

# Коэрцитивное поле в трёхмерном наноаналоге спинового льда

*или*

## Чем дальше в лес, тем больше дров: а по какому закону?

Мистонов А.А.



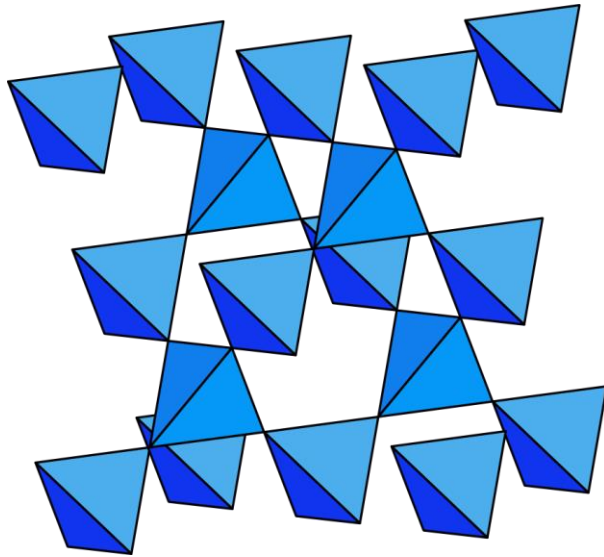
Санкт-Петербургский государственный университет



Петербургский институт ядерной физики

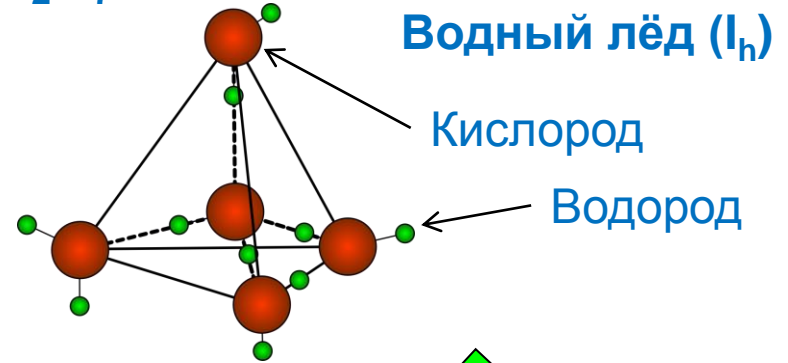
# Спиновый лёд

Первые представители:  $\text{Ho}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ ,  $\text{Dy}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$



Структура пирохлора

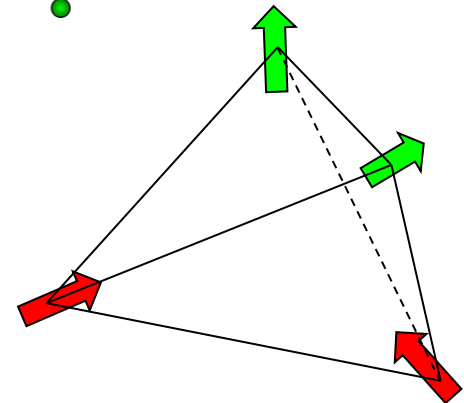
Вершины тетраэдров –  
редкоземельные ионы с  
**ИЗИНГОВЫМИ** магнитными  
моментами



