

Г-681

Объединённый институт ядерных исследований

На правах рукописи

ГОРДЕЕВ
Виктор Александрович

УДК 539.126

СПИН-РЕЗОНАНСНАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ
МЮОНА И МЮОНИИ

Специальность: 01.04.16 - физика ядра
и элементарных частиц

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание учёной степени
доктора физико-математических наук

Дубна 1991

Работа выполнена в Ленинградском институте ядерной физики им. Б. П. Константинова АН СССР.

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук,
член-корреспондент АН СССР

Б. А. Никольский,

доктор физико-математических наук,
профессор

В. Г. Зинов,

доктор физико-математических наук,
старший научный сотрудник

Г. Я. Коренман.

Ведущее предприятие: Московский физико-технический институт.

Защита диссертации состоится " сентябрь 1991 г.
в _____ часов на заседании Специализированного совета Д-047.01.03 при Лаборатории ядерных проблем Объединённого института ядерных исследований, г. Дубна Московской области.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

Автореферат разослан 26 июля 1991 г.

Учёный секретарь Специализированного совета
доктор физико-математических наук, профессор

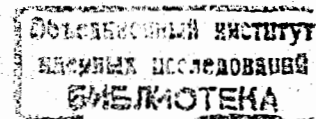
Д. А. Батусов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Мюонный метод исследования вещества берёт своё начало с работы Т. Ли и Ч. Янга ^{1/1}, где впервые рассматривался вопрос о несохранении пространственной и зарядовой чётности в слабых взаимодействиях. Экспериментальное обнаружение резкой асимметрии в распределении позитронов $\mu-e$ - распада ^{1/2} и явилось основой рождения нового ядерно-физического метода исследования свойств мюона и мюония (лёгкого аналога атома водорода - связанной системы $\mu^+e^- \equiv \mu e$) и способов их взаимодействия в веществе - μSR ($\mu e SR$) - спектроскопии. μSR - метод по физической сути, возможностям и перспективам, сравним с методом ядерного магнитного резонанса (ЯМР), а соответственно, $\mu e SR$ - метод с методом электронного парамагнитного резонанса (ЭПР). Методы ЯМР и ЭПР относятся к классу спин-резонансных методов молекулярной спектроскопии, поэтому естественно будет назвать μSR и $\mu e SR$ - методы - спин-резонансной спектроскопией мюона и мюония.

В течение более 30 лет после 1957 года происходило (и происходит сейчас) систематическое исследование свойств мюона и мюония. В СССР работы по физике мюона начались практически сразу после открытия несохранения чётности в $\mu-e$ - распаде с использованием пучков P^+ -мезонов фазотрона ЛЯП ОИЯИ. Пионерами этих исследований являются И. И. Гуревич, Б. А. Никольский (ИАЭ), А. И. Алиханян, В. Г. Кириллов-Угрюмов (ФИАН). В 60-е годы были заложены основы мюонного метода исследования вещества и приоритет этих исследований безусловно принадлежит советским физикам. В работах В. Г. Носова и И. В. Яковлевой (ФИАН), И. Г. Ивантера и В. П. Смилги (ИАЭ) заложены теоретические основы мюонного метода. В работах В. Г. Фирсова, Ю. В. Обухова и др. (ИГЭФ), И. И. Гуревича, Б. А. Никольского и др. (ИАЭ) разработаны экспериментальные методы исследования и положено начало систематическим исследованиям физики и химии взаимодействия мюона и мюо-

- 1) Lee T. D., Yang C. N. Phys. Rev., 1956, v. 104, No. 1, p. 254.
- 2) Ga-win R. L. et al. Phys. Rev., 1957, v. 105, No. 4, p. 1415.



ния с веществом в жидкой и твердой фазах *). В 70-е годы происходит резкое возрастание числа работ с использованием мюонов, что, прежде всего, определяется вводом в строй светосильных ускорителей - мезонных фабрик SIN (Швейцария), LAMPF (США), TRIUMF (Канада) и образованием там большого числа новых экспериментальных μSR - групп. В 1976 году пущен в эксплуатацию мюонный канал на синхротроне ЛЯФ и начались экспериментальные исследования с мюонами на установке "Мюоний".

В 70-е годы начались систематические исследования методом μSR атомарных полупроводников (Si, Ge). Интерес к этим исследованиям прежде всего связан с тем, что в малолегированных образцах Si и Ge экспериментально наблюдается долгоживущий мюоний и монокристаллы этих элементов явились полигоном для проверки выводов теории. В 1973 году в работе группы Беркли ^{3/} в монокристаллах кремния обнаружено парамагнитное состояние ("аномальный" мюоний), константа сверхтонкого взаимодействия которого существенно (~ в 100 раз) меньше обычного ("нормального") мюония и кроме того обладает явно выраженной анизотропией по отношению к осям симметрии монокристалла. "Нормальный" и "аномальный" мюоний проявляются в эксперименте одновременно. Однако природа этих состояний (и особенно это касается "аномального" мюония) была загадочной. Решение этой загадки было одной из задач экспериментальной μSR - группы ЛЯФ.

В работах И.И. Гуревича, Б.А. Никольского и др. (ИАЭ) заложены основы применения мюонного метода для исследования магнетиков. Магнитный момент мюона явился чувствительным магнитным зондом для изучения внутренних магнитных полей. В ЛЯФ эти возможности были распространены на изучение распределения магнитных полей в промышленных электротехнических сталях и созданы способы практического

*). Настоящая диссертация посвящена исследованиям с положительно заряженными мюонами и поэтому здесь не рассматриваются работы с использованием отрицательно заряженных мюонов, где успехи советских ученых как в теоретических, так и в экспериментальных работах также существенны.

3) Brewer J.H. et al. Phys. Rev. Lett., 1973, v.31, No.3, p.143.

применения μSR - метода непосредственно в производстве.

В 1976 году в книге В.Г. Барышевского ^{4/} была высказана идея, что атом мюония (а также водород, мю-мезоатомы ядер, обладающих спином) в основном состоянии имеет дополнительную квантовую характеристику - электрический квадрупольный момент, сравнимый по порядку величины с ядерными квадрупольными моментами. В работах ^{5/}, выполненных в TRIUMF, была обнаружена слабая анизотропия сверхтонкого взаимодействия "нормального" мюония в кристаллическом α -кварце, что и было интерпретировано как квадрупольное взаимодействие мюония в неоднородных электрических внутрикристаллических полях. Наличие квадрупольного момента у мюония открывает новое направление исследований методом μSR - исследование внутренних электрических полей, что существенно расширяет объекты исследований мюонным методом, включая изоляторы с некубической симметрией внутрикристаллического поля, сегнетоэлектрики и т.д. Поэтому систематические исследования квадрупольных осцилляций мюония нам представляются крайне важными.

Изучение процессов, происходящих с мюонием, важно и для выяснения природы слабого взаимодействия. Например, отсутствие (либо обнаружение) перехода мюоний-антимюоний является критерием справедливости (либо несправедливости) законов сохранения электронного и мюонного лептонных чисел. Впервые на возможность изучения этого процесса было указано Б.М. Понтекорво ^{6/}. Первый эксперимент по поиску конверсии мюоний-антимюоний выполнен на синхротроне NEVIS (Колумбийский университет, США) Д.Д. Амато и др. ^{7/}. Поисковые эксперименты и методическая подготовка к аналогичным исследованиям в ЛЯФ велись с 1978 года. Однако более полный теоретический и экспериментальный анализ возможности постановки такого эксперимента начался с 1986 года в связи с подготовкой к работе на Московской мезонной фабрике ИЯИ АН СССР пуск в строй которой ожидается в ближайшие годы. Рассмотрены также другие воз

4) Барышевский В.Г. Ядерная оптика поляризованных сред. Минск, БГУ, 1976, 144 с.

5) Brewer J.H. et al. Phys. Rev. Lett., 1979, v.42, No.12, p.808. Brewer J.H. et al. Hyp. Inter., 1979, v.6, p.181.

6) Понтекорво Б. ЖЭТФ, 1957, т.33, в.2(3), с.549.

7) Amato J.J. et al. Phys. Rev. Lett., 1968, v.21, No.25, p.1709.

возможности применения мюонного метода для экспериментальной проверки теории электрослабого взаимодействия.

Цели и задачи работы. 1. Создание на мюонном канале синхротрона ЛИЯФ установки "Мюоний" и комплекса аппаратуры (электронная логика, системы питания и стабилизации, системы измерения малых магнитных полей, системы управления и автоматики, криостаты и термостаты и т.д.), необходимой для её эксплуатации. Исследование пучков мюонов. 2. Систематическое исследование квадрупольного взаимодействия мюония в неоднородных внутрикристаллических электрических полях и исследование возможности мюонного метода для изучения нового класса веществ. 3. Исследование характеристических состояний атома мюония в атомарных полупроводниках и бинарных полупроводниковых соединениях. Изучение природы "аномального" мюония. 4. Анализ возможности применения мюонного метода для исследования редких распадов мюона. 5. Развитие способов применения методов спин-резонансной спектроскопии мюона и мюония в прикладной физике и технике.

Научная новизна. 1. Проведено экспериментальное исследование параметров квадрупольного взаимодействия мюония в кристаллической решётке α -кварца. Определена ориентация осей тензора градиента электрического поля в исследуемых образцах. 2. Впервые предложен и реализован метод экспериментального определения знака квадрупольной постоянной Q . Экспериментально показано, что с увеличением температуры образца происходит изменение величины и знака квадрупольной постоянной, обусловленное быстрой диффузией мюония по своим местам локализации. 3. Проведены систематические исследования условий образования и взаимодействия с решёткой вещества "нормального" и "аномального" мюония, диамагнитной фракции в монокристаллах кремния n и p -типа проводимости в широком диапазоне температур. Предложена схема взаимодействия мюона и мюония в веществе. 4. Проведена экспериментальная проверка модели молекулярного радикала для "аномального" мюония. 5. Впервые показано наличие состояний "нормального" и "аномального" мюония в бинарном полупроводниковом соединении $GaAs$. Показана универсальность механизма взаимодействия мюона и мюония в атомарных полупроводниках и в бинарных полупроводниковых соединениях. 6. Проведено со-

поставление основных экспериментальных данных, характеризующих состояние "аномального" мюония и "аномального" водорода (обнаруженного в кремнии методом ЭПР /8/) и установлена общность их структур. 7. Предложена качественная микроскопическая модель взаимодействия положительно заряженного мюона с веществом мишени с момента начала термализации до момента распада мюона.

Практическая ценность. 1. Результаты работы полезны для более глубокого понимания физики взаимодействия заряженных мюонов с веществом. В μSR -экспериментах наряду с исследованием целого ряда тонких физических эффектов, таких, например, как влияние среды на сверхтонкое взаимодействие в водородоподобном атоме, можно решать и вопросы, важные для технологии полупроводников. Это вопросы о состоянии водорода в этих соединениях, о структуре внутрикристаллического поля, о роли концентрации носителей заряда, типе проводимости, о ширине запрещённой зоны для взаимодействия водорода (мюония) с компонентами полупроводниковых композиций, о захвате водорода на структурные и имплантированные примеси, о степени дислоцированности технических материалов и ряд других вопросов. 2. Предложена новая постановка эксперимента по поиску безнейтринного распада мюона с помощью установки, использующей стандартную μSR -технику, дополненную на выходе электронного телескопа магнитным спектрометром. 3. Предложена новая низкофононовая методика исследования перехода мюоний-антимюоний. Проведена экспериментальная оценка фоновых условий в предлагаемой постановке эксперимента. 4. Предложен и реализован способ определения магнитной текстуры и способ определения параметров магнитной неоднородности ферромагнитных материалов. Проведено экспериментальное исследование влияния различных режимов термической обработки образцов электротехнических сталей на параметры тензора магнитной текстуры и направление намагниченности доменов. 5. Предложен и реализован способ определения концентрации радиационных дефектов в слабелегированных полупроводниках и изоляторах. 6. Экспериментально показано, что существование квадруполь-

8) Горелкинский Ю.В., Невинный И.Н. Письма в ЖЭТФ, 1987, т. 13, в.2, с. 105.

