

МОСКОВСКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
(ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ)
Кафедра физики низких температур

Исследование влияния толщины нитей аэрогеля на Λ -подобную фазу в сверхтекучем ^3He

Дипломная работа студента 322 группы
Краснихина Д. А.

Научный руководитель
член-корр. РАН д.ф.-м.н. Дмитриев В. В.

Работа выполнена в ИФП РАН им. П. Л. Капицы
2009

Содержание

1. Введение	3
1.1. А-фаза и А-подобная фаза сверхтекучего ^3He	4
1.2. ЯМР свойства А-фазы и А-подобной фазы	5
1.3. Критическая анизотропия	6
2. Оценка количества адсорбированного газа	8
3. Экспериментальная установка	11
3.1. ЯМР спектрометр	12
3.2. Заполнение адсорбатором экспериментальной ячейки	13
3.3. Термометрия	14
4. Экспериментальный результаты	15
5. Заключение	17
6. Список литературы	19

1. Введение

Жидкий гелий-3 при температурах порядка милликельвина переходит в сверхтекучее состояние. Этот переход, как и переход в сверхпроводящее состояние в металлах и сплавах, связан с куперовским спариванием. В ^3He спиновый и механический момент пары равны, соответственно, $S = 1$, $L = 1$. Благодаря такому нетривиальному спариванию существует несколько сверхтекучих фаз ^3He с различной симметрией [1].

Безусловный интерес представляет влияние примесей на свойства ^3He . При нетривиальном спаривании примеси могут менять симметрию сверхтекучих фаз. Однако при температурах порядка 1 мК ни одно вещество практически не растворяется в ^3He , и при охлаждении образца ^3He все примеси оседают на стенках сосуда. В середине 90-х годов было предложено использовать в качестве примесей аэрогель [2]. Аэрогель – это высокопористое стекло, состоящее из тонких нитей толщиной около 30 ангстрем, а характерное расстояние между нитями порядка 500 ангстрем.

В слабых магнитных полях в ^3He в аэрогеле, как и в чистом ^3He , наблюдается две сверхтекучих фазы: А-подобная и В-подобная. Доказано, что высокотемпературная фаза, В-подобная фаза, является прямым аналогом В-фазы в чистом ^3He . Природа А-подобной фазы до конца не изучена. (см. раздел 1.1 и 1.2)

В эксперименте наблюдается два состояния А-подобной фазы. Какое состояние реализуется, согласно теоретическим предсказаниям, сильно зависит от толщины нитей аэрогеля (см. раздел 1.3). Целью данной работы являлась исследование этой зависимости. Толщина нитей аэрогеля в эксперименте увеличивалась за счет веществ, адсорбированных на нитях при азотной температуре. (см. раздел 2)

Исследования проводились методами ядерного магнитного резонанса (ЯМР).

1.1. А-фаза и А-подобная фаза сверхтекучего ^3He

На рис. 1 представлены фазовые диаграммы чистого ^3He и ^3He в аэрогеле в слабых магнитных полях.

Сплошными линиями ограничены фазы в чистом ^3He . Переход между сверхтекучими фазами А и В – переход первого рода, потому А-фаза может быть переохлаждена. На диаграмме показана линия равновесного перехода. В аэрогеле ^3He так же наблюдается две фазы – А-подобная и В-подобная (далее в тексте T_c будет обозначаться температура сверхтекучего перехода в чистом ^3He , а T_{ca} – температура сверхтекучего перехода ^3He в аэрогеле).

В ^3He в аэрогеле А-подобная фаза стабильна только в очень узкой области вблизи сверхтекучего перехода. В эксперименте А-подобная фаза наблюдается при охлаждении из нормальной фазы, так как остается метастабильной в достаточно большом диапазоне температур (см. рис.1). На отогреве из В-подобной фазы А-подобная фаза не образуется.

Куперовские пары в сверхтекучем ^3He имеют спин и механический момент, равные единице. Поэтому параметр порядка сверхтекучего ^3He – это матрица 3×3 $d_{\mu j}$ имеющая один спиновый и один пространственный индекс. Параметр порядка в А-фазе называется параметром порядка Андерсона-Бринкмана-Мореля (АВМ, [1]) и имеет следующий вид:

$$d_{\mu j} = \Delta_0 \hat{d}_\mu (\hat{m}_j + i\hat{n}_j)$$

или в векторном виде

$$\vec{d}(\vec{k}) = \Delta_0 \hat{d}(\hat{m}\hat{k} + i\hat{n}\hat{k})$$

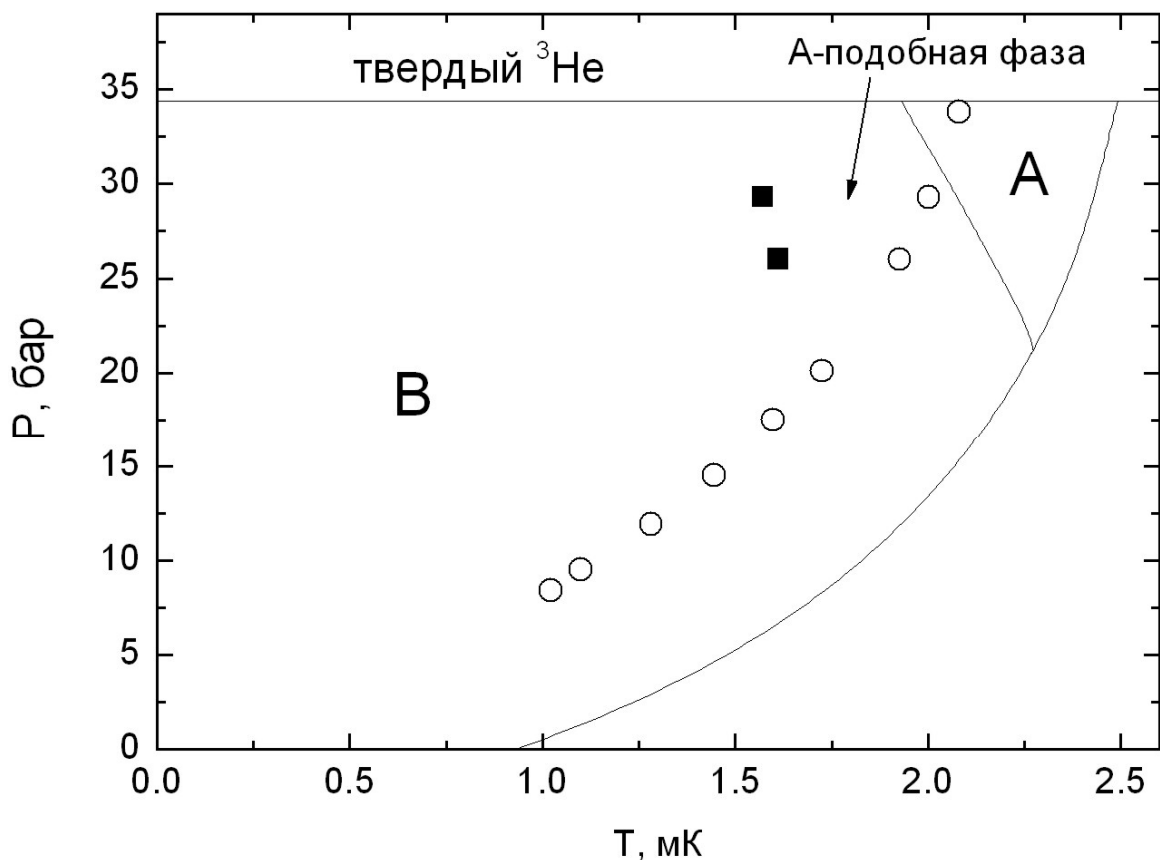


Рис. 1: фазовая диаграмма чистого ^3He и ^3He в 98.2% аэрогеле в слабых магнитных полях. \circ – температура сверхтекучего перехода в ^3He в аэрогеле. \blacksquare – температура перехода из метастабильной А-подобной фазы в В-подобную в ^3He в аэрогеле при охлаждении. Сплошными проведены линии фазовых переходов в чистом ^3He .

