

ЧИСТО ЯДЕРНАЯ ДИФРАКЦИЯ МЕССБАУЭРОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В КРИТИЧЕСКОЙ ОБЛАСТИ ВБЛИЗИ ТОЧКИ НЕЕЛЯ

Г.В.Смирнов, М.В.Зеленухин, У. ван Бюрк¹⁾

Мессбауэровские спектры чисто ядерной дифракции резонансного гамма-излучения ^{57}Fe в кристалле $^{57}\text{FeVO}_3$ исследованы в окрестности фазового перехода кристалла из антиферромагнитного в парамагнитное состояние. Продемонстрирована чувствительность спектров к зарождению антиферромагнитного упорядочения атомных моментов в критической области перехода.

¹⁾ Технический Университет г. Мюнхен, ФРГ.

В последнее время интерес к исследованию критических динамических явлений в магнетиках при фазовых переходах второго рода значительно возрос. Это вызвано прежде всего успехами теории, которой удалось существенно продвинуться в понимании критической динамики магнетиков ^{1,2}, а также дальнейшим развитием экспериментальных методов ³⁻⁸.

В настоящей работе предлагается осуществить новый в методическом отношении подход к изучению магнитных критических явлений в кристаллах, основанный на явлении чисто ядерной дифракции мессбауэровских лучей. Этот вид дифракции обладает повышенной чувствительностью к наличию структурного упорядочения внутрикристаллических полей. Рассмотрим этот вопрос подробнее.

Решающую роль в формировании картины дифракции излучения в кристалле играют фазовые соотношения волн, рассеянных на атомных узлах кристаллической решетки. Фазовые соотношения волн определяются как геометрическими факторами, задаваемыми атомной структурой кристалла, так и природой процесса рассеяния. В случае мессбауэровских лучей рассеяние на атоме носит комплексный характер и складывается из двух когерентных процессов: резонансного рассеяния на ядрах мессбауэровского изотопа и потенциального рассеяния на электронах. Интерференция двух названных процессов, в каждом из которых выполняются свои фазовые соотношения, приводит к довольно сложной картине дифракции излучения в кристалле.

Важной для изучаемого вопроса особенностью ядерного резонансного рассеяния оказывается сильная зависимость фазы волны, рассеянной на ядре, от ориентации ядерного спина по отношению к волновым векторам. Ориентация спина, благодаря магнитному сверхтонкому взаимодействию, связана с направлением магнитного момента атома. Что касается электронного рассеяния мессбауэровских лучей, то подобной зависимости там нет. В силу указанных обстоятельств ядерное резонансное рассеяние и только оно оказывается чувствительным к наличию структурного упорядочения магнитных полей в кристалле. В тех случаях, когда атомная структура кристалла не совпадает с его магнитной структурой в дифракционной картине возникают пики интенсивности, которые формируются только за счет дифракции излучения на ядерной решетке кристалла. Угловое положение и интенсивность этих чисто ядерных рефлексов отражает симметрию упорядочения магнитных внутрикристаллических полей. Именно чисто ядерные рефлексy и представляют интерес для исследования фазовых переходов. Дифракция мессбауэровских лучей на ядерной решетке кристалла впервые наблюдалась в антиферромагнитном кристалле гематита ⁹.

Эффективность применения предлагаемого метода в исследованиях магнитного критического состояния антиферромагнетика основывается на том факте, что само существование мессбауэровских спектров при чисто ядерной дифракции обусловлено антиферромагнитным упорядочением спинов в кристаллической решетке. Вблизи точки Нееля при подходе к парамагнитной области дифракционный сигнал гаснет, и это непосредственно свидетельствует о разрушении антиферромагнетизма в кристалле. Подобное поведение спектра дифракции качественно отличается от поведения спектров в традиционных мессбауэровских экспериментах на прохождении, где присутствие остаточного магнетизма выражается лишь в небольшом уширении резонансных линий. Ввиду сказанного следует ожидать, что с помощью чисто ядерной дифракции удастся провести исследования в непосредственной окрестности T_N , и что применение предлагаемого метода для изучения фазовых переходов даст дополнительные сведения о природе магнитного критического состояния кристалла.

