

**Анализ магнитного рассеяния из данных
SANS и SAPNS измерений**

Рунов В.В.

ПИЯФ - НИЦ КИ

Амплитуда магнитного рассеяния на атоме

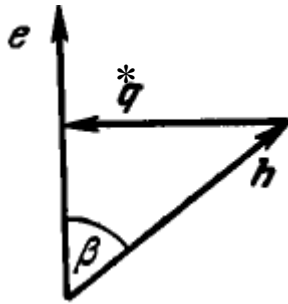


Рис. 1.8. Связь между векторами \mathbf{q}^* , \mathbf{e} и \mathbf{h} .

Рассмотрим частный случай, когда состояние системы нейтрон плюс атом в результате столкновения не изменяется (переход $(s, m) \rightarrow (s; m)$). В этом случае выражение для амплитуды рассеяния (1.1.25) можно переписать в виде:

$$f = r_0 |\gamma| SP(\mathbf{x}) F,$$

где

$$F = 2 (s_n \mathbf{q}^*), \quad (1.1.27)$$

$$\mathbf{q}^* = \mathbf{e} (\mathbf{e} \mathbf{h}) - \mathbf{h}$$

(здесь \mathbf{h} есть единичный вектор в направлении спина атома). Связь между векторами \mathbf{q}^* , \mathbf{e} и \mathbf{h} показана на рис. 1.8.

в оптимальной конфигурации:

$$f = 0.539 S \times 10^{-12} \text{ см}, \quad S - \text{ спин атома}$$

Рассеяние неполяризованных нейтронов в магнитном поле \mathbf{H}

$$\frac{d\Sigma}{d\Omega}(\mathbf{q}) = \frac{N}{V} V_p^2 |F(\mathbf{q})|^2 (\Delta\rho_{\text{nuc}}^2 + \Delta\rho_{\text{mag}}^2 \sin^2 \alpha) + \text{Fon},$$

α or θ is the angle between \mathbf{q} and $\langle \mathbf{M} \rangle$

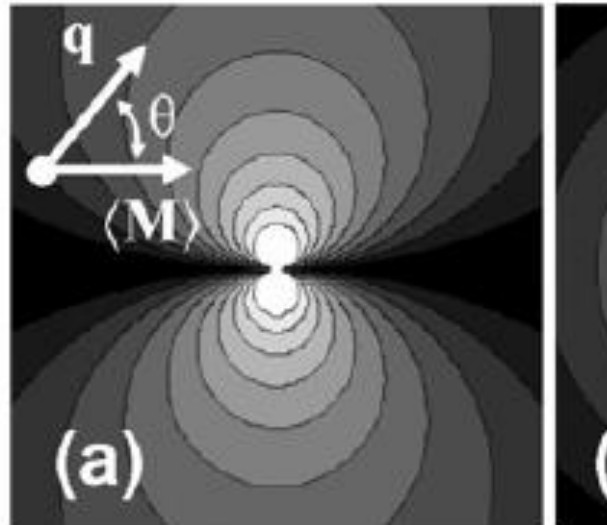


Figure 6. Contour graphs

Figure 6. Contour graphs showing theory prediction for the angular anisotropy of the magnetic SANS intensity on a 2D detector. (a) The $\sin^2 \theta$ variation, characteristic for uniformly magnetized particles in

Рассеяние неполяризованных нейтронов в магнитном поле \mathbf{H}

$$\frac{d\Sigma}{d\Omega}(\mathbf{q}) = \frac{N}{V} V_p^2 |F(\mathbf{q})|^2 (\Delta\rho_{\text{nuc}}^2 + \Delta\rho_{\text{mag}}^2 \sin^2 \alpha) + \text{Fon},$$

α or θ is the angle between \mathbf{q} and $\langle \mathbf{M} \rangle$

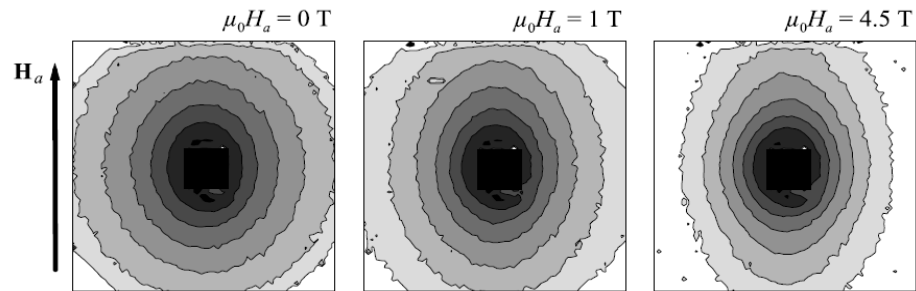


Figure 21. Grey-scale-coded map of the experimental scattering intensity of nanocrystalline Tb recorded on the 2D detector at $T = 5$ K and at three different magnetic fields as indicated in the figure. The field direction is vertical, and pixels in the corners have momentum transfer $q \cong 1.3 \text{ nm}^{-1}$. Subsequent shadings denote doubling of the intensity with darker regions corresponding to higher intensity. The central black squares mask the region of the beam stop. Reprinted with permission from [97]. Copyright 2004 by the American Physical Society.

