

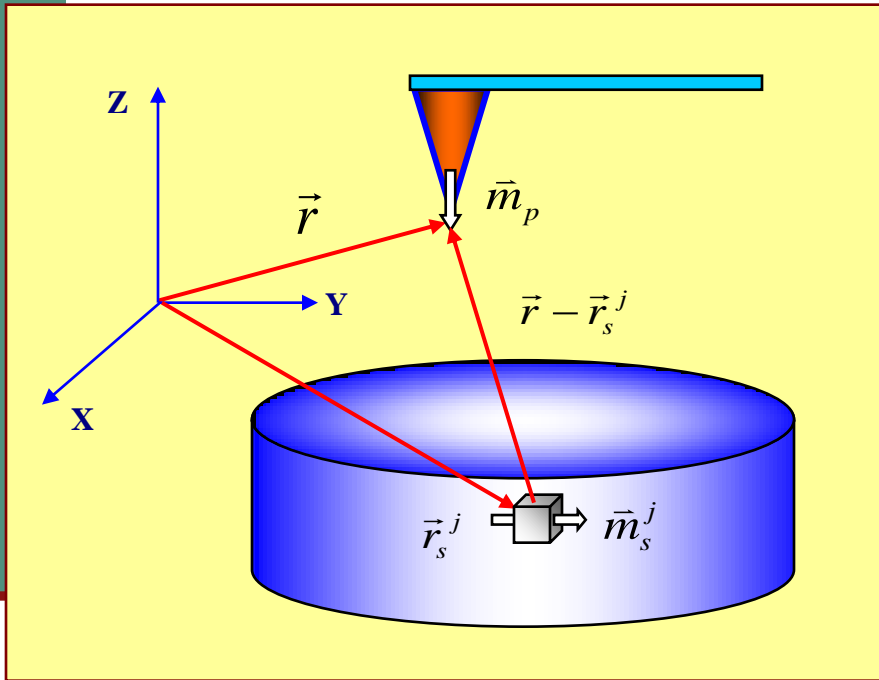
Воздействие зонда МСМ микроскопа на намагниченность исследуемых объектов

Аспирантка 1 года обучения О.Л. Ермолаева
Научный руководитель с.н.с В.Л. Миронов

План доклада:

- Принципы МСМ
- Артефакты МСМ, возмущение однородной частицы
- Перемагничивание МСМ зондом однородно намагниченной частицы
- Перемагничивание МСМ зондом частицы с вихревым распределением намагниченности
- Взаимодействие круглого вихря с магнитным полем МСМ зонда
- Перемагничивание частиц CoPt с перпендикулярной анизотропией

Магнитно-силовая микроскопия

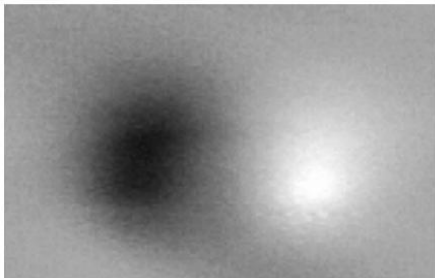


$$\Delta\varphi = \frac{QF'_z}{k}$$

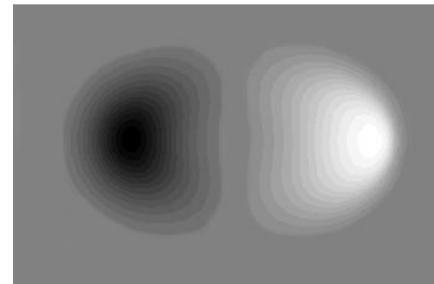
$$\frac{\partial}{\partial z} F_z(\vec{r}) = \sum_j ((\vec{m}_p \vec{\nabla}) \frac{\partial}{\partial z} H_z^j(\vec{r} - \vec{r}_s^j))$$

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

Артефакты МСМ изображений

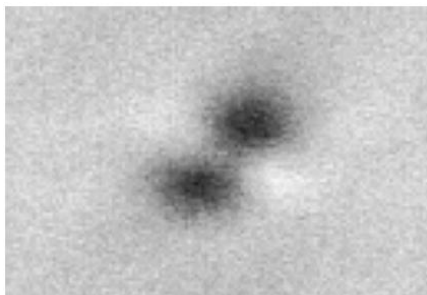


(a)

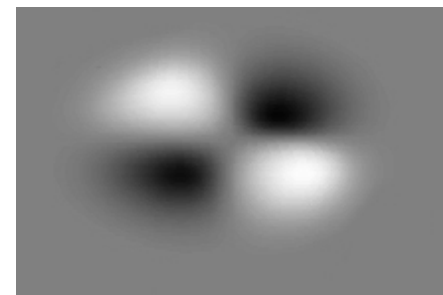


(б)

МСМ изображение однородно намагниченной частицы
(эксперимент (a) и компьютерное моделирование (б))



(a)



(б)

МСМ изображение вихревой частицы (эксперимент (a) и
компьютерное моделирование (б))

Возмущение однородно намагниченной частицы полем МСМ зонда

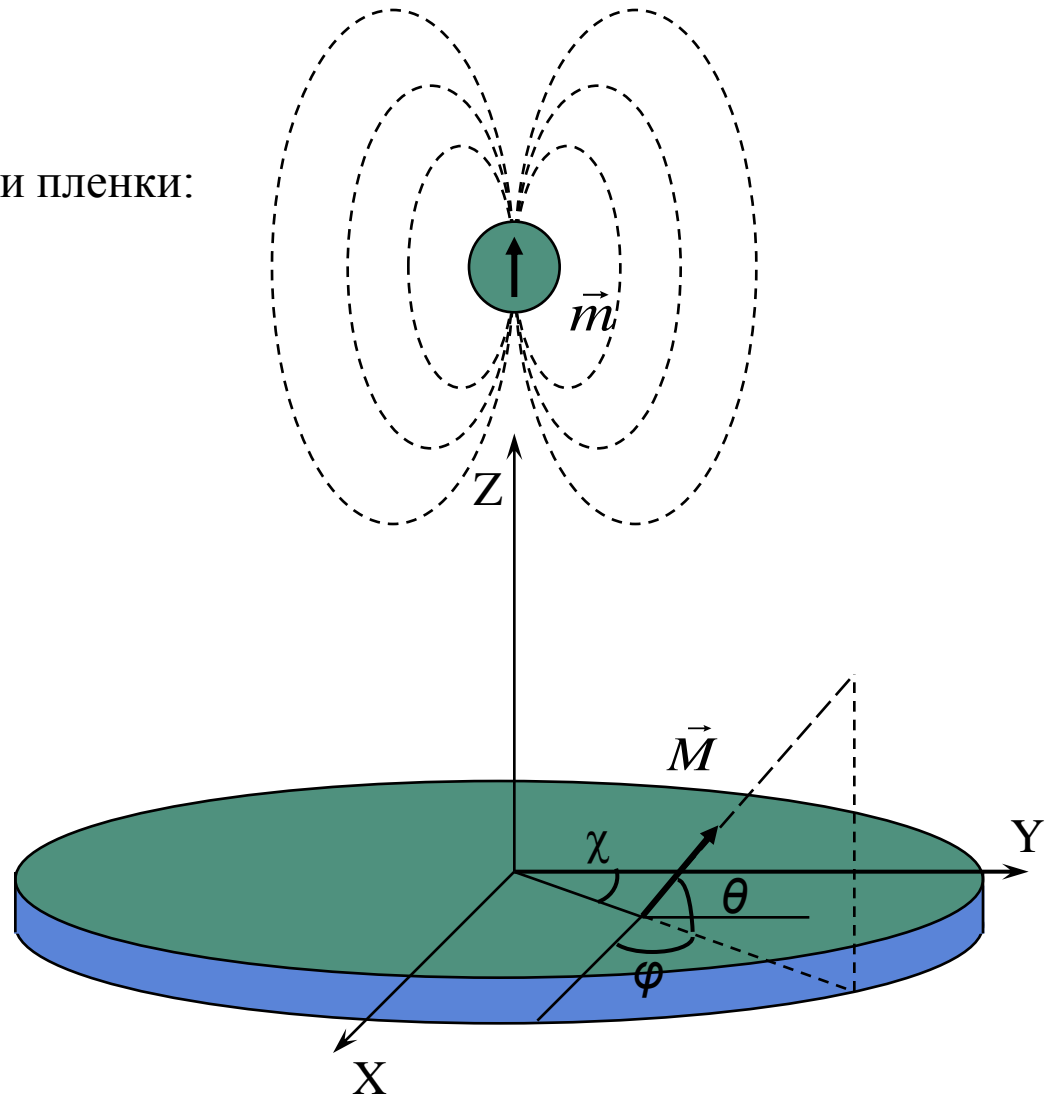
$$|\vec{M}| = M_s$$

Компоненты намагниченности пленки:

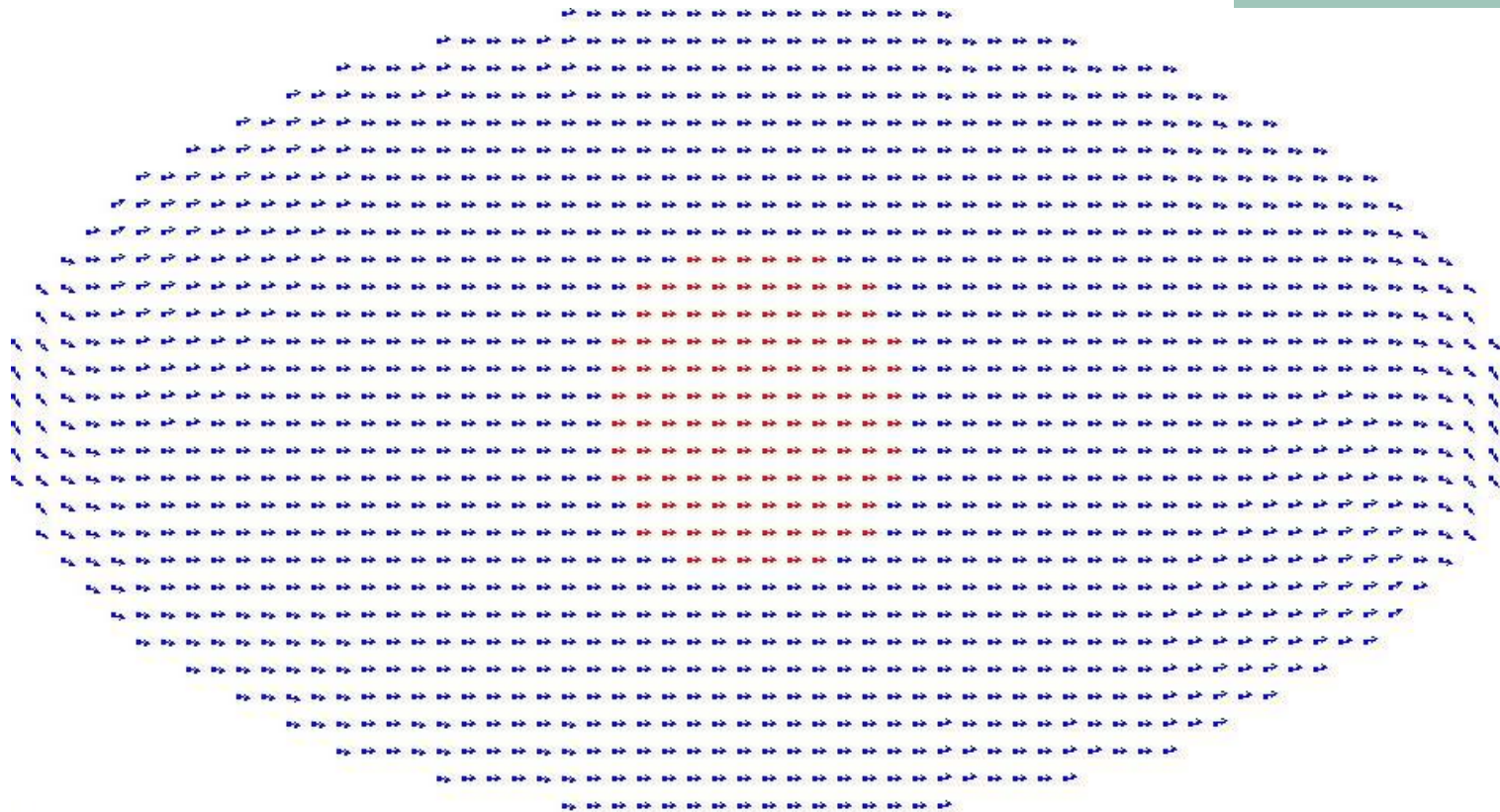
$$\begin{cases} M_z = M_s \sin\theta \\ M_x = M_s \cos\theta \sin\varphi \\ M_y = M_s \cos\theta \cos\varphi \end{cases}$$

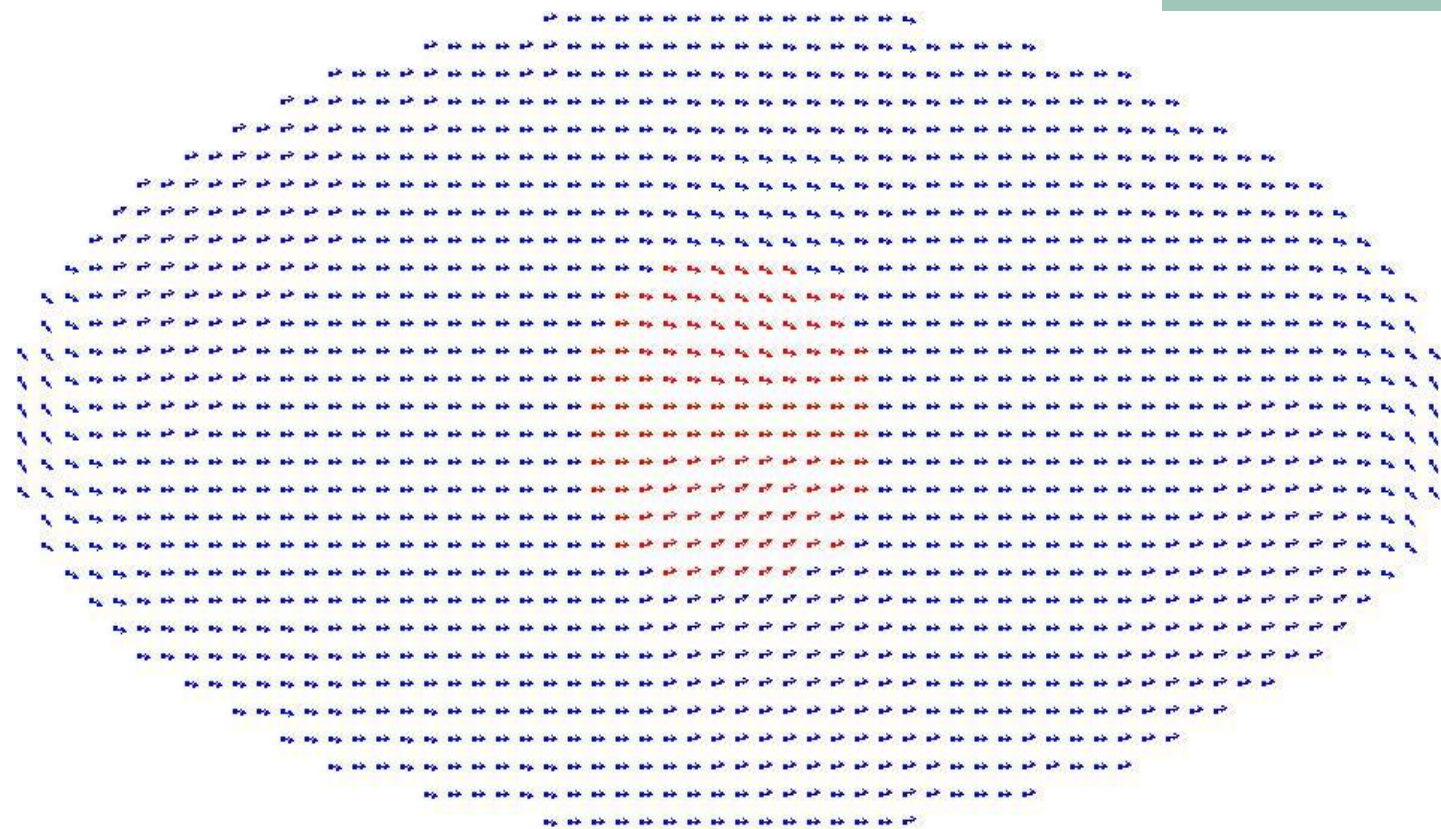
Компоненты поля зонда:

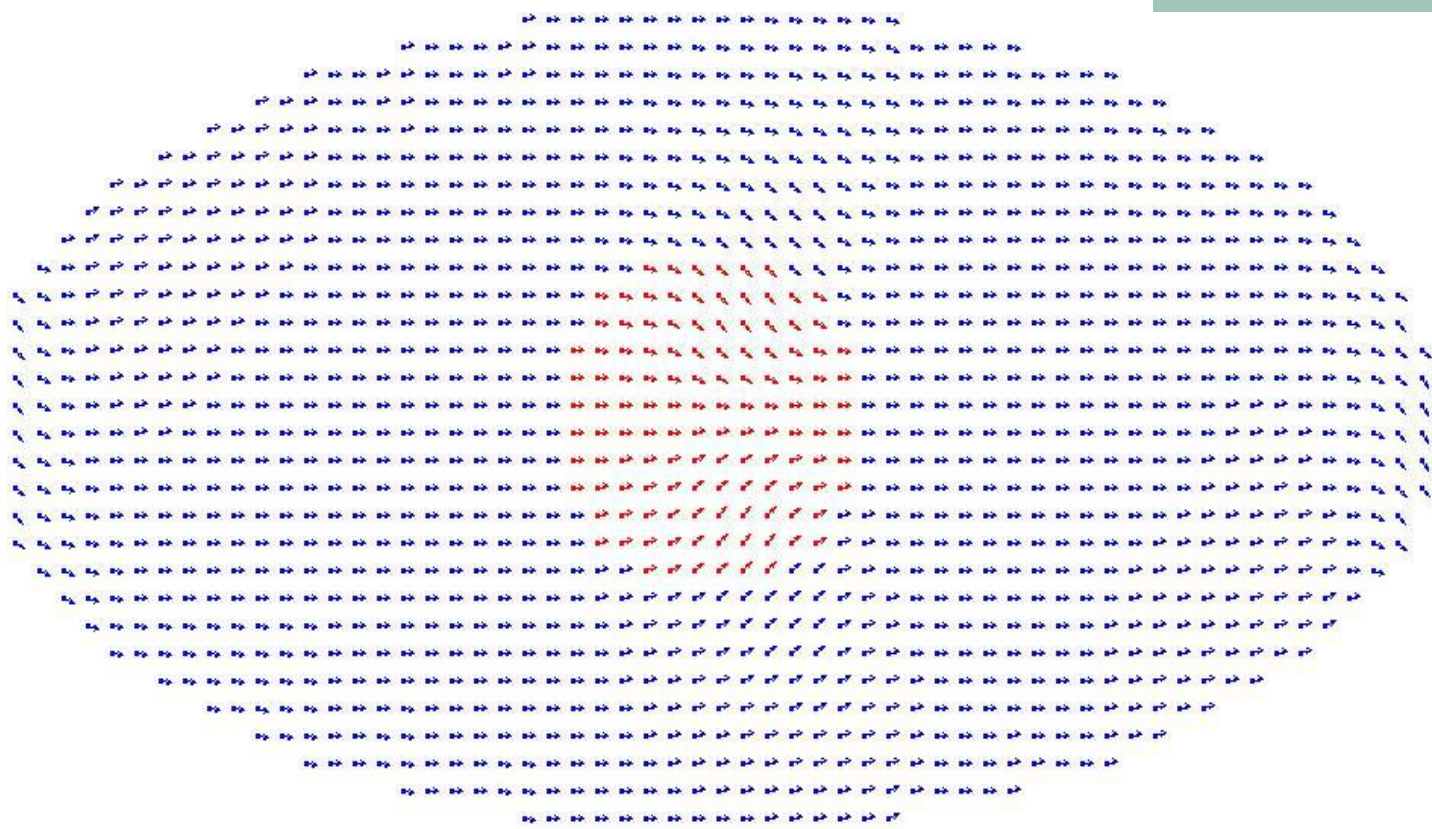
$$\begin{cases} H_z = \frac{m(2z^2 - x^2 - y^2)}{R^5} \\ H_x = \frac{3mzx}{R^5} \\ H_y = \frac{3mzy}{R^5} \end{cases}$$

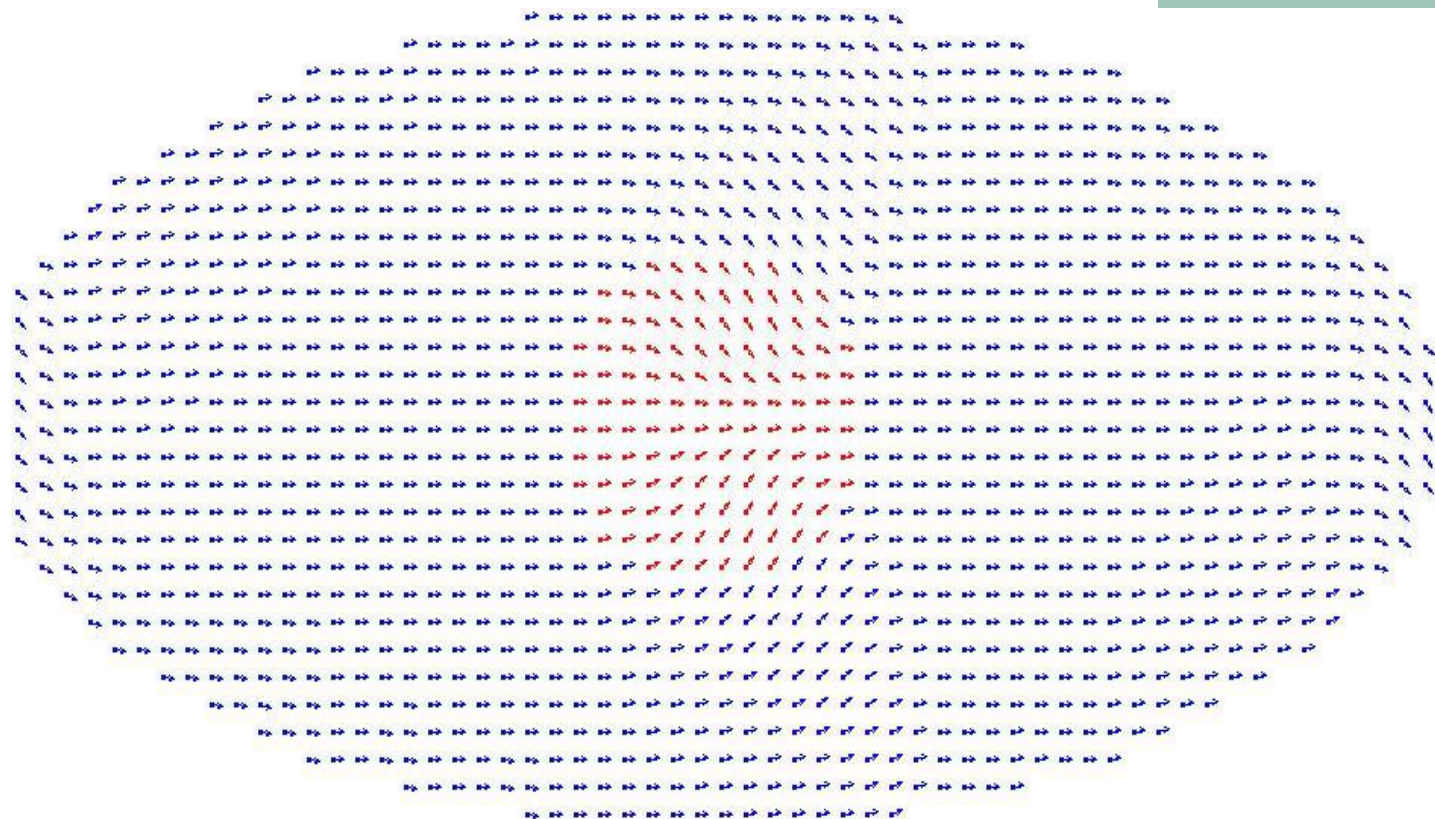


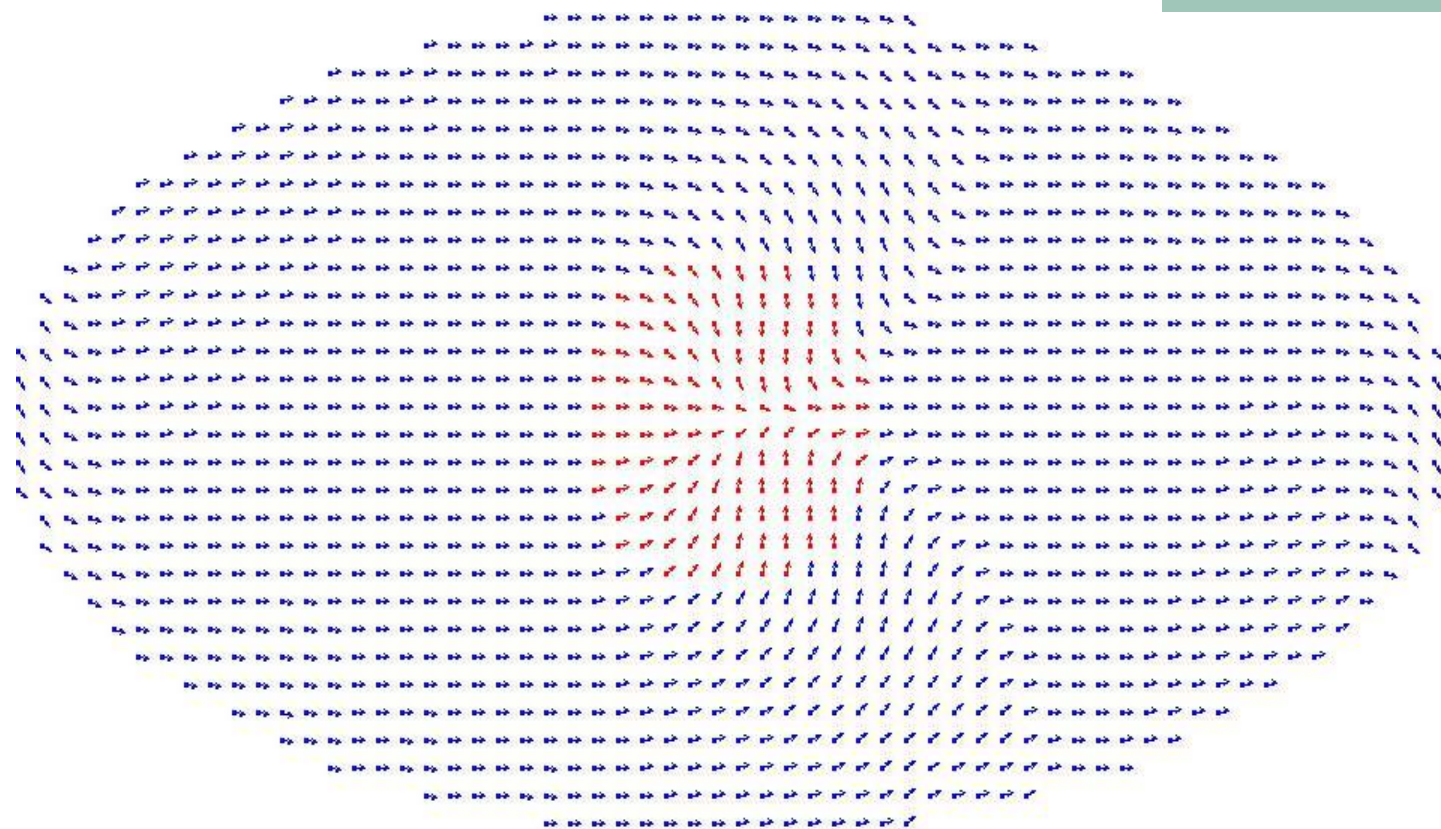
Компьютерное моделирование

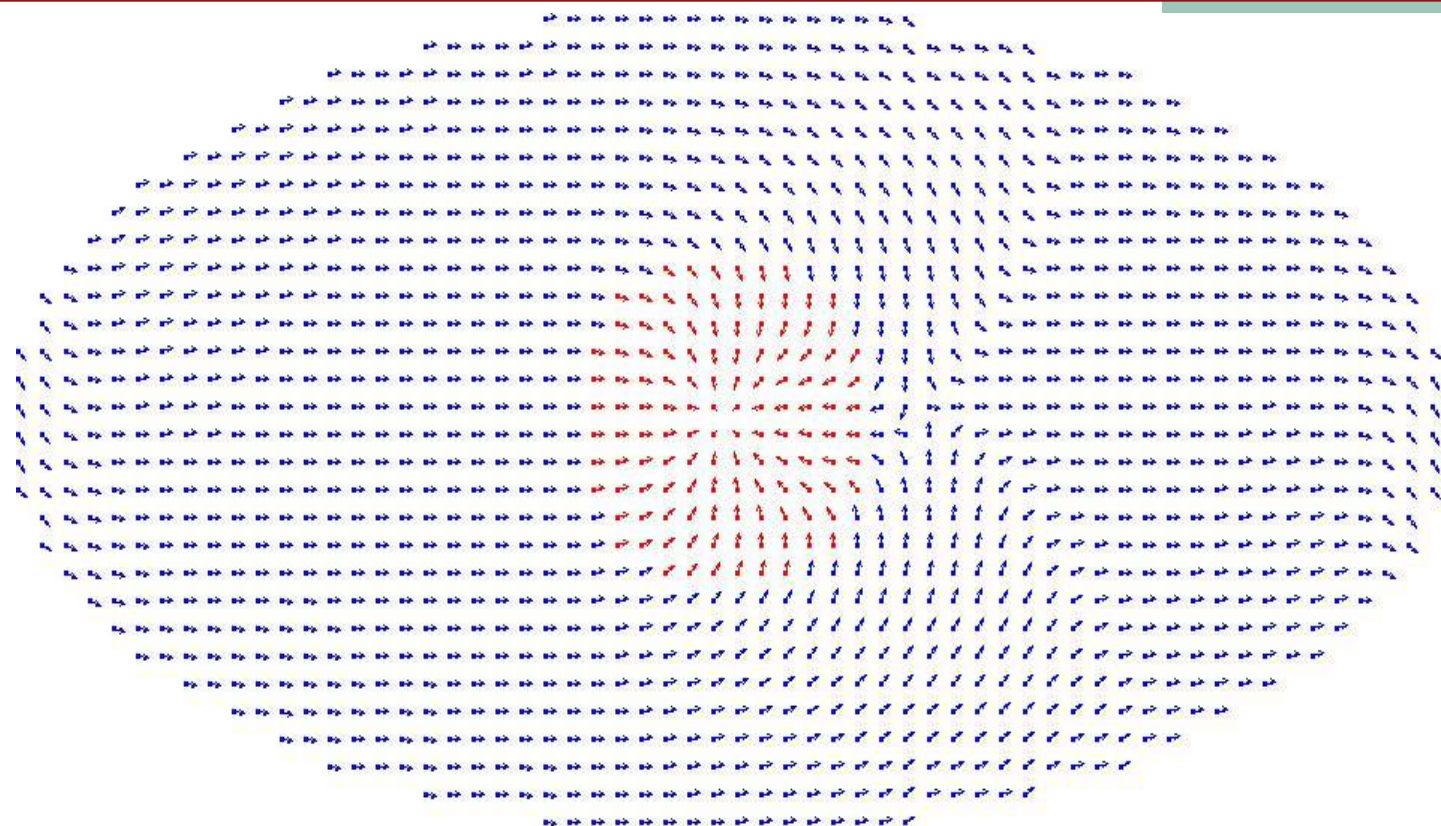












Линеаризованный функционал энергии частицы

$$W_{обм.} = \frac{l_{ex}^2 M_s^2}{2} \int_V \left\{ \left(\frac{\partial \theta}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \theta}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial \varphi}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \varphi}{\partial y} \right)^2 \right\} dV$$

$$W_{вн.поля.} = -m M_s \int_V \frac{(2z^2 - x^2 - y^2)\theta + 3z(x\varphi + y(1 - \theta^2/2 - \varphi^2/2))}{R^5} dV$$

$$W_{м.см.V} = M_s^2 \frac{\partial \varphi}{\partial x} \int_s \left(\frac{\partial \varphi}{\partial x'} \right) / |\rho - \rho'| d\rho'$$

$$W_{м.см.S} = 2\pi M_s^2 \int_S \theta^2 dS$$

$$W_{аниз.} = k^2 \int_V \varphi^2 dV$$

Система уравнений Эйлера:

$$\begin{cases} \Delta \theta = \varepsilon_1 \frac{(2 - \rho^2) - 3\rho \theta \sin \chi}{1 + \rho^{2^{5/2}}} + \varepsilon_2 \theta \\ \Delta \varphi = \varepsilon_1 \frac{3\rho(\cos \chi - \varphi \sin \chi)}{\rho^2 + 1^{5/2}} + \frac{\varepsilon_2}{4\pi} \frac{\partial \varphi}{\partial x} \int_s \left(\frac{\partial \varphi}{\partial x'} \right) / |\rho - \rho'| d\rho' + k'^2 \varphi \end{cases}$$

$$k' = k / M_s l_{ex}^2$$

$$\varepsilon_1 = V_d / l_{ex}^2 z;$$

$$\varepsilon_2 = 4\pi z / l_{ex}^2$$

$$\rho = \rho / z$$

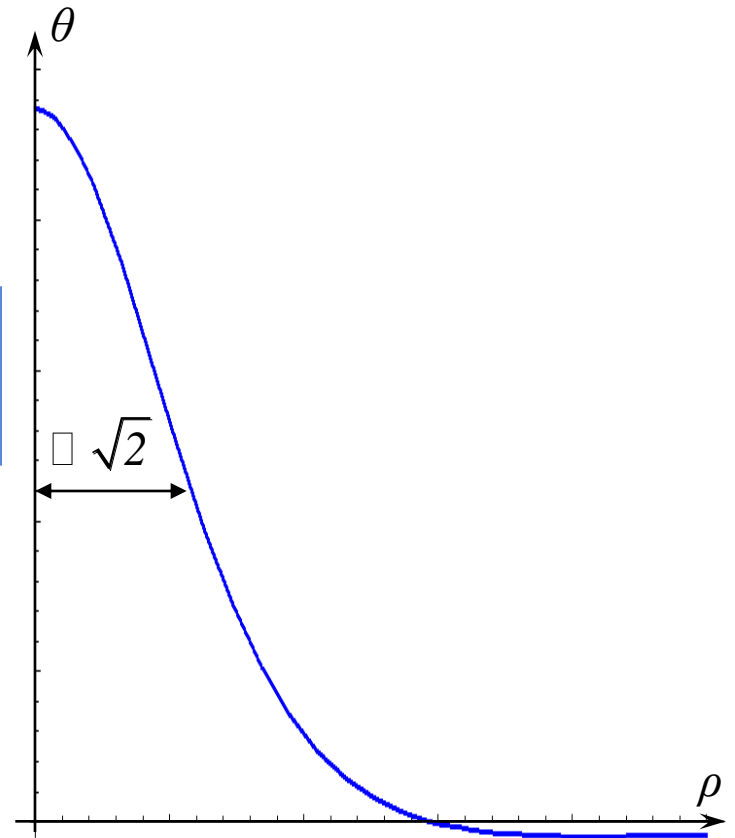
Решение уравнения Эйлера для полярного угла θ :

$$\theta'' + \frac{1}{\rho} \theta' - \theta = \varepsilon_1 \frac{(2 - \rho^2 / \varepsilon_2)}{1 + \rho^2 / \varepsilon_2}^{5/2}$$

$$\theta(\rho) = \varepsilon_1 \varepsilon_2^{3/2} \int_0^\infty \frac{s^2 \exp(-s \sqrt{\varepsilon_2})}{1 + s^2} J_0(\rho \sqrt{\varepsilon_2}) ds ;$$

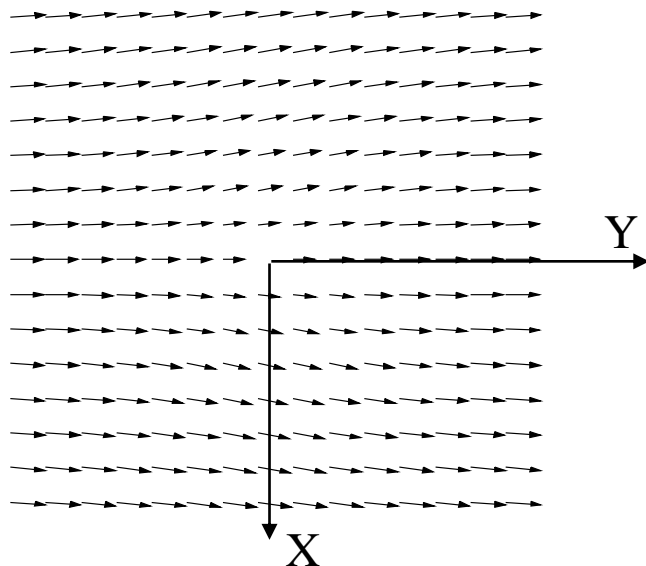
При $\rho \rightarrow 0$ учитывая, что $\varepsilon_2 \gg 1$ $\theta(0) = 2 \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2}$

При $\rho \rightarrow \infty$ $\theta(\rho) = \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2^{3/2}} \frac{(2 - \rho^2)}{(\rho^2)^{5/2}} ;$

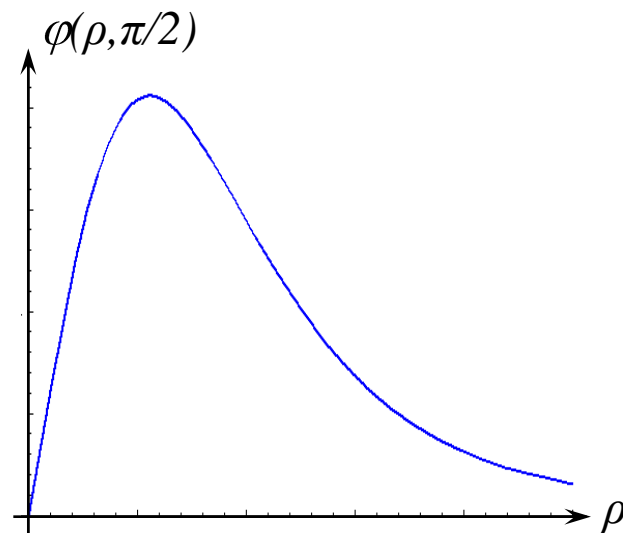


Зависимость полярного угла от расстояния до диполя

Решение уравнения Эйлера для азимутального угла φ



распределение φ -компоненты
намагниченности



зависимость функции $\varphi(\rho, \pi/2)$

$$\varphi_{\rho\rho} + \frac{1}{\rho} \varphi_{\rho} + \frac{1}{\rho^2} \varphi_{\chi\chi} - k'^2 \varphi = \varepsilon_1 \frac{3\rho \cos \chi}{1 + \rho^2}^{5/2}$$

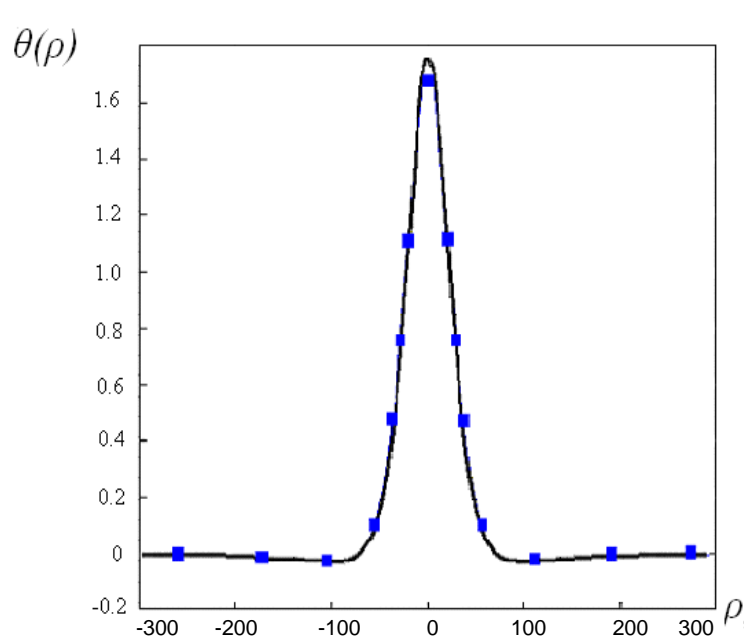
$$\varphi(\rho, \chi) = -\varepsilon_1 \cos \chi \int_0^{\infty} \frac{s^2 \exp(-s)}{k'^2 + s^2} J_1 s \rho ds$$

Асимптотики:

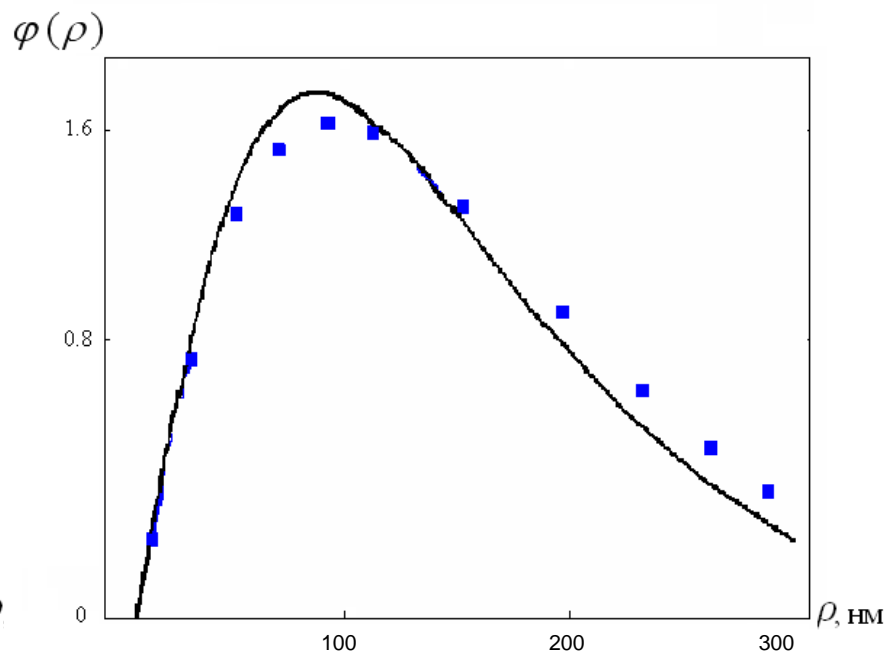
При $\rho \rightarrow 0$ $\varphi(\rho) = \frac{3\varepsilon_1 \rho \cos \chi}{k'^2}$

При $\rho \rightarrow \infty$ $\varphi(\rho) = \varepsilon_1 \frac{3\rho \cos \chi}{k'^2 (1 + \rho^2)^{3/2}}$;

Сравнение теоретических расчетов и результатов компьютерного моделирования



(a)



(б)

Зависимости θ (а) и φ (б) компонент распределения намагниченности от расстояния до центра. Красная линия – теоретическое значение. Синяя линия – компьютерное моделирование.

