



**μSR** rotation relaxation resonance  
m s  
u p  
o i  
n n

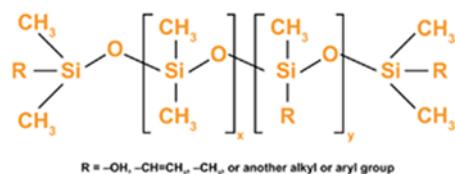


**μSR-ИССЛЕДОВАНИЯ  
НА СИНХРОЦИКЛОТРОНЕ  
НИЦ «КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ» - ПИЯФ**

**Воробьев С.И.**

**НАУЧНАЯ СЕССИЯ ОТДЕЛЕНИЯ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ, 24 - 27 декабря 2024 г.**

# Исследование эластомеров с наночастицами $\text{CoFe}_2\text{O}_4$ с помощью $\mu\text{SR}$ -метода



Sample volume=32cm<sup>3</sup>

- P<sub>0</sub> : Φ<sub>1</sub>=0% at H=0kA/m;  
P<sub>1</sub> : Φ<sub>1</sub>=1% at H=0kA/m;  
P<sub>2</sub> : Φ<sub>1</sub>=5% at H=0kA/m;  
P<sub>3</sub> : Φ<sub>1</sub>=10% at H=0kA/m;  
P<sub>4</sub> : Φ<sub>1</sub>=15% at H=0kA/m.

- P<sub>1m</sub> : Φ<sub>1</sub>=1% at H=80kA/m;  
P<sub>2m</sub> : Φ<sub>1</sub>=5% at H=80kA/m;  
P<sub>3m</sub> : Φ<sub>1</sub>=10% at H=80kA/m;  
P<sub>4m</sub> : Φ<sub>1</sub>=15% at H=80kA/m.

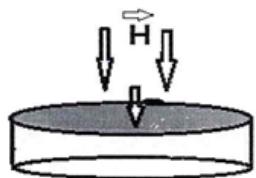


Рис. 1. Образцы эластомеров.



Фотография образца P0  
(0% наночастиц  $\text{CoFe}_2\text{O}_4$ )



Фотография образца P4  
(15% наночастиц  $\text{CoFe}_2\text{O}_4$ )

Для исследования  $\mu\text{SR}$ -методом магнитных свойств магнитореологических эластомеров были изготовлены образцы в виде дисков диаметром 64 мм и толщиной 9 мм.

Подготовлено два набора образцов с концентрацией 1, 5, 10 и 15% с неупорядоченной и с упорядоченной ориентацией магнитных моментов наночастиц  $\text{CoFe}_2\text{O}_4$ .

Полимеризация образцов второго набора была проведена в магнитном поле 80 кА/м, перпендикулярном плоскости диска.

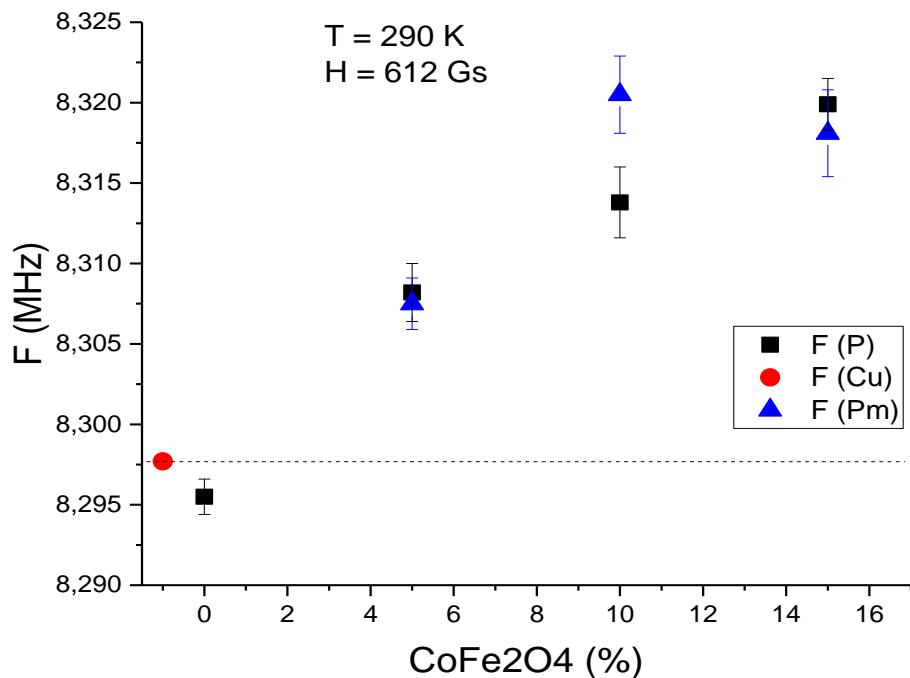
В качестве матрицы использована силиконовая резина (silicon rubber (SR), Globasil AD 27 type, from Globalchimica SRL), в которую перед полимеризацией вводилась феррояжидкость.

