

Учреждение Российской академии наук  
Институт физических проблем им. П. Л. Капицы РАН

На правах рукописи

УДК 538.941

ЗАВЬЯЛОВ

Владислав Витальевич

**Измерение леггеттовской частоты  $^3\text{He-V}$  в  
аэрогеле**

01.04.09 – Физика низких температур

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

Москва – 2011

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,  
Ю. Г. Махлин  
доктор физико-математических наук,  
М. С. Тагиров

Ведущая организация: Московский государственный университет  
им. М.В.Ломоносова, Физический факультет

Защита состоится **21 сентября 2011 г** в **10** часов на заседании диссертационного совета Д **002.103.01** при Институте физических проблем им. П. Л. Капицы РАН, расположенном по адресу: 119334, г.Москва, ул.Косыгина 2.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института физических проблем им. П. Л. Капицы РАН.

Автореферат разослан \_\_\_\_\_ августа 2011 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,  
доктор физико-математических наук,  
член-корреспондент РАН



*Л.А.Прозорова*

## Общая характеристика работы

**Актуальность работы.** Изотопы гелия  $^3\text{He}$  и  $^4\text{He}$  — единственные вещества, не затвердевающие вплоть до абсолютного нуля температуры. Атомы  $^3\text{He}$  имеют ядерный спин  $1/2$  и являются ферми-частицами. При температурах  $\sim 1$  мК в  $^3\text{He}$  происходит куперовское спаривание и возникает сверхтекучесть. Куперовское спаривание происходит с единичным спином и единичным орбитальным моментом, из-за чего сверхтекучий  $^3\text{He}$  является сложной системой с большим разнообразием свойств. В зависимости от условий в слабых магнитных полях реализуются две сверхтекучие фазы, называемые А- и В-фазой.

В данной работе рассматривается В-фаза  $^3\text{He}$ . Ее параметр порядка имеет вид матрицы поворота. Конкретный вид этой матрицы определяется различными условиями (магнитное поле, стенки ячейки и т.д.). Это приводит к пространственно-неоднородному распределению параметра порядка (текстуре) и сложным законам спиновой динамики ([1]).

Одним из интересных явлений спиновой динамики в В-фазе  $^3\text{He}$  является возможность существования *однородно прецессирующего домена* (ОПД) ([2], [3]). При этом возникает пространственно-однородное устойчивое состояние, в котором намагниченность и параметр порядка прецессируют строго определенным образом. Данная работа посвящена исследованию малых пространственно-однородных колебаний ОПД.

Теория сверхтекучего  $^3\text{He}$  хорошо развита и в большинстве случаев находится в отличном согласии с экспериментом. Это происходит во многом благодаря тому, что  $^3\text{He}$  при сверхнизких температурах является практически идеально чистым веществом: растворимость всех прочих веществ в нем ничтожна. Представляет интерес влияние примесей на столь хорошо изученный объект, в частности для объяснения свойств других похожих систем.

Единственным известным методом внесения примесей в сверхтекучий  $^3\text{He}$  является помещение его в аэрогель ([4], [5]).

Аэрогель представляет собой «мочалку» из нитей  $\text{SiO}_2$ . Характерный диаметр нитей  $30 - 40 \text{ \AA}$ , а расстояние между ними —  $500 - 1000 \text{ \AA}$ . Поскольку диаметр нитей меньше длины когерентности сверхтекучего  $^3\text{He}$ , аэрогель можно считать однородной примесью. Аэрогель достаточно малой плотности не полностью подавляет сверхтекучесть  $^3\text{He}$ , а лишь уменьшает температуру перехода. При этом реализуются две сверхтекучие фазы. До недавнего времени вопрос идентификации этих фаз оставался открытым, однако сейчас уже можно считать доказанным, что они аналогичны А- и В-фазе чистого  $^3\text{He}$ .

