

Магнитная динамика в
мультиферроиках-ферроборатах.
Неупругое рассеяние нейтронов.

Докладчик: Овсяников А.К.

Авторы работы: И.В. Голосовский, А.К. Овсяников,
М. Воент, Д.Н. Аристов, П.Г. Матвеева

Мотивация

Семейство $RM_3(BO_3)_4$ (где R=Y, La-Lu; M=Al,Fe):

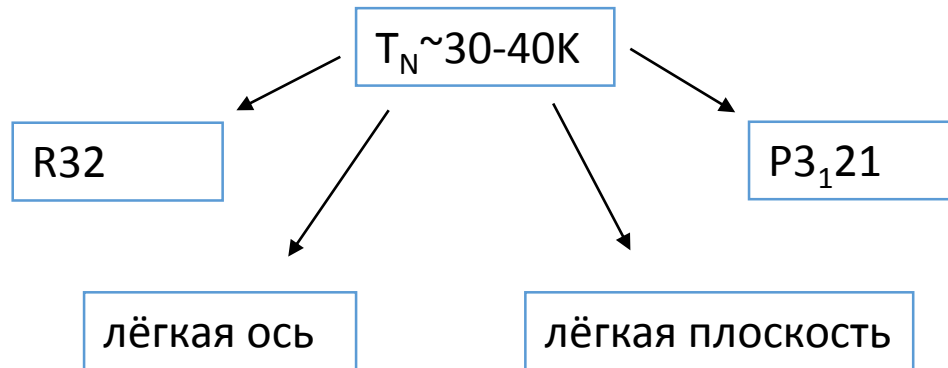
- $HoAl_3(BO_3)_4$ - значение поляризации 3600 мкКл/м² при поле 70 кЭ (рекорд на 2012 год)
- $SmFe_3(BO_3)_4$ - гигантский магнитоэлектрический эффект, диэлектрическая постоянная возрастает в 3 раза при понижении температуры от $T_N=40$ К до 4.2 К

Изучение взаимодействий двух магнитных подсистем – 3d и 4f

N. I. Leonyuk, V.V. Maltsev, E.A. Volkova et al., Opt.Mater. 30, 161 (2007).
А.А. Мухин и др. Письма в ЖЭТФ, 93,305. (2011).

Магнитная структура

Магнитная структура $RFe_3(BO_3)_4$



Магнитная структура $NdFe_3(BO_3)_4$

$T_N = 30K$

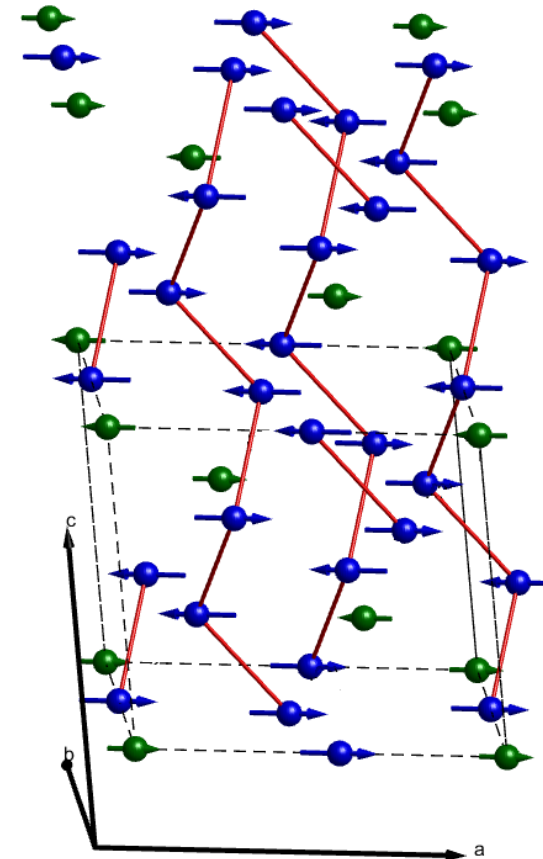
группа R32

$k = [0\ 0\ 3/2]$

Атомы Fe образуют винтовые цепочки расположенные параллельно оси c.

