

ОСНОВНИ ПОНЯТИЯ

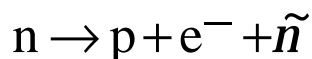
1. Съставни частици на ядрата – нуклеони

Протоните и неутроните, двете съставни частици на ядрата, са изградени от по три кварка - частици с дробен електричен заряд $(1/3)e$ или $(2/3)e$, където $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{C}$ б разновидности (аромата): u (up), d (down), c (charm), s (strange), t (truth), b (beauty), всеки от тях с античастица. Зарядът на u -кварка е $+(2/3)e$, а на d -кварка е $-(1/3)e$. Протонът се състои от два u -кварка и един d -кварк с общ заряд $2(2/3)e - (1/3)e = 1e$ Неутронът е съставен от един u -кварк и два d -кварка, чийто сумарен заряд е нула: $-2(1/3)e + (2/3)e = 0$. Протоните и неутроните взаимодействат помежду си чрез силното ядрено, електромагнитното и слабото взаимодействия

вид нуклеон	Маса	заряд	магнитен момент* (ядр.магнетони)
неутрон	$939,5527 \pm 0,0052 \text{ MeV}$	0	$-(1,913148 \pm 0,000066)$
	$1,00898 \text{ amu}$ $1838,5 m_0$		
протон	$938,2592 \pm 0,0052 \text{ MeV}$ $1,00759 \text{ amu}$ $1836 m_0$	$1 e$	$(2,792782 \pm 0,000017)$

Двата нуклеона имат аномално високи магнитни моменти: протонът има магнитен момент почти 3 ядрени магнетона вместо единица, а неутронът вместо нулев магнитен момент (като неутрална частица) има отрицателен и почти равен на два ядрени магнетона - кваркова структура.

Неутронът е нестабилна частица - разпада се под действие на слабото взаимодействие:



с период $T_{1/2} = 11,7$ минути.

Нуклеоните (протони и неутрони) имат спин $1/2 \mathbf{h}$ - фермиони - статистика на Ферми-Дирак. За тях е в сила принципа на Паули и това тяхно свойство съществено определя поведението им в ядрата.