ного момента мюония открывает новые возможности в мюонном методе и может быть использовано для изучения неоднородных внутрикристаллических электрических полей.

Апробация работы и публикации. Основные результаты диссертации докладывались на научных семинарах в ЛИЯФ, ИТЭФ, ЛЯП ОИЯИ, на сессиях Отделения ядерной физики АН СССР в 1978-1988 г.г., на Зимних Школах ЛИЯФ по физике ядра и элементарных частиц (Усть-Нарза СССР, 1980, 1987, 1989), на Всесоюзных совещаниях (Москва, 1979; Звенигород, 1981, 1983, 1985, 1987; Алма-Ата, 1989), на Международных конференциях в Дубне (СССР, 1977, 1987), Цюрихе (Швейцария, 1978), Ванкувере (Канада, 1980), Шимодэ (Япония, 1983), Упсале (Швеция, 1986), Праге (Чехословакия, 1989), Москве (СССР, 1989). Материал диссертации отражен в 37 публикациях в советской и зарубежной печати.

Структура диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения, содержит 75 рисунков, 15 таблиц и список литературы из 185 наименований. Общий объем диссертации 232 страницы.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении кратко описана история развития мюонного метода исследований, сформулирована цель диссертационной работы, дано обоснование актуальности и важности обсуждаемых проблем.

В первой главе рассматриваются основные принципы мюонного метода исследования, дано описание характеристик пучка мюонов мю-мезонного канала синхротронного ускорителя ЛЯП и установки "Мюоний", на которой и проводились экспериментальные исследования. Блок-схема установки "Мюоний" показана на рис. I. Основными элементами установки являются: сцинтилляционные счетчики (1-5) для регистрации остановившихся в мишени М мюонов и позитронов μ -e - распада; кольца Гельмгольца (КГ) для создания в области мишени однородного магнитного поля, направленного перпендикулярно (H_1) или параллельно ($H_{||}$) относительно направления пучка мюонов; компенсирующие катушки (КК) для компенсации магнитного поля Земли; рас-

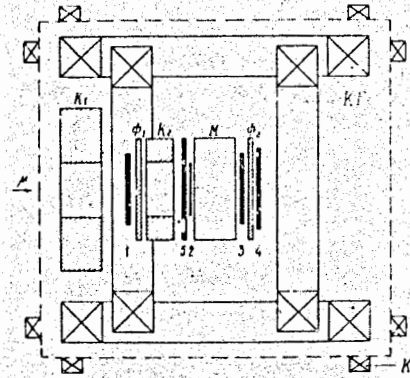


Рис. I.
Блок-схема установки "Мюоний"

сеянного магнитного поля от магнита ускорителя и магнитных элементов мю-мезонного канала; фильтры Φ_1, Φ_2 и коллиматоры K_1 и K_2 для получения максимума остановок мюонов в исследуемой мишени, задания формы пучка и порога регистрации позитронов; электронная логика. Область расположения мишени М оборудована системой кристаллов и термостатов.

Основной принцип μ SR - метода есть регистрация актов $\mu^+ \rightarrow e^+ \nu \bar{\nu}$ - распадов остановившихся мюонов и определение по этой информации амплитуд характеристических состояний, включающих в себя μ^+ , возможных переходов между ними и поляризации мюона в каждом состоянии. Для каждого зарегистрированного акта распада измеряется интервал времени между остановкой μ^+ и вылетом позитрона распада в данном телесном угле и строится временная гистограмма событий $N_{e^+}(t)$.

В перпендикулярном магнитном поле магнитный момент мюона будет прецессировать с ларморовой частотой:

$$(f_L)_\mu = \frac{\mu_\mu H}{I \hbar} = \frac{e H}{m_\mu c}, \quad (1)$$

где μ_μ - магнитный момент мюона; I - его спин и временная зависимость $N_{e^+}(t)$ в этом случае будет иметь вид:

$$[N_{e^+}(t)]_1^{\mu^+} = N_0 e^{-t/\tau} [1 + a(R) \cos \omega_\mu t] + \varphi, \quad (2)$$

где N_0 - множитель, определяемый суммарной статистикой эксперимента; $\tau = 2,19703(4) \cdot 10^{-6}$ с - время жизни мюона; $a(R)$ - коэффициент асимметрии μ -e - распада, слабо зависящий от эффективной тормозной толщины мишени R; $\omega_\mu = 2\pi (f_L)_\mu$ - круговая частота прецессии спина мюона; φ - фон случайных совпадений (в наших условиях $\varphi/N_0 < 0,01$, поэтому в дальнейших выражениях

величиной Φ (будем пренебрегать).

В продольном поле прецессия спина мюона отсутствует и для $N_{e^+}(t)$ имеем:

$$[N_{e^+}(t)]_{\parallel}^{\mu^+} = N_0 e^{-t/\tau} [1 + a(R)]. \quad (3)$$

На рис.2 приведены экспериментальные спектры μ - e^- -распада в углероде в перпендикулярном и продольном магнитных полях, полученные на установке "Мюоний".

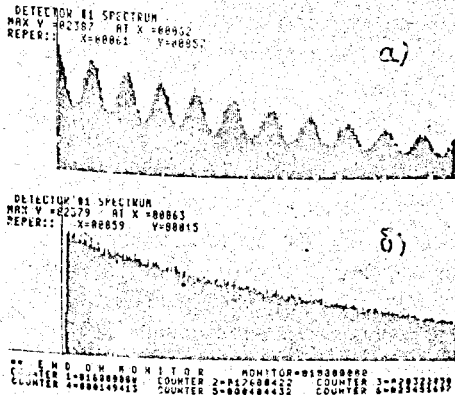


Рис.2. Экспериментальный спектр μ - e^- -распада мюонов, установившихся в углероде ($R_{эфф.} = 4,05 \text{ Г/см}^2$) в перпендикулярном магнитном поле $H_{\perp} = 354 \text{ Э}$ (а) и в продольном поле $H_{\parallel} = 250 \text{ Э}$ (б). Фотографии с экрана дисплея. Цена деления канала $\delta = 10 \text{ нс-канал}$.

Магнитный момент связанной системы $\mu^+e^- \equiv \mu_{\mu e}$ (мюония) есть сумма магнитных моментов мюона и электрона и примерно равен магнитному моменту электрона $\mu_{\mu e} \approx eh/2m_e c$. Для триплетного состояния мюония 3S_1 ($J = 1, m = 1$) ларморова частота прецессии:

$$(\frac{f_c}{2})_{\mu e} = \frac{eH}{2m_e c}, \quad (4)$$

т.е. примерно в 103 раза больше частоты прецессии в поле H свободного мюона, что даёт возможность экспериментального разграничения этих двух состояний. Как показано И.И.Гуревичем, Б.А.Никольским и др. [9], одночастотная прецессия мюония с круговой

9) Гуревич И.И. и др. ЖЭТФ, 1971, т.60, в.2, с.471.

частотой $\omega_{\mu e} = 2\pi (\frac{f_c}{2})_{\mu e}$ является лишь приближением, справедливым при достаточно малых временах наблюдения. В действительности временная картина зависимости $N_{e^+}(t)$ будет определяться несколькими частотами, связанными со сверхтонким расщеплением уровней энергии системы (μ^+e^-) в магнитном поле. Реально в эксперименте удаётся наблюдать (при измерениях в слабых магнитных полях $H_{\perp} < 150 \text{ Э}$) две частоты, близкие к $\omega_{\mu e}$, и временная зависимость имеет вид биений:

$$[N_{e^+}(t)]_{\perp}^{\mu_{\mu e}} = N_0 e^{-t/\tau} [1 + \frac{1}{2} a(R) \cos \omega_{\mu e} t \cdot \cos \Omega t], \quad (5)$$

где Ω - частота модуляции. Наблюдение двухчастотной прецессии позволяет найти частоты $\omega_{\mu e}$ и Ω , которые связаны с частотой сверхтонкого расщепления атома мюония ω_0 в среде простым соотношением $\omega_0 = \omega_{\mu e}^2 / \Omega$. Величина ω_0 в свою очередь, связана с размером водородоподобной системы (μ^+e^-) в среде.

На рис.3 представлена гистограмма $[N_{e^+}(t)]_{\perp}^{\mu_{\mu e}}$ в плавленном кварце ($T = 300 \text{ К}$).

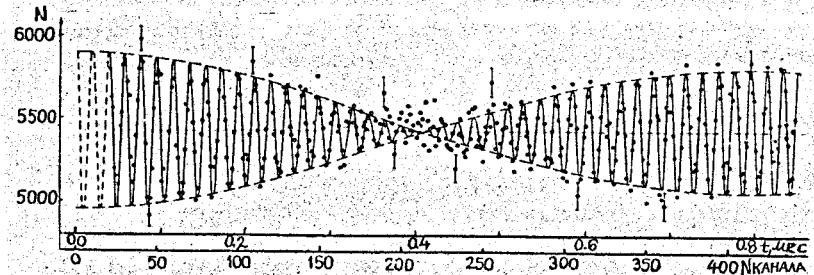


Рис.3. Двухчастотная прецессия мюония в плавленном кварце ($H_{\perp} = 37 \text{ Э}$, $T = 300 \text{ К}$). Данные исправлены, а распад и медленную прецессию на частоте свободного мюона. Сплошные кривые - теоретическая зависимость, полученная по формуле (5). Цена деления канала $\delta = 1,92 \text{ нс}$.

В продольном поле зависимость $N_{e^+}(t)$ для среды, в которой образуется мюоний, имеет вид:

$$[N_{e^+}(t)]_{\parallel}^{M_{\mu}} = N_0 e^{-t/\tau} \left[1 + a(R) \frac{1}{2} \left(\frac{1+2\chi^2}{1+\chi^2} \right) \right], \quad (6)$$

где $\chi = H/H_0$, а величина H_0 - представляет собой магнитное поле, создаваемое магнитным моментом мюона на электроны мюония. При $H \geq H_0$ в значительной мере исчезает взаимодействие магнитных моментов электрона и мюона в атоме мюония. Это обстоятельство даёт возможность идентификации формы нахождения атома мюония в среде.

Реально в большинстве случаев мюониевая прецессия не наблюдается ввиду быстрых химических реакций мюония, протекающих за время $\sim 10^{-10}$ с, существенно меньшее возможного времени наблюдения $\sim 10^{-8}$ с, а также из-за наличия спин-обменных взаимодействий между электроном мюония и электронами среды. Однако косвенно информацию о процессах, происходящих с мюонием в веществе, можно извлекать из измерений осевой поляризации спина мюона ($P_{\text{ост}}$), сдвига фазы (δ) мюонной прецессии и времени релаксации поляризации τ_{\perp} и τ_{\parallel} при различных значениях магнитных полей H_{\perp} , H_{\parallel} и температуры среды.

Обычные формулы для математической обработки спектров распада в перпендикулярном и продольном магнитных полях следующие:

$$[N_{e^+}(t)]_{\perp} = N_0 e^{-t/\tau} \left[1 + a(R) P_{\text{ост}} e^{-t/\tau_{\perp}} \cos(\omega_{\mu} t + \delta) \right] + \varphi, \quad (7)$$

$$[N_{e^+}(t)]_{\parallel} = N_0 e^{-t/\tau} \left[1 + a(R) P_{\text{ост}} e^{-t/\tau_{\parallel}} \right] + \varphi. \quad (8)$$

Исковыми параметрами являются: N_0 , τ_{\perp} , τ_{\parallel} , $P_{\text{ост}}$, $P_{\text{ост}}$, ω_{μ} , δ . Параметр $a(R)$ находится из контрольных измерений с мишенью из углерода.