$T_c = 13.5\ K$

несоразмерная структура $k = [0\ 0\ 3/2 + e]$

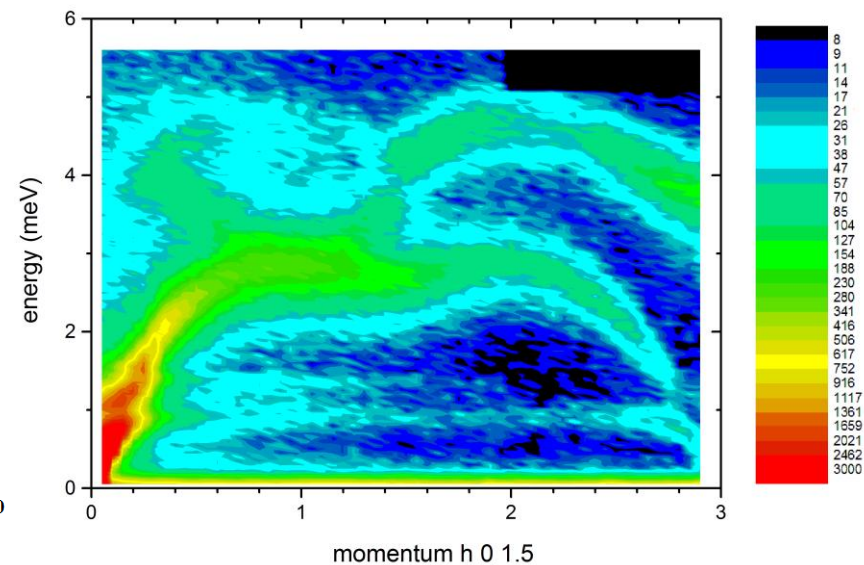
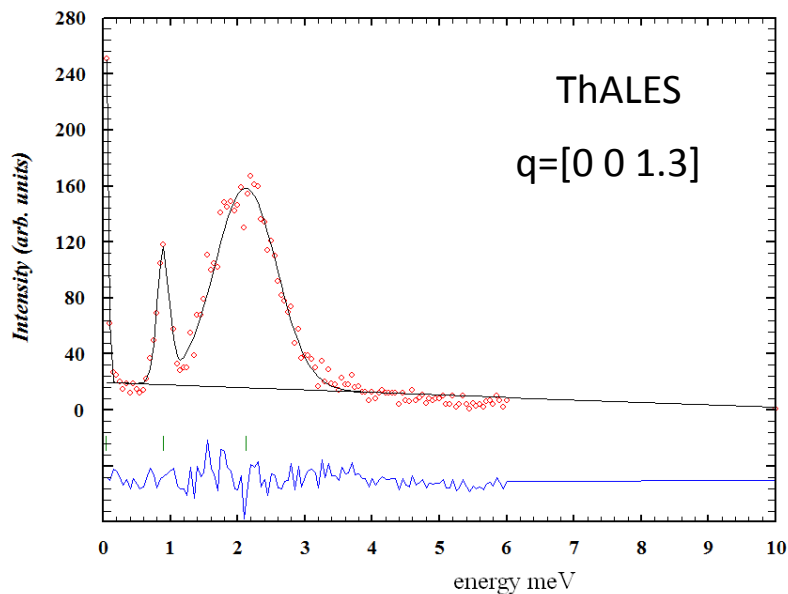