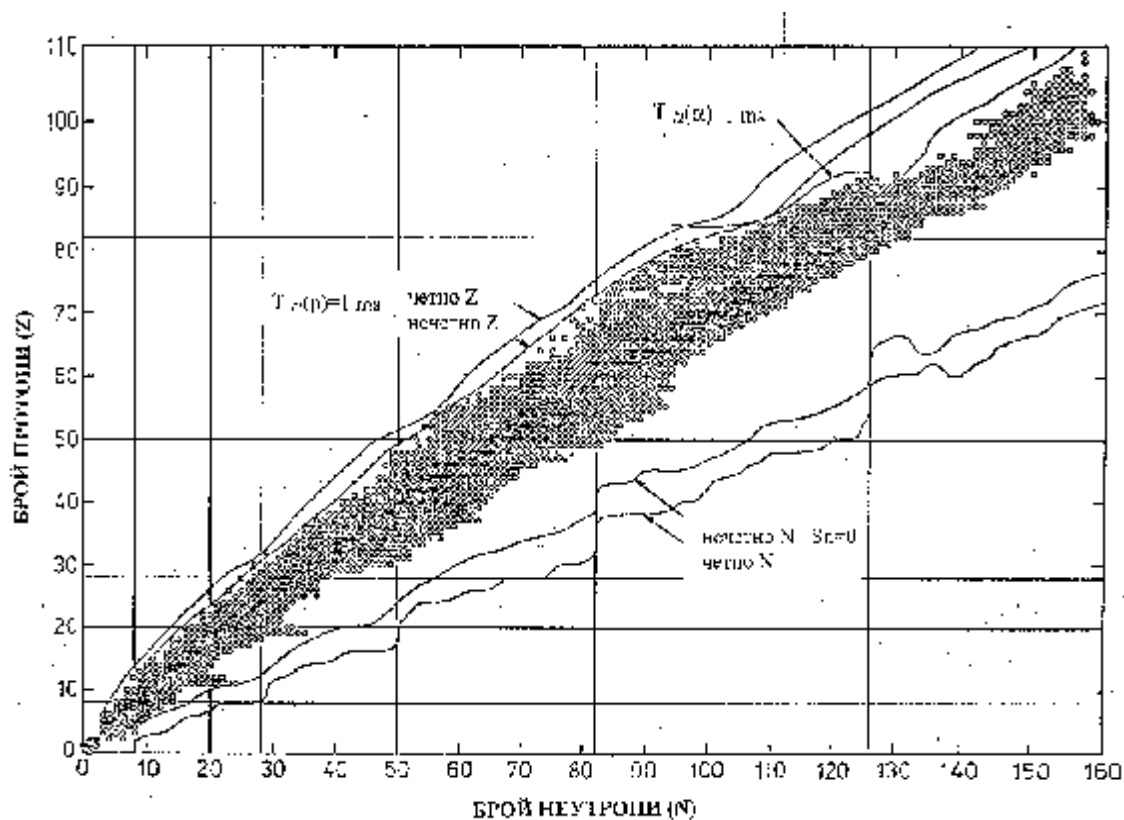
2. Основни понятия и означения

Масово число A (най-близкото до масата цяло число) - дава броя на нуклеоните от двата вида в едно ядро.

брой протони - Z , N - брой неутрони, $N = A - Z$

* Ядреният магнетон, с който се измерват магнитните моменти на ядрата, се дефинира аналогично на магнетона на Бор: $M_{\text{я}} = e\mathbf{h}/2m_{\text{р}}$, където $m_{\text{р}}$ е масата на протона. Вижда се, че ядреният магнетон е около 2000 по-малък от $M_{\text{в}}$, магнетона на Бор.

Диаграма на Сегре с координати N и Z . Плътните кръгчета са стабилните нуклиди - "пътечка" около т.нар. линия на стабилност.



Изотопи - ядра с еднакъв атомен номер, но различен брой неутрони - ядрата по сечението $Z = \text{const}$

Изотони - ядра с един и същ брой неутрони – ядрата по сечението $N = \text{const}$

Изобари - ядра с еднакво масово число - сечението $A = \text{const}$ се намира под 45° спрямо двете оси N и Z

3. Размери на ядрата

От опитите на Ръдърфорд е известно, че размерите на ядрата са с пет порядъка по-малки от размерите на атомите ($R_{\text{ат}} \sim 10^{-10}$ m). Установено е, че радиусите на ядрата са

$$R = r_0 A^{1/3}$$

$$r_0 = 1,2 \text{ fm}, 1 \text{ fm} = 10^{-15} \text{ m}$$

$$V_{\text{яд}}/V_{\text{ат}} \approx 10^{-15}$$

Ядрото е изключително плътна среда – около $2 \cdot 10^8 \text{ t/cm}^3$

Обемът на ядрото е пропорционален на броя на нуклеоните A - с

увеличаване на броя им расте обема, а не плътността, която остава постоянна – това е следствие от свойството на насищане на ядрените сили