Феррояжидкость с 3% концентрацией магнитных наночастиц в воде была стабилизирована с использованием в качестве ПАВ додецилсульфат натрия  $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{11}\text{SO}_4\text{Na}$  с плотностью  $\rho = 1.01 \text{ g/cm}^3$  и лауриновой кислоты  $\text{C}_{11}\text{H}_{23}\text{COOH}$  с плотностью  $\rho = 0.88 \text{ g/cm}^3$ . Один мл феррояжидкости содержал 0.17 г феррита кобальта, а на 1 г  $\text{CoFe}_2\text{O}_4$  приходилось 0.25 г ПАВ.

Распределение наночастиц по размерам:

$$D_0 = 7.8 \pm 0.1 \text{ нм}, \sigma = 0.40 \pm 0.01 \text{ нм}.$$

# Исследование эластомеров с наночастицами $\text{CoFe}_2\text{O}_4$ с помощью $\mu\text{SR}$ -метода



$\mu\text{SR}$ -методом было проведено исследование магнитных свойств эластомеров в зависимости от концентрации наночастиц  $\text{CoFe}_2\text{O}_4$  во внешнем поперечном магнитном поле 612 Гс при температуре 290 К. Измерена величина магнитного поля, создаваемого однодоменными наночастицами  $\text{CoFe}_2\text{O}_4$ , которая увеличивается пропорционально концентрации наночастиц.

Зависимость частоты прецессии спина мюона от концентрации наночастиц  $\text{CoFe}_2\text{O}_4$  при температуре 290 К в магнитном поле  $H = 612$  Гс: чёрные квадраты – Р образцы, синие треугольники –  $P_m$  образцы и красная точка – медный образец

В.С. Лобин, С.И. Воробьев, Е.В. Виноградов, А.Л. Геталов, Е.Н. Комаров, С.А. Котов. Исследование эластомеров с наночастицами  $\text{CoFe}_2\text{O}_4$  с помощью  $\mu\text{SR}$ -метода. XI Всероссийский молодежный научный форум с международным участием “Open Science 2024”, 13–15 ноября 2024 года, г. Гатчина.

Исследования необходимо продолжить



00100000  
00000000  
00055844  
00033941  
00000637  
00107619  
00078396  
00031777  
00007076



00100000  
00000000  
00013737  
00009103  
00000812  
00091726  
00066719  
00092478  
00015606



# Исследование ферромагнитности на основе $\text{Fe}_3\text{O}_4$ в среде $\text{D}_2\text{O}$ с помощью $\mu\text{SR}$ -метода

Экспериментальные данные по ферромагнитности приводятся в сравнении с аналогичными данными для тяжелой воды, которая в образце  $\text{Fe}_3\text{O}_4/2\text{DBS}/\text{D}_2\text{O}$  занимает  $\sim 95\%$  его объема. Для  $\text{D}_2\text{O}$  были выполнены отдельные измерения при нескольких температурах.

