

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт физических проблем им. П. Л. Капицы
Российской академии наук

На правах рукописи
УДК 538.941

КРАСНИХИН
Дмитрий Анатольевич

А-подобная фаза ^3He в анизотропном аэрогеле

01.04.09 – Физика низких температур

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2012

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Сверхтекучий ^3He – это уникальная физическая система. Сверхтекучесть ^3He связана с куперовским спариванием квазичастиц с орбитальным моментом и полным ядерным спином, равными единице. Такое спаривание приводит к большому разнообразию физических свойств и допускает большое количество вариантов построения волновой функции системы. Несмотря на сложный вид параметра порядка, свойства чистого сверхтекучего ^3He хорошо изучены, для многих явлений разработаны количественные теории [1]. В слабых магнитных полях в объёмном ^3He в зависимости от условий реализуются две сверхтекучие фазы: А фаза (с параметром порядка Андерсона-Бринкмана-Мореля, АВМ) и В фаза (с параметром порядка Бальяна-Вертхамера, ВВ). Очевидный интерес представляет изучение влияния примесей на столь сложный тип сверхтекучести. Однако при сверхнизких температурах ^3He является почти идеально чистым веществом. Смесь ^3He и ^4He при сверхнизких температурах расслаивается на две фазы, причем в фазе богатой ^3He практически не содержится ^4He . Прочие вещества при таких температурах вымерзают на стенках экспериментальной ячейки. По этой причине, единственный способ внести примеси – это поместить внутрь ^3He жесткий каркас из достаточно тонких нитей. Характерная толщина этих нитей должна быть меньше, чем длина когерентности (несколько сотен ангстрем) – в противном случае каркас будет играть роль множества стенок, а не примесей. В качестве такого каркаса стали использовать аэрогель из оксида кремния (*silica aerogel*) высокой пористости. Аэрогель представляет из себя «мочалку» из нитей SiO_2 . Характерный диаметр нитей 30-50 Å, а расстояние между ними – 500-1000 Å. Вскоре было установлено, что аэрогель достаточно малой плотности (или, что то же самое, высокой пористости) не полностью подавляет сверхтекучесть ^3He , а лишь уменьшает температуру сверхтекучего перехода [2], [3]. При этом, так же, как и в объёмном ^3He , в слабых магнитных

полях реализуются две сверхтекучие фазы. Фазовая диаграмма сверхтекучего ^3He в аэрогеле качественно схожа с фазовой диаграммой чистого ^3He , поэтому сверхтекучие фазы в ^3He в аэрогеле по аналогии были названы А-подобной и В-подобной фазой. Установлено, что низкотемпературная, В-подобная, фаза имеет параметр порядка, близкий к параметру порядка объемной В фазы [4], [5]. Что касается другой фазы, высокотемпературной или А-подобной, то до недавнего времени вопрос о её структуре оставался открытым. Было обнаружено, что свойства А-подобной фазы зависят от анизотропии образца аэрогеля, которую можно создать, например, деформируя образец. Так, при сильном одноосном сжатии в аэрогеле реализуется АВМ фаза с орбитальным вектором параметра порядка \hat{l} , зафиксированном вдоль оси деформации [6]. В недеформированных же или слабоанизотропных образцах аэрогеля наблюдались свойства ядерного магнитного резонанса (ЯМР), которые не удавалось интерпретировать. К тому же наблюдались спиновые состояния, зависящие от предыстории. Происхождение этих состояний оставалась непонятным [A2].

Г.Е. Воловиком было высказано предположение, что в А-подобной фазе реализуется АВМ фаза в состоянии Ларкина-Имри-Ма [7]. Эффект Ларкина-Имри-Ма состоит в том, что поле неоднородностей разрушает дальний порядок параметра порядка. Однако прямых экспериментальных подтверждений этой теории к началу работы над диссертацией не было.

В диссертационной работе проводились исследования А-подобной фазы сверхтекучего ^3He в аэрогеле методами ЯМР, целью которых было установление параметра порядка и его пространственной структуры, изучение свойств разных спиновых состояний, а также интерпретация ранее проведенных ЯМР экспериментов.

