

*Измерение константы жесткости
спиновых волн и энергетической
щели в спектре магнонов
аморфных ферромагнетиков
методом малоуглового рассеяния
нейтронов*

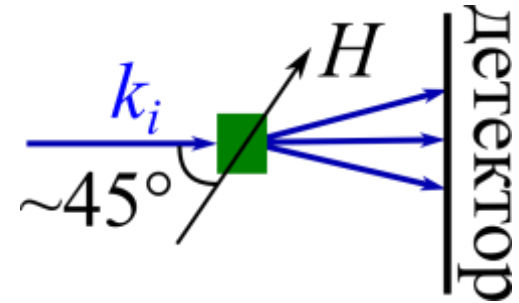


Азарова Любовь,
ПИЯФ, СПбГУ

Научный руководитель:
проф., д.ф.-м.н. Григорьев С.В.

- Методика
- Эксперимент МУРПН
- Мотивация
- Моделирование
- Аттестация образцов
- Результаты
- Заключение

В 80х годах XX века в ЛИЯФ был разработан метод наклонной геометрии, при помощи которого можно измерять рассеяние на спиновых волнах в ферромагнетиках



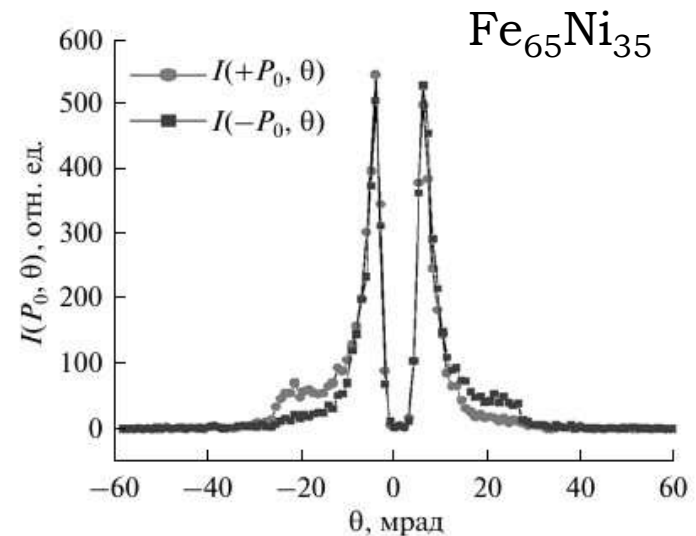
$$\Delta I(\mathbf{q}) = I(\mathbf{q}, +\mathbf{P}) - I(\mathbf{q}, -\mathbf{P})$$

$$\begin{aligned} \Delta I(\mathbf{q}) &\sim \int d\omega (2k_B T / \omega) (\mathbf{q}\mathbf{m})^2 [\delta(\omega - \epsilon_q) + \delta(\omega + \epsilon_q)] \\ &= \int d\omega (2k_B T / \omega) \frac{[k^2(\theta_x^2 \cos^2 \varphi + (\omega/2E)^2 \sin^2 \varphi + \theta_x(\omega/2E) \sin 2\varphi)]}{k^2(\theta^2 + (\omega/2E)^2)} \delta(\omega \\ &\pm \epsilon_q) \end{aligned}$$

$$\Delta I = \frac{2k_B T}{E} \sin 2\phi \frac{2\theta_x |\theta_0|}{\theta^2 \sqrt{\theta_0^2 - \theta^2}} \quad \theta_0 = \frac{E}{Ak_i^2}$$

1. Окорочков А.И., Рунов В.В., Топерверг Б.П. и др. // Письма в ЖЭТФ. 1986. V. 43. P. 390.

2. С. В. Григорьев, Е. В. Алтынбаев, Н. Ескерлебе, А. И. Окорочков // ПОВЕРХНОСТЬ. РЕНТГЕНОВСКИЕ, СИНХРОТРОННЫЕ И НЕЙТРОННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ, 2014, No 10, с. 71–78



Геометрия МУРН

$$q = k_i - k_f \quad \omega = E_i - E_f \quad \Rightarrow \quad \begin{cases} q_x = k_i \theta_x, \\ q_y = k_i \theta_y, \\ q_z = k_i \hbar \omega / (2E). \end{cases}$$

Неупругая компонента

$$E_q = Aq^2 + g\mu_B H \quad \omega = \pm E_q$$

$$(\tilde{\omega} - \theta_0)^2 + \theta^2 = \theta_C^2$$

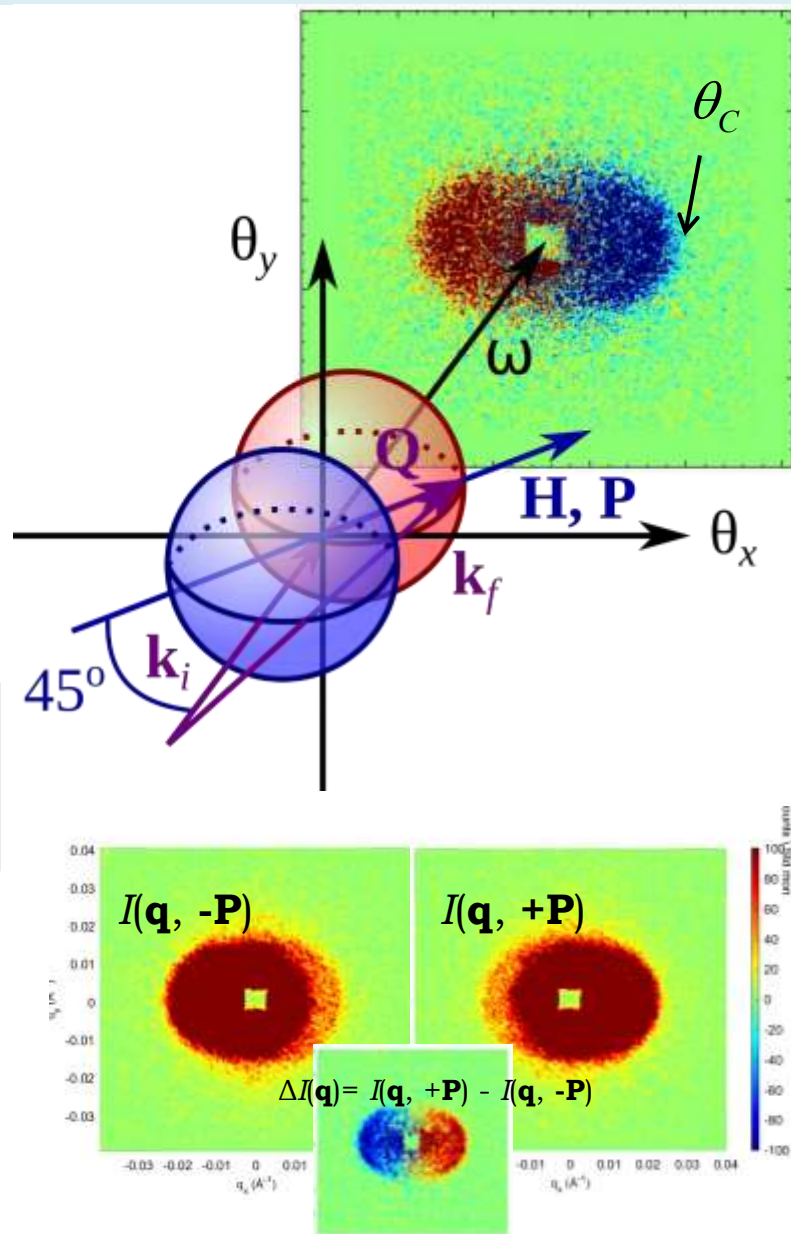
$$(\tilde{\omega} + \theta_0)^2 + \theta^2 = \theta_C^2$$