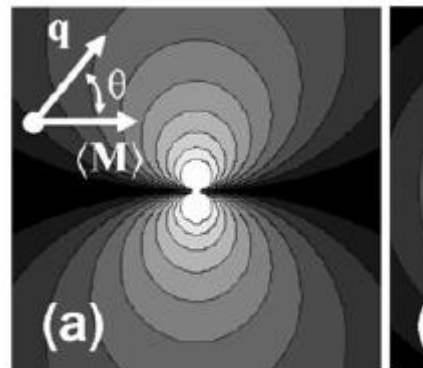
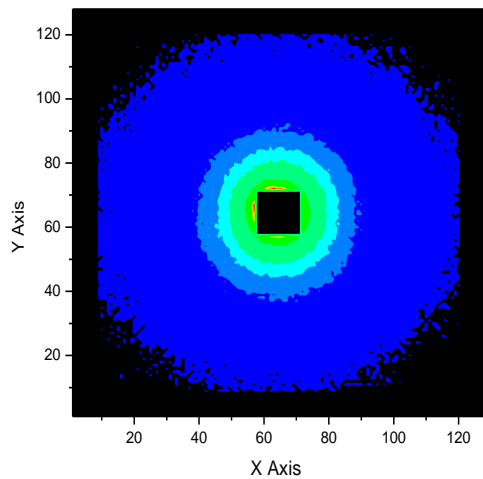


Figure 6. Contour graphs

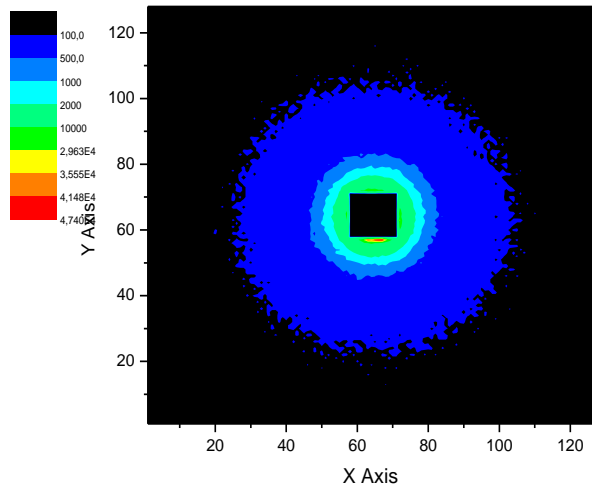
Рассеяние поляризованных нейтронов

$$d\Sigma/d\Omega \sim \Delta\rho^2_{nuc} + \Delta\rho^2_{mag} \sin^2 \alpha \pm 2P(\Delta\rho_{nuc}\Delta\rho_{mag}) \sin^2 \alpha + Fon$$

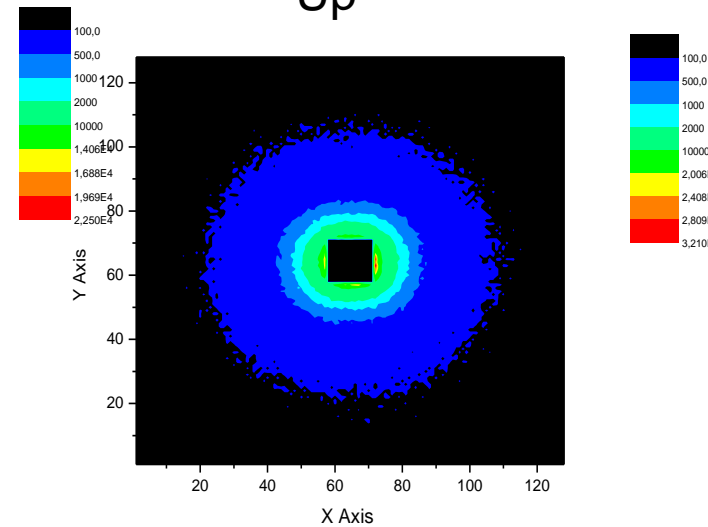
UP+Down



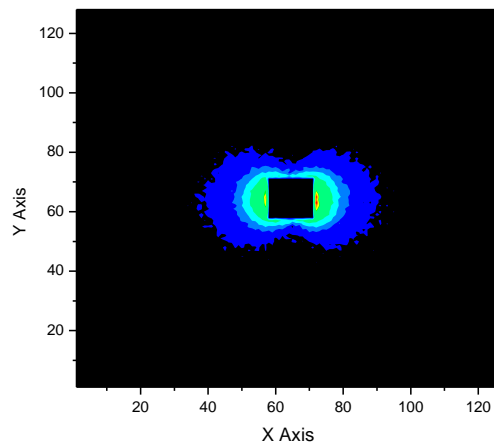
Down



Up



H=2T



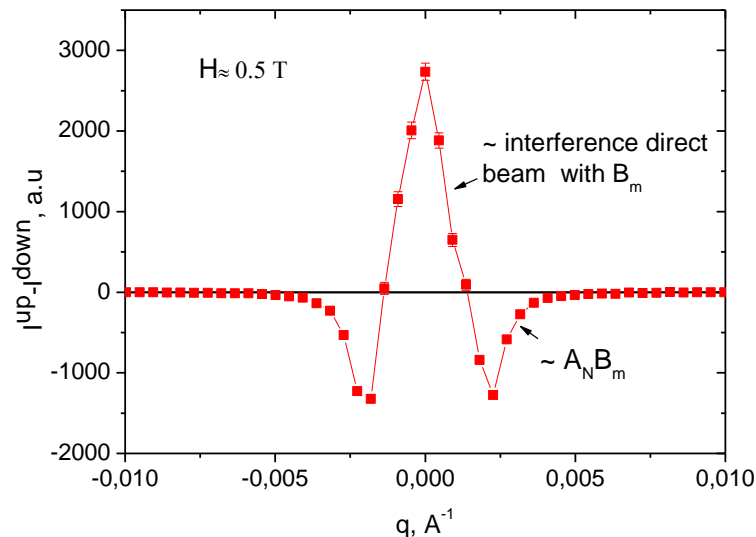
Up-Down

Rsod 10Co

Поляризованные нейтроны:

$$\frac{d\Sigma}{d\Omega} \sim \Delta\rho_{nuc}^2 + \Delta\rho_{mag}^2 \sin^2 \alpha \pm 2P(\Delta\rho_{nuc}\Delta\rho_{mag}) \sin^2 \alpha + Fon$$

$$I^{up} - I^{down} \sim P(\Delta\rho_{nuc}\Delta\rho_{mag})$$



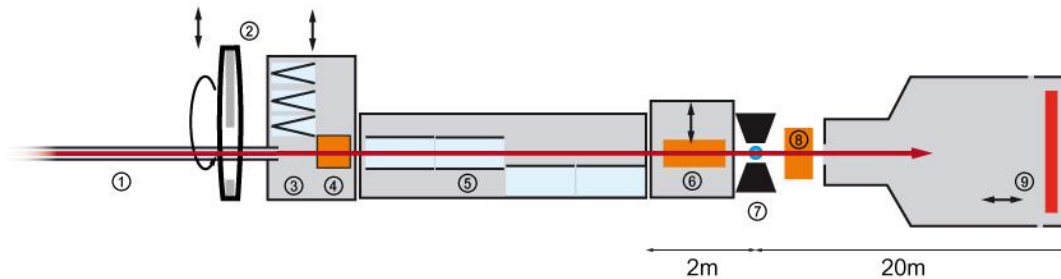
Преимущество:

□ Получаем информацию о масштабе магнитно-ядерно контрастирующих областей с высокой чувствительностью, которая обусловлена:

- линейной зависимостью к изменению любой амплитуды;
- возможностью работать на физически нулевом фоне ?.