$$\oint H dS = 0$$



4 магнитных подсистемы  
вдоль осей типа  $\langle 111 \rangle$

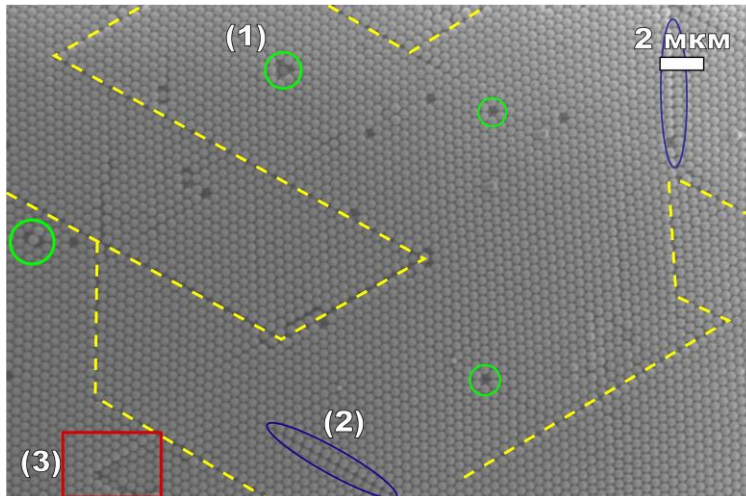


**ПРАВИЛО ЛЬДА**

Распределение спинов в каждом тетраэдре: 2-in-2-out

# Опалоподобные структуры

## I. Электродепозиция полистирольных сфер Опалоподобная структура (ОПС)

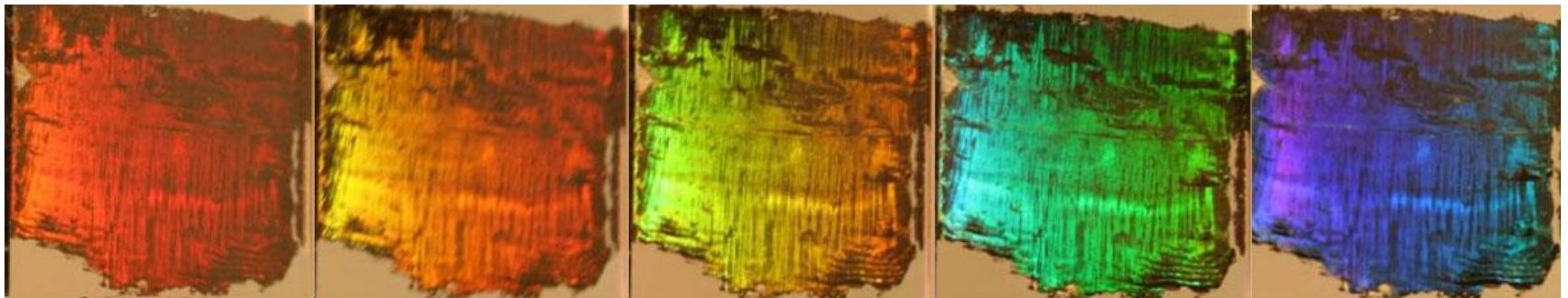
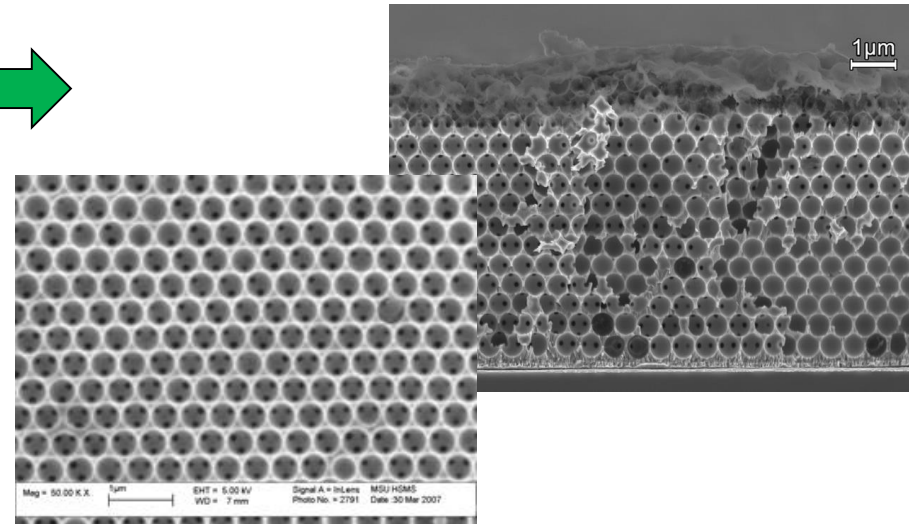


- (1) Точечные дефекты
- (2) Линейные дефекты
- (3) Планарный дефект

## II. Электрохимическая депозиция металла в пустоты опала

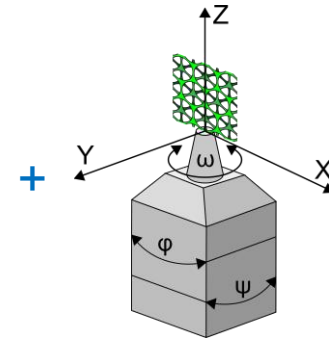
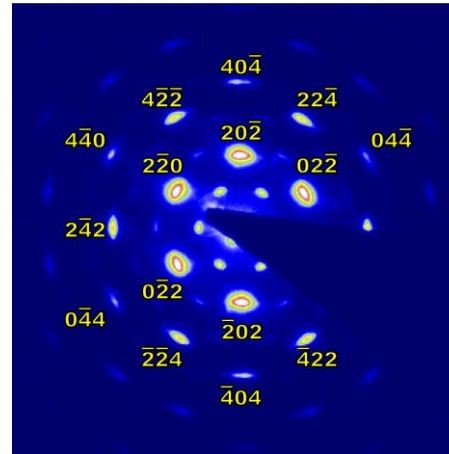
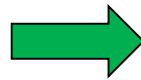
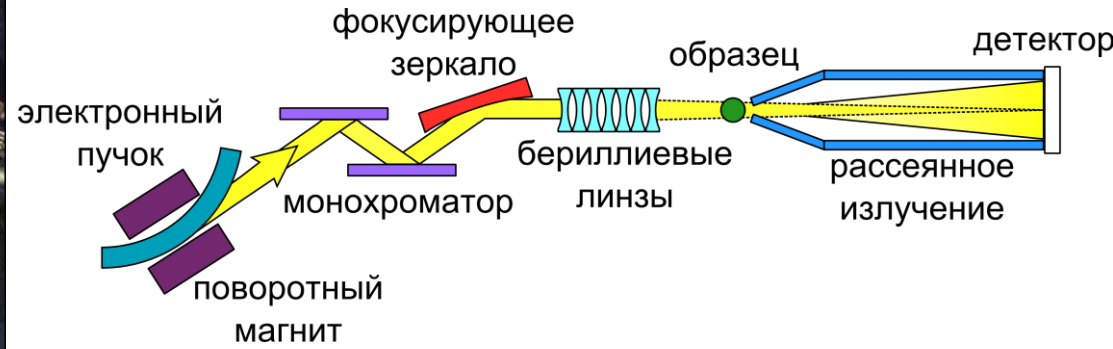
+

