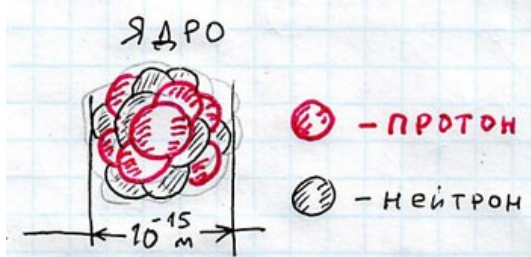


Тема 22. Физика атомного ядра и элементарных частиц

1. Общие сведения об атомных ядрах

В 1932 г. была открыта новая элементарная частица с массой примерно равной массе протона, но имеющая электрического заряда - **нейтрон** (нейтральный). Практически сразу два физика - Д.Д. Иваненко из СССР и В. Гейзенберг из Германии - предложили **нейтронно-протонную** модель атомного ядра. Дальнейшие исследования полностью подтвердили их предположения.

Нейтрон - электрически нейтральная элементарная частица, в свободном состоянии - неустойчив. Протон - положительно заряженная элементарная частица, в свободном состоянии - стабилен



В современной физике считается, что в ядре постоянно происходят *взаимные превращения* протонов в нейтроны и наоборот. Поэтому эти частицы получили общее название - **нуклоны**.

Массу ядер и элементарных частиц принято измерять в **атомных единицах массы**:

$$1 \text{ а. е. м.} = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$$

$$m_p = 1,00728 \text{ а. е. м.}$$

$$m_n = 1,00866 \text{ а. е. м.}$$

$$m_p \approx m_n = 1 \text{ а. е. м.} = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$$

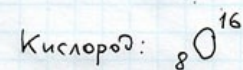
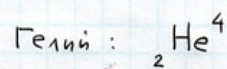
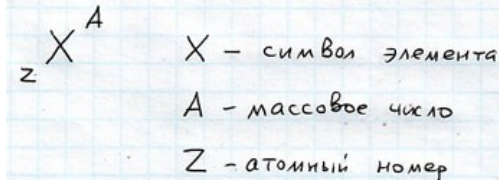
Число протонов **N_p** в ядре химического элемента равно атомному заряду **Z** (порядковому номеру) элемента
 $N_p = Z$

Почти вся масса атома сосредоточена в ядре. Сумма количества протонов **N_p** и нейтронов **N_n** равна массовому числу атома **A** . Массовое число **A** - это целое число, ближайшее к атомной массе (в а.е.м.)

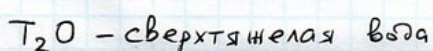
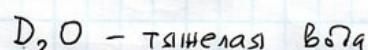
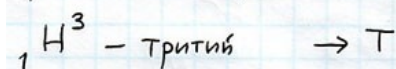
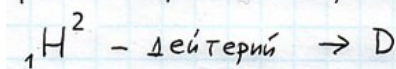
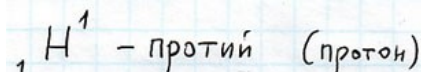
$N_p + N_n = A$

Число нейтронов **N_n** в атомном ядре: **$N_n = A - Z$**

Атомные ядра химических элементов в физик принято обозначать:



Атомы, состоящие из одинакового количества протонов, но разного количества нейтронов, называются **изотопами**. Например, у водорода имеется четыре изотопа:



В настоящее время известно около 300 стабильных и свыше 1000 нестабильных ядер. **Радиоактивные ядра** - это нестабильные (неустойчивые) ядра, которые могут самопроизвольно распадаться. Степень стабильности ядер характеризуется **периодом полураспада** - временем, в течение которого половина

исходного количества ядер распадается.

Возвращаясь к модели атомного ядра, следует отметить, что она была усовершенствована. Согласно **капельной модели**, нуклоны в ядре взаимодействуют подобно молекулам жидкости (см. Тема 10, п. 3). Причем, между нуклонами, расположенным в поверхностном слое, действуют силы, аналогичные силам поверхностного натяжения жидкости, что повышает стабильность ядра. Эта модель хорошо объясняет механизм *ядерных реакций*, особенно *реакции деления ядер*.

