

4. ТЕОРИИ СТРОЕНИЯ АТОМНОГО ЯДРА

Ядерные модели – приближённые методы описания некоторых свойств ядер, основанные на отождествлении ядра с какой-либо другой физической системой, свойства которой либо хорошо изучены, либо поддаются более простому теоретическому анализу. Таковы, например, капельная модель ядра, оболочечная модель, модель нуклонных ассоциаций. Степени свободы ядра можно разделить на одночастичные и коллективные. Соответственно ядерные модели делятся на одночастичные (модели независимых частиц), описывающие движение индивидуальных частиц, коллективные (модели с сильным взаимодействием), описывающие коррелированное движение большого числа частиц и обобщенные, в которых рассматривается как одночастичные, так и коллективные степени свободы.

Адроны и лептоны, входя в структуру ядра, определяют его свойства, в частности, устойчивость ядерной структуры. Стабильное и возбужденное состояние ядра атома описывают различными моделями, получившими название оболочечная и капельная.

4.1 Капельная модель строения ядра

Первой моделью ядра была **капельная** модель описывающая взаимодействие нуклонов в ядре, по аналогии с взаимодействием молекул в капле жидкости (Н. Бор, Дж. Уиллер, Я. Френкель).

Эту модель предложил в 1936 Н. Бор, чтобы объяснить большие времена жизни возбужденных ядер тяжёлых элементов, образующихся при захвате медленных нейтронов. Времена жизни оказались в миллион раз больше времени, необходимого нейтрону, чтобы пересечь ядро (10^{-22} с). Это свидетельствует о том, что возбужденное ядро представляет собой некую систему («составное ядро»), время существования которой намного больше времени ее образования.

Бор высказал предположение, что ядерная реакция протекает в две стадии. На первой падающая частица входит в ядро-мишень, образуя «составное ядро», где в многочисленных столкновениях теряет свою первоначальную энергию, распределяя ее среди других нуклонов ядра. В результате ни у одной из частиц не оказывается энергии, необходимой для вылета из ядра. Вторая стадия, распад составного ядра, происходит спустя некоторое время, когда энергия случайно сконцентрируется на одной из частиц или потеряется в виде гамма-излучения. Считается, что вторая стадия не зависит от деталей механизма образования составного ядра. Вид распада определяется лишь игрой возможных вариантов.

В качестве простой аналогии этой картине ядерной реакции Бор предложил рассмотреть поведение капли. Между молекулами такой капли действуют силы, связывающие их друг с другом и препятствующие испарению, пока не будет подведено тепло извне. Появление еще одной молекулы, обладающей дополнительной кинетической энергией, приводит в результате ее статистического перераспределения к увеличению температуры капли как целого. Спустя некоторое время случайная концентрация энергии на какой-либо молекуле может привести к ее испарению. Теория Бора была детально разработана и позволила построить последовательную картину разнообразных ядерных реакций, в том числе реакций под действием нейтронов и заряженных частиц промежуточных энергий (вплоть до 100 МэВ). Полезными оказались введенные по аналогии понятия ядерной температуры, удельной теплоемкости и испарения частиц. Например, угловое распределение «испарившихся» частиц оказалось не зависящим от направления падающей частицы, т.е. изотропным, поскольку вся информация о первоначальном направлении теряется на стадии существования составного ядра.

Капельная модель наилучшим образом описывает поведение **возбужденных** ядер. В этой модели атомное ядро рассматривается как сферическая капля несжимаемой заряженной жидкости радиуса $R=r_0A^{1/3}$. Основанием для аналогии с жидкостью послужило то, что плотность ядерного вещества у всех ядер вблизи линии стабильности приблизительно одинакова, что говорит о его несжимаемости. Кроме того, с жидкостью ядерное вещество сближает и свойство насыщения ядерных сил (энергия связи ядер приблизительно пропорциональна массовому числу). При расчёте энергии связи ядра учитываются объемная, поверхностная и кулоновская энергии. Дополнительно учитываются выходящие за рамки чисто капельных представлений энергия симметрии и энергия спаривания. В рамках этой модели [Вайцзеккер](#) получил полуэмпирическую формулу для энергии связи ядра:

$$E_{св}(A,Z) = a_1A - a_2A^{2/3} - a_3Z^2/A^{1/3} - a_4(A/2 - Z)^2/A + a_5A^{-3/4}, \quad (23)$$

