

ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ РЕЗОНАНС В ЭФФЕКТИВНОМ ПОЛЕ

Л. Н. Новиков, В. Г. Показаньев

Согласно классической теории магнитного резонанса, момент спин-системы, подверженной воздействию постоянного магнитного поля \vec{H}_0 и перпендикулярного ему радиочастотного поля $\vec{H}_1 \cos \omega t$, совершает вынужденную прецессию вокруг направления поля \vec{H}_0 с частотой ω . Когда частота ω близка к $\omega_0 = \gamma H_0$, наблюдается резонансный эффект поглощения энергии радиочастотного поля $H_1(t)$. Стационарная прецессия на частоте γH_e , определяемой эффективным полем $H_e = [(H_0 - \omega/\gamma)^2 + H_1^2]^{1/2}$, в экспериментах по магнитному резонансу не наблюдается, что обусловлено изотропным распределением прецессирующих диполей в поле H_e . Для наблюдения резонанса в эффективном поле на частоте $\omega_e = \gamma H_e$ необходимо воздействовать на спин-систему дополнительным полем на этой частоте, которое внесло бы когерентность в движение отдельных спинов в эффективном поле. Этого можно достичь с помощью осциллирующего радиочастотного поля $\vec{H}_2(t)$, параллельного полю \vec{H}_0 . Поле $\vec{H}_2(t)$ может быть разложено на две компоненты, одна из которых перпендикулярна \vec{H}_e , а другая параллельна. Резонанс, вызываемый перпендикулярной компонентой, наблюдался ранее [1] и в настоящее время хорошо изучен. Компонента поля $\vec{H}_2(t)$, осциллирующая вдоль эффективного поля, обычно не учитывается, однако нетрудно видеть, что ее влияние качественно мало чем отличается от эффекта модуляции поля H_0 на частотах кратных ω_0 , известного в литературе как "параметрический резонанс" [2].

В настоящей заметке сообщается об обнаружении параметрического резонанса в эффективном поле. Для простоты рассматривается случай, когда эффективное поле имеет вид $H_e = H_1$, т.е. случай точного резонанса в лабораторной системе координат. При этом компоненту поля, осциллирующую вдоль направления \vec{H}_e , можно легко обеспечить амплитудной модуляцией поля $\vec{H}_1(t)$:

$$H_1(t) = 2H_1(1 + m \cos \Omega t) \cos \omega t. \quad (I)$$



Рис. I Параметрический резонанс C_8^{133} в эффективном поле $H_e = H_1 = 2,74 \cdot 10^{-3}$ э

Теоретическое рассмотрение, выполненное на основе уравнений Блоха, показывает, что модуляция эффективного поля приводит к появлению дополнительного движения магнитных диполей на частотах $\omega_0 + n\Omega$. В случае равенства времен релаксации $T_1 = T_2 = T$ можно получить следующие выражения для поперечной и продольной составляющих намагниченности:

$$M_x + iM_y = -i \frac{M_0}{T} \exp[i\omega t] \sum_{k,l} (-1)^k J_k\left(\frac{m\omega_1}{\Omega}\right) J_l\left(\frac{m\omega_1}{\Omega}\right) \text{Im} \left\{ \frac{\exp[i(k+l)\Omega t]}{1/T + i(k\Omega - \omega_1)} \right\},$$

$$M_z = \frac{M_0}{i} \sum_{k,l} (-1)^k J_k\left(\frac{m\omega_1}{\Omega}\right) J_l\left(\frac{m\omega_1}{\Omega}\right) \text{Re} \left\{ \frac{\exp[i(k+l)\Omega t]}{1/T + i(k\Omega - \omega_1)} \right\}, \quad (2)$$

где $J_k\left(\frac{m\omega_1}{\Omega}\right)$ - функции Бесселя, Ω - частота модуляции радиочастотного поля. Видно, что при фиксированном значении $\omega_e = \omega_1$, резонанс ожидается на частотах $\Omega = \omega_e / n$, где $n = 1, 2, 3 \dots$

С целью проверки теоретических выводов был выполнен эксперимент на оптически ориентированных парах C_2^{133} при комнатной температуре. Экспериментальная установка в основных чертах подобна описанной ранее [3]. Частота радиочастотного поля ω и напряженность магнитного поля H_0 удовлетворяли условию $\omega - \gamma H_0 = 0$. Амплитуда поля $H_1(t)$ модулировалась звуковым генератором ЗГ-10, частота которого могла плавно изменяться с помощью синхронного двигателя с редуктором. Сигнал резонанса регистрировался по изменению глубины модуляции на частоте Ω интенсивности прошедшего через ячейку света, параллельного полю H_0 (регистрация M_z - составляющей намагниченности).

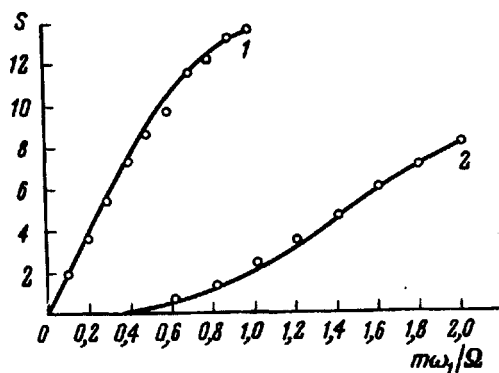


Рис.2 Зависимость сигнала параметрического резонанса от относительной глубины модуляции радиочастотного поля. Кривая 1 - резонанс $\Omega = \omega_e$, кривая 2 - резонанс $\Omega = \omega_e/2$. По оси ординат отложена величина сигнала резонанса в относительных единицах

Как показано на рис.1, были обнаружены резонансы на частотах 960, 480 и 320 гц, что в точности соответствует значениям $\omega_e/2\pi$, $\omega_e/4\pi$ и $\omega_e/6\pi$ при данной амплитуде радиочастотного поля. Асимметрия кривых резонанса и искажение формы кратных резонансов обусловлены нелинейностью развертки частоты модуляции и фазочастотной зависимостью синхронного детектора.

На рис. 2 представлены зависимости величины сигнала резонансов на частотах ω_e и $\omega_e/2$ от глубины модуляции радиочастотного поля. Согласно (2) $M_z \approx J_0 J_1$ для резонанса $\Omega = \omega_e$ и $M_z \approx J_1 J_2$ для резонанса $\Omega = \omega_e/2$. Эти зависимости показаны на рисунке сплошными кривыми, на которые точками нанесены экспериментально полученные значения.

Как видно из рис. 1, обнаруженным резонансам свойственна очень малая ширина линии, равная примерно 60 гц (для сравнения отметим, что минимальная ширина линии обычного резонанса в условиях лаборатории равна ~ 250 гц), что характерно для параметрического резонанса, в котором отсутствует явление насыщения [2].

Уральский политехнический
институт им. С.М.Кирова

Поступило в редакцию
4 августа 1966 г.

Литература

- [1] A.Redfield. Phys. Rev., 98, 1787, 1955.
- [2] Е.Е. Александров, О.В.Константинов, В.И.Перель, В.А.Ходовой. ЕЭТФ. 45, 503, 1963.
- [3] В.Cagnac. Thésés, l'Université de Paris, 1960.