

НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНЫ
ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
Специализированный совет Д01.68.01

На правах рукописи

Литвиновский Людвиг Леонидович

РАДИАЦИОННЫЙ ЗАХВАТ И НЕУПРУГОЕ РАССЕЯНИЕ НЕЙТРОНОВ ВБЛИЗИ
Порога возбуждения нижних уровней тяжелых атомных ядер

Специальность 01.04.16 - физика ядра
и элементарных частиц

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Киев - 1995



00754922 (Т)

АВ 32.563

Диссертацией является рукопись.

Работа выполнена в Институте ядерных исследований
НАН Украины, г. Киев

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук
ЕЖОВ Станислав Николаевич

Доктор физико-математических наук
КОРЖ Иван Александрович

Доктор физико-математических наук,
профессор
ПОПОВ Альберт Борисович

Ведущая организация: Физико-энергетический институт,
г. Обнинск

Защита состоится 22 июня 1995 г. в 14⁴⁵ на заседании
Специализированного совета Д01.68.01 Института ядерных
Исследований НАН Украины в зале заседаний ИЯИ НАН Украины
по адресу 252028, г. Киев, пр. Науки, 47.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИЯИ НАН
Украины.

Автореферат разослан 22 мая 1995 г.

Ученый секретарь Специализированного совета Д01.68.01

В. Д. Чеснокова

В. Д. ЧЕСНОКОВА



ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Одними из наиболее информативных методов исследования структуры тяжелых ядер и механизма нуклон-ядерного взаимодействия при низких энергиях являются на сегодняшний день нейтронно-физические эксперименты. Такие исследования условно разделяются на три широких класса в соответствии с общепринятой классификацией энергетических диапазонов - медленные, промежуточные и быстрые нейтроны.

Для медленных нейтронов с энергией до нескольких сотен (тысяч) электронвольт (область аппаратурно разрешенных резонансов) основной вклад во взаимодействие с тяжелыми ядрами дает механизм составного ядра. Однако, при всей простоте теоретической интерпретации, экспериментальные работы с использованием медленных нейтронов несут крайне ограниченную информацию о свойствах ядер и параметрах нуклон-ядерного взаимодействия. При энергии нейтронов выше одного мегавольта (быстрые нейтроны) компунд-состояния уже заметно перекрываются, что требует привлечения моделей более сложных, чем простое приближение изолированных резонансов. Большое число открытых каналов реакции и широкий диапазон орбиталей, дающих вклад во взаимодействие, увеличивают число параметров любой модели. Дополнительная неоднозначность возникает из-за заметного вклада предравновесных и прямых реакций, увеличивающегося с ростом энергии нейтронов.

Наиболее достоверную информацию о свойствах ядер и механизме ядерных реакций при низких энергиях дают эксперименты на промежуточных нейтронах с энергиями от нескольких кэВ до нескольких сотен кэВ. Импульсные источники нейтронов на базе ускорителей заряженных частиц или импульсных реакторов позволяют решить ограниченный круг нейтронно-физических задач. Поэтому, основным препятствием для проведения ряда экспериментальных работ в области промежуточных энергий длительное время являлось отсутствие интенсивных источников моноэнергетических нейтронов.

Предложенный Симпсоном и Миллером традиционный метод нейтронных интерференционных фильтров на основе природных элементов Al, Si, S, Ti и Fe позволял формировать на стационарных атомных реакторах интенсивные пучки квазимоноэнергетических нейтронов со

средними энергиями 1.9, 24.3, 53.5 и 144 кэВ. Такой набор дифференциальных точек был явно недостаточен для сколь-нибудь систематических исследований. Этот недостаток был преодолен после создания фильтров на основе обогащенных стабильных изотопов. Среди ведущих ядерно-физических лабораторий мира наиболее полный набор таких фильтров имеется в настоящее время на исследовательском реакторе ВВР-М ИЛИ НАН Украины. Единственным недостатком имевшегося набора был ограниченный диапазон энергий 1.9 - 275 кэВ. В настоящей работе представлены результаты новых разработок, позволившие существенно расширить энергетический диапазон, доступный для исследований с помощью методики фильтрованных пучков.

В области промежуточных энергий, аналогично медленным нейтронам, основной вклад во взаимодействие с тяжелыми ядрами дает механизм составного ядра. Однако, заметная доля парциальных нейтронных волн с ненулевым орбитальным моментом обеспечивает более широкий диапазон спинов возбуждаемых компаунд-резонансов по сравнению с медленными нейтронами. При этом резонансы тяжелых ядер остаются еще изолированными, что существенно упрощает теоретическую интерпретацию данных по сравнению с областью высоких энергий.

Благодаря возможности усреднения по энергетическому интервалу, существенно превосходящему область разрешенных резонансов, эксперименты с промежуточными нейтронами позволяют определить средние параметры резонансов с малыми флуктуационными погрешностями. Усреднение по большому числу резонансов является ключевым преимуществом (n, γ)-экспериментов в этой области энергий. Отсутствие влияния индивидуальной природы конкретного возбуждаемого резонанса обеспечивает надежную идентификацию квантовых характеристик возбужденных уровней дочерних ядер. Кроме того, такие эксперименты позволяют получить информацию о коллективных возбужденных системах (гигантских резонансах).

Открытые каналы неупругого рассеяния для промежуточных нейтронов существенно расширяют возможности исследования механизма нуклон-ядерного взаимодействия. Вместе с тем, сравнительно небольшое число открытых каналов реакции (радиационный захват, упругое рассеяние и неупругое рассеяние с возбуждением нескольких нижайших уровней) исключает неопределенности, характерные для области быстрых нейтронов. Наиболее достоверный анализ нейтронных

микроконстант тяжелых ядер может быть выполнен ниже порога возбуждения второго уровня. Такой анализ, проведенный в настоящей работе для ряда ядер, позволил получить ранее отсутствовавшие данные о параметрах d - и g -парциальных нейтронных волн и исследовать ряд тонких эффектов, таких, как энергетическая зависимость нейтронных силовых функций, влияние принципа Паули на распределение силы одночастичных состояний, проявление одночастичного максимума в массовой зависимости g -нейтронной силовой функции и др.

Как отмечалось выше, основной вклад во взаимодействие медленных и промежуточных нейтронов с тяжелыми ядрами дает механизм составного ядра. Вместе с тем, экспериментальное обнаружение нестатистических эффектов в области изолированных резонансов представляет несомненный интерес из-за возможности однозначной теоретической интерпретации данных. Это обстоятельство объясняет большое количество экспериментальных работ, посвященных поиску таких эффектов. Однако, согласно результатам этих работ, вклад нестатистических (прямых и предравновесных) процессов в большинстве случаев оказывается меньше экспериментальных погрешностей анализируемых величин (сечений, угловых распределений продуктов реакции, интенсивностей γ -переходов и пр.). До настоящей работы достоверно обнаруженным нестатистическим эффектом в области промежуточных энергий являлся только эффект усиления отдельных первичных γ -переходов при захвате нейтронов околomagическими ядрами. В настоящей работе предсказан и экспериментально обнаружен ранее неизвестный эффект нестатистического усиления канала неупругого рассеяния нейтронов вблизи порога возбуждения первого уровня тяжелых ядер.

Кроме исследования структуры ядер и механизма ядерных реакций, актуальность экспериментальных измерений и теоретического анализа данных в области промежуточных энергий определяется рядом прикладных задач нейтронной физики. Одной из наиболее важных задач прикладного характера является оценка нейтронных микроконстант ядер делящихся и конструкционных материалов и продуктов деления, необходимая для расчетов реакторов. Подробно анализируемый в настоящей работе канал неупругого рассеяния нейтронов представляет особый интерес, т.к. приводит к эффективному "смягчению" исходного спектра деления.

Нейтронные данные в области промежуточных энергий необходимы также для проведения корректных расчетов в рамках современных астрофизических моделей звездного нуклеосинтеза. В условиях термодинамического равновесия при звездных температурах возбужденные состояния ядер оказываются заметно заселенными. Поэтому, принципиальное значение приобретают расчеты нейтронных сечений возбужденных ядер, недоступных для прямых экспериментальных измерений. Точность таких расчетов во многом определяет достоверность астрофизических оценок возраста и условий протекания звездного нуклеосинтеза, основанных на анализе наблюдаемых распространенностей элементов. Методика расчета нейтронных сечений возбужденных ядер и ряд других проблем, связанных с нейтронными аспектами астрофизики, подробно проанализированы в настоящей работе.

Цель работы. В связи с вышеизложенным, основной задачей диссертационной работы являлся комплексный анализ экспериментальных данных для всех открытых каналов реакции при взаимодействии промежуточных нейтронов с тяжелыми ядрами с целью получения информации о ядерной структуре и механизме ядерных реакций при низких энергиях, а также с целью уточнения параметров звездного нуклеосинтеза.

Научная новизна работы.

1. Все представленные в работе экспериментальные данные об усредненных нейтронных сечениях, угловых распределениях упругого и неупругого рассеяния нейтронов и усредненных по резонансам спектрах первичных γ -переходов из реакции (n, γ) получены впервые.
2. Предложен новый метод исследования энергетической зависимости нейтронных силовых функций из анализа сечения неупругого рассеяния нейтронов на первом возбужденном уровне четно-четных ядер.
3. Предложен новый метод определения d- и f-нейтронных силовых функций из анализа сечений неупругого рассеяния нейтронов с возбуждением низколежащих изомерных состояний тяжелых ядер. С использованием этого метода впервые определены f-нейтронные силовые функции, указывающие на проявление одночастичного максимума в их массовой зависимости. Для d-нейтронных силовых функций

впервые обнаружен и объяснен эффект сильного расщепления компонент спин-орбитального дублета в области минимума.

