

ИССЛЕДОВАНИЯ ДОЛГОЖИВУЩЕГО СИГНАЛА ИНДУКЦИИ В СВЕРХТЕКУЧЕМ $^3\text{He-B}$

А.С.Боровик-Романов, Ю.М.Буньков, В.В.Дмитриев, Ю.М.Мухарский

Обнаружено, что частота "долгоживущего" сигнала индукции в $^3\text{He-B}$ зависит от времени, а скорость изменения частоты растет с увеличением градиента поля. Проведены эксперименты, доказавшие справедливость выдвинутой для объяснения этого явления теории И.А.Фомина, согласно которой образец $^3\text{He-B}$, в котором возбуждена однородная прецессия намагниченности, разбивается на две фазы. В одной из этих фаз намагниченность параллельна полю и не прецессирует, а в другой прецессирует с углом отклонения близким к 104° .

В нормальном ^3He сигнал ядерной индукции, возникающий после отклонения спиновой системы радиочастотным (РЧ-) импульсом, спадает за время, определяемое величиной неоднородности внешнего постоянного магнитного поля H . В сверхтекучем $^3\text{He-B}$, однако, наблюдается сигнал индукции спадающий существенно медленнее. Продолжительность этого необычного сигнала индукции, обнаруженного в работах ^{1,2}, достигала одной секунды причем долгоживущая часть сигнала составляла по интенсивности $\sim 10\%$ от начальной интенсивности. Авторы работы ¹ связывали такой сигнал с текстурными эффектами. В наших экспериментах интенсивность долгоживущей части сигнала индукции достигала $90 \div 95\%$ от начальной интенсивности сигнала индукции, что уже нельзя объяснить особенностями текстуры.

Эксперименты проводились в магнитных полях 77, 154 и 276 Э (что соответствует частотам ЯМР 250, 500 и 850 кГц) при давлениях в ячейке с ^3He 20 и 29,3 бар.

Необходимая температура ($0,5 \div 2$ мК) достигалась при помощи криостата ядерного размагничивания и измерялась ЯМР-термометром "PLM-3". Эксперименты проводились в разных экспериментальных ячейках. Ячейка № 1 (рис. 1, а) представляла собой цилиндр с внутренним диаметром 5 мм, длиной 13 мм и соединялась с остальным объемом экспериментальной камеры каналом ϕ 2 мм. По образующей цилиндра была намотана приемно-передающая РЧ-катушка импульсного ЯМР-спектрометра. Однородность РЧ-поля в основной части ячейки была не хуже 1%. Постоянное внешнее магнитное поле было направлено перпендикулярно оси цилиндра. Сигнал свободной индукции воспринимался цифровым запоминающим осциллографом "Datalab-905" и передавался на ЭВМ.

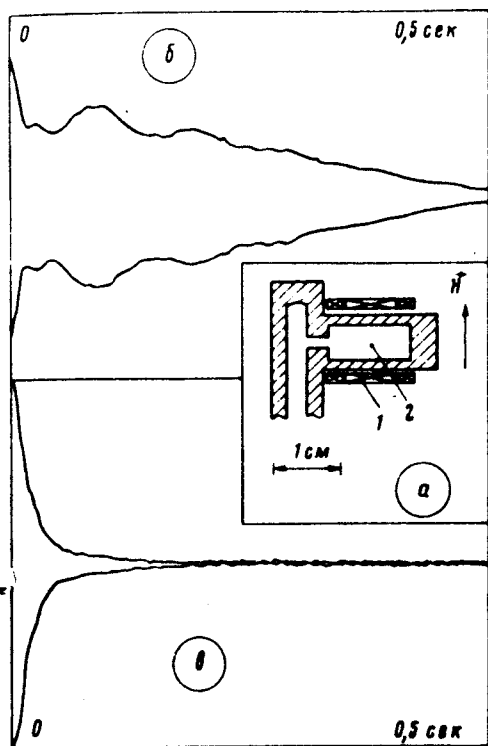


Рис. 1

Рис. 1. а - Ячейка № 1; 1 - РЧ-катушка, 2 - объем с ^3He ; б - огибающая ДСИ в $^3\text{He-V}$ при $T = 1,8$ мК ($0,7 T_c$); $P = 29,3$ бар. Начальный угол отклонения намагниченности $\beta_0 = 90^\circ$; в - огибающая сигнала ядерной индукции при тех же условиях в нормальном ^3He ($T = 3$ мК)