2. Ядерные силы

Протоны и нейтроны удерживаются в ядре с помощью **ядерных**, которые являются одним из основных сил в природе (см. Тема 4, п. 1). Взаимодействие, осуществляемое с помощью этих сил, называется **сильным**. Особенности ядерных сил:

- поле этих сил **не является центральным**, т.е. по своим свойствам резко отличается от ЭМП и гравитационного поля;
- ядерные силы относятся к **силам притяжения**;
- это **короткодействующие силы**, которые проявляются на расстояниях не более размера атомного ядра;
- это **сильнодействующие силы**; они в 100 раз превышают электромагнитные силы;
- эти силы обладают свойством **зарядовой независимости**, т.е. они действуют: протон-протон, нейтрон-нейтрон, протон-нейтрон;
- эти силы обладают **свойством насыщения**, т.е. каждый нуклон взаимодействует только с рядом расположенными нуклонами, а не со всеми нуклонами в ядре. Поэтому при увеличении числа нуклонов ядерные силы ослабевают, что ведет, например, к распаду ядер тяжелых элементов.

3. Энергия связи и дефект массы

Энергия связи ядра $E_{св}$ - это такая энергия, которую необходимо затратить, чтобы расщепить атомное ядро на отдельные протоны и нейтроны и удалить их на такое расстояние, на котором перестают действовать ядерные силы. Значение энергии связи определяет *прочность* ядра. Как было сказано выше, **$E_{св}$** зависит от количества нуклонов в ядре. Поэтому для сравнения используют *удельную* энергию связи

$$\epsilon_{св} = E_{св} / A$$

удельн.
энерг.
свзвч

Как выяснилось, **масса ядра в целом всегда меньше суммы масс отдельных нуклонов**, входящих в состав ядра. Разность между массой исходных частиц и массой ядра называют **дефектом массы**:

$$\Delta m = Z m_p + (A - Z) m_n - m_{я}$$

$\Delta E_{св} = \Delta m c^2$ ф-ла Эйнштейна

или

$$\Delta E_{св} = \Delta m \cdot 931$$

931 МэВ (мегаэлектронвольт) \sim 1 а. е. м.

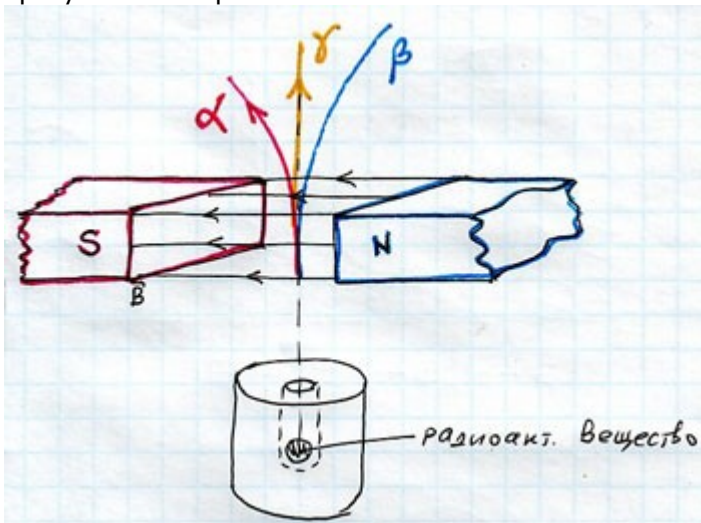
Формула Эйнштейна показывает взаимосвязь массы и энергии и является, по сути, расширенным толкованием внутренней энергии (см. Тема 1, п.3).

4. Естественная радиоактивность

Радиоактивность - свойство атомных ядер самопроизвольно (спонтанно) менять свой состав (заряд ядра **Z**, число нуклонов **A**) путем испускания элементарных частиц, квантов электромагнитного излучения или ядерных фрагментов ("осколков ядра"). Некоторые из существующих в природе элементов являются радиоактивными - **U**, **Th** и др. Естественная радиоактивность была открыта в 1896 г. французским физиком А. Беккерелем. Он обнаружил, что соли урана испускают невидимые лучи, которые могут вызывать люминисценцию, проникать через непрозрачные вещества, ионизировать газы, засвечивать фотопластинку в темноте. Позже было обнаружено, что такими же свойствами обладают торий, полоний, радий и другие тяжелые элементы. Все эти и подобные элементы были названы **радиоактивными**, а испускаемые ими лучи - **радиоактивными лучами** (радиоактивным излучением).

