

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВРЕМЕННОГО ХОДА РАСПАДА БРЭГГОВСКИХ МОД КОЛЛЕКТИВНЫХ ЯДЕРНЫХ ВОЗБУЖДЕНИЙ В КРИСТАЛЛЕ

Г.В.Смирнов, Ю.В.Швыдько

В работе впервые проводится экспериментальное исследование временного хода отклика коллективных ядерных состояний в кристалле при селективном их возбуждении коллимированным пучком γ -квантов в окрестности брэгговского угла. Наблюдено сокращение \approx в 6 раз характерного времени отклика ядерных возбуждений в точном положении брэгговского угла по сравнению с продолжительностью отклика изолированного ядра.

В работе ¹ экспериментально показано, что ядерные возбужденные состояния, образующиеся в кристалле в условиях резонансной дифракции γ -лучей, распадаются быстрее, чем при

некогерентном рассеянии. Явление ускоренного распада брэгговских мод коллективных ядерных возбуждений было предсказано в ^{2, 3} и подробно теоретически исследовано в ⁴. Указание на наличие эффекта содержалось в эксперименте ⁵.

В работе ¹ эксперимент выполнялся в условиях возбуждения ядер широко расходящимся пучком γ -квантов, так что возбуждались практически все брэгговские моды коллективных ядерных состояний, имеющие каждая свою временную характеристику. Поэтому наблюдался усредненный эффект ускоренного распада. В настоящей работе впервые ставится задача изучить сам процесс ускорения, т. е. получить временную характеристику распада, как функцию угла падения γ -кванта на кристалл в окрестности брэгговского угла. Для этой цели необходимо было осуществить избирательное возбуждение различных брэгговских мод и измерить временной ход их распада. Основные результаты работы сообщались в ⁶.

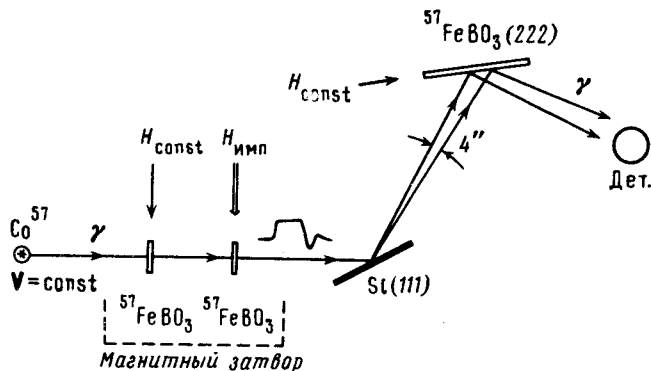


Рис. 1. Оптическая схема эксперимента в двухкристальной геометрии когерентного рассеяния $\text{Si}(111) \times {}^{57}\text{FeBO}_3(222)$

На рис. 1 показана оптическая схема эксперимента. Мессбауэровское излучение 14,4 кэВ ядер ${}^{57}\text{Fe}$ (источник ${}^{57}\text{Co}(\text{Cr})$ активностью 10^{10} Бк, ширина линии источника $\Gamma_s = 2,5 \Gamma_n$, Γ_n — естественная ширина уровня 14,4 кэВ) коллимировалось до расходимости $4''$ путем брэгговского отражения от кристалла $\text{Si}(111)$. Коллимированное излучение направлялось на исследуемый кристалл ${}^{57}\text{FeBO}_3$ (обогащенный по изотопу ${}^{57}\text{Fe}$ до 95%). Кристалл был практически идеален и имел только небольшой изгиб — $2''$ на длине 10 мм. Рентгеновская топограмма кристалла приводилась в ^{7, 8}. Кристалл ${}^{57}\text{FeBO}_3$ ориентировался по отношению к коллимированному пучку γ -квантов под углами близкими к брэгговскому углу $\theta_B = 10,2^\circ$, который соответствует ядерному брэгговскому отражению (222) ^{9, 1}. Излучение мессбауэровского источника было настроено на резонанс $\Delta m = 0$ в ${}^{57}\text{FeBO}_3$. Кристалл находился в однодоменном состоянии под действием постоянного магнитного поля, лежащего в плоскости кристалла и в плоскости рассеяния. В этих условиях с резонансом взаимодействовала только π -поляризованная компонента γ -излучения. Когерентно рассеянное γ -излучение регистрировалось сцинтилляционным детектором $\text{NaI}(\text{Tl})$. Сигнал с детектора поступал в спектрометрический тракт ^{10, 1}, который обеспечивал измерение временной зависимости дифракции мессбауэровского излучения. Временное разрешение системы составляло 6 нс.

