



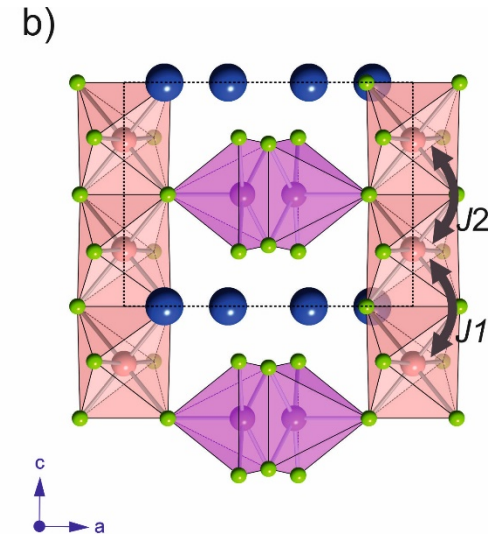
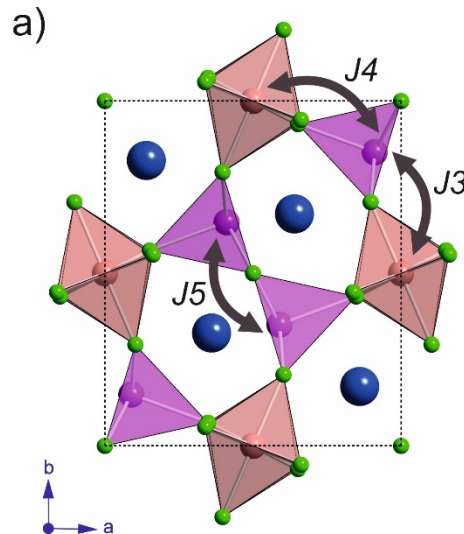
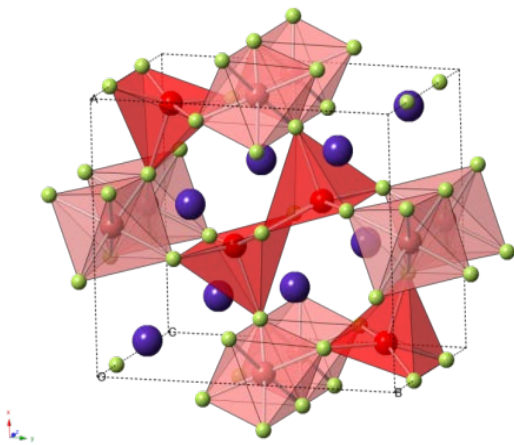
Температурная и полевая эволюция кирального рассеяния в NdMn_2O_5 : дифракция поляризованных нейтронов.

А. Н. МАТВЕЕВА

Научный руководитель:
к.ф.-м.н.; с.н.с.
И.А. ЗОБКАЛО

Magnetic multiferroics RMn_2O_5 - $R = \text{Tb, Yb, Y, Dy, Er, Eu} \dots$

Пространственная группа *Pbam* (?)



суперобмен
 $\mathbf{H}_{12} = -J(\mathbf{S}_1 \cdot \mathbf{S}_2)$

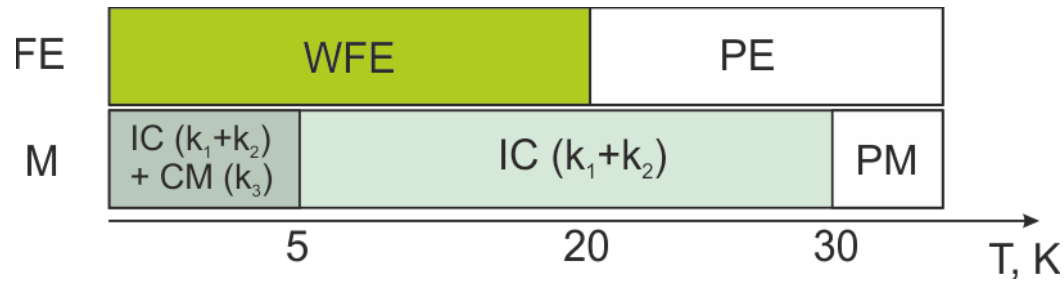


$J3, J4, J5$ – в плоскости *ab*
 $J3, J4$ – $\text{Mn}^{4+} - \text{Mn}^{3+}$
 $J5$ – $\text{Mn}^{3+} - \text{Mn}^{3+}$

$J1$ и $J2$ вдоль *c*
 $\text{Mn}^{4+} - \text{Mn}^{4+}$

Обменно - фрустрированная система !

