

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

имени М.В. Ломоносова

Научно-исследовательский институт ядерной физики

имени Д.В. Скобельцына

На правах рукописи

Комаров Сергей Юрьевич

СТРУКТУРА ЯДЕР 1f-2p ОБОЛОЧКИ

Специальность 01.04.16 –

физика атомного ядра и элементарных частиц

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

Москва - 2009

Работа выполнена в Отделе электромагнитных процессов и взаимодействий атомных ядер НИИ ядерной физики МГУ имени Д.В. Скобельцына.

Научный руководитель:

кандидат физико-математических наук

Игорь Николаевич Бобошин

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук

Леонард Александрович Малов (ОИЯИ, Дубна)

доктор физико-математических наук, профессор

Наталья Семеновна Зеленская (НИИЯФ МГУ)

Ведущая организация:

Институт ядерных исследований РАН,

117312, Москва, проспект 60-летия Октября, д. 7а

Защита состоится « 18 » _____ декабря _____ 2009 года в « 15 » часов на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д501.001.77 при Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова по адресу: 119991, г. Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 5, «19 корпус НИИЯФ МГУ», аудитория 2-15.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИИЯФ МГУ.

Автореферат разослан « 10 » _____ ноября _____ 2009 г.

Ученый секретарь совета

по защите докторских

и кандидатских диссертаций Д501.001.77

доктор физико-математических наук,

профессор



С.И. Страхова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Модель оболочек является основой современного понимания структуры атомного ядра. В рамках этой модели большое значение имеет волновая функция основного состояния ядра, которая может быть представлена в терминах чисел нуклонов, заселяющих отдельные подоболочки. Такие волновые функции вместе с энергетическими положениями состояний одночастичного гамильтониана ядра несут прямую информацию об оболочечной структуре ядра. Полученная экспериментально информация такого типа позволяет провести эффективную проверку предсказаний различных теоретических моделей.

Надежные данные по одночастичной структуре основных состояний ядер в настоящее время могут быть получены, прежде всего, в реакциях однонуклонной передачи, т.е. в реакциях срыва и подхвата нуклонов. Однако при извлечении данных из результатов экспериментов этого типа, как правило, возникают разного рода систематические ошибки, снижающие ценность и информативность данных.

В Отделе электромагнитных процессов и взаимодействий атомных ядер НИИЯФ МГУ был разработан математический метод совместного анализа данных ядерных реакций по срыву и подхвату нуклона, а также соответствующий комплекс программ для его реализации. С использованием названных средств были получены параметры протонных и нейтронных подоболочек ядер начала 1f-2p оболочки – Ti, Cr, Fe. В последующих работах подобные результаты получены для других изотопов – Ca, Ni, Sr, Zr, Sn. По мере продвижения в область середины 1f-2p оболочки стал ясен сложный характер оболочечной структуры исследуемых ядер. В них заполняемая подоболочка расположена очень близко к соседним подоболочкам и происходит интенсивное смешивание конфигураций. Более сложная исследуемая структура приводит к необходимости решать более сложные задачи по анализу данных. Насущной задачей стала модернизация имеющегося комплекса программ и на его основе дальнейшее изучение структуры атомных ядер с привлечением наиболее точных и достоверных спектроскопических данных.

Цели работы. Целью диссертационной работы являлось получение количественных характеристик структуры (заселенностей и энергетических положений подоболочек) ядер середины 1f-2p оболочки и нахождение закономерностей заполнения нуклонных подоболочек в указанных ядрах.

Основные результаты диссертационной работы.

Создан новый программный комплекс для реализации метода совместного анализа данных реакций срыва и подхвата. Новизна разработанного комплекса состоит в создании возможностей проверки всех гипотез значений полного переданного момента j и гибкого управления и контроля над всеми этапами вычислений, что приводит к существенному повышению эффективности расчетов. Созданный программный комплекс позволяет на основе экспериментальных данных реакций однонуклонной передачи и данных о спинах и четностях уровней получать точные и надежные значения энергий и заселенностей ядерных подболочек.

1. Получены новые данные – энергии и заселенности протонных подболочек ядер $^{58,60,62,64}\text{Ni}$, $^{64,66,68}\text{Zn}$ и нейтронных подболочек ядер ^{50}Ti , ^{52}Cr , ^{54}Fe , $^{58,60,62,64}\text{Ni}$, $^{64,66,68,70}\text{Zn}$. Кроме того, для некоторых из указанных ядер определены энергии Ферми, значения целевых параметров и фрагментационных ширин распределения спектроскопических сил.

2. Обнаружено и количественно описано явление вырождения нейтронных подболочек $2p_{3/2}$, $1f_{5/2}$, $2p_{1/2}$ в ядрах $^{58,60,62,64}\text{Ni}$, которое проявляется в их близком энергетическом положении и в приблизительно равномерном распределении нейтронов по ним.

3. Показано, что энергии и заселенности протонных подболочек изотопов $^{58,60,62,64}\text{Ni}$ соответствуют классической оболочечной модели с присутствием небольшой доли состояний, возникающих благодаря конфигурационному смешиванию.

4. Установлено, что заполнение нейтронных подболочек в ядрах $^{64,66,68,70}\text{Zn}$ характеризуется большой степенью смешивания одночастичных состояний. При увеличении числа нейтронов в изотопах Zn нейтронная подболочка $1g_{9/2}$ интенсивно заполняется, и в ^{70}Zn на ней находится порядка 2 нейтронов. Энергетическая щель между подболочками $2p_{1/2}$ и $1g_{9/2}$ в ядре ^{70}Zn значительно меньше аналогичной щели в ^{68}Ni . Полученные результаты позволили связать особенности одночастичной структуры и имеющиеся данные об энергиях первых возбужденных состояний 2^+ и параметрах деформации ядер Ni, Zn.

5. Обнаружено, что энергетические положения протонных подболочек изотопов Zn в целом соответствуют классической оболочечной модели. При этом смешивание конфигураций приводит к образованию большого числа вакансий на низколежащей подболочке $1f_{7/2}$ и заполнению подболочек выше $2p_{3/2}$. Особенно сильно этот эффект наблюдается у изотопа ^{64}Zn , в меньшей степени у изотопов ^{66}Zn , ^{68}Zn .

6. На основании результатов сравнительного анализа полученных данных о протонной структуре изотопов Ni и Zn с имеющимися в литературе данными было установлено, что причиной имеющихся расхождений является недооценка в ранних работах роли ядерных уровней с высокими энергиями возбуждения и использование необоснованных ограничений на физические значения переданного полного момента j .

На основании сравнения полученных данных о нейтронной структуре изотопов $^{58,60,62,64}\text{Ni}$ с результатами расчетов в рамках трех модельных подходов установлено, что наилучшее согласие демонстрируют дисперсионно-оптическая модель (ДОМ) и оболочечная модель Монте-Карло (MCSM), и в меньшей степени – релятивистская модель среднего поля (РМСП).

Научная новизна работы. Получены новые, достоверные и взаимосогласованные данные об оболочечной структуре стабильных четно-четных изотопов Zn, Ni, ядер ^{50}Ti , ^{52}Cr , ^{54}Fe . Обнаружены ранее неизвестные особенности заполнения подоболочек в указанных ядрах. Для изотопов $^{64, 66, 68, 70}\text{Zn}$ параметры нейтронных, а для ^{68}Zn параметры протонных подоболочек получены впервые.

Практическая ценность работы. Создан новый программный комплекс для реализации метода совместного анализа данных реакций срыва и подхвата, позволяющий получать точные и надежные значения энергий и заселенностей ядерных подоболочек. Полученные в работе численные характеристики структуры ядер 1f-2p оболочки могут применяться для проверки верности предсказаний моделей атомных ядер.

Личный вклад автора. Основные результаты, представленные в диссертации (новый программный комплекс, новые данные – параметры нуклонных подоболочек, анализ полученных данных), получены самим автором, либо при его непосредственном участии.