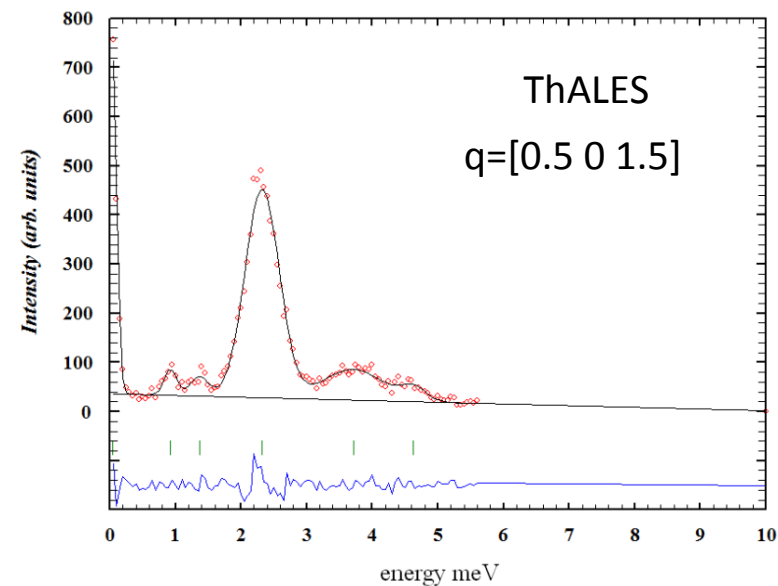
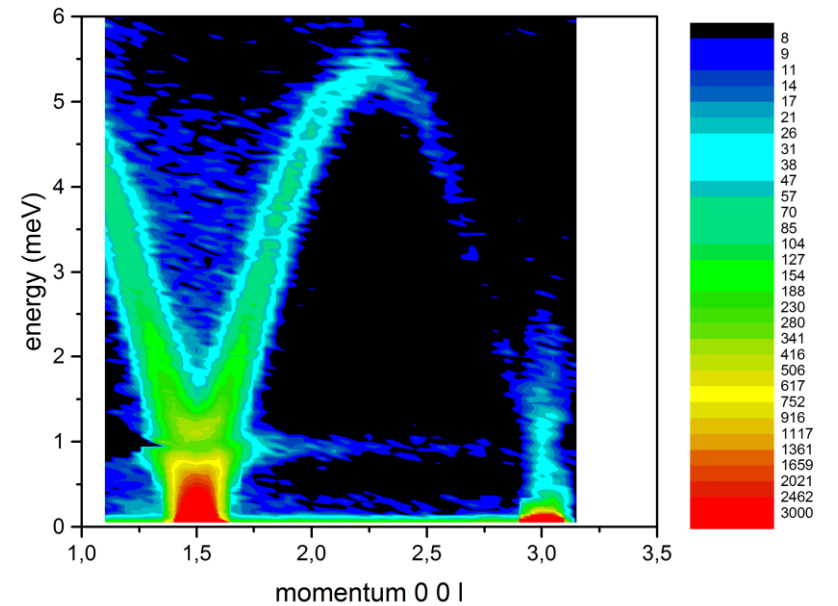
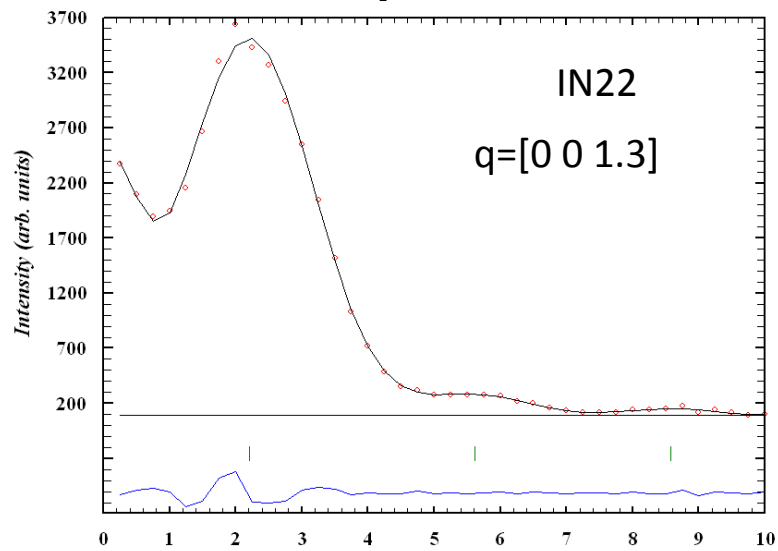
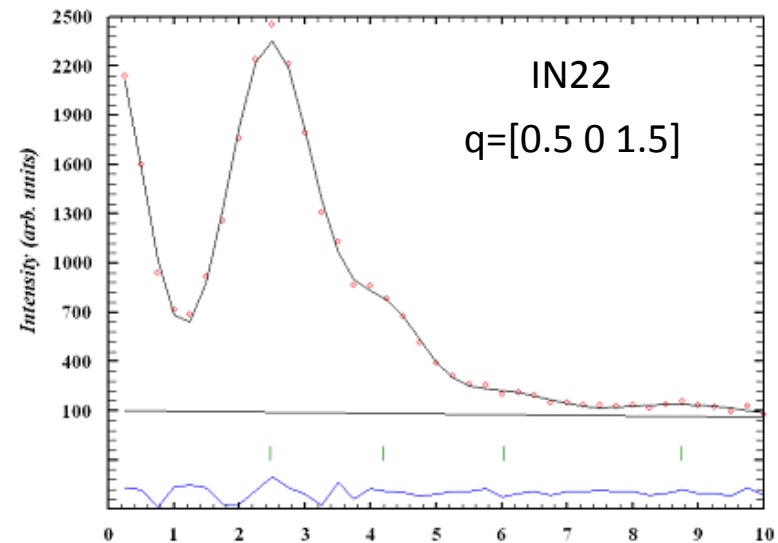


