



**ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ**

3-2003-166

УДК 539.163

539.172.4

539.1.074.22

**ГЛЕДЕНОВ**  
**Юрий Михайлович**

**ИССЛЕДОВАНИЕ**  
**ИНДУЦИРОВАННЫХ НЕЙТРОНАМИ РЕАКЦИЙ**  
**С ВЫЛЕТОМ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ**

Специальность: 01.04.16 — физика атомного ядра  
и элементарных частиц

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
доктора физико-математических наук

Дубна 2003

Работа выполнена в Лаборатории нейтронной физики  
им. И.М. Франка Объединенного института ядерных исследований

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук,  
профессор, зав. кафедрой

Кадменский С.Г.

доктор физико-математических наук,  
профессор, нач. сектора

Пенионжкевич Ю.Э.

доктор физико-математических наук,  
профессор, ведущий научный сотрудник

Петров Г.А.

Ведущая организация:

Институт теоретической и экспериментальной физики, Москва

Защита диссертации состоится “ “ декабря 2003 г.  
в часов на заседании специализированного совета Д 720.001.06  
при Лаборатории нейтронной физики им. И.М. Франка и  
Лаборатории ядерных реакций им. Г.Н. Флерова Объединенного  
института ядерных исследований (г. Дубна, Московская область).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Объединенного  
института ядерных исследований.

Автореферат разослан “ “

2003 г.

Ученый секретарь совета  
кандидат физико-математических наук А.Г. Попеко



## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Исследование реакций  $(n, p)$  и  $(n, \alpha)$  на медленных и промежуточных (с энергией от нескольких мэВ до нескольких сотен кэВ) нейтронах представляет большой интерес для нескольких областей науки.

Во-первых, исследование реакций  $(n, p)$  и  $(n, \alpha)$  представляет интерес как для изучения строения ядра как такового и изучения элементарных взаимодействий, проявляющихся в свойствах атомных ядер, так и для теории ядерных реакций и  $\alpha$ - и  $p$ -распадов. Изучение строения ядра неразрывно связано с выяснением механизма ядерных реакций. С появлением интенсивных импульсных источников нейтронов стало развиваться и это новое направление нейтронной спектроскопии, позволяющее дополнить (или получить совсем новую) информацию об энергии, спине, четности ядерных состояний, и получать полные и парциальные  $\alpha$ - и  $p$ -ширины дополнительно к нейтронным и радиационным ширинам нейтронных резонансов (НР).

Экспериментальные данные для средних и тяжелых ядер, полученные на медленных и быстрых нейтронах, показывают, что для них основную роль играют разные механизмы ядерных реакций. В реакциях  $(n, p)$  и  $(n, \alpha)$  на быстрых нейтронах это прямые и полупрямые процессы, на медленных и промежуточных ( $E_n \leq 100$  кэВ) нейтронах подавляющий вклад в энергию возбуждения вносится за счет энергии связи нейтрона  $B_n$ , поэтому можно пренебречь прямыми, а рассматривать только процессы, идущие через стадию компаунд-ядра, то есть описывать статистической теорией, которая имеет дело со средними величинами и распределениями резонансных параметров около них. Даже низколежащие состояния ядер оказались весьма сложными структурами. С ростом же энергии возбуждения структура состояний ядер значительно усложняется, особенно таких высоковозбужденных как НР, каждый из

которых индивидуален по своим характеристикам. Поэтому для дальнейшего изучения ядерной структуры необходимо проводить комплексное изучение ядерных реакций, в которых проявляются различные компоненты волновых функций состояний.

Во-вторых, исследование вышеуказанных реакций интересно для решения некоторых проблем ядерной астрофизики. Последние годы в астрофизике широко обсуждается много сценариев образования и развития Вселенной. При этом одной из основных возможностей проверки сценариев образования и развития звезд различного типа является процесс образования во Вселенной химических элементов: нуклеосинтез в звездах и при взрывах сверхновых. Другими словами, сценарии развития должны объяснять химический и изотопный состав современной Вселенной. Однако такая проверка возможна, только если известны скорости ядерных реакций при звездных температурах. Основной реакцией образования изотопов средних и тяжелых элементов является радиационный захват нейтронов. Экспериментальная база данных по сечениям этих реакций для стабильных изотопов практически имеется. Потребности в сечениях для радиоактивных изотопов, экспериментальные данные для которых отсутствуют, в какой-то мере удовлетворяются расчетами в рамках статистической модели ядра. Современные программы для таких расчетов тестируются на большом экспериментальном материале по сечениям реакции  $(n, \gamma)$  в широком диапазоне энергий нейтронов. Однако последние годы возникает все более настоятельная потребность в надежных данных по скоростям реакций с участием протонов и  $\alpha$ -частиц при сравнительно небольших энергиях ( $E_\alpha \leq 10 - 15$  МэВ). К сожалению, экспериментальных данных в этой области энергий (и интересующих ядер) очень мало, а попытки использовать некоторые современные компьютерные программы для расчетов дают результаты, различающиеся для реакций с участием

протонов на фактор 2, а  $\alpha$ -частиц - на порядок. В связи с этим возникает потребность в исследованиях ядерных реакций с участием  $\alpha$ -частиц небольших энергий с тем, чтобы выбрать потенциал, правильно описывающий взаимодействие  $\alpha$ -частиц с широким кругом ядер в рамках статистической модели ядра. Это дало бы возможность правильно оценивать скорости различных ядерных реакций с участием  $\alpha$ -частиц в звездах и при взрывах сверхновых. В этом случае существенную роль может сыграть расширение исследований реакции  $(n,\alpha)$  на резонансных нейтронах, поскольку сейчас необходимы экспериментальные данные, которые позволят судить о возможности статистического описания свойств  $\alpha$ -ширин и величины их средних значений, а также правильно выбрать параметры потенциала, описывающего взаимодействие  $\alpha$ -частиц с ядрами при звездных температурах.

В-третьих, до настоящего времени сохраняется повышенный интерес к изучению проявления слабого взаимодействия в ядерных процессах.

Одним из главных предсказаний Стандартной Модели является наличие слабых нейтральных токов. Такие токи были найдены в лептон-нуклонных взаимодействиях. Эффекты несохранения четности (НЧ) в нуклон-нуклонных (NN) взаимодействиях, проявляющиеся в различных процессах в малонуклонных системах и ядрах, должны быть обусловлены как заряженными так и нейтральными токами. Наличие вклада заряженного тока было обнаружено в протон-протонном рассеянии при различных энергиях протонов и результат согласуется с теорией. Тем не менее до сих пор не найдено наличие нейтральных токов в NN взаимодействии, а проведенные эксперименты дали оценку соответствующей константы  $f_{\pi} < 1,2 \cdot 10^{-7}$ . Важнейшим условием, определяющим перспективы исследований НЧ эффектов в NN

взаимодействию, является возможность их теоретической интерпретации в терминах констант НЧ NN-потенциала и матричных элементов, которые входят в выражения для наблюдаемых НЧ эффектов. Хотя НЧ эффекты благодаря их большому усилению в ядре были обнаружены именно в тяжелых ядрах, возможность определения параметров слабого NN взаимодействия из такого рода измерений до сих пор остается предметом дискуссий. Исследование НЧ эффектов, по-видимому, предпочтительнее проводить на малонуклонных системах и на легких ( $A < 10$ ) ядрах, в которых вышеуказанные эффекты легче теоретически выделить из ядерных и электромагнитных взаимодействий. Решающим для определения величины слабой нейтральной константы могло бы быть измерение P-нечетной асимметрии в реакции  $(n, p) \rightarrow (d, \gamma)$ , которая обусловлена только нейтральным током. Однако ожидаемый эффект в этом случае всего  $2 \cdot 10^{-8}$  при очень маленьком сечении этой реакции  $\sigma \sim 0,2$  барн, что делает проведение такого эксперимента весьма проблематичным. С этой точки зрения более перспективными могут оказаться исследования P-нечетных асимметрий в реакциях с медленными поляризованными нейтронами на легких ядрах:  ${}^6\text{Li}(n, \alpha){}^3\text{H}$  с измерением P-нечетной асимметрии в канале  ${}^3\text{H}$  и  ${}^{10}\text{B}(n, \alpha){}^7\text{Li}^* \Rightarrow {}^7\text{Li} + \gamma$  ( $E_\gamma = 0,478$  МэВ) с измерением P-нечетной асимметрии в  $\gamma$ -канале. Хотя ожидаемые величины эффектов здесь мало больше, чем в реакции  $(n, p) \rightarrow (d, \gamma)$ , условия для проведения эксперимента много лучше из-за больших сечений этих реакций на тепловых нейтронах (около 1000 и 4000 барн, соответственно). В то же время легкие ядра могут быть хорошо описаны в рамках кластерной и мультикластерной моделей и расчеты позволяют выразить измеряемые коэффициенты P-нечетных асимметрий со слабыми константами.

**Цель работы.** Целью представленной работы было:

1. Проведение измерений сечений вызванных тепловыми и резонансными нейтронами реакций с вылетом заряженных частиц на стабильных и радиоактивных ядрах в области  $A \leq 60$ .

2. Изучение структуры атомных ядер и характеристик компаунд-состояний ядер-нейтронных резонансов.

3. Решение некоторых задач астрофизики, например, проблемы перепроизводства редкого изотопа  $^{36}\text{S}$  в расчетах, тестирование моделей, используемых для расчетов р-процесса и т.д.

4. Исследование Р-нечетных и Р-четных корреляций в реакции  $^{35}\text{Cl}(n, p)^{35}\text{S}$  с тепловыми поляризованными и резонансными неполяризованными нейтронами.

5. Поиск нарушения пространственной четности в реакциях  $^6\text{Li}(n, \alpha)^3\text{H}$ ,  $^{10}\text{B}(n, \alpha)^7\text{Li}$  и  $^{10}\text{B}(n, \alpha_1)^7\text{Li}^* \rightarrow \gamma \rightarrow ^7\text{Li}$  с холодными поляризованными нейтронами.

6. Разработка и реализация методик для выполнения указанных выше исследований.