Зависимость магнитно-ядерной интерференция $\Delta(q) = I^+(q) - I^-(q)$ от переданного импульса в образце CuZn(20) (Ni 1 at %) в поле $H \approx 0.5T$
 Образец без дополнительной термической обработки

MLZ KWS1



- | | |
|---|--|
| ① Neutron guide NL3 | ⑥ MgF_2 focussing lenses |
| ② High-speed chopper
$\Delta\lambda/\lambda=1\%$ | ⑦ Sample position with magnet |
| ③ Changeable polarisers | ⑧ ^3He spin filter
with reversible polarisation
(to be implemented) |
| ④ Spin flipper | ⑨ Anger-type scintillation detector |
| ⑤ Neutron guide sections 18 x 1m | |

$$Q = 0.0007 - 0.5 \text{ \AA}^{-1}$$

$$\text{Maximal flux: } 1.5 \cdot 10^8 \text{ n cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$$

$$\text{Typical flux: } 8 \cdot 10^6 \text{ n cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ (collimation 8 m, aperture } 30 \times 30 \text{ mm}^2, \lambda = 7 \text{ \AA)}$$

$$\text{FWHM } 10\%, \lambda[\text{\AA}] = 4.5 - 12$$

$$\text{Detector: position-sensitive scintillation } 128 \times 128 \text{ pixels with } 5.25 \times 5.25 \text{ mm}^2$$

Эксперимент:

$$\lambda = 7 \text{ \AA}$$

$$L = 20; 8; 1.5 \text{ m}$$

$$P \approx 0.95$$

$$\text{Коллимация на образце: } 6 \times 6 \text{ mm}^2$$

Samples: segmental copolyurethaneimides + CoFe_2O_4 and $\text{Al}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$

~ 10x10 mm², thickness ~1mm

CoFe_2O_4 nanoparticles - “Co”

$\text{Al}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ nanoparticles – “Al”

$\text{C}_{204}\text{H}_{290}\text{O}_{59}\text{N}_6\text{S}_1$ - “Rsod”

Sample type: amorphous

Rsod + 10;7;4;1 мас.% “Co” or “Al”

According to electron microscopy data, ferrites of cobalt and aluminum were spherical particles with an average size of 40 ± 10 nm and 20 ± 10 nm, respectively.

Шпинель CoFe_2O_4 : $H_C = 880$ Oe, $M_S = 55$ emu/g, $M_r = 31$ emu/g; $T_C = 660$ K

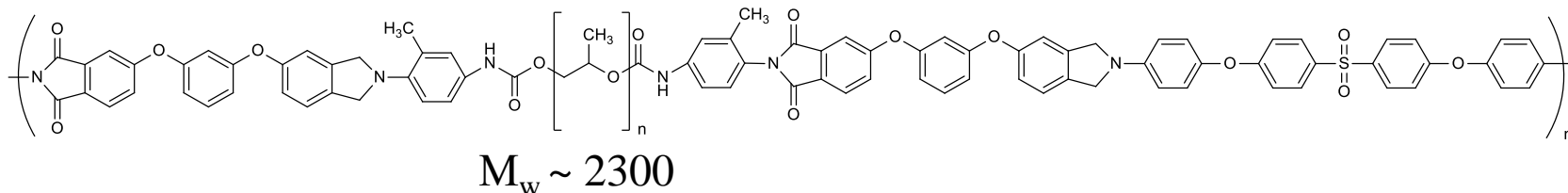
Гранат $\text{Al}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$: $H_C = 47$ Oe, $M_S = 15$ emu/g, $M_r = 5$ emu/g; $T_C = 610$ K

Образцы для ПИЯФ, Гатчина

**Сегментный блок-сополимер использованный для композитов
с 1 мас.% наночастиц CoFe_2O_4 и $\text{Al}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$**

(P-2300ТДИ-Р)СОД

Брутто формула: $\text{C}_{204}\text{H}_{290}\text{O}_{59}\text{N}_6\text{S}_1$

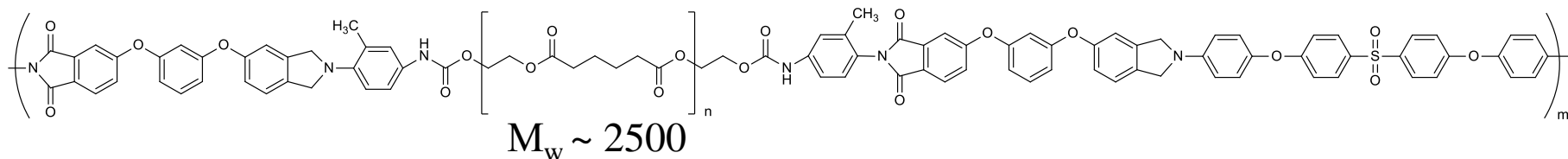


Образцы для KWS-1, Мюнхен

**Сегментный блок-сополимер использованный для композитов
с 1, 4, 7, 10 мас.% наночастиц CoFe_2O_4 и $\text{Al}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$**

