

## О ВОЗМОЖНОСТИ БОЗЕ-КОНДЕНСАЦИИ МАГНОНОВ, ВОЗБУЖДАЕМЫХ НЕКОГЕРЕНТНОЙ НАКАЧКОЙ

Ю.Д.Калафати, В.Л.Сафонов<sup>1)</sup>

Предсказывается новый тип неустойчивости спиновых волн в условиях некогерентной внешней накачки, приводящей к резкому увеличению числа магнов на дне зоны спектра.

Известно, что воздействия когерентных переменных магнитных полей на систему спиновых волн в магнетиках приводят к различного рода параметрическим неустойчивостям. При этом возникают сильнонеравновесные состояния, описание которых проводится, как правило, в рамках динамической теории (см. <sup>1)</sup>). В настоящей работе показано, что при некогерентной накачке еще до порога параметрической неустойчивости (который в этих условиях сильно возрастает) возможна бозе-конденсация квазиравновесных магнов.

Будем исходить из кинетического уравнения для чисел заполнения магнов  $n_{\mathbf{k}}$ :

$$\frac{d}{dt} n_{\mathbf{k}} = I^{(4)}\{n_{\mathbf{k}}\} + f_{\mathbf{k}} + r_{\mathbf{k}}, \quad (1)$$

где  $I^{(4)}\{n_{\mathbf{k}}\}$  — четырехмагнонный интеграл столкновения (трехчастичные столкновения не рассматриваются);  $f_{\mathbf{k}}$  — приходный член, описывающий вероятность рождения магнона за счет внешнего воздействия;  $r_{\mathbf{k}}$  — релаксационный член, ответственный за взаимодействие магнов с термостатом (магноны других ветвей, фононы). Решение уравнения (1) будем искать в виде

$$n_{\mathbf{k}} = \{\exp[(\epsilon_{\mathbf{k}} - \mu)/T] - 1\}^{-1}, \quad (2)$$

где  $\epsilon_{\mathbf{k}}$  — энергия магнона ( $\hbar = k_B = 1$ ). Тогда интеграл столкновения обращается в нуль, а состояние системы характеризуется двумя параметрами — химическим потенциалом ( $\mu$ ) и температурой ( $T$ ) как функциями интенсивности внешнего источника накачки. Нетрудно видеть, что рост  $n_{\mathbf{k}}$  приводит к росту  $T$  и (или)  $\mu$ . При этом по  $\mu$  существует особенность в точке касания химическим потенциалом дна зоны магнов  $\mu = \min(\epsilon_{\mathbf{k}})$ , где число заполнения обращается в бесконечность. Далее термодинамическое описание системы спиновых волн в рамках уравнений (1), (2) неприменимо. Ситуация, в определенной степени, аналогична случаю равновесной бозе-конденсации. Рассмотрение спинволновой системы с конденсатом можно провести методом, аналогичным изложенному в <sup>2)</sup>. Учет магнон-магнонных взаимодействий в приближении самосогласованного поля показывает, что между магнонами возникают парные аномальные корреляции для операторов рождения и уничтожения квазичастиц. Ниже мы ограничимся анализом докритической области.

Вводя следующие обозначения

$$\begin{aligned} N &\equiv \int d^3 k n_{\mathbf{k}}, & F_N &\equiv \int d^3 k f_{\mathbf{k}}, & R_N &\equiv \int d^3 k r_{\mathbf{k}}, \\ E &\equiv \int d^3 k \epsilon_{\mathbf{k}} n_{\mathbf{k}}, & F_E &\equiv \int d^3 k \epsilon_{\mathbf{k}} f_{\mathbf{k}}, & R_E &\equiv \int d^3 k \epsilon_{\mathbf{k}} r_{\mathbf{k}}, \end{aligned} \quad (3)$$

из (1) несложно получить уравнения баланса для полного числа частиц и энергии системы магнов

$$\frac{d}{dt} N = F_N + R_N, \quad \frac{d}{dt} E = F_E + R_E,$$

которые определяют эволюцию  $\mu$  и  $T$ . Релаксационные члены для простоты можно записать

<sup>1)</sup> ИАЭ им. И.В.Курчатова.

