

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
ИНСТИТУТ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОБЛЕМ имени П. Л. КАПИЦЫ

На правах рукописи

ЗМЕЕВ Дмитрий Евгеньевич

УДК 538.941

ИССЛЕДОВАНИЯ СВЕРХТЕКУЧИХ ФАЗ
³HE В АЭРОГЕЛЕ

Специальность 01.04.09 — физика низких температур

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

МОСКВА 2006

Работа выполнена в Институте физических проблем им. П. Л. Капицы РАН.

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
член-корреспондент РАН
В. В. Дмитриев

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор
М. С. Тагиров

доктор физико-математических наук,
профессор
Л. П. Межов-Деглин

Ведущая организация: Институт теоретической физики имени
Л. Д. Ландау РАН

Защита диссертации состоится "24" января 2007 г. в 11 ч. на заседании
Диссертационного совета Д 002.103.01 при Институте физических проблем
им. П. Л. Капицы РАН 119334, г. Москва, ул. Косыгина 2.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института физических про-
блем им. П. Л. Капицы РАН.

Автореферат разослан "21" декабря 2006 г.

Учёный секретарь Диссертационного
совета Д 002.103.01
доктор физико-математических наук,
член-корреспондент РАН

Л. А. Прозорова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Среди физических систем, обладающих сверхтекучестью, гелий-3 занимает выделенное место. Это вещество может находиться в нескольких различных сверхтекучих состояниях, проявляющих большое разнообразие всевозможных свойств. Такое разнообразие обусловлено нетривиальным куперовским спариванием квазичастиц в сверхтекучем состоянии с орбитальным моментом и ядерным спином равными единице. Несмотря на довольно сложную структуру параметра порядка, свойства сверхтекучего ^3He хорошо изучены, и для многих явлений созданы количественные теории [1]. Кроме этого, сверхтекучий ^3He — самое чистое вещество. Все примеси вымерзают на стенках сосуда, когда ^3He становится сверхтекучим (при температурах ниже 2.5 мК), и даже изотоп — ^4He — практически не растворяется в ^3He . Представляет интерес изучение влияния примесей на такую чистую и сложную по своей природе систему. В то время как для сверхпроводников существует проблема избавления от примесей и прочих дефектов, внесение примесей в сверхтекучий ^3He представляет сложность. Возможность вносить примеси в сверхтекучий ^3He появилась начиная с 1995 г., когда была открыта сверхтекучесть ^3He в аэрогеле высокой пористости [2, 3]. Аэрогель представляет собой неупорядоченную сеть из тончайших нитей, состоящих из молекул SiO_2 . Поскольку диаметр нитей ($\approx 30\text{\AA}$) много меньше длины когерентности куперовских пар (несколько сотен ангстрем), аэрогель играет роль примесей. Как и следовало ожидать, аэрогель понижает температуру сверхтекучего перехода, но кроме этого примеси могут, в принципе, изменять симметрию параметра порядка сверхтекучих фаз. Также как и в чистом сверхтекучем ^3He , в ^3He в аэрогеле в слабых магнитных полях реализуются две сверхтекучие фазы — при высоких температурах и давлениях наблюдается так называемая фаза А-типа, а в остальной области фазовой диаграммы — фаза В-типа. Установлено, что симметрия параметра порядка в фазе В-типа не меняется по сравнению с В-фазой чистого ^3He [4, 5]. Однако количественные характеристики ^3He -В могут

изменяться при внесении примесей. В частности, до данной работы была неизвестна леггеттовская частота в $^3\text{He-V}$ в аэрогеле — величина, определяемая диполь-дипольным взаимодействием ядерных магнитных моментов в куперовской паре. Было известно, что пространственное распределение параметра порядка (текстура) в $^3\text{He-V}$ в аэрогеле сильно отличается от текстуры в чистом $^3\text{He-V}$, но детально это различие изучено не было. Что касается фазы А-типа, то в настоящее время не известен даже вид её параметра порядка.

В диссертационной работе проводились исследования сверхтекучих фаз ^3He в аэрогеле методами ЯМР, целью которых были измерение леггеттовской частоты в $^3\text{He-V}$ в аэрогеле, изучение текстуры параметра порядка в $^3\text{He-V}$ в аэрогеле, а также исследование фазы А-типа.