Научная новизна работы

В диссертационной работе показано, что А-подобная фаза в слабоанизотропном аэрогеле является АВМ фазой в состоянии Ларкина-Имри-Ма.

Была измерена леггеттовская частота для А-подобной фазы и выяснена природа разных спиновых состояний А-подобной фазы. Также были проведены измерения скорости продольной релаксации намагниченности в А-подобной фазе для разных температур, спиновых состояний и направлений постоянного магнитного поля.

Апробация работы

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

- International Symposium on Quantum Fluids and Solids (QFS 2007), August 2007, Kazan, Russian Federation
- 25th International Conference on Low Temperature Physics (LT 25), August 2008, Amsterdam, The Netherlands
- International Symposium on Quantum Fluids and Solids (QFS 2010), August 2010, Grenoble, France
- 26th International Conference on Low Temperature Physics (LT 26), August 2011, Beijing, China

Структура и объем диссертации.

Диссертация состоит из введения, четырёх глав и заключения. Общий объём работы составляет 66 страниц и включает в себя основной текст, 29 рисунков и список литературы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

В первой главе приводится краткий обзор базовых представлений о сверхтекучем ^3He и более подробно рассматривается А фаза, её параметр порядка – параметр порядка АВМ, вид дипольной энергии, вводятся основные

уравнения спиновой динамики. Дается понятие о АВМ фазе в состоянии Ларкина-Имри-Ма. В сверхтекучем ^3He в аэрогеле может разрушаться дальний порядок параметра порядка АВМ фазы, что приводит к тому, что вектора параметра порядка \hat{l} разнонаправлены в разных частях образца. Характерное расстояние, на котором меняется направление вектора \hat{l} называется длиной Ларкина-Имри-Ма (ЛИМ). Если среднее направление векторов \hat{l} по образцу равно нулю – состояние называется ОГ состоянием (от англ. *orbital glass*), если не равно нулю – OF состоянием (от англ. *orbital ferromagnetic*). Нужно отметить, что распределение направлений векторов \hat{l} в ОГ состоянии может быть анизотропно из-за анизотропии аэрогеля.

Вводится два спиновых состояния: SN состояние (от англ. *spin nematic*) и SG состояние (от англ. *spin glass*). В равновесии спиновый вектор параметра порядка \hat{d} направлен перпендикулярно магнитному полю. В случае SN состояния вектор \hat{d} направлен одинаково во всём образце. В случае же SG состояния вектор \hat{d} разупорядочен.

Приводятся ЯМР свойства ОГ-SN состояния для одноосной анизотропии вектора \hat{l} типа «растяжение» (другими словами, такое состояние можно получить в изначально изотропном образце аэрогеля, растянув его):

$$\Delta\omega = \frac{\Omega_A^2}{2\omega_L} q \left(-\cos\beta + \sin^2\mu \frac{5\cos\beta - 1}{4} \right) \quad (1)$$

для одноосной анизотропии вектора \hat{l} типа «сжатие» и для OF состояния:

$$\Delta\omega = \frac{\Omega_A^2}{2\omega_L} q \left(-\cos\beta + \sin^2\mu \frac{7\cos\beta + 1}{4} \right) \quad (2)$$

и ЯМР свойства ОГ-SG состояния:

$$\Delta\omega = \frac{\Omega_A^2}{2\omega_L} q \cos\beta \left(\frac{3}{2} \sin^2\mu - 1 \right) \quad (3)$$

где $\Delta\omega$ – сдвиг частоты ЯМР от ларморовской частоты; Ω_A – леггеттовская частота; ω_L – ларморовская частота; q – параметр, характеризующий сте-

пень анизотропии распределения векторов \hat{l} (если $q=1$, то все вектора \hat{l} сонаправлены); β – угол отклонения намагниченности от равновесного направления; μ – угол наклона постоянного магнитного поля, отсчитываемый от оси анизотропии образца. Формулы (1)-(3) имеют смысл в том случае, если дипольная длина больше длины ЛИМ.

Во второй главе описана экспериментальная установка. Кратко описан цикл ядерного размагничивания, описываются использованная в работе экспериментальная камера и образцы аэрогеля (№1, №2 и №3). Приводятся схемы применявшихся спектрометров ЯМР и описываются принципы их работы.

