



# Температурная и полевая эволюция кирального рассеяния в $\text{NdMn}_2\text{O}_5$ : дифракция поляризованных нейтронов.

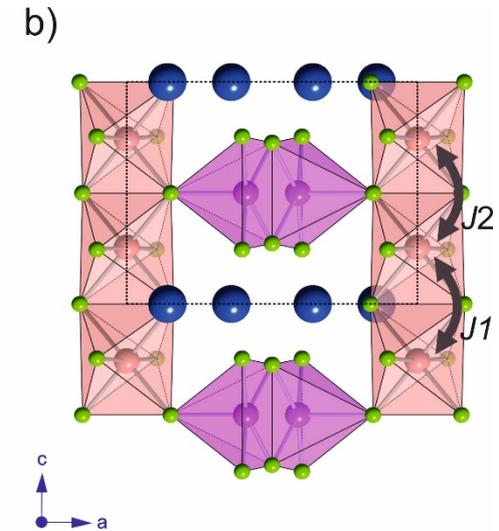
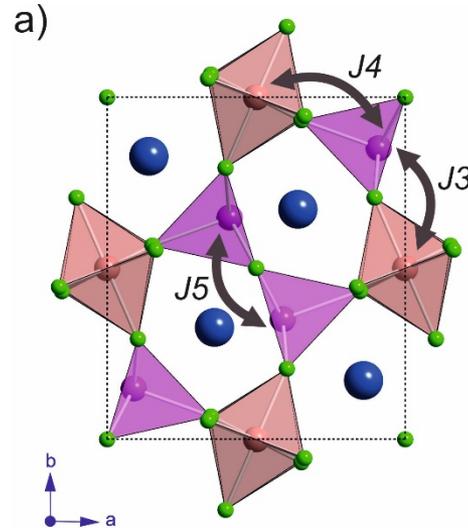
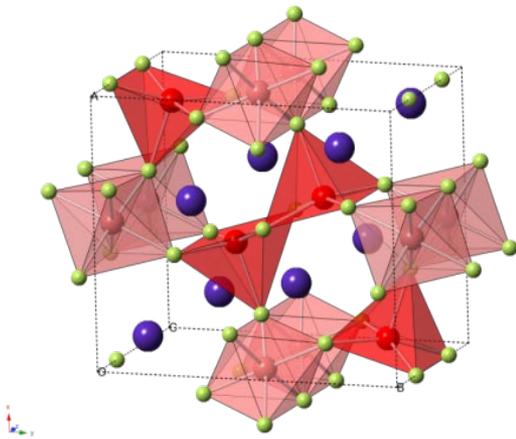
---

**А. Н. МАТВЕЕВА**

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

# Magnetic multiferroics $\text{RMn}_2\text{O}_5$ - $R = \text{Tb, Yb, Y, Dy, Er, Eu} \dots$

Пространственная группа *Pbam* (?)



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

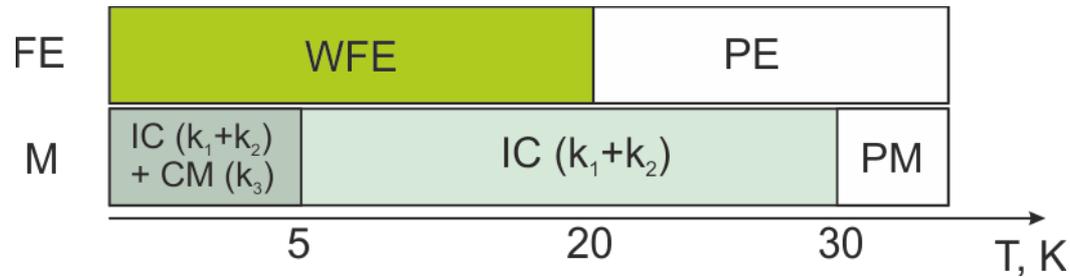


$J3, J4, J5$  – в плоскости *ab*  
 $J3, J4$  –  $\text{Mn}^{4+} - \text{Mn}^{3+}$   
 $J5$  –  $\text{Mn}^{3+} - \text{Mn}^{3+}$

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

Обменно - фрустрированная система !