Первый эксперимент в этом направлении был нами проведен с антиферромагнитным кристаллом FeVO_3 . Точка Нееля в этом кристалле всего на 50° превышает комнатную температуру. Используемый для измерений образец был выращен в Физическом Институте Чехословацкой Академии Наук ¹⁰ из материала, обогащенного мессбауэровским изотопом ^{57}Fe до 95%. Он представлял собой монокристаллическую пластинку с линейными размерами $8 \times 6 \times 0,1 \text{ мм}^3$. Образец помещался в камеру для нагрева, которая была смонтирована на

гонометрическом устройстве. Температура на образце могла меняться в диапазоне от 300 К до 500 К, при этом стабильность ее поддержания была не хуже 0,01 К, разброс температуры на образце не превышал 0,1 К. Конструкция камеры позволяла накладывать на образец магнитное поле величиной до нескольких сотен гаусс. Изучалось температурное поведение мессбауэровских спектров дифракционного чисто ядерного рассеяния лучей от системы плоскостей (1 1 1) бората железа в третьем порядке отражения. Указанные плоскости параллельны поверхности кристалла.

На рис. 1 представлены спектры, измеренные при различных температурах в окрестности T_N в магнитном поле 100 Гс. Хорошо видно, как при повышении температуры происходило схлопывание спектра и одновременно исчезновение дифракционной картины. Данные эксперимента в температурном диапазоне $T < T_N$ хорошо описываются теорией при значении $T_N = 348,35$ К и статического критического индекса $\beta = 0,37$, что согласуется с величинами, полученными в работе ¹¹.

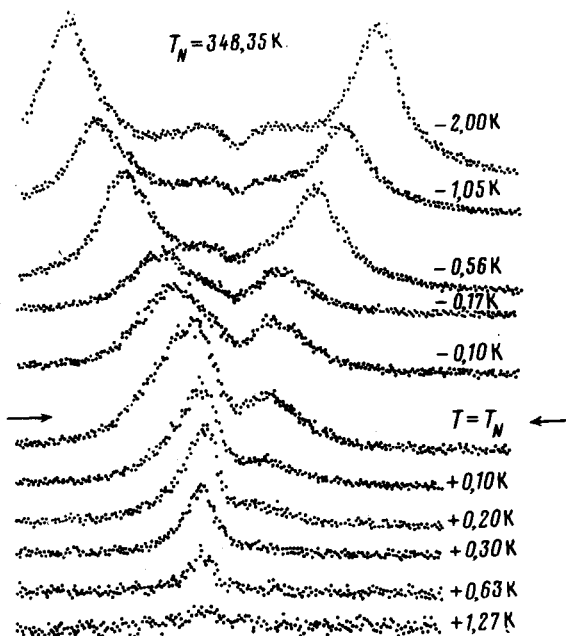


Рис. 1

Рис. 1. Мессбауэровские спектры чисто ядерной дифракции резонансного гамма излучения ^{57}Fe в монокристалле $^{57}\text{FeBO}_3$ — брэгтовское отражение (333). К кристаллу приложено внешнее магнитное поле около 100 Гс. Температура меняется в окрестности перехода из антиферромагнитного в парамагнитное состояние

Рис. 2. Индуцирование спектров чисто ядерной дифракции резонансных гамма лучей под действием приложенного к кристаллу магнитного поля