в  $\tau$  — приближении:

$$R_N = \tau_N^{-1} [N - N^{(0)}], \quad R_E = \tau_E^{-1} [E - E^{(0)}],$$

где  $N^{(0)}$  и  $E^{(0)}$  определяются из (3) с  $\mu = 0$ . Стационарные решения для  $T$  и  $\mu$  в зависимости от интенсивности накачки  $F$  находятся из интегральных уравнений

$$\tau_N F_N = N - N^{(0)}, \quad \tau_E F_E = E - E^{(0)}. \quad (4)$$

Численный анализ этих уравнений для спиновых волн со спектром  $\epsilon_k = (\epsilon_0^2 + s^2 k^2)^{1/2}$  (характерным для антиферромагнетиков) показал, что функции  $T(F)$  и  $\mu(F)$  монотонно возрастают с ростом  $F$ .

В случае, когда  $\tau_F \ll \tau_N$  изменением температуры системы до порога неустойчивости можно пренебречь. Тогда для расчета изменения химического потенциала достаточно первого уравнения в (4). Указанное выше неравенство имеет место в магнетиках, в которых среди процессов взаимодействия спиновых волн с термостатом преобладают процессы с сохранением суммарного числа магнонов изучаемой ветви спектра. Это, например, процесс распада магнона на магнон и фонон (феррит ЖИГ, антиферромагнетик  $\text{FeVO}_3$  и т.п.).

В антиферромагнетике, возбуждаемом некогерентной накачкой, имеющей полосу частот лоренцевой формы с шириной  $\Delta\Omega$  и частотой максимума  $\Omega$ , на которой амплитуда переменного магнитного поля есть  $h$ , приходный член равен

$$f_k = 2|h V_k|^2 (2n_k + 1) \Delta\Omega [(2\epsilon_k - \Omega)^2 + \Delta\Omega^2]^{-1}, \quad (5)$$

где  $V_k = g^2 (H + H_D/2) \epsilon_k^{-1}$  — коэффициент связи с полем накачки,  $H$  — постоянное магнитное поле,  $H_D$  — поле Дзялошинского,  $g$  — гиромагнитное отношение. Из условия  $\mu = \min(\epsilon_k)$  с учетом (5) получаем выражение для порога неустойчивости  $h_*$ :

$$h_*^2 = T^4 \Phi\left(\frac{\epsilon_0}{T}, \frac{\Omega}{T}, \frac{\Delta\Omega}{T}\right) / g^4 (2H + H_D)^2 \Delta\Omega \tau_N,$$

где

$$\Phi(x, y, z) = 2 \cdot [I_1(x, x) - I_1(0, x)] / I_2(x, y, z),$$

$$I_1(x, y) \equiv \int_{y-x}^{\infty} dt \frac{(t+x)[(t+x)^2 - y^2]^{1/2}}{e^t - 1},$$

$$I_2(x, y, z) \equiv \int_x^{\infty} dt \frac{(t^2 - x^2)^{1/2}}{t[(2t-y)^2 + z^2]} \text{cth}[(t-x)/2].$$

Для сравнения порога параметрической неустойчивости, возбуждаемой той же некогерентной накачкой, определяется формулой (см. <sup>1)</sup>):  $(h_c V_k)^2 \approx \gamma_k \Delta\Omega$ , где  $\gamma_k$  — скорость релаксации магнонов с  $\epsilon_k \approx \Omega$ . Обращает на себя внимание в первую очередь противоположные зависимости  $h_*$  и  $h_c$  от  $\Delta\Omega$ . Оценка  $h_*$  и  $h_c$  для  $\text{FeVO}_3$  ( $H_D \approx 100$  кЭ) при  $T = 1$  К,  $\epsilon_0 = 20$  ГГц,  $\Omega = 40$  ГГц,  $\Delta\Omega = 2$  ГГц,  $\tau_N^{-1} = 1$  кГц и  $\gamma_k = 1$  мГц дает:  $h_* \sim 10^{-1}$  Э и  $h_c \sim 30$  Э.

Таким образом, наблюдение бозе-конденсации магнонов возможно в области гелиевых температур. Образование конденсата означает возникновение осциллирующего макроскопического магнитного момента, который можно обнаружить по когерентному электромагнитному излучению с частотой кратной величине щели спектра. Аналогичный эффект может возникнуть и за порогом параметрического резонанса магнонов.

#### Литература

1. Львов В.С. Нелинейные спиновые волны. М.: Наука, 1987.
2. Лифшиц Е.М., Питаевский Л.П. Статистическая физика. ч. 2, М.: Наука, 1978, гл. 3.