$$\tilde{\omega} = \frac{\omega}{2E} \quad \theta_0 = \frac{E}{Ak_i^2}$$

Cutoff angle

$$\theta_C^2 = \theta_0^2 - \frac{g\mu_B H}{Ak_i^2}$$

SW stiffness



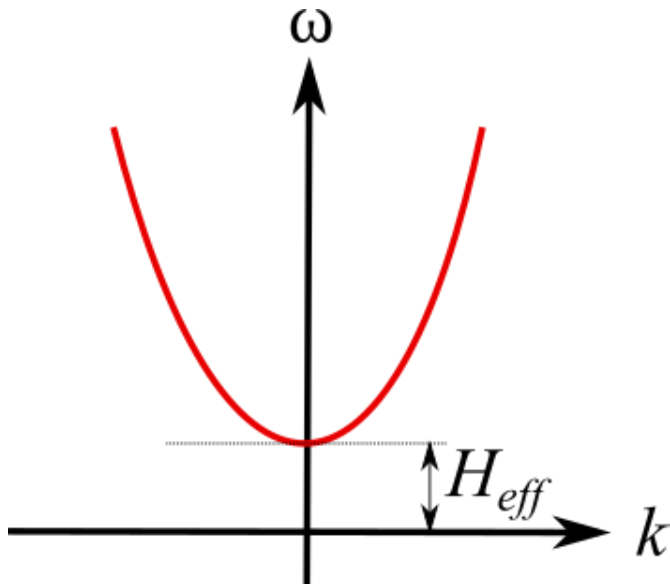
1. Огороков А.И., Рунов В.В., Топерверг Б.П. и др. // Письма в ЖЭТФ. 1986. V. 43. P. 390.

2. С. В. Григорьев, Е. В. Алтынбаев, Н. Ескерлебе, А. И. Огороков // ПОВЕРХНОСТЬ. РЕНТГЕНОВСКИЕ, СИНХРОТРОННЫЕ И НЕЙТРОННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ, 2014, No 10, с. 71-78

Спектр спиновых волн

$$E_q = Aq^2$$

$$E_q = Aq^2 + g\mu_B H$$



1. J. A. Fernandez-Baca, J. W. Lynn, J. J. Rhyne, and G. E. Fish, Phys. Rev. B 36, 8497 (1987).
2. J. A. Fernandez-Baca, J. J. Rhyne, and G. E. Fish, J. Magn. Magn. Mat. 54–57, 289 (1986).
3. J. A. Fernandez-Baca, J.W. Lynn, J. J. Rhyne, and G. E. Fish, J. Appl. Phys. 61, 3406 (1987)

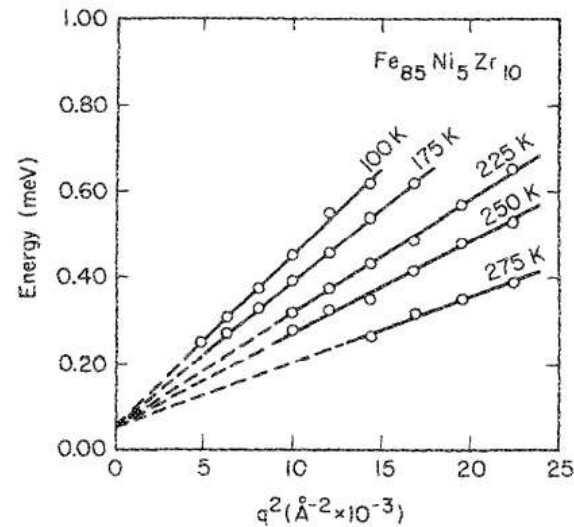
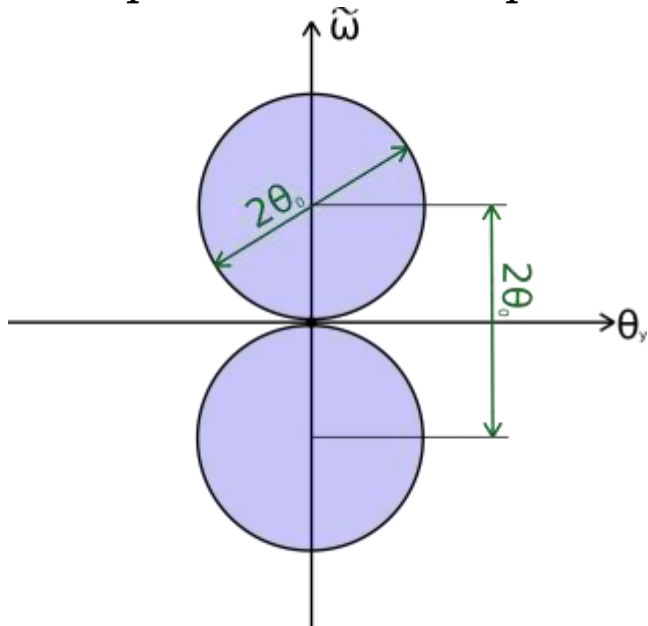


FIG. 1. E_q vs q^2 for $\text{Fe}_{85}\text{Ni}_5\text{Zr}_{10}$ ($T_C = 306$ K) at $T = 100, 175, 225, 250,$ and 275 K. The spin-wave energies obey the quadratic dispersion relation of Eq. (1) in the range of temperatures and wave vectors under study.

$$E_q = Aq^2 + g\mu_B H + \Delta$$

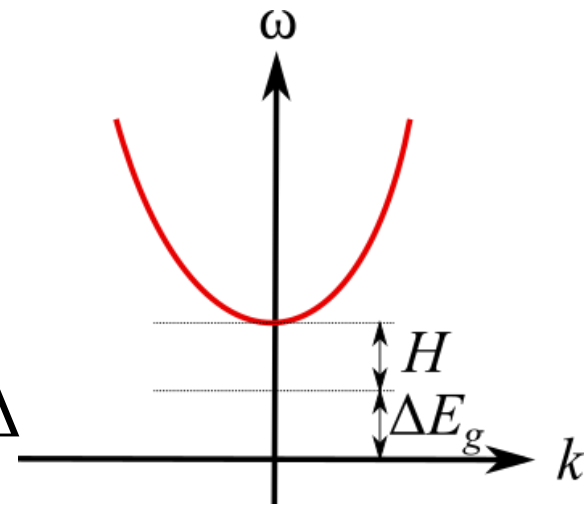
С.В. Григорьев, К.А. Пшеничный и др. *Измерение жесткости спиновых волн в аморфных ферромагнитных микропроводах методом малоуглового рассеяния поляризованных нейтронов*. Письма в ЖЭТФ, том 110, вып. 12, с. 799 – 805, 2019.



