

Тема 4.4-4.5. Молекула. Атомное ядро

Состав и характеристика атомного ядра

Д.Д.Иваненко выдвинул, а В.Гейзенберг развил идею о том, что ядро состоит из протонов (p) и нейтронов (n). Эти частицы носят общее название – нуклоны. Протон представляет собой ядро атома водорода. Его масса (m_p) равна: $m_p = 938,2$ Мэв. Массу частиц в ядерной физике выражают в единицах энергии, умножая массу на квадрат скорости света. Если массу выражать в СИ (кг), то эта величина будет очень маленькой, например, масса протона в этой системе равна $1,67265 \cdot 10^{-27}$ кг. Масса протона в 1836 раз больше массы электрона ($m_e = 0,511$ Мэв). Заряд протона равен $+1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл, то есть по абсолютной величине равен заряду электрона.

Протон характеризуют спином (s), который равен $s = 1/2$, и собственным магнитным μ_p моментом:

$$\mu_p = +2,79\mu_0,$$

где μ_0 – ядерный магнетон:

$$\mu_0 = \frac{e \cdot \hbar}{2 \cdot m_p c} = 5,05 \cdot 10^{-24} \text{ Дж/Тл}.$$

Нейтрон обладает массой: $m_n = 939,5$ Мэв, то есть на 1,3 Мэв больше, чем m_p . Заряд нейтрона равен нулю. Спин нейтрона $s = 1/2$; магнитный момент $\mu_n = -1,91 \mu_0$, то есть магнитный момент нейтрона меньше магнитного момента протона и, кроме этого, μ_n отрицателен.

Большое значение магнитного момента у протона в сравнении с единицей ядерного магнитного момента – ядерным магнетоном, а также наличие существенного магнитного момента у электрически нейтрального нейтрона оказались неожиданными экспериментальными фактами. Эти факты стали понятны, когда была установлена природа ядерных сил.

Объем ядра ничтожно мал в сравнении с объемом атома и составляет примерно 10^{-15} часть от объема атома. Радиус ядра равен $(2 - 10) \cdot 10^{-15}$ м.

Величину 10^{-15} м называют "ферми" и обозначают Ф. Масса ядра почти в 2000 раз больше массы электронов атома. Плотность вещества в ядре составляет около $2 \cdot 10^{14}$ г/см³, а в отдельном нуклоне – $7,5 \cdot 10^{14}$ г/см³. Таким образом, ядро на 1/3 заполнено веществом, а атом за пределами ядра практически "пустой". Поскольку нуклоны взаимодействуют с ограниченным числом соседей, то размер ядра возрастает пропорционально $A^{1/3}$, где А – массовое число. Наличие у ядра магнитного момента приводит к возникновению взаимодействия между магнитным моментом ядра и магнитным моментом электронной оболочки, которое обуславливает сверхтонкое расщепление спектральных линий, составляющее сотые доли ангстрема. Для измерения ядерного магнитного момента используется явление магнитного резонанса: если поместить исследуемое вещество в электромагнитное поле, то при определенном значении частоты поля, называемой резонансной, ядра будут переходить из одного энергетического состояния в другое. Волны резонансной частоты будут поглощаться ядрами более интенсивно. Явление избирательного поглощения электромагнитного излучения, связанного с переходом ядер в другие энергетические состояния, называют ядерным магнитным резонансом (ЯМР). ЯМР используется для исследования структуры ядер, а также для исследования электронной оболочки вокруг ядра. При образовании различных химических соединений структура электронной оболочки изменяется. При этом изменяется магнитное поле электронной оболочки и, воздействуя на магнитный момент ядра, вызывает соответствующие смещения частот ЯМР.

Если в состав ядра входит большое количество протонов и нейтронов, то спины протонов и нейтронов попарно компенсируют друг друга. При четном и нечетном их количестве спин ядра может быть или целым числом, или равным нулю. Если количество протонов нечетно, а нейтронов четно или наоборот, то спин ядра есть число, кратное 1/2.

Энергия связи ядра

Масса ядра всегда меньше массы входящих в него нуклонов. Это обусловлено тем, что при объединении нуклонов выделяется энергия связи между ними. При этом между нуклонами возникают интенсивные силы притяжения (ядерные силы), которые совершают значительную работу, численно равную энергии связи ($E_{\text{св}}$) ядра. В процессе объединения нуклонов эта энергия выделяется, а значит, масса ядра ($m_{\text{я}}$) должна быть меньше, чем масса исходных изолированных протонов (m_{p}) и нейтронов (m_{n}):

$$m_{\text{я}} < \sum_1^Z m_{\text{p}} + \sum_1^{A-Z} m_{\text{n}}, \quad (3.1)$$

где A – массовое число, равное сумме нейтронов ($A-Z$) и протонов Z .