**Научная новизна.** Предложена и начата в ЛНФ ОИЯИ программа измерений реакций  $(n, p)$ ,  $(n, \alpha)$  на радиоактивных ядрах, которая впоследствии стала реализовываться и в других ядерных центрах. Измерены сечения реакций  $(n, p)$  и  $(n, \alpha)$  на тепловых нейтронах для 12 изотопов из области  $A < 60$ , из них для 4 впервые. Для 6 изотопов из области  $A < 60$  измерены сечения на резонансных нейтронах, из них на 4 впервые. Впервые проведено измерение реакции  $^{147}\text{Sm}(n, \alpha)^{144}\text{Nd}$  в диапазоне энергии нейтронов до 500 кэВ. Проведен статистический анализ  $\alpha$ -ширин резонансов  $^{147}\text{Sm}$  до 700 эВ с использованием рекордного по числу ширин набора данных более 100, результаты которого

демонстрируют важность и возможность продолжения и углубления таких исследований для понимания структуры нейтронных резонансов. Впервые измерены спектры  $\alpha$ -частиц в реакции  ${}^{67}\text{Zn}(n,\alpha){}^{64}\text{Ni}$ , на основе которых была проведена новая спиновая идентификация нейтронных резонансов  ${}^{67}\text{Zn}$  и получено указание на существование в этом ядре деструктивной интерференции уровней, приводящих к подавлению  $\alpha_0$ -переходов в тепловом сечении указанной реакции. Для нескольких радиоактивных изотопов ( ${}^7\text{Be}$ ,  ${}^{26}\text{Al}$ ,  ${}^{36}\text{Cl}$ ) впервые в прямых измерениях получены сечения в области энергии нейтронов, представляющей интерес для астрофизики. На основе данных по сечениям получены скорости реакций при астрофизических температурах, которые используются в расчетах в различных астрофизических моделях. Впервые проведены успешные измерения Р-нечетных и лево-правых асимметрий в реакциях  ${}^{35}\text{Cl}(n, p){}^{35}\text{S}$  и  ${}^{14}\text{N}(n, p){}^{14}\text{C}$  с тепловыми поляризованными нейтронами и асимметрии “вперед-назад” с резонансными нейтронами для первой реакции. В реакции  ${}^{35}\text{Cl}(n, p){}^{35}\text{S}$  впервые в нейтронных реакциях с вылетом заряженных частиц обнаружена Р-нечетная асимметрия, а также лево-правая и асимметрия “вперед”-“назад” и вычислен матричный элемент слабого взаимодействия. Найдена лево-правая асимметрия в реакции  ${}^{14}\text{N}(n, p){}^{14}\text{C}$ . Проведены измерения по поиску Р-нечетной асимметрии в реакциях  ${}^6\text{Li}(n,\alpha){}^3\text{H}$  и  ${}^{10}\text{B}(n,\alpha){}^7\text{Li}$  с холодными поляризованными нейтронами. Р-нечетные эффекты пока не обнаружены, но получены наиболее точные на сегодняшний день ограничения на величины коэффициентов Р-нечетных асимметрий, для первой реакции на основе имеющейся кластерной модели получено ограничение на константу слабого нейтрального тока. Проведены первые измерения Р-нечетной асимметрии в реакции  ${}^{10}\text{B}(n,\alpha_1){}^7\text{Li}^* \rightarrow \gamma \rightarrow {}^7\text{Li}$  с холодными поляризованными нейтронами.



**Практическая ценность.** Измеренные сечения и значения протонных и  $\alpha$ -ширин нейтронных резонансов включены в базы данных и уже используются в области ядерной физики, в расчетах астрофизических моделей и при оценке накопления ядер водорода и гелия, влияющих на свойства конструкционных материалов, работающих в нейтронных полях.

В результате проведенных исследований по измерениям Р-четных и Р-нечетных корреляций становится возможным обнаружение ранее не известных эффектов.

Некоторые из разработанных нами спектрометров заряженных частиц работают в различных лабораториях мира.

### **Основные результаты, выносимые на защиту:**

1. Разработано и создано целое семейство (более 10) светосильных детекторов и спектрометров заряженных частиц и специальная электроника, которые позволили проводить измерения сечений и ширин реакций  $(n, p)$  и  $(n, \alpha)$  на стационарных и импульсных источниках нейтронов с шириной вспышки от 8 нс до 240 мкс.
2. Разработан и создан комплекс установок для изучения Р-нечетных и Р-четных асимметрий в реакциях с нейтронами с вылетом заряженных частиц на уровне точности  $\sim 10^{-8}$ .
3. Измерены сечения реакций  $(n, p)$  и  $(n, \alpha)$  на тепловых нейтронах для 12 изотопов из области  $A < 60$ , из них для 4 впервые.
4. Для 6 изотопов из области  $A < 60$  измерены сечения на резонансных нейтронах, из них на 4 впервые. Предложена и начата в ЛНФ ОИЯИ программа  $(n, p)$ ,  $(n, \alpha)$  – измерений на радиоактивных ядрах ( $^{22}\text{Na}$ ,  $^{36}\text{Cl}$ ,  $^7\text{Be}$ ,  $^{40}\text{K}$ ).
5. Впервые проведено измерение реакции  $^{147}\text{Sm}(n, \alpha)^{144}\text{Nd}$  в диапазоне

энергии нейтронов до 500 кэВ. Проведен статистический анализ  $\alpha$ -ширин резонансов  $^{147}\text{Sm}$  до 700 эВ с использованием рекордного по числу ширин набора данных более 100, результаты которого демонстрируют важность и возможность продолжения и углубления таких исследований для понимания структуры нейтронных резонансов.

6. Впервые измерены спектры  $\alpha$ -частиц в реакции  $^{67}\text{Zn}(n,\alpha)^{64}\text{Ni}$ , на основе которых была проведена новая спиновая идентификация нейтронных резонансов  $^{67}\text{Zn}$  и получено указание на существование в этом ядре деструктивной интерференции уровней, приводящих к подавлению  $\alpha_0$ -переходов в тепловом сечении указанной реакции.

7. Для нескольких изотопов ( $^7\text{Be}$ ,  $^{26}\text{Al}$ ,  $^{36}\text{Cl}$ ,  $^{14}\text{N}$ ) получены сечения в области энергии нейтронов, представляющей интерес для астрофизики. На основе данных по сечениям получены скорости реакций при астрофизических температурах, которые используются в расчетах в различных астрофизических моделях. В ряде случаев (происхождение редкого изотопа  $^{36}\text{S}$ , реакция  $^{14}\text{N}(n,p)^{14}\text{C}$  и роль реакции  $^{13}\text{C}(\alpha,n)^{16}\text{O}$  как источника нейтронов для  $s$ -процесса и т.д.) наши данные являются ключевыми.

8. Успешное измерение реакции  $^{147}\text{Sm}(n,\alpha)^{144}\text{Nd}$  в широком диапазоне энергии нейтронов показало возможность использования данных по реакции  $(n,\alpha)$  для тестирования новых теоретических моделей, используемых при изучении  $p$ -процесса.

9. Проведены измерения  $P$ -нечетных и лево-правых асимметрий в реакциях  $^{35}\text{Cl}(n,p)^{35}\text{S}$  и  $^{14}\text{N}(n,p)^{14}\text{C}$  с тепловыми поляризованными нейтронами и асимметрии "вперед-назад" с резонансными нейтронами для первой реакции. В реакции  $^{35}\text{Cl}(n,p)^{35}\text{S}$  обнаружены  $P$ -нечетная (впервые в нейтронных реакциях с вылетом заряженных частиц), лево-правая асимметрия, а также асимметрия "вперед"- "назад" и вычислен

матричный элемент слабого взаимодействия  $W_{PN}=(0,06\pm 0,02)$  эВ. Найдена лево-правая асимметрия в реакции  $^{14}\text{N}(n, p)^{14}\text{C}$ .

10. Проведены исследования P-нечетной асимметрии в реакциях  $^6\text{Li}(n, \alpha)^3\text{H}$  и  $^{10}\text{B}(n, \alpha)^7\text{Li}$  с холодными поляризованными нейтронами. P-нечетные эффекты пока не обнаружены, но в первой реакции уже получена уникальная точность  $\alpha_{PN} = -(6,4\pm 3,9)\cdot 10^{-8}$ , позволяющая на основе имеющейся кластерной модели дать оценку константы нейтрального тока  $f_{\pi} \leq 1,2\cdot 10^{-7}$ .

11. Проведены исследования P-нечетной асимметрии в реакции  $^{10}\text{B}(n, \alpha_1)^7\text{Li}^* \rightarrow \gamma + ^7\text{Li}$  с холодными поляризованными нейтронами. В результате двух измерений, выполненных в Гатчине и Гренобле, получены, соответственно, следующие оценки P-нечетного эффекта в этой реакции  $\alpha_{PN} = (6,8\pm 3,7)\cdot 10^{-7}$  и  $-(2,73\pm 3,75)\cdot 10^{-8}$ .

**Апробация работы.** Различные составные части диссертационной работы докладывались на конференциях: 2-6 Всесоюзных конференциях по нейтронной физике (Киев, 1973, 1975, 1977, 1980 и 1983 гг., соответственно); 1 Международной конференции по нейтронной физике, Киев, 1987; 1-10 Международных семинарах по взаимодействию нейтронов с ядрами (Дубна, 1992, 1994-2002 гг., соответственно); 34, 37, 48 и 52 Совещаниях по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра, (Алма-Ата, 1984; Юрмала, 1987, Москва, 1998 и Москва, 2002, соответственно); 8 Школе по нейтронной физике, Дубна, 1998; Школе-семинаре "Современные вопросы физики" (Уланбатор, Монголия, 2002); Международных конференциях "Ядерные данные для науки и технологии" (Гатлинбург, США, 1994, Триест, Италия, 1997 и Цукуба, Япония, 2001); 2, 3 и 6 Международных симпозиумах по ядерной астрофизике "Ядра в космосе" (Карлсруе, Германия, 1992, Ассерджи, Италия, 1994 и Архус, Дания, 2000); 7 и 8 Международных симпозиумах

"Спектроскопия гамма-лучей и связанные вопросы" (Асиломар, 1990 и Фрибург, Швейцария, 1993); Международных конференциях по ядерной физике (Висбаден, Германия, 1992 и Париж, Франция, 1998).

**Публикации.** По материалам диссертации опубликовано 64 работы.

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы, включающего 367 наименований. Работа содержит 11 таблиц и 83 рисунка.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дается обоснование актуальности темы и сформулированы основные цели работы. Изложено краткое содержание диссертации с описанием основных ее результатов. Каждая из последующих глав предваряется кратким обзором по рассматриваемым проблемам и содержанию главы.

В первой главе рассматривается экспериментальная техника, используемая для проведения измерений. Сделан краткий обзор источников нейтронов со сравнением основных характеристик нейтронных пучков, в первую очередь источников так называемых «белых» нейтронов, измерения на которых проводятся методом времени пролета и являются основным поставщиком экспериментальных данных по нейтронным резонансам (НР).

В следующей части этой главы рассматриваются детекторы заряженных частиц, используемые наиболее широко при работе на нейтронных пучках. Это полупроводниковые поверхностно-барьерные кремниевые детекторы (ПБ), широко используемые в спектрометрических измерениях заряженных частиц, и ионизационные газонаполненные детекторы - ионизационные и пропорциональные

камеры (ИК, ПК). Обсуждены сравнительные характеристики этих двух типов детекторов, проанализированы их достоинства и недостатки, показаны ограничения их применения при работе на пучках нейтронов различных нейтронных источников. Здесь же приведено описание нескольких конструкций детекторов, созданных нами, и успешно применяемых в экспериментах:

-Плоско-параллельные ИК с сеткой. Двухсекционные ИК состоят из двух идентичных секций с общим катодом. Они имеют объем от 10 до 40 л и могут работать при давлении рабочего газа до 2-10 атм., условно подразделяясь на ИК низкого и высокого давления (ИКНД и ИКВД, соответственно). ИК универсальны, удобны и просты в эксплуатации, для нее используются стандартные высоковольтные блоки и кабели. Поэтому сделанные нами ИК такого типа широко использовались и используются в измерениях на нейтронных пучках ряда ведущих лабораторий мира.

-Добавление в каждую секцию ИК еще по дополнительной сетке (ИКДС) позволяет провести идентификацию заряженных частиц разного типа с близкими энергиями.

-Для исследования газовых мишеней нами была сконструирована специальная ИК с сеткой ИКГМ. Особенность этого детектора состоит в том, что ядра газа, наполняющего камеру, являлись одновременно ионизационным газом и мишенями для нейтронного пучка.