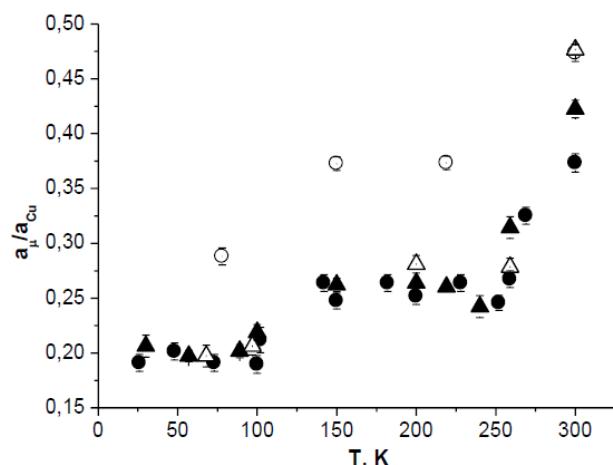


Рис. 1. Зависимость доли асимметрии мюонной компоненты от температуры в образцах  $\text{D}_2\text{O}$  (светлые значки) и  $\text{Fe}_3\text{O}_4/2\text{DBS}/\text{D}_2\text{O}$  (темные значки) во внешних поперечных магнитных полях 280 Гс (круглые точки) и 8 Гс (треугольники).

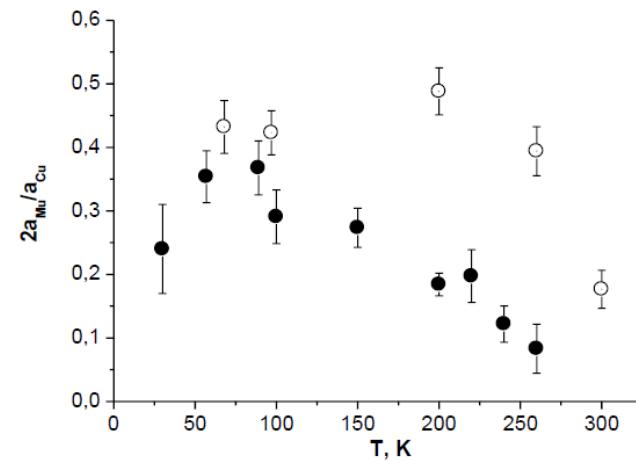


Рис. 2. Зависимость доли асимметрии мюониевой компоненты от температуры в образцах  $\text{D}_2\text{O}$  (светлые значки) и  $\text{Fe}_3\text{O}_4/2\text{DBS}/\text{D}_2\text{O}$  (темные значки) в слабом поперечном магнитном поле 8 Гс

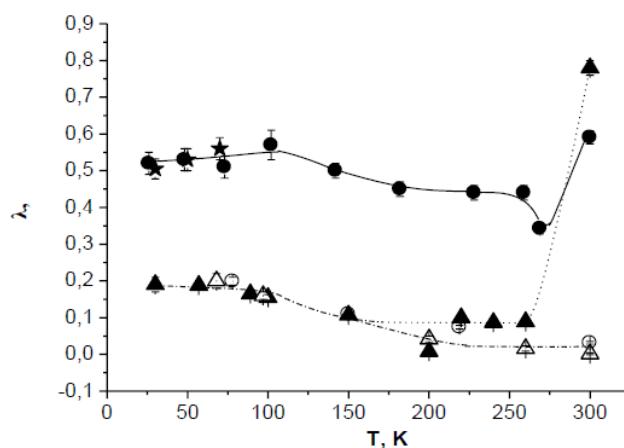


Рис. 3. Зависимость скорости релаксации спина мюона от температуры образцов  $\text{D}_2\text{O}$  (светлые значки) и  $\text{Fe}_3\text{O}_4/2\text{DBS}/\text{D}_2\text{O}$  (темные значки) в поперечных магнитных полях 8 Гс (треугольники) и 280 Гс (точки); звёздочками отмечены результаты ZFC-измерений во внешнем магнитном поле 280 Гс. Линии проведены для лучшей визуализации соответствующих температурных зависимостей

