



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

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

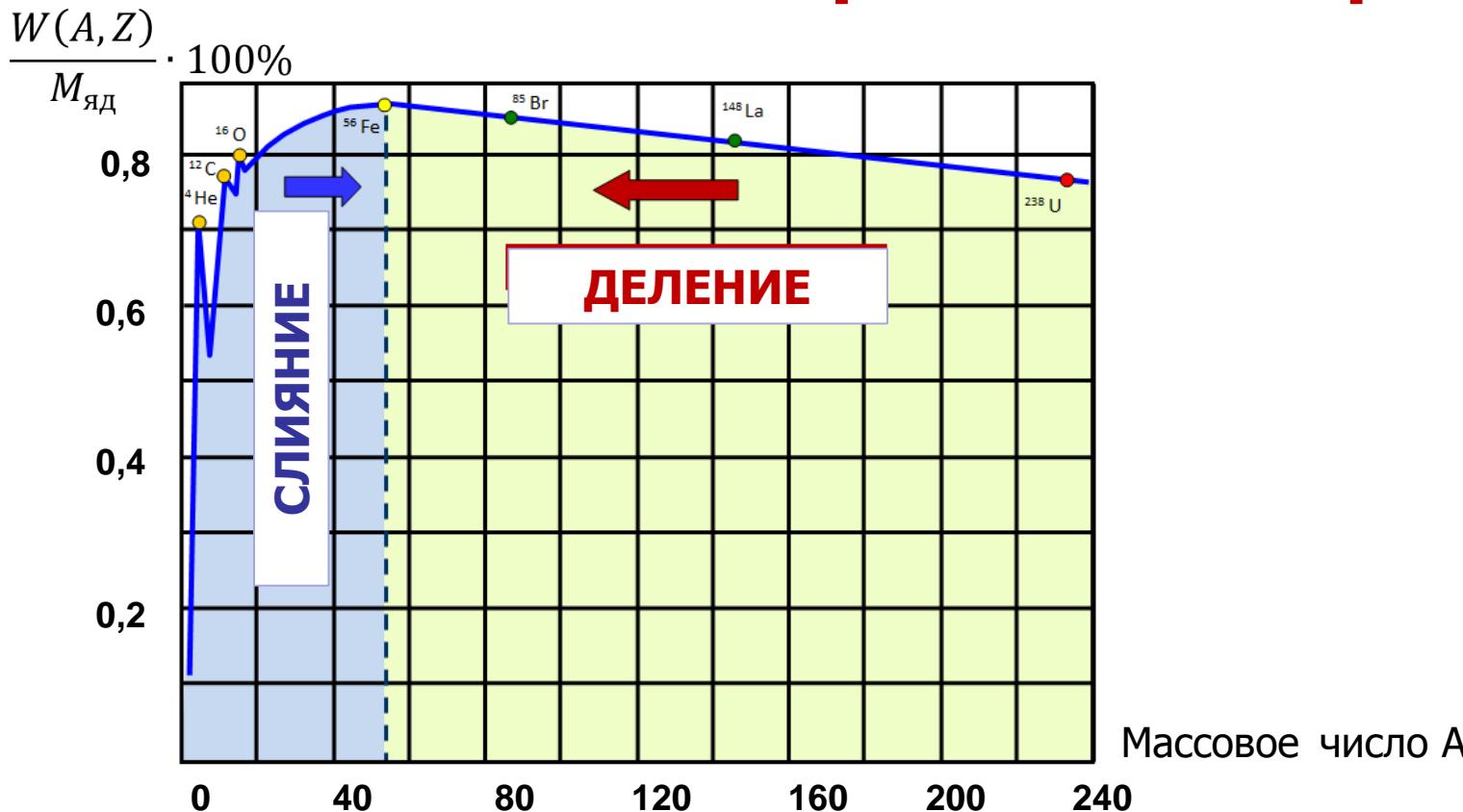
$$\sum m \approx \text{Const}$$

Ядерная физика

Энергия связи ядра $W(A, Z)$

$$\begin{aligned} M(A, Z)c^2 + W(A, Z) &= \\ = Z \cdot m_p c^2 + (A - Z)m_n c^2 & \\ W(A, Z) &\sim 10^{-2} \cdot Mc^2 \end{aligned}$$

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. Штрасман обнаружили среди продуктов реакций Ba ($Z = 56$).

- 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 развел 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.

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

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

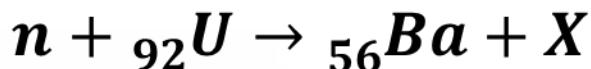
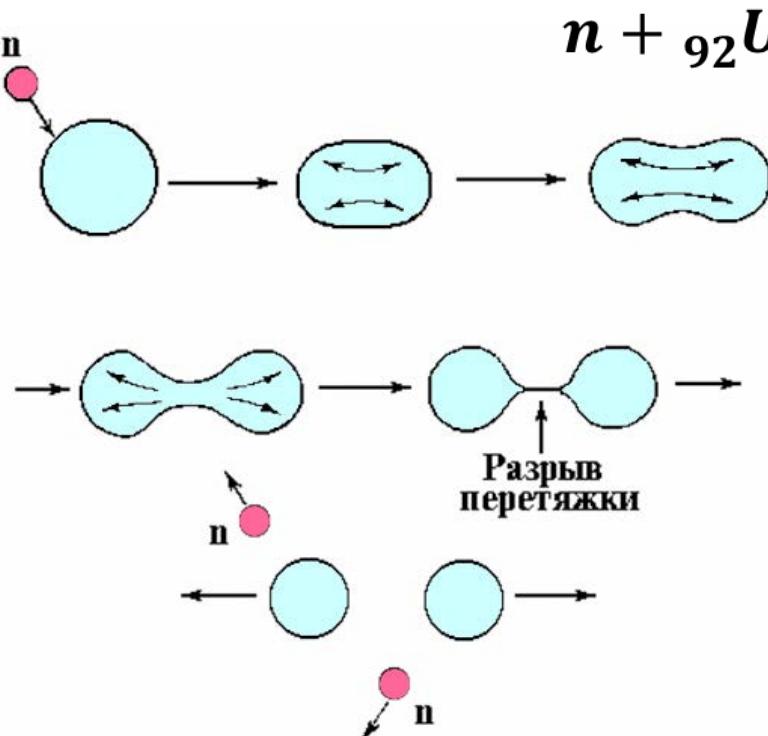
$$\frac{Z^2}{A} = 17 \text{ для иттрия } {}_{39}^{89}\text{Y}$$

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. Штрасман обнаружили при облучении урана нейтронами среди продуктов реакции барий.



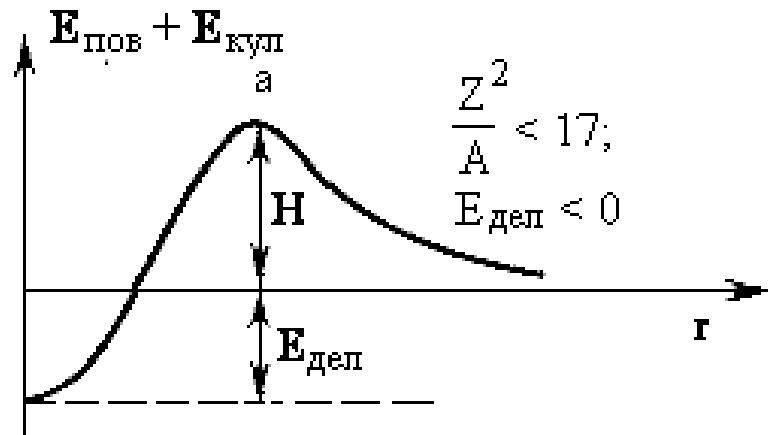
1939 г. — Л. Мейтнер и О. Фриш объяснение процесса деления урана под действием нейтронов.

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

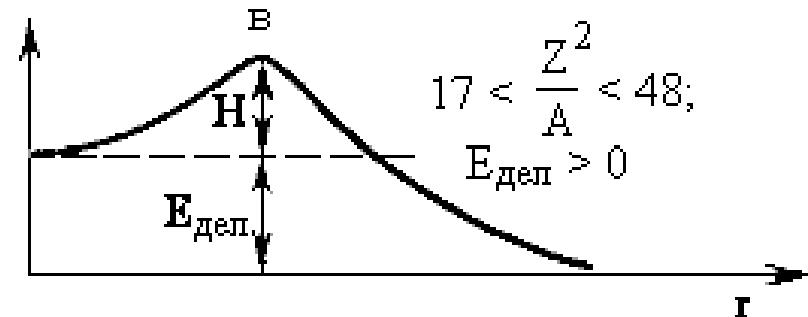
$$\tilde{E}_{\text{кул}} = E_{\text{кул}} \left(1 - \frac{1}{5} \varepsilon^2\right)$$

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

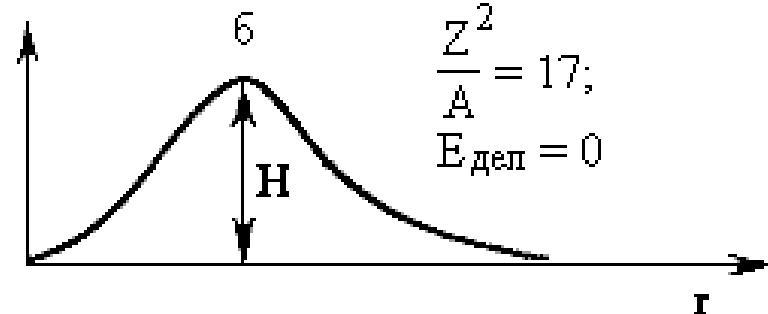
Барьер деления



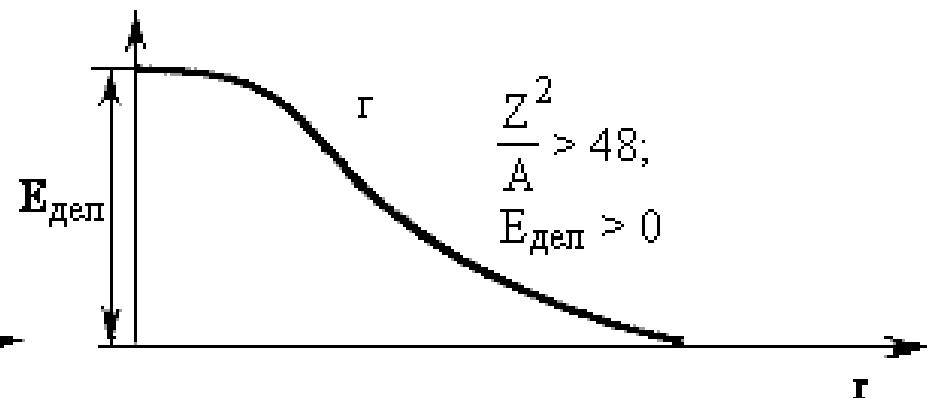
$$\frac{Z^2}{A} < 17; \\ E_{\text{дел}} < 0$$