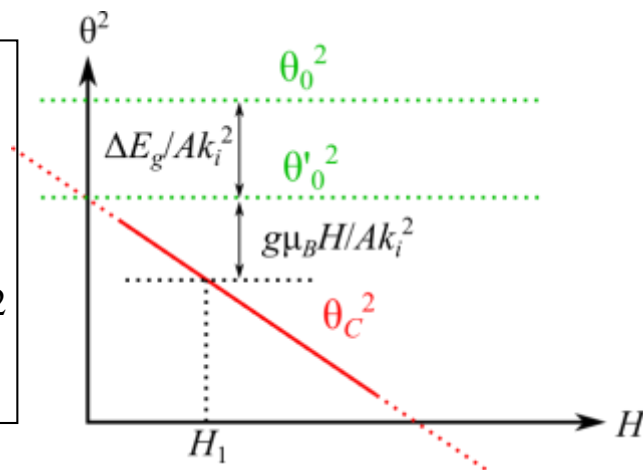
$$E_q = Aq^2 + g\mu_B H$$

Спин-волновая жёсткость не должна зависеть от магнитного поля!

$$E_q = Aq^2 + g\mu_B H + \Delta$$



$$\theta_C^2 = \theta_0^2 - \frac{g\mu_B H + \Delta}{Ak_i^2} = \frac{\hbar^4}{4m_n^2 A^2} - \frac{g\mu_B H + \Delta}{4\pi^2 A} \lambda^2$$



Величина жесткости спиновых волн ферромагнитного микропровода Fe77.5Si5.5B15 при комнатной температуре равна $A = 82(3) \text{ мЭВ} \cdot \text{А}^2$, а энергетическая щель $\Delta = 0.048(2) \text{ мЭВ}$.

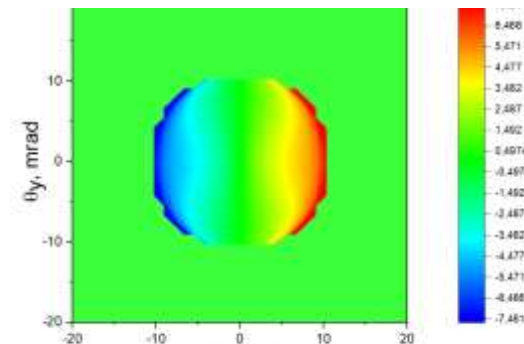
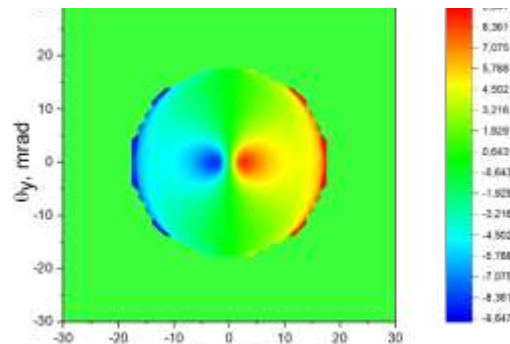
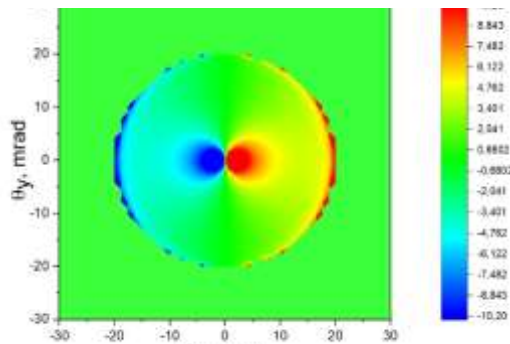
H= 10 мТл

H= 100 мТл

H= 300 мТл

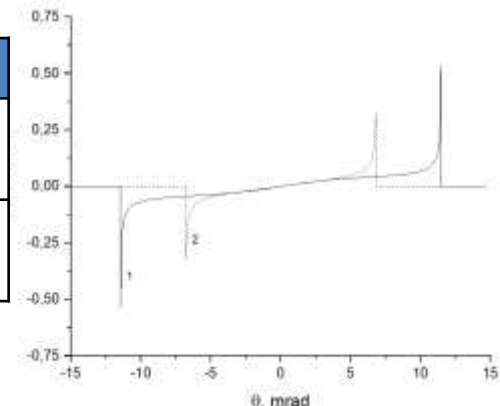
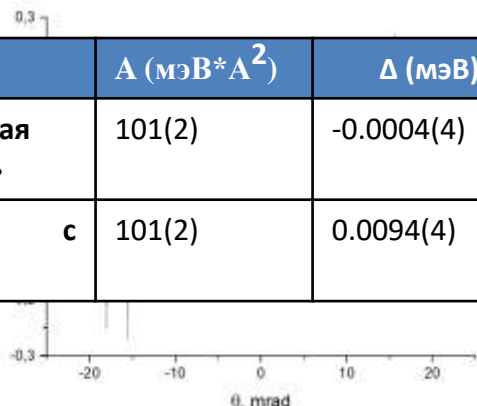
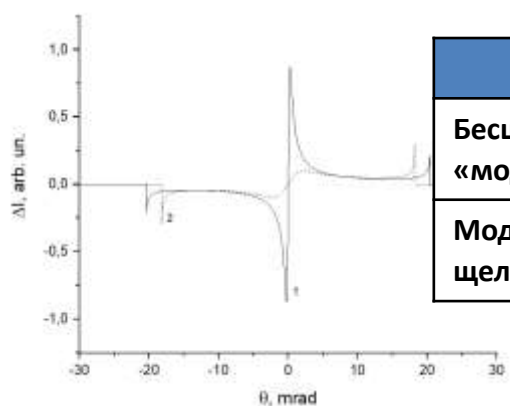
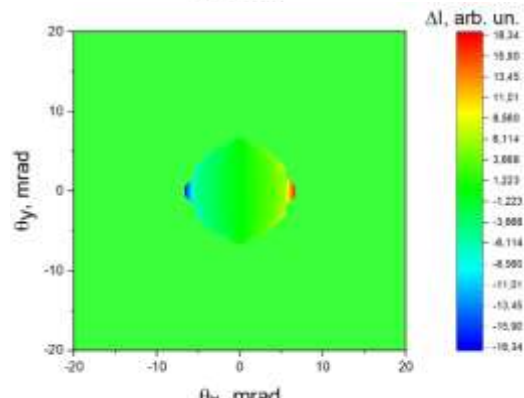
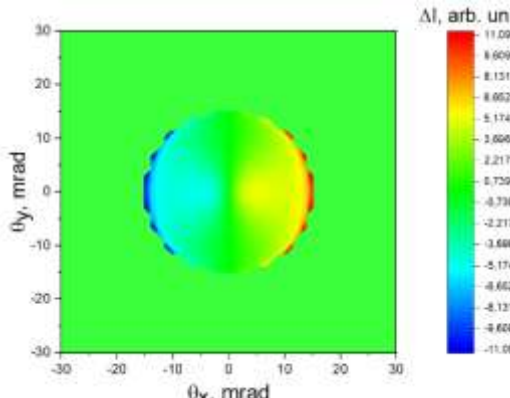
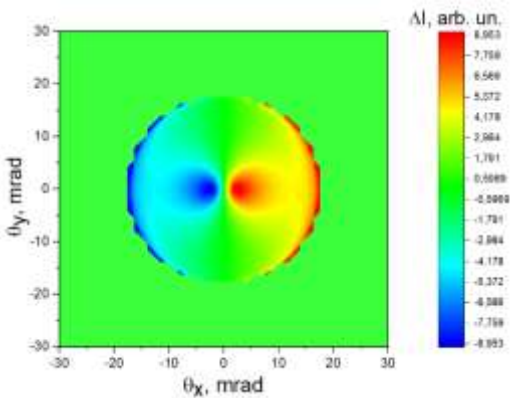
A = 100
мЭВ*А²

