2. ВВЕДЕНИЕ В ЯДЕРНУЮ ФИЗИКУ

Фундаментальную основу радиохимии составляет учение о радиоактивности, и его развитие в рамках ядерной физики. В данной главе приведена информация по строению и свойствам атомных ядер, необходимая для понимания причин устойчивости ядер по отношению к радиоактивному распаду.

Как известно, химический элемент состоит из атомов – мельчайших частиц, сохраняющих его свойства.

В первом приближении атом можно рассматривать как шар, состоящий из расположенного в центре малого положительно заряженного ядра и электронной оболочки, подразделённой на слои. Оболочки последовательно заполняются электронами. Электрон – стабильная отрицательно заряженная частица со спином 1/2 с массой ~$9\cdot10^{-28}$ г и с магнитным моментом равным магнетону Бора. Практически вся масса атома сосредоточена в атомном ядре. Ядро состоит нуклонов, т.е. из ядерных частиц, способных существовать в двух состояниях – протона или нейтрона. Число протонов определяет электрический заряд атомного ядра и порядковый номер Z атома в периодической системе элементов. Число нейтронов равно разности массового числа и числа протонов.

Атомное ядро с зарядом Z и массовым числом A состоит из A нуклонов: Z – протонов и N нейтронов, связанных между собой ядерными силами. Ядро имеет Z положительных элементарных зарядов. Общее число нуклонов в ядре называется массовым числом $A=N+Z$. Эта сумма всегда является целым числом; её не следует отожествлять с атомной массой, под которой понимают значение массы атома, выраженное в атомных единицах массы. Атомная единица массы принята равной 1/12 массы нейтрального атома изотопа углерода ^{12}C (1 а.е. м. =$1{,}6605402\cdot10^{-27}$ кг =1 а.е.м. 0,931494028 ГэВ/с²), поэтому атомная масса этого изотопа по определению равна точно 12. Атомная масса меньше суммы масс составляющих атом частиц (протонов, нейтронов, электронов) на величину, обусловленную энергией их взаимодействия (дефект массы).Разность между атомной массой изотопа и его массовым числом называется избытком массы (обычно его выражают в МэВ). Он может быть как положительным, так и отрицательным.

Протон (стабильная элементарная частица, с спином 1/2, магнитный момент $\mu=2{,}79\mu_B$, +e =$1{,}6021773\ 10^{-19}$ Кл) имеет массу 1838,5 электронных масс, m_p=$1{,}6726231\cdot10^{-27}$ кг=1,00726470 а.е.м.=938,27231 МэВ. Нейтрон (электрически нейтральная элементарная частица, спин 1/2, магнитный момент $\mu=-1{,}91\mu_B$) имеет массу, превышающую массу протона на 2,5 электронных масс, M_n=1,008986 а.е.м.=939,5 МэВ = 1838,5 m_e ($m_n>m_p+m_e$). В свободном состоянии нейтрон нестабилен: он распадается с $T_{1/2}$=10,18 м (время жизни нейтрона $\tau=881.5\pm1.5$ с), образуя протон и испуская электрон и антинейтрино, $\tilde{\nu}$(β^--распад). В ядрах нейтрон стабилен.

Для отнесения атомов к стабильным или нестабильным, в ядерной физике вводится понятие нуклид, под которым понимают — разновидность атома, характеризуемая числом протонов и нейтронов, а также энергетическим состоянием ядра. Нуклид, испускающий ионизирующее излучение, называется радионуклидом. Нуклиды с одинаковым числом протонов, но различным количеством нейтронов (Z=const) называются изотопами. нуклиды с одинаковым количеством нейтронов в ядре, N, но с разным числом протонов, Z (N=*const*) — изотонами, нуклиды с одинаковым избытком нейтронов (N-Z=*const*) — изодиферами, нуклиды с одинаковым массовым числом, A, но с разными числами нейтронов и протонов — изобарами.

Конкретный изотоп обозначается символом химического элемента, слева внизу указывается число протонов Z (атомный номер в периодической системе), слева вверху – массовое число, A, справа внизу – число нейтронов N (обычно не указывается), справа вверху – заряд иона (валентность).

$^{A}_{Z}$Химический символ$_{N}$

Часто N обычно не указывают, а справа от символа верху пишут валентность или заряд иона. Например, типичное обозначение нуклида углерода имеет вид: $^{12}_{6}C^{4+}$.

Величина положительного электрического заряда ядра Z определяется количеством протонов в ядре, которое совпадает с порядковым номером элемента в периодической таблице. Заряд равен $Z \cdot e$, где e=1,602·10^{-19} Кл – абсолютная величина элементарного электрического заряда. Заряд определяет химические свойства всех изотопов данного элемента.

Заряд ядра был определён в 1913 г. Г. Мозли, который измерил с помощью дифракции на кристаллах длину волны (Λ) характеристического рентгеновского излучения для многих элементов. Измерения показали, что Λ изменяется дискретным образом от некоторой целой величины Z, которая совпадает с порядковым номером элемента и изменяется на единицу при переходе от элемента к соседнему элементу в периодической системе, а для водорода равна единице. Мозли интерпретировал величину Z как заряд ядра.

Закон Мозли устанавливает связь между частотой характеристического рентгеновского излучения ν=1/Λ и зарядом ядра Z:

$$\sqrt{\nu} = AZ - B, \qquad (1)$$

где для данной серии излучения постоянные A и B не зависят от вида элемента.

Например, для K_{α}-линии рентгеновского излучения эта зависимость имеет вид:

$$\nu = const(Z\text{-}1)^2. \qquad (2)$$

Этот закон позволяет измерять заряды ядер.

Положительный заряд атомного ядра можно определить по рассеянию заряженных частиц атомными ядрами. Измерение заряда ядер на основе закона Кулона провел Чедвик в 1920 г., но ещё в 1911 г. Резерфорд, используя закон Кулона для интерпретации опытов по рассеянию α-частиц на металлических фольгах, оценил размер и заряд ядра.

