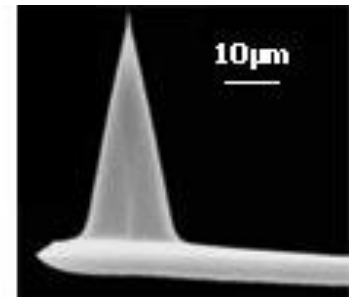
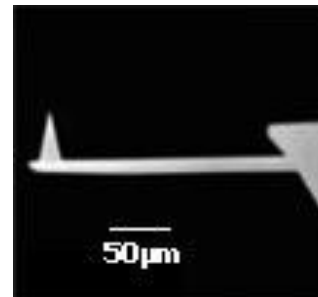
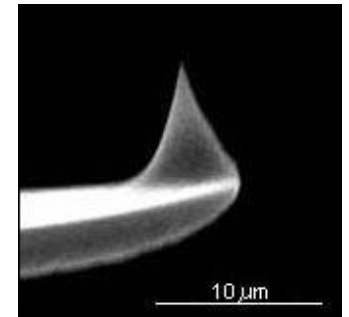
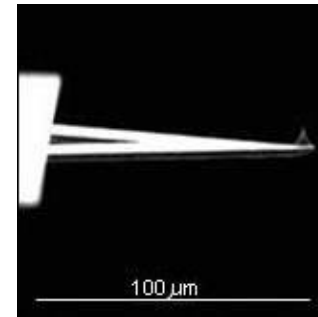
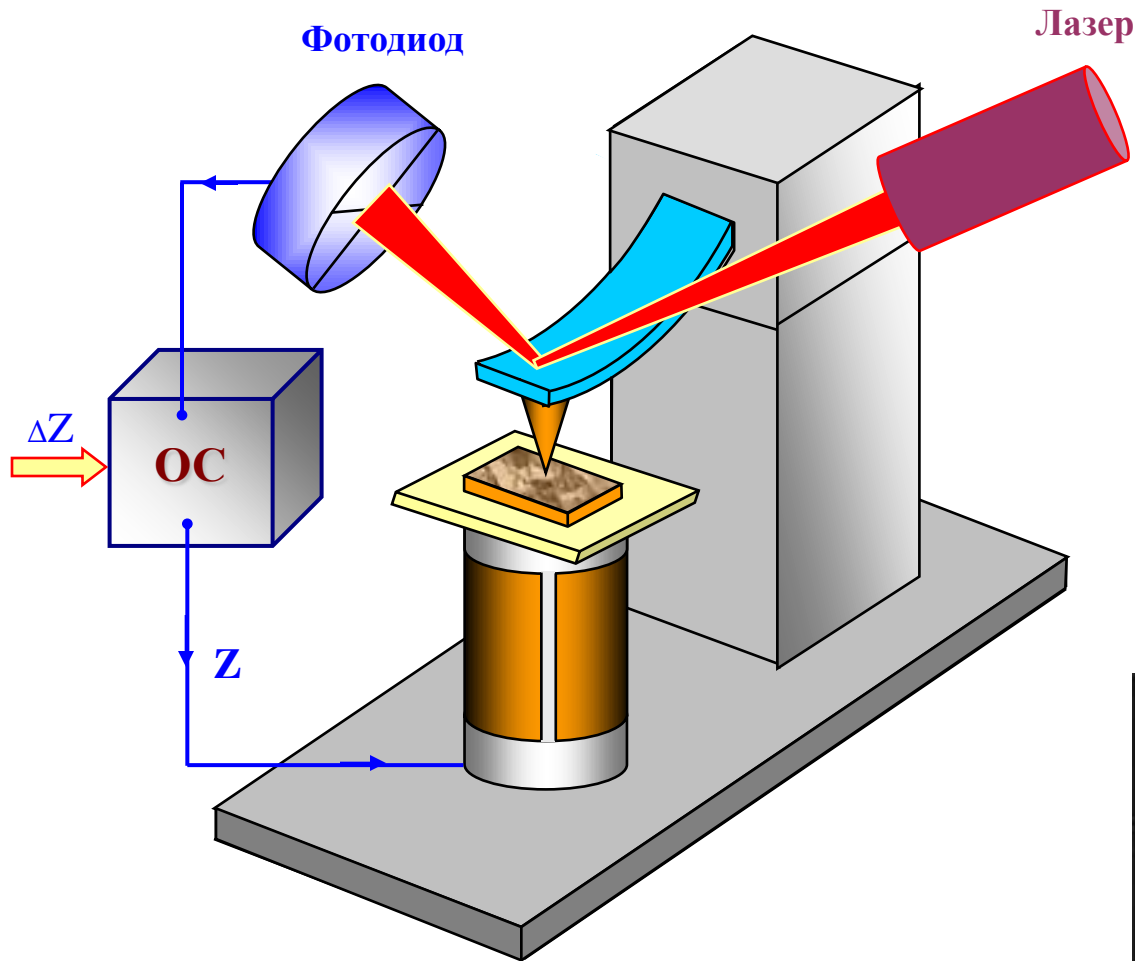


Магнитно-силовая микроскопия ферромагнитных наночастиц

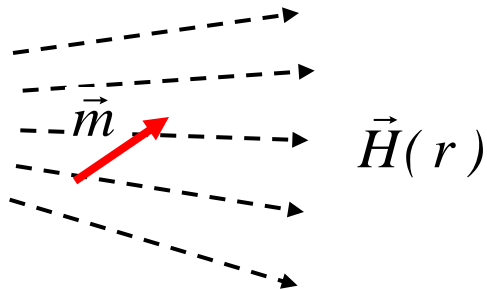
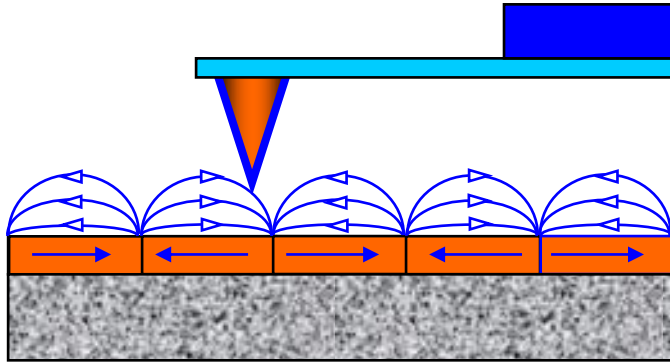
План доклада

- Принципы магнитно-силовой микроскопии (МСМ)
- МСМ вихревых состояний в наночастицах Co
- МСМ многослойных частиц на основе Co
- МСМ слабокоэрцитивных наночастиц

Магнитно - силовая микроскопия



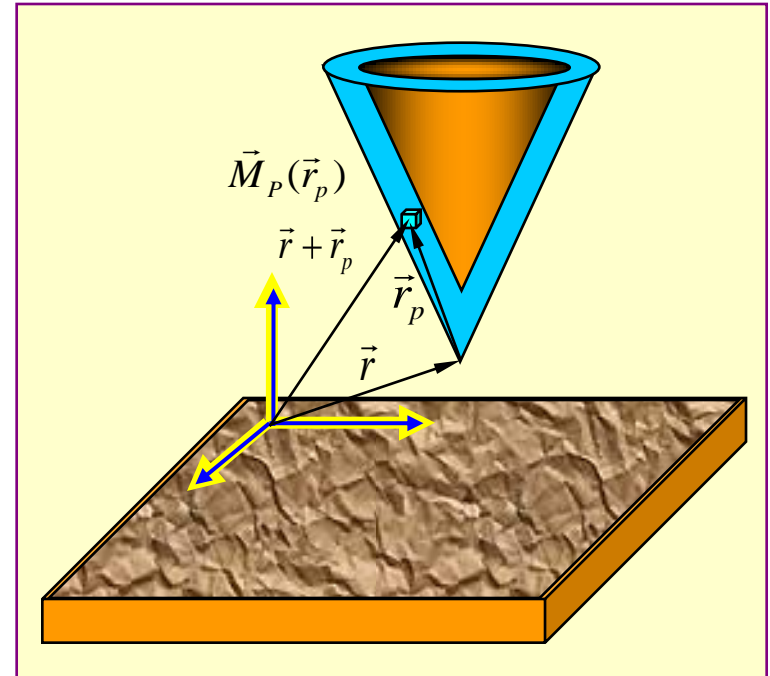
Магнитно - силовая микроскопия



$$w = -(\vec{m}\vec{H})$$

$$\vec{f} = -\text{grad}(w) = \vec{\nabla}(\vec{m}\vec{H})$$

$$\vec{N} = [\vec{m}\vec{H}]$$



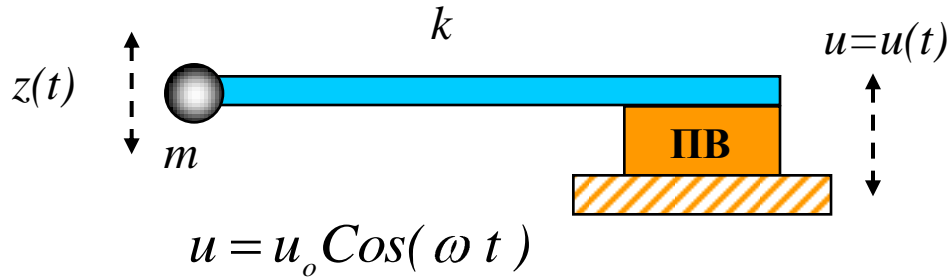
$$\vec{M}_p(\vec{r}_p)dV_p$$

$$E = - \int_{V_p} \vec{M}_p(\vec{r}_p) \vec{H}_s(\vec{r} + \vec{r}_p) dV_p$$

$$\vec{F} = -\vec{\nabla}E = \int_{V_p} \vec{\nabla} (\vec{M}_p(\vec{r}_p) \vec{H}_s(\vec{r} + \vec{r}_p)) dV_p$$

$$F_z = \int_{V_p} \left(M_{px} \frac{\partial H_{sz}}{\partial x} + M_{py} \frac{\partial H_{sz}}{\partial y} + M_{pz} \frac{\partial H_{sz}}{\partial z} \right) dV_p$$

Магнитно - силовая микроскопия

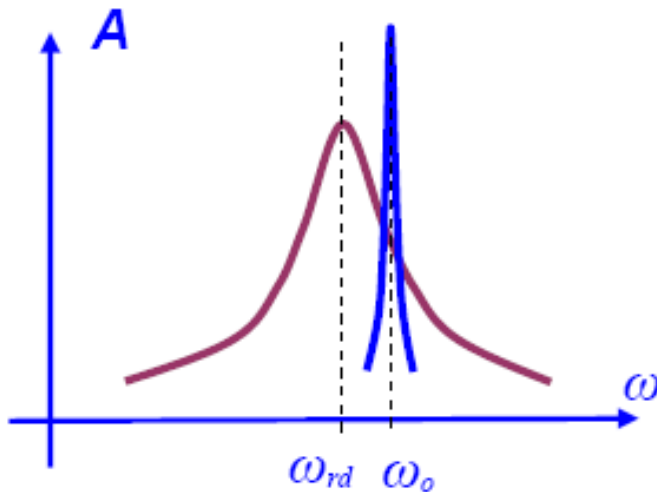


$$m\ddot{z} = -k(z - u) - \gamma\dot{z} + F_0$$

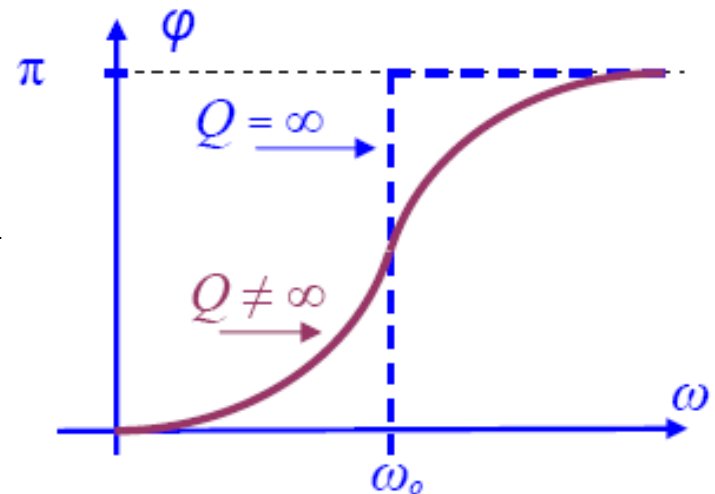
$$\ddot{z} + \frac{\omega_0}{Q} \dot{z} + \omega_0^2 z = \omega_0^2 u_0 \text{Cos}(\omega t)$$

$$A(\omega) = \frac{u_0 \omega_0^2}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + \frac{\omega^2 \omega_0^2}{Q^2}}}$$

$$\varphi(\omega) = \text{arctg} \left[\frac{\omega \omega_0}{Q(\omega_0^2 - \omega^2)} \right]$$