\vec{d} - выделенное направление в спиновом пространстве, на которое куперовские пары в данной точке Ферми-сферы обладают нулевой проекцией спина. Δ_0 - энергетическая щель. $\hat{l} = \hat{m} \times \hat{n}$, где \hat{l} - единичный вектор, совпадающий по направлению с направлением среднего момента импульса куперовской пары. Наличие такого выделенного направления обуславливает анизотропный вид энергетической щели с двумя нулями в направлении \hat{l} (рис. 2).

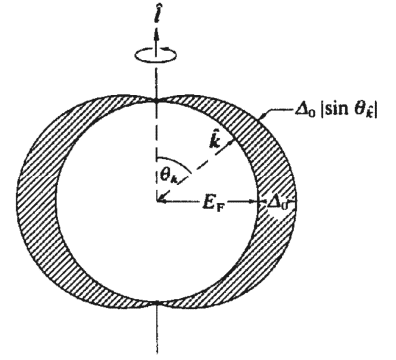


рис. 2: Схематический вид энергетической щели (заштрихованные области) в А-фазе

1.2. ЯМР свойства А-фазы и А-подобной фазы

В А-фазе в равновесии $\vec{d} \perp \vec{M}$, значит и $\vec{d} \perp \vec{H}$. Вектор \vec{l} не зафиксирован, потому, чтобы уменьшить дипольную энергию ($F_D \sim -(\vec{d}\vec{l})^2$), \vec{l} становится параллельно \vec{d} . Спиновая динамика сверхтекучего ^3He описывается уравнениями Леггетта [1].

$$\begin{cases} \dot{\vec{S}} = \gamma \vec{S} \times \vec{H} + \Omega_A \frac{\chi}{\gamma^2} (\vec{d} \times \vec{l})(\vec{d}\vec{l}), \\ \dot{\vec{d}} = \gamma \vec{d} \times (\vec{H} - \frac{\gamma}{\chi} \vec{S}), \end{cases}$$

где Ω_A - леггеттовская частота А-фазы, γ - гиромагнитное отношение, χ - магнитная восприимчивость.

Решением уравнений Леггетта определяются частоты свободных колебаний и направления отклонения намагниченности ^3He при таких колебаниях. При непрерывном ЯМР в постоянном магнитном поле \mathbf{H} под действием слабого переменного магнитного поля \mathbf{h} намагниченность ^3He совершает малые колебания около положения равновесия. Из-за орбитальной вязкости \vec{l} остается неподвижным. Имеется две моды с частотами:

$$\begin{aligned} (\omega_{\perp}^A)^2 &= \omega_L^2 + \Omega_A^2 \\ \omega_{\parallel}^A &= \Omega_A \end{aligned}$$

где $\omega_L = \gamma H$ - ларморовская частота ^3He , ω_{\perp} и ω_{\parallel} частоты продольного и поперечного резонанса соответственно. При условии, хорошо соблюдавшемся при наших экспериментах

$$\Delta\omega_{\perp} = \omega_{\perp}^A - \omega_L \ll \omega_L$$

сдвиг частоты резонанса в А-фазе при поперечном ЯМР можно записать так:

$$\Delta\omega_{\perp} = \frac{\Omega_A^2}{2\omega_L}$$

При импульсном ЯМР в постоянном магнитном поле \mathbf{H} импульсом отклоняют намагниченность ^3He на большой угол. В таком случае частота свободной прецессии намагниченности:

$$\omega_{\perp} = \omega_L + \frac{\Omega_A^2}{8\omega_L} (1 + 3 \cos \beta)$$

где β - угол отклонения намагниченности.

Для А-подобной фазы сверхтекучего ^3He в аэрогеле на эксперименте наблюдалось два состояния:

Первое состояние. Параметр порядка остается таким же как и в А-фазе[3]. Свойства импульсного ЯМР хорошо совпадают со свойствами импульсного ЯМР в объемном ^3He . Однако отличаются свойства непрерывного ЯМР, так как \vec{l} теперь зафиксировано вдоль оси анизотропии[4]. Сдвиг частоты непрерывного резонанса зависит от угла ξ между полем \mathbf{H} и \vec{l} :

$$\Delta\omega_{\perp} = -\frac{\Omega_A^2}{2\omega_L} \cos(2\xi)$$

соответственно, если $\vec{l} \parallel \vec{H}$, то сдвиг частоты отрицательный.

Второе состояние. Параметр порядка неизвестен. Свойства непрерывного и свойства импульсного ЯМР кардинально отличаются от свойств в А-фазе. В непрерывном ЯМР есть небольшой *положительный* сдвиг частоты резонанса, не зависящий или слабо зависящий от направления поля. Сдвиг частоты резонанса в импульсном ЯМР [3]:

$$\Delta\omega_{\perp} = A(1 + \cos\beta)$$

Есть две модели, описывающие второе состояние А-подобной фазы: модель Воловика и модель Фомина. В модели Воловика параметр порядка соответствует АВМ фазе, но при величине анизотропии меньшей некоторой критической, пространственная однородность параметра порядка становится невыгодной, и скачком возникает разупорядоченное состояние Ларкина-Имри-Ма [5]. Модель Фомина предсказывает, что при анизотропии меньше критической, реализуется так называемая “robust” фаза.

1.3. Критическая анизотропия

Для того, чтобы определить в какое из двух состояний, описанных выше, попадет А-подобная фаза, нужно ввести понятия степени анизотропии и критической анизотропии. Мысленно сожмем идеально изотропный образец аэрогеля вдоль оси. Степенью анизотропии будем называть отношение изменения длины к начальной длине образца. Если полученная степень анизотропии больше некой критической анизотропии, то \vec{l} фиксируется вдоль оси анизотропии (в данном случае она же ось сжатия) и сверхтекучий ^3He в аэрогеле в А-подобной фазе будет находиться в первом состоянии. Если же степень анизотропии недостаточна, то сверхтекучий ^3He в аэрогеле в А-подобной фазе будет находиться во втором состоянии.

