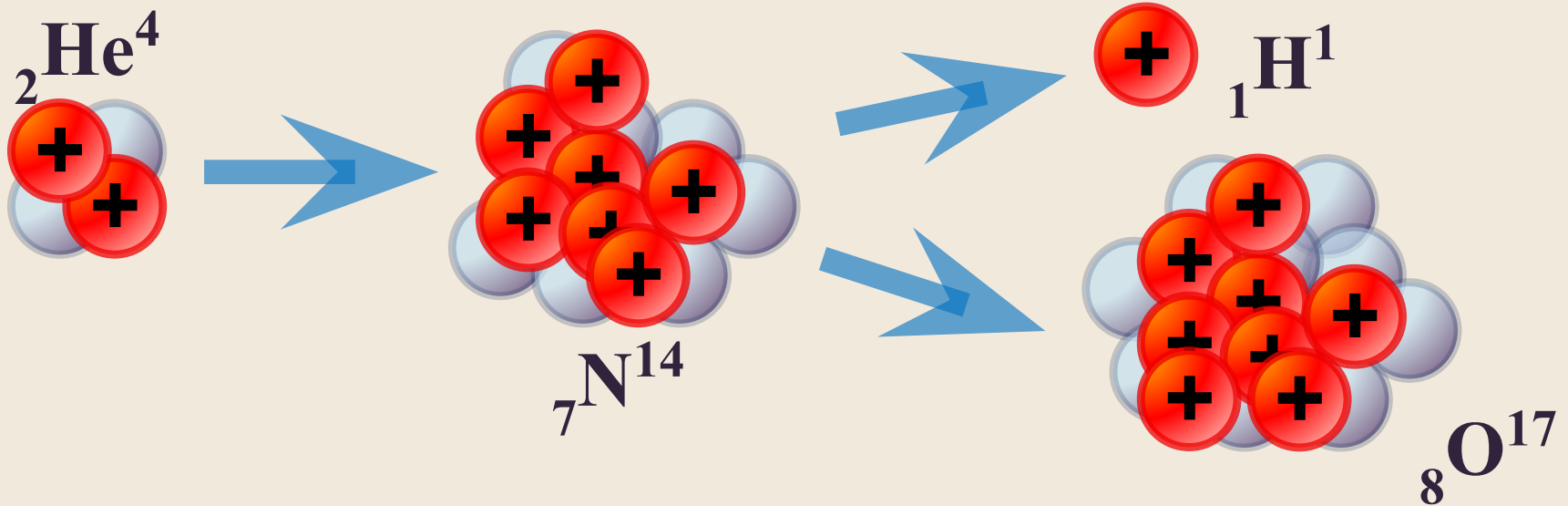
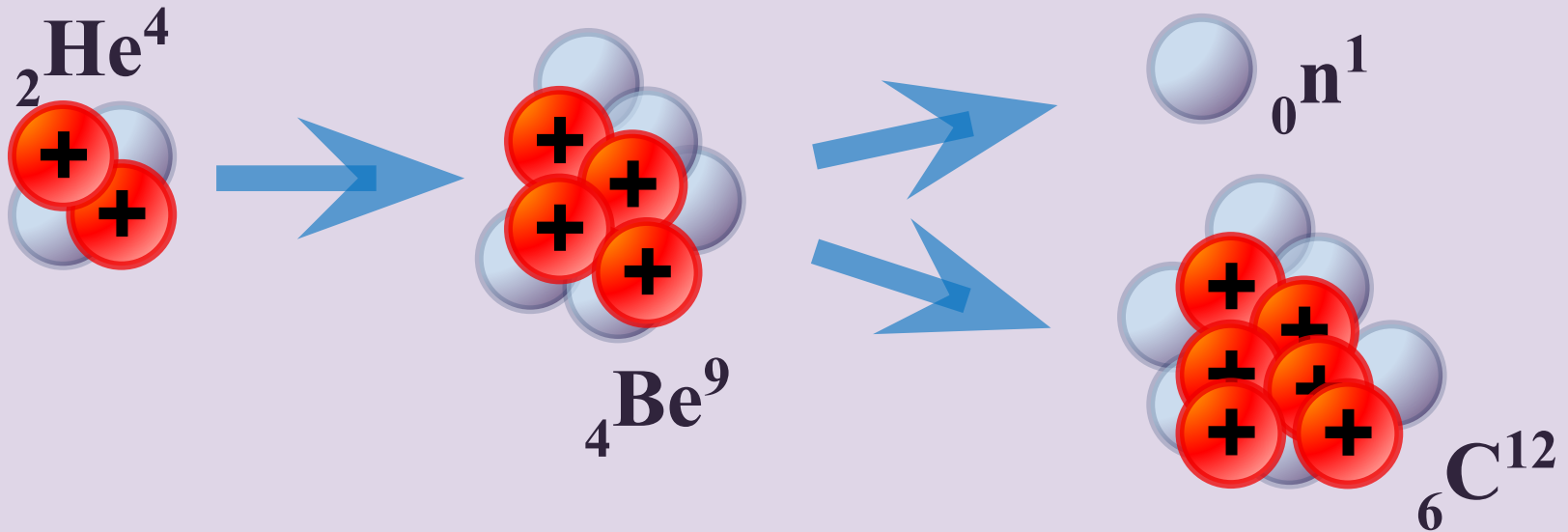
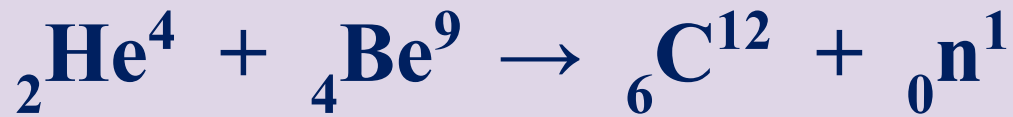


Открытие протона (Э. Резерфорд – 1919 г.)



Протон: заряд = $+1$, масса = $1.6726 \cdot 10^{-27}$ кг

Открытие нейтрона (Дж. Чедвик – 1932 г.)



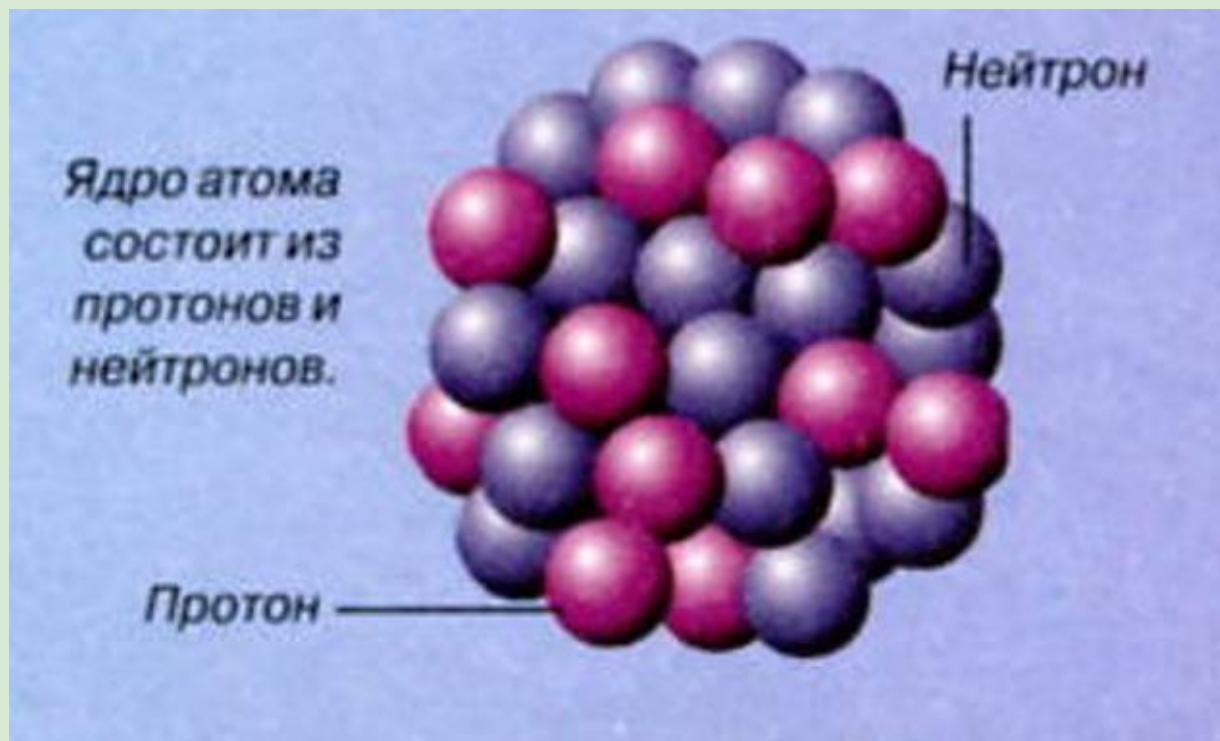
Нейтрон: заряд = 0, масса = $1.6749 \cdot 10^{-27}$ кг

Состав ядра

Ядро состоит из нуклонов: протонов и нейтронов. Протонно-нейтронная модель была предложена Гейзенбергом и Иваненко в 1932 году.

Практически вся масса атома сосредоточена в ядре.

Плотность ядерного вещества огромна: *100 мегатонн в см³*.



Размер ядра

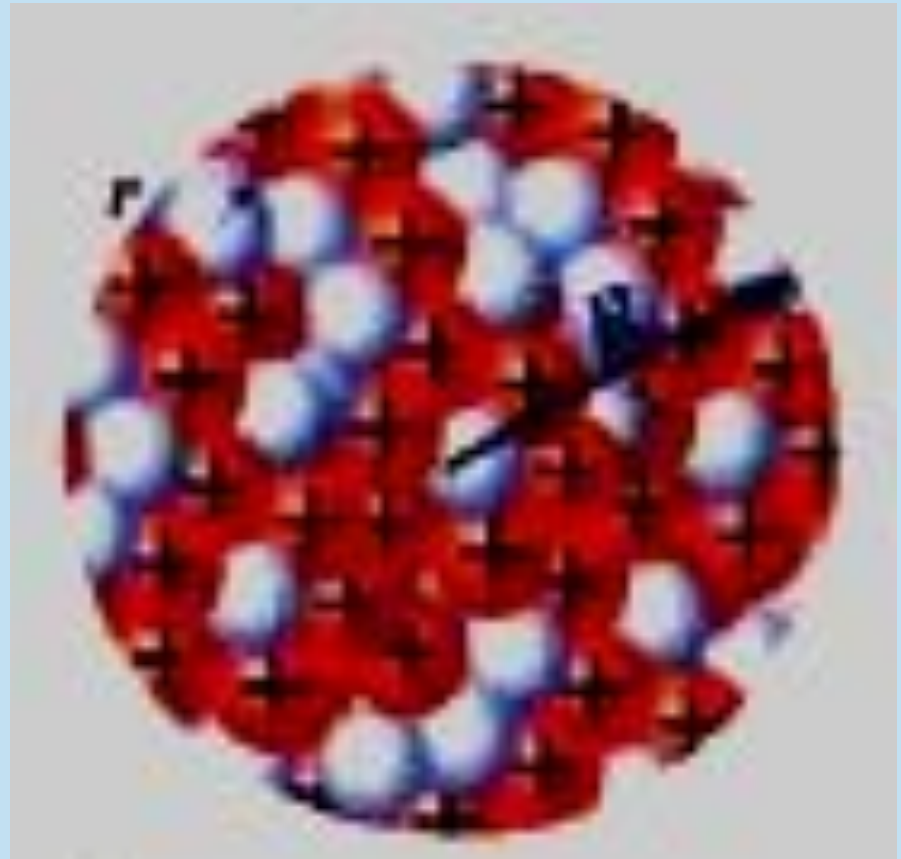
Объем ядра

$$\frac{4}{3}\pi R^3 = \frac{4}{3}\pi r^3 \cdot A$$

A – массовое число –
число нуклонов в ядре

$$R = r \cdot A^{1/3}$$

$$r = 1.2 \cdot 10^{-15} \text{ м}$$



Шар, состоящий из ядерного вещества, диаметром **0.5 км** равен по весу земному шару.

Спин ядра

Протон имеет спин

$$s = 1/2$$

и собственный магнитный момент

$$\mu_p = +2.79 \mu_J$$

μ_J – ядерный магнетон

– единица магнитного момента.

$$\mu_J = \frac{-e\hbar}{2m_p} = \frac{\mu_B}{1836};$$

почти в 2000 раз меньше магнетона Бора. \Rightarrow магнитный момент протона в 600 раз меньше магнитного момента электрона.



Спин ядра

Нейтрон тоже обладает спином $S = 1/2$ и собственным магнитным моментом

$$\mu_n = -1.91 \mu_J$$

несмотря на отсутствие заряда.

Спины нуклонов складываются в результирующий спин ядра по правилам квантовой механики.

Спин ядра квантуется по закону. $L_J = h \cdot \sqrt{I(I+1)}$;

Квантовое число спина ядра I будет целым (или нулем) при четном и полуцелым при нечетном числе нуклонов.

Спины большинства нуклонов антипараллельны $\Rightarrow I$ - небольшое число.

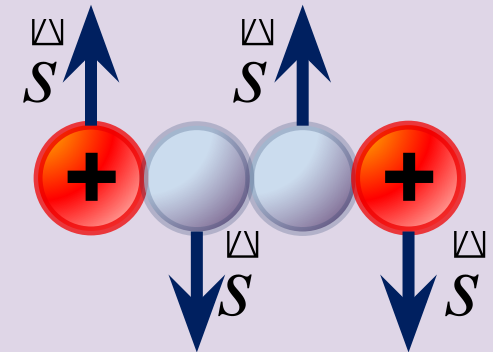
У всех четно – четных ядер (четное число протонов и нейтронов) спин равен нулю.

