



μ SRotation
elaxation
esonance
m s
u p
o i
n n

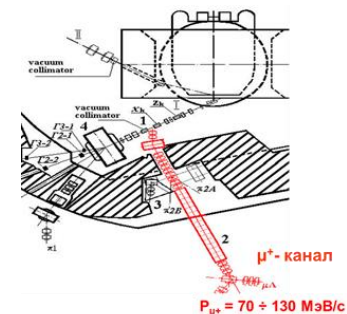


**ИССЛЕДОВАНИЕ
НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ МАГНИТНЫХ
СИСТЕМ С ПОМОЩЬЮ μ SR-МЕТОДА
НА СИНХРОЦИКЛОТРОНЕ ПИЯФ**

Воробьев С.И.

μSR-исследование магнитных свойств феррожидкости с 3% концентрацией наночастиц CoFe_2O_4 , диспергированных в воде H_2O

Совместно: Объединенный институт ядерных исследований (Дубна); «Horia Hulubei» National Institute of Physics and Engineering (Bucharest, Romania); «Politehnica» University of Bucharest (Bucharest, Romania)



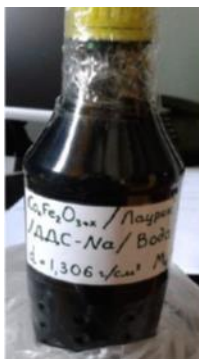
Магнитные жидкости на основе однодоменных магнитных наночастиц ферритов-шпинели, диспергированных в различных жидких средах, представляют определённый практический и научный интерес.

В работе представлено экспериментальное исследование феррожидкости на основе магнитных наночастиц из молекул CoFe_2O_4 , диспергированных в воде H_2O с концентрацией наночастиц 3%.

В данном исследовании было определено, что структура и величина намагниченности феррожидкости зависит от вязкости самой жидкости. Показано, что при комнатной температуре (290 К) и внешнем магнитном поле 527 Гс наблюдаемая дополнительная намагниченность составляет ~ 20 Гс.

В небольшой доле исследуемого образца (~20%) наблюдается отрицательная намагниченность (диамагнетизм). При низкой температуре (~30 К) образец в магнитном поле ведёт себя как парамагнетик.

Впервые экспериментально с помощью μSR-метода измерено магнитное поле внутри и ближайшей окрестности наночастицы CoFe_2O_4 , которое составляет $1,96 \pm 0,44$ кГс, таким образом произведено прямое измерение намагниченности наноразмерного объекта.



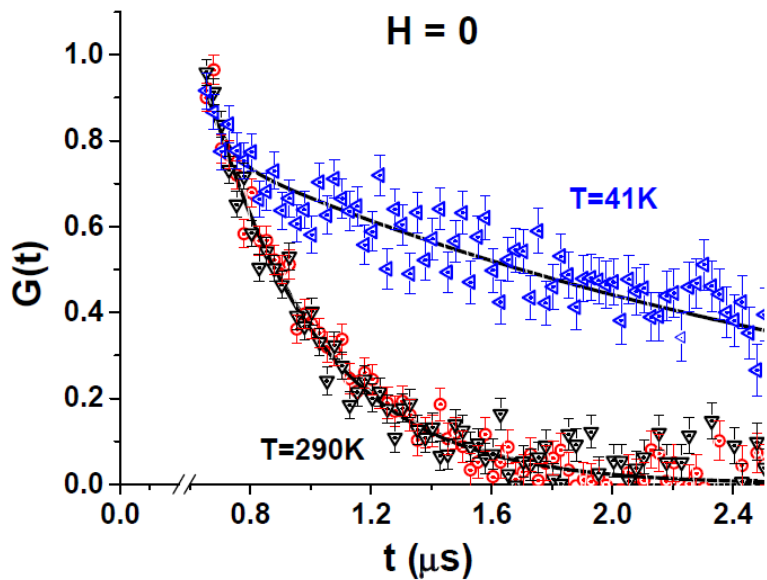


Рис. 1. Функция релаксации $G(t)$ в магнитном поле $H=0$ при $T=41\text{ K}$ (треугольники) и $T=290\text{ K}$ (светлые точки и квадраты).