Для задания начала отсчета времени использовался магнитный резонансный затвор с кристаллами ${}^{57}\text{FeBO}_3$ в качестве активных элементов ^{10, 1}. Он обеспечивал резкое открытие пучка γ -квантов за время ≤ 10 нс. Через 720 нс затвор закрывался — рис. 2, а.

Временные зависимости когерентного ядерного рассеяния измерялись в интервале углов $\pm 10''$ в окрестности θ_B . Был получен двумерный массив данных $I(\tau, \theta - \theta_B)$, представляющий собой интенсивность когерентного резонансного рассеяния γ -квантов, как функцию двух параметров: $\theta - \theta_B$ — относительного угла падения квантов на кристалл и τ — задержки во времени вылета γ -кванта из кристалла по отношению к моменту прихода фронта возбуждающего импульса.

Кроме зависимостей когерентного рассеяния γ -квантов нами были выполнены измерения временного хода некогерентного рассеяния, которое должно было характеризовать распад одиночного ядра для сравнения с распадом коллективного возбужденного состояния. С этой

целью измерялась временная зависимость вылета электронов конверсии. Малая эффективная глубина выхода 7,3 кэВ электронов (1000 Å) практически исключала искажение временного хода резонансного рассеяния квантов на изолированных ядрах. Искажение могло бы иметь место, если бы электроны несли информацию из рассеивающего слоя большой толщины ($\gg 3000 \text{ \AA}$), в котором спектр падающих γ -квантов уже заметно деформируется из-за резонансного поглощения.

Для регистрации электронов, выходящих на поверхность мишени — поликристаллической пластинки ^{57}Fe , использовался газоразрядный лавинный счетчик ¹¹. Мишень в нем служила анодом. Временное разрешение счетчика было существенно лучше 6 нс. В процессе этих измерений счетчик устанавливался на пучок γ -квантов после магнитного резонансного затвора.

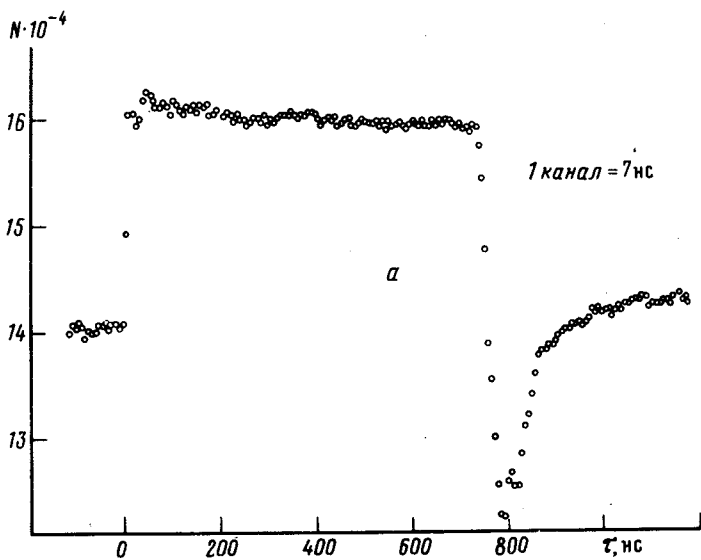
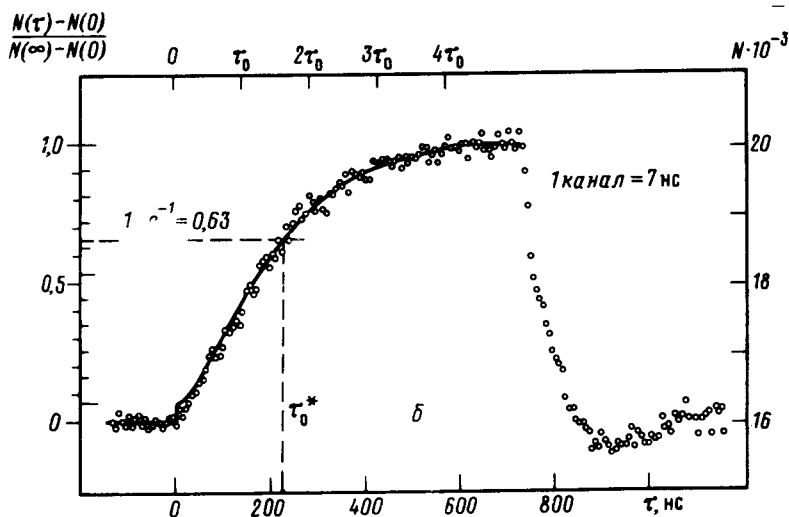


