

АТОМНОЕ ЯДРО СОСТАВ АТОМНОГО ЯДРА И ЕГО ХАРАКТЕРИСТИКИ

Экспериментально установлено, что атомное ядро состоит из протонов и нейтронов, которые имеют общее название – **нуклоны**.

Протон (p) – элементарная частица, обладающая положительным элементарным зарядом $|e| = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл, масса которой $m_p = 1,00728$ а.е.м.

Нейтрон (n) – элементарная частица, не имеющая электрического заряда, масса которой $m_n = 1,00866$ а.е.м.

Зарядовое число Z ядра равно количеству протонов, содержащихся в нем, и определяет заряд ядра $q_{\text{я}} = Z|e|$.

Массовое число A ядра равно количеству нуклонов (протонов и нейтронов) содержащихся в нем.

Число N нейтронов в ядре равно

$$N = A - Z.$$

Символически характеристики ядра химического элемента X обозначаются так:

$${}^A_Z X.$$

В физике ядра и элементарных частиц широко используется ряд внесистемных единиц. Масса частиц может измеряться как в абсолютной (кг, г), так и в относительной мере – атомных единицах массы ($1 \text{ а.е.м.} = 1,66 \cdot 10^{-27}$ кг). Массы частиц также часто относят к массе электрона $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31}$ кг или $5,486 \cdot 10^{-4}$ а. е. м.

В качестве внесистемной единицы энергии широко используется единица энергии, называемая электрон-вольт: $1 \text{ эВ} = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Дж. Используя соотношение Эйнштейна между массой m объекта и его энергией покоя $E_0 = mc^2$, массу можно выразить в единицах энергии электрон-вольтах:

$$E_0 = 1,6605 \cdot 10^{-27} \text{ кг} \cdot 2,998^2 \cdot 10^{16} \text{ м}^2/\text{с}^2 = 14,9246 \cdot 10^{-11} \text{ Дж} = 931,50 \text{ МэВ.} \Rightarrow \\ 1 \text{ а. е. м.} = 931,5 \text{ МэВ}/c^2.$$

Массы всех ядер, за исключением ядра водорода, меньше, чем массы образующих их протонов и нейтронов в свободном состоянии. Величина этой разности масс характеризует степень связи нуклонов в данном ядре. Ее называют дефектом масс.

Дефект масс – это разность между суммарной массой всех нуклонов ядра в свободном состоянии и массой ядра:

$$\Delta m = Zm_p + (A - Z)m_n - m_{\text{я}}.$$

Энергия связи $E_{\text{св}}$ ядра – это минимальная работа, которую необходимо совершить против действия ядерных сил притяжения между нуклонами для разделения ядра на составляющие его свободные нуклоны. Учитывая взаимосвязь энергии покоя частицы с ее массой ($E_0 = mc^2$, где c – скорость света в вакууме), энергия связи $E_{\text{св}}$ ядра ${}^A_Z X$ может быть вычислена по формуле:

$$E_{\text{св}} = \Delta mc^2 = (Zm_p + (A - Z)m_n - m_{\text{я}})c^2. \quad (1)$$

Энергия связи, приходящаяся в среднем на один нуклон ядра, называется **удельной энергией связи $\varepsilon_{\text{св}}$** :

$$\varepsilon_{\text{св}} = \frac{E_{\text{св}}}{A},$$

где $E_{\text{св}}$ – энергия связи ядра, A – его массовое число.

Ядра с одинаковым числом протонов Z , отличающиеся числом нейтронов, называются **изотопами**. Например изотопы водорода: ${}^1\text{H}_1$ – водород, ${}^2\text{H}_1$ – дейтерий, ${}^3\text{H}_1$ – тритий; изотопы урана: ${}^{235}\text{U}_{92}$, ${}^{238}\text{U}_{92}$ и др.

Химические свойства всех изотопов одного и того же элемента одинаковы, т. к. зависят только от числа протонов в ядре. **Физические** свойства изотопов могут сильно отличаться. Например, йод есть нерадиоактивный и радиоактивный.

