

Пороговые эффекты в импульсном ЯМР в сверхтекучем $^3\text{He-B}$

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

Проведены эксперименты по импульсному ЯМР $^3\text{He-B}$ в плоскопараллельной геометрии. Оказалось, что возбуждение сигнала индукции имеет пороговый характер, причем частота сигнала индукции равна ларморовской.

В свободном $^3\text{He-B}$ частота прецессии спинов равна ларморовской при углах отклонения ядерной намагниченности меньше 104° ^{1,2}. При этом вектор \mathbf{n} прецессирует вместе с вектором намагниченности. Стенки оказывают существенное влияние на ориентацию вектора \mathbf{n} . Если, в невозмущенном состоянии, вдали от стенок $\mathbf{n} \parallel \mathbf{H}$ (\mathbf{H} – постоянное внешнее магнитное поле), то в непосредственной близости от стенок, расположенных параллельно \mathbf{n} , а именно на расстоянии от стенок, меньшем так называемой магнитной длины R_H , вектор \mathbf{n} составляет некоторый угол с поверхностью стенки, определяемый из условия:

$$\cos^2 \phi = 1/5. \quad (1)$$

Вследствие этого частота ЯМР сдвигается от ларморовской и для данного угла ϕ определяется из уравнения^{3,4}:

$$\omega^2 = \frac{1}{2} [\omega_0^2 + \Omega_B^2] + \left\{ \frac{1}{4} (\omega_0^2 + \Omega_B^2)^2 - \omega_0^2 \Omega_B^2 \cos^2 \phi \right\}^{1/2}, \quad (2)$$

где ω_0 – ларморовская частота, Ω_B – частота продольного резонанса.

В работах^{5,6} были проведены эксперименты по непрерывному ЯМР в камере с ^3He , заполненной набором плоскопараллельных пластин, причем расстояние между пластинами было меньше R_H , а внешнее магнитное поле было направлено параллельно или под некоторым углом к поверхности пластинок. Оказалось, что частота ЯМР сдвинута относительно ларморовской в точном соответствии с уравнением (2). Целью нашей работы было исследование сигналов импульсного ЯМР в $^3\text{He-B}$ в аналогичной геометрии. В этом случае формула (2) вообще говоря уже несправедлива, так как при импульсном ЯМР мы имеем большие углы отклонения спинов от направления внешнего магнитного поля и связанная с этим зеemanовская энергия может существенно превышать поверхностную энергию, отклоняющую \mathbf{n} от \mathbf{H} .

Экспериментальный объем с ^3He имел форму прямоугольного параллелепипеда с размерами $5,5 \times 5,5 \times 10 \text{ мм}^3$ и был заполнен набором равноотстоящих пластин из тонкого (12 мкм) лавсана. Расстояние между пластинами составляло 0,3 мм. Внешнее постоянное магнитное поле было направлено параллельно пластинам. Эксперименты проводились в полях 77 и 154 Э. При таких условиях $R_H \approx 1 \text{ мм}$, т.е. можно считать, что в равновесии текстура вектора \mathbf{n} однородна в пространстве между пластинок, причем вектор \mathbf{n} везде составляет угол ϕ с направлением внешнего постоянного поля, определяемый из условия (1).

Все эксперименты проводились при давлении 29,3 бар и в диапазоне температур 0,48 – 0,74 T_c . Для измерения температуры использовался платиновый термометр PLM-3, калиброванный по температуре перехода ^3He в сверхтекучее состояние. Необходимая температура достигалась при помощи криостата ядерного размагничивания.

Эксперименты проводились следующим образом.

Измерительная схема настраивалась на фиксированную частоту (250 или 500 кГц), затем при медленном сканировании внешнего магнитного поля периодически подавались радиочастотные (РЧ) импульсы. Амплитуда поля РЧ-импульсов равнялась 2 Э. Сигнал от спинов ^3He записывался при помощи цифрового запоминающего осциллографа „DataLab-905“, что поз-

воляло измерять также и частоту сигнала. Оказалось, что сигнал индукции возникает пороговым образом: при малых длительностях РЧ-импульса не было обнаружено никакого сигнала индукции, но едва длительность РЧ-импульса превышала ~ 20 мкс (что соответствует повороту намагниченности на $\sim 40^\circ$ в случае нормального ^3He), происходил резкий рост амплитуды сигнала индукции (рис.1). Для количественной характеристики амплитуды сигнала индукции он интегрировался в промежутке от 0,8 до 1,1 мс после окончания РЧ-импульса. Максимальная величина сигнала в данном поле сильно зависела от частоты заполнения импульса, причем оптимальная частота РЧ-импульса в свою очередь зависела от температуры и менялась от 550 до 530 кГц в поле 154 Э при изменении температуры от 0,5 до 0,7 T_c (рис.2). Пороговая длительность импульса, однако, практически не зависела от частоты РЧ-импульса и температуры. Кроме того, оказалось, что частота сигнала индукции всегда равна ларморовской (т.е. равна, например, 500 кГц в поле 154 Э) и изменяется в соответствии с изменением внешнего поля. Частота же сигнала непрерывного ЯМР сильно сдвинута от ларморовской в соответствии с уравнением (2).