В ходе эксперимента на тонкую металлическую фольгу направляли узкий пучок α-частиц с энергией E_α. α-частицы проходили сквозь фольгу, причём часть из них в результате упругих столкновений с атомными ядрами отклонялась от прямолинейного пути, т.е. рассеивалась. Соотношение числа частиц dn, рассеянных под углом , с первоначальным числом частиц n определяли по формуле Резерфорда:

$$\frac{dn}{n} = \frac{N\rho}{16}\left(\frac{Z_1 Z_2 e^2}{4\pi\varepsilon_0 E_\alpha}\right)\frac{d\Omega}{sin^4(\Omega/2)}, \qquad (3)$$

где N – число атомных ядер в единице объёма; – плотность слоя; ε_0 – диэлектрическая проницаемость вакуума, Z_1 и Z_2 – заряды ядер рассеиваемого и рассеивающего атомов соответственно.

Формула Резерфорда позволила объяснить экспериментальные результаты по рассеянию α-частиц на тяжелых ядрах, что привело к открытию атомного ядра и созданию ядерной модели атома.

При одинаковых условиях число рассеянных частиц растёт пропорционально квадрату заряда ядра Z атомов облучаемого вещества. В настоящее время рассеяние заряженных частиц используется не для определения порядкового номера, а для определения радиуса ядра или геометрической формы атомного ядра.

Для нейтрального атома число находящихся в атомном ядре протонов, являющихся носителями положительных зарядов, определяет заряд ядра или порядковый номер и равно числу электронов в оболочке. В ядре сосредоточено 99,97% массы атома. Величина $A=N+Z$ указывает на число нуклонов в атомном ядре и вследствие этого является целым числом.

Взаимосвязь между массой любого тела и его полной энергией описывается формулой:

$$E=mc^2 \qquad (4)$$

где $c= 2{,}998\cdot10^{10}$ *см/с* — скорость света в вакууме,

$$m=\frac{m_0}{\sqrt{1-\left(\frac{v}{c}\right)^2}}$$

m — релятивистская масса, v – скорость движения тела, m_0 – его масса покоя.

Переход от массы к энергии проводят по соотношению:

1 а.е.м.= $1{,}66054\cdot10^{-24}$ г= $1{,}492\cdot10^{-10}$ Дж=931,494 МэВ/c^2.

1 а.е.м. — величина, обратная числу Авогадро, то есть $1/N_A$, где N_A=6,02·10^{23}. Такой выбор атомной единицы массы удобен тем, что молярная масса данного элемента, выраженная в граммах на моль, в точности совпадает с массой атома этого элемента, выраженной в а. е.м.

Замечание. 1 МэВ =1.10^6 эВ. Электронвольт (эВ) является внесистемной единицей энергии, наиболее часто применяющейся в ядерной физике; 1 эВ равен кинетической энергии, которую приобретает электрон при прохождении между двумя точками с разностью потенциалов 1 В. 1 эВ=1,602176487·10^{-19} Дж=1,602176487·10^{-12} эрг = 1,782661758·10^{-36} кг; 1 ГэВ/с² ≈ 1,073 544 а.е.м.

Массы атомов определяют с помощью приборов — масс-спектрометров.

За атомную массу элемента, состоящего из смеси изотопов, принимают среднее значение атомной массы изотопов с учётом их процентного содержания. Массу атома следовало бы вычислять как сумму масс протонов, электронов и нейтронов, из которых он построен. Однако точное определение массы атомов показало, что экспериментально полученные значения массы всегда меньше значений, вычисленных как сумма масс частиц, составляющих ядро. Атомная масса меньше суммы масс составляющих атом частиц (протонов, нейтронов, электронов) на величину, обусловленную энергией их взаимодействия (дефект массы). Величина дефекта массы позволяет оценить энергию связи нуклонов в ядре.

Ядро представляет систему связанных между собой нуклонов. Возникновение связанного состояния возможно только под действием ядерных сил притяжения, удерживающих нуклоны в ограниченном объёме. Чтобы ядро было устойчиво, система из взаимодействующих между собой нуклонов должна иметь минимум полной энергии. Полная энергия E_1 системы из A нуклонов до объединения в ядро, т.е. находящихся между собой на таких расстояниях, когда действием сил между ними можно пренебречь, равна

$$E_1 = \sum_{i=1}^{A} m_i \,, \qquad (5)$$

где m_i – массы нуклонов, из которых образовано ядро. (Здесь массы выражены в единицах энергии).

После объединения нуклонов в ядро массой M полная энергия составит

$$E_2 = M, \qquad (6)$$

а изменение энергии системы будет равно

$$\Delta E = E_2 - E_1 = M - \sum_{i=j}^{A} m_i. \qquad (7)$$

Работа сил притяжения вызывает переход системы в состояние с меньшей энергией, поэтому величина ΔE<0 равна энергии, которая выделяется при образовании ядра и передаётся в окружающее пространст-

во. Чтобы разрушить ядро и удалить нуклоны на такие расстояния, где их можно считать свободными, требуется затратить энергию $|\Delta E|$.

Полная энергия связи ядра**:**

$$E_{св} = |\Delta E| = \sum_{i=1}^{A} m_i - M = [Zm_p + (A-Z)m_n - M_{яд}(A,Z)]c^2 \qquad (8)$$

Таким образом, энергия связи рассчитывается как разность между энергией связанной системы частиц и суммарной энергией этих частиц в свободном состоянии. Для устойчивых систем энергия связи отрицательна: чем она больше, тем прочнее система. Энергия связи с обратным знаком равна минимальной работе, которую нужно затратить, чтобы разделить систему на её элементарные составные части.

Для устойчивого ядра полная энергия связи положительна и равна той энергии, которую надо затратить, чтобы разделить ядро на все составляющие его нуклоны. Если $E_{св}>0$, то ядро устойчиво, если $E_{св}<0$ — нуклоны ядра разлетаются как свободные частицы. Масса ядра и его устойчивость определяются тем, насколько величина энергии притяжения между нуклонами превышает суммарную кинетическую энергию движения нуклонов в ядре.

Экспериментально полученные массы всегда меньше значений, вычисленных как сумма масс частиц, составляющих ядро. Эта разность масс (дефект массы) равна:

$$\Delta m = Zm_p + Nm_n + Zm_e - m = Zm_H + Nm_n - n \qquad (9)$$

и эквивалентна энергии связи $E_{св} = \Delta mc^2$.

Дефект массы — разность между массой системы взаимодействующих частиц и суммой их масс в свободном состоянии и определяется полной энергией их взаимодействия, т.е. энергией их связи. Дефект массы, являясь мерой энергии связи, определяет степень устойчивости системы и позволяет определить величину энергии, выделяющейся в ядерных реакциях.

