

Строеж и основни характеристики на ядрото. Маса и енергия на ядрото. Енергия на връзката. Ядрени реакции. Закони за запазване в ядрените реакции

Строеж и основни характеристики на ядрото

Всеки атом има отрицателно заредена обвивка и положително заредено ядро. В ядрото е съсредоточена почти цялата маса на атома (99,95%). Всяко ядро е изградено от протони и неутрони, наречени с общото име *нуклони*. (Протонът е частица с положителен електричен заряд, равен по големина на заряда на електрона, а неутронът е частица без електричен заряд.) Масата на протона m_p е приблизително равна на 1836 електронни маси (m_e): $m_p \approx 1836 m_e$, а масата на неутрона m_n е с 2,5 електронни маси по-голяма: $m_n \approx 1838,5 m_e$. Броят на протоните се означава със Z , а на неутроните – с N . Общият брой протони и неутрони определя масовото число на различните изотопи на химични елементи от периодичната система и се означава с A ($A = N + Z$). Следователно броят на неутроните в ядрото е $N = A - Z$. Атомният номер на всеки елемент е равен на броя на протоните Z .

За обозначаване на различните ядра се използват записите ${}_Z X^A$ или ${}_Z^A X$, където X е химичният символ на елемента с дадено Z . Например, ${}_4\text{Be}^9$ е елемента берилий с $Z = 4$ и $A = 9$, т.е. $N = 5$.

Протонът и неутронът могат да се означават като ${}_1^1 p$ и ${}_0^1 n$, а α -частицата, която е хелиево ядро – ${}_2^4\text{He}$.

Ядрата, които имат еднакъв брой протони и различен брой неутрони, се наричат *изотопи*, а тези с еднакъв брой неутрони и различен брой протони – *изотони*. Ядрата с еднакво масово число A , но различен брой протони и неутрони се наричат *изобари*. Различните изотопи имат еднакви химични и почти еднакви физични свойства, доколкото тези свойства се определят от електронната обвивка на атома. Затова например, отделянето на ${}_{92}^{235}\text{U}$ от ${}_{92}^{238}\text{U}$ е сложна технологична задача, при която се ползва различието в масите на изотопите.

Досега са известни над 2000 ядра, от които приблизително 300 са стабилни. Интересен е фактът, че по-голямата част от стабилните ядра (159) имат четен брой протони и неутрони. Ядрата с четни стойности на Z и N се наричат *четно-четни*, а тези с нечетни Z и N – *нечетно-нечетни* (такива са само 4: ${}_1^2\text{H}$, ${}_3^6\text{Li}$, ${}_5^{10}\text{B}$, ${}_7^{14}\text{N}$). Ядрата с четен брой протони и нечетен брой неутрони се наричат *четно-нечетни* (54) и обратно – нечетен брой протони и четен брой неутрони – *нечетно-четни* (50). Това показва, че при формиране на вътрешната структура на ядрата четността на протоните и неутроните е от особено значение.

При малки масови числа A стабилните ядра съдържат приблизително равен брой протони p и неутрони n . При увеличаване на масовото число A , процентното съдържание на неутрони нараства.

С известно приближение може да се приеме, че ядрата на атомите имат почти сферична форма. Проведените чрез различни методи измервания на радиусите на ядрата показват, че те се подчиняват на следната обща закономерност:

$$R = r_0 A^{1/3}; \quad r_0 = (1,2 \div 1,5) \cdot 10^{-15} \text{ m},$$

от която следва, че обемът на ядрото е пропорционален на броя на нуклоните ($V \sim A$). Експериментите показват, че ядрата нямат рязко очертани граници. (Това е свързано с факта, че нуклоните притежават вълнови свойства и размерът на ядрата придобива условен смисъл.) Средната плътност на ядреното вещество може да се пресметне, като се раздели масата на ядрото $M \approx A m_p$ (допускаме, че $m_p \approx m_n$) на обема му $V = (4/3)\pi R^3$. Получената стойност е от твърде висок порядък ($\rho \approx 10^{17} \text{ kg/m}^3$). Това е невероятно голяма плътност в сравнение с плътностите на обикновените вещества, в които участват химичните елементи и техните съединения (например плътността на водата $\rho \approx 10^3 \text{ kg/m}^3$).

