

ПЕРИОДИЧЕСКАЯ МОДУЛЯЦИЯ МЕССБАУЭРОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

В.К.Войтовецкий, С.Б.Сазонов

Получено выражение для спектральной интенсивности мессбауэровского излучения, периодически модулированного пропусканием через чередующиеся во времени слои с различными комплексными показателями преломления. Проанализировано влияние параметров модуляции на спектральные распределения модулированного излучения. Показано, что должна иметь место интерференция в процессе перехода изотопа от источника к поглотителю через различные "временные каналы".

Амплитудную и фазовую модуляцию гамма-лучей можно осуществить периодической сменой свойств среды между ядрами излучателя и ядрами пог-

лотителя. Если излучение проходит сквозь чередующиеся во времени слои с комплексными показателями преломления $\alpha_1 + i\beta_1$ и $\alpha_2 + i\beta_2$, то модулированная амплитуда вероятности фотона имеет вид:

$$A(t) = \exp \left[i \left(\omega_0 + i \frac{\Gamma}{2} \right) t \right] B(t + \eta), \quad (1)$$

где $B(t + \eta)$ – модуляционная функция. Функция $B(\eta)$ обладает свойствами:

$$B(\eta) = \begin{cases} f_1 e^{i\phi_1} & 0 \leq \eta < \tau \\ f_2 e^{i\phi_2} & \tau \leq \eta \leq T \end{cases} . \quad (2)$$

Здесь $\omega_0 = E/\hbar$, E – энергия, Γ – ширина возбужденного уровня ядер источника, T – период модуляции, τ – доля периода, в течение которой ядро поглотителя освещается через слой с параметрами α_1 и β_1 ; $f_i = e^{-\frac{\omega_0 \beta_i d_i}{c}} = e^{-\frac{k_i d_i}{2}}$, k_i – линейный коэффициент поглощения, d_i – толщина слоя.

После фурье-преобразования $A(t)$ и усреднения интенсивности модулированного излучения по всем значениям η спектральное распределение излучения

$$I(\Delta) \sim \frac{f_1^2 \tau/T + f_2^2 (1-\tau)/T}{\Delta^2 + \Gamma^2/4} + \frac{f_1^2 + f_2^2 - 2f_1 f_2 \cos(\phi_1 - \phi_2)}{\Delta^2 + \Gamma^2/4} \times \\ \times \frac{1}{\Gamma T/2} \left[\left(1 - \frac{2\Gamma^2/4}{\Delta^2 + \Gamma^2/4} \right) C(\Delta) - \frac{2\Gamma^2/4}{\Delta^2 + \Gamma^2/4} D(\Delta) \right] \left[1 - 2 \cos \Delta T e^{-\Gamma T/2} + e^{-\Gamma T} \right], \quad (3)$$

где

$$C(\Delta) = 1 - e^{-\Gamma T} - 2e^{-\Gamma T/2} \left[\cos \Delta \tau \operatorname{sh} \frac{\Gamma}{2} (T - \tau) + \cos \Delta (T - \tau) \operatorname{sh} \frac{\Gamma}{2} \tau \right],$$

$$D(\Delta) = 4 \frac{\Delta}{\Gamma} e^{-\Gamma T/2} \left[\sin \Delta \tau \operatorname{ch} \frac{\Gamma}{2} (T - \tau) + \sin \Delta (T - \tau) \operatorname{ch} \frac{\Gamma}{2} \tau - \sin \Delta T \right]$$

$$\Delta = \omega_0 - \omega .$$

В условиях периодической модуляции свойств среды для фотона возможны два, сдвинутых один относительно другого во времени, пути от источника к поглотителю: через слой первого вещества и через слой второго вещества. Фурье-преобразование и усреднение интенсивности

модулированного излучения по η соответствуют переходу от периодической смены свойств среды и модуляции амплитуды вероятности отдельного фотона к стационарному процессу, отвечающему реальным условиям эксперимента. В этом стационарном процессе нельзя определить, какой из возможных путей для детектируемого фотона реализуется.