Энергия связи на один нуклон:

$$\varepsilon = \frac{E_{св}}{A} \qquad (10)$$

Замечание. Стандартная формула для расчёта энергии связи ядра:

$$E_{св}=Zm_H+(A-Z)m_n-M \qquad (12а)$$

где Z - заряд ядра (в единицах e), A - массовое число, m_H, m_n и M - массы атома водорода, нейтрона и атома, соответствующего данному ядру. Однако в таблицах изотопов обычно приводятся не массы элементарных частиц (например, не масса протона, а масса атома водорода), что заставляет при расчетах учитывать массы электронов. Более удобной считается формула:

$$E_{св}=Z\Delta_H+(A-Z)\,\Delta_n-\Delta, \qquad (12б)$$

где ΔH, ΔH_n и Δ - избыток массы атома водорода, нейтрона и атома, соответствующего данному ядру.

Энергия связи ядра с данными A и Z может быть вычислена при помощи полуэмпирической формулы Вайцзеккера, связывающей энергию связи ядра, $E_{св}$, с массовым числом A и зарядом Z. Она следует из

капельной модели ядра, и имеет вид суммы объёмной, поверхностной, кулоновской, парной энергий и изотопического члена:

$$E_{св}(A,Z)=15{,}75A-17{,}8A^{2/3}-0{,}71\frac{Z^2}{A^{1/3}}-94{,}8\frac{\left(\frac{A}{2}-Z\right)^2}{A}+34\frac{\delta}{A^{3/4}}\quad МэВ, \tag{13}$$

где δ=1, 0, -1 соответственно для чётно-чётных и нечётно-нечётных ядер.

В основе капельной модели ядра лежит представление о ядре как о сферической капле заряженной несжимаемой ядерной жидкости.

Будучи приближенной, формула (14) тем не менее, сыграла большую роль в развитии ядерной физики (например, в теории деления ядер). Она дала, в частности, возможность предсказать делимость нечётных изотопов урана и плутония под действием медленных нейтронов и указала направление поиска ядерного топлива для атомной энергетики.

Изменение массы покоя ядер, сопровождающее ядерное превращение достигает 0,1%, тогда как перестройка внешних электронных оболочек, происходящая при химических превращениях, изменяет массы покоя атомов и молекул не более чем на 10^{-7}%.

Объём атомного ядра пропорционален числу нуклонов в ядре. Ядро имеет размеры ≈ 10^{-15}÷10^{-14} м, т.е. 1÷10 ферми (напомним, что ферми — единица измерения расстояния, обозначается фм, 1 ферми = 1 фм = $1\cdot10^{-15}$ м).

Первые представления о размерах ядра были получены Резерфордом при экспериментальном изучении рассеяния α-частиц с энергией ~ 5 МэВ при прохождении через тонкую фольгу золота. Наблюдалось рассеяние некоторых α-частиц на очень большие углы θ, почти до 180°. На этом основании в 1911 г. Резерфорд пришел к выводу, что в центре атома имеется область положительного электрического заряда, связанная с большой массой, сконцентрированной в очень малом объеме (по сравнению с объёмом атома).

Размеры заряженной части ядра – ~10^{-14} м, что намного меньше радиуса атома, 10^{-10} м. Радиус ядра пропорционален $A^{1/3}$, т.е. плотность ядерного вещества почти постоянна. (Она равна $2{,}3\cdot10^{14}$ г/см^3, для сравнения: плотность золота 19,32 г/см^3). Это говорит об огромных силах, которые необходимы для скрепления вещества такой плотности. Поэтому любое изменение в ядре (через распад или реакции) может освободить большое количество энергии.

Ядро, как квантовомеханическая система, не имеет определенной границы. Размеры ядер определяют рассеянием α-частиц, быстрых нейтронов или быстрых электронов на ядрах, по энергетическому спектру α-частиц и др. Наиболее точными считаются оценки размеров ядра по результатам рассеяния ядрами быстрых нейтронов и электронов.

Ядро имеет почти сферическую форму. Радиус его определяется через массовое число A как

$$R=r_0A^{1/3,} \qquad (14)$$

где $r_0 = (1{,}2\div1{,}4)\cdot10^{-13}$ см.

С помощью рассеяния быстрых электронов с кинетической энергией $E_{кин}$>500 МэВ удалось оценить не только размер области, занятой протонами, но и распределение плотности $\rho_э$ электрического заряда по ядру. Ядро не является твёрдой сферой. Распределение ядерной материи по объёму (радиусу) ядра в центральной области постоянно, но у периферии резко уменьшается до нуля. Положения центра масс и центра заряда ядра отличаются на 0,1 фм. Функция $\rho(r)$ подчиняется распределению Ферми:

$$\rho(r)=\frac{\rho_0}{1+exp\left[\dfrac{r-R_0}{\eta}\right]}, \qquad (15)$$

где ρ_0 – плотность ядерной материи в центре ядра, $R_0=1{,}08\cdot10^{-13}A^{1/3}$ см – радиус ядра, r – расстояние, на котором плотность ядерной материи уменьшается в два раза, $\eta\approx 0{,}55\cdot10^{-13}$ *см* – параметр диффузности (скорость убывания плотности ядерного вещества). Уменьшение плотности ядерного вещества от $0{,}9\rho_0$ до $0{,}1\rho_0$ для всех ядер происходит на одинаковых расстояниях $d = 2{,}4\cdot10^{-13}$ см. Поэтому у лёгких ядер отсутствует область, где плотность ядерного вещества примерно постоянна.

Так как тяжёлые ядра имеют на ~50% больше нейтронов, чем протонов, то массовый радиус больше зарядового. Менее плотный приповерхностный слой ядра имеет иной состав, чем основная материя. Можно ожидать, что протоны вытесняются наружу протонным отталкиванием, а нейтроны смещаются во внутреннюю область ядра.

Плотность ядерной материи в центре ядра почти одинакова у всех ядер, она не зависит от числа нуклонов и составляет ~0.17 нукл./фм^3. Толщина поверхностного слоя у всех ядер тоже почти одинакова и равна 2.4 фм.