Синим цветом обозначены атомы Fe, зелёным – Nd; красные линии – цепочки Fe.

M. Janoschek, P. Fischer et al. PRB, 81, 094429, 2010.

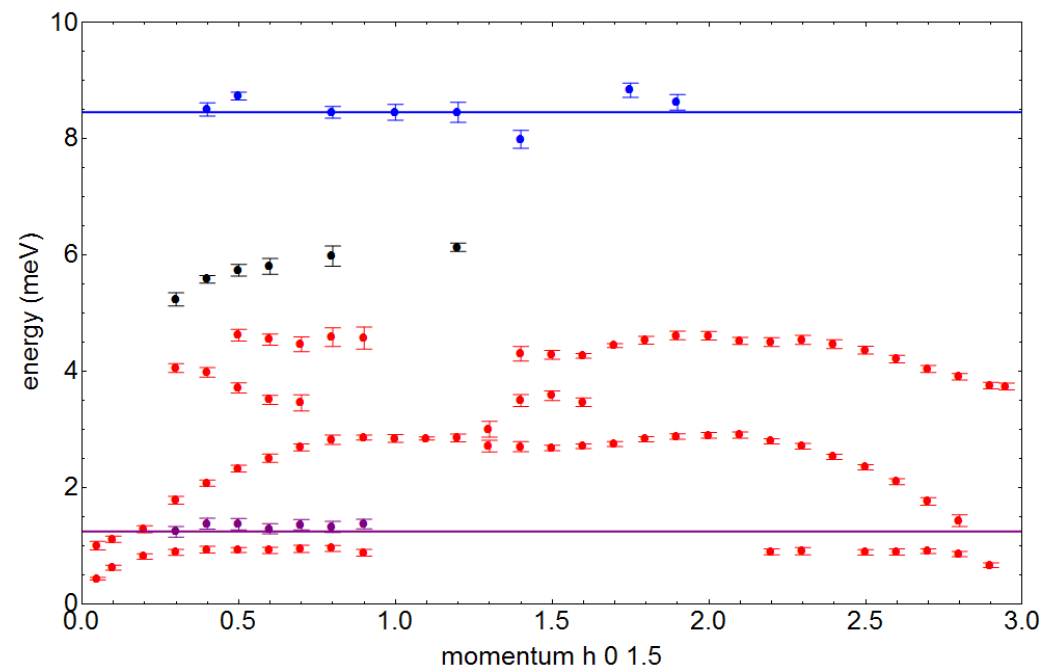
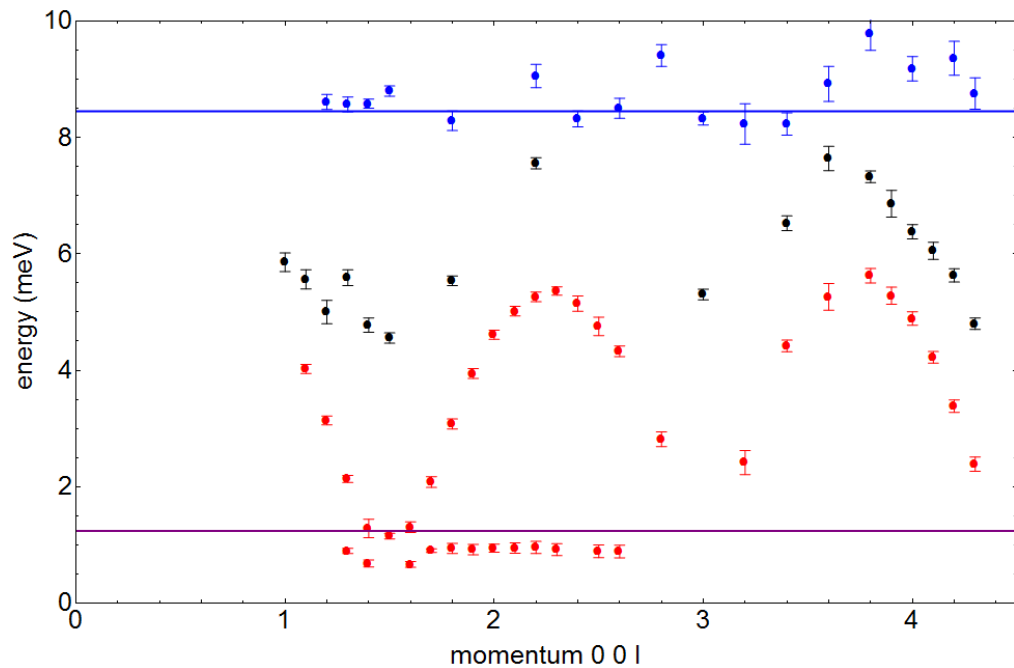
Эксперимент

