

2. АТОМНОЕ ЯДРО

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 $\frac{1}{2}$, 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 $\frac{1}{2}$, 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 $\frac{1}{2}$, 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 (β - 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.

2.1 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 ν и зарядом Z :

$$\sqrt{\nu} = AZ - B \quad (11)$$

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

Заряд ядра можно измерить в опытах по рассеянию α -частиц на фольгах.

2.2 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}C . Значение атомной единицы массы легко выразить в граммах. Для этого надо взять обратную величину от числа Авогадро (N_A):

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

А.е.м. выражается через энергетические единицы:

$$1 \text{ а.е.м.} = 1,5 * 10^{-3} \text{ эрг} = 1,5 * 10^{-10} \text{ Дж} = 931,49 \text{ МэВ}$$

Таким образом, одной атомной единице массы соответствует энергия 931 Мэв, а одной массе электрона – 0,511 Мэв.

Масса ядра всегда меньше суммы масс составляющих его нуклонов.

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

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.

2.3 Форма и размеры ядра

Впервые размеры ядра правильно оценил Э.Резерфорд, который в 1911 изучал рассеяние α -частиц при прохождении через тонкую золотую фольгу. Дифференциальное сечение упругого рассеяния нерелятивистской заряженной частицы в кулоновском поле ядра-мишени описывается формулой Резерфорда

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \left[\frac{Z_1 Z_2 e^2}{4E_\alpha} \right]^2 \frac{1}{\sin^4 \frac{\theta}{2}} \quad (12)$$

где Z_1 и Z_2 - заряды налетающей частицы и ядра-мишени, e - элементарный заряд, E_α - кинетическая энергия налетающей частицы, θ - угол рассеяния.

Его первые эксперименты показали, что размеры заряженной части ядра – порядка 10^{-14} м. Более поздние и более точные эксперименты позволили установить, что радиус ядра приблизительно пропорционален $A^{1/3}$ и, следовательно, плотность ядерного вещества почти постоянна. (Она колоссальна: 100000 т/мм^3 .)

Ядро имеет приблизительно сферическую форму. Если атом имеет размер порядка 10^{-8} см, то ядро – порядка 10^{-12} см.

Размеры ядер определяют рассеянием α -частиц, быстрых нейтронов или быстрых электронов на ядрах, по энергетическому спектру α -частиц и др. Объем ядра намного меньше объема атома, Например, радиус атома водорода составляет 0,046 нм, а радиус ядра атома водорода (протон p) - $6,5 \cdot 10^{-7}$ нм. Несмотря на такие маленькие размеры ядра, в нем сосредоточена основная масса атома. Радиус ядра конкретного элемента равен

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

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

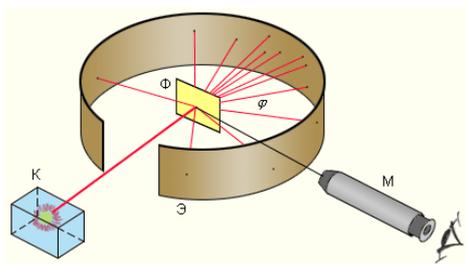


Рис.5. Схема опыта Резерфорда по рассеянию α -частиц. К – свинцовый контейнер с радиоактивным веществом, Э – экран, покрытый сернистым цинком, Ф – золотая фольга, М – микроскоп.

Радиус ядерного взаимодействия несколько больше, $R_{вз} = 1,4 * 10^{-13} A^{1/3}$ см. Это значение соответствует радиусу действия ядерных сил; оно характеризует расстояние от центра ядра, на котором внешний нейтральный нуклон начинает впервые «ощущать» его воздействие. Такая величина радиуса ядра сравнима с расстоянием от центра ядер, на котором происходит рассеяние альфа-частиц и протонов.

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.

Внутренний электрический квадрупольный момент ядра Q_0 измеряется в системе координат ядра. Величина внешнего электрического квадрупольного момента ядер Q измеряется в лабораторной системе координат. Для аксиально симметричного относительно оси z ядра электрическим квадрупольным моментом ядра называется величина, определяемая соотношением

$$Q_0 = \frac{1}{e} \int (3z^2 - r^2) \rho(\vec{r}) dv \quad (14)$$

где $\rho(r)$ - плотность заряда в точке r внутри ядра.