NdMn_2O_5



Существует одновременно три магнитных фазы

$k_1, k_2 = (0.5 \ 0 \ k_{z1,2})$ – упорядочение марганца

k_1 (фаза 1) – $T_N = 30$ К

k_2 (фаза 2) – $T_2 = 28$ К (?)

$k_3 = (0.5 \ 0 \ 0)$ – упорядочение Nd^{3+} – $T_{\text{Nd}} = 5$ К

Дифрактометр POLI – MLZ

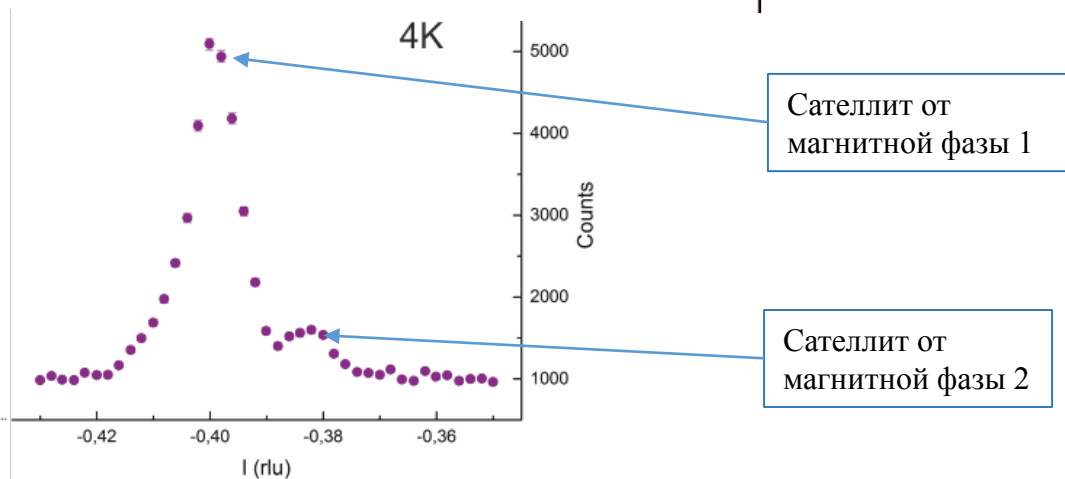
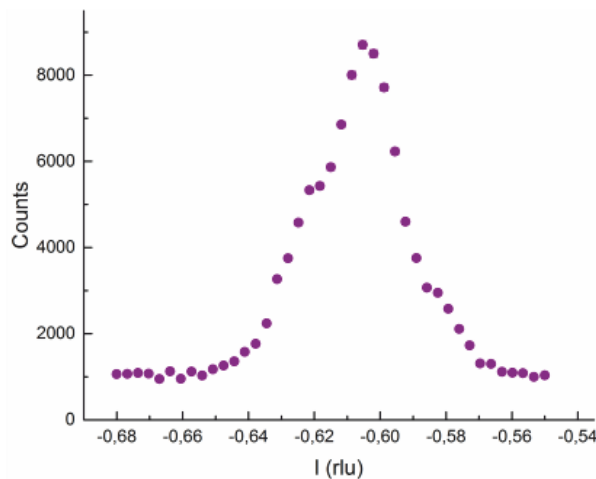
V. Hutanu, A. Sazonov

Монокристалл NdMn_2O_5 –
параллелепипед-like 3x3x4 мм³.

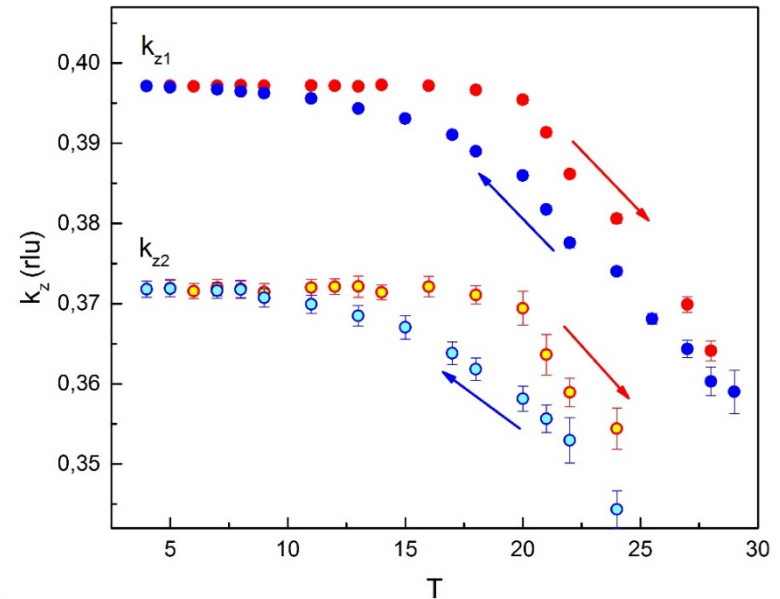
Ориентация в эксперименте:
 b -вертикальна,
плоскость ac -горизонтальна.

