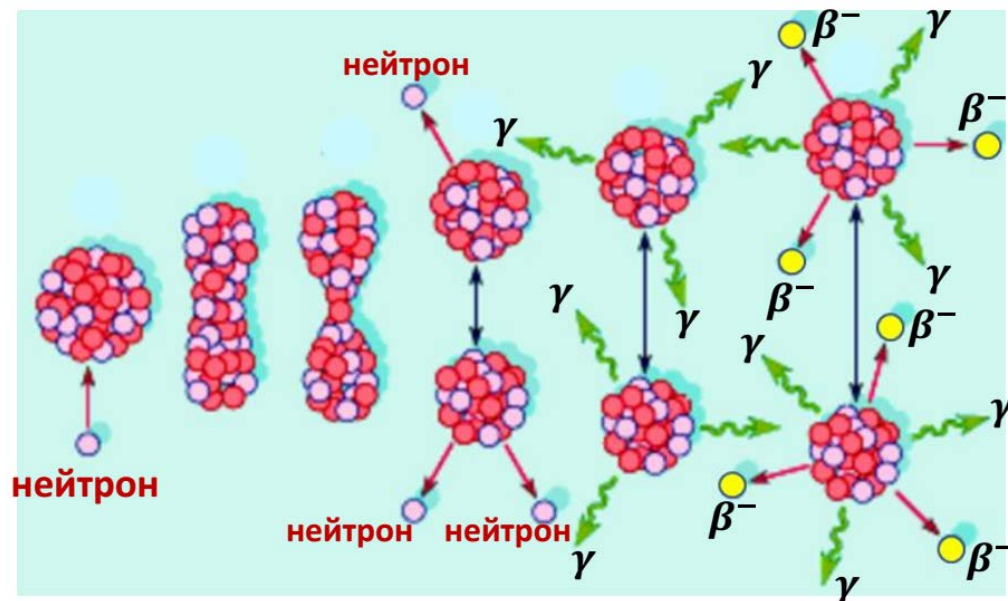
$$N/Z({}_{56}\text{Ba}) = \mathbf{1,45}$$