Спин ядра ядро атома гелия

нуклоны в ядре



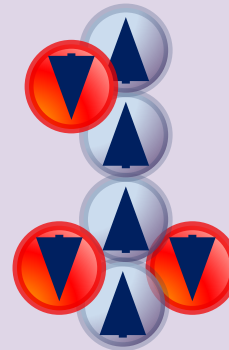
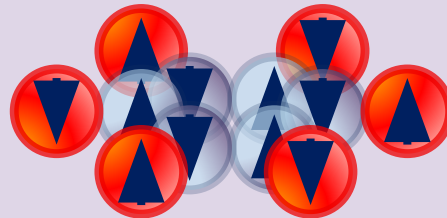
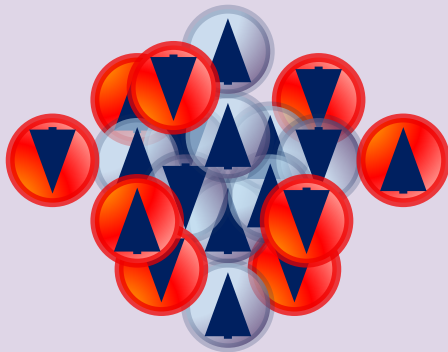
Спины нуклонов в основном
состоянии



ядро атома фтора



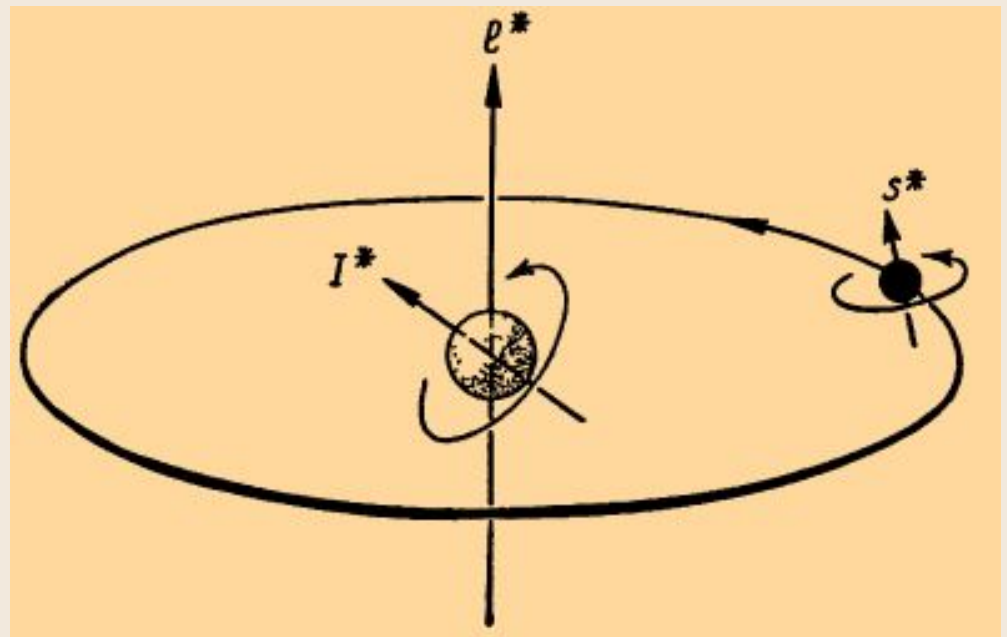
Составные части ядра



Спин ядра

Момент импульса ядра складывается с моментом электронной оболочки в результирующий момент атома с квантовым числом F ($L_I + L_J \rightarrow L_F$).

Взаимодействие магнитных моментов электронов и ядра приводит к зависимости энергии от взаимной ориентации моментов ядра и электронов \Rightarrow сверхтонкая структура. (очень малая величина).



Модели ядра

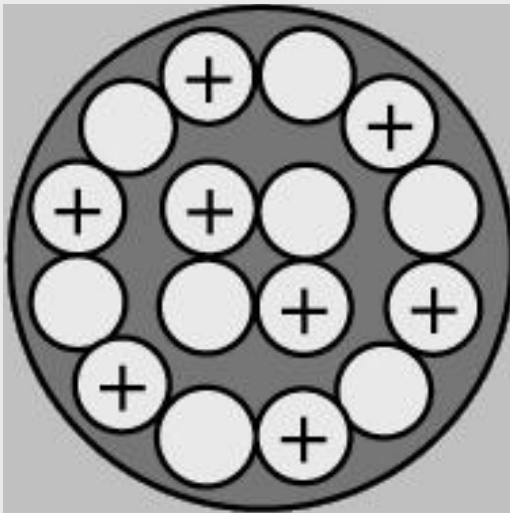
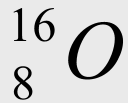
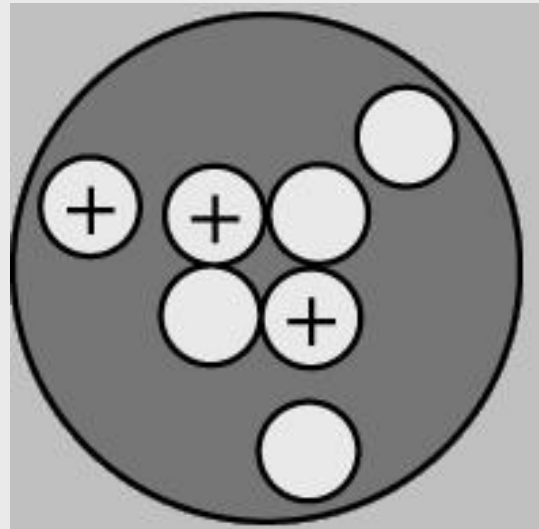
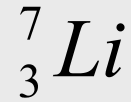
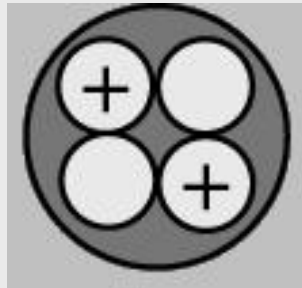
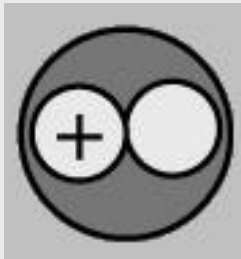
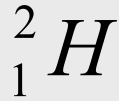
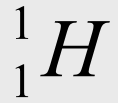
Для описания свойств ядра создают ядерные модели, т.к. построение общей теории затруднительно из-за недостатка знаний о характере сил и громоздкости квантовой задачи многих тел.

Исчерпывающего описания не дает ни одна из моделей.

Оболочечная модель предложена М. Геппер-Майер.

Нуклоны движутся независимо в усредненном центральном симметричном поле. Энергетические уровни заполняются и учетом принципа Паули, уровни дискретные, группируются в оболочки. На каждой оболочке может находиться определенное число нуклонов. Полностью заполненная оболочка – особо устойчивое образование.

Модели ядра



Модели ядра

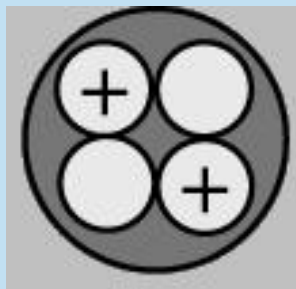
Из опыта: особо устойчивые ядра у которых число протонов или число нейтронов (или оба числа) равно 2, 8, 20, 28, 50, 82, 126 – магические числа,

⇒ магические ядра,
дважды магических
ядер пять:

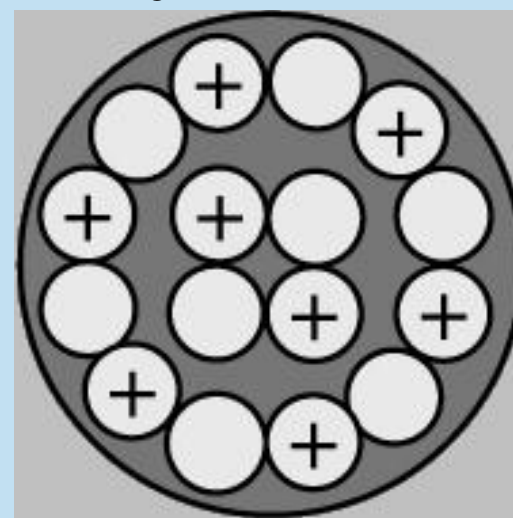
⇒ ${}^4_2\text{He}$, ${}^{16}_8\text{O}$, ${}^{40}_{20}\text{Ca}$,
 ${}^{48}_{20}\text{Ca}$, ${}^{208}_{82}\text{Pb}$, –
особо устойчивы ⇒

α – частицы – продукт
распада.

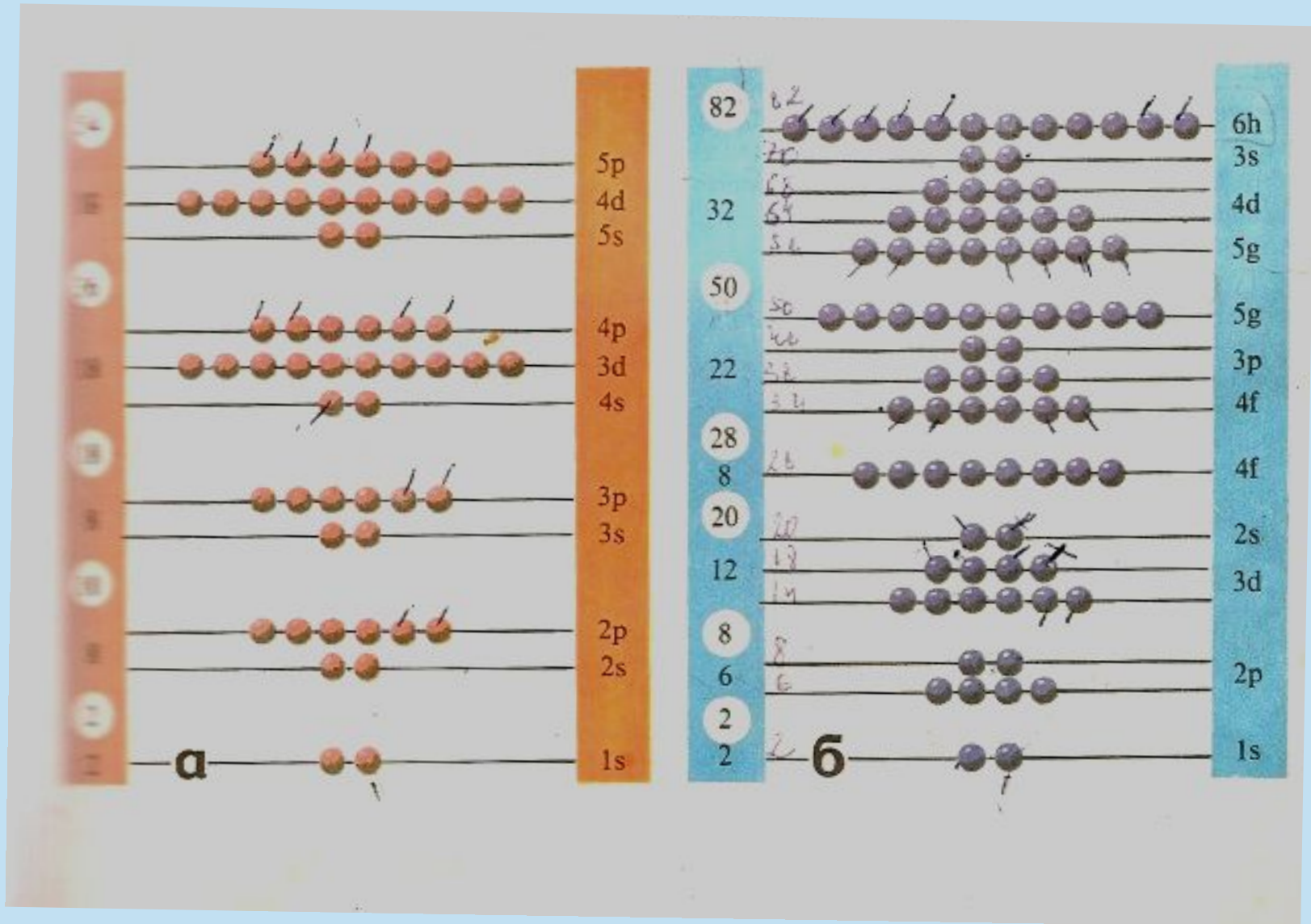
${}^4_2\text{He}$



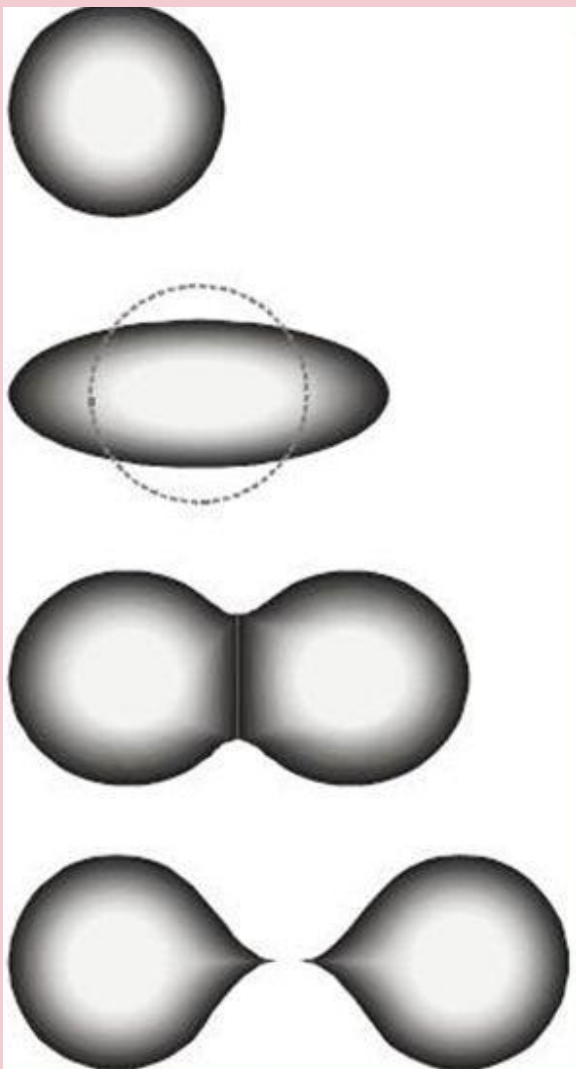
${}^{16}_8\text{O}$



Модели ядра



Модели ядра

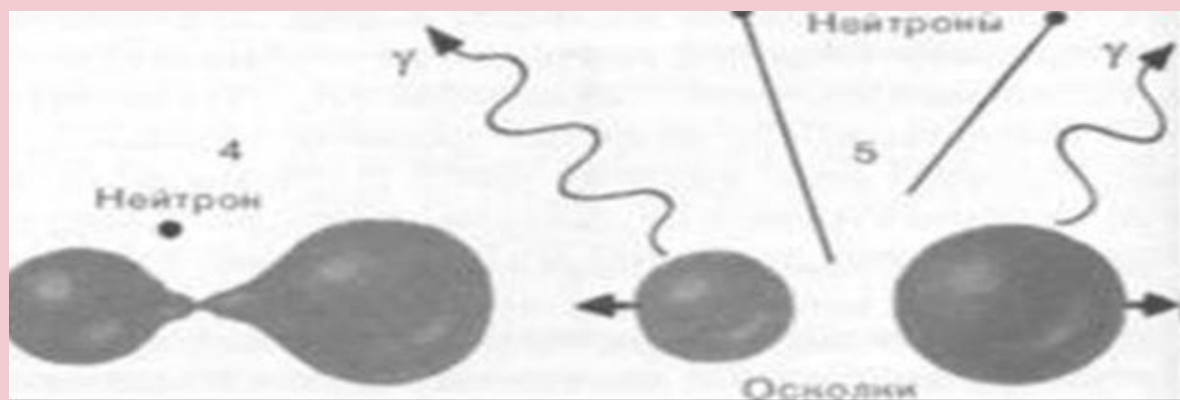


Капельная модель.