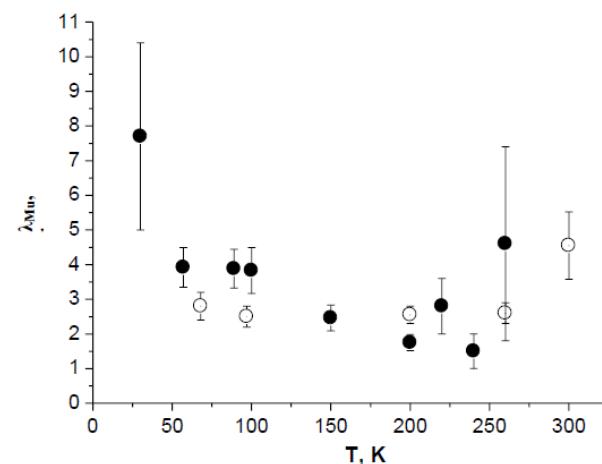


Рис. 4. Зависимость скорости релаксации спина мюония от температуры образцов  $\text{D}_2\text{O}$  (светлые значки) и  $\text{Fe}_3\text{O}_4/2\text{DBS}/\text{D}_2\text{O}$  (темные значки) в поперечном магнитном поле 8 Гс

# Исследование феррородиактическости на основе $\text{Fe}_3\text{O}_4$ в среде $\text{D}_2\text{O}$ с помощью $\mu\text{SR}$ -метода

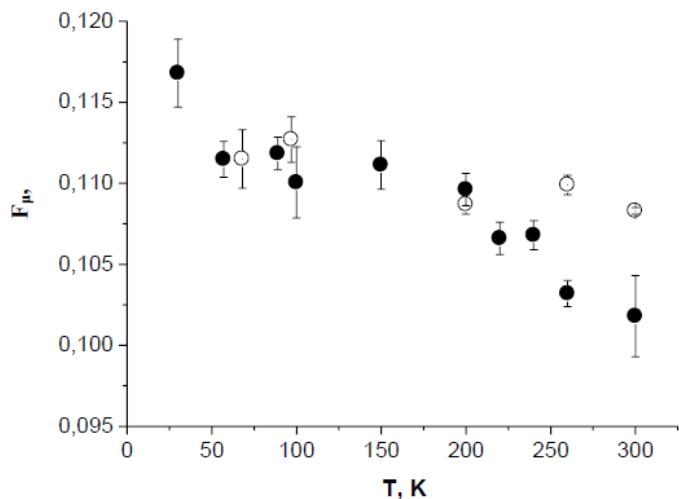


Рис. 5. Зависимость частоты прецессии спина мюона от температуры в образцах  $\text{D}_2\text{O}$  (светлые значки) и  $\text{Fe}_3\text{O}_4/2\text{DBS}/\text{D}_2\text{O}$  (темные значки) во внешнем поперечном магнитном поле с напряженностью 8 Гс

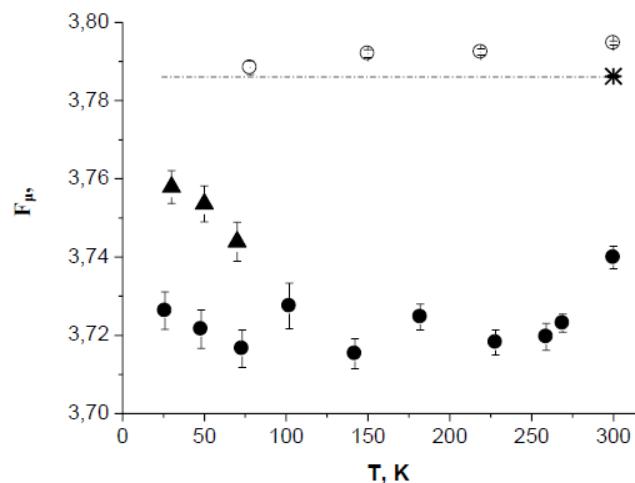


Рис. 6. Зависимость частоты прецессии спина мюона от температуры образцов  $\text{D}_2\text{O}$  (светлые значки) и  $\text{Fe}_3\text{O}_4/2\text{DBS}/\text{D}_2\text{O}$  (темные значки) во внешнем поперечном магнитном поле 280 Гс. Треугольниками показаны результаты ZFC-измерений. Звездочкой показана частота мюонной прецессии в эталонном медном образце. Измерения при температуре 300 К на всех указанных образцах производились без выключения магнитного поля