Δ = 0



A = 100
мЭВ*А²

Δ = 0,01
мЭВ



	A (мЭВ*А ²)	Δ (мЭВ)
Бесцелевая «модель»	101(2)	-0.0004(4)
Модель целью	с 101(2)	0.0094(4)

Образцы – аморфные
сплавы FeNi
40Fe40Ni14P6B (40/40)
48Fe34Ni18P (48/34)

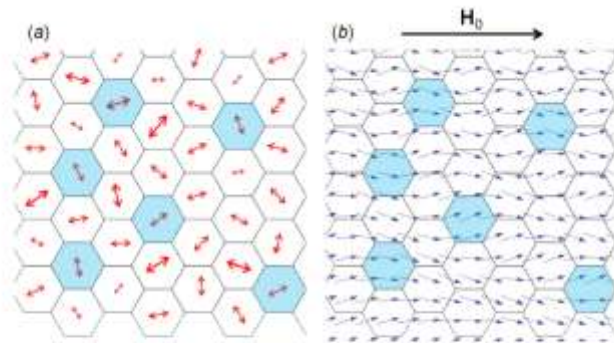
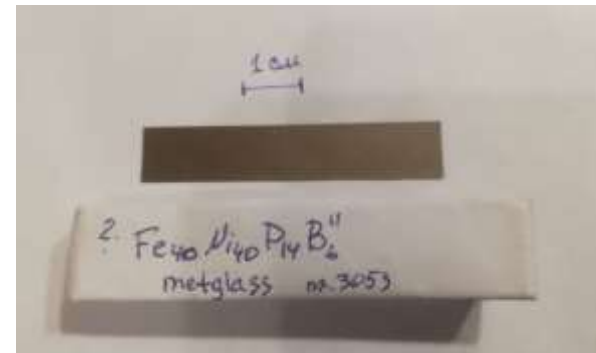
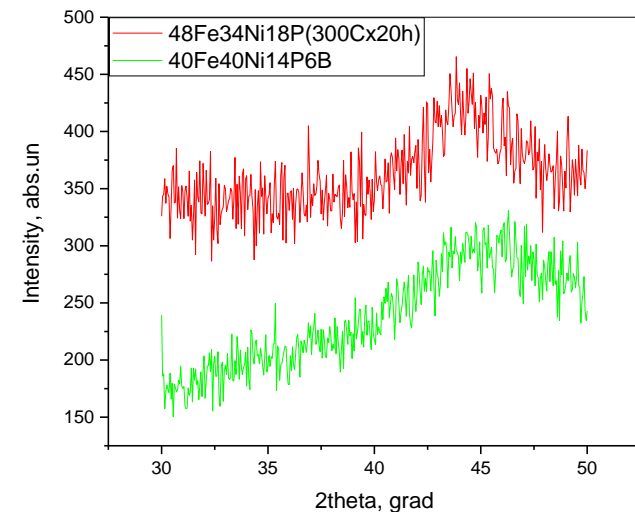
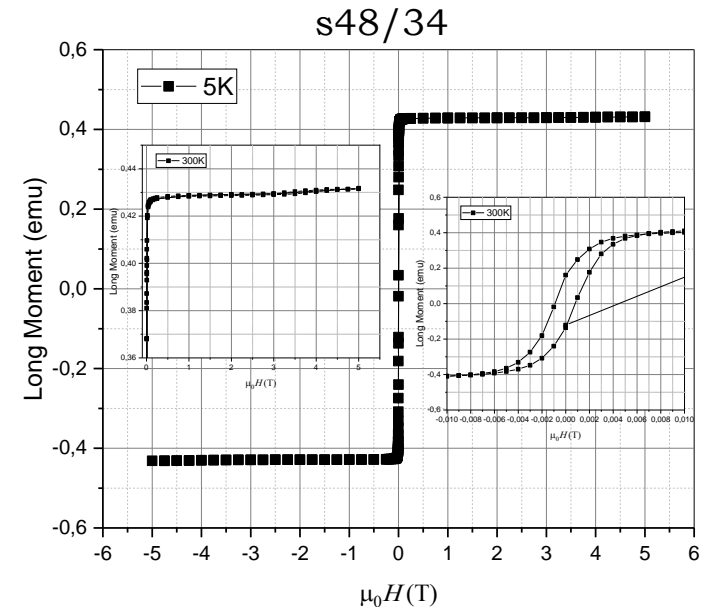
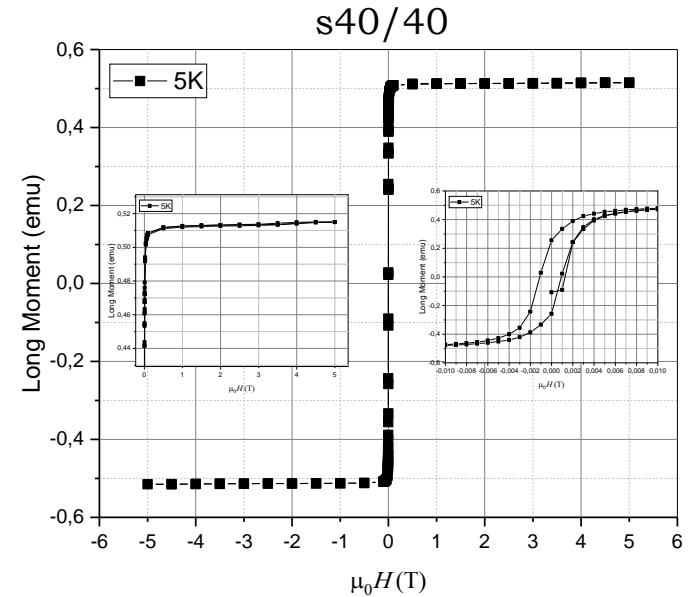
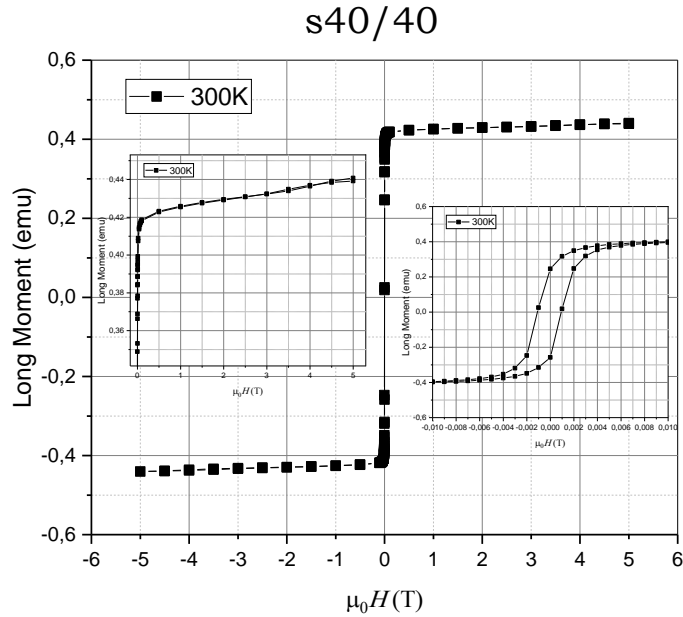