МСМ контраст возмущенной структуры

$$\Delta\varphi \propto \frac{\partial^2}{\partial z^2} \int_V (\vec{M} \vec{H}) dV$$

Контраст, создаваемый θ -компонентой намагниченности:

$$\Delta\varphi_\theta = 16\pi^2 M_s^2 \varepsilon_1^2 \varepsilon_2 \int_0^\infty \frac{s^3 \exp(-2s\sqrt{\varepsilon_2})}{1+s^2} (1 + 4s\sqrt{\varepsilon_2} + 2s^2 \varepsilon_2) ds$$

Учитывая, что $\varepsilon_2 \gg 1$, приближенно контраст равен: $\Delta\varphi_\theta = \frac{57\pi^2 M_s^2 \varepsilon_1^2}{2\varepsilon_2}$

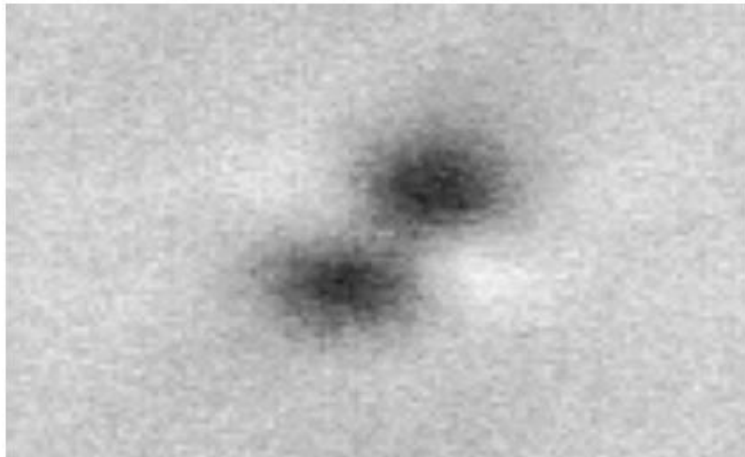
Контраст, создаваемый φ -компонентой намагниченности:

$$\Delta\varphi_\varphi = \frac{8\pi M_s^2 \varepsilon_1^2}{\varepsilon_2} \int_0^\infty \frac{s^3 \exp(-2s)}{k'^2 + s^2} (3s^4 + 9s^2 k'^2 + 10k'^4) ds$$

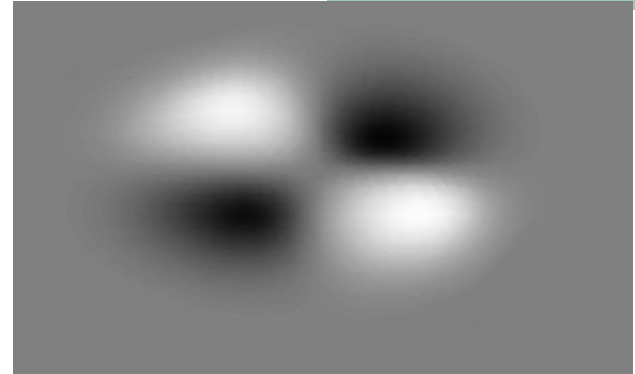
В случае, если $k' \gg 1$ приближенно контраст равен: $\Delta\varphi_\varphi = \frac{60\pi M_s^2 \varepsilon_1^2}{\varepsilon_2 k'^2}$

Отношение $\frac{\Delta\varphi_\varphi}{\Delta\varphi_\theta} \approx \frac{2}{\pi k'^2} \ll 1$ при $k' \gg 1$.

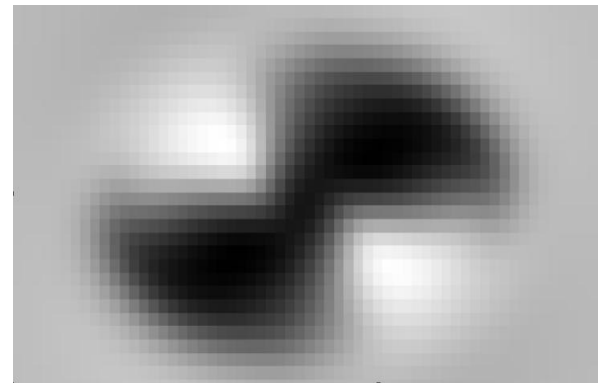
Влияние поля зонда магнитно-силового микроскопа на распределение намагниченности в исследуемых образцах



Экспериментальное МСМ
изображение вихревой частицы



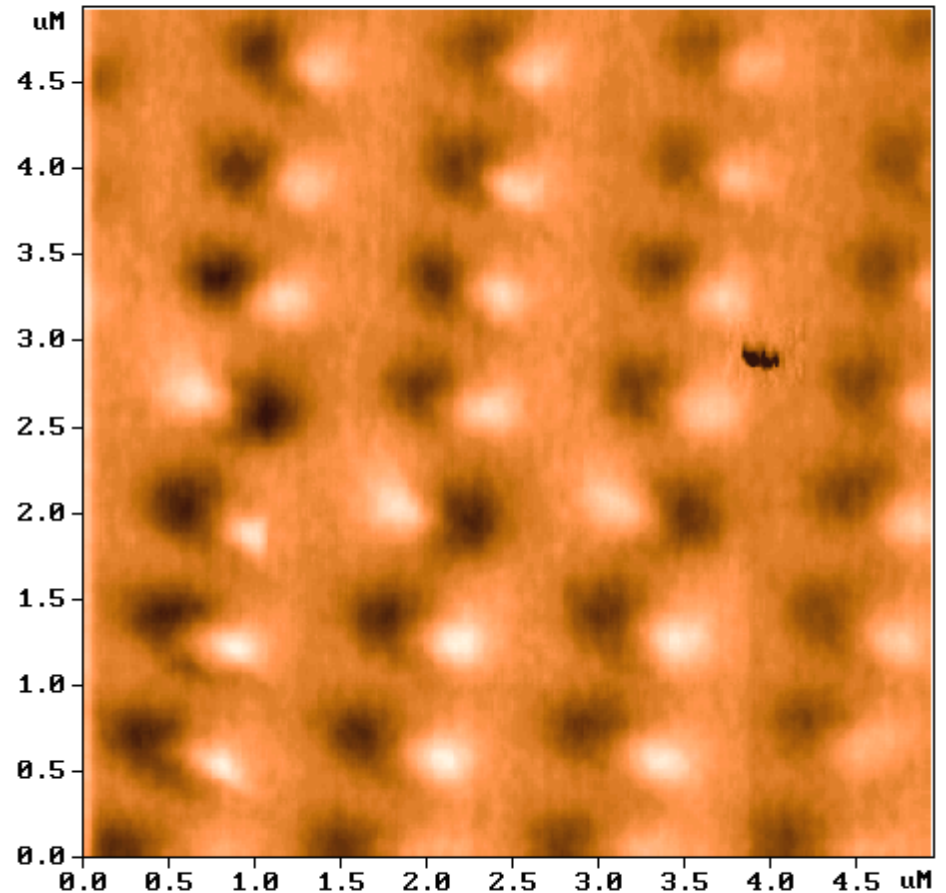
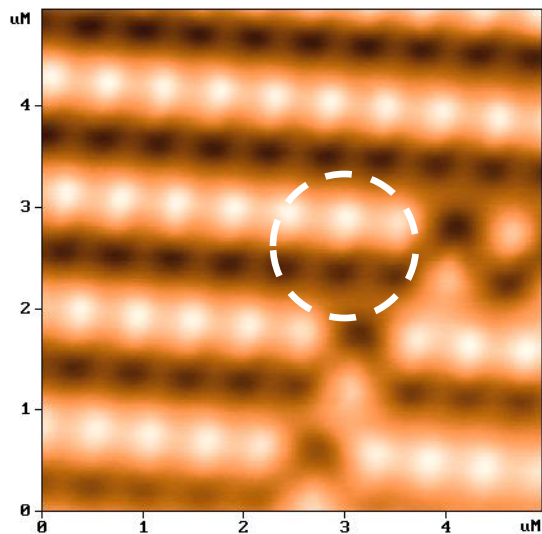
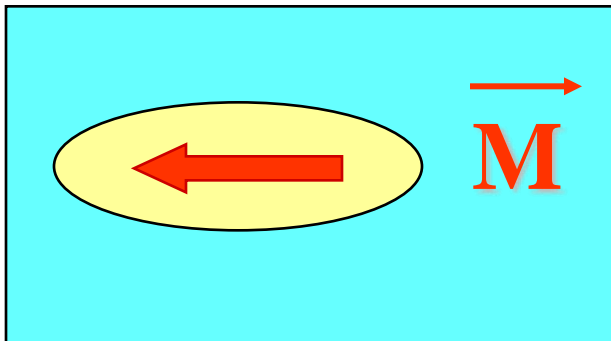
Численное моделирование без учета
возмущения намагниченности частицы



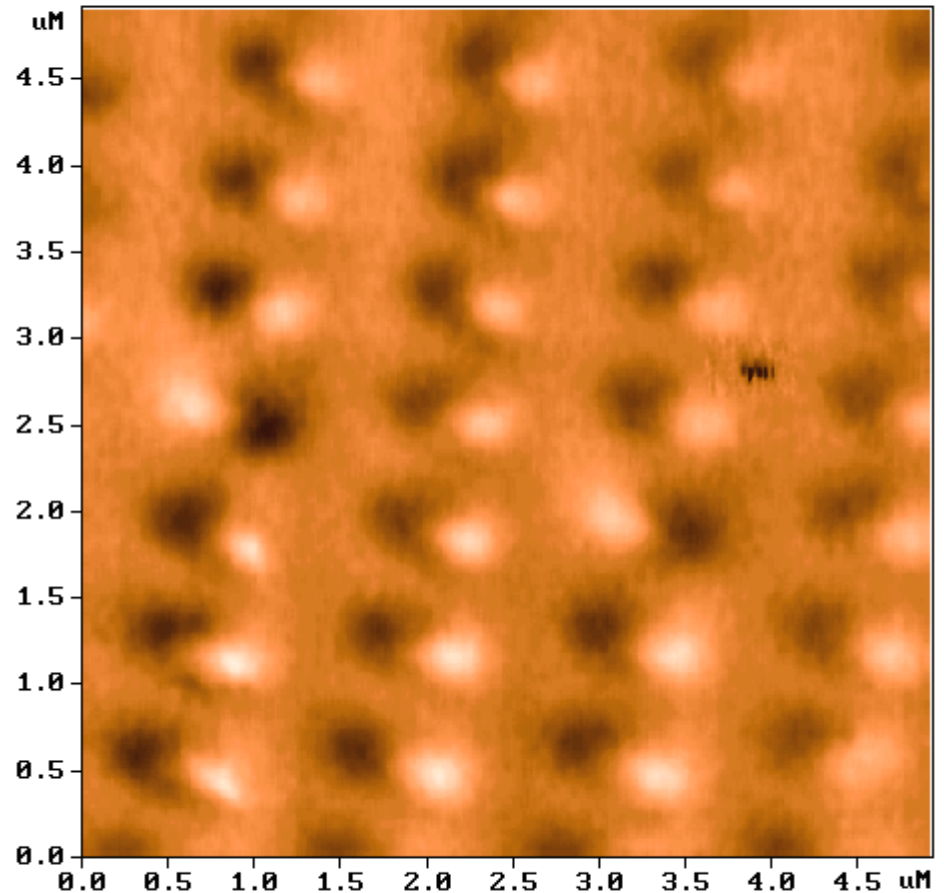
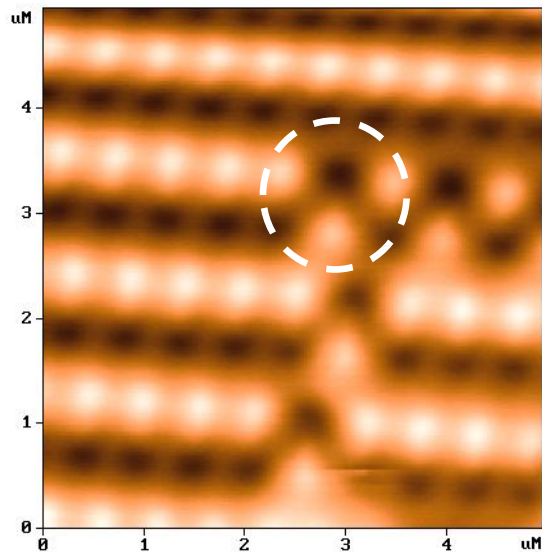
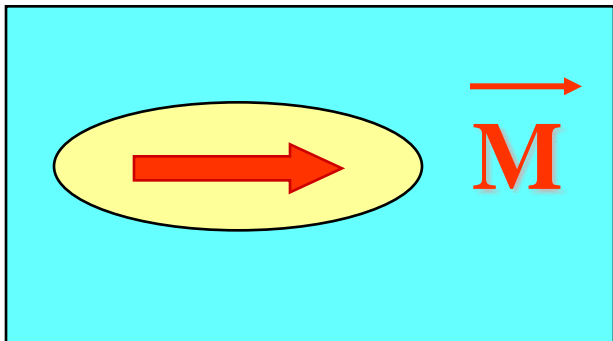
Численное моделирование с учетом
возмущения намагниченности частицы

Перемагничивание МСМ зондом однородно намагниченной частицы

Индивидуальный акт перемагничивания частицы

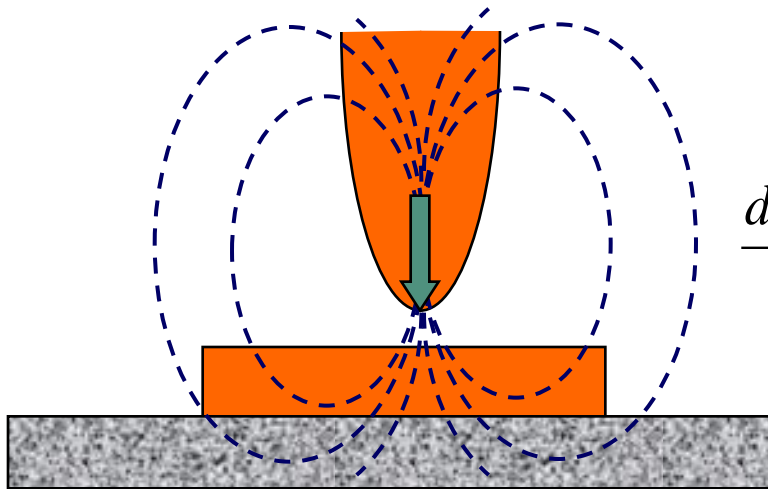


Индивидуальный акт перемагничивания частицы



Моделирование процессов МСМ перемагничивания

Приближение точечного зонда

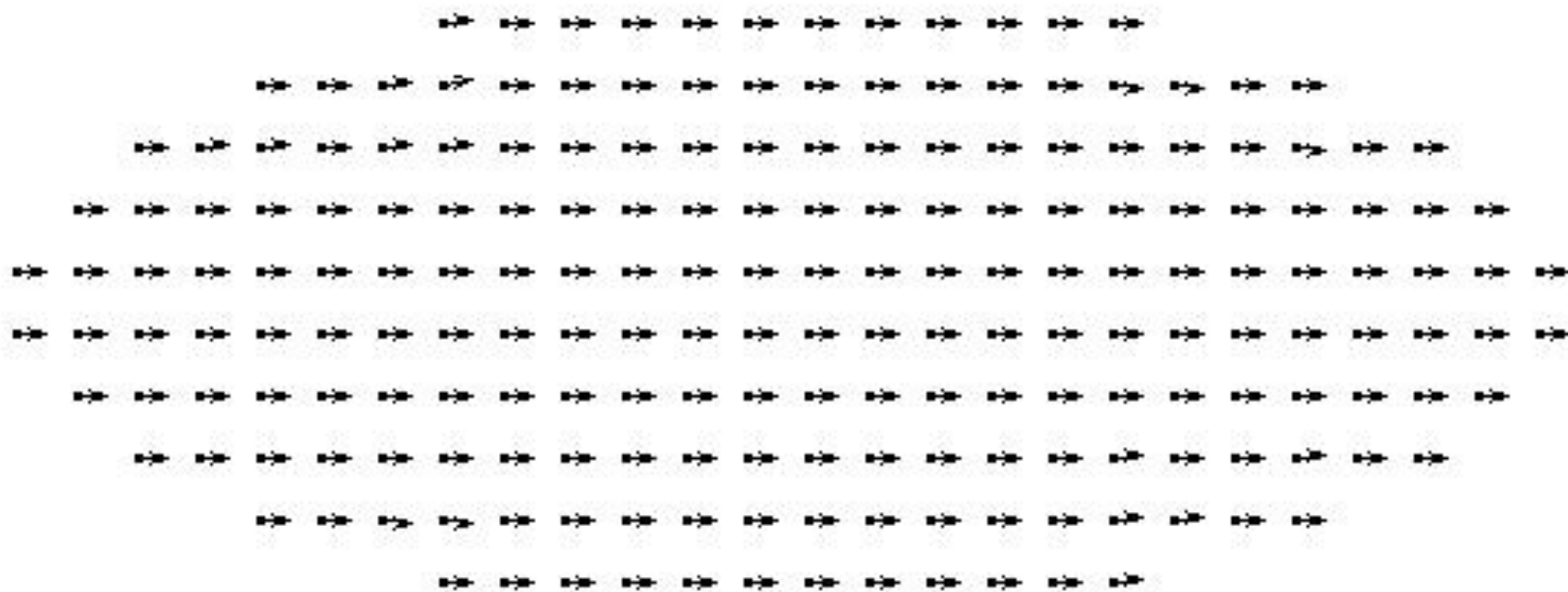


Уравнения Ландау - Лифшица

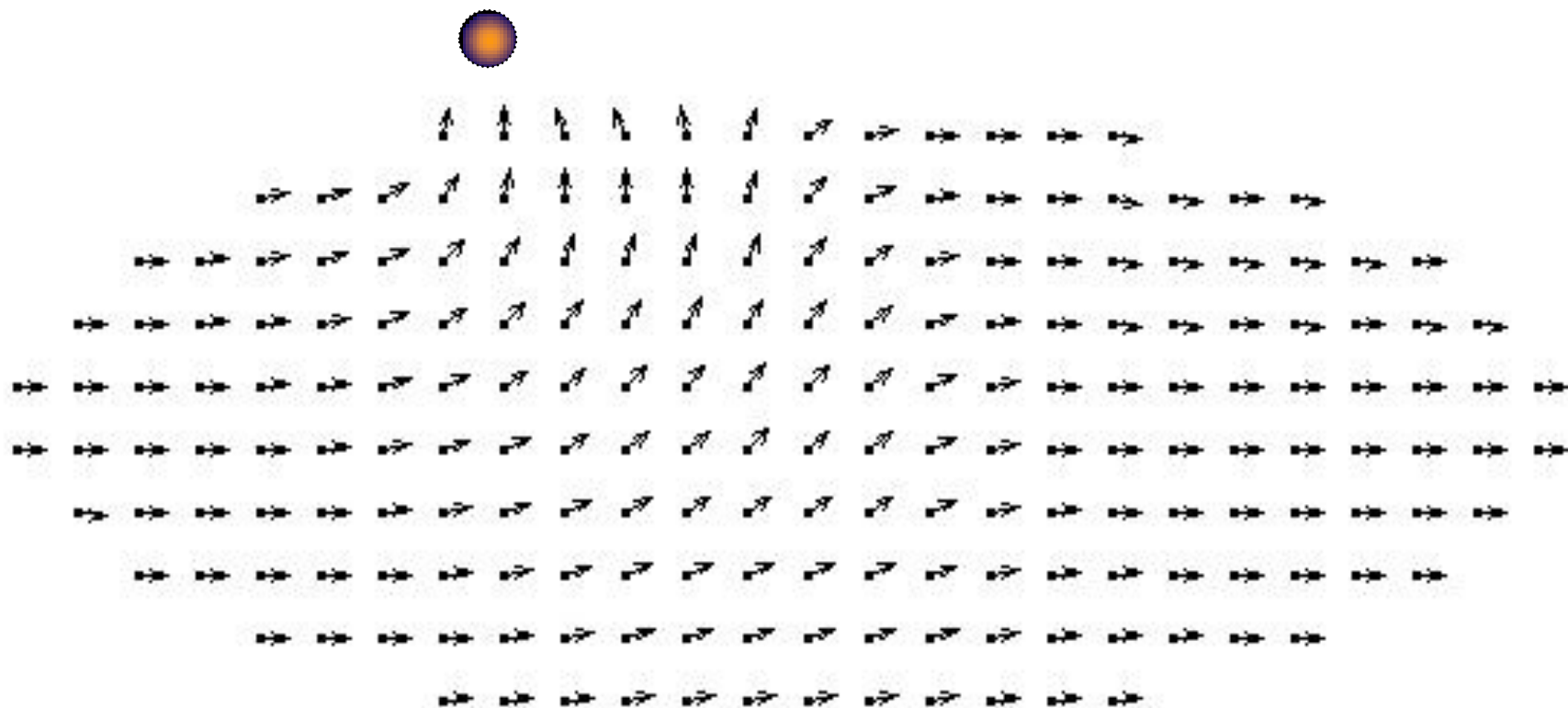
$$\frac{d\vec{m}_s^j}{dt} = -\gamma [\vec{m}_s^j \times \vec{H}_{eff}^j] - \frac{\lambda}{|\vec{m}_s^j|^2} [\vec{m}_s^j \times [\vec{m}_s^j \times \vec{H}_{eff}^j]]$$

$$\vec{M}_p = \vec{m}_{eff} V_{eff}$$

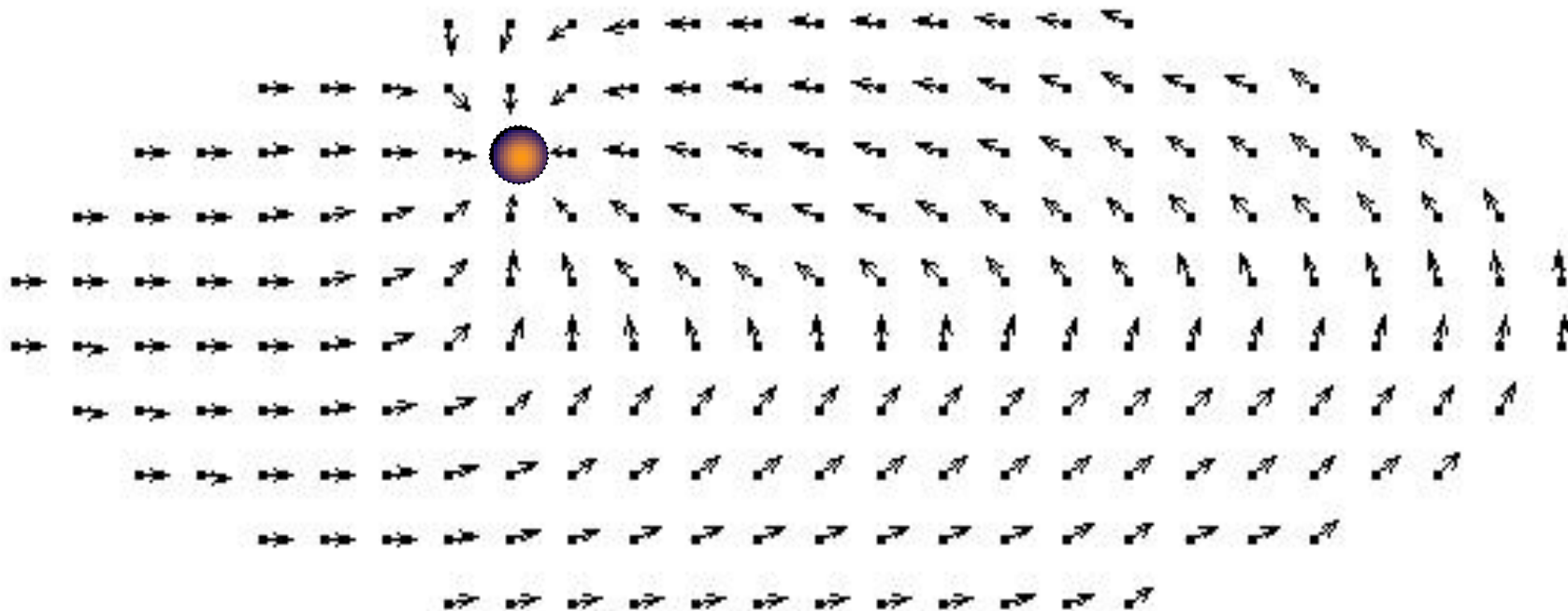
Моделирование процессов МСМ перемагничивания



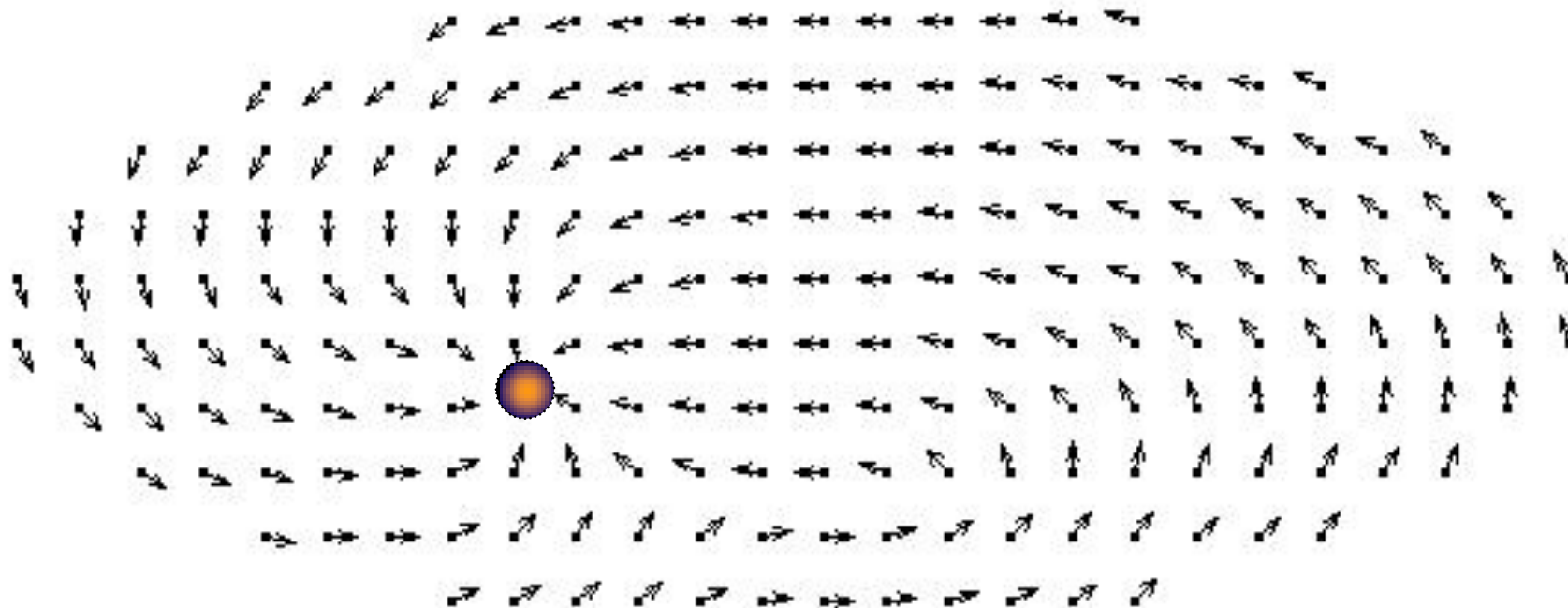
Моделирование процессов МСМ перемагничивания



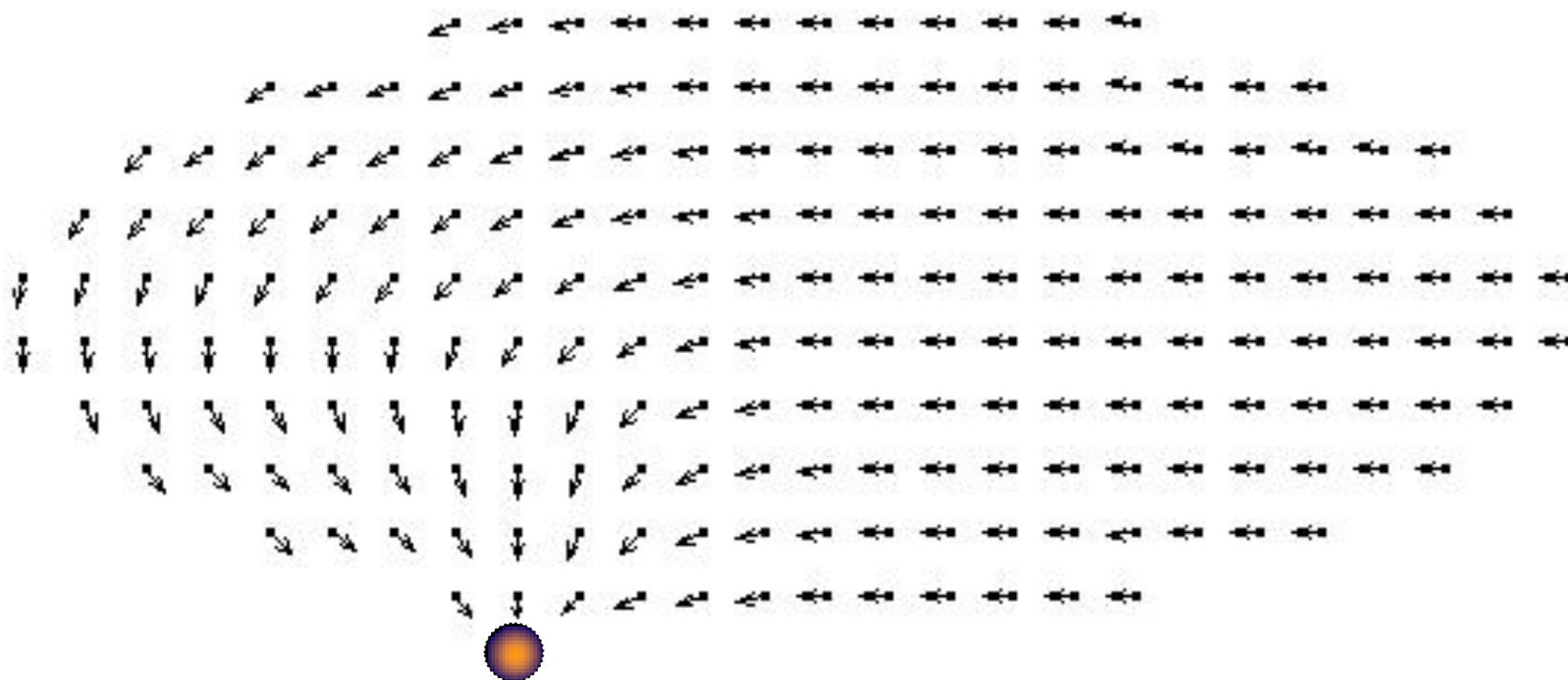
Моделирование процессов МСМ перемагничивания



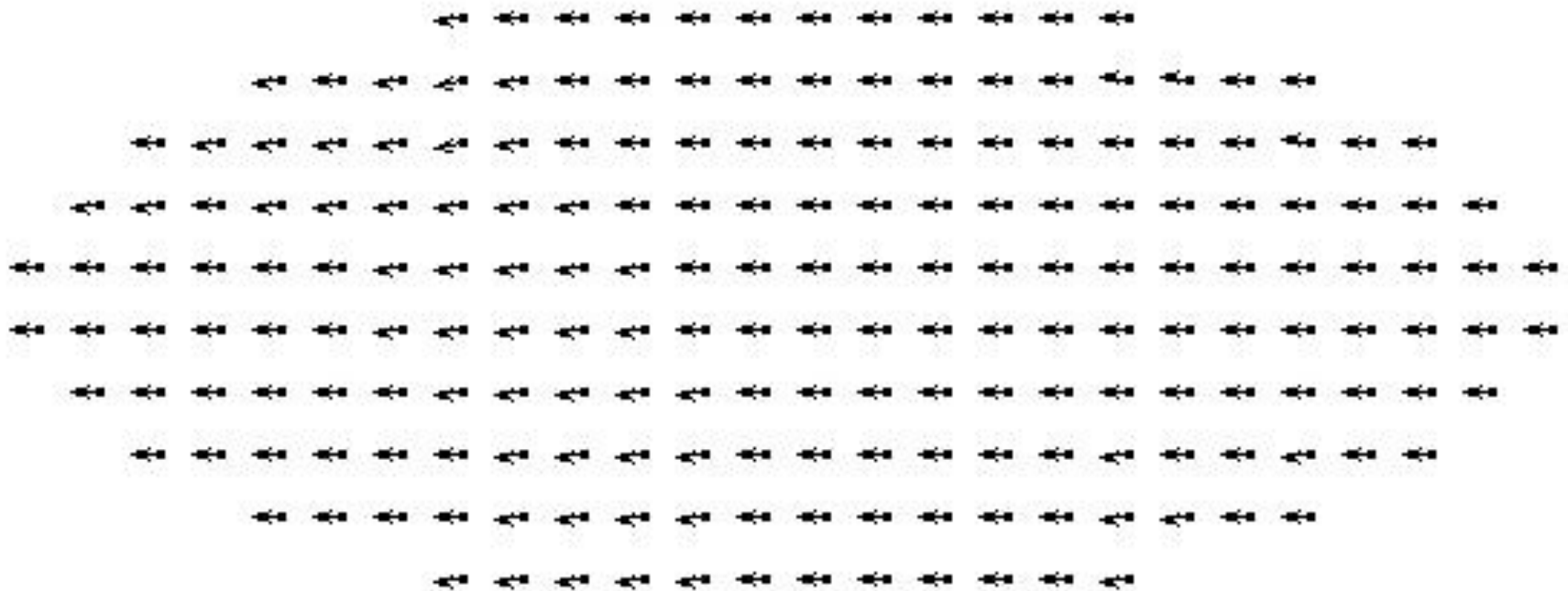
Моделирование процессов МСМ перемагничивания