Интерпретация большинства ЯМР-экспериментов в  $^3\text{He}$  в аэрогеле затруднена из-за сложной, меняющейся от образца к образцу текстуры параметра порядка. В частности, к моменту проведения данной работы не были измерены основные параметры сверхтекучего  $^3\text{He}$  в аэрогеле, в том числе и леггеттовская частота — важный параметр, характеризующий величину диполь-дипольного взаимодействия атомов куперовской пары.

**Научная новизна работы.** В данной работе был разработан и применен метод определения леггеттовской частоты, хорошо работающий как в чистом  $^3\text{He}$ , так и в  $^3\text{He}$  в аэрогеле.

Впервые была получена формула для частоты пространственно-однородных колебаний ОПД, возникающих при получении ОПД методом непрерывного ЯМР в присутствии поперечного радиочастотного поля накачки. Измерение частоты этих колебаний позволяет определить леггеттовскую частоту  $^3\text{He}$ .

Была произведена серия численных экспериментов, позволивших учесть влияние эффектов магнитной релаксации и пространственной неоднородности на частоту этих колебаний. С помощью численных экспериментов была

получена приближенная формула для коэффициента затухания колебаний.

Были проведены эксперименты в объемном  $^3\text{He}$  и в  $^3\text{He}$  в аэрогеле. Рассматриваемые колебания ОПД были впервые обнаружены экспериментально. Оказалось, что для объемного  $^3\text{He}$  их свойства хорошо согласуются с теорией.

Наблюдение колебаний в  $^3\text{He}$  в аэрогеле позволило впервые провести измерения леггеттовской частоты. Измерения были проведены в относительно небольшом диапазоне экспериментальных условий, однако они дали возможность количественно интерпретировать особенности текстуры параметра порядка для данного образца аэрогеля. Это позволило впоследствии провести измерения леггеттовской частоты в большом диапазоне температур и давлений по форме линии непрерывного ЯМР.

**Апробация работы.** Основные результаты, представленные в диссертации, докладывались и обсуждались на семинарах ИФП и следующих конференциях:

- International Symposium on Quantum Fluids and Solids, July 2004, Trento, Italy
- 24<sup>th</sup> International Conference on Low Temperature Physics, August 2005, Orlando, FL, USA

**Публикации.** По материалам диссертации опубликовано 3 научные работы ([A1], [A2], [A3]).

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения и библиографии. Общий объем диссертации 70 страниц, из них 60 страниц текста, включая 26 рисунков. Библиография включает 49 наименований на 7 страницах.

# Содержание работы

## Гл. 1. Свойства сверхтекучего $^3\text{He}$ .

В первой главе приведены основные понятия о сверхтекучем  $^3\text{He}$ , о его фазовой диаграмме и параметре порядка. Подробно рассмотрена В-фаза  $^3\text{He}$ . Обсуждаются факторы, влияющие на пространственное распределение параметра порядка (текстуру), уравнения спиновой динамики, а также основные эффекты, наблюдаемые с помощью ЯМР. Рассмотрен однородно прецессирующий домен, его основные свойства и способы получения с помощью импульсного и непрерывного ЯМР. Кроме того, рассмотрен  $^3\text{He}$  в аэрогеле. Обсуждаются проблемы интерпретации ЯМР экспериментов, связанные со сложной текстурой параметра порядка  $^3\text{He}$  в аэрогеле.

## Гл. 2. Колебания ОПД (теория).

Во второй главе рассмотрена система уравнений Леггетта, описывающая динамику намагниченности и параметра порядка в В-фазе  $^3\text{He}$ . При рассмотрении не учитываются эффекты магнитной релаксации и эффекты, связанные с пространственной неоднородностью. Для условий непрерывного ЯМР получено положение равновесия, соответствующее ОПД. Найдены частоты малых колебаний вокруг этого равновесия. Обнаружено три моды пространственно-однородных колебаний. Две из них были получены ранее в теоретической работе [6] (вычисления производились в предположении нулевого поля радиочастотной накачки). Третья мода колебаний имеет частоту:

$$\Omega^2 = \frac{4}{\sqrt{15}} \frac{H_R}{H_0} \frac{\Omega_B^2}{1 + 8/3(\Omega_B/\gamma H_0)^2}, \quad (1)$$

зависящую от амплитуды поля радиочастотной накачки  $H_R$  и от леггеттовской частоты  $\Omega_B$ . Именно эта мода колебаний оказалась наиболее удобной для наблюдений, по ее частоте можно определить леггеттовскую частоту В-фазы  $^3\text{He}$ .