Рис. 2. а — Зависимость интенсивности мессбауэровского излучения от времени после прохождения через магнитный резонансный затвор (γ -импульс), б — временной ход выхода электронов из поликристаллического ^{57}Fe . Возбуждался переход $\Delta m = 0$. Сплошная линия — расчет по теории



На рис. 2, б показан временной ход рассеяния, измеренный по выходу электронов. Сплошная линия на рис. 2, б — расчет по теории. Временной ход резонансного рассеяния вычислялся на основе общего метода функций отклика, предложенного в ⁴. Расчет также учитывал то, что в эксперименте счетчик регистрировал не только конверсионные электроны, но и небольшое количество фотоэлектронов, отклик которых на возбуждение происходит практически мгновенно. Доля фотоэлектронов составляла 7%.

Характерное время отклика ядра — τ_0^* на возбуждение прямоугольным импульсом со спектральной шириной $\Gamma_s = 2,5 \Gamma_n$ составило $\tau_0^* = 230 \pm 10 \text{ нс}$. Во избежание путаницы

отметим, что отличие τ_0^* от хорошо известной величины $\tau_0 = 141,1$ нс, — времени жизни 14,4 кэВ уровня ^{57}Fe , вполне закономерно. Равенство $\tau_0^* = \tau_0$ должно достигаться только при $\Gamma_s \rightarrow \infty$, т. е. при возбуждении ядра белым спектром.

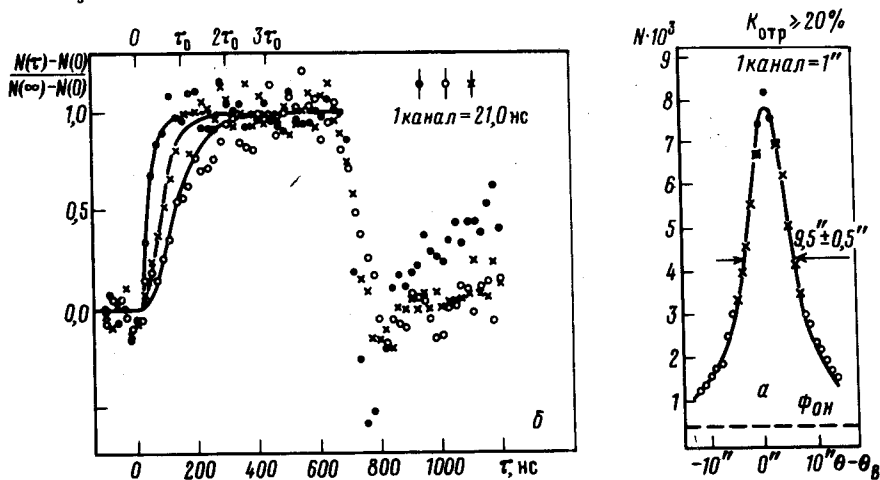
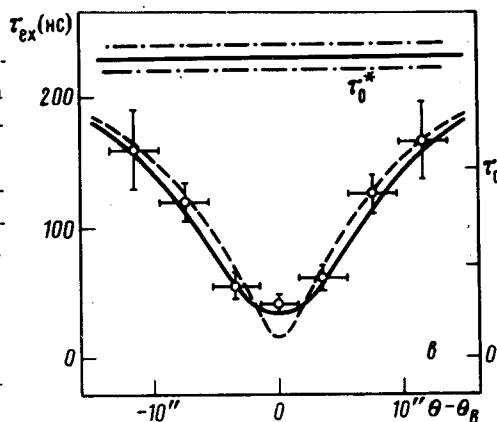