Карты рассеяния ThALES



Температура измерений $T=12.5$ К, направления $q=[h\ 0\ 1.5]$, $q=[0\ 0\ l]$

Эксперимент



Абсорбционная спектроскопия

Рамановская спектроскопия

Абсорбционная спектроскопия

Абсорбционная спектроскопия

Дублетное расщепление основного состояния иона Nd^{3+} ; $\Delta=1.24$ мэВ

Энергия кристаллического поля иона Nd^{3+} ; уровень $^4I_{9/2}$ $E=8.2$ мэВ

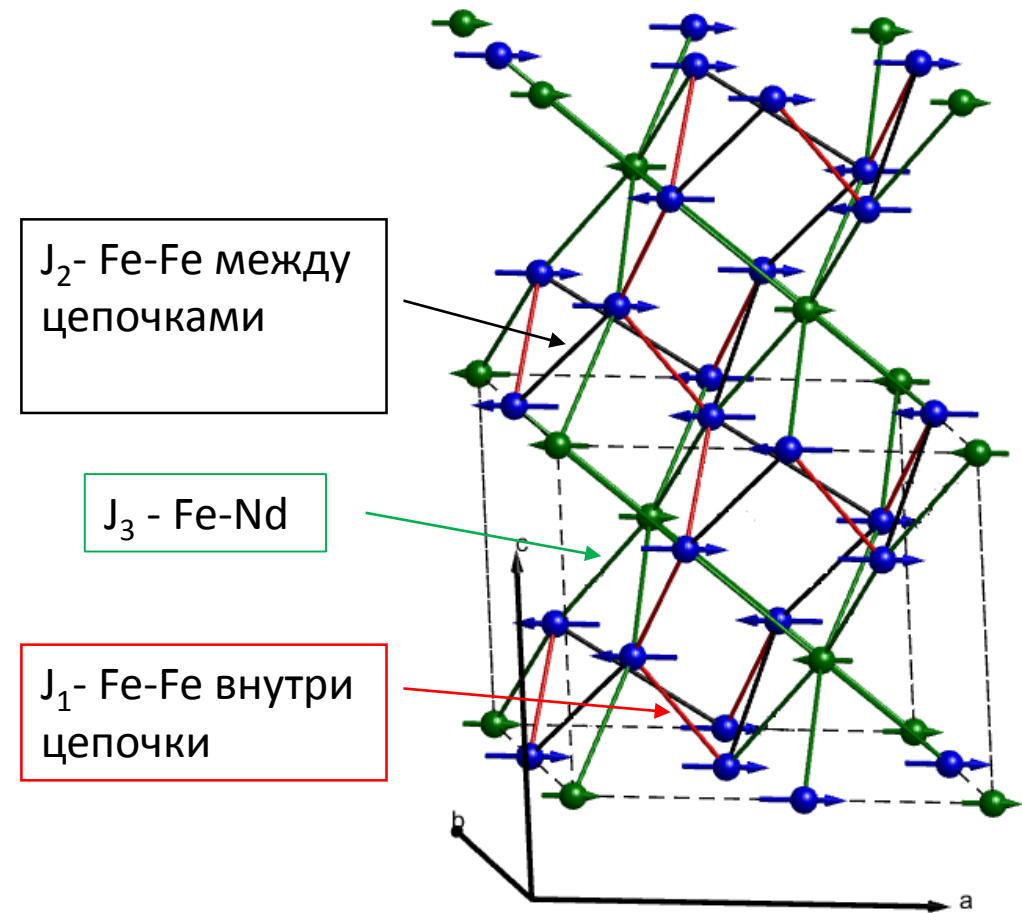
Рамановская спектроскопия

Дву-магнонный континуум- нейтрон возбуждает две спиновые волны. $E \sim 4.4-8.6$ мэВ

Теория спиновых волн

$$\hat{H} = - \sum_{n.n.} J_1 \vec{S}_i \vec{S}_j - \sum_{n.n.n.} J_2 \vec{S}_i \vec{S}_j - \sum_{n.n.} \left(J_3^{ab} (S_i^x S_j^x + S_i^y S_j^y) + J_3^c S_i^z S_j^z \right)$$

где x – ось направленная вдоль кристаллографической оси a , z – вдоль c ; S - оператор спина Fe^{3+} , s – оператор спина Nd^{3+} ; J_1 и J_2 – обменное взаимодействие между ближайшими и следующими за ближайшими соседями Fe^{3+} ; J_3 – обмен между ближайшими соседями Fe^{3+} и Nd^{3+} . Анизотропия обмена Fe^{3+} и Nd^{3+} учитывается с помощью разделения тензора J_3 на компоненты $J_3^{xx} = J_3^{yy} = J_3^{ab}$ и $J_3^{zz} = J_3^c$.



Теория спиновых волн

Подход Гольштейна-Примакова для спиновых операторов:

$$\begin{cases} S_i^+(r_i) = \sqrt{2S}a_i = \sqrt{2S}b_i^+ \\ S_i^-(r_i) = \sqrt{2S}a_i^+ = \sqrt{2S}b_i \\ S_i^x = S - a_i^+a_i = -S + b_i^+b_i \end{cases}$$

где a_i, b_i операторы рождения (уничтожения) в ферромагнитных подрешетках с противоположным направлением спина;
 $i = \{1 \sim 4\}$ - номер кристаллической подрешетки.



Переход к операторам $a_{q,i}, b_{q,i}$ описывающие спиновую волну с волновым вектором q .

$$c_{q,i} = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{r_i} c_i(r_i) e^{iqr_i}$$

где $c_i = \{a_i, b_i\}$, N - число элементарны ячеек.

Гамильтониан в виде квадратичной формы по бозонным операторам

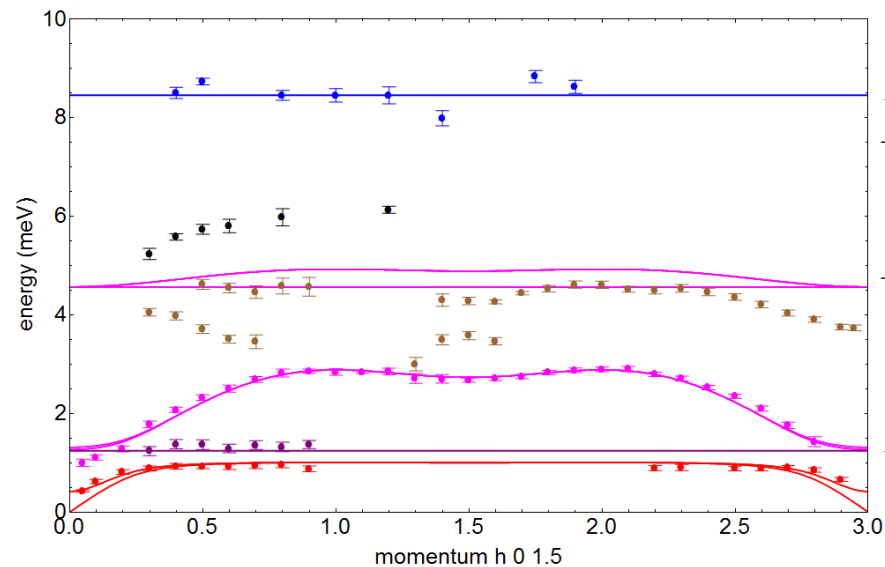
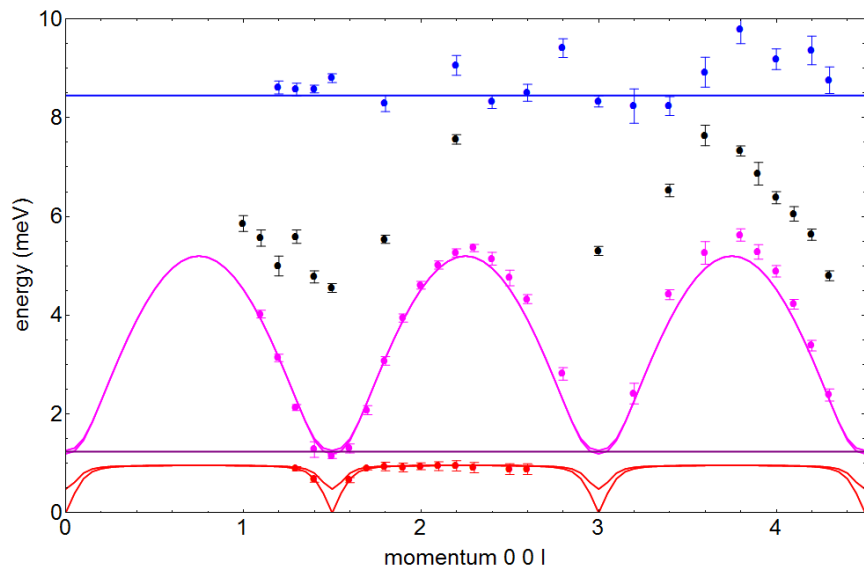
$$\hat{H} = \sum_q \sum_{ij} A_{ij}(q) c_{q,i}^+ c_{q,j} + \sum_{ij} [B_{ij}(q) c_{q,i} c_{q,j} + h. c.]$$