$$Q = \frac{\omega_0 m}{\gamma}$$



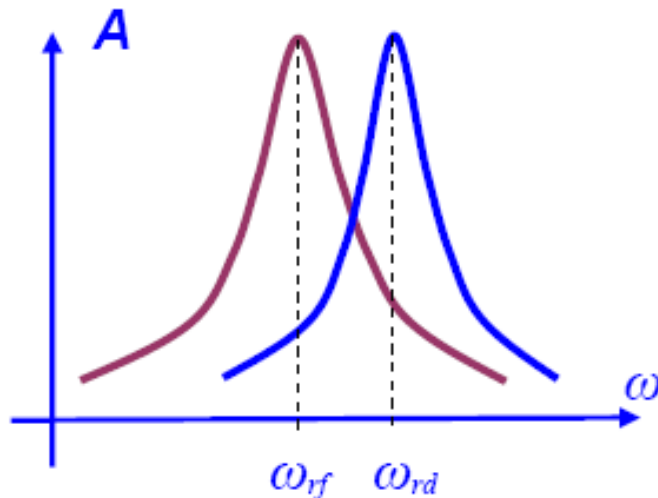
Магнитно - силовая микроскопия

$$F_{PS} = F_{PS0} + \frac{\partial F}{\partial z}(z_0) \cdot z(t)$$

$$m\ddot{z} = -k(z - u) - \gamma\dot{z} + F_0 + F_{PS0} + F'_z z$$

$$m\ddot{z} + \gamma\dot{z} + (k - F'_z) \cdot z = ku_0 \cos(\omega t)$$

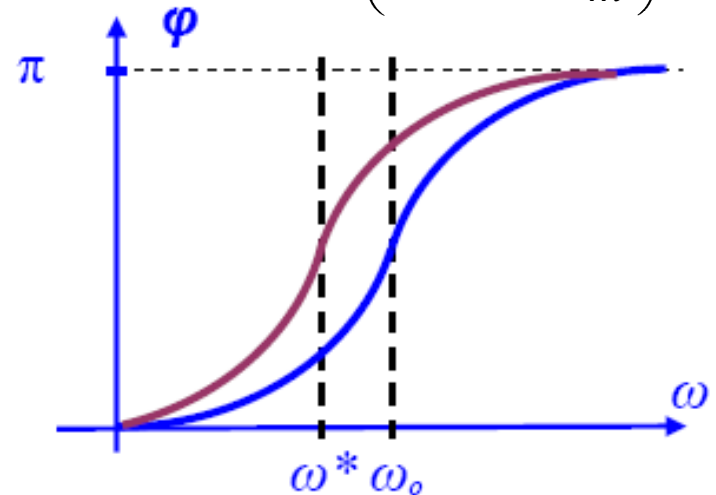
$$A(\omega) = \frac{u_0 \omega_0^2}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2 - \frac{F'_z}{m})^2 + \frac{\omega^2 \omega_0^2}{Q^2}}}$$



$$\ddot{z} + \frac{\omega_0}{Q} \dot{z} + \left(\omega_0^2 - \frac{F'_z}{m} \right) \cdot z = \omega_0^2 u_0 \cos(\omega t)$$

$$\Delta\omega = \omega_{rd} - \omega_{rf} = \omega_{rd} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{F'_z}{m\omega_{rd}^2}} \right)$$

$$\varphi(\omega) = \arctg \frac{\omega \omega_0}{Q \left(\omega_0^2 - \omega^2 - \frac{F'_z}{m} \right)}$$

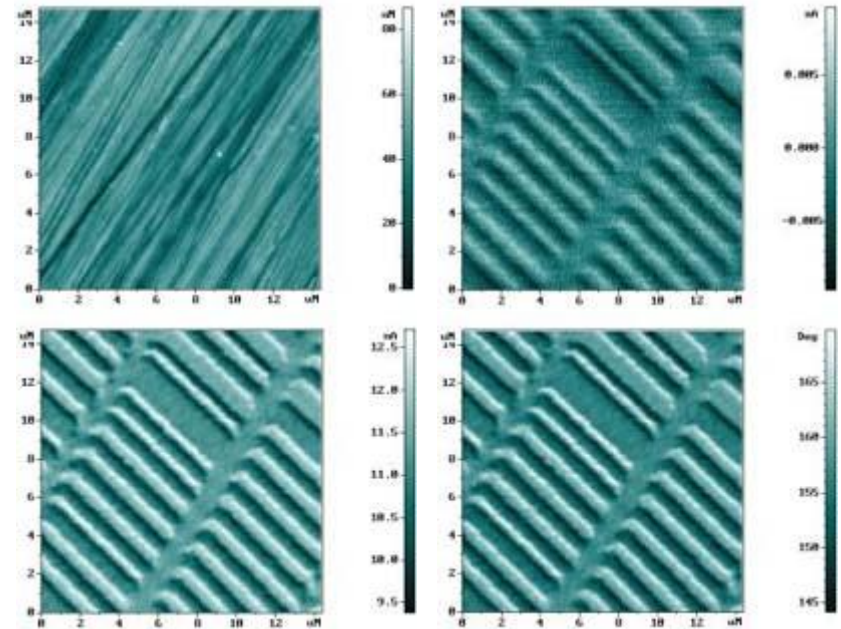


Магнитно - силовая микроскопия

$$\varphi(\omega_0) = \arctg \left[\frac{k}{QF'_z} \right] \approx \frac{\pi}{2} - \frac{QF'_z}{k}$$

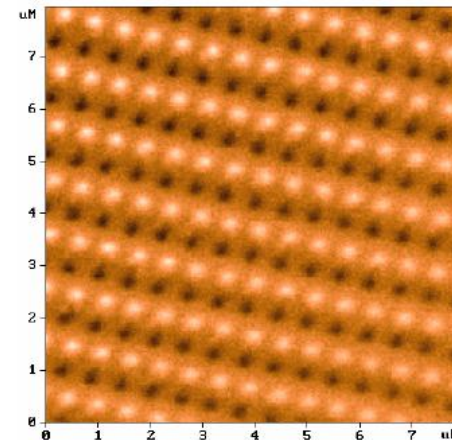
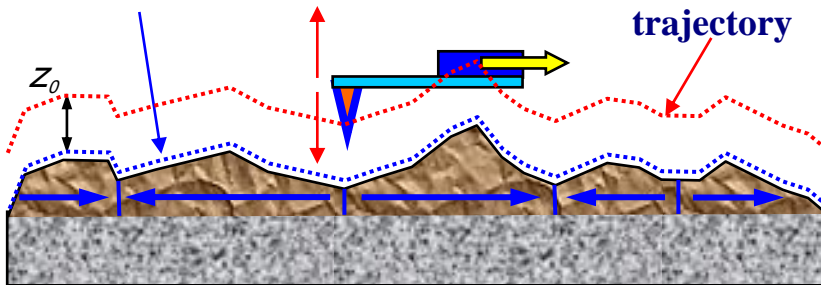
$$\Delta\varphi = \varphi(\omega_0) - \frac{\pi}{2} = -\frac{QF'_z}{k}$$

$$\Delta\varphi = -\frac{Q}{k} \frac{\partial F_z}{\partial z}$$

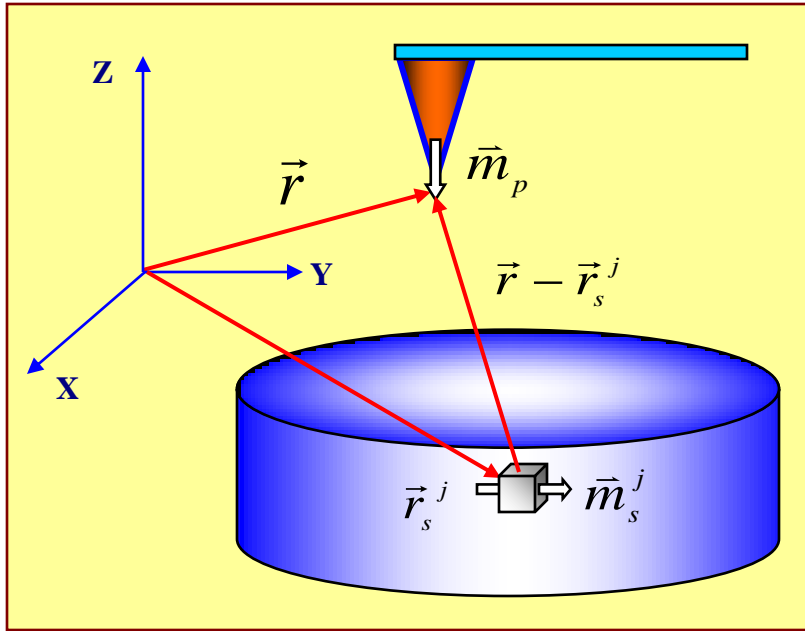


First pass trajectory

Second pass trajectory



Моделирование МСМ контраста



$$\Delta\varphi = -\frac{QF'_z}{k}$$

$$\frac{\partial}{\partial z} F_z(\vec{r}) = \sum_j ((\vec{m}_p \vec{\nabla})) \frac{\partial}{\partial z} H_z^j(\vec{r} - \vec{r}_s^j)$$

$$H_z^j(\vec{r} - \vec{r}_s^j) = \frac{3(z - z_s^j)(\vec{m}_s^j \cdot (\vec{r} - \vec{r}_s^j))}{|\vec{r} - \vec{r}_s^j|^5} - \frac{m_{sz}^j}{|\vec{r} - \vec{r}_s^j|^3}$$

$$\frac{d\vec{m}_s^j}{dt} = -\gamma [\vec{m}_s^j \times \vec{H}_{eff}^j] - \frac{\lambda}{|\vec{m}_s^j|^2} [\vec{m}_s^j \times [\vec{m}_s^j \times \vec{H}_{eff}^j]]$$

$$\vec{H}_{eff}^j = -\frac{1}{\mu_0} \frac{\partial E}{\partial \vec{m}_s^j}$$

Магнитно-силовая микроскопия



“Solver P7LS”



“Solver PRO”

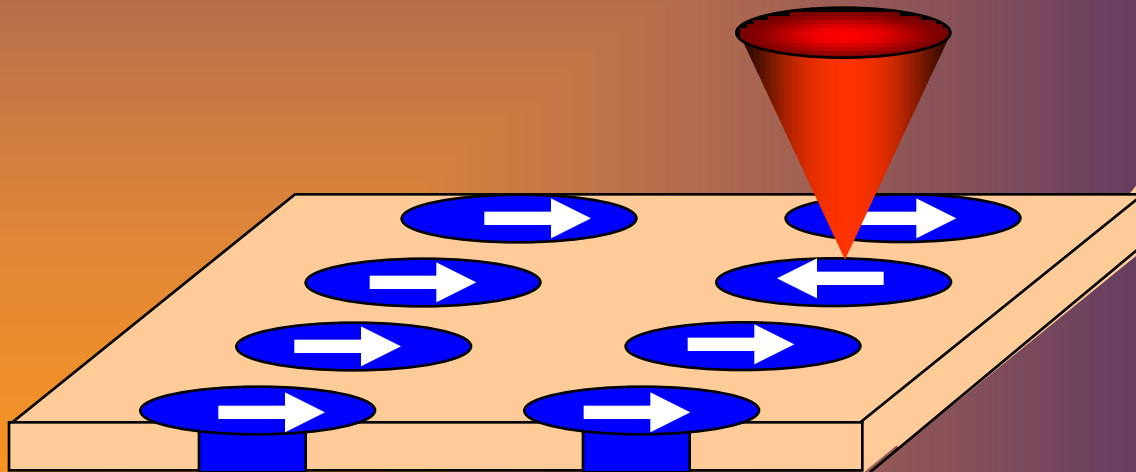


“Solver - HV”

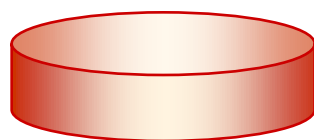
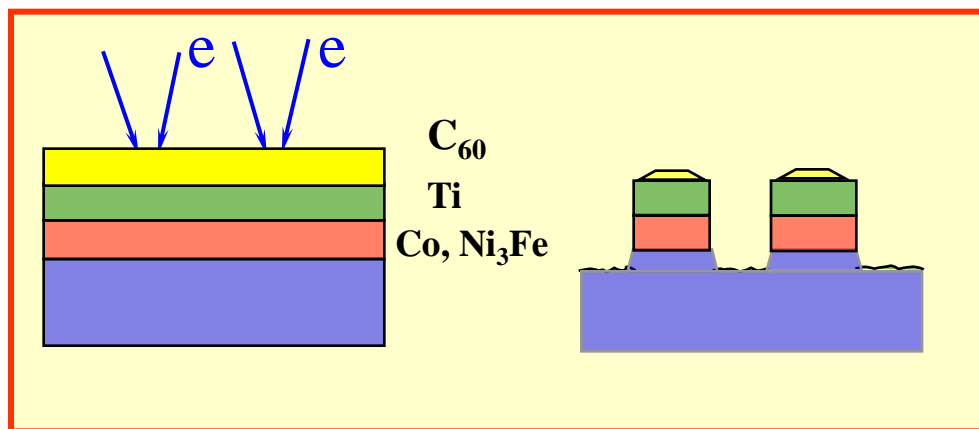
Исследование многовихревых состояний в ферромагнитных наночастицах

Введение

Массивы магнитных наночастиц как среда для записи информации и как источники сильно неоднородного магнитного поля