### Гл. 3. Численные эксперименты.

В третьей главе описывается постановка численных экспериментов и их результаты.

Уравнения спиновой динамики  $^3\text{He}$ -В, записанные во вращающейся системе координат, решались численно в одномерной геометрии, соответствующей условиям наблюдения непрерывного поперечного ЯМР. Пространственные неоднородности и спиновые токи допускались вдоль оси ячейки, кроме того, учитывались эффекты магнитной релаксации.

Численные эксперименты позволили решить следующие задачи:

- обнаружение низкочастотных колебаний ОПД, проверка уравнения (1);
- нахождение оптимального способа возбуждения и наблюдения колебаний;
- изучение влияния спиновой релаксации и пространственной неоднородности на частоту колебаний;
- изучение коэффициента затухания колебаний;
- изучение влияния объемного  $^3\text{He}$ , находящегося в зазорах между аэрогелем и стенками ячейки.

Было обнаружено, что подходящим способом возбуждения колебаний является небольшое ступенчатое изменение величины постоянного магнитного поля или, что практически эквивалентно, частоты радиочастотной накачки. Колебания удобно наблюдать на сигнале поглощения поперечного ЯМР.

Частота колебаний хорошо описывается формулой (1). Эффекты, связанные с магнитной релаксацией и неоднородностью магнитных полей при не слишком больших сдвигах частоты практически не влияют на частоту колебаний.

Для коэффициента затухания колебаний была получена приближенная формула:

$$k = \left( 0.1699 - 0.4187 \left( \frac{\Omega_B}{2\pi} \cdot 10^{-6} \right)^2 \right) \frac{10^{-6}}{\tau} \Delta f. \quad (2)$$

Здесь  $\Omega_B$  — леггеттовская частота,  $\tau$  — время релаксации Леггетта-Такаги. Сдвиг частоты  $\Delta f$  отсчитывается от некоторой частоты, близкой к ларморовской в центре ячейки. Точное значение этой частоты зависит от многих параметров и подробно не изучалось. Таким образом, измеряя наклон зависимости коэффициента затухания от сдвига частоты и зная величину леггеттовской частоты, можно оценить время релаксации Леггетта-Такаги.

Еще одна задача численного эксперимента состояла в оценке влияния объемного  $^3\text{He}$  в зазорах при наблюдении колебаний ОПД в аэрогеле. Такие зазоры неизбежно присутствуют в реальном эксперименте для обеспечения достаточно хорошего теплового контакта  $^3\text{He}$  в аэрогеле с гелием, находящемся в криостате. Было показано, что в наших условиях, когда объем зазоров составляет 15% от объема всей ячейки, а соотношение леггеттовских частот объемного  $^3\text{He}$  и  $^3\text{He}$  в аэрогеле равно 1.8, ошибка при определении частоты колебаний не должна превышать 5%.

#### **Гл. 4. Экспериментальная установка.**

В четвертой главе подробно описана экспериментальная установка: криостат ядерного размагничивания, ЯМР-спектрометр, экспериментальная ячейка и образец аэрогеля, обсуждаются вопросы термометрии.