$(-1\ 0\ -1)_+$

$(0\ 0\ 0)_-$



$\lambda = 1.16\text{\AA}$





Сферическая нейтронная поляриметрия

Эллиптическая спираль

Элемент поляризационной матрицы

$$\mathbf{M}(\mathbf{r}_n) = \mathbf{u}\mu_u \cos(\mathbf{r}_n \cdot \mathbf{k}) + \mathbf{v}\mu_v \sin(\mathbf{r}_n \cdot \mathbf{k})$$

$$P_{ij} = \frac{I_{ij}^+ - I_{ij}^-}{I_{ij}^+ + I_{ij}^-}$$

$\mathbf{m} = [\mathbf{u} \times \mathbf{v}]$ – вектор спирали

\mathbf{u} , \mathbf{v} – единичные вектора вдоль горизонтальной (\mathbf{u}) и вертикальной (\mathbf{v}) оси,
 μ_u , μ_v - амплитуда осей эллипса в направлении \mathbf{u} или \mathbf{v} .

Элементы поляризационной матрицы

Эллиптический параметр

$$P_{yy} = -P_{zz} \sim \frac{\mu_u^2 - \mu_v^2}{\mu_u^2 + \mu_v^2} = \frac{R^2 \cos^2 \beta - 1}{R^2 \cos^2 \beta + 1}$$

Киральный параметр

$$P_{yx} = P_{zx} \sim \frac{2(1 - 2n_l)\mu_u\mu_v}{\mu_u^2 + \mu_v^2} = \frac{2(1 - 2n_l)R \cos \beta}{R^2 \cos^2 \beta + 1}$$

$$R = \mu_u / \mu_v$$

n_r - доля правых доменов

n_l - доля левых доменов

β - угол между вектором рассеяния и вектором спирали

Сферическая нейтронная поляриметрия

Элементы поляризационных матриц, E = 0						
4K	(1 0 0)+			(-1 0 -1)+		
	x	y	z	x	y	z
x	-0.80(4)			-0.86(3)		
y	-0.12(3)	-0.29(3)		-0.16(2)	-0.17(2)	
z	-0.05(3)		0.18(3)	-0.16(2)		0.16(2)
18K	(1 0 0)+			(-1 0 -1)+		
	x	y	z	x	y	z
x	-0.98(7)			-0.74(3)		
y	-0.05(7)	-0.42(7)		-0.16(4)	0.43(2)	
z	-0.09(6)		0.38(9)	-0.04(4)		-0.27(2)

$$n_r \approx 0.40(2)$$

$$n_l \approx 0.60(2)$$

T = 4 K (SNP)

$\alpha \sim 23.9(2.9)^\circ$ - угол между плоскостью спирали и плоскостью **ab**;
 $\gamma \sim 16.0(2.1)^\circ$ угол наклона среднего магнитного момента по всем магнитным атомам к горизонтальной оси и

T = 6 K (XYZ, DPN ПИЯФ)

$\alpha \sim 23.9(1.3)^\circ$;
 $\gamma \sim 16.3(3.4)^\circ$

T = 18 K (SNP)

$\alpha \sim 19.0(2.7)^\circ$;
 $\gamma \sim 12.4(3.1)^\circ$

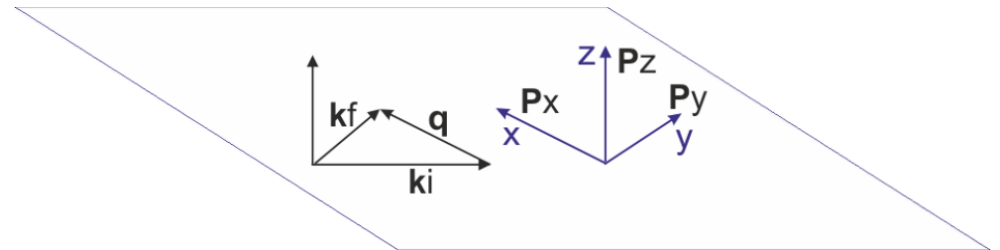
Дифракция поляризованных нейтронов без анализа поляризации после рассеяния

