

## 23 Ядерная физика.

### 23.1 Введение.

**Def.** Ядерная физика, наука о строении, свойствах и превращениях атомных ядер.

В ядерной физике размеры, массы, энергии и длительность процессов настолько малы, что их невозможно представить. Использовать систему СИ для описание законов ядерной физики неудобно, т.к. в величинах будет большое количество нулей после запятой. Поэтому для ядерной и атомной физики используют свою систему единиц.

Величина	Единица измерения	Соотношение с СИ	Пример
<i>Электрический заряд</i>	$\pm 1$	$e = -1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл	$-1^e, +1^p$
<i>Масса</i>	1 а.е.м.	1 а.е.м. = $1,66 \cdot 10^{-27}$ кг	${}^1_1p, {}^1_0n$
<i>Энергия</i>	Электрон-вольт(эВ)	1 эВ = $1,6 \cdot 10^{-19}$ Дж	Энергия ионизации водорода -13,6эВ
<i>Длина</i>	Ферми	1 Ф = $10^{-15}$ м	Диаметр ядра атома водорода 1 Ф

### 23.2 Методы наблюдения и регистрации элементарных частиц.

#### 23.2.1 Метод сцинтилляций

**Def.** Метод сцинтилляций основан на регистрации коротких вспышек света — сцинтилляций, возникающих в некоторых веществах при прохождении через них заряженных частиц.

При переходе атомов из возбужденного состояния в основное излучается свет в виде коротких вспышек света (сцинтилляций), которые могут быть зарегистрированы различными способами. Сцинтилляции могут быть зарегистрированы прямым наблюдением в микроскоп или же с помощью фотоэлектронного умножителя энергия света может быть переведена в электрический сигнал.

В основе сцинтилляционного метода лежит явление люминесценции, которая вызвана возбуждением атомов, когда входящее в их состав атомов электроны переходят на более высокие энергетические уровни и через некоторое время возвращаются в основное состояние.

От веществ, которые применяются в качестве сцинтилляторов, требуется, чтобы они давали сильные и равномерные вспышки, обладали высоким коэффициентом поглощения ионизирующих излучений, не поглощали значительно собственные излучения и имели небольшое время свечения.

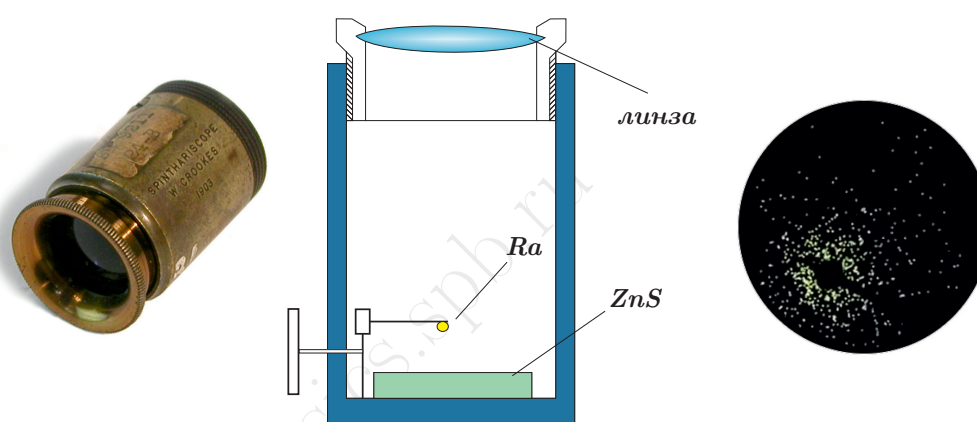
Чаще всего в качестве сцинтилляторов используются неорганические монокристаллы.

Вещество	Время свечения, мкс	Длина волны, нм
NaI(Tl)	0,25	410
CsI(Tl)	0,5	560
ZnS(Ag)	1	450
CdS(Ag)	1	760

Сцинтилляционные счетчики обладают большой эффективностью счета – до 100%.



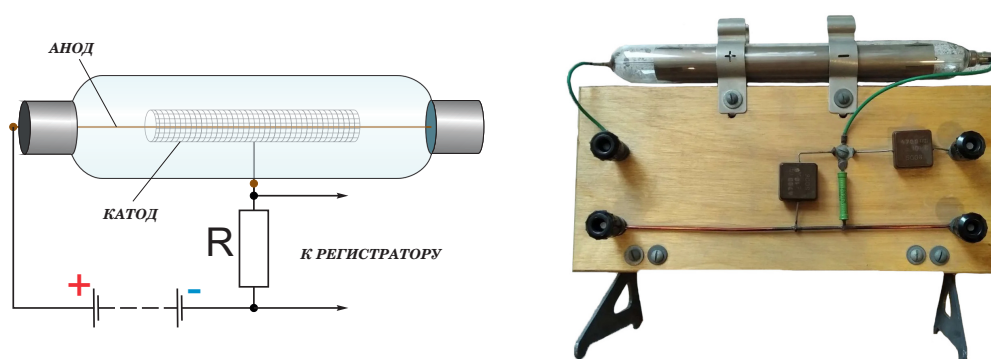
Устройство сцинтилляционных счетчиков аналогично устройству экрана в опыте Резерфорда. Основным является экран, покрытый ZnS.



Первый подобный прибор был изобретен Круксом в 1903 году и был назван – **спинтарископ**. Благодаря этому прибору было обнаружено, что 1 г Ra испускает в единицу времени определенное число  $\alpha$ -частиц.

### 23.2.2 Счетчик Гейгера–Мюллера, 1912–1913гг.

Стеклянная колба заполнена разреженной смесью аргона с примесью паров метилового спирта при низком давлении  $10^4$  Па ( $0,1 p_{\text{атм}}$ ). Между нитью (анодом) и цилиндром (катодом) подается высокое напряжение.



Нет частицы Цепь разомкнута, ток не течет, поэтому  $U_R = 0$

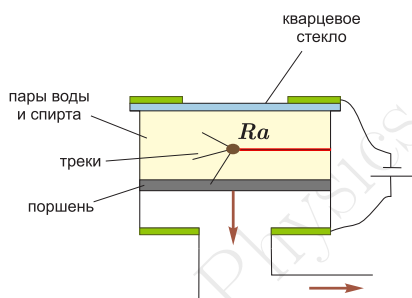
Есть частица Пролетающая частица ионизирует газ. Идет лавинный разряд, между катодом и анодом начинает течь ток, на сопротивлении появляется напряжение  $U_R \neq 0$ .

Импульс напряжения можно зарегистрировать различными способами, например подав его на динамик. В результате при появлении ионизирующей частицы, мы будем слушать кратковременный звук.

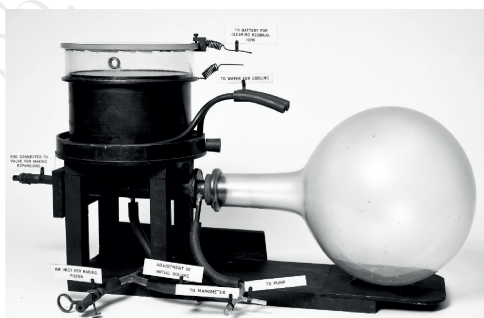
### 23.2.3 Камера Вильсона

Камеру изобрел в 1912 году шотландский физик Чарльз Вильсон. Вильсон выяснил, что вода охотнее конденсируется на отрицательно заряженных ионах. Для создания переохлаждённого пара используется быстрое адиабатическое расширение, сопровождающееся резким понижением температуры.

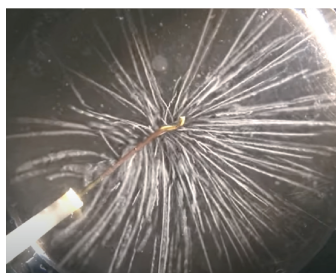
Быстрая заряженная частица, двигаясь сквозь облако перенасыщенного пара, ионизирует его. Процесс конденсации пара происходит быстрее в местах образования ионов. Как следствие, там, где пролетела заряженная частица, образуется след из капелек воды, который можно сфотографировать. Именно из-за такого вида треков камера получила свое английское название — облачная камера.