#### **Гл. 5. Результаты эксперимента.**

В пятой главе приведены результаты экспериментов. Описанные в работе эксперименты проводились с объемным  $^3\text{He}$  и с  $^3\text{He}$  в аэрогеле в диапазоне температур 0.8–2.5 мК при давлениях 19.5 и 24.8 бар и магнитных полях 279–285 Э (соответствующие частоты ЯМР 906–923 кГц). Температуры сверхтекучих переходов объемного  $^3\text{He}$  и  $^3\text{He}$  в аэрогеле для давления 19.5 бар:  $T_c = 2.224$  мК,  $T_{ca} = 0.750 T_c$ ; для давления 24.8 бар:  $T_c = 2.356$  мК,  $T_{ca} = 0.805 T_c$ .

Колебания ОПД с частотой (1) были обнаружены и в объемном  $^3\text{He}$ , и



$^3\text{He}$  в аэрогеле, во всех экспериментальных условиях, когда ОПД полностью заполняет ячейку.

Было выяснено, что частота колебаний, в соответствии с формулой (1), не зависит от сдвига частоты в достаточно широком диапазоне и пропорциональна квадратному корню из амплитуды радиочастотной накачки (рис. 1). Леггеттовская частота объемного  $^3\text{He}$ -В, измеренная с помощью колебаний ОПД, совпала с данными работы [7] (рис 2).

Было обнаружено, что коэффициент затухания колебаний линейно зависит от сдвига частоты, а определенное по формуле (2) эффективное время релаксации Леггетта-Такаги хорошо согласуется с известными для  $^3\text{He}$ -В данными.

С помощью колебаний ОПД была измерена леггеттовская частота  $^3\text{He}$ -В в аэрогеле. Измерения были проведены в относительно небольшом диапазоне температур,  $0.48 - 0.51 T_{ca}$ , при которых возможно получение ОПД. Этого оказалось достаточно, чтобы уверенно проинтерпретировать данные непрерывного ЯМР в аэрогеле и уже из них получить леггеттовскую частоту для гораздо большего диапазона экспериментальных условий.

На рисунке 3 показан сигнал поглощения, полученный при наблюдении непрерывного ЯМР в нашем образце аэрогеля. Весь сигнал сдвинут от ларморовской частоты и имеет несколько выраженных пиков. Сдвиг частоты сигнала непрерывного ЯМР определяется леггеттовской частотой, а также текстурой параметра порядка, причем максимально возможный сдвиг равен  $\Omega_B^2/2\omega_0$ , где  $\omega_0$  — ларморовская частота. Значение леггеттовской частоты, полученное по частоте колебаний ОПД, позволило определить, что пик с наибольшим сдвигом соответствует именно этому максимальному значению. Таким образом, оказалось возможным определять величину леггеттовской частоты по сдвигу частоты этого пика.