Теоретические оценки критической анизотропии дают[5,6]:

$$\left(\frac{\Delta l}{l}\right)_{crit} \sim 10^{-2} - 10^{-3}$$

В эксперименте в большинстве образцов аэрогеля сверхтекучий ^3He в А-подобной фазе находится в первом состоянии. По-видимому, в процессе изготовления образцы аэрогеля немного деформируются, и этого достаточно для того, чтобы степень анизотропии превысила критическую анизотропию. Следовательно, чтобы получить оба состояния на одном образце нужно понизить степень анизотропии аэрогеля. Сделать это можно двумя способами: или растянуть образец вдоль оси анизотропии, или сжать по осям, перпендикулярным оси анизотропии. Как правило, образцы аэрогеля для ЯМР экспериментов в ^3He имеют цилиндрическую форму, и ось анизотропии совпадает с осью цилиндра, потому предложенные способы уменьшения степени анизотропии сопряжены с серьезными техническими трудностями.

Однако критическая анизотропия сильно зависит от еще и параметров аэрогеля, а именно от толщины нитей δ [5,6]:

$$\left(\frac{\Delta l}{l}\right)_{crit} \sim \delta^3 \quad (*)$$

Соответственно, при заданной степени анизотропии, увеличивая толщину нитей, можно увеличить критическую анизотропию. Таким образом, начав с первого состояния и увеличивая толщину нитей аэрогеля, можно добиться того, что

$$\left(\frac{\Delta l}{l}\right)_{crit} > \left(\frac{\Delta l}{l}\right)$$

и значит в сверхтекучем ³Не при соответствующей температурах будет реализовываться уже второе состояние А-подобной фазы. Во втором случае, уменьшив толщину нитей до исходной, снова получить

$$\left(\frac{\Delta l}{l}\right)_{crit} < \left(\frac{\Delta l}{l}\right)$$

а значит – первое состояние А-подобной фазы.

Любая твердая поверхность адсорбирует газы, и аэрогель не исключение. Если поверхность находится в газе, у которого давление близко к давлению насыщенных паров при данной температуре, то на ней может адсорбироваться монослой и более. Далее, если резко охладить экспериментальный объем, весь газ вымерзнет, а адсорбированные монослои останутся прочно «сидеть» на нитях аэрогеля и толщина нитей примеси (аэрогеля) увеличится.

2. Оценка количества адсорбированного газа.

В этой работе использовался аэрогель (см. рис. 3) с пористостью 98.2%, т.е. только 1.8% объема образца занимают нити аэрогеля, а 98.2% – пространство между ними, которое будет заполнено ^3He . Диаметр нитей аэрогеля около 30 Å, среднее расстояние между нитями – 500-1000 Å, его плотность около 40 мг/см³. Из-за своей специфического строения, аэрогель имеет очень большую площадь поверхности – около 25 м²/см³.

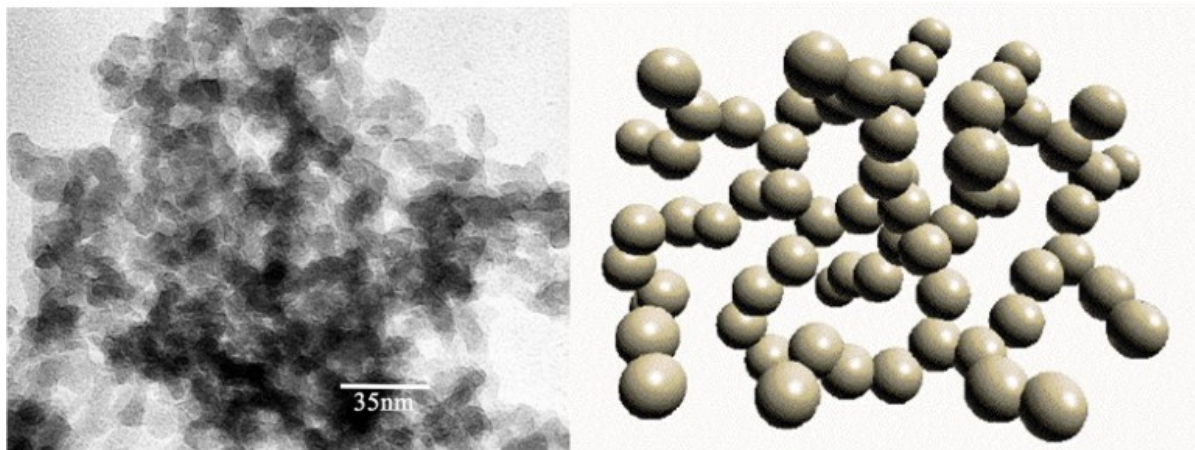


Рис. 3: Аэрогель. Фотография (слева), сделанная электронным микроскопом, и модель (справа).

Для оценки количества адсорбированного вещества на аэрогеле использовалась вибрирующая проволочка (жесткая полукруглая петля с закрепленными концами) с наклеенным на неё кусочком аэрогеля. Находясь в магнитном поле, проволочка колеблется при пропускании через нее переменного тока и резонансная частота этих колебаний обратно пропорциональна \sqrt{m} , где m сумма масс аэрогеля и проволочки. Адсорбированный газ увеличивает массу аэрогеля и соответственно понижает резонансную частоту.

Для предварительных измерений было изготовлено две вибрирующие проволочки с аэрогелем на стенде (см. рис. 4). Вибрирующая проволочка с аэрогелем (диск диаметром 5 мм и толщиной около 2 мм) (*A*) установлена на площадке, изготовленной из эпоксидной смолы Stycast 1266 (*S*). Над проволочкой на расстоянии 5-6 мм на стайкастовых стойках закреплен постоянный магнит (*M*), создающий вертикальное магнитное поле ~ 1 кЭ в области проволочки.

Платформа на штанге (*B*) опускается в заглушенную трубку длиной около 50 см. К незаглушенному концу трубки припаян переходник на вакуумный разъем для проводов, лампу ПМТ-4М, выход на манометр, насос, объем с испытываемым газом. Температура внутри трубки контролируется термопарой медь-константан, один спай которой приклеен к стайкастовой платформе, а второй находился в жидком азоте. Трубка откачивается форвакуумным насосом и опускается в жидкий азот. После того, как температура на дне трубки установится, напускается газ под давлением близким (90-95%) к давлению насыщенных паров данного вещества при азотной температуре.

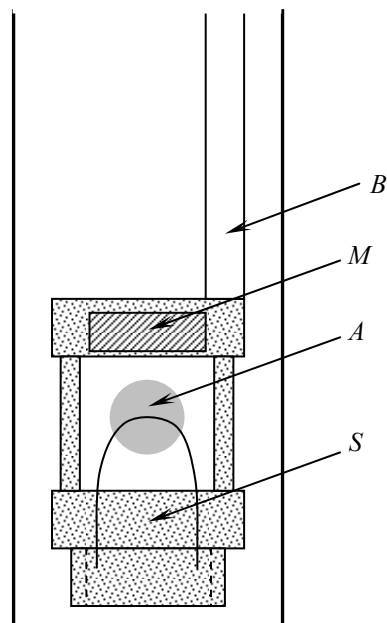


Рис. 4: стенд для измерения количества адсорбированного вещества на аэрогеле

Для того, чтобы оценить $\frac{m_{adsorb}}{m_{aerogel}}$, где m_{adsorb} – масса адсорбированного на аэрогеле газа,

$m_{aerogel}$ – масса аэрогеля, нужно измерить следующие резонансные частоты:

1. голая проволочка без аэрогеля (ν_{wire})
2. проволочка с наклеенным образцом аэрогеля в вакууме ($\nu_{wire+aerogel+stycast}$)
3. проволочка с аэрогелем в газе, с тот момента как резонансная частота установилась, т.е. равновесное количество газа адсорбировалось. ($\nu_{wire+aerogel+stycast+adsorb}$)
4. проволочка без аэрогеля, но со стайкастом, на который образец был приклеен. ($\nu_{wire+stycast}$)

тогда можно оценить количество адсорбированных монослоев n :

$$n = \frac{\rho N_A A_m m_{adsorb}}{S_V \mu m_{aerogel}}$$

где ρ - плотность аэрогеля, N_A - число Авогадро, A_m - площадь, занимаемая одной молекулы адсорбируемого вещества в монослое, S_V - площадь поверхности аэрогеля на единицу массы, μ - молярная масса адсорбируемого вещества.

