



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

**Воробьев С.И.  
(Лаборатория Мезонной Физики)**

**НАУЧНАЯ СЕССИЯ ОТДЕЛЕНИЯ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ, 23 - 26 декабря 2025 г.**

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

Для исследования  $\mu\text{SR}$ -методом магнитных свойств магнитореологических эластомеров были изготовлена 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 феррожидкость.

Феррожидкость 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  $\rho = 1.01 \text{ г/см}^3$  и лауриновой кислоты  $\text{C}_{11}\text{H}_{23}\text{COOH}$  с плотностью  $\rho = 0.88 \text{ г/см}^3$ . Один мл феррожидкости 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:  $D_0 = 7.8 \pm 0.1 \text{ нм}$ ,  $\sigma = 0.40 \pm 0.01 \text{ нм}$ .

Sample volume =  $32 \text{ cm}^3$

$P_0$  :  $\Phi_1=0\%$  at  $H=0 \text{ kA/m}$ ;

$P_1$  :  $\Phi_1=1\%$  at  $H=0 \text{ kA/m}$ ;

$P_2$  :  $\Phi_1=5\%$  at  $H=0 \text{ kA/m}$ ;

$P_3$  :  $\Phi_1=10\%$  at  $H=0 \text{ kA/m}$ ;

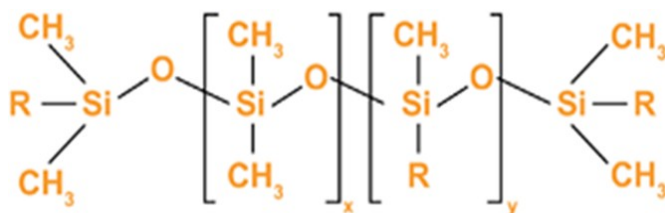
$P_4$  :  $\Phi_1=15\%$  at  $H=0 \text{ kA/m}$ .

$P_{1m}$  :  $\Phi_1=1\%$  at  $H=80 \text{ kA/m}$ ;

$P_{2m}$  :  $\Phi_1=5\%$  at  $H=80 \text{ kA/m}$ ;

$P_{3m}$  :  $\Phi_1=10\%$  at  $H=80 \text{ kA/m}$ ;

$P_{4m}$  :  $\Phi_1=15\%$  at  $H=80 \text{ kA/m}$ .



$R = -\text{OH}, -\text{CH}=\text{CH}_2, -\text{CH}_2-, \text{ or another alkyl or aryl group}$

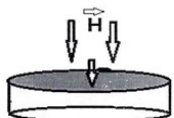
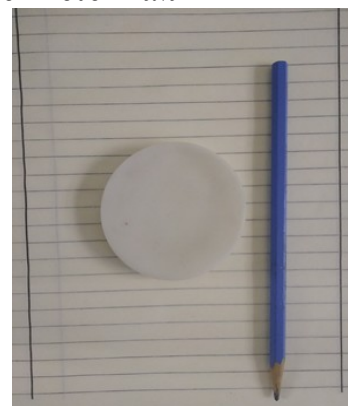
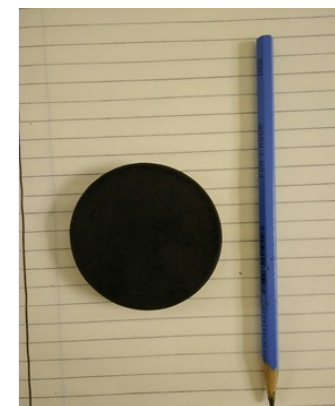


Рис. 1. Образцы эластомеров.



