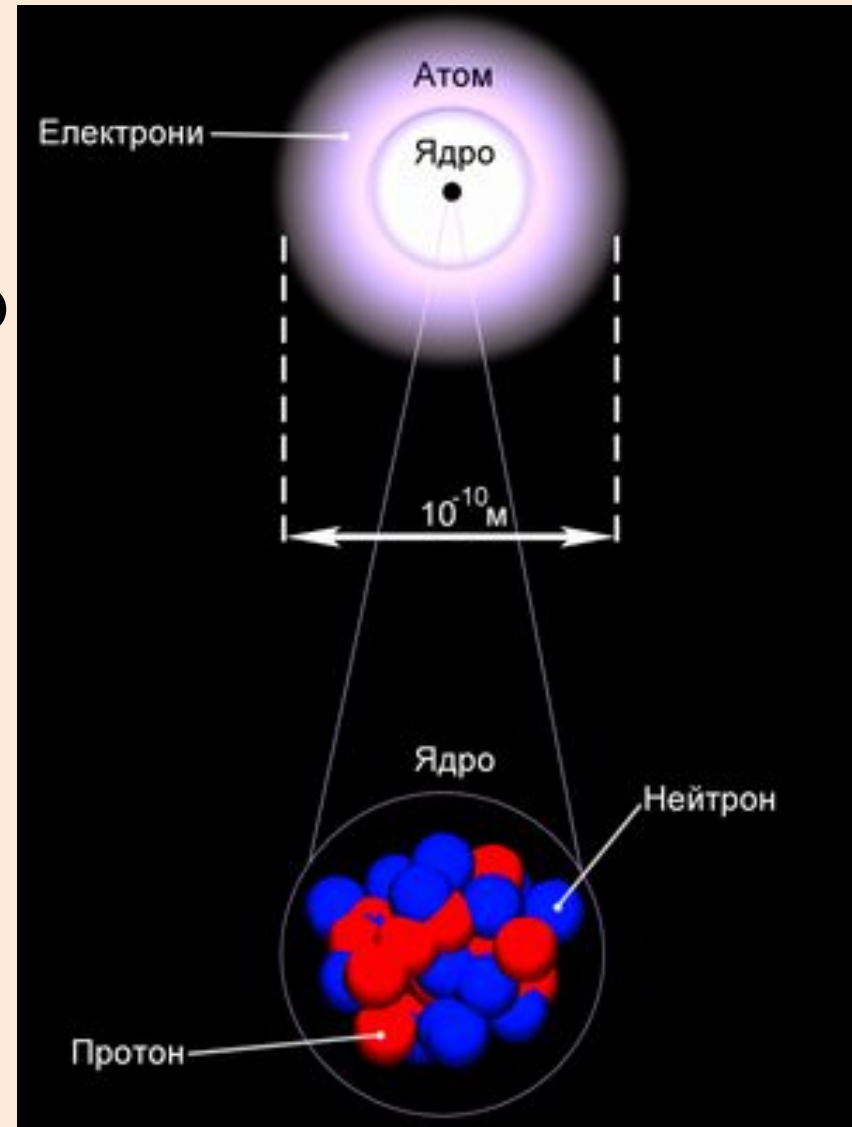


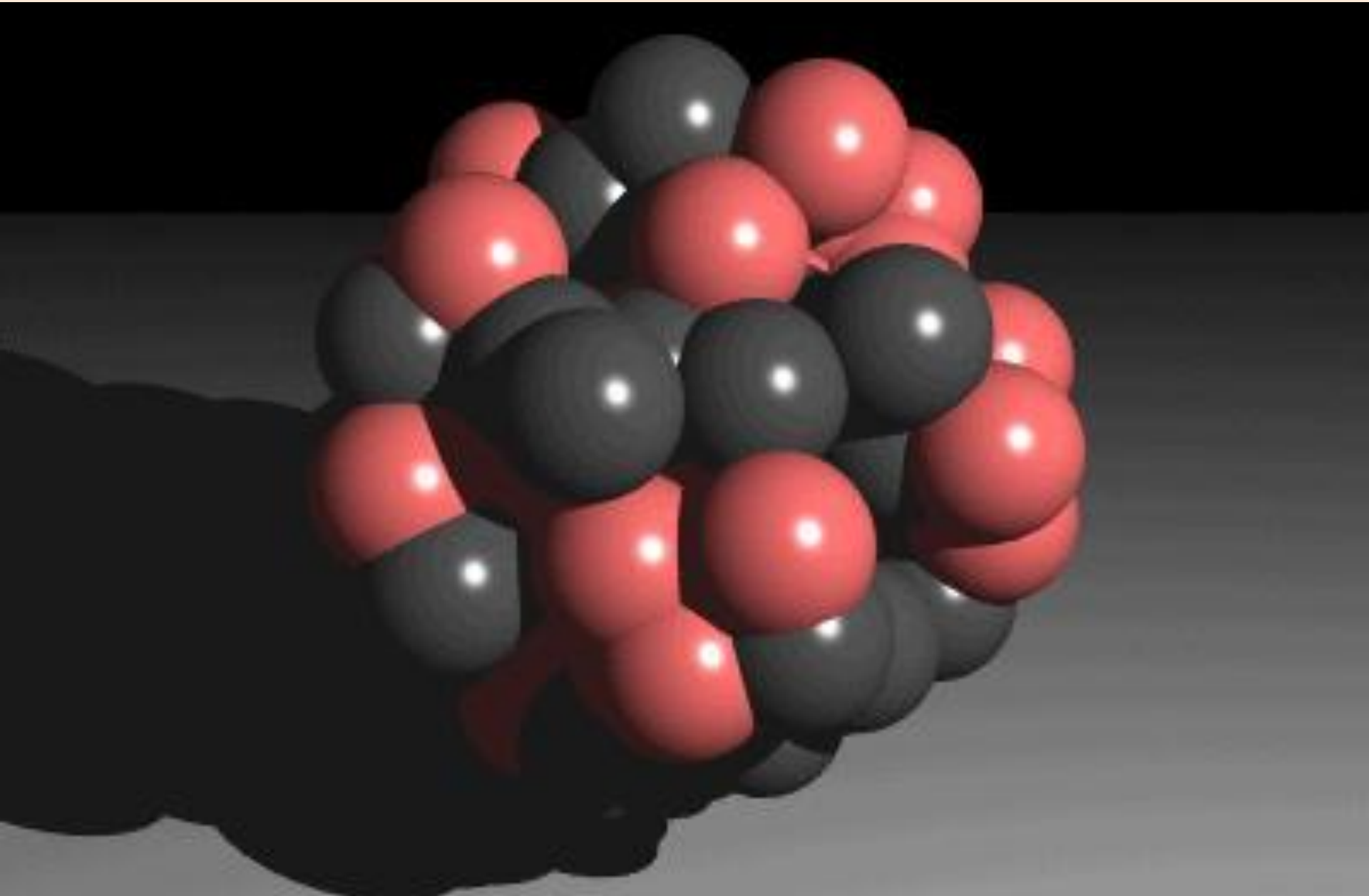
ЭЛЕМЕНТЫ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ

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 **НУКЛОНЫ²**.



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.

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



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



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



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 - 100×10^6 ТОНН В 1 см^3

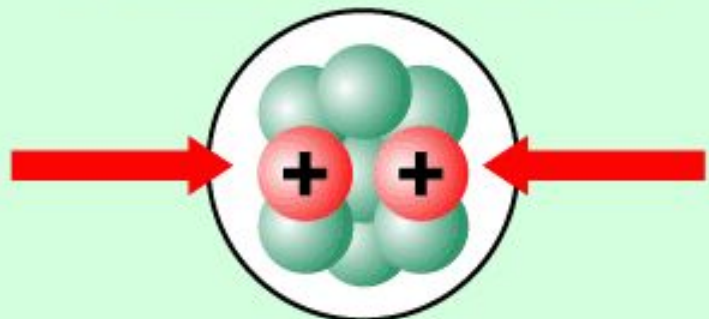


ШАР, СОСТОЯЩИЙ ИЗ ЯДЕРНОГО ВЕЩЕСТВА,
ДИАМЕТРОМ 0,5 км РАВЕН ПО ВЕСУ ЗЕМНОМУ ШАРУ

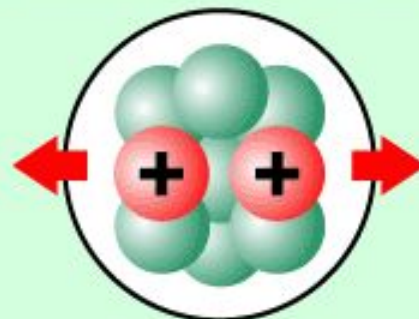


СИЛЫ, ДЕЙСТВУЮЩИЕ В ЯДРЕ

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 энергии

$$W_{\text{энергии}} = \Delta m c^2$$

Δm – дефект массы
ядра.

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

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

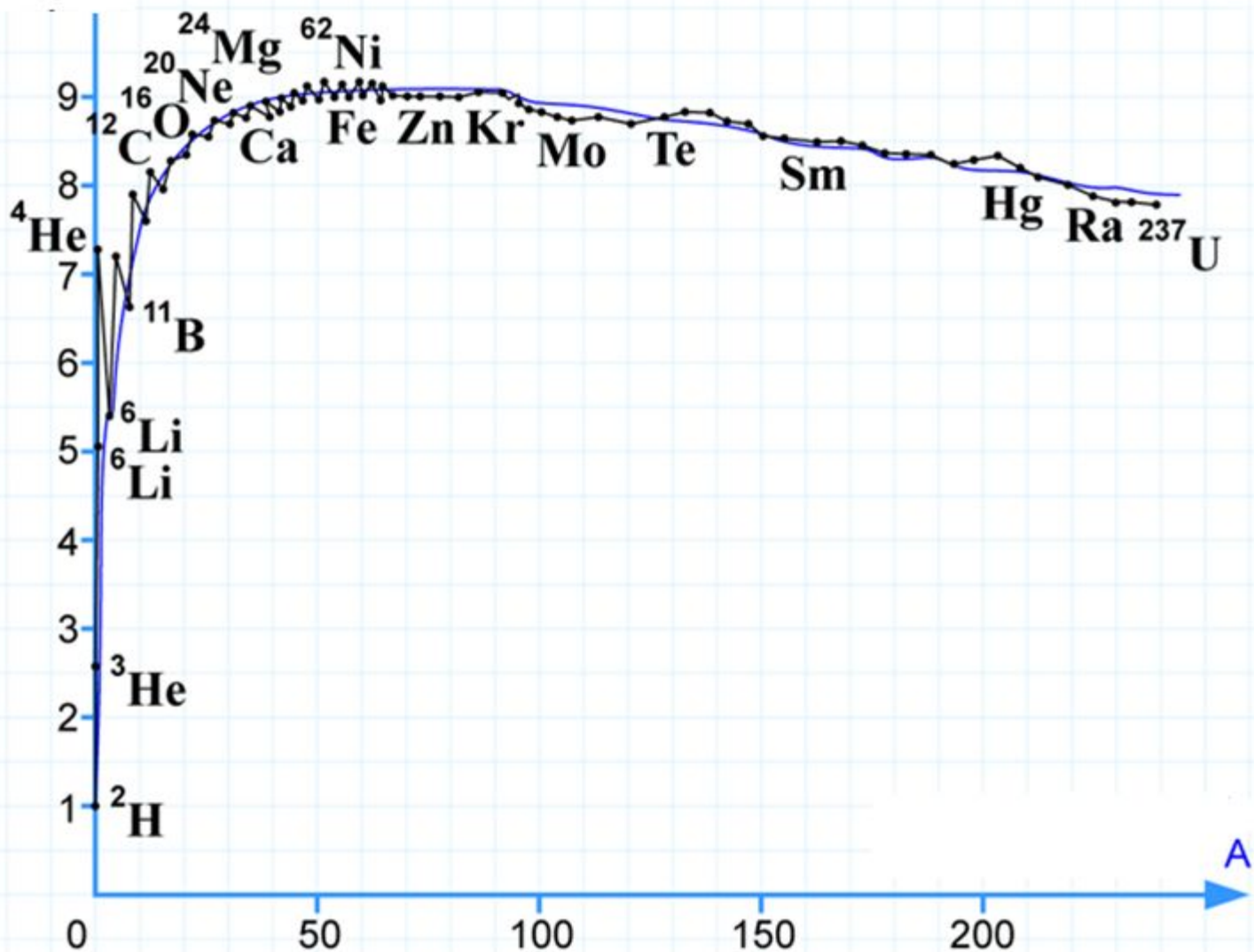
Энергия связи,
приходящаяся на один
нуклон, называется
удельной энергией

связи:

$$\delta W = \frac{W_{св}}{A}$$

Удельная энергия связи ядер ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ

δW , 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.

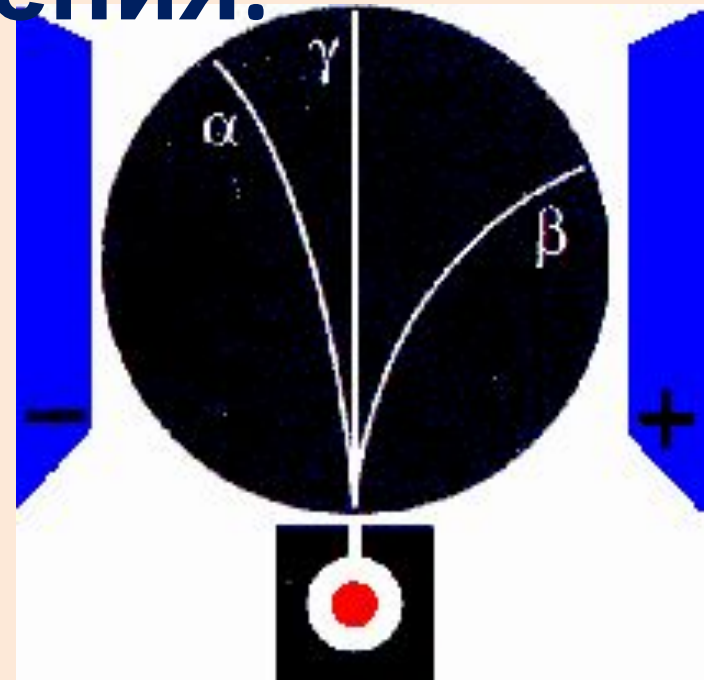
Радиоактивными являются все элементы с порядковым номером

$Z > 83$.

