

**О измерении спин-волновой  
жёсткости в гелимагнетиках  
 $\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x\text{Si}$  методом малоуглового  
рассеяния поляризованных  
нейтронов**

Кирилл Пшеничный

Научный руководитель: С.В. Григорьев

# Введение

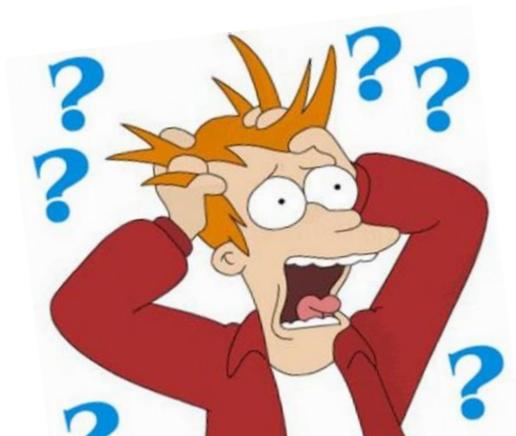
Что такое жёсткость спиновой волны?



Зачем?



Как?



# Аналитика

Компоненты вектора рассеяния

$$\begin{cases} q_x = k_i \theta_x, \\ q_y = k_i \theta_y, \\ q_z = k_i \hbar \omega / (2E). \end{cases}$$

Дисперсионное соотношение для гелимагнетика

$$E_q = A(\vec{q} - \vec{k}_s)^2 + g_s \mu_B (H - H_{C2}) = A\vec{Q}^2 + \Delta$$

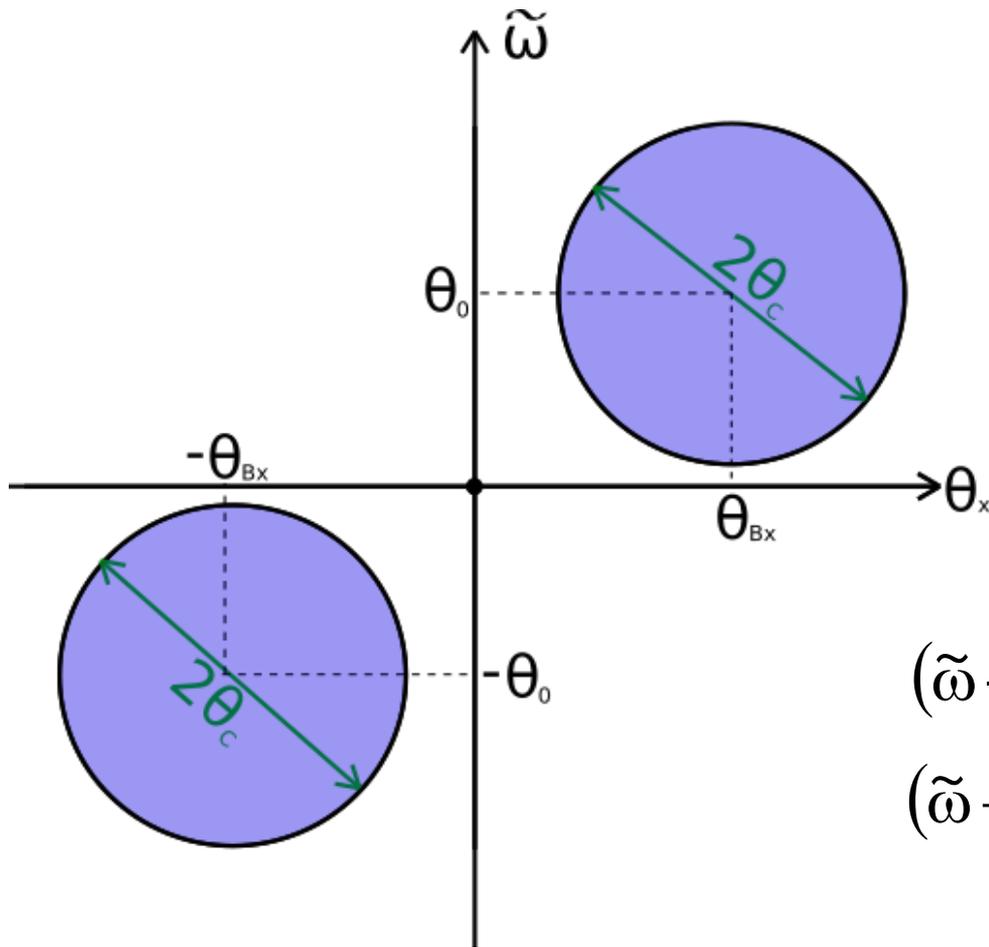
После подстановки компонентов вектора рассеяния, получим:

$$E_q = A \left\{ (k_i \theta_x - k_{sx})^2 + (k_i \theta_y - k_{sy})^2 + \left( k_i \frac{\hbar \omega}{2E} - k_{sz} \right)^2 \right\} + \Delta$$

И учитывая закон сохранения энергии:

$$\omega - E_{-q} = 0 \quad \omega + E_q = 0$$

# Аналитика



Уравнения сфер!

$$(\tilde{\omega} - \theta_0)^2 + \theta_x^2 + \theta_y^2 = \theta_0^2$$

$$(\tilde{\omega} + \theta_0)^2 + \theta_x^2 + \theta_y^2 = \theta_0^2$$

$$\tilde{\omega} = \frac{\omega}{2E} \quad \theta_{Bx} = \frac{k_{sx}}{k_i}$$

$$(\tilde{\omega} - \theta_0)^2 + (\theta_x - \theta_{Bx})^2 + \theta_y^2 = \theta_C^2$$

$$(\tilde{\omega} + \theta_0)^2 + (\theta_x + \theta_{Bx})^2 + \theta_y^2 = \theta_C^2$$