В третьей главе описываются эксперименты по идентификации параметра порядка А-подобной фазы, определению леггетовской частоты и изучению свойств спиновых состояний.

В первой части главы рассматривается «эффективный» сдвиг частоты $((\Omega_A^*)^2 = 2\omega|\Delta\omega|)$ в экспериментах по непрерывному ЯМР ($\beta \approx 0$) для образца №1, который был помещен в экспериментальную ячейку, деформированную на 9% вдоль оси, причем магнитное поле было направлено вдоль этой же оси ($\mu = 0$). Предполагалось, что такая сильная деформация приведет к ориентации параметра порядка, другими словами, реализуется состояние, близкое к состоянию с $q \approx 1$. Результаты для величины «эффективного» сдвига частоты образца №1 сравниваются с результатами из [6], [A1], [A2], [8], пересчитанными к одним и тем же экспериментальным условиям (см. рис. 1). Из совпадения зависимостей следует, что во всех образцах реализовывалось состояние, близкое к состоянию с $q \approx 1$. Отсюда следует, что зависимость «эффективного» сдвига для образца №1 является зависимостью квадрата леггетовской частоты сверхтекучего ^3He в аэрогеле с пористостью 98,2%.

ЯМР свойства образцов №2 и №3 существенно отличались от свойств образца №1, в частности отличались знак и величина сдвига при $\mu = 0$ (см.

рис. 1). Мы предположили, что сверхтекучий ^3He в этих образцах находятся в OG состоянии, а два спиновых состояния, получаемые разными способами прохождения через температуру сверхтекучего перехода ^3He в аэрогеле – обычное охлаждение и охлаждение с большой радиочастотной накачкой – соответствуют OG-SN и OG-SG состояниям. Если это предположение верно, то ЯМР свойства сверхтекучего ^3He в этих образцах аэрогеля, должны полностью описываться леггетовской частотой и параметром q , см. формулы (1) и (3) (здесь мы считаем, что анизотропия одноосна – это характерно для большинства образцов аэрогеля, что связано с технологией изготовления образцов). Из результатов непрерывного ЯМР были вычислены параметры q , для образца №1 параметр составил $q \approx -0,25$, для образца №3 – $q \approx -0,05$. Полученные значения параметров соответствуют анизотропии распределения векторов \hat{l} типа «растяжение». Для образца №2 были проведены исследования свойств непрерывного (рис. 2) и импульсного ЯМР (рис. 3 и 4) в зависимости от спинового состояния и направления постоянного магнитного поля. Все теоретические зависимости на этих рисунках проведены в предположении, что в экспериментах реализуется OG-SN и OG-SG состояния (см. формулы (1) и (3)). Теоретические зависимости хорошо описывают экспериментальные данные, потому можно считать исходное предположение верным.

Во второй части главы на примере образца №2 изучалась зависимость параметра q от величины одноосной деформации. Отметим, что в первой серии экспериментов образец №2 был сжат по оси на 4%, а анизотропия распределения векторов \hat{l} оставалась типа «растяжение». Во второй серии экспериментов образец №2 был помещен в ячейку свободно, т.е. фактически образец был растянут еще на ~4%. По результатам экспериментов было установлено, что это дополнительное растяжение меняет распределение векторов \hat{l} в соответствии с теоретическими представлениями. Однако, несмотря на такое большое изменение деформации величина изменения параметра q

