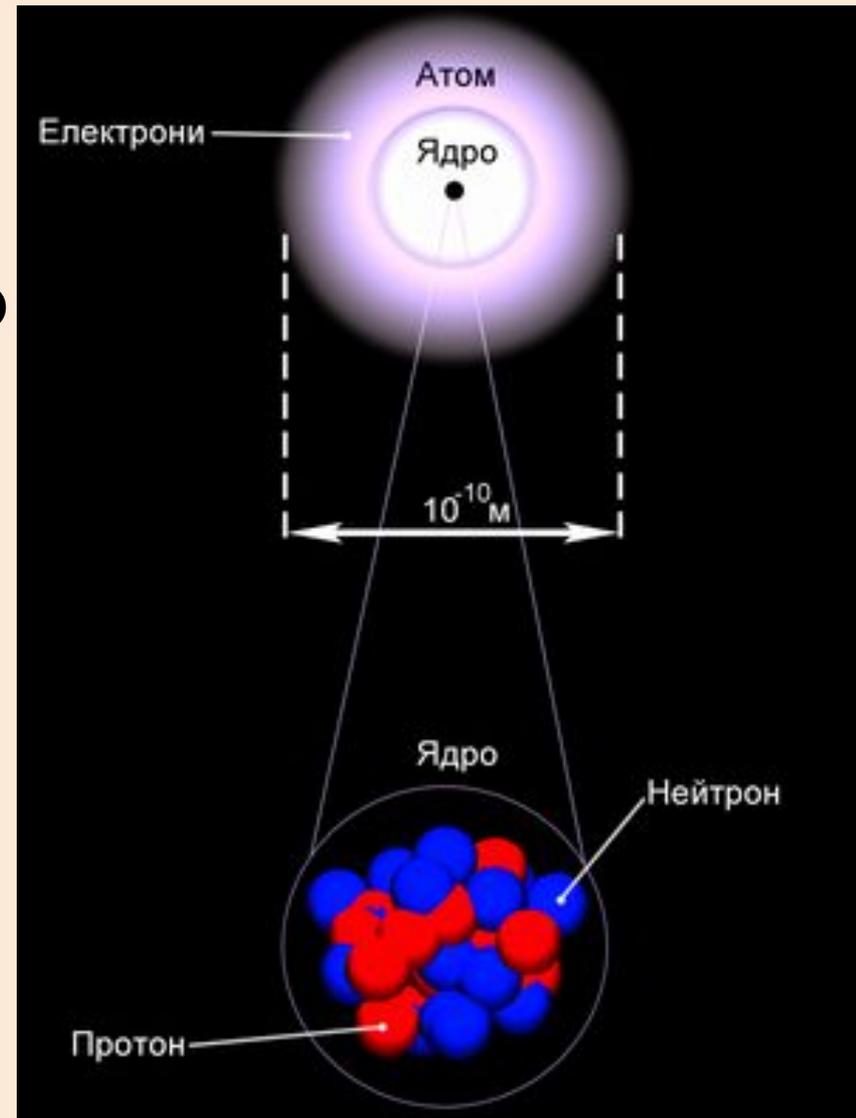


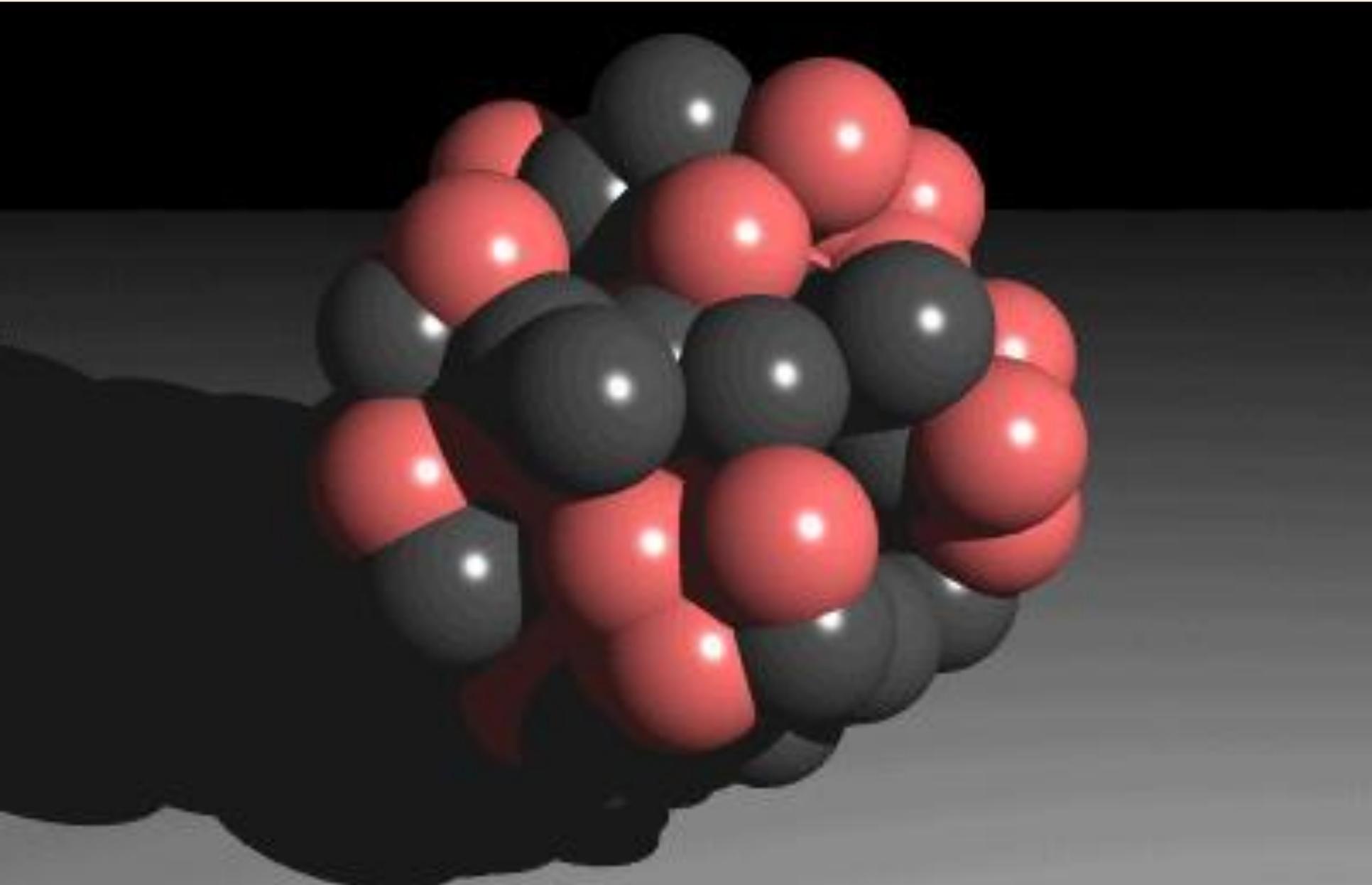
# ЭЛЕМЕНТЫ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ

# Протонно-нейтронная модель ядра

В 1932 году русский физик Иваненко и немецкий физик Гейзенберг независимо друг от друга предложили протонно-нейтронную модель ядра. Согласно этой модели, атомное ядро состоит из **протонов и нейтронов**. Ядерные частицы получили название **НУКЛОНЫ<sup>2</sup>**.



# Модель ядра



# Характеристики протона:

- время жизни свободного протона  $> 10^{32}$  лет
- заряд  $q_p = 1.6 \cdot 10^{-19}$  Кл;
- масса  $m_p = 1 \text{ а.е.м.} = 1.6724 \cdot 10^{-27}$  кг = 938.3 МэВ;
- спиновое число  $s = 1/2$ ;
- собственный магнитный момент

$$\mu_p = +2.79 \mu_N$$

$$\mu_N = e\hbar / 2m_p = 5.05 \cdot 10^{-27} \text{ Дж/Т} \text{ – ядерный}$$

# Характеристики нейтрона:

- время жизни свободного нейтрона 12 мин., схема распада  $n \rightarrow p + e^{-} + \bar{\nu}$  ;
- заряд  $q_n = 0$ ;
- масса  $m_n = 1.6748 \cdot 10^{-27}$  кг = 939.55 МэВ;
- спиновое число  $s=1/2$ ;
- собственный магнитный момент

$$\mu_n = -1.91 \mu_J;$$

Знак «—» показывает, что магнитные моменты протона и нейтрона антипараллельны.

Каждое ядро содержит  $Z$  протонов и  $N$  нейтронов.  $Z$  - зарядовое число равное порядковому номеру элемента в таблице Менделеева.

Суммарное число протонов и нейтронов в ядре - массовое число  $A$ :

$$A = Z + N$$

Обозначение ядер:



Изотопы – это ядра с одинаковым числом протонов  $Z$ , но различным количеством нейтронов  $N$ . Например, водород имеет три изотопа:

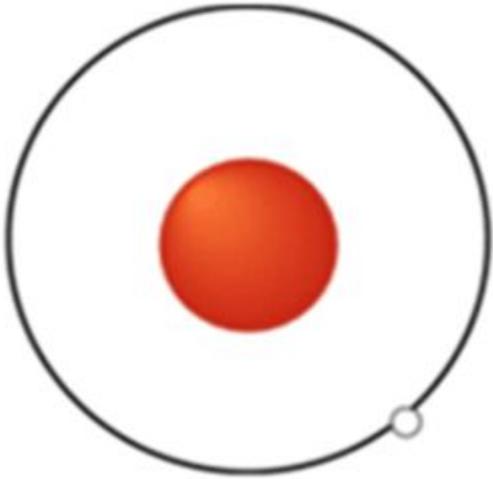
${}_1\text{H}^1$  – обычный водород, протий ( $Z=1$ ,  $N=0$ )

${}_1\text{H}^2$  – тяжелый водород: дейтерий  ${}_1\text{D}^2$  ( $Z=1$ ,  $N=1$ ).

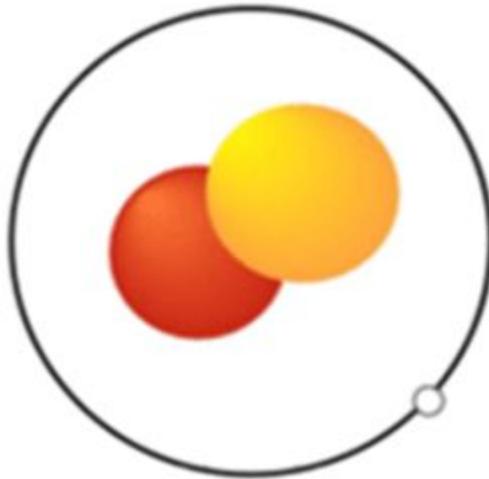
${}_1\text{H}^3$  – сверхтяжелый водород: тритий  ${}_1\text{T}^3$  ( $Z=1$ ,  $N=2$ ).

${}_1\text{H}^1$  и  ${}_1\text{H}^2$  – стабильны,  ${}_1\text{H}^3$  – радиоактивен.

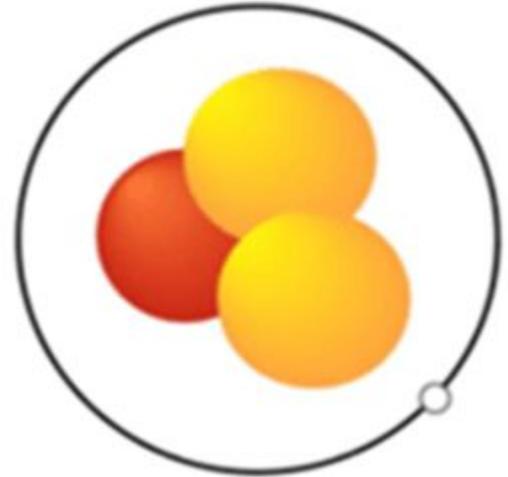
${}^1_1\text{H}^1$



${}^2_1\text{D}^2$



${}^3_1\text{T}$



**Изобары** – атомные ядра различных элементов, имеющие одинаковые массовые числа.

**Изотоны** – ядра с одинаковым числом нейтронов. Например  ${}_{7}\text{N}^{14}$  и  ${}_{6}\text{C}^{13}$ .

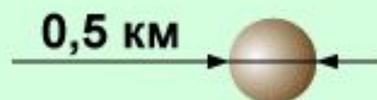
**Изомеры** – радиоактивные ядра с одинаковыми  $Z$  и  $A$ , но различными периодами полураспада.

МАССА ПРОТОНА ИЛИ НЕЙТРОНА  
В 1840 РАЗ БОЛЬШЕ МАССЫ ЭЛЕКТРОНА



ПОЭТОМУ ПРАКТИЧЕСКИ ВСЯ МАССА  
АТОМА СОСРЕДОТОЧЕНА В ЕГО ЯДРЕ

ПЛОТНОСТЬ ЯДЕРНОГО ВЕЩЕСТВА  
ОГРОМНА -  $100 \times 10^6$  ТОНН В  $1 \text{ см}^3$

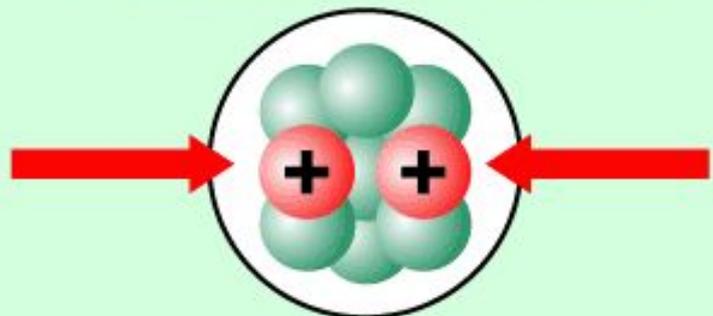


ШАР, СОСТОЯЩИЙ ИЗ ЯДЕРНОГО ВЕЩЕСТВА,  
ДИАМЕТРОМ 0,5 км РАВЕН ПО ВЕСУ ЗЕМНОМУ ШАРУ

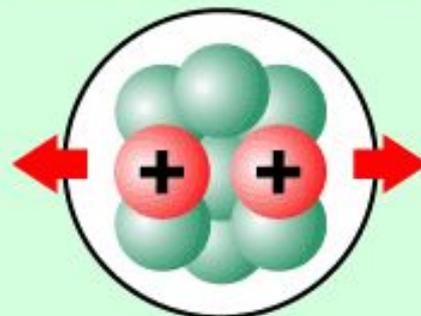


## СИЛЫ, ДЕЙСТВУЮЩИЕ В ЯДРЕ

МЕЖДУ ЧАСТИЦАМИ, ВХОДЯЩИМИ В ЯДРО,  
ДЕЙСТВУЮТ ОСОБЫЕ СИЛЫ ВЗАИМНОГО  
ПРИТЯЖЕНИЯ - ЯДЕРНЫЕ СИЛЫ



МЕЖДУ ПРОТОНАМИ ЯДРА, ЭЛЕКТРИЧЕСКИ  
ОДНОИМЕННО ЗАРЯЖЕННЫМИ ЧАСТИЦАМИ,  
ДЕЙСТВУЮТ СИЛЫ ВЗАИМНОГО ОТТАЛКИВАНИЯ



ПО СВОЕЙ ВЕЛИЧИНЕ ЯДЕРНЫЕ СИЛЫ ВЗАИМНОГО ПРИТЯЖЕНИЯ ОГРОМНЫ  
И ЗНАЧИТЕЛЬНО ПРЕВОСХОДЯТ СИЛЫ ВЗАИМНОГО ОТТАЛКИВАНИЯ ПРОТОНОВ

# Ядерные силы

Протоны в ядре отталкиваются кулоновскими силами. Это не приводит к разрушению ядер, так как между нуклонами в ядре действуют ядерные силы неэлектрической природы. Взаимодействие нуклонов в ядре названо сильным взаимодействием.

# Свойства ядерных сил

1) не зависят от заряда

нуклонов;

2) короткодействующие

(действуют на расстояниях, не превышающих  $2 \cdot 10^{-15}$  м);

3) насыщенные (удерживают

ограниченное число

нуклонов);

4) нецентральные (действуют

# Энергия связи ядра

Энергия, которую надо затратить, чтобы расщепить ядро на отдельные нуклоны, называется энергией связи атомного ядра. Энергия связи ядра в момент слияния нуклонов выделяется в виде излучения.

Из закона взаимосвязи массы и

$$W_{\text{энергии}} = \Delta m c^2$$

$\Delta m$  – дефект массы  
ядра.