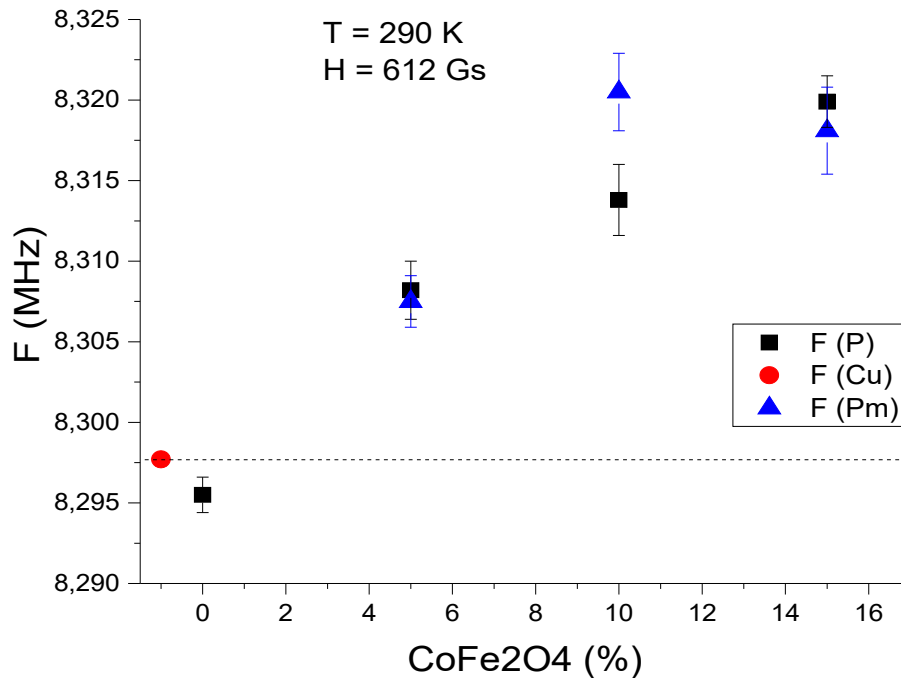
Фотография образца P0  
(0% наночастиц  $\text{CoFe}_2\text{O}_4$ )



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



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



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

Получены предварительные результаты измерения магнитной восприимчивости  $\chi$  микроскопической структуры эластомеров в зависимости от концентрации наночастиц  $\text{CoFe}_2\text{O}_4$ .

$\mu\text{SR}$ -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.



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

На рисунке 1 показано поведение асимметрии в зависимости от концентрации наночастиц в образце. Видно, что проводящие свойства образцов не зависят от концентрации примеси. Во всех образцах больше половины остановившихся мюонов образуют мюоний и быстро теряют поляризацию за время меньше 9 нс.

На рисунке 2 показано поведение скорости релаксации поляризации мюона  $\lambda$  в зависимости от концентрации магнитных наночастиц в образцах. Наблюдается устойчивый рост скорости релаксации поляризации мюонов, остановившихся в образце, по мере увеличения количества наночастиц  $\text{CoFe}_2\text{O}_4$  в исследуемых образцах.

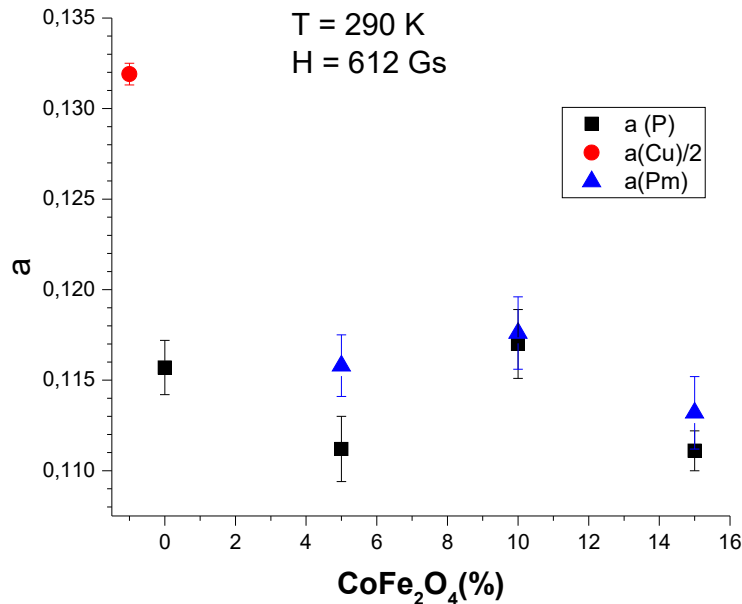


Рис. 1. Зависимость амплитуды прецессии спина мюона от величины концентрации  $\text{CoFe}_2\text{O}_4$ .