Апробация работы. Основные результаты, изложенные в диссертации, опубликованы в 4-х научных статьях, представлены в 5 тезисах докладов и докладывались на следующих конференциях:

- 57-я Международная конференция по проблемам ядерной спектроскопии и структуры атомного ядра «Ядро – 2007. Фундаментальные проблемы ядерной физики, атомной энергетики и ядерных технологий» (2007, г. Воронеж),

- 58-я Международная конференция по проблемам ядерной спектроскопии и структуры атомного ядра «Ядро – 2008. Проблемы фундаментальной ядерной физики. Разработка ядерно-физических методов для нанотехнологий, медицинской физики и ядерной энергетики» (2008, г. Москва),
- 59-я Международная конференция по проблемам ядерной спектроскопии и структуры атомного ядра «Ядро-2009. Фундаментальные проблемы и прикладные аспекты ядерной физики: от космоса до нанотехнологий» (2009, г. Чебоксары).

Полный список публикаций (9 работ) приведен в конце автореферата.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы, содержит 132 страницы, 25 рисунков, 18 таблиц. Список литературы содержит 154 наименования.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Глава 1 посвящена описанию физики ядерных реакций срыва и подхвата нуклонов, особенностей извлечения физических величин из данных реакций, выяснению факторов, приводящих к неопределенностям в экспериментальных данных. В ней изложен метод совместного анализа данных, полученных в экспериментах по нуклонному срыву и подхвату. В этой главе также приводятся сведения о базах ядерных данных, использованных в ходе исследования ядерной структуры в диссертационной работе.

В **§1.1** дается общее описание прямых ядерных реакций срыва и подхвата нуклона. Важнейшая характеристика, измеряемая в реакциях срыва и подхвата нуклона – спектроскопический фактор, или, с точностью до коэффициентов, спектроскопическая сила S_j , образовавшегося состояния конечного ядра. Числа заполнения и энергии нуклонных подболочек определяются простыми и энергетически взвешенными суммами спектроскопических сил, соответственно.

В **§1.2** разбираются основные источники систематических ошибок в данных реакций однонуклонной передачи. Основные источники неопределенностей в спектроскопических данных следующие:

- ошибки в нормировке спектроскопических сил S_j ;
- ошибки в определении полного момента j переданного нуклона.

Результатами являются наличие больших, порядка 20 - 30 % и более, погрешностей в значениях спектроскопических сил и несогласованность данных срыва и подхвата.

В §1.3 подробно изложен метод совместного анализа данных. Метод состоит в согласовании данных экспериментов срыва и подхвата на одном начальном ядре и данных о спинах-четностях состояний конечных ядер реакций, для чего используются модельно-независимые правила сумм и перенормировка спектроскопических сил. Метод позволяет уменьшить систематические ошибки в данных такого рода, в результате точность согласованных данных повышается до 10% и появляется возможность надежно определять параметры нуклонных подболочек, прежде всего – энергии и заселенности.

§1.4 содержит краткий обзор баз данных (ENSDF, NSR, NUDAT и др.), содержащих наиболее полные экспериментальные и оцененные спектроскопические данные, а также библиографическую информацию. Информация из этих баз данных была использована в представленной работе.

В Главе 2 представлено подробное описание новой программной реализации метода совместного анализа данных экспериментов по изучению реакций срыва и подхвата, сделанной автором диссертационной работы, которая представляет собой результат модернизации и дальнейшего развития программного алгоритма метода, разработанного ранее.

В §2.1 изложены ключевые особенности модернизации компьютерного обеспечения

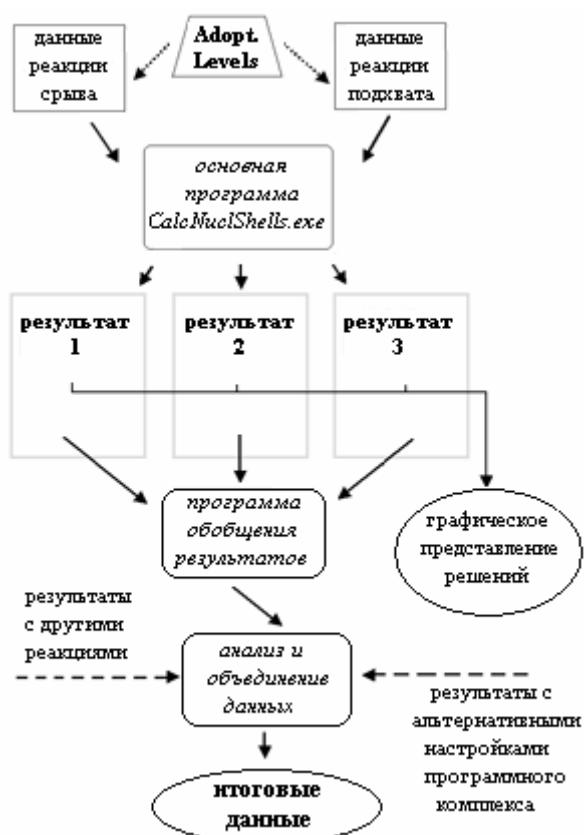


Рис. 1. Алгоритм работы программного комплекса.

метода совместного анализа данных. Модернизация состоит в автоматизации всех процессов расчета и в создании возможностей гибкого управления и контроля над всеми этапами вычислений, что повышает скорость и точность расчетов. В частности, в процессе вычислений происходит полный перебор и проверка всех возможных значений переданного момента j . В результате модернизации создан новый программный комплекс CalcNuclShells.

В §2.2 подробно рассматривается работа нового программного комплекса CalcNuclShells. Приводится алгоритм и последовательность операций обработки при использовании данного программного комплекса. (Рис. 1).

Комплекс состоит из пяти отдельных программ:

- две программы подготовки первичных файлов для основной программы комплекса - Pro1Anew.exe и Pro2new.exe;
- основная программа комплекса, обеспечивающая совместную нормировку спектроскопических сил реакций по срыву и подхвату нуклона - CalcNuclShells.exe;
- две программы обобщения результатов, полученных программой CalcNuclShells.exe при разных параметрах расчета и при различных данных однонуклонных реакций - Pro4.exe и Pro5.exe.

Работа программного комплекса состоит из нескольких подготовительных этапов (работа программ Pro1Anew.exe и Pro2new.exe), непосредственно самого вычисления (выполнение программы CalcNuclShells.exe) и обобщения результатов программами Pro4.exe и Pro5.exe.

В **§2.3** определены критерии выбора физических решений из полного множества решений, возникающих вследствие перебора всех возможных вариантов значений переданного момента j . Разработанный программный комплекс CalcNuclShells был использован для получения новых результатов о структуре ядер.

Глава 3 посвящена исследованию протонных оболочек ядер середины 1f-2p оболочки на основании совместного анализа данных экспериментов срыва и подхвата нуклонов с использованием программного комплекса CalcNuclShells.

В ходе выполнения диссертационной работы получены заселенности и энергии протонных и нейтронных подоболочек ядер $^{58, 60, 62, 64}\text{Ni}$ (**§3.1**, Рис. 2-4), $^{64, 66, 68, 70}\text{Zn}$ (**§3.4**, Рис. 7-8), нейтронных подоболочек ^{50}Ti , ^{52}Cr , ^{54}Fe (**§3.2**, Рис. 5). Полученные в данной и в более ранних работах результаты позволили установить систематику энергий протонных подоболочек четно-четных изотопов Ni (**§3.3**, Рис. 6). Для изотопов $^{58, 60, 62, 64}\text{Ni}$ получены энергии Ферми $-E_F$ и значения целевых параметров Δ поверхности Ферми нейтронных и протонных состояний и фрагментационные ширины протонных состояний.

Проведен анализ полученных данных, найдены особенности заполнения и взаимного расположения нейтронных и протонных подоболочек указанных ядер, показана их связь с другими наблюдаемыми свойствами: энергиями возбужденных состояний, параметрами деформации, спинами и четностями основных состояний.

Анализ полученных данных для нейтронных подболочек изотопов $^{58, 60, 62, 64}\text{Ni}$ в §3.1 показывает, что в изотопах $^{58, 60, 62, 64}\text{Ni}$ при увеличении числа нейтронов N заполняются, главным образом, 3 нейтронных подболочки: $2p_{3/2}$, $1f_{5/2}$ и $2p_{1/2}$ (Рис. 2). В указанных изотопах условная граница между заполненными и пустыми подболочками оказывается сильно размытой. Каждая добавленная пара нейтронов приблизительно равномерно распределяется по подболочкам $2p_{3/2}$, $1f_{5/2}$, $2p_{1/2}$, и дополнительно в двух последних изотопах начинается заполнение более высоких подболочек $1g_{9/2}$ и $2d_{5/2}$.