Научная новизна работы

В работе была впервые измерена леггеттовская частота в В-фазе ^3He в аэрогеле в широком диапазоне температур и давлений. Обнаружено, что параметр порядка в $^3\text{He-V}$ в аэрогеле на границе со сверхтекучим чистым ^3He ориентируется иначе, чем параметр порядка чистого $^3\text{He-V}$ на границе с твёрдой стенкой. В фазе А-типа обнаружено два спиновых состояния, способных сосуществовать в объёме образца. Эти состояния существенно отличаются друг от друга свойствами, наблюдаемыми в экспериментах по ЯМР. Также впервые наблюдался продольный резонанс в обеих фазах ^3He в аэрогеле.

Апробация работы

Результаты, изложенные в работе, докладывались и обсуждались на следующих научных конференциях и симпозиумах:

- 24th International Conference on Low Temperature Physics, August 2005, Orlando, FL, USA
- International Symposium on Ultralow Temperature Physics, August 2005, Gainesville, FL, USA

- Symposium on Quantum Phenomena at Low Temperatures, April 2006, Lammi, Finland
- International Symposium on Quantum Fluids and Solids, August 2006, Kyoto, Japan
- XXXIV Собрание по физике низких температур, сентябрь 2006, Краснодарский край

По теме диссертации опубликовано 3 работы.

Структура и объём диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения. Общий объём работы составляет 90 страниц и включает в себя основной текст, 41 рисунок и список литературы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении кратко обоснована актуальность исследуемой проблемы, сформулированы цель и задачи диссертационной работы, приведено краткое содержание диссертации по главам.

В первой главе приводится краткий обзор базовых представлений о сверхтекучем ^3He . Рассматриваются параметр порядка, вид дипольной энергии, приводятся основные уравнения спиновой динамики. Дается понятие о текстурах вектора параметра порядка, излагаются методы измерения леггеттовской частоты в чистом ^3He -В. Приводится фазовая диаграмма ^3He в аэрогеле и описываются его основные свойства.

Во второй главе описана экспериментальная установка. Приводятся данные об аэрогеле и особенностях работы с ним. Кратко описан цикл ядерного размагничивания, описываются использованные в работе экспериментальные ячейки. Приводятся схемы использованных ЯМР спектрометров и описываются принципы их работы.