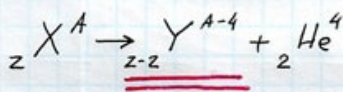
Радиоактивное излучение имеет сложный состав. В него входят три различных вида излучения, которые получили названия альфа-лучей, бета-лучей и гамма-лучей. Проще всего разделить эти три вида излучения,

пропустив его через МП:



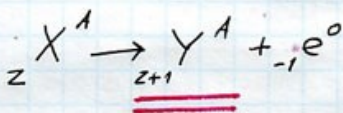
Альфа-лучи:

α -лучи - это ядра гелия ${}_2\text{He}^4$



Бета-лучи:

β -лучи - это электроны ${}_{-1}e^0$



Гамма-лучи:

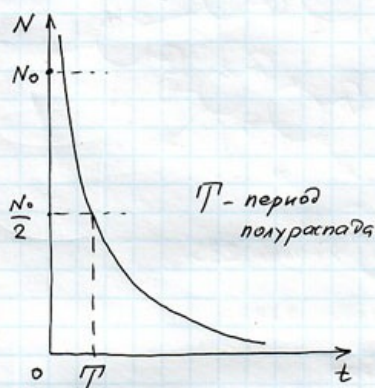
γ -лучи - эл. магн. изл. с $\lambda < 0,1 \text{ нм}$
(жёсткое излучение)

Уравнение, которое показывает, какое количество ядер **N** распалось в данный момент времени **t**, считая, что в начальный момент **t₀=0** их было **N₀**, называется законом **радиоактивного распада**:

$$N = N_0 \cdot e^{-\lambda t} \quad \text{закон радиоактивного распада}$$

$e = 2,71828$ - постоянная

λ - постоянная распада данного элемента



Продукт радиоактивного распада также может быть радиоактивным. Поэтому в процессе радиоактивного распада получается цепочка радиоактивных элементов до тех пор, пока не образуется стабильный элемент.

Для наблюдения радиоактивных излучений, элементарных частиц используют различные способы регистрации и приборы: ионизационный и сцинтилляционный счетчики, камеру Вильсона, пузырьковую камеру, толстослойные фотоэмульсии.

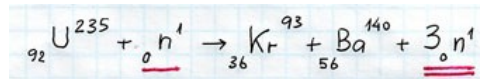
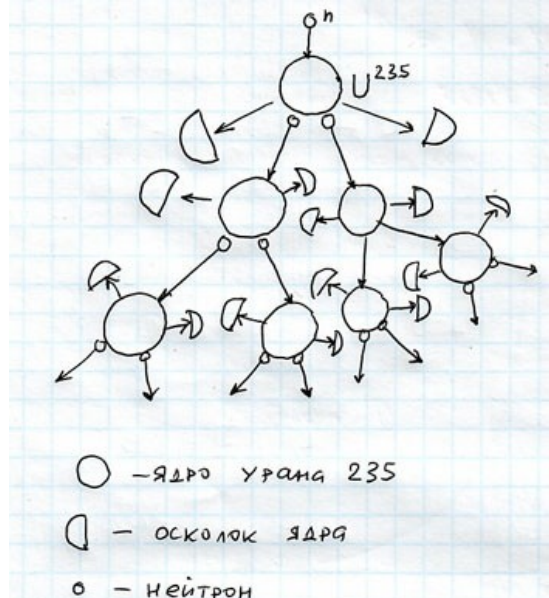
5. Цепная ядерная реакция

ОБЩЕЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ:

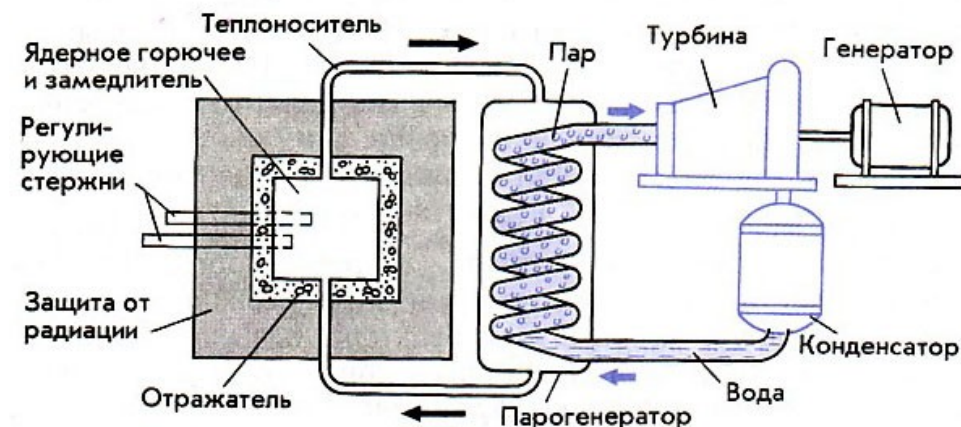
ядерная реакция - это процесс превращения атомных ядер в результате действия на них быстрых элементарных частиц или ядер других атомов.

