

3-82-182

ГЛЕДЕНОВ
Юрий Михайлович

ИССЛЕДОВАНИЕ
АЛЬФА-ШИРИН НЕЙТРОННЫХ РЕЗОНАНСОВ
СФЕРИЧЕСКИХ И ПЕРЕХОДНЫХ ЯДЕР
В ОБЛАСТИ $60 \leq A \leq 150$

Специальность: 01.04.16 - физика атомного ядра
и элементарных частиц

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Работа выполнена в Лаборатории нейтронной физики
Объединенного института ядерных исследований, г.Дубна

Научный руководитель –
доктор физико-математических наук
старший научный сотрудник Ю.П.Попов.

Официальные оппоненты:
доктор физико-математических наук
старший научный сотрудник Ю.П.Гангрский,

кандидат физико-математических наук
младший научный сотрудник Р.М.Мусаелян.

Ведущее предприятие: Институт ядерных исследований АН УССР, г.Киев.

Защита диссертации состоится " " _____ 1982 года
в " " час. на заседании специализированного совета Д.047.01.05
при Лаборатории нейтронной физики и Лаборатории ядерных реакций
Объединенного института ядерных исследований (г.Дубна, Московская
область).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ

Автореферат разослан " " _____ 1982 г.

Ученый секретарь
специализированного совета Ю.В.Таран

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Предметом обсуждения диссертации являются альфа-ширины нейтронных резонансов, полученные в результате исследований реакции (n, α) на резонансных нейтронах в широкой области атомных ядер: $60 \leq A \leq 150$. Детальное изучение этого нового канала распада нейтронных резонансов (в дополнение к ранее хорошо изученным нейтронному и радиационному каналам) является актуальным по ряду причин. Во-первых, способствует выяснению сложной структуры нейтронных резонансов, расширяя возможности нейтронной спектроскопии. Полученная до сих пор информация касается, как правило, лишь малой части волновой функции нейтронного резонанса: в основном ее малоквазичастичных компонент; прогресс здесь может состоять в расширении работ по измерению парциальных радиационных ширин для гамма-переходов на высоковозбужденные состояния и альфа-ширин нейтронных резонансов. Во-вторых, альфа-распад высоковозбужденных состояний ядер, как новый тип альфа-распада, полезен для понимания самого процесса альфа-распада, стимулирует появление новых теоретических подходов. Реакция (n, α) на резонансных нейтронах позволяет возбуждать относительно долгоживущие (по ядерным временам) состояния и исследовать их альфа-распад, механизм которого имеет много общего с механизмом классического альфа-распада основных состояний. Однако если естественный альфа-распад характерен лишь для сравнительно тяжелых ядер (несколько изотопов редкоземельных элементов, сильно нейтронодефицитные ядра после бета-распада с $A \gtrsim 110$ и ядра элементов, расположенных за висмутом), то возбуждение ядра на энергию связи нейтрона дает возможность исследовать альфа-распад на ядрах элементов практически всех атомных весов. Расширение таких исследований представляет особый интерес и в связи с появившимися указаниями на возможное изменение механизма альфа-распада с ростом энергии возбуждения родительского ядра. В-третьих, данные по реакции (n, α) на ядрах элементов с $A < 100$ являются необходимыми для оценки накопления в конструкционных материалах атомных реакторов ядер гелия, существенно влияющего на физические и механические свойства сталей.

Цель работы состоит в расширении круга ядер, на которых наблюдалась реакция (n, α) , в область ядер $60 < A < 110$, где экспериментальные данные практически отсутствовали, и расширении экспери-

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
БИБЛИОТЕКА

ментальной информации об альфа-ширинах нейтронных резонансов для переходных ядер с $A \approx 150$, что необходимо для:

- проверки справедливости положений статистической теории;
- оценки различных теоретических моделей, используемых сейчас при описании альфа-распада высоковозбужденных состояний ядер;
- получения количественных данных о влиянии резонансных и промежуточных нейтронов на накопление гелия в конструкционных материалах ядерных реакторов.

Научная новизна. В данной работе впервые удалось экспериментально наблюдать и изучить некоторые основные закономерности реакции (n, α) для ядер из новой области с $A < 110$. Для изотопов селена-77, рутения-99, -101, палладия-105 реакция (n, α) наблюдалась впервые; для изотопов цинка-64, -67 и молибдена-95, для которых ранее имелись только предварительные данные, получены существенно уточненные и более обширные сведения. Получены данные по альфа-ширинам для изотопов самария-147, -149 и неодима-145 для вдвое большего количества резонансов, нежели в опубликованных ранее работах. Благодаря этому удалось провести анализ альфа-ширин отдельно для резонансов обоих спинов ($J = I \pm 1/2$). С помощью полученных результатов удалось проверить предположения и выводы некоторых теоретических моделей альфа-распада.