-Проблема “гамма”-вспышки может быть преодолена в значительной степени благодаря применению идеи компенсационной ИК (КИК), адаптированной для измерений на источнике “белых” нейтронов. Принцип КИК иллюстрирует рис. 1. В ней плоскости электродов, расположенных по обе стороны центрального электрода, содержащего образец, находятся под равным, но противоположным по знаку потенциалом. Когда вспышка  $\gamma$ - квантов проходит через камеру, она индуцирует почти одинаковые по величине, но противоположные по

знаку заряды в этих двух объемах. Поэтому из-за  $\gamma$  - вспышки на сигнальном электроде собирается близкий к нулю заряд. Напротив,  $(n, p)$ - или  $(n, \alpha)$ -взаимодействия в образце приводят к образованию заряда только в одном из объемов и индуцируют нормальный сигнал. С использованием КИК на 8,835 м пролетной базе ORELA измерения были расширены по энергии примерно до 1 МэВ. Рис. 2 иллюстрирует измерения сечения реакции  ${}^6\text{Li}(n,\alpha){}^3\text{H}$ , которая использовалась как

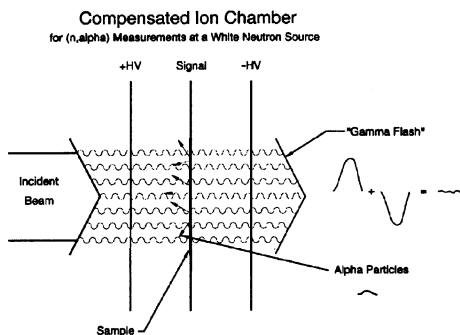


Рис. 1. Схема, демонстрирующая принцип работы компенсационной ионизационной камеры (КИК) для измерений реакций  $(n, p)$  и  $(n, \alpha)$  на “белых” нейтронных источниках.

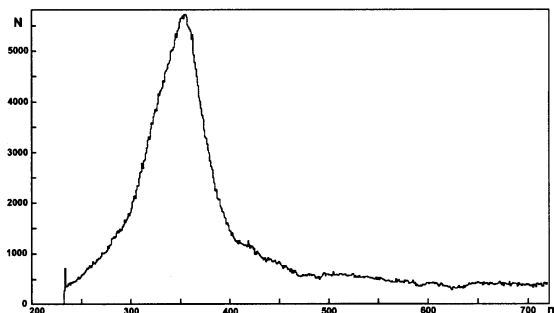


Рис. 2. Времяпролетный спектр тритонов из реакции  ${}^6\text{Li}(n,\alpha){}^3\text{H}$ , измеренный с помощью КИК на пролетной базе 8,835 м на ORELA

калибровочная в измерениях реакции  $^{147}\text{Sm}(n, \alpha)^{144}\text{Nd}$ , выполненных с помощью КИК. Широкий максимум соответствует известному нейтронному резонансу при  $E_n=244,5$  кэВ.

- Были созданы также 3 детектора заряженных частиц на основе пропорциональных камер (ПК):

- светосильный детектор для исследования реакции  $(n, \alpha)$  на импульсных источниках нейтронов (ПКИИ);

- длинная камера для измерений асимметрии вылета заряженных частиц (ДПК);

- система ПК для измерения асимметрии вылета заряженных частиц в экспериментах с легкими ядрами (СПК).

Далее в главе 1 приведено описание используемой электроники, включающей как детекторную электронику, так и измерительно-накопительный модуль многопараметрических измерений (ИНМ). Подробнее представлен ИНМ, разработанный с нашим участием и используемый в измерениях в Дубне.

Заключает эту главу рассмотрение методов получения образцов, используемых для проведения измерений в связи с тем, что изготовление качественного образца является важнейшей частью эксперимента.

В главе 2 представлены некоторые примеры проведенных измерений и обсуждается физика, полученная из них: сечения около нейтронного порога, свойства высоковозбужденных состояний ядер (НР). Основное внимание уделено области относительно легких ядер с атомным номером  $A < 60$ , где последние 15 лет был достигнут наиболее значительный прогресс в изучении реакций  $(n, p)$  и  $(n, \alpha)$ . Если наши измерения на тепловых нейтронах в основном уточняли имеющиеся ранее часто противоречивые данные, что, как показано в главе 2, тем не менее, в некоторых случаях имеет принципиально важное значение, то на резонансных и фильтрованных нейтронах для большого ряда изотопов

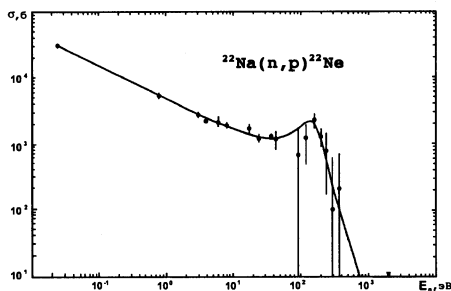


Рис. 3. Сечение реакции  $^{22}\text{Na}(n, p)^{22}\text{Ne}^*$  в зависимости от энергии нейтронов. Точки – результат наших измерений. Кривая – результат подгонки данных к одиночному  $7/2^+$  резонансу.

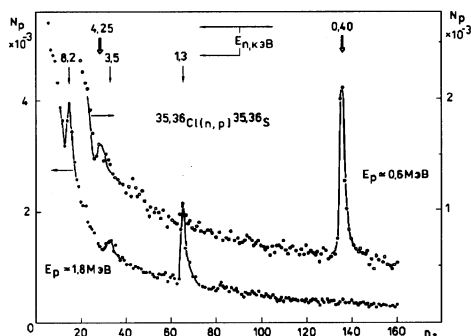


Рис. 4. Времяпролетный спектр выхода протонов из реакции  $^{36}\text{Cl}(n, p)^{36}\text{S}$  из нашей первой работы. Верхняя кривая – аналогичный спектр в окне протонов из реакции  $(n, p)$  на  $^{35}\text{Cl}$ , который присутствовал как примесь в использованном образце.

$(^{14}\text{N}, ^{22}\text{Na}, ^{26}\text{Al}, ^{36}\text{Cl}, ^{40}\text{K})$  реакции  $(n, p)$  и (или)  $(n, \alpha)$  были наблюдаемы и изучены впервые. В связи с тем, что реакции с вылетом заряженных частиц (на нейтронах с энергией до нескольких сот кэВ) достаточно редки, большой интерес вызвала начатая нами программа исследований на радиоактивных ядрах, которая позволяет расширить круг исследуемых ядер. Рис. 3 и 4 иллюстрируют первые такие измерения  $^{22}\text{Na}$  и  $^{36}\text{Cl}$ , выполненные в Дубне с использованием ПД и ИК в качестве детекторов заряженных частиц, а на рис. 5 и 6 – измерения на  $^{36}\text{Cl}$ , выполненные в Лос Аламосе с помощью ПД.



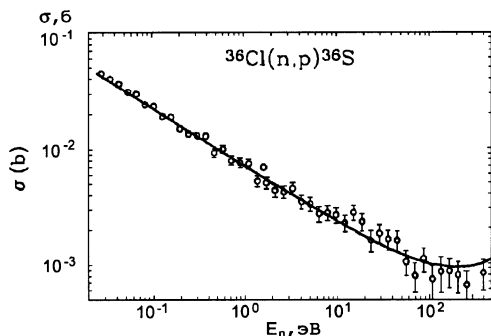


Рис. 5. Сечение реакции  $^{36}\text{Cl}(n, p)^{36}\text{S}$  в диапазоне от тепловой энергии до 500 эВ. Кружки – данные совместных измерений в Лос Аламосе. Кривая – результат многоуровневой подгонки.

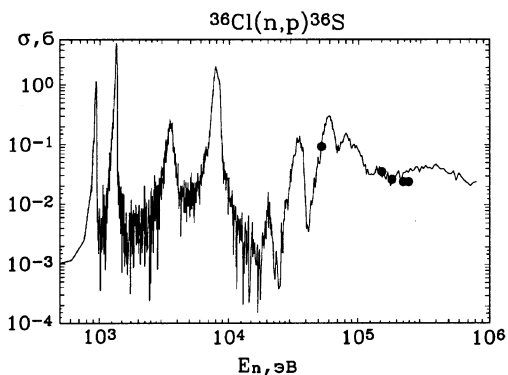


Рис. 6. Как и на рис. 5 для энергии от 500 эВ до 800кэВ.

Результаты измерений сечений и параметров нейтронных резонансов для этих и других измеренных ядер представлены в виде рисунков и таблиц.

Отдельная часть главы 2 посвящена изучению статистических свойств  $\alpha$ -ширин НР. Возвращение к этой, как оказалось, крайне интересной для понимания структуры НР задаче оказалось возможным благодаря нашему недавнему измерению на ORELA, в котором в области энергии нейтронов до 700 эВ получено более 100 значений  $\alpha$ -ширин НР со спинами  $J^\pi = 3^-$  и  $J^\pi = 4^-$ . Выполнен анализ полных  $\alpha$ -ширин

НР отдельно для обоих спинов, обсуждены отклонения распределений  $\alpha$ -ширин от статистической теории, а также детально обсуждается ситуация с резонансом при  $E_0=184$  эВ, обладающего аномально большими нейтронной и  $\alpha$ -ширинами и необычным спектром  $\alpha$ -частиц, а также с несколькими другими более высокими резонансами с большой  $\alpha$ -шириной.

На примере реакции  $^{67}\text{Zn}(n,\alpha)^{64}\text{Ni}$  показаны возможности по уточнению спинов НР.

В главе 3 рассмотрены астрофизические аспекты, особое внимание уделено проблемам, связанным с исследуемыми реакциями. Исключительно важная роль ядерной физики в астрофизических теориях не вызывает сомнений. Очевидно также, что данные по распространенности нуклидов во Вселенной – одному из основных экспериментальных источников, лежащих в основе современных представлений о происхождении и эволюции Вселенной – требуют понимания и объяснения. Другими словами, сценарии развития должны объяснять химический и изотопный состав современной Вселенной. Хотя представления об основных процессах уже сложились, имеется еще большой ряд вопросов, требующих объяснений и уточнений. В этой главе показана роль измерений реакций  $(n, p)$  и  $(n, \alpha)$  для астрофизики, в соответствующих разделах рассмотрены такие вопросы как:

-нуклеосинтез в стандартной модели Большого взрыва ( $^7\text{Be}(n, p)^7\text{Li}$ ); -нуклеосинтез в нестандартной модели Большого взрыва ( $^{17}\text{O}(n,\alpha)^{14}\text{C}$ ); -взрывной звездный нуклеосинтез ( $^{26}\text{Al}$ ); -происхождение редкого изотопа  $^{36}\text{S}$  ( $^{35,36}\text{Cl}(n, p)^{35,36}\text{S}$ ;  $^{36}\text{Cl}(n,\alpha)^{33}\text{P}$ ;  $^{40}\text{K}(n, p)^{40}\text{Ar}$ ;  $^{40}\text{K}(n,\alpha)^{37}\text{Cl}$ ); -  $^{22}\text{Na}$ , астрономия  $\gamma$ -лучей и неон- $E$  аномалия; -реакция  $^{14}\text{N}(n, p)^{14}\text{C}$  и роль реакции  $^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$  как источника нейтронов для  $s$ -процесса; -реакция  $(n, \alpha)$  и  $p$ -процесс.

В качестве одного примера рассмотрим проблему перепроизводства редкого изотопа  $^{36}\text{S}$ , получаемого в расчетах. Для ее решения потребовались измерения сечений реакций, сетка которых приведена на рис. 7, при звездных температурах, приводящих как к образованию, так и разрушению этого изотопа.