Вторичные нейтроны

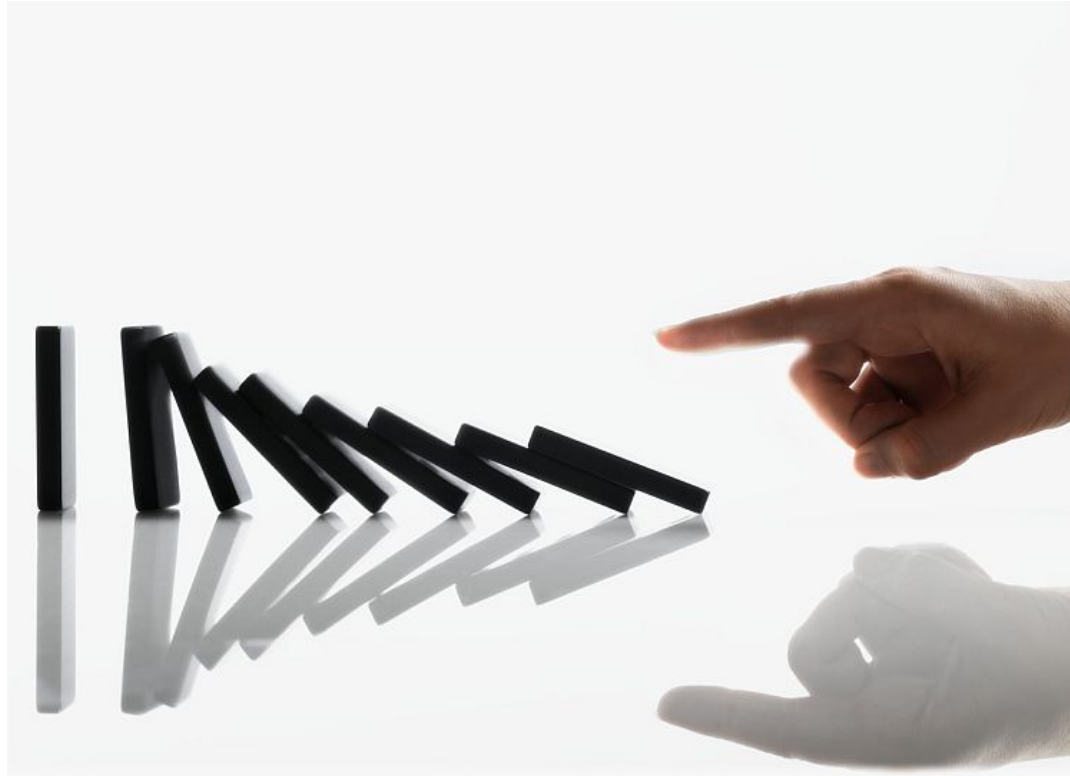
$$\nu_n = 2,5$$

$$\bar{T}_n \cong 2 \text{ МэВ}$$

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



Цепная реакция

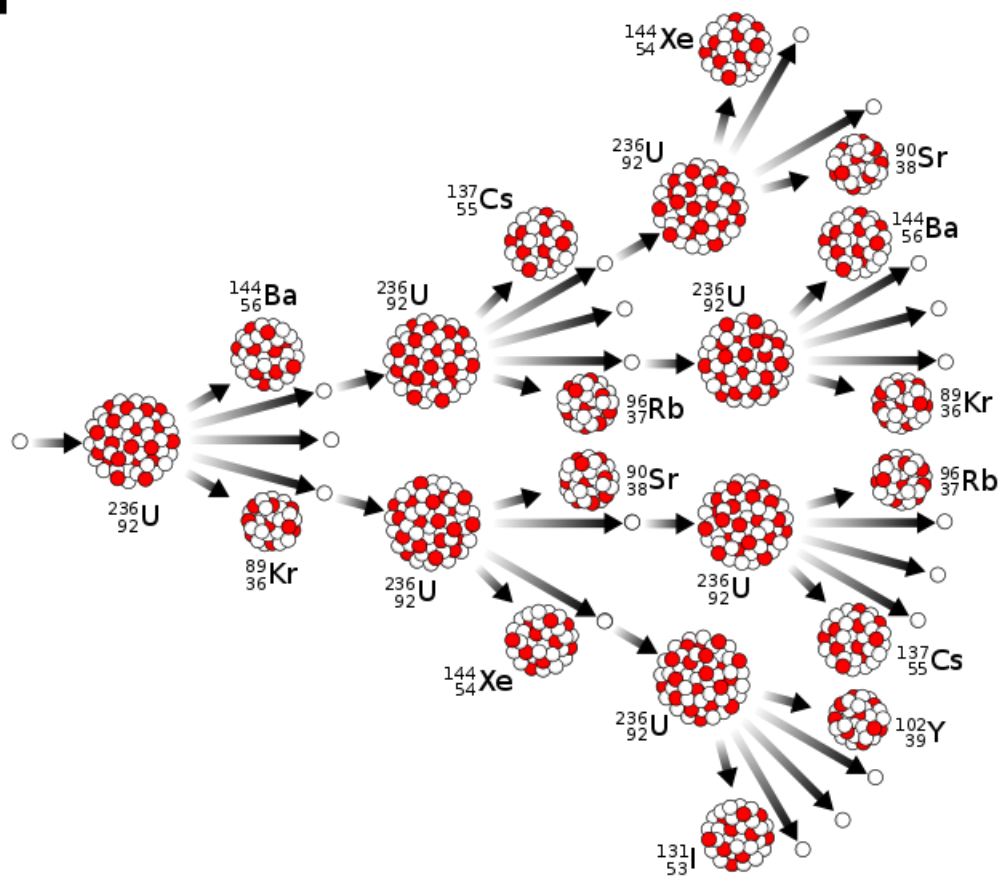


1913 г. – Макс Боденштейн. Неразветвленная цепная реакция

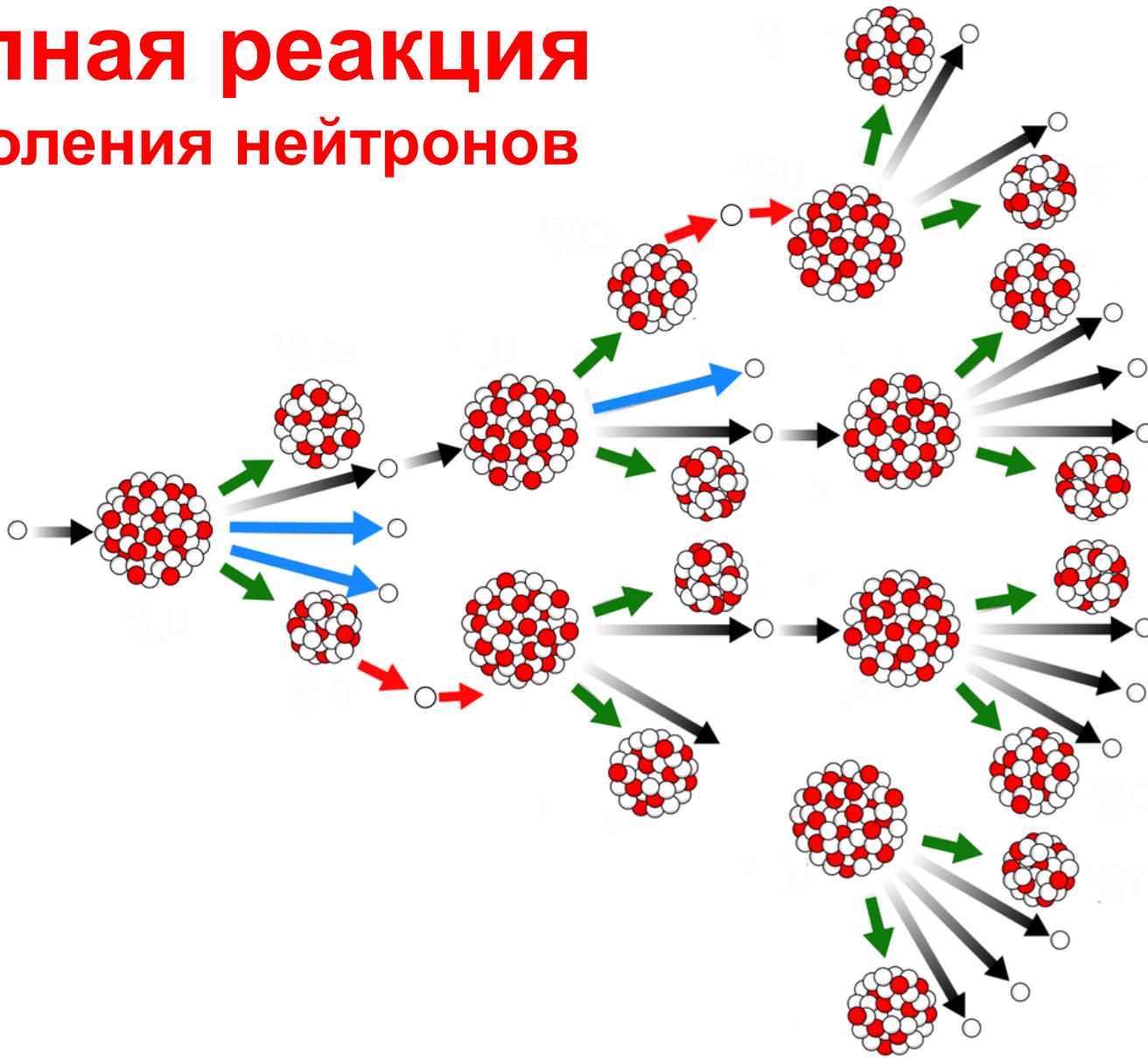
Цепная реакция



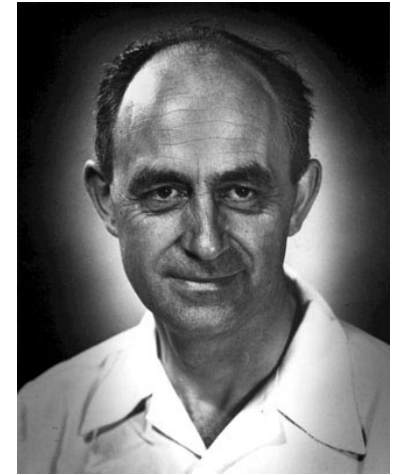
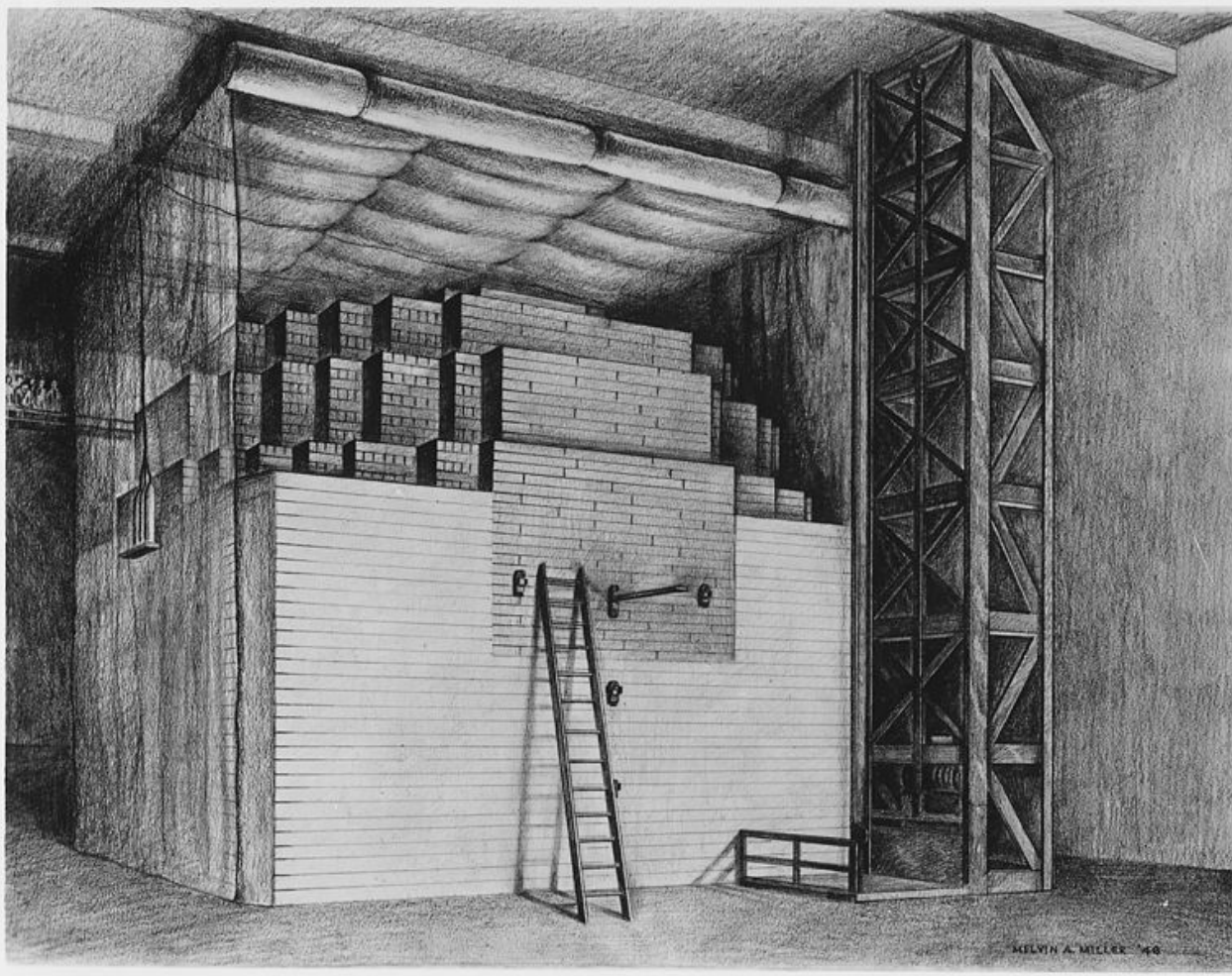
1928 г. – Н.Н. Семенов.
Разветвленная цепная реакция