Первое слагаемое в энергии связи ядра, подобного жидкой капле, пропорционально массовому числу A и описывает примерное постоянство удельной энергии связи ядер. Второе слагаемое - поверхностная энергия ядра уменьшает полную энергию связи, так как нуклоны, находящиеся на поверхности имеют меньше связей, чем частицы внутри ядра. Это аналог поверхностного натяжения. Третье слагаемое в энергии связи обусловлено кулоновским взаимодействием протонов. В капельной модели предполагается, что электрический заряд протонов равномерно распределен внутри сферы радиуса $R=r_0A^{1/3}$. Четвертое слагаемое - энергия симметрии ядра отражает тенденцию к стабильности ядер с $N=Z$. Пятое слагаемое - энергия спаривания учитывает повышенную стабильность основных состояний ядер с четным числом протонов и/или

нейтронов. Входящие в формулу коэффициенты a_1, a_2, a_3, a_4 и a_5 оцениваются из экспериментальных данных по энергиям связи ядер, что дает

$a_1 = 15.75$ МэВ; $a_2 = 17.8$ МэВ; $a_3 = 0.71$ МэВ; $a_4 = 94.8$ МэВ;

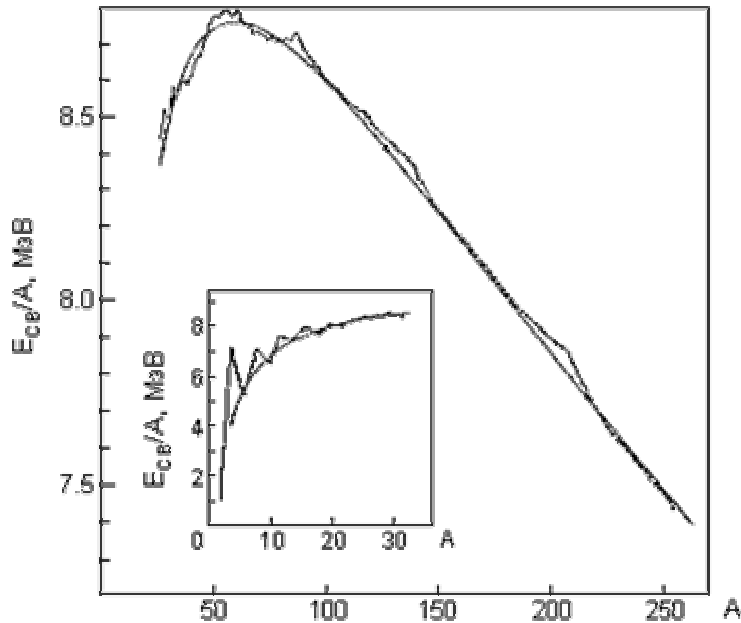
$$a_5 = \begin{cases} +34 \text{ МэВ} & \text{для четно - четных ядер} \\ 0 \text{ МэВ} & \text{для нечетных ядер} \\ -34 \text{ МэВ} & \text{для нечетно - нечетных ядер} \end{cases}$$

В этой модели, основываясь на ядерных реакциях, связанных с выбрасыванием внутриядерных частиц, ядро сравнивают с каплей жидкости, состоящей из ассоциированных молекул, на которую оно похоже, по ряду свойств, а процесс распада возбужденного ядра - с «испарением» внутриядерных частиц из возбужденного ядра. При этом предлагается, что в ядрах нуклоны сгруппированы в гелионы (ядра гелия) и тритоны (ядра трития).

Капельная модель оказалась особенно ценной при объяснении явления деления ядер, когда для развала ядра урана на две примерно равные части с большим выделением энергии достаточно поглощения одного

медленного нейтрона. Электростатическое отталкивание протонов вызывает некоторую нестабильность ядра, которая обычно перекрывается за счет ядерных сил, обеспечивающих энергию связи.

Рис.14 .Экспериментальные значения удельной энергии связи и расчет по формуле Вейцеккера



Но при повышении ядерной температуры сферической «капли» в ней могут возникнуть колебания, в результате которых капля деформируется в эллипсоид. Если деформация ядра будет продолжаться, то электростатическое отталкивание двух его положительно заряженных половин может возобладать, и тогда произойдет его деление.