Как видно из (3), в таком процессе, в отличие от стационарного процесса без модуляции, спектральное распределение излучения, кроме лоренцевой линии, содержит также симметричную относительно ω_0 нелоренцевую часть. Интенсивность нелоренцевой части спектра, обусловленной модуляцией излучения, из-за физической неразличимости возможных путей для фотона включает интерференционный член, величина которого зависит от сдвига фаз между двумя "каналами" для фотона.

Таким образом, в отличие от ранее наблюдавшихся интерференционных явлений при когерентном взаимодействии гамма-лучей с ядрами и электронными оболочками атомов (интерференция ядерного резонансного рассеяния и релеевского рассеяния на электронах [1], ядерная дифракция [2], интерференция внутренней конверсии гамма-лучей и фотоэффекта [3]), когда процесс идет одновременно по двум или нескольким "пространственным каналам", при модуляции излучения пропусканием через среду с периодически изменяющимися во времени оптическими свойствами должна наблюдаться интерференция в процессе перехода фотона от источника к поглотителю через различные "временные каналы".

Если для модуляции излучения используется прерыватель с полным перекрытием потока излучения ($f_2 = 0$), то второй "канал" для фотона отсутствует и интерференции, естественно, нет, что соответствует чисто амплитудной модуляции амплитуды вероятности фотона.

Модуляция приводит к появлению в спектре боковых полос и ослаблению центральной линии¹⁾. Положение боковых полос в спектре определяется значением ΓT . При $\Gamma T \ll 1$ боковые полосы четко разделены, с увеличением ΓT они сближаются с центральной линией. Когда $\Gamma T \gg \gg 1$, модуляционная часть спектра практически уже не содержит боковых полос и полный спектр переходит в одну, но существенно ослабленную по сравнению с лоренцевой линией. На рис. 1 приведены для значений $\Gamma T = 2,4; 3,1; 22$ ($\Gamma \tau = 1$) расчетные мессбауэровские спектры поглощения модулированного излучения. При $\Gamma T \ll 1$ интенсивности центральной линии и боковых полос в спектре модулированного излучения зависят от величины $\Gamma \tau$. На рис. 2 приведены расчетные спектры поглощения резонансного излучения для значений $\Gamma T = 2,1$ и $\Gamma \tau = 0,2; 1$. Если $\Gamma T \gg 1$, значением $\Gamma \tau$ определяется ширина и интенсивность центральной линии.

Соотношение между интенсивностью лоренцевой линии и модуляционной частью спектра существенно зависит от знака и величины интерференционного члена.

¹⁾ Нелоренцевая часть спектра излучения симметрична относительно взаимной замены τ и $T - \tau$.

В работе Руби и др. [4] были получены первые четкие результаты в экспериментах по периодической модуляции гамма-излучения с помощью механического прерывателя. Позже подобные эксперименты были выполнены Гаузером и др. [5]. Авторы [5] отмечают, что в противоречии с работой [4], несмотря на близость экспериментальных условий, они получили совершенно различные результаты.

