

## 1. АТОМНОЕ ЯДРО

**Ядро атомное**, положительно заряженная центральная часть атома, в которой сосредоточена практически вся масса атома. Состоит из протонов и нейтронов (нуклонов). Число протонов определяет электрический заряд атомного ядра и порядковый номер  $Z$  атома в периодической системе элементов. Число нейтронов равно разности массового числа и числа протонов. Объем атомного ядра пропорционален числу нуклонов в ядре. В поперечнике тяжелые ядра достигают  $10\text{--}12$  см. Плотность ядерного вещества порядка  $10^{14}$  г/см<sup>3</sup>.

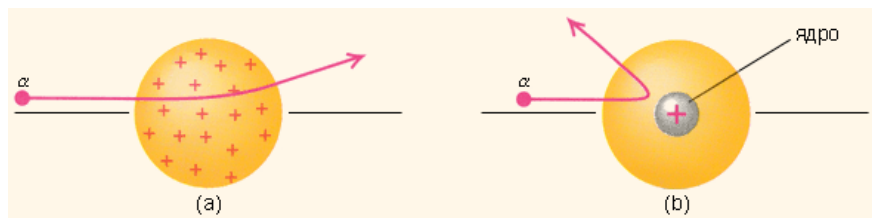
Первые прямые эксперименты по исследованию внутренней структуры атомов были выполнены Э.Резерфордом и его сотрудниками Э.Марсденом и Х.Гейгером в 1909–1911 годах. Резерфорд бомбардировал  $\alpha$ -частицами с энергией 5 Мэв атомы тяжелых элементов (золото, серебро, медь и др.). Электроны, входящие в состав атомов, вследствие малой массы не могут заметно изменить траекторию

$\alpha$ -частицы. Рассеяние, то есть изменение направления движения  $\alpha$ -частиц, может вызвать только тяжелая положительно заряженная часть атома. Схема опыта Резерфорда представлена на рис.1.

**Рис.1.** Схема опыта Резерфорда по рассеянию  $\alpha$ -частиц. К – свинцовый контейнер с радиоактивным веществом, Э – экран, покрытый слоем кристаллов сульфида цинка, Ф – золотая фольга, М – микроскоп.

От радиоактивного источника, заключенного в свинцовый контейнер,  $\alpha$ -частицы направлялись на тонкую металлическую фольгу. Рассеянные частицы попадали на экран, покрытый слоем кристаллов сульфида цинка, способных светиться под ударами быстрых заряженных частиц. Сцинтилляции на экране наблюдались глазом с помощью микроскопа. Наблюдения рассеянных  $\alpha$ -частиц в опыте Резерфорда можно было проводить под различными углами  $\varphi$  к первоначальному направлению пучка. Было обнаружено, что большинство  $\alpha$ -частиц проходит через тонкий слой металла, практически не испытывая отклонения. Однако небольшая часть частиц отклоняется на значительные углы, превышающие  $30^\circ$ . Очень редкие  $\alpha$ -частицы (приблизительно одна на десять тысяч) испытывали отклонение на углы, близкие к  $180^\circ$ .

Этот результат находился в резком противоречии с моделью атома Томсона, согласно которой положительный заряд распределен по всему объему атома. При таком распределении положительный заряд не может создать сильное электрическое поле, способное отбросить  $\alpha$ -частицы назад. Электрическое поле однородного заряженного шара максимально на его поверхности и убывает до нуля по мере приближения к центру шара. Если бы радиус шара, в котором сосредоточен весь положительный заряд атома, уменьшился в  $n$  раз, то максимальная сила отталкивания, действующая на  $\alpha$ -частицу по закону Кулона, возросла бы в  $n^2$  раз. Следовательно, при достаточно большом значении  $n$   $\alpha$ -частицы могли бы испытать рассеяние на большие углы вплоть до  $180^\circ$ . Эти соображения привели Резерфорда к выводу, что атом почти пустой, и весь его положительный заряд сосредоточен в малом объеме. Эту часть атома Резерфорд назвал атомным ядром. Так возникла ядерная модель атома. Рис.2 иллюстрирует рассеяние  $\alpha$ -частицы в атоме Томсона и в атоме Резерфорда.

