

Ш - 251



ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

3-82-366

ШАРАПОВ

Эдуард Иванович

**НЕЙТРОННАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ
МАЛОНУКЛОННЫХ СИСТЕМ**

Специальность: 01.04.16 – физика атомного ядра
и элементарных частиц

Автореферат диссертации на соискание ученой
степени доктора физико-математических наук

Дубна 1982

Работа выполнена в Лаборатории нейтронной физики
Объединенного института ядерных исследований.

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук,
старший научный сотрудник

И.Я. БАРИТ

доктор физико-математических наук,
старший научный сотрудник

В.Б. БЕЛЯЕВ

доктор физико-математических наук,
профессор

В.П. ВЕРТЕБНЫЙ

Ведущая организация - Институт атомной энергии им. И.В. Курчатова,
Москва.

Защита состоится " " _____ 198 г. в " " часов
на заседании специализированного совета Д.047.01.05 при
Лаборатории нейтронной физики и Лаборатории ядерных реакций
Объединенного института ядерных исследований по адресу:
г. Дубна, Московской обл., Лаборатория нейтронной физики ОИЯИ,
конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

Автореферат разослан " " _____ 1982 г.

Ученый секретарь

специализированного совета

Ю.В. ТАРАН

1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Малонуклонные исследования находятся на передовых рубежах современной физики. Периодически раз в два года проводятся Международные конференции по свойствам малонуклонных ядер. Легчайшие ядра выделены простотой структуры и редкостной возможностью безмодельного расчета свойств, исходя из первичных нуклон-нуклонных взаимодействий. К настоящему времени ряд теоретических методов, таких как вариационный, К-гармоник, уравнений Фаддеева и некоторые другие, развит настолько, что с их помощью, используя реалистические ядерные силы, можно рассчитывать энергии связи ядер, среднеквадратичные радиусы, зарядовые формфакторы, длины и фазы рассеяния, вероятности электромагнитных переходов и сечения радиационного захвата нейтронов и других реакций. Экспериментальные значения соответствующих величин являются пробными камнями теории. Их уточнение, либо расширение их круга за счет новых, ранее не определенных величин, представляет важную задачу и, несомненно, актуально в свете наблюдаемого прогресса теории.

Однако, некоторые экспериментальные величины, характеризующие свойства малонуклонных систем в процессах взаимодействия с медленными нейтронами, трудноизмеримы. К их числу относятся значения и энергетические зависимости сечений радиационного захвата нейтронов дейтронами и ядрами гелия-3, длины рассеяния нейтронов на трехнуклонных ядрах, поляризационные сечения взаимодействия нейтронов с легчайшими ядрами. Для них экспериментальная информация практически отсутствовала к моменту начала данного исследования. Измерение соответствующих величин и детальное сравнение результатов эксперимента с теорией малонуклонных систем являлось, таким образом, насущной задачей.

Цель работы состояла в том, чтобы исследовать свойства малонуклонных ядерных систем в реакциях с нейтронами низких энергий; основные усилия были направлены на:

- 1) систематическое изучение сечений радиационного захвата нейтронов легчайшими ядрами: дейтронами и гелием-3;
- 2) измерение для малонуклонных ядер длин рассеяния нейтронов в состояниях с определенным спином;
- 3) изучение особенностей энергетической зависимости сечений реакций ${}^3\text{He}(n, p)t$ и ${}^6\text{Li}(n, n)l$ для s -волновых нейтронов;

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
БИБЛИОТЕКА

4) исследование возбужденных уровней легчайших ядер: гелия-4, лития-8; лития-7 - вблизи энергии связи нейтрона.

Базовые установки и экспериментальные методики. Исследования выполнены на уникальной физической установке - импульсном реакторе на быстрых нейтронах ИБР-30, методом времени пролета с использованием обоих режимов работы этой установки: реакторного и бустерного в сочетании с ускорителем электронов ЛУЭ-40. Использование импульсного реактора для селекции нейтронов по энергии стало определяющим фактором в преодолении многих трудностей изучения ряда ранее недоступных для эксперимента процессов. Вторым фактором явилась реализация оптимальных методик измерений сечений рассеяния и радиационного захвата с применением особо чистых твердых, газовых и криогенных изотопных мишеней, а также специально созданных различных детекторов нейтронов и гамма-лучей. Третьим фактором было применение автоматизированных средств получения и обработки экспериментальной информации, созданных в Измерительном центре Лаборатории нейтронной физики ОИЯИ.

Научная новизна работы. Большинство экспериментальных результатов получено впервые, в их числе: сечение рассеяния тепловых нейтронов ядрами ${}^3\text{He}$, энергетический ход сечения рассеяния $\sigma_n({}^3\text{He})$ в области энергий 1 кэВ - 100 кэВ; полное сечение $\sigma_t({}^3\text{He})$ в диапазоне 1 кэВ - 100 кэВ, сечение радиационного захвата $\sigma_{nr}({}^3\text{He})$ для энергий в интервале 1 - 70 кэВ, энергетическая зависимость сечения реакции ${}^3\text{He}(n, p)\text{T}$ в диапазоне 25 - 150 кэВ, энергетическая зависимость сечения рассеяния нейтронов $\sigma_n({}^6\text{Li})$ в интервале 0,7 - 80 кэВ, поляризационное сечение рассеяния нейтронов ядрами ${}^7\text{Li}$. Физические выводы о свойствах малонуклонных ядер, сообщаемые в разделе результатов, являются либо новыми, либо существенно дополняют известные ранее закономерности. Новой является постановка задачи определения дублетной и квартетной компонент (nd)-захвата с обоснованием эксперимента по измерению круговой поляризации гамма-квантов радиационного захвата поляризованных тепловых нейтронов ядрами неполяризованной мишени дейтерия.

Научная и практическая ценность. Некоторые из изученных процессов взаимодействия медленных нейтронов с легчайшими ядрами играют большую роль в прикладных задачах. Радиационный захват нейтронов дейтронами существенен для тяжеловодных реакторов. Нейтронные сечения таких реакций, как: ${}^3\text{He}(n, p)\text{T}$, ${}^6\text{Li}(n, \text{T}){}^4\text{He}$ - важны для многих практических применений, так как относятся к числу стандартных. Сечения взаимодействия нейтронов с изотопами ${}^6\text{Li}$ и ${}^7\text{Li}$

имеют большое значение для воспроизводства трития при управляемом термоядерном синтезе. Новые экспериментальные данные по сечениям указанных реакций, полученные в диссертации, являются определенным вкладом в проблему ядерно-физических констант, решаемую многими коллективами страны с целью удешевления производства ядерной энергии.

Научная ценность исследований, выполненных под руководством и при непосредственном участии автора, состоит в систематическом экспериментальном исследовании процессов взаимодействия нейтронов с легчайшими ядрами и в установлении ряда закономерностей этих процессов. Широкое использование методов нейтронной спектроскопии для систематического исследования легчайших ядер с обращением к процессам, ранее недоступным для измерения, привело к созданию нового направления на стыке нейтронной спектроскопии ядер и физики малонуклонных систем. Достигнутые результаты показали перспективность этого направления исследований на нейтронных спектрометрах с импульсными реакторами ИБР-30 и ИБР-2 в качестве источников нейтронов.

Положения и результаты, вынесенные на защиту

1. Использование импульсного реактора ИБР в сочетании с оптимальными методиками измерения парциальных нейтронных сечений является мощным средством развития светосильной нейтронной спектроскопии, направленной на изучение свойств ядер, проявляющихся как в труднодоступных, редких реакциях, так и в экспериментах с малыми эффектами.

2. Благодаря достижимой только в методе времени пролета исключительной детальности информации о различных нейтронных сечениях, а также, благодаря привлечению к анализу результатов современной теории малонуклонных систем, эксперименты с медленными нейтронами дали важную информацию о свойствах легчайших ядер.