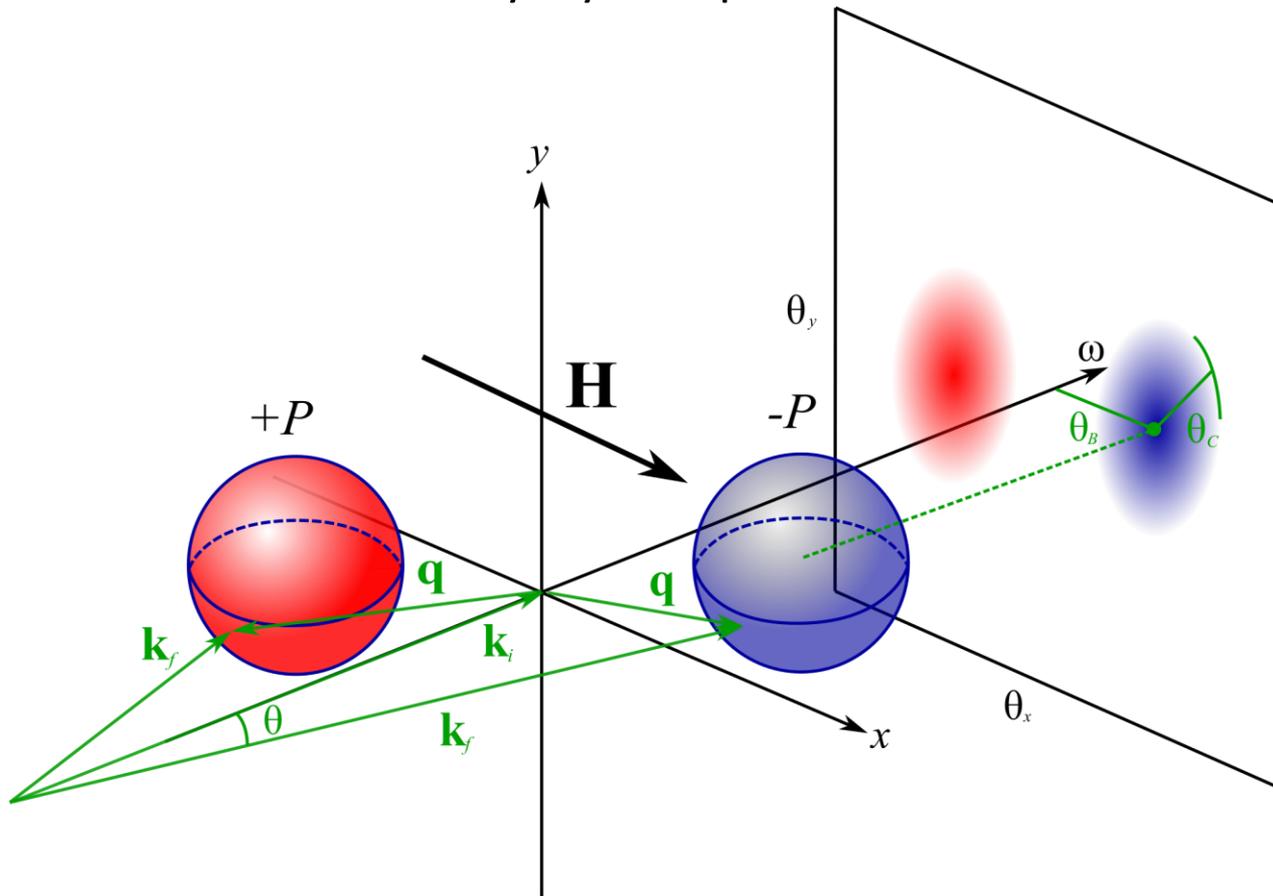
$$\theta_0 = \frac{E}{Ak_i^2} \quad \theta_C^2 = \theta_0^2 - \frac{\Delta}{Ak_i^2}$$

$$\Delta = g\mu(H - H_{C2})$$

$$A^2 k_i^4 \theta_C^2 + A k_i^2 \Delta - E = 0$$

# Схема рассеяния нейтронов

Поле  $H$  направлено перпендикулярно падающему пучку нейтронов



кинематическая схема рассеяния поляризованных нейтронов в случае геликоидального магнетика, намагниченного в поле  $H > H_{C2}$ .

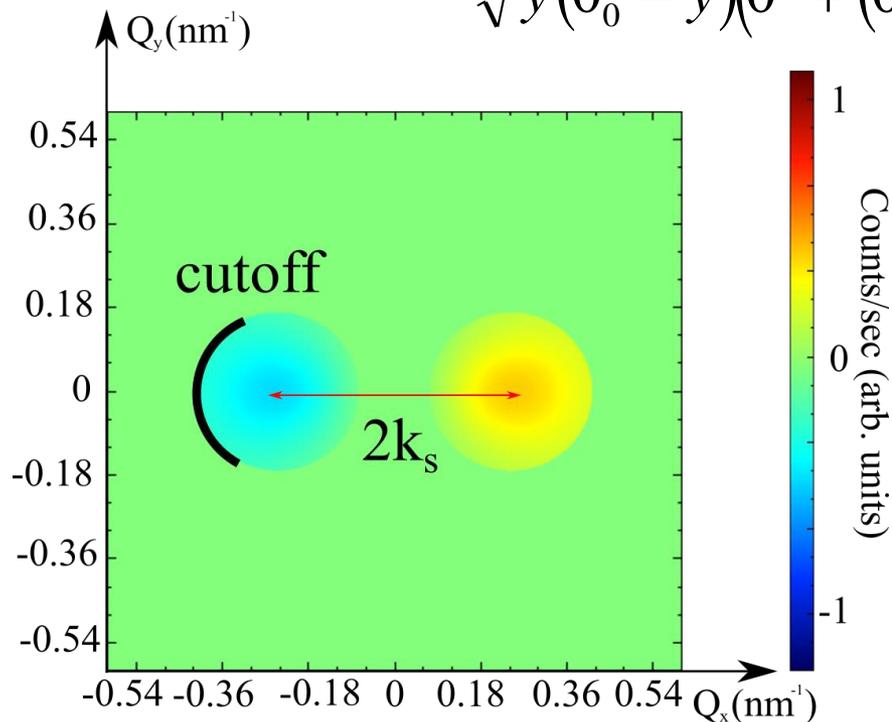
# Сечение рассеяния

Сечение рассеяния для гелимагнетика:

$\Delta I^I$  - интенсивность рассеяния для «верхней» сферы (в положительном полупространстве энергий)

$\Delta I^{II}$  - интенсивность рассеяния для «нижней» сферы (в отрицательном полупространстве энергий)

$$\Delta I^I = \frac{\theta_x^2 \theta_0 \left[ (\theta_0 - \sqrt{y}) (\theta^2 + (\theta_0 - \sqrt{y})^2) - (\theta_0 + \sqrt{y}) (\theta^2 + (\theta_0 + \sqrt{y})^2) \right]}{\sqrt{y} (\theta_0^2 - y) (\theta^2 + (\theta_0 + \sqrt{y})^2) (\theta^2 + (\theta_0 - \sqrt{y})^2)}$$



$$\sqrt{y} = \sqrt{-\theta_y^2 - (\theta_x - \theta_{Bx})^2 + \theta_C^2}$$

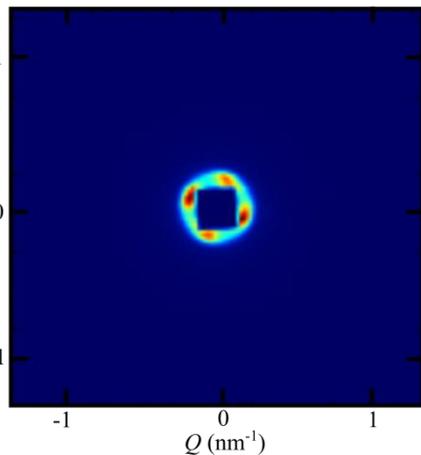
$$\Delta I \approx \int \frac{2k_B T}{\omega} (\hat{q} \hat{m})^2 [\delta(\omega - E_q) + \delta(\omega + E_q)] d\omega$$

# Поиск $T_c$ , $H_{c1}$ , $H_{c2}$

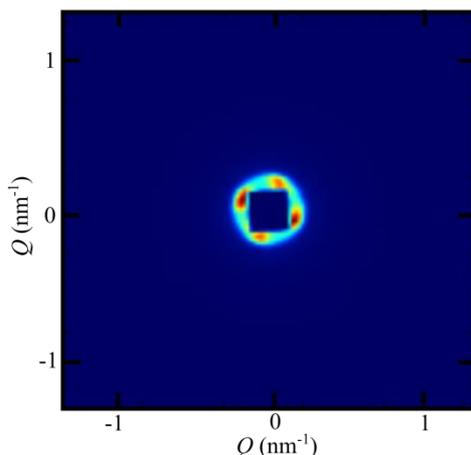
$\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x\text{Si}$ ,  $x=0.25$