Интенсивность магнитного сателлита спиральной несоизмерной структуры

$$I_x^\pm \sim \underbrace{M_\perp M_\perp^*}_{I_M} \mp i(n_r - n_l) \underbrace{(M_\perp \times M_\perp^*)_x}_{I_{Ch}}$$

$$M_\perp = Q \times (M \times Q)$$

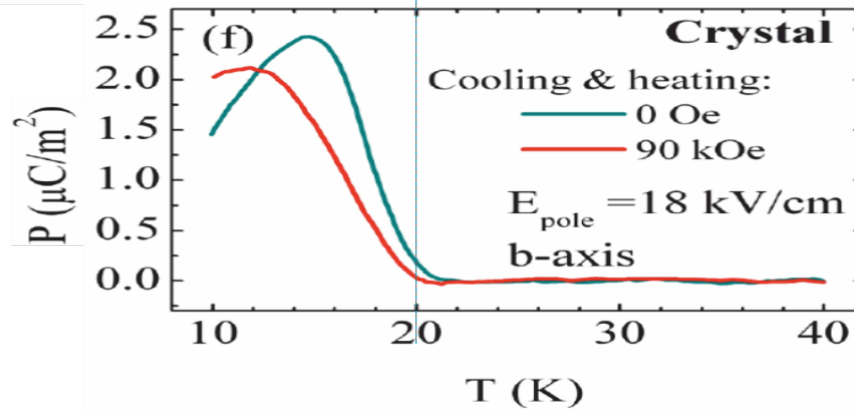
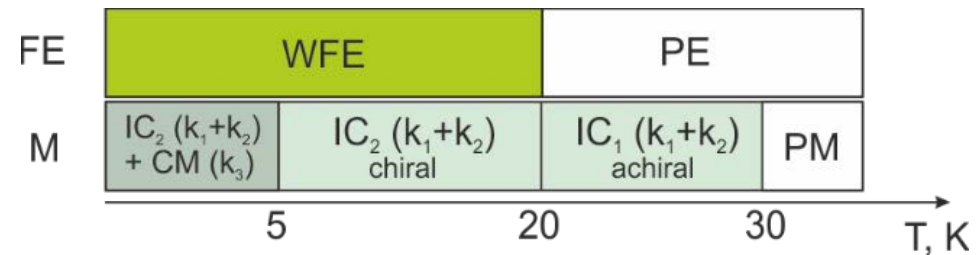
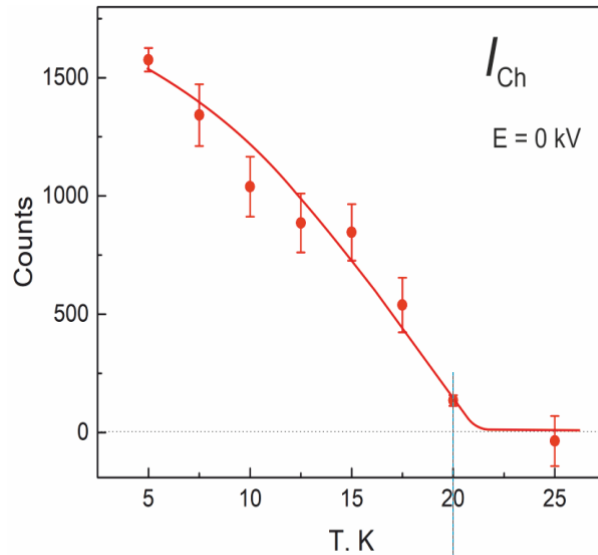
I_x^\pm - интенсивность рассеянных нейтронов при поляризации падающего пучка P вдоль x (+) или против x (-).



