

6-2001-87

На правах рукописи
УДК 539.17.015; 539.126.33

Ш - 648

ШИТОВ
Юрий Александрович

ИССЛЕДОВАНИЕ
ГАММА-НЕЙТРИННЫХ УГЛОВЫХ КОРРЕЛЯЦИЙ
В ЗАХВАТЕ ПОЛЯРИЗОВАННЫХ МЮОНОВ ЯДРАМИ ^{28}Si

Специальность: 01.04.16 — физика ядра и элементарных частиц

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем имени В.П.Джелепова Объединенного института ядерных исследований (Дубна)

Научный руководитель:
канд. физ.-мат. наук Егоров Вячеслав Георгиевич

Официальные оппоненты:
доктор физ.-мат. наук, профессор Зинов Валентин Григорьевич
канд. физ.-мат. наук, ст.научн.сотр. Тетерева Татьяна Всеволодовна

Ведущая организация - Институт теоретической и экспериментальной физики (ИТЭФ), 117259, Москва, Б.Черемушкинская, 25.

Защита состоится " " 2001 г. в " " часов на заседании диссертационного совета Д720.001.03 Объединенного института ядерных исследований (ОИЯИ) по адресу: 141980, Московская обл., г.Дубна, ОИЯИ, конференц-зал ЛЯП.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

Автореферат разослан " " 2001 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Батусов Ю.А.

Актуальность проблемы. Поиск явлений и эффектов за пределами Стандартной Модели (СМ) является в настоящий момент одной из основных задач теоретических и экспериментальных работ в различных областях физики. Не вызывает сомнения тот факт, что мы находимся на переломном этапе развития науки, когда ожидаемые в ближайшее десятилетие открытия (природа и масса нейтрино, осцилляции нейтрино, природа темной материи, распад протона, Хиггс-бозоны, кварки 4 поколения и др.) могут привести к новому, качественно новому, революционному скачку в физике, обобщить существующие теории в рамках новой Единой теории фундаментальных взаимодействий.

Исследования слабых взаимодействий в ядерном мюонном захвате, являющиеся основной задачей настоящей работы, лежат в русле обозначенной тематики. Проблематика диссертации — составная часть направления "Исследования электрослабых взаимодействий в области низких и промежуточных энергий", являющегося темой первого приоритета в ОИЯИ. Эксперименты, на которых базируется настоящая работа, были поддержаны российскими (РФФИ) и международным (грант фонда Сороса) грантами.

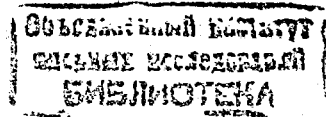
Объектом неослабевающего интереса остаются исследования как основных (поиск возможной примеси S- и T-взаимодействий), так и индуцированных (измерение компонентов слабого адронного тока) констант (формфакторов) слабых взаимодействий. Среди последних наибольший интерес в настоящее время представляет формфактор индуцированного псевдоскалярного взаимодействия g_P , теоретическое значение которого базируется на гипотезе частичного сохранения аксиально-векторного тока (PCAC), играющей важную роль в теории слабых взаимодействий $g_P/g_A \sim 7$. Кроме того, интерес к g_P проявляется и в современных теориях КХД, где точное измерение g_P рассматривается как уникальный тест аксиальной-векторной структуры нуклона, отвечающей за явное и спонтанное нарушение киральной симметрии в КХД низких энергий.

Вместе с тем, g_P остается самым "плохо измеренным" формфактором. Разброс многочисленных измерений довольно велик, от подавления (μ -захват в ${}^6\text{Li}$ и ${}^{28}\text{Si}$, радиационный μ -захват в средних и тяжелых ядрах), до 20-50% (по разным оценкам) усиления (радиационный μ -захват в водороде¹). И если подавление g_P гипотетически можно отнести к возможной перенормировке аксиальной части слабого адронного тока, связанной с обменными эффектами, то усиление g_P пока не может быть объяснено в рамках современных теоретических моделей.

Основными свойствами констант слабых взаимодействий по определению является их поведение по отношению к преобразованиям пространственной симметрии². Поэтому измерение угловых корреляций величин, фигурирующих в слабом взаимодействии, является *прямым и самым чувствительным способом измерения формфакторов*. Все остальные способы измерения являются косвенными. Так, в рассматриваемом нами захвате поляризованного мюона бесспиновым ядром аксиальный формфактор g_A определяет *поляризацию дочернего ядра*, в то время как индуцированный псевдоскалярный формфактор g_P — *выстроенность спина дочернего ядра*

¹Radiative Muon Capture on Hydrogen and the Induced Pseudoscalar Coupling / G.Jonkmans, S.Ahmad, D.S.Armstrong et al. // Phys.Rev.Lett. - 1996. - Vol.77. - С.4512-4515.

²В самих названиях формфакторов (векторное, скалярное, тензорное и т.д.) содержится информация о пространственной симметрии определяемых ими членов.



относительно импульса. Эти независимые друг от друга характеристики могут быть измерены экспериментально.

Несмотря на наибольшую чувствительность корреляционных характеристик к величине факторов слабого взаимодействия, в настоящее время известно лишь несколько экспериментов в секторе мюонного захвата, использующих данную методику. Это связано со сложностью измерений и анализа данных. Первым был пионерский эксперимент³ на ^{28}Si , усовершенствованная методика которого используется и в настоящей работе. В остальных четырех экспериментах исследовались поляризационные характеристики ядер отдачи, образующихся в мюонном захвате на ^{12}C . Результаты проведенных в 70-х и начале 80-х годов работ отличаются невысокой точностью и большим разбросом, а сами эксперименты не лишены ряда методических просчетов и ошибок.

Несмотря на постоянно растущие возможности научно-технической базы исследований, на текущий момент выполнены лишь единичные эксперименты в обсуждаемой области. После начала нами серии измерений на ^{28}Si аналогичный по целям эксперимент осуществлялся канадской экспериментальной группой на мезонной фабрике TRIUMF (Канада). Наконец, исследование гамма-нейтринных корреляций в мюонном захвате на ^{16}O является последним на сегодняшний день экспериментом в обсуждаемом секторе⁴.