Результаты наших измерений для криптона ($A_m \approx 0.16 \text{ нм}^2$, $p_{н.н.} \approx 1.7 \text{ торр}$ при 77 К)

$$\nu_{wire} = 1265 \text{ Гц}$$

$$\nu_{wire+stycast} = 1023 \text{ Гц}$$

$$\nu_{wire+aerogel+stycast} = 460 \text{ Гц}$$

$$\nu_{wire+aerogel+stycast+adsorb} = 387 \text{ Гц}$$

метана ($A_m \approx 0.18 \text{ нм}^2$, $p_{н.н.} \approx 10 \text{ торр}$ при 77 К)

$$\nu_{wire} = 1004 \text{ Гц}$$

$$\nu_{wire+stycast} = 882 \text{ Гц}$$

$$\nu_{wire+aerogel+stycast} = 582 \text{ Гц}$$

$$\nu_{wire+aerogel+stycast+adsorb} = 571 \text{ Гц}$$

показывают, что количество адсорбируемых монослоев оценочно составляет 2.2 и 0.8 соответственно. Т.е. можно рассчитывать, что нити аэрогеля покрываются как минимум один монослой адсорбата.

При низких температурах аэрогелем адсорбируется еще и гелий. Адсорбированный ^3He – парамагнетик, его магнитная восприимчивость с понижением температуры растет по закону Кюри. Аэрогель обладает очень большой поверхностью (около 25 м^2 на см^3), потому при температурах порядка 1 мК магнитный момент адсорбированного на поверхности твердого ^3He в несколько раз превышает магнитный момент жидкого ^3He в аэрогеле, что мешает интерпретации результатов. Поэтому после охлаждения экспериментальной камеры до гелиевой температуры, но до сжижения ^3He , в неё напускается ^4He в количестве, достаточном для покрытия нитей аэрогеля двумя монослоями. При давлении 29.3 бар, мы не наблюдали роста восприимчивости при охлаждении, т.е. сигналы ЯМР, полученные в экспериментах, обусловлены только жидким ^3He .

Таким образом, диаметр нитей примеси в обычных ЯМР экспериментах складывается из толщины нити аэрогеля и двух монослоев ^4He . В нашем же эксперименте, к двум монослоям ^4He ($A_m \approx 0.10 \text{ нм}^2$) добавляется еще около монослоя другого вещества. При этом диаметр нитей примеси меняется примерно на 30%, т.е., согласно формуле (*), критическая анизотропия увеличивается в ~ 2 раза.

В дальнейшем, от использования криптона пришлось отказаться, так как при азотной температуре давление насыщенных паров криптона слишком низкое, и потому перепад давления, который можно поддерживать между экспериментальной ячейкой и резервуаром с газом, не боясь конденсации криптона, слишком мал. Это приводит к слишком большим временам заполнения ячейки (порядка месяца), поэтому вместо криптона использовался другой инертный газ – аргон, с давлением насыщенных паров при 77 К ~ 200 мм.рт.ст.

3. Экспериментальная установка

Исследования проводились на криостате ядерного размагничивания в ИФП РАН им. Капицы [7] (см. рис. 5). Криостат состоит из рефрижератора растворения ^3He - ^4He (на рис. 5 показана только камера растворения (MC)) и медной ступени ядерного размагничивания (DS), находящихся в вакуумной рубашке (V). Экспериментальная камера (C) изображена более подробно на рис. 6. Камера изготовлена в основном из эпоксидной смолы Stycast 1266. В верхней части находится цилиндрическая ячейка с образцом аэрогеля. Образец имеет форму цилиндра диаметром 5 мм и высотой 1,5 мм, между поверхностью аэрогеля и стенками оставлен зазор примерно 0,15 мм. Ось анизотропии образца аэрогеля совпадает с осью цилиндра.

Ячейка присоединена к объему, в котором расположен нагреватель (H) и низкочастотный кварцевый резонатор (F), использующийся как датчик давления и температуры. К этому объему прикреплен дополнительный цилиндр с вибрирующей проволокой с аэрогелем (W) для измерения количества адсорбируемого газа. Медная трубка ведет от этого объема вниз к теплообменнику (E) на медной ступени криостата ядерного размагничивания, от которого отходит тонкий капилляр (FL), служащий для заполнения камеры.

Рядом с ячейкой подвешена ЯМР катушка (L). Катушка состоит из двух секций прямоугольного сечения. Направление поля для этой катушки показано вектором h . Катушка не касается ячейки и имеет тепловой контакт на камеру растворения криостата растворения ^3He - ^4He . В гелиевой ванне (HB) вокруг вакуумной рубашки расположен сверхпроводящий соленоид (SS), создающий постоянное вертикальное магнитное поле H высокой однородности и градиентные катушки, позволяющие улучшать однородность поля. Для измерения резонансной частоты проволочки с аэрогелем при азотной температуре, снаружи ячейки на вакуумной рубашке намотан соленоид из медной проволоки (CS), создающий также вертикальное магнитное поле.