Излучение радиоактивных веществ состоит из трех компонент:

α -, β - и γ -излучения.

α - и β -лучи отклоняются
магнитным полем в
противоположные
стороны, а γ -лучи не
отклоняются совсем.



α - лучи

γ - лучи

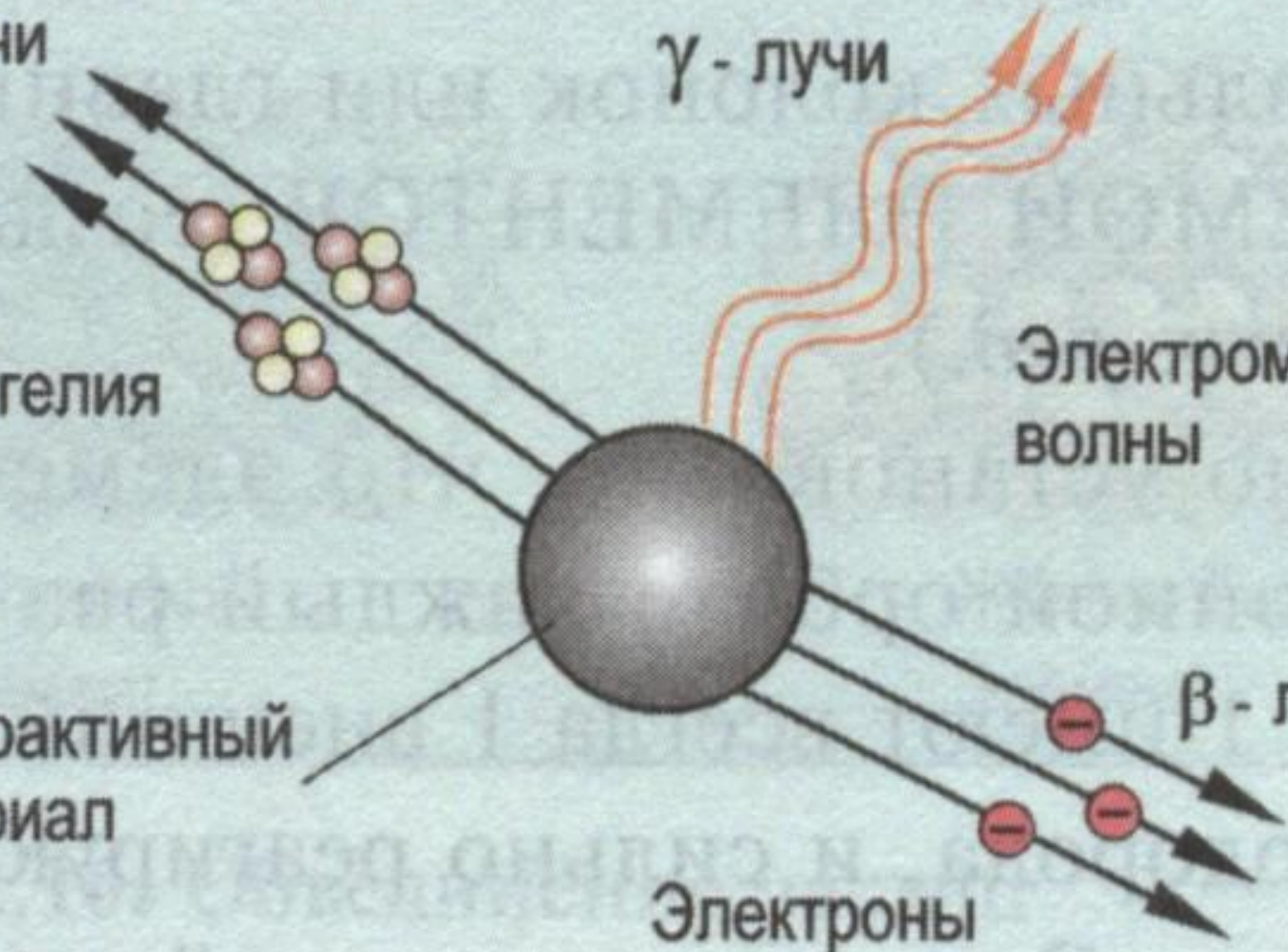
Ядра гелия

Электромагнитные волны

Радиоактивный материал

β - лучи

Электроны

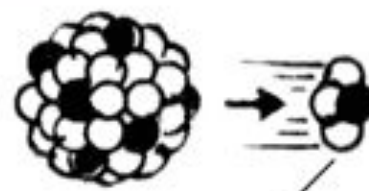
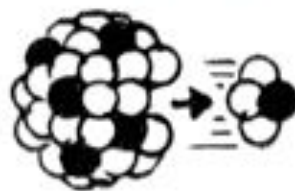


Основные типы ядерных превращения, приводящие к испусканию радиоактивных излучений

Альфа-распад

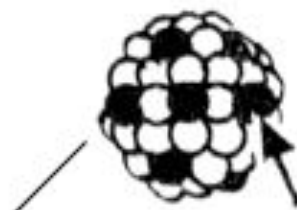


Ядро атома



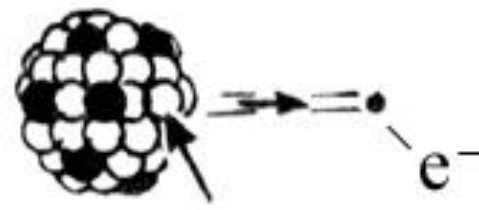
Альфа-частица

Бета-распад



Ядро атома

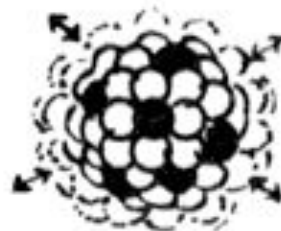
Нейтрон



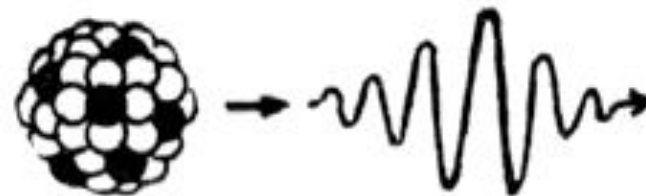
Протон

e^-

Гамма-излучение



Возбуждённое ядро



Гамма-квант

Правила смещения Содди при α - и

β -распаде

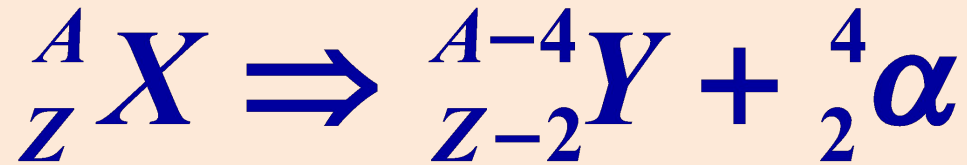
Сумма зарядовых (массовых)

чисел до распада равняется

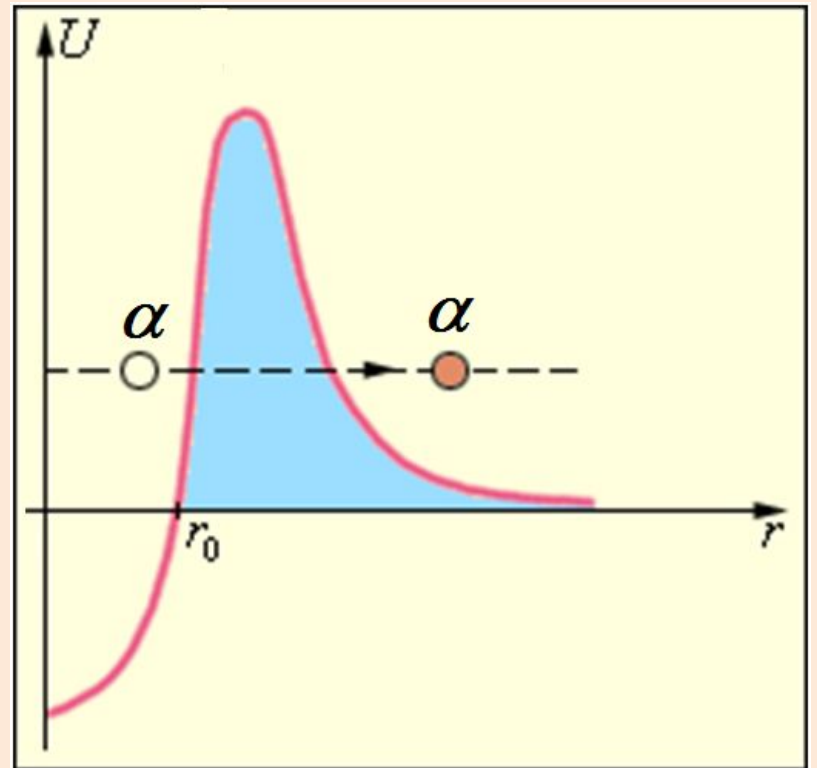
сумме зарядовых (массовых)

чисел после распада.

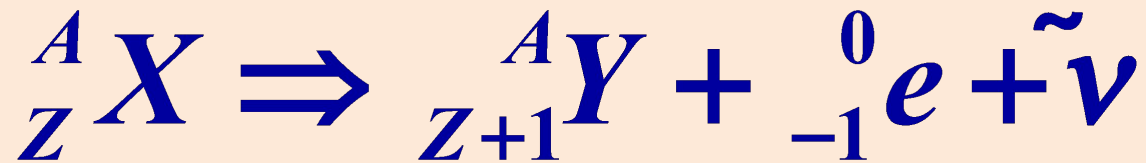
α -распад



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.

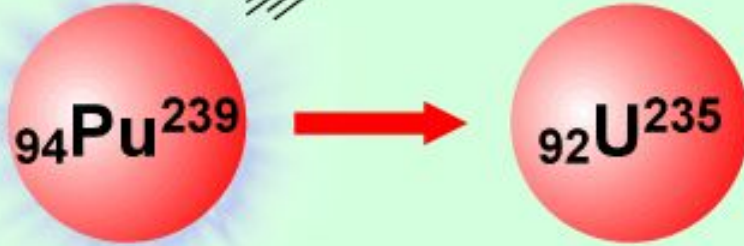
β -распад происходит в результате распада нейтрона внутри ядра по



Примеры α - и β -распадов

АЛЬФА - РАСПАД

АЛЬФА-ЧАСТИЦА

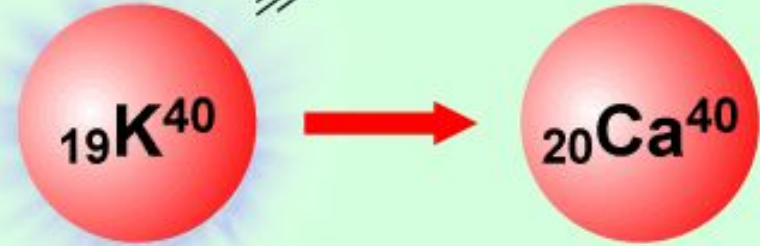


ЯДРО ПЛУТОНИЯ

ЯДРО УРАНА

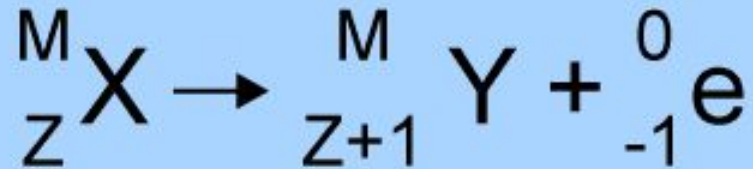
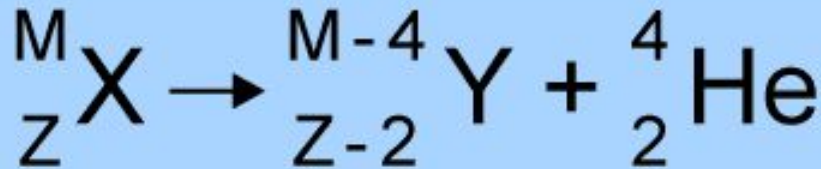
БЕТА - РАСПАД

ЭЛЕКТРОН

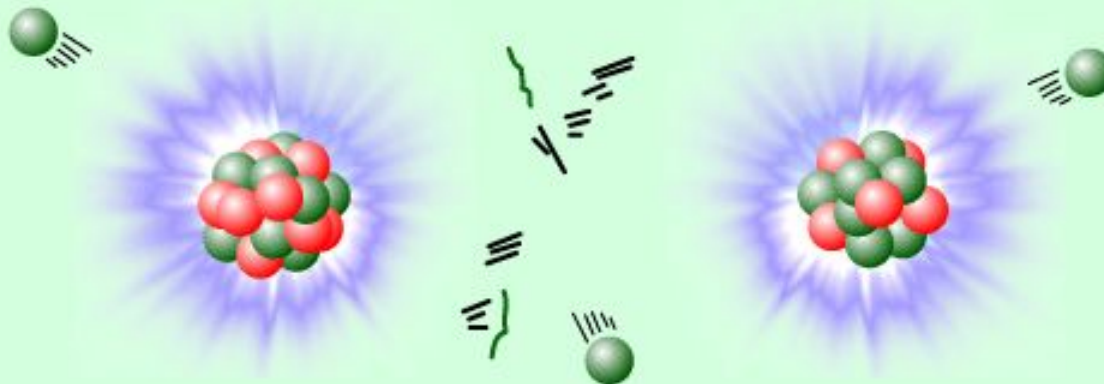


ЯДРО КАЛИЯ

ЯДРО КАЛЬЦИЯ



СПОНТАННОЕ ДЕЛЕНИЕ



γ -излучение

1. γ -излучение - это коротковолновые фотоны.
2. Возникает в результате α - и β -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**