4.2 Оболочечная модель ядра

Изучение ядерных реакций убедительно продемонстрировало существование энергетических уровней ядер. Эти уровни представляют собой состояния ядра с определенной энергией, которым приписаны определенные квантовые числа, как и энергетическим уровням атома.

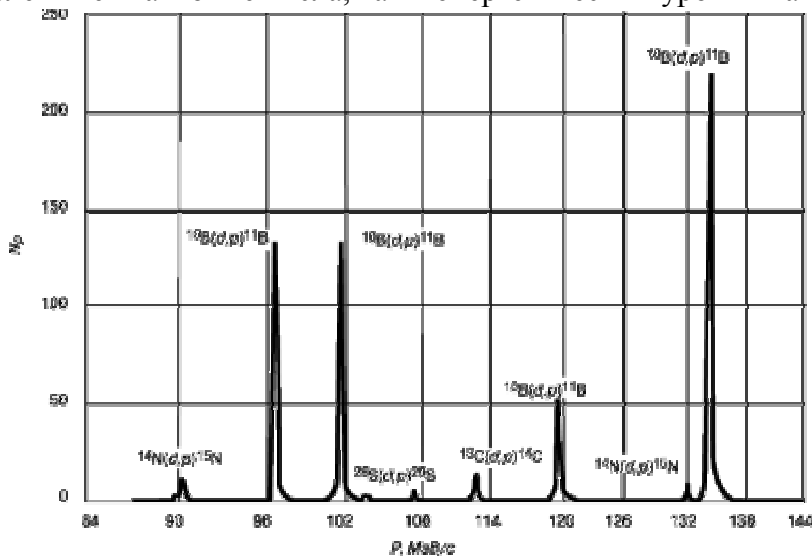
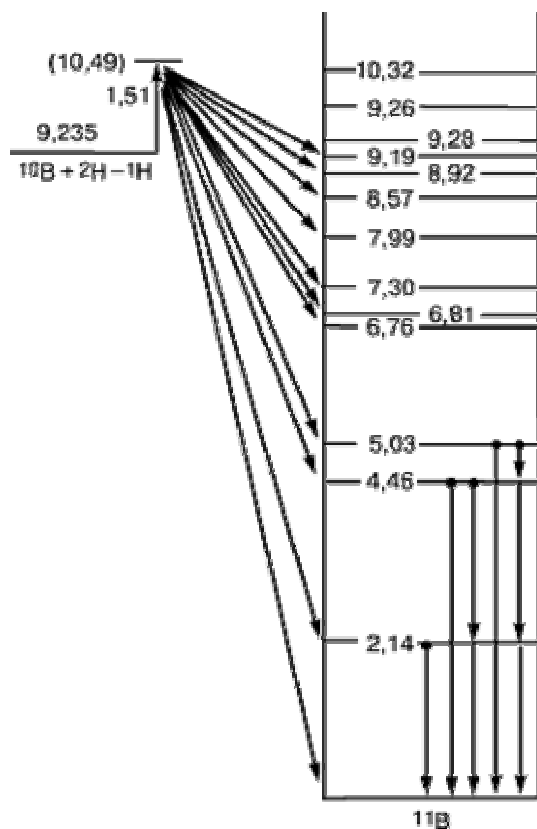


Рис. 15. Спектр протонов, возникающих в реакции $^{10}\text{B}(d,p)^{11}\text{B}$. Величина N_p – число протонов, P – импульс протона. Слабые пики отвечают примесям азота, кремния и углерода.

О существовании у ядра дискретных энергетических уровней свидетельствует то, что возбуждение ядра, приводящее к испусканию излучения, происходит лишь при определенных энергиях бомбардирующих частиц, а также то, что энергии испускаемых частиц соответствуют переходам между определенными уровнями. Например, можно измерить число протонов, образующихся при бомбардировке бора-10 моноэнергетическими дейтронами в результате реакции



и определить их импульсы по отклонению в магнитном поле. Зарегистрированный спектр протонов из мишени, содержащей бор с примесями углерода, азота и кремния, и представлен на **Рис.15**. Острые, резкие пики ясно показывают, что энергия ядра квантуется подобно энергии атома.

Рис.16. Уровни энергии ядра ${}^{11}\text{B}$. Энергия возбуждения ядра ${}^{11}\text{B}$ выражена в МэВ.