3. Проведены экспериментальные исследования процессов радиационного захвата нейтронов дейтронами и ядрами гелия-3. Тепловое сечение захвата нейтронов дейтронами измерено с погрешностью 4% прямым методом регистрации гамма-квантов радиационного захвата. Проанализирована возможность определения дублетной и квартетной компонент (nd)-захвата в опыте с измерением круговой поляризации гамма-лучей. Измерено сечение радиационного захвата нейтронов ядрами гелия-3 в интервале энергий 0,025 эВ - 70 кэВ, и дано объяснение обнаруженной энергетической зависимости.

• 4. Установлены закономерности в радиационном захвате нейтронов легчайшими ядрами. Резкое уменьшение сечения при переходе от протон-

ной мишени к более сложным ядрам объяснено правилом отбора по симметрии волновых функций ядер, действующим при захвате нейтрона с испусканием гамма-излучения мультипольности $M1$. Получены указания на существенную роль обменных токов в процессах захвата нейтронов легчайшими ядрами.

5. Наибольший интерес для теории малонуклонных систем представляют полученные заключения о волновых функциях основных состояний ядер ${}^3\text{He}$ и ${}^4\text{He}$. Примесь состояния смешанной симметрии в волновой функции ядра ${}^4\text{He}$ установлена на уровне 0,14%. Столь незначительная примесь к главному S -состоянию ${}^4\text{He}$ играет большую роль, так как снимает запрет по симметрии волновых функций и ведет к экспериментально наблюдаемому значению сечения реакции ${}^3\text{He}(n, \gamma){}^4\text{He}$ для S -волновых нейтронов.

6. Измерены поляризационное сечение рассеяния нейтронов ядрами лития-7, сечения рассеяния нейтронов ядрами гелия-4, лития-6 и лития-7. Экспериментально определены и сравнены с теорией для легчайших ядер длины рассеяния нейтронов в состояниях с определенным полным спином. Установлена сильная спиновая зависимость длин рассеяния для всех изученных ядер. При сравнении полученных значений синглетной и триплетной длин рассеяния нейтрона на ${}^3\text{He}$ с теоретическими расчетами, использующими простейшие сепарабельные нуклон-нуклонные потенциалы в уравнениях Фаддеева-Якубовского, показана необходимость дальнейшего совершенствования подобных подходов.

7. Существенно уточнены имевшиеся экспериментальные данные для отклонения энергетического хода сечения реакции ${}^3\text{He}(n, p)\text{T}$ от закона $1/\nu$, и сделан вывод об одночастичном характере первого возбужденного уровня ${}^4\text{He}$, играющего роль отрицательного резонанса при взаимодействии нейтронов с гелием-3. Сечение реакции ${}^3\text{He}(n, p)\text{T}$ измерено до энергий 150 кэВ с точностью 3% и рекомендовано в качестве стандарта для практических применений.

8. Получены экспериментальные указания на отсутствие отрицательного резонанса в сечениях взаимодействия S -волновых нейтронов с литием-6 вопреки большому значению теплового сечения реакции ${}^6\text{Li}(n, \alpha)\text{T}$. Эту реакцию для S -волновых нейтронов с литием-6 можно объяснить как прямой процесс, а большое различие длин рассеяния нейтрона для ${}^6\text{Li}$ и ${}^7\text{Li}$ в разных спиновых состояниях - как следствие наличия уровней аномальной (в терминологии оболочечной модели) четности в области положительных энергий. Установлены возможные характеристики таких уровней ${}^7\text{Li}$ и ${}^8\text{Li}$.

Апробация работы и публикации. Результаты исследования докладывались на Всесоюзных конференциях по нейтронной физике (Киев, 1977 и 1980гг.), на III Международной школе по нейтронной физике (Алушта, 1978г.), Международном симпозиуме по проблеме нескольких тел в ядерной физике (Дубна, 1979г.), Международной конференции по ядерным сечениям для технологии (Ноксвилл, 1979), Международной конференции по ядерным данным для науки и технологии (Антверпен, 1982г.).

Основные материалы диссертации опубликованы в печатных работах /1-21/.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, шести глав, подразделенных на 31 параграф, в которых изложен основной материал работы, заключения, списка литературы и приложения - всего на 231 странице машинописного текста, включая 58 рисунков, 23 таблицы и библиографию из 187 наименований.

II. КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении показана актуальность изучения свойств малонуклонных ядер, обоснована необходимость использования медленных нейтронов для этой цели и определены задачи данного исследования. Дана общая характеристика базовой установки и использованных экспериментальных методов. Кратко перечислены полученные экспериментальные результаты и выводы, показана научная новизна работы, описана структура диссертации.

Глава I является вводной в проблему и состоит из пяти параграфов, посвященных теоретическим подходам к проблеме нескольких тел в ядерной физике, роли нейтронов в получении экспериментальной информации о свойствах малонуклонных систем, прикладному значению ядерных реакций на легчайших ядрах под действием нейтронов и актуальным задачам в области изучения свойств легчайших ядер с помощью нейтронов.

Проанализированы основные достижения в расчетах малонуклонных систем на основе интегральных уравнений Фаддеева-Якубовского, методами гиперсферических функций и вариационным, использующими современные реалистические нуклон-нуклонные потенциалы. Изложены основные подходы к расчету сечений раздвационного захвата нейтронов малонуклонными ядрами.

Сделанный краткий обзор экспериментов, выполненных на легких ядрах с помощью нейтронов, показал, что они могут давать существенную информацию о длинах рассеяния нейтронов, вероятностях электромагнитных переходов и величинах сечений ряда процессов, характерис-

тиках возбужденных уровней, но большинство полученных до настоящей работы результатов относилось к протонам, реже - к дейтронам, а для четырехнуклонной системы нейтронные данные при малых энергиях практически отсутствовали. В этой связи сформулированы основные задачи исследования малонуклонных систем с помощью медленных нейтронов.

Глава II содержит описание оборудования и аппаратуры, использованных в эксперименте. Сообщены краткие сведения об импульсном реакторе ИБР-30 с инжектором-ускорителем электронов ЛУЭ-40 как источнике нейтронов для исследований методом времени пролета, в том числе данные о нейтронных потоках.

Описаны принцип работы, конструкция и характеристики 210-литрового жидкостного сцинтиляционного детектора нейтронов, созданного для опытов по пропусканию образцов. Детектор обладает низкой (менее 0,1%) чувствительностью к гамма-фону при высокой, 20-40%, нейтронной эффективности в области энергий ниже 100 кэВ.

Дано описание сцинтиляционного детектора, предназначенного для регистрации рассеянных нейтронов при спектрометрии по времени пролета. Детектор изготовлен на основе слоев плексигласа и светосостава $ZnS(Ag)$ с бором-10. Его эффективность равна 1-2% в диапазоне энергий 1 МэВ - 1 кэВ, телесный угол $3,2\pi$, время жизни нейтронов в детекторе ≈ 6 мкс.

Сообщены основные сведения о применявшихся стандартных гамма-спектрометрах с кристаллами $NaI(Tl)$ и $Ge(Li)$ и об использованных в экспериментах установке для поляризации медленных нейтронов (1ж) и установке для поляризации ядер: поляризатор, принцип действия которого основан на методе (2ж) пропускания нейтронов через поляризованную протонную мишень, обеспечивал поляризацию нейтронного пучка около 55% в области энергий 1 эВ - 100 кэВ, ядра поляризовались при сверхнизких температурах ~ 30 мК в криостате с растворением гелия-3 в гелии-4 (3ж).