$$2I_M = I_x^+ + I_x^-$$

$$2I_{Ch} = I_x^+ - I_x^-$$

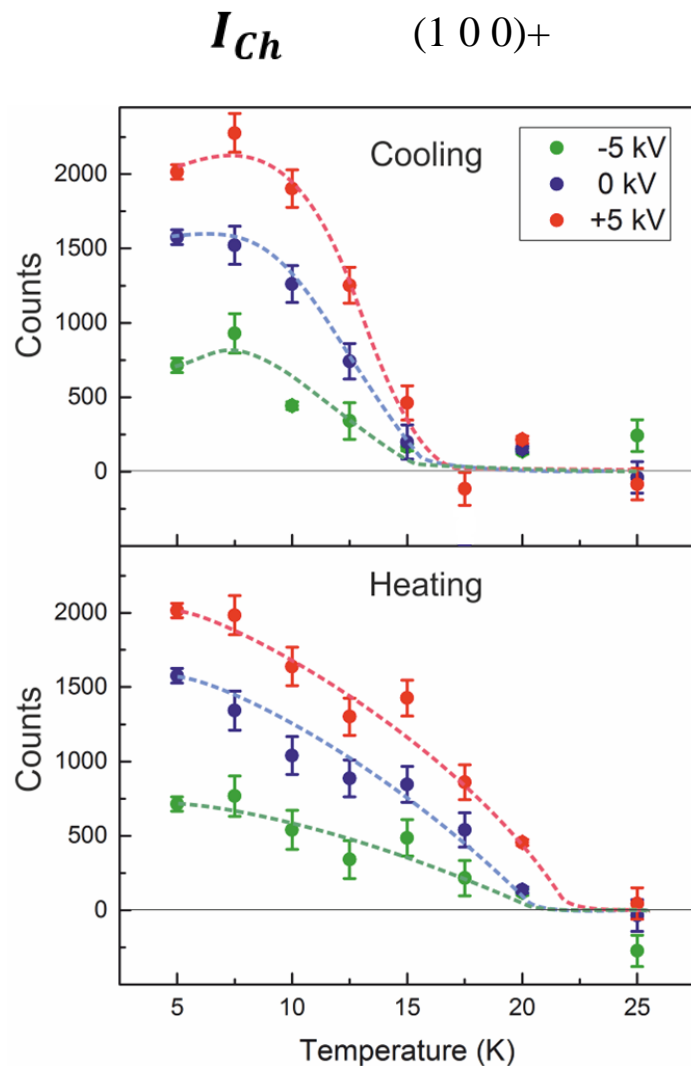
Дифракция поляризованных нейтронов без анализа поляризации после рассеяния



S. Chattopadhyay et al. Phys. Rev. B 93, 104406 (2016).

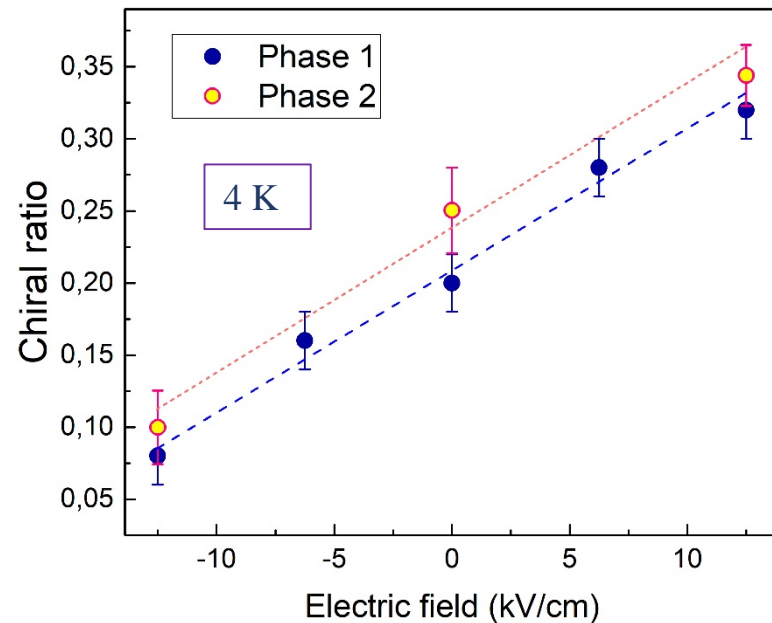
Киральное рассеяние в электрических полях

Нагрев до 40 К, затем охлаждение в электрическом поле.
Электрическое поле вдоль оси b .



Киральность заметно не изменяется при изменении электрического поля от -5 kV (-12,5 kV/cm) до +5 kV (+12,5 kV/cm) при постоянной температуре 15 К после охлаждения в нулевом поле.

