

НАБЛЮДЕНИЕ НАПРАВЛЕННОГО ВПЕРЕД УСИЛЕННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ γ -КВАНТОВ ПРИ СПОНТАННОМ РАСПАДЕ ЯДЕР

Ю.В.Швыдько, Г.В.Смирнов, С.Л.Попов, Т.Хертрих ¹⁾

*Институт атомной энергии им. И.В.Курчатова
123182, Москва*

¹⁾*Technical University Munich, Garching, D - 8048, FRG*

Поступила в редакцию 29 ноября 1990 г.

Ядерная мишень, являющаяся практически черным поглотителем для резонансного γ -излучения, становится сильным излучателем γ -квантов в первичном направлении после быстрого прекращения ее облучения. Для обнаружения этого явления использован магнитный резонансный прерыватель пучка γ -квантов, время срабатывания которого много меньше характерного времени спонтанного распада возбужденного ядерного состояния.

Спонтанный распад промежуточного возбужденного состояния, образующегося в реакции рассеяния γ -кванта в макроскопической системе ядер, должен происходить по когерентному каналу, если корреляция фаз ядерных возбуждений, которая возникает при захвате первичного кванта, сохраняется на протяжении времени жизни возбуждения. В этом случае γ -квант испускается вперед ¹ или в направлении брэгговского угла ^{1,2}. При этом значительно увеличивается вероятность излучательного канала распада по сравнению с вероятностью внутренней конверсии. Физическая причина усиления излучательного канала заключена в характере взаимодействия, устанавливающегося между макроскопической системой ядер и ее собственным полем излучения.

Спонтанный распад ядер с испусканием γ -квантов в направлении брэгговского угла наблюдался в работах ³⁻⁴. Что касается направления вперед, то до последнего времени имелась возможность наблюдать распад промежуточного возбужденного состояния лишь в присутствии первичного γ -излучения, возбуждающего ядра. При этом вторичное γ -излучение, рассеянное вперед, могло проявить себя только через интерференцию с первичным излучением ⁵⁻⁸. Процесс излучения вперед в чистом виде, т.е. в условиях спонтанного распада ядер, удалось наблюдать только недавно, благодаря использованию коротких возбуждающих импульсов синхротронного излучения ⁹.

В настоящей работе сообщается о наблюдении направленного вперед переизлучения γ -квантов при спонтанном распаде ядер, возбужденных мессбауэровским излучением. Для обнаружения этого явления использовался

магнитный резонансный прерыватель пучка γ -квантов, время срабатывания которого было много меньше характерного времени распада возбужденного ядерного состояния. Эксперимент был поставлен таким образом, чтобы имелась возможность не только наблюдать спонтанное излучение вперед, но и выявить усиление излучательного канала распада, - в данном случае оценить интенсивность переизлученных вперед γ -квантов по отношению к интенсивности возбуждавшего ядра γ -излучения.

