

СИЛИ И ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

Фундаментални взаимодействия и симетрии

Четири фундаментални взаимодействия: гравитационно, електромагнитно, силно и слабо.

гравитационното взаимодействие е открито чрез свойството му „кумулятивност”, т.е. сумиране на действието от всички частички на тялото. Обхватна действие - до безкрайност.

електромагнитното взаимодействие обединява електричните и магнитните явления. Обхват на действие - до безкрайност. Развитие в квантовата електродинамика (Файнман, Швингер и Томонага). Електричните заряди взаимодействат помежду си чрез обмен на фотони (векторни полета), чиято вътрешна характеристика – спин е $1\hbar$.

- силно взаимодействие - въведено през 1932 г. (след откриване на неутрона), за обяснение устойчивостта на ядрата и вътрешната структура на нуклеоните. Обхват на действие - до около 1 fm (10^{-15} m), на по-големи разстояние е за пренебрегване.

- слабо взаимодействие - въведено от Ферми през 1935 г. за обяснение на β -разпадането. С около 10 порядъка по-слабо от силното. Обхват на действие - с три порядъка по-малък от този на силното. Слабото взаимодействие се осъществява също чрез обмен на частици с цял спин, т.нар. „промеждутъчните бозони.

взаимодействие	интензитет	обхват, m	характерно време, s	механизъм (обмен на ...)
силно	1 (10^{-1} - 10)	$\sim 10^{-15}$	$\sim 10^{-23}$	глюони ($m = 0$)
електромагнитно	$1/137$	∞	$\sim 10^{-16-19}$	фотони ($m = 0$)
слабо	$\sim 10^{-10}$	$\sim 10^{-18}$	$\sim 10^{-13}$	промежд. бозони ($m \sim 100\text{ GeV}$)
гравитационно	$\sim 10^{-38}$	∞	?	гравитони (?)

За силата на взаимодействието се съди по скоростта на процесите (характерното време).

Взаимодействията се характеризират с определени симетрии и закони за запазване. Законите за запазване са свързани с принципа на инвариантност на физическите закони спрямо трансформации на влизащите в тях величини. Инвариантност означава симетрия спрямо дадена трансформация и обратно - ако има симетрия, тя трябва да води до закон за запазване.

Във ФЕЧ законите за запазване се формулират независимо от динамичните уравнения и те включват вътрешни симетрии. Видът на взаимодействието определя симетриите. Колкото по-силно е взаимодействието, толкова повече симетрии се

проявяват, както и повече закони за запазване са в сила.

Геометрични и вътрешни симетрии.

Геометричните са свързани с трансформации в пространството и времето и са известни от класическата физика. ЗЗЕ следва от хомогенността на времето (свързан е с инвариантност на физическите закони спрямо трансляция по оста на времето). ЗЗИ е свързан с хомогенността на пространството (транслация в пространството). ЗЗ на ъгловия момент следва от изотропността на пространството, при ротацията в пространството физическите закони не се изменят.

Дискретни трансформации, напр. пространствена инверсия. Тя е еквивалентна на огледално отражение и ротация - еквивалентност на пространствената инверсия с огледалното отражение. Квантовото число четност възниква във връзка с т.нар. Р-трансформация (пространствена инверсия). ЗЗ на четността означава, че съществува огледална симетрия. С-трансформация означава зарядово спрягане, което е смяната на частиците с античастици. Т-трансформация означава смяна посоката на времето.

При слабото взаимодействие може да се наруши ЗЗ на четността. Тогава се въвежда СР-трансформация (зарядово спрягане + огледално отражение) - ЗЗ на СР-четността. Но може и тя да се нарушава. Тогава се въвежда СРТ-трансформация (зарядово спрягане, огледално отражение и обръщане посоката на времето). Слабото взаимодействие *без никакви изключения* е инвариантно спрямо нея.

Силно ядрено взаимодействие - свойства

* от свойствата на стабилните ядра,

* от изучаване свойствата на деутрона (най-простата свързана система от два нуклеона)

* от опитите по разсейване на протони и неутрони.

Основни характеристики на ядрените сили:

- голям интензитет
- къс обхват на действие
- насищане
- не зависят от електричния заряд
- зависят от спина
- имат обменен характер
- проява на силно отблъскване на много малки разстояния
- имат малка нецентрална (тензорна) компонента
- не действат изобщо на частиците, наречени лептони (напр. електрони).

Обща оценка от свойствата на стабилните ядра

Голям интензитет на ядрените сили – от специфичната енергия на свързване $\epsilon = B/A$ на нуклеон в ядрата – около 8 MeV (с 6 порядъка по-голяма от средната енергия на свързване на електроните в един атом).

Късото действие на ядрените сили - установено още от опитите на Ръдърфорд - размери на ядрата (<10 fm).

$$\sqrt[3]{\frac{V}{A}} = \sqrt[3]{\frac{4\pi R^3}{3 A}} = r_0 \sqrt[3]{\frac{4}{3}} \pi = 1,4 \cdot 10^{-15} \sqrt[3]{4,19} \approx 2 \text{ fm},$$

Тук $R = 1,4 \cdot 10^{-15} A^{1/3}$.

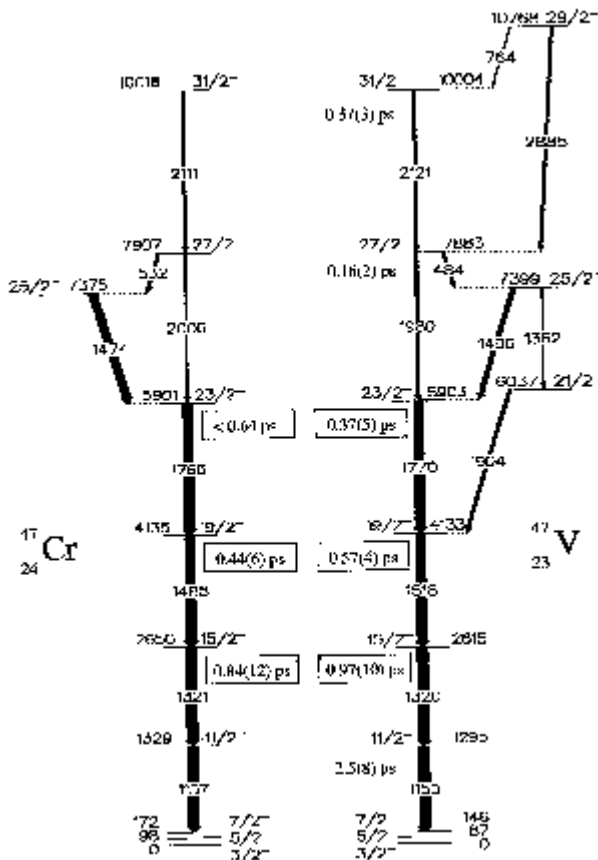
Свойство на насищане – свързано с късодействие на ядрените сили - всеки нуклеон взаимодейства само с най-близките си съседи. Ако това не беше така, $B \sim A(A-1) \sim A^2$, и съответно $e = B/A \sim A$, но опитните данни го опровергават. Ядрената плътност щеше да расте с A . Насищането на ядрените сили се потвърждава от факта, че система от два нуклеона (p,n) е стабилна, добавянето на още един неутрон в третия прави ядрото β -радиоактивно, а ядро с един протон и три неутрона не съществува.

Свойството на насищане е свързано с обменния характер на ядрените сили. Ако взаимодействието става чрез обмен на частици, то ще е ограничено само до най-близките съседи.

Зарядова независимост на ядрените сили - равенството на Z и N при леките ядра (до $Z = N = 20$); почти еднакви нива на възбуждане при *леките огледални ядра*.

Нивата на ${}^7_3\text{Li}_4$ и ${}^7_4\text{Be}_3$. Възбудените нива са с еднакви спинове и четности и много близки енергии. Малките разлики в енергиите се дължат на електромагнитното отблъскване между

MeV		MeV	
11,1	$3/2^-$	10,8	$3/2^-$
7,5	$5/2^-$	7,2	$5/2^-$
6,5	$5/2^-$	6,5	$5/2^-$
4,6	$7/2^-$	4,5	$7/2^-$
0,48	$1/2^-$	0,45	$1/2^-$
	$3/2^-$		$3/2^-$



протоните в двете ядра. В тази двойка ядра броят на нуклеон-нуклеонните връзки е еднакъв: 3 (p,p) и 6(n,n) връзки в ${}^7_3\text{Li}_4$ и 3 (n,n) и 6 (p,p) връзки в ${}^7_4\text{Be}_3$ - предположение за симетрия на (n,n) и (p,p) взаимодействия - *зарядова симетрия*.