$$17 < \frac{Z^2}{A} < 48; \\ E_{\text{дел}} > 0$$



$$\frac{Z^2}{A} = 17; \\ E_{\text{дел}} = 0$$

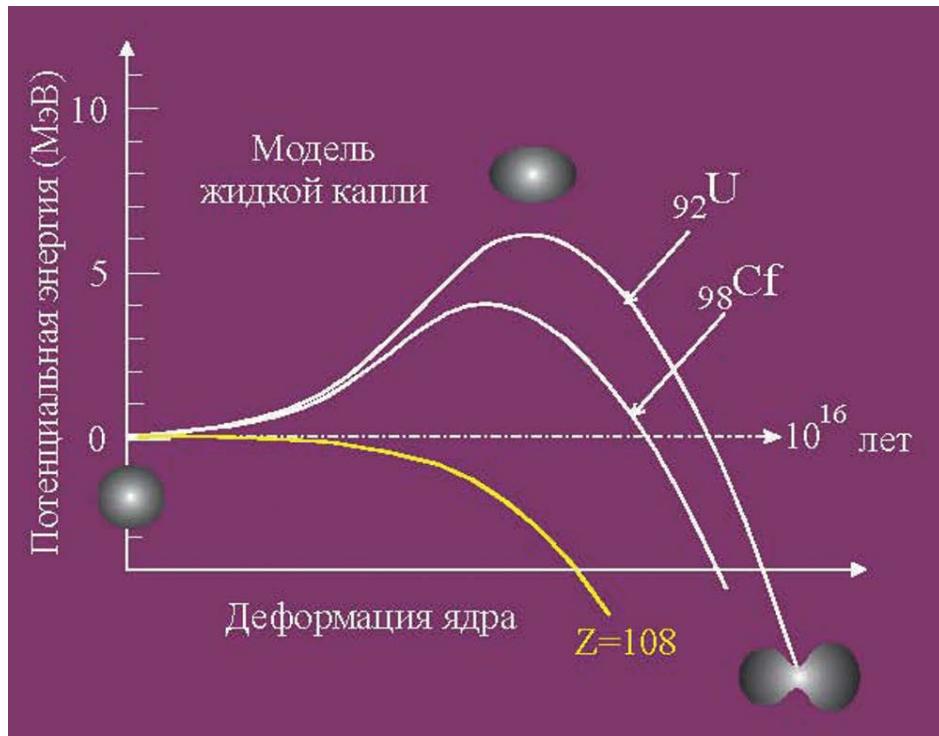


$$\frac{Z^2}{A} > 48; \\ E_{\text{дел}} > 0$$

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

$$Z = 120 \div 125$$

Барьер деления



Z^2/A	Элемент	Н (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}Hs	0	10^{-22} с

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

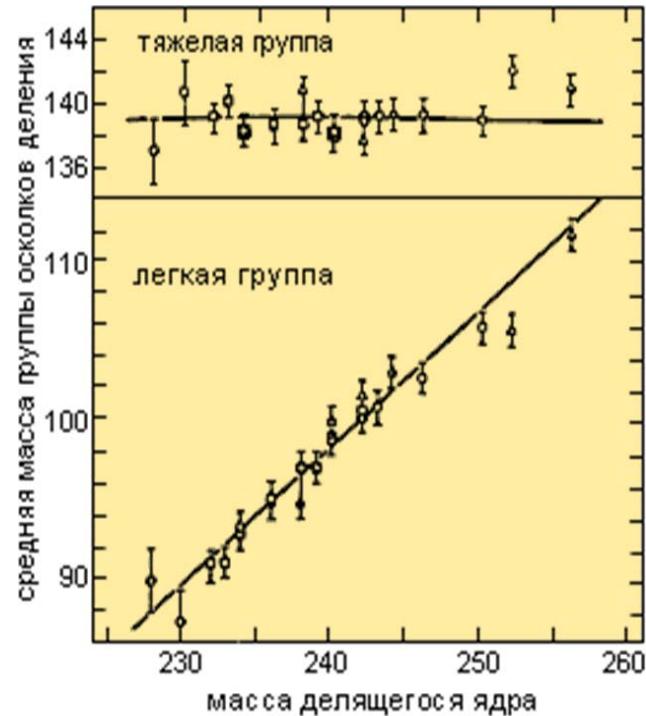
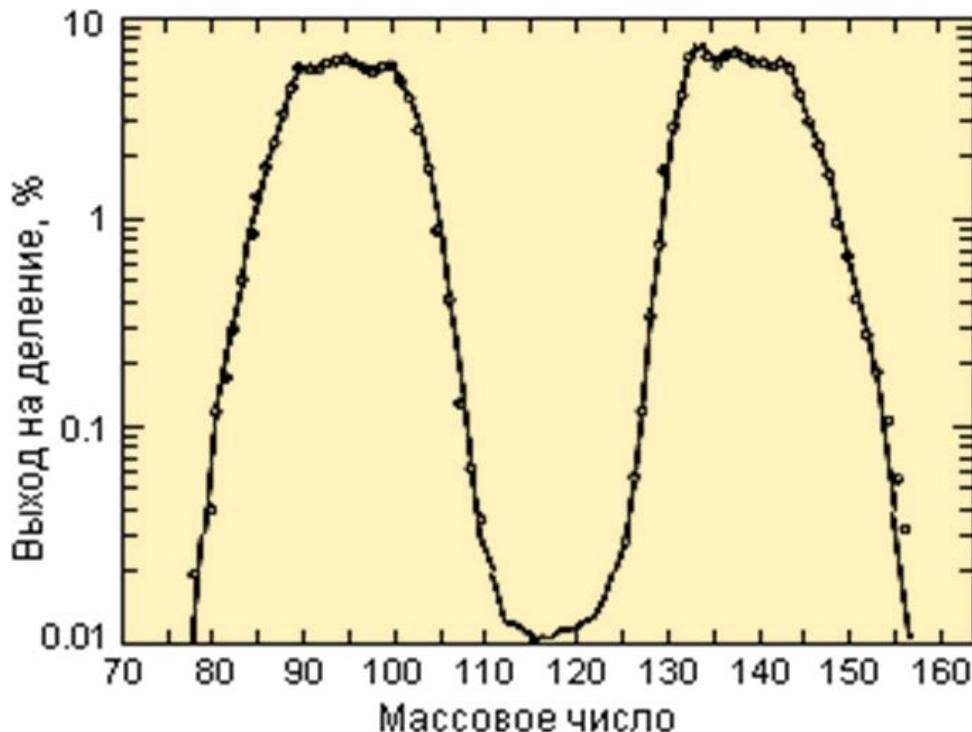
$$B_n \geq H$$

$$T_n \cong 0$$

(медленные нейтроны)

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

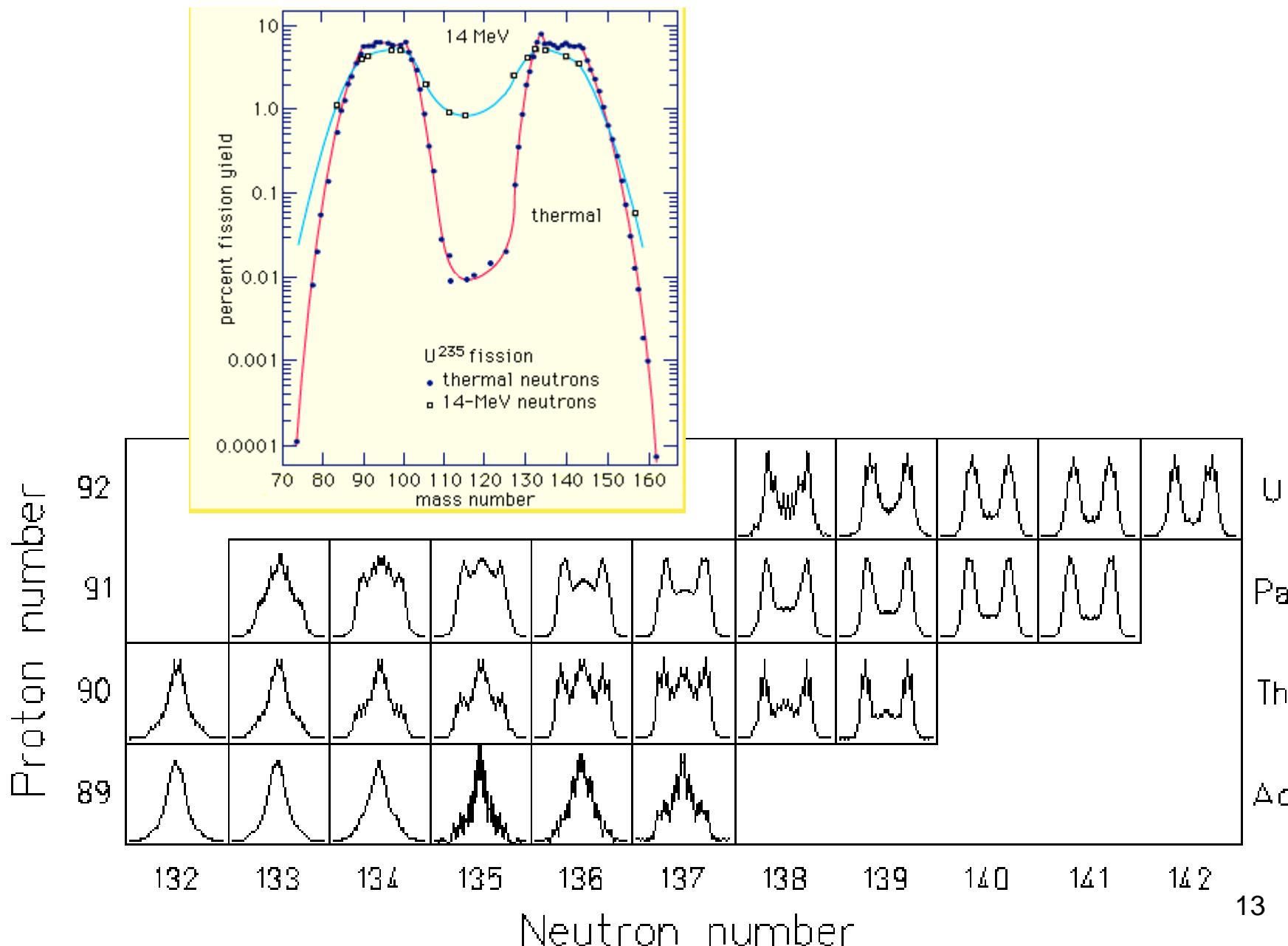
Массовое распределение осколков деления



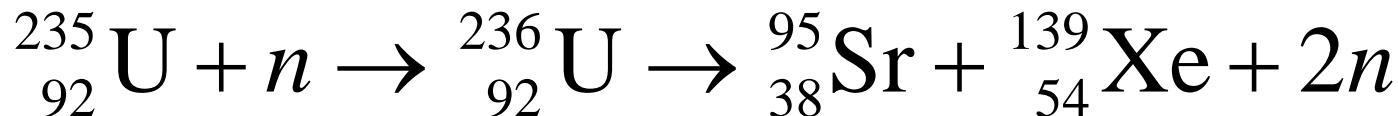
Осколки деления образуются в широком диапазоне $A = 72-161$ и $Z = 30-65$.