Конструкция камеры



Камера Вильсона (Кавендишская лаборатория)



Пример треков (НИЯУ МИФИ)

Пересыщенный пар создается путем быстрого расширения воздуха с парами спирта. Пролетающая частица ионизирует атомы спирта, они выступают в роли неоднородностей, и по пути ее следования образуются капельки жидкости. Они называются треком частицы. Они хорошо фотографируются при освещении.

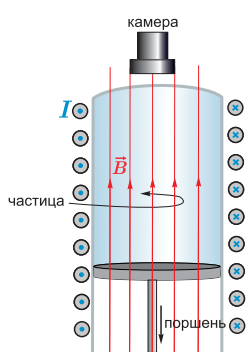
*За изобретение камеры Вильсон получил Нобелевскую премию по физике 1927 года.*

Видеоэксперимент [НИЯУ МИФИ \(Конденсационная камера\)](#)

Капица предложил поместить камеру Вильсона в магнитное поле. Траектория частицы становится кривой (дуга окружности), которая дает информацию об удельном заряде частицы  $\frac{q}{m}$ .

### 23.2.4 Пузырьковая камера

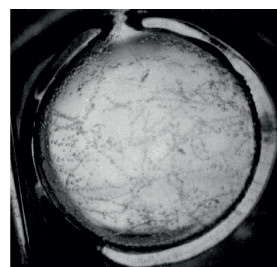
Пузырьковая камера была изобретена Дональдом Глазером (США) в 1952 году. За своё изобретение Глазер получил Нобелевскую премию по физике в 1960 году.



Конструкция пузырьковой камеры



Пузырьковая камера  
(Лаборатория им. Энрико Ферми)



первые треки, полученные  
в пузырьковой камере  
25 мая 1955 года

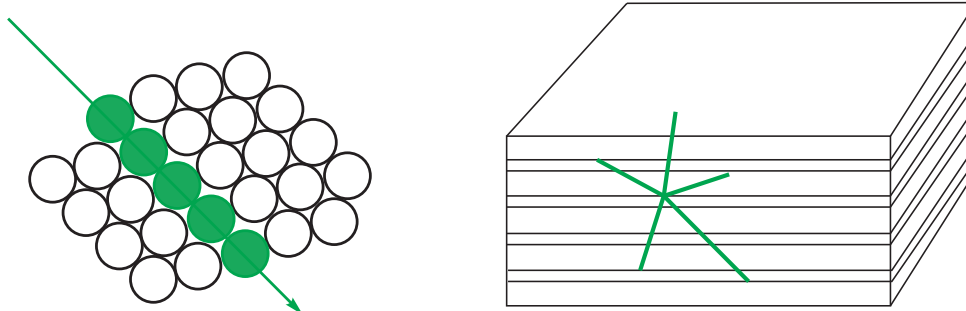
Камера заполнена жидкостью, которая находится в состоянии, близком к закипанию. Перегрев жидкости достигается за счёт быстрого понижения давления до значения, при котором температура кипения жидкости оказывается ниже её текущей температуры. Если в данном состоянии в камеру попадёт ионизирующая частица, то её траектория будет отмечена цепочкой пузырьков пара и может быть сфотографирована. В качестве рабочей жидкости наиболее часто применяют жидкие водород и дейтерий.

Частицы впускаются в камеру в момент её максимальной чувствительности. Спустя некоторое время, необходимое для достижения пузырьками достаточно больших размеров, камера освещается и следы фотографируются (стереофотосъёмка с помощью 2–4 объективов). После фотографирования давление поднимается до прежней величины, пузырьки исчезают, и камера снова оказывается готовой к действию. Весь цикл работы составляет величину менее 1 с, время чувствительности 10–40 мс.

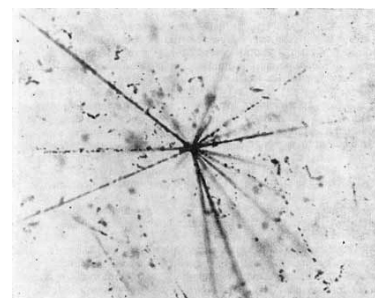
Американский физик Луис Альварес впервые применил компьютерную программу для обработки сотен тысяч фотографий, позволявшую анализировать данные с очень большой скоростью.

### 23.2.5 Метод толстослойных фотоэмульсий

Этот метод ещё в 1896 году позволил французскому физику А. Беккерелю открыть явление радиоактивности. Затем данный метод был развит советскими физиками Л. В. Мысовским и Г. Б. Ждановым.



Фотографическая эмульсия состоит из большого числа мелких кристаллов бромистого серебра, распределенных в желатине. Размеры кристаллов от 0,1 до 1 микрона. Если через эмульсию пролетают ионизирующие частицы, то в некоторых кристаллах происходят определенные изменения, приводящие к тому, что после проявления (обработки специальным раствором) зерна эмульсии превращаются в частицы металлического серебра. Совокупность большого числа темных зерен образует видимое черное изображение. Анализируя полученное изображение траектории заряженной частицы в фотоэмульсии можно идентифицировать различные частицы. Открытие и наблюдение распадов  $\pi$ -мезонов в ядерных эмульсиях явилось убедительной демонстрацией преимуществ этого метода.



Благодаря большой концентрации серебра плотность фотоэмульсий довольно велика, поэтому треки заряженных частиц получаются очень короткими (например, треки  $\pi$ -частиц, испускаемые радиоактивными элементами, имеют длину порядка  $10^4$  мкм). Трек длиной в  $10^4$  мкм в эмульсии эквивалентен треку в  $10^4$  см в камере Вильсона. При фотографировании треков их можно увеличить. В связи с этим фотоэмульсии применяются для изучения реакций, вызываемых частицами в ускорителях сверхвысоких энергий и в космических лучах.

*Итог: практически все приборы, регистрирующие элементарные частицы, представляют собой системы, которые могут находиться в неустойчивом состоянии. Достаточно пролететь частице, как начинается процесс перехода системы в устойчивое состояние, что позволяет регистрировать частицу.*



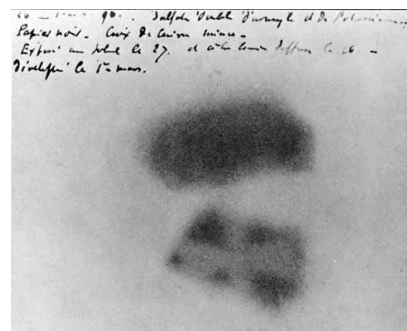
## 23.3 Естественная радиоактивность. Состав радиоактивного излучения.

### 23.3.1 Открытие

26 февраля 1896 года французский физик Анри Беккерель, проводя опыты по изучению испускания рентгеновских лучей люминесцирующими веществами. Он освещал урановую руду и наблюдал за фотопластинкой.

*Серия опытов показала, что и без облучения урановой соли она испускает лучи, вызывающие потемнение фотопластинки. Т.е. излучение происходит самопроизвольно.*

Позже Беккерель исследовал люминесцирующие соединения урана и подтвердил свои выводы. Эти соединения тоже самопроизвольно испускали лучи, заставляющие темнеть фотопластинку.



*Изображение фотопластинки Беккереля с тенью от мальтийского креста*

**Def.** Радиоактивность—самопроизвольное испускание лучей.

Радиоактивность оказалась присуща самым тяжелым элементам таблицы Менделеева.

Следующий большой вклад в исследование этого нового явления сделала Мария Склодовская-Кюри (кстати, единственная женщина-физик, дважды удостоенная Нобелевской премии (1903, 1911гг.)) Она исследовала на радиоактивность большинство известных тогда элементов. В отличие от Беккереля, Кюри предложила обнаруживать радиоактивные излучения по ионизации воздуха, что оказалось более точным.