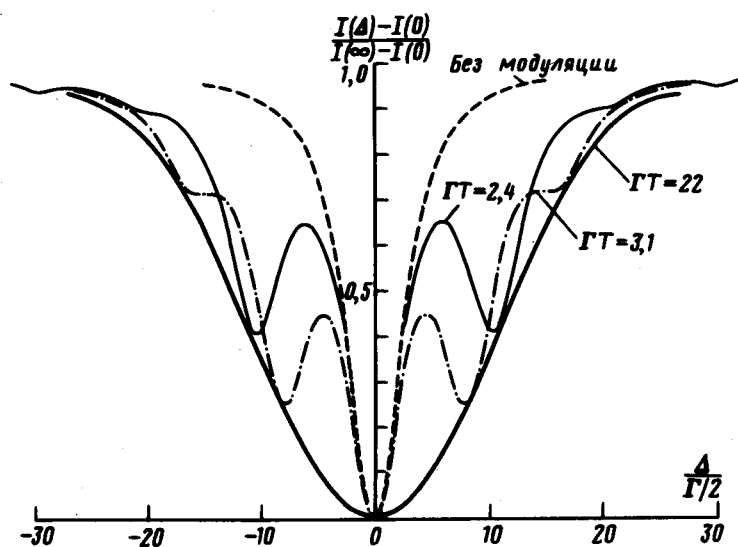


Рис. 1. Мессбауэровские спектры поглощения модулированного излучения в Fe^{57} при различных значениях $\Gamma\tau$ ($\Gamma\tau = 1$; $f_2 = 0$).

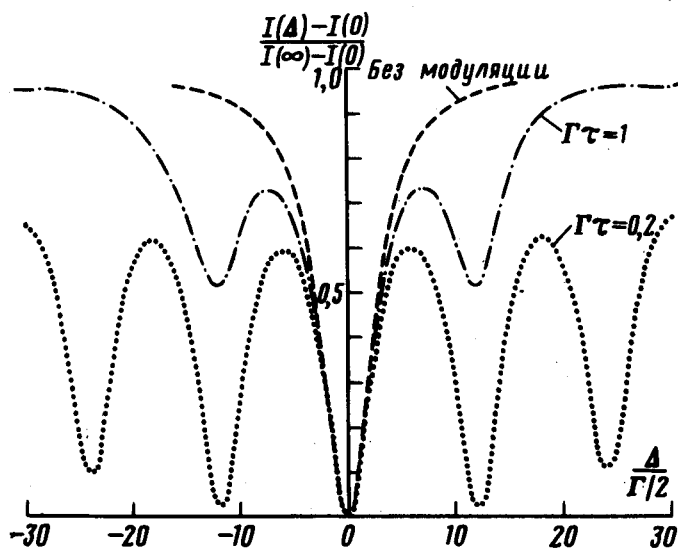


Рис. 2. Мессбауэровские спектры поглощения модулированного излучения в Fe^{57} при $\Gamma\tau = 2,1$ и различных значениях $\Gamma\tau$ ($f_2 = 0$).

Объяснение "противоречия" результатов работ [4] и [5] заключается в следующем. В [5] авторы при сравнении экспериментальных данных с расчетом используют полученное ими выражение для спектрального распределения модулированного мессбауэровского излучения. Это выражение отражает только чисто амплитудную модуляцию; фазовая модуляция, ее влияние на характер спектра при этом совершенно не учитываются.

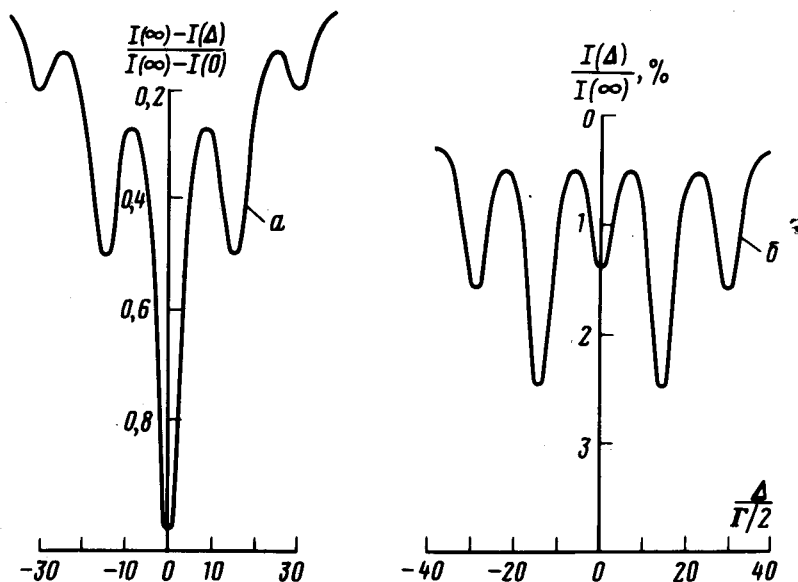


Рис. 3. Мессбауэровские спектры поглощения модулированного излучения в Fe^{57} при $a - \Gamma T = 2,1$; $\Gamma T = 0,54$; $f_2^2 / f_1^2 = 0,05$; $\phi_1 - \phi_2 = 0,86\pi/2$. $\delta - \Gamma T = 1,82$; $\Gamma T = 0,42$; $f_2^2 / f_1^2 = 0,25$; $\phi_1 - \phi_2 = 0,89\pi$.

