

Проекция магнитного момента на магнитное поле имеет скачки производных при $H = H_{c1}$ и $H_2 = H_{c2}$, а также максимум при большем значении поля $H = H_3$ [8]. Первая особенность и максимум возникают и в сильно анизотропных, но однородных (не слоистых) сверхпроводниках [9], а особенность при $H_2 = H_{c2}$ — проявление слоистости. В эксперименте [10] явно видны первая особенность и максимум, вторая особенность замаскирована малой величиной скачка производной, но обнаруживается при элементарной обработке данных.

Кинки являются естественными носителями нормальной компоненты, что приводит к резкой анизотропии критического тока [6, 11]. Эксперимент [12] подтверждает предсказание теории.

Теория [6, 7] предсказывает нелинейные крутильные колебания образцов слоистого сверхпроводника.

Работы, представленные в настоящей аннотации, выполнены в сотрудничестве с Б.И. Ивлевым, Н.Б. Копниным, С.С. Маловым и Ю.Н. Овчинниковым. Благодарю моих соавторов, а также В.Н. и Н.В. Заварицких, И.Ф. Щеголева и В.А. Копылова за обсуждение экспериментальной ситуации и предоставление экспериментальных данных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Welp U, Kwok W.K, Grabtree G.W., Vandervoort K.G., Liu J.Z.//Phys. Rev. Lett. 1989. V. 62. P. 1908.
Lee W.C., Klemm R.A., Johnston D.C.//Ibidem. V. 63. P. 1012.
2. Vermeer A.J. et al.//Physica. Sen C. 1989. V. 162 — 164. P. 409.
3. Ivlev B.L, Kopnin N.B., Pokrovsky V.L.// Low Temp. Phys. 1990. V. 80. P. 187.
4. Leviton L.S.//Phys. Rev. Lett. 1991. V. 66. P. 224.
5. Kolomeiskii E.B., Mikheev L.V. Preprint. — 1990.
6. Ivlev B.L, Ovchinnikov Yu.N, Pokrovsky V.L.//Europhys. Lett. 1990. V. 13. P. 187; Mod. Phys. Lett. Ser. B. 1991. V. 5. P. 73.
7. Maslov S.S., Pokrovsky V.L.//Europhys. Lett. 1991. V. 14. p. 591.
8. Маслов С.С., Покровский В.Л.//Письма ЖЭТФ. 1991.
9. Буздин А.Н., Симонов А.Ю.//Там же. 1990. Т. 51. С. 68; ЖЭТФ. 1990. Т. 98. С. 2074.
10. Заварицкий Н.В., Заварицкий В.Н.// Письма ЖЭТФ. 1991. Т. 53. С. 212.
- [11] Tachiki M, Takahashi S.//Sol. State Commun. 1989. V. 70. P. 291.
12. Roas B., Schultz L., Saemann-Ischenko G.//Phys. Rev. Lett. 1990. V. 64. P. 479.

538.945(048)

М.А. Теплов. ЯМР, ЯКР и ядерная релаксация в ВТСП. Возможность существования в оксидных сверхпроводниках двух фаз (проводящей и диэлектрической) обсуждалась уже давно [1, 2]. К настоящему времени в опытах по дифракции нейтронов на порошках удалось установить, что в сверхпроводниках $\text{La}_2\text{CuO}_{4+x}$, $\text{Nd}_{2-x}\text{Ce}_x\text{CuO}_4$, $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ в определенной области значений x разделение фаз действительно происходит, причем наблюдаемая в экспериментах температура перехода в сверхпроводящее состояние достигает максимума на границе области сосуществования фаз [3]. В самой же области сосуществования фаз образец представляет собой смесь сверхпроводника фиксированного состава с максимальным T_c значением и несверхпроводника (диэлектрика или металла) отличного, но определенного для данного x , состава. Имеющиеся экспериментальные данные заставляют предполагать, что критические температуры оксидных сверхпроводников ограничиваются их фазовой нестабильностью. Поэтому представляется необходимым получение детальной информации об электронном строении обеих фаз вещества. В данном докладе описываются результаты экспериментальных исследований методом ядерного магнитного резонанса (ЯМР) двухфазной системы $\text{Pr}_{1-x}\text{Ce}_x\text{CuO}_{4-y}$ ($T_c = 24$ К). Это вещество относится к классу так называемых "электронных сверхпроводников" $\text{Ln}_{2-x}\text{M}_x\text{CuO}_{4-y}$ ($\text{Ln} = \text{Pr}, \text{Nd}, \text{Sm}, \text{Eu}$; $\text{M} = \text{Ce}, \text{Th}$), имеющих структуру Nd_2CuO_4 [4]. Двухфазный состав вещества при $x = 0,15$ был установлен ранее в экспериментах с образцами $\text{Nd}_{2-x}\text{Ce}_x\text{CuO}_{4-y}$ [5].