Массивы магнитных наночастиц



a, b, h

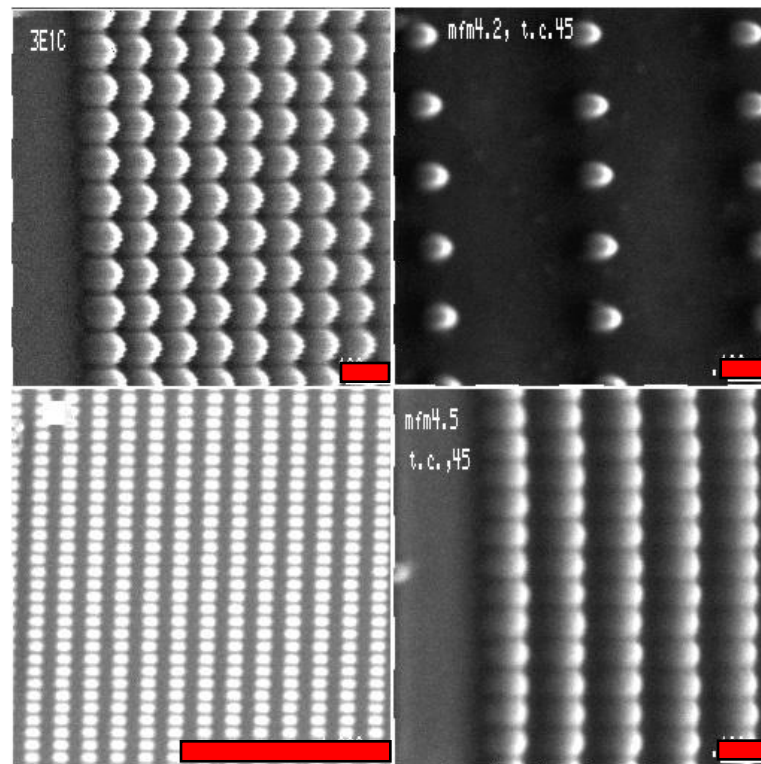
Film thickness:

C₆₀ ~ 20 - 100 нм Ti ~ 20 - 30 нм,

Co, Ni₃Fe ~ 5 - 100 нм

Латеральные размеры частиц:

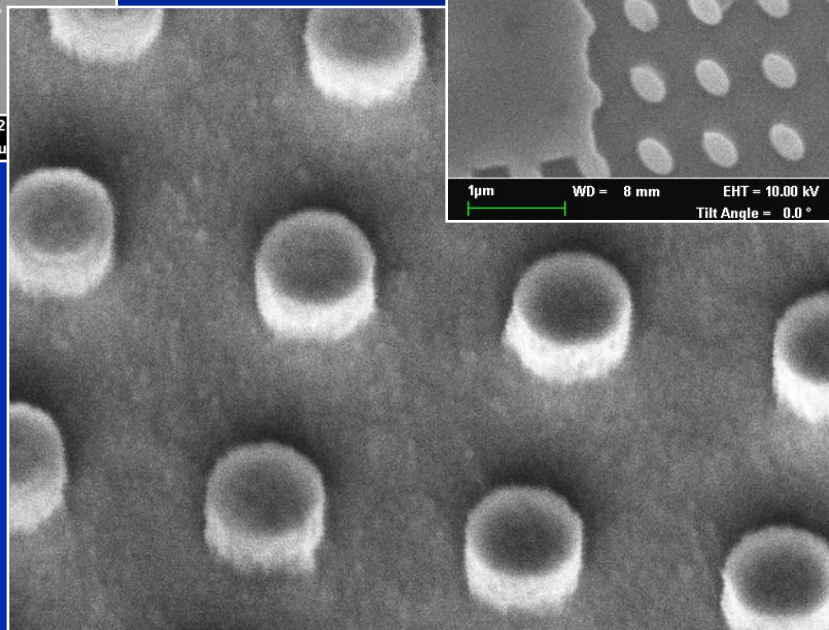
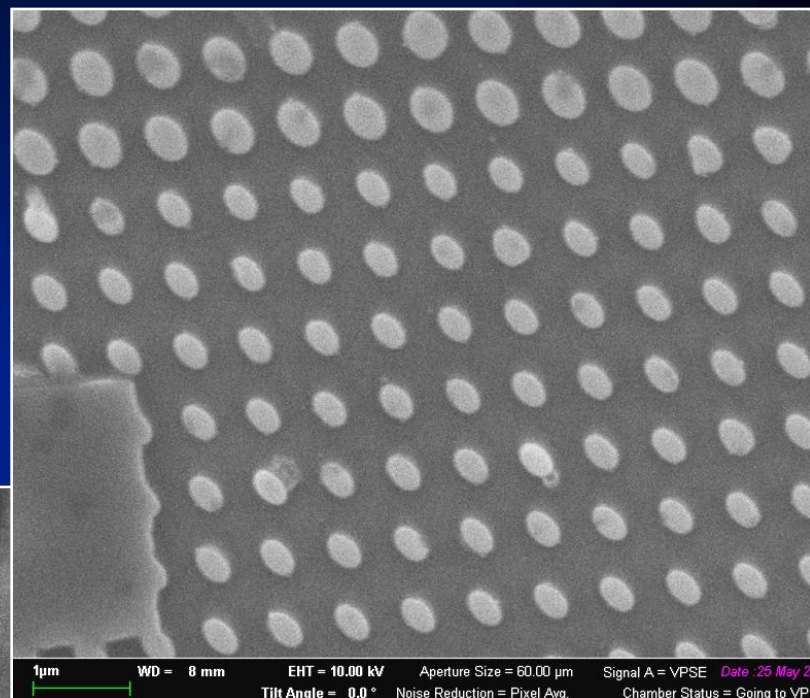
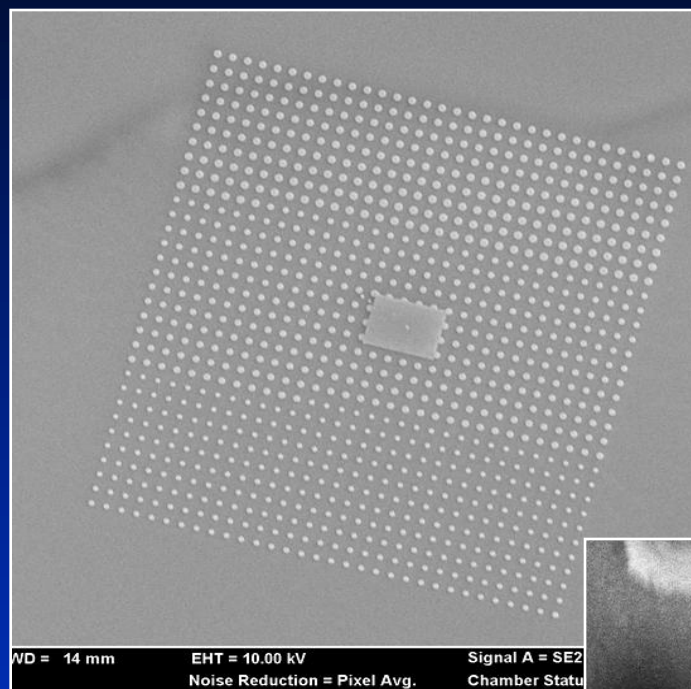
от 20 нм до 1 мкм



— - 0.1 мкм

— - 1 мкм

Электронная литография

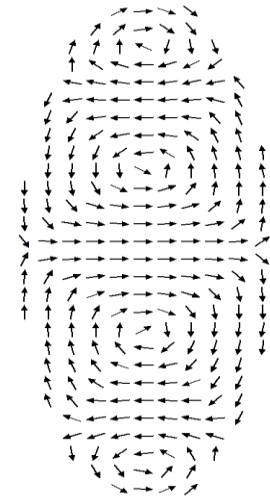
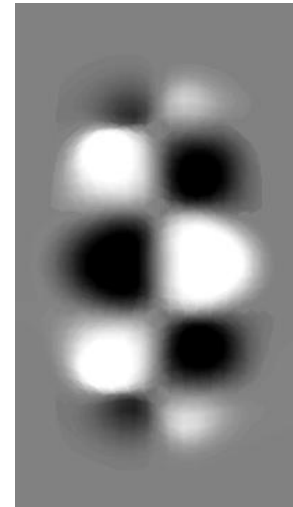
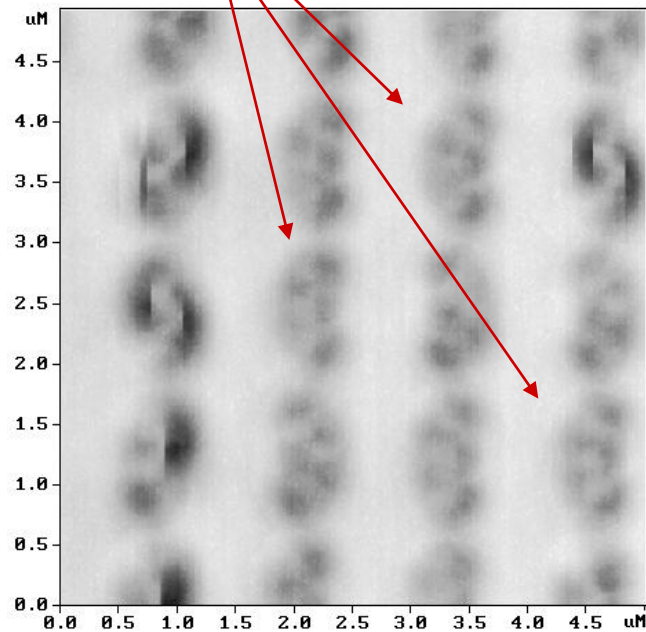


Латеральные размеры:

15 нм - 1 мкм

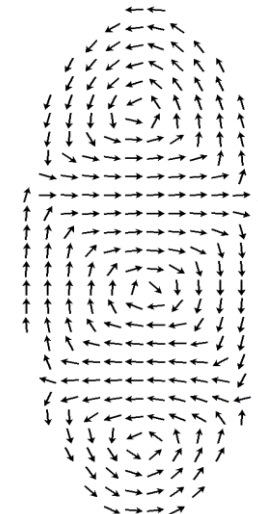
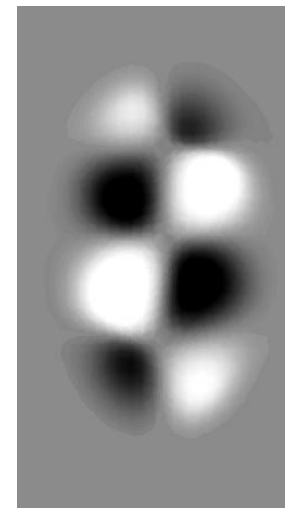
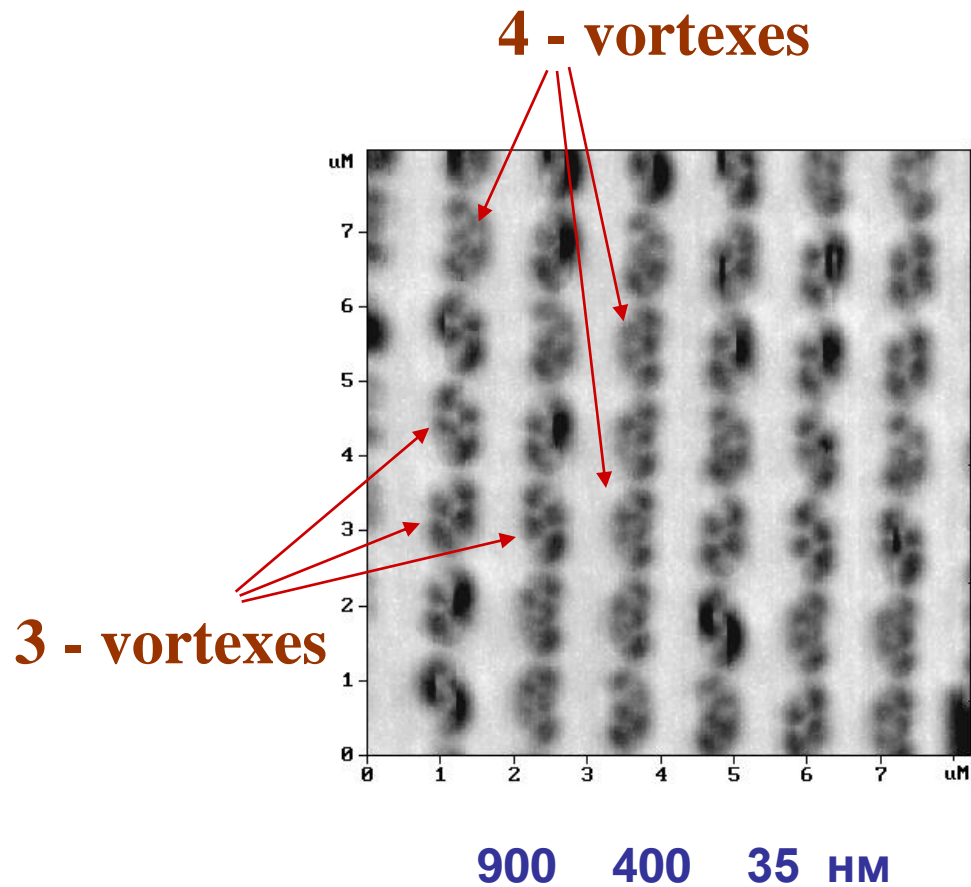
Четырехвихревые состояния в наночастицах Co