**Дефект массы ядра - это разность между суммарной массой частиц, составляющих ядро, и массой целого ядра  $M_{\text{я}}$  :**

$$\Delta m = Zm_{\text{я}} + (A - Z)m_{\text{n}} - M$$

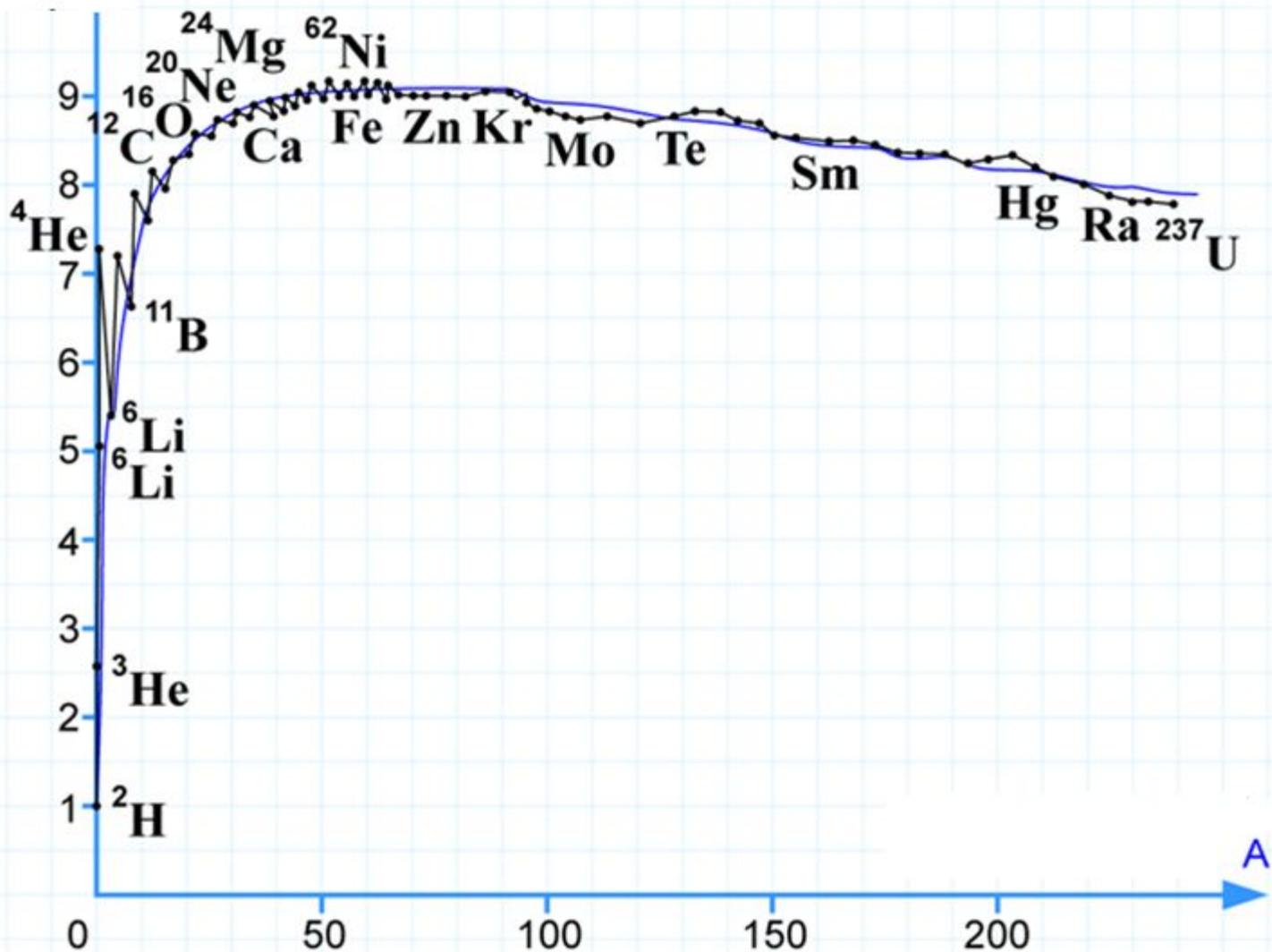
Энергия связи,  
приходящаяся на один  
нуклон, называется  
удельной энергией

СВЯЗИ:

$$\delta W = \frac{W_{св}}{A}$$

# Удельная энергия связи ядер ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ

$\delta W$ , МэВ/нуклон



Из графика видно, что:

у ядер с  $0 < A < 40$  удельная энергия связи резко возрастает с ростом  $A$ .

у ядер с массовым числом  $40 < A < 100$  удельная энергия связи максимальна;

у ядер с  $A > 100$  удельная энергия связи плавно убывает с ростом  $A$ ;

## Способы высвобождения внутриядерной энергии:

1. Деление тяжелых ядер (цепная реакция)
2. Синтез легких ядер (термоядерная реакция).

# Спин ядра

**Это собственный момент импульса ядра — векторная сумма собственных и орбитальных моментов импульса нуклонов.**

# Магнитный момент ядра

пропорционален спину ядра.

Единица магнитных моментов ядер

- ядерный магнетон:

$$\mu_{\text{я}} = \frac{e\hbar}{2m_p}$$

Он примерно в 660 раз меньше магнетона Бора, поэтому магнитные свойства атомов определяются в основном магнитными свойствами его электронов.

# Радиоактивность

Это явление самопроизвольного испускания химическими элементами излучения со значительной проникающей способностью и ионизирующими свойствами.

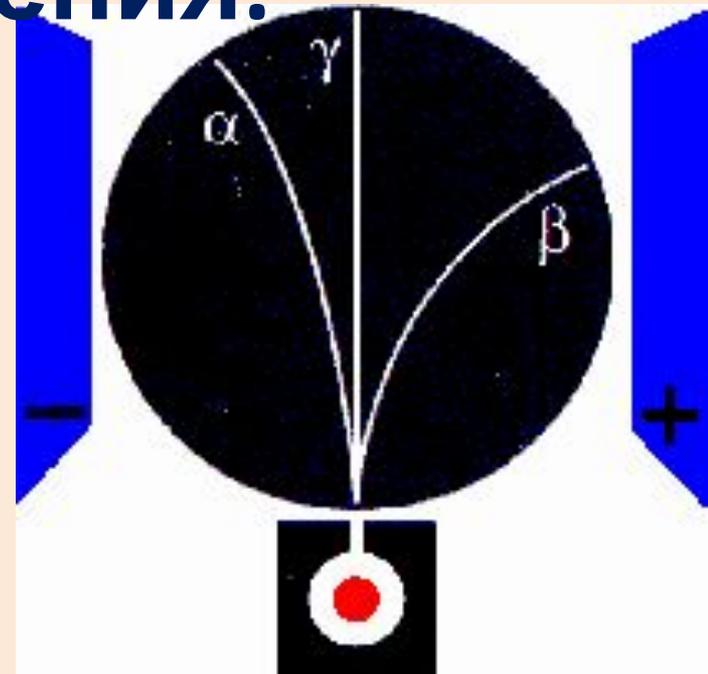
Радиоактивными являются все элементы с порядковым номером

$Z > 83$ .

# Излучение радиоактивных веществ состоит из трех компонент:

$\alpha$ -,  $\beta$ - и  $\gamma$ -излучения.

$\alpha$ - и  $\beta$ -лучи отклоняются  
магнитным полем в  
противоположные  
стороны, а  $\gamma$ -лучи не  
отклоняются совсем.



$\alpha$  - лучи

$\gamma$  - лучи

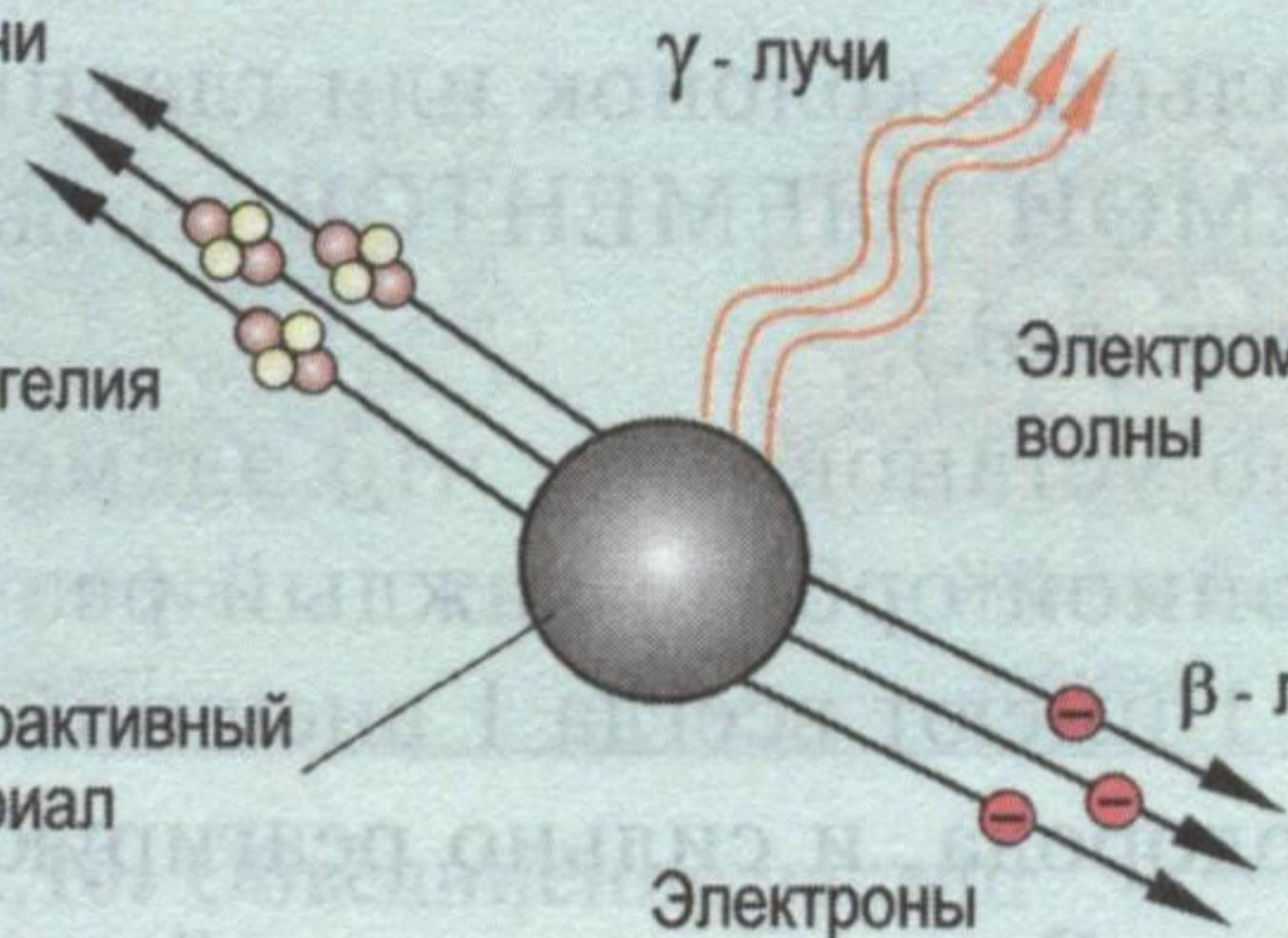
Ядра гелия

Электромагнитные  
волны

Радиоактивный  
материал

$\beta$  - лучи

Электроны

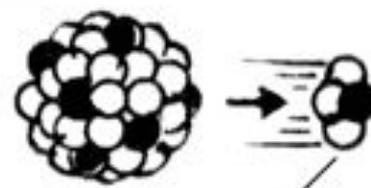
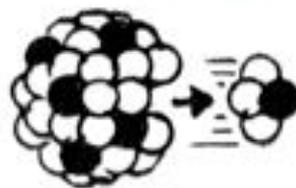


# Основные типы ядерных превращения, приводящие к испусканию радиоактивных излучений

## Альфа-распад

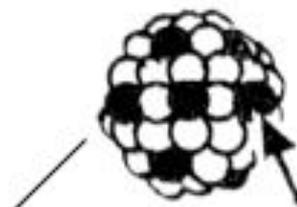


Ядро атома



Альфа-частица

## Бета-распад



Ядро атома

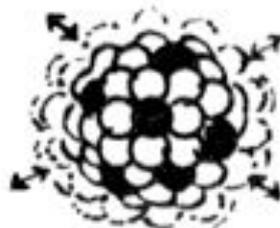
Нейтрон



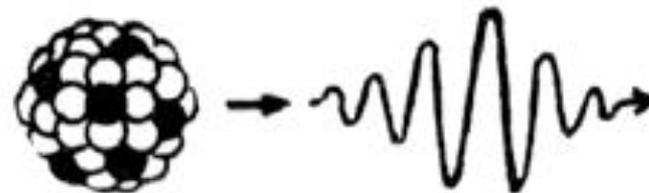
Протон

$e^-$

## Гамма-излучение



Возбуждённое ядро



Гамма-квант

Правила смещения Содди при  $\alpha$ - и

$\beta$ -распаде

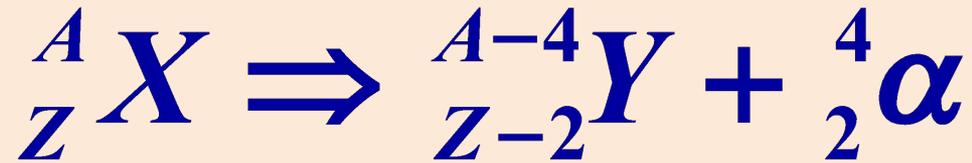
**Сумма зарядовых (массовых)**

**чисел до распада равняется**

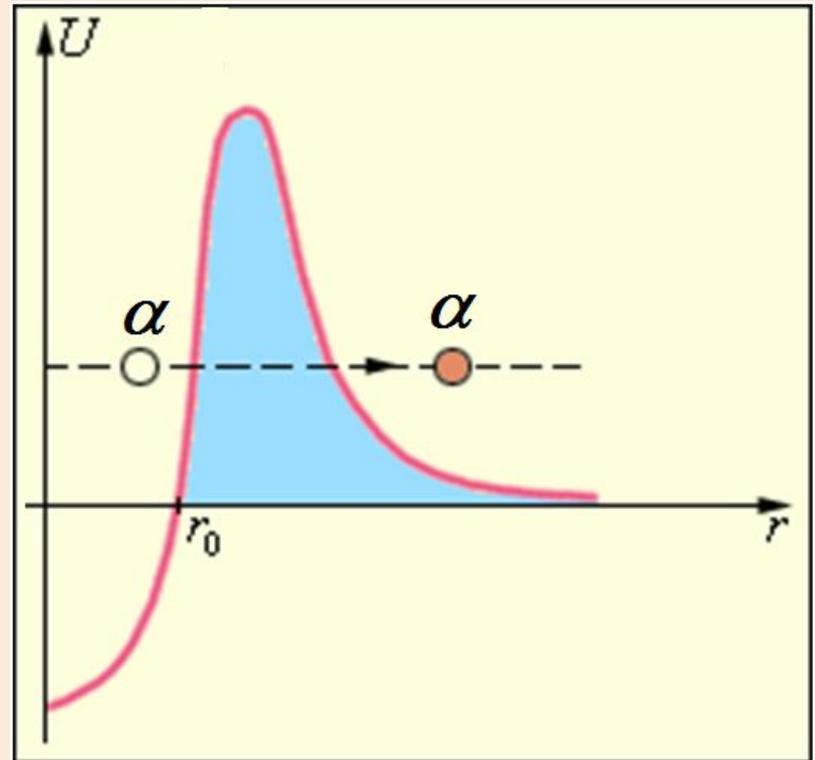
**сумме зарядовых (массовых)**

**чисел после распада.**

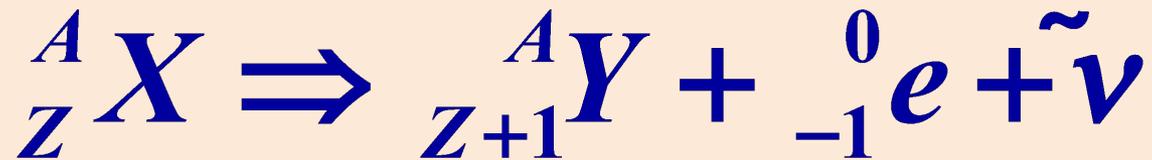
# α-распад



Возникает в результате туннелирования α-частицы сквозь потенциальный барьер, создаваемый ядерными силами.



# β-распад



При β-распаде вместе с электроном испускается нейтральная частица – антинейтрино. Она имеет нулевой заряд, спин ½, почти нулевую массу покоя.