Практическая ценность. Полученные данные могут служить критерием правильности предсказаний теоретических моделей, следовательно, и их применимости для описания процессов типа реакции (n, α) . Уточнение параметров оптического потенциала, используемого для описания реакции (n, α) в области малых энергий альфа-частиц полезно при оценке сечений обратной реакции (α, n) , весьма важной для астрофизики. В работе проведены оценки сечений $\sigma_{n\alpha}$ на резонансных и промежуточных нейтронах, исследовано влияние резонансных и промежуточных нейтронов на накопление гелия в конструкционных материалах ядерных реакторов. Разработанный новый быстрый детектор позволяет значительно расширить исследуемый диапазон энергии нейтронов в поисках редких реакций типа (n, α) ; показана возможность его использования в измерениях с хорошим разрешением по энергии нейтронов (на импульсных нейтронных источниках с короткой вспышкой $\tau = 50$ нс).

Для защиты выдвигаются следующие основные результаты, полученные в диссертации

I. Создан новый малофононовый быстрый детектор альфа-частиц, способный работать на пучках нейтронов от импульсных источников с дли-

тельностью вспышки от 50 нс и выше при наличии мощных импульсных и постоянных полей гамма-квантов и нейтронов.

2. Установлено наличие альфа-распада высоковозбужденных состояний в новой области атомных ядер $60 < A < 110$. Впервые наблюдалась реакция (n, α) на резонансных нейтронах при исследовании изотопов селена-77, рутения-99, -101 и палладия-105. Существовавшие предварительные данные для цинка-64, -67 и молибдена-95 существенно уточнены и расширены.

3. Вдвое, по сравнению с предыдущими работами, расширено число измеренных альфа-ширин резонансов для изотопов самария-147, -149 и неодима-145. Это позволило провести анализ средних альфа-ширин и распределений полных альфа-ширин отдельно для резонансов с разными спинами.

4. Показано, что для исследованных ядер, в том числе и из новой области, при описании общих закономерностей реакции (n, α) на резонансных нейтронах, иными словами, альфа-распада высоковозбужденных состояний ядер, в первом приближении можно пользоваться статистической теорией, правильно предсказывающей значения средних альфа-ширин, характер распределений альфа-ширин, объясняющей отсутствие корреляций с другими ширинами. Отмечено, что в эксперименте проявились эффекты, указывающие на возможные отклонения от предельной статистической теории.

5. Проведен анализ экспериментальных альфа-ширин в широком диапазоне атомных весов, который показывает, что, по-видимому, гигантские резонансы в альфа-частичной силовой функции отсутствуют. Это означает, что если альфа-кластерные уровни объемной или поверхностной природы и существуют в ядре, то они сильно "размешаны" по оболочечным уровням.

6. На основе новых экспериментальных данных проведены оценки сечений $\sigma_{n\alpha}$ на резонансных и промежуточных нейтронах, впервые исследовано влияние резонансных и промежуточных нейтронов на накопление гелия в конструкционных материалах ядерных реакторов.

Апробация работ. Основные материалы диссертации докладывались на II, III, IV и V Всесоюзных конференциях по нейтронной физике (Киев, 1973, 1975, 1977 и 1980 г.г. соответственно), Международной конференции по избранным вопросам структуры ядра (Дубна, 1976), Международной конференции по взаимодействию нейтронов с ядрами (Лоуэлл, США, 1976), на Рабочем совещании по проблемам альфа-распада и кластерной структуры ядра (Дубна, 1979),

IV симпозиуме по спектрам гамма-лучей радиационного захвата нейтронов и смежным вопросам (Гренобль, Франция, 1981).

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 22 научные работы.

Объем и структура диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения. В ней содержится 146 страниц машинописного текста, включая 39 рисунков, 17 таблиц и список литературы из 159 наименований.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении дана характеристика исследований реакции (n, α) , обсуждены их актуальность, научное и прикладное значение, сформулированы цели работы и результаты, выносимые на защиту.

Первая глава содержит краткий обзор исследований альфа-распада. Начавшись с изучения естественной радиоактивности ядер, в течение нескольких десятилетий исследовался практически лишь альфа-распад их основных состояний. Прогресс в этой области исследований носил скачкообразный характер, причем последний подъем интереса к изучению альфа-распада произошел в последние два десятилетия. За это время на пучках быстрых протонов и тяжелых ионов были синтезированы новые ядра, удаленные от линии бета-стабильности, что существенно увеличило число альфа-излучателей; для широкого круга ядер исследован с помощью реакции (n, α) альфа-распад высоковозбужденных компаунд-состояний ядер. В свою очередь, произошло и дальнейшее развитие теории.

В первом параграфе рассмотрены вопросы альфа-распада основных состояний атомных ядер. Во втором – проанализирована современная ситуация (как в теоретическом, так и экспериментальном аспектах), сложившаяся в изучении альфа-распада высоковозбужденных состояний ядер; особое внимание уделено альфа-распаду компаунд-состояний, возникающих в результате захвата медленных нейтронов ядром.

