

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ СПИНОВ ЖИДКОГО ^3He СО СПИНАМИ
ЯДЕР ^1H НА СТЕНКЕ*И.С.Солодовников, Н.В.Заварицкий**Институт физических проблем им.П.Л.Капицы РАН**117973, Москва, Россия*

Поступила в редакцию 8 июля 1992 г.

Обнаружено значительное уменьшение продольной намагниченности ядер жидкого ^3He , вызванное воздействием радиочастотного поля на спины протонов в стенках экспериментальной камеры. Эффект увеличивается при понижении температуры от 0,2 до 0,05 К.

Поверхностные магнитные свойства атомов ^3He , находящихся вблизи стенок различного типа, исследуются в работах ¹⁻⁵. Взаимодействие спинов ^3He и ядерных спинов ^{19}F подложки было подробно изучено для порошка тефлона ^{1,2}. Авторы ³ исследовали связь ^3He - ^{169}Tm . В работе ⁴ определялась величина времени спин-решеточной релаксации T_1 ядерных магнитных моментов различных атомов на поверхности, обусловленная наличием жидкого ^3He . Авторы объясняют результаты этих измерений предполагая, что связь спинов ^3He и ядерных спинов подложки осуществляется диполь-дипольным взаимодействием между ними, которое модулируется движением атомов гелия в поверхностном слое; этот механизм одинаков для различных типов стенки. В случае подложки, содержащей электронные парамагнитные примеси, может возникать дополнительный канал связи спиновых систем ². Однако в системе жидкий гелий-протоны пористого поликарбонатного материала было обнаружено ⁵ взаимодействие в 10^2 раза более слабое, чем в случае ^3He - ^{19}F . В данной работе связь спинов жидкого ^3He со спинами ^1H исследовалась по влиянию насыщения ЯМР протонов на поверхности стенок экспериментальной камеры на величину намагниченности ^3He .

Измерительный объем камеры, изготовленной из эпоксидной смолы Стайкаст-1266, имел диаметр 4,3 мм и длину 12 мм; изнутри камера была покрыта тонким слоем предварительно откачанной смолы. Ячейка охлаждалась рефрижератором растворения ^3He - ^4He с помощью медных проволок, залуженных сверхпроводящим сплавом и вклеенных в стенку ячейки. Между ними были вклеены такие же проволоки, температура которых определялась угольным термометром. Объемная геометрия опыта позволяла контролировать возможный нагрев образца радиочастотным (РЧ) полем. Экспериментальный газ, использованный в основной серии опытов, содержал не более 0,01% ^4He . При заполнении ячейки он пропусклся через фильтр из порошка силикагеля с площадью поверхности $\sim 50\text{ м}^2$, который поддерживался при температуре 0,1-0,15 К. При этом возможная примесь ^4He поглощалась фильтром из-за преимущественной адсорбции ^4He ⁶. Жидкость во время опыта находилась под давлением 2-10 торр. Стационарное магнитное поле H_0 , ориентированное вдоль оси измерительного объема, включалось при высокой температуре ячейки и при ее охлаждении захватывалось трубкой из ниобиевой фольги. Относительная неоднородность поля по образцу составляла $\sim 5 \cdot 10^{-4}$. Перпендикулярно H_0 располагались две скрещенные сверхпроводящие катушки,

которые позволяли создавать вращающееся РЧ поле h_1 . В стенке экспериментальной камеры находилась приемная катушка трансформатора потока, связанного с ВЧ СКВИДом, позволявшим определять магнитный момент M_z образца, параллельный H_0 .

При выбранной температуре с помощью развертки частоты РЧ поля проводилась серия адиабатических быстрых прохождений линии ЯМР ^3He . По величинам изменения продольного магнитного момента образца при прохождении линии, измеряемых СКВИДом, рассчитывались величина равновесного магнитного момента образца M_0 и время спин-решеточной релаксации T_1 по методике, описанной в ⁷. Величины T_1 составляли от 3 до 9 мин. Для исследования взаимодействия спинов ^3He и ядер ^1H подложки использовалось непрерывное РЧ поле, вращающееся с частотой близкой к частоте ЯМР протонов. РЧ поле включалось в течение времени $\sim 3T_1$ ^3He , затем с помощью адиабатического быстрого прохождения линии ЯМР ^3He измерялась установившаяся величина продольного магнитного момента образца M_z .