Я.Н. Френкель 1939 год.

Н Бор – развитие.

Сходство ядра с каплей жидкости;
одинаковая плотность у всех ядер \Rightarrow
несжимаемость; силы между составными
частями – короткодействующие.
Объясняет процесс деления ядер.

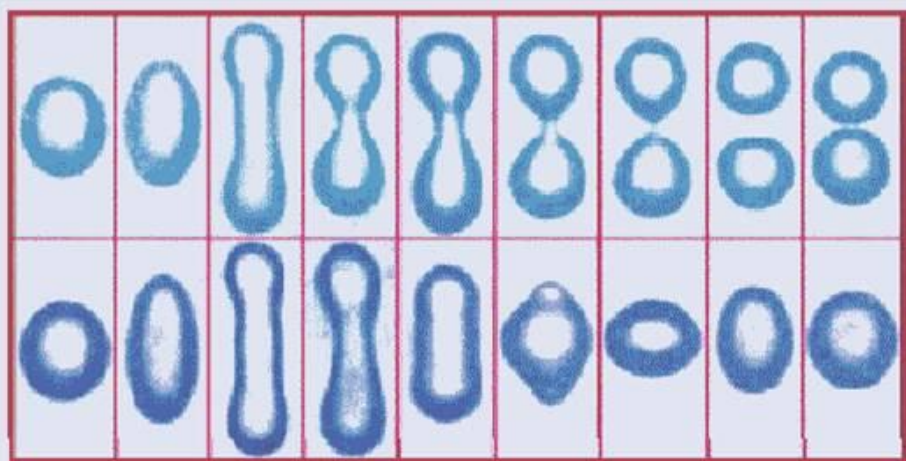


Модели ядра

Механизм деления ядра

Ядро представляется в виде шара с электрическим зарядом, равномерно распределенным по объему.

Когда ядро поглощает нейтрон, приобретенная энергия идет либо на возбуждение нуклонов, либо на деформацию ядра



Ядро удлиняется до седловидной точки. Сила отталкивания между зарядами на концах вытянутого ядра становится больше чем притягивающая ядерная сила. Ядро делится на два осколка

Ядерные силы и энергия связи ядра

Ядерные силы – силы, удерживающие нуклоны в ядре, во много раз превосходят силы кулоновского отталкивания протонов.

Энергия связи ядра равна минимальной энергии, которую необходимо затратить для полного расщепления ядра на отдельные нуклоны.

Энергия связи ядра - энергия, выделившаяся при образовании ядра из отдельных нуклонов.

Дефект массы:

$$\Delta M = Zm_p + Nm_n - M_{\text{я}}$$

Энергия связи нуклонов в ядре огромна, \Rightarrow масса ядра $m_{\text{я}}$ заметно меньше суммы масс входящих в него частиц (в отличии от атома).

$$E = m \cdot c^2$$

$$E_{\text{св}} = \Delta M \cdot c^2$$

Дефект масс и энергия связи ядра

Дефект массы часто легче посчитать в *а.е.м.*

На *1 а.е.м.* приходится энергия связи =
931 МэВ

Пример расчета для бора ${}_5\text{B}^{10}$

$$E_{\text{св}} = [(Z \cdot m_p + N \cdot m_n) - m_{\text{я}}] \cdot 931,5 \text{ МэВ};$$

$$E_{\text{св}} = [(5 \cdot 1,00728 + 5 \cdot 1,00866) - 10,01019] \cdot 931,5 \text{ МэВ} \approx 64,75 \text{ МэВ}.$$

Дефект масс и энергия связи ядра

Удельная энергия связи – энергия связи на один нуклон.

В ядре тяжелого водорода (дейтона)

${}^2_1\text{H}$ составляет

1.1 МэВ

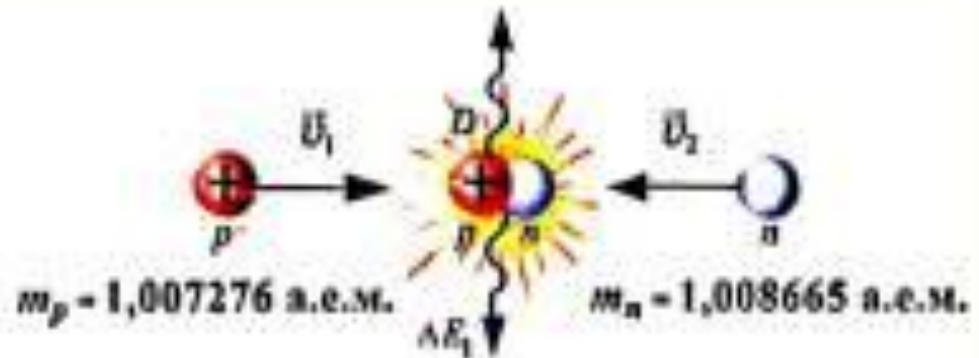
($\Delta M = 0.0024$ а.е.м.

$E_{\text{св}} = 2.2$ МэВ)

Заметно меньше чем в ядре гелия.

①

ОБРАЗОВАНИЕ ДЕЙТРОНА



$$m_D = 2,013553 \text{ а.е.м.}$$

$$\Delta m = (m_p + m_n) - m_D = 0,002388 \text{ а.е.м.}$$

$$\Delta E = \Delta m \cdot c^2 = 2,224 \text{ МэВ}$$

$$\text{Удельная энергия } (E_{\text{св}})_1 = \frac{1}{2} \Delta E = 1,112 \text{ МэВ}$$

связи

Дефект масс и энергия связи ядра

У ${}^4_2\text{He}$ Удельная энергия связи

составляет

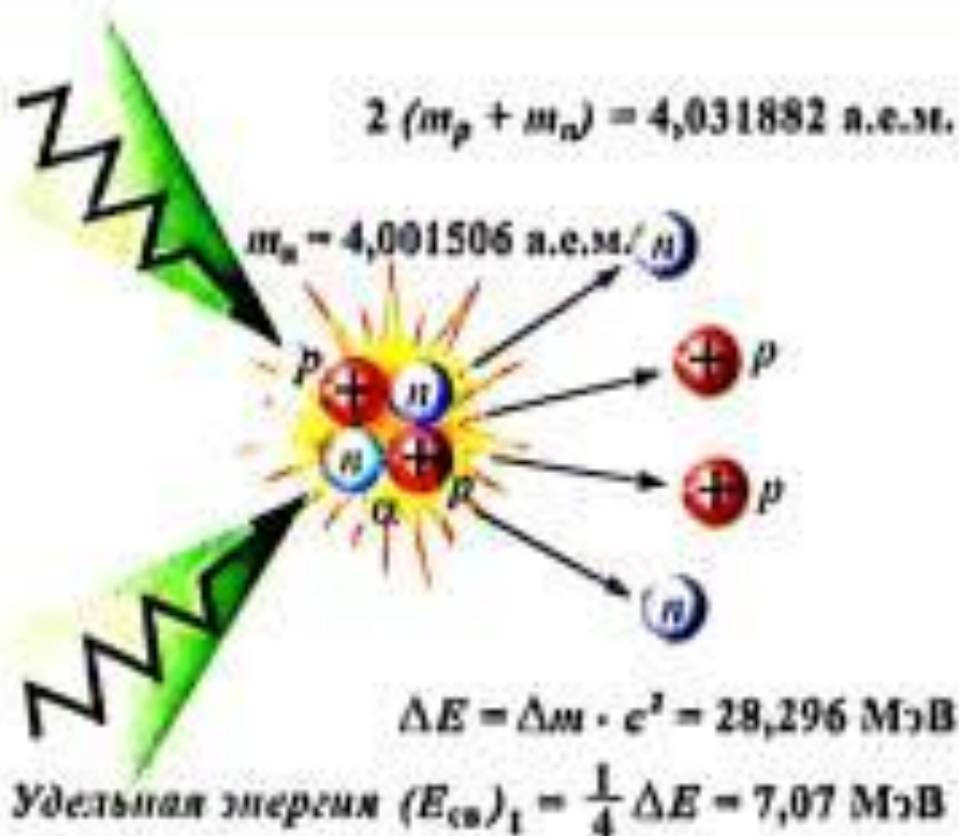
7.1 МэВ

$(\Delta M = 0.03 \text{ а.е.м.})$

$E_{\text{св}} = 28.3 \text{ МэВ}$

Для других атомов того же порядка.

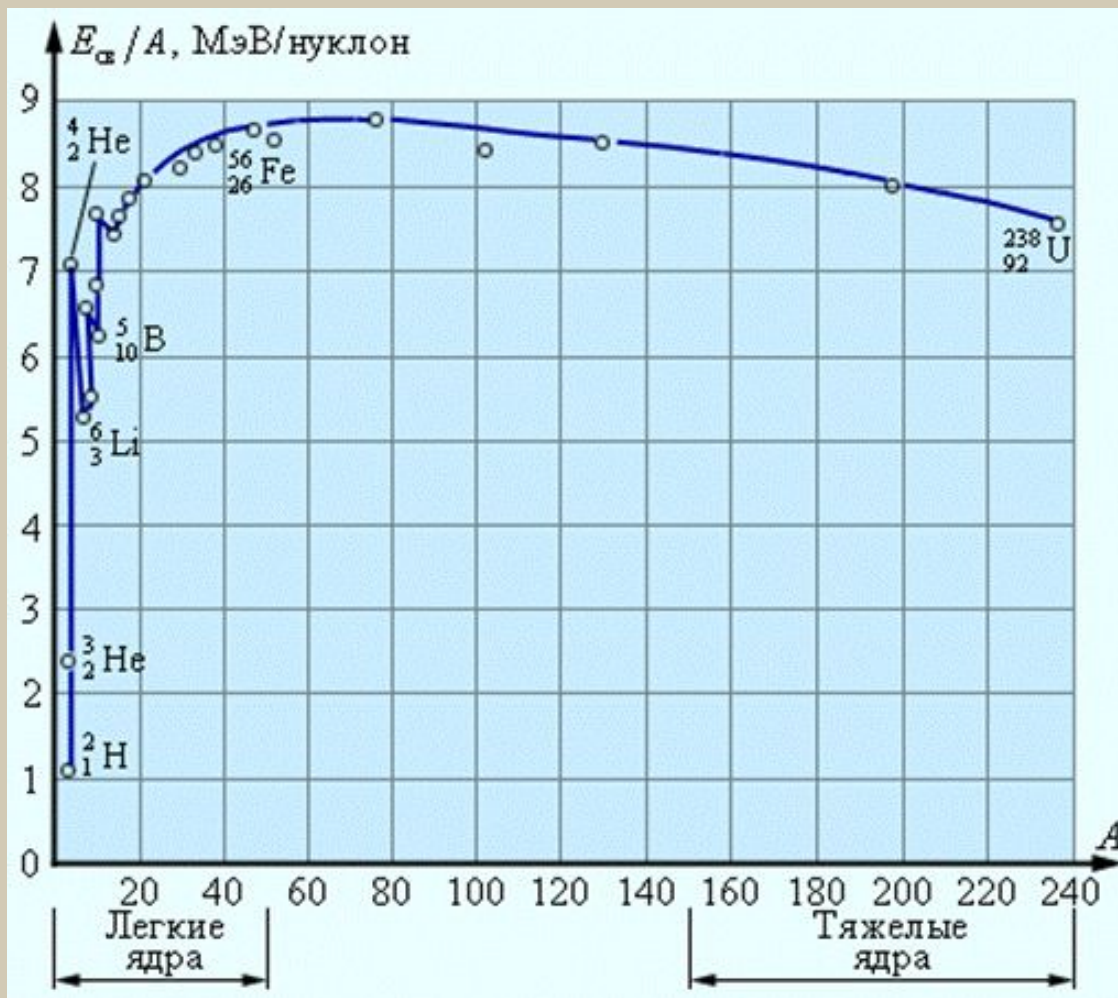
② ЭНЕРГИЯ СВЯЗИ α - ЧАСТИЦЫ



Дефект масс и энергия связи ядра

Элемент	Число протонов в ядре	Число всех нуклонов в ядре	Энергия связи ядра, Мэв	Энергия связи на один нуклон, Мэв
Водород . . .	1	1	0	0
Дейтерий * . .	1	2	2,18	1,09
Гелий	2	4	28,20	7,05
Литий	3	6	31,81	5,30
Углерод . . .	6	12	91,66	7,64
Кислород . .	8	16	126,96	7,94
Уран	92	238	1780,0	7,5

Дефект масс и энергия связи ядра



Сильнее всего
связаны нуклоны в
ядрах с $A = 50 \div 60$
от Cr до Zn
(8.7 МэВ)

с ростом A падает
(7.5 МэВ у урана).

⇒ деление тяжелых
ядер и слияние
легких,
сопровожающееся
выделением
энергии.

Дефект масс и энергия связи ядра

Одно деление урана

⇒ **240 МэВ**,

слияние двух ${}_1\text{H}^2 \rightarrow {}_2\text{He}^4 \Rightarrow 24 \text{ МэВ}$.

Образование $\text{CO}_2 \Rightarrow 5 \text{ эВ}$.

При реализации есть проблемы с активацией тяжелых ядер и сближением легких до

$$10^{-15} \text{ м.}$$

Барьер: кулоновские силы отталкивания.

Ядерный и термоядерный взрыв, атомные электростанции, Солнце и звезды.

Ядерные силы

Между нуклонами очень интенсивное взаимодействие, имеющее характер притяжения.

Силы, связывающие нуклоны в ядре, называются **ядерными**.

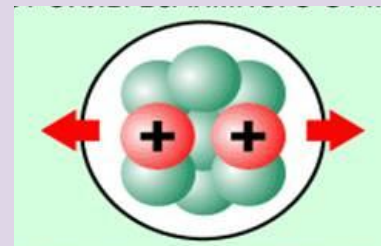
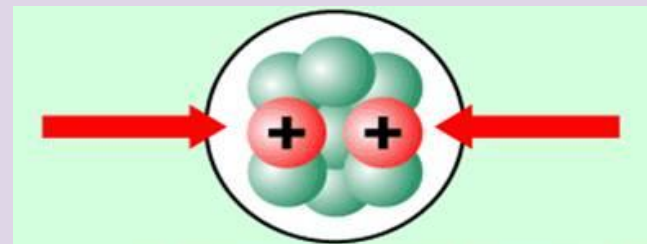
Ядерные силы \gg сил электрического взаимодействия ($\sim 1 \text{ МэВ}$).

\Rightarrow **сильное взаимодействие**.

Ядерные силы **короткодействующие** (радиус действия 10^{-15} м)

Ядерные силы действуют между нуклонами **независимо от заряда** (протон-протон, нейтрон-нейтрон, нейтрон-протон)

Ядерные силы не центральные, нельзя представить действующими вдоль прямой между центрами нуклонов, \Rightarrow зависимость от ориентации спинов нуклонов. Дейтон образуется только если спины p и n одинаковы.