(P-2500ТДИ-Р)СОД

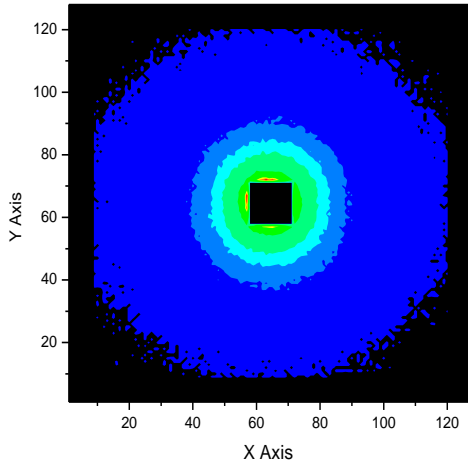
Брутто формула: $\text{C}_{204}\text{H}_{242}\text{O}_{79}\text{N}_6\text{S}_1$



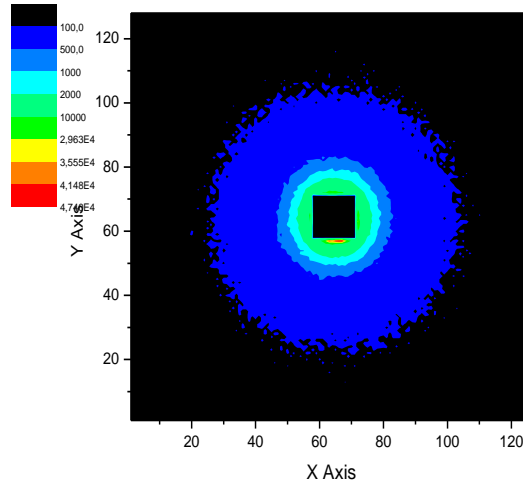
Для поляризованных нейтронов

$$d\Sigma/d\Omega \sim \Delta\rho^2_{nuc} + \Delta\rho^2_{mag} \sin^2 \alpha \pm 2P(\Delta\rho_{nuc}\Delta\rho_{mag}) \sin^2 \alpha + Fon$$

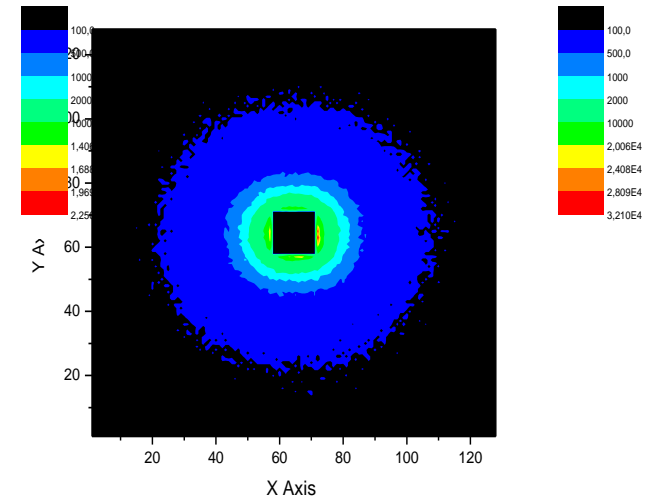
UP+Down



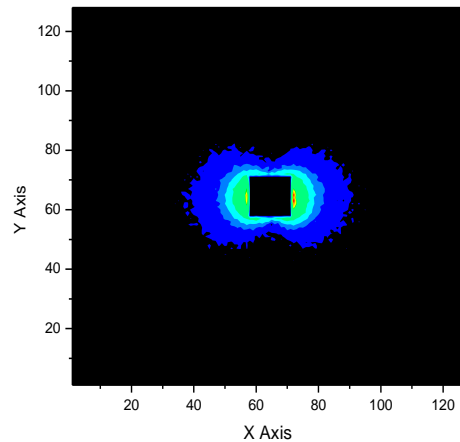
Down



Up



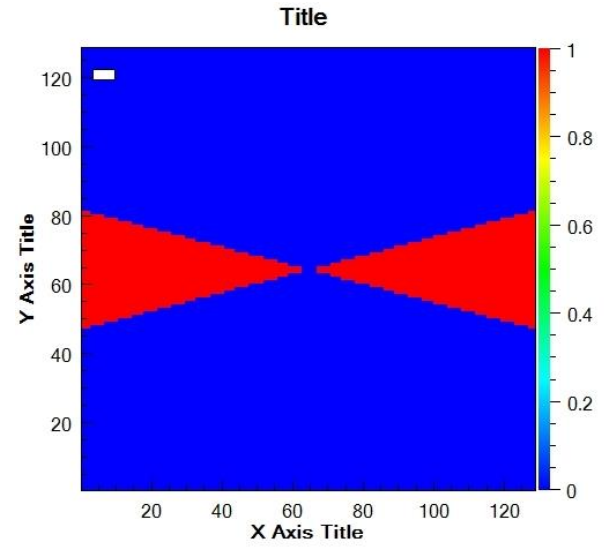
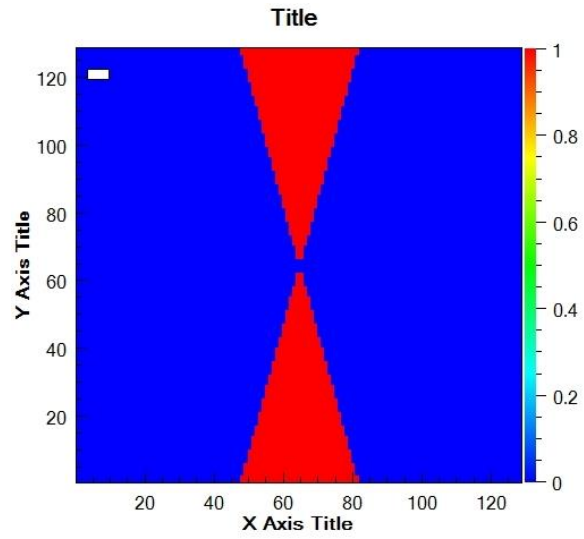
H=2T