Моделирование процессов МСМ перемагничивания



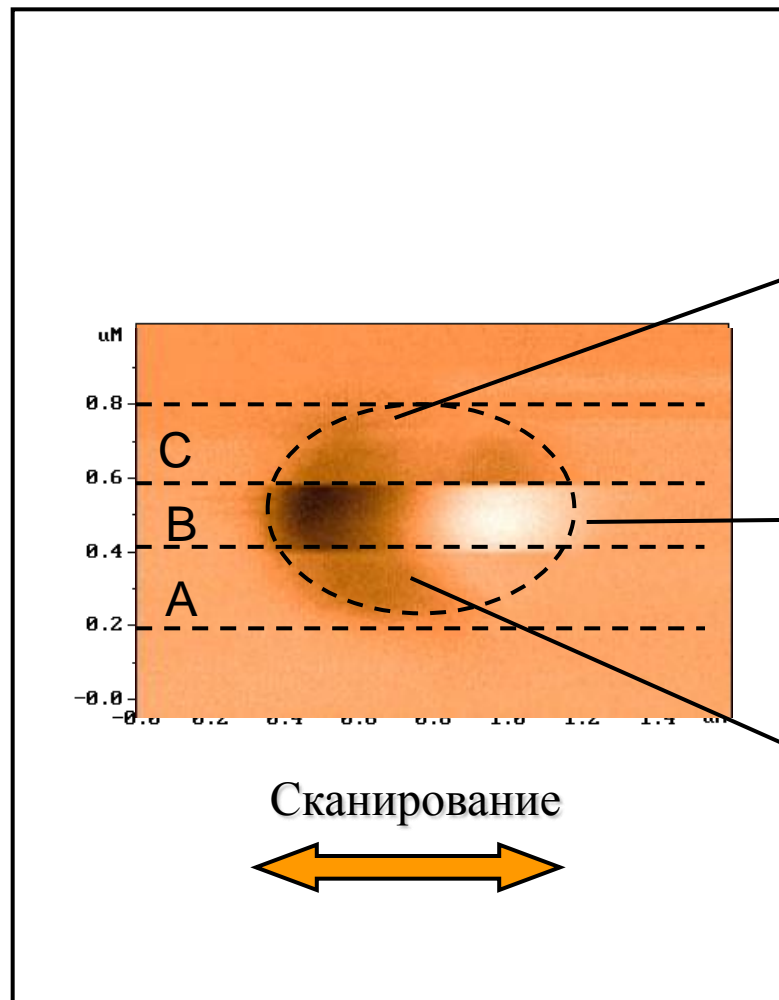
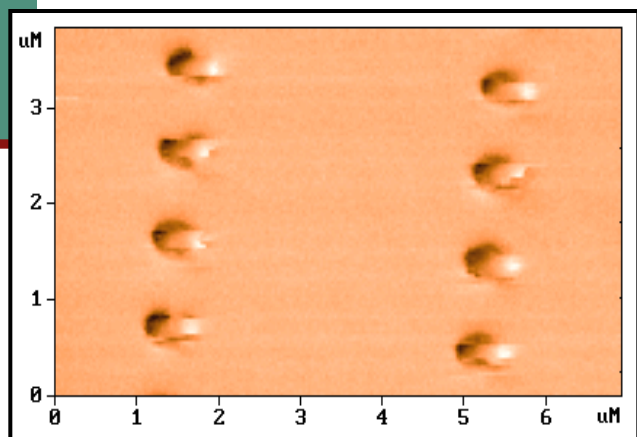
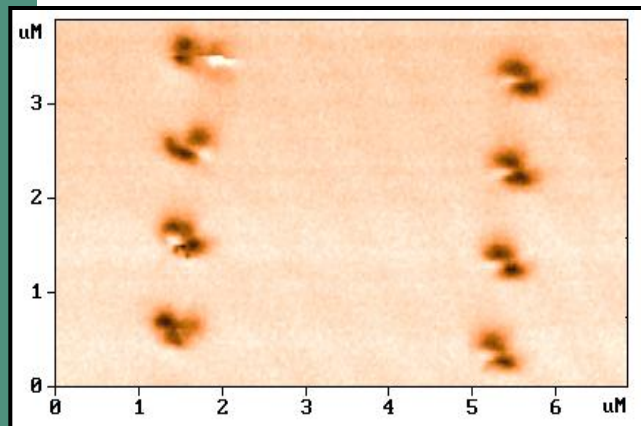
Моделирование процессов МСМ перемагничивания



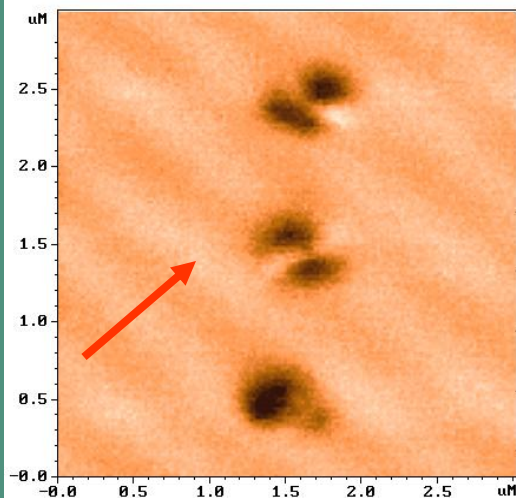


Перемагничивание МСМ зондом частицы с вихревым распределением намагниченности

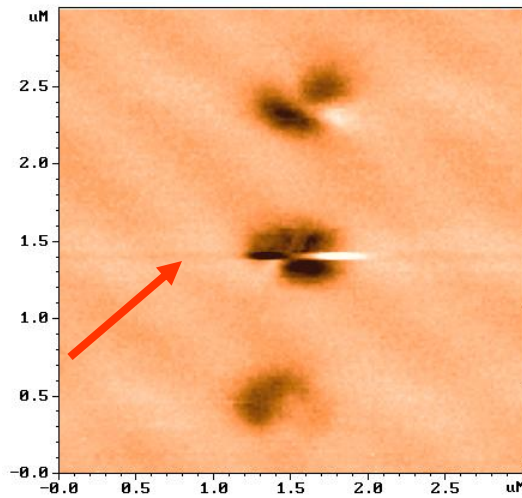
Экспериментальное наблюдение эффектов перемагничивания вихревых частиц



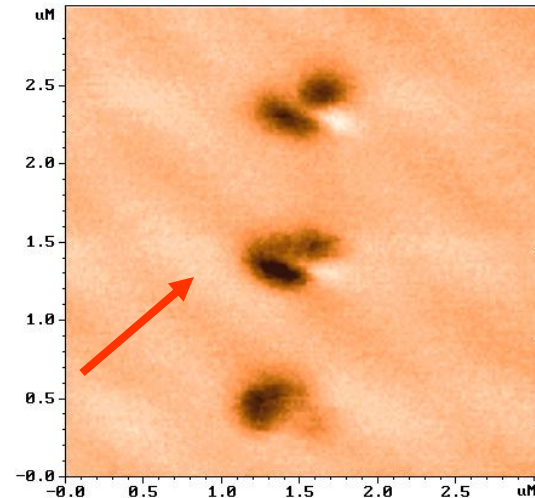
Индукированные зондом MCM переходы $VS \Rightarrow US \Rightarrow VS$



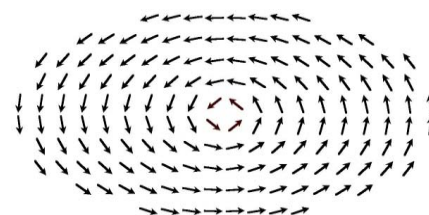
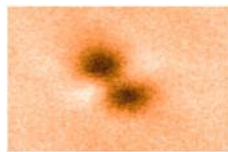
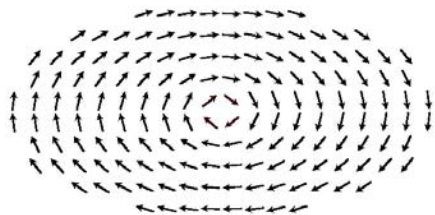
Правый вихрь



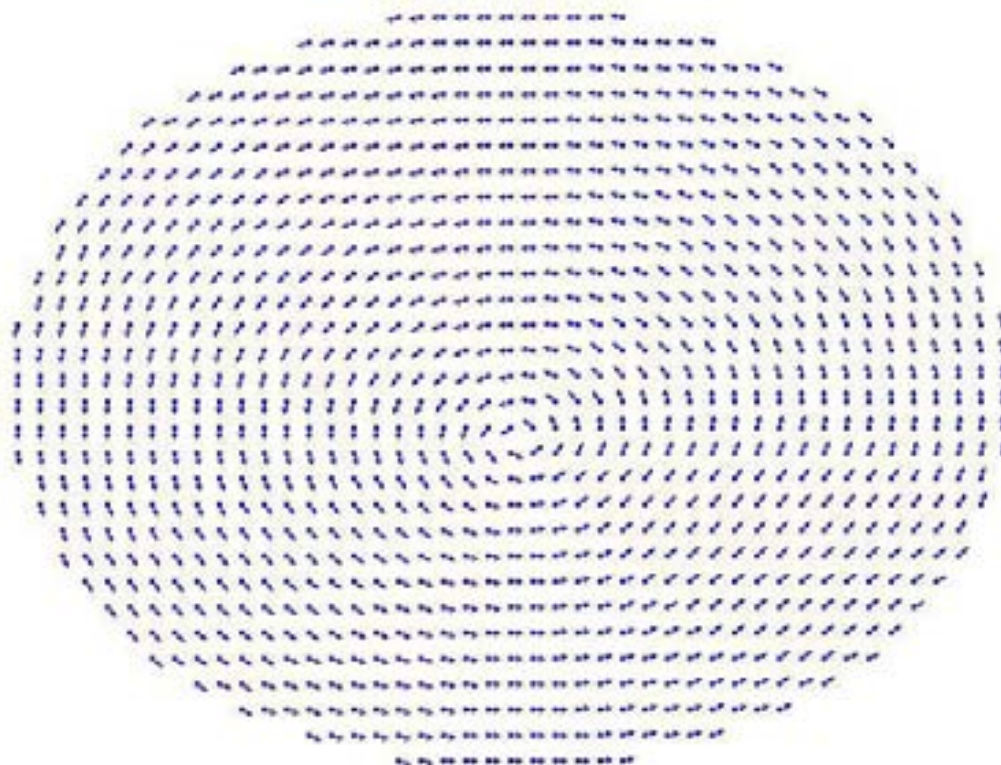
Переход в
однородное
состояние



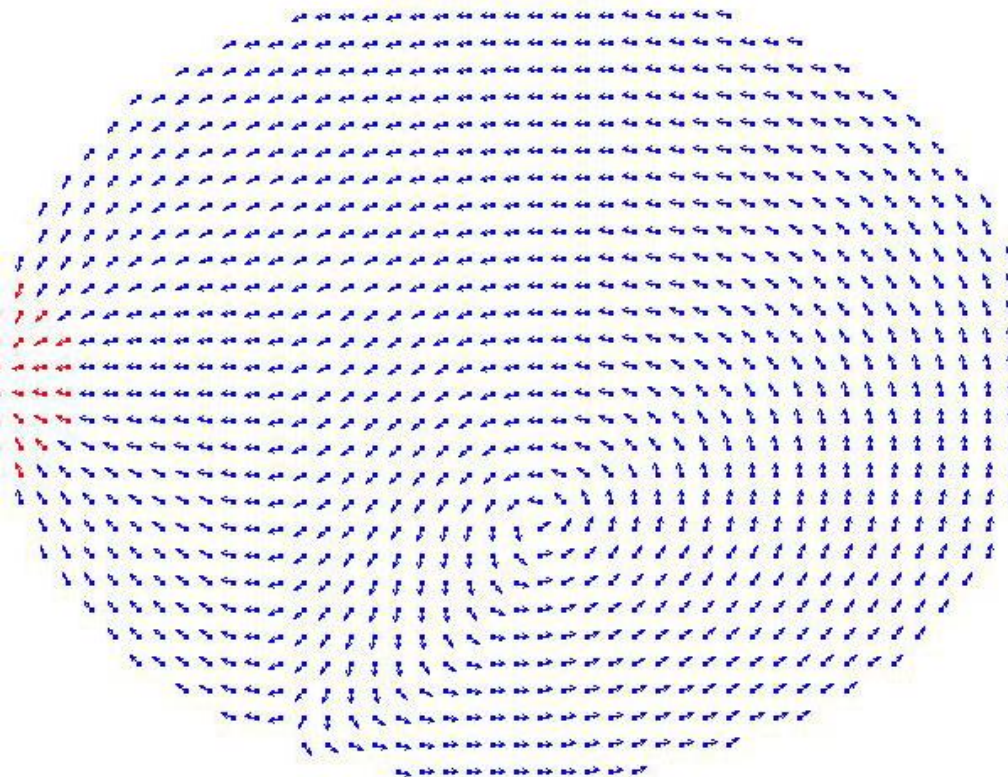
Левый вихрь

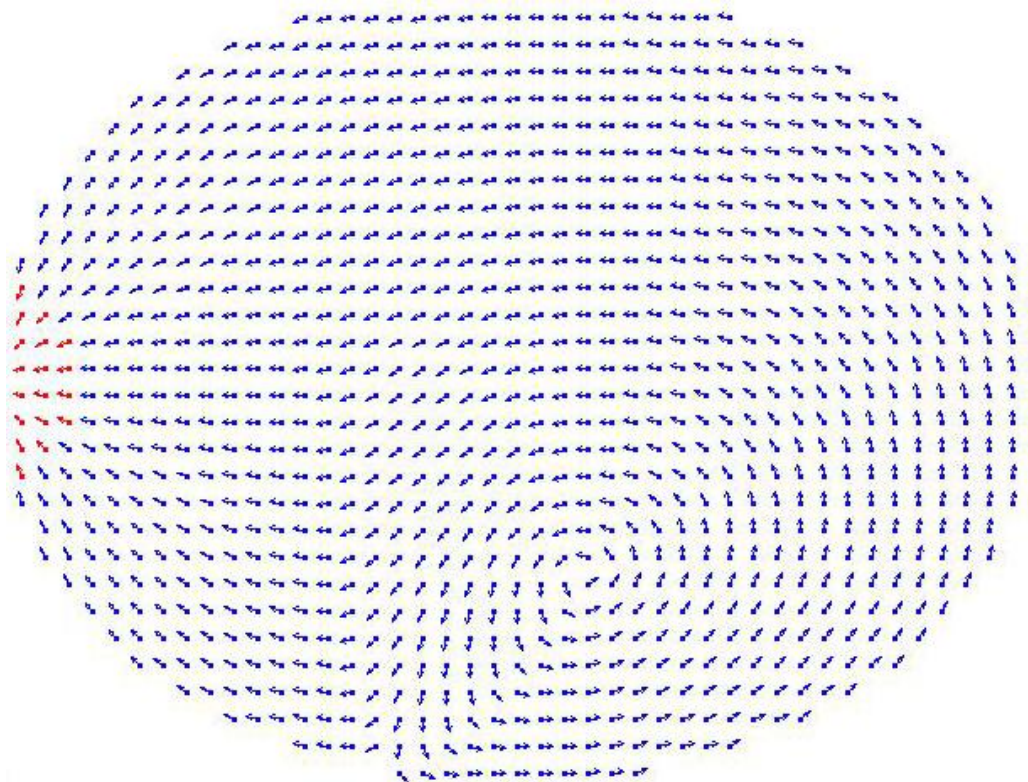


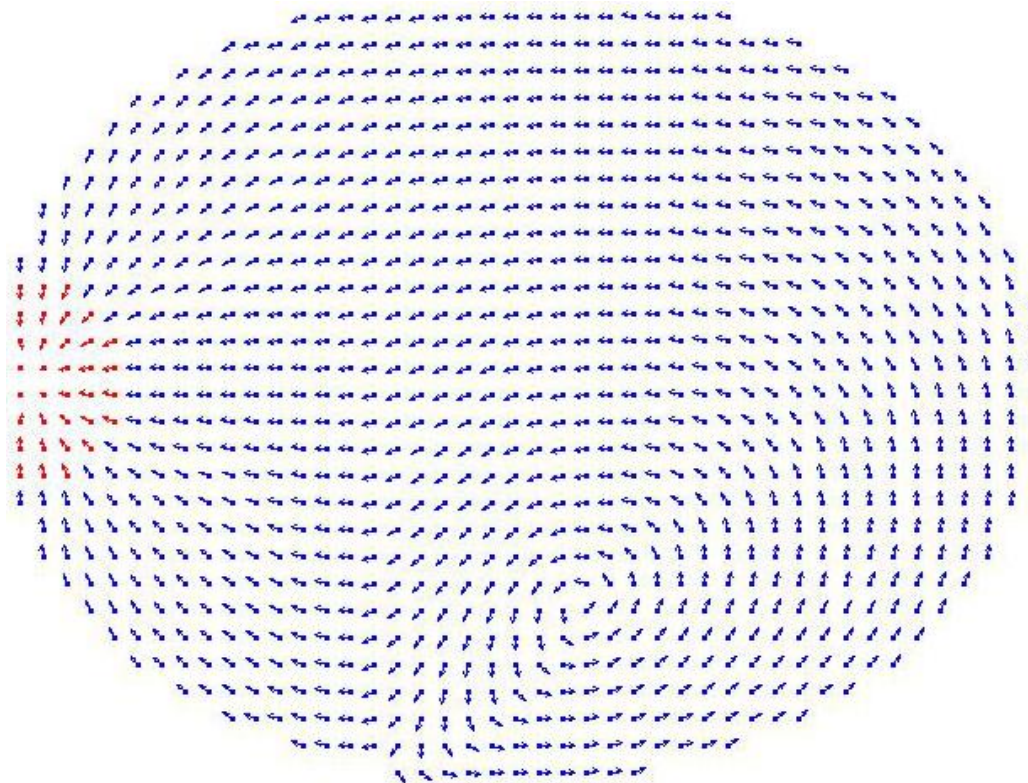
Компьютерное моделирование перехода вихревого состояния в однородное.

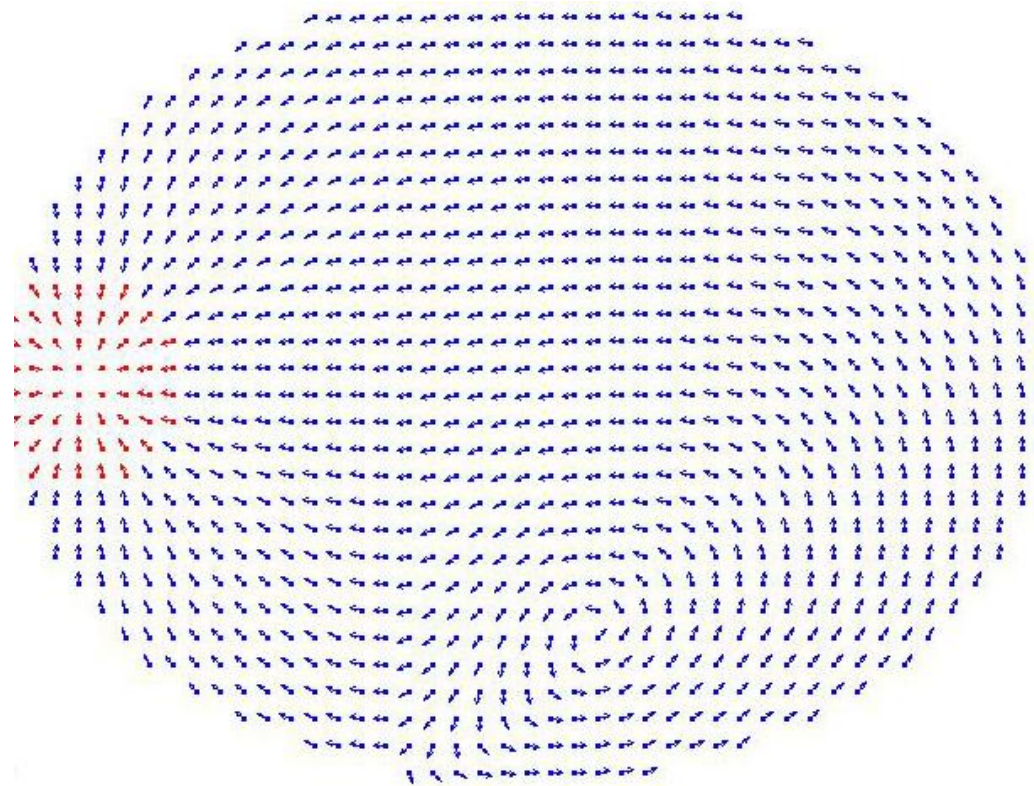


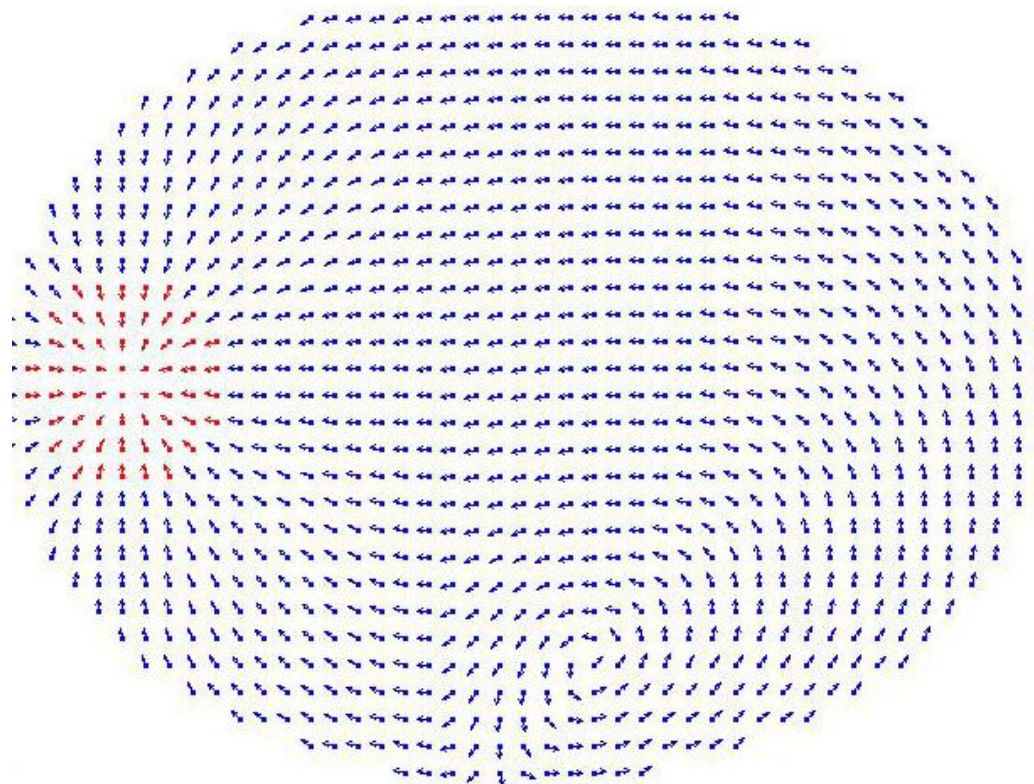
MFM probe

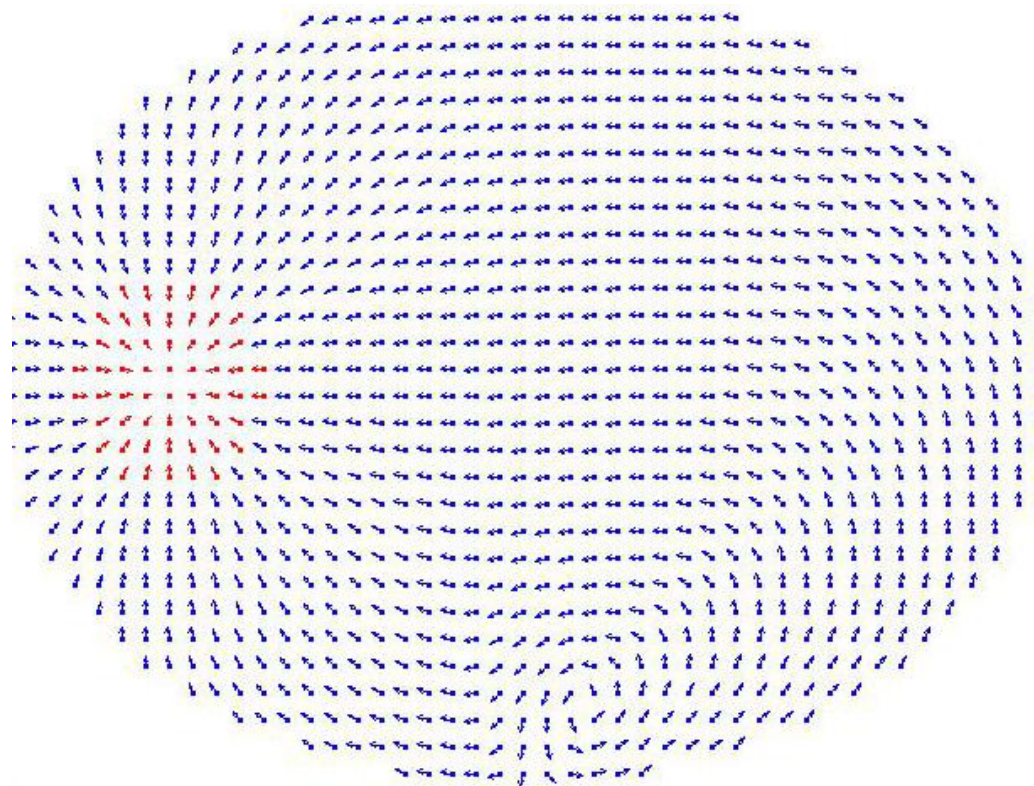


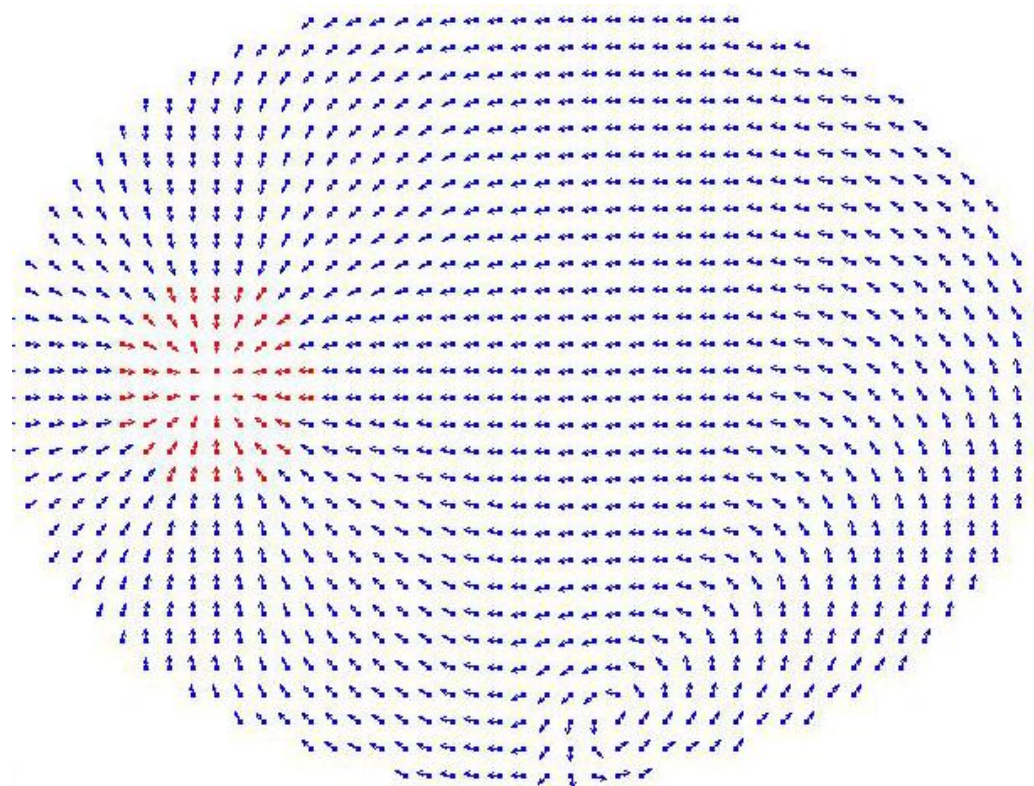


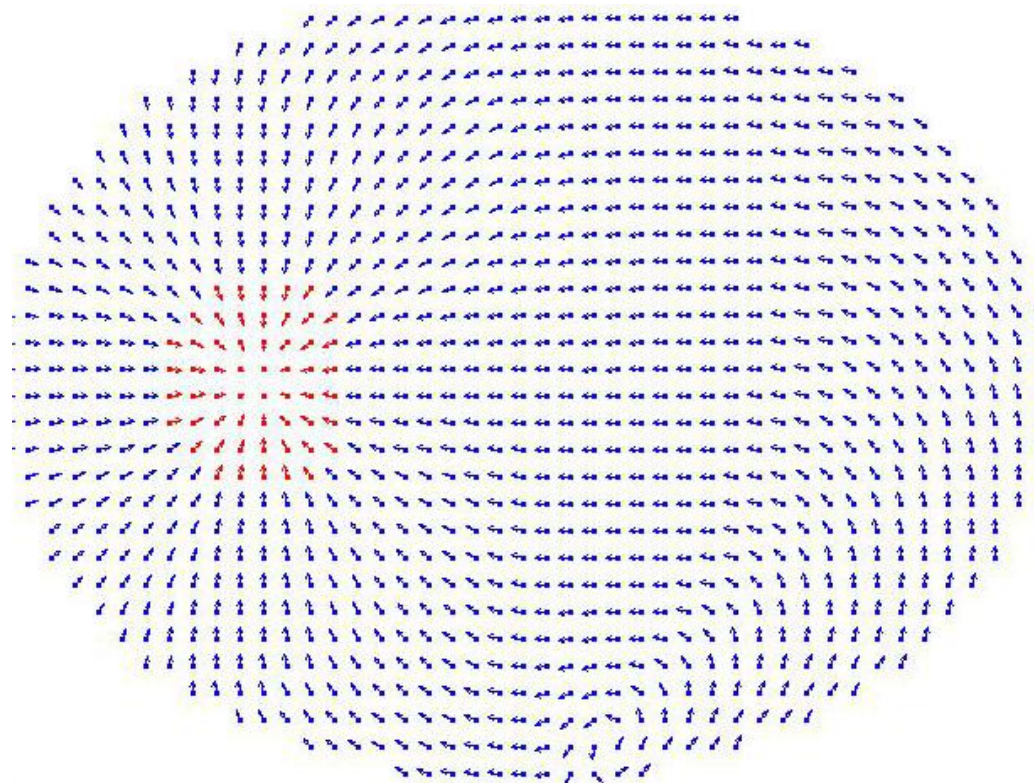


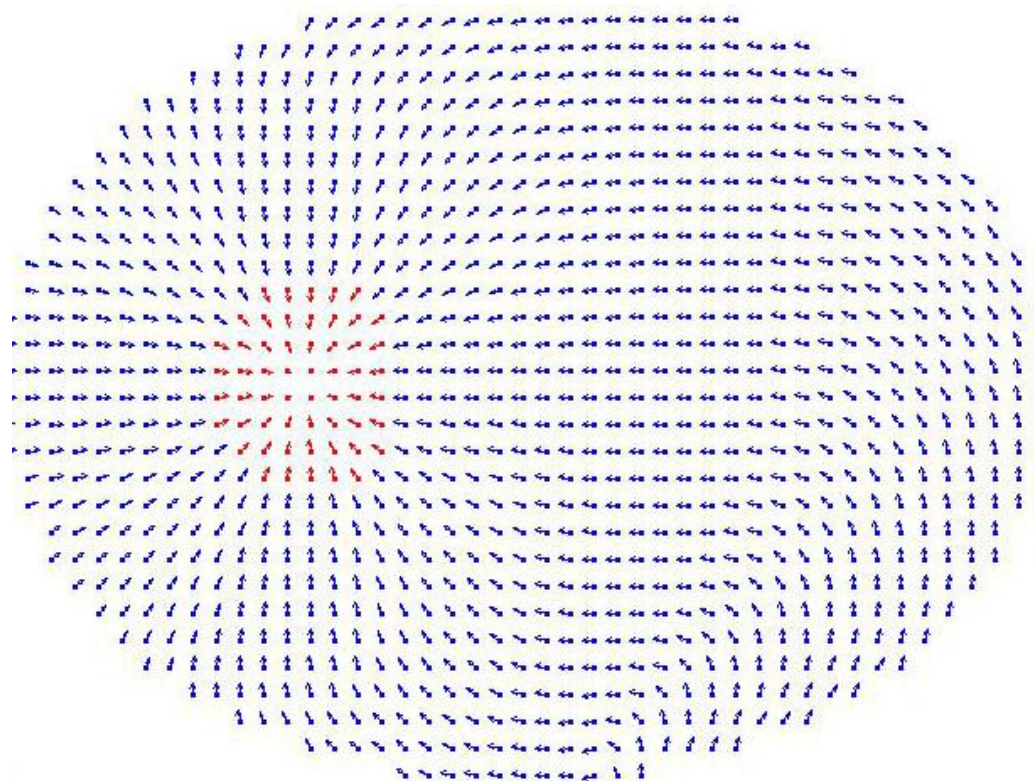


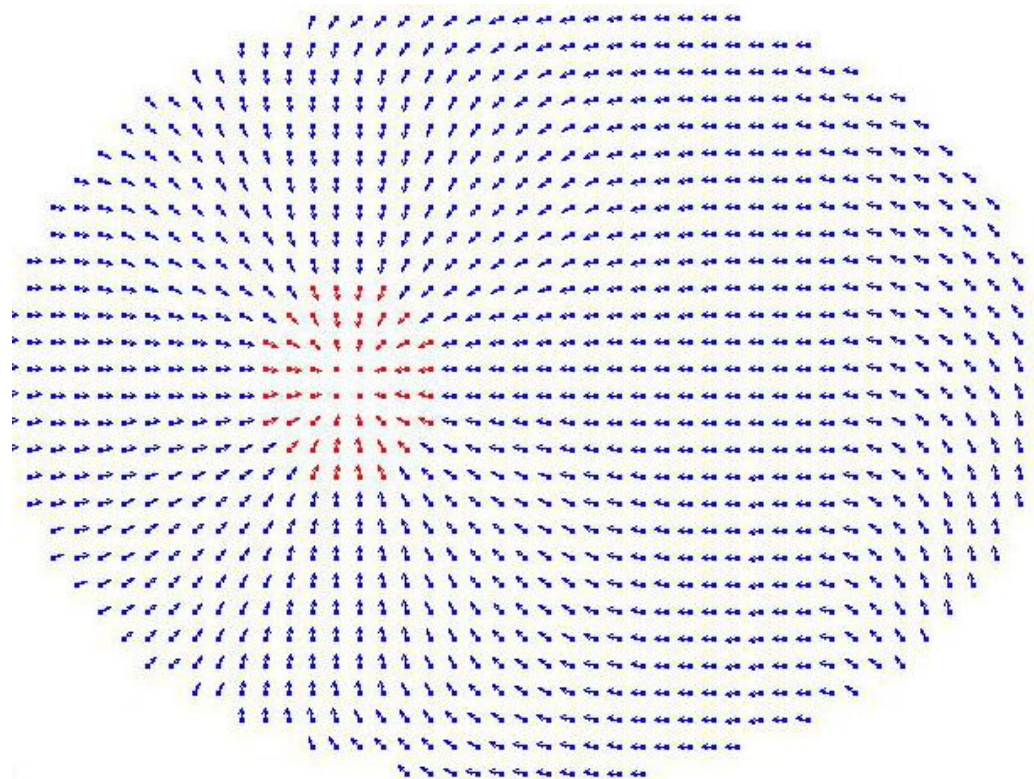


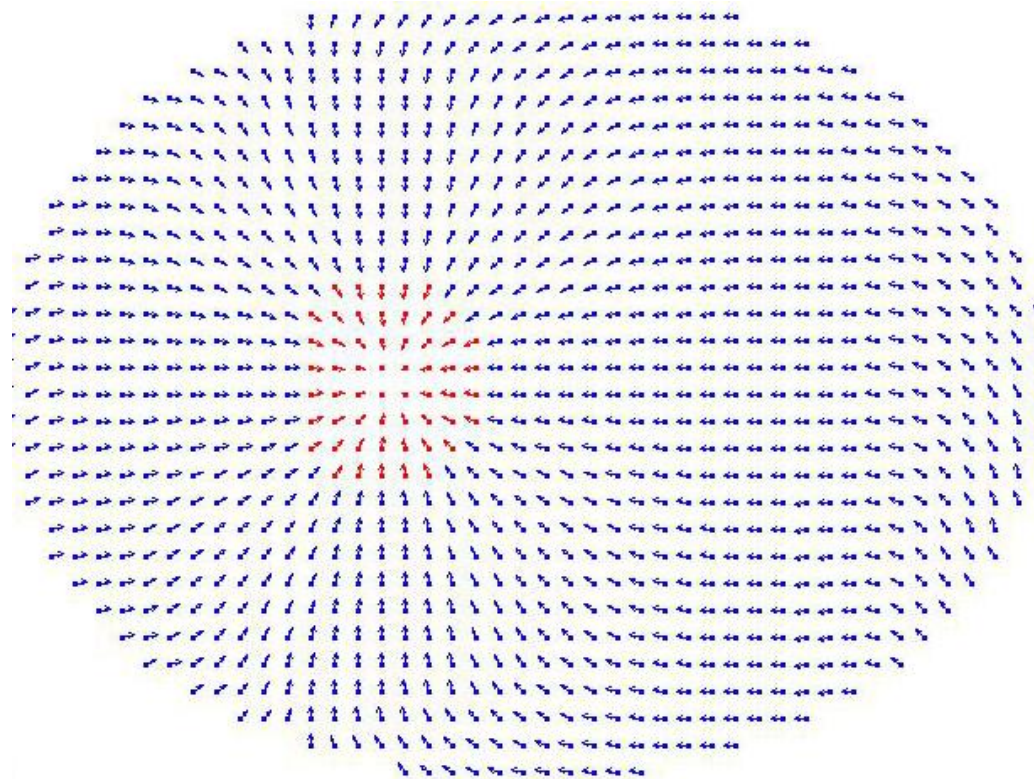


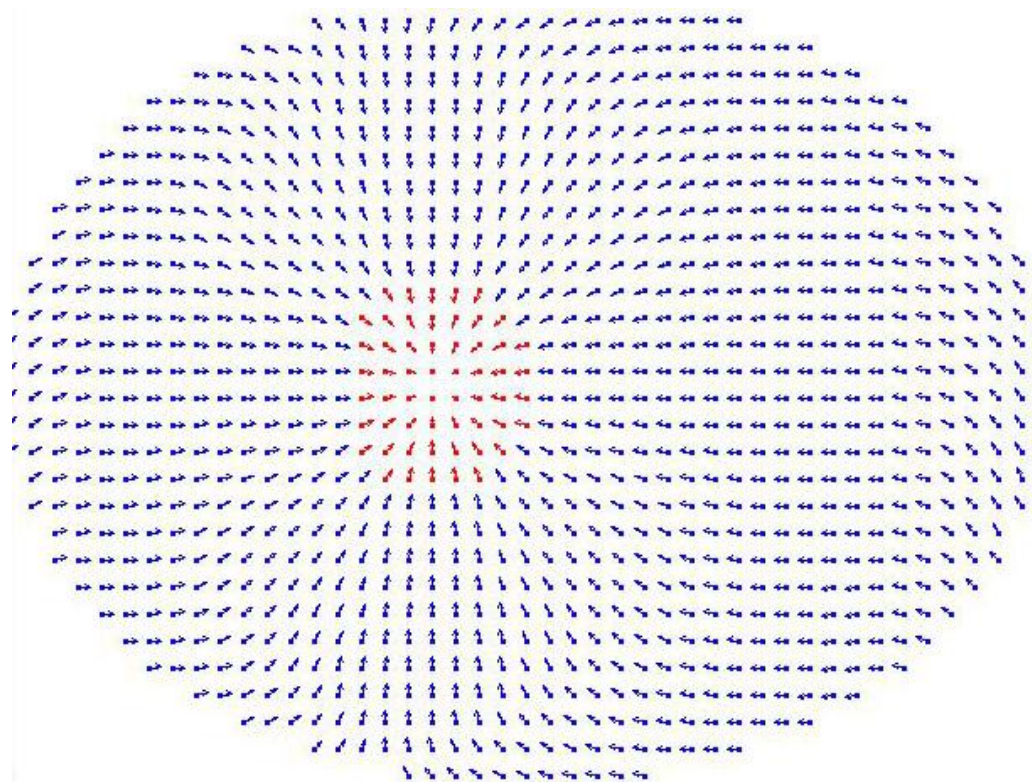


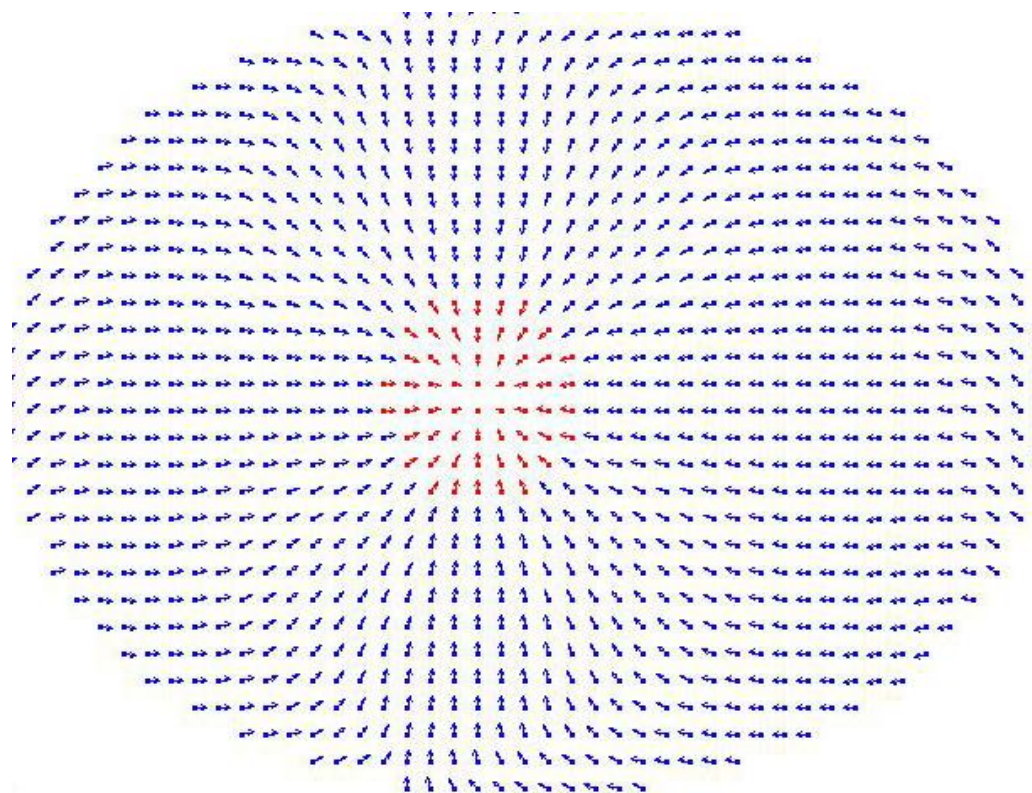


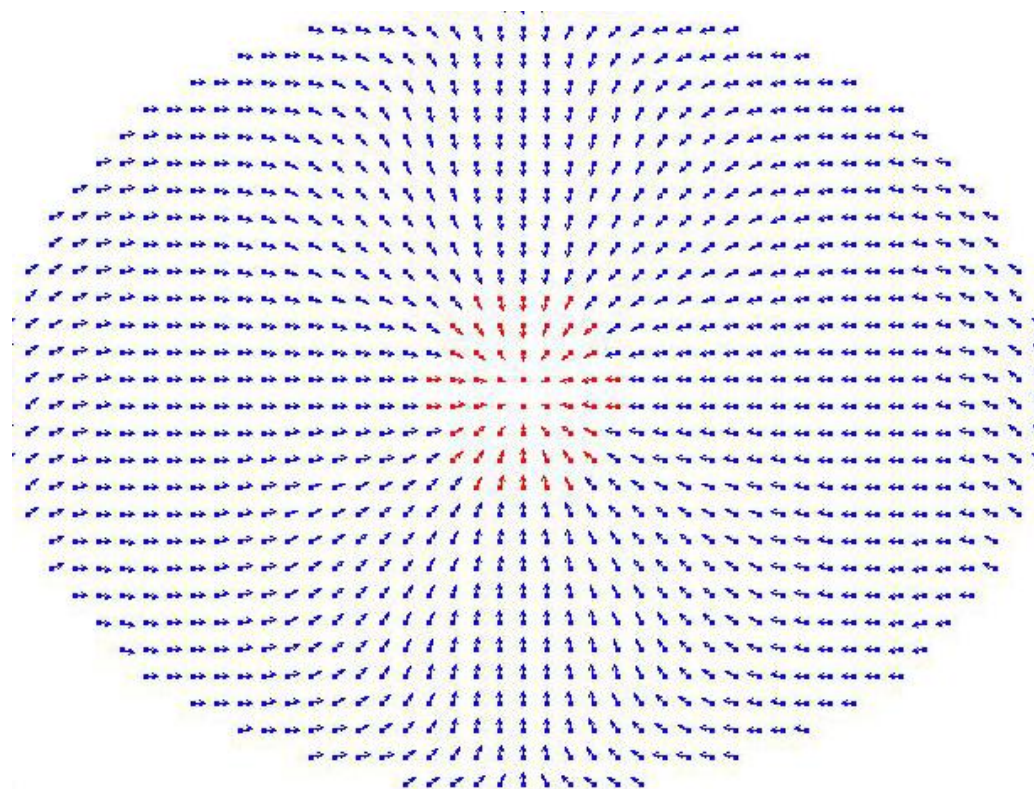


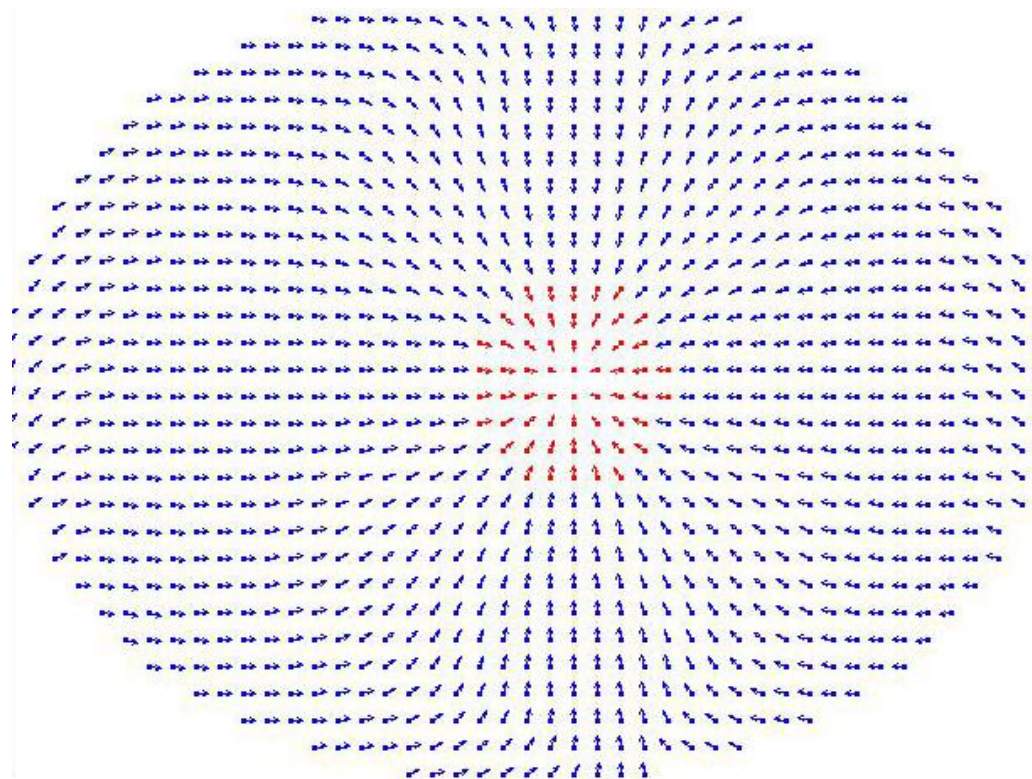


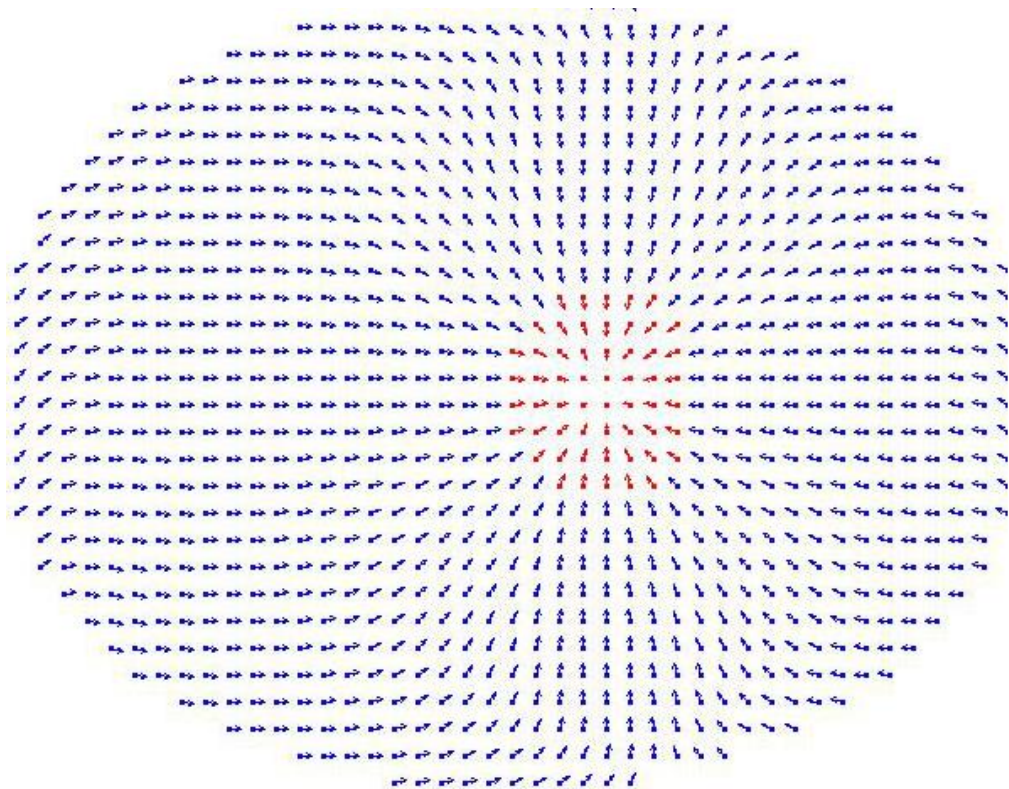


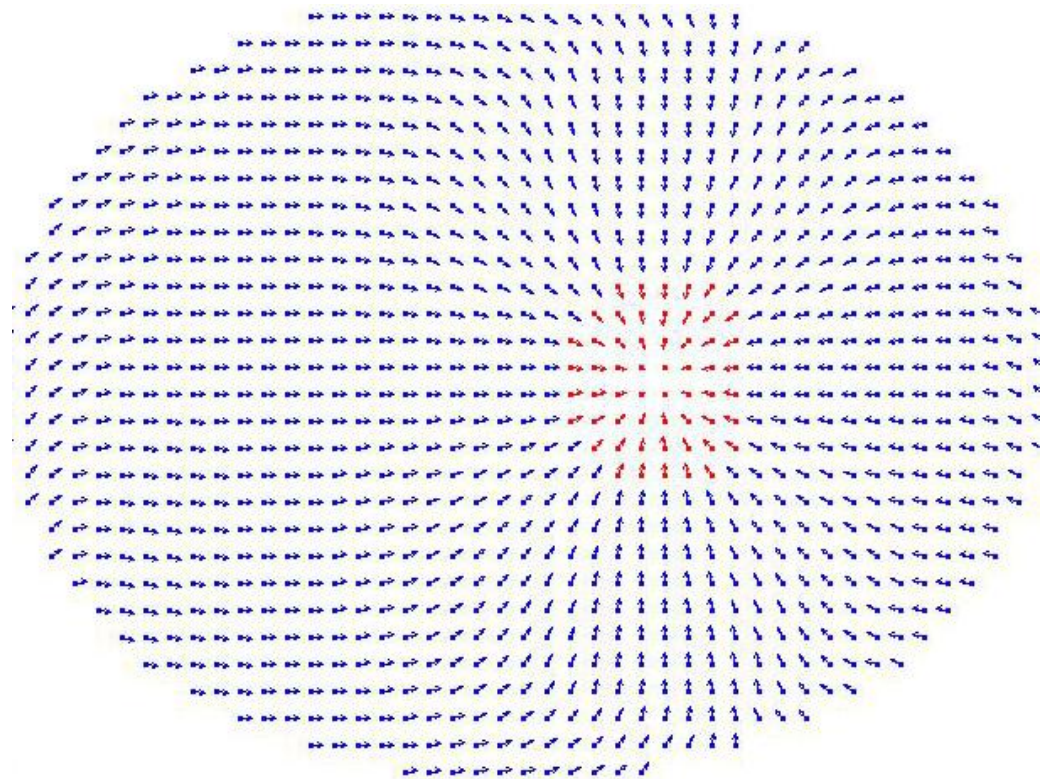


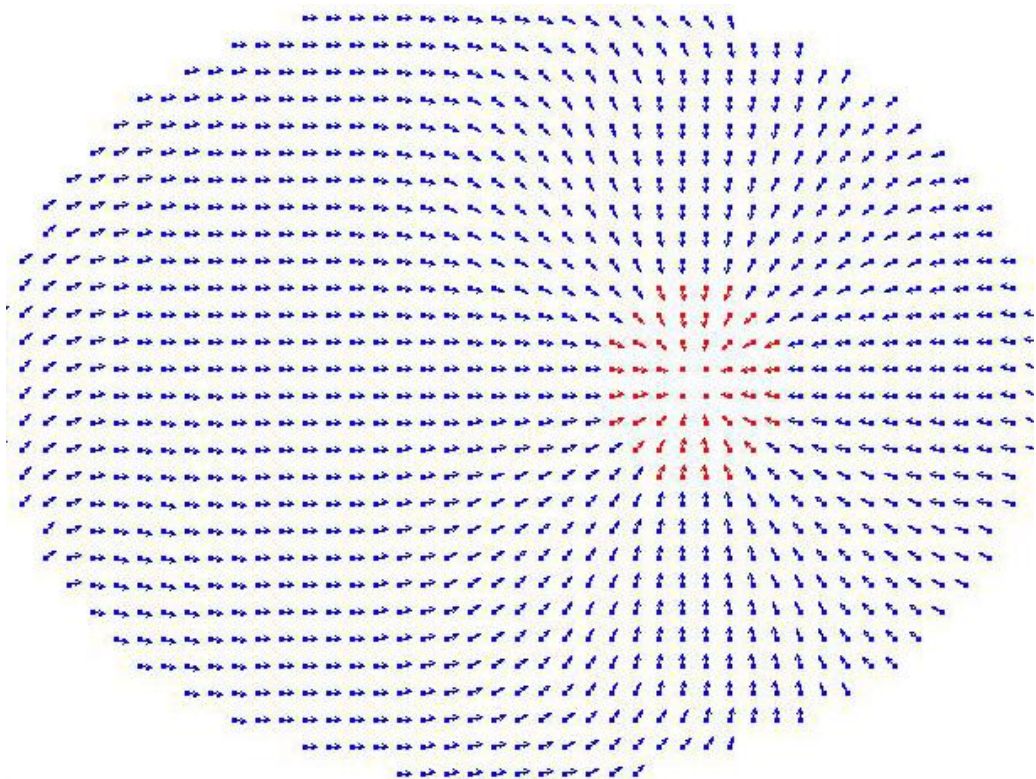


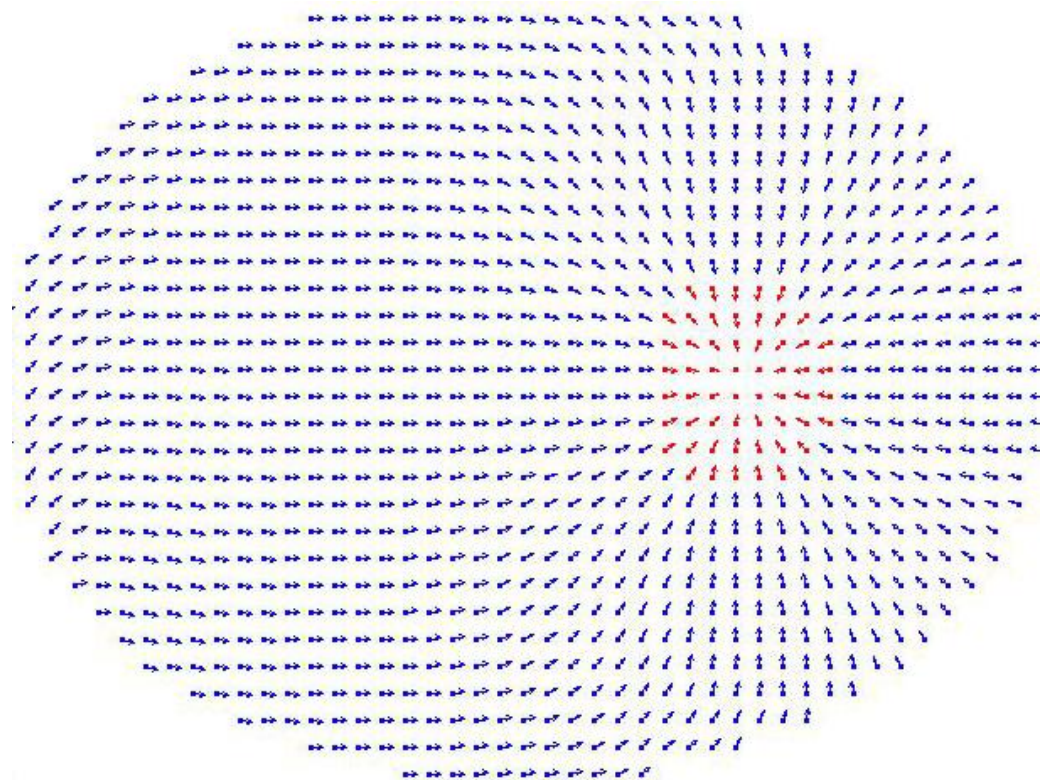


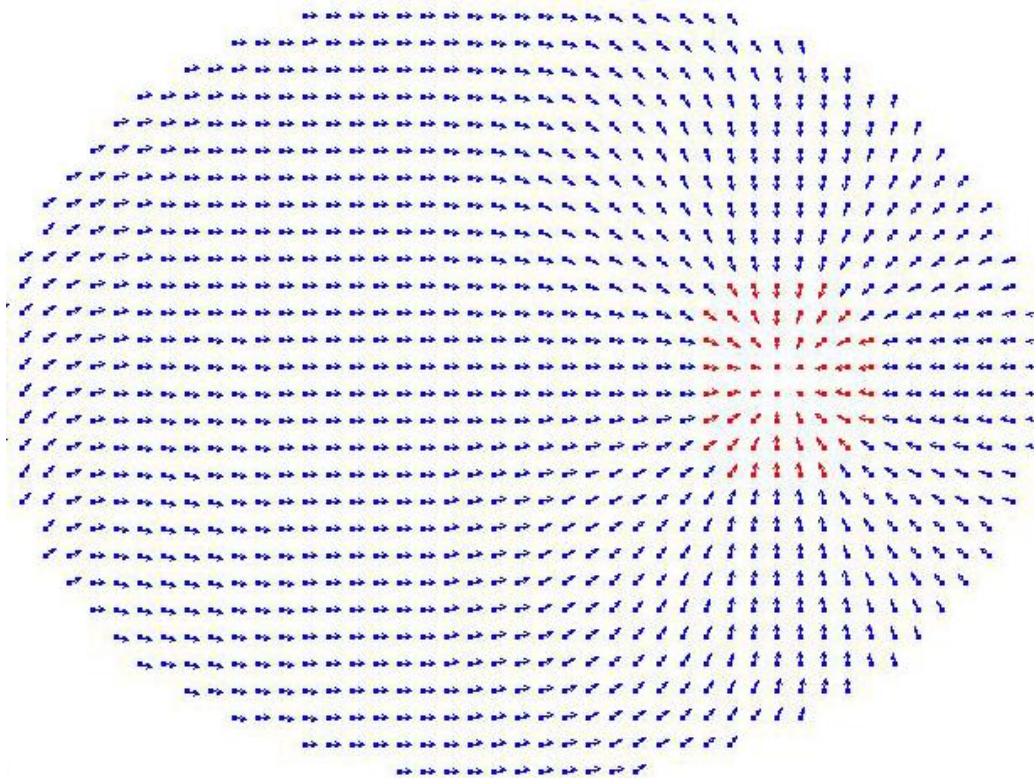