Глава III посвящена экспериментальному и теоретическому изучению процесса радиационного захвата нейтронов дейтронами и ядрами гелия-3. В вводном параграфе главы проанализированы методы измерения эффектив-

ных сечений радиационного захвата и некоторые результаты: известны два прямых измерения (с помощью $NaI(Tl)$ детекторов) реакции $D(n,\gamma)T$ с противоречивыми значениями 350 и 600 мкбн для величины сечения $\sigma_{n\gamma}(D)$ и одно сообщение с результатом $\sigma_{n\gamma}(^3He) = 60 \pm \pm 30$ мкбн для гелия-3 без физических выводов. В настоящей работе выполнены измерения сечения $\sigma_{n\gamma}(D)$ посредством регистрации гамма-лучей радиационного захвата нейтронов $Ge(Li)$ -детектором в геометрии, показанной на рис.1.

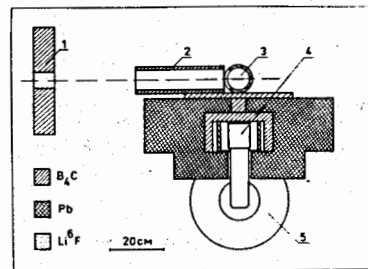


Рис.1. Геометрия измерений сечения $\sigma_{n\gamma}$: 1,2 - коллиматоры нейтронного пучка, 3 - образец, 4 - детектор в защите, 5 - криостат детектора.

Высокое разрешение спектрометра с $Ge(Li)$ -детектором способствовало преодолению трудностей, связанных с измерением малого сечения при наличии фонов. Наблюденный гамма-переход с энергией $E_\gamma = 6,26$ МэВ (энергия связи нейтрона в тритоне), показан на рис.2.

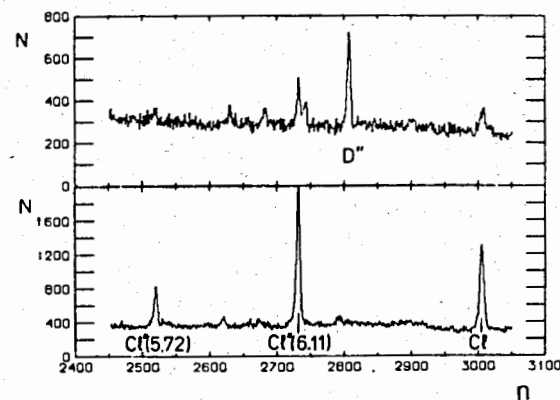


Рис.2. Участок спектра гамма-излучения в реакции $D(n,\gamma)T$ в области энергий около 6 МэВ. Вверху - спектр для образца $D_2O(H_2O)$, внизу - $D_2O(H_2O + NaCl)$.

1ж) Алфименков В.П., Андросов А.В., Иваненко А.И., Мареев Ю.Д. ОИЯИ 13-9396, Дубна, 1975.

2ж) Таран Ю.В., Шапиро Ф.Л. ЖЭТФ, 1963, т.44, с.2185.

3ж) Алфименков В.П., Овчинников О.Н. ОИЯИ Р8-9168, Дубна, 1975.

Эксперимент выполнен с тяжелой водой и методически поставлен таким образом, что позволил реализовать недавно возникшую возможность нормировки на сечение $\sigma_{ny}(Cl)$ для гамма-перехода в хлоре с энергией 6,11 МэВ - очень близкой к E_D - и тем самым снизить влияние систематических погрешностей.

Результаты измерений сечения $\sigma_{ny}(D)$ различными методами (прямой - данная работа) приведены для сравнения в таблице.

Таблица. Результаты измерений $\sigma_{ny}(D)$ разными методами

| Метод | Прямой | Диффузионная длина | Активация |
|-------------------------|--------------|--------------------|-----------------------------|
| $\sigma_{ny}(D)$, мкбн | 476 ± 20 | 440 ± 45 | 570 ± 10 520 ± 9 |

Сделаны следующие выводы:

- активационный результат 570 ± 10 мкбн, по-видимому, завышен;
- остальные согласуются друг с другом в пределах точности их измерения; величину $\sigma_{ny}(D) = 476 \pm 20$, как находящуюся посередине, можно рекомендовать для практических применений;
- в настоящее время реальная погрешность экспериментального значения $\sigma_{ny}(D)$ составляет 4%;
- экспериментальное значение согласуется с теоретической величиной $\sigma_{теор.} = 520 \pm 50$ мкбн, рассчитанной в рамках микроскопической теории с использованием сепарабельных нуклон-нуклонных потенциалов при решении интегрального уравнения Фаддеева и учетом мезонных обменных токов (последние добавляют согласно теории 115 мкбн); количественное определение вклада обменных токов в сечение $\sigma_{ny}(D)$ подлежит дальнейшему уточнению.

В диссертационной работе выполнено первое в литературе теоретическое решение задачи определения величины сечения радиационного захвата тепловых нейтронов ядрами гелия-3 и первое детальное экспериментальное изучение этого процесса. В предположении, что это - прямой процесс, сечение его вычислено по теории возмущений посредством расчета матричного элемента оператора магнитного дипольного момента $\hat{M}_1 = [M_p \sum \sigma_z^p + M_n \sum \sigma_z^n] e\hbar/2mc$ (здесь M_p и M_n - магнитные моменты протона и нейтрона, σ_z - z-компонента матриц Паули) между основным состоянием ядра-продукта ^4He и состоянием $(n\ ^3\text{He})$ -системы в непрерывном спектре. Вклад в сечение от матричного элемен-

та более сложного, двухчастичного оператора M_{T2} (обменные токи), не учитывался. С использованием гауссового приближения для S' -состояний смешанной симметрии - малых компонент волновых функций ядер ^3He и ^4He , антисимметричных при перестановке пространственных координат - для сечения получено выражение

$$\sigma_{ny}(^3\text{He}) = \frac{350}{(Mc^2)^{3/2}} \frac{e^2}{(\hbar c)^2} (M_p - M_n)^2 \frac{E_B^3}{\sqrt{E_n}} \frac{\alpha^7 t^{10}}{(\alpha^2 + \frac{3}{4} t^2)^{10}} P_{^3\text{He}}(S') P_{^4\text{He}}(S'), \quad (I)$$

в котором E_B - энергия связи нейтрона в ^4He , E_n - кинетическая энергия нейтрона, $P(S')$ - вес S' -состояния в волновой функции ядра, α и t - известные параметры: величины обратных эффективных размеров ядер ^4He и ^3He . Пользуясь формулой (I), можно извлекать значения вкладов S' -состояний, если известно экспериментальное значение сечения.

Измерение сечения $\sigma_{ny} \approx 10^{-5}$ бн при конкуренции (np) -процесса с сечением $\sigma_{np} \approx 10^4$ бн - трудная задача. Она была решена с применением газовых образцов и детектора с кристаллом $\text{NaI}(Te)$ (размерами $\phi 100 \times 100$), тщательно защищенного от фоновых нейтронов и гамма-лучей. Измерения методом времени пролета были выполнены не только в тепловой области, но и впервые для нейтронов с энергией 1-70 кэВ. В последнем случае была применена изотопная мишень жидкого гелия-3, приготовленная с помощью низкотемпературного криостата. Для килоэлектронвольтных нейтронов использование жидкой, а не газовой мишени целесообразнее ввиду уменьшения сечения конкурирующей реакции.

Захват нейтронов гелием-3 сопровождается испусканием гамма-квантов с энергией $E_B = 20,5 \text{ МэВ}$, которым соответствует пик в аппаратном спектре импульсов $\text{NaI}(Te)$ -детектора (рис.3), полученном с мишенью ^3He в пучке нейтронов. В спектре с эквивалентным рассеивателем на месте мишени (крестики) пик отсутствует. Результаты для сечения $\sigma_{ny}(E)$ представлены на рис.4. Наблюдаемая энергетическая зависимость сечения получила простое объяснение: первоначальное уменьшение сечения σ_{ny} с ростом энергии нейтронов - это известный закон $1/v$ для сечения реакции, вызываемой S -волновыми нейтронами; последующий рост сечения вызван p -волновыми нейтронами, для которых ожидается энергетическая зависимость вида $\sim \sqrt{E_n}$.