Цепная реакция поколения нейтронов



Первый ядерный реактор Чикагская Поленница



Энрико
Ферми

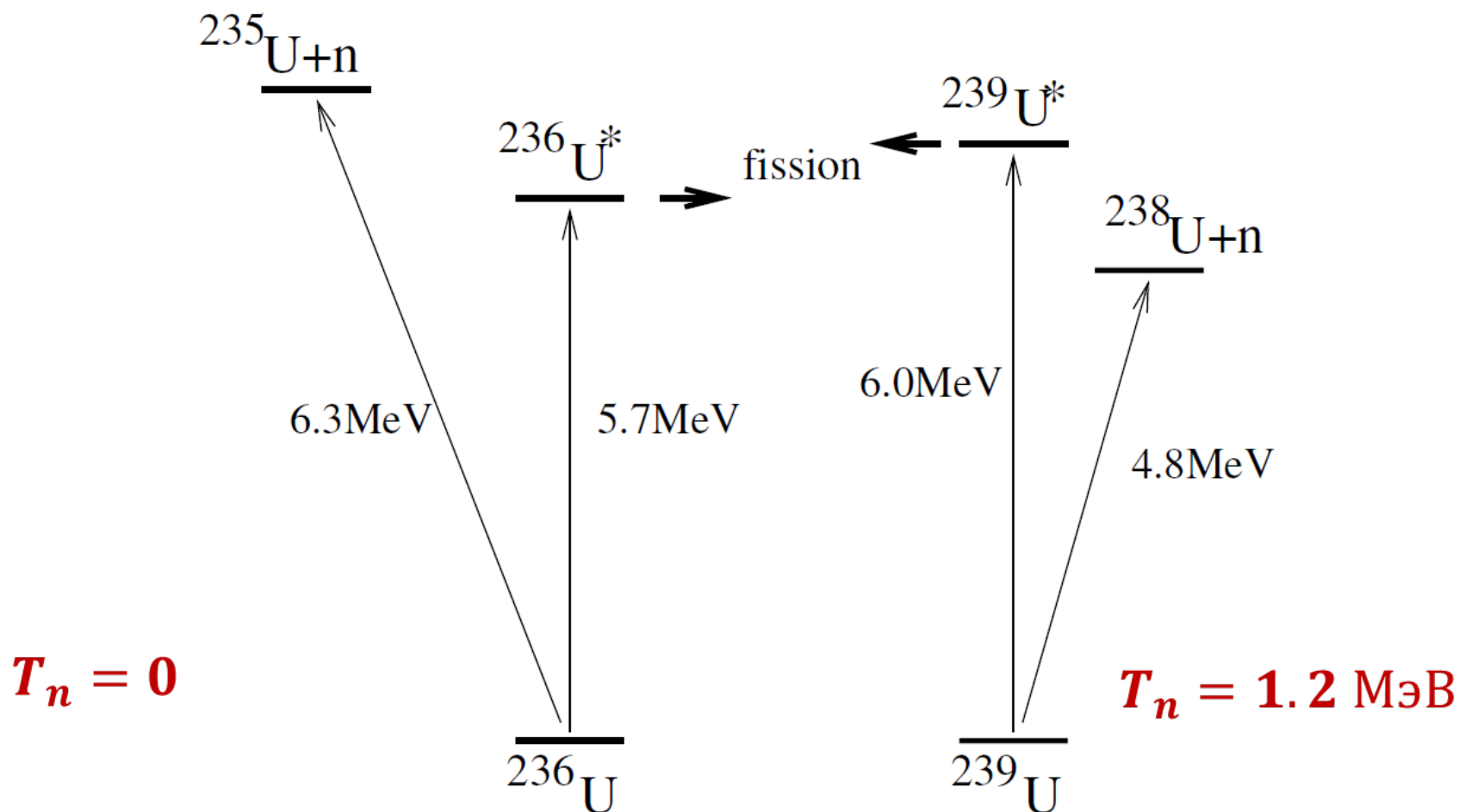
2 .12. 1942

стадион
Универстета
Чикаго

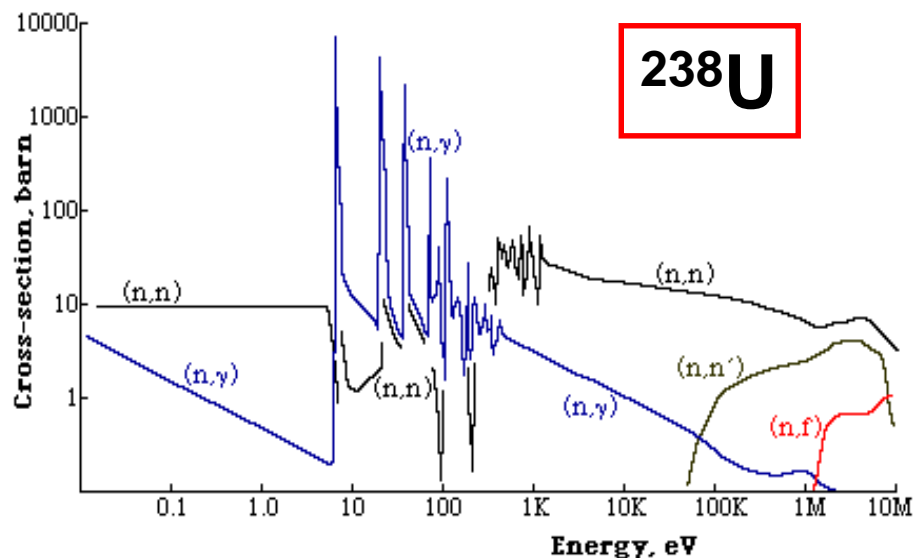
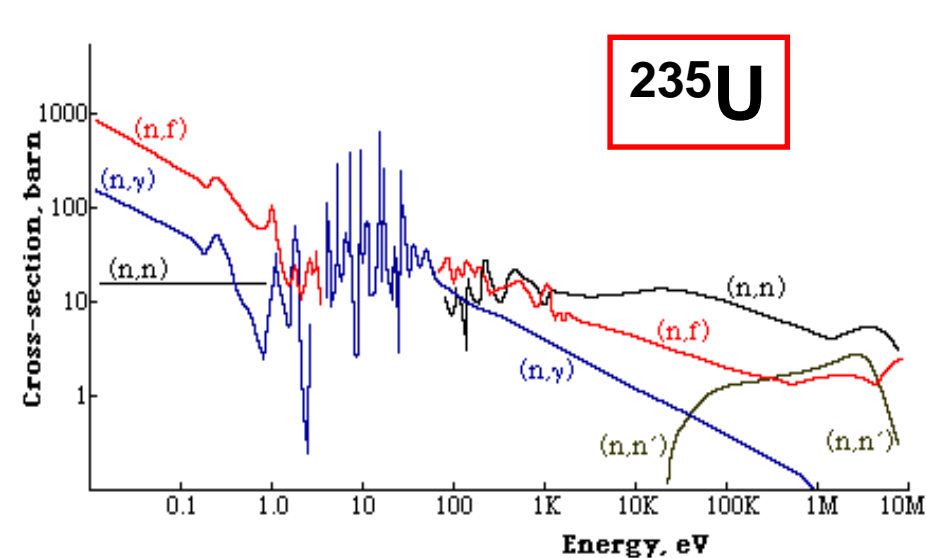
Изоотопы U

