3. ТЕОРИИ СТРОЕНИЯ АТОМНОГО ЯДРА

Ядерные модели *– приближённые методы описания некоторых свойств ядер, основанные на отожествлении 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.*

Андроны 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.

Первой моделью ядра была **капельная** модель описывающая взаимодействие нуклонов в ядре, по аналогии с взаимодействием молекул в капле жидкости. развитая в работах Н.Бора, Дж.Уиллера и Я.Френкеля. Модель наилучшим образом описывает поведение **возбужденных** ядер. В этой модели атомное ядро рассматривается как сферическая капля заряженной жидкости. Основанием для такой аналогии 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). В рамках капельной модели удалось объяснить многие свойства атомного ядра и получить полуэмпирическую формулу для энергии связи атомных ядер (формула Вайцзеккера), которая позволила понять некоторые закономерности в α- и β - распадах, делении ядер и грубо оценивать массы и энергии связи новых ядер

$$E_{св} = a_1A - a_2A^{2/3} - a_3Z^2/A^{1/3} - a_4(A/2 - Z)^2/A + a_5A^{-3/4}, \qquad (7)$$

где a_1 = 15,75 МэВ; a_2 = 17,8 МэВ; a_3 = 0,71 МэВ; a_4 = 94,8 МэВ;

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

В этой модели, основываясь на ядерных реакциях, связанных с выбрасыванием внутриядерных частиц, ядро сравнивают с каплей жидкости, состоящей из ассоциатированных 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).

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.5**).

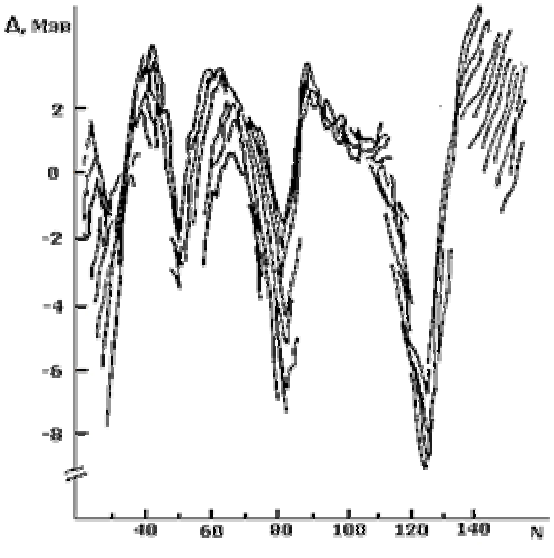

Рис.5. Разность масс между экспериментальными значениями и предсказаниями формулы Вайцзеккера для ядер с различным числом нейтронов

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.

Впервые на особую устойчивость ядер с магическим

числом нейтронов или протонов обратили внимание Бартлет (1932 г.) и Эльзассер (1933 г.). Эльзассер попытался понять стабильность магических ядер, предполагая, что нуклоны, подобно электронам в атоме, движутся независимо друг от друга в одночастичной потенциальной яме. Однако он смог объяснить только три первых магических числа: 2, 8 и 20. Работа Эльзассера осталась незамеченной, так как в то время еще не было накоплено достаточно экспериментальных данных и, кроме того, его предположение казалось совершенно невероятным, поскольку в ядре, в отличие от атома, нет выделенного силового центра, а короткодействующий характер ядерных сил, казалось бы, исключал введение результирующего среднего потенциала.

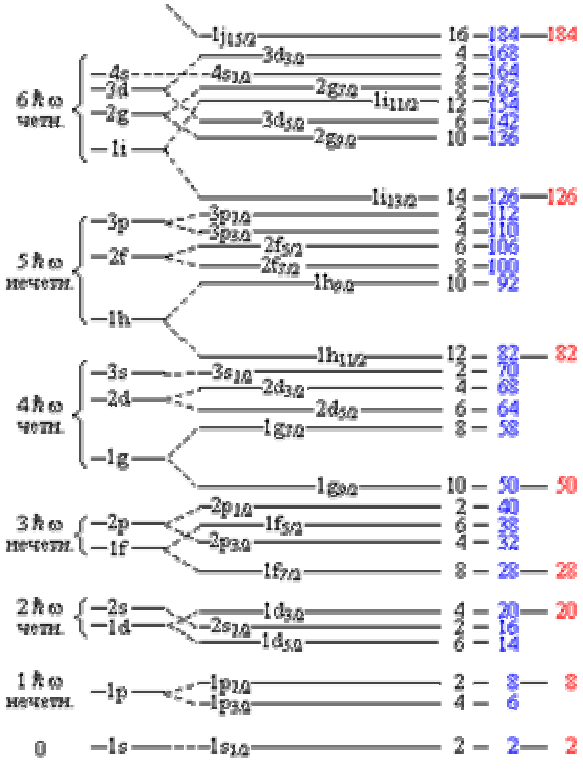

Рис.6. Одночастичные уровни в оболочечном потенциале. Приведено схематическое изображение уровней в потенциале Вудса-Саксона: слева без учета спин-орбитального взаимодействия, справа - с учетом. Фигурные скобки объединяют уровни, входящие в одну осцилляторную оболочку. Черным цветом дано число вакантных мест для нуклонов одного сорта, в синим приведено полное число частиц, красным указаны магические числа.

С течением времени, однако, накапливались все новые и новые экспериментальные доказательства существования оболочечной структуры ядер. Однако все предложенные варианты потенциальной ямы не давали правильных значений магических чисел. Наконец, 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 (**рис.6**). 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 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.

Устойчивость, стабильность ядер характеризуется параметром Бора, т.е. значением $\mathbf{Z^2 / A}$. 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 $^{209}_{83}$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 $_{43}$**Tc** и прометия $_{61}$**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 проницаемостью (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.

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 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.

Распределением 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.

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 элементов 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 г.). 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. Впервые такие расчеты одночастичных состояний с использованием деформированного аксиально-симметричного потенциала были выполнены в 1955 году Нильссоном).