ЯМР меди. Известно [6,7], что в антиферромагнетиках Nd_2CuO_4 и Pr_2CuO_4 электрическое квадрупольное взаимодействие ядер меди достаточно сильно ($\nu_Q = 13 - 14$ МГц), а при легировании этих соединений церием или торием появляются центры меди, для которых характерно очень слабое квадрупольное взаимодействие. Если в сверхпроводнике с $x = 0,15$ эти центры существуют еще наравне с другими (имеющими частоты ЯКР в широком спектре от 20 до 60 МГц), то в несверхпроводящей металлической фазе ($x > 0,18$) их содержание является преоб-

ладающим. Относительное содержание центров меди с широким спектром ЯКР велико в той области значений x , которая соответствует большим наблюдаемым величинам T_c , и близко к нулю при $x \leq 0,05$ и $x = 0,2$ [6]. Корреляция такого поведения с концентрационной (x) зависимостью доли сверхпроводящей фазы [5] позволяет отнести центры меди со слабым квадрупольным взаимодействием к несверхпроводящему металлу.

Остановимся на результатах исследований ЯМР меди в металлической фазе $\text{Pr}_{1,85}\text{Ce}_{0,15}\text{CuO}_{4-y}$. Спин-решеточная релаксация этих ядер при температурах от 2,4 до 300 К имеет корринговский характер: $T_1 T = 147 \text{ мс} \cdot \text{К}$ [8]. Эксперименты с ориентированным порошком [9] не выявляют признаков угловой зависимости времени T_1 ; вместе с тем, они показывают, что в кристалле время спин-спиновой релаксации T_2 при ориентации внешнего поля \mathbf{H} вдоль оси c должно быть заметно меньше, чем в случае $\mathbf{H} \perp c$. Наблюдаемое соотношение времен релаксации двух изотопов ${}^{63}\text{T}_2 / {}^{65}\text{T}_2 > 1$ говорит в пользу того, что механизм спин-спиновой релаксации ядер меди имеет магнитную природу.

Расчеты различных вкладов в градиент электрического поля (ГЭП) на ядрах меди, выполненные, как в работе [10], с учетом эффектов ковалентности и перекрывания электронных орбит меди и кислорода, а также в предположении 15%-ной примеси состояния Cu^+ , дают квадрупольную частоту $\nu_Q = -34,5 - 16 + 53,2 = 2,7 \text{ МГц}$; здесь три вклада последовательно представляют решетку лигандов, 3p- и 3d-электроны [9]. При температурах жидкого гелия узкие линии ЯМР меди наблюдаются на "пьедестале", в котором можно угадать размытую квадрупольную структуру спектра ЯМР порошка. Численное моделирование спектра показывает, что он хорошо описывается суммой четырех кривых гауссовой формы (две узкие линии и два "пьедестала"), причем среднеквадратичные величины полуширины "пьедесталов" составляют 800 кГц (${}^{63}\text{Cu}$) и 700 кГц (${}^{65}\text{Cu}$), т.е. соответствуют среднеквадратичным значениям $\langle \nu_Q^2 \rangle^{1/2} = 1,6$ и 1,4 МГц, соответственно. Эти величины близки к расчетной частоте, однако, отсутствие каких-либо следов немонотонного спада интенсивности сигнала ЯМР на крыльях линии наводит на мысль о том, что "пьедесталы" образовались из-за случайного распределения величин около нулевого среднего значения и что они могут возникнуть вследствие динамических флуктуаций ГЭП. В таком случае можно ожидать проявления флуктуаций ГЭП и в ядерной релаксации меди. Действительно, как показывают измерения спин-решеточной релаксации при температурах жидкого гелия [9], время ${}^{63}\text{T}_1$ изотопа ${}^{63}\text{Cu}$ всегда меньше, чем ${}^{65}\text{T}_1$, как и должно быть при квадрупольном механизме релаксации вследствие большей величины электрического квадрупольного момента ядер ${}^{63}\text{Cu}$.