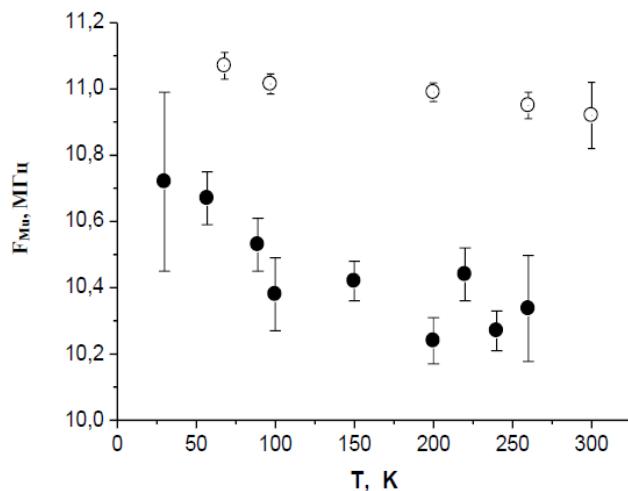


Рис. 7. Зависимость частоты прецессии спина мюония от температуры в образцах  $\text{D}_2\text{O}$  (светлые точки) и  $\text{Fe}_3\text{O}_4/2\text{DBS}/\text{D}_2\text{O}$  (черные точки) во внешнем поперечном магнитном поле 8 Гс (поле определено по частоте прецессии спина мюона в медном образце)

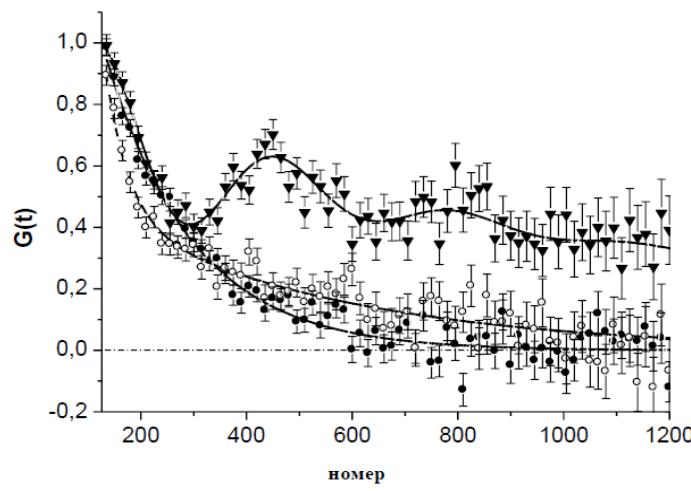


Рис. 11. Функции релаксации поляризации мюонов в образце феррородиактическости в нулевом внешнем магнитном поле при температурах 300 К (черные точки), 215 К (треугольники), 97 К (светлые точки); 1 канал = 4,9 нс

# Исследование феррожидкости на основе $\text{Fe}_3\text{O}_4$ в среде $\text{D}_2\text{O}$ с помощью $\mu\text{SR}$ -метода

В заключение отметим, что наблюдается значительное изменение характеристик  $\mu\text{SR}$ -спектров в исследованной нами феррожидкости по сравнению с такими же характеристиками в тяжелой воде, которая составляет основу образца.

Доля диамагнитной (мюонной) компоненты в  $\text{D}_2\text{O}$  зависит от величины внешнего магнитного поля, в феррожидкости такой зависимости не наблюдается (рис. 1).

Наблюдается одинаковая температурная зависимость доли мюонной фракции в феррожидкости и в тяжелой воде, но скорость релаксации мюонной фракции в феррожидкости при  $T > 100$  К существенно выше скорости релаксации этой же фракции в  $\text{D}_2\text{O}$  (рис. 1 и рис. 3).