Выражение (3.1) вытекает из соотношения специальной теории относительности о взаимосвязи массы и энергии (E):

$$\Delta m \cdot c^2 = \Delta E. \quad (3.2)$$

Как следует из (3.1) и (3.2), уменьшение массы совокупности нуклонов ($\Delta m_{\text{p,n}}$), объединенных в ядро, составит :

$$\Delta m_{\text{p,n}} = E_{\text{св}}/c^2 = \Delta E/c^2. \quad (3.3)$$

Величину $\Delta m_{\text{p,n}}$ называют дефектом массы и обозначают буквой Δ . Массу ядра и энергию его связи в соответствии с выражениями (3.1) – (3.3) можно найти так:

$$m_{\text{я}} = Zm_{\text{p}} + (A - Z)m_{\text{n}} - \Delta = Zm_{\text{p}} + (A - Z)m_{\text{n}} - E_{\text{св}}/c^2, \quad (3.4)$$

$$E_{\text{св}} = \Delta \cdot c^2 = [Zm_{\text{p}} + (A - Z)m_{\text{n}} - m_{\text{я}}] \cdot c^2. \quad (3.5)$$

Поскольку чаще всего известны не массы ядер, а массы атомов (m_{a}), то формулу (3.5) можно переписать так:

$$E_{\text{св}} = [Zm_{\text{H}} + (A - Z)m_{\text{n}} - m_{\text{a}}] \cdot c^2, \quad (3.6)$$

где m_{H} – масса изотопа водорода ${}^1_1\text{H}$.

Формула (3.6) удобнее для практического использования, чем (3.5), но она менее точна, так как в ней не учитывается энергия связи электронов. Однако эта погрешность невелика, так как энергия связи на один нуклон составляет в среднем примерно 8 МэВ, а энергия связи электрона в миллион раз меньше – порядка 10 эВ. Как видно из формул (3.5) и (3.6), энергия связи ядра зависит от количества нуклонов. Опытным путем установлено, что при увеличении атомного номера $E_{\text{св}}$ в расчете на один нуклон изменяется так, как показано на рис.3.1.

$E_{\text{св}}$ на один нуклон с увеличением атомного номера вначале возрастает, а затем уменьшается. Наибольшее значение $E_{\text{св}}$ на один нуклон наблюдается для ядер атомов с массовым числом от 40 до 80. Следовательно, эти ядра должны быть наиболее устойчивыми.

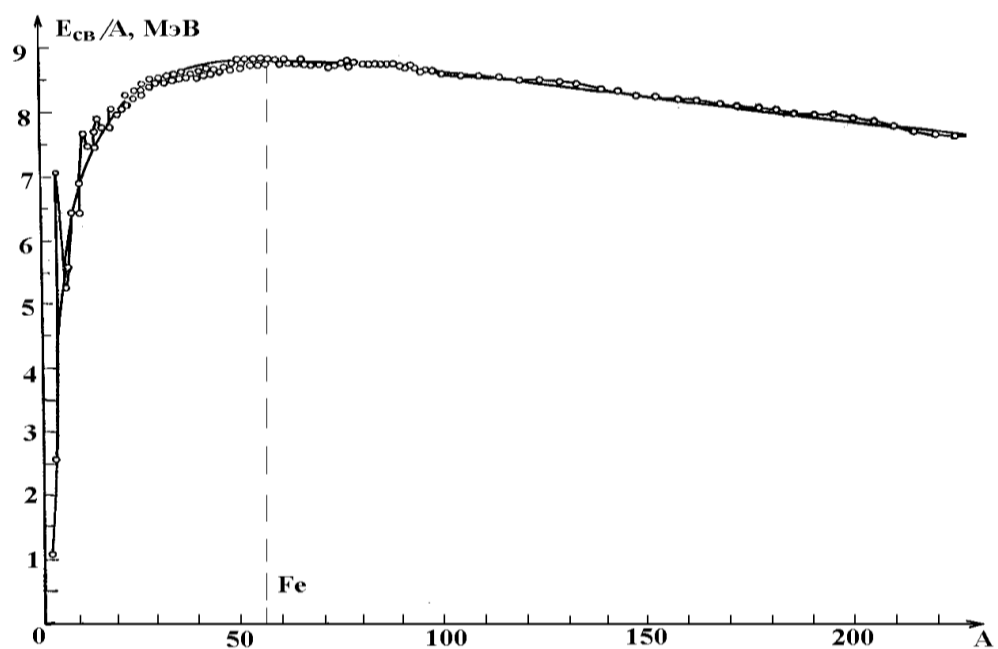


Рис.3.1.