$B = 0 \text{ T}$

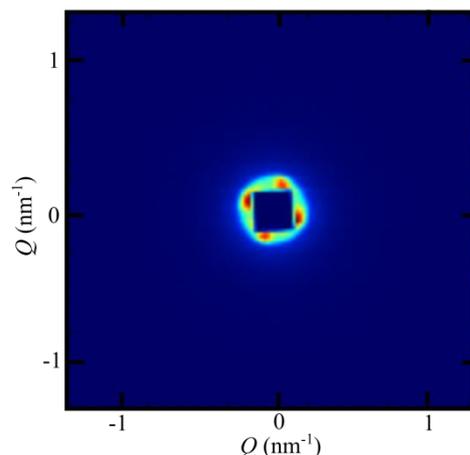
$T = 3 \text{ K}$



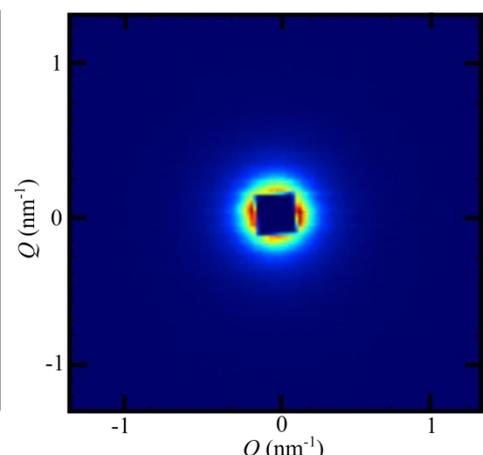
$T = 13 \text{ K}$



$T = 33 \text{ K}$

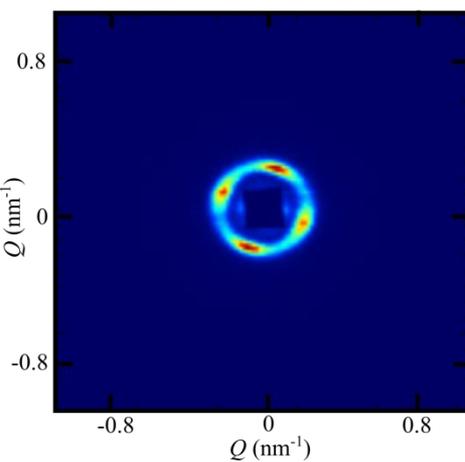


$T = 38 \text{ K}$

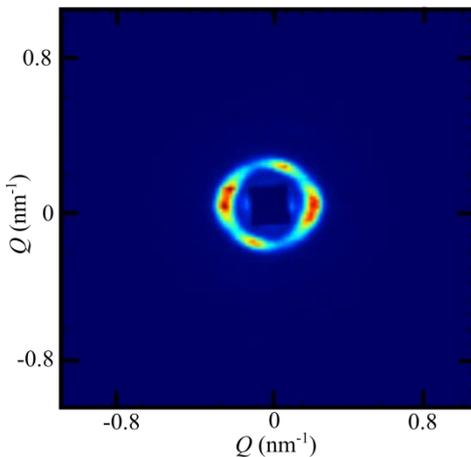


$T = 3 \text{ K}$

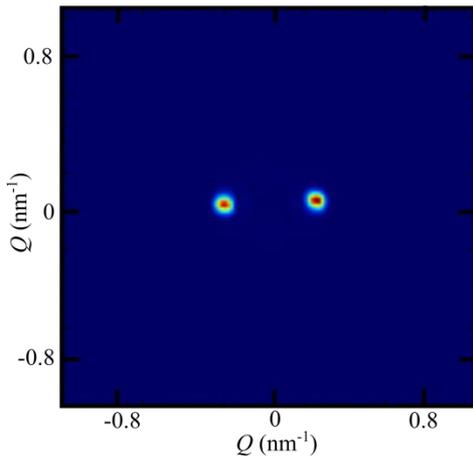
$B = 0 \text{ T}$



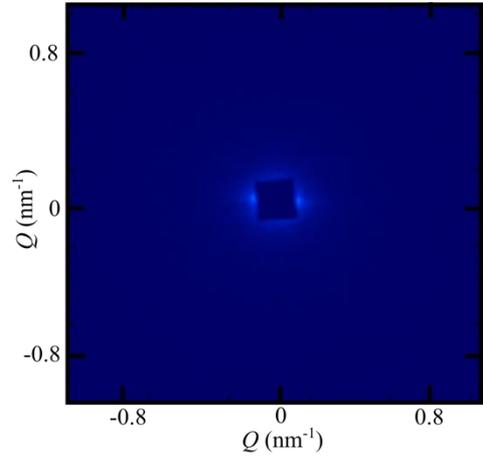
$B = 0.08 \text{ T}$



$B = 0.12 \text{ T}$

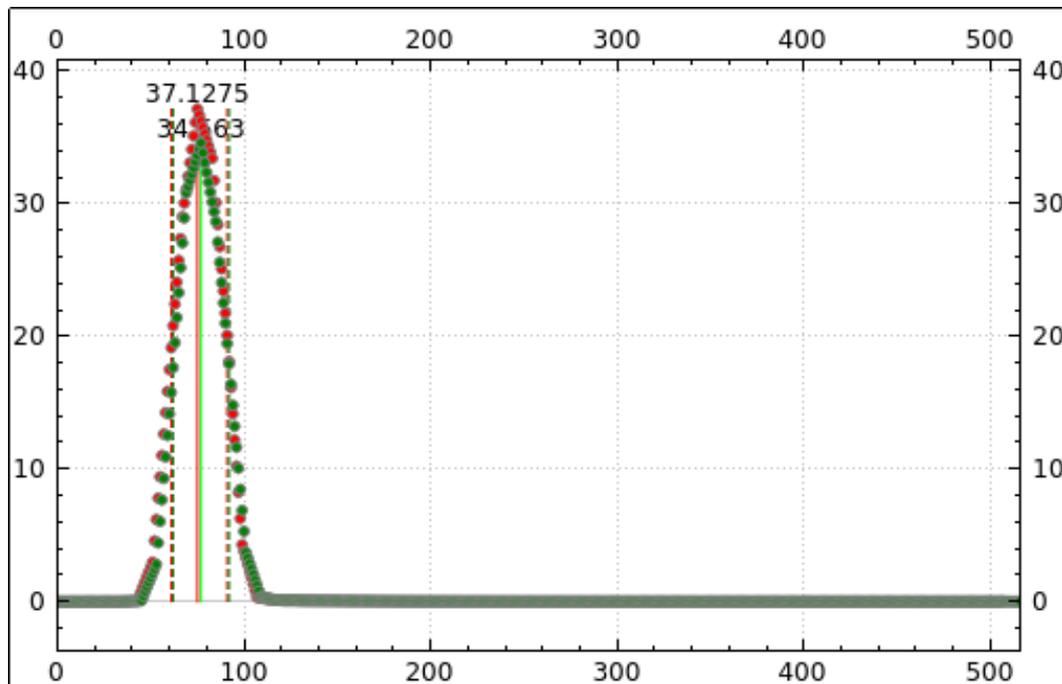
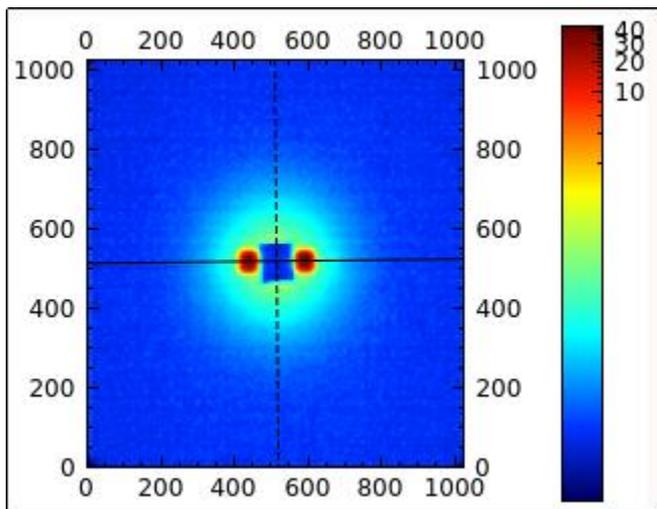