Ядрата на атомите се характеризират със *спин* и *магнитен момент*. Спинът на ядрото се определя от векторната сума на спиновете на съставлящите го нуклони. Протонът и неутронът имат спин $s = \pm(1/2)\hbar$. В такъв случай за спина на ядрото има значение четността или нечетността на N или Z :

– за четно-четните ядра спиновете в основните състояния са равни на нула, а във възбудените имат стойности цели числа, кратни на \hbar ;

– за ядрата с нечетен брой нуклони спиновете в основното и възбуденото състояние заемат не много големи стойности, които са кратни на $\hbar/2$;

– за нечетно-нечетните ядра спиновете имат целочислени, също сравнително малки стойности, кратни на \hbar : $0, 1\hbar, 2\hbar, \dots, 10\hbar$.

Магнитните моменти на ядрата са свързани със спиновете им. Теоретично е доказано, че всяка частица със заряд e и маса m има магнитен момент

$$(1) \quad \mu_0 = \frac{e\hbar}{2mc}.$$

За електрона горната формула дава стойност, която е твърде близка до измерената. Ако в (1) заместим масата m с масата m_p на протона, ще получим теоретичната стойност на неговия магнитен момент, която се оказва значително по-малка от измерената (≈ 3 пъти). За неутрона съгласно тази формула получаваме нулев магнитен момент (като неутрална частица той няма електричен заряд), докато измерванията показват, че неговият магнитен момент е отрицателен. По-голямата измерена стойност на магнитния момент на протона, както и наличието на магнитен момент на неутрона се дължи на разпределението на електричния заряд в тях. Неутронът, както протонът и други тежки частици не са неделими, а са изградени от кварки.

Спиновете и магнитните моменти на ядрата не са равни на сумата от големините на спиновете и магнитните моменти на нуклоните, участващи в състава им. Опитните данни показват, че всички четно-четни ядра имат магнитни моменти, равни на нула (спиновете на тези ядра също са равни на нула). От тези факти следва изводът, че протоните (а също и неутроните) вътре в състава на ядрата са комбинирани по двойки с противоположно ориентирани магнитни моменти и спинове.

Маса и енергия на ядрото. Енергия на връзката

Една от най-важните характеристики на атомното ядро е неговата маса M . В ядрената физика масата на ядрата се измерва в атомни единици маса (u). За една атомна единица маса (1 u) се приема 1/12 част от масата на неутралния атом на въглерода $^{12}_6\text{C}$: $1 \text{ u} = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$.

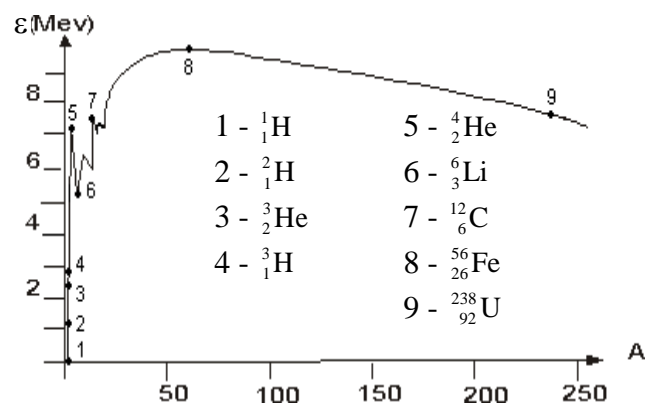
В табл. 1 са приведени масите на ядрата на някои изотопи. Вижда се, че масите им, изразени в атомни единици маса, са почти равни на масовото им число.

В ядрената физика обикновено се работи с енергии, като на всяка маса се съпоставя енергията в покой. Енергетичният еквивалент на една атомна единица маса е: $1 \text{ u} = mc^2 = 1,49 \cdot 10^{-10} \text{ J} \approx 931 \text{ MeV}$.

Познаването на точните стойности на масите на протона m_p и неутрона m_n дава възможност да се сравни масата на атомното ядро $M(A, Z)$ със сумата от масите на всички A нуклони (Z протони и $A-Z$ неутрони), от които то е изградено. Оказва се, че винаги масата на ядрото е по-малка от сумата от масите на съставлящите го нуклони. Величината

$$\Delta E = (Zm_p + (A-Z)m_n - M(A, Z))c^2$$

се нарича *енергия на връзката* на ядрото спрямо всички съставлящи го нуклони. Енергията на връзката е мярка за енергията, която трябва да се изразходва, за да се раздели даденото ядро на съставлящите го нуклони.