В виду небольшого количества экспериментальных данных представляется крайне важным расширение применения методики угловых корреляций в секторе мюонного захвата, проведение новых экспериментов на новых ядрах с целью дальнейшего уточнения наших знаний о природе слабых взаимодействий. Все вышесказанное подчеркивает актуальность выбранной темы диссертации.

Цель диссертационной работы. Измерение корреляционных характеристик процесса ядерного μ -захвата на ядре ^{28}Si и оценка величины индуцированного псевдоскалярного взаимодействия g_p . Экспериментальная оценка величины g_p дает возможность проверки PCAC — одной из базовых гипотез теории слабых взаимодействий.

Направление исследований. Для достижения заявленной цели работа велась по следующим основным направлениям:

1. экспериментальное измерение профиля доплеровски уширенных γ -линий 1229 и 2171 кэВ, разряжающих уровень 2202 кэВ ядра ^{28}Al , образующегося в реакции $^{28}\text{Si}(\mu, \nu)$; измерение мультипольности γ -перехода 2171 кэВ, разряжающего уровень 2202 кэВ ядра ^{28}Al ;
2. определение параметров, характеризующих условия экспериментов, анализ природы и структуры фона в окрестности исследуемых γ -линий;
3. построение теоретической модели профиля исследуемых линий, наиболее полно отражающей реальные условия эксперимента: математическое моделирование процесса торможения дочернего ядра, анализ теоретических работ по кинематике и ядерным матричным элементам (ЯМЭ) изучаемого процесса, сравнение

³ γ -Neutrino Angular Correlations in Muon Capture / G.H.Miller, M.Eckhause, F.R.Kane et al. // Phys.Rev.Lett. — 1972. — Vol.29. — Num.17. — P.1194-1198.

⁴Проект AC/MC (Angular Correlations in Muon Capture) осуществляется той же коллаборацией, которой было выполнено представленное в настоящей работе исследование мюонного захвата на ^{28}Si , и находится в стадии публикации результатов эксперимента.

моделей, используемых предположений, допущений и гипотез, отбор оптимальных моделей;

4. фитирование экспериментального спектра теоретическим профилем, определение величины корреляционного параметра λ , оценка на его основе величины g_p ; обсуждение полученного результата, сравнение его с результатами других экспериментов, анализ перспектив дальнейших исследований.

Методы исследований. В работе используются:

1. методы прецизионной ядерной спектроскопии с использованием HPGe детекторов большого объема для измерения временных и энергетических спектров, сопровождающих исследуемые реакции;
2. метод гамма-нейтринной угловой корреляции в мюонном захвате для измерения профиля доплеровски уширенных γ -линий, чувствительного к корреляционным характеристикам процесса, которые, в свою очередь, зависят от величины индуцированного псевдоскалярного фактора g_p ;
3. методы теории тройной угловой корреляции между спином мюона, направлением вылета нейтрино и направлением вылета гамма-кванта, разряжающего дочернее ядро, образующееся после μ -захвата. Использовались для определения корреляционной функции процесса, корреляционных коэффициентов как функций факторов теории слабых взаимодействий и параметров ядерных матричных элементов изучаемого перехода;
4. методы теории Линхарда, Шарфа, Шиотта (LSS) торможения ионов в веществе, применяемые для расчета торможения отдачи дочернего ядра в мишени⁵;
5. численные компьютерные методы решения оптимизационных задач. Использовались для фитирования экспериментально измеренных профилей γ -линий их теоретической формой и определения параметров модели, главным из которых являлась величина искомого корреляционного коэффициента λ .

Достоверность и обоснованность. Полученный результат базируется на научном подходе к планированию, подготовке и проведению экспериментов, тщательной проработке теоретических и практических аспектов обработки экспериментальных данных. Измерения проводились в двух экспериментах, поставленных по различной методике. Результаты, полученные отдельно в каждом из них, согласуются между собой. В ходе обработки данных был проведен тщательный анализ явлений и эффектов, являющихся источником возможных систематических ошибок эксперимента: неопределенности расчетов корреляционной функции и ядерных матричных элементов, влияние реальной геометрии, функции отклика детектирующей системы.

⁵Lindhard J., Scharff M., Schiott H.E. //Dansk. Vid. Selsk. Mat.-Fys. Medd. — 1963. — Vol.33. — P.3.

Измерения времен жизни возбужденных ядерных состояний в диапазоне 10^{-14} — 10^{-12} с по ослаблению доплеровского смещения энергии γ -лучей / И.Х.Лемберг, А.А.Пастернак //Современные методы ядерной спектроскопии. — Л.: 1985. — С.3-63.

торможения дочерних ядер, каскадного заселения исследуемого уровня с более высоких уровней, прямого заселения исследуемого уровня по другому каналу реакции, фоновых условий. Оптимальное значение взятой в качестве свободного параметра мультипольности γ -линии 2171 кэВ, получаемое при фитировании экспериментальных данных теоретической моделью, находится в хорошем согласии с величиной мультипольности, измеренной в специальном дополнительном эксперименте.

Наконец, результат аналогичной по цели работы, полученный другой научной группой с использованием иных методик постановки эксперимента и обработки данных, находится в согласии с результатом настоящей работы, хотя и имеет большую погрешность измерения.

Все вышесказанное подтверждает достоверность и обоснованность полученного результата.

На защиту выносятся:

1. экспериментальные результаты для корреляционного параметра $x = 0.238 \pm 0.023_{stat} \pm 0.018_{sys} = 0.238 \pm 0.029_{tot}$ (отношение ядерных матричных амплитуд μ -захвата на возбужденное состояние 2201 кэВ ядра ^{28}Si) и полученной на его основе оценки отношения формфакторов слабых взаимодействий $g_P/g_A \leq 0$;
2. комплексная теоретическая модель для расчета профилей γ -линий в рамках метода гамма-нейтринных угловых корреляций в мюонном захвате;
3. методика учета эффектов, связанных с поляризацией мюонов при исследовании гамма-нейтринных угловых корреляций в мюонном захвате;
4. методика исследования каскада $0^+ \xrightarrow{\mu C} 1^+ \xrightarrow{\gamma} 2^+$ (γ -линия 2171 кэВ);
5. методика учета составного фона в окрестности исследуемой γ -линии 1229 кэВ.