$B = 0.24 \text{ T}$

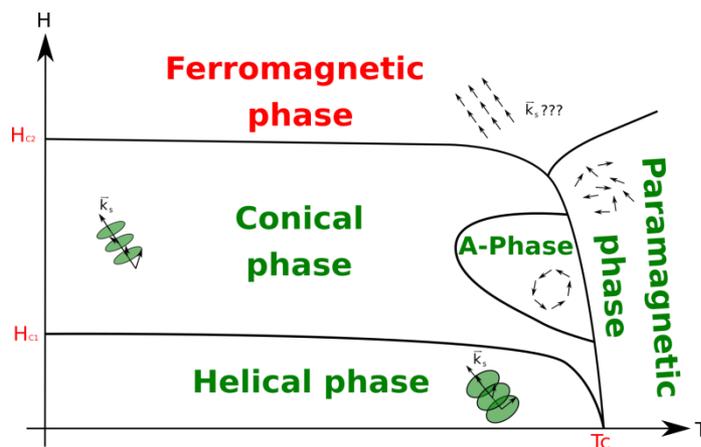
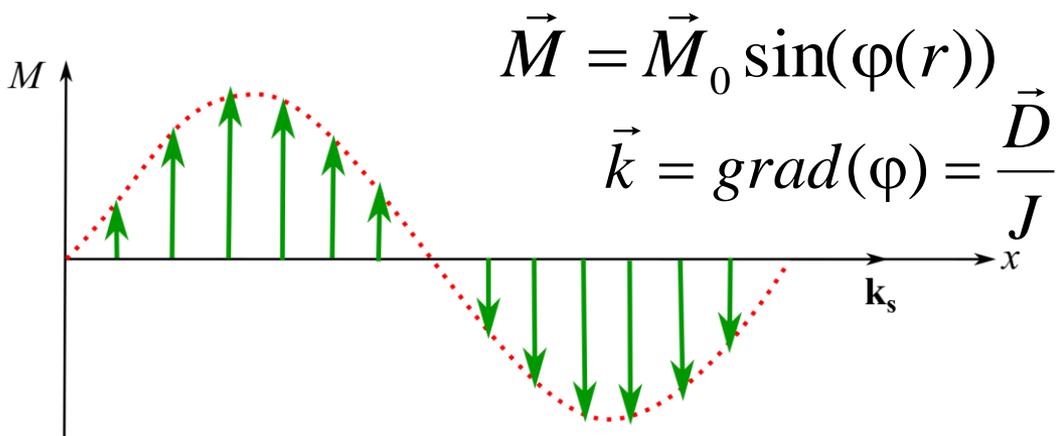


# Поиск $k_s$

$\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x\text{Si}$ ,  $x=0.25$



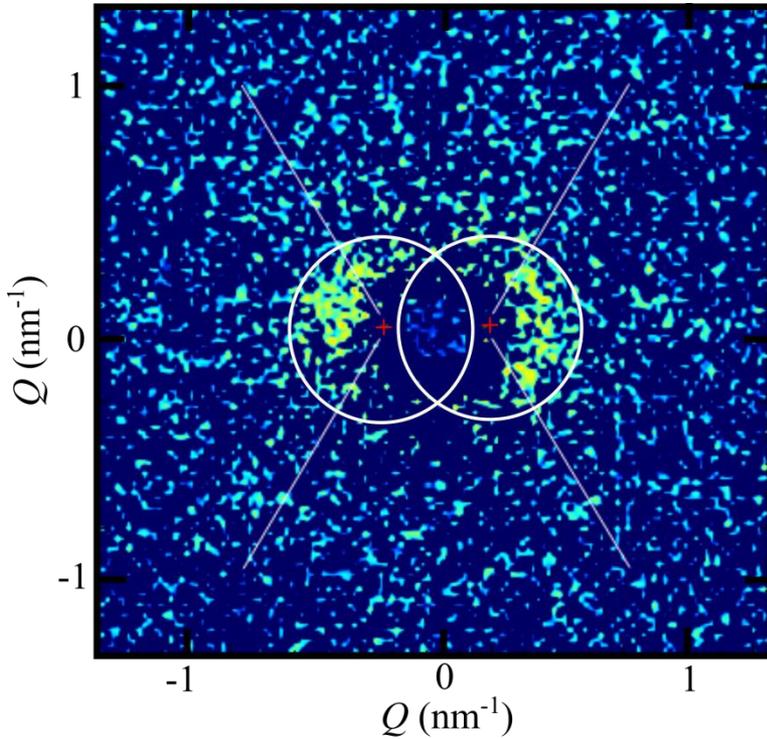
$H < H_{c2}$



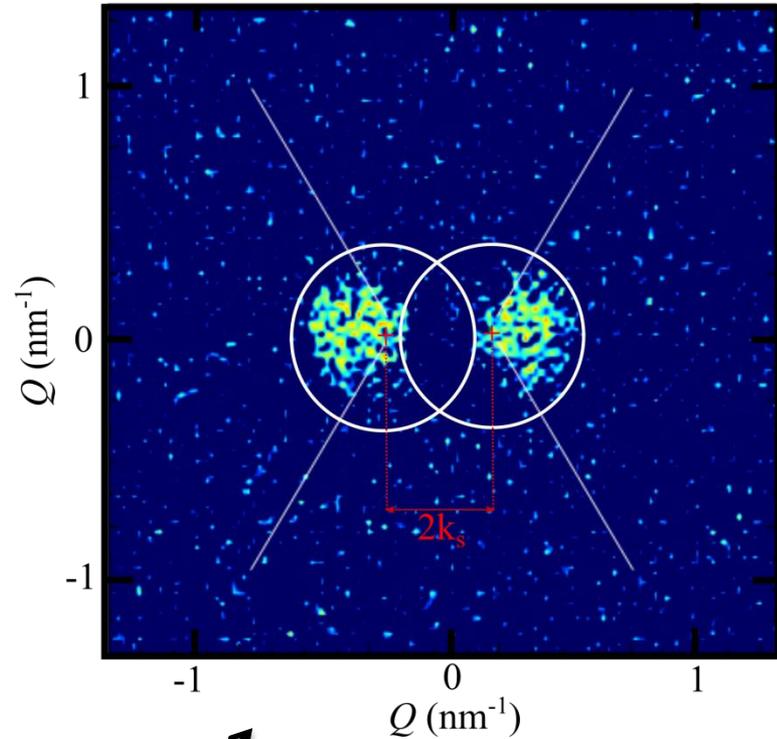
# Обработка (азимутальное усреднение)

$B = 0.7T$

Экспериментальная карта рассеяния

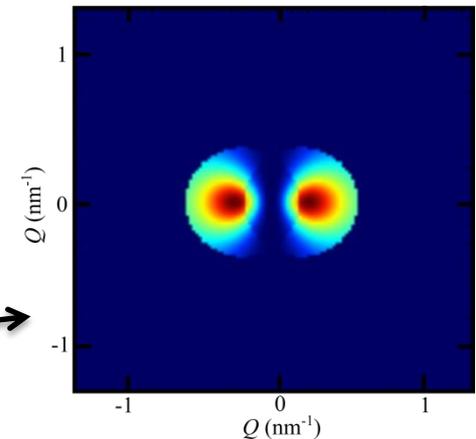


Теоретическая карта рассеяния



Теоретическая карта рассеяния с  
добавленным нормальным шумом  
с средним в нуле