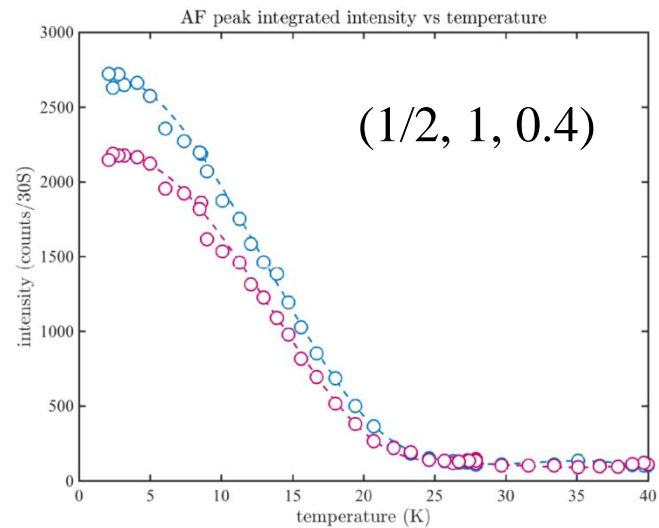
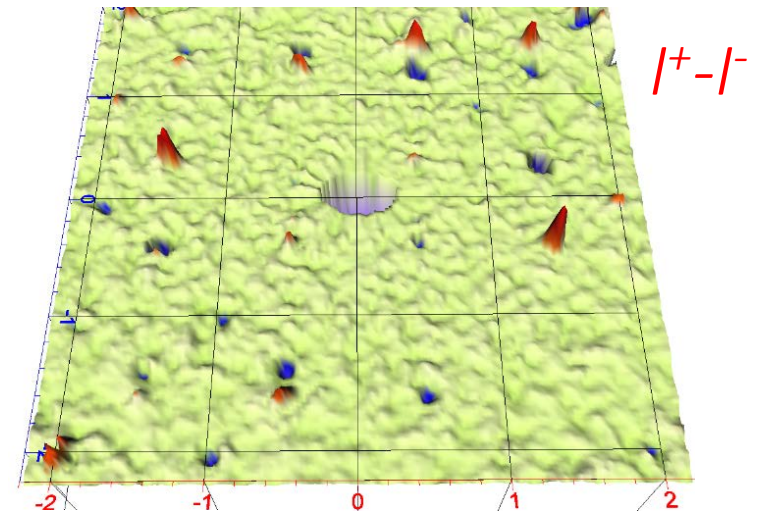
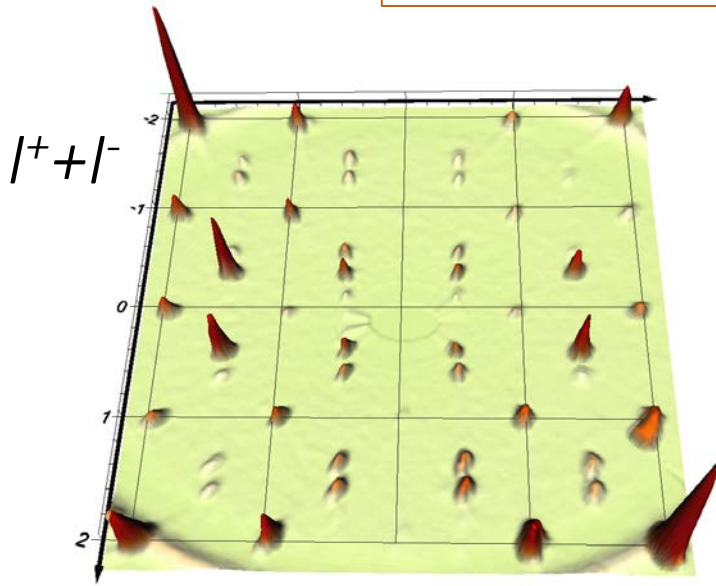
Полевая зависимость киральной заселенности.



Дифракция в слабом магнитном поле

Дифрактометр 6Т2 – LLВ, с А. Г. Гукасовым

0.1 Т, 2 К



Антисимметричный обмен – взаимодействие Дзялошинского-Мория, DMI

$$V_{DM} = \mathbf{D}[\mathbf{S}_1 \times \mathbf{S}_2]$$

Антисимметричный суперобмен через анион

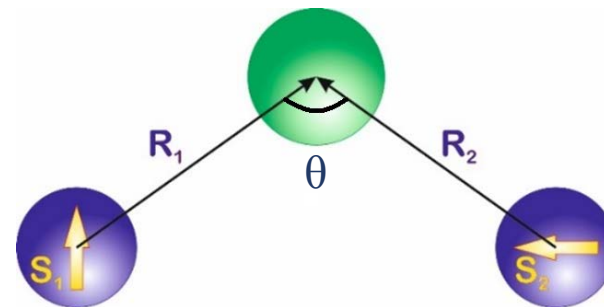
$$V_{DM} = d(\theta) [\mathbf{R}_1 \times \mathbf{R}_2] [\mathbf{S}_1 \times \mathbf{S}_2];$$

$$\mathbf{D} = d(\theta) [\mathbf{R}_1 \times \mathbf{R}_2]$$

$[\mathbf{R}_1 \times \mathbf{R}_2]$ - определяет *направление* вектора Дзялошинского