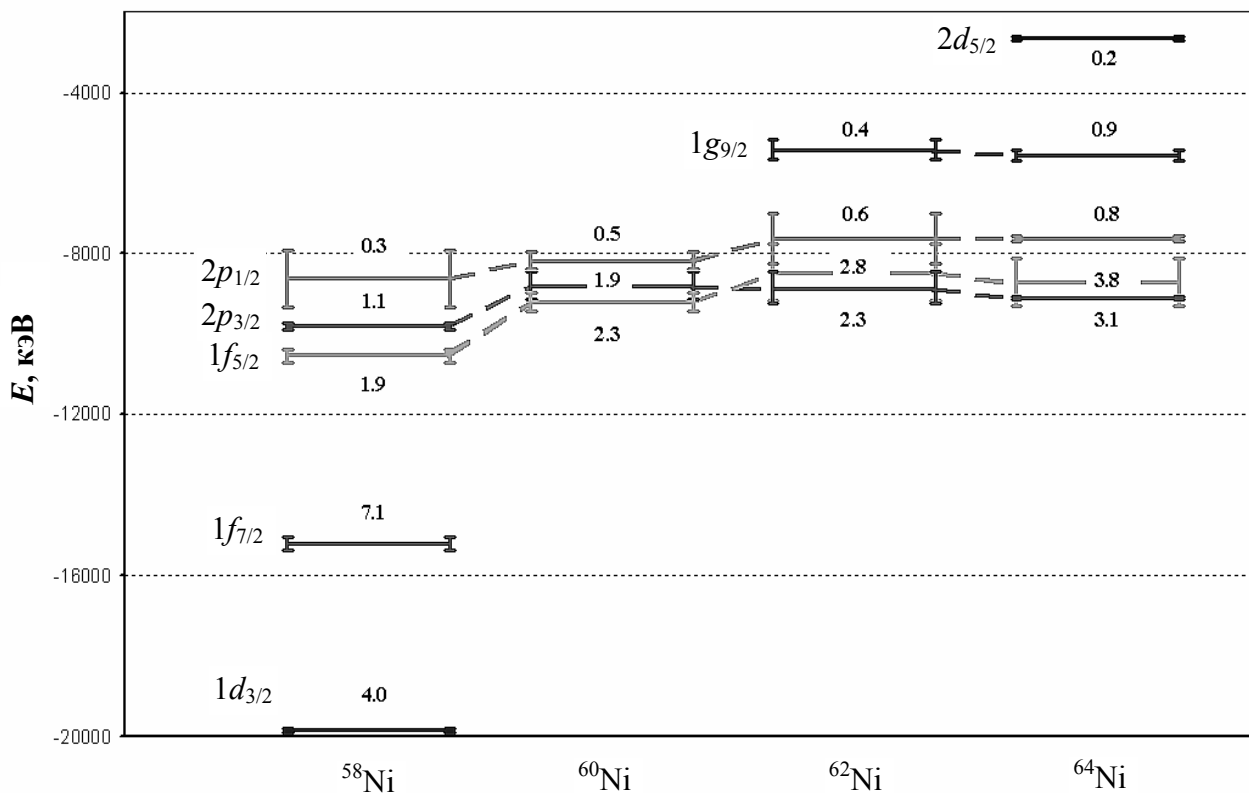


Рис. 2. Энергии нейтронных подболочек изотопов Ni (кэВ). Над или под изображениями подболочек указаны числа нейтронов на них.

Эффект параллельного заполнения подболочек замечен на качественном уровне при рассмотрении спектроскопических сил состояний соответствующих изотопов, и результаты, полученные в диссертационной работе, дают его количественную оценку.

Сильное смешивание заселенностей нейтронных подболочек $2p_{3/2}$, $1f_{5/2}$, $2p_{1/2}$ в изотопах $^{58, 60, 62, 64}\text{Ni}$ сопровождается близкими значениями энергий названных подболочек (см. рис 2), что свидетельствует о значительной степени вырождения. Вырождение нейтронных подболочек $2p_{3/2}$, $2p_{1/2}$, $1f_{5/2}$ в ядрах $^{58, 60, 62, 64}\text{Ni}$ предсказывается теоретическими вычислениями в рамках оболочечной модели Монте-Карло. Таким образом, в диссертационной работе на основе экспериментальных данных подтверждено наличие вырождения названных подболочек в изотопах Ni.

На рис. 3 приведены данные о поверхности Ферми для нейтронных подоболочек ^{64}Ni . Точками обозначены значения заселенностей и одночастичных энергий соответствующих подоболочек. Видно, что связь динамики заселенностей подоболочек и их энергий хорошо описывается в рамках аппроксимации BCS - кривыми, соответствующими наличию спаривания. При увеличении атомного веса A изотопов Ni происходит последовательное увеличение энергии Ферми и систематическое и значительное уменьшение параметра щели Δ , отражающего степень крутизны спада поверхности Ферми. Уменьшение параметра щели Δ с увеличением A объясняется, по нашему мнению, сильной размытостью границы заполнения подоболочек $2p_{3/2}$, $1f_{5/2}$, $2p_{1/2}$.

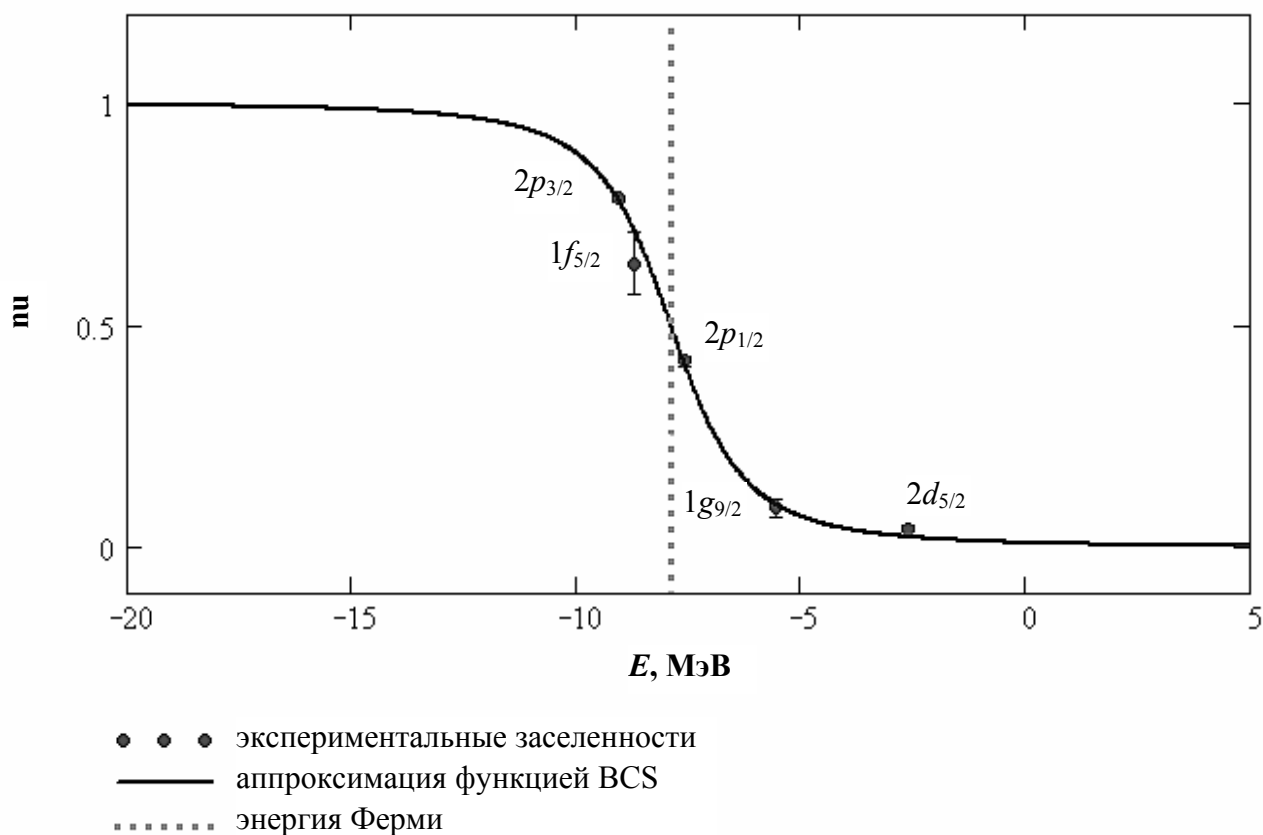


Рис. 3. Поверхность Ферми нейтронных подоболочек ядра ^{64}Ni (ν и E – относительные заселенности и одночастичные энергии подоболочек, соответственно).