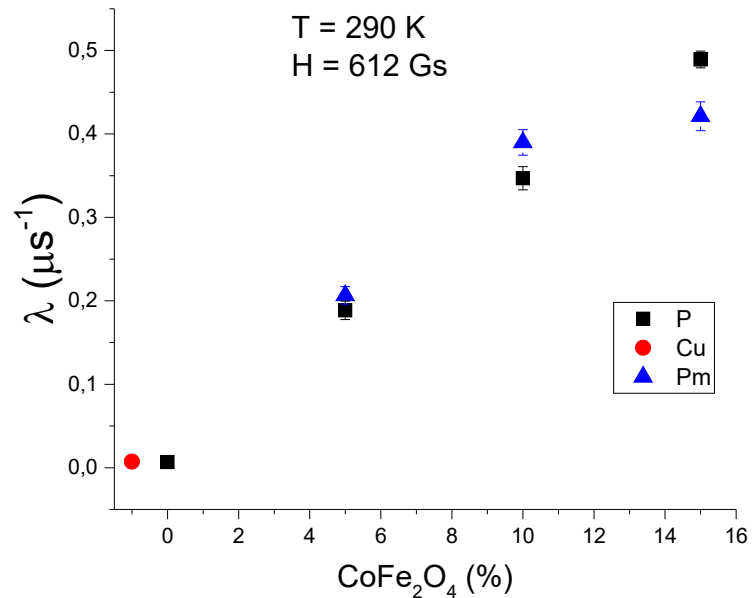


Рис. 2. Зависимость скорости релаксации поляризации мюона от концентрации наночастиц  $\text{CoFe}_2\text{O}_4$ : чёрные квадраты – P образцы, синие треугольники – P<sub>m</sub> образцы и красная точка – медный образец.

**Исследования необходимо продолжить**



## Фаза прецессии положительно заряженного мюона в феррожидкости с 3% концентрацией наночастиц $\text{CoFe}_2\text{O}_4$ в ZFC-эксперименте

Ранее, в нашей работе [S.I. Vorob'ev et al. Magnetochemistry, 7 (2021) 104] на  $\mu\text{SR}$ -установке было исследовано различие магнитных свойства феррожидкости с 3% наночастиц  $\text{CoFe}_2\text{O}_4$  охлаждённых в магнитном поле (FC) и в нулевом магнитном поле (ZFC).

Наблюдаемые две частоты прецессии поляризации положительно заряженных мюонов ( $\mu^+$ ) соответствовали приложенному магнитному полю с поправкой плюс/минус  $\sim h \leq 20$  Гс. Фазы прецессии в случае FC-измерений в пределах ошибок равны нулю, как и для ZFC-измерений при комнатной температуре (290 К) и ниже 150 К. Однако, в диапазоне температур 150-250 К появляется отличная от нуля фаза, отрицательная для высокой частоты и положительная для низкой (см. рисунок).

Надо отметить, что при обработке экспериментальных данных с фиксированной нулевой фазой величина остальных получаемых параметров не менялась (асимметрия, скорость деполяризации, частота).