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

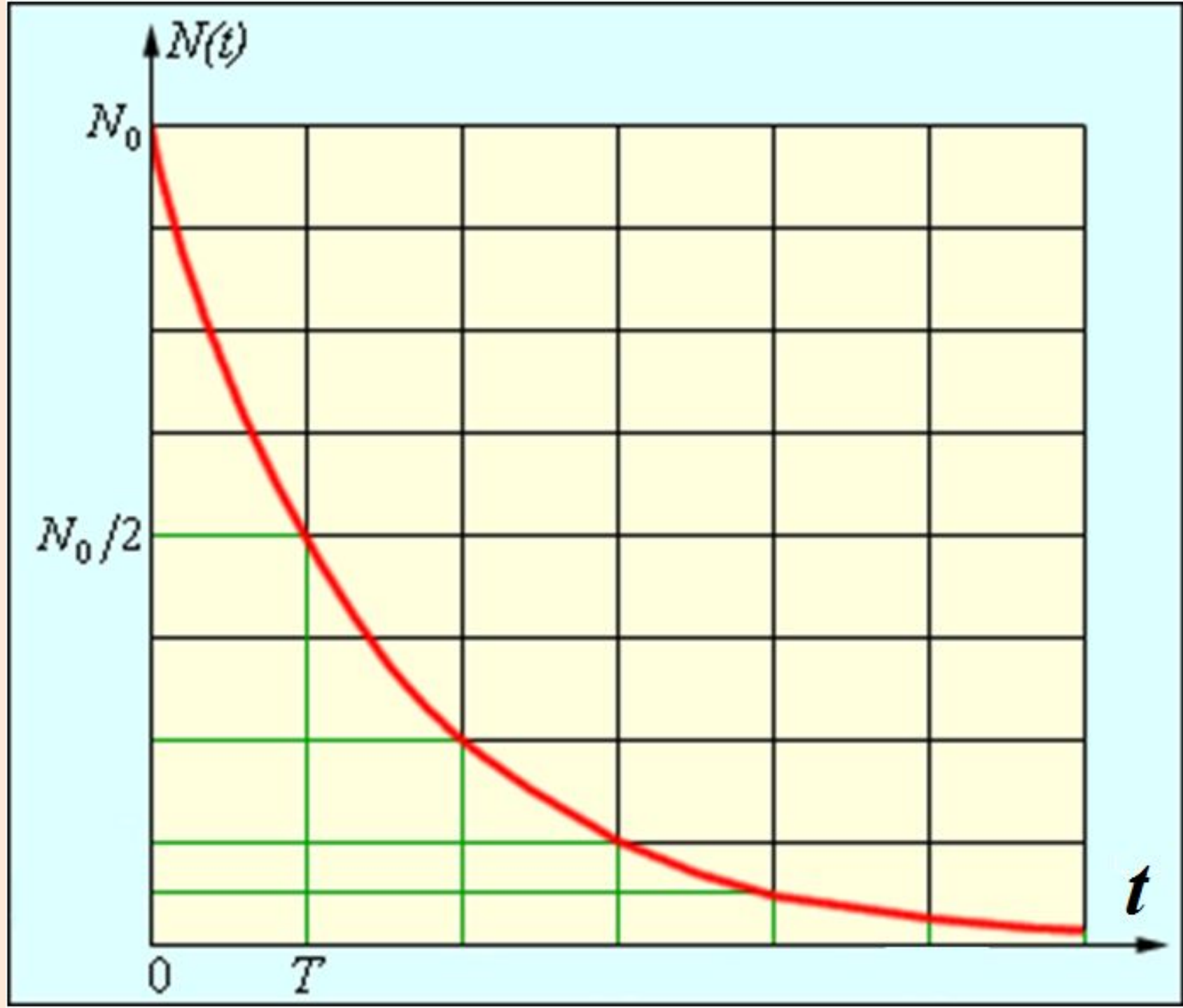
$$\ln N = -\lambda t + C, \quad N = N_0 \cdot e^{-\lambda t}$$

λ – 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:

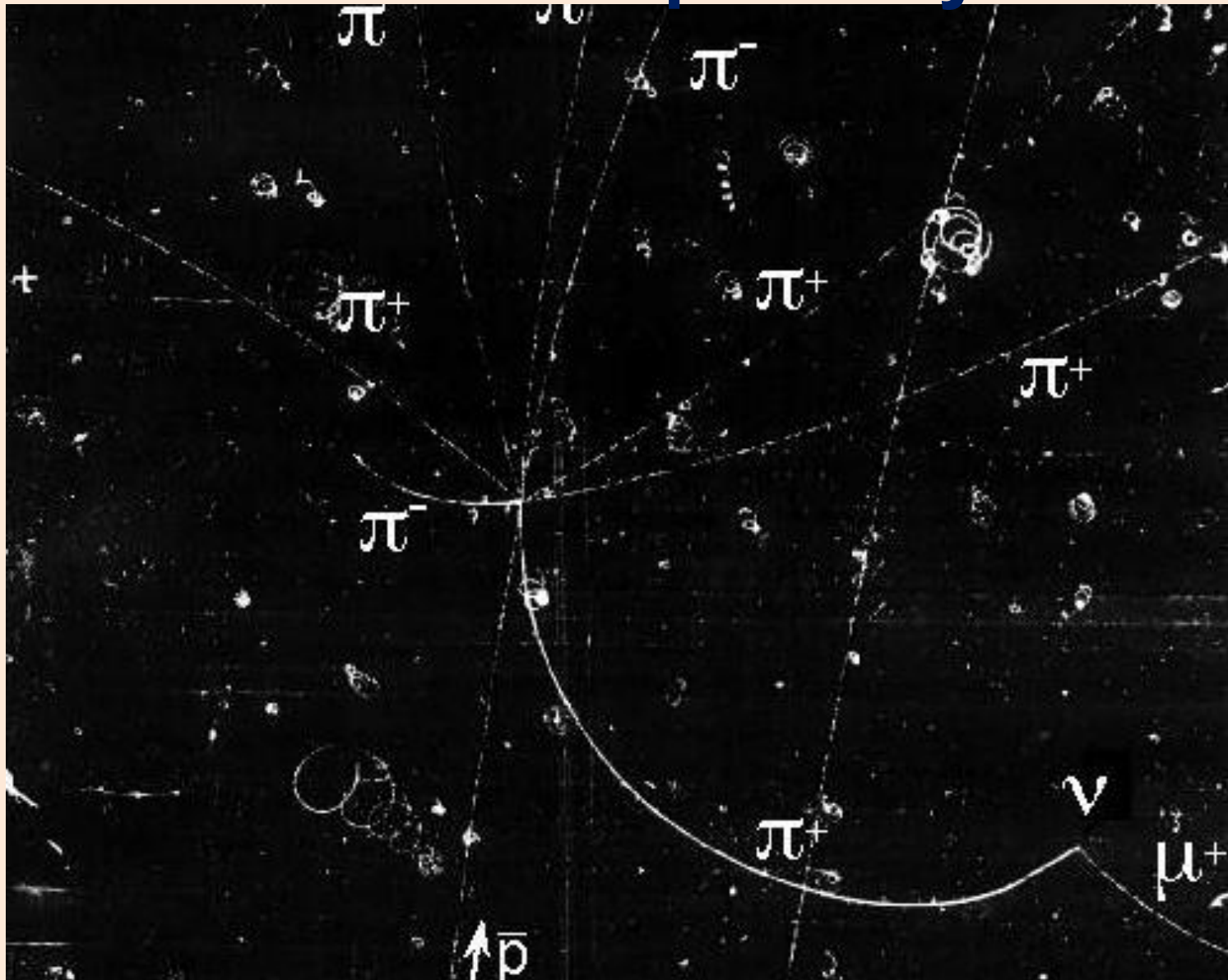
камера Вильсона, диффузионная
камера, пузырьковая камера,
фотоэмульсии.

Счетчик Гейгера



Ханс Гейгер

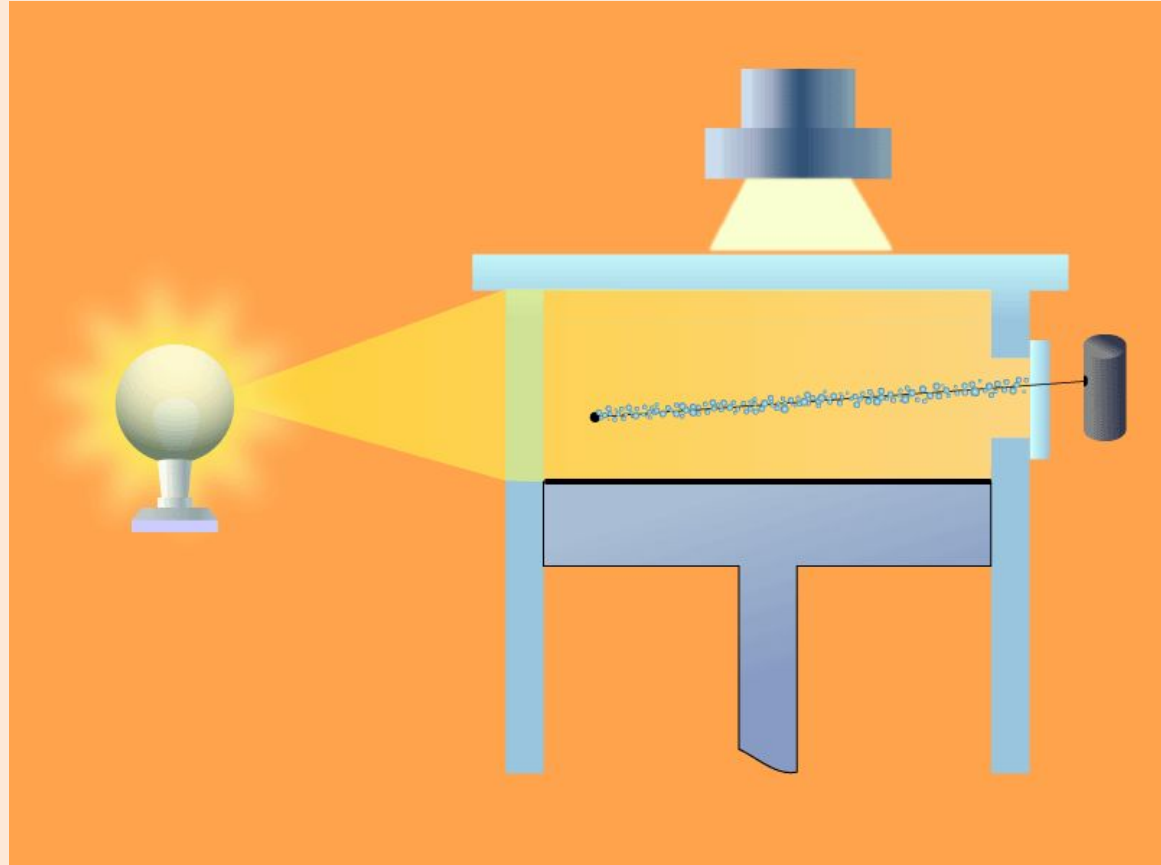
Треки элементарных частиц в толстослойной фотоэмульсии