В §3.1 также выполнен анализ протонных подболочек ядер $^{58}, ^{60}, ^{62}, ^{64}\text{Ni}$. Заселенности и энергетические положения подболочек данных ядер представлены на Рис. 4.

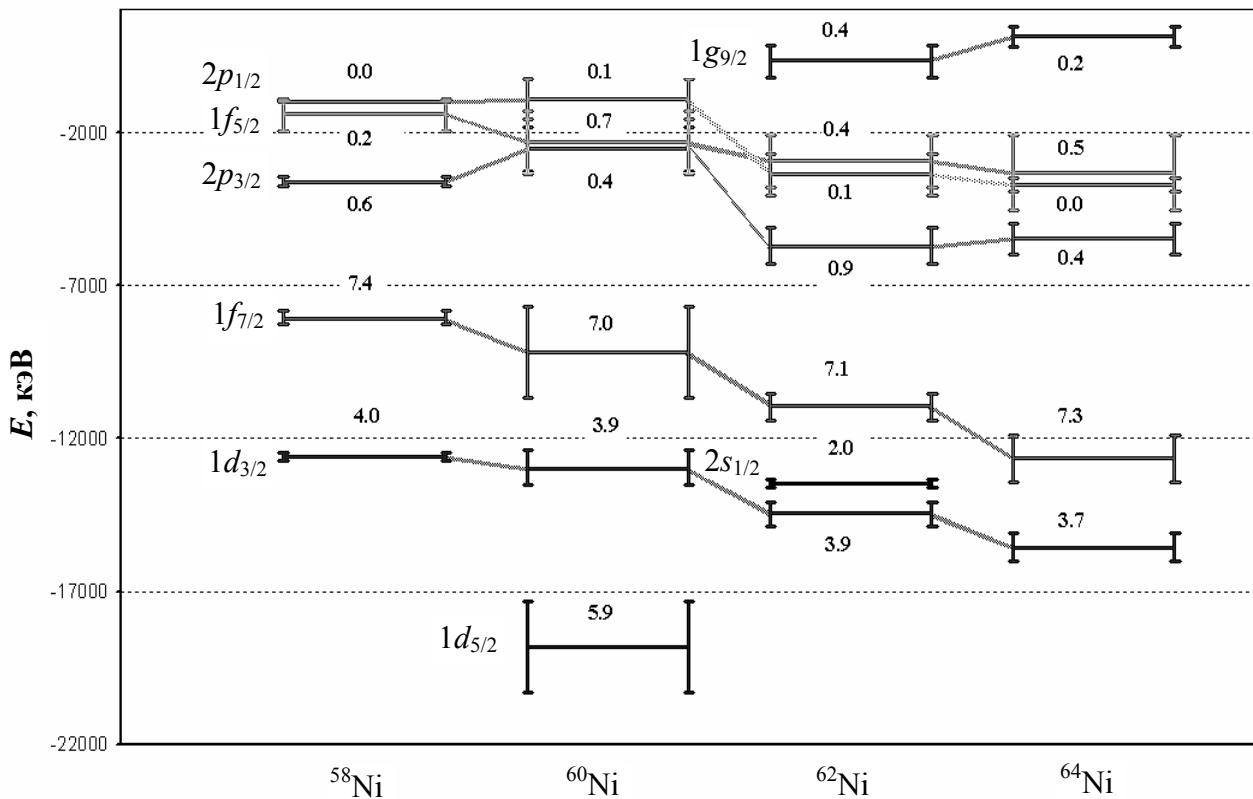


Рис. 4. Энергии протонных подболочек изотопов Ni (кэВ). Над или под изображениями подболочек указаны числа протонов на них.

Поскольку изотопы Ni имеют заряд $Z = 28$, то, согласно модели с последовательно заполняемыми низшими подболочками, данные ядра должны иметь полностью заполненную оболочку $1d_{3/2}$ (6 протонов), полностью заполненную подболочку $1f_{7/2}$ (8 протонов), а оболочки $2p_{3/2}$, $1f_{5/2}$ и $2p_{1/2}$ должны быть пустыми. Результаты, полученные в диссертационной работе, в целом соответствуют такой картине с определенными отклонениями. Относительные заселенности низкорасположенных подболочек $2s_{1/2}$ и $1d_{3/2}$ близки к единице. Относительная заселенность подболочки $1f_{7/2}$ составляет в разных изотопах от 87% (^{60}Ni) до 92% (^{58}Ni), а заселенность $2p_{3/2}$ колеблется от 8% (^{58}Ni) до 23% (^{62}Ni). Оболочечная щель между $1f_{7/2}$ и $2p_{3/2}$, соответствующая магическому числу $Z = 28$, составляет от 4.5 до 7.2 МэВ.

Абсолютные значения энергии Ферми $-E_F$ увеличиваются с увеличением числа N в изотопах, поскольку положения подболочек становятся глубже с увеличением числа нейтронов. Щелевой параметр Δ для всех изотопов остается приблизительно одинаковым

в диапазоне 2.4 – 2.8 МэВ. Исключение составляет значение Δ , полученное для ^{58}Ni на основе данных $^{58}\text{Ni}(d, n)$. Постоянство щелевого параметра говорит об одинаковой степени смешивания одночастичных протонных состояний в изотопах ^{58}Ni , ^{60}Ni , ^{62}Ni , ^{64}Ni .

Для нейтронных подоболочек ^{50}Ti , ^{52}Cr , ^{54}Fe (§3.2, рис. 5) совместный анализ данных экспериментов двух типов с достаточно высокой точностью приводит к расположению

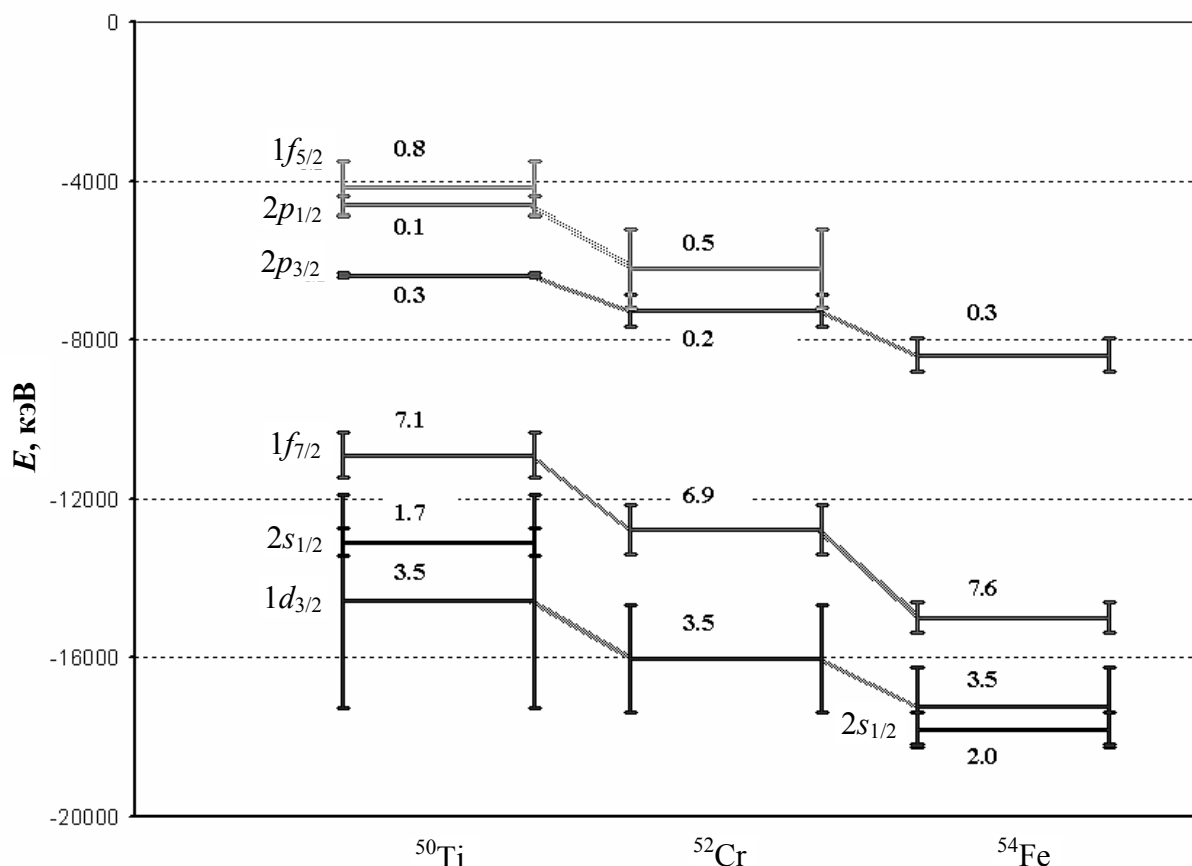


Рис. 5. Энергии нейтронных подоболочек ядер ^{50}Ti , ^{52}Cr , ^{54}Fe (изотоны с $N = 28$) (кэВ).