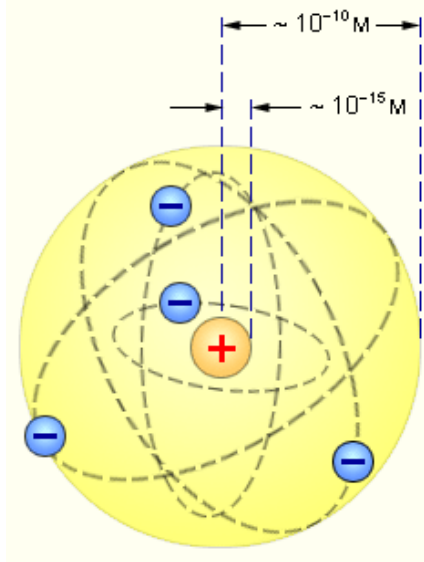


**Рис.2.** Рассеяние  $\alpha$ -частицы в атоме Томсона (а) и в атоме Резерфорда (б).

Опыты Резерфорда привели к выводу, что в центре атома находится плотное положительно заряженное

ядро, диаметр которого не превышает  $10^{-14}\text{--}10^{-15}$  м. Это ядро занимает только  $10^{-12}$  часть полного объема атома, но содержит весь положительный заряд и не менее 99,95% его массы. Веществу, составляющему ядро атома, следовало приписать колоссальную плотность порядка  $\rho \approx 10^{15}$  г/см<sup>3</sup>. Заряд ядра должен быть равен суммарному заряду всех электронов, входящих в состав атома. Впоследствии удалось установить, что если заряд электрона принять за единицу, то заряд ядра в точности равен номеру данного элемента в Периодической таблице элементов.

Опираясь на классические представления о движении микрочастиц, Резерфорд предложил планетарную модель атома. Согласно этой модели, в центре атома располагается положительно заряженное ядро, в котором сосредоточена почти вся масса атома. Атом в целом нейтрален. Вокруг ядра, подобно планетам, вращаются под действием кулоновских сил со стороны ядра электроны (рис.3). Находясь в состоянии покоя электроны не могут, так как они упали бы на ядро.



**Рис.3.** Планетарная модель атома Резерфорда. Показаны круговые орбиты четырех электронов.

Планетарная модель атома явилась крупным шагом в развитии знаний о строении атома. Она позволила интерпретировать результаты опытов по рассеянию  $\alpha$ -частиц. Однако она оказалась неспособной объяснить сам факт длительного существования атома, т.е. его устойчивость. Эти трудности были преодолены сначала постулатами Бора, а затем – квантовой механикой.

Атомное ядро – положительно заряженная центральная часть атома, в которой сосредоточена практически вся масса атома. Ядро атома состоит из нуклонов. Под нуклоном понимается ядерная частица, которая может существовать в двух состояниях – протона или нейтрона. Термином нуклон, называют элементарные частицы ядра атома ( протон  $p$  или нейтрон  $n$ ); его ввели, когда выяснили, что

ядерные силы у протонов и нейтронов одинаковы (без учета электромагнитных сил). Так как ядерные силы намного превышают электромагнитные, то замена протона на нейтрон внутри ядра практически не влияет на его общую энергию. Эта энергетическая симметрия протонов и нейтронов наглядно проявляется в подобии ядерных спектров так называемых "зеркальных" ядер, т.е. ядер, которые получаются путем замены нейтрона на протон и обратно.

Замечание. Различие между протоном и нейтроном можно провести только, если они находятся в свободном состоянии (например, нейтрон – нестабилен и подвергается распаду, как типичный радионуклид, тогда как протон – стабилен). Провести различие между ними в ядре невозможно (оба стабильны). Поэтому ядро состоит из частиц одного вида - нуклонов. Однако, часто (например, когда говорят о заряде ядра) удобнее считать ядро состоящим из нейтронов и протонов (в том смысле, что столько-то нейтронов и столько-то протонов пошло на синтез конкретного ядра, и именно столько их получится, если ядро развалить; но вовсе не в том смысле, что они существуют в ядре, как самостоятельные сущности).

**Электрон** – стабильная отрицательно заряженная частица со спином  $1/2$ , массой около  $9 \cdot 10^{-28}$  г и магнитным моментом равным магнетону Бора; относится к лептонам и участвует в электромагнитном, слабом и гравитационном взаимодействиях.

**Нуклон** (от лат. nucleous – ядро) – общее название протона и нейтрона, являющихся составными частями атомных ядер.

**Протон** (от греч. protos – первый) – стабильная элементарная частица с зарядом  $+e$ , со спином  $1/2$ , магнитным моментом  $\mu = 2,79 \mu_B$  и массой  $1838,5$  электронных масс ( $10^{-24}$  г), относящаяся к группе барионов (класс андронов). Положительный заряд протона точно равен элементарному заряду  $e = 1,6021773 \cdot 10^{-19}$  Кл, масса протона равна  $m_p = 1,6726231 \cdot 10^{-27}$  кг =  $1,00726470$  а.е.м. =  $938,27231$  МэВ. Масса легкого изотопа атома водорода (протия).  $m_{ам}(^1H) = 1,00814$  а.е.м. =  $938,7$  МэВ =  $1837 m_e$ ,  $m_p = 1,00759$  а.е.м. =  $938,7$  МэВ =  $1839 m_e$