По аналогии с оптической спектроскопией исследование излучений, испускаемых ядром при переходах между энергетическими уровнями, называется ядерной спектроскопией. Однако, как можно видеть из **Рис.16**, расстояние между энергетическими уровнями ядер значительно больше, чем между электронными уровнями атомов, а к ядерным излучениям, кроме электромагнитного, относятся также излучения электронов, протонов, альфа-частиц и частиц других типов.

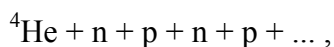
На **Рис.16** приведена схема энергетических уровней ядра бор-11 (${}^{11}\text{B}$), причем энергии возбуждения выражены в МэВ. Неравномерность распределения ядерных энергетических уровней, не характерная для распределения атомных энергетических уровней, обусловлена более плотной упаковкой ядер и более

сильным взаимодействием частиц внутри ядра. С возбужденных уровней, отвечающих ядру ${}^{10}\text{B}$, бомбардируемому дейтронами с энергией 1,51 МэВ, могут происходить переходы на любой из уровней, расположенных ниже, сопровождаемые испусканием протонов. Если после испускания протона ядро ${}^{11}\text{B}$ остается в возбужденном состоянии, оно может затем распадаться, переходя в наинизшее, «основное» состояние с испусканием одного или нескольких гамма-квантов.

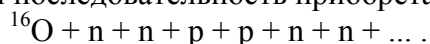
Оболочечная модель ядра – теория, основанная на представлении о ядре, как о системе нуклонов, движущихся в некотором среднем потенциальном поле, создаваемом другими нуклонами. Возникла в 1930-х гг. по аналогии с атомной моделью оболочек.

Оболочечная модель ядра описывает строение ядер, находящихся в основном, **стабильном** состоянии. Согласно этой модели, нуклоны в ядре располагаются по оболочкам, причем на каждой оболочке может находиться лишь определенное число нуклонов. Теоретически можно считать, что существуют две системы нуклонных энергетических уровней: одна - для нейтронов, а другая - для протонов, причем каждый энергетический уровень заполняется нуклонами взаимно независимо. Ядра атомов, обладающие полностью заполненными нуклонными оболочками, имеют повышенную устойчивость.

В 1932 Дж.Бартлетт заметил, что все стабильные ядра, расположенные между ${}^4\text{He}$ и ${}^{16}\text{O}$, относятся к последовательности



тогда как между ${}^{16}\text{O}$ и ${}^{36}\text{Ar}$ аналогичная последовательность приобретает вид



Он высказал предположение, что эти изменения в последовательности отражают порядок заполнения оболочек нейтронами и протонами. Принцип запрета Паули действует в случае ядерных частиц точно так же, как и в случае электронов, а в модели оболочек он приводит к тому, что на первой оболочке могут находиться только два протона и два нейтрона, на второй – по шести обеих частиц (заполнена у ${}^{16}\text{O}$) и на третьей по десяти (заполнена у ${}^{36}\text{Ar}$). Наличие периодичности в структуре ядер проявляется и дальше, хотя и с некоторыми отступлениями. Существование определенных «магических чисел» (2, 8, 20, 28, 50, 82 и 126) нейтронов и протонов в ядрах, которым соответствуют пики кривой энергии связи, можно объяснить на основе модифицированной модели оболочек (называемой моделью независимых частиц), которая позволяет правильно предсказывать спины и магнитные моменты ядер. Например, спины ядер с заполненными оболочками, как и предсказывает эта модель, равны нулю.

Устойчивость, стабильность ядер характеризуется параметром Бора, т.е. значением Z^2/A . Если численно параметр Бора имеет значение более 33, то ядро неустойчиво (**радиоактивно**). Последним в Периодической таблице элементом, у которого еще имеется устойчивый изотоп, является висмут ${}^{209}_{83}\text{Bi}$. Элементы с Z от 84 до 92 не имеют ни одного устойчивого изотопа - все они неустойчивы (**радиоактивны**).

Радиоактивны также все изотопы элементов, получаемые искусственным путем (методом ядерных реакций) - с Z от 93 до 104. Нет ни одного устойчивого изотопа у двух относительно легких элементов -

технеция $_{43}\text{Tc}$ и прометия $_{61}\text{Pm}$. У других элементов радиоактивность присуща только некоторым изотопам. Под радиоактивность принято понимать явление самопроизвольного распада ядер элементов, сопровождающееся выделением лучей высокой проникающей способности и излучением энергии.