Максимум на кривой $E_{\text{св}} = f(A)$ соответствует примерно массовому числу 56, то есть вблизи ядра железа. Понижение ядерной энергии связи при уменьшении A обусловлено тем, что у легких ядер связи нуклонов не достигают насыщения. С возрастанием A свыше 56 $E_{\text{св}}$ уменьшается по причине увеличения энергии отталкивания протонов в ядре. Кривая

изменения $E_{\text{св}}$ не монотонна, как это изображено на рис.3.1, а подвержена колебаниям. Наиболее существенны колебания $E_{\text{св}}$ на начальном этапе, что схематически показано на рис.3.1. Появление зубцов на кривой изменения энергии связи обусловлено ядрами, у которых число нейтронов либо протонов равно одному из чисел 2, 8, 20, 28, 50, 82, 126. Эти числа были названы магическими. Если в ядре магическими являются и число протонов, и число нейтронов, то оно называется дважды магическим. Таких ядер пять: ${}^4_2\text{He}$, ${}^{16}_8\text{O}$, ${}^{40}_{20}\text{Ca}$, ${}^{48}_{20}\text{Ca}$, ${}^{208}_{82}\text{Pb}$.

Ядерные силы

По современным представлениям ядерные частицы – нуклоны – образуют поле ядерных сил. Ядерное поле определяют как особую форму материи, обусловленную взаимодействием между нуклонами. Огромная энергия связи нуклонов свидетельствует о большой интенсивности ядерного взаимодействия, его называют сильным взаимодействием. Ядерные силы удерживают нуклоны на расстоянии примерно 10^{-15} м друг от друга, несмотря на сильное электростатическое отталкивание между протонами.

Опытным путем установлены следующие особенности ядерных сил:

1. Ядерные силы короткодействующие. Если расстояние между нуклонами превышает $2 \cdot 10^{-13}$ см, то взаимодействия между ними не обнаруживается. На расстоянии меньше 10^{-13} см действуют силы отталкивания.
2. Ядерные силы обладают зарядовой независимостью: ядерные силы, действующие между двумя протонами, нейтронами, а также между протоном и нейтроном, одинаковы.
3. Ядерные силы зависят от взаимной ориентации спинов нуклонов. Этот факт подтверждается опытами по рассеянию нейтронов, а также тем, что нейтрон и протон образуют дейтон лишь в том случае, если спины их параллельны. Зависимость ядерных сил от ориентации спинов

взаимодействующих нуклонов обуславливает отсутствие у них центральной симметрии.

4. Ядерные силы обладают свойством насыщения: каждый нуклон может взаимодействовать с ограниченным количеством нуклонов. Подтверждением свойства насыщения ядерных сил являются такие факторы: энергия связи на 1 нуклон у большинства ядер с разным количеством нуклонов примерно одинакова – 8 МэВ; объем ядра пропорционален количеству входящих в него нуклонов.

Способность ядерных сил к насыщению, по-видимому, можно считать следствием их короткодействия. Если принять, что за пределами радиуса действия сил притяжения между нуклонами возникают силы отталкивания, то эти силы препятствуют тому, чтобы в зону притяжения попало много нуклонов.

Модели ядра

Атомное ядро является сложной квантовой системой сильно взаимодействующих нуклонов. Решение задачи множества сильно взаимодействующих частиц в квантовой теории получить пока не удалось даже при использовании современной электронно-вычислительной техники. Для объяснения свойств ядер были разработаны модели, каждая из которых позволяет объяснить не весь комплекс свойств ядра, а лишь отдельные из них. Хронологически первой была предложена капельная модель М.Барном (1936г.), Я.И. Френкелем (1939г.) и развитая Н. Бором. В этой модели ядро было представлено в виде заряженной капли очень плотной жидкости. С течением времени капля может деформироваться и изменять форму. В пользу данной модели свидетельствуют два фактора: силы между молекулами воды и нуклонами в ядре являются короткодействующими; сжимаемость вещества в ядре и в капле жидкости очень маленькая. В то же время капелька воды и ядро существенно отличны: в ядре менее 300 частиц, связанных ядерными

силами, а в капле жидкости находятся миллиарды атомов, силы связи между которыми незначительны. Капельная модель позволила получить полуэмпирическую формулу для вычисления энергии связи ядра в зависимости от числа протонов и нейтронов, объяснить изменение формы и деление ядер, описать возбужденное состояние ядер.