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

Массовое распределение осколков деления

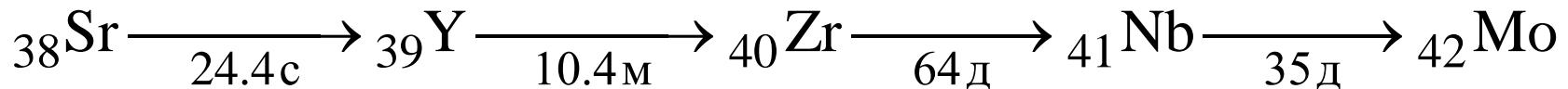


Радиоактивность осколков деления

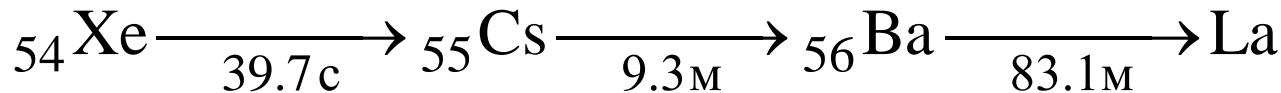


$$\frac{N}{Z} = 1 + 0.015A^{2/3}$$

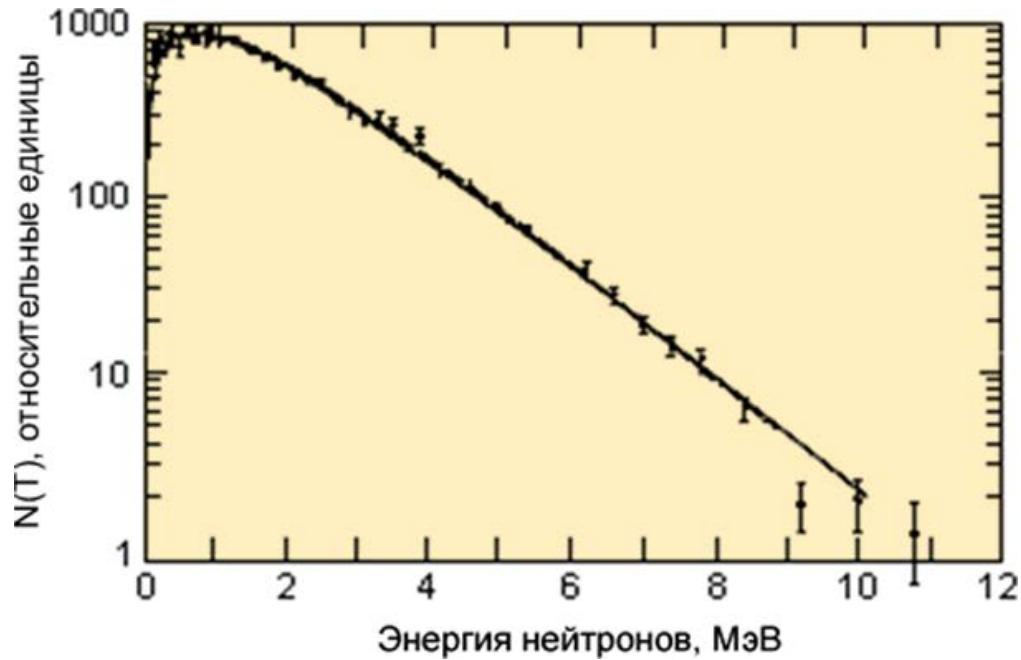
$$A = 95$$



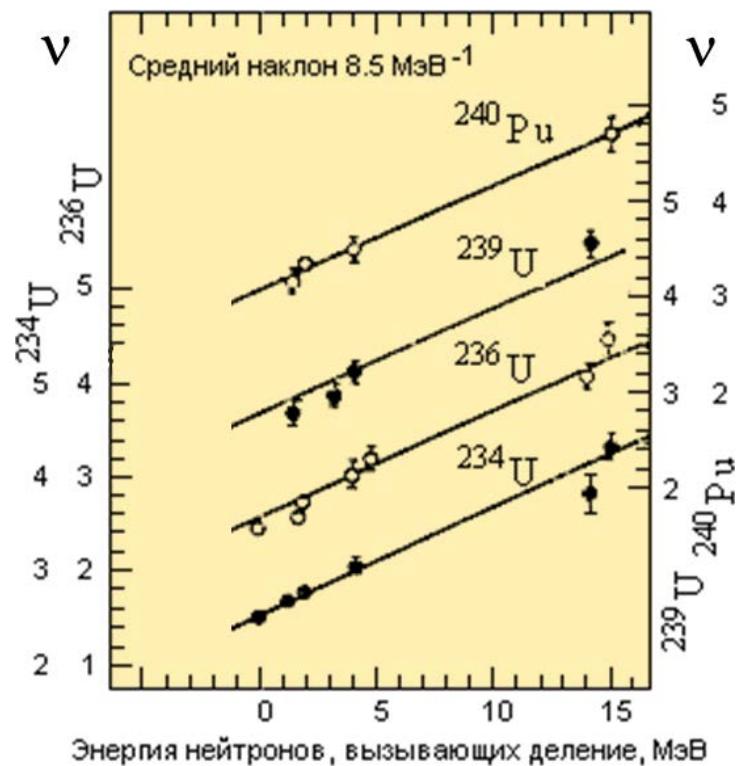
$$A = 139$$



Нейтроны деления

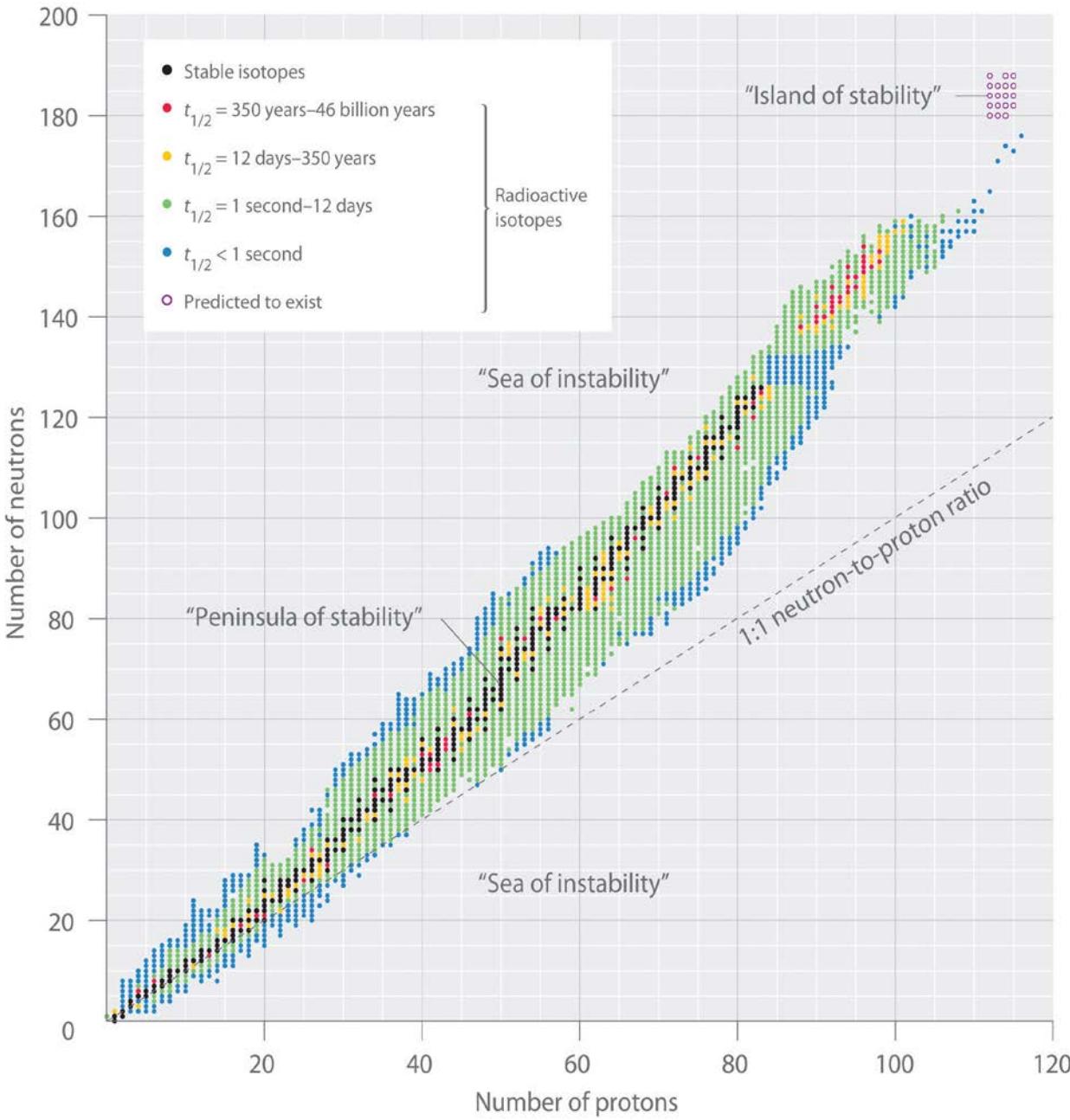


Спектр нейтронов деления



Число нейтронов деления

Нейтроны деления



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

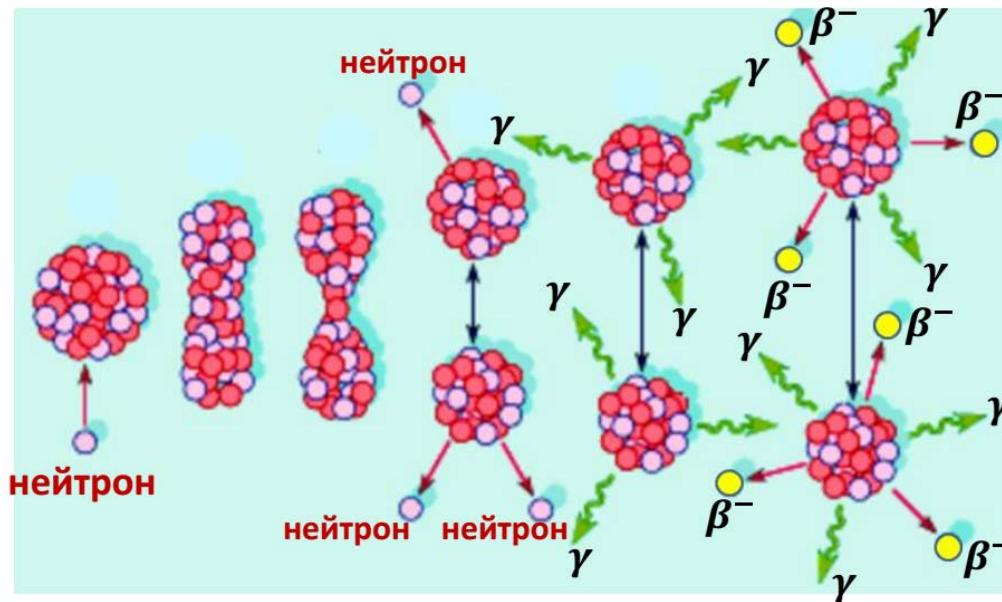
$$\frac{N_{\text{оск}}}{Z_{\text{оск}}} = \frac{N_U}{Z_U} = \frac{146}{92} = 1,6$$