фиг. 1

Таблица 1

Изотоп	Масово число	Маса [u]
^1_1H	1	$1,00782522 \pm 4 \cdot 10^{-8}$
^2_1H	2	$2,01410222 \pm 7 \cdot 10^{-8}$
^3_1H	3	$3,01604972 \pm 16 \cdot 10^{-8}$
^3_2He	3	$3,01602970 \pm 16 \cdot 10^{-8}$
^4_2He	4	$4,00260326 \pm 27 \cdot 10^{-8}$
^7_3Li	7	$7,0160048 \pm 8 \cdot 10^{-7}$
^7_4Be	7	$7,0169299 \pm 8 \cdot 10^{-7}$
^9_4Be	9	$9,0121828 \pm 6 \cdot 10^{-7}$
$^{11}_5\text{B}$	11	$11,00930533 \pm 3 \cdot 10^{-7}$
$^{12}_6\text{C}$	12	12,00000000
$^{14}_7\text{N}$	14	$14,00307440 \pm 13 \cdot 10^{-8}$
$^{16}_8\text{O}$	16	$15,99491502 \pm 2 \cdot 10^{-7}$

Често е удобно да се работи със *специфичната енергия на връзката*, дефинирана като $\varepsilon = \Delta E/A$, която всъщност е енергия на връзката на един нуклон.

Експерименталното изследване на енергията на връзката дава богата и интересна информация за свойствата на ядрата. На фиг. 1 е показана зависимостта на специфичната енергия на връзката от масовото число.

От хода на зависимостта могат да се направят няколко основни изводи.

– От положителните стойности на ΔE и ε за всички ядра следва, че ядрените сили са сили на привличане, по-интензивни от електромагнитните (тъй като компенсират изцяло електромагнитното отблъскване

между протоните). Ако сравним силата на двете взаимодействия на разстояние 10^{-15} m, ядреното превъзхожда електромагнитното $10^2 \div 10^3$ пъти.

– Ако се изключат най-леките ядра, може да се каже, че специфичната енергия на връзката има големина около 8 MeV, с максимум около 8,8 MeV. Това показва много голямата интензивност на ядрените сили. (За сравнение може да се посочи, че енергията на свързване на електрона в атома на водорода е 13,6 eV, т.е. около 10^6 пъти по-малка.)

– Почти постоянната стойност на специфичната енергия на свързване за всички ядра показва, че ядрените сили имат свойството насищане, което означава, че плътността на ядрата е приблизително постоянна. Постоянството на плътността от своя страна потвърждава, че размерите на ядрата са пропорционални на $A^{1/3}$.

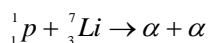
– Доколкото специфичната енергия на връзката има максимум от 8,8 MeV при $A = 56$ (желязо), за леките ядра е енергетично по-изгодно да се слоят, при което се отделя т. нар. *термоядрена енергия*. За тежките ядра е енергетично по-изгодно да се разцепят на части, като при това се отделя т. нар. *атомна енергия*.

Магични се наричат ядрата, които имат брой на протоните или неутроните 2, 8, 20, (28), 50, 82 и за неутроните още 126. Ако броят и на протоните, и на неутроните е „магично число”, ядрото се нарича *двойно магично*. Такива ядра са само пет: ${}^4_2\text{He}$, ${}^{16}_8\text{O}$, ${}^{40}_{20}\text{Ca}$, $({}^{48}_{20}\text{Ca})$, ${}^{208}_{82}\text{Pb}$.

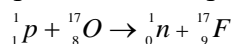
Ядрени реакции. Закопи за запазване в ядрените реакции

В най-широк смисъл на думата, ядрена реакция се нарича процес на сблъсък между две или повече частици, протичащи с участието на силно взаимодействие. Ядрените реакции са основен метод за изучаване на ядрата и елементарните частици.

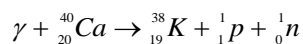
Най-нагледен и универсален начин е записът, приет в химията. Например:



отразява сблъсък на протон с ядрото на *Li*, при което се образуват две частици;



отразява сблъсък на протон с ядрото на кислорода, при което се образуват неутрон и ядро на флуора;



отразява сблъсък на γ -квант с ядрото на калция, при което се образуват неутрон, протон и ядро на калия.

Последните две реакции могат да се запишат като:



Често се използва и много по-краткия запис:



които показват избиване на неутрон при обстрелване с протон и обстрелване с γ -квант, при което се избиват протон и неутрон.

При ядрените реакции са валидни различни закони за запазване. Всеки закон за запазване се състои в това, че определена величина трябва да остава постоянна преди и след взаимодействието. Тези закони винаги налагат някакви ограничения, които се наричат забрани, върху продуктите, получавани при реакциите.

Във всички ядрени реакции е изпълнен законът за запазване на енергията. При ядрените реакции са валидни още и законите за запазване на импулса, момента на импулса и електричния заряд. Изпълняват се и някои закони за запазване на величини като лептонен и барионен заряд, което практически означава запазване на броя на лептоните (леките частици – електрони, неутрино и др.) и барионите (тежките частици – нуклони, хиперони).