

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
имени М.В. ЛОМОНОСОВА

НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ имени Д.В. СКОБЕЛЬЦЫНА

На правах рукописи

**БОБОШИН ИГОРЬ НИКОЛАЕВИЧ**

**МАГИЧЕСКИЕ ЧИСЛА И ЭВОЛЮЦИЯ ОБОЛОЧЕЧНОЙ  
СТРУКТУРЫ АТОМНЫХ ЯДЕР**

Специальность 01.04.16 – физика атомного ядра и элементарных частиц

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
доктора физико-математических наук

Москва – 2010

Работа выполнена в Отделе электромагнитных процессов и взаимодействий атомных ядер Научно-исследовательского института ядерной физики имени Д.В.Скобельцына Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова.

**Официальные оппоненты:**

доктор физико-математических наук, профессор  
**Константин Александрович Гриднев** (СПбГУ)

доктор физико-математических наук, профессор  
**Наталья Семеновна Зеленская** (НИИЯФ МГУ)

доктор физико-математических наук  
**Леонард Александрович Малов** (ОИЯИ, Дубна)

Ведущая организация:

**Институт ядерных исследований РАН,**  
117312, Москва, проспект 60-летия Октября, д. 7а

Защита состоится “ 24 ” декабря 2010 г. в 15 часов на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 501.001.77 при МГУ имени М.В. Ломоносова по адресу: 119992, г. Москва, Ленинские горы, дом 1, строение 5 («НИИЯФ МГУ, корпус 19»), аудитория 2-15.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИИЯФ МГУ.

Автореферат разослан “ 17 ” ноября 2010 г.

Ученый секретарь совета  
по защите докторских  
и кандидатских диссертаций  
доктор физико-математических наук,  
профессор

С.И.Страхова

## **Общая характеристика работы**

В диссертации получены численные параметры оболочечной структуры ядер с  $Z = 20 - 50$  и исследована связь между эволюцией оболочечной структуры и процессами формирования магических ядер с неклассическими магическими числами нуклонов.

### **Актуальность темы**

Магические числа нуклонов в атомных ядрах 2, 8, 20, 28, 50, 82, 126 были установлены к середине XX века на основе анализа большого количества экспериментальных данных о наблюдаемых свойствах ядер, таких как энергии связи, энергии состояний  $2+$  и других. Объяснить названные числа удалось в рамках оболочечной модели при рассмотрении потенциала с сильным спин-орбитальным взаимодействием. На протяжении многих лет магические числа считались неизменными. Однако развитие в последние годы новых экспериментальных методов, таких как использование пучков радиоактивных ионов, позволило исследовать свойства атомных ядер, расположенных вдали от области  $\beta$ -стабильности, и обнаружить, что в указанных ядрах некоторые классические магические числа, такие как 8, 20, 28, исчезают, одновременно появляются новые, неклассические магические числа 6, 16, 32 и другие. Анализ экспериментальных данных показывает, что аналогичные явления имеют место также в области  $\beta$ -стабильных ядер. В рамках оболочечной модели появление магических чисел ассоциируется с формированием структур с замкнутыми оболочками. Появление экспериментальных данных об изменчивости магических чисел делает актуальным тему диссертации: установление связи между эволюцией оболочечной структуры и процессами формирования магических ядер с неклассическими магическими числами нуклонов. В рамках названной темы в диссертации были поставлены и решены следующие основные задачи.

1. Получение наиболее точных и достоверных значений параметров оболочечной структуры ядер с  $Z$  от 20 до 50 на основании совместного анализа экспериментальных данных реакций срыва и подхвата и исследование на основе полученной информации процессов эволюции оболочечных структур в указанных ядрах. Названные эксперименты являются одним из самых надежных средств изучения одночастичных свойств ядер. Однако получению точных и достоверных параметров оболочечной структуры из этих экспериментов, как правило, препятствует наличие значительных систематических ошибок. Для их уменьшения автором диссертационной работы был предложен и разработан метод совместного анализа данных реакций срыва и подхвата. С его помощью в настоящей работе были получены значения энергий и заселенностей протонных и нейтронных одночастичных состояний вблизи энергий Ферми четно-четных стабильных изотопов Ca, Ti, Cr, Fe, Ni, Zn, Sr, Zr, Sn. Исследована эволюция оболочечных структур в указанных ядрах: то, как

изменяются числа заполнения и энергии одночастичных состояний с изменением чисел нуклонов, каковы закономерности этих изменений и в каких случаях они приводят к формированию структур, соответствующих тем или иным магическим числам. Полученные данные дают новое, основанное на эксперименте знание об оболочечной структуре ядер с  $Z = 20 - 50$  и позволяют проводить проверку различных теоретических моделей, описывающих одночастичные свойства ядер.

2. Систематизация и единый анализ данных о возникновении и исчезновении магических чисел в ядрах  $Z \leq 50$  на основе экспериментальной информации о наблюдаемых свойствах ядер, к которым относятся энергии уровней со спином-четностью  $2^+$ , отношения энергий уровней со спином-четностью  $4^+$  и  $2^+$ , параметры деформации, энергии отделения нуклонов и некоторые другие характеристики. Основное внимание уделялось ядрам, которые обладают свойствами магических ядер, однако не обладают классическими числами нуклонов 2, 8, 20 и др. При анализе были рассмотрены стабильные и экзотические ядра, учтены имевшиеся ранее и относительно недавно появившиеся экспериментальные данные.

3. Установление связи между динамикой - появлением и исчезновением - различных магических чисел и эволюцией оболочечной структуры соответствующих ядер. В ходе ее решения были определены также возможные основные причины такого рода эволюции.

## Основные результаты диссертации

В диссертации получены следующие новые результаты:

1. Предложен и разработан метод совместного анализа данных реакций срыва и подхвата, позволяющий снизить модельную зависимость спектроскопических факторов и значений полного переданного момента, получаемых из данных реакций срыва и подхвата, уменьшить систематические и статистические погрешности в указанных величинах и получать данные о параметрах оболочечной структуры ядер с высокой степенью точности и достоверности.
2. Впервые на основании данных реакций срыва и подхвата и данных о спинах и четностях ядерных состояний с использованием метода совместного анализа определены значения параметров оболочечной структуры ядер – числа заполнения и энергии протонных и нейтронных одночастичных состояний изотопов  $^{40,42,44,46,48}\text{Ca}$ ,  $^{46,48,50}\text{Ti}$ ,  $^{50,52,54}\text{Cr}$ ,  $^{54,56,58}\text{Fe}$ ,  $^{58,60,62,64}\text{Ni}$ ,  $^{64,66,68,70}\text{Zn}$ ,  $^{84,86,88}\text{Sr}$ ,  $^{90,92,94,96}\text{Zr}$ ,  $^{112,116,118,120,124}\text{Sn}$ .
3. Впервые на основании данных о нейтронных и протонных одночастичных состояниях, полученных на основе совместного анализа данных реакций срыва и подхвата, исследована оболочечная структура изотопов  $Z = 20 - 50$ . Обнаружены нейтронные и протонные оболочечные структуры,

соответствующие как классическим магическим числам 20, 28, 50, так и неклассическим магическим числам 40, 56, 64. Оболочечные структуры, соответствующие магическим числам, характеризуются заселенностями одночастичных состояний ниже энергии Ферми, близкими к 1, а выше энергии Ферми - близкими к 0, и большими значениями энергетических щелей между заполненными и пустыми состояниями. Показано существование параллельного и последовательного заселения одночастичных состояний при увеличении чисел нуклонов в ядрах, при которых добавленные нуклоны заселяют одновременно несколько состояний или преимущественно одно состояние соответственно. Последовательное заселение сопровождается увеличением энергетических щелей, что приводит к формированию в ядрах  $^{48}\text{Ca}$  и  $^{96}\text{Zr}$  оболочечных структур, соответствующих магическим числам  $N = 28$  и  $N = 56$  соответственно. Обнаружено формирование групп одночастичных состояний с большой плотностью в нейтронных оболочках изотопов Ni и Sn, приводящее к образованию оболочечных структур, соответствующих магическим числам  $N = 40$  и  $N = 64$  соответственно. Установлено, что энергетическое положение нейтронного одночастичного состояния  $1f_{7/2}$  понижается с увеличением числа нейтронов в изотопах Ca, Ti, Cr и повышается в изотопах Fe, и показано, что причина явления состоит в заселении нейтронных одночастичных состояний  $2p_{3/2}$ ,  $2p_{1/2}$  и  $1f_{5/2}$  в изотопах Fe и изменении эффективных нуклон-нуклонных сил, действующих на нейтроны, находящиеся в состоянии  $1f_{7/2}$ . Получены значения двухчастичных матричных элементов, характеризующие роль различных эффективных нуклон-нуклонных взаимодействий в эволюции оболочечных структур ядер с  $Z = 20 - 50$ .

4. На основании анализа экспериментальных данных об энергиях первых возбужденных состояний со спинами-четностями  $2^+$ , об отношениях энергий первых возбужденных состояний со спинами-четностями  $4^+$  и  $2^+$ , о параметрах деформации, об энергиях отделения нуклонов и других данных о наблюдаемых свойствах ядер установлено, что ядра с неклассическими магическими числами 6, 14, 16, 26, 34, 40, 56, 64 проявляют себя в виде особого рода объектов, названных уединенными магическими ядрами. Определены свойства, получен список уединенных ядер в области  $Z \leq 50$ . Свойства таких ядер аналогичны свойствам традиционных магических ядер, однако не связаны с проявлением магических чисел 2, 8, 20, 28 и т.д. Указанным ядрам соответствуют магические пары чисел нуклонов. Уединенные магические ядра не образуют изотопических или изотонических рядов, они располагаются как внутри области  $\beta$ -стабильности, так и вне этой области.
5. Показано наличие корреляций между изменениями параметров, характеризующих наблюдаемые свойства ядер вблизи уединенных магических ядер, и эволюцией параметров их оболочечной структуры, определенных из данных реакций срыва и подхвата. Экстремумам энергий первых уровней  $2^+$ , отношений энергий уровней со спинами-четностями

4+ и 2+, параметров деформации, энергий отделения нуклонов, достигаемым в уединенном магическом ядре  $^{96}\text{Zr}$ , соответствует формирование структур энергий и заселенностей нейтронных и протонных одночастичных состояний этого ядра, характерных для магических ядер. При удалении от ядра  $^{96}\text{Zr}$  магические свойства соседних изотопов и изотонов исчезают, а названные структуры одночастичных состояний разрушаются. Аналогичная связь имеет место для уединенных магических ядер  $^{68}\text{Ni}$ ,  $^{114}\text{Sn}$ . Предложена гипотеза, согласно которой спаривание нейтронов и протонов с одинаковыми полными моментами  $j$  может приводить к образованию уединенных магических ядер и определяет спины-четности ядер  $A < 100$ , имеющих по одной вакансии на протонной и нейтронной подоболочках с одинаковыми значениями  $j$ .

### **Личный вклад автора**

Автором диссертации предложен и разработан метод совместного анализа данных реакций срыва и подхвата. С помощью указанного метода получены параметры оболочечной структуры ядер с  $Z = 20 - 50$ . Обнаружено формирование нейтронных и протонных структур, соответствующих магическим числам 20, 28, 40, 50, 56, 64, обнаружены два типа заполнения подоболочек, рассчитаны усредненные двухчастичные матричные элементы эффективного нуклон-нуклонного взаимодействия, обнаружены и описаны уединенные магические ядра, установлена связь между процессами формирования уединенных магических ядер и эволюцией их оболочечной структуры, показано, что спаривание нейтронов и протонов с одинаковыми полными моментами  $j$  может приводить к образованию уединенных магических ядер.