Up-Down

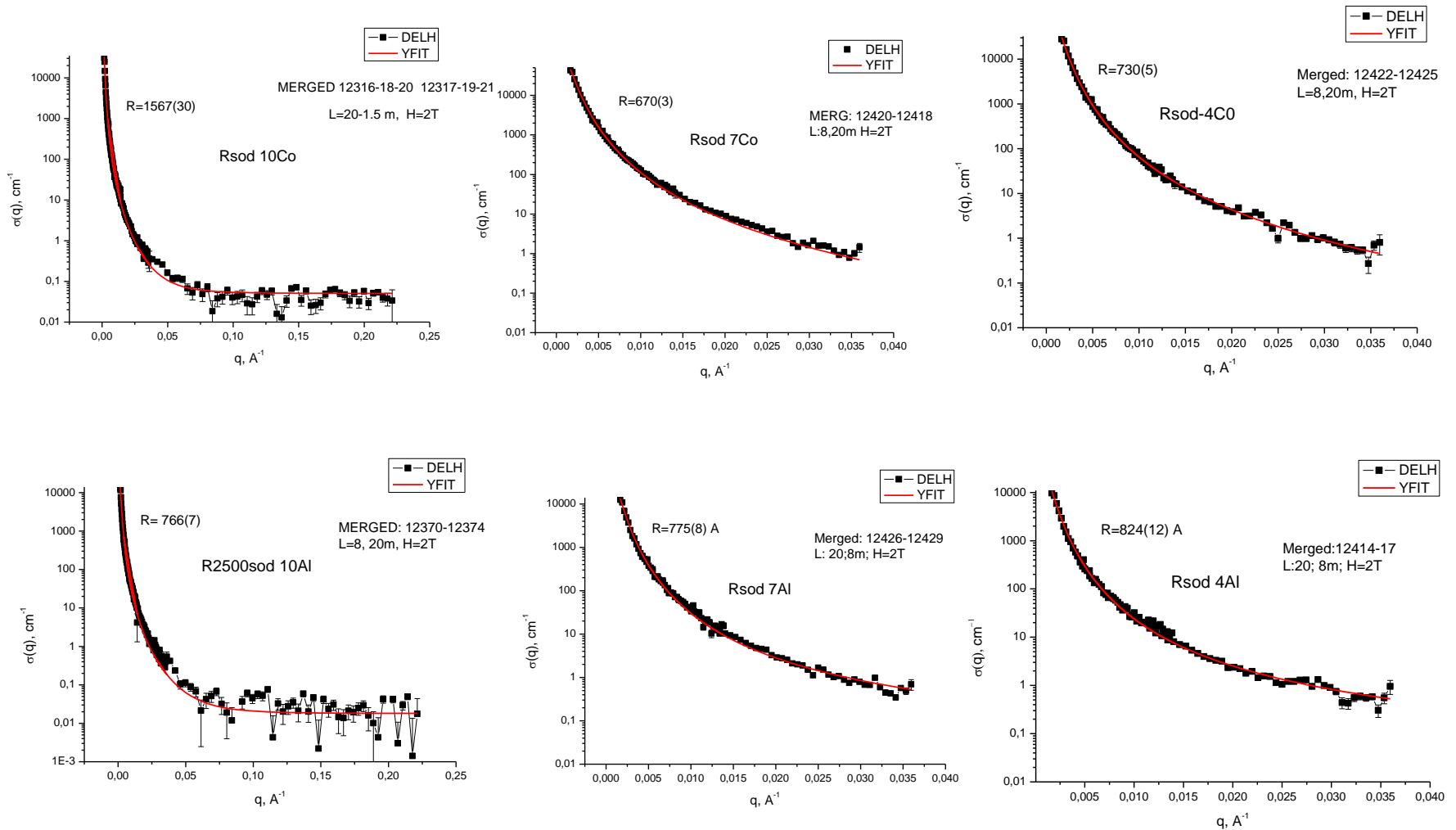
Rsod 10Co

MASK



$$\theta \approx \pm 16^\circ$$

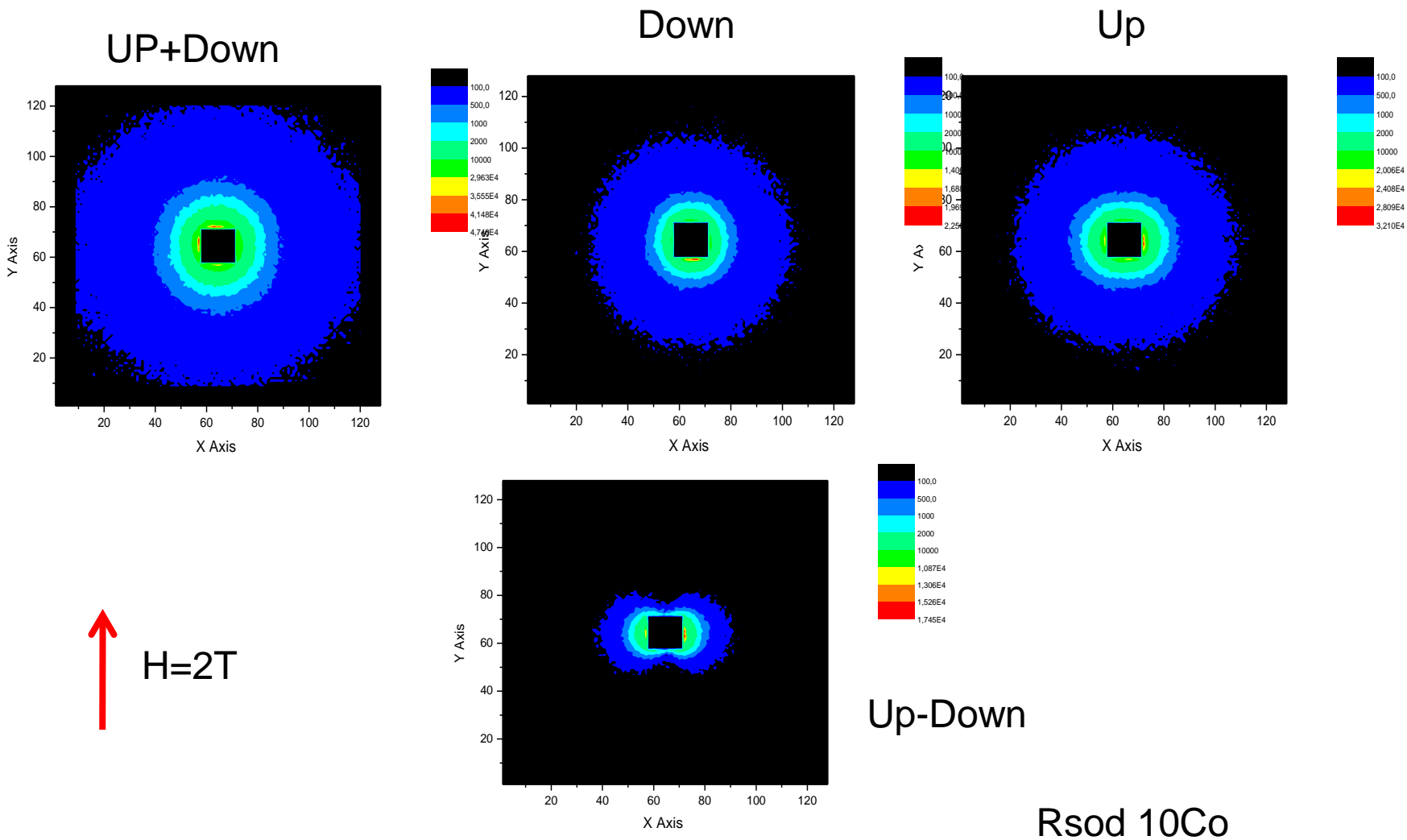
q- dependence of magnetic-nuclear interference scattering DELH: magnetic –nuclear interference in horizontal plane



