

## Состав и характеристика атомного ядра

Ядра атомов состоят из двух видов элементарных частиц – протонов и нейтронов. Эти частицы носят название *нуклонов*.

*Протон* (p) – ядро атома водорода. Он обладает зарядом +e и массой  $m_p = 1,672 \cdot 10^{-27}$  кг (энергия покоя  $E_{0p} = 938,2$  МэВ).

*Нейтрон* (n) – не обладающая электрическим зарядом частица с массой  $m_n = 1,675 \cdot 10^{-27}$  кг (энергия покоя  $E_{0n} = 939,5$  МэВ).

Количество протонов  $Z$ , входящих в состав ядра, определяет его заряд и называется *зарядовым числом* ядра.

Число нуклонов  $A$  в ядре называется *массовым числом* ядра. При превращениях ядер зарядовое и массовое числа сохраняются.

Для обозначения ядер применяют символ  ${}^A_ZX$ , где под  $X$  подразумевается химический символ элемента. Вверху ставится массовое число, внизу – атомный номер (зарядовое число).

Масса ядра  $m_{\text{я}}$  всегда меньше суммы масс входящих в него частиц. Это обусловлено тем, что при объединении в ядро выделяется энергия связи нуклонов друг с другом. Энергия связи  $E_{\text{св}}$  равна той работе, которую нужно совершить, чтобы разделить образующие ядро нуклоны и удалить их друг от друга на такие расстояния, при которых они практически не взаимодействуют друг с другом. Согласно закону взаимосвязи массы и энергии, энергия связи нуклонов в ядре равна:

$$E_{\text{св}} = c^2((Zm_p + (A - Z)m_n) - m_{\text{я}}) \quad (1)$$

## Удельная энергия связи

Энергия связи, приходящаяся на один нуклон, т.е.  $E_{св}/A$ , называется удельной энергией связи нуклонов в ядре. Эта величина характеризует меру прочности ядра: чем больше  $E_{св}/A$ , тем ядро прочнее.

Удельная энергия связи зависит от массового числа  $A$ . График этой зависимости представлен на рисунке 1. Сильнее всего связаны нуклоны в ядрах с массовыми числами порядка 50–60 (т.е. для элементов от Сг до Zn). Энергия связи для этих ядер достигает 8,7 МэВ/нуклон. С ростом массового числа удельная энергия связи постепенно уменьшается; для самого тяжелого природного элемента – урана – она составляет 7,5 МэВ/нуклон.

