

Спин и магнитен момент на ядрото. Размери и форма на ядрата. Квадруполен момент. Модели на ядрото – колективни, едночастични, обобщени

Спин и магнитен момент на ядрото. Размери и форма на ядрата. Квадруполен момент

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

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

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.

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 $M \approx Am_p$ (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 $\rho \approx 10^3 \text{ kg/m}^3$).

Отначало се е считало, че формата на всички ядра в основно състояние е сферична. По-късно се е изяснило, че формата на много ядра значително се отклонява от сферичната. За изследване на формата на ядрата и за редица други въпроси от физиката на ядрото голяма роля играе изучаването на **електричния квадруполен момент** на ядрото.

Електричният квадруполен момент Q се определя от отношението:

$$e.Q = \int \rho(\vec{r})(3.z^2 - r^2) dV,$$

където $\rho(\vec{r})$ е плътността на електричния заряд в точка $\vec{r}$, вътре в ядрото, а оста Z се избира така, че величината Q да е максимална по абсолютно стойност. Очевидно когато $Q=0$ има сферично разпределение на заряда:

$$\int \rho(\vec{r})x^2 dV = \int \rho(\vec{r})y^2 dV = \int \rho(\vec{r})z^2 dV = \frac{1}{3} \int \rho(\vec{r})r^2 dV.$$

Следователно електричният квадруполен момент описва степента на несферичност на

разпределението на електричния заряд в ядрото.

Квадруполните моменти отнесени към единица заряд се измерват в cm^2 или **барн (b)**, като $1 \text{ барн} = 10^{-24} \text{ cm}^2$.

Модели на ядрото – колективни, едночастични, обобщени

Известно е, че от всички фундаментални сили в природата ядрените са най-интензивни. В ядрата действат два вида сили: кулонови (електростатични) сили между протоните и ядрени сили между нуклоните, които се характеризират с редица особени свойства: това са сили на привличане, действащи на малки разстояния, сравними с линейните размери на самите нуклони (при разстояния, по-малки от $0,6 \cdot 10^{-15} \text{ m}$, те се проявяват като сили на отблъскване); не зависят от електричните заряди на нуклоните – действат по еднакъв начин между два протона, два неутрона и между протон и неутрон; зависят не само от разстоянието между нуклоните, но и от ориентацията на техните спинове спрямо правата, която ги съединява (нецентрален характер на ядрените сили).

Въпросите, обхващащи теорията на ядрото, могат формално да се разделят на две групи: структура на ядрото и механизъм на ядрените реакции.

Трудностите, които съществуват за създаване на последователна теория на ядрото са:

- не е известен точният вид на силите, действащи между нуклоните в ядрото;
- уравненията, описващи движенията на нуклоните в ядрото са твърде обемисти и сложни;
- ядрото не може да се разглежда като непрекъсната среда.

Липсата на цялостна теория на ядрото води до създаване на множество модели, описващи едни или други негови свойства. В основата на всеки ядрен модел стои допускането на някакво приближение спрямо набора от степени на свобода на ядрото. Счита се, че отчитаните степени на свобода слабо взаимодействат с останалите степени на свобода.

Степените на свобода на ядрото е естествено да се разделят на едночастични, описващи движението на индивидуалните частици, и колективни, съответстващи на корелираното движение на голям брой частици. В съответствие с това, използваните в ядрената физика модели, могат да се разделят на колективни, едночастични и обобщени, в които се използват както едночастичните, така и колективните степени на свобода.

Моделите, основани на колективните степени на свобода, е прието да се наричат модели със силно взаимодействие между частиците. Колективните ефекти се проявяват в такива състояния на веществото, когато свободният пробег на всяка частица е малък в сравнение с размерите на системата, т.е. главна роля играят честите и интензивни взаимодействия на частицата с най-близките ѝ съседи. В тези модели ядрото се третира като течност или твърдо тяло. Типичен представител е капковият модел на ядрото.