### **Практическая ценность работы**

Практическая ценность работы обусловлена тем, что в ходе проведенных исследований был разработан метод расчета параметров оболочечной структуры ядер на основе данных реакций срыва и подхвата, который может быть использован в различных ядерных лабораториях. Полученные в работе параметры оболочечной структуры ядер  $Z = 20 - 50$  могут быть использованы для проверки теоретических моделей, описывающих одночастичные состояния. Полученный в диссертации на основе экспериментальных данных список магических пар в области  $Z \leq 50$  может быть использован для проверки теоретических моделей, предсказывающих возникновение магических чисел в атомных ядрах.

### **Апробация работы**

Материалы диссертации докладывались и обсуждались на научных семинарах НИИЯФ МГУ, ЛТФ ОИЯИ, ИЯИ РАН, а также на международных конференциях: на 36 – 41 (1986 – 1991 гг), 44 (1994 г.), 50 – 59 (2000 – 2009 гг) Международных Совещаниях по Ядерной Спектроскопии

и Структуре Атомного Ядра, на Международных конференциях по ядерной структуре «Nuclear Structure and Related Topics» (Дубна 2003, 2006), на Международных конференциях «Ядерные данные для науки и технологии» (Мито (1988), Юлих (1991), Гатлинбург (1994), Цукуба (2001), Санта Фе (2004), Ницца (2007)).

### **Структура и объем диссертации**

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка цитируемой литературы, изложена на 227 страницах, включает в себя 78 рисунков и 34 таблицы. Список литературы содержит 299 работ.

### **Содержание диссертации**

Во **введении** изложена исследуемая проблема, сформулированы тема и задачи диссертационной работы, обосновывается их актуальность. Здесь же схематично изложено содержание диссертации, распределение материала по главам и перечислены основные положения, которые автор выносит на защиту.

В **главе 1** проанализирована проблема получения параметров оболочечной структуры ядер из данных реакций срыва и подхвата и излагается разработанный автором метод совместного анализа данных таких реакций. В **§1** анализируются методы получения спектроскопических сил ядерных уровней, угловых моментов передаваемых частиц при изучении реакций однонуклонной передачи, исследуются причины возникновения систематических ошибок. Систематические ошибки в значениях спектроскопических сил могут составлять 20 – 50% и приводить к существенным противоречиям между данными реакций срыва и данными реакций подхвата. Основная часть систематических ошибок содержится в модельно-зависимой абсолютной нормировке спектроскопических сил и неопределенностях значений полного момента  $j$  переданного нуклона. Здесь же дан обзор и анализ попыток, предпринятых разными авторами для решения указанной проблемы, и показана недостаточность существующих подходов. В **§2** излагаются идеи и аппарат предложенного метода совместной оценки данных реакций срыва и подхвата, позволяющий с хорошей степенью точности и надежности получать значения энергий и заселенностей одночастичных состояний ядер-мишеней. Систематические ошибки в абсолютной нормировке получаемых в экспериментах спектроскопических сил уменьшаются за счет введения новой нормировки, а ошибки в определении полного переданного момента  $j$  - на основе учета экспериментальной информации о значениях спинов-четностей состояний конечных ядер реакций. В основу метода положены модельно-независимые правила сумм, связывающие между собой спектроскопические силы срыва и подхвата. В рамках метода происходит взаимная корректировка исходных данных из экспериментов с тем, чтобы выполнялись следующие

соотношения: для подболочек, ближайших к энергии Ферми, данные для которых представлены с максимальной полнотой, –

$$S^-(n, l, j) + S^+(n, l, j) = 2j + 1, \quad (1)$$

для остальных подболочек –

$$S^-(n, l, j) + S^+(n, l, j) \leq 2j + 1, \quad (2)$$

для всех подболочек –

$$|\sum_{nlj} S^-(n, l, j) - \sum_{nlj} S^+(n, l, j) - K| \rightarrow 0. \quad (3)$$

В соотношениях (1) – (3) использованы следующие обозначения:  $S^\pm(n, l, j)$  – суммы спектроскопических сил состояний ( $nlj$ ), надстрочные символы «+» и «-» обозначают срыв и подхват нуклона соответственно, суммирование в соотношении (3) проводится по валентной и верхним подболочкам в первой сумме и нижним подболочкам во второй, а  $K$  – число протонов или нейтронов на валентной подболочке согласно оболочечной модели без смешивания конфигураций. Спектроскопические силы с точностью до множителей равны спектроскопическим факторам. Смысл соотношения (3) состоит в условии сохранения полного количества нуклонов в ядре. Под подболочками в настоящей работе понимаются одночастичные состояния, на которые (или с которых) происходит передача нуклона в ходе реакций. Для того чтобы удовлетворить условиям (1) – (3), вводится новая нормировка спектроскопических сил ядерных состояний

$$S_i^-(n, l, j) \rightarrow n^+ S_i^-(n, l, j), \quad S_i^+(n, l, j) \rightarrow n^+ S_i^+(n, l, j). \quad (4)$$

Законность введения новых нормировок основана на модельной зависимости стандартных нормировок спектроскопических сил.

На основе экспериментальной информации о значениях спинов-четностей конечных состояний находятся все возможные варианты значений полного переданного момента  $j$  для каждого акта передачи нуклона. Это позволяет определить реалистичные интервалы изменений нормировочных множителей  $n^+$  и  $n^-$  в соотношениях (4) и взаимосогласованные значения спектроскопических сил  $n^+ S_i^+(n, l, j)$  и  $n^- S_i^-(n, l, j)$ . Взаимосогласованные спектроскопические силы используются для определения энергий одночастичных состояний ( $nlj$ )

$$-E(n, l, j) = (1 - N(n, l, j))[B(A + 1) - e^+(n, l, j)] + N(n, l, j)[B(A) + e^-(n, l, j)] \quad (5)$$

и их заселенностей

$$N(n, l, j) = \frac{n^- S^-(n, l, j) + (2j+1 - n^+ S^+(n, l, j))}{2(2j+1)}, \quad (6)$$

где  $B(A)$ ,  $B(A+1)$  – энергии отделения соответствующего нуклона в ядре-мишени и соседнем ядре,  $e^+(n, l, j)$ ,  $e^-(n, l, j)$  – центры распределений спектроскопических сил.

Основными достоинствами получаемых с помощью разработанного метода параметров оболочечной структуры являются то, что они рассчитаны на основе большого количества согласованных между собой экспериментальных данных различного рода, и то, что влияние модельных зависимостей и величины систематических ошибок минимизируется. Погрешность получаемых данных уменьшается до  $\sim 10\%$ , а обновленные спектроскопические факторы срыва и подхвата находятся в согласии друг с другом и с данными по спидам-четностям. Повышение точности с исходных 20 – 50 % происходит благодаря уменьшению как систематической, так и статистической погрешности. Для проведения расчетов на основе метода совместного анализа данных реакций срыва и подхвата были созданы соответствующие компьютерные программы.

В **главе 2** при помощи описанного выше метода исследуется нейтронная оболочечная структура четно-четных стабильных изотопов Ca, Ti, Cr, Fe, Ni, Zn, Sr, Zr, Sn. В **§2.1** представлены определенные в диссертационной работе значения энергий и заселенностей одночастичных нейтронных состояний изотопов  $^{40,42,44,46,48}\text{Ca}$  (см. рис. 1 и рис. 2), проведено сравнение с имеющимися данными, анализируются полученные результаты.

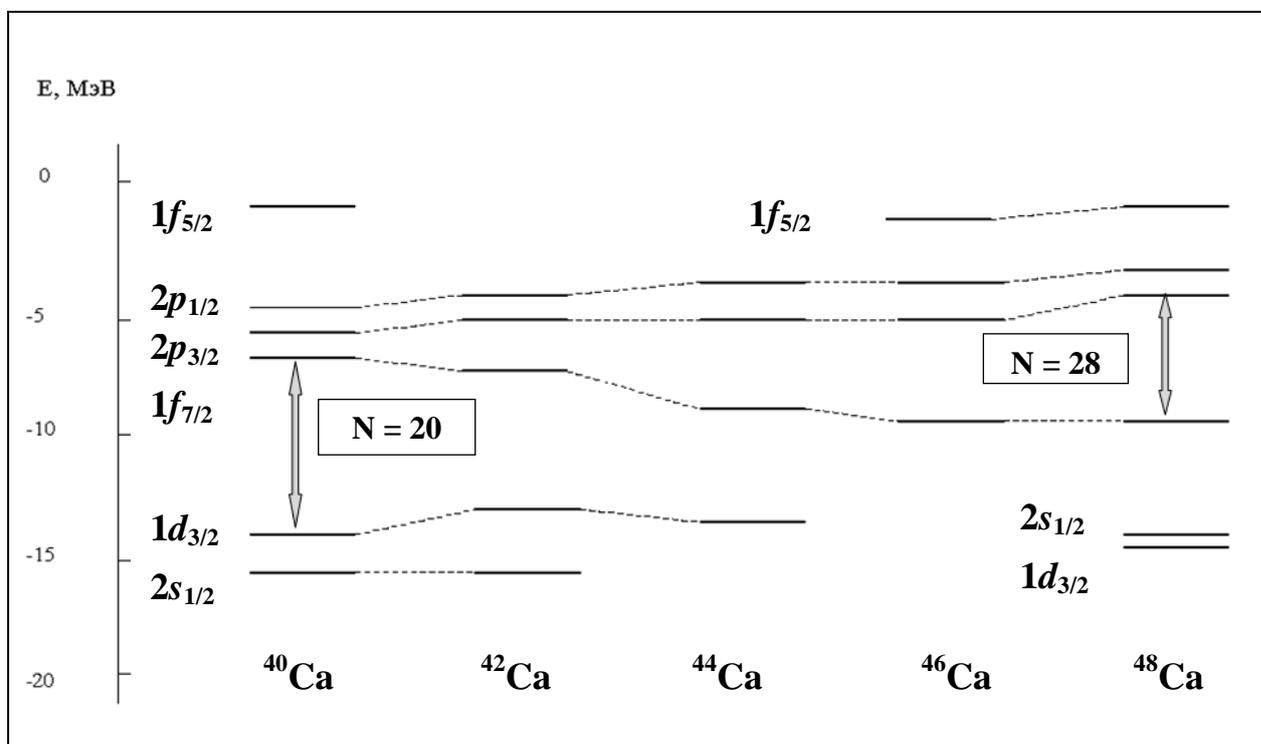


Рис. 1. Энергии (МэВ) нейтронных подоболочек ядер  $^{40,42,44,46,48}\text{Ca}$ .