4. Маса на основното състояние и енергия на свързване

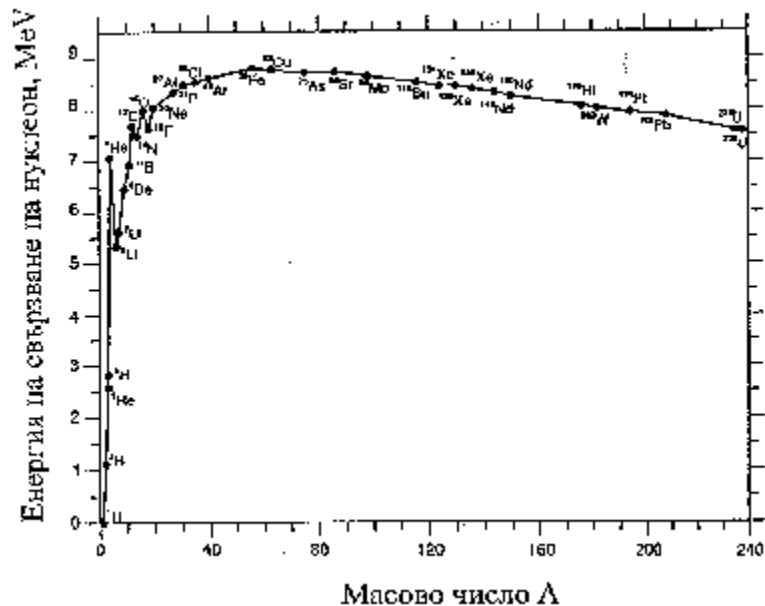
$$M_{\text{я}}(Z,A) = Zm_{\text{p}} + (A - Z)m_{\text{n}} - B/c^2$$

m_{p} и m_{n} -маси на протона и на неутрона, B е енергията на свързване на ядрото – енергията за разделяне на съставните нуклеони. Енергията на свързване се определя от масата на ядрото - експериментално измервана величина

$$B(Z,A) = [Zm_{\text{p}} + (A - Z)m_{\text{n}} - M_{\text{я}}(Z,A)]c^2$$

специфична енергия на свързване $\epsilon = B/A$,

- средна енергия на свързване на нуклеон в ядрото



Специфичната енергия на свързване остава почти постоянна за болшинството ядра - следствие от късия радиус на действие на ядрените сили: всеки нуклеон взаимодейства само с най-близките си съседи. Ако всеки нуклеон взаимодейства с всички останали нуклеони в ядрото, на брой $A - 1$, енергията на свързване B трябва да е пропорционална на $A(A - 1)$, $\epsilon = B/A$ трябваше да расте линейно с A .

Разликата между истинската маса и масовото число се изразява чрез величината *масов излишък*

$$DM_{\text{ат}}(Z,A) = M_{\text{ат}}(Z,A) - A$$

опаковъчен коефициент, $f = (M - A)/A = DM/A$ - масов излишък на един нуклеон. За ядра с $20 < A < 200$ опаковъчният коефициент е отрицателен

5. Приложения на енергията на свързване

Енергия за отделяне на частица (p, n, α -частица)

Тя представлява енергията, необходима да се извлече един протон $S_p(A, Z)$, един неутрон $S_n(Z, A)$ или α -частица $S_\alpha(A, Z)$ от ядрото - аналогична на енергията на йонизация в атомите

Енергията за отделяне на протон се получава (от ф-лата на Тейлор) чрез разликата в енергията на свързване за две ядра, чийто брой протони се различава с единица:

$$S_p = \frac{\partial B(A, Z)}{\partial Z} \Delta Z = \frac{\Delta B}{\Delta Z},$$

$$[M(Z-1, N) + m_p - M(Z, N)]c^2 = B(Z, N) - B(Z-1, N) = \Delta B / \Delta Z \text{ при } \Delta Z = 1.$$

Енергия на отделяне на неутрон

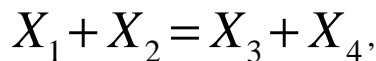
$$S_n = \frac{\partial B(A, Z)}{\partial N} \Delta N = \frac{\Delta B}{\Delta N}$$

Енергия на отделяне на α -частица

$$S_\alpha = \frac{\partial B(A, Z)}{\partial Z} \Delta Z + \frac{\partial B(A, Z)}{\partial A} \Delta A = 2 \frac{\partial B(A, Z)}{\partial Z} + 4 \frac{\partial B(A, Z)}{\partial A}$$

Линните $S_p(A, Z) = 0$ и $S_n(Z, A) = 0$ в диаграмата на Сегре показват докъде е възможно съществуването на ядра (Z при фиксирано N или N при фиксирано Z), макар и нестабилни спрямо β - или друг вид разпадане. Извън тези граници, при $S_p < 0$, $S_n < 0$ и $S_\alpha < 0$, времената на живот на ядрата са от порядъка на 10^{-23} s, такива ядра не могат да задържат последния добавен протон или неутрон.