## III. Травление сфер в толуоле Инвертированная опалоподобная структура (ИОПС)



Никелевый опалоподобный кристалл в белом свете под разными углами

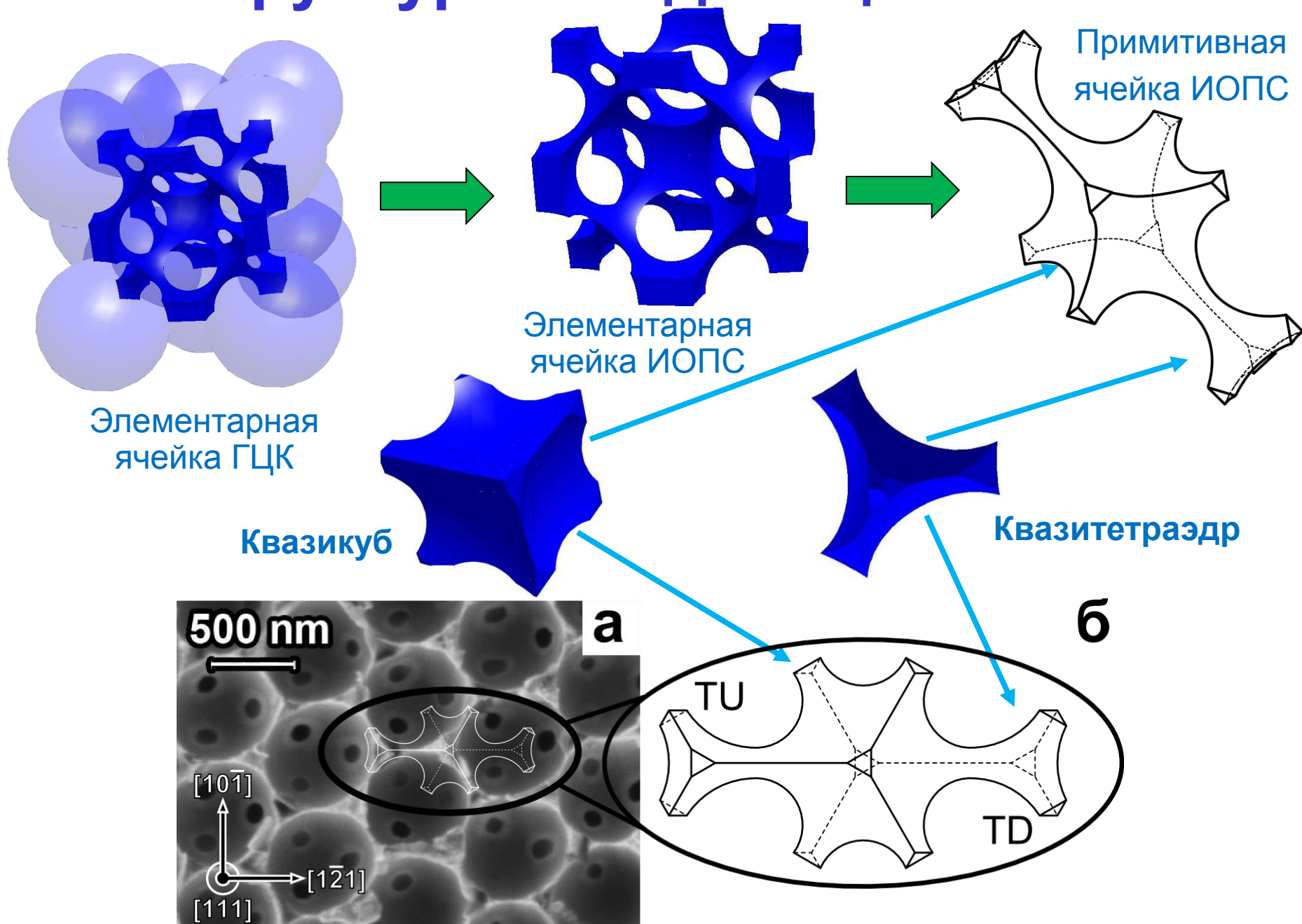
# Малоугловая дифракция СИ



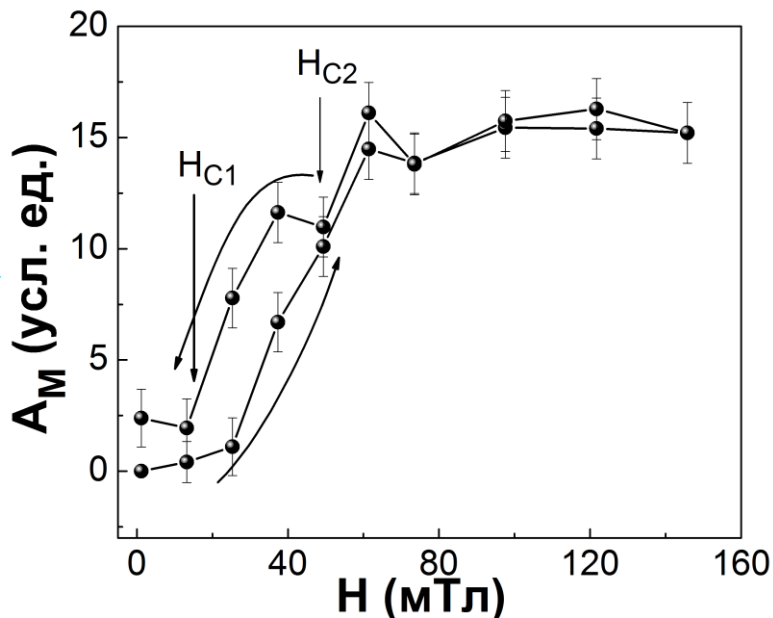
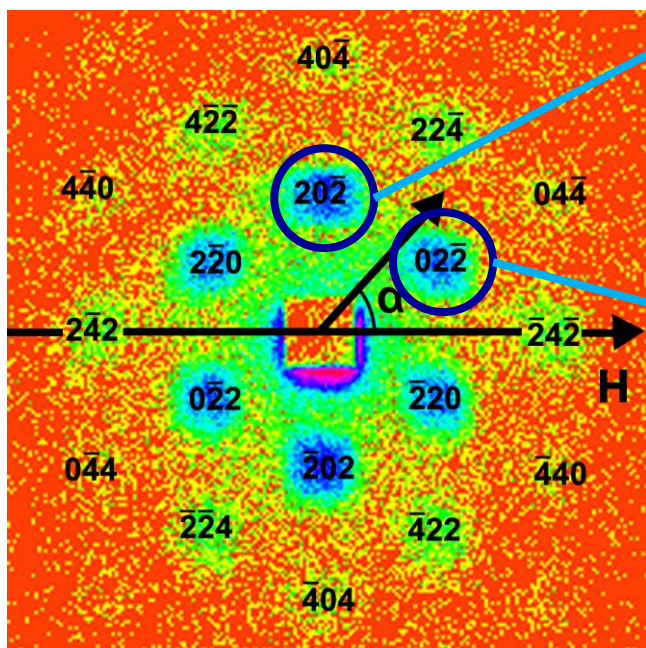
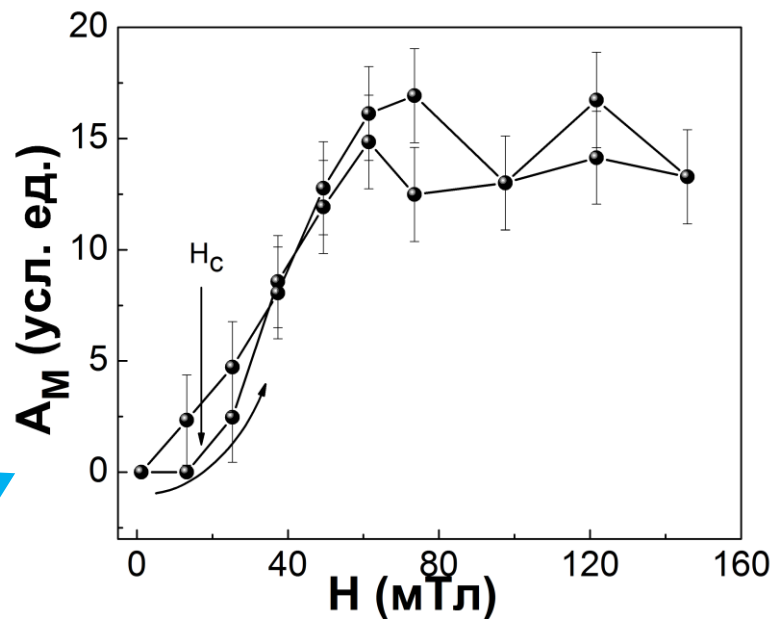
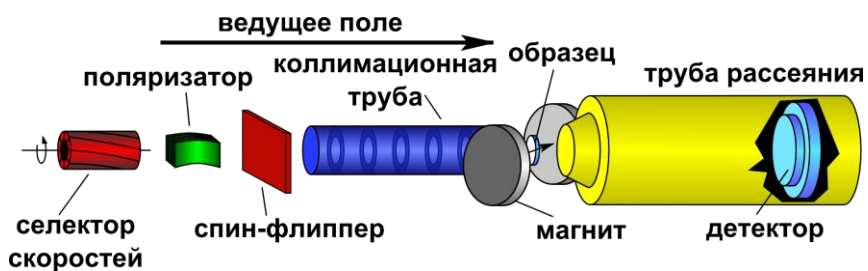
Двойникованная гранцентрированная кубическая (ГЦК) структура  
 $a = 760 \text{ нм}$