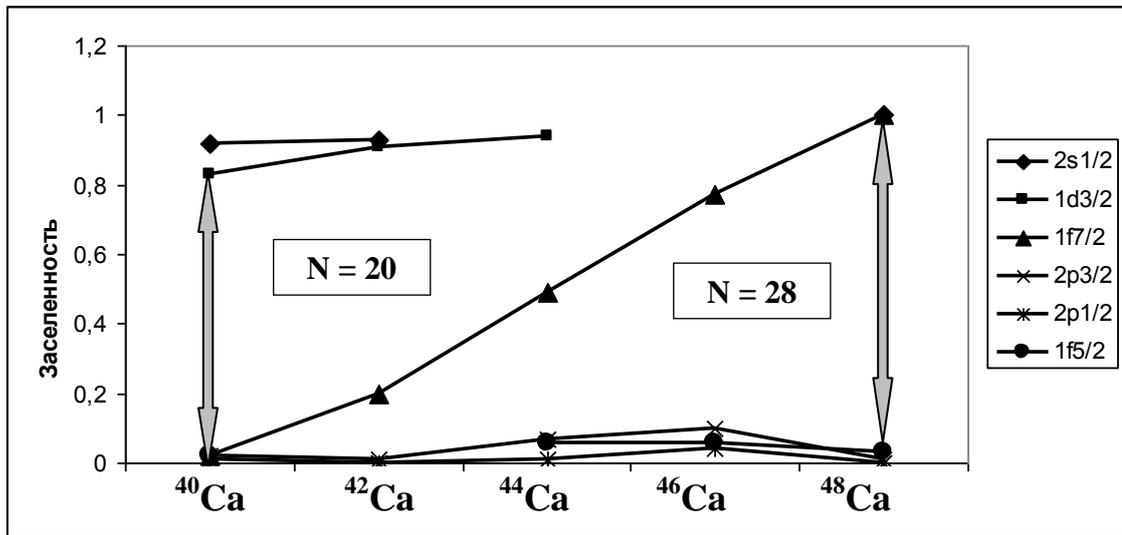


Рис. 2. Заселенности нейтронных подоболочек в изотопах <sup>40,42,44,46,48</sup>Ca. Значение 1 соответствует полностью заполненной подоболочке, значение 0 – пустой.

В полученных значениях энергий и заселенностей отчетливо проявляются магические числа  $N = 20$  и  $N = 28$ . Имеет место эволюция оболочечной структуры изотопов Ca с изменением числа нейтронов. При увеличении числа нейтронов в изотопах <sup>40-48</sup>Ca заселяется, в основном, подоболочка  $1f_{7/2}$ , ее заселенность изменяется от 0 до 1. Заселенности подоболочек  $2p_{3/2}$ ,  $2p_{1/2}$ ,  $1f_{5/2}$ , расположенных выше энергии Ферми, находятся в диапазоне от 0 до 0,1, максимум заселенностей приходится на изотопы <sup>44,46</sup>Ca (рис. 2). На рис. 1 виден процесс формирования энергетической щели, соответствующей магическому числу  $N = 28$ . В изотопе <sup>40</sup>Ca подоболочка  $1f_{7/2}$  пуста, она расположена близко к подоболочкам  $2p_{3/2}$  и  $2p_{1/2}$ , щель между  $1f_{7/2}$  и  $2p_{3/2}$  относительно мала и составляет 1,4 МэВ. По мере заполнения подоболочки  $1f_{7/2}$  ее энергетическое положение понижается, в то время как положение остальных подоболочек приблизительно постоянно (энергии подоболочек  $2p_{3/2}$  и  $2p_{1/2}$ , наоборот, несколько увеличиваются). В результате щель между нейтронными подоболочками  $1f_{7/2}$  и  $2p_{3/2}$  в изотопах <sup>40-48</sup>Ca увеличивается на 4 МэВ. В изотопе <sup>48</sup>Ca подоболочка  $1f_{7/2}$  полностью заполняется (рис.2) и одновременно щель между  $1f_{7/2}$  и  $2p_{3/2}$  достигает максимума (рис.1). Итогом является формирование нейтронного магического числа  $N = 28$  в изотопе <sup>48</sup>Ca. Найденная на основе экспериментальных данных эволюция структуры оболочек может быть описана теоретически, если учесть эффективные взаимодействия между нуклонами. Из полученных данных следует, что двухчастичные матричные элементы, описывающие в рамках модели оболочек эффективные нуклон-нуклонные взаимодействия (монопольные составляющие), равны  $V_{f_{7/2} f_{7/2}}^{nn} = -0,32$  МэВ,  $V_{f_{7/2} p_{3/2}}^{nn} = +0,18$  МэВ,  $V_{f_{7/2} p_{1/2}}^{nn} = +0,17$  МэВ,  $V_{f_{7/2} f_{5/2}}^{nn} = +0,01$  МэВ,  $V_{f_{7/2} d_{3/2}}^{nn} = 0$ ,  $V_{f_{7/2} s_{1/2}}^{nn} > +0,26$  МэВ. Отрицательный знак символизирует притяжение нуклонов, положительный знак – отталкивание. Из полученных величин следует, что в

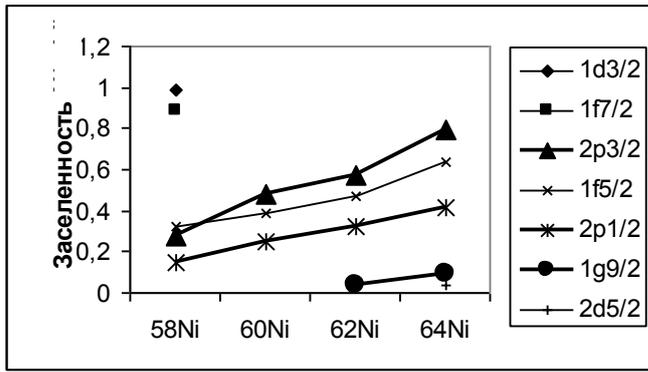


Рис. 3. Заселенности нейтронных подболочек изотопов Ni

рассматриваемом случае имеет место доминирование притягивающего взаимодействия нейтронов, заселяющих подболочку  $1f_{7/2}$ , между собой, по сравнению с остальными аналогичными взаимодействиями. В §2.2 представлены и анализируются полученные в настоящей работе данные о нейтронных подболочках изотопов  $^{46,48,50}\text{Ti}$ , в §2.3 - изотопов  $^{50,52,54}\text{Cr}$ , а в §2.4 - изотопов  $^{54,56,58}\text{Fe}$ . Из полученных данных о заселенностях изотопов Fe следует, что добавленные к изотопу  $^{54}\text{Fe}$  пары нейтронов в изотопах  $^{56,58}\text{Fe}$  распределяются приблизительно равномерно по подболочкам  $2p_{3/2}$ ,  $2p_{1/2}$  и  $1f_{5/2}$ . Иными словами, при увеличении N происходит параллельное (одновременное) заполнение нескольких подболочек. Это контрастирует с тем, как заполняется нейтронная f-оболочка в изотопах  $^{40-48}\text{Ca}$ , в которых в  $^{42}\text{Ca}$  начинает заполняться самая нижняя подболочка  $1f_{7/2}$ , и все последующие добавленные нейтроны садятся на эту подболочку. В полученных данных об изотопах  $^{54,56,58}\text{Fe}$  обращает на себя внимание повышение энергии подболочки  $1f_{7/2}$  с ростом N, по

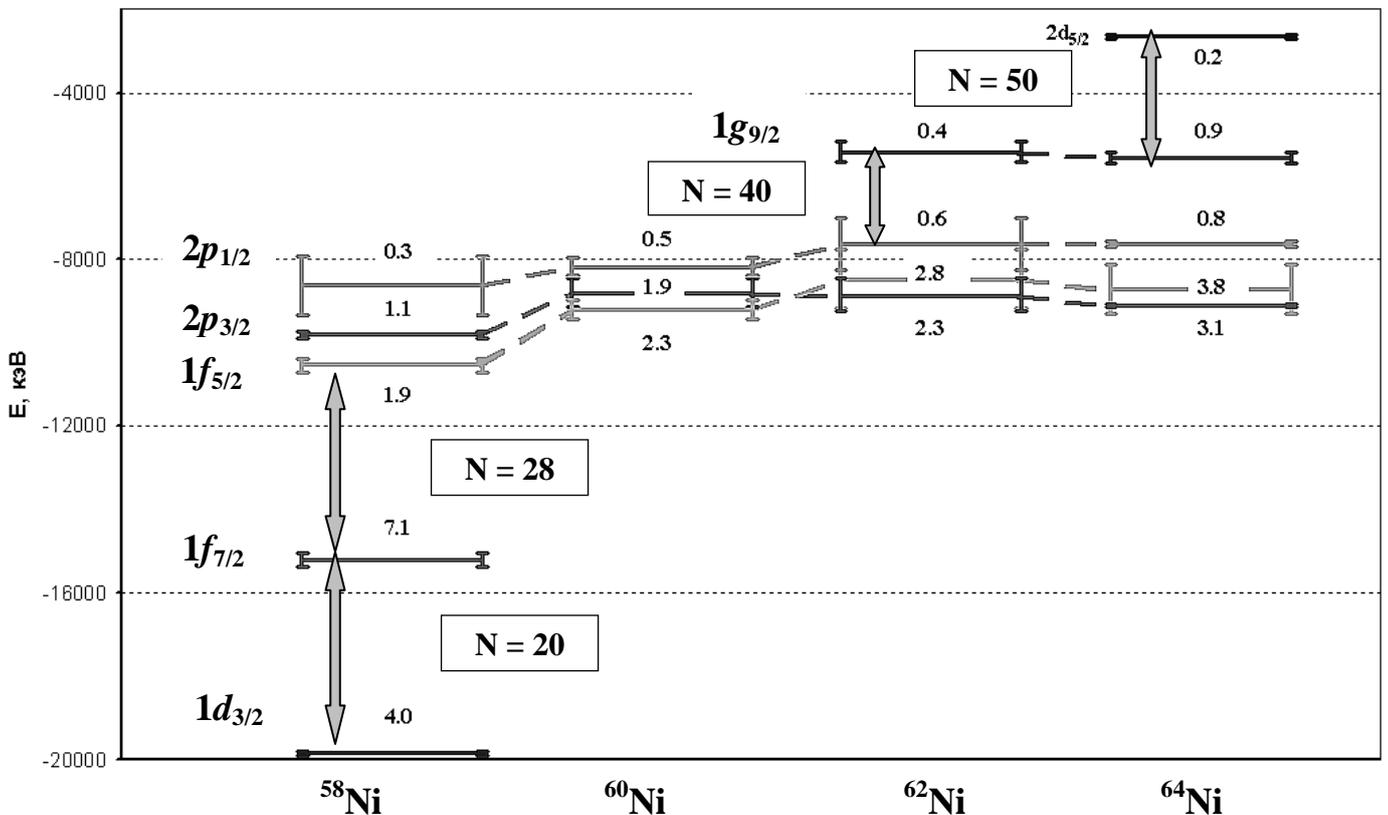


Рис. 4. Энергии (кэВ) нейтронных подболочек изотопов Ni. Над или под изображениями подболочек указаны числа нейтронов на них.