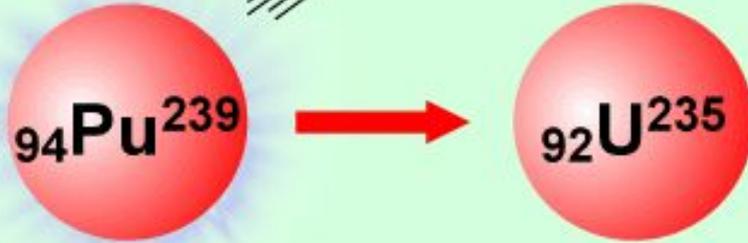
β -распад происходит в результате распада нейтрона внутри ядра по



# Примеры $\alpha$ - и $\beta$ -распадов

АЛЬФА - РАСПАД

АЛЬФА-ЧАСТИЦА

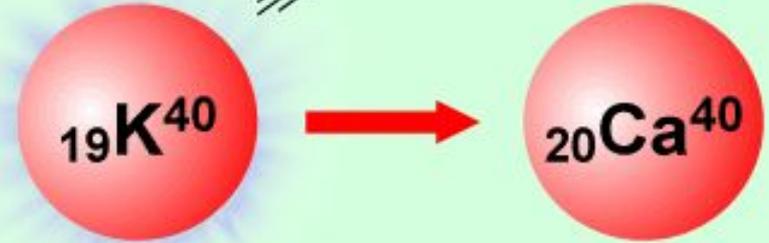


ЯДРО ПЛУТОНИЯ

ЯДРО УРАНА

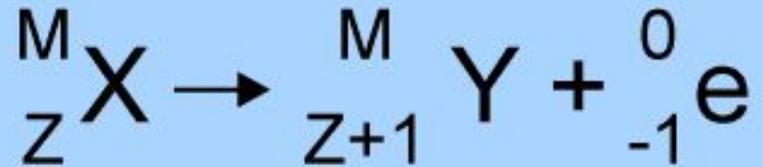
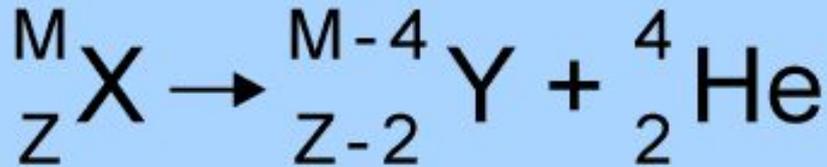
БЕТА - РАСПАД

ЭЛЕКТРОН

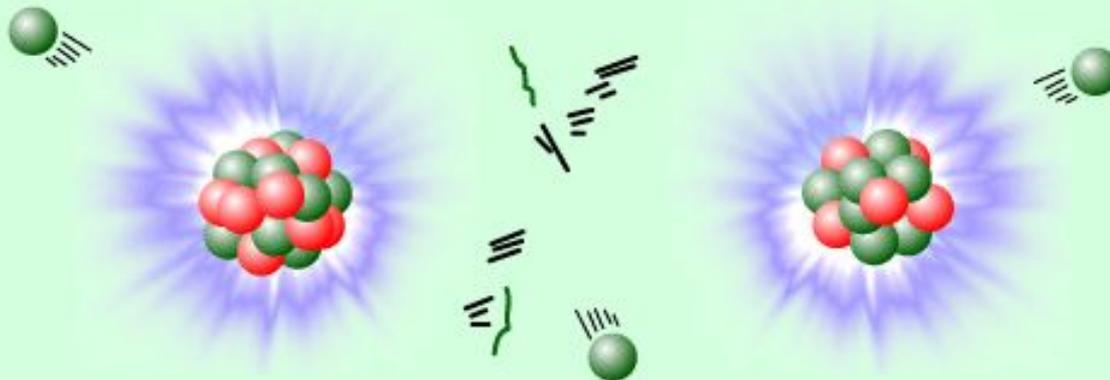


ЯДРО КАЛИЯ

ЯДРО КАЛЬЦИЯ



СПОНТАННОЕ ДЕЛЕНИЕ



# $\gamma$ -излучение

1.  $\gamma$ -излучение - это коротковолновые фотоны.
2. Возникает в результате  $\alpha$ - и  $\beta$ -распада.
3. Спектр линейчатый, что подтверждает дискретность энергетических уровней энергии нуклонов в ядре.
4. Испускается дочерним, а не матерински ядром.
5. Не описывается правилами смещения Содди.



# Закон радиоактивного

распада  
Количество распадов,

происходящих в данном  
количестве радиоактивного

элемента за 1 секунду,

называется активностью:

$$A = \frac{-dN}{dt}$$

**Активность пропорциональна  
числу ядер радиоактивного  
вещества на данный момент  
времени**

$$\frac{-dN}{dt} = \lambda N, \quad \frac{dN}{N} = -\lambda dt$$

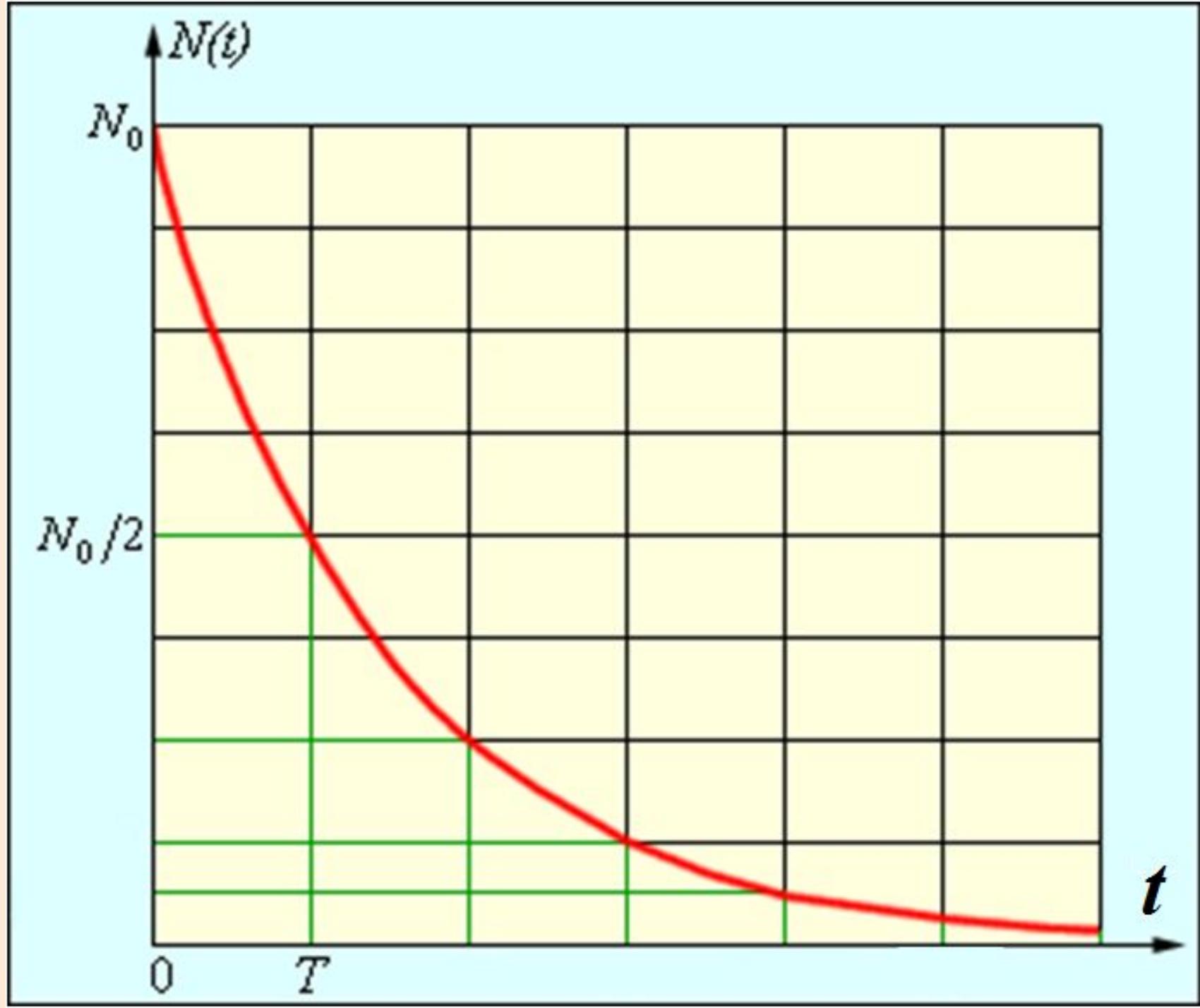
$$\ln N = -\lambda t + C, \quad N = N_0 \cdot e^{-\lambda t}$$

**$\lambda$  – постоянная распада**

Период полураспада  $T$  - время, за которое распадается половина ядер. Характеризует скорость распада.

Например: радий  ${}_{88}\text{Ra}^{226}$  имеет период полу-распада 1600 лет; торий  ${}_{90}\text{Th}^{231}$  25.64 часа; полоний  ${}_{84}\text{Po}^{212}$  -  $3 \cdot 10^{-7}$  с.

$$\frac{N_0}{2} = N_0 e^{-\lambda T}, \quad e^{\lambda T} = 2, \quad \lambda = \frac{\ln 2}{T}$$



# Приборы для регистрации радиоактивного излучения:

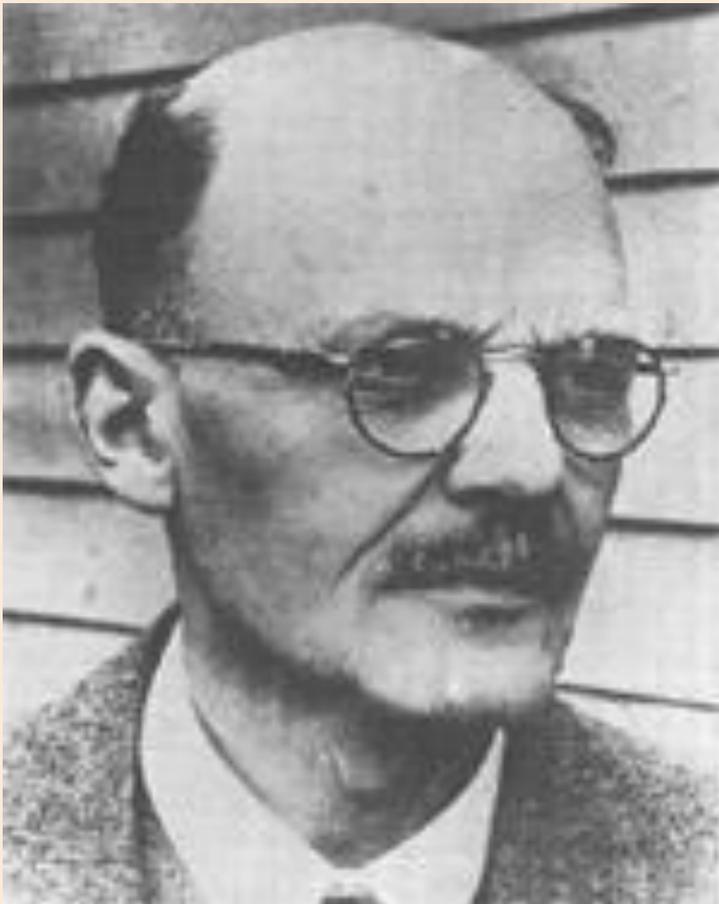
## 1. Электрорегистраторы:

сцинтилляционный счетчик,  
ионизационная камера,  
газоразрядный счетчик,  
полупроводниковый детектор;

## 2. Видеорегистраторы:

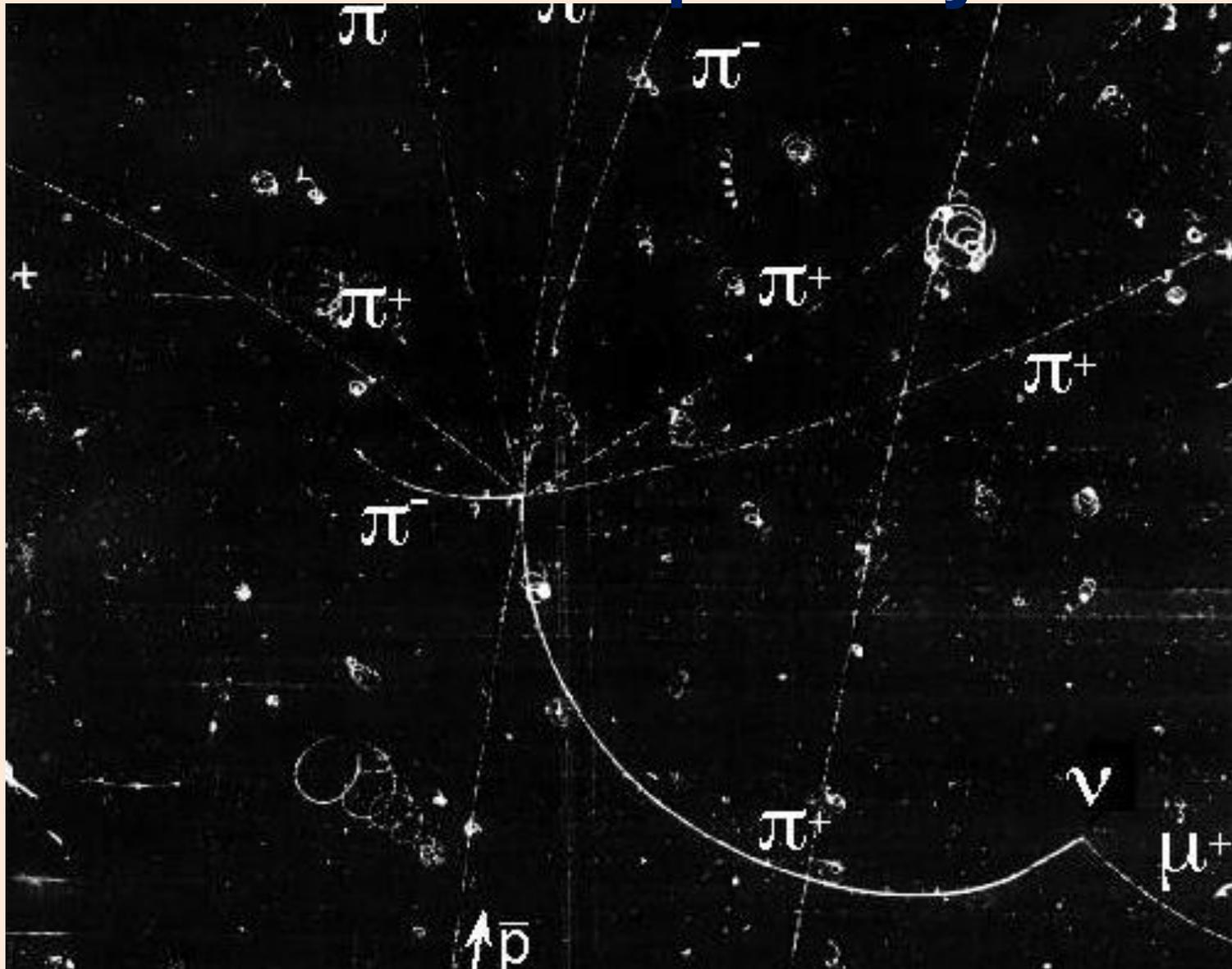
камера Вильсона, диффузионная  
камера, пузырьковая камера,  
фотоэмульсии.