1. Предсказан и обнаружен экспериментально неизвестный ранее эффект нестатистического усиления канала неупругого рассеяния промежуточных нейтронов ядрами, основной и первый возбужденный уровни которых имеют ярко выраженную одночастичную (одноквазичастичную) природу.
5. Из анализа усредненных по резонансам спектров первичных γ -переходов из реакции (n, γ) впервые определены параметры M1-гигантского резонанса и обнаружена сильная температурная зависимость его ширины.
6. Предложен новый метод оценки средней температуры в процессе звездного нуклеосинтеза на основании анализа распространенностей ядер, имеющих низколежащий первый возбужденный уровень.
7. Предложен новый подход к оценке неопределенностей при расчете возраста r -процесса нуклеосинтеза по Re-Os-хронометру. С учетом этой оценки показана применимость метода, ранее считавшегося сомнительным, и определены верхний и нижний пределы возраста r -процесса.

Научная и практическая ценность работы.

1. Разработаны новые нейтронные интерференционные фильтры, формирующие нейтронные пучки с энергиями 313 и 610 кэВ, существенно расширяющие энергетический диапазон, доступный для фундаментальных и прикладных нейтронно-физических исследований с помощью методики фильтрованных пучков на исследовательских реакторах.
2. Разработан комплекс оригинальных алгоритмов и программ обработки первичной экспериментальной информации, получаемой в нейтронно-физических экспериментах различного вида с использованием медленных и промежуточных нейтронов (эксперименты по пропусканию и активации, измерение угловых распределений рассеянных нейтронов, измерение спектров γ -лучей захвата нейтронов и пр.).
3. Разработана методика ранее недоступных прямых измерений сечения маловероятных процессов неупругого рассеяния с возбуждением

изомерных уровней тяжелых ядер в области промежуточных энергий нейтронов.

4. Для ряда ядер продуктов деления, конструкционных материалов и ядер, сечения которых используются в качестве метрологических стандартов, получены новые экспериментальные данные об усредненных полных и парциальных нейтронных сечениях в практически важной области промежуточных энергий.

Апробация работы и публикации по диссертации.

Основные результаты работ, изложенных в диссертации, докладывались на I Международной конференции по нейтронной физике (Киев, 1987), на Международной конференции по избранным вопросам структуры ядра (Дубна, 1989), на I-III Международных семинарах по взаимодействию нейтронов с ядрами (Дубна, 1993-1995), на 8-м Международном симпозиуме по спектроскопии гамма-лучей захвата (Фрайбург, 1993), а также на научных семинарах и научных конференциях Института ядерных исследований НАН Украины. Основные результаты отражены в 26 печатных работах, список которых приведен в конце автореферата.

Структура и объем диссертации.

Диссертация состоит из введения, семи глав и заключения. Полный объем диссертации составляет 387 страниц, в том числе 257 страниц машинописного текста, 132 рисунка, 43 таблицы и список литературы из 211 наименований на 26 страницах.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении рассмотрена актуальность нейтронно-физических экспериментов в области промежуточных энергий нейтронов и изложены основные причины, определившие тематику настоящей работы, преимущественно связанную с измерениями и анализом данных о сечениях радиационного захвата и неупругого рассеяния нейтронов вблизи порога возбуждения нижайших уровней тяжелых атомных ядер. Приведен краткий обзор диссертации по главам.

В первой главе представлено развернутое описание основанного на R-матричной теории метода параметризации нейтронных сечений в области низких и промежуточных энергий. Приведено обоснование ис-

пользованного в настоящей работе одноуровневого приближения, справедливого в области изолированных резонансов. Описаны достаточно строгие для этой области выражения, имеющие вид известных формул Хаузера - Фешбаха - Молдауэра, позволяющие параметризовать усредненные по резонансам сечения упругого и неупругого рассеяния нейтронов, сечения первичных γ -переходов из реакции (n, γ) и полные сечения радиационного захвата нейтронов. Определены соответствующие флуктуационные факторы, позволяющие проводить расчет усредненных сечений с учетом возможной корреляции амплитуд каналов упругого и неупругого рассеяния.

Выполнен подробный обзор существующих данных о средних резонансных параметрах тяжелых ядер (нейтронные силовые функции, параметры потенциального рассеяния нейтронов, параметры плотности уровней и средние радиационные ширины). Приведен ретроспективный обзор модельных подходов к параметризации нейтронных силовых функций S_{n1} , а также обзор экспериментальных методов и результатов поиска эффектов спин-спинового и спин-орбитального расщепления S_{n1} . Представлен обзор экспериментальных данных и методов модельной параметризации радиационных силовых функций первичных γ -переходов в (n, γ) -реакциях. Для средних радиационных ширин нейтронных резонансов $\Gamma_{\gamma 1}$ выполнен статистический анализ имеющихся данных и модельные расчеты с целью подтверждения спиновой независимости $\Gamma_{\gamma 1}$.

Представлен обзор оригинальных работ, посвященных поиску нестатистических эффектов в экспериментах с медленными и промежуточными нейтронами. По результатам обзора сделан вывод о том, что достоверно обнаруженным до настоящей работы нестатистическим эффектом в области промежуточных энергий является только эффект усиления отдельных первичных γ -переходов при захвате нейтронов околомагическими ядрами. В остальных случаях вклад нестатистических (прямых и предравновесных) процессов оказывается меньше экспериментальных погрешностей анализируемых величин (сечений, угловых распределений продуктов, интенсивностей γ -переходов и пр.).

Приведено описание современных астрофизических представлений о α - и γ -процессах звездного нуклеосинтеза и выполнен обзор литературных данных о параметрах этих процессов (средняя температура ядра, плотность нейтронной и электронной компонент и др.). Рас-

омотрено влияние звездных условий на сечения радиационного захвата нейтронов и вклад изомерных состояний в α -процессе. Описаны выражения для модельной параметризации усредненных нейтронных сечений возбужденных ядер с учетом открытого канала суперупругого рассеяния нейтронов (рассеяние нейтронов с ускорением за счет де-возбуждения ядра). Представлен обзор экспериментальных работ по исследованию суперупругого рассеяния. Приведено описание моделей, позволяющих провести хронологию формирования Галактики и Солнечной системы на основании анализа распространенностей долгоживущих нестабильных изотопов. Выполнен подробный обзор работ, посвященных Re-Os-хронометру γ -процесса звездного нуклеосинтеза.

Представленные в первой главе обзорная информация и методы модельной параметризации нейтронных сечений и других ядерных и астрофизических констант далее использованы в главах 4-7 для статистического анализа, тестирования полученных экспериментальных результатов и их теоретической интерпретации.

Вторая глава посвящена описанию использованных в настоящей работе экспериментальных методик и их обоснованию. Приведены характеристики использованных в измерениях композиционных фильтров на основе стабильных изотопов ^{10}B , $^{6,7}\text{Li}$, ^{52}Cr , $^{54,56,57,58}\text{Fe}$, $^{58,60,62,64}\text{Ni}$ и природных элементов F, Al, Si, S, Se, Ti, V, Mn, Cd и Rh, созданных на исследовательском реакторе ВВР-М ИЯИ НАНУ до настоящей работы с участием ее автора. Этот набор фильтров позволял формировать интенсивные пучки квазиодноэнергетических нейтронов (плотность потока $\Phi_n \sim 10^5 - 10^7$ нейтрон/с см^2) с малым вкладом фоновых групп ($\Delta_D \leq 30\%$) в интервале энергий $E_n = 1.9 - 144$ кеВ. В связи с необходимостью расширения перекрываемого диапазона энергий, в настоящей работе были разработаны два новых фильтра на основе стабильных изотопов ^7Li , ^{52}Cr , $^{54,56}\text{Fe}$ и ^{60}Ni , формирующие интенсивные пучки ($\Phi_n \sim 2 \cdot 10^5$ нейтрон/с см^2 , $\Delta_D < 30\%$) со средними энергиями $E_n = 313$ и 610 кеВ.

Описаны эксперименты по измерению полных нейтронных сечений σ_c для изотопов железа $^{54,56,57}\text{Fe}$ в интервале энергий $E_n = 3 - 6000$ эВ. Измерения проводились на реакторе ВВР-М ИЯИ НАНУ по методу времени пролета с дополнительной фильтрацией пучка, обеспечивавшей эффективное подавление γ -фона и фона многократно перерассеянных нейтронов.

Представлено описание методики измерения полных нейтронных сечений ядер Rh, Ag, In, ^{165}Gd и ^{187}Os в области аппаратно разрешенных резонансов при энергиях нейтронов $E_n = 1.9 - 610$ кэВ.

Описаны эксперименты по исследованию усредненных по резонансам сечений и угловых распределений упруго и неупруго рассеянных нейтронов ядрами Rh, Ag, ^{187}Os и Au при средних энергиях нейтронов $E_n = 24.3, 45, 134$ и 275 кэВ.

Приведено развернутое описание шестиканального парного гамма-спектрометра и выполненные с его помощью эксперименты по измерению усредненных по захватным состояниям спектров первичных γ -переходов из (n, γ) -реакции на ядрах Br, In, ^{165}Gd и ^{187}Os . Измеренные при средних энергиях нейтронов $E_n = 1.9, 24.3$ и 134 кэВ спектры γ -лучей из реакции $^{116}\text{In}(n, \gamma)^{116}\text{In}$ показаны на Рис. 1.