В области температур  $100 \div 300$  К во внешнем магнитном поле в феррожидкости наблюдается значительное подавление мюониевой фракции по отношению к аналогичной фракции в  $\text{D}_2\text{O}$ , причем скорости релаксации поляризации по мюониевой компоненте для обоих образцов практически не зависят от температуры последних (рис. 2, рис. 4).

Для той и другой фракции отклонения в поведении характеристик в феррожидкости от характеристик в образце  $\text{D}_2\text{O}$  наибольшей степени наблюдаются в твердой и в жидкой фазах вблизи точки плавления.

В феррожидкости в поперечном спину мюона магнитном поле имеет место сдвиг частоты прецессии спинов, как мюона, так и мюония по отношению к частоте прецессии в  $\text{D}_2\text{O}$ .

В отсутствие внешнего магнитного поля в образцах феррожидкости и  $\text{D}_2\text{O}$  в диапазоне температур  $150 \div 250$  К в функциях релаксации поляризации наблюдаются осцилляции, связанные с взаимодействием квадрупольного момента атома мюония с неоднородным электрическим полем кристаллической решетки льда. Частота осцилляций в указанном диапазоне температур остаётся практически неизменной и не зависит от наличия наночастиц магнетита в поликристаллах льда.

Доля мюониевой компоненты в феррожидкости в отсутствие внешнего магнитного поля составляет существенно большую величину по сравнению с долей, наблюданной в слабом внешнем магнитном поле. Особенно это проявляется в области высоких температур ( $> 150$  К). Совершенно иначе ведет себя доля мюониевой компоненты в образце  $\text{D}_2\text{O}$ .

ISSN Print 2413-5291

НАЦИОНАЛЬНАЯ АССОЦИАЦИЯ УЧЕНЫХ (НАУ)  
DOI: 10.31618/NAS.2413-5291.2024.1.101



Ежемесячный  
научный журнал  
Том 1 №101 / 2024

Воробьев С.И., Геталов А.Л., Комаров Е.Н., Котов С.А., Лобин В.С., Щербаков Г.В.  
*Влияние магнитных наночастиц на поведение поляризованных положительных  
мюонов в феррожидкости на основе  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  в среде  $\text{D}_2\text{O}$ .* Ежемесячный научный  
журнал «Национальная ассоциация ученых (НАУ)». 2024. Том 1, № 101, стр.13-27.