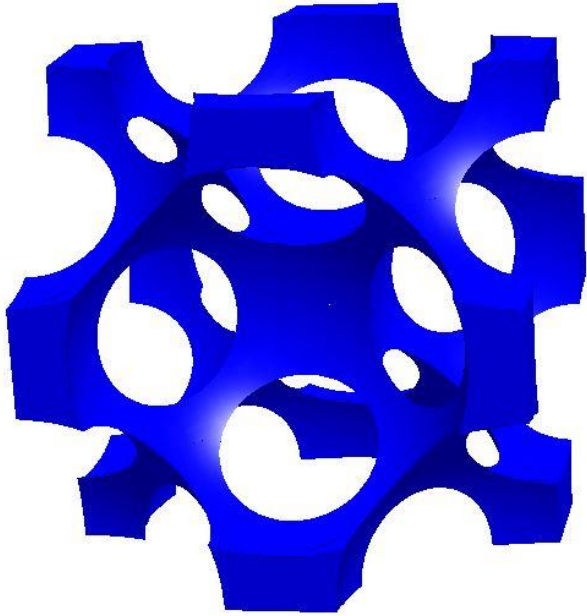
# Структурные единицы ИОПС



# Малоугловая дифракция нейтронов



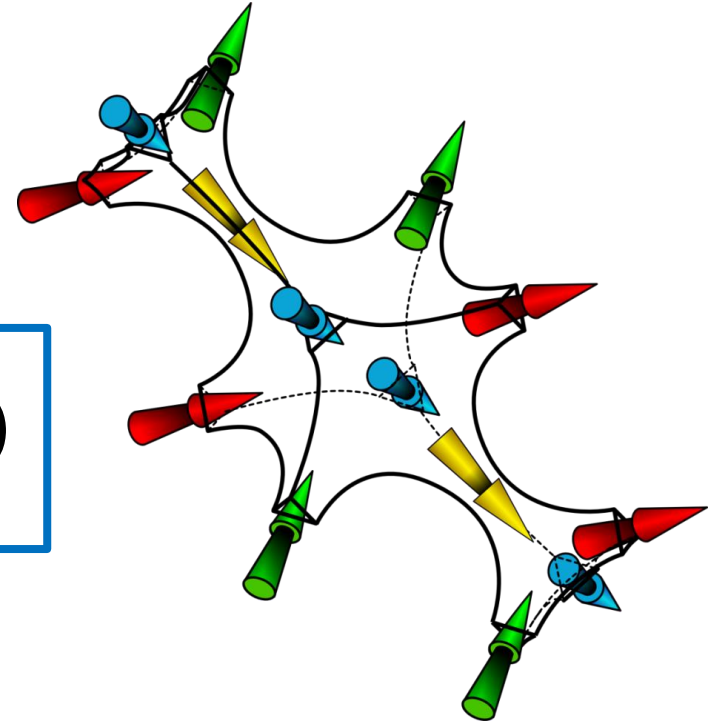
# Наноаналог спинового льда



ГЦК структура

Перемычки:  
«ИЗИНГОВЫЕ» намагниченности

$$\oint H dS = 0$$



4 магнитных подсистемы  
вдоль осей типа <111>

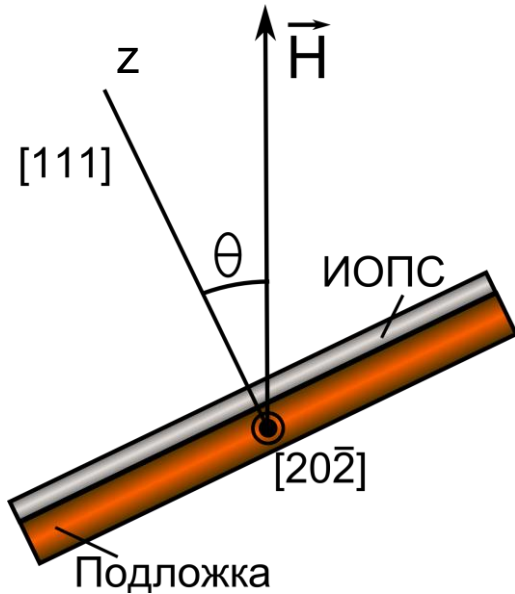
Количество векторов локальной намагниченности входящих в каждый квазикуб и квазитетраэдр должно быть равно количеству выходящих векторов: N-in-N-out

