

**ОБНАРУЖЕНИЕ ЭФФЕКТА
УСКОРЕНИЯ РАСПАДА ЯДЕРНОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ В КРИСТАЛЛЕ
ПРИ РЕЗОНАНСНОМ РАССЕЙАНИИ ГАММА-КВАНТОВ**

Г.В.Смирнов, Ю.В.Швыдько, Э.Реало¹⁾

Проведены исследования временного хода когерентного рассеяния резонансных γ -квантов на ядрах в кристалле. Впервые удалось наблюдать ускорение распада возбужденного состояния ядер в направлении брэгговского угла.

¹⁾ Институт физики Академии наук Эстонской ССР.

Продолжительность резонансного взаимодействия γ -кванта с ядром определяется временем жизни возбужденного состояния, которое образуется после его захвата. Это время очень велико для низколежащих изомерных состояний, характерных для мессбауэровских переходов. При взаимодействии γ -кванта с системой резонансных ядер, образующих кристалл естественным кажется представление о независимом характере распада отдельного возбужденного ядра, тем более, что отдельные ядра практически не взаимодействуют между собой.

Вместе с тем, еще в начале 60-х годов высказывались соображения в пользу того, что при определенных обстоятельствах можно ожидать взаимного влияния ядерных осцилляторов в процессе излучения, приводящего к изменению характеристик распада возбужденного состояния ¹.

Последовательно эта проблема впервые рассмотрена в работах Кагана и Афанасьева ², где было введено представление о коллективном делокализованном возбуждении в системе идентичных ядер в кристалле (ядерный экситон) и показано, что распад коллективного возбуждения с сохранением когерентности происходит только в направлении первичного γ -кванта и под углом Брэгга. Из полученных авторами выражений для вероятности прямо следует вывод о существенном ускорении в распаде по когерентным каналам и вытекает заключение о возможности наблюдения этого явления в экспериментах по рассеянию. В дальнейшем теория временного запаздывания γ -квантов при резонансном брэгговском рассеянии была развита в работе ³.

Важно отметить, что ускорение распада можно наблюдать только по когерентному упругому каналу, поскольку в других случаях — рассеяние с опрокидыванием спина, рождение конверсионного электрона и т.д., всегда имеется указание на конкретное ядро, претерпевшее распад, т.е. теряется коллективный характер взаимодействия и, очевидно, реализуются черты распада индивидуального ядра.

Уже длительное время сохранялся большой интерес к этой проблеме, однако, попытки наблюдать предсказываемое теорией явление до последнего времени успехом не увенчались.

Для исследования ускоренного распада необходимо выделить момент времени, который определенным образом задает начало или конец возбуждения ядер в рассеивающем кристалле, и исследовать временной ход последующего излучения квантов.

В принципе, такую возможность дает известный метод запаздывающих совпадений, который уже применялся в экспериментах по исследованию временного хода некогерентного рассеяния в поликристаллах (см. например, ^{4,5}). Однако, ограничение метода по активности источника (не более 10^6 Бк из-за опасности ложных совпадений) не допускает его применения в условиях жесткой коллимации γ -пучка.

Другая возможность связана с использованием импульсного синхротронного излучения. Но на этом пути стоит чрезвычайно трудная задача фильтрации из белого спектра мессбауэровской компоненты, относительное содержание которой там $\sim 10^{-14}$. Недавно были опубликованы первые результаты экспериментов Чечина и др. ⁶ по когерентному импульсному возбуждению ядер Fe^{57} синхротронным излучением.

В настоящей работе реализован способ, в котором осуществлено быстрое открывание пучка мессбауэровских квантов с помощью затвора и таким образом выделен момент прихода резонансного излучения в рассеивающую систему ядер. Понятно, что в таком способе точность фиксации нулевой отметки времени определяется длительностью нарастания интенсивности γ -пучка — τ_{ϕ} , т.е. скоростными свойствами используемого затвора. К последнему предъявляются исключительно высокие требования. Длительность фронта τ_{ϕ} должна быть много меньше времени жизни возбужденного состояния ядра — τ_0 (для ядра Fe^{57} $\tau_0 = 142$ нс). Нам удалось решить проблему затвора, используя обнаруженные ранее свойства быстрого перемагничивания кристаллов $FeVO_3$ ⁷. Как выяснилось, достаточно совершенные кристаллы бората железа способны менять состояние намагниченности за время

$2 \div 5$ нс в импульсных магнитных полях ~ 5 Э. Применение этих кристаллов в специально разработанном затворе, подробное описание которого содержится в ⁸, позволило нам получить импульсы γ -излучения близкие по форме к прямоугольникам с длительностью фронта $\tau_{\phi} \leq 15$ нс. Существенным преимуществом примененного метода является возможность использования мессбауэровских источников любой достижимой активности, что является необходимым требованием экспериментов по дифракции, обладающих малой светосилой.

