



# Анализ структуры магнитной жидкости методом анизотропного малоуглового рассеяния

Д.И. Фрей<sup>1</sup>, А.А. Велигжанин<sup>1,2</sup>, А.А. Чернышов<sup>2</sup>, Я.В. Зубавичус<sup>1,2</sup>, Е.В. Яковенко<sup>2</sup> и М.В. Авдеев<sup>3</sup>.

1. Московский физико-технический институт, 141700, Институтский пер., Долгопрудный, Россия

2. НИЦ Курчатовский Институт, 123182, пл.Курчатова 1, Москва, Россия

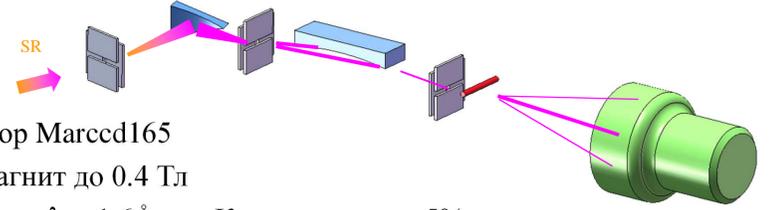
3. Объединенный институт ядерных исследований, 141980, Московская область, Дубна, Россия

## Актуальность

- Взаимодействие магнитных частиц определяет микроструктуру магнитных жидкостей и влияет на их макроскопические свойства.
- Метод малоуглового рентгеновского рассеяния (МУРР) традиционно применяется для исследования структуры подобных систем.
- Внешнее магнитное поле усиливает взаимодействие частиц, а также позволяет частично снять усреднение по ориентациям и повысить информативность малоугловых данных.

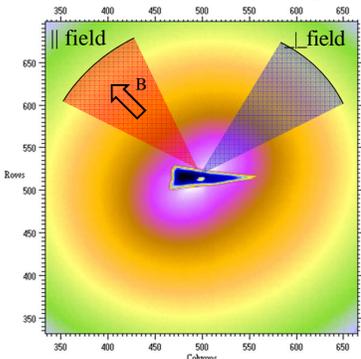
## Экспериментальная установка

- Станция «ДИКСИ» Курчатовского источника синхротронного излучения



- Особенности:
  - 2D детектор Marccd165
  - Электромагнит до 0.4 Тл
  - Длина волны  $\lambda = 1.6 \text{ \AA}$  → Концентрации <5% из-за поглощения

## Анизотропия картин МУРР



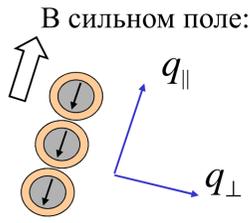
$$I(q_{\perp}) = P_{eff}(q) \cdot S_{eff}^{\perp}(q) \approx P_{eff}(q)$$

Размер и дисперсность частиц

$$I(q_{\parallel}) = P_{eff}(q) \cdot S_{eff}^{\parallel}(q)$$

$$S_{eff}^{\parallel}(q) \approx I(q_{\parallel}) / I(q_{\perp})$$

Эффективный структурный фактор → межчастичное расстояние



## Полученные структурные параметры

	Co 0.5%	Co 3%	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> 1.5%	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> 5%
Средний Ø, нм	14.2	14.8	5.4	5.0
Дисперсность, %	25	22	44	45
Межчастичное расстояние, нм	28	26	-	24
Длина когерентности	90	112	-	38

## Моделирование малоуглового рассеяния

## Рассеяние на цепочках магнитных частиц

### Рассеяние на отдельных частицах

– Частицы в феррожидкости считаются шариками с форм-фактором

$$F(q, R) = \Delta\rho \cdot V \cdot \left( 3 \frac{\sin qR - qR \cos qR}{(qR)^3} \right)$$

– Учтено распределение частиц по размерам  $D_N(R)$

– Интенсивность рассеяния отдельными частицами:

$$I_{spheres}(\vec{q}) = \int_0^{\infty} F^2(\vec{q}, R) \cdot D_N(R) dR$$

– Используется приближение локальной монодисперсности, считается, что цепочку образуют частицы одного размера. Структурный фактор цепочки:

$$|S_{chain}(\vec{q})|^2 = \frac{1 - \cos(\vec{q}\vec{n}lN)}{1 - \cos(\vec{q}\vec{n}l)}$$

– Считается, что из-за большего магнитного момента в цепочки объединяются только крупные частицы (начиная с некоторого размера  $R_c$ ).

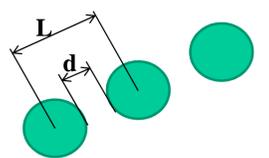
– Длина цепочек различна, число частиц в них распределено по Пуассону.

– Расстояние между частицами в цепочке определяется удвоенной толщиной оболочки  $d$ , не зависящей от размера частицы:  $L = 2R + d$

– Магнитный момент цепочки определяется ее общим объемом, исходя из постоянной плотности магнитного момента в материале магнитных частиц, с усреднением по ориентациям и учетом распределения частиц по размерам.

– Интенсивность рассеяния цепочками частиц:

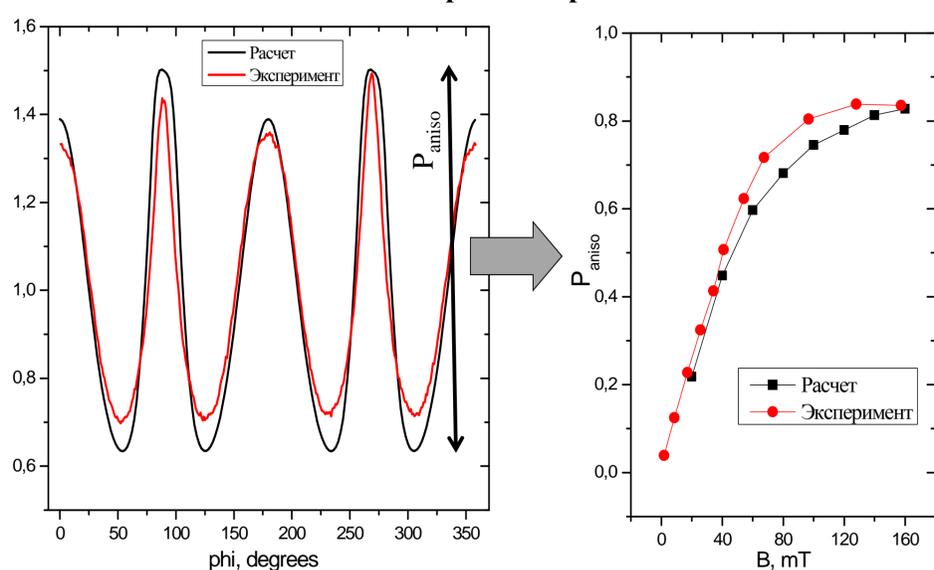
$$I_{chains}(\vec{q}) = \sum_{k=1}^{k_{max}} \int_0^{\infty} F^2(q, R) \cdot |S_k(\vec{q}, R)|^2 \cdot p(k) \cdot D_N(R) dR$$



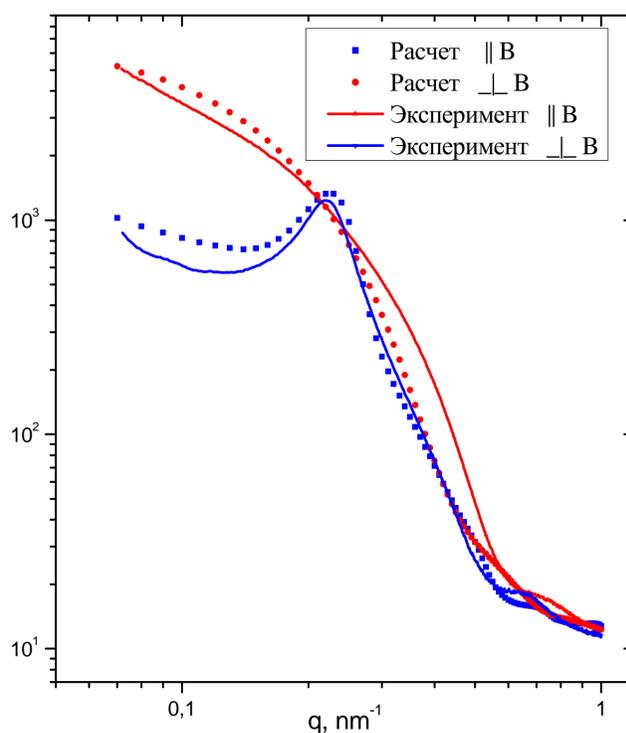
## Результаты моделирования (поиск по сетке значений)

Параметры цепочек	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	Co
Средний радиус частиц, нм	5.2	7.1
Дисперсность	45%	24%
Среднее число частиц	1.6	5
Расстояние между частицами, нм	1.0	6.2
Доля частиц в цепочках	24%	8%
Минимальный радиус частиц в цепочках, нм	6.5	9.6
Магнитное поле, мТл	160	160
Температура, К	300	300
Магнитный момент единицы объема	6.5 μ <sub>B</sub>	13.5 μ <sub>B</sub>

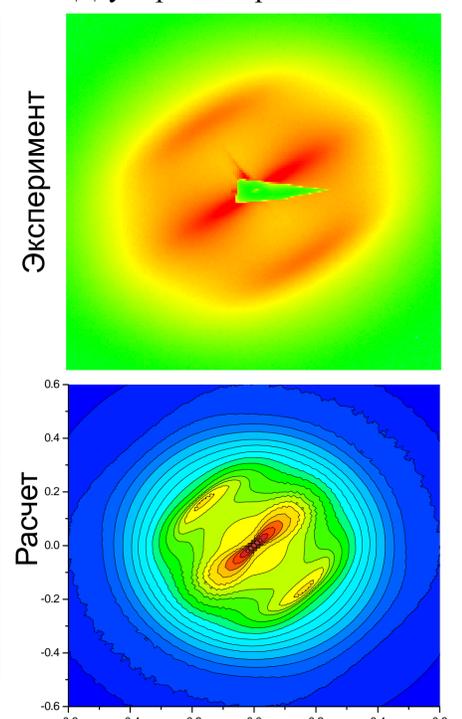
## Анализ анизотропии картин МУРР



## Одномерные срезы интенсивности



## Двумерные картины МУРР



## Выводы

- Методом малоуглового рассеяния наблюдается процесс упорядочения цепочек магнитных частиц под действием внешнего магнитного поля.
- По данным МУРР определены структурные параметры системы, такие как средний размер, дисперсность и межчастичное расстояние в цепочке.
- Написана программа, позволяющая моделировать малоугловое рассеяние от цепочек магнитных частиц в магнитном поле в приближении локальной монодисперсности.
- Для двух различных типов магнитных жидкостей проведен расчет малоуглового рассеяния. Получены значения параметров системы, при которых наблюдается качественное совпадения расчета с экспериментом.