Над или под изображениями подоболочек указаны числа нейтронов на них.

подоболочек, которое, в целом, близко к предсказаниям модели оболочек с последовательным заполнением низших состояний. Число $N = 28$ является магическим. На рис. 5 хорошо видны большие энергетические щели над подоболочкой $1f_{7/2}$, характерные для магических ядер, заселенности $1d_{3/2}$ и $1f_{7/2}$ близки к 100%, а заселенности подоболочек выше $1f_{7/2}$ незначительны.

В §3.3 представлены значения энергий одночастичных протонных состояний изотопов ^{48}Ni , ^{50}Ni , ^{52}Ni , ^{54}Ni , полученные проф. Е.А. Романовским, к.ф.–м.н. О.В. Беспаловой и др. при помощи соотношений, связывающих характеристики зеркальных ядер. В основу были положены данные об энергиях подоболочек соответствующих изотопов, полученные как в §3.2 настоящей диссертационной работы, так и в более ранних работах с использованием метода совместного анализа данных. Объединение найденных таким образом значений с данными об энергиях, полученными

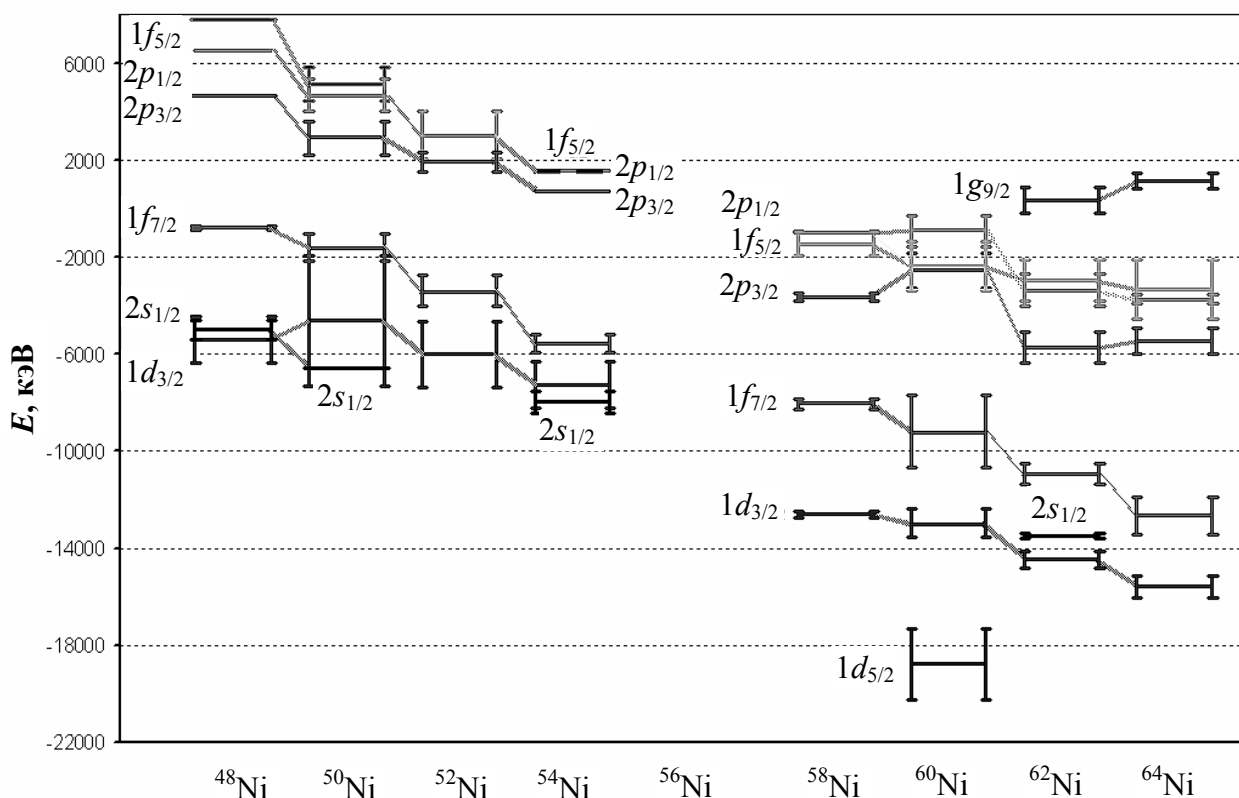


Рис. 6. Энергии протонных подоболочек ядер $^{48, 50, 52, 54, 58, 60, 62, 64}\text{Ni}$ (кэВ).

непосредственно из данных срыва и подхвата в настоящей диссертационной работе, позволяет получить динамику изменения энергий протонных подоболочек для большого количества изотопов Ni (см рис. 6).

§3.4 посвящен получению и анализу новых данных о протонной и нейтронной структуре изотопов $^{64, 66, 68, 70}\text{Zn}$.

В целом полученная картина энергетического положения протонных подоболочек изотопов $^{64, 66, 68}\text{Zn}$ близка к традиционной (см. рис. 7). Наиболее полные результаты получены для изотопа ^{64}Zn . Для изотопа ^{70}Zn результаты отсутствуют в силу недостатка экспериментальных данных. В изотопе ^{64}Zn энергетические промежутки между подоболочками $1d_{3/2}$ и $1f_{7/2}$, а также между подоболочкой $1f_{7/2}$ и группой подоболочек $2p_{3/2}$,

$1f_{5/2}$, $2p_{1/2}$, значительны и равны соответственно 2.6 и 2.9 МэВ. В рамках модели оболочек они ассоциируются с магическими числами $Z = 20$ и $Z = 28$ соответственно. Группа подоболочек $2p_{3/2}$, $1f_{5/2}$, $2p_{1/2}$ расположена в изотопах Zn компактно в диапазоне 1 – 1.4 МэВ. Заселенность подоболочки $2p_{3/2}$ в ^{64}Zn близка к традиционной, при этом наблюдается довольно высокая заселенность подоболочек $1f_{5/2}$, $2p_{1/2}$.

Особенностью полученных результатов является малая заселенность подоболочки $1f_{7/2}$ в ядре ^{64}Zn . Число вакансий на $1f_{7/2}$ составляет ~ 1.4 , что является нетривиальным фактом, если учесть глубокое расположение подоболочки $1f_{7/2}$. Большое количество