Сравнение экспериментального значения сечения $\sigma_{ny}(^3\text{He}) = 27 \pm 9$ мкбн в тепловой точке с расчетом по формуле (I) дало (при известном значении $P_{^3\text{He}}(S') \approx 2\%$) экспериментальную оценку

$$P_{^4\text{He}}(S') \approx 0,14\% \quad (2)$$

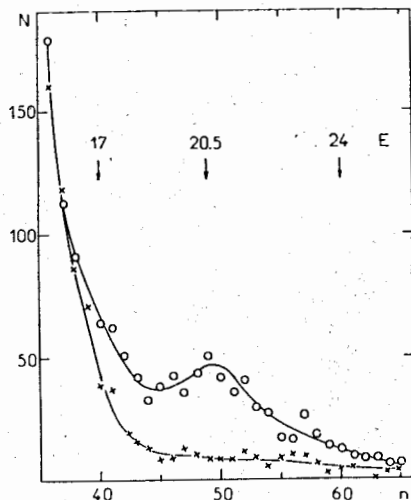


Рис.3. Амплитудный спектр импульсов детектора $\text{NaI}(\text{Tl})$, полученный с мишенью ${}^3\text{He}$ при измерении сечения $\sigma_{n\gamma}$ для нейтронов с энергией $E = 70$ кэВ.

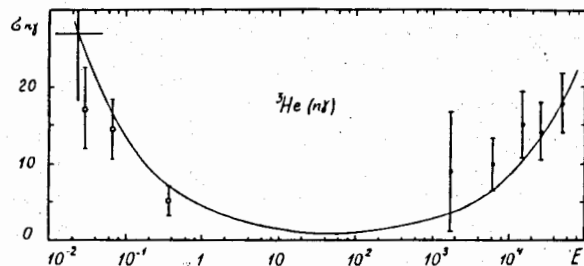


Рис.4. Эффективное сечение $\sigma_{n\gamma}({}^3\text{He})$ (в микробарнах) в зависимости от энергии нейтронов E (в электронвольтах). Кружочки - измерение с газовой мишенью, точки - с мишенью жидкого гелия-3.

для веса состояния промежуточной симметрии в волновой функции ядра ${}^4\text{He}$. Оценка (2) справедлива с точностью до фактора ≈ 2 из-за неопределенности других параметров в формуле (1). Она согласуется с теоретической из вариационных расчетов с использованием реалистических NN -потенциалов.

Настоящие эксперименты и более позднее измерение в тепловой точке с результатом $\sigma_{n\gamma}({}^3\text{He}) = 60 \pm 12$ мкбн [1*] инициировали создание теории [2*], в которую включены мезонные обменные токи. Но и эта теория не дала однозначного результата, описав как значение $\sigma_{n\gamma}({}^3\text{He})$ работы [1*] с помощью осциллирующих волновых функций, так и значение настоящей работы с помощью экспоненциальной волновой функции He . Таким образом, теоретические оценки сечения $\sigma_{n\gamma}({}^3\text{He})$ остались приближенными. Желателен более строгий расчет, например, с использованием реалистических NN -потенциалов в методе интегральных уравнений Фаддеева-Якубовского. С появлением такого расчета станет актуальным дальнейшее уточнение экспериментального значения $\sigma_{n\gamma}({}^3\text{He})$.

В заключение главы III предложен и обоснован эксперимент по определению дублетной, ${}^2\sigma_{n\gamma}$, и кватрнетной, ${}^4\sigma_{n\gamma}$, компонент сечения радиационного захвата тепловых нейтронов дейтронами, $\sigma_{n\gamma}(\text{D})$:

$$\sigma_{n\gamma}(\text{D}) = {}^2\sigma_{n\gamma} + {}^4\sigma_{n\gamma} = \frac{1}{3}\sigma_{n\gamma}^- + \frac{2}{3}\sigma_{n\gamma}^+$$

В этой формуле $\sigma_{n\gamma}^\pm$ - сечения, соответствующие захватным состояниям (nd) -системы с полным спином $J^\pm = I \pm 1/2$ ($I = 1$ - спин дейтрона). Теоретические предсказания для отношения $\chi = \sigma_{n\gamma}^-/\sigma_{n\gamma}^+$ лежали в диапазоне $\chi = I - 20$ в зависимости от используемого варианта теории. Экспериментальная информация по этому вопросу полностью отсутствует.

В качестве первого эксперимента в работе предложено провести опыт по циркулярной поляризации гамма-квантов захвата неполяризованной дейтронной мишенью поляризованных тепловых нейтронов. Показано, что в случае $\text{D}(n, \gamma)\text{T}$ реакции необходимо учитывать интерференцию переходов соответствующих спинов J^\pm . В рамках формализма статистических тензоров получено следующее выражение для коэффициента циркулярной поляризации

$$P_\gamma = f_n \cos\theta (\chi \pm 2\sqrt{\chi+5}) / (3\chi+6), \quad (3)$$

показывающее, что предложенный эксперимент определит только интервал значений χ . Дальнейшее уточнение оценки χ потребует выполнения полного поляризационного эксперимента с поляризованной дейтронной мишенью.

[1*] Suffert M., Bertollet R. Nucl. Phys.A, 1979, v.318, p.54.

[2*] Towner I.S., Khanna F.C. Nucl. Phys.A, 1981, v.356, p.445.

В главе IV помещены материалы, связанные с исследованием для малоуклонных ядер длин рассеяния нейтронов a_j в состояниях с определенным спином. Даны основные соотношения и изложены некоторые сведения о методах измерения полных, когерентных и поляризационных сечений, необходимых для экспериментального определения длин рассеяния a_j классическим способом совместного решения нескольких уравнений.

Для ядра ${}^3\text{He}$ с комплексной синглетной длиной рассеяния ($a = A - iB$) предложен метод определения a_j по энергетической зависимости сечения рассеяния $\sigma_n(E)$ в широком, до 100 кэВ, интервале энергий нейтронов. В нулевом приближении по эффективному радиусу взаимодействия обоснована параметризация сечений вида

$$\sigma_n(E) = \pi \left[\frac{A_-^2 + B_-^2}{(1+kB_-)^2 + k^2A_-^2} \frac{3A_+^2}{1+k^2A_+^2} \right], \quad (4)$$

$$\sigma_{np}(E) = \pi \frac{A_+^2}{(1+kB_+)^2 + k^2A_+^2}, \quad (5)$$

использованная при экспериментальном определении величин $A_- = \text{Re} a_s$ и $A_+ = a_t$ (значение $B_- = \text{Im} a_s$ рассчитано по известному сечению (σ_{np}) тепл.).

Геометрия измерений сечения рассеяния $\sigma_n({}^3\text{He})$ в тепловой области и полученные результаты ($\sigma_n = 3,16 \pm 0,20$ бн) показаны на рис.5. Измерения осуществлены с тонкими газовыми образцами, чтобы преодолеть влияние мощной конкуренции со стороны реакции поглощения ${}^3\text{He}(n, p)T$ (сечение $\sigma_{np} = 5327$ бн). Измерено и сечение рассеяния нейтронов ядрами гелия-3 в области энергий 1 - 150 кэВ, результат для которого показан на рис.6. Измерения проводились на газовых образцах изотопа ${}^3\text{He}$ с применением сцинтилляционного детектора рассеянных нейтронов с большим ($\approx 3,2\pi$) телесным углом. Эталоном служили газовые образцы ${}^4\text{He}$, H_2 , CO_2 .