Свойства на deutрона

Деутрон - най-простата свързана система от два нуклеона. Деутронът *няма възбудени нива*.

Енергия на свързване

$$B = [m_p + m_n - M(^2\text{H})]c^2 = (2,22463 \pm 0,00004) \text{ MeV}.$$

Специфичната енергия на свързване $\epsilon = 1,11 \text{ MeV}$ е много ниска в сравнение със средната стойност от около 8 MeV - *деутронът е слабо свързана система*.



Елементарна теория на деутрона

Ядрен потенциал - тримерна правоъгълна потенциална яма с дълбочина V_0 . Системата протон-неутрон се разглежда в СЦМ като движение на частица с ефективна маса

$$\mu = \frac{m_p m_n}{m_p + m_n} \approx \frac{m_p}{2}$$

в правоъгълната потенциална яма. Предполага се, че най-ниското енергетично състояние има

$\mathbf{l} = 0$ - сферично-симетрично решение на у-нието на Шрьодингер

$$\left[-\frac{\hbar^2}{2\mu} \Delta + V(r) \right] \psi = E\psi(r) \quad \text{с} \quad \Delta\psi = \frac{1}{r^2} \frac{d}{dr} \left(r^2 \frac{d\psi}{dr} \right).$$

Радиалната вълнова функция - от вида $\psi(r) = u(r)/r$ и тогава $\Delta\psi = \frac{1}{r} \frac{d^2 u}{dr^2}$, а у-нието за $u(r)$ става

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{d^2 u}{dr^2} + V(r)u(r) = Eu(r).$$

в областта $r < R$ с $V(r) = -V_0$ у-нието е $\frac{d^2 u}{dr^2} + \frac{2\mu}{\hbar^2} (V_0 - W)u(r) = 0$,

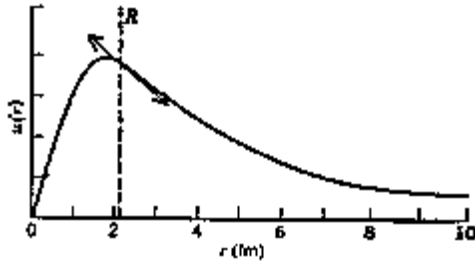
а в областта $r > R$ с $V(r) = 0$ -

$$\frac{d^2 u}{dr^2} - \frac{2\mu}{\hbar^2} Wu(r) = 0.$$

$W = -E$ ($W > 0$).

$u_1'' + k^2 u_1 = 0$ - в областта $r < R$ и $u_2'' - g^2 u_2 = 0$ - в областта $r > R$,

$$c \quad k^2 = \frac{2\mu}{\hbar^2}(V_0 - W) \quad \text{и} \quad \gamma^2 = \frac{2\mu}{\hbar^2}W.$$



Решенията са:

$$u_1(r) = A \sin(kr) + B \cos(kr) - \text{област } r < R$$

$$u_2(r) = C \exp(-\gamma r) + D \exp(\gamma r) - \text{област } r > R.$$

Вълновата функция на деутрона за $R = 2,1 \text{ fm}$

$\psi(r) = u(r)/r$ удовлетворява стандартните условия за вълнови функции. За да е райна при $r \rightarrow \infty$ и при $r \rightarrow 0$, $D = 0$ и $B = 0$. От условието за непрекъснатост логаритмичните производни на двете решения в точката $r = R$ трябва да са равни

$$\left(\ln \frac{u_1}{R} \right)' = \left(\ln \frac{u_2}{R} \right)', \quad \text{което е все едно} \quad \frac{u_1'(R)}{u_1(R)} = \frac{u_2'(R)}{u_2(R)}.$$

$$\cot g(kR) = -\frac{\gamma}{k} = -\sqrt{\frac{W}{V_0 - W}}$$

Това е връзка между V_0 и R . Радиусът на деутрона, определен от опитите по разсейване на електрони, е $2,1 \text{ fm}$ (първо приближение за R). Числено решение на уравнението дава $V_0 = 35 \text{ MeV}$.

