

НАБЛЮДЕНИЕ АНАЛОГА ЭФФЕКТА ДЖОЗЕФСОНА НА СПИНОВОМ ТОКЕ

А.С.Боровик-Романов, Ю.М.Буньков, А. де Ваард¹⁾,
В.В.Дмитриев, В.Макроциева²⁾, Ю.М.Мухарский,
Д.А.Сергацков.

Проведены исследования характера протекания спинового тока, переносящего продольную намагниченность $^3\text{He-B}$ сквозь узкое отверстие. Экспериментально наблюдался переход от режима протекания тока со сбросом фазы к безгистерезисной зависимости тока от разности фаз параметра порядка.

Протекание сверхпроводящего тока между сверхпроводниками, разделенными туннельным переходом и обусловленное разностью фаз параметра порядка было предсказано Джоозефсоном. В настоящее время эффектом Джоозефсона принято называть также протекание через слабую связь электрического тока в сверхпроводниках (см. ¹⁾) и массового сверхтекучего тока в ^3He и ^4He ²⁾ в случае, когда токо-фазовая зависимость безгистерезисная (однозначная). Куперовские пары в сверхтекучем ^3He обладают магнитным моментом. В результате в ^3He возможен сверхтекучий перенос магнитного момента — спиновый сверхток (см. ³⁾). В ряде теоретических ⁴⁾ и экспериментальных ⁵⁾ работ было показано, что в $^3\text{He-B}$ можно осуществить уникальную ситуацию при которой удастся наблюдать перенос намагниченности на макроскопические расстояния сверхтекучим спиновым током. Пространственная ориентация намагниченности $^3\text{He-B}$ в условиях описываемых экспериментов жестко связана с ориентацией вектора \mathbf{n} , описывающего спиновую часть параметра порядка. В результате градиенты фаз спиновой части параметра порядка удастся записать в виде градиентов углов отклонения (β) и прецессии (α) намагниченности S , а также измерять эти углы во время экспериментов. Согласно ⁴⁾ сверхток компоненты намагниченности, продольной магнитному полю S_z определяется градиентами углов α и β . Если $\nabla\alpha \perp H$ и $\nabla\beta = 0$, то

$$J_{S_z} = -(\chi/\gamma)(1 - \cos\beta)[(1 - \cos\beta)c_{\parallel}^2 + (1 + \cos\beta)c_{\perp}^2] \nabla\alpha, \quad (1)$$

где c_{\perp} и c_{\parallel} — скорости спиновых волн.

В работе ⁶⁾ экспериментально исследовалось протекание тока J_S через длинный узкий капилляр и был обнаружен эффект сброса фазы. В данной статье описаны условия эксперимента, в котором наблюдалась безгистерезисная зависимость тока (эффект Джоозефсона). Эксперименты проводились аналогично описанным в ⁶⁾. Две экспериментальные камеры, заполненные $^3\text{He-B}$, были соединены каналом Φ 1,2 мм и длиной 4,5 мм. В центре канала была сделана перетяжка Φ 0,48 мм, проекция которой показана на врезке к рис. 1. В обеих камерах возбуждались домены с однородной прецессией намагниченности (ОПД). ОПД образуется при достаточной амплитуде радиочастотного (РЧ) поля в тех частях камеры, в которых магнитное поле меньше, чем $\omega_{\text{рч}}/\gamma$, ($\omega_{\text{рч}}$ — частота РЧ поля). В ОПД S отклонена на угол $\geq 104^\circ$. Возникающий при этом сдвиг частоты ЯМР компенсирует неоднородность внешнего магнитного поля, так что частота и фаза прецессии S внутри ОПД в первом приближении однородна. Эта однородность поддерживается протеканием спиновых сверхтоков (см. ⁴⁾, ⁵⁾). Фаза прецессии ОПД однозначно связана с фазой возбуждающего РЧ поля. Описываемые эксперименты проводились в поле с однородным градиентом ($\nabla|H|$) направ-

¹⁾ Камерлинг-Оннес лаборатория, Лейден, Нидерланды.

²⁾ Институт экспериментальной физики, Кошице, ЧССР.

ленным вдоль поля, что позволяло контролировать пространственное расположение доменов ОПД и невозмущенный ^3He разделены доменной границей с характерным размером $2\lambda = 2(c_{\parallel}^2 / \omega_{\text{pч}} \gamma \nabla H)^{1/3}$. В доменной границе β плавно меняется от 104° до 0° . В центре доменной границы $\gamma H = \omega_{\text{pч}}$ ⁴. Поэтому доменную границу можно передвигать, изменяя магнитное поле. Схема экспериментальной камеры и принципиальная схема эксперимента представлены на рис. 1.

