

Лекция 13

«Свойства ядерных сил. Модели ядер»

1. Свойства ядерных сил
2. Общие характеристики моделей ядер
3. Капельная модель ядра
4. Применение капельной модели ядра

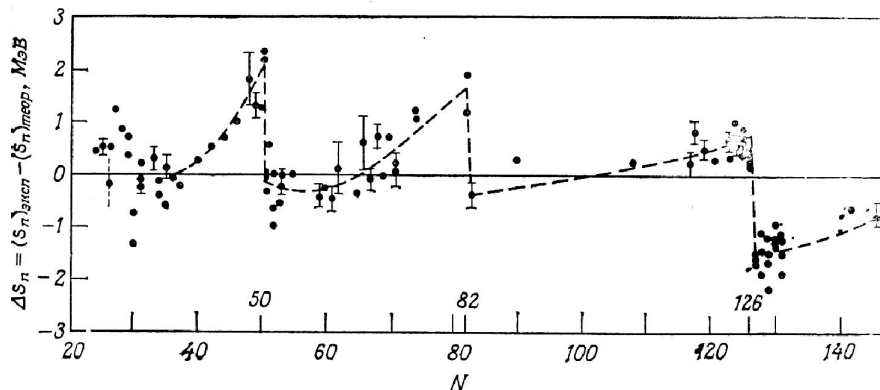
Свойства ядерных сил

При построении моделей ядра необходимо учитывать свойства сил, удерживающих протоны и нейтроны внутри ядра. Общей теории ядерных сил до сих пор не создано. Экспериментальные данные указывают на отдельные свойства ядерных сил. Часто свойства оказываются противоречивыми, чтобы создать одну модель, учитывающую все характеристики взаимодействия внутри ядра.

Ядерные силы – короткодействующие. Это следует из постоянства

удельной энергии связи ядра $\varepsilon = \frac{E_{св}}{A} \approx const$. Величина ε остается

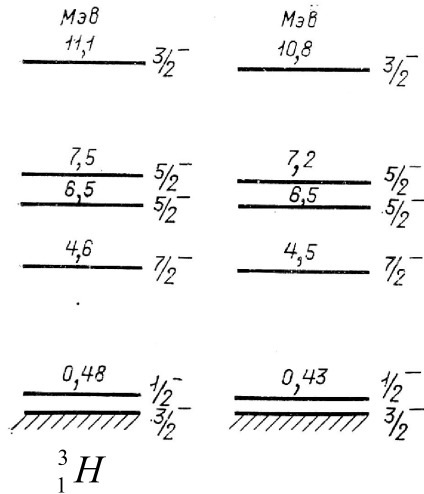
постоянной около $8 \text{ МэВ} / \text{нукл}$ для больших ядер. Такое поведение энергии связи также указывает на насыщение ядерных сил.



Существование магических ядер с увеличенной энергией связи при определенном числе нуклонов ($A = 8; 20; 50; 82; \dots$) указывает на наличие внутри ядра оболочечной структуры с увеличенной прочностью ядер.

Свойства ядерных сил

Ядерные силы оказываются зарядово-независимыми. Экспериментально установлено, что парная энергия связи двух нуклонов $\epsilon_{св}^{pp} \approx \epsilon_{св}^{pn} \approx \epsilon_{св}^{nn}$ за



счет взаимодействия остается практически одинаковой, за вычетом поправки на кулоновское отталкивание.

На это указывает одинаковая структура уровней зеркальных ядер (число протонов одного ядра равно числу нейтронов другого ядра, при

одинаковом массовом числе A : ${}^3_1\text{H}$ и ${}^3_2\text{He}$).

Внутри ядра происходит парное спаривание нуклонов с компенсацией динамических характеристик, таких как спины, магнитные моменты. Для самых тяжелых ядер суммарные моменты (спины) не превышают $I \leq \frac{11}{2} \hbar$

Ядерные силы имеют сложный тензорный характер (не центральный).

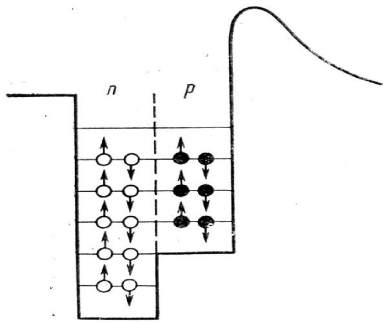
Связанная система	Нет связанной системы	
<p>l $S=1$ n $Q>0$</p>	<p>$S=0$ $Q<0$</p>	<p>l $S=0$ n $Q>0$</p>

Свойства ядерных сил

Ядерные силы зависят от спин - орбитального взаимодействия нуклонов. Оказывается, что $\Delta E_{\uparrow\uparrow}(SI) > \Delta E_{\uparrow\downarrow}(SI)$ - при параллельном направлении спина и момента, энергия связи нуклона оказывается больше.

Ядерные силы носят локальный обменный характер. Переносчиком выступает виртуальный π -мезон с радиусом дальнего действия порядка 1 ферми ($\sim 1\text{ф}$).