Радиусът на деутрона е по-голям от радиуса на действие на ядрените сили. Ако вземем $u_2(r) = C \exp(-\gamma r)$, $1/\gamma$ може да се разглежда като ефективен радиус на деутрона, тъй като при $r = 1/\gamma$ вълновата функция намалява 2,7 пъти. Оценката за този ефективен радиус дава

$$r_D = \frac{1}{\gamma} = \frac{\hbar}{\sqrt{m_p W}} = \frac{\hbar c}{\sqrt{m_p c^2 W}} = \frac{197}{\sqrt{938 \cdot 35}} \left[\frac{\text{MeV} \cdot \text{fm}}{\text{MeV}} \right] \sim 4,3 \text{ fm}.$$

Деутронът е динамична система - двата нуклеона са по-дълго време извън радиуса на действие на ядрените. Енергията на свързаното състояние е много близо до енергията на несвързаните състояния - деутронът няма възбудени състояния.

Спин и четност

Пълният момент на деутрона се получава от спиновете на съставните частици и от орбиталния ъглов момент \vec{L} на нуклеоните спрямо центъра на тежестта

$$\mathbf{I} = \mathbf{s}_n + \mathbf{s}_p + \mathbf{L}.$$

Измереният спин е $I = 1$ с положителна четност. Спиновете на нуклеоните могат да са паралелни или антипаралелни. За получаване на пълен спин $I = 1$ съществуват три възможности $|\mathbf{I}_n - \mathbf{I}_p| \leq L \leq \mathbf{I}_n + \mathbf{I}_p$. Като се има предвид, че \mathbf{I}_n и \mathbf{I}_p могат да бъдат 0 или 1, възможните стойности на L са 0, 1 и 2. Спин $I = 1$ се получава при следните комбинации:

- паралелни спинове ($S = s_n + s_p = 1$) с $L = 0$
- антипаралелни спинове ($S = s_n - s_p = 0$) с $L = 1$
- паралелни спинове ($S = 1$) с $L = 2$ (взима се най-ниската стойност за I от неравенството $|1 - 2| \leq I = 1 \leq 1 + 2$).

Неутронът има четна вълнова функция (експ. доказано), което изключва възможността $L = 1$. Следователно двата нуклеона са с паралелни спинове и с две възможности за орбиталния момент $L = 0$ и $L = 2$.

Магнитен диполен момент

За състоянието с $L = 0$ магнитният диполен момент на деутрона трябва да се получава от сумата на магнитните моменти на протона и неутрона

$$\boldsymbol{\mu} = \boldsymbol{\mu}_n + \boldsymbol{\mu}_p = \frac{M_{\text{я}}}{\hbar} (g_s^n \mathbf{s}_n + g_s^p \mathbf{s}_p)$$

като жиромагнитният фактор $g_s^n = -3,826084$ и $g_s^p = 5,585691$. Наблюдаваният магнитен момент представлява z -компонентата на $\boldsymbol{\mu}$ при максималните стойности на спиновете на нуклеоните ($+\hbar/2$). Тогава

$$\mu_z = \frac{1}{2} M_{\text{я}} (g_s^n + g_s^p) = 0,879804 M_{\text{я}}.$$

Измереният магнитен момент е $(0,8574376 \pm 4 \cdot 10^{-7}) M_{\text{я}}$ съвпада добре, но разликата превишава експерименталната грешка. Може да се предположи, че малката разлика се дължи на смесване на състоянията с $L = 0$ и $L = 2$.

Електричен квадруполен момент

Голите протон и неутрон нямат квадруполен момент - ненулева стойност за квадруполния момент на деутрона е указание за орбитално движение. Опитно определенният квадруполен момент е

$$eQ = (0,00288 \pm 0,0002) \text{ eb},$$

е много малка, но не е нула.

Експериментите по разсейване на протони и неутрони от деутрони също показват смесване с примес около 4% на D -състоянието. Измерването на квадруполния момент и оттам точното определяне на вълновата функция на D -

състоянието имат голямо значение, тъй като от съществуване на състоянието с $L = 2$ се прави заключение за нецентралния (тензорен) характер на ядрените сили.