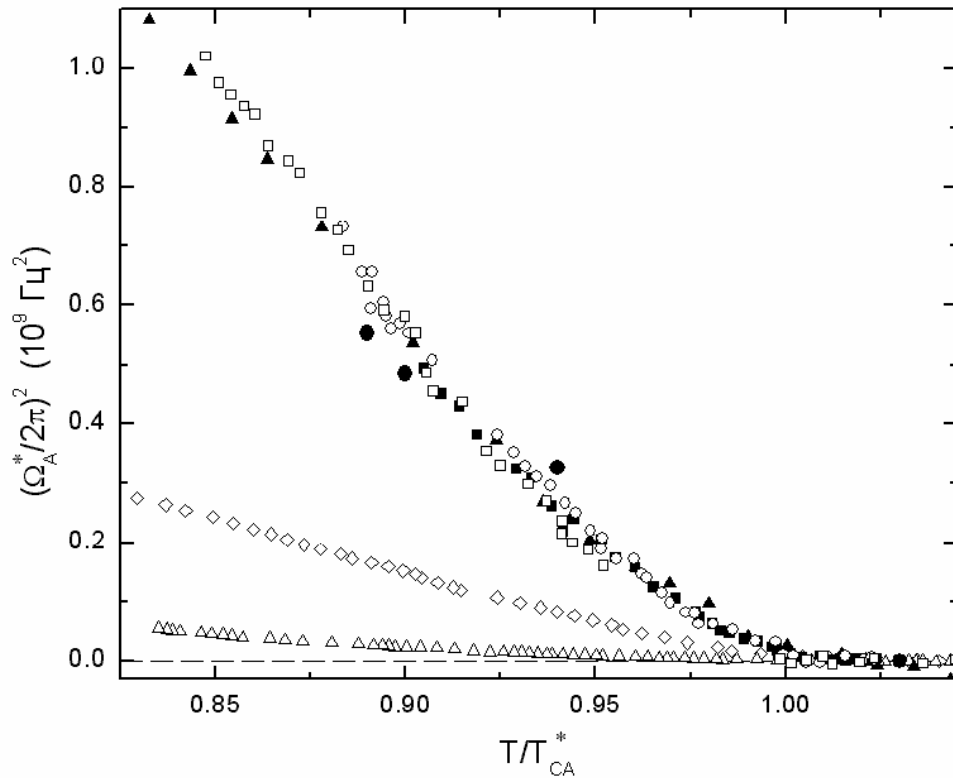


Рис.1 Температурные зависимости «эффективного» сдвига в А-подобной фазе при разных давлениях, пересчитанные к давлению 26,0 бар. (□) – образец №1; (▲) – образец аэрогеля [6]; (●) – образец аэрогеля из [A2]; (■) – образец аэрогеля [A1]; (○) – образец аэрогеля [8]; (◇) – образец №2; (△) – образец №3. Здесь и далее T_{ca}^* – температура сверхтекучего перехода ^3He в аэрогеле.

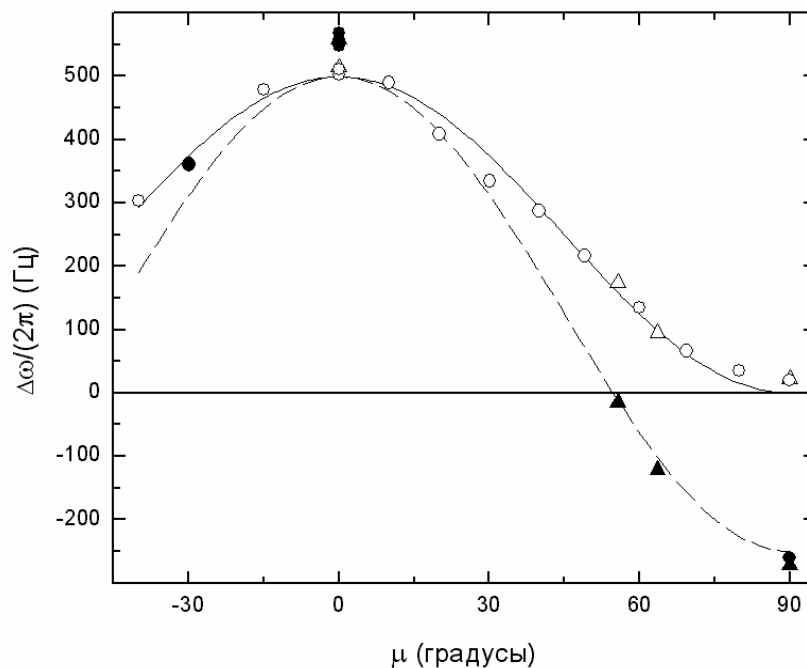


Рис.2 Зависимость сдвига частоты в непрерывном ЯМР от направления постоянного магнитного поля в А-подобной фазе в образце №2. Закрашенные точки соответствуют OG-SG состоянию, незакрашенные – OG-SN состоянию. Частота ЯМР 328,5 кГц. Данные, обозначенные кружочками, получены на данной частоте; данные, обозначенные треугольниками, получены на частоте 341,5 кГц, но пересчитаны к 328,5 кГц. $T = 0,81 T_{ca}^*$. Давление 26 бар. Сплошная линия соответствует зависимости (1), пунктирная – (3).

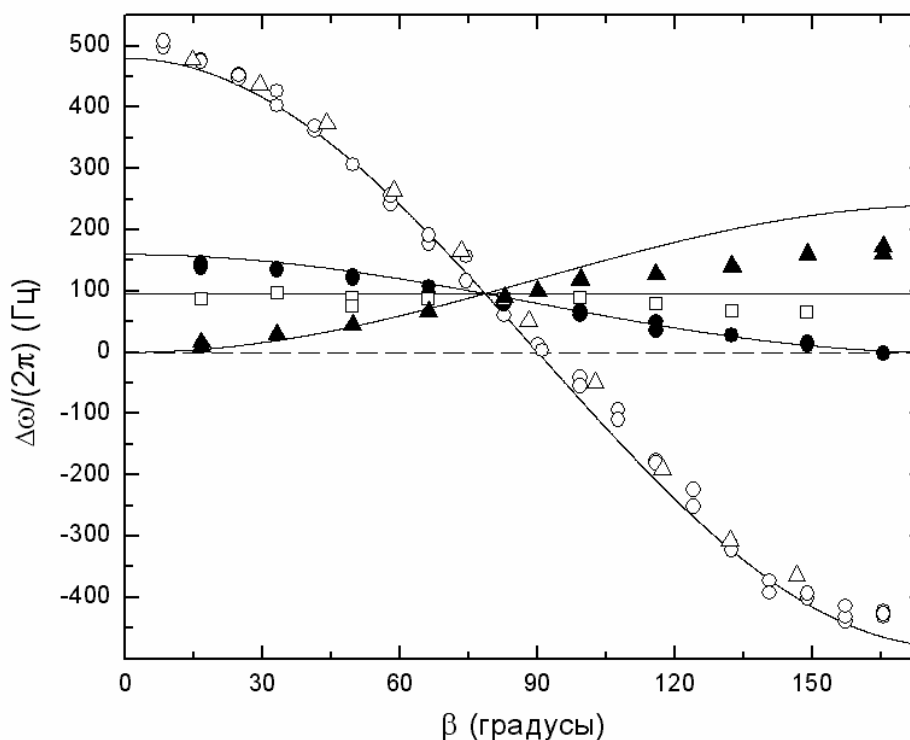


Рис.3 Зависимость сдвига частоты сигнала свободной индукции (ССИ) от ларморовской от угла отклонения намагниченности β в А-подобной фазе в OG-SN состоянии. Образец №2. (\circ) и (Δ) - $\mu = 0$; (\bullet) - $\mu = 54,7^\circ$; (\square) - $\mu = \mu_{c1} = 63,4^\circ$; (\blacktriangle) - $\mu = 90^\circ$. Частота ЯМР 341,5 кГц. Данные, обозначенные (Δ), получены на частоте 664 кГц, но пересчитаны к частоте ЯМР 341,5 кГц. $T = 0,81 T_{ca}^*$, давление 26 бар.

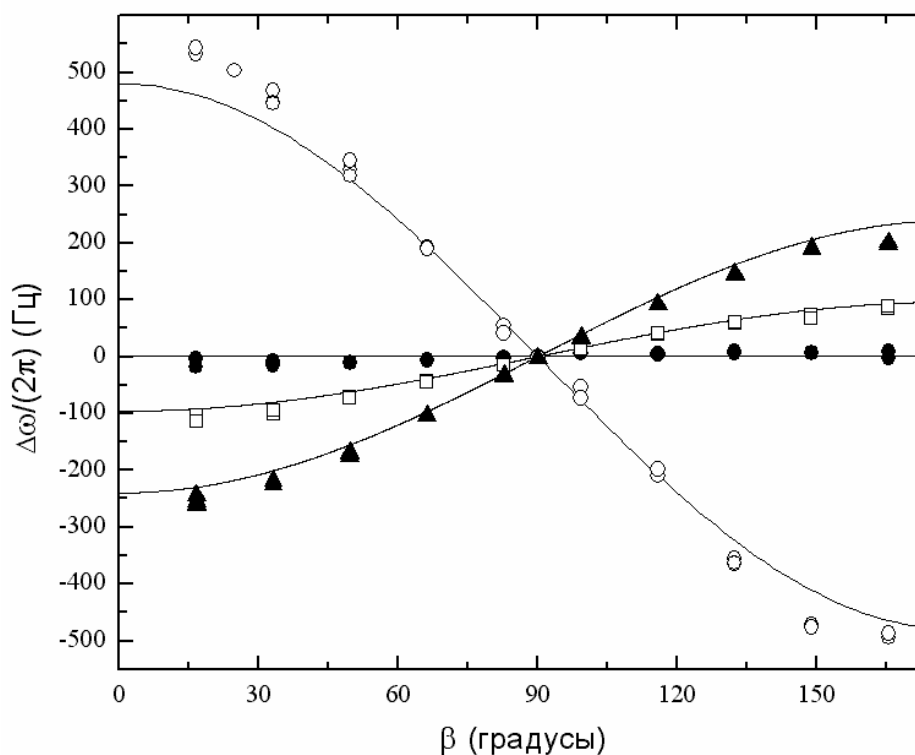


Рис.4 Зависимость сдвига частоты ССИ от ларморовской от угла отклонения намагниченности β в А-подобной фазе в OG-SG состоянии. Образец №2. (\circ) - $\mu = 0$; (\bullet) - $\mu = \mu_{c2} = 54,7^\circ$; (\square) - $\mu = 63,4^\circ$; (\blacktriangle) - $\mu = 90^\circ$. Частота ЯМР 341,5 кГц, $T = 0,81 T_{ca}^*$, давление 26 бар.

оказалась очень мала. Нужно отметить, что данный вопрос нуждается в более подробном исследовании.

В третьей части главы изучалась скорость продольной магнитной релаксации намагниченности в А-подобной фазе в образце №2. Экспериментально показано, что восстановление продольной намагниченности со временем происходит не по экспоненциальному закону. Исследования зависимости характерной скорости магнитной релаксации от градиента магнитного поля при разных спиновых состояниях и направлениях постоянного магнитного поля показали (см. рис. 5), что при направлении постоянного магнитного поля вдоль оси образца (вдоль оси анизотропии) скорость релаксации велика и примерно одинакова для обоих спиновых состояний. При направлении поля перпендикулярно оси образца скорость релаксации в пределе нулевого градиента для OG-SG состояния существенно превышает скорость релаксации для OG-SN состояния, что является дополнительным доказательством существования двух принципиально разных спиновых состояний. Количественно данные результаты объяснить не удалось, требуются дополнительные исследования.

В четвертой главе обсуждаются результаты [A1], [9], [10], которые не удаётся объяснить с помощью модели АВМ фазы в состоянии Ларкина-Имри-Ма в одноосно анизотропном аэрогеле. Их предлагается рассмотреть, используя ту же модель в двухосно анизотропном аэрогеле. Показано, что результаты импульсного ЯМР [A1], [9] полностью объясняются с помощью данного предположения.

«F-состояние» и «с-состояние», наблюдавшиеся в эксперименте [10], рассматриваются как сосуществование OG-SN и OG-SG состояний в двухосно анизотропном аэрогеле. Используя это предположение, из результатов непрерывного ЯМР вычисляются параметры анизотропии распределения векторов \hat{l} . С помощью этих же параметров можно описать результаты импульсного ЯМР (см. рис. 6). Нужно отметить, что сплошная линия на рис. 6 проведена без подгоночных параметров: все данные характеризующие образец по-

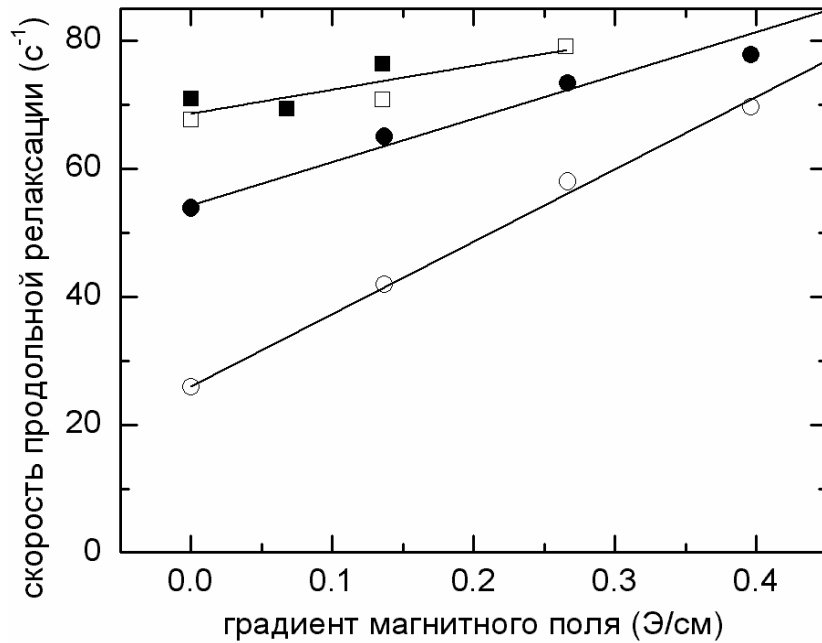


Рис. 5. Скорость продольной релаксации намагниченности в сверхтекучем ^3He в А-подобной фазе в образце №2 в разных спиновых состояниях и при разном направлении магнитного поля. $T = 0,89T_{ca}^*$, магнитное поле 105 Э, давление 27,2 бар. Магнитное поле направлено вдоль оси z в OG-SN состоянии (□); поле – вдоль оси z в OG-SG состоянии (■); поле – перпендикулярно оси z в OG-SN состоянии (○); поле – перпендикулярно оси z в OG-SG состоянии (●). Сплошные линии – линейная экстраполяция.

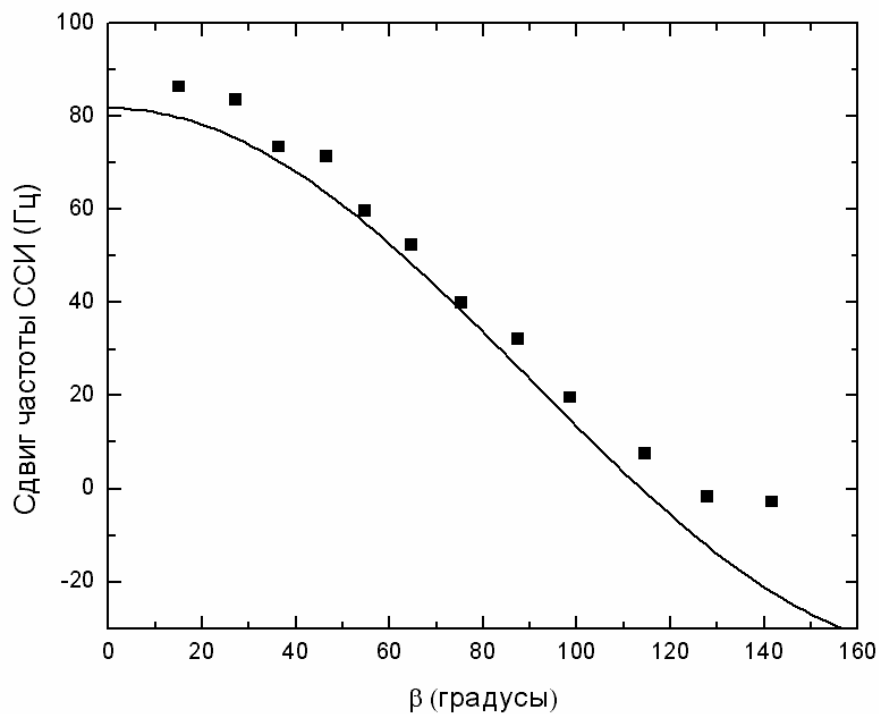


Рис. 6. Зависимость сдвига частоты от ларморовской в импульсном ЯМР для смеси «с-состояния» и «f-состояния» из работы [10]. Точки – экспериментальные данные, полученные при давлении 29,3 бар, в магнитном поле 224 Э и при температуре $0,82T_{ca}^*$. Сплошная кривая – теоретическая (подробности см. в тексте).