Енергия на реакцията Q
Ядрената реакция



включва четири частици – две начални и две продукти на реакцията, всяка от които с маса M_i ($i = 1, 2, 3, 4$). Пълната енергия на системата трябва да се запазва

$$E = (M_1 + M_2)c^2 + T_1 + T_2 = (M_3 + M_4)c^2 + T_3 + T_4 = \text{const}$$

T_i - кинетична енергия на ядрото или частицата i

полагаме $[M_1 + M_2 - (M_3 + M_4)]c^2 = Q$

разликата в масите на входните и изходните частици в реакцията определя енергията на реакцията Q

Q може да се изрази и чрез енергиите на свързване

$$Q = B_3 + B_4 - (B_1 + B_2)$$

$Q = 0$ – еластично разсейване, когато частиците X_1 и X_2 след реакцията са същите, но с променени кинетични енергии.

$Q < 0$ – реакцията е *ендоенергетична*. Тя не може да се извърши, ако във входния канал на реакцията не се внесе енергия под формата на кинетична енергия на бомбардиращата частица. В системата на център на масите (СЦМ) минималната кинетична енергия за осъществяване на реакцията е Q . Тази реакция е *прагова* - бомбардиращата частица трябва да има някаква минимална кинетична енергия (в лабораторна координатна система), за да се извърши реакцията.

$Q > 0$ – реакцията е *екзоенергетична*. При $A < 20$ и $A > 200$ са възможни екзоенергетични реакции, използвани за източник на енергия – реакцията на *делене* на едно тежко ядро на две ядра със средни маси и реакцията на *сливане* на две леки ядра. И в двата случая средната енергия на свързване на нуклеон за продуктите на реакцията е по-голяма от специфичната енергия на свързване за началните частици.

Случай на делене:

$$\begin{aligned} Q_{\text{дел}} &= [M(A, Z) - M(A_1, Z_1) - M(A_2, Z_2)]c^2 = \\ &= B_1 + B_2 - B = A(\epsilon_1 A_1 + \epsilon_2 A_2) / (A_1 + A_2) - \epsilon A = A(\bar{\epsilon} - \epsilon) > 0 \end{aligned}$$

Тук $\bar{\epsilon}$ е средното тегловно

$$\bar{\epsilon} = (\epsilon_1 A_1 + \epsilon_2 A_2) / (A_1 + A_2).$$

при деленето на ^{235}U средната енергия на нуклеон минава от $\epsilon = 7,6$ MeV до около $\bar{\epsilon} = 8,5$ MeV. При такова делене трябва да се отдели енергия $E_{\text{дел}} = (8,5 - 7,6) \cdot 235 = 211$ MeV - около 1/1000 от масата в покой на ядрото, което се дели.

Случай на сливане:

$$\begin{aligned} Q_{\text{сл}} &= [M(A_1, Z_1) + M(A_2, Z_2) - M(A, Z)]c^2 = \\ &= B - (B_1 + B_2) = \epsilon A - A(\epsilon_1 A_1 + \epsilon_2 A_2) / (A_1 + A_2) = A(\epsilon - \bar{\epsilon}) > 0 \end{aligned}$$

Опаковъчният коефициент $f = (M - A)/A$ и масовият излишък са положителни в областите на тези два типа реакции, т.е. при $A < 20$ е възможно сливането, а при $A > 200$ – деленето. В случаите, когато f е отрицателно, деленето и ядрения синтез са възможни само при внасяне на достатъчно висока енергия, например чрез много висока кинетична енергия на бомбардираща частица.