$d(\theta)$ определяет *знак* вектора Дзялошинского

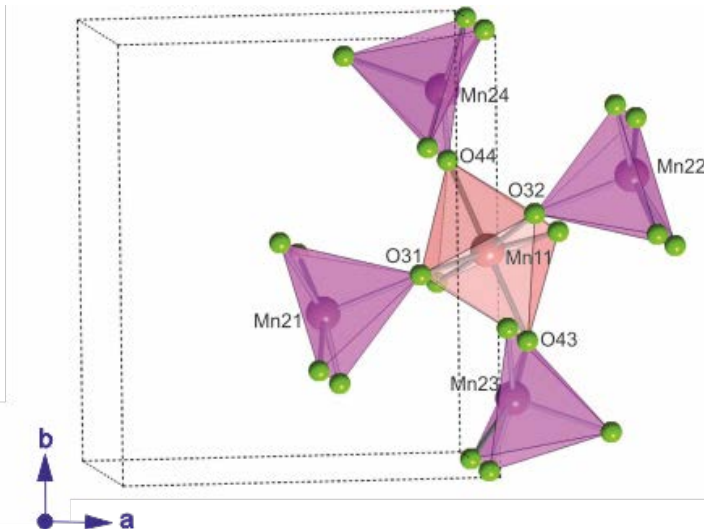
Знак обменного параметра $d(\theta)$ очень чувствителен к углу связи вблизи некоторого критического угла θ_k !



F. Keffer, Phys.Rev. 126, 896, 1962

*A. S. Moskvin, I. G. Bostrem, Sov. Phys. Solid State 19
1532, 1977*

DMI в RMn_2O_5



для $Pbam$ $\mathbf{D} = 0$

$Pbam \longrightarrow Pm, \gamma = 90^\circ$

V. Baledent et al, Phys.Rev.Lett. 114, 117601, 2015



для Pm $\mathbf{D} \neq 0!$

Выводы

Результаты экспериментов с использованием поляризованных нейтронов показывают, что ниже $T_N = 30$ К в NdMn_2O_5 происходит упорядочение в несоразмерную **некиральную** магнитную структуру. Ниже $T = 20$ К происходит переход в несоразмерную **киральную** магнитную структуру. Этот переход сопровождается появлением электрической поляризации в соединении.

Обуславливая преимущественное направление вращения спиралей, DMI может рассматриваться как причина возникновения ферроэлектричества в NdMn_2O_5 .

Наблюдаемая в экспериментах разность в заселенности «правых» и «левых» доменов обусловлена в *as-grown* кристалле:

- близостью углов связи $\text{Mn}^{3+}\text{-O-Mn}^{4+}$ к критической величине θ_k , характерной для NdMn_2O_5 ;
- особенностями роста кристаллов (неравномерное остывание, механические напряжения), что может обеспечить преимущественный знак параметра антисимметричного обмена $d(\theta)$.

Приложение электрического поля приводит к изменению углов связей Mn-O близких к некоторой критической величине θ_k . Таких изменений достаточно, чтобы изменить знак параметра антисимметричного обмена $d(\theta)$ в некоторых доменах.



Измерения, описание результатов и расчёты были проведены в сотрудничестве:

С.В. ГАВРИЛОВ, И.А. ЗОБКАЛО

ФГБУ «ПИАФ» НИЦ «Курчатовский институт»

Andrey SAZONOV, Vladimir HUTANU

Institute of Crystallography, RWTH Aachen University and Jülich Centre for Neutron Science at Heinz Maier-Leibnitz Zentrum, Garching, Germany за

высококвалифицированную помощь в проведении экспериментов;

Arsen GOUKASSOV

Laboratoire Leon Brillouin, CEN Saclay, France за

высококвалифицированную помощь в проведении экспериментов;