лучены из результатов непрерывного ЯМР [10], а значения леггеттовской частоты из части 1 главы 3 (рис. 1).

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 работы.

- Экспериментально показано, что в слабоанизотропном аэрогеле в А-подобной фазе сверхтекучего ^3He реализуется АВМ фаза в состоянии Ларкина-Имри-Ма.
- Измерена зависимость леггеттовской частоты от температуры для А-подобной фазы в аэрогеле пористостью 98,2%.
- Доказано существование двух спиновых состояний в А-подобной фазе, одно из которых – нематическое (вектора параметра порядка \hat{d} направлены одинаково во всём образце), другое – стекольное (вектора параметра порядка \hat{d} направлены по-разному в разных частях образца)
- Измерена скорость продольной релаксации намагниченности в А-подобной фазе для разных температур, спиновых состояний и направлений постоянного магнитного поля.
- Объяснено поведение А-подобной фазы в предыдущих работах, используя модель «АВМ фаза в состоянии Ларкина-Имри-Ма» для одноосно анизотропного аэрогеля [9], [A1], [A2] и для двухосно анизотропного аэрогеля [A1], [9], [10].

Результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

[A1] Dmitriev V.V., Krasnikhin D.A., Mulders N., Zavjalov, Zmeev D.E.

Transverse and longitudinal nuclear magnetic resonance in superfluid ^3He in anisotropic aerogel. *Письма в ЖЭТФ*, **86**, 681 (2007).

[A2] Dmitriev V.V., Krasnikhin D.A., Mulders N., Zmeev D.E. **Soliton-like Spin State in the A-like Phase of ^3He in Anisotropic Aerogel.** *J. Low Temp. Phys.*, **150**, 493 (2008).

- [A3] Dmitriev V.V., Krasnikhin D.A., Mulders N., Senin A.A., Volovik G.E., Yudin A.N. **Orbital glass and spin glass states of $^3\text{He-A}$ in aerogel.** *JETP Lett.*, **91**, 599 (2010).
- [A4] Dmitriev V.V., Krasnikhin D.A., Mulders N., Senin A.A., Yudin A.N. **Nuclear Spin Relaxation in Glass States of $^3\text{He-A}$ in Stretched Aerogel.** *J. Low Temp. Phys.*, **162**, 226-232 (2011).
- [A5] Dmitriev V.V., Krasnikhin D.A., Senin A.A., Yudin A.N. **NMR properties of $^3\text{He-A}$ in biaxially anisotropic aerogel.** *J. Phys.: Conf. Ser.* (принята в печать, дата выхода 3-ий квартал 2012 г.).

Литература

- [1] Vollhardt D., Wölfle P.. The Superfluid Phases of Helium 3. London: Taylor & Francis (1990).
- [2] Porto J.V., Parpia J.M., *Phys. Rev. Lett.*, **74**, 4667 (1995).
- [3] Sprague D., Haard T.M., Kycia J.B., *Phys. Rev. Lett.*, **75**, 661 (1995).
- [4] Barker D.I., Lee Y., Polukhina L., Osheroff, *Phys. Rev. Lett.*, **85**, 2148 (2000).
- [5] Дмитриев В.В., Завьялов В.В., Змеев Д.Е., Косарев И.В., Малдерс Н., *Письма в ЖЭТФ*, **76**, 371 (2002).
- [6] Kunitatsu T., Sato T., Izumina K., Matsubara A., Sasaki Y., Kubota M., Ishikawa O., Mizusaki T, Bunkov Yu.M., *Письма в ЖЭТФ*, **86**, 244 (2007).
- [7] Volovik G.E., *J. Low Temp. Phys.*, **150**, 453-463 (2008).
- [8] Elbs J., Bunkov Yu.M., Collin E. et al., *Phys. Rev. Lett.*, **100**, 215304 (2008).
- [9] Ishikawa O., Kado R., Nakagawa H., Obara K., Yano H., Hata T., Yokogawa H., Yokoyama M., *AIP Conf. Proc.*, **850**, 235 (2006).
- [10] Dmitriev V.V., Levitin L.V., Mulders N., Zmееv D.E., *Письма в ЖЭТФ*, **84**, 539 (2006).