Научная новизна. В рамках настоящей работы достигнута лучшая на сегодняшний день точность измерения корреляционного параметра x процесса мюонного захвата в ядре ^{28}Si , в 2.8 раза превышающая точность аналогичного по цели эксперимента, проводившегося в это же время, но по другой методике⁶. Извлекаемая из x на основании современных моделей расчетов ЯМЭ величина индуцированного псевдоскалярного взаимодействия g_P оказывается существенно подавленной по сравнению с предсказанием гипотезы PCAC. Вопрос о причинах данного расхождения остается открытым, полученный результат требует дальнейшего осмысления, стимулирует новые экспериментальные и теоретические исследования в данной области.

Практическая полезность. Результаты, полученные в диссертации, представляют интерес для практического применения метода гамма-нейтринных угловых корреляций. В работе проведен анализ всех методических аспектов данного вопроса и систематически изложен накопленный опыт. Это позволяет использовать метод

⁶ Muon Capture in ^{28}Si and g_P/g_A / B.A.Moftah, E.Gete, D.F.Measday et al. // Phys.Lett. B - 1997. - Vol.395. - P.157-162.

гамма-нейтринных угловых корреляций как инструмент для решения других научных задач. В частности, наработки данной работы используются при исследовании⁷ корреляционных характеристик мюонного перехода первого запрета в ^{16}O .

Другой областью применения метода может стать исследование ядерных свойств систем, исчезающих и возникающих в процессе мюонного захвата, исследование механизмов ядерных реакций, сопровождаемых вылетом γ -квантов, а также изучение эффектов ион-атомных взаимодействий внутри вещества мишени через механизм торможения дочерних ядер реакции.

Апробация работы. Результаты работы были опубликованы в российских и международных научных журналах, представлялись на различных научных конференциях: WEIN, Международный симпозиум по проблемам взаимодействия мюонов и пионов в веществе, Международные совещания по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра, NANP.

Структура и объем диссертации Работа имеет объем 102 страницы и включает в себя введение, четыре главы, заключение и список литературы из 130 наименований.

Во введении обоснована актуальность выбранной проблематики, изложены объект, цели, задачи, направления и методы исследований, обозначены положения, выносимые автором на защиту.

Первая глава "Исследование слабых взаимодействий в ядерном μ -захвате" посвящена анализу истории и современного статуса исследований слабых взаимодействий в физике ядерного мюонного захвата. Данная глава разбита на три основные части.

В первой части обсуждается возможность поиска явлений и эффектов за пределами CM в ядерном мюонном захвате. Анализ теоретических и практических работ в этой области наглядно демонстрирует, что μ -захват реально и потенциально является инструментом исследования всех основных положений и гипотез теории слабых взаимодействий: T-инвариантности, CVC, μ/e -универсальности, G-инвариантности (токи второго рода), PCAC.

Являясь полуплептонным процессом, мюонный захват идет при гораздо большем (в $m_\mu/m_e \sim 200$ раз) переданном импульсе по сравнению с β -распадом. Соответственно, в структуре слабого адронного тока существенно, до нескольких процентов, вырастает вклад индуцированных формфакторов, которые становятся предметом исследования на предмет поиска и выявления эффектов за пределами CM. Кроме того, процесс μ -захвата уникален тем, что в нем проявляется эффект взаимодействия слабого и сильного фундаментальных физических полей. Поэтому исследования этого процесса представляют интерес не только для физики слабых взаимодействий, но и КХД, и физики высоких энергий.

Вторая часть главы посвящена анализу основных экспериментальных методик, использующихся при исследовании слабых взаимодействий в мюонном захвате. В данных работах используется весь спектр методов физики низких и промежуточных энергий: прецизионный энергетический и временной анализ, самые разнообразные детекторы, их сборки и комбинации, техника совпадений широкого спектра вплоть до наносекундного диапазона, спектрометры различных типов и т.д. и т.п.

Подробно рассмотрены измерение полных и парциальных скоростей мюонного захва-

⁷Experiment AnCor: Search for Scalar Interaction in β Decay and μ Capture / Ch.Briancon, V.B.Brudanian, J.Deutsch et al. // Physics of Atomic Nuclei. - 1998. - Vol.61. - Num.8. - P.1293-1300.

та, исследование переходов из сверхтонкой структуры мезоатома, определение поляризации и выстроенности дочерних ядер в μ -захвате, измерение корреляционных характеристик процесса. Обсуждаются сравнительные характеристики различных методов, их достоинства и недостатки.

Измерения полных и парциальных скоростей мюонного захвата являются наиболее простыми из рассмотренных методик, и на их базе было осуществлено наибольшее количество работ. Однако теоретическая интерпретация полученных результатов осложнена сильной модельной зависимостью скорости захвата, совокупным воздействием всех слабых формфакторов, вклад которых не всегда известен с достаточной точностью.

Из теоретических расчетов следует, что характеристики мюонного захвата, зависящие от отношений ЯМЭ, оказываются менее модельно зависимыми, чем параметр скорости мюонного захвата, являющийся квадратичной формой относительно ЯМЭ (этим объясняется его сильная чувствительность к ядерной структуре переходов). Именно на измерение таких характеристик — поляризации и выстроенности дочерних ядер, отношений скоростей переходов с разных уровней сверхтонкой структуры мезоатома, корреляционных характеристик — направлены другие методы, применяющиеся при исследовании мюонного захвата. И хотя подобные методы измерения довольно сложны и имеют множество ограничений при выборе конкретных исследуемых ядер, при правильно подобранных условиях они способны обеспечить точность результатов, сравнимую с той, что получается в классическом методе исследования скорости мюонного захвата.