$$N/Z_{(56\text{Ba})} = 1,45$$

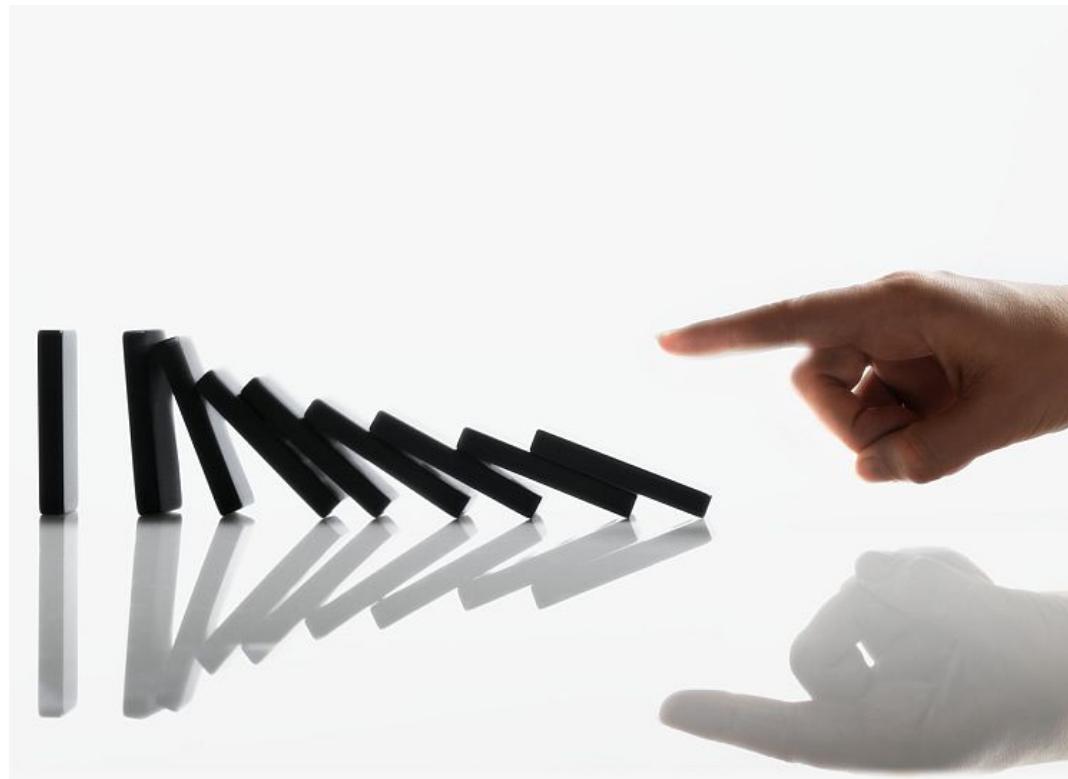
Вторичные нейтроны

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

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

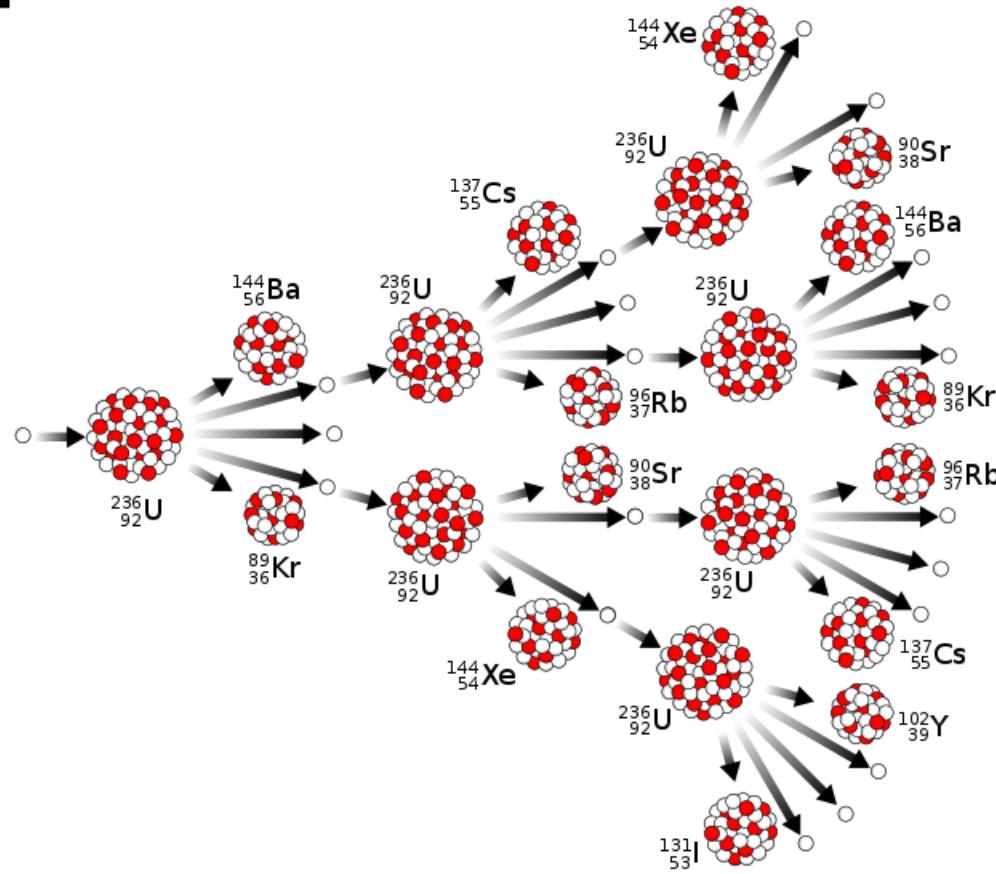


1913 г. – Макс Боденштейн. Неразветвленная цепная реакция

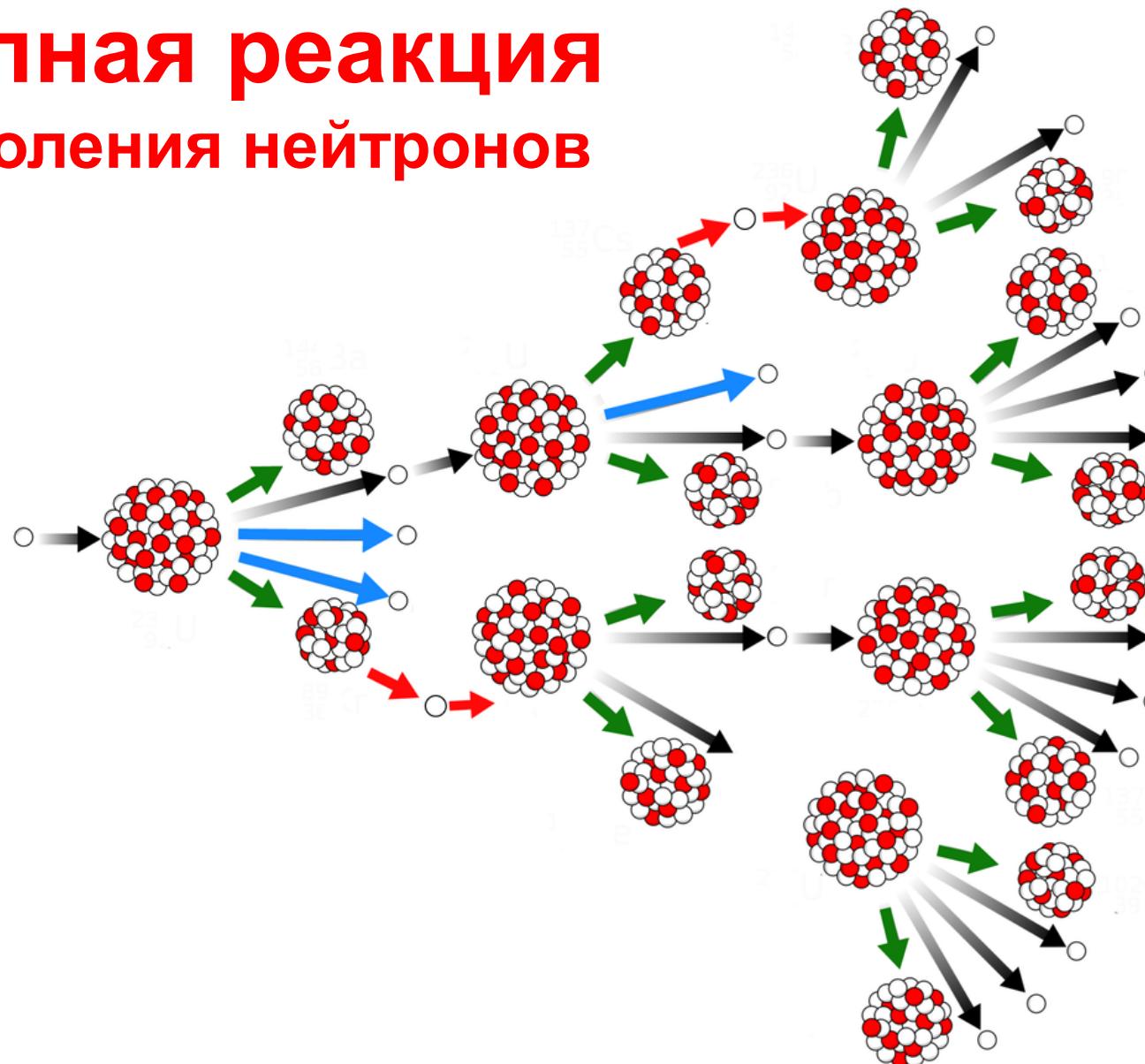
Цепная реакция



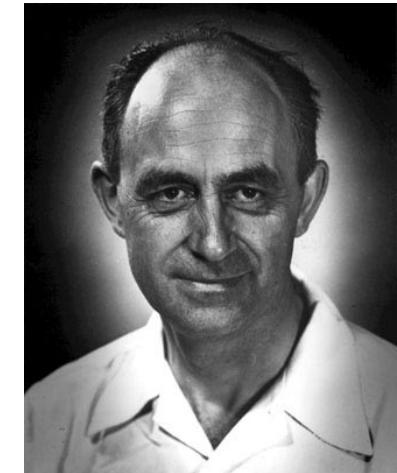
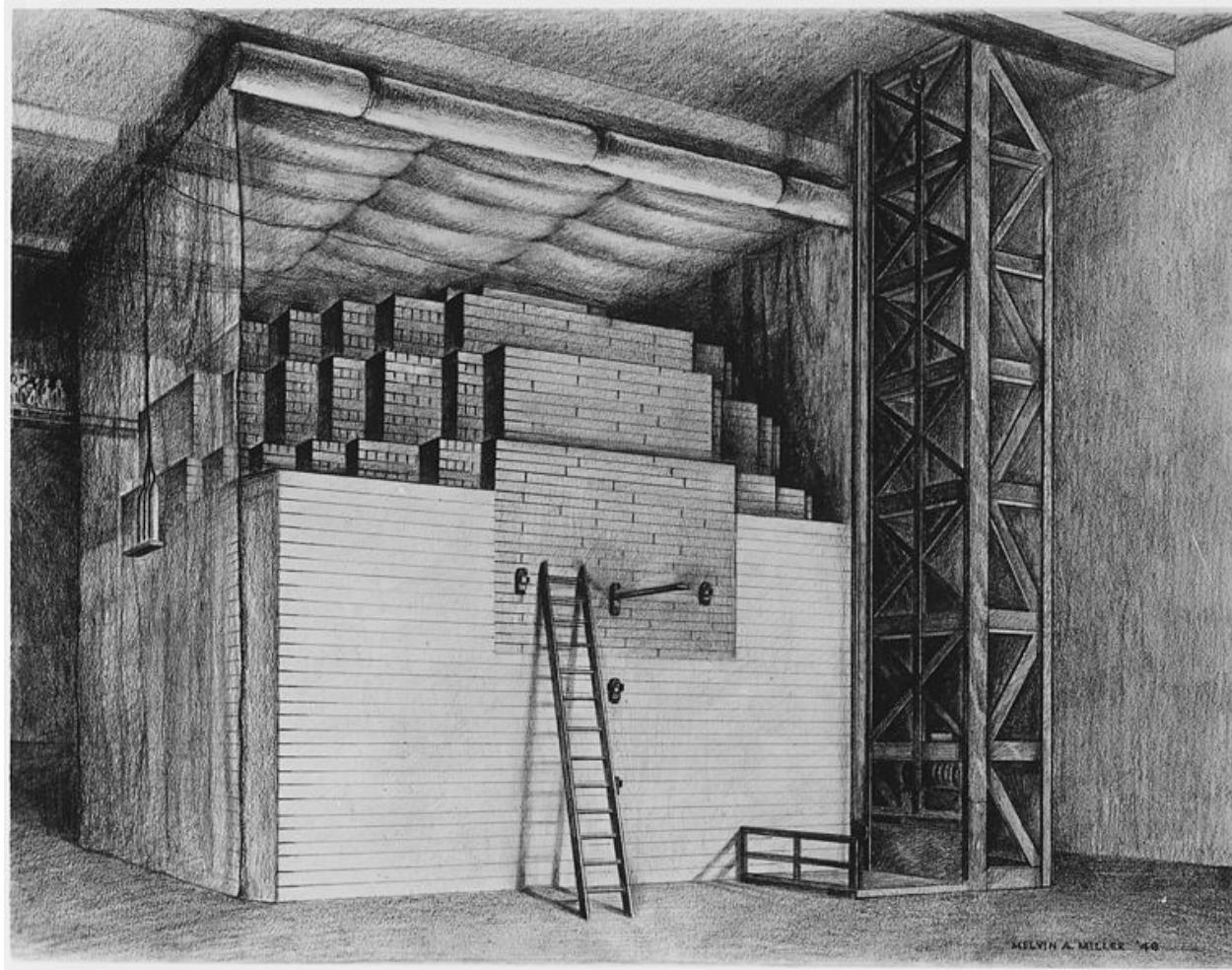
1928 г. – Н.Н. Семенов.
Разветвленная цепная реакция