контрасту с изотопами  $^{40-48}\text{Ca}$ . Это объясняется описанной выше сменой заполняемых нейтронных одночастичных состояний изотопах Fe по сравнению с изотопами Ca и соответствующей разной силой эффективного взаимодействия нуклонов в разных состояниях, что следует из полученных в §2.2 и приведенных выше значений двухчастичных матричных элементов. В §2.5 представлены результаты исследования нейтронных подболочек изотопов  $^{58,60,62,64}\text{Ni}$ . Данные о заселенностях (см. рис. 3) свидетельствуют о параллельном заполнении нескольких подболочек. Сильное смешивание заселенностей нейтронных одночастичных состояний  $2p_{3/2}$ ,  $1f_{5/2}$ ,  $2p_{1/2}$  в изотопах  $^{58,60,62,64}\text{Ni}$  сопровождается близостью значений их энергий, которые находятся в интервале шириной 1 – 2 МэВ. Т.о., наблюдается весьма сильное вырождение указанных состояний, которое было предсказано теоретически [1]. В нейтронной оболочечной структуре изотопов Ni (рис. 4) наблюдаются энергетические щели, соответствующие как классическим магическим числам  $N = 20, 28, 50$ , так и щель, соответствующая магическому числу  $N = 40$ . В §2.6 изучаются нейтронные подболочки изотопов  $^{64,66,68,70}\text{Zn}$ . Главное отличие от данных для изотопов Ni ( $Z = 28$ ) состоит в отсутствии в структуре изотопов Zn ( $Z = 30$ ) вырождения состояний  $2p_{3/2}$ ,  $1f_{5/2}$ ,  $2p_{1/2}$  и, соответственно, в отсутствии энергетической щели, отвечающей магическому числу  $N = 40$ . Экстраполяция данных об энергиях нейтронных подболочек изотопов  $^{58-64}\text{Ni}$  (§2.5) дает значение энергетической щели между подболочками  $2p_{1/2}$  и  $1g_{9/2}$  в ядре  $^{68}\text{Ni}$  3.2 МэВ. Полученная в §2.6 величина этой щели в  $^{70}\text{Zn}$  значительно меньше и составляет 0.7 МэВ. Кроме того, относительная заселенность подболочки  $1g_{9/2}$  в  $^{70}\text{Zn}$  составляет довольно значительную величину  $\sim 0.2$ . Таким образом, из полученных данных следует вывод, что структура нейтронных подболочек, соответствующая магическому числу  $N = 40$ , которая имеет место в изотопах

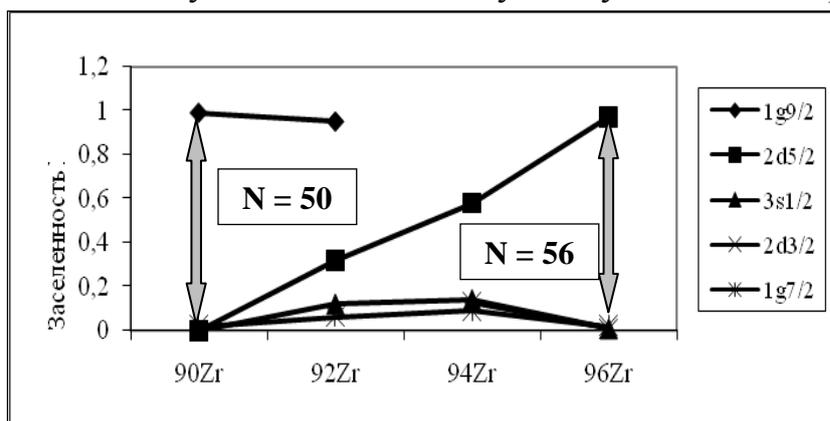


Рис. 5. Заселенности нейтронных подболочек изотопов Zr.

Ni, отсутствует в изотопах Zn. Этот результат объясняет важную и необычную особенность экспериментально наблюдаемых свойств изотопов Ni и Zn — наличие максимумов  $E(2+1)$  и минимумов параметров деформации при  $N = 40$  в изотопах Ni и их отсутствие в изотопах Zn. В §2.7 исследуются нейтронные подболочки изотопов  $^{84,86,88}\text{Sr}$  и формирование классического магического числа  $N = 50$ . В §2.8 представлены и анализируются полученные данные о нейтронных подболочках изотопов  $^{90,92,94,96}\text{Zr}$  (рис. 5 и 6). В данных об энергиях подболочек отчетливо проявляются известные

магические числа  $N = 28$  и  $N = 50$ . Энергетические щели, соответствующие этим числам, в ядре  $^{90}\text{Zr}$  составляют 6.8 и 5.3 МэВ соответственно. Наряду с этим, в полученных данных имеются свидетельства существования еще одного магического числа  $N = 56$ . Оболочечная структура, соответствующая магическому числу  $N = 56$ , формируется как итог эволюции нейтронной структуры изотопов  $^{90,92,94,96}\text{Zr}$  при увеличении числа нейтронов. С увеличением числа нейтронов в изотопах Zr происходит, главным образом, заполнение только подоболочки  $2d_{5/2}$  (рис. 5). В ядре  $^{96}\text{Zr}$  подоболочка  $2d_{5/2}$  становится полностью заполненной, а подоболочки выше  $2d_{5/2}$  являются пустыми. Положение нейтронной подоболочки  $2d_{5/2}$  понижается относительно остальных, что приводит к постепенному увеличению энергетического промежутка между ней и вышерасположенными подоболочками (рис. 6). Величина щели  $2d_{5/2} - 3s_{1/2}$  увеличивается от 1.2 МэВ в изотопе  $^{90}\text{Zr}$  до 2.3 МэВ в изотопе  $^{96}\text{Zr}$ . Увеличение энергетических щелей  $\Delta$  между нейтронными состояниями  $2d_{5/2}$  и  $3s_{1/2}$  при увеличении числа нейтронов  $N$  в изотопах  $^{90,92,94,96}\text{Zr}$  в линейном приближении подчиняется зависимости  $\Delta(\text{Zr}^N) = \Delta E(\text{Zr}^{50}) + (N - 50) \times \delta$ , где  $\delta \approx 0.18$  МэВ/нуклон.

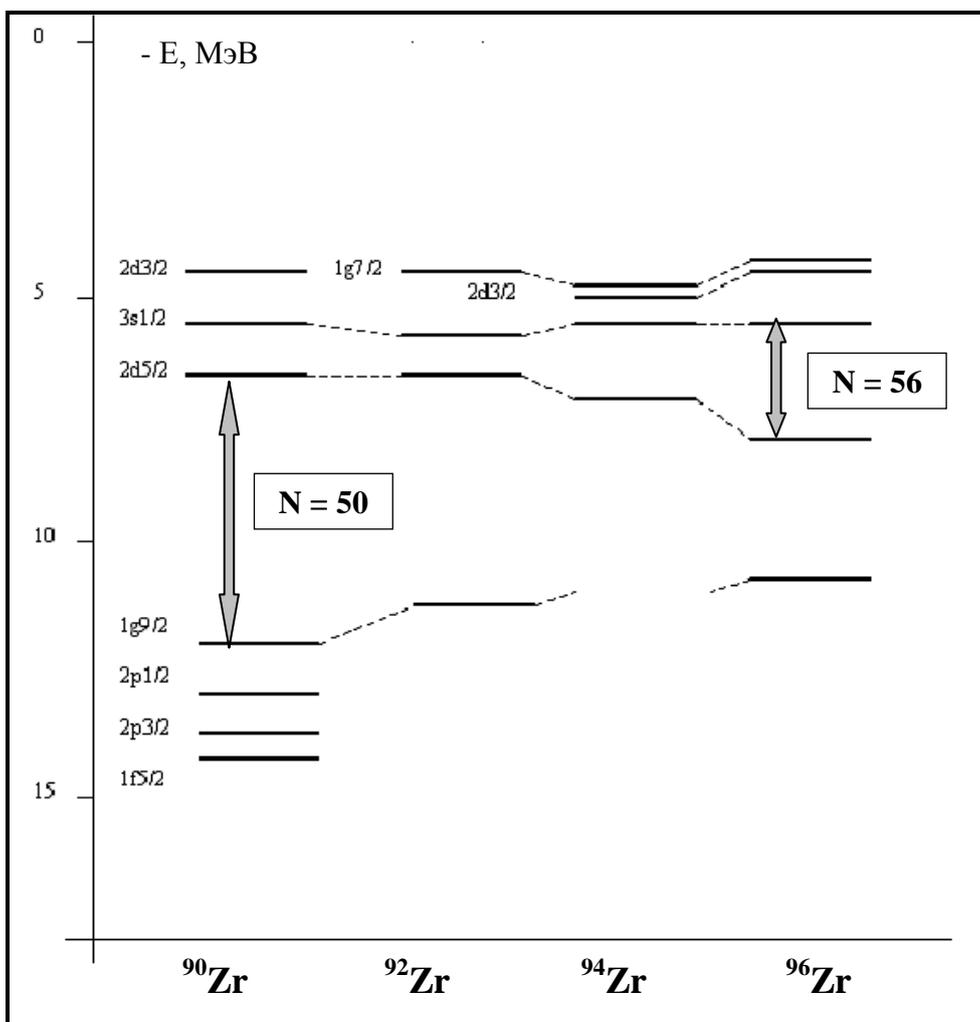


Рис. 6. Энергии (МэВ) нейтронных подоболочек изотопов Zr (фрагмент общей схемы).

Таким образом, в ядре  $^{96}\text{Zr}$  образуется структура одночастичных нейтронных состояний – и заселенностей, и энергий, характерная для магических ядер и соответствующая магическому числу  $N = 56$ . Наблюдается аналогия между формированием энергетической щели  $N = 28$  в изотопах Ca и энергетической щели  $N = 56$  в изотопах Zr (см. рис. 1 и 6, рис. 2 и 5). Анализ данных по спинам-четностям и спектроскопическим факторам уровней других ближайших изотопов и изотонов ядра  $^{96}\text{Zr}$  показывает, что сформированная в ядре  $^{96}\text{Zr}$  структура нейтронных подоболочек, соответствующая магическому числу  $N = 56$ , при удалении от этого ядра в любую сторону по  $N$  и по  $Z$  разрушается. В §2.9 приводятся полученные в работе данные о нейтронных подоболочках изотопов  $^{112,116,118,120}\text{Sn}$ . Минимальная оценка щели, соответствующей магическому числу  $N = 50$ , в изотопах Sn составляет 7 МэВ. Особенность нейтронной оболочки  $N = 51 - 82$  изотопов Sn состоит в том, что составляющие ее подоболочки устойчиво разделяются на 2 группы (см. рис. 7). В первую группу входят подоболочки

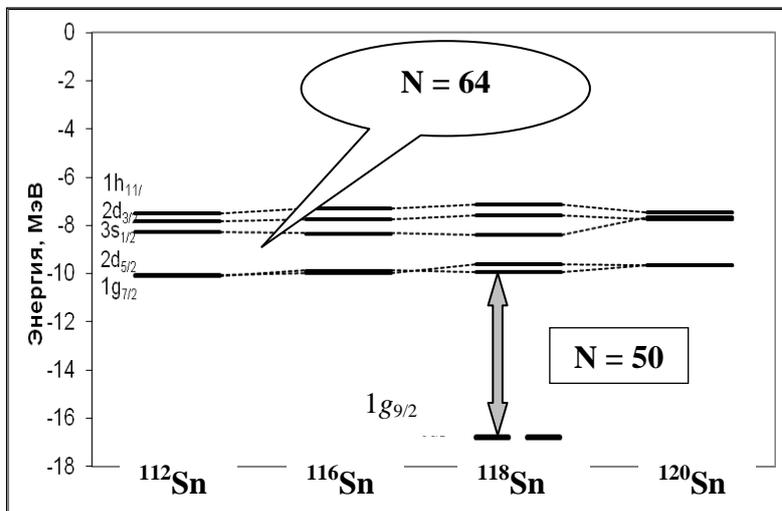


Рис. 7. Энергетические положения (МэВ) нейтронных подоболочек изотопов Sn. Указана приблизительная оценка энергии подоболочки  $1g_{9/2}$ .