Заключительная третья часть главы является обзором работ, в которых исследовались слабые взаимодействия в мюонном захвате, систематизированных по ядрам мишени.

Большинство работ посвящено измерению скоростей мюонного захвата в малонуклонных системах, главным образом, в водороде и гелии ^3He . Теоретически исследование таких систем предпочтительно для выявления фундаментальных характеристик слабого взаимодействия, поскольку в данном случае отсутствуют или малы неопределенности, связанные с модельными расчетами ядерной структуры переходов.

Однако в малонуклонных системах возникают проблемы иного рода, связанные с трудностями точного учета мезоатомных и мезомолекулярных эффектов, идущих в мишени перед мюонным захватом. Точное определение данных эффектов представляется довольно сложной задачей, а систематическая погрешность, вносимая в измеряемую величину скорости μ -захвата, является весьма существенной.

Другой проблемой, возникающей в измерениях скорости мюонного захвата в водороде, являются неопределенности, связанные с оценкой эффективности нейтронных счетчиков: В этой связи повышение точности измерений скорости мюонного захвата на водороде представляется сложной задачей, требующей перехода к мишеням малой плотности и использованием более интенсивных мюонных пучков.

Более перспективным является исследование мюонного захвата на ядрах ^3He , основным преимуществом которого является рождение заряженной частицы в конечном состоянии, которая может быть зарегистрирована с высокой эффективностью и сильным подавлением фона. Именно на этом ядре недавно была достигнута наилучшая точность измерения скорости мюонного захвата, получены наилучшие в мю-

онном секторе оценки величины индуцированного псевдоскалярного формфактора, возможных примесей скалярного, псевдоскалярного и тензорного взаимодействий⁸. Главной проблемой исследования мюонного захвата на сложных ядрах являются модельная зависимость результатов. Однако совершение компьютерных расчетов, измерение относительных, а не абсолютных характеристик, выбор для исследований специальных парциальных переходов позволяют компенсировать указанный основной недостаток.

Наиболее исследованным из сложных ядер является ^{12}C , где наряду с амплитудой процесса измерялись корреляционные и поляризационные характеристики мюонного захвата на основное состояние. Наличие хорошо изученного изотриплета ($T = 1$, $T_z = -1, 0, +1$) $^{12}\text{B}(1^+, g.s.) - ^{12}\text{C}(1^+, 15.11\text{МэВ}) - ^{12}\text{N}(1^+, g.s.)$ позволяет повысить точность моделирования ядерной структуры перехода.

В ядре ^{11}B впервые было проведено измерение отношения скоростей захвата Λ_+/Λ_- из двух состояний сверхтонкой структуры мезоатома, в ядре ^{16}O исследовалось отношение скоростей переходов разного уровня запрета $q = \Lambda_0/\Lambda_1$, на ядре ^{28}Si был впервые применен метод гамма-нейтринных корреляций, использующийся и в данной работе. Кроме того, измерения скоростей мюонного захвата с целью определения константы индуцированного псевдоскалярного формфактора g_P проводились на ^6Li , ^{23}Na .

Проведенный в первой главе работы анализ показывает, что вопрос о подавлении константы псевдоскалярного взаимодействия g_P в мюонном захвате остается открытым. Результаты, полученные на H , ^3He , D , ^{12}C , ^{16}O , ^{23}Na находятся в согласии с предсказанием PCAS. В то же время, данные экспериментов на ^6Li и ^{28}Si указывают на существенное подавление g_P . Эксперименты по радиационному захвату мюонов демонстрируют зависимость от массы ядра и подавление для средних и тяжелых ядер константы g_P . А полученное в исследовании радиационного захвата на водороде существенное превышение величины g_P по отношению к предсказанию PCAS пока не объяснено в рамках существующих теоретических моделей. Следует отметить сильную модельную зависимость результатов по радиационному мюонному захвату. Все вышеизложенное позволяет сделать вывод об актуальности исследований слабого индуцированного псевдоскалярного формфактора g_P в обычном мюонном захвате на различных ядрах.

Вторая глава диссертации “Корреляционные характеристики μ -захвата: теоретические аспекты” посвящена проработке теоретических вопросов исследования. На первом этапе изучается структура слабого адронного тока, возникающего в мюонном захвате, анализируются входящие в его состав различные слабые константы, исследуются ограничения, накладываемые на слабые формфакторы в рамках основных предположений и гипотез теории слабых взаимодействий.

На втором этапе был проанализирован гамма-переход взаимодействия. Переход от гамма-перехода μ -захвата на свободном протоне к гамма-переходу мюонного захвата в сложных ядрах осуществляется через мультипольное разложение в виде ядерных матричных амплитуд, выражающихся через ЯМЭ. Переход $0^+ \xrightarrow{\mu} 1^+$, являющийся предметом исследования настоящей работы, определяют две матричные амплитуды⁹

⁸A precision measurements of nuclear muon capture on ^3He / P.Ackerbauer, D.V.Balin, V.M.Baturin et al. // Phys. Lett. B - 1998. - Vol. 417. - P.224-232.

⁹Формализм матричных амплитуд согласно работе: Балашов В.В., Г.Я.Коренман, Р.А.Эрамжан

$M_1(2)$, $M_1(-1)$, в свою очередь, зависящие от линейных комбинаций формфакторов слабого адронного тока ($g_V, g_A, g_M, g_S, g_P, g_T$), кинематических параметров процесса и четырех ЯМЭ¹⁰ [101], [121], [011p], [111p].