С помощью созданного затвора были проведены впервые исследования временного хода когерентного рассеяния мессбауэровских лучей. Использовалось излучение ядер Fe^{57} и идеальный кристалл $Fe^{57}VO_3$ в качестве рассеивающего объекта.

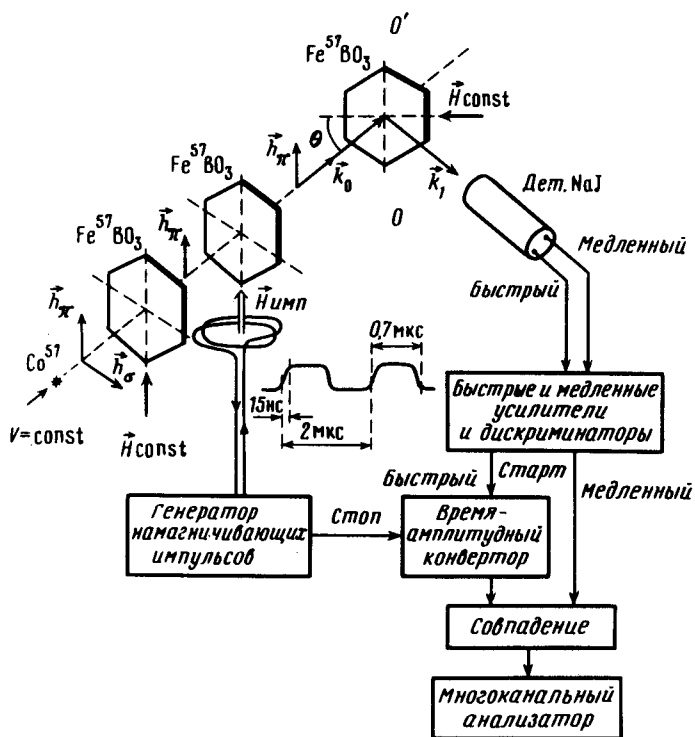


Рис. 1. Схема эксперимента

На рис. 1 представлены основные элементы экспериментальной схемы: мессбауэровский источник Co^{57} в хrome; узел затвора γ -излучения, включающий в себя два кристалла $Fe^{57}VO_3$, намагничивающее устройство в виде катушек Гельмгольца и генератор импульсов тока; кристалл $Fe^{57}VO_3$, на котором изучалось рассеяние; детектор и блоки временного спектрометрического тракта ⁹.

Мессбауэровский спектр железа-57 в кристалле $Fe^{57}VO_3$ состоит из шести линий магнитного сверхтонкого расщепления. Все описанные здесь эксперименты выполнялись при настройке линии источника на резонансный ядерный переход $+1/2 \rightarrow +1/2$ в кристалле.

Геометрия эксперимента определялась направлением волновых векторов k_0 — падающего и k_1 — рассеянного пучков, задававшими плоскость рассеяния, а также осью гониометра OO^1 , перпендикулярной плоскости рассеяния. На ней устанавливался исследуемый кристалл бора-железа.

Слабоферромагнитные кристаллы $Fe^{57}VO_3$ представляли собой тонкие монокристаллические пластинки, на поверхность которых выходила плоскость (111) — плоскость легкого намагничивания. Первые два кристалла имели толщину 22 ± 2 мкм каждый, а третий — 150 мкм. Степень обогащения резонансным изотопом Fe^{57} составляла 95%. Все кристаллы обладали высоким кристаллическим совершенством.