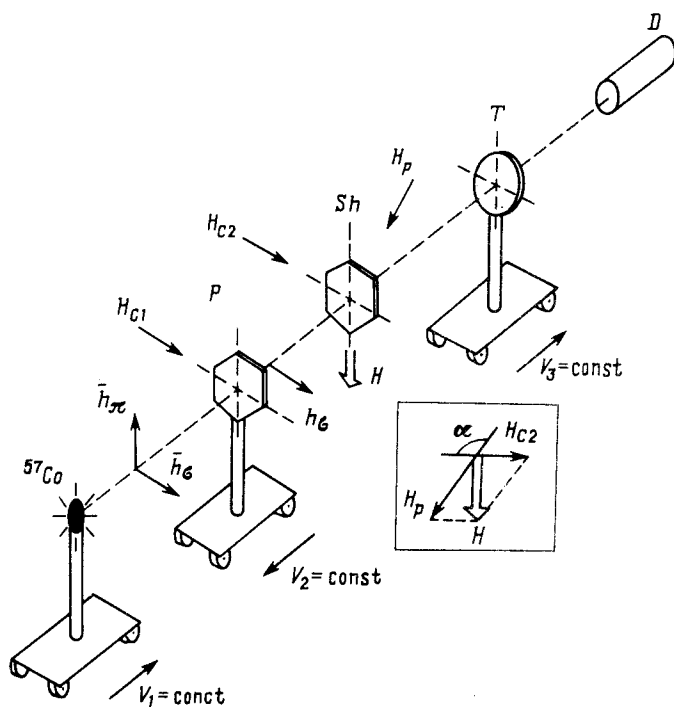


Рис. 1. Схема эксперимента. Источник 14,4 кэВ мессбауэровских γ -квантов - $^{57}\text{Co}(\text{Cr})$, P - поляризатор излучения ($^{57}\text{FeBO}_3$), Sh - прерыватель излучения ($^{57}\text{FeBO}_3$), T - ядерно-резонансная мишень ($\text{K}_2\text{Mg}[^{57}\text{Fe}(\text{CN})_6]10\text{H}_2\text{O}$) и D - детектор γ -излучения (NaI)

На рис. 1 приведена схема эксперимента. На оптической оси располагались в порядке следования: источник 14,4 кэВ мессбауэровских γ -квантов - $^{57}\text{Co}(\text{Cr})$, P - поляризатор излучения (кристалл $^{57}\text{FeBO}_3$), Sh - прерыватель излучения (также кристалл $^{57}\text{FeBO}_3$), T - ядерная мишень ($\text{K}_2\text{Mg}[^{57}\text{Fe}(\text{CN})_6]10\text{H}_2\text{O}$) и D - детектор γ -излучения. Детектор регистрировал только γ -кванты, распространяющиеся в первичном направлении.

Он имел приемный телесный угол $\cong 5 \cdot 10^{-5}$ стеррад. В схеме использованы три мессбауэровских вибратора. Все вибраторы работали синхронно в режиме постоянных скоростей. С помощью первого вибратора V_1 одиночная линия источника с шириной $\Gamma_s = 0,2$ мм/с настраивалась в резонанс с ядрами в кристалле прерывателя $^{57}\text{FeBO}_3$ для возбуждения в нем перехода $+1/2 \Rightarrow +1/2$. Ядерные резонансы в прерывателе были несколько смещены от аналогичных резонансов в поляризаторе из-за нагрева кристалла-прерывателя при многократном перемагничивании. Для осуществления тонкой подстройки положений резонансов, используемых в поляризаторе и прерывателе, поляризатор приводился в движение своим вибратором V_2 . Наконец,

ядерная мишень приводилась в движение третьим вибратором V_3 , чтобы совместить ядерный резонанс в мишени с линией излучения источника. Таким образом, после необходимой подстройки скоростей вибраторов мессбауэровские γ -кванты, излучаемые источником, находились в резонансе со всеми ядерно-резонансными объектами в собранной схеме.

Поляризатором служил кристалл $^{57}\text{FeVO}_3$, толщиной $L_p = 35$ мк, намагниченный вдоль горизонтального направления магнитным полем H_{c1} . При возбуждении перехода $\Delta m = 0$ ($+1/2 \Rightarrow +1/2$) он поглощал π -поляризованную компоненту падающего излучения. Фактор резонансного поглощения был равен $\mu L_p = 98$. Степень поляризации прошедшего пучка $N^\sigma - N^\pi / (N^\sigma + N^\pi)$ составляла $\cong 0,90$.