На следующем шаге исследовалась корреляционная функция процесса

$$\begin{aligned} \mu^- + (A, Z, J_0)_i &\rightarrow (A, Z - 1, J_1)_f + \nu_\mu \\ &\quad \downarrow \tau \\ &(A, Z - 1, J_2)_i + \gamma_{E,L}, \end{aligned}$$

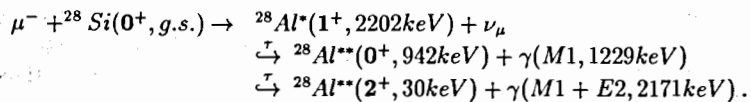
в котором предметом изучения является тройная корреляция между поляризацией мюона \vec{P} , импульсом нейтрино \vec{p} и направлением вылета вторичного γ -кванта. В методе гамма-нейтринных угловых корреляций корреляционная функция определяет профиль вторичной γ -линии при ее измерении идеальным детектором на идеальной мишени (нет торможения дочернего ядра). В работе приводится вид корреляционной функции в частном случае исследуемых каскадов $0^+ \xrightarrow{\mu^+} 1^+ \xrightarrow{\gamma} 0^+ / 2^+$. Входящие в корреляционную функцию коэффициенты α , $a_2^{(0)}$, $b_2^{(0)}$, $c_1^{(0)}$ являются функциями параметра отношения матричных амплитуд $x \equiv M_1(2)/M_1(-1)$ и (за исключением α) мультипольности γ -кванта, сопровождающего мюонный захват.

Параметр x определяется фитированием измеренного и теоретического профилей вторичной γ -линии. При этом необходим учет реальных экспериментальных условий, чему посвящена вторая часть главы.

Учет реальных характеристик детектирующей системы осуществлялся сверткой идеального профиля γ -линии с реальной функцией отклика (использовалась параметризация в виде гауссиана). Основное внимание было уделено вопросам торможения и многократного рассеяния дочерних ядер, образующихся в мюонном захвате. Расчеты показывают, что этот процесс существенно ослабляет и искажает форму исследуемой γ -линии даже при малых временах жизни возбужденного уровня дочерних ядер $\tau > 20$ фс. Поэтому данный эффект требует особенно тщательного учета. В работе детально изложен метод учета торможения и рассеяния, основанный на LSS-теории, приведены формулы и выкладки, использовавшиеся для расчетов.

В конечном итоге была выведена общая формула профиля исследуемой γ -линии с учетом корреляционных характеристик мюонного захвата и реальных условий эксперимента, которая была использована в обработке экспериментальных данных.

В третьей главе "Методика экспериментов по исследованию μ -захвата на ядре ^{28}Si " описаны экспериментальные процедуры тестового и двух основных измерений парциальных переходов:



В тестовом эксперименте была проверена работоспособность методики гамма-нейтринных корреляций, отсутствие сильных фоновых пиков в окрестности исследуемых линий.

Поглощение мезонов атомными ядрами. — М.: Атомиздат, 1978. — 296с.

¹⁰В представлении: Morita M., Fujii A. Theory of Allowed and Forbidden Transition in Muon Capture Reactions // Phys.Rev. — 1960. — Vol.118. — Num.2. — P.606-618.

После тестового эксперимента было осуществлено два основных измерения. Постановка экспериментов выглядит следующим образом. Мюонный пучок проходил через коллиматор, замедлитель и систему счетчиков, останавливаясь в мишени (монокристалл из натурального кремния, имеющий форму цилиндра $\varnothing 65 \times 25$ мм), окруженной стаканообразным пластиковым сцинтиллятором. γ -кванты регистрировались двумя HPGe детекторами *A* и *B* большого объема (200 см³), установленными параллельно друг другу по обе стороны от мишени. В первом эксперименте детекторы перемещались вдоль оси пучка, и измерения проводились в двух положениях "вперед" (угол между направлением мюонного пучка и осью детектор-мишень составил $\approx 57^\circ$) и "назад" ($\approx 118^\circ$). Таким образом, варьирование угла ($\vec{P} \vec{k}$) осуществлялось путем изменения геометрии установки. Во втором эксперименте мишень с детекторной сборкой (угол между направлением мюонного пучка и осью детектор-мишень $\approx 90^\circ$) была помещена внутрь соленоида, создающего в районе мишени однородное магнитное поле $B \approx 320$ Гс. В этом случае изменение угла ($\vec{P} \vec{k}$) осуществлялось за счет прецессии спина мюона.

В обоих экспериментах важной отличительной чертой является исследование поляризованных мюонов ($\vec{P} \vec{k} \neq 0$). При этом профиль изучаемой γ -линии оказывается чувствительным не только к одному коэффициенту $a_2^{(0)}$, как это было в других экспериментах, а также к α , $b_2^{(0)}$ и $c_1^{(0)}$, что приводит к повышению чувствительности измерений к искомому слабому формфактору g_P .

Другой важной особенностью экспериментов стала многоступенчатая система временной фильтрации сигналов, в которой использовалась техника совпадений быстрых сигналов HPGe детекторов и сигналов со счетчиков. Главными отличительными особенностями системы являются:

1. выделение одиночных остановок мюонов в мишени при помощи техники совпадений. Регистрация γ -квантов осуществлялась только во время "окна измерений" — в течение 2 мкс через 50 нс после мюонной остановки. Это позволило существенно подавить некоррелированный фон;
2. запрет срабатываний счетчиков во время "окна измерений" для "хороших" событий. Это приводило к подавлению фона Мишелевских электронов, образующихся в распаде мюона;
3. запрет измерений при занятом АЦП (отсев наложенных сигналов) и во время релаксации HPGe детекторов после попадания в них Мишелевских электронов для "хороших" событий (отсев смещенных сигналов). В результате улучшалось разрешение и профиль функции отклика детекторов;
4. применение специальной двухпороговой схемы временной привязки на HPGe детекторах для улучшения привязки временного сигнала.

Применение данной методики позволило существенно подавить фон (улучшить соотношение сигнал/шум) в экспериментальных спектрах.

В четвертой главе "Анализ данных и результаты эксперимента" изложен комплекс задач обработки данных экспериментов.