Q_0 характеризует отличие распределения заряда ядра от сферически симметричного. Для сферически симметричного ядра $Q_0=0$. При $Q_0<0$, ядро является сплюснутым вдоль оси z эллипсоидом, при $Q_0>0$ ядро - вытянутое вдоль оси z эллипсоид

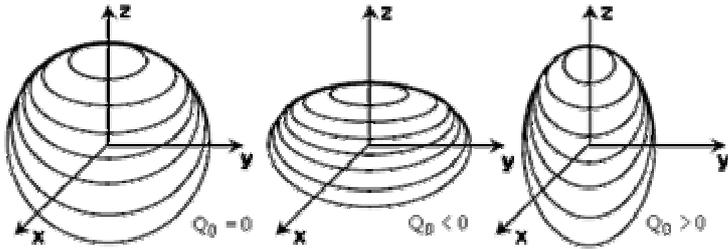
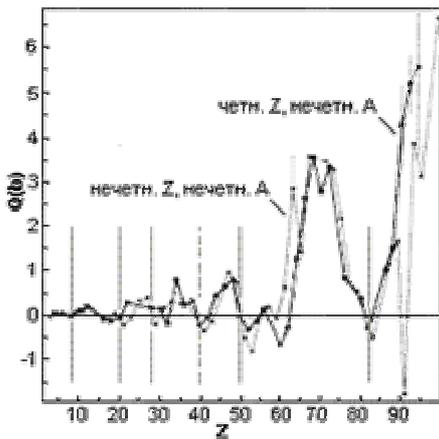


Рис. 6. Формы ядер и их электрические квадрупольные моменты

Внешний электрический квадрупольный момент Q связан с внутренним электрическим квадрупольным моментом Q_0 соотношением

$$Q = \frac{J(2J-1)}{(J+1)(2J+3)} Q_0, \quad (15)$$

где J - спин ядра.



Величина квадрупольного момента измеряется в **барнах** ($1 \text{ б} = 10^{-24} \text{ см}^2$). Ниже представлена зависимость квадрупольных моментов ядер от числа протонов в ядре. Для магических чисел квадрупольные моменты близки к нулю.

Рис. 7. Зависимость электрических квадрупольных моментов ядер от числа протонов в ядре.

2.4 Структура ядра

Важным фактором является характер распределения нуклонов по объёму (радиусу) ядра. Для детального исследования внутренней структуры ядер используют эффект рассеяния атомными ядрами электронов с энергией $>100 \text{ МэВ}$.

Распределение ядерной материи является распределение Ферми (**Рис. 8**).

$$\rho(r) = \frac{\rho_0}{1 + \exp\left[\frac{r-R}{a}\right]} \quad (16)$$

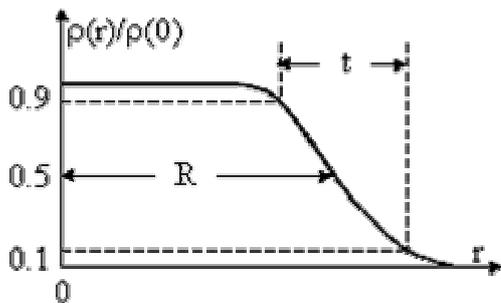
где ρ_0 - плотность ядерной материи в центре ядра, R - радиус ядра - расстояние, на котором плотность ядерной материи падает в два раза, a - параметр диффузности.

Рис.8. Распределение Ферми

Для ядер, расположенных вблизи долины стабильности (см.ниже), были установлены следующие закономерности.

Пространственное распределение протонов и нейтронов для ядер вблизи долины стабильности практически совпадают.

Плотность ядерной материи в центре ядра ρ_0 приблизительно одинакова у всех ядер и составляет $\sim 0.17 \text{ нукл./Фм}^3$ (**Рис. 9**). Толщина поверхностного слоя t (спад плотности от $0.9\rho_0$ до $0.1\rho_0$) у всех ядер примерно одинакова $t=4.4a=2.4\text{Фм}$.



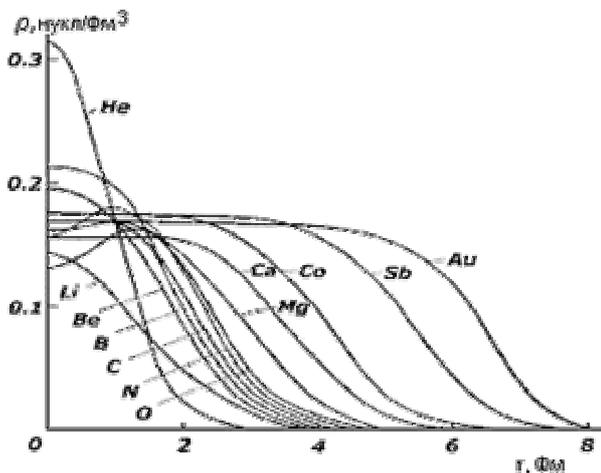


Рис.9. Плотность распределения ядерной материи

Величина радиуса ядра определяется числом нуклонов в ядре, $R=1.3A^{1/3}$ Фм (**Рис. 10**).