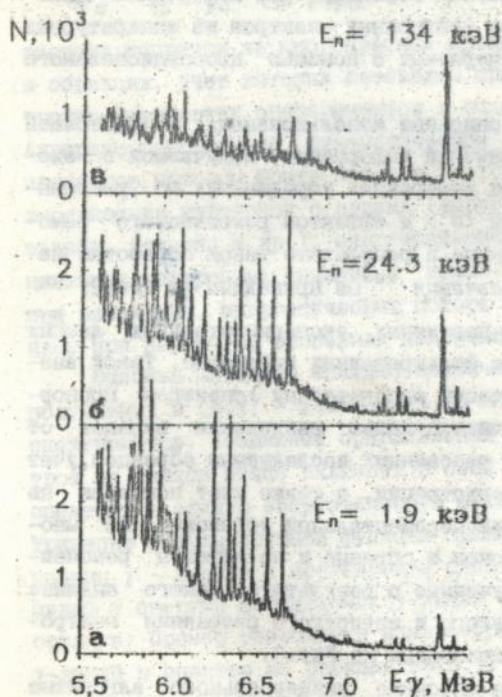


Рис. 1. Спектры первичных γ -переходов из реакции $^{116}\text{In}(n, \gamma)^{116}\text{In}$ при энергиях нейтронов $E_n = 1.9$ (а), 24.3 (б) и 134 кэВ (в).

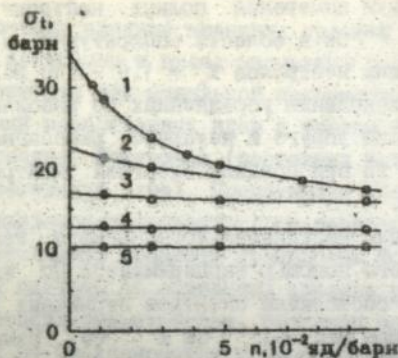


Рис.2. Наблюдаемые полные нейтронные сечения ^{197}Og при энергии нейтронов 1.9(1); 12 (2); 24.3 (3); 59 (4) 144 кэВ (5).

В третьей главе описан комплекс оригинальных алгоритмов и программы обработки первичной экспериментальной информации. Описана использованная при определении характеристик нейтронных фильтров процедура восстановления нейтронных спектров из аппаратурных спектров протонов отдачи, измеряемых с помощью пропорционального водородного счетчика.

Представлено подробное описание использованных в настоящей работе методов обработки первичной информации, получаемой в экспериментах по пропусканию при измерениях усредненных по резонансам полных нейтронных сечений $\langle \sigma_t \rangle$ и эффектов резонансного самоэкранирования в $\langle \sigma_t \rangle$. Полученные в результате такой обработки наблюдаемые полные нейтронные сечения ^{197}Og приведены на Рис.2.

Описан алгоритм анализа первичных экспериментальных данных из экспериментов по рассеянию фильтрованных нейтронов. Такой анализ включал в себя параметризацию аппаратурных спектров пропорционального водородного счетчика с целью разделения вкладов от нейтронов, упруго и неупруго рассеянных исследуемым образцом, учет отличия в эффективности их регистрации, а также учет поправок на конечное угловое разрешение экспериментальной установки, на многократное перерассеяние нейтронов в образце и на эффекты резонансного самоэкранирования. Полученные в результате такого анализа дифференциальные сечения упругого и неупругого рассеяния нейтронов с $E_n = 134$ кэВ на ^{103}Rh приведены на Рис.3.

Представлено развернутое описание универсального алгоритма

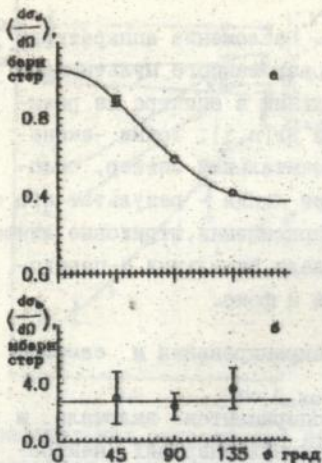


Рис. 3. Дифференциальные сечения упругого (а) и неупругого (б) рассеяния нейтронов с энергией 134 кэВ на ^{103}Rh . Точки - экспериментальные данные, линии - результат их аппроксимации полиномами Лежандра.

расчета поправок на многократные процессы перерассеяния нейтронов в образцах, учет которых необходим при анализе данных любых нейтронно-физических экспериментов в области промежуточных энергий. Алгоритм основан на статистическом моделировании многократных процессов методом Монте-Карло с учетом всех открытых каналов взаимодействия нейтронов с ядрами (упругое и неупругое рассеяние, захват, деление и др.), энергетической зависимости полного и частичных нейтронных сечений и параметров угловых распределений при рассеянии, энергетических потерь на ядра отдачи и возбуждение ядер при неупругом рассеянии нейтронов и др.

Описана методика анализа первичных экспериментальных данных, получаемых в (n, γ) - измерениях на многоканальном парном гамма-спектрометре. Созданный оригинальный алгоритм обработки γ - спектров на первом этапе включает в себя преобразование накопленных спектров в единую энергетическую шкалу, их суммирование, параметризацию результирующей функции отклика спектрометра по изолированным γ - линиям в исследуемом спектре, а также определение площадей и энергий наблюдаемых γ -линий с учетом известной функции отклика. Пример разложения аппаратурно неразрешенного мультиплета γ -линий в спектре из реакции $\text{Br}(n, \gamma)$ представлен на Рис. 4.

Расчет относительных интенсивностей первичных γ - переходов проводился с учетом энергетической зависимости эффективности

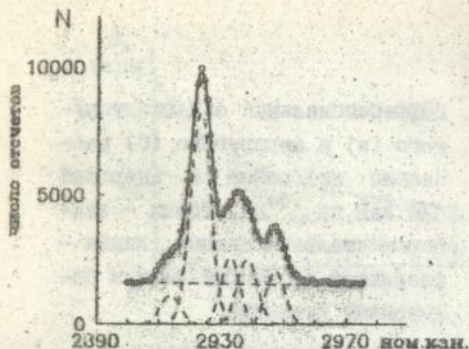


Рис.4. Разложение аппаратно неразрешенного мультиплета γ -линий в спектре из реакции $\text{Br}(n, \gamma)$. Точки - экспериментальный спектр, сплошная линия - результат его аппроксимации, штриховые линии - вклады отдельных γ -переходов и фона.

спектромет. и эффектов резонансного самоэкранирования и самопоглощения γ -квантов в образце.

Дальнейшая обработка данных (n, γ) -экспериментов включала в себя совместный анализ измеренных при различных энергиях нейтронов E_n относительных интенсивностей первичных γ -переходов I_{γ_i} с целью определения спинов и четностей конечных состояний J_f^{π} . По мере увеличения E_n , нейтронные волны с орбитальными моментами $l > 0$ начинают давать заметный вклад в радиационный захват, что приводит к изменению величин I_{γ} , различному для разных J_f^{π} . На Рис.5 представлена полученная в настоящей работе зависимость от E_n приведенных интенсивностей первичных γ -переходов на конечные состояния ^{156}Gd с различными J_f^{π} . Анализ показал, что достоверность идентификации квантовых характеристик состояний резко повышается при совместном анализе данных для различных энергий нейтронов E_n .

Описана методика совместного анализа дифференциальных данных об усредненных по резонансам полных и парциальных нейтронных сечениях, включая данные о сечениях парциальных γ -переходов в реакции (n, γ) , с целью определения средних резонансных параметров тяжелых атомных ядер. Разработанный алгоритм позволяет анализировать любой набор усредненных нейтронных сечений, измеренных при различных энергиях, с учетом экспериментальных и флуктуационных погрешностей данных.

В четвертой главе представлены результаты анализа влияния вклада удаленных связанных состояний компаунд-ядра (так называемых

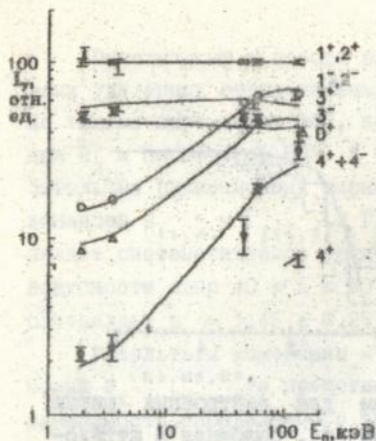


Рис. 5. Зависимость от энергии нейтронов приведенных интенсивностей первичных переходов в ^{156}Gd , усредненных по конечным состояниям с одинаковыми спином и четностью. Точки - экспериментальные данные, линии - результат их аппроксимации.

отрицательных резонансов) на величину определяемых резонансных параметров и их достоверность. Выполнен сравнительный статистический анализ литературных данных о параметрах первых отрицательных (ПОР) и первых положительных резонансов (ППР) ядер среднего атомного веса $40 \leq A \leq 90$. Представлены результаты измерения и параметризации полных нейтронных сечений изотопов железа $^{54,56,57}\text{Fe}$ в диапазоне энергий $E_n = 3 - 6000$ эВ.

В силу недоступности прямого исследования удаленных отрицательных резонансов в экспериментах с нейтронами, их параметры не могут быть определены однозначно. Общепринятым подходом при параметризации сечений в области низких энергий является пренебрежение их вкладом, фактически означающее замену реально существующих состояний, лежащих ниже энергии связи нейтрона, одним (в редких случаях двумя) эффективным отрицательным резонансом (ЭОР).