# Счетчик Гейгера



Ханс Гейгер

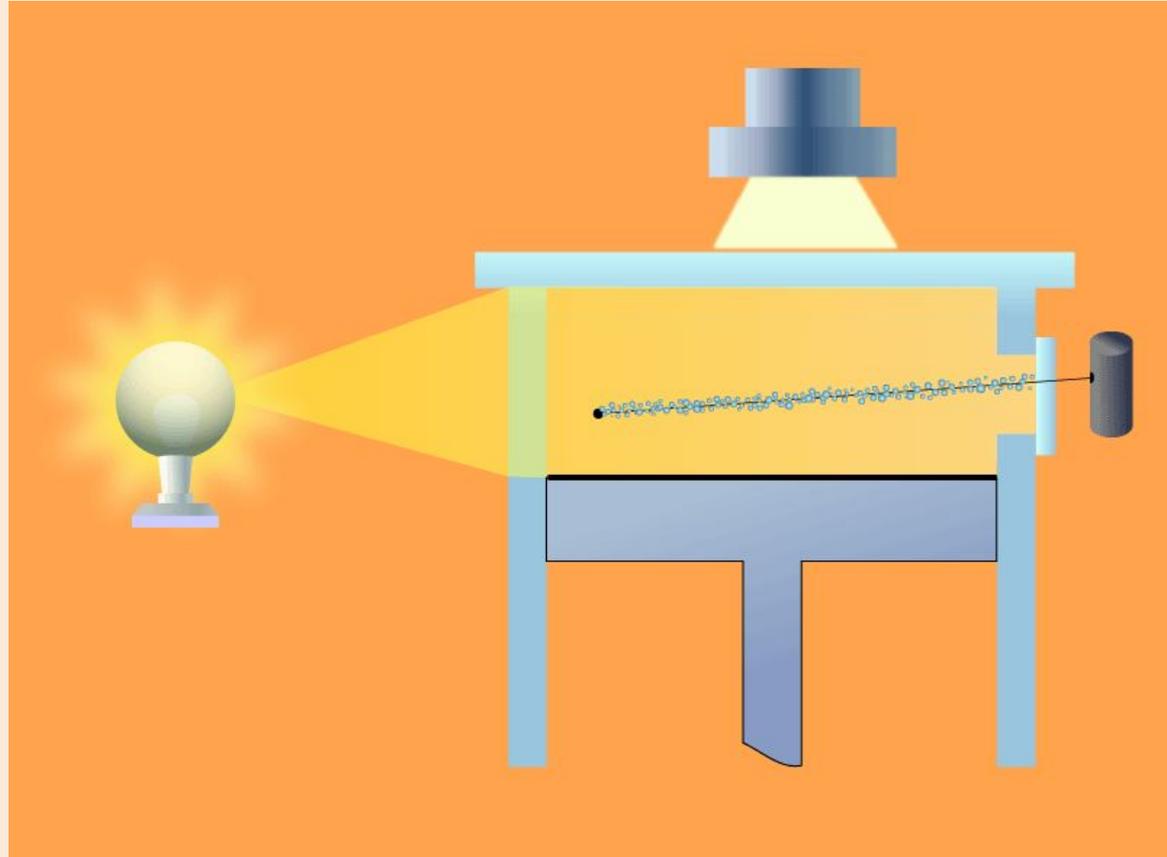
# Треки элементарных частиц в толстослойной фотоэмульсии



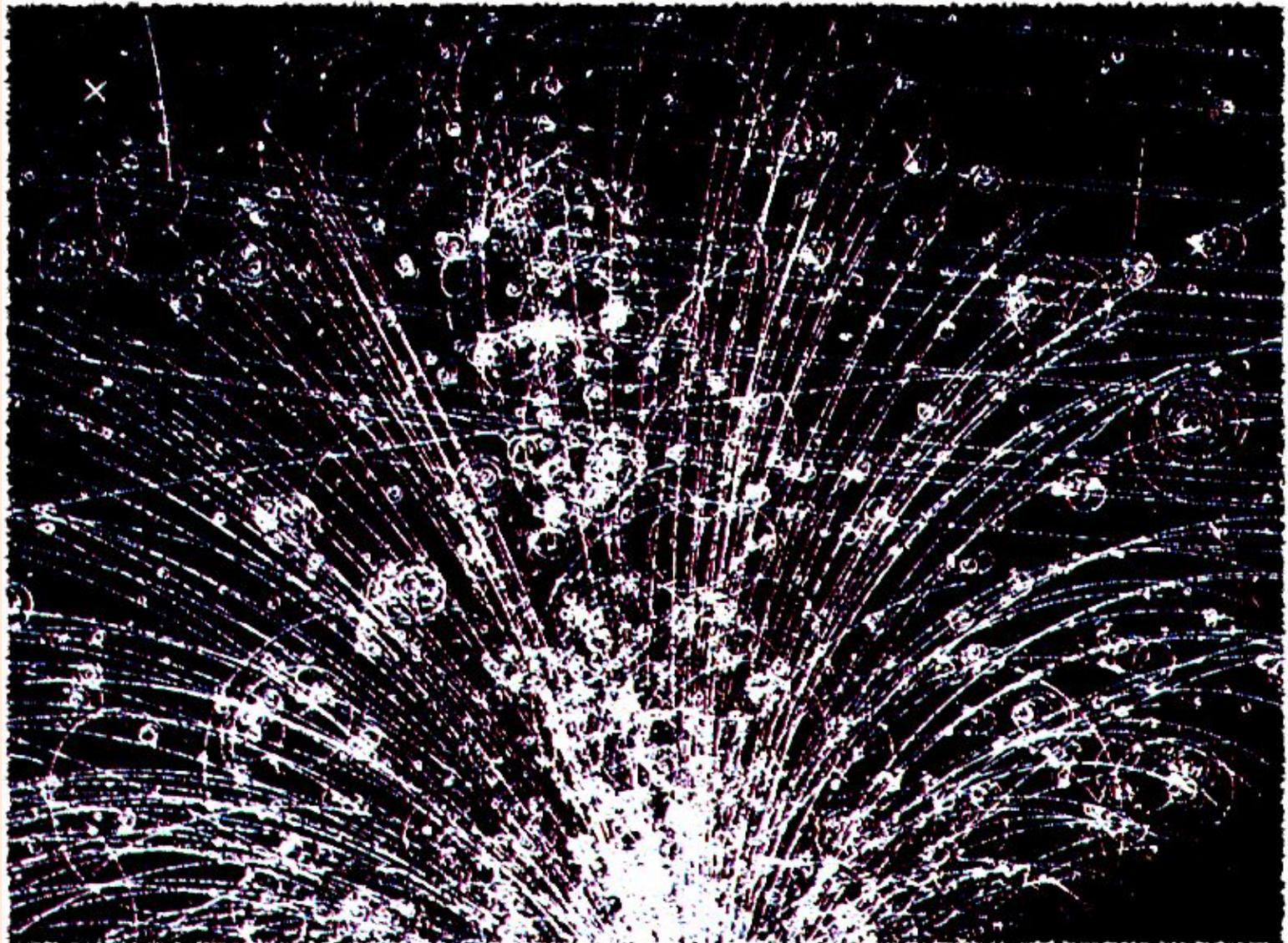
# Камера Вильсона



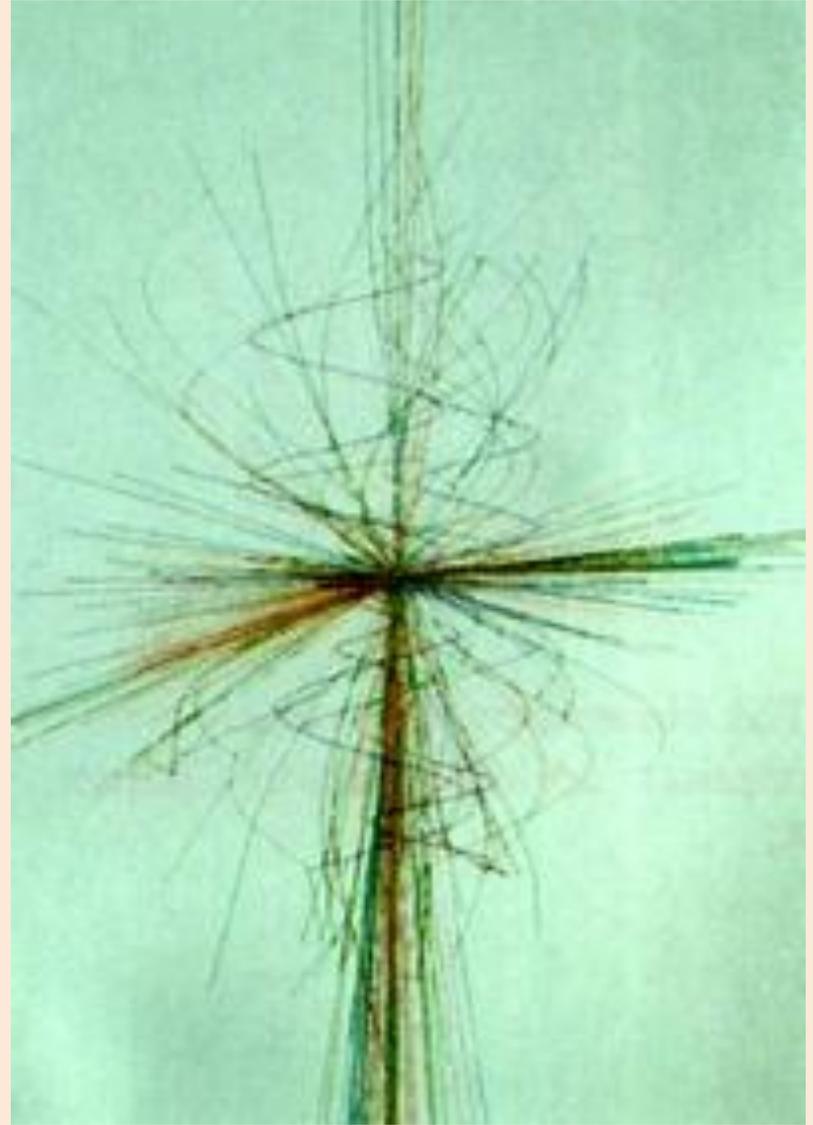
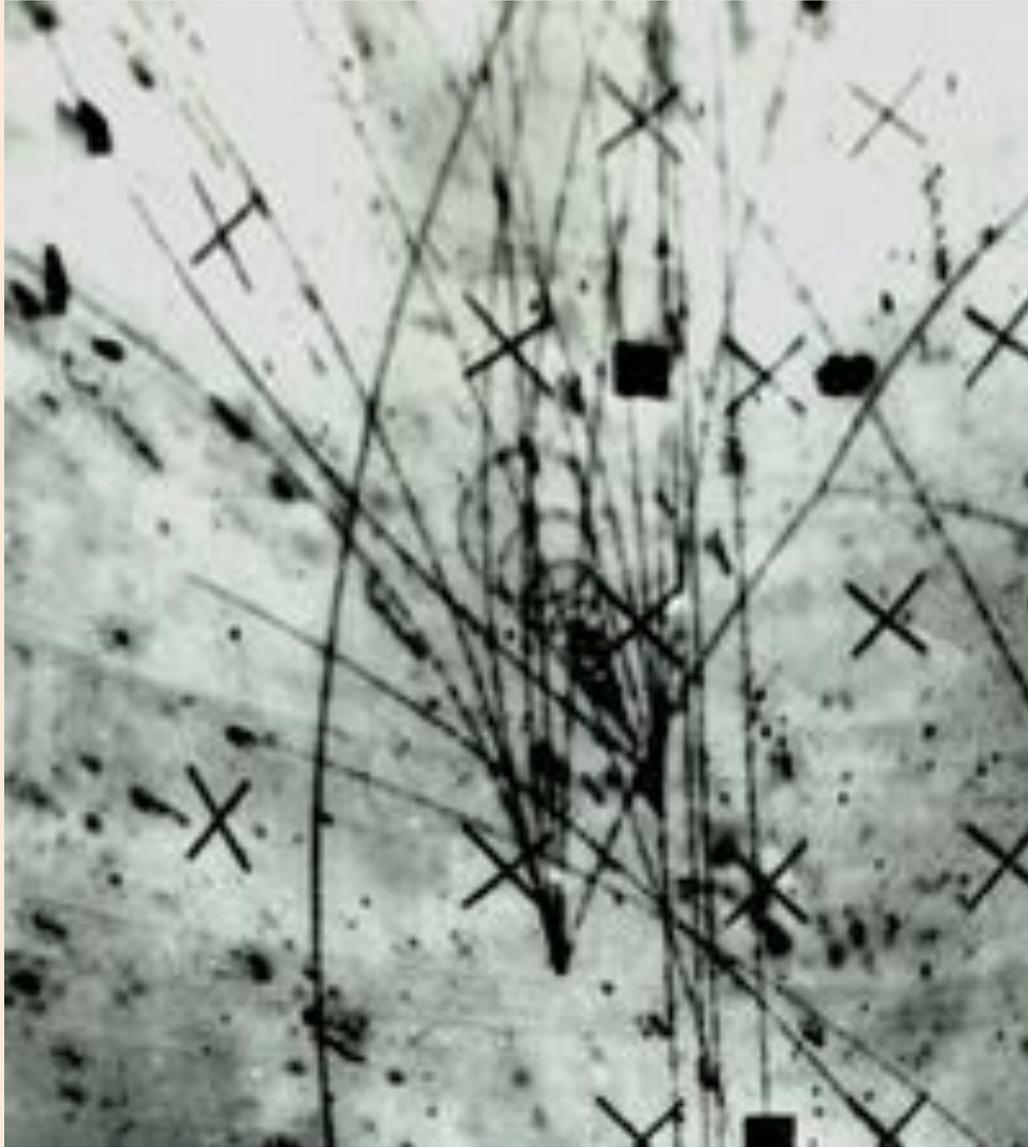
Чарльз Томсон  
Вильсон



# Треки частиц в камере



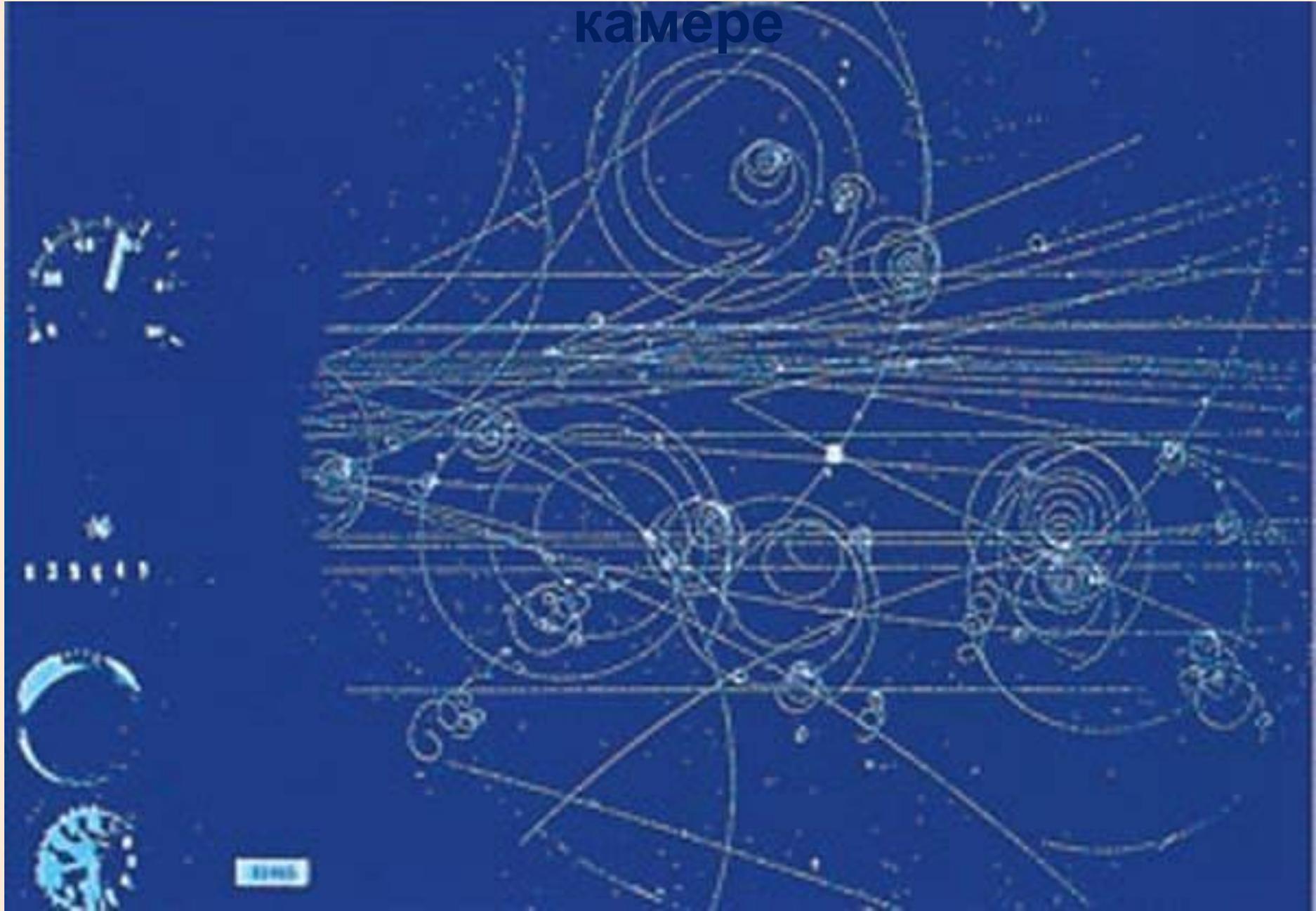
# Треки частиц в камере Вильсона



# Пузырьковая камера

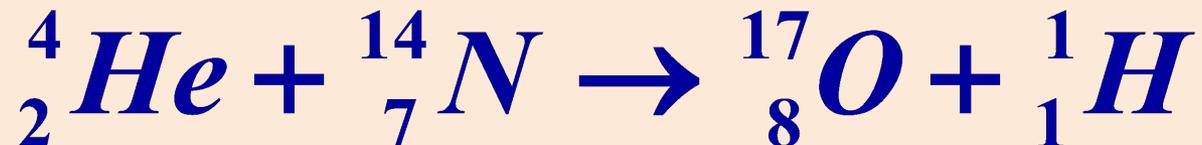


# Треки частиц в пузырьковой камере



# Ядерные реакции

Взаимодействие атомного ядра с элементарной частицей или с другим ядром, в результате которого ядро превращается в ядро другого элемента, называют ядерной реакцией. Впервые ядерную реакцию осуществил Резерфорд в 1919 г.



