

М - 256

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Мареев

3-86-84

УДК 539.172.4

МАРЕЕВ
Юрий Дмитриевич

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕСОХРАНЕНИЯ
ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ЧЕТНОСТИ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПОЛЯРИЗОВАННЫХ
РЕЗОНАНСНЫХ НЕЙТРОНОВ

Специальность: 01.04.16 - физика атомного ядра
и элементарных частиц

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Дубна 1986

Работа выполнена в Лаборатории нейтронной физики
Объединенного института ядерных исследований.

Научный руководитель:

кандидат физико-математических наук,
старший научный сотрудник

Алфименков В.П.

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук,
старший научный сотрудник

Крупчицкий П.А.

кандидат физико-математических наук,
старший научный сотрудник

Киселев Ю.Ф.

Ведущая организация:

Институт атомной энергии им. И.В.Курчатова, Москва.

Защита диссертации состоится "19" март 1986 года
в "16³⁰" часов на заседании специализированного совета
Д.047.01.05 при Лаборатории нейтронной физики и Лаборатории
ядерных реакций Объединенного института ядерных исследований
(г.Дубна, Московской области).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

Автореферат разослан "7" апрель 1986 года.

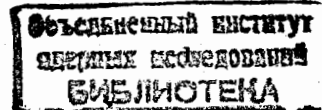
Ученый секретарь
специализированного совета

Таран Ю.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. При взаимодействии нейтронов с ядрами вещества наблюдается ряд эффектов несохранения четности, обусловленных слабым взаимодействием нуклонов в ядре. К ним относятся такие эффекты, как вращение спина поперечно-поляризованного нейтрона в плоскости, перпендикулярной направлению движения при прохождении нейтрона через неполяризованную мишень, а также зависимость полного сечения взаимодействия с неполяризованными ядрами для нейтронов, поляризованных параллельно и антипараллельно направлению движения (зависимость сечения от спиральности нейтронов). Соответствующие оценки относительного изменения полного сечения от спиральности нейтронов и угла поворота поляризации (в радианах) для мишеней толщиной в длину свободного пробега, основанные на рассмотрении рассеяния на Р-нечетном потенциале ядра, т.е. когда ядро рассматривается лишенным внутренних степеней свободы, давали практически неизмеримые величины $10^{-6}+10^{-8}$, и поэтому велись поиски усиления эффектов такого рода. В 1976 году в работе Форте было высказано соображение, что рассматриваемые Р-нечетные нейтронно-оптические эффекты должны значительно усиливаться вблизи одночастичных р-волновых резонансов, и конкретно был предложен эксперимент по измерению угла поворота спина нейтрона в ^{124}Sn , у которого при энергии 62 эВ расположен р-волновой резонанс с относительно большой одночастичной компонентой. Такой эксперимент был выполнен в 1980 году в Гренобле на пучке нейтронов с энергией 1,7 мэВ. Ожидаемого эффекта на ^{124}Sn обнаружено не было, в то время как на ^{117}Sn вращение нейтронной поляризации оказалось очень большим, по крайней мере, в тысячу раз превышающее оценки, сделанные на основании рассмотрения рассеяния нейтронов на Р-нечетном потенциале ядра. Для ^{117}Sn было получено также указание на зависимость полного сечения от спиральности нейтронов. Объяснение большой величины эффектов следовало из появившейся практически одновременно теоретической работы О.П.Сушкова и В.В.Фламбаума*, в которой усиленные Р-нечетные нейтронно-оптические эффекты связывались со смешиванием по четности компаунд-состояний ядер. В этой работе было показано, что для средних и тяжелых ядер для нейтронов с энергиями в районе р-резонансов Р-нечетные эффекты могут достигать значений $10^{-2}+10^{-3}$. Для зависимости полного сечения от спиральности нейтронов предсказывался резонансный ход эффекта с максимумом при энергии резонанса.

* Сушков О.П., Фламбаум В.В. Письма в ЖЭТФ, 1980, т.32, в.5, с.377.



В сложившейся ситуации стало весьма актуальным проведение экспериментов в области энергий нейтронов, включающей непосредственно р-волновой компаунд-резонанс.

Основная цель работы. Основная цель работы состояла в экспериментальной проверке теоретических выводов, основанных на модели смешивания слабым взаимодействием компаунд-состояний ядер противоположной четности и одного спина, о значительном усилении и резонансном ходе одного из Р-нечетных нейтронно-оптических эффектов, а именно - зависимости полного сечения от спиральности нейтронов в области энергий р-волновых компаунд-резонансов. Необходимо было исследовать величину и энергетический ход Р-нечетного эффекта для ^{117}Sn ($E_p = 1,33$ эВ) и ^{139}La ($E_p = 0,75$ эВ).