В настоящее время нет общей (количественной) теории, описывающей свойства высоковозбужденных состояний ядер, кроме статистической. Поэтому описание альфа-распада компаунд-состояний производится сейчас с использованием различных модельных представлений в рамках статистической теории, в основе которой лежит концепция компаунд-состояний Н.Бора. В связи с наблюдением на опыте (чаще в области

сравнительно легких ядер с $A < 100$) эффектов, не укладывающихся в простую схему предельной статистической теории, представляется интересным посмотреть, насколько хорошо описывает статистическая теория закономерности нового канала распада нейтронных резонансов – реакции (n, α) .

Во второй главе изложена методика проведенных исследований реакции (n, α) на резонансных нейтронах. Изучение указанной реакции связано со значительными экспериментальными трудностями, обусловленными главным образом ничтожной вероятностью альфа-распада компаунд-ядра по сравнению с конкурирующими реакциями (в основном реакцией (n, γ) , сечение которой для изучаемых ядер в $\approx 10^6$ раз больше) и необходимостью проведения измерений на фоне мощных импульсных и постоянных полей гамма-квантов и нейтронов источника. В этих условиях круг исследуемых ядер и их резонансных состояний, доступных для регистрации реакции (n, α) , сильно зависит от выбора типа детектора, его конструкции и режима работы, при этом детектор должен удовлетворять следующим требованиям:

- большая площадь мишеней ($\approx 10^4 \text{ см}^2$), позволяющая проводить измерения на большом количестве вещества (десятки грамм при максимальной толщине слоя мишени, определяемой пробегом альфа-частиц в веществе, в несколько миллиграмм на квадратный сантиметр);
- высокая эффективность (не хуже 50%) регистрации альфа-частиц из реакции (n, α) при крайне низкой эффективности регистрации гамма-квантов ($\epsilon_{\gamma}/\epsilon_{\alpha} \lesssim 10^{-9}$);
- низкие фоны (собственные и на пучке нейтронов от источника) и стабильная работа в течение нескольких сот часов в условиях облучения, что позволяет надежно выделять альфа-переходы с интенсивностью в несколько десятков частиц за 100 часов измерений;
- высокое быстродействие, необходимое как для удовлетворения требования малости фонов, так и для работы на пучках нейтронов от импульсных источников с короткой (вплоть до 50 нс) вспышкой и обеспечения быстрого восстановления характеристик после импульса мощности, что нужно для расширения исследуемого диапазона по энергии нейтронов.

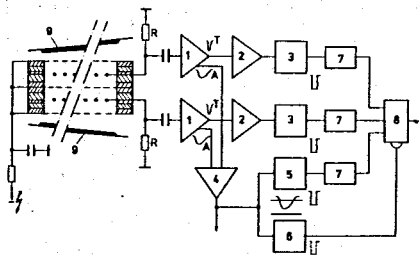
Последнее требование является определяющим при продвижении исследований реакции (n, α) в новую область ядер: $60 < A < 110$, изучаемые ядра в которой характеризуются сравнительно небольшими энергиями альфа-частиц, $E = 4 + 6 \text{ МэВ}$, и плотностью уровней ($\mathcal{D} \approx 100 \text{ эВ}$).

Проведенные исследования различных типов детекторов на пучках нейтронов привели к созданию нового малофонового светосильного де-

детектора, выполненного на основе пропорциональных камер (ПК) и удовлетворяющего указанным выше требованиям ^{1,2}. Цель была достигнута путем оптимизации конструкции, использования специальной геометрии измерений с помощью щелевых коллиматоров, но в основном благодаря резкому повышению быстродействия детектора (работа на быстрой компоненте импульса с ПК и разработка наносекундной электронной аппаратуры).

Детектор состоит из восьми конструктивно независимых сдвоенных ПК, помещенных в общем вакуумированном корпусе из дюралюминия. Мишени с исследуемым веществом размещаются в пространстве между камерами. Конструкция дает возможность при необходимости легко менять количество и расположение камер и мишеней и способ их облучения в соответствии с требованиями эксперимента. Способ изготовления и конструкция каждой камеры не отличаются сильно от описанных в литературе. Высоковольтные электроды намотаны вольфрамовой проволокой диаметром 50 мкм с шагом 2 мм, сигнальные – проволокой из золоченого вольфрама, диаметр которой после расчетов распределения электрического поля и экспериментальной проверки на пучке нейтронов выбран равным 100 мкм и шаг – 6 мм. Все сигнальные проволочки объединены вместе и составляют общий сигнальный электрод, чувствительная площадь камер – 270x270 мм². Расстояние между сигнальным и высоковольтным электродами – 8 мм. Блок-схема одного канала электронной аппаратуры для сдвоенной камеры приведена на рис. 1. При использованной схеме отбора регистрируются импульсы, возникающие одновременно (в пределах разрешающего времени детектора, которое у нас составляло обычно 60 + 90 нс) в обеих половинах сдвоенной камеры, если их суммарная амплитуда попадает в окно, задаваемое дискриминаторами нижнего и верхнего уровней сигналов.