Цепная реакция поколения нейтронов



Первый ядерный реактор Чикагская Поленница



Энрико
Ферми

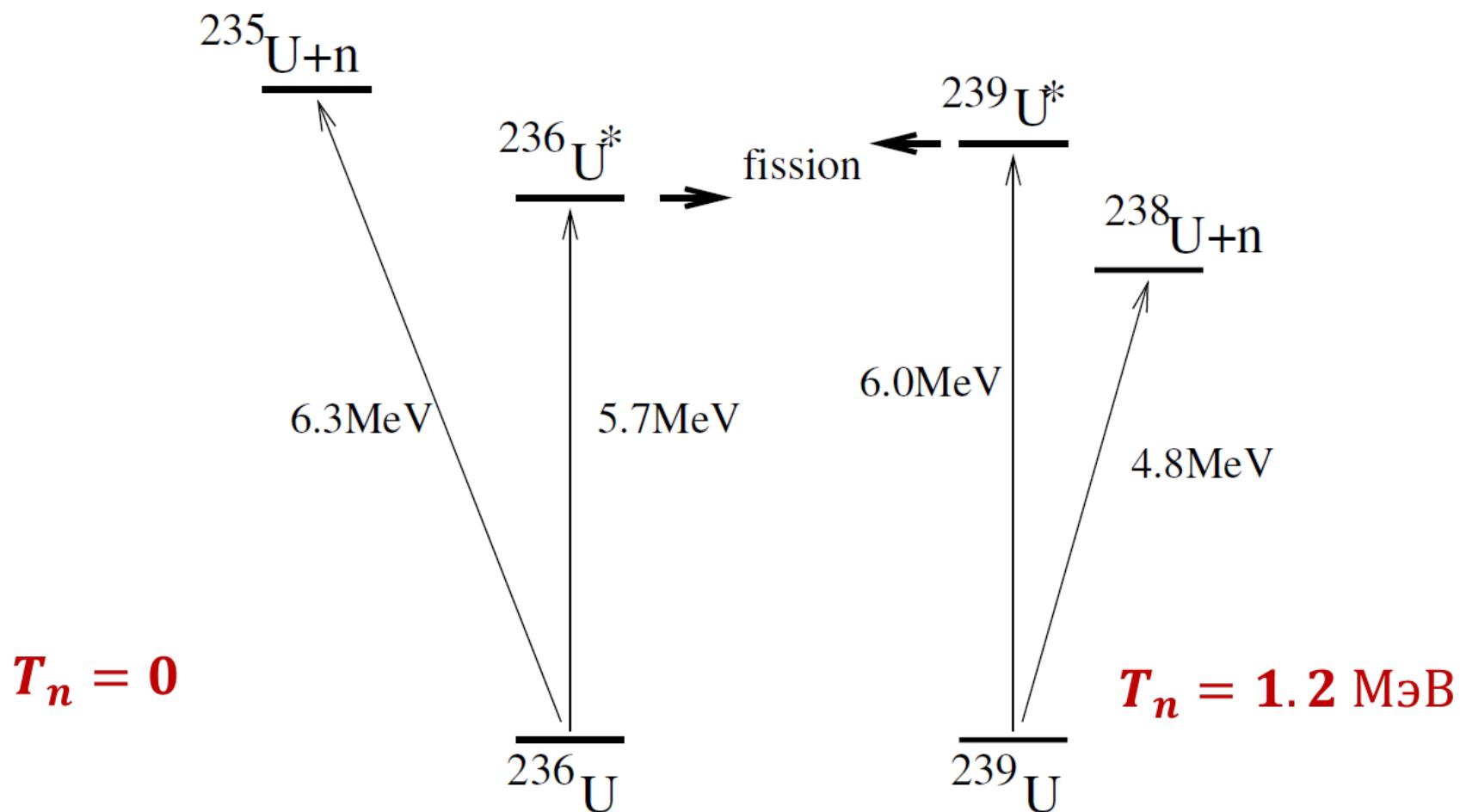
2.12.1942

стадион
Универстета
Чикаго

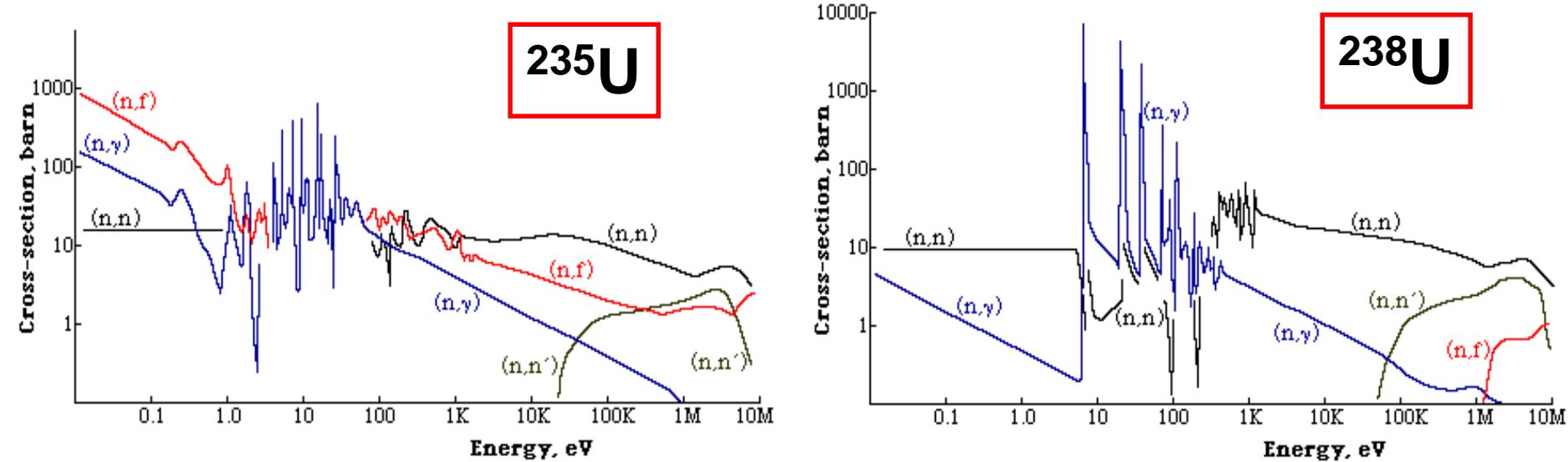
Изотопы U

^{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



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

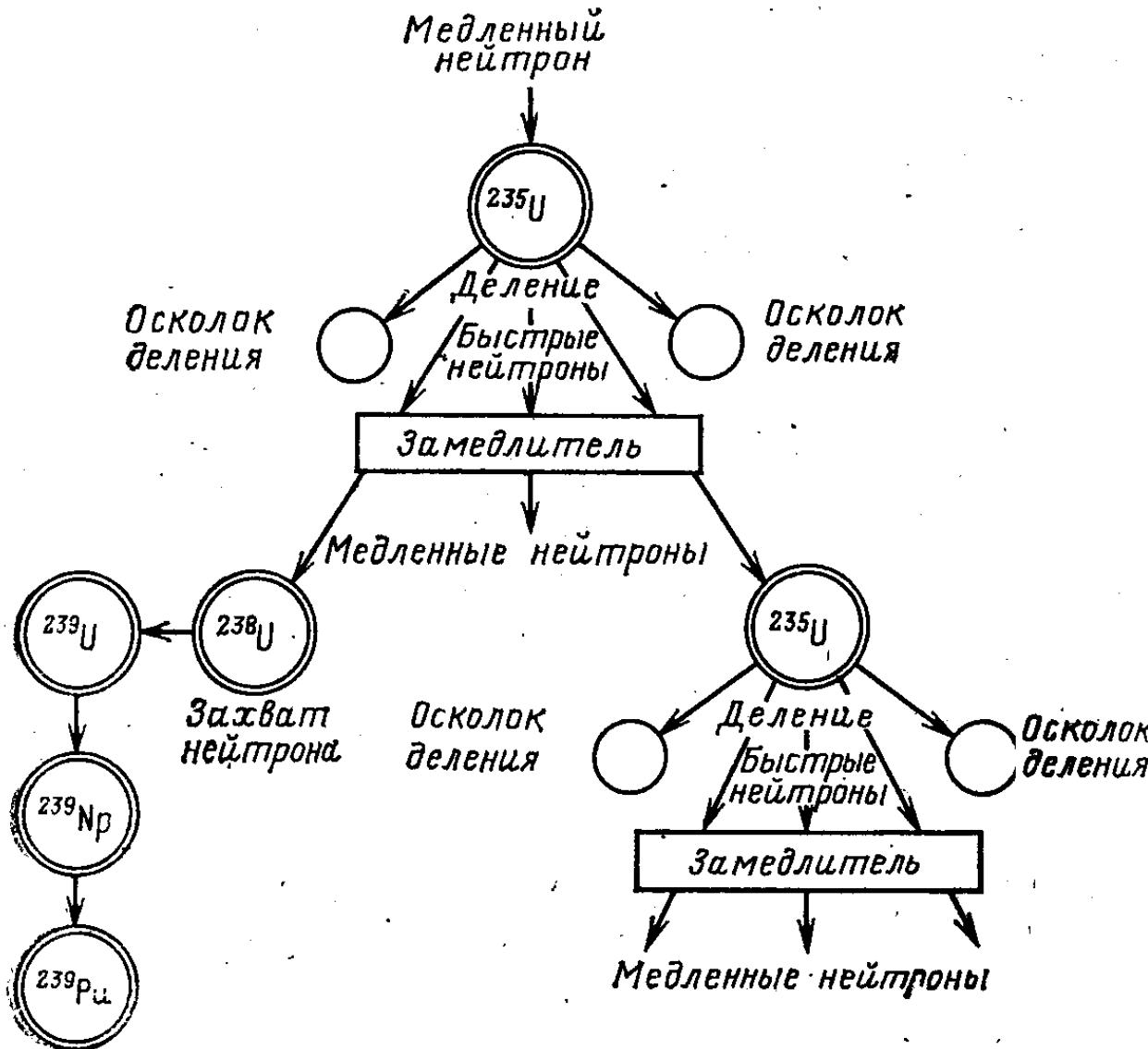