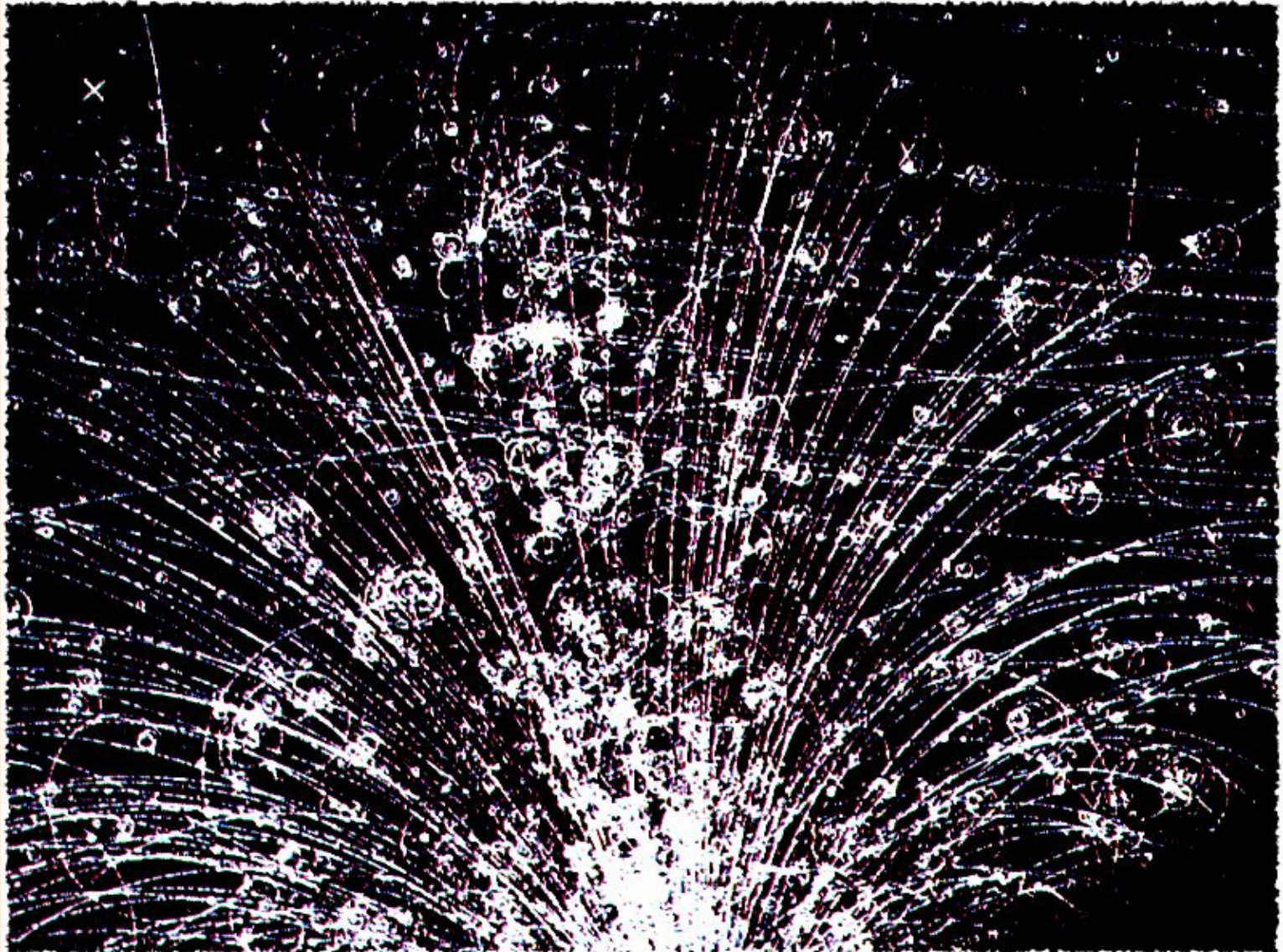
Камера Вильсона



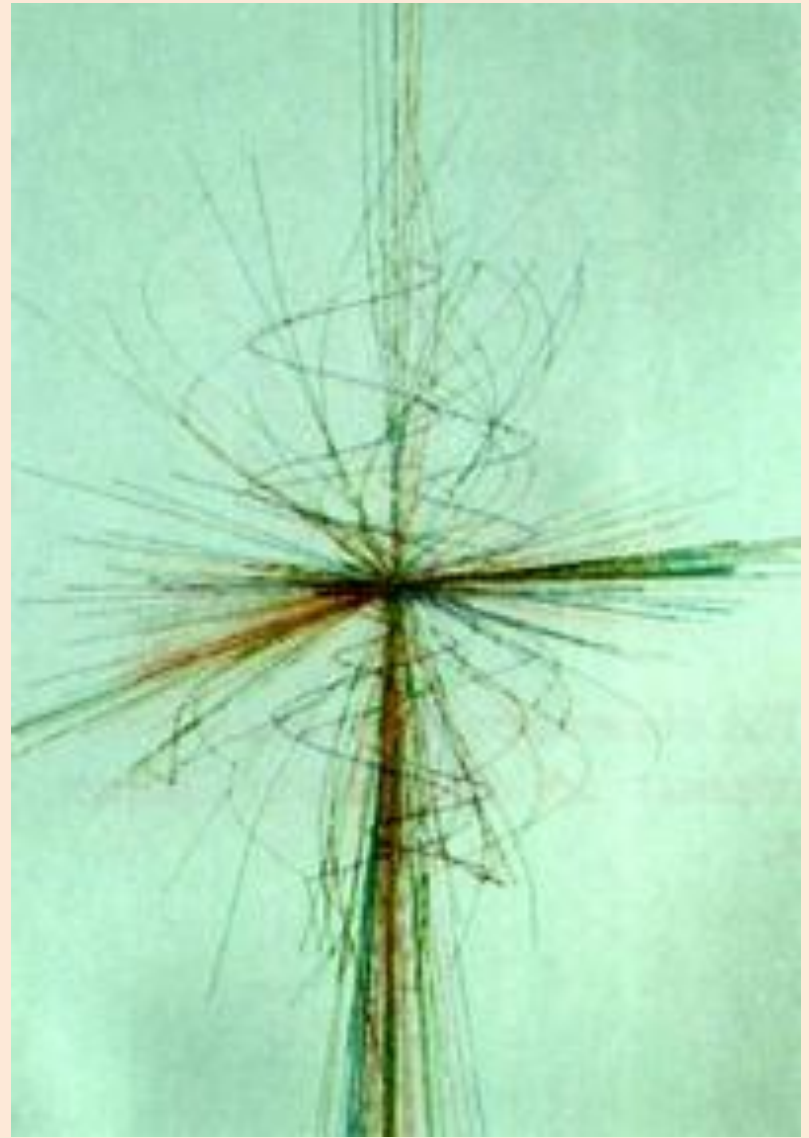
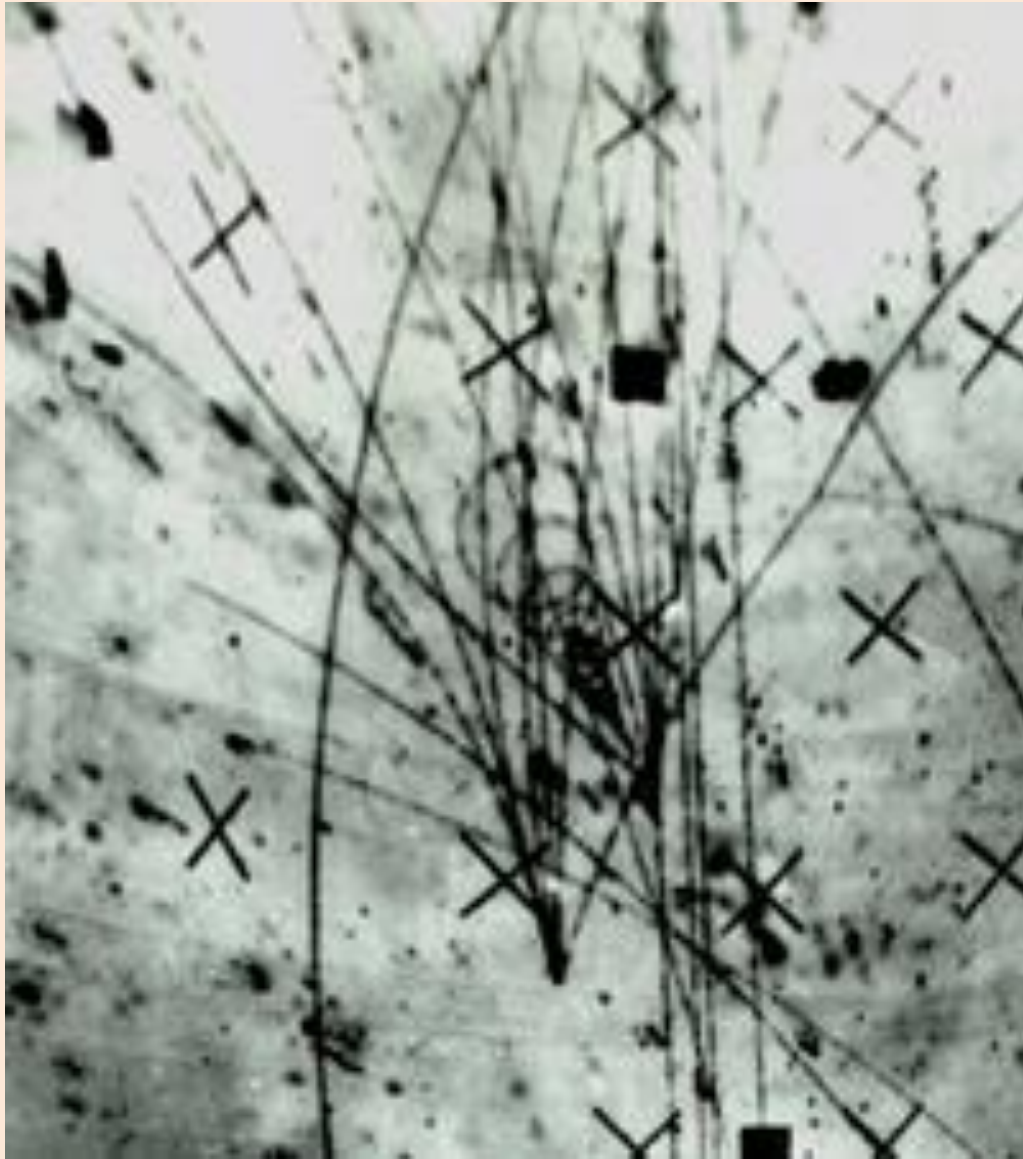
Чарльз Томсон
Вильсон



Треки частиц в камере



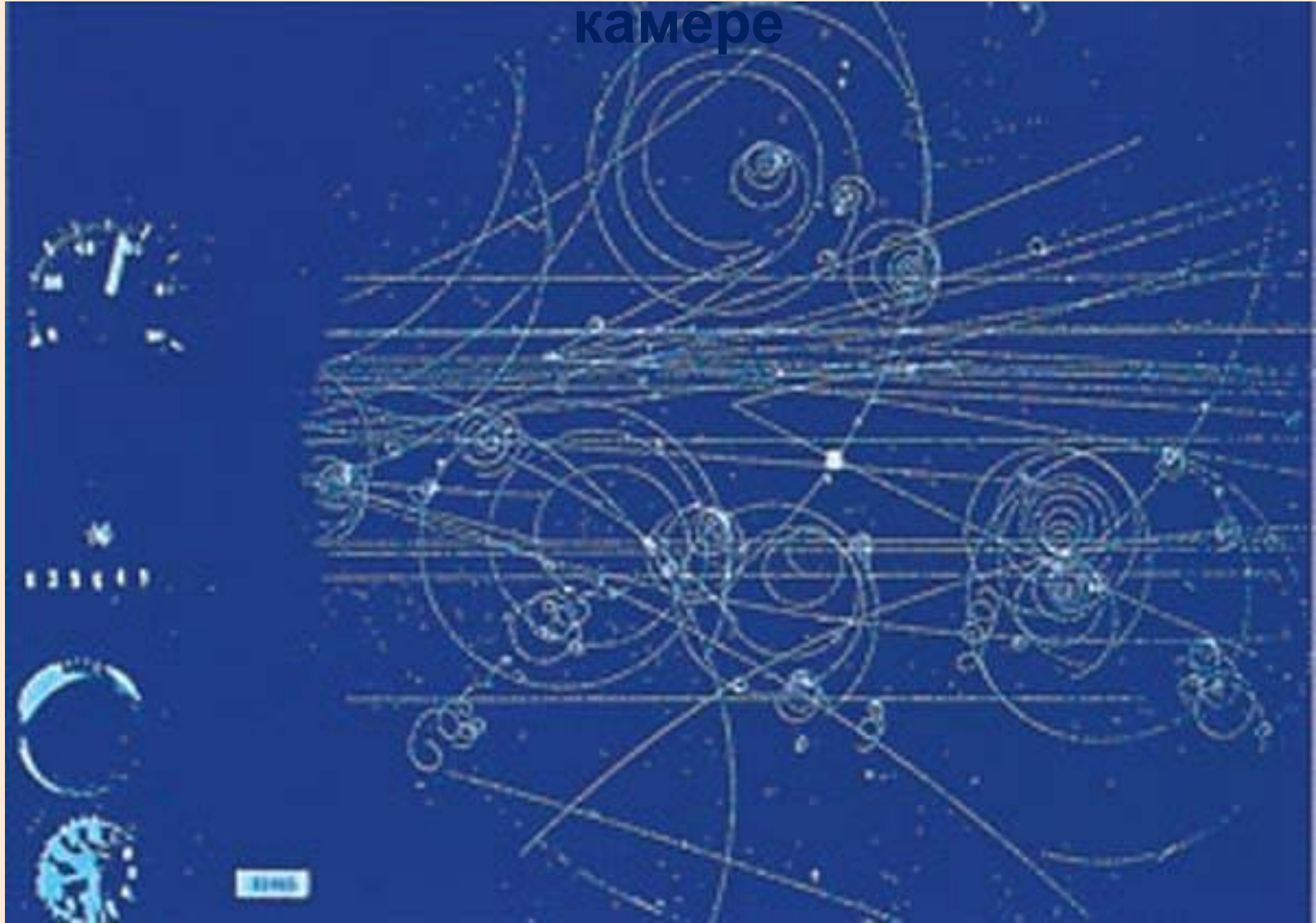
Треки частиц в камере Вильсона



Пузырьковая камера

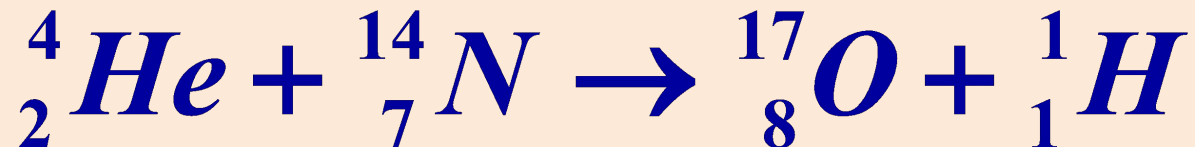


Треки частиц в пузырьковой камере



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:

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

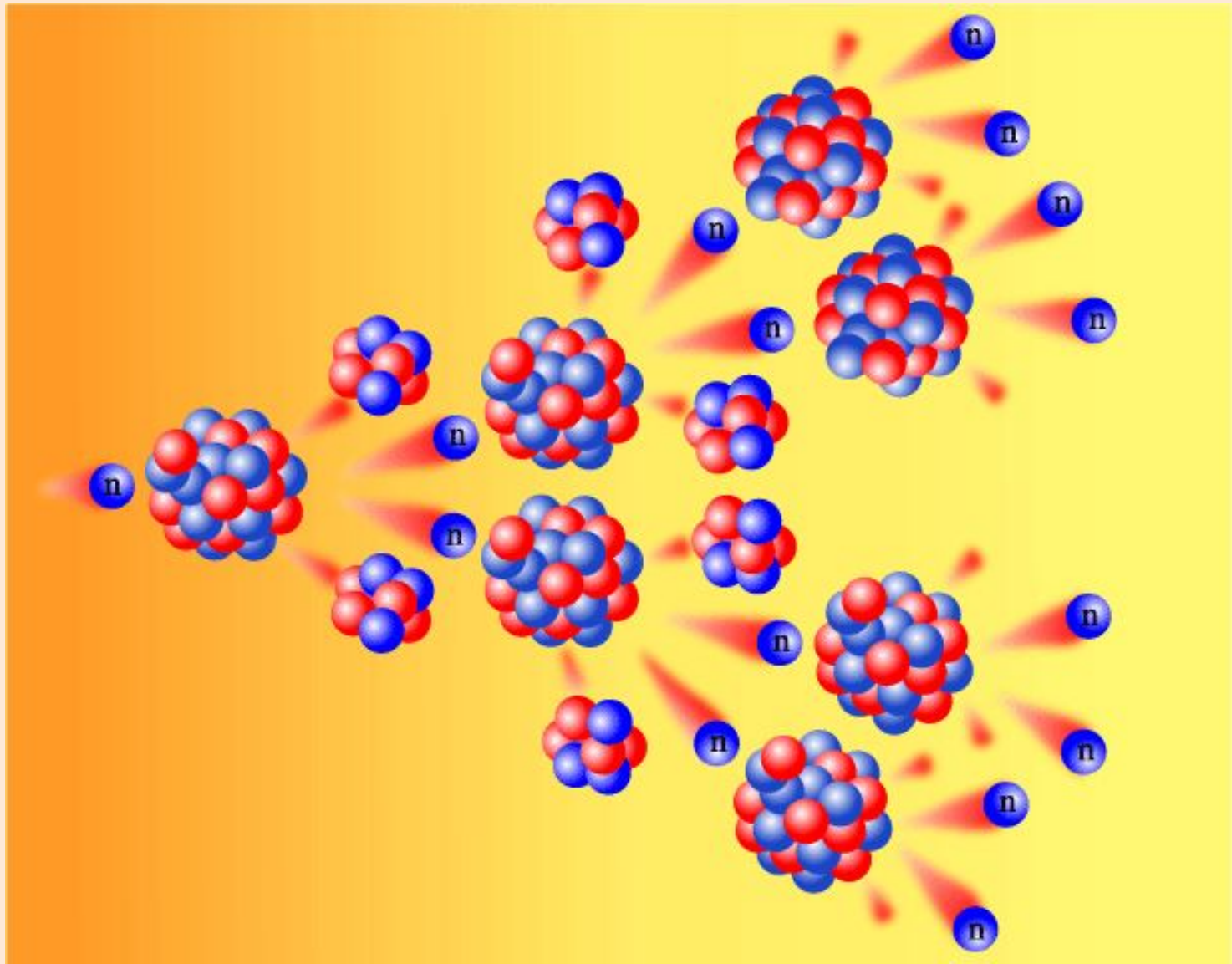
- Интегрируем:

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

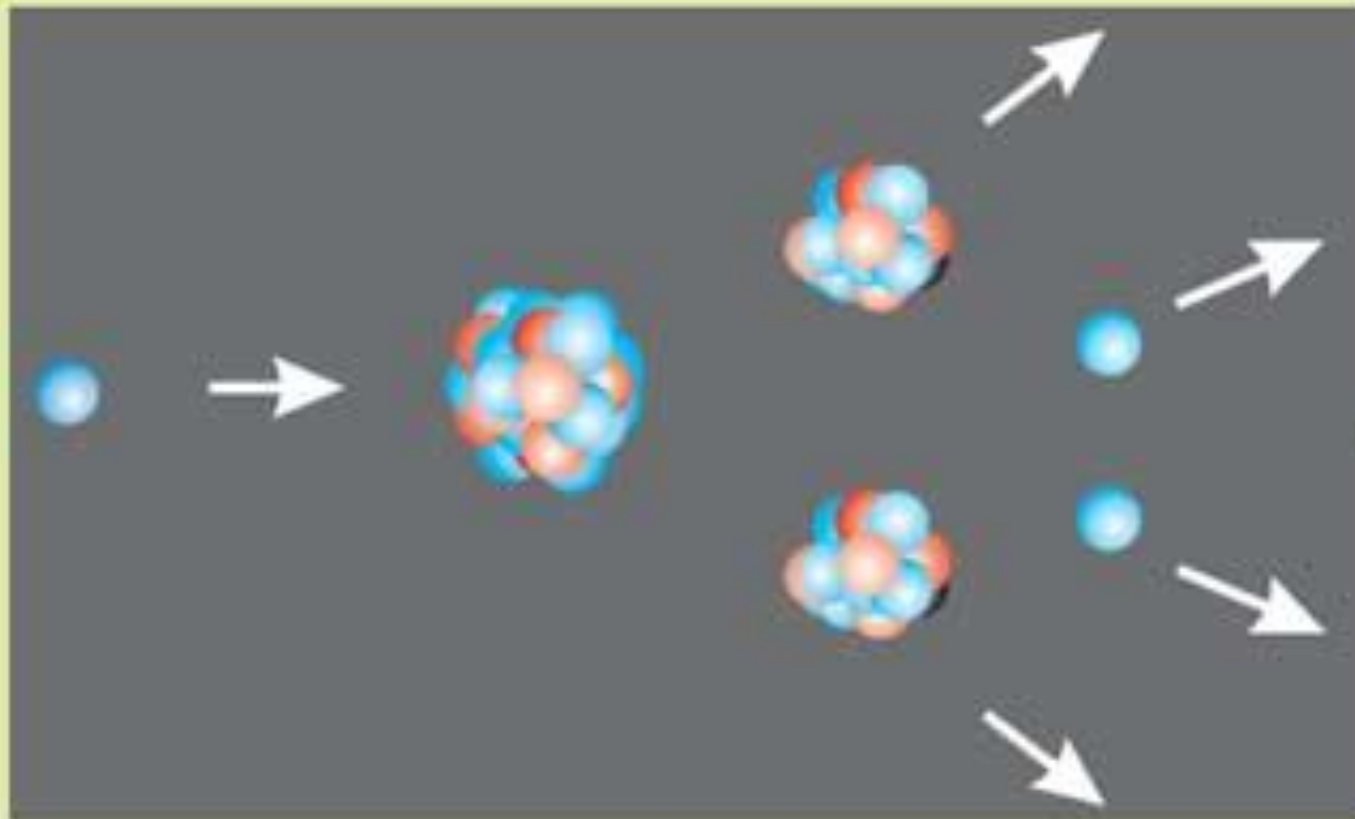
- Получаем:

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

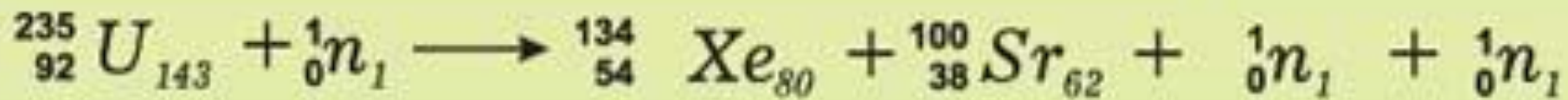
Цепная реакция деления с $k=2$



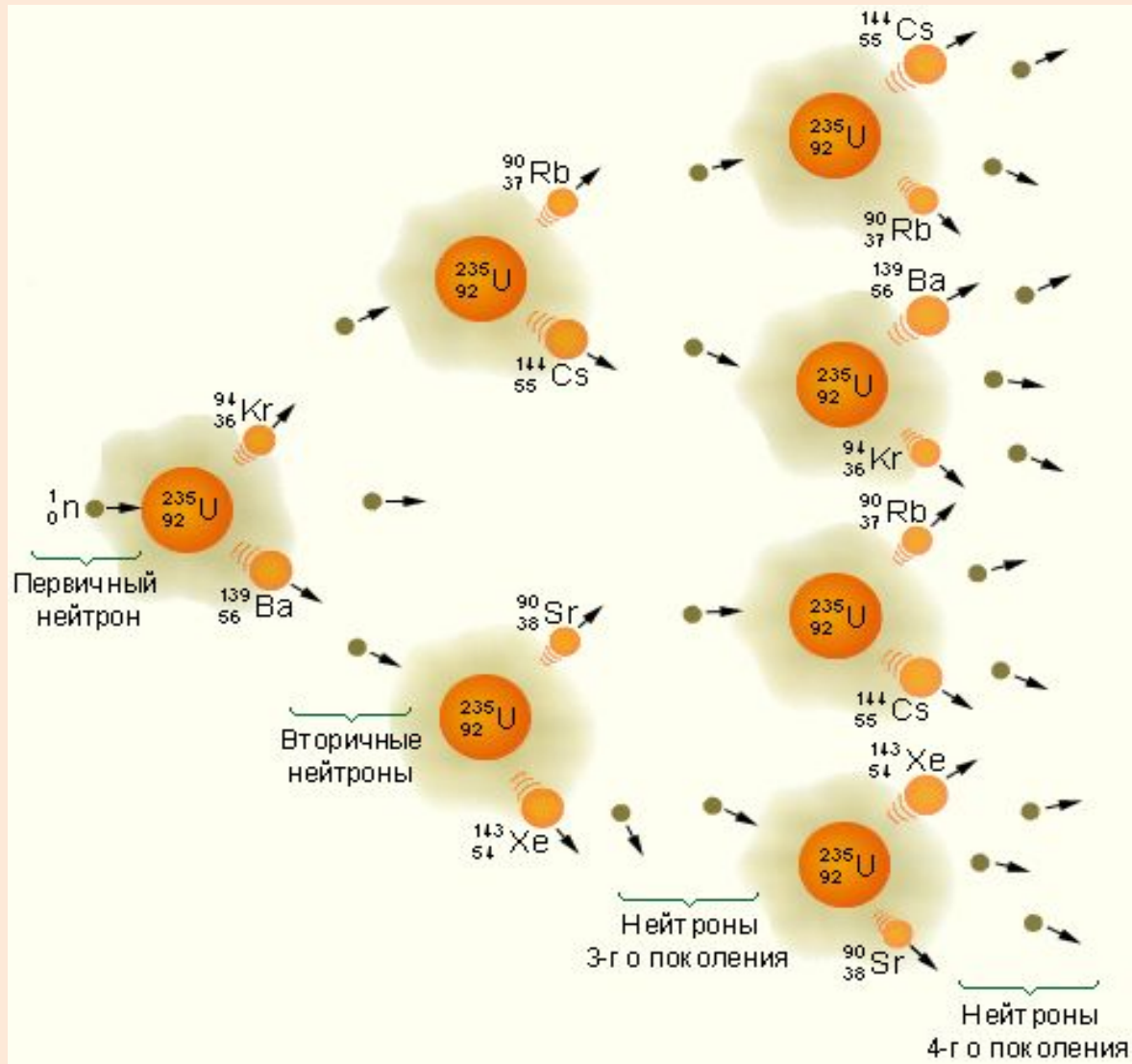
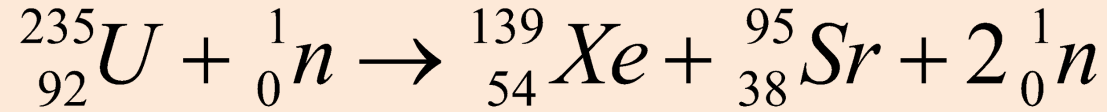
Реакция деления ядра урана



