

УДК 539.143.43

© 1991

ПРИРОДА КРИТИЧЕСКОГО УСКОРЕНИЯ ЯДЕРНОЙ КВАДРУПОЛЬНОЙ СПИН-РЕШЕТОЧНОЙ РЕЛАКСАЦИИ В ОБЛАСТИ ФАЗОВОГО ПЕРЕХОДА В КАЛОМЕЛИ

В. С. Вихнин, А. С. Юрков

Исследована природа аномалий ядерной спин-решеточной релаксации (СРР) вблизи фазового перехода в Hg_2Cl_2 и предложен механизм СРР, позволивший количественно объяснить эксперимент.

В спин-гамильтониане ядер Cl^{35} ($I=3/2$) учитывались статическое квадрупольное расщепление в параупругой фазе, линейное и квадратичное взаимодействие ядерного спина с двухкомпонентным параметром порядка. Линейное взаимодействие ответственно за СРР, вызванную прямыми процессами поглощения или испускания фонона, возможными при учете затухания мягкой моды; квадратичное взаимодействие определяет СРР за счет рамановских процессов. Динамика параметра порядка описывалась в модели недодемпфированной мягкой моды, взаимодействующей с релаксатором (модель спектра флуктуаций с центральным пиком).

Сравнение расчетов с экспериментом позволило получить не только качественное, но и количественное согласие. При этом предполагалось, что аномалии СРР вблизи температуры фазового перехода определяются в основном однофононными процессами.

В [1] наблюдалось критическое ускорение ядерной квадрупольной спин-решеточной релаксации (СРР) в области несобственного сегнетоэластического фазового перехода при $T_c=186$ К в каломели. Каломель является модельным несобственным сегнетоэластиком, где наблюдались рекордно низкие частоты недодемпфированной мягкой моды [2]. В связи с этим представляется важным вопрос о механизме критического ускорения СРР в этой случае.

Является ли здесь достаточным для объяснения эксперимента механизм СРР вследствие рамановского рассеяния мягких фононов [3], либо доминирующим является прямой процесс СРР в условиях затухания мягкой моды и возможного появления центрального пика в спектре флуктуаций параметра порядка?

С учетом спин-решеточного взаимодействия с параметром порядка каломели динамический спин-гамильтониан ядер Cl^{35} ($I=3/2$) представляется в виде

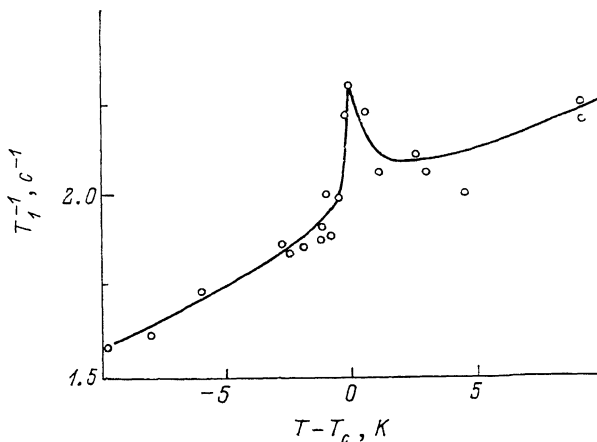
$$H = A(2I_x^2 - I_y^2 - I_z^2) + V_1(\gamma_1^2 + \gamma_2^2)(2I_x^2 - I_y^2 - I_z^2) + V_2[\gamma_1\{I_x, I_x\} + \gamma_2\{I_y, I_z\}] + [V_3(\gamma_1^2 - \gamma_2^2)(I_x^2 - I_y^2) + V_4\gamma_1\gamma_2\{I_x, I_y\}], \quad (1)$$

где первое слагаемое описывает статическое квадрупольное расщепление в параупругой фазе, второе — диагональное по спиновым переменным квадратичное взаимодействие ядерного спина с двухкомпонентным параметром порядка (γ_1, γ_2), третье — линейное недиагональное взаимодействие ядерного спина с параметром порядка, четвертое — недиагональное квадратичное взаимодействие. Второе слагаемое в (1) определяет главным образом эффект сдвига частоты ЯКР при фазовом переходе, который наблюдался в [1], третье — прямые процессы СРР, четвертое — рамановское рассеяние фононов на ядерном спине.

Вблизи температуры фазового перехода процессы рамановского рассеяния мягких фононов на ядерном спине приводят к температурной зависимости скорости продольной СРР в виде кусочно-линейной функции, имеющей излом при $T = T_c$. Такая зависимость не соответствует экспериментальной ситуации в кристалле каломели [1], причем и вклад дефектных полей не позволяет получить качественного согласия с экспериментом.

Для анализа роли прямых процессов поглощения или испускания одного мягкого фонона при переходах в ядерной спин-системе, возможность которых возникает при учете затухания мягких фононов, воспользуемся (1) и флуктуационно-диссипационной теоремой. В результате скорость продольной СРР $1/T_1$, определяемая этими процессами, может быть записана в виде

$$T_1^{-1} = \frac{24kTV_2}{\omega_{\text{NQR}} \hbar^2} \text{Im} \chi(\omega_{\text{NQR}}), \quad (2)$$



Критическое поведение скорости ядерной квадрупольной СРР в каломели. Сплошная линия — теория, точки — эксперимент [1].