^{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



Реакции (n,f) , (n,γ) 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

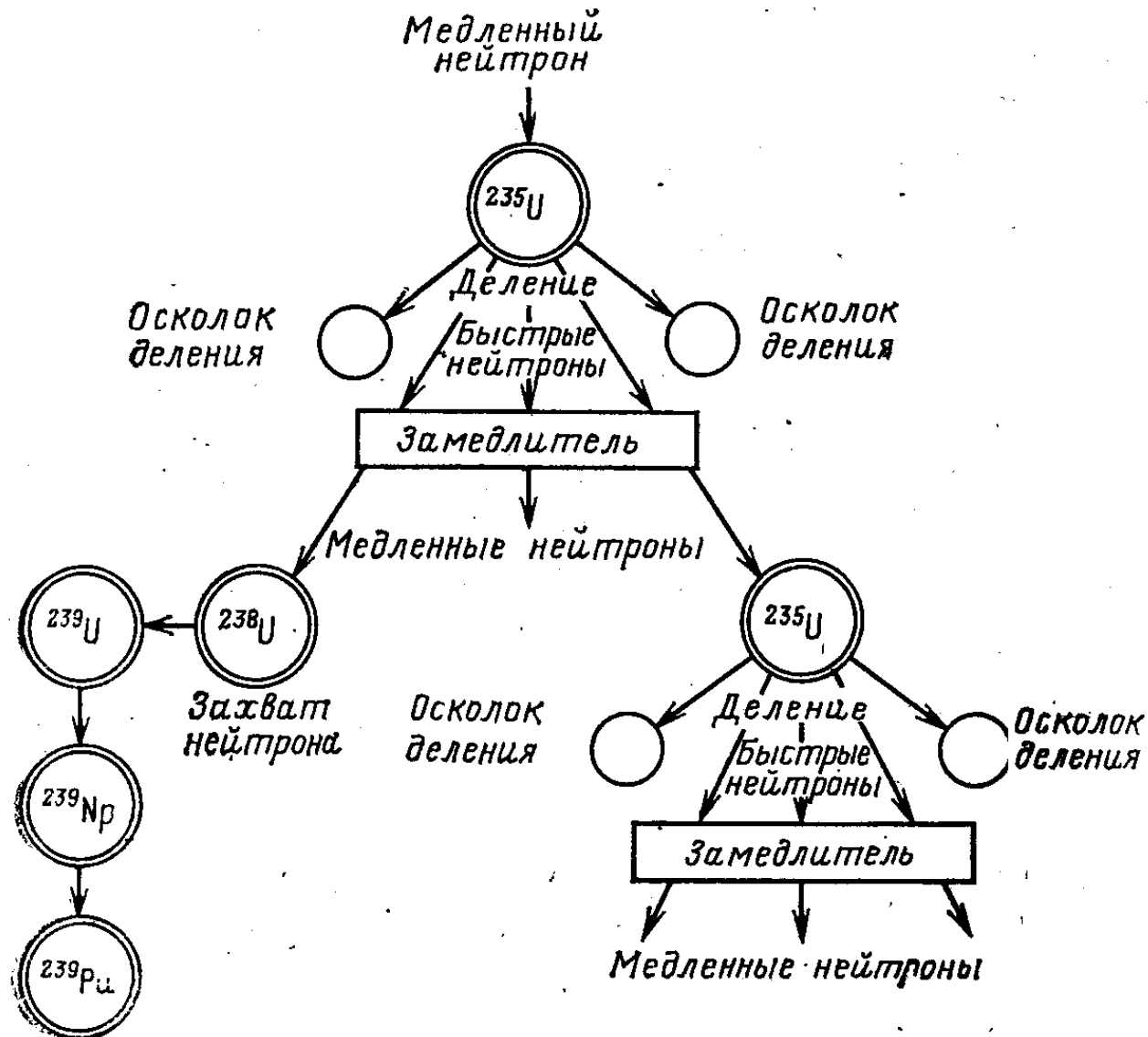
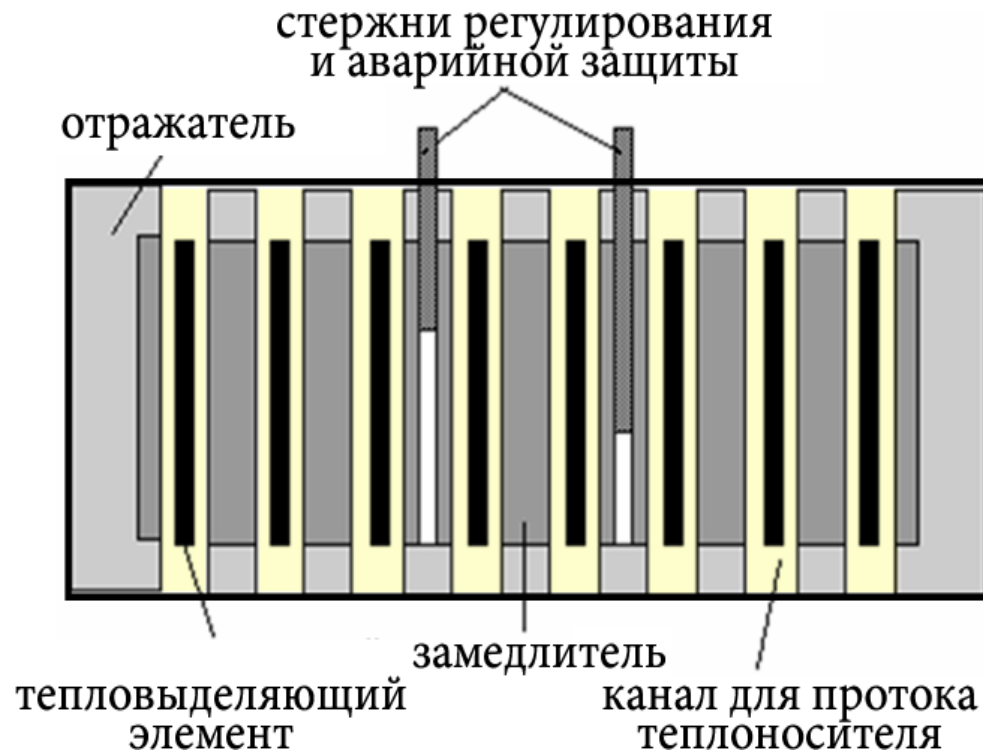


Схема гетерогенного теплового реактора



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.

Схема работы АЭС



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

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



Академик АН СССР
Блохинцев Д.И.