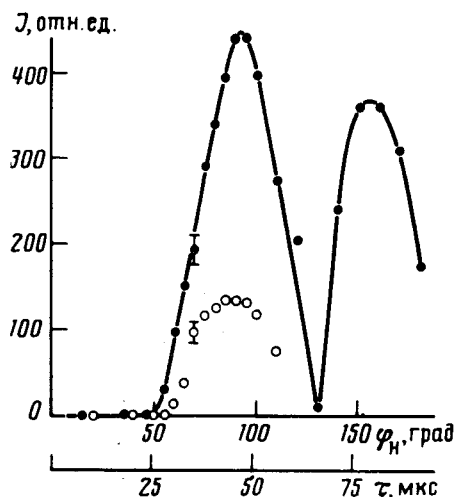


Рис. 1

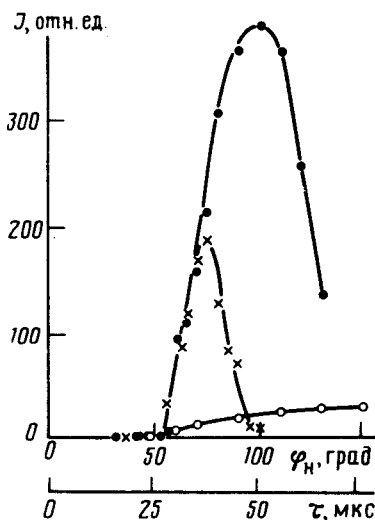


Рис. 2

Рис.1. Зависимость интенсивности сигнала индукции от длительности РЧ-импульса (τ) в магнитном поле $H = 154$ Э: ϕ_H — угол поворота намагниченности в нормальном ^3He импульсом соответствующей длины; \bullet — $T/T_c = 0,61$; \circ — $T/T_c = 0,49$

Рис.2. Зависимость интенсивности сигнала индукции от длительности РЧ-импульса при температуре $0,55 T_c$; \bullet — $f = 540$ кГц, \times — $f = 550$ кГц; \circ — $f = 500$ кГц

При длительностях возбуждающего импульса от 20 до 40 мкс наблюдался еще один неожиданный эффект. Сигнал индукции имел не совсем регулярный характер: на фоне монотонного спада сигнала были видны небольшие „провалы” или „горбы”. Оказалось, что существуют две устойчивые формы сигнала индукции, которые регулярно следуют одна за другой при подаче серии одинаковых импульсов, причем этот эффект сохранялся даже при часовой задержке между двумя соседними импульсами.

Порог в зависимости интенсивности сигнала индукции от длительности возбуждающего импульса можно объяснить следующим образом: уравнение (2) можно считать верным лишь для очень малых углов отклонений намагниченности от внешнего поля; при достаточно больших углах отклонений намагниченности прецессия со сдвинутой от ларморовской частотой становится, видимо, неустойчивой, и система пороговым образом переходит на ларморовскую

частоту, соответствующую другому решению уравнений Леггета, которое обычно реализуется в экспериментах с ^3He в большом объеме (т.е. влиянием стенок можно пренебречь). Это предположение подтверждается численным решением уравнений Леггета для нашего случая выполненного Леманом и Гало. Природа чередования форм сигнала индукции остается пока неясной.

В заключение авторы хотели бы выразить свою благодарность И.А.Фомину, оказавшему существенную помощь в интерпретации пороговых эффектов, А.А.Леману и В.Л.Гало за предоставленные ими результаты предварительных расчетов, а также С.Елагину за помощь в проведении экспериментов.

Литература

1. *Brinkman W.F., Smith H.* Phys. Lett., 1975, 53A, 43.
2. *Corruccini L.R., Osheroff D.D.* Phys. Rev., 1978, 17B, 126.
3. *Osheroff D.D., Engelsberg S., Brinkman W.F., Corruccini L.R.* Phys. Rev. Lett., 1975, 34, 190.
4. *Leggett A.J.* Rev. Mod. Phys., 1975, 47, 331.
5. *Ahonen A.I., Krusius M., Paalanen M.A.* J. Low. Temp. Phys., 1976, 25, 421.
6. *Ahonen A.I., Alvesalo T.A., Haikola M.T., Krusius M., Paalanen M.A.* J. Phys. C.: Solid. st., 1975, 8, L269.

Институт физических проблем
Академии наук СССР

Поступила в редакцию
16 мая 1983 г.