Fig. 2.1 Model for the magnetic microstructure of a bulk ferromagnet. (a) Sketch of an idealized two-dimensional (nuclear) grain microstructure. The red arrows represent spatial variation of the direction and/or magnitude of the magnetic anisotropy field; for simplicity, it is assumed to be a uniaxial magnetic anisotropy. The hexagons' colors represent the spatial variation of the magnetic material's parameters. (b) Superposed magnetic microstructure in the presence of an applied magnetic field H_0 .

Аттестация аморфной
структуры методом РФА



Макромагнитные измерения (СКВИД)



Поле намагничивания:

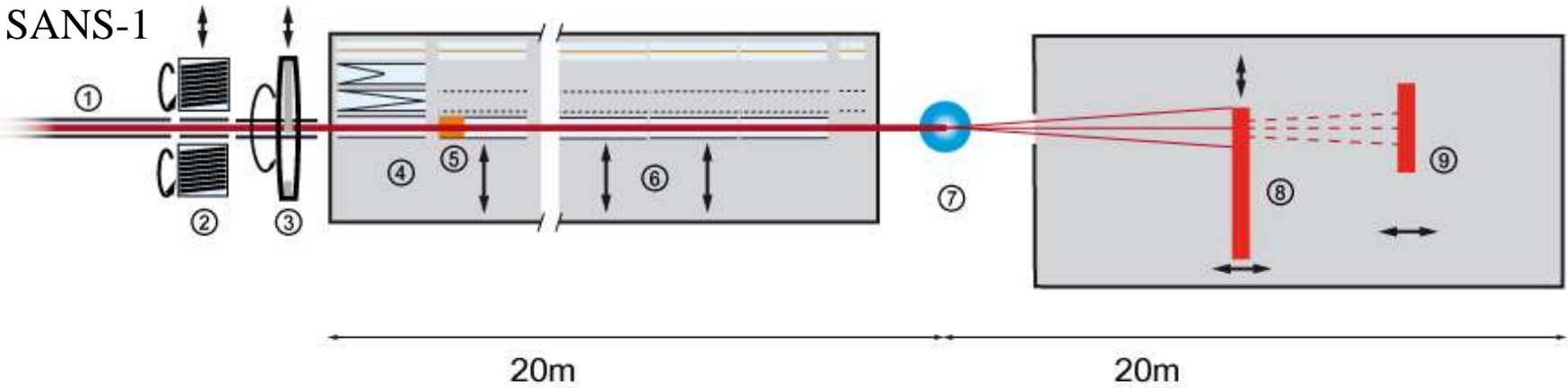
S40/40

$H_m = 10$ mT (300K)

$H_m = 9$ mT (5K)