Рис. 1. Блок-схема электронной аппаратуры сдвоенной камеры: 1 – предусилитель; 2 – усилитель; 3 – формирователь; 4 – линейный сумматор; 5, 6 – дискриминаторы нижнего и верхнего уровней соответственно; 7 – линия задержки; 8 – схема совпадений и антисовпадений; 9 – мишени.



Быстрая электронная аппаратура выполнена в стандарте КАМАК и позволяет проводить измерения на многомерном анализаторе или на линии с ЭВМ.

Для различных газовых смесей определены область рабочих напряжений и зависимость коэффициента газового усиления M от напряжения для давлений рабочего газа от 0,4 до 1,6 атм. В качестве рабочего газа в измерениях использовалась смесь $Ar + 20\% CO_2$ при давлениях 0,6 или 0,1 атм. Для определения временного разрешения детектора исследовалось временное распределение сигналов сдвоенной камеры. Импульсы с одной половины сдвоенной камеры подавались на вход "Старт" время-амплитудного конвертора, а со второй – через линию задержки на вход "Стоп". За исключением случая наполнения 100% CH_4 , где полная ширина на половине высоты временного распределения $\tau_{0,5} = 18$ нс и ширина по основанию, включающая 90% событий, $\tau_{0,1} \approx 60$ нс, временное разрешение для всех остальных смесей составило $\tau_{0,5} = 30 + 60$ нс и $\tau_{0,1} = 70 + 130$ нс при давлении 0,6 атм.

Детально исследовано время восстановления амплитудных характеристик после импульса мощности реактора при $M = 10$ (рис. 2), особое

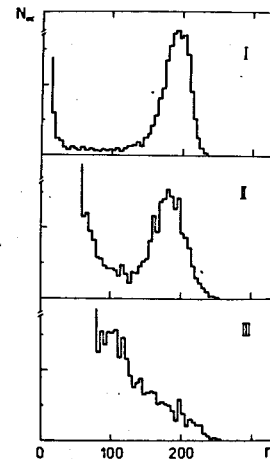


Рис. 2. Амплитудные спектры импульсов от альфа-источника: I – вне пучка нейтронов; II, III – в режиме облучения на нейтронном пучке во "временном окне" 60 + 80 мкс после импульса мощности реактора для камер с сигнальными проволочками 100 и 50 мкм соответственно. N_{α} – счет в каналах, n – номер канала амплитудного анализатора.

внимание уделено изучению различных характеристик детектора на пучках нейтронов.

Основные характеристики детектора:

- суммарная площадь мишеней - 10000 см²;
- временное разрешение $\tau_{0,5} \approx 20$ нс;
- время восстановления амплитудных характеристик после импульса мощности: а) реактора при длительности импульса $\tau = 4$ мкс - 45 мкс, б) ускорителя с $\tau = 50$ нс - 15 мкс;
- собственные фоны - менее 1 имп./мин.

В третьей главе приведены результаты измерений полных альфа-ширин нейтронных резонансов, описан метод их определения из экспериментальных спектров и проведено сравнение данных из резонансной области с результатами, полученными в измерениях на тепловых нейтронах.

Измерения проводились на различных пролетных базах ($L = 30, 85, 240$ м) на пучках нейтронов импульсного реактора ИБР-30 ЛНФ ОИЯИ, работавшего в качестве бустера с линейным ускорителем электронов. В качестве мишеней использовались, как правило, обогащенные изотопы. Мишени представляли собой слои вещества большой площади, нанесенные на алюминиевые подложки, и изготовлялись методом осаждения из спиртовой суспензии со связывающим лаком. Основные сведения о мишенях и условиях измерений приведены в таблице I.

В результате измерений получены временные спектры выхода альфа-частиц для указанных изотопов, приведенные для примера для изотопов ⁹⁵Mo и ⁹⁹Ru на рис. 3, 4.

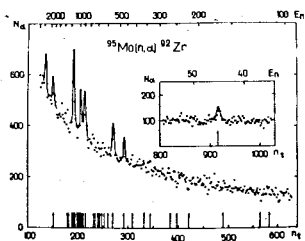


Рис. 3. Выход альфа-частиц из реакции $^{95}\text{Mo}(n, \alpha)^{92}\text{Zr}$ в зависимости от времени пролета нейтронов. E_n - энергия нейтронов в эВ.

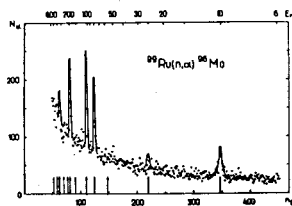


Рис. 4. Выход альфа-частиц из реакции $^{99}\text{Ru}(n, \alpha)^{96}\text{Mo}$ в зависимости от времени пролета нейтронов. E_n - энергия нейтронов в эВ.

Таким образом, убедительно показано наличие альфа-распада компаунд-состояний в новой области ядер с $A \approx 110$ ^{3+7/}, существенно расширено число измеренных альфа-ширин резонансов ядер в области $A \approx 150$ ^{3, 6 + 8/}. Для абсолютной нормировки результатов параллельно выполнялись измерения на калибровочных мишенях. Обычно нормировку проводили по резонансам 3,42 и 83,4 эВ самария-147.