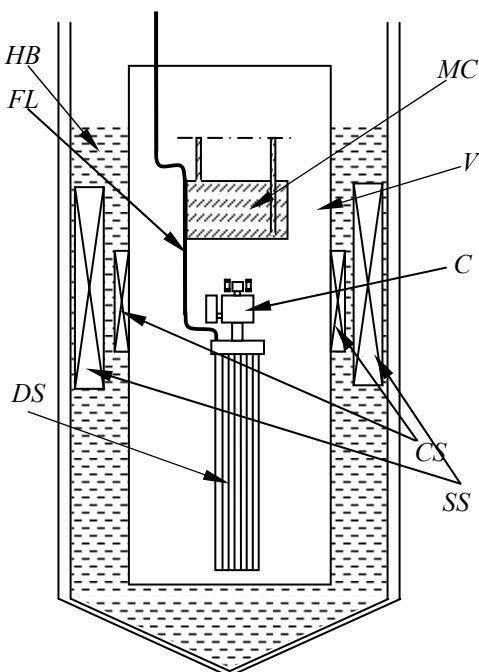


Рис. 5: схема криостата ядерного размагничивания

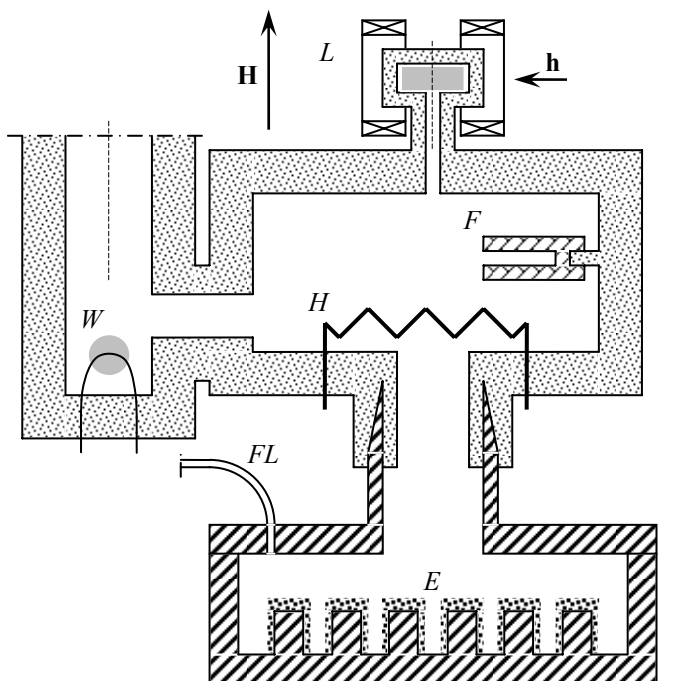


Рис. 6: схема экспериментальной камеры

3.1. ЯМР спектрометр

Применялся спектрометр непрерывного ЯМР, работающий на постоянной частоте. Блок-схема спектрометра представлена на рис. 7. Управление полем и регистрацию результатов осуществляет компьютер. Все эксперименты проводились в поле ~ 290 Э на частоте ЯМР 891.3 кГц, при давлении в ячейке 29.3 бар.

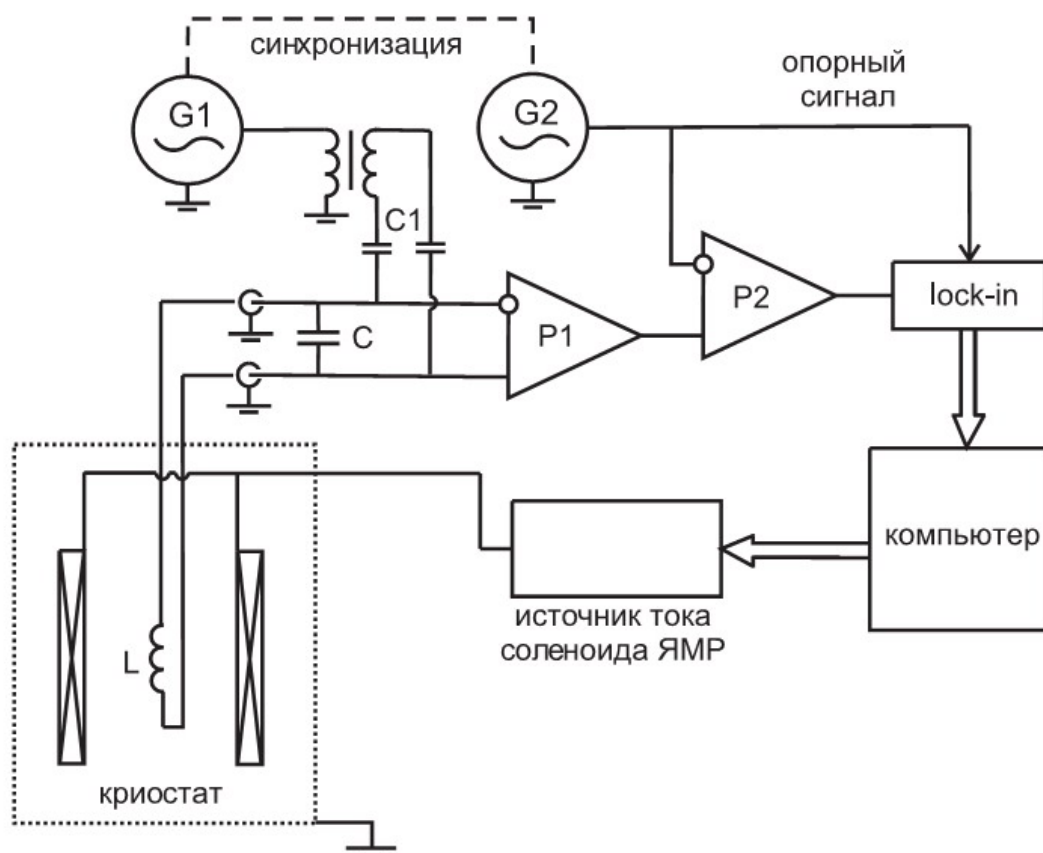


Рис.7: блок-схема ЯМР спектрометра.

Катушка ЯМР L является одновременно и возбуждающей, и приемной. Вместе с емкостью $C \approx 100$ нФ (это емкость проводов, ведущих из криостата) L образует колебательный контур добротностью $Q \sim 100$. Накачка с генератора $G1$ подается на контур через цепь развязки – трансформатор и конденсаторы малой емкости. Сигнал с контура снимается усилителем $P1$. Фазочувствительный вольтметр (lock-in усилитель) выделяет в сигнале составляющую на частоте опорного сигнала, поступающего с генератора, и передает компьютеру её амплитуду и фазу.

Напряжение на контуре складывается из сигнала накачки и полезного сигнала – ЭДС, наведенного в катушке колебаниями магнитного момента ^3He . Поскольку магнитная восприимчивость ^3He весьма мала ($\chi \sim 10^{-7}$), а углы отклонения намагниченности от направления \mathbf{H} в непрерывном ЯМР не превышают градуса, второе слагаемое сложно заметить на фоне первого. Для решения этой проблемы использовалась схема компенсации, состоящая из генератора $G2$, синхронизированного с генератором $G1$, и усилителя $P2$. Перед началом измерений амплитуда и фаза $G2$ подбиралась такими, чтобы компенсировать накачку на входе фазочувствительного вольтметра.

3.2. Заполнение адсорбатором экспериментальной ячейки

Отдельного внимания заслуживает процедура заполнения адсорбатором экспериментальной ячейки и охлаждения до гелиевых температур. Основные сложности связаны с тем, что капилляр заполнения ячейки (FL) имеет маленький диаметр (около 100 мкм), потому при охлаждении до гелиевых температур из адсорбируемого газа образуется пробка. Чтобы решить эту проблему, была разработана следующая процедура:

- 1) В градусной камере криостата растворения создается давление 1.2-1.25 атм. (необходимо для того, чтобы в дальнейшем азот не попал в капилляр заполнения градусной камеры из гелиевой ванны (HB))
- 2) В вакуумную рубашку (V) напускается 0.1 торр гелия ^3He в качестве теплообменного газа.
- 3) Через заливочную трубку гелиевая ванна (HB) заполняется жидким азотом.
- 4) Предварительно было измерено, что отношение объемов экспериментальной ячейки и линии заполнения – 10:1. Потому в ячейке устанавливается давление примерно 0.9 от давления насыщенных паров метана при азотной температуре. Такое значение выбрано для того, чтобы в дальнейшем не получить метан при давлении насыщенных паров в экспериментальной ячейке или в капилляре заполнения. Абсолютное давление измерялось манометром снаружи криостата. По изменению резонансной частоты низкочастотного кварцевого резонатора («вилки», F) можно было судить об изменении давления в экспериментальной ячейке.
- 5) Капилляр заполнения (FL) откачивается от метана в течение нескольких секунд, и далее напускается аргон аналогично пункту 4. Аргон мы использовали для того, чтобы по возможности увеличить количество адсорбированного аэрогелем газа. При температурах, когда почти весь метан вымерзает, аргон еще имеет значительное давление насыщенных паров (Например, при температуре около 65 К давление паров метана около 0,5 мм.рт.ст., а у аргона 21 мм.рт.ст.). Потому при температурах ниже 65 К аргон еще дополнительно адсорбируется на твердый метан.
- 6) Через предварительно вставленную до дна трубку избыточным давлением ^4He из гелиевой ванны (HB) выдавливается азот.
- 7) Капилляр заполнения (FL) прокачивается в течение нескольких секунд от аргона и тут же в ячейку (C) начинает подаваться гелий под давлением 1-2 атм. Давление постоянно поддерживается таким, чтобы был поток гелия в экспериментальную ячейку. Параллельно начинается заливка гелия в гелиевую ванну (HB). Т.е. во время охлаждения, создается поток ^4He в капилляре заполнения (FL), который выдувает остатки аргона в экспериментальную ячейку (C).
- 8) После того, как температура ячейки достигает 20-30 К, подача ^4He прекращается. Далее ^4He выкачивается из линии заполнения и экспериментальной ячейки. Давление насыщенных паров метана и аргона при таких температурах пренебрежимо мало, потому нет опасности выкачать вместе с ^4He адсорбированные вещества.
- 9) После того, как экспериментальная ячейка охладилась до гелиевой температуры, нагревателем испаряется гелий из гелиевой ванны и ^3He выкачивается из вакуумной рубашки (V). Температура на дне ванны (HB) при откачке ^3He не поднималась выше 8 К.

В результате, частота проволоочки с аэрогелем в вакууме при гелиевой температуре составила 749 Гц. Без адсорбированного аргона и метана при тех же условиях резонансная частота проволоочки составила 940 Гц. Из этого можно сделать вывод, что на аэрогеле адсорбировалось порядка монослоя. К сожалению, более точную оценку дать сложно, так как не измерена величина $v_{\text{wire+stycast}}$ проволоочки, установленной в экспериментальной ячейке, однако и проволоочка, и аэрогель по своим характерным размерам близки к использовавшимся при измерениях на стенде (см. раздел 2).

3.3. Термометрия

Для измерения температуры использовался низкочастотный кварцевый резонатор – «вилка»[8]. Под действием внешней накачки, «вилка» совершает колебания, затухающие главным образом из-за вязкости ^3He , которая сильно меняется с температурой. С помощью генератора DS345 и lock-in усилителя SR830 снимается частотная характеристика «вилки». Резонанс наблюдается на частотах около 31,8 кГц. Его ширина в интересующей нас интервале меняется от 140 до 500 Гц.

В первой серии экспериментов (с адсорбированным на аэрогеле метаном и аргоном) «вилка» была откалибрована по леггеттовской частоте в А-фазе. А-подобная фаза для 98.2% аэрогеля находится ниже по температуре, чем область существования равновесной А-фазы (см. рис. 1), но А-фазу можно достаточно сильно переохладить (примерно до $0.7T_c$). Показания «вилки» в А-фазе сильно зависят от текстуры, которая формируется при образовании. Потому все и измерения, и калибровка проходили в «одной и той же» А-фазе, т.е. А-фаза не переходила ни в В-фазу, ни в нормальную фазу.

Во второй серии экспериментов (после откачки адсорбата) «вилка» использовалась уже в В-фазе, так как в А-фазе ширина резонанса имела слабую зависимость от температуры. В предыдущих экспериментах «вилка» была прокалибрована в В-фазе в давлении 26 бар. Из этой калибровки следует, что зависимость ширины «вилки» в интересующей нас области температур ($0.7T_c$ - $0.9T_c$) хорошо описывается линейной зависимостью. Поэтому мы провели калибровку вилки в давлении 29.3 бар по двум точкам. Первая точка – это переход из В-фазы в А-фазу на отогреве. Этот переход равновесный и виден как скачок ширины резонансной линии на несколько десятков герц. Вторая точка – это переход в В-фазу из переохлажденной А-фазы. Температура вычислялась из леггеттовской частоты А-фазы перед переходом.

4. Экспериментальные результаты

На рис. 8 и 9 показано как меняется форма линии ЯМР при охлаждении в А-подобной фазе.

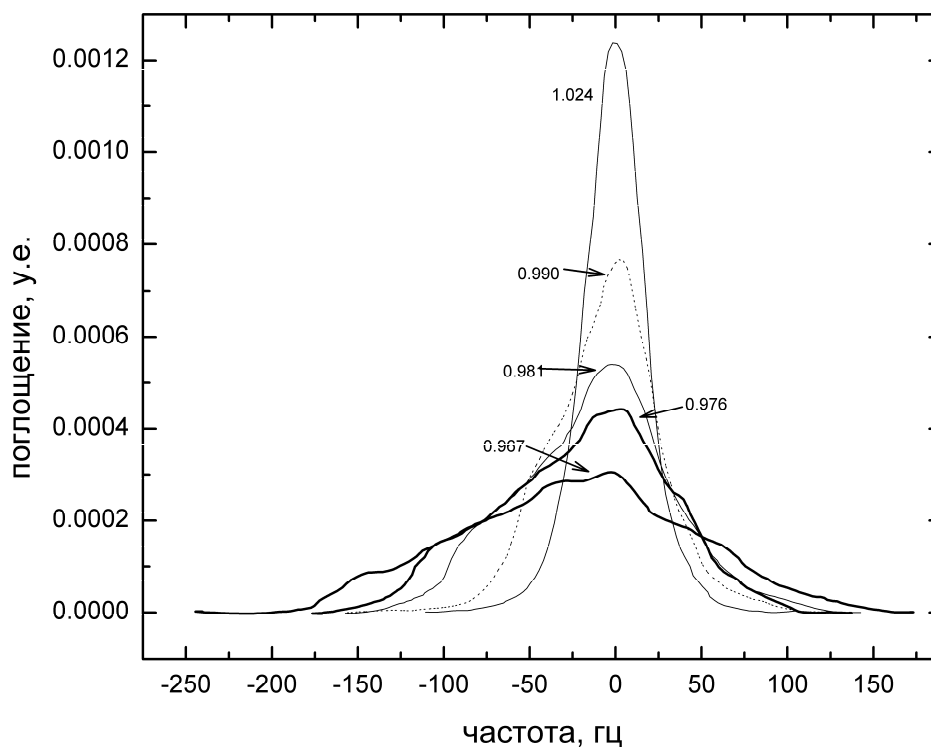


рис. 8: линия ЯМР ^3He в аэрогеле с адсорбированным метаном и аргоном. Для каждой линии указана температура в единицах T/T_{ca} .