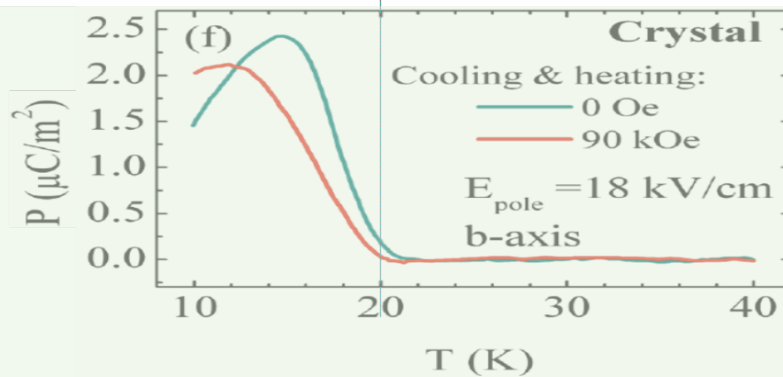
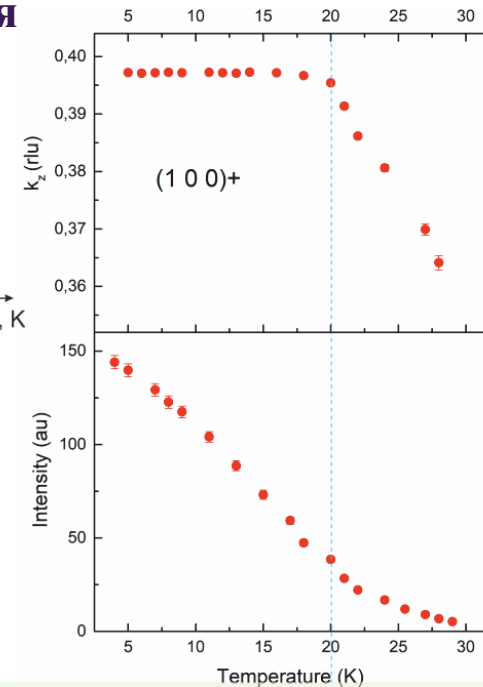
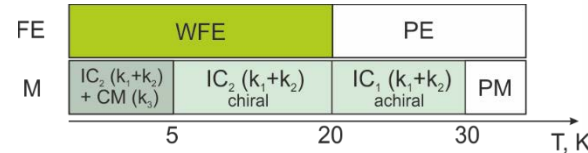
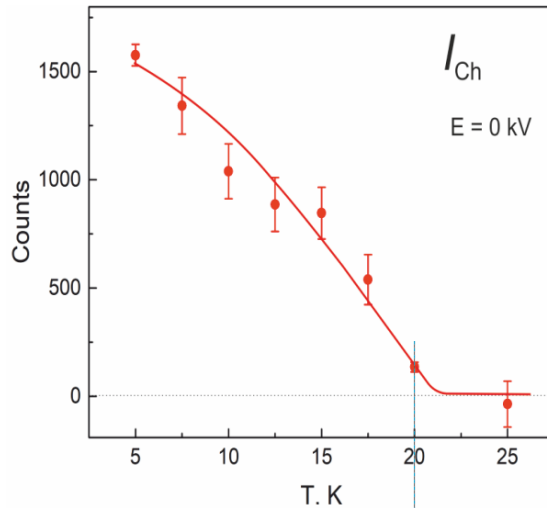
С.Н. Барило, С.Н. Ширяеву ИПЦ Материаловедения НАН Беларуси за предоставленные монокристаллы.

Искренняя благодарность

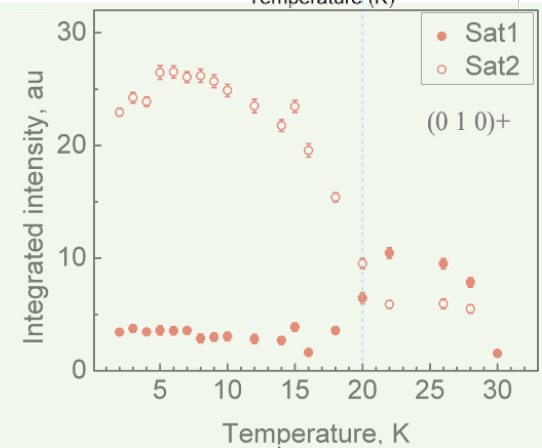


Спасибо за внимание!

Дифракция поляризованных нейтронов без анализа поляризации после рассеяния



S. Chattopadhyay et al. *Phys. Rev. B* **93**, 104406 (2016).



I.A. Zobkalo et al. *JMMM* **354**, 85, (2014).