В 1949-50 годах М.Гепперт-Майер и И.Х. Йенсен предложили оболочечную модель ядра. Данная модель предусматривает независимое движение каждого нуклона в самосогласованном поле других нуклонов. В ядре образуются по аналогии с атомом дискретные энергетические уровни. Нуклоны, обладая спином $s = 1/2$, как и электроны, заполняют эти уровни в соответствии с принципом Паули. Дискретные уровни объединены в оболочки, содержащие определенное число протонов и нейтронов. Заполненные оболочки представляют собой устойчивое образование. Оболочечная модель объясняет: периодичность строения легких невозбужденных ядер; наличие магических чисел и ядер, для которых характерны повышенное значение энергии связи и сферической симметрии, а также пониженная величина радиуса ядра; магнитные моменты основных и возбужденных состояний ядер. У описанных выше моделей есть существенные недостатки, например, капельная модель не позволяет объяснить наличие магических чисел, а оболочечная – деление ядер.

Достоинства оболочечной и капельной моделей включает обобщенная модель. В ней принято, что ядро содержит устойчивый остов, состоящий из заполненных оболочек, который ведет себя подобно капле жидкости. Внешние нуклоны незаполненной оболочки движутся в поле остова и могут его деформировать. Обобщенная модель объясняет: форму несферических ядер; наличие колебательных и вращательных уровней энергии; наличие уровней возбуждения, обусловленных внешними нуклонами, а также движением остова, состоящего из заполненных оболочек. Было предложено несколько модификаций обобщенной модели ядра, в которых движение

нуклонов незаполненных оболочек считается не независимым, а взаимосвязанным.

В 1936-37 годах Я.И.Френкель и Л.Д.Ландау предложили модель ядра, состоящую из ферми-газа нуклонов. Такое состояние в ядрах может возникнуть, если они находятся в очень сильном возбуждении: энергия возбуждения составляет около 7 МэВ. Ядра в этом состоянии можно описать с позиции статистики и термодинамики. Данную модель называют статистической. Она объясняет: уровни возбужденных ядер, вероятность испускания соответствующих γ -квантов при переходе между возбужденными уровнями; наличие в ядре оболочек.

Природа ядерных сил

В 1934 году советские физики Е.И.Тамм и Д.Д.Иваненко выдвинули идею об обменном характере ядерных сил: взаимодействие осуществляется в результате виртуального обмена частицами. В квантовой механике под виртуальными частицами понимают частицы, испускание которых происходит с кажущимся нарушением закона сохранения энергии. Процесс создания виртуальной частицы, например, электроном можно представить так:

$$e^- \leftrightarrow e^- + \hbar\omega.$$

(3.7)

Электрон распадается на электрон и виртуальный фотон $\hbar\omega$. Это выражение в классическом представлении является грубым нарушением закона сохранения. В соответствии же с соотношениями неопределенностей Гейзенберга справедливо произведение

$$\Delta E \cdot \Delta t = \hbar.^1 \quad (3.8)$$

Определенность энергии за промежуток Δt выполняется с точностью, определяемой выражением (3.8). Таким образом, за промежуток $\Delta t = \hbar/\Delta E$

¹ Более точное выражение (3.8) имеет вид $\Delta E \cdot \Delta t \geq \hbar/2$.

может наблюдаться отклонение от закона сохранения энергии и, следовательно, может быть создан виртуальный фотон с энергией $\hbar\omega$, если неопределенность энергии ΔE оказывается не меньше, чем энергия фотона. Электрон как бы занимает на время дополнительную энергию при условии ее быстрой отдачи за счет поглощения фотона другим зарядом.

Расстояние, на которое перемещается фотон:

$$\ell = c \cdot \Delta t = c \cdot \hbar / \Delta E. \quad (3.9)$$

Известными к 1934 г. элементарными частицами были электрон, фотон, нейтрино и позитрон. Вначале полагали, что, может быть, нуклоны обмениваются одной из указанных выше частиц. Самая тяжелая из них – электрон. Для электрона величина ℓ , определяемая формулой (3.9), будет следующей:

$$\ell = c \frac{\hbar}{m_e \cdot c^2} = \Lambda,$$

где Λ – величина перемещения частицы по формуле (3.9), называемая комптоновской длиной волны.