Спектр дисперсионных кривых получается из системы линейных уравнений

$$\omega^2(q) \vec{C} = (A + B)(A - B) \vec{C}$$

где $\vec{C} = (c_{q,i}, c_{q,i}^+)^T$, A и B - матрицы размерностью 16×16 , зависящие от обменных параметров, значений спинов и взаимном расположении взаимодействующих атомов.

Результаты и обсуждение



Кристаллическое поле

Дву-магнонный континуум

Дублетное расщепление

Метод	J_1 мэВ	J_2 мэВ	J_3 мэВ	
			J_3^{ab}	J_3^c
Рассеяние нейтронов	0.582(1)	0.069(3)	0.042(2)	0.035(3)
Абсорбционная спектроскопия	0.54	0.16	0.041	

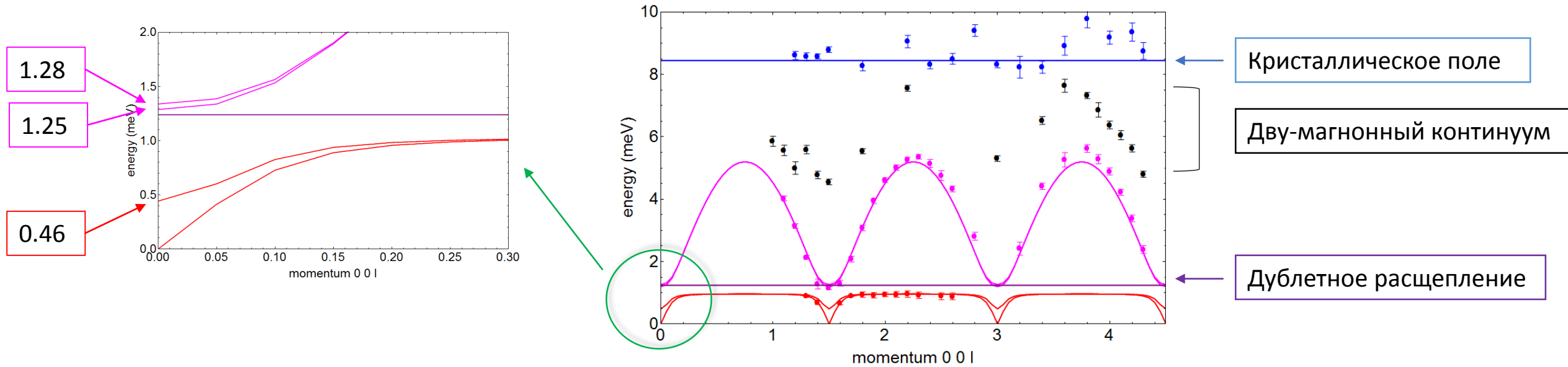
С Fe взаимодействует Nd в основном состоянии \rightarrow эффективный спин Nd $s=0.5$.

При $T=12.5\text{K}$, величина момента Fe $m=4 \mu$ \rightarrow эффективный спин Fe $S=2$.

M. N. Popova, E. P. Chukalina et al., PRB, 75, 224435 (2007).

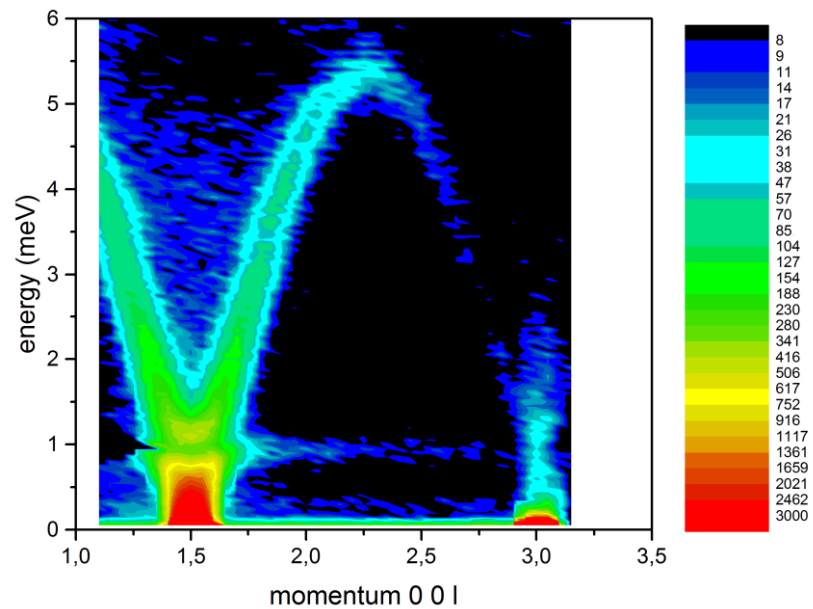
P. Fischer et al., J. Phys.: Condens. Matter 18, 7975 (2006).