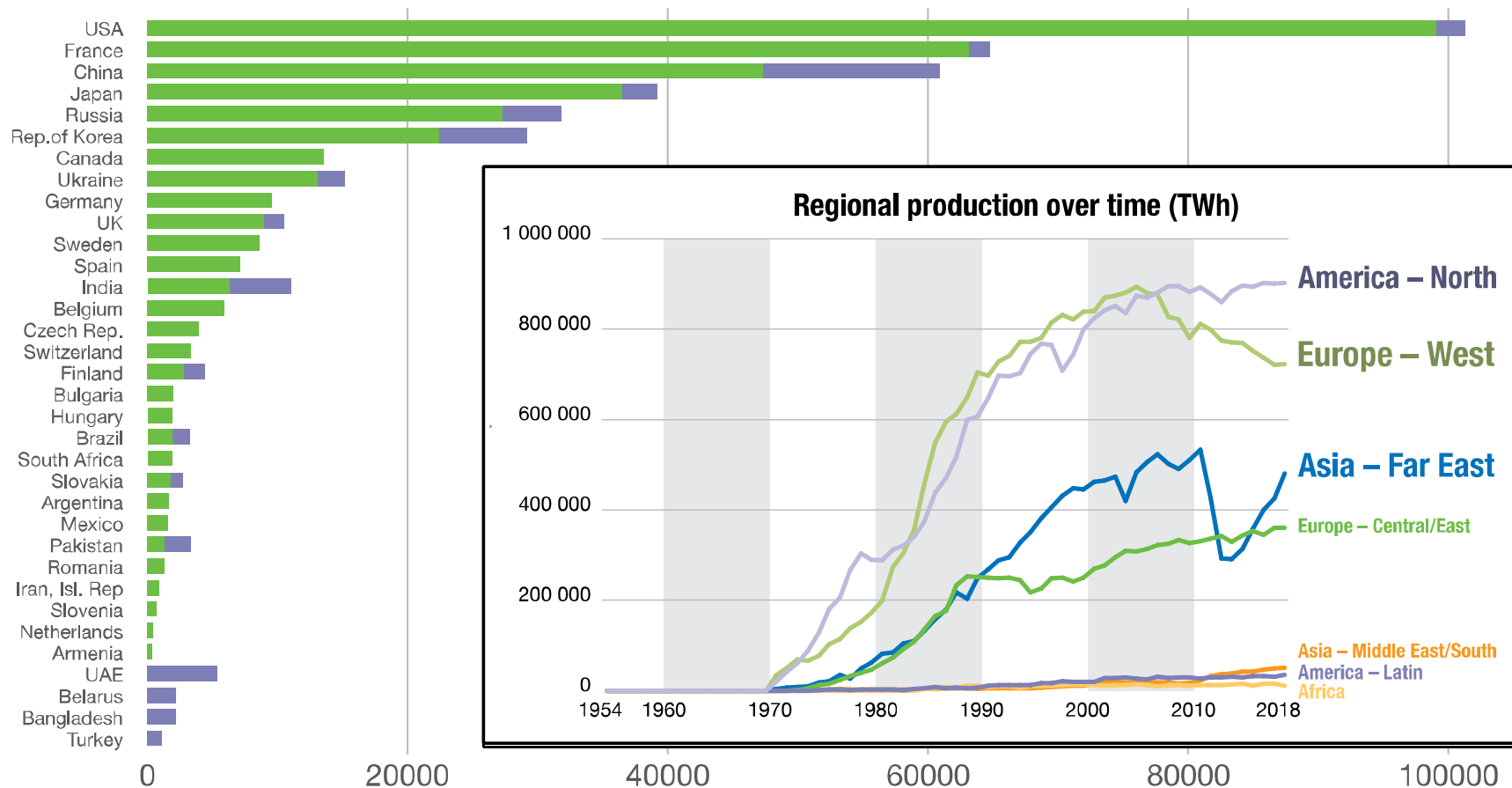
ТВЭЛ



Нововоронежская АЭС-2 Мощность 2 597,3 МВт



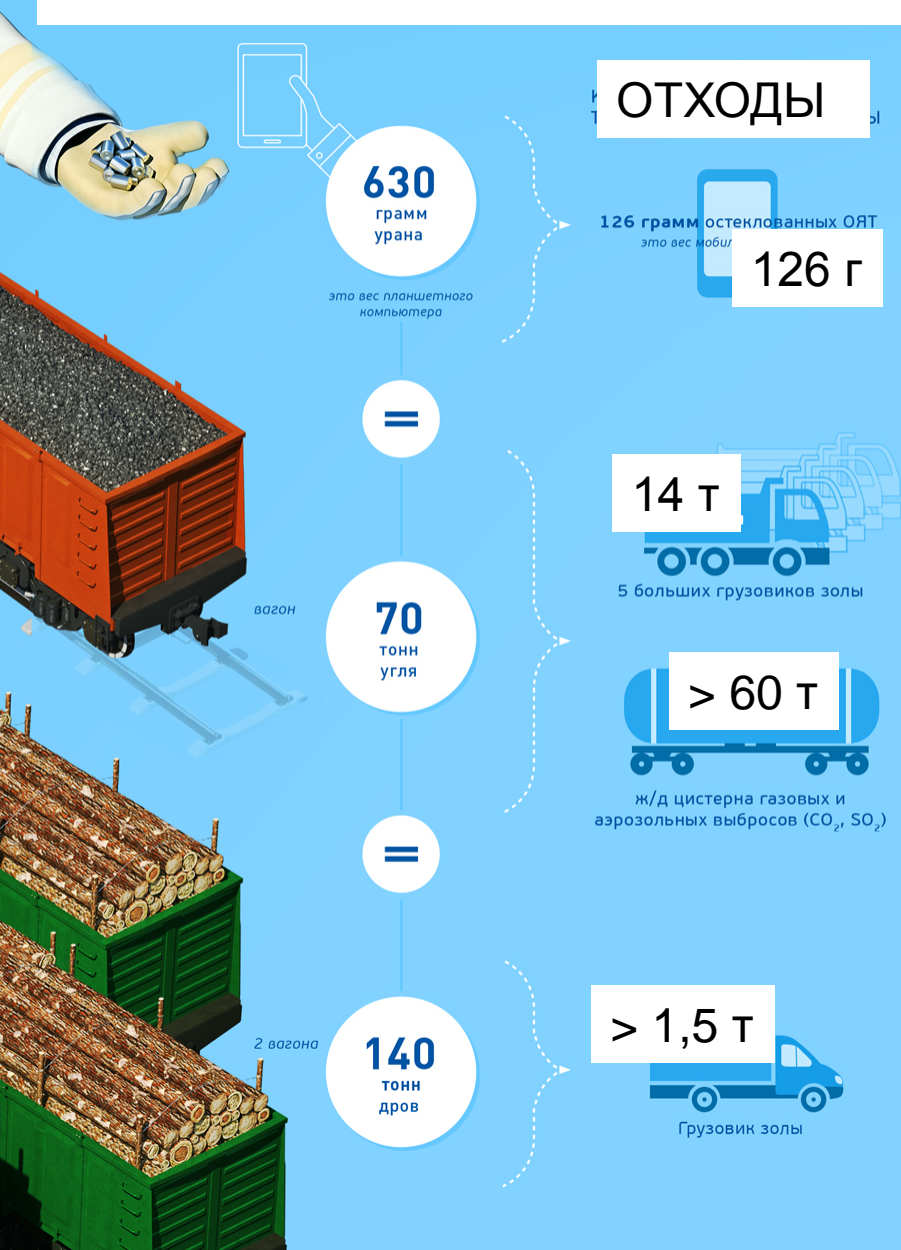
2018 Nuclear power capacity per country – (MW(e))



Страна	число реакторов	Выработано (ТВт*ч)	% от сумм. выработки
--------	-----------------	--------------------	----------------------

США	98+2	8080	19.3%
Франция	58+1	395.9	71.7%
Китай	46+11	277,1	4.2%
Япония	38+2	49,3	6.2%
Россия	36+6	191,3	17,9%

ЭНЕРГОЕМКОСТЬ ТОПЛИВА



Площадь, необходимая для выработки 4000 МВт

ТОЧНОСТЬ: ПОСАТОМ

ЧТОБЫ ВЫРАБОТАТЬ 4 000 МВт ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НУЖНО ЗАНЯТЬ ПЛОЩАДЬ РАВНУЮ

АТОМНАЯ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЯ

Например, Балаковская АЭС



АЭС

Треть территории детского лагеря «Артек».

0,68 кв.км

0,6 км²

Мало ограничений по месту строительства: нет зависимостей от уровня солнца, ветра, нахождения рядом жилых территорий.

СОЛНЕЧНАЯ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЯ



Солнце

Площадь небольшого государства Лихтенштейн.

142,4 кв.км

142 км²

Предпочтительнее строить в пустыне, энергия не постоянная.

Нужна электростанция в 10 раз больше самой огромной в мире солнечной электростанции – в пустыне Мохаве (США).

ВЕТРОВАЯ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЯ



Ветер

Площадь, превышающая государство Андорра.

571,43 кв.км

571 км²

Можно строить только на территориях, где постоянный ветер (побережья, степи).

Нужна электростанция в 6 раз больше самой мощной в мире ветровой электростанции – London Array (Великобритания).

ГЭС

Например, Усть-Илимская ГЭС



ГЭС

При создании водохранилища была затоплена территория, сравнимая по площади с Санкт-Петербургом.

1550 км²

Ограниченное количество водных ресурсов.

было вырублено 11,9 млн м³ леса

гибель многих видов рыбы

Ядерный взрыв

Условие осуществления цепной реакции деления:

Число нейтронов, вызывающих деление в следующем поколении, должно быть не меньше, чем в предыдущем.

Если оно не зависит от поколения, т. е. неизменно, то коэффициент размножения нейтронов $k = 1$ и цепная реакция протекает в стационарном режиме (в ядерных реакторах).