На Рис.6(а) представлены наблюдаемые конечные суммы для относительных приведенных ширин ЭОР и ППР $\chi_{(-1,1)}^0 = \Gamma_{(-1,1)n}^0 / \bar{\Gamma}_n^0$, рассчитанные на основании имеющихся в литературе экспериментальных данных. Там же представлена модельная кривая, соответствующая распределению Портера-Томаса. Как видно из рисунка, данные для ширин ППР хорошо согласуются с ожидаемым распределением. Распределение относительных ширин ЭОР имеет подобную же форму, однако, их среднее значение существенно отличается от 1:

$$\langle \Gamma_{(-1)n}^0 / \bar{\Gamma}_n^0 \rangle = 5.0 \pm 0.8.$$

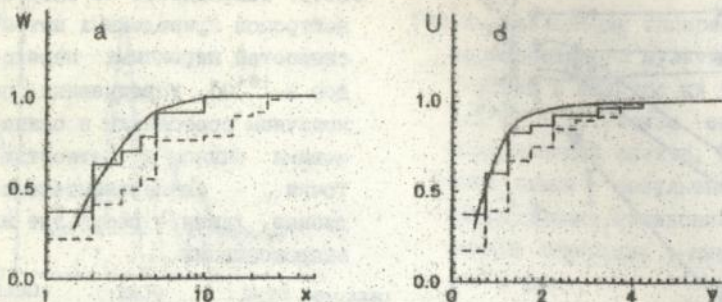


Рис.6. Наблюдаемые значения конечных сумм для нейтронных ширин (а) и расстояний между резонансами (б). Сплошная и штриховая гистограммы соответствуют данным для первых положительного и отрицательного резонансов, линии — ожидаемым распределениям Портера-Томаса (а) и Вигнера (б).

Это означает, что данные о ширине ЭОР $\Gamma_{(-1)n}^0$ в среднем по всей совокупности ядер $40 \leq A \leq 90$ завышены по сравнению с истинными ширинами реальных отрицательных уровней в ~ 5 раз.

На Рис.6(б) в сравнении с модельной кривой, соответствующей распределению Вигнера, приведены наблюдаемые конечные суммы для относительных расстояний $y_{(-1,1)} = D_{(-1,1)} / \bar{D}$ ($D_{(-1)}$ — расстояние между ЭОР и ППР, $D_{(1)}$ — расстояние между ППР и вторым положительным резонансом). Как видно из рисунка, распределение для $D_{(1)}$ хорошо согласуется с модельным предсказанием. Распределение расстояний $D_{(-1)}$ имеет форму, близкую к ожидаемой, однако среднее значение для этого распределения заметно отличается от 1:

$$\langle D_{(-1)} / \bar{D} \rangle = 1.61 \pm 0.24.$$

Так как энергия ППР E_1 является несмещенной (положения положительных резонансов являются величинами, непосредственно измеряемыми экспериментально), отличие расстояний $D_{(-1)}$ от средних значений \bar{D} означает, что имеющиеся в литературе экспериментальные данные об энергиях ЭОР $E_{(-1)}$ в среднем по всей совокупности ядер $40 \leq A \leq 90$ смещены относительно истинного положения реальных отрицательных уровней в ~ 2.2 раза.

Выполненный в работе анализ показал, что пренебрежение вкладом удаленных отрицательных резонансов приводит к перенормировке не только параметров ЗОР, но также радиуса потенциального рассеяния R'_0 и параметров ППР. В частности, статистический анализ относительных радиационных ширин первого и второго положительных резонансов $Z_{(1,2)} = \Gamma_{\gamma(1,2)} / \bar{\Gamma}_{\gamma}$ для ядер среднего атомного веса выявляет систематическое отличие этих величин. Среднее по всей совокупности ядер $40 \leq A \leq 90$ значение отношения $p_{\gamma} = \langle Z_{(1)} / Z_{(2)} \rangle$ составляет $p_{\gamma} = 1.46 \pm 0.25$.

Результаты измерения и параметризации полных нейтронных сечений $\sigma_{\text{п}}^{54,56,57}\text{Fe}$ представлены на Рис.7. Анализ показал сильную зависимость определяемого значения радиуса потенциального рассеяния s -нейтронов R'_0 для $^{56,57}\text{Fe}$ от способа параметризации данных. Полученные значения R'_0 с учетом и без учета вкладов удаленных отрицательных резонансов составили:

для ^{56}Fe - $R'_0 = 6.23 \pm 0.16$ фм и 7.13 ± 0.17 фм ;

для ^{57}Fe - $R'_0 = 5.30 \pm 0.12$ фм и 8.60 ± 0.21 фм соответственно.

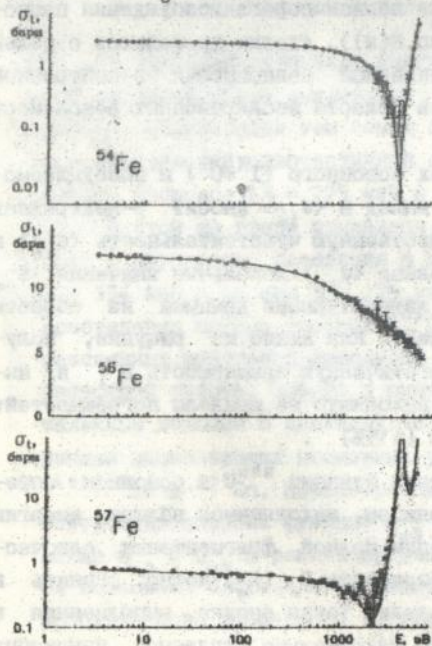


Рис.7. Полные нейтронные сечения $^{54,56,57}\text{Fe}$. Точки - экспериментальные данные, линии - результат их аппроксимации.

ЛНБ им. В. Стефаника
АН України

В литературе имеются данные о R'_0 для этих ядер, полученные из анализа всей области разрешенных резонансов до энергий порядка нескольких сотен кэВ. Такие данные практически нечувствительны к вкладам удаленных резонансов. Имеющиеся в литературе оцененные значения составляют

$$\text{для } {}^{56}\text{Fe} - R'_0 = 6.1 \pm 0.3 \text{ фм},$$

$$\text{для } {}^{57}\text{Fe} - R'_0 = 5.9 \pm 0.3 \text{ фм}.$$

Сравнение результатов настоящей работы с этими данными показывает, что в обоих случаях, когда сечения оказываются чувствительны к величине R'_0 , пренебрежение вкладами удаленных отрицательных состояний приводит к заметному занижению R'_0 .

В пятой главе представлены результаты измерения и анализа усредненных по резонансам сечений неупругого рассеяния нейтронов $\langle \sigma_{in} \rangle$ тяжелыми атомными ядрами вблизи порога возбуждения их ближайших уровней.

Приведены результаты параметризации имеющихся в литературе экспериментальных данных о $\langle \sigma_{in} \rangle$ вблизи порога возбуждения первого уровня ${}^{238}\text{U}$ ($E_{ур} = 45$ кэВ) (Рис.8(а)). Анализ проводился с целью исследования возможной энергетической зависимости р-нейтронной силовой функции S_{n1} этого ядра в области изолированных резонансов $E_n < 300$ кэВ.

Благодаря различию в спинах основного ($I_n^{\pi} = 0^+$) и возбуждаемого ($I_n^{\pi} = 2^+$) уровней, основной вклад в $\langle \sigma_{in} \rangle$ вносит р-нейтронная волна. Это обеспечивает преимущественную чувствительность $\langle \sigma_{in} \rangle$ к величине S_{n1} . Полученные из анализа $\langle \sigma_{in} \rangle$ локальные значения S_{n1} приведены на Рис.8(б) вместе с литературными данными из области разрешенных резонансов ($E_n \leq 5$ кэВ). Как видно из рисунка, полученные данные не проявляют энергетическую зависимость S_{n1} в интервале энергий $E_n = 0-275$ кэВ, выходящую за пределы погрешностей: $S_{n1} \approx \text{Const} (E_n) (\pm 15\%)$.

Значение р-нейтронной силовой функции ${}^{238}\text{U}$ в основном определяется 4р-одночастичным состоянием, находящимся вблизи энергии связи нейтрона B_n . В предположении полной фрагментации одночастичной силы, энергетическую зависимость $S_{n1}(E_n)$ можно оценить в рамках оптико-статистической модели. Такая оценка, выполненная в настоящей работе, указывает, что максимально ожидаемое изменение

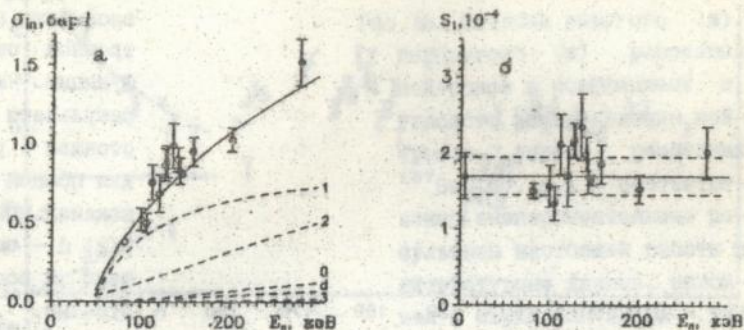


Рис.8. а). Сечение неупругого рассеяния нейтронов с возбуждением первого уровня ^{238}U . Точки - экспериментальные данные; штриховые линии 0, 1, 2, 3 и d - соответственно вклады в сечение от v -, p -, d - и f -парциальных волн во входном канале и вклад прямых процессов; сплошная линия - сумме парциальных вкладов. б). Локальные значения p -нейтронной силовой функции ^{238}U . Штриховыми линиями показан 15%-ный коридор погрешностей.

S_{n1} в пределах интервала энергий $\Delta E_n = 275$ кэВ составляет $\delta S_{n1}^{\text{max}} \sim 10\%$. Полученный из анализа $\langle \sigma_{in} \rangle$ результат не противоречит этой оценке, подтверждая тем самым отсутствие какой-либо подструктуры в распределении одночастичной силы $4p$ -состояния ^{238}U в энергетическом масштабе $\Delta E_n = 275$ кэВ в пределах точности $\sim 15\%$.