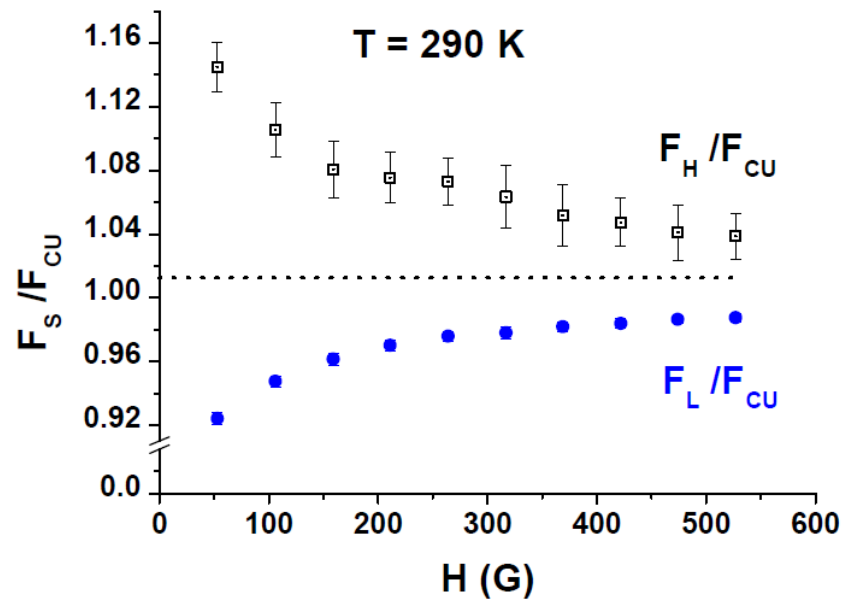


Рис. 2. Зависимость частот F_s ($s=H, L$) прецессии спина мюона в образце от величины внешнего магнитного поля при температуре 290 K .

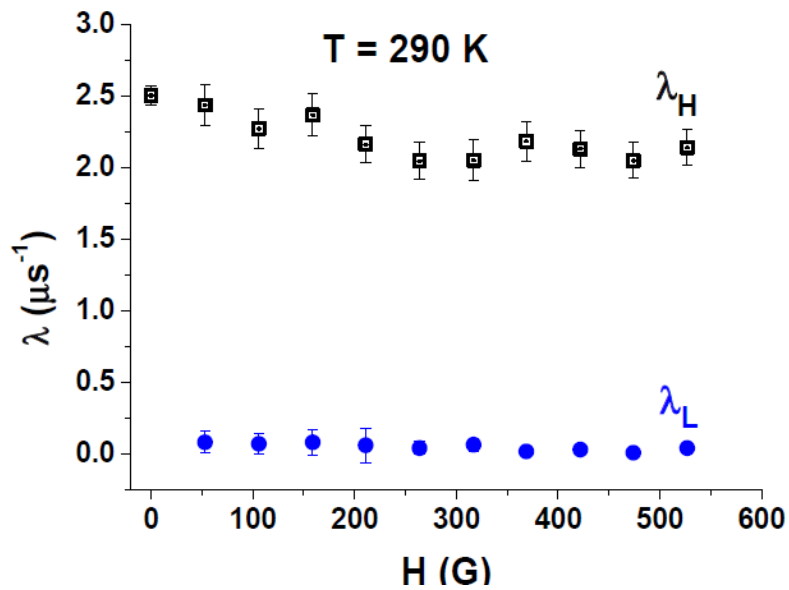


Рис. 3. Зависимость скоростей релаксации мюона от величины внешнего магнитного поля при температуре 290 K .