При работе в продольных магнитных полях необходимо помнить, что распределение $[N_{e^+}(t)]_{\parallel}$, даваемое выражением (8), наиболее информативно для наблюдения изменения поляризации мюона во времени (параметр τ_{\parallel}), но не позволяет получить абсолютное значение величины $P_{\text{ост}}$. Для определения величины $P_{\text{ост}}$ необходимо проводить нормировку путём сравнения результатов двух опытов, второй из которых выполняется в перпендикулярном поле.

При этом для уменьшения систематических погрешностей важно, чтобы опыты в перпендикулярном и продольном магнитном поле проводились, по возможности, одновременно. В настоящей работе применен метод "скрещенных" измерений. Набор спектров для H_{\perp} и H_{\parallel} проводился не последовательно один за другим, а частями путём многократного перехода $H_{\perp} \rightarrow H_{\parallel} \rightarrow H_{\perp} \rightarrow H_{\parallel} \dots$, с последующим их суммированием в два μSR -спектра, соответствующих измерению в перпендикулярном и продольном магнитном поле.

Во второй главе рассмотрен характер сверхтонкого взаимодействия (СТВ) в атоме мюония, внедрённого в кристаллическую решётку вещества. Энергия СТВ между ядром (мюоном) и электроном в атоме мюония может быть записана в виде:

$$V(\vec{r}, \vec{S}, \vec{I}) = V_1(\vec{r}) \vec{S} \cdot \vec{I} + V_2(\vec{r}) \{ 3(\vec{S} \cdot \vec{n})(\vec{I} \cdot \vec{n}) - \vec{S} \cdot \vec{I} \}, \quad (9)$$

где $V_1(\vec{r}) = 16 \pi \mu_B \mu_N \delta(\vec{r}) / 3I$, $V_2(\vec{r}) = -2 \mu_B \mu_N / I \cdot r^3$,

$\vec{n} = \vec{r}/r$, $\vec{r} = \vec{r}_1 - \vec{r}_2$, $\vec{r}_1, \mu_e, \vec{S}$ и $\vec{r}_2, \mu_{\mu}, \vec{I}$ - координаты, магнитные моменты и операторы спина электрона и ядра, соответственно. При обычном анализе сверхтонкого расщепления уровней атомов, находящихся в основном $1S$ состоянии, второе слагаемое в выражении для $V(\vec{r}, \vec{S}, \vec{I})$ не учитывают, так как при усреднении по сферически симметричному состоянию оно равно нулю. Однако, как впервые показал В.Г. Барышевский ¹⁰, взаимодействие пропорциональное V_2 может примешать к триплетному состоянию мюония, например, состояние $3D_1$. В результате, не изменяя практически энергии триплетного уровня, малая примесь к нему D -состояния приведёт к качественно новому результату - к появлению у системы квадрупольного момента Q^* . Наличие квадрупольного момента приводит к расщеплению уровней сверхтонкой

10) Барышевский В.Г. Ядерная оптика поляризованных сред - Минск, БГУ, 1976, 144 с.

*) Сказанное можно сравнить с аналогичным механизмом возникновения квадрупольного момента у дейтрона.

структуры при помещении Mu в неоднородное электрическое (например, внутрикристаллическое) поле. В этом случае спиновый гамильтониан мюония в отсутствие внешнего магнитного поля имеет вид:

$$\mathcal{H} = A \vec{S} \cdot \vec{I} + \frac{1}{6} Q_{ik} p_{ik} \quad (I0)$$

Здесь первое слагаемое есть обычное сверхтонкое взаимодействие между спинами мюона (\vec{I}) и электрона (\vec{S}), второе слагаемое - квадрупольное взаимодействие с неоднородным электрическим полем; A - константа СТВ; $p_{ik} = \partial^2 \varphi / \partial x_i \partial x_k$ - тензор градиента электрического поля (ГЭП), создаваемого окружением в центре мюония; $Q_{ik} = C_F \{ (F_i F_k) - \frac{2}{3} F^2 \delta_{ik} \}$ - оператор квадрупольного момента мюония; $\vec{F} = \vec{I} + \vec{S}$ - полный момент мюония; $C_F = \frac{3}{2} eQ$ для $F = I$ ($C_F = 0$ для $F = 0$); Q - квадрупольный момент мюония.

Если кристалл находится во внешнем магнитном поле \vec{H} , спиновый гамильтониан мюония принимает вид:

$$\mathcal{H} = A \vec{S} \cdot \vec{I} + \frac{1}{6} Q_{ik} p_{ik} - g_e \mu_e \vec{S} \cdot \vec{H} - g_\mu \mu_\mu \vec{I} \cdot \vec{H} \quad (II)$$

где g_e и μ_e (g_μ и μ_μ) - соответственно, g -фактор и магнитный момент электрона (мюона).

Поведение поляризации мюонов в составе атома мюония полностью определяется структурой энергетических уровней (II). Последние зависят от величины \vec{H} и его ориентации относительно главных осей тензора ГЭП. Для произвольной ориентации главных осей тензора ГЭП приближённые выражения для энергетических уровней можно представить в виде:

$$\begin{aligned} E_0 &= -\frac{3}{4} A - \frac{\omega_+^2}{A}, \quad E_1 = A + \frac{\omega_+^2}{A} - \frac{d}{4} f(\nu, \varphi), \\ E_{2,3} &= A/4 \pm \omega_- + \frac{d}{8} f(\nu, \varphi), \end{aligned} \quad (I2)$$

где $d = eQ p_{zz}$ - квадрупольная постоянная мюония в кристалле; $\eta = |(p_{xx} - p_{yy}) / p_{zz}|$ - параметр, характеризующий анизотропию тензора ГЭП в кристалле; $\omega_\pm = (\omega_e \pm \omega_\mu) / 2$; ω_e и ω_μ - частоты Ларморовской прецессии спинов электрона и мюона в магнитном поле \vec{H} ; $f(\nu, \varphi) = 3 \cos^2 \nu - 1 + \eta \sin^2 \nu \cos 2\varphi$ - функция, описывающая квадрупольный вклад в (II); ν, φ - полярный и азиму-

тальный углы, характеризующие наклон \vec{H} относительно оси тензора ГЭП.

Временная зависимость вектора поляризации мюонов определяется частотами всех возможных переходов между уровнями:

$\omega_{ik} = (E_i - E_k) / \hbar$. Причём экспериментально легче всего наблюдать переходы между подуровнями триплета (E_1, E_2, E_3), которые и несут основную информацию о квадрупольном взаимодействии.

В первых работах, выполненных в ЛИФ, проведены измерения параметров квадрупольного взаимодействия мюония в α -кварце. Разработан способ измерения знака квадрупольной постоянной d и показано, что при изменении температуры образца от $T = 293$ К до $T = 90$ К имеет место изменение знака вклада квадрупольного взаимодействия в сверхтонкое расщепление мюония. Это может быть связано как с изменением ориентации главных осей тензора ГЭП, так и с процессом диффузии мюония.

Эти вопросы и явились толчком для проведения более тщательных исследований квадрупольного взаимодействия мюония в кристаллическом α -кварце. Исследования проведены на оптически чистом монокристалле α -кварца для следующих трёх ориентаций: I - оптическая ось \hat{C} кристалла направлена вдоль вектора магнитного поля \vec{H} , одна из осей второго порядка \hat{a} - вдоль вектора поляризации \vec{P}_0 ; II - ось \hat{C} вдоль \vec{P}_0 , ось \hat{a} - вдоль \vec{H} ; III - ось \hat{C} вдоль \vec{P}_0 , ось \hat{a} - перпендикулярно \vec{H} . Эксперименты проводились в температурном интервале 75 ± 300 К. Основные экспериментальные данные показаны на рис. 4, 5, 6.

Приведённые экспериментальные данные указывают на необходимость учёта процесса диффузии мюония, влияние которого растёт с ростом температуры образца, а также позволяет установить возможные точки локализации мюония в α -кварце в процессе диффузии (рис. 7).

Приведённые результаты показывают, что диффузия мюония по возможным местам его локализации в решётке образца сказывается уже в области температур 90-120 К. Однако скорость диффузии в этой области температур достаточно медленная и этот процесс не влияет на величину измеряемых параметров квадрупольного взаимодействия в образце и параметры тензора ГЭП. Противоположная

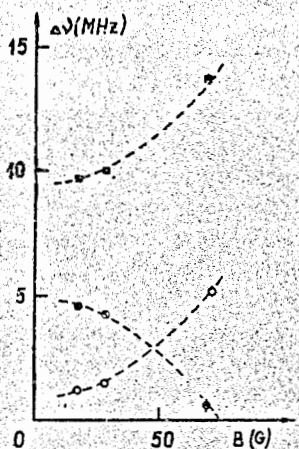


Рис. 4.
Экспериментальная зависимость разности частот прецессии Mu в α - SiO_2 от величины внешнего магнитного поля при $T = 75$ К. Светлые точки - ориентация I. Тёмные точки и квадратики - ориентация II. Пунктирные кривые - теоретический расчёт.

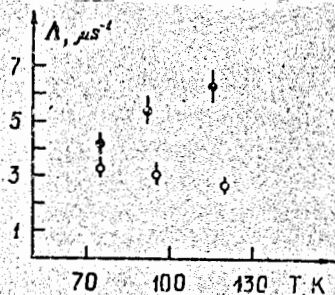


Рис. 5.
Температурная зависимость скорости релаксации мюния в α -кварце. Внешнее магнитное поле $H = 70$ Э. Светлые точки - ориентация I. Тёмные точки - ориентация II.

картина наблюдается при $T > 180$ К, где тензор ГЭП становится аксиально-симметричным, а квадрупольная постоянная d уменьшается по величине и меняет знак. Такое изменение величины и симметрии квадрупольного взаимодействия при увеличении T обусловлено быстрой диффузией Mu по своим низкотемпературным местам локализации. Если скорость переходов мюния из одного местоположения в другое $1/\tau$ будет много больше $|d|$, то его поведение должно определяться усреднённым спиновым гамильтонианом, описывающим атом с квадрупольным моментом в неоднородном электрическом поле. В этом случае усреднение по углам приводит к тому, что средний

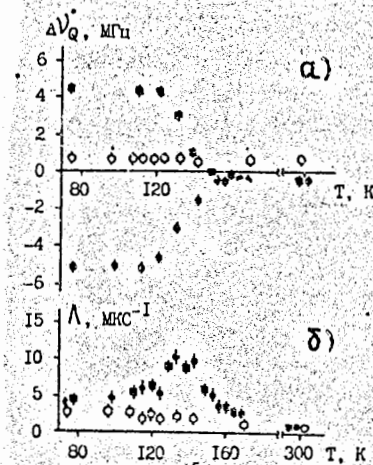


Рис. 6.
а) Экспериментальная температурная зависимость квадрупольного вклада ΔV_Q в разность частот прецессии Mu в α -кварце при $H_1 = 70$ Э.
б) Температурная зависимость скорости релаксации Mu в α -кварце во внешнем магнитном поле $H_1 = 70$ Э. Светлые точки - ориентация I. Тёмные точки - ориентация II. Квадратики - ориентация III.

