

# КВАНТОВЫЕ БИЕНИЯ ИНТЕНСИВНОСТИ СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ, РАССЕЯННОГО НА ЯДРАХ С МОДУЛИРОВАННЫМ СВЕРХТОНКИМ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕМ

Э. К. Садыков, Ю. А. Антонов

В экспериментах [1-3] были обнаружены временные биения интенсивности рассеянного  $\gamma$ -излучения при возбуждении ядер  $\text{Fe}^{57}$  синхротронным излучением (СИ). Теория этого явления для стационарного случая была развита в [4, 5]. СИ имеет широкий спектральный состав, поэтому амплитуды рассеяния импульса СИ через все подуровни зеемановской структуры возбужденного состояния ядра оказываются сравнимыми — их интерференция и составляет суть квантовых биений.

В то же время при резонансном рассеянии  $\gamma$ -излучения естественных источников (в стационарном режиме) такие биения не возникают. Они появляются, если на ядерную систему наложено радиочастотное (РЧ) поле [6, 7]. При воздействии РЧ поля на зеемановскую структуру уровней возникают квазиэнергии с характерными частотами Раби. Частота Раби [8] описывает изменение заселенностей резонансно-связанных уровней. Но биения интенсивности рассеянного в таких условиях излучения определяются не квазиэнергиями, а частотой модуляции [8].

В данной работе рассматривается некогерентное рассеяние импульса СИ на рассеивателе с резонансно-возбужденным зеемановским спектром. Показано, что спектр рассеяния содержит слагаемые, описывающие биения на частотах, представляющих собой комбинации квазиэнергий, и, в частности, на частотах Раби.

Выражение для интенсивности некогерентного рассеяния [4] с учетом вращающегося поля на ядре амплитудой  $H_1$ , частотой  $\omega$  и фазой  $\varphi$  дается формулой:

$$I_{mm'} = A \exp\left(-\frac{\Gamma t}{\hbar}\right) \left| \sum_{\substack{M_e, M_g, m'' \\ n, n'}} \exp\{it(a_e M_e - a_g M_g)\} \exp\{-i\omega t(n - m')\} \times \right. \\ \left. \times \exp\{-i\varphi(n - m')\} \exp\{i\varphi(n' - m'')\} d_{M_g m''}^g d_{M_g m'}^g \mu_{m'' n'}^\perp d_{M_e m'}^e d_{M_e m}^e \mu_{m n}^\perp \right|^2, \quad (1)$$

где  $A = k_0^2/(2\pi\hbar^3) \cdot |F_{\omega_0}|^2$ ;  $\bar{F}_{\omega_0}$  — Фурье-образ амплитуды импульса СИ;  $d^g(\beta), d^e(\beta)$  — матрицы вращений для основного и возбужденного уровней ядра;  $\mu, \mu^\perp$  — операторы магнитного дипольного перехода,

$$a_{g, e} = \omega_{g, e} \left[ (1 + \omega/\omega_{g, e})^2 + (\omega_{1g, 1e}/\omega_{g, e})^2 \right]^{1/2}, \\ \omega_{1g, 1e} = j_{g, e} H_1, \quad \beta_{g, e} = \arctg(\omega_{1g, 1e}/(\omega_{g, e} - \omega)).$$

Здесь  $\gamma_{g, e}$  — ядерное гиромагнитное отношение. Формула (1) получена при использовании стандартной процедуры перехода во вращающуюся систему координат [9].

Конкретизируем задачу и рассмотрим непосредственно резонанс на возбужденном уровне ядра  $\text{Fe}^{57}$  ( $I_g = 1/2, I_e = 3/2$ ):  $\omega = \omega_e$ . В этом случае  $d^g(\beta)$  обращается в символ Кронеккера, а  $d^e(\beta)$  — матрица 4-го порядка. Производя в (1) суммирование по  $m''$  и  $M_g$ , группируя члены по проекциям, возводя модуль в квадрат, усредняя по  $\varphi$  и по  $m$  и  $m'$ , получаем

$$I = A \exp \left\{ -\frac{\Gamma I}{\hbar} \right\} \sum_{\substack{M_e, \hat{n}^*, m, m' \\ \hat{n} - n = \hat{n}' - n'}} \exp \{ia_e t (M_e - \hat{M}_e)\} \exp \{i\omega t (\hat{n} - n)\} \times \\ \times \mu_{m'n'}^{\perp} \mu_{m'\hat{n}}^{\perp} d_{M_e n'}^e d_{M_e \hat{n}}^e d_{M_e n}^e d_{M_e \hat{n}}^e \mu_{nm} \mu_{\hat{n}m} \quad (2)$$

В этом выражении можно выделить такую группу слагаемых:

а) высокочастотная (ВЧ)

$$\sum_{\substack{M_e, \hat{n}^* = n, m, m' \\ \hat{n} - n = \hat{n}' - n'}} \exp \{i\omega t (\hat{n} - n)\} \mu_{m'n'}^{\perp} \mu_{m'\hat{n}}^{\perp} d_{M_e n'}^e d_{M_e \hat{n}}^e d_{M_e n}^e d_{M_e \hat{n}}^e \mu_{nm} \mu_{\hat{n}m} \quad (3)$$

б) низкочастотная (НЧ)

$$\sum_{\substack{M_e^* = M_e, n, n' \\ m, m'}} \exp \{ia_e t (M_e - \hat{M}_e)\} (\mu_{n'm'}^{\perp})^2 d_{M_e n'}^e d_{M_e \hat{n}}^e d_{M_e n}^e d_{M_e \hat{n}}^e (\mu_{nm})^2. \quad (4)$$

Оценка показывает, что интенсивности ВЧ и НЧ компонент сравнимы. Поэтому на эксперименте возможно наблюдение НЧ осцилляций. Так как время жизни ядра в возбужденном состоянии ограничено, период НЧ осцилляций должен быть достаточно мал, чтобы наблюдаться за время измерения (~140 нс). Вследствие этого амплитуда РЧ поля должна быть достаточно высокой. Расчеты для Fe<sup>57</sup> показывают, что  $H_1$  должно быть  $\geq 6$  Тл. Кроме этого, резонансные ядра в рассеивателе должны находиться в одинаковых позициях. В противном случае спектр рассеяния может усложниться из-за присутствия когерентно-рассеянного излучения.

Таким образом, показано, что, возбуждая ядра с радиочастотно-модулированным зеемановским спектром СИ, можно наблюдать НЧ осцилляции интенсивности рассеянного  $\gamma$ -излучения, соответствующие частотам Раби.

Резонанс на основном уровне рассматривается аналогично.

#### Список литературы

- [1] Gerdaу E., Ruffer R., Hollatz R., Hannon J. P. // Phys. Rev. Lett. 1986. V. 57. N 9. P. 1141—1144.
- [2] Ruffer R., Gerdaу E., Hollatz R., Hannon J. P. // Phys. Rev. Lett. 1987. V. 58. N 22. P. 2359—2364.
- [3] Van Bruck U., Mossbauer R. L., Gerdaу E., Ruffer R., Hollatz R., Smirnov C. V. // Phys. Rev. Lett. 1987. V. 59. N 3. P. 355—359.
- [4] Trammel G. T., Hannon J. P. // Phys. Rev. B. 1978. V. 18. N 1. P. 165—172.
- [5] Trammel G. T., Hannon J. P. // Phys. Rev. B. 1979. V. 19. N 7. P. 3835—3836.
- [6] Mitin A. V. // Phys. Lett. 1981. V. 84A. N 5. P. 283—286.
- [7] Bashkirov Sh. Sh., Beljanin A. L., Sadykov E. K. // Phys. Stat. Solid(b). 1979. V. 93. P. 437—442.
- [8] Войтовецкий В. К., Сазонов С. Б. // Препринт Ин-та атомной энергии. 1984. № 3952/2. 52 с.
- [9] Gabriel H. // Phys. Rev. 1969. V. 184. N 2. P. 359—363.

Казанский государственный университет  
им. В. И. Ульянова (Ленина)

Поступило в Редакцию  
25 марта 1992 г.