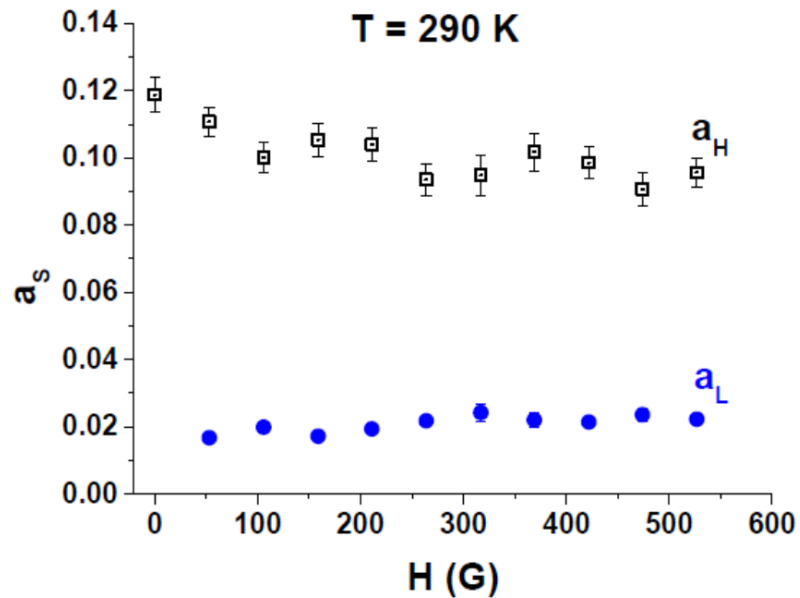


Рис. 4. Зависимость амплитуд прецессии спина мюона (заселённостей) от величины внешнего магнитного поля при температуре 290 K .

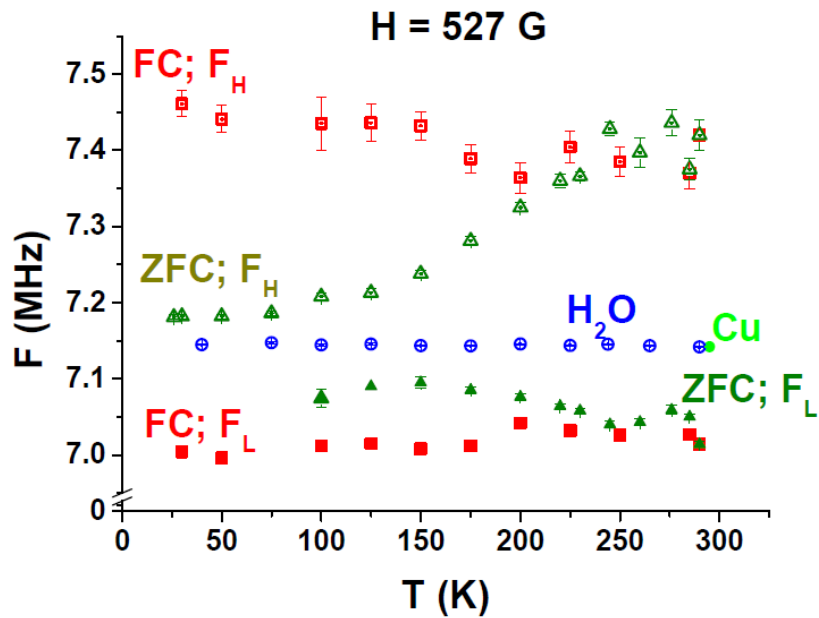


Рис. 5. Температурная зависимость частот прецессии спина мюона в магнитном поле $H = 527$ Гс .