Таблица I

Условия эксперимента

Мишень	обогащение, %	макс. E_α , МэВ	толщина слоя соединения, мг/см ²	количество слоев	полная площадь мишеней, см ²	временное разрешение, нс/м	время измерения, час
⁶⁴ ZnO	99,3	3,63	1,9	4	3600	45	230
⁶⁷ ZnO	87,9	4,59	3,8	2 4	1800 3600	45 17	170 60
⁷⁷ Se	91,1	4,24	3,2	8	5000	120	200
⁹⁵ MoO ₃	95,5	6,12	5,4	8	7200	35	270
⁹⁹ Ru	94,6	6,55	2,7	1	900	45 90	190 90
¹⁰¹ Ru	93,5	5,57	2,2	2	1800	45 120	80 60
Ru	ест	-	4,6	4	3600	45	190
¹⁰⁵ Pd	ест	6,13	12,1	4	1800	120	180
¹⁴⁵ Nd ₂ O ₃	84,6	8,32	4,8	2 8	1350 5000	130 45	170 180
¹⁴⁷ Sm ₂ O ₃	96,4	9,8	9,0	11	9400	17	150
¹⁴⁹ Sm ₂ O ₃	96,9	9,3	9,1	8	6800	45	300

Значения полных альфа-ширин получены исходя из числа отсчетов альфа-частиц N_α в отдельных резонансах с учетом изменения с энергией потока нейтронов и вероятности их захвата по формуле

$$\Gamma_\alpha = K \cdot \frac{\epsilon_k \omega_k t_k}{\epsilon \omega t} \cdot \frac{N_\alpha \cdot \Gamma}{A \Phi} \quad (I)$$

где $K = \frac{A_k \cdot \Gamma_k^k \cdot \Phi_k}{\Gamma_k \cdot N \sigma_k^k}$ - калибровочный коэффициент, а ε - эффективность детектора к альфа-частицам, ω - геометрический фактор, t - время измерений, A' - площадь резонанса под кривой пропускания (площадь Юза), Φ - поток нейтронов на образец, Γ , Γ_α - полная и альфа-ширины резонанса. Индекс "к" указывает на принадлежность к калибровочному резонансу. Фон определялся по межрезонансной области; в областях с плохим энергетическим разрешением измерялся в фоновых окнах после марганцевого фильтра. В результате измерений получены значения альфа-ширин для 29 резонансов ядер из области $60 \leq A \leq 110$ и для 70 резонансов переходных ядер с $A \approx 150$.

Проведенное сопоставление экспериментальных данных по альфа-ширинам резонансов и измеренных к настоящему времени величин сечений (n, α) -реакции на тепловых нейтронах позволяет отметить следующее. В основном наблюдается удовлетворительное согласие данных, то есть вклад известных резонансов в тепловое сечение не противоречит экспериментальной величине σ_{nd}^T , за исключением случаев изотопов цинка-67 и неодима-145, для которых имеются значительные разногласия относительно альфа-переходов в основное состояние дочернего ядра (α_0 -переходы). Вместо вычисленного по параметрам только измеренных резонансов цинка-67 $\sigma_{n\alpha_0}^{T(рез)} \approx \sigma_{n\alpha}^{T(рез)} \approx 200$ мкб (*) измерения на тепловых нейтронах дают оценку $\sigma_{n\alpha_0}^T \leq 10$ мкб; для неодима-145 $\sigma_{n\alpha_0}^{T(рез)} \approx 23$ мкб, а $\sigma_{n\alpha_0}^T \leq 0,7$ мкб. В то же время сечения для α_1 -переходов согласуются удовлетворительно. Это

*) Если спин резонансов цинка-67, дающих основной вклад в $\sigma_{n\alpha}^{T(рез)}$, в работе /4/ идентифицирован неверно (для резонансов с $J^\pi = 2^-$ α_0 -переходы отсутствуют), то в этом случае трудно объяснить чрезвычайно большую интенсивности α_1 -переходов и отсутствие до $E_n \approx 4$ кэВ резонансов со спином 3^- , для которых α_0 -переходы возможны.

расхождение не удается объяснить, используя обычные методы оценки сечения по формуле Брейта-Вигнера. Отсутствие α_0 -переходов для указанных изотопов при тепловых энергиях нейтронов указывает на возможность проявления здесь сильной деструктивной интерференции между уровнями.

В четвертой главе проведен анализ полученных экспериментальных данных, исследованы свойства альфа-ширин. Значительное место уделено изучению возможностей теоретического описания, проведена проверка статистической теории.