Для электрона комптоновская длина волны Λ_e равна

$$\Lambda_e = \frac{\hbar}{m_e \cdot c} = \frac{1,05 \cdot 10^{-34}}{9,1 \cdot 10^{-31} \cdot 3 \cdot 10^8} \approx 2 \cdot 10^{-12} \text{ м.}$$

Из формулы видно, что Λ_e электрона примерно в 1000 раз больше размера ядра. Следовательно, электрон не может быть виртуальной частицей, посредством которой реализуется связь нуклонов в ядре.

Японский физик Юкава в 1934 году высказал гипотезу, что существуют частицы, в 200-300 раз тяжелее электрона, которые и являются переносчиками ядерного взаимодействия, так как по массе эти частицы занимают промежуточное положение между электронами и нуклонами, их назвали мезонами (мезон – по-гречески средний). В 1936 году были обнаружены в космических лучах частицы с массой покоя $m = 207 m_e$. Их назвали μ -мезонами (мюоны). Однако оказалось, что мюоны очень слабо

взаимодействуют с нуклонами. И только в 1947 году были обнаружены π -мезоны (пионы), которые оказались носителями ядерных сил. Существуют положительные, отрицательные и нейтральные пионы: π^+ , π^- и π^0 ; $m_{\pi^+} = m_{\pi^-} = 273m_e$; $m_{\pi^0} = 264m_e$. Спин всех пионов равен нулю.

Протоны и нейтроны в результате протекания виртуальных процессов оказываются окруженными пионами:

$$p \leftrightarrow p + \pi^-, \quad (3.10)$$

$$n \leftrightarrow n + \pi^+, \quad (3.11)$$

$$p \leftrightarrow p + \pi^0; \quad n \leftrightarrow n + \pi^0. \quad (3.12)$$

Иногда виртуальные пионы вокруг нуклонов называют мезонной шубой, образующей поле ядерных сил. Поглощение мезонов соседними нуклонами обуславливает возникновение сильного взаимодействия между ними, которое может быть реализовано по следующим схемам:

$$\begin{aligned} p + n &\leftrightarrow n + \pi^+ + p \leftrightarrow n + p & (a), \\ n + p &\leftrightarrow p + \pi^- + n \leftrightarrow p + n & (б), \\ p + n &\leftrightarrow p + \pi^0 + n \leftrightarrow p + n & (в), \\ p + p &\leftrightarrow p + \pi^0 + p \leftrightarrow p + p & (г), \\ n + n &\leftrightarrow n + \pi^0 + n \leftrightarrow n + n & (д). \end{aligned} \quad (3.13)$$

Процесс (3.13а) подтвержден экспериментально: после прохождения пучка нейтронов через водород в нем обнаружены протоны, а в водороде обнаружено такое же количество нейтронов. Это означает, что пролетающие вблизи протонов нейтроны захватывают π^+ -мезоны и превращаются в протоны. Протоны же, потерявшие π^+ -мезоны, превращаются в нейтроны (см.(3.11)).

Нуклоны оказываются, как видно из (3.10) – (3.13), окруженными виртуальными π -мезонами, которые образуют поле ядерных сил. Если нуклону сообщить энергию, равную энергии пиона, то от него отрывается реальный, обнаруживаемый на опыте, пион. Если соударяются нуклоны, обладающие большим запасом энергии, то может отрываться сразу несколько пионов. Как видно из (3.10), нейтрон часть времени находится в виртуальном состоянии:

$$n \leftrightarrow p + \pi^-.$$

Орбитальное движение отрицательного пиона обуславливает возникновение наблюдаемого у нейтрона отрицательного магнитного момента. Большой магнитный момент у протона (больше одного ядерного магнитного момента) объясняется орбитальным движением π^+ -мезона в течение времени, когда протон находится в виртуальном состоянии:

$$p \leftrightarrow n + \pi^+.$$

Количественная теория, описывающая взаимодействие нуклонов путем обмена пионами, пока не создана: нет метода математического описания взаимодействия частиц с силами такой интенсивности, как ядерные. Считается, что мезонная теория упрощает природу взаимодействия между нуклонами. Именно этим обстоятельством объясняют тот факт, что мезонная теория применима для ядерных процессов с энергиями менее 1 ГэВ.