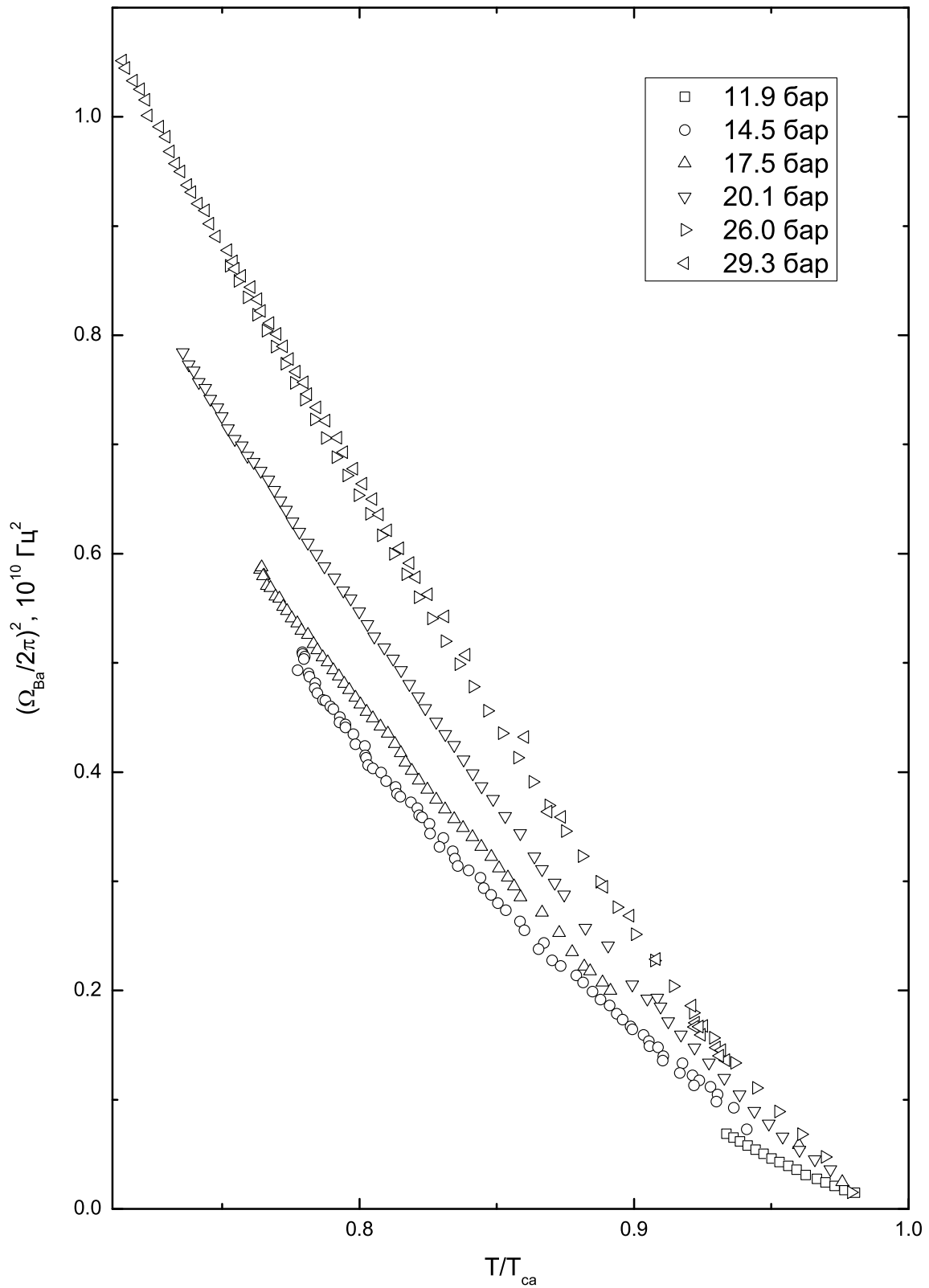


Рис. 1. Зависимость леггеттовской частоты в $^3\text{He}-\text{B}$ в аэрогеле от температуры при разных давлениях. $T_{ca}=T_{ca}(P)$ — температура сверхтекучего перехода в ^3He в аэрогеле для соответствующих давлений.

В третьей главе излагается метод измерения леггеттовской частоты $\Omega_{\text{Ва}}$ в ${}^3\text{He-V}$ в аэрогеле с помощью поперечного ЯМР. В чистом ${}^3\text{He}$, при условии что текстура в образце известна, можно измерять леггеттовскую частоту, измеряя максимальный сдвиг частоты на линии ЯМР. Сделать измерения в ${}^3\text{He-V}$ в аэрогеле напрямую, по аналогии с чистым ${}^3\text{He-V}$, не удавалось, поскольку на момент начала диссертационной работы линии ЯМР в ${}^3\text{He-V}$ в аэрогеле не имели чёткой интерпретации в терминах текстуры параметра порядка. Обнаружив особенность на линии ЯМР и соотнеся её с максимально возможным дипольным сдвигом [6], мы получили возможность измерять леггеттовскую частоту. Причём диапазон давлений и температур, в которых имела возможность провести измерения, был существенно больше, чем в более ранних измерениях [7] с помощью колебаний однородно прецессирующего домена (ОПД) (в этом методе не возникает трудностей, связанных с неизвестностью текстуры, поскольку она однородна). Измерения с помощью этих двух способов в перекрывающемся диапазоне дали одинаковые результаты. На рис. 1 представлены измеренные нами методом непрерывного ЯМР температурные зависимости $\Omega_{\text{Ва}}$ при нескольких давлениях.