Полученные значения альфа-ширин интересно проанализировать как с точки зрения их абсолютных значений (средние ширины), так и их флуктуаций от резонанса к резонансу. Приведенные альфа-ширины (деленные на проникаемость) оказались в $10^5 - 10^6$ раз (то есть на величину порядка $\mathcal{D}^J / \mathcal{D}^{обар}$) ниже вигнеровского предела, следовательно, для описания экспериментальных альфа-ширин следует использовать статистическую теорию. Тогда

$$\langle \Gamma_\alpha \rangle = \mathcal{D}^J / 2\pi \cdot \sum_{sl} P_{sl}, \quad (2)$$

где P_{sl} - проникаемость потенциального барьера ядра для альфа-частиц с орбитальным моментом l ; s - уровень дочернего ядра, на который происходит альфа-распад; \mathcal{D}^J - среднее расстояние между резонансами со спином J . При этом расчеты проводились по оптической (ОМ) и кластерной (КМ) моделям. Степень согласия теоретических и экспериментальных значений средних альфа-ширин иллюстрируется рис. 5.

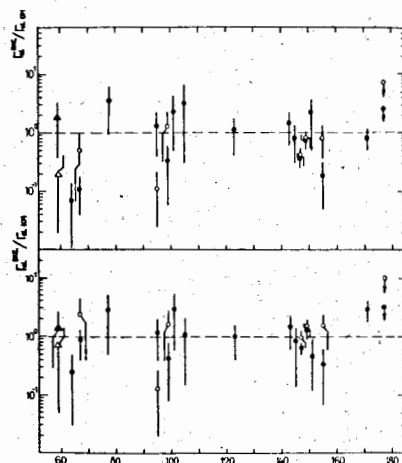


Рис. 5. Отношение экспериментальных средних значений альфа-ширин к теоретическим. Вверху - расчет выполнен по оптической модели, внизу - по кластерной модели.

Флуктуации полных альфа-ширин согласно статистической теории должны подчиняться χ^2 -распределению с эффективным числом степеней свободы ($\nu_{\Sigma\varphi} = (\sum_{i\ell} P_{i\ell})^2 / \sum_{i\ell} P_{i\ell}^2$), то есть быть довольно большими (малые $\nu_{\Sigma\varphi}$). Это приводит к большой погрешности величины $\langle \Gamma_{\alpha} \rangle_{\text{эксп}}$, обусловленной усреднением по малому числу резонансов. Приведенные на рис. 5 погрешности включают как обычные статистические ошибки экспериментальных альфа-ширин, так и ошибки усреднения (погрешности для величин $\Gamma_{\alpha}^{\text{теор}}$ не учтены).

В целом можно отметить хорошее согласие теоретических средних значений альфа-ширин с полученными в эксперименте. Исключением являются на порядок завышенные результаты расчета по ОМ для цинка-67 ($J^{\pi} = 3^-$), хотя в то же время КМ дает совпадающий с экспериментом результат. По-видимому, эксперимент не подтверждает наличия в этой области A и E_{α} оптического максимума в силовой функции альфа-частиц. Аналогичная ситуация наблюдается для альфа-переходов с четными ℓ для изотопов самария и иттербия-171.

Экспериментальные закономерности распределения альфа-ширин наиболее хорошо изучены для изотопов самария-147 и -149, для которых удалось получить значения $\nu_{\Sigma\varphi}^{\text{эксп}}$. Для полных альфа-ширин резонансов самария-147 наблюдается удовлетворительное согласие теоретических распределений (для обоих значений спина) с экспериментальными, особенно без учета резонанса с $E_0 = 185$ эВ, который имеет большую альфа- (и нейтронную) ширину и существенно влияет на флуктуационные и корреляционные свойства экспериментальных альфа-ширин. В случае резонансов самария-149 хорошее согласие расчетных и экспериментальных распределений имеется только для резонансов со спином 3^- , для резонансов со спином 4^- наблюдается значительное расхождение. Физическую причину сужения распределения альфа-ширин пока указать трудно.

Об экспериментальных закономерностях распределений альфа-ширин в области ядер с $A < 110$ говорить пока рано, так как для каждого из ядер зарегистрировано всего по несколько альфа-ширин. Однако сравнение распределения альфа-ширин цинка-67, для которого измерено наибольшее число альфа-ширин, с предполагаемым по статистической теории распределением Портера-Томаса ($\nu = 1$) свидетельствует, что эти распределения не противоречат друг другу.

Для изотопов самария-147 и -149 вычислены коэффициенты корреляции между нейтронными и альфа-ширинами. Статистическая теория рассматривает Γ_{α} и Γ_n как характеристики независимых способов распада отдельного уровня ядра, флуктуирующие независимо. Наши результаты (при исключении резонанса самария-147 с $E_0 = 185$ эВ) совместимы с предположением о нулевой истинной корреляции.

Глава пятая посвящена исследованию влияния реакции (n, α) на резонансных и промежуточных нейтронах на накопление ядер гелия в конструкционных материалах ядерных реакторов [9, 10].