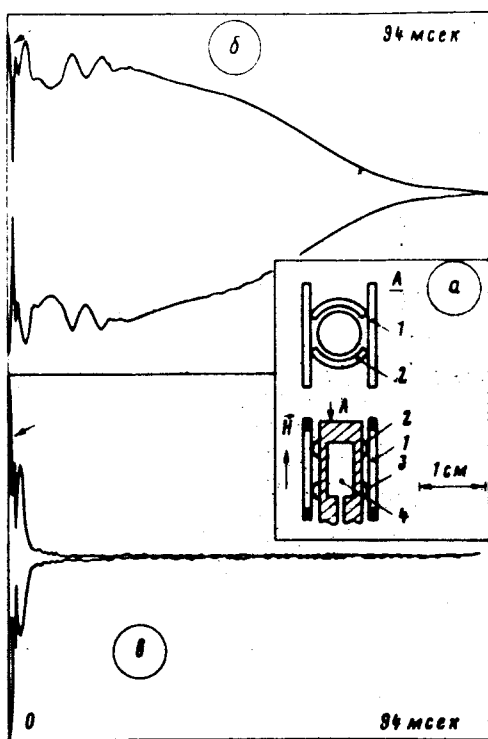


Рис. 2

Рис. 2. а - Ячейка № 2; 1 - возбуждающая РЧ-катушка, 2 и 3 - приемные седловидные РЧ-катушки, 4 - объем с ^3He ; б, в - сигналы индукции с катушек 2 и 3 соответственно, записанные после подачи отклоняющего РЧ-импульса ($\beta_0 = 100^\circ$) на катушку 1. $T = 0,74 T_c$; $H = 154$ Э; $P = 20$ бар; $\nabla H = 0,9$ Э/см

Было обнаружено, что в течение нескольких миллисекунд (после отклонения спиновой системы ядер ^3He РЧ-импульсом) сигнал индукции спадает в примерном соответствии с неоднородностью H . Однако, затем скорость спада сигнала индукции резко замедляется (иногда амплитуда сигнала даже возрастает) - образуется долгоживущий сигнал индукции (ДСИ). Длительность ДСИ достигала 0,5 секунды в наиболее однородном в наших условиях поле (рис. 1, б, в) и уменьшается при наложении градиента H . Интенсивность ДСИ быстро возрастает при увеличении начального угла отклонения β_0 вплоть до значений $\beta_0 \sim 104^\circ$, где она составляет 90 - 95% от начальной интенсивности. При $\beta_0 \lesssim 30^\circ$ ДСИ нами не наблюдался. Существенным для понимания природы ДСИ оказалось следующее: частота ДСИ уменьшается со временем по закону близкому к линейному при наличии линейного гради-

ента H , причем скорость изменения частоты **возрастает** при увеличении величины $\nabla |H|$. Все эти свойства сигнала ДСИ хорошо объясняются предложенной И.А.Фоминим теорией³. Согласно этой теории при наличии линейного градиента H расфазировка спиновой системы энергетически невыгодна. Развившись такая расфазировка приводит к сверхтекучим спиновым токам, текущим вдоль направления градиента поля и переносящим намагниченность из одной части образца в другую. Это приводит к разбиению (с сохранением полной зеемановской энергии) образца ^3He на две однородные части, различные по величине продольной намагниченности (в дальнейшем для краткости эти части мы будем называть фазой 1 и фазой 2). В фазе 1 $-\beta = 0$, в фазе 2 $-\beta \geq 104^\circ$, причем спины в фазе 2 прецессируют синфазно и именно поперечная намагниченность фазы 2 наводит в РЧ-катушке сигнал ДСИ. Местоположение фаз однозначно определяется направлением градиента поля: фаза 1 возникает в той части образца, где средняя величина поля больше. Частота прецессии намагниченности фазы 2 равна γH_0 (H_0 — поле на границе между фазами). Релаксация приводит к движению межфазной границы и, следовательно, к уменьшению интенсивности ДСИ и изменению частоты сигнала из-за наличия градиента поля (подробнее см. ³).

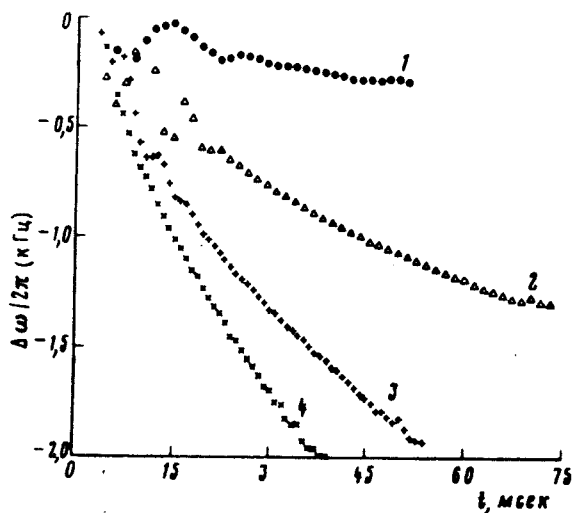


Рис. 3. Зависимость частоты ДСИ от времени для разных значений ∇H . Сигнал снимался с катушки 2. $\beta_0 = 100^\circ$; $T = 0,74 T_c$; $\bar{H} = 154$ Э; $P = 20$ бар. Градиент поля равен: 1 — 0,4 Э/см; 2 — 0,9 Э/см; 3 — 1,65 Э/см; 4 — 2,4 Э/см