Базовые установки и экспериментальные методики. Для решения поставленной задачи потребовалось использование созданной при непосредственном участии автора уникальной установки - нейтронного спектрометра по времени пролета с пучком поляризованных резонансных нейтронов. В качестве источника нейтронов использовался импульсный реактор ИБР-30 Лаборатории нейтронной физики. Резонансные нейтроны поляризовались пропусканием их через поляризованную протонную мишень. В качестве протонной мишени использовался монокристалл соли двойного лантан-магниевого нитрата, в котором протоны кристаллизационной воды поляризовались динамическим методом. В экспериментах применялась протонная мишень большой площади, удобная в эксплуатации и обеспечивавшая возможность проведения продолжительных измерений.

Продольная поляризация нейтронов и ее реверс обеспечивались соответствующими конфигурациями ведущего магнитного поля. Накопление времяпролетных спектров, контроль поляризации, управление экспериментом, а также первоначальная обработка результатов измерений проводились с помощью системы, созданной на базе малой ЭВМ.

Научная новизна работы заключается в том, что впервые измерена величина и энергетический ход Р-нечетного нейтронно-оптического эффекта - зависимость полного сечения от спиральности нейтронов в области энергии нейтронов, включающей р-волновые нейтронные компаунд-резонансы ^{117}Sn и ^{139}La .

Впервые экспериментально показано, что изучаемый Р-нечетный эффект имеет резонансный энергетический ход и по величине согласуется с теоретическими предсказаниями, основанными на модели смешивания слабым взаимодействием компаунд-состояний ядер одинакового спина и противоположной четности. На примере ^{139}La видно, что Р-нечетные эффекты в ядрах могут усиливаться в $10^5 + 10^6$ раз по сравнению с нуклон-

нуклонным слабым взаимодействием и достигать величин порядка 10^{-1} .

На основании результатов измерений оценены модули матричных элементов, определяющие смешивание s- и р-компаунд-состояний.

В работе экспериментально определены параметры исследованных резонансов.

Научная и практическая ценность работы. Полученные в настоящей работе результаты позволили существенным образом обосновать теоретическое описание изучаемых явлений смешиванием компаунд-состояний ядер, имеющих противоположную четность.

Проведенные эксперименты положили начало изучению Р-нечетных нейтронно-оптических эффектов в нейтронных резонансах. Полезный опыт, полученный при проведении настоящей работы, в дальнейшем будет использован при планировании и постановке новых экспериментов.

Созданный уникальный нейтронный спектрометр по времени пролета с пучком поляризованных резонансных нейтронов представляет несомненную практическую ценность для проведения экспериментальных исследований, в которых изучается спиновая зависимость различных ядерных процессов. Это продемонстрировано выполнением на установке физических исследований, как вошедших в настоящую диссертацию, так и не вошедших в нее.

Положения и результаты, вынесенные на защиту

1. Создана светосильная установка для поляризации нейтронов в широком энергетическом диапазоне (от тепловых до нескольких десятков кэВ), которая в течение многих лет успешно используется в экспериментах на пучке реактора ИБР-30 Лаборатории нейтронной физики ОИЯИ.

2. Впервые в мире проведены экспериментальные исследования нарушения пространственной четности в р-волновых нейтронных резонансах ^{117}Sn ($E_p = 1,33$ эВ) и ^{139}La ($E_p = 0,75$ эВ). В этих резонансах получены следующие величины эффектов относительного изменения резонансного сечения при перемене знака спиральности нейтронов

$$\mathcal{P}(^{117}\text{Sn}) = (4,5 \pm 1,3) \cdot 10^{-3},$$

$$\mathcal{P}(^{139}\text{La}) = (7,3 \pm 0,5) \cdot 10^{-2}.$$

3. Экспериментально определены параметры исследуемых р-волновых компаунд-резонансов, необходимые для расчета Р-нечетных эффектов. Наличие в резонансе Р-нечетного эффекта однозначно указывает на то, что это есть р-резонанс со спином $J = I \pm 1/2$.

4. Показано, что Р-нечетная зависимость полного сечения от спиральности нейтронов имеет явно выраженный резонансный энергетический ход, предсказанный теоретически на основании вышеуказанной модели.

5. В рамках модели, основанной на смешивании компаунд-состояний, проведено сравнение результатов измерений асимметрии полного сечения

взаимодействия продольно-поляризованных нейтронов противоположной спиральности в р-резонансах, полученных в настоящей работе, с результатами измерений Р-нечетных эффектов, выполненных на тепловых нейтронах на тех же ядрах. Все имеющиеся в настоящее время экспериментальные данные по нейтронно-оптическим Р-нечетным эффектам на исследованных ядрах находятся в достаточно хорошем согласии между собой.

6. В рамках двухуровневого приближения из найденных экспериментально величин $\mathcal{P}(E_p)$ получены нижние оценки модулей матричных элементов слабого взаимодействия, приводящего к смешиванию компаунд-состояний противоположной четности.

Апробации работы и публикации. Основные результаты, изложенные в диссертации, докладывались на Международной конференции по ядерным данным для науки и технологии (Антверпен, 1982), на Рабочем совещании по фундаментальным исследованиям на реакторах (Гренобль, 1983), на Международной конференции по ядерной физике (Флоренция, 1983), на VI Всесоюзной конференции по нейтронной физике (Киев, 1983).