$1g_{7/2}$  и  $2d_{5/2}$  с энергиями приблизительно от 10 до 9.5 МэВ. Вторую группу составляют подоболочки  $3s_{1/2}$ ,  $2d_{3/2}$ ,  $1h_{11/2}$  в диапазоне энергий приблизительно от 8.5 до 7 МэВ. Для разных изотопов промежутки между группами составляет от 1.5 до 2 МэВ. Образование двух групп подоболочек большой плотности сопровождается вырождением состояний, образующих псевдоспиновые дублеты  $2d_{5/2} - 1g_{7/2}$  и  $3s_{1/2} - 2d_{3/2}$ . Таким

образом, нейтронные одночастичные состояния изотопов Sn образуют щель, соответствующая магическому числу  $N = 64$ . Однако указанное магическое число в наблюдаемых свойствах изотопов Sn проявляет себя относительно слабо, и это объясняется тем, что заселенности подоболочек заметно отличаются от тех, которые должны быть у магических ядер. В §2.10 обобщаются данные о нейтронных подоболочках изотопов от Ca до Sn, полученные в главе 2. Двухчастичные матричные элементы, полученные на основании этих данных и описывающие монополярные нуклон-нуклонные взаимодействия, равны  $V_{f7/2 f7/2}^{pn} = -0.81$  МэВ,  $V_{f7/2 p3/2}^{pn} = -0.66$  МэВ,  $V_{f7/2 p1/2}^{pn} = -0.79$  МэВ,  $V_{f7/2 d3/2}^{pn} = -0.44$  МэВ,  $V_{f7/2 s1/2}^{pn} = -0.60$  МэВ. Вклад тензорных

сил во взаимодействие  $V_{f7/2 p1/2}^{pn}$  оценивается величиной  $- 0.09$  МэВ, вклад во взаимодействие  $V_{f7/2 p3/2}^{pn}$  - величиной  $+ 0.04$  МэВ. Знаки вкладов тензорных сил соответствуют протон-нейтронным притягивающим силам с переверотом спина (spin-flip forces). Разница значений  $V_{f7/2 p1/2}^{pn}$  и  $V_{f7/2 p3/2}^{pn}$  проясняет механизм формирования группы вырожденных нейтронных подоболочек, расположенных с высокой плотностью, в изотопах Ni, о чем говорилось ранее, при изложении §2.5. Заполнение протонной подоболочки  $1f_{7/2}$  в изотопах Ni из-за разницы сил взаимодействия вследствие наличия тензорных сил приводит к относительному понижению нейтронной  $2p_{1/2}$  и повышению нейтронной  $2p_{3/2}$  подоболочки, т.е. к уменьшению нейтронной спин-орбитальной щели  $2p$ . Вторая причина вырождения состоит в понижении положения нейтронной подоболочки  $1f_{5/2}$  и ее сближением с  $2p_{3/2}$ , что объясняется заполнением протонной подоболочки  $1f_{7/2}$  и предполагаемым в работах [1, 2] наличием притягивающих тензорных сил между протонами  $1f_{7/2}$  и нейтронами  $1f_{5/2}$ . В изотопах Zn происходит заполнение протонных подоболочек, расположенных значительно выше  $1f_{7/2}$ , и эффект пропадает. Таким образом, тензорные силы могут лежать в основе образования группы вырожденных подоболочек и формирования магического числа  $N = 40$  в изотопе  $^{68}\text{Ni}$ .

**Глава 3** посвящена исследованию при помощи метода совместного анализа данных реакций срыва и подхвата протонной оболочечной структуры четно-четных стабильных изотопов Ca, Ti, Cr, Fe, Ni, Zn, Zr, Sn. В **§3.1** приведены значения заселенностей и энергий протонных подоболочек в изотопах  $^{40,42,44,46,48}\text{Ca}$ . Щель между подоболочками  $\pi 1f_{7/2}$  и  $\pi 2p_{3/2}$  в изотопах  $^{40-48}\text{Ca}$  увеличивается на  $3.8$  МэВ – от  $0.9$  МэВ для  $^{40}\text{Ca}$  до  $4.7$  МэВ для  $^{48}\text{Ca}$ . Таким образом, формирование протонной оболочки  $1f_{7/2}$ , которой соответствует протонное магическое число  $Z = 28$ , происходит в результате эволюции протонной оболочечной структуры при заполнении нейтронной подоболочки  $1f_{7/2}$ . Обнаруженный процесс идет синхронно с процессом формирования нейтронного магического числа  $N = 28$  (см. § 2.1). На основе полученных данных определены значения величин эффективных нуклон-нуклонных монополюсных взаимодействий:  $V_{f7/2 f7/2}^{np} = - 0.87$ ,  $V_{f7/2 p3/2}^{np} = - 0.40$ ,  $V_{f7/2 p1/2}^{np} = - 0.59$ ,  $V_{f7/2 d3/2}^{np} = - 0.95$ ,  $V_{f7/2 s1/2}^{np} = - 0.43$ ; вклады тензорных сил во взаимодействия  $V_{f7/2 p1/2}^{np}$  и  $V_{f7/2 p3/2}^{np}$  оценены как  $- 0.13$  и  $+ 0.06$  соответственно. Все значения указаны в МэВ. Взаимодействия  $V_{f7/2 f7/2}^{pn}$  и  $V_{f7/2 f7/2}^{np}$ , полученные из исследования различных процессов (§2.10 и §3.1), равны  $- 0.81$  МэВ и  $- 0.87$  МэВ и находятся в хорошем согласии друг с другом, что подтверждает адекватность подходов, использующих эффективные нуклон-нуклонные силы для описания эволюции оболочечных структур. В **§3.2** - **§3.8** приведены полученные значения энергий и заселенностей протонных подоболочек  $^{46,48,50}\text{Ti}$ ,  $^{50,52}\text{Cr}$ ,  $^{54,56}\text{Fe}$ ,  $^{58,60,62,64}\text{Ni}$ ,

$^{64,66,68}\text{Zn}$ ,  $^{90,92,94,96}\text{Zr}$ ,  $^{112,116,118,120,124}\text{Sn}$  соответственно. На рис. 8 и 9 показаны заселенности и энергетические положения протонных подболочек изотопов  $^{90,92,94,96}\text{Zr}$ . Протонная оболочечная структура указанных изотопов интенсивно эволюционирует с изменением числа нейтронов.

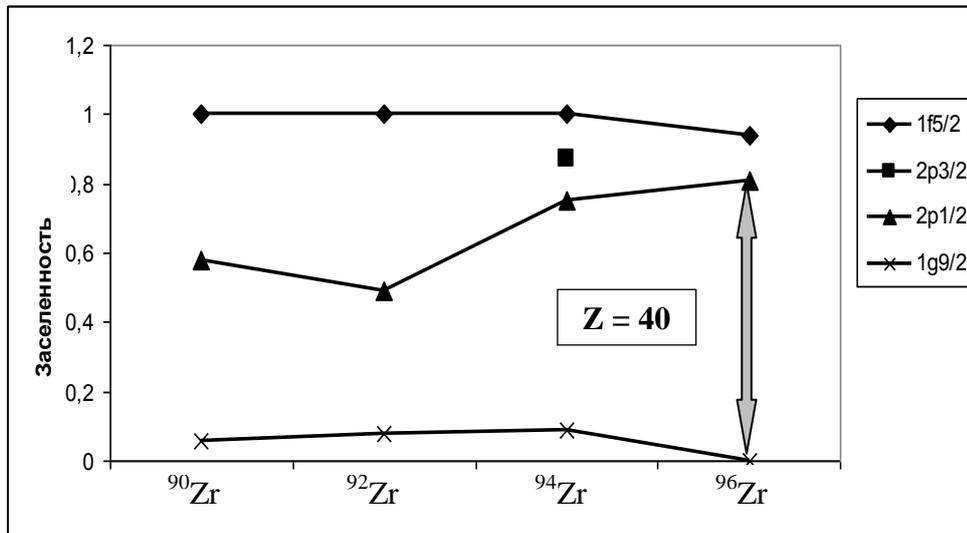


Рис. 8. Заселенности протонных подболочек изотопов Zr.