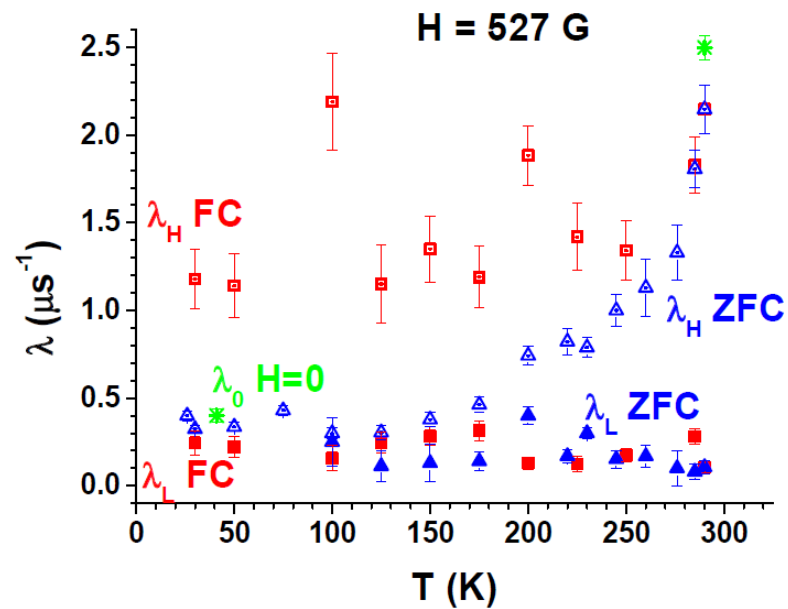


Рис. 6. Температурная зависимость скоростей релаксации поляризации мюона λ_H и λ_L , в магнитном поле $H = 527$ Гс.

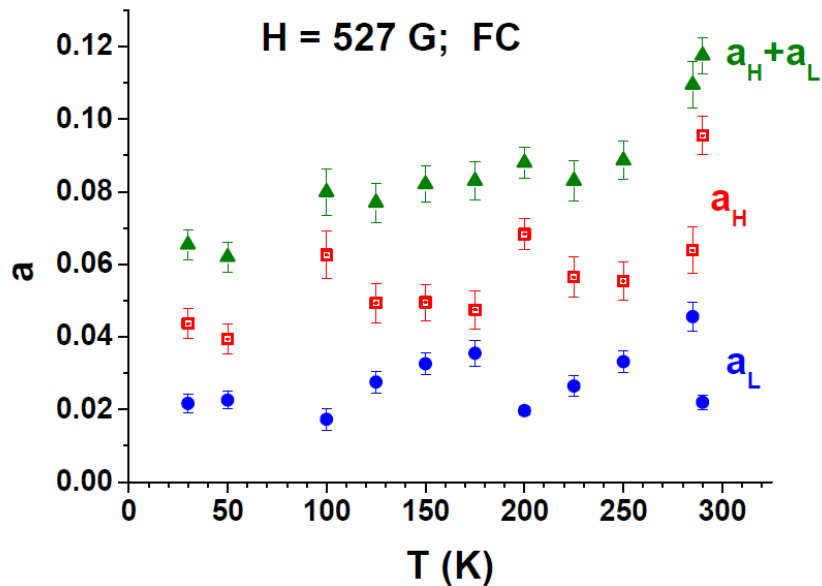


Рис. 7. Температурная зависимость заселённости верхней F_H и нижней F_L частот в магнитном поле $H = 527$ Гс в FC-режиме.

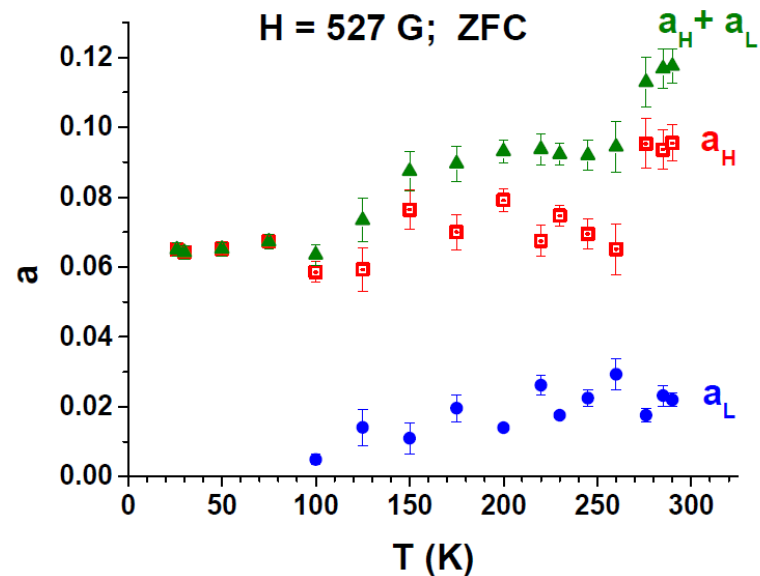


Рис. 8. Температурная зависимость заселённости верхней F_H и нижней F_L частот в магнитном поле $H = 527$ Гс в ZFC-режиме.

μ SR-исследование магнитных свойств феррожидкости с 3% концентрацией наночастиц CoFe_2O_4 , диспергированных в воде H_2O

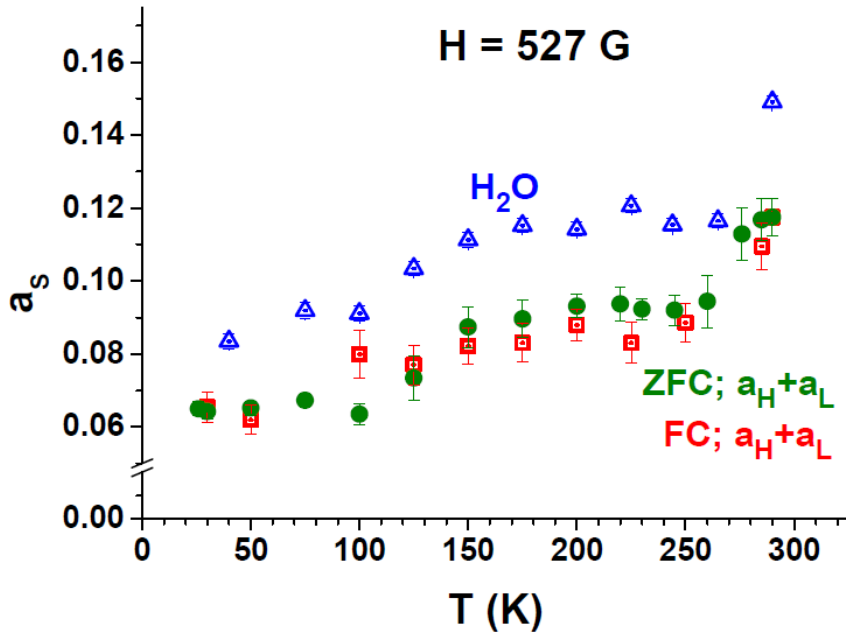
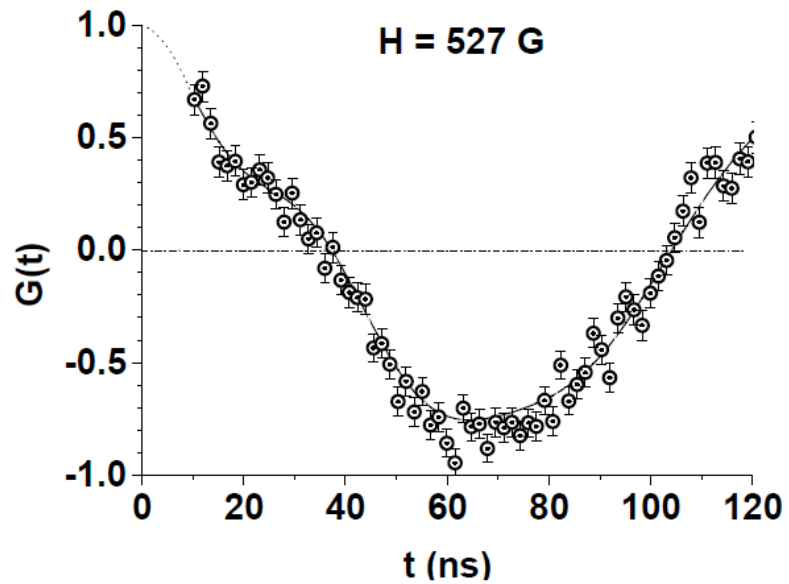


Рис. 9. Температурные зависимости доли асимметрии мюонной компоненты в поперечном магнитном поле $H = 527 \text{ Гс}$ в FC-режиме ($a_H + a_L$ – квадраты), в ZFC-режиме ($a_H + a_L$ – точки) и треугольники – для образца из воды H_2O .

Сумма парциальных амплитуд во всех температурных точках почти на 20% меньше амплитуды прецессии, полученной на воде (H_2O) (Рис. 9). Такое отличие можно объяснить тем, что часть мюонов останавливается в самих наночастицах, где магнитное поле значительно больше внешнего магнитного поля $H = 527 \text{ Гс}$.



На рисунке приведена функция релаксации $G(t)$ для суммы спектров в диапазоне температур $26 \div 100 \text{ К}$, полученных в ZFC-режиме во внешнем магнитном поле $H = 527 \text{ Гс}$. Удовлетворительное описание её получено в рамках двухчастотной гипотезы: дополнительно к основному вкладу с амплитудой $a_L = 0.099 \pm 0.001$, скоростью релаксации $\lambda_L = 0.35 \pm 0.03 \text{ мкс}^{-1}$ и частотой $F_L = 7.167 \pm 0.002 \text{ МГц}$ ($H = 528.76 \pm 0.14 \text{ Гс}$) имеется небольшой вклад с параметрами $a_H = 0.027 \pm 0.007$, $\lambda_H = 24 \pm 6 \text{ мкс}^{-1}$ и $F_H = 26.5 \pm 0.6 \text{ МГц}$ ($H = 1.96 \pm 0.44 \text{ кГс}$). Этот вклад связан с остановками мюонов в ближайшей окрестности наночастиц и внутри наночастиц.



ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
«ПЕТЕРБУРГСКИЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ им. Б. П. КОНСТАНТИНОВА
НАЦИОНАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО ЦЕНТРА «КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»



Вторая премия

на конкурсе научных работ 2021 года

в области физики конденсированного состояния

присуждена работе

С.И. Воробьев, С.Г. Барсов, А.Л. Геталов, Е.Н. Комаров,
С.А. Котов, Г.В. Щербаков, М. Балашою, К.И. Грицай,
В.Н. Дугинов, Д. Бузату, К. Стан и др.

Исследование магнитных свойств феррожидкости
с помощью поляризованных мюонов

Директор



С.Е. Горчаков



Результаты исследований феррожидкости опубликованы:

М. Балашою, С.Г. Барсов, Д. Бика, Л. Векас, С.И. Воробьев, К.И. Грицай, В.Н. Дугинов, В.А. Жуков, Е.Н. Комаров, В.П. Коптев, С.А. Котов, Т.Н. Мамедов, С.М. Микиртычьянц, К. Петреску, Г.В. Щербаков. *Влияние магнитных наночастиц на поведение поляризованных положительных мюонов в феррожидкости на основе Fe_3O_4 в среде D_2O* . Препринт ПИЯФ–2745, Гатчина–2007, 27 стр.

М. Балашою, С.Г. Барсов, Д. Бика, Л. Векас, С.И. Воробьев, К.И. Грицай, В.Н. Дугинов, В.А. Жуков, Е.Н. Комаров, В.П. Коптев, С.А. Котов, Т.Н. Мамедов, К. Петреску, Г.В. Щербаков. *Исследование свойств наноструктурированных магнитных систем на основе Fe_3O_4 μ SR-методом*. Препринт ОИЯИ Р14-2008-89, Дубна, 2008, 9 стр.

М. Балашою, С.Г. Барсов, Д. Бика, Л. Векас, С.И. Воробьев, К.И. Грицай, В.Н. Дугинов, В.А. Жуков, Е.Н. Комаров, В.П. Коптев, С.А. Котов, Т.Н. Мамедов, К. Петреску, Г.В. Щербаков. *Исследование свойств наноструктурированных магнитных систем на основе Fe_3O_4 μ SR-методом*. Письма в ЖЭТФ, том 88, вып. 3, 2008, стр. 243-247.

M. Balasoïu, S.G. Barsov, D. Bica, L. Vekas, S.I. Vorobyev, K.I. Gritsaj, V.N. Duginov, V.A. Zhukov, E.N. Komarov, V.P. Koptev, S.A. Kotov, T.N. Mamedov, C. Petrescu, and G.V. Shcherbakov. *μ SR Study of the properties of Fe_3O_4 -based nanostructured magnetic systems*. JETP Letters, 2008, Vol. 88, № 3, pp. 210 – 213.

T.N. Mamedov, D.S. Andrievskii, M. Balasoïu, K.I. Gritsaj, V.N. Duginov, A.L. Getalov, E.N. Komarov, S.A. Kotov, A.E. Moroslip, I.I. Pavlova, V.G. Scherbakov, S.I. Vorob'ev, C. Stan. *Magnetic properties investigation of a ferrofluid with cobalt ferrite nanoparticles using polarized muons*. Journal of optoelectronics and advanced materials, 2015, Vol. 17, No. 7-8, July–August p. 1086-1091.

С.И. Воробьев, А.Л. Геталов, Е.Н. Комаров, С.А. Котов, Г.В. Щербаков. *Исследование магнитных свойств феррожидкости с наночастицами $CoFe_2O_4$ с помощью μ SR-метода*. Сборник «Основные результаты научной деятельности 2015». - Гатчина Ленинградской обл.: Издательство ФГБУ «ПИЯФ» НИЦ «Курчатовский институт», 2016. Стр. 52-53.

S.I. Vorob'ev, M. Balasoïu, D. Buzatu, A.L. Getalov, K.I. Gritsai, V.N. Duginov, E.N. Komarov, S.A. Kotov, C. Stan, G.V. Scherbakov. *μ SR-study of a 3% $CoFe_2O_4$ nanoparticle concentration ferrofluid*. Magnetochemistry, 2021, 7, 104.

С.И. Воробьев, М. Балашою, Д. Бузату, А.Л. Геталов, К.И. Грицай, В.Н. Дугинов, Е.Н. Комаров, С.А. Котов, К. Стан, Г.В. Щербаков. *Исследование феррожидкости с 3%-ной концентрацией наночастиц $CoFe_2O_4$ с помощью поляризованных мюонов*. Препринт НИЦ «Курчатовский институт» - ПИЯФ–3049, Гатчина–2021, 14 стр.



Результаты исследований феррожидкости доложены:

А.Л. Геталов. μ SR-исследования магнитной жидкости с трёхпроцентной концентрацией наночастиц $CoFe_2O_4$. Семинар ОФВЭ, 28.01.2020 г.

μ SR-исследование феррожидкости с 3% концентрацией наночастиц $CoFe_2O_4$. Семинар ЛЯП им. В.П. Дзелепова ОИЯИ, 24.12.2020 г.

С.И. Воробьев, А.Л. Геталов. Исследование материалов μ SR-методом на синхротроне ПИЯФ. Семинар ОФВЭ, 09.04.2016 г.

Исследование наноструктурированных магнитных систем. Семинар ЛЯП ОИЯИ, 15.05.2017 г.