Рис. 3. а — Интенсивность брэгговского ядерного отражения резонансных γ -лучей от плоскостей (222) кристалла $^{57}\text{FeVO}_3$ в зависимости от угла падения квантов (для перехода $\Delta t = 0$), б — зависимость от времени когерентного ядерного рассеяния в окрестности брэгговского угла: крылья — \circ , склоны — \times , вершина — \bullet брэгговского максимума; в — зависимость времени отклика ядерной системы τ_{ex}^* в $^{57}\text{FeVO}_3$ (222) от угла падения γ -квантов. Сплошные линии на рисунках — расчет по теории. Пунктиром на рис. 3, в проведена зависимость $\tau_{ex}^*(\theta - \theta_B)$, рассчитанная для нерасходящегося γ -излучения



Обратимся теперь к результатам основных измерений. Из двумерного массива экспериментальных данных $I(\tau, \theta - \theta_B)$ можно извлечь как угловые так и временные характеристики рассеяния, осуществляя интегрирование по различным интервалам времени и углов. На рис. 3, а показана угловая зависимость интенсивности когерентного резонансного рассеяния γ -излучения на кристалле $^{57}\text{FeVO}_3$. График получен суммированием $I(\tau, \theta - \theta_B)$ по временному интервалу $200 \text{ нс} \leq \tau \leq 700 \text{ нс}$. Полуширина угловой кривой — $9,5'' \pm 0,5''$ хорошо согласуется с расчетами по теории ^{4, 12} — сплошная линия. Для иллюстрации временного хода когерентного рассеяния при возбуждении отдельных групп брэгговских мод было выбрано три угловых интервала — первый, шириной $7''$, вдали от угла брэгга (симметрично справа и слева), второй шириной $4''$, на склонах угловой кривой и третий — шириной $3''$, в непосредственной окрестности брэгговского угла. На рис. 3, б показаны соответствующие выделенным угловым интервалам временные зависимости когерентного рассеяния. Сплошные линии на рис. 3, б — численный расчет по теории ⁴. При вычислении временного хода проводилось усреднение по углам падения θ — кванта на кристалл. При этом учитывалась расходимость пучка — $4''$ и изгиб кристалла — $2''$.

На рис. 3, в показана зависимость времени когерентного отклика ядерной системы в кристалле — τ_{ex}^* как функция относительного угла падения γ -излучения на кристалл. Эта функция как раз является характеристикой процесса ускорения. Из рис. 3, в видно, что

даже вдаль от брэгговского угла — на расстоянии $11''$, когда интенсивность когерентного рассеяния уже заметно упала, характерное время отклика ядерной системы, равное 170 ± 30 нс, меньше времени отклика изолированного ядра ($\tau_0^* = 230 \pm 10$ нс), хотя и приближается к нему. При подходе к брэгговскому положению характерное время отклика резко падает и в непосредственной окрестности брэгговского угла достигает величины 40 ± 10 нс. Несмотря на ограниченное эффективное угловое разрешение эксперимента ($4'' + 2''$), время отклика ядерной системы оказалось приблизительно в 6 раз короче, чем у изолированного ядра. Исходя из сказанного можно сделать вывод, что и время распада коллективного ядерного состояния сокращается по мере приближения к брэгговскому углу. На это явно указывает и временной ход когерентного рассеяния после резкого прерывания затвором γ -пучка в момент $\tau = 720$ нс (рис. 3, б)¹⁾.