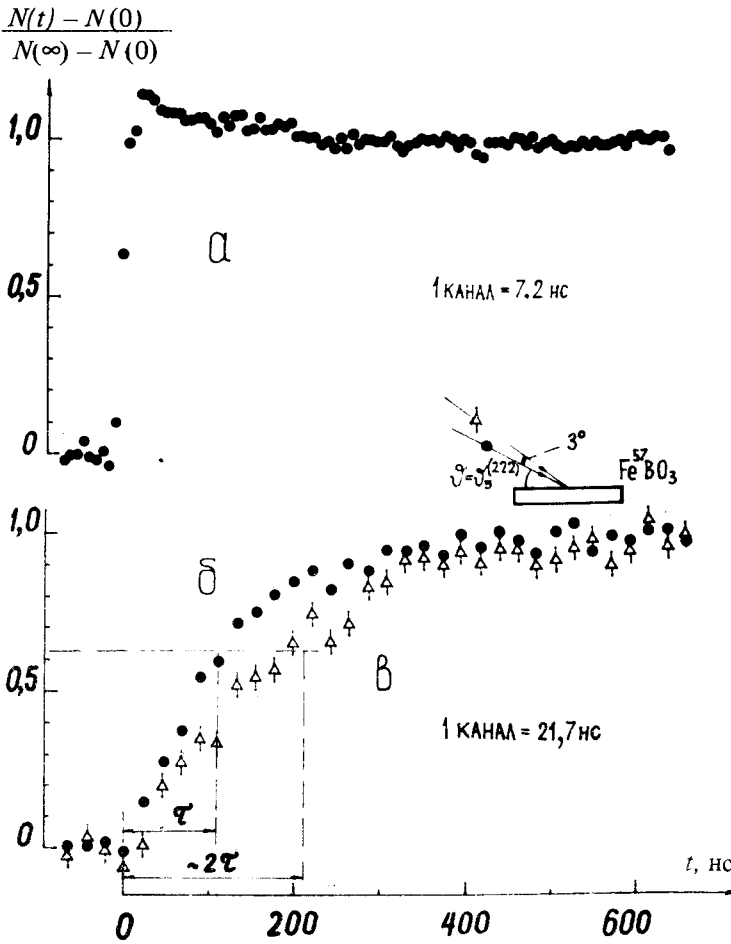


Рис. 2. *а* – Зависимость интенсивности γ -излучения от времени после магнитного резонансного затвора; *б* – временной ход брэгговского рассеяния (черные кружочки); *в* – временной ход некогерентного рассеяния (треугольники)

Кристаллы, входившие в состав затвора, устанавливались перпендикулярно к γ -пучку. Первый кристалл постоянно находился в намагниченном состоянии под действием внешнего поля H_{const} перпендикулярного к (k_0, k_1) . Он служил поляризатором и пропускал в основном π -поляризованную компоненту излучения. Следующий кристалл бората железа, через который проходило излучение, подвергался действию импульсного магнитного поля $H_{имп}$ в направлении, совпадающем с H_{const} . При этом происходил переход кристалла из ненамагниченного – многодоменного состояния (непрозрачного для π -компоненты), в намагниченное – однодоменное состояние, в котором π -компонента могла проходить через кристалл. В процессе таких переходов формировались импульсы π -поляризованной компоненты γ -излучения.

На рис. 2 показана зависимость от времени интенсивности в проходящем γ -пучке – *а*. Цена канала равнялась 7,2 нс. Полученная зависимость имеет вид четко выраженной ступеньки с длительностью фронта $\tau_{\phi} \leq 15$ нс (процесс возврата в исходное состояние здесь не рассматривается). Этой крутизны оказывается вполне достаточно для того, чтобы изучать временной ход интересующих нас процессов ядерного рассеяния.

Третий кристалл, на котором изучалось рассеяние, намагничивался постоянно в плоскости (k_0, k_1) так, что с ядрами в нем могла взаимодействовать только прерываемая π -поляризованная компонента излучения. Для исследования процесса когерентного рассеяния кристалл устанавливался в положение брэгговского ядерного отражения. Использовался наиболее сильный чисто ядерный рефлекс для резонанса $\Delta m = 0$ в кристалле $Fe^{57}BO_3 - (222)$, $\theta_B = 10,26^\circ 10$.

Измеренный временной ход брэгговского рассеяния приведен на рис. 2 — кривая б. Цена точки в этой зависимости составляет 21,7 нс. Как и следовало ожидать, резонансное рассеяние оказалось задержанным по отношению к приходящему фронту γ -излучения, — крутая ступенька трансформировалась в пологий подъем. Но главный вопрос заключается не в этом, а в том каков характер нарастания интенсивности, так как он несет информацию о времени жизни возбужденного состояния ядерной системы.

