

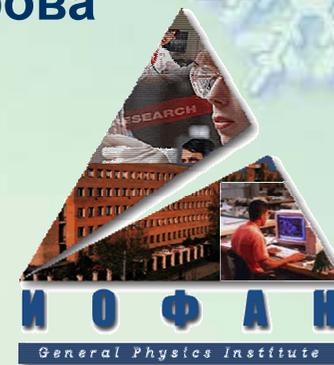
**ХХХХІV школа  
по Физике Конденсированного Состояния Вещества  
ФКС-2010**

# **Прогресс в исследовании мультиферроиков**

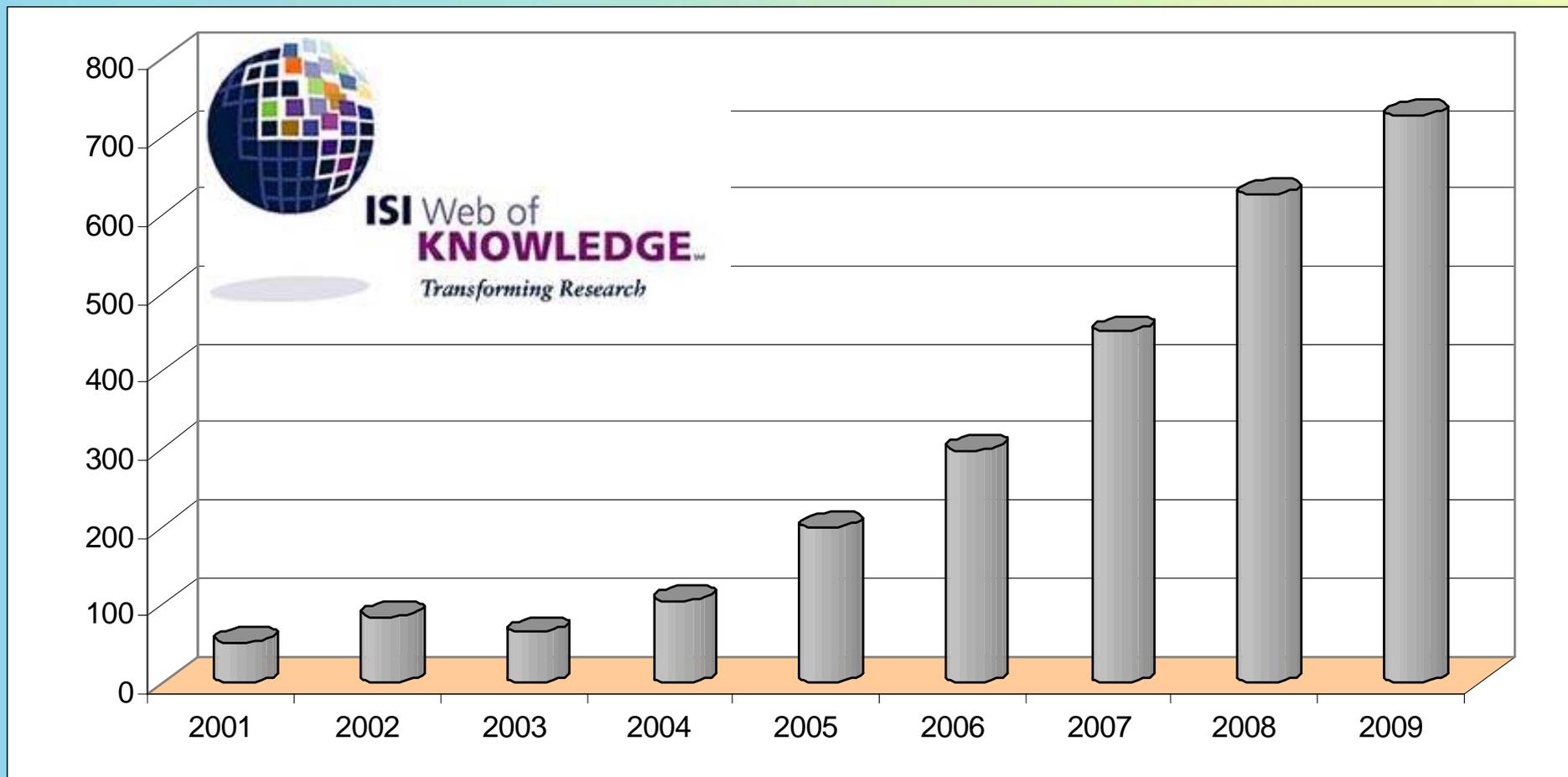
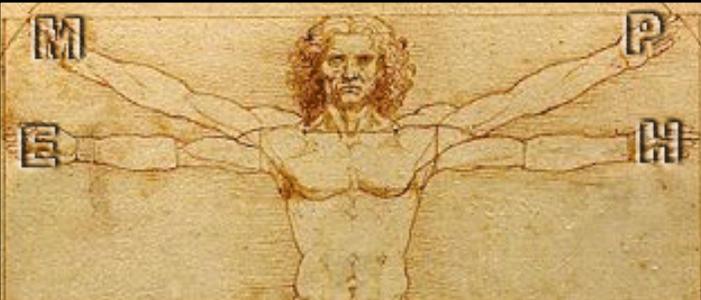
**А.К. Звездин<sup>1)</sup>, А.П. Пятаков<sup>1,2)</sup>**

**1) Институт Общей Физики РАН им. А. М. Прохорова**

**2) МГУ им. М. В. Ломоносова**



# Магнитоэлектрический Ренессанс

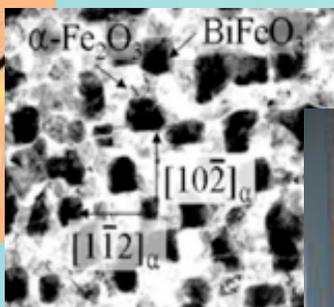
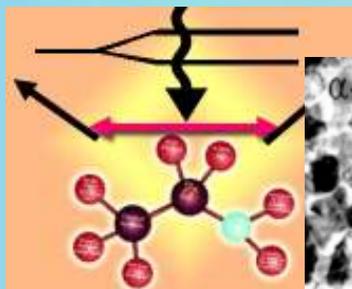


**Количество публикаций, посвященных МЭ тематике**

# Магнитоэлектрический Ренессанс

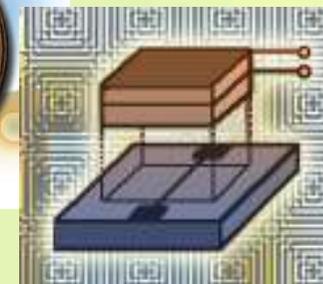
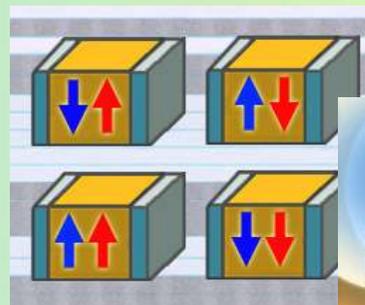
## Научный интерес

- Микроскопические механизмы
- Экспериментальные методы
- Композитные материалы
- Тонкие пленки и наноструктуры



## Практический интерес

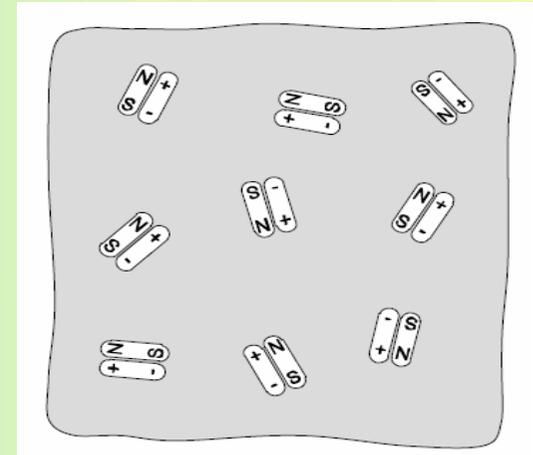
- Магнито  $\leftrightarrow$  электрические преобразователи
- 4-ичные логические элементы
- Энергонезависимая память
- Обработка СВЧ сигналов



# МЭ эффект: история

## Предтечи

- 1900 P. Curie
- 1926 P. Debye
- 1948 B.D. Tellegen



## Первооткрыватели

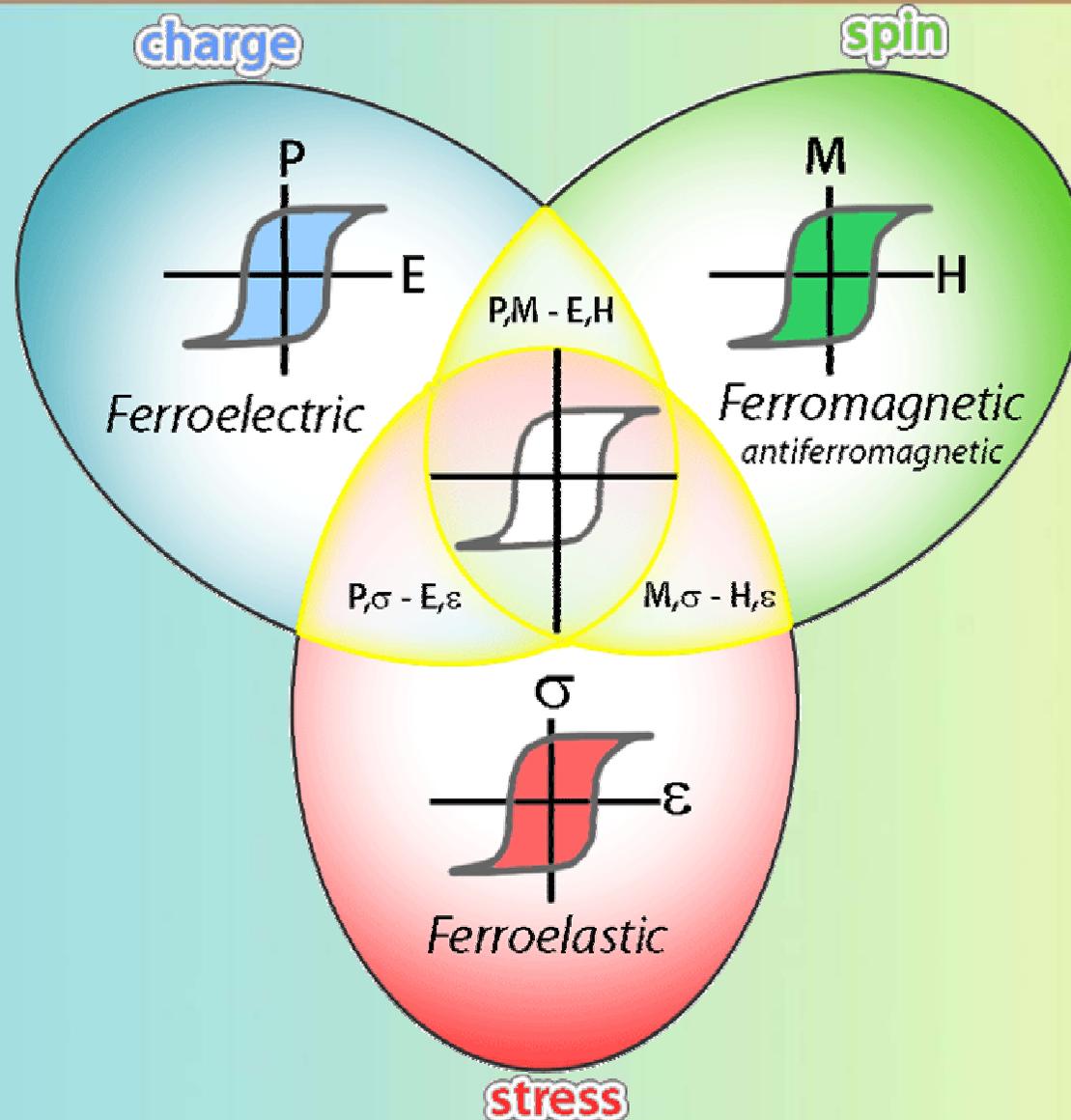
- 1956 Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц

$$P = \alpha H; M = \alpha E$$

- И. Е. Дзялошинский 1957 ( $\text{Cr}_2\text{O}_3$ )
- Д.Н. Астров (1960)
- V.J. Folen, G.T. Rado, E.W Stalder (1961)

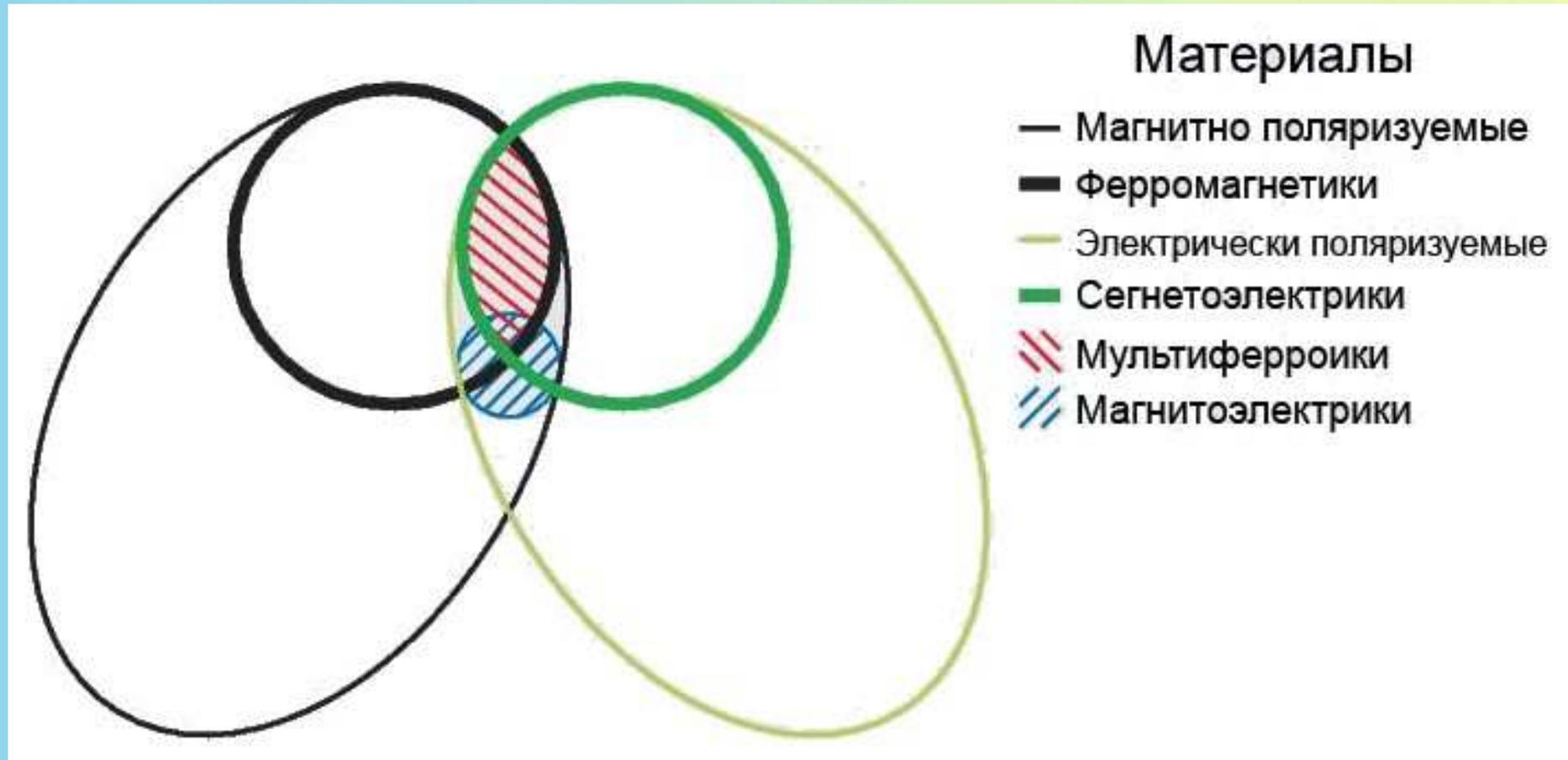
**P, T – нечет.**

# Мультиферроики



Сегнетомагнетики 1958 (Г.А. Смоленский и др. ЖЭТФ, т.28, 2152)

# Магнитоэлектрики и мультиферроики



# Магнитоэлектрические явления

- Линейный МЭ эффект:

$$P_i = \alpha_{ij} H_j \quad M_j = \alpha_{ij} E_i$$

- Квадратичные эффекты

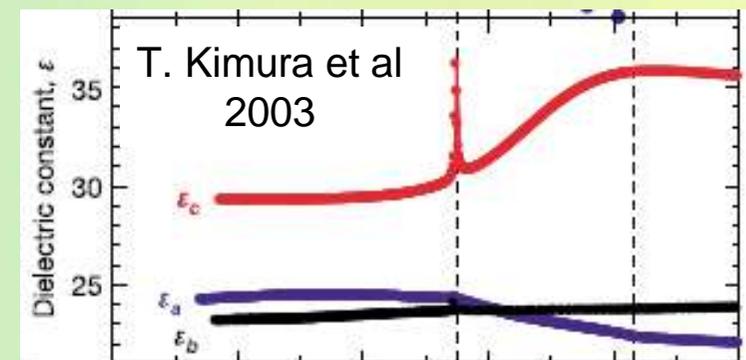
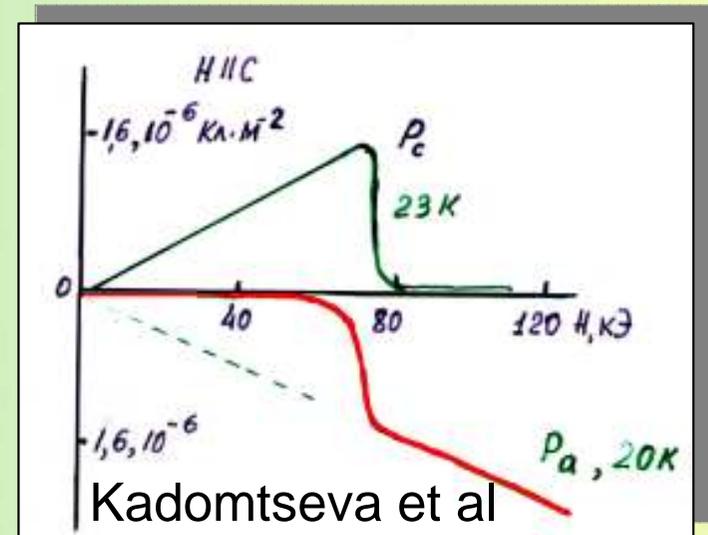
$$P_i = \frac{1}{2} \beta_{ijk} \cdot H_j H_k \quad M_i = \frac{1}{2} \gamma_{ijk} \cdot E_j E_k$$

- Аномалии при фазовых переходах

$$\Delta \varepsilon(T = T_N)$$

- Магнитоэлектрические эффекты  $\Delta \varepsilon / \varepsilon(H)$

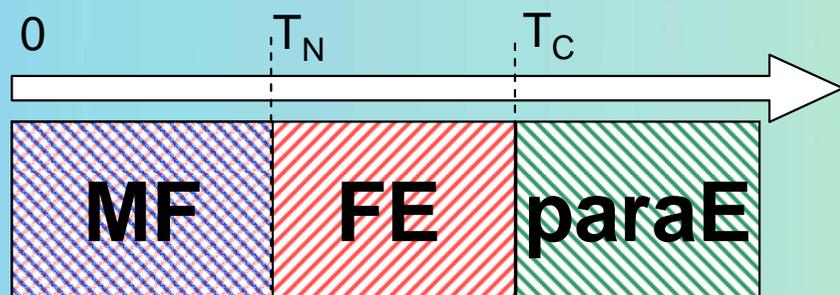
- Магнитоэлектрическое управление в мультиферроиках:  $E \Rightarrow M ; H \Rightarrow P$



# Мультиферроики

## Мультиферроики I-типа

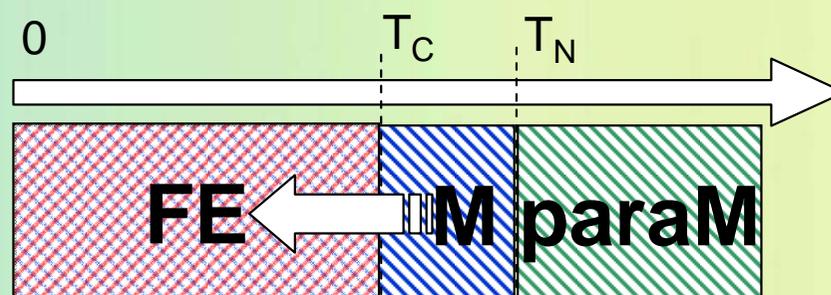
Электрическая поляризация  
независима от магнитного  
порядка:  $T_C > T_N$



Слабое МЭ взаимодействие:  
4-ная логика, плохо для МЭ  
преобразователей

## Мультиферроики II-типа

Электрическая поляризация  
порождена магнитным  
упорядочением:  $T_C < T_N$

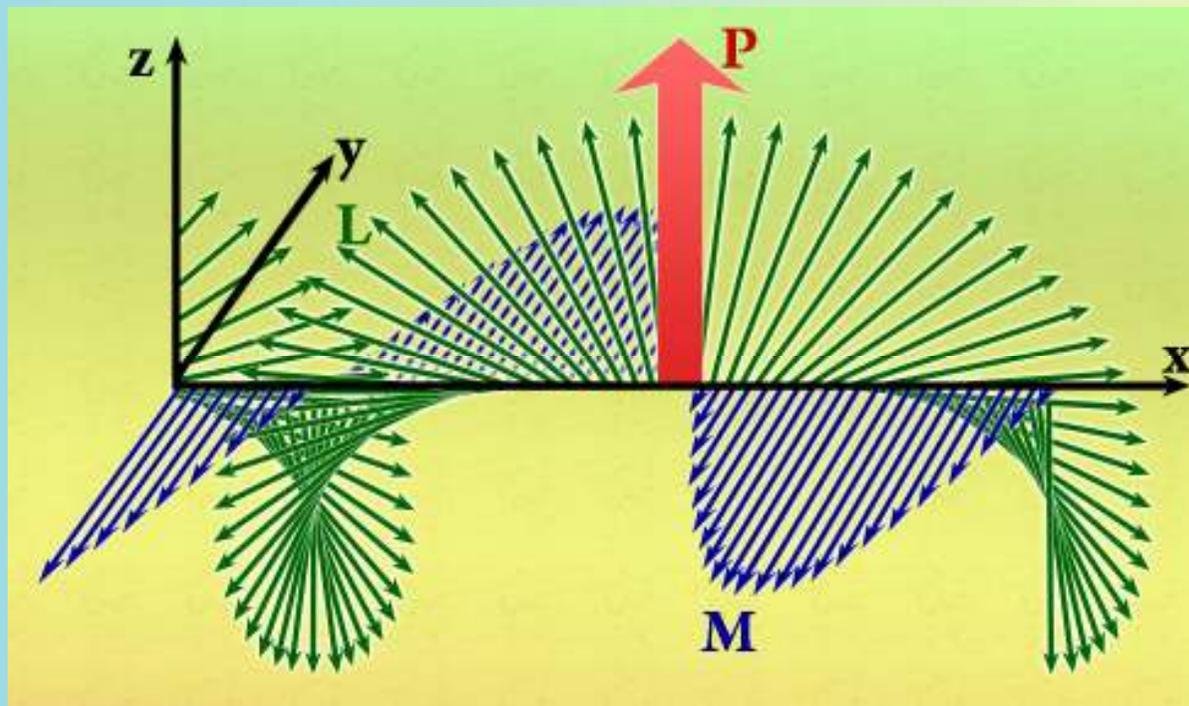


Колоссальное МЭ  
взаимодействие:  
электрическая запись/  
магнитное считывание

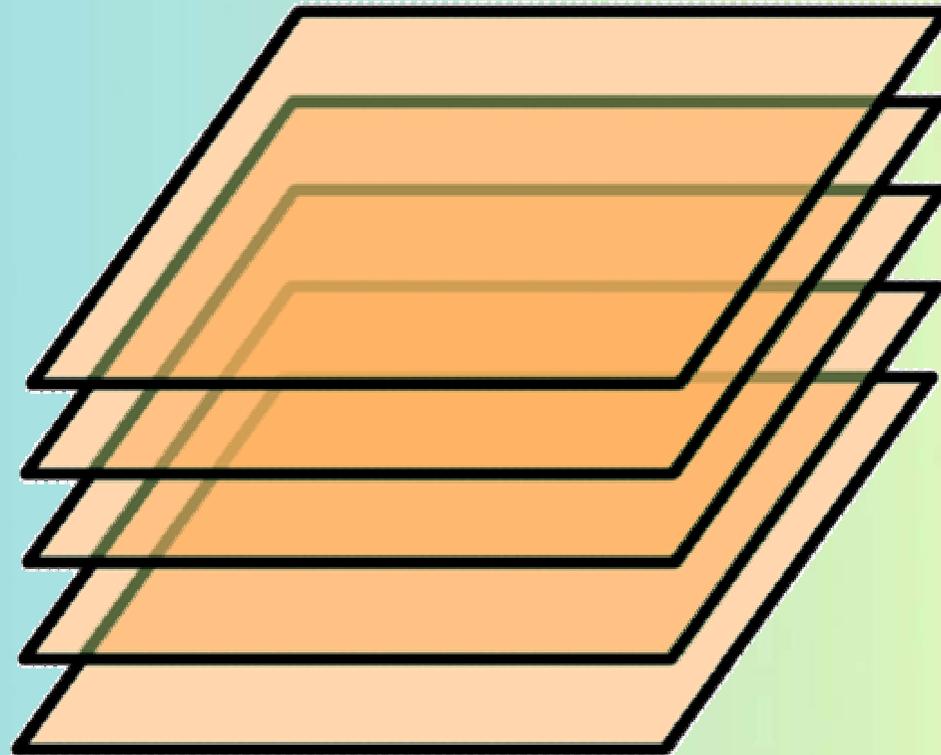
# Часть 1.

## Электрическая поляризация из магнетизма

*побочный продукт магнитных  
спиралей*

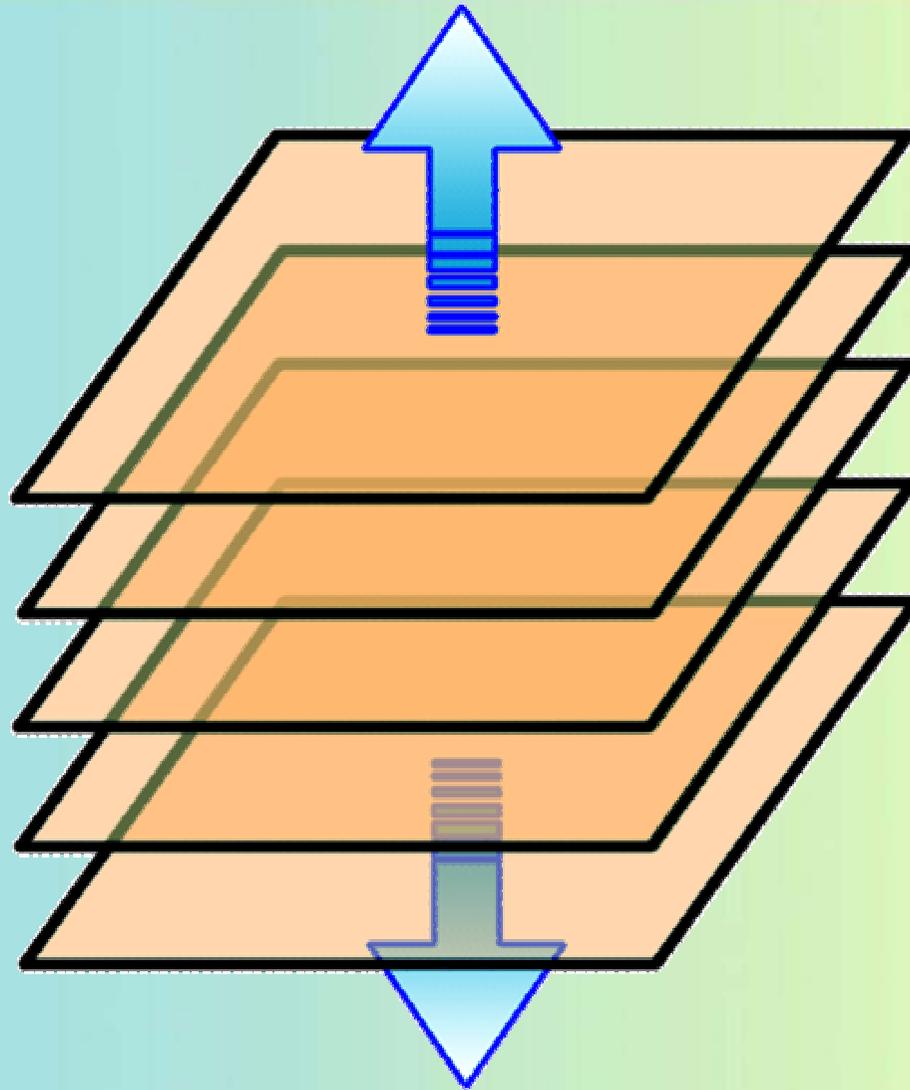


# Как создать полярное направление?



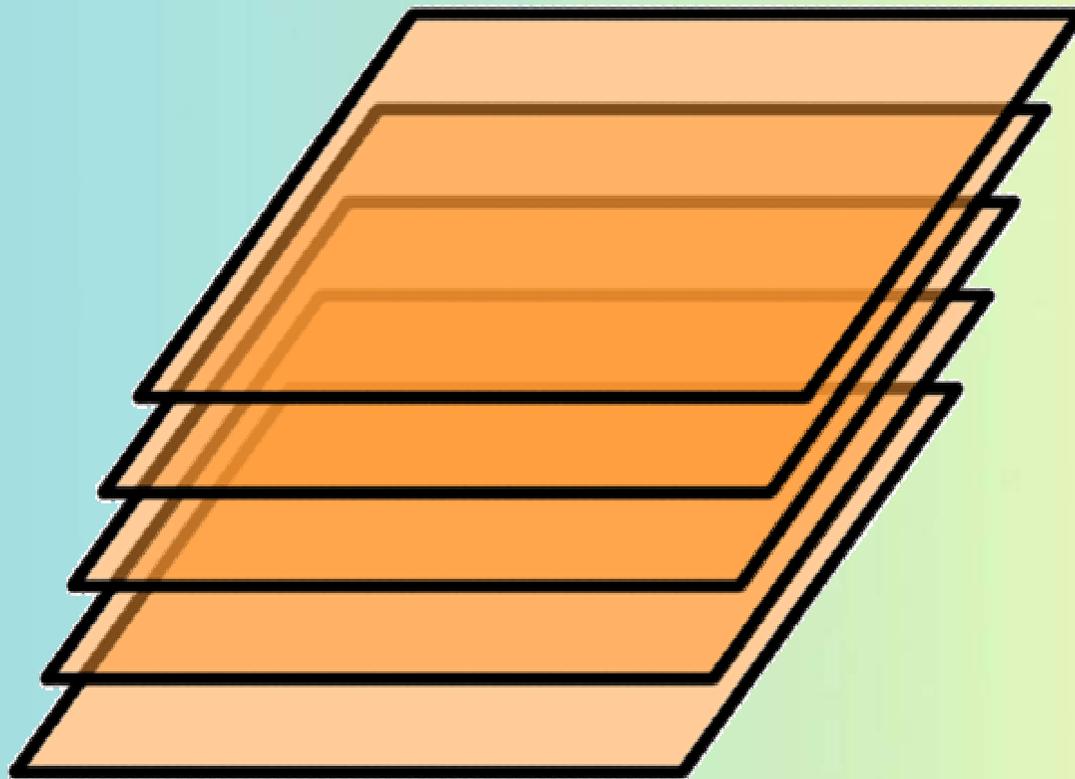
Растяжение/сжатие?

# Как создать полярное направление?



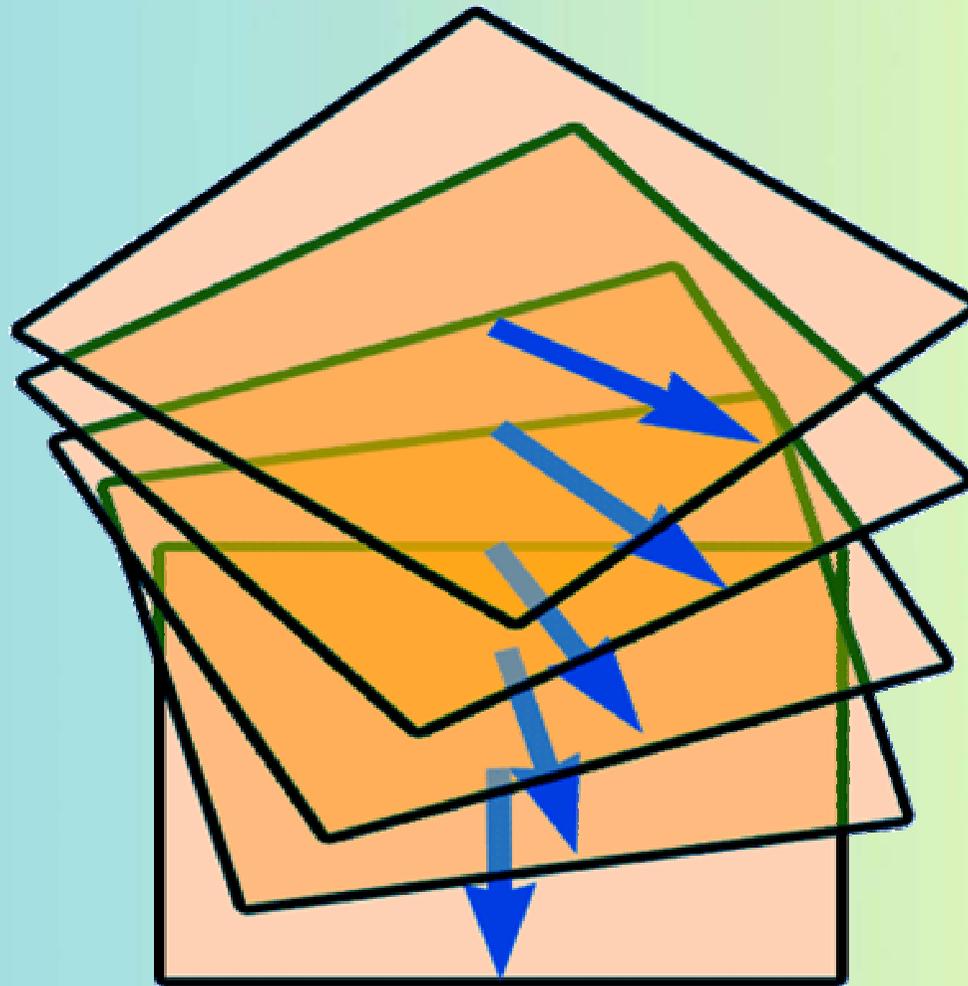
Растяжение/сжатие?

# Как создать полярное направление?



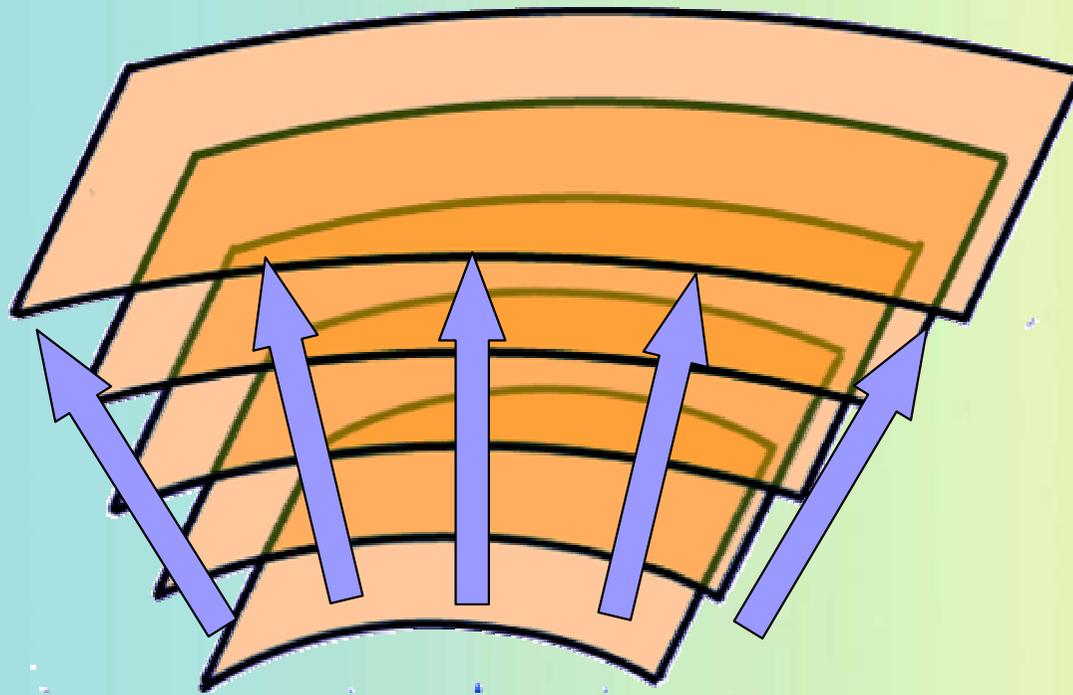
Сдвиг?

# Как создать полярное направление?



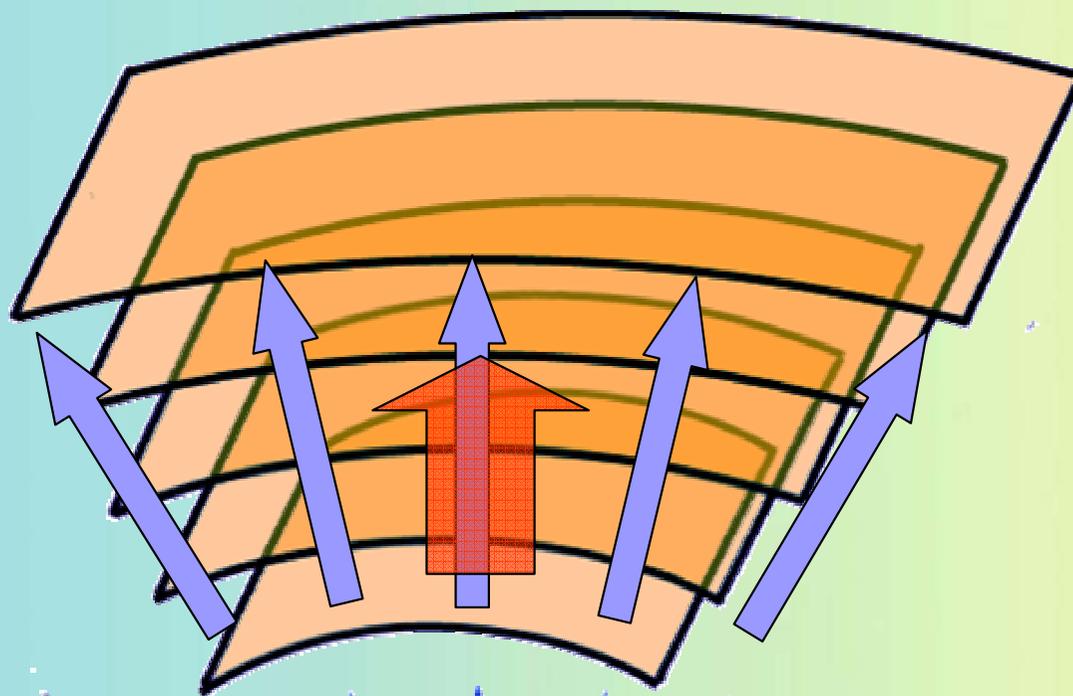
Кручение?

# Как создать полярное направление?



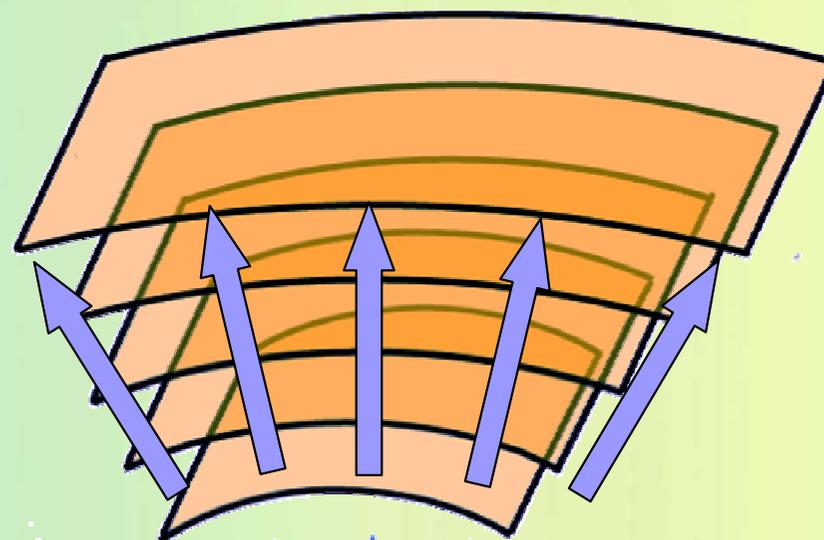
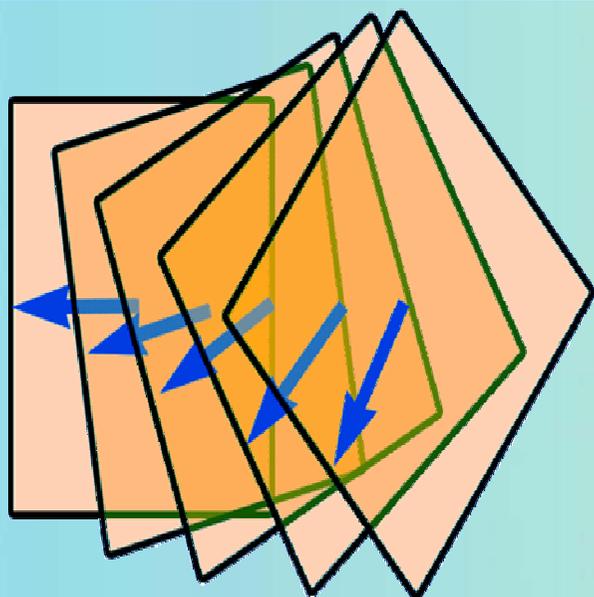
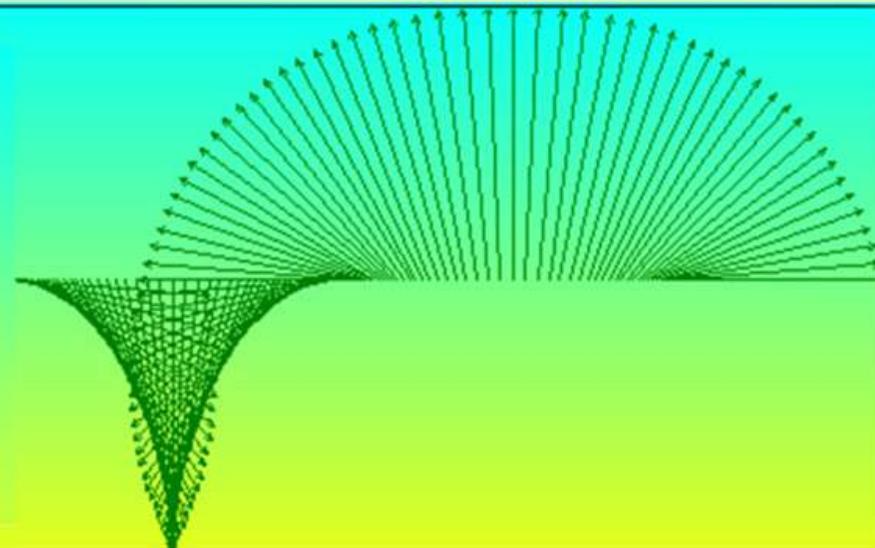
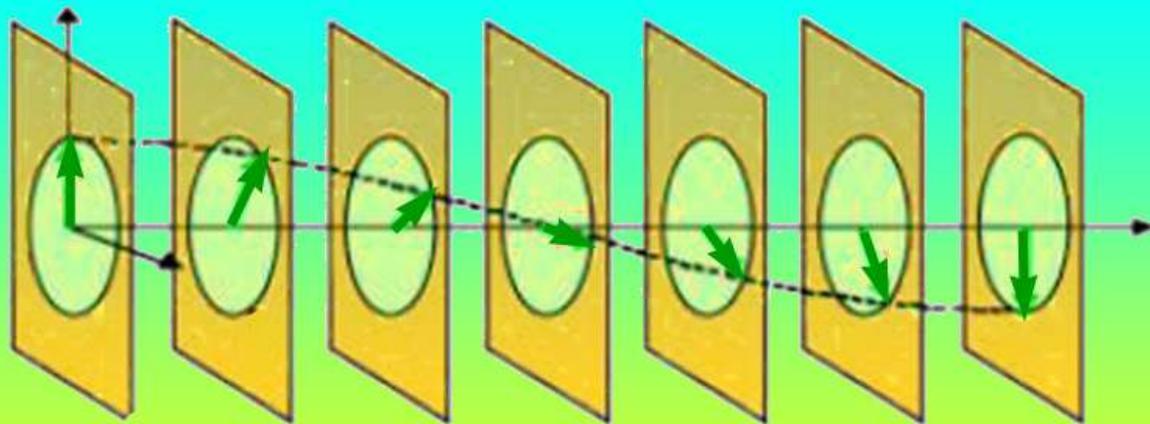
Изгиб!

# Как создать полярное направление?



Флексоэлектрический эффект

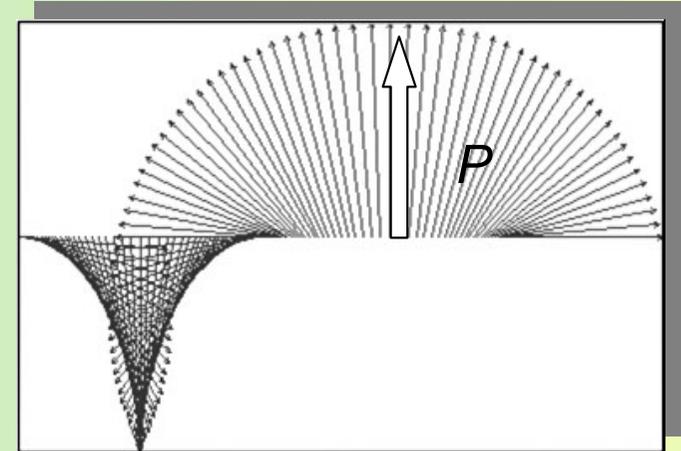
# Геликоиды и циклоиды



# Аналогия между МЭ и ЖК

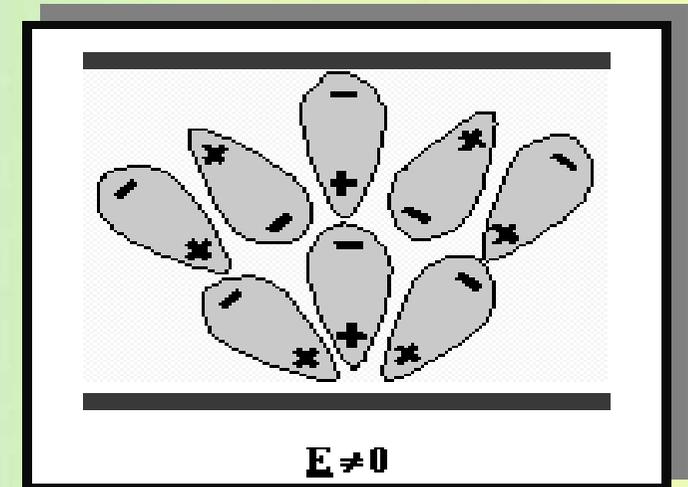
- Неоднородное МЭ взаимодействие

$$F_{Lifshitz-like} = -\gamma \cdot P \cdot [L(\nabla L) - (L \cdot \nabla)L]$$



- Флексоэлектрическая энергия в ЖК

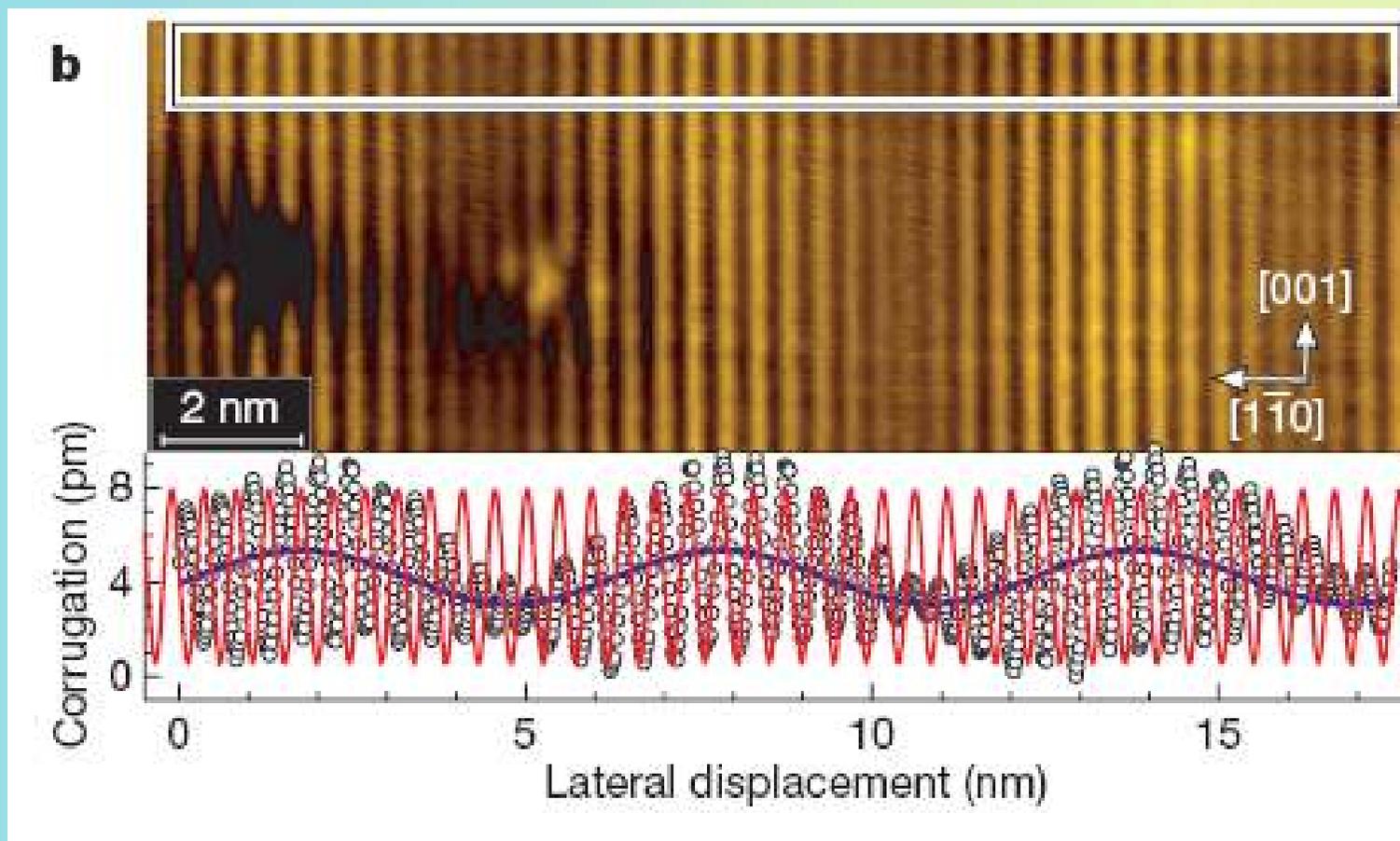
$$F_{Flexo} = -\gamma \cdot E \cdot [n(\nabla n) - (n \cdot \nabla)n]$$



Аналогия с флексоэлектрической энергией в жидких кристаллах: A. Zvezdin et al, Phys.Rev.B 50, 2953

# О пользе аналогий

Теория: А.К. Звездин, Краткие сообщения по физики ФИАН, 2002, п.4,  
Поверхностные структуры в ЖК -> спиновые структуры в тонких пленках



Эксперимент Mn/W(110):

M. Bode, M. Heide, K.von Bergman et al, Nature, 447, 190 (2007)

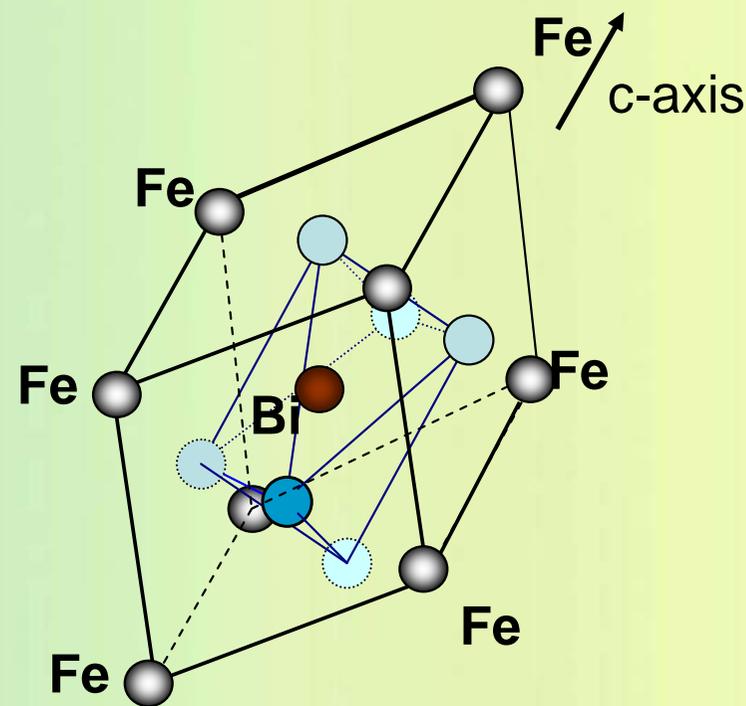
# $\text{BiFeO}_3$ – классический мультиферроик

- Синтез: Г.А. Смоленский, В.А. Исупов, А.И. Аграновская, 1960
- Свойства :  $T_c=1083\text{K}$ ;  $T_N=643\text{K}$ ; ( $P=0.061\text{ C/m}^2$ ); диэлектрик до  $\sim 200\text{K}$
- Пространственная группа  $R3c$  [Kubel, Schmid, Acta Cryst. 1990]

## Теоретические предсказания:

- линейный МЭ эффект;
- слабый ферромагнетизм
- P, M МЭ управление

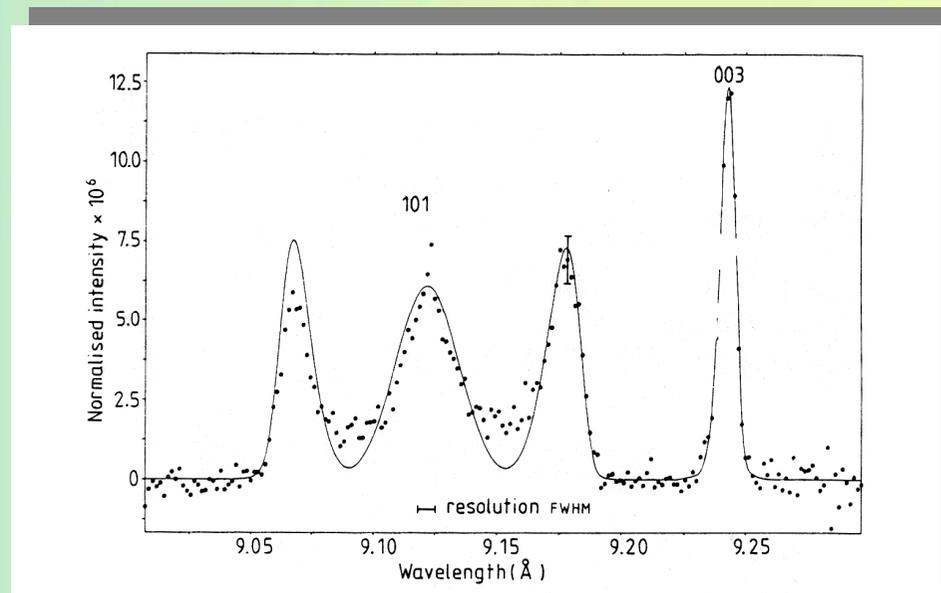
при комнатных температурах!



# Циклоида в $\text{BiFeO}_3$



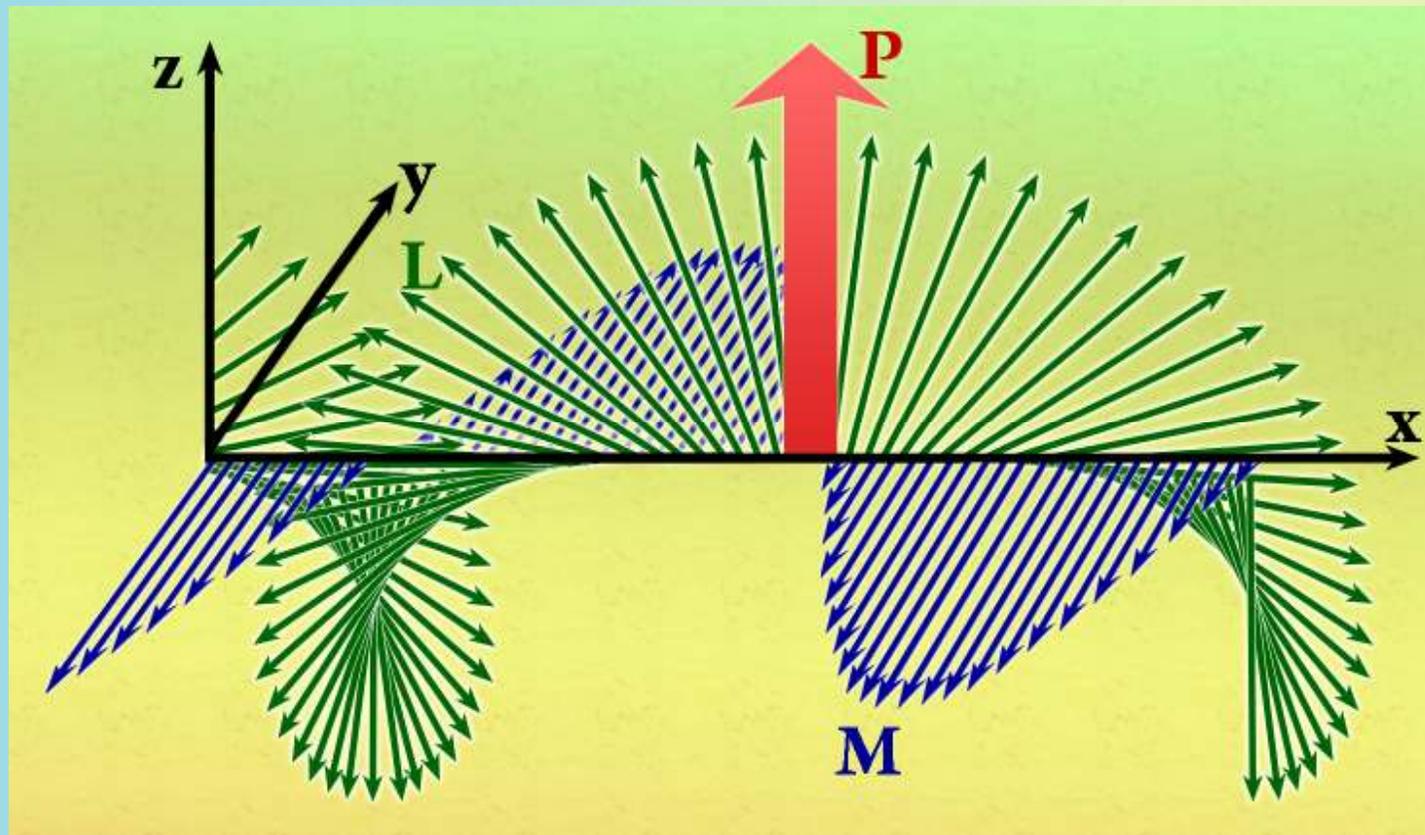
Дубна 1964: G. Vascon, Р.П. Озеров,  
I. Sosnowska и E. Sosnowskii:  
Обсуждение результатов  
нейтронографии  $\text{BiFeO}_3$



1982  $\text{BiFeO}_3$ , TOFD ,  
период циклоиды 62nm

В.П. Плахтий, Е.И. Мальцев, Д.М. Каминкер,  
Нейтронографическое исследование некоторых соединений со структурой перовскита  
Изв. АН СССР сер.физ. т. 28 вып.3 с.436 (1963).

# Скрытые в циклоиде



$$\frac{1}{V} \int \dots dV$$



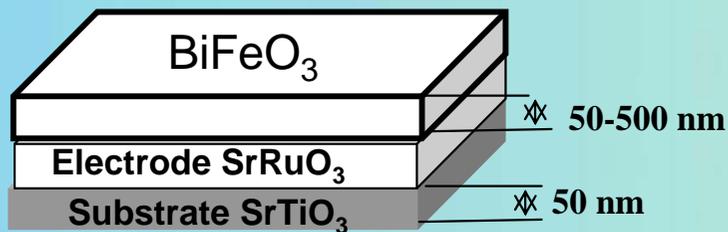
$$\langle \mathbf{L}_i \rangle = 0; \quad \langle \mathbf{M}_s \rangle = 0; \quad \langle \text{ME effect} \rangle = 0$$

$$F_{Flexo} = -\gamma \cdot E \cdot [\mathbf{n}(\nabla \mathbf{n}) - (\mathbf{n} \cdot \nabla) \mathbf{n}]$$

# Появление эффектов

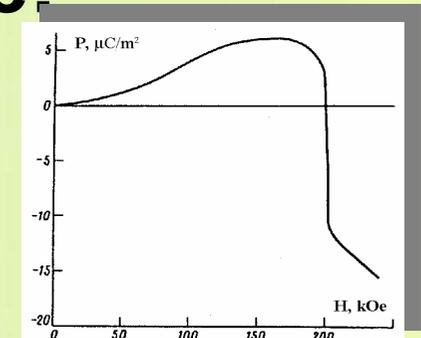
Необходимое условие – фазовые переходы в однородное состояние:

- индуцированные магнитным полем



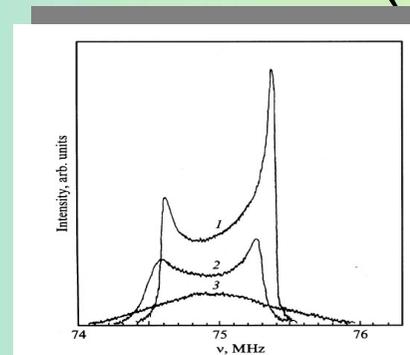
J. Wang et al, Science, **299**, 1719 (2003)

- концентрационные (замещение Bi, Fe)



A.M. Kadomtseva et al,  
Ferroelectrics, **162**, 135 (1994)

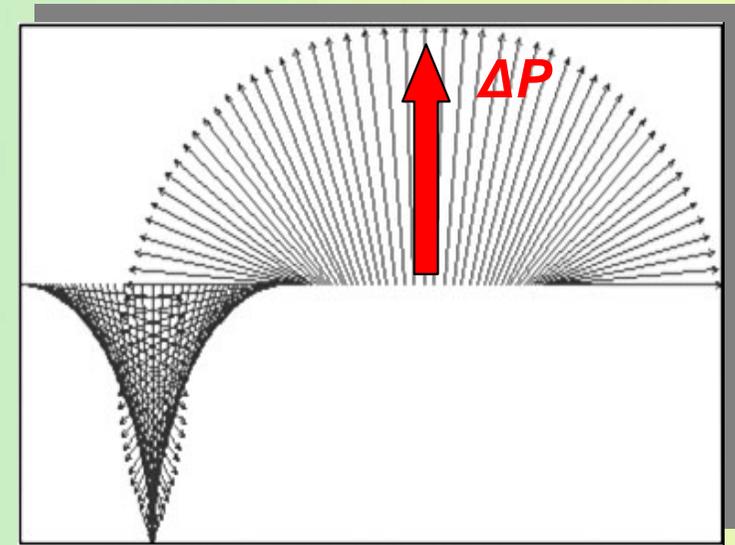
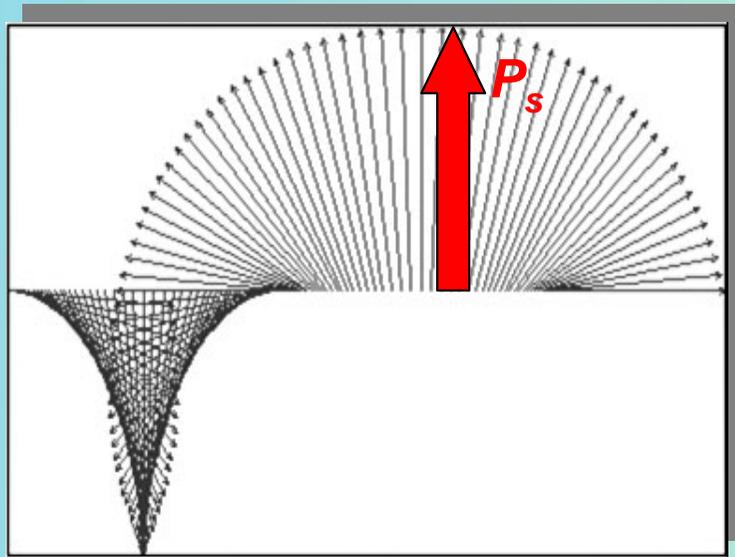
- вызванные деформацией (тонкие пленки)



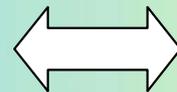
Залесский А.В.  
ФТТ 45, 135 (2005)

Обзор: A. M. Kadomtseva et al, Phase Transitions, v.79 p. 1019 (Arxiv.org)

# Прямой и обратный флексомагнитоэлектрические эффекты



$P_s$  наводит циклоиду



Циклоида наводит  $\Delta P < 0.01\% P_s$

## Спиральные мультиферроики

$TbMnO_3$ : Т. Kimura et al, Nature **426**, 55 (2003)

$MnWO_4$  ( $40\mu C/m^2$ );  $Ba_2Mg_2Fe_{12}O_{22}$  ( $80\mu C/m^2$ );  $Ni_3V_2O_8$  ( $100\mu C/m^2$ );  $DyMnO_3$  ( $1500\mu C/m^2$ )

### Феноменологическое рассмотрение:

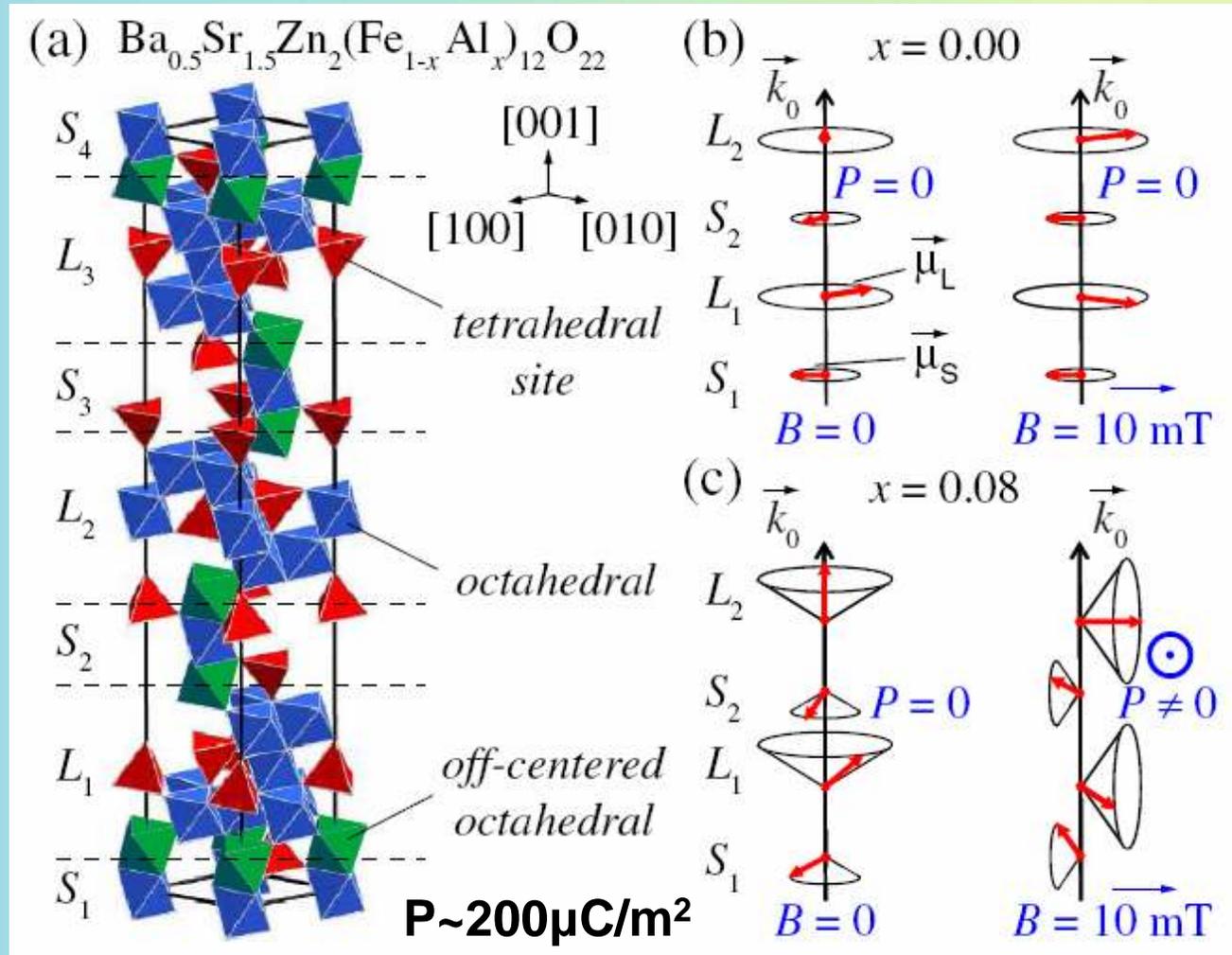
M. Mostovoy, PRL, **96**, 067601 (2006); В.В. Меньшенин ЖЭТФ, **135**, 265 (2009)

### Микроскопическое рассмотрение:

H. Katsura, N. Nagaosa, A.V. Balatsky, PRL, **95**, 057205;

I. A. Sergienko, E. Dagotto, PRB **73**, 094434; A.V. Syromyatnikov, ЖЭТФ, **132**, 666

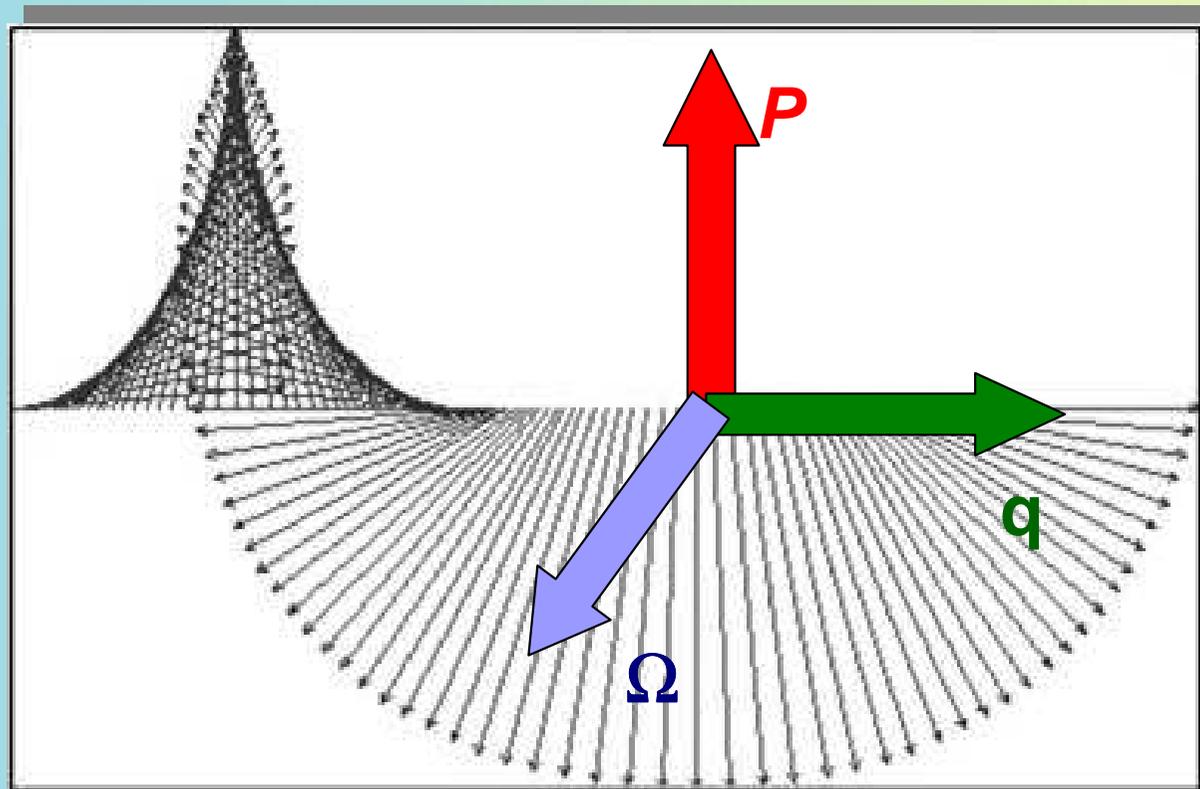
# Управление магнитной структурой с помощью концентрации примесей



Sae Hwan Chun et al, Realization of Giant Magnetoelectricity in Helimagnets, PRL 104, 037204 (2010)

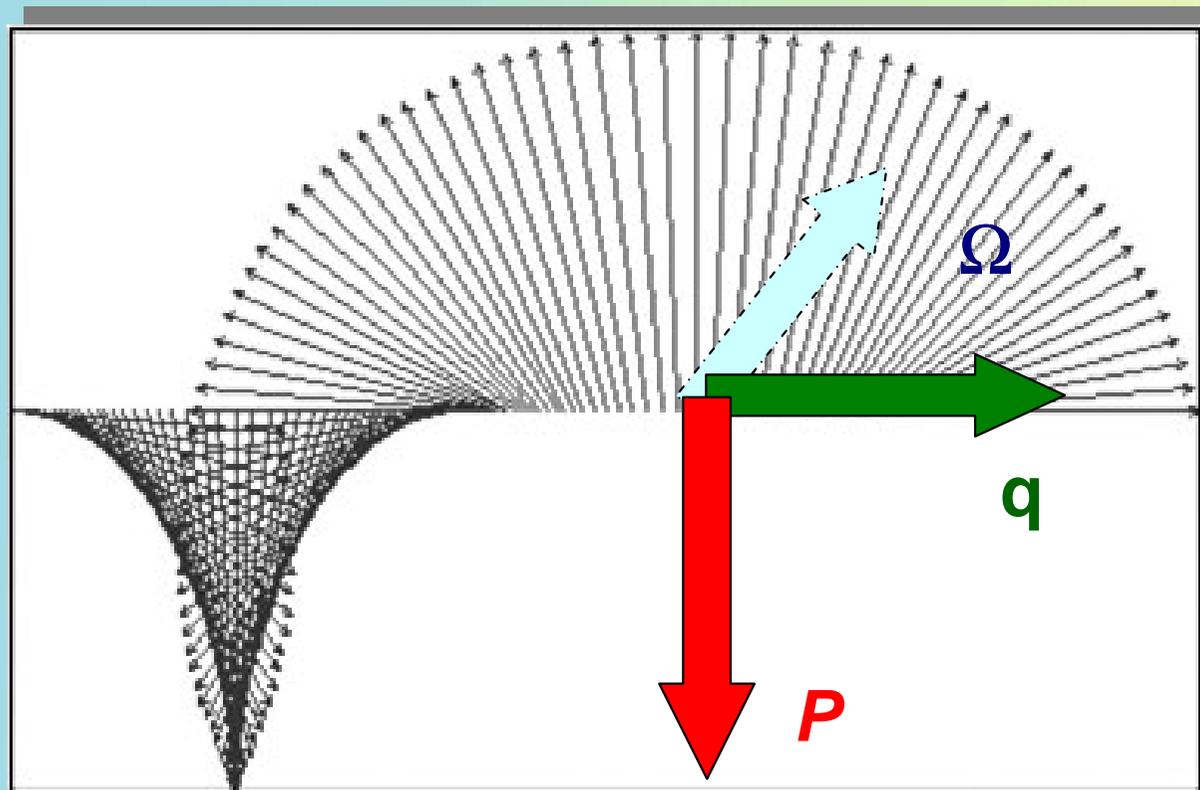
# Киральность и поляризация

$$P \sim [\Omega \times q]$$

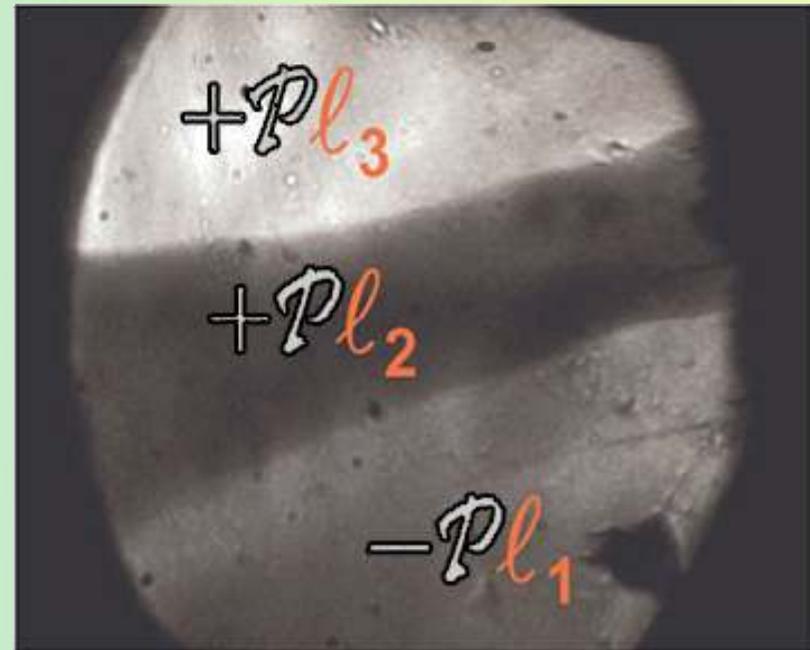
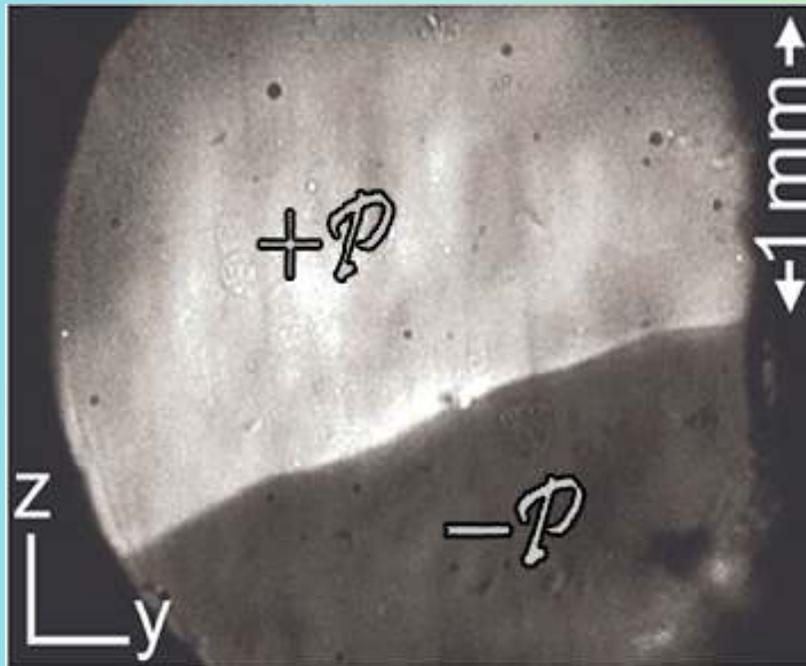


# Киральность и поляризация

$$P \sim [\Omega \times q]$$



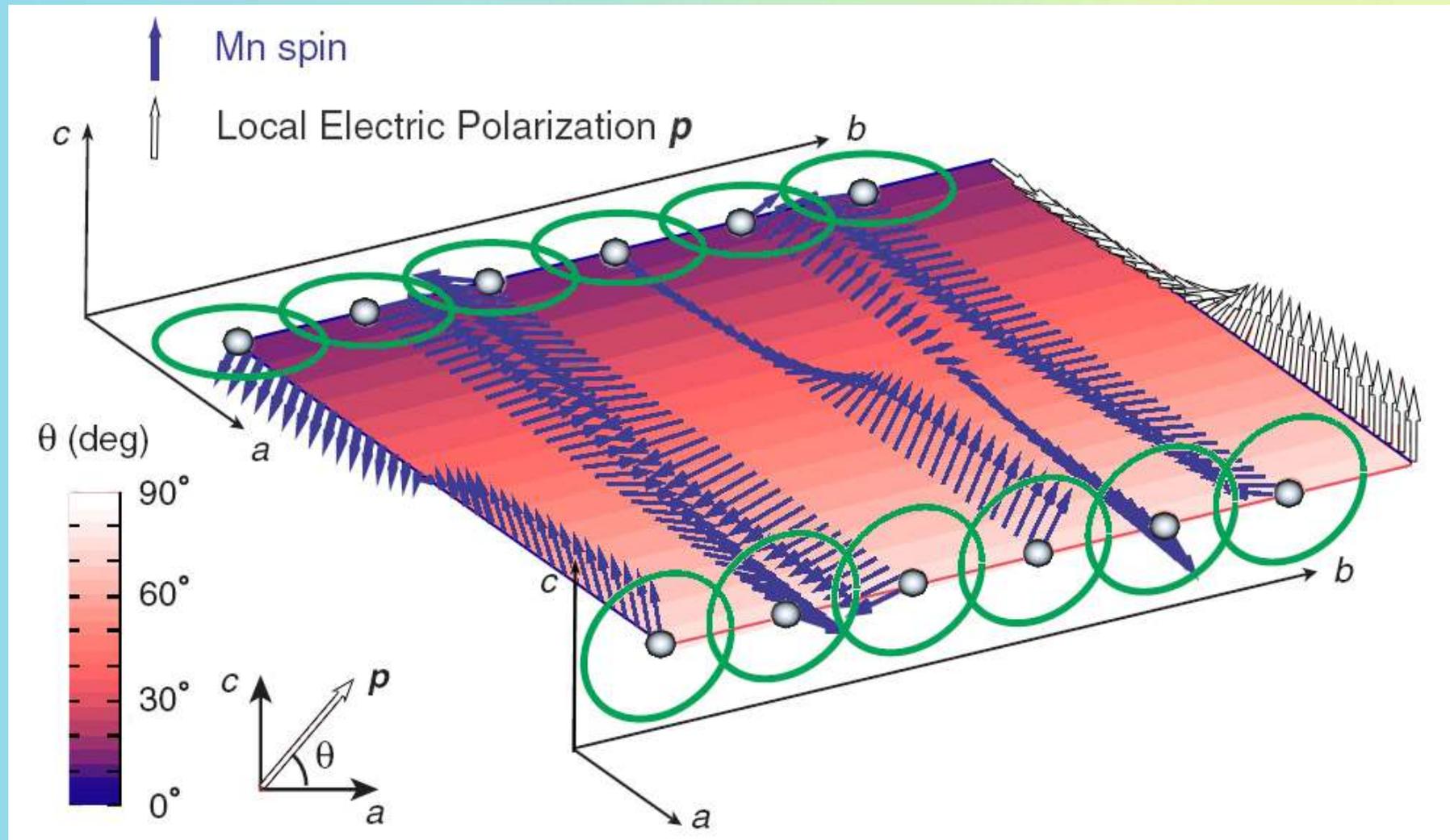
# Киральные магнитные и сегнетоэлектрические домены



MnWO<sub>4</sub>

D. Meier, M. Maringer, Th. Lottermoser, P. Becker, L. Bohaty, and M. Fiebig,  
PRL 102, 107202 (2009)

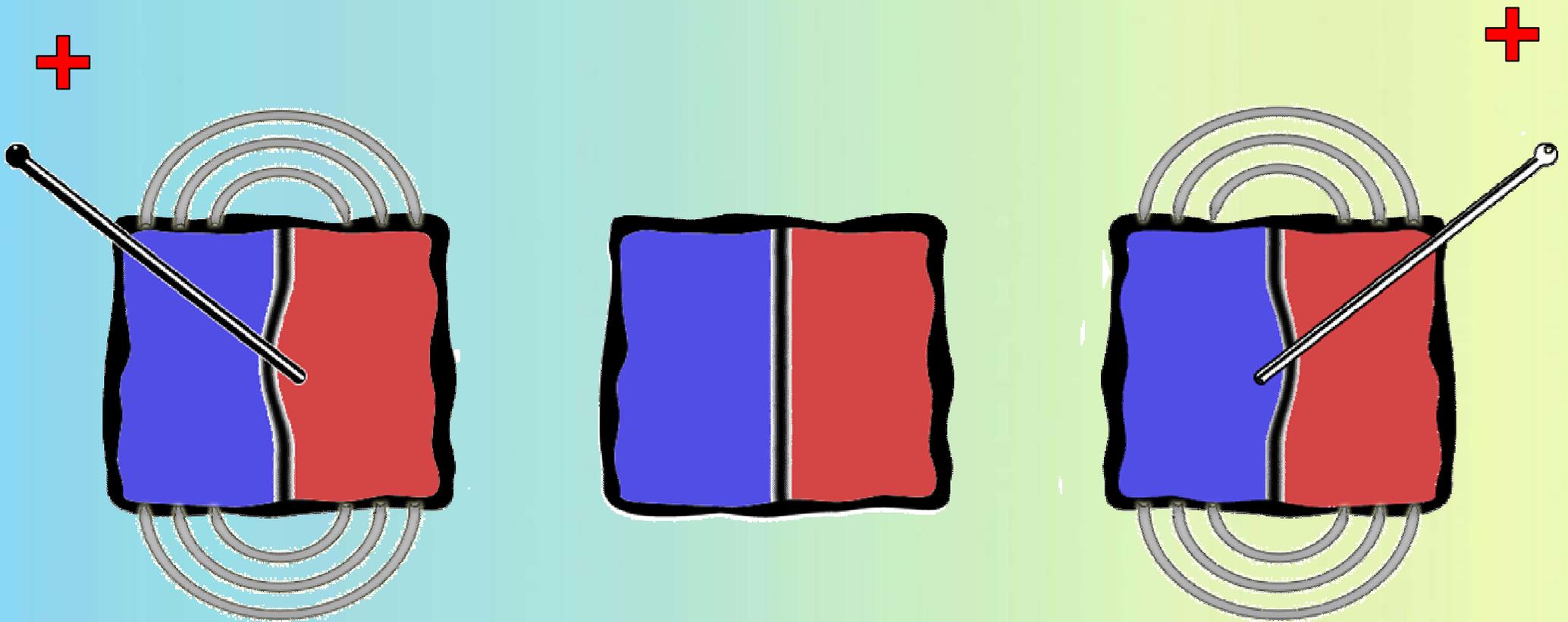
# Доменная граница между киральными доменами



F. Kagawa, M. Mochizuki, Y. Onose, H. Murakawa, Y. Kaneko, N. Furukawa, and Y. Tokura, *Dynamics of Multiferroic Domain Wall in Spin-Cycloidal Ferroelectric DyMnO<sub>3</sub>*, PRL 102, 057604 (2009)

# Часть 2 Магнитоэлектричество и микромагнетизм

## Электроиглоукалывание магнитных доменов



# Электрическая поляризация магнитных доменных границ

Письма в ЖЭТФ, том 37, вып. 12, стр. 565 – 567

20 июля 1983 г.

## ТЕОРИЯ НЕОДНОРОДНОГО МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА

В.Г.Барьяхтар, В.А.Львов, Д.А.Яблонский

Предсказано существование электрической поляризации магнито-упорядоченных сред в области магнитной неоднородности, в частности внутри доменных границ.

В тех случаях, когда в однородном магнитном кристалле имеется равновесная плотность электрической поляризации  $P$ , зависящая от состояния магнитной подсистемы, говорят о наличии в таком кристалле магнитоэлектрического (МЭ) эффекта (см., например, <sup>1,2</sup>). Это явление тесно связано с магнитной симметрией системы <sup>3</sup>. Перечень классов магнитной симметрии, допускающих наличие МЭ эффекта приведен в <sup>4</sup>.

Если в силу каких-либо причин в магнитном кристалле образуется магнитная неоднородность, то группа его магнитной симметрии сужается (в случае неоднородности общего вида — до единичной группы). Это приводит к тому, что в области магнитной неоднородности возникает электрическая поляризация  $P(r)$ , симметрия пространственного распределения которой определяется симметрией магнитной неоднородности. Назовем такое явление неоднородным МЭ эффектом, а рассматриваемый обычно <sup>1-4</sup> МЭ эффект будем называть однородным. Подчеркнем, что указанный эффект должен иметь место в магнитных кристаллах любой симметрии (в том числе и не допускающих однородного МЭ эффекта). Возникновение электрической поляризации, связанной с наличием неоднородности (не обязательно магнитной природы), является весьма общим эффектом. Хорошо известен, в частности, флексоэлектрический эффект в жидких кристаллах <sup>5</sup>.

Если характерные размеры неоднородности  $\lambda$  намного превосходят размеры элементарной магнитной ячейки, то неоднородный МЭ эффект можно описать феноменологически. В случае ферромагнитного (ФМ) кристалла для этого нужно ввести в рассмотрение координатно зависящую плотность намагниченности  $M(r)$ . Вообще говоря, МЭ взаимодействия имеют как короткодействующую, так и далекодействующую часть. В данной работе рассмотрим только случаи, в которых вкладом далекодействующих сил в неоднородный МЭ эффект можно пренебречь. Тогда, ограничиваясь связываемыми не выше второй степени по  $M$  ( $\alpha = x, y, z$ ), и воспользовавшись малостью параметра  $a/\lambda$  ( $a$  — характерный радиус убывания МЭ взаимодействия), связь между поляризацей и намагниченностью запишем в следующем виде:

$$P_i(r) = f_{i,\alpha\beta}^{(0)} M_\alpha M_\beta + f_{ik,\alpha\beta}^{(1)} M_\alpha \frac{\partial M_\beta}{\partial x_k} + \frac{1}{2} \tilde{f}_{ikl,\alpha\beta\gamma}^{(2)} \frac{\partial M_\alpha}{\partial x_k} \frac{\partial M_\beta}{\partial x_l} + \frac{1}{2} f_{ikl,\alpha\beta}^{(2)} M_\alpha \frac{\partial^2 M_\beta}{\partial x_k \partial x_l} \quad (1)$$

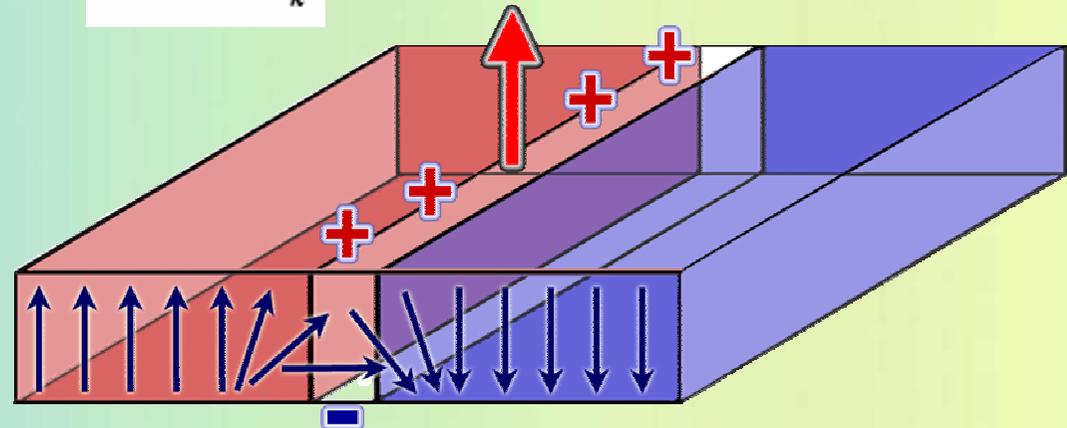
© Издательство „Наука“, Письма в ЖЭТФ, 1983 г.

565

## Неоднородное МЭ взаимодействие

Магнитная неоднородность =>  
понижение симметрии =>  
возникновение электрической поляризации

$$f_{ik,\alpha\beta}^{(1)} M_\alpha \frac{\partial M_\beta}{\partial x_k}$$



Барьяхтар В Г, Яблонский Д А ФТТ 24 2522 (1982)

Барьяхтар В Г, Львов В А, Яблонский Д А Письма в ЖЭТФ 37 565 (1983)

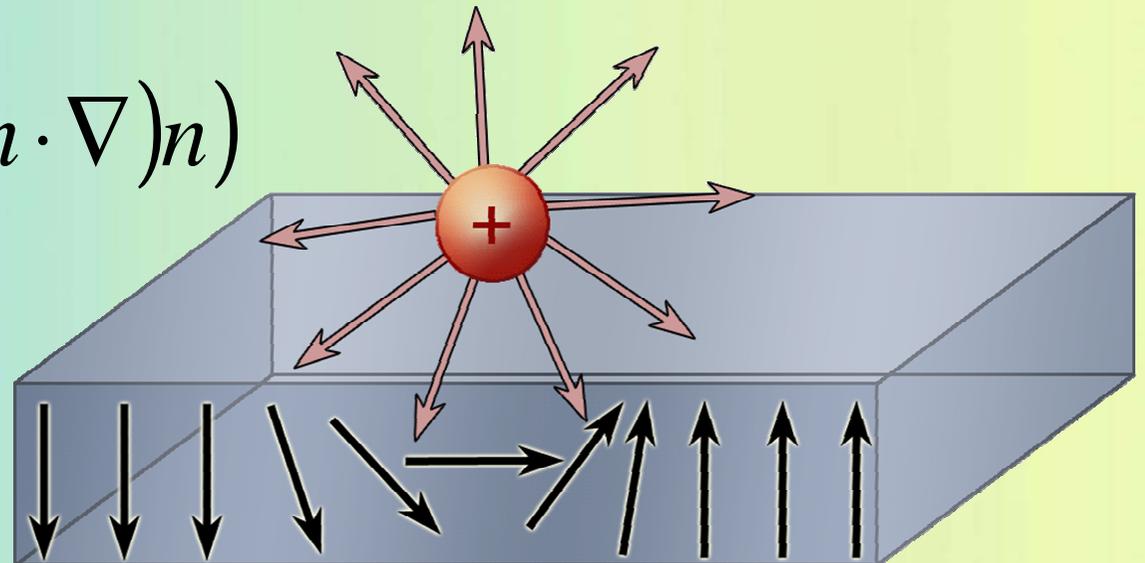
# Зарождение доменной границы

I. Dzyaloshinskii *EPL* **83** 67001 (2008)

$$F_{exch} = A \sum_{i=x,y,z} (\nabla n_i)^2 = A \left( (\nabla \theta)^2 + \sin^2 \theta (\nabla \varphi)^2 \right)$$

$$F_{ME} = \gamma \mathcal{P} \cdot (n \cdot (\nabla \cdot n) - (n \cdot \nabla) n)$$

$$F_{an} = -K_u \cos^2 \theta$$



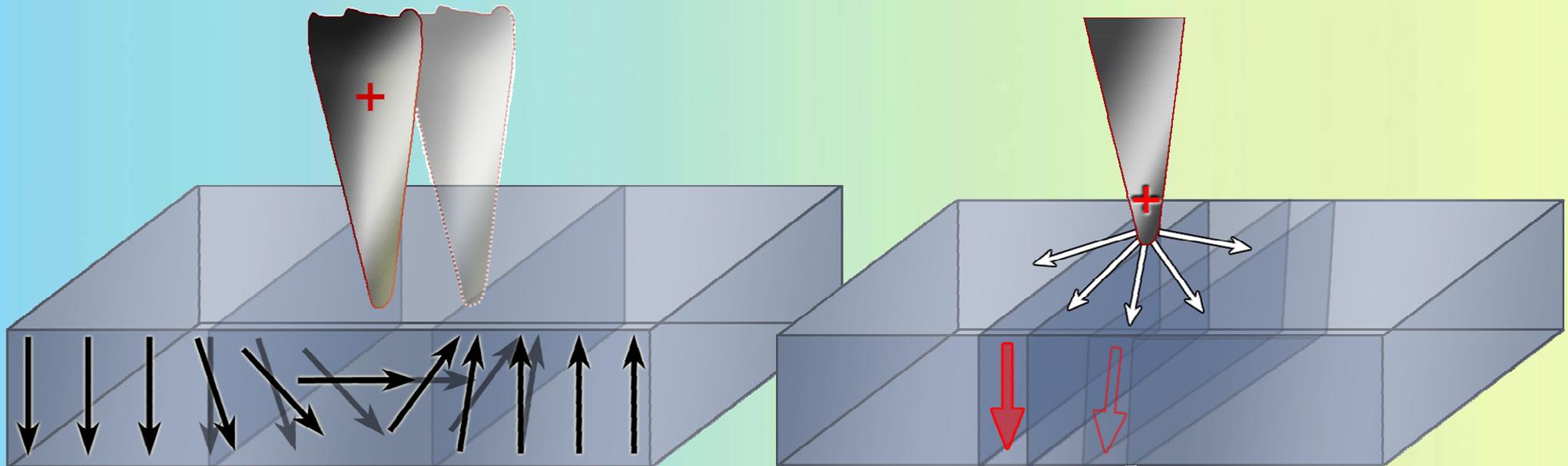
$$F_{DW} = 4\sqrt{AK_u} - \pi\gamma\mathcal{P}_s$$

$$E_t = 4\sqrt{K_u A} / (\pi\chi_e\gamma)$$

# Движение доменной границы

I. Dzyaloshinskii *EPL* 83 67001 (2008)

$$f = -\frac{dF}{dx} = \gamma \chi_e \pi \frac{dE}{dx} \qquad v = \frac{\gamma \chi_e \pi}{\eta} \frac{dE}{dx}$$

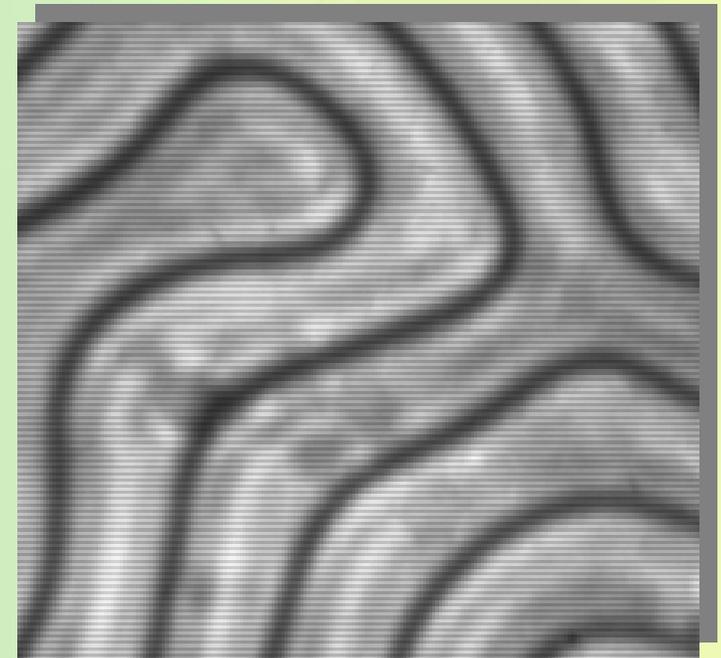


# МЭ эффекты в пленках ферритов гранатов

- 1967 Квадратичный МЭ эффект в ИФГ Т.Н. О’Dell, Philos. Mag. 16, 487
- 1985 ЭлектроМО эффект в ИФГ Б.Б. Кричевцов, Р.В. Писарев, А.Г. Селицкий, Письма в ЖЭТФ, 41, 259
- 1989 Линейный МЭ эффект в пленках ФГ: Письма в ЖЭТФ 49, 466

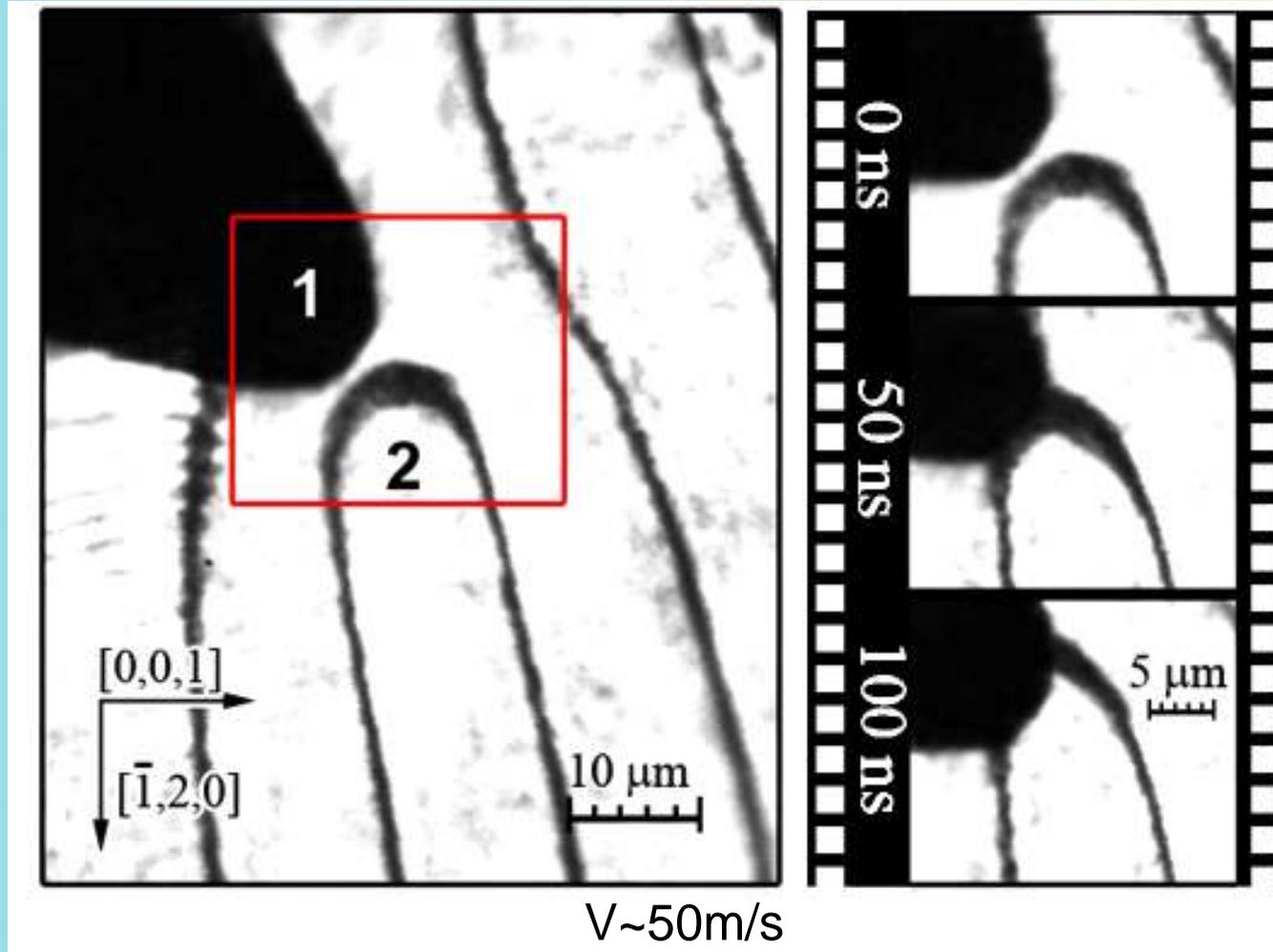
## Достоинства ФГ:

- Магнитооптические материалы
- МЭ эффекты при комнатных температурах
- Четко выраженная микромагнитная структура



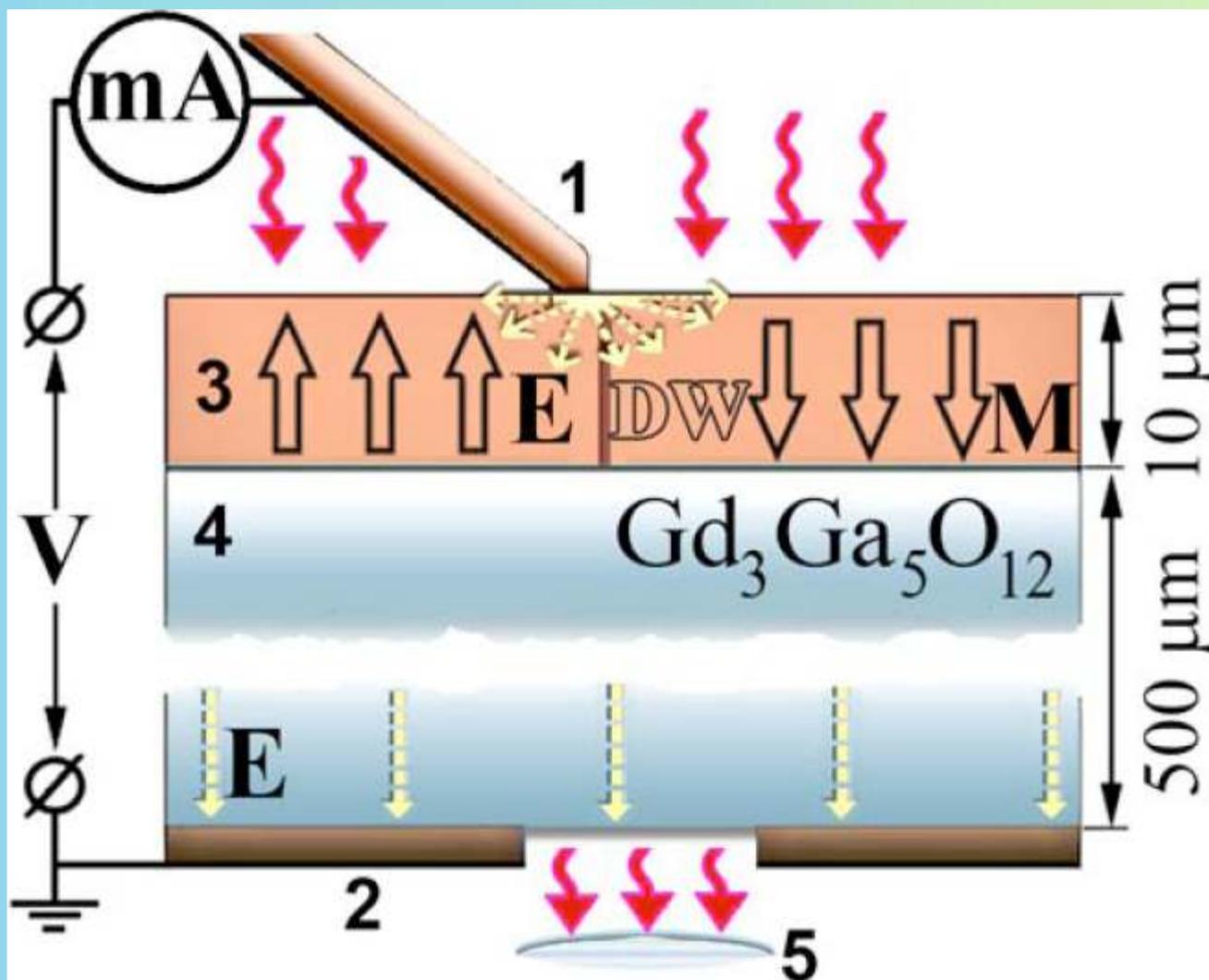
Изображение доменной структуры  
в поляризационном микроскопе

# Электроиндуцированное движение доменных границ



A.S. Logginov, G.A. Meshkov, A.V. Nikolaev, E.P. Nikolaeva, A.P. Pyatakov, A.K. Zvezdin,  
APL, v.93, p.182510 (2008)

# Эксперимент



1. Медная проволока

2. Заземляющий  
контакт

3. Пленки ФГ

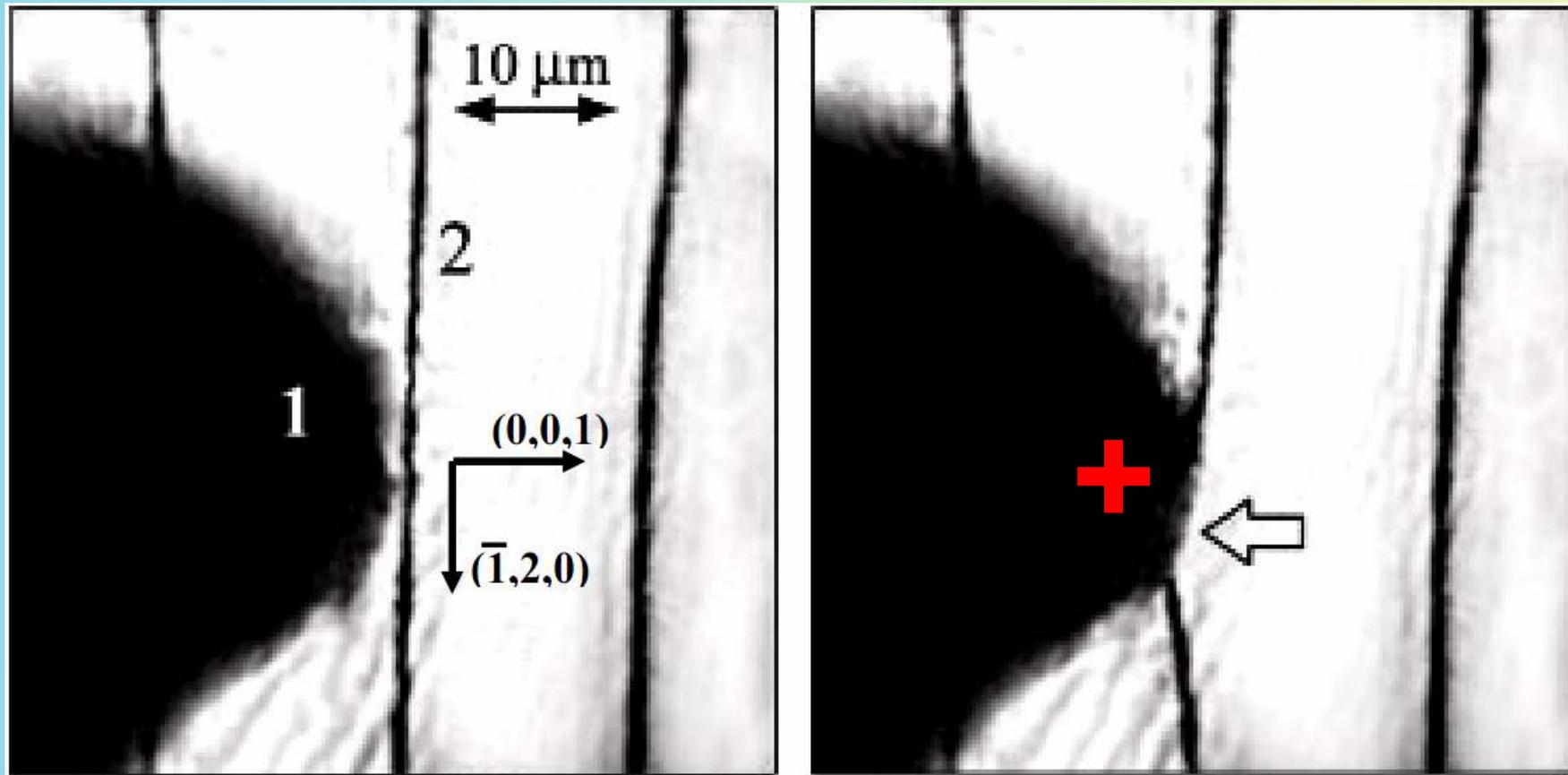
(толщина ~ 10мкм)

4. Подложка (0.5мм)

5. Объектив

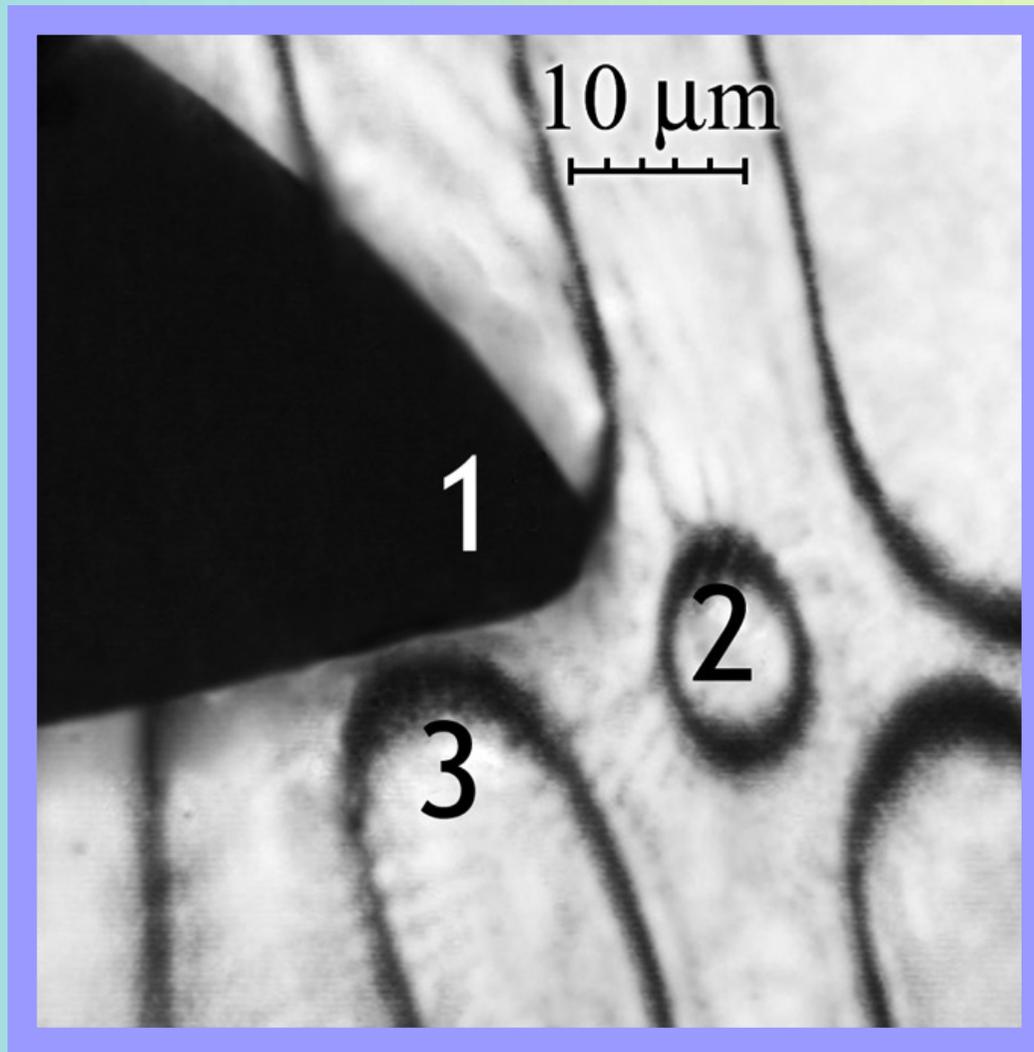
ДГ — Доменная стенка

# Смещение доменной границы в Е-поле

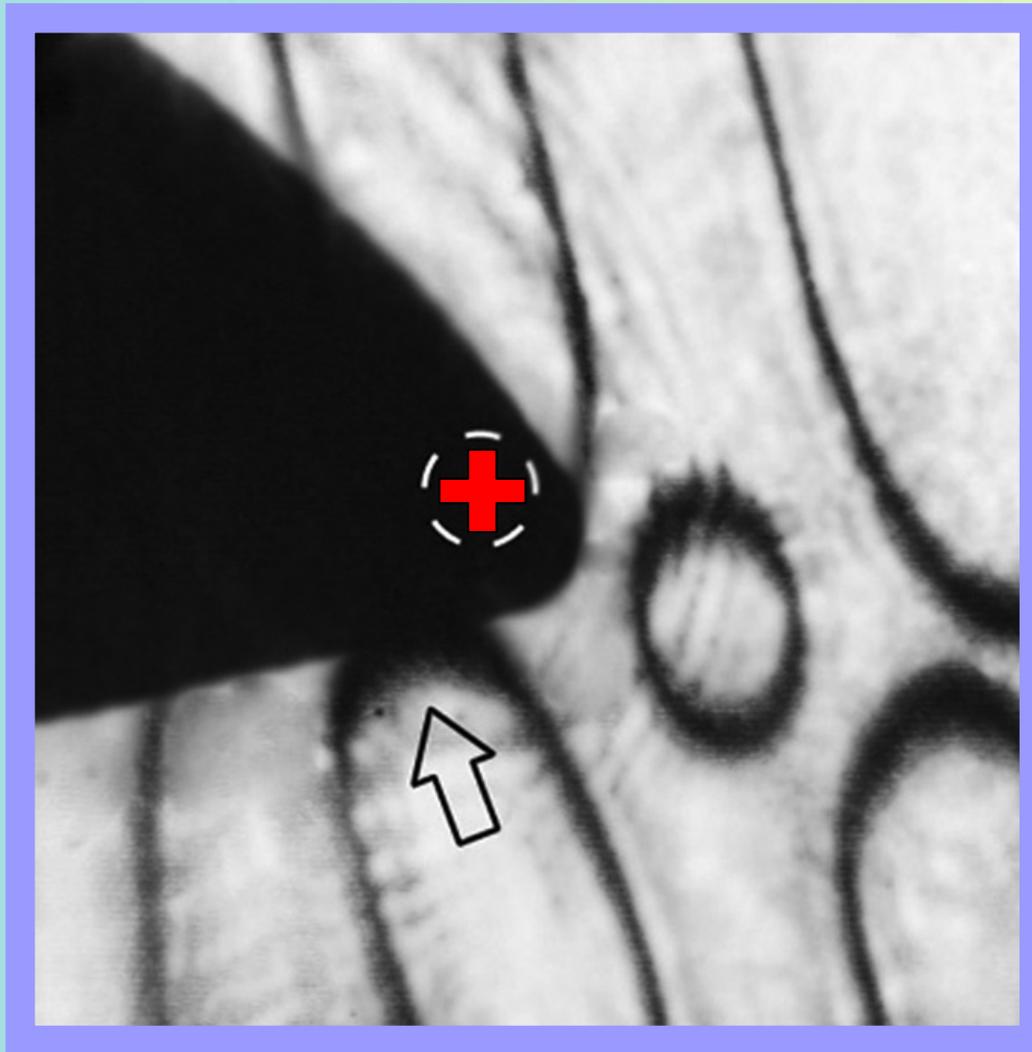


A.S. Logginov, G.A. Meshkov, A.V. Nikolaev, A.P. Pyatakov,  
JETP Lett., v.86, p.115 (2007)

# Трансформация микромагнитной структуры

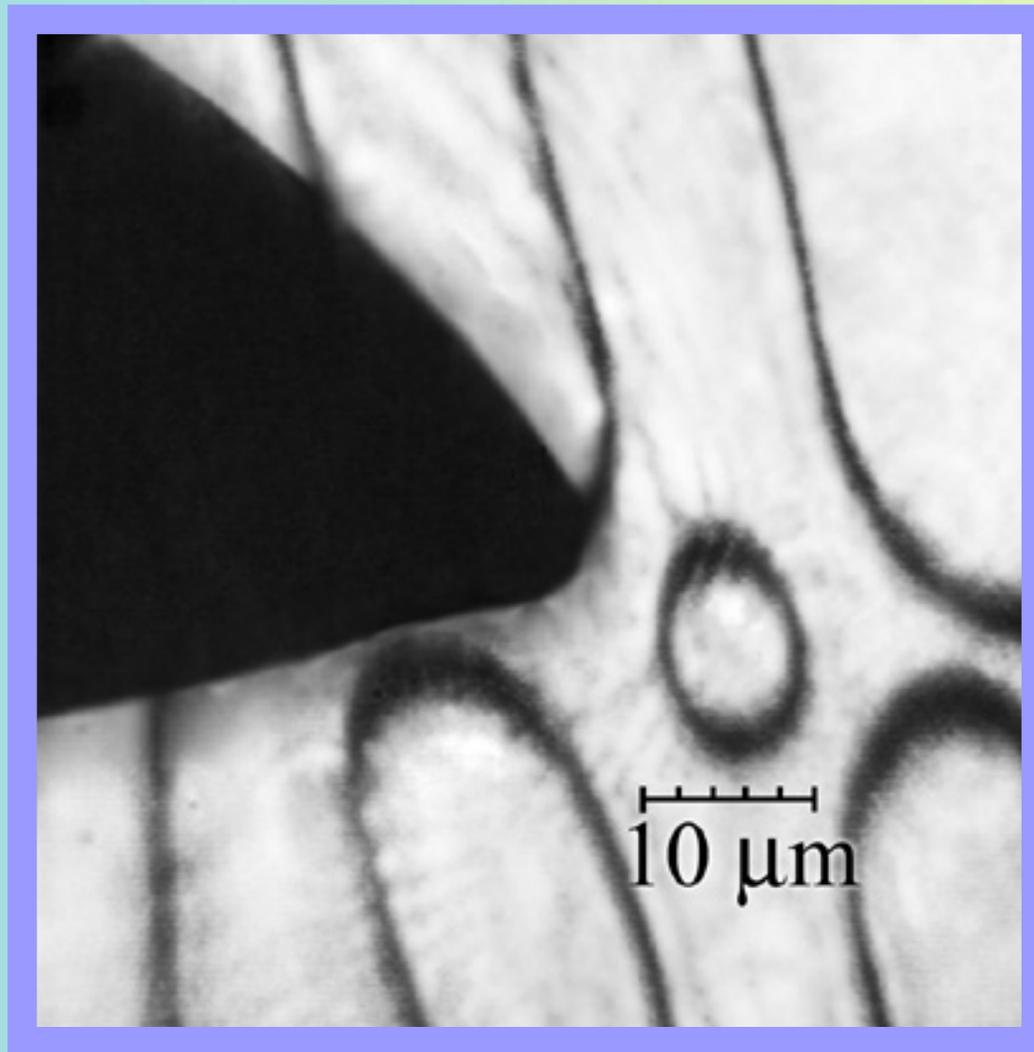


# Трансформация микромагнитной структуры

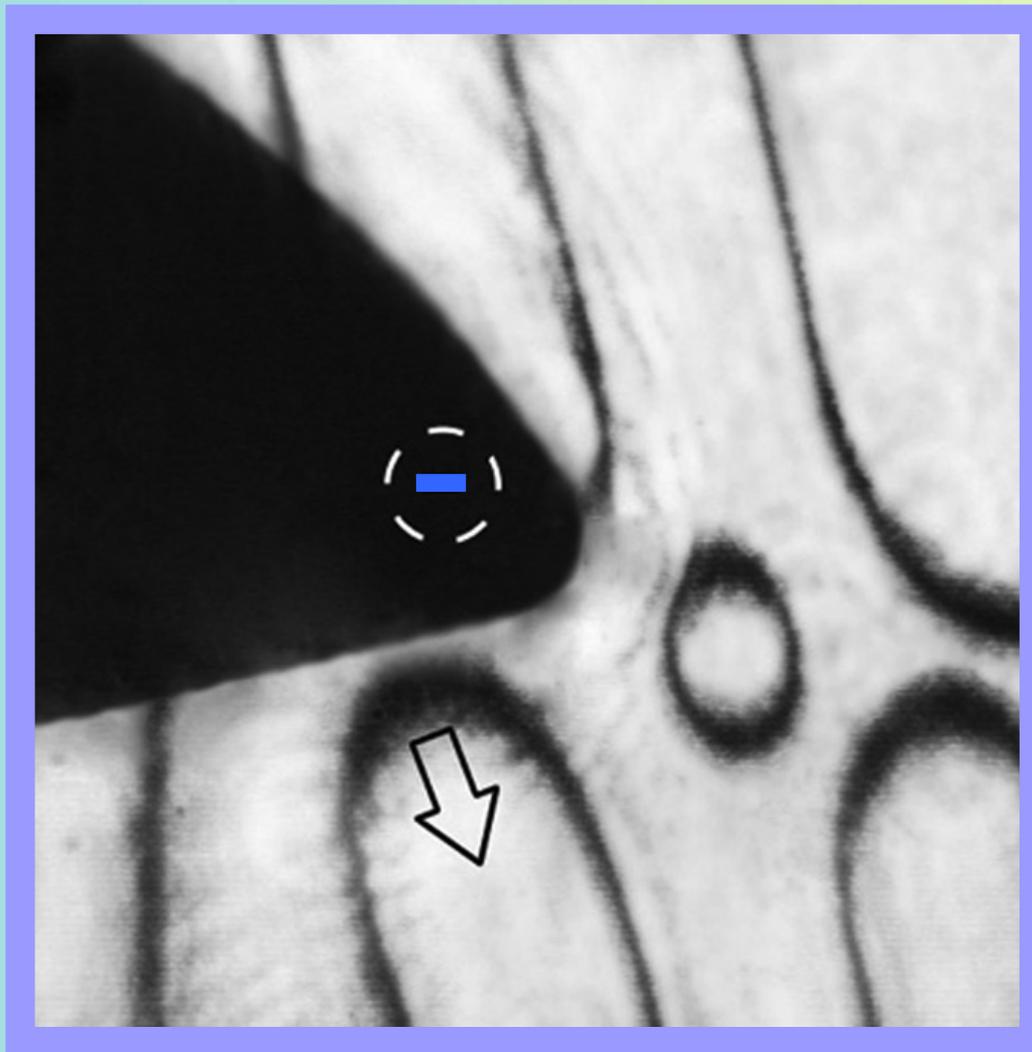


A.P.Pyatakov et al, arXiv: 0806.0811

# Трансформация микромагнитной структуры

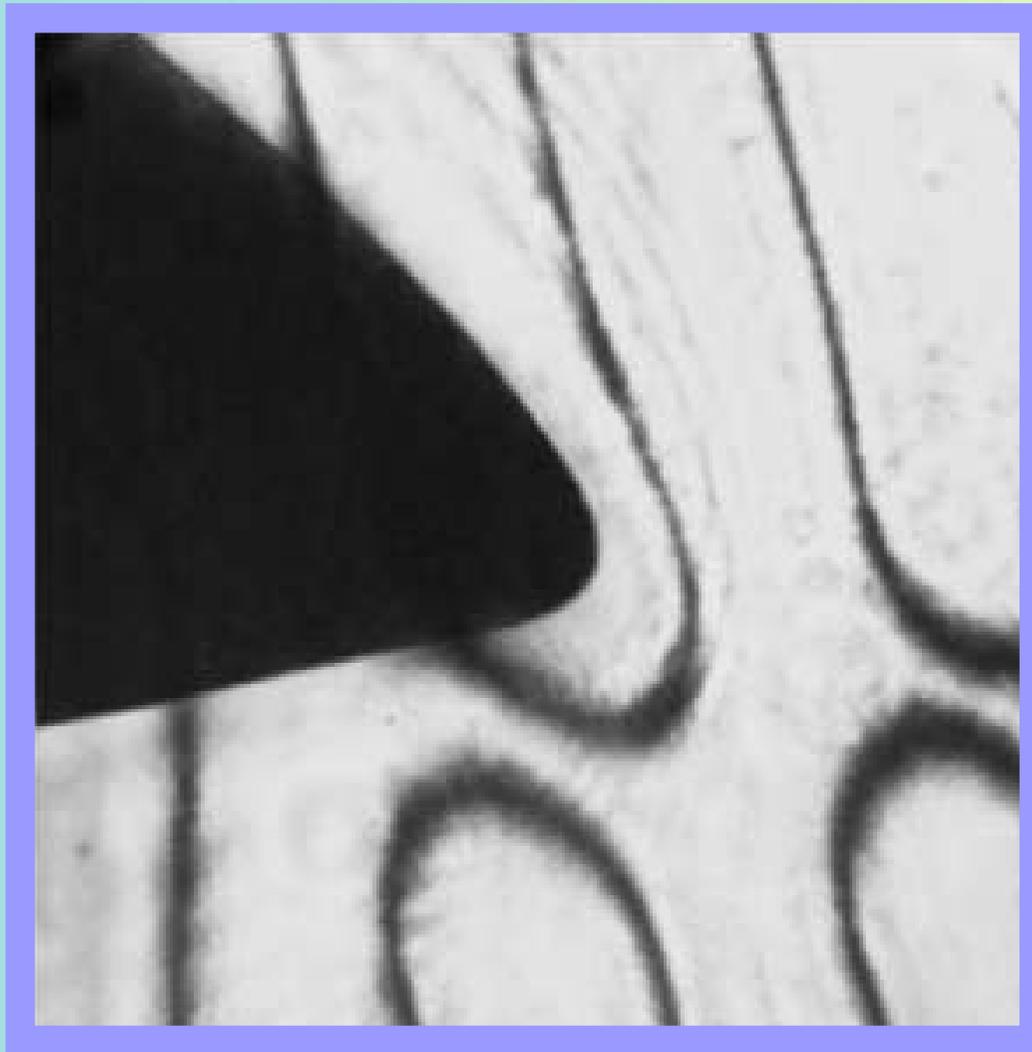


# Трансформация микромагнитной структуры



A.P.Pyatakov et al, arXiv: 0806.0811

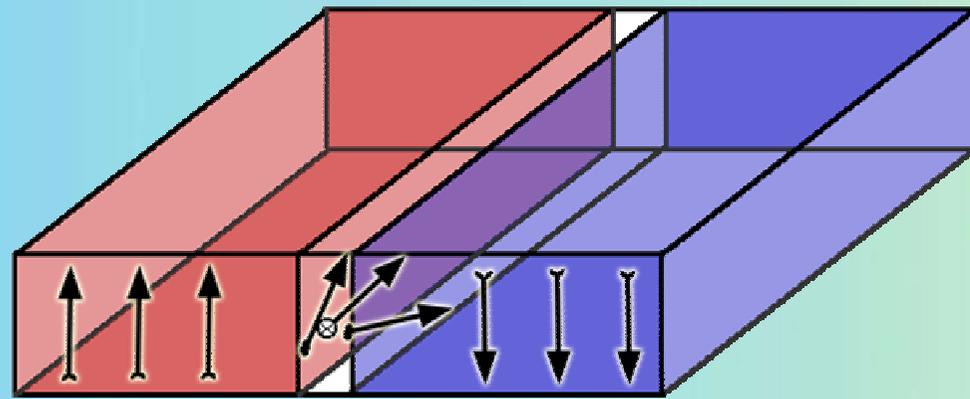
# Трансформация микромагнитной структуры



A.P.Pyatakov et al, arXiv: 0806.0811

# Влияние кристаллографической ориентации подложки

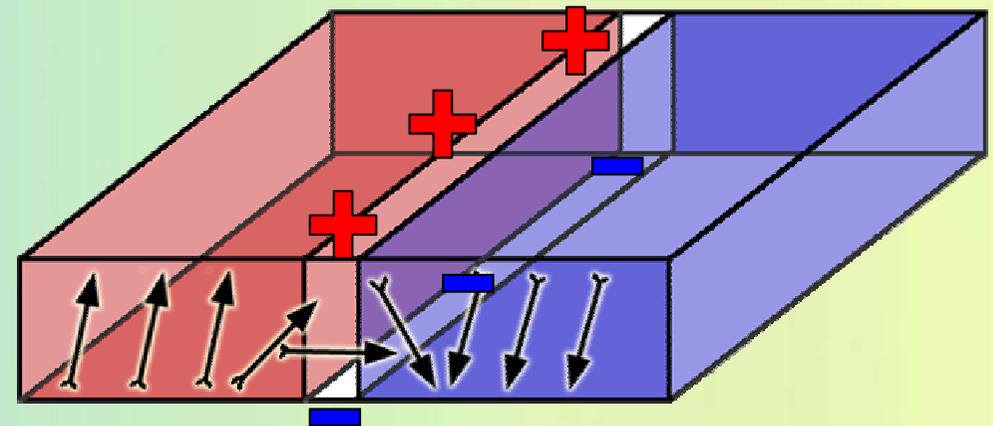
Доменная граница Блоха



Пленки (111)

$$((\nabla \cdot \mathbf{M}) = 0, \quad (\mathbf{M} \cdot \nabla) \mathbf{M} = 0)$$

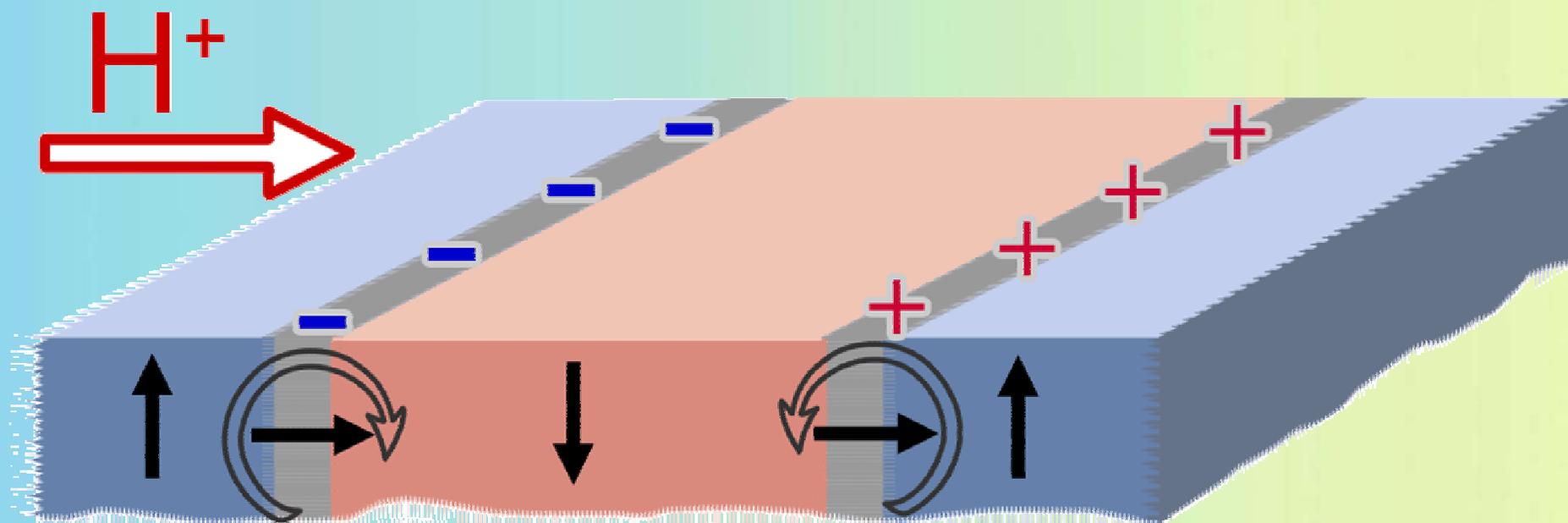
Доменная граница Нееля



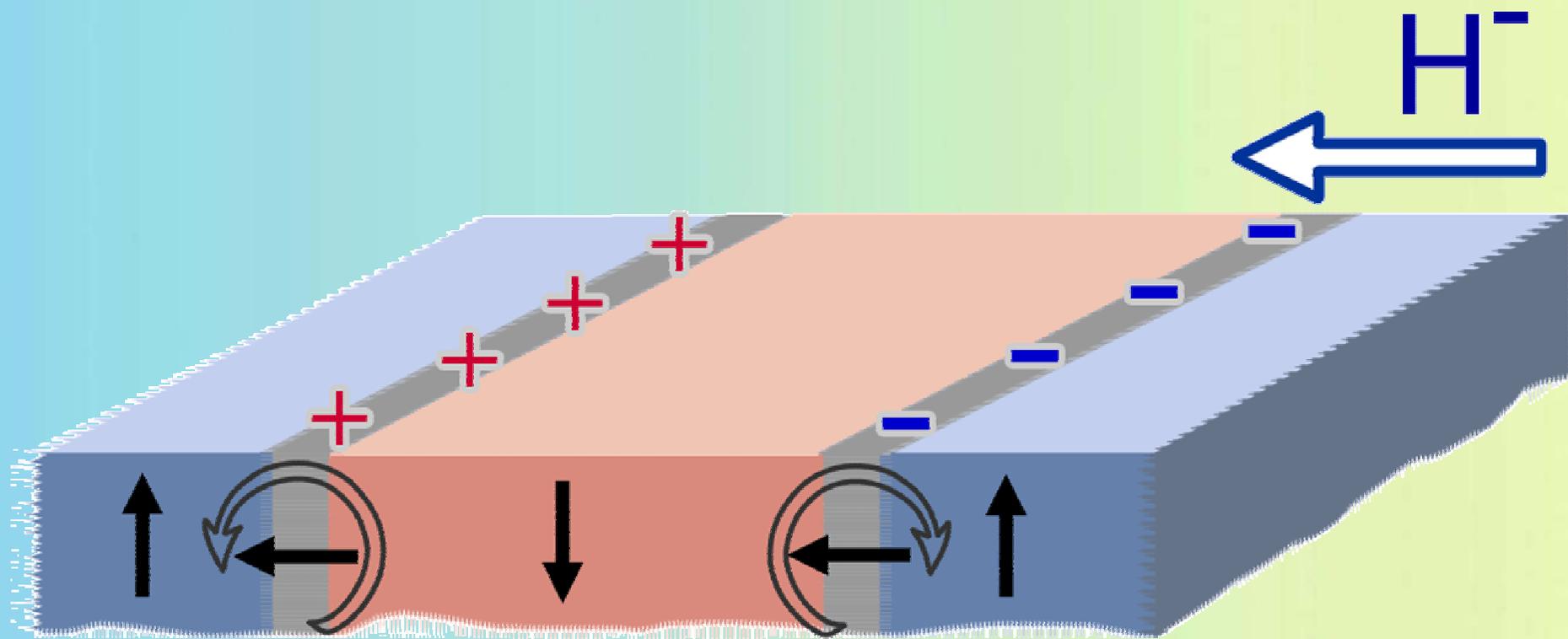
Пленки (210)

$$(\nabla \cdot \mathbf{M}) \neq 0 \quad (\mathbf{M} \cdot \nabla) \mathbf{M} \neq 0$$

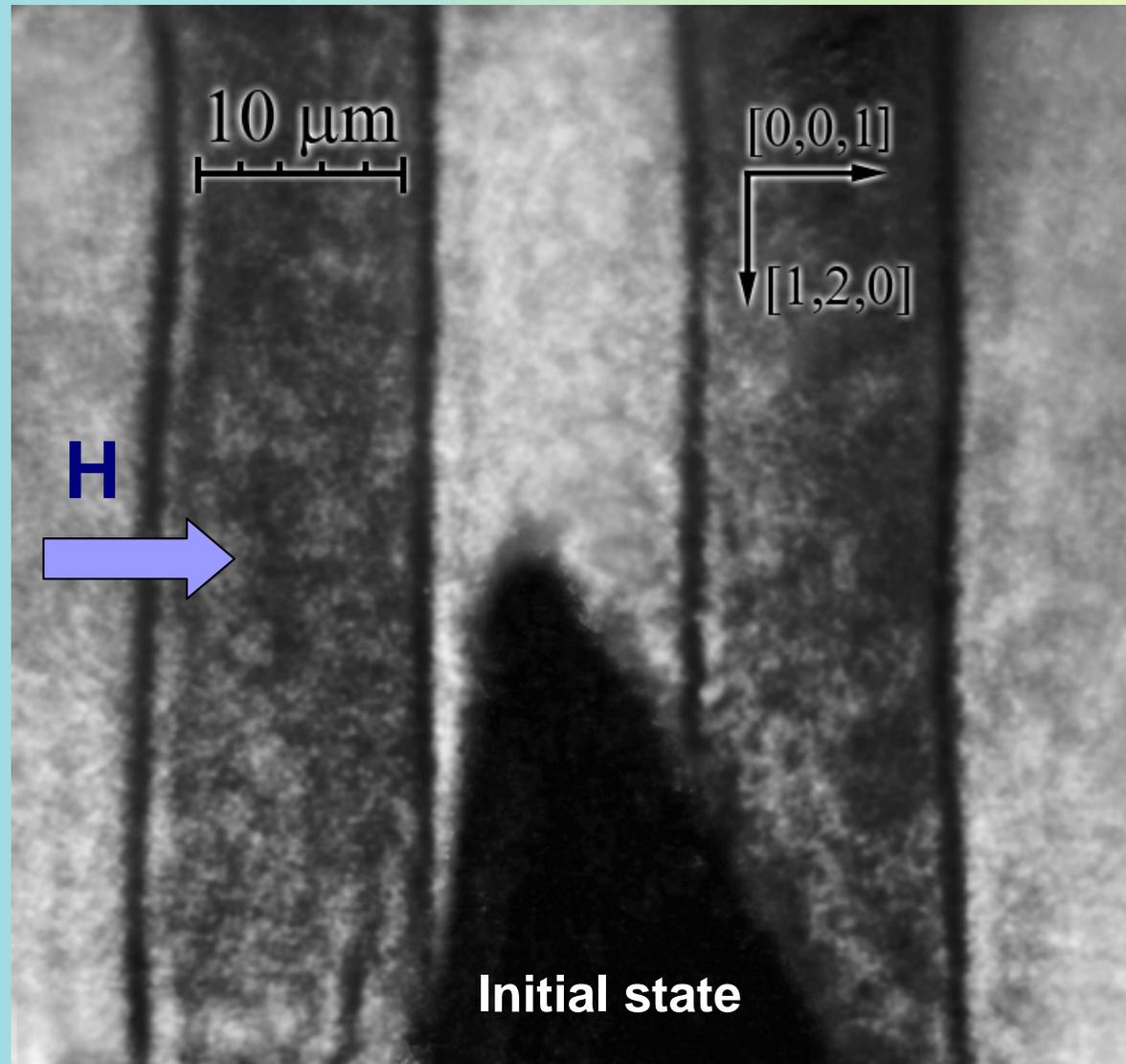
# Стенки Нееля с контролируемой киральностью



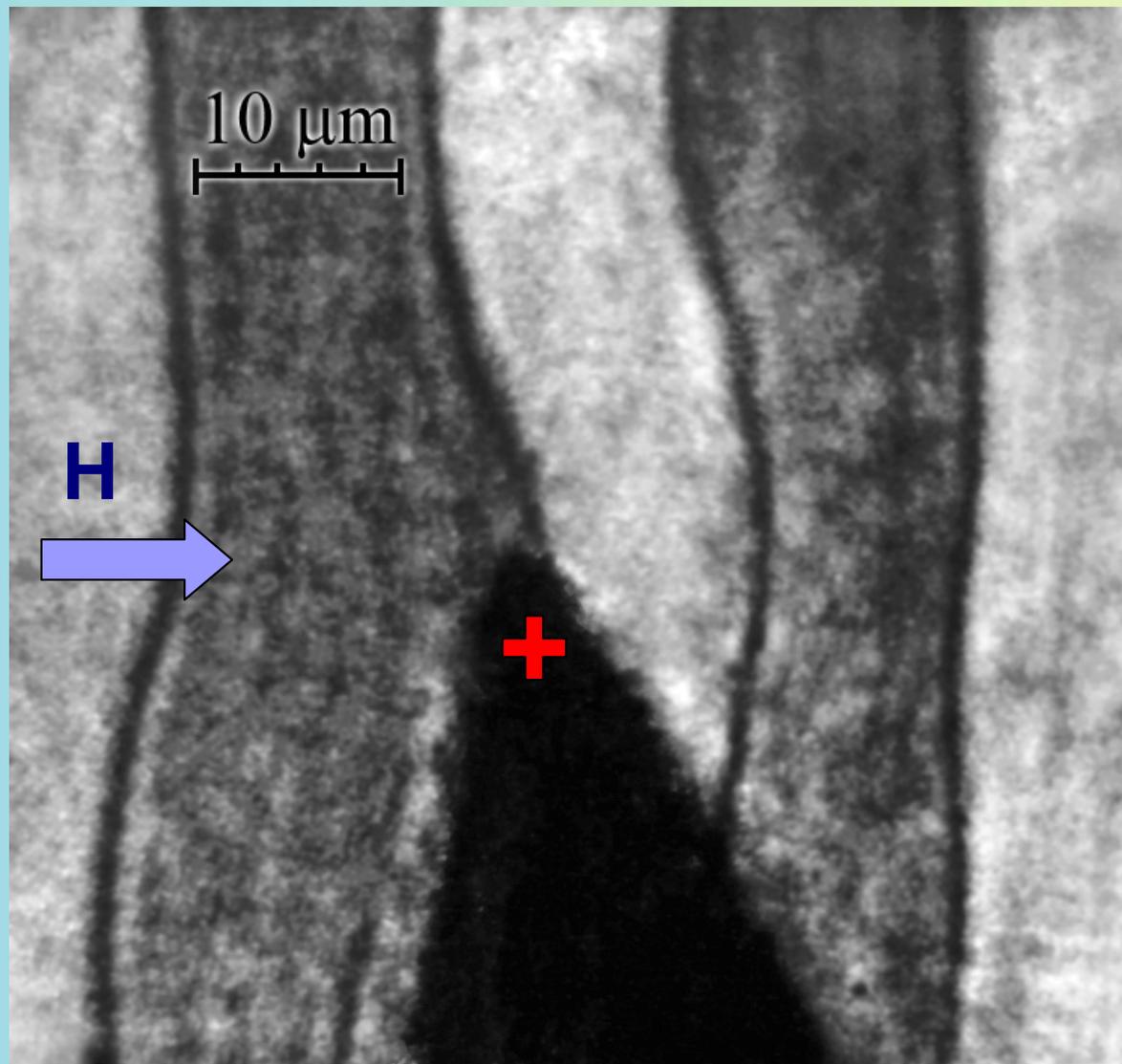
# Стенки Нееля с контролируемой киральностью



# Зависимость от киральности

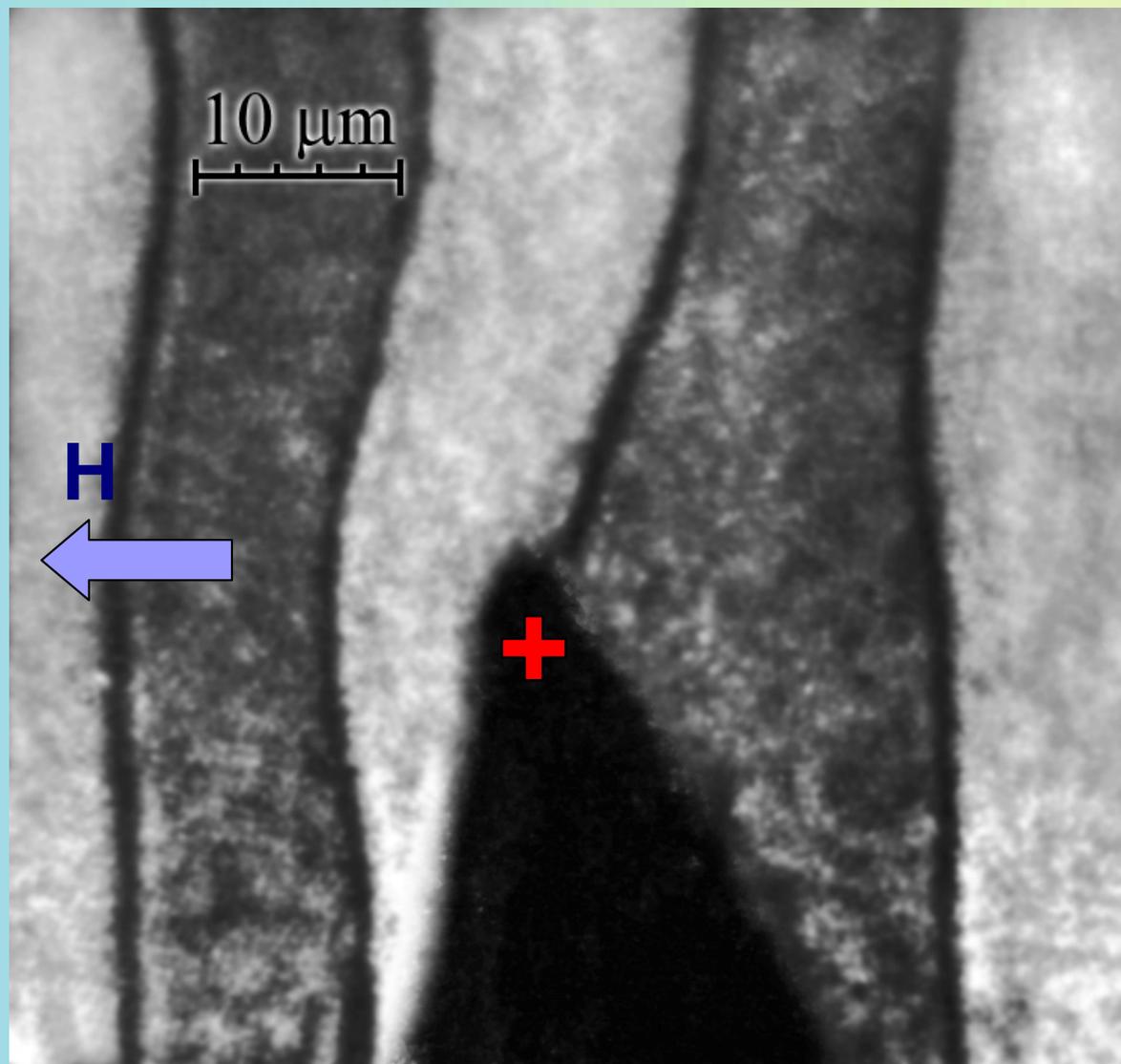


# Зависимость от киральности



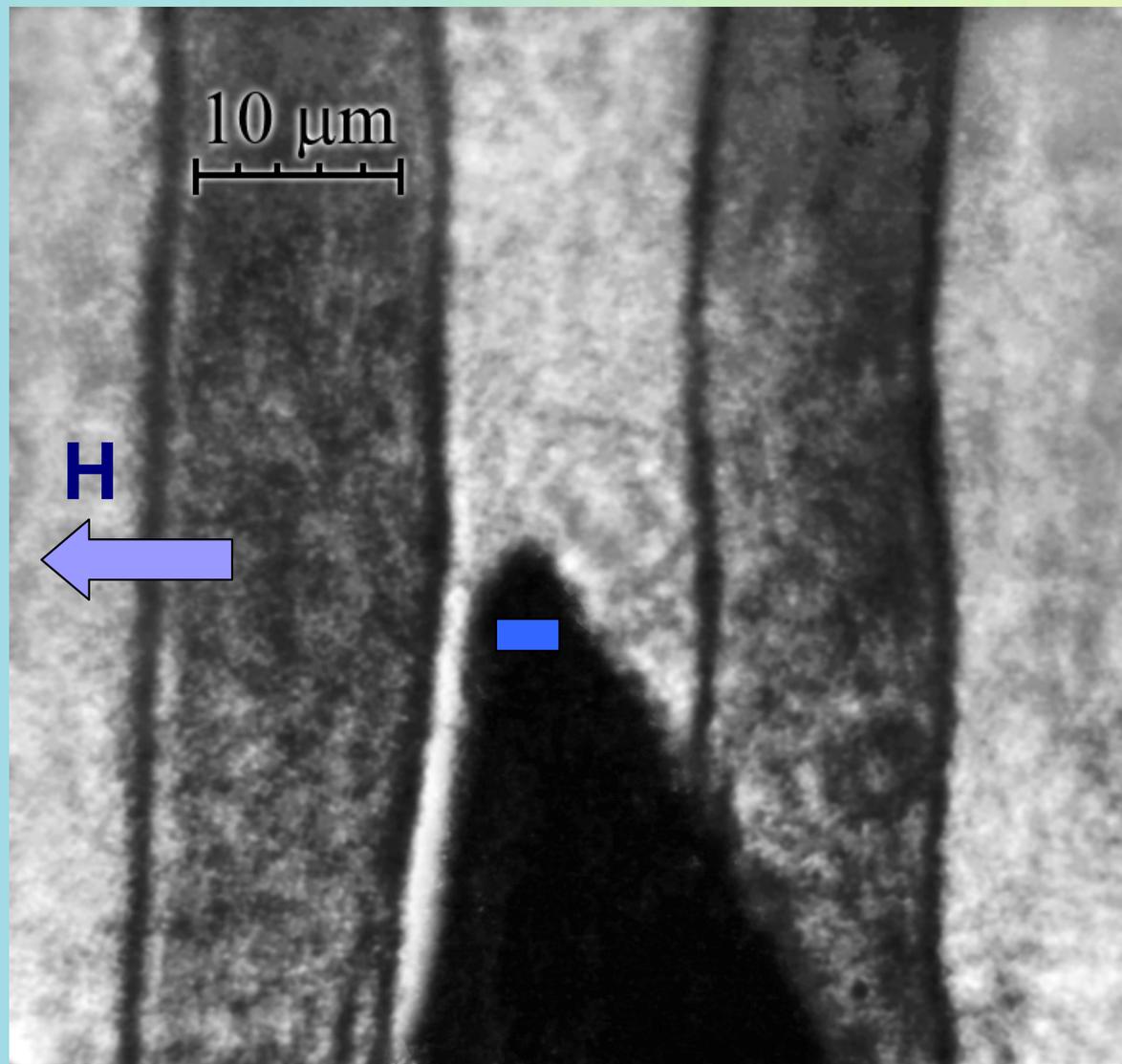
A.P. Pyatakov et al, Arxiv1001.0672

# Зависимость от киральности



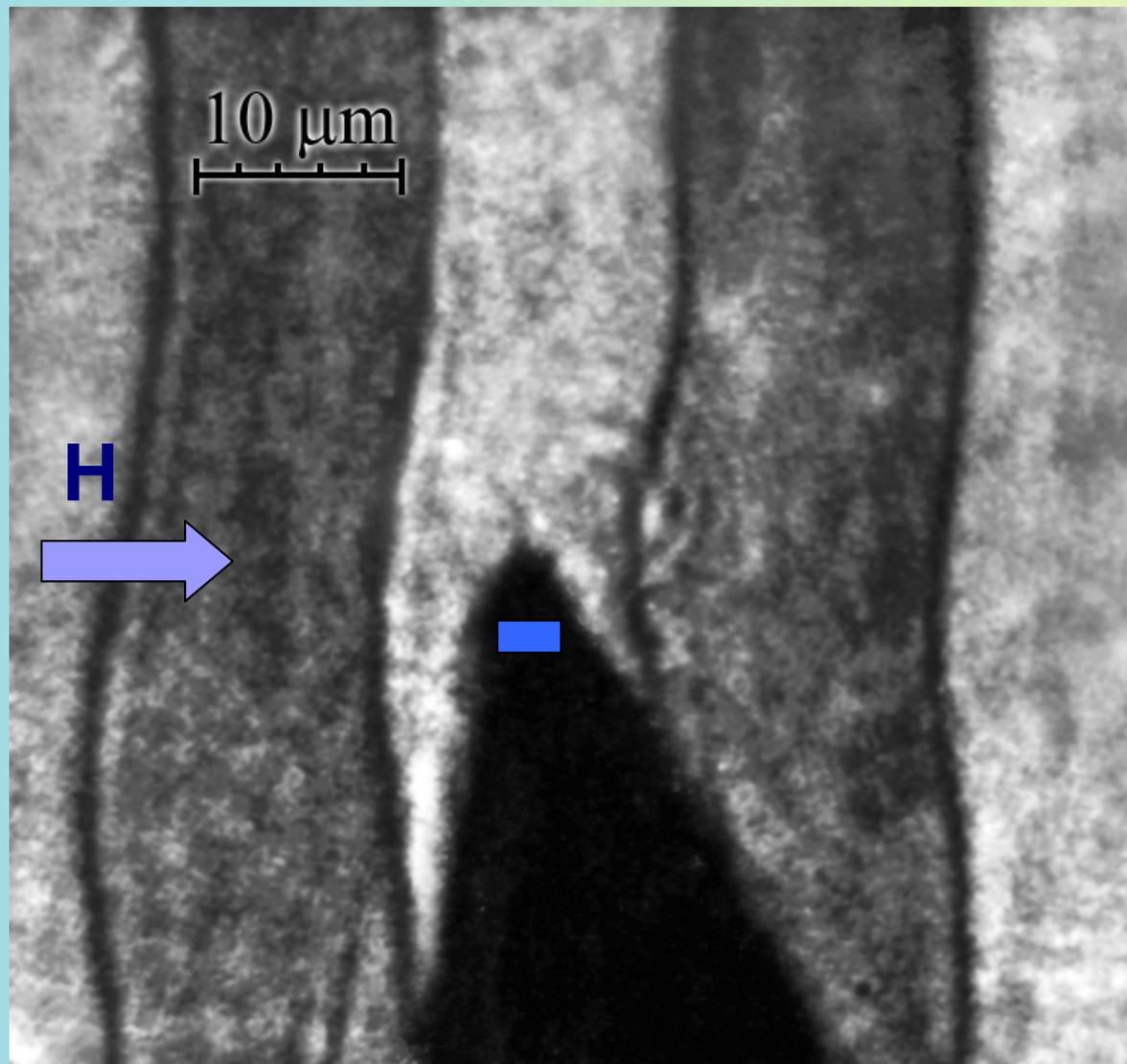
A.P. Pyatakov et al, Arxiv1001.0672

# Зависимость от киральности



A.P. Pyatakov et al, Arxiv1001.0672

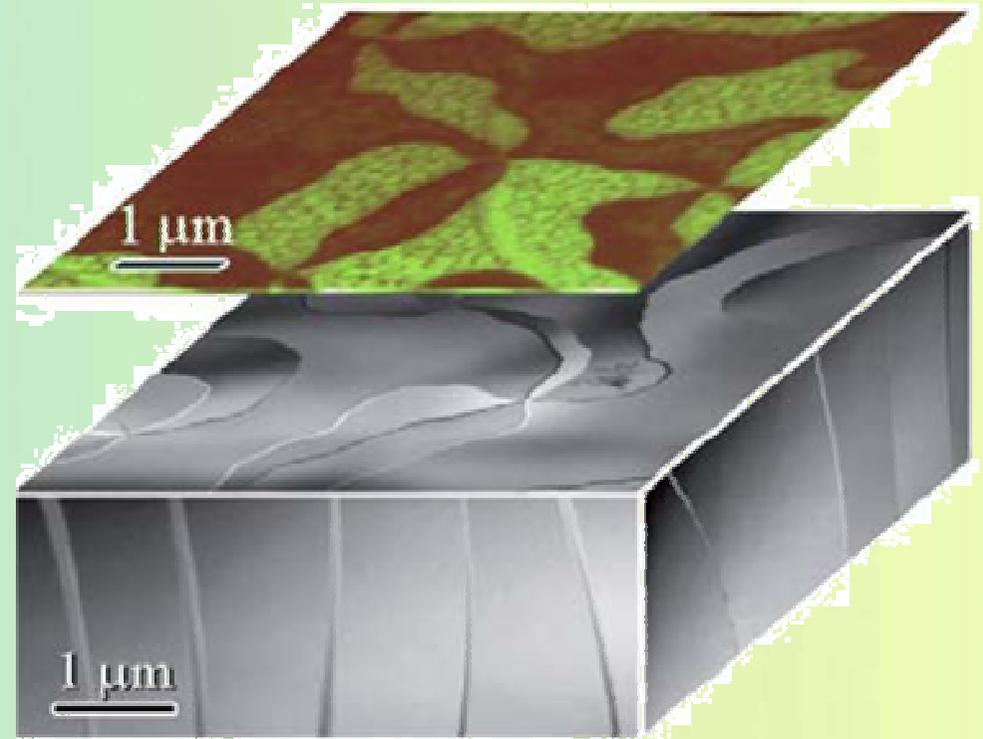
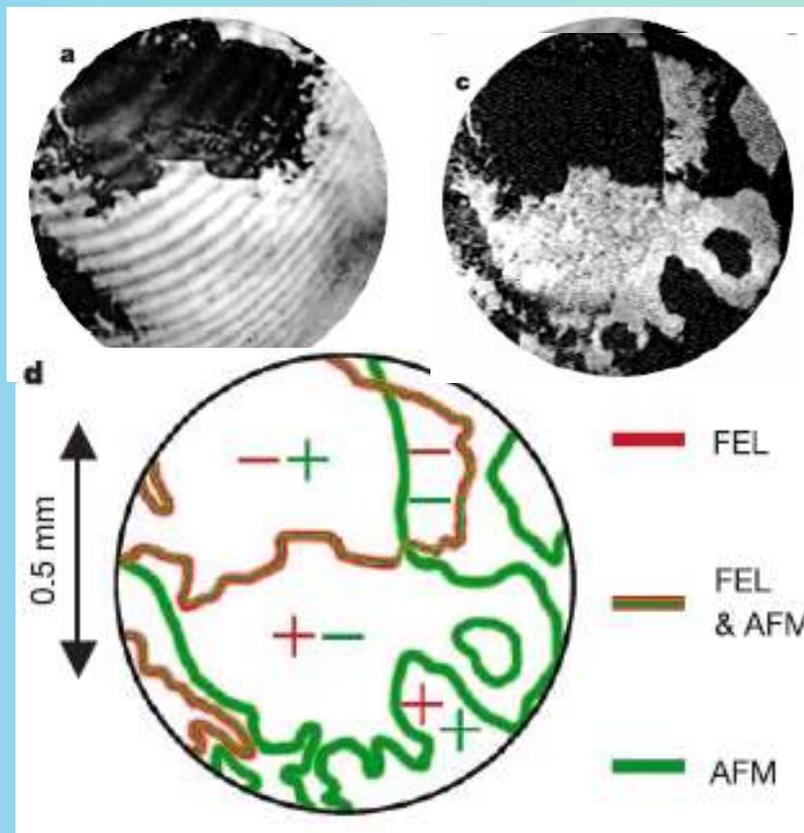
# Зависимость от киральности



A.P. Pyatakov et al, Arxiv1001.0672

# Магнитоэлектрический пиннинг

M. Fiebig, Th. Lottermoser, D. Fröhlich, A. V. Goltsev, R. V. Pisarev, *Nature*, **419**, 818  
Теория: A. V. Goltsev *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **90**, 177204 (2003).



M. Fiebig *et al.*, *Nature*, **419**, 818 (2002)

T. Choi *et al.*, *Nature Mater.* **9**, 253 (2010)

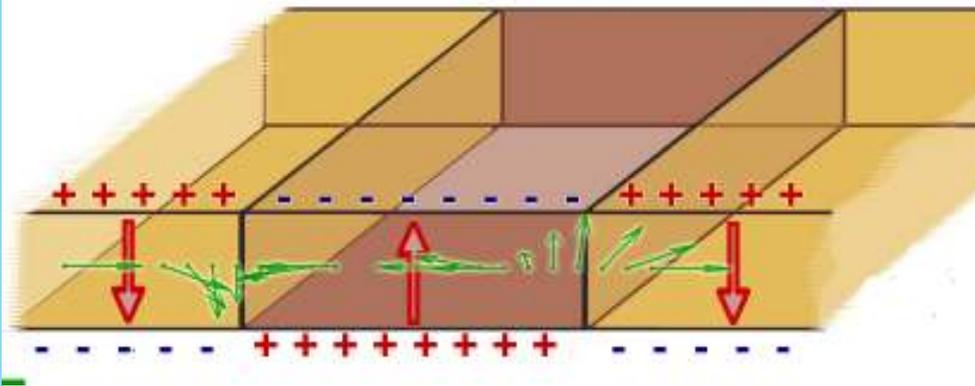
# МЭ пинниг за счет флексо-эффетов

Z.V.Gareeva, A.K. Zvezdin,

Interacting antiferromagnetic and ferroelectric domain structures of multiferroics,  
Phys. Status Solidi, RRL 3, 79 (2009)

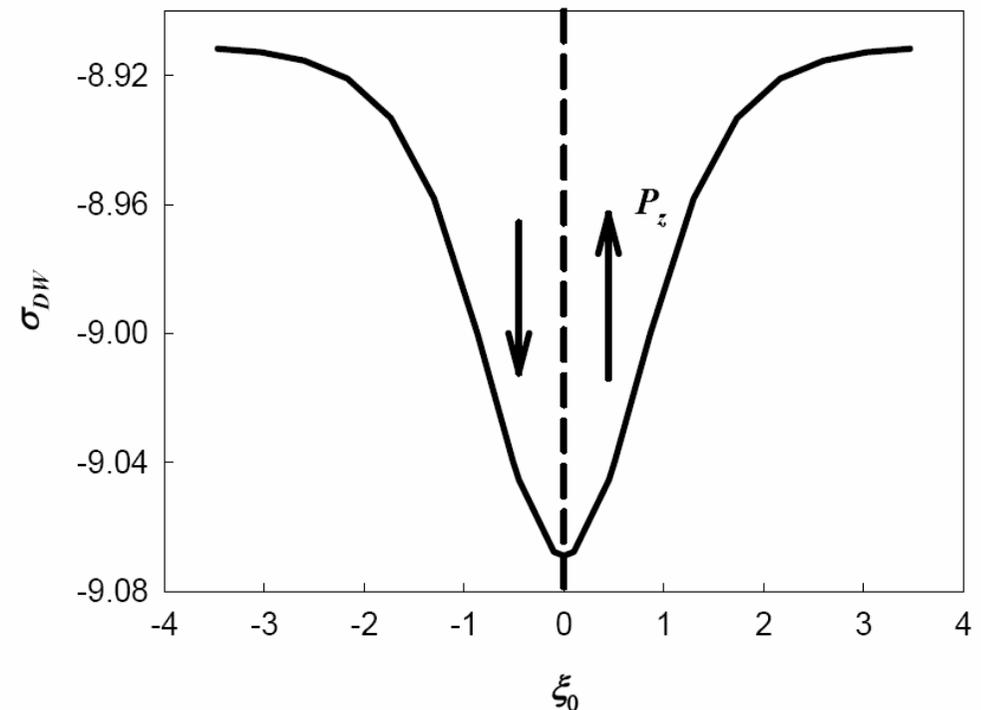
Clamped chiral domain walls: A. Scaramucci, Th. Kaplan, M. Mostovoy, ArXiv 0906.5298

## Сегнетоэлектрическая и АФМ структура



Теория: Z. V. Gareeva and A.K. Zvezdin  
ФТТ 2010 (в печати)

## Потенциальная яма



# *Resume*

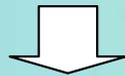
- Нарушение пространственной инверсии может породить спиновые спирали
- Циклоидальное магнитное упорядочение может породить электрическую поляризацию
- Микромагнитные структуры могут проявлять магнитоэлектрические свойства даже в центросимметричных средах

*Антракт*

# BiFeO<sub>3</sub> – классический мультиферроик

## Однородный МЭ эффект

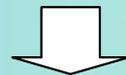
$$F_{HME} \sim P_z \cdot (M_x L_y - M_y L_x)$$



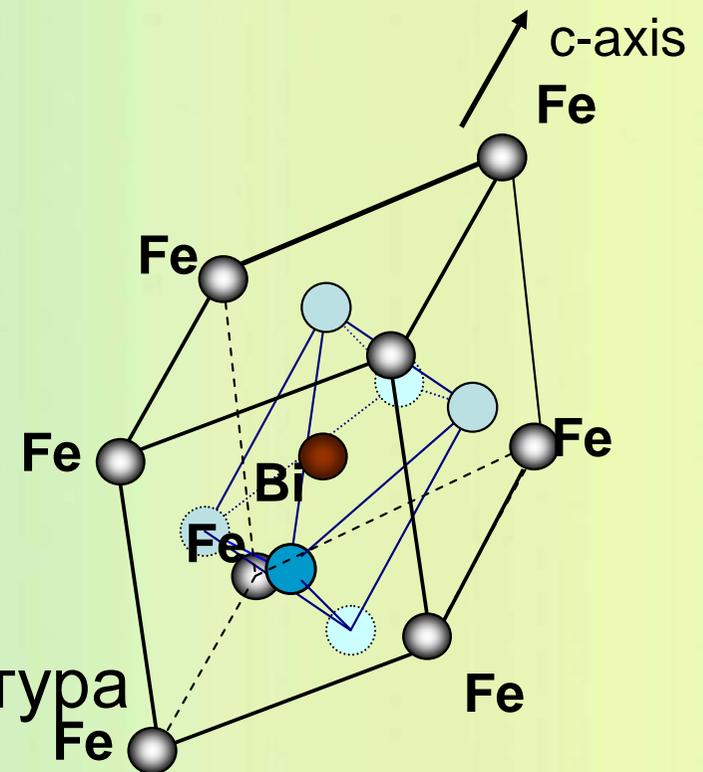
Скос магнитных подрешеток  
(слабый ферромагнетизм)

## Неоднородный МЭ эффект

$$F_{IME} = \gamma \cdot P_z \cdot (L_z \cdot (\nabla \cdot L) - (L \cdot \nabla) L_z)$$



Пространственно-модулированная структура



I. Sosnowska, A. Zvezdin JMMM 140-144, 167 (1995)

$\gamma \sim 0.6 \text{ erg/cm}^2$

# Теорема об эквивалентности форм DLM и PLM

Ферромагнетизм наведенный сегнетоэл. поляризацией

$$P_z(M_x L'_y - M_y L'_x)$$

A.M. Kadomtseva, A.K. Zvezdin, Yu.F. Popov, A.P. Pyatakov, G.P. Vorob'ev,  
JETP Lett. **79**, 571 (2004)

Слабый ферромагнетизм Дзялошинского-Мории

$$D_z(M_x L_y - M_y L_x)$$

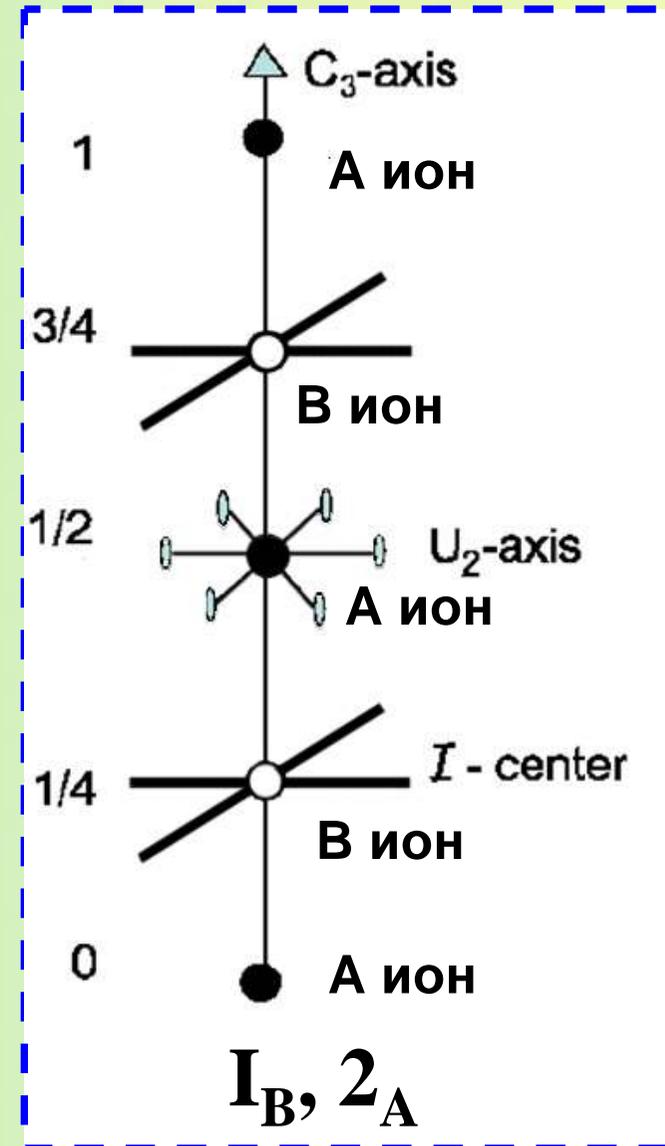
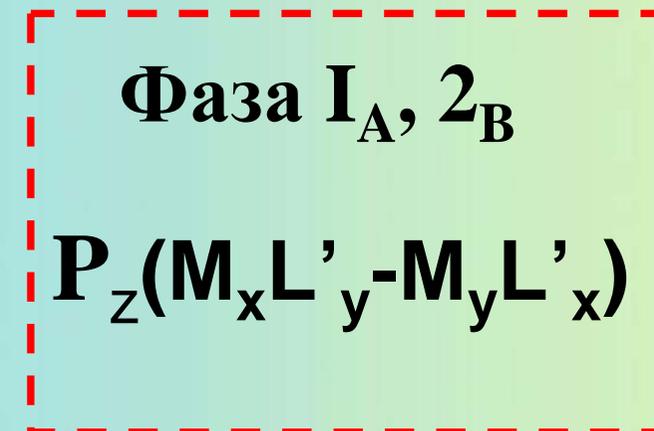
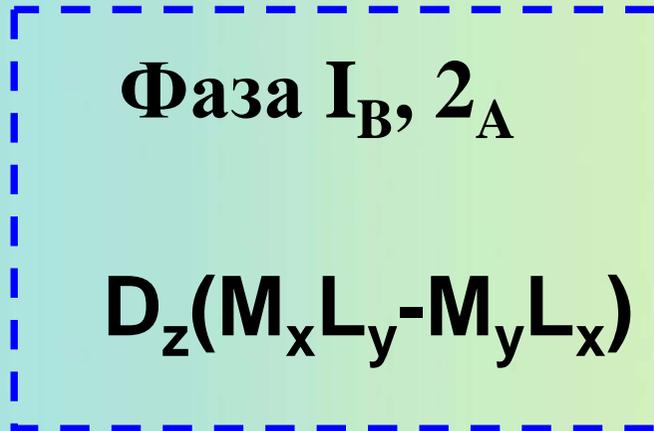
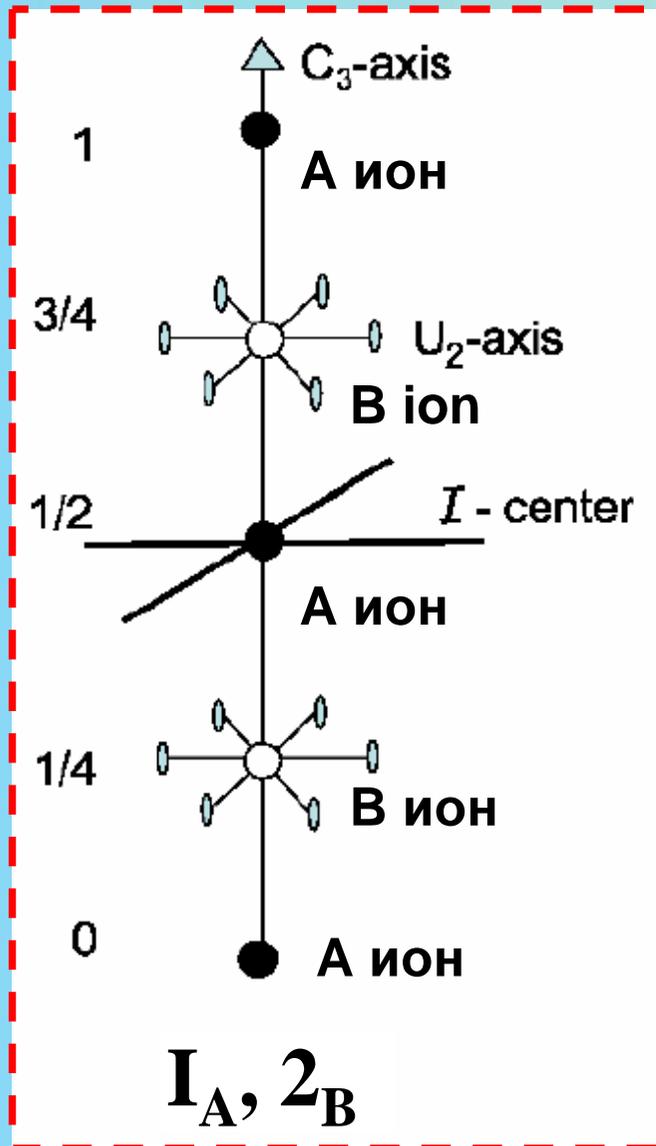
C. Ederer , N.A. Spaldin , PRB **71** 060401; C. J. Fennie, PRL **100**, 167203 (2008)

## DLM или PLM?

Дискуссия, см.: R. de Sousa and J. E. Moore vs. C.J. Fennie  
PRL **102**, 249701 and 249702 (2009)

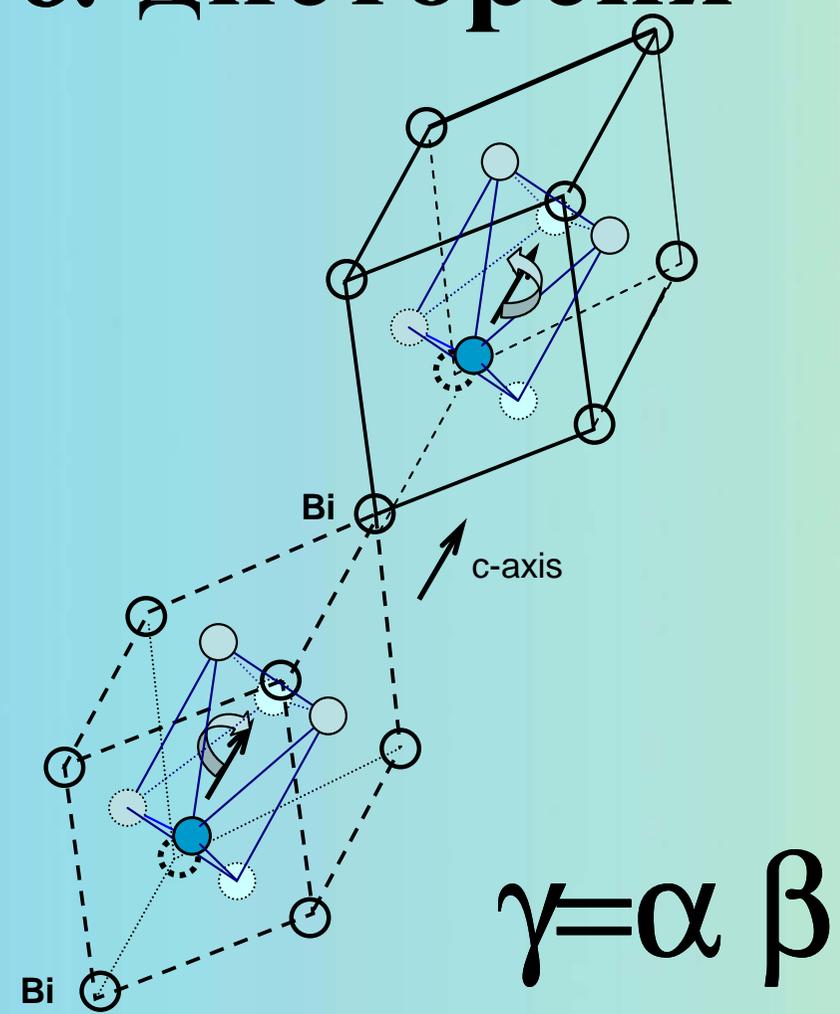
Согласно симметрии две формы эквивалентны!

# Две виртуальные фазы в соединениях $ABO_3$

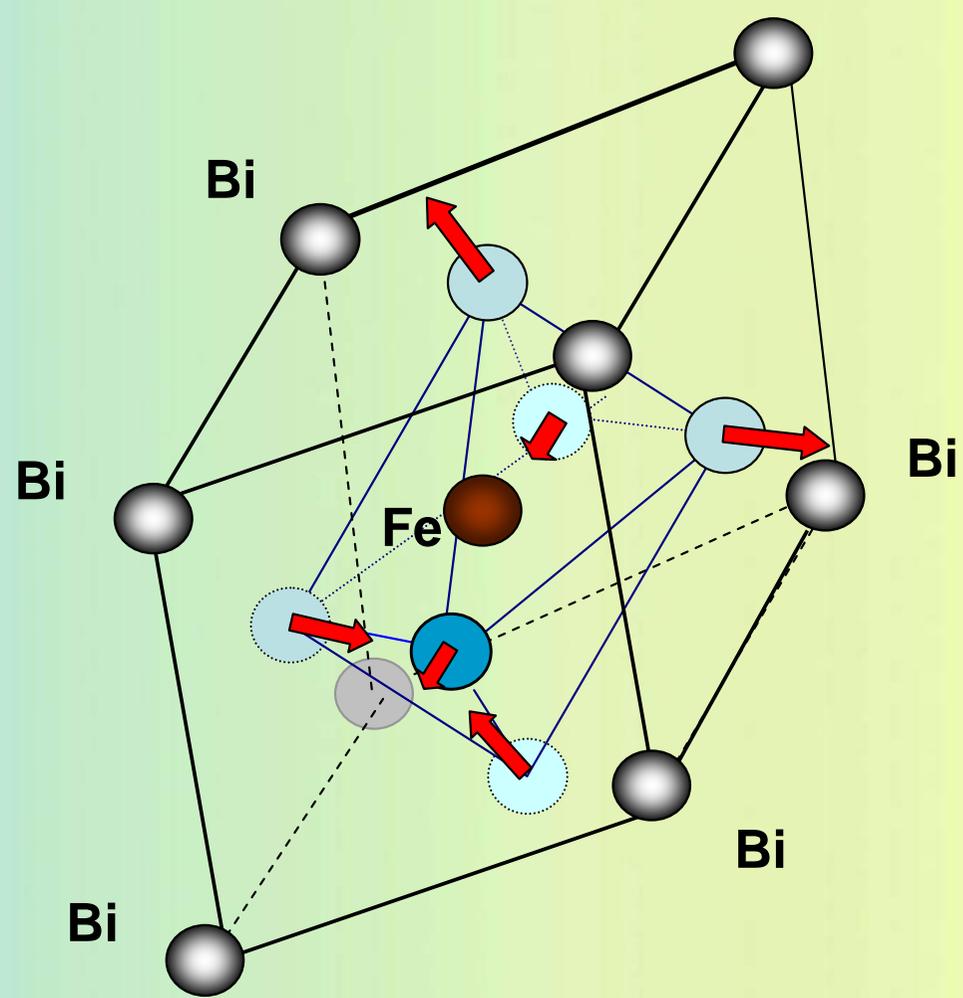


# Искажения в решетке $\text{BiFeO}_3$

## $\alpha$ -дисторсия



## $\beta$ -дисторсия



# Irreducible representations of $R\bar{3}c$ space group

	$\mathbf{I}$	$2_x$	$\mathbf{I}_B, 2_A$	$\mathbf{I}_A, 2_B$
$\Gamma_1$	1	1	$\alpha_z; L_z; D_z$	$\gamma'_z$
$\Gamma_2$	-1	1	$M_z$	
$\Gamma_3$	$\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} M_x \\ M_y \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} L_x \\ L_y \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} M_x \\ M_y \end{pmatrix}$
$\Gamma_4$	-1	-1	$P_z; \gamma_z; Z_0$	$P_z; \alpha'_z; L'_z$
$\Gamma_5$	-1	1		
$\Gamma_6$	$\begin{pmatrix} -1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} -1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} E_y \\ E_x \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} E_y \\ E_x \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} L'_x \\ L'_y \end{pmatrix}$

# Two references phases in BiFeO<sub>3</sub>

	$I_B, 2_A$	$I_A, 2_B$
$\Gamma_1$	$\alpha_z; L_z; D_z$	$\gamma'_z$
$\Gamma_2$	$M_z$	
$\Gamma_3$	$\begin{pmatrix} M_x \\ M_y \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} L_x \\ L_y \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} M_x \\ M_y \end{pmatrix}$
$\Gamma_4$	$P_z; \gamma_z; Z_0$	$P_z; \alpha'_z; L'_z$
$\Gamma_5$		
$\Gamma_6$	$\begin{pmatrix} E_y \\ E_x \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} E_y \\ E_x \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} L'_x \\ L'_y \end{pmatrix}$

**Phase  $I_B, 2_A$**

$$\alpha_z(M_x L_y - M_y L_x)$$

or

$$D_z(M_x L_y - M_y L_x)$$

**Phase  $I_A, 2_B$**

$$\alpha'_z(M_x L'_y - M_y L'_x)$$

or

$$P_z(M_x L'_y - M_y L'_x)$$

# The equivalence of DLM and PLM

	$I_B, 2_A$	$I_A, 2_B$
$\Gamma_1$	$\alpha_z; L_z; D_z$	$\gamma'_z$
$\Gamma_2$	$M_z$	
$\Gamma_3$	$\begin{pmatrix} M_x \\ M_y \end{pmatrix} \begin{pmatrix} L_x \\ L_y \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} M_x \\ M_y \end{pmatrix}$
$\Gamma_4$	$P_z; \gamma_z; Z_0$	$P_z; \alpha'_z; L'_z$
$\Gamma_5$		
$\Gamma_6$	$\begin{pmatrix} E_y \\ E_x \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} E_y \\ E_x \end{pmatrix} \begin{pmatrix} L'_x \\ L'_y \end{pmatrix}$

$$\alpha'_z \begin{pmatrix} L'_x \\ L'_y \end{pmatrix} = \alpha_z \begin{pmatrix} L_x \\ L_y \end{pmatrix}$$

In other words

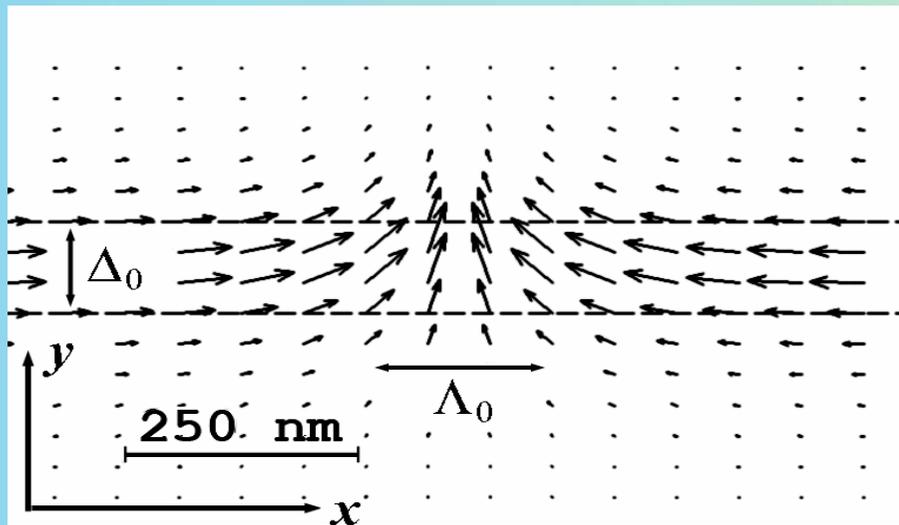
$$P_z(M_x L'_y - M_y L'_x) = D_z(M_x L_y - M_y L_x)$$

# Micromagnetism in magnetoelectrics

V. Bar'yahtar et al, *Inhomogeneous ME effect*,  
JETP Lett. **37**, p. 673 (1983)

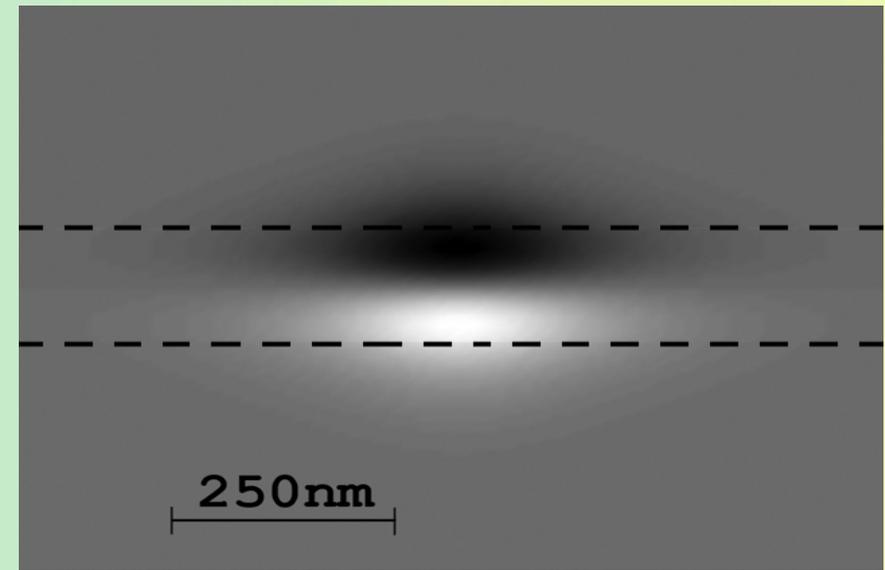
I. Dzyaloshinskii, *Magnetoelectricity in ferromagnets*,  
EPL, **83**, 013108 (2008)

## Micromagnetic structure

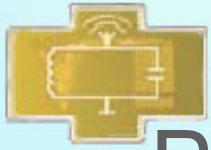


$$\theta(y) = 2 \cdot \text{atan}(\exp(y/\Delta_0)) \quad \varphi(x) = 2 \cdot \text{atan}(\exp(x/\Lambda_0))$$

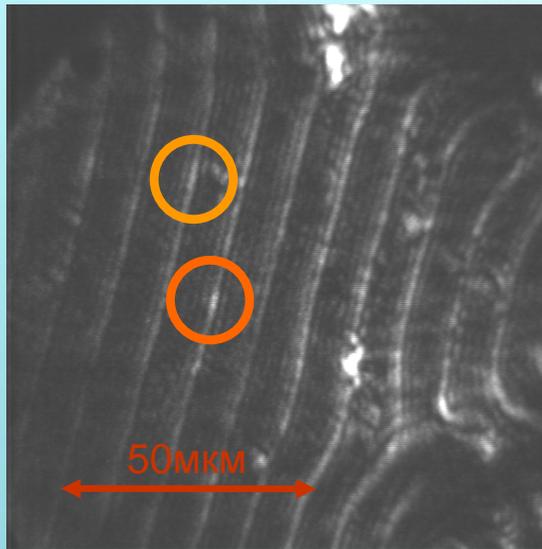
## Electric charges



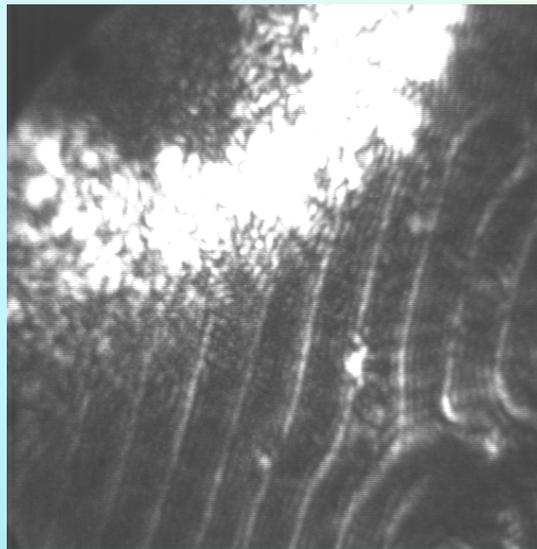
A.S. Logginov, A.K. Zvezdin, A.P. Pyatakov et al, *Electric field control of micromagnetic structures*, JMMM, v. 310, p. 2569 (2007)



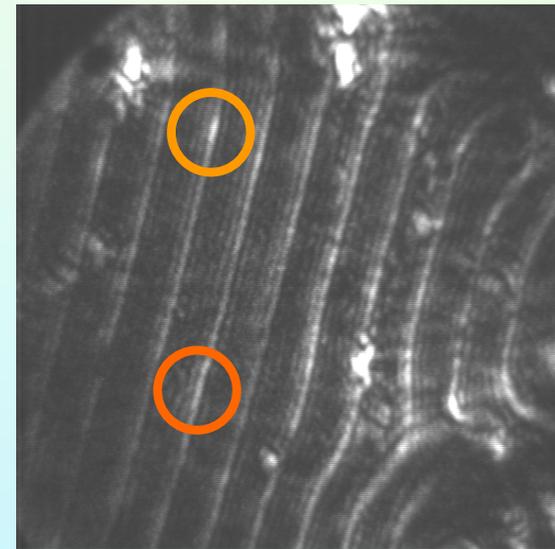
# Результаты: экспериментальное наблюдение движения линий Блоха



«Завязка»

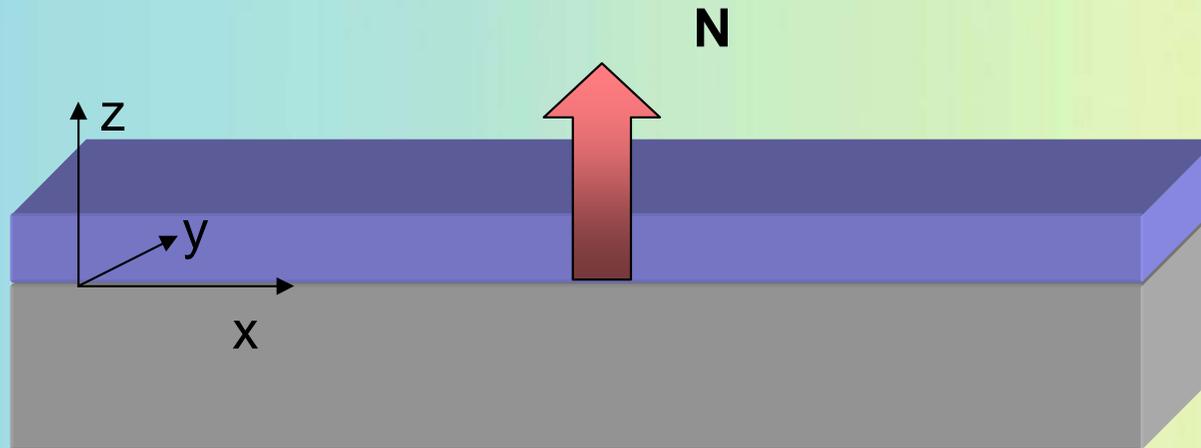


«Кульминация»



«Развязка»

# Поверхностный флексо-МЭ эффект



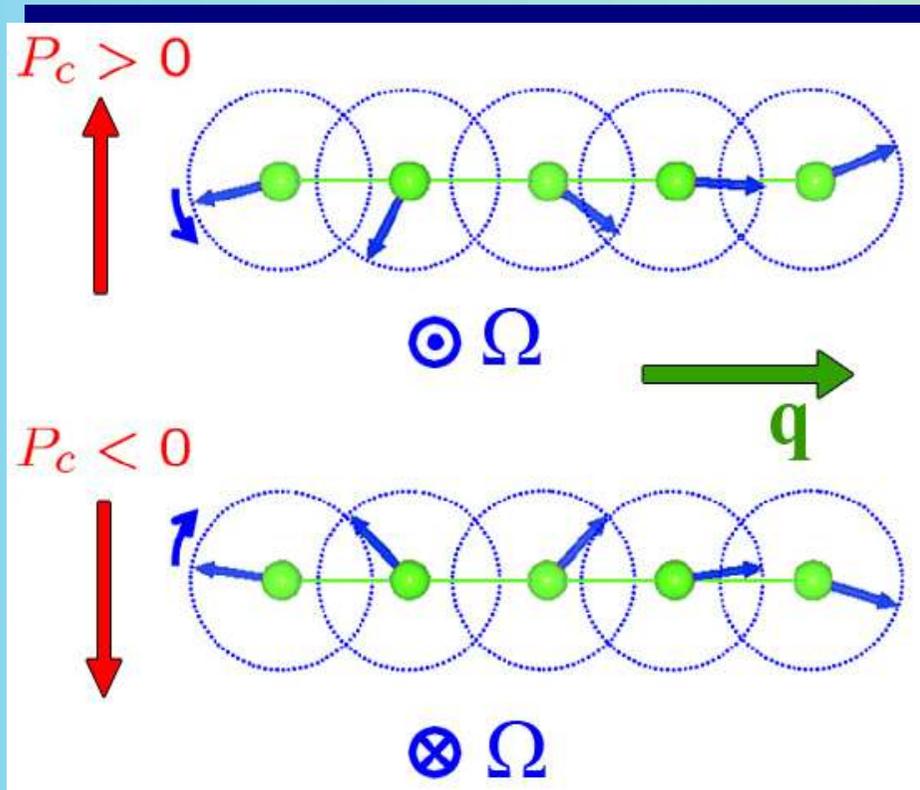
$$F_{Flexo} = -\gamma(\mathbf{N}) \cdot [\mathbf{n}(\nabla \mathbf{n}) - (\mathbf{n} \cdot \nabla) \mathbf{n}]$$

$\mathbf{n}$  – вектор директора/ вектор намагниченности

Нулевое приближение  $K \ll Aq^2$   $\mathbf{n} = (\sin [2\pi/\lambda x], 0, \cos[2\pi/\lambda x])$

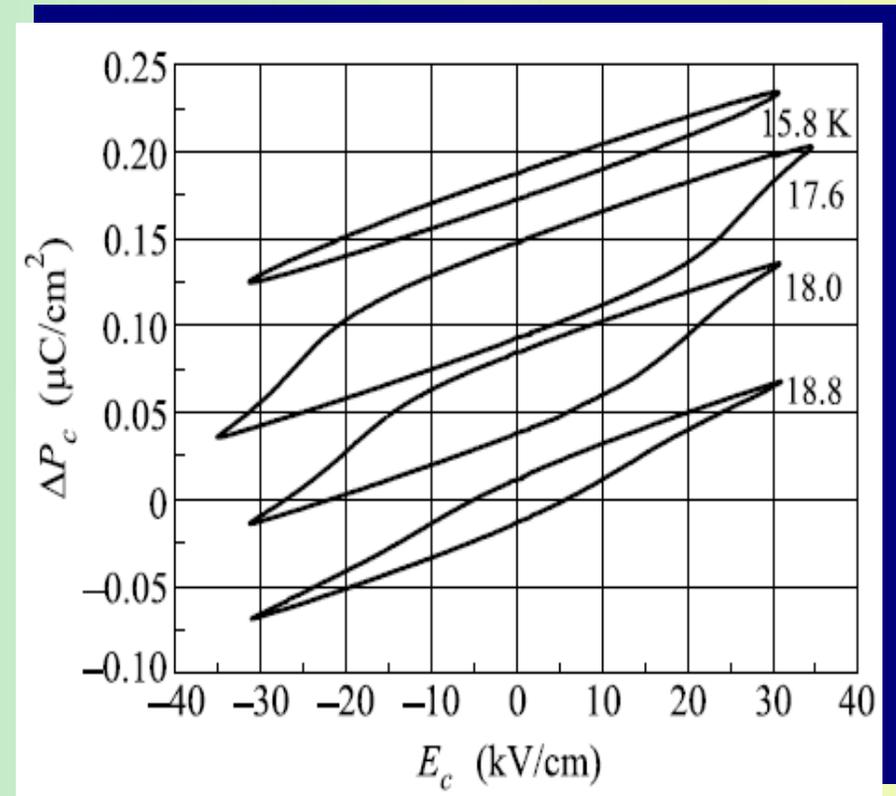
$\lambda = 4\pi A/\gamma$ ,  $A$  упругая/ обменная константа

# Переключение хиральности электрическим полем



TbMnO<sub>3</sub>

Y. Yamasaki et al, PRL **98**, 147204 (2007)



DyMnO<sub>3</sub> Е. В. Милов и др,

[Письма в ЖЭТФ , 85, 610 (2007)]

# Обсуждение

## Характерные особенности эффекта:

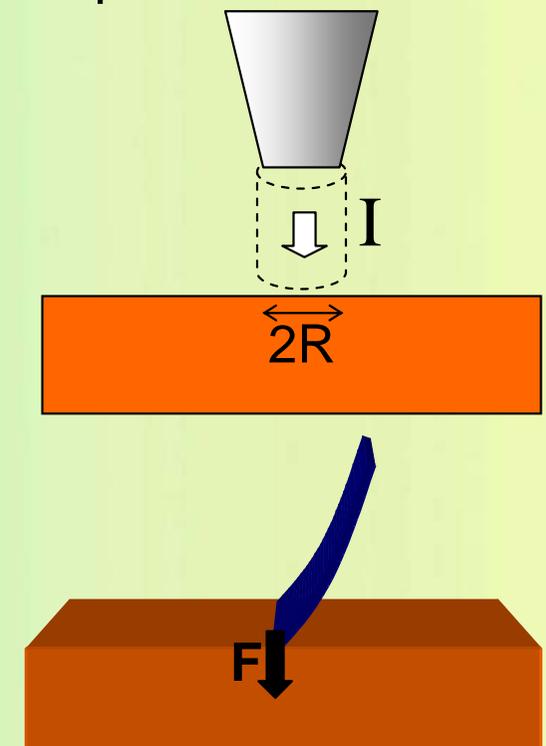
- не зависит от магнитной полярности (М-четен)
- меняет знак при переключении эл. полярности (Е-нечетен)
- Зависит от кристаллографической ориентации

## Исключение паразитных эффектов:

- Утечки
  - контроль с помощью миллиамперметра
  - противоречит М-четности эффекта

## Механическое давление иглы

- противоречит Е – нечетности эффекта



**Вывод:** эффект магнитоэлектрической природы

# Сводная таблица

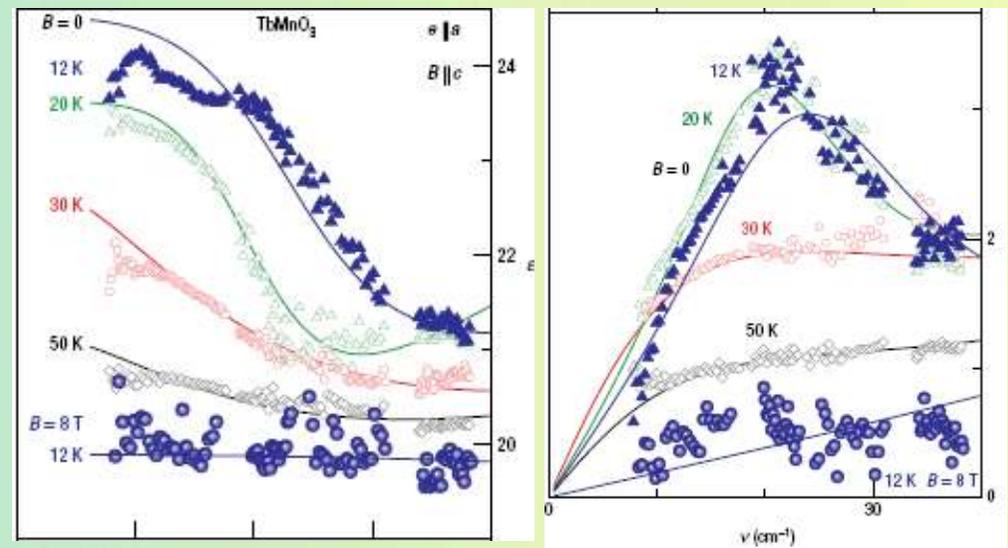
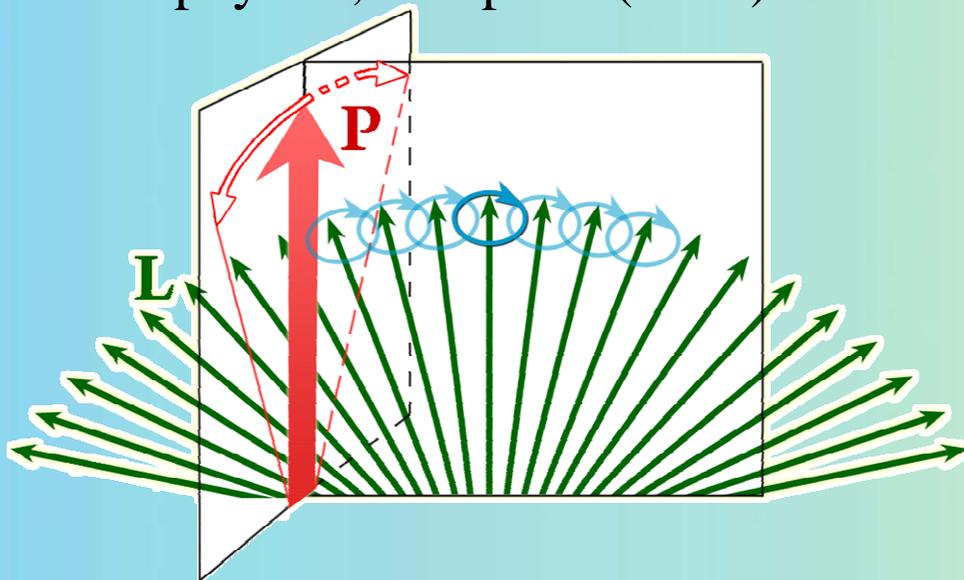
N	подложка	формула	h, μ	4πM <sub>s</sub> , Gs	p, μ	Эффект?
1	(111)	(BiTm) <sub>3</sub> (FeGa) <sub>5</sub> O <sub>12</sub>	10	144	8,7	НЕТ
2	(111)	(BiLu) <sub>3</sub> (FeGa) <sub>5</sub> O <sub>12</sub>	19	78	39	НЕТ
3	(110)	(BiLu) <sub>3</sub> (FeGa) <sub>5</sub> O <sub>12</sub>	4	162	9,2	ДА
4	(110)	(BiLu) <sub>3</sub> (FeGa) <sub>5</sub> O <sub>12</sub>	6	76	14,4	ДА
5	(210)	(BiLu) <sub>3</sub> (FeGa) <sub>5</sub> O <sub>12</sub>	10	53.5	34	ДА
6	(210)	(BiLu) <sub>3</sub> (FeGa) <sub>5</sub> O <sub>12</sub>	10	62	28	ДА
7	(210)	(BiLu) <sub>3</sub> (FeGa) <sub>5</sub> O <sub>12</sub>	8.6	55	27	ДА

# Сводная таблица

N	подложка	формула	h, μ	4πM <sub>s</sub> , Gs	ρ, μ	Эффект?
1	(111)	(BiTm) <sub>3</sub> (FeGa) <sub>5</sub> O <sub>12</sub>	10	144	8,7	НЕТ
2	(111)	(BiLu) <sub>3</sub> (FeGa) <sub>5</sub> O <sub>12</sub>	19	78	39	НЕТ
3	(110)	(BiLu) <sub>3</sub> (FeGa) <sub>5</sub> O <sub>12</sub>	4	162	9,2	ДА
4	(110)	(BiLu) <sub>3</sub> (FeGa) <sub>5</sub> O <sub>12</sub>	6	76	14,4	ДА
5	(210)	(BiLu) <sub>3</sub> (FeGa) <sub>5</sub> O <sub>12</sub>	10	53.5	34	ДА
6	(210)	(BiLu) <sub>3</sub> (FeGa) <sub>5</sub> O <sub>12</sub>	10	62	28	ДА
7	(210)	(BiLu) <sub>3</sub> (FeGa) <sub>5</sub> O <sub>12</sub>	8.6	55	27	ДА

# Магноны и электромагноны

A. Pimenov, A. A. Mukhin, V. Yu. Ivanov, V. D. Travkin, A. M. Balbashov, A. Loidl, Possible evidence for electromagnons in multiferroic manganites, Nature physics, v. 2 p. 97 (2006)



Магноны и пространственно модулированные структуры:

A.I. Popov, Г.А. Esina, A.K. Zvezdin, Solid State Physics, v. 38, n.10 (1996)

H Katsura, A V Balatsky and N Nagaosa Phys. Rev. Lett. 98 027203 (2007)

A. Cano, E. I. Kats, Phys. Rev. 78, 012104 (2008)

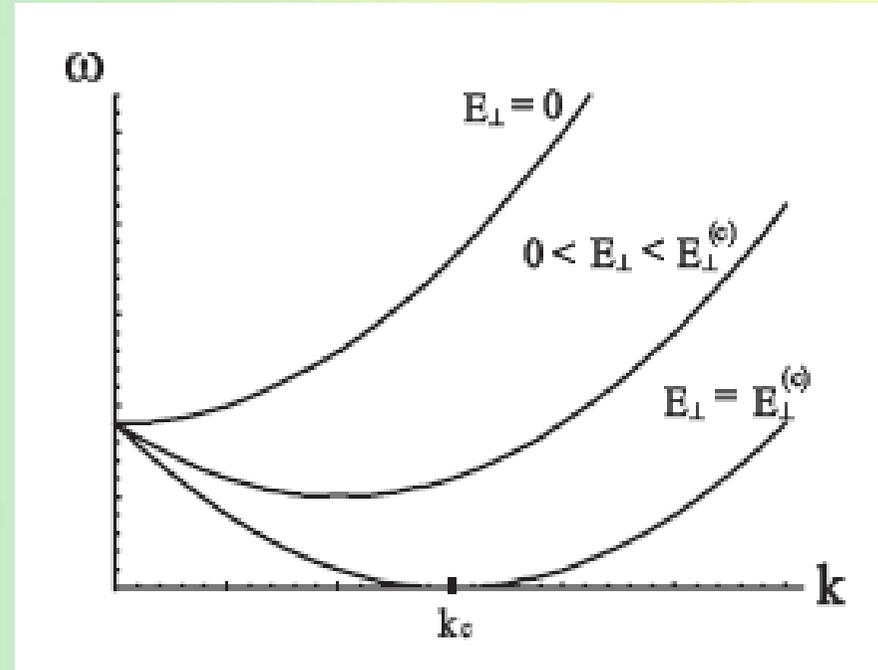
R. de Sousa and J.E. Moore. Physical Review B, 77, 012406 (2008)

# Электрически индуцированный сдвиг дисперсионной кривой магнонов

$$i\hbar\dot{M}_\alpha = [M_\alpha H]$$

$$H = H_0 + V_E$$

$$H_0 = \int d^3r \left[ \frac{A}{2} \sum_\alpha |\nabla M_\alpha|^2 - \frac{a}{2} M_z^2 - h_0 M_z \right]$$

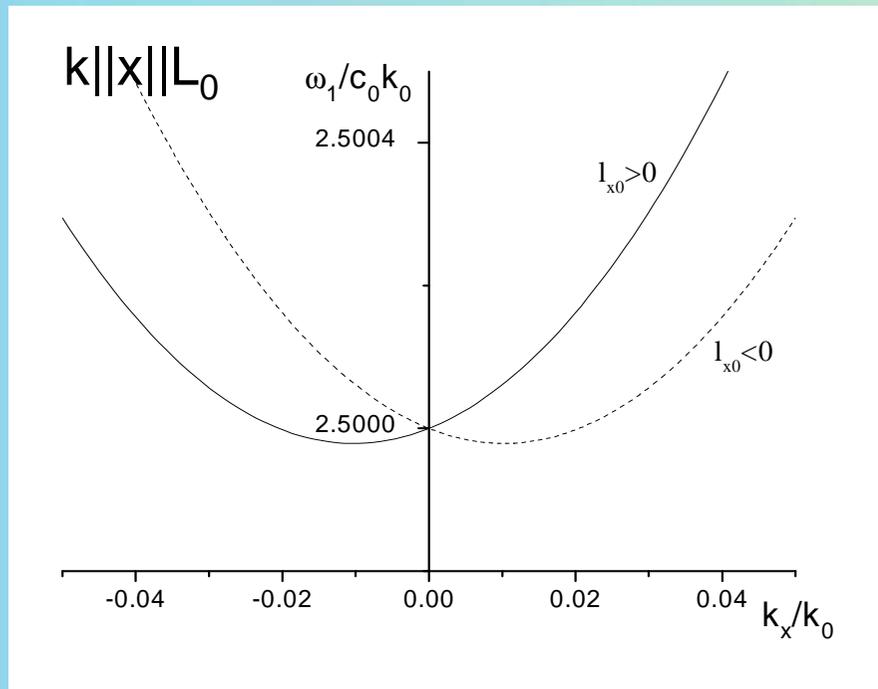


$$V_E = b_1 \int d^3r (\mathbf{E} \cdot \mathbf{M}(\mathbf{r})(\nabla \cdot \mathbf{M}(\mathbf{r}))) + b_2 \int d^3r (\mathbf{E} \cdot \{\mathbf{M}(\mathbf{r}) \times [\nabla \times \mathbf{M}(\mathbf{r})]\})$$

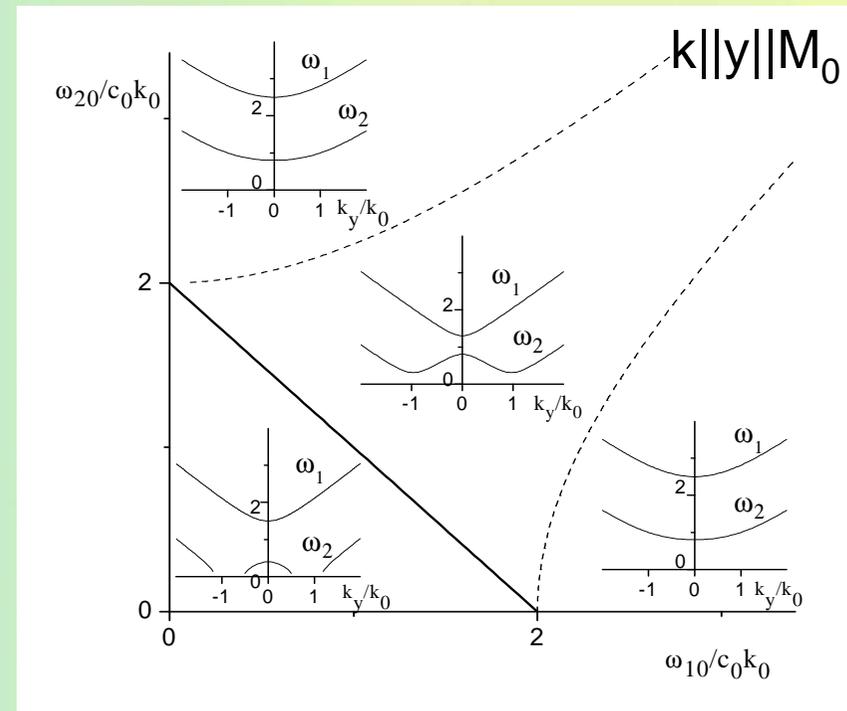
$$\Omega_E(\mathbf{k}) = \gamma \left\{ h_0 + aM_s + AM_s k^2 - \gamma b \mathbf{k} \cdot [\mathbf{E} \times \mathbf{M}_s] \right\} \quad b = b_1 + b_2 \quad \gamma = \frac{\mu_0}{\hbar}$$

# Спектры магнонов в $\text{ViFeO}_3$

## Невзаимность спектра



## Взаимодействие магнонов двух ветвей



$$\omega_1 = \Delta c_{1x} k_x + \sqrt{(\omega_{1k}^2 + (\Delta c_{1x} k_x)^2)}$$

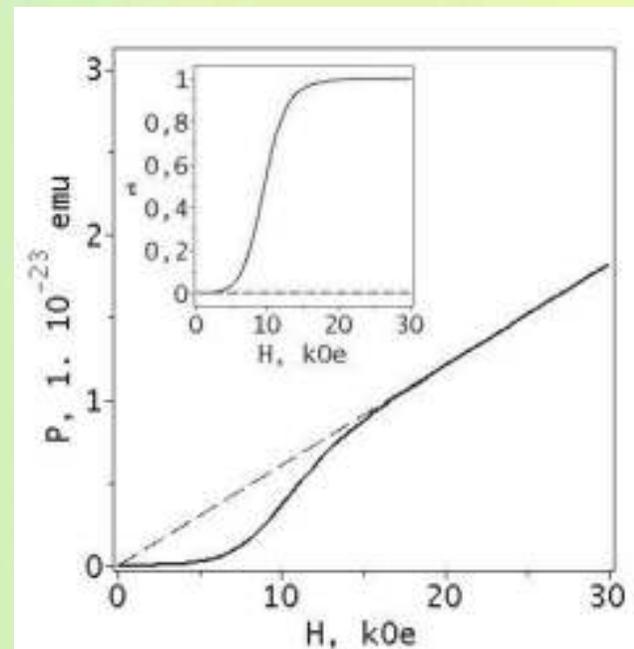
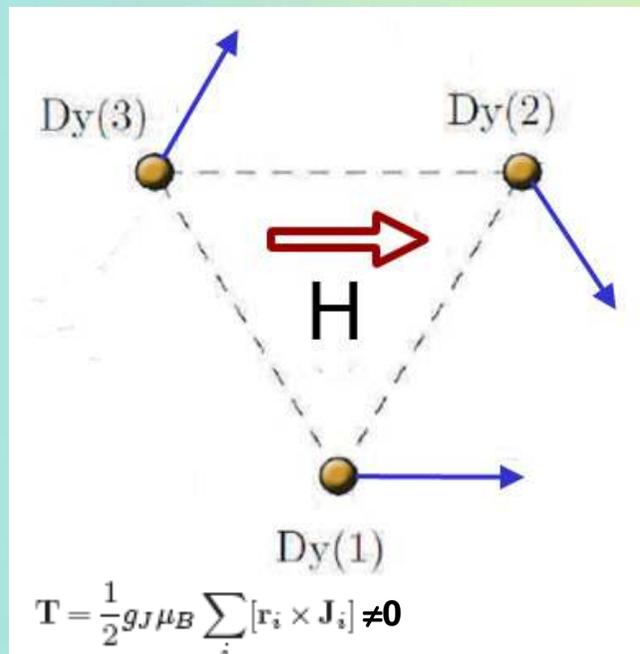
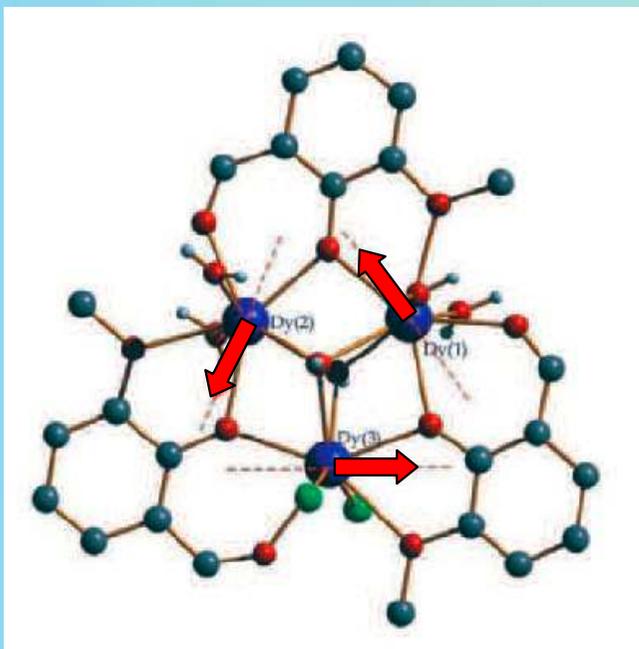
$$\omega_2 = \Delta c_{2x} k_x + \sqrt{(\omega_{2k}^2 + (\Delta c_{2x} k_x)^2)}$$

$$\Delta c_{1x,2x} = \chi_{z0,y0}^e d_1 d_2 l_{x0}$$

$$\tilde{\omega}_{1,2}^2 = (\omega_{10}^2 + \omega_{20}^2) / 2 + c_0^2 k_y^2 \pm \sqrt{(\omega_{10}^2 - \omega_{20}^2)^2 / 4 + 4k_0^2 c_0^4 k_y^2}$$

$$k_0 = d_2 P_{z0} / 2A$$

# Dy<sub>3</sub> Molecular nanocluster



$$\hat{H}_{me} = 2Re \sum_{\mu t \tau} \sum_{Rr l'} (-1)^\mu \cdot E_{-\mu} \cdot a_{t\tau} \\ \times A(l', tR) \cdot W_l^{-1} \cdot C_{1\mu t \tau}^{Rr} \cdot \alpha_R \cdot \hat{Y}_{Rr}(J)$$

$$\Phi_0 = |+++ \rangle,$$

$$\Phi_1 = |++- \rangle,$$

$$\Phi_4 \equiv \bar{\Phi}_3 = |+-- \rangle,$$

$$\Phi_5 \equiv \bar{\Phi}_2 = | - + - \rangle$$

$$\Phi_2 = |+-+ \rangle,$$

$$\Phi_3 = |-++ \rangle,$$

$$\Phi_6 \equiv \bar{\Phi}_1 = |--+ \rangle,$$

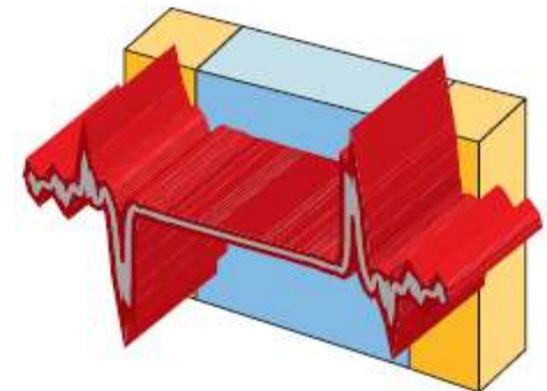
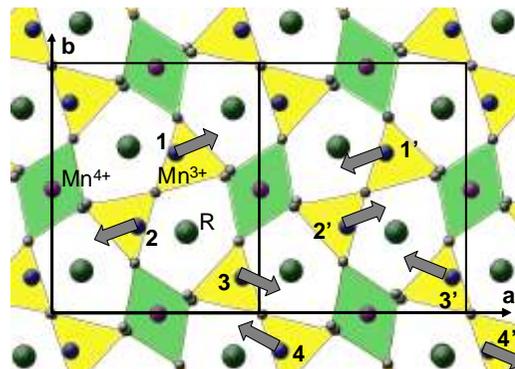
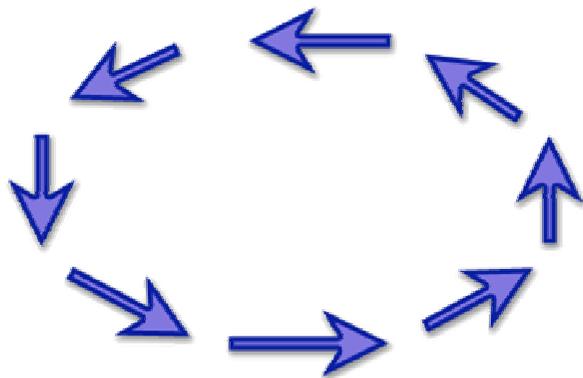
$$\Phi_7 \equiv \bar{\Phi}_0 = |--- \rangle$$

P. Curie 1894 Sessoli R. 2007 Chibotaru L. F. Soncini A. 2008 ;  
A.I. Popov, D. I. Plokhov and A. K. Zvezdin, EPL, **87** 67004 (2009)

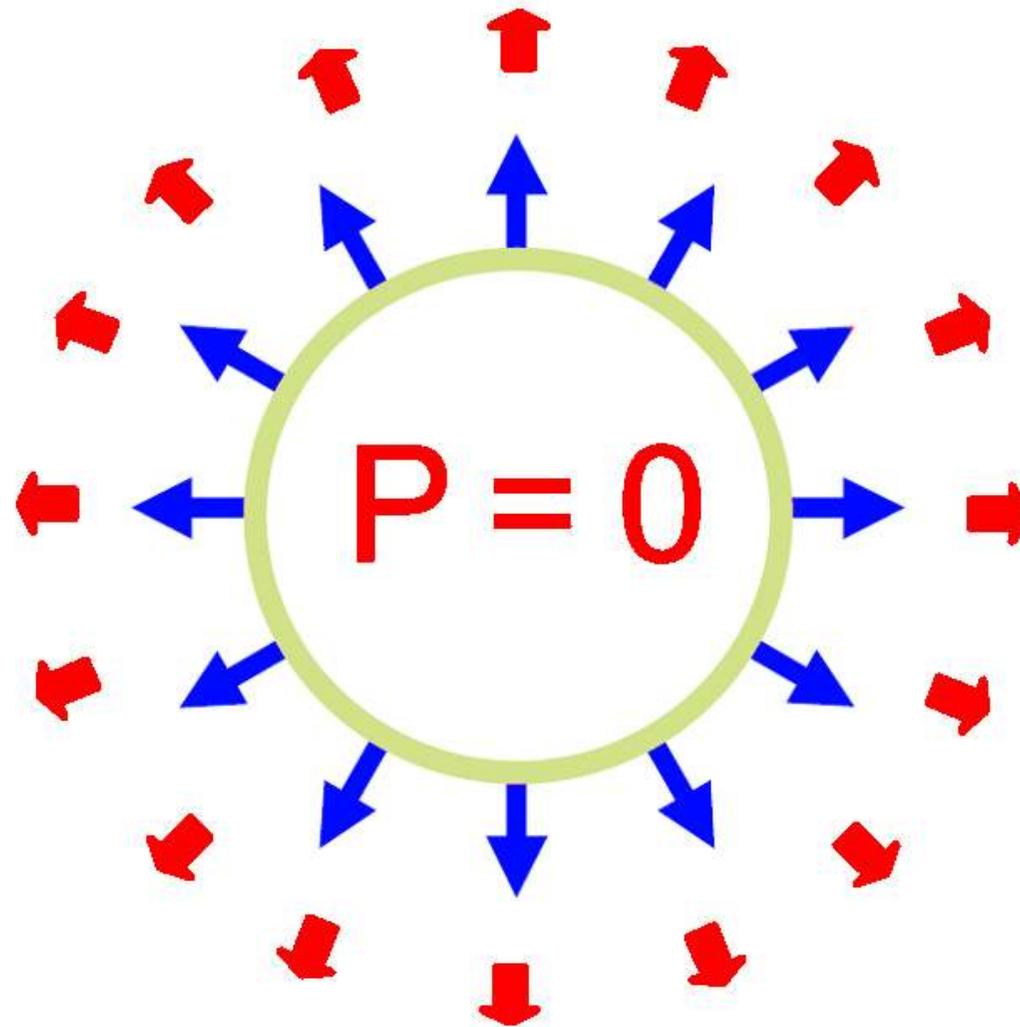


# Часть 2 Тороидный момент и другие концепции магнитоэлектричества

Спиновые карусели,  
треугольники, кресты и пр.

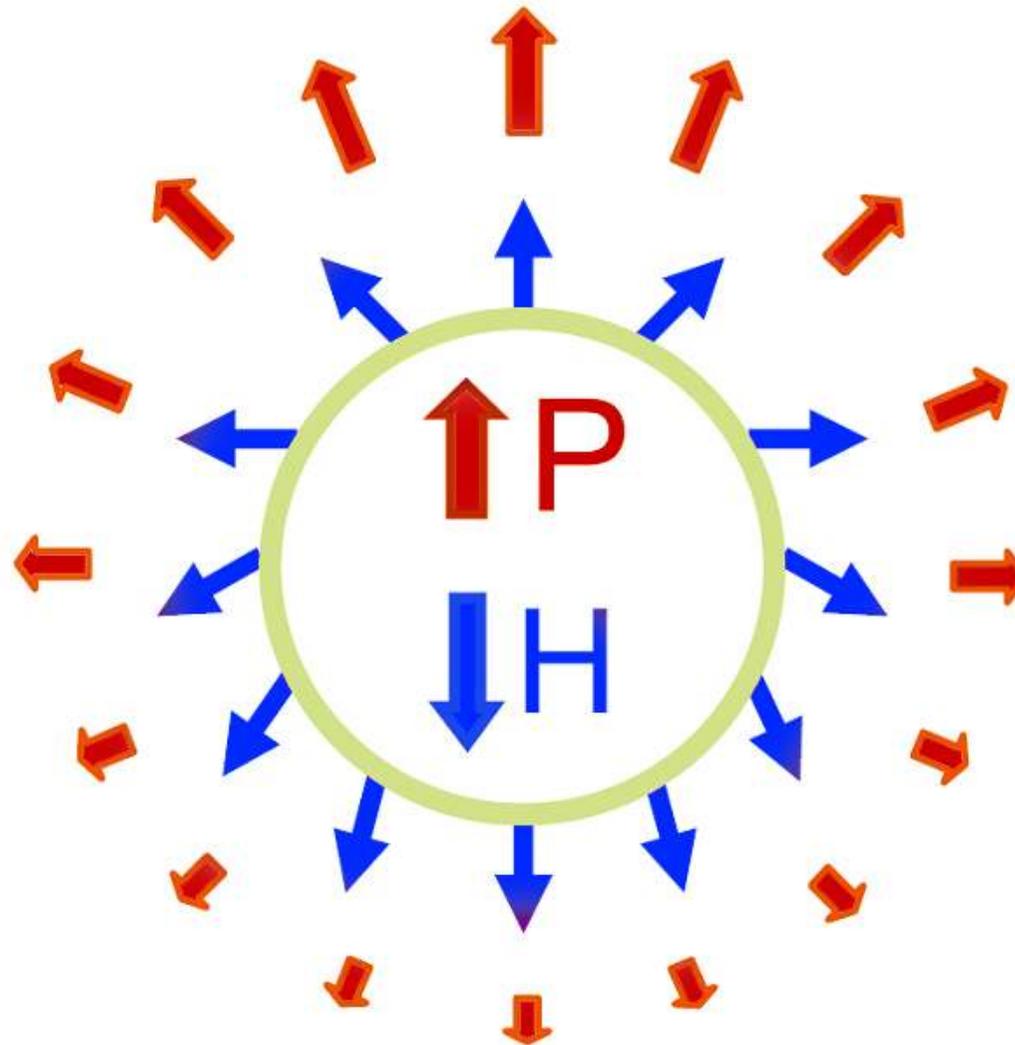


# Скрытое электричество



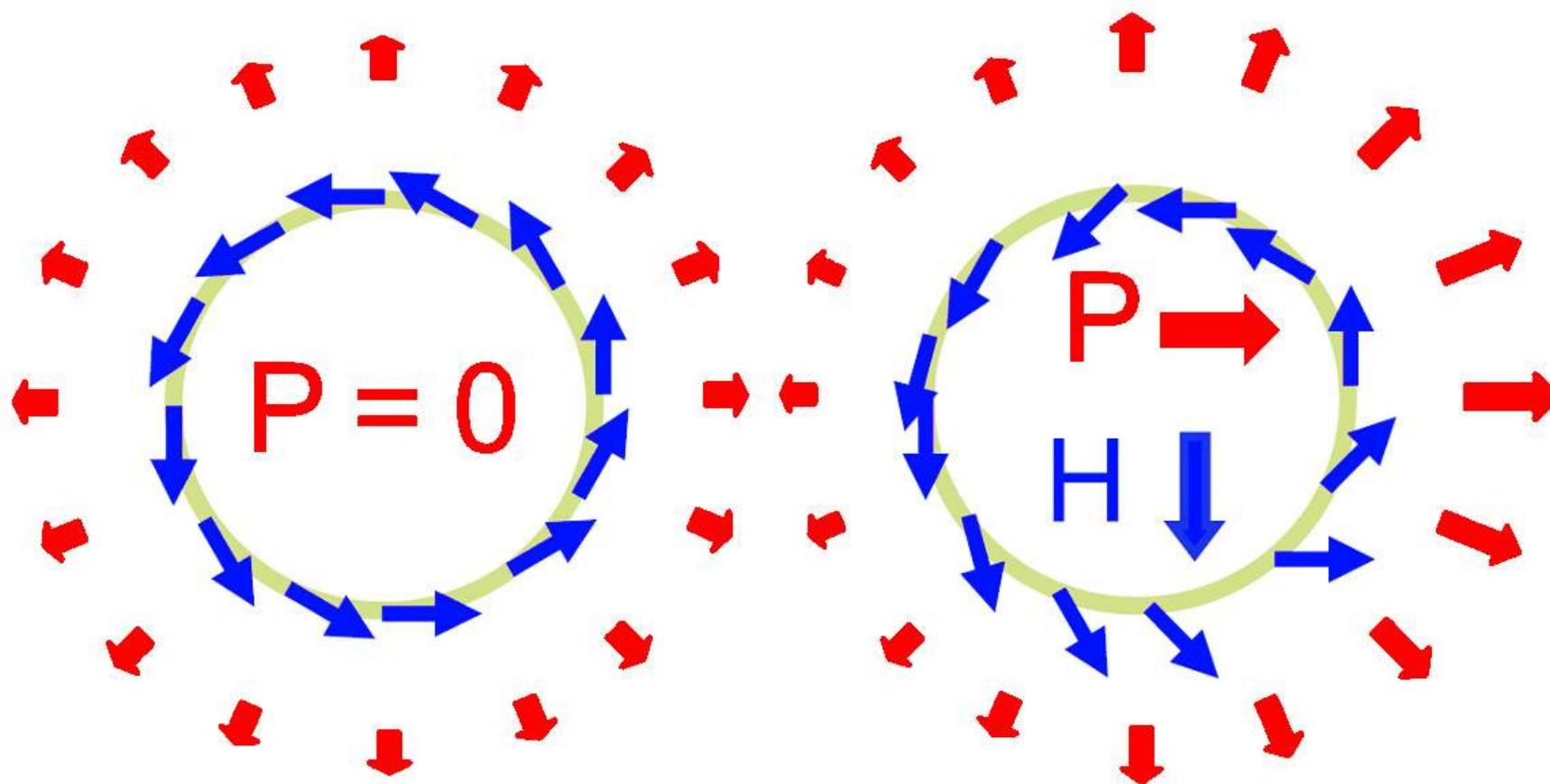
Kris T. Delaney, Maxim Mostovoy, and Nicola A. Spaldin, Superexchange-Driven Magnetoelectricity in Magnetic Vortices, PRL 102, 157203 (2009)

# Скрытое электричество



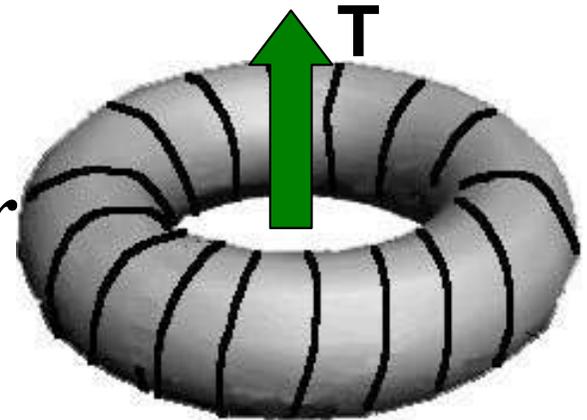
Kris T. Delaney, Maxim Mostovoy, and Nicola A. Spaldin, Superexchange-Driven Magnetoelectricity in Magnetic Vortices, PRL 102, 157203 (2009)

# Скрытое электричество



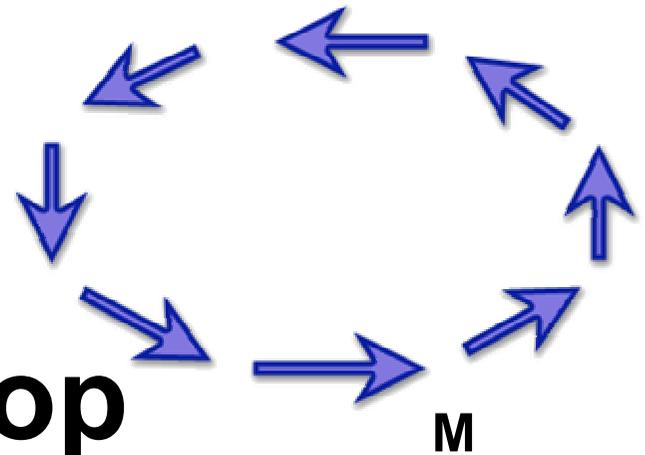
# Тороидальный момент

$$\mathbf{T} = \frac{1}{10c} \int [(\mathbf{j} \cdot \mathbf{r}) \mathbf{r} - 2r^2 \mathbf{j}] d^3 r$$



V.M. Dubovik, V.V. Tugushev, Phys. Rep. 187, 145

$$F = -\mathbf{T} \cdot [\nabla \times \mathbf{B}(0)]$$



**P-, T- нечетный вектор  
(полярно-аксиальный)**

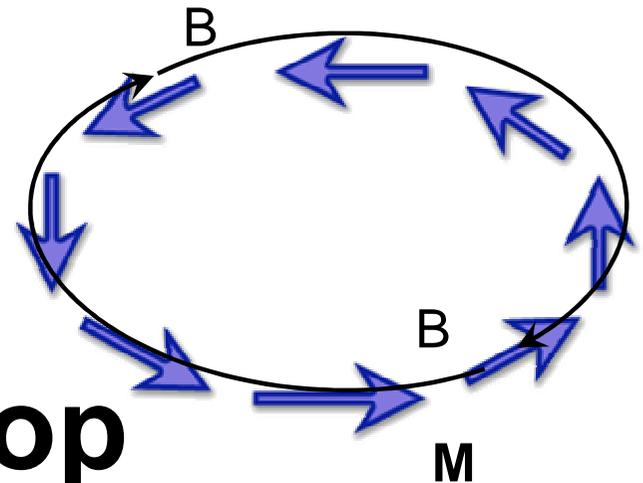
# Тороидальный момент

$$\mathbf{T} = \frac{1}{10c} \int [(\mathbf{j} \cdot \mathbf{r}) \mathbf{r} - 2r^2 \mathbf{j}] d^3 r$$



V.M. Dubovik, V.V. Tugushev, Phys. Rep. 187, 145

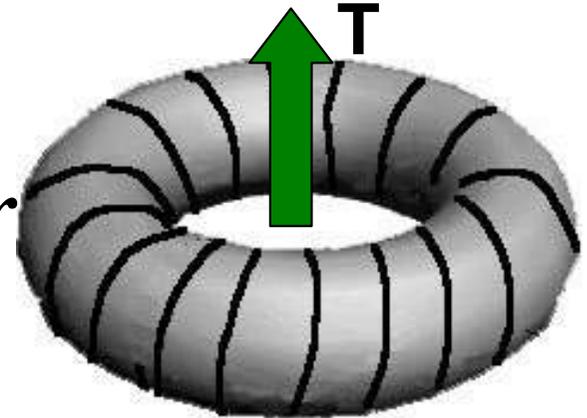
$$F = -\mathbf{T} \cdot [\nabla \times \mathbf{B}(0)]$$



**P-, T- нечетный вектор  
(полярно-аксиальный)**

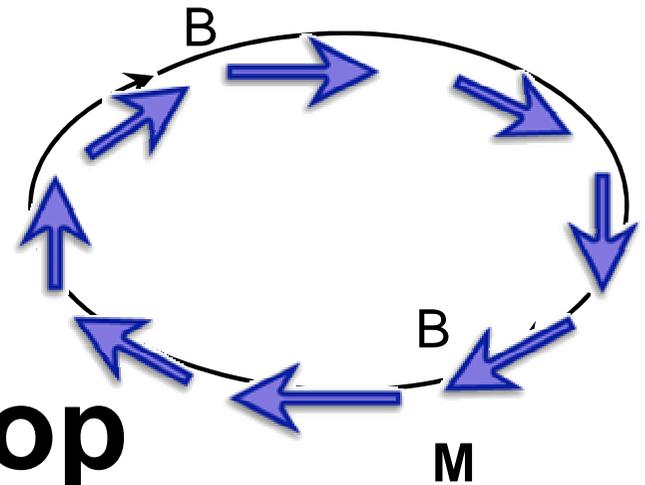
# Тороидальный момент

$$\mathbf{T} = \frac{1}{10c} \int [(\mathbf{j} \cdot \mathbf{r}) \mathbf{r} - 2r^2 \mathbf{j}] d^3 r$$



V.M. Dubovik, V.V. Tugushev, Phys. Rep. 187, 145

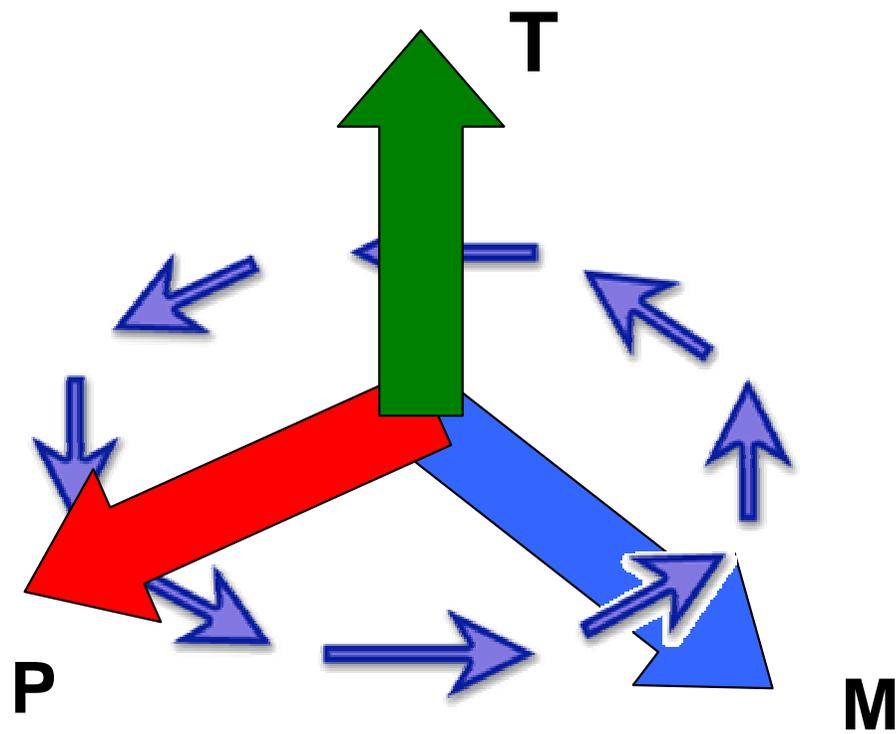
$$F = -\mathbf{T} \cdot [\nabla \times \mathbf{B}(0)]$$



**P-, T- нечетный вектор  
(полярно-аксиальный)**



# Связь параметров порядка



$$F = -T \cdot [P \times M]$$



# Магнитоэлектрический эффект и тороидный момент

$$F_{ME} = -\alpha_{ij} \cdot E_i \cdot H_j$$

$$P_i^{induced} = \alpha_{ij} H_j; \quad M_j^{induced} = \alpha_{ij} E_i$$

$$F = -\mathbf{T} \cdot [\mathbf{E} \times \mathbf{H}] + \dots \Rightarrow T_i \sim \varepsilon_{ijk} \alpha_{jk}$$

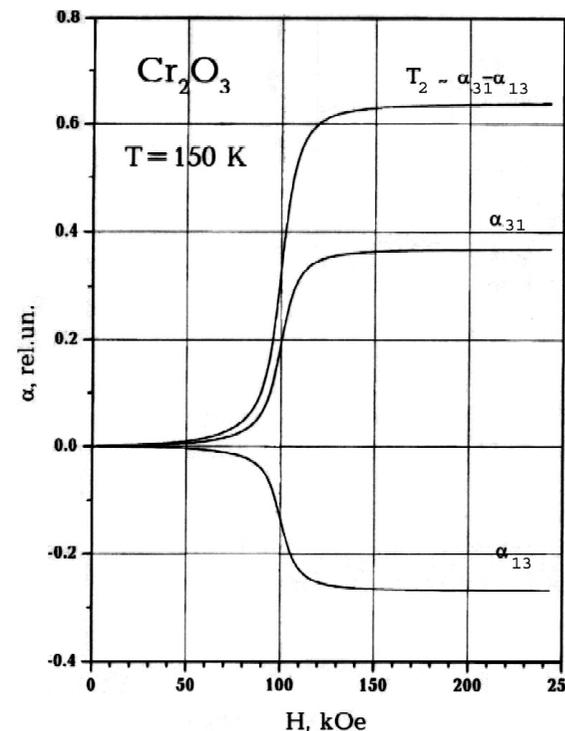
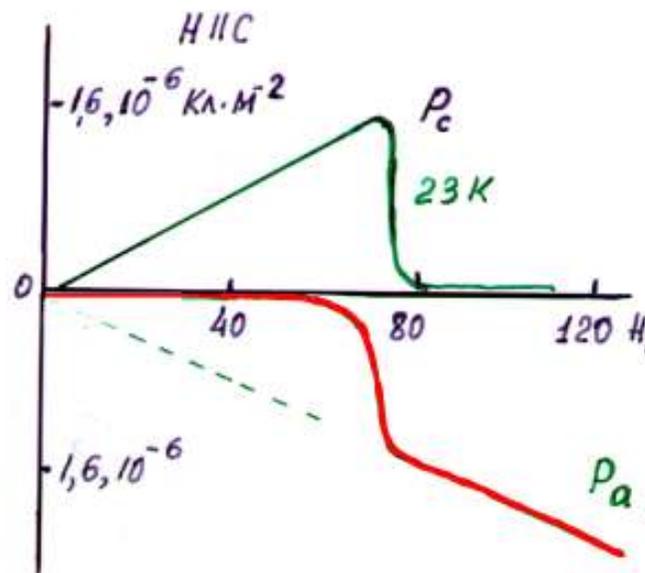
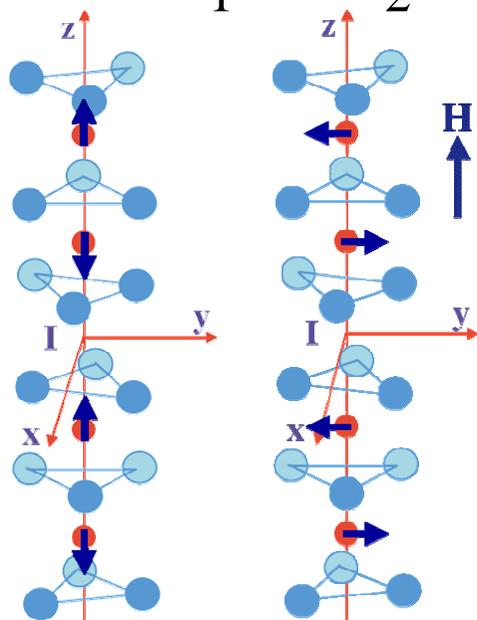
$$\alpha_{ij} = \begin{pmatrix} \alpha_{11} & \alpha_{12} & \alpha_{13} \\ \alpha_{21} & \alpha_{22} & \alpha_{23} \\ \alpha_{31} & \alpha_{32} & \alpha_{33} \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} T_x \\ T_y \\ T_z \end{pmatrix} \sim \begin{pmatrix} \alpha_{23} - \alpha_{32} \\ \alpha_{31} - \alpha_{13} \\ \alpha_{12} - \alpha_{21} \end{pmatrix}$$



# Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>: классический магнитоэлектрик

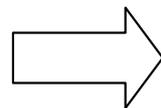
S.S.Krotov, A.M.Kadomtseva, Yu.F.Popov, A.K.Zvezdin, G.P.Vorob'ev, D.V.Belov, JMMM, **226-230**, p.963 (2001)

$$\mathbf{L} = \mathbf{M}_1 - \mathbf{M}_2$$



$$\alpha_{ij} = \begin{pmatrix} a_1 L_z & 0 & 0 \\ 0 & a_1 L_z & 0 \\ 0 & 0 & a_2 L_z \end{pmatrix}$$

**продольный МЭ эффект**



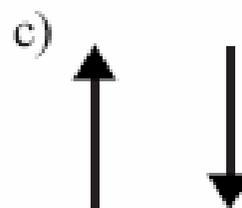
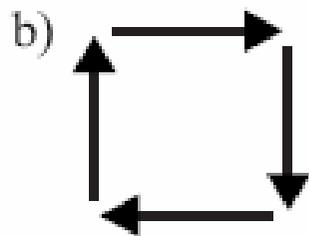
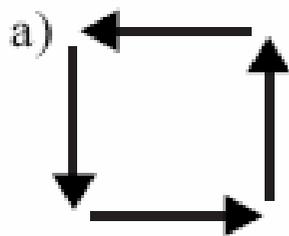
**Спин-флоп**

$$\alpha_{ij} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & a_3 L_x \\ 0 & 0 & 0 \\ a_4 L_x & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

**поперечный МЭ эффект**

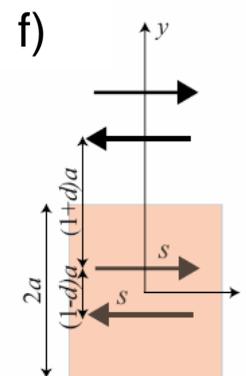
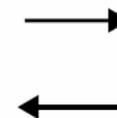
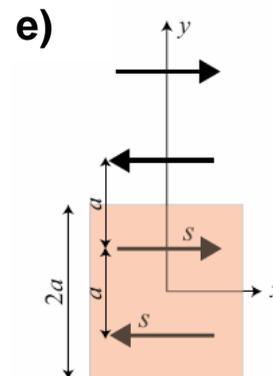
# Тороидное упорядочение в магнитных веществах

Одиночная ячейка:



С учетом периодичности:

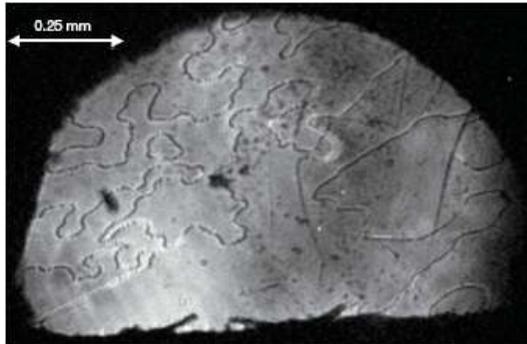
$$\mathbf{T} = \frac{1}{2} \mu_B \sum_{\alpha} [\mathbf{r}^{\alpha} \times \mathbf{S}^{\alpha}]$$



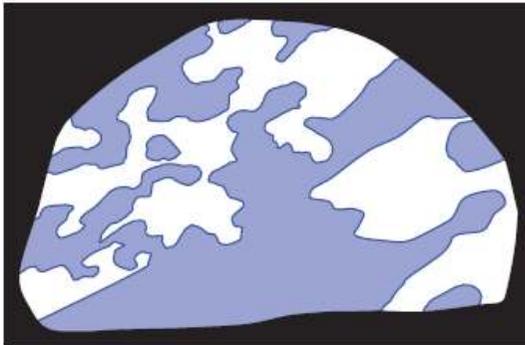


# Магнитооптические эффекты

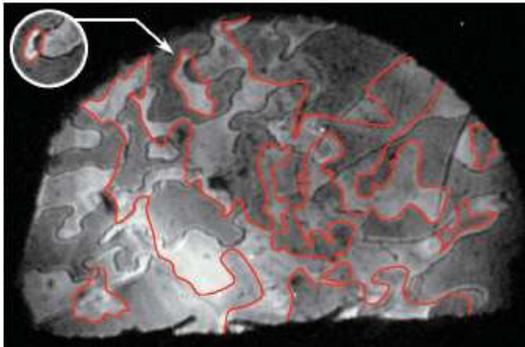
## Вторая гармоника



b



c

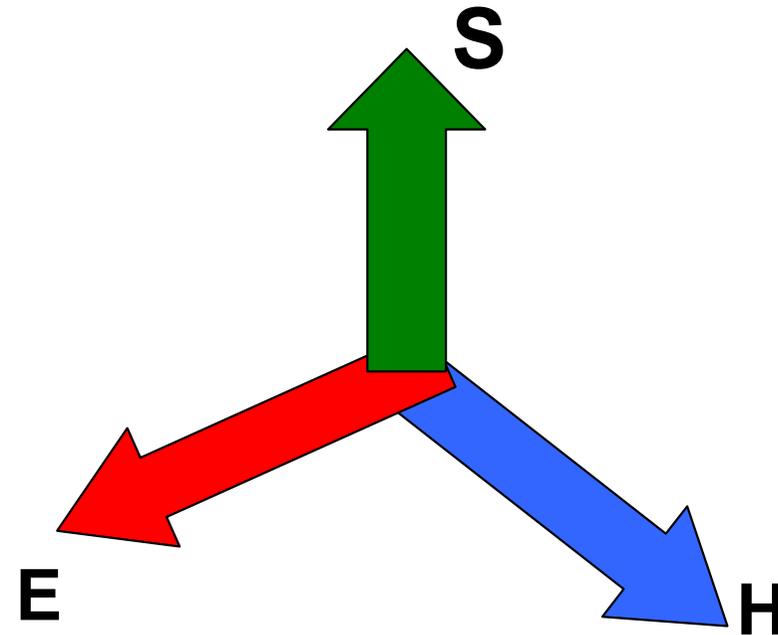


B.B. Van Aken et al, Nature, **449**, p. 702

## Магнитохиральные эффекты

Первый эффект: B.B. Krichevtsov, V.V. Pavlov, R.V. Pisarev, PRL. v. 76, 4628–4631 (1993)