Анализ двумерной зависимости $I(\tau, \theta - \theta_B)$ показывает также, что сокращение продолжительности коллективного отклика ядерной системы (рис. 3, б, в) сопровождается одновременно резким ростом максимальной интенсивности отклика (рис. 3, а). Такая взаимосвязь раскрывает физическую причину эффекта ускорения, которая, очевидно, обусловлена усилением упругого когерентного канала в процессе рассеяния.

В заключение авторы выражают благодарность К.П.Алешину, М.А.Волкову, А.С.Субботину, И.Б.Филиппову, оказавшим большую техническую помощь; Ю.В.Петрикину за предоставление газоразрядного лавинного счетчика электронов; А.И.Чумакову, М.В.Зелепухину, С.Л.Попову за ценные советы и постоянный интерес к работе. Авторы выражают свою признательность Ю.М.Кагану за полезное обсуждение результатов работы и постоянную поддержку.

Литература

1. Смирнов Г.В., Швыдыко Ю.В., Реало Э. Письма в ЖЭТФ, 1984, 39, 33.
2. Trammell G. T. Chem. Effects of Nucl. Transf. IAEA, Viena, 1961, p. 75.
3. Афанасьев А.М., Каган Ю. Письма в ЖЭТФ, 1965, 2, 130.
4. Kagan Yu., Afanas'ev A. M., Kohn V. G. J. Phys. C, 1979, 12, 615.
5. Чечин А.И., Андропова Н.А., Зелепухин М.В., Артемьев А.Н., Степанов Е.П. Письма в ЖЭТФ, 1983, 37, 531.
6. Смирнов Г.В., Швыдыко Ю.В. Труды III Всесоюзного совещания по когерентному взаимодей. излуч. с веществом. Ужгород, 1985, стр. 178.
7. Kotrbova M., Kadeckova S., Novak J., Bradler J., Smirnov G. V., Shvyd'ko Yu. V. J. Cryst. Growth 1985, 71, 607.
8. Smirnov G. V., Shvyd'ko Yu. V., van Bürck U., Mössbauer R.L. Phys. Stat. Sol. (b), 1986, 134, 465.
9. van Bürck U., Smirnov G. V., Mössbauer R.L., Maurus H.J., Semioschkina N.A. J. Phys. C, 1980, 13, 4511.
10. Смирнов Г.В., Швыдыко Ю.В., Колотов О.С., Погожев В.А., Котрбова М., Кадечкова С., Новак Й. ЖЭТФ, 1984, 86, 1495.
11. Петрикин Ю.В., Алексеев В.Н., Бычков В.А. и др. Заводская лаборатория, 1983, №11, 46.
12. Каган Ю., Афанасьев А.М., Перстнев И.П. ЖЭТФ, 1968, 54, 1530.
13. van Bürck U., Mössbauer R.L., Gerdau E., Rüffer R., Hollatz R., Smirnov G. V., Hannon J. Phys. Rev. Lett., 1986, 57.

Институт атомной энергии
им. И.В.Курчатова

Поступила в редакцию
29 сентября 1986 г.

¹⁾ Вскоре после окончания описанного эксперимента, на синхротронном источнике ДОРИС был измерен временной ход распада коллективного ядерного возбуждения, создававшегося в кристалле $^{57}\text{FeO}_3$ окрестности угла Брэгга импульсами синхротронного излучения¹³. В точном положении брэгговского угла период полураспада возбужденного состояния оказался равным 12 нс, а на полувывоте брэгговского пика — 18 нс.