Температурные зависимости леггеттовской частоты в ${}^3\text{He-V}$ в аэрогеле при разных давлениях обладают некоторыми свойствами, отсутствующими у аналогичных зависимостей в чистом ${}^3\text{He-V}$. Было обнаружено, что для разных давлений температурные зависимости $\Omega_{\text{Ва}}^2 = \Omega_{\text{Ва}}^2(T_{\text{ca}}-T)$ совпадают (рис. 2). Установлено, что эта универсальная зависимость имеет степенной вид: $\Omega_{\text{Ва}}^2 \propto (T_{\text{ca}}-T)^\alpha$. Также было обнаружено, что линия сверхтекучих переходов в ${}^3\text{He}$ в аэрогеле $T_{\text{ca}}=T_{\text{ca}}(P)$ совпадает с некоторой изолинией, вдоль которой леггеттовская частота в чистом ${}^3\text{He-V}$ остаётся постоянной ($\Omega_{\text{в}} = \Omega_{\text{в}}(P,T)=\text{const}$). Было проверено, что эта закономерность выполняется для аэрогелей с разными плотностями, исследованными другими группами. Эти две эмпирические зависимости не имеют теоретического объяснения на настоящий момент.

Кроме измерений леггеттовской частоты методом поперечного ЯМР, были проведены измерения с помощью продольного ЯМР для одной фиксированной частоты продольной накачки.

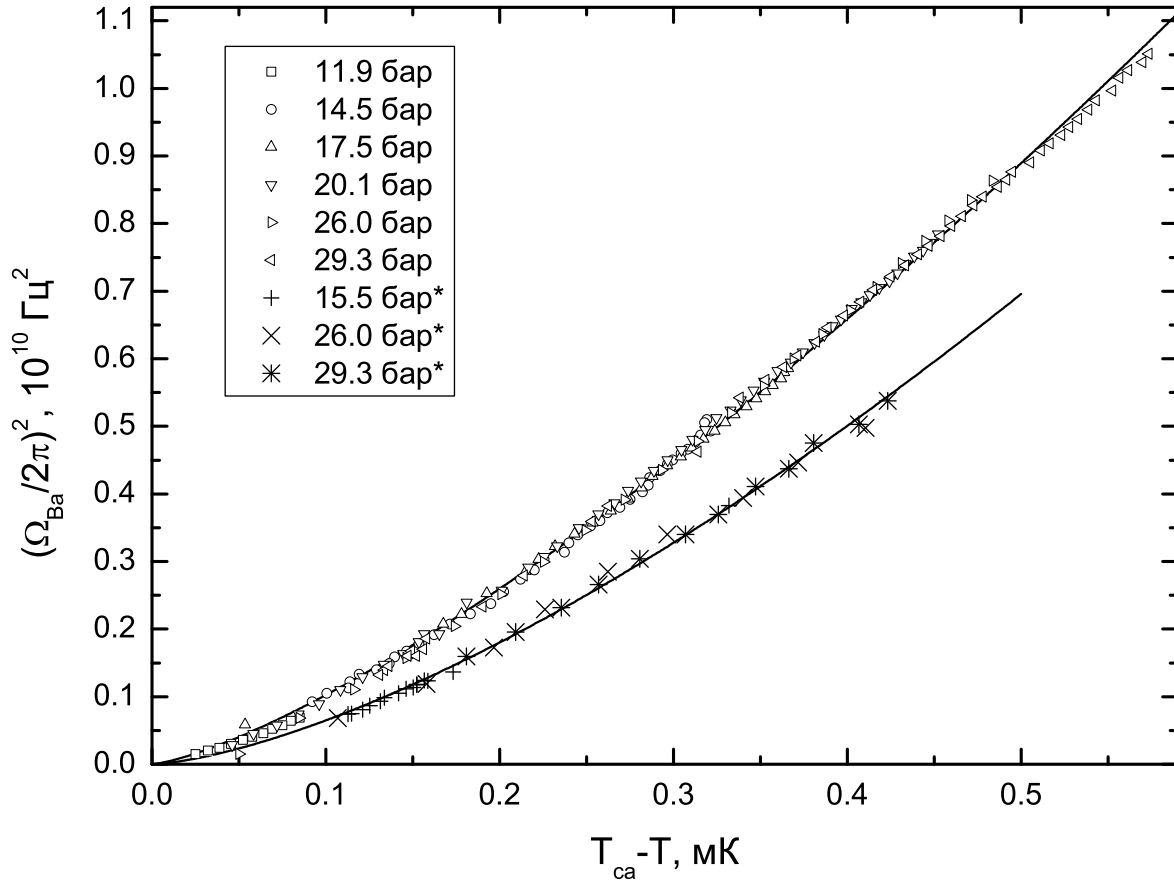


Рис. 2. Зависимость леггеттовской частоты в ${}^3\text{He-V}$ в аэрогеле от $(T_{ca}-T)$. $T_{ca}=T_{ca}(P)$ соответствует давлениям, при которых были получены температурные зависимости. Зависимость имеет степенной характер $\Omega_{Ba}^2 \propto (T_{ca}-T)^\alpha$, $\alpha \approx 1.34$. Звёздочками отмечены зависимости, измеренные нами в другом образце ${}^3\text{He}$ в аэрогеле ($\alpha \approx 1.48$).

Четвёртая глава посвящена исследованию пространственного распределения ориентации вектора параметра порядка (текстуры) в ${}^3\text{He-V}$ в аэрогеле. Для изучения текстур параметра порядка удобно рассматривать вектор орбитального момента импульса \mathbf{L} , который появляется в ${}^3\text{He-V}$ в магнитном поле. Пространственная ориентация \mathbf{L} в чистом ${}^3\text{He-V}$ определяется минимизацией ориентационной энергии и выглядит следующим образом: вдали от стенок сосуда \mathbf{L} выстраивается вдоль магнитного поля, вблизи стенок сосуда направление \mathbf{L} перпендикулярно поверхности, а градиентная энергия не позволяет параметру порядка быстро изменять ориентацию по пространству.

На основе анализа экспериментальных данных нами выдвинуто предположение, что вектор \mathbf{L} ориентируется на границе ${}^3\text{He}\text{--}\text{В}$ в аэрогеле – чистый ${}^3\text{He}$ вдоль поверхности, а не перпендикулярно, как это происходит в чистом ${}^3\text{He}\text{--}\text{В}$ вблизи твёрдой стенки. Предполагая, что вид ориентирующей текстуры энергии не изменяется в аэрогеле за исключением граничного условия, можно смоделировать равновесную текстуру и вид линии поглощения ЯМР. Сравнение результатов такого моделирования с экспериментальными данными подтверждает выдвинутое предположение.

Также проведены эксперименты в магнитных полях, направленных под углом к оси ячейки. Сигнал ЯМР сильно отличается от ожидаемого для геометрии ячейки сигнала в чистом ${}^3\text{He}$ и также может быть качественно объяснён в предположении параллельности вектора \mathbf{L} поверхности аэрогеля. Форма линии не зависела от того, было ли направление магнитного поля изменено при низких температурах, после сверхтекучего перехода, или выше T_{ca} . Это означает, что возможные локальные неоднородности в объёме аэрогеля слабо влияют на ориентацию вектора параметра порядка.

Был обнаружен текстурный переход: особенность линии ЯМР, с помощью которой была измерена леггеттовская частота и которую мы связываем с текстурным дефектом, скачком исчезала вблизи температуры сверхтекучего перехода и не появлялась при последующем охлаждении.

Мы выяснили также, что вид фазы чистого ${}^3\text{He}$ (А или В), окружающего образец с ${}^3\text{He}\text{--}\text{В}$ в аэрогеле, не оказывает влияния на ориентирующий эффект границы.

В пятой главе изложены результаты экспериментов с высокотемпературной фазой ${}^3\text{He}$ в аэрогеле — фазой А-типа. Приводится сравнение экспериментальных данных с результатами существующих теорий фазы А-типа [8, 9].

В этой фазе мы наблюдали два различных спиновых состояния с различающимися свойствами. При обычном охлаждении мы получали линию ЯМР с двумя пиками, которые мы соотнесли с двумя спиновыми состояниями. Сдвиг частоты в непрерывном ЯМР для одного из состояний (f) превышал сдвиг частоты для другого состояния (c) в 4 раза. Прикладывая при охлаждении через T_{ca} к образцу ${}^3\text{He}$ в аэрогеле радиочастотные им-

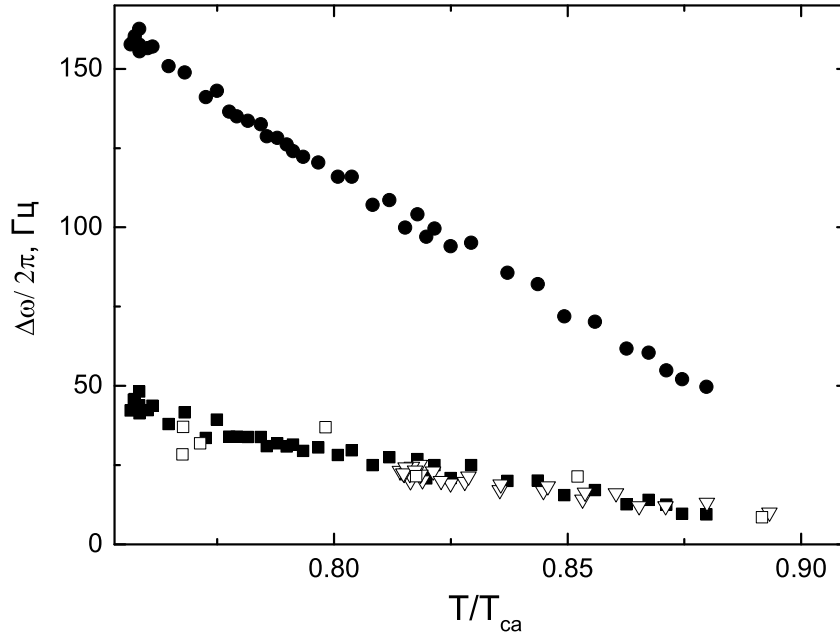


Рис. 3. Сдвиги частоты линий ЯМР: ● и ■ — пики (f) и (c) линии с двумя пиками соответственно, □ и ▽ — линии с одним пиком (c) на разных отогревах. $P=29.3$ бар, $H=224$ Э.

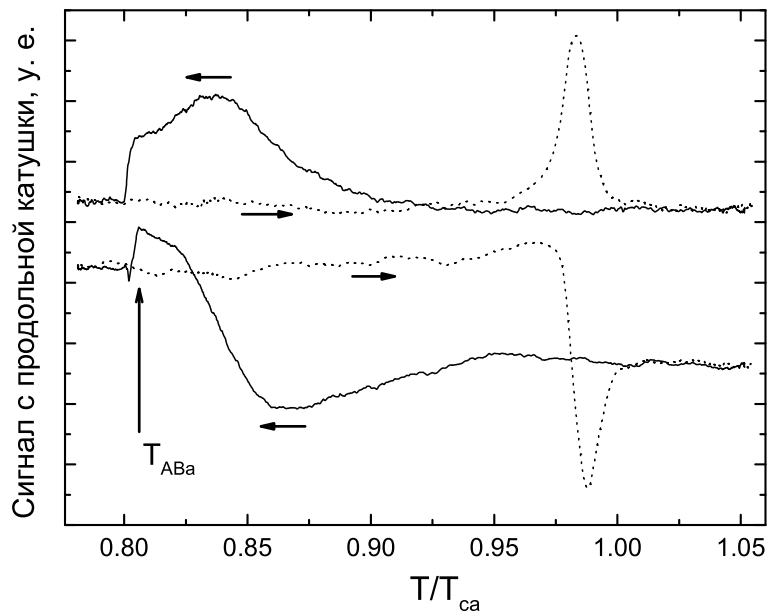


Рис. 4. Сигналы поглощения и дисперсии продольного ЯМР. Сигналы от фазы А-типа наблюдались при охлаждении (показаны сплошной линией), сигналы от В-фазы наблюдались при нагреве (показаны пунктирной линией). При температуре T_{ABa} происходит переход из фазы А-типа в В-фазу. $P=26.0$ бар, $H=224$ Э. Частота продольной накачки была равна 9593 Гц.