Атомные ядра вблизи долины стабильности представляют собой довольно компактные объекты. Их радиусы меняются от 2-3 Фм (Ферми) для самых легких ядер до 7-8 Фм для самых тяжелых. Однако для ядер, удаленных от долины стабильности, ситуация иная. Для некоторых ядер, перегруженных нейтронами (протонами), наблюдается так называемый нейтронный (протонный) слой - область вблизи поверхности ядра, в которой с учетом фактора нормировки N/Z $\rho_n > \rho_p$ ($\rho_p > \rho_n$) (**Рис. 10**).

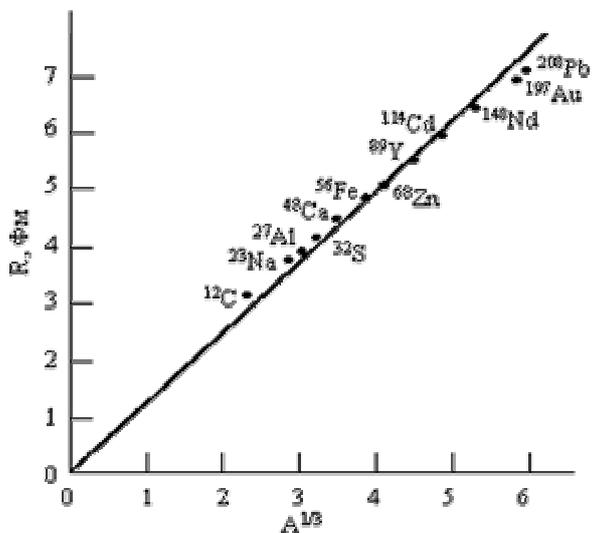


Рис.10. Радиусы ядер, полученные в экспериментах по рассеянию электронов.

В легких ядрах с большим отношением N/Z было открыто нейтронное гало. Нейтронное гало наблюдается в ядрах, у которых энергия связи нейтрона $B_n < 1-1.5$ МэВ. Оказалось, что в гало-ядрах наряду с кором, для которого плотность распределения протонов и нейтронов с точностью до фактора Z/A совпадают, существует довольно большая область на периферии ядра, в которой плотность распределения нейтронов ρ_n существенно больше плотности распределения протонов ρ_p ($\rho_n \gg \rho_p$). Обнаружены также ядра, имеющие протонное гало.

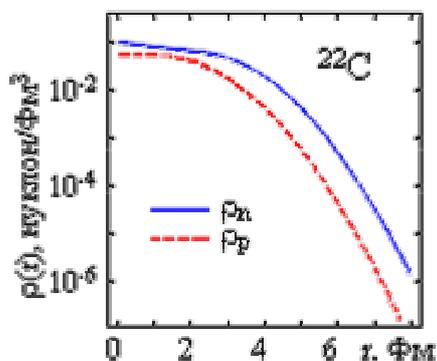


Рис.11. Нейтронный слой у ядра ^{22}C

Нейтронное облако, окружающее кор ядра, простирается на гораздо большие расстояния, чем радиус ядра, определяемый соотношением $R=1.3A^{1/3}$. Так для гало-ядра ^{11}Li пространственное распределение двух нейтронов, образующих ядерное гало вокруг кора ^9Li , простирается столь далеко, что радиус ядра ^{11}Li оказывается сравним с радиусом ядра ^{208}Pb (**Рис. 12**).

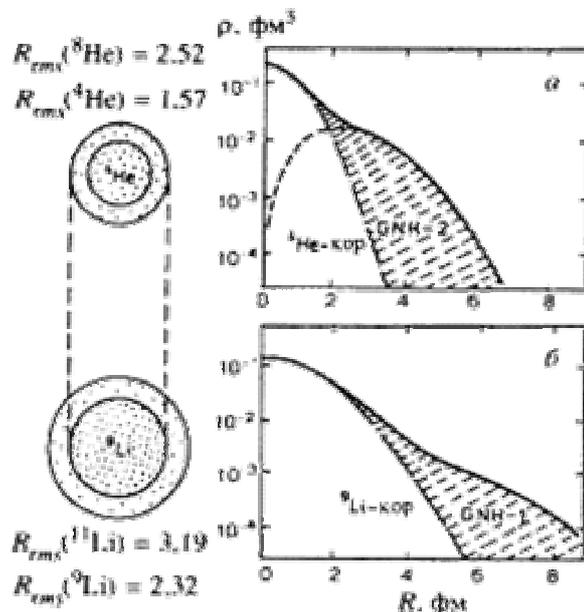
Рис. 12. Распределение нейтронной плотности в гало-ядрах