На основании полученных результатов в соответствии с параметризацией сечения в виде (4) определены экспериментальные значения длин ($n^3\text{He}$)-рассеяния:

$$\text{Re} a_s = A_- = 6,53 \pm 0,32 \text{ фм}, \quad a_t = A_+ = 3,62 \pm 0,15 \text{ фм} \quad (6)$$

Проведено сравнение с теоретическими значениями:

$$\text{Re} a_s = 8,05 (9,42) \text{ фм}, \quad a_t = 3,08 (3,15) \text{ фм},$$

рассчитанными Харченко и Левашовым ^{1*} посредством решения уравне-

^{1*} Харченко В.Ф., Левашов В.П. ИТФ-77-85Р, Киев, 1977.

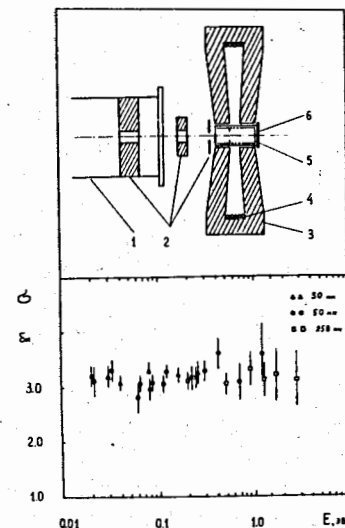


Рис.5. Схема эксперимента и результаты для полного сечения рассеяния нейтронов ядрами гелия-3 в тепловой области энергий: 1 - нейтронотвод, 2 - коллиматоры пучка, 3 - защита, 4 - гелиевые счетчики, 5 - кадмиевый экран, 6 - газовый контейнер.

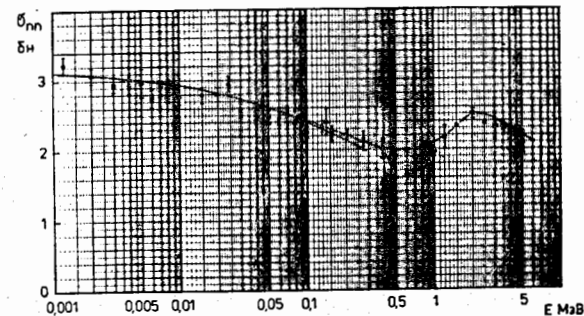


Рис.6. Сечение рассеяния нейтронов гелием-3. Черные точки - данная работа, сплошная линия - расчет по формуле (4) с параметрами (6).

ний Фаддеева-Якубовского с сепарабельными нуклон-нуклонными потенциалами с различным выбором формфакторов: экспоненциальным (значение в скобках) и Юкавы. Большая величина синглетной длины объяснена в теории притягивающим характером взаимодействия в подсистеме из четырех нуклонов с изотоспином $T = 0$ и спином $J = 0$. Экспериментальный набор (6) подтвердил это предсказание и указал на предпочтительность использования в теоретических расчетах формфактора Юкавы. Для получения лучшего количественного согласия требуется совершенствование теоретических методов исследования четырехнуклонных систем и, в частности, проведение расчетов с учетом кулоновского взаимодействия.

Для ${}^7\text{Li}$ изучен вопрос об энергетическом поведении спиновой зависимости рассеяния нейтронов. Выполнен эксперимент по пропусканию поляризованных нейтронов с энергией до 100 кэВ через поляризованную мишень лития-7. Ядра ${}^7\text{Li}$ поляризовались методом "грубой силы" при температуре $\approx 35\text{ мК}$ во внешнем магнитном поле 15 килоэрстед. Достигнутая при этом величина поляризации около 3% оказалась достаточной для выполнения эксперимента ввиду сильной спиновой зависимости сечения рассеяния $\sigma_n({}^7\text{Li})$, обнаруженной во всем исследованном интервале энергий нейтронов.

Результаты для полного и поляризационного (рис. 7) сечений $(n, {}^7\text{Li})$ -рассеяния равны

$$\sigma_n({}^7\text{Li}) = 1,06 \pm 0,03 \text{ бн}, \quad \sigma_n^{\text{пол}}({}^7\text{Li}) = 0,56 \pm 0,08 \text{ бн}$$

и для длин $(n, {}^7\text{Li})$ -рассеяния, определенных стандартным способом совместного решения нескольких уравнений, -

$$a(J^+ = 2) = -3,61 \pm 0,07 \text{ фм}, \quad a(J^- = 1) = 0,8 \pm 0,3 \text{ фм}.$$

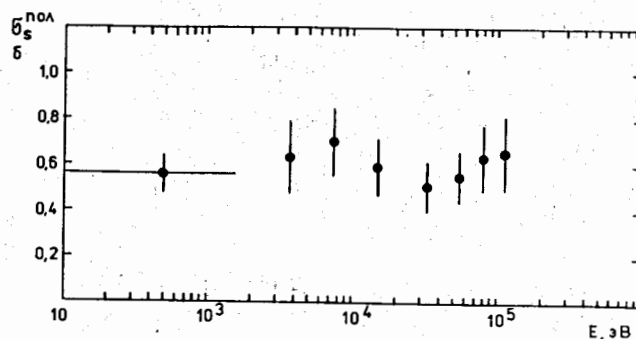


Рис. 7. Поляризационное сечение рассеяния нейтронов литием-7 в зависимости от энергии нейтронов.

Квинтетная длина рассеяния $a_5({}^7\text{Li})$ - один из немногих известных примеров с отрицательным знаком длины. Если в случае (np) -рассеяния ($a_5 = -23,75 \text{ фм}$) отрицательный знак вызван отсутствием связанного синглетного состояния (np) -системы, то отрицательный знак квинтетной длины $(n, {}^7\text{Li})$ -рассеяния может быть объяснен с помощью непосредственно ненаблюдаемого широкого одночастичного резонанса S -волновых нейтронов в области энергий $\approx 3 \text{ МэВ}$.

Уточненный набор длин рассеяния получен для изотопа ${}^6\text{Li}$, для которого были выполнены измерения сечения рассеяния нейтронов с энергией до 80 кэВ:

$$\bar{a}(J^- = 1/2) = (4,00 \pm 0,06) - i(0,53 \pm 0,02) \text{ фм}$$

$$a^+(J^+ = 3/2) = (0,65 \pm 0,03) - i(0,07 \pm 0,01) \text{ фм}.$$

Рассеяние нейтронов на ${}^6\text{Li}$ сильно зависит от полного спина системы: нейтрон + ядро-мишень, и в состоянии с $J = 1/2$ ведет себя как рассеяние от непроницаемой сферы, а в состоянии с $J = 3/2$ подавлено интерференционным воздействием от далекого уровня при положительных (по отношению к нейтронному порогу) энергиях.

В главе У обобщены результаты выполненных исследований возбужденных уровней малонуклонных ядер ${}^4\text{He}$, ${}^7\text{Li}$ и ${}^8\text{Li}$ в реакциях на медленных и промежуточных нейтронах с энергией до нескольких сот килоэлектронвольт. В вступном параграфе главы дано изложение основных элементов R -матричного одноуровневого формализма, используемых далее при анализе экспериментов. В связи с обновлением и расширением экспериментальных данных отмечена актуальность повторения зарядово-инвариантного фазового анализа свойств 4-нуклонной системы, выполненного Баритом и Сергеевым [ж].

Далее описаны измерения полного сечения, сечений (np) -реакции и рассеяния нейтронов ядрами гелия-3, выполненные впервые для энергий до 150 кэВ. Применялись газовые образцы изотопа гелия-3. Экспериментальная точность составила: для полных сечений I - 5% при энергиях I - 100 кэВ, для сечения рассеяния 3 - 4% и сечения реакции $(2 - 3)\%$. Эффективное сечение реакции ${}^3\text{He}(n, p)T$ в тепловой точке $\sigma(\text{тепл}) = 5337 \pm 8 \text{ бн}$ было получено из опытов по пропусканию образцов ${}^3\text{He}$ с различным давлением газа, а его значения при энергиях I кэВ - 150 кэВ - с помощью измерения отношения сечений реакций ${}^3\text{He}(n, p)T$ и ${}^6\text{Li}(n, T){}^4\text{He}$ и последующего использования "литие-

[ж) Барит И.Я., Сергеев В.А. ЯФ, 1971, т.13, с.1230.