# $\text{NdMn}_2\text{O}_5$



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  $\text{Nd}^{3+}$  –  $T_{\text{Nd}} = 5$  К

# Дифрактометр POLI – MLZ

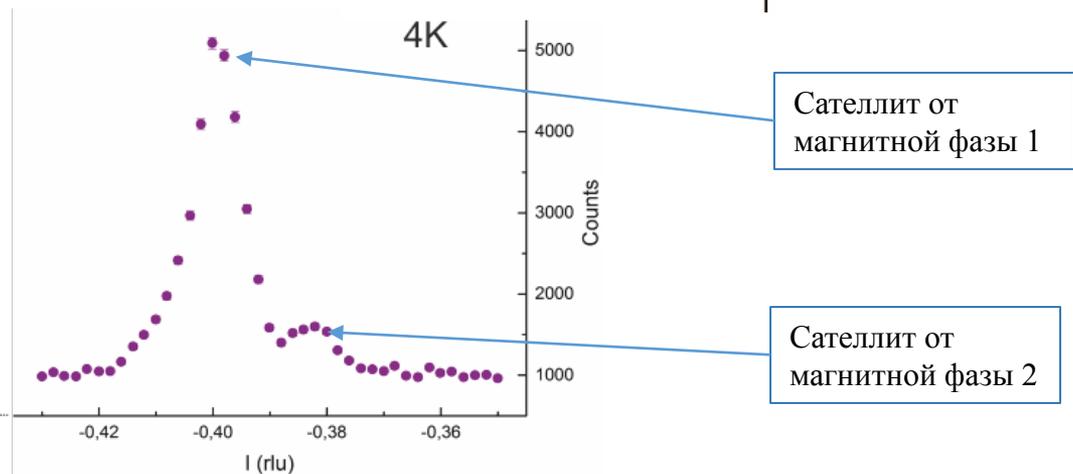
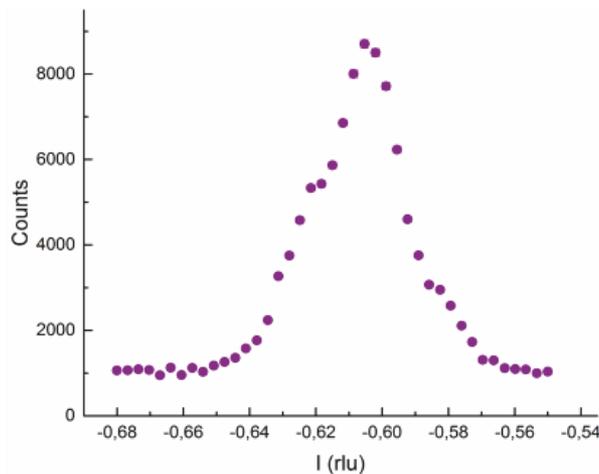
V. Hutanu, A. Sazonov

Монокристалл  $\text{NdMn}_2\text{O}_5$  –  
параллелепипед-like 3x3x4 мм<sup>3</sup>.

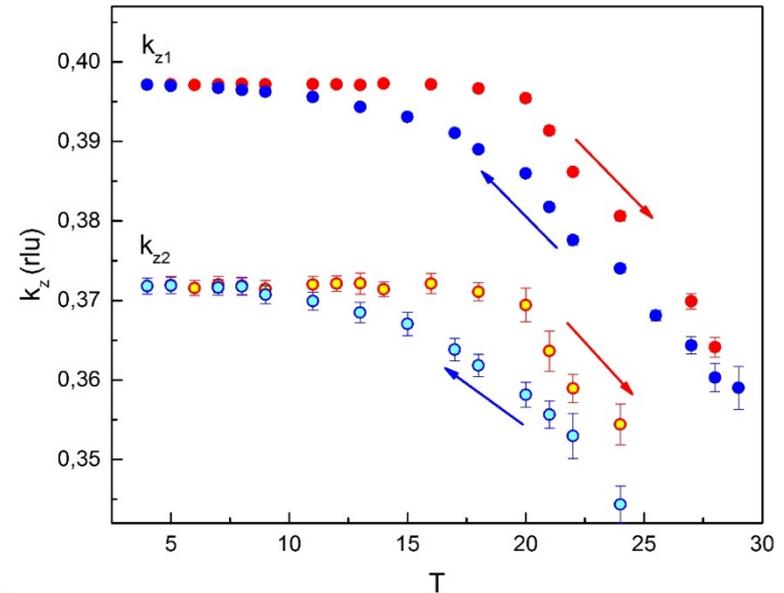
Ориентация в эксперименте:  
 $b$ -вертикальна,  
плоскость  $ac$ -горизонтальна.