4 - vortexes

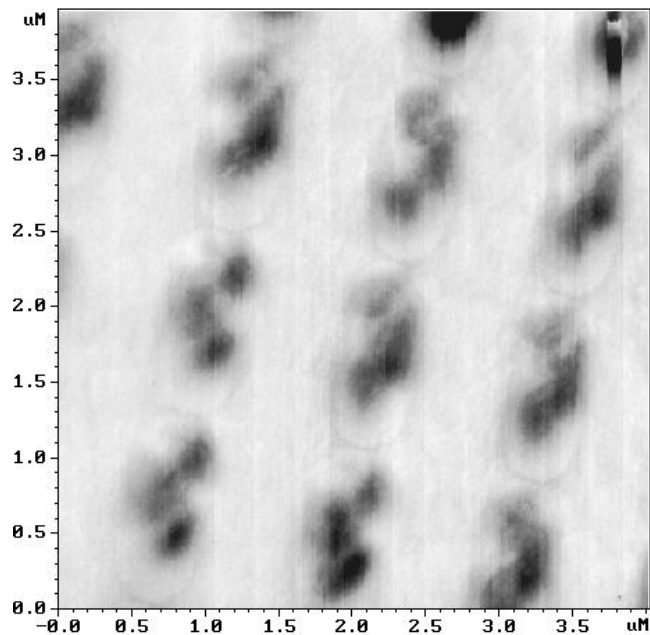


1000 550 35 nm

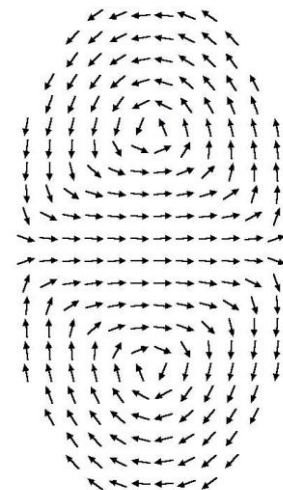
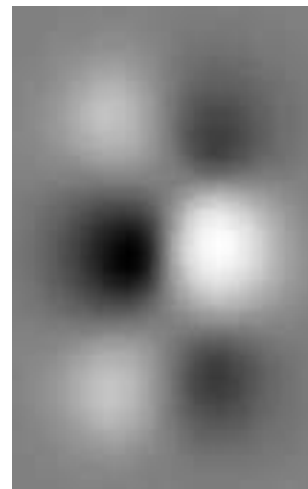
Трехвихревые состояния в наночастицах Co



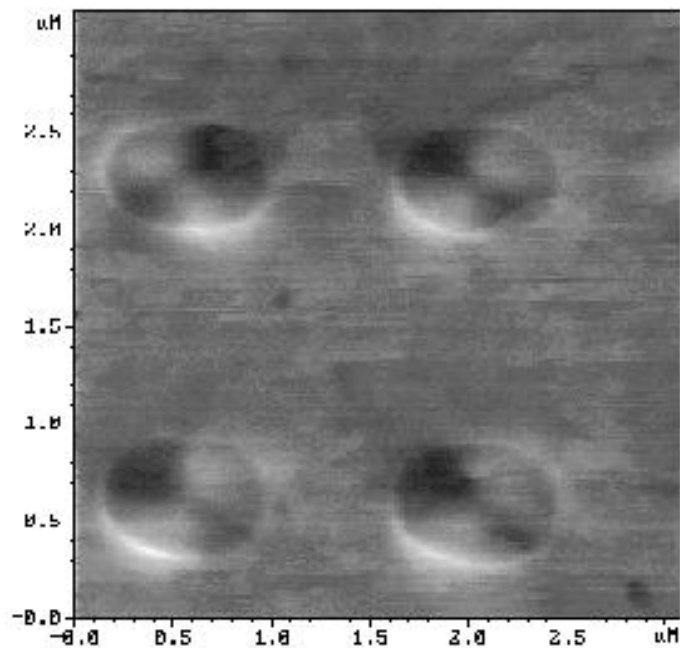
Двухвихревые состояния в наночастицах Co



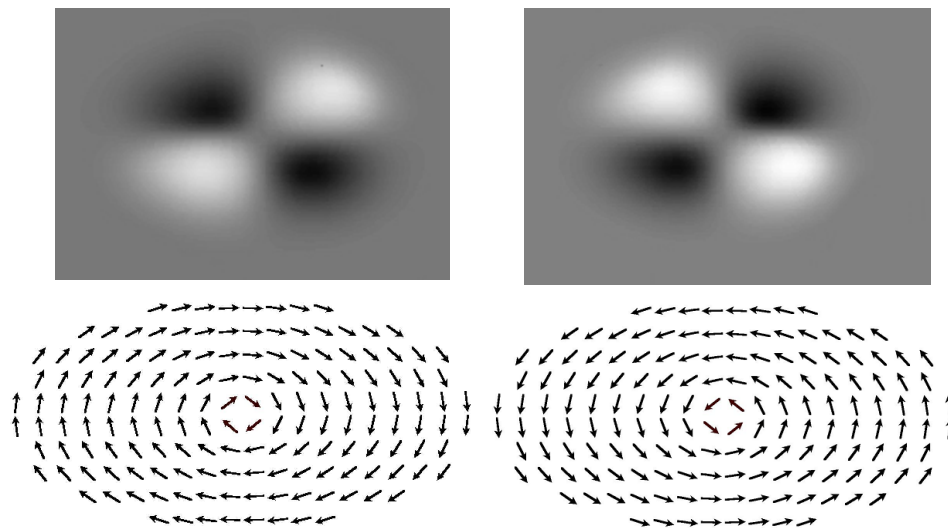
700 400 35 нм



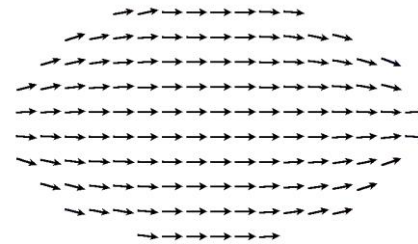
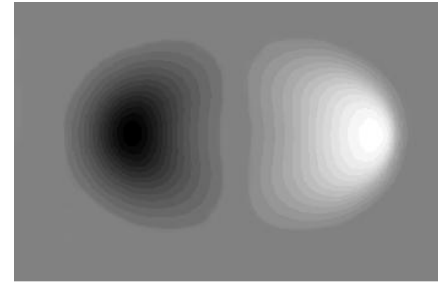
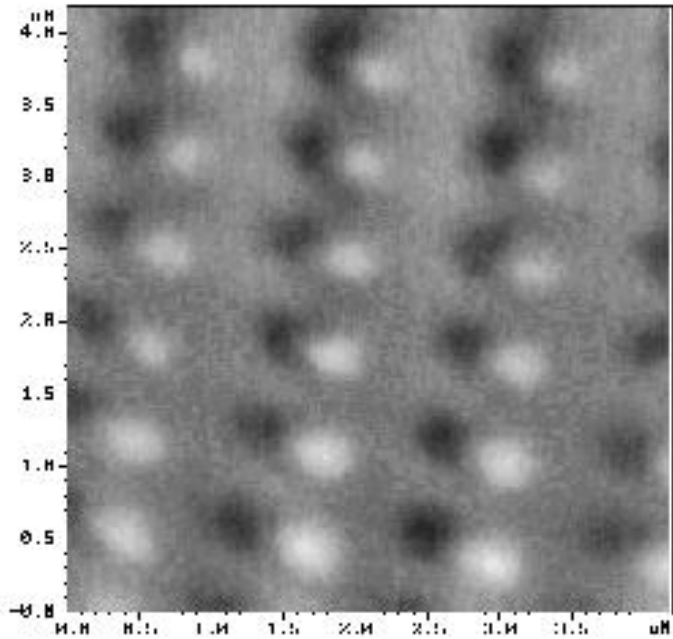
Одновихревые состояния наночастиц Co



600 400 30 nm



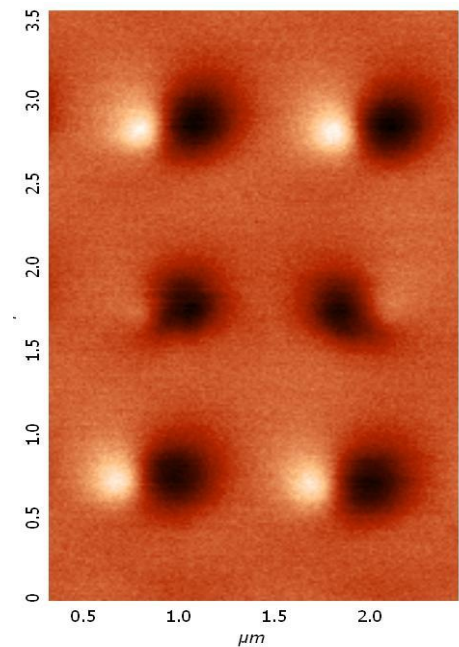
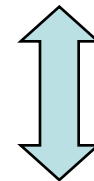
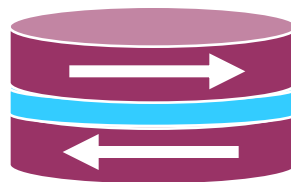
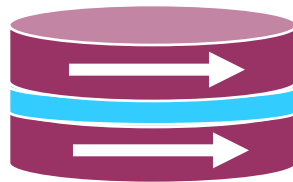
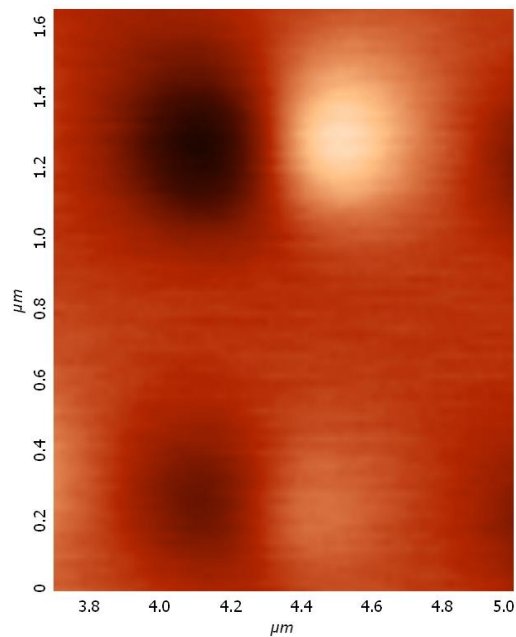
Состояния с однородной намагниченностью



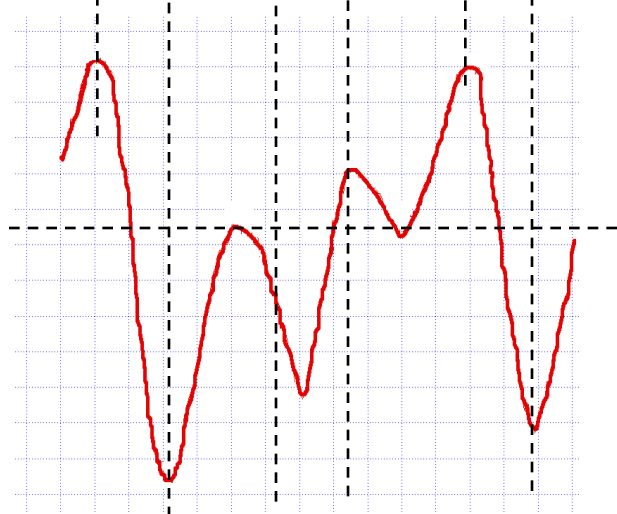
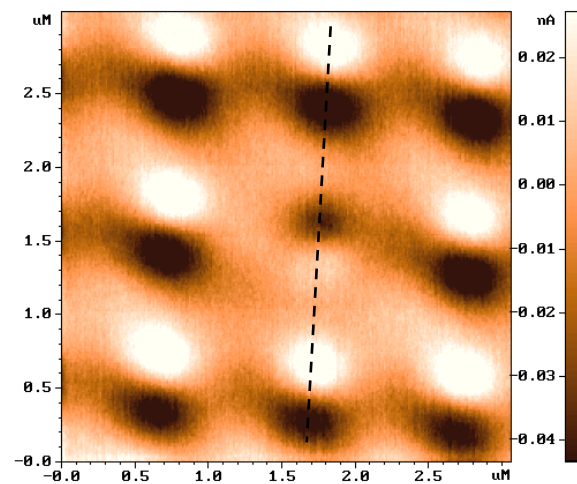
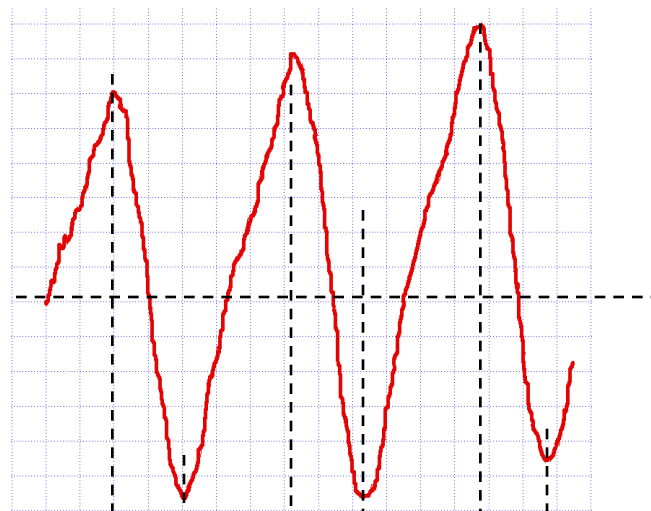
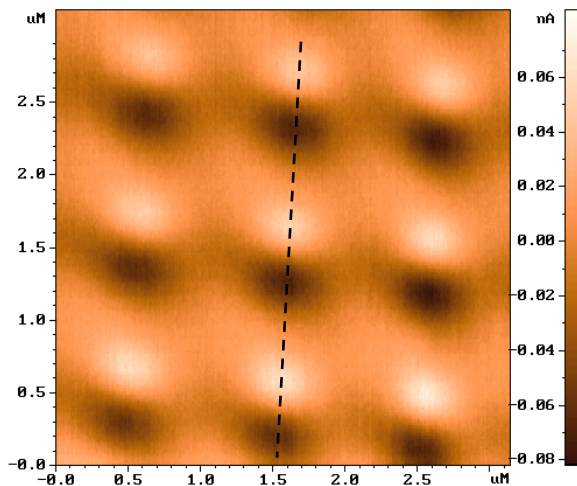
600 400 20 nm