Свойства радиоактивности обнаруживаются по ионизации воздуха.

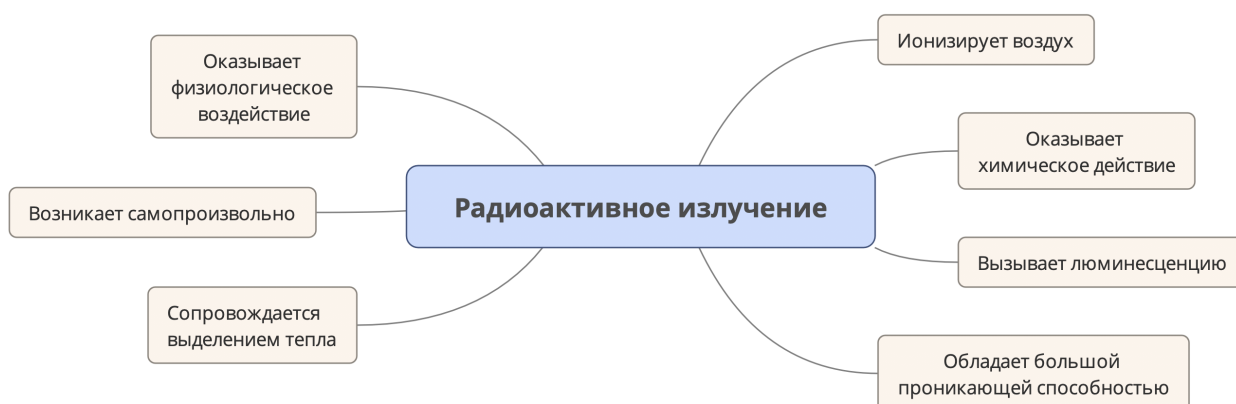
Опыты Марии Кюри привели к следующим результатам:

1. Свойство радиоактивности присуще всем соединениям урана. Радиоактивностью обладает торий и все его соединения.
2. Радиоактивность препарата с любым химическим составом, в котором содержится уран или торий, равна радиоактивности чистых урана или тория, взятых в количестве, в котором они содержатся в этом соединении. Следовательно, радиоактивность—свойство атомов самого элемента.

Мария со своим мужем Пьером Кюри выделила из уранового минерала еще два вещества, которые обладали радиоактивными свойствами в большей степени, чем уран и торий. Так были получены полоний и радий. В урановой руде содержится ничтожная доля радия, примерно 1г на 3т урана. Марии и Пьеру Кюри потребовались годы чтобы получить несколько десятых долей чистого радия. В знак признательности они подарили свинцовую капсулу с радием Беккерелю. Он носил ее в лацкане пиджака, и под ним, к концу жизни на его теле образовалась незаживающая язва. Позднее выяснилось, что все элементы с номером, большим 83, являются радиоактивными. Радий был помещен в дотолу пустовавшую клетку таблицы Менделеева с N88.



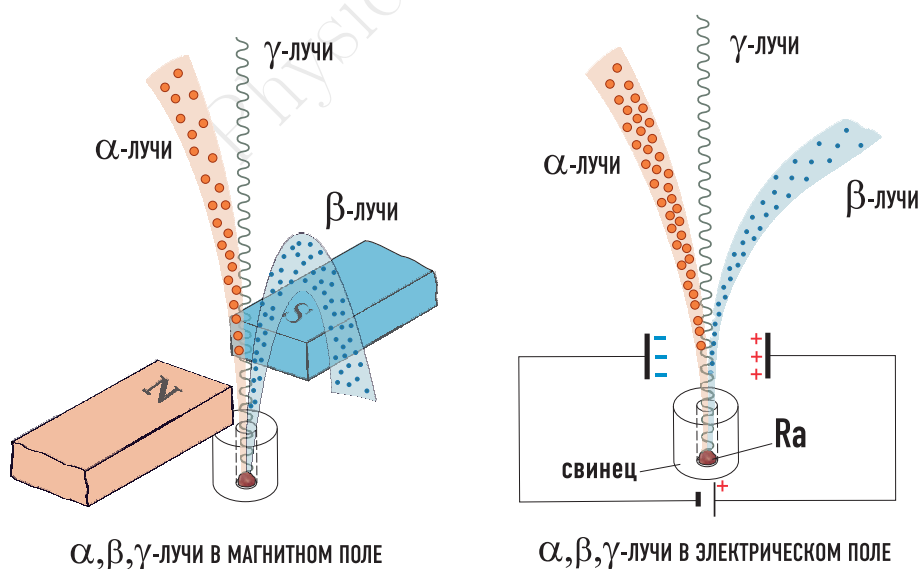
## 23.3.2 Свойства радиоактивных излучений:



## 23.3.3 Состав радиоактивного излучения

Резерфорду смог установить состав радиоактивного излучения.

Он поставил следующий эксперимент: в вакууме радиоактивный препарат помещали на дно узкого канала свинцового цилиндра, напротив помещалась фотопластинка покрытая  $ZnS$ . Выходившее радиоактивное излучение пропускали через однородное магнитное поле.



Опыт показал, что в магнитном поле пучок излучения распадался на три части. Две составляющие первичного излучения отклонялись в противоположные стороны, что указывало на наличие у них зарядов противоположных знаков. Третья составляющая сохраняла прямолинейность распространения.

**Def.** Излучение, обладающее положительным зарядом, получило название альфа-лучи, отрицательным — бета-лучи, нейтральным — гамма-лучи.

Изучая природу альфа-излучения, Резерфорд провёл следующий эксперимент. На пути альфа-частиц он поместил счётчик Гейгера, который измерял число испускающихся частиц за определённое время. После этого при помощи электрометра он измерил заряд частиц, испущенных за это же время. Зная суммарный заряд альфа-частиц и их количество, Резерфорд рассчитал заряд одной такой частицы. Он оказался равен двум элементарным.

По отклонению частиц в магнитном поле он определил отношение её заряда к массе. Оказалось, что на один элементарный заряд приходится две атомные единицы массы.

Таким образом, было установлено, что при заряде, равном двум элементарным, альфа-частица имеет четыре атомные единицы массы. Из этого следует, что альфа-излучение — это поток ядер гелия.

$\alpha$ -лучи: в камере Вильсона можно определить отношение заряда к массе (по треку) и увидеть, что это ядра He.

$\beta$ -лучи: так же приходим к выводу, что это электроны.

$\gamma$ -лучи: не отклоняются ни электрическим, ни магнитным полем и считаются электромагнитной волной.

#### 23.3.4 Правило смещений Содди.

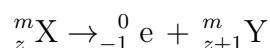
В ядерной физике закон радиоактивных смещений, также известный как правило радиоактивных смещений Содди — основное правило, описывающее превращения элементов в процессе радиоактивного распада. Закон был открыт в 1913 году английским радиохимиком Фредериком Содди.

Закон описывает, какой элемент и какой изотоп этого элемента получается при том или ином типе радиоактивного распада:

$\alpha$ -распад:



$\beta$ -распад:



#### 23.3.5 Закон радиоактивного распада

Выкачивая воздух из сосуда с торием, Резерфорд выделил emanацию тория (газ, известный сейчас как торон или радон-220, один из изотопов радона) и исследовал её ионизирующую способность. Было установлено, что радиоактивность этого газа каждую минуту убывает вдвое.

Изучая зависимость активности радиоактивных веществ от времени, учёный открыл закон радиоактивного распада.