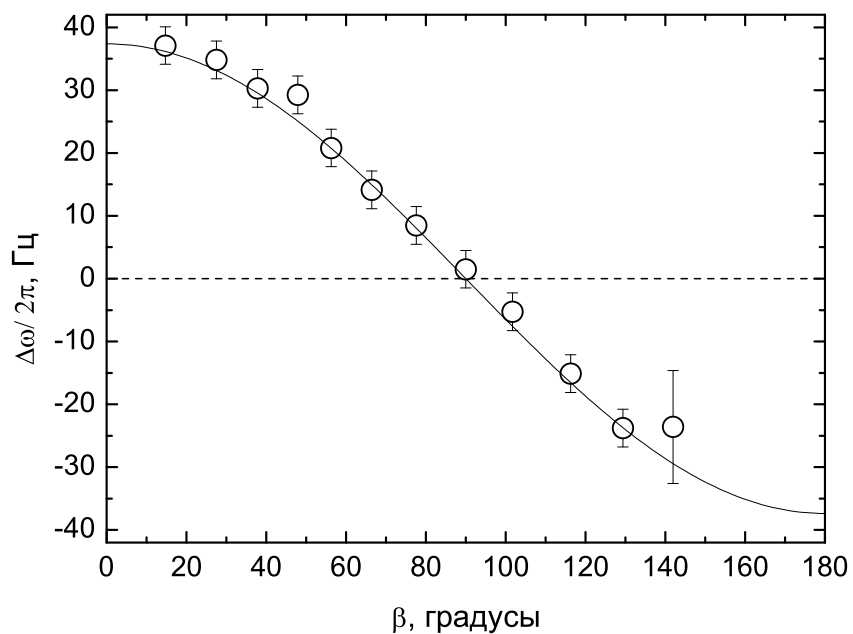


Рис. 5. Зависимость частоты сигнала свободной индукции от начального угла отклонения намагниченности в чистом состоянии (c). Линией показан результат подгонки зависимости функцией $(\omega - \omega_L)/2\pi = A \cos \beta$. $P=29.3$ бар, $T=0.76 T_{ca}$. $H=224$ Э.

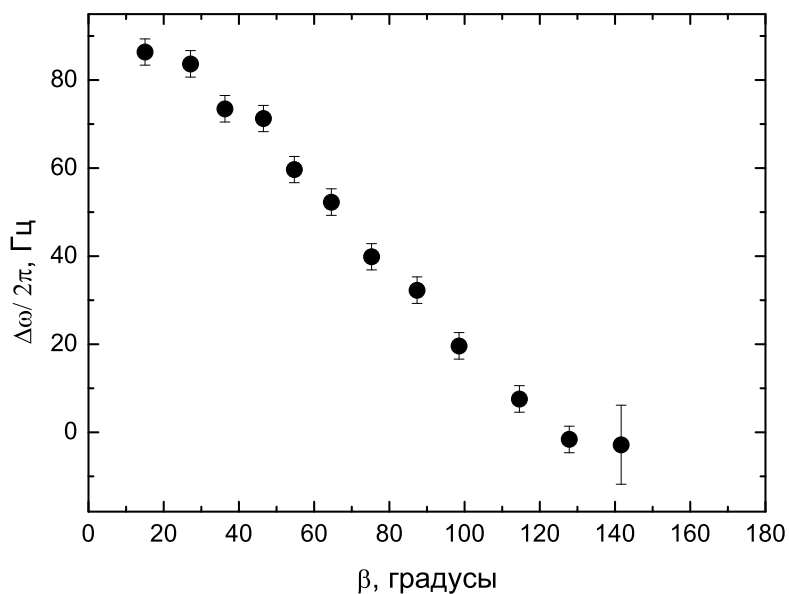


Рис. 6. Зависимость частоты сигнала свободной индукции от начального угла отклонения намагниченности в состоянии ($f + c$). $P=29.3$ бар, $T=0.76 T_{ca}$. $H=224$ Э.

пульсы, переворачивавшие намагниченность на 180° , мы получили линию с одним пиком, причём сдвиг частоты для неё соответствовал состоянию (c) (см. рис. 3). Состояние (f) в чистом виде получить не удалось.

На рис. 4 приведены результаты продольного ЯМР для смеси двух состояний (f) и (c). Для чистого состояния (c) сигнал продольного ЯМР обнаружен не был. Это означает, что сигнал на охлаждении на рис. 4 связан только с состоянием (f).