Всего известно около 300 устойчивых изотопов. Элементов в таблице Менделеева около 110.

Размеры ядра. Ядро можно примерно считать шаром радиуса

$$R = R_0 A^{1/3},$$

где $R_0 = (1,3 \div 1,7) \cdot 10^{-15}$ м, A – массовое число. Для ядра водорода (протон) $R = R_0$.

Нуклоны являются **фермионами** и имеют спин, равный $1/2$. Спин ядра является их векторной суммой и квантуется по известному правилу

$$L_{\text{я}} = \hbar \sqrt{j(j+1)},$$

где $j = 0, 1/2, 1, 3/2, \dots$, j – *внутреннее* (полное) *спиновое* квантовое число.

Ядра с четным A имеют целочисленный спин в единицах \hbar (бозоны), с нечетным A – полуцелый спин (фермионы). Спины нуклонов располагаются антипараллельно и в основном компенсируют друг друга.

Нуклоны имеют собственные магнитные моменты, из которых складывается собственный магнитный момент ядра.

Единицей магнитных моментов является ядерный магнетон

$$\mu_{\text{я}} = \frac{e\hbar}{2m_{\text{p}}},$$

где m_{p} – масса протона. Так как $m_{\text{p}} = 1836m_{\text{e}}$, то ядерный магнетон в 1836 раз меньше магнетона Бора (для электронов). Отсюда следует, что магнитные свойства атомов определяются магнитными свойствами его электронов.

ЯДЕРНЫЕ СИЛЫ

Между составляющими ядро нуклонами действуют особые, специфические для ядра силы, значительно превышающие кулоновские силы отталкивания между протонами. Они называются **ядерными силами**.

С помощью экспериментальных данных доказано, что ядерные силы намного превышают гравитационные (в 10^{38} раз), электрические и магнитные и не сводятся к ним. Они относятся к классу так называемых **сильных взаимодействий**.

Основные свойства ядерных сил:

1. Являются силами *притяжения*.
2. Являются *короткодействующими* – их действие проявляется на расстояниях $\sim 10^{-15}$ м. При увеличении расстояния между нуклонами ядерные силы быстро уменьшаются до нуля, а при расстояниях меньше их радиуса действия оказываются в несколько раз больше электрических сил действующих между протонами на том же расстоянии.

3. Ядерным силам свойственна *зарядовая независимость*, т.е. эти силы, существуют между частицами (нуклонами) не зависимо от их знака (протон-протон, протон-нейтрон, нейтрон-нейтрон – одинаковы по величине). То есть ядерные силы имеют не электрическую природу.
4. Ядерным силам свойственно *насыщение*, т.е. каждая частица, может взаимодействовать только с определенным числом ближайших нуклонов составляющих ядро.
5. Ядерные силы зависят от *взаимной ориентации спинов* взаимодействующих нуклонов.
6. Ядерные силы *не являются центральными*, т.е. действующими по линии соединяющей центры взаимодействующих нуклонов.

Сложный характер ядерных сил и трудности точного расчета не позволили до настоящего времени разработать единую теорию атомного ядра.

- В 1934 году Х. Юкава предсказал новую частицу – квант ядерного поля. Согласно гипотезе Юкава взаимодействие между нуклонами возникает в результате испускания и поглощения этих частиц. Они определяют ядерное поле по аналогии с электромагнитным полем, которое возникает как следствие обмена фотонами.
- Принимая во внимание известные факты, что ядерные силы – короткодействующие и имеют характерный радиус действия ~ 1 Фм, Юкава оценил массу квантов ядерного поля ~ 200 МэВ. Предсказанная Юкавой частица должна была занимать по массе промежуточное значение между электроном и протоном и была названа мезоном от греческого слова *mesos* – средний. После предсказания свойств мезона начались энергичные поиски этой частицы.
- В 1947 году в космических лучах была обнаружена частица, которая сильно взаимодействовала с протонами и нейтронами и была той самой частицей, которую предсказал Юкава. Ее назвали π -мезоном или пионом. Существует три разновидности π -мезонов: отрицательно заряженный π^- -мезон с массой ~ 140 МэВ, его положительно заряженная античастица π^+ -мезон, и нейтральный π^0 -мезон с массой ~ 135 МэВ.
- Все три частицы нестабильны. Время жизни π^- и π^+ -мезонов составляет $2,6 \cdot 10^{-8}$ с, π^0 -мезона – $0,8 \cdot 10^{-16}$ с.