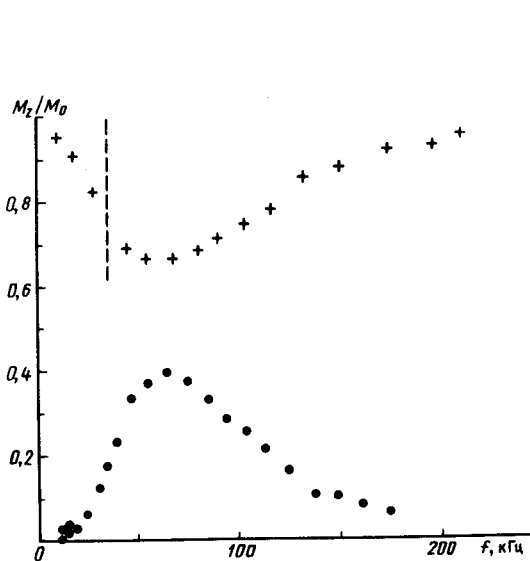


Рис.1

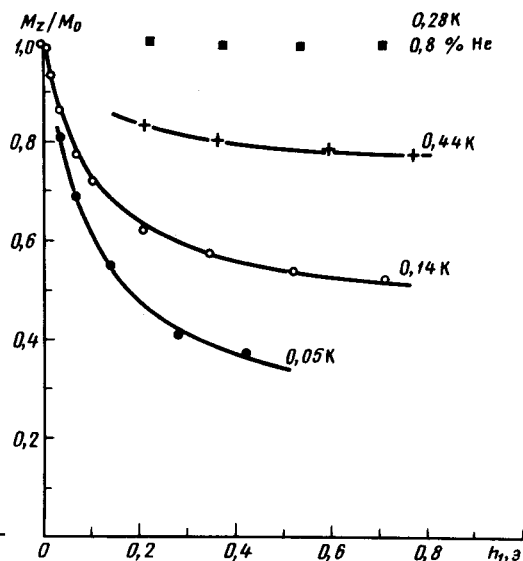


Рис.2.

Рис.1. + - магнитный момент образца жидкого ^3He в присутствии РЧ поля, $H_0 = 11 \text{ Э}$, $h_1 = 0,10 \text{ Э}$, $T = 0,11 \text{ К}$, пунктиром отмечена частота ЯМР ^3He . • - сигнал ЯМР протонов стенок ячейки (в условных единицах)

Рис.2. Магнитный момент образца жидкого ^3He как функция величины РЧ поля, $H_0 = 11 \text{ Э}$, частота РЧ поля 55 кГц. Кривые показывают аппроксимацию выражением (1)

Зависимость величины M_z от частоты РЧ поля показана на рис.1. На частотах, соответствующих ЯМР протонов, наблюдается уменьшение магнитного момента гелия, это указывает на связь спиновых систем ^1H и ^3He . Для сравнения в нижней части рис.1 приведена частотная зависимость величины изменения продольного магнитного момента от стенок ячейки, не заполненной жидким гелием, после короткого импульса РЧ поля; эта кривая показывает форму линии ЯМР протонов. В магнитных полях 22 и 44 Э как по уменьшению магнитного момента гелия так и по отклику пустой ячейки мы наблюдали также линию резонанса протонов на двойной ларморовской частоте,

которая для эпоксидной смолы Стайкаст-1266 была подробно изучена в работе ⁸ ¹⁾. Время спин-решеточной релаксации протонов T_{1p} , определенное по времени восстановления намагниченности пустой ячейки после РЧ импульса, составляло ~ 1 мин.

Зависимости M_z от величины РЧ поля для частоты, соответствующей максимуму протонного резонанса, показаны на рис.2. Эффект уменьшения продольной намагниченности наблюдается только при использовании очищенного ³He. При добавлении ⁴He в экспериментальный газ отклонение величины M_z от M_0 не превышает погрешности измерений. Это указывает на разрыв связи между спиновыми системами протонов и ³He, очевидно, за счет пленки ⁴He, покрывающей стенки ячейки, и на малый нагрев образца РЧ полем.