Состояния (f) и (c) обладают также сильно различающимися зависимостями сдвига частоты сигнала свободной индукции от угла отклонения намагниченности. На рис. 5 приведены результаты экспериментов по импульсному ЯМР для чистого состояния (c). Сдвиг частоты для этого состояния описывается формулой $\Delta\omega/2\pi = (\omega - \omega_L)/2\pi = A \cos \beta$, где β — начальный угол отклонения намагниченности.

Зависимость $\Delta\omega(\beta)$ для смеси состояний ($f+c$) приведена на рис. 6. Интерпретация результатов в смеси состояний затруднена, поскольку предположительно сигнал индукции складывается из двух независимых сигналов от состояний (f) и (c).

На основании полученных экспериментальных данных не удаётся сделать однозначный вывод о том, какая из существующих теоретических моделей правильно описывает свойства фазы А-типа. Идентификация параметра порядка этой фазы требует дальнейших исследований, например изучения состояния (f) в чистом виде.

В заключении перечисляются результаты диссертации и предлагаются эксперименты, в которых могут быть использованы результаты диссертации и эксперименты, которые могли бы дополнить содержание диссертации.

Основные результаты

1. Измерена леггеттовская частота в В-фазе ^3He в аэрогеле с пористостью 98.2 % в широком диапазоне температур и давлений. Эмпирически обнаружены зависимости температуры сверхтекучего перехода в ^3He в аэрогеле и универсальное поведение леггеттовской частоты в зависимости от температуры для разных давлений.
2. Предложено граничное условие для параметра порядка в ^3He -В в аэрогеле на границе между ^3He -В в аэрогеле и сверхтекучим чистым ^3He .
3. В фазе А-типа ^3He в аэрогеле обнаружены два спиновых состояния, названные (f) и (c). Эти состояния отличаются свойствами ЯМР, в частности в состоянии (c) не наблюдается продольный резонанс. Сдвиг частоты от ларморовского значения в импульсном ЯМР в состоянии (c) зависит от начального угла отклонения намагниченности β по формуле $\Delta\omega = A \cos \beta$. Полученные сведения об этих спиновых состояниях могут стать основой для идентификации параметра порядка в фазе А-типа.
4. Впервые наблюдались сигналы продольного резонанса в ^3He в аэрогеле.

Результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

- V. V. Dmitriev, N. Mulders, V. V. Zavjalov and D. E. Zmeev. **NMR Studies of Texture in the B-like Phase of ^3He in Aerogel.** *AIP Conf. Proceedings*, **850**, 225 (2006)
- V. V. Dmitriev, N. Mulders, V. V. Zavjalov and D. E. Zmeev. **CW NMR Measurements of the Leggett Frequency in ^3He -B in Aerogel.** *AIP Conf. Proceedings*, **850**, 229 (2006)
- V. V. Dmitriev, L. V. Levitin, N. Mulders, and D. E. Zmeev. **Longitudinal NMR and Spin States in the A-like Phase of ^3He in Aerogel.** *Письма в ЖЭТФ*, **84**, 539 (2006)

Литература

- [1] D. Vollhardt and P. Wölfle. The Superfluid Phases of Helium Three. *Taylor & Francis*, London (1990).
- [2] J. V. Porto and J. M. Parpia. *Phys. Rev. Lett.*, **74**, 4667 (1995).
- [3] D. T. Sprague, T. M. Haard, J. B. Kycia, et al. *Phys. Rev. Lett.*, **75**, 661 (1995).
- [4] B. I. Barker, Y. Lee, L. Polukhina, D. D. Osheroff, et al. *Phys. Rev. Lett.*, **85**, 2148 (2000).
- [5] В. В. Дмитриев, В. В. Завьялов, Д. Е. Змеев и др. *Письма в ЖЭТФ*, **76**, 371 (2002).
- [6] V. V. Dmitriev, N. Mulders, V. V. Zavjalov and D. E. Zmееv. *AIP Conf. Proceedings*, **850**, 229 (2006).
- [7] В. В. Дмитриев, В. В. Завьялов, Д. Е. Змеев, Н. Малдерс. *Письма в ЖЭТФ*, **79**, 612 (2004).
- [8] G. E. Volovik. *Письма в ЖЭТФ*, **84**, 533 (2006).
- [9] I. A. Fomin. *Письма в ЖЭТФ*, **84**, 740 (2006).