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

$(0\ 0\ 0)_-$



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





# Сферическая нейтронная поляриметрия

Эллиптическая спираль

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

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

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

Элемент поляризационной матрицы

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

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

$\beta$  - 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)

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

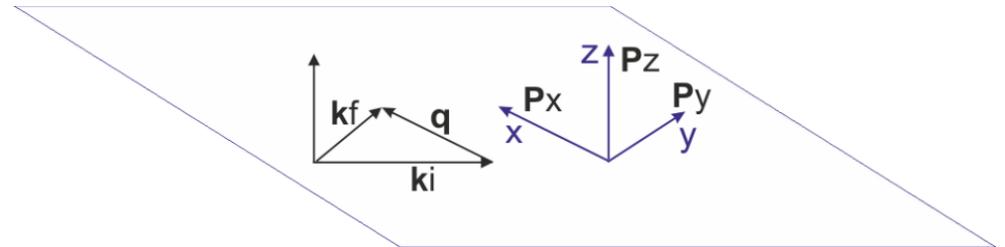
## Дифракция поляризованных нейтронов без анализа поляризации после рассеяния

*Интенсивность магнитного сателлита спиральной несоизмерной структуры*

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

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

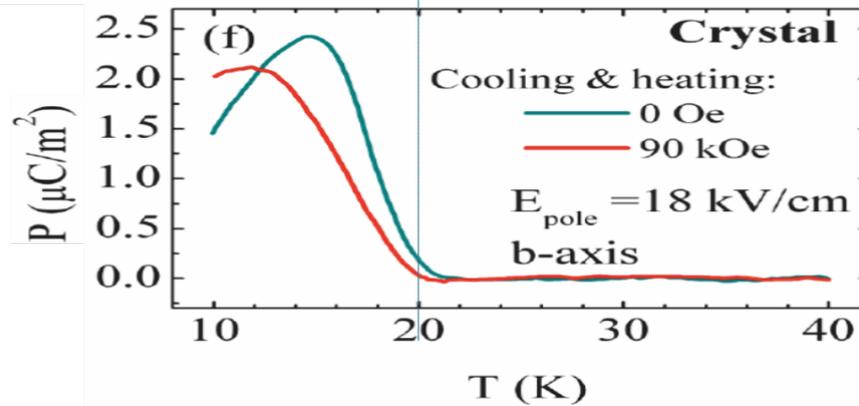
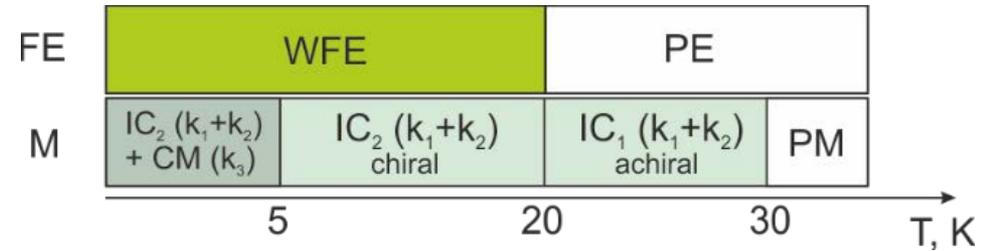
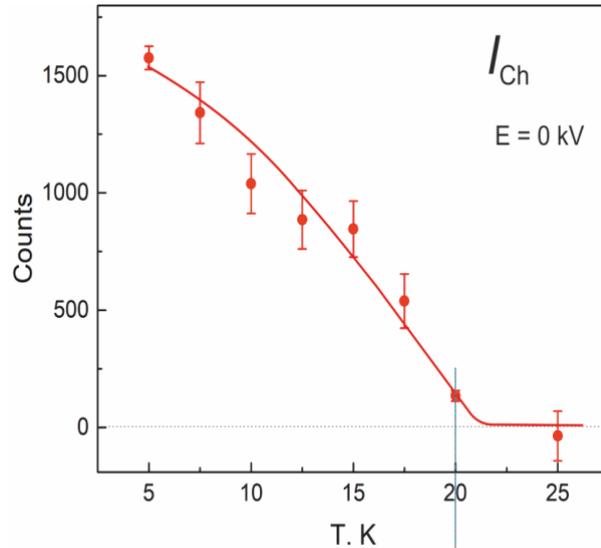
$I_x^\pm$  - интенсивность рассеянных нейтронов при поляризации падающего пучка  $P$  вдоль  $x$  (+) или против  $x$  (-).



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

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

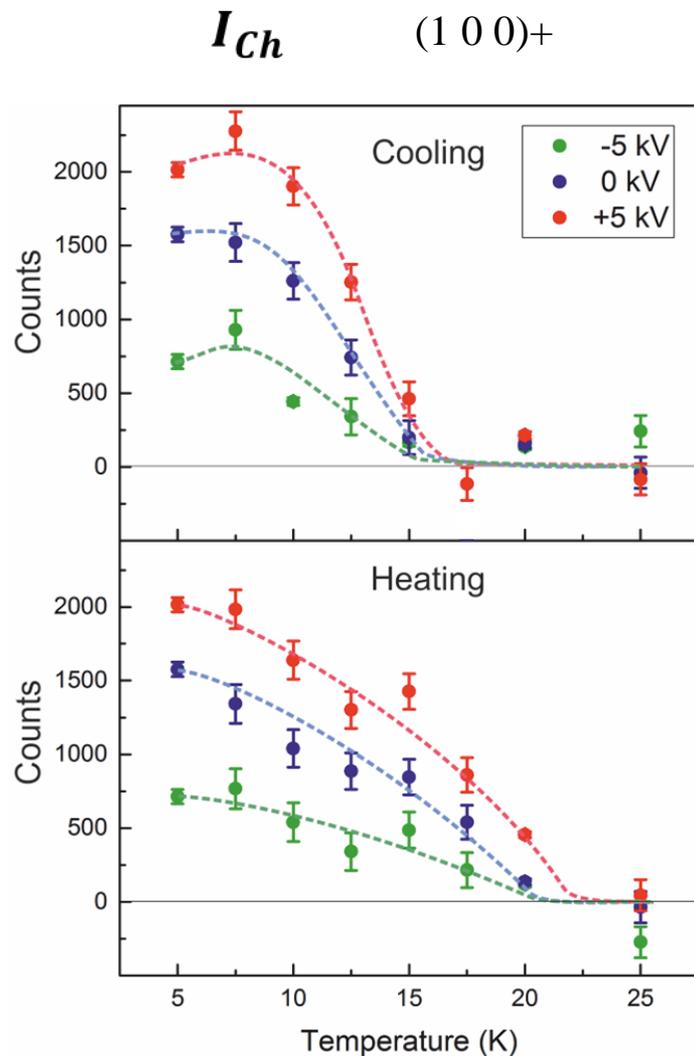
## Дифракция поляризованных нейтронов без анализа поляризации после рассеяния