**Для ядерной реакции необходимо, чтобы частицы сблизилась на расстояние порядка  $10^{-15}$  м.**

**Ядерные реакции подчиняются законам сохранения энергии, импульса, электрического и барионного зарядов. Ядерные реакции могут протекать как с выделением, так и с поглощением кинетической энергии.**

# Цепная ядерная реакция деления

Цепная ядерная реакция деления – это реакция, при которой происходит размножение падающих частиц. Коэффициент размножения нейтронов  $k$ :

$$k = \frac{n_t}{n_{t-1}}$$

где  $n_{t-1}$  – число нейтронов предыдущего поколения,  $n_t$  – число нейтронов данного поколения.

Необходимое условие для развития цепной ядерной реакции :

$$k \geq 1$$

# Цепная ядерная реакция деления

(продолжение)

Реакция **самоподдерживающаяся**:  $k=1$ ;  
**развивающаяся**:  $k>1$ ; **затухающая**:  $k<1$ .

**Критическая масса** – минимальная масса  
делящегося вещества, необходимая для  
поддержания реакции.

Цепные реакции делятся на **управляемые** и  
**неуправляемые**.

Неуправляемая цепная реакция -- **атомная  
бомба**.

Управляемая цепная реакция -- **ядерный  
реактор**.

# Скорость развития цепной реакции деления

- Пусть  $T$  – среднее время жизни одного поколения нейтронов,  $N$  – число нейтронов в данном поколении. В следующем поколении их число равно  $kN$ , т.е. число нейтронов за одно поколение

$$dN = kN - N = N(k - 1)$$

- Тогда скорость нарастания цепной реакции:

$$\frac{dN}{dt} = \frac{N(k - 1)}{T}$$

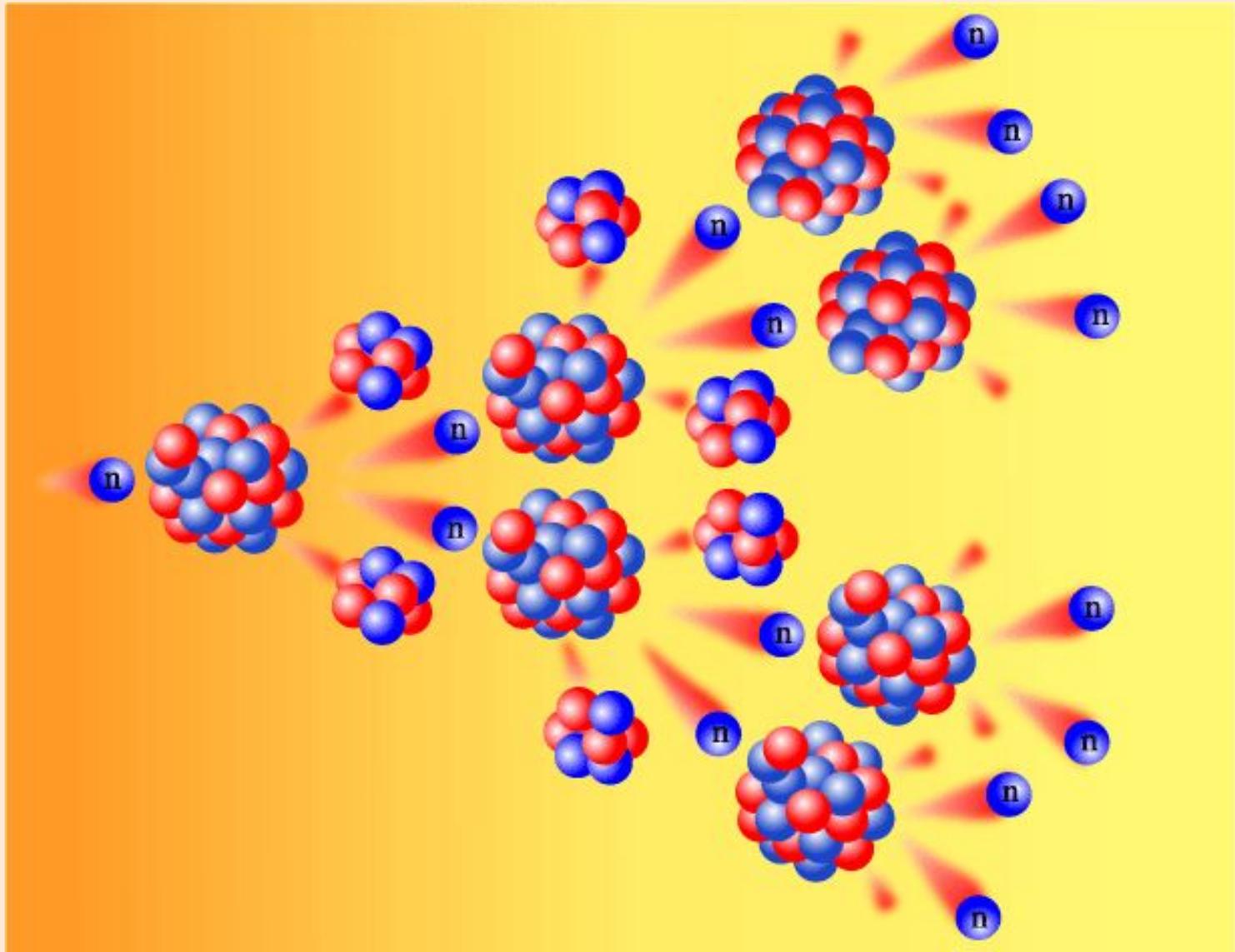
- Интегрируем:

$$\int \frac{dN}{N} = \frac{(k - 1)}{T} \int dt$$

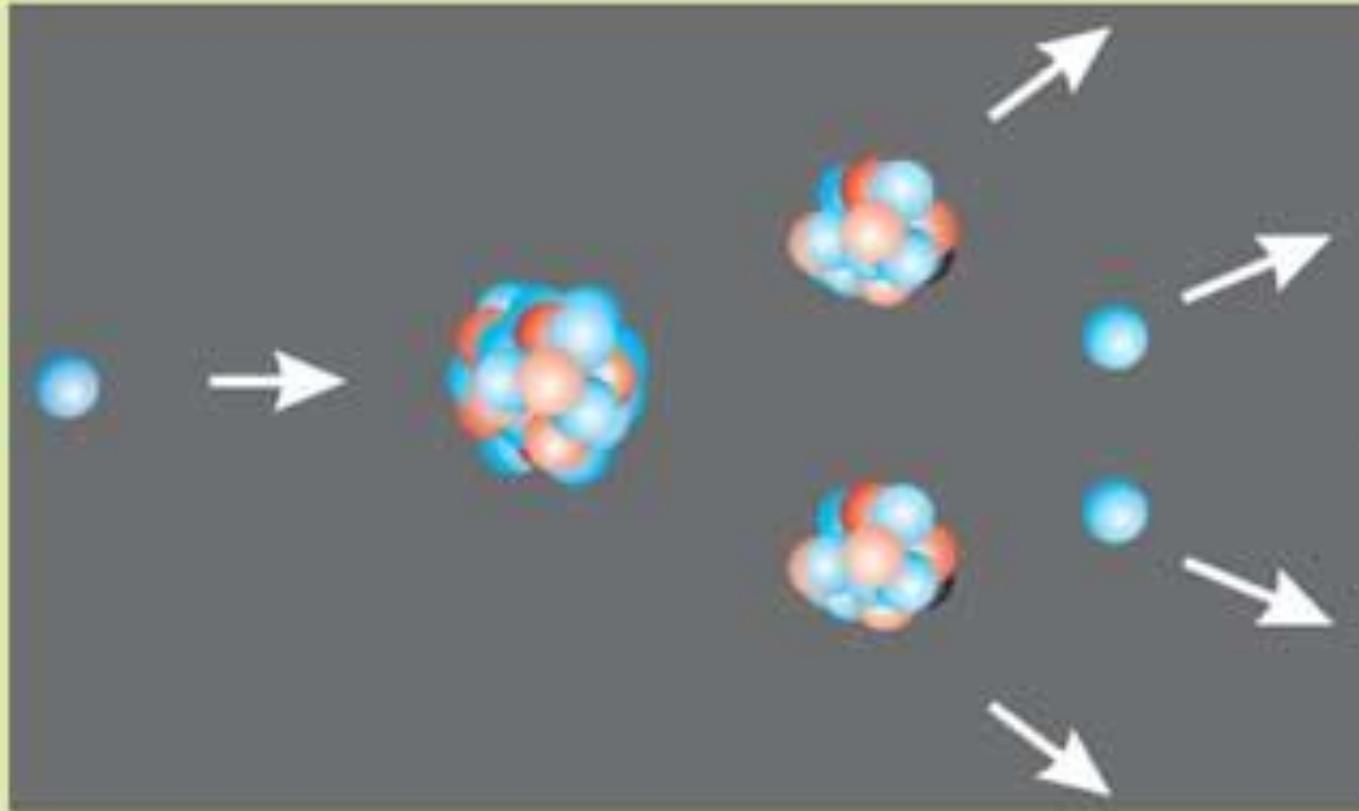
- Получаем:

$$N(t) = N_0 e^{\frac{k-1}{T}t}$$

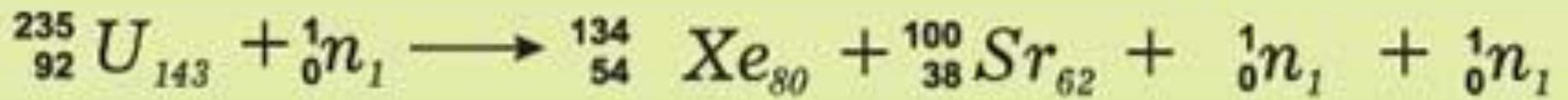
# Цепная реакция деления с $k=2$



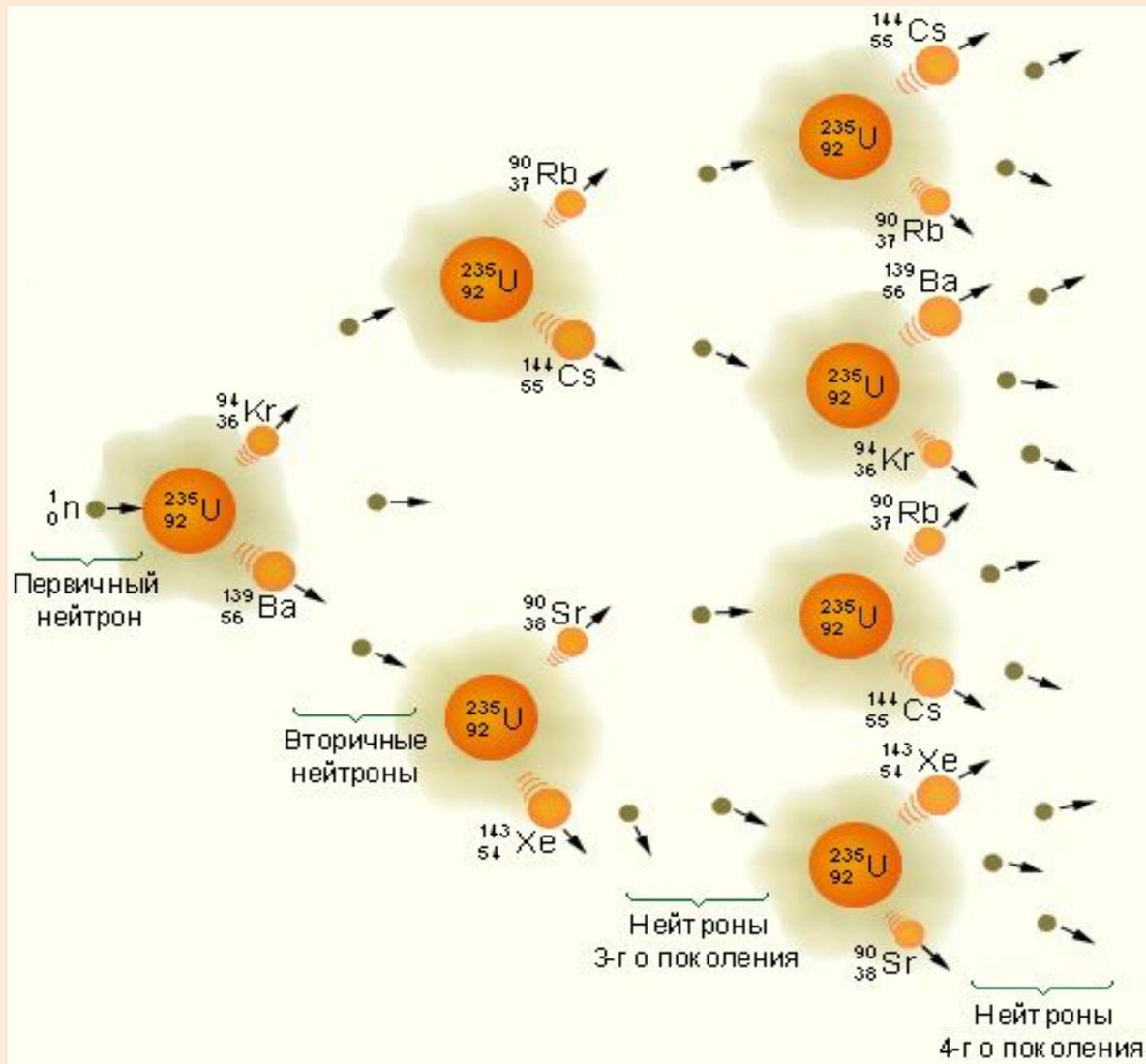
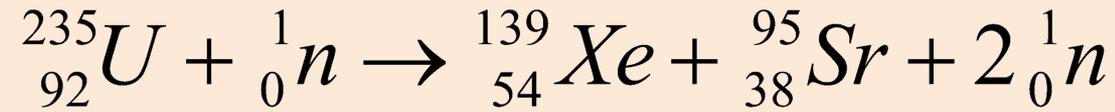
## Реакция деления ядра урана



$$\Delta E = 200 \text{ МэВ}$$



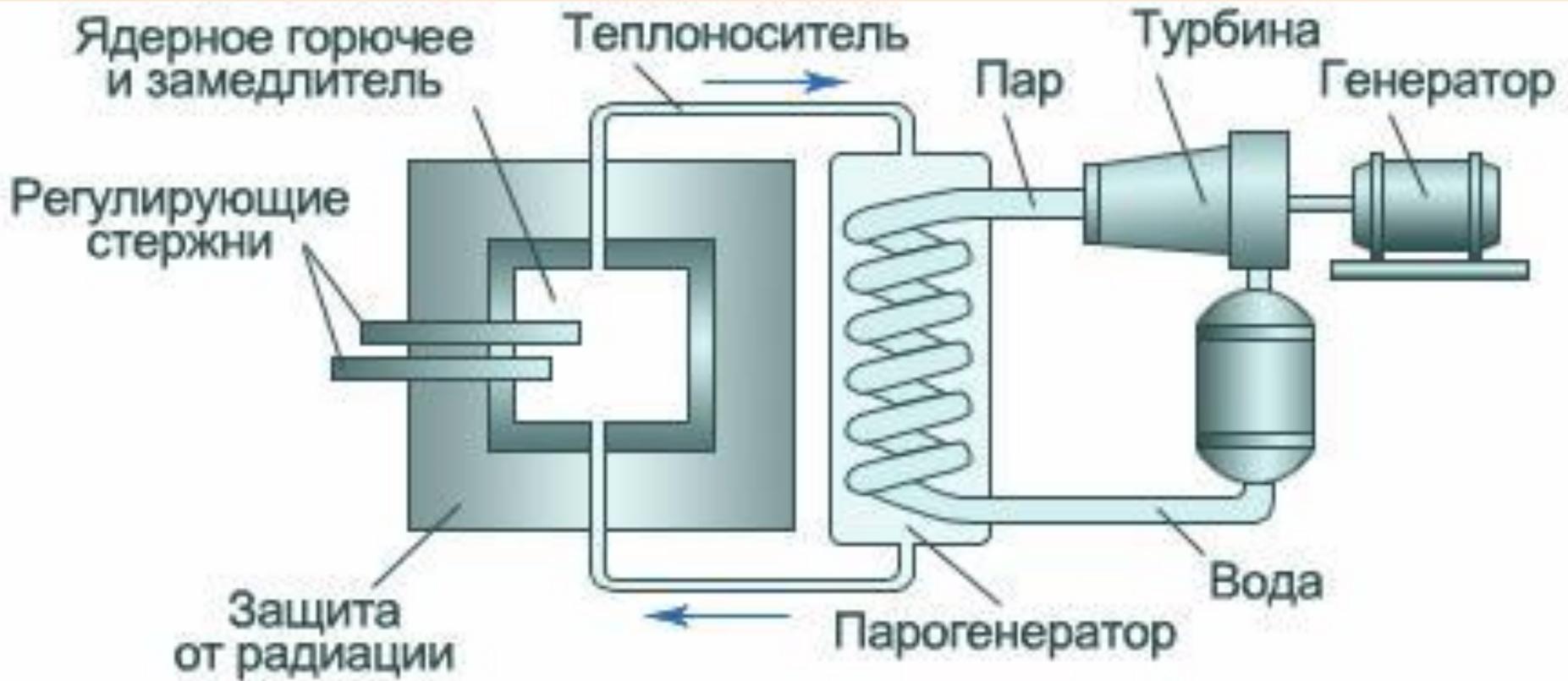
# Цепная ядерная реакция деления урана-235