Остаточная поляризация мюонов на *K*-орбите ядер мишени в первом эксперименте определялась в отдельном эксперименте на специальной μSR -установке. Во вто-

ром эксперименте осуществлялся мониторинг прецессии спина мюона на базе временных спектров Мишелевских электронов, что позволило определить асимметрию вылета электронов и, соответственно, остаточную поляризацию мюонов. Вместе с асимметрией вылета электронов определялась начальная фаза (угол) спина мюона по отношению к оси пучка и период прецессии. Нуль-калибровка временных спектров электронов была проведена по высокоэнергетичным электронам (присутствуют в мюонном пучке), рассеивающимся на мишени и попадающим в γ -детекторы. Для повышения точности временной привязки была измерена энергетическая зависимость нуля временной шкалы, которая в дальнейшем учитывалась при обработке данных.

Описанные процедуры калибровки временных спектров позволили с хорошей точностью определять угол $(\vec{P} \vec{k})$ для каждого γ -кванта по времени его появления относительно мюонной остановки во второй эксперимент.

В конечном фитировании данных первого эксперимента использовались 8 энергетических спектров (для каждой линии (1229 и 2171 кэВ), каждого детектора (A и B), каждой геометрии "вперед"- "назад"). Во втором эксперименте для каждой линии каждого детектора γ -кванты сортировались в пределах $\delta\phi \pm 25^\circ$ для восьми базовых углов $(\vec{P} \vec{k}) = -135^\circ, -90^\circ, -45^\circ, 0^\circ, +45^\circ, +90^\circ, +135^\circ, +180^\circ$ — итого 32 обрабатываемых спектра.

Функция отклика детекторов аппроксимировалась гауссианом с параметрами, полученными из обработки неуширенных фоновых и калибровочных линий экспериментальных спектров.

Учет торможения дочерних ядер производился в рамках теории LSS. Для более достоверного учета тормозных потерь были учтены поправки, полученные из реальных экспериментальных данных.

Особое внимание было уделено идентификации фоновых пиков в окрестности линии 1229 кэВ. Метод гамма-нейтринных угловых корреляций критичен к примесям фоновых линий, поэтому их учет необходим для устранения систематики результата. Основной фоновым пиком является γ -линия 1204 кэВ, возникающая в реакции неупругого рассеяния быстрых нейтронов (доминирует канал $(\mu, \nu n)$) на ядрах самого германиевого детектора $^{74}\text{Ge}(n, n'\gamma)$. Нейтрон передает ядру Ge кинетическую энергию E_R и возбуждает низколежащий уровень E_{Ge}^* . γ -детектор при этом является калориметром, регистрирующим суммарную энергию $E = E_{Ge}^* + E_R$. Поэтому профиль этой линии представляет собой асимметричный треугольник с широким, плавно спадающим правым "хвостом". Форма этой линии была восстановлена при помощи анализа аналогичных пиков 596, 691 и 1040 кэВ, присутствующих в спектре.

Аналогичным образом была восстановлена симметричная, треугольная, уширенная γ -линия 1222 кэВ, которая разряжает уровень 3956 кэВ ядра ^{27}Al , заселяющийся в сильном канале $(\mu, \nu n)$. Ее параметры определялось из γ -линий 1719, 2210 и 2941 кэВ, возникающих в той же реакции.

Наконец, была учтена неуширенная 1238 кэВ γ -линия, возникающая из разрядки долгоживущего уровня 2058 кэВ в ядре ^{56}Fe , заселяющегося как в прямой (n, n') -реакции, так и β^+ -распада долгоживущего радиоактивного изотопа ^{56}Co , активирующегося в окружающих материалах. Ее форма аппроксимировалась аппаратной функцией отклика детекторов.

Для исследования цепочки $0^+ \xrightarrow{\mu\alpha} 1^+ \xrightarrow{\gamma} 2^+$ необходимо знание мультипольности

γ -перехода 2171 кэВ, которая входит в качестве множителя в корреляционные коэффициенты $a_2^{(0)}$, $b_2^{(0)}$ и $c_1^{(0)}$. Для измерения данной величины был проведен специальный вспомогательный эксперимент. Мультипольность — параметр смеси электромагнитных переходов $\delta \equiv E2/M1$ — определялась из исследования углового распределения γ -квантов 2171 кэВ с уровня 2202 кэВ ядра ^{28}Al , заселяющегося в реакции $^{26}\text{Mg}(^3\text{He}, p)^{28}\text{Al}$. Данное измерение было проведено на циклотроне ФТИ им. А.Ф.Иоффе РАН (Санкт-Петербург) при энергии пучка $E_{He} = 6.9$ МэВ. Полученная величина δ была использована в расчетах и существенно повысила устойчивость фита при совместной обработке γ -линий 1229 и 2171 кэВ.

Исследуемый уровень 2202 кэВ ядра ^{28}Al может заселяться и непрямым образом с вышележащих уровней или из других каналов мюонного захвата. Наиболее существенным является реакция $^{29}\text{Al}(\mu, \nu n)$, поскольку примесь изотопа ^{29}Si в натуральном кремнии составляет 4.67%. Теоретический и экспериментальный анализ показал, что оба указанных процесса вносят незначительный вклад в систематику конечного результата.

С учетом вышеизложенных особенностей обработки данных проводилось фитирование экспериментальных спектров теоретическими профилями линий различными способами: фитирование данных первого эксперимента с учетом и без учета сложного фона, фитирование данных второго эксперимента, совместное фитирование данных обоих экспериментов. Результаты обоих экспериментов находятся в согласии как с друг с другом, так и с результатом, полученными другой группой на мезонной фабрике TRIUMF¹¹. В указанном эксперименте, проведенном на мезонной фабрике TRIUMF, для очистки фона при помощи техники совпадений исследовался $\gamma\gamma$ -каскад 1229 кэВ ($^{28}\text{Al}^*(2202 \text{ кэВ} \rightarrow 972.4 \text{ кэВ})$)—941 кэВ ($^{28}\text{Al}^*(972.4 \text{ кэВ} \rightarrow 30.6 \text{ кэВ})$). Хотя данная процедура позволяет добиться большей чистоты спектра, однако методика совпадений существенно снижает скорость набора полезной статистики в исследуемом γ -пике. Благодаря достоинствам применяемой в настоящей работе методики (измерение поляризованных мюонов, учет γ -перехода 2171 кэВ, учет фона в окрестности 1229 кэВ) точность полученного нами результата $r = 0.238 \pm 0.029_{tot}$ в 2.8 раза превышает точность результата канадской группы $r = 0.315 \pm 0.08$.