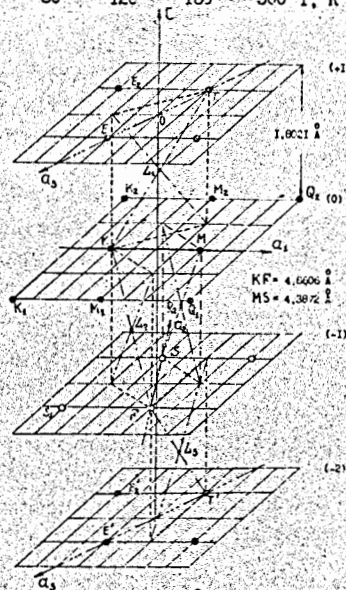


Рис. 7.
Структура кристалла α -кварца (вид сбоку, перпендикулярно слоям). \bullet, \circ, \circ - атомы кремния. Атомы кислорода расположены в центре $Si-Si$ связей (на рис. не показаны). $\hat{a}_1, \hat{a}_2, \hat{a}_3$ - оси симметрии 2-го порядка. L_1, L_2, L_3 - места локализации мюния для случая левого α -кварца.

градиент поля $\langle f_{ik} \rangle$, который "чувствует" Mu , совершающий быстрые перескоки между своими низкотемпературными положениями λ

α - кварце, будет иметь аксиальную симметрию относительно оси \hat{C} ; а наблюдаемая квадрупольная постоянная $\langle d \rangle = eQ \langle I_{zz} \rangle$ изменится следующим образом:

$$\langle d \rangle = \left[\sin^2 \alpha_0 - \frac{1}{2} \cos^2 \alpha_0 (1 - \eta) \right] \cdot d. \quad (13)$$

α_0 - угол между осью симметрии тензора ГЭИ и осью \hat{C} кристалла. Формула (13) хорошо описывает экспериментальную ситуацию, свидетельствуя в пользу того, что высокотемпературный случай определяется целиком диффузией.

Существование квадрупольного момента мюония открывает новые возможности в мюонном методе, связанные с исследованием квадрупольного расщепления уровней мюония и механизма его квадрупольной релаксации в веществе. В этом смысле мюонный метод становится сходным с ядерным квадрупольным резонансом и может быть использован для изучения не только магнитных, но и неоднородных внутрикристаллических электрических полей.

В третьей главе приводятся результаты экспериментальных исследований "нормального" (M_{II}) и "аномального" (M_{II}^*) мюония в атомарных полупроводниках (на примере Si) и бинарных полупроводниковых соединениях (на примере GaAs).

Впервые "аномальный" мюоний был обнаружен в кремнии К.М. Кроу и др. /13/ в 1973 году. Более тщательные экспериментальные исследования "аномальных" частот в кремнии были выполнены Б.Д. Патерсоном и др. /11/, а теоретический анализ Ю.М. Белоусовым, В.Н. Горелкиным и В.П. Смилкой /12/. В последующих экспериментах "аномальный" мюоний был обнаружен также в германии /13/ и алмазе /14/.

С целью исследования механизма взаимодействия атома мюония в монокристаллах атомарных полупроводников на установке "Мюоний" были проведены систематические исследования слабелегированных образцов кремния разного типа проводимости в широком диапазоне температур (60-730 К). В экспериментах определялись амплитуды всех возможных состояний мюона в кремнии при различных температурах,

- 11) Patterson B.D. et al. Phys.Rev.Lett., 1978, v.40, No.20, p.1347.
- 12) Белоусов Ю.М. и др. ЕСТФ, 1978, т.74, в.2, с.629; в.75, в.6(12), с.1999.
- 13) Graf H. et al. Hyperf. Inter., 1979, v.6, p.177.
- 14) Holzschuh et al. Phys. Rev., 1962, v.A25, p.1272.

скорость релаксации указанных состояний и возможные переходы между ними. Эксперименты проводились как в перпендикулярных, так и в продольных магнитных полях. В условиях быстрой релаксации системы спинов мюонов такая постановка опытов более информативна, поскольку продольное магнитное поле в значительной степени предотвращает действие деполаризующих факторов. Программа опытов с кремнием включала измерения двух типов. В условиях, когда прецессионные частоты M_{II} - и M_{II}^* -состояний доступны для их прямого наблюдения, использовался метод выделения соответствующих фурье-компонент распределения времён μ -e - распадов в перпендикулярном магнитном поле. Второй тип измерений, в которых прецессионные частоты M_{II} и M_{II}^* состояний не изучались, служил для исследования характеристик процесса деполаризации мюонов в кремнии в перпендикулярных и продольных магнитных полях. Часть полученных экспериментальных данных представлена на рис.8-10. На рис.8 приведены результаты фурье-анализа экспериментальных спектров для образца кремния p-типа проводимости при $T = 60$ К. Из рис.8 видно, что при $T = 60$ К в кремнии наблюдаются состояния M_{II} , M_{II}^* и μ^+ -диамагнитная фракция. На рис.9,10 зависимости

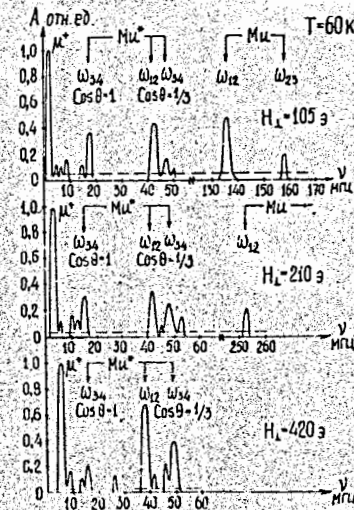


Рис.8. Спектры наблюдаемых частот в образце кремния p-типа при $T = 60$ К. Стрелками показаны расчётные значения частот состояний M_{II} и M_{II}^* .

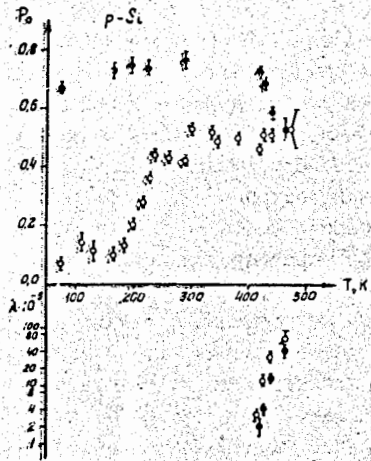


Рис. 9.
Температурная зависимость P_0 (вверху) и λ (внизу) для кремния p-типа при $H_{||} = 420$ Э (светлые кружки) и $H_{||} = 200$ Э (чёрные кружки). Ниже 400 К значения $\lambda < 1 \cdot 10^5$ с⁻¹ и на рисунке не показаны.

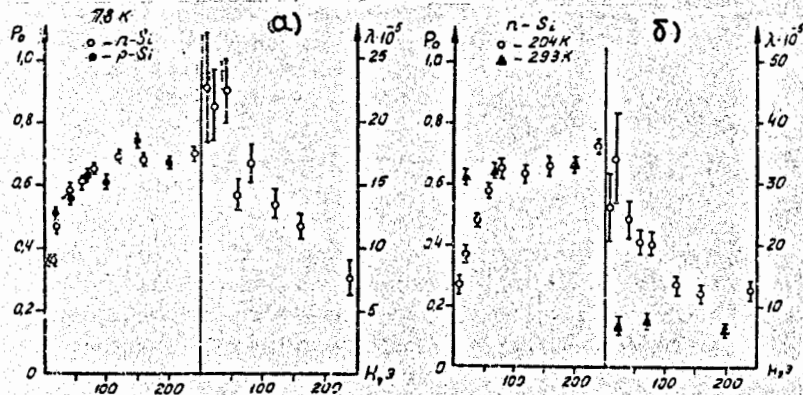
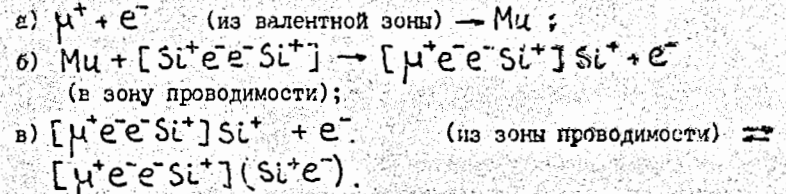


Рис. 10. Зависимость начальной поляризации P_0 и скорости её релаксации λ от напряжённости продольного магнитного поля в кремнии n и p-типа при $T = 78$ К (а) и в кремнии n-типа при $T = 204, 293$ К (б). Величины для p-кремния меньше $1 \cdot 10^5$ с⁻¹ и на рисунке не показаны.

начальной поляризации мюонов и скорости её релаксации λ в перпендикулярных и продольных магнитных полях. Анализ полученных экспериментальных данных, проведённый в диссертации, приводит к картине взаимодействия мюония в образце, которую можно представить в виде следующей схемы:



Процесс а) есть образование мюония, которое энергетически всегда возможно, если потенциал ионизации мюония превышает ширину запрещённой зоны полупроводника. Процесс б) интерпретируется как переход $Mu \rightarrow \mu^+$; активационный барьер в кремний равен 0,18 эВ. Процесс в) соответствует переходам $\mu^+ \rightleftharpoons Mu^*$, то есть под символом Mu^* подразумевается радикальная система $[\mu^+e^-Si^+](Si^+e^-)$, в которой электрон локализован на одном из соседних с мюоном атомов кремния.

С целью проверки модели молекулярного радикала для Mu^* - состояния проведено исследование влияния радиационных нарушений монокристалла кремния и последующего их отжига на соотношение амплитуд "нормального" и "аномального" мюония и диамагнитной фракции. Показано, что подвижность состояний Mu и Mu^* в образце различна. Состояние Mu быстро диффундирует по решётке, в то время как состояние Mu^* представляет собой объект, жёстко связанный с решёткой образца.

С целью проверки универсальности механизма взаимодействия мюона и мюония в веществе проведены исследования более сложных полупроводников. Впервые показано наличие состояний Mu и Mu^* в арсениде галлия. Исследовался образец $GaAs$, легированный хромом ($\rho \approx 10^8$ Ом·см, $[p] = 2 \cdot 10^{12}$ см⁻³). Исследовалась температурная зависимость начальной амплитуды и скорости релаксации мюонной компоненты поляризации в перпендикулярном и продольных магнитных полях и получены зависимости, аналогичные приведённым на рис. 9, 10 данным для Si. Экспериментальные данные в перпен-

дикулярном поле указывают на характерный рост поляризации мюонной компоненты в области температур 160-200 К и при $T > 500$ К, что связано с переходами $Mu^* \rightarrow \mu^+$ и $Mu \rightarrow \mu^+$. Эксперименты в продольных полях указывают, что "аномальный" мюоний, существующий в GaAs при $T < 170$ К, обладает более сильной сверхтонкой связью (фактор усиления $\sim 2 + 3$), чем аналогичное состояние в Si. Прямое измерение частот сверхтонкого расщепления уровней Mu^* в монокристаллах GaAs и GaP позднее проведено в PSI с использованием аппаратуры высокого разрешения в сильных магнитных полях /15/. Сравнение данных по GaAs, GaP с аналогичными результатами по Si и Ge говорят об универсальности механизма взаимодействия μ^+ в кристаллических решётках атомарных и бинарных полупроводников.

В работе /3/ методом ЭПР в кремнии впервые обнаружено парамагнитное состояние с разрешённой сверхтонкой структурой от ядер водорода (центр Si-AA9), имплантированных в образец при $T=80$ К. Сопоставление основных экспериментальных данных, характеризующих состояния Mu^* и Si-AA9 в кремнии показывает, что Si-AA9 является водородным аналогом "аномального" мюония. Для сравнения свойств Mu^* и Si-AA9 была выполнена дополнительная серия ЭПР-экспериментов. Центр Si-AA9 является стабильным образованием в решётке кремния и устойчиво наблюдается в течение длительного времени после имплантации водорода при условии хранения образцов при температурах ниже 180 К. Проведённый изохронный отжиг показывает, что в области температур 190-210 К относительная доля центров Si-AA9 уменьшается, а при $T > 210$ К необратимо исчезает (рис. II), что связано с распадом (аннигиляцией) парамагнитной конфигурации. Как видно из рис. II температурные области, где происходит переход $Mu^* \rightarrow \mu^+$ и аннигиляция центра Si-AA9 совпадают.