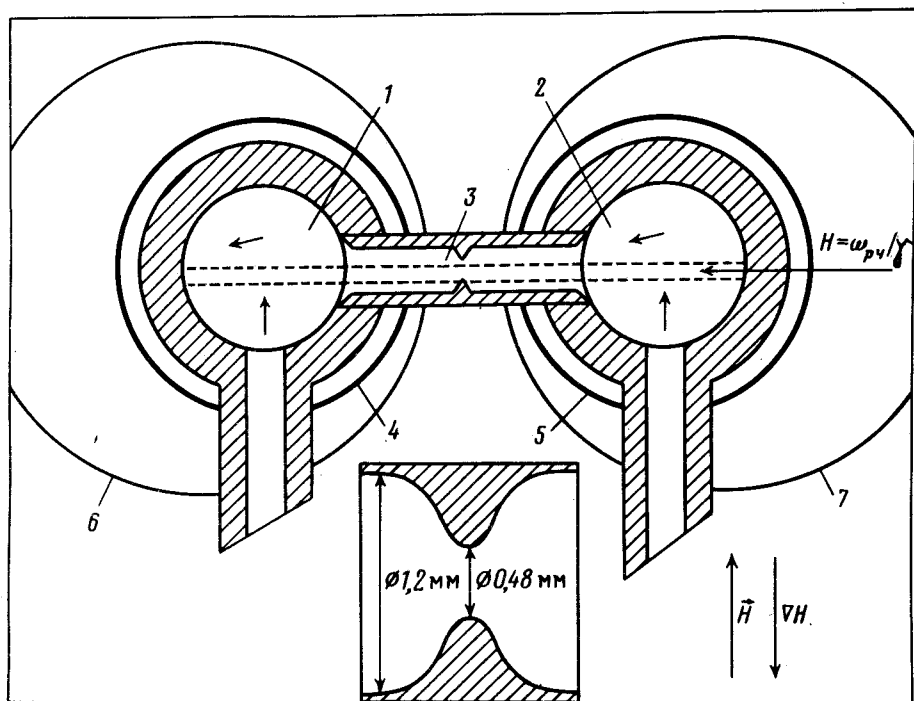


Рис. 1. Эскиз экспериментальной камеры, 1, 2 – экспериментальные объемы, 3 – канал, 4, 5 – катушки ЯМР, 6, 7 – медные экраны. Пунктирами выделена область расположения доменной границы. На врезке показан профиль сужения в канале

Для образования разности фаз прецессии на концах канала, частоты РЧ полей в камерах растривались на 0,01 Гц. Возникавший вдоль канала спиновый сверхток переносил S_z и следовательно зеемановскую энергию $S_z H$. В результате изменялась РЧ мощность, поглощаемая ОПД. По изменению этой мощности мы измеряли величину тока S_z . Эксперименты проводились в полях 71, 142 и 284 Э при давлении 0 и 20 бар при температуре до $0,3 T_c$.

Для спинового тока в $^3\text{He-B}$ можно ввести длину ξ , которая аналогична длине когерентности Гинзбурга – Ландау в сверхпроводимости⁷. Она зависит от разности частот прецессии ОПД и ларморовской частоты в канале $\omega_k = \gamma H_k$

$$\xi = c_{\perp} (\omega_{\text{pч}} (\omega_{\text{pч}} - \omega_k))^{-1/2}. \quad (2)$$

Соответственно меняя H и приближая ω_k к $\omega_{\text{pч}}$ можно ожидать, что ξ окажется порядка размеров перешейка канала. При этом, по аналогии со сверхпроводимостью, токово-фазовая зависимость может стать безгистерезисной. Наибольшая область полей при которых наблюдался эффект Джозефсона была получена при $\omega_k = 230$ кГц при $P = 0$ бар. На рис. 2 показаны типичные зависимости тока от разности фаз прецессии в зависимости от малого изменения поля ΔH . Для того, чтобы прокалибровать расположение доменной границы ОПД относительно канала, был измерен наклон линейного участка токо-фазовых зависимостей при малой разности фаз (см. рис. 3). Как следует из формулы (1) этот наклон должен быть прак-

тически постоянным, когда в канале расположен ОПД, и уменьшаться при прохождении через канал доменной границы. На рис. 3 показаны зависимости $\partial J/\partial \Delta \varphi$ от ΔH для $\nabla H = 0,9 \text{ Э/см}$ (\bullet, \circ) и $0,15 \text{ Э/см}$ (\diamond, \blacklozenge). Шкала ΔH выбрана так, что величина $\partial J/\partial \Delta \varphi$ обращается в ноль в одной точке для обеих зависимостей. Символами (\bullet, \blacklozenge) показаны точки, в которых получены безгистерезисные токо-фазовые зависимости. Видно, что они получены в условиях, когда в канале находилась доменная граница.