В 1939 г. несколькими учеными в Германии и Франции была открыта реакция деления ядер урана, обстреливаемых нейтронами.

Именно для объяснения деления тяжелых ядер Н. Бор предложил капельную модель ядра. В обычных условиях тяжелое ядро имеет сферическую форму. При захвате ядром нейтрона возникает сильное возбуждение, ядро деформируется и образуется "перетяжка", которая обрывается, поскольку кулоновские силы становятся больше ядерных сил. Осколки ядра разлетаются с огромными скоростями. Кроме того, при делении исходного ядра на части из него выбрасываются 2-3 нейтрона. Эти нейтроны попадают в другие ядра, вызывая их деление и выброс еще большего количества новых нейтронов, которые попадают в другие ядра и так далее. Процесс может настать лавинообразно и неуправляемо. Это и есть **цепная ядерная реакция**. Деление тяжелых ядер сопровождается выделением большого количества энергии. Например, деление всех ядер, содержащихся в 1 кг урана-235, эквивалентно 23 000 000 кВт.ч. Неуправляемая цепная ядерная реакция протекает при взрыве атомной бомбы.



Для управления цепной ядерной реакцией используют вещества, способные поглощать нейтроны - кадмий или бор. Стержни из этих веществ вдвигают в ядерный реактор - реакция замедляется, выделение энергии уменьшается; выдвигают - реакция ускоряется, выделение энергии увеличивается.

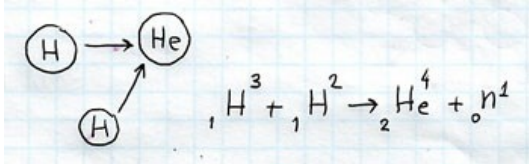


АЭС относится к типу тепловых электростанций, поскольку использует тепловую энергию ядерной реакции для получения пара, который и вращает лопасти турбин электрогенераторов.

6. Термоядерная реакция

Ядерная реакция, которая происходит в высокотемпературной плазме при сближении быстро движущихся ядер, называется **термоядерной реакцией** или реакцией термоядерного синтеза. Температура, при которой протекает такая реакция, должна достигать миллионов градусов, а давление - в миллионы раз превышать атмосферное. Ядра приобретают настолько большие скорости движения, что способны преодолеть кулоновские силы отталкивания, слиться в новое ядро, образовав новый элемент.

Наиболее просто осуществляется термоядерный синтез на основе слияния тяжелого водорода и превращения его в гелий:



При синтезе 1 г тяжелого водорода в гелий выделяется 630 ГДж энергии.

Впервые неуправляемая термоядерная реакция была осуществлена при взрыве водородной бомбы.

Ученые всего мира пытаются осуществить управляемую термоядерную реакцию, однако при этом возникает целый ряд неразрешимых пока проблем. Например, создание температуры в миллионов градусов и удержание такой "горячей" плазмы длительное время в магнитном поле реактора. В институте атомной энергии им. И.В. Курчатова на термоядерной установке "Токомак" получена плазма с температурой около 1 000 000 К и временем жизни около 80 мс.

7. Элементарные частицы

Введение понятия "**элементарная частица**" в физике связано с идеей отыскать такие *неделимые* частицы, из которых состоит вся материя.

Неделимость сначала приписывалась атомам, потом ядрам, затем нуклонам. Однако обнаружение внутренней структуры у этих и многих других вновь открываемых элементарных частиц придало данному термину совершенно иной смысл.

Элементарными называются частицы, которые *на современном уровне знаний* не имеют внутренней структуры, т.е. их нельзя представить состоящими из каких-либо других частиц.

