



# МАССИВЫ ЖЕЛЕЗНЫХ НАНОНИТЕЙ: ЧЕМ ЗАНЯТЬСЯ В ОЧЕРЕДИ НА НЕЙТРОНЫ?

Школа по Физике Поляризованных Нейтронов 2020

10-11 декабря 2020



Санкт-Петербургский  
государственный университет

**МИСТОНОВ А. А.**  
a.mistonov@spbu.ru

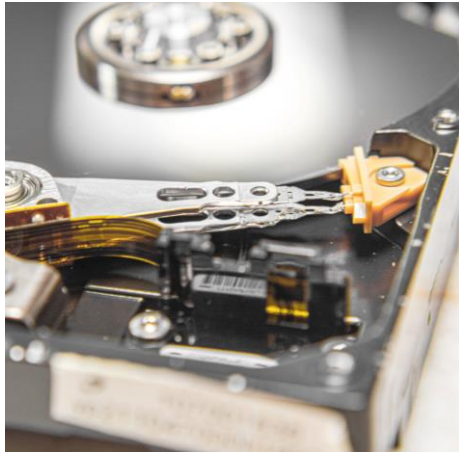


# В НАРОДНОМ ХОЗЯЙСТВЕ



«ЖЕЛЕЗО РЖАВЕЕТ НЕ НАХОДЯ СЕБЕ ПРИМЕНЕНИЯ, СТОЯЧАЯ ВОДА ГНИЕТ ИЛИ ЗАМЕРЗАЕТ НА ХОЛОДЕ, А УМ ЧЕЛОВЕКА, НЕ НАХОДЯ СЕБЕ ПРИМЕНЕНИЯ, ЧАХНЕТ»

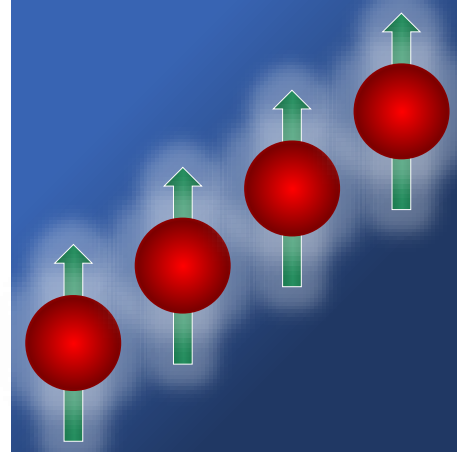
ЛЕОНАРДО ДА ВИНЧИ



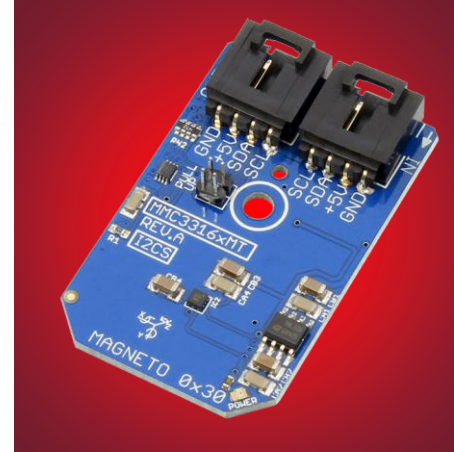
ХРАНЕНИЕ  
ИНФОРМАЦИИ



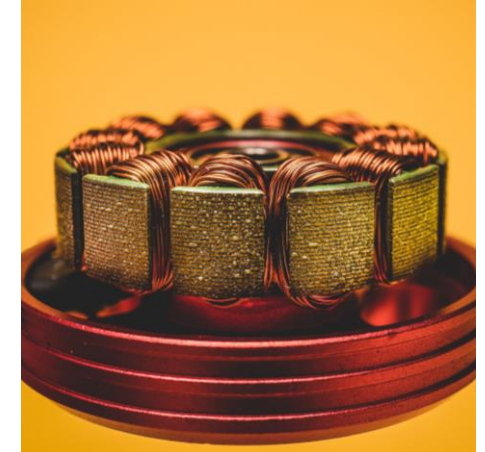
МЕДИЦИНА



СПИНТРОНИКА



СЕНСОРЫ



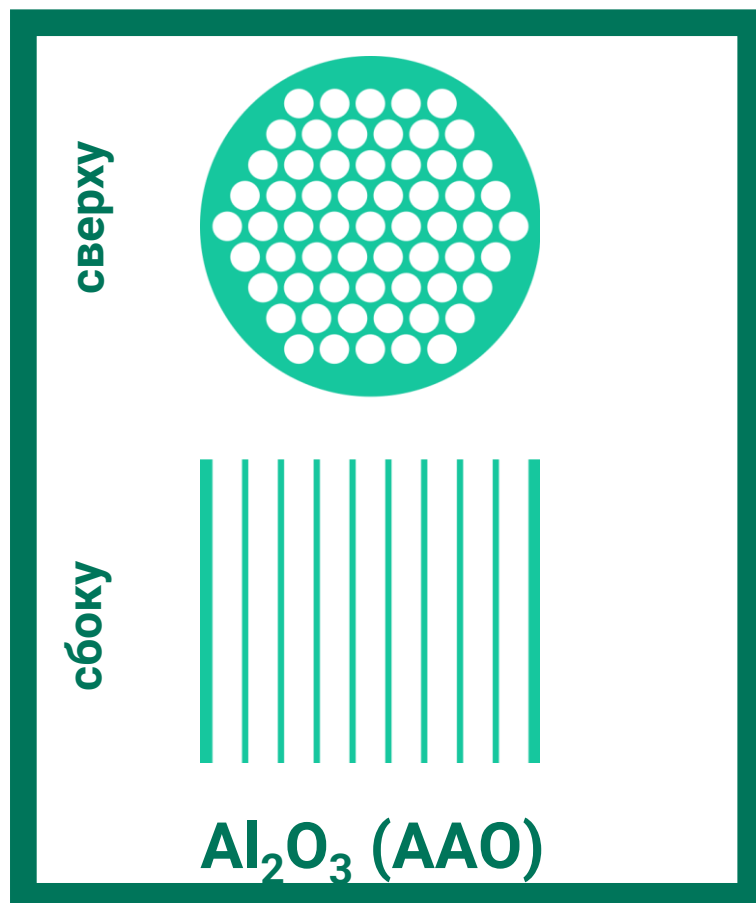
ТЕОРИЯ  
МАГНЕТИЗМА



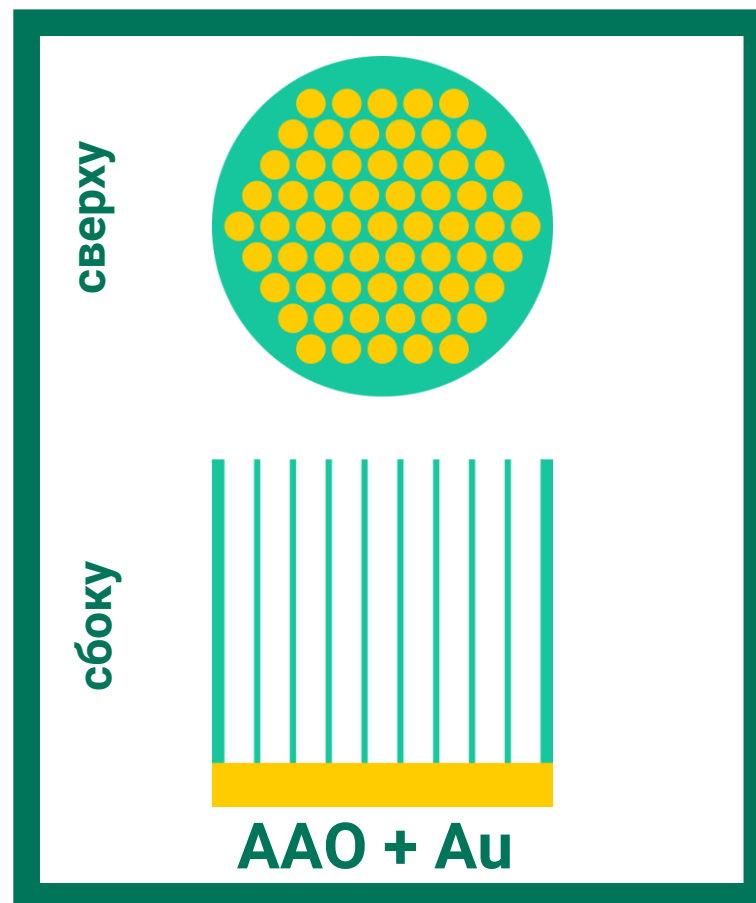
# ОТ СОЗДАТЕЛЕЙ...



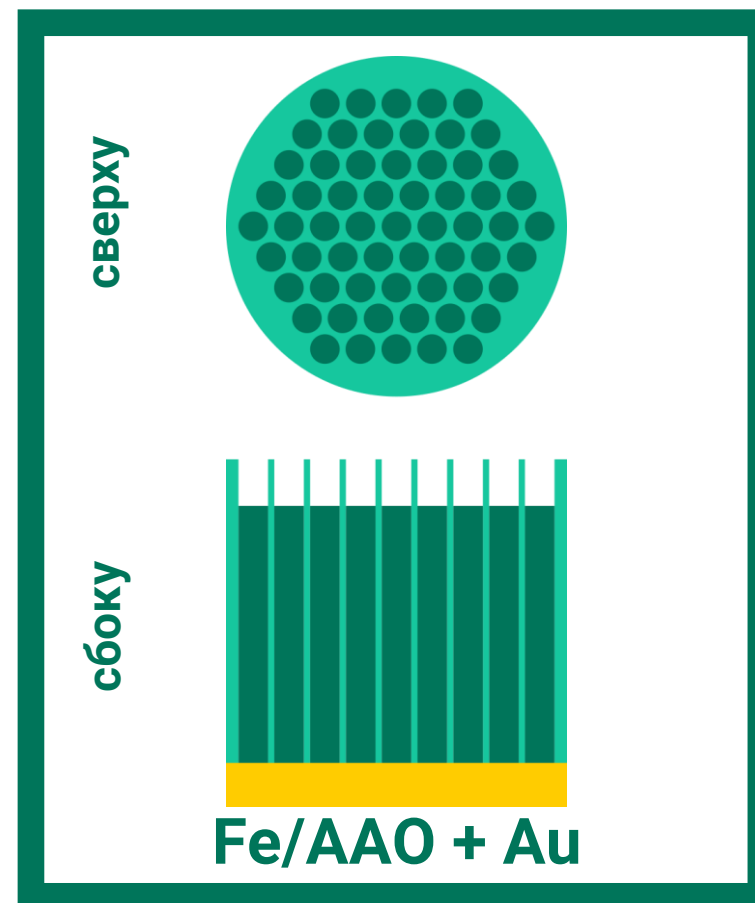
## 1 ПОРИСТАЯ МЕМБРАНА



## 2 НАПЫЛЕНИЕ ПРОВОДЯЩЕГО СЛОЯ



## 3 ОСАЖДЕНИЕ НАНОНИТЕЙ





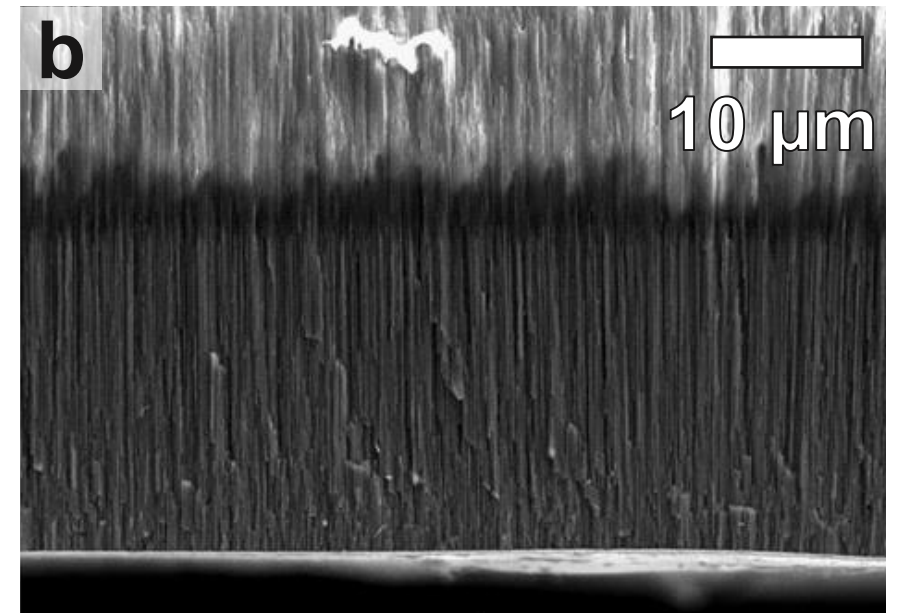
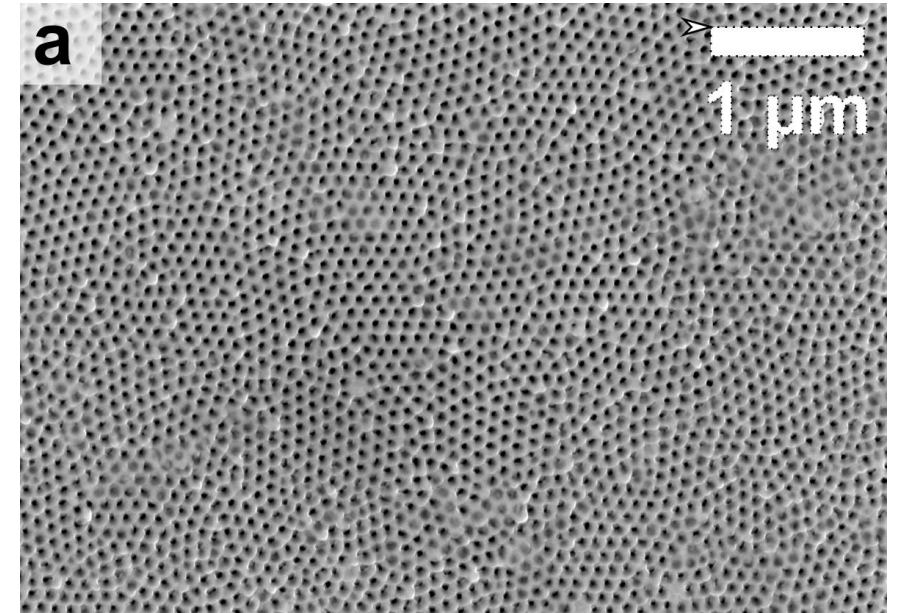
# НАНОСТРУКТУРА



 **ДИАМЕТР**  
 $52 \pm 5 \text{ нм}$

 **ПЕРИОД**  
 $101 \pm 10 \text{ нм}$

 **ДЛИНА**  
 $3 - 20 \text{ мкм}$



Измерения проводились в РЦ  
«Нанотехнологии» ([nano.spbu.ru](http://nano.spbu.ru))





# АТОМАРНАЯ СТРУКТУРА

Измерения проводились в РЦ «Рентгendifракционные методы исследования» (xrd.spbu.ru)

**МАТЕРИАЛ НИТЕЙ**

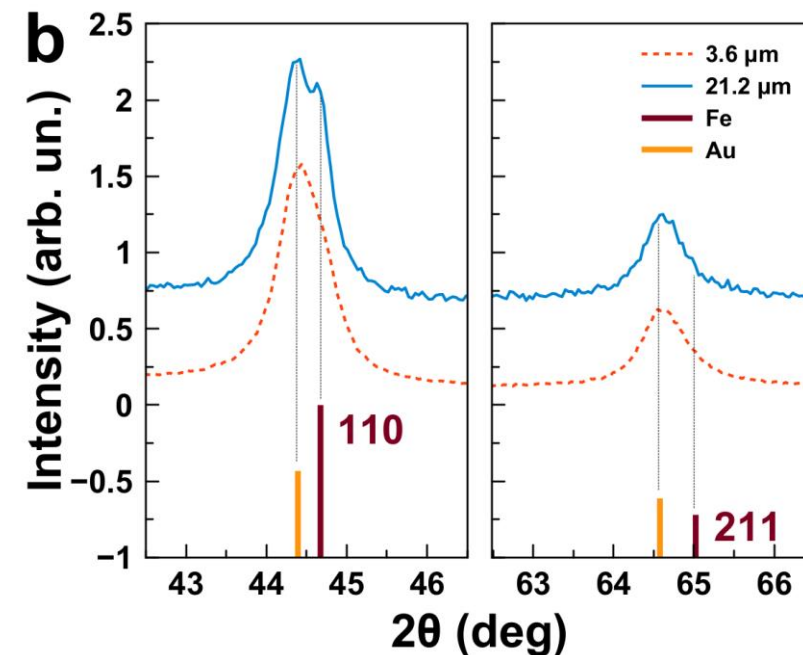
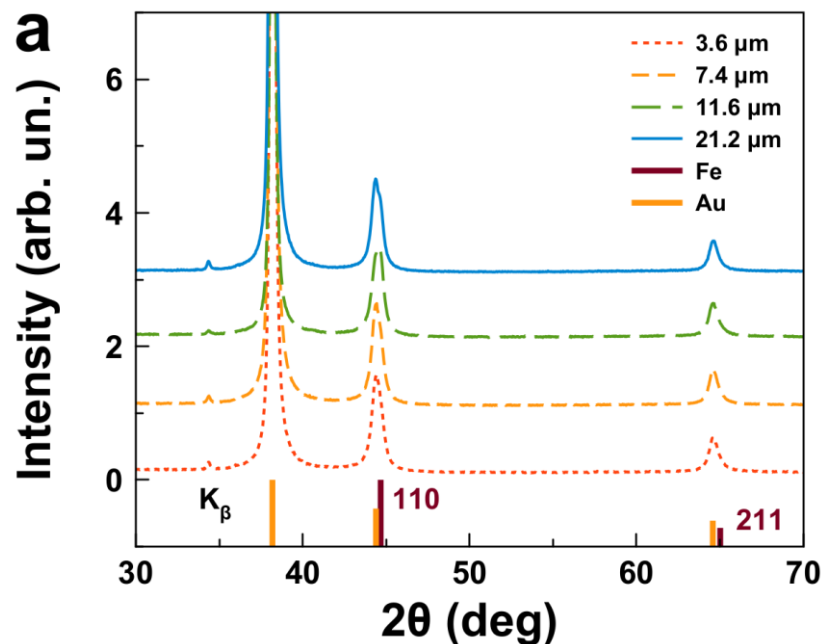
$\alpha$ -Fe

**РЕШЁТКА**

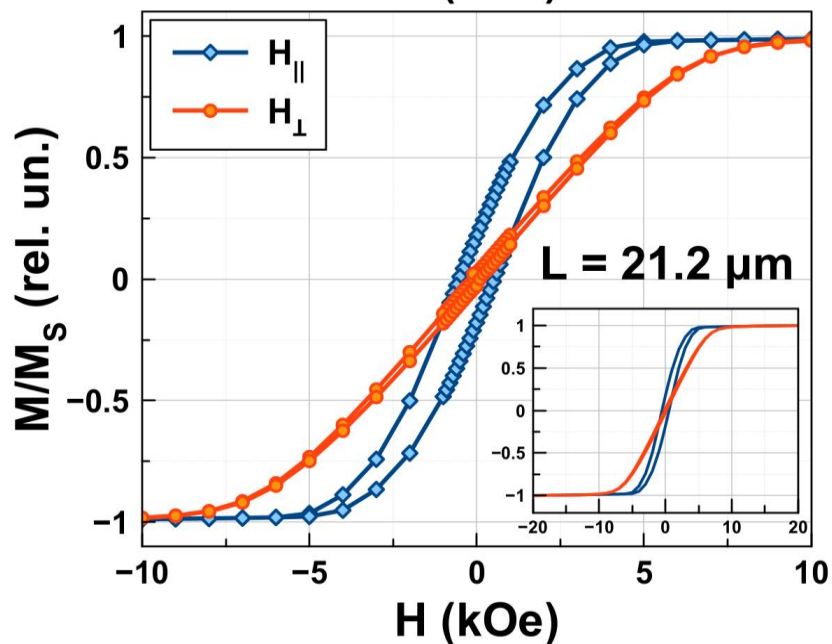
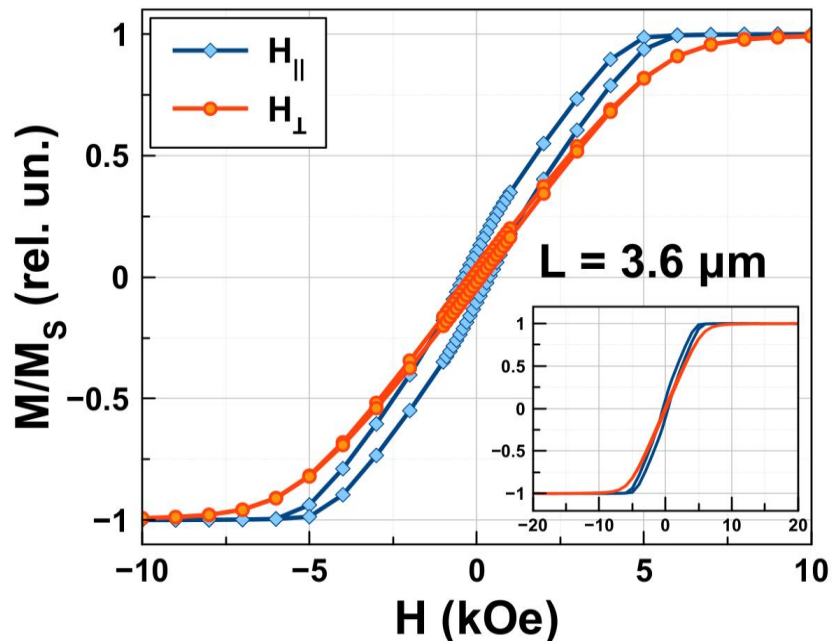
ОЦК

**ТЕКСТУРА**

НЕТ







# ЖИВАЯ ПЕТЛЯ



**АНИЗОТРОПИЯ ФОРМЫ**  
Разные петли в поле вдоль и поперёк нитей

**ЛЁГКАЯ Ось ВДОЛЬ НИТИ**  
Даже для самого короткого образца

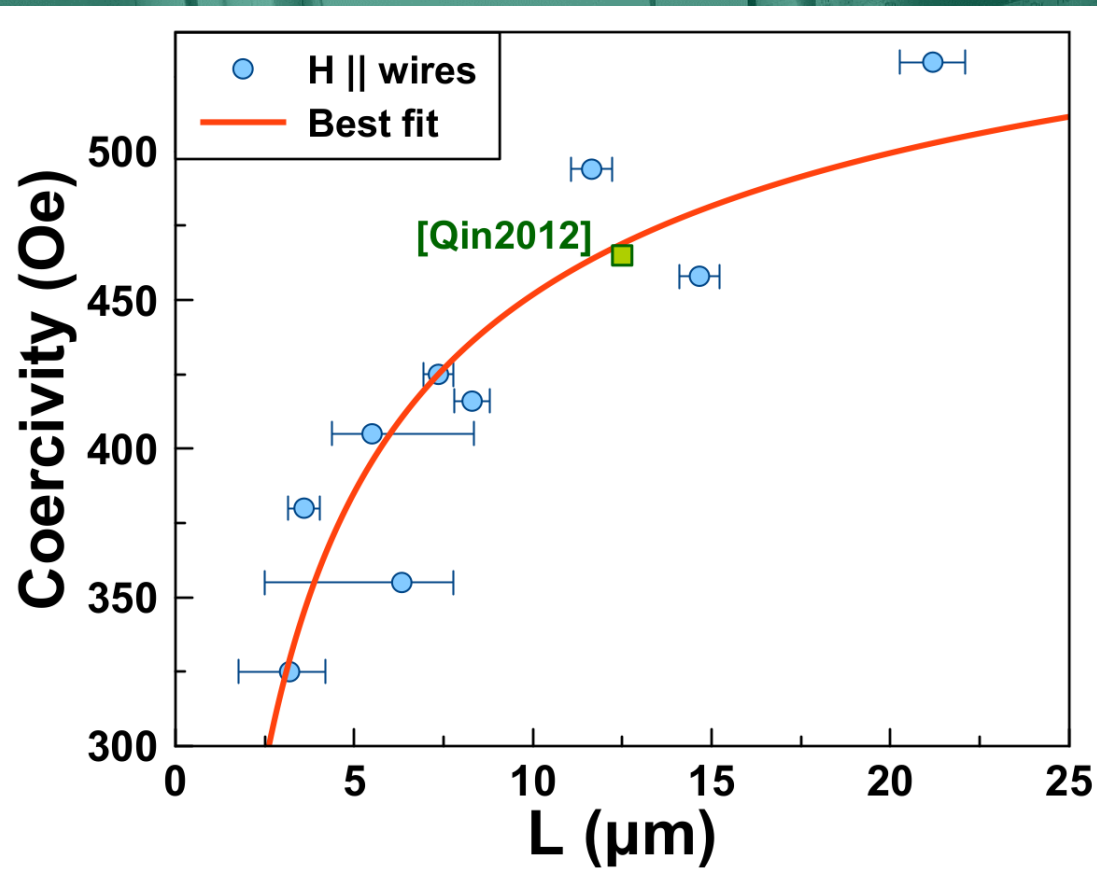
**УМЕНЬШЕНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ?**  
Коэрцитивная сила растёт

Измерения проводились в Институте физики конденсированного состояния (Германия)





S. Lim *et al*, *Journal of Alloys and Compounds*,  
vol. 505, no. 2, pp. 609–612, 2010



$$H_0 = 615 \pm 38 \text{ Э}$$

$$\varepsilon = 3 \pm 1$$

[Qin2012] X. F. Qin *et al*, *IEEE Transactions on Magnetics*,  
48 (11), 3136–3139 (2012)

$$H_c = H_0 \left( 1 - \sqrt{\frac{\varepsilon M_s D_p^2}{4 H_0 D_{int} L} \left( 1 - \frac{1}{\sqrt{1 + L^2 / D_{int}^2}} \right)} \right)$$

$$M_s = 21.3 \text{ кЭ}$$

$$D_p = 52 \text{ нм}$$

$$D_{int} = 101 \text{ нм}$$

$H_0$  – коэрцитивная сила отдельной нити

$\varepsilon$  – параметр, определяющийся взаимодействием

# РОСТ $H_c$ С ДЛИНОЙ





# ВИХРЕВАЯ ДОМЕННАЯ СТЕНКА

$$L_v = \frac{0.18 D_p^2}{\sqrt{10} l_{ex}} \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{1}{30} \frac{D_p^2}{A} \mu_0 M_s H}}$$

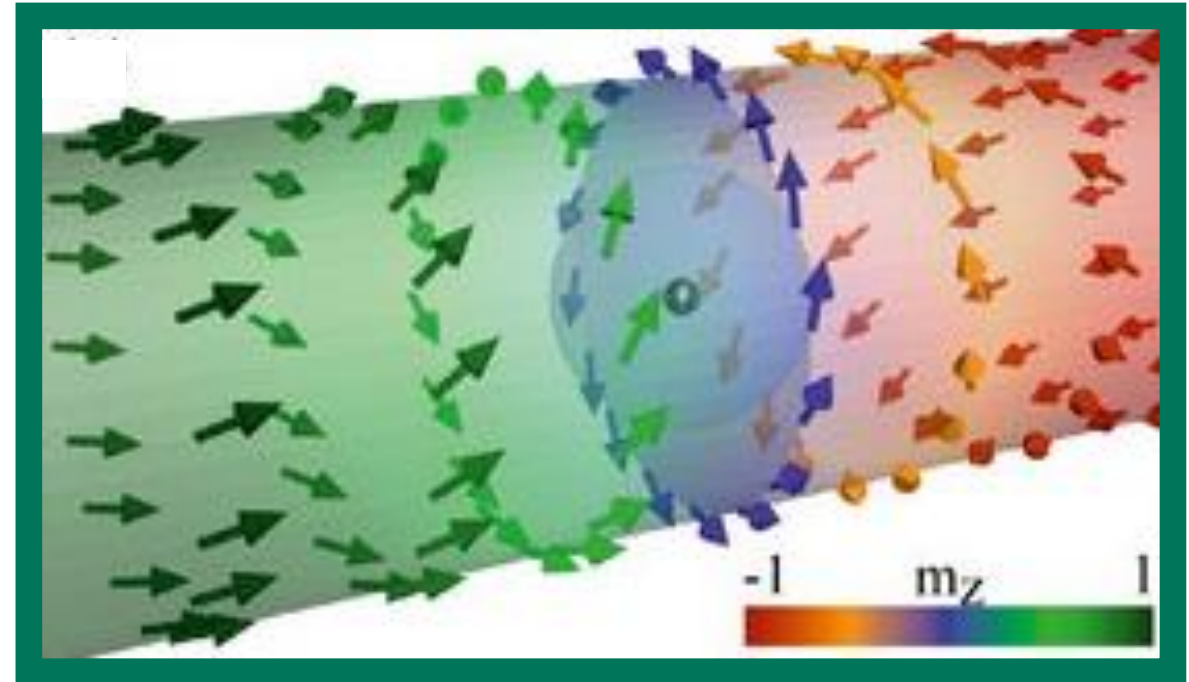
$$M_s = 21.3 \text{ кЭ}$$

$$D_p = 52 \text{ нм}$$

$$l_{ex} = 3.5 \text{ нм} - \text{обменная длина}$$

$$A = 2.1 \cdot 10^{-11} \text{ Дж/м} - \text{обменная постоянная}$$

S. Jamet et al, *Magnetic Nano-and Microwires*,  
pp. 783–811 (2015)



D. Sander et al, *J. Phys. D: Appl. Phys.*,  
50, 363001 (2017)

$$L_v \rightarrow \infty \quad \Rightarrow \quad H_0 = 630 \text{ Э}$$

$$[H_0 = 615 \pm 38 \text{ Э}]$$





⬆️ **НАСЫЩЕНИЕ**  
Образец помещается в поле больше  $H_s$

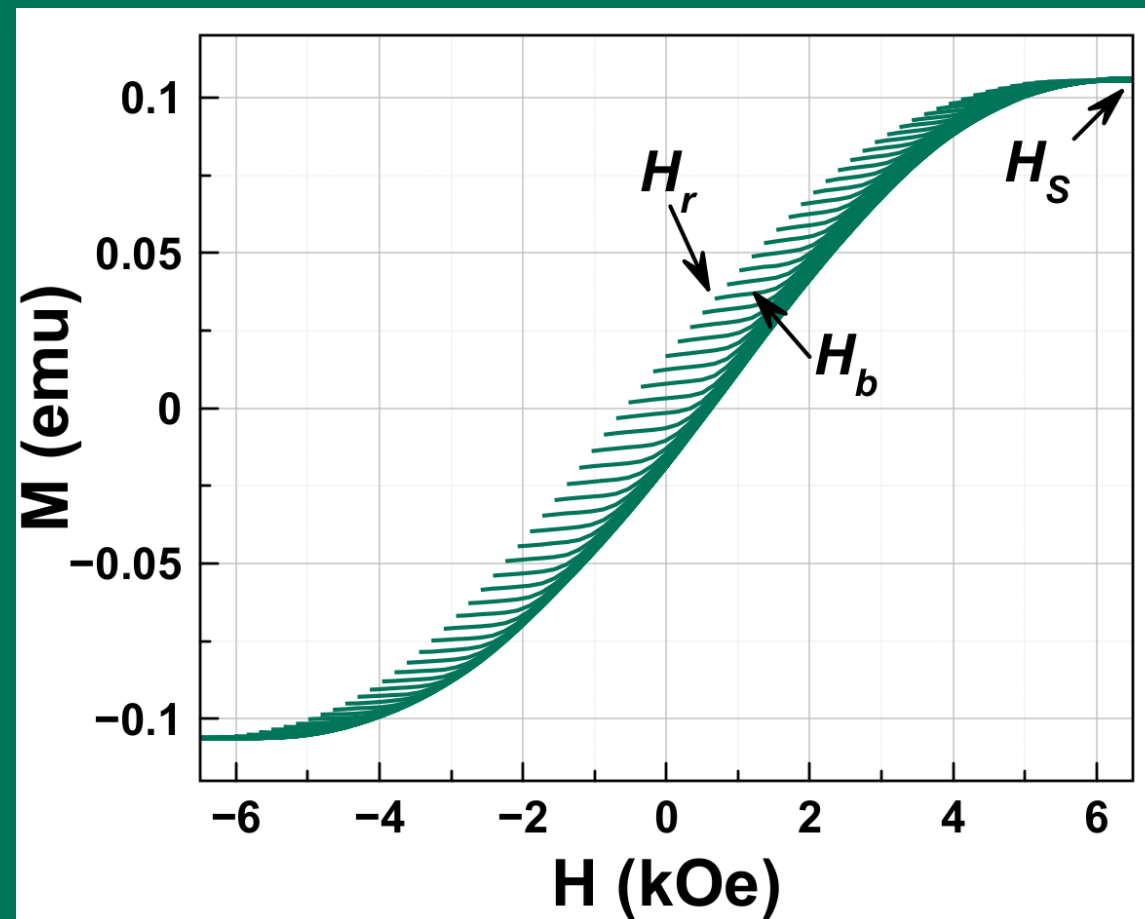
⬇️ **НЕПОЛНОЕ ПЕРЕМАГНИЧИВАНИЕ**  
Поле уменьшается до  $H_r$

⚡ **ИЗМЕРЕНИЕ**  
Измеряется намагниченность  
в полях  $H_b$  от  $H_r$  до  $H_s$

🔄 **ПОВТОРЕНИЕ**  
Для новой кривой  $H_r$  уменьшается  
пошагово вплоть до  $-H_s$

$$M_{FORC}(H_b, H_r)$$

I. Mayergoyz, *Journal of Applied Physics*,  
vol. 57, no. 8, pp. 3803–3805, 1985.



ОСНОВЫ МЕТОДА I

# FIRST-ORDER REVERSAL CURVES



I. Mayergoyz, *Journal of Applied Physics*,  
vol. 57, no. 8, pp. 3803–3805, 1985.

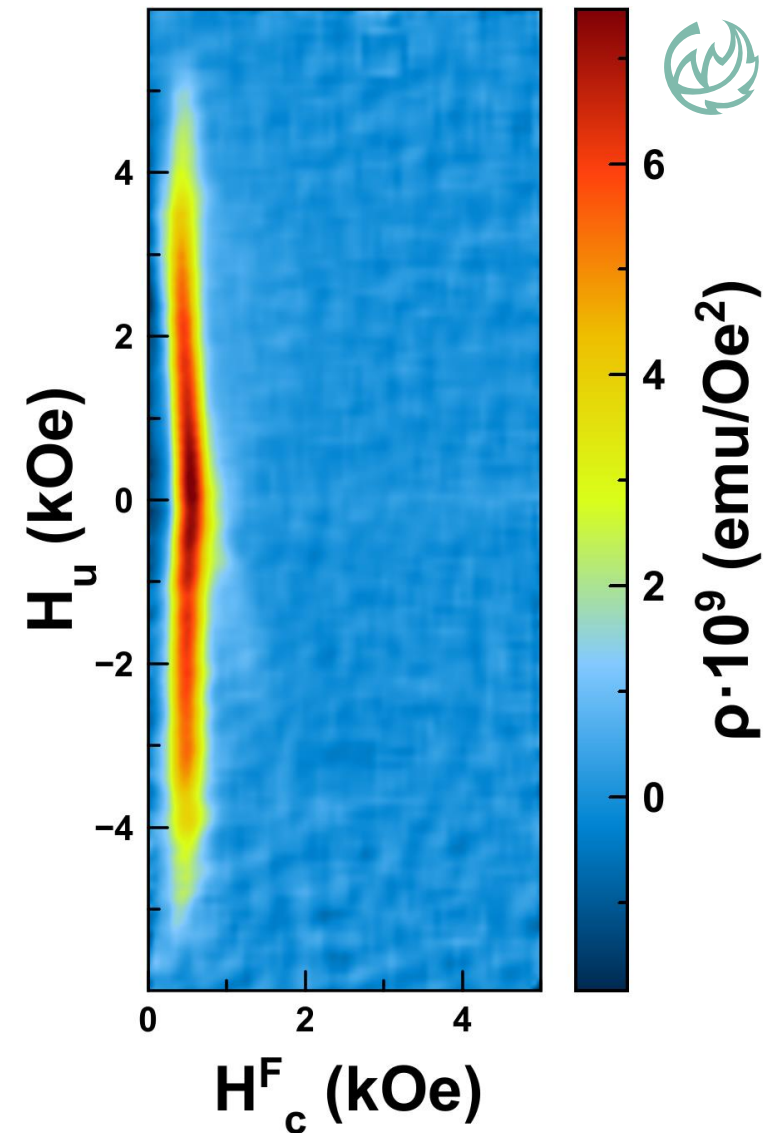
$$\rho_{FORC} = -\frac{1}{2} \frac{\partial^2 M_{FORC}(H_b, H_r)}{\partial H_b \partial H_r}$$

ПОВОРОТ КООРДИНАТНОЙ ПЛОСКОСТИ

$$H_c^F = \frac{H_b - H_r}{2} \quad H_u = \frac{H_b + H_r}{2}$$

ОСНОВЫ МЕТОДА II

# FIRST-ORDER REVERSAL CURVES

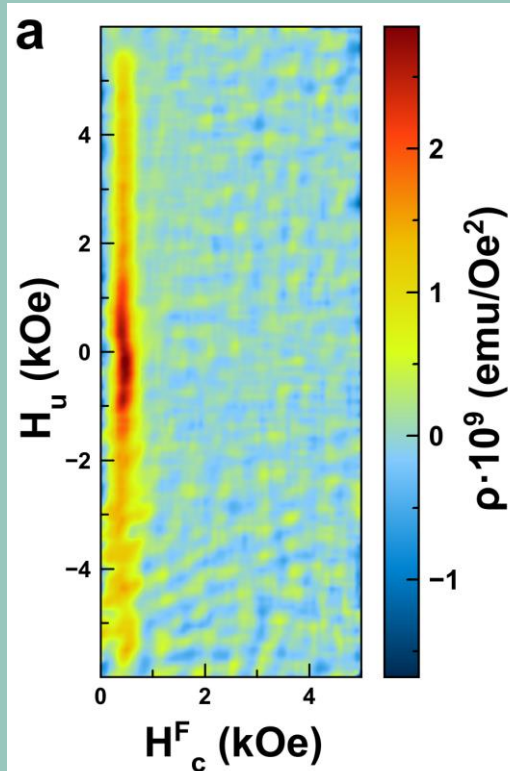




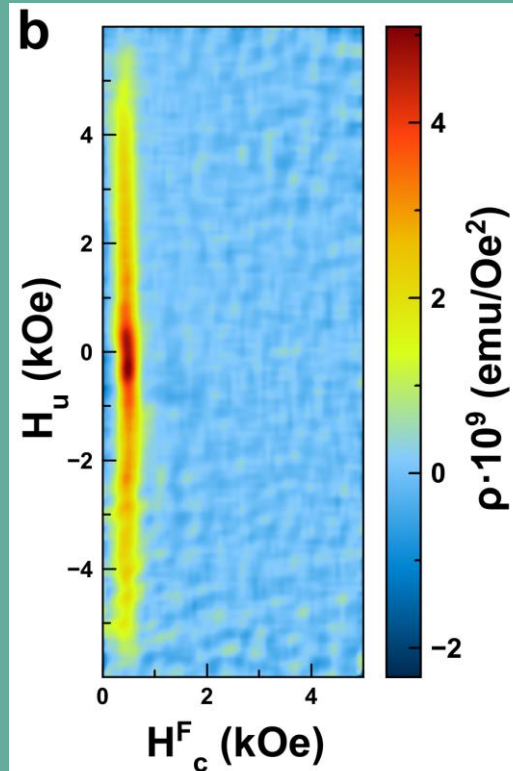
# FORC ДИАГРАММЫ

Измерения проводились в РЦ «Инновационные технологии композитных наноматериалов»  
(nanocomposites.spbu.ru)

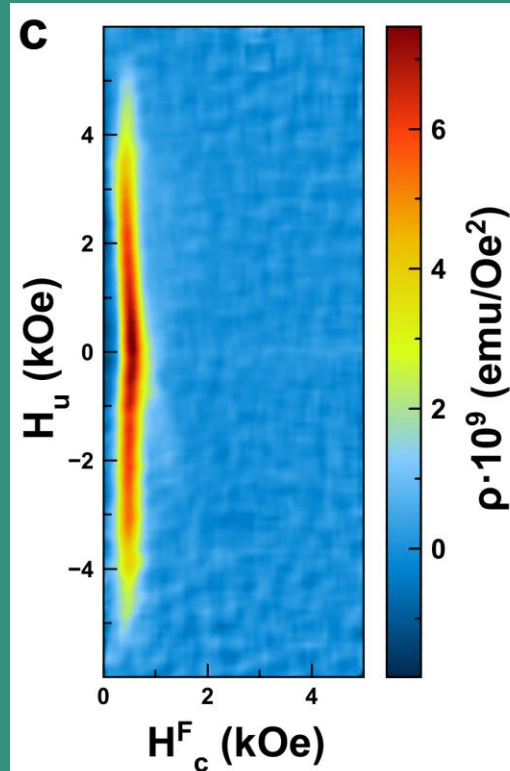
L = 3.6 мкм



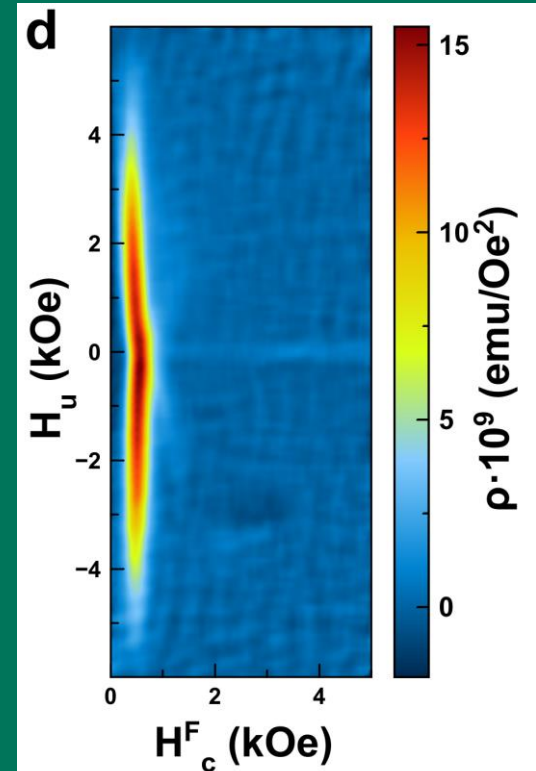
L = 7.4 мкм



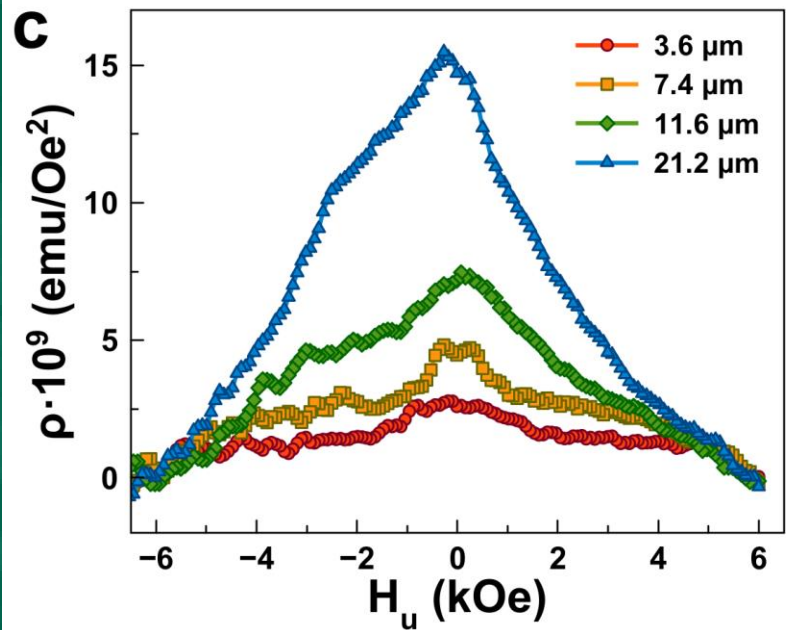
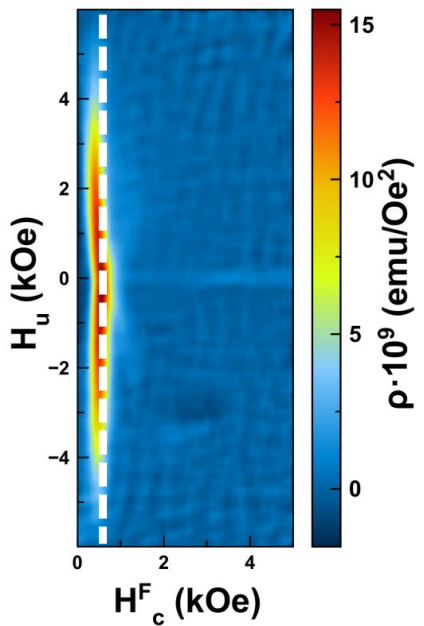
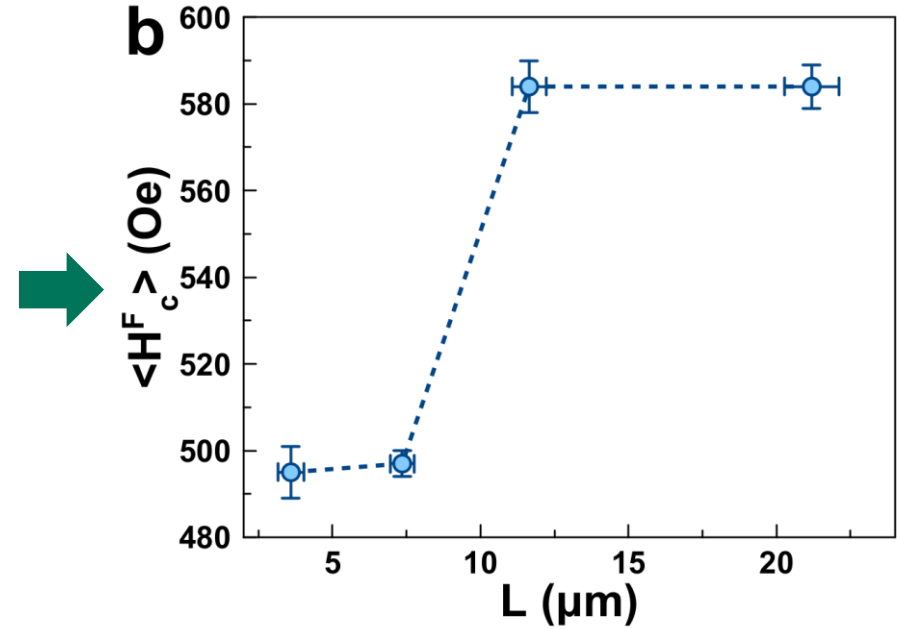
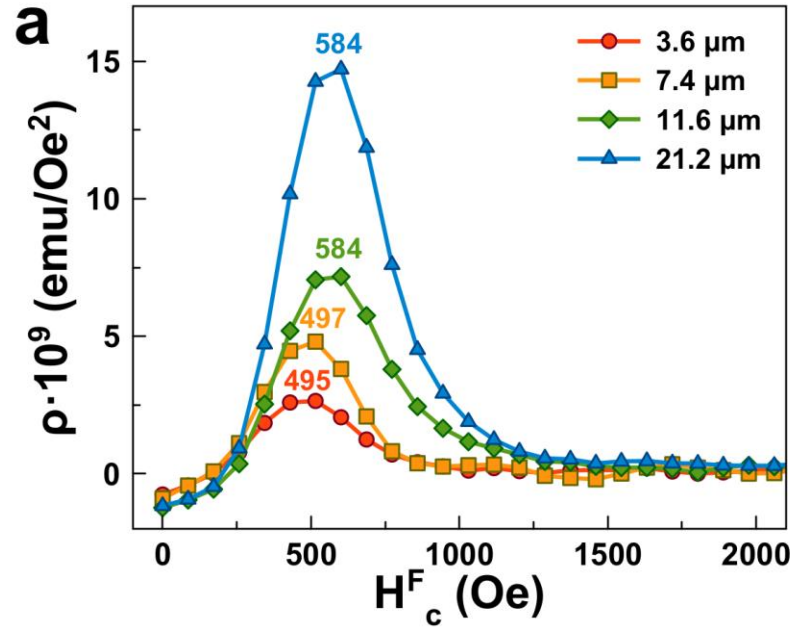
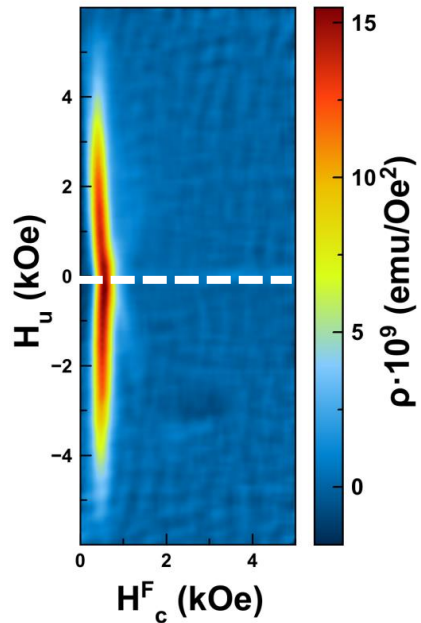
L = 11.6 мкм



L = 21.2 мкм







ПОЛЕ ПЕРЕМАГНИЧИВАНИЯ  
РАСТЁТ С ДЛИНОЙ

ЛОКАЛЬНЫЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ  
ПЕРЕХОДЯТ В СРЕДНИЕ (MEAN FIELD)

# FORC СЕЧЕНИЯ





Отправлено в  
**Journal of Alloys and Compounds**

Школа по Физике Поляризованных Нейтронов 2020



# ВЫВОДЫ

## ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ УМЕНЬШАЮТСЯ С ДЛИНОЙ НИТЕЙ

Зависимость коэрцитивной силы от длины  
Уменьшение ширины  $H_u$

## ПОВЕДЕНИЕ ПОХОЖЕЕ НА ОДНОДОМЕННОЕ

Замкнутые контура FORC диаграмм  
Рабочая модель перемагничивания

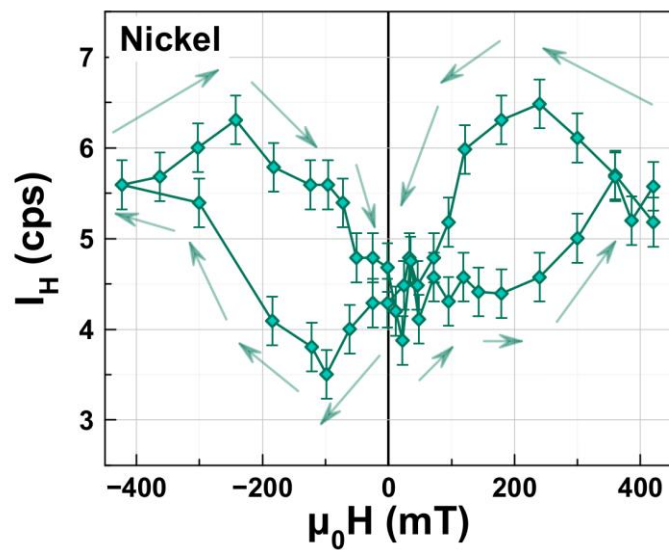
## ДВИЖЕНИЕ ВИХРЕВОЙ ДОМЕННОЙ СТЕНКИ

Поля изолированной нити из разных моделей очень близки

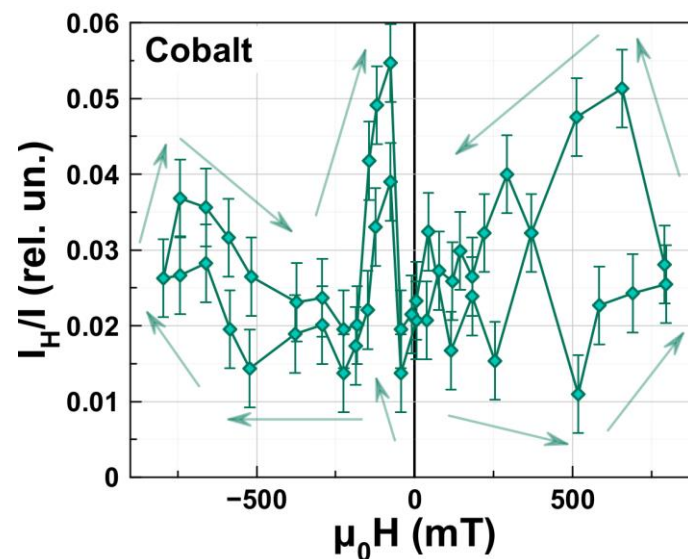


# НЕЙТРОПЛАНИРОВАНИЕ

- ❓ «РАЗВОРОТ» НАМАГНИЧЕННОСТИ
- ❓ КОГЕРЕНТНЫЕ ЭФФЕКТЫ
- ❓ ОТЛИЧИЯ ОТ НИКЕЛЯ И КОБАЛЬТА
- ❓ «КРЫЛЬЯ БАБОЧКИ»



С.В. Григорьев и др., **Письма в ЖЭТФ**, т. 94, в. 8, с. 678-684 (2011)



A.P. Chumakov et al, **Physica B**, 406, 2405–2408 (2011)

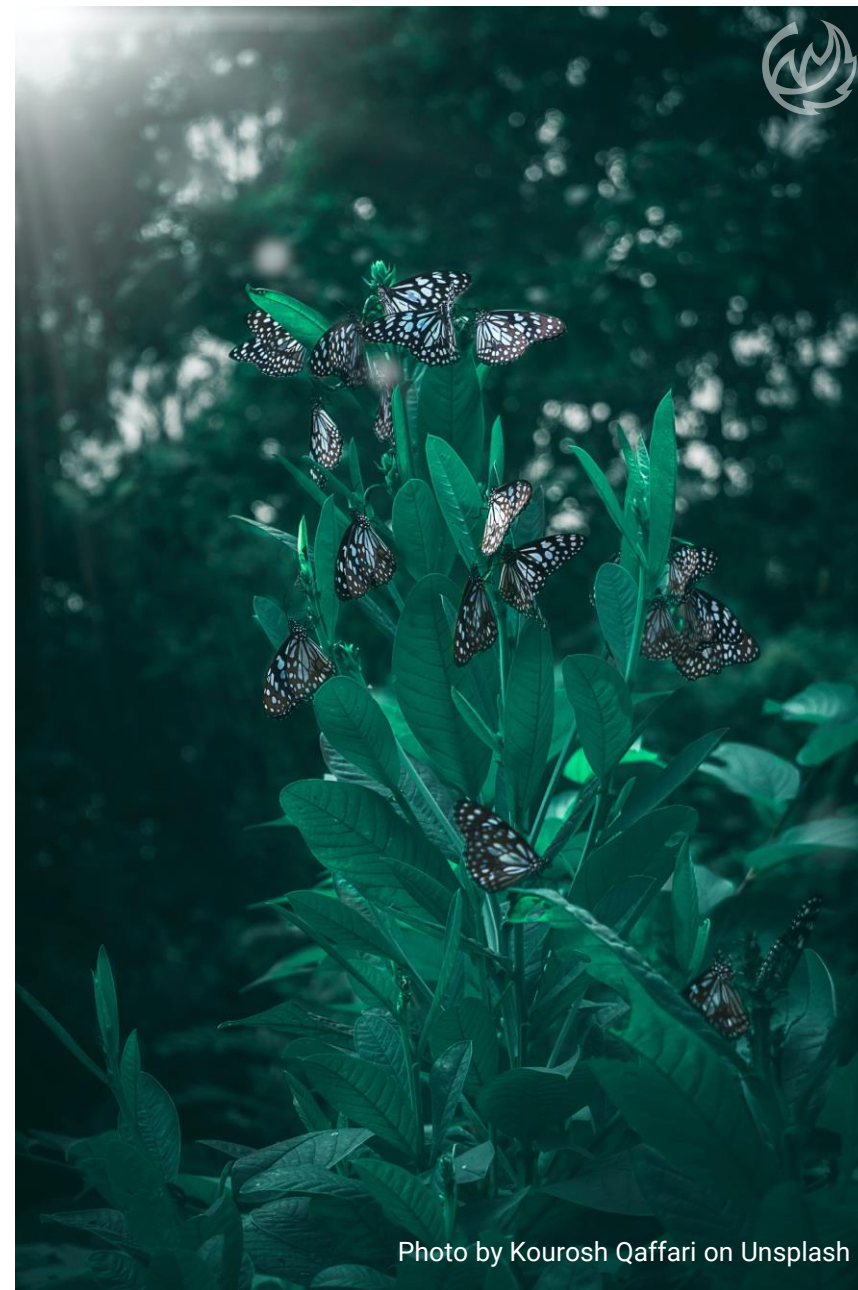


Photo by Kourosh Qaffari on Unsplash







Российский  
научный фонд



**АХМЕД**  
Елмакави



**ЕКАТЕРИНА**  
Яшина



**ИЛЬЯ**  
Дубицкий



**СПАСИБО  
ЗА  
ВНИМАНИЕ!**



**СТЕПАН**  
Сотничук

**КИРИЛЛ**  
Напольский



**ДИРК**  
Менцель



Санкт-Петербургский  
Государственный  
Университет  
**Научный Парк**