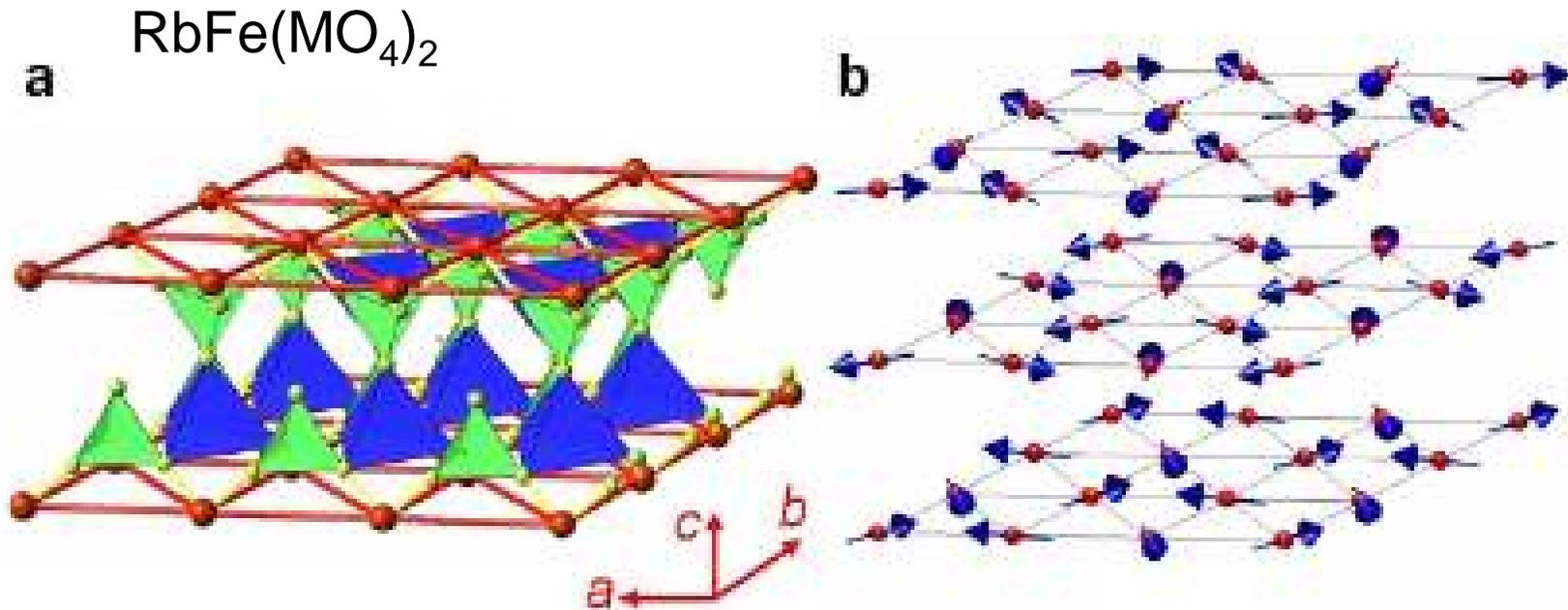
Resonant ME X-ray Scattering in GaFeO<sub>3</sub>  
T. Arima et al, JPSJ, **74**, p. 1419 (2005)



$$\mathbf{S} = [\mathbf{E} \times \mathbf{H}]$$



# Не циклоидой единой...

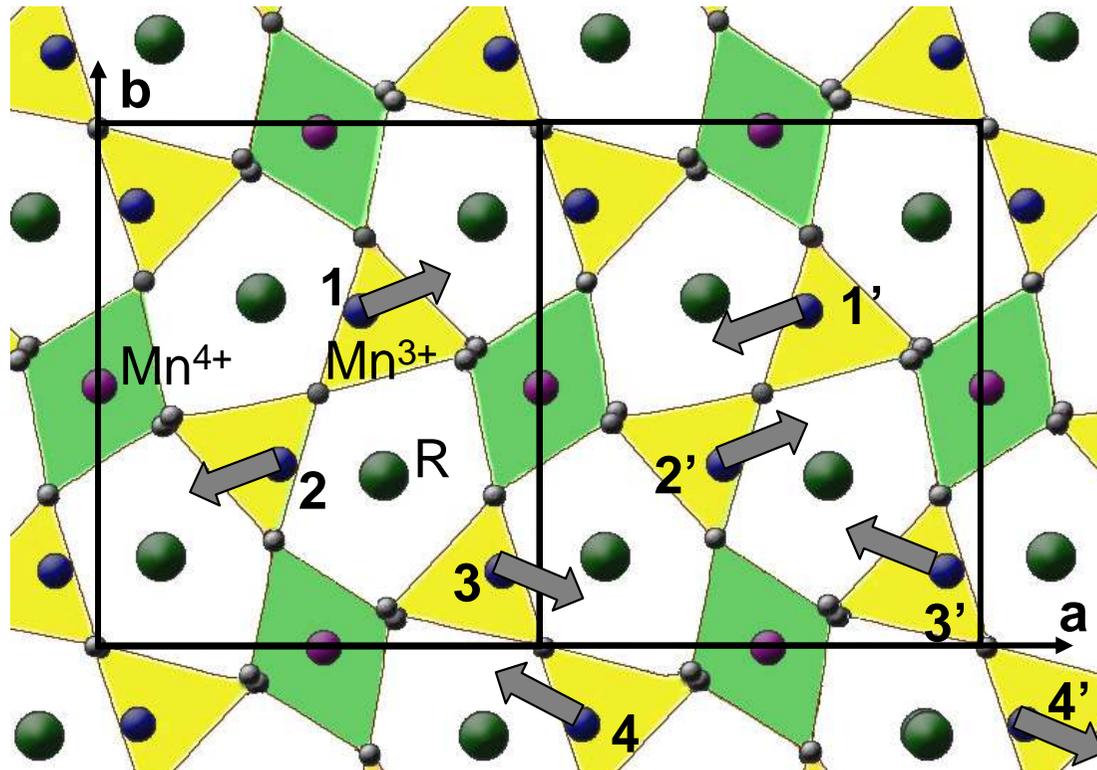


$$S_x(\mathbf{r}) = [\sigma^+(q_z) + \sigma^-(q_z)] e^{i\mathbf{q}\cdot\mathbf{r}} + cc \quad S_y(\mathbf{r}) = -i[\sigma^+(q_z) - \sigma^-(q_z)] e^{i\mathbf{q}\cdot\mathbf{r}} + cc$$

$$F = \dots + \kappa P_z \left[ |\sigma^+(q_z)|^2 - |\sigma^-(q_z)|^2 \right] + \dots$$

**M. Kenzelmann et al, Direct transition from a disordered to a multiferroic phase on a triangular lattice, PRL, 98, 267205 (2007)**

# Магнитные структуры в $RMn_2O_5$



## Антиферромагнитные МОДЫ

(Bertaut notation)

$$\mathbf{G} = (\mathbf{S}_1 - \mathbf{S}_2) + (\mathbf{S}_3 - \mathbf{S}_4)$$

$$\mathbf{A} = (\mathbf{S}_1 - \mathbf{S}_2) - (\mathbf{S}_3 - \mathbf{S}_4)$$

$$G_x: S_{1x} \parallel S_{3x}; S_{2x} \parallel S_{4x}$$

$$A_y: S_{1y} \parallel S_{4y}; S_{2y} \parallel S_{3y}$$

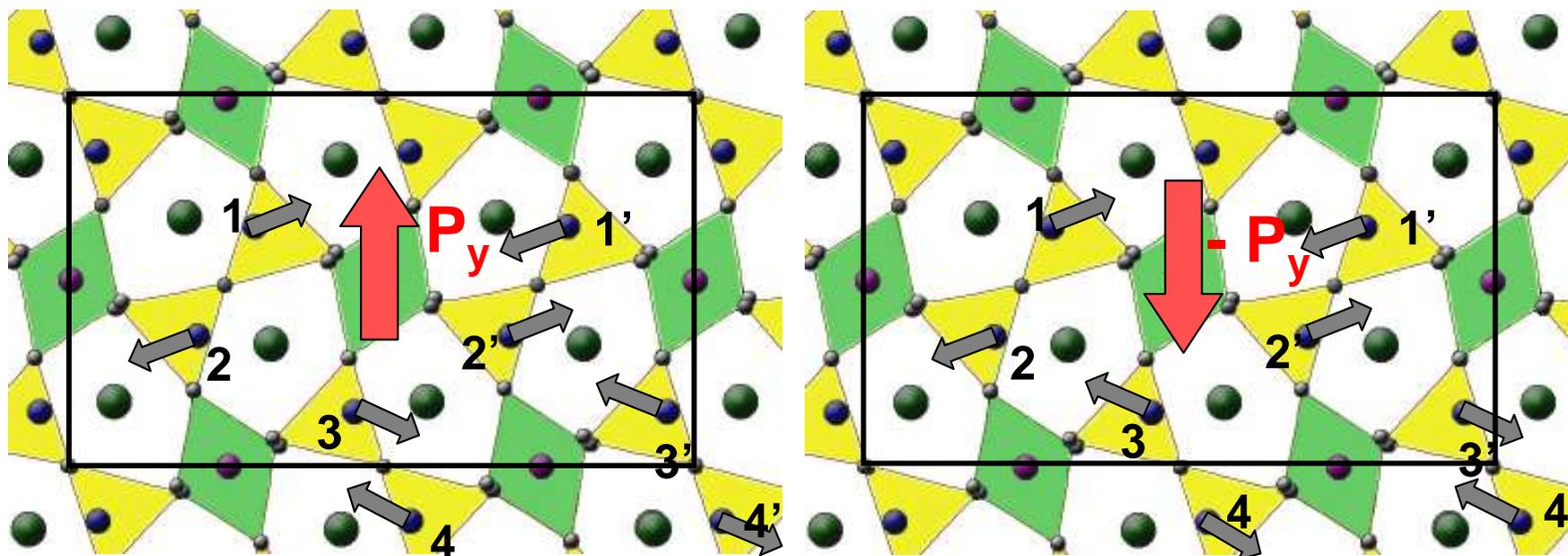
Удвоение ячейки вдоль a-оси

Нейтроннографические исследования:

G. Buisson, Phys. Status Solidi, **17**, 191 (1973); P.P. Gardner et al, J.Phys.C, **21** 5653 (1988)  
V. Polyakov, V. Plakhty et al, Physica B, **297**, 208 (2001)



# Электрическая поляризация



$G_x, A_y$

$\pm E_y$

$A_x, G_y$

$$P_y (A^2 - G^2)$$

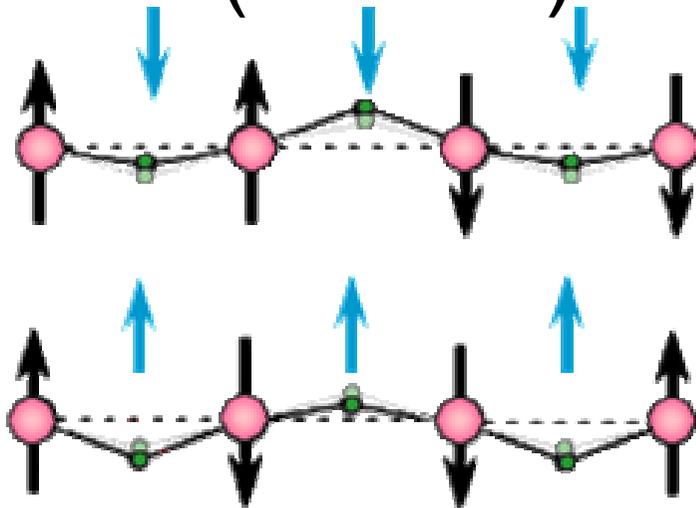
Переключение электрическим полем АФМ доменов в  $Y\text{Mn}_2\text{O}_5$ :



# Микроскопические механизмы

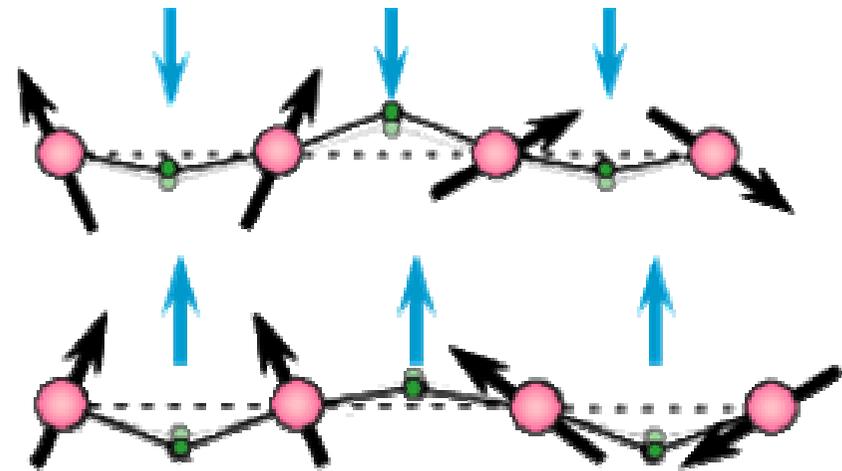
**Нерелятивистский  
(Гейзенберга)**

$$P \sim (L1 * L2)$$



**Релятивистский  
(Дзялошинского-Мори)**

$$P \sim [L1 \times L2]$$



Tsuyoshi Kimura: Origin of Multiferroicity: Magnetism Induces Ferroelectricity,  
JPSJ Online-News and Comments [Nov. 10, 2006]

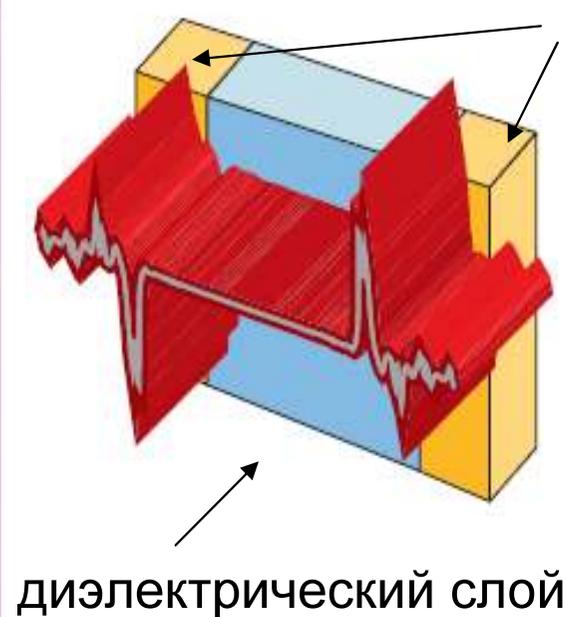
**Относительная роль механизмов:**

A.S. Moskvin, S.-L. Drechsler, Microscopic mechanisms of spin-dependent electric polarization in 3d oxides, Phys. Rev. B 78, 024102 (2008)



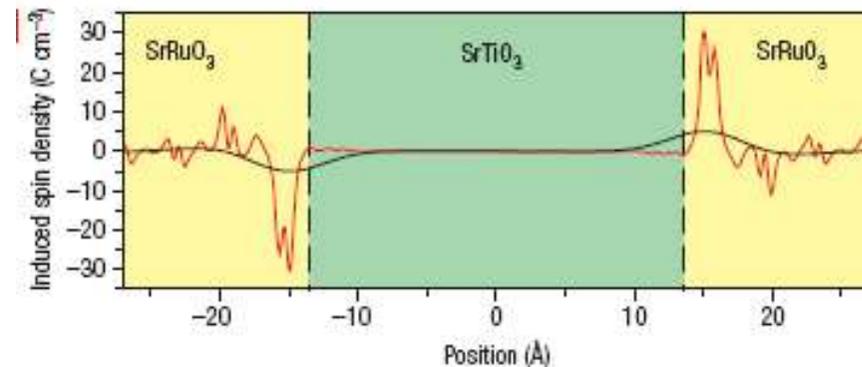
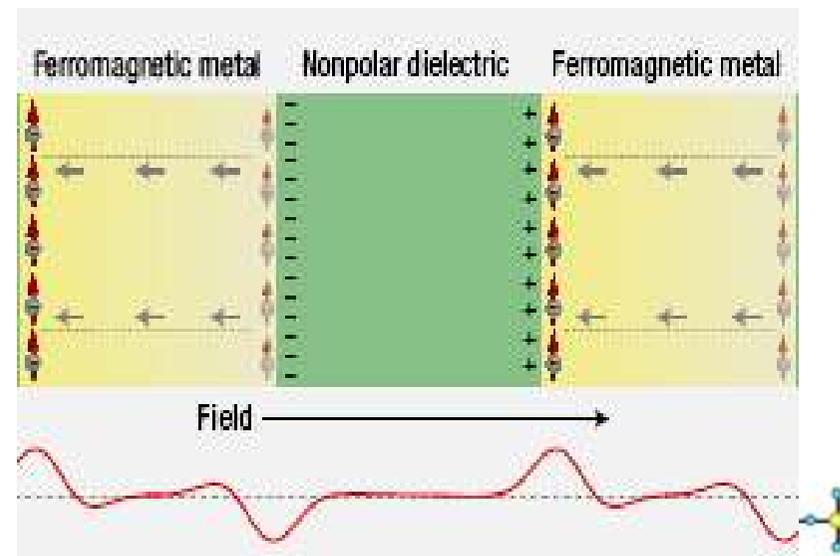
# Поверхностный МЭ эффект

*J. M. Rondinelli et al, Nature nanotechnology 3, 46 (2008)*



$\eta = C_{sp} / C_0$

$C_0 = 250 \text{ фмФ/мкм}^2$



**H. Kroemer “the interface is the device”**

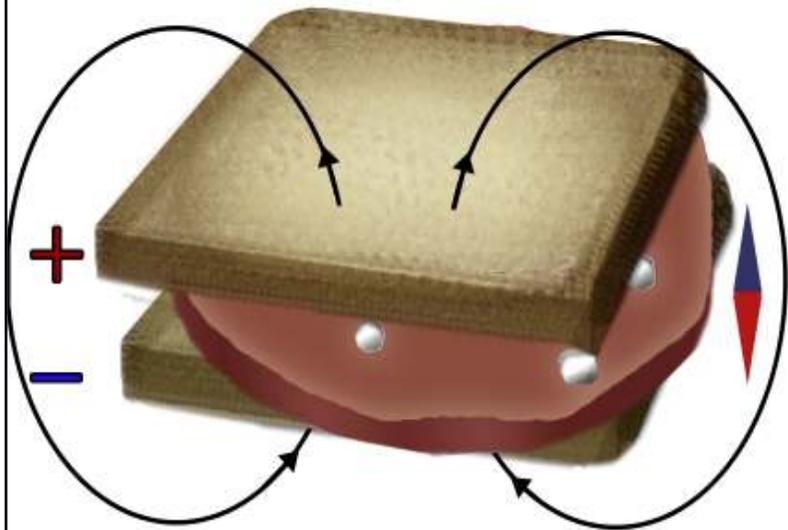


# Resume

- Магнитоэлектрические эффекты могут возникать:
  - при тороидном упорядочении
  - при фрустрированной антиферромагнитной структуре
  - на поверхности магнитной и диэлектрической сред

# Часть 3

## Композиционные материалы



Как приготовить  
магнитоэлектрический  
сэндвич?

# МЭ материалы

## Основные требования:

- температуры магнитного  $T_N$  и электрического  $T_C$  упорядочения выше комнатной
- значительные величины магнитоэлектрического эффекта  $>0.1\text{В}/(\text{см}\cdot\text{Э})$ ,  $0.1\text{ СГС}$
- малая электропроводность ( $\sigma < 10^{-11} (\text{Ом}\cdot\text{см})^{-1}$ )

«Естественные» мультиферроки: ***BiFeO<sub>3</sub>***

«Искусственные» мультиферроки:

**Магнитострикция × Пьезоэффект = МЭ эффект**

Терфенол:  $\text{Tb}_{1-x}\text{Dy}_x\text{Fe}_2$  ЦТС:  $\text{Pb}(\text{Zr},\text{Ti})\text{O}_3$

# МЭ эффект: в числах

**Представьте:** чтобы индуцировать электрическую поляризацию классического сегнетоэлектрика  $\text{PbTiO}_3 \sim 1 \text{ C/m}^2$  Нужно поле  $H=1 \text{ МТ}$  (10 млрд  $H$  Земли) (МЕ эффект  $\alpha=10^{-3} \text{ CGS}$ )

Материал	МЭ эффект, CGS ( $\alpha=4\pi P/H$ )	Техн. Ед. , СИ
Хромит $\text{Cr}_2\text{O}_3$	$10^{-3}$ классика	20 mV/(cm Oe)
$\text{TbPO}_4$	$10^{-1}$ гигантский МЭ	37 ps/m
<i>Феррит висмута</i> $\text{BiFeO}_3$	0.01	6 mV/(cm Oe); (1,25 ps/m)
<i>Композиты</i>	0.2	100-1000 mV/(cm Oe)

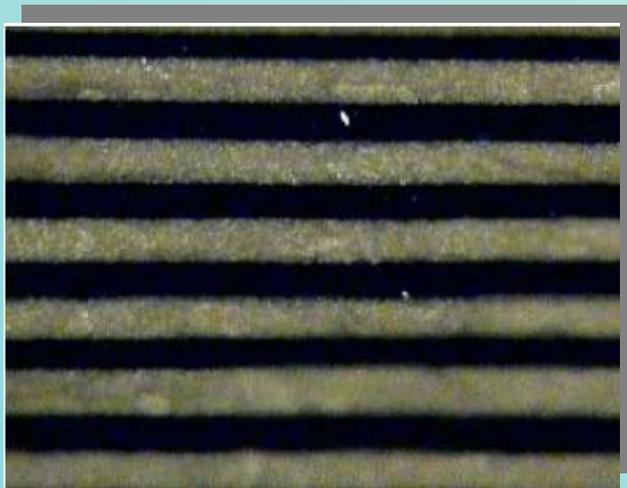
# Композиционные материалы

1972 Первые (объемные) композиты  $\text{BaTiO}_3/\text{CoFe}_2\text{O}_4$

*van Suchtelen, van der Boomgard 1972 Philips Res. Lab*

Проблемы:

- Химические реакции между компонентами
- Образование микротрещин
- Слияние магнитной фазы в проводящие каналы



↑↓ 10-100 μ

2001 Слоистые структуры  
(G. Srinivasan et al, Phys. Rev. B **64** 214408)

- Фазы послойно разделены
- Слои можно изготавливать отдельно
- МЭ эффект 0.4 В/см Э

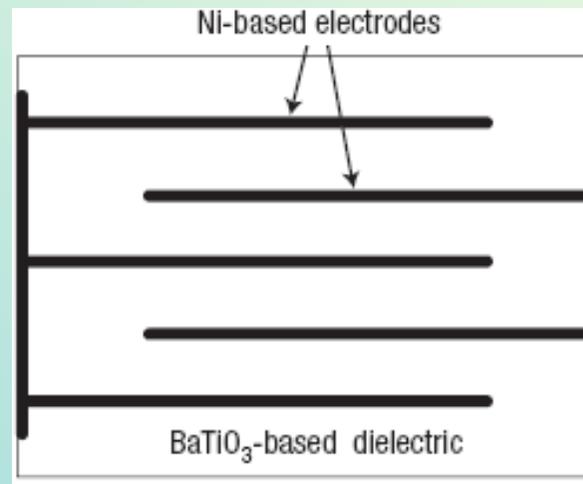
Y.K. Fetisov, A.A. Bush, K.E. Kamentsev et al,  
IEEE Sensor journal, v.6, p.935

Монография: Бичурин М.И., Петров В.М., Филиппов Д.А., Сринивасан Г., Нан С.В.  
Магнитоэлектрические материалы, Издательство "Академия Естествознания", 2006 год

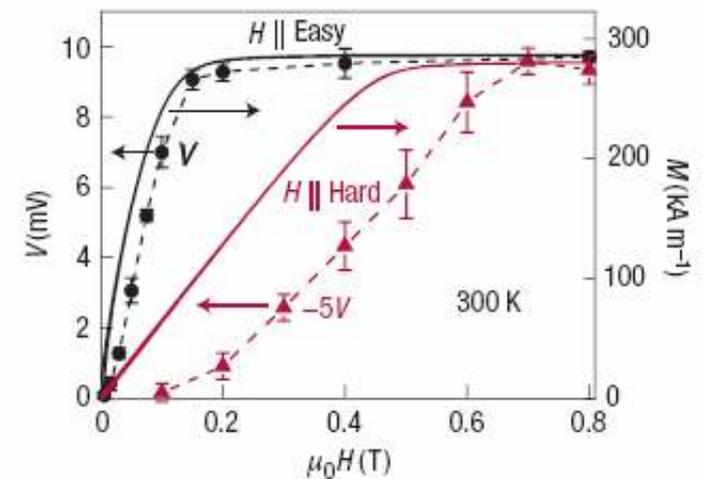
# МЭ сенсор по центу штука



0.6  $\mu\text{F}$ , AVX,  
Northern Ireland



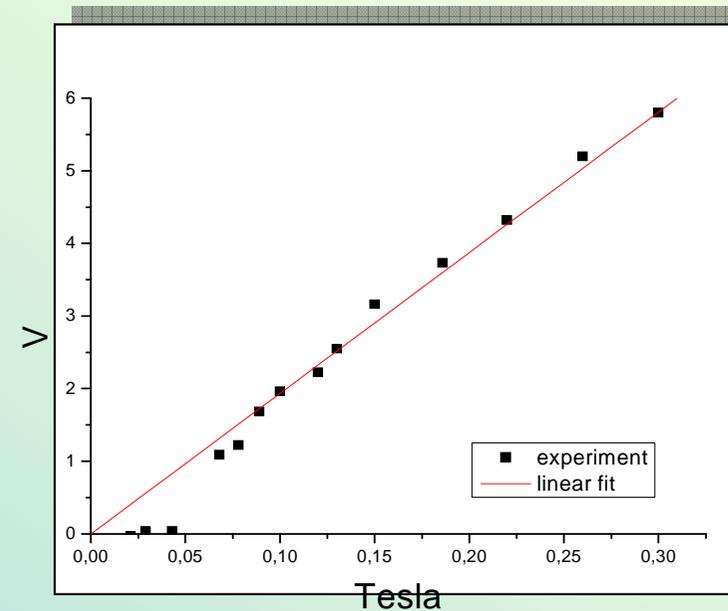
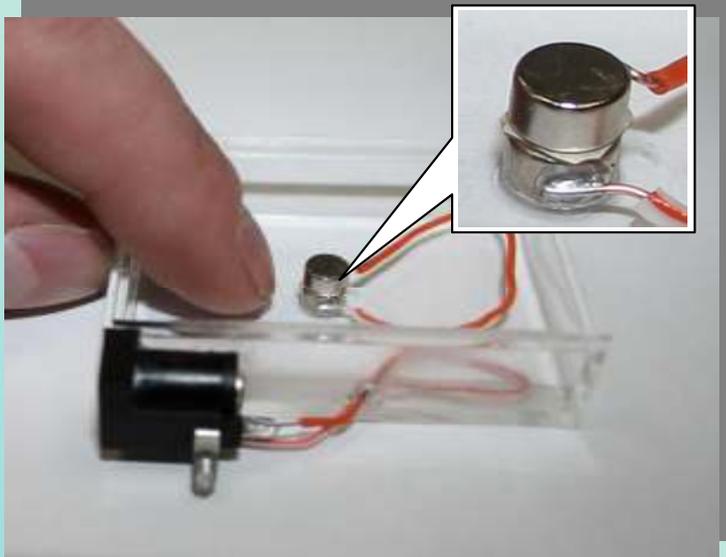
Многослойный конденсатор,  
81 слой, 4,5mm<sup>2</sup> каждый



МЭ характеристика

C. Israel, N. D. Mathur, and J. F. Scott, A one-cent room-temperature magnetoelectric sensor, Nature materials, v. 7, p.93 (2008)

# Композит быстрого приготовления

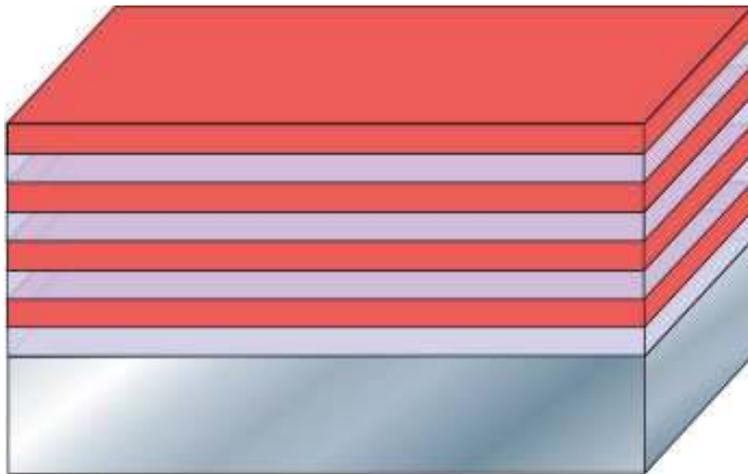


## Intel ISEF: такие недетские детские проекты

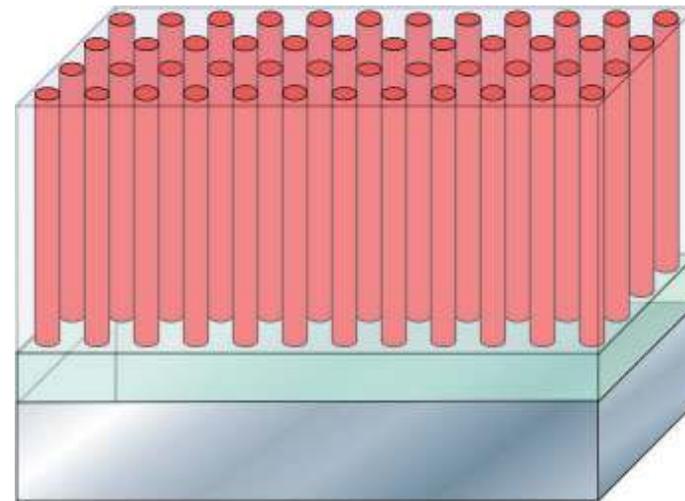
Датчик магнитного поля на основе слоистой структуры «магнит/пьезоэлектрик/магнит» представляли в финале конкурсе Intel ISEF в Альбукерке пятнадцатилетний Коля Белиовский и шестнадцатилетний Ваня Щигрев из Физической исследовательской школы ...

«Компьютер Пресс» | Новости Интел

# Эпитаксиальные структуры



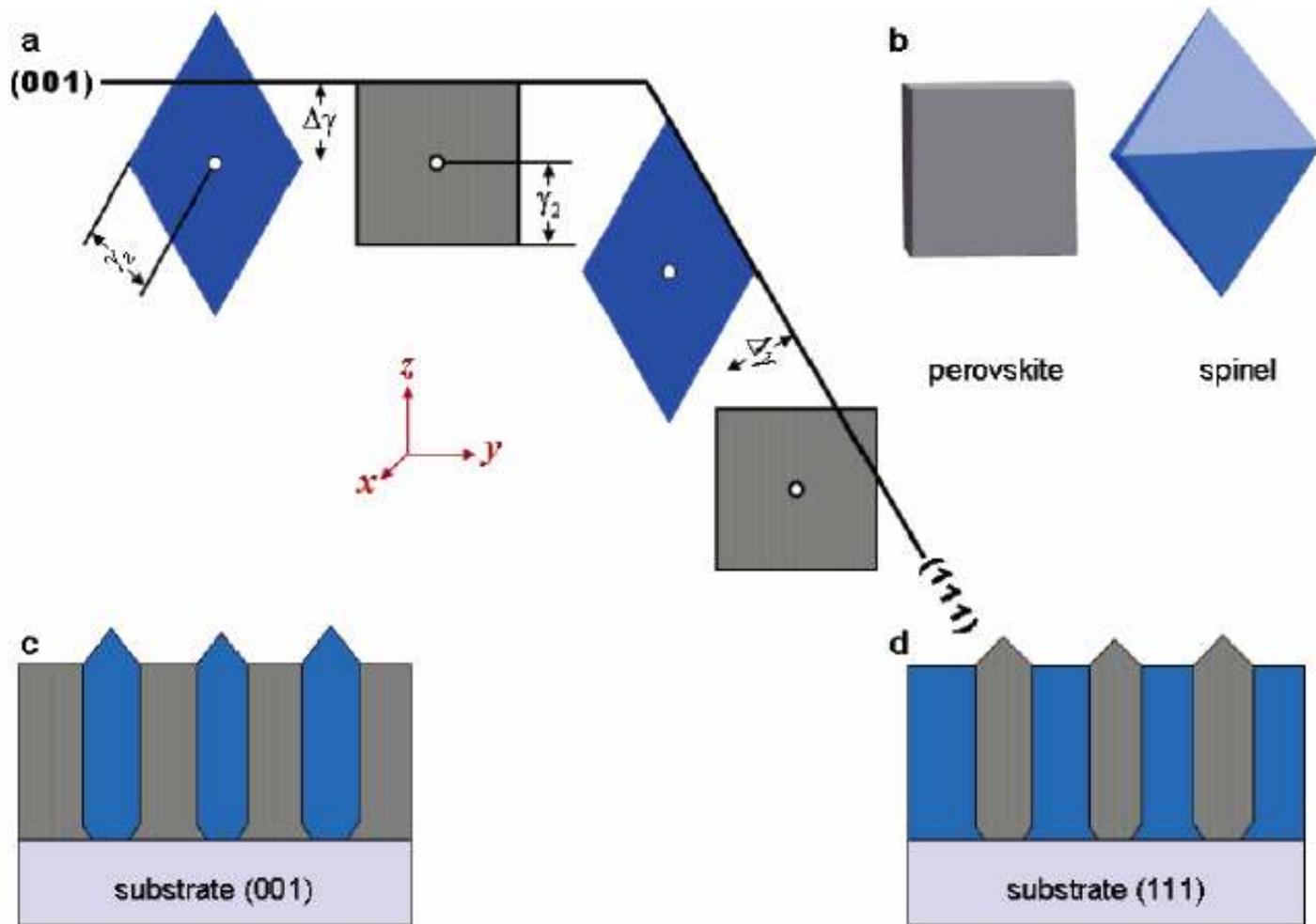
многослойная



3D композит

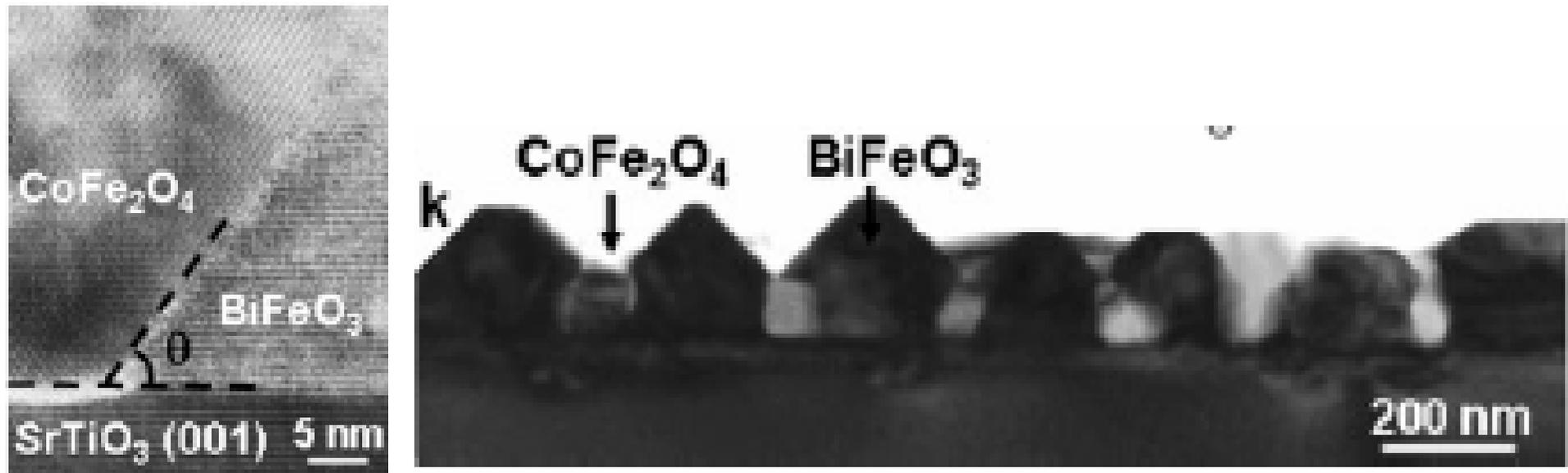
H. Zheng, et al and R. Ramesh,  
Multiferroic  $\text{BaTiO}_3\text{-CoFe}_2\text{O}_4$  Nanostructures, Science 303, 661 (2004)

# Дизайн наноструктур

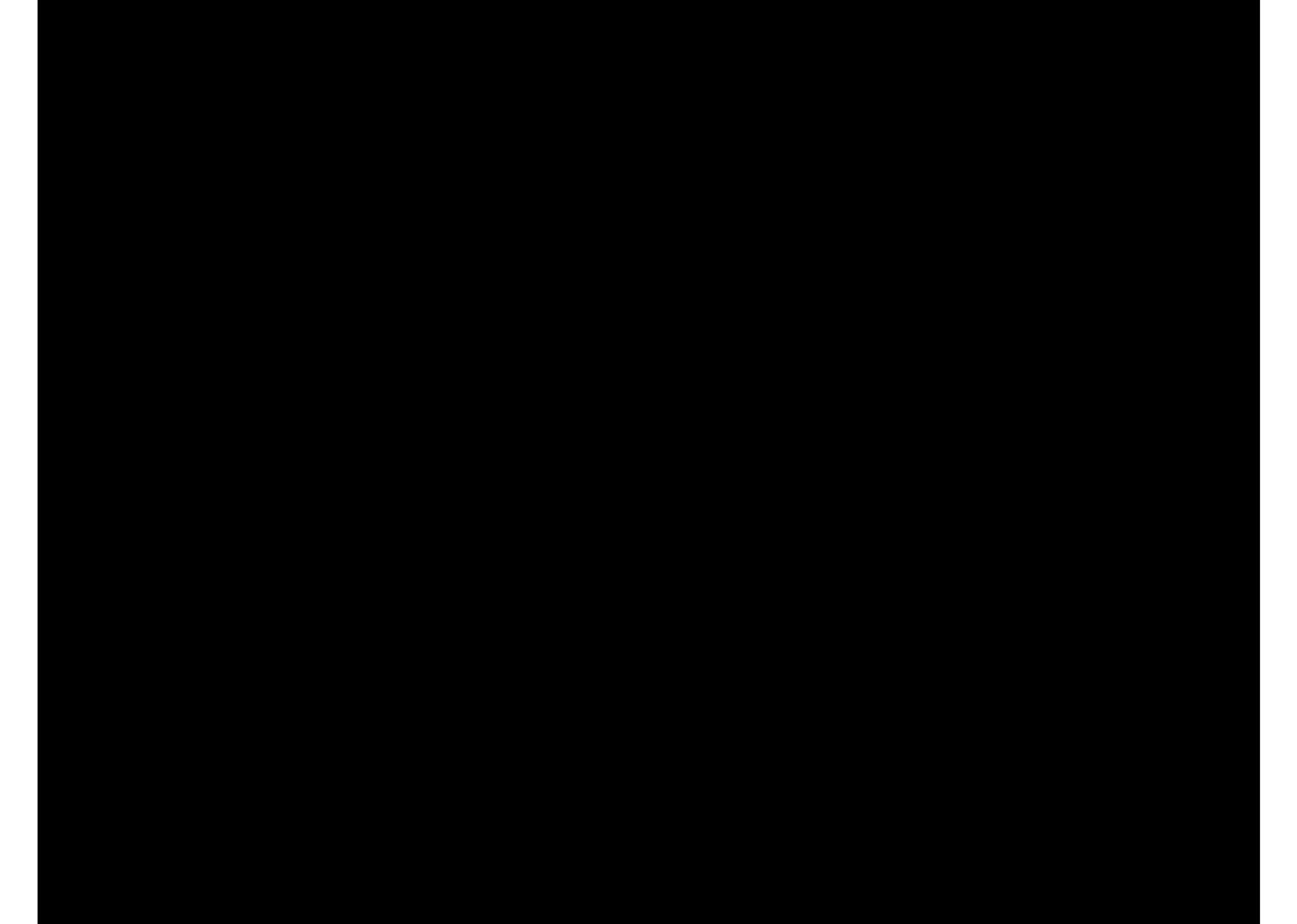


H. Zheng et al and R. Ramesh, Controlling Self-Assembled Perovskite-Spinel Nanostructures, Nano Letters, v. 6, p. 1401 (2006)

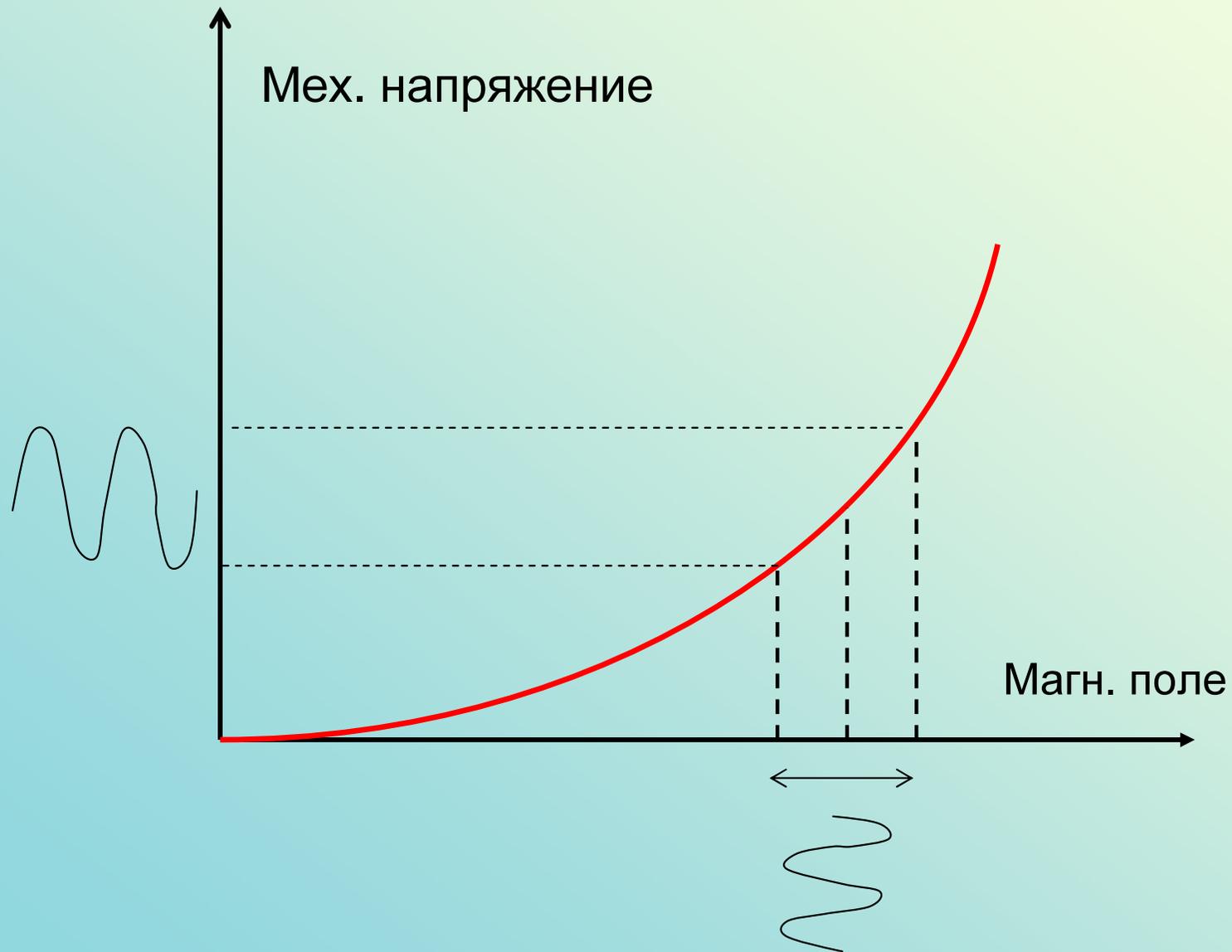
# Смачивание / несмачивание



H. Zheng et al and Ramamoorthy Ramesh,  
Self-Assembled Growth of BiFeO<sub>3</sub>-CoFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> Nanostructures, *Adv. Mater.* 2006, **18**, 2747



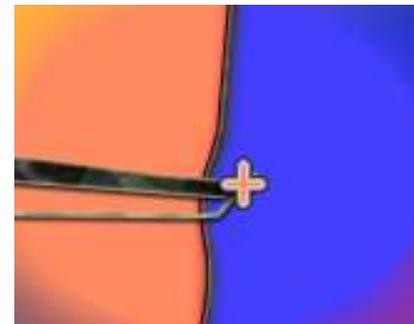
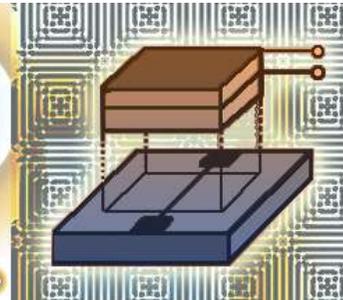
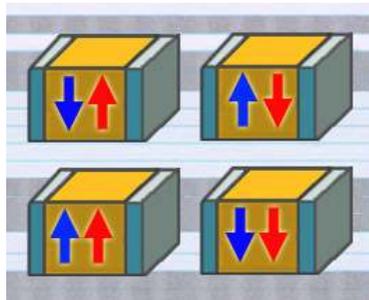
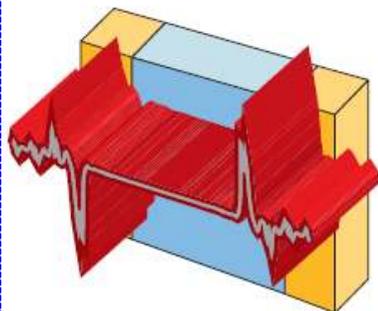
# Нелинейность характеристики



Поле смещения – смещает рабочую точку



# Часть 4. Практические приложения

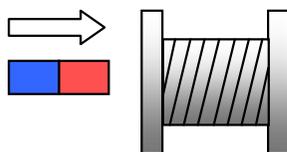




# Сенсоры магнитного поля

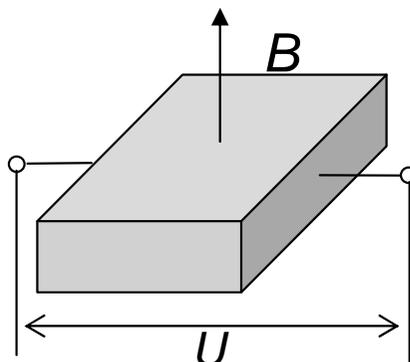
## 1. Электромагнитная индукция

*М. Фарадей 1840*



## 2. Датчики Холла

*Э. Холл 1879*

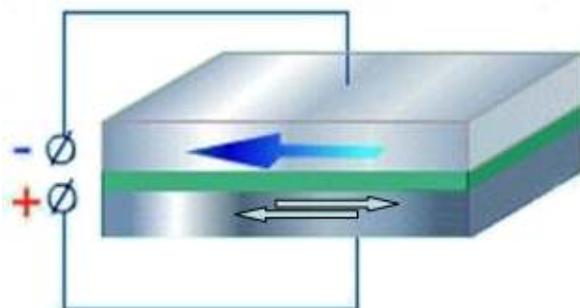


## 3. GMR – устройства (спиновые клапаны)

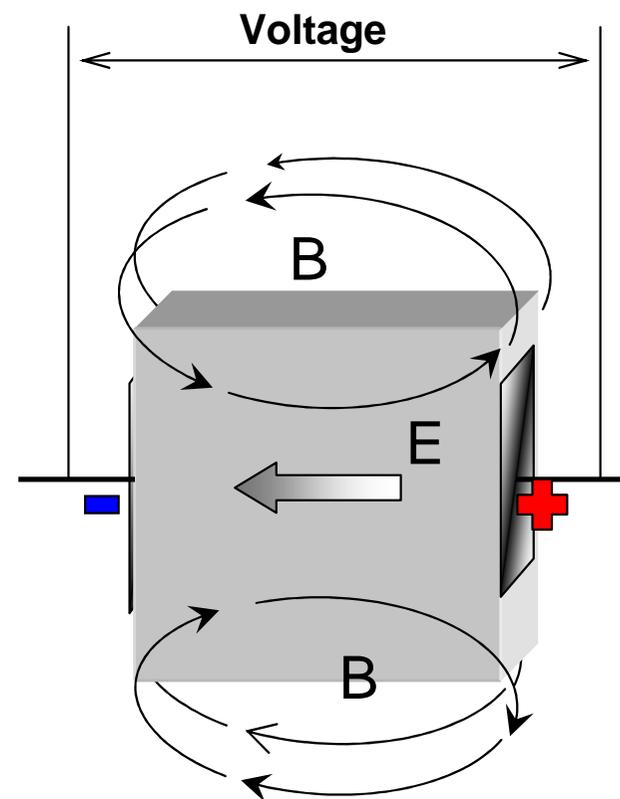
Giant Magnetic Resistance:

$$GMR = \frac{R_{\downarrow\uparrow} - R_{\uparrow\uparrow}}{R_{\uparrow\uparrow}}$$

*А. Ферт и др.  
1988*

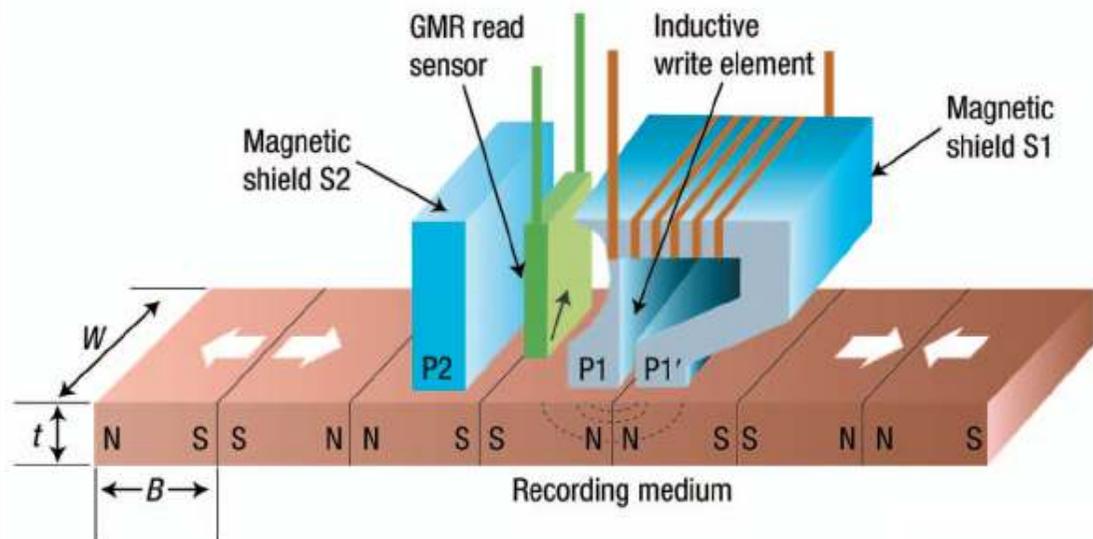


## Магнитоэлектрики



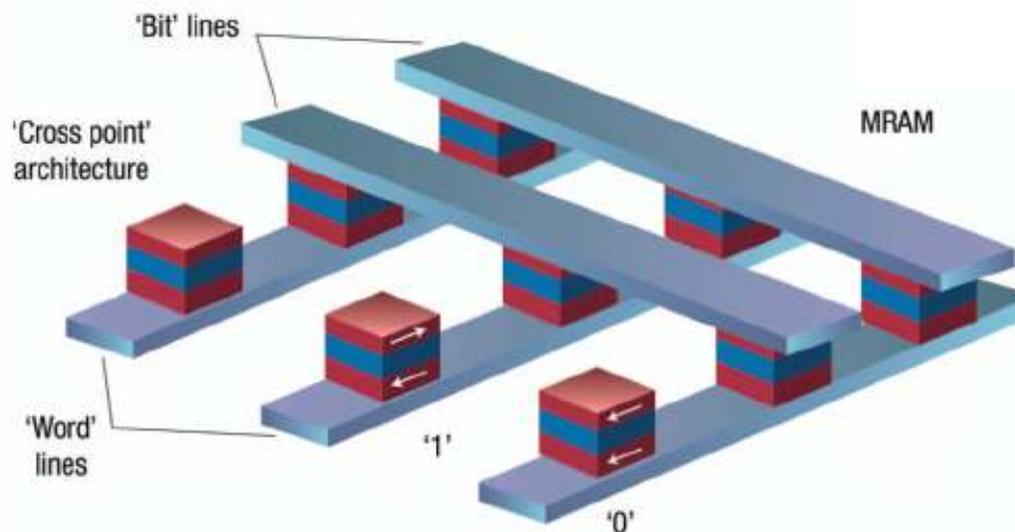


# Механизмы записи/считывания



A. Fert, Nobel Lecture:  
Origin, development, and future  
of spintronics  
Reviews of Modern Physics,  
v. 80, 1517 (2008)

А. Ферт, Происхождение, развитие  
и перспективы спинтроники,  
Успехи Физических Наук,  
т. 178, с.1336

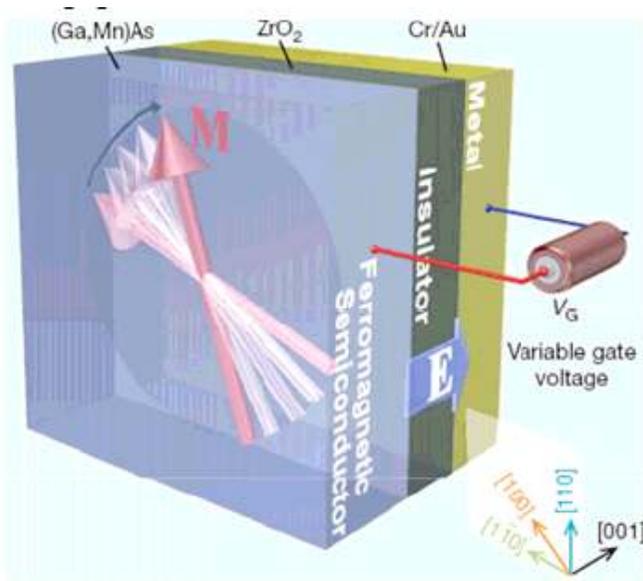




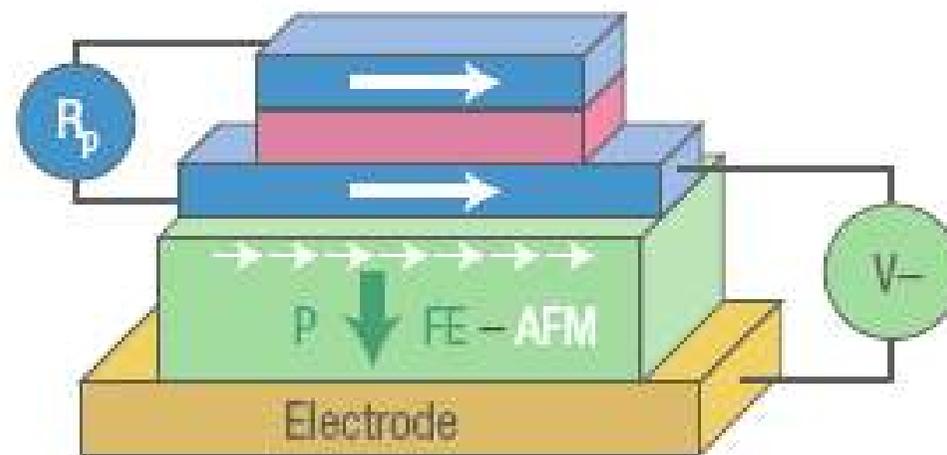
# Спинтроника без токов

## Магнитоэлектрический эффект:

- нет омических потерь
- нет ограничений на быстродействие со стороны времени пролета  $t=L/V$



*D.Chiba et al., Nature* **455**, 515 (2008).

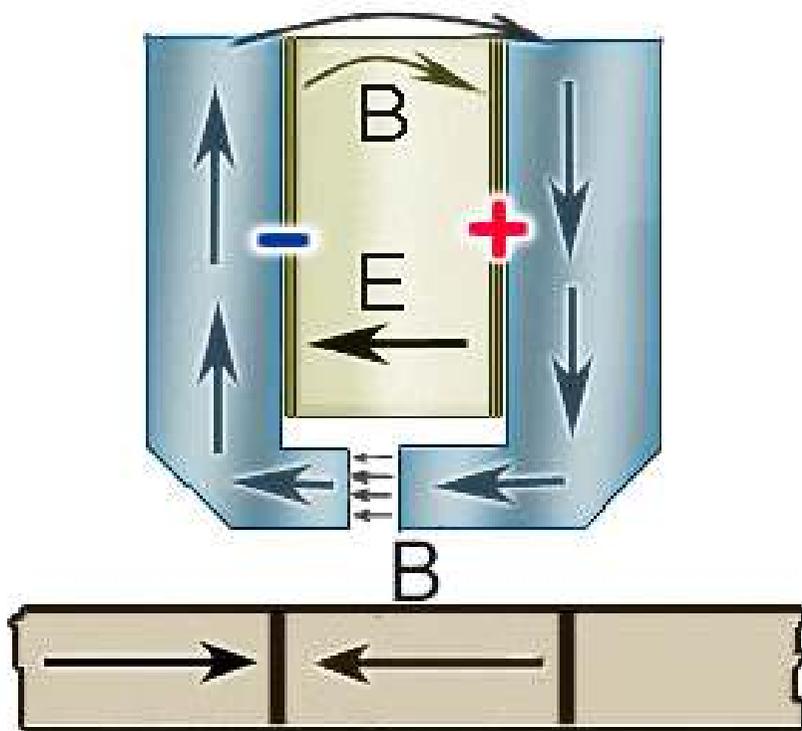


M. Bibes, A. Barthelemy  
*Nat. Mat.* **7**, 425 (2008)

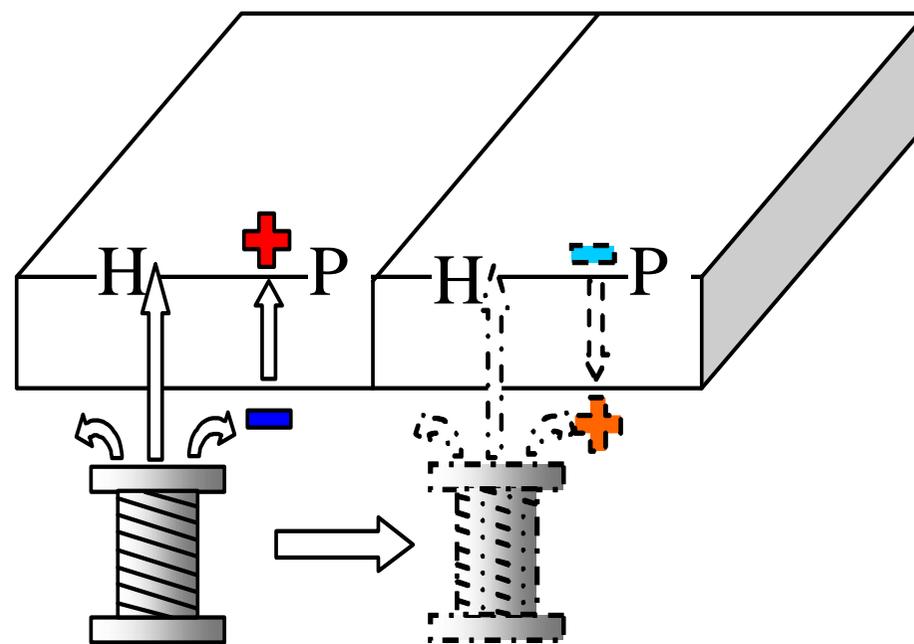


# Устройства памяти

## Емкостные головки



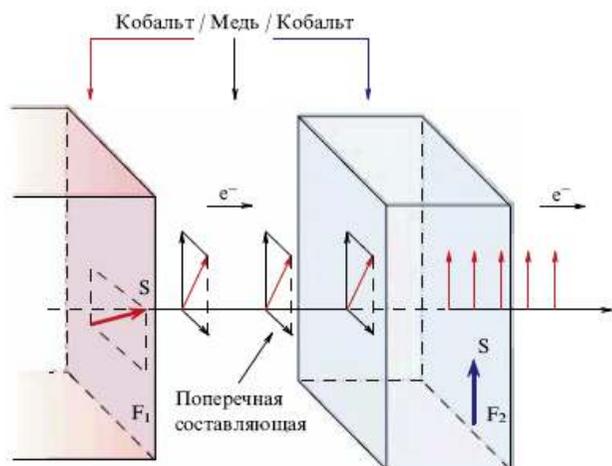
## Память на МЭ доменах



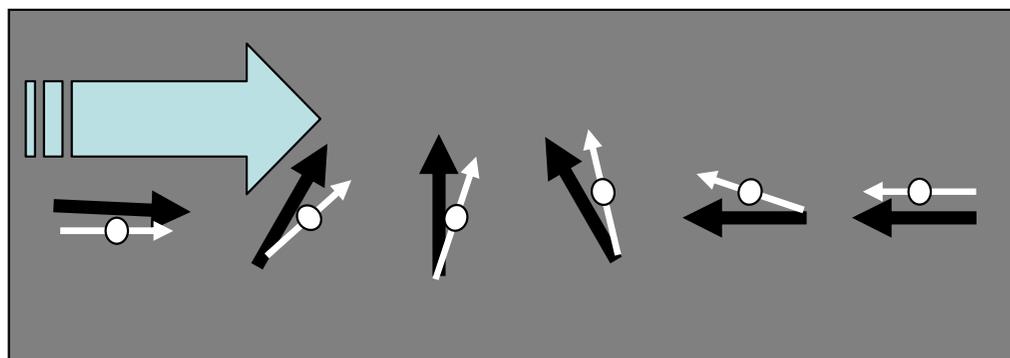


# Перемагничивание СПИНОВЫМ ТОКОМ

## Перенос спина



## Движение доменных границ под действием электрического тока



C. Chappert, Joo Kim.,

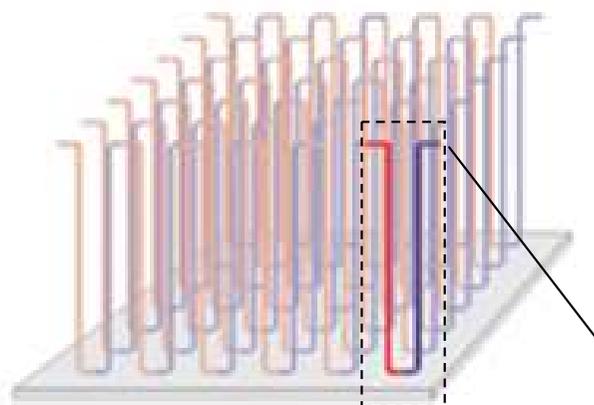
**Electronic free of charge,**

Nature Physics 4, 851 (2008)



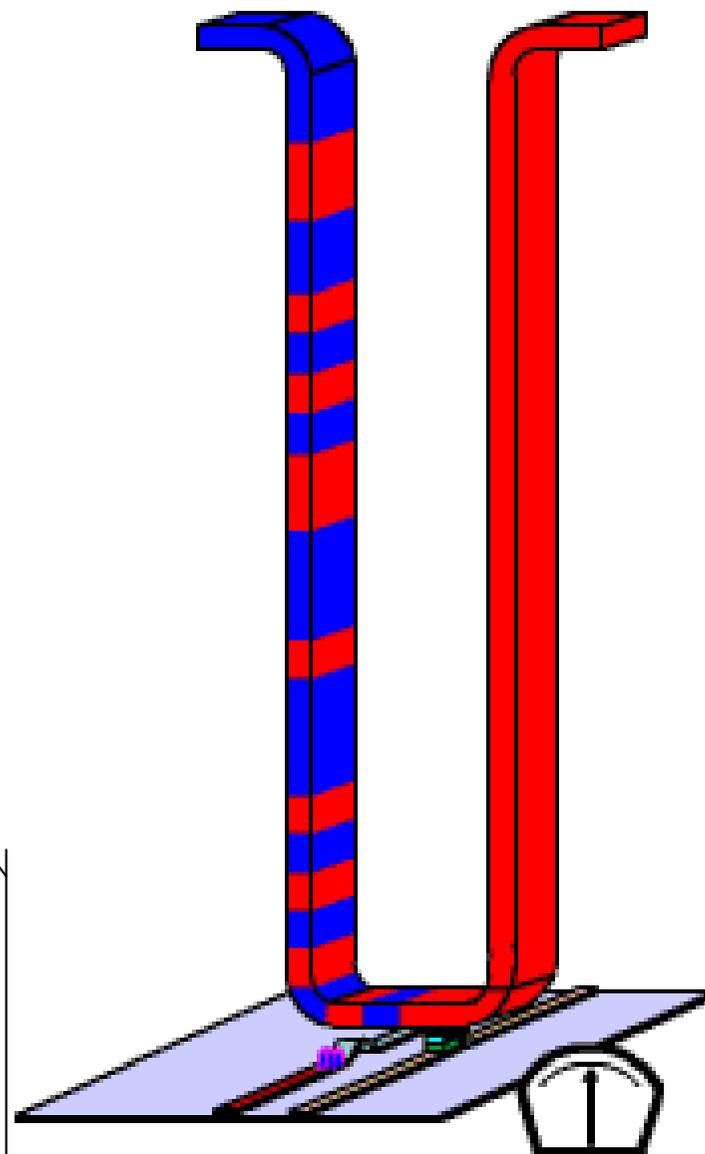
# Race track memory

(память на беговой дорожке)



Racetrack Storage Array

- быстрота оперативной памяти
- энергонезависимость постоянной памяти
- отсутствие движущихся деталей

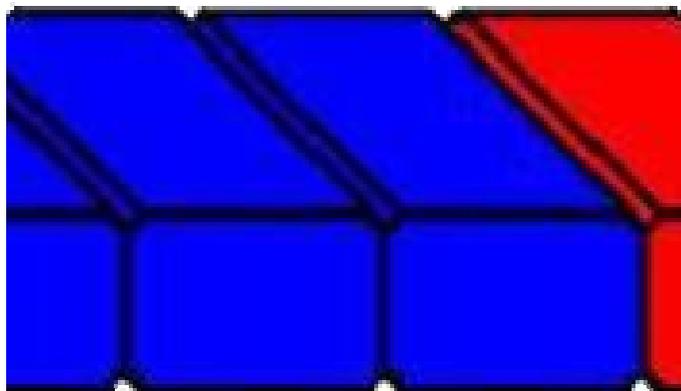


*Parkin, US Patent 7,031,178*



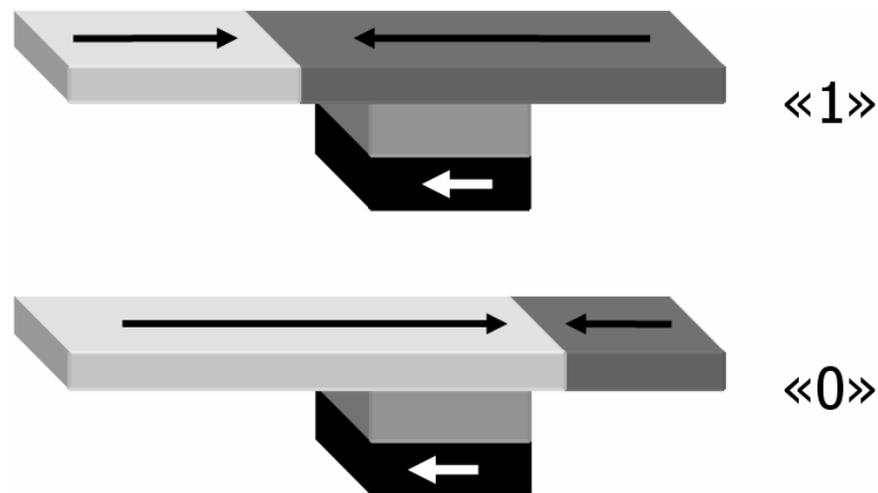
# Необратимые смещения ДГ

## Память на беговой дорожке



S.S.R. Parkin, US patent 6834005

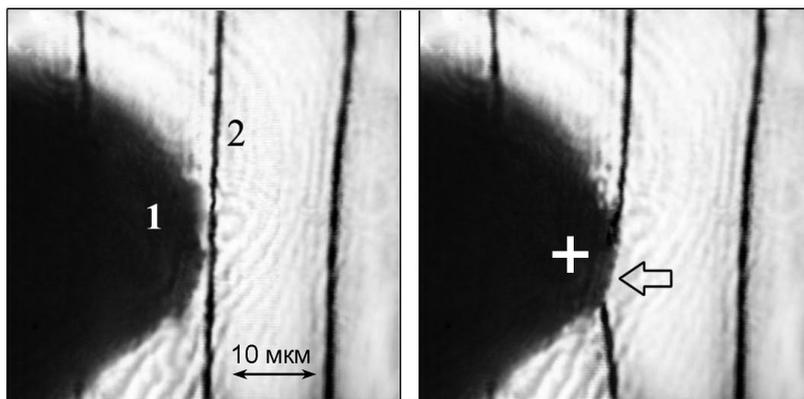
## Магнитная запись





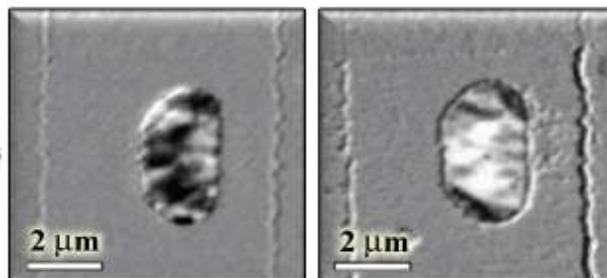
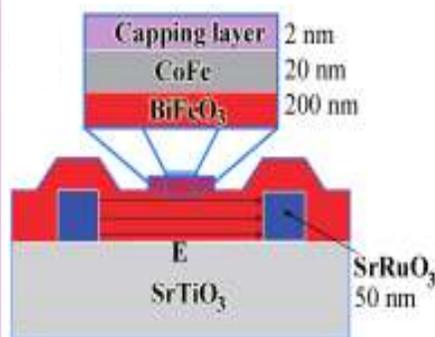
# Электрическое управление микромагнетизмом – комнатные T

## Пленки феррит-гранатов



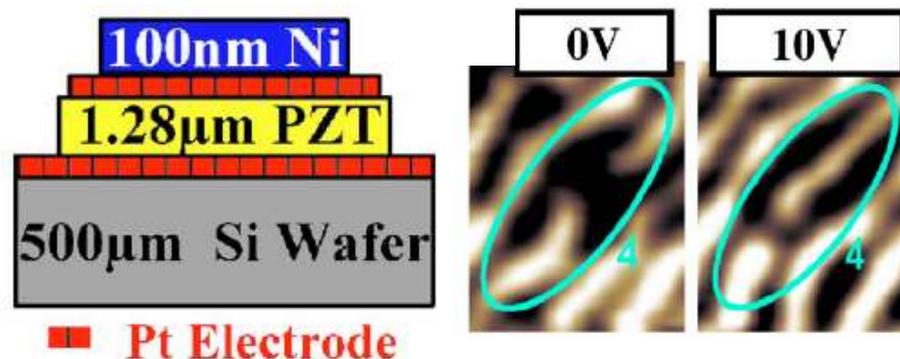
*A.C. Логгинов, Г.А. Мешков и др.*  
*Письма в ЖЭТФ, 86, 124 (2007)*

## Обменно-связанные структуры



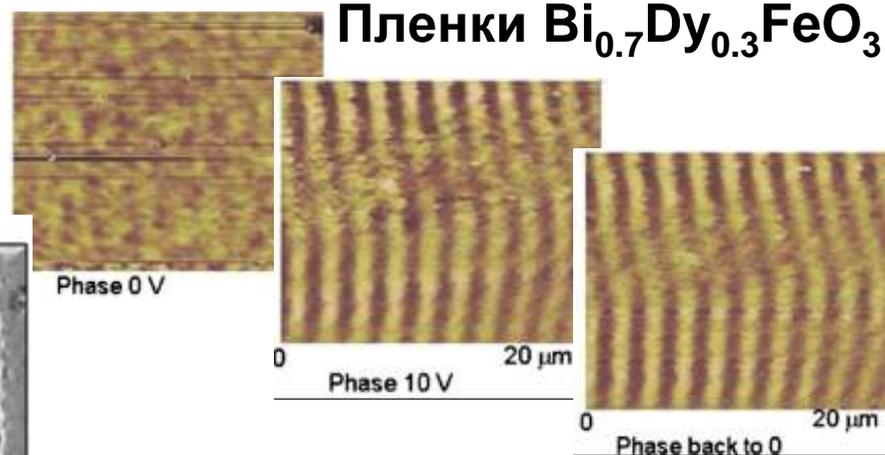
*Y.H. Chu et al, Nature Mat., 7, 478 (2008)*

## Композиты пьезоэл./магнитострик.



*Tien-Kan Chung et al, APL, 92, 112509 (2008)*

## Пленки $\text{Bi}_{0.7}\text{Dy}_{0.3}\text{FeO}_3$

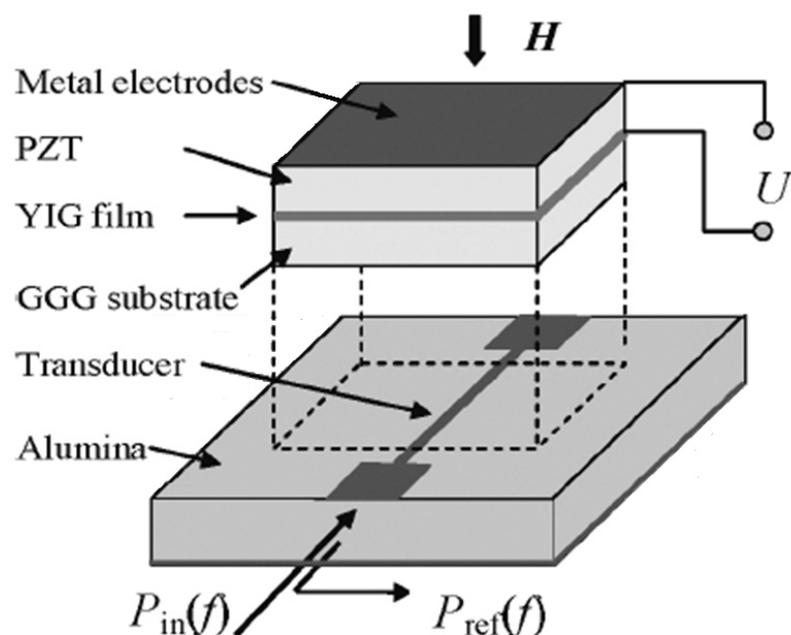


*V. R. Palkar, K. Prashanthi, APL, 93, 132906 (2008)*



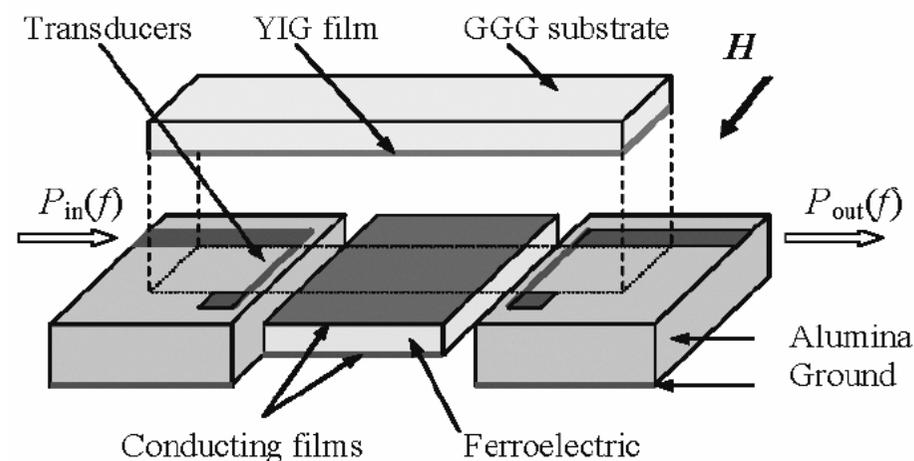
# Применения в СВЧ технике

## Перестраиваемый резонатор



$f_0 = 5$  ГГц;  $\Delta f = 18$  МГц;  $E = 10$  кВ/см

## Фазовращатель



$f_0 = 5$  ГГц;  $\Delta\phi = \pm 90^\circ$ ;  $E = \pm 10$  кВ/см

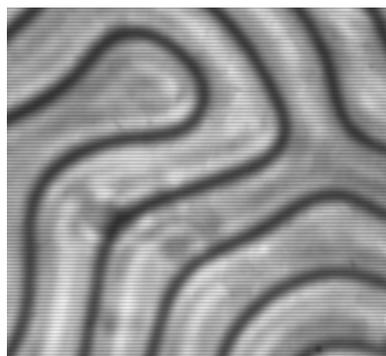
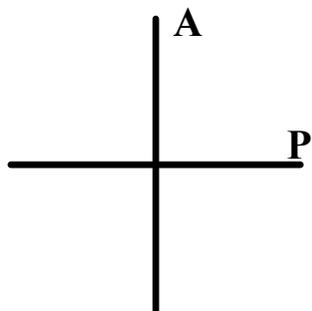
Двухслойные композиты: YIG пленки и ЦТС

G. Srinivasan, and Y. K. Fetisov, *Microwave Magnetolectric Effects and Signal Processing Devices*, Integrated Ferroelectrics, v. 83 p.89 (2006)

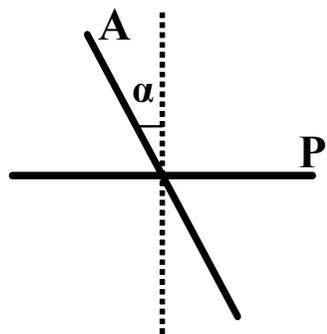


# Обратимые смещения ДГ

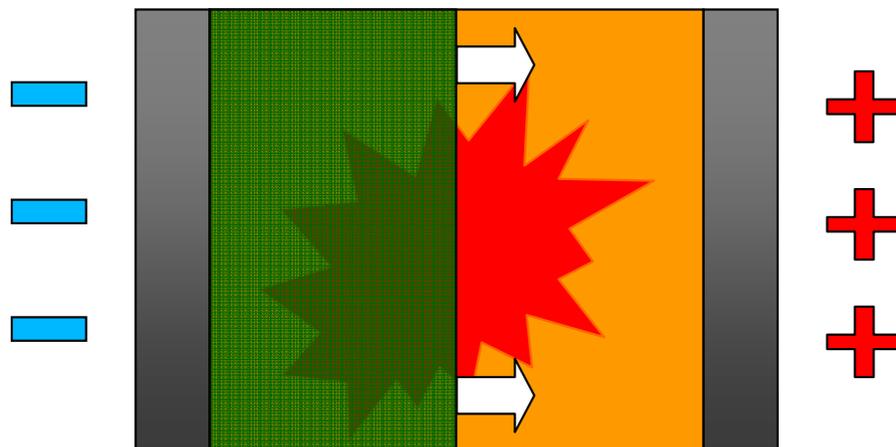
Скрещенные поляризаторы



Слегка раскрещенные поляризаторы

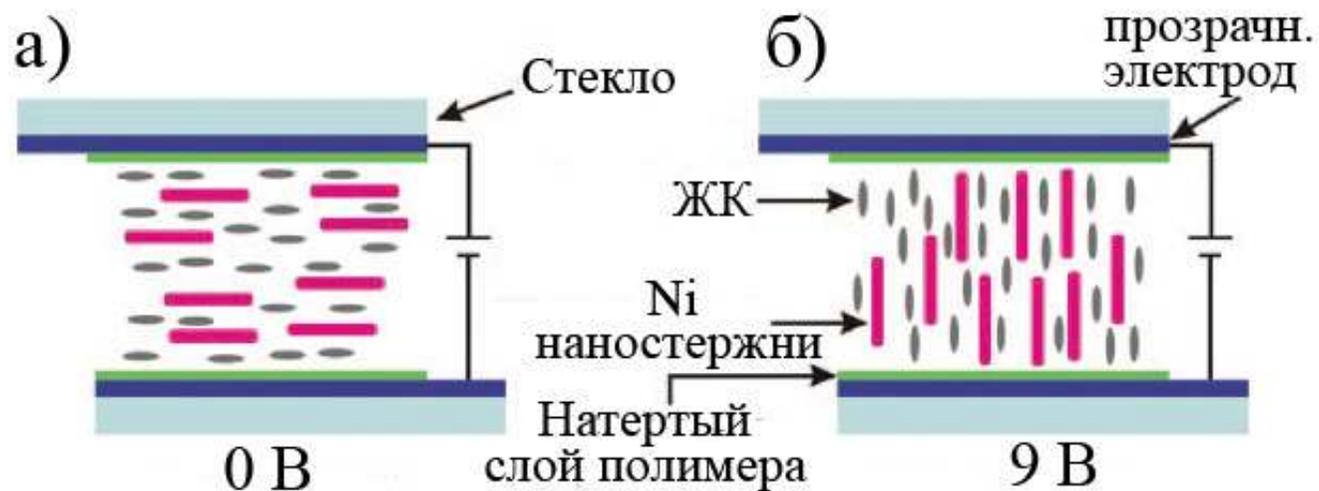


ЭМО ячейка





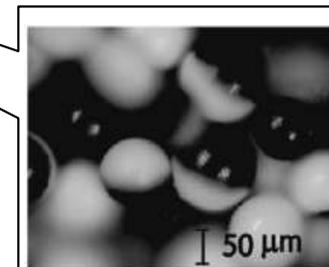
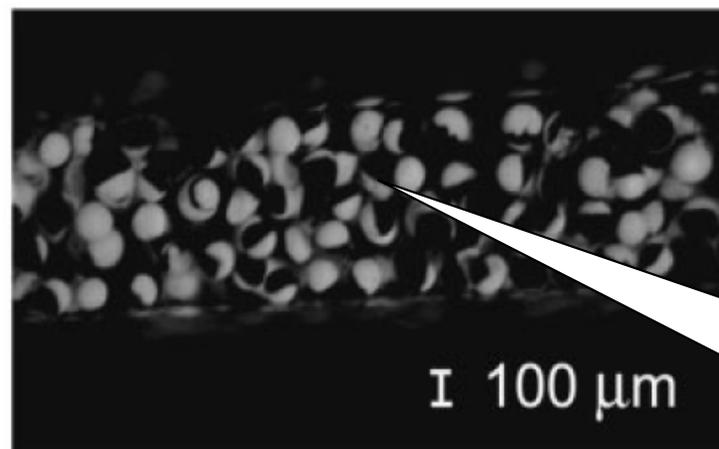
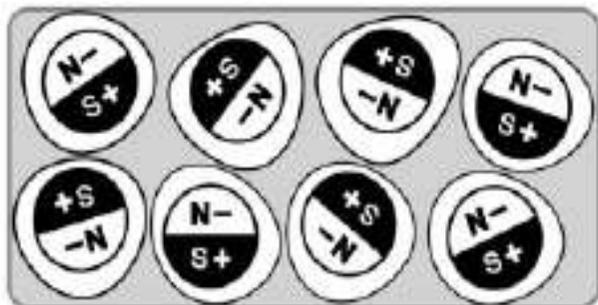
# «Омагниченные» жидкие кристаллы и E-paper



$d=10-19$  Кл·м  
 $M\sim 10$  мГс  
 $\tau\sim 1$  мс  
 $V=3$  В/мкм

*Tsung-Ju Lin et al, Appl. Phys. Lett. 2008, 93, 013108*

$m\sim 1$  мГс,  $\tau=1$  с



*A. Ghosh et al, Small, 20 Oct 2008*



# Resume

- Композиционные материалы – искусственные магнитоэлектрики и мультиферроики
- Магнитоэлектрический эффект как решение:
  - задач спинтроники,
  - проблем магнитной записи
  - интегральной СВЧ-техники

*Спасибо за внимание!*



# Launch into market

Fujitsu Lab & Tokyo-Tech:  
BiFeO<sub>3</sub> modified composition  
for a new generation  
of non-volatile Ferroelectric RAM

- Memory cell 65 nm
- Five times greater capacity

First shipment 2009

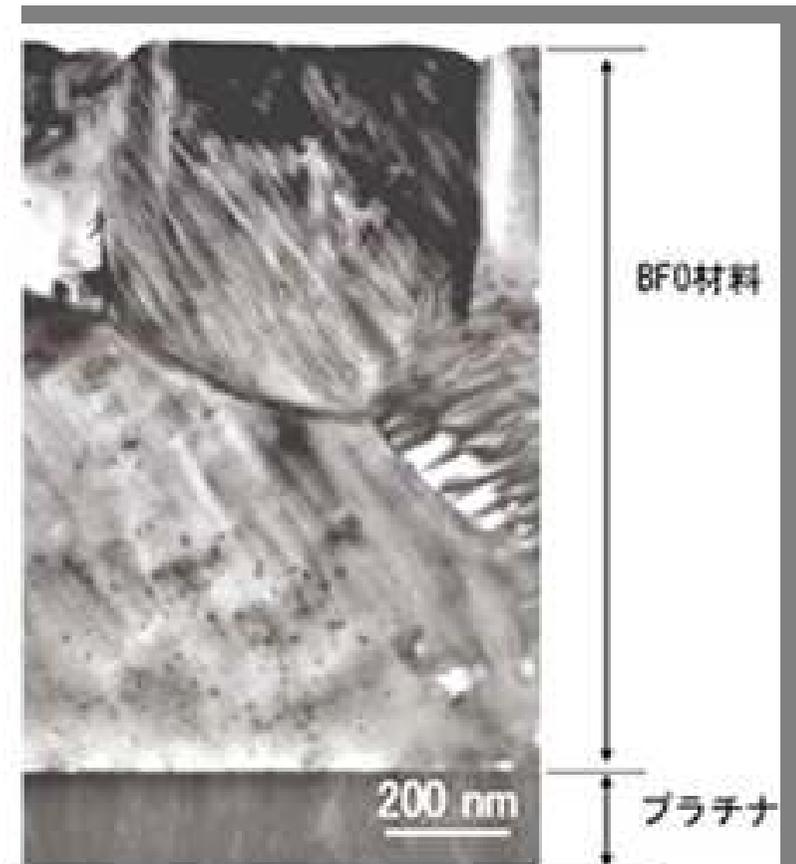


図 透過型電子顕微鏡による新材料の断面