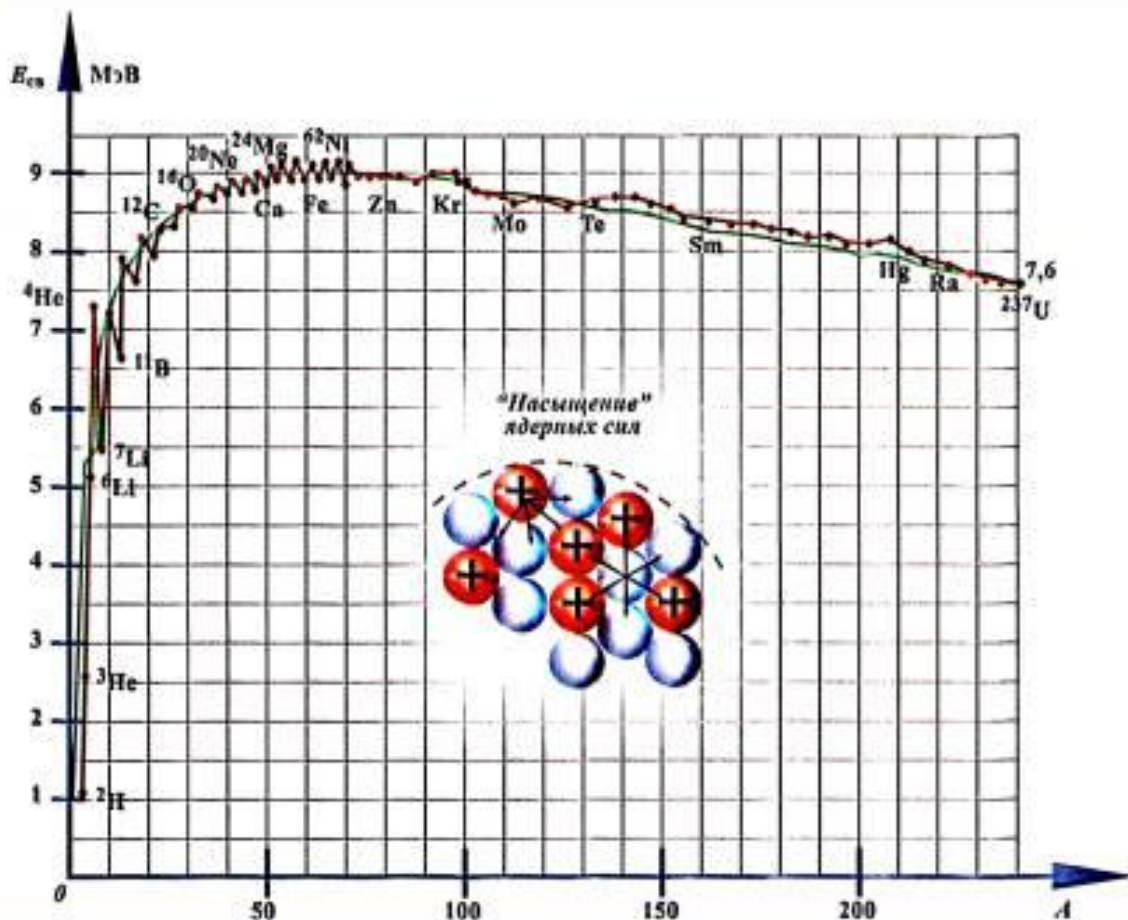


Ядерные силы

Обладают свойством насыщения: нуклон в ядре взаимодействует с ограниченным числом соседей, \Rightarrow примерно постоянная удельная энергия связи и пропорциональность объема ядра числу нуклонов.

③

УДЕЛЬНАЯ ЭНЕРГИЯ СВЯЗИ НУКЛОНА В ЯДРЕ



α – распад и энергетические уровни ядра

Распад протекает по схеме: ${}_Z X^A \rightarrow {}_{Z-2} Y^{A-4} + {}_2 \text{He}^4$

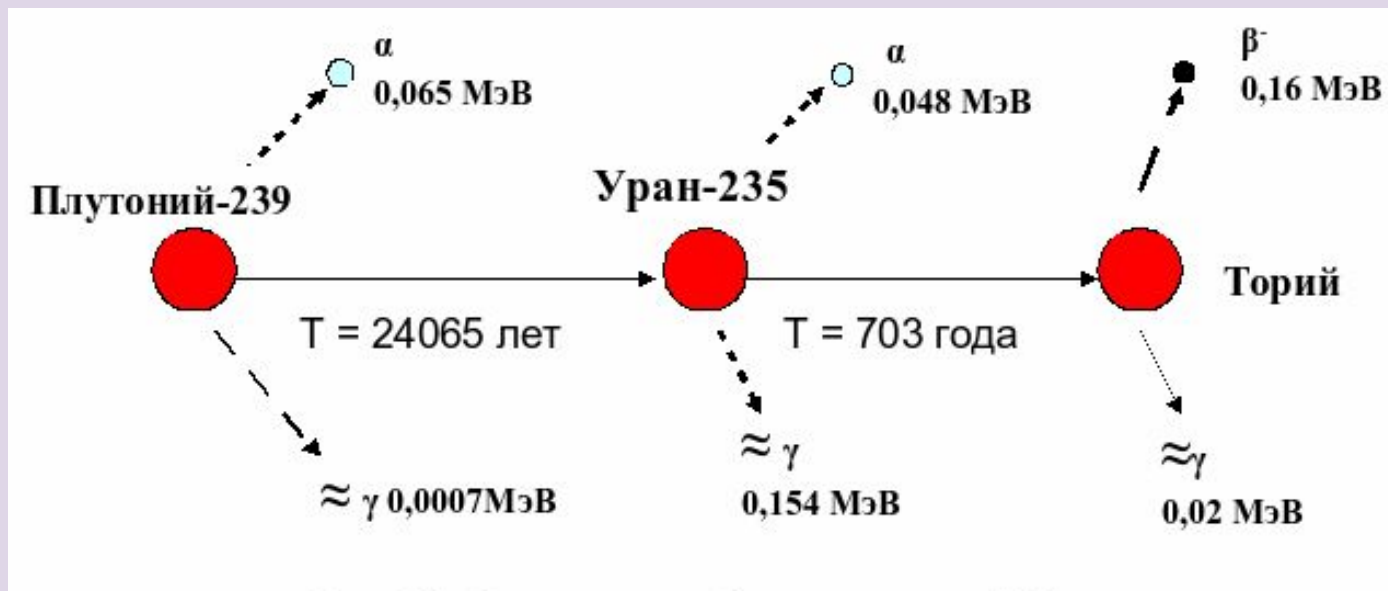
Альфа распад урана 238



Кинетическая энергия равна избытку энергии покоя материнского ядра над суммой масс дочернего и α –частицы. Эта энергия разделяется между продуктами обратно пропорционально их массам.

α – распад и энергетические уровни ядра

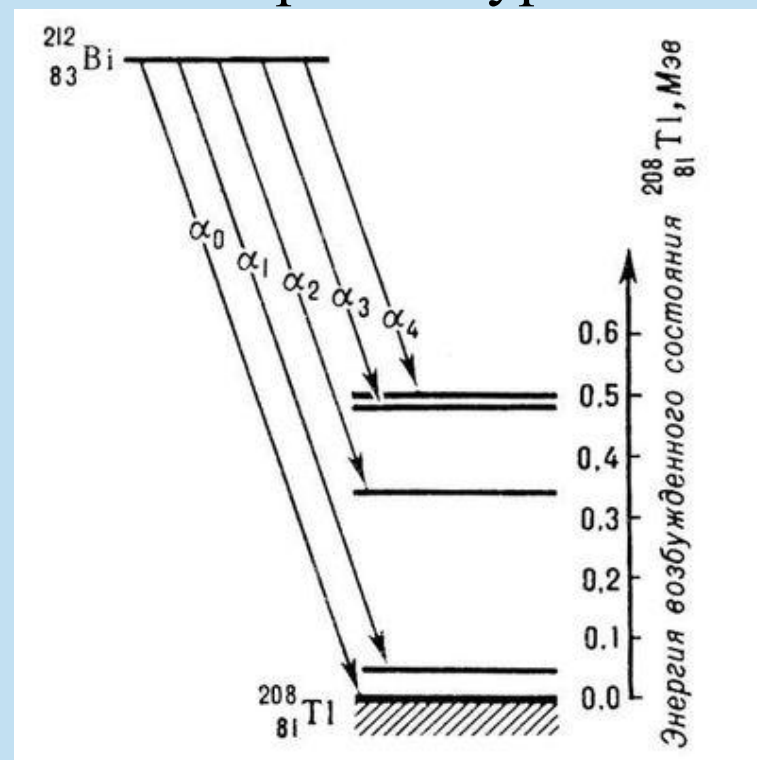
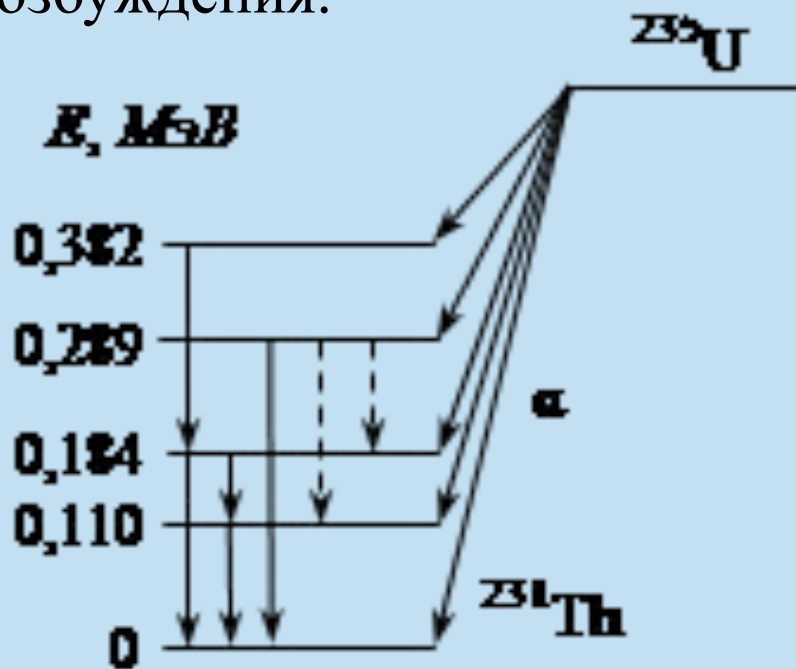
Скорости α – частиц очень велики: кинетическая энергия может достигать несколько *МэВ*.



Пролетая через вещество, α – частица затрачивает энергию на ионизацию (по 35 эВ на пару ионов) $\Rightarrow 10^5$ пар ионов \Rightarrow в воздухе пролетает несколько сантиметров, в твердых телах – десятки микрон (лист бумаги задерживает полностью).

α – распад и энергетические уровни ядра

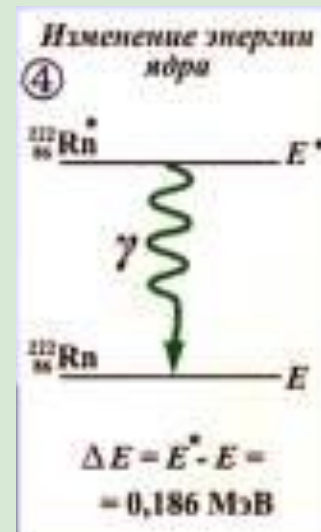
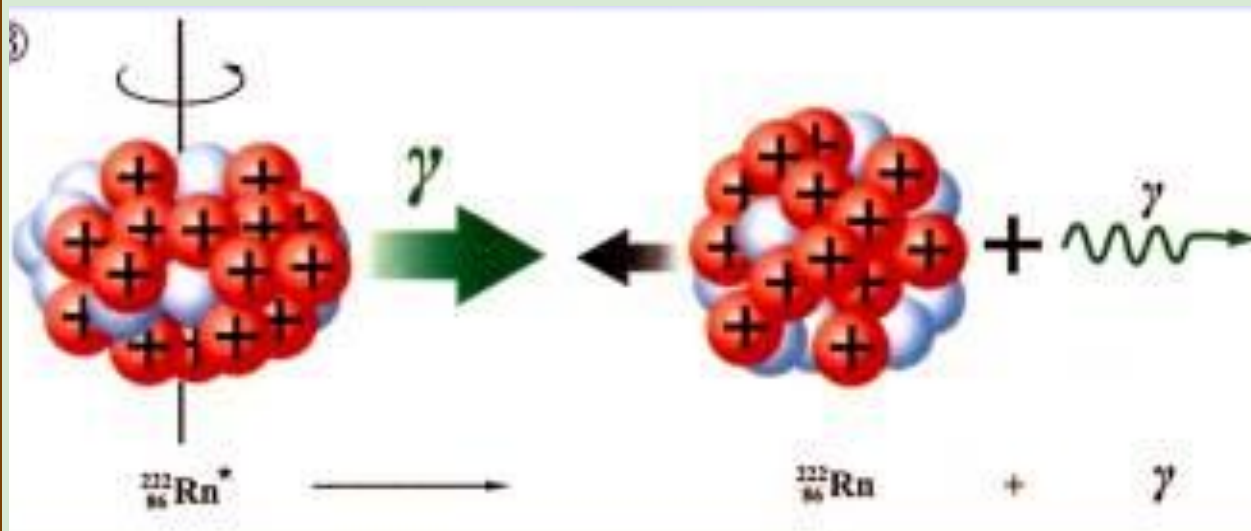
Энергии α –частиц оказывается строго определенными (линейчатый спектр). В большинстве случаев испускается несколько групп α –частиц с близкой, различной энергией. \Rightarrow дочернее ядро в возбужденном состоянии на разных уровнях возбуждения.