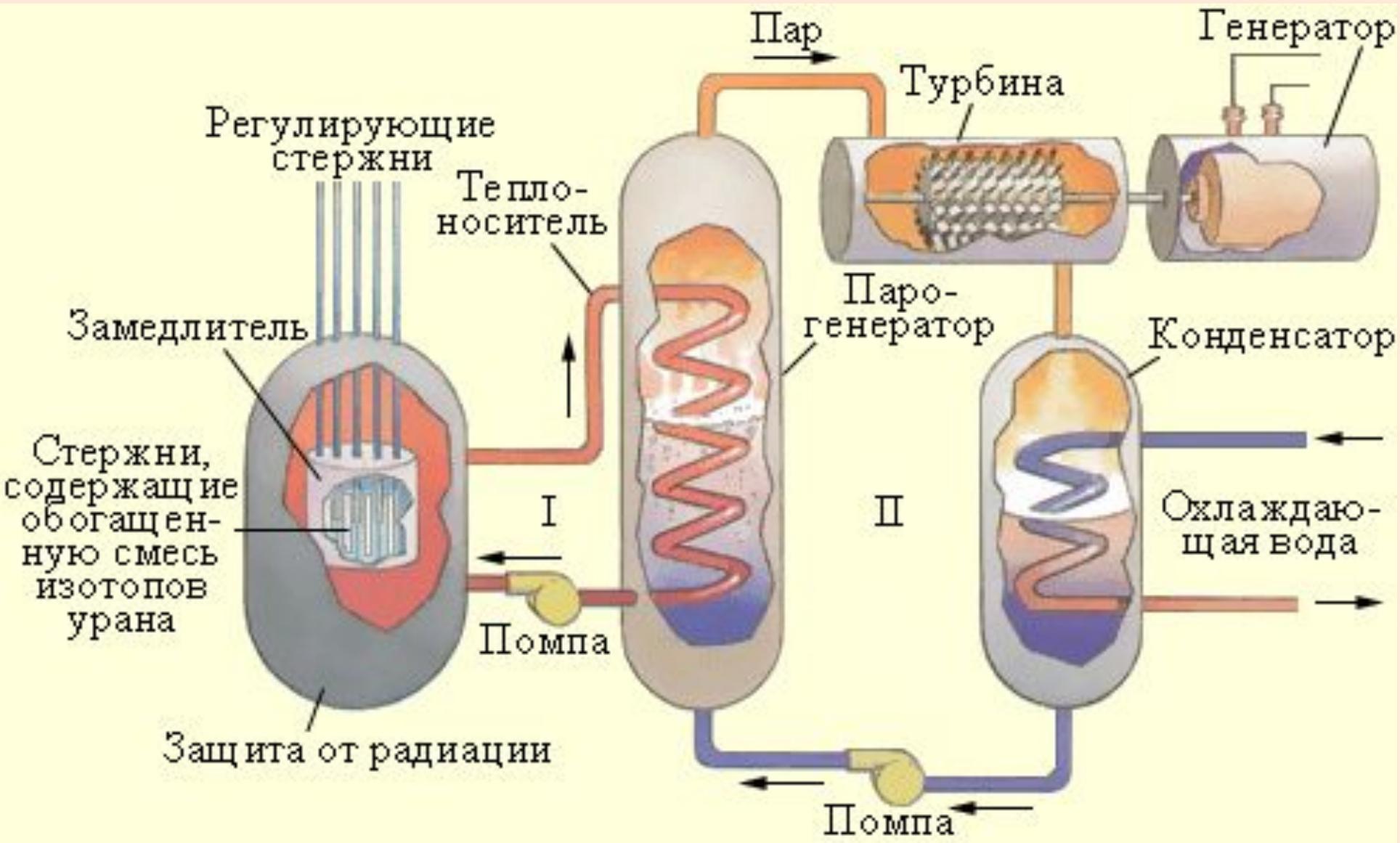
# Атомные электростанция



# Атомная электростанция

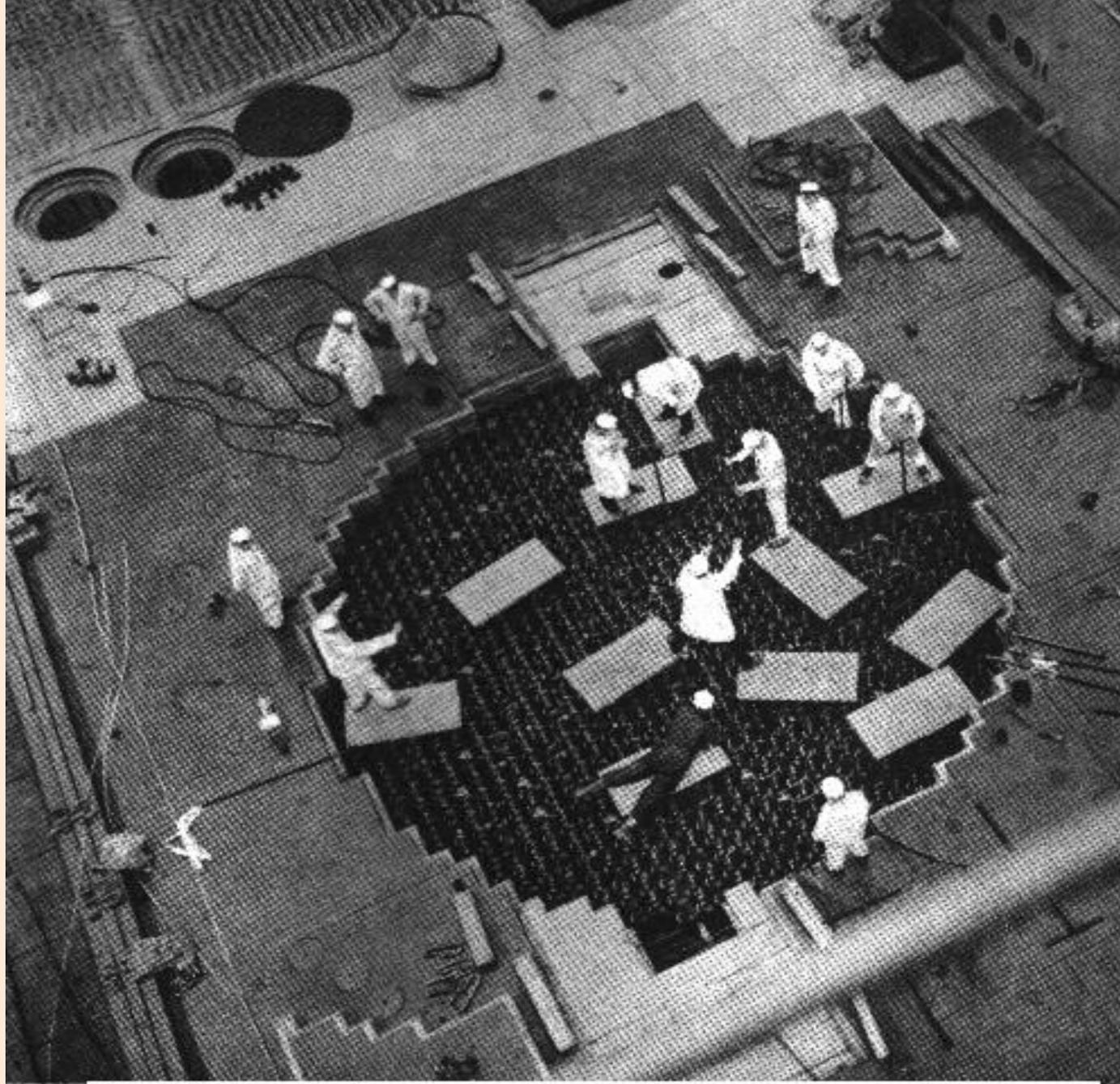


# Схема устройства ядерного реактора.



# Атомный реактор





**Рис. 54.** Атомный реактор Белоярской АЭС имени И. В. Курчатова при подготовке к пуску.

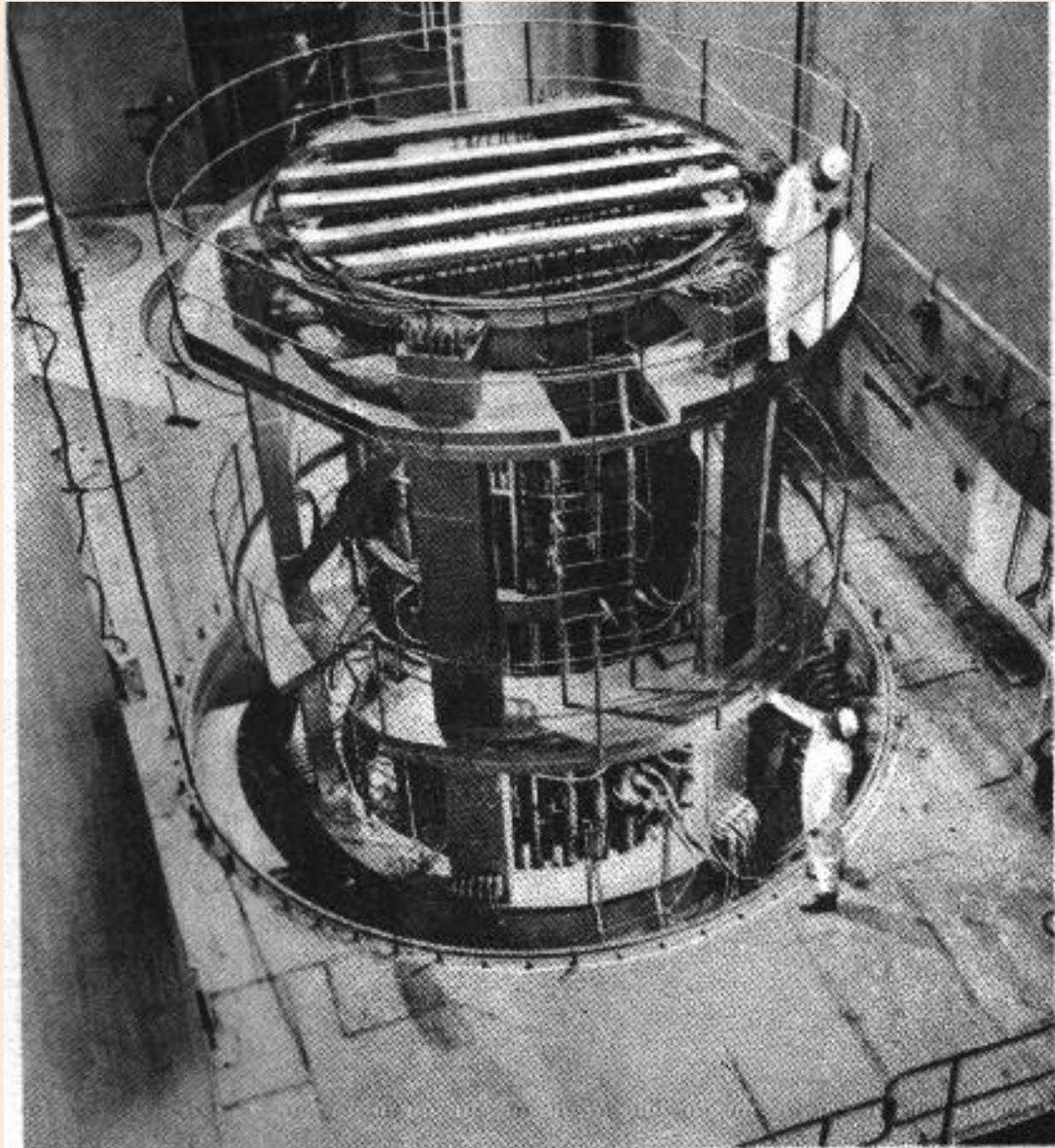
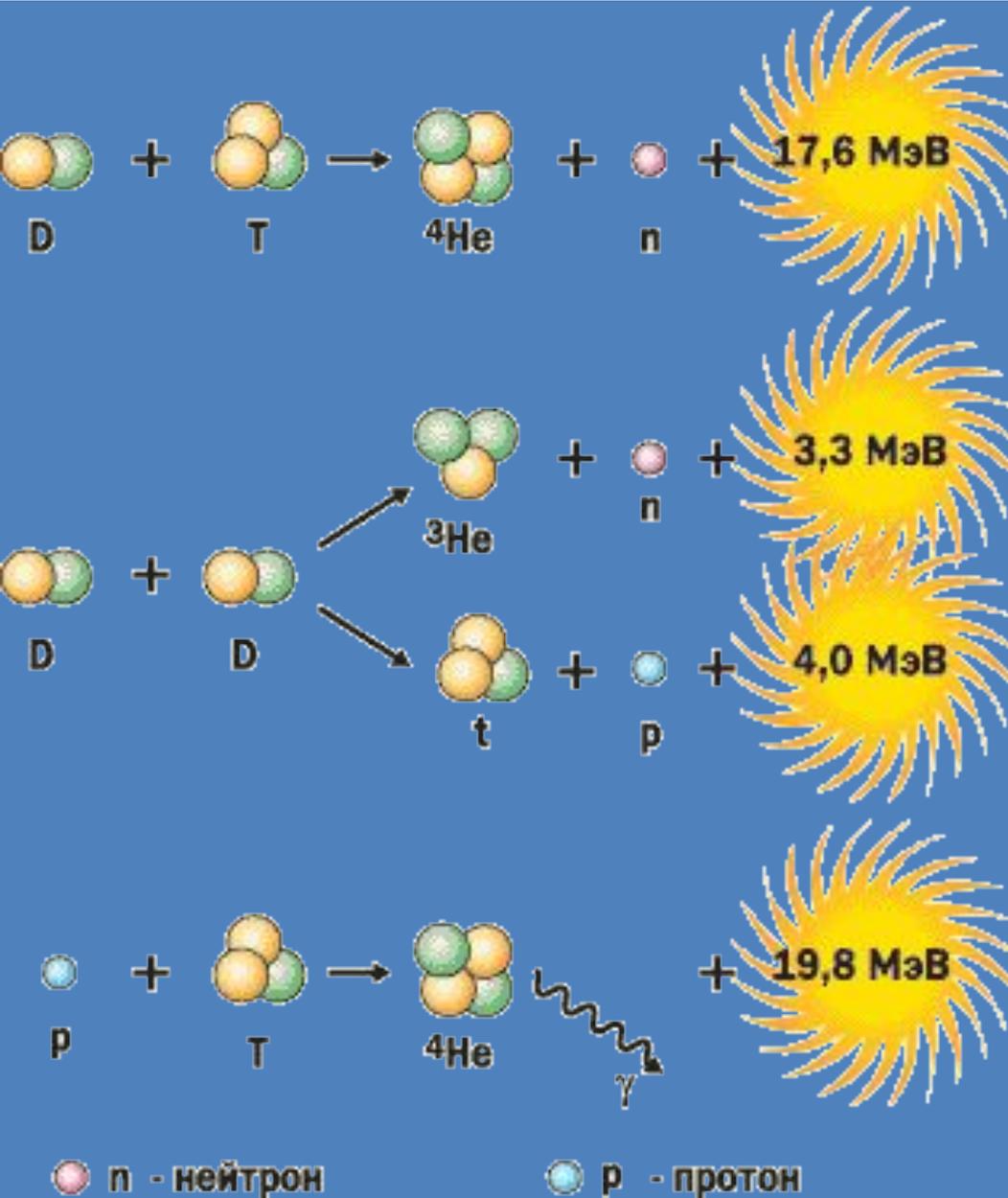