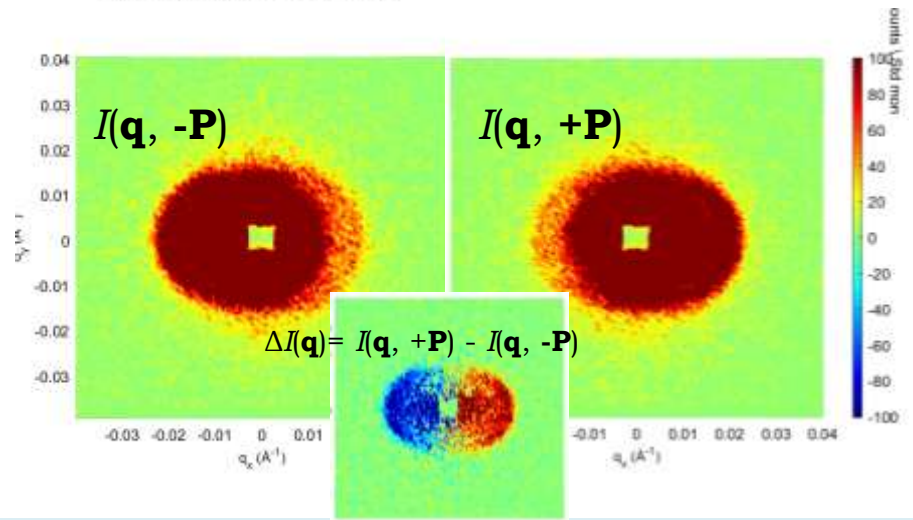
S48/34

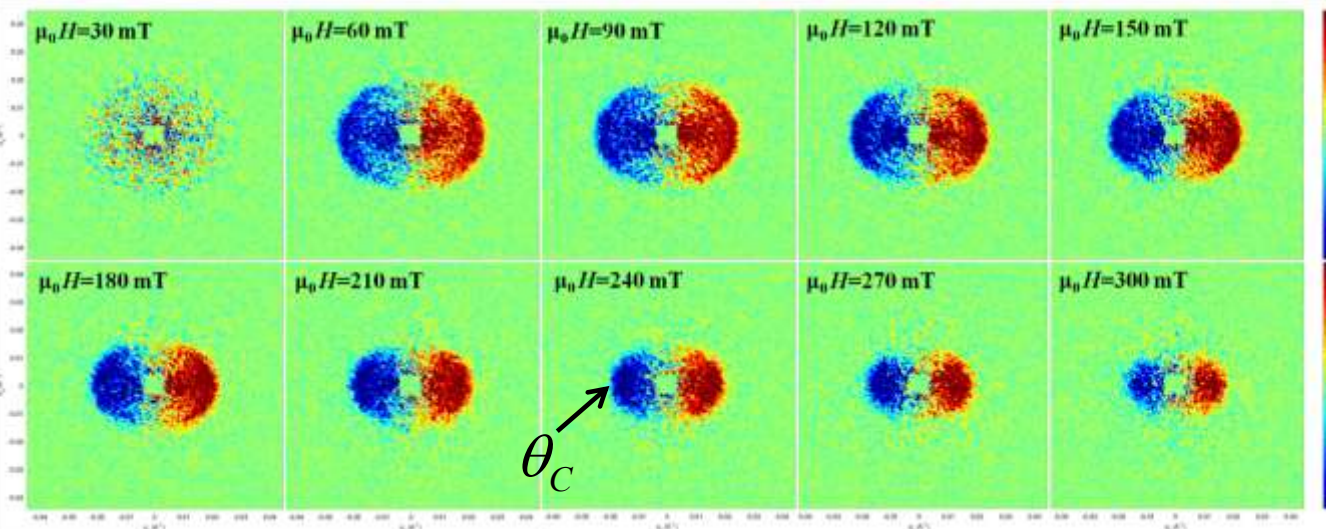
$H_m = 9$ mT (5K)



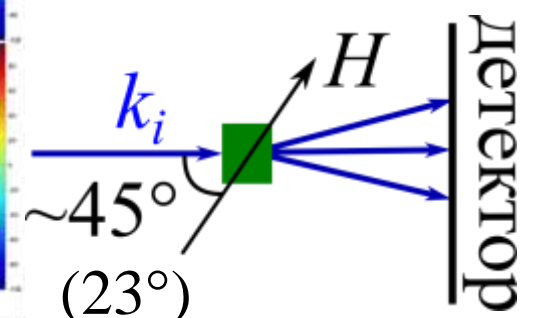
- ① Neutron guide NL4a
- ② Velocity selector 1+2
- ③ TISANE Chopper
- ④ Changeable polarisers
- ⑤ Spin flipper
- ⑥ 4 collimation sections 19 m (neutron guide, collimation slits)

- ⑦ Sample position
- ⑧ Position sensitive area detector, 1 x 1 m²
- ⑨ High resolution position-sensitive area detector, 0.5 x 0.5 m² (installation 2016)

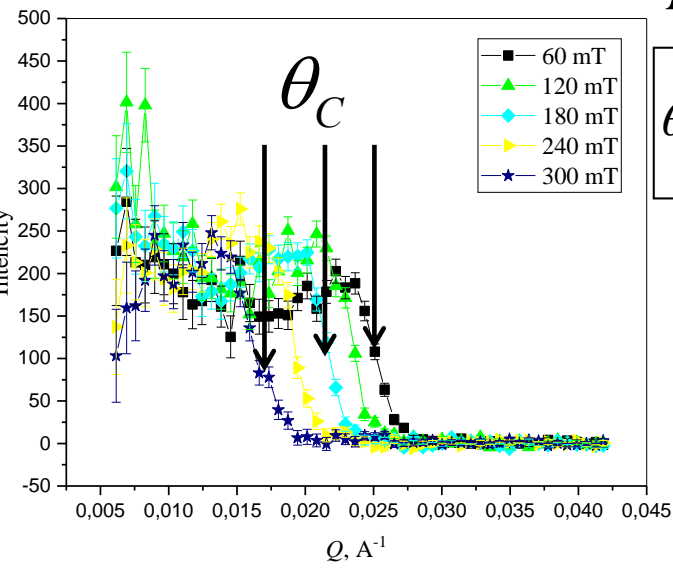




SANS-1



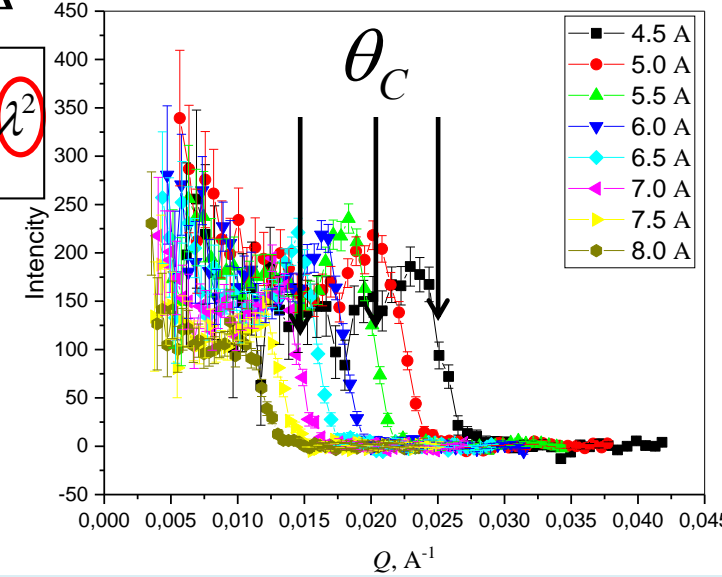
H-scan



$$E_q = Aq^2 + g\mu_B H + \Delta$$

$$\theta_C^2 = \frac{\hbar^4}{4m_n^2 A^2} - \frac{g\mu_B H + \Delta}{4\pi^2 A}$$

lambda-scan



H-скан

$$\theta_C^2 = \frac{\hbar^4}{4m_n^2 A^2} - \frac{g\mu_B H + \Delta}{4\pi^2 A} \lambda^2 \Rightarrow \theta_C^2(H) = aH + b$$

$$a = -\frac{g\mu_B}{4\pi^2 A} \lambda^2$$

$$b = \frac{\hbar^4}{4m_n^2 A^2} - \frac{\Delta}{4\pi^2 A} \lambda^2$$

$$A = -\frac{g\mu_B}{4\pi^2 a} \lambda^2$$

$$\Delta = \left(\frac{\hbar^4}{4m_n^2 A^2} - b \right) \frac{4\pi^2 A}{\lambda^2}$$