**Нейтрон** (от лат. neuter - ни тот ни другой), электрически нейтральная элементарная частица (нулевой заряд) со спином  $1/2$ , магнитным моментом  $\mu = -1,91 \mu_B$  и массой, превышающей массу протона на  $2,5$  электронных масс; относится к барионам  $M_n = 1,008986$  а.е.м. =  $939,5$  МэВ =  $1838,5 m_e$ . Из  $m_n > m_p + m_e$ . В свободном состоянии нейтрон нестабилен: он распадается с периодом полураспада  $11,7$  мин образуя протон и испуская электрон и антинейтрино ( $\beta$  - распад). Вместе с протонами нейтроны образуют атомные ядра; в ядрах нейтрон стабилен.

Для объяснения отличия экспериментальных значения магнитных моментов протона и нейтрона от теоретических ( $\mu_p = 1 \mu_B$ ,  $\mu_n = 1 \mu_B$ ) нуклонам должна быть приписана определенная структура.

Атомное ядро с зарядом  $Z$  и массовым числом  $A$  состоит из  $A$  нуклонов:  $Z$  – протонов и  $A-Z$  нейтронов, связанных между собой ядерными силами. В ядре нет электронов.

## 1. Заряд атомного ядра

Заряд атомного ядра  $Z$  определяется количеством протонов в ядре (и, следовательно, количеством электронов в атомных оболочках), которое совпадает с порядковым номером элемента в Периодической таблице. Заряд определяет химические свойства всех изотопов данного элемента. Заряд может быть измерен по закону Мозли, устанавливающую простую связь между частотой характеристического рентгеновского излучения  $\nu$  и зарядом  $Z$ :

$$\sqrt{\nu} = AZ - B$$

где для данной серии излучения постоянные  $A$  и  $B$  не зависят от элемента.

Заряд ядра можно измерить в опытах по рассеянию  $\alpha$ -частиц на фольгах.

## 2. Масса атомного ядра

Атом можно рассматривать как шар, состоящий из расположенного в центре чрезвычайно малого ядра и электронной оболочки, подразделенной на слои. Для нейтрального атома число находящихся в атомном ядре протонов, которые являются носителями положительных зарядов,

определяет заряд ядра или порядковый номер и равно числу электронов в оболочке. Атом имеет размер порядка  $10^{-8}$  см.

Масса ядра  $M$  измеряется в атомных единицах массы. Атомная единица массы (а.е.м.) – единица массы, применяемая для выражения масс микрочастиц. За одну атомную единицу массы (а.е.м.) принимается  $1/12$  части массы нейтрального атома изотопа  $^{12}\text{C}$ . Значение атомной единицы массы легко выразить в граммах. Для этого надо взять обратную величину от числа Авогадро ( $N_A$ ):

$$1 \text{ а.е.м.} = \frac{1}{12} * \frac{12}{N_A} = \frac{1}{6,025 * 10^{23}} = 1,66 * 10^{-24} \text{ г} = 1,6605655 * 10^{-27} \text{ кг}$$

Согласно соотношению Эйнштейна  $E = m * c^2$ , где  $c = 3 * 10^{10}$  см/сек – скорость света в вакууме, каждому значению массы  $M$  в граммах, соответствует энергия  $E$  в эргах. Например, массе в 1 г соответствует энергия  $9 * 10^{20}$  эрг. Энергетическое выражение одной атомной единицы массы:

$$1 \text{ а.е.м.} = 1,66 * 10^{-24} * 9 * 10^{20} \approx 1,5 * 10^{-3} \text{ эрг.}$$

В ядерной физике а.е.м. часто выражают в электронвольтах.  $1 \text{ эв} = 1,6 * 10^{-12}$  эрг. Существует более крупная единица  $1 \text{ Мэв} = 10^6 \text{ эв} = 1,6 * 10^{-6}$  эрг. Одной атомной единице массы соответствует энергия  $931 \text{ Мэв}$ , а одной массе электрона –  $0,511 \text{ Мэв}$ .