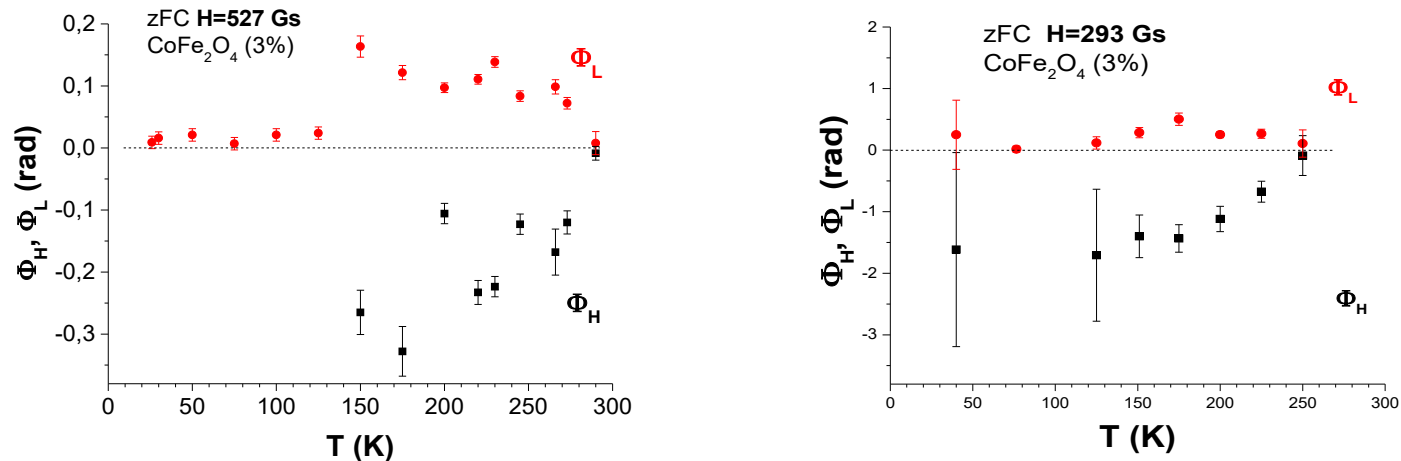


Рис. Температурная зависимость начальных фаз прецессии спина ансамбля мюонов в образце  $\text{CoFe}_2\text{O}_4$  (3%) ZFC-измерение во внешнем магнитном поле  $H=527$  Гс (левый) и  $H=293$  Гс (правый);  $\Phi_H$  – красные точки фаза низкой частоты,  $\Phi_L$  – темные квадраты фаза высокой частоты.

В ZFC-эксперименте замораживаются изотропно направленные наночастицы. При температуре  $T_b > 150$  К происходит разблокировка вращательных степеней свободы. Вслед за медленно вращающимися в двойном ПАВ наночастицами локальное поле на мюоне тоже вращается  $H(t) = H + h(t)$ .

За один полный оборот вектора магнитного поля спиновая функция приобретает фазу, пропорциональную телесному углу, который охватывает вектор (фаза Берри).

Эффекты геометрической фазы (фаза Берри) в нейтронной оптике подробно изложены в статье [В.И. Боднарчук и др. УФН 166(2) (1996) 185].





АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ  
ФИЗИКИ ТВЕРДОГО ТЕЛА  
Международная научная конференция

ACTUAL PROBLEMS OF  
SOLID STATE PHYSICS  
International Scientific Conference



СОБНИК ТЕЗИСОВ  
BOOK OF ABSTRACTS

APSSP  
2025

ГО «Научно-практический центр  
Национальной академии наук  
Беларуси по материаловедению»  
Scientific-Practical Materials Research  
Centre of NAS of Belarus



Минск, Беларусь 2025

➤ Е.В. Виноградов, С.И. Воробьев, А.Л. Геталов, Е.Н. Комаров, С.А. Котов. *Программа MNK2025A для обработки данных  $\mu$ SR-эксперимента. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025663790 от 30.05.2025.*

➤ А.Л. Геталов, С.И. Воробьев, Е.В. Виноградов, В.С. Лобин, Е.Н. Комаров, С.А. Котов. *Фаза прецессии положительно заряженного мюона в феррожидкости с 3% концентрацией наночастиц  $\text{CoFe}_2\text{O}_4$  в ZFC-эксперименте. Актуальные проблемы физики твердого тела [Электронный ресурс]: сб. тезисов. XI Междунар. науч. конф., Минск, 19–23 мая 2025 г. / ГО «НПЦ НАН Беларуси по материаловедению»; редкол.: В. М. Федосюк (пред.) [и др.]. – Минск: ГО «НПЦ НАН Беларуси по материаловедению», 2025. С. 175.*