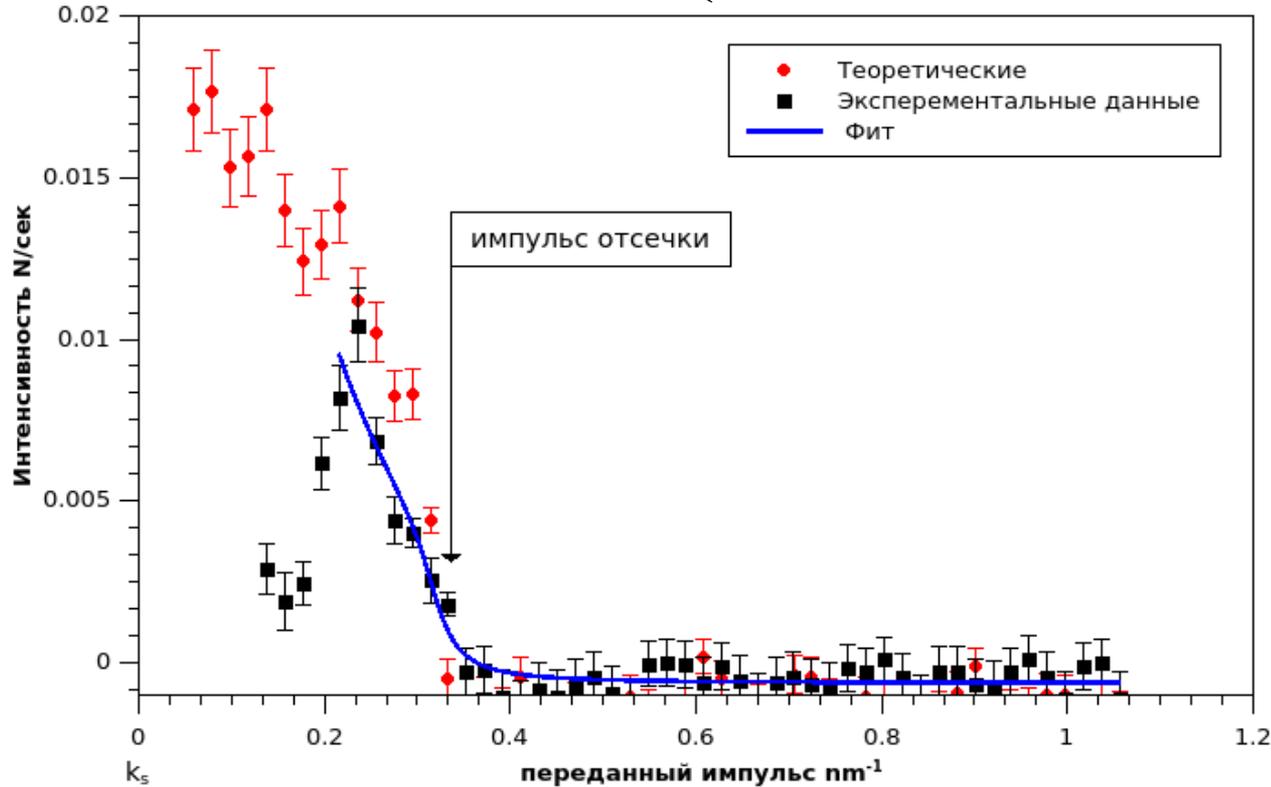
Теоретическая, но без шума



# Обработка (фитирование)

$B = 0.7T$

$$\text{Фит: } I = I_0 + I_1 \frac{w_l^2}{4Q^2 + 2w_l^2} \left( 1 + \text{arctg} \left( \frac{2(Q_{cutoff} - Q)}{\delta} \right) / \pi \right)$$

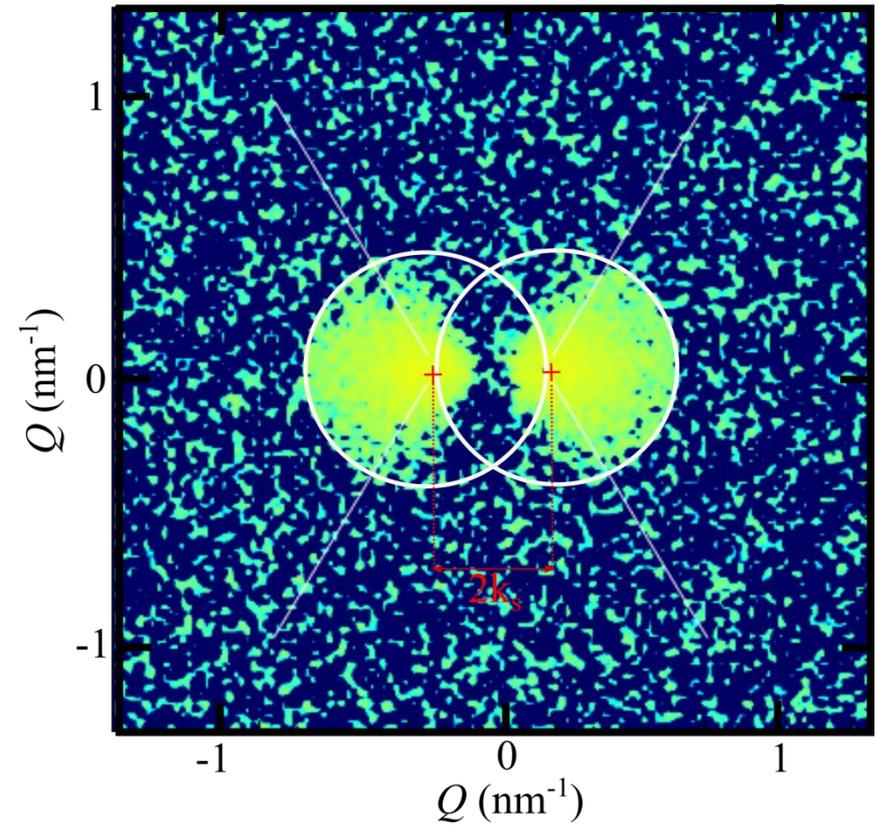
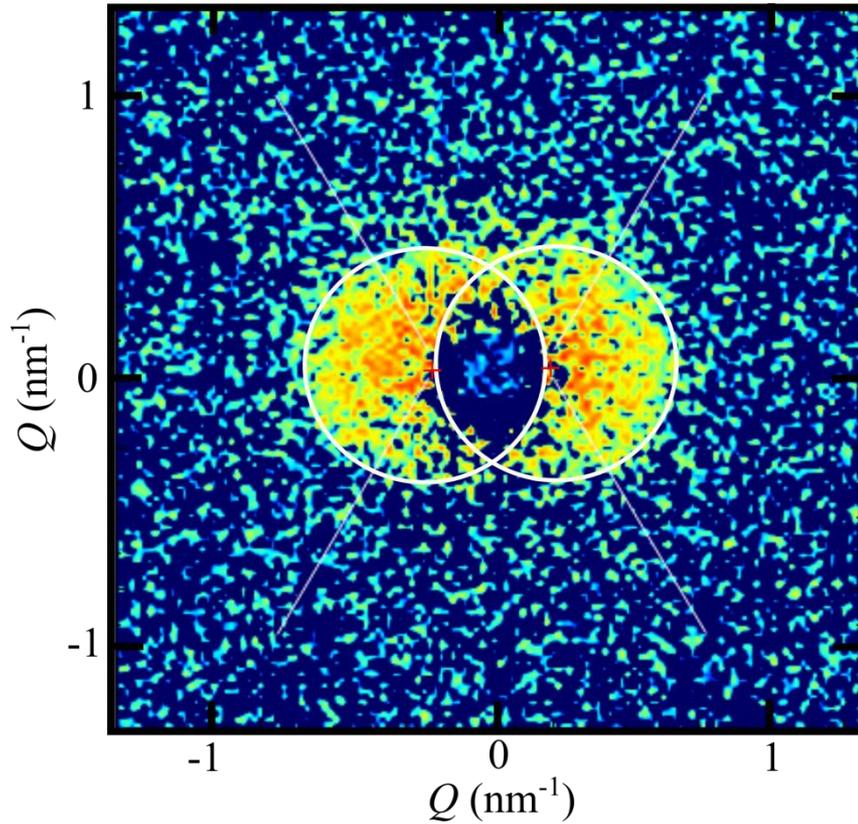