В настоящее время истинно элементарными являются фотоны, электроны и позитроны, мю-мезоны, все виды нейтрино. Эти частицы не участвуют в сильном взаимодействии, их поведение определяется электромагнитным и слабым взаимодействием (см. Тема 4, п. 1).

Элементарные частицы характеризуются массой покоя, электрическим зарядом, средним временем жизни и некоторыми другими параметрами.

По массе покоя все элементарные частицы условно подразделяют на *четыре группы* (класса):

I - **фотоны**, их масса покоя равна нулю ($m_0 = 0$);

II - **лептоны**, $0 < m_0 \leq m_e$

III - **мезоны**, $m_e < m_0 \leq m_p$

IV - **барионы**, $m_p \leq m_0 < m_D$

Таблица классификации элементарных частиц

Группа	Название частицы	Символ		Масса (в электронных массах)	Электрический заряд	Спин	Время жизни (с)	
		Частица	Античастица					
Фотоны	Фотон	γ		0	0	1	Стабилен	
Лептоны	Нейтрино электронное	ν_e	$\bar{\nu}_e$	0	0	1/2	Стабильно	
	Нейтрино мюонное	ν_μ	$\bar{\nu}_\mu$	0	0	1/2	Стабильно	
	Электрон	e^-	e^+	1	-1 1	1/2	Стабилен	
	Мю-мезон	μ^-	μ^+	206,8	-1 1	1/2	$2,2 \cdot 10^{-6}$	
Адроны	Мезоны	π^0		264,1	0	0	$0,87 \cdot 10^{-16}$	
		π^+	π^-	273,1	1 -1	0	$2,6 \cdot 10^{-8}$	
		K^+	K^-	966,4	1 -1	0	$1,24 \cdot 10^{-8}$	
			K^0	\bar{K}^0	974,1	0	0	$\approx 10^{-10} - 10^{-8}$
	Эта-нуль-мезон	η^0		1074	0	0	$\approx 10^{-18}$	
	Барыоны	Протон	p	\bar{p}	1836,1	1 -1	1/2	Стабилен
		Нейтрон	n	\bar{n}	1838,6	0	1/2	898
		Лямбда-гиперон	Λ^0	$\bar{\Lambda}^0$	2183,1	0	1/2	$2,63 \cdot 10^{-10}$
		Сигма-гипероны	Σ^+	$\bar{\Sigma}^+$	2327,6	1 -1	1/2	$0,8 \cdot 10^{-10}$
			Σ^0	$\bar{\Sigma}^0$	2333,6	0	1/2	$7,4 \cdot 10^{-20}$
			Σ^-	$\bar{\Sigma}^-$	2343,1	-1 1	1/2	$1,48 \cdot 10^{-10}$
		Кси-гипероны	Ξ^0	$\bar{\Xi}^0$	2572,8	0	1/2	$2,9 \cdot 10^{-10}$
			Ξ^-	$\bar{\Xi}^-$	2585,6	-1 1	1/2	$1,64 \cdot 10^{-10}$
	Омега-минус-гиперон	Ω^-	$\bar{\Omega}^-$	3273	-1 1	1/2	$0,82 \cdot 10^{-11}$	

Массу покоя элементарных частиц обычно сравнивают с массой электрона, а если эта масса равна нулю, значит частица движется со скоростью света (фотон, нейтрино). Электрический заряд элементарных частиц выражают в единицах элементарного заряда **-e** или **+e**.

Основные свойства элементарных частиц:

1. Весь окружающий нас мир построен, в основном, только из трех частиц - протона, нейтрона, электрона.
2. Заряд частицы равен +1 или -1; двух - или многозарядных частиц не существует.
3. Большинство частиц нестабильны и имеют очень малое время жизни.
4. Почти каждой частице соответствует **античастица**.

Частица и античастица отличаются только знаком заряда: *электрон -e, позитрон +e*. При их столкновении происходит *аннигиляция* - они обе превращаются в другие элементарные частицы.

Способность к взаимным превращениям является **фундаментальным свойством** элементарных частиц.

Попытка объяснить многообразие элементарных частиц, а именно - адронов, привела к гипотезе о **кварках** - самых элементарных частицах, из которых состоят все известные. Характерной особенностью кварков является **дробный электрический заряд**, кратный **1/3 элементарного**. В настоящее время принято считать, что существует **6 кварков**. Кварки могут существовать только внутри адронов и *в принципе* не могут наблюдаться в свободном состоянии.