Основные материалы, включенные в диссертацию, опубликованы в четырех печатных работах. Список этих работ приведен в конце автореферата.

Объем и структура диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы - всего на 115 страницах машинописного текста, включая 22 рисунка, 5 таблиц и библиографии из 67 наименований.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении рассмотрена ситуация, сложившаяся к началу проведения работ, описанных в настоящей диссертации, при этом основное внимание уделено явлениям несохранения четности с участием нейтронов низких энергий. На примере электромагнитных переходов в ядрах рассмотрены факторы динамического, кинематического и структурного усиления Р-нечетных эффектов в ядерных взаимодействиях. В конце введения кратко сформулированы положения и результаты, вынесенные на защиту, и дано краткое изложение содержания диссертации.

Первая глава посвящена рассмотрению усиленных нейтронно-оптических эффектов нарушения пространственной четности, которые возникают при прохождении нейтронов через вещество и вызываются слабым взаимодействием нуклонов в ядрах. Сюда относятся такие эффекты, как Р-нечетное вращение спина поперечно-поляризованного нейтрона и зависимость полного сечения от спиральности продольно-поляризованных нейтронов при прохождении через неполяризованные ядерные мишени. Эти эф-

фекты связаны с нарушающей четность частью амплитуды упругого рассеяния нейтронов вперед, которая возникает из-за слабого взаимодействия нуклонов в ядрах. Ввиду того, что нейтронно-оптические эффекты в процессах, связанных с образованием компаунд-ядра, значительно превосходят аналогичные эффекты в одночастичных процессах, главное внимание уделено теоретическому рассмотрению величины и энергетического поведения эффектов, основанному на смешивании слабым взаимодействием компаунд-состояний противоположной четности.

В двухуровневом приближении, т.е. в предположении, что смешиваются один \mathcal{J} - и один р-резонанс одинакового спина, получены выражения для рассматриваемых Р-нечетных нейтронно-оптических эффектов, связывающие эти эффекты с энергией нейтронов и параметрами смешивающихся резонансов.

Вблизи р-резонанса разность полных нейтронных сечений σ_+ и σ_- для нейтронов с положительной и отрицательной спиральностями удобно представить в виде:

$$\Delta\sigma = \sigma_+ - \sigma_- = 2 \mathcal{P}(E) \sigma_p(E),$$

где

$$\mathcal{P}(E) = \frac{2 W_{\mathcal{J}p}}{E - E_{\mathcal{J}}} \sqrt{\frac{\Gamma_{\mathcal{J}}^{\pi}(E) \Gamma_{p1/2}^{\pi}(E)}{\Gamma_p^{\pi}(E) \Gamma_p^{\pi}(E)}}. \quad (I)$$

Здесь $\sigma_p(E)$ - обычное брейт-вигнеровское сечение в р-резонансе, $W_{\mathcal{J}p}$ - матричный элемент слабого взаимодействия, взятый между смешивающимися состояниями, E - энергия нейтронов, $E_{\mathcal{J}}$ - энергия \mathcal{J} -резонанса, $\Gamma_{\mathcal{J},p}^{\pi}(E)$ - зависящие от энергии нейтронов полные нейтронные ширины \mathcal{J} - и р-резонансов, $\Gamma_{p1/2}^{\pi}(E)$ - нейтронная ширина р-резонанса в канале с полным моментом нейтрона $j = 1/2$. Поскольку $\mathcal{P}(E)$ в пределах резонанса можно считать константой, из приведенного выражения для $\Delta\sigma$ видно, что Р-нечетный эффект в полном сечении носит резонансный характер и достигает максимального значения при энергии резонанса.

Приведены теоретические оценки эффектов в р-резонансах средних и тяжелых ядер. В мишенях с толщиной, соответствующей длине свободного пробега нейтрона по резонансной части сечения, угол поворота поляризации (в радианах) и относительное изменение прозрачности при реверсе спиральности оказались порядка $10^{-2} + 10^{-3}$. Отмечено, что большая величина эффектов связана с кинематическим усилением, обусловленным тем, что примесная \mathcal{J} -амплитуда в $1/kR$ раз больше, чем основная р-амплитуда, а также с динамическим усилением Р-нечетного смешивания уровней компаунд-ядра.

Во второй главе дан обзор экспериментальных исследований нарушения пространственной четности в нейтронной оптике, выполненных на тепловых нейтронах. Приведены полученные в этих работах эксперимен-

тальные данные, которые в дальнейшем используются в диссертационной работе для сопоставления с результатами, полученными в настоящей работе с резонансными нейтронами.