Масса ядра равна разности между массой атома и суммой  $Z$  электронов атомной оболочки (с точностью до энергии связи этих электронов). Масса атома измеряется масс-спектрометром. Масса любого атома (и ядра), если ее выразить в атомных единицах массы, оказывается близкой к некоторому целому числу  $A$ . Это число называется массовым числом. Оно определяет количество нуклонов (протонов и нейтронов) в ядре. Так как заряд ядра  $Z$  численно равен количеству протонов ядре, то число  $N = A - Z$  определяет количество содержащихся в ядре нейтронов. Ядра с одинаковым массовым числом  $A$  называются **изобарами**, с одинаковым зарядом  $Z$  – **изотопами**, а с одинаковым числом  $N = A - Z$  – **изотонами**. Конкретное ядро (атом) с данными  $A$  и  $Z$  иногда называют нуклидом.

**Изотопы** - нуклиды с одинаковыми  $Z$ , но различными  $A$  и  $N$

**Изобары** - нуклиды с одинаковыми  $A$ , но различными  $Z$  и  $N$

**Изотоны** - нуклиды с одинаковыми  $N$ , но различными  $Z$  и  $A$

**Изотопы** - нуклиды с одинаковым числом протонов, но различным количеством нейтронов.

**Нуклид** - разновидность атома, характеризующаяся числом протонов и нейтронов, а в некоторых случаях энергетическим состоянием ядра.

**Радионуклид** - нуклид, испускающий ионизирующее излучение.

**Ионизирующее излучение** - поток заряженных или нейтральных частиц и квантов электромагнитного излучения, прохождение которых через вещество приводит к ионизации и возбуждению атомов или молекул среды. По своей природе делится на фотонное (гамма-излучение, тормозное излучение, рентгеновское излучение) и корпускулярное (альфа-излучение, электронное, протонное, нейтронное, мезонное).

За атомную массу элемента, состоящего из смеси изотопов, принимают среднее значение атомной массы изотопов с учетом их процентного содержания. Атомная масса меньше суммы масс составляющих атом частиц (протонов, нейтронов, электронов) на величину, обусловленную энергией их взаимодействия (Дефект массы).

В ядерных процессах обычного вида (без участия античастиц) число нуклонов сохраняется. Оно равно сумме массовых чисел взаимодействующих (или образующихся) ядер.

### 3. Форма и размеры ядра

Ядро имеет приблизительно сферическую форму. Атом имеет размер порядка  $10^{-8}$  см.

Размеры ядер можно определить такими способами, как рассеяние  $\alpha$ -частиц, быстрых нейтронов или быстрых электронов на ядрах, по энергии  $\alpha$ -частиц и др. Объем ядра намного меньше объема атома. Например, радиус атома водорода составляет  $0,046 \text{ нм}$ , а радиус ядра атома водорода (протон  $r$ ) –  $6,5 * 10^{-7} \text{ нм}$ . Несмотря на такие маленькие размеры ядра, в нем сосредоточена основная масса атома. Радиус ядра конкретного элемента равен

$$R = (1,2 \div 1,3) * 10^{-13} A^{1/3} \text{ см} = 1,21 A^{1/3} \text{ ферми}$$

( $A$  – атомный вес,  $1 \text{ ферми} = 10^{-13} \text{ см}$ ).

Радиус ядерного взаимодействия несколько больше,  $R_{вз} = 1,4 * 10^{-13} A^{1/3} \text{ см}$ .

Тяжелые ядра отклоняются от сферической формы. Они вытягиваются вдоль направления спина. Мерой несферичности ядра является величина электрического квадрупольного момента  $Q$ .

**Квадрупольный момент ядра**, величина, характеризующая отклонение распределения электрического заряда в атомном ядре от сферически симметричного.

### 4. Спин и магнитный момент ядра

Представление о спине и магнитном моменте ядра было введено для объяснения сверхтонкой структуры спектральных линий.

**Спин** (англ. Spin, букв. – вращение), собственный момент количества движения микрочастицы, имеющий квантовую природу и не связанный с движением частицы как целого; измеряется в единицах постоянной планка  $\hbar$  и может быть целым (0, 1, 2, ...) или полуцелым (1/2, 3/2, ...).

У протона и нейтрона спин одинаков и равен 1/2. Существует простая закономерность, связывающая спин с массовым числом. Все ядра с четным A имеют целый спин, а ядра с нечетным A – полуцелый спин. Отсюда следует несправедливость протонно-электронной модели ядра. Так, например, если бы ядро азота состояло из 14 протонов и 7 электронов, то его спин был бы нечетным ("«азотная катастрофа»") тогда как если ядро состоит из 7 нейтронов и 7 протонов, то спин – четный, как это и имеет место на самом деле.

**Магнитный момент**, векторная величина, характеризующая вещество как источник магнитного поля. Макроскопический магнитный момент создают замкнутые электрические токи и упорядоченно ориентированные магнитные моменты атомных частиц (например, у электронов в атомах) и спиновые, связанные со спином частицы. Магнитный момент тела определяется векторной суммой частиц, из которых тело состоит.