Стабильные ядра – довольно компактные объекты. Их радиусы меняются от 2÷3 фм для самых лёгких ядер до 7÷8 фм для самых тяжёлых. Однако для ядер, удалённых от долины стабильности, ситуация иная. Для некоторых ядер, перегруженных нейтронами (протонами), наблюдается так называемый нейтронный (протонный) слой – область вблизи поверхности ядра, в которой с учётом фактора нормировки N/Z $\rho_n>\rho_p$ ($\rho_p>\rho_n$).

В лёгких ядрах с большим отношением N/Z существует нейтронное гало. Оно наблюдается в ядрах, у которых энергия связи нейтрона B_n <1.5 МэВ. В гало-ядрах наряду с приповерхностным слоем (кором), для которого плотность распределения протонов и нейтронов совпадают, существует большая область на периферии ядра, в которой плотность распределения нейтронов ρ_n существенно больше плотности распреде-

ления протонов $\rho_p(\rho_n >> \rho_p)$. Обнаружены также ядра, имеющие протонное гало.

Нейтронное облако, окружающее кор ядра, простирается на гораздо бóльшие расстояния, чем радиус ядра, определяемый соотношением $R=1.3A^{1/3}$. Так, для гало-ядра ^{11}Li пространственное распределение двух нейтронов, образующих ядерное гало вокруг кора ^{9}Li, простирается столь далеко, что радиус ядра ^{11}Li оказывается сравним с радиусом ядра ^{208}Pb.

Ядро, также как и составляющие его нуклоны, имеет собственные моменты: спин, магнитный момент и электрический квадрупольный момент.

Собственный момент количества движения микрочастицы, имеющий квантовую природу и не связанный с движением частицы как целого называется спином. Спин измеряется в единицах постоянной Дирака $\hbar = h/2\pi 1{,}0546 \cdot 10^{-34}$ Дж·с (h – постоянная Планка), имеет размерность момента импульса. и может быть целым (0, 1, 2,…) или полуцелым (1/2, 3/2,…). Ядерный спин выражается квантовым числом I в единицах $\hbar = h/2\pi$.

Представление о спине и магнитном моменте ядра было введено для объяснения сверхтонкой структуры спектральных линий.

Различают два случая расщепления спектральных линий. Тонкая структура спектральных линий обусловлена взаимодействием электронов в электронной оболочке атома. Сверхтонкая структура линий – влиянием атомного ядра (изотопным эффектом и ядерным спином). Изотопный эффект проявляется в изменении частоты испускаемых атомом линий вследствие сдвига энергетических линий, который зависит от массы ядра.

Несмотря на то, что число нуклонов в ядре может быть очень велико, спины ядер обычно невелики и составляют несколько ħ, что объясняется особенностью взаимодействия одноимённых нуклонов. Все парные протоны и нейтроны взаимодействуют только так, что их спины взаимно компенсируются (в парах всегда взаимодействуют партнеры с антипараллельными спинами). Суммарный орбитальный момент пары также всегда равен нулю. В результате ядра, состоящие из чётного числа протонов и чётного числа нейтронов, не имеют механического момента (чётно-чётные ядра в основном состоянии имеют I=0). Отличные от нуля спины существуют только у ядер, имеющих в своём составе непарные нуклоны. Спин такого нуклона суммируется с его же орбитальным моментом и имеет какое-либо полуцелое значение: 1/2, 3/2, 5/2. Ядра нечётно-нечётного состава имеют целочисленные спины: 1, 2, 3 и т. д. (у протона и нейтрона спин одинаков и равен ½, поэтому все ядра с чётным A имеют целый спин, а ядра с нечётным A – полуцелый спин). Суммарный момент четвёрки нуклонов (ядра ^{4}He) – равен 0.

Магнитный момент характеризует магнитные свойства вещества. Магнитный дипольный момент ядра определяет энергию взаимодейст-

вия ядра с однородным магнитным полем. Магнитными моментами обладают элементарные частицы, атомные ядра, электронные оболочки атомов и молекул. Магнитные моменты отдельных элементарных частиц обусловлены существованием у них спина. Магнитные моменты ядер складываются из спиновых магнитных моментов протонов и нейтронов, образующих эти ядра, а также из магнитных моментов, связанных с их орбитальным движением внутри ядра.

Единицей магнитного момента является ядерный магнетон

$$\mu_{Я} = \frac{e\hbar}{2m_p c} = 5{,}0508343 \cdot 10^{-27} \quad Дж \cdot Тл^{-1} \left(А \cdot м^2\right), \qquad (16)$$

где m_p – масса протона.

Ядерный магнетон в m_p/m_e=1836 раз меньше электронного магнетона Бора. Магнитный момент ядра равен целому кратному ядерного магнетона Бора. У различных ядер магнитные моменты равны от -2 до +5 ядерных магнетонов. Из-за относительно большой массы нуклонов магнитные моменты ядер очень малы по сравнению с магнитными моментами электронов. Магнитный момент чётно-чётных пар, как и спин, равен нулю. Магнитные моменты ядер с непарными нуклонами образуются собственными моментами этих нуклонов и моментом, связанным с орбитальным движением непарного протона.

Магнитный момент нейтрона μ_n=-1,9135$\mu_я$. Его направление противоположно направлению спина. Спин и магнитный момент имеют разные знаки. Магнитный момент протона +2,7926$\mu_я$ (момент направлен по спину). Отличие магнитного момента протона от одного ядерного магнетона кажется странным. Еще более удивительным представляется существование магнитного момента у не имеющего заряда нейтрона. Возможно, это связано с со сложной внутренней структурой нейтрона.

Нейтроны и протоны в ядре располагаются таким образом, что их спины и магнитные моменты взаимно компенсируются (в чётно-чётных ядрах наблюдается полная компенсация). Максимальный спин ядра не превышает нескольких единиц, т.е. он гораздо меньше $A/2$, чему он должен был бы равняться, если бы спины всех нуклонов складывались.

Информацию о распределении электрического заряда в ядре и его структуре можно получить с помощью дипольного и квадрупольного моментов ядра. Электромагнитные моменты определяют потенциал взаимодействия ядра или частиц с внешними электрическими и магнитными полями. Электрический дипольный момент ядер в основном состоянии равен нулю, что является следствием чётности квадрата волновой функции основного состояния ядра.

Ядра в основном состоянии имеют электрический дипольный момент всегда равный нулю. Сильное электрическое поле может вызывать поляризацию протонов в ядре и возникновение дипольного момента.