вого стандарта" – прецизионных значений сечения $\sigma_{\text{Li}}(E)^{\text{Iж}}$.
 В этих измерениях использовалась импульсная ионизационная камера ^{2ж)} со слоями лития-6 в виде соединения Li_2CO_3 . Результаты представлены на рис.8, содержащем и другие данные, полученные в основном косвенными методами и с большей погрешностью. Сплошная кривая до энергии 100 кэВ на этом рисунке – расчетное сечение согласно параметризации (4) для длин рассеяния. Имеет место явно выраженное отклонение сечения реакции ${}^3\text{He}(n, p)\text{T}$ от закона $1/\sqrt{v}$, обнаруженное еще в 50-е годы А.А.Бергманом, А.И.Исаковым, Ю.П.Поповым и Ф.Л.Шапиро при измерении энергетической зависимости сечения до 25 кэВ ^{3ж)} и объясненное существованием возбужденного уровня гелия-4 с энергией 20,5 МэВ (рис.9).

Из рассматриваемых измерений в расширенном до 150 кэВ интервале энергий нейтронов определены уточненные значения

$$\alpha = (5,34 \pm 0,11) \cdot 10^{-2} \text{кэВ}^{-1/2}, \quad \beta = (2,11 \pm 0,32) \cdot 10^{-3} \text{кэВ}^{-1}$$

параметров параболы $(I + \alpha\sqrt{E} + \beta E)$, описывающей отклонение сечения (n, p) -реакции от закона $1/\sqrt{v}$ и получены характеристики

$$\gamma^{\pi} = 0^+, \quad E_{\lambda} = 20,36 \text{ МэВ}, \quad \gamma_n^2 = \gamma_p^2 = 3,4 \text{ МэВ}, \quad R_n = R_p = 3,5 \text{ фм},$$

определенно указывающие на одночастичную природу первого возбужденного уровня ядра ${}^4\text{He}$. Проведено сравнение с расчетами свойств этого уровня по различным моделям. Показано, что теория не дает удовлетворительного соответствия экспериментальным данным.

Последние два параграфа главы У содержат описание измерений сечений рассеяния нейтронов для изотопов ${}^6\text{Li}$ и ${}^7\text{Li}$ и соответствующих результатов. Как и в случае гелия-3 сечения измерялись с помощью сцинтилляционного детектора рассеянных нейтронов, геометрия которого показана на рис.10. Образцы – изотопные мишени ${}^6\text{Li}$ и ${}^7\text{Li}$ – были металлическими. В связи с высокой химической активностью образцов их механическая обработка и упаковка в контейнеры с лавсановыми стенками производилась в боксе с инертной атмосферой. Образцы были тонкими ($n \approx 0,01$) для падавшего пучка. Измерения выполнены для ${}^7\text{Li}$ – относительно рассеяния на углероде и для ${}^6\text{Li}$ – относительно ${}^7\text{Li}$. Точность определения сечений составила 2-3% (стандартная

Iж) Gayther D.V. Annals of Nucl. Energy, 1977, v.4, p. 515.

2ж) Долецки К., Малецки Х., Стэмпиньски М. ОИЯИ 3-81-459, Дубна, 1981.

3ж) В кн.: Шапиро Ф.Л. Собрание трудов, ч.1 Физика нейтронов. М., Наука, 1976, с. 211.

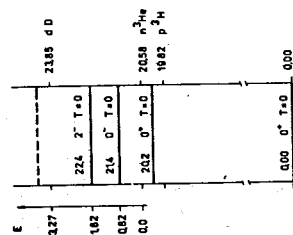


Рис.9. Схема первых уровней ядра ${}^4\text{He}$.
 Справа – энергии порогов соответствующих реакций, слева – кинетическая энергия в с.п.м.

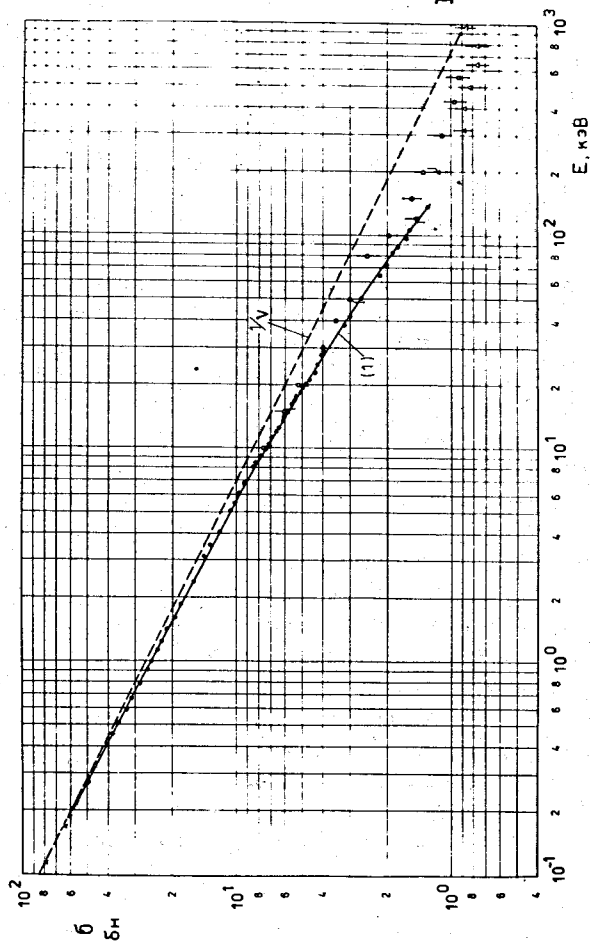


Рис.8. Сечение реакции ${}^3\text{He}(n, p)\text{T}$ в зависимости от энергии нейтронов. Черные точки – данная работа, пунктир – закон $1/\sqrt{v}$, сплошная кривая – формула (4) с параметрами (6).

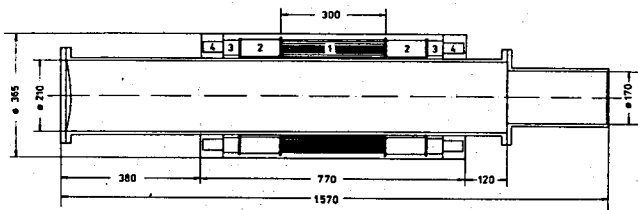


Рис.10. Геометрия детектора рассеянных нейтронов:

1 - сцинтилляционные блоки, 2 - фотоумножители,
3 - делители напряжения для ФЭУ, 4 - предусилители.

ошибка). Результат для лития-6 показан на рис.11 (черные точки до энергии 80 кэВ).

Энергетический ход нейтронных сечений лития в области до 300 кэВ не обнаружил иной резонансной структуры, кроме известных р-резонансов лития-6 и лития-7 вблизи 250 кэВ. Для изучения энергетического поведения S-волнового сечения требовалось, особенно в случае ${}^6\text{Li}$, надежно выделить вклады р-резонансов. Для этого в анализ были включены, помимо полученных, другие известные данные в области энергий 0,1-0,8 МэВ, имеющие точность 2-3%. Резонансное р-волновое сечение описывалось в рамках одноуровневого формализма, а S-волновое сечение - феноменологически в виде: $\sigma_n(E) = (0,72 + \delta \cdot E)$ бн, $\sigma_\alpha(E) = (149,5/\sqrt{10^3 E} - 0,025 - \beta \sqrt{E})$ бн. Значения параметров р-волнового резонанса 250 кэВ и S-волновых сечений определены равными: $\gamma_n^2 = 930 \pm 6$ кэВ, $\gamma_\alpha^2 = 22,3 \pm 0,3$ кэВ, $R_n = 4,08$ фм, $R_\alpha = 4,4$ фм; $\delta = (-1,8 \pm 0,2) \cdot 10^{-4}$ кэВ $^{-1}$, $\beta = (-2,2 \pm 0,2) \cdot 10^{-3}$ кэВ $^{-1/2}$.