$$\Delta E = 200 \text{ МэВ}$$



Цепная ядерная реакция деления урана-235



Атомные электростанция



Атомная электростанция

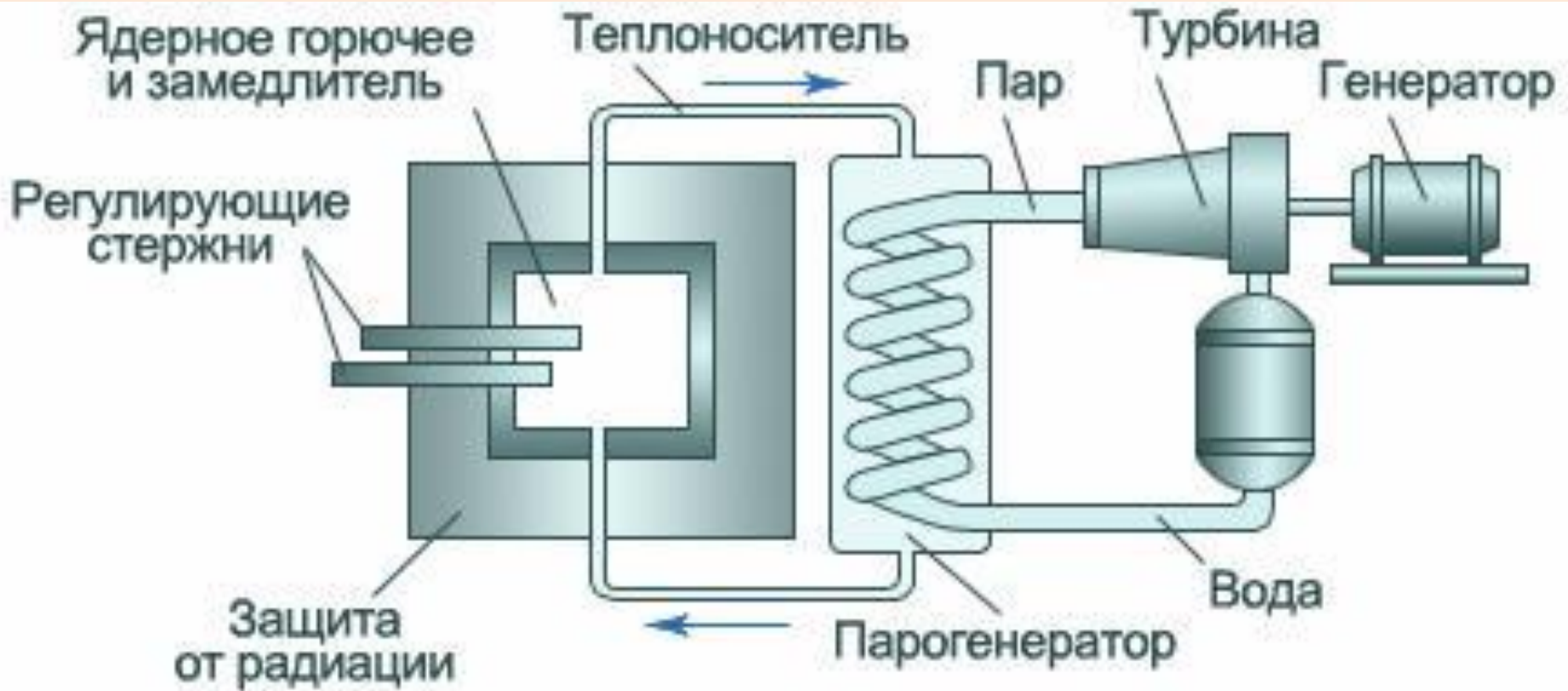
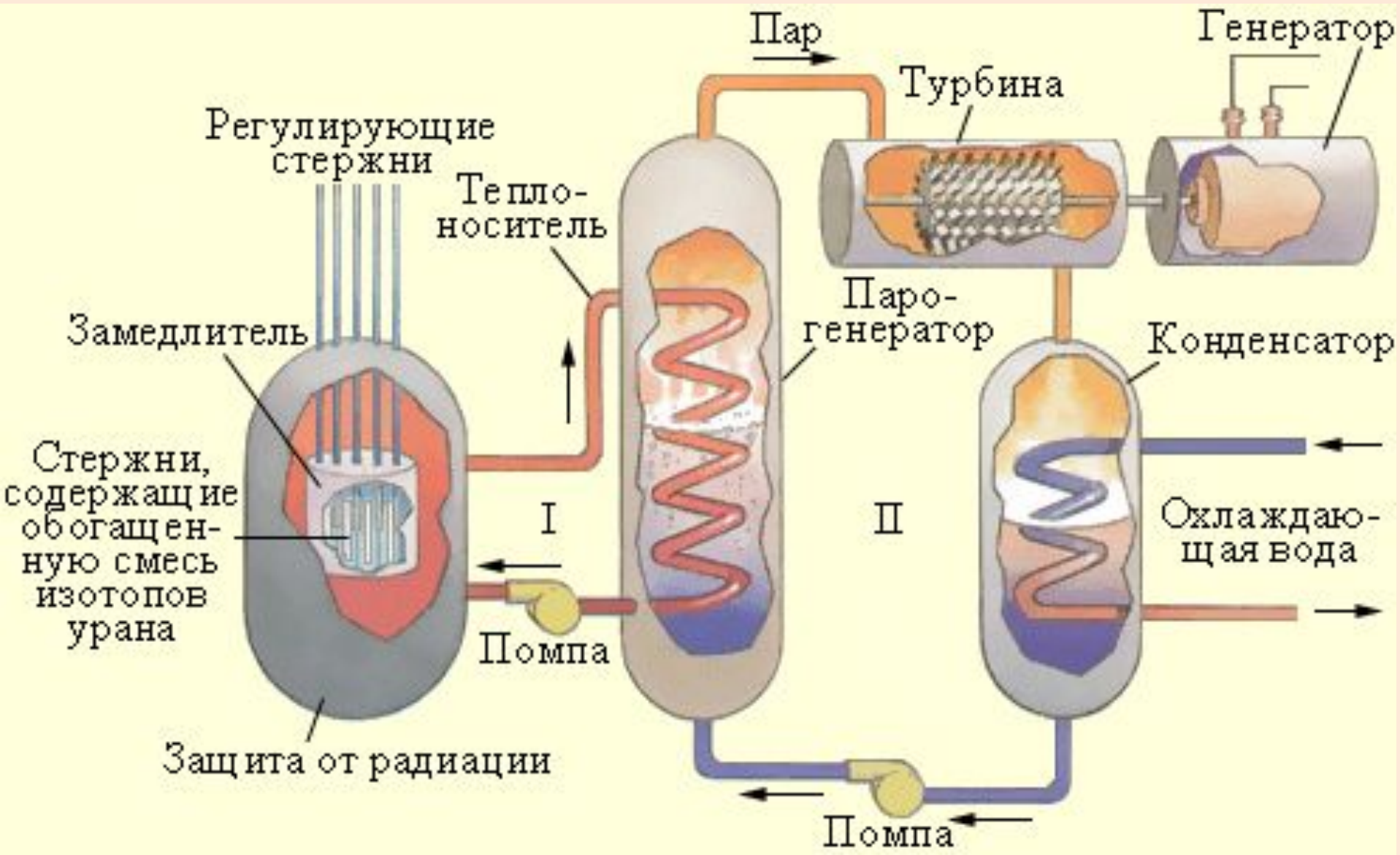


Схема устройства ядерного реактора.



Атомный реактор



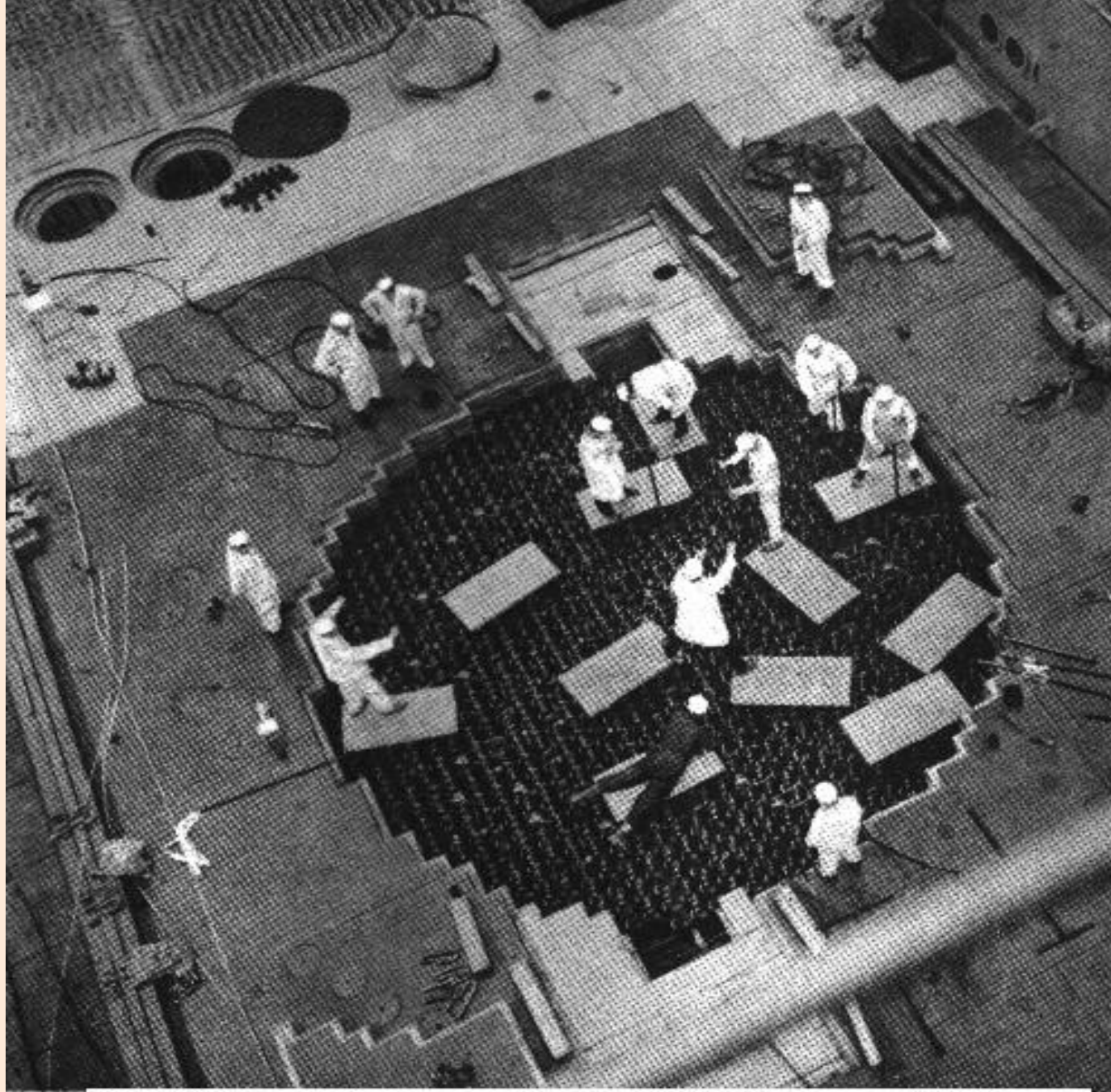


Рис. 54. Атомный реактор Белоярской АЭС имени И. В. Курчатова при подготовке к пуску.

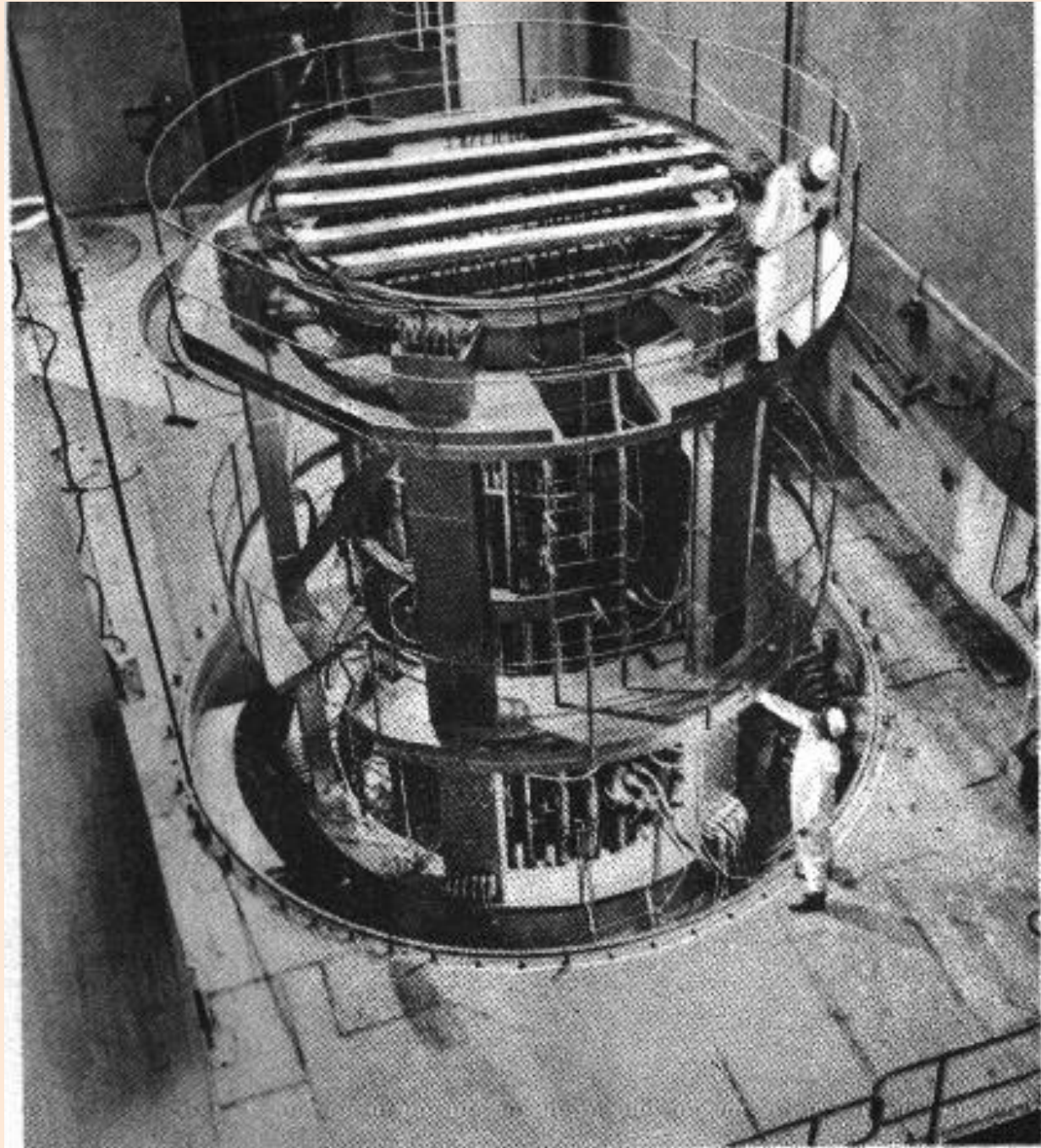
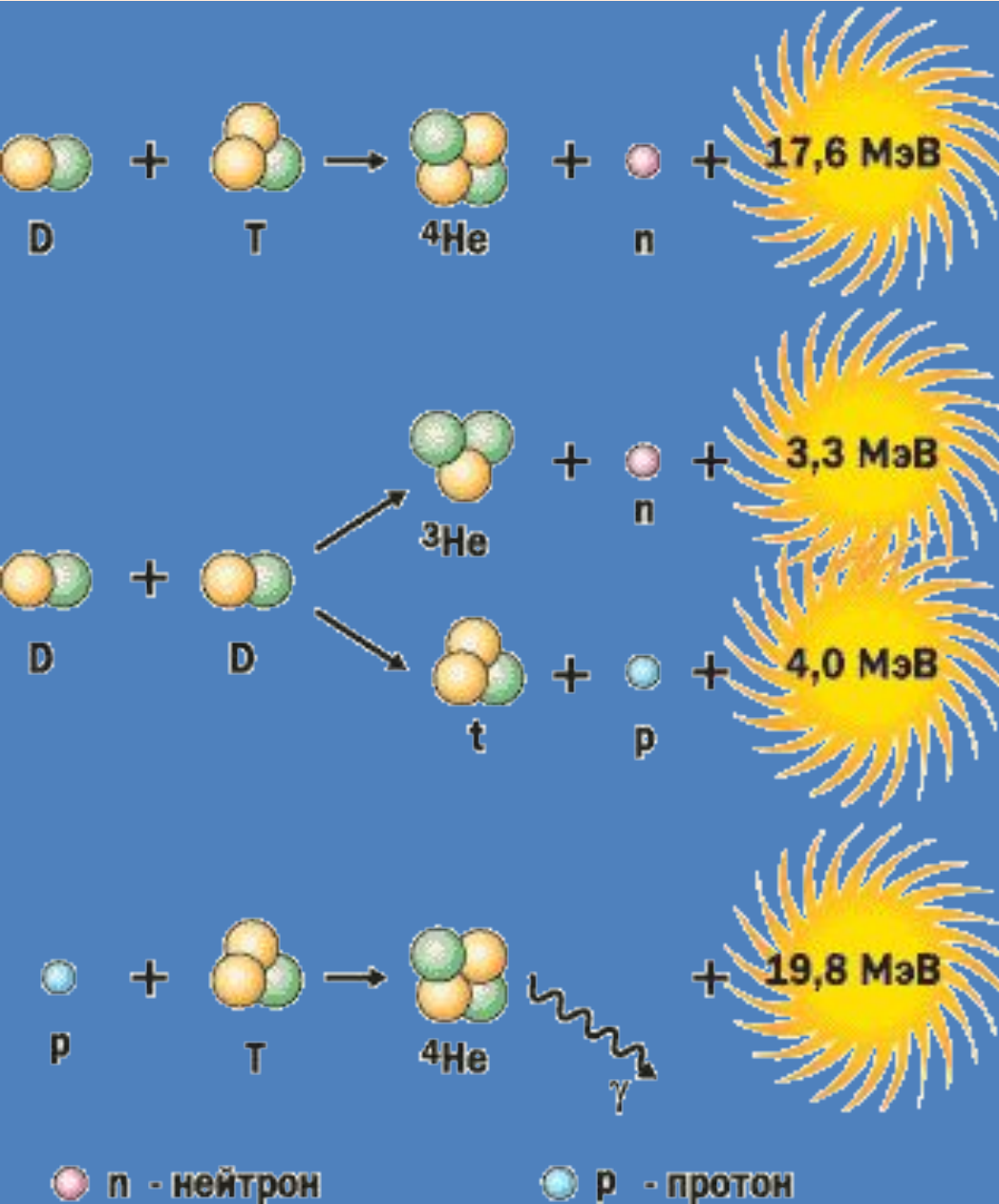