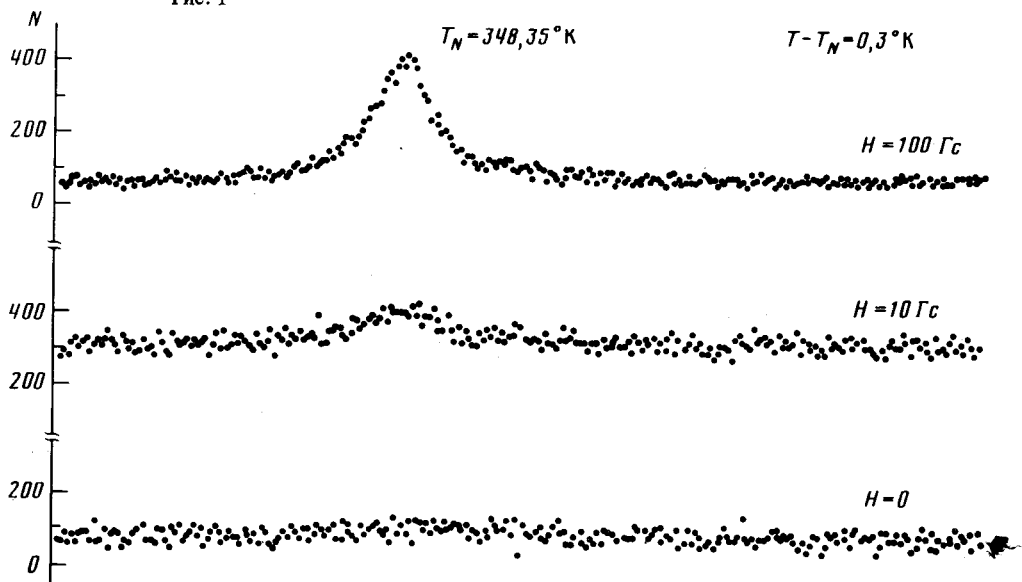


Рис. 2

Наибольший интерес представляют результаты измерений выше T_N . Здесь в присутствии поля были получены необычные мессбауэровские спектры, которые, имея чисто магнитную природу, состоят всего лишь из одной линии. Причем ее полная ширина равна $\Gamma_s + \Gamma_n$ (где Γ_s — ширина линии источника, Γ_n — естественная ширина ядерного уровня), то есть, в кристалле ширина резонанса в этих условиях была близка к естественной ширине ядерного уровня. Наблюдение дифракции на ядерной решетке кристалла выше T_N , в силу рассмотренных особенностей этого явления, может быть объяснено только наличием в кристалле антиферромагнитного упорядочения спинов. Оно действительно должно иметь место благодаря взаимодействию Дзялошинского — это так называемый эффект индуцированного магнитным полем антиферромагнетизма, предсказанный в ¹² и экспериментально подтвержденный в ^{13,14}. Средняя величина магнитного поля на ядре при этом столь мала, что магнитное сверхтонкое расщепление ядерных уровней оказывается скрытым в пределах естественной ширины уровня первого возбужденного состояния ядра.

Нужно отметить, что восстановление полем антиферромагнитного порядка в парамагнитной области температур наблюдалось нами при снижении внешнего магнитного поля вплоть до 10 Гс! (рис. 2). Наблюдать подобные эффекты в эксперименте на прохождение было бы чрезвычайно трудно, поскольку соответствующее уширение резонансной линии составляло бы менее чем десятую долю процента. Это обстоятельство убедительно демонстрирует чувствительность выбранного метода к зарождению магнитного упорядочения в кристалле в критической области температур.

Отметим интересную возможность применения полученного результата для фильтрации мессбауэровского синхротронного излучения (СИ). Метод чисто ядерной дифракции является наиболее эффективным при решении задачи выделения узкой полосы резонансного излучения из сплошного спектра СИ ¹⁵. Но до настоящего времени считалось, что этим методом возможно выделить лишь сложный спектр, содержащий несколько уширенных линий. Подобный спектр был впервые получен в ¹⁶. Проведенные нами исследования показывают, что использование ядерной дифракции при температуре выше T_N позволят создать мессбауэровский источник на основе СИ, излучающий одиночную линию с шириной близкой к естественной ширине ядерного уровня.

Литература

1. Hohenberg P.C., Halperin B.I. Rev. Mod. Phys., 1977, 49, 435.
2. Mazenko G.F., Valls O.T. Phys. Rev., B, 1981, 24, 1419.
3. Hohenemser C., Suter R.M., Chow L., Kobeissi M.A., Dunlap R., Gottlieb A.M. Hyperfine Interaction, 1981, 10, 887.
4. Kobeissi M.A. Phys. Rev. B, 1981, 24, 2380.
5. Hohenemser C., Chow L., Suter R.M. Phys. Rev. B, 1982, 26, 5056.
6. Mezei F. Phys. Rev. Lett., 1982, 49, 1096.
7. Keller H., Savic I.M. Phys. Rev. B, 1983, 28, 2638.
8. Sliyka J., Keller H., Kündig W., Wanklyn B.M. Phys. Rev. B, 1984, 30, 3649.
9. Смирнов Г.В., Скляревский В.В., Восканян Р.А., Артемьев А.Н. Письма в ЖЭТФ, 1969, 9, 123.
10. Kotrbova M., Kadeckova S., Novak J., Bradler J., Smirnov G.V., Shvydko Yu. V. J. Cryst. Growth., 1985, 71, 607.
11. Eibschütz M. et al. J. Appl. Phys., 1970, 41, 1276.
12. Боровик-Романов А.С., Ожогин В.И. ЖЭТФ, 1960, 43, 2042.
13. Прокурова Л.А. ЖЭТФ, 1969, 57, 1966.
14. Yakimov S.S., Ozhogin V.I., Gamlitskii V. Ya., Cherepanov V.M., Pudkov S.D. Phys. Lett., 1972, 39A, 421.
15. Чечин А.И., Андропова Н.В., Зеленухин М.В., Артемьев А.Н., Степанов Е.П. Письма в ЖЭТФ, 1983, 37, 531.
16. Gerdau E., Ruffer R., Winkler H., Tolksdorf W., Klages C.P., Hannon J.P. Phys. Rev. Lett., 1985, 54, 835.

Поступила в редакцию

27 декабря 1985 г.

21 февраля 1986 г.