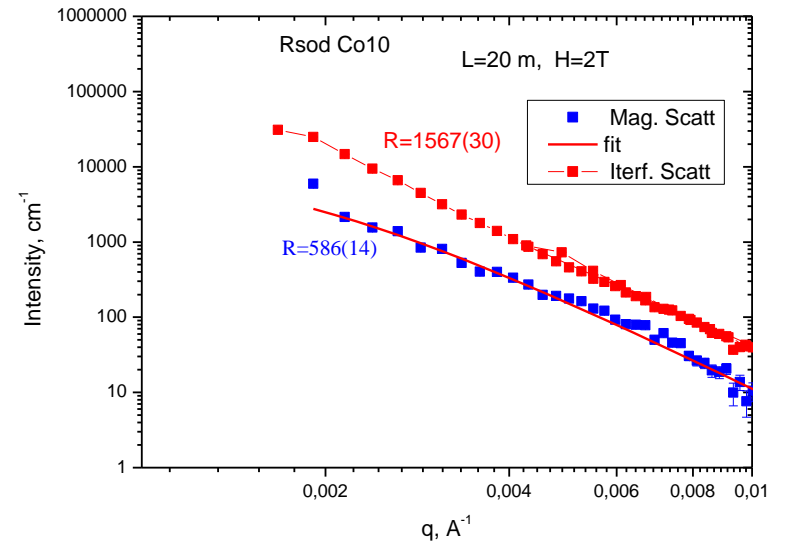
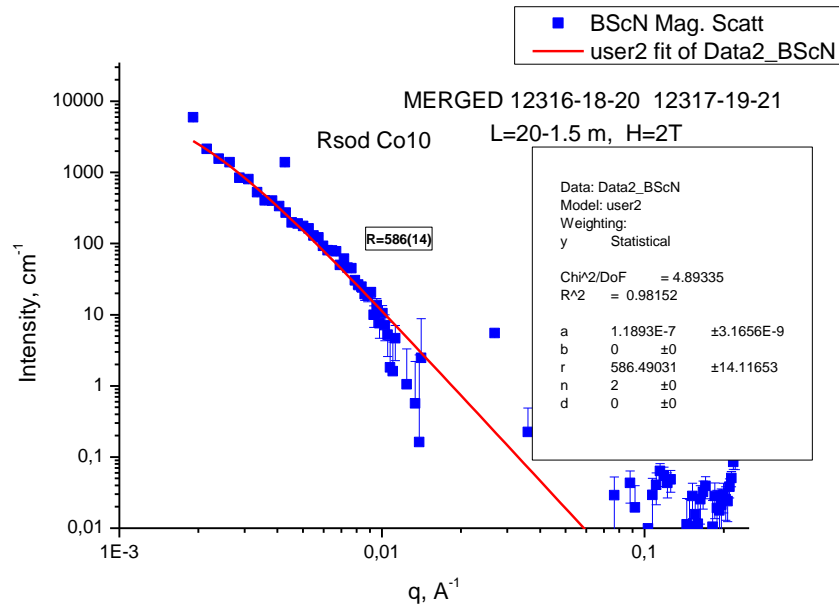
Fit: $\sigma(q) = a/(q^2+(1/R_C)^2)^2 :$

Для поляризованных нейтронов

$$d\Sigma/d\Omega \sim \Delta\rho^2_{nuc} + \Delta\rho^2_{mag} \sin^2 \alpha \pm 2P(\Delta\rho_{nuc}\Delta\rho_{mag}) \sin^2 \alpha + Fon$$