Результаты и обсуждение

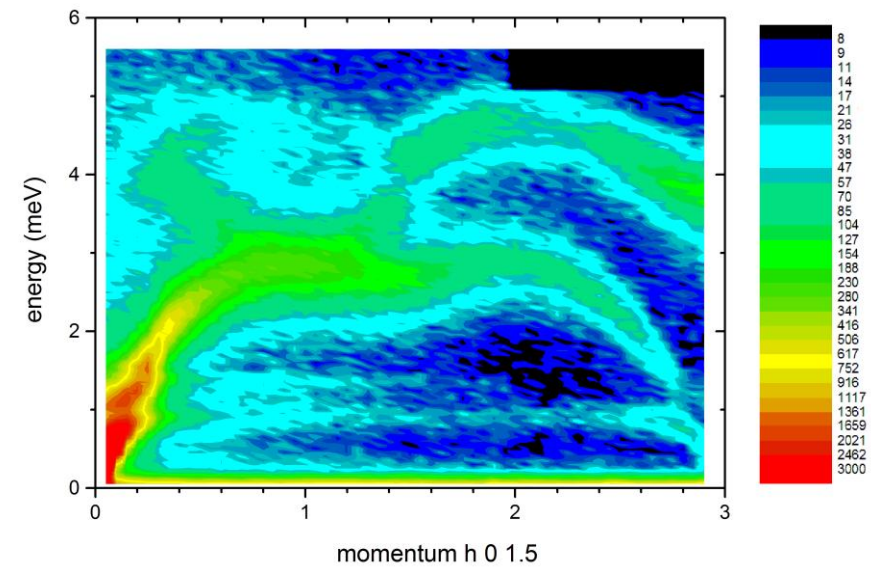


Метод	$\omega_1(0)$ мэВ	$\omega_2(0)$ мэВ	$\omega_3(0)$ мэВ	$\omega_4(0)$ мэВ
Рассеяние нейтронов	0	0.44	1.28	1.33
Террагерцовая спектроскопия	0	0.46	1.25	1.28

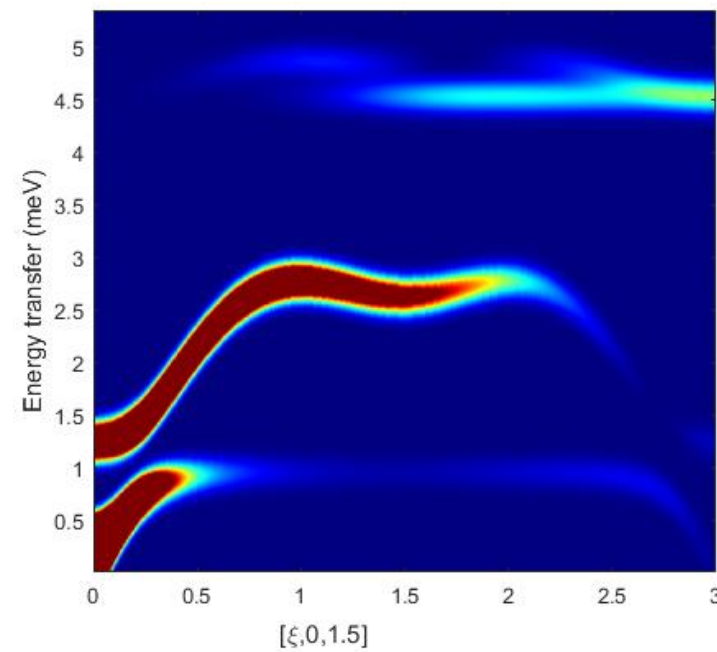
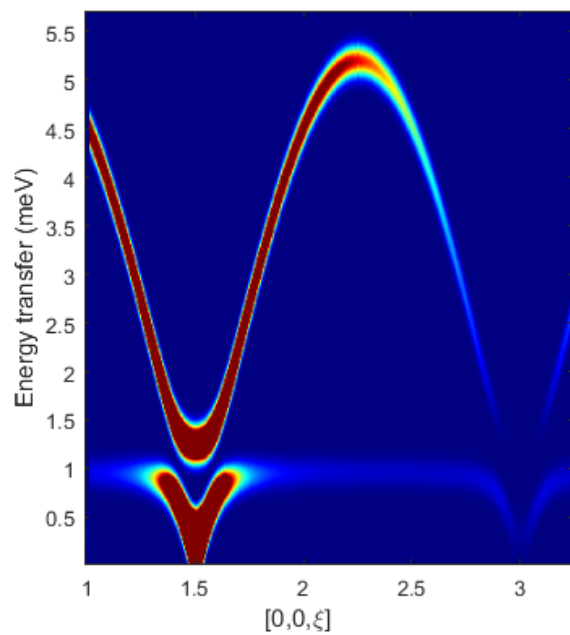
Результаты и обсуждение