И така, от свойствата на deutрона: спин 1 с паралелни спинове на протона и неутрона, четна вълнова функция, неравенство на магнитния момент с точната сума от магнитните моменти на свободни протон и неутрон, малка енергия на свързване и липса на възбудени състояния, дълбока и тясна потенциална яма, направихме изводи за ядрените сили, че са късодействащи, зависят от спина и потенциалът има тензорна съставна.

Опити по разсейване – спинова зависимост

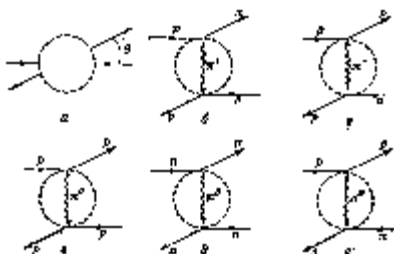
Мишени от молекулярен водород и се изследва сечението на разсейване на неутрони при много ниски енергии на нуклеоните - *ултрастудените неутрони*.

Молекулата на водорода може е с паралелни спинове на двата протона (орто-водород - триплет) или с антипаралелни спинове (пара-водород - синглет). Молекулите орто-водород са три пъти повече от молекулите на пара-водорода. От измерване сечението на разсейване на ултрастудени неутрони от смес от пара- и орто- водород и само от пара-водород може да се извлече и сечението за разсейване на орто-водород. Измерванията дават $S_{\text{орто}} = 125 \text{ mb}$, а $S_{\text{пара}} = 4 \text{ mb}$ (вместо очакваното 3:1) измереното отношение на сеченията е $125/4=31,2$ – десет пъти повече от очакваното! При разсейване от пара-водород спинът на разсейващия се неутрон ще е винаги паралелен на спина на единия протон и антипаралелен на спина на другия протон, а при разсейване от орто-водород спинът на неутрона ще е паралелен (или антипаралелен) едновременно и на двата протона. Резултат - *силна зависимост на ядрените сили от спина на взаимодействащите частици*.

Обменен характер

Диференциални сечения на системите (p,p) и (p,n). При ниски енергии са почти еднакви - извод за зарядова независимост на ядрените сили. Но има една съществена разлика в ъгловата зависимост. За системата (p,p) съществува добре изразен максимум при малки ъгли, дължащ се на еластично разсейване. За системата (p,n) съществува симетрия на диференциалното сечение спрямо линията 90° .

Обяснение с „размяна на местата” на двете разсейващи се частици или точно в процеса на разсейването те си обменят електричния заряд. В процеса на взаимодействието двата нуклеона си обменят частица, която при недостиг на енергия е виртуална. Тази частица – π -мезон или *пион* – е въведена за пръв път от Юкава през 1935 г. и открита през 1947 г. в състава на космичното лъчение. Пионът съществува като изоспинов триплет π^+ , π^- , π^0 и в зависимост от вида на обменния пион могат да протекат разни процеси.



Теория на Юкава

Когато два нуклеона се приближат на разстояние в обхвата на ядрените сили, те си разменят частица. Оценка за масата от съотношенията на неопределеност. Раждането на обменната частица става с нарушаване на закона за запазване на енергията $m_N \rightarrow m_N + m_\pi$. При еластично разсейване протонът няма откъде да вземе необходимата енергия за създаване на тази частица, затова процесът се нарича *виртуален*, законът за запазване на енергията се нарушава за време Δt и с енергия ΔE

$$\Delta E \Delta t \geq \hbar.$$

Ако родената частица се движи със скорост $v \sim c$ тя ще измине разстояние $R = c\Delta t$, и това разстояние дава порядъка на радиуса на действие на ядрените сили. Масата на частицата

$$m_\pi c^2 = \Delta E \geq \frac{\hbar c}{R} = \frac{197}{1,5} \left[\frac{\text{MeV}\cdot\text{fm}}{\text{fm}} \right] \sim 130 \text{ MeV}$$

Тук сме приели $R \sim 1,5 \text{ fm}$ и за масата на пиона се получава $\sim 130 \text{ MeV}$. Определените експериментално маси на трите пиона са 135 MeV ($273 m_0$) за заредените и $139,6 \text{ MeV}$ за неутралния. Както и при нуклеонния дублет, малката разлика в масите се дължи на различието им спрямо електромагнитното взаимодействие.