Другой характеристикой распределения электрического заряда в ядре является квадрупольный электрический момент Q, который не ра-

вен нулю для многих ядер, находящихся даже в стационарных состояниях. Атомные ядра, спин которых больше или равен единице, имеют отличные от нуля квадрупольные моменты, что говорит об их не точно сферической форме. Квадрупольный момент определяет степень взаимодействия ядра с неоднородным электрическим полем. Электрический квадрупольный момент является мерой отклонения распределения заряда ядра от симметрии шара и определяется геометрической формой ядра

Известны ядра с положительными и отрицательными квадрупольными моментами. Отсутствие сферической симметрии у электрического поля, создаваемого ядром с ненулевым квадрупольным моментом, приводит к образованию дополнительных энергетических уровней атомных электронов и появлению в спектрах атомов линий сверхтонкой структуры, расстояния между которыми зависят от квадрупольного момента.

Электрический квадрупольный момент Q – мера несферичности ядра. Для сферически симметричного ядра Q=0. При Q<0, ядро является сплюснутым эллипсоидом, при Q>0 ядро – вытянутым эллипсоидом. Квадрупольный момент имеет размерность площади и измеряется в единицах барн, 1 барн = 10^{-28} м^2. Все магические ядра имеют сферическую форму (Q=0), которая соответствует наиболее устойчивым ядрам. Квадрупольные моменты ядер зависят от числа протонов в ядре. У дейтрона Q=2,74·10^{-31} м^2, что говорит о сигарообразном распределении заряда. Положительное значение этой величины (знак «+») показывает, что вращение ядра вокруг оси происходит с наименьшим моментом инерции.

Взаимодействие квадрупольного момента с электрическими полями, создаваемыми электронами в атомах и молекулах, приводит к аномальным сверхтонким изменениям в спектрах, которые используют для определения квадрупольного момента.

В сильных (ядерных) и электромагнитных взаимодействиях между заряженными частицами выполняется закон сохранения чётности.

Квантовое число, характеризующее симметрию волновой функции Ψ физической системы при некоторых дискретных преобразованиях называется чётностью (*parity, P*). Если при таком преобразовании Ψ не меняет знака, то чётность положительна, если меняет, то чётность отрицательна. Для истинно нейтральных частиц, которые тождественны своим античастицам, кроме пространственной чётности, можно ввести понятие зарядовой чётности и комбинированной чётности. Чётность P_{A+B} системы, состоящей из двух взаимодействующих частиц A и B, равна $P_{A+B}=P_AP_B(-1)^l$, где P_A и P_B – внутренние чётности систем A и B; l – орбитальное число. Чётность нуклона положительна.

Таким образом, чётность ядра указывает на то, сохраняет ли волновая функция частиц $\Psi(x,y,z)$ свой знак при изменении знака всех пространственных координат x, y и z. В первом случае функция называется чётной, во второй – нечётной.

Важным свойством многих изолированных квантовых систем является закон сохранения чётности: если изолированная физическая система в момент времени $t = 0$ имела определенную чётность, то система сохраняет свою чётность во все последующие моменты времени. Чётность является таким же интегралом движения, как энергия, импульс или момент импульса. Чётность сохраняется в процессах, обусловленных сильными (с участием ядерных сил) и электромагнитными взаимодействиями. Выполнение закона сохранения чётности приводит к правилам отбора для электромагнитного излучения атомов и ядер, для радиоактивных превращений и ядерных реакций.

Основные состояния чётно-чётных ядер всегда имеют положительную чётность. У других ядер основные состояния могут быть как чётными, так и нечётными. Ядра в возбужденных состояниях могут иметь различную чётность, не обязательно совпадающую с чётностью основного состояния, которая отмечается знаком плюс или минус при обозначении спина.

Как основное, так и возбужденные состояния ядер, помимо энергии, спина и чётности, характеризуются квантовыми числами, которые называются изоспином и проекцией изоспина. (В литературе эти квантовые числа обозначаются обычно символами T_z или I_z).

Любой нуклон обладает изотопическим спином, равным $1/2$, у которого есть две возможные «проекции» в особом изотопическом пространстве. Когда проекция изотопического спина I_z равна $+1/2$, то нуклон становится протоном, а когда $-1/2$ – нейтроном. Такое поведение изотопического спина выглядит естественным с точки зрения квантовой механики, поскольку в её арсенале уже есть квантовое число с аналогичными свойствами – спин.

Изоспин сохраняется во всех процессах, обусловленных сильным взаимодействием, однако нарушается в слабом и электромагнитном взаимодействии. Сохранение изоспина в сильных взаимодействиях позволяет вычислять сечения реакций и предсказывать структуру ядерных уровней в случаях, когда эффекты несохраняющих изоспин взаимодействий малы.

Введение этих квантовых чисел связано с тем фактом, что ядерные силы инвариантны относительно замены протонов на нейтроны. Это особенно ярко проявляется в спектрах т.н. «зеркальных» ядер, т.е. ядер-изобар, у которых число протонов одного равно числу нейтронов другого (например, спектры ядер ^{13}C и ^{13}N). Для всех известных пар таких ядер имеет место подобие спектров низших возбужденных состояний: спины и чётности низших состояний одинаковы, а энергии возбуждения близки.

Таким образом, характеристиками уровней конкретного ядра являются энергия, спин состояния, четность состояния и изоспин.

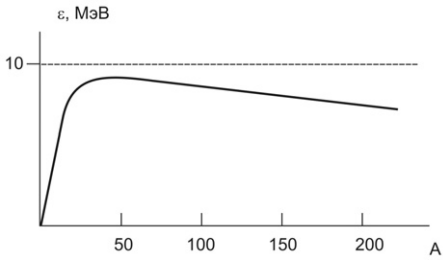


Рис. 1. Зависимость средней энергии связи в расчёте на один нуклон от массового числа.

Рассмотрим теперь торые общие свойства нуклидов.

Анализ хода кривой зависимости удельной энергии связи ядра от атомного веса, $\varepsilon(A)$, (рис. 1) позволяет установить некоторые характеристики взаимодействия между нуклонами в ядре.