Вначале рассмотрены эксперименты по измерению вращения поперечной поляризации нейтронов вокруг направления импульса для олова и лантана, которые были выполнены в институте Лаур-Ланжевена в Гренобле. Далее рассматриваются исследования Р-нечетной зависимости полного сечения от спиральности для тепловых нейтронов. Здесь рассмотрен предварительный эксперимент на ^{117}Sn , выполненный в ИЛЛ, и описаны измерения, которые проводились в ЛЯФ* и ИТЭФ. В ЛЯФ были получены значения коэффициентов асимметрии полного сечения взаимодействия тепловых нейтронов противоположных спиральностей для ^{117}Sn и ^{139}La , а также измерены коэффициенты асимметрии сечения радиационного захвата. На основании полученных результатов авторы пришли к выводу, о том, что практически вся зависимость полного сечения от спиральности для тепловых нейтронов связана с $(n-\gamma)$ - реакцией, т.е. с процессами, идущими через компаунд-ядро. В ИТЭФ зависимость полного сечения от спиральности тепловых нейтронов была исследована как на интересующем нас изотопе ^{117}Sn , так и на $^{79,81}\text{Br}$ и других мишенях. Для образцов ^{232}Th , ^{239}Pu естественной смеси изотопов хлора и свинца получены верхние пределы эффекта на уровне нескольких единиц 10^{-6} .

Рассмотренные в данной главе экспериментальные работы, помимо полученных в них интересных результатов и выводов, полезны еще и с методической точки зрения. Используемые в этих работах приемы, направленные на устранение или существенное уменьшение влияния различного рода нестабильностей на получаемые результаты, несомненно, представляют большой практический интерес для экспериментаторов.

В третьей главе диссертации кратко рассмотрены методы и физические принципы, положенные в основу созданного на базе импульсного реактора ИБР-30 ЛФ ОИЯИ светосильного нейтронного спектрометра по времени пролета с поляризованными резонансными нейтронами, а также даны описания и характеристики отдельных узлов установки и спектрометра.

Поляризация нейтронов в данном спектрометре осуществляется методом пропускания нейтронного пучка через поляризованную протонную мишень, который был предложен и разработан в ЛФ ОИЯИ. Данный метод поляризации нейтронов выгодно отличается от других тем, что позволяет эффективно поляризовать нейтроны в широкой области энергий (от тепловых до нескольких десятков кэВ), обладает большой светосилой и умеренной потерей интенсивности нейтронного пучка. Метод основан на использовании сильной спиновой зависимости взаимодействия нейтронов с

протонами. В диссертационной работе дано определение поляризации, приведены необходимые в практической работе соотношения, параметры и графики, взятые из работ авторов данного метода.

В качестве мишени - поляризатора нейтронов использовался монокристалл двойного лантан-магниевого нитрата (ЛМН), в котором протон кристаллизационной воды поляризовались с помощью динамического метода, использующего насыщение СВЧ излучением одного из двух "запрещенных" ЭПР-переходов. Поляризация осуществлялась при температуре $\approx 1\text{ К}$ и легко достижимых магнитных полях $\approx 2 \cdot 10^4$ Э. Небольшое изменение поля (≈ 40 Э) позволяет перестраиваться с одного запрещенного перехода на другой и получать протонную поляризацию как параллельную, так и антипараллельную направлению магнитного поля. Реверс поляризации таким способом требует времени около часа. В диссертации метод динамической поляризации ядер рассмотрен на примере простейшей системы - магнитно-разведенного кристалла, содержащего независимые пары, состоящие из электронного и протонного спинов, связанных диполь-дипольным взаимодействием. Отмечены отличия реальных систем от рассмотренной простейшей системы.

Выделение нейтронов определенной энергии из сплошного энергетического спектра нейтронной вспышки импульсного реактора осуществлялось с помощью метода времени пролета. В работе приведены основные соотношения, характеризующие этот метод.

Спектрометр содержит поляризатор нейтронов - поляризованную протонную мишень, системы реверса и контроля поляризаций, магнитный канал для провода поляризованных нейтронов от поляризатора до исследуемого образца, детектор нейтронов, а также систему регистрации получаемой экспериментальной информации и автоматического управления экспериментом, выполненную на базе малой ЭВМ. Схема экспериментальной установки показана на рис. I. В качестве импульсного источника нейтронов использовался реактор ИБР-30. Средняя мощность реактора составляла ~ 20 кВт при 5 имп/с и длительности нейтронной вспышки 70 мкс. Поляризованная протонная мишень содержала кристалл ЛМН с оптимальной для резонансных нейтронов толщиной по пучку ≈ 17 мм и поперечной площадью 32 см^2 с осью симметрии z' , направленной по пучку нейтронов. Кристалл помещался в СВЧ-резонатор, находящийся в I^0 -ной ванне гелиевого криостата, в горизонтальное перпендикулярное пучку нейтронов магнитное поле с напряженностью ≈ 20 кЭ, создаваемое специальным электромагнитом. Длина волны СВЧ-излучения составляла ≈ 4 мм. Потеря интенсивности пучка в таком поляризаторе составляет приблизительно порядок.

Для обеспечения однородной по мишени и стабильной протонной поляризации поле электромагнита шиммированием сделано в объеме мишени

* Kolomensky B.A. et al. Phys.Lett., 1981, v.1078B, No4, p.272-274.
** Абов В.Г. и др. ЯФ, 1984, т.40, с.1585.