В этой же главе приведены результаты измерений сечений упругого и неупругого рассеяния и полных нейтронных сечений ^{103}Rh при $E_n = 134$ кэВ и Ag при $E_n = 275$ кэВ. Измерения $\langle \sigma_{in} \rangle$ вблизи порога возбуждения первых уровней ^{103}Rh и Ag прямым методом регистрации рассеянных нейтронов выполнены впервые. Результаты, полученные в настоящей работе, вместе с имеющимися в литературе экспериментальными данными о сечениях $\langle \sigma_{in}^m \rangle$ неупругого рассеяния с возбуждением низколежащих изомерных уровней ^{87}Sr , ^{93}Nb , ^{103}Rh , Ag , ^{111}Cd , $^{113, 115}\text{In}$ и ^{117}Sn , параметризовались с целью определения d - и f -нейтронных силовых функций S_{n2} и S_{n3} этих ядер. Надежное определение S_{n2} и S_{n3} в рамках предложенного в работе метода оказывается возможным благодаря большому отличию спинов основного I_g и возбуждаемого изомерного I_m уровней:

$$I = |I_m - I_g| \geq 3$$

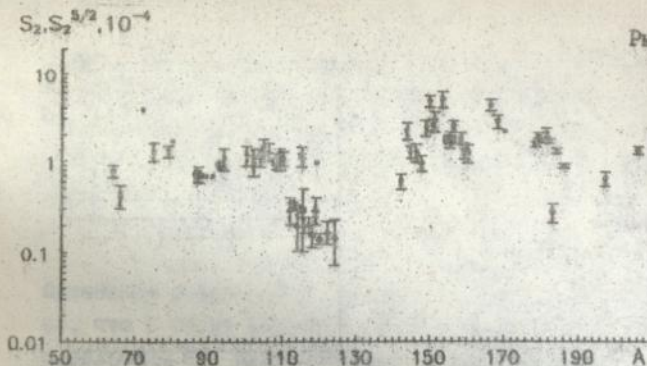


Рис.9. Массовая зависимость d-нейтронной силовой функции. и, е - результаты настоящей работы для полной и одноканальной ($j = 5/2$) d - силовых функций соответственно.

При таком отличии d- и f-парциальные нейтронные волны вносят основной вклад в $\langle \sigma_{in}^m \rangle$.

Сравнение полученных значений полных S_{n2} и одноканальных $S_{n2}^{5/2}$ d-нейтронных силовых функций с ранее имевшимися данными представлено на Рис.9. Полученные данные являются одними из наиболее точных. Для $^{113,116}\text{In}$ обнаружено аномально большое расщепление компонент спин-орбитального дублета;

$$k_a = S_{n2}^{5/2} / S_{n2}^{6/2} = 7.5 \pm 1.9.$$

Аномальный эффект объяснен влиянием принципа Паули на распределение силы $2d_{3/2}$ - и $2d_{5/2}$ -одночастичных состояний в ^{113}In и ^{116}In . Для этих ядер состояние $2d_{5/2}$ оказывается ниже поверхности Ферми и не дает вклада в одноканальную силовую функцию $S_{n2}^{5/2}$.

В работе впервые получена информация о f-нейтронных силовых функциях S_{n3} тяжелых ядер. Полученные для ^{111}Cd и ^{117}Sn значения составляют соответственно $S_{n3} = (3.9 \pm 0.7) 10^{-4}$ и $(4.2 \pm 0.7) 10^{-4}$ и указывают на проявление 2f-одночастичного максимума в массовой зависимости S_{n3} .

В этой же главе обсуждаются результаты измерений угловых распределений и сечений упругого и неупругого рассеяния нейтронов с $E_n = 24.3$ и 45 кэВ на ^{187}Os (Рис.10) и с $E_n = 134$ кэВ на ^{197}Au , а также результаты исследования эффектов резонансного самоэкранирования в полном нейтронном сечении ^{187}Os при $E_n = 1.9, 12, 24.3, 59$ и 144 кэВ (Рис.2). Полученные данные существенно дополняют ранее имевшуюся экспериментальную информацию о сечениях этих ядер.

Представлены результаты анализа всей совокупности экспериментальных данных о нейтронных сечениях ^{187}Os в диапазоне энергий

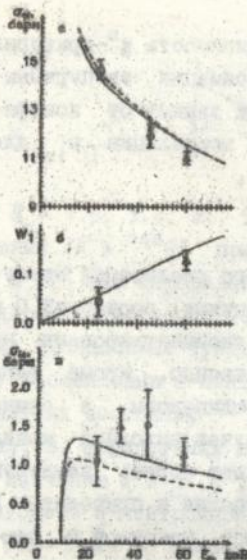


Рис. 10. Сечение упругого (а), неупругого (в) рассеяния нейтронов и коэффициент w_1 углового распределения нейтронов, упруго рассеянных ^{197}Au (б). \circ, Δ — соответственно экспериментальные результаты настоящей работы и литературные данные, сплошная и штриховая линии — результат аппроксимации всей совокупности данных для ^{197}Au с учетом и без учета корреляции каналов упругого и неупругого рассеяния.

$E_n \leq 150$ кэВ и данных о сечениях неупругого рассеяния и радиационного захвата нейтронов ^{197}Au в диапазоне $E_n \leq 250$ кэВ. Анализ был выполнен с целью обнаружения предсказанного эффекта нестатистического усиления канала неупругого рассеяния нейтронов с возбуждением первого уровня этих ядер. Схема такого процесса показана на Рис. 11. Нейтрон, падающий во входном канале на одно из одночастичных состояний А, отдает часть энергии на возбуждение неспаренного нуклона, и затем покидает ядро. При этом в выходном канале нейтрон остается в том же состоянии А. Такой процесс возможен благодаря большой ширине одночастичных состояний вблизи

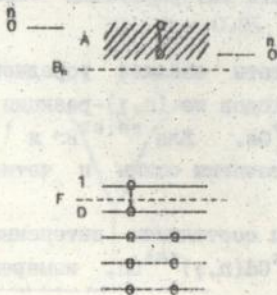


Рис. 11. Схема предравновесного процесса при неупругом рассеянии нейтронов.



Рис. 12. Зависимость χ^2 -критерия аппроксимации экспериментальных данных от коэффициента корреляции ρ_{in} для золота.

энергии связи (порядка нескольких MeV). Для его реализации требуется, чтобы силы одночастичных (одноквазичастичных) состояний 0 и 1 вблизи уровня Ферми были преимущественно сконцентрированы на основном и возбужденном уровнях ядра соответственно. Кроме того необходимо, чтобы четности этих уровней были одинаковы, а спины отличались не более, чем на 1. В описанном случае выходной канал с конфигурацией типа "две частицы + дырка" будет играть заметную роль в качестве первого предравновесного состояния и приводить к связи (корреляции) входного и выходного каналов. Основной и первый возбужденный уровни у ядер ^{187}Os и ^{197}Au удовлетворяют перечисленным требованиям.

На Рис. 12 приведена полученная для ^{197}Au зависимость χ^2 -критерия аппроксимации экспериментальных данных о $\langle \sigma_{in} \rangle$ и $\langle \sigma_{\gamma} \rangle$ от коэффициента корреляции ρ_{in} амплитуд каналов упругого и неупругого рассеяния. Наилучшее согласие экспериментальных и расчетных величин было достигнуто при значениях

$$\begin{aligned} \rho_{in} &= 0.65 && \text{для } ^{187}\text{Os} \text{ и} \\ \rho_{in} &= 0.80 \pm 0.15 && \text{для } ^{197}\text{Au}. \end{aligned}$$

Близкие значения величин ρ_{in} для двух исследованных ядер служат дополнительным подтверждением правильности интерпретации обнаруженного эффекта.

В шестой главе представлены результаты анализа усредненных по резонансам спектров первичных γ -переходов из (n, γ) -реакции на ядрах $^{79,81}\text{Br}$, ^{113}Cd , ^{116}In , ^{156}Gd и ^{187}Os . Для $^{80,82}\text{Br}$ и ^{116}In обнаружены ранее неизвестные уровни и уточнены спины и четности большинства ранее известных состояний.

При анализе усредненных по конечным состояниям интенсивностей первичных γ -переходов из реакции $^{156}\text{Gd}(n, \gamma)^{156}\text{Gd}$, измеренных

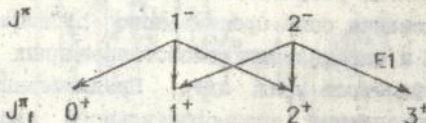


Рис. 13. Схема распада β -захватных состояний ^{156}Gd .

при $E_n = 1.9, 3.5, 45, 59$ и 134 кэВ (Рис. 6), и полных нейтронных сечений $\langle \sigma_t \rangle$ ^{156}Gd при $E_n = 1.9, 3.5, 12, 24.3, 45, 59, 75, 134, 144$ и 275 кэВ определен набор средних резонансных параметров этого ядра, существенно уточняющий ранее имевшуюся информацию, а также исследована чувствительность данных к возможному спин-спиновому расщеплению β -нейтронной силовой функции. Схема распада β -захватных состояний ^{156}Gd приведена на Рис. 13. Спин компаунд-резонансов, формируемых при захвате β -нейтронов, может принимать два значения $J^\pi = 1^-, 2^-$, соответствующие двум компонентам спинового дублета β -нейтронной силовой функции S_{n0} . γ -переходы на конечные состояния со спином $J_f^\pi = 0^+, 3^+$ связаны только с одной из двух компонент спинового дублета, а переходы на состояния с $J_f^\pi = 1^+, 2^+$ с обеими компонентами. Поэтому, анализ интенсивностей таких переходов дает возможность исследовать спиновое расщепление S_{n0} .

