

# Състав на ядрото. Електричен и барионен заряд. Статистика. Четност на вълновата функция. Маса и енергия на ядрото. Енергия на връзката

## Състав на ядрото. Електричен и барионен заряд

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*. 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  $Z$ .

Протонът и неутронът могат да се означават като  ${}_1^1 p$  и  ${}_0^1 n$ , а  $\alpha$ -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.

Досега са известни над 2000 ядра, от които приблизително 300 са стабилни. 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.

Съвкупността от наличните експериментални данни за взаимните превръщания на атомните ядра и елементарните частици показва, че е изпълнен закона за запазване на електричния заряд. При обикновените ядрени реакции (реакции без образуване на античастици) масовото число остава постоянно, което е израз на закона за запазване на броя на нуклоните. Обобщението на този закон за всички частици и античастици води до закона за запазване на т. нар. **барионен заряд**. При произволен процес барионния заряд остава постоянен. Барионните заряди, също както електричните са целочислени (единица за електричен заряд е заряда на електрона). Барионните заряди на протона  $p$  и неутрона  $n$  са равни на единица. Затова барионния заряд на ядрото е равен на масовото му число  $A$ .

Електронът и  $\gamma$ -квантът имат барионен заряд нула. Законът за запазване на барионния заряд намира широко приложение във физиката на елементарните частици.

## Статистика. Четност на вълновата функция

В квантовата теория състоянието на система от  $n$  частици се описва от вълнова функция

$$\Psi_{s_1 s_2 \dots s_n}(r_1 \dots r_n),$$

която зависи от координатите  $r_i$  и от спините  $s_i$  на частиците.

В квантовата механика е в сила принципът за неразличимост на частиците. Две частици от един и същ вид, например два протона, са абсолютно еднакви и неразличими. Ако в системата се разменят местата на две частици, вълновата ѝ функция ще се промени до числов множител:

$$\Psi_{s_1 s_2 \dots s_n}(r_1 \dots r_n) = P_{12} \Psi_{s_1 s_2 \dots s_n}(r_1 \dots r_n).$$

Ако още веднъж се сменят местата на тези частици, ще получим изходната вълнова функция, т.е.  $P_{12}^2 = 1$  или  $P_{12} = \pm 1$ .

Когато  $P_{12} = 1$ , вълновата функция се нарича симетрична по частиците. Когато  $P_{12} = -1$ , вълновата функция се нарича антисиметрична по частиците.

Частици от определен вид се описват от точно определена вълнова функция. Ако се описват от симетрична вълнова функция, те се подчиняват на статистиката на Бозе-Айнщайн и се наричат бозони. Ако частиците се описват от антисиметрична вълнова функция, те се подчиняват на статистиката на

Ферми-Дирак и се наричат фермиони.

Частиците с цял спин  $s=0, 1, 2 \dots$  са бозони, а с полуцял спин  $s=1/2, 3/2, \dots$  се наричат фермиони. Характерно за бозоните е, че те могат да се натрупват в едно и също квантово-механично състояние, а за фермионите е характерно, че в едно квантово-механично състояние може да има само една частица (принцип на Паули).

Четността е фундаментално понятие. Тя характеризира свойствата на симетрия на ядрата, елементарните частици и въобще на произволна физична система по отношение на огледалното отражение. Според закона за запазване на четността, *всяка физична система, която има огледална симетрия в началното състояние, запазва тази симетрия във всички следващи моменти*. Този закон е в сила, както за електромагнитните взаимодействия, отговорни за структурата на атомите и молекулите, така и за ядрените сили, отговарящи за структурата на ядрата.

В квантовата теория състоянието на система от  $n$  частици се описва от комплексна вълнова функция на координатите на тези частици  $\Psi(r_1 \dots r_n)$  (в случая не се интересуваме от спиновете на частиците). Състоянието на тази система е четно, ако нейната вълнова функция не се изменя при промяна на знака на координатите на всички частици, т.е.

$$\Psi(-r_1, \dots, -r_n) = \Psi(r_1, \dots, r_n) .$$

Състоянието на тази система е нечетно, ако вълновата функция при същата операция променя своя знак, т.е.

$$\Psi(-r_1, \dots, -r_n) = -\Psi(r_1, \dots, r_n) .$$

Всяка елементарна частица има неотменимата характеристика **вътрешна симетрия  $P$** , която има стойности  $\pm 1$ . Частиците, за които  $P = 1$ , се наричат четни, а тези, за които  $P = -1$ , се наричат нечетни. Тогава, състоянието на системата е четно, ако

$$P_1 \cdots P_n \Psi(-r_1, \dots, -r_n) = \Psi(r_1, \dots, r_n)$$

и е нечетно, когато

$$P_1 \cdots P_n \Psi(-r_1, \dots, -r_n) = -\Psi(r_1, \dots, r_n) .$$

От тези формули следват следните правила, позволяващи да се използва закона за запазване на четността за получаване на правила за подбор в различните ядрени реакции, а също за експериментално определяне на вътрешните четности на атомните ядра и елементарните частици.