В связи с созданием высокопоточных реакторов и реакторов на быстрых нейтронах в последнее время большое внимание уделяется проблеме накопления гелия в сталях. Повышение концентрации гелия C_{He} в материалах за счет реакции (n, α) заметно влияет на их физико-механические свойства и соответственно на эксплуатационные характеристики реактора. При расчетах C_{He} обычно используют двухгрупповое приближение и учитывают только тепловые нейтроны и быстрые нейтроны с энергией, превышающей порог реакции (n, α) для рассматриваемых элементов. Однако за счет вылета глубокоподбарьерных альфа-частиц определенный вклад в C_{He} могут вносить и резонансные и промежуточные нейтроны ($E_n \lesssim 1$ МэВ). В работе рассчитан этот вклад при условном флюэнсе $\Phi = 10^{23}$ н·см⁻² для основных элементов, а также сталей (табл. 2), используемых в реакторостроении, при их облучении в нейтронных полях с различным энергетическим спектром (I - спектр деления ^{235}U , II - спектр от реактора DFR , активная зона; III - спектр от реактора DFR , отражатель; IV - спектр от реактора на окисном топливе PFR , активная зона; V - спектр $1/E$).

Таблица 2

Количество гелия в сталях (атом)

Тип стали	Вид нейтронного спектра				
	I	II	III	IV	V
304	$8,6 \cdot 10^{-3}$	$1,06 \cdot 10^{-2}$	1,37	0,164	550
316	$3,27 \cdot 10^{-2}$	$5,22 \cdot 10^{-2}$	1,77	0,262	688
17-4PH	$3,7 \cdot 10^{-3}$	$3,43 \cdot 10^{-3}$	0,567	0,066	229
OX16NI5M3B	$3,76 \cdot 10^{-2}$	$5,93 \cdot 10^{-2}$	2,22	0,323	870
X18N9	$1,72 \cdot 10^{-2}$	$2,34 \cdot 10^{-2}$	1,69	0,217	677
Инкопель	$5,86 \cdot 10^{-2}$	$5,47 \cdot 10^{-2}$	10,9	1,27	4420

Функции возбуждения до 1 МэВ вычислены с использованием наших экспериментальных данных по альфа-ширинам резонансов по обычной формуле для усредненных сечений; пример таких расчетов для никеля-59 приведен на рис. 6. Оценивалась роль неупругих процессов. Результаты подтверждают важность двухступенчатой реакции $^{58}\text{Ni}(n, \gamma)^{59}\text{Ni}(n, \alpha)^{56}\text{Fe}$. Анализ показал, что спектр нейтронов оказывает существенное влияние на накопление гелия.

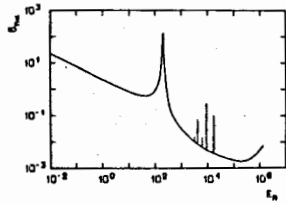


Рис. 6. Сечение реакции $^{59}\text{Ni}(n, \alpha)^{56}\text{Fe}$.
 E_n в эВ, $\sigma_{n\alpha}$ в б.

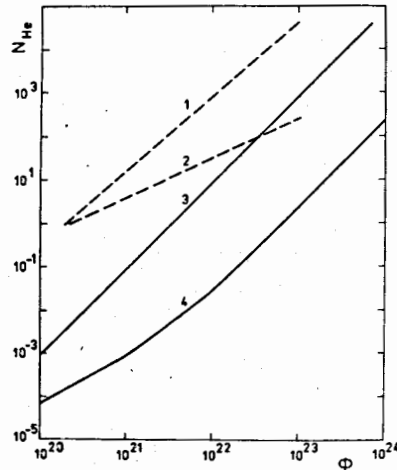


Рис. 7. Зависимость концентрации галлия в никеле и нержавеющей стали от флюенса нейтронов: 1 - тепловые; 2 - быстрые; 3, 4 - промежуточные нейтроны для стали OX16Ni5M3B (спектры У и Ш соответственно).
 Φ - н·см⁻², N_{Ga} - в единицах атом.

На рис. 7 приведена зависимость концентрации галлия в никеле и нержавеющей стали от флюенса тепловых, быстрых и промежуточных нейтронов. Исходя из этих зависимостей можно оценить по порядку величины концентрации галлия, образующегося в материалах, содержащих никель.

Видно, что в зависимости от энергетического спектра падающих нейтронов и при больших флюенсах (для никелесодержащих сталей) относительный вклад нейтронов промежуточных энергий в накопление галлия может быть существенным, и учет этого вклада желателен при расчетах мощных энергетических реакторов. В связи с этим дальнейшее изучение реакции (n, α) на резонансных и промежуточных нейтронах представляется актуальной задачей.

В заключении приводятся основные результаты выполненной работы.

1. Создан малошумный быстрый детектор альфа-частиц, способный работать на пучках нейтронов от импульсных источников с длительностью всплески от 50 нс и выше при наличии мощных импульсных и постоянных полей гамма-квантов и нейтронов.

2. Установлено наличие альфа-распада высоковозбужденных состояний в новой области атомных ядер: $60 < A < 110$. Впервые наблюдалась реакция (n, α) на резонансных нейтронах при исследовании изотопов селена-77, рутения-99, -101 и палладия-105. Существовавшие предварительные данные для цинка-64, -67 и молибдена-95 существенно уточнены и расширены.

3. Вдвое, по сравнению с предыдущими работами, расширено число измеренных альфа-ширин резонансов для изотопов самария-147, -149 и неодима-145. Это позволило провести анализ средних альфа-ширин и распределений альфа-ширин отдельно для резонансов с разными спинами.

4. Показано, что для исследованных ядер в целом описания общих закономерностей реакции (n, α) на резонансных нейтронах в первом приближении можно пользоваться статистической теорией, правильно предсказывающей значения средних альфа-ширин, характер распределения альфа-ширин, объясняющей отсутствие корреляций с другими ширинами. Отмечено, что на эксперименте проявились эффекты, указывающие на возможные отклонения от предельной статистической теории.

5. Анализ экспериментальных альфа-ширин в широком диапазоне атомных весов показывает, что, по-видимому, гигантские резонансы в альфа-частичной силовой функции отсутствуют. Это означает, что если альфа-кластерные уровни объемной или поверхностной природы и существуют в ядре, то они сильно "размешаны" по оболочечным уровням.

6. Наблюдается удовлетворительное согласие наших данных по альфа-ширинам резонансов с результатами измерений сечений реакции (n, α) на тепловых нейтронах, за исключением данных для изотопов цинка-67 и неодима-145. Отсутствие для них α_0 -переходов при тепловых энергиях нейтронов указывает на возможность проявления здесь сильной деструктивной интерференции между уровнями.

7. На основе новых экспериментальных данных проведены оценки сечений реакции (n, α) на резонансных и промежуточных нейтронах; впервые исследовано влияние резонансных и промежуточных нейтронов на накопление галлия в конструкционных материалах ядерных реакторов.

Работы, положенные в основу диссертации

1. Антонов А., Богдзель А.А., Гледенов Ю.М., Тишин В.Г. Система пропорциональных камер для исследования реакции (n, α) на резонансных нейтронах. - ОИЯИ, Р13-12146, Дубна, 1979.
2. Антонов А., Богдзель А.А., Гледенов Ю.М., Маринова С., Попов Ю.П., Тишин В.Г. Детектор альфа-частиц для исследований реакции (n, α) на импульсных нейтронных источниках. - ПТЭ, 1981, № 3, с.52.

3. Гледенов Ю.М., Пак Хон Чер, Попов Ю.П. Полные альфа-ширины нейтронных резонансов. - В сб.: Бюллетень центра данных ЛИЯФ, Л., 1977, вып. 4, с.3.
4. Антонов А., Балабанов Н., Гледенов Ю.М., Пак Хон Чер, Попов Ю.П. - Реакция (n, α) и новая область альфа-распада компаунд-состояний ядер. - ЯФ, 1978, т.27, с.18.
5. Антонов А., Балабанов Н., Гледенов Ю.М., Пак Хон Чер, Попов Ю.П. Полные альфа-ширины нейтронных резонансов ^{67}Zn , ^{95}Mo , ^{99}Ru , ^{101}Ru . - В сб.: Нейтронная физика (материалы 4-й Всесоюзной конференции по нейтронной физике, Киев, 1977), М., 1977, ч.2, с.305.
6. Антонов А., Гледенов Ю.М., Маринова С., Риголь К. Исследование реакций $^{77}\text{Se}(n, \alpha)^{74}\text{Ge}$ и $^{145}\text{Nd}(n, \alpha)^{142}\text{Ce}$ на резонансных нейтронах. - ОИЯИ, РЗ-81348, Дубна, 1981.
7. Балабанов Н.П., Гледенов Ю.М., Пак Хон Чер, Попов Ю.П., Семенов В.Г. Изучение нейтронных резонансов в реакции (n, α) на ^{105}Pd , ^{149}Sm и ^{171}Yb . - ОИЯИ, РЗ-8653, Дубна, 1975.
8. Balabanov N.P., Gledenov Yu.M., Pak Hong Chol, Popov Yu.P., Semenov V.G. Total α -widths on neutron resonances of ^{147}Sm and ^{149}Sm . - Nucl.Phys., 1976, v.A261, p.35.
9. Балабанов Н.П., Гледенов Ю.М., Попов Ю.П., Флорек М., Фурман В.И. Расчеты накопления гелия в конструкционных материалах реакторов за счет реакции (n, α) на промежуточных нейтронах. - В сб.: Нейтронная физика. (Материалы 2-й Всесоюзной конференции по нейтронной физике, Киев, 1973). Обнинск, 1974, ч.3, с.126.
10. Балабанов Н.П., Гледенов Ю.М. О влиянии резонансных и промежуточных нейтронов на накопление гелия в конструкционных материалах ядерных реакторов. - ОИЯИ, РЗ-81-276, Дубна, 1981.

Рукопись поступила в издательский отдел
II марта 1982 года.