Для того, чтобы получить прямое подтверждение теории Фомина мы провели дополнительные эксперименты с новой экспериментальной ячейкой с ^3He (рис. 2, а). Ячейка имела форму цилиндра диаметром 4 мм, длиной 8 мм и соединялась с остальным объемом экспериментальной камеры длинным (~ 5 мм) и узким ($\phi 1$ мм) каналом. Для экспериментов использовались три РЧ-катушки. Катушка 1 (см. рис.) создавала во всем объеме ячейки РЧ-поле однородностью не хуже 1% и использовалась преимущественно в качестве возбуждающей катушки. Седловидные катушки 2 и 3 с одинаковыми характеристиками использовались преимущественно в качестве приемных, причем их области чувствительности не перекрывались. Таким образом, эти катушки воспринимали сигнал индукции от двух разных частей образца ^3He в ячейке. Внешнее магнитное поле было ориентировано вдоль оси цилиндра. На рис. 2, б, в показаны огибающие сигналов индукции записанных с катушек 2 и 3 после подачи отклоняющего РЧ-импульса на катушку 1. Направление градиента H было выбрано так, чтобы фаза 2 образовывалась в верхней части экспериментальной ячейки. Как видно из рисунка сигналы индукции воспринятые катушками 2 и 3 сильно отличаются по продолжительности. Рассмотрим что происходит с ^3He в ячейке после подачи отклоняющего импульса. В первые несколько миллисекунд (до того как произошло разбиение объема с ^3He на две фазы) обе катушки принимают сигнал индукции быстро спадающий со временем из-за пространственной расфазировки (быстрый спад сигнала на обеих катушках в самом начале — на рисунках 2, б, в отмечен стрелками).

В дальнейшем происходит разбиение образца ${}^3\text{He}$ на две фазы. Так как начальный угол отклонения $\beta_0 = 100^\circ$, то фаза 2 занимает практически весь объем ячейки и заполняет область чувствительности не только катушки 2, но и катушки 3. Спины в фазе 2 быстро сфазированы (быстрое возрастание сигнала индукции в обеих катушках). Движение границы между фазами приводит к тому, что область чувствительности катушки 3 заполняется фазой 1 не имеющей поперечной намагниченности ($\beta = 0$) и сигнал на катушке 3 быстро исчезает. Сигнал на катушке 2 начинает падать только тогда, когда межфазная граница достигает ее области чувствительности. При изменении знака градиента H катушки 2 и 3 меняются ролями: ДСИ хорошо виден на катушке 3 и отсутствует на катушке 2. Таким образом нам удалось экспериментально наблюдать разбиение образца ${}^3\text{He}$ на две фазы с образованием которых связано образование ДСИ.

Изменение частоты ДСИ связано с движением межфазной границы, которое в свою очередь происходит из-за процессов релаксации. Фомин показал, что здесь существенны два механизма релаксации — леггеттовский и диффузионный, причем диффузионный механизм преобладает в конечной части ДСИ. Учет одного лишь диффузионного механизма релаксации приводит к линейной зависимости частоты ДСИ от времени ³. На рис. 3 показаны типичные измеренные зависимости частоты ДСИ от времени для разных значений ∇H . Видно, что вклад леггеттовского механизма релаксации существен, что приводит к отклонению зависимости $\omega(t)$ от линейной.

В заключение хотелось бы обратить внимание на следующее: для того, чтобы образовался достаточно интенсивный ДСИ необходимо, чтобы экспериментальный объем ${}^3\text{He}$ на который действует РЧ-поле, был слабо связан с остальной частью ${}^3\text{He}$ в камере, так как возникающие при формировании ДСИ сверхтекучие спиновые токи могут приносить намагниченность непосредственно в область чувствительности РЧ-катушек из других частей камеры. В наших экспериментах обе ячейки ${}^3\text{He}$ соединялись с остальной частью камеры узкими каналами. В работах ^{1,2} экспериментальные объемы были открыты, что и помешало наблюдать ДСИ большой интенсивности. Следует также отметить, что сам процесс разбиения образца ${}^3\text{He}$ на две части и образования межфазной границы не ясен до конца. Часто сразу после образования ДСИ мы наблюдали колебания амплитуды и частоты сигнала. Возможно, это связано с затухающими колебаниями межфазной границы.

Авторы хотят выразить свою благодарность И.Фомину за тесное и плодотворное сотрудничество, В.Л.Голо и Г.А.Харадзе за полезные обсуждения результатов, а также С.М.Елугину за помощь в проведении экспериментов.

Литература

1. *Corruccini L.R., Osheroff D.D.* Phys. Rev. B, 1978, 17, 126.
2. *Giannetta R.W., Smith E.N., Lee D.M.* JLT, 1981, 45, 295.
3. *Фомин И.А.* Письма в ЖЭТФ, данный выпуск, стр.