Радиоактивный распад сопровождается выделением большого количества энергии. Радиоактивное ионизирующее излучение, кроме нагревания тел, обладают большой проникаемостью (жесткостью).

Что касается устойчивых, стабильных изотопов, то к настоящему времени для элементов с Z до 83 известно примерно 280 устойчивых изотопов. Наиболее устойчивыми являются изотопы с численными значениями параметров N и Z , равными: 2, 8, 20, 50, 82, 112, 152. Эти числа получили название магических. Дважды магическими называют ядра атомов, у которых параметры N и Z одновременно принадлежат к магическим значениям.

Дважды магические ядра атомов обладают особой устойчивостью. Полное заполнение энергетических ядерных уровней нуклонами соответствует достижению особого сочетания нуклонов, при котором силы, скрепляющие ядро (мезонные силы) максимальны.

Экспериментальные исследования выявили некоторую периодичность в изменении индивидуальных характеристик основных и возбужденных состояний ядер (таких, как энергии связи, спины, магнитные моменты, четности, некоторые особенности α - и β -распада, размещение ядер-изомеров среди остальных ядер и др.). Эту периодичность капельная модель описать была не способна (**Рис.17**).

Рис.17. Разность масс между экспериментальными значениями и предсказаниями формулы Вайцеккера для ядер с различным числом нейтронов

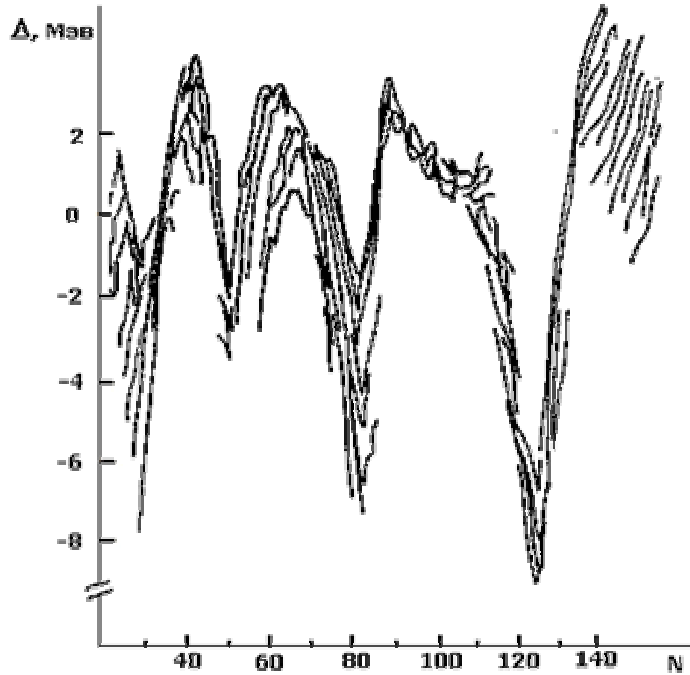
Отмеченная периодичность подобна периодичности свойств электронных оболочек атома и определяется магическими числами нейтронов и протонов:

n	2, 8, 20, 28, 50, 82, 126, 184
p	2, 8, 20, 28, 50, 82, 114

Магические числа нейтронов и протонов по аналогии с атомами соответствуют полностью заполненным оболочкам. Различие в магических числах - 126 (для нейтронов) и 114 (для протонов) - обусловлено кулоновским взаимодействием.