λ-скан

$$\theta_C^2 = \frac{\hbar^4}{4m_n^2 A^2} - \frac{g\mu_B H + \Delta}{4\pi^2 A} \lambda^2 \Rightarrow \theta_C^2(\lambda^2) = c\lambda^2 + d$$

$$c = -\frac{g\mu_B H + \Delta}{4\pi^2 A}$$

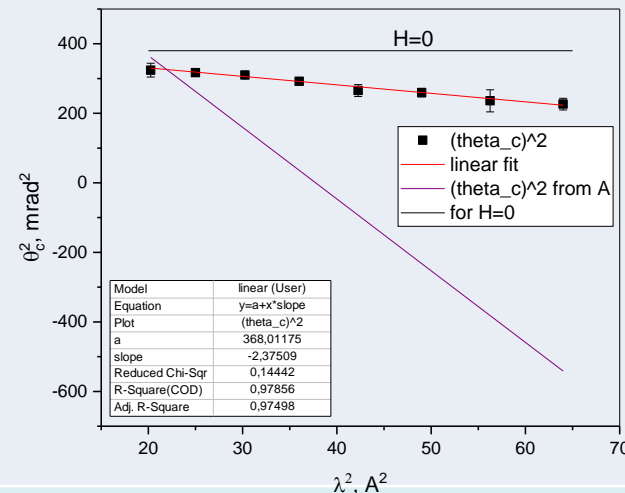
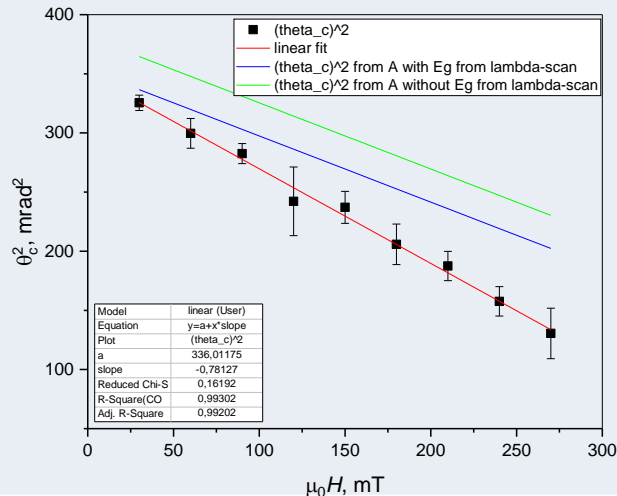
$$d = \frac{\hbar^4}{4m_n^2 A^2}$$

$$\Delta = -4\pi^2 A c - g\mu_B H$$

$$A = \frac{\hbar^2}{2m_n \sqrt{d}}$$

$$A = 74.3 \pm 15 \text{ meV } \text{\AA}^2 \quad \Delta = 0.062 \pm 0.017 \text{ meV}$$

$$\Delta = 0.008 \pm 0.0007 \text{ meV} \quad A = 106.5 \pm 0.8 \text{ meV } \text{\AA}^2$$

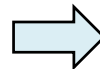


Лучший способ определить жесткость спиновых волн – лямбда-зависимость!

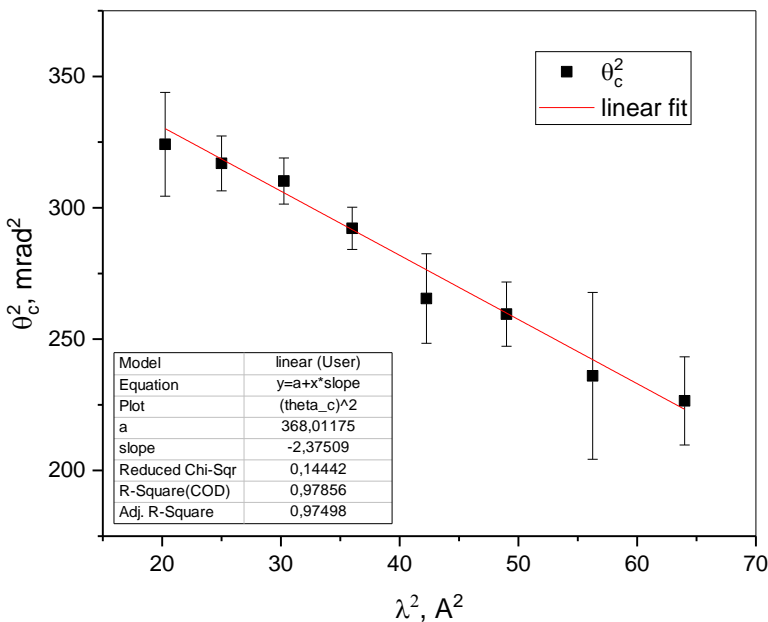
$$\theta_c^2 = \frac{\hbar^4}{4m_n^2 A^2} - \frac{g\mu_B H + \Delta}{4\pi^2 A} \lambda^2$$