Анализ экспериментальных данных по центрам Si-AA9, Mu^* и результатов квантовохимических расчётов, проведённый в диссертации, позволяет установить конфигурационную структуру центров Si-AA9 и Mu^* (H(Mu) расположены в центре Si-Si связи) и

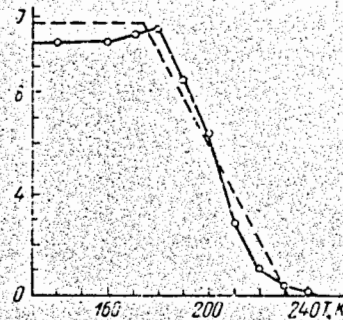


Рис. II.
Интенсивность ЭПР-сигнала (в отн. ед.) от температуры изохронного отжига ($t = 15$ мин.) центров Si-AA9. Наклонная пунктирная линия - температурная область перехода $Mu^* \rightarrow \mu^+$.

их зарядовое состояние (нейтральное).

Приводится качественная микроскопическая модель взаимодействия μ^+ с веществом мишени с момента начала термализации до момента распада μ^+ . В рассматриваемой модели существенную роль играют надтепловые процессы, происходящие за времена, меньшие 10^{-10} с, в течение которого происходит образование всех наблюдаемых состояний, включающих μ^+ и их термализация. Образование состояния Mu^* в этой модели рассматривается как захват Mu (или μ^+) ионизационной связью. Приведены результаты расчётов энергетической устойчивости парамагнитных комплексов в решётке кремния при посадке водорода (мюония) на однократно и двукратно ионизованную связь атома кремния в решётке монокристалла. Показано, что для однократно ионизованной связи водороду (мюонии) энергетически выгодно занять связецентрированное положение. При ионизации двух (и более) связей возникает смещение узельного атома кремния в междоузлие и возникающая вакансия захватывает атом водорода (мюония) - вакансионная модель.

В четвёртой главе анализируются возможности использования методов спин-резонансной спектроскопии мюоня и мюония в физике частиц.

В работах /16,17/ указано на возможное наличие в природе

- 16) Wilczek F. Phys. Rev. Lett., 1982, v.49, No.21, p.1549.
17) Ансельм А.А., Уральцев Н.Г., ЖЭФ, 1983, т.24, в.6, с.1961.

15) Schneider J.N. et al. Hyperf. Inter., 1986, v.32, p.607.

безмассовых голдстоуновских или почти безмассовых псевдоголдстоуновских бозонов, при испускании которых меняются фермионные ароматы - странность, мюнный заряд и т.д. Такие бозоны были названы фамилонами. Фамилоны возникают, если в теории, в которой присутствует горизонтальная симметрия, имеется дополнительная глобальная симметрия, которая спонтанно нарушается одновременно с горизонтальной симметрией. Наличие фамилона - α должно приводить к распадам $\mu \rightarrow e\alpha$, $K^+ \rightarrow \pi^+\alpha$, вероятности которых равны:

$$\Gamma_0(\mu \rightarrow e\alpha) = \frac{1}{16\pi} \frac{m_e m_\mu^2}{\langle \eta \rangle}, \quad \Gamma_0(K \rightarrow \pi\alpha) = \frac{1}{16\pi} \frac{m_d m_K^3}{\langle \eta \rangle m_S}, \quad (14)$$

где $m_e, m_\mu, m_K, m_d, m_S$ - массы e, μ - лептонов, каона и d, s - кварков; $\langle \eta \rangle$ - среднее вакуумное значение хиггсовского поля, ответственного за нарушение горизонтальной симметрии.

Распад $\mu^+ \rightarrow e^+\alpha$ даёт монохроматическую линию с энергией позитрона $E = E_{max} = 52,83$ МэВ. Относительная вероятность распада $\mu \rightarrow e\alpha$ к обычному распаду $\mu \rightarrow e\nu\bar{\nu}$ определяется соотношением:

$$R_\alpha = \Gamma_0(\mu \rightarrow e\alpha) / \Gamma_0(\mu \rightarrow e\nu\bar{\nu}). \quad (15)$$

При наличии распада $\mu \rightarrow e\alpha$ в конце спектра позитронов распада $\mu \rightarrow e\nu\bar{\nu}$ должен наблюдаться узкий пик. Оценка величины R_α была получена в эксперименте TRIUMF /18/, где получено ограничение: $R_\alpha \leq 2,6 \cdot 10^{-6}$.

В диссертации предложена новая постановка эксперимента по поиску фамилона с помощью установки, использующей стандартную μSR -технику, дополненную на выходе электронного телескопа магнитным спектрометром с разрешением по энергии не хуже 10^{-4} . Показано, что наличие распада $\mu \rightarrow e\alpha$ приводит к изменению асимметрии $\mu-e$ - распада C'' на конце спектра Мишеля по формуле:

$$C'' = C' \frac{1}{1 + R_\alpha / \Delta E}, \quad (16)$$

где C' - коэффициент асимметрии при отсутствии $\mu \rightarrow e\alpha$ - рас-

18) Jodidio A. et al. Phys. Rev.. 1986, v.34D, No.7, p.1967.

пада, ΔE - энергетическое разрешение магнитного спектрометра.

Рассмотрена возможность экспериментального улучшения пределов на массу правого W_R бозона в опытах по исследованию вклада правых токов в $\mu-e$ - распаде путём изучения энергетического спектра позитронов с помощью магнитного спектрометра. Существующая на сегодня оценка для массы W_R : $m(W_R) > 406 \text{ ГэВ}/c^2$ /18/. Показано, что улучшение энергетического разрешения спектрометра ΔE до уровня $\Delta E = 10^{-4}$ позволяет дать ограничение на массу W_R на уровне $\sim 800 \text{ ГэВ}/c^2$, а при $\Delta E = 10^{-5}$ на уровне $\sim 1,2 \cdot \text{ТэВ}/c^2$. Предложена схема экспериментальной аппаратуры для проведения таких исследований.

Предложена новая низкофоновая методика исследования перехода мюний-антимюний, в которой фактом обнаружения эффекта является регистрация высокоэнергетичных электронов от распада $\mu^- \rightarrow e^- \nu \bar{\nu}$. Схема расположения аппаратуры в эксперименте ЛИЯФ показана на рис.12 и состоит из: I - тракта пучка поверхностных мюонов; II - области взаимодействия, в которой предусмотрена также возможность анализа μSR - сигнала мюния; III - электронного (позитронного) тракта с магнитным анализом знака частицы*);

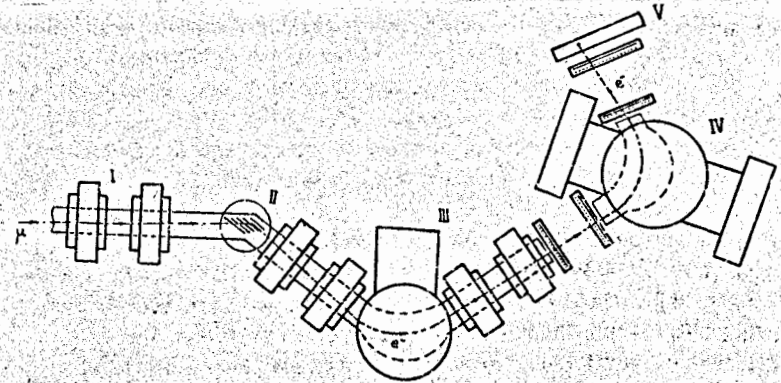


Рис.12. Схема расположения элементов установки ЛИЯФ.

*). Включение магнита в электронном телескопе необходимо для устранения фона при перезарядке позитронов на стенках элементов пропорциональных камер.

IV - магнитного спектрометра с пропорциональными камерами на линиях задержек; У - спектрометра полного поглощения. Для вероятности наблюдения перехода $M - \bar{M}$ получаем оценку:

$$P(\bar{M}) = F(M) W_{\bar{M}} \epsilon \frac{\lambda_0}{\lambda_c + \lambda_0} \Phi(\Omega, E_{\text{пор}}), \quad (17)$$

где $F(M)$ - вероятность обнаружения мюония в вакууме (для набора тонких алюминиевых фольг $F(M) = 0,12$); $W_{\bar{M}} = 2,5 \cdot 10^{-5} \cdot f^2$ - вероятность перехода $M - \bar{M}$ в вакууме ($f = G/G_F$ - отношение константы взаимодействия в процессе $M - \bar{M}$ к константе слабого взаимодействия G_F); $\epsilon \approx 0,9$ - эффективность регистрации быстрого электрона; $\lambda_0 = 4,52 \cdot 10^5 \text{ с}^{-1}$ - скорость распада мюона; $\lambda_c = 11,4 \cdot 10^5 \text{ с}^{-1}$ - скорость захвата μ^- в мезоатоме Al ; $\Phi(\Omega, E_{\text{пор}})$ - функция телесного угла Ω и порога регистрации быстрого электрона $E_{\text{пор}}$. Для $\Omega = 0,15$ стер. и $E_{\text{пор}} = 30$ МэВ $\Phi(\Omega, E_{\text{пор}}) = 3,6 \cdot 10^{-3}$, таким образом:

$$P(\bar{M}) > 2,7 \cdot 10^{-9} \cdot f^2. \quad (18)$$

Поток "поверхностных" мюонов синхротрона ЛИИФ - $3 \cdot 10^4 \mu^+/\text{с}$, за 200 часов работы $N_{\mu^+} = 2,16 \cdot 10^{10}$ и $P(\bar{M}) \cdot N_{\mu^+} > 58 \cdot f^2$, что позволяет дать оценку для величины f на уровне $f < 0,15$. Для будущей мезонной фабрики ИИИ АН СССР ожидаемое значения для величины f (если эффект перехода $M - \bar{M}$ не будет обнаружен) - $f < 10^{-3}$. Лучший экспериментальный результат на сегодня по исследованию перехода $M - \bar{M}$ получен в TRIUMF /19/: $f < 0,3$.

Проведён анализ фоновых условий в предлагаемой постановке эксперимента с учётом процессов образования пар (ОП), взаимодействия в конечном состоянии (ВКС) и перезарядки на электронах мишени (П). Показано, что вероятность фоновых процессов $W_{\text{фон}} = W_{\text{ОП}} + W_{\text{ВКС}} + W_{\text{П}}$ значительно ниже имеющейся оценки для вероятности перехода $M - \bar{M}$ и существует механизм подавления этих процессов путём обрезания регистрируемого интервала энергии электронов на высокоэнергетическом конце энергетического спектра. Так, если не регистрировать электроны с энергией ниже 40 МэВ, то при использовании мишени из Al толщиной 10^{-3} см вероятность

19) Huber T.M. et al. Phys. Rev., 1990, v.41D, No.9, p.2709.