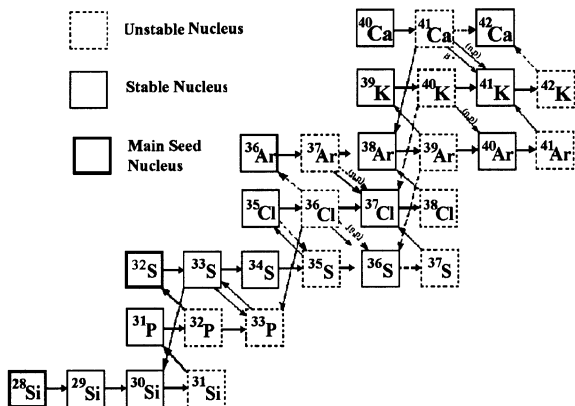


Рис. 7. Путь s-процесса в области  $^{36}\text{S}$ .

Другим примером служит взрывной нуклеосинтез  $^{26}\text{Al}$ .  $^{26}\text{Al}$  - один из самых интересных изотопов, произведенных, как считают, во взрывном звездном нуклеосинтезе. Дело в том, что он является одним из очень небольшого числа изотопов, указывающих на то, что нуклеосинтез - продолжающийся и сейчас процесс. Первое его обнаружение было сделано спутником HEA03, когда наблюдали  $\gamma$ -линию 1,809 МэВ от распада  $^{26}\text{Al}$  на первое возбужденное состояние  $^{26}\text{Mg}$ . Наблюдение этой  $\gamma$ -линии служит доказательством того, что образование  $^{26}\text{Al}$  произошло по крайней мере не раньше, чем  $\approx 7,2 \times 10^5$  лет назад (период полураспада  $^{26}\text{Al}$ ), и весьма вероятно, что процесс продолжается и сегодня. Наблюдение  $^{26}\text{Mg}$  аномалии в некоторых метеоритах служит косвенным

доказательством того, что  $^{26}\text{Al}$  был произведен перед формированием Солнечной системы 5 миллиардов лет назад. Эта и другие изотопные аномалии в метеоритах были восприняты как доказательство того, что формирование Солнечной системы произошло из-за взрыва ближайшей сверхновой или из-за выброса массы из ближайшей звезды-красного гиганта в его самой активной фазе. Было установлено, что реакции  $^{26}\text{Al}(n, p)^{26}\text{Mg}$  и  $^{26}\text{Al}(n, \alpha)^{23}\text{Na}$  являются основными для разрушения  $^{26}\text{Al}$  в астрофизическом окружении, которое предлагалось как наиболее вероятное для его производства, поэтому знание сечений этих реакций очень важно для лучшего понимания природы образования первичного  $^{26}\text{Al}$ . Сечения реакций  $^{26}\text{Al}(n, p)^{26}\text{Mg}$  и  $^{26}\text{Al}(n, \alpha)^{23}\text{Na}$  впервые были оценены Скелтоном и др. из обратной реакции. Сечения  $(n, p_0)$  и  $(n, \alpha_0)$  были получены методом детального баланса. Главным результатом этих измерений является получение настолько больших сечений, что  $^{26}\text{Al}$  должен был эффективно разрушаться во взрывах сверхновых, в которых производится много нейтронов. Тем не менее, измеренные сечения очень сильно отличались от теоретических предсказаний, и полученное из обратной реакции  $(n, \alpha_0)$ -сечение было много больше, чем  $(n, p_0)$ , тогда как теоретические расчеты дают противоположный результат. На основании анализа спинов уровней было предположено, что сечение  $^{26}\text{Al}(n, p_1)^{26}\text{Mg}^*$  (которое нельзя измерить в обратной реакции, так как для этого потребовалась бы мишень в возбужденном состоянии) должно быть много больше сечения реакции  $^{26}\text{Al}(n, p_0)^{26}\text{Mg}$  из-за много большей проницаемости ядерного барьера для вылетающего протона. Это было проверено в первом прямом измерении сечения реакции  $^{26}\text{Al}(n, p)^{26}\text{Mg}$ , проведенным Траутветтером и др. В этом измерении было определено, что отношение  $(n, p_1)/(n, p_0)$  меняется примерно от 100 при тепловой энергии до  $\approx 3$  вблизи 300 кэВ. При астрофизических энергиях

теоретическая скорость реакции была еще на 50% выше величины, измеренной Траутветтером и др. Надо отметить, что измерения Траутветтера и др. были сделаны на нейтронном источнике, который приближается, но не точно воспроизводит распределение Максвелл-Больцмана при  $kT=31$  и  $71$  кэВ. Степень влияния приближения на результаты зависит от (неизмеренной) энергетической зависимости сечения. Измерения были сделаны только в 4 широких энергетических окнах, а сечение реакции  $^{26}\text{Al}(n,\alpha)^{23}\text{Na}$  вообще не было получено в этих измерениях. Кроме того, температурный диапазон между  $0,2$  ГК (типичной для красных гигантов) и тепловой энергией не был перекрыт в этих измерениях, тогда как скорость реакции, как видно из тепловых данных, меняется почти в  $100$  раз в этом диапазоне. По этим причинам были предприняты новые прямые измерения сечений реакций  $^{26}\text{Al}(n, p_1)^{26}\text{Mg}^*$  и  $^{26}\text{Al}(n, \alpha_0)^{23}\text{Na}$ , выполненные в нашей совместной работе с Келером и др. в диапазоне энергий от тепловых до  $50$  кэВ и  $9$  кэВ, соответственно. Результаты приведены на рис. 8 и 9.

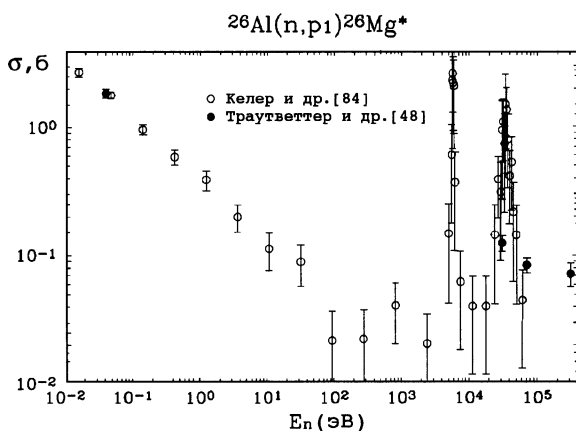


Рис. 8. Сечение реакции  $^{26}\text{Al}(n, p_1)^{26}\text{Mg}$ . Данные Траутветтера и др. показаны сплошными кружками, нашей работы – открытыми кружками.

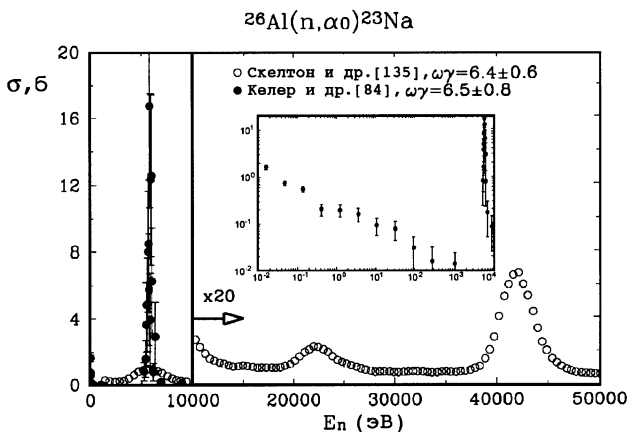


Рис. 9. Сечение реакции  $^{26}\text{Al}(n, \alpha_0)^{23}\text{Na}$ . Открытые кружки – из измерений обратной реакции Скултона и др., сплошные кружки – из наших прямых измерений. На вставке наши данные до 10 кэВ в логарифмическом масштабе.

Из-за того, что измерение Траутветтера было выполнено в относительно широких энергетических окнах, не представляется возможным сделать прямое сравнение двух наборов данных по измерениям  $(n, p)$ , а лучше сравнить их после усреднения наших данных по распределению Максвелла-Больцмана, то есть сравнить астрофизические скорости реакций. Астрофизические скорости реакций для каналов  $(n, \alpha)$  и  $(n, p)$ , полученные из экспериментальных данных, вместе с оценками этих скоростей по статистической модели, показаны на рис. 10 и 11. Вследствие того, что  $(n, \alpha_0)$ -измерения Скултона и др. и нашей работы согласуются для “силы” резонанса при 6 кэВ, скорости реакции, посчитанные из этих данных, также хорошо согласуются друг с другом. Это не очевидно из рис. 10, потому что Скултон и др. рассчитали скорость реакции лишь для  $T > 0,1$  ГК. С другой стороны, результаты по реакции  $(n, p)$  из нашей работы примерно на 65% выше данных Траутветтера при  $T = 0,36$  ГК. К сожалению, наши новые данные не охватывают область достаточно высоких энергий, необходимую для

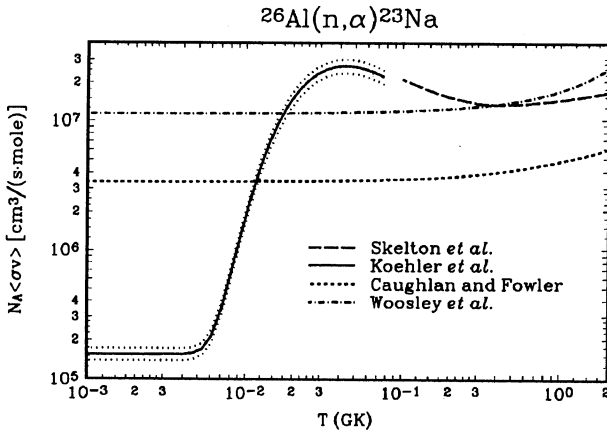


Рис. 10. Астрофизические скорости реакций для реакции  $^{26}\text{Al}(n, \alpha_0)^{23}\text{Na}$ . Сплошная кривая рассчитана из наших прямых измерений, длинно-штриховая кривая рассчитана из измерений обратной реакции Скейлтона и др. Коротко-штриховая и штрих-пунктирная кривые – расчеты по статистической модели для скорости реакции  $(n, \alpha)$  Колана и Фаулера и Вусли и др.

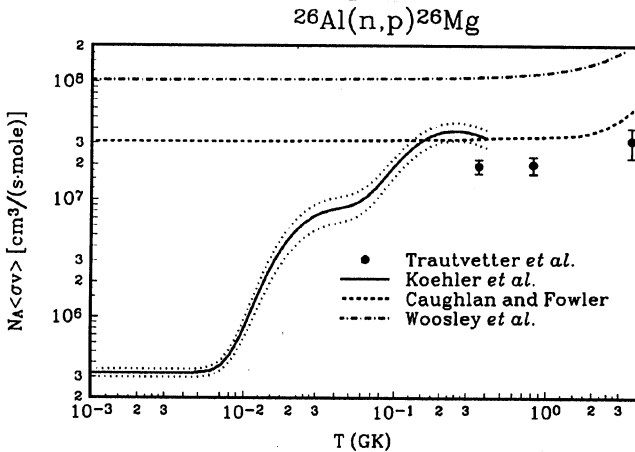


Рис. 11. Астрофизические скорости реакций для реакции  $^{26}\text{Al}(n, p)^{26}\text{Mg}$ . Кружки - из измерений Траутветтера и др., сплошная кривая рассчитана из наших измерений. Оба эти набора данных относятся только к  $(n, p)$  реакции. Коротко-штриховая и штрих-пунктирная кривые – расчеты по статистической модели для полной скорости реакции  $(n, p)$  Колана и Фаулера и Вусли и др.

расчетов скоростей реакций при температуре взрывного нуклеосинтеза, и требуются новые измерения, способные разрешить проявившиеся разногласия с данными Траутветтера и др. В связи с тем, что сечения

достаточно велики, разница в этих двух измерениях может дать существенный эффект при расчетах количества  $^{26}\text{Al}$ , произведенного в астрофизическом окружении с избытком нейтронов. Как видно из рис. 10 и 11, более новый расчет Колана и Фаулера имеет лучшее согласие с  $(n, p)$ -данными, нежели  $(n, \alpha)$ , и совсем наоборот для более старой скорости реакции Вусли и др.