Чем больше атомов, тем больше вероятность того, что какой-то распадётся. Если число атомов увеличить в два раза, то эта вероятность увеличится тоже в два раза. Т.о. скорость распада прямо пропорциональна числу атомов:

$$\frac{dN}{dt} \sim N \Rightarrow \frac{dN(t)}{dt} = kN(t) \Leftrightarrow$$

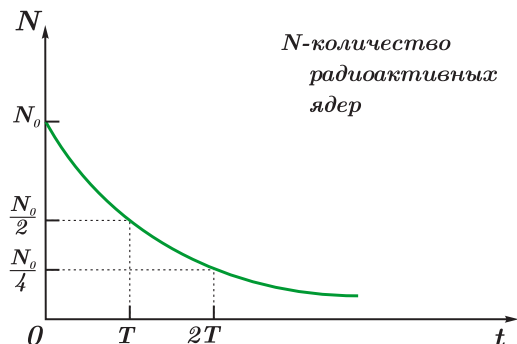
$$\frac{dN(t)}{N(t)} = kdt \Leftrightarrow \ln N = kt + \ln C \Leftrightarrow$$



$$\ln \frac{N}{C} = kt \Leftrightarrow \frac{N}{C} = e^{kt} \Leftrightarrow N = Ce^{kt}$$

$$t = t_0 \Rightarrow N = N_0 \Rightarrow C = N_0 \Rightarrow N = N_0 e^{kt}$$

Активность вещества характеризуется периодом полураспада ( $T$ )—интервалом времени, в течение которого распадается половина имеющегося количества атомов радиоактивного вещества.



$$N = \frac{N_0}{2} \Leftrightarrow t = T \Leftrightarrow \frac{N_0}{2} = N_0 e^{kT} \Leftrightarrow \frac{1}{2} = e^{kT}$$

$$\ln \frac{1}{2} = -\ln 2 = kT \Leftrightarrow k = -\frac{\ln 2}{T} \Leftrightarrow$$

$$N = N_0 e^{-\frac{\ln 2}{T} \cdot t} = N_0 e^{-\frac{t}{T} \ln 2} = N_0 (e^{\ln 2})^{-\frac{t}{T}} = N_0 2^{-\frac{t}{T}}$$

$$N = N_0 \cdot 2^{-\frac{t}{T}}$$

$$\tau = \frac{T}{\ln 2} \text{ — среднее время жизни.}$$

Пример:

Уран-238(U)  $T = 4,5 \cdot 10^9$  лет

Радий(Ra)  $T = 1590$  лет

Радон(Rn)  $T = 3,8$  лет

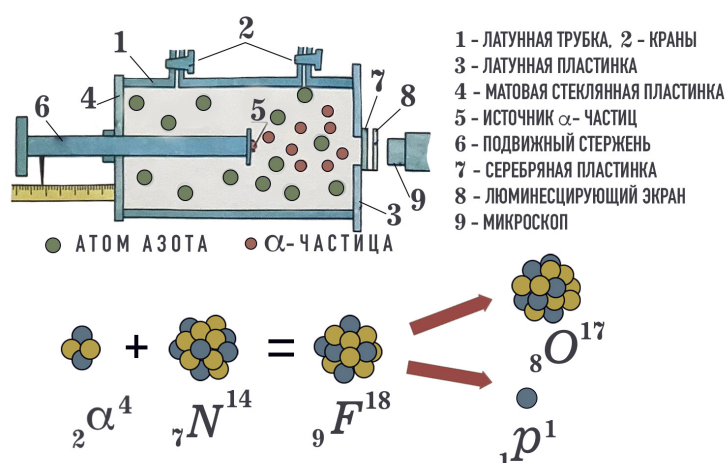
Полоний(Po)  $T = 2,5$  мин

В теле человека  $5 \cdot 10^5$  распадов в минуту.

## 23.4 Открытие протона

Открытие протона приписывают Резерфорду в 1919 году. Хотя как ионизированный атом водорода он был известен давно. Было не ясно, что эта частица входит в атомы всех элементов.

В 1919г. Резерфорд проводил опыты по зондированию строения ядра, очень похожие на проводимые ранее.



Если из установки откачать воздух, то вспышки на экране полностью соответствуют по своей интенсивности проводимым ранее опытам.

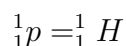
Если заполнить установку кислородом, то картина, наблюдаемая в микроскоп изменится. α-частицы поглощаются кислородом, и вспышек нет (при определенном расстоянии от экрана до источника).

Если заполнить установку азотом, то на экране начинают появляться вспышки меньшей интенсивности. Пояснить это можно двояко:

либо α-частицы где-то теряют энергию, либо в результате взаимодействия бшт α-частиц с изотопом появляются другие частицы.

Как можно это проверить? Излучение направить через камеру Вильсона в магнитном поле.

*Исследование излучения в камере Вильсона в магнитном поле приводят к тому, что α-частицы выбивают из ядра протоны, т.е. частицы с зарядом 1 и массой 1.*



Как можно оценить то, какое вещество появилось в камере? По спектру обнаруживается кислород вместо азота.



*Реакция открытия протона является эндотермической. т.е. идет с поглощением тепла.*



## 23.5 Открытие нейтрона.

Мысль о возможном существовании нейтрона была высказана Резерфордом в 1920 году. Он представлял нейтрон в виде тесного дублета, т.е. соединения протона с электроном. Если вспомнить строение гелия, то если в ядре два протона, то его масса должна быть равна двум, а не четырем. Т.о. Резерфорд предполагает, что гелия состоит из двух протонов и двух нейтральных дублетов. Эта точка зрения имела право на существование, т.к. в двадцатые годы было известно только три элементарные частицы: протон, электрон, фотон.

*В 1930г. немецкие физики Вальтер Боте и его ученик Герберт Бекер обнаружили при бомбардировке Ве новое излучение, которое проникало через слой свинца толщиной 20 см.*

Излучение было загадочным, им заинтересовались Ирен и Фредерик Жолио-Кюри. Было обнаружено следующее:

- ионизирует воздух в очень слабой степени
- не отклоняется ни в электрических, ни в магнитных полях
- не вызывают люминисценцию
- не обладает химическим действием
- не дает следа в камере Вильсона

До Жолио-Кюри было высказано предположение, что это очень жесткое  $\gamma$ -излучение.

*Ирен и Фредерик Жолио-Кюри поставили на пути излучения водородосодержащую заслонку из парафина.*

Оказалось, что она, в отличие от свинца, надежно прикрывала неизвестное излучение Боте-Беккера, при этом из парафина вылетали быстрые протоны.

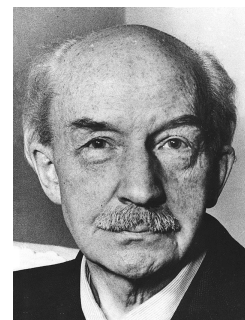
Производя необходимые измерения, они получили, что энергия фотонов исходного излучения должна быть около 50эВ.

Они писали:

Итак, настоящими опытами, по-видимому, установлено, что  $\alpha$ /м излучение высокой частоты способно освободить в водородосодержащих веществах протоны и придавать им большие скорости.

Неясно было, почему протон излучение может выбить только из водородосодержащих веществ, и не выбивает из свинца, например.

Работой Жолио-Кюри заинтересовался английский физик Джеймс Чедвик из лабораторий Резерфорда в Кембридже. Он сразу стал считать излучение нейтронами, т.к. по идеям его учителя Резерфорда нейтральная частица должна существовать. Позднее он писал:



Вальтер Боте  
(1891-1957)



Фредерик Жолио  
(1900-1958)

Ирен Кюри  
(1897-1956)

Мои мысли, естественно, вертелись вокруг нейтронов.