Подгонка, соответствующая этим параметрам, показана на рис.11 и рис.12 кривой I. Отклонение сечения реакции ${}^6\text{Li}(n, \alpha)\text{T}$ для S-волновых нейтронов оказалось очень малым и противоположного в сравнении с ${}^3\text{He}$ знака.

Такой энергетический ход сечения реакции ${}^6\text{Li}(n, \alpha)\text{T}$, энергетический ход S-волнового сечения рассеяния ${}^6\text{Li}(n, n){}^6\text{Li}$, а также данные по спиновой зависимости для (n, ${}^6\text{Li}$)-рассеяния были интерпретированы в настоящей работе введением в рамках R-матричного формализма уровней аномальной (в терминах оболочечной модели) четности компаунд-ядра ${}^7\text{Li}$ при энергиях выше нейтронного порога $B = 7,25$ МэВ в ядре-продукте ${}^7\text{Li}$ (рис.13). Для этих уровней на основе R-матричного анализа определены значения энергий E_λ , приведенных нейтронных ширин γ_n^2 и приведенных альфа-частичных ширин γ_α^2 (ширин ${}^6\text{Li}(n, \alpha)$ -реакции). Существование отрицательного резонанса -

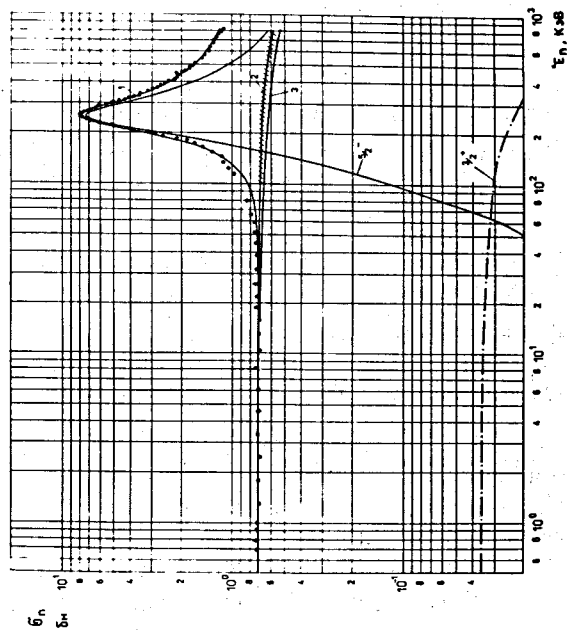


Рис.11. Сечение рассеяния $\sigma_n({}^6\text{Li})$.

Черные точки - данная работа.
Кривые: 1 - R-матричная подгонка; 2 - полученное S-волновое сечение; 3 - S-волновое сечение в допущении существования отрицательного резонанса.

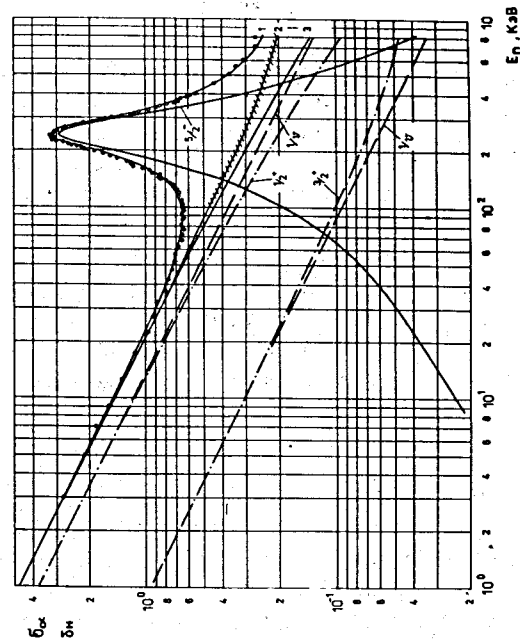


Рис.12. Сечение реакции ${}^6\text{Li}(n, \alpha)\text{T}$.

Точки - App. of Nucl. En., 1977, v.4, p.515,
кривые: 1 - R-матричная подгонка,
2 - полученное S-волновое сечение, 3 - S-волновое сечение в допущении существования отрицательного резонанса.

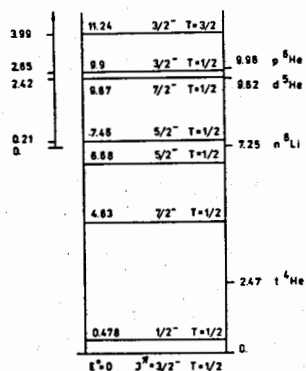


Рис.13. Схема низколежащих уровней ядра ${}^7\text{Li}$.

В главе VI обобщаются результаты исследований основных закономерностей и особенностей взаимодействия медленных нейтронов в легчайшими ядрами. В их числе: сильная спиновая зависимость рассеяния, определяющая роль в радиационном захвате правила отбора по симметрии волновых функций легких ядер, большие мезонные эффекты в механизме захвата нейтронов, отклонения от универсального закона $1/v$ в энергетической зависимости сечений поглощения нейтронов, возбуждение нейтронами ядерных уровней аномальной четности, указания на нарушение зарядовой инвариантности ядерных сил в малонуклонных системах.

В приложении помещены таблицы эффективных сечений взаимодействия нейтронов с легчайшими ядрами ${}^3\text{He}$, ${}^6\text{Li}$, ${}^7\text{Li}$, измеренные в данной работе.

В заключении на основании всех приведенных в диссертации материалов сделаны следующие основные выводы:

1. Реализован ряд экспериментальных методов светосильной нейтронной спектроскопии в сочетании с импульсным реактором ИБР-30, оказавшихся плодотворными для изучения свойств легчайших ядер.

2. Выполнены измерения труднодоступных эффективных сечений взаимодействия нейтронов с ядрами ${}^2\text{H}$ (радиационный захват) и ${}^3\text{He}$ (рассеяние и радиационный захват).

3. Осуществлены прецизионные измерения нейтронных сечений в области энергий от 0,025 эВ до ~ 100 кэВ для ядер ${}^3\text{He}$ (сечение реакции ${}^3\text{He}(n, p)\text{T}$ и полное сечение), ${}^6\text{Li}$ и ${}^7\text{Li}$ (сечение рассеяния),

-уровня положительной четности ($E_\lambda = 6,5$ МэВ, $\gamma^\pi = 1/2^+$), вводимшегося в ряде работ для объяснения большого значения теплового сечения реакции ${}^6\text{Li}(n, \alpha)\text{T}$, не подтверждено выполненным анализом. Согласно последним литературным данным, этот уровень не наблюдается и в обратной реакции ${}^4\text{He}(T, n){}^6\text{Li}$, и для объяснения большого теплового сечения поглощения нейтронов литием-6 в теории предложен и обоснован механизм прямой реакции.

играющих важную роль в практических приложениях.

4. Получены экспериментальные данные о длинах рассеяния, сечениях радиационного захвата, параметрах и свойствах возбужденных уровней легчайших ядер, необходимые для развития современной теории малонуклонных систем.

5. Обнаружен и исследован ряд закономерностей взаимодействия нейтронов с легчайшими ядрами, в том числе сильная спиновая зависимость длин рассеяния нейтронов, определяющая роль в радиационном захвате правила отбора по симметрии волновых функций малонуклонных ядер, большие мезонные эффекты при захвате нейтронов.