однородным с точностью не хуже 10^{-4} , а величина магнитного поля стабилизирована стабилизатором магнитного поля на основе ЯМР.

В качестве СВЧ-генератора использовалась лампа обратной волны (ЛОВ), частота которой стабилизировалась с точностью лучше 10^{-4} с помощью высокооборотного опорного резонатора проходного типа. Долговременная стабильность выходной СВЧ мощности обеспечивалась стабилизацией питания ЛОВ.

Для охлаждения поляризованной протонной мишени в условиях повышенной тепловой нагрузки от СВЧ-излучения ($\approx 0,1$ Вт) использовался криостат на температуру ≈ 1 К с непрерывной доливкой жидкого гелия в откачиваемую ванну, который позволял проводить непрерывные измерения без остановок для пополнения гелия.

Контроль за протонной поляризацией в процессе запуска мишени осуществлялся по сигналу протонного магнитного резонанса. Этот метод обладает высокой чувствительностью к малым поляризациям и позволяет определять знак поляризации. Время достижения рабочей поляризации (50+70%) составляло около часа. В рабочих условиях протонная поляризация мишени и связанная с ней нейтронная поляризация контролировались по величине прозрачности протонной мишени для нейтронов, определяемой с помощью мониторинжных счетчиков М1 и М2 (см. рис.1). К мониторинговому нейтронному счетчику М2, находящемуся в нейтронном пучке за протонной мишенью, предъявлялись специфические требования. Он должен перекрывать весь пучок, обладать равномерной по всей площади чувствительностью к проходящим нейтронам, малым ослаблением нейтронного пучка, нечувствительностью к гамма-лучам, низким собственным фоном и хорошим плато. Этим требованиям удовлетворял специально разработанный пропорциональный нейтронный счетчик с малым содержанием ^3He . В качестве мониторинжных счетчиков М1 использовались стандартные борные счетчики польского производства типа *NWT-52*.

Проводка поляризованного пучка нейтронов до исследуемого образца и получение нейтронных пучков различной спиральности из первоначально поперечно-поляризованного нейтронного пучка производились за счет создания соответствующих конфигураций ведущих магнитных полей. Быстрый реверс спиральности нейтронов осуществлялся переключением за время, меньшее 1 с, тока в электромагните (6), расположенном сразу за токовой фольгой, и эффективно работал до энергий ≈ 50 эВ.

Исследуемый образец (9) помещался в соленоид (8) с полем, направленным по импульсу нейтронов и имевшим напряженность, равную 200 Э.

Прошедшие через образец нейтроны по вакуумному нейтронному доводились до нейтронного детектора, расположенного на расстоянии 58 м от активной зоны реактора. В качестве детектора использовался 210 -

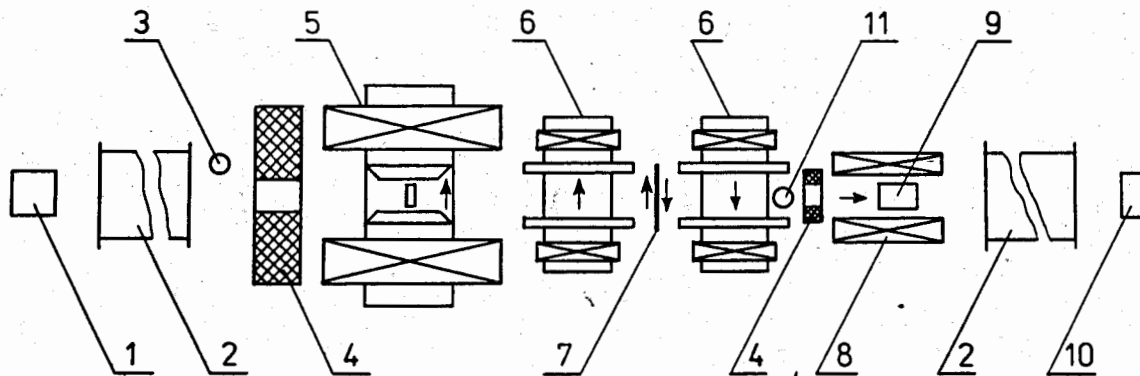


Рис. I. Схема экспериментальной установки ЛНФ для исследований зависимости полного сечения от спиральности нейтронов вблизи p -волновых компаунд-резонансов.

I - реактор; 2 - вакуумные нейтронотводы; 3 - мониторный счетчик M1; 4 - коллиматоры; 5 - поляризованная протонная мишень; 6 - электромагниты ведущего поля; 7 - токовая фольга; 8 - соленоид; 9 - исследуемый образец; 10 - детектор нейтронов; 11 - мониторный счетчик M2. Стрелками на пути пучка показаны направления магнитных полей.

литровый секционированный жидкостный сцинтилляционный (п-γ) детектор, в котором нейтроны регистрируются по каскадным гамма-лучам, испускаемым при захвате нейтронов в специальном конверторе, расположенном внутри детектора. Секционированная конструкция давала возможность использовать детектор в режиме совпадений с числом совпадающих импульсов $n \geq 2$, что приводило к резкому снижению фона от реактора. Для уменьшения фона космических лучей применялась схема пропускания, которая закрывала выход детектора, когда суммарная амплитуда импульса со всех баков превышала установленный порог 10 МэВ. Эффективность регистрации нейтронов в режиме двойных совпадений с порогом 0,25 МэВ составляла 40% для нейтронов ≤ 10 эВ.