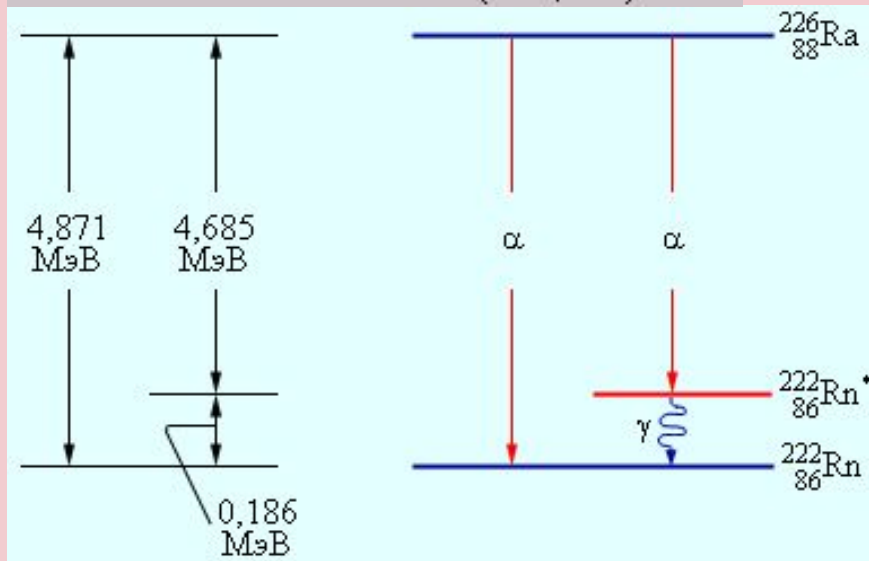
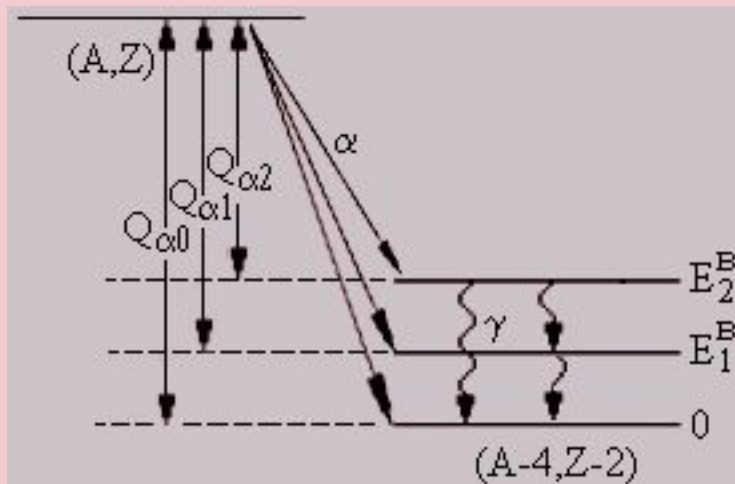
α – распад

и энергетические уровни ядра

α –распад обычно сопровождается испусканием γ – лучей дочерним ядром. γ – излучение – электромагнитное излучение, возникающее при переходе ядра из возбужденного состояния в основное.



α – распад и энергетические уровни ядра

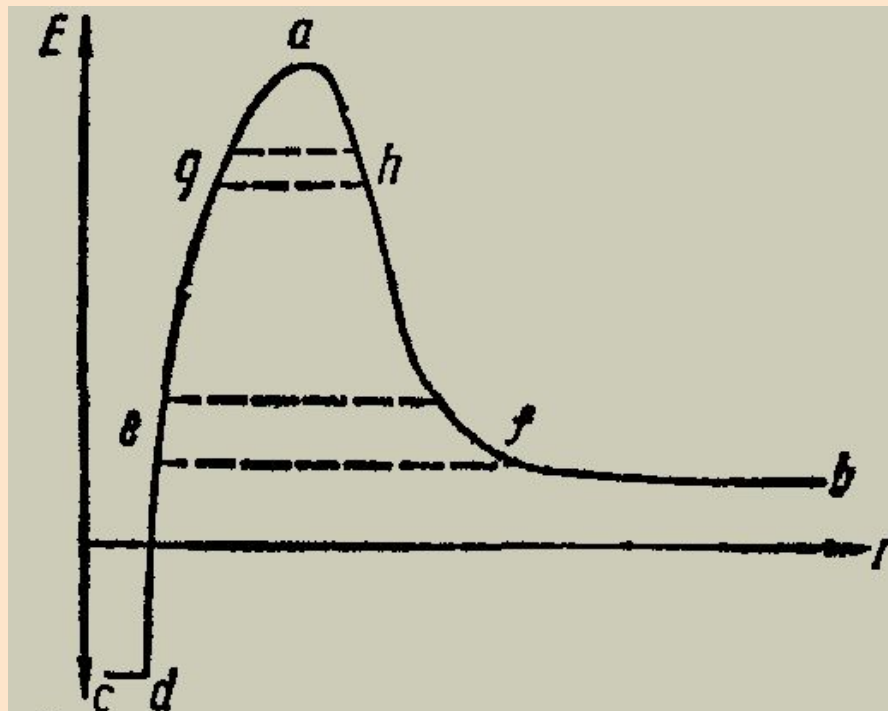
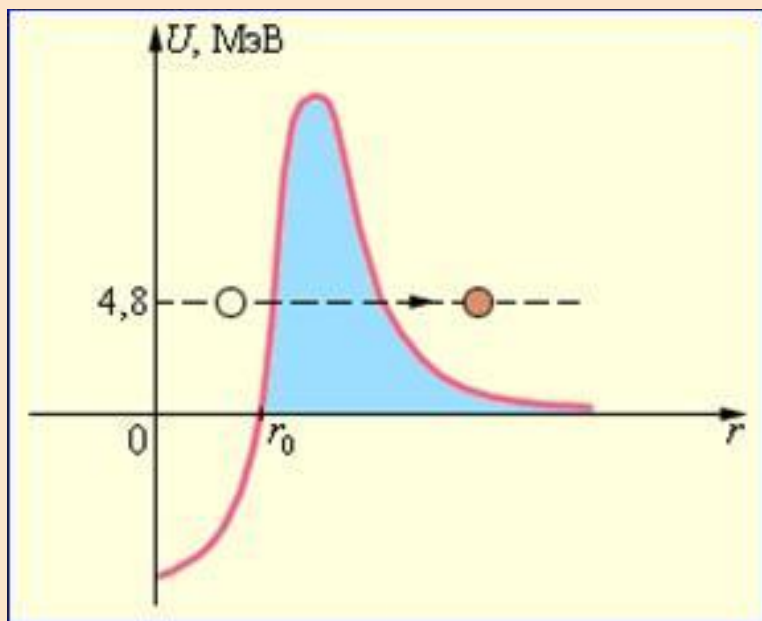


Энергия возбужденного состояния может выделяться и другими способами: испускание какой-либо частицы, или внутренней конверсией – передачей энергии в электронную оболочку, \Rightarrow вылет электрона и характеристическое рентгеновское излучение.

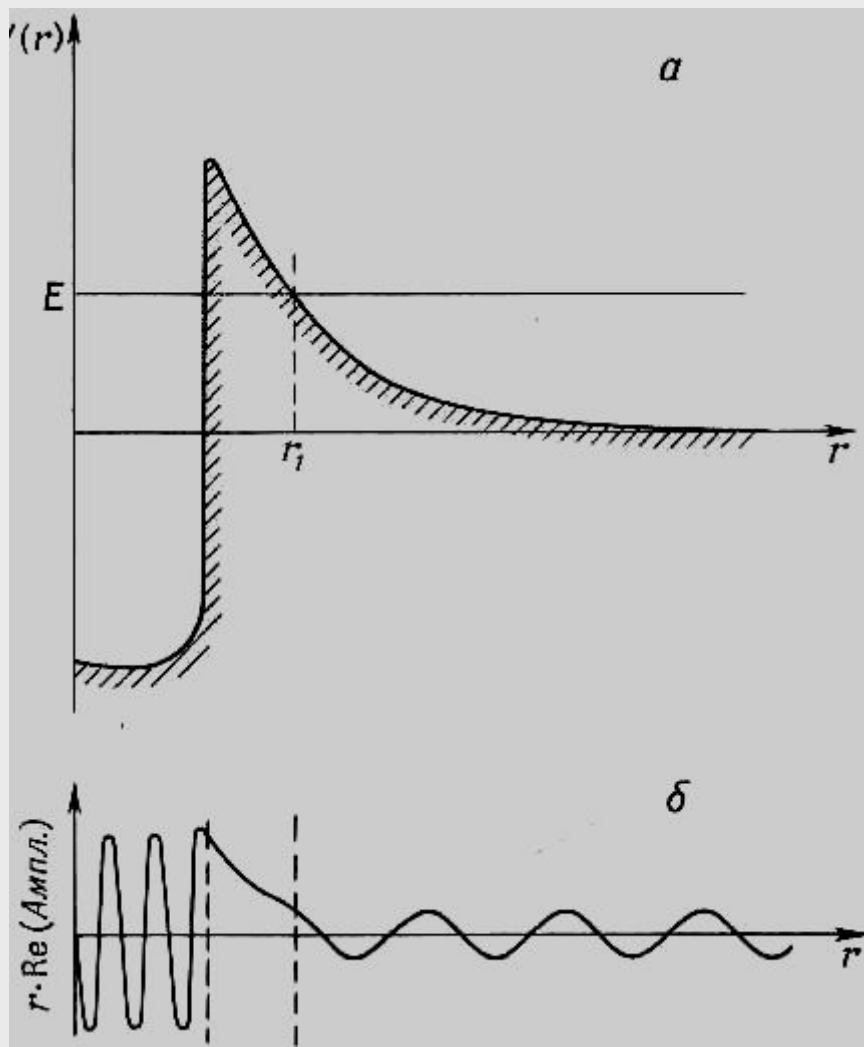
α – распад

и энергетические уровни ядра

α – частица не существует в ядре в готовом виде, а возникает в момент распада. Покидая ядро преодолевает потенциальный барьер, Высота которого превосходит энергию α –частицы (до **6 МэВ**) \Rightarrow Туннельный эффект. Теория согласуется с опытом.



α – распад и энергетические уровни ядра



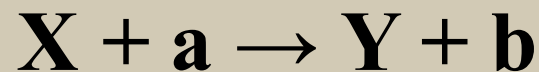
Аналогично происходит α –распад и другие. Процесс самопроизвольного деления ядер урана, открыт Г.Н. Флеровым и К.А. Петржаком в 1940 году.

Ядерные реакции

Так называются процессы сильного взаимодействия атомных ядер или ядер с частицами (p, n, α, d, \dots). Взаимодействие возникает при сближении до расстояний $\sim 10^{-15}$ м.

Взаимодействие легкой частицы с ядром.

Уравнение записывается в виде:



X, Y – ядра, a и b легкие частицы.

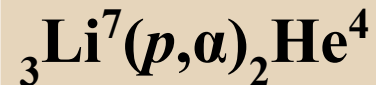
Ядерные реакции происходят как с выделением, так и с поглощением энергии (энергия реакции определяется дефектом масс). Если сумма масс продуктов реакции больше суммы масс исходных то реакция идет с поглощением энергии.

Ядерные реакции

Первая ядерная реакция была осуществлена Э Резерфордом в 1919 г. Он использовал природные α –частицы, испускаемые радиоактивным источником.



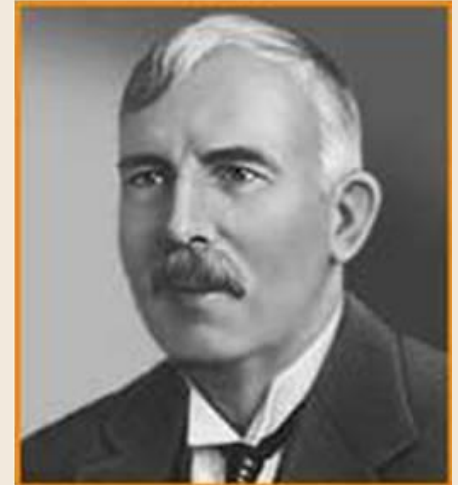
Частицы можно ускорять искусственно. В 1932 году Кокрофт и Уолток с помощью умножителя напряжения ускорили протоны до **0.8 МэВ**, и провели реакцию:



В атмосфере постоянно под действием нейтронов, образуемых космическими лучами, протекает реакция:



${}_6\text{C}^{14}$ – радиоуглерод, – распад с периодом полураспада **5730** лет. Усваивается растениями при фотосинтезе. \Rightarrow определение возраста образцов.



Ядерные реакции

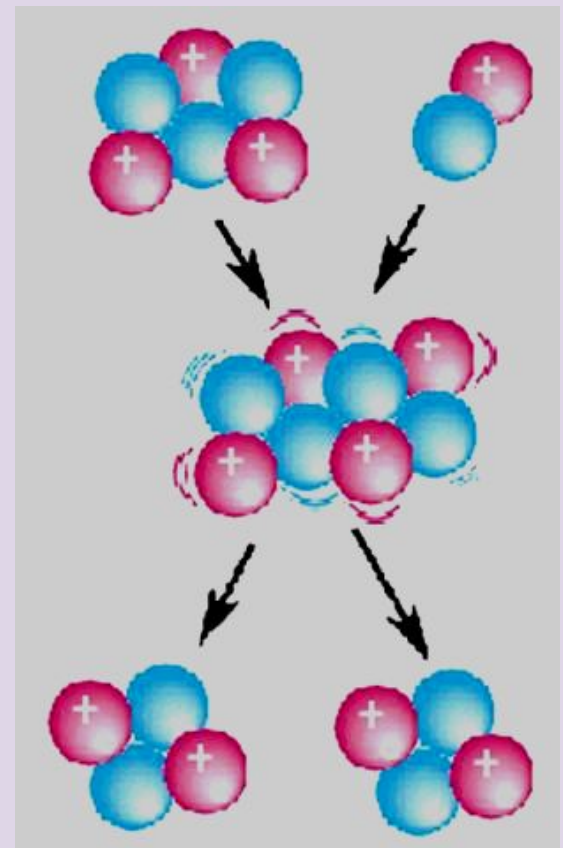
В 1936 году Бор установил, что реакции с не очень быстрыми частицами протекают в два этапа.

На первом этапе ядро захватывает частицу, образуя составное ядро (компаунд ядро).

Энергия, принесенная частицей, распределяется между нуклонами за очень короткое время. ядро в возбужденном состоянии. На втором этапе – испускание **b** – частицы.

Если **a** = **b**, то реакция называется рассеянием. Если равны их энергии, то это упругое рассеяние.

Ядерная реакция
– когда **b** не тождественна **a**.



Ядерные реакции

Ядерное время $\tau \sim 10^{-21}$ с – время пролета нуклона с энергией 1 МэВ через ядро.

Среднее время жизни составного ядра $10^{-14} \div 10^{-12}$ с

\Rightarrow распад уже не зависит от первого этапа – захвата.

Т.е. вероятность и характер распада не зависит от характера захвата.

Быстрые частицы реагируют с ядром без образования компаунда. \Rightarrow прямое ядерное взаимодействие.

Реакции срыва: ядро срывает с частицы нуклон.

Реакции подхвата: частица отрывает нуклон от ядра.