$\chi(\omega_{\text{NQR}})$ — восприимчивость системы, обязанная мягкой моде, на частоте ЯКР ω_{NQR} . Таким образом, поведение T_1^{-1} будет определяться характеристиками мягкой моды. Эксперименты по рассеянию нейтронов на каломели [4] показали, что χ_k удовлетворяет модели недодемпфированной мягкой моды с частотой ω_k и затуханием γ , которая взаимодействует с релаксатором, обладающим временем релаксации τ (модель спектра флуктуаций с центральным пиком)

$$\chi_k^{-1} = m [\omega_k^2 - 2i\omega\gamma + \delta^2 - \omega^2 - \delta^2/(1 - i\omega\tau)], \quad (3)$$

δ — параметр взаимодействия мягкой моды с релаксатором, причем $\omega_k^2 = \omega_0^2 + \lambda_1 k_1^2 + \lambda_2 k_2^2 + \lambda_3 k_3^2$, где k отсчитывается от X-точки зоны Бриллюэна, параметры дисперсии $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ определены в [4], а $\omega_0 \rightarrow 0$ при $T \rightarrow T_c$. Воспользуемся этой моделью с целью описания СРР. Подставляя (3) в (2) с учетом $\chi = N^{-1} \sum_k \chi_k$ и переходя в последней сумме к интегрированию по k , находим

$$T_1^{-1} = \frac{6V_2^2 k T \Omega (\tilde{\gamma})^{1/2} [\theta + (\theta + 1)^{1/2}]^{-1/2}}{\omega_{\text{NQR}}^2 \hbar^2 \pi \sqrt{2} m (\lambda_1 \lambda_2 \lambda_3)^{1/2}}, \quad (4)$$

$$\theta = (\bar{\omega}^2 - \omega_{\text{NQR}}^2) (\omega_{\text{NQR}} \tilde{\gamma})^{-1}, \quad (4a)$$

$$\tilde{\gamma} = \gamma + \tau \delta^2 / [2(1 + \omega_{\text{NQR}}^2 \tau^2)], \quad (4b)$$

$$\bar{\omega}^2 = \omega_0^2 + \delta^2 \omega_{\text{NQR}}^2 \tau^2 (1 + \omega_{\text{NQR}}^2 \tau^2)^{-1}. \quad (4b)$$

Полученное выражение для T_1^{-1} соответствует одновременному вкладу в СРР как затухающей мягкой моды, так и центрального пика в спектре флуктуаций параметра порядка.

Сравнение (4) с экспериментом в предположении, что эффективный параметр затухания $\tilde{\gamma}$, а также сдвиг частоты мягкой моды вследствие взаимодействия с релаксатором не обладают критической температурной зависимостью, позволило получить не только качественное, но и количественное согласие (см. рисунок). При этом критические зависимости $\omega_0(T)$ соответствовали экспериментально определенным в [5, 6] и использовались результаты работы [4] для характеристик дисперсии мягкой моды, ее затухания и взаимодействия с релаксатором. Наблюдаемая на опыте относительно небольшая величина пика T_1^{-1} в точке фазового перехода фактически контролируется величиной τ^{-1} , которую при разумном значении $V_2=10^{-12}$ эрг/см следует полагать равной $\sim 10^9$ с $^{-1}$. Последняя величина не противоречит экспериментам по комбинационному рассеянию света [5] и рассеянию нейтронов [4].

Таким образом, критическое поведение СРР в модельном несобственном сегнетоэластике каломели находит объяснение как результат взаимодействия ядерного спина с флуктуациями параметра порядка, в спектре которых имеет место центральный пик.

Авторы благодарны А. А. Каплянскому и Ю. Ф. Маркову за полезные обсуждения и внимание к работе.

Список литературы

- [1] Kaplyanskii A. A., Popov N. S., Barta C. // Proc. of the XXth Congress AMPERE 1979. P. 383.
- [2] Каплянский А. А., Марков Ю. Ф., Барта Ч. // Изв. АН СССР, сер. физ. 1979. Т. 43. С. 1641—1649.
- [3] Rigamonti A. // Phys. Rev. Lett. 1967. V. 19. P. 436; Bonera G., Borsa F., Rigamonti A. // Phys. Rev. 1970. V. B2. P. 2781.
- [4] Benoit J. P., Hauret G. // J. Phys. (Paris). 1982 V. 43. P. 641—649.
- [5] Войко М. Е., Вихнин В. С., Задохин Б. С., Марков Ю. Ф., Юрков А. С. // Тез. докл. Всес. школы-семинара по физике сегнетоэластиков. Ужгород, 1991.
- [6] Kaplyanskii A. A., Limonov M. F., Markov Yu. F. // Indian J. of Pure and Applied Physics. 1988. V. 26. P. 252.

Физико-технический институт
им. А. Ф. Иоффе АН СССР
Санкт-Петербург

Поступило в Редакцию
21 июня 1991 г.