Наконец в качестве еще одного примера из главы 3 рассмотрим реакцию  $^{14}\text{N}(n, p)^{14}\text{C}$  и роль реакции  $^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$  как источника нейтронов для  $s$ -процесса.

До недавнего времени наиболее известная модель для  $s$ -процесса основывалась на звездах промежуточной массы на асимптотической ветви гигантов (AGB), где в качестве источника нейтронов бралась реакция  $^{22}\text{Ne}(\alpha, n)^{25}\text{Mg}$ . Тем не менее, более новые расчеты  $s$ -процесса, основанные на моделях AGB звезд небольшой массы, дали результаты, лучше согласующиеся с экспериментальными данными и дали толчок новому интересу к реакции  $^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$  как главному источнику нейтронов для  $s$ -процесса. Однако в некоторых сценариях  $^{14}\text{N}$  может действовать как сильный “отравитель” в цепи реакций, включающий нейтронный источник  $^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$ , делая эту цепь реакций больше потребителем, нежели поставщиком нейтронов. Также  $^{14}\text{N}$  может играть определяющую роль в нуклеосинтезе  $^{19}\text{F}$ . Астрофизическая среда, ответственная за происхождение этого изотопа, оставалась тайной в течение многих лет. Последние наблюдения и расчеты указывают, что основное количество  $^{19}\text{F}$  может быть произведено в  $s$ -процессе. Альтернативно было предложено, что большинство  $^{19}\text{F}$ , видимого в природе, было синтезировано при взрыве сверхновых благодаря  $v$ -процессу.



В  $s$ -процессе значимость  $^{14}\text{N}$  сильно зависит от величины усредненного по Максвеллу-Больцману сечения реакции  $^{14}\text{N}(n, p)^{14}\text{C}$  при температурах около  $kT=20$  кэВ. Брем и др. сделали первые прямые измерения абсолютных сечений при интересных для астрофизики температурах ( $E_n=25,0$  и  $52,4$  кэВ), используя нейтронный источник с Максвелловским спектром. Их результат для астрофизической скорости реакции при температурах  $s$ -процесса был примерно втрое меньше, чем скорость, использованная в более ранних расчетах нуклеосинтеза. Из уменьшения скорости реакции, следующего из их измерений, Брем и др. сделали выводы, что: 1)  $^{14}\text{N}$  играет соответственно меньшую роль как поглотитель нейтронов, 2) количество произведенного  $^{14}\text{C}$  также уменьшится, и 3) возможно производство значительного количества  $^{15}\text{N}$  в течение  $s$ -процесса (ранее считали, что  $^{15}\text{N}$  производится только в течение взрывного нуклеосинтеза). Хотя данные Брема и др. приводят к очень интересным астрофизическим выводам, их данные не согласуются с другими измерениями, на которых основывались ранее принятые скорости реакции. При температурах  $s$ -процесса большинство предыдущих данных было получено в прямых измерениях Джонсона и Баршала и измерений обратных реакций Гиббонса и Маклина и Сандерса. Эти данные вместе с результатами измерений теплового сечения показывают, что сечение в 2 - 3 раза больше, чем приведенное Бремом и др. К сожалению измерения Брема и др. и другие прямые измерения не перекрываются по энергии, а измерения обратной реакции страдают проблемами, связанными с толщиной мишени при этих низких энергиях.

В последующем Келер и О'Брин провели измерения хода сечения в диапазоне энергии от тепловых до  $34,6$  кэВ. Измеренный ход сечения был близок к  $1/v$ , а после нормировки на измеренное тепловое сечение величина сечения была в согласии с более старыми данными при более высоких энергиях, поддерживая принятые ранее (большие) скорости

реакции. Были также опубликованы новые измерения теплового сечения, которые хорошо согласуются со старыми значениями; таким образом эти новые измерения подтвердили калибровку, использованную в работах Келера. Наконец, выполненные нами на пучке фильтрованных пучков реактора измерения сечений реакции  $^{14}\text{N}(n, p)^{14}\text{C}$  при энергиях 24,5; 53,5 и 144 кэВ, также согласуются с более высокой скоростью реакции. Данные вместе с сечениями, использованными для расчетов ранее принятых скоростей реакций показаны на рис. 12. Видно, что все экспериментальные данные поддерживают ранее принятую скорость реакции, втрое превышающую скорость, рекомендованную Бремом и др. Следовательно,  $^{14}\text{N}$  является потенциально сильным отравителем для нейтронов в течение  $s$ -процесса, а производство  $^{15}\text{N}$  в  $s$ -процессе гораздо менее вероятно, нежели предположено Бремом и др.

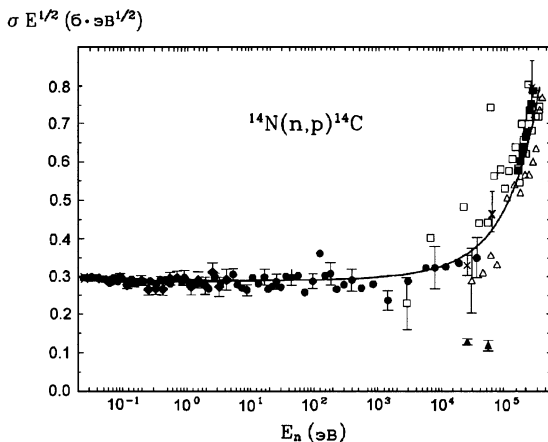


Рис. 12. Приведенное сечение реакции  $^{14}\text{N}(n, p)^{14}\text{C}$ . Открытые квадраты и треугольники – из инверсных измерений Сандерса и Гиббонса и Маклина, соответственно. Сплошные квадраты, треугольники, кружки, ромбы и – из прямых измерений Джонсона и Баршала, Брема и др., Келера и О’Брина, Келера, соответственно. Крестики – наши данные.

Для расчетов  $s$ ,  $r$  и  $p$  – процессов требуются данные по скоростям реакций для десятков тысяч реакций с участием многих тысяч изотопов, большинство из которых радиоактивны. Так как для большинства из них получение экспериментальных данных невозможно, используются расчетные величины, которые, в свою очередь, должны хорошо описывать имеющиеся экспериментальные данные. Очень важной проблемой остается проведение расчетов, воспроизводящих распространенности имеющихся около 30 стабильных протонизбыточных изотопов между  $^{74}\text{Se}$  и  $^{196}\text{Hg}$  (так называемые  $p$ -изотопы), которые экранированы от  $\beta$ -распада при  $s$  и  $r$  – процессах. Их распространенности обычно в 10-100 раз меньше по сравнению с распространенностями  $s$ - и  $r$  - ядер. К сожалению имеющаяся информация по скоростям реакций ( $p, \gamma$ ) очень бедна, а для реакций, включающих  $\alpha$ -частицы, еще хуже – имеется только два эксперимента с прямыми измерениями  $\alpha$ -захвата при низких энергиях ( $^{70}\text{Ge}(\alpha, \gamma)$  и  $^{144}\text{Sm}(\alpha, \gamma)$ ), тем более, что экспериментальная скорость второй реакции оказалась в 10 раз меньше теоретических предсказаний. Именно поэтому очень важными представляются измерения реакции ( $n, \alpha$ ) с целью тестирования чувствительности  $\alpha$ -канала к используемым в расчетах потенциалам  $\alpha$ -частиц. Эти и ряд других проблем подробно обсуждены в этой главе.

Глава 4 посвящена поискам и изучению эффектов несохранения пространственной четности в реакциях ( $n, p$ ), ( $n, t$ ) и ( $n, \alpha$ ).

Широкие исследования слабого взаимодействия в ядерных реакциях с нейтронами начались после выхода работы Абова и др., в которой при исследовании реакции  $^{113}\text{Cd}(n, \gamma)$  было впервые обнаружено нарушение пространственной четности в ядерных силах. За прошедшие почти 40 лет эффекты НЧ были обнаружены в делении, нейтронной

оптике, реакции ( $n, p$ ) и исследовались на поляризованных тепловых и резонансных нейтронах, охватывая практически весь возможный диапазон ядер-мишеней от  $^1\text{H}$  (реакция  $np \rightarrow d\gamma$ ) до  $^{233}\text{Th}$  и  $^{239}\text{U}$ . Одной из главных целей этих исследований является изучение эффективного нуклон-ядерного потенциала, нарушающего четность. В реакциях, идущих через составное ядро, наличие слабого взаимодействия проявляется в малом смешивании состояний с одинаковым спином и противоположной четностью, что, в свою очередь, приводит к различным поляризационным и угловым эффектам. При этом из-за механизмов усиления в ядре наблюдаемые эффекты НПЧ могут быть существенно больше «затравочного»  $F \sim 10^{-7}$ . Особенностью некоторых ядер легких и средних масс является то, что можно точно указать, какие уровни смешиваются слабым взаимодействием, и по измеренному эффекту асимметрии найти матричный элемент гамильтониана слабого взаимодействия, смешивающего состояния. Одним из таких случаев является ядро  $^{36}\text{Cl}$ . Вблизи энергии возбуждения равной энергии связи нейтрона ядро  $^{36}\text{Cl}$  имеет два уровня с  $J^\pi=2^+$  и  $J^\pi=2^-$ : s- и p- волновые нейтронные резонансы  $^{35}\text{Cl}$  при  $E_0 = -180$  эВ и  $E_0 = 398$  эВ, соответственно.

В экспериментах, выполненных нашей группой из ЛНФ ОИЯИ совместно с ЛНИ ЛИЯФ, в реакции с вылетом заряженных частиц  $^{35}\text{Cl}(n, p)^{35}\text{S}$  на пучке тепловых поляризованных нейтронов реактора ВВР-М ЛИЯФ в Гатчине была впервые измерена P-нечетная асимметрия вида  $(s_n p_p)$ , а также P-четная лево-правая асимметрия  $s_n[p_p p_p]$  (результаты приведены в последней строке табл.1) и было определено значение матричного элемента слабого взаимодействия  $|W_{SP}|$ . Одной из существенных причин, ограничивающих возможности определения матричного элемента, является то, что для извлечения  $W_{SP}$  из величины P-нечетной асимметрии необходимо знать не только параметры s- и p-резонансов, но и значения амплитуд нейтронных и других (протонных

для ( $n, p$ ) реакции) ширины по каналам реакции с полным моментом  $j=1/2$  и  $3/2$  ( $j=l+s$ ), которые практически неизвестны. Информация о соотношениях амплитуд может быть получена в измерениях  $P$ -четных корреляций, таких как лево-правая  $\alpha_{LR}$  вида  $s_n[\mathbf{p}_n \mathbf{p}_p]$  и вперед-назад  $\alpha_{FB}$  вида  $\mathbf{p}_n \mathbf{p}_p$ . Последняя корреляция была недавно измерена нами на пучке резонансных (не поляризованных) нейтронов реактора ИБР-30 в Дубне. Эти исследования описаны в части 2 главы 4.