$$\theta_c^2(\lambda^2) = c\lambda^2 + d$$



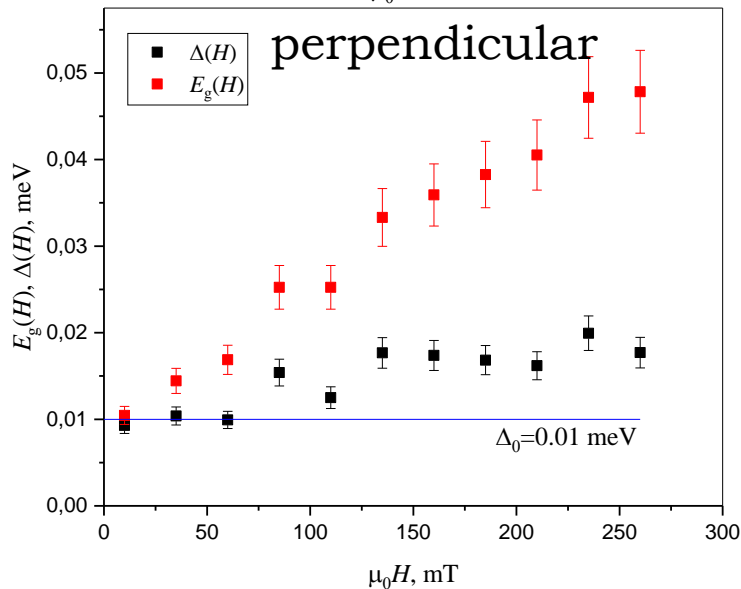
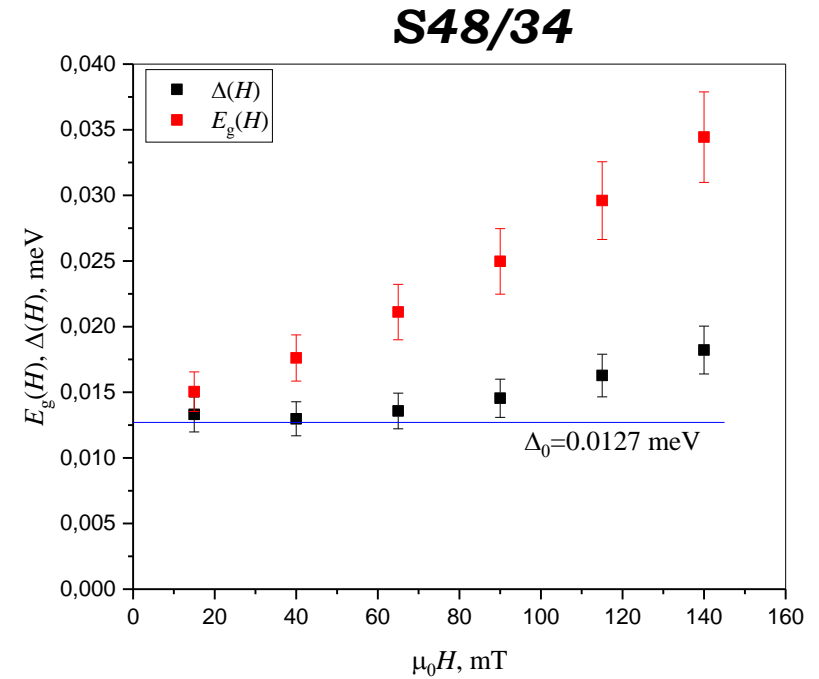
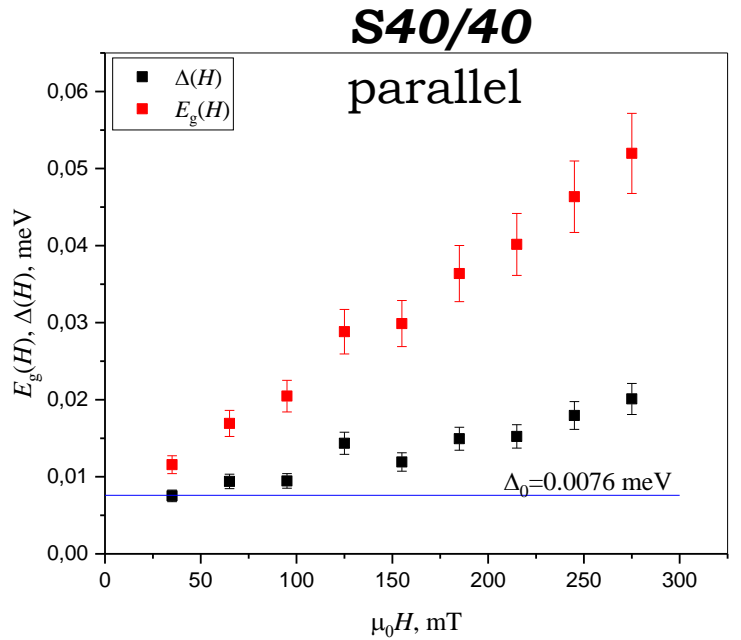
$$A = \frac{\hbar^2}{2m_n \sqrt{d}}$$



СВ жесткость A зависит только от:

- мировых констант \hbar и m_n
- свободного параметра в линейной зависимости d
- в таком определении жесткости присутствует минимально влияние внешних факторов и экспериментальных условий

$$A = 106.5 \pm 0.8 \text{ meV } \text{\AA}^2$$



$$E_g = \Delta + g\mu_B H_{\text{int}} = \left(\frac{\hbar^4}{4m_n^2 A^2} - \theta_C^2(H) \right) \frac{4\pi^2 A}{\lambda^2}$$

$$\Delta = \left(\frac{\hbar^4}{4m_n^2 A^2} - \theta_C^2(H) \right) \frac{4\pi^2 A}{\lambda^2} - g\mu_B H_{\text{int}}$$

$$H_{\text{int}} \approx H - (H_{S(40)} - H_{S(1)})$$

S40/40

S48/34

Параллельная ориентация:

$$A = 106.5 \pm 0.8 \text{ meV \AA}^2$$

$$\Delta_0 = 0.0076 \pm 0.0006 \text{ meV}$$

Перпендикулярная ориентация:

$$A = 106.9 \pm 0.8 \text{ meV \AA}^2$$

$$\Delta_0 = 0.0102 \pm 0.0008 \text{ meV}$$

Параллельная ориентация:

$$A = 111.2 \pm 0.9 \text{ meV \AA}^2$$

$$\Delta_0 = 0.0127 \pm 0.0003 \text{ meV}$$

Предположения о $\Delta(H)$?

1. Зависимости щели от поля $\Delta(H)$ **не существует**, это артефакт.



Обнаружена щель, но что-то не было учтено или модель совсем неверна.

2. Зависимость $\Delta(H)$ **существует** и не линейна (константа в малых полях и растет в больших).



Не связана с природой щели



Связана с природой щели



Возникает как результат влияния **случайной анизотропии**, присутствующей в аморфных магнетиках.



Присутствие значительного количества **примесей**, через которые магныны не могут перемещаться в малых полях.

- Теоретическое моделирование показывает, что методом МУРПН возможно измерить энергетическую щель порядка 0.01мэВ с точностью до 0.001 мэВ.
- Экспериментальные данные предоставили нам важную информацию о том, что в процессе подобного эксперимента необходимо измерять как зависимость от длины волны λ (для определения жесткости СВ), так и от магнитного поля H (для определения щели).
- Энергетическая щель Δ зависит от магнитного поля, но причины этого пока не ясны.

- Григорьев С.В., ПИЯФ, СПбГУ
- Пшеничный К.А., ПИЯФ
- Виноградов Р.М., СПбГУ

- Andre Heinemann, HERIION, MLZ (Germany)
- Ахмед Елмекави, NRC, Egypt
- Мистонов А.А., СПбГУ
- Быков А., ПИЯФ



Спасибо за внимание!

H-скан

$$\theta_C^2 = \frac{\hbar^4}{4m_n^2 A^2} - \frac{g\mu_B H}{4\pi^2 A} \lambda^2 \Rightarrow \theta_C^2(H) = aH + b$$

$$a = -\frac{g\mu_B}{4\pi^2 A} \lambda^2$$

$$b = \frac{\hbar^4}{4m_n^2 A^2}$$

$$A = -\frac{g\mu_B}{4\pi^2 a} \lambda^2$$

$$A = \frac{\hbar^2}{2m_n \sqrt{b}}$$

$$A = 74.3 \text{ мЭВ } A^2$$

$$A = 110.9 \text{ мЭВ } A^2$$

λ-скан

$$\theta_C^2 = \frac{\hbar^4}{4m_n^2 A^2} - \frac{g\mu_B H}{4\pi^2 A} \lambda^2 \Rightarrow \theta_C^2(\lambda^2) = c\lambda^2 + d$$

$$c = -\frac{g\mu_B H}{4\pi^2 A}$$

$$d = \frac{\hbar^4}{4m_n^2 A^2}$$

$$A = -\frac{g\mu_B H}{4\pi^2 c} \lambda^2$$

$$A = \frac{\hbar^2}{2m_n \sqrt{d}}$$

$$A = 18.3 \text{ мЭВ } A^2$$

$$A = 106.5 \text{ мЭВ } A^2$$