# Намагничивание ИОПС

- Вектора намагниченности выстраиваются так, чтобы минимизировать энергию взаимодействия с **магнитным полем**
- **Правило льда** определяет взаимную ориентацию четырёх векторов в каждом тетраэдре
- Намагничивание происходит через попарную переориентацию векторов локальной намагниченности, скачкообразно – существуют **критические поля**



# СКВИД-магнитометрия



Температура:  $T = 300 \text{ К}$

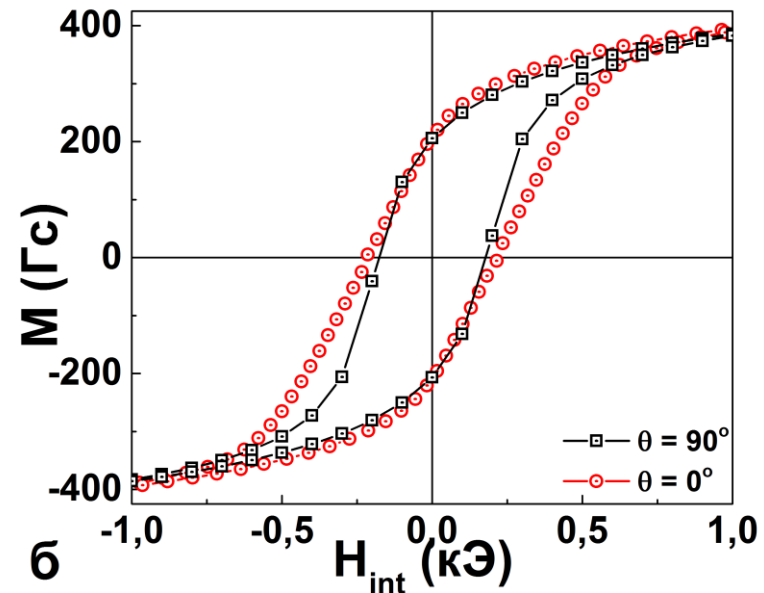
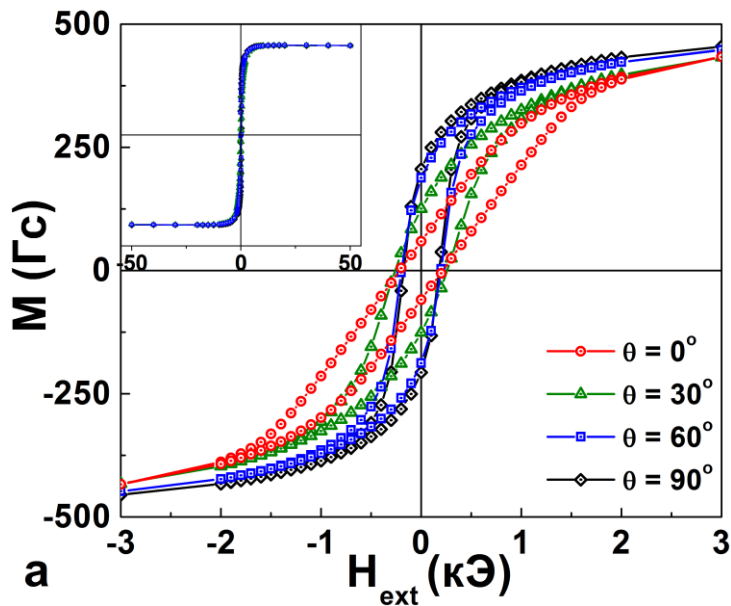
Внешнее магнитное поле:  $H = -50 \text{ кЭ} - 50 \text{ кЭ}$

Диапазон углов:  $\theta = 0^\circ - 90^\circ$

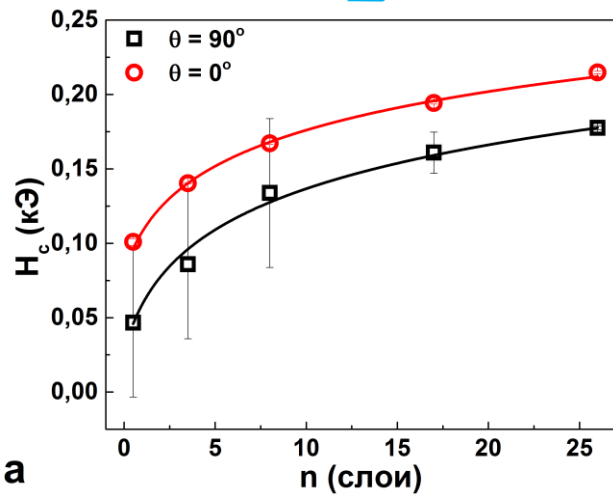
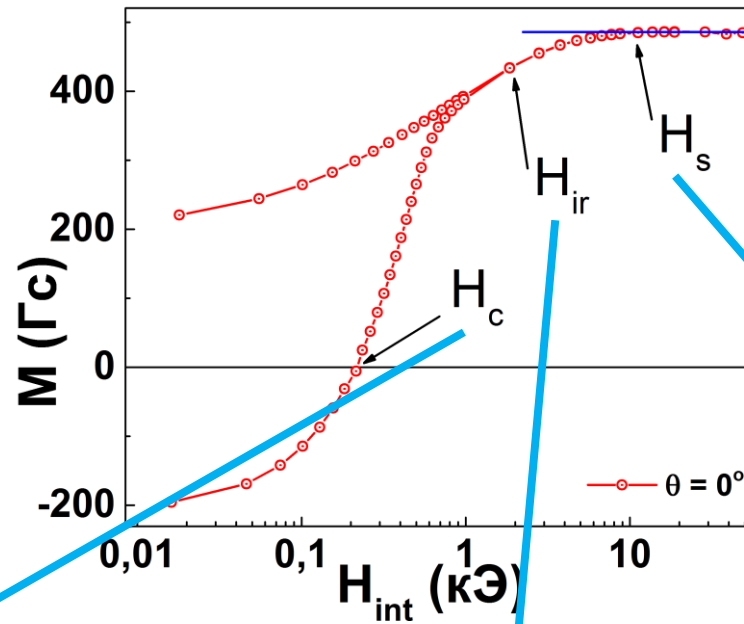
Пересчёт поля с учётом:

- Анизотропия формы плёнки
- Спекание полистерольных сфер

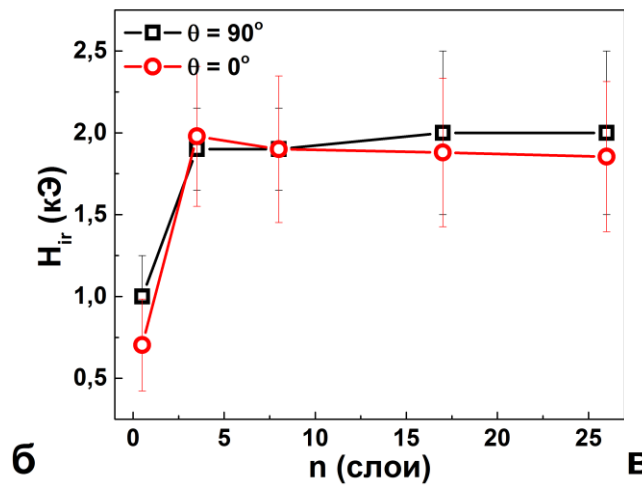
$$H_z^{\text{int}} = H_z^{\text{ext}} - 4\pi k N_{zz} M_z$$



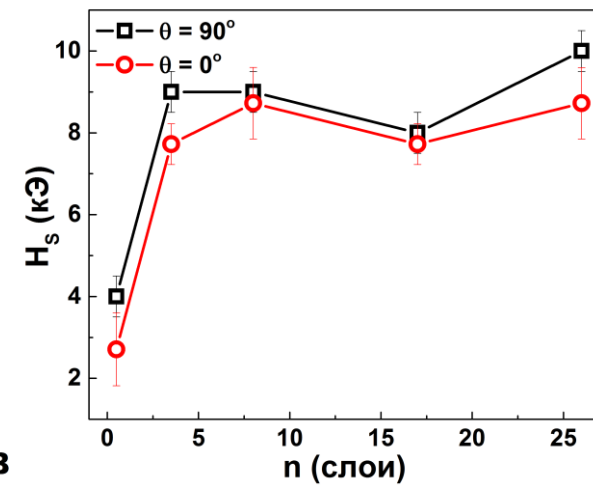
# Критические поля



Коэрцитивная сила

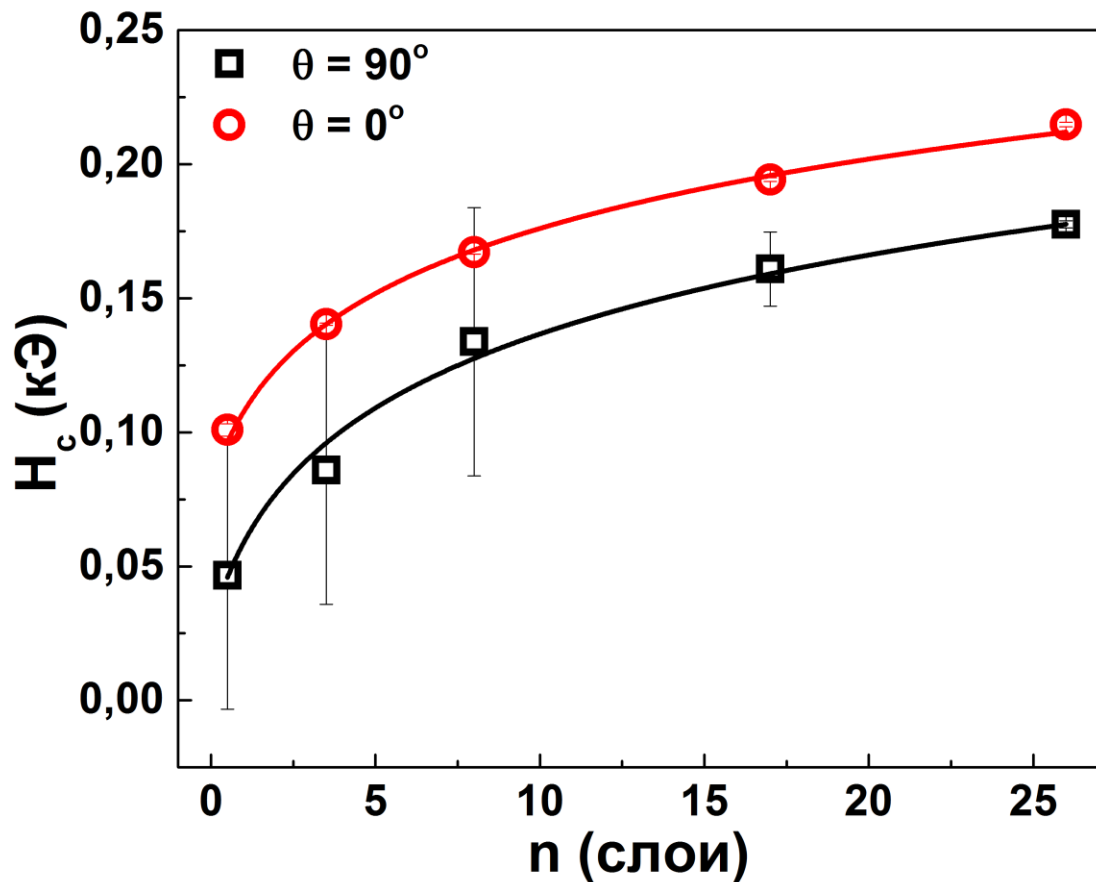


Поле необратимости



Поле насыщения