Существует симметрия между числом протонов и нейтронов.



Реально, с учетом кулоновского взаимодействия, уменьшающего внутреннюю энергию протонов, получается поднятие “дна” потенциала, что приводит к уменьшению числа протонов для стабильных ядер.

Плотность нуклонов внутри ядра остается практически постоянной – подобно состоянию капли вещества

$$\rho = \frac{M_{\text{яд}}}{V_{\text{яд}}} = \frac{m_N \cdot N}{\frac{4}{3}\pi(r_0 \cdot A^{\frac{1}{3}})^3} = \frac{N}{\frac{4}{3}\pi \cdot r_0^3}$$

$$\rho \approx 10^{14} \text{ г/см}^3$$

Общие характеристики моделей ядер

Модели ядер можно условно разделить на два класса: с сильной связью между частицами и независимым движением частиц внутри ядра.

К первому классу относится капельная модель, с короткодействующим сильным взаимодействием частиц на маленьких расстояниях r по сравнению с размером самого ядра ($r \ll R_{яд}$). Пробег взаимодействия (L) частиц внутри ядра, также предполагается маленьким ($L \ll R_{яд}$). Состояние нуклона определяется только нуклонами его ближайшего окружения.

Эта модель объясняют энергетические характеристики ядра: возможность распада, деления, устойчивость ядер, энергию связи и др.

В модели независимых частиц предполагается, что отдельные нуклоны свободно движутся (по оболочкам) в усредненном потенциальном поле, образованном всеми частицами ядра. Пробег взаимодействия частиц получается большим ($L \gg R_{яд}$). Большой пробег частиц для низкого состояния по энергии обусловлен принципом Паули для фермионов.

Эта модель объясняет динамические характеристики ядра - спин ядра, четность энергетических уровней, магнитный момент.

Капельная модель ядра

Короткодействующие силы и их насыщение указывает на адекватность представления ядер в виде капли, состоящей из отдельных фрагментов – нуклонов. На основе капельной модели построена полуэмпирическая формула для энергии связи ядра (формула Вайцзеккера):

$$E_{св}(A, Z) = \alpha \cdot A - \beta \cdot A^{\frac{2}{3}} - \gamma \frac{Z^2}{A^{\frac{1}{3}}} - \xi \frac{(Z - \frac{A}{2})^2}{A} + \frac{\delta \cdot \eta}{A^{\frac{3}{4}}}$$

$+\alpha \cdot A$ - указывает на постоянство удельной энергии связи

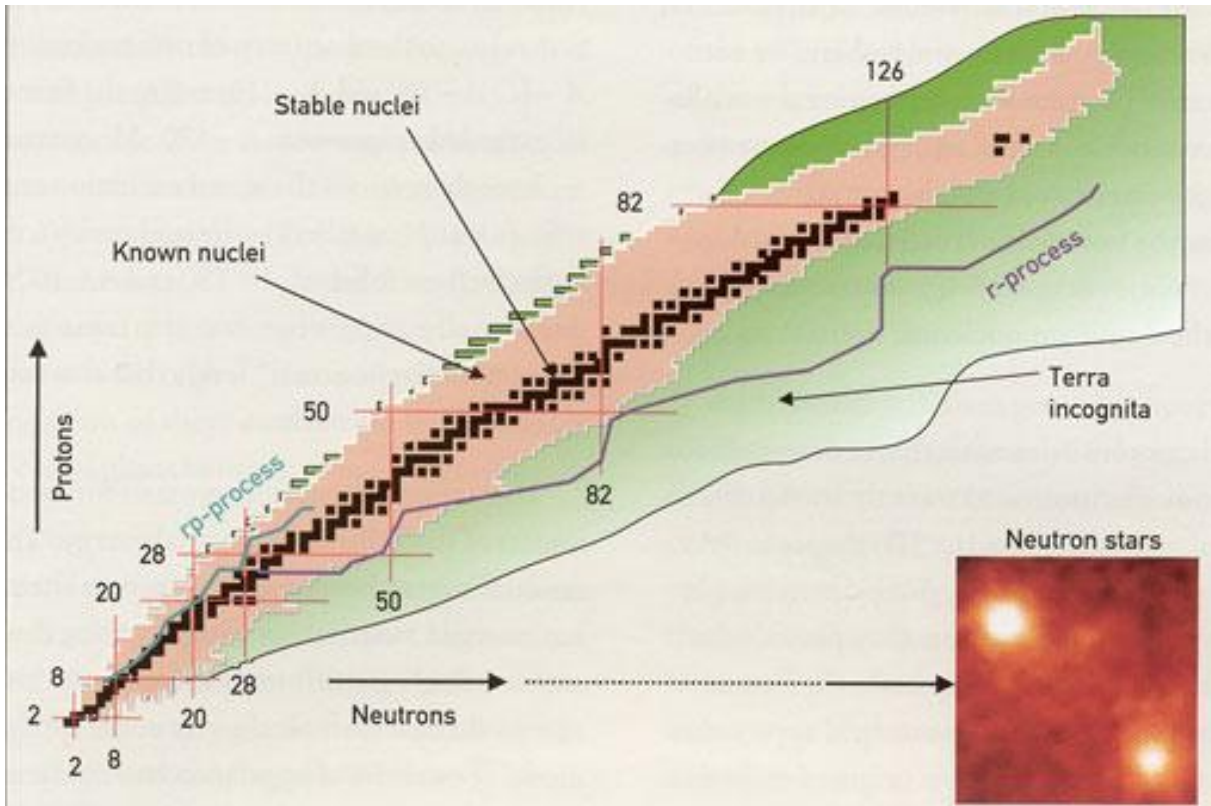
$-\beta \cdot A^{2/3}$ -ослабление энергии связи поверхностных нуклонов $S_{нов} \sim R^2 \sim (A^{1/3})^2 \sim A^{2/3}$
за счет «оголения» (не заполненности связей) у поверхностных нуклонов;