2.5 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 μ_B равен целому кратному ядерного магнетона Бора, который в $m_p/m_e=1836$ раз меньше магнетона Бора:

$$\mu_B = \frac{M_B}{1836} = 5,05 \cdot 10^{-24} \text{ эрг/Г} \quad (17)$$

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.2**.

Табл.2. Спины и магнитные моменты некоторых ядер

Ядро	Спин в \hbar	μ в μ_B	Ядро	Спин в \hbar	μ в μ_B
n	1/2	-1,91	${}^9_4\text{Be}$	3/2	-1,2
p	1/2	+2,79	${}^{12}_6\text{C}$	0	0
${}^2_1\text{H}$	1	0,86	${}^{13}_6\text{C}$	1/2	+0,7
${}^3_1\text{H}$	1/2	+3	${}^{14}_7\text{N}$	1	+0,4
${}^3_2\text{He}$	1/2	-2,1	${}^{15}_7\text{N}$	1/2	-0,28
${}^4_2\text{He}$	0	0	${}^{16}_8\text{O}$	0	0
${}^6_3\text{Li}$	1	+0,8	${}^{115}_{49}\text{In}$	9/2	+5,5
${}^7_3\text{Li}$	3/2	+3,2	${}^{209}_{83}\text{Bi}$	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.

2.6 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:

$$\Delta m = Zm_p + Nm_n + Zm_e - m = Zm_H + Nm_n - n \quad (18)$$

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:

$$\Delta E(A,Z) = [Zm_p + (A-Z)m_n - M_{\text{яд}}(A,Z)]c^2 \quad (19)$$

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 ΔM 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

$$\Delta E(A,Z) = \alpha A - \beta A^{2/3} - \gamma \frac{Z^2}{A^{1/3}} - \varepsilon \frac{(A-2Z)^2}{A} + \delta \quad (20)$$

($\alpha, \beta, \gamma, \varepsilon, \delta$ - 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 $E'_{св}/A$.

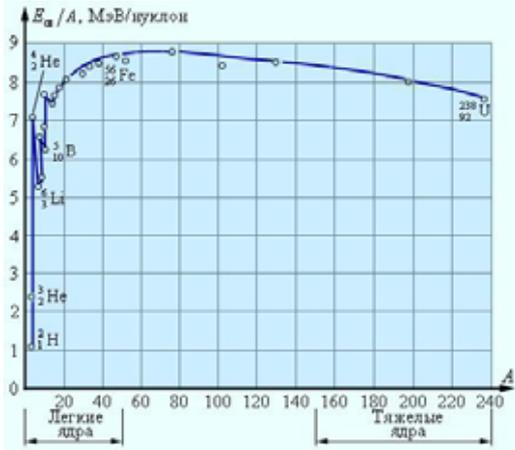


Рис.13. Зависимость средней энергии связи в расчете на один нуклон от массового числа.

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 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.13**) 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.

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.13**, 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 деления на части (реакция деления) вторых. В стабильных ядрах между зарядом Z и массовым числом A существует соотношение вида

$$Z = \frac{A}{1,98 + 0,015A^{2/3}} \quad (21)$$

При отклонении от этого соотношения ядро проявляет свойство β^- или β^+ - радиоактивности

График **Рис.13** 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 на Земле энергия термоядерного синтеза реализуется только в водородной бомбе.

2.7 Четность.

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

Четность, квантовое число, характеризующее симметрию волновой функции Ψ физической системы или элементарной частицы при некоторых дискретных преобразованиях; если при таком преобразовании Ψ не меняет знака, то четность положительна, если меняет, то четность отрицательна. Для истинно нейтральных частиц (или систем), которые тождественны своим античастицам, кроме пространственной 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

$$P_{A+B} = P_A P_B (-1)^l, \quad (22)$$

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

2.8 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 хромодинамика.

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: $\Delta W \approx 8A$ 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 α -частиц. Не вошедшие в α -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 (МэВ-ы). 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.