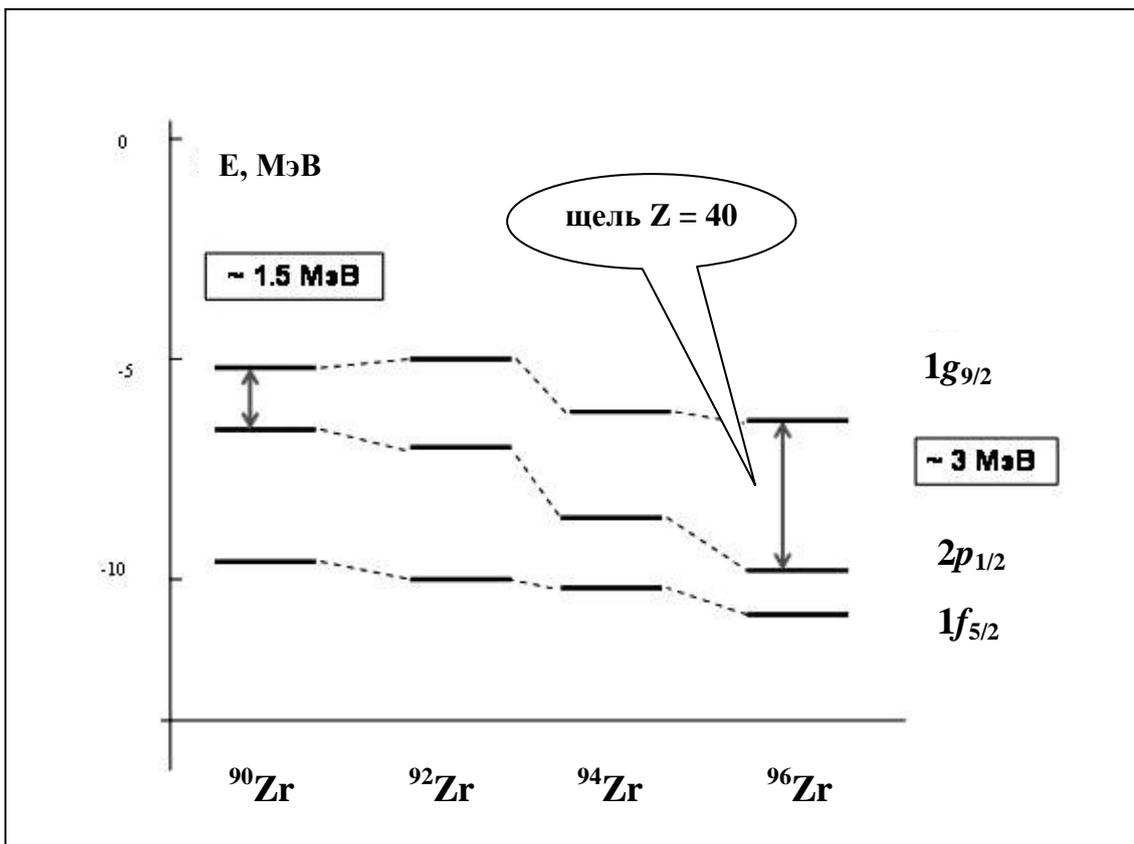


Рис. 9. Энергетические положения (МэВ) протонных подболочек

Последняя заполненная протонная подболочка  $2p_{1/2}$  меняет положение относительно других подболочек с увеличением  $N$ , следствием чего является увеличение энергетической щели между  $2p_{1/2}$  и  $1g_{9/2}$  от 1.5 МэВ для  $^{90}\text{Zr}$  до 3.0 МэВ для  $^{96}\text{Zr}$ . В линейном приближении увеличение промежутка между указанными протонными подболочками при увеличении числа нейтронов в изотопах  $^{90,92,94,96}\text{Zr}$  подчиняется правилу  $\Delta(Zr^N) = \Delta E(Zr^{50}) + (N - 50) \times \delta$  со значением  $\delta \approx 0.25$  МэВ/нуклон. В ядре  $^{96}\text{Zr}$  энергетический промежуток  $2p_{1/2} - 1g_{9/2}$  достигает своего максимума (рис.9). Заселенности протонных подболочек изменяются таким образом, что картина заселенностей в изотопе  $^{96}\text{Zr}$  приобретает вид, характерный для магического ядра (рис.8). Таким образом, в ядре  $^{96}\text{Zr}$  формируется магическая структура протонных подболочек, соответствующая магическому числу  $Z = 40$ . Анализ энергий и спинов-четностей уровней ближайших к  $^{96}\text{Zr}$  изотопов  $\text{Y}$ ,  $\text{Nb}$ ,  $\text{Ta}$  показывает, что при удалении от  $^{96}\text{Zr}$  по линии изотопов или изотонов щель между  $2p_{1/2}$  и  $1g_{9/2}$  быстро уменьшается, что означает разрушение структуры протонных подболочек, соответствующей магическому числу  $Z = 40$ . Найденная эволюция протонных подболочек в изотопах  $^{90,92,94,96}\text{Zr}$  происходит синхронно с аналогичной эволюцией нейтронных подболочек в этих изотопах, которая обнаружена ранее в §2.8. На основании данных главы 2 и главы 3 можно сделать вывод, что ядро  $^{96}\text{Zr}$  представляет собой особый, необычный объект. В нем формируются локально протонная структура, соответствующая магическому числу  $Z = 40$ , и нейтронная структура, соответствующая магическому числу  $N = 56$ , которые разрушаются при удалении от этого ядра по линии изотопов или изотонов. В §3.9 обобщаются данные о протонных подболочках изотопов от  $\text{Ca}$  до  $\text{Sn}$ , полученные в главе 3. Сделаны следующие оценки двухчастичных матричных элементов (монопольных составляющих):  $V_{f7/2 f7/2}^{pp} \sim +0.1$ ,  $V_{f7/2 p3/2}^{pp} \sim +0.4$ ,  $V_{f7/2 f5/2}^{pp} \sim +0.7$ ,  $V_{f7/2 d3/2}^{pp} \sim +0.5$ ,  $V_{f7/2 s1/2}^{pp} > +0.4$ ,  $V_{g9/2 g7/2}^{pn} \sim -0.54$ ,  $V_{g9/2 d5/2}^{pn} \sim -0.21$ ,  $V_{g9/2 d3/2}^{pn} \sim -0.32$ ,  $V_{g9/2 s1/2}^{pn} \sim -0.27$ ,  $V_{g9/2 g9/2}^{pp} \sim -0.19$ ,  $V_{g9/2 p1/2}^{pp} \sim +0.19$ . Значения указаны в МэВ. Вклады тензорного взаимодействия оцениваются как:  $-0.07$  МэВ для  $V_{g9/2 d3/2}^{pn}$ ,  $+0.04$  МэВ для  $V_{g9/2 d5/2}^{pn}$ , что соответствует наличию протон-нейтронных притягивающих сил с переворотом спина.

**Глава 4** посвящена исследованию динамики магических чисел в атомных ядрах. В ней проводится анализ экспериментальных данных о наблюдаемых свойствах, которые свидетельствуют о возникновении и исчезновении магических чисел в ядрах: данных об энергиях  $E(2^+_1)$  первых возбужденных состояний со спинами-четностями  $2^+$ , отношений энергий первых возбужденных состояний со спинами-четностями  $4^+$  и  $2^+$ , энергий отделения нуклонов, параметров деформации и других характеристик. Магические ядра характеризуются экстремумами указанных параметров. §4.1 посвящен общему анализу данных об энергиях  $E(2^+_1)$ . Ядра с классическими магическими числами протонов или нейтронов 2, 8, 20, 28, 50, 82, 126 на карте нуклидов в координатах  $(N, Z)$  образуют прямые линии изотопов или изотонов с повышенными значениями  $E(2^+_1)$ . Ядра с неклассическими

магическими числами протонов или нейтронов 14, 16, 32, 34 и др. образуют замкнутые области ядер с повышенными значениями  $E(2^+_1)$  – *острова магичности*. Они появляются в области относительно легких ядер  $Z \leq 50$ , что связано с меньшей плотностью подболочек в таких ядрах. В §4.2 обнаруженные острова магичности рассматриваются подробно. Для каждого острова определяются ядра, которым соответствуют локальные экстремумы указанных выше параметров, определяющих магичность. Каждое найденное таким образом ядро определяется как неклассическое магическое ядро.

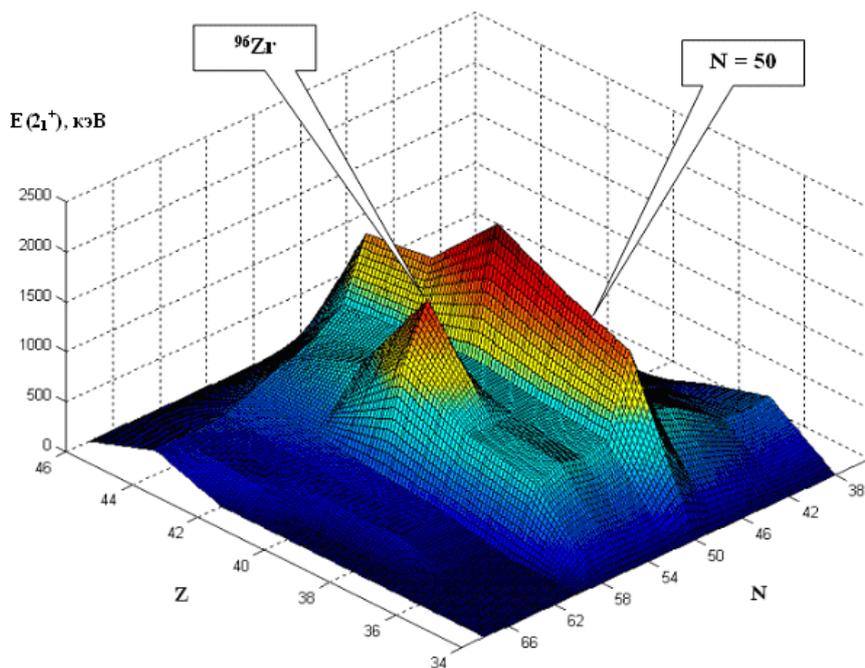


Рис.10. Энергии  $E(2^+_1)$  первых уровней в ядрах  $Z = 34 - 44$  (кэВ).  
Одиночный пик соответствует точке  $Z = 40, N = 56$  (ядро  $^{96}\text{Zr}$ ).

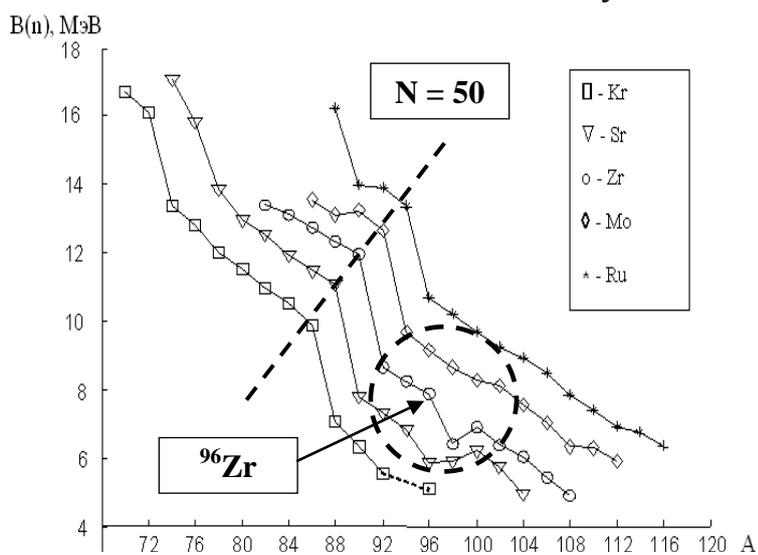


Рис. 11. Энергии отделения нейтрона в изотопах Kr, Sr, Zr, Mo, Ru (МэВ).

На рис. 10 и 11 представлены энергии  $E(2^+_1)$  и энергии отделения нейтрона в ядрах вблизи изотопов Zr. Ядра вблизи  $^{96}\text{Zr}$  образуют замкнутую область - остров магичности с изотопом  $^{96}\text{Zr}$  в центре. Изотопу  $^{96}\text{Zr}$  соответствует одиночный пик, в то время как ядрам с классическим магическим числом  $N = 50$  – линейная структура максимумов. Аналогичные результаты получены в этой области

массовых чисел  $A$  также для параметров деформации, отношений  $E(4^+_1)/E(2^+_1)$ , зарядовых радиусов, что говорит о магичности  $^{96}\text{Zr}$  как по протонному числу  $Z = 40$ , так и по нейтронному числу  $N = 56$ . При

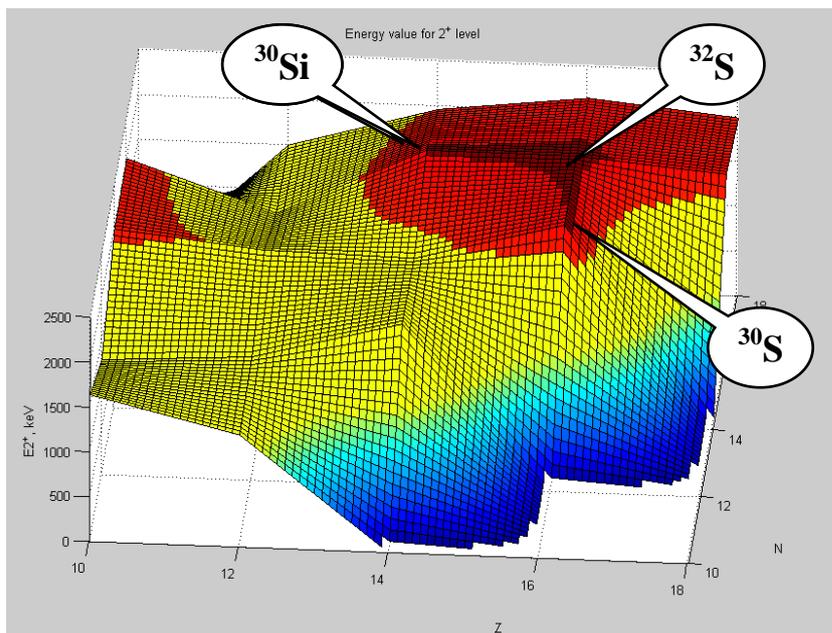


Рис. 12. Энергии (кэВ) первых возбужденных состояний  $E(2^+_1)$  ядер вблизи  $(Z, N) = (14, 16)$ ,  $(16, 16)$ ,  $(16, 14)$ .