ЯМР празеодима. Основным состоянием иона Pr^{3+} ($4f^2$, ${}^3\text{H}_4$, $J = 4$) в кристаллическом электрическом поле симметрии D_{4h} является синглет Γ_3 , отделенный от ближайшего возбужденного состояния (дублета Γ_3) энергетическим интервалом 119 см^{-1} [11]. Поэтому появляется возможность получить дополнительную информацию об образце из данных ЯМР ${}^{141}\text{Pr}$ (естественная распространенность 100%, ядерный спин $I = 5/2$) [12 — 14]. Расщепление уровней энергии ${}^{141}\text{Pr}$ в магнитном поле описывается спиновым гамильтонианом аксиальной симметрии: $H = -\gamma_{\parallel} \hbar H_z I_z - \gamma_{\perp} \hbar (H_x I_x + H_y I_y) + D [I_z^2 - I(I+1)/3]$. Из спектров, снятых при температурах 1,5 — 4,2 К, следует, что в образце $\text{Pr}_{1,85}\text{Ce}_{0,15}\text{CuO}_{4-y}$ присутствуют два типа центров — быстрорелаксирующие (Pr1) и медленнорелаксирующие (Pr2). Параметры этих спектров имеют близкие значения: $\gamma_{\parallel}^{(1)}/2\pi \approx 1,84 \text{ кГц/Э}$, $|D^{(1)}/h| \approx 2,5 \text{ МГц}$, $\gamma_{\parallel}^{(2)}/2\pi = 1,66 \pm 0,05 \text{ кГц/Э}$, $\gamma_{\perp}^{(2)}/2\pi = 5,1 \pm 0,5 \text{ кГц/Э}$, $|D^{(2)}/h| = 2,4 \pm 0,2 \text{ МГц}$.

Благодаря анизотропии u в спектре порошка линии ЯМР празеодима, соответствующие ориентациям $\mathbf{H} \parallel c$ и $\mathbf{H} \perp c$, разнесены по полю, и это позволяет изучать угловую зависимость скорости ядерной релаксации. На рисунке показаны результаты измерений при температурах от 0,05 до 1,6 К скоростей релаксации $T_{1\parallel}^{-1}$ и $T_{2\parallel}^{-1}$ в поле $\mathbf{H} \parallel c$ на частоте 23 МГц; эти скорости остаются практически неизменными в широком диапазоне полей от 7,5 кЭ до верхней границы спектра (19 кЭ). Как видно, релаксационные характеристики ядер Pr1 и Pr2, в отличие от спектральных параметров, резко различаются. Обращает на себя внимание замедление релаксации поперечной намагниченности ядер Pr2 при охлаждении. Такое поведение аналогично температурной зависимости $T_2^{-1}(T)$ ядер Cu (2) в $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{69}$ [15] и ядер меди в системе с тяжелыми фермионами CeCu_2Si_2 [16] при переходе этих соединений в сверхпроводящее состояние. Скорости спин-решеточной релаксации ядер Pr1 и Pr2 уменьшаются при охлаждении от 1,6 К до 0,05 К приблизительно в 200 и 500 раз. При $T = 0,05 \text{ К}$ относительная доля ядер празеодима с большим временем

T_2 составляет $0,35 \pm 0,02$, а относительная доля ядер с большим временем T_1 равна $0,36 \pm 0,05$. Совпадение этих величин еще раз подтверждает присутствие в образце двух типов центров (Pr1 и Pr2) с относительным содержанием 2:1.

Анализ экспериментальных ЯМР-данных меди и празеодима в образце $\text{Pr}_{185}\text{Ce}_{0,15}\text{CuO}_4$ позволяет сделать следующие выводы:

1) Данные ЯМР подтверждают наличие в образце двух фаз.

2) Узкие линии ЯМР меди со слабо выраженными следами квадрупольного взаимодействия принадлежат ядрам меди в металлической (несверхпроводящей) фазе образца. Важной особенностью этой фазы является квадрупольный характер ядерной релаксации меди.