# $\mu$ SR-эксперименты по исследованию наноструктурного образца CuO и эндометаллофуллеренов C<sup>60</sup>@Fe

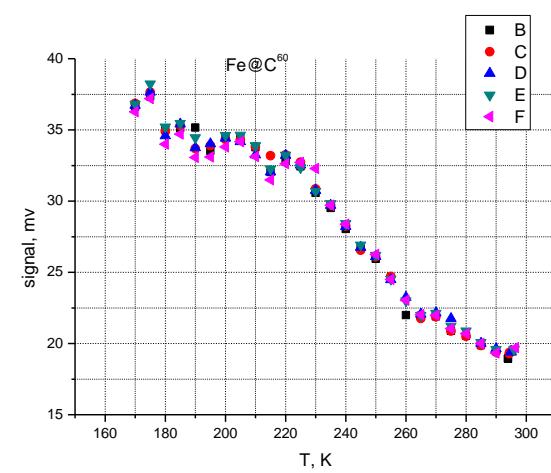
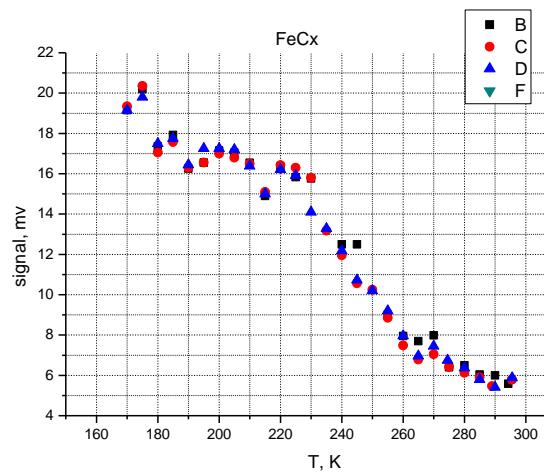
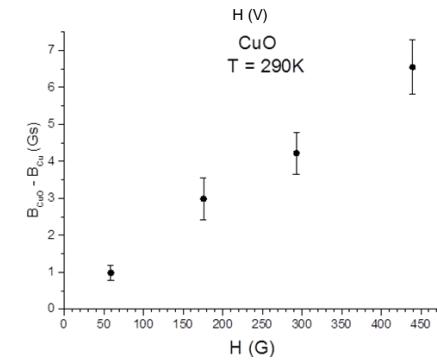
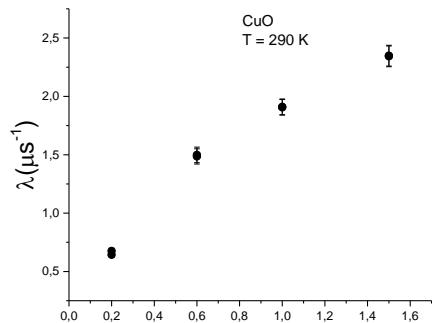
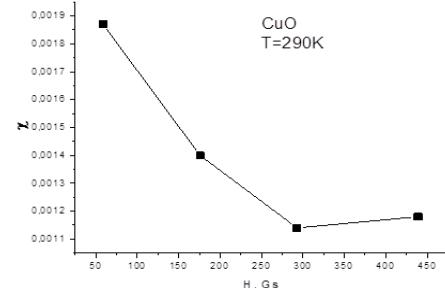


Исследования посвящены изучению магнитных свойств наноструктурных образцов оксида меди CuO и эндометаллофуллеренов C<sup>60</sup>@Fe (в перспективе и с редко-земельными ионами).

Образец оксида меди CuO впервые был изготовлен по новой технологии путем электродугового испарения графитового электрода, содержащего медь.



К настоящему моменту есть результаты измерения магнитной восприимчивости прекурсора FeC<sup>x</sup>, а также образца эндометаллофуллерена Fe@C<sup>60</sup> в диапазоне температур 170K – 300K в нулевом магнитном поле.



Сигнал в единицах мВ пропорционален магнитной восприимчивости и должен быть отнормирован по результатам калибровки на магнитометре. Образцы отправлены для калибровки в СПбГУ.

Мы намерены в дальнейшем исследовать гистерезисные свойства этих материалов в магнитном поле, а также провести соответствующие  $\mu$ SR-измерения на ускорителе ПИЯФ.

## **μSR-эксперименты по исследованию нано-ферригидрита бактериального происхождения**



Интересно **магнитное взаимодействие между суперпарамагнитными частицами** на примере **наночастиц ферригидрита** (номинальная химическая формула  $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ ). Во взаимодействующих частицах возникает две несвязанные (или слабосвязанные) магнитные системы - поверхностные спины и результирующий момент частиц. Соответственно, локальные магнитные поля в этих подсистемах будут разные, как за счёт магнитного окружения, так и за счёт разной скорости релаксации.

Ферригидрит  $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ , существуют только в наноразмерном виде.

**Ферригидрит характеризуется антиферромагнитным порядком** с температурой Нееля  $\sim 350$  К, но наличие дефектов в поверхностном слое приводит к появлению у антиферромагнитной наночастицы значительного нескомпенсированного магнитного момента ( $100 - 300 \mu_B$ ).

Иными словами, ферригидрит – композиционный **наноматериал с антиферромагнитным ядром и ферро(ферри)магнитной оболочкой с постоянным магнитным моментом**.

μSR-исследование биоферригидрита будет весомым вкладом в комплексное изучение ферригидита, проводимое методами Мёссбауэрской спектроскопии, магнитометрии, с помощью электронного просвечивающего микроскопа.

## Работы по криогенному оборудованию



*С новым  
годом!*