➤ С.И. Воробьев, Е.В. Виноградов, А.Л. Геталов, В.С. Лобин, Е.Н. Комаров, С.А. Котов. *Применение  $\mu$ SR-метода для исследования магнитных свойств вещества. Актуальные проблемы физики твердого тела [Электронный ресурс]: сб. тезисов. XI Междунар. науч. конф., Минск, 19–23 мая 2025 г. / ГО «НПЦ НАН Беларуси по материаловедению»; редкол.: В. М. Федосюк (пред.) [и др.]. – Минск: ГО «НПЦ НАН Беларуси по материаловедению», 2025. С. 246.*

➤ Vorobyev S.I., Vinogradov E.V., Getalov A.L., Lobin V.S., Komarov E.N., Kotov S.A. *The  $\mu$ SR-method application for studying the magnetic properties of a matter. Book of abstracts Institute of Nuclear Physics, Academy of Sciences of Uzbekistan, The XI International Conference «Modern Problems of Nuclear Energy and Nuclear Technologies», October 14-16, 2025, Tashkent, Uzbekistan. Pp. 66-67.*

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2025663790

Программа MNK2025A для обработки данных  $\mu$ SR – эксперимента

Правообладатель: Федеральное государственное бюджетное учреждение «Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» (РУ)

Авторы: Виноградов Евгений Валерьевич (РУ), Воробьев Сергей Иванович (РУ), Геталов Александр Леонидович (РУ), Комаров Евгений Николаевич (РУ), Котов Сергей Арестович (РУ)



Заявка № 2025661057

Дата поступления 06 мая 2025 г.

Дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ 30 мая 2025 г.

Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной собственности

Ю.С. Зубов

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



RU2025663790

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА  
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ  
ГОСУДАРСТВЕННАЯ РЕГИСТРАЦИЯ ПРОГРАММЫ ДЛЯ ЭВМ

Номер регистрации (свидетельства):

2025663790

Дата регистрации: 30.05.2025

Номер и дата поступления заявки:

2025661057 06.05.2025

Дата публикации и номер бюллетеня:

30.05.2025 Бюл. № 6

Контактные реквизиты:

нет

Авторы:

Виноградов Евгений Валерьевич (РУ),

Воробьев Сергей Иванович (РУ),

Геталов Александр Леонидович (РУ),

Комаров Евгений Николаевич (РУ),

Котов Сергей Арестович (РУ)

Правообладатель(и):  
Федеральное государственное бюджетное учреждение «Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» (РУ)

Название программы для ЭВМ:

Программа MNK2025A для обработки данных  $\mu$ SR – эксперимента

Реферат:

Программа позволяет исключать ред систематические ошибки и увеличивать точность результата. При обработке  $\mu$ SR-спектров в рамках 2-частотной гипотезы извлекается частота биений (разность близких частот), которая пропорциональна локальной намагниченности структуры образца. В программе также реализованы: учёт нелинейности системы регистрации; учёт балансирующего фона; вычитаемого из обрабатываемого спектра; обработка временных  $\mu$ SR-спектров методом наименьших квадратов по формулам, соответствующим разным магнетикам (парамагнетик, коллинеарный ферромагнетик, асперомгнетик, спиновое стекло и др.), в любом сочетании; учтена возможность корреляций частот и фаз прецессии мюона; обработка нескольких просуммированных спектров. Результаты обработки выводятся в виде: краткой и полной таблицы исходных и найденных параметров,  $\chi^2$ , поверхностного уровня, формул обработки; графика с экспериментальными точками и теорией. Тип ЭВМ: IBM PC совместный компьютер; ОС: WINDOWS 98, XP, 7, 10x86.