На рисунке 4 показана температурная зависимость леггеттовской частоты

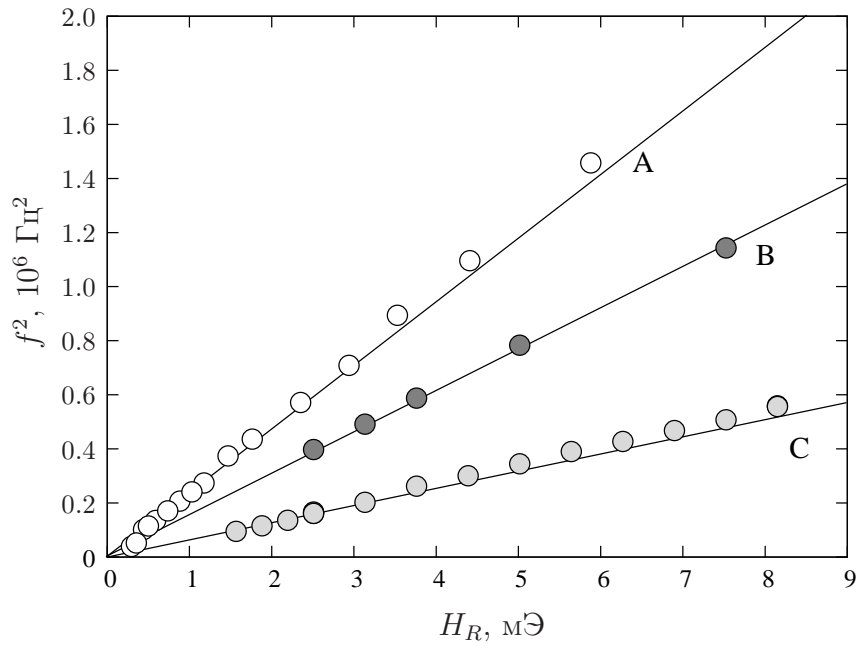


Рис. 1. Зависимость квадрата частоты колебаний ОПД от амплитуды поля радиочастотной накачки при различных условиях: А — давление 24.8 бар, магнитное поле 279 Э, температура  $0.46 T_c$ ; В — давление 19.5 бар, магнитное поле 285 Э, температура  $0.60 T_c$ ; С — давление 19.5 бар, магнитное поле 285 Э, температура  $0.82 T_c$ . Сплошными линиями показаны зависимости, вычисленные по формуле (1) и данным для  $\Omega_B$  из [7].

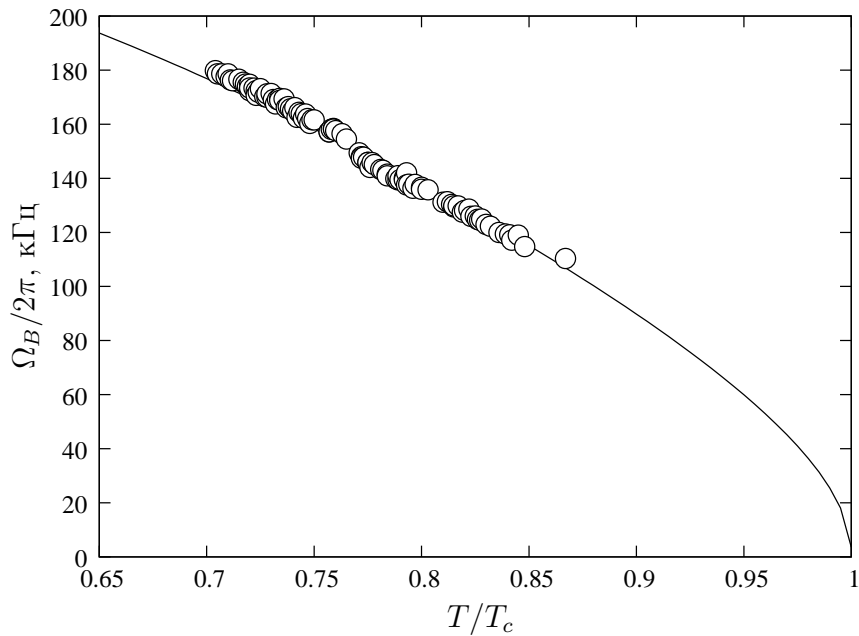


Рис. 2. Температурная зависимость леггеттовской частоты, вычисленная по формуле (1) из измеренной частоты колебаний ОПД. Измерения проведены в давлении 19.5 бар и магнитном поле 285 Э. Сплошная кривая — данные [7] интерполированные к давлению 19.5 бар.

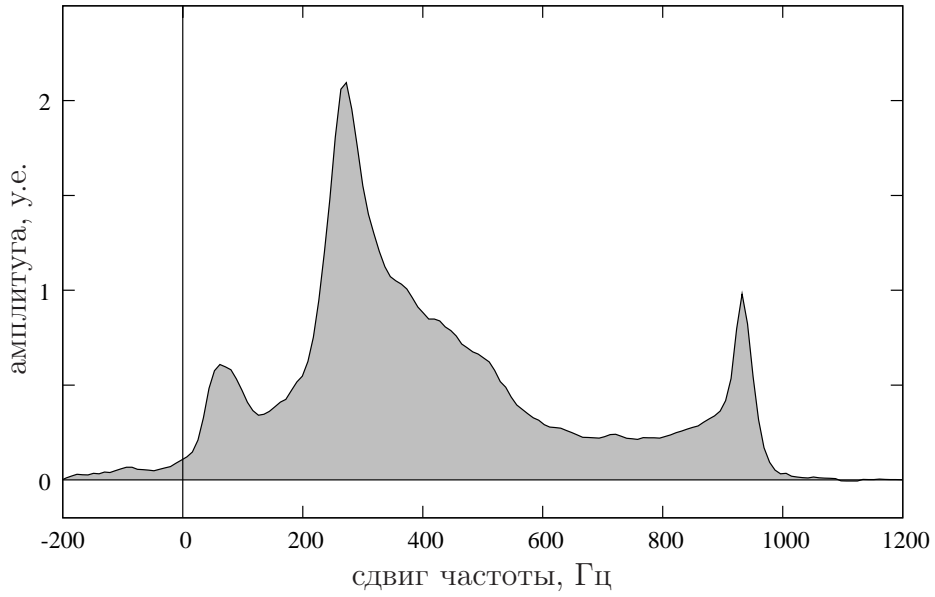


Рис. 3. Линия поглощения непрерывного ЯМР в  $^3\text{He}$  в аэрогеле. Правый пик соответствует сдвигу частоты  $\Omega_B^2/2\omega_0$ . Давление 24.8 бар, температура  $0.76 T_{ca}$  ( $0.61 T_c$ ).

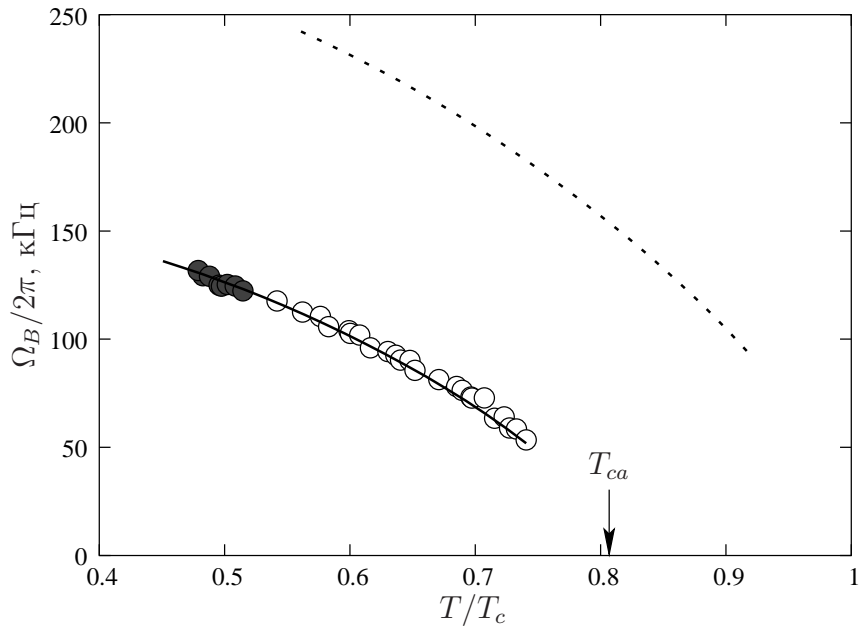


Рис. 4. Леггеттовская частота  $^3\text{He}$  в аэрогеле, измеренная по частоте колебаний ОПД (темные точки) и по форме линии непрерывного ЯМР (белые точки). Давление 24.8 бар,  $T_{ca} = 0.805 T_c$ . Пунктирная кривая — леггеттовская частота в объемном  $^3\text{He}$  для этого же давления по данным [7], сплошная кривая — та же зависимость, но построенная от  $T/T_{ca}$  и уменьшенная в 1.78 раза.