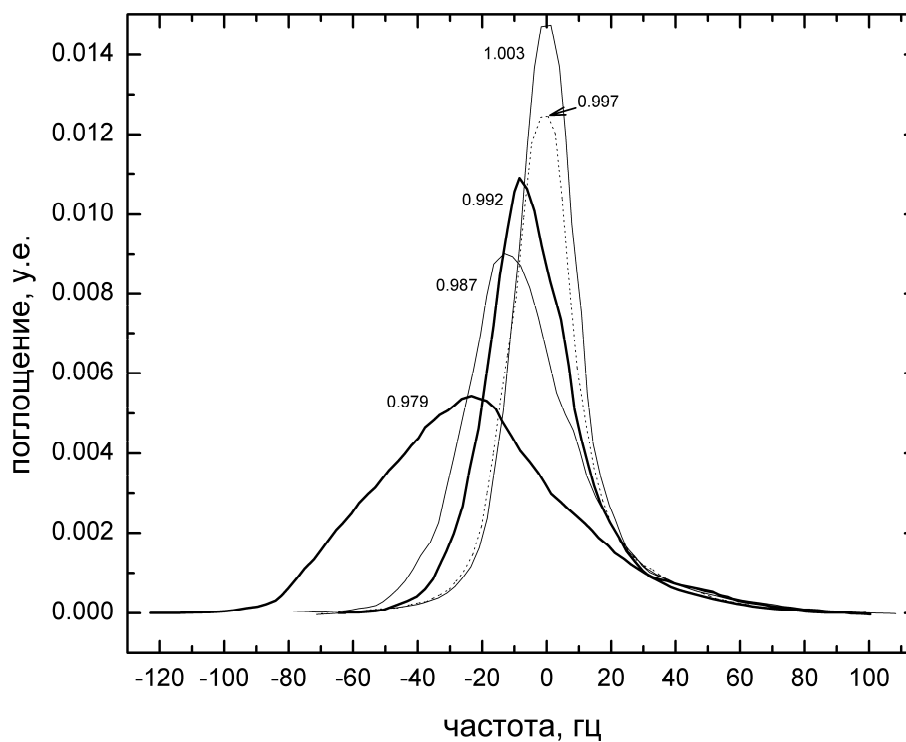


рис. 9: линия ЯМР ^3He в аэрогеле без метана и аргона. Для каждой линии указана температура в единицах T/T_{ca} .

При обработки линий ЯМР вычислялись следующие величины: левый край (left border) – сдвиг левого экстремума дисперсии, правый край (right border) – сдвиг правого экстремума дисперсии, ширина линии (width) – расстояние между экстремумами дисперсии, $M1$ – первый момент линии.

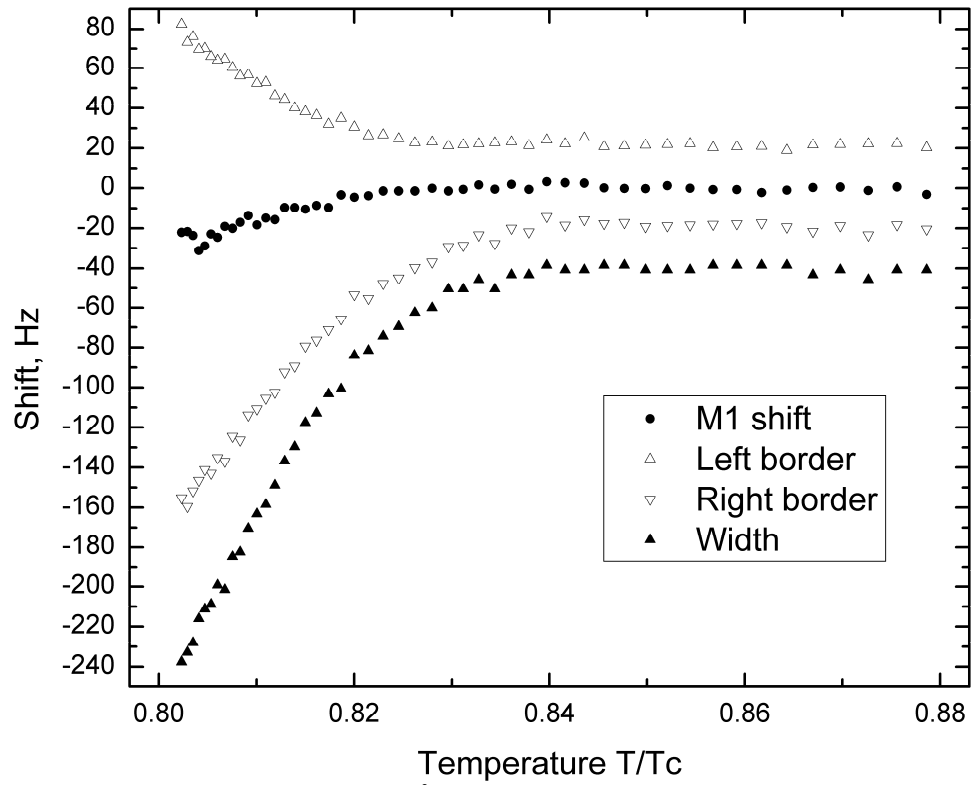


рис. 10: результаты непрерывного ЯМР в ^3He в аэрогеле с адсорбированным метаном и аргоном.

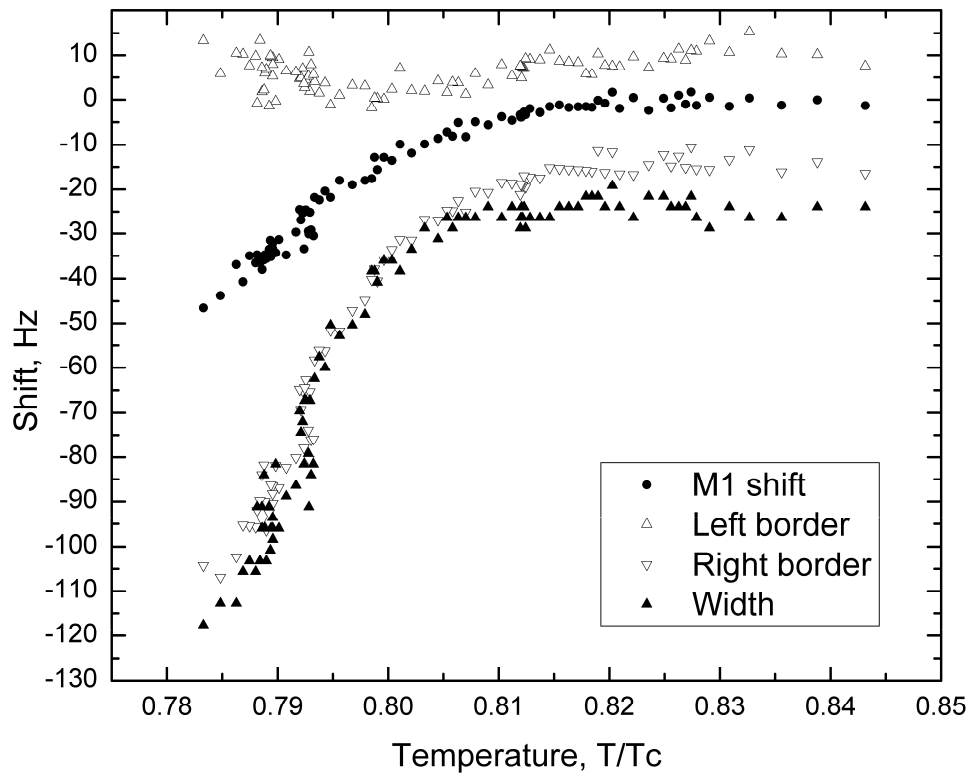


рис. 11: результаты непрерывного ЯМР в ^3He в аэрогеле без адсорбированного метана и аргона.