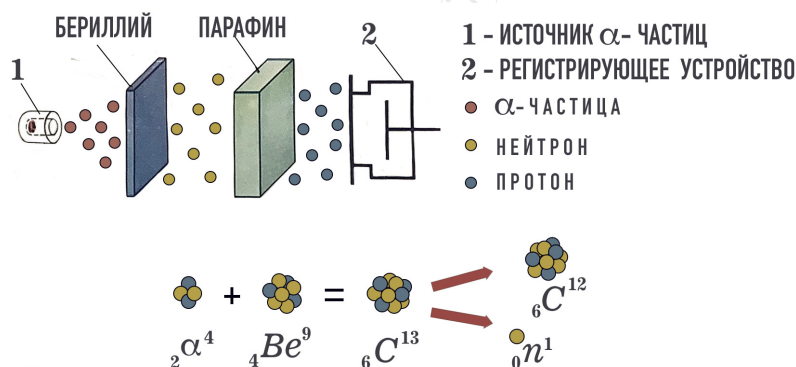
Чедвик аккуратно выполнил измерения энергии ядер отдачи, кроме этого он убедился, что оно может выбивать не только протоны, но и ядра лития, углерода, азота и т.д.

27 февраля 1932 года появляется краткое сообщение "Возможность существования нейтрона."

Результаты, полученные мною, очень трудно объяснить, исходя из предположения об  $\alpha$ /м излучении, если при столкновении должны сохраняться энергия и импульс. Однако трудности исчезают, если считать, что излучение состоит из частиц с массой 1 и зарядом 0, т.е. нейтронов. Можно предположить, что в результате захвата  $\alpha$ -частицы ядром Ве образуется ядро С и испускается нейтрон. Столкновения этих нейтронов с атомами, через которые они проходят, создают атомы отдачи; наблюдаемая энергия атомов отдачи находится в полном соответствии с такой точкой зрения.



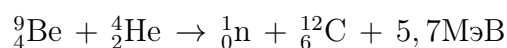
Джеймс Чедвик  
(1891-1974)



1932г.—Чедвик рассчитал, что

$$m_n = 1,675 \cdot 10^{-27} \text{ кг} \quad q_n = 0 \Rightarrow \frac{1}{0}n$$

$$(m_p = 1,672 \cdot 10^{-27} \text{ кг})$$



Реакция открытия нейтрона является экзотермической, т.е. идет с выделением тепла.



Все вышеизложенное должно было убедить в том, что сложнее всего определять, регистрировать, отождествлять нейтральные частицы.

## 23.6 Структура ядра. Ядерные силы. Энергия связи.

### 23.6.1 Протон-нейтронная модель ядра.

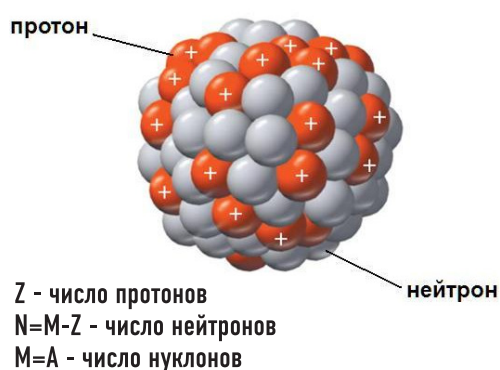
В 1932 году советский ученый Дмитрий Дмитриевич Иваненко выдвинул гипотезу о протонно-нейтронной модели ядра, электроны в его модели не входили в состав ядра. Несколько позже подобную модель ядра высказал и Гейзенберг. Надо сказать, что эта модель была принята скептически многими учеными. Она, как им казалось, противоречила испусканию электронов при  $\beta$ -распаде.

*В 1932г.(в год открытия нейтрона) Иваненко и Гейзенберг предложили пространно-нейтронную теорию строения ядра. Протоны и нейтроны называют нуклонами.*

Позитрон был открыт в 1932 году в составе космических лучей. Существование космического излучения было доказано австрийским физиком В. Гессом, совершившим в 1912 году подъем на воздушном шаре с электроскопом. Сообщая о результатах своего эксперимента в статье, опубликованной в журнале «Physikalische Zeitschrift», Гесс в частности писал: «Результаты моих наблюдений лучше всего объясняются предположением, что из мирового пространства на границу атмосферы падает излучение большой проникающей способности». В 1936 году В. Гессу за открытие космических лучей была присуждена Нобелевская премия по физике.



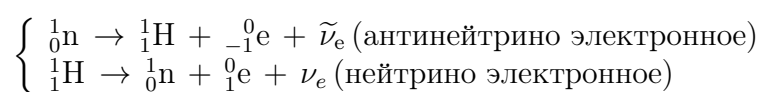
Дмитрий Иваненко (1904-1994) Вернер Гейзенберг (1901-1976)



$$m = m_e$$

$$q = +q_e$$

Как объяснить наличие  $\beta$ -излучения при радиоактивном распаде:



*Ни позитронов, ни электронов нет в ядре. Они возникают в результате ядерных превращений нуклонов (взаимно превращение нуклонов сопровождается выделением электронов и позитронов)*



Испускание электронов и позитронов похоже на испускание света атомами.

## 23.6.2 Ядерные силы. Сильное взаимодействие.

## 23.6.3 Дефект масс. Энергия связи.

**Def.** Дефект масс ядра - разность между массой отдельных нуклонов, находящихся в свободном состоянии и массой ядра, которое состоит из этого же количества нуклонов.

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

Масса свободного протона равна **1,007 276 а.е.м.**, нейтрона — **1,008 665 а.е.м.**

Энергию связи можно отнести к потенциальной энергии связанной с сильным взаимодействием нуклонов внутри ядра.

**Def.** Энергия связи это работа, которую могли бы совершать ядерные силы при разделении ядра на отдельные свободные нуклоны.

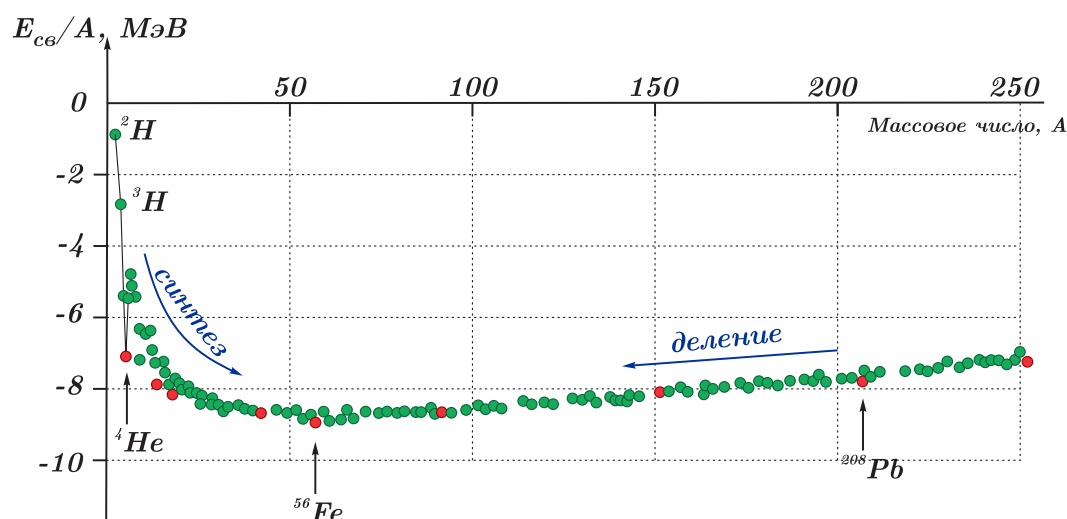
При разделении ядра на свободные нуклоны, ядерные силы будут совершать отрицательную работу, поэтому энергия связи будет отрицательной. Именно поэтому, ядро атома является стабильной системой.

Энергию связи можно рассчитать через дефект масс по формуле Эйнштейна:

$$E_{\text{св}} = \Delta M c^2 = (Zm_p + Nm_n - M_{\text{ядра}})c^2$$

**Def.** Удельная энергия связи это энергия связи ядра приходящаяся на один нуклон в данном ядре.

$$E_{\text{уд}} = \frac{E_{\text{св}}}{A}$$



По графику видно, что может идти два типа ядерных реакций с выделением энергии:

1. Синтез ядер - образование более тяжелых ядер из более легких
2. Деление ядер - выбивание из ядра частиц или деление ядра на осколки.