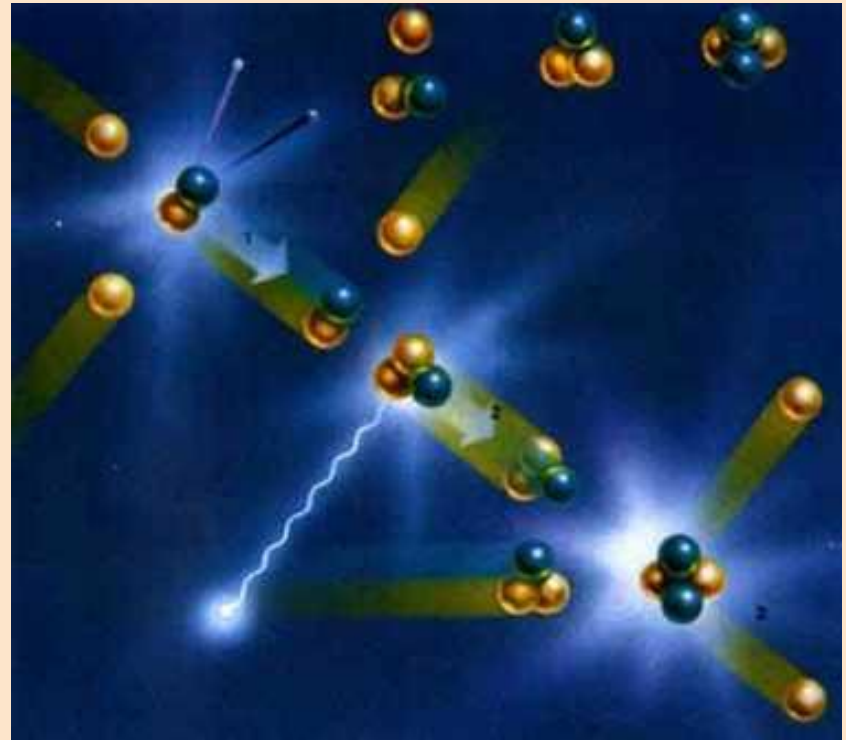
Ядерный синтез, термоядерные реакции

Слияние легких ядер в одно, сопровождается выделением огромного количества энергии. Такой синтез называется термоядерной реакцией. Т.к. необходимы очень высокие температуры.

Кулоновский потенциальный барьер из-за малых расстояний достигает **0.8 МэВ** . \Rightarrow

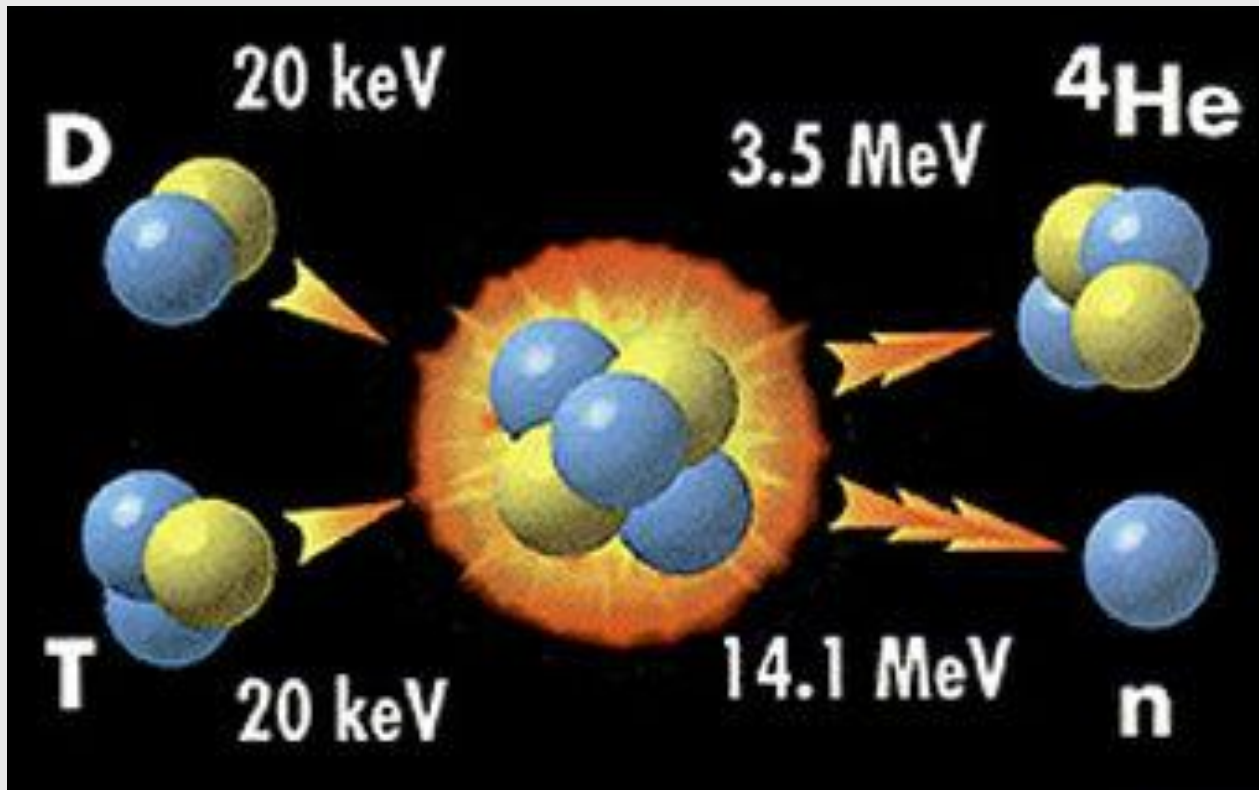
Необходима температура **$2 \cdot 10^9 \text{ К}$**

однако из-за неравномерного распределения по скоростям оказывается достаточно всего **10^7 К** .



Ядерный синтез, термоядерные реакции

Водородная бомба: ${}_1\text{H}^2 + {}_1\text{H}^3 \rightarrow {}_2\text{He}^4 + {}_0n^1$



– сопровождается выделением 17.6 МэВ энергии (3.5 МэВ на нуклон). Запалом служит обычная атомная бомба. Реакция носит неконтролируемый характер.

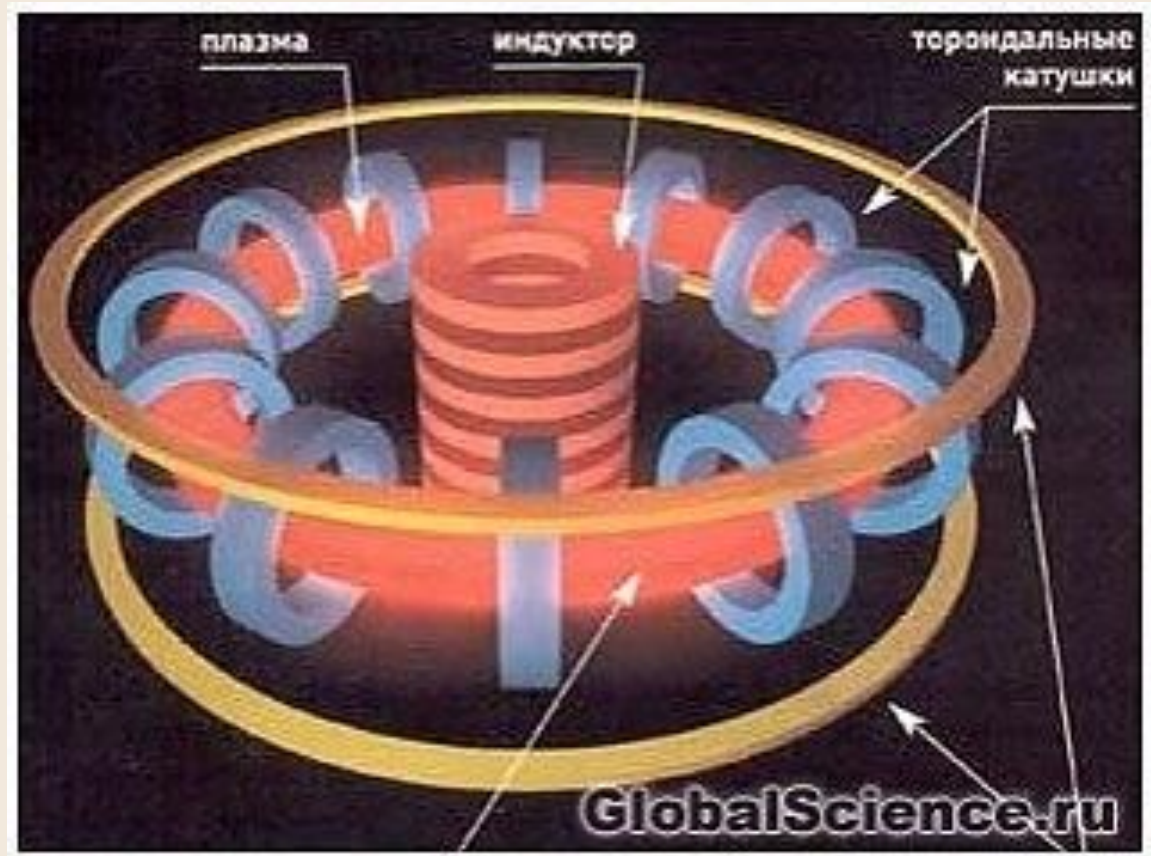
Ядерный синтез, термоядерные реакции

Для осуществления управляемых реакций надо поддерживать в некотором объеме температуру $10^8 K \Rightarrow$ огромные трудности удержания плазмы.

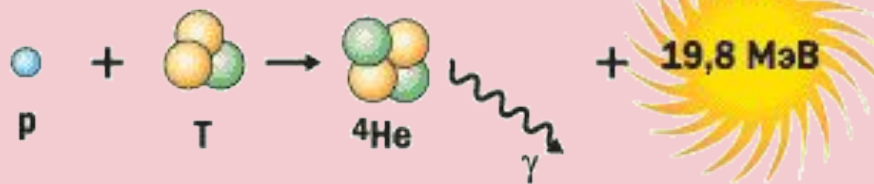
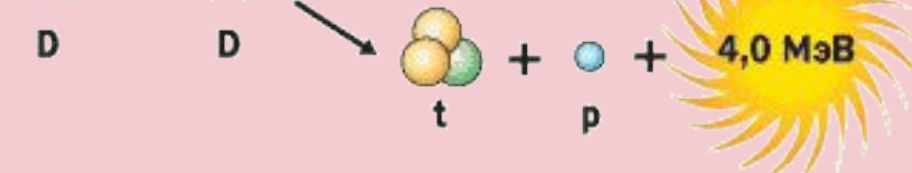
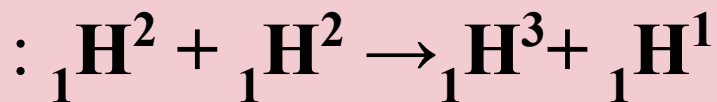
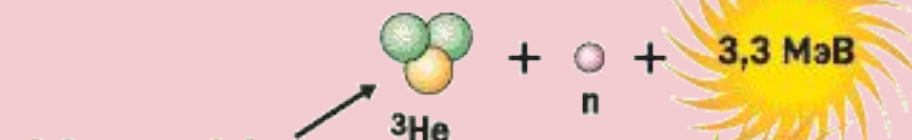
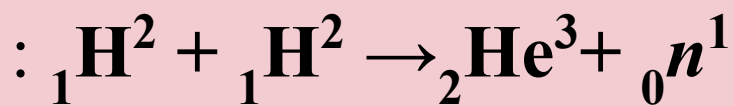
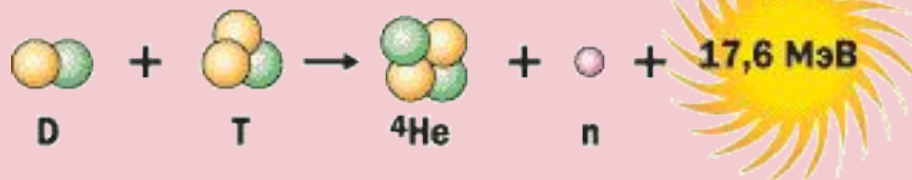
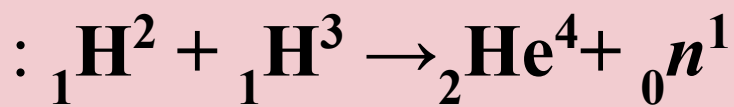
Токамак –
удержание с
помощью
магнитного поля.

Разогрев
протекающим
током.

Импульсные
системы.



Ядерный синтез, термоядерные реакции

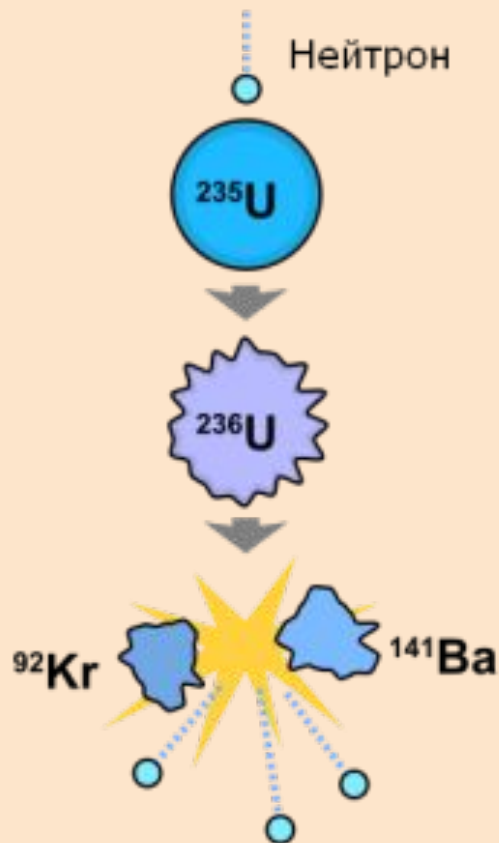


● n - нейтрон

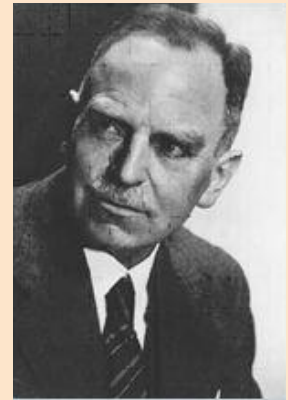
● p - протон

Деление ядер

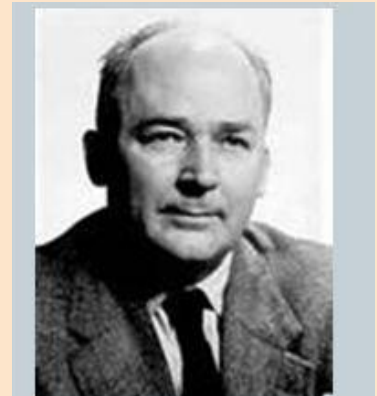
Наибольшее значение имеют реакции, вызываемые нейтронами, Нейтроны не испытывают кулоновского отталкивания и могут проникать в ядро, обладая малой энергией.



В 1938 году Ган и Штрассман обнаружили, что при облучении нейтронами урана, образуются элементы из середины периодической системы (барий, лантан и т. д.). Фишер и Мейтнер предположили, что это осколки деления урана.