Язык программирования: Фортран

Объем программы для ЭВМ: 93967 байт



Institute of Nuclear Physics of  
Uzbekistan Academy of Sciences



THE XI INTERNATIONAL CONFERENCE

MODERN PROBLEMS  
OF NUCLEAR ENERGY AND  
NUCLEAR TECHNOLOGIES

Dedicated to the 80th anniversary of the  
birth of Academician Bekhzod Yuldashev

BOOK OF  
ABSTRACTS

October 14-16, 2025  
Tashkent, Uzbekistan





### Интенсивность пучка с растяжкой



### Интенсивность пучка без растяжки



**Нужно, чтобы снова стало так!**

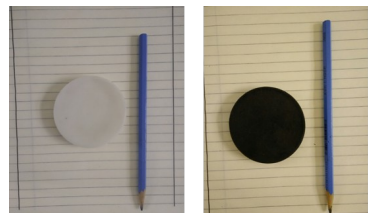


**Интенсивность пучка  
с растяжкой**

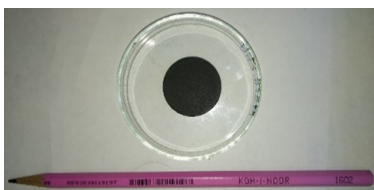




## Ждут «своего» ансамбля поляризованных мюонов



Исследования эластомеров с наночастицами  $\text{CoFe}_2\text{O}_4$ : два набора образцов с концентрацией 0, 5, 10 и 15% с неупорядоченной и с упорядоченной ориентацией магнитных моментов наночастиц  $\text{CoFe}_2\text{O}_4$ .

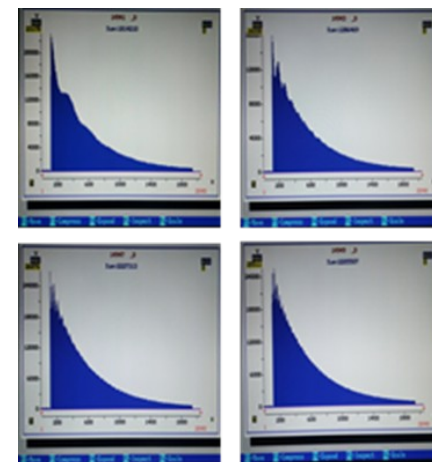


### $\mu\text{SR}$ -эксперименты по изучению магнитных свойств наноструктурных образцов:

❖ оксида меди  $\text{CuO}$

❖ эндометаллофуллеренов  $\text{C}_{60}@\text{Fe}$  (в перспективе и с редко-земельными ионами).

К настоящему моменту есть результаты измерения магнитной восприимчивости прекурсора  $\text{FeC}_x$ , а также образца эндометаллофуллерена  $\text{Fe}@\text{C}_{60}$  в диапазоне температур 170К – 300К в нулевом магнитном поле.



$\mu\text{SR}$ -эксперименты по исследованию нано-ферригидрита бактериального происхождения. (Ядерный семинар ОФВЭ, 16.04.2024).

Ферригидрит – композиционный наноматериал с антиферромагнитным ядром и ферро(ферри)магнитной оболочкой с постоянным магнитным моментом. Интересно **магнитное взаимодействие между суперпарамагнитными частицами** на примере наночастиц ферригидрита (номинальная химическая формула  $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ ).

$\mu\text{SR}$ -исследование биоферригидрита будет весомым вкладом в комплексное изучение ферригидрита, проводимое методами Мёссбауэровской спектроскопии, магнитометрии, с помощью электронного просвечивающего микроскопа.