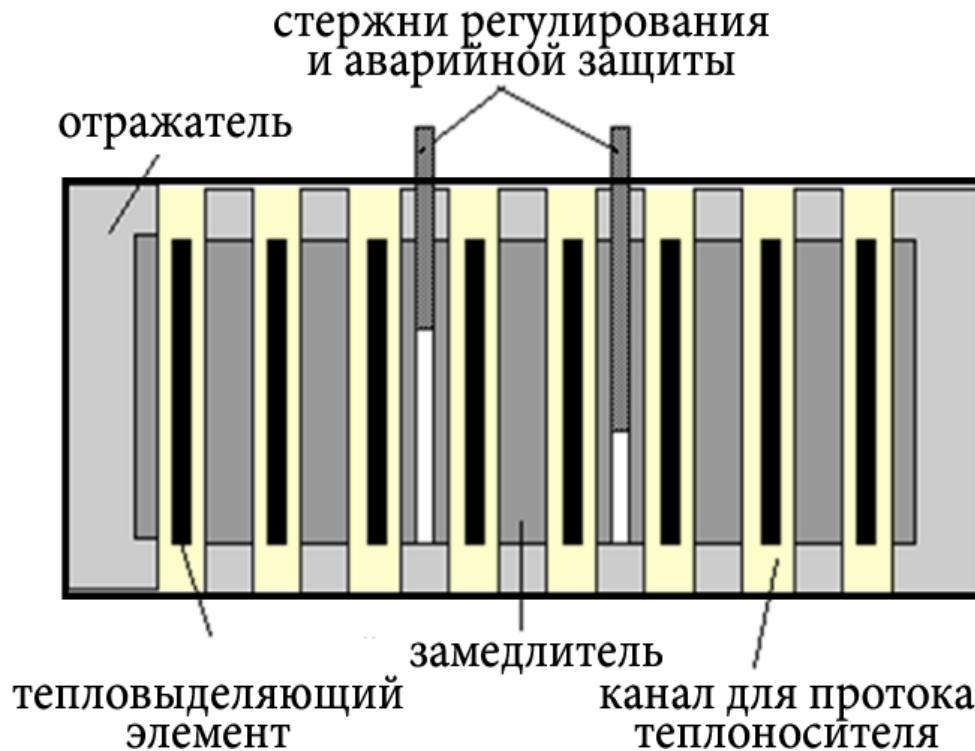


Схема гетерогенного теплового реактора



Активная зона (выделение энергии):

- замедлитель,
- тепловыделяющие элементы (твэлы). Расстояние между твэлами 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 твэлов 550 кг обогащенного ^{235}U - 5%

Мощность реактора 5 МВт



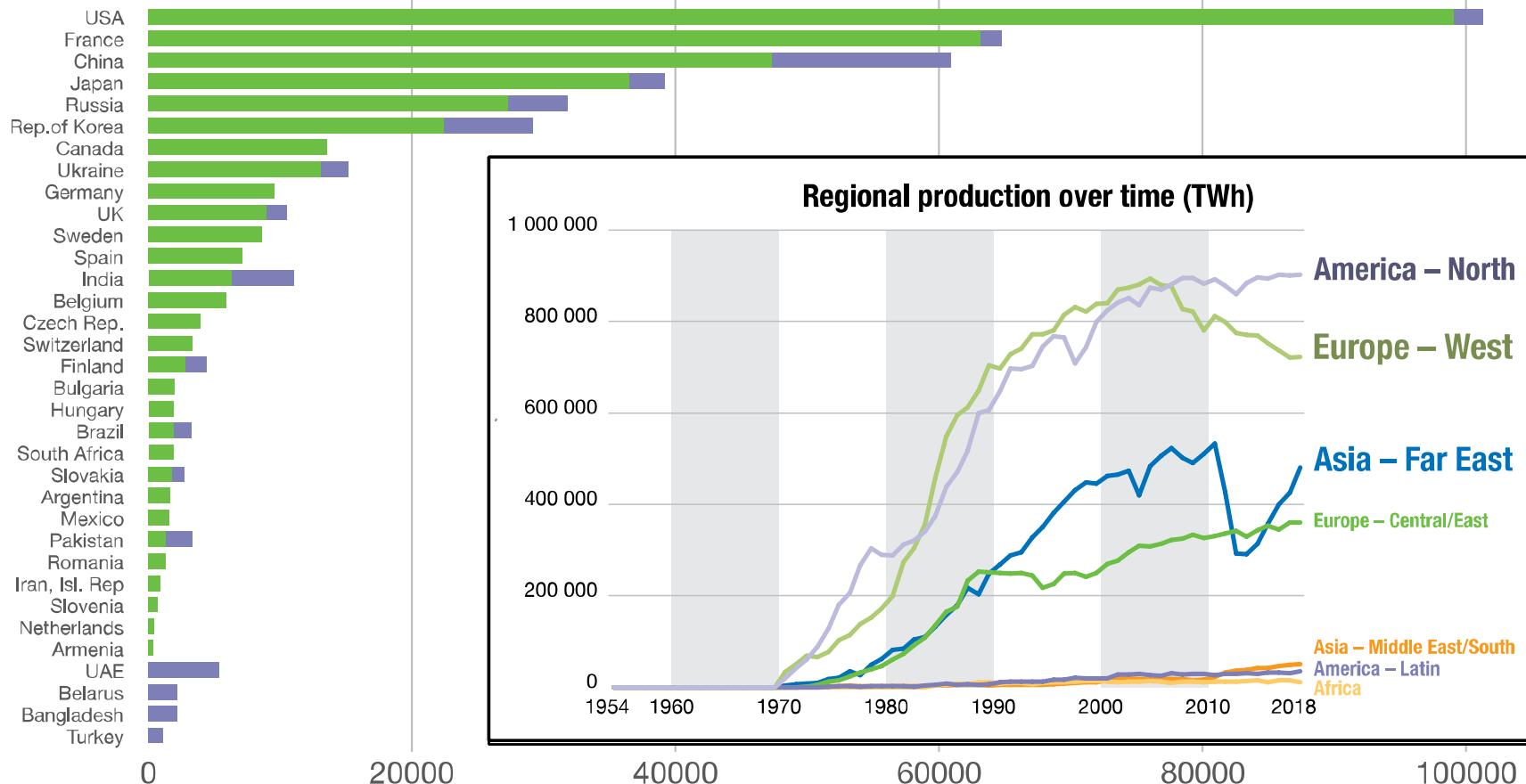
Академик АН СССР
Блохинцев Д.И.