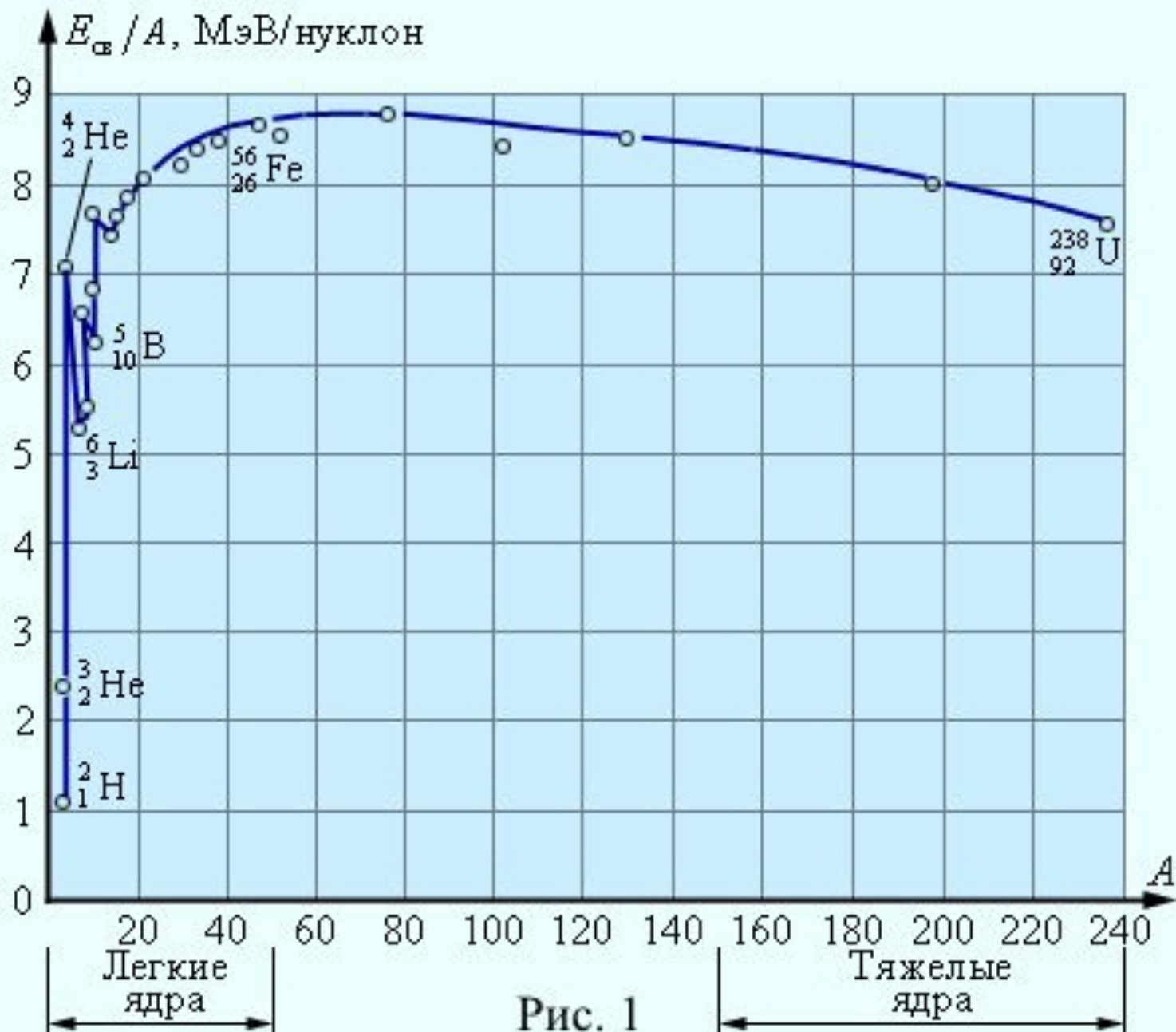


Рис. 1

Уменьшение удельной энергии связи при переходе к тяжелым элементам объясняется увеличением энергии кулоновского отталкивания протонов. В тяжелых ядрах связь между нуклонами ослабевает, а сами ядра становятся менее прочными. В случае стабильных легких ядер, где роль кулоновского взаимодействия невелика, числа протонов и нейтронов  $Z$  и  $N$  оказываются одинаковыми. Под действием ядерных сил как бы образуются протон – нейтронные пары. Но у тяжелых ядер, содержащих большое число протонов, из-за возрастания энергии кулоновского отталкивания для обеспечения устойчивости требуются дополнительные нейтроны.

Такая зависимость удельной энергии связи от массового числа делает энергетически возможными два процесса: 1) деление тяжелых ядер на несколько более легких ядер и 2) слияние (синтез) легких ядер в одно ядро. Оба процесса должны сопровождаться выделением большого количества энергии.

## Ядерные реакции

Ядерной реакцией называется процесс сильного взаимодействия атомного ядра с элементарной частицей или с другим ядром, приводящий к преобразованию ядра (или ядер). Взаимодействие реагирующих частиц возникает при их сближении до расстояний порядка  $10^{-15}$  м благодаря действию ядерных сил.

Наиболее распространенным видом ядерной реакции является взаимодействие легкой частицы  $a$  с ядром  $X$ , в результате которого образуется легкая частица  $b$  и ядро  $Y$ :



В качестве легких частиц  $a$  и  $b$  могут фигурировать нейтрон ( $n$ ), протон ( $p$ ), дейтрон ( ${}^2\text{H}$ ,  $D$  или  $d$ , ядро изотопа водорода – дейтерия – с массовым числом  $A=2$ ),  $\alpha$ -частица ( $\alpha$ ) и  $\gamma$ -фотон ( $\gamma$ ).