# Коэрцитивная сила

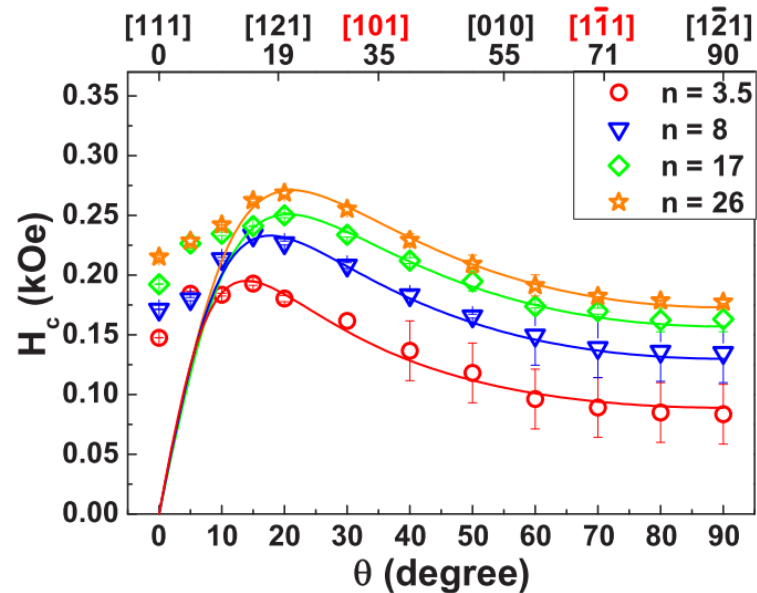


$$H_{c0} = 80 \pm 2 \text{ Э}$$

$$\alpha = 40 \pm 1 \text{ Э}$$

$$H_{c0} = 27 \pm 7 \text{ Э}$$

$$\alpha = 45 \pm 2 \text{ Э}$$



$$H_c = H_{c0} + \alpha \ln(n + 1)$$

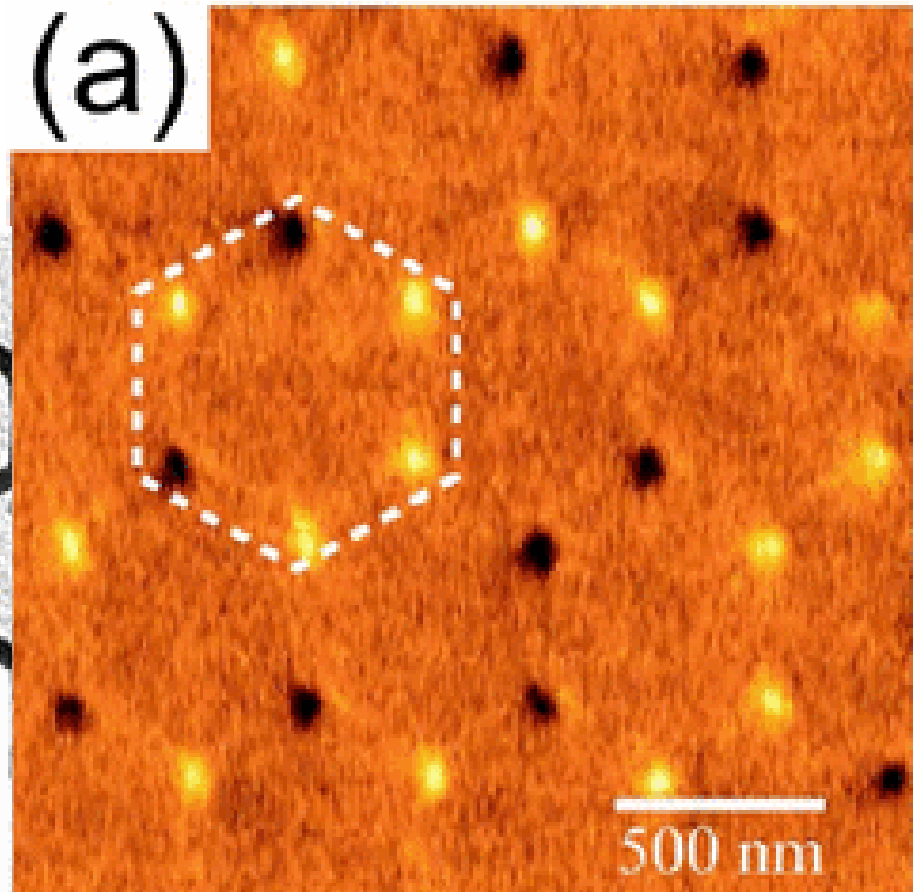
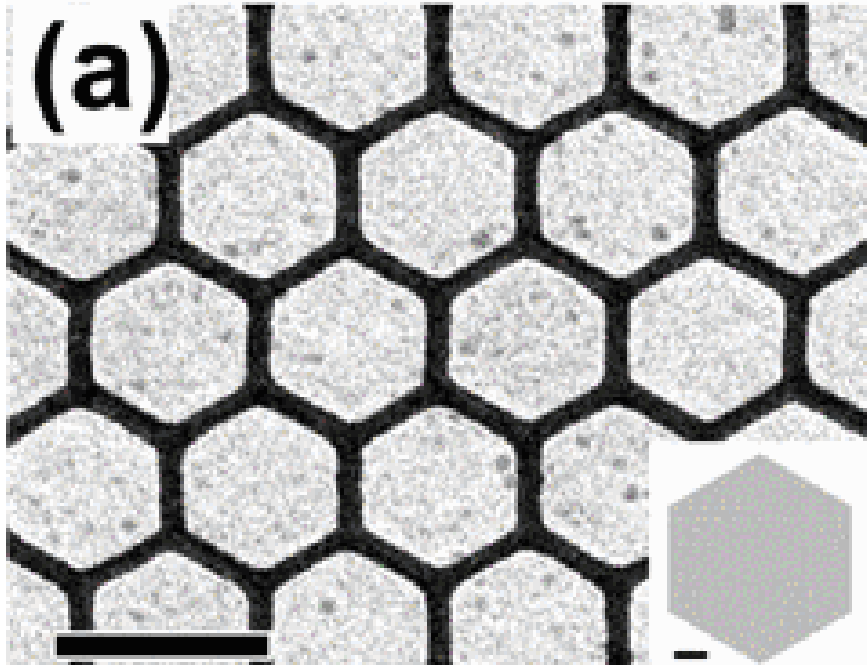
# Другие нанoаналоги