3) ЯМР празеодима наблюдается, скорее всего, от сверхпроводящей фазы. Большие скорости ядерной релаксации празеодима при низких температурах можно объяснить флуктуациями внутриатомных (сверхтонких) магнитных полей, которые, в свою очередь, могут возникнуть при флуктуациях валентности $\text{Pr}^{3+} - \text{Pr}^{4+}$.

4) На основании наблюдаемого относительного содержания двух типов центров празеодима атомы Pr2 могут быть отнесены к ближайшему четырехкратному окружению атомов Се.

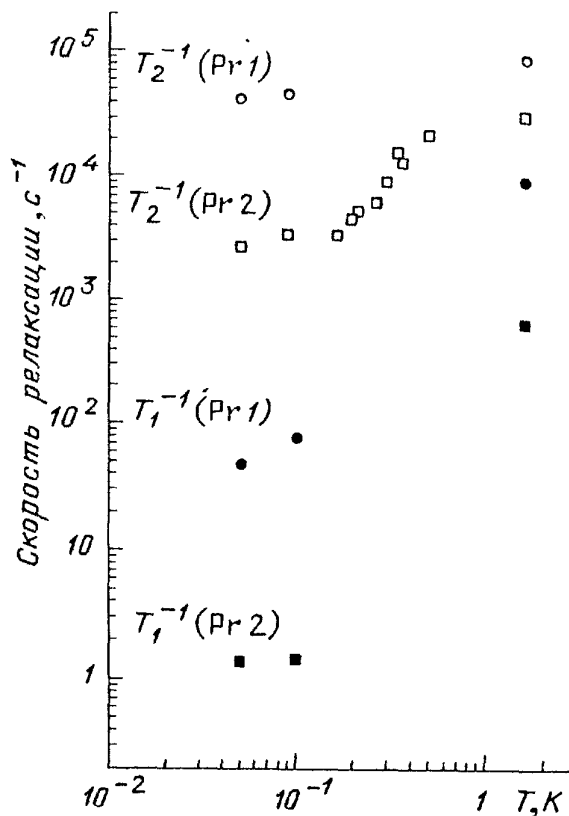


Рис. 4

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Бородин В.А., Горьков Л.П. и др.//Письма ЖЭТФ. 1987. Т. 46 (Приложение). С. 211.
2. Горьков Л.П., Сокол А.В.//Ibidem. С. 333.
3. Jorgensen J.D. et al.//Proc. of the Third Intern. Symposium on Superconductivity. Sendai. Japan, November 6 — 9, 1990 (to be published by Springer-Verlag, Tokyo).
4. Tokura Y., Takagi H., Uchida S.//Nature, London. 1989. V. 337. P. 345.
5. Lightfoot P. et al.//Physica. Ser. C. 1990. V. 168. P. 627.
6. Abe M. et al.//Ibidem. 1989. V. 160. P. 8.
7. Kohori Y. et al.// J. Phys. Soc. Japan. 1989. V. 58. P. 3493.
8. Kumagai K. et al.//Physica. Ser. B. 1990. V. 165 — 166. P. 1297.
9. Бахареv О.Н. и др.//Письма ЖЭТФ, 1990. Т. 51. С. 571.
10. Завидонов А.Ю. и др.//СФХТ. 1990. Т. 3. С. 1597.
- [11] Nekvasil V.//Physica. Ser. C. 1990. V. 170. P. 469.
12. Бахареv О.Н. и др.//Письма Б ЖЭТФ. 1990. Т. 52. С. 812.
13. Бахареv О.Н. и др.//Ibidem. С. 1012.
14. Bakharev O.N. et al.//Proc. of the Third German-Soviet Bilateral Seminar on HTSC. — Karlsruhe, FRG, October 8 — 12, 1990. P. 9.
15. Бахареv О.Н. и др.// Письма ЖЭТФ. 1988. Т. 47. С. 383.
16. Mac Laughlin D.E. et al.// Phys. Rev. Ser. B. 1984. V. 30. P. 1577.

53(048)

НАУЧНАЯ СЕССИЯ ОТДЕЛЕНИЯ ОБЩЕЙ ФИЗИКИ
И АСТРОНОМИИ АКАДЕМИИ НАУК СССР
(27 марта 1991 г.)

27 марта 1991 г. в Институте физических проблем АН СССР им. П.Л. Капицы состоялась научная сессия Отделения общей физики и астрономии АН СССР. На сессии были заслушаны доклады: