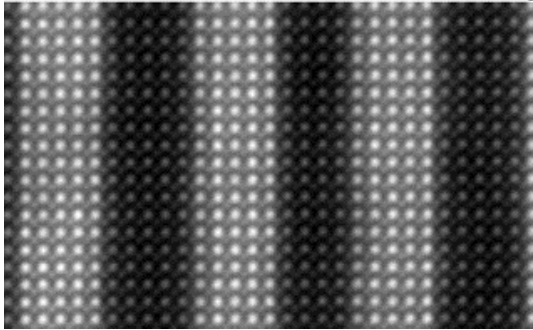




**Что мы узнали о спиновой киральности в многослойных магнитных системах с помощью рассеяния поляризованных нейтронов .**

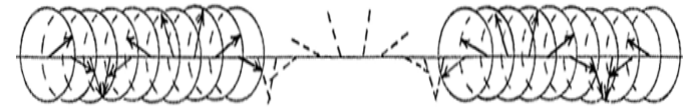
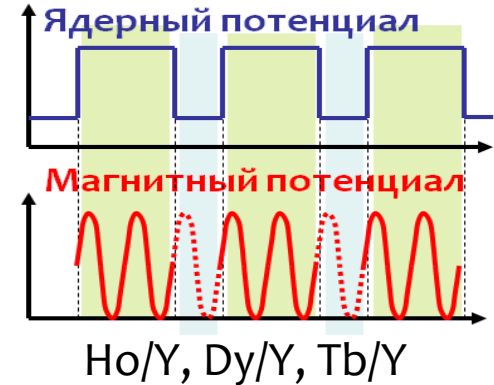
Докладчик: Владислав Тарнавич (ПИЯФ)

# СВЕРХСТРУКТУРЫ



(1986) в структуре Fe/Cr/Fe при толщине прослойки Cr =  $4 \div 8 \text{ \AA}$  ФМ слои Fe упорядочены антиферромагнитно;

(1988) открыт эффект гигантского магнитосопротивления в сверхрешетке Fe/Cr (Нобелевская премия 2007 г.).

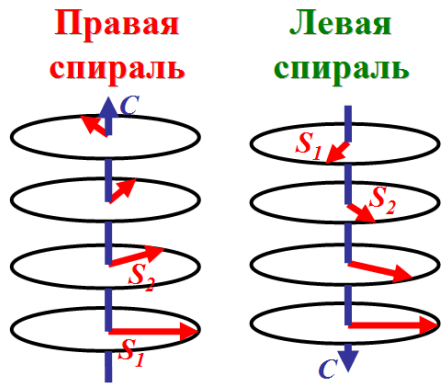


[Phys. Rev. Lett. 56 (1986) P. 259]

Спиновая спираль характеризуется:

- периодом
- волновым вектором

# СПИНОВАЯ КИРАЛЬНОСТЬ



$$\vec{C}_{i,i+1} = [\vec{S}_i \times \vec{S}_{i+1}]$$

- в гелимагнетиках спиновая киральность включена в магнитный параметр порядка;
- наличие кристаллографического центра инверсии  $\rightarrow$  система вырождена;
- вырождение снимается:

в нецентросимметричных кристаллах MnSi [Phys.Rev.B vol. 74 P. 214414]

внешним воздействием  $\rightarrow$  деформация кручения в Ho [Phys.Rev.B 64 (2001) P. 100402(R)]

внешним магнитным полем в Dy/Y [Phys. Rev. Lett. 100 № 1. (2008) P. 197203;

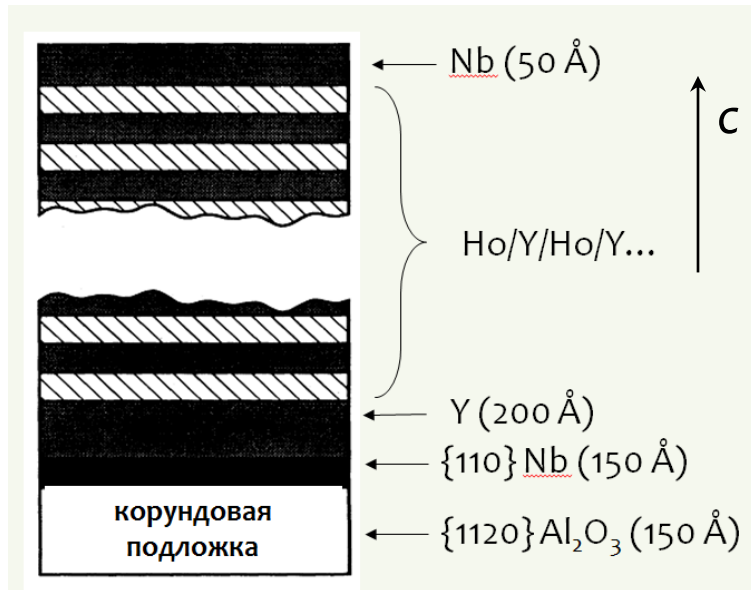
Phys. Rev. B. 82 (2010) P. 195432]

## ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Установить возможность и характерные особенности нарушения киральной спиновой симметрии многослойной структуры  $\text{Ho/Y}$  с приложением внешнего магнитного поля.

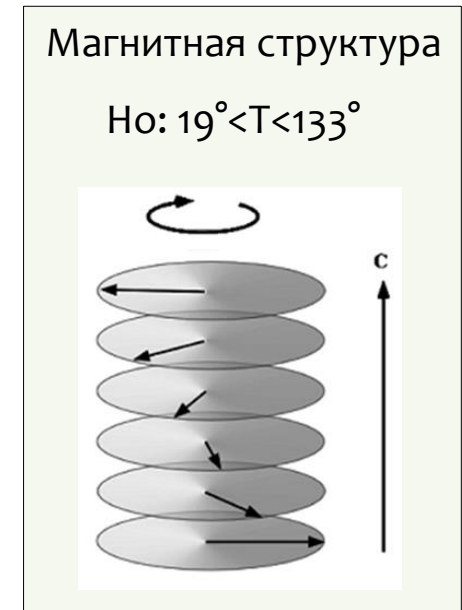
# ОБРАЗЦЫ

Многослойные структуры Ho/Y выращены методом МЛЭ



Тип решетки - ГПУ

Ho	2.823 Å
Y	2.808 Å



Обозначение образца	Толщина слоя Ho, [Å]	Толщина слоя Y [Å]	Количество бислоев
Ho45Y30	45	30	20
Ho25Y20	25	20	20
Ho20Y30	20	30	30
Ho60Y30	60	30	30
Ho25Y40	25	40	20

# РАССЕЯНИЕ ПОЛЯРИЗОВАННЫХ НЕЙТРОНОВ В ГЕЛИМАГНЕТИКАХ

Сечение рассеяния поляризованных нейтронов на спиновых спиральях можно представить в следующем виде [УФН. – 2002. – Т. 172, № 6. – С. 617]:

$$\sigma = \left[ \frac{rF(q)}{2} \right]^2 \left\{ S^2 (1 + (\hat{\mathbf{q}}\hat{\mathbf{c}})^2) + 2 \langle C \rangle (\hat{\mathbf{q}}\mathbf{P}_0)(\hat{\mathbf{q}}\hat{\mathbf{c}})(n_L - n_R) \right\} \delta(\mathbf{q} - \mathbf{k}) \sim I(P_0)$$

$\hat{\mathbf{c}} = [\mathbf{S}_1 \times \mathbf{S}_2] / \langle C \rangle$  – единичный киральный вектор,

$n_L$  и  $n_R$  – уровни заселённости доменов с лево- и право-закрученными спиральями,

$\hat{\mathbf{q}} = \mathbf{q} / q$  – единичный вектор переданного импульса,

$\mathbf{P}_0$  – вектор поляризации падающего нейтронного пучка

**P-независимая часть рассеяния:**

$$\Sigma\sigma(\mathbf{q}) = \sigma(\mathbf{q}, \mathbf{P}_0) + \sigma(\mathbf{q}, -\mathbf{P}_0) \sim S^2 (1 + (\hat{\mathbf{q}}\hat{\mathbf{c}})^2)$$

**P-зависимая часть рассеяния:**

$$\Sigma\sigma(\mathbf{q}) = \sigma(\mathbf{q}, \mathbf{P}_0) - \sigma(\mathbf{q}, -\mathbf{P}_0) \sim \langle C \rangle (\hat{\mathbf{q}}\mathbf{P}_0)(n_L - n_R)$$

Для удобства сопоставления двух вкладов в рассеяние мы вводим киральный параметр  $\gamma$ :

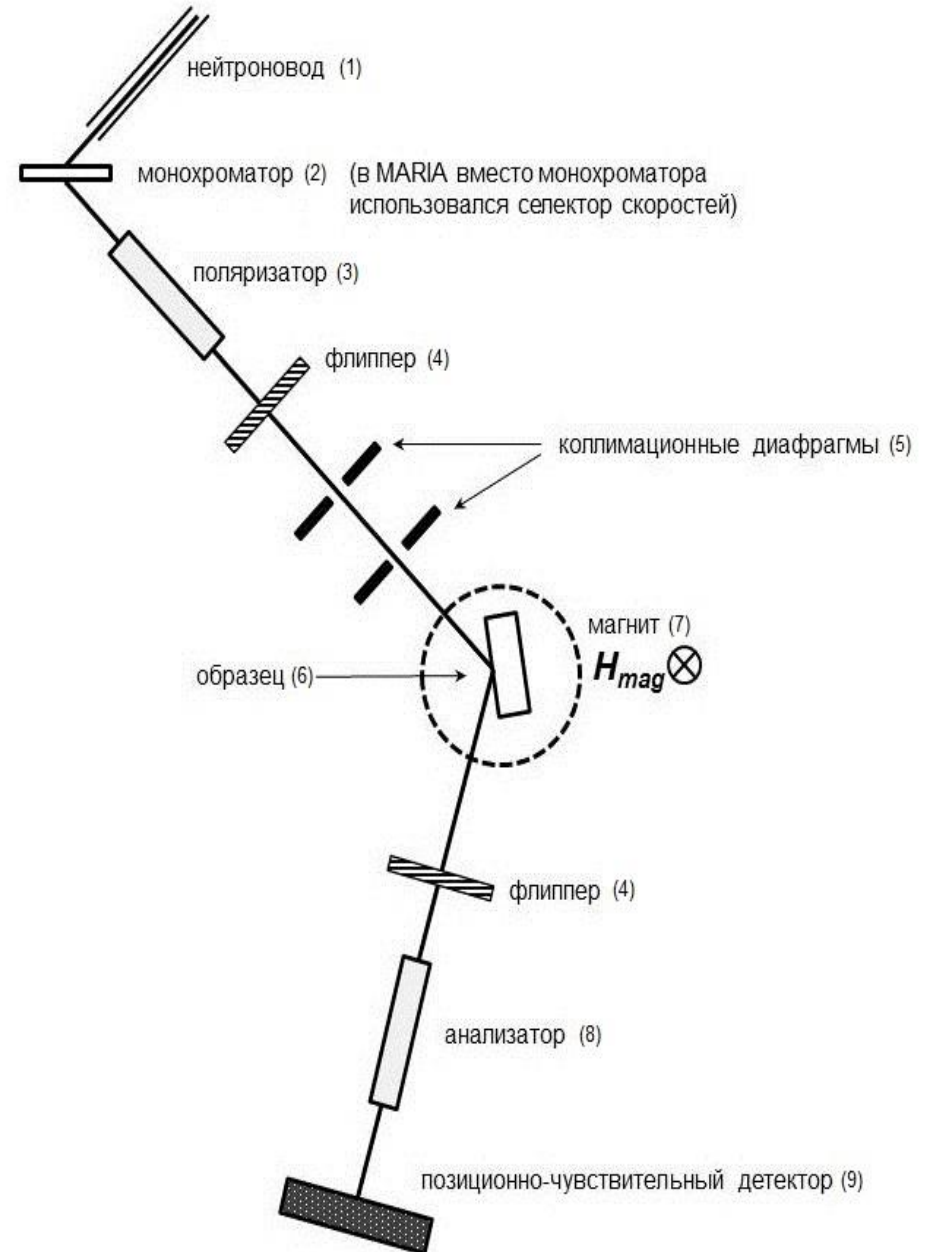
$$\gamma = \frac{\langle C \rangle (\hat{\mathbf{q}}\mathbf{P}_0)(n_L - n_R)}{S^2} = \left| \frac{1}{P_0} \frac{I(+P_0) - I(-P_0)}{I(+P_0) + I(-P_0)} \right|$$

# РАССЕЯНИЕ ПОЛЯРИЗОВАННЫХ НЕЙТРОНОВ : ЭКСПЕРИМЕНТ

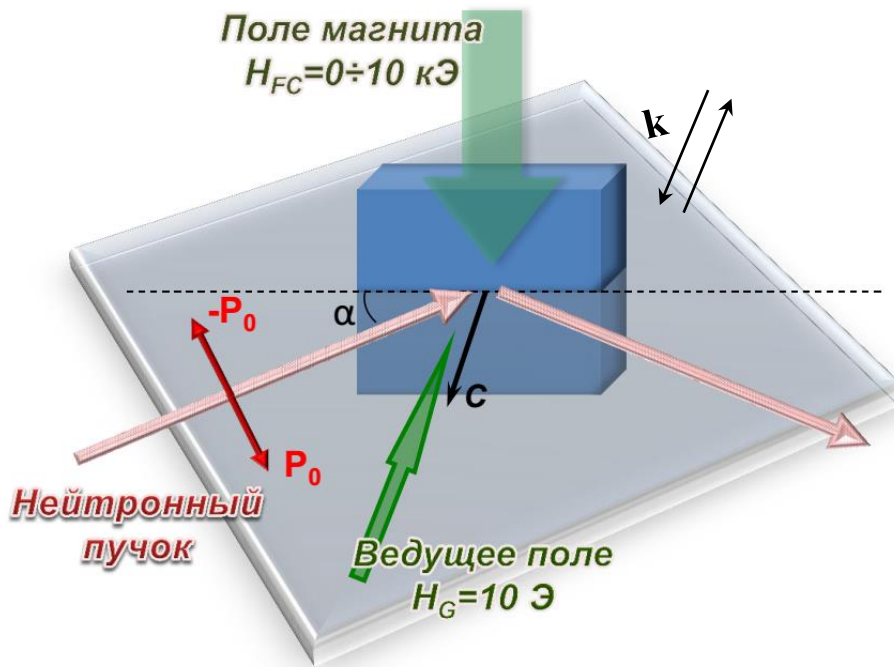
Многослойная структура  $\text{Ho/Y}$   
исследовалась на

- MARIA (JCNS, Гархинг, Германия)
- SuperADAM (ILL, Гренобль, Франция).

Параметр	MARIA	SuperADAM
поляризация $P$ , %	98	99.7
длина волны $\lambda$ , Å	4.5÷10	5.183
разрешение, $\Delta \lambda / \lambda$	0.1	0.005



# РАССЕЯНИЕ ПОЛЯРИЗОВАННЫХ НЕЙТРОНОВ : ЭКСПЕРИМЕНТ



Режимы охлаждения:

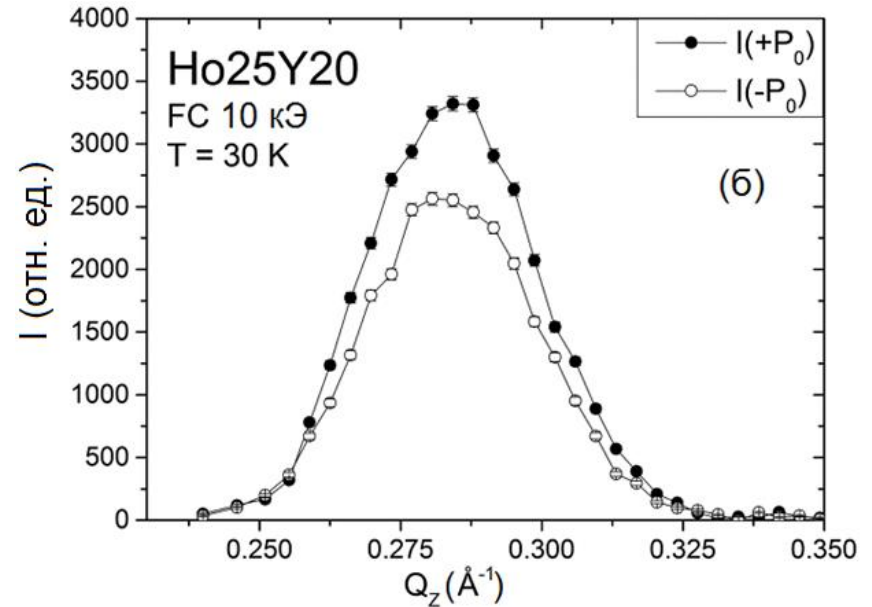
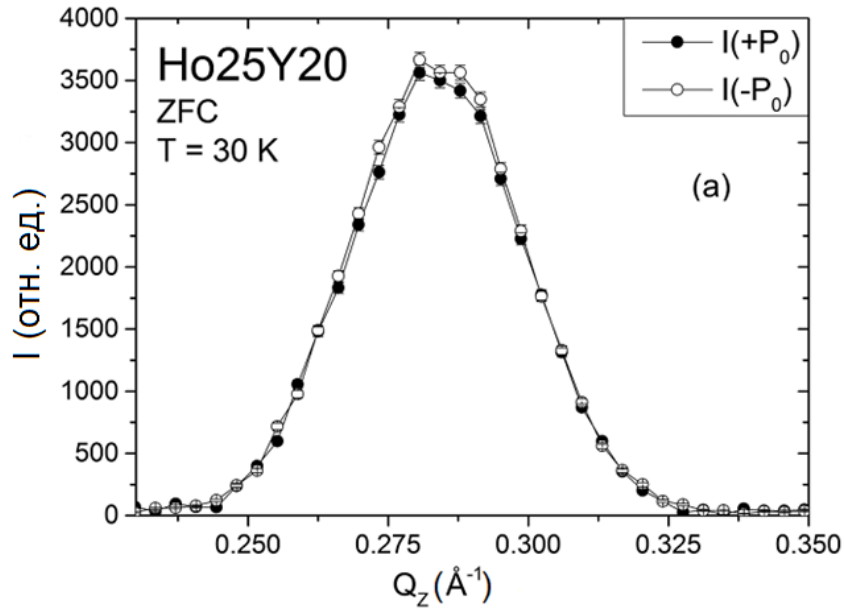
- ZFC – охлаждение без поля
- FC – охлаждение в поле

**Магнитной анизотропии  $H_0$  в плоскости  $ab$  нет.**

[Zverev V.I., et al., J. Phys.: Condens. Matter. – 2015. – Vol. 27. – P. 146002.]



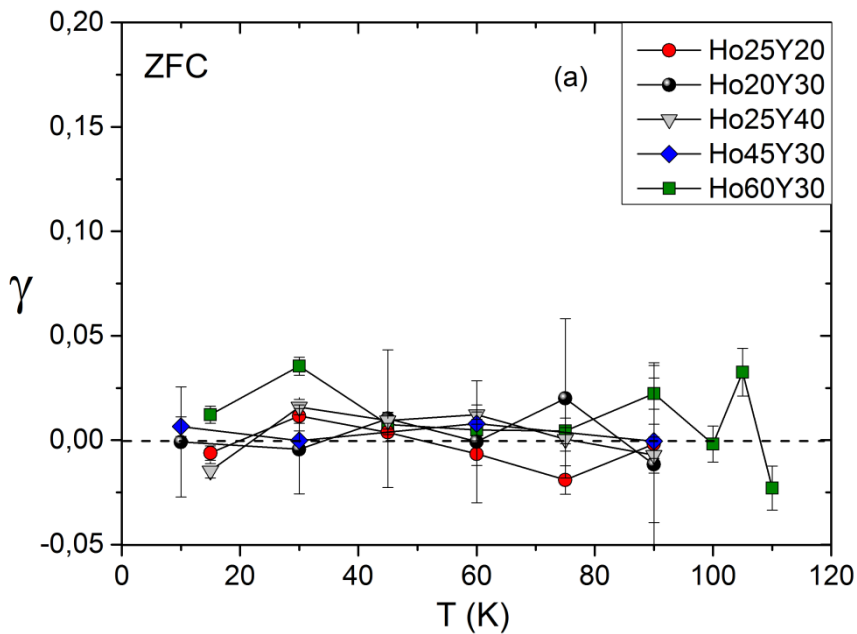
## Нарушение киральной спиновой симметрии



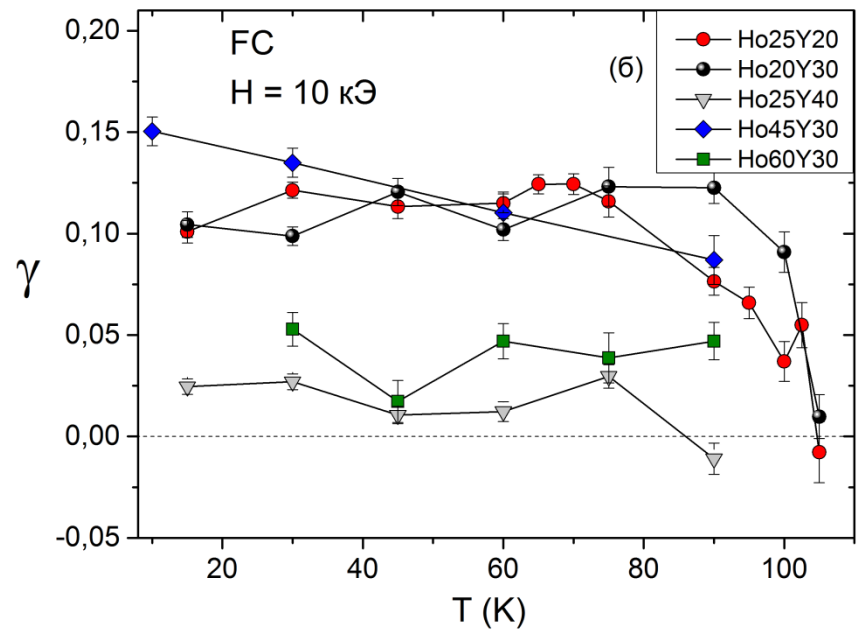
Профиль экспериментальной кривой зеркального отражения от структуры Ho25Y20 для двух значений поляризации  $I(+P_0)$  и  $I(-P_0)$ , полученных при охлаждении образца до 30 K в режиме ZFC (а) и в режиме FC при  $H = 10$  кЭ (б).

# Температурная зависимость параметра $\gamma$

$$\gamma = \frac{\langle C \rangle (\hat{\mathbf{q}} \mathbf{P}_0) (n_L - n_R)}{S^2} = \left| \frac{1}{P_0} \frac{I(+P_0) - I(-P_0)}{I(+P_0) + I(-P_0)} \right|$$

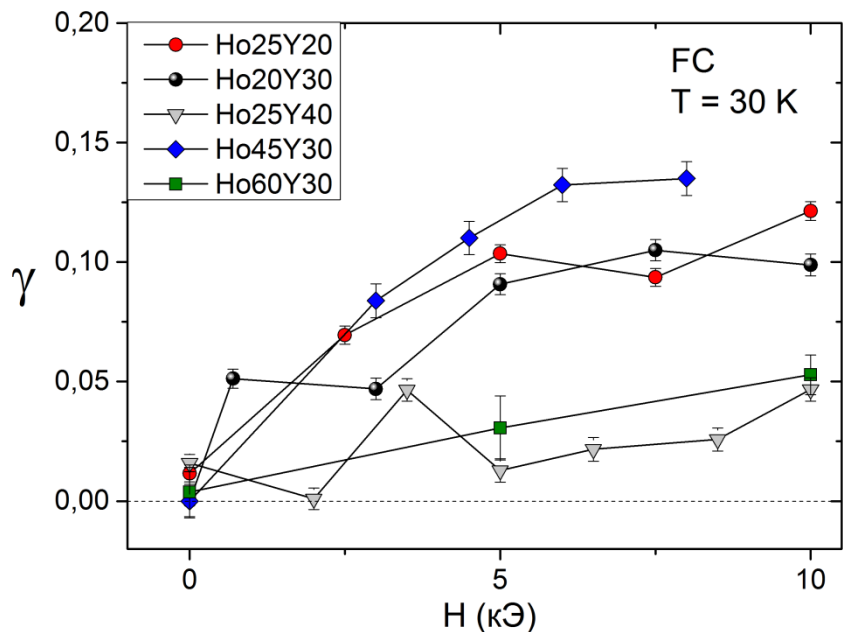


Охлаждение образца в нулевом поле



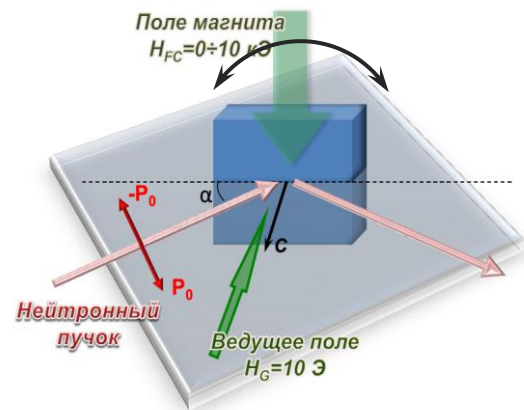
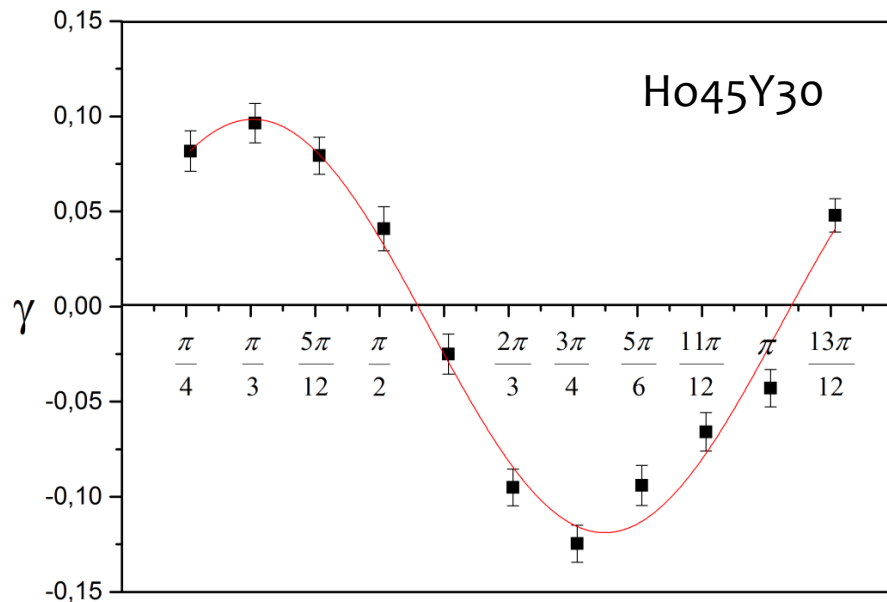
Полевое охлаждение образца при H = 10 кЭ

## Полевая зависимость параметра $\gamma$

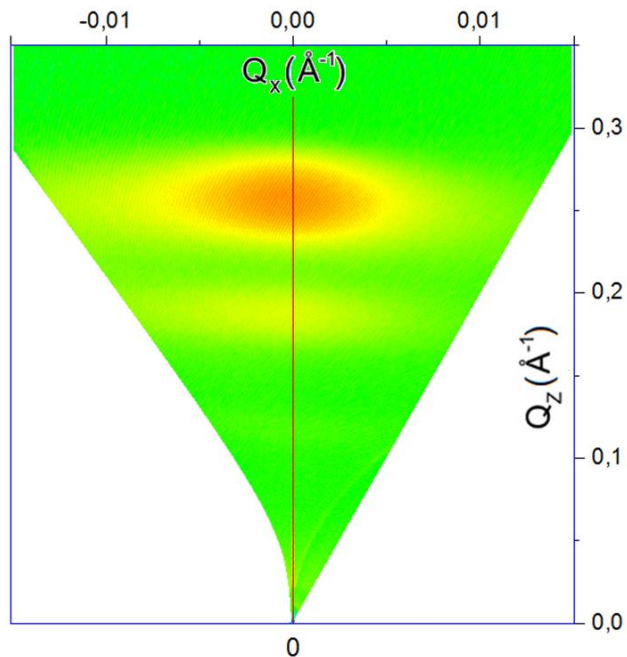


Полевое охлаждение образца до  
T = 30 K

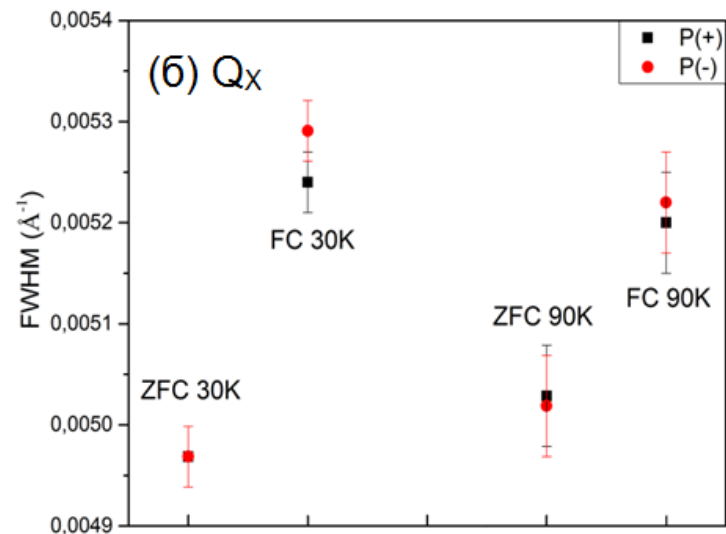
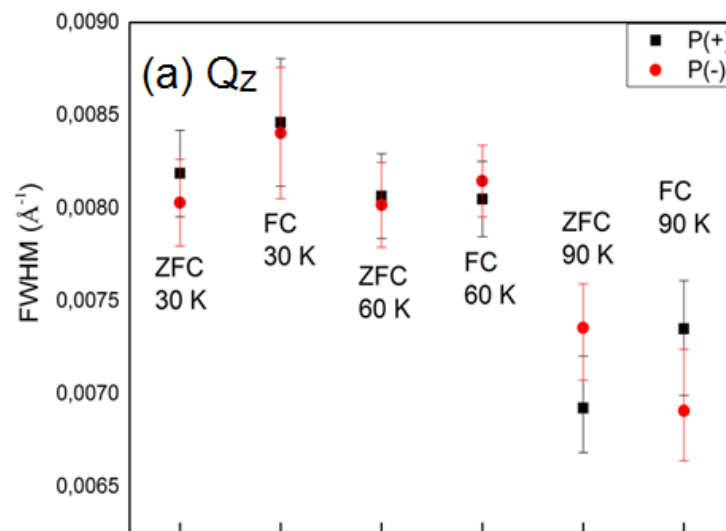
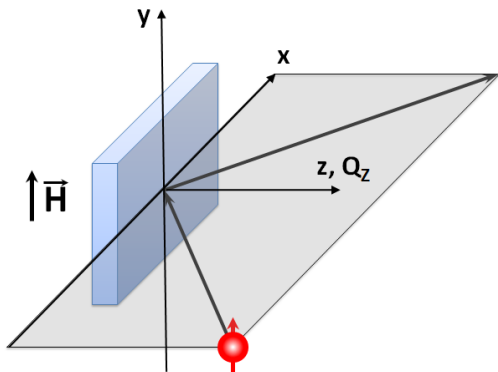
## Азимутальная зависимость параметра $\gamma$



# Влияние поля на размеры спиральных доменов



Двумерная карта нейтронного рассеяния от структуры **НобоУзо**, полученная в режиме ZFC при  $T = 30$  K (поляризация  $+P_0$ )



Полуширина пика по направлению  $Q_z$  и  $Q_x$  при различных режимах охлаждения

# ГИПОТЕЗА №1

возникновением на границе раздела слоёв взаимодействия Дзялошинского-Мория [Phys. Rev. B **81**, 020404(R) (2010), JMMM. V. 267–270 (2015) Pp. 381]

RAPID COMMUNICATIONS

PHYSICAL REVIEW B **81**, 020404(R) (2010)

## Control of chirality normal to the interface of hexagonal magnetic and nonmagnetic layers

Jason T. Haraldsen and Randy S. Fishman

Materials Science and Technology Division, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tennessee 37831, USA

(Received 2 November 2009; revised manuscript received 11 December 2009; published 8 January 2010)

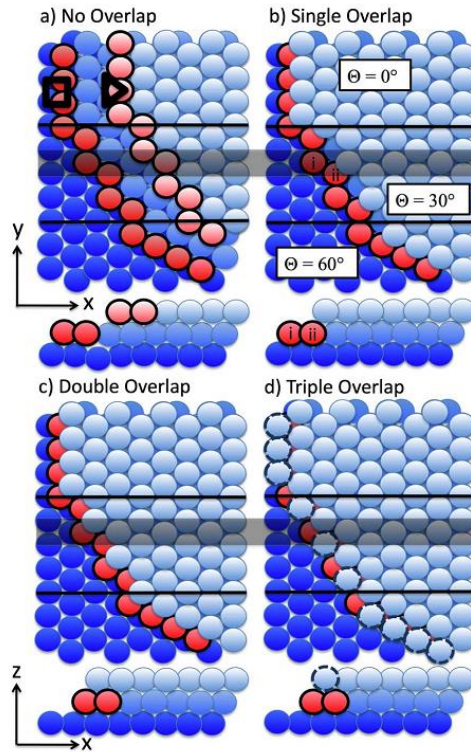
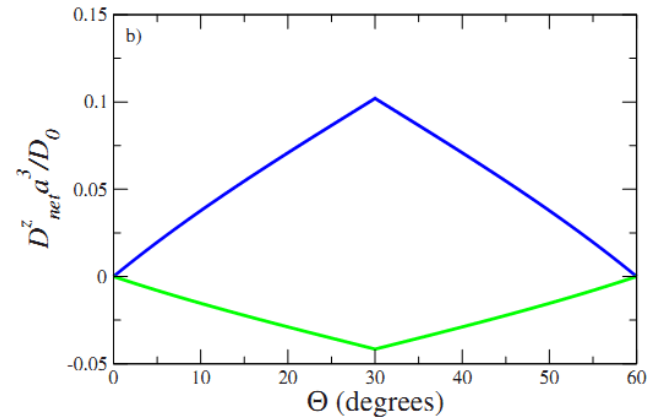


FIG. 2. (Color online) The HCP stacking of nonmagnetic (blue/light gray without borders) and magnetic (red/gray with solid dark borders) sites for interface angles  $\Theta = 0^\circ$ ,  $30^\circ$ , and  $60^\circ$  with (a) zero, (b) single, (c) double, and (d) triple overlapping of steps. The larger

$$D_{ij} = \frac{D_0}{R_{ij}} \sum_n \frac{\mathbf{R}_{in} \cdot \mathbf{R}_{jn} (\mathbf{R}_{in} \times \mathbf{R}_{jn})}{(R_{in} R_{jn})^3}$$



За счёт перекрытия магнитных и немагнитных атомов, «ступеньки» на границе раздела слоёв способны привести к появлению антисимметричного взаимодействия Дзялошинского-Мория, ориентированного по направлению нормали к интерфейсу в магнитной гетероструктуре.

Field induced spin chirality and chirality switching in magnetic multilayers

Elena V. Tartakovskaya <sup>a,b,\*</sup>

<sup>a</sup> Institute of Magnetism NAS of Ukraine, Vernadsky blvd 36b, 03142 Kiev, Ukraine

<sup>b</sup> Institute of High Technologies, Taras Shevchenko National University of Kiev, 03022 Kiev, Ukraine

$$E_z(\varphi_0) = -g\mu_B SH \sum_{n=0}^N \cos(\theta_n) =$$

$$= -g\mu_B SH \left\{ (1 - 4\xi^2) + 4\xi^2 \frac{\sin \Phi}{\sin q} \cos(Nq + 2\varphi_0) \right\},$$

$$E_{DM}(\varphi_0) = DS^2 [\sin(\theta_N(\varphi_0) - \theta_{N-1}(\varphi_0)) + \sin(\theta_1(\varphi_0) - \theta_0(\varphi_0))],$$

$\theta_n$  – угол между моментами в  $n$  – ой плоскости и магнитным полем;

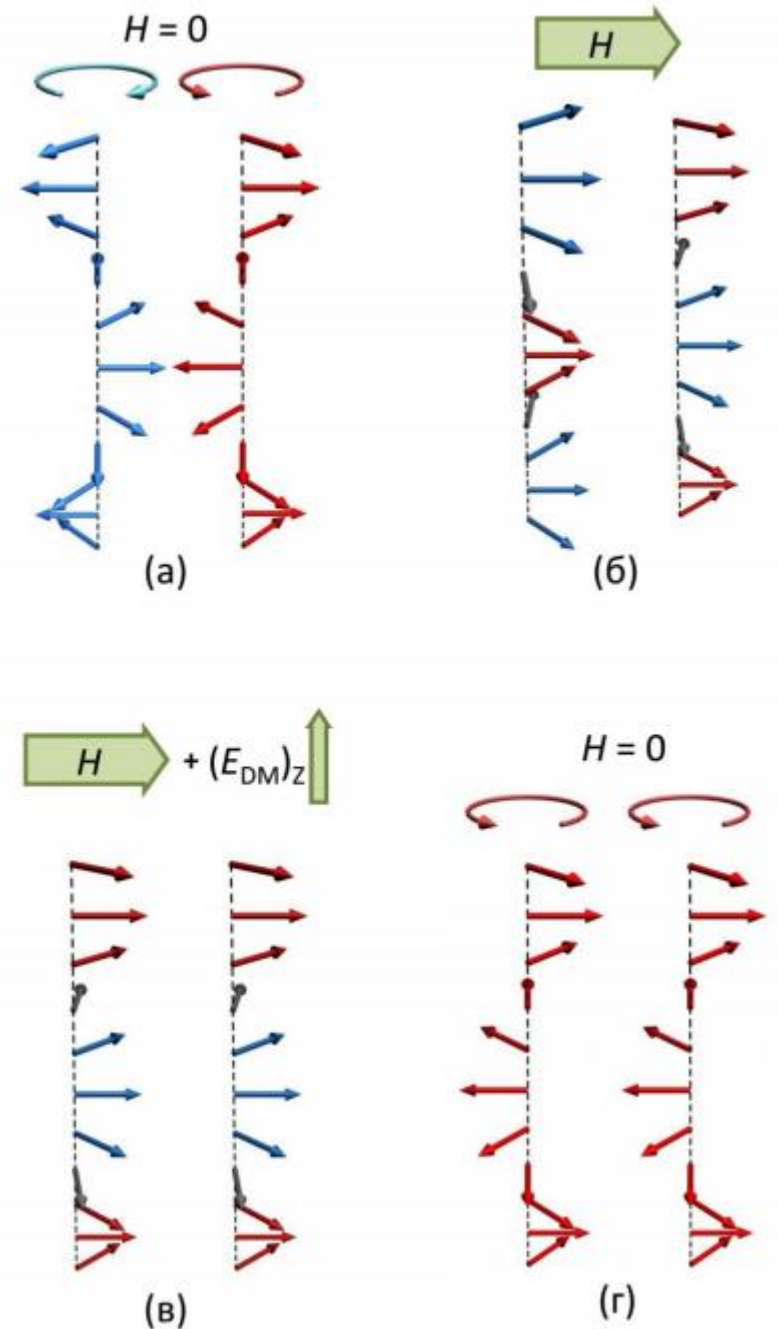
$q$  – угол между спинами двух соседних монослоёв;

$\Phi$  – суммарный поворот спина в слое;

$\theta_i(\varphi_0)$  – углы между спинами на границах слоя;

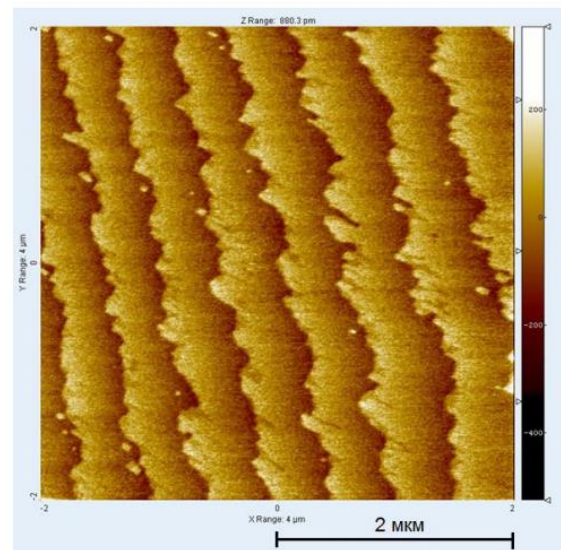
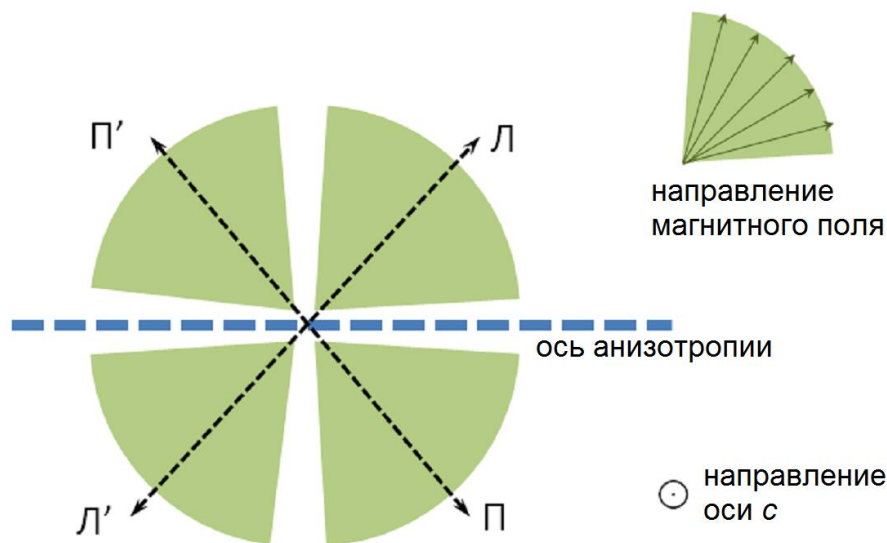
$\phi_0$  – безразмерная константа

if  $\varphi_0 + (Nq/2) = \pi k$   $E_z$  минимизируется и становится меньше  $E_{DM}$



## Гипотеза №2

Существование в образце одноосной анизотропии и не инверсой симметрии пленки.



$$W(k, \psi) \Big|_{|\sin(\varphi_0)| \ll 1} \approx \underbrace{+2HM_0d \cdot \frac{\sin(kd/2)}{kd}}_{\text{Энергия Зеемана}} - \underbrace{AM_0^2d \frac{\cos(2\psi) \sin(kd(1/2 + \Delta)) \cos(kd(1/2 - \Delta))}{2kd}}_{\text{Симметричная часть энергии анизотропии}} + \underbrace{AM_0^2d \frac{\sin(2\psi)}{2kd} \sin(kd(1/2 + \Delta)) \sin(kd(1/2 - \Delta))}_{\text{Ассиметричная часть энергии анизотропии}}.$$

$\Phi_0$  угол между моментом в центре геликоида и полем;  
z-безразмерная константа,  
направление вектора  $\mathbf{k}$  определяет киральность

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

- Установлено нарушение киральной спиновой симметрии в многослойной Ho/Y структуре при охлаждении образцов ниже  $T_N$  во внешнем магнитном поле;
- Параметр  $\gamma$  демонстрирует знакопеременную синусоидальную (с периодом  $174^\circ \pm 8^\circ$ ) зависимость от направления магнитного поля;
- Изложены два возможных сценария нарушения спиновой киральной симметрии.



# Благодарности



Григорьев С. В., Четвериков Ю. О., Черненко Ю. П. – ПИЯФ НИЦ КИ



Д. Лотт – HZG, Geesthacht, Germany



С. Маттаух – JCNS, Garching, Germany



UPPSALA  
UNIVERSITET

V. Караклис, А. Олешкевич – Uppsala University, Uppsala, Sweden



Е. Тартаковская, Киев – ИМ НАН Украины

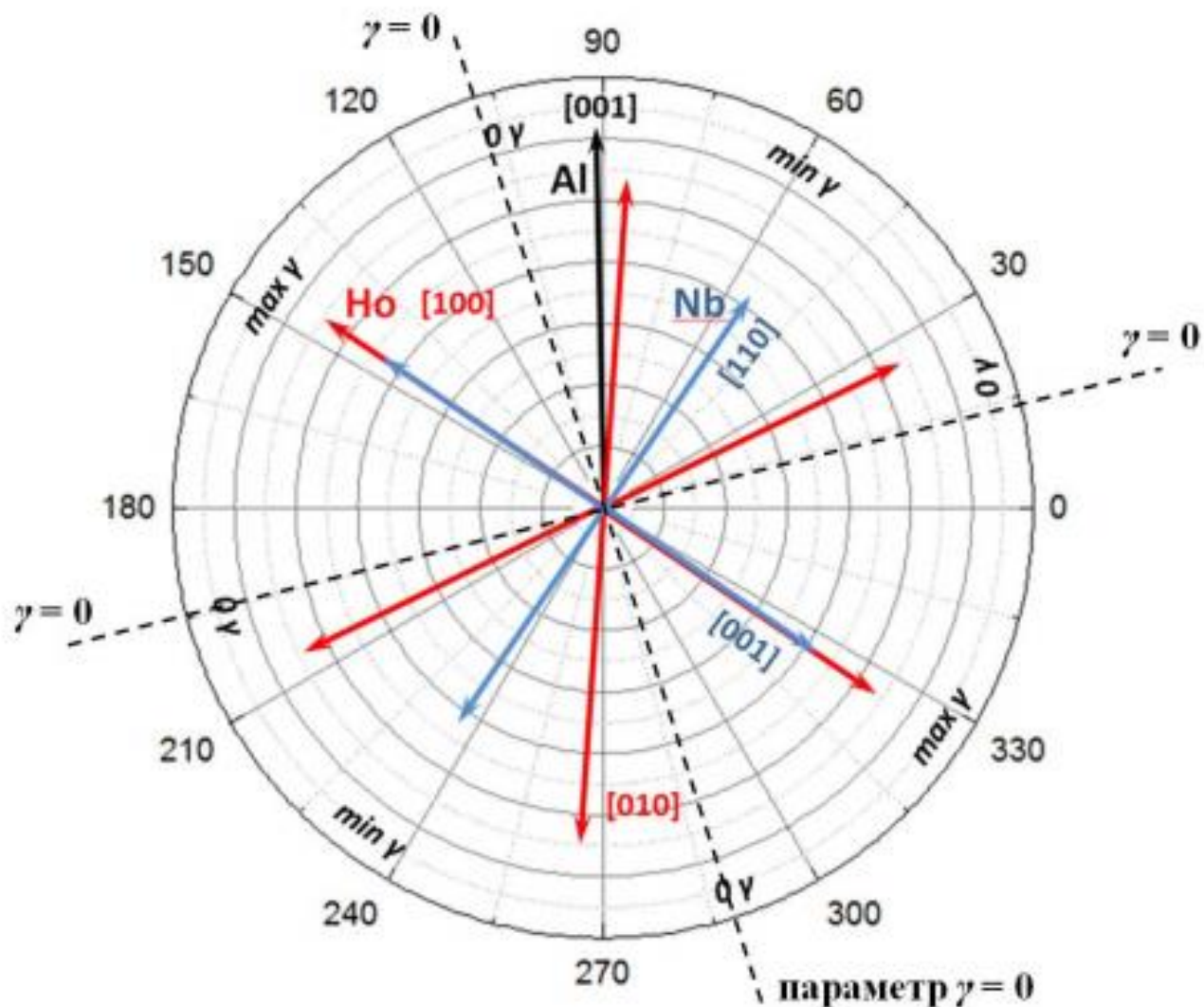


Рис. 3.13. Направления кристаллографических осей слоёв  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , Nb и Ho/Y в образце Ho45Y30, сопоставленные с круговой диаграммой кирального параметра Малеева  $\gamma$ .

Спиновая спираль переходит в так называемую  $\sin$ -структуру [46], которая представляет из себя веерную спиновую структуру, описанную ранее. Если значение  $H$  оказывается порядка или больше  $H_{C_1}/2$ , веерная структура может быть представлена выражением:

$$\sin\left(\frac{\theta_n}{2}\right) = 2\xi \sin(nq + \varphi_0) \quad (3.1)$$

где  $\theta_n$  – угол между моментами в  $n$  – ой плоскости и магнитным полем,  $q$  – угол между спинами двух соседних монослоёв,  $\xi$  – безразмерная константа ( $0 < 2\xi < 1$ ), которая зависит от величины внешнего поля и константы обменного взаимодействия [47]. Межслоевое РККИ взаимодействие рассматривается как значительно более слабое, чем внутрислоевое [4, 48] и в данной модели не учитывается. Поэтому рассмотрим модель на примере одного магнитного слоя

$$\begin{aligned} E_Z(\varphi_0) &= -g\mu_B SH \sum_{n=0}^N \cos(\theta_n) = \\ &= -g\mu_B SH \left\{ (1 - 4\xi^2) + 4\xi^2 \frac{\sin\Phi}{\sin q} \cos(Nq + 2\varphi_0) \right\}, \end{aligned} \quad (3.2)$$

где  $\varphi_0$  есть некоторая формальная константа, причём  $\sin(\theta_0/2) = 2\xi \sin(\varphi_0)$  и рассматривается как изначально неизвестный параметр, по которому минимизируется энергия.

Энергия  $E_Z(\varphi_0)$  достигает минимума при:

$$\varphi_0 = -\frac{Nq}{2} + k\pi, \quad \text{если } \Phi > 0, \quad \text{то есть } 2\pi m < \Phi < \pi(1 + 2m) \quad (3.3)$$

или

$$\begin{aligned} \varphi_0 &= -\frac{Nq}{2} + \pi(2k + 1)/2 \quad \text{если } \sin\Phi < 0, \\ &\text{то есть } \pi(1 + 2m) < \Phi < 2\pi(1 + m) \end{aligned} \quad (3.4)$$

где  $\Phi$  – суммарный поворот спина в слое,  $k$  и  $m$  – целочисленные значения, включая 0.

$$E_{DM}(\varphi_0) = DS^2 [\sin(\theta_N(\varphi_0) - \theta_{N-1}(\varphi_0)) + \sin(\theta_1(\varphi_0) - \theta_0(\varphi_0))], \quad (3.5)$$

где  $\theta_i(\varphi_0)$  – углы между спинами на границах слоя и  $D$  – постоянная ДМ взаимодействия в единицах энергии. Расчёты, выполненные в работе [46] показывают, что при значениях  $\varphi_0 + (Nq/2) = \pi k$  Зеемановская энергия  $E_Z$ , достигает минимума и оказывается ниже  $E_{DM}$ . Это означает, что энергии ДМ