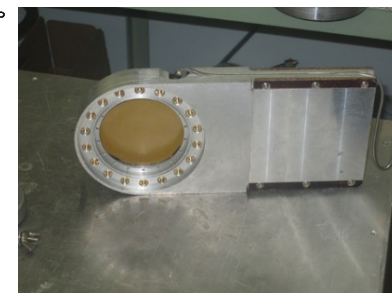
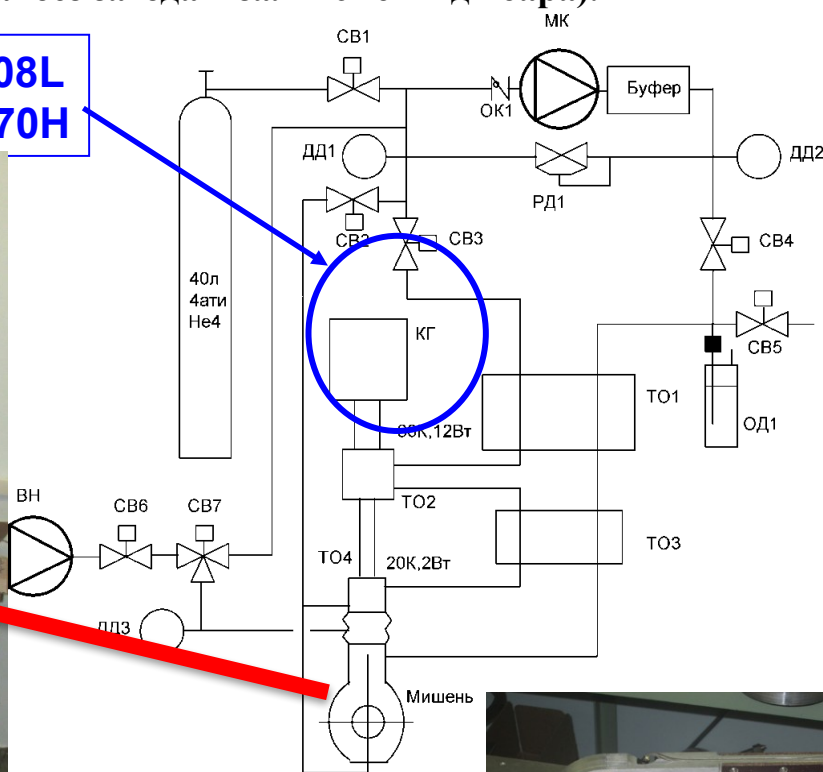
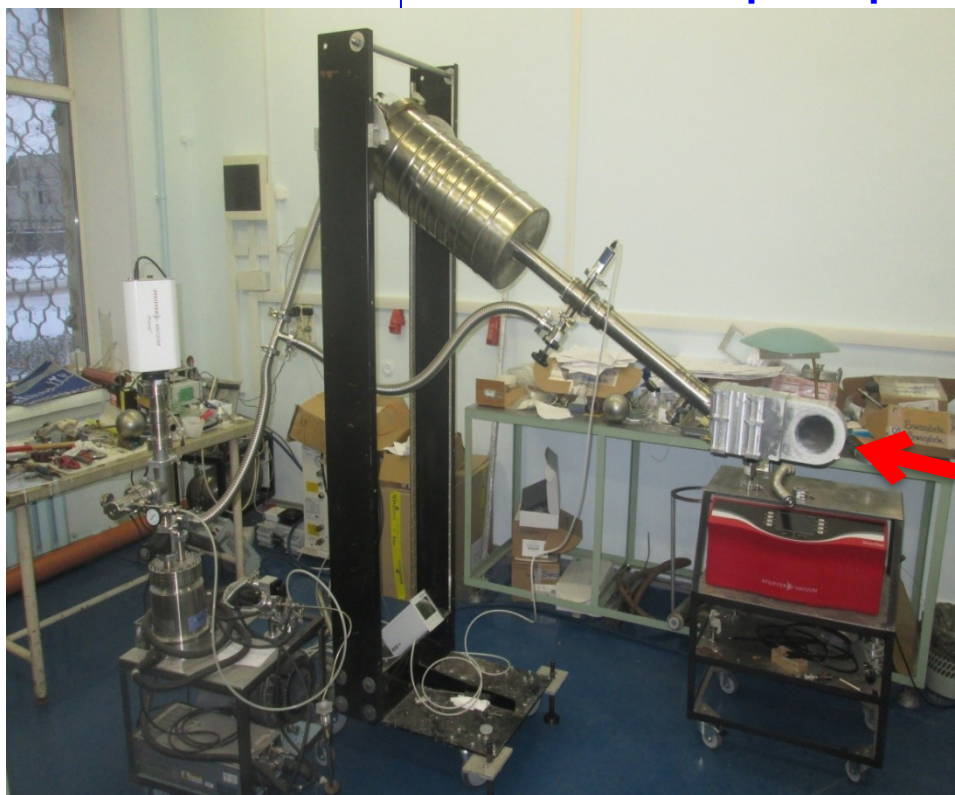