Большая продолжительность измерений с частым реверсом поляризации нейтронов потребовала автоматизации управления реверсом с накоплением двух время-пролетных спектров, соответствовавших противоположным спиральностям нейтронов. Это осуществлялось автоматизированной системой, созданной на базе малой ЭВМ. Помимо указанных функций, система производила регистрацию информации с мониторинговых счетчиков, простейшую предварительную обработку результатов измерений, а также протокольную распечатку части информации, накопленной в каждом из циклов измерений с фиксированным направлением поляризации. Протокольная информация была очень полезной как для контроля за работой всей установки, так и при окончательной обработке результатов измерений.

Четвертая глава содержит описание метода измерения зависимости полных сечений взаимодействия резонансных нейтронов от спиральности, процедуру измерения и обработки результатов. Здесь же приведены результаты измерений и их сравнение с теоретическими оценками и данными, полученными с тепловыми нейтронами.

В эксперименте измерялся так называемый эффект пропускания

$$\mathcal{E} = \frac{N_p - N_a}{f_n (N_p + N_a)} \quad (2)$$

где N_p и N_a — число отсчетов детектора при поляризации нейтронов соответственно по и против импульса, f_n — нейтронная поляризация. Эффект пропускания связан с изменением полного сечения при изменении знака спиральности нейтронов простым соотношением:

$$\mathcal{E} = -\frac{n}{2} \Delta \sigma = -n \mathcal{P}(E) \sigma_p(E), \quad (3)$$

здесь n — толщина мишени в ядрах/см². Р-нечетные экспериментальные эффекты в полных сечениях вблизи р-резонансов удобно характеризовать величиной $\mathcal{P}(E)$, где она практически постоянна. В случае измерений вдали от резонанса, что часто имеет место при измерениях на тепловых

и холодных нейтронах, целесообразно, по-видимому, приводить экспериментальные значения $\Delta \sigma$.

Для экспериментального исследования несохранения пространственной четности вблизи нейтронных резонансов необходимы ядерные мишени, имеющие р-волновые нейтронные резонансы со спином $J = I \pm \frac{1}{2}$, т.к. в том случае, если спин р-резонанса $J = I \pm \frac{3}{2}$, эффекта в принципе быть не должно. Из-за возможностей нашего спектрометра эти резонансы должны быть достаточно низковольтными. Этим требованиям в достаточной мере удовлетворяли изотопы ^{117}Sn и ^{139}La , у которых имелись слабые низковольтные резонансы при энергиях соответственно 1,33 эВ и 0,75 эВ, которые с большой вероятностью можно отнести к р-волновым, поскольку их нейтронные ширины на 3 + 4 порядка меньше соответствующих средних нейтронных ширины ζ -резонансов. К тому же на этих изотопах были обнаружены Р-нечетные эффекты на тепловых нейтронах.

Измерения пропускания проводились методом времени пролета на описанном выше спектрометре поляризованных резонансных нейтронов. В качестве мишеней использовались металлические образцы олова и лантана, имевшие толщину, близкую к оптимальной в две длины свободного пробега для нейтронов резонансных энергий.

При исследовании данного образца, в ходе одного цикла рабочих измерений, продолжавшегося около 50 часов, при фиксированном направлении протонной поляризации относительно магнитного поля электромагнита, в памяти ЭВМ накапливались два временных спектра N_p и N_a с быстрым реверсом нейтронной поляризации. Быстрый реверс поляризации уменьшал вклад в исследуемый эффект от неизбежных флуктуаций интенсивности нейтронного пучка и нестабильностей аппаратуры. Для контроля за возможными систематическими аппаратурными эффектами циклы измерений с разными направлениями протонной поляризации относительно внешнего магнитного поля чередовались приблизительно через каждые двое суток. При этом существенно использовалось то обстоятельство, что изменение направления протонной поляризации изменяет знак исследуемого эффекта при практически неизменных экспериментальных условиях. Суммарное чистое время набора статистики в случае ^{117}Sn составило 12 суток, а в случае ^{139}La — 7 суток.

Полученные для данного образца в циклах с фиксированным направлением протонной поляризации спектры N_p и N_a суммировались и давали две пары суммарных спектров N_p и N_a , из которых затем находились значения экспериментального эффекта пропускания для обоих направлений протонной поляризации. Полученные таким образом значения \mathcal{E} для двух направлений протонной поляризации проверялись на статистическую согласованность и отсутствие ложных эффектов, после чего усреднялись и давали окончательные значения \mathcal{E} для данного образца.