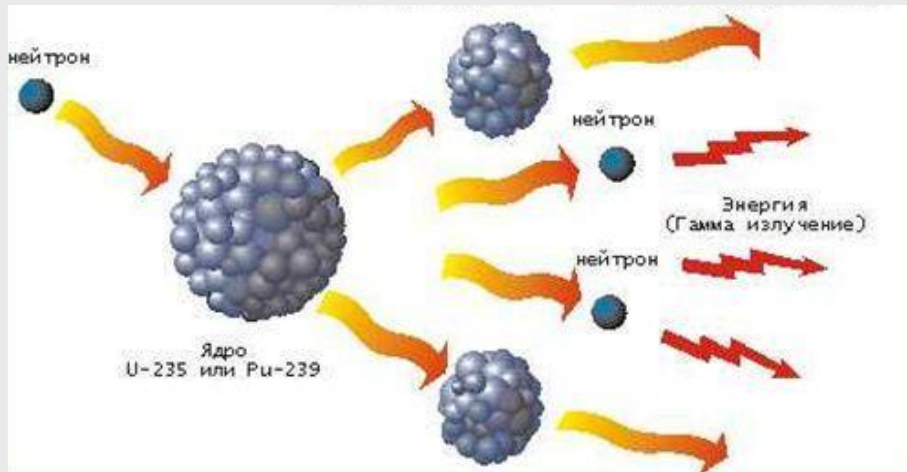


Отто Ган
(1879 — 1968)

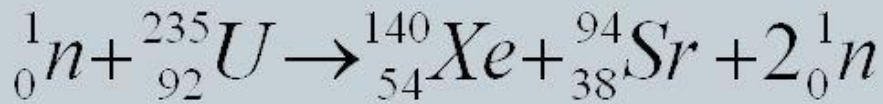


Фриц Штрассман
(1902 - 1980)

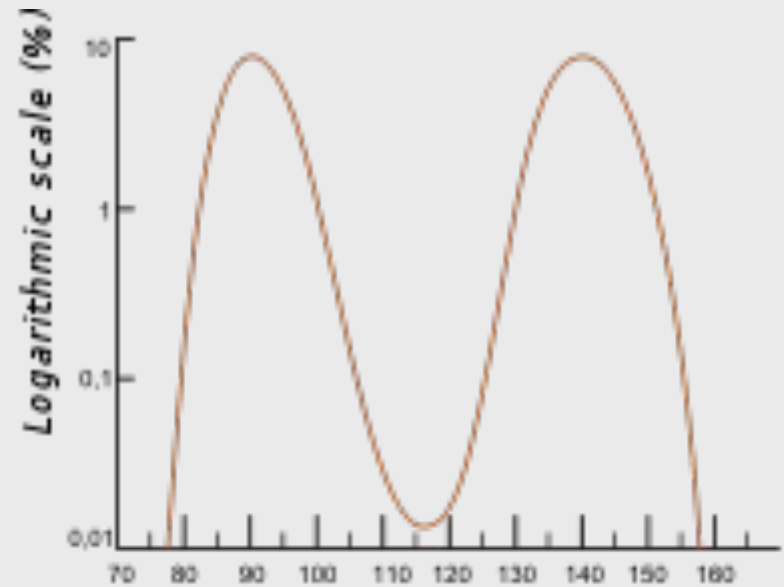
Деление ядер



Наиболее вероятные – когда отношение масс **3:2**, таких примерно **7%**, в то время как осколки равной массы **0.01 %**.



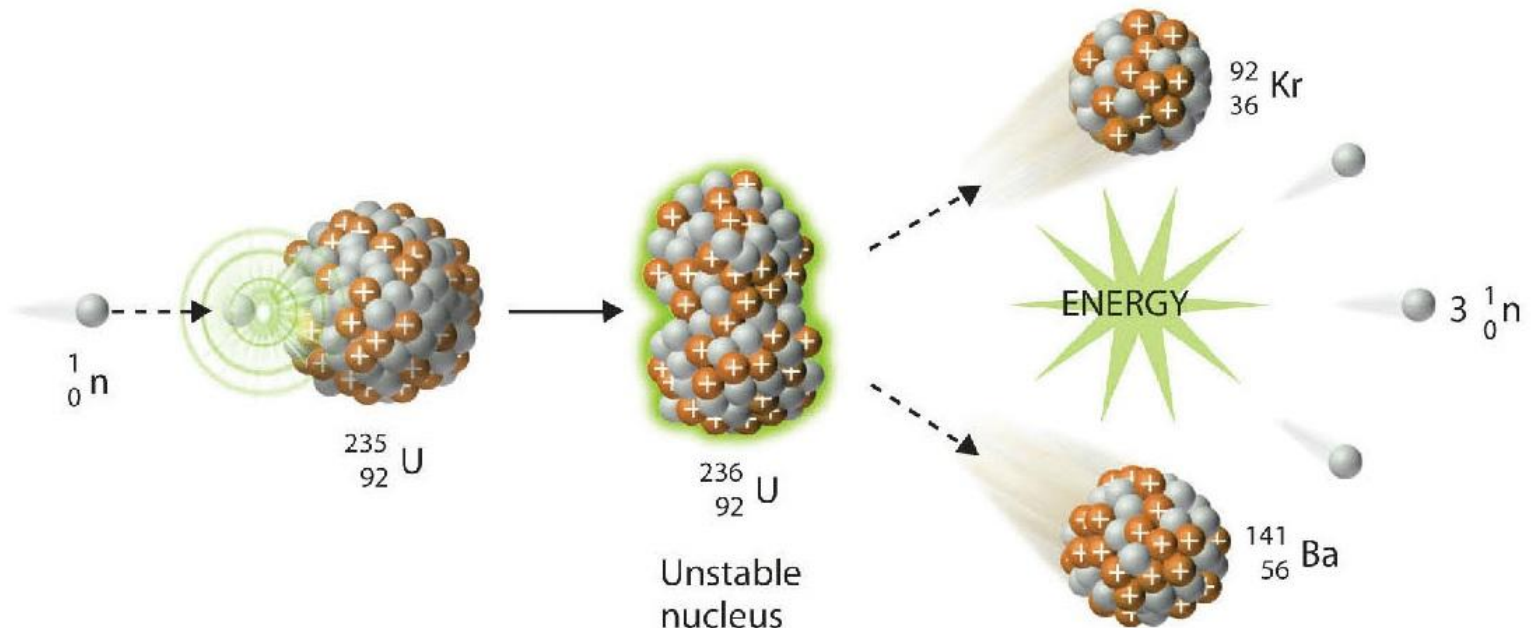
Деление может происходить разными путями (80 различных видов осколков).



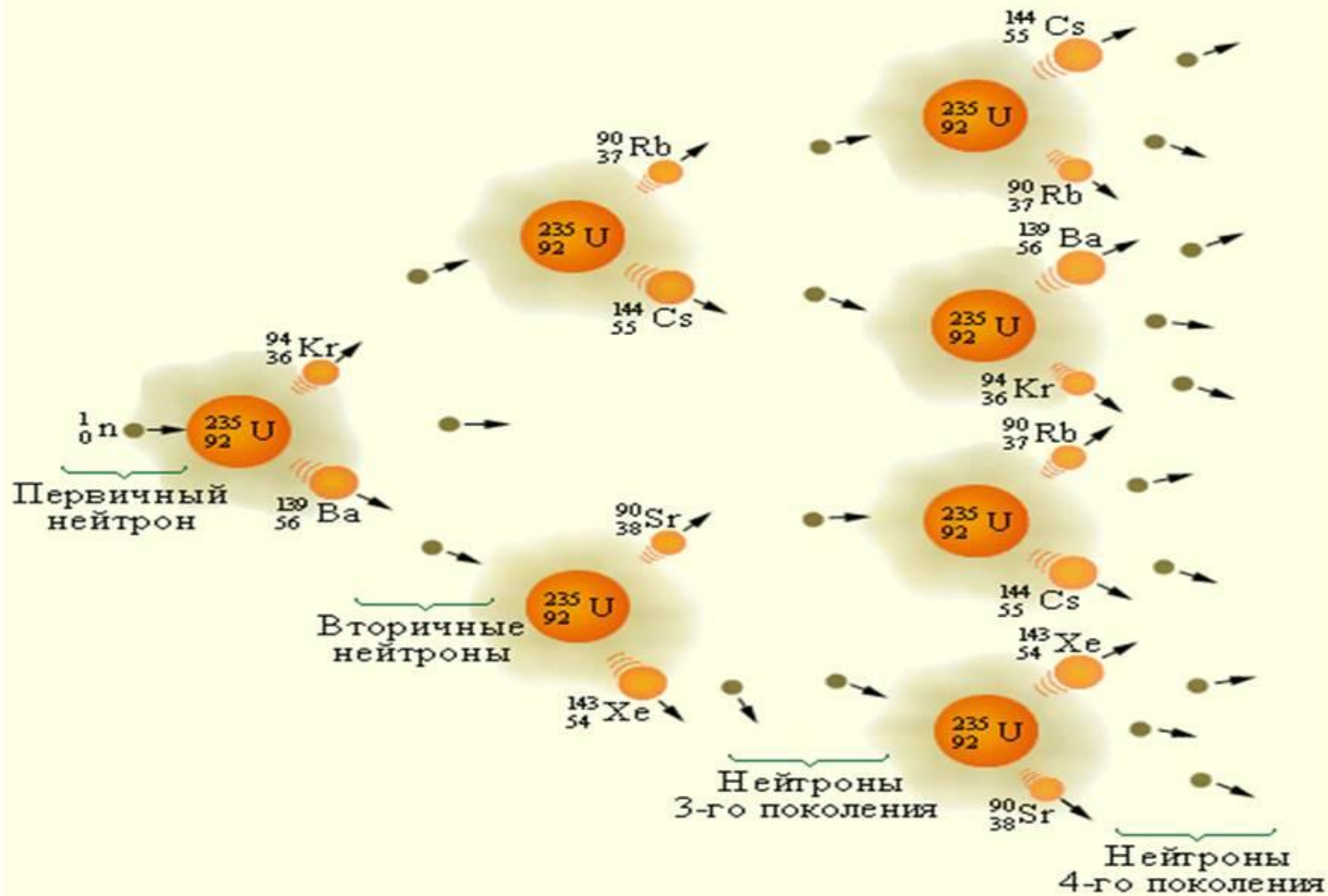
Distribution of Uranium-235 fission products (A)

Деление ядер

Удельная энергия связи для осколков примерно на 1 МэВ больше чем у урана \Rightarrow выделение большого количества энергии. Кроме этого, осколки перегружены нейтронами, т.к. с ростом номера увеличивается относительное количество нейтронов в ядрах \Rightarrow освобождение от избытка нейтронов. Примерно 2.5 нейтрона на деление. \Rightarrow цепная реакция.



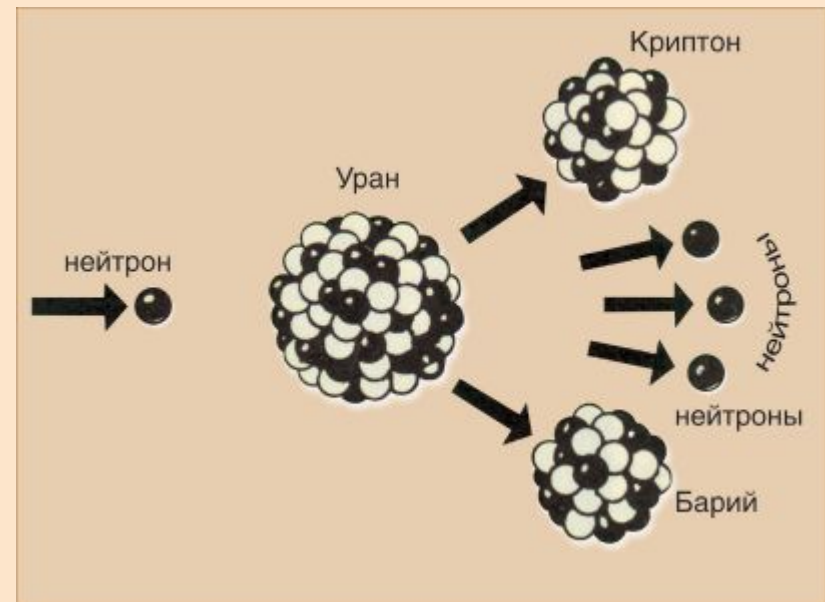
Механизм протекания цепной ядерной реакции



Деление ядер

Испускание нескольких нейтронов при делении ядер ${}_{92}\text{U}^{233}$, ${}_{92}\text{U}^{235}$ и ${}_{94}\text{Pu}^{239}$ дает возможность осуществления цепной реакции. В идеале, количество нейтронов растет в геометрической прогрессии, и процесс протекает очень быстро т.к. нейтроны имеют энергию $\sim 2 \text{ МэВ}$ ($v \sim 2 \cdot 10^7 \text{ м/с}$) и время между актами деления очень мало.

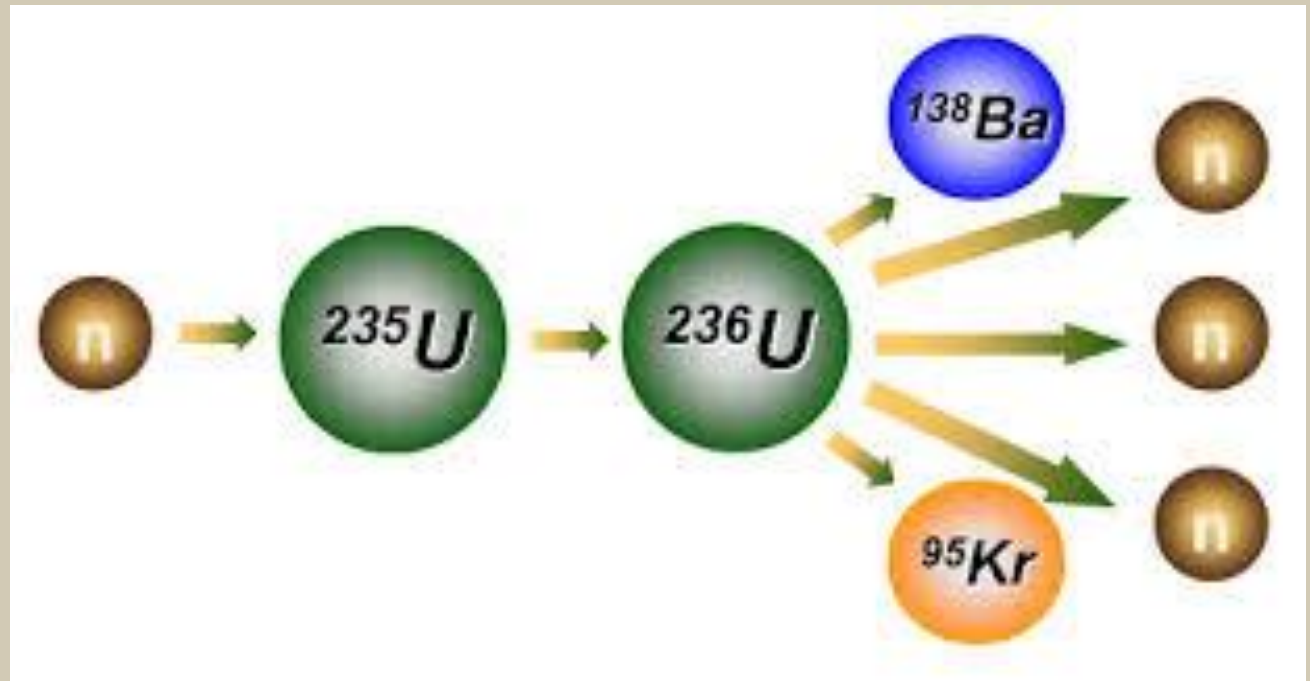
Однако велики и потери нейтронов (вылет из зоны реакции и захват примесями) Первая потеря уменьшается увеличением массы \Rightarrow критическая масса.