регистрации фоновых электронов равна:

$$W_{\text{ОП}} = 7,2 \cdot 10^{-8}, \quad W_{\text{ВКС}} = 3,3 \cdot 10^{-12}, \quad W_{\text{П}} = 4,6 \cdot 10^{-7}.$$

С целью проверки результатов оценки фона и выбора порога обрезания по энергии электронов в предлагаемой постановке эксперимента на мюонном канале синхротрона ЛИИФ проведено экспериментальное исследование энергетического спектра позитронов и электронов, вылетающих из мишени после остановки в ней пучка положительно заряженных мюонов (мишень Cu , тормозная толщина по пучку $6,3 \text{ г/см}^2$). Использовался магнитный спектрометр на основе спектрометрического магнита СП-56 и проволочных пропорциональных камер со съёмом информации на линиях задержки. В таблице I представлена оценка вероятности вылета фонового электрона от величины $E_{\text{П}}$, вычисленная из приведённых экспериментальных данных и рассчитанная для процесса перезарядки на электронах мишени (в данных условиях эксперимента - высокоэнергичный ~ 80 МэВ пучок мюонов и толстая мишень - этот процесс преобладает над другими возможными процессами).

Таблица I

Оценка выхода позитронов и фоновых электронов из мишени.

$E_{\text{П}}, \text{МэВ}$	$N_{\text{ОП}}$	N_{e^+}	N_{e^-}	$W_{\text{ЭКСП}} = N_{e^-}/N_{e^+}$	$W_{\text{ПРИВ}}$	$W_{\text{РАСЧ}}$
34	$7 \cdot 10^8$	14820	19	$1,28 \cdot 10^{-3}$	$2,46 \cdot 10^{-6}$	$6,6 \cdot 10^{-6}$
40	$1 \cdot 10^9$	10380	5	$4,81 \cdot 10^{-4}$	$9,25 \cdot 10^{-7}$	$4,5 \cdot 10^{-6}$

- $E_{\text{П}}$ - порог обрезания спектра Мишеля (оценка);
- $N_{\text{ОП}}$ - число остановок мюонов в мишени (Cu ; $6,3 \text{ г/см}^2$);
- $N_{e^+}(N_{e^-})$ - число зарегистрированных позитронов (электронов) в спектрометре, удовлетворяющих критериям отбора;
- $W_{\text{ЭКСП}}$ - ожидаемое значение величины отношения N_{e^-}/N_{e^+} приведённое к тонкой мишени (Al ; $0,027 \text{ г/см}^2$);
- $W_{\text{РАСЧ}}$ - расчётное значение величины отношения N_{e^-}/N_{e^+} для тонкой мишени (Al ; $0,027 \text{ г/см}^2$).

Как видно из таблиц I, измеренные значения вероятности перезарядки на электронах мишени хорошо согласуются с вычисленными значениями.

В пятой главе рассмотрены возможности применения методов спин-резонансной спектроскопии мюона и мюония для решения прикладных задач в физике и технике.

Предложен и реализован способ определения магнитной текстуры и способ определения параметров магнитной неоднородности ферромагнитных материалов.

Компоненты тензора магнитной текстуры вычисляются с помощью формулы:

$$dN(t, \vec{k}) = N_0 [1 + a P_p(0) K_\alpha(n'_{\alpha\beta} + \tilde{\mu}'_{\alpha\beta}(t))] e^{-t/\tau_\mu} dt, \quad (19)$$

где
$$n_{\alpha\beta} = \langle n_\alpha n_\beta \rangle = \langle \frac{v_\alpha v_\beta}{v^2} \rangle, \quad (20)$$

$$\tilde{\mu}_{\alpha\beta}(t) = \langle (\delta_{\alpha\beta} - n_\alpha n_\beta) \cos gbt \rangle + e_{\alpha\beta\gamma} \langle n_\gamma \sin gbt \rangle. \quad (21)$$

Здесь $dN(t, \vec{k})$ - число позитронов μ^+ -распада во временном канале t в направлении \vec{k} (K_α - компонента); N_0 - нормирующий множитель; τ_μ - коэффициент асимметрии; $P_p(0)$ - поляризация пучка μ^+ при $t = 0$; $n_{\alpha\beta}$ - тензор магнитной текстуры; $\tilde{\mu}_{\alpha\beta}$ - тензор поляризации; τ_μ - время жизни мюона; \vec{v} - макроскопическое поле домена (v_α, v_β - компоненты); $\delta_{\alpha\beta}$ - символ Кронекера; g - гиромагнитное отношение для мюона; $e_{\alpha\beta\gamma}$ - единичный антисимметричный тензор 3-го ранга; \vec{n} - орт вектора координатной оси.

Тензоры со штрихами $n'_{\alpha\beta}$ и $\tilde{\mu}'_{\alpha\beta}$, заданные в лабораторной системе координат, связаны с соответствующими тензорами $n_{\alpha\beta}$ и $\tilde{\mu}_{\alpha\beta}$ в системе координат образца посредством матриц поворота.

При некаллинеарности векторов локального магнитного поля и магнитного момента мюона, спин мюона будет прецессирует, с соответствующей этому полю Ларморовской частотой, до момента распада. Для ансамбля остановившихся в веществе мюонов в момент времени $t = 0$ число позитронов распада в малый телесный угол в направ-

лении \vec{k} в момент времени от t до $t+dt$ будет определяться формулой (19). При различной ориентации образца относительно пучка мюонов и направления на регистрирующий счётчик будет изменяться экспериментально наблюдаемая величина $dN(t, \vec{k})/dt$, т.е. будет меняться как относительное число позитронов, зарегистрированных счётчиком, так и их распределение во времени. Это обстоятельство и даёт возможность определения тензоров $n_{\alpha\beta}$ и $\tilde{\mu}_{\alpha\beta}(t)$.

Симметричный тензор 2-го ранга $n_{\alpha\beta}$ характеризует строенность доменов образца. Главные оси этого тензора логично назвать осями магнитной текстуры. В этих осях тензор текстуры $n_{\alpha\beta}$ будет диагональным, а величины диагональных элементов будут являться количественной характеристикой магнитной текстуры образца.

Тензор $\tilde{\mu}_{\alpha\beta}$ характеризует временной ход поляризации ансамбля мюонов и определяет временное распределение позитронов распада попадающих в регистрирующий счётчик. Для образцов с малым разбросом полей в доменах его можно аппроксимировать как:

$$\tilde{\mu}_{\alpha\beta}(t) = \tilde{\mu}_{\alpha\beta} e^{-\lambda t} \cos(\omega t + \varphi_0). \quad (22)$$

Такая аппроксимация оправдана при $\omega \gg \lambda$. При этом круговая частота ω будет определяться модулем среднего магнитного поля в доменах, а λ - разбросом значений этих полей.

В диссертации приведены результаты экспериментального исследования семи образцов электротехнической стали. Определены компоненты тензора магнитной текстуры и направления намагниченности доменов в исследованных образцах. Получены величины среднего магнитного поля \bar{B} и разброс δB магнитных полей в доменах. Проведено экспериментальное исследование влияния трёх различных режимов термической обработки образцов электротехнической стали на параметры тензора магнитной текстуры и направление намагниченности доменов: 1 - выпрямляющий отжиг с приложением растягивающего напряжения; 2 - быстрый отжиг (без растягивающего напряжения); 3 - медленный отжиг. Показано, что 1-ый режим отжига приводит к одноосной магнитной текстуре. Для 2 и 3-го режимов отжига направление магнитной текстуры в образцах менее выражено, причём большей анизотропией обладает образец, стожённый по режиму 3. Пока-

зана существенная роль покрытия и приповерхностных слоев металла в формировании магнитной текстуры материала. Проведённые исследования показывают возможность использования мюонного метода для контроля магнитных свойств материалов на различных стадиях производства.

Предложен и реализован способ определения концентрации радиационных дефектов в слаболегированных полупроводниках и изоляторах. Показано, что экспериментально измеряемые μSR -параметры зависят от концентрации радиационных дефектов (типа смещённых атомов) в образце. С целью изучения возможности применения μSR -метода для дефектоскопии сверхчистых материалов в ЛИЯФ были исследованы образцы совершенных кристаллов кремния и кварца, в которые вводилось контролируемое число радиационных дефектов путём облучения исходных образцов быстрыми нейтронами реактора с последующим их ступенчатым отжигом. Концентрация введённых радиационных дефектов определялась методом эффекта Холла на контрольных образцах кремния, облучаемых вместе с исследуемыми образцами. Экспериментальные μSR -спектры в перпендикулярном магнитном поле 60 Э содержали в себе частоты прецессии состояний μ^+ , Mu и Mu^* (только для кремния). Часть полученных в работе данных представлены в таблице 2.

Как видно из таблицы 2, для кремния наиболее чувствительным параметром, зависящим от концентрации в образце дефектов, является параметр λ_{μ} , для кварца - C_{μ} , которые и могут служить индикаторами содержания радиационных дефектов в исследуемых образцах.

В диссертации также проанализирована возможность применения нового μSR^2 -метода ^{*}). Показано, что применение в μSR^2 -эксперименте пропорциональных камер для регистрации точки останова мюона в мишени и направления вылета позитрона распада с пространственным разрешением не хуже, чем 10^{-2} см, позволяет получать информацию о пространственной корреляции магнитных полей в исследуемом образце и измерять корреляционные радиусы (r_c) с характерным масштабом порядка 10^{-4} см.

^{*}) Идея μSR^2 -метода, основанная на статистическом анализе событий $\mu-e$ -распада, происходящих в малой выделенной области пространства мишени, принадлежит В.Н.Горелкину.

Таблица 2

Параметры состояний μ^+ и Mu в образцах кремния и кварца при различных концентрациях в них радиационных дефектов

	Концентрация дефектов, см ⁻³	μSR -параметры			
		C_{μ}	$\lambda_{\mu} \cdot 10^5 c^{-1}$	C_{Mu}	$\lambda_{Mu} \cdot 10^5 c^{-1}$
Si, T = 60 K	$8 \cdot 10^{12}$	$0,021 \pm 0,008$	0,05	$0,047 \pm 0,011$	9 ± 2
	$3 \cdot 10^{15}$	$0,033 \pm 0,006$	- " -	$0,050 \pm 0,09$	43 ± 8
	$6 \cdot 10^{15}$	$0,045 \pm 0,007$	- " -	$0,046 \pm 0,008$	52 ± 11
	10^{16}	$0,042 \pm 0,006$	- " -	$0,051 \pm 0,015$	121 ± 40
	$2 \cdot 10^{18}$	$0,031 \pm 0,009$	- " -	- *)	- *)
SiO ₂ , T=300K	10^{14}	$0,0217 \pm 0,014$	0,05	$0,0447 \pm 0,0022$	3 ± 1
	$2 \cdot 10^{15}$	$0,0598 \pm 0,0030$	- " -	$0,0391 \pm 0,0025$	$1 \pm 0,6$
	10^{18}	$0,1637 \pm 0,0027$	- " -	$0,0214 \pm 0,0066$	4 ± 2
	$2 \cdot 10^{19}$	$0,2239 \pm 0,0024$	- " -	$0,0057 \pm 0,0057$	$0,5 \pm 2,0$

^{*}) Сигнал Mu в экспериментальном μSR -спектре отсутствует.

В заключении сформулированы основные результаты диссертационной работы. Они сводятся к следующему:

I. Создана установка "Мюоний", предназначенная для исследования вещества методом вращения спина мюона, и комплекс аппаратуры, необходимый для её эксплуатации. Отличительной особенностью установки "Мюоний" от существующих - высокая степень однородности магнитного поля в месте расположения исследуемой мишени (относительная неоднородность поля не хуже 10^{-5}), хорошая компенсация магнитного поля Земли и рассеянного поля магнита ускорителя и элементов мюонного канала (компенсация до уровня 10^{-6} эрстед), глубокая степень экранировки фотоэлектронных умножителей синциллиационных счётчиков от влияния внешнего магнитного поля. Проведено экспериментальное исследование характеристик пучков мюонов на выходе мю-мезонного канала синхротрона ЛИЯФ.