M. Balasoiu, T.N. Astafeva, **S.G. Barsov**, I. Bica, V.N. Duginov, D. Flueraşu, **A.L. Getalov**, K.I. Gritsay, **E.N. Komarov**, **S.A. Kotov**, S.N. Lysenko, **G.V. Scherbakov**, C. Stan, **Vorob'ev S.I.** *Investigation of magnetic structure of the ferrofluid with cobalt ferrite nanoparticles by polarized muons.* **International Conference on Magnetic Fluids – ICMF 2019**, Sorbonne Université in Paris (France) July 8-12, 2019.

Duginov V.N., **Andrievskii D.S.**, Balasoiu M., Flueraşu D., **Getalov A.L.**, Gritsay K.I., **Komarov E.N.**, **Kotov S.A.**, Mamedov T.N., **Moroslip A.E.**, **Scherbakov G.V.**, Stan C., **Vorob'ev S.I.** *Study of the ferroliquids with cobalt ferrite nanoparticles using polarized muons.* **Moscow International Symposium on Magnetism**, 1 – 5 July 2017, Book of Abstracts p.823, M.V. Lomonosov Moscow State University (2017).

Mamedov T.N., **Andrievskii D.S.**, Balasoiu M., Gritsay K.I., Duginov V.N., **Getalov A.L.**, **Komarov E.N.**, **Kotov S.A.**, **Moroslip A.E.**, **Pavlova I.I.**, **Scherbakov G.V.**, **Vorob'ev S.I.**, Stan C. *Magnetic properties investigation of a ferrofluid with cobalt ferrite nanoparticles using polarized muons.* Сборник тезисов **Второй международной летней школы и совещания по физике комплексных и магнитных мягких систем: физико-механические и структурные свойства**, Дубна, 29 сентября – 3 октября 2014 г.

T.N. Mamedov, M. Balasoiu, **S.G. Barsov**, D. Bica, K.I. Gritsay, V.N. Duginov, **E.N. Komarov**, **V.P. Koptev**, **S.A. Kotov**, C. Petrescu, **G.V. Shcherbakov**, L. Vekas, **S.I. Vorobyev.** μ SR *Study of magnetic fluids based on the Fe_3O_4 and $CoFe_2O_4$ nanoparticles dispersed in water.* **2nd European Nuclear Physics Conference**, IFIN-HH, Bucharest, Romania, 2012.

T.N. Mamedov, M. Balasoiu, **S.G. Barsov**, D. Bica, K.I. Gritsay, V.N. Duginov, **E.N. Komarov**, **V.P. Koptev**, **S.A. Kotov**, C. Petrescu, **G.V. Shcherbakov**, L. Vekas, **S.I. Vorobyev.** μ SR *study of the magnetic system based on Fe_3O_4 and $CoFe_2O_4$ nanoparticles dispersed in water.* 2011. **Structural aspects of biocompatible ferroc colloids**., FLNP ОИЯИ и NRC.

В.Н. Дугинов, М. Балашою, **С.Г. Барсов**, Д. Бика, Л. Векас, **С.И. Воробьев**, К.И. Грицай, В.А. Жуков, **Е.Н. Комаров**, **В.П. Коптев**, **С.А. Котов**, Т.Н. Мамедов, К. Петреску, **Г.В. Щербakov.** **ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАМОРОЖЕННОЙ ФЕРРОЖИДКОСТИ НА ОСНОВЕ Fe_3O_4 μ SR-МЕТОДОМ.** 13-я Международная Плесская Конференция по нанодисперсным магнитным жидкостям, Министерство образования и науки РФ, Плес, Россия. Изд-во Ивановского государственного энергетического университета. Сборник научных трудов. Т.1. (2008), Стр. 63-68.

Предварительные μ SR-эксперименты по изучению распределения магнитных однодоменных наночастиц CoFe_2O_4 в эластомерной матрице

Полимеризация образцов производилась в отсутствии магнитного поля и в магнитном поле 80 кА/м

Sample volume = 32cm^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 $H = 80\text{kA/m}$.