**Магнитно - силовая
микроскопия
двухслойных частиц
на основе Co**

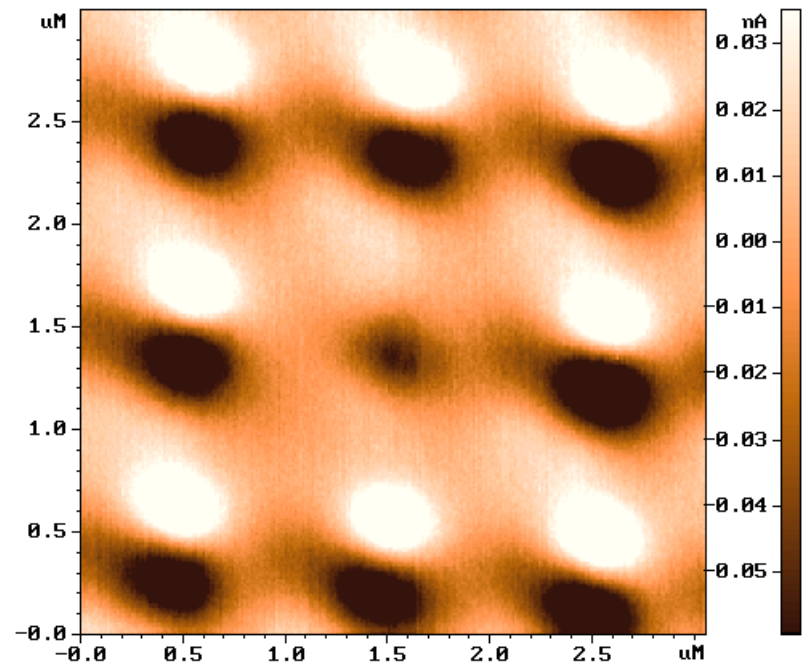
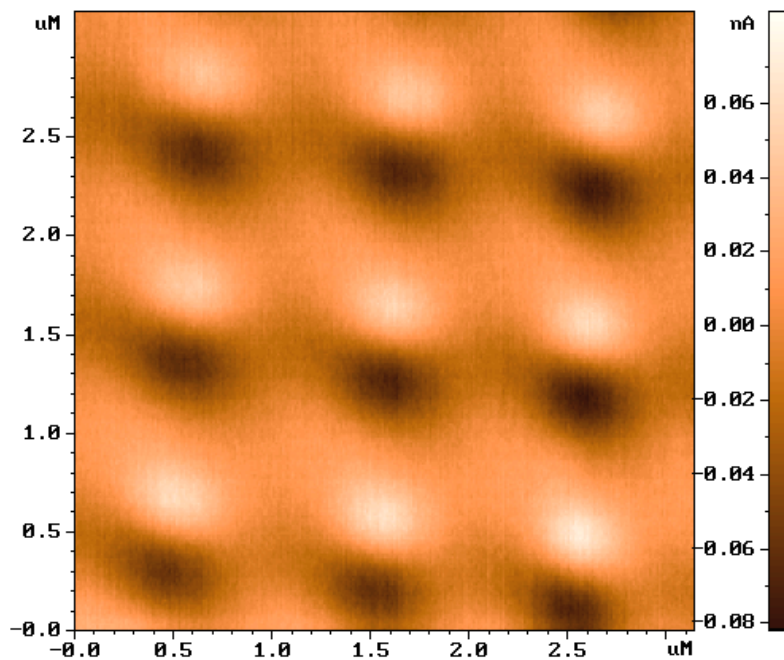
Двухслойные частицы Co



МСМ перемангичивание



Двухслойные частицы Co



μm

0

2

4

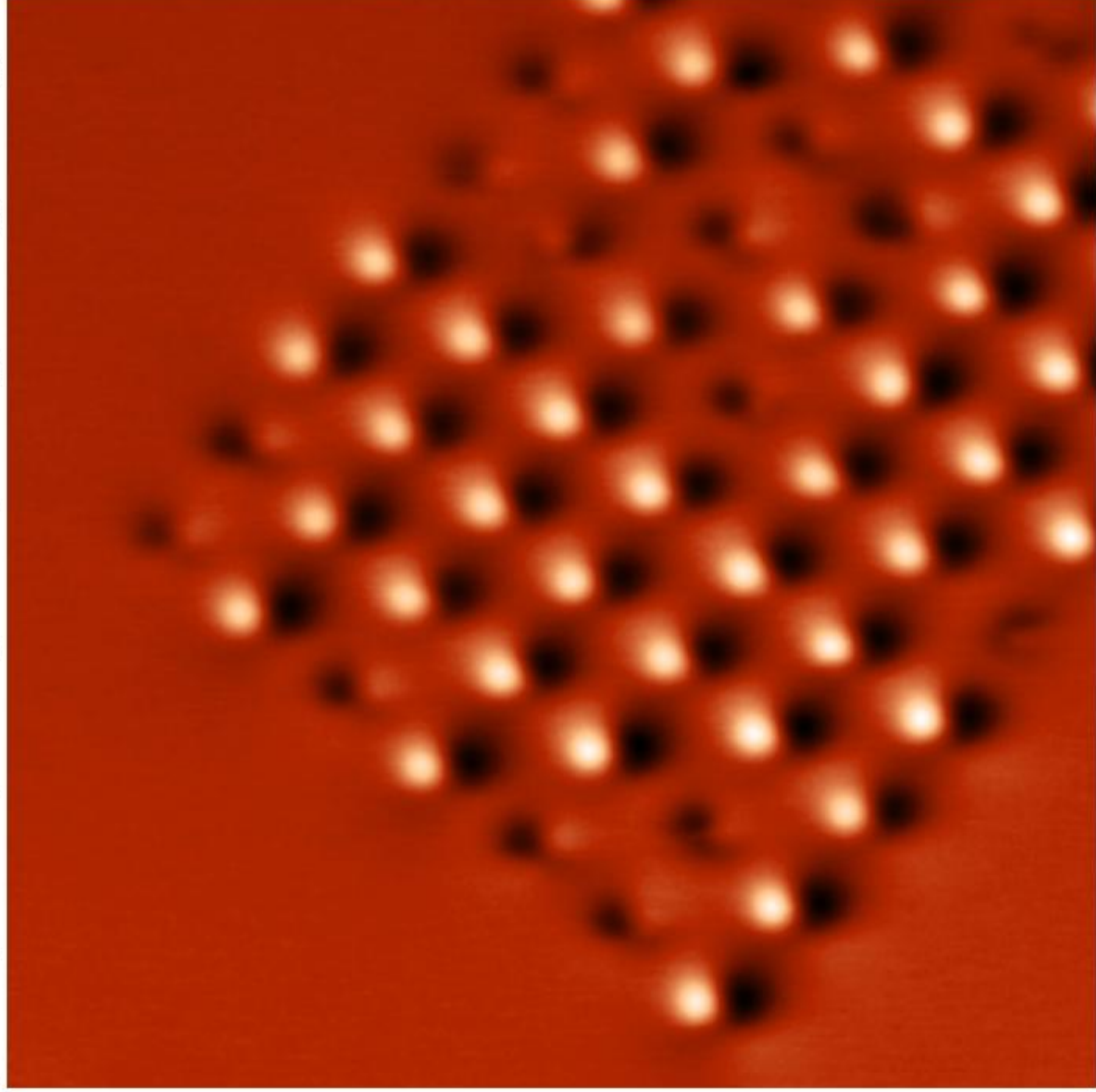
6

8

10

12

14



**МСМ исследования
неколлинеарных
геликоидальных состояний
в многослойных
наномагнитах**

Магнитостатическое взаимодействие

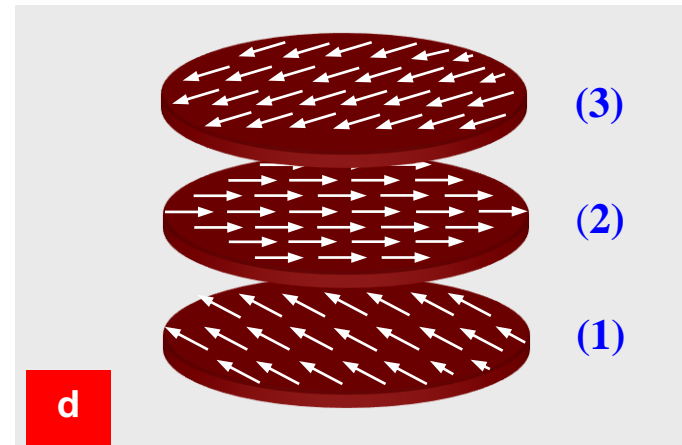
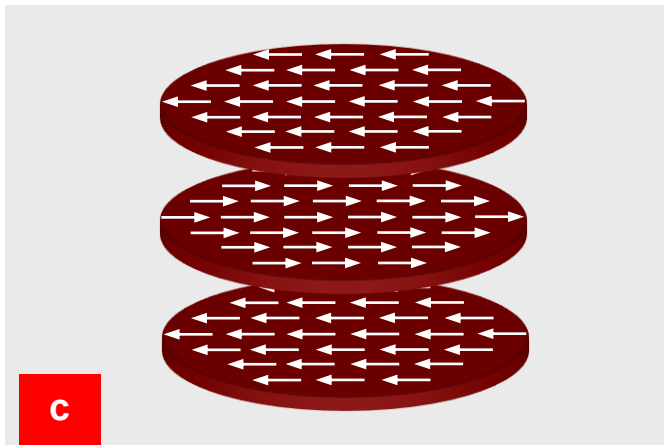
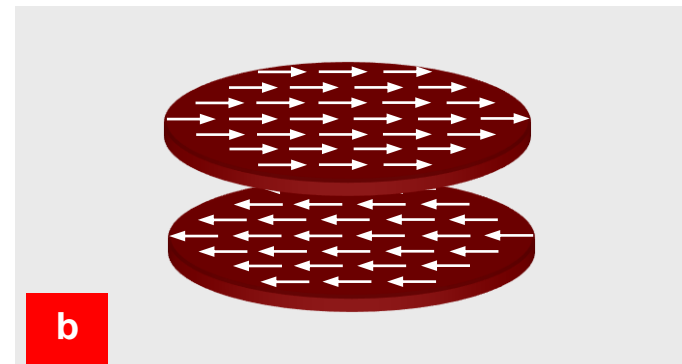
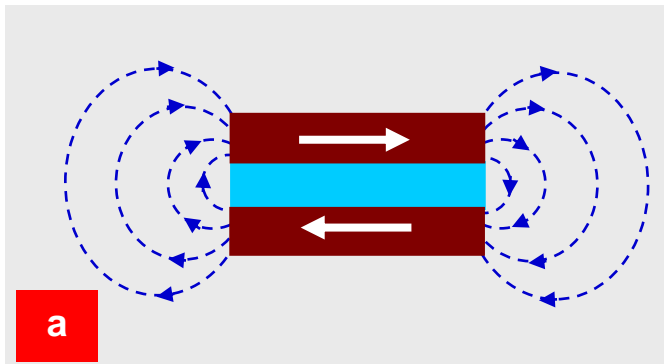
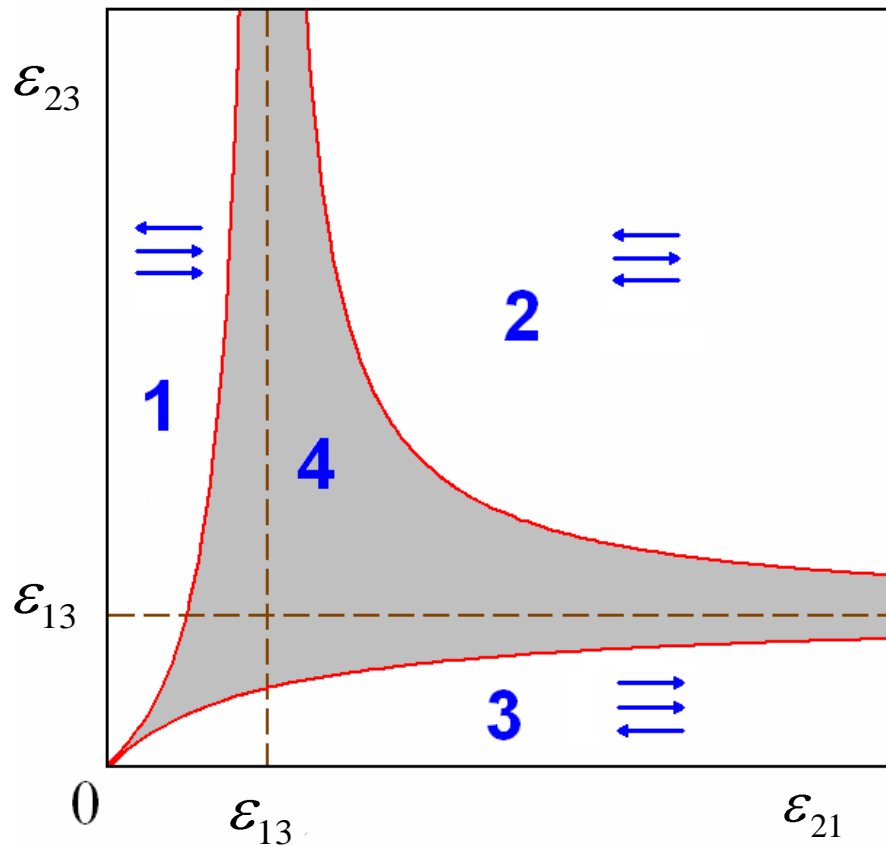