2. Исследованы параметры регистрирующей части установки "Мюоний" на пучке мюонов (временное разрешение, интегральная и дифференциальная нелинейность конвертора время-код, калибровка временной шкалы и т.д.). Проведены калибровочные измерения на эталонных мишенях (углерод, плавленый кварц). Развита методика экспериментального исследования характеристических состояний мюония и мюона в исследованных образцах путём применения методики "скрещенных" измерений в перпендикулярном и продольном магнитных полях.

3. Проведено экспериментальное исследование параметров квадрупольного взаимодействия атома мюония в кристаллической решётке d-кварца в области температур 75-300 К для трёх ориентаций осей симметрии образца относительно направления внешнего магнитного поля и поляризации пучка мюонов. Определена ориентация осей тензора градиента электрического поля в монокристалле d-кварца. Показано, что в области температур 75-120 К имеет место медленная диффузия мюоний по трём возможным местам локализации его в решётке образца.

4. Впервые предложен и реализован метод экспериментального определения знака квадрупольной постоянной d . Показано, что при переходе от $T = 90$ К до $T = 293$ К происходит изменение величины и знака квадрупольной постоянной, обусловленное быстрой диффузией мюония по своим низкотемпературным местам локализации.

5. Проведены систематические исследования условий образования и взаимодействия с решёткой вещества "нормального" и "аномального" мюония, диамагнитной фракции в монокристаллах кремния n и p-типа проводимости в широком диапазоне температур 60-730 К. В области низких температур 60-200 К обнаружены все возможные состояния "нормального" и "аномального" мюония. Исследована температурная зависимость амплитуды и времени релаксации этих состояний. Измерены частоты сверхтонкого взаимодействия в атоме мюония, внедрённого в кристаллическую решётку кремния.

6. Изучена температурная зависимость и зависимость от величины магнитного поля амплитуды состояний и скорости релаксации поляризации мюона и мюония в продольных и перпендикулярных маг-

нитных полях. Найдены температурные области, в которых происходят переходы между различными состояниями. Произведена оценка высоты активационного барьера ΔE при вступлении мюония в химическую реакцию с атомами решётки кремния с образованием диамагнитного соединения ($\Delta E = 0,18$ эВ). Произведена оценка доли различных компонент состояний, включающих в себя μ^+ в кремнии, во всём исследованном интервале температур. Показано отсутствие недостающей поляризации (неучтённых каналов взаимодействия мюона в образцах кремния). Предложена схема взаимодействия мюона и мюония в веществе, в котором под символом Mu^* ("аномальный" мюоний) подразумевается молекулярный радикал типа: $[Si^+e\mu^+](Site)$.

7. Проведена экспериментальная проверка модели молекулярного радикала для Mu^* . Показано, что подвижность состояний Mu и Mu^* в образце кремния существенно различна. Состояние Mu быстро диффундирует по решётке, в то время как состояние Mu^* представляет собой объект, жёстко связанный с решёткой образца. Впервые показано наличие состояний Mu и Mu^* в бинарном полупроводниковом соединении GaAs. "Аномальный" мюоний существует в GaAs при $T < 170$ К и обладает более сильной сверхтонкой связью (фактор усиления $\sim 2 + 3$), чем в Si. Показана универсальность механизма взаимодействия мюона и мюония в атомарных полупроводниках и в бинарных полупроводниковых соединениях.

8. Проведено сопоставление основных экспериментальных данных, характеризующих состояние Mu^* и водородосодержащий центр Si-AA9, обнаруженный в кремнии методом ЭПР. Показано, что характер симметрии сверхтонкого взаимодействия одинаков для Mu^* и Si-AA9. Совпадает (с учётом изотопного эффекта) главные значения тензора сверхтонкого взаимодействия центров Mu^* и Si-AA9, области температурной устойчивости и тип симметрии их электронных g-тензоров. Таким образом, по своим свойствам центр Si-AA9 подобен Mu^* и является водородным аналогом "аномального" мюония. Привлечение результатов квантовохимических расчётов электронной структуры Mu , помещённого в различные точки кристаллических матриц кремния и алмаза, показывает, что свойства Mu , расположенного в точках 3C (центр X-X связи, X - атомы Si, C) решёток кремния и алмаза, находятся в качест-

венном соответствии с известными свойствами "аномального" мюония (водорода). Установлено зарядовое состояние центров Mu^+ и $Si-AA9$ (нейтральное).

9. Предложена качественная микроскопическая модель взаимодействия μ^+ с веществом мишени с момента начала термализации до момента распада μ^+ , в которой существенную роль играют надтепловые процессы взаимодействия μ^+ с частично ионизованной решёткой монокристалла. Образование состояния Mu^* в этой модели рассматривается как захват Mu (или μ^+) ионизованной связью. Привлечение результатов расчётов энергетической устойчивости парамагнитных комплексов в решётке кремния при посадке водорода (мюония) на ионизованную связь показывает, что для однократно ионизованной связи водороду (мюонию) энергетически выгодно занять связецентрированное положение (точка BC).

В результате проведённого цикла исследований решена проблема "аномального" мюония, впервые возникшая в 1973 году.

10. Аналитически показано, что при наличии в природе безмассового голдстоуновского (или почти безмассового псевдоголдстоуновского) бозона - фамилона (α) и связанного с ним возможного распада мюона $\mu \rightarrow e\alpha$ зависимость коэффициента асимметрии $\mu-e$ - распада от энергии имеет аномалию в высокоэнергетическом конце спектра Мишеля. Предложена новая постановка эксперимента по поиску фамилона с помощью установки, использующей стандартную μSR -технику, дополненную на выходе электронного телескопа магнитным спектрометром с разрешением по энергии не хуже 10^{-4} . Дана оценка вклада процесса $\mu \rightarrow e\alpha$ к обычному распаду $\mu \rightarrow e\nu\bar{\nu}$ в зависимости от энергетического разрешения экспериментальной аппаратуры. Рассмотрена возможность экспериментального улучшения пределов на массу правого W_R бозона в опытах по исследованию вклада правых токов в $\mu-e$ - распаде.

11. Предложена новая низкофононая методика исследования перехода мюоний - антимюоний, в которой фактом обнаружения эффекта является регистрация высокоэнергетичных электронов от распада $\mu \rightarrow e\nu\bar{\nu}$. Показано, что использование этой методики позволяет улучшить существенную оценку вероятности перехода

$Mu \rightarrow \bar{M}u$ даже при проведении эксперимента на ускорителе с током выведенного пучка протонов $I + 2 \mu A$. Анализ фоновых условий в предлагаемой постановке эксперимента с учётом процессов образования пар, перезарядки на электронах мишени и взаимодействия в конечном состоянии показал, что вероятность фоновых процессов ниже имеющейся сегодня экспериментальной оценки для вероятности перехода $Mu \rightarrow \bar{M}u$.

12. Проведено экспериментальное исследование энергетического спектра позитронов и электронов, вылетающих из мишени после остановки в ней пучка положительно заряженных мюонов (мишень Cu , тормозная толщина по пучку $6,3 \text{ г/см}^2$) с использованием магнитного спектрометра с пропорциональными камерами на линиях задержки. Получены энергетические спектры позитронов и электронов при двух значениях порога энергии - 34 и 40 МэВ. Показано, что экспериментальная вероятность выхода фонового электрона находится в хорошем согласии с расчётными значениями.

13. Предложен и реализован способ определения магнитной текстуры и способ определения параметров магнитной неоднородности ферромагнитных материалов. Проведено экспериментальное исследование семи образцов электротехнической стали. Определены компоненты тензора магнитной текстуры и направления намагниченности доменов в исследованных образцах. Получены величины среднего магнитного поля B_0 и разброс δB магнитных полей в доменах. Проведено экспериментальное исследование влияния различных режимов термической обработки образцов электротехнических сталей на параметры тензора магнитной текстуры и направление намагниченности доменов. Показана существенная роль покрытия и приповерхностных слоев металла в формировании магнитной текстуры материала. Проведённые исследования показывают возможность использования мюонного метода для контроля магнитных свойств материалов на различных стадиях производства.

14. Экспериментально показано, что существование квадрупольного момента мюония открывает новые возможности в мюонном методе, связанные с исследованием квадрупольного расщепления уровней мюония и механизма его квадрупольной релаксации в веще-

стве. В этом смысле мюонный метод становится сходным с ядерным квадрупольным резонансом и может быть использован для изучения не только магнитных, но и неоднородных внутрикристаллических электрических полей. Исследование температурной зависимости параметров квадрупольного взаимодействия мюония в веществе несёт информацию о процессе диффузии нейтральной водородоподобной системы по кристаллической решётке образца.

15. Предложен и реализован способ определения концентрации радиационных дефектов в слаболегированных полупроводниках и изоляторах. Проведено экспериментальное исследование μSR - методом образцов кремния и кварца, содержащих различное число радиационных дефектов в диапазоне концентраций $(8 \cdot 10^{12} + 2 \cdot 10^{19}) \text{ см}^{-3}$. Показано, что параметр асимметрии прецессии спина на μ^+ - S'_μ (для кварца) и скорость релаксации поляризации спина μ^+ в мюонии $-\lambda_{\mu\mu}$ (для кремния) обладают высокой чувствительностью к концентрации в образце радиационных дефектов и могут служить индикаторами их содержания в исследуемом образце.

16. Проанализирована возможность применения нового μSR^2 - метода на непрерывном пучке мюонов. Показано, что применение в μSR^2 - эксперименте пропорциональных камер для регистрации точки остановки мюона в мишени и направления вылета позитрона распада с пространственным разрешением не лучше, чем 10^{-2} см, позволяет получать информацию о пространственной корреляции магнитных полей в исследуемом образце и измерять корреляционные радиусы (r_c) с характерным масштабом порядка 10^{-4} см.

Основные результаты диссертации опубликованы в работах:

1. Гордеев В.А., Круглов С.П., Кудинов В.И., Кузьмин Л.А., Микиртычьянц С.М., Минайчев Е.В., Обухов Ю.В., Савельев Г.И., Фирсов В.Г., Щербаков Г.В. Процессы деполяризации μ^+ -мезонов в монокристаллах кремния. - Письма в ЖЭТФ, 1978, т.27, в.7, с.420-424.
2. Gordeev V.A., Kruglov S.P., Kuz'min L.A., Mikirtichyants S.M., Minaichev E.V., Obukhov Yu.V., Saveliev G.I., Firsov V.G., Scherbakov G.V. Processes of μ^+ -Meson Depolarization in Silicon Single Crystals. - *Hyperf. Inter.*, 1979, v.6, p.171-174.