изменении любого из чисел  $Z$  или  $N$  магические свойства ядер убывают и исчезают, поэтому для ядер, подобных  $^{96}\text{Zr}$ , используется также термин *уединенное магическое ядро*. Проводимое далее в §4.2 рассмотрение других островов магичности приводит к аналогичным результатам. В качестве еще одного примера на рис. 12 представлены энергии первых возбужденных состояний  $E(2^+_1)$  ядер вблизи  $(Z, N) = (14, 16)$ ,  $(16, 16)$ ,  $(16, 14)$ . Для ядер, удаленных от области  $\beta$ -стабильности, в некоторых случаях недостаточное количество экспериментальных данных восполняется имеющимися в литературе теоретическими оценками. Уединенные магические ядра, в отличие от классических, не имеют магических изотопов и/или изотонов и характеризуются магическими парами чисел. Итогом проведенного исследования является следующий список магических пар  $(Z, N)$ :  $(2, 6)$ ,  $(6, 8)$ ,  $(8, 6)$ ,  $(8, 16)$ ,  $(14, 16)$ ,  $(16, 14)$ ,  $(16, 16)$ ,  $(14, 20)$ ,  $(16, 20)$ ,  $(14, 26)$ ,  $(16, 26)$ ,  $(20, 34)$ ,  $(28, 40)$ ,  $(40, 56)$ ,  $(50, 64)$ . Им соответствуют ядра  $^8\text{He}$ ,  $^{14}\text{C}$ ,  $^{14}\text{O}$ ,  $^{24}\text{O}$ ,  $^{30}\text{Si}$ ,  $^{30}\text{S}$ ,  $^{32}\text{S}$ ,  $^{34}\text{Si}$ ,  $^{36}\text{S}$ ,  $^{40}\text{Si}$ ,  $^{42}\text{S}$ ,  $^{54}\text{Ca}$ ,  $^{68}\text{Ni}$ ,  $^{96}\text{Zr}$ ,  $^{114}\text{Sn}$ . В §4.3 проводится обсуждение полученного в предыдущем параграфе результата. Приведенный выше эмпирический список магических пар сравнивается со списком, предложенным Б.А.Брауном и В.Рихтером на основании «осцилляторного правила» [3]. В списке Брауна – Рихтера отсутствуют пары  $(14, 16)$ ,  $(16, 14)$ ,  $(16, 16)$ ,  $(14, 26)$ ,  $(16, 26)$  из эмпирического списка. Продолженный на более тяжелые ядра, список Брауна – Рихтера должен содержать пары  $(32, 40)$  и  $(34, 40)$ , что противоречит экспериментальным данным. Задача теоретических исследований возникновения и исчезновения магических чисел формулируется как задача описания приведенного выше списка магических пар, полученного на основании анализа экспериментальных данных.

**Глава 5** посвящена вопросам связи динамики магических чисел и эволюции оболочечной структуры атомных ядер. В **§5.1** устанавливается связь между наблюдаемыми свойствами (глава 4) и оболочечной структурой (главы 2 и 3) уединенных магических ядер. Для уединенных магических ядер  $^{96}\text{Zr}$ ,  $^{68}\text{Ni}$  и  $^{114}\text{Sn}$  в главах 2 и 3 диссертации при помощи метода совместной оценки данных реакций срыва и подхвата получены данные о протонной и нейтронной оболочечной структуре. В этих ядрах возникают структуры, характерные для магических ядер, однако, в отличие от классических структур, устойчивых при изменении  $N$  или  $Z$ , эти структуры локальны и при изменении  $N$  или  $Z$  исчезают. Так, в ядре  $^{96}\text{Zr}$  в результате синхронной эволюции нейтронной и протонной структур формируются нейтронная и протонная энергетические щели и соответствующие заселенности подоболочек (см. рис. 5, 6, 8, 9). При удалении от ядра  $^{96}\text{Zr}$  в любую сторону по линии изотопов или изотонов в соседних ядрах обе – протонная и нейтронная – указанные структуры разрушаются. Это находится в полном соответствии с динамикой свойств ядер вблизи  $^{96}\text{Zr}$  (рис. 10, 11). В изотопах  $\text{Ni}$  ( $Z = 28$ ) группа плотно расположенных нейтронных подоболочек  $2p_{3/2}$ ,  $2p_{1/2}$  и  $1f_{5/2}$  отделена от  $1g_{9/2}$  значительной щелью  $\sim 3$  МэВ (рис. 4), которая исчезает при изменении  $Z$ , в изотопах  $\text{Zn}$  ( $Z = 30$ ). Это находится в соответствии с изменениями энергий  $E(2^+_1)$ , параметров деформаций и энергий связи ядер вблизи  $^{68}\text{Ni}$ . Аналогичная ситуация имеет место для  $^{114}\text{Sn}$ . Для изотопов  $\text{Sn}$  локальность структуры, соответствующе магическому числу  $N = 64$  (рис. 7), должна быть подтверждена в будущем исследованием соседних изотопических цепочек. Таким образом, в диссертационной работе обнаружена связь между изменениями параметров, характеризующих наблюдаемые свойства ядер вблизи уединенных магических ядер, и эволюцией параметров их оболочечной структуры, определенных из данных реакций срыва и подхвата. В **§5.2 - §5.3** рассмотрены возможные причины эволюции оболочечной структуры, коротко изложены имеющиеся в литературе теоретические подходы к их описанию на основании рассмотрения эффективных двухчастичных сил. Согласно имеющимся в литературе расчетам, тензорные силы вносят главный вклад в эволюцию оболочечной структуры, которая приводит к изменению магических чисел в экзотических ядрах. Действительно, магические пары (2,6), (8,16), (14,20), (16,20), (20,34) из эмпирического списка, полученного в главе 4 диссертационной работы, объясняются в расчетах по оболочечной модели с помощью введения притягивающего тензорного взаимодействия протонов и нейтронов, имеющих полные моменты  $j = l - 1/2$  и  $j = l + 1/2$  с одинаковыми  $l$ . Однако некоторые пары из эмпирического списка не могут быть объяснены наличием тензорного взаимодействия или только учетом двухчастичных матричных элементов в рамках оболочечной модели. Например, пары (14, 16), (16, 14) соответствуют отталкивающему тензорному взаимодействию между нейтронами и протонами с подоболочек  $1d_{5/2}$  и не могут быть объяснены с его помощью. Следовательно, необходима дальнейшая разработка теоретических подходов для объяснения обсуждаемых явлений. В

**§5.4** предложена гипотеза, согласно которой взаимодействие (спаривание) нейтронов и протонов с одинаковыми  $j$  приводит к возникновению неклассических магических ядер, соответствующих магическим парам  $(Z,N) = (6,8), (8,6), (8,16), (14,16), (16,14), (16,16), (14,26), (16,26), (20,34), (40,56)$ . В ядрах, соответствующих перечисленным парам, протонные и нейтронные конфигурации имеют одинаковую особенность: в этих ядрах последними заполненными подоболочками являются протонная и нейтронная подоболочки с одинаковыми значениями полного момента  $j$ , и в добавление сверху одной из этих подоболочек находится заполненная подоболочка с двумя нуклонами, имеющими  $j = 1/2$ , т.е. либо подоболочка  $s_{1/2}$ , либо  $p_{1/2}$ . Согласно предложенной гипотезе, парное взаимодействие протона и нейтрона с одинаковыми  $j$  приводит к их пространственной взаимной переориентации, образованию пары и выигрышу в энергии связи. Роль дополнительной подоболочки с  $j = 1/2$  состоит в создании условий для более интенсивного взаимодействия нуклонов одинаковыми  $j$ . В частности, в рамках предложенной гипотезы находит свое объяснение необычный случай магичности числа  $N = 26$  в ядрах с нейтронным избытком. Экспериментальные данные о спинах-четностях основных состояний ядер с числом протонов или нейтронов 21, 23, 25, 27, экспериментальные данные о приведенных вероятностях  $B(E2)$  в нейтронно-избыточных изотопах Cl, S и P свидетельствуют о Нильссоновском расщеплении подоболочки  $1f_{7/2}$  при  $N = 26$ . Тогда проекции полного момента протона и нейтрона при  $Z = 14$  и  $N = 26$  равны, что приводит к их спариванию. При  $Z = 16$  сверху заполненной протонной подоболочки имеется заполненная подоболочка  $2s_{1/2}$  с двумя нуклонами.

В настоящей работе предполагается, что полные моменты  $j_1$  и  $j_2$  спаренных нуклонов в ядре выстраиваются либо параллельно, либо антипараллельно согласно формуле

$$\frac{(\tau_1 \cdot \tau_2)}{|\tau_1 \cdot \tau_2|} \frac{(j_1 \cdot j_2)}{|j_1 \cdot j_2|} (\pi_1 \cdot \pi_2) = -1 \quad (6),$$

где  $\pi_1$  и  $\pi_2$  - четности,  $\tau_1$  и  $\tau_2$  - изотопические спины нуклонов,  $|j_1| = |j_2|$ , круглые скобки означают скалярное произведение векторов. Нуклоны одного вида с одной и той же подоболочки, согласно (6), имеют моменты  $j_1$  и  $j_2$ , направленные противоположно. Экспериментальные данные о спинах-четностях основных состояний четно-четных ядер подтверждают эту закономерность. В случае взаимодействующих протона и нейтрона проверить равенство можно следующим образом. Спин-четность ядра с одной вакансией на протонной подоболочке и одной вакансией на нейтронной подоболочке с одинаковыми значениями  $j$  определяется парой нечетного протона и нечетного нейтрона при обеспечении условий их взаимодействия. Индикатором того, что волновые функции протона и нейтрона сильно перекрываются и условия их взаимодействия

обеспечиваются, служит существование соответствующего магического ядра. Сравнение предсказанных формулой (6) при дополнительном условии  $(\tau_1 \cdot \tau_2) < 0$  и экспериментальных значений проведено в табл. 1. Область исследуемых ядер определялась условием, чтобы можно было проследить последовательность заполнения подоболочек, исходя из соответствующих значений спинов и четностей близлежащих нечетных ядер.

Таблица 1. Сравнение предсказаний правила спаривания и экспериментальных данных.