Магнитный момент ядра  $\mu_B$  равен целому кратному ядерного магнетона Бора, который в  $m_p/m_e=1836$  раз меньше магнетона Бора:

$$\mu_B = \frac{M_B}{1836} = 5,05 \cdot 10^{-24} \text{ эрг/Г} \quad (1)$$

Магнитный момент нейтрона  $\mu_n = -1,913148 \mu_B$ , протона  $+2,79 \mu_B$ . Отличие магнитного момента протона от одного ядерного магнетона является удивительным результатом. Еще более удивительным представляется существование магнитного момента у не имеющего заряда нейтрона. Эти факты до сих пор не объяснены: возможно они указывают на сложную структуру нуклонов.

Спины и приближенные значения магнитных моментов для некоторых ядер приведены в **Табл.1**.

**Табл.1**

Ядро	Спин в $\hbar$	$\mu$ в $\mu_B$	Ядро	Спин в $\hbar$	$\mu$ в $\mu_B$
n	1/2	-1,91	${}^4\text{Be}^9$	3/2	-1,2
p	1/2	+2,79	${}^6\text{C}^{12}$	0	0
${}^1_1\text{H}^2$	1	0,86	${}^6\text{C}^{13}$	1/2	+0,7
${}^1_1\text{H}^3$	1/2	+3	${}^7\text{N}^{14}$	1	+0,4
${}^2_2\text{He}^3$	1/2	-2,1	${}^7\text{N}^{15}$	1/2	-0,28
${}^2_2\text{He}^4$	0	0	${}^8\text{O}^{16}$	0	0
${}^3_3\text{Li}^6$	1	+0,8	${}^{49}\text{In}^{115}$	9/2	+5,5
${}^3_3\text{Li}^7$	3/2	+3,2	${}^{83}\text{Bi}^{209}$	9/2	+4

Нейтроны и протоны в ядре располагаются таким образом, что их спины и магнитные моменты взаимно компенсируются (в четно-четных ядрах наблюдается полная компенсация). Максимальный спин ядра не превышает нескольких единиц, т.е. он гораздо меньше A/2, чему он должен был бы равняться, если бы спины всех нуклонов складывались. Также обстоит дело и с магнитными моментами. (Тот факт, что магнитный момент ядер не превышает несколько ядерных магнетонов, служит дополнительным свидетельством против протонно-электронной модели ядра. Если бы в состав ядра входили электроны, то магнитные моменты ядер были бы по порядку величины близки к электронному магнетону Бора, т.е. были бы примерно в 1000 раз больше).

При вычислении спина и магнитного момента ядра надо учитывать не только спины и магнитные моменты нуклонов, но и дополнительные механические и магнитные моменты, обусловленные их орбитальным движением в ядре.

## 5. Энергия связи и устойчивость ядер

Массу атома следовало бы вычислять как сумму масс протонов, электронов и нейтронов, из которых он был построен. Однако точное определение массы атомов показало, что экспериментально полученные массы всегда меньше значений, вычисленных как сумма масс частиц, составляющих ядро. Эта разность масс (**дефект массы**) равен:

$$\Delta m = Zm_p + Nm_n + Zm_e - m = Zm_H + Nm_n - n \quad (2)$$

и, эквивалентна **энергии связи**  $\Delta E = \Delta mc^2$ .

Дефект массы, являясь мерой энергии связи, представляет собой так же, как и эта энергия, меру устойчивости системы.

Мерой прочности (устойчивости) ядра является его энергия связи  $\Delta E(A,Z)$ , т.е. превышение суммы масс всех нуклонов ядра над массой самого ядра:

$$\Delta E(A,Z) = [Zm_p + (A-Z)m_n - M_{\text{яд}}(A,Z)]c^2 \quad (3)$$

**Энергия связи**, разность между энергией связанной системы частиц и суммарной энергией этих частиц в свободном состоянии. Для устойчивых систем энергия связи отрицательна и тем больше по абсолютной

величине, чем прочнее система. Энергия связи с обратным знаком равна минимальной работе, которую нужно затратить, чтобы разделить систему на ее элементарные составные части.

**Дефект массы**, разность  $\Delta M$  между массой  $M$  системы взаимодействующих тел (частиц) и суммой их масс  $\sum m$  в свободном состоянии. Определяется полной энергией их взаимодействия, т.е. энергией их связи  $E_{св}$ :  $\Delta M = E_{св}/c^2$ . Знание дефекта массы позволяет определить величину энергии, выделяющейся в ядерных реакциях. Точные значения масс атомных ядер (в том числе протона) определяются с помощью масс-спектрометров – приборов, в которых используются фокусирующие свойства электрического и магнитного полей по отношению к движению заряженных частиц. Точное значение массы нейтрона получено из рассмотрения ядерных реакций, протекающих с участием нейтронов.