Диаграмма состояний

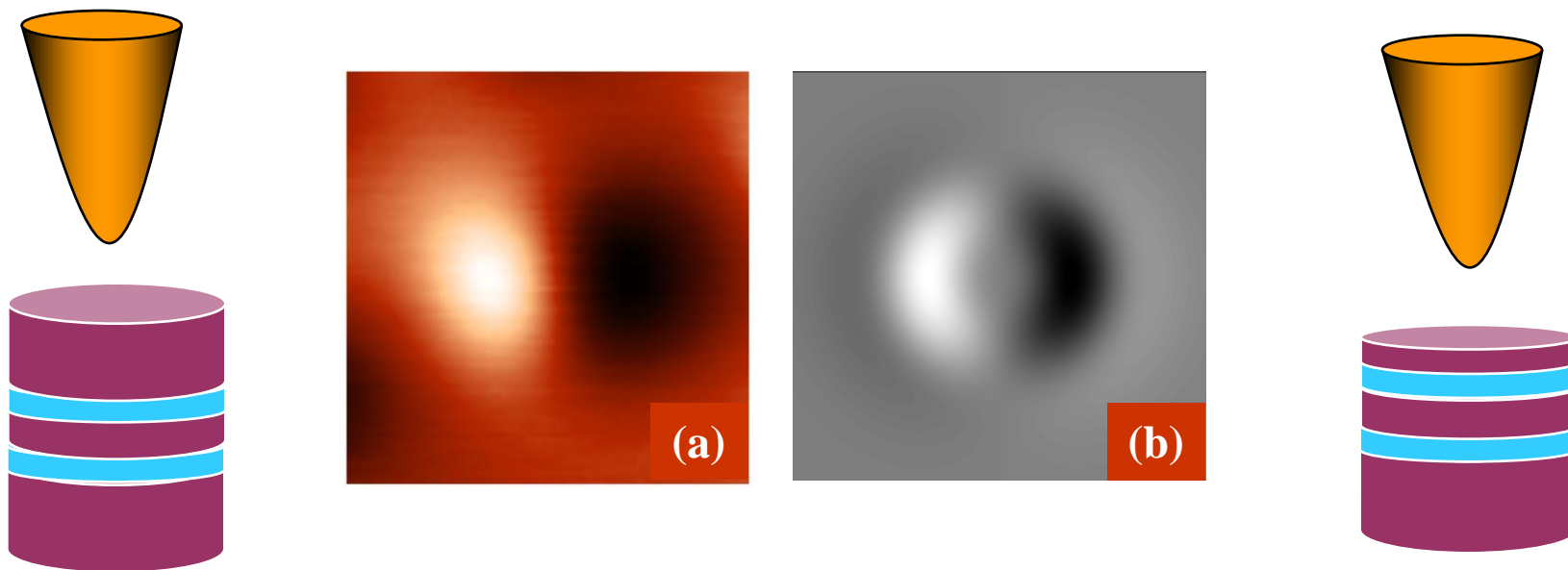


$$E = \varepsilon_{21} \cos \theta_{21} + \varepsilon_{23} \cos \theta_{23} + \varepsilon_{13} \cos \theta_{13}$$

$$\cos \theta_{21} = \frac{\varepsilon_{13}^2 \varepsilon_{23}^2 - \varepsilon_{21}^2 \varepsilon_{23}^2 - \varepsilon_{13}^2 \varepsilon_{21}^2}{2 \varepsilon_{21}^2 \varepsilon_{23} \varepsilon_{13}}$$

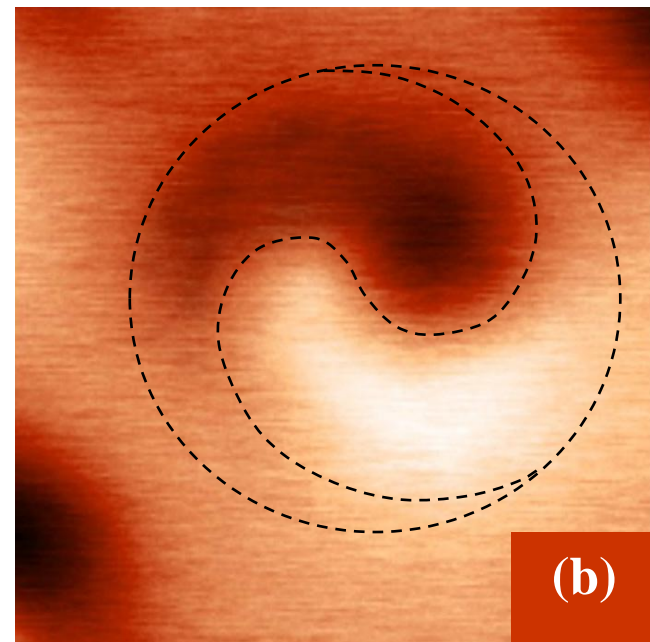
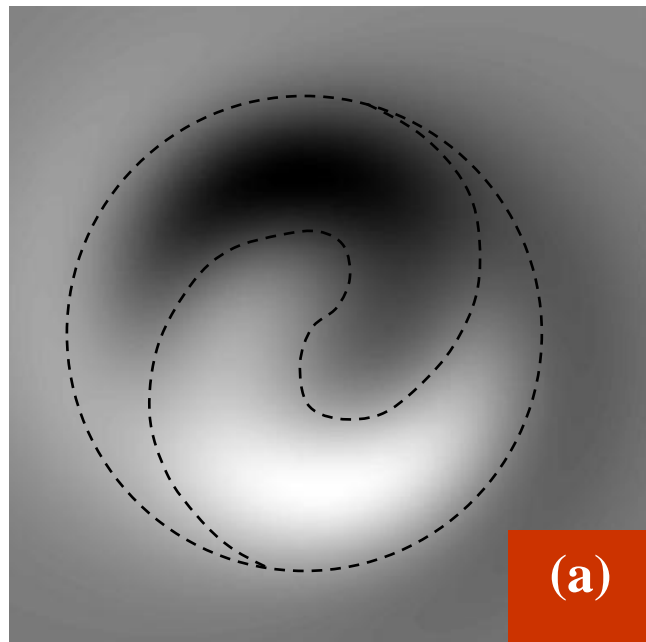
$$\cos \theta_{23} = \frac{\varepsilon_{21}^2 \varepsilon_{13}^2 - \varepsilon_{21}^2 \varepsilon_{23}^2 - \varepsilon_{13}^2 \varepsilon_{23}^2}{2 \varepsilon_{21} \varepsilon_{23}^2 \varepsilon_{13}}$$

Оптимизация структур для МСМ измерений



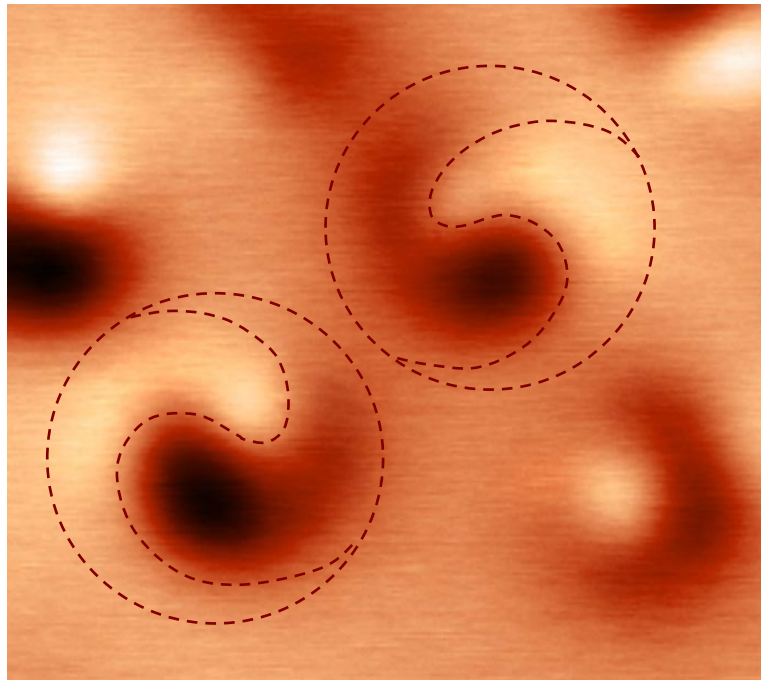
Слои Co - 16, 11, 8 нм
Прослойка Si - 3 нм
Диаметр - 300 нм

Регистрация спирального распределения МСМ контраста



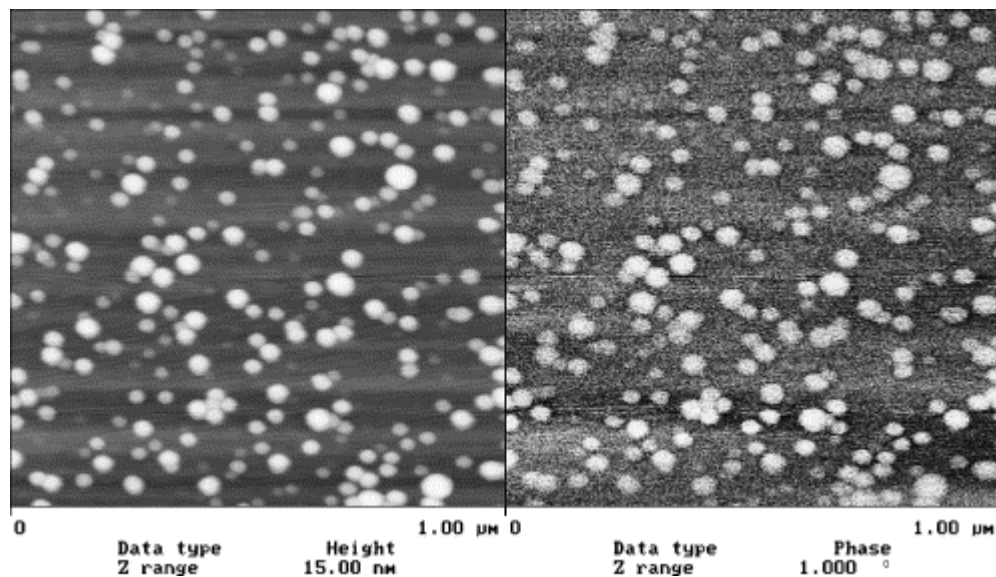
$$\theta_{21} = 109^\circ \quad \theta_{23} = 257^\circ$$

Правая и левая ориентация геликоидальных состояний



**Магнитно-силовая
микроскопия
слабокоэрцитивных
наночастиц**

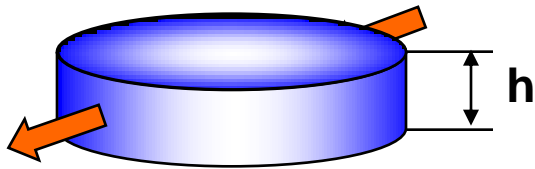
MCM нанокластеров Co



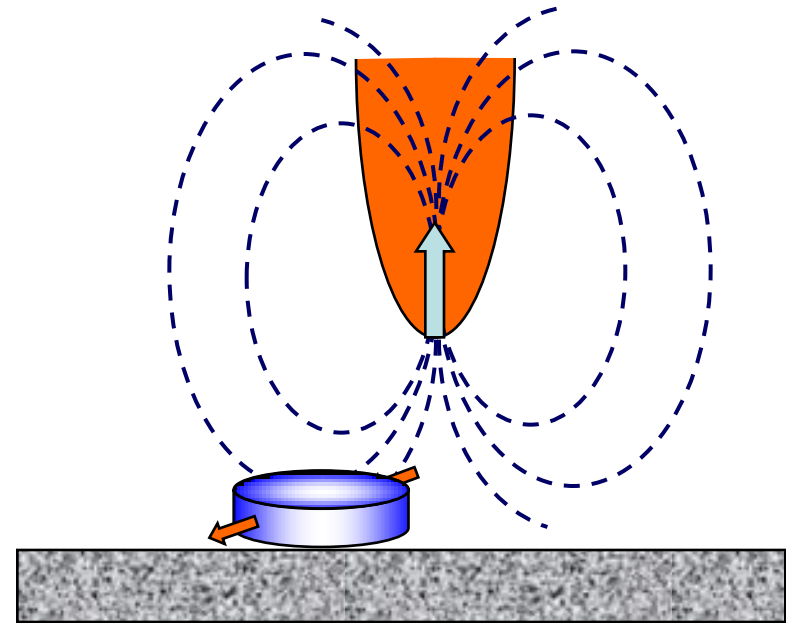
S. A. Koch , R. H. te Velde , G. Palasantzas, J. Th. M. De Hosson
Appl. Surf. Science, 226, 185 (2004).
Appl. Phys. Lett., 84(4), 556 (2004).