Если оно уменьшается ($k < 1$)

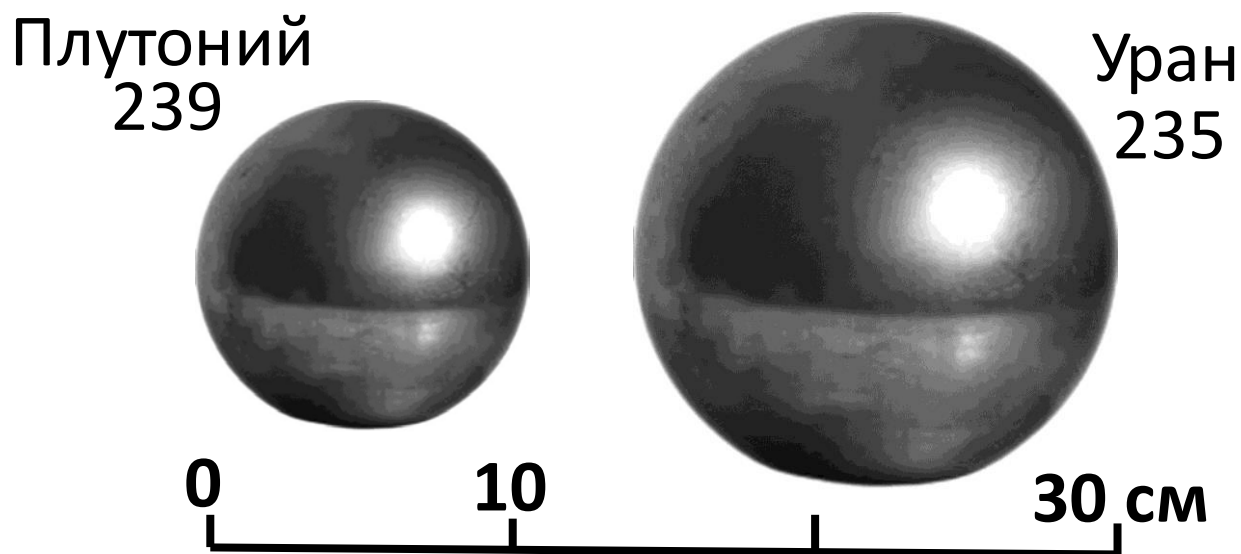
– режим подкритический – и цепная реакция затухает.

Если оно увеличивается ($k > 1$)

– режим надкритический – и цепная реакция лавинообразно (экспоненциально) нарастает и завершается ядерным взрывом.

Критическая масса –
минимальная масса делящегося вещества,
в которой протекает незатухающая цепная
реакция деления

Критическая масса минимальна для сферических тел.
Металлические плутоний-239 и уран-235
в форме сферы имеют критические массы
соответственно **11** и **50 кг**.

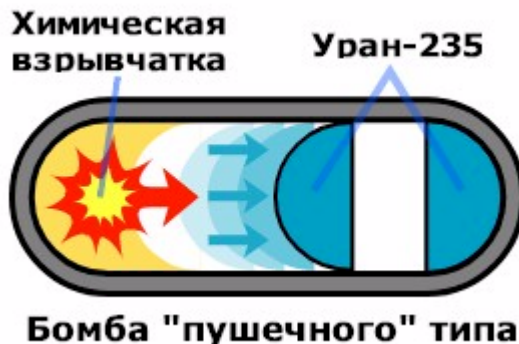


Ядерный взрыв

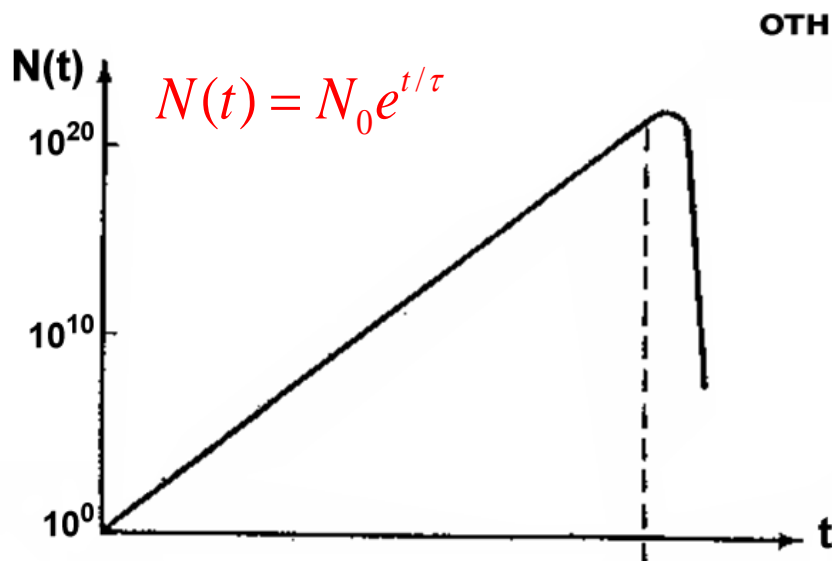
Для осуществления ядерного взрыва в результате цепной реакции деления необходимо, чтобы масса делящегося вещества (урана-235, плутония-239 и др.) превышала критическую (50 кг для ^{235}U и 11 кг для ^{239}Pu). До взрыва система должна быть подкритической. Ядерный взрыв развивается за счёт экспоненциально растущего со временем числа разделившихся ядер:

$$N(t) = N_0 e^{t/\tau}$$

Среднее время τ между двумя последовательными актами деления — 10^{-8} с. Время полного деления 1 кг ядерной взрывчатки — 10^{-7} - 10^{-6} с. В результате большого энергосвободения в центре ядерной бомбы температура поднимается до 10^8 К, а давление — до 10^{12} атм. При полном делении 1 кг урана выделяется энергия равная энергосвободению при взрыве 20 килотонн тротила.