### 23.6.4 Пример расчета энергии связи

Найдем энергию связи для изотопа  ${}^7_3\text{Li}$ :

$$\begin{aligned} E_{\text{св}} &= (3 \cdot m_p + 4 \cdot m_n - m_{\text{Li}}) \cdot c^2 = (3 \cdot 1,007276 + 4 \cdot 1,008665 - 238,05006) \text{а.е.м.} \cdot 9 \cdot 10^{16} \text{ м}^2/\text{с}^2 = \\ &= 0,040478 \text{а.е.м.} \cdot 9 \cdot 10^{16} \text{ м}^2/\text{с}^2 = 0,040478 \frac{1,66 \cdot 10^{-27} \text{ кг}}{1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж/эВ}} \cdot 9 \cdot 10^{16} \text{ м}^2/\text{с}^2 = 37,8 \text{ МэВ} \end{aligned}$$

и для изотопа  ${}^{238}_{92}\text{U}$ :

$$\begin{aligned} E_{\text{св}} &= (92 \cdot m_p + 146 \cdot m_n - m_{\text{U}}) \cdot c^2 = (92 \cdot 1,007276 + 146 \cdot 1,008665 - 238,05006) \text{а.е.м.} \cdot 9 \cdot 10^{16} \text{ м}^2/\text{с}^2 = \\ &= 1,884422 \frac{1,66 \cdot 10^{-27} \text{ кг}}{1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж/эВ}} \cdot 9 \cdot 10^{16} \text{ м}^2/\text{с}^2 = 1759,6 \text{ МэВ} \end{aligned}$$

## 23.7 Ядерные реакции.

**Def.** Ядерными называются реакции превращения ядер происходящие в результате их взаимодействия с элементарными частицами или другими ядрами.

Что можно использовать как частицы "проводящие расщепление"? Сами по себе ядра практически всех элементов- стабильны, для деления требуется воздействие.

*В качестве снарядов используются  $\alpha$  - частицы, протоны, другие ядра. Наиболее эффективными являются нейтроны.*



Т.к. нейтроны не обладают зарядом, они могут приблизиться к положительно заряженному ядру на расстояние действия ядерных сил, обладают массой покоя (в отличие от  $\gamma$  - квантов и нейтрино). Основной недостаток нейтронов - невозможно разогнать нейтроны.

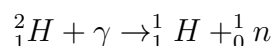
Поэтому многие реакции осуществляли с помощью заряженных частиц, например протонов.

*В 1932 году осуществлена первая ядерная реакция с помощью протонов полученных на ускорителе*



Сейчас ускоренные заряженные частицы в основном участвуют в ядерных реакциях осуществляемых в научных целях. В Европе самый мощный ускоритель находится в Объединенном Международном центре ядерных исследований (ЦЕРН) и там разгоняют частицы до 270ГэВ. Самый мощный ускоритель в России находится в Серпухове - 76ГэВ.

Существуют также реакции которые идут под воздействием  $\gamma$  квантов:



Однако наиболее эффективными для практического использования являются реакции, протекающие при взаимодействии ядер с нейтронами. Выдающийся итальянский физик Э. Ферми первым начал изучать реакции, вызываемые нейтронами. Он обнаружил, что ядерные превращения вызываются не только быстрыми ( $>1\text{МэВ}, 14 \cdot 10^3\text{км/с}$ ), но и медленными нейтронами, движущимися с тепловыми скоростями.

Очень интересными свойствами обладают ультрахолодные нейтроны ( $E < 10^{-7}\text{эВ}$ ). Их "сажают" в ловушку где они живут до распада. Такие нейтроны очень удобно изучать. Очень много в исследовании таких электронов было сделано у нас в Гатчине, в ядерном институте РАН, было выяснено, что время жизни свободного нейтрона ( $896 \pm 10\text{с}$ ). Нейтрон стабилен только в ядре (в отличие от протона, время жизни которого  $10^{32}$  лет)



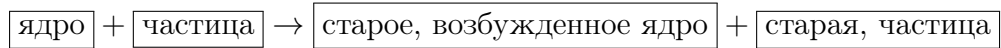
Энрико Ферми  
(1901-1954)

*Опыт показывает, что ядерные реакции чаще вызывают медленные нейтроны. Нейтроны часто специально замедляют.*

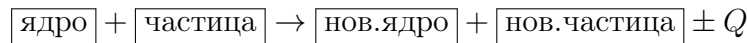


### 23.7.1 Типы ядерных реакций:

1. Реакция рассеяния на ядре (опыт Резерфорда с альфа частицами)

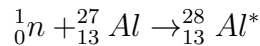
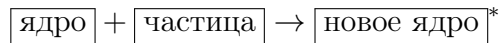


2. Реакция превращения (радиационный захват)



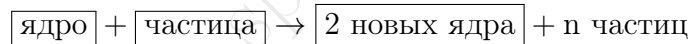
Например реакции открытия нейтрона и протона.

3. Реакция поглощения



часто захватываются быстрые нейтроны

4. Ядерное деление:

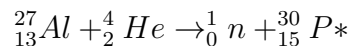


## 23.8 Искусственная радиоактивность

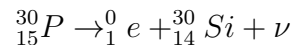
В 1934 году Ирен и Фридерик Жолио-Кюри обнаружили, что при бомбардировке алюминия  $\alpha$  частицами появляются не только протоны, но и нейтроны, электроны, позитроны,  $\alpha$  частицы. Причем, бомбардируемое вещество продолжало излучать после того, как источник  $\alpha$  частиц был удален.

*Явления испускания каких-либо лучей, после воздействия на вещество потоком элементарных частиц или легких ядер названо искусственной радиоактивностью.*

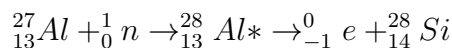
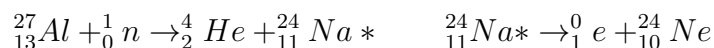
Что же наблюдали супруги Кюри?



Получался радиоактивный фосфор. Фосфор участвует в позитронном распаде, т.к. его массовое число соответствует редкому изотопу:



При бомбардировке атомов алюминия получившимися нейтронами может произойти:



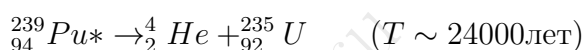
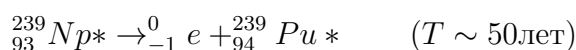
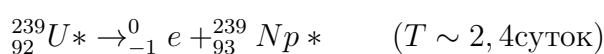
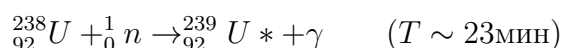
К 1925 году были открыты все 88 естественных нерадиоактивных элемента. Пустые клетки: 43,61,85,87.

Было сделано предположение, что бомбардировка нейтронами может привести к получению следующего элемента таблицы Менделеева. Так искусственно был получен технеций:



Тот же принцип решили положить в основу получения, так называемых трансуранных элементов.

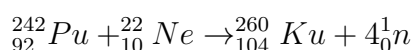
В 1934 году Э.Ферми решил получить изотопы урана, путем облучения его нейтронами, чтобы изучить свойства этих изотопов.



Уран 238 имеет время полураспада 4,5 млрд лет, поэтому в природе 99,3% урана 238 и 0,7% урана 235.

Трансуранные элементы, которые получаются в этой реакции на земле были, но они уже распались, либо их концентрация предельно мала. Ферми, наверняка, в своих экспериментах получил и Np и Pu, но не зафиксировал эти элементы. Открытие приписывают Макмилану и Эйблсону в 1940 году.