Энергия связи (и масса) ядра с данными  $A$  и  $Z$  может быть вычислена при помощи полуэмпирической формулы

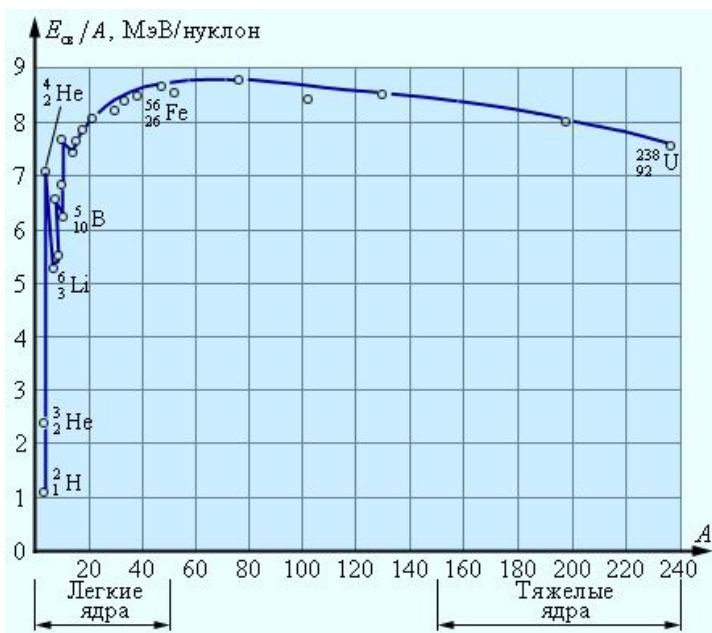
$$\Delta E(A, Z) = \alpha A - \beta A^{2/3} - \gamma \frac{Z^2}{A^{1/3}} - \varepsilon \frac{\left(\frac{A}{2} - Z\right)^2}{A} + \delta \quad (4)$$

( $\alpha, \beta, \gamma, \varepsilon, \delta$  - коэффициенты), которая следует из капельной модели атомного ядра. В основе капельной модели ядра лежит представление о ядре как о сферической капле заряженной несжимаемой ядерной жидкости.

Эта энергия расходуется на взаимосвязь нуклонов в атомном ядре, поэтому ее называют энергией связи  $E'_{св}$ . С другой стороны, эта энергия является той энергией, которую необходимо затратить, чтобы разделить атомное ядро на составляющие нуклоны. Если энергию связи атома разделим на число нуклонов, то получим среднее значение энергии связи на один нуклон  $E'_{св}/A$ .

Пример: Для  ${}^4\text{He}$ :  $E'_{св} = 2m_H + 2m_n - m_{\text{He}} = (2 \cdot 1,007825 + 2 \cdot 1,008665 - 4,002604) \text{ а.е.м.} = 0,030376 \text{ а.е.м.} = 28,30 \text{ МэВ}$ . Энергия связи на один нуклон для  ${}^4\text{He}$  составляет  $7,1 \text{ МэВ}$ .

Изменение массы покоя ядер (дефект массы), сопровождающее ядерное превращение может достигать 0,1%, тогда как перестройка внешних электронных оболочек, происходящая при химических превращениях, сопровождается изменением массы покоя атомов и молекул не более, чем на  $10^{-7}\%$ . Зависимость энергии связи на один нуклон от числа нуклонов (**Рис.4**) проходит через максимум. Для нуклидов с  $A > 11$  ( $Z > 5$ ) среднее значение энергии связи на один нуклон составляет от 7,4 до 8,8 МэВ.



**Рис.4** Зависимость средней энергии связи в расчете на один нуклон от массового числа.

Средняя энергия связи на один нуклон ядра, у большинства ядер середины периодической системы элементов примерно одинакова и составляет около 8,6 МэВ. Для нуклидов с  $A \approx 60$ , т.е. для группы элементов Fe-Co-Ni, энергии связи на нуклон имеет максимальное значение. Это указывает на то, что данные элементы по своим ядерно-физическим свойствам являются наиболее устойчивыми. При этом, значение энергии связи на нуклон для нуклидов с четным числом нуклонов всегда выше среднеарифметического значения соответствующих величин для соседних нуклидов с нечетным числом нуклонов. У ряда

легких ядер средняя энергия связи оказывается существенно меньше (приблизительно 1 МэВ у дейтерия), а у тяжелых ядер она уменьшается с ростом числа нуклонов в ядре и достигает примерно 7,5 МэВ для урана. Вследствие этого энергетически выгодны реакции синтеза легких ядер и деления тяжелых ядер. Так, в реакции синтеза ядер гелия из дейтерия и трития выделяется энергия 17,6 МэВ, или 3,5 МэВ на нуклон. Деление ядер урана сопровождается выделением энергии около 200 МэВ, или 1 МэВ на нуклон.