1. Четността на частица с орбитален момент  $l$  и вътрешна четност  $P_A$  е  $P_A(-1)^l$ .
2. Вътрешната четност  $P_{AB}$  на сложна система, състояща се от две частици (две подсистеми) с вътрешна четност  $P_A$  и  $P_B$  и с относителен орбитален момент  $l$  е  $P_A P_B (-1)^l$ .

От експерименталните данни е известно, че вътрешните четности на електрона, протона и неутрона не се променят при ядрените и електромагнитните взаимодействия. Следователно можем да си изберем произволно четността им – за удобство тя се приема равна на единица. Следователно четността на система от нуклони /или електрони/ с орбитални моменти  $l_1, l_2 \dots l_n$  е  $(-1)^{l_1+l_2+\dots+l_n}$ .

### 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  $A-Z$

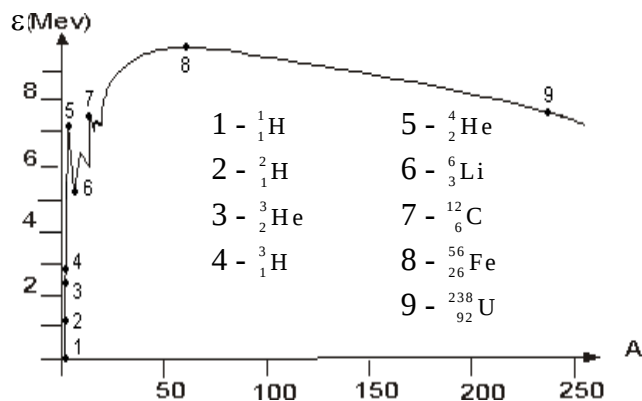
Таблица 1

| Изотоп            | Масово число | Маса [u]                           |
|-------------------|--------------|------------------------------------|
| $^1_1\text{H}$    | 1            | $1,00782522 \pm 4 \cdot 10^{-8}$   |
| $^2_1\text{H}$    | 2            | $2,01410222 \pm 7 \cdot 10^{-8}$   |
| $^3_1\text{H}$    | 3            | $3,01604972 \pm 16 \cdot 10^{-8}$  |
| $^3_2\text{He}$   | 3            | $3,01602970 \pm 16 \cdot 10^{-8}$  |
| $^4_2\text{He}$   | 4            | $4,00260326 \pm 27 \cdot 10^{-8}$  |
| $^7_3\text{Li}$   | 7            | $7,0160048 \pm 8 \cdot 10^{-7}$    |
| $^7_4\text{Be}$   | 7            | $7,0169299 \pm 8 \cdot 10^{-7}$    |
| $^9_4\text{Be}$   | 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           | $15,99491502 \pm 2 \cdot 10^{-7}$  |

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

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  $\Delta E$  и  $\varepsilon$  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 слейт, 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. *ядрена 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:  $^4_2\text{He}$ ,  $^{16}_8\text{O}$ ,  $^{40}_{20}\text{Ca}$ ,  $^{48}_{20}\text{Ca}$ ,  $^{208}_{82}\text{Pb}$ .

Атомните ядра аналогично на атомите имат дискретни (квантувани) стойности на енергията. Ако едно ядро има възможната най-малка енергия  $E_1$ , равна на енергията на свързване  $\Delta E$  ( $E_1 = \Delta E$ ), то се намира в *основно енергетично състояние*; ако неговата енергия е  $E > E_1$ , то се намира във *възбудено енергетично състояние*. Случаят  $\Delta E = 0$  съответства на разделяне на ядрото на съставлящите го нуклони. Съвкупността от всички възможни възбудени състояния, които може да заема дадено ядро, се нарича *спектр на ядрените енергетични нива*. Разликата между енергията на всяко възбудено състояние и енергията на основното се нарича *енергия на възбуждане*:

$$\Delta E_i = E_i - E_1,$$

където  $i$  е номерът на съответното възбудено състояние. Обикновено ядрата преминават от основно във възбудено състояние при облъчване с различни частици (протони, неутрони,  $\alpha$ -частици) или високоенергетични фотони (т.нар.  $\gamma$ -кванти). Възбудените състояния са нестабилни и ядрата се връщат в основно състояние чрез различни процеси на излъчване в зависимост от енергията на възбуждане.