За 15 лет американскими физиками во главе с Сибергом (1940-1950) синтезировано 10 трансуранных элементов и изучены их свойства. Сейчас получены элементы с  $Z \sim 118$  время жизни менее 0,003 с. Исследовать и зафиксировать достаточно тяжело. Первенство в получении элементов "Второй сотни" принадлежит советским физикам во главе с Флеровым. Идея: бомбардировать не нейтронами, а тяжелыми ядрами (Дубна). Так был получен Курчатовий:



К середине 60-х годов появилась теория по которой элементы с  $Z = 114, 126, 184, 186$  должны быть более стабильны, чем их окружение. Идея получила название "синтезирование сверхэлементов". Несколько десятилетий пытались воплотить эту идею. Пока не получилось.

## 23.9 Цепная реакция деления. Ядерный реактор.

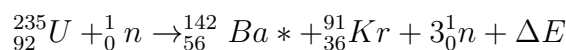
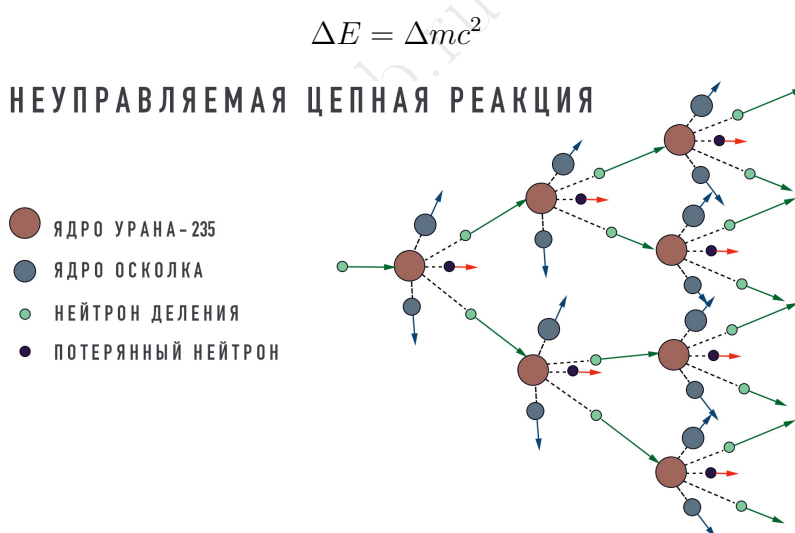
В 1934-1938 годах многие ученые изучали самопроизвольное деление урана на осколки. Такой процесс энергетически выгоден и может идти самопроизвольно. В основном это явление широко изучалось в Германии немецкими учеными О. Ганом и Ф. Штрассманом и в Италии Энрико Ферми. В 1938 Э.Ферми в США, где в 1942 г был пущен первый в мире ядерный реактор.

Реакции деления урана с выделением большой энергии были предсказаны супругами Кюри, они теоретически обосновали, что в результате такой реакции выделяются 2-3 быстрых нейтрона. Шейтнером в 1938 году сначала было предсказано, а затем получено, что при делении урана 235 появляются радиоактивные элементы с  $Z = 39, 38, 36, 54, 57, 53$  и быстрые нейтроны.

Как же происходит деление. Здесь на помощь приходит так называемая капельная модель ядра. Ядро - заряженная капля. Каплю жидкости удерживают силы поверхностного натяжения, ядро - силы поверхностного слоя ядра. В отличие от капли, для ядра определяющими являются две тенденции: силы натяжения поверхностного слоя стремятся уменьшить площадь поверхности ядра, а силы электростатического отталкивания стремятся раздвинуть частицы ядра.

Нейтрон попадая в ядро, повышает его энергию на величину своей энергии связи. Возбужденное ядро приходит в колебание, то сжимаясь, то вытягиваясь. При деформации ядра - капли увеличивается его поверхность, а значит и поверхностная энергия, следовательно увеличивается полная энергия. В результате устойчивость ядра уменьшается. Энергия кулоновского отталкивания при деформации ядра уменьшается, это приводит к уменьшению полной энергии ядра, то есть к повышению устойчивости. Произойдет деление ядра или нет зависит от того, какая тенденция окажется сильнее: сжатие или растяжение.

Реакция деления ядра урана сопровождается выделением огромной энергии. Экспериментально, с помощью масс-спектрографа получено, что сумма масс осколков меньше массы большого ядра, тогда выделяется энергия



$$\Delta E = 8,4 \cdot 142 + 8,6 \cdot 91 - 7,5 \cdot 235 \approx 200 \text{ МэВ}$$

Такая энергия выделяется при делении одного ядра атома урана. В виде чего может выделяться такая энергия?



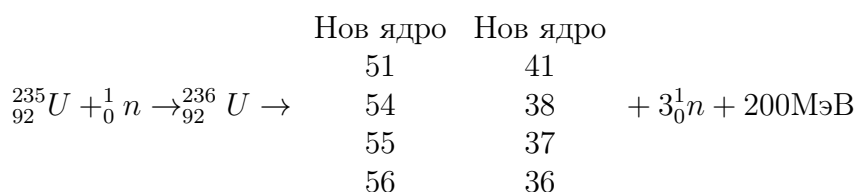
*Энергия выделяется в виде кинетической энергии осколков,  $\beta$  частиц,  $\gamma$  квантов, нейтронов, нейтрино.*

Э.Ферми экспериментально получил:

St. →

Ядра урана 238 делятся редко и лишь быстрыми нейтронами. Чаще эти ядра захватывают нейтрон и превращаются в плутоний. Ядра урана 235 делятся любыми нейтронами, но лучше - медленными (тепловыми)

Общий вид реакции деления урана  $^{235}\text{U}$  медленными нейтронами выглядит так:



Основной характеристикой такой реакции является:

1. Выделение огромной энергии
2. Образуются радиоактивные изотопы
3. При определенных условиях может перейти в цепную благодаря вторичным нейтронам.

Еще в 1939 году Зильдовичем была указана возможность проведения цепной ядерной реакции.



Если превращение одного ядра автоматически влечет за собой аналогичное превращение других ядер, то реакция непрерывно развивается и носит цепной характер.

Основным параметром цепной реакции является коэффициент рождения нейтронов:

$$k = \frac{\text{число нейтронов, возникших в последующем звене реакции}}{\text{число нейтронов, возникших предыдущем звене реакции}}$$

Реакция носит цепной характер, если  $k \geq 1$ , при равенстве говорят об управляемой ядерной реакции.

Коэффициент рождения нейтронов можно изменить. Как Вы думаете, от чего он зависит?

1. От состава ядерного горючего. Ядерное топливо обогащают. В природе уран 238 - 99,3%, урана 235 - 0,7%.



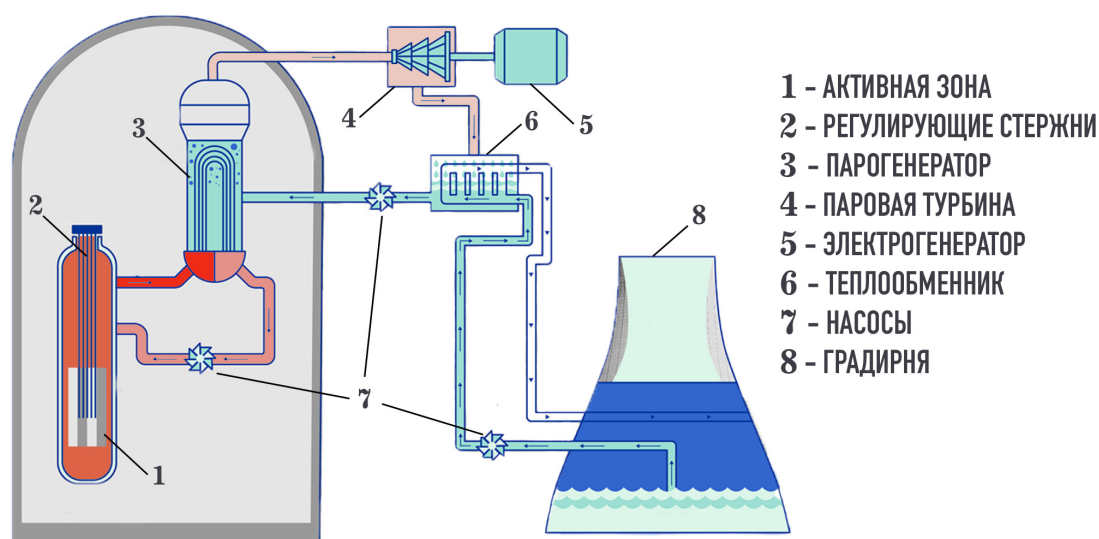
- От размера активной зоны. Если размер зоны мал, то нейтроны хоть и будут рождаться, но будут из нее уходить. Коэффициент может стать меньше 1. Критическому размеру соответствует критическая масса.
- От энергии нейтронов. Нейтроны целесообразно замедлять. Для чистого урана-235 критическая масса составляет около 50 кг. Критическую массу урана можно во много раз уменьшить, если использовать так называемые замедлители нейтронов. Дело в том, что нейтроны, рождающиеся при распаде ядер урана, имеют слишком большие скорости, а вероятность захвата медленных нейтронов ядрами урана-235 в сотни раз больше, чем быстрых. Наилучшим замедлителем нейтронов является тяжелая вода  $D_2O$ . Обычная вода при взаимодействии с нейтронами сама превращается в тяжелую воду. Хорошим замедлителем является также графит, ядра которого не поглощают нейтронов. При упругом взаимодействии с ядрами дейтерия или углерода нейтроны замедляются до тепловых скоростей.