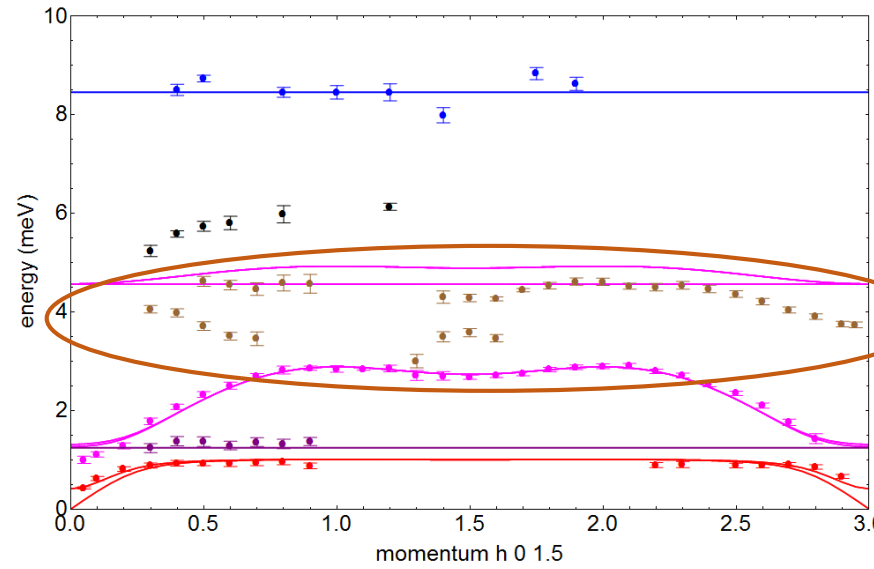
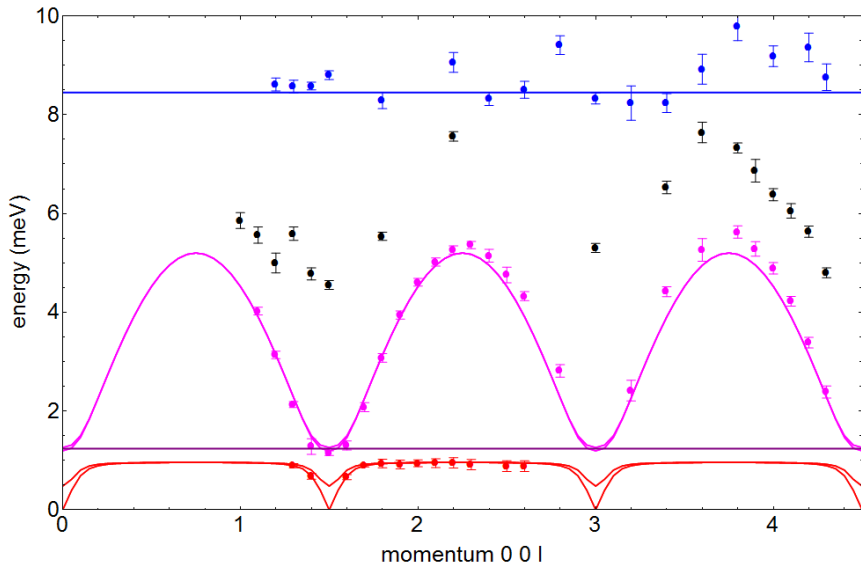
Карты рассеяния ThALES



Карты рассеяния – расчет



Результаты и обсуждение



Кристаллическое поле

Дву-магнонный континуум

Дублетное расщепление

1. Линейная теория спиновых волн - не работает.
2. Изменение модели магнитной структуры (ввод дополнительных обменов, увеличение числа подрешеток и т.д.) – не работает.
3. Учет дипольного взаимодействия - ?

$$\hat{H} = \sum_{ij} (J_{ij} \delta_{\alpha\beta} - Q_{ij}^{\alpha\beta}) S_i^\alpha S_j^\beta$$

где i, j – номера атомов, α, β – x, y, z компоненты.

$$Q_{ij}^{\alpha\beta} \sim \frac{3R_{ij}^\alpha R_{ij}^\beta - \delta_{\alpha\beta} R_{ij}^2}{R_{ij}^5} \sim 0.001 \text{ мЭВ}$$

Заключение

В работе предложена модель для описания низкоэнергетических спиновых волн в кристалле $\text{NdFe}_3(\text{BO}_3)_4$, в рамках которой определены параметры обменных взаимодействий. Эти параметры согласуются с оценками сделанными из данных абсорбционной спектроскопии и дают верные значения энергетических щелей при $q=0$.

Впервые экспериментально показано наличие аномальных мод в диапазоне энергий 3-5 мэВ в направлении $q=[\pi \ 0 \ 1.5]$

Благодарю за внимание