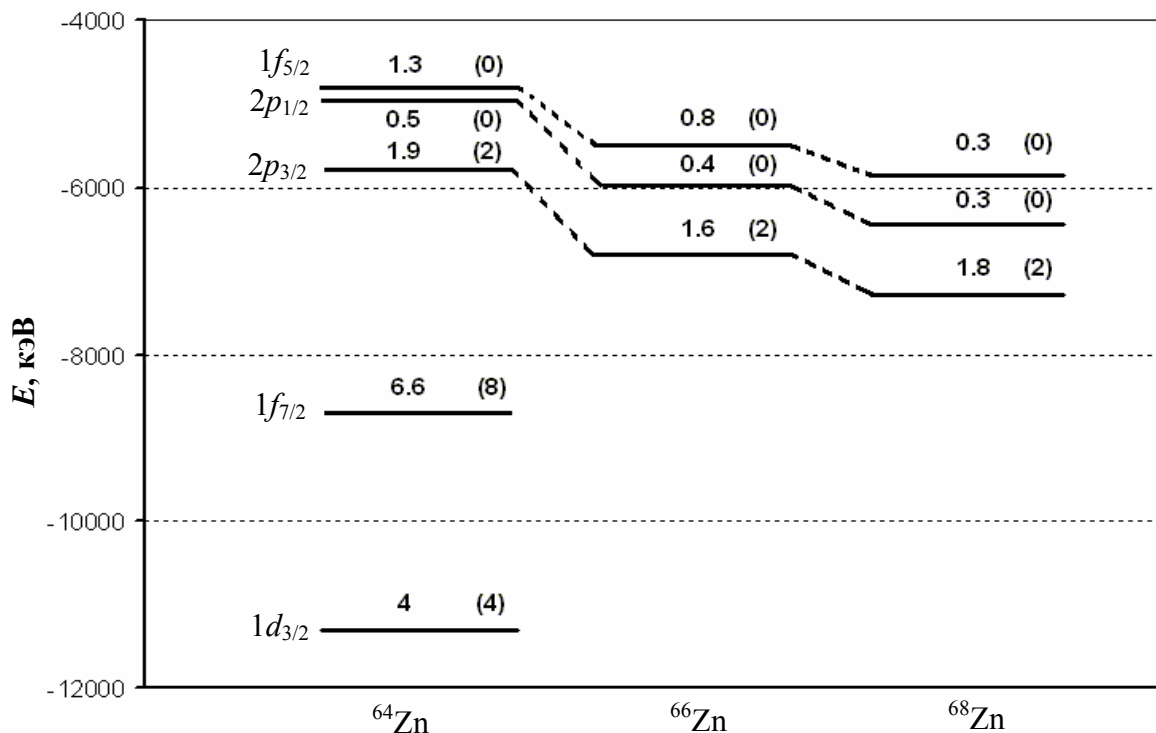


Рис. 7. Энергии протонных подоболочек ядер 64 , 66 , ^{68}Zn (кэВ). Над или под изображениями подоболочек указаны числа протонов на них. Рядом в круглых скобках – числа протонов согласно оболочечной модели с последовательным заполнением низших состояний.

вакансий следует из значительной суммы спектроскопических сил переходов с $l = 3$ на состояния ядра ^{65}Ga в реакции срыва нуклона. Эти переходы, согласно данным реакции $^{64}\text{Zn}(^7\text{Li}, ^6\text{He})$ и согласно проведенному в диссертационной работе анализу на основе правил сумм, соответствуют передаче момента $j = 7/2$.

Заселенность и энергию протонной подоболочки $1g_{9/2}$ в изотопах Zn можно оценить приблизительно. Данные подхвата на изотопах ^{64}Zn и ^{66}Zn показывают наличие переходов с $l = 4$ в районе энергий возбуждения 2.5 МэВ и приводят к оценке 0.03 – 0.04 минимальной вероятности заполнения подоболочки $1g_{9/2}$. Для 68 , ^{70}Zn полученные в

реакциях подхвата энергии возбуждения недостаточны для оценки заселенностей. Данные срыва на $^{64, 66, 68, 70}\text{Zn}$ говорят о том, что она расположена выше 2 МэВ относительно $1f_{5/2}$.

В §3.4 анализируется также нейтронная структура изотопов $^{64, 66, 68, 70}\text{Zn}$. Числа заполнения нейтронных подболочек изотопов $^{64, 66, 68, 70}\text{Zn}$ (рис. 8) свидетельствуют о сильном смешивании одночастичных состояний. Оно выражается в плавном спаде заселенностей при уменьшении глубины расположения подболочек. Так, например, числа нуклонов на подболочках $2p_{3/2}$ и $1f_{5/2}$ в изотопах ^{64}Zn и ^{66}Zn приблизительно равны друг к другу. Особым образом сильное смешивание проявляет себя в динамике заселения нейтронами подболочек в изотопах Zn при увеличении числа нейтронов. Каждый последующий четно-четный изотоп отличается от предыдущего двумя дополнительными нейтронами.

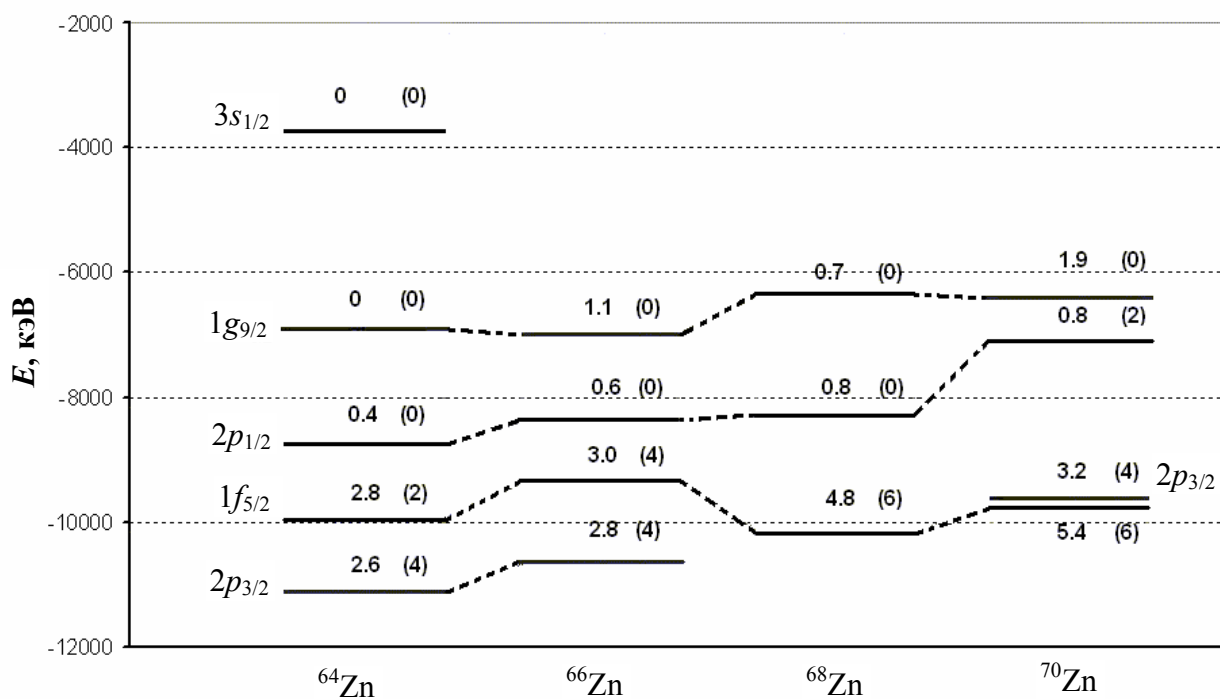


Рис. 8. Энергии нейтронных подболочек ядер $^{64, 66, 68, 70}\text{Zn}$ (кэВ). Над или под изображениями подболочек указаны числа нейтронов на них, полученные в диссертационной работе. Рядом в круглых скобках – числа нейтронов согласно оболочечной модели с последовательным заполнением низших состояний.

Полученные результаты показывают, что пара добавленных нейтронов в среднем распределяется по нескольким верхним подболочкам приблизительно равномерно. Можно сказать, что заполнение подболочек в таких случаях происходит параллельно. Подобный эффект сильного смешивания состояний был обнаружен при исследовании

нейтронных подболочек ядер $^{58, 60, 62, 64}\text{Ni}$ (§3.1). То, что порядок заполнения подболочек отличается от последовательного, в обоих случаях приводит к необычной последовательности спинов основных состояний соседних нечетных изотопов. Спины – четности основных состояний ядер $^{63, 65, 67, 69}\text{Zn}$ равны $3/2^-, 5/2^-, 5/2^-, 1/2^-$ соответственно.

Особый интерес представляют данные о заселении нейтронами подболочки $1g_{9/2}$ в исследуемых изотопах Zn. По мере увеличения числа N нейтронов в изотопах число нейтронов на подболочке $1g_{9/2}$ также постепенно увеличивается. Из полученных результатов следует, что в ^{64}Zn эта подболочка пуста, а в ^{70}Zn на ней находится почти 2 нейтрона. Согласно оболочечной модели без учета эффектов спаривания и других остаточных взаимодействий, во всех рассмотренных ядрах заселенность подболочки $1g_{9/2}$ должна быть равна нулю.