На рис.2 (сверху) представлены участки спектров вблизи изучавшихся резонансов, а снизу приведены окончательные значения ε . Здесь для получения более наглядной картины ε усреднены по группам каналов. Сплошные кривые проведены по экспериментальным точкам в соответствии с выражением (3) с использованием метода наименьших квадратов. Видно, что эффект имеет явно выраженный резонансный энергетический ход.

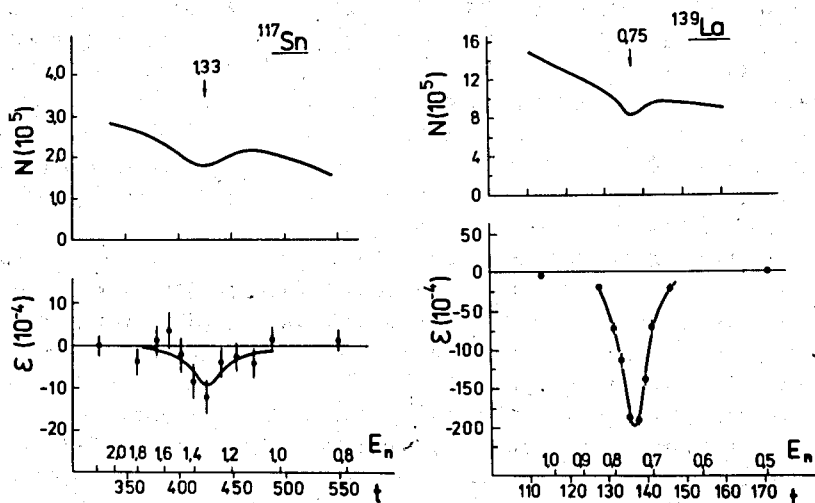


Рис.2. Время-пролетные спектры и эффекты пропускания для ^{117}Sn и ^{139}La . На горизонтальной оси приведены номера каналов анализатора t и энергии нейтронов E_n в эВ. Стрелками с цифрами указаны положения и энергии резонансов.

Одним из важных преимуществ метода времени пролета для данного эксперимента явилась возможность наблюдения энергетического хода эффекта в резонансе и одновременного контроля по участкам вне резонанса. Отсутствие заметного эффекта вне резонанса позволяет считать, что наблюдаемый эффект обусловлен резонансной частью сечения.

Из экспериментальных значений ε определялись величины $\rho(E_p)$. При этом в случае необходимости учитывалось уширение экспериментально наблюдаемого резонанса в спектре за счет эффекта Доплера и недостаточно хорошего энергетического разрешения.

Временные спектры, полученные при исследовании Р-нечетных эффектов с высокой статистической точностью, были использованы для получения необходимых для анализа параметров E_p , Γ_p и g_p^{II} исследуемых р-резонансов ^{117}Sn и ^{139}La .

Таблица I

Ядро- мишень	n , 10^{23} яд/см ²	E_p эВ	$\sigma_p(E_p)$ 10^{-24} см ²	Γ_p 10^{-3} эВ	$g \Gamma_p^{\Pi}$ 10^{-8} эВ	E_s эВ	$g \Gamma_s^{\Pi^0}$ 10^{-3} эВ	$\mathcal{P}(E_p)$ 10^{-3} эВ	$ W_{Sp} $ 10^{-3} эВ
^{117}Sn	1,3	$1,33 \pm 0,01$	$1,8 \pm 0,2$	180 ± 18	$16,6 \pm 2,1$	- 29	5,5	$4,5 \pm 1,3$	$0,38 \pm 0,10$
^{139}La	1,25	$0,75 \pm 0,01$	$2,8 \pm 0,4$	45 ± 5	$3,6 \pm 0,3$	- 48,6	84	73 ± 5	$1,28 \pm 0,12$

Таблица 2

Ядро- мишень	$\Delta \sigma_{th}$ 10^{-29} см ²	$\Delta \sigma_{th}^*$ 10^{-29} см ²	$\Delta \sigma_{th}^{**}$ 10^{-29} см ²
^{117}Sn	$5,4 \pm 0,6$ ЛЛЯФ $10,2 \pm 4,0$ 9 ± 2 ИТЭФ	$7,7 \pm 2,6$ ОИЯИ	$13,4 \pm 1,7$ ИЛЛ
^{139}La	$35,3 \pm 5,5$ ЛЛЯФ	37 ± 8 ОИЯИ	$49 \pm 8,5$ ИЛЛ

Сводка экспериментальных результатов, полученных в настоящей работе, представлена в таблице I. Там же приведены толщины использованных мишеней и измеренные брайт-вигнеровские параметры исследованных резонансов.