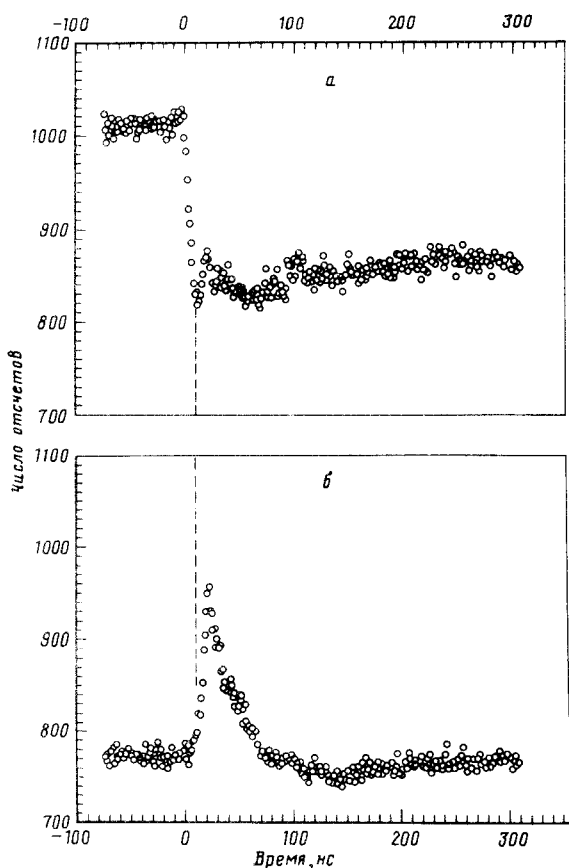


Рис. 2. *a* - Временная зависимость прерывания 14,4 кэВ мессбауэровского γ -излучения. При измерении этой зависимости ядерная мишень - T была выведена из резонанса с падающим на нее γ -излучением. *б* - Временная зависимость γ -излучения, выходящего в первичном направлении из ядерной мишени - T . Мишень настроенная в резонанс с падающим γ -излучением. Число отсчетов на обеих зависимостях нормировано на одно и тоже время измерения (2 часа)

Главным элементом схемы являлся скоростной прерыватель излучения. Его роль выполнял кристалл $^{57}\text{FeVO}_3$, управляемый внешними магнитными полями H_{c2} и H_p . Механизм быстрого прерывания основывался на переориентации магнитным полем малоинерционной спиновой системы атомов железа в кристалле $^{57}\text{FeVO}_3$ ¹⁰⁻¹¹. Изначально кристалл намагничивался вдоль го-

ризональной оси постоянным магнитным полем $H_{c2} \cong 21$ Э, создаваемым в объеме $\cong 150$ см³ большими катушками Гельмгольца. В некоторый момент времени очень быстро ≤ 5 нс включалось поле $H_p \cong 26$ Э, направленное под углом $\alpha = 150^\circ$ к \vec{H}_{c2} . Оно создавалось малыми катушками Гельмгольца в объеме $\cong 0,5$ см³. Величины полей и угол между ними подбирались таким образом, чтобы результирующее поле $\vec{H} = \vec{H}_{c2} + \vec{H}_p$ было перпендикулярно \vec{H}_{c2} , а вектор намагниченности кристалла $^{57}\text{FeVO}_3 - Sh$ повернулся бы на 90° . Начиная с этого момента прерыватель поглощал выделяемую поляризатором σ -поляризованную компоненту γ -излучения. Таким образом система двух кристаллов (поляризатор + прерыватель) должна стать непрозрачной для мессбауэровского излучения. Временная зависимость прерывания γ -излучения показана на рис. 2а. Для ее измерения ядерно-резонансная мишень выводилась из резонанса с падающим излучением. Длительность фронта прерывания составила не более 10 нс, что много меньше времени жизни первого возбужденного состояния ядра $^{57}\text{Fe} - \tau_0 = 141$ нс. Такая скорость закрытия обусловлена, во-первых, возможностью быстрой переориентации намагниченности кристалла и, во-вторых, большим фактором ядерно-резонансного поглощения в данном образце ¹¹. Для перехода $\Delta m = 0$ и при толщине кристалла $L_{Sh} = 30$ мк он был равен $\mu L_{Sh} = 84$. Через 0,5 мкс поле H_p выключалось, кристалл-прерыватель возвращался в исходное состояние, прозрачное для σ -поляризованной компоненты γ -излучения (этот переходный процесс на рис. 2а не показан). Прерывание повторялось каждые 2 мкс.