Капковият модел е предложен от Бор. Той е построен въз основа на предположението, че ядрото има аналогични свойства с тези на капка течност. Основания за това предположение са близкодействащите ядрени сили, взаимодействието на нуклоните с най-близките им съседи, еднаквата плътност на ядрата. С помощта на този модел е изведена полуемпирична формула за енергията на свързване между нуклоните в ядрата и е обяснен механизъмът на ядрените реакции, а в частност и деленето на ядрата. Съществено в модела е, че ударението се поставя на колективното поведение на нуклоните.

Ядрото се третира като заредена капка течност. Като независими степени на свобода се считат обемното свиване на ядрото и колебанието на повърхността. В енергията на връзка на ядрото се отчитат обемната, повърхностната и кулоновата енергии. Освен това се отчитат и излизащите извън рамките на капковите представи енергия на симетрия и енергията на сдвояване, т.е. отчитат се всички членове на формулата на Вайцекер.

Област на използване на модела

- Описване на усреднената енергия на връзка на ядрото като функция на **A** и **Z**.
- Разглеждане на повърхностните колебания на сферичните ядра.
- Качествено обяснение на процеса на делене на ядрото.

Моделите, основани на едночастичните степени на свобода, е прието да се наричат модели на независимите частици. Едночастичните степени на свобода се проявяват, когато свободният пробег на частиците е по-голям, така, че всяка частица се движи независимо в някакво усреднено самосъгласувано поле.

Слоестият модел е изграден на предположението за независимо движение на нуклоните в ядрото и се различава коренно от капковия модел. Той е създаден за да бъде обяснено съществуването на магичните числа. Съгласно този модел нуклоните заемат определени енергетични слоеве (нива) в

ядрото аналогично на електроните в атома, но слоевете са различни за протоните и неутроните. Запълването на тези нива е свързано със стабилността на ядрата. Най-устойчиви са ядрата с напълно запълнени протонни или нетронни слоеве. Това са магичните ядра, съдържащи 2, 8, 20, 28, 50, 82, 126 протона или неутрона. Ако и протонните и неутронните слоеве в дадено ядро са изцяло запълнени (двойно магичните ядра), то притежава особено голяма устойчивост. Този модел дава задоволителни резултати при описание на леките и средните ядра, както и за тези в основно състояние.

Нуклоните се движат независимо един от друг в самосъгласуваното поле на общия за всички нуклони силов център. Реалното взаимодействие може да се представи като сума от самосъгласуваното и някакво остатъчно взаимодействие. Счита се, че остатъчното взаимодействие е малко и може да се пренебрегне.

Област на приложимост на модела

- Получаване на магическите числа.
- Обяснение на спиновете и четността на основните състояния на двойно магическите ядра.
- Обяснение на спиновете, четността и магнитните моменти на основните и някои възбудени състояния на ядра, отличаващи се от магическите с един нуклон (+ или -).

При обобщения модел със силно взаимодействие се приема, че всички нуклони се движат независимо в самосъгласувано поле. За разлика от слоестия модел, силовият център има сферично несиметрична форма, и освен това може да се върти като цяло. При въртенето му се увеличат напълно или частично всички нуклони.

Област на приложимост на модела

- Обяснява разположението и характеристиките на голям брой нисколежащи нива на много ядра.

Съществуват и други модели, които са някакви варианти (опростени или обобщени) на вече разгледаните, като например:

- ферми-газ;
- ядрена материя;
- слоест модел със sd-сдвояване;
- модел на нуклонните асоциации;
- слоист модел с остатъчно взаимодействие.

Характерно за всички разгледани модели е, че се подбират параметри, съгласувани с експерименталните данни. Разбира се, въвеждайки достатъчно много параметри, могат да се обяснят много данни на основата на кой да е модел. Но такива модели са бедни на физични идеи и като правило обясняват вече известни факти, но не са способни да предскажат нови явления. Ценният модел има минимален брой параметри и позволява да се предскажат, макар и качествено, нови явления.