Подавляющая часть π - мезонов распадается.

В НАСТОЯЩЕЕ ВРЕМЯ УЧЕНЫЕ ИСПОЛЬЗУЮТ МОДЕЛИ ЯДРА:

1. Капельную;
2. Оболочечную;
3. Оптическую.

Согласно *капельной* модели ядро представляет каплю заряженной «жидкости» с очень большой плотностью $\rho \approx 10^{17}$ кг/м³. Как и в капле, ее поверхность может колебаться и если амплитуда колебаний становится большой, ядро может развалиться, происходит процесс деления ядра. Капельная модель позволяет получить формулу для энергии связи ядра, понять механизм некоторых ядерных реакций. Но она не позволяет объяснить все.

Например, почему ядра с числом протонов или (и) нейтронов равным 2, 8, 20, 28, 50, 82, 126 являются особенно устойчивыми (*магические* и *дважды магические* числа и ядра).

Оболочечная модель. Здесь предполагается, что каждый нуклон в ядре движется в потенциальном поле, созданном другими нуклонами. Глубина потенциальной ямы 40–50 МэВ, не зависит от числа нуклонов. Энергия нуклонов в ядре квантуется. Нуклоны в ядре могут находиться в основном и в возбужденном состоянии, т. е. располагаться на определенных энергетических уровнях. Группы близких уровней образуют оболочки. Ядра с полностью заполненными протонами или нейтронами внешними оболочками являются устойчивыми и их называют *магическими*. Ядра магические по протонам и нейтронам – *дважды магические* и являются особо устойчивыми.

Обобщенная модель ядра. Здесь попытались объединить капельную и оболочечную модели ядра.

Предлагается считать, что внутренняя и устойчивая часть ядра (остов) состоит из нуклонов и описывается гидродинамической (капельной) моделью, а внешние нуклоны движутся в поле остова и их движение описывается оболочечной моделью.

Оптическая модель была сформулирована В. Вайскопфом, Г. Фешбахом и другими в 1950 – 1954 гг. Основные положения этой модели сводятся к следующему.

Нуклоны, образующие тяжелое ядро, можно подразделить на две группы. Одна группа нуклонов образует внутренние замкнутые слои и, следовательно, расположена далеко от границы Ферми (от сферического уровня, соответствующего энергии Ферми $\varepsilon_F = \frac{p_F^2}{2m}$). Другую группу образуют внешние нуклоны, расположенные вблизи границы Ферми.

Нуклоны ядра, образующие первую группу, не могут получить энергию от внешнего нуклона, пролетающего через ядро, так как его энергия недостаточна для того, чтобы перевести эти нуклоны на более высокие незанятые уровни.

Поэтому существует заметная вероятность того, что нуклон пройдет через ядро без потери энергии, а лишь изменит направление своего импульса. Такое взаимодействие нуклона с ядром можно рассматривать как упругое рассеяние.

Внешние нуклоны, образующие вторую группу, ведут себя иначе: они могут принять на себя энергию влетевшего нуклона и перейти на более высокие незанятые энергетические уровни. Влетевший нуклон, передав свою энергию нуклонам ядра, может остаться в ядре, иначе говоря, поглотится ядром, в результате чего образуется промежуточное ядро.

Эти модели позволяют объяснить механизм ядерных реакций, формулу для $E_{св}$, объяснить спины и магнитные моменты ядер, различную устойчивость и периодичность изменения свойств, но полного представления о ядерных взаимодействиях нуклонов пока нет.