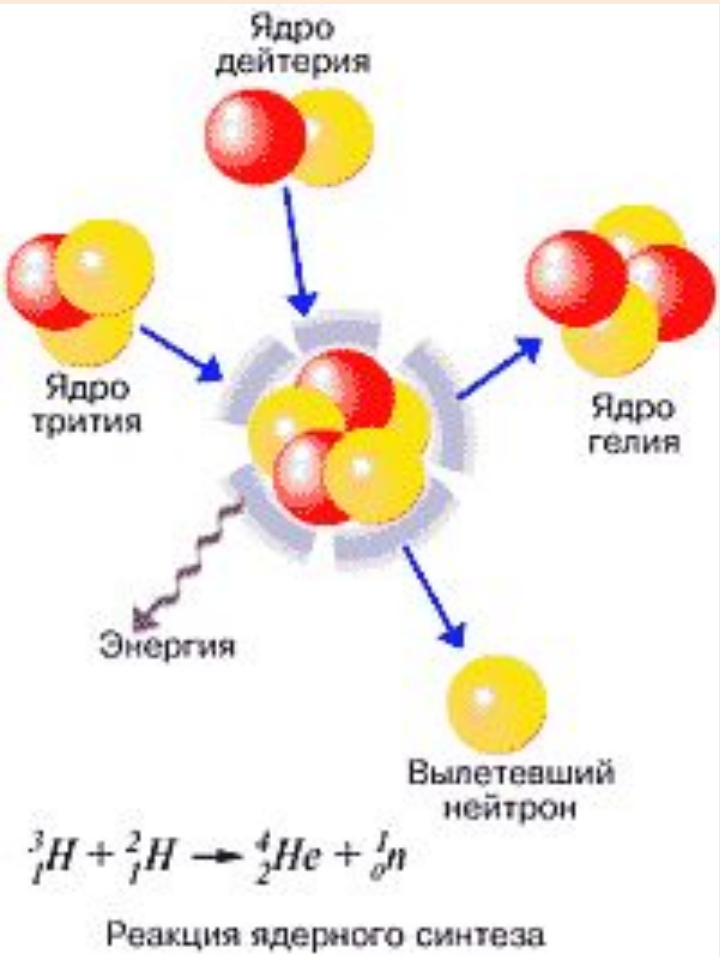
Рис. 56. Реактор Нововоронежской АЭС (подготовка к работе).

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:

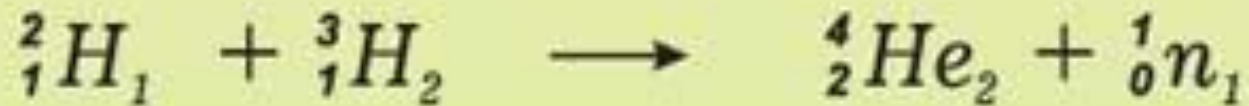


$$E = \Delta m \cdot c^2, \quad \Delta m = m_A + m_a - m_B - m_b$$

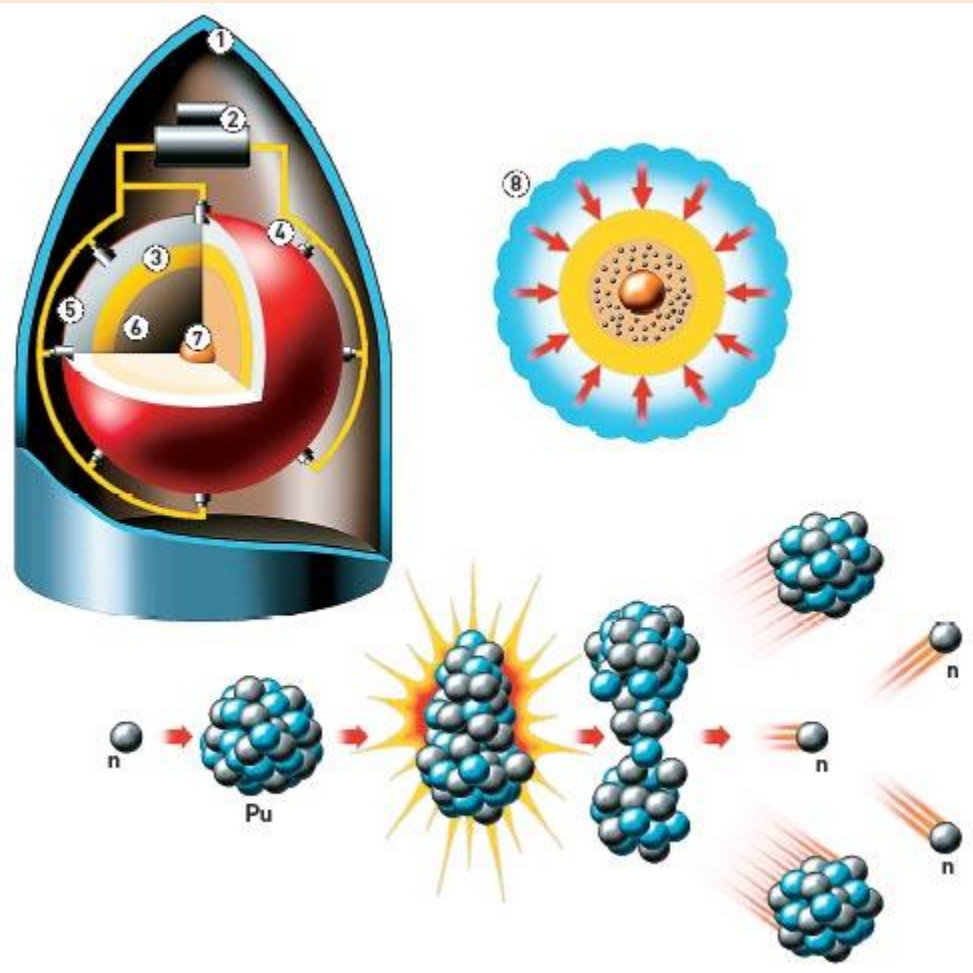
Реакция синтеза ядра гелия из ядер водорода:



$$\Delta E = 17,6 \text{ МэВ}$$

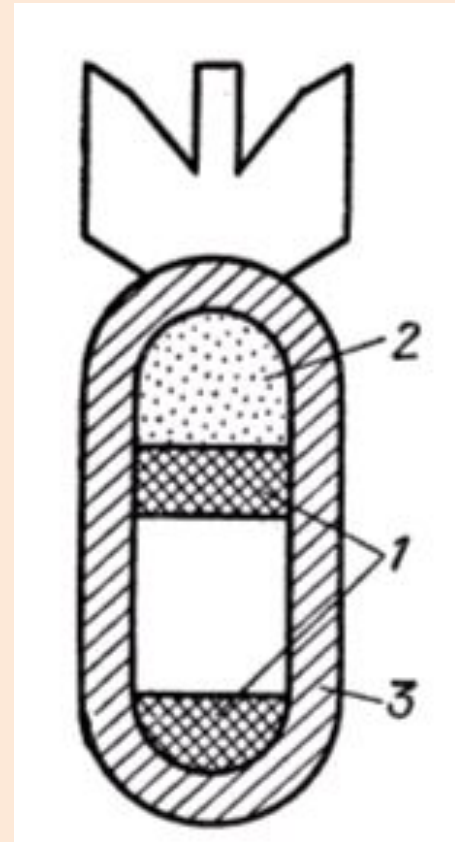
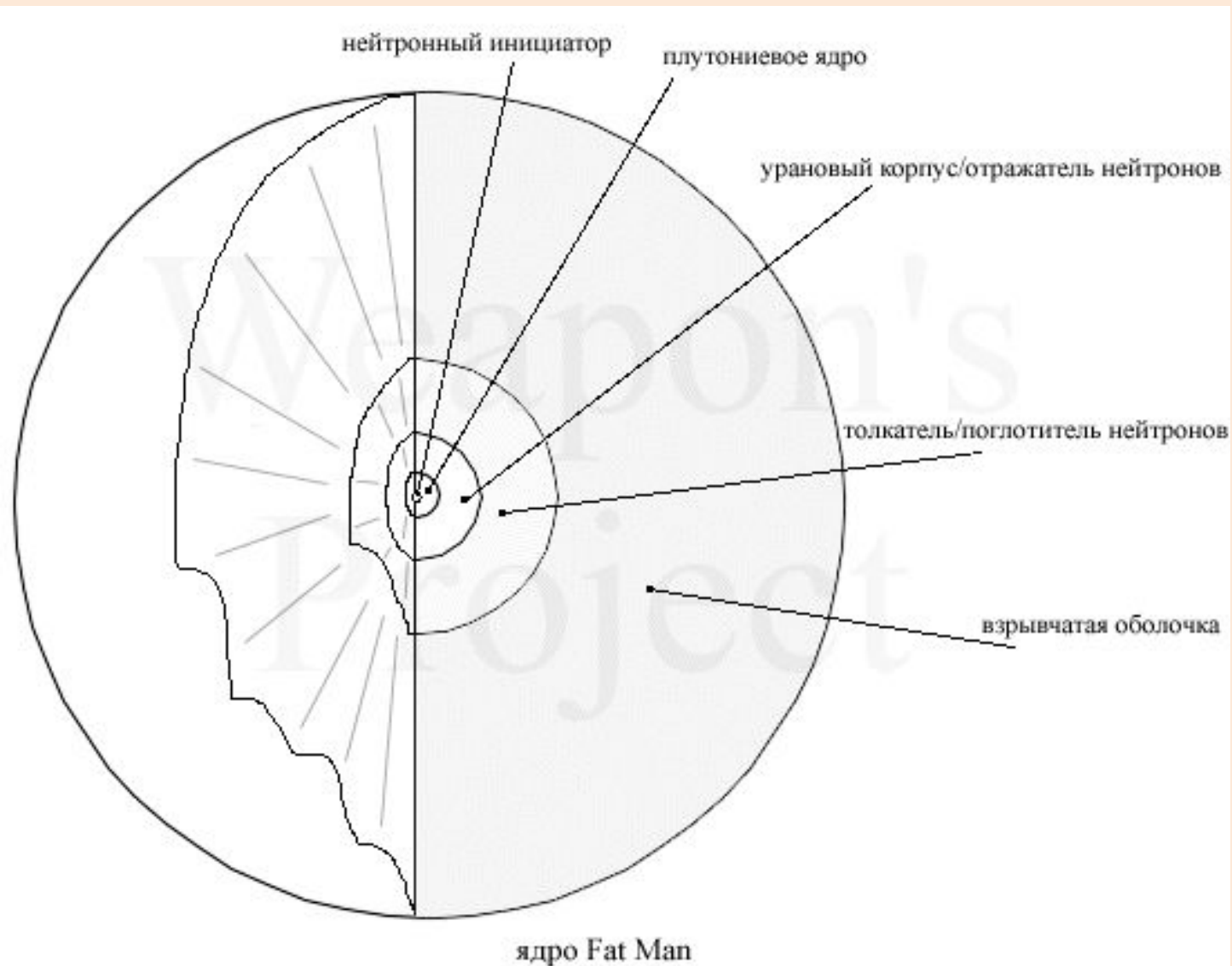