В конечном итоге была получена величина $r = 0.247 \pm 0.027$, которая является усредненным результатом обеих групп. Данный корреляционный параметр является *модельно-независимой, экспериментально измеренной величиной*.

Для оценки величины индуцированного псевдоскалярного формфактора g_P из экспериментальной величины r необходимо привлечение модельных расчетов ЯМЭ. В работе приводятся результаты всех известных на настоящий момент теоретических расчетов, которые представлены как в графическом, так и в табличном виде.

Анализ представленных данных показывает, что разброс результатов, получаемых из разных теоретических моделей, довольно велик. Однако нельзя не отметить очевидную тенденцию. Простейшая модель импульсного приближения Фьюджи-Примакова дает согласующийся с предсказанием PCAC результат. Использование все более сложных моделей расчетов ЯМЭ к все более сильному подавлению g_P . Так, современные, представляющиеся наиболее реалистичными, модели приводят к нулевым и отрицательным значениям $g_P/g_A \leq 0$, вступая в противоречие с предсказаниями PCAC ($g_P/g_A \sim 7$).

¹¹Смотри ссылку 6.

Далее следует обсуждение полученного результата, анализируются причины расхождений теоретических и экспериментальных оценок величины g_P . Последние эксперименты, включая настоящую работу, сняли ряд вопросов относительно возможной систематики экспериментального результата (согласие результатов, полученных разными группами по разным методикам, установлена незначительность непрямого заселения исследуемого уровня 2202 кэВ, время жизни которого недавно измерено с достаточной точностью, измерена мультипольность γ -перехода 2171 кэВ). Все эти факторы резко уменьшили возможность внесения существенной систематической погрешности при обработке экспериментальных данных и получении конечного результата.

На наш взгляд, основные неопределенности в настоящий момент связаны с теоретическими расчетами ЯМЭ исследуемого перехода. Расчеты показывают высокую чувствительность g_P к неосновным ЯМЭ процесса (прежде всего [121] и [011p]) и малость вклада основного ЯМЭ [101]. В этих условиях существенный вклад в характеристики перехода вносят эффекты высших порядков, надежность расчетов которых на современном этапе развития теоретической науки еще недостаточно велика.

Таким образом, вопрос о причинах подавления g_P в ядре ^{28}Si остается открытым и стимулирует как новые экспериментальные работы по исследованию корреляционных характеристик мюонного захвата на других ядрах, прямому измерению ЯМЭ, так и новые теоретические работы, необходимые для существенного улучшения понимания специфики ядерных процессов, проходящих в исследуемых парциальных переходах.

Накопленный в настоящей работе опыт, навыки и знания, полученные при проработке всех аспектов методики гамма-нейтринных угловых корреляций, могут быть использованы и используются в новых работах. В частности, наработки настоящего исследования используются при исследовании перехода первого запрета $0^+ \rightarrow 1^-$ в мюонном захвате на ядре ^{16}O , чувствительного к сумме основного и индуцированных скалярных констант $C_S + g_S$. Кроме того, данная методика может применяться для исследования структуры ядер и механизмов ядерных реакций, идущих с вылетом γ -квантов, а также эффектов ион-атомных взаимодействий внутри вещества мишени через механизм торможения дочерних ядер реакции.

В заключении дается краткое описание основных этапов проделанной работы, подведены итоги и сформулированы основные выводы, приведен список научных публикаций по теме диссертации.

Основные итоги работы.

1. Предложена комплексная теоретическая модель профилей γ -линий 1229 и 2171 кэВ, сопровождающих μ -захват в ^{28}Si , учитывающая корреляционные характеристики процесса, торможение ядер отдачи, функцию отклика детекторов, реальную геометрию установки и другие систематические эффекты. Рассмотрены как конкретные расчеты применительно к исследуемому процессу на ядрах ^{28}Si , так и общие аспекты модели, которая может быть использована и используется для анализа гамма-нейтринных угловых корреляций других переходов в мюонном захвате;
2. Впервые в рамках метода гамма-нейтринных угловых корреляций осуществлены базирующиеся на основе μSR -технологии измерение и анализ эффектов,

связанных с поляризацией мюона. В данной постановке эксперимента профили исследуемых линий чувствительны, не только к одному корреляционному коэффициенту $a_2^{(0)}$, как это имеет место в других работах, но и к другим корреляционным коэффициентам (α , $b_2^{(0)}$ и $c_1^{(0)}$), что повышает чувствительность эксперимента к величине индуцированного псевдоскалярного формфактора g_P . Кроме того, необходимые для анализа данных характеристики процесса — остаточная поляризация мюона на K -орбите, угол (\vec{P}, \vec{k}) между направлением вылета γ -кванта и спином мюона в момент захвата — *измеряются одновременно в этом же эксперименте*, а не оцениваются по каким-либо иным данным (вспомогательные измерения, результаты других экспериментов). В этом отношении цельность (самодостаточность) предложенного метода существенно снижает систематическую погрешность получаемого конечного результата;