р – n подболочки	Z	N	Ядро	Предсказание (6)	Экспериментальное значение
$1s_{1/2} - 1s_{1/2}$	1	1	${}^2\text{H}$	$1^+$	$1^+$
$1p_{3/2} - 1p_{3/2}$	5	5	${}^{10}\text{B}$	$3^+$	$3^+$
$1p_{1/2} - 1p_{1/2}$	7	7	${}^{14}\text{N}$	$1^+$	$1^+$
$1p_{1/2} - 2s_{1/2}$	7	15	${}^{22}\text{N}$	$0^-$	нет данных
$1d_{5/2} - 1d_{5/2}$	13	13	${}^{26}\text{Al}$	$5^+$	$5^+$
$2s_{1/2} - 2s_{1/2}$	15	15	${}^{30}\text{P}$	$1^+$	$1^+$
$1d_{3/2} - 1d_{3/2}$	19	19	${}^{38}\text{K}$	$3^+$	$3^+$
$1d_{3/2} - 2p_{3/2}$	19	31	${}^{50}\text{K}$	$0^-$	$(0^-, 1, 2^-)$
$1f_{7/2} - 1f_{7/2}$	27	27	${}^{54}\text{Co}$	$7^+$	о.с. $0^+$ (193 мсек) изомер $(7^+)$ (1.48 мин)
$2p_{3/2} - 2p_{3/2}$	31	31	${}^{62}\text{Ga}$	$3^+$	$0^+$
$2p_{1/2} - 2p_{1/2}$	33	33	${}^{66}\text{As}$	$1^+$	нет данных
$1f_{5/2} - 1f_{5/2}$	39	39	${}^{78}\text{Y}$	$5^+$	о.с. $(0^+)$ (50 мсек) изомер $(5^+)$ (5.7 сек)
$1f_{5/2} - 2d_{5/2}$	37	55	${}^{92}\text{Rb}$	$0^-$	$0^-$
$1g_{9/2} - 1g_{9/2}$	49	49	${}^{98}\text{In}$	$9^+$	нет данных

Данные, представленные в табл. 1, говорят в пользу предложенной гипотезы. Гипотеза предсказывает спины четности основных состояний ядер  ${}^{98}\text{In} - 9^+$ ,  ${}^{66}\text{As} - 1^+$ ,  ${}^{22}\text{N} - 2^-$ , увеличение энергии связи ядер  ${}^{40}\text{O}$ ,  ${}^{50}\text{S}$ ,  ${}^{56}\text{S}$ ,  ${}^{86,88}\text{Ni}$ .

Проведенный в главе 5 анализ позволил определить три основных фактора, приводящего к образованию уединенных магических ядер: тензорное притягивающее взаимодействие протонов и нейтронов с одинаковыми орбитальными моментами  $l$ , спаривание нейтронов и протонов с одинаковыми полными моментами  $j$ , возникновение внутри оболочек групп подболочек с большой плотностью.

**В Заключение** сформулированы основные результаты, полученные в диссертации.

## Список основных публикаций

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. I.N.Boboshin, V.V.Varlamov, B.S.Ishkhanov, I.M.Kapitonov. Single-Particle Properties of the  $1f2p$  Shell Nuclei on the Basis of Proton Stripping and Pick-Up Data Nucl.Phys. A496 (1989) 93 - 107
2. И.Н.Бобошин, В.В. Варламов, Б.С. Ишханов, И.М. Капитонов. Анализ структуры ядер  $1f - 2p$  оболочки на основе данных по нуклонному срыву и подхвату. Изв. АН СССР, сер. физ. 53, № 10 (1989) 2046 – 2061
3. И.Н.Бобошин, В.В. Варламов, Б.С. Ишханов, И.М. Капитонов. Свойства нейтронных подоболочек четно-четных изотопов  $Ti$  из совместного анализа данных по нейтронному срыву и подхвату. Известия АН СССР, сер. физ. 55, № 1 (1991) 157-161
4. И.Н.Бобошин, В.В. Варламов, Е.В. Нартова. Нейтронные подоболочки ядер  $Ti$ ,  $Cr$ ,  $Fe$ . Изв. АН СССР, сер: физ. 56, № 5 (1992) 93 – 101
5. I.N.Boboshin, V.V.Varlamov. The New ENSDF Search System NESSY: IBM/PC nuclear spectroscopy database. Nucl.Instrum.Methods Phys.Res. A369 (1996) 113 – 119
6. I.N.Boboshin, B.S.Ishkhanov, V.V.Varlamov. New Data on Nuclear Subshells Obtained from the Analysis of the Information from the International Database on Nuclear Structure ENSDF. Ядерная физика 67, № 10 (2004) 1872 – 1876
7. О.В.Беспалова, И.Н.Бобошин, В.В.Варламов, Б.С.Ишханов, Е.А.Романовский, Т.И.Спаская. Заселенности и энергии протонных подоболочек в четно-четных ядрах  $Ni$ . Изв. РАН, сер. физ. 65, № 11 (2001) 1558 - 1560
8. О.В. Беспалова, И.Н. Бобошин И.Н., В.В.Варламов, Б.С.Ишханов, Е.А. Романовский, Т.И.Спаская Т.И. Протонные подоболочки ядер  $^{46,48}Ca$ . Изв. РАН, сер. физ. 66, № 5 (2002) 714 - 718
9. О.В.Беспалова, И.Н.Бобошин, В.В.Варламов, Б.С.Ишханов, Е.А.Романовский, Т.И.Спаская. Сопоставление экспериментальных одночастичных характеристик протонных состояний в  $^{40}Ca$  с вычисленными в рамках дисперсионной оптической модели. Изв. РАН, сер. физ. 66, № 10 (2002) 1477-1482
- 10.Беспалова О.В., Бобошин И.Н., Варламов В.В, Ишханов Б.С., Романовский Е.А., Спаская Т.И. Числа нейтронов на подоболочках четно-четных ядер  $Ni$ . Изв. РАН, сер. физ. 67, № 5 (2003) 749 – 751
- 11.Беспалова О.В., Бобошин И.Н., Варламов В.В., Ишханов Б.С., Романовский Е.А., Сарсенов Ж.Б., Спаская Т.И., Тимохина Т.П., Сопоставление экспериментальных одночастичных характеристик нейтронных состояний в ядрах  $^{42,44,46,48}Ca$  с расчетными по дисперсионной модели., Известия РАН, сер.физ. 68, № 8 (2004) 1161-1164

12. О.В.Беспалова, И.Н.Бобошин, В.В.Варламов, А.В.Изотова, Б.С.Ишханов, Е.А.Романовский, Т.И.Спаская. Нейтронные подоболочки четно-четных ядер Fe. Изв. РАН, сер. физ. 69, № 1 (2005) 127-129
13. О.В.Беспалова, И.Н.Бобошин, В.В.Варламов, Т.А.Ермакова, Б.С.Ишханов, Е.А.Романовский, Т.И.Спаская, Т.П.Тимохина. Нейтронные и протонные подоболочки изотопов  $^{112,124}\text{Sn}$ . Изв. РАН, сер. физ. 69, № 5 (2005) 678-681
14. О.В.Беспалова, И.Н.Бобошин, В.В.Варламов, А.В.Изотова, Б.С.Ишханов, Е.А.Романовский, Т.И.Спаская, Т.П.Тимохина. Протонные подоболочки четно-четных изотопов железа. Изв. РАН, сер. физ. 69, № 5 (2005) 675-677
15. Беспалова О.В., Бобошин И.Н., Варламов В.В., Ишханов Б.С., Романовский Е.А., Спаская Т.И., Тимохина Т.П., Протонные и нейтронные подоболочки четно-четных ядер Sn., Известия РАН, сер. физ. 69, № 1 (2005) 116-119
16. О.В.Беспалова, И.Н.Бобошин, В.В.Варламов, Т.А.Ермакова, Б.С.Ишханов, Е.А.Романовский, Т.И.Спаская, Т.П.Тимохина. Исследование нейтронный оболочечной структуры четно-четных изотопов  $^{40-56}\text{Ca}$  в рамках дисперсионной оптической модели. ЯФ 68, № 2 (2005) 216-232
17. Беспалова О.В., Бобошин И.Н., Варламов В.В., Ермакова Т.А., Изотова А.В., Ишханов Б.С., Романовский Е.А., Спаская Т.И., Тимохина Т.П., Нейтронные подоболочки четно-четных ядер изотопов хрома., Известия РАН, сер. физ. 69, № 11 (2005) 1689-1691
18. О.В.Беспалова, И.Н.Бобошин, В.В.Варламов, Б.С.Ишханов, Е.А.Романовский. Информация о структуре ядер из международной базы данных:  $^{96}\text{Zr}$  – новое дважды магическое ядро. Изв. РАН, сер. физ. 70, № 5 (2006) 661-668
19. Беспалова О.В., Бобошин И.Н., Варламов В.В., Ермакова Т.А., Ишханов Б.С., Романовский Е.А., Спаская Т.И., Тимохина Т.П. Исследование особенностей нейтронной и протонной оболочечной структуры изотопов  $^{90-96}\text{Zr}$ . Ядерная Физика 69, № 5 (2006) 824-837
20. Беспалова О.В., Бобошин И.Н., Варламов В.В., Ермакова Т.А., Ишханов Б.С., Романовский Е.А., Спаская Т.И., Тимохина Т.П. Нейтронные подоболочки ядер  $^{84,86,88}\text{Sr}$ : магическое ядро  $^{88}\text{Sr}$ . Известия РАН, сер. физ. 70, № 5 (2006) 694-697
21. Беспалова О.В., Бобошин И.Н., Варламов В.В., Ермакова Т.А., Ишханов Б.С., Романовский Е.А., Спаская Т.И., Тимохина Т.П. Протонные подоболочки ядер  $^{50,52}\text{Sr}$ . Известия РАН, сер. физ. 70, № 5 (2006) 690-693
22. И.Н.Бобошин, В.В.Варламов, Б.С.Ишханов, Е.А.Романовский. Новые магические ядра и условия их образования. Известия РАН, сер. физ. 71, №3 (2007) 339 - 345
23. I.N.Boboshin, V.V.Varlamov, B.S.Ishkhanov, E.A.Romanovsky. New Double Magic Nucleus  $^{96}\text{Zr}$  and Conditions for Existence of New Magic Nuclei. Ядерная физика 70, №8 (2007) 1407- 1412
24. И.Н.Бобошин. Новые магические ядра и нейтрон-протонное спаривание. Ядерная Физика 71, №7, (2008) 1278 – 1282

25. О.В. Беспалова, И.Н. Бобошин, В.В. Варламов, Т.А. Ермакова, Б.С. Ишханов, С.Ю. Комаров, Х. Коура, Е.А. Романовский, Т.И. Спасская. Энергии одночастичных протонных состояний 1f и 2p в изотопах  $^{58,60,62,64}\text{Ni}$ . Известия РАН, сер. физ. 73, № 6 (2009) 867-870
26. I. Angeli, Yu. P. Gangrsky, K. P. Marinova, I. N. Boboshin, S. Yu. Komarov, B. S. Ishkhanov and V V Varlamov. N and Z dependence of nuclear charge radii. J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. 36 (2009) 085102 - 085127
27. И. Н. Бобошин, С. Ю. Комаров. Параметры одночастичной структуры изотопов  $^{64,66,68,70}\text{Zn}$ . Известия РАН, сер. физ. 73, № 11, (2009) 1541–1547

### **Цитируемая литература**

- [1] M. Honma, T. Otsuka, B. A. Brown, T. Mizusaki, Phys. Rev. C65 (2002) 061301
- [2] T. Otsuka, T. Suzuki, and Yu. Utsuno, Nuclear Physics A 805 (2008) 127
- [3] B. A. Brown and W. A. Richter, Phys. Rev. C72 (2005) 057301

**БОБОШИН ИГОРЬ НИКОЛАЕВИЧ**

**МАГИЧЕСКИЕ ЧИСЛА И ЭВОЛЮЦИЯ ОБОЛОЧЕЧНОЙ  
СТРУКТУРЫ АТОМНЫХ ЯДЕР**

Специальность 01.04.16 – физика атомного ядра и элементарных частиц

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
доктора физико-математических наук

Цифровая печать. Тираж 100 экз.  
Заказ № Т-229

Отпечатано в типографии КДУ.  
Тел.: (495) 939-44-91. E-mail: [press@kdu.ru](mailto:press@kdu.ru)