Моделирование МСМ контраста

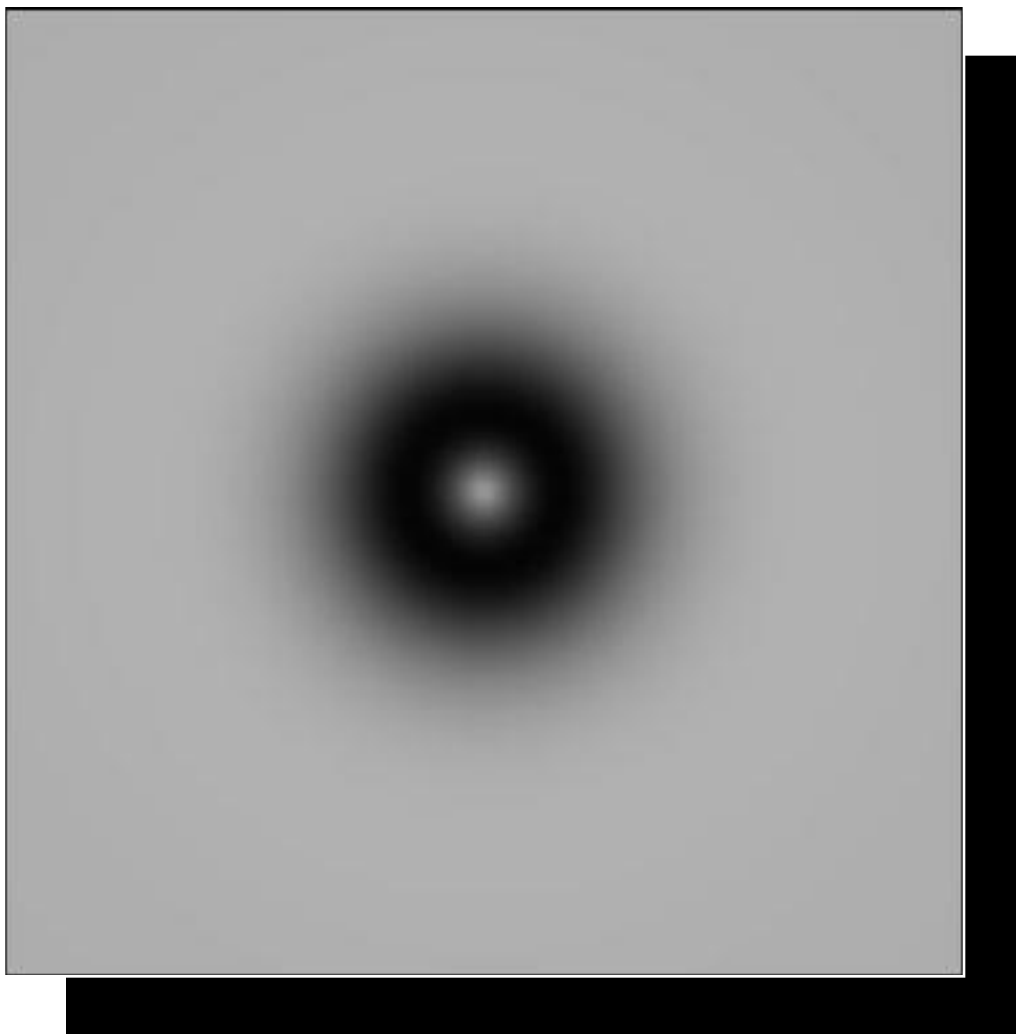
Низкокоэрцитивные
частицы



$$h \ll d < 100 \text{ nm}$$

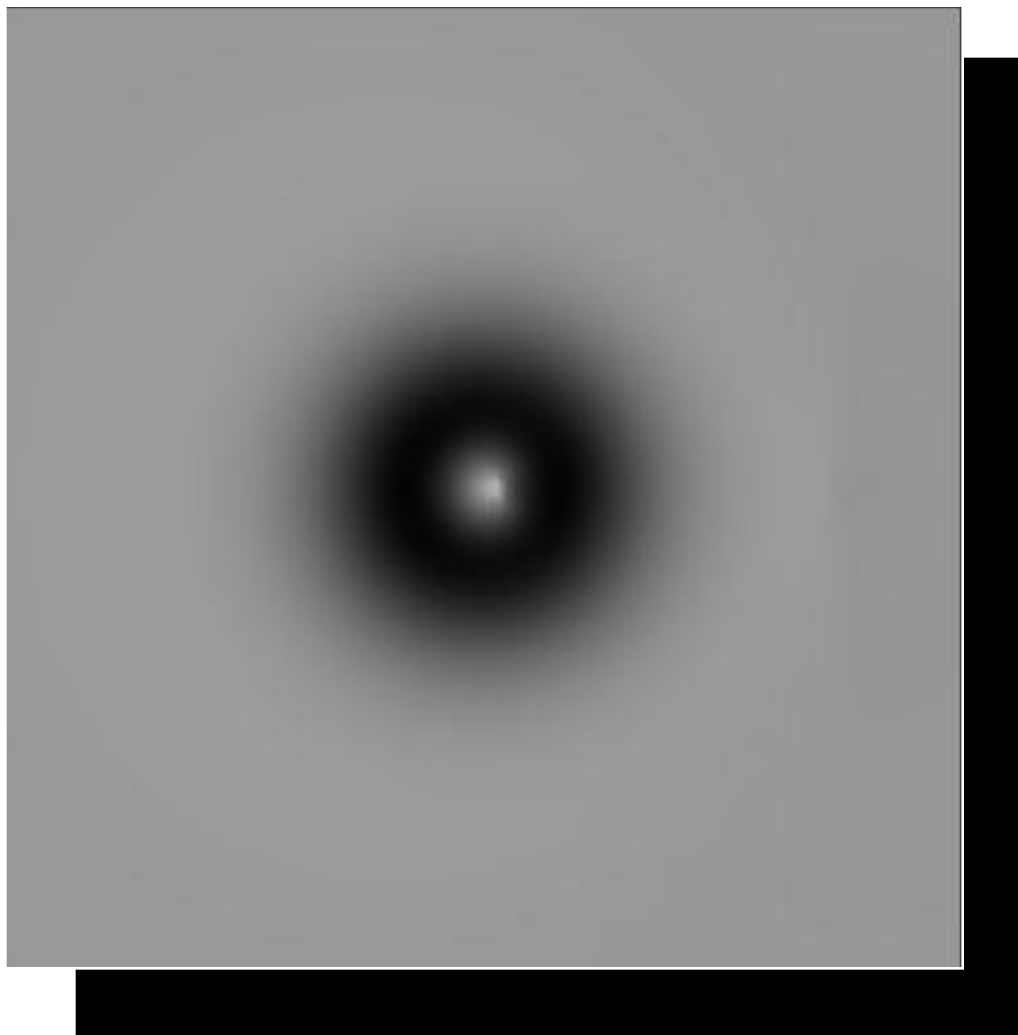


Плоская частица во внешнем поле



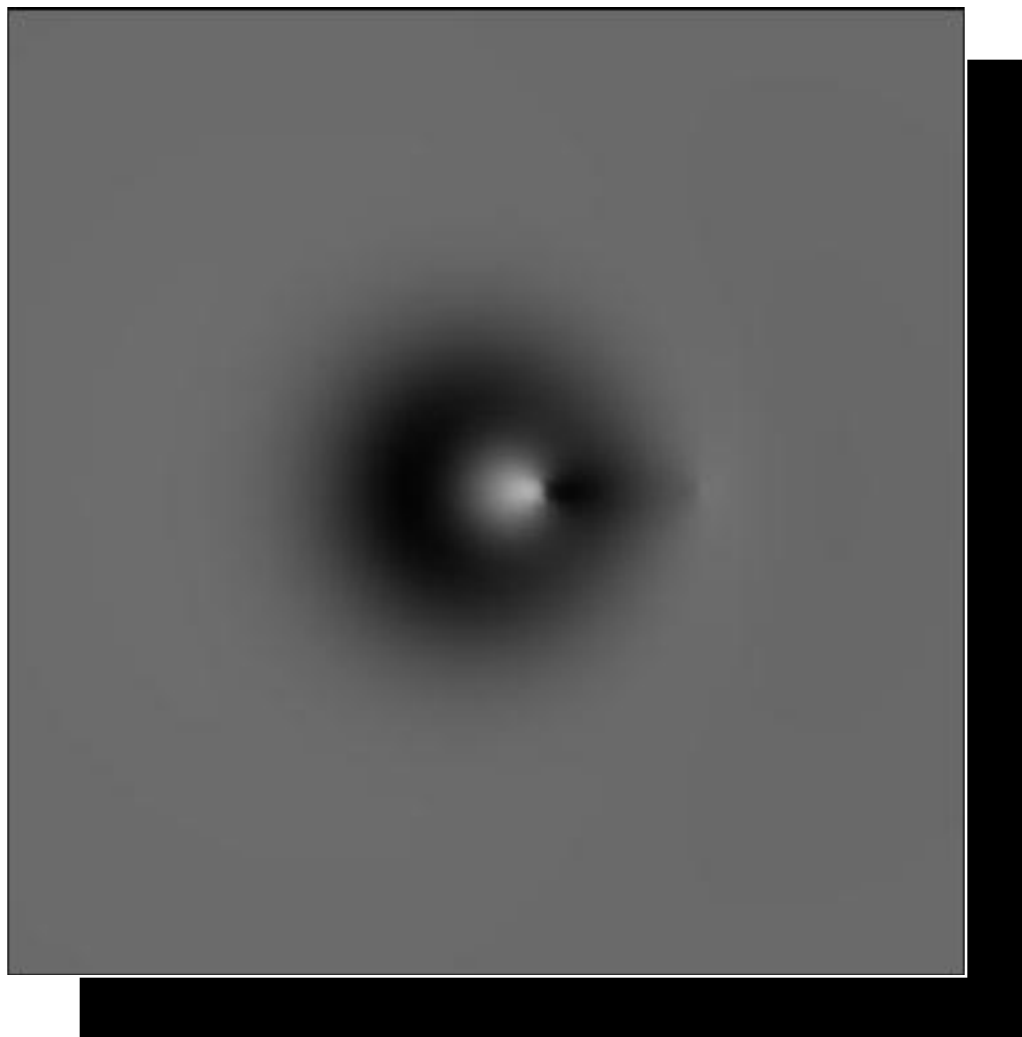
Плоская частица во внешнем поле

\vec{H}



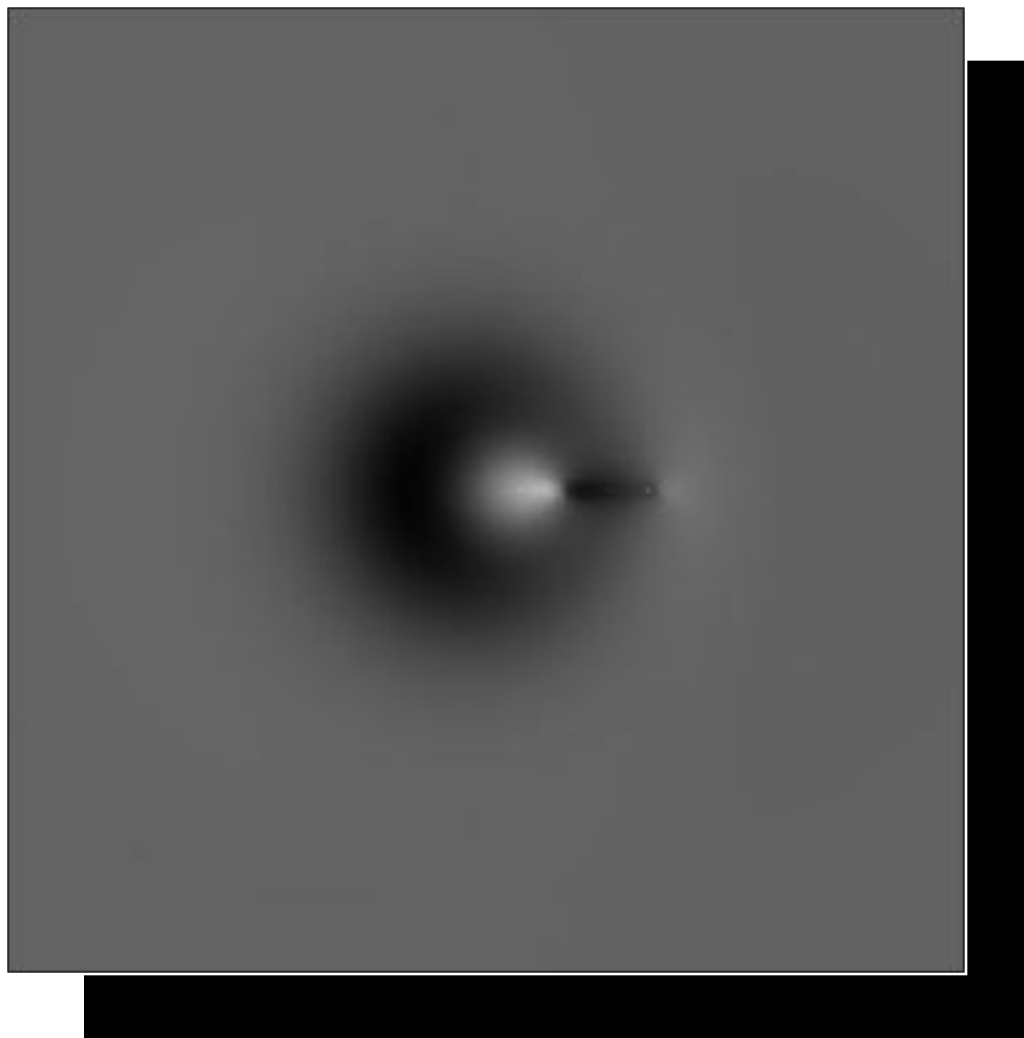
Плоская частица во внешнем поле

\vec{H}



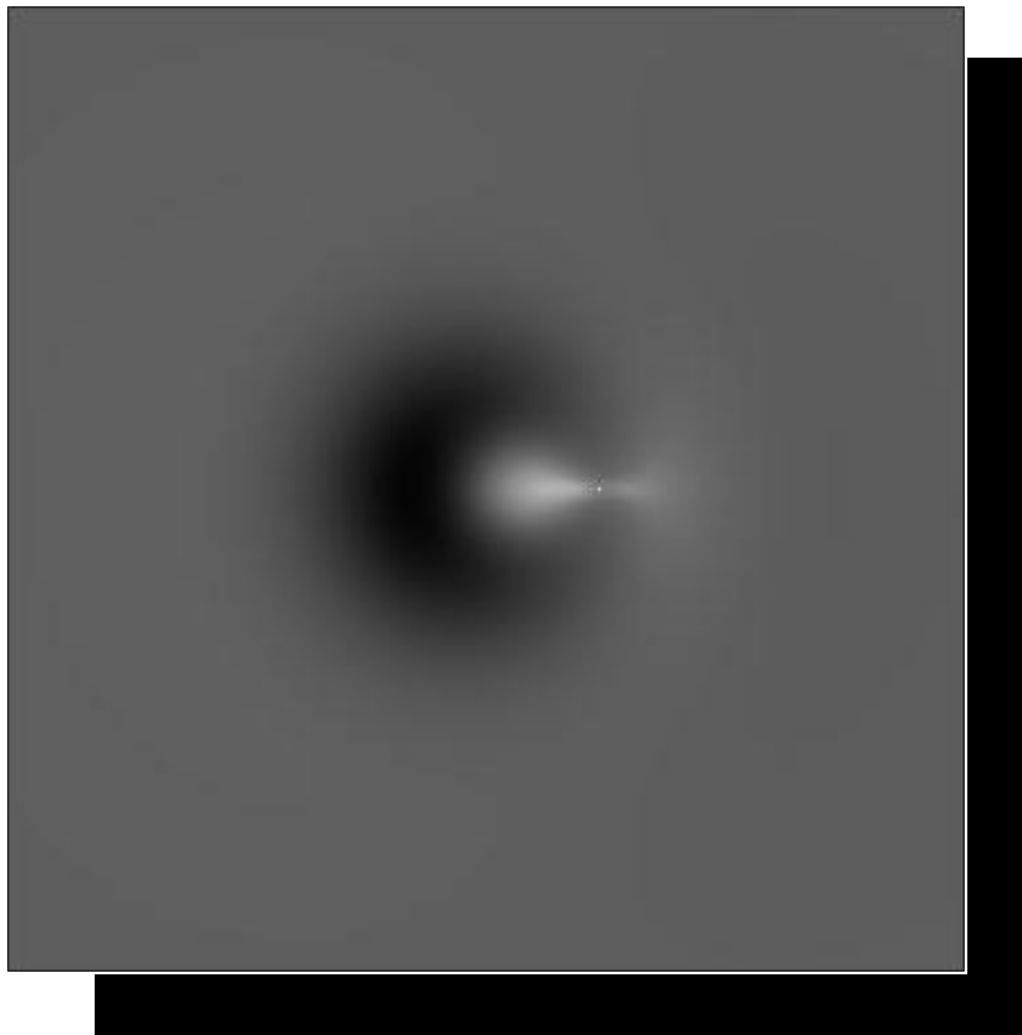
Плоская частица во внешнем поле

\vec{H}



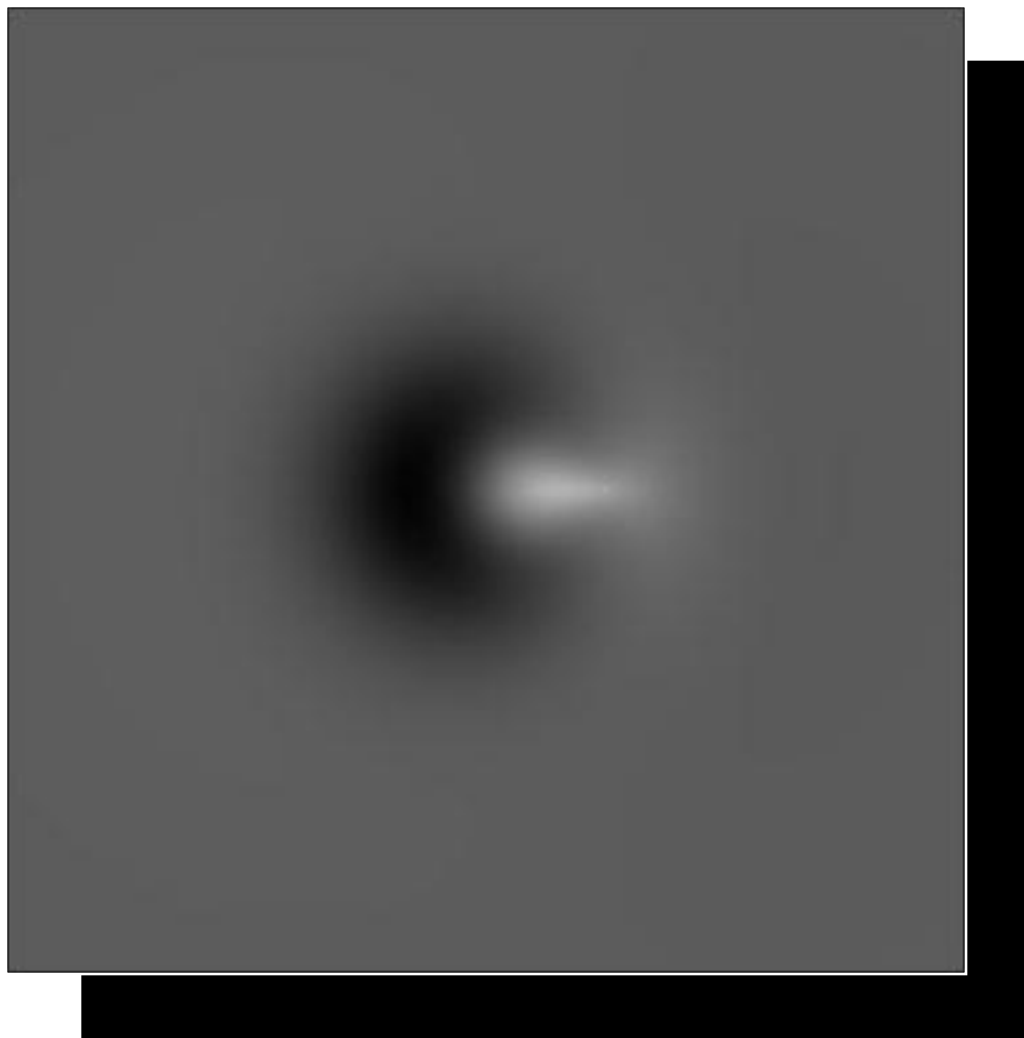
Плоская частица во внешнем поле

\vec{H}



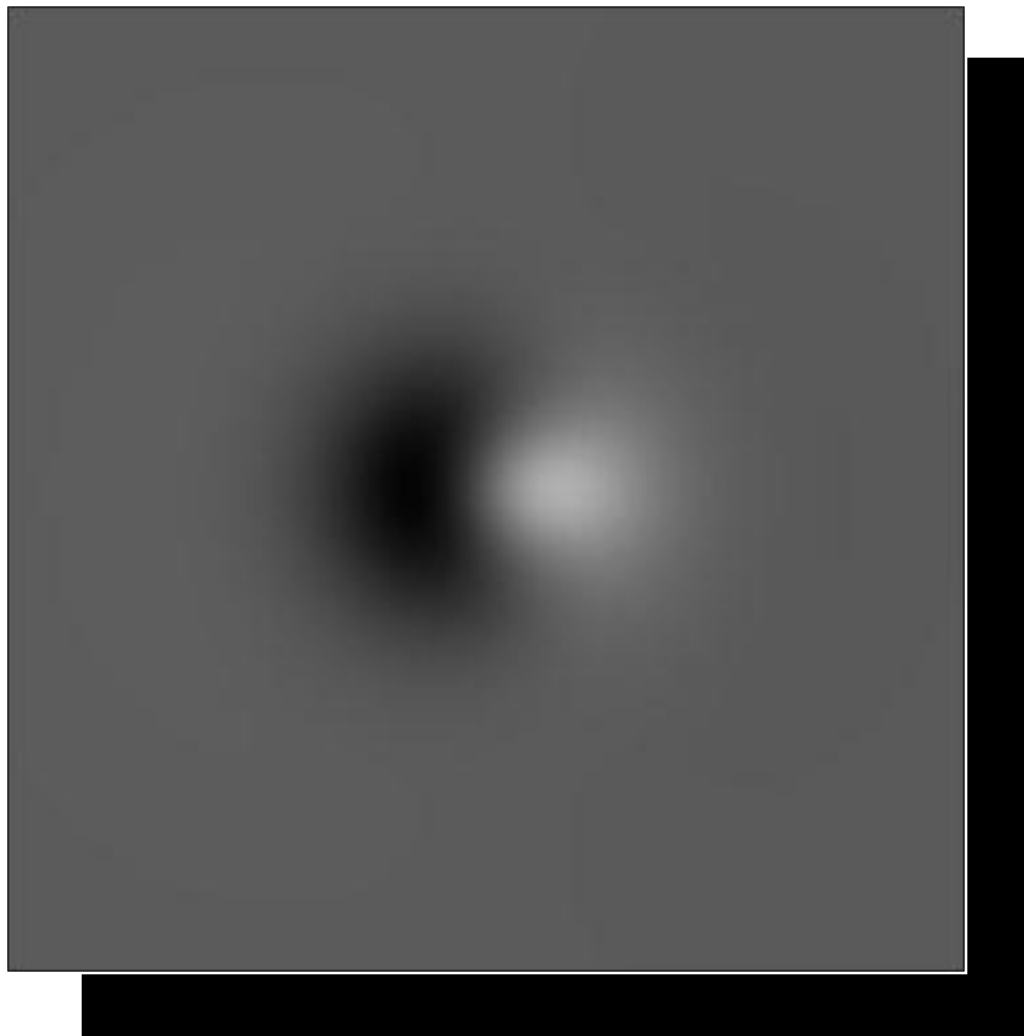