Нововоронежская АЭС-2
Мощность 2 597,3 МВт

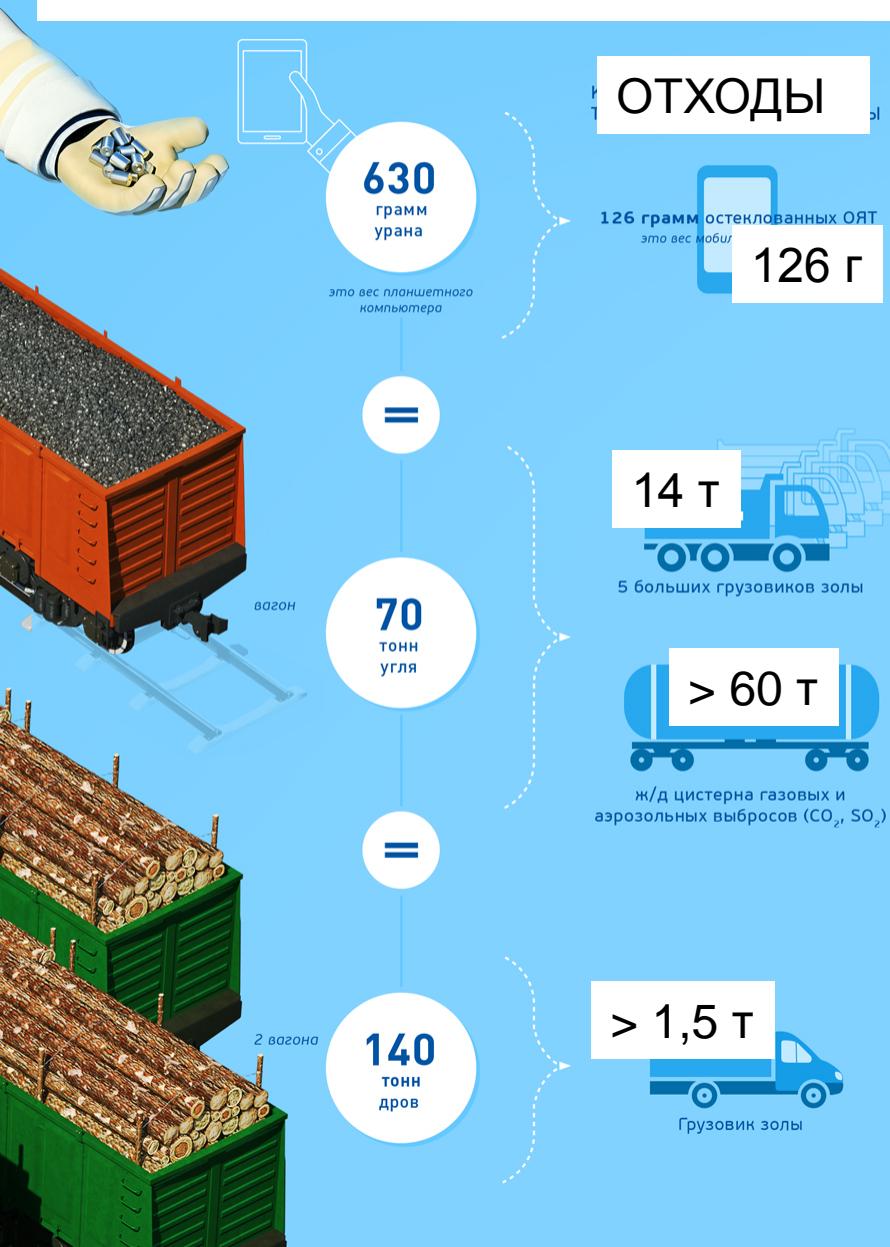


2018 Nuclear power capacity per country – (MW(e))



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

Треть территории детского лагеря «Артек».

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

Площадь небольшого государства Лихтенштейн.

Предпочтительнее строить в пустыне, энергия не постоянная.

Площадь, превышающая государство Андорра.

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).

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

Ограничено количество водных ресурсов.

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 ($k > 1$)

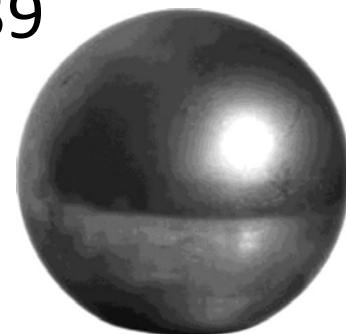
– режим надкритический – и цепная реакция лавинообразно (экспоненциально) нарастает и завершается ядерным взрывом.

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

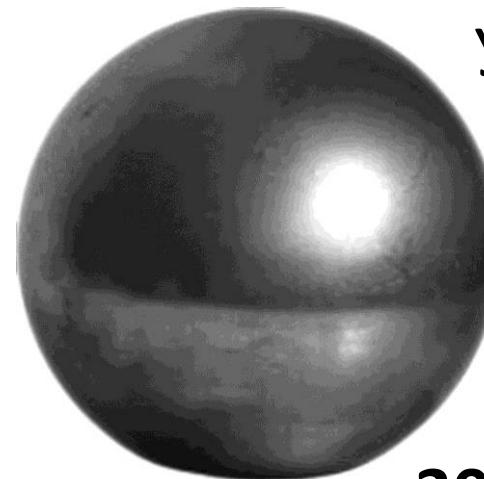
Критическая масса минимальна для сферических тел.

Металлические плутоний-239 и уран-235
в форме сферы имеют критические массы
соответственно **11** и **50 кг**.

Плутоний
239



Уран
235



0 10 30 см

Ядерный взрыв

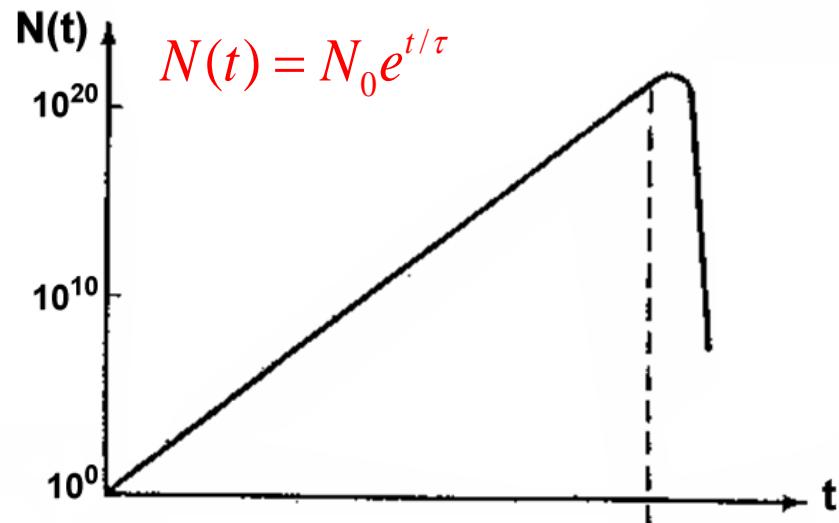
Для осуществления ядерного взрыва в результате цепной реакции деления необходимо, чтобы масса делящегося вещества (урана-235, плутония-239 и др.) превышала критическую (50 кг для ^{235}U и 11 кг для ^{239}Pu). До взрыва система должна быть подкритической. Ядерный взрыв развивается за счёт экспоненциально 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 энерговыделения 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 энерговыделению при взрыве 20 килотонн тротила.



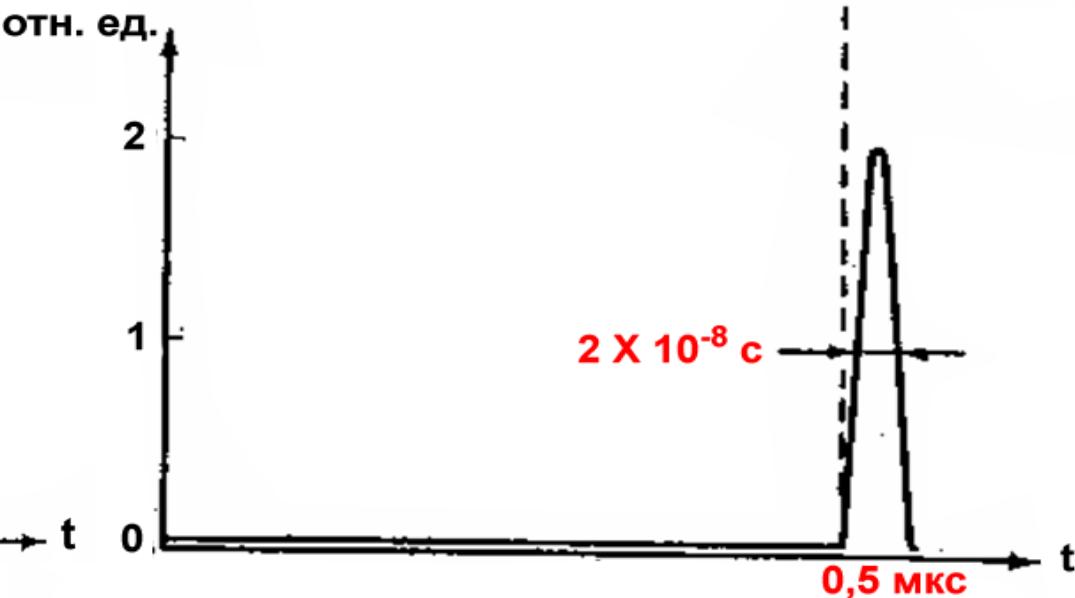
Ядерный взрыв



Образование
критической
массы

Начало
взрыва

Зависимость от времени числа
нейтронов при ядерном взрыве.