ты в аэрогеле для давления 24.8 бар, измеренная с помощью колебаний ОПД и по форме линии непрерывного ЯМР. Было показано, что в этом давлении для леггеттовских частот в объемном  $^3\text{He}$  и в  $^3\text{He}$  в аэрогеле выполняется следующее соотношение:

$$\frac{\Omega_B(T/T_c)}{\Omega_{Ba}(T/T_{ca})} \approx 1.78.$$

Если пренебречь различием магнитных восприимчивостей объемного  $^3\text{He}$  и в  $^3\text{He}$  в аэрогеле, которое невелико вблизи температуры сверхтекучего перехода, такое же соотношение должно выполняться и для величин энергетической щели в объемном  $^3\text{He}$  и в  $^3\text{He}$  в аэрогеле.

### **Основные результаты работы.**

- Получена формула для частоты низкочастотной моды пространственно-однородных колебаний ОПД.
- Показано, что измерение частоты этих колебаний может быть использовано для измерения леггеттовской частоты в В-фазе  $^3\text{He}$ .
- С помощью численных экспериментов исследовано влияние пространственной неоднородности и магнитной релаксации на частоту и коэффициент затухания этих колебаний.
- Колебания обнаружены экспериментально как в объемном  $^3\text{He}$ , так и в  $^3\text{He}$  в аэрогеле. Для объемного  $^3\text{He}$ , параметры которого известны, свойства колебаний находятся в хорошем количественном согласии с теорией.
- Полученные результаты позволили впервые провести измерения Леггеттовской частоты В-фазы  $^3\text{He}$  в аэрогеле.

## Список публикаций

- A1. Dmitriev V., Zavjalov V., Zmeev D. Spatially homogeneous oscillations of homogeneously precessing domain in  $^3\text{He-B}$  // Journal of Low Temperature Physics. 2005. Vol. 138. Pp. 765–770. 10.1007/s10909-005-2300-5. URL: <http://dx.doi.org/10.1007/s10909-005-2300-5>.
- A2. Дмитриев В. В., Завьялов В. В., Змеев Д. Е., Малдерс Н. Измерения леггеттовской частоты в  $^3\text{He-B}$  в аэрогеле // Письма в ЖЭТФ. 2004. Vol. 79. Pp. 612–617.
- A3. Dmitriev V. V., Mulders N., Zavjalov V. V., Zmeev D. E. NMR Studies of Texture in the B-like Phase of  $^3\text{He}$  in Aerogel // AIP Conference Proceedings. 2006. Vol. 850. Pp. 225–228. URL: <http://www.springer.com/materials/book/978-0-7354-0347-5>.

## Цитированная литература

1. Vollhardt D., Wolfe P. The Superfluid Phases of Helium 3. Taylor&Francis, 1990.
2. Боровик-Романов А. С., Буньков Ю. М., Дмитриев В. В. et al. Разбиение прецессии намагиченности в  $^3\text{He-B}$  на два домена. Эксперимент // ЖЭТФ. 1985. Vol. 88. Pp. 2025–2038.
3. Фомин И. А. Разбиение прецессии намагиченности в  $^3\text{He-B}$  на два домена. Теория // ЖЭТФ. 1985. Vol. 88. Pp. 2039–2051.
4. Porto J. V., Parpia J. M. Superfluid  $^3\text{He}$  in Aerogel // Phys. Rev. Lett. 1995. — Jun. Vol. 74, no. 23. Pp. 4667–4670.

5. Sprague D. T., Haard T. M., Kycia J. B. et al. Homogeneous Equal-Spin Pairing Superfluid State of  $^3\text{He}$  in Aerogel // *Phys. Rev. Lett.* 1995. — Jul. Vol. 75, no. 4. Pp. 661–664.
6. Фомин И. А. Периодические движения намагниченности в В-фазе гелия-3 // *ЖЭТФ*. 1983. Vol. 84. Pp. 2109–2120.
7. Hakonen P. J., Krusius M., Salomaa M. M. et al. NMR and axial magnetic field textures in stationary and rotating superfluid  $^3\text{He-B}$  // *Journal of Low Temperature Physics*. 1989. Vol. 76. Pp. 225–283. 10.1007/BF00681586. URL: <http://dx.doi.org/10.1007/BF00681586>.