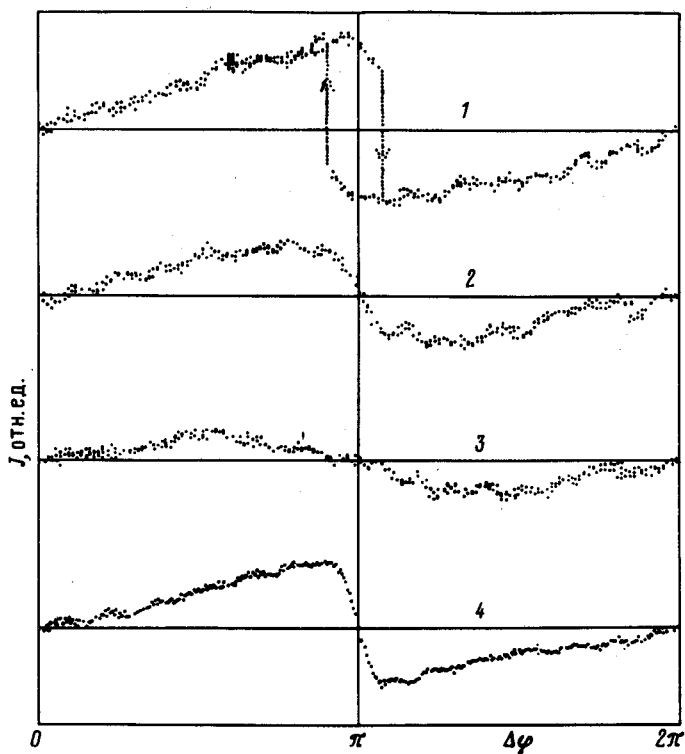


Рис. 2. Экспериментальные зависимости спинного тока от разности фаз прецессии между ОПД

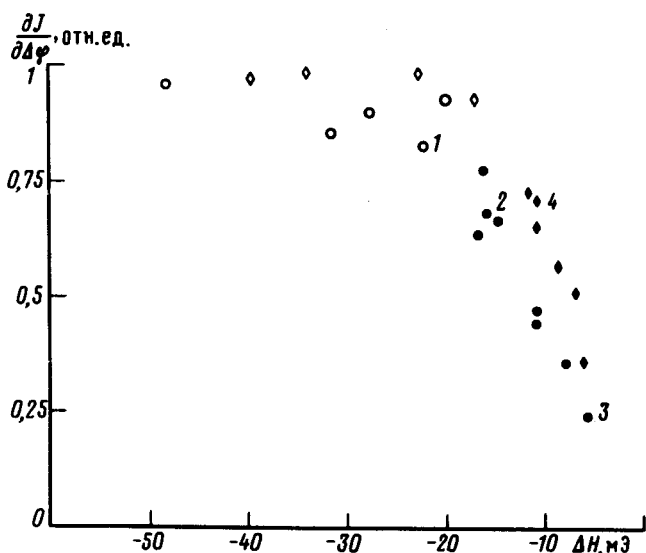


Рис. 3. Зависимость $\partial J/\partial(\Delta \varphi)$ от разности магнитных полей на доменной границе и в канале при малых ($\Delta \varphi$). Цифрами обозначены экспериментальные точки, представленные на рис. 2

Наблюдаемые токо-фазовые зависимости имеют не синусоидальную форму. Отклонение токо-фазовых зависимостей в эффекте Джозефсона от синусоидальной формы принято рассматривать в модели, предложенной для сверхпроводимости Лихаревым ^{1, 2}. В работе ⁷

Маркеловым было показано, что для спинового тока это рассмотрение не правомочно. Там же была предложена модель для описания спинового тока между доменами. Так как в нашей экспериментальной ситуации ток течет между двумя доменными стенками, мы не можем пользоваться моделью Маркелова. Однако следует заметить, что качественно форма наблюдаемых токо-фазовых зависимостей близка как к модели Лихарева, так и, в пределе $\beta \rightarrow 104^\circ$, к модели Маркелова (см. запись 4 на рис. 2).

В заключение мы выражаем глубокую благодарность И.А.Фомину и А.В.Маркелову за полезные обсуждения этой работы.

Литература

1. *Likharev K.K.* Rev. Mod. Phys., 1979, 51, 101.
2. *Avenel O., Varoquaux E.* Phys. Rev. Lett., 1988, 60, 416.
3. *Leggett A.J.* Rev. Mod. Phys., 1976, 47, 331.
4. *Фомин И.А.* ЖЭТФ, 1985, 88, 2039.
5. *Боровик-Романов А.С., Буньков Ю.М., Дмитриев В.В. и др.* ЖЭТФ, 1985, 88, 2025.
6. *Боровик-Романов А.С., Буньков Ю.М., Дмитриев В.В., Мухарский Ю.М.* Письма в ЖЭТФ, 1987, 47, 98.
7. *Маркелов А.В.* ЖЭТФ, 1988, 93, 156.

Институт физических проблем
Академии наук СССР

Поступила в редакцию
14 марта 1988 г.