$-\gamma \frac{Z^2}{A^{2/3}}$ - ослабление энергии связи за счет кулоновской энергии равномерно

заряженной сферы радиуса R : $U_{кул} \sim \frac{Z(Z-1)}{R} \sim \frac{Z^2}{A^{1/3}}$

$-\xi \frac{(Z - \frac{A}{2})^2}{A}$ ослабление энергии при неравенстве числа протонов и нейтронов $Z \neq \frac{A}{2}$

$+\delta_0 \frac{\eta}{A^{3/4}}$ - учитывает изменения энергии связи для четно-нечетных ядер



Применение капельной модели ядра

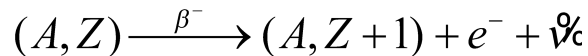
$$E_{\text{св}}(A, Z) = \alpha \times A - \beta \times A^{\frac{2}{3}} - \gamma \frac{Z^2}{A^{\frac{1}{3}}} - \xi \frac{(Z - \frac{A}{2})^2}{A} + \frac{\delta \times \eta}{A^{\frac{3}{4}}}$$

Коэффициенты (МэВ): $\alpha = 15,75$; $\beta = 17,8$; $\gamma = 0,71$; $\xi = 94$; $\eta = 34$ получены методом наилучшего согласия кривой удельной энергии связи $\varepsilon(A, Z)$ для всего диапазона ядер A .

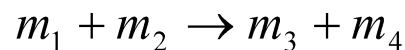
Из $E_{\text{св}}(A, Z)$ можно получить связь между A и Z для максимальной прочности ядер. Проведя дифференцирование $(\frac{\partial E_{\text{св}}}{\partial Z})_A = 0$

получаем $Z_{\text{уст}} = \frac{A}{2 + 0.015 \cdot A^{2/3}}$

Отклонения ядер (A, Z) от $Z_{\text{уст}}$ приводит к β^+ - или β^- - распадам ядер, например



Можно рассчитать энергию Q и порог реакции T_{min}



$$Q = (m_1 + m_2) \cdot c^2 - (m_3 + m_4) \cdot c^2$$

$$T_{\text{min}} = |Q| \cdot \left(1 + \frac{m_1}{m_2}\right)$$

Массы ядер вычисляются по формуле

$$M_i = Z \cdot m_p + (A - Z) \cdot m_n - E_{\text{св}}(A, Z)$$

Применение капельной модели ядра

Капельная модель используется в теории ядерных реакций при невысоких энергиях, для объяснения характеристик долгоживущего промежуточного ядра O^* и энергетического поведения сечений различных процессов для отдельных каналов распада ядра O^* .

Модель также используется для оценки устойчивости ядер.

Модель хорошо объясняет энергетические характеристики реакций синтеза и деления ядер.

В соответствии с капельной моделью при $A \approx 300$ энергия связи стремится к нулю, что ограничивает таблицу Менделеева по числу ядерно-устойчивых элементов в природе.

Дефект массы ядра

Масса ядра

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

$$E_{\text{св}}(A, Z) = \alpha \times A - \beta \times A^{\frac{2}{3}} - \gamma \frac{Z^2}{A^{\frac{1}{3}}} - \xi \frac{(Z - \frac{A}{2})^2}{A} + \frac{\delta \times \eta}{A^{\frac{3}{4}}}$$

Дефект массы ядра:

$$D(A, Z) = M(A, Z)c^2 - 1aeE \times A$$

$$M(A, Z)c^2 - 1aeE \times A + D(A, Z) = 931 \times A(\quad) + (\quad , \quad)$$

$$m_1 + m_2 \rightarrow m_3 + m_4$$

$$Q = (m_1 + m_2) \cdot c^2 - (m_3 + m_4) \cdot c^2$$

Энергия реакции

$$Q = D(A_1 Z_1) + D(A_2 Z_2) - [D(A_3 Z_3) + D(A_4 Z_4)]$$

Значения $D(A, Z)$ - табулированы (см. приложение к задачку)