## Работы по криогенному оборудованию

Для чего нужно:

1. Изменять температуру исследуемых образцов в диапазоне 25 – 300 К;
2. Стабильно работать при высоких температурах (200 – 300 К);
3. Исключить потери гелия 20% (криогенная станция), так как позволит отказаться от использования сосуда Дьюара (без криогенной станции - 100%);
4. Экономия ускорительного времени (автономная работа- без захода в зал и смены дьюара).

**Криорефрижератор СН-208L**  
**Гелиевый компрессор F-70H**







## Работы по криогенному оборудованию







## Работы по криогенному оборудованию

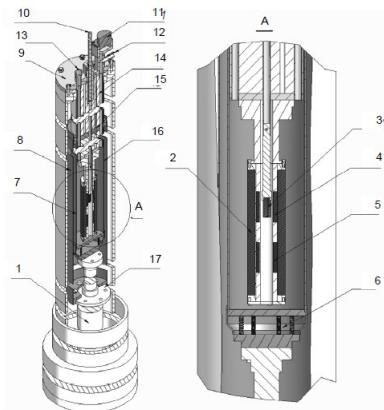
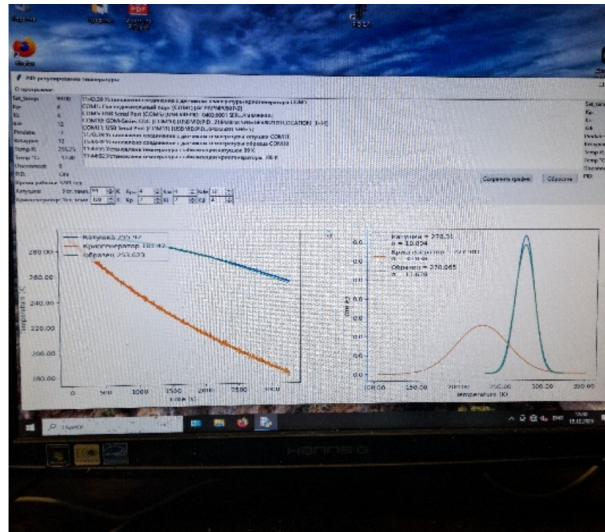


Рис. 2. Схема конструкции магнитометра: 1 – криогенератор; 2 – задающий соленоид; 3 – исследуемый образец; 4 – измерительный соленоид; 5 – опорный соленоид; 6 – вибрационная развязка; 7 – биметаллическая шпала криостата; 8 – вакуумная изоляция; 9 – верхний фланец криостата; 10 – держатель трансформатора взаимной индукции; 11 – разъем для сигнальных проводов; 12, 13 – штуцеры для подвода и оттока хладагента; 14 – тепловая изоляция; 15 – тепловой перехват; 16 – жидан для перехвата теплового излучения; 17 – пелоя ступень криогенератора



### Установка по измерению магнитной восприимчивости

Управление температурой выведено на ПК.

Регистрируется температура рабочей головки криогенератора, температура гелиевой камеры с катушками и температура на образце.

Проведены фоновые измерения.