В 1949 М. Гепперт-Майер и Дж. Иенсен сделали решающий шаг в становлении оболочечной модели. Они поняли, что для объяснения заполнения ядерных оболочек при $N, Z = 50, 82$ и $N = 126$, необходимо учесть так называемое спин-орбитальное взаимодействие: взаимодействие спина нуклона с его орбитальным моментом количества движения. Благодаря этому им удалось воспроизвести наблюдаемые в эксперименте магические числа нуклонов. Далее они указали на важность учета принципа Паули при рассмотрении движения нуклона в ядре: принцип Паули препятствует потере энергии нуклоном при столкновении, так как все низколежащие одночастичные состояния заняты, поэтому средняя длина свободного пробега нуклона оказывается больше размеров ядра, что позволяет говорить об индивидуальных орбитах нуклонов. В модели оболочек предполагается, что нуклоны движутся независимо друг от друга в сферически-симметричной потенциальной яме. Собственные состояния нуклона в такой яме находят, решая соответствующее уравнение Шредингера. Эти состояния характеризуются квантовыми числами, которые определяют физические величины, сохраняющиеся при движении в сферически-симметричном поле. В оболочечной модели спин ядра складывается из суммы спинов и орбитальных моментов отдельных нуклонов. Принцип Паули и специфика ядерного взаимодействия приводят к тому, что все четно-четные ядра имеют спин равный 0. Четность состояния определяется произведением внутренних четностей составляющих его частиц на четности волновых функций, описывающих их движение относительно общего центра инерции. Внутренняя четность нуклонов принята положительной.

Оболочечная модель согласуется с эмпирическим правилом повышения устойчивости ядер, содержащих четное число протонов и нейтронов. Менее стабильны ядра с нечетным числом протонов, но четным числом нейтронов (и наоборот). Неустойчивыми являются ядра, в которых число протонов и



нейтронов нечетное. Последняя закономерность хорошо иллюстрируется распределением естественных известных 273-х природных изотопов по правилу четности.

Табл. 6. Распределение естественных изотопов по правилу четности.

Число изотопов	N	Z
166	четное	четное
55	четное	нечетное
47	нечетное	четное
5	нечетное	нечетное

Для 26 элементов известно лишь по одному устойчивому изотопу. Такие элементы называют моноизотопными. У других элементов, преимущественно с четными порядковыми номерами, число устойчивых изотопов доходит до 10.

Табл. 7. Количество устойчивых изотопов у элементов Периодической таблицы.

число устойчивых изотопов	2	3	4	5	6	7	8	9	10
число элементов	17	5	6	6	8	9	2	2	1

Серии элементов, состоящие из двух или более изотопов называют полиизотопными или плеядами.

Оболочечная модель строения ядра атома позволяет конструировать ядра атомов новых элементов. Например, долгое время считали, что ядра атомов с параметром $Z < 93$ получить в относительно устойчивом состоянии невозможно вследствие крайне малого времени жизни, а ядра атомов с параметром $Z > 100$ вообще нельзя получить в весовых количествах. Однако, основываясь на теоретических расчетах с привлечением положений оболочечной модели, выявили и экспериментально получили достаточно устойчивые ядра атомов с параметром $Z < 104$ в количествах, с которыми можно работать в лабораторных условиях или использовать в ядерной технологии. Полагают, что повышенной устойчивостью должны обладать ядра атомов элементов с параметрами $Z = 114; 126; 184$.

Оболочечная модель хорошо воспроизводит экспериментальные значения спинов и четностей, электрических квадрупольных и магнитных моментов атомных ядер, средние времена жизни β -активных ядер, объясняет распределение ядер изомеров. Наилучшие предсказания оболочечная модель дает для ядер вблизи заполненных оболочек, для которых самосогласованный потенциал сферически-симметричный. Однако в атомном ядре наблюдаются возбужденные состояния и другого типа - многонуклонные возбужденные состояния, в которых движение отдельных нуклонов скоррелировано. Это колебательные и вращательные возбуждения атомных ядер. Когерентные колебания протонов относительно нейтронов называются гигантскими резонансами. Наиболее изученный из них гигантский дипольный резонанс. Он наблюдается во всех ядрах. Феноменологическая теория колебательных состояний атомных ядер была разработана О. Бором (1952). По мере удаления от заполненных оболочек минимум потенциальной энергии может соответствовать деформированному ядру. У несферического ядра изменяются одночастичные уровни, меняется частота колебаний, появляются вращательные степени свободы.

Модель, которая позволила бы одновременно учесть как одночастичные так и коллективные степени свободы ядра - обобщенная модель была предложена в начале 50-х годов Д. Рейнуотером, О. Бором и Б. Моттельсоном. В этой модели предполагается сильная связь внешних по отношению к заполненным оболочкам нуклонов с остовом, что может приводить к устойчивой равновесной деформации ядра. Движение остова описывается в гидродинамической модели. Одночастичные состояния рассчитываются в деформированном потенциале.