Большое значение имеют энергии одночастичных состояний нейтронов ядер $^{64, 66, 68, 70}\text{Zn}$. Полученные результаты подтверждают наличие значительной ~ 3.2 МэВ энергетической щели между подболочками $1g_{9/2}$ и $3s_{1/2}$ в изотопе ^{64}Zn , соответствующей магическому числу $N = 50$. Подболочки внутри оболочки $N = 29 - 50$ в изотопах Zn расположены в диапазоне шириной ~ 5 МэВ, при этом взаимное энергетическое расположение различных подболочек изменяется с изменением числа N нейтронов в изотопе.

Эволюция оболочечной структуры позволяет объяснить важные наблюдаемые свойства ядер Ni и Zn. Из данных по энергиям первых возбужденных состояний $2^+ E(2^+_1)$ следует ясно выраженная особенность: в ядре ^{68}Ni имеется значительный максимум, в то время как в других ядрах при $N = 40$ максимума нет. На основании этих наблюдений ядро ^{68}Ni отнесено к неклассическим магическим ядрам с парой $(Z, N) = (28, 40)$. Полученные в диссертационной работе результаты согласуются с вышеперечисленными фактами и проясняют механизм исчезновения магических свойств числа $N = 40$ в изотопах Zn. Его суть состоит в повышении энергетического положения нейтронной подболочки $2p_{1/2}$ относительно соседних подболочек при увеличении числа нейтронов N , что приводит к значительному уменьшению энергетической щели между $2p_{1/2}$ и $1g_{9/2}$. Эта щель составляет, согласно настоящей работе, около 0.7 МэВ в ядре ^{70}Zn , и, согласно имеющимся оценкам, 3.2 МэВ в ядре ^{68}Ni . Вкупе с большой заселенностью нейтронной подболочки $1g_{9/2}$ в ядре ^{70}Zn обнаруженный эффект приводит к тому, что, в отличие от изотопов Ni, число $N = 40$ не является магическим числом для изотопов Zn.

В **Главе 4** проводится сравнение полученных в диссертационной работе данных с результатами других экспериментальных и теоретических работ.

В **§4.1** проводится сравнение полученных данных по протонным подболочкам ^{58}Ni , ^{60}Ni , ^{62}Ni , ^{64}Ni с результатами работы [Phys.Rev. C47, 2113 (1993)], основанными на анализе экспериментальных данных. Проведенный сравнительный анализ показал большую универсальность применяемого в диссертационной работе метода: в его рамках учитываются все возможные физические значения переданного полного момента j для каждого перехода. При определенных комбинациях j решения, получаемые в рамках подхода [Phys.Rev. C47, 2113 (1993)], являются частными случаями общих решений, получаемых в настоящей работе в рамках метода совместного анализа. Кроме того, при получении параметров протонных подболочек Ni в диссертационной работе использовался большой массив данных о спектроскопических факторах уровней с высокими энергиями возбуждения.

В **§4.2** проведено сравнение полученных данных по протонным подболочкам ^{64}Zn с результатами работы [Phys.Rev. C47, 2113 (1993)]. Данные двух работ в целом соответствуют друг другу. Близкие значения обоих параметров получены для подболочек $2p_{3/2}$. Однако имеют место некоторые различия. Вероятность заполнения подболочки $1f_{7/2}$ в ядре ^{64}Zn , согласно цитируемой работе, равна 1, что расходится со значением 0.83, полученным в диссертационной работе (см. §3.4).

Наиболее сильно отличаются значения энергий подболочек $1d_{3/2}$ в ^{64}Zn и заселенности $1f_{5/2}$ в $^{64}, ^{68}\text{Zn}$, полученные в [Phys.Rev. C47, 2113 (1993)] и в диссертационной работе. Значения энергий $1d_{3/2}$ различаются приблизительно на 4 МэВ. Расхождение связано с тем, что в [Phys.Rev. C47, 2113 (1993)] используются данные из реакций подхвата $^{64}\text{Zn}(d, ^3\text{He})$ и $^{66}\text{Zn}(d, ^3\text{He})$, соответственно, в то время как в диссертационной работе использовались данные реакций подхвата $^{64}\text{Zn}(t, \alpha)$ и $^{66}\text{Zn}(t, \alpha)$. Анализ, проведенный в диссертационной работе, показал, что использование данных реакций $^{64}\text{Zn}(t, \alpha)$ и $^{66}\text{Zn}(t, \alpha)$ приводит к более точному выполнению правил сумм, т.е. к большему согласию с экспериментами срыва. Для снятия противоречий между источниками данных необходимы дальнейшие эксперименты по изучению реакций подхвата протонов на ядрах Zn с различными частицами.

Рассмотрение в §4.3 данных по нейтронным подоболочкам ^{58}Ni , ^{60}Ni , ^{62}Ni , ^{64}Ni , полученных в рамках релятивистской модели среднего поля (PMCP), дисперсионно-оптической модели (ДОМ) и оболочечной модели Монте-Карло (MCSM) показывает, что представленные модели в целом адекватно описывают параметры нейтронной оболочечной структуры ядер $^{58, 60, 62, 64}\text{Ni}$ вблизи энергии Ферми, полученные на основании данных экспериментов срыва и подхвата (см. рис. 9). Во всех представленных случаях отчетливо наблюдаются значительный энергетический промежуток между отдельной подоболочкой $1f_{7/2}$ и подоболочками $1f_{5/2}$, $2p_{3/2}$, $2p_{1/2}$, которые образуют группу близко расположенных состояний. Диапазоны энергий, в котором заключены указанные три подоболочки, приблизительно одинаковы для всех представленных случаев. Более детальное рассмотрение количественных характеристик показывает различие между теоретическими подходами между собой и по сравнению с данными, полученными в диссертационной работе.

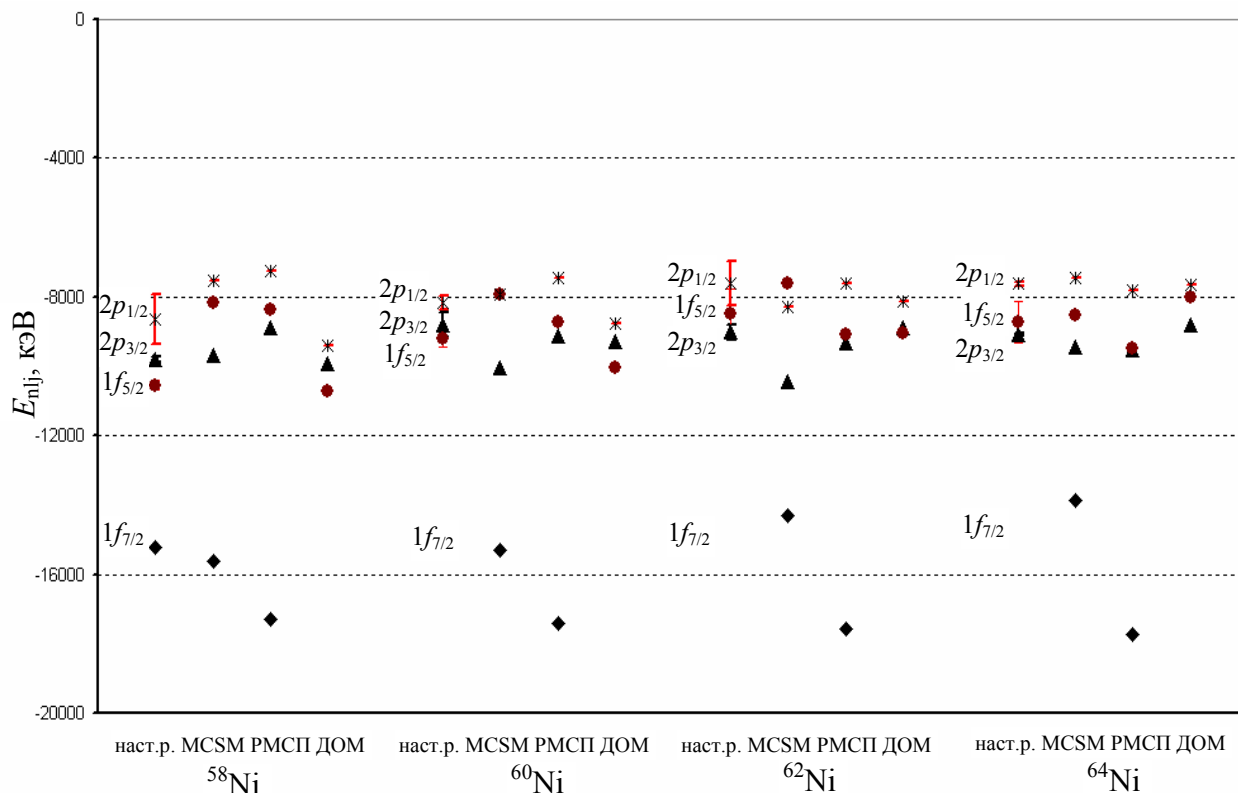


Рис. 9. Сравнение данных диссертационной работы по одночастичным энергиям E_{nlj} (кэВ) нейтронных подоболочек изотопов Ni с теоретическими результатами.