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

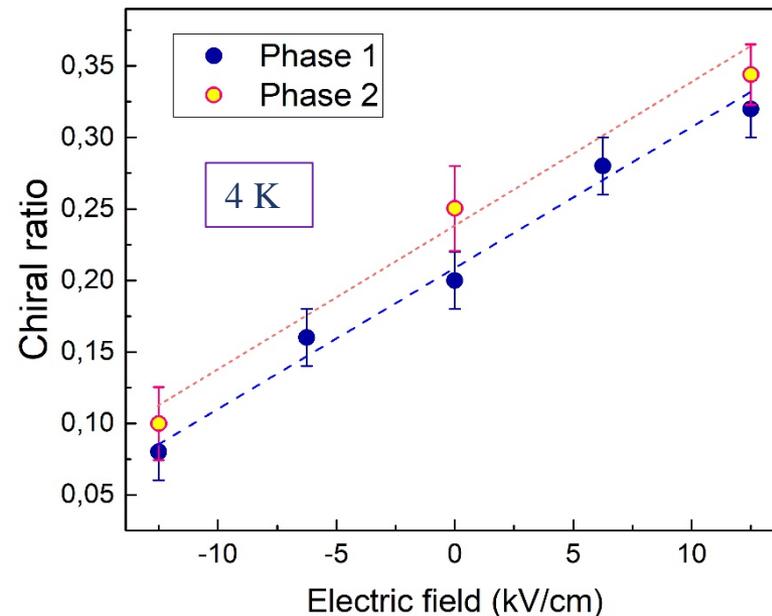
## Киральное рассеяние в электрических полях

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.

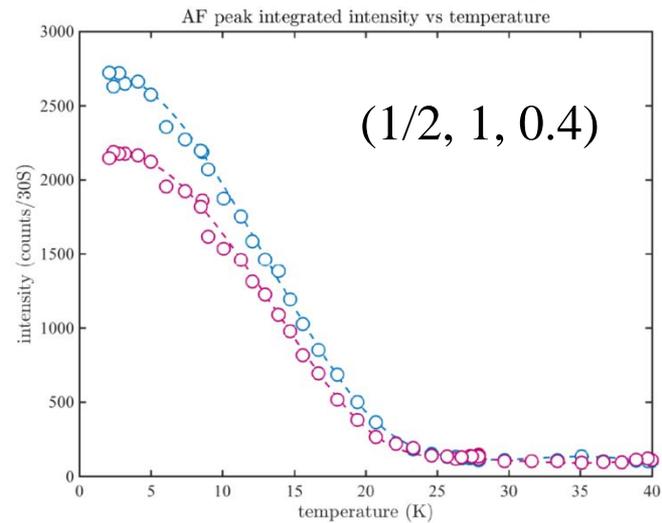
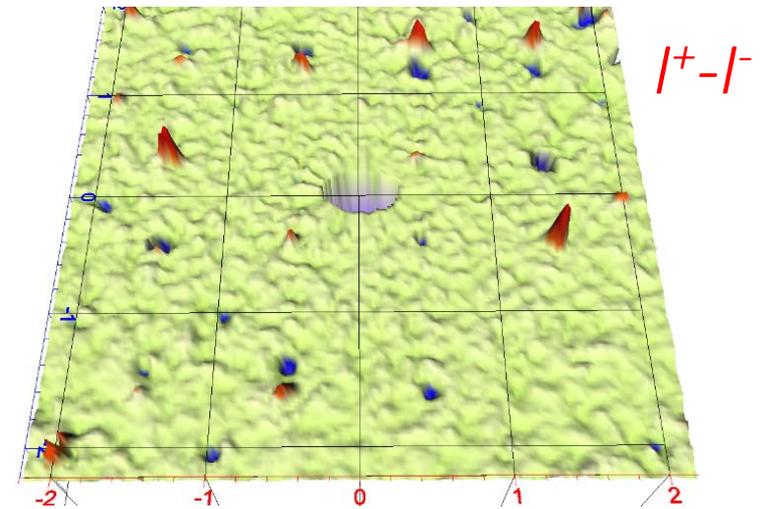
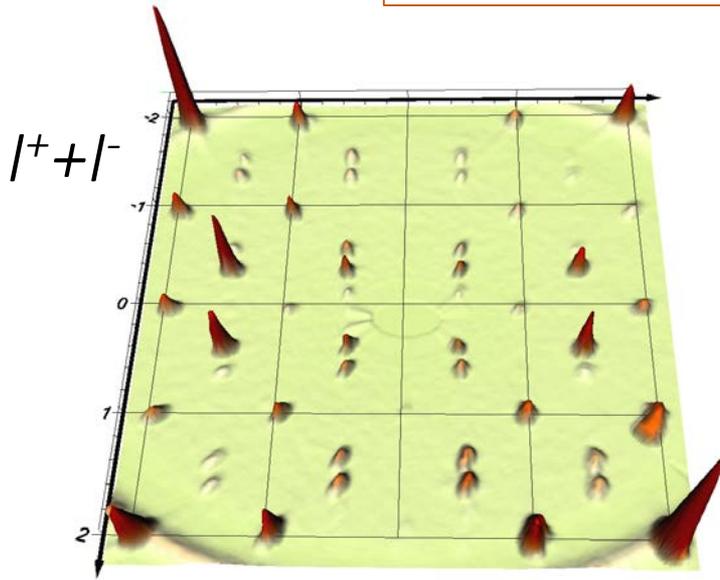
Полевая зависимость киральной заселенности.