3. Барсов С.Г., Геталов А.Л., Гордеев В.А., Круглов С.П., Коноплева Р.Ф., Кудинов В.И., Кузьмин Л.А., Микиртычьянц С.М., Минайчев Е.В., Мясичева Г.Г., Обухов Ю.В., Савельев Г.И., Фирсов В.Г., Щербаков Г.В. Деполяризация положительных мюонов в слаболегированных монокристаллах кремния. - ЖЭТФ, 1979, т.76, в.6, с.2198-2205.
4. Барсов С.Г., Геталов А.Л., Гордеев В.А., Круглов С.П., Коноплева Р.Ф., Кудинов В.И., Кузьмин Л.А., Микиртычьянц С.М., Минайчев Е.В., Мясичева Г.Г., Обухов Ю.В., Савельев Г.И., Фирсов В.Г., Щербаков Г.В. Характеристические состояния мюония (μ^+ -мезона) в кремнии в продольных магнитных полях. - ЖЭТФ, 1980, т.79, в.4(10), с.1461-1468.
5. Гордеев В.А., Обухов Ю.В. μSR - спектроскопия атома мюония (μ^+e^-) в кремнии. - В сб.: "Физика атомного ядра" (Материалы XV Зимней Школы ЛИЯФ по физике ядра и элементарных частиц), Ленинград, ЛИЯФ, 1980, с.179-208.
6. Волченков В.А., Гордеев В.А., Егисеев В.А., Иванов Е.М., Коптев В.П., Микиртычьянц С.М., Рябов Г.А., Щербаков Г.В. Экспериментальное исследование пучков мю-канала ЛИЯФ. - Препринт ЛИЯФ № 617, Л., ЛИЯФ, 1980, 32 с.
7. Barsov S.G., Getalov A.L., Gordeev V.A., Konopleva R.F., Kruglov S.P., Kudinov V.I., Kuz'min L.A., Mikirtichyants S.M., Minaichev E.V., Myasishcheva G.G., Obukhov Yu.V., Saveliev G.I., Firsov V.G., Shcherbakov G.V. Characteristic Muonium (μ^+ -Meson) States in Single-Crystal Silicon. - *Hyperf. Inter.*, 1981, v.8, p.409-416.
8. Барсов С.Г., Геталов А.Л., Гордеев В.А., Круглов С.П., Кузьмин Л.А., Микиртычьянц С.М., Обухов Ю.В., Фирсов В.Г., Щербаков Г.В. Установка "Мюоний" для исследования вещества методом вращения спина μ -мезона (μSR -методом). - Препринт ЛИЯФ № 659, Л., ЛИЯФ, 1981, 28 с.
9. Барсов С.Г., Геталов А.Л., Гордеев В.А., Горелкин В.Н., Грузин П.Л., Круглов С.П., Кузьмин Л.А., Мельничук В.П., Микиртычьянц С.М., Милосердин В.Ю., Смилга В.П., Щербаков Г.В. Способ определения магнитной текстуры материалов.

- Авторское свидетельство № 923273, БИ № 47, 1986, с.305.
10. Барсов С.Г., Геталов А.Л., Гордеев В.А., Горелкин В.Н., Грузин П.Л., Круглов С.П., Кузьмин Л.А., Мельничук В.П., Микиртычянц С.М., Милосердин В.Ю., Смилга В.П., Щербаков Г.В. Исследование магнитных свойств электротехнических сталей мюонным методом. - Известия АН СССР, сер.физ., 1982, т.46, в.4, с.643-645.
11. Барсов С.Г., Геталов А.Л., Гордеев В.А., Евсеев В.А., Коноплёва Р.Ф., Круглов С.П., Кудинов В.И., Кузьмин Л.А., Микиртычянц С.М., Минайчев Е.В., Мясичева Г.Г., Обухов Ю.В., Савельев Г.И., Фирсов В.Г., Щербаков Г.В. Исследование влияния радиационных дефектов на характеристические состояния внедрённого атома мюония. - Письма в ЖЭТФ, 1983, т.37, в.1, с.40-43.
12. Барсов С.Г., Барышевский В.Г., Геталов А.Л., Гордеев В.А., Круглов С.П., Кузьмин Л.А., Кутень С.А., Микиртычянц С.М., Щербаков Г.В. Исследование параметров квадрупольного взаимодействия атома мюония (μ^+e^-) в α -кварце. - Препринт ЛИЯФ № 879, Л., ЛИЯФ, 1983, 17 с.
13. Барсов С.Г., Геталов А.Л., Горелкин В.Н., Гордеев В.А., Грузин П.Л., Круглов С.П., Кузьмин Л.А., Мельничук В.П., Микиртычянц С.М., Милосердин В.Ю., Смилга В.П., Щербаков Г.В. Способ определения параметра магнитной неоднородности ферромагнитного материала. - Авторское свидетельство № 1103129, БИ № 26, 1984, с.120.
14. Barsov S.G., Getalov A.L., Gordeev V.A., Evseev V.A., Konopleva R.F., Kruglov S.P., Kudinov V.I., Kuz'min L.A., Mikirtychyants S.M., Minaichev E.V., Myasishcheva G.G., Obukhov Yu.V., Savel'ev G.I., Firsov V.G., Shcherbakov G.V. The Effect of Radiation Defects in Silicon Single Crystal Lattice on the Characteristic States of the Interstitial Muonium Atom. - *Hyperf. Inter.*, 1984, v.17-19, p.551-556.
15. Barsov S.G., Firsov V.G., Getalov A.L., Gordeev V.A., Kruglov S.P., Kudinov V.I., Kuz'min L.A., Mikirtychyants S.M., Minaichev E.V., Myasishcheva G.G., Obukhov Yu.V., Savel'ev G.I., Shcherbakov G.V. Depolarization of the μ^+ -Mesons in the Single-Crystal AsGa. -

- Hyperf. Inter.*, 1984, v.17-19, p.635-638.
16. Barsov S.G., Getalov A.L., Gordeev V.A., Kruglov S.P., Kuz'min L.A., Mikirtychyants S.M., Shcherbakov G.V., Baryshevskii V.G., Kuten S.A., Rapoport V.I. Investigation of Muonium Quadrupole Interaction in α -Quartz in the Temperature Region 75 + 120 K. - *Phys. Lett.*, 1985, v.110A, No 4, p.225-227.
17. Гордеев В.А. О возможности экспериментального обнаружения распада $\mu^+ \rightarrow e^+ + \text{фамилон}$. - Препринт ЛИЯФ № 1077, Л., ЛИЯФ, 1985, 13 с.
18. Барсов С.Г., Геталов А.Л., Гордеев В.А., Евсеев В.А., Коноплёва Р.Ф., Круглов С.П., Кудинов В.И., Кузьмин Л.А., Микиртычянц С.М., Минайчев Е.В., Мясичева Г.Г., Обухов Ю.В., Савельев Г.И., Фирсов В.Г., Щербаков Г.В. Исследование деполяризации положительных мюонов в монокристалле арсенида галлия в перпендикулярном магнитном поле. - Письма в ЖЭТФ, 1985, т.42, в.10, с.424-426.
19. Barsov S.G., Getalov A.L., Gordeev V.A., Kruglov S.P., Kuz'min L.A., Mikirtychyants S.M., Shcherbakov G.V., Baryshevskii V.G., Kuten S.A., Rapoport V.I. Temperature Dependence of the Quadrupole Interaction and the Diffusion of Muonium Atoms in α -Quartz. - *Hyperf. Inter.*, 1986, v.32, p.631-635.
20. Drukarev E.G., Gordeev V.A., Mikhailov A.I. Muonium to Antimuonium Conversion. - Preprint LNPI No 1317, 1987, 20 p.
21. Гордеев В.А., Друкарев Е.Г., Михайлов А.И. Переход мюоний-антимюоний. - В сб.: "Физика атомного ядра" (Материалы XII Зимней Школы ЛИЯФ по физике атомного ядра и элементарных частиц), Л., ЛИЯФ, 1987, с.141-161.
22. Gordeev V.A., Gorelkinskii Yu.V., Konopleva R.F., Nevinnui N.M., Obukhov Yu.V., Firsov V.G. Anomalous States of Muonium and Implanted Hydrogen in Silicon. - Preprint LNPI No 1340, 1987, 29 p.
23. Гордеев В.А. Мюоний в конденсированных средах. - // Мюоны и пионы в веществе (Труды Международного

- симпозиума по проблемам взаимодействия мюонов и пионов с веществом, Дубна, 30 июня - 4 июля 1987 г.), Дубна, ОИЯИ, 1987, Д14-87-799, с.175-182.
24. Гордеев В.А., Обухов Ю.В. О природе "аномального" мюония в полупроводниках. // Мюоны и пионы в веществе, Дубна, ОИЯИ, 1987, Д14-87-799, с.183-187.
25. Барышевский В.Г., Кутень С.А., Рапопорт В.И., Барсов С.Г., Гордеев В.А. Мюоний в веществе: особенности поведения, связанные с наличием квадрупольного момента. - // Мюоны и пионы в веществе, Дубна, ОИЯИ, 1987, Д14-87-799, с.198-202.
26. Гордеев В.А. Применение μSR -метода для поиска редких распадов мюона. // Мюоны и пионы в веществе, Дубна, ОИЯИ, 1987, Д14-87-799, с.442-446.
27. Gorelkinskii Yu.V., Nevinnyi N.N., Gordeev V.A., Obukhov Yu.V., Mudryi A.V., Rapoport V.I., Gelfand R.B., Ulyashin A.G. Implanted Hydrogen in Silicon: Electronic Paramagnetic Resonance and Quantum Chemical Calculations. (International Conference on Ion Implantation in Semiconductors and Other Materials, September 12-17, 1988, Lublin, Poland), Abstracts, p.67.
28. Гордеев В.А., Гуцев Г.Л., Мякенькая Г.С. О конфигурац и "аномального" мюония в кристаллической решётке кремния. - ФТП, 1989, т.23, в.3, с.493-498.
29. Гельфанд Р.Б., Гордеев В.А., Горелкинский Ю.В., Кутень С.А., Мудрый А.В., Невинный Н.Н., Пушкарчук А.Л., Рапопорт В.И., Ульяхин А.Г. Квантовохимическое моделирование водородо-подобных состояний в кремнии и алмазе. - Препринт ЛИЯФ № 1474, Л., ЛИЯФ, 1989, 36 с.
30. Гельфанд Р.Б., Гордеев В.А., Горелкинский Ю.В., Коноплёва Р.Ф., Кутень С.А., Мудрый А.В., Невинный Н.Н., Обухов Ю.В., Рапопорт В.И., Ульяхин А.Г., Фирсов В.Г. Эквивалентные состояния мюония водорода в кремнии. - ФТТ, 1989, т.31, в.8, с.176-185.
31. Гордеев В.А., Киселёв А.Д. Прецизионное измерение энергетического спектра позитронов $\mu-e$ распада как

- способ изучения редких мод распада мюона. - В сб.: Физика высоких энергий (Материалы XXIV Зимней Школы ЛИЯФ по физике атомного ядра и элементарных частиц), Л., ЛИЯФ, 1989, с.115-158.
32. Гордеев В.А., Горелкин В.Н. Анализ возможностей использования прпорциональных камер в μSR -экспериментах. - В сб.: Физика высских энергий (Материалы XXIV Зимней Школы ЛИЯФ по физике атомного ядра и элементарных частиц), Л., ЛИЯФ, 1989, с.159-175.
33. Гордеев В.А., Гордиенко Л.А., Евсеев В.А., Коноплёва Р.Ф., Хаджи В.Е. Способ определения концентрации радиационных дефектов в слабелегированных полупроводниках и изоляторах. - Заявка на изобретение № 4636265/258699 от 12 января 1989 г., 9 с.
34. Barsov S.G., Gordeev V.A., Baryshevsky V.G., Kuten S.A., Rapoport V.I. Hyperfine Interactions of Muonium in Alpha-Quartz. - Hyperf. Inter., 1990, v.60, p.713-716.
35. Gordeev V.A., Konopleva R.F., Firsov V.G., Obukhov Yu.V., Gorelkinskii Yu.V., Nevinny N.N. Equivalent States of Muonium and Implanted Hydrogen in Silicon (Experiment). - Hyperf. Inter., 1990, v.60, p.717-722.
36. Gordeev V.A., Gorelkinskii Yu.V., Nevinnyi N.N., Gelfand R.B., Kuten S.A., Mudry A.V., Pushkarchuk A.L., Rapoport V.I., Ulyashin A.G. Hyperfine Interactions of Muonium and Hydrogen in Silicon and Diamond: Quantum Chemical Calculations. - Hyperf. Inter., 1990, v.60, p.723-726.
37. Drukarev E.G., Gordeev V.A. Muonium to Antimuonium Conversion. Achievements and Hopes, - Preprint INPI, 1990, No 1588, 26 p.