Деление ядер

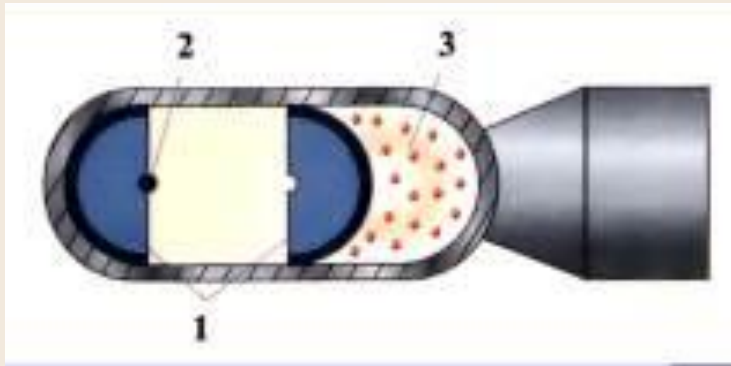
В куске чистого урана один нейтрон вызывает реакцию деления с выходом двух – трех нейтронов. При массе большей критической, реакция принимает взрывной характер, \Rightarrow атомная бомба. Если масса меньше критической, то большинство нейтронов вылетает наружу, \Rightarrow затухание реакции.

При полном делении ядер содержащихся в 1 г урана, выделяется энергия 23000 кВт ч.



Деление ядер

В земной атмосфере всегда найдутся нейтроны, рожденные космическими лучами \Rightarrow для начала реакции надо соединить несколько кусков урана в один. Цепная реакция идет на быстрых нейтронах. Успевают прореагировать только часть заряда.



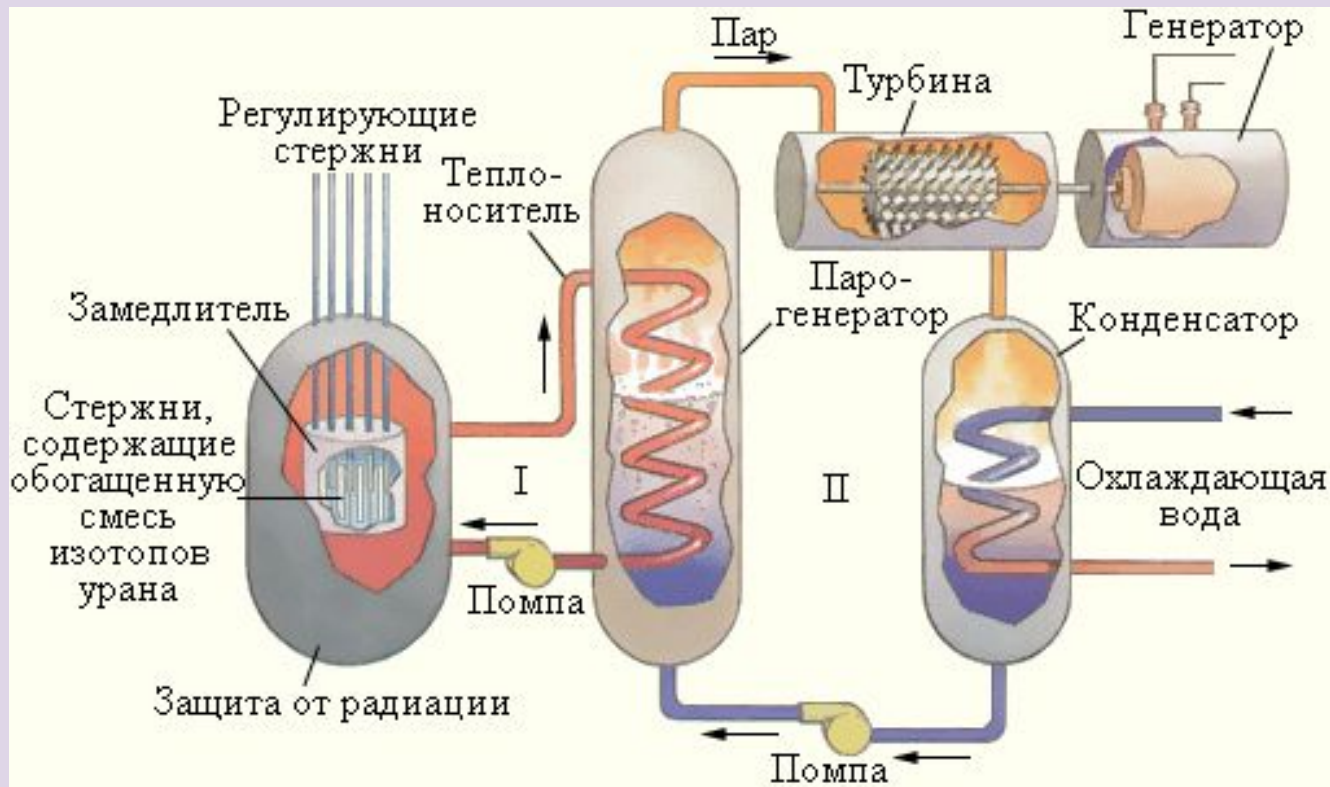
- 1 – куски ${}_{92}\text{U}^{235}$,
или плутония ${}_{94}\text{Pu}^{239}$
- 2 – первичные нейтроны
- 3 – запал

Для бомбы нужен ${}_{92}\text{U}^{235}$, в природе его 0.7% и 92% ${}_{92}\text{U}^{238}$
 \Rightarrow обогащение урана – разделение изотопов.

В природном уране реакция не проходит.

Деление ядер

Другой способ используется в ядерных реакторах. Здесь используют природный или немного обогащенный уран. Требуется выделение энергии без взрыва, т.е. реакция должна проходить в управляемом режиме.



Деление ядер

Сравнительно большие блоки из природного или немного обогащенного урана располагают на некотором расстоянии. Промежутки между блоками заполняют замедлителем нейтронов. Замедление нейтронов до тепловых скоростей.

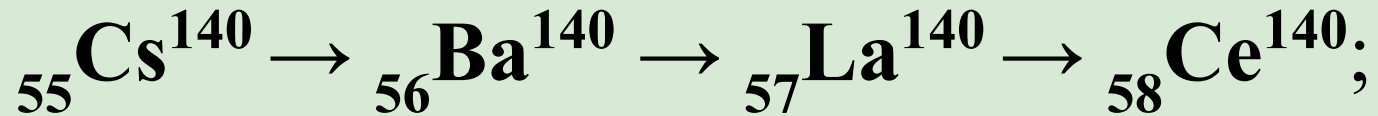


Деление ядер

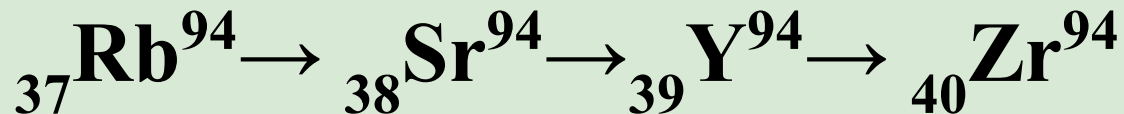
Выделение нейтронов



не устраняет полностью перегрузку $\Rightarrow \beta$ – распады с испусканием γ – лучей.



И



Конечные продукты ${}_{58}\text{Ce}^{140}$ и ${}_{40}\text{Zr}^{94}$ – стабильны.

Деление ядер

Кроме урана, при облучении нейтронами делятся:

${}_{90}\text{Th}^{232}$, ${}_{91}\text{Pa}^{231}$ и трансурановый ${}_{94}\text{Pu}^{239}$.

Тепловыми нейтронами делятся:

${}_{92}\text{U}^{235}$, ${}_{92}\text{U}^{233}$, ${}_{94}\text{Pu}^{239}$, ${}_{90}\text{Th}^{230}$.

${}_{92}\text{U}^{238}$ делится только быстрыми ($\sim 1 \text{ МэВ}$) нейтронами.

– медленные нейтроны захватываются ядром ${}_{92}\text{U}^{238}$ без деления, возбуждение снимается γ – излучением.

Реакция радиационного захвата ${}_{92}\text{U}^{238}(n,\gamma){}_{92}\text{U}^{239}$

Деление ядер

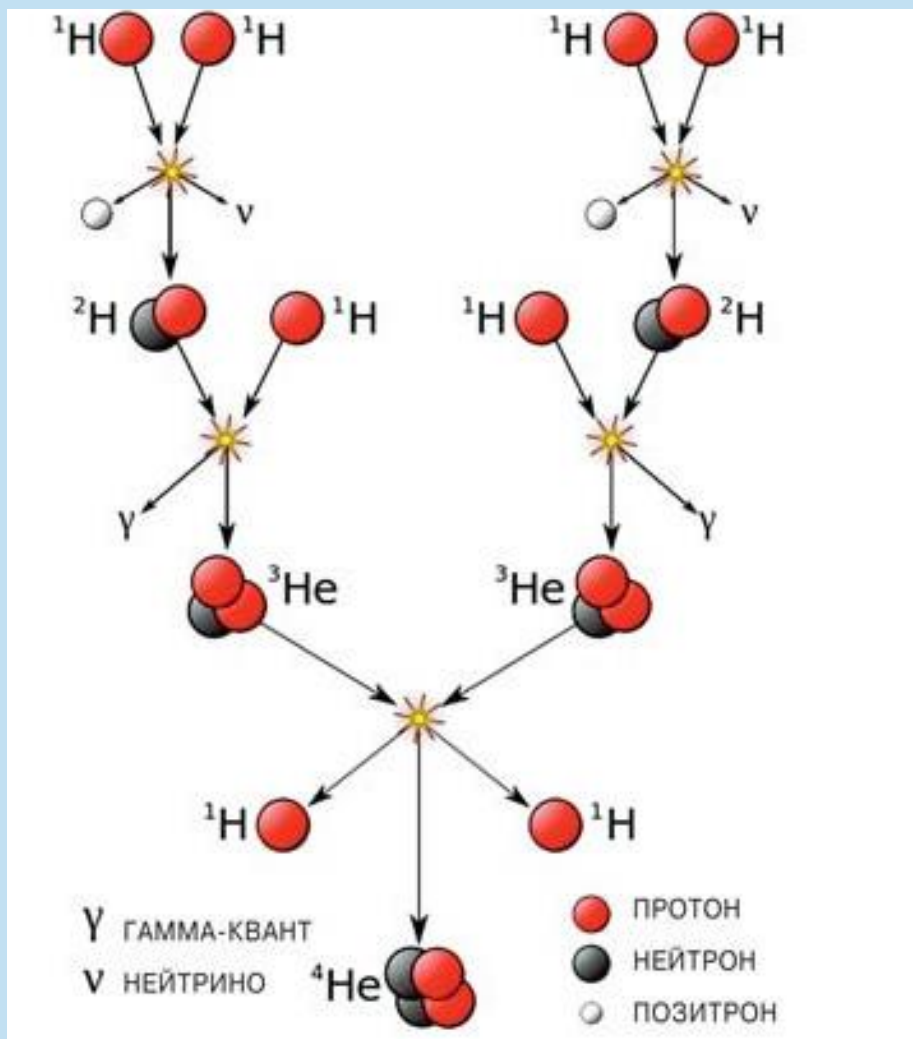
Аналогично ведет себя ${}_{90}\text{Th}^{232}$: ${}_{90}\text{Th}^{232}(n,\gamma){}_{90}\text{Th}^{233}$

Образовавшиеся ядра нестабильны, $\Rightarrow \beta$ – распад \Rightarrow освобождение от избытка нейтронов \Rightarrow стабильные ядра.



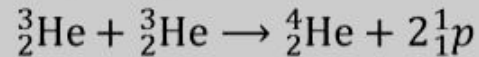
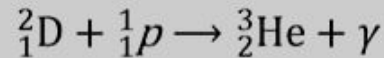
Оба конечных продукта α – активны, но периоды их полураспада велики: 24000 и 162000 лет соответственно.

Ядерный синтез, термоядерные реакции

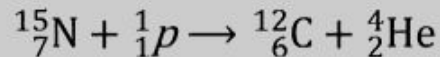
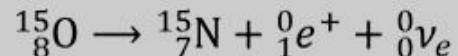
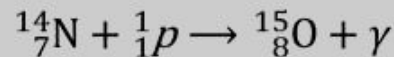
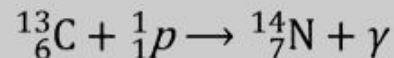
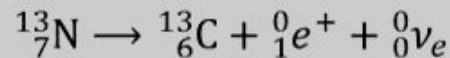
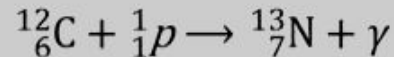


Ядерный синтез, термоядерные реакции

1) Протон-протонный цикл



2) Углеродно-азотный цикл



Результат обоих циклов – превращение 4 протонов в ядро He с рождением 2 позитронов и γ -излучения. На 1 ядро He $Q = 26,8$ МэВ.

Изотоп	Масса нейтрального атома	Изотоп	Масса нейтрального атома
${}^1_1\text{H}$ (водород)	1,00783	${}^{10}_5\text{B}$ (бор)	10,01294
${}^2_1\text{H}$ (дейтерий)	2,01410	${}^{11}_5\text{B}$ (бор)	11,00931
${}^3_1\text{H}$ (тритий)	3,01605	${}^{12}_6\text{C}$ (углерод)	12,00000
${}^3_2\text{He}$ (гелий)	3,01602	${}^{14}_7\text{N}$ (азот)	14,00307
${}^4_2\text{He}$ (гелий)	4,00260	${}^{15}_7\text{N}$ (азот)	15,00011
${}^6_3\text{Li}$ (литий)	6,01513	${}^{16}_8\text{O}$ (кислород)	15,99491
${}^7_3\text{Li}$ (литий)	7,01601	${}^{17}_8\text{O}$ (кислород)	16,99913
${}^8_4\text{Be}$ (бериллий)	8,00531	${}^{27}_{13}\text{Al}$ (алюминий)	26,98146