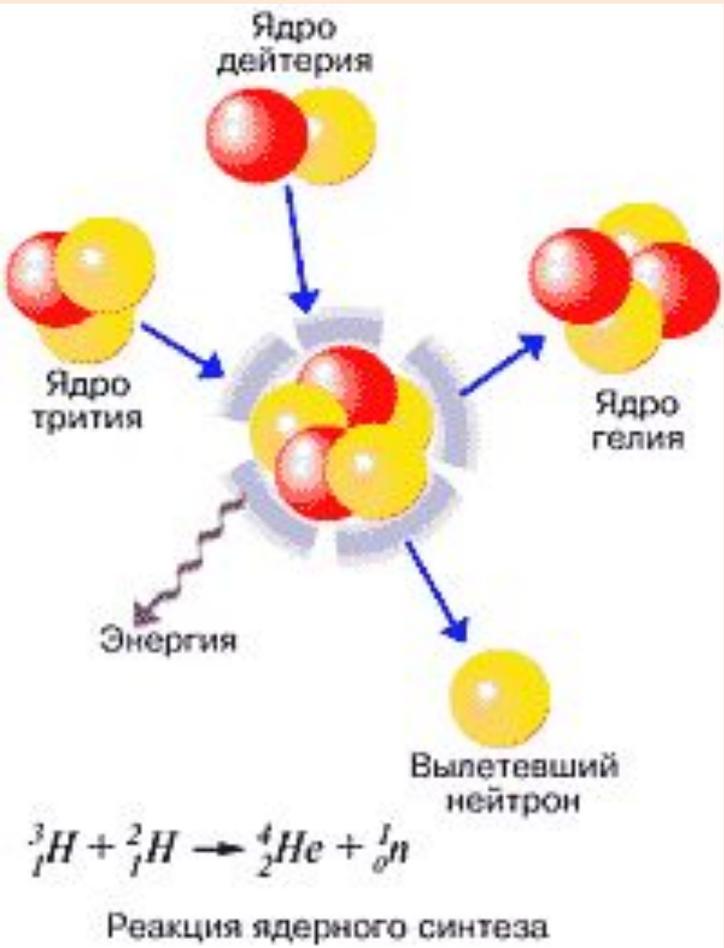
Рис. 56. Реактор Нововоронежской АЭС (подготовка к работе).

# Реакция синтеза атомных ядер



- Реакция синтеза – это образование путем слияния из легких ядер более тяжелых. Удельная энергия связи  $E_{\text{св}}$  резко увеличивается при переходе от H к He и Li, т.е. реакция синтеза должна сопровождаться выделением огромной энергии.

# Термоядерные реакции



Это ядерные реакции между легкими атомными ядрами, протекающие при очень высоких температурах ( $\sim 10^7$  К и выше). При этом вещество находится в состоянии полностью ионизованной плазмы. Необходимость высоких температур объясняется тем, что для слияния ядер в термоядерной реакции необходимо, чтобы они сблизилась на очень малое расстояние и попали в сферу действия ядерных сил. Этому сближению препятствуют кулоновские силы отталкивания, действующие между одноименно заряженными ядрами. Чтобы их преодолеть, ядра должны обладать очень большой кинетической энергией.

Выход ядерной реакции:

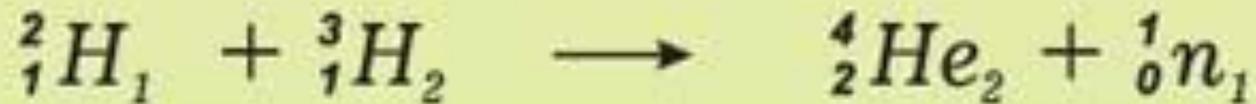


$$E = \Delta m \cdot c^2, \quad \Delta m = m_A + m_a - m_B - m_b$$

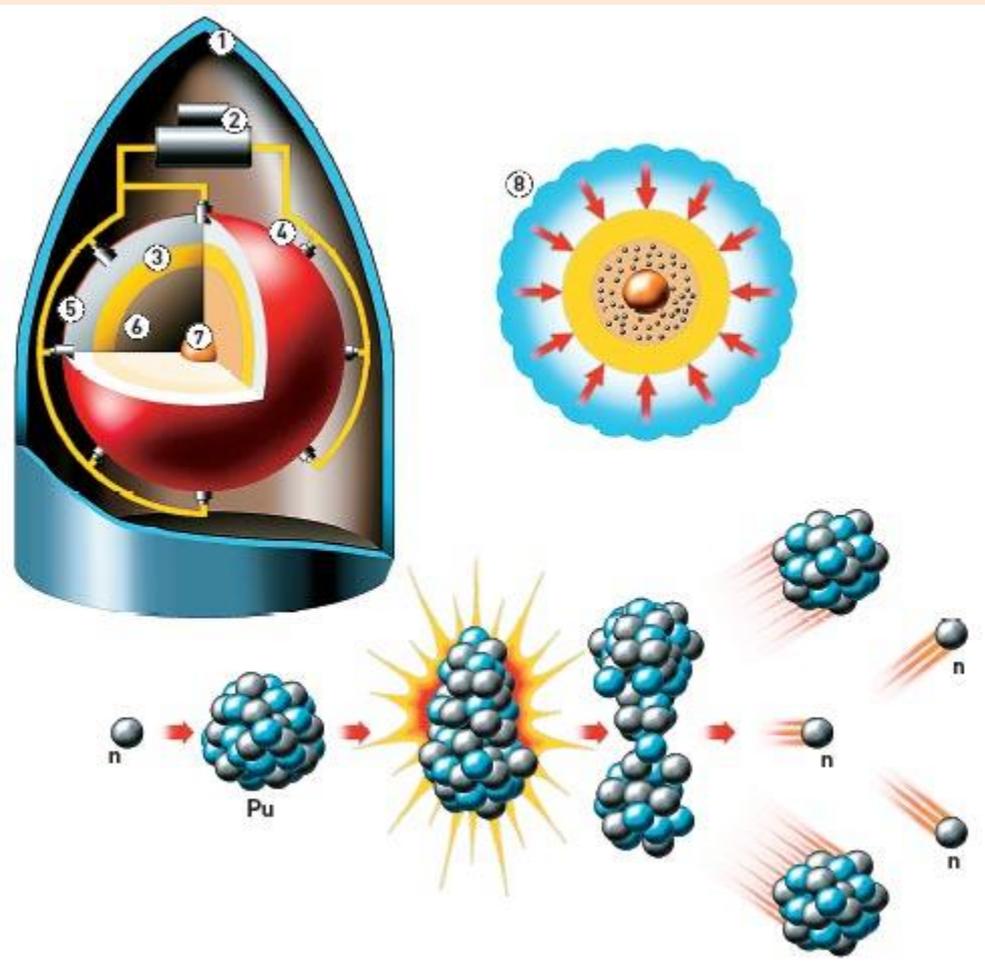
Реакция синтеза ядра гелия из ядер водорода:



$$\Delta E = 17,6 \text{ МэВ}$$

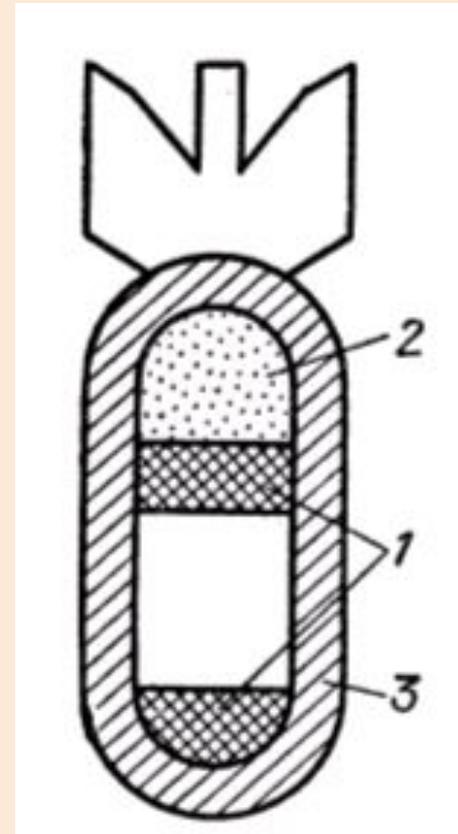
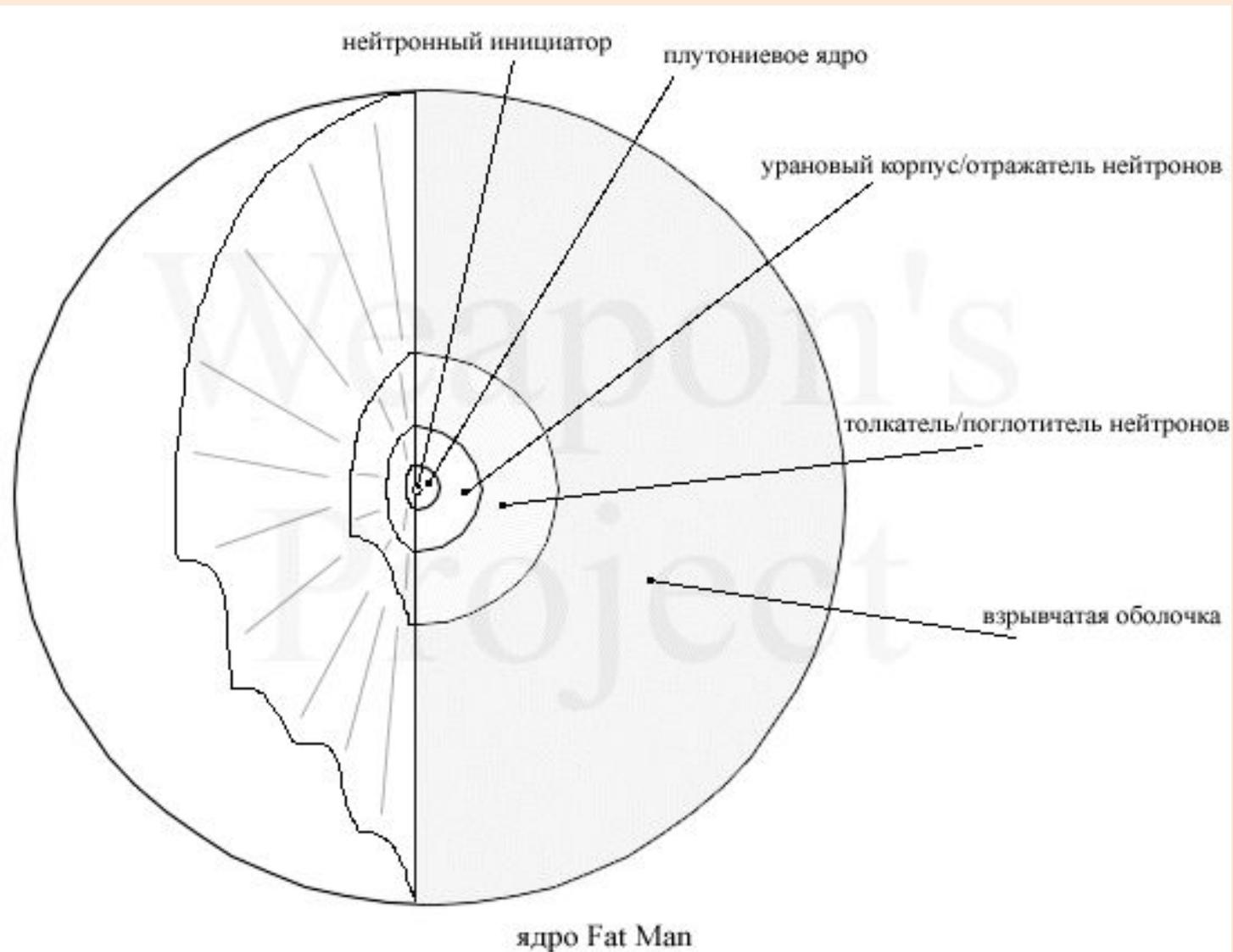


# Атомная бомба



- 1 — корпус  
2 — взрывной механизм  
3 — обычное взрывчатое вещество  
4 — электродетонатор  
5 — нейтронный отражатель  
6 — ядерное горючее ( $^{235}\text{U}$ )  
7 — источник нейтронов  
8 — процесс обжатия ядерного горючего направленным внутрь взрывом