Атомная бомба



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

Устройство атомной бомбы



Атомная бомба

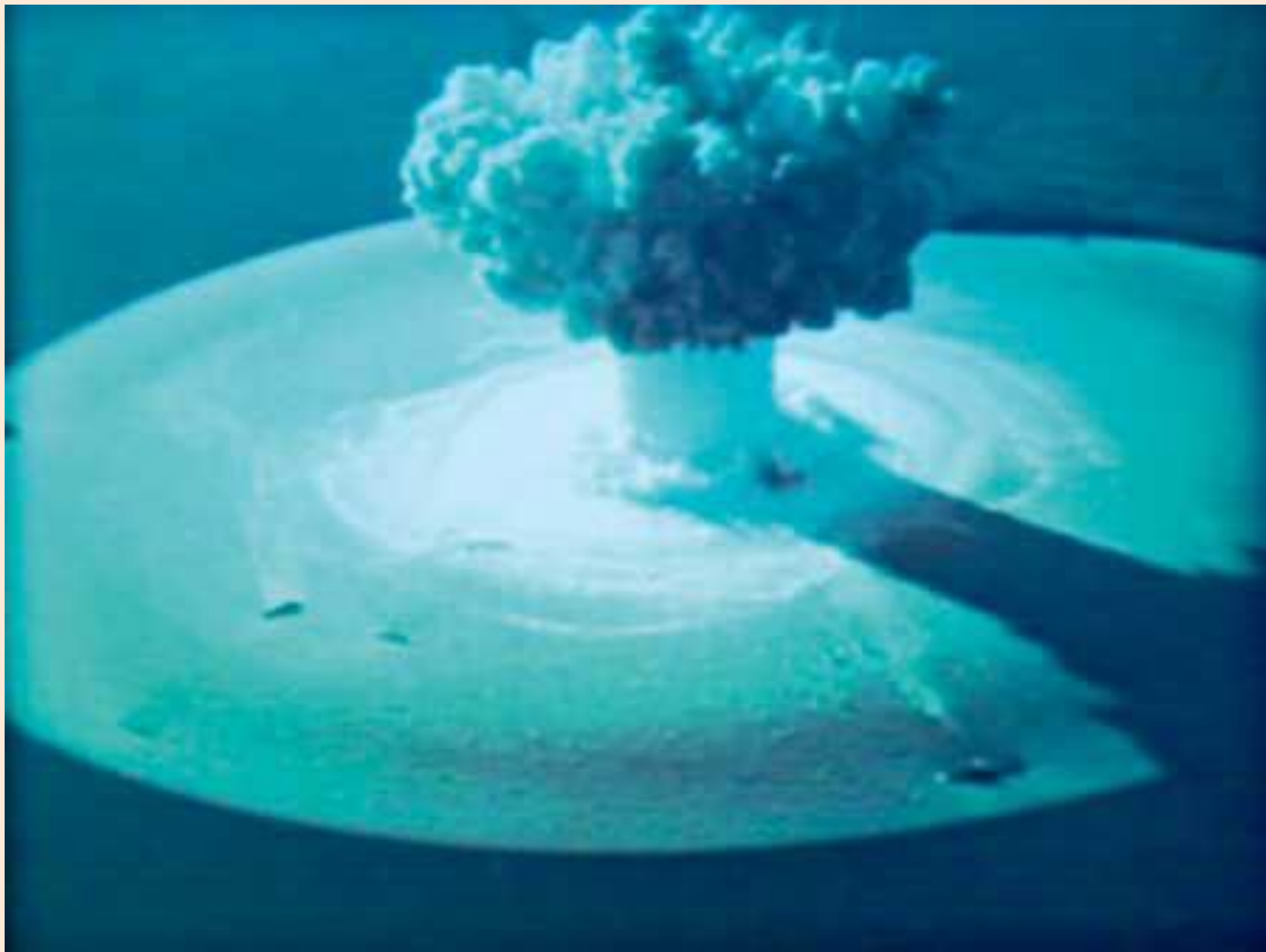


Атомные бомбы «Малыш» и «Толстяк»

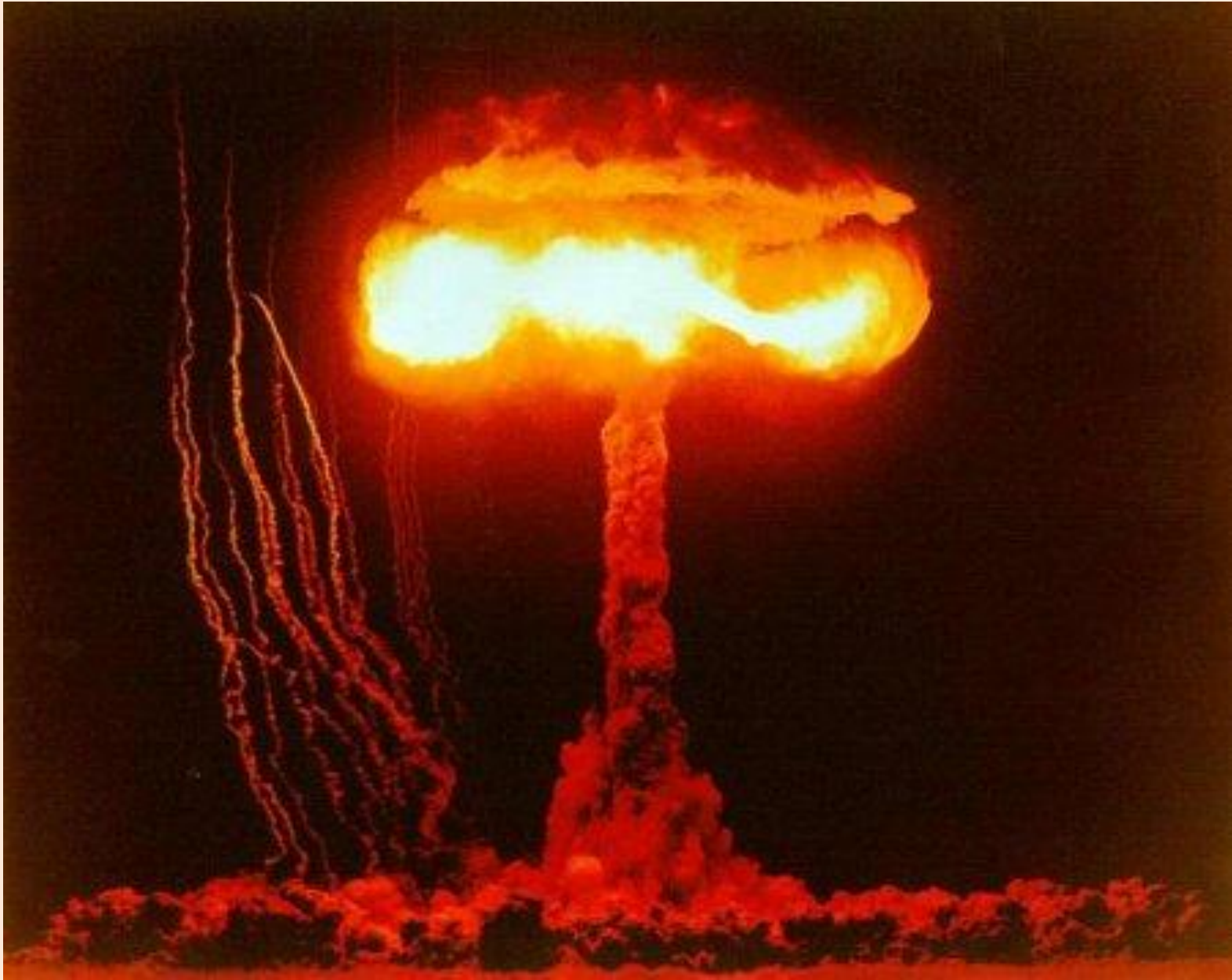


Little boy и Fat man

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



АТОМНЫЙ взрыв



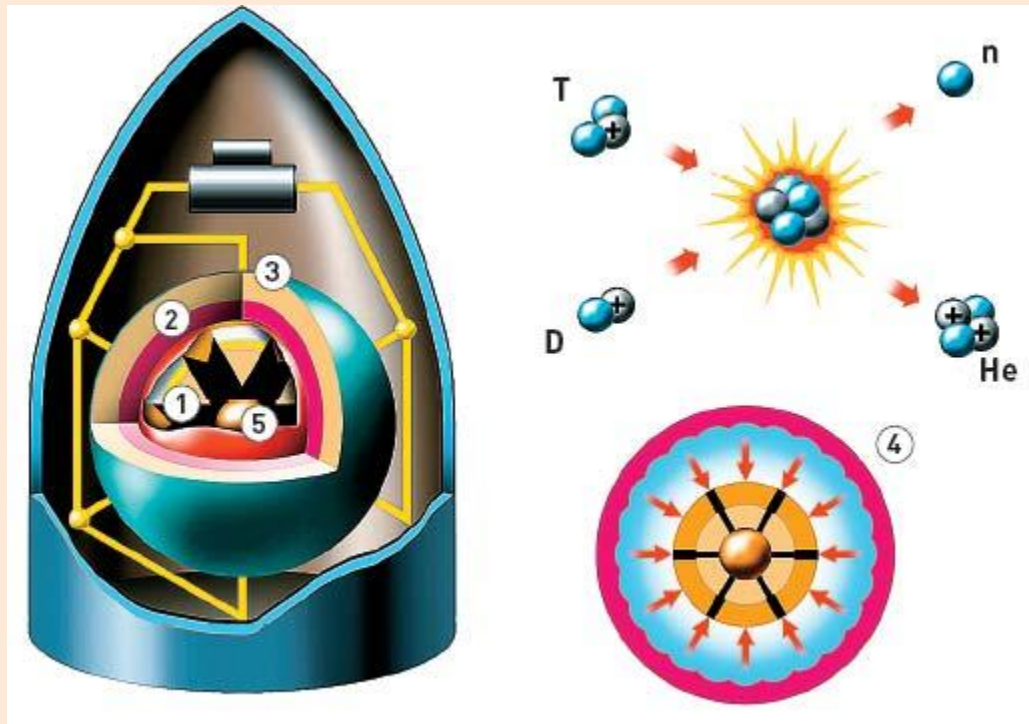
Испытание РДС-6с состоялось 12 августа 1953 г.

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}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}U , сжимающую и поджигающую термоядерное топливо

Термоядерный взрыв



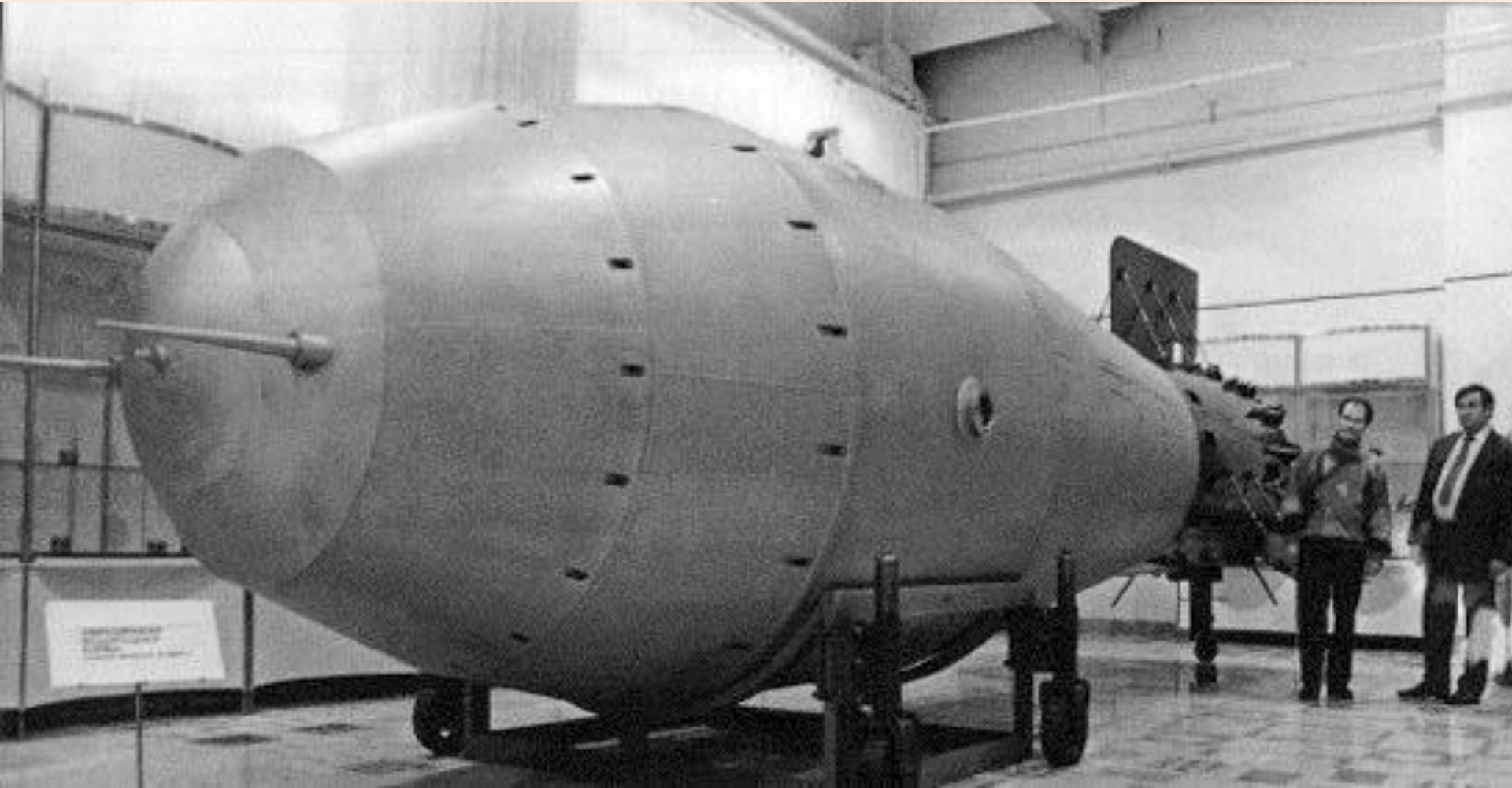
Термоядерный взрыв



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