Удельная энергия связи ε(A) быстро возрастает при малых A, достигает максимума, а затем медленно уменьшается. Для нуклидов с A>11 (Z>5) среднее значение энергии связи на один нуклон составляет от 7,4 до 8,8 МэВ. Для нуклидов с A≈60, т.е. для группы элементов Fe-Co-Ni, энергия связи на нуклон имеет максимальное значение — данные элементы являются наиболее устойчивыми. Важным обстоятельством является то, что значение энергии связи на нуклон для ядер с чётным числом нуклонов всегда выше среднеарифметического значения соответствующих величин для соседних нуклидов с нечётным числом нуклонов. У лёгких ядер энергия связи существенно меньше (1 МэВ у дейтерия), а у тяжёлых ядер она уменьшается с ростом числа нуклонов в ядре и достигает 7,5 МэВ для урана. Поэтому энергетически выгодны реакции синтеза лёгких ядер и деления тяжёлых ядер. Так, в реакции синтеза ядер гелия из дейтерия и трития выделяется энергия 17,6 МэВ (3,5 МэВ на 1 нуклон). Деление ядер урана сопровождается выделением энергии ~200 МэВ, или 1 МэВ на нуклон.

Удельная энергия связи нуклонов в ядре в миллион раз превышает энергию связи валентных электронов в атоме, равную ~10 эВ для большинства атомов. Поэтому энергия, выделяющаяся в ядерных реакциях, в миллионы раз выше энергии химических реакций.

Устойчивость ядер зависит от параметра (A-Z)/Z — отношения чисел нейтронов и протонов. Ядра лёгких нуклидов наиболее устойчивы при (A-Z)/Z<1. С ростом массового числа всё более заметным становится электростатическое отталкивание между протонами, и область устойчивости сдвигается к значениям (A-Z)/Z>1. Для наиболее тяжёлых ядер (A-Z)/Z≈1,5.

Встречающиеся в природе стабильные нуклиды распределены по чётным и нечётным значениям Z и N. Все ядра с чётными значениями этих величин являются ядрами лёгких нуклидов ${}^{2}_{1}H, {}^{6}_{3}Li, {}^{10}_{5}B, {}^{14}_{7}N$ – все они стабильны. Если среди изобар с нечётными A обычно стабилен лишь один, то в случае чётных A встречаются по два, три и более стабильных изобар. Наиболее стабильны чётно-чётные, наименее — нечётно-нечётные ядра. Как нейтроны, так и протоны, проявляют тенденцию

группироваться парами с партнерами с антипараллельными спинами, что приводит к нарушению плавности зависимости энергии связи от A.

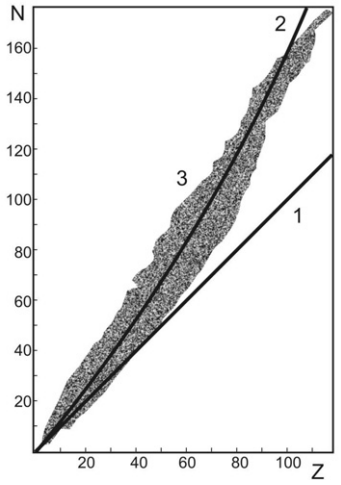
Чётность числа протонов или нейтронов создаёт запас устойчивости, который приводит к возможности существования нескольких стабильных нуклидов, различающихся по числу нейтронов для изотопов и по числу протонов для изотонов. Чётность числа нейтронов в составе тяжёлых ядер определяет их способность делиться под воздействием нейтронов.

Энергия связи одного присоединяемого или отделяемого от ядра нуклона зависит от чётности числа имеющихся в составе ядра протонов и нейтронов. Анализ удельной энергии связи как функции A и Z демонстрирует наибольшую устойчивость ядер с чётным числом протонов и нейтронов (Ч-Ч ядра). Эти ядра имеют удельную энергию связи, на ~1 МэВ большую, чем соседние ядра, у которых либо N, либо Z – нечётные (Ч-Н и Н-Ч ядра) и широко распространены в природе. Объединение внутри ядра одноименных нуклонов в пары (эффект спаривания) обусловлен действием между ними добавочным ядерных сил и является энергетически выгодным процессом, увеличивающим удельную энергию связи на 1 МэВ. Промежуточное положение по величине удельной энергии связи и распространенности в природе занимают чётно-нечётные и нечётно-чётные ядра. Наименьшие значение удельной энергии связи и количества стабильных нуклидов (четыре) имеют нечётно-нечётные ядра.

Заслуживают внимания особо высокие значения удельной энергии связи, даже на фоне чётно-чётных ядер, для ядер с содержанием нейтронов и (или) протонов, равным 2, 8, 20, 50, 82, 126 (только для нейтронов). Эти числа (и соответствующие ядра) получили название магических. Магические ядра – атомные ядра, содержащие магическое число (2, 8, 20, 28, 50, 82, 126) протонов или нейтронов. Они отличаются повышенной устойчивостью и большей распространённостью в природе по сравнению с соседними ядрами в периодической системе элементов. Например, олово, атомный номер которого $Z = 50$, имеет 10 стабильных изотопов. Наблюдается наибольшее число стабильных изотопов для $N = 82$. Особенно устойчивыми являются дважды магические ядра, у которых и число нейтронов, и число протонов равно одному из магических чисел, например, ${}_{2}{}^{4}\mathrm{He}$, ${}_{8}{}^{16}\mathrm{O}$, ${}_{20}{}^{40}\mathrm{Ca}$, ${}_{82}{}^{208}\mathrm{Pb}$.

У ядер, следующих за висмутом (Z>83), из-за большого числа протонов полная стабильность оказывается невозможной. Сравнение энергий связи для лёгких и тяжёлых ядер показывает энергетическую выгодность слияния (синтеза) первых и разделения на части (реакция деления) вторых. В стабильных ядрах заряд Z связан с массовым числом A:

$$Z = \frac{A}{1{,}98 + 0{,}015A^{2/3}} \qquad (17)$$



При отклонении от этого соотношения («дорожка стабильности») ядро проявляет свойство электронной или позитронной бета-радиоактивности.

Рис. 2. Нейтронно-протонная диаграмма: 1 — *Z*=*N*; 2 — график подгоночной кривой ко всему массиву данных, *N*=192tg[0,007(Z-1)]; 3 — граница области известных в настоящее время нуклидов.