Полученные в модели PMCP значения энергий подоболочек $1f_{5/2}$, $2p_{3/2}$, $2p_{1/2}$ близки полученным в диссертационной работе для $^{60, 62, 64}\text{Ni}$, различия составляют не более ~ 1 МэВ. Для ^{58}Ni различия существенны: так, например, различие энергий $1f_{5/2}$ составляет около 2.5 МэВ. Большое расхождение имеет место для величины промежутка между $1f_{7/2}$ и

вышележащими подболочками $1f_{5/2}$, $2p_{3/2}$, $2p_{1/2}$ в ^{58}Ni : он составляет 8.4 МэВ согласно модели РМСР и 4.7 МэВ согласно полученным в настоящей работе данным .

Значения энергий подболочек, полученные в рамках ДОМ, демонстрируют хорошее соответствие с результатами диссертационной работы. Вычисленные энергии подболочек $1f_{5/2}$, $2p_{3/2}$, $2p_{1/2}$ в для всех изотопов совпадают с экспериментальными в пределах погрешностей. Взаимное расположение подболочек $1f_{5/2}$ и $2p_{3/2}$, найденное в диссертационной работе, отражается только в данных, вычисленных с помощью ДОМ.

Полученные в диссертационной работе данные в целом с хорошей точностью подтверждают основные результаты, полученные в рамках оболочечной модели Монте-Карло (MCSM). Наблюдается совпадение энергий подболочки $1f_{7/2}$ в пределах 0.4 МэВ. Из расчетов по MCSM следует, что уровни $1f_{5/2}$, $2p_{3/2}$, $2p_{1/2}$ в значительной степени являются вырожденными. Этот результат хорошо подтверждается полученными данными. Общий диапазон энергий, в котором заключены указанные 3 уровня, полученный в расчетах по модели MCSM, составляет 2-3 МэВ. Согласно результатам настоящей работы, для $^{60, 62, 64}\text{Ni}$ диапазон даже несколько меньше, порядка 1 – 2 МэВ, т.е. вырождение еще более сильное, чем предсказывает модель MCSM.

Таким образом, результаты всех трех рассматриваемых теоретических подходов в общих чертах подтверждаются данными, полученными их экспериментов. Значения одночастичных энергий подболочек $1f_{5/2}$, $2p_{3/2}$, $2p_{1/2}$ и их порядок следования, наиболее близкие к полученным на основе экспериментальных данных, дает дисперсионно - оптическая модель ДОМ. Оболочечная модель Монте-Карло (MCSM) хорошо описывает энергии подболочки $1f_{7/2}$ и в целом группы подболочек $1f_{5/2}$, $2p_{3/2}$, $2p_{1/2}$. Однако энергии отдельных подболочек внутри этой группы и их последовательность в некоторых случаях отличаются от экспериментальных. Модель РМСР в целом довольно точно описывает группу подболочек $1f_{5/2}$, $2p_{3/2}$, $2p_{1/2}$, однако значения энергии подболочки $1f_{7/2}$ и энергетической щели между этой подболочкой и группой $1f_{5/2}$, $2p_{3/2}$, $2p_{1/2}$ значительно отличаются от полученных в диссертационной работе. Указанные отличия выходят за рамки экспериментальных ошибок.

В **Заключении** сформулированы основные результаты, полученные в диссертационной работе.

Основные результаты диссертации опубликованы в работах:

1. О.В. Беспалова, И.Н. Бобошин, В.В. Варламов, Т.А. Ермакова, Б.С. Ишханов, С.Ю. Комаров, Е.А. Романовский, Т.И. Спасская, Т.П. Тимохина. Анализ новых данных по одночастичной структуре ядер середины $1f - 2p$ оболочки в рамках дисперсионной оптической модели. Известия РАН, Серия физическая, 72, №6 (2008) 896-902.
2. И.Н.Бобошин, В.В.Варламов, Б.С.Ишханов, С.Ю.Комаров, Е.А.Романовский. Структура оболочек новых магических ядер: систематика свойств. Известия РАН, серия физическая, 72, №3 (2008) 308-314.
3. 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, серия физическая, 73, №6, (2009) 867-870.
4. И.Н. Бобошин, С.Ю. Комаров. Параметры одночастичной структуры изотопов $^{64}, ^{66}, ^{68}, ^{70}\text{Zn}$. Известия РАН, серия физическая, 73, №11, (2009) 1541-1547; И.Н. Бобошин, С.Ю. Комаров. Параметры одночастичной структуры изотопов $^{64}, ^{66}, ^{68}, ^{70}\text{Zn}$. Препринт НИИЯФ МГУ № 2009-6/850, (2009).
5. O.V.Bespalova, I.N.Boboshin, T.A.Ermakova, B.S.Ishkhanov, S.Yu.Komarov, E.A.Romanovsky, T.I.Spaskaya, T.P.Timokhina, V.V.Varlamov. New Data on Single-Particle Structure of Nuclei from the Middle of $1f-2p$ -Shell. LVII International Conference on Nuclear Physics NUCLEUS 2007 "Fundamental Problems of Nuclear Physics, Atomic Power Engineering and Nuclear Technologies", June 25 – 29, 2007, Voronezh, Russia. Book of Abstracts. ISBN 598340052-5. Saint-Petersburg, 2007, p. 97.
6. O.V.Bespalova, I.N.Boboshin, T.A.Ermakova, B.S.Ishkhanov, S.Yu.Komarov, E.A.Romanovsky, T.I.Spaskaya, T.P.Timokhina, V.V.Varlamov. Analysis of Single-Particle Structure of Double Magic Nucleus $^{48}\text{Ni}_{20}$ by Dispersive Optical Model. LVII International Conference on Nuclear Physics NUCLEUS 2007 "Fundamental Problems of Nuclear Physics, Atomic Power Engineering and Nuclear Technologies", June 25 – 29, 2007, Voronezh, Russia. Book of Abstracts. ISBN 598340052-5. Saint-Petersburg, 2007, p. 98.
7. И.Н.Бобошин, В.В.Варламов, Б.С.Ишханов, С.Ю.Комаров. Оболочечная структура легких и средних ядер: новые данные и их анализ. Развитие метода получения оболочечных параметров из спектроскопических данных. Сборник тезисов докладов. 58 Международная конференция по проблемам ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра «Ядро-2008». 23 - 27 июня 2008 г., ISBN 978-5-98340-211-

- 9, г. Москва. Издательство Санкт-Петербургского государственного университета, 2008, с. 67-68.
8. О.В.Беспалова, И.Н.Бобошин, В.В.Варламов, Т.А.Ермакова, Б.С.Ишханов, А.А.Климочкина, С.Ю.Комаров, Е.А.Романовский, Т.И.Спаская. Исследование нейтронной оболочечной структуры ядер $^{58, 60, 62, 64}\text{Ni}$ в рамках модели среднего поля с дисперсионным оптическим потенциалом. Тезисы докладов 59-й Международной конференции «Ядро – 2009» (59 Совещания по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра), Санкт-Петербург, 2009, с. 78.
9. О.В.Беспалова, И.Н.Бобошин, В.В.Варламов, Т.А.Ермакова, Б.С.Ишханов, С.Ю.Комаров, Е.А.Романовский, Т.И.Спаская. Энергии одночастичных нейтронных и протонных состояний в изотопах $^{58, 60, 62, 64}\text{Zn}$. Тезисы докладов 59-й Международной конференции «Ядро – 2009» (59 Совещания по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра), Санкт-Петербург, 2009, с. 79.

Подписано в печать 01.11.09
Формат 60x88 1/16. Объем 1 п.л.
Тираж 100 экз. Заказ № 875
Отпечатано в ООО «Соцветие красок»
119991, г. Москва, Ленинские горы, д.1
Главное здание МГУ, к. А-102.