Магнитное и интерференционное рассеяние

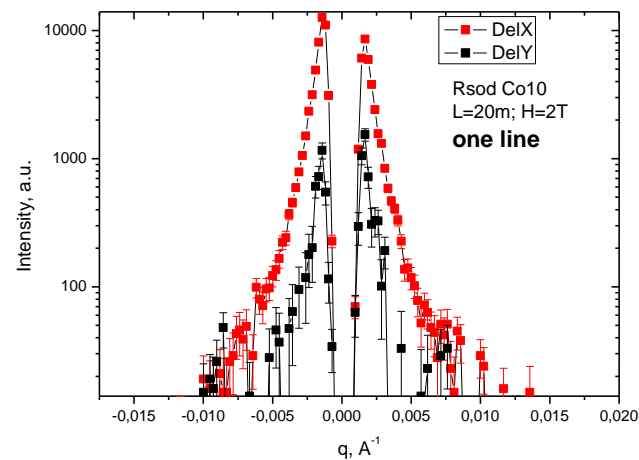
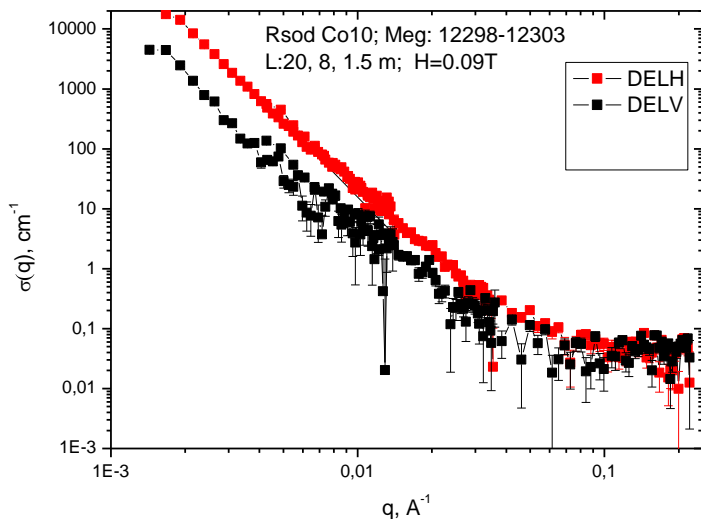
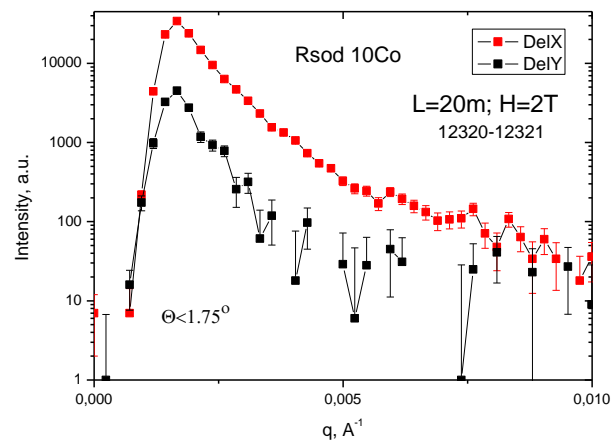
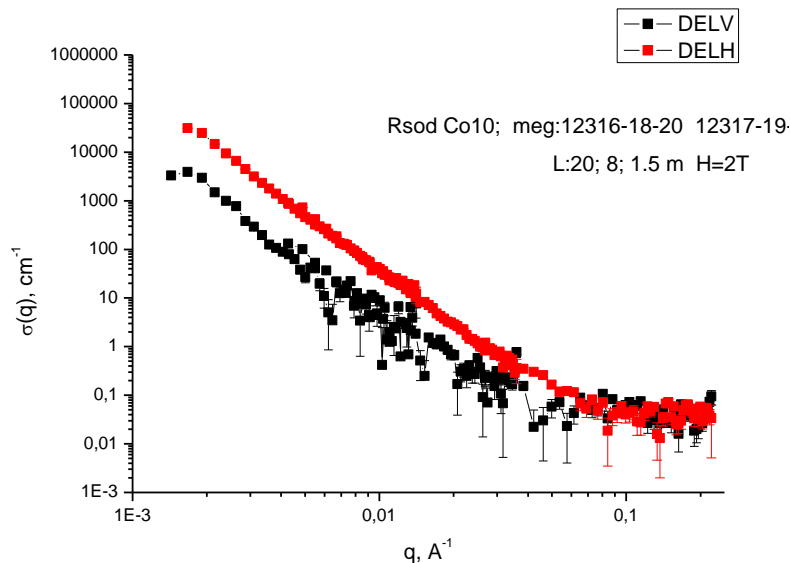


Mag-Nuc интерференционное рассеяние в вертикальном (DELV) и горизонтальном (DELH) направлениях в секторах усреднения θ .