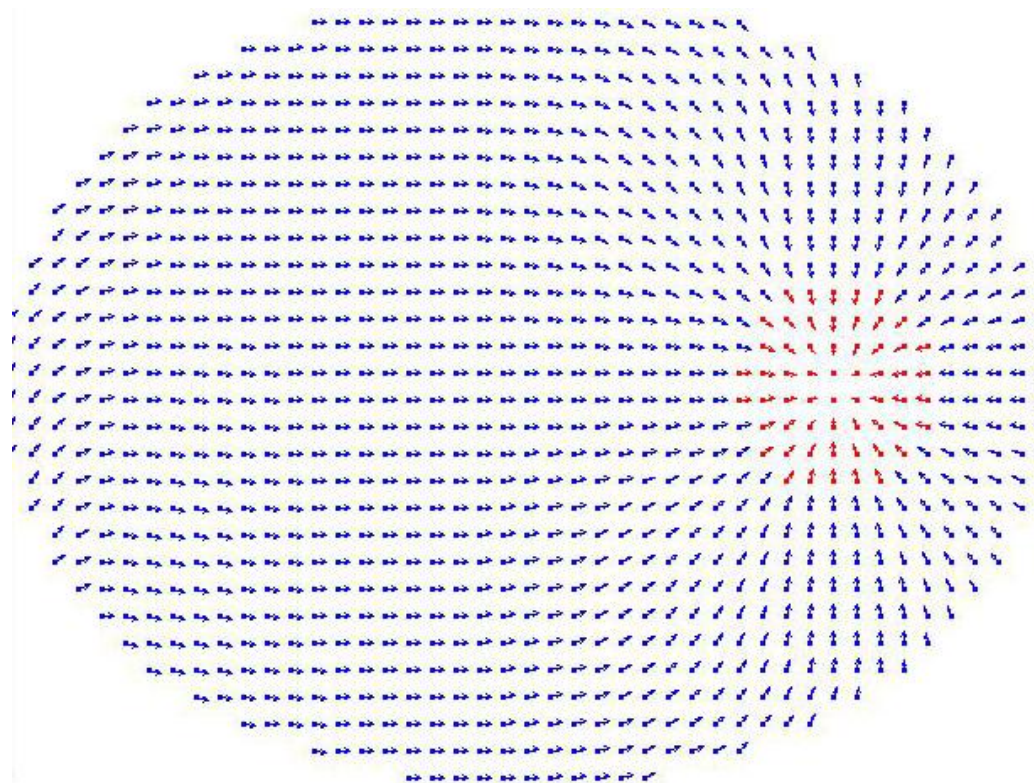


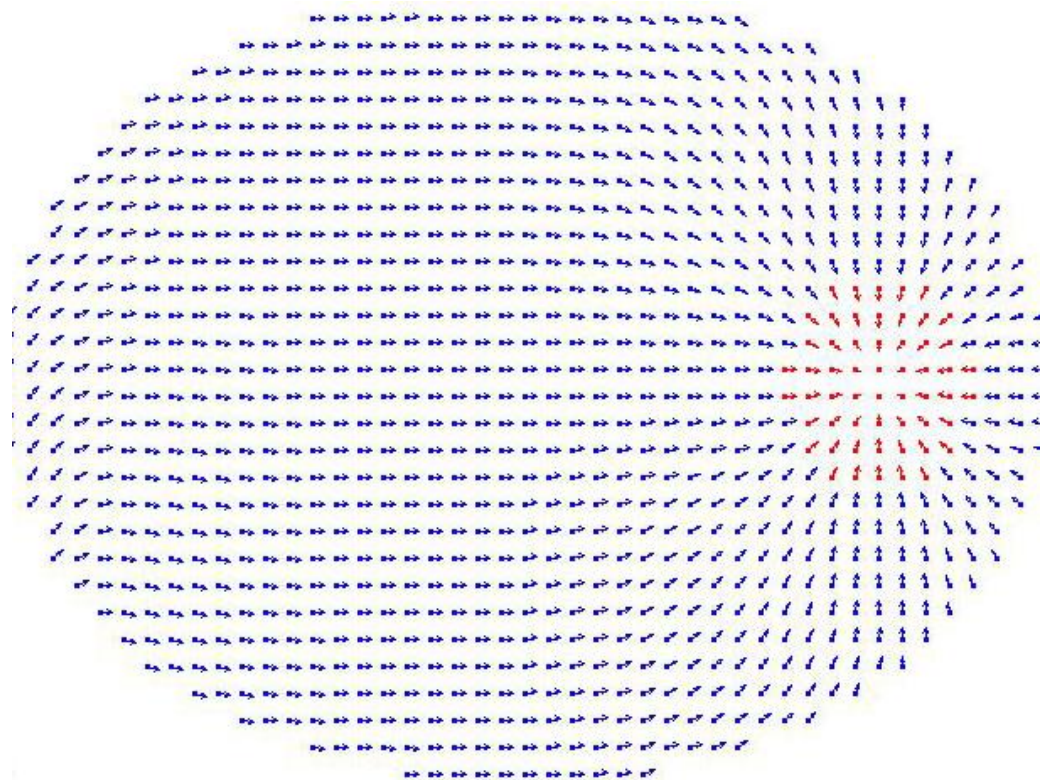


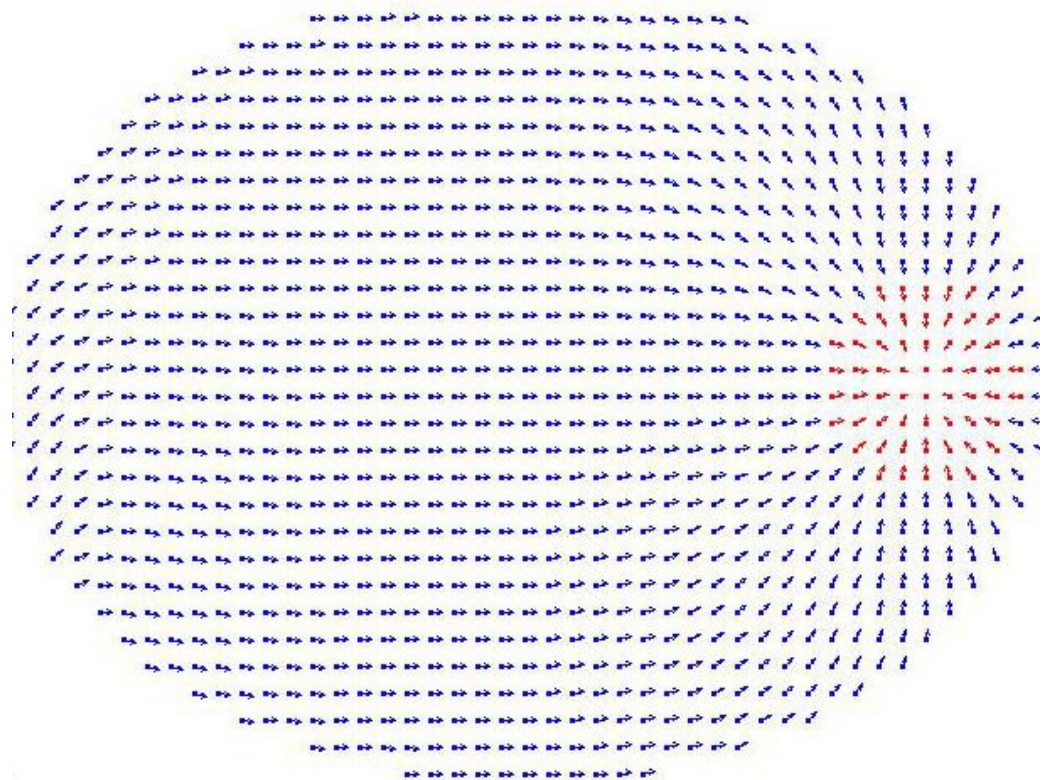


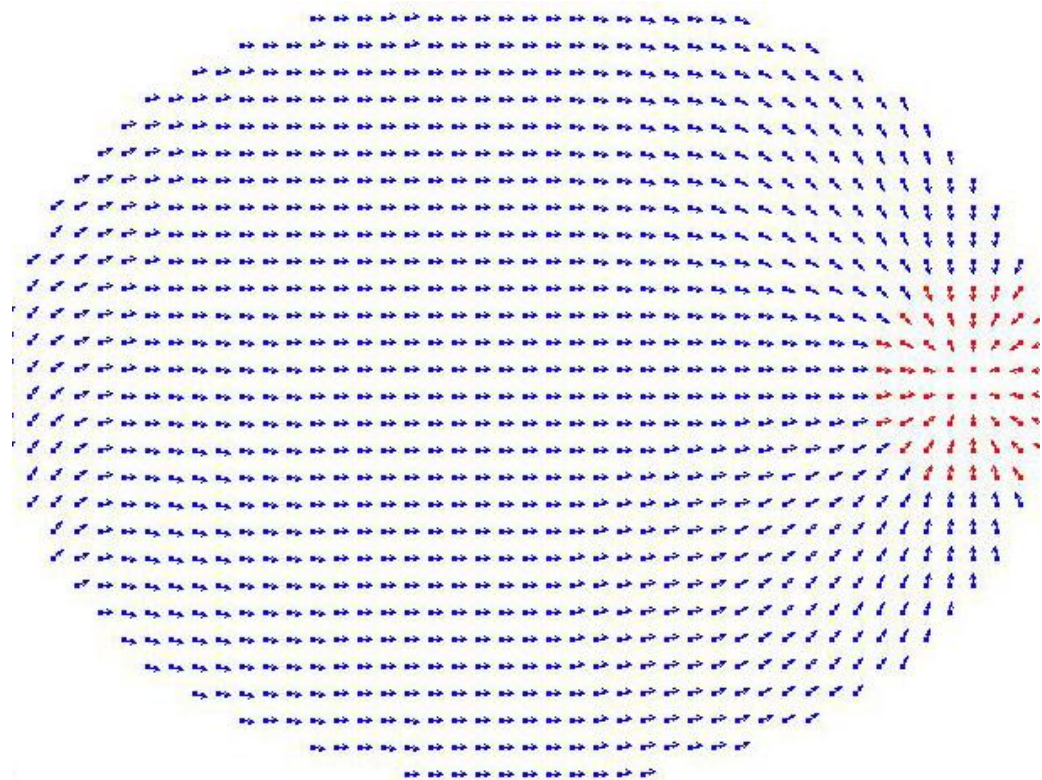


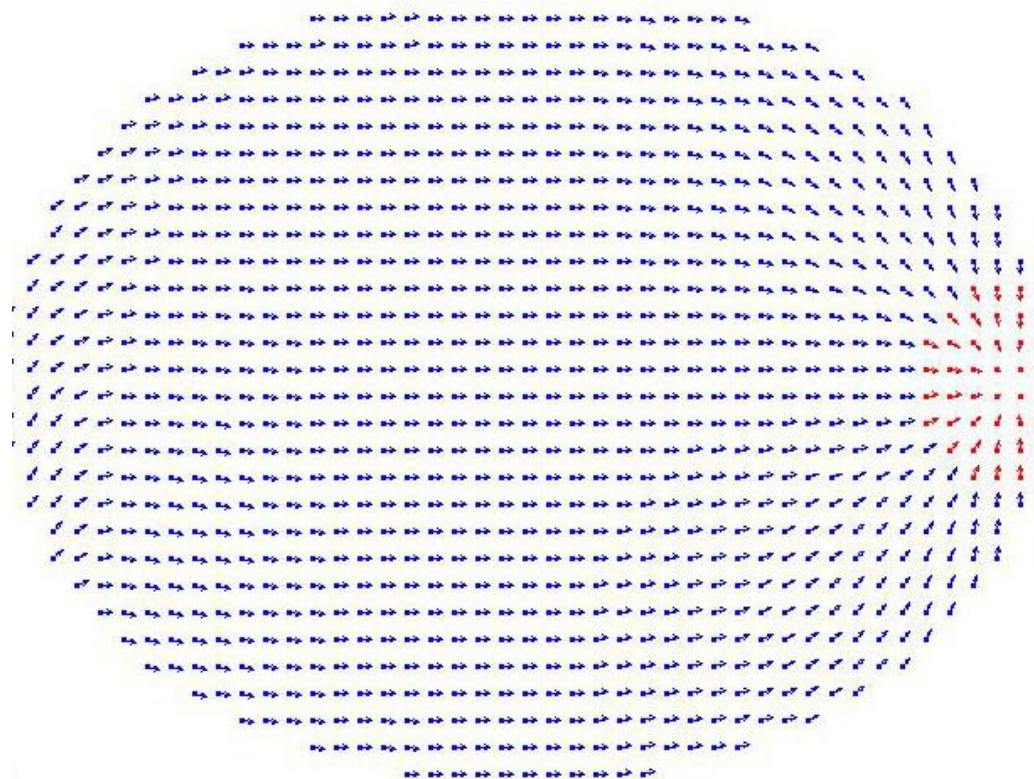


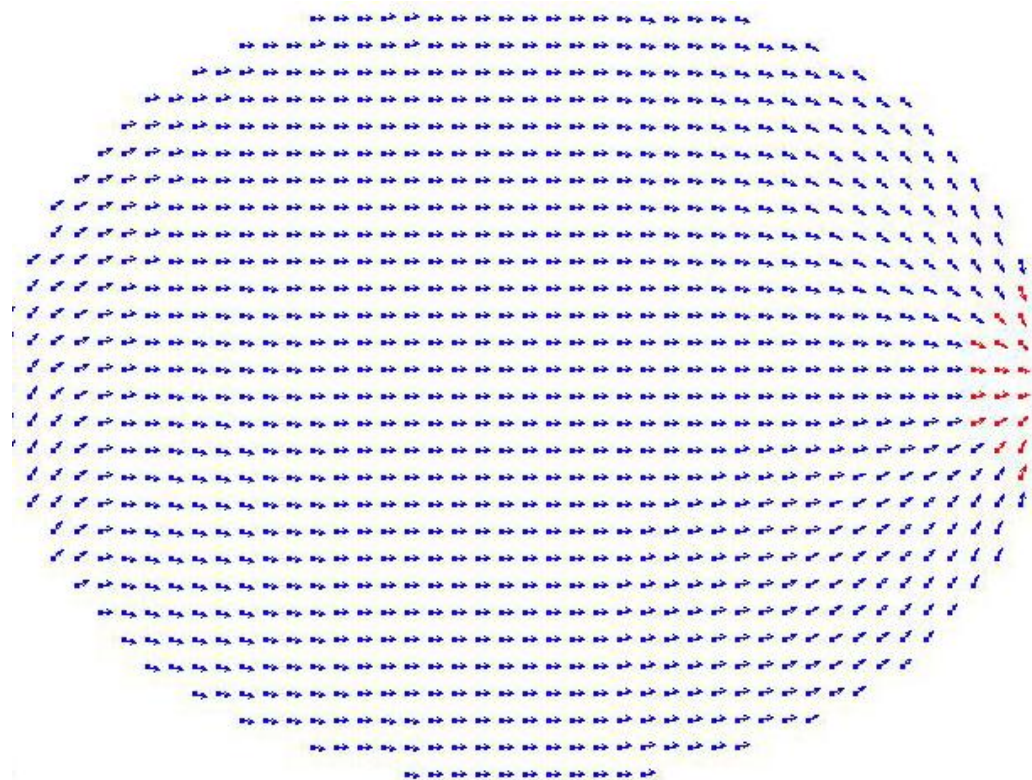


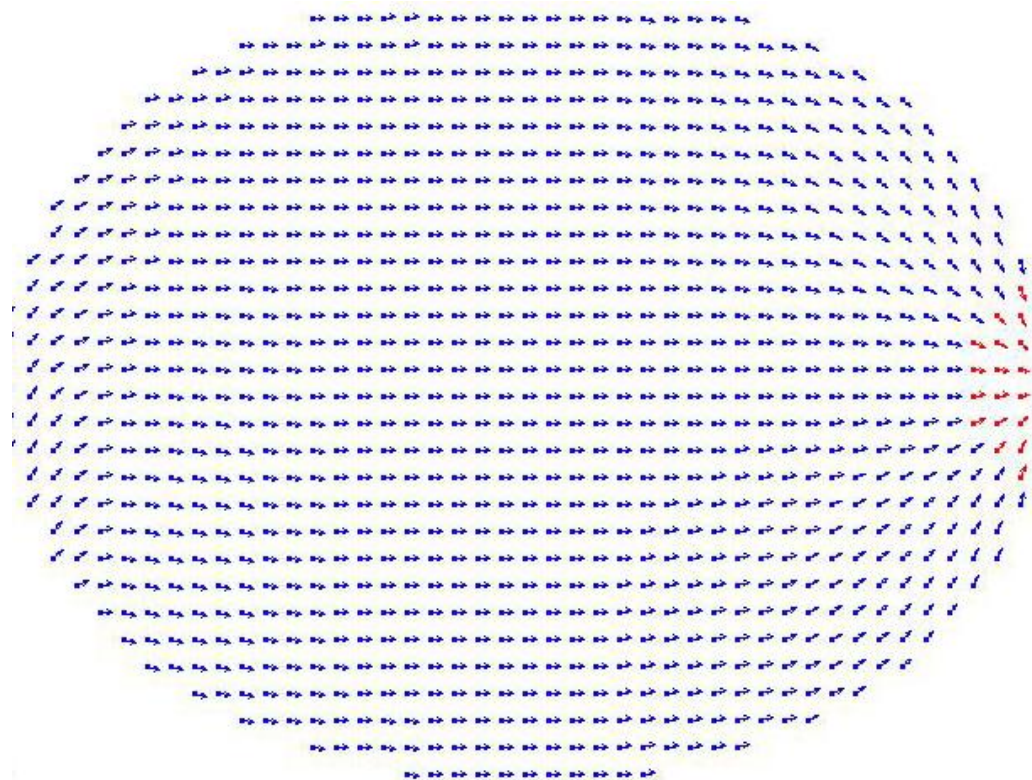


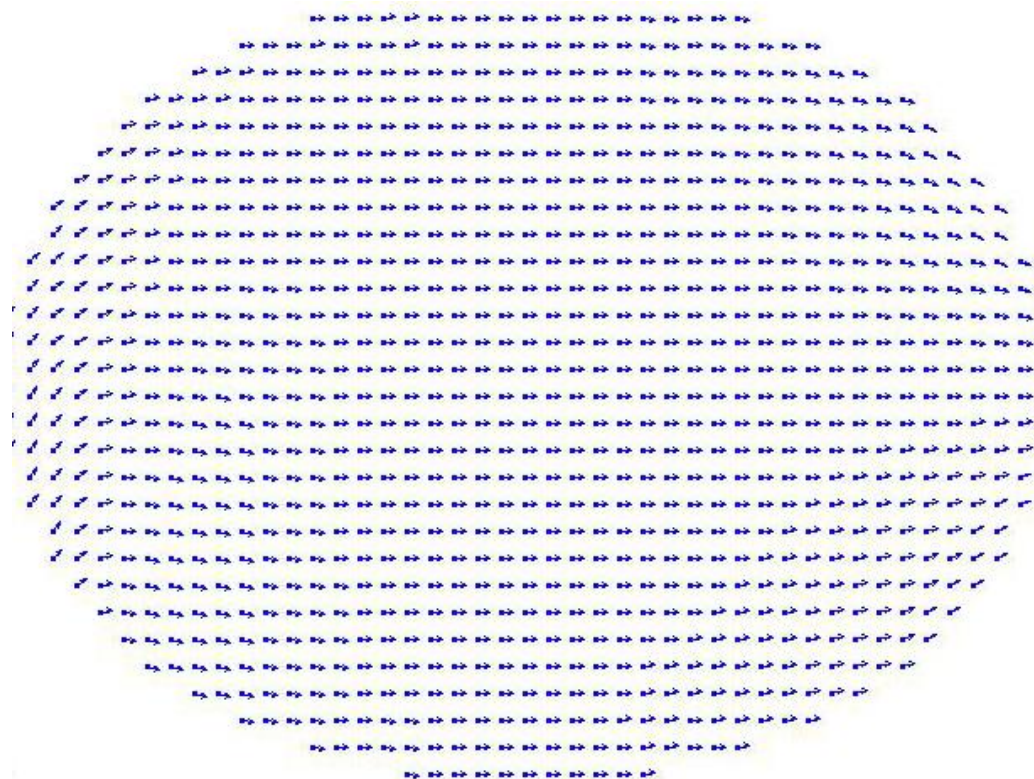




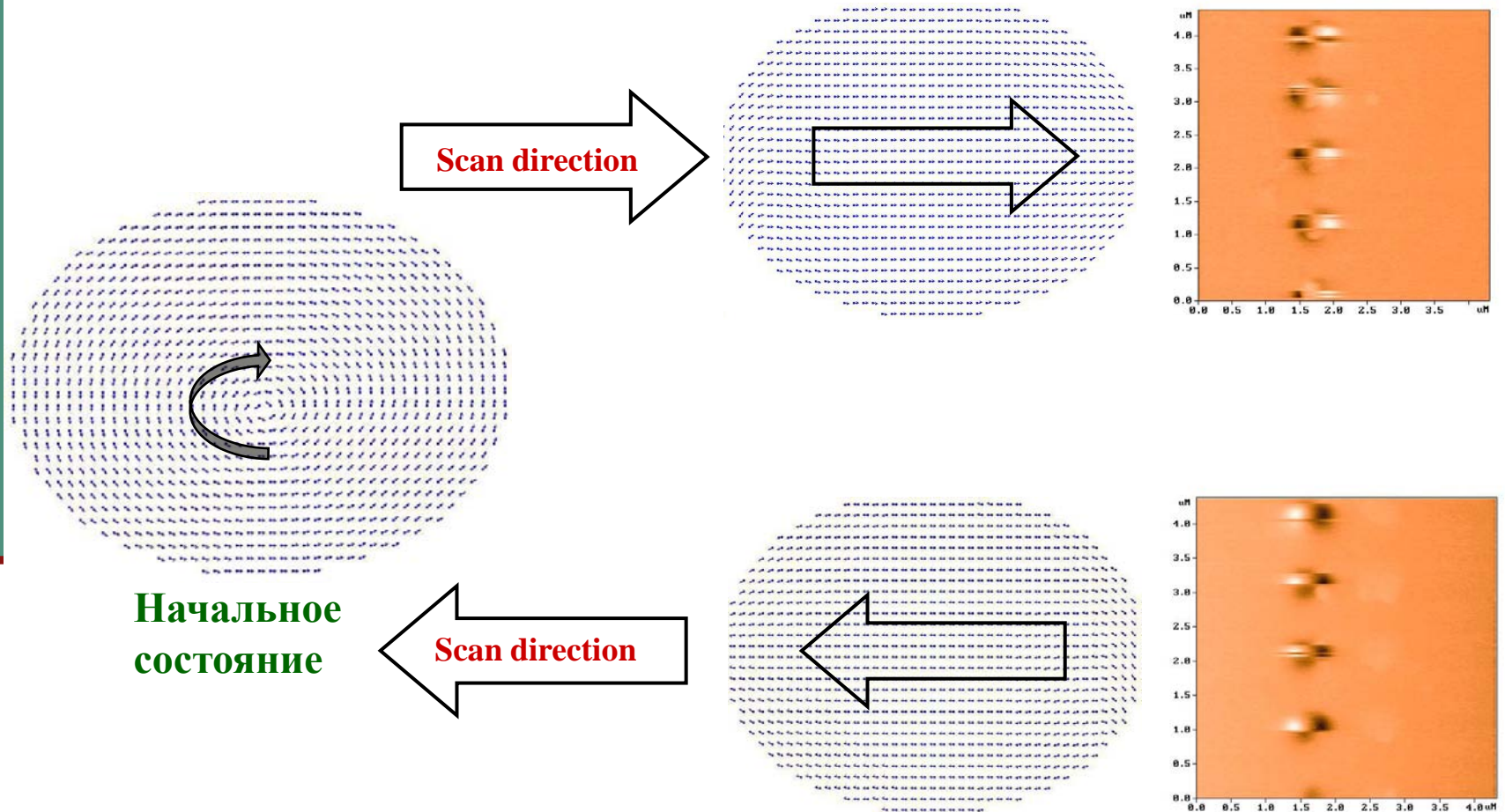




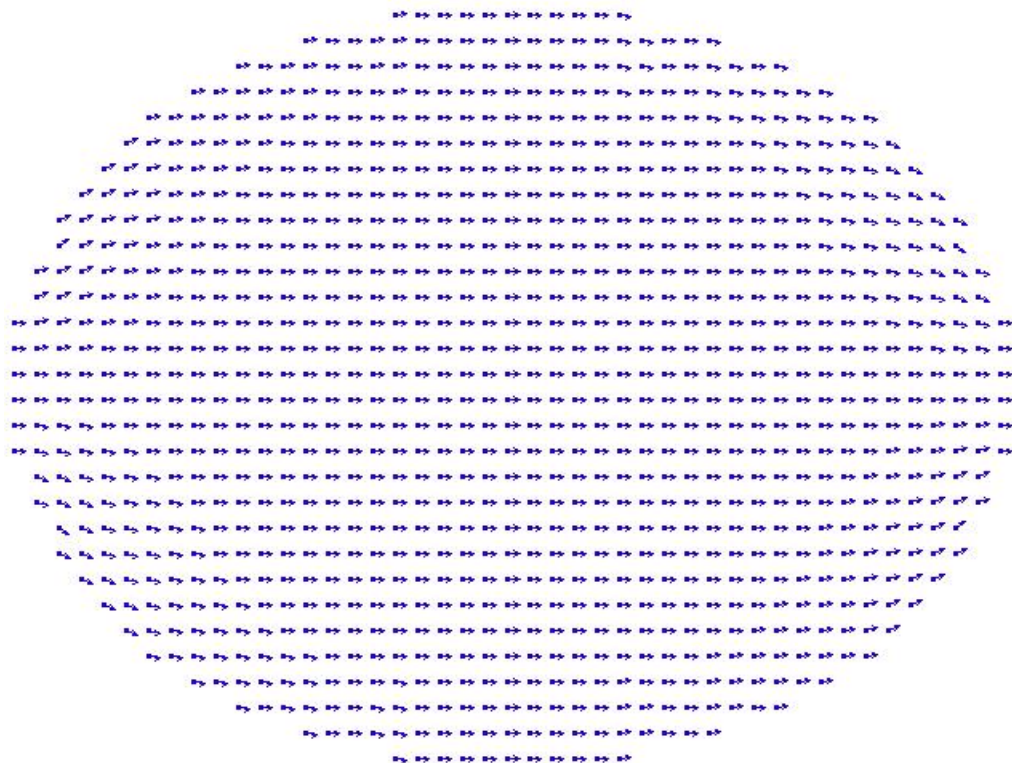


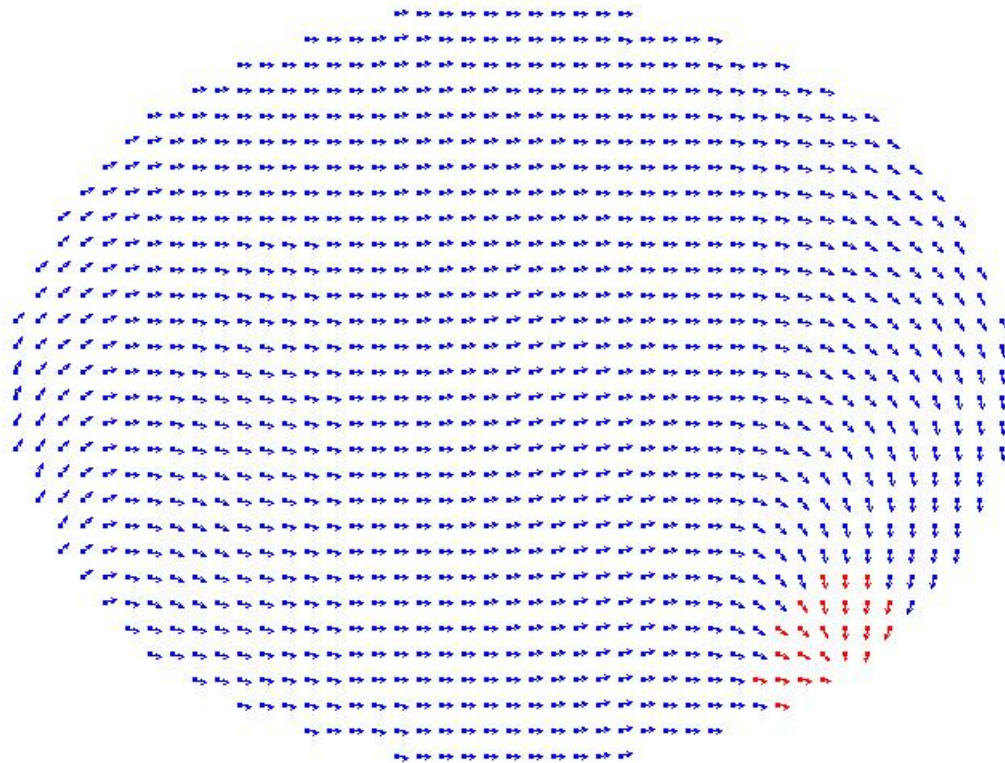


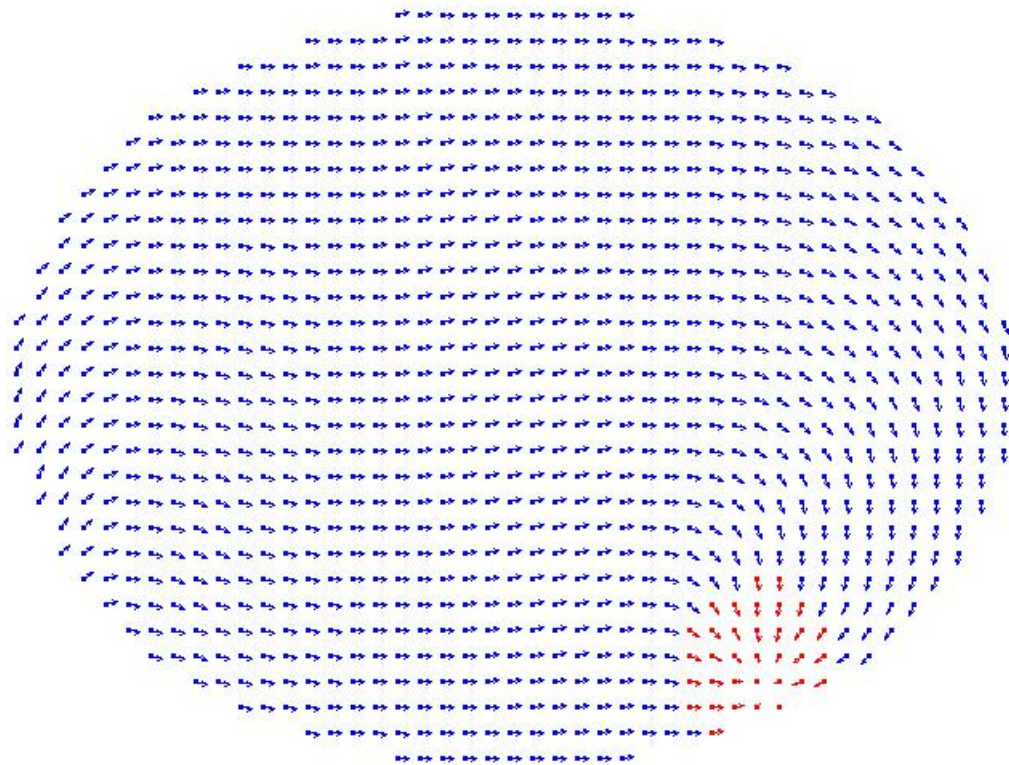
Переход из вихревого в состояние с однородной намагниченностью $VS \Rightarrow US$

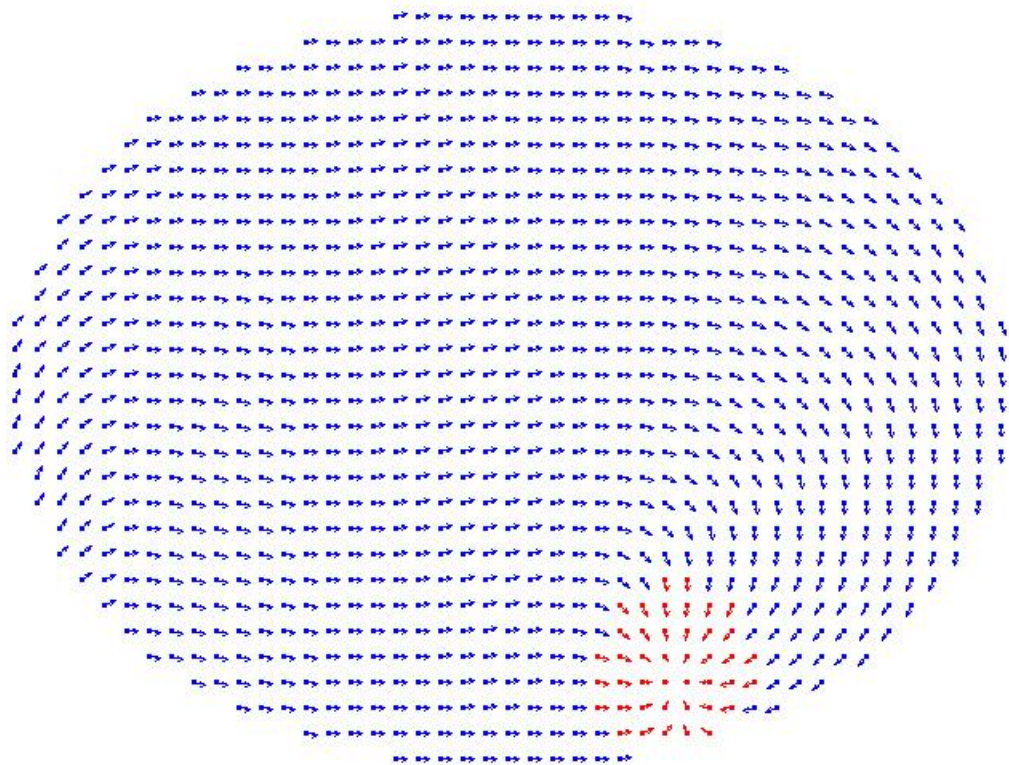


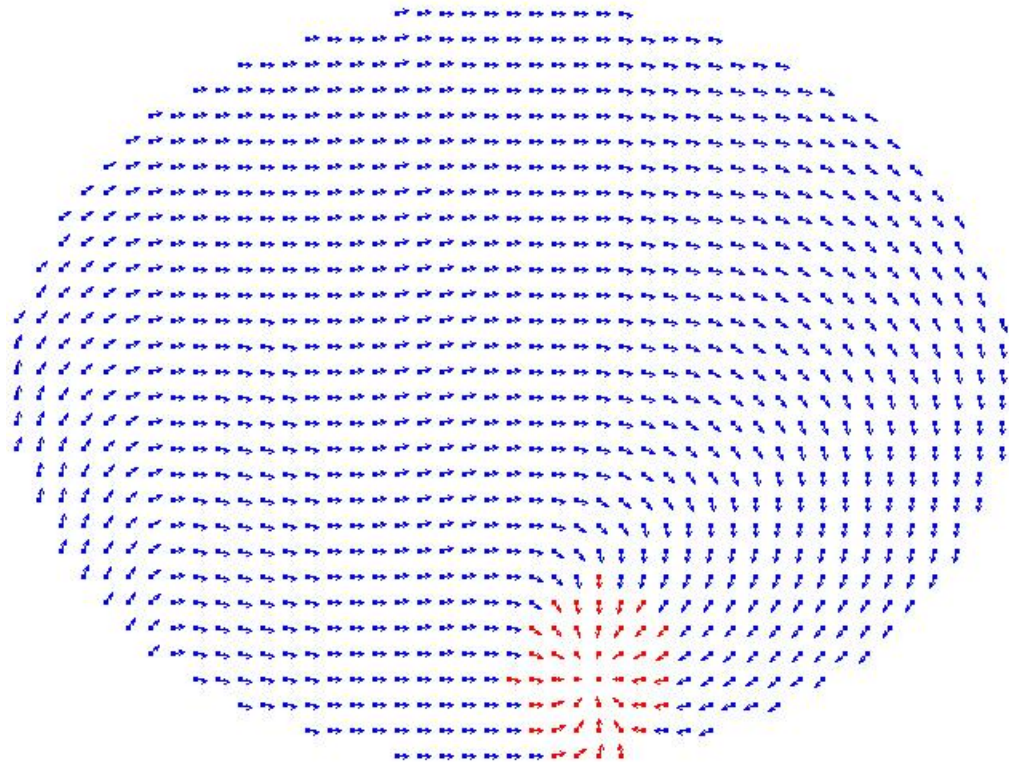
Компьютерное моделирование перехода однородного состояния в вихревое.

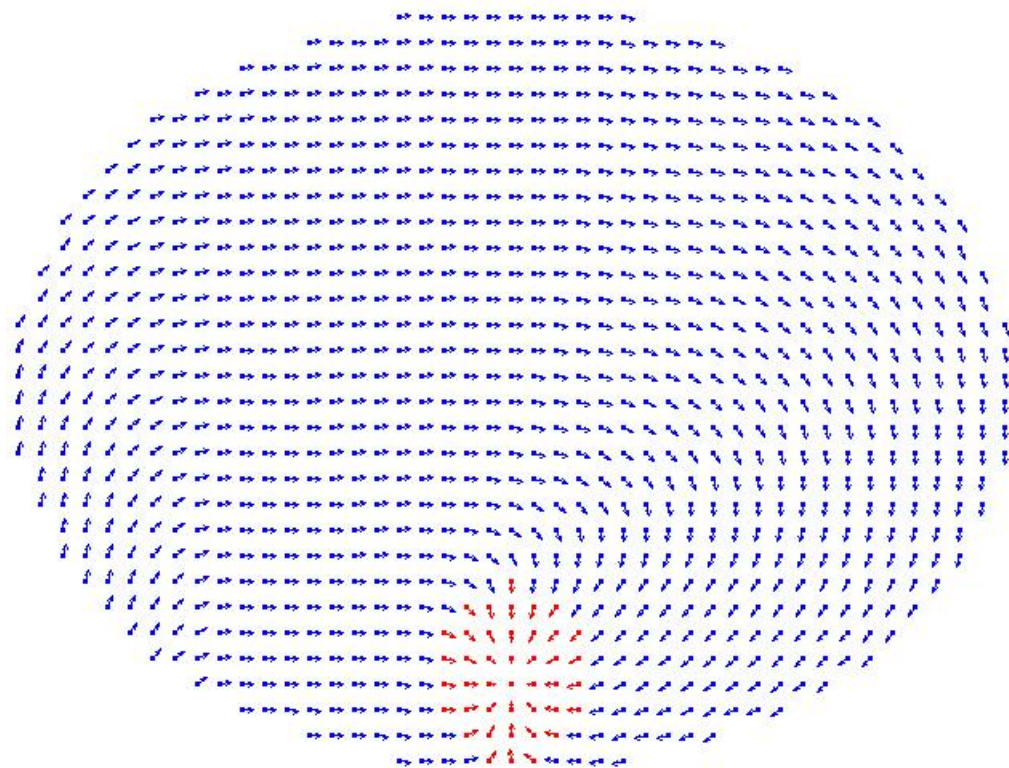


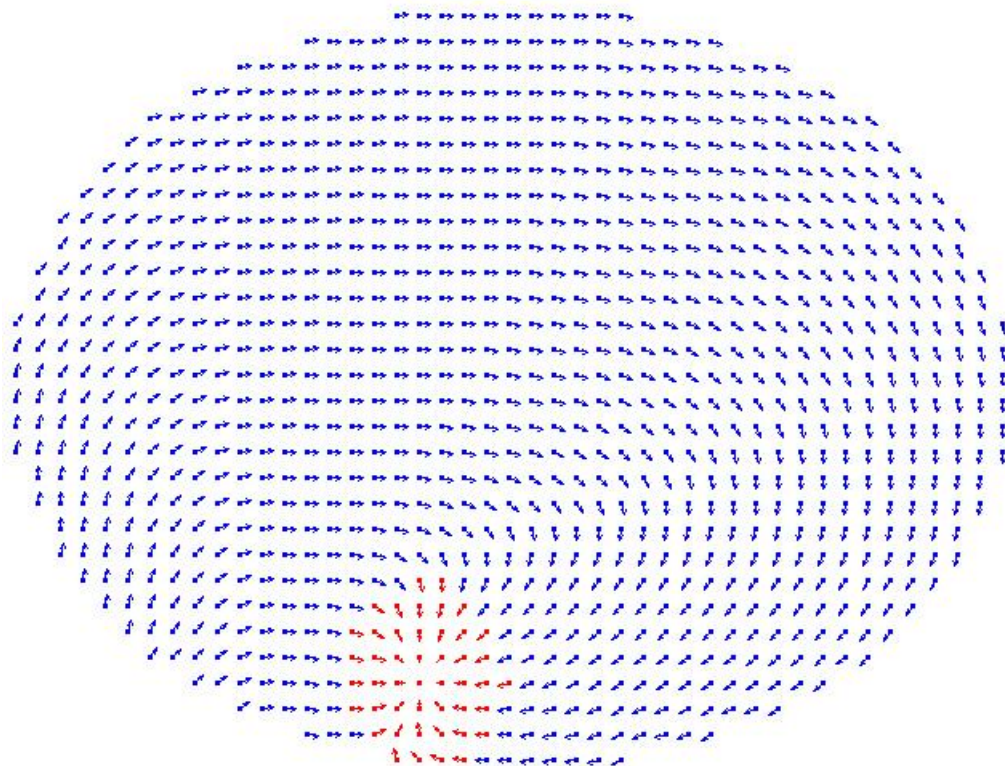


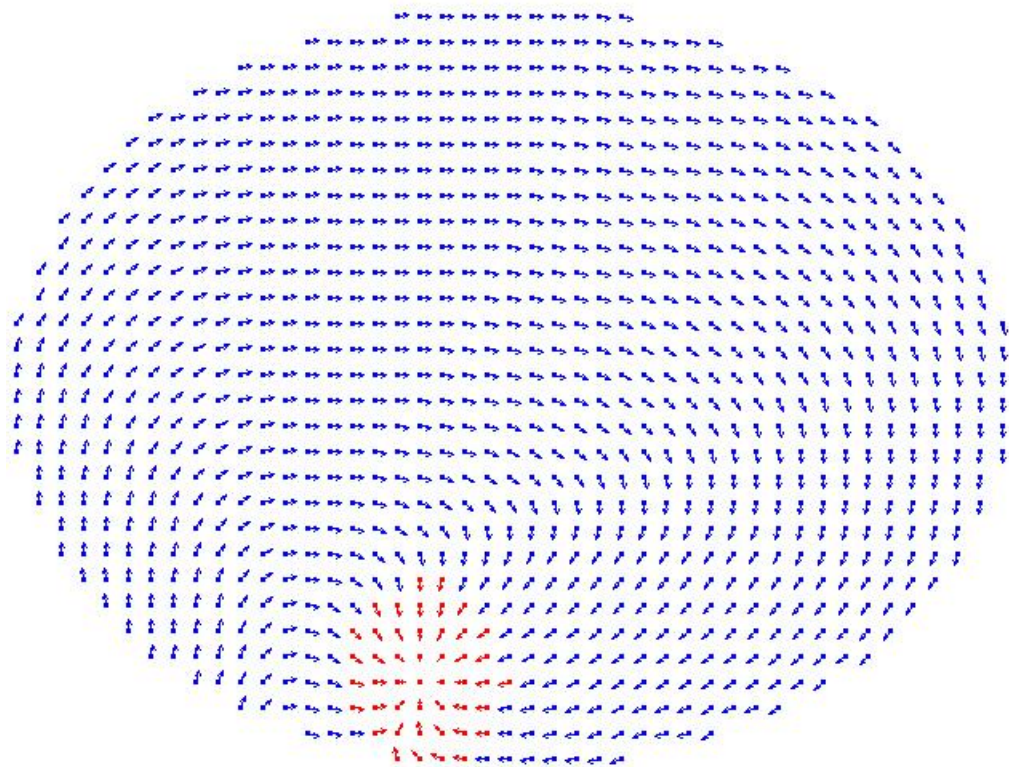


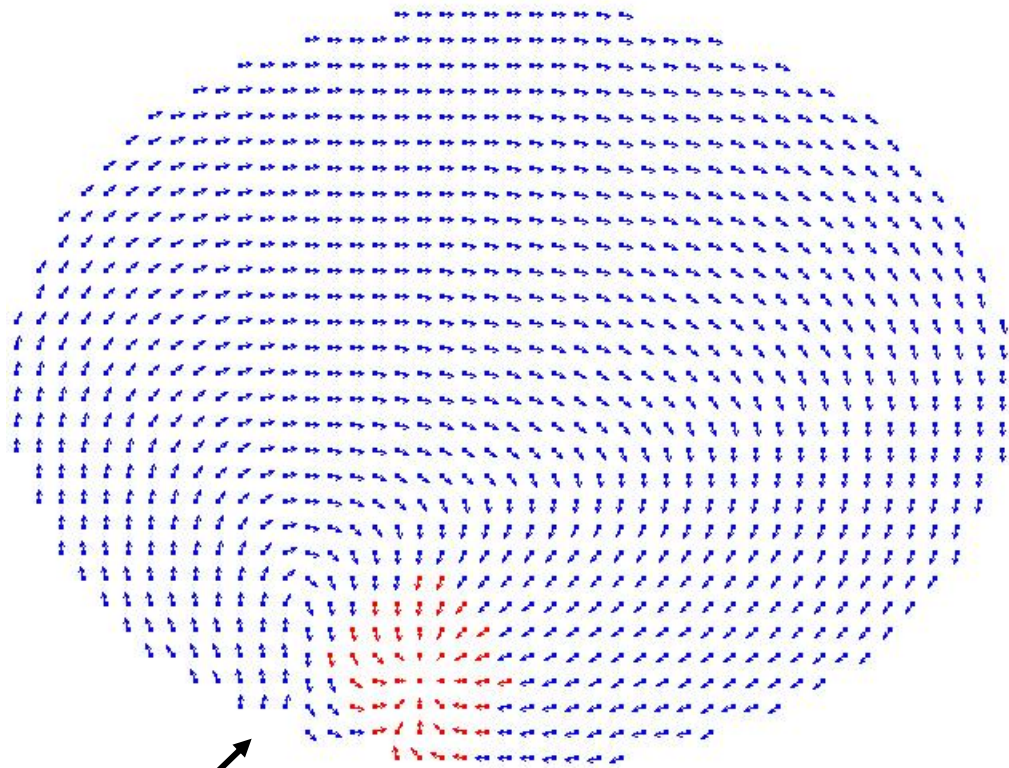


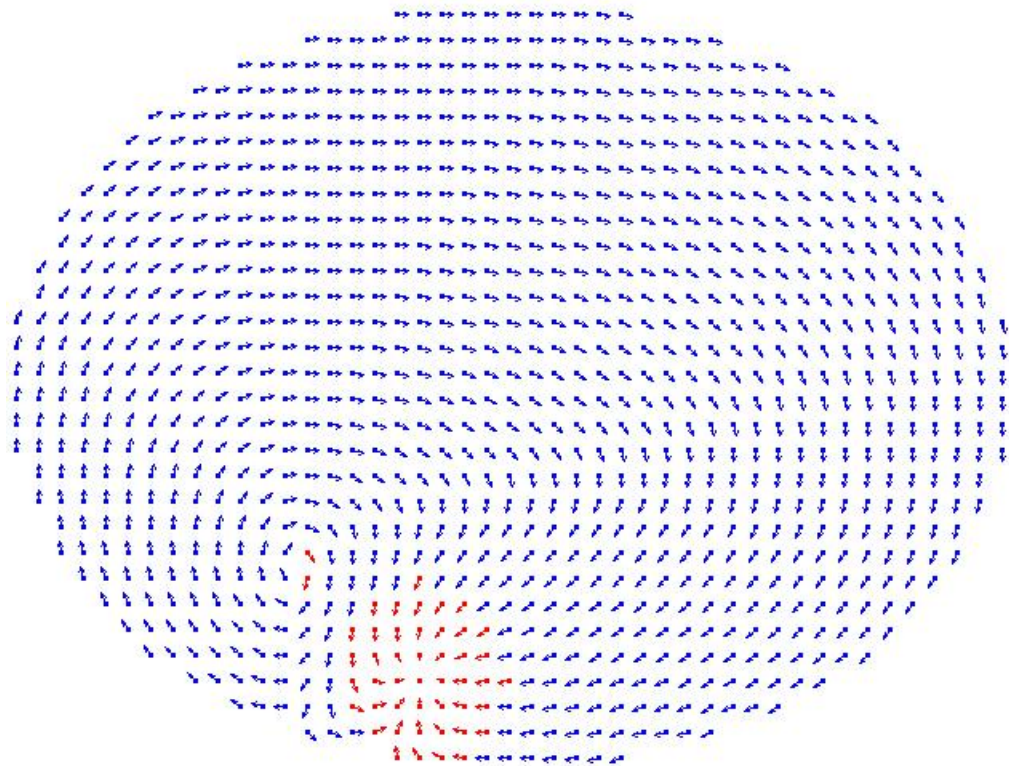


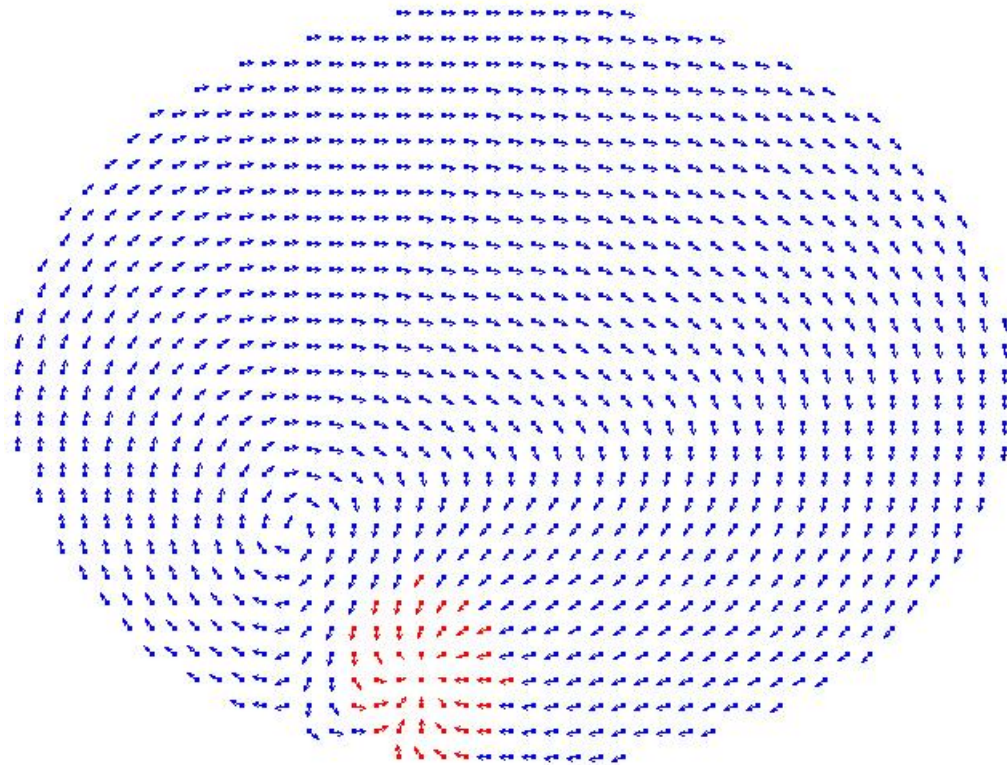


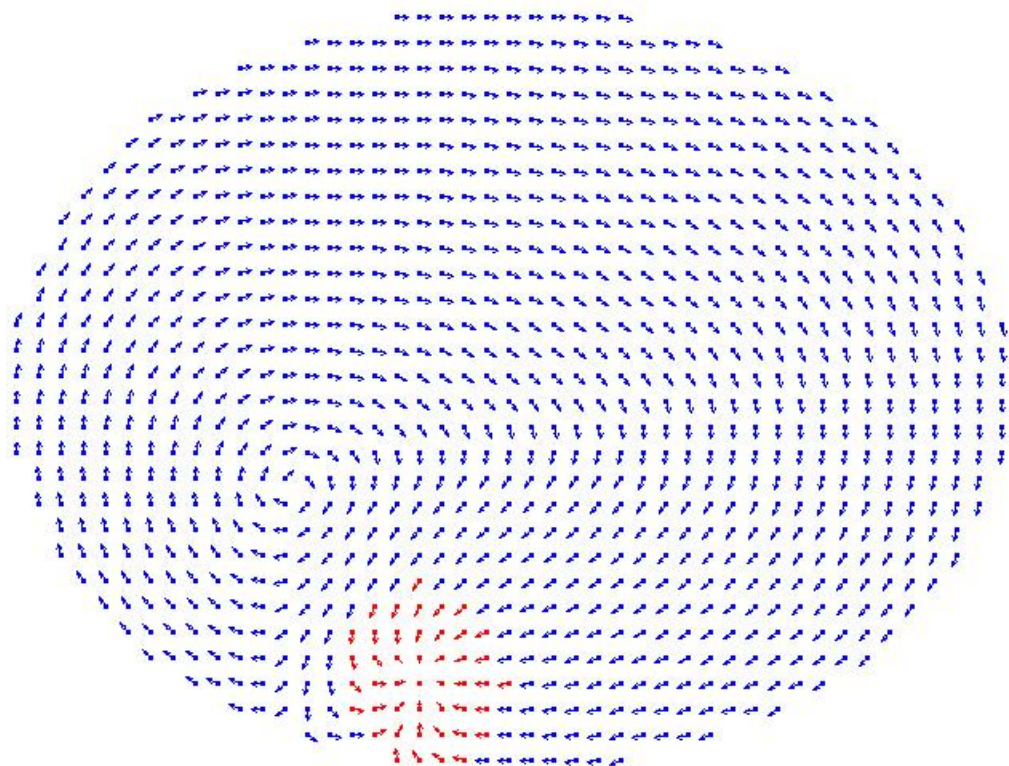


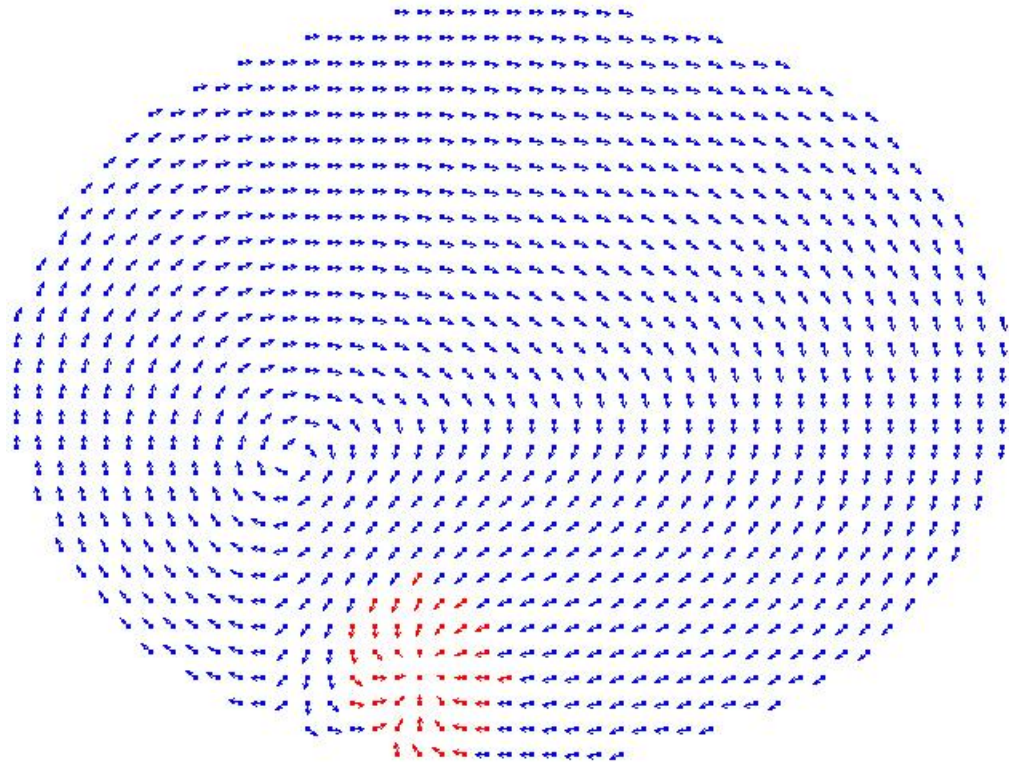


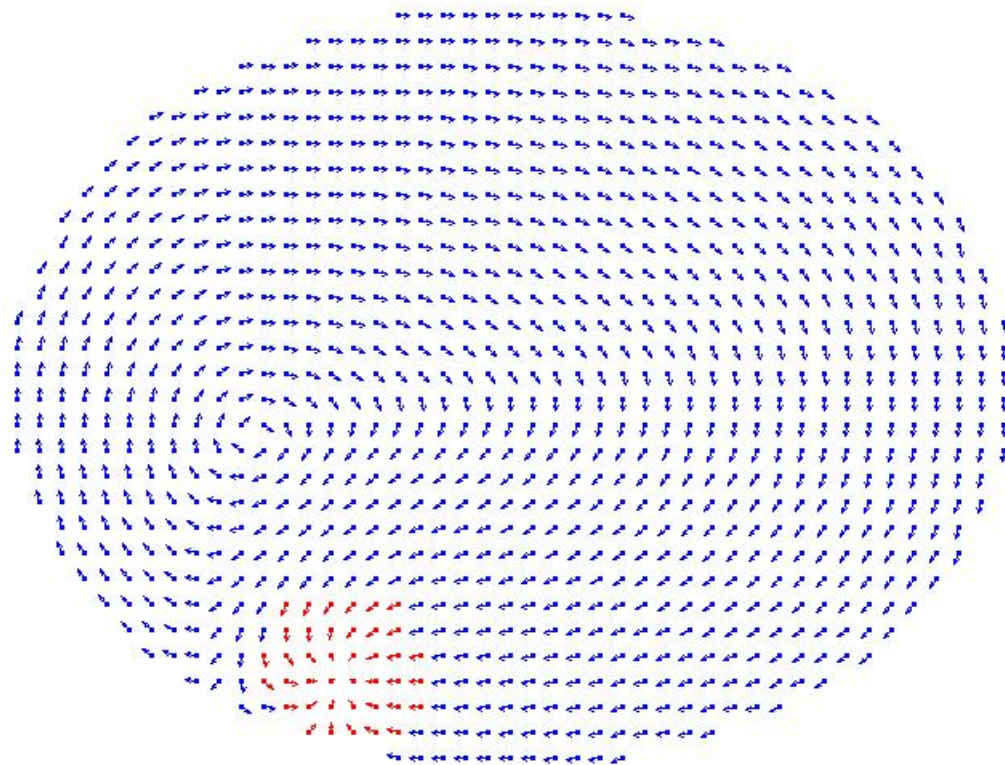


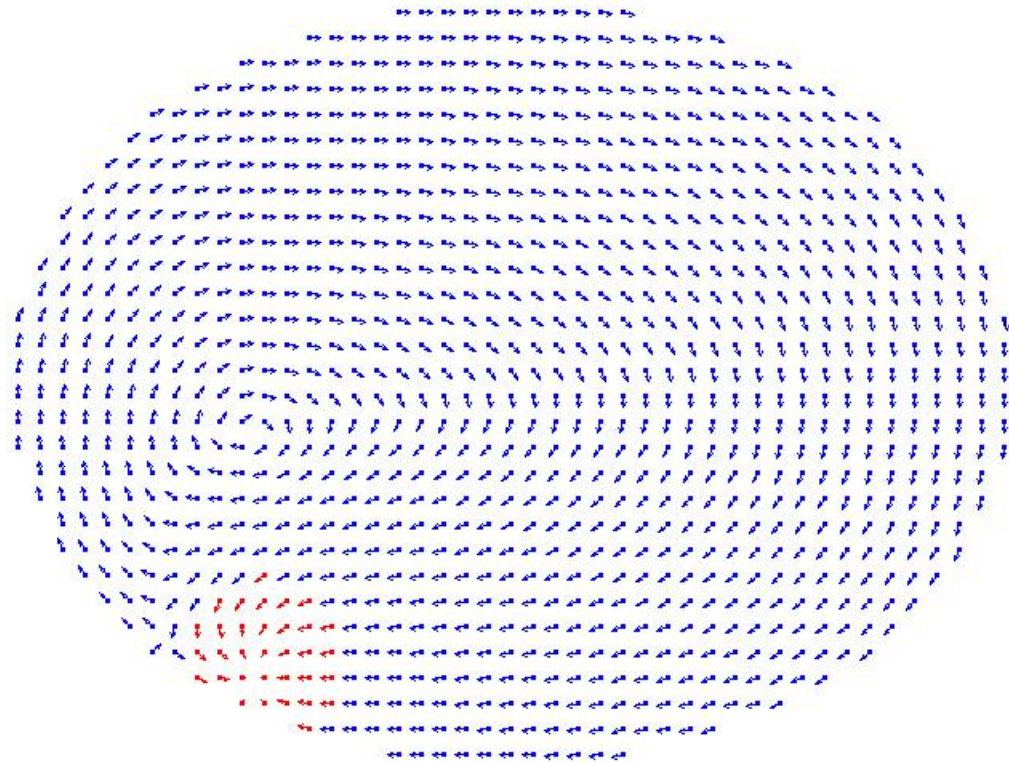


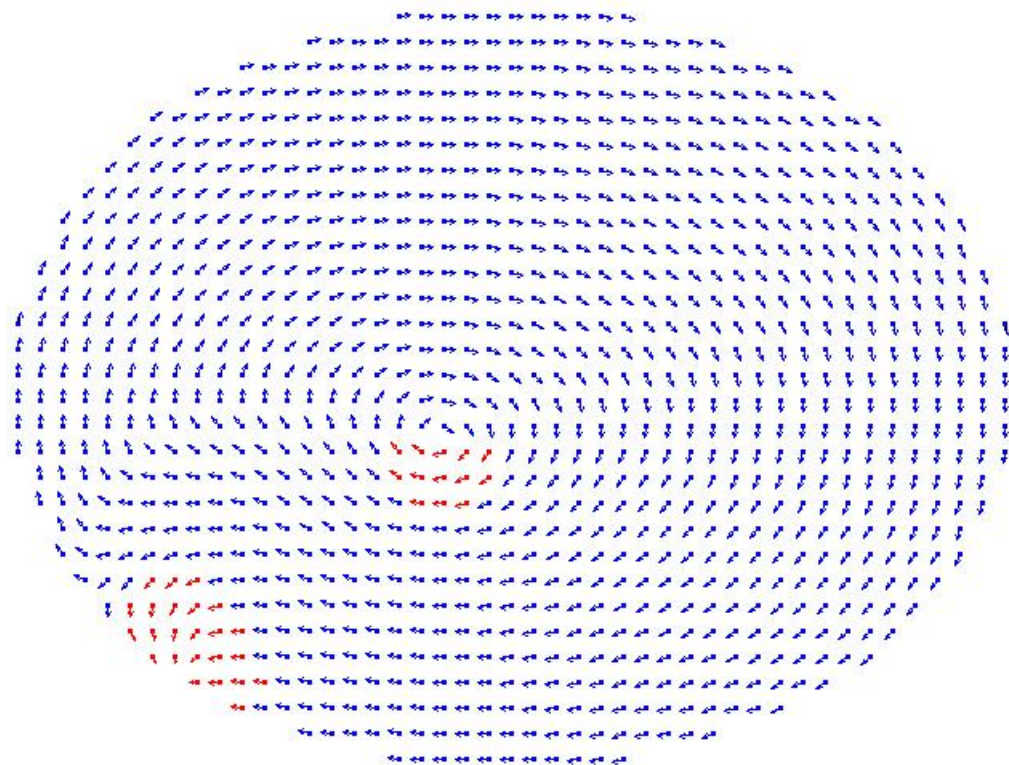


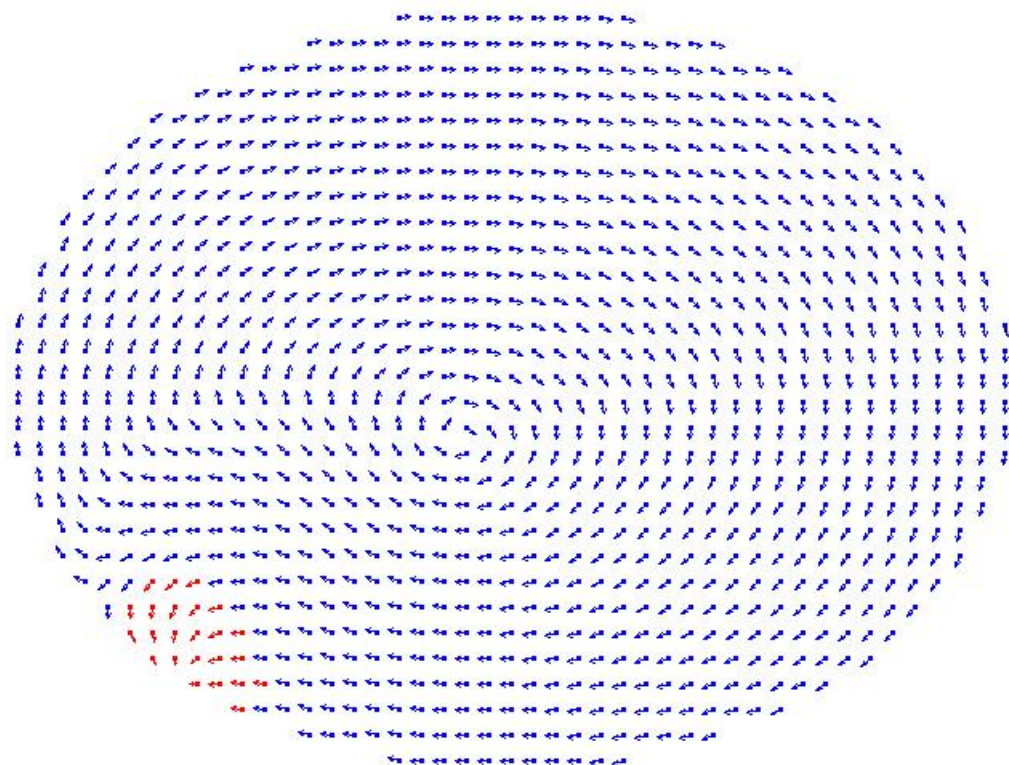


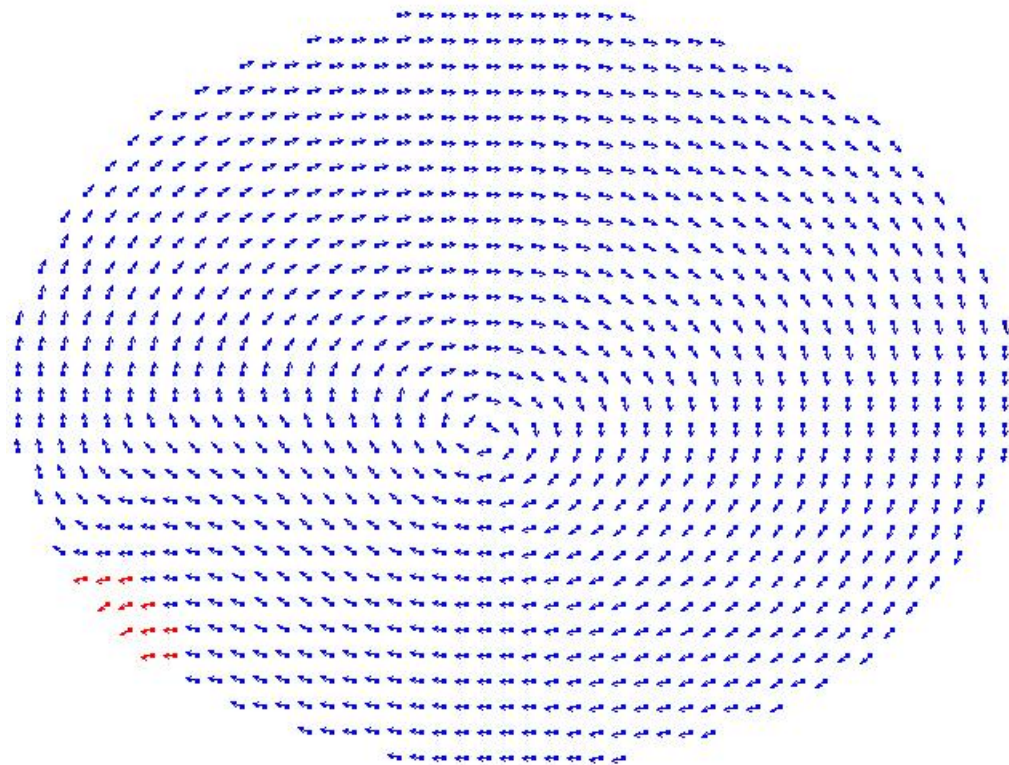




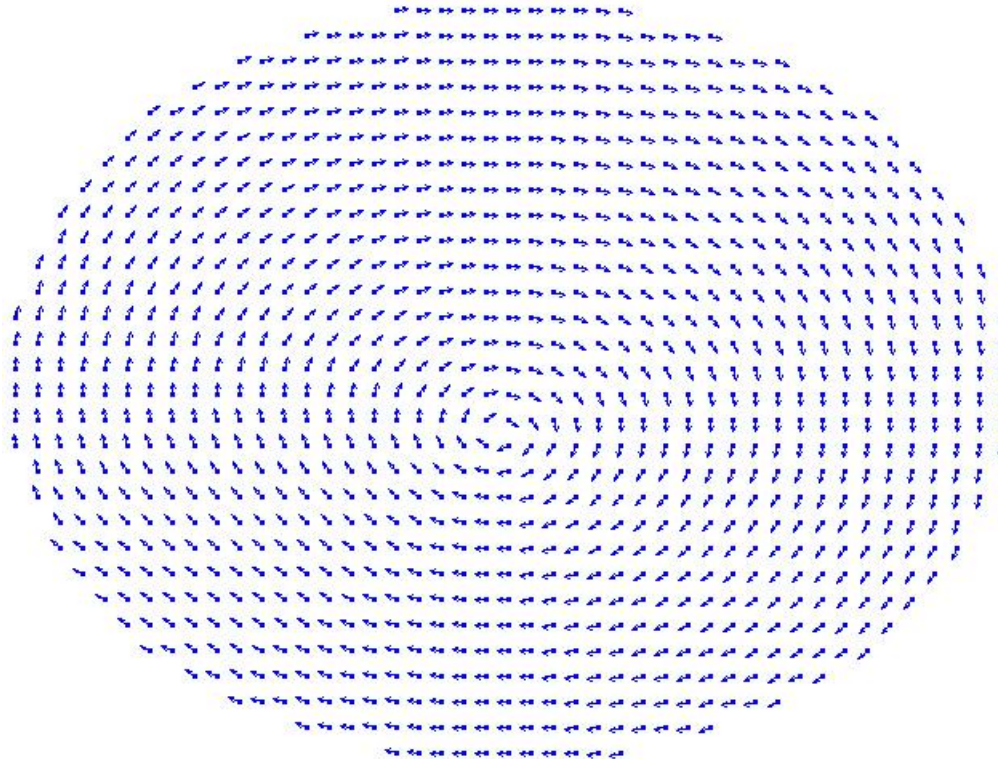




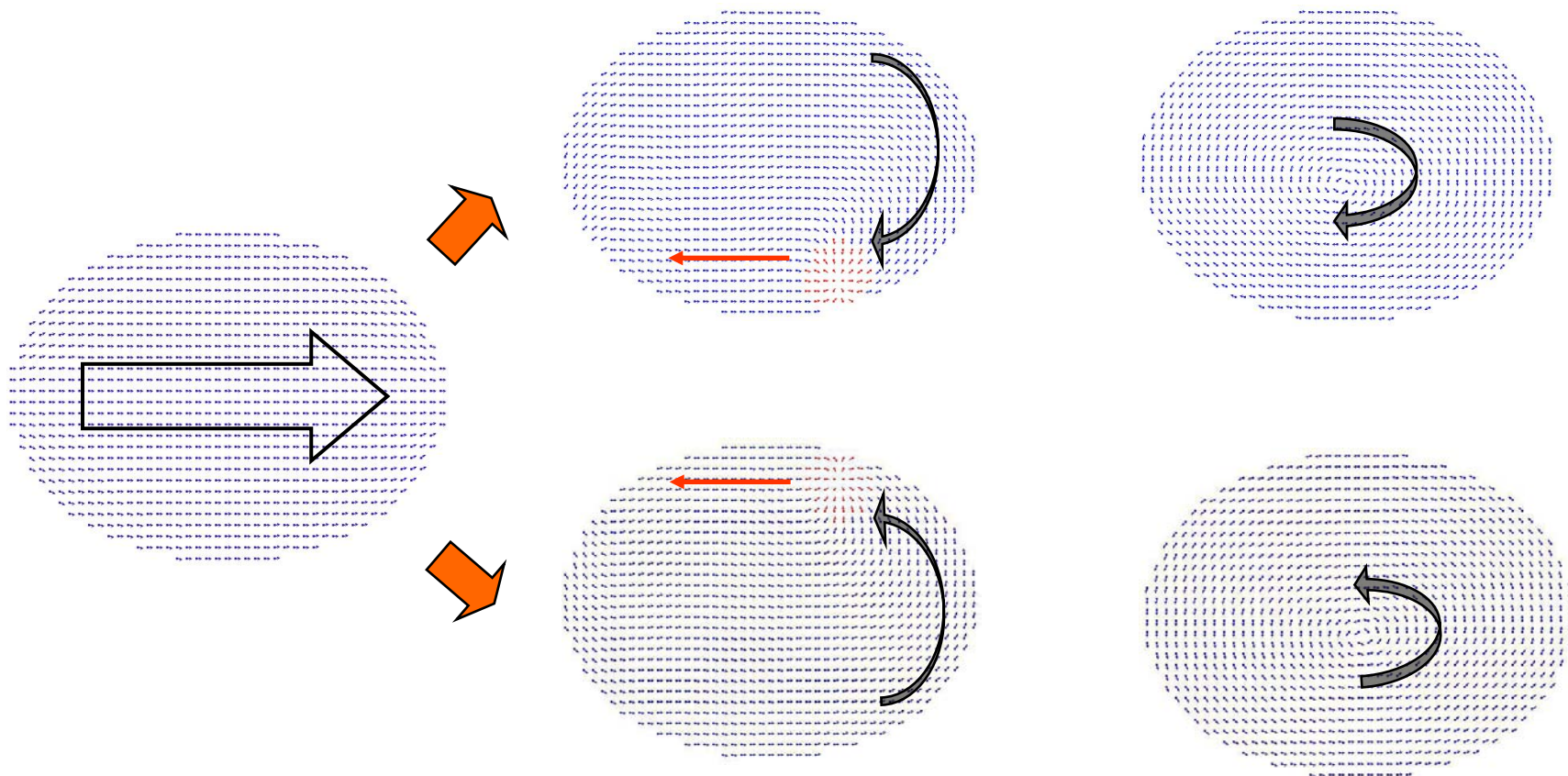




Конечное состояние – вихрь с противоположным направлением завихренности



Управление направлением завихренности магнитного вихря



Взаимодействие круглого вихря с магнитным полем МСМ зонда

Вихревое распределение намагниченности в ферромагнитных наночастицах

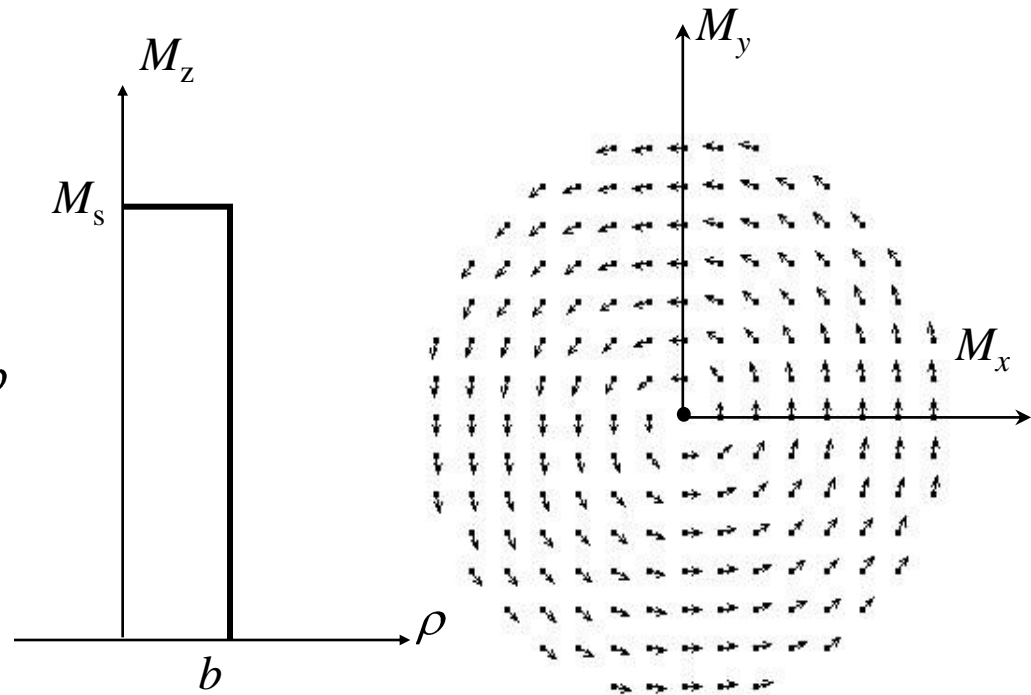
Модель жесткого вихря

Компоненты намагниченности
Модель жесткого вихря:

$$M_x = M_s \frac{y}{\rho} = M_s \sqrt{1 - M_z^2} \sin \varphi$$

$$M_y = -M_s \frac{x}{\rho} = -M_s \sqrt{1 - M_z^2} \cos \varphi$$

$$M_z = \begin{cases} M_s, & \rho \leq b \\ 0, & \rho > b \end{cases}$$



Энергия взаимодействия магнитного вихря с полем магнитного диполя

Энергия Зеемана:

$$W_z = - \int_V (\vec{M} \vec{H}) d^3 r$$

Поле точечного диполя:

$$\vec{H}(\vec{R}) = -\frac{3(\vec{m}_p \vec{R})}{R^5} \vec{R} + \frac{\vec{m}_p}{R^3}$$

$$\vec{H}(\vec{R}) = -\frac{3m_p z_0}{R^5} \vec{R} + \frac{m_p}{R^3} \vec{k}$$

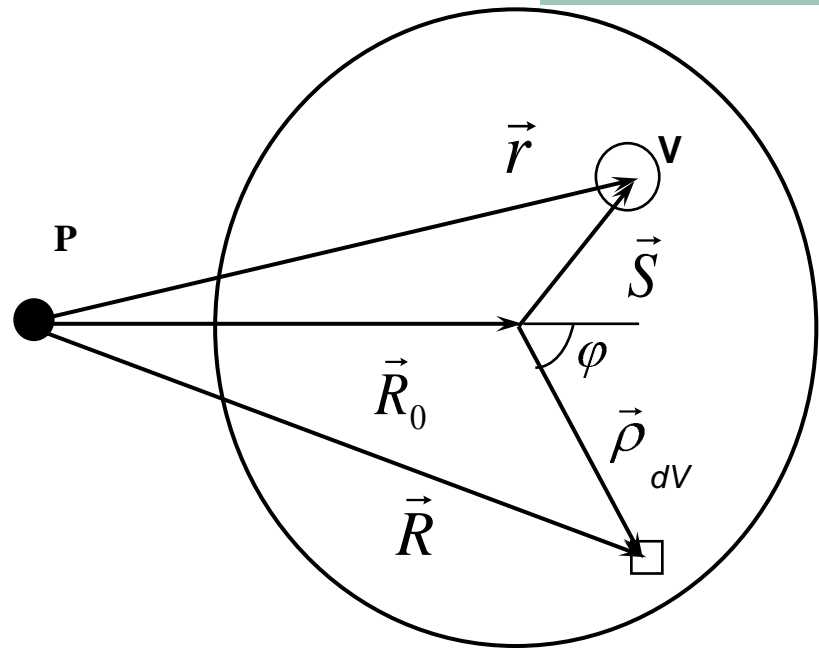


Рис. 5. взаимодействие вихря с полем диполя
 \vec{r} - радиус-вектор от диполя до центра вихря
 \vec{S} - смещение вихря от центра частицы
 $\vec{\rho}$ - положение элементарного диполя
 \vec{R}_0 - радиус-вектор от диполя до центра частицы

Энергия взаимодействия кора вихря с полем диполя

Энергия Зеемана:

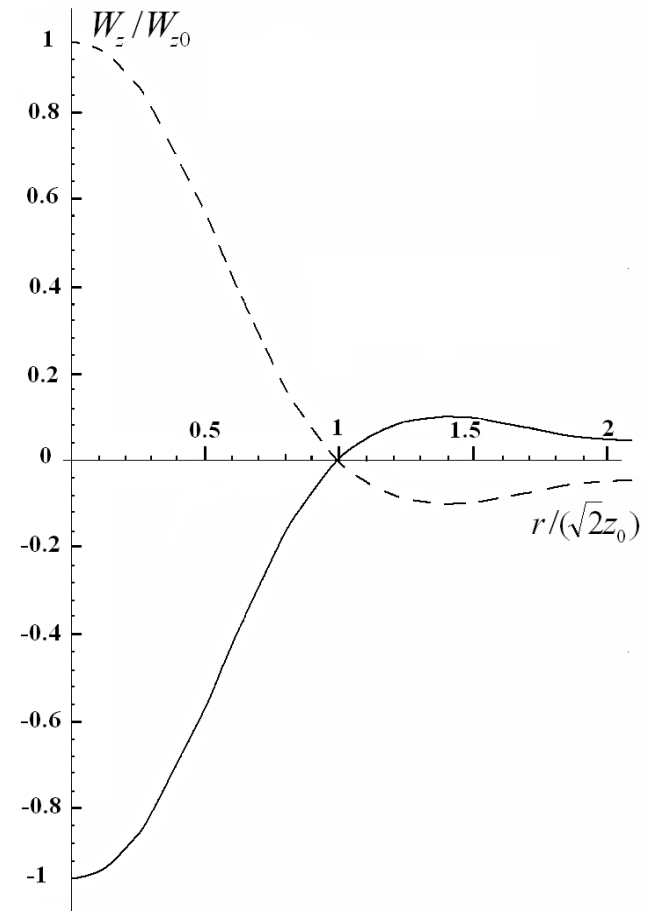
$$W_z = - \int_V (\vec{M} \vec{H}) d^3 r = - \int_V M_z H_z d^3 r$$

Z-компонента поля диполя:

$$H_z(\vec{R}) = -\frac{3m_p z_0^2}{R^5} + \frac{m_p}{R^3}$$

$$W_{core} = m_p M_s \int_0^{2\pi} \int_0^b \frac{(z_0^2 - r^2 - \rho^2) \rho}{(z_0^2 + r^2 + \rho^2 - 2r\rho \cos \varphi)^{5/2}} d\rho d\varphi$$

$$W_{0core} = -\frac{2\pi b^2 m_p \vec{M}_c}{(z_0^2 + b^2)^{3/2}}$$



Зависимость энергии Зеемана от расстояния между зондом и кором вихря;
сплошная линия – для $\vec{M}_z \uparrow \uparrow \vec{p}_m$
пунктирная – для $\vec{M}_z \uparrow \downarrow \vec{p}_m$

Энергия взаимодействия оболочки вихря с полем диполя

Энергия Зеемана:

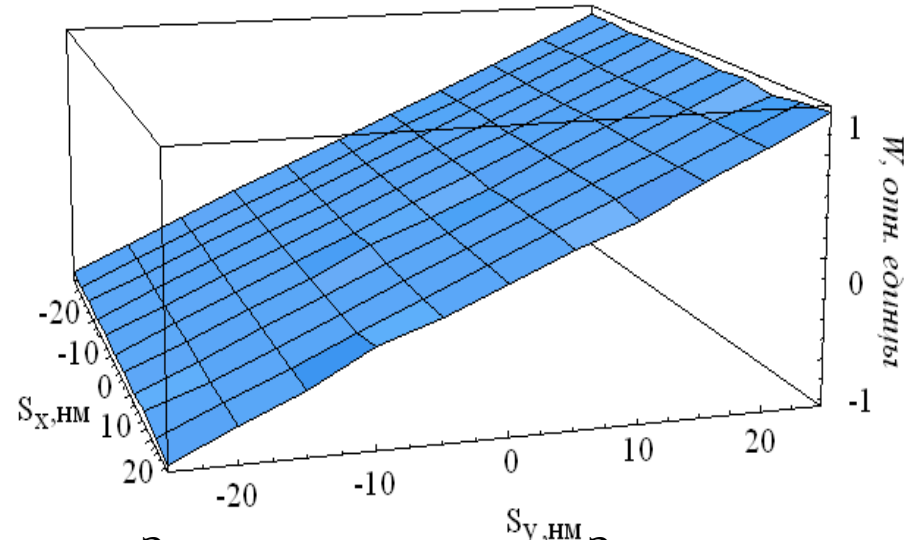
$$W_{shell} = - \int_V (M_x H_x + M_y H_y) d^3 r$$

$$W_{shell} = \int_0^{2\pi} \int_0^R \frac{3z_0 m_p M_s h(s_y(x_0 + \rho \cos \varphi) - (s_x + x_0)\rho \sin \varphi) \rho d\rho d\varphi}{\sqrt{(R_0^2 + \rho^2 + 2\rho x_0 \cos \varphi)^5 (s^2 + \rho^2 - 2\rho(s_x \cos \varphi + s_y \sin \varphi))}}$$

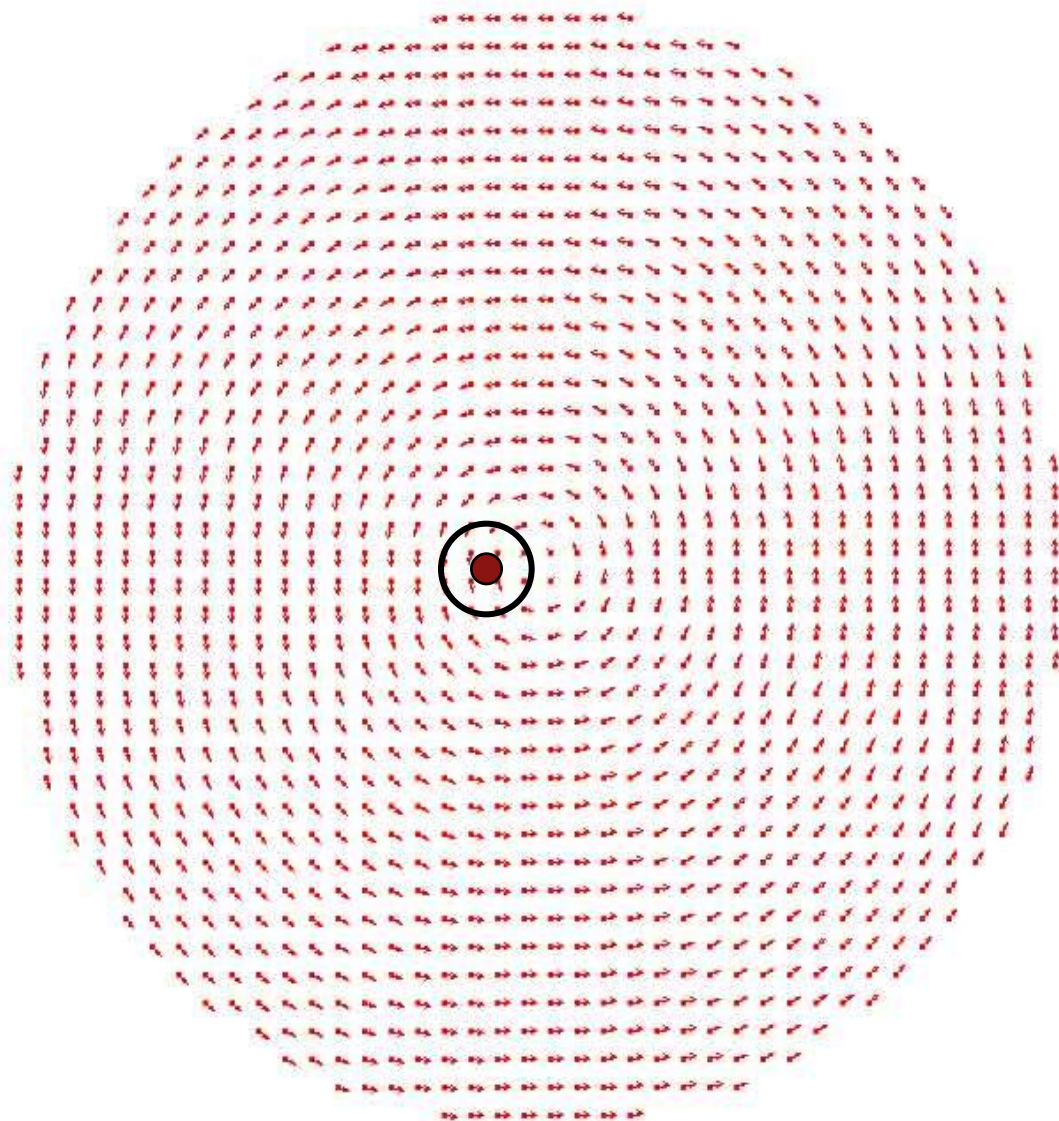
Сила, действующая на оболочку:

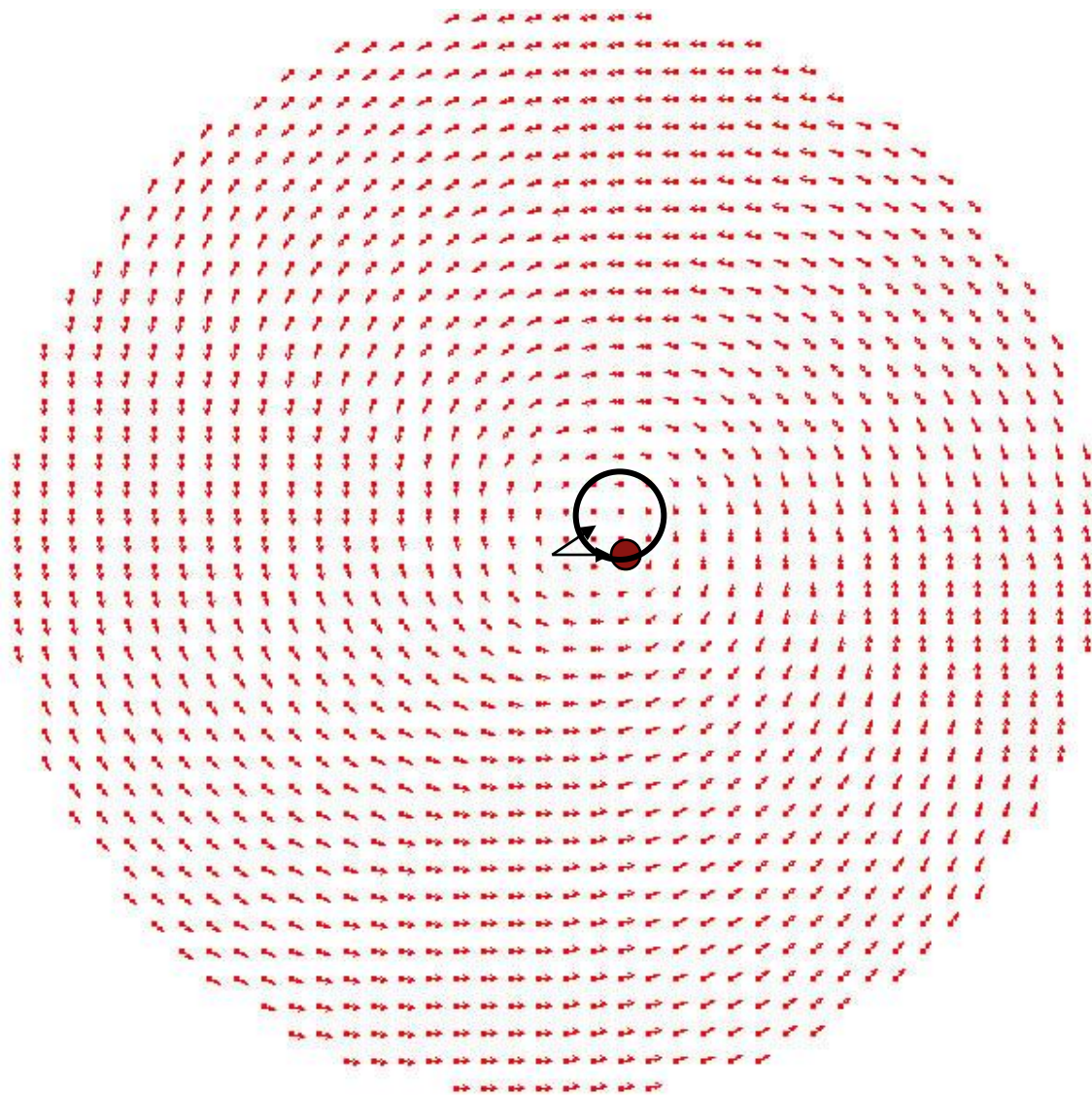
$$\vec{F}_{shell} = - \frac{\partial W_{shell}}{\partial s_x} \vec{i} - \frac{\partial W_{shell}}{\partial s_y} \vec{j}$$

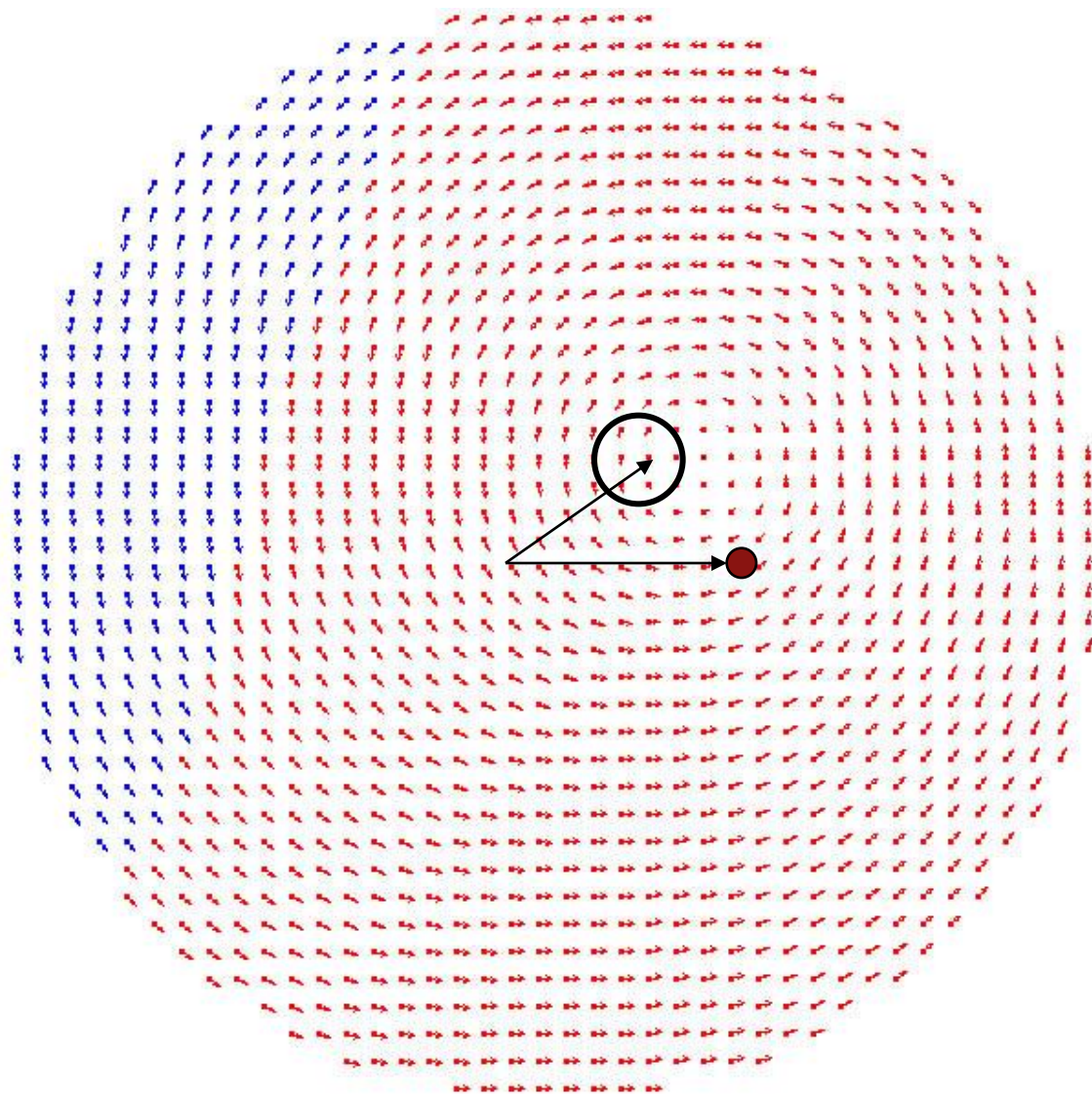
$$\operatorname{tg} \alpha = \int_0^{2\pi} \int_b^R \frac{3z_0 m_p M_s h(\rho \cos \varphi + x_0 \cos^2 \varphi)}{(\rho^2 + x_0^2 + z_0^2 - 2\rho x_0 \cos \varphi)^{5/2}} d\rho d\varphi$$

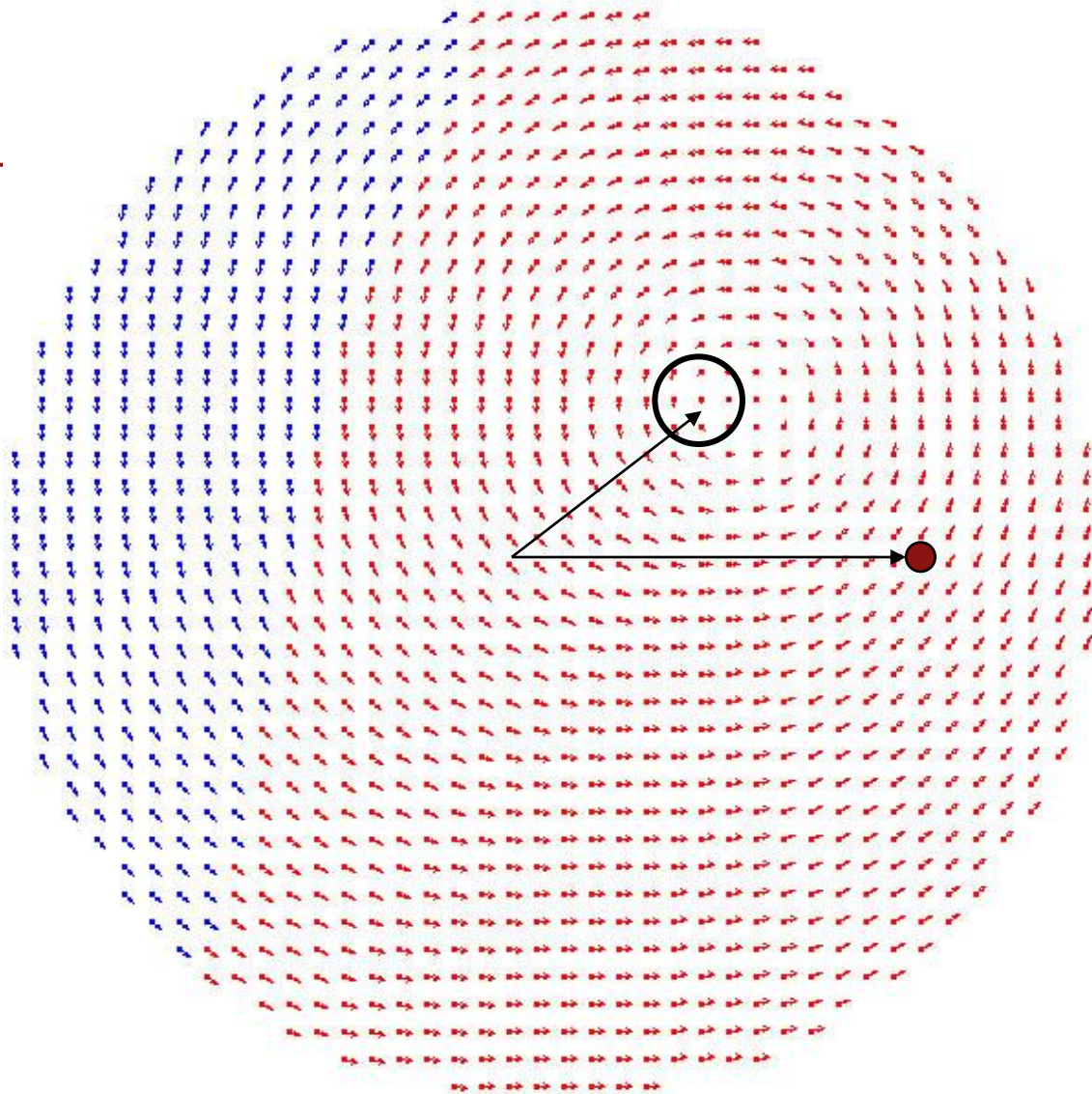


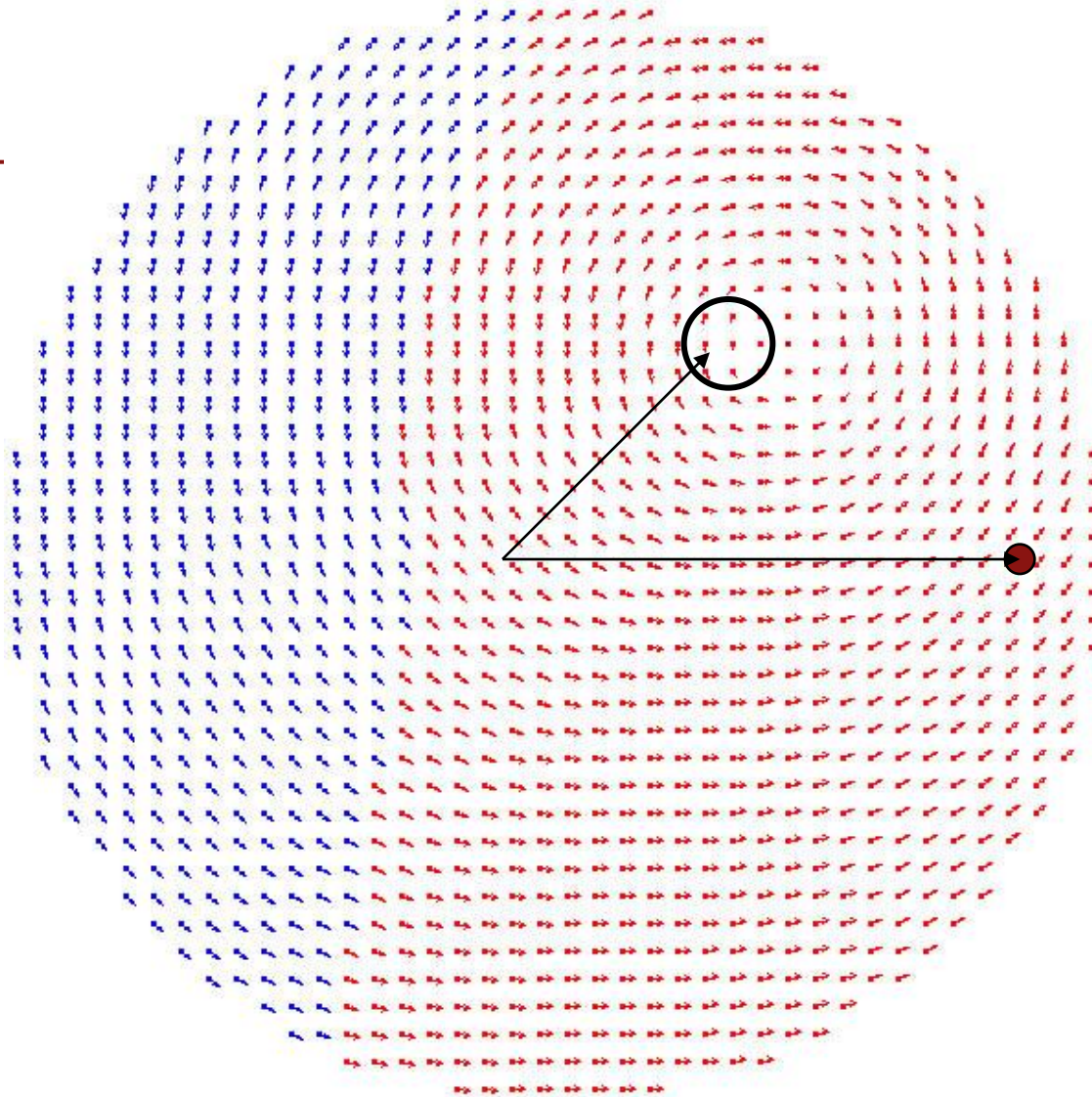
Зависимость энергии Зеемана от смещения вихря

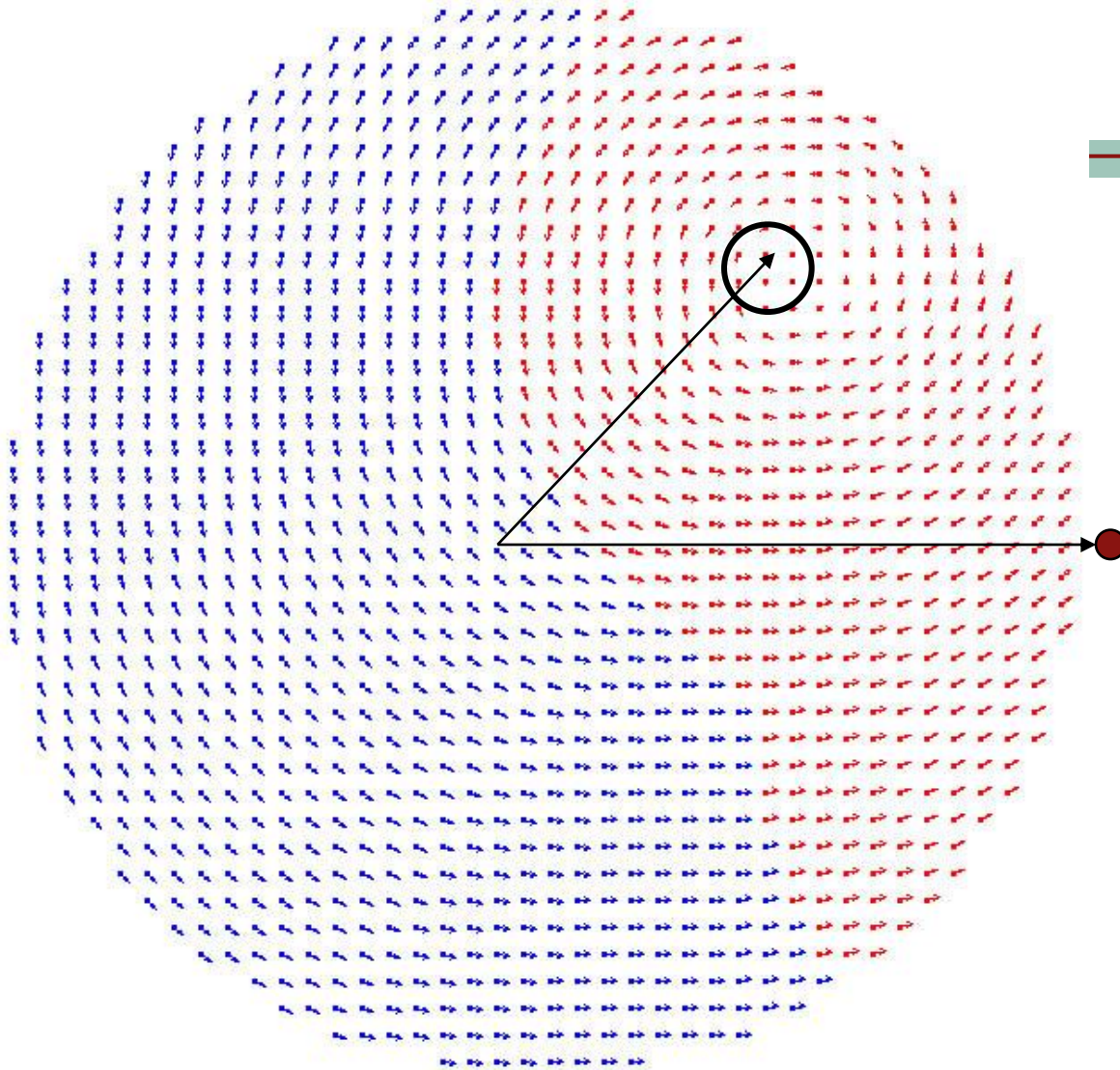


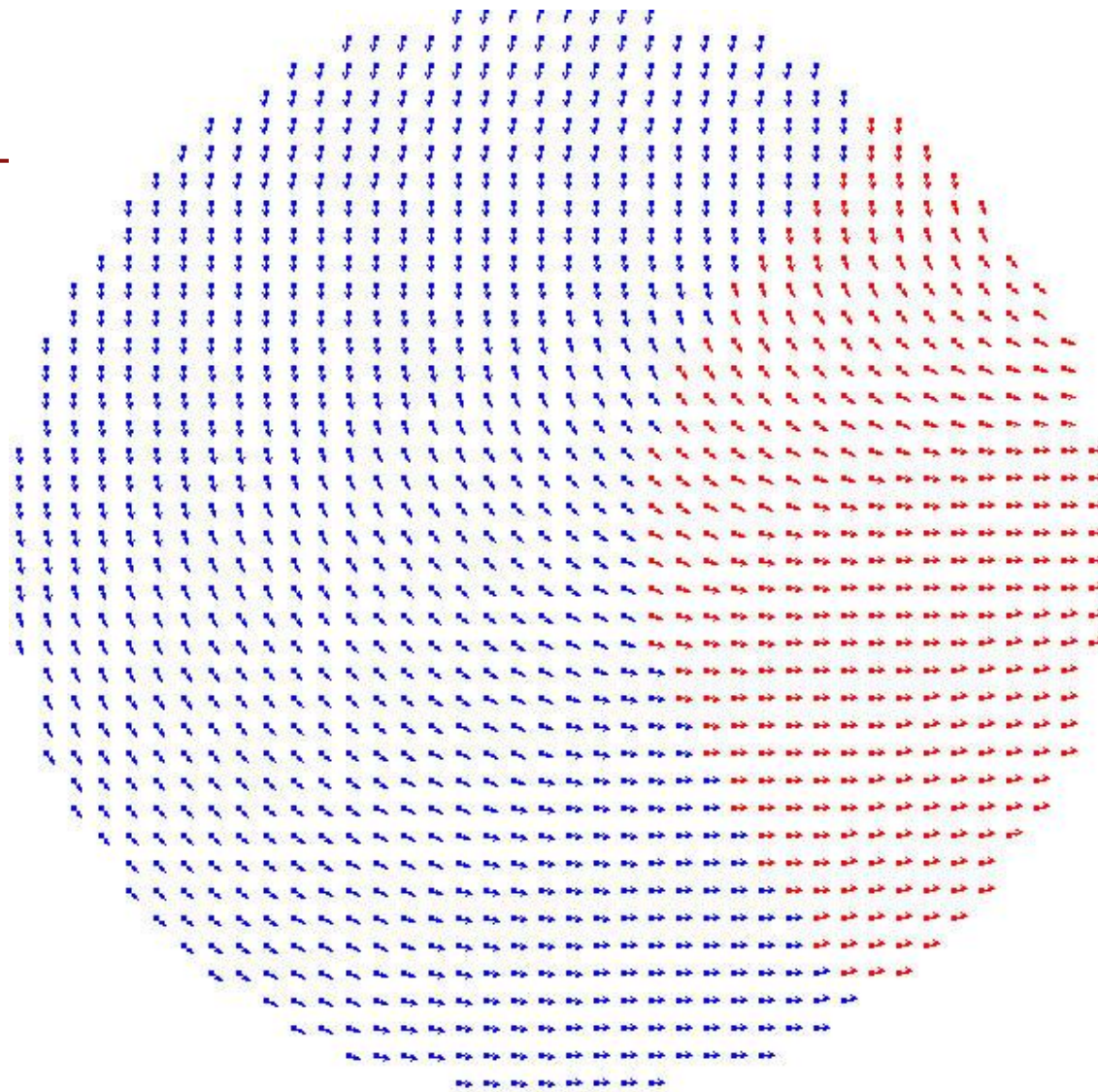


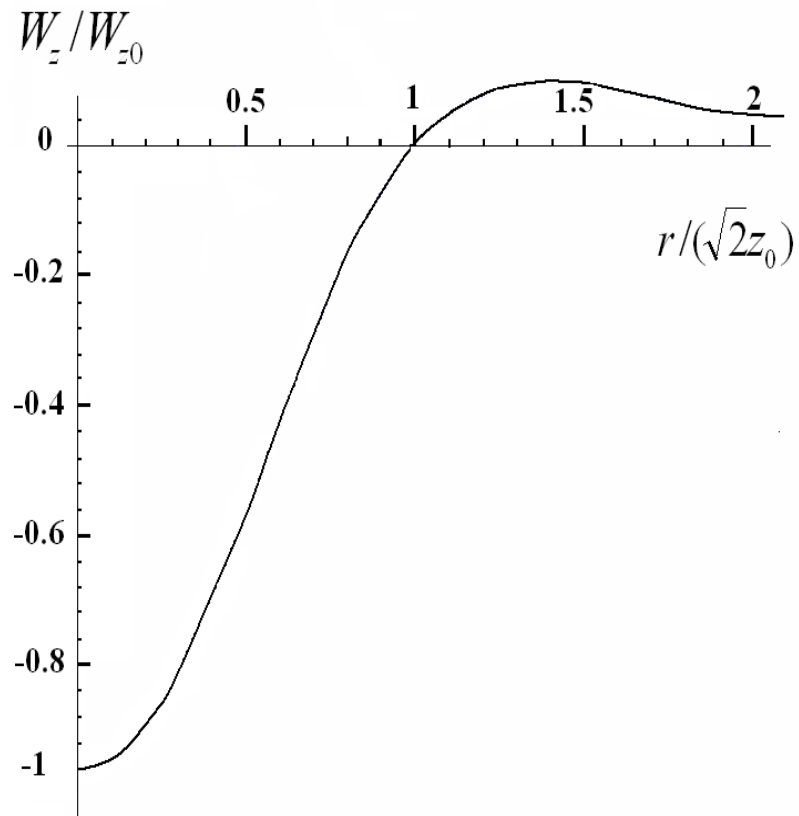




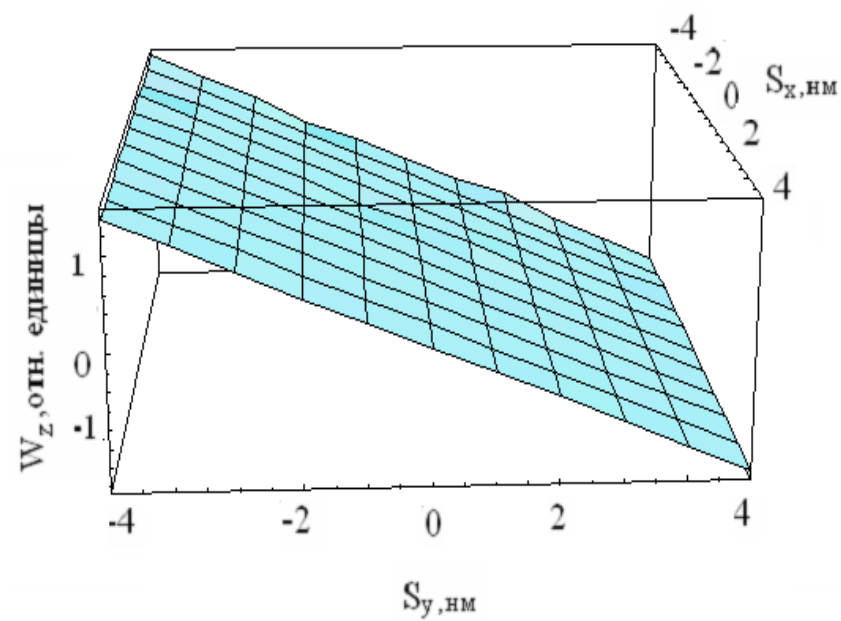




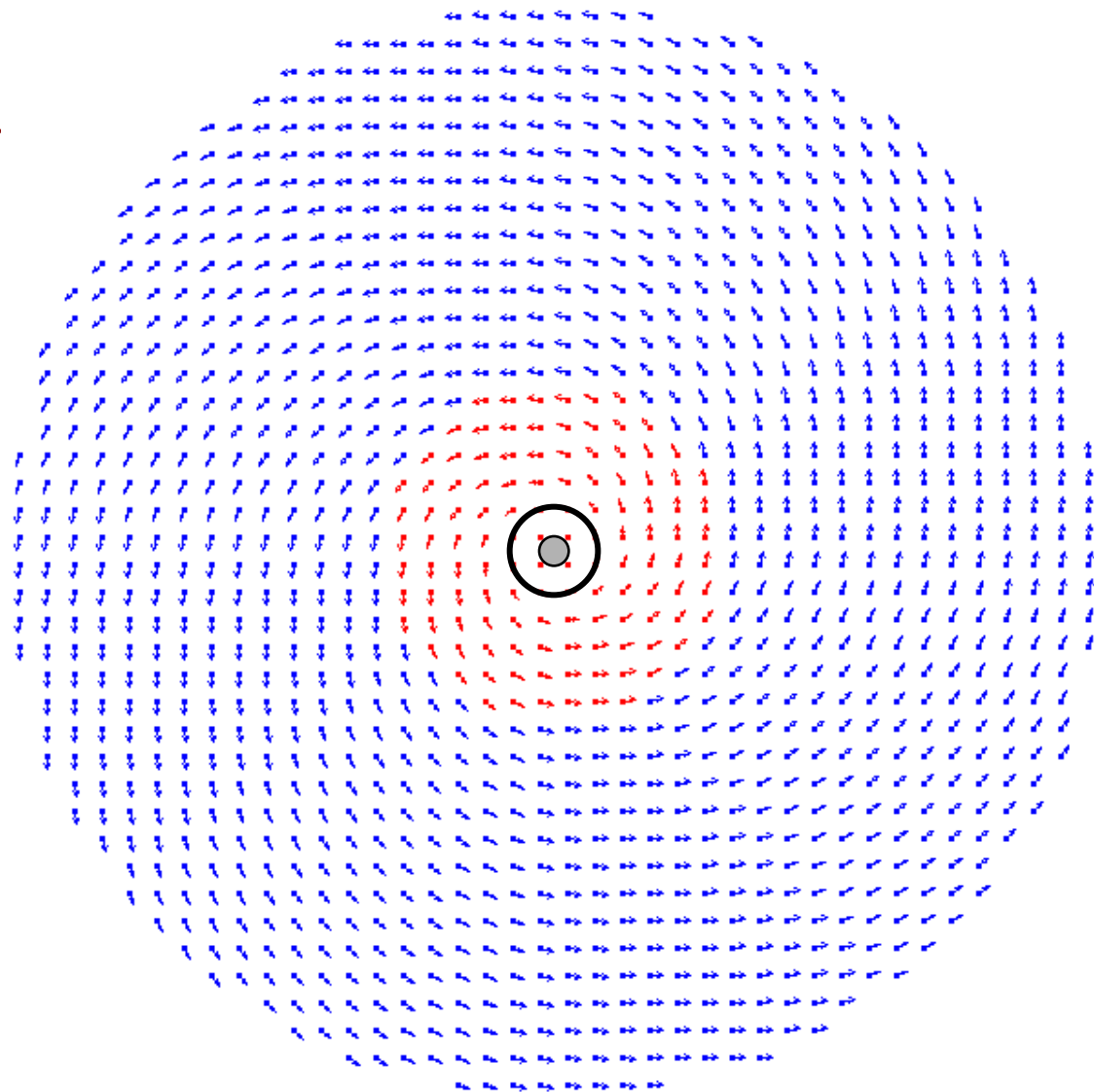


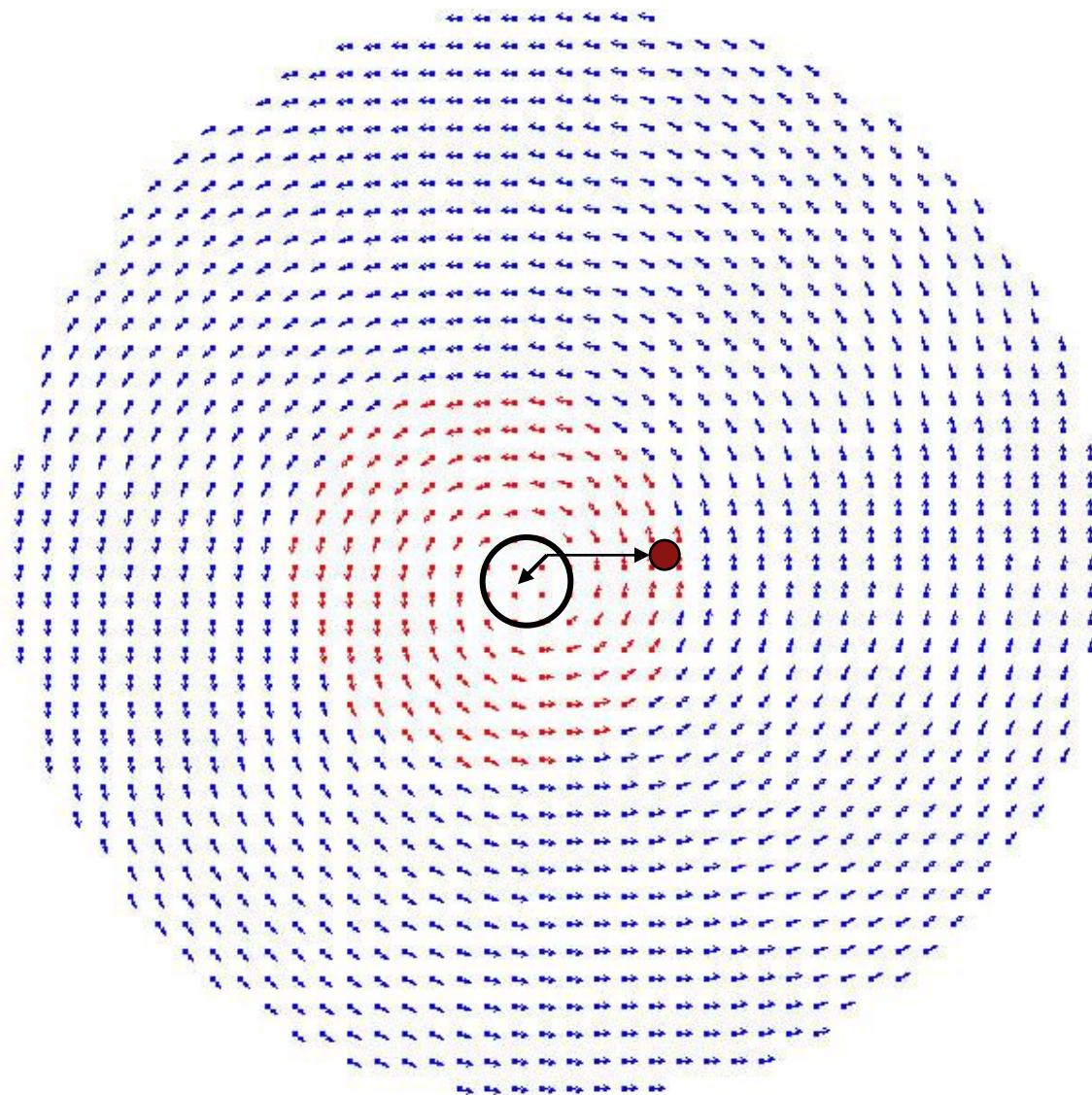


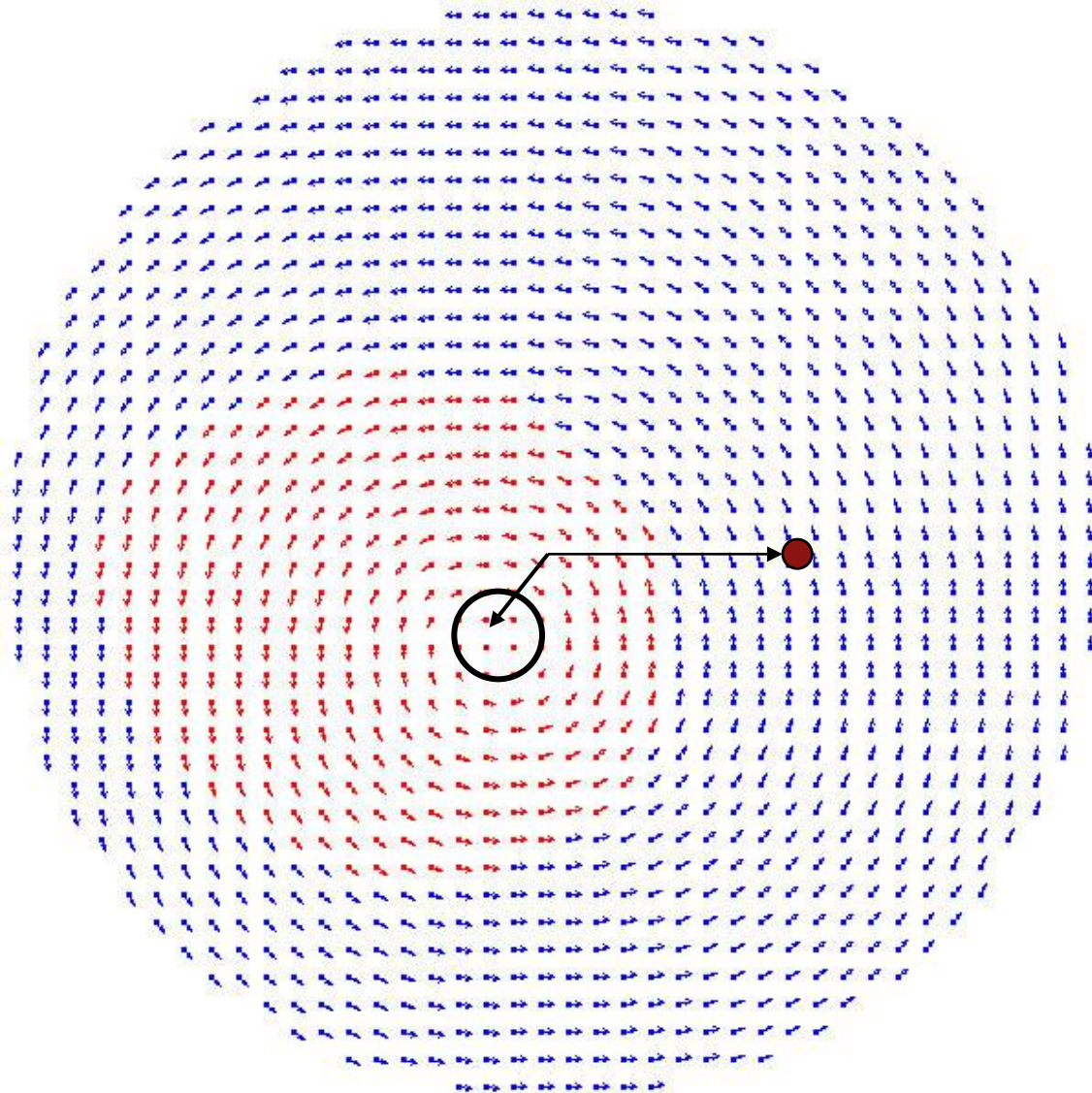
а) Энергия взаимодействия Кора

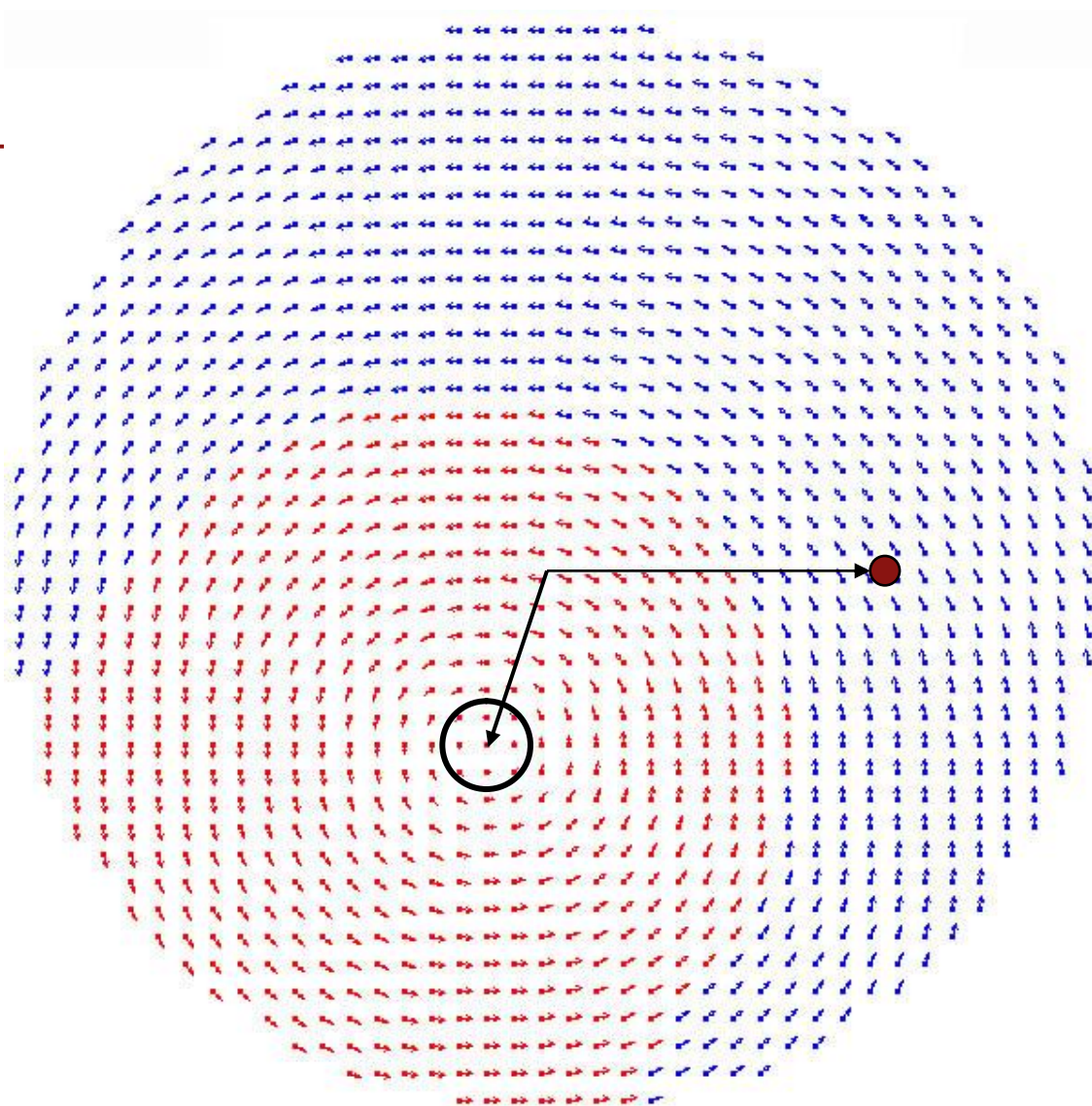


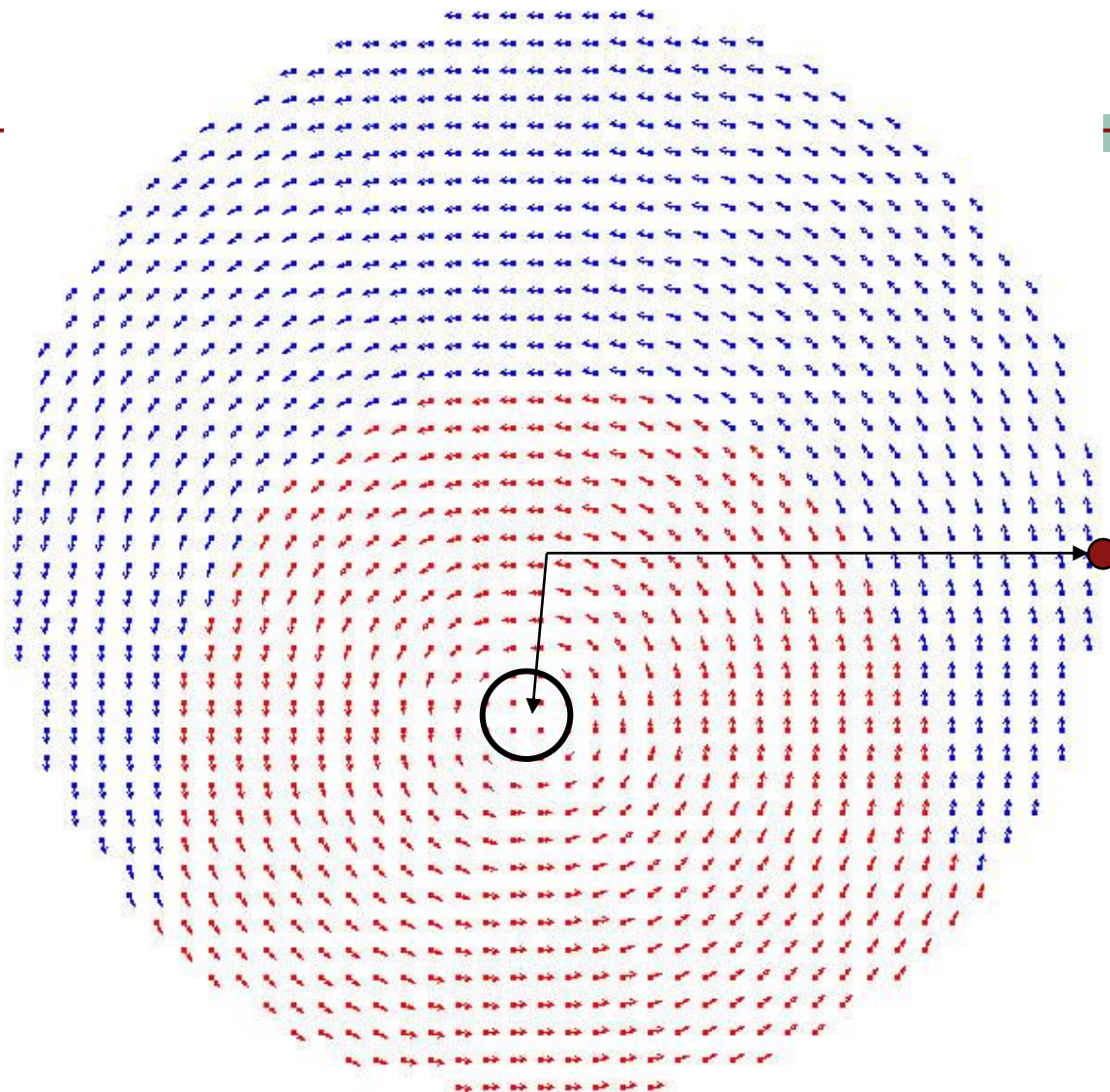
б) Энергия взаимодействия оболочки

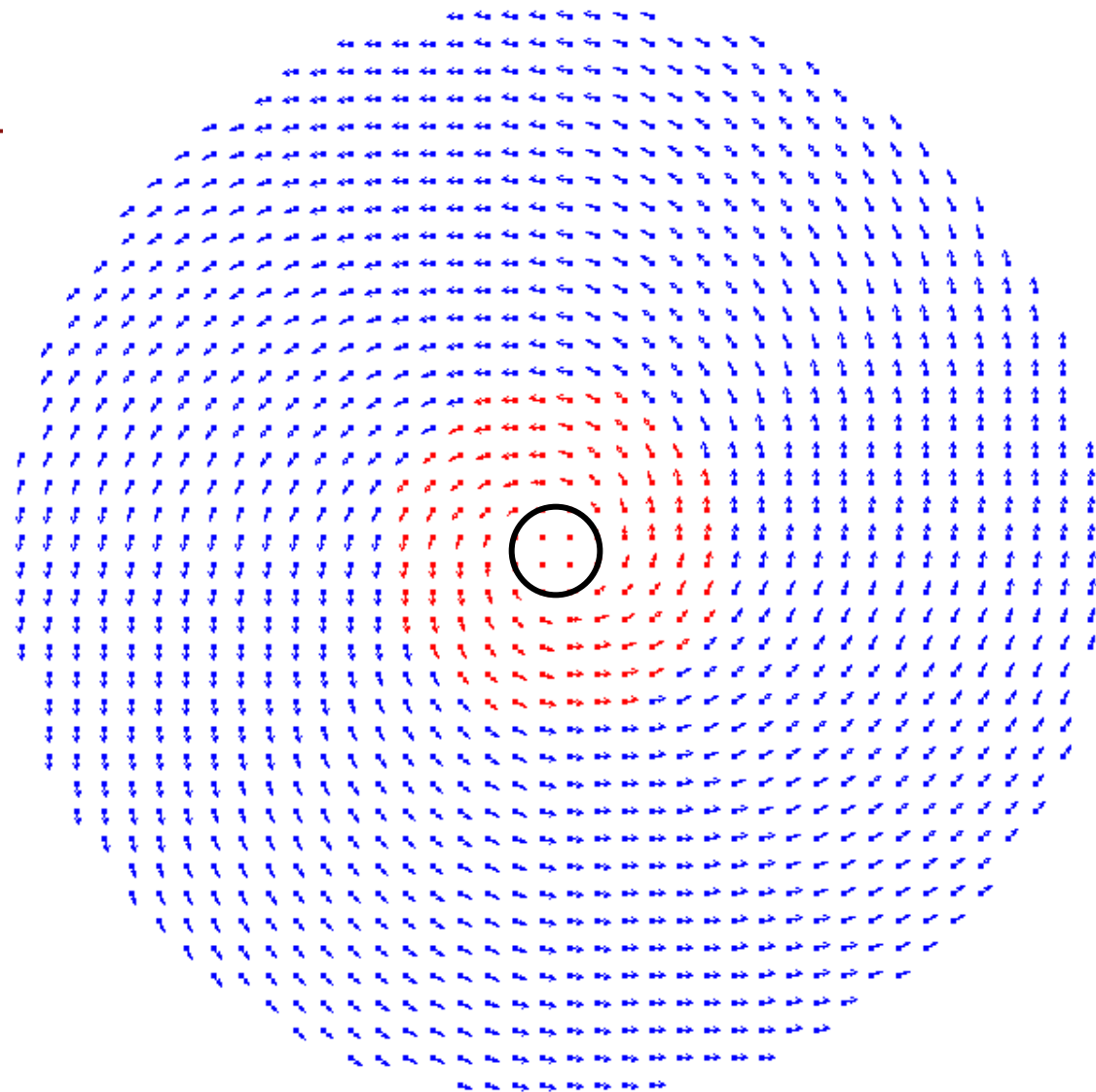






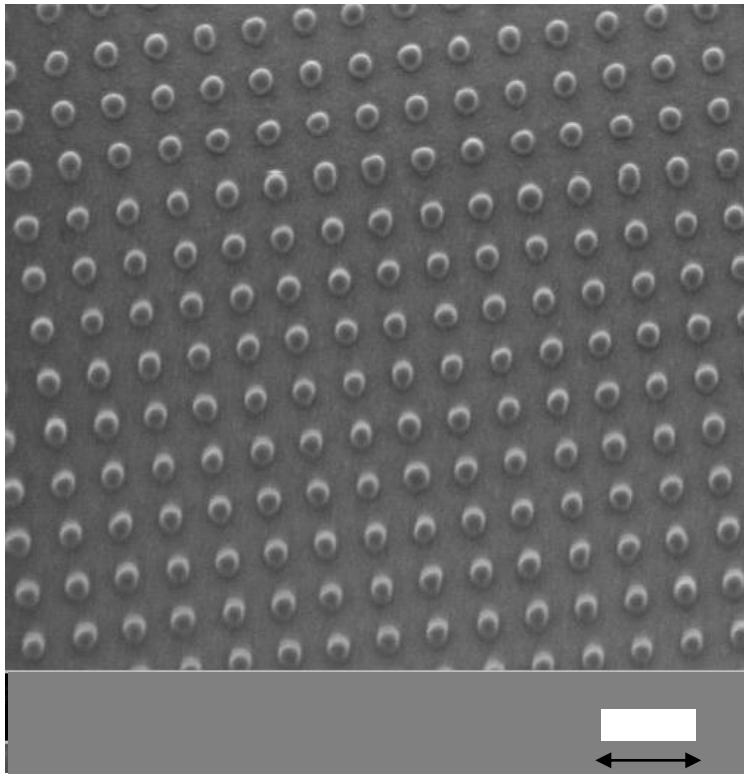






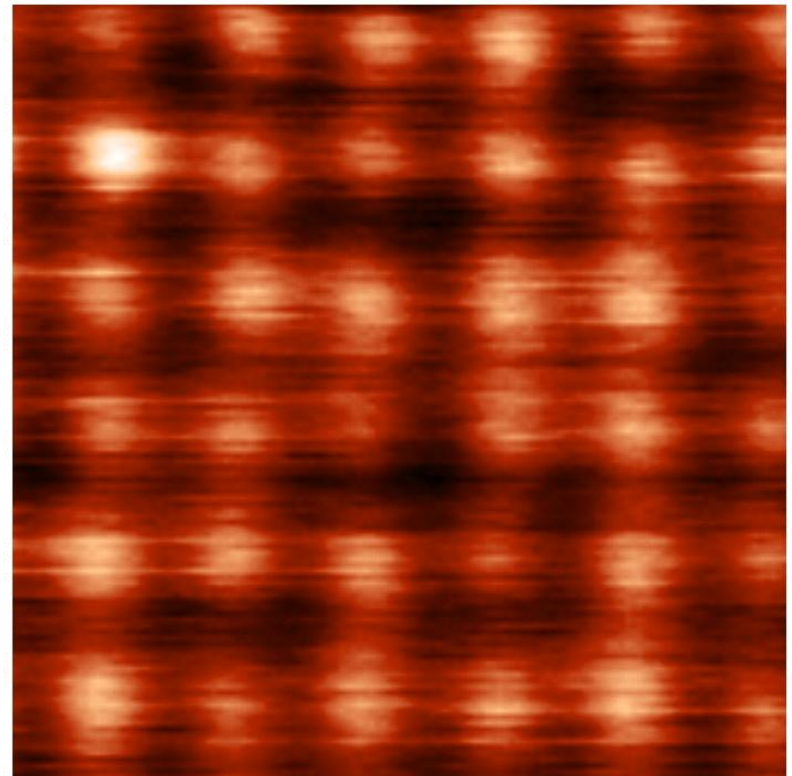
Перемагничивание частиц CoPt с перпендикулярной анизотропией

Массив частиц CoPt



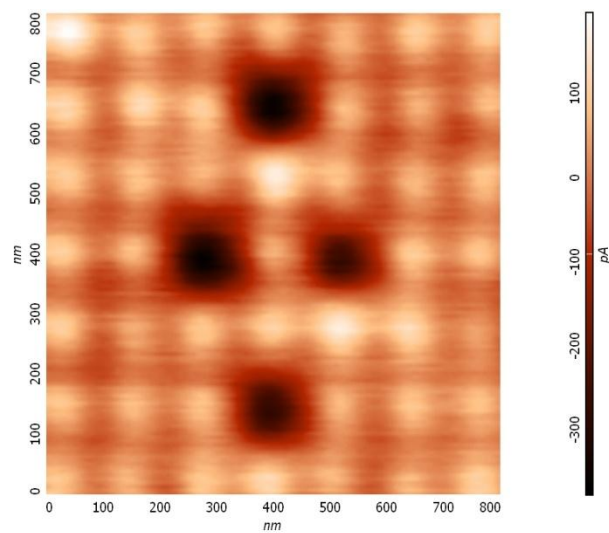
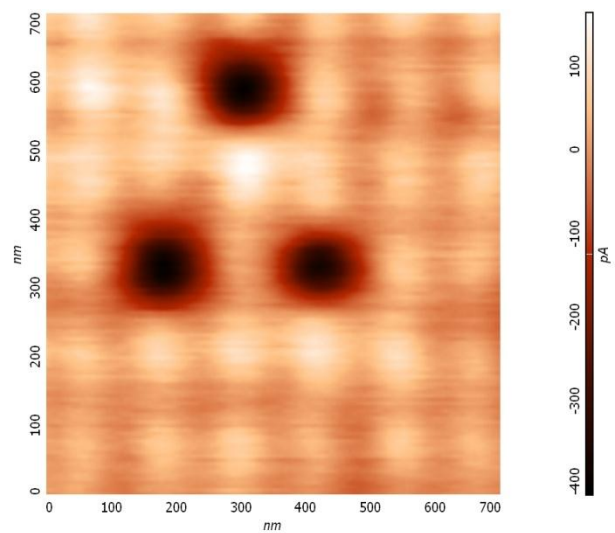
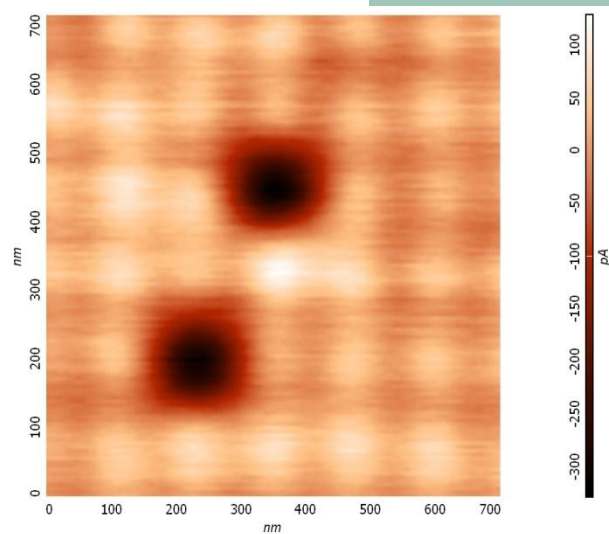
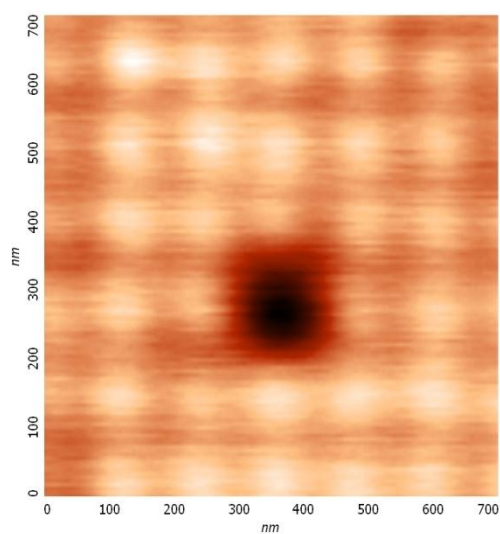
200 нм

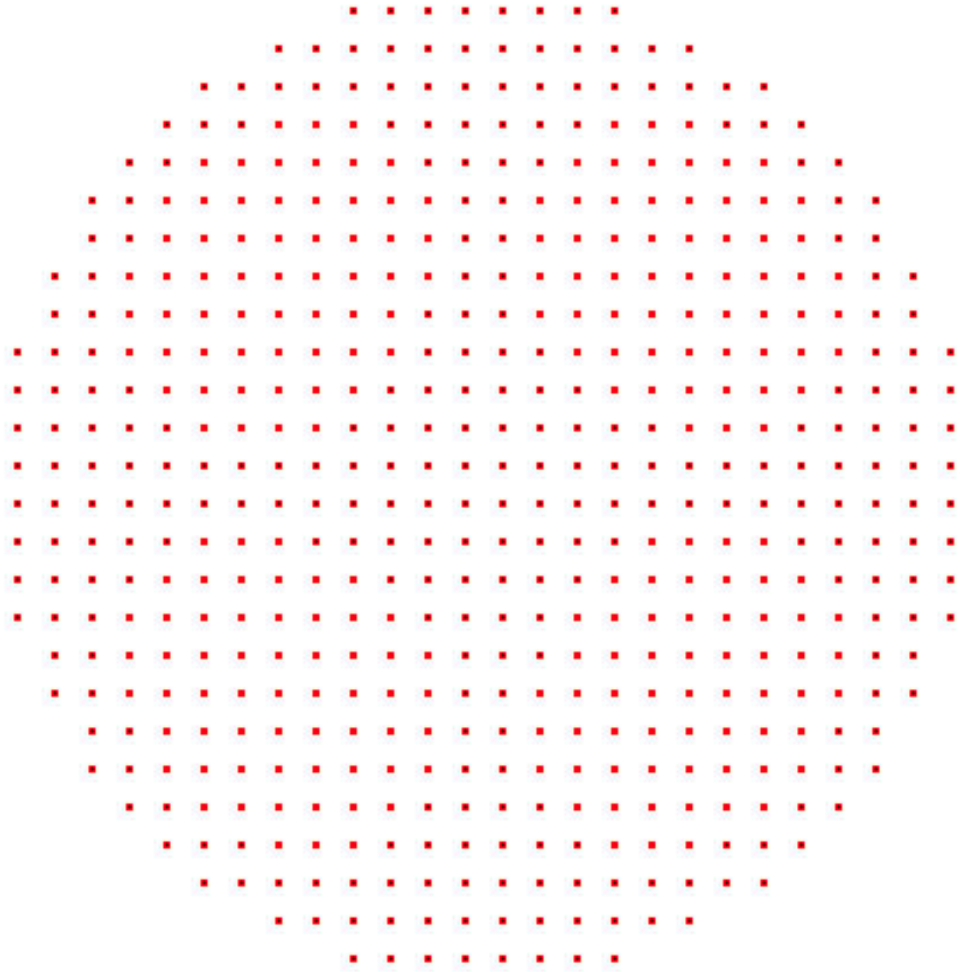
электроннограмма

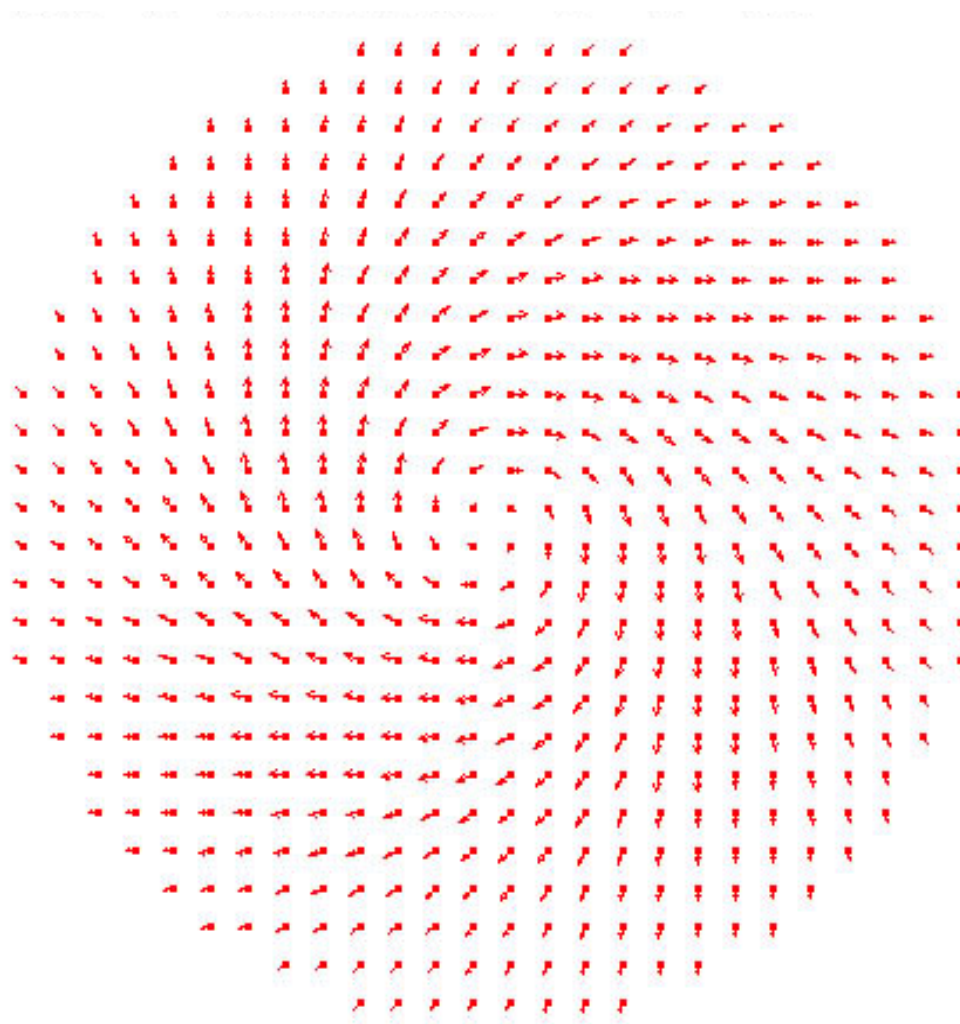


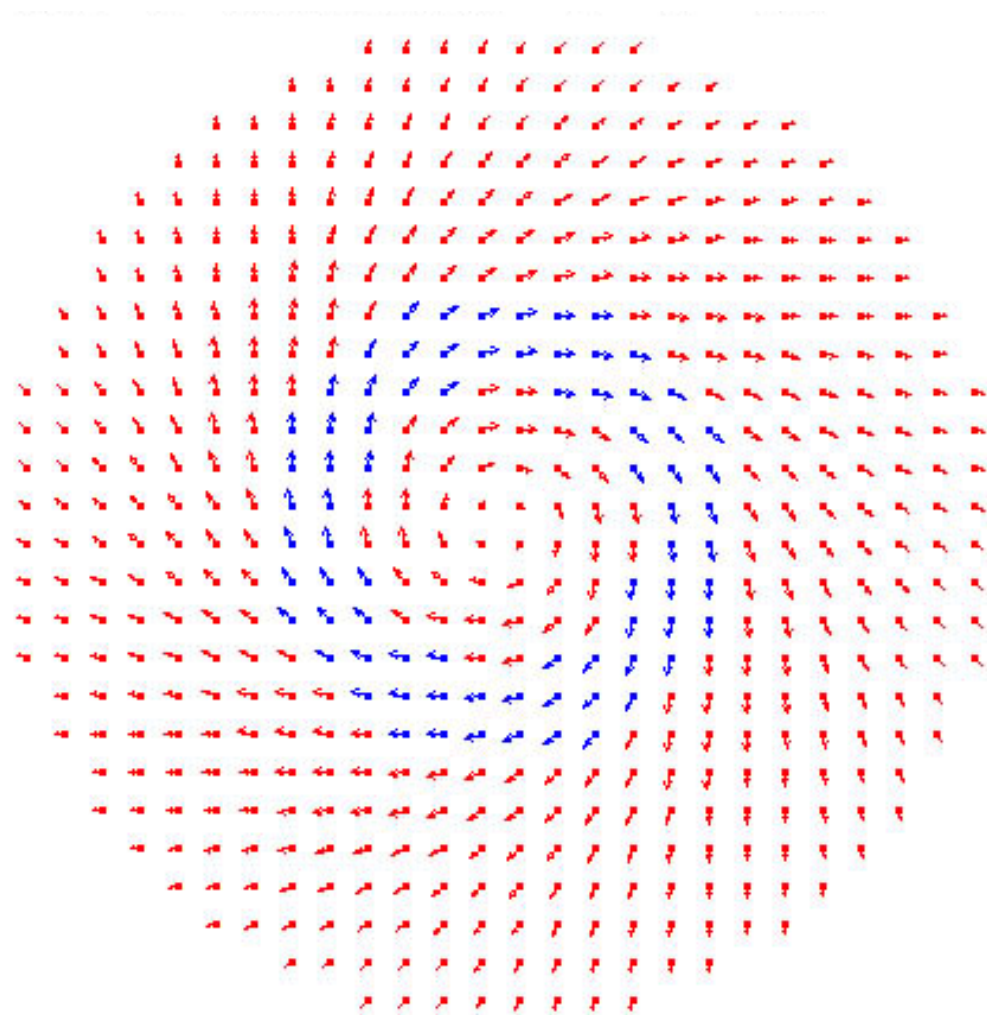
МСМ изображение

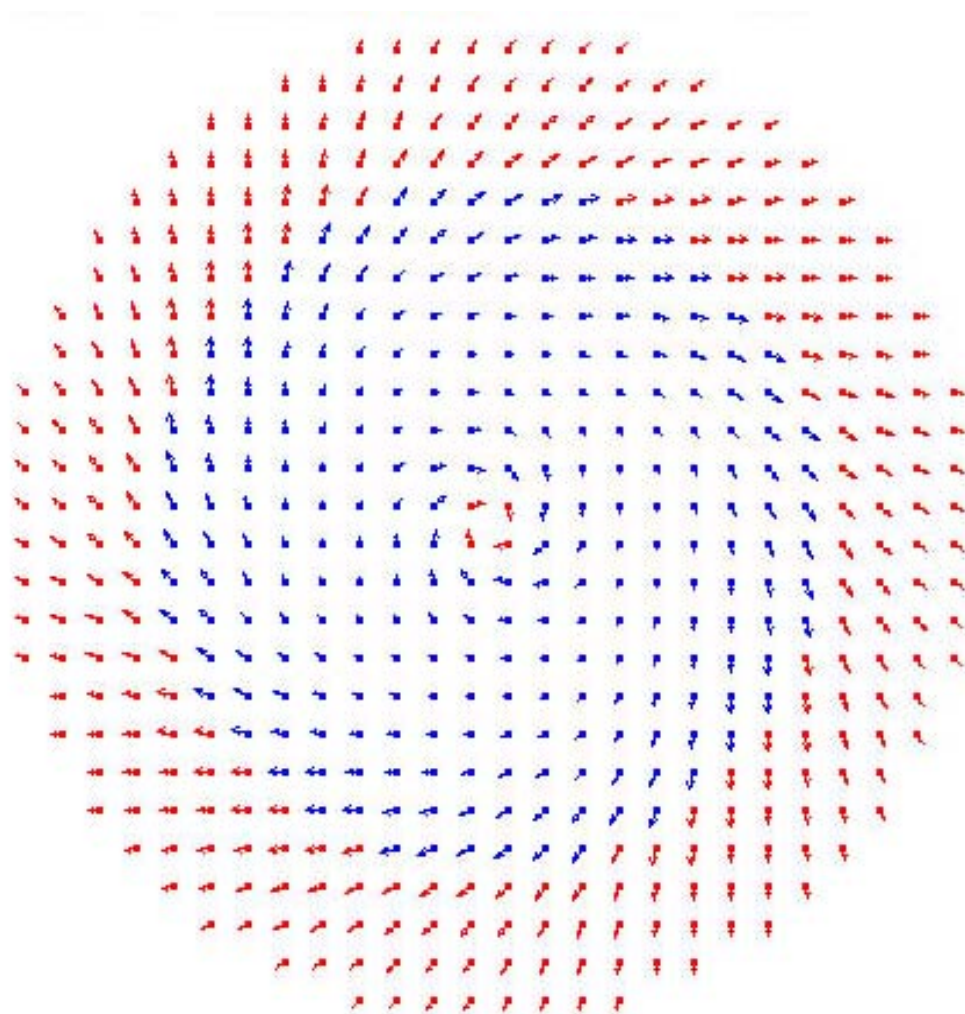
Перемагничивание частиц с перпендикулярной анизотропией

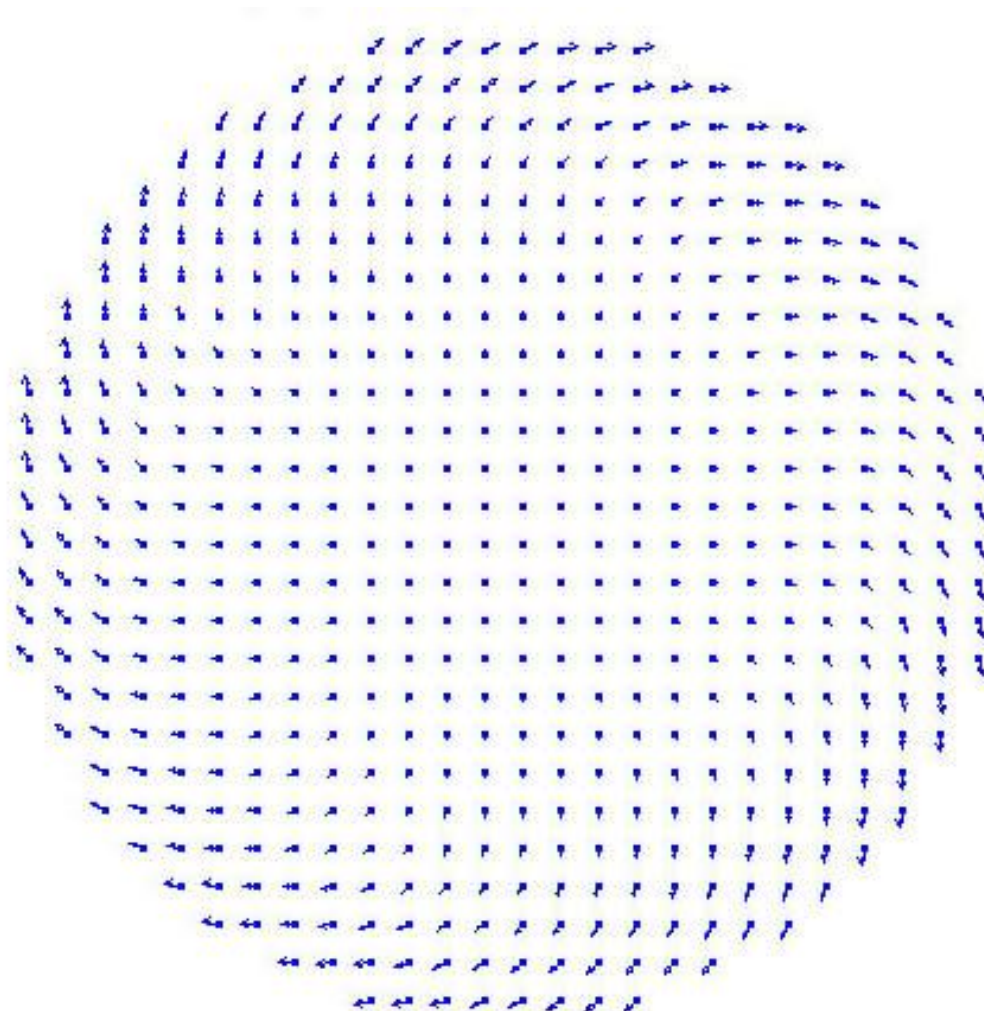


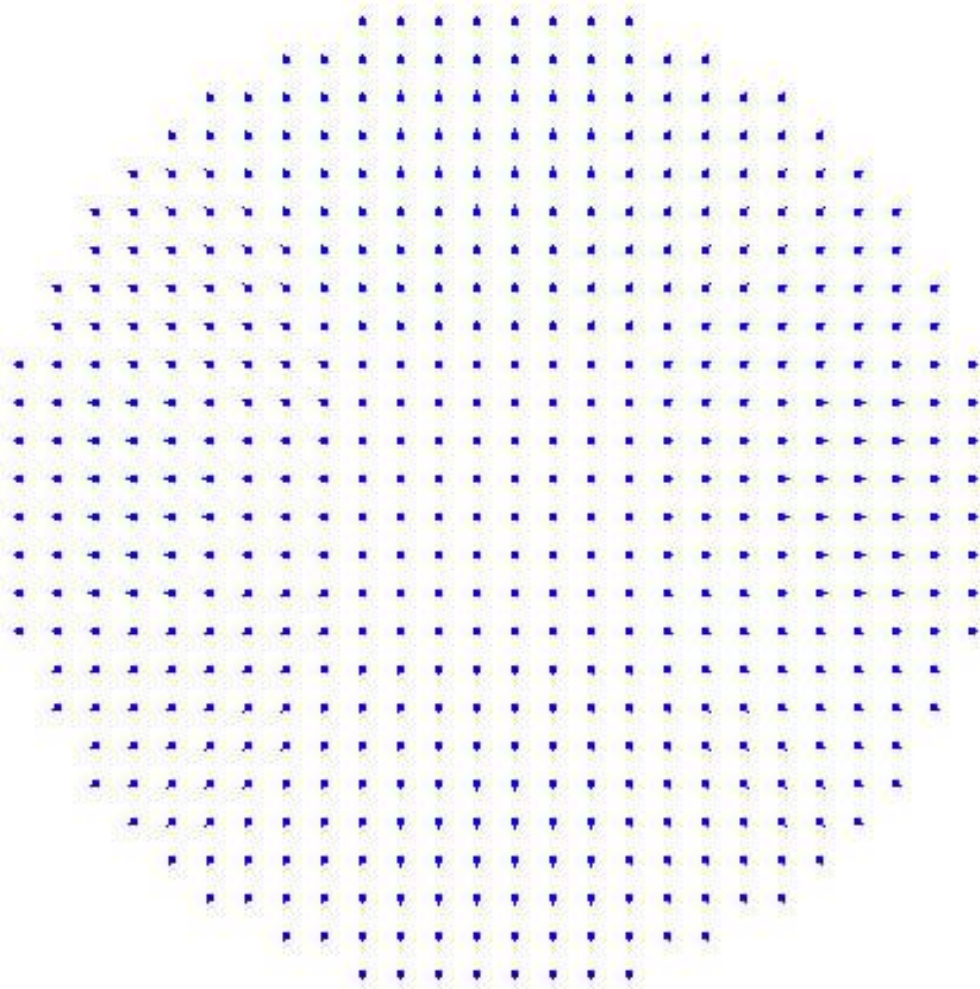












Заключение:

- Рассмотрено слабое возмущение распределение намагниченности образца полем МСМ зонда и найден вносимый этим возмущением вклад в МСМ контраст.
- Показана возможность индуцированного зондом перемагничивания однородной частицы
- Рассмотрены переходы частицы из вихревого состояния в однородное и обратно в вихревое под действием поля МСМ зонда.
- Рассмотрено взаимодействие круглого вихря с магнитным полем МСМ зонда
- Перемагничивание частиц CoPt с перпендикулярной анизотропией