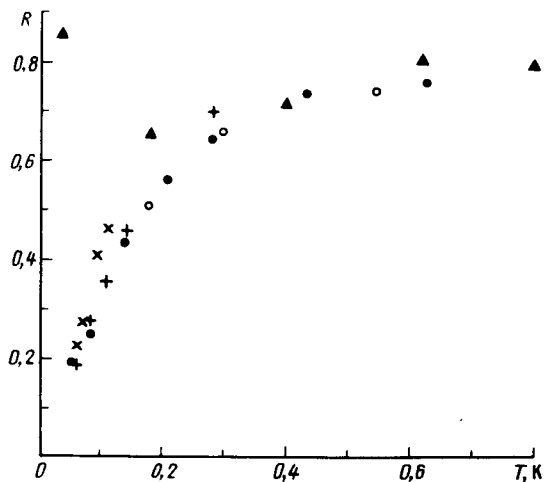


Рис.3. Относительный магнитный момент образца ³He в случае полного насыщения ЯМР протонов на поверхности стенок ячейки при различных величинах H_0 : \circ - 5 Э, \bullet - 11 Э, $+$ - 22 Э, \times - 44 Э; \blacktriangle - данные работы ¹ для системы жидкий гелий - порошок тефлона, $H_0 = 15,4$ кЭ

Резонанс протонов в глубине стенок был полностью насыщен при всех использованных величинах h_1 , поскольку параметр, определяющий насыщение, $(\gamma_p h_1)^2 T_{1p} T_{2p} \gg 1$ уже при $h_1 > 10^{-2}$ Э. Здесь γ_p - гиромангнитное отношение, $T_{2p} \sim 10^{-5}$ с - время поперечной релаксации протонов. Намагниченность протонов вблизи поверхности может быть отлична от нуля из-за их связи со спинами жидкости. При малых значениях h_1 отклонение величины M_z от M_0 пропорционально h_1 , что по-видимому связано с диффузией намагниченности в спиновой системе протонов от поверхности вглубь стенки. При дальнейшем росте h_1 величина M_z/M_0 выходит на плато высоты R . Величина R определяет значение магнитного момента образца жидкого ³He в условиях, когда резонанс спинов ядер ¹H на поверхности стенок полностью насыщен. Мы аппроксимировали кривые $M_z(h_1)$ с помощью выражения

$$\frac{M_z}{M_0} = \frac{1 + aRh_1}{1 + ah_1}. \quad (1)$$

Значения R не зависят от напряженности магнитного поля в исследованном интервале полей (рис.3). При $T \gtrsim 0,2$ К величина R медленно растет с повышением температуры. Это можно объяснить включением объемного механизма

¹⁾ Уменьшение магнитного момента гелия при частоте РЧ поля, равной двойной ларморовской частоте ³He, не превышало погрешности измерений.

спин-решеточной релаксации ^3He , который уменьшает отклонение магнитного момента гелия от равновесной величины при насыщении ЯМР протонов на поверхности стенок. При $T. \leq 0,2\text{ K}$ наблюдается быстрое уменьшение величины R с понижением температуры. Такое поведение расходится с данными, полученными для системы $^3\text{He}-^{19}\text{F}$ в работе ¹ (см. рис.3). Модель связи спиновых систем ядер подложки и жидкости, предложенная авторами этой работы для наилучшего описания экспериментальных результатов, предполагает, что взаимодействие происходит между атомами первого слоя подложки и первым твердым слоем гелия на поверхности из-за движения атомов этого слоя. Эта модель позволяет ожидать отсутствия температурной зависимости величины R при температурах ниже $0,5-1\text{ K}$, при которых движение атомов в слое твердого гелия не зависит от температуры ^{2,4}, это явно не согласуется с полученными нами результатами.

Авторы благодарны В.И.Марченко за обсуждения работы.

-
1. A.Schuhl, F.B.Rasmussen, and M.Chapellier, *J. Low Temp. Phys* **57**, 483 (1984).
 2. Q.Geng, M.Olsen, and F.B.Rasmussen, *J.Low Temp. Phys.* **74**, 369 (1989).
 3. А.В.Егоров, О.Н.Бахарев, А.Г.Володин и др., *ЖЭТФ* **97**, 1175 (1991).
 4. O.Gonen, P.L.Kuhns, C.Zuo, and J.S.Waugh, *J.Magn. Reson* **81**, 491 (1989).
 5. D.R.Swanson, D.Candela, and D.O.Edwards, *J.Low Temp. Phys.* **72**, 213 (1988).
 6. K.Thompson, *J.Low Temp. Phys.* **32**, 361 (1978).
 7. И.С.Солодовников, *ЖЭТФ* **100**, 189 (1991).
 8. L.Scrbek, J.Sebek, and R.S.Safrata, *Phys. B* **165-166**, 919 (1990).