Пример. Пусть, например, ядро урана  ${}^{238}_{92}\text{U}$  делится на два одинаковых ядра с массовыми числами 119. У этих ядер, как видно из **Рис.4**, удельная энергия связи порядка 8,5 МэВ/нуклон. Удельная энергия связи ядра урана 7,6 МэВ/нуклон. Следовательно, при делении ядра урана выделяется энергия, равная 0,9 МэВ/нуклон или более 200 МэВ на один атом урана.

Рассмотрим теперь другой процесс. Пусть при некоторых условиях два ядра дейтерия  ${}^2_1\text{H}$  сливаются в одно ядро гелия  ${}^4_2\text{He}$ . Удельная энергия связи ядер дейтерия равна 1,1 МэВ/нуклон, а удельная энергия связи ядра гелия

равна 7,1 МэВ/нуклон. Следовательно, при синтезе одного ядра гелия из двух ядер дейтерия выделится энергия, равная 6 МэВ/нуклон или 24 МэВ на атом гелия.

Следует обратить внимание на то, что синтез легких ядер сопровождается примерно в 6 раз большим выделением энергии на один нуклон по сравнению с делением тяжелых ядер.

Из величины энергии связи для различных ядер следует, что наиболее устойчивыми являются четно-четные ядра, наименее устойчивыми – нечетно-нечетные. Особой устойчивостью обладают ядра, содержащие магическое число нуклонов (2, 8, 20, 50, 82, 126).

**Магические ядра** – атомные ядра, содержащие так называемое магическое число (2, 8, 20, 28, 50, 82, 126) протонов или нейтронов. Отличаются повышенной устойчивостью и большей распространённостью в природе по сравнению с соседними ядрами в Периодической системе элементов.

У ядер, следующих за висмутом ( $Z > 83$ ), из-за большого числа протонов полная стабильность оказывается вообще невозможной. Сравнение энергий связи для легких и тяжелых ядер показывает энергетическую выгоду слияния (синтеза) первых и разделения на части (реакция деления) вторых. В стабильных ядрах между зарядом  $Z$  и массовым числом  $A$  существует соотношение вида

$$Z = \frac{A}{1,98 + 0,015A^{2/3}} \quad (5)$$

При отклонении от этого соотношения ядро проявляет свойство  $\beta^-$  или  $\beta^+$  - радиоактивности

График **Рис.4** имеет существенное значение для ядерной энергетики. Очевидно, что как ядерный синтез (реакции слияния легких ядер), так и деление (распад тяжелых ядер на отдельные осколки) сопровождаются большим дефектом масс, и, следовательно, выделением большого количества энергии. Асимметричный вид графика показывает, что при ядерном синтезе выделение энергии будет значительно выше, чем при делении. К сожалению, развитие науки пошло таким образом, что процесс ядерного деления удалось реализовать в энергетических установках, тогда как реакторы ядерного синтеза до сих пор не созданы. В настоящее время энергия термоядерного синтеза реализуется только в водородной бомбе.

## 6. Четность.

При существовании зеркальной симметрии волновая функция системы обладает определенной четностью (положительной или отрицательной).

**Четность**, квантовое число, характеризующее симметрию волновой функции  $\Psi$  физической системы или элементарной частицы при некоторых дискретных преобразованиях; если при таком преобразовании  $\Psi$  не меняет знака, то четность положительна, если меняет, то четность отрицательна. Для истинно нейтральных частиц (или систем), которые тождественны своим античастицам, кроме пространственно четности, можно ввести понятие зарядовой четности и комбинированной четности (для остальных частиц замена их на античастицы меняет саму волновую функцию).

В сильных (ядерных) и электромагнитных взаимодействиях выполняется закон сохранения четности.

Четность  $P_{A+B}$  системы, состоящей из двух взаимодействующих частиц  $A$  и  $B$ , равна

$$P_{A+B} = P_A P_B (-1)^l, \quad (6)$$

где  $P_A$  и  $P_B$  – внутренние четности систем  $A$  и  $B$ ;  $l$  – орбитальное число. Внутренняя четность нуклона положительна.

## 7. Ядерные силы

Нуклоны в ядре удерживают ядерные силы.