Ядерные реакции могут сопровождаться как выделением, так и поглощением энергии. Количество выделяющейся энергии  $Q$  называется энергией реакции (энергетическим выходом реакции).

Она определяется разностью масс исходных и конечных ядер (частиц):

$$Q = (\sum m_1 - \sum m_2) c^2 \quad (8)$$

где  $\sum m_1$  – сумма масс ядер, вступающих в реакцию,

$\sum m_2$  – сумма масс ядер, образовавшихся в результате реакции.

Если сумма масс образующихся ядер превосходит сумму масс исходных ядер, реакция идет с поглощением энергии и энергия реакции будет отрицательной ( $Q < 0$ ).



## Радиоактивность

Радиоактивностью называется самопроизвольное превращение одних атомных ядер в другие, сопровождаемое испусканием элементарных частиц. К числу радиоактивных процессов относятся: 1)  $\alpha$ -распад, 2)  $\beta$ -распад, 3)  $\gamma$ -излучение ядер, 4) спонтанное деление тяжелых ядер, 5) протонная радиоактивность.

Закон радиоактивного превращения выражается формулой

$$N=N_0e^{-\lambda t} \quad (2)$$

где  $N_0$  – количество ядер в начальный момент времени,  $N$  – количество нераспавшихся ядер в момент времени  $t$ ,  $\lambda$  – характерная для радиоактивного вещества константа, называемая *постоянной распада*.

Время, за которое распадается половина первоначального количества ядер, называется периодом полураспада  $T_{1/2}$ . Из (2) следует, что

$$T_{1/2} = (\ln 2) / \lambda \quad (3)$$

Активностью радиоактивного препарата  $A$  называется число распадов, происходящих в препарате за единицу времени:

$$A = dN_{\text{расп}}/dt = \lambda N \quad (4)$$

Радиоактивность, наблюдающаяся у ядер, существующих в природных условиях, называется **естественной**. Радиоактивность ядер, полученных посредством ядерных реакций, называется **искусственной**. Между искусственной и естественной радиоактивностью нет принципиального различия. Процесс радиоактивного превращения в обоих случаях подчиняется одним и тем же законам. Радиоактивное ядро называют материнским, а ядра, образующиеся в результате распада, – дочерними.

Почти 90 % из 2500 известных атомных ядер нестабильны.

## Альфа-распад

Альфа лучи представляют собой поток ядер гелия  ${}^4_2\text{He}$ . Распад протекает по схеме



Из схемы распада видно, что атомный номер дочернего ядра Y на две единицы, а массовое число на четыре единицы меньше, чем у исходного (материнского) ядра X.

## Бета-распад

Наиболее распространенный вид  $\beta$ -распада – электронный распад – протекает по схеме



Из схемы видно, что дочернее ядро имеет атомный номер, на единицу больший, чем у материнского ядра, массовые числа обоих ядер одинаковы. Наряду с электроном испускается также антинейтрино  $\tilde{\nu}$ .

## **Основные виды детекторов ядерных излучений**

Детекторы ядерных излучений – это приборы для регистрации альфа- и бета-частиц, рентгеновского и гамма излучения, нейтронов, протонов и т.п. Детекторы служат для определения состава излучения и измерения его интенсивности, а также энергии частиц. В основе всех методов регистрации лежат процессы взаимодействия излучения с веществом.

1. Импульсная ионизационная камера (плоский конденсатор в объеме, наполненном газом). Применяется для регистрации тяжелых заряженных частиц (протоны, альфа-частицы).

2. Счетчик Гейгера (цилиндрический конденсатор, заполненный инертным газом). Позволяет идентифицировать легкие частицы (электроны).

3. Сцинтилляционный детектор (экран со специальным покрытием, используемый для регистрации фотонов, испускаемых возбужденными атомами).