На Рис. 14 представлена зависимость χ^2 -критерия аппроксимации экспериментальных данных от коэффициента спинового расщепления

$$k_n = S_{n0}^{J=1-1/2} / S_{n0}^{J=1+1/2}$$

Как видно из рисунка, данные заметно чувствительны к величине k_n , однако выходящего за пределы погрешностей эффекта спинового расщепления S_{n0} для ^{156}Gd не наблюдается. Оцененное при анализе всей совокупности данных значение коэффициента составляет

$$k_n = 0.85 \pm 0.30.$$

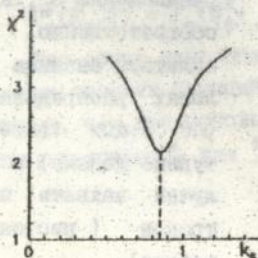


Рис. 14. Зависимость χ^2 -критерия аппроксимации экспериментальных данных от коэффициента k_n .

В этой же главе представлены результаты анализа данных для ^{113}Cd и ^{115}In с целью исследования спин-орбитального расщепления р-нейтронных силовых функций и определения самосогласованных наборов средних резонансных параметров этих ядер. Предложенный в работе метод исследования расщепления спин-орбитального дублета $S_{n1}^{1/2}$ и $S_{n1}^{3/2}$ аналогичен описанному выше для случая спин-спинового расщепления.

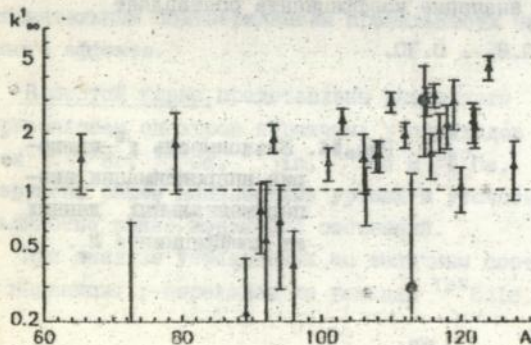
Для ^{113}Cd использовались литературные данные о сечении радиационного захвата $\langle \sigma_\gamma \rangle$ в интервале энергий нейтронов $E_n < 200$ кэВ и γ -спектрах из реакции $^{113}\text{Cd}(n, \gamma)^{114}\text{Cd}$, измеренных при средних энергиях нейтронов $E_n = 1.9$ и 24.3 кэВ. Для ^{115}In использовались экспериментальные результаты настоящей работы - наблюдаемые полные нейтронные сечения, определенные при $E_n = 3.5, 12, 24.3, 144$ и 610 кэВ, и усредненные интенсивности первичных переходов из реакции (n, γ) , измеренные при $E_n = 1.9, 24.3$ и 134 кэВ.

На Рис. 15 представлено сравнение полученных в настоящей работе для ^{113}Cd и ^{115}In значений коэффициента спин-орбитального расщепления р-нейтронной силовой функции $k_1 = S_{n1}^{1/2} / S_{n1}^{3/2}$ с ранее имевшимися данными, основанными на анализе угловых распределений упруго рассеянных нейтронов. Для ^{113}Cd полученное значение

$$k_1(^{113}\text{Cd}) = 0.3 \begin{matrix} + 1.0 \\ - 0.3 \end{matrix}$$

имеет достаточно большую погрешность, что не позволяет сделать какие-либо выводы о наличии или отсутствии эффекта спин-орбитального расщепления. Для ^{115}In полученный результат

Рис. 15. Массовая зависимость коэффициента спин-орбитального расщепления S_{n1} . А, е - соответственно результаты анализа угловых распределений $\langle d\sigma_{n1} / d\Omega \rangle$ (литературные данные) и γ -лучей захвата нейтронов (настоящая работа).



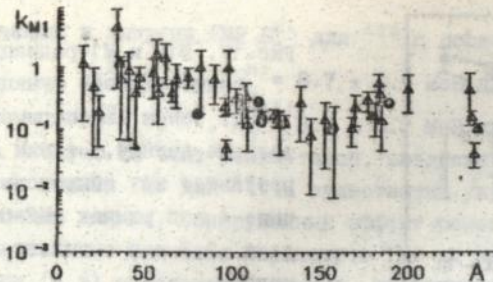


Рис. 16. Массовая зависимость отношения $S_{\gamma}^{M1}/S_{\gamma}^{E1}$. Δ , \circ — соответственно литературные данные и результаты настоящей работы.

$$k_1(^{116}\text{In}) = 3.0 \pm 1.5$$

подтверждает наличие эффекта.

Для всех ядер, для которых проводились измерения и анализ спектров γ -лучей из реакции (n, γ) , было определено отношение M1- и E1-радиационных силовых функций $k_{M1} = S_{\gamma}^{M1}/S_{\gamma}^{E1}$. Сравнение полученных значений k_{M1} с ранее имевшимися данными представлено на Рис. 16. Как видно из рисунка, полученные результаты являются одними из наиболее точных.

Наиболее детальный анализ радиационных силовых функций E1- и M1-переходов был выполнен для ^{114}Cd и ^{116}In с целью выбора оптимальной модели параметризации гигантских электрического и магнитного резонансов (ГЭДР и ГМР) и определения их характеристик. На Рис. 17, 18 приведены результаты исследования энергетической зависимости $S_{\gamma}^{M1}(E_{\gamma})$ и $S_{\gamma}^{E1}(E_{\gamma})$ для этих ядер. Энергетическая зависимость силовых функций параметризовалась в рамках двух моделей:

- 1). В виде однокомпонентного лоренциана (L-модель) с шириной гигантского резонанса Γ_G , не зависящей от энергии E_{γ} и температуры конечного состояния ядра T .
- 2). В рамках модели Кадменского-Фурмана (KF-модель) с температурной зависимостью ширины в виде:

$$\Gamma_G^T(E_{\gamma}, T) = \Gamma_G(E_{\gamma}^2 + 4\pi^2 T^2) / E_G^2, \quad \text{где } E_G - \text{энергия резонанса.}$$

Для обоих ядер описание энергетической зависимости E1-радиационных силовых функций в рамках KF-модели оказалось более реалистичным, чем при использовании стандартного лоренциана. В частности, полученные для ^{114}Cd значения E_G^{E1} составили

$S_7^{E1, M1}$, отн. ед.

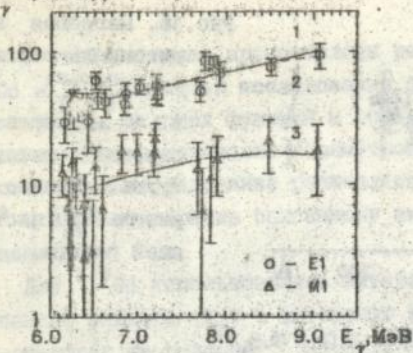


Рис. 17. E1- и M1-радиационные силовые функции ^{114}Cd . Точки - экспериментальные данные, линии - результат их аппроксимации: 1 - в рамках KR-модели, 2, 3 - в рамках L-модели.

$$E_G^{E1} = 12 \pm 2 \text{ MeV для L-модели и}$$

$$E_G^{E1} = 16.2 \pm 1.7 \text{ MeV для KR-модели.}$$

Последняя величина заметно лучше согласуется с систематикой данных для соседних ядер, предсказывающей значение $\langle E^{E1} \rangle = 16 \text{ MeV}$.

Полученные для ^{114}Cd относительные величины $S_7^{E1, M1}$ перекрывают сравнительно широкий интервал энергий $\Delta E_\gamma \sim 3 \text{ MeV}$, однако имеют достаточно большую погрешность (Рис. 17). Их параметризация проводилась только в виде однокомпонентного лоренциана. Полученные для ^{114}Cd значения параметров гигантского магнитного резонанса составили:

$$E_G^{M1} = 8.8 \pm 1.6 \text{ MeV и } \Gamma_G^{M1} = 4.7 \pm 2.6 \text{ MeV.}$$

Для параметризации данных о $S_7^{M1}(E_\gamma)$ для ^{116}In (Рис. 18) использовались обе модели. Полученные значения χ^2 -критерия аппро-

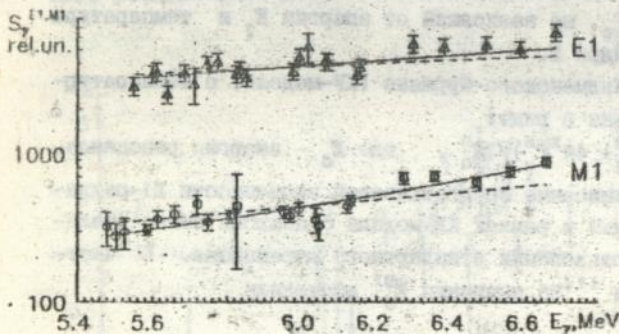


Рис. 18. E1- и M1-радиационные силовые функции ^{116}In . Точки - экспериментальные данные, сплошные и штриховые линии - результат их аппроксимации в рамках KR- и L-моделей, соответственно.

ксимации и энергии ГМР E_G^{M1} для ^{116}In составили:

$$\chi^2 = 2.93, \quad E_G^{M1} = 8.7 \pm 4.9 \text{ МэВ для L-модели и}$$

$$\chi^2 = 1.12, \quad E_G^{M1} = 8.6 \pm 0.2 \text{ МэВ для KF-модели.}$$

Как следует из этих результатов, введение температурной зависимости ширины ГМР для ^{116}In существенно улучшает качество параметризации данных. Обнаруженный эффект ранее был неизвестен. Экспериментальные значения параметров ГМР из анализа γ -спектров из реакции (n, γ) определены впервые. Их величина хорошо согласуется с предсказаниями спин-флип модели для ядер в области массовых чисел $A \sim 115$: $E_G^{M1} \sim 8.5 \text{ МэВ}$ и $\Gamma_G^{M1} \sim 4 \text{ МэВ}$.