Из экспериментально найденных значений $\rho(E_p)$, используя соотношение (I), можно получить величины матричных элементов W_{sp} , обуславливающих такое смешивание. Практически, однако, такой расчет неоднозначен, поскольку неизвестны спины р-резонансов, т.е. неизвестно, с каким ξ -резонансом смешивается данный р-резонанс. Кроме того, полностью отсутствует информация о знаках амплитуд нейтронных ширин смешивающихся резонансов, а также информация о доле в нейтронной ширине р-резонанса процесса, идущего через канал с полным моментом нейтрона $j = I/2$, т.е. о величине $(\Gamma_{PI/2}^p)^{1/2}$. В связи со сказанным, даже в двухуровневом приближении, для матричных элементов смешивания удается получить лишь оценки по модулю. В последней колонке табл. I приведены результаты расчетов $|W_{sp}|$, проведенные в предположении, что $\Gamma_{PI/2}^p = \Gamma_p^p$ и с данным р-резонансом смешивается ближайший сильный ξ -резонанс, т.е. резонанс, имеющий максимальное значение величины $\Gamma^p/(E_p - E_\xi)^2$. В рамках двухуровневого приближения такие расчеты дают нижнюю оценку величины $|W_{sp}|$.

В конце главы проведено сопоставление результатов измерений Р-нечетных эффектов в р-волновых нейтронных резонансах с результатами, полученными на тепловых нейтронах на тех же ядрах. В таблице 2 представлены результаты измерений зависимости полных сечений от спиральности тепловых нейтронов для ^{117}Sn и ^{139}La в виде ΔG . Там же представлены значения ΔG^* , рассчитанные из результатов измерений в р-волновых компаунд-резонансах, и значения ΔG^{**} из измерений Р-нечетного вращения. Как видно из таблицы, согласие результатов можно считать вполне удовлетворительным. Таким образом, сравнение экспериментальных результатов показывает, что модель смешивающихся компаунд-состояний, на основе которой производилось сравнение, достаточно хорошо описывает величину и энергетический ход эффекта.

В заключении в краткой форме сформулированы основные результаты и выводы работы, которые приведем ниже.

Диссертационная работа посвящена экспериментальному исследованию величины и энергетического хода одного из Р-нечетных нейтронно-оптических эффектов, а именно изучению зависимости полного сечения от спиральности нейтронов вблизи р-волновых компаунд-резонансов. Такое исследование интересно не только тем, что оно явилось еще одним подтверждением слабого взаимодействия нуклонов, но и тем, что оно позволило проверить теоретические выводы, основанные на модели смешивания

компаунд-состояний противоположной четности, о значительном усилении и резонансном ходе Р-нечетных эффектов в области р-волновых нейтронных резонансов.

Для решения поставленной задачи потребовалось использование созданной при непосредственном участии автора уникальной установки - нейтронного спектрометра по времени пролета с пучком поляризованных резонансных нейтронов. Исследования зависимости пропускания нейтронов от их спиральности были проведены для р-волновых резонансов ^{117}Sn и ^{139}La .

В результате проведенных измерений впервые было экспериментально показано, что изучаемый эффект носит резонансный характер, и по величине согласуется с теоретическими предсказаниями, основанными на модели смешивания по четности компаунд-состояний ядер. На примере ^{139}La видно, что Р-нечетные эффекты в ядрах могут усиливаться в $10^5 + 10^6$ раз по сравнению с нуклон-нуклонным слабым взаимодействием и достигать величин порядка 10^{-1} .

В работе получены экспериментальные оценки модулей матричных элементов, определяющих смешивание слабым взаимодействием компаунд-состояний разной четности.

Результаты данной работы позволили существенным образом обосновать правильность теоретического описания изучаемых явлений смешиванием компаунд-состояний по четности.

Проведенные эксперименты положили начало изучению Р-нечетных нейтронно-оптических эффектов в нейтронных резонансах и показали практическую пригодность созданного в ЛНФ ОИЯИ нейтронного спектрометра с поляризованными резонансными нейтронами для решения таких задач. Полезный опыт, полученный при проведении настоящей работы, в дальнейшем будет использован при планировании и постановке новых экспериментов.

Основные материалы диссертации опубликованы в работах:

1. Алфименков В.П., Андросов А.В., Иваненко А.И., Мареев Ю.Д., Овчинников О.Н. Установка для поляризации медленных нейтронов на реакторе ИБР-30. - Дубна, 1975. - 19 с. (Сообщение / Объед. ин-т ядер. исслед.: I3-9396).
2. Алфименков В.П., Борзаков С.Б., Во Ван Тхуан, Мареев Ю.Д., Пикельнер Л.Б., Хрыкин А.С., Шарапов Э.И. Экспериментальное исследование несохранения Р-четности в нейтронном резонансе ^{117}Sn . - Письма в ЖЭТФ, 1981, т. 34, в. 5, с. 308-312.
3. Алфименков В.П., Борзаков С.Б., Во Ван Тхуан, Мареев Ю.Д., Пикельнер Л.Б., Хрыкин А.С., Шарапов Э.И. Нарушение пространственной четности в резонансе 0,75 эВ лантана - I39. - Письма в ЖЭТФ, 1982, т. 35, в. I, с. 42-44.

4. Alfimenkov V.P., Borzakov S.B., Vo Van Thuan, Mareev Yu.D., Pikelner L.B., Khrykin A.S. and Sharapov E.I. Parity nonconservation in neutron resonances. - Nucl. Phys., 1983, v. A398, p. 93-106.

Рукопись поступила в издательский отдел
13 февраля 1986 года.