Свойства ядер различных нуклидов систематизируют с помощью протонно-нейтронной диаграммы – графика, связывающего число нейтронов в нуклиде с числом протонов (рис. 1). В настоящее время известны нуклиды со всеми значениями *Z* от 0 (нейтрон) до 117. Для существующих в природе ядер *Z* меняется от 1 (водород) до 92 (уран). Остальные нуклиды получают искусственно. Не существует стабильных нуклидов с *Z*=0, 43, 61 и *Z*>84. Известны нуклиды с числом нуклонов *A* от 1 до 263 включительно. Не существует стабильных нуклидов при *A*=5, 8 и при *A*>210.

Ядра с чётным числом протонов и чётным числом нейтронов устойчивы, в то время как комбинация из нечётного числа протонов и нечётного числа нейтронов, наоборот, крайне неустойчива. Здесь действует правило Маттауха: нет двух стабильных изобаров, порядковые номера которых различались бы на единицу. Исключение из этого правила имеет место при числе нуклонов *A*=50, 113 и 180. Правило Маттауха важно для обнаружения существующих в природе радионуклидов. Так, например, в триадах природных изобаров: ${}^{40}_{18}Ar$, ${}^{40}_{19}K$, ${}^{40}_{20}Ca$; ${}^{138}_{55}Ba$, ${}^{138}_{56}La$, ${}^{138}_{57}Pr$; ${}^{176}_{70}Yb$, ${}^{176}_{71}Lu$, ${}^{176}_{72}Hf$ средний член является радиоактивным нуклидом.

Лёгкие стабильные нуклиды (до *Z*≤20) содержат в составе ядра примерно равное число протонов и нейтронов. При увеличении *A* относительная доля нейтронов возрастает. Например, у лёгкого нуклида ${}^{12}_{6}C$ соотношение *N*/*Z* = 1; у среднего нуклида ${}^{56}_{26}Fe$ *N*/*Z*=1,15; у тяжёлого нуклида ${}^{238}_{92}U$ *N*/*Z* = 1,59. Опережающий рост числа нейтронов при больших *A* вызван действием дальнодействующих кулоновских сил отталкивания протонов в ядре. Большинство химических элементов имеет по несколько стабильных и β-активных нуклидов. Некоторые элементы имеют всего по одному стабильному нуклиду (^{9}Be, ^{19}F, ^{23}Na), остальные по 2÷3 стабильных нуклида. Олово (Sn) имеет десять стабильных нуклидов. Выше дорожки стабильности располагаются β^+-активные нуклиды, ниже – β^--активные нуклиды. Свойства ядер существенно зависят от чётности чисел *Z* и *N*. Наибольшее число стабильных нуклидов (155 из 265) имеют чётно-чётные ядра (*Z* – чётно, *N* – чётно), поровну стабиль-

ных нуклидов (по 53) с чётно-нечётным и нечётно-чётным количеством нуклонов в составе ядер. Имеется всего четыре стабильных нуклида (^{2}H, ^{6}Li, ^{10}B и ^{14}N) с нечётно-нечётным составом ядер.

Используя существующие модели ядра, удаётся объяснить некоторые свойства атомного ядра, а в отдельных случаях даже количественно описать их. Однако с помощью одной модели невозможно дать объяснение всем свойствам атомного ядра.

Рассмотрим некоторые модели строения атомного ядра.

Капельная модель ядра предложена Н. Бором в 1936 г. в рамках теории составного ядра, была развита Я. Френкелем и Д.Уилером, на её основании К.Вайцзеккер вывел полуэмпирическую формулу для энергии связи ядра атома.

Модель основана на аналогии между поведением нуклонов в ядре и поведением молекул в капле жидкости. Действительно, силы, действующие между составными частицами (молекулами в жидкости и нуклонами в ядре), являются короткодействующими и им свойственно насыщение. Для капли жидкости характерна постоянная плотность её вещества. Ядра же характеризуются практически постоянной удельной энергией связи и постоянной плотностью, не зависящей от числа нуклонов в ядре. Объём капли, как и объём ядра, пропорционален числу частиц. Модель трактует ядро, как каплю электрически заряженной несжимаемой жидкости, подчиняющуюся законам квантовой механики. Благодаря большой плотности нуклонов в ядре и чрезвычайно сильному взаимодействию между ними столкновения очень часты и поэтому независимое движение отдельных нуклонов невозможно. Как в капле обыкновенной жидкости, поверхность ядра может колебаться. Если амплитуда колебаний будет самопроизвольно нарастать, то капля распадётся на части, т. е. произойдёт деление ядра.

Базирующаяся на капельной модели, формула Вайцзеккера позволяет вычислять энергию связи ядра по известным A и Z. Она описывает энергии всех известных ядер (за исключением самых лёгких) со среднеквадратичным отклонением 2,7 МэВ. При $A\approx100$ это даёт относительную погрешность 10^{-2}. Массу любого ядра можно вычислять с точностью до 10^{-4}.

Так как капельная модель является макроскопической теорией, то она не учитывает микроскопического строения ядра, например, распределения ядерных оболочек. Поэтому формула Вайцзеккера плохо применима для магических ядер. В рамках капельной модели считается, что ядро должно делиться на два фрагмента равной массы, но это наблюдается лишь с вероятностью ~1% (обычно один из осколков деления тяжёлых ядер стремится обладать магическим числом 50 или 82, т. е. массы фрагментов будут различаться в ~1,5 раза). Также капельная модель не пригодна для количественного описания спектров энергий возбуждённых состояний ядер.

Хотя капельная модель позволила получить полуэмпирическую формулу для энергии связи нуклонов в ядре, качественно объяснила причины деления ядер и его механизм, а также существование коллективных возбуждений ядра, она не объяснила повышенную устойчивость ядер, содержащих магические числа протонов и нейтронов.

Оболочечная модель успешно описывает электронные оболочки атома. Поэтому, после обнаружения «магических чисел» протонов и нейтронов в ядре атомов (2, 8, 20, 50, 82, 126) было предложено использовать эту модель и в теории строения ядра. Сделать это смогли М. Гепперт-Майер, И.Х.Д. Йенсен в 1950 г. Их модель в некоторой степени похожа на оболочечную модель атома Бора, поскольку она допускает, что содержащиеся в атомном ядре протоны и нейтроны распределены по оболочкам.