3. Впервые исследован каскад $0^+ \xrightarrow{\mu^C} 1^+ \xrightarrow{\gamma} 2^+$ с учетом мультипольности γ -линии 2171 кэВ. В других работах изучалась только γ -линия 1229 кэВ ($0^+ \xrightarrow{\mu^C} 1^+ \xrightarrow{\gamma} 0^+$). Включение в анализ гораздо более интенсивной γ -линии 2171 кэВ позволило повысить точность экспериментального результата за счет существенно увеличения полезной статистики, а также более точного учета торможения ядер отдачи¹². Для проверки достоверности, снижения систематической погрешности и повышения точности анализа указанного каскада в специальном дополнительном эксперименте была впервые измерена величина мультипольности γ -перехода 2171 кэВ;
4. Предложена методика учета составного фона в окрестности исследуемой γ -линии 1229 кэВ, заключающаяся в восстановлении профилей фоновых линий 1204 кэВ ($^{74}\text{Ge}(n, n'\gamma)$) и 1222 кэВ ($^{28}\text{Si}(\mu, \nu n)^{27}\text{Al}^*(3956 \text{ кэВ}) \rightarrow \gamma_{1222}$). Эти фоновые пики имеют сложные, нестандартные формы, параметризация которых была выполнена по профилям других имеющихся в спектре γ -линий, образующихся в аналогичных реакциях. Корректный учет фона существенно повысил достоверность анализа;
5. Измерено отношение ядерных матричных амплитуд мюонного захвата на возбужденное состояние 2201 кэВ ядра ^{28}Si :

$$x = 0.238 \pm 0.023_{\text{stat}} \pm 0.018_{\text{sys}} = 0.238 \pm 0.029_{\text{tot.}}$$

Достигнутая точность измерения этого модельно-независимого корреляционного параметра является наилучшей на текущий момент и в 2.8 раза превышает точность результата аналогичного по цели, проводившегося примерно в этот же период времени, но по другой методике эксперимента на TRIUMF¹³. Следует особо подчеркнуть, что более точный результат был получен *исключительно за счет преимуществ примененных методик измерения и обработки данных*, принимая во внимание тот факт, что мезонная фабрика TRIUMF по своим

¹²Пик 2171 кэВ несет дополнительную информацию о процессе торможения ядер отдачи, тождественном тому, что влияет на пик 1229 кэВ, поскольку обе γ -линии разряжают один и тот же уровень одного и того же дочернего ядра. Поэтому учет γ -линии 2171 кэВ позволяет более точно определить параметры торможения ядра отдачи.

¹³Смотри ссылку 6.

параметрам превосходит мюонный пучок фазотрона ЛЯП ОИЯИ, на котором была выполнена настоящая работа;

6. На основе x получена оценка отношения формфакторов слабых взаимодействий $g_P/g_A \leq 0$. Будучи модельно зависимой, она, тем не менее, свидетельствует о сильном подавлении величины индуцированного псевдоскалярного формфактора g_P по сравнению с предсказанием гипотезы $PCAC$ ($g_P/g_A \sim 7$). Данный результат стимулирует новые экспериментальные и теоретические работы, призванные ответить на вопрос о причинах имеющегося противоречия.

Публикации. Основные научные результаты настоящего исследования опубликованы в следующих работах:

1. Measurement of the induced pseudoscalar form factor in the capture of polarized muons by Si nuclei. / V.Brudanin, V.Egorov, T.Filipova, A.Kachalkin, V.Kovalenko, A.Salamatin, Yu.Shitov, I.Štekl, S.Vassiliev, V.Vorobel, Ts.Vylov, I.Yutlandov, Sh.Zaparov, J.Deutsch, R.Prieels, L.Grenacs, J.Rak, Ch.Briançon // Nuclear Physics A – 1995. – Vol.587. P.577-595.
2. Investigation of Spin-Neutrino Angular Correlations in the Capture of Polarized Muons by Silicon Nuclei / Ch.Briançon, V.Brudanin, J.Deutsch et al. // WEIN'95 - Yamada Conf. XLIV. Proc. of IV Int.Symp. on Weak and Electromagnetic Interactions in Nuclei – Singapore – World Scientific – 1995. – P.390-394.
3. Investigation of The Spin-Neutrino Angular Correlation in The Capture of Polarized Muons by Si Nuclei. / V.Brudanin, V.Egorov, T.Filipova, A.Kachalkin, V.Kovalenko, T.Mamedov, A.Salamatin, Yu.Shitov, I.Štekl, V.Vorobel, Ts.Vylov, I.Yutlandov, Sh.Zaparov, J.Deutsch, L.Grenacs, R.Prieels. Ch.Briançon // Тез. докл. 45 Международного совещания по яд. спектр. и структуре ат. ядра – СПб. – 1995. – С.177-177.
Измерение индуцированного псевдоскалярного формфактора в захвате поляризованных мюонов ядром Si. / В.Б.Бруданин, В.Воробел, Ц.Вылов, В.Г.Егоров, Ш.Э.Запаров, А.К.Качалкин, В.Э.Коваленко, Т.Н.Мамедов, А.В.Саламатин, Ю.А.Шитов, И.Штекл, Т.В.Филипова, И.А.Ютландов, Л.Гренач, Д.Дойч, Р.Приелс, Ш.Бриансон // Мюоны и пионы в веществе. Труды III Международного симпозиума по проблемам взаимодействия мюонов и пионов с веществом, 18–21 октября – Дубна. – 1995. – С.156-161.
4. Исследование угловых распределений γ -квантов, испускаемых ядрами ^{28}Al , образующимися в реакции $^{26}\text{Mg} + ^3\text{He}$ в совпадениях с протонами / М.Ф.Кудояров, В.В.Лобанов, А.А.Пастернак, Ю.А.Шитов // Тез. докл. 46 Международного совещания по яд. спектр. и структуре ат. ядра. – СПб. – 1996. С.137-137.
The Compact 4π -Camera: First Results of γ - p - α Coincidence measurements / M.F.Kudoyarov, V.V.Lobanov, A.A.Pasternak, Yu.A.Shitov // Heavy Ion Physics / Edited by Ts.Oganessian, R.Kalpachieva. – World Scientific – Singapore – 1998. P.742-746.
5. The Spin-Neutrino Correlation Revisited in ^{28}Si Muon Capture: a New Determination of the Induced Pseudoscalar Coupling g_P/g_A / Ch.Briançon, V.Brudanin, J.Deutsch, V.Egorov, T.Filipova, M.Kudoyarov, V.Lobanov, T.Mamedov, A.Pasternak, R.Prieels, A.Salamatin, Yu.Shitov, Ts.Vylov, I.Yutlandov, Sh.Zaparov // Nucl.Phys. A – 2000. – Vol.671. – P.647-657.

Рукопись поступила в издательский отдел
26 апреля 2001 года.