6. Получены новые данные об отклонении энергетического хода сечений реакций ${}^3\text{He}(n, p)\text{T}$ и ${}^6\text{Li}(n, \alpha)\text{T}$ от закона $1/v$, подтвердившие существование первого возбужденного уровня ядра ${}^4\text{He}$, но указавшие на отсутствие подобного уровня в ${}^7\text{Li}$ при энергии ниже нейтронного порога, что находится в соответствии с выводами кластерной модели.

7. Впервые определенный экспериментальный набор длин рассеяния нейтронов на ядрах ${}^3\text{He}$ подтвердил теоретическое предсказание о преобладании рассеяния в синглетном канале и указал на необходимость совершенствования расчетов по методу интегральных уравнений Фаддеева-Якубовского.

8. Комплексное использование методов нейтронной спектроскопии для систематического исследования свойств малонуклонных ядер с обращением к процессам, ранее недоступным для измерения, привело к созданию нового направления на стыке светосильной нейтронной спектроскопии ядер и физики малонуклонных систем, имеющего перспективу развития на входящих в практику нейтронного эксперимента мощных импульсных источниках нейтронов, таких как импульсный реактор ИБР-2, протонные (на энергию до 1000 МэВ) и другие сильноточные ускорители заряженных частиц.

Основные материалы диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Алфименков В.П., Аюбян Г.Г., Вежицки Я., Говоров А.М., Пикельнер Л.Б., Шаратов Э.И. Длины рассеяния нейтрона на ядре ${}^3\text{He}$. - Ядерная физика, 1977, т. 25, вып. 6, с. 1145-1148.
2. Шаратов Э.И. Изучение четырехнуклонной системы в реакциях с нейтронами при низких энергиях. Материалы III Международной школы по нейтронной физике. - ОИЯИ ДЗ-11787, Дубна, 1978, с. 437-457.

3. Алфименков В.П., Борзаков С.Б., Вежицки Я., Овчинников О.Н., Пикельнер Л.Б., Шарапов Э.И. Радиационный захват нейтронов ^3He в интервале энергий 1-70 кэВ. - Письма в ЖЭТФ, 1979, т. 29, вып. I, с. 100-102.
4. Алфименков В.П., Борзаков С.Б., Бунатян Г.Г., Вежицки Я., Пикельнер Л.Б., Шарапов Э.И. Реакция $^3\text{He}(n, \alpha, \gamma)$ и структура волновых функций ^3He и ^4He . - Международный симпозиум по проблеме нескольких тел в ядерной физике. ОИЯИ Д4-12366, Дубна, 1979, с.106.
5. Алфименков В.П., Борзаков С.Б., Вежицки Я., Осипенко Б.П., Пикельнер Л.Б., Тишин В.Г., Шарапов Э.И. Радиационный захват тепловых нейтронов дейтронами. - ОИЯИ Р3-12667, Дубна, 1979. - 8с.
6. Luschikov V.I., Pikelner L.B., Popov Yu.P., Frank I.M., Sharapov E.I., Yazvitskii Yu.S. Selected Topics in Research Program on IBR-2. - In: Nuclear Cross Sections for Technology. (Proceed. of the Intern. Conf., Knoxville, 22-26 oct.1979). NBS Special Publication 594, Washington, 1980, p.385-393.
7. Alfimenkov V.P., Borzakov S.B., Wierzbicki J., Osipenko B.P., Pikelner L.B., Tishin V.G., Sharapov E.I. Radiative Thermal Neutron Capture by Deuteron. - In: Program of the Intern. Conf. on Nuclear Cross Sections for Technology, Knoxville, 22-26 oct.1979. Bulletin of the American Phys. Soc., 1979, v.24, p.873.
8. Алфименков В.П., Борзаков С.Б., Васильева Э.В., Во Ван Тхуан, Осипенко Б.П., Пикельнер Л.Б., Тишин В.Г., Шарапов Э.И. Прямые измерения эффективного сечения радиационного захвата тепловых нейтронов дейтронами. - Ядерная физика, 1980, т. 32, вып. 6, с. 1187-1191.
9. Алфименков В.П., Борзаков С.Б., Во Ван Тхуан, Пикельнер Л.Б., Шарапов Э.И. Прямые измерения теплового сечения радиационного захвата нейтронов дейтронами. В кн.: Нейтронная физика (Материалы 5-ой Всесоюзной конференции, Киев, 1980). - М., ЦНИИатоминформ, 1980, ч. 2, с. 194-198.
10. Шарапов Э.И. К вопросу о дублетной и квартетной компонентах (nd)-захвата. - ОИЯИ Р3-80-534, Дубна, 1980. - 7с.
11. Алфименков В.П., Борзаков С.Б., Бунатян Г.Г., Вежицки Я., Пикельнер Л.Б., Шарапов Э.И. Радиационный захват тепловых нейтронов гелием-3. - Ядерная физика, 1980, т. 31, вып. I, с. 21-28.
12. Алфименков В.П., Борзаков С.Б., Вежицки Я., Говоров А.М., Пикельнер Л.Б., Шарапов Э.И. Энергетическая зависимость полного сечения взаимодействия нейтронов с ядрами ^3He в интервале 0,025-250 эВ. - ОИЯИ, Р3-80-394, Дубна, 1980. - 4с.

13. Алфименков В.П., Борзаков С.Б., Во Ван Тхуан, Говоров А.М., Ласонь Л., Пикельнер Л.Б., Шарапов Э.И. Взаимодействие нейтронов промежуточных энергий с ^3He . - Ядерная физика, 1981, т. 33, вып. 4, с. 891-899.
14. Шарапов Э.И. Радиационный захват нейтронов легчайшими ядрами. - Физика элементарных частиц и атомного ядра (ЭЧАЯ), 1981, вып. 4, с. 962-1000.
15. Попов Ю.П., Шарапов Э.И. К вопросу о выполнении принципа зарядовой инвариантности в ядерных взаимодействиях. В кн.: Сильные и слабые утверждения в ядерной спектроскопии и теории ядра. - Л., Наука, Ленинградское отделение, 1981, с. 90-95.
16. Борзаков С.Б., Малецки Х., Пикельнер Л.Б., Стэмпиньски М., Шарапов Э.И. Особенности отклонения от закона $1/v$ сечения реакции $^3\text{He}(n, p)\gamma$. Возбужденный уровень ядра ^4He . - Ядерная физика, 1982, т.35, вып. 3, с. 532-541.
17. Малецки Х., Пикельнер Л.Б., Родионов К.Г., Саламатин И.М., Шарапов Э.И. Детектор нейтронов и гамма-лучей для работ в области нейтронной спектроскопии. - ОИЯИ 13-6609, Дубна, 1971. - 15с.
18. Борзаков С.Б., Во Ван Тхуан, Пикельнер Л.Б., Шарапов Э.И. Нейтронный сцинтилляционный детектор для спектрометрии по времени пролета. - ОИЯИ 13-82-243, Дубна, 1982. - 5с.
19. Алфименков В.П., Борзаков С.Б., Во Ван Тхуан, Мареев Ю.Д., Пикельнер Л.Б., Рубин Д., Хрыкин А.С., Шарапов Э.И. Спиновая зависимость сечения рассеяния ядром ^7Li s -волновых нейтронов. - Ядерная физика, 1982, т.35, вып.3, с. 542-548.
20. Алфименков В.П., Борзаков С.Б., Во Ван Тхуан, Пикельнер Л.Б., Шарапов Э.И. Взаимодействие промежуточных и быстрых нейтронов с ядрами ^6Li . - ОИЯИ Р3-82-III, Дубна, 1982. - 11с.
21. Пикельнер Л.Б., Попов Ю.П., Шарапов Э.И. Светосильная нейтронная спектроскопия ядер. - Успехи физических наук, 1982, т. 137, вып. I, с. 39-84.

Рукопись поступила в издательский отдел
21 мая 1982 года.