# 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

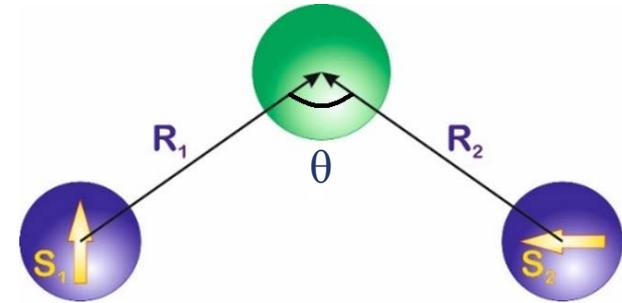
$$V_{DM} = d(\theta)[\mathbf{R}_1 \times \mathbf{R}_2][\mathbf{S}_1 \times \mathbf{S}_2];$$

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

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

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

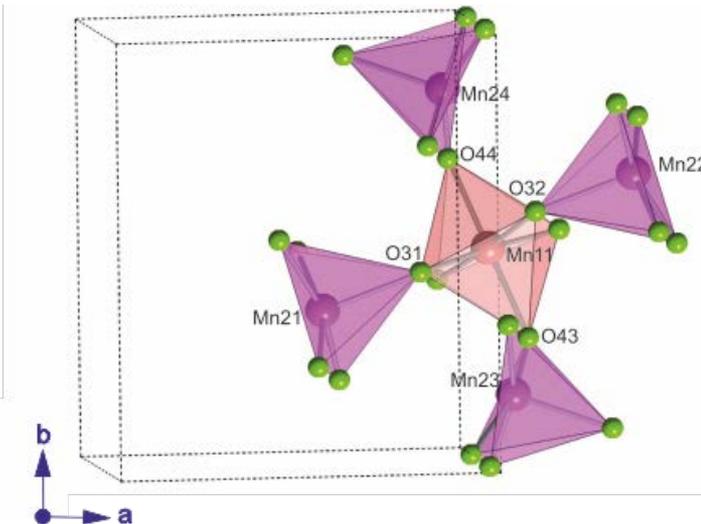
Знак обменного параметра  $d(\theta)$  очень чувствителен к углу связи вблизи некоторого критического угла  $\theta_k$ !



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

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

### DMI в $\text{RMn}_2\text{O}_5$



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  $\text{NdMn}_2\text{O}_5$  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  $\text{NdMn}_2\text{O}_5$ .