Одно из главных предсказаний стандартной модели электрослабого взаимодействия – существование нейтральных токов. Такие токи были найдены в лептон-нуклонных взаимодействиях. Однако, несмотря на длительную историю исследования несохранения четности в ядерных реакциях, до сих пор нет однозначных доказательств существования нейтральных токов в слабых NN взаимодействиях. В сложных ядрах, благодаря коллективной природе ядерной структуры,  $P$ -нечетные эффекты усилены иногда на несколько порядков величины. Однако надежная интерпретация экспериментальных данных затруднена теоретическими неопределенностями, связанными именно со сложной структурой ядра. Исследования «простых» процессов, таких как реакции  $np \Rightarrow d\gamma$  и  $nd \Rightarrow t\gamma$ , также до сих пор не дали значимого результата из-за сложностей экспериментального характера. На сегодняшний день наиболее точные экспериментальные оценки константы мезонного обмена, соответствующей нейтральному току, дают значение  $h_\pi^1 \leq 1,2 \cdot 10^{-7}$ . Эта величина существенно ниже теоретического «лучшего значения» («best value»)  $4,6 \cdot 10^{-7}$ .

Наиболее оптимальным и перспективным направлением в исследованиях свойств нейтрального тока в слабых NN процессах, с нашей точки зрения, являются реакции с медленными поляризованными нейтронами на легких ядрах с  $A=6-10$ , в частности, в реакции  ${}^6\text{Li}(n, \alpha){}^3\text{H}$  с

наблюдением  $P$ -нечетной асимметрии в  ${}^3\text{H}$ -канале, в реакции  ${}^{10}\text{B}(n,\alpha){}^7\text{Li}$  и реакции  ${}^{10}\text{B}(n,\alpha){}^7\text{Li}^* \rightarrow \gamma \rightarrow {}^7\text{Li}$  с измерением  $P$ -нечетной асимметрии вылета  $\gamma$ -квантов. Такие ядра до энергий возбуждения 25-30 МэВ хорошо описываются в рамках кластерных и мультикластерных схем, что позволяет провести оценки  $P$ -нечетных эффектов, используя методы, характерные для малонуклонных систем. В части 3 главы 4 представлены эксперименты по поиску  $P$ -нечетных асимметрий в указанных реакциях, начатые нами в 1990 г. в Гатчине и недавно продолженные на реакторе ИЛЛ в Гренобле. Результаты проведенных к настоящему времени измерений коэффициентов как  $P$ -нечетной, так и лево-правой асимметрии на легких ядрах приведены в табл. 1. Жирным шрифтом выделены результаты наших измерений. Из нее видно, что  $P$ -нечетная асимметрия

Таблица 1. Значения или верхние пределы коэффициентов  $P$ -нечетной асимметрии  $a_{PNC}$  и лево-правой асимметрии  $a_{LR}$ .

Реакция	$a_{PNC}, 10^{-6}$	$a_{LR}, 10^{-6}$
${}^3\text{He}(n,p){}^3\text{H}$	<1,2	-0,34±0,57
${}^6\text{Li}(n,\alpha){}^4\text{He}$	<1,4 <b>-0,064±0,055</b> <b>-0,071±0,039</b>	95±4
${}^{10}\text{B}(n,\alpha_0){}^7\text{Li}^*$	<16 <8 <3,7 <b>0,34±0,67</b>	77±6
${}^{10}\text{B}(n,\alpha_1){}^7\text{Li}^*$	<3,8 <1,5 <0,61 <b>-0,25±0,16</b>	-2,8±1,4 -10±1,5
${}^{10}\text{B}(n,\alpha_1){}^7\text{Li}^* \rightarrow \gamma(M1) \rightarrow {}^7\text{Li}$	<b>0,68±0,37</b> <b>0,088±0,046</b>	
${}^{14}\text{N}(n,p){}^{14}\text{C}$	<b>7±12</b>	<b>66±18</b>
${}^{35}\text{Cl}(n,p){}^{35}\text{S}$	<b>-151±34</b>	<b>-240±43</b>

при испускании заряженных частиц в исследованных легких ядрах пока не обнаружена. Тем не менее, уже достигнута рекордная на сегодня точность на уровне  $5 \cdot 10^{-8}$ , и имеются реальные предпосылки для проведения аналогичных измерений с точностью до  $(5-10) \cdot 10^{-9}$ .

В заключении сформулированы основные результаты, полученные в диссертации.

### **Основные результаты работы:**

1. Разработано и создано более 10 светосильных детекторов и спектрометров заряженных частиц и специальная электроника, которые позволили проводить измерения сечений и ширин реакций  $(n, p)$  и  $(n, \alpha)$  на стационарных и импульсных источниках нейтронов с шириной вспышки от 8 нс до 240 мкс.
2. Разработан и создан комплекс установок для изучения Р-нечетных и Р-четных асимметрий в реакциях с нейтронами с вылетом заряженных частиц на уровне точности  $\sim 10^{-8}$ .
3. Измерены сечения реакций  $(n, p)$  и  $(n, \alpha)$  на тепловых нейтронах для 12 изотопов из области  $A < 60$ , из них для 4 впервые.
4. Для 6 изотопов из области  $A < 60$  измерены сечения на резонансных нейтронах, из них на 4 впервые. Предложена и начата в ЛНФ ОИЯИ программа  $(n, p)$ ,  $(n, \alpha)$  – измерений на радиоактивных ядрах ( $^{22}\text{Na}$ ,  $^{36}\text{Cl}$ ,  $^7\text{Be}$ ,  $^{40}\text{K}$ ), которая впоследствии стала реализовываться в ядерных центрах в Лос Аламосе, Ок-Ридже и Геле.
5. Впервые проведено измерение реакции  $^{147}\text{Sm} (n, \alpha) ^{144}\text{Nd}$  в диапазоне энергии нейтронов до 500 кэВ. Проведен статистический анализ  $\alpha$ -ширин резонансов  $^{147}\text{Sm}$  до 700 эВ с использованием рекордного по числу ширин набора данных более 100, результаты которого

демонстрируют важность и возможность продолжения и углубления таких исследований для понимания структуры нейтронных резонансов.

6. Впервые измерены спектры  $\alpha$ -частиц в реакции  ${}^{67}\text{Zn}(n,\alpha){}^{64}\text{Ni}$ , на основе которых была проведена новая спиновая идентификация нейтронных резонансов  ${}^{67}\text{Zn}$  и получено указание на существование в этом ядре деструктивной интерференции уровней, приводящих к подавлению  $\alpha_0$ -переходов в тепловом сечении указанной реакции.
7. Для нескольких изотопов ( ${}^7\text{Be}$ ,  ${}^{26}\text{Al}$ ,  ${}^{36}\text{Cl}$ ,  ${}^{14}\text{N}$ ) получены сечения в области энергии нейтронов, представляющей интерес для астрофизики. На основе данных по сечениям получены скорости реакций при астрофизических температурах, которые используются в расчетах в различных астрофизических моделях. В ряде случаев (происхождение редкого изотопа  ${}^{36}\text{S}$ , реакция  ${}^{14}\text{N}(n, p){}^{14}\text{C}$  и роль реакции  ${}^{13}\text{C}(\alpha, n){}^{16}\text{O}$  как источника нейтронов для  $s$ -процесса и т.д.) наши данные являются ключевыми.
8. Успешное измерение реакции  ${}^{147}\text{Sm}(n,\alpha){}^{144}\text{Nd}$  в широком диапазоне энергии нейтронов показало возможность использования данных по реакции  $(n,\alpha)$  для тестирования новых теоретических моделей, используемых при изучении  $p$ -процесса.
9. Проведены измерения  $P$ -нечетных и лево-правых асимметрий в реакциях  ${}^{35}\text{Cl}(n, p){}^{35}\text{S}$  и  ${}^{14}\text{N}(n, p){}^{14}\text{C}$  с тепловыми поляризованными нейтронами и асимметрии "вперед-назад" с резонансными нейтронами для первой реакции. В реакции  ${}^{35}\text{Cl}(n, p){}^{35}\text{S}$  обнаружены  $P$ -нечетная (впервые в нейтронных реакциях с вылетом заряженных частиц), лево-правая асимметрия, а также асимметрия "вперед"- "назад" и вычислен матричный элемент слабого взаимодействия



$W_{PN}=(0,06\pm 0,02)$  эВ. Найдена лево-правая асимметрия в реакции  $^{14}\text{N}(n, p)^{14}\text{C}$ .

10. Проведены исследования Р-нечетной асимметрии в реакциях  $^6\text{Li}(n, \alpha)^3\text{H}$  и  $^{10}\text{B}(n, \alpha)^7\text{Li}$  с холодными поляризованными нейтронами. Р-нечетные эффекты пока не обнаружены, но в первой реакции уже получена уникальная точность  $\alpha_{PN}=- (6,4\pm 3,9)\cdot 10^{-8}$ , позволяющая на основе имеющейся кластерной модели дать оценку константы нейтрального тока  $f_{\pi}\leq 1,2\cdot 10^{-7}$ .

11. Проведены исследования Р-нечетной асимметрии в реакции  $^{10}\text{B}(n, \alpha_1)^7\text{Li}^* \xrightarrow{-\gamma} ^7\text{Li}$  с холодными поляризованными нейтронами. В результате двух измерений, выполненных сначала в Гатчине и позднее после модернизации аппаратуры в Гренобле, получены, соответственно, следующие оценки Р-нечетного эффекта в этой реакции  $\alpha_{PN}=(6,8\pm 3,7)\cdot 10^{-7}$  и  $-(2,73\pm 3,75)\cdot 10^{-8}$ .

### **Основные результаты диссертации опубликованы в работах:**

1. Popov Yu. P., Gledenov Yu. M. — Neutron induced reactions followed by charged particles emission. In: Nuclei in the Cosmos. (Proc. of the Second Intern.Symp. on Nucl. Astrophysics, Karlsruhe, Germany, 6-10 July, 1992). Institute of Physics Publishing, Bristol and Philadelphia, p. 233-238.
2. Koehler P. E., Graff S. M., O'Brien H. A., Gledenov Yu.M., Popov Yu.P.—  $^{36}\text{Cl}(n, p)^{36}\text{S}$  cross section from 25 meV to 800 keV and the nucleosynthesis of the rare isotope  $^{36}\text{S}$ . Phys. Rev., 1993, v. C47, p. 2107-2112.
3. Gledenov Yu. M., Salatski V. I., Sedyshev P. V. —The  $^{14}\text{N}(n, p)^{14}\text{C}$  reaction cross section for thermal neutron. Z. Phys., 1993, v. A346, p. 307-308.