Намагниченность (пермаллой):  $M = 8.6 \times 10^5 \text{ Ам}^{-1}$

Длина связей:  $l = 500 \text{ нм}$

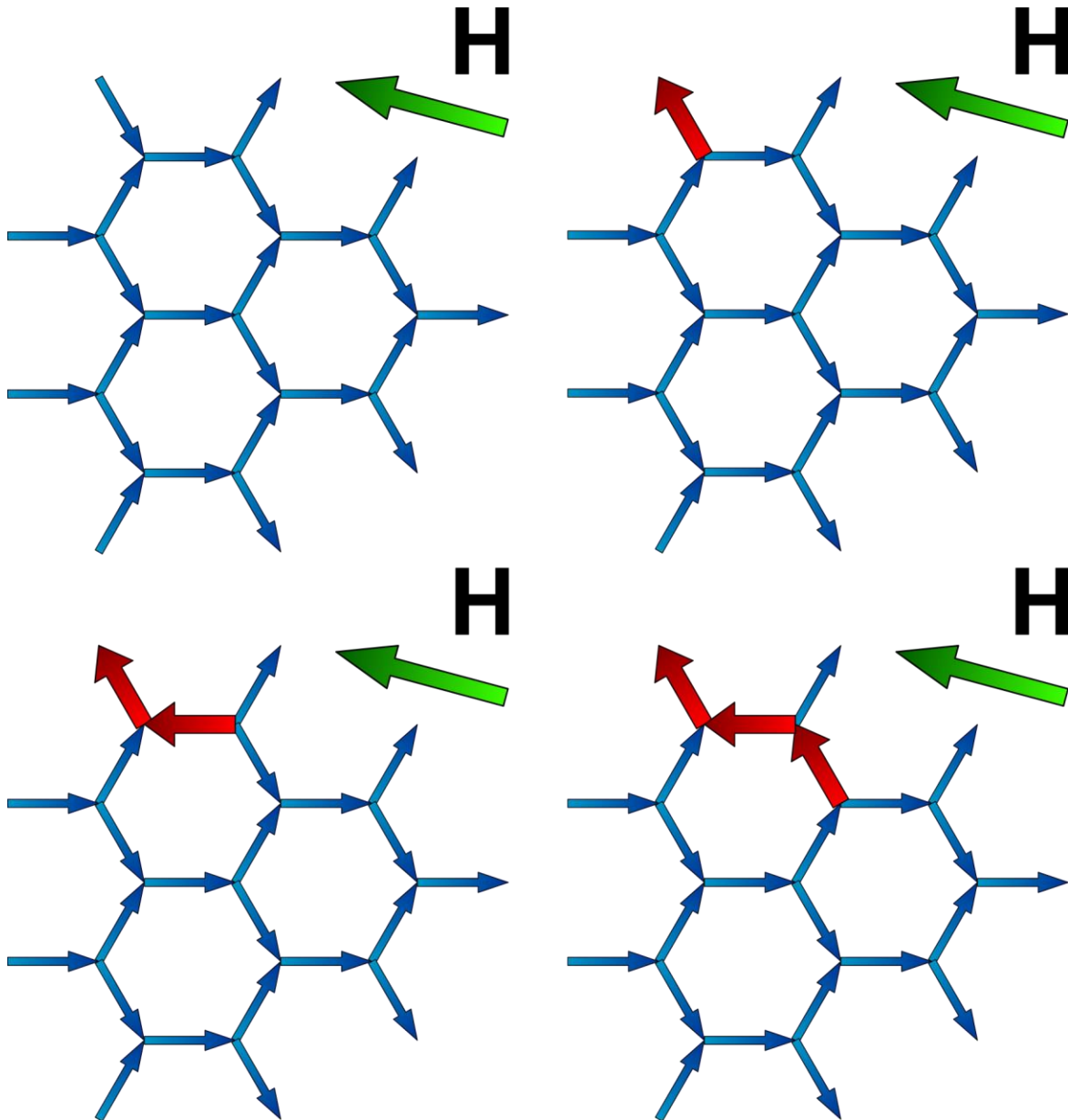
Ширина:  $w = 110 \text{ нм}$

Толщина:  $t = 23 \text{ нм}$





# Лавины (на самом деле, цепочки)



Число лавин в системе с линейным размером  $L$  (число связей):

$$N \sim \ln L$$

# Заключение

Коэрцитивная сила в трёхмерном нанoаналоге спинового льда возрастает с толщиной образца. При этом:

- **А по какому закону?**
- **Не логарифм ли это?**
- **Если логарифм, то почему?**
- **А не из-за лавин ли это?**
- **Если из-за лавин, то как это связано с их количеством?**

# Благодарности

Саполетова Н.А.  
Напольский К.С.  
Елисеев А.А.



Григорьева Н.А.  
Вальковский Г.А.  
Дубицкий И.С.  
Шишкин И.С.  
Григорьев С.В.



Menzel D.



Heinemann A.



Honnecker D.





**Спасибо за внимание!**