Для выявления эффекта ускорения в распаде коллективного возбуждения мы провели также измерение временного хода резонансного некогерентного рассеяния. При этом кристалл отворачивался от брэгговского положения на 3° . Когерентное рассеяние при этом положении кристалла отсутствовало и приходившие в детектор γ -кванты были связаны только с некогерентным рассеянием, например, рассеянием с опрокидыванием спина ядра в основном состоянии или возбуждением (поглощением) фонона. Этот вопрос был изучен нами в работе ¹¹. В измерениях временного хода некогерентного рассеяния детектор был приближен к кристаллу на расстояние ~ 4 см, с целью увеличения приемного угла. Средний угол рассеяния γ -квантов в этих измерениях равнялся 90° . Кривая в на рис. 2 представляет результат измерений временного хода небрэгговского рассеяния.

Уже из простого сравнения кривых б и в видно, что брэгговское рассеяние происходит значительно быстрее небрэгговского при рассеянии на той же системе ядер в идеальном кристалле. Одинаковый уровень интенсивности, выбранный, например, на отметке $(1 - e^{-1}) = 0,63$, в условиях сохранения когерентности достигается приблизительно в два раза быстрее чем в условиях некогерентного рассеяния. Таким образом, в полученном результате непосредственно обнаруживается эффект ускорения распада коллективного возбуждения ядер в кристалле при резонансном когерентном рассеянии квантов. Заметим, что существенное различие во времени двух процессов получено даже в условиях недостаточной коллимации падающего пучка (в нашем эксперименте расходимость составляла $\sim 1^{\circ}$), и оно должно быть значительно больше в условиях жесткой коллимации вблизи брэгговского угла.

В заключение авторы выражают благодарность О.С.Колотову, В.А.Погожеву (МГУ им. М.В.Ломоносова) за большой вклад в разработку магнитного резонансного затвора. М.Котрбовой, С.Кадечковой, Й.Новаку (Физический институт ЧСАН, Прага) за притотворение уникальных кристаллов $Fe^{57}VO_3$. К.П.Алешину, М.А.Волкову (ИАЭ им. И.В.Курчатова), Х.Раудсеппу (ИФ АН Эст. ССР) за постоянную техническую помощь.

Авторы очень благодарны также Ю.М.Кагану за большой интерес к работе и ценные замечания при обсуждении результатов.

Литература

1. Trammell G. T. Chemical Effects of Nuclear Transformations, IAEA, Viena, 1961, 1, 75.
2. Афанасьев А.М., Каган Ю. Письма в ЖЭТФ, 1965, 2, 130; Каган Ю., Афанасьев А.М. ЖЭТФ, 1966., 50, 271; Kagan Yu., Afanas'ev A.M. Mössbauer Spectroscopy and its Applications, Proceedings Panel, Viena, 1971, p. 143.
3. Kagan Yu., Afanas'ev A.M., Kohn V.G. J. Phys. C: Sol. State Phys., 1979, 12, 615.
4. Thieberger P., Moragues J.A., Sunyar A.W. Phys. Rev., 1968, 171, 425.
5. Кох Р., Реало Э. Изв. АН Эст. ССР, сер. физ.-мат., 1981, 30, 171.
6. Чечин А.И., Андропова Н.В., Зелепухин М.В., Артемьев А.Н., Степанов Е.П. Письма в ЖЭТФ, 1983, 37, 531.
7. Kolotov O.S., Pogozhev V.A., Telesnin R. V., Smirnov G. V., Shvyd'ko Yu. V., Kadečkova S., Kotrbova M., Novak J. Phys. Stat. Sol. (a), 1982, 72, K197.
8. Смирнов Г.В., Швидько Ю.В., Колотов О.С., Погожев В.А., Котрбова М., Кадечкова С., Новак Й. ЖЭТФ, 1984, 86, вып. 4.
9. Швидько Ю.В., Алешин К.П., Колотов О.С., Погожев В.А., Раудсепп Х., Реало Э., Смирнов Г.В. Препринт ИАЭ 3932/14, 1984.

10. *Van Bürck U., Smirnov G. V., Mössbauer R. L., Maurus H. J., Semioschkina N. A.* J.Phys. C: Sol. State Phys., 1980, 13, 4511.
11. *Смирнов Г.В., Швыдько Ю.В.* Письма в ЖЭТФ, 1982, 35, 409.

Институт атомной энергии
им. И.В.Курчатова

Поступила в редакцию
21 августа 1983 г. ●
После переработки
11 ноября 1983 г.