Поскольку в экспериментах в [5] по "второму каналу" проходило всего 5% излучения, а значение $\phi_1 - \phi_2$, по-видимому, мало отличалось от $\pi/2$, экспериментальный спектр поглощения оказался близким к расчетному для чисто амплитудной модуляции. (В общем случае, даже при $f_2^2 / f_1^2 = 0,05$ интерференционный член может составлять до 50% общей величины модуляционной части спектра). Конечно, при чисто амплитудной модуляции спектр в экспериментах Руби и др. должен был бы иметь тот же вид, что и спектр в [5], но в первой работе $f_2^2 / f_1^2 = 0,25$, значительная часть излучения проходила по "второму каналу" и вследствие интерференции могло сильно проявиться влияние фазовой модуляции.

Для экспериментальных параметров работ [4] и [5] были рассчитаны мессбауэровские спектры поглощения; в расчете было использовано выражение (3). Эти спектральные распределения при $\phi_1 - \phi_2 =$

$= 0,86\pi/2$ для [5] и $\phi_1 - \phi_2 = 0,89\pi$ для [4] (например, рис. 3¹⁾) близки к соответственным экспериментальным спектрам в [5] и [4]. Различие спектров на рис. 3 обусловлено фазовой модуляцией; интерференция в процессе перехода фотона от источника к поглотителю через различные "временные каналы" определила характер спектра.

Авторы благодарят В.М.Галицкого, И.И.Гуревича и Ю.М.Кагана за обсуждение результатов работы.

Поступила в редакцию
19 сентября 1975 г.

После переработки
23 декабря 1975 г.

Институт атомной энергии
им. И.В.Курчатова

Литература

- [1] V. K. Voitovetskii, I. L. Korsunskii, A. I. Novikov, Su. F. Pazhin. Phys. Lett., 27A, 244, 1968; В.К.Войтовецкий, И.Л.Корсунский, А.И.Новиков, Ю.Ф.Пажин. ЖЭТФ, 54, 1361, 1968.
- [2] P. S. Black, S. P. Duerdoth. Proc. Phys. Soc., 84, 169, 1964; В.К.Войтовецкий, И.Л.Корсунский, Ю.Ф. Пажин, Р.С.Силаков. Письма в ЖЭТФ, 12, 314, 1970.
- [3] C. Sauer, E. Matthias, R. L. Mössbauer. Phys. Rev. Lett., 21, 961, 1968; Ю.М.Каган, А.М.Афанасьев, В.К.Войтовецкий. Письма в ЖЭТФ, 9, 155, 1969.
- [4] S. L. Ruby, R. S. Preston, C. E. Skov, B. S. Zabransky. Phys. Rev., 8, 59, 1973.
- [5] U. Hauser, W. Neuwirth, N. Thesen. Phys. Lett., 49A, 57, 1974.

¹⁾Расчет проведен для значений $\Gamma T = 2,1$ и $\Gamma \tau = 0,54$, соответствующих скорости диска-модулятора в [5] 2713 оборотов/сек и значений $\Gamma T = 1,82$ и $\Gamma \tau = 0,42$, соответствующих скорости диска-модулятора в [4] 500 оборотов/сек. В эксперименте Руби и др. слои диска-модулятора имели переменную за период толщину и в расчете в качестве d_i и соответственно f_i и $\phi_1 - \phi_2$ были приняты их эффективные значения.