В аэрогеле с исходной толщиной нитей, т.е. без дополнительно адсорбированных веществ, наблюдается отрицательный сдвиг (см. рис. 9). Это означает, что вектор \vec{l} в среднем направлен вдоль оси образца. Однако с понижением температуры сильно уширяется, значит направление вектора \vec{l} неоднородно по образцу.

При увеличении диаметра нитей (т.е. когда на аэрогеле адсорбирован метан и аргон) появился небольшой положительный сдвиг части линии ЯМР, видный по сигналу дисперсии (см. рис. 10), который после удаления адсорбата пропадает (см. рис. 11). Но первый момент линии отрицательный и в том и другом случае. Более того, зависимости первого момента от температуры ниже сверхтекучего перехода практически одинаковые (см. рис. 12). По-видимому, это означает, что в части образца ^3He реализуется второе состояние А-подобной фазы, что проявляется в изменении формы линии. Однако это часть настолько мала, что на первом моменте линии этих изменений не видно. С другой стороны нельзя исключать другой вариант. Возможно, что за счет поверхностного натяжения адсорбата образец аэрогеля немного деформировался, и в некоторых областях изменилась ориентация вектора \vec{l} .

Второй эффект – это изменение температуры сверхтекучего перехода. Она определялась, как температура, при которой возникает сдвиг частоты линии. Для ^3He в аэрогеле с адсорбатом $T_{ca} \approx 0.83 T_c$, а без адсорбата $T_{ca} \approx 0.82 T_c$ (см. рис. 12). Казалось бы, увеличение количества примесей должно понижать температуру сверхтекучего перехода, однако происходит обратное. В аэрогеле есть области с повышенной плотностью нитей, в этих областях сверхтекучий переход подавлен и происходит при более низкой температуре. Эти областей понижают температуру сверхтекучего перехода *всего* образца. Видимо, адсорбат «забывает» подобные области и за счет этого повышает температуру перехода. Подобный эффект уже наблюдался ранее при заполнении аэрогеля ^4He [9].

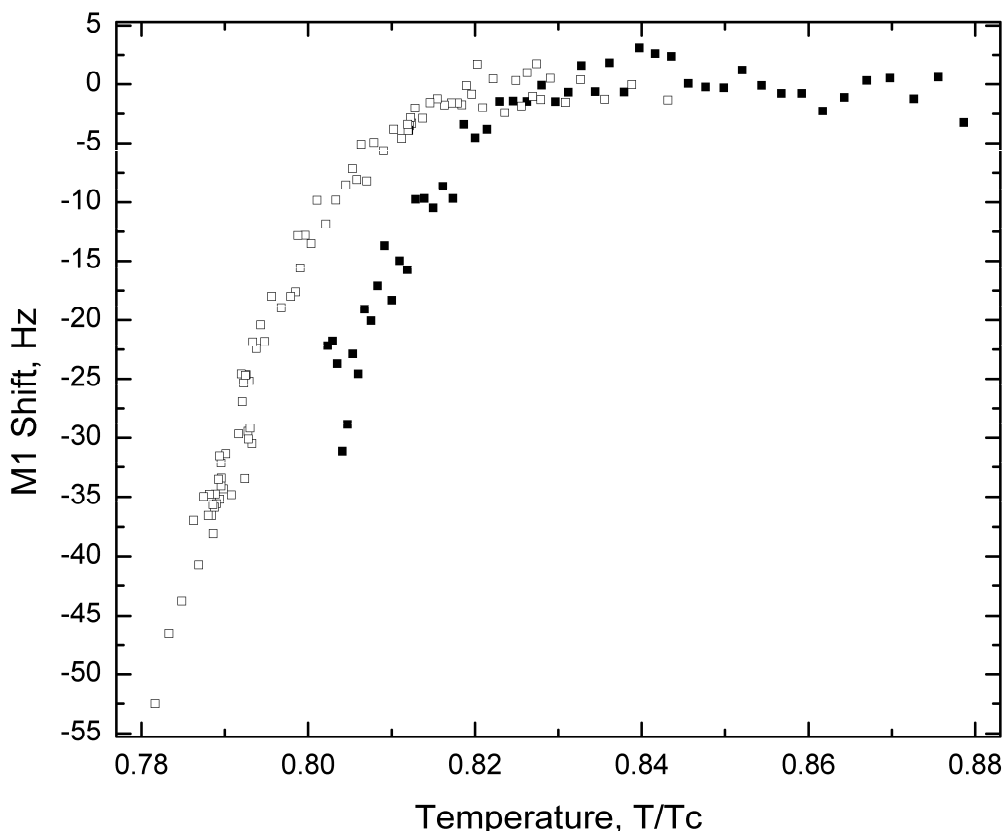


рис.12: первый момент линии. □ – ^3He в аэрогеле без адсорбированного метана и аргона, ■ – ^3He в аэрогеле с адсорбированным метаном и аргоном.

5. Заключение

Результатом работы является:

- 1) обнаружено небольшое изменение формы линии ЯМР сверхтекучего ^3He в аэрогеле с адсорбированным метаном и аргоном. Причину однозначно установить не удалось из-за малости эффекта
- 2) обнаружено повышение T_{ca} в аэрогеле с адсорбированным метаном и аргоном.

Я глубоко признателен своему научному руководителю за предоставленную мне возможность участвовать в интересной и актуальной научной работе, оказавшей огромное влияние на моё физическое образование, за внимательное руководство и обсуждение результатов.

Я благодарен сотрудникам лаборатории А. Юдину, А. Сенину и Д. Змееву, которые внесли неоценимый вклад в эту работу. Работа не могла быть выполнена без помощи сотрудников механической мастерской и криогенного отдела ИФП РАН им. П. Л. Капицы.

Список литературы

- [1] D.Vollhardt, P.Wölfle, *The Superfluid Phases of Helium Three* (Taylor & Francis, London, 1990)
- [2] J.V. Porto, J.M. Parpia, *Phys. Rev. Lett.* **74**, 4667 (1995)
- [3] Dmitriev et al., *JETP Lett.*, vol.86, 594 (2007)
- [4] T.Kunimatzu et al., *Pis`ma v ZhETF*, vol.86, iss. 3, pp. 244-248
- [5] G. E. Volovik, *Pis`ma v ZhETF* **84**, 533-538 (2006)
- [6] E.V. Surovtsev, I. A. Fomin arXiv:cond-mat/0708.1074v1
- [7] А. С. Боровик-Романов, Ю. М. Буньков, В. В. Дмитриев, Ю. М. Мухарский, Г. К. Твалашвили, *ПТЭ* **3**, 185 (1985)
- [8] R. Blaauwgeers et al., *J. Low. Temp. Phys.* **146**, 537 (2007)
- [9] A. Golov, J. V. Porto, J. M. Parpia, *Phys. Rev. Lett.* **80**, 1998 (1998)