Оболочечная модель основана на том, что при определенных числах протонов и нейтронов (так называемых магических числах, равных 2, 8, 20, 28, 50 и 82), а также при числе нейтронов 126 встречается много нуклидов, которые наиболее стабильны, т.е. обладают большой энергией связи. Среди них выделяются ядра с двумя магическими числами – с магическим числом нейтронов и магическим числом протонов: $^{4}_{2}\mathrm{He}$, $^{16}_{8}\mathrm{O}$, $^{40}_{20}\mathrm{C}a$, $^{208}_{82}\mathrm{Pb}$. Нуклиды с магическими числами нейтронов имеют очень малое сечение захвата нейтронов, в то время как нуклид, содержащий на один нейтрон больше, чем магическое ядро, имеет большое сечение. Энергия связи последнего нейтрона, присоединенного свыше магического числа нейтронов, весьма мала, так что этот нейтрон может легко отщепляться.

Известны экспериментальные факты, поддерживающие оболочечную модель ядра: более широкое распространение тех элементов, у которых Z или N являются магическими числами; стабильные элементы в конце природных радиоактивных рядов имеют «магическое число» нейтронов или протонов; сечения поглощения нейтронов для изотопов с магическим числом намного ниже, чем у ближайших к ним изотопов; энергия связи для последнего в оболочке нейтрона максимальна у магического нейтронного числа, но резко понижается для следующего добавленного нейтрона; электрические квадрупольные моменты близки к нулю для магического ядерного числа; энергия возбуждения, передаваемая от основного ядерного состояния к первому возбуждённому состоянию больше для заполненных оболочек.

Модель предполагает распределение нуклонов в ядре по дискретным энергетическим уровням, заполняемым нуклонами согласно принципу Паули, и связывает устойчивость ядер с заполнением этих уровней. Ядра с полностью заполненными оболочками наиболее устойчивы. Нуклоны движутся независимо друг от друга в некотором среднем потенциальном поле (потенциальной яме), создаваемом движением всех нуклонов ядра (самосогласованном поле). Потенциал зависит от расстоя-

ния до центра ядра. Нуклоны в поле с таким потенциалом находятся на определенных уровнях энергии. В основном состоянии они заполняют нижние уровни, причём, в соответствии с принципом Паули, в одном состоянии может находиться не более одного протона и одного нейтрона.

Комбинированное взаимодействие нейтронов и протонов описывается в терминах «ядерной потенциальной ямы». Поскольку протоны – заряженные частицы, а нейтроны – нет, то протоны и нейтроны находятся в отдельных потенциальных ямах. На больших расстояниях (более нескольких ферми) никакие силы не действуют. Когда нейтрон достигает «поверхности» ядра, происходит взаимодействие с ближайшими нуклонами, и нейтрон захватывается ядром. Это взаимодействие быстро увеличивается в приповерхностной области по мере того, как нуклон входит в контакт с другими нуклонами, до тех пор, пока они не окружат его, и он не окажется внутри ядра.

При внесении в ядро протона, ядро его сначала отталкивает дальнодействующими кулоновскими силами. Только при приближении протона почти вплотную к поверхности ядра, ядерное взаимодействие начинает преобладать над отталкиванием. Ядерное взаимодействие усиливается до тех пор, пока протон не окажется окружённым нуклонами, как это было и в случае нейтрона, но в данном случае всегда имеют место отталкивания со стороны других протонов. Отталкивание уменьшает общее взаимодействие, поэтому потенциальная яма протона менее глубока, чем у нейтрона.

В отличие от свободных частиц, для которых энергия может принимать любые значения (непрерывный спектр), связанные частицы (т. е. частицы, кинетическая энергия которых меньше потенциальной), могут находиться в состояниях только с определёнными дискретными значениями энергий – дискретный спектр. Так как ядро – система связанных нуклонов, оно обладает дискретным спектром энергий и обычно находится в наиболее низком энергетическом состоянии, называемым основным.

Если передать ядру достаточную энергию, оно перейдёт в возбуждённое состояние. С ростом энергии возбуждения уровни сближаются быстрее у тяжёлых ядер, чем у лёгких. Плотность уровней зависит от чётности числа нейтронов в ядре. Для ядер с чётными (особенно магическими) числами нейтронов плотность уровней меньше, чем для ядер с нечётными, при равных энергиях возбуждения первый возбуждённый уровень в ядре с чётным числом нейтронов расположен выше, чем в ядре с нечётным.

Во всех возбуждённых состояниях ядро может находиться лишь конечное время, до тех пор, пока возбуждение не будет снято. Состояния, энергия возбуждения которых меньше энергии связи частицы или группы частиц в данном ядре, называются связанными. Состояния с энергией возбуждения, превышающей энергию связи частиц, называют-

ся возбуждёнными: ядро может испустить частицу или γ-квант и вернуться в основное состояние.

Устойчивость ядер характеризуется параметром Бора Z^2/A. Если он больше 33, то ядро радиоактивно. Последним в периодической таблице элементом, у которого ещё имеется устойчивый изотоп, является висмут $^{209}_{83}\mathrm{Bi}$. Элементы с Z от 84 до 92 не имеют ни одного устойчивого изотопа. Радиоактивны также все изотопы элементов с Z от 93 до 104. Нет ни одного устойчивого изотопа у двух относительно лёгких элементов – технеция $_{43}\mathrm{Tc}$ и прометия $_{61}\mathrm{Pm}$. У других элементов радиоактивность присуща только некоторым изотопам**.**

У сверхтяжёлых ядер магические числа нейтронов не совпадают с магическими числами протонов. Для протонов, начиная с Z=82, предсказаны магические числа 114, 126, 164 и 228, в то время как магическими числами для нейтронов после N=126 являются 184, 196, 228 и 272. Различие в магических числах – 126 (для нейтронов) и 114 (для протонов) – обусловлено кулоновским взаимодействием. Ближайший нуклид с двумя магическими числами должен быть $^{298}_{114}\mathrm{Э}$.

Замечание. Этот изотоп в настоящее время синтезирован.

Оболочечная модель ядра применима для описания лёгких и средних ядер, а также для ядер, находящихся в основном состоянии. Она качественно описывает такие характеристики нечётных ядер, как спины основных состояний, магнитные моменты, вероятности β-переходов и магнитных γ-переходов и т. д.

Однако оболочечная модель не даёт объяснения многим свойствам ядер, таким как нестабильность тяжёлых ядер или деление тяжёлых чётно-нечётных ядер тепловыми нейтронами. Эти эффекты объясняет капельная модель ядра.