Седьмая глава посвящена описанию результатов, связанных с нейтронно-физическими аспектами астрофизики. В этой главе представлены результаты расчетов нейтронных сечений ядер ^{73}Ge , ^{93}Nb , ^{103}Rh , ^{113}Od , $^{117,119}\text{Sn}$, ^{126}Te , ^{169}Tm , $^{180,181}\text{Ta}$ и $^{186,187,189}\text{Ov}$ в основном и нижайших возбужденных состояниях, заметно заселяемых в ν -процессе звездного нуклеосинтеза. Показана допустимость использования средних резонансных параметров ядер-мишеней в основном состоянии при расчете сечений для возбужденных ядер и выполнен анализ погрешностей, возникающих при таком подходе.

В этой же главе представлен результат оценки средней температуры ν -процесса T , выполненной на основе анализа относительной распространенности ядер в окрестности ^{103}Rh , для которого вклад захвата из первого возбужденного состояния играет заметную роль в звездных условиях и существенно зависит от температуры. Анализ показал, что наблюдаемая распространенность ^{103}Rh несколько лучше параметризуется на верхней границе интервала допустимых температур $k_B T = 10 - 30 \text{ кэВ}$. Этот результат не противоречит другим существующим в настоящее время оценкам, а также данным прямых астрометрических наблюдений звезд - красных гигантов.

Представлено обоснование применимости подхода и последующая оценка возраста ν -процесса звездного нуклеосинтеза по Re-Ov -хронومتру. Такая оценка основывается на сравнении вклада ν -процесса в распространенность долгоживущего изотопа ^{187}Re ($T_{1/2} = 4.47 \cdot 10^{10}$ лет в земных условиях) и возникшей в результате его распада доли ^{187}Ov . Двумя основными источниками неопределенности при использовании этого метода до настоящей работы являлись:

1). Отличие нейтронных сечений $^{186,187}\text{Ov}$ в звездных условиях от экспериментально измеряемых величин, наиболее существенно проявляющееся для ^{187}Ov , имеющего низколежащий возбужденный уровень с энергией $E_1 = 9.7$ кэВ.

2). Сильная зависимость периода полураспада ^{187}Re от температуры среды.

При расчетах нейтронных сечений $^{186,187}\text{Ov}$ в звездных условиях были исследованы и учтены практически все возможные источники неопределенности, связанные с: - энергетической и спиновой зависимостью средних резонансных параметров; - отличием параметров, соответствующих различным орбитальным моментам; - обнаруженной в настоящей работе для ^{187}Ov связью каналов упругого и неупругого рассеяния и др. Выполненный анализ позволил рассчитать сечения захвата нейтронов $^{186,187}\text{Ov}$ в звездных условиях с точностью $\sim 4\%$ (ранее существовавшая неопределенность составляла $\geq 20\%$).

Оценка вклада "ускоренного" распада ^{187}Re , нарабатываемого в ν - и γ -процессах, была выполнена на основании анализа наблюдаемых распространенностей специально подобранных долгоживущих в земных условиях ядер - чистых продуктов ν - и γ -процессов, периоды полураспада которых, аналогично ^{187}Re , существенно зависят от температуры среды: ^{176}Lu ($T_{1/2} = 4.1 \cdot 10^{10}$ лет, ν -продукт), ^{113}Cd ($T_{1/2} = 9 \cdot 10^{15}$ лет, γ -продукт) и ^{115}In ($T_{1/2} = 4 \cdot 10^{14}$ лет, γ -продукт). Сравнительный анализ их распространенностей позволил получить следующие оценки доли "ускоренного" распада для ^{187}Re :

$$D_{\nu} \leq D_{\nu}^{\text{max}} = 38\% ; D_{\gamma} = (3.7 \pm 0.3)\%$$

Строгий расчет возраста γ -процесса Δ_{γ} требует учета динамики вспышек сверхновых. Однако, верхняя и нижняя границы возраста ^{187}Re могут быть определены и без ее учета. Не зависящая от динамики вспышек оценка возраста γ -процесса Δ_{γ} при 67%-ном уровне достоверности составила:

$$3.4 \cdot 10^9 \text{ лет} \leq \Delta_{\gamma} \leq 13.0 \cdot 10^9 \text{ лет} .$$

Полученный результат заметно сужает диапазон возможных значений Δ_{γ} по сравнению с ранее имевшимися оценками по Re-Ov -хронометру:

$$0 \leq \Delta_{\gamma} \leq 17 \cdot 10^9 \text{ лет} .$$

(В ряде работ применимость Re-Ov -хронометра была подвергнута сомнению из-за возможности ускоренного распада ^{187}Re , что соответствует нижнему пределу $\Delta_{\gamma}^{\text{min}} = 0$.)

Полученное значение нижней границы возраста r -процесса было использовано для оценки нижних границ возраста Галактики Δ_G и Вселенной Δ_U . С учетом возраста Солнечной системы $\Delta_{\text{сн}} = 4.5 \cdot 10^9$ лет, нижняя граница Δ_G была оценена, как:

$$\Delta_G = \Delta_{\text{сн}} + \Delta_r \geq 7.9 \cdot 10^9 \text{ лет.}$$

Принимая время формирования протогалактики $\Delta_r \sim 1 \cdot 10^9$ лет, нижняя граница возраста Вселенной, оцененная в настоящей работе по Re-Os-хронометру, составила

$$\Delta_U = \Delta_r + \Delta_G \geq 8.9 \cdot 10^9 \text{ лет.}$$

Полученная оценка Δ_U не противоречит расчетам по U-Th-хронометру и анализу динамики расширения Вселенной.

В заключении сформулированы следующие основные выводы по диссертационной работе:

1. На основе стабильных изотопов ^{62}Cr , $^{54,56}\text{Fe}$ и ^{60}Ni разработаны новые нейтронные интерференционные фильтры, формирующие нейтронные пучки с энергиями 313 и 610 кэВ, существенно расширяющие энергетический диапазон, доступный для фундаментальных и прикладных нейтронно-физических исследований с помощью методики фильтрованных пучков на стационарных исследовательских реакторах.
2. Разработан комплекс оригинальных алгоритмов и программ обработки первичной экспериментальной информации, получаемой в нейтронно-физических экспериментах различного вида с использованием медленных и промежуточных нейтронов (эксперименты по пропусканию и активации, измерение угловых распределений рассеянных нейтронов, измерение спектров γ -лучей захвата нейтронов и пр.).
3. На основании статистического анализа имеющихся экспериментальных данных о параметрах отрицательных резонансов ядер среднего атомного веса показано, что совокупность данных не соответствует статистическим законам распределения и, за широко практикуемого пренебрежения вкладами удаленных отрицательных состояний. Влияние учета их вкладов на качество параметризации экспериментальных данных и величину параметров первых положительных резонансов продемонстрировано на примере параметризации полных нейтронных сечений стабильных изотопов железа $^{54,56,57}\text{Fe}$ в диапазоне энергий 2–6000 эВ, впервые измеренных в настоящей работе.

4. Из анализа сечения неупругого рассеяния нейтронов на первом уровне ^{238}U определены локальные значения p -нейтронной силовой функции этого ядра в диапазоне энергий 82 – 275 кэВ. Полученные результаты не указывают на проявление какой-либо промежуточной структуры в распределении силы $4p$ -одночастичного состояния.
5. Предложен новый метод определения d - и f -нейтронных силовых функций из анализа сечений неупругого рассеяния нейтронов с возбуждением низколежащих изомерных состояний тяжелых ядер. С использованием этого метода впервые определены f -нейтронные силовые функции $S_{n3}^{111}\text{Cd}$ и ^{117}Sn , указывающие на проявление одночастичного максимума в массовой зависимости S_{n3} в области $A \sim 115$. Для d -нейтронной силовой функции ^{115}In впервые обнаружен эффект сильного расщепления компонент спин-орбитального дублета, связанный с влиянием принципа Паули на распределение силы одночастичных состояний.
6. Впервые измерены сечения упругого и неупругого рассеяния нейтронов с энергиями 24.3 и 45 кэВ и полные нейтронные сечения при энергиях 1.9, 12, 24.3, 59 и 144 кэВ для ^{187}Ov . Предсказан и при анализе сечений ^{187}Ov и ^{197}Au подтвержден неизвестный ранее эффект нестатистического усиления канала неупругого рассеяния вблизи порога реакции для тяжелых ядер, основной и первый возбужденный уровни которых имеют ярко выраженную одночастичную (одноквазичастичную) природу.
7. Впервые измерены усредненные по резонансам спектры первичных γ -переходов из реакции (n, γ) для ядер $^{79,81}\text{Br}$ при энергиях нейтронов 1.9, 2.8 и 59 кэВ, для ^{115}In при энергиях 1.9, 24.3 и 134 кэВ и для ^{155}Gd при энергиях 3.5 и 45 кэВ. Обнаружены ранее неизвестные уровни и определены спины и четности известных состояний ^{80}Br до энергии возбуждения 1011 кэВ, ^{82}Br до энергии 823 кэВ и ^{116}In до энергии 1302 кэВ.
8. При совместном анализе усредненных сечений и γ -спектров из реакции (n, γ) реализован новый метод исследования спин-спинового (для ^{155}Gd) и спин-орбитального (для ^{113}Cd и ^{115}In) расщепления нейтронных силовых функций. Для ^{115}In подтверждено наличие аномального расщепления p -нейтронной силовой функции.
9. Из анализа усредненных по резонансам спектров первичных γ -пе-

реходов из реакции (n, γ) впервые определены параметры М1-гигантского резонанса для ^{114}Og и ^{116}In и обнаружена сильная температурная зависимость его ширины у ^{116}In .

10. Выполнены расчеты сечений радиационного захвата и суперупругого рассеяния нейтронов для ряда тяжелых ядер, имеющих низколежащие возбужденные состояния, заметно заселяемые в α -процессе звездного нуклеосинтеза. Оценена средняя температура α -процесса из анализа распространенности ядер в окрестности ^{103}Rh , для которого вклад захвата из первого возбужденного состояния существенно зависит от температуры среды.
11. Предложен новый подход к оценке неопределенностей при расчете возраста r -процесса нуклеосинтеза по Re-Os-хронометру. С учетом этой оценки показана применимость метода и определены верхний и нижний пределы возраста r -процесса и нижний предел возраста Галактики.