4. Gledenov Yu. M., Salatski V. I., Sedyshev P. V., Sedysheva M. V., Pshenichnyj V.A., Andrzejewski J. — Cross sections of the  $^{14}\text{N}(n, p)^{14}\text{C}$  reaction at 24.5, 53.5 and 144 keV. Z. Phys., 1994, v. A348, p. 199-200.
5. Gledenov Yu. M., Popov Yu. P., Rigol J., Salatski V. I. — Study of the  $^{36}\text{Cl}(n, p)^{35}\text{S}$  Reaction in the Neutron Energy Range up to 10 keV. Z. Phys., 1985, v. A 322, p. 685-687.
6. Gledenov Yu. M., Kvitck J., Marinova S., Popov Yu.P., Rigol J., Salatski V.I. — The Investigation of the Reaction  $^{22}\text{Na}(n, p)^{22}\text{Ne}$  for a Neutron Energy to 1000 eV. Z. Phys., 1982, v. A 308, p. 57-61.
7. Балабанов Н. П., Втюрин В. А., Гледенов Ю. М., Попов Ю. П. — Исследование альфа-ширин компаунд-ядер. ЭЧАЯ, 1990, т. 21, с. 317-363.
8. Антонов А., Весна В. А., Гледенов Ю. М., Зварова Т.С., Лобашев В.М., Окунев И.С., Попов Ю.П., Риголь Х., Смотрицкий Л.М., Шульгина Е.В. — Исследование Р-четных и Р-нечетных угловых корреляций в реакциях  $^{35}\text{Cl}(n, p)^{35}\text{S}$  и  $^{14}\text{N}(n, p)^{14}\text{C}$ . ЯФ, 1988, т. 48, с. 305-311.
9. Весна В. А., Гледенов Ю. М., Окунев И. С., Попов Ю.П., Шульгина Е.В.— Поиск Р-нечетных эффектов в реакциях  $^6\text{Li}(n, \alpha)^3\text{H}$  и  $^{10}\text{B}(n, \alpha)^7\text{Li}$  с поляризованными тепловыми нейтронами. ЯФ, 1996, т. 59, с. 23-32.
10. Балабанов Н.П., Гледенов Ю.М. — О влиянии резонансных и промежуточных нейтронов на накопление гелия в конструкционных материалах ядерных реакторов. Сообщение ОИЯИ, РЗ-81-276, Дубна, 1981, 9с.
11. Гледенов Ю. М., Келер П.Е. — Исследование  $(n, p)$  и  $(n, \alpha)$ -реакций с тепловыми и резонансными нейтронами. ЭЧАЯ, 2002, т. 33, с. 261-347.
12. Алексеев А.А., Белоусов Ю.В., Бергман А.А., Волков А.Н., Гледенов Ю.М., Гончаренко О.Н., Грачев М.Н., Казарновский М.В.,

- Матушко В.Л., Мостовой В.И., Новиков А.В., Новоселов С.А., Паржицкий С.С., Попов Ю.П., Рябов Ю.В., Ставиский Ю.Я. — Третье поколение спектрометров по времени замедления нейтронов в свинце. Первые эксперименты и перспективы. ЯФ, 1999, т. 62, с. 851-854.
13. Alekseev A.A., Bergman A.A., Fedchenko V.A., Kazarnovski M.V., Langer O.A., Matushko G.K., Matushko V.L., Novoselov S.A., Ryabov Yu.V., Stavisky Yu.Ya., Gledenov Yu.M., Parzhitskii S.S., Popov Yu.P. — Ultrahigh-intensity lead slowing-down neutron spectrometer driven by proton beam of Moscow meson factory (MMF). "Nuclear Data for Science and Technology" (Proceedings of the International Conference, May 9-13, 1994, Gatlinburg) American Nuclear Society, Inc. 1994, v.2, p. 142-144.
14. Gledenov Yu. M., Okunev I. S., Parzhitskii S. S., Shul'gina E.V., Vesna V.A. — Investigation of P-odd correlations in the capture of thermal polarized neutrons involving emission of secondary charged particles (technical issue). Nucl. Instr. Meth., 1994, v. A350, p. 517-524.
15. Antonov A., Bogdzal A. A., Gledenov Yu. M., Tishin V. G. — Low-background high-efficiency detector for the study of the  $(n, \alpha)$  reaction at pulsed neutron source. Nucl. Techn., 1982, v. 59, p. 526-531.
16. Гледенов Ю.М., Салацкий В.И., Седышев П.В., Шаланьски П.И., Анджеевски Ю., Жак А. — Измерение сечения реакций  $^{17}\text{O}(n, \alpha)^{14}\text{C}$ ,  $^{36}\text{Ar}(n, \alpha)^{33}\text{S}$  и  $^{21}\text{Ne}(n, \alpha)^{18}\text{O}$  на тепловых нейтронах. Сообщение ОИЯИ, P3-97-239, Дубна, 1997, 8с.
17. Gledenov Yu. M., Machrafi R, Salatski V.I., Sedyshev P.V., Andrzejewski J., Szalanski P.J.— Testing an ionization chamber and measurement of  $(n, p)$  and  $(n, \alpha)$  reaction cross sections. Nucl. Instr. Meth., 1999, v. A431, p. 201-207.
18. Гледенов Ю. М., Квиткова Н. И., Митриков М. П., Митрикова Р.С., Тишин В.Г., Фунг Ван Зуан — Идентификация и спектрометрия

низкоэнергетических заряженных частиц при помощи ионизационной камеры с двумя сетками. ПТЭ, 1988, т. 3, с. 55-58.

19. Gledenov Yu.M., Sedysheva M.V., Khuukhenkhuu G., Zhang Guohui, Tang Guoyou, Chen Jinxiang, Zhang Xuemei, Chen Zemin, Chen Yingtang. — Investigation of the Fast Neutron Induced ( $n, \alpha$ ) Reaction (Experimental Techniques). JINR Communications, E3-95-445, Dubna, 1995, 14p.
20. Gledenov Yu.M., Sedysheva M.V., Khuukhenkhuu G., Bao Shanglian, Tang Guoyou, Chen Zemin, Chen Yingtan. — Study of the Fast Neutron Induced ( $n, \alpha$ ) Reaction for Medium-Mass Nuclei. In: Conf. proc. Nuclear Data for Science and Technology, Trieste, 19-24 May 1997, p. 514-516.
21. Gledenov Yu.M., Sedysheva M.V., Khuukhenkhuu G., Zhang Guohui, Tang Guoyou, Chen Jinxiang, Zhang Xuemei, Chen Zemin, Chen Yingtang. — Twin Ionization Chamber for Studies of ( $n, p$ ), ( $n, \alpha$ ) Reactions. JINR Communications, E13-2000-89, Dubna, 2000, 8p.
22. Florek M., Gledenov Yu.M., Sedysheva M., Zeinalov Sh., Khuukhenkhuu G., Zhang Guohui, Tang Guoyou, Chen Zemin, Zhang Xuemei. — The  $^{36}\text{Ar}(n, \alpha_0)$  Cross Sections Measurements in the Neutron Energy Region 4.5 - 6.4 MeV. In book: "Neutron Spectroscopy, Nuclear Structure, Related Topics" (VII International Seminar on Interaction of Neutrons with Nuclei, May 25-28, 1999, Dubna) JINR, E3-98-212, Dubna, 1999, p. 225-228.
23. Koehler P. E., Kappeler F., Schatz H., Gledenov Yu.M., Popov Yu.P., Harvey J.A., Hill N.W., Wiesher M., Kawanagh R.W., Vogelaar R.B.— Recent results in explosive and s-process nucleosynthesis from measurements on radioactive and stable targets. Capture Gamma-Ray Spectroscopy. Ed. J. Kern. World Scientific, Singapore, 1994, p. 714-723.
24. Gledenov Yu.M., Koehler P. E., Andrzejewski J, Guber K.H., Rausher T. —  $^{147}\text{Sm}(n, \alpha)$  cross section measurements from 3 eV to 500 keV:

- Implications for explosive nucleosynthesis reaction rates. *Phys. Rev.*, 2000, v. 62, p. 042801(1-4) (R).
25. Антонов А., Богдзель А.А., Гледенов Ю.М., Маринова С., Попов Ю.П., Тишин В.Г. — Детектор альфа-частиц для исследований реакции  $(n, \alpha)$  на импульсных нейтронных источниках. — ПТЭ, 1981, №3, с. 52-57.
26. Антонов А., Весна В.А., Гледенов Ю.М., Лобашев В.М., Окунев И.С., Попов Ю.П., Риголь Х., Смотрицкий Л.М. — Наблюдение несохранения пространственной четности и лево-правой асимметрии в реакции  $^{35}\text{Cl}(n, p)^{35}\text{S}$ . Письма в ЖЭТФ, 1984, т. 40, с. 209-211.
27. Гледенов Ю.М., Ермаков В.А., Седышев П.В., Седышева М.В., Тишин В.Г. — Измерительно-накопительный модуль многопараметрических измерений для ионизационной камеры с двумя сетками. Сообщение ОИЯИ, P10-95-438, Дубна, 1995, 18с.
28. Гледенов Ю. М., Зварова Т. С., Митриков М. П., Митрикова Р.С., Попов Ю.П., Салацкий В.И., Фунг Ван Зуан. — Исследование реакции  $^7\text{Be}(n, p)^7\text{Li}$  в области энергии нейтронов от 0,025 до 500 эВ. Краткие сообщения ОИЯИ, №17-86, Дубна, 1986, с. 36-40.
29. Gledenov Yu.M., Salatski V.I., Sedyshev P.V., Sedysheva M.V., Pshenichnyj V.A., Andrzejewski J. —  $^{14}\text{N}(n, p)^{14}\text{C}$  reaction cross sections at thermal, 24 keV, 54 keV and 144 keV neutron energy. Capture Gamma-Ray Spectroscopy. Ed. J. Kern. World Scientific, Singapore, 1994, p. 584-586.
30. Gledenov Yu.M., Salatski V.I., Sedyshev P.V., Szalanski P.J., Andrzejewski J., Zak A. — The  $(n_{\text{th}}, p)$  and  $(n_{\text{th}}, \alpha)$  cross sections measurements. In: Conf. proc. Nuclear Data for Science and Technology, Trieste, 19-24 May 1997, p. 511-513.
31. Kvitek J., Hnatowicz V., Cervena J., Vacik J., Gledenov Yu.M. — Proton Transition in  $^{22}\text{Na}(n, p)^{22}\text{Ne}$  Reaction. *Z. Phys.* 1981, v. A299, p. 187-188.

32. Koehler P.E., Kavanagh R.W., Vogelaar R.B., Gledenov Yu.M., Popov Yu.P. —  $^{26}\text{Al}(n, p_1)$  and  $(n, \alpha_0)$  cross sections from thermal energy to 70 keV and the nucleosynthesis of  $^{26}\text{Al}$ . *Phys.Rev.*, 1997, v.C56, p. 1138-1143.
33. Гледенов Ю. М., Салацкий В. И., Седышев П. В., Шаланьски П. И. — Измерение сечения реакции  $^{35}\text{Cl}(n, p)^{35}\text{S}$  для тепловых нейтронов. Сообщение ОИЯИ, РЗ-96-356, Дубна, 1996, 18с.
34. Анджеевски Ю., Гледенов Ю.М., Замыслов Г.В., Кислицкий А.И., Любанский Г.Б., Пшеничный В.А., Салацкий В.И., Федосеев Н.П. — Измерение сечения реакций  $^{36}\text{Ar}(n, \alpha)^{33}\text{S}$  и  $^{50}\text{V}(n, p)^{50}\text{Ti}$  для тепловых нейтронов. Сообщение ОИЯИ РЗ-91-244, Дубна, 1991, 8с.
35. Анджеевски Ю., Вертебный В. П., Гледенов Ю. М., Гребнев А.В., Зварова Т.С., Митриков М.П., Попов Ю.П., Пшеничный В.А., Салацкий В.И., Фунг Ван Зуан. — Измерение теплового сечения реакции  $^{36}\text{Cl}(n, p)^{36}\text{S}$ . Сообщение ОИЯИ РЗ-87-319, Дубна, 1987, 8с.
36. Gledenov Yu. M., Salatski V.I., Sedyshev P.V., Sedysheva M.V., Koehler P.E., Vesna V.A., Okunev I.S. — Recent Results of Measurements of the  $^{14}\text{N}(n, p)^{14}\text{C}$ ,  $^{35}\text{Cl}(n, p)^{35}\text{S}$ ,  $^{36}\text{Cl}(n, p)^{36}\text{S}$  and  $^{35}\text{Cl}(n, \alpha)^{33}\text{P}$  Reaction Cross Sections. In: *Nuclei in the Cosmos*. (Proc. of the Third Intern.Symp. on Nucl. Astrophysics, Assergi, Italy, 8-13 July, 1994). American Institute of Physics, New York, p. 173-177.
37. Гледенов Ю. М., Салацкий В. И., Седышев П. В., Стемпиньски М., Шаланьски П.И.— Измерение сечения реакции  $^{35}\text{Cl}(n, p)^{35}\text{S}$  для тепловых нейтронов и параметры резонансов при энергиях 398 и 4249 эВ. *ЯФ*, 1999, т. 62, с. 877-885.
38. Andrzejewski J., Gledenov Yu. M., Popov Yu. P., Salatski V.I., Pshenichnyi V.A.— The cross section of the  $^7\text{Be}(n, p)^7\text{Li}$  reaction at 24.5 keV. *Z. Phys.*, 1991, v. A340, p. 105-106.