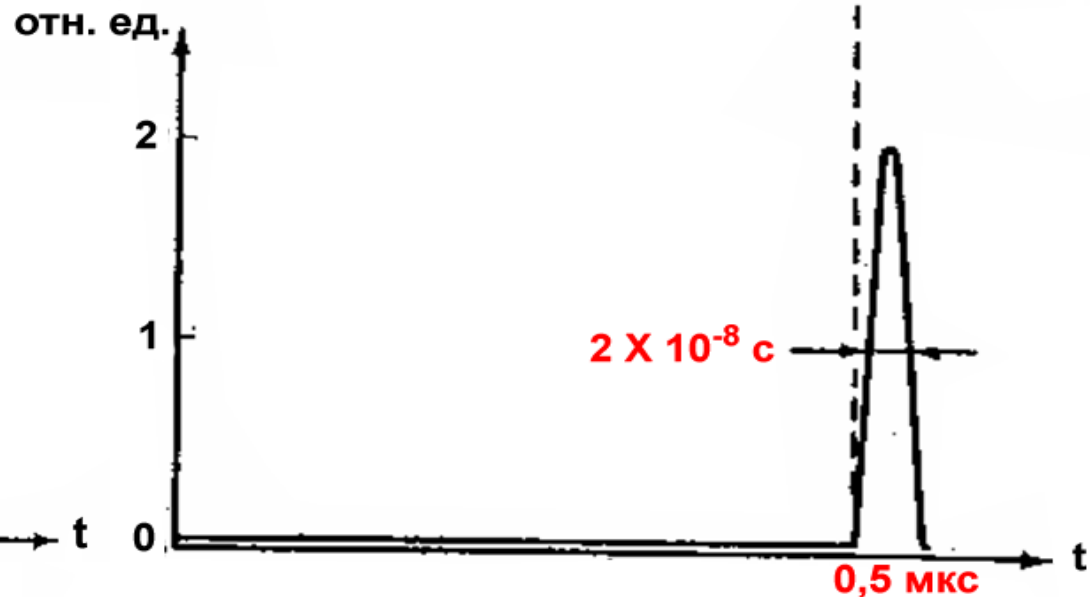
Ядерный взрыв



Образование
критической
массы

Начало
взрыва

**Зависимость от времени числа
нейтронов при ядерном взрыве.**



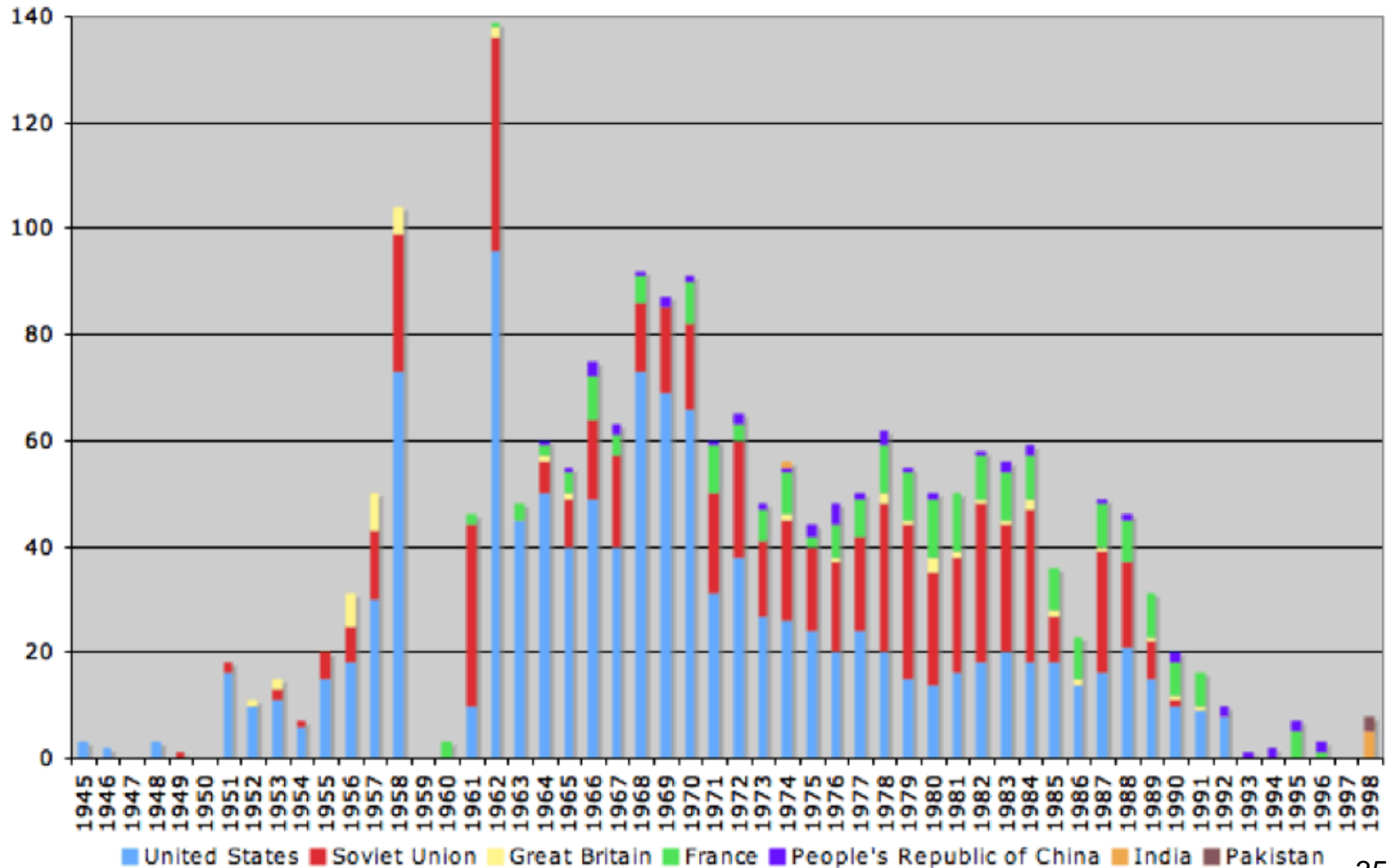
Образование
критической
массы

Начало
взрыва

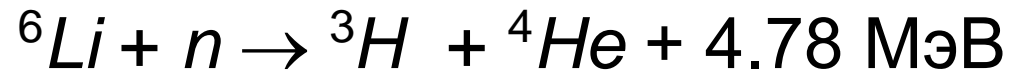
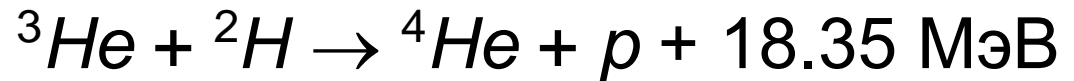
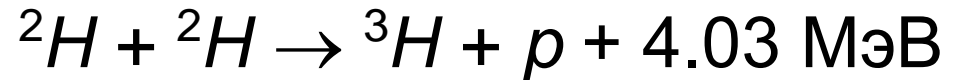
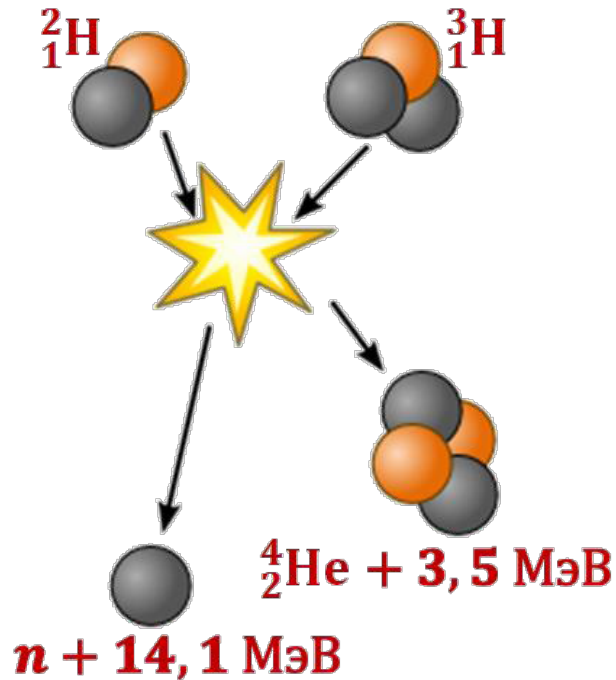
**Зависимость от времени энергии
ядерного взрыва.**