Применение замедлителей нейтронов и специальной оболочки из бериллия, которая отражает нейтроны, позволяет снизить критическую массу до 250 г.

В атомных бомбах цепная неуправляемая ядерная реакция возникает при быстром соединении двух кусков урана-235, каждый из которых имеет массу несколько ниже критической.

## 23.10 Ядерный реактор и атомные электростанции

Устройство, в котором поддерживается управляемая реакция деления ядер, называется ядерным (или атомным) реактором. Схема ядерного реактора на медленных нейтронах приведена на рис:



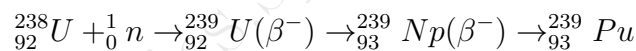
Ядерная реакция протекает в активной зоне реактора, которая заполнена замедлителем и пронизана стержнями, содержащими обогащенную смесь изотопов урана с повышенным содержанием урана-235 (до 3%). В активную зону вводятся регулирующие стержни, содержащие кадмий или бор, которые интенсивно поглощают нейтроны. Введение стержней в активную зону позволяет управлять скоростью цепной реакции.

Активная зона охлаждается с помощью прокачиваемого теплоносителя, в качестве которого может применяться вода или металл с низкой температурой плавления (например, натрий, имеющий температуру плавления 98 °С). В парогенераторе теплоноситель передает тепловую энергию воде, превращая ее в пар высокого давления. Пар направляется в турбину, соединенную с электрогенератором. Из турбины пар поступает в конденсатор. Во избежание утечки радиации контуры теплоносителя I и парогенератора II работают по замкнутым циклам.

Турбина атомной электростанции является тепловой машиной, определяющей в соответствии со вторым законом термодинамики общую эффективность станции. У современных атомных электростанций коэффициент полезного действия приблизительно равен 33%. Следовательно, для производства 1000 МВт электрической мощности тепловая мощность реактора должна достигать 3000 МВт. При этом 2000 МВт должны уноситься водой, охлаждающей конденсатор. Это приводит к локальному перегреву естественных водоемов и последующему возникновению экологических проблем.

Наряду с описанным выше ядерным реактором, работающим на медленных нейтронах, большой практический интерес представляют реакторы, работающие без замедлителя на быстрых нейтронах. В таких реакторах ядерным горючим является обогащенная смесь, содержащая не менее 15% изотопа  ${}_{92}^{235}\text{U}$ .

Преимущество реакторов на быстрых нейтронах состоит в том, что при их работе ядра урана-238, поглощая нейтроны, посредством двух последовательных  $\beta^-$ -распадов превращаются в ядра плутония, которые затем можно использовать в качестве ядерного топлива:



Коэффициент воспроизводства таких реакторов достигает 1,5, т. е. на 1 кг урана-235 получается до 1,5 кг плутония. В обычных реакторах также образуется плутоний, но в гораздо меньших количествах.

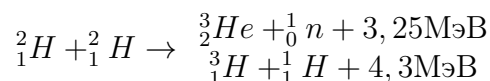
Первый ядерный реактор был построен в 1942 году в США под руководством Энрико Ферми. В нашей стране первый реактор был построен в 1946 году под руководством И. В. Курчатова.

## 23.11 Термоядерная реакция.

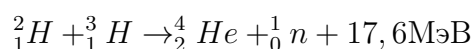
Согласно энергетической кривой выделение энергии будет происходить и при синтезе легких ядер. По доступности этих веществ реакция более выгодная. Энергия от Солнца идет благодаря тому, что в недрах звезды происходит реакция синтеза: из четырех протонов образуется гелий. По оценкам температура в центре звезд  $14 \cdot 10^6 \text{ K}$ .

Основные виды термоядерных реакций:

1. Дейтериевый синтез



2. Дейтериево-тритиевый синтез



Дейтерий выделить достаточно просто из запасов тяжелой воды или обычной воды, где на 1 атом дейтерия приходится около 6000 атомов водорода.

Что необходимо для осуществления термоядерной реакции:

1. Полная ионизация атомов - получение предельно ионизированной плазмы. Это необходимо, чтобы избежать отталкивания электрических объектов на расстояниях  $10^{-10}$  м.
2. Чтобы начали действовать ядерные силы., ядра необходимо сблизить на  $10^{-15}$  м.

Это достигается сильным нагреванием. Оценим:

$$\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r} = \frac{mv^2}{2} = \frac{3}{2}kT \Rightarrow T \sim 3,7 \cdot 10^9 K$$

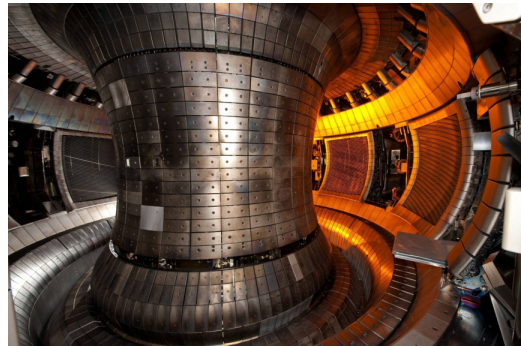
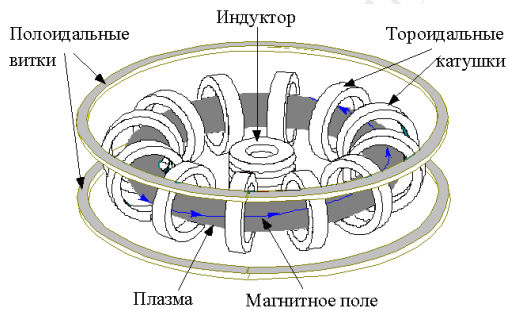
Эксперимент показал, что реакция идет при  $10^6 K$ , т.к. в соответствии с распределением Максвелла, всегда существуют быстрые частицы.

**Def.** Реакция ядерного синтеза, происходящая в плазме при создании начальной высокой температуры называется термоядерной.

В термоядерной бомбе вначале высокая температура создается взрывом атомной бомбы.

### Проблема с управляемым «термоядом»

Наиболее близко удалось подойти с помощью установки, изобретенными советскими физиками. ТОКАМАК (ТО раидальная КАмера с МАгнитными Катушками). Магнитное поле удерживает плазму внутри торойда, не давая со стенками. Уже получены температуры до 200 млн К, больше чем в центре звезд.



Еще один способ разработанный недавно: устройство с инерционным удержанием. Мощные лазеры могут нагреть малые объемы вещества до необходимых температур за очень малое время и частицы не успевают разлетаться за счет собственной инерции вступают в реакции.