**Ядерные силы**, силы, удерживающие нуклоны (протоны и нейтроны) в атомном ядре. Ядерные силы действуют только на расстояниях порядка  $10^{-13}$  см и достигают величины в 100 – 1000 раз превышающей силу взаимодействия электрических зарядов. Ядерные силы не зависят от заряда нуклонов. Они обусловлены сильными взаимодействиями.

**Сильное взаимодействие**, самое сильное из фундаментальных взаимодействий элементарных частиц. В сильных взаимодействиях участвуют адроны. Сильное взаимодействие превосходит электромагнитное взаимодействие примерно 100 раз, его радиус действия около  $10^{-13}$  см. частный случай сильного взаимодействия – ядерные силы. Современной теорией сильной связи является квантовая хронодинамика.

**Адроны**, элементарные частицы, участвующие в сильном взаимодействии (барионы и мезоны, включая все резонансы).

Основные свойства ядерных сил:

- большая интенсивность (следует из большой величины энергии связи, рассчитанной на один нуклон  $\varepsilon = \frac{\Delta W}{A} \approx 8 \text{ Мэв}$ );
- малый радиус действия (из размеров ядра);
- насыщение (из пропорциональности энергии связи массовому числу:  $\Delta W \approx 8A \text{ Мэв}$ );
- спиновая зависимость (из отличия в устойчивости четно-четных, нечетных и нечетно-нечетных ядер);

- тензорный (нецентральный) характер (из существования квадрупольного момента у дейтона).

Можно выделить четыре типа взаимодействий ядерных частиц:

- **сильные взаимодействия**, ответственные за основной энергетический вклад в связь нуклонов внутри ядра. Радиус действия этих сил очень мал (примерно равен радиусу ядер) и практически отсутствует вне радиуса их действия
- **электромагнитные взаимодействия**, ответственные за энергетический вклад в связь заряженных частиц. Эти силы в сотни раз слабее сильных взаимодействий, но могут проявляться на достаточно больших расстояниях
- **слабые взаимодействия**, ответственные за энергетический вклад в связь элементарных частиц, составляющих нуклоны. Взаимодействия этого типа проявляются при самопроизвольном распаде нуклонов
- **гравитационные взаимодействия** - слабые взаимодействия, ответственные за энергетический вклад в связь элементарных частиц, составляющих нуклоны. Взаимодействия этого типа проявляются при самопроизвольном распаде нуклонов

Радиус ядерных сил по порядку величины равен размеру нуклона, поэтому ядра - сгустки очень плотной материи. Наиболее тесно нуклоны упакованы в ядре атома гелия, которое состоит из двух протонов и двух нейтронов. Атом гелия, лишенный своих электронов, называется альфа-частицей. Во многих случаях удобно считать, что и более тяжелые ядра состоят из  $\alpha$ -частиц. Не вошедшие в  $\alpha$ -частицы нуклоны слабее связаны с ядром, чем те, которые находятся в их составе. Ядерные силы - пример сильных взаимодействий. Они многократно превосходят кулоновскую силу. Электростатическое взаимодействие характеризуется энергией порядка нескольких электронвольт, а характерные ядерные энергии в миллион раз больше - мегаэлектронвольты (Мэвы). Короткодействие ограничивает действие ядерных сил ближайшим окружением нуклона, в то время как медленно спадающее с расстоянием электростатическое отталкивание протонов действует во всем объеме ядра. С ростом числа нуклонов ядра становятся неустойчивыми, и поэтому большинство тяжелых ядер радиоактивны, а совсем тяжелые вообще не могут существовать. Конечное число элементов в природе - следствие короткодействия ядерных сил. Ядерные силы очень слабо зависят от того, взаимодействует протон с протоном, нейтрон с нейтроном или протон с нейтроном.

Удивительный вывод квантовой физики: два нуклона притягиваются друг к другу, потому что обмениваются между собой частицей. Частицу назвали пи-мезоном, или пионом. Один нуклон испускает пи-мезон, другой его поглощает, а в результате нуклоны притягиваются друг к другу. В слове "мезон" *он* - окончание, как у всех названий частиц, а корень *мезо* взят из греческого, *мезос* - промежуточный: масса р-мезона больше массы электрона и меньше массы протона. Масса р-мезона стала известна еще до открытия этой частицы. По теории (она была создана в 1935 году японским физиком Хидэки Юкава, 1907-1981) между радиусом действия ядерных сил и массой р-мезона  $m_p$  существует простая связь:  $m_p \geq \hbar/cr_n$ . Есть три сорта р-мезонов - положительный, отрицательный и нейтральный. Их массы несколько отличаются, но все они примерно в 200 раз больше массы электрона.