4. Следовые детекторы (камера Вильсона, пузырьковая камера, фотоэмульсионная пластинка) фиксируют треки, оставляемые частицами в рабочем веществе. По геометрии треков устанавливается число заряженных частиц, участвовавших в реакции, и направления их движения.

## Виды взаимодействий элементарных частиц

В настоящее время элементарными частицами называют большую группу мельчайших частиц материи, которые не являются атомами или атомными ядрами (за исключением протона – ядра атома водорода) и которые при взаимодействии ведут себя как единое целое. Характерным свойством всех элементарных частиц является их способность к взаимным превращениям (рождению и уничтожению) при взаимодействии с другими частицами. Ситуация с определением элементарности усложнилась после того, как выяснилось, что многие из этих частиц имеют внутреннюю структуру.



Известны четыре вида взаимодействий (фундаментальные взаимодействия) между элементарными частицами: сильное, электромагнитное, слабое и гравитационное. Эти взаимодействия отличаются интенсивностью процессов, вызываемых среди элементарных частиц. Об интенсивности взаимодействий можно судить по скорости (или степени вероятности) процессов, вызываемых ими. Обычно для сравнения берут скорости процессов при энергиях сталкивающихся частиц около 1 ГэВ (такая энергия характерна для физики элементарных частиц). Сравнительные характеристики этих четырех типов взаимодействия приведены в таблице 1, в которой указаны интенсивности взаимодействий по сравнению с сильным, принятым за единицу, а также длительность процессов и радиус действия соответствующих сил.

Таблица 1

Взаимодействие	Интенсивность	Длительность процессов, с	Радиус действия, см
Сильное	1	$10^{-24}$	$10^{-13}$
Электромагнитное	$\sim 10^{-2}$	$10^{-20}$	$\infty$
Слабое	$10^{-5}$	$> 10^{-8}$	$10^{-16}$
Гравитационное	$10^{-39}$	?	$\infty$

Электромагнитное взаимодействие значительно слабее сильных взаимодействий, однако из-за дальнего действия электромагнитные силы во многих случаях оказываются главными. Именно эти силы вызывают разлет осколков, которые образуются при делении атомных ядер. Эти силы ответственны за все электрические и магнитные явления, наблюдаемые нами в различных формах их проявления: оптических, механических, тепловых, химических и т.д. Электромагнитные силы могут быть как *силами притяжения* (между разноименно заряженными частицами), так и *силами отталкивания* (между одноименно заряженными частицами).

**Сильные взаимодействия** обеспечивают связь нуклонов в ядре и удерживают нуклоны в атомных ядрах. Расстояние, на котором проявляется сильное взаимодействие (радиус действия  $r$ ), составляет примерно  $10^{-13}$  см. Сильное взаимодействие выступает исключительно в качестве *сил притяжения*.

Гравитационное взаимодействие является универсальным и самым слабым. Ему подвержены все элементарные частицы. Радиус действия не ограничен ( $r = \infty$ ). Однако в процессах микромира гравитационное взаимодействие ощутимой роли не играет. Гравитационные силы проявляют себя как *силы притяжения*.

**Слабое взаимодействие** ответственно за все виды  $\beta$ -распада ядер, за все процессы взаимодействия нейтрино с веществом, а также за многие распады элементарных частиц. Слабое взаимодействие гораздо слабее не только сильного, но и электромагнитного взаимодействия. Слабое взаимодействие, как и сильное, является короткодействующим.

Для элементарных частиц весьма характерна их *многочисленность*. В настоящее время открыто несколько сотен частиц, подавляющее большинство которых нестабильно.

По *времени жизни  $\tau$*  различают *стабильные*, *квазистабильные* и так называемые *резонансы*. Резонансами называют *короткоживущие* частицы, распадающиеся за счет сильного взаимодействия со временем жизни  $\sim 10^{-23}$  с. Нестабильные частицы с временем жизни, превышающим  $10^{-20}$  с, распадаются за счет электромагнитного или слабого взаимодействия. По сравнению с характерным ядерным временем ( $10^{-23}$  с) время  $10^{-20}$  следует считать большим. По этой причине их и называют квазистабильными. Стабильными же частицами ( $\tau \rightarrow \infty$ ) являются только фотон, электрон, протон и нейтрино.