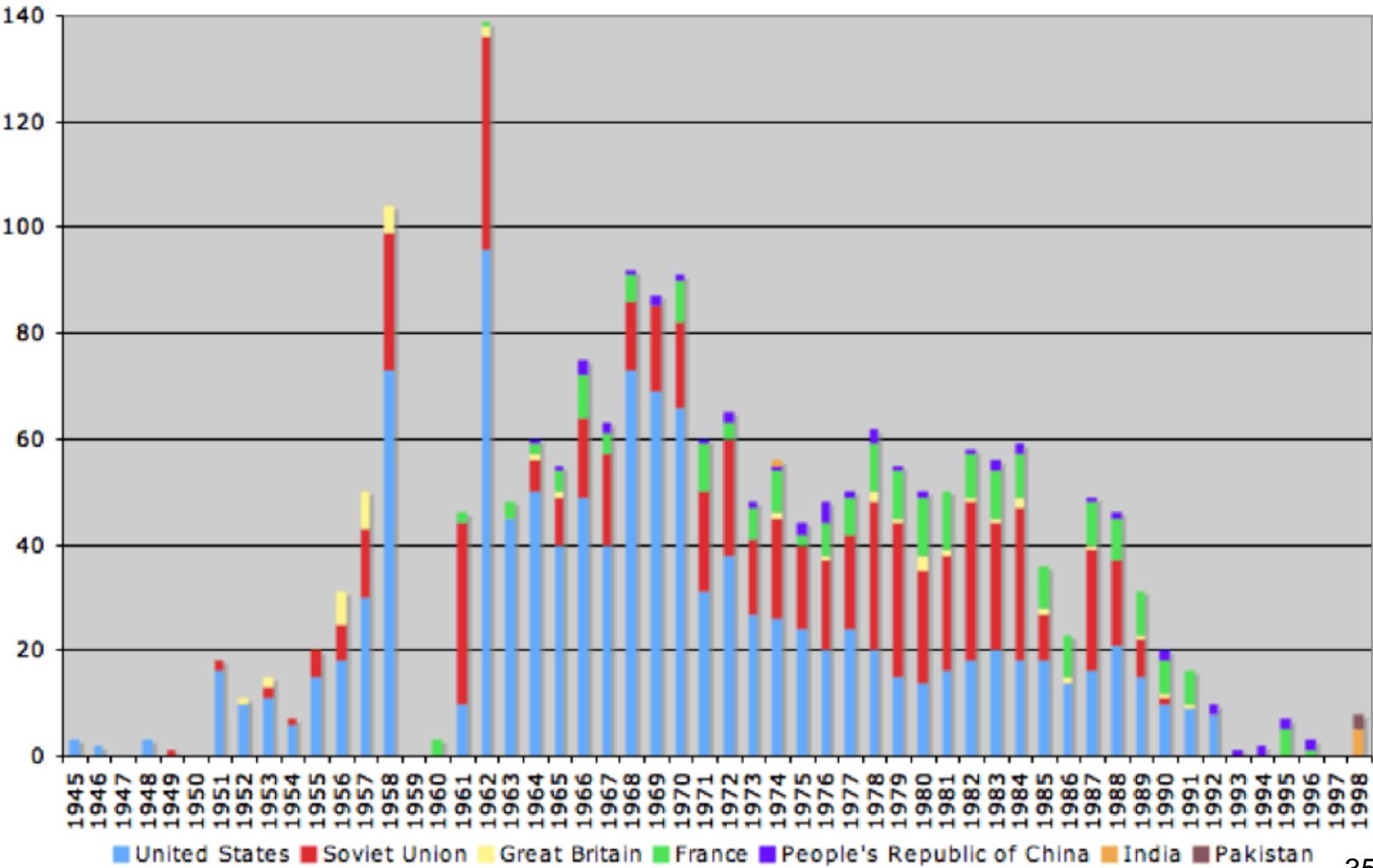
Образование
критической
массы

Начало
взрыва

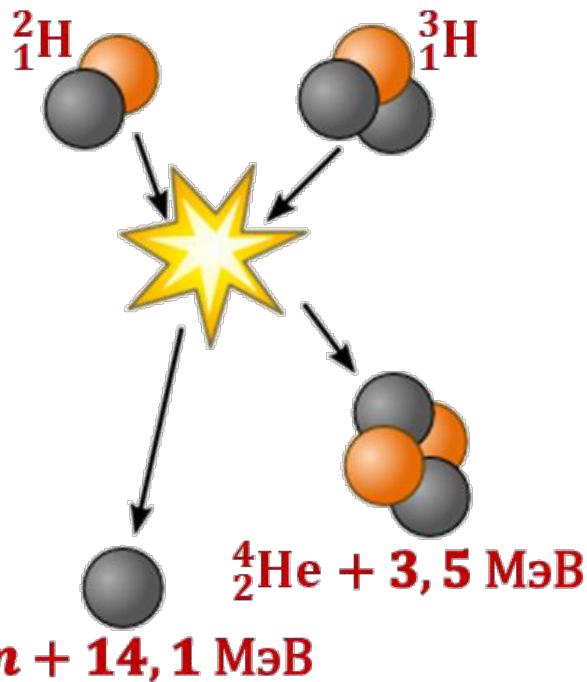
Зависимость от времени энергии
ядерного взрыва.

Ядерные испытания

Worldwide nuclear testing, 1945-1998



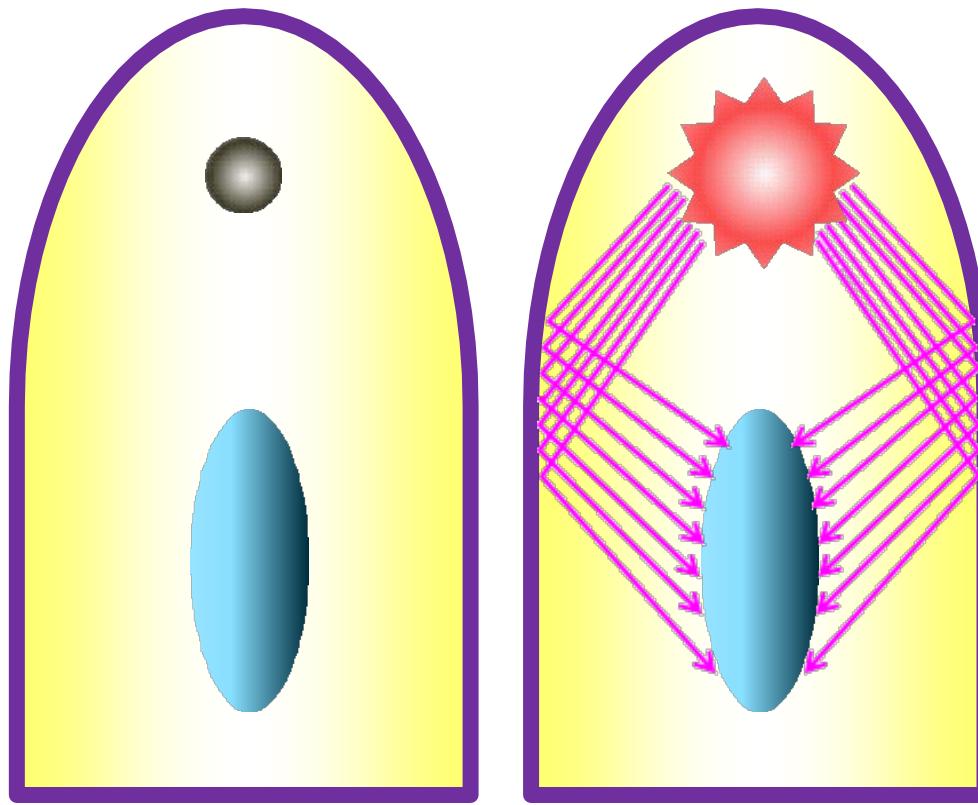
РЕАКЦИИ СИНТЕЗА



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 $T \approx 6 \cdot 10^8 \text{ К}$

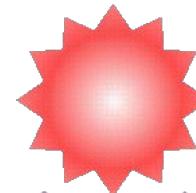
Принцип действия современной термоядерной (водородной) бомбы



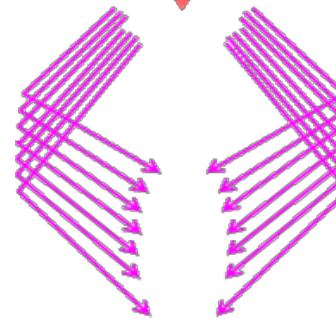
Ядерная бомба



Термоядерный заряд



Взрыв ядерной бомбы

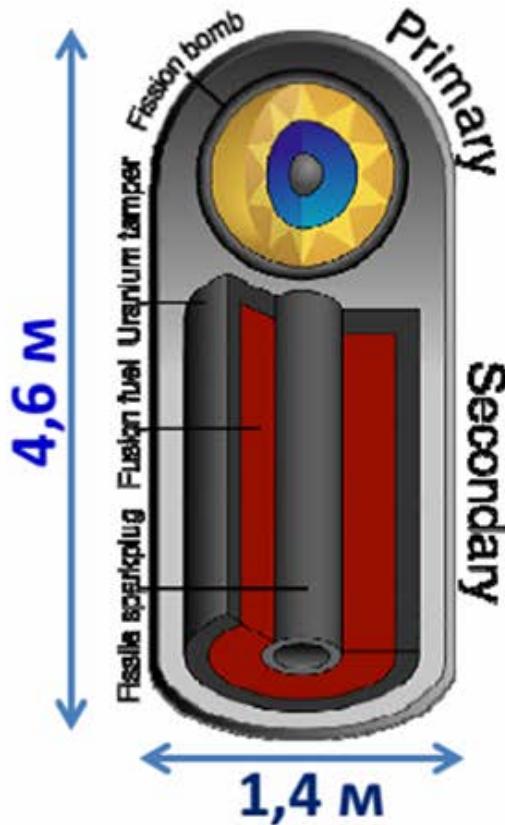


Рентгеновское излучение ядерного взрыва

Ядерный взрыв генерирует интенсивное рентгеновское излучение, которое, фокусируясь на термоядерном заряде (дейтерида 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)



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**.

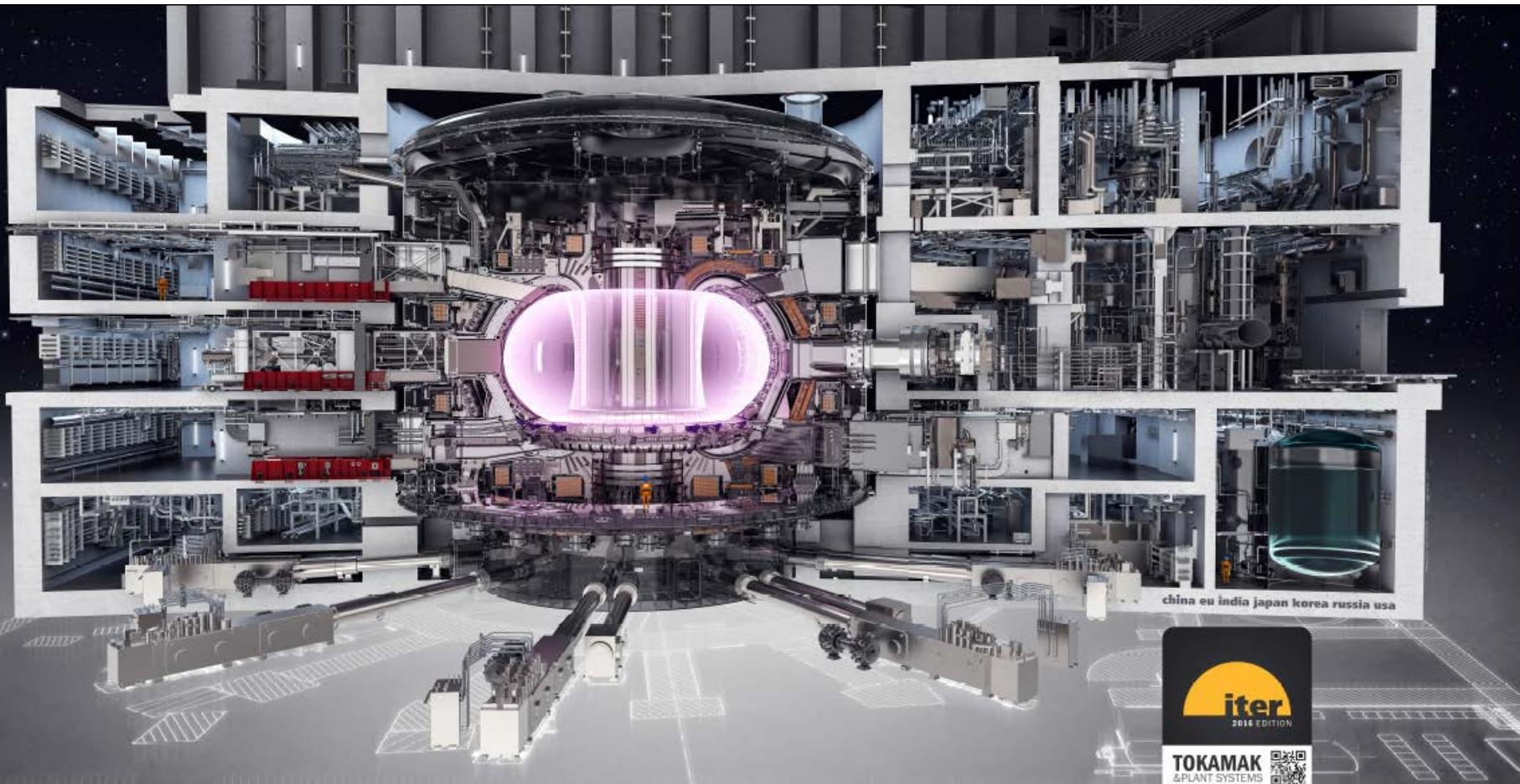
Проектная мощность уменьшена вдвое за счёт замены **урана-238** инертным к делению свинцом.

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**.





Токомак:

температура плазмы

150 млн °C

объем плазмы

840 м³

Запуск

2015 г.