Ядерные испытания

Worldwide nuclear testing, 1945-1998



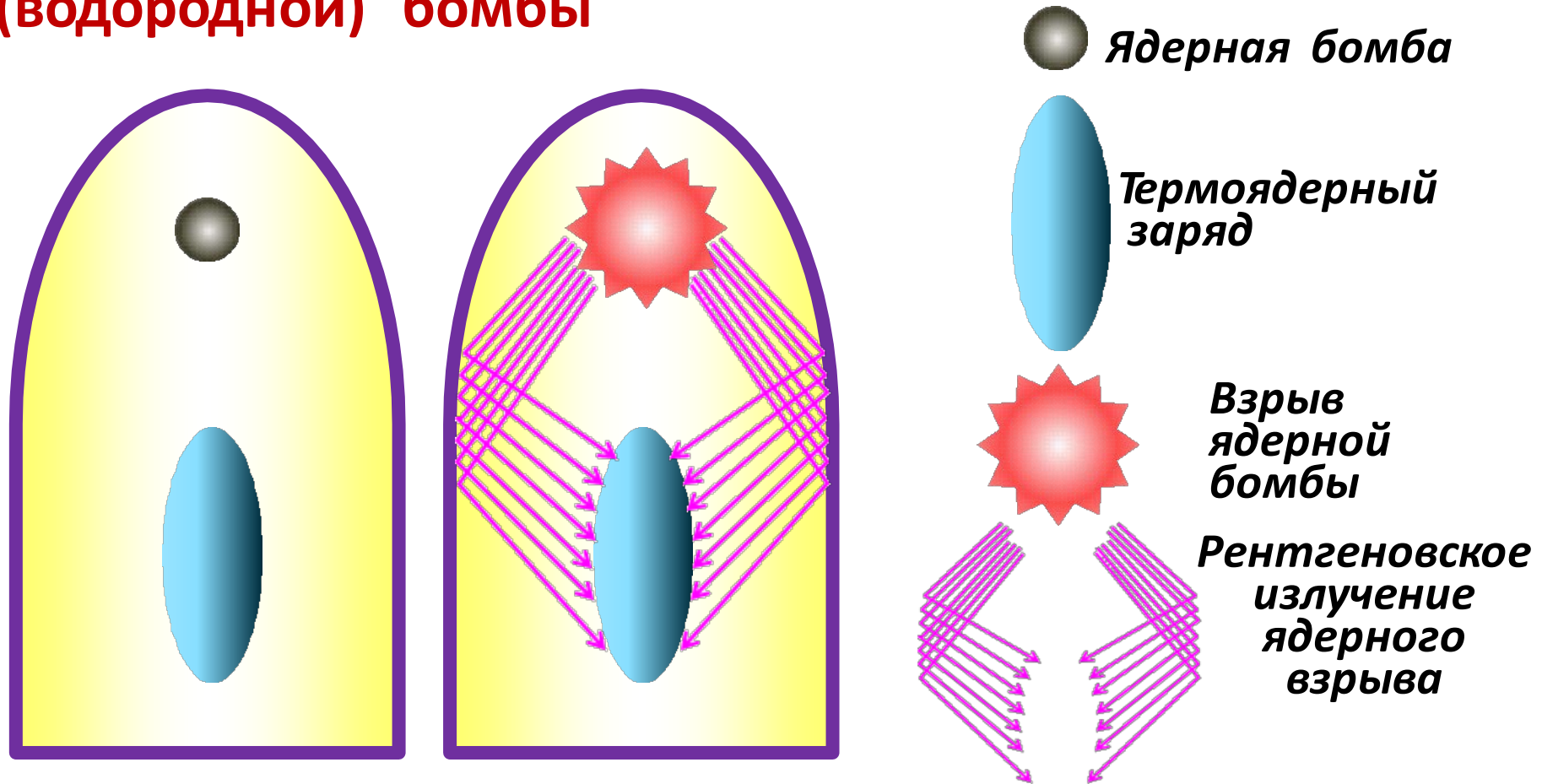
РЕАКЦИИ СИНТЕЗА



Температура при взрыве атомной бомбы недостаточна для инициации самоподдерживающейся реакции синтеза. Ключевой явилась идея о сжатия дейтерия или дейтерий-тритиевой смеси. Необходимы давления в десятки млн. атм.

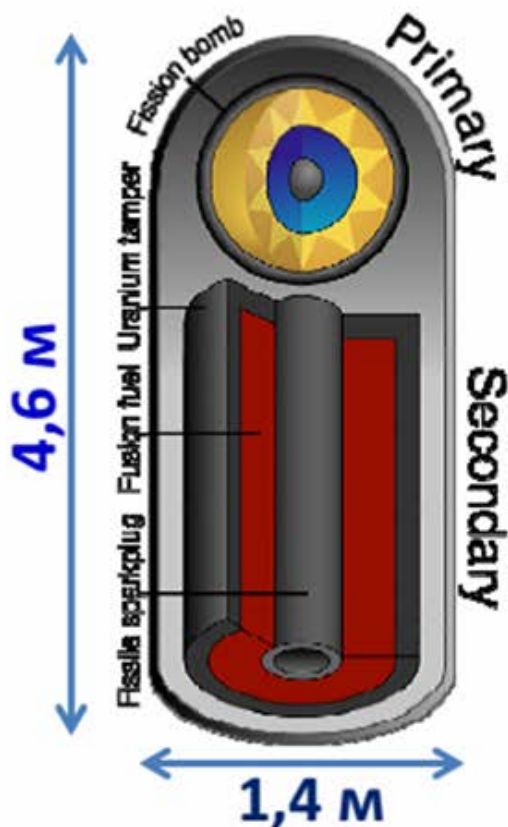
Энергии $kT=50 \text{ кэВ}$ соответствует температура $T \approx 6 \cdot 10^8 \text{ К}$

Принцип действия современной термоядерной (водородной) бомбы



Ядерный взрыв генерирует интенсивное рентгеновское излучение, которое, фокусируясь на термоядерном заряде (дейтериде лития ${}^6\text{LiD}$), сжимает и нагревает его, инициируя термоядерный синтез (термоядерный взрыв). Рентгеновское излучение испускается в 1-ю микросекунду ядерного взрыва.

Американское испытание термоядерной бомбы Атолл Бикини (28.02.1954)



5 Мт – синтез,
10 Мт – деление
урана-238

Кратер: диаметр 2 км,
глубина 75 м

Распределение энергии термоядерного взрыва

Царь-бомба (100 Мт)

Характеристики: двухфазная водородная бомба мощностью 101,5 Мт.

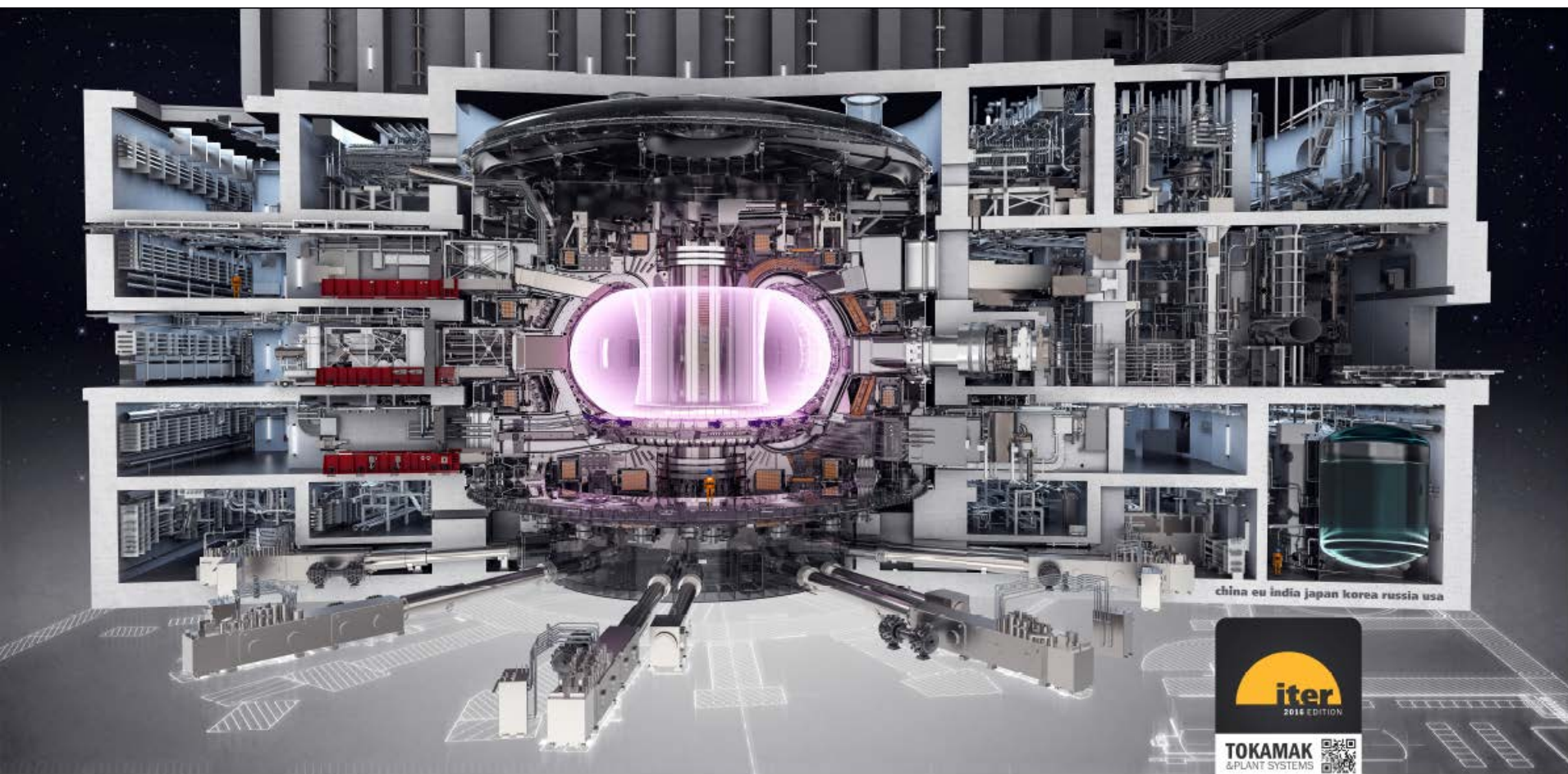
Атомный взрыв 1-й ступени должен был дать 1,5 Мт. Термоядерный взрыв 2-й ступени – 50 Мт. Оболочка урана-238 должна была дать ещё 50 Мт. Проектная мощность уменьшена вдвое за счёт замены урана-238 инертным к делению свинцом.

Взорвана 30.11.1961 над Новой Землёй.
Сброшена на парашюте с самолёта на высоте 10,5 км.
Взрыв на высоте 4 км. Мощность взрыва 58 Мт.



ITER

Евросоюз, Китай, Индия, Южная Корея,
Казахстан, Россия, Япония, США



Токомак:	температура плазмы	150 млн °C
	объем плазмы	840 м³
Запуск	2015 г.	