## Переносчики взаимодействия

Это особая группа элементарных частиц, в которую входят *фотоны* (переносчики электромагнитного взаимодействия), *промежуточные векторные бозоны* (переносчики слабого взаимодействия), так называемые *глюоны* (переносчики сильного взаимодействия) и *гравитоны* (переносчики гравитационного взаимодействия).

## Основные классы элементарных частиц

В настоящее время элементарные частицы делятся на большие классы и подклассы в зависимости от типов фундаментальных взаимодействий, в которых эти частицы участвуют. Элементарные частицы объединены в три группы: *фотоны, лептоны и адроны*. Естественно, что отнесенные к каждой из этих групп элементарные частицы обладают общими свойствами и характеристиками, которые отличают их от частиц другой группы.

1. **Фотоны** ( $\gamma$ ) – (кванты электромагнитного поля) участвуют в *электромагнитных взаимодействиях*, но не обладают сильным и слабым взаимодействиями.



2. **Лептоны.** Это частицы, не участвующие в сильных взаимодействиях и имеющие спин  $1/2$ . К ним относятся электроны ( $e$ ), мюоны ( $\mu$ ), таоны ( $\tau$ ) и соответствующие им нейтрино. Лептоны принимают участие в *слабых взаимодействиях*. За исключением нейтрино, лептоны участвуют и в *электромагнитных взаимодействиях*.

Все лептоны можно отнести к *истинно элементарным частицам*, поскольку у них, в отличие от адронов, не обнаружена внутренняя структура.

3. **Адроны.** Так называют элементарные частицы, участвующие в *сильных взаимодействиях*. Как правило, они участвуют и в *электромагнитном*, и в *слабом взаимодействиях*. Эти частицы образуют многочисленную группу частиц (свыше 400).

Адроны подразделяют на мезоны (адроны с нулевым или целочисленным спином, т.е. *бозоны*) и барионы (адроны с полуцелым спином (т. е. *фермионы*) и массами, не меньшими массы протона).

## Кварки

Кварк – фундаментальная частица, обладающая электрическим зарядом, кратным  $e/3$ , и не наблюдающаяся в свободном состоянии, но входящая в состав адронов (сильно взаимодействующих частиц, таких как протоны и нейтроны). Кварки являются бесструктурными, точечными частицами; это проверено вплоть до масштаба примерно  $10^{-16}$  см, что примерно в 20 тысяч раз меньше размера протона.

**Античастица** – частица–двойник некоторой другой элементарной частицы, обладающая той же массой и тем же **спином** (собственный вращательный момент элементарных частиц), отличающаяся от неё знаками всех других характеристик (электрического заряда, барионного и лептонного чисел).

# Элементарные частицы

## Адроны – составные частицы

участвуют в сильном взаимодействии (наряду с электромагнитным и слабым).

- мезоны (адроны с целым спином, т. е. бозоны);
- барионы (адроны с полуцелым спином, т. е. фермионы). К ним, в частности, относятся частицы, составляющие ядро атома, - протон и нейтрон.

## Лептоны - фундаментальные

участвуют только в электромагнитном и слабом взаимодействии

- Электроны
- мюоны,
- тау-лептоны
- Нейтрино (электронное, мюонное, тау-нейтрино).

# Элементарные частицы



По значениям масс покоя элементарные частицы делятся на: лептоны (легкие частицы), мезоны (средние, промежуточные частицы) и барионы (тяжелые частицы), которые в свою очередь подразделяются на нуклоны и гипероны.

# Элементарные частицы

ФЕРМИОНЫ



*Частицы с полуцелым спином*



Электрон, протон, нейтрон

БОЗОНЫ



*Частицы с целым спином*



Фотон, мезон