Поле H - вертикально

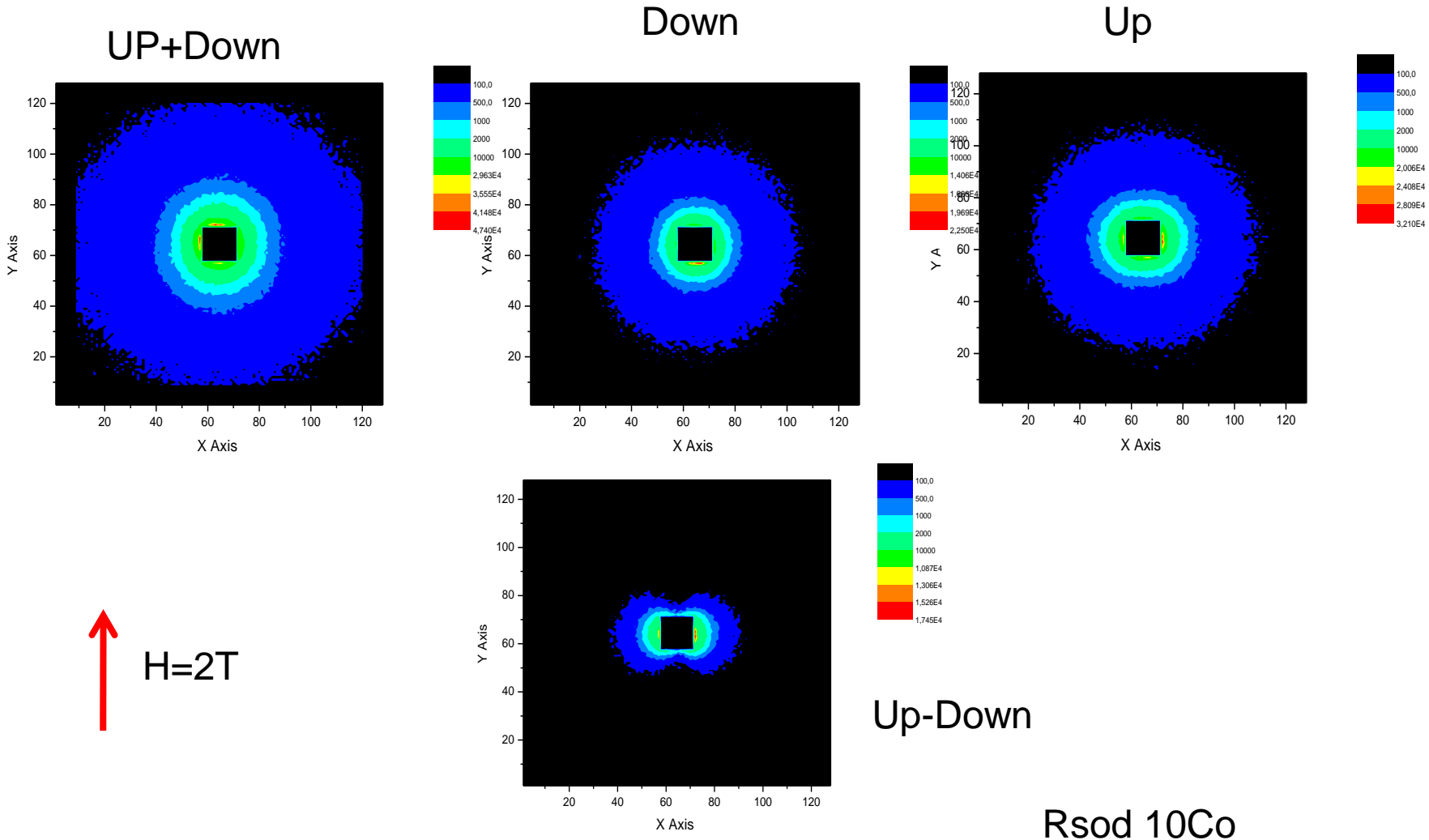
$\theta \approx \pm 16^\circ$

$\theta \approx \pm 1.75^\circ$

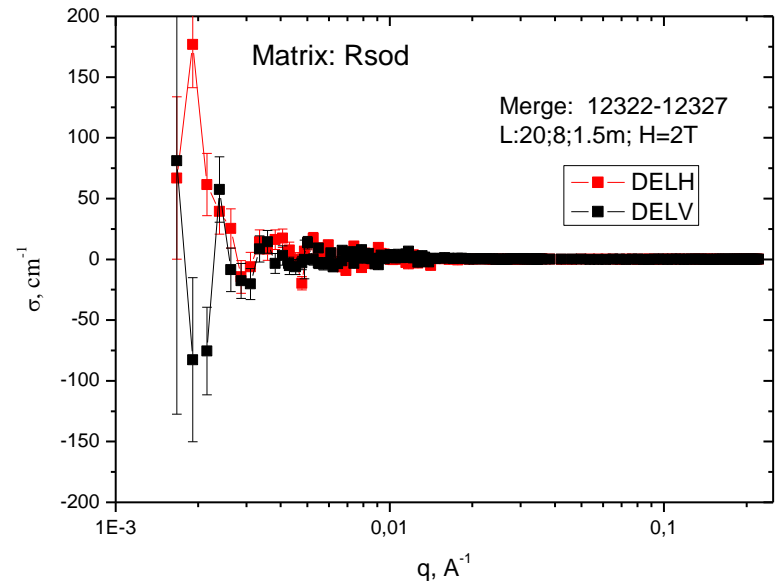
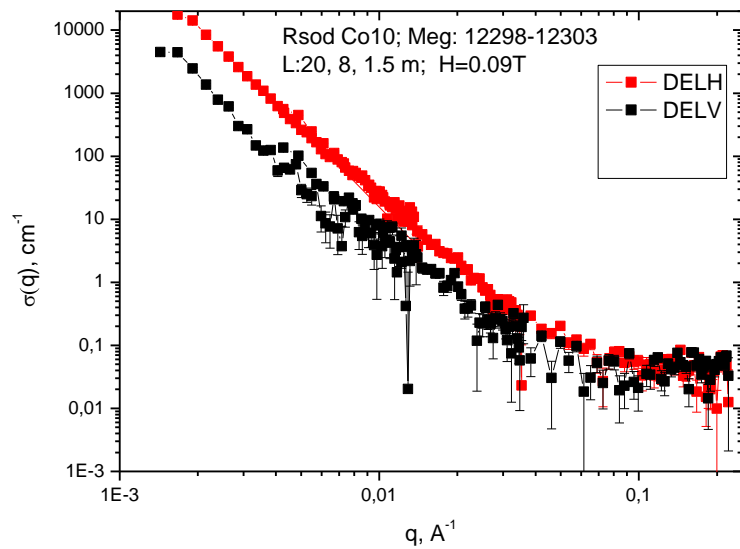


Для поляризованных нейтронов

$$d\Sigma/d\Omega \sim \Delta\rho^2_{nuc} + \Delta\rho^2_{mag} \sin^2 \alpha \pm 2P(\Delta\rho_{nuc}\Delta\rho_{mag}) \sin^2 \alpha + \text{Fon}(\uparrow, \downarrow)$$



Магнитно-ядерное интерференционное рассеяние в вертикальном (DELV) и горизонтальном (DELH) направлениях в секторе усреднения $\theta \approx \pm 16^\circ$
Поле H - вертикально



Заключение

- По-видимому, перпендикулярные вектору рассеяния компоненты локального магнитного момента, на каком-то уровне измерений, есть всегда
- Все доступные методы хороши (SANS, SAPNS и др.) , если ведут к пониманию физических процессов
- Все методы имеют ограничения и систематические ошибки
- Ограничения и систематические ошибки надо уметь оценивать, (praemonitus, praemunitus)

Благодарю участников проекта:

Копицу Г.П.

Бугрова А.Н.

Смыслова Р.Ю.

Спасибо за внимание

2D - detector