Мишень была сделана из мелкодисперсного порошка ферроцианида калия, обогащенного резонансным изотопом до 95%. Спектр поглощения имел одиночную линию. Толщина мишени по резонансным ядрам составляла 0,82 мг/см², что соответствовало фактору резонансного поглощения $\cong 11$. Измерялась временная зависимость γ -излучения, испускаемого ядерной мишенью в узком телесном угле $\cong 5 \cdot 10^{-5}$ стерад в первичном направлении. Детектирующая система аналогична описанной в ^{4,11}. Временное разрешение детектора 5,5 нс. Результаты измерений представлены на рис. 2б.

Из сопоставления последовательности событий, отраженных на зависимостях рис. 2а и рис. 2б, хорошо видно, что после прерывания падающего на мишень γ -пучка мишень становится на короткое время сама источником излучения. При этом максимум ее свечения задержан на 10 нс по отношению к моменту окончания прерывания γ -пучка. Такое задержанное самопроизвольное свечение мишени может быть связано только с распадом предварительно возбужденных в ней ядер. Распад ядер происходит спонтанно. Существенно, что пиковое значение интенсивности освобожденного мишенью излучения сравнимо с интенсивностью поглощаемого излучения (приведенные спектры нормированы на одинаковое время измерений). Этот факт свидетельствует о том, что при распаде ядер значительная часть запасенной энергии освобождается в виде γ -излучения. Заметим, что оно попадает в узкий телесный угол вокруг первичного направления. Из этого мы делаем вывод о направленности задержанного излучения из мишени. Кроме того оно высвобождается за время меньшее, чем время жизни $\tau_0 = 141$ нс возбужденного состояния изолированного ядра ^{57}Fe . Таким образом налицо обсуждавшиеся в теории ¹ признаки спонтанного когерентного распада возбужденного ядерного состояния: высокая вероятность излучательного канала распада и его направленность. Если раньше такой распад наблюдался в монокристаллах в брэгговских направлениях ^{3,4}, то в настоящей работе, также как и в работе ⁹, он впервые обнаружен в направлении первичного пучка. Дополнительным по отношению к работе ⁹ результатом является непосред-

ственное наблюдение усиления радиационного канала при спонтанном распаде ядер. В заключение отметим, что в направлении вперед спонтанный когерентный распад возбужденного ядерного состояния может наблюдаться как в регулярных, так и в нерегулярных ядерных системах.

В последующей работе будут даны дополнительные экспериментальные данные с более полной интерпретацией спектров и теоретическим анализом.

Литература

1. Афанасьев А.М., Каган Ю. Письма в ЖЭТФ, 1965, 2, 165.
 2. Trammell G.T. Chem. Effects of Nucl. Transf. IAEA, Vienna, 75, 1961.
 3. Gerdau E., Rueffer R., Winkler H., Tolksdorf W., Klages C.P., Hannon J.P. Phys. Rev. Lett., 1985, 54, 835; Rueffer R., Gerdau E., Hollatz R., Hannon J.P. Phys. Rev. Lett., 1987, 58, 2359.
 4. Смирнов Г.В., Швыдько Ю.В. Письма в ЖЭТФ, 1986, 44, 431; Shvyd'ko Yu.V., Smirnov G.V. Journal Phys.: Cond. Matter, 1989, 1, 10563.
 5. Lynch F.J., Holland R.E., Hammermesh V. Phys. Rev. 1960, 120, 513.
 6. Monahan J.E., Perlow G.J. Phys. Rev. A, 1979, 20, 1499.
 7. Helisto P., Ikonen E., Katila T., Riski K. Phys. Rev. Lett., 1982, 49, 1209.
 8. Швыдько Ю.В., Попов С.Л., Смирнов Г.В. Письма в ЖЭТФ, 1991, 53, 234.
 9. Hastings J.B., Sidons D.P., van Buerck U., Bergman L.E., Hollatz R. Preprint BNL 1990.
 10. Kolotov O.S., Pogozhev V.A., Smirnov G.V., Shvyd'ko Yu.V., Kadeckova S., Kotrbova M., Novak J. Phys. Stat. Sol. (a), 1982, 72, k197.
 11. Смирнов Г.В., Швыдько Ю.В., Колотов О.С., Погожев В.А., Котрбова М., Кадечкова С., Новак Й. ЖЭТФ, 1984, 86, 1495.
-