$$Q_{cutoff} = 0.33 \text{ nm}^{-1} \quad A = \left\{ \frac{Q_i^2}{2E_i^2} \left( \Delta + \sqrt{\Delta^2 + 4E_i^2 \left( \frac{Q_{cutoff}}{Q_i} \right)^2} \right) \right\}^{-1}$$

СПИН-ВОЛНОВАЯ ЖЁСТКОСТЬ  $A = 45.13 \text{ meV}\text{\AA}^2$

# Обработка

$B = 0.34\text{T}$

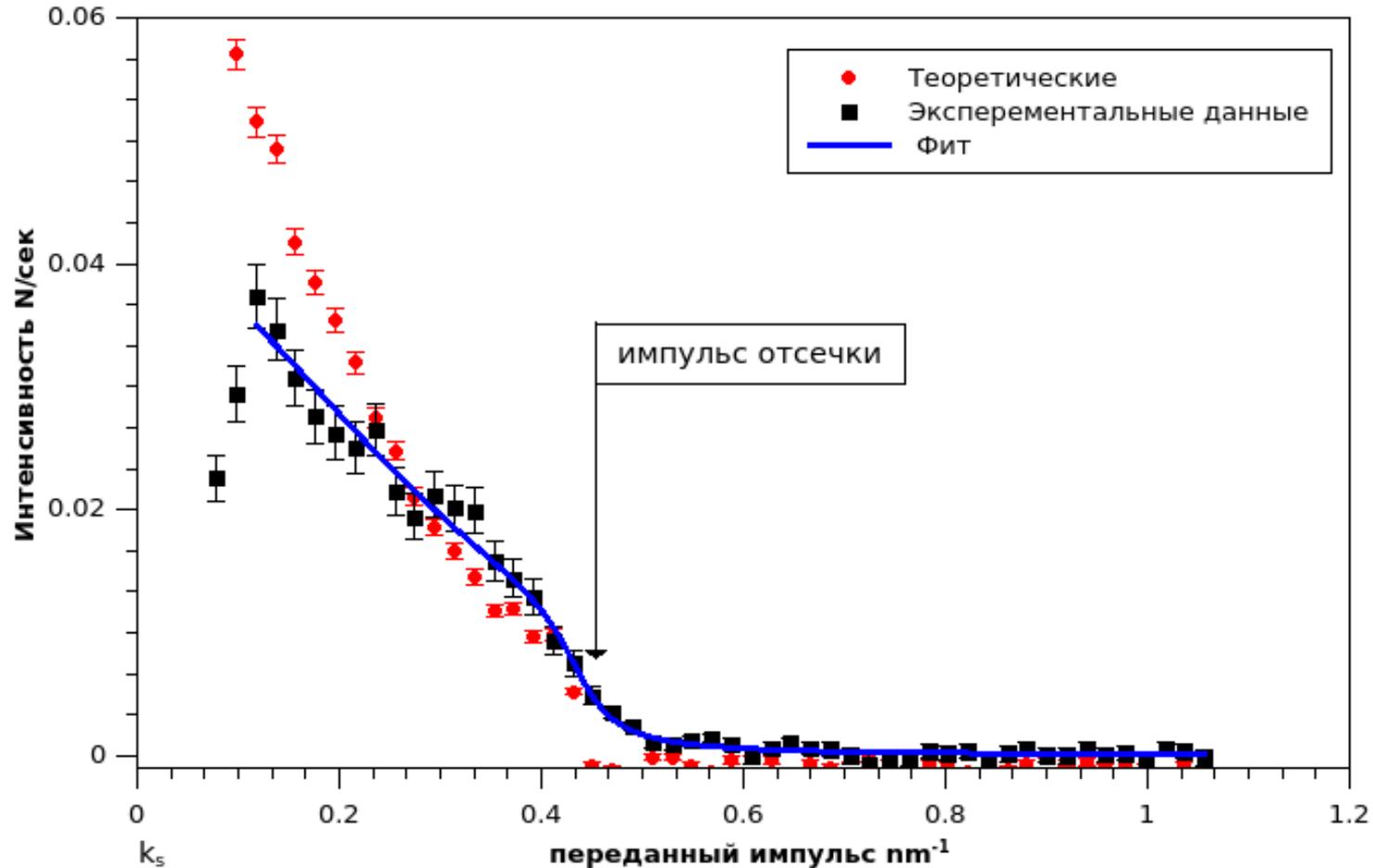


С уменьшением поля, угол отсечки увеличивается!

$$\theta_C^2 = \theta_0^2 - \frac{\Delta}{Ak_i^2}$$

# Обработка

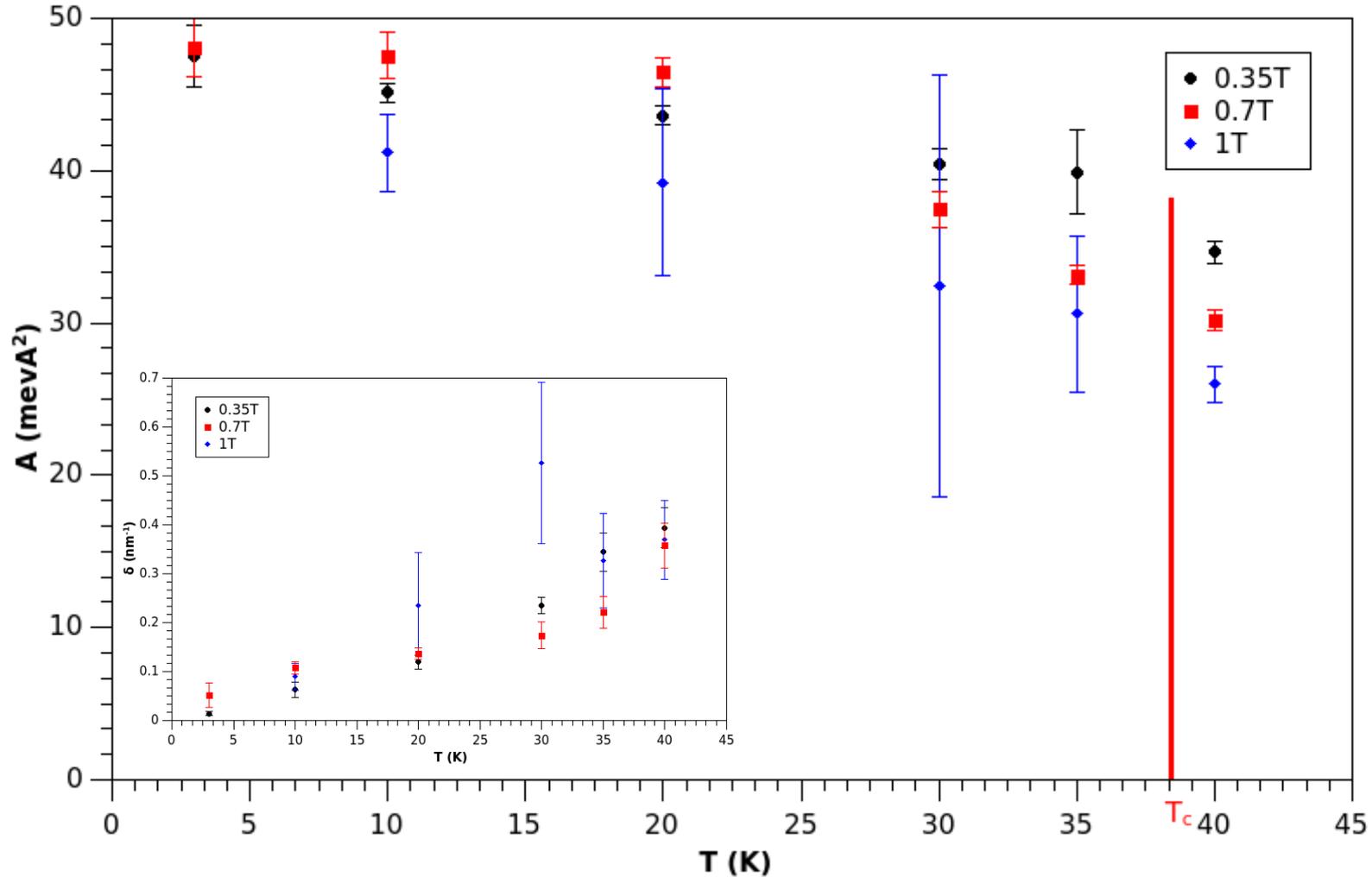
$B = 0.34\text{T}$



$$Q_{cutoff} = 0.43 \text{ nm}^{-1}$$

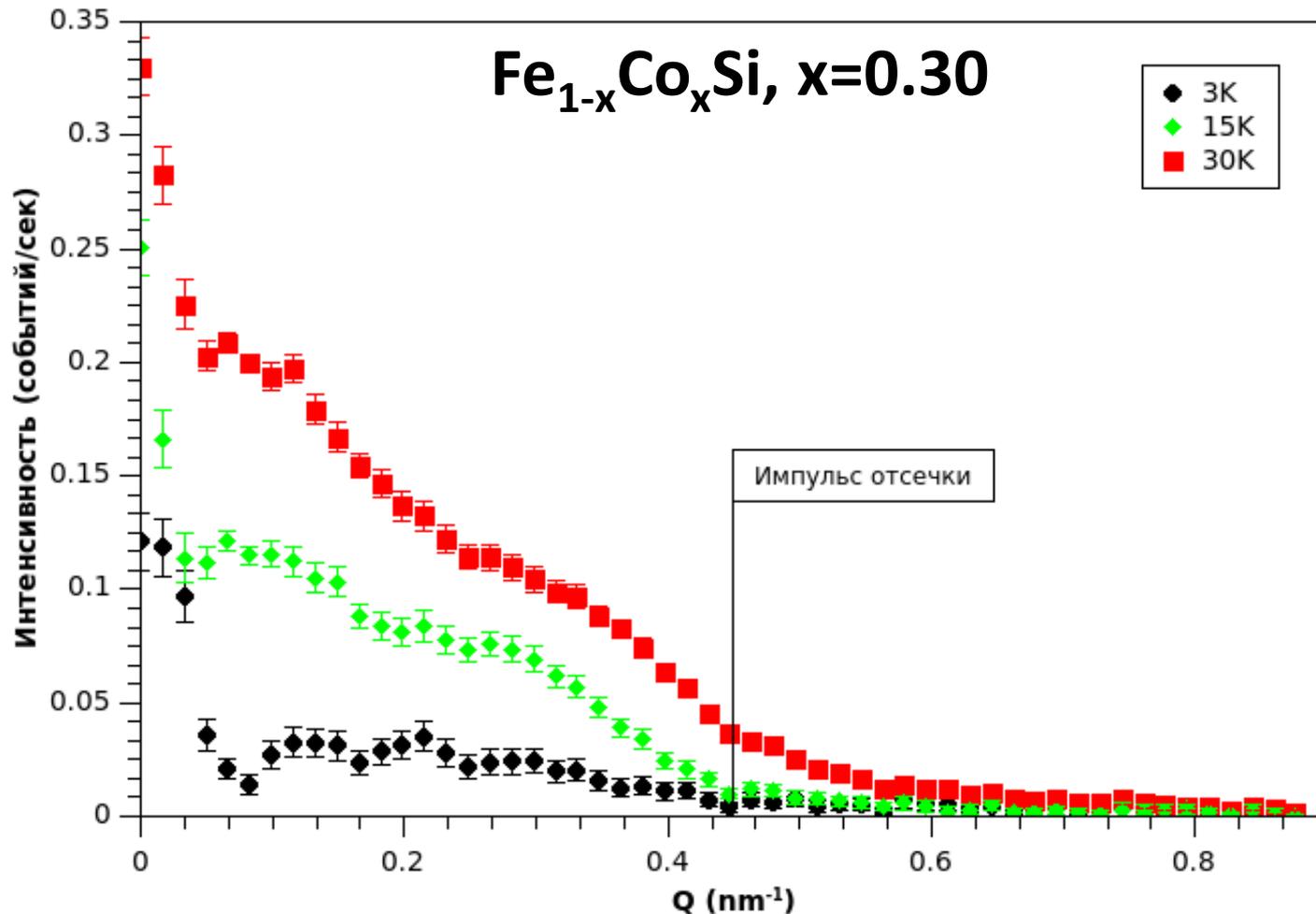
СПИН-ВОЛНОВАЯ ЖЁСТКОСТЬ  $A = 47.57 \text{ meV}\text{\AA}^2$

# Спин-волновая жёсткость $\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x\text{Si}$ , $x=0.25$



Разность спин-волновой жёсткости при различных значениях поля обусловлено ошибкой определения  $H_{c2}$  и другими погрешностями

# Интенсивность рассеяние нейтронов на магнонах в зависимости от температуры



С ростом температуры увеличивается кол-во магнонов и как следствие увеличение интенсивности

# Бонус (использование двумерной корреляционной функции для оценки жёсткости)

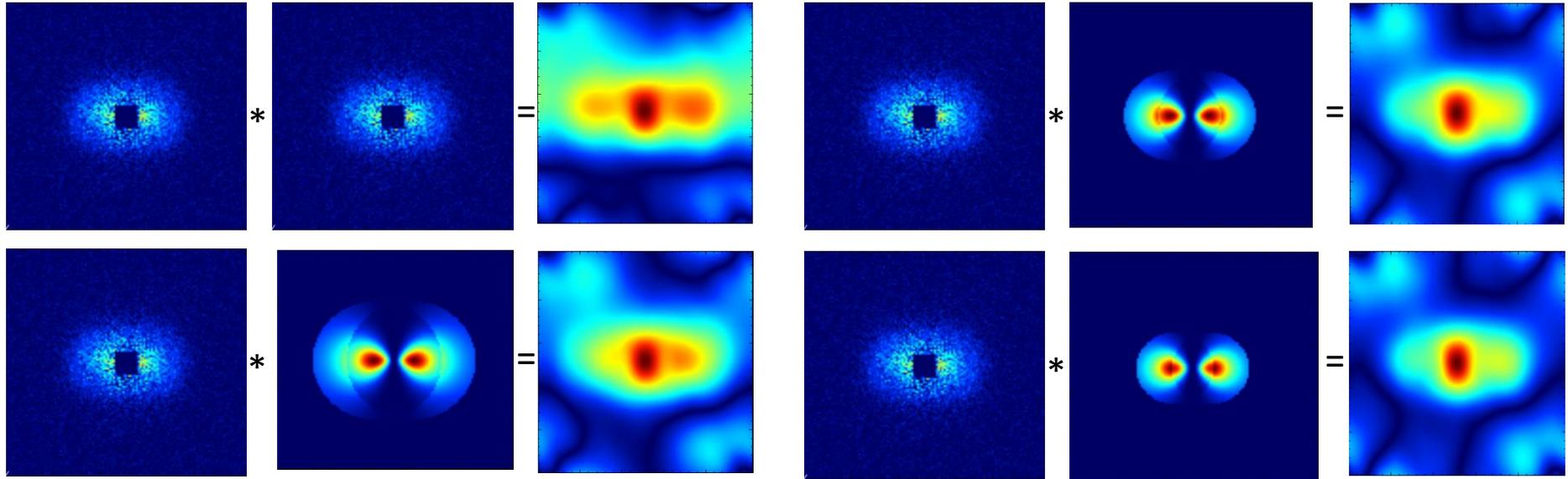
Обычная взаимная корреляция и её связь со свёрткой

$$a(x) = f(x) \otimes g(x) = f^*(-x) * g(x) = \int f^*(-x_0)g(x_0 - x)dx_0$$

Двумерная взаимная корреляция

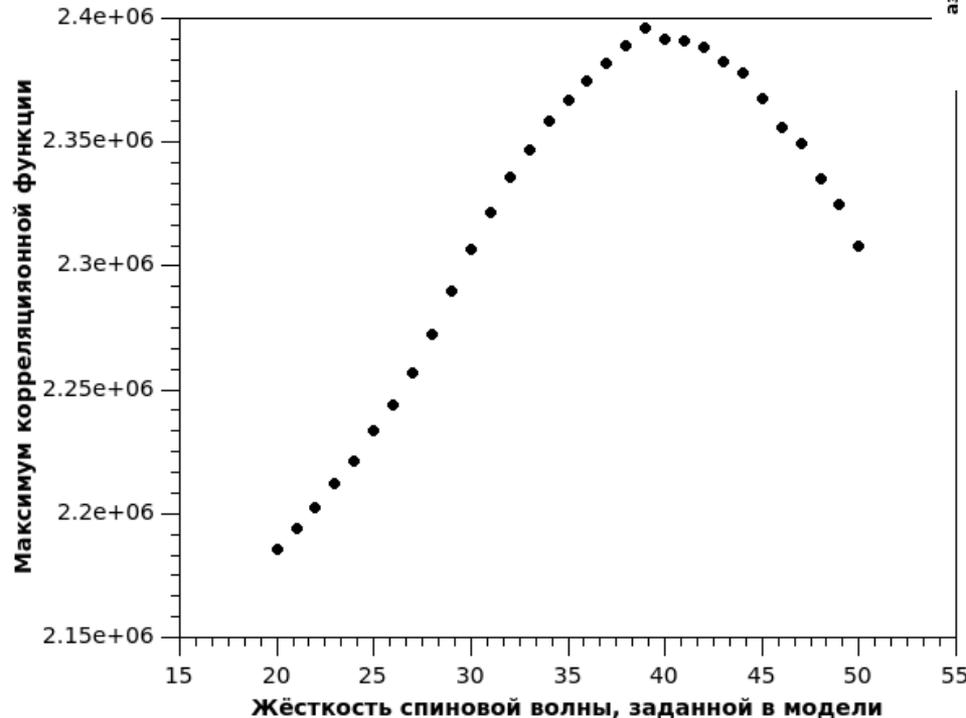
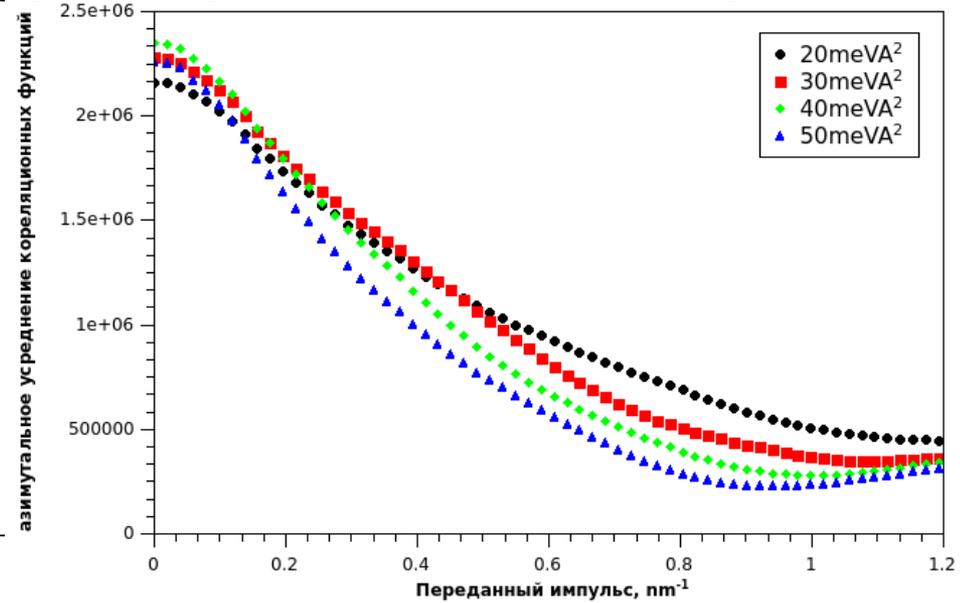
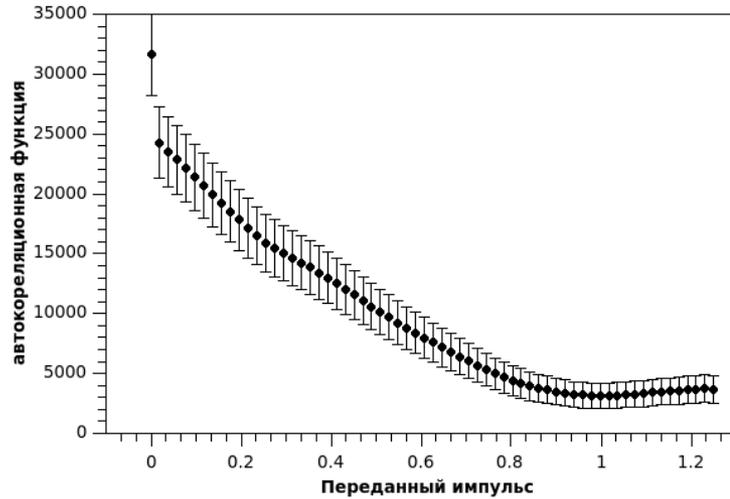
$$a(x, y) = \iint f^*(-x_0, y_0)g(x_0 - x, y_0 - y)dx_0dy_0$$

$$a(x, y) = F^{-2} [F^2[f^*(-x, -y)] \cdot F^2[g(x, y)]]$$



# Бонус

(использование двумерной корреляционной функции для оценки жёсткости)



Максимум,  
определяет степень  
← похожести модели и  
экспериментального  
сигнала

Спасибо за внимание!