Плоская частица во внешнем поле

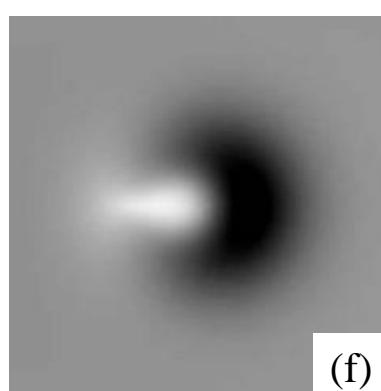
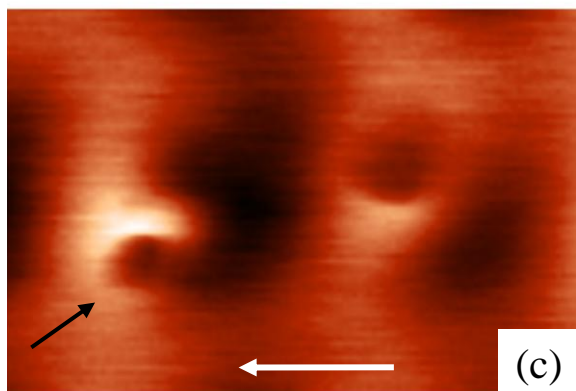
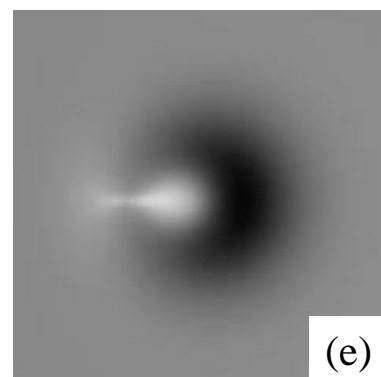
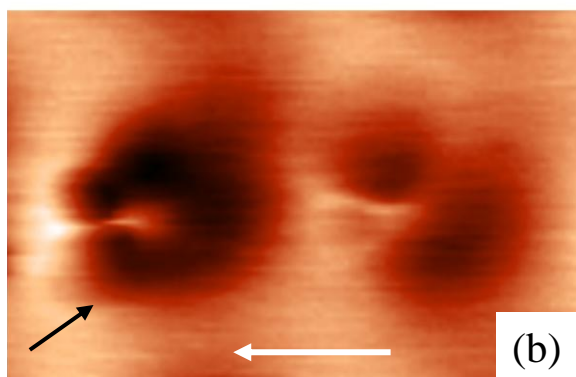
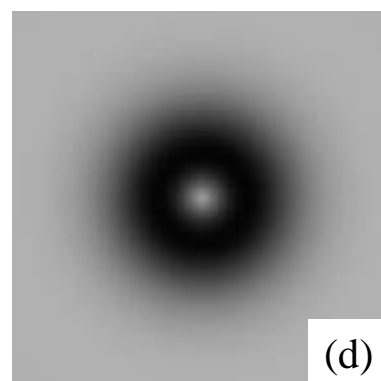
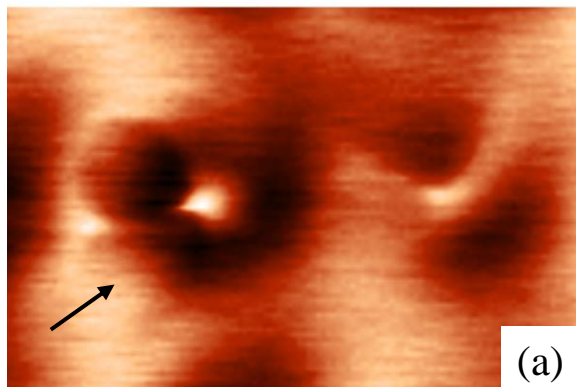
\vec{H}



Плоская частица во внешнем поле

\vec{H}





Частицы Co
диаметр 50 нм
толщина 20 нм

Заключение

- 1. MCM вихревых состояний в наночастицах.**
- 2. Эффекты перемагничивания частиц зондом MCM.**
- 3. MCM многослойных частиц на основе Co.**
- 4. MCM слабокоэрцитивных наночастиц.**

Acknowledgements