# Устройство атомной бомбы



# Атомная бомба

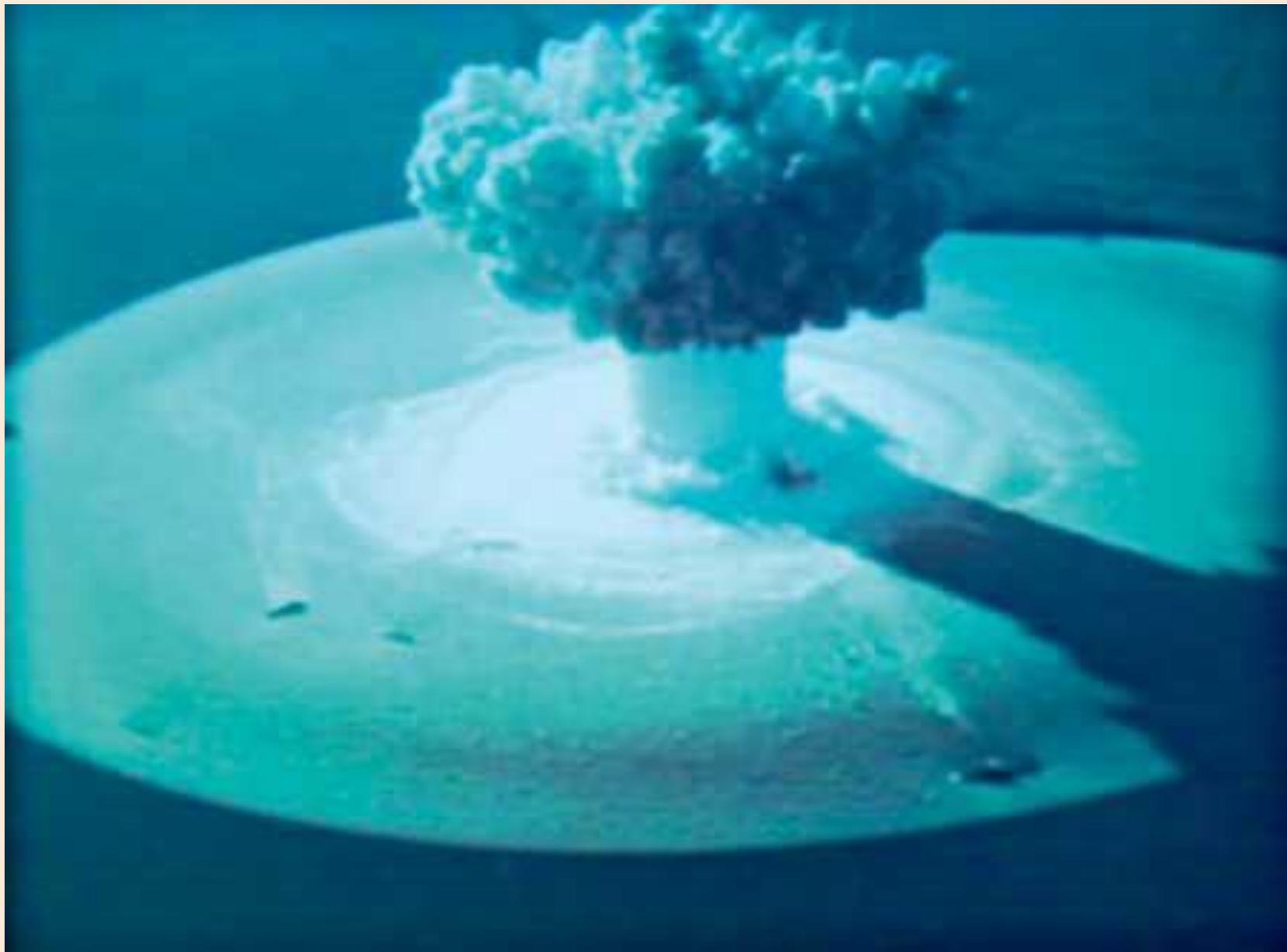


## Атомные бомбы «Малыш» и «Толстяк»

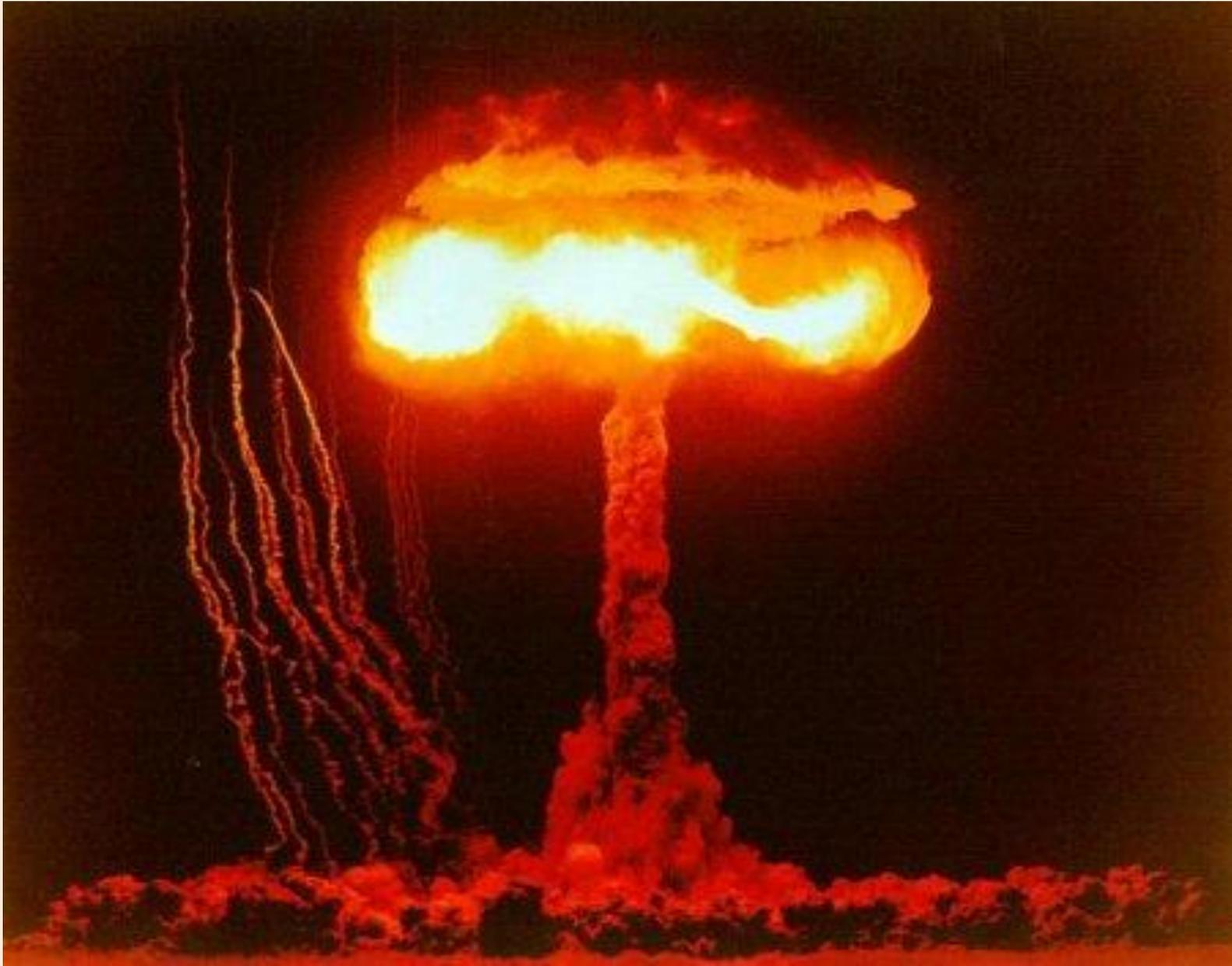


Little boy и Fat man

Фотография первого подводного ядерного взрыва на полигоне Новая Земля, бухта Чёрная, 21 сентября 1955 г., мощность 3,5 Кт, глубина 12 м



# АТОМНЫЙ ВЗРЫВ



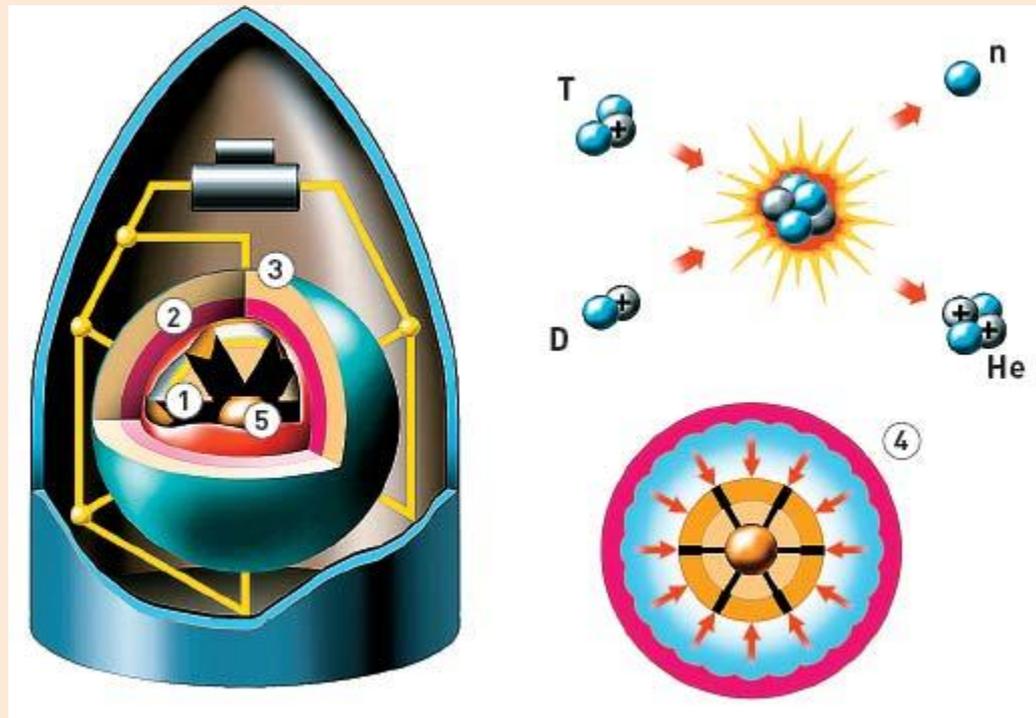
Испытание РДС-6с состоялось 12 августа 1953 г.

Энерговыделение - 400 кт.





# Термоядерная бомба

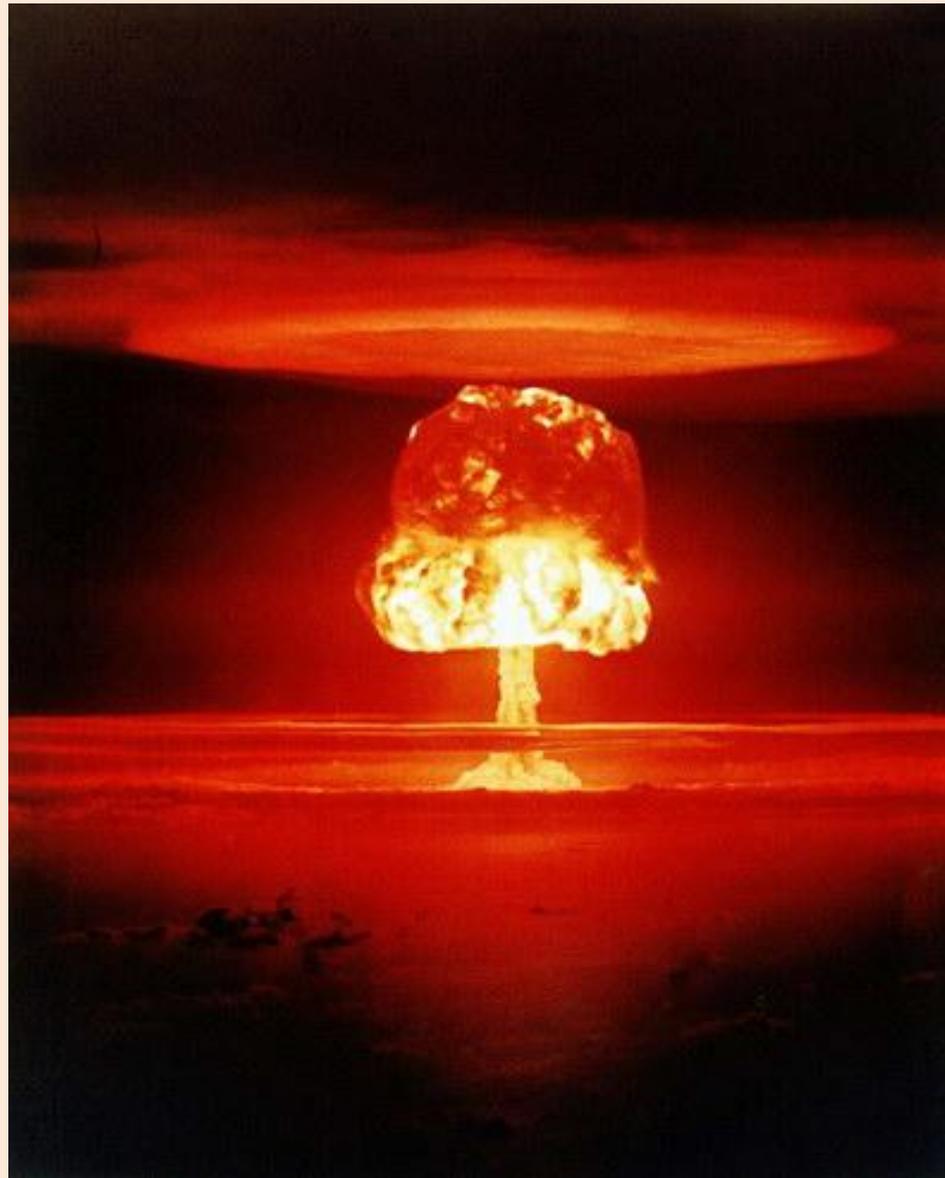


- 1 — инициирующий ядерный заряд (с разделенным на части ядерным горючим)  
2 — термоядерное горючее (смесь D и T)  
3 — ядерное горючее ( $^{238}\text{U}$ )  
4 — инициирующий ядерный заряд после подрыва шашек обычного ВВ  
5 — источник нейтронов. Излучение, вызванное срабатыванием ядерного заряда, порождает радиационную имплозию (испарение) оболочки из  $^{238}\text{U}$ , сжимающую и поджигающую термоядерное топливо

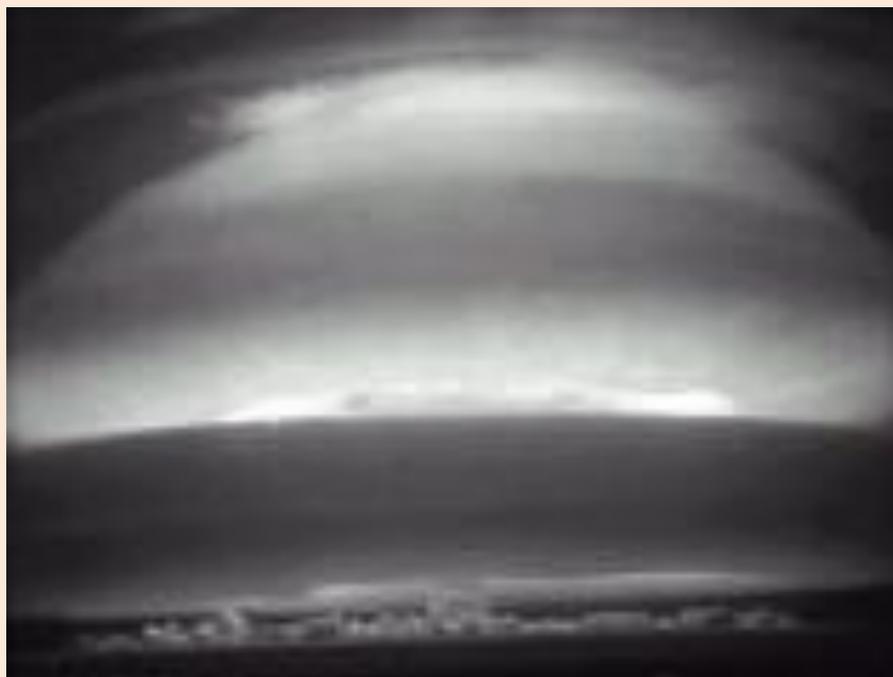
# Термоядерный взрыв



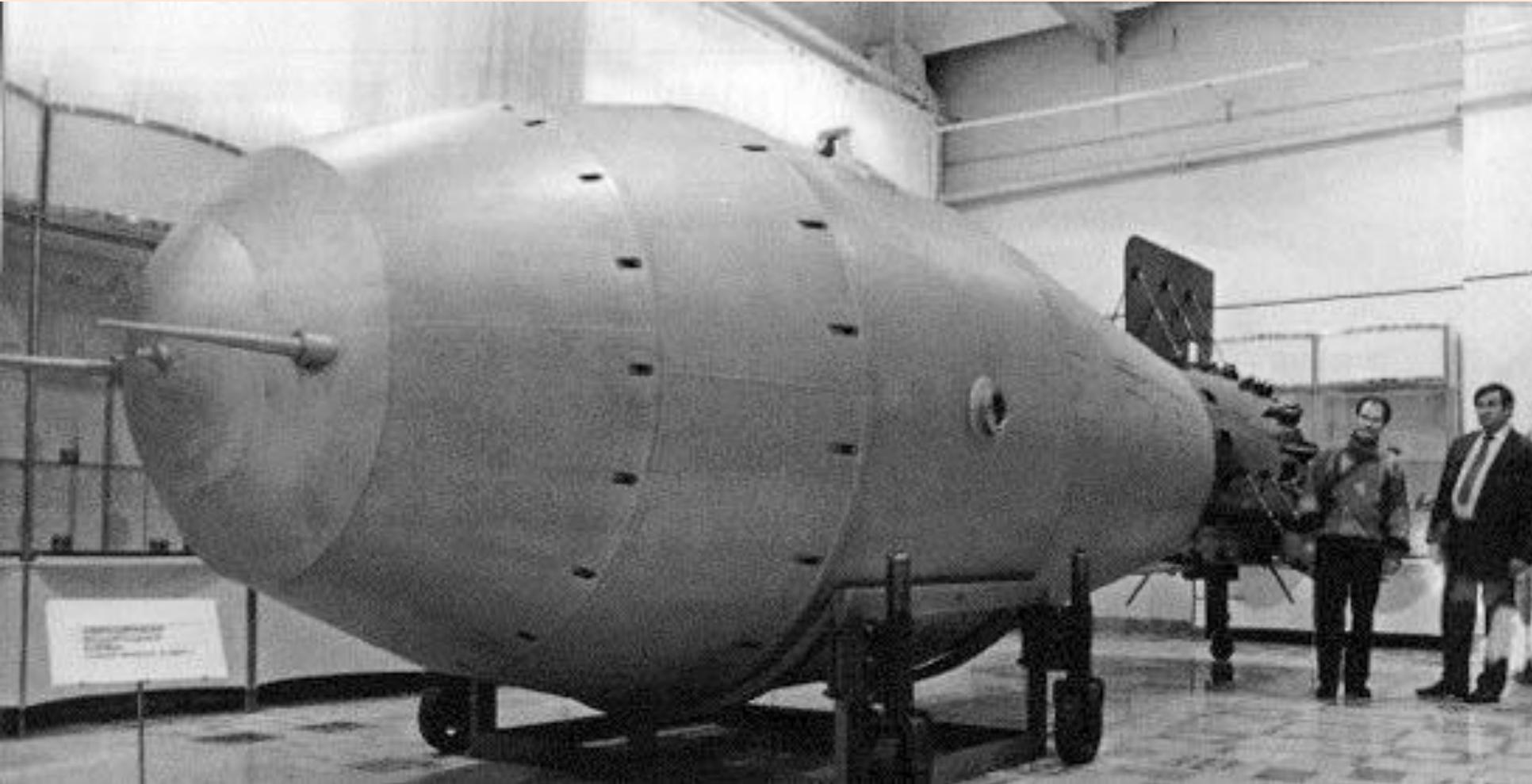
# Термоядерный взрыв



25 Ноября 1955 года в 9:47 состоялось испытание первого советского термоядерного заряда мегатонного класса.



# Водородная бомба



Самый мощный советский термоядерный заряд. Испытан 30 октября 1961 года на неполную мощность. Энерговыведение 50 Мт ТЭ. Музей ядерного оружия РФЯЦ-ВНИИЭФ. (Архив Минатома)



# Взрыв самой мощной термоядерной бомбы