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  $\theta_k$ , характерной для  $\text{NdMn}_2\text{O}_5$ ;
- 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  $\theta_k$ . 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;

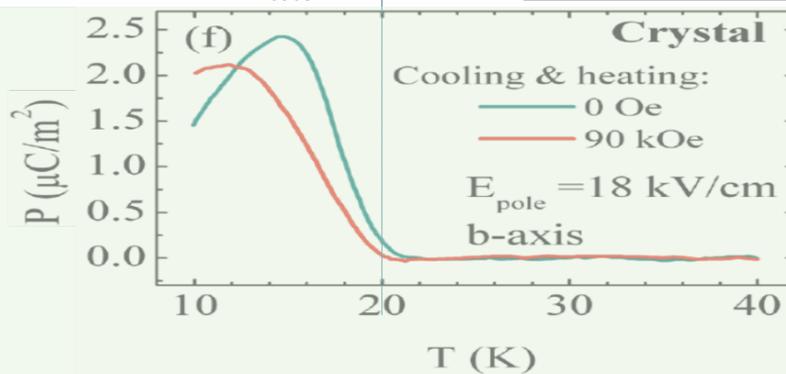
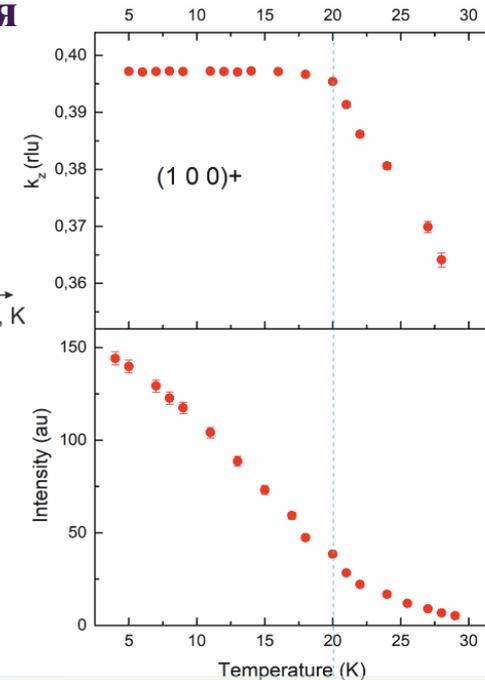
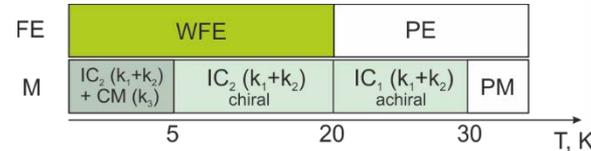
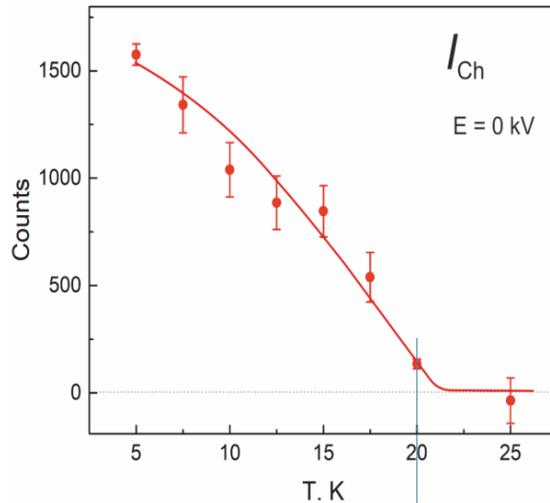
*С.Н. Барило, С.Н. Ширяеву* ИПЦ Материаловедения НАН Беларуси за предоставленные монокристаллы.

*Искренняя благодарность*

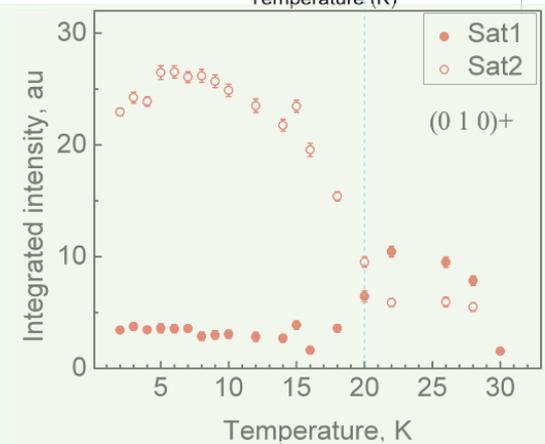


**Спасибо за внимание!**

# 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).