Основные публикации по диссертационной работе:

1. Литвинский Л.Л. Корреляция каналов упругого и неупругого рассеяния нейтронов тяжелыми ядрами в области энергий ≤ 100 кэВ// Атомная Энергия.- 1992.- т.72, вып.3.- с.290-293.
2. Литвинский Л.Л. Расчет поправок на многократные процессы в нейтронно-физических экспериментах// Препринт ИЯИ АН Украины КИИИ-92-19.- Киев.- 1992.- 20 с.
3. Литвинский Л.Л., Мурзин А.В., Шкарупа А.М. Нейтронные сечения ^{187}Os и их анализ с учетом возможной корреляции каналов упругого и неупругого рассеяния // Ядерная Физика.- 1993.- т.56, вып.1. - с.31-42.
4. Литвинский Л.Л. Сечения радиационного захвата нейтронов $^{186,187}\text{Os}$ в звездных условиях// Ядерная Физика.- 1993.- т.56, вып.9. - с.20-30.
5. Литвинский Л.Л. Неупругое рассеяние нейтронов и d -нейтронная силовая функция атомных ядер в области массовых чисел $A \sim 100$ // Ядерная Физика.- 1993.- т.56, вып.9.- с.128-136.
6. Murzin A.V., Libman V.A., Litvinsky L.L., Pshenichny V.A. et al. Investigations of neutron capture γ -ray spectra at the filtered neutron beams of the WWR-M reactor in Kiev// 8 Int. Symp. on Capture Gamma Ray Spectroscopy, Fribourg, 20-24 Sept.

- 1993.- Singapore: World Scientific.- 1994.- p.924-930.
7. Litvinsky L.L. Analysis of neutron inelastic scattering near threshold for heavy nuclei // 8 Int. Symp. on Capture Gamma Ray Spectroscopy, Fribourg 20 - 24 Sept. 1993.- Singapore: World Scientific.- 1994.- p.765-767.
 8. Hoyler F., Jolie J., Judge S., Murzin A.V., Litvinsky L.L. et al. Investigation of the level scheme of ^{80}Br using ARC- and conversion electron data // 8 Int. Symp. on Capture Gamma Ray Spectroscopy, Fribourg 20 - 24 Sept. 1993.- Singapore: World Scientific. - 1994. - p.260-267.
 9. Новоселов Г.М., Литвинский Л.Л., Ворона П.Н., Гребнев А.В. и др. Полные нейтронные сечения и средние параметры резонансов ядра ^{115}In в диапазоне энергий $E = 2-614$ кэВ // Письма в ЖЭТФ.- 1994.- т.59, вып.9.- с.575-578.
 10. Литвинский Л.Л., Саббах С., Жигалов Я.А., Кривенко В.Г. и др. Упругое и неупругое рассеяние нейтронов с энергией 134 кэВ на ^{197}Au // Вопросы Атомной Науки и Техники, сер.: Ядерные Константы.- 1994.- вып.1.- с.15-17.
 11. Litvinsky L.L. Analysis of average primary gamma - transition intensities and cross sections of the $^{113}\text{Cd}(n,\gamma)$ reaction // Zeit. Physik A.- 1994.- v.349, No 2.- p.147-153.
 12. Litvinsky L.L. Analysis of ARC-spectra and neutron capture cross sections of ^{113}Cd // II Int. Seminar on Interaction of Neutrons with Nuclei, Dubna, April 1994 (Abstracts).- Dubna: JINR.- 1994.- p.32.
 13. Litvinsky L.L., Vorona P.N., Murzin A.V., Statistics of Negative Resonance Parameters of Nuclei in Mass Region $40 < A < 90$ // Вопр. Атомной Науки и Техники, сер. : Ядерные Константы. - 1994. - вып.3.- с.38-40.
 14. Литвинський Л.Л., Кривенко В.Г., Пугач Я.В., Саббах С. Непружне розсіювання нейтронів з енергією 134 кев ^{103}Rh // Український Фізичний Журнал.- 1994.- т.39, вип.3.- с.276-279.
 15. Литвинский Л.Л., Власов М.Ф., Новоселов Г.М. Средние резонансные параметры ^{236}U // Письма в ЖЭТФ.-1994.-т.60, вып.3.- с.155-157.
 16. Литвинский Л.Л., Лишман В.А., Пуртов О.А., Шкарупа А.М. Алгоритм обработки гамма-спектров из реакции (n,γ) , измеряемых с помощью парного гамма-спектрометра // Препринт ИЯИ НАН Украины

- КИЯИ-94-12. - Киев. - 1994. - 12 с.
17. Литвинский Л.Л., Ворона П.Н., Кривенко В.Г., Лишман В.А. и др. Полные нейтронные сечения изотопов железа $^{54,56,57}\text{Fe}$ в диапазоне энергий 3-6000 эВ// *Вопр. Атомной Науки и Техники, сер.: Ядерные Константы.* - 1994. - с.45-50.
 18. Литвинский Л.Л., Лишман В.А. Неупругое рассеяние нейтронов и энергетическая зависимость р-нейтронной силовой функции // *Письма в ЖЭТФ.* - 1994. - т.59, вып.7. - с.442-446.
 19. Литвинский Л.Л., Жигалов Я.А., Кривенко В.Г., Пуртов О.А., Саббах С. Неупругое рассеяние нейтронов с энергией 275 кэВ серебром, *Вопр. Атомной Науки и Техники, сер.: Ядерные Константы.* - 1994. - вып.3. - с.41-44.
 20. Литвинский Л.Л., Кривенко В.Г., Мурзин А.В., Новоселов Г.М. и др. Усредненные по резонансам спектры первичных γ -переходов из реакции $^{115}\text{In}(n, \gamma)^{116}\text{In}$ при энергиях нейтронов 1.9, 24.3 и 134 кэВ// *Препринт ИЯИ НАН Украины КИЯИ-94-15.* - Киев. - 1994. - 10 с.
 21. Литвинский Л.Л., Жигалов Я.А., Лишман В.А., Мурзин А.В. и др. Неупругое рассеяние нейтронов с энергией 45 кэВ на ^{167}Ov // *Ядерная Физика.* - 1995. - т.58, N 2. - с.14-15.
 22. Литвинский Л.Л. d- и f-нейтронные силовые функции ядер в области массовых чисел $A = 90-120$ // *Ядерная Физика.* - 1995. - т.58, N 4. - с.1-5.
 23. Литвинський Л.Л., Ворона П.М., Гнідак М.Л., Гребньов О.В. та ін. Повні нейтронні перерізи та середні резонансні параметри ^{168}Gd // *Український Фізичний Журнал.* - 1995. - т.40, N 3. - с.156-158.
 24. Литвинский Л.Л., Саббах С., Шкарупа А.М. ^{103}Rh , как потенциальный термометр в-процесса звездного нуклеосинтеза // *Кинематика и физика небесных тел.* - 1995. - т.11, N.1. - с.17-22.
 25. Litvinsky L.L. A possible temperature dependence of width of ^{116}In giant magnetic resonance // *III Int. Seminar on Interaction of Neutrons with Nuclei, Dubna, April 1995 (Abstracts).* - Dubna: JINR. - 1995. - p.35.
 26. Novosiolov G.M., Litvinsky L.L. Energy dependence of s- and p-neutron strength functions and potential scattering radius of ^{238}U // *III Int. Seminar on Interaction of Neutrons with Nuclei, Dubna, April 1995 (Abstr.).* - Dubna: JINR. - 1995. - p.40.

Литвинський Л.Л. Радіаційний захват та непружне розсіювання нейтронів близько порога збудження найнижчих рівнів важких атомних ядер.

Дисертація (рукопис) на здобуття вченого ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.16 - фізика ядра та елементарних частинок, Інститут ядерних досліджень Національної Академії Наук України, Київ, 1995.

Захищаються результати експериментальних вимірювань та аналізу даних про радіаційний захват та непружне розсіювання нейтронів проміжних енергій важкими атомними ядрами. Вперше виявлено ефекти посилення каналу непружного розсіювання нейтронів близько порога збудження перших рівнів важких ядер, температурної залежності ширини гігантського магнітного резонансу, аномального спин-орбітального розщеплення d -нейтронної силової функції. За методом Re-Os-хронології оцінено вік r -процесу зоряного нуклеосинтезу та нижні межі віку Галактики та Всесвіту.

Litvinsky L.L. Radiative capture and inelastic scattering of neutrons near the excitation threshold of lowest levels of heavy nuclei.

The thesis (manuscript) on the Doctor degree of physical and mathematical sciences on a speciality 01.04.16 - physics of nucleus and elementary particles, Institute for Nuclear Research of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kiev, 1995.

Results of experimental measurements and analysis of the data on radiative capture and inelastic scattering of intermediate energy neutrons by heavy nuclei are maintained. The effects are discovered for the first time, such as strengthening of inelastic scattering channel near first level excitation threshold of heavy nuclei, temperature dependence of width of giant magnetic resonance, and anomalous spin-orbit splitting of d -neutron strength function. The age of the r -process nucleosynthesis in stars, as well as lower limits for the Galaxy and the Universe ages, are evaluated by using of the Re-Os chronometer.

Ключові слова: нейтрон, резонанс, непружне розсіювання, радіаційний захват, гамма-спектр, зоряний нуклеосинтез.

Подписано к печати 15 .05.1995 г.
Бумага тип. Офсетная печать. Усл.печ.лист 2.0
Тираж 100 экз. Заказ 34

ИНИ НАН Украины, 252028, Киев-28, пр.Науки, 47 .

AB 32.563

AB 32.563