39. Gledenov Yu. M., Kvitek J., Marinova S., Popov Yu. P., Rigol J., Salatski V. I. — Study of the  $^{22}\text{Na}(n, p)^{22}\text{Ne}$  Reaction in the Neutron Energy Range up to 1 keV. Nuclear Data for Science and Techn. ECSC, EEC, EAEC, Brussels and Luxemburg, 1983, p. 150-151.
40. Гледенов Ю. М., Мицина Л. В., Митриков М., Попов Ю. П., Риголь Х., Салацкий В. И., Фунг Ван Зуан. — Реакция  $^{35}\text{Cl}(n, p)^{35}\text{S}$  и протонные ширины резонансов при энергиях 398 и 4249 эВ. Сообщение ОИЯИ РЗ-89-351, Дубна, 1989, 18с.
41. Гледенов Ю. М., Кузнецова Л. В., Попов Ю. П., Риголь Х., Салацкий В. И. — Исследование реакций  $^{40}\text{K}(n, \alpha)^{37}\text{Cl}$  и  $^{40}\text{K}(n, p)^{40}\text{Ar}$  на тепловых и резонансных нейтронах. Сообщение ОИЯИ, РЗ-85-275, Дубна, 1985, 7с.
42. 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. 3-7.
43. Yu. M. Gledenov, P. E. Koehler, J. Andrzejewski, Yu. P. Popov, R. Yu. Gledenov. — Statistical analysis of  $\alpha$ -particle widths of neutron resonances in  $^{147}\text{Sm}(n, \alpha)$  reaction. 9 International Seminar on Interaction of Neutrons with Nuclei. Neutron Spectroscopy, Nuclear Structure, Related Topics. ISINN-9, Dubna, May 23-26, 2001, E3-2001-192, p. 364-371.
44. Gledenov Yu. M., Koehler P. E., Andrzejewski J., Popov Yu. P., Gledenov R. Yu. —  $^{147}\text{Sm}(n, \alpha)$  Cross Section Measurements from 3 to 500 keV: Resonance Neutrons. In : Proc. of Intern. Conf. on Nuclear Data for Science and Technology (ed. K. Shibata) October 7 – 12, 2001. V.1, p. 358-361.
45. Антонов А., Гледенов Ю. М., Маринова С. Г., Попов Ю. П., Риголь Х. — Исследование реакции  $(n, \alpha)$  на ядрах  $^{143}\text{Nd}$  и  $^{147}\text{Sm}$  с высоким разрешением по энергии нейтронов. ЯФ, 1984, т. 39, с. 794-800.
46. Гледенов Ю. М., Жак А., Маринова С., Митриков М., Попов Ю. П.,

- Фунг Ван Зуан, Чадраабал И. — Спектры  $\alpha$ -частиц в резонансах реакции  $^{147}\text{Sm}(n,\alpha)^{144}\text{Nd}$  и вопрос об отсутствии  $\alpha_0$ -переходов в этой реакции на тепловых нейтронах. ЯФ, 1985, т. 41, с. 837-842.
47. Антонов А., Балабанов Н.П., Гледенов Ю. М., Пак хон Чер, Попов Ю.П. — Реакция  $(n, \alpha)$  и новая область альфа-распада компаунд-состояний ядер. ЯФ, 1978, т. 27, с. 18-28.
48. Andrzejewski J., Gledenov Yu.M., Koehler P.E., Guber K.H., Rausher T. —  $^{147}\text{Sm}(n,\alpha)$  cross section measurements from 3 eV to 500 keV: Implications for explosive nucleosynthesis reaction rates. 8 International Seminar on Interaction of Neutrons with Nuclei. Neutron Spectroscopy, Nuclear Structure, Related Topics. ISINN-8, Dubna, May 17-20, 2000 E3-2000-192, p. 146-152.
49. Koehler P.E., Gledenov Yu.M., Andrzejewski J., Guber K.H., Raman S., Rausher T. Improving Explosive Nucleosynthesis Models Via  $(n,\alpha)$  Measurements— Nucl. Phys., 2001, v. A 688, p.86с-89с.
50. Антонов А., Гледенов Ю.М., Зварова Т.С., Попов Ю.П., Риголь Х., Весна В.А., Лобашев В.М., Окунев И.С., Смотрицкий Л.М., Шульгина Е.В. — Исследование угловых корреляций в реакции  $(n, p)$ . В сб. "Нейтронная физика", т.1, с. 130-134. ЦНИИатоминформ, М., 1988.
51. Gledenov Yu.M., Machrafi R., Oprea A.I., Salatski V.I., Sedyshev P.V., Szalanski P.I., Vesna V.A., Okunev I.S.— A search for P-odd and P-even correlations in the  $^{35}\text{Cl}(n, p)^{35}\text{S}$  reaction. Nucl. Phys., 1999, v. A 654, p. 943с - 948с.
52. Весна В. А., Гледенов Ю. М., Окунев И. С., Опря А., Салацкий В. И., Седышев П. В., Шаланьски П. — Измерение коэффициента асимметрии вперед-назад в реакции  $^{35}\text{Cl}(n,p)^{35}\text{S}$  на резонансных нейтронах. Сообщения ОИЯИ, РЗ-2002-175, Дубна, 2002, 12с.



53. Gledenov Yu.M., Oprea A.I., Salatsky V.I., Sedyshev P.V., Szalanski P.I. — Asymmetry coefficients in (n, p) reactions. In: VI Intern. Seminar on Inter. of Neutron with Nuclei “Neutron Spectroscopy, Neutron Structure and Related Topic”, Dubna, E3-98-202, 1998, p. 327-331.
54. Gledenov Yu.M., Machrafi R., Oprea A.I., Popov Yu.P., Sedyshev P.V. — A study of angular correlation in (n,p) reaction. In: VII Intern. Seminar on Inter. of Neutron with Nuclei “Neutron Spectroscopy, Neutron Structure and Related Topic”, Dubna, E3-98-212, 1999, p. 295-302.
55. Весна В. А., Окунев И. С., Песков Б.Г., Шульгина Е.В., Антонов А.Д., Анджеевски Ю., Гледенов Ю. М., Митриков М.П., Попов Ю.П. — Исследования несохранения Р-четности в реакции  ${}^6\text{Li}(n,\alpha){}^3\text{H}$  с поляризованными нейтронами. Письма в ЖЭТФ, 1990, т. 52, с. 660-662.
56. Andrzejewski J., Antonov A.D., Gledenov Yu. M., Mitrikov M.P., Popov Yu.P., Okunev I. S., Peskov B.G., Shul'gina E.V., Vesna V.A. — Study of parity violation in the  ${}^6\text{Li}(n,\alpha){}^3\text{H}$  reaction with polarized neutrons. In: Capture gamma-ray spectroscopy, Pacific Grove, CA 1990, Ed. R.W.Hoff. AIP Conf. Proc. 238, N.Y., p. 808.
57. Vesna V.A., Gledenov Yu. M., Okunev I. S., Parzhitskii S.S., Popov Yu.P., Shul'gina E.V.— P-odd correlations in the reactions  ${}^6\text{Li}(n,\alpha){}^3\text{H}$  and  ${}^{10}\text{B}(n,\alpha){}^7\text{Li}$  with polarized neutrons. In: 1992 Intern. Nucl. Phys. Conf. , July 26 - Aug. 1, Wiesbaden, Germany. Ed. U.Grundinger, GSI, p.1.4.10.
58. Гледенов Ю. М., Весна В. А., Несвижевский В.В., Петухов А.К., Седышев П.В., Солднер Т., Шульгина Е.В., Циммер О.— Исследование асимметрии вылета тритонов в реакции  ${}^6\text{Li}(n,\alpha){}^3\text{H}$  с тепловыми поляризованными нейтронами. Сообщение ОИЯИ, РЗ-2002-151, Дубна, 2002, 8 с.

59. Gledenov Yu. M., Vesna V.A., Shul'gina E.V., Sedyshev P.V., Nesvizhevski V.V., Petukhov A.K., Soldner T., Zimmer O.— Recent results on the measurements of the P-odd correlations in the capture of slow polarized neutrons by  ${}^6\text{Li}$  and  ${}^{10}\text{B}$ . In: Proc. of the 2-nd Intern. School on Contemporary Physics. Ulaanbaatar, Mongolia, 9-19 Sept. 2002, p. 39-51.
60. Весна В. А., Гледенов Ю. М., Лебедев-Степанов П.В., Окунев И.С., Сняжков А.В., Чувильский Ю.М., Шульгина Е.В.—Поиск нарушения пространственной четности в  $\gamma$ -переходе  ${}^7\text{Li}^* \rightarrow \gamma(M1) \rightarrow {}^7\text{Li}$  ( $E_\gamma=0,478$  МэВ). ЯФ, 1999, т. 62, с. 565-576.
61. Весна В. А., Гледенов Ю. М., Лебедев П.В., Окунев И.С., Сняжков А.В., Чувильский Ю.М., Шульгина Е.В.—Изучение несохранения P-четности на  $\gamma$ -квантах  $E_\gamma=0,478$  МэВ в выходном канале реакции  ${}^7\text{Li}^* \rightarrow \gamma(M1) \rightarrow {}^7\text{Li}$ . Препринт ПИЯФ, Гатчина, 1996, 10 с.
62. Vesna V.A., Gledenov Yu. M., Nesvizhevski V.V., Petukhov A.K., Sedyshev P.V., Soldner T., Shul'gina E.V.— The study of P-odd asymmetry  $\alpha_{pn}(s_n k_\gamma)$  in the  ${}^{10}\text{B}(n,\alpha){}^7\text{Li}^* \Rightarrow \gamma \Rightarrow {}^7\text{Li}(g. s.)$  reaction. ISINN-10. Neutron Spectroscopy, Nuclear Structure, Related Topics. E3-2003-10, Dubna, 2003, p. 52-59 .
63. Весна В. А., Гледенов Ю. М., Несвижевский В. В., Петухов А.К., Седышев П. В., Солднер Т., Шульгина Е. В. — Измерение P-нечетной асимметрии вылета  $\gamma$ -квантов в реакции  ${}^{10}\text{B}(n,\alpha){}^7\text{Li}^* \rightarrow \gamma \rightarrow {}^7\text{Li}(o. s.)$ . Изв. АН. Сер.физ., 2003, т.67, с. 118-122.
64. Весна В. А., Гледенов Ю.М., Седышев П.В., Шульгина Е. В. — Новые детекторы гамма-квантов для изучения P-нечетных эффектов интегральным методом. Препринт ПИЯФ №2480, Гатчина, 2002, 11с.

*Макет Н. А. Киселевой*

Подписано в печать 21.08.2003.

Формат 60 × 90/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 2,5. Уч.-изд. л. 2,36. Тираж 100 экз. Заказ № 54054.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований  
141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6.

E-mail: [publish@pds.jinr.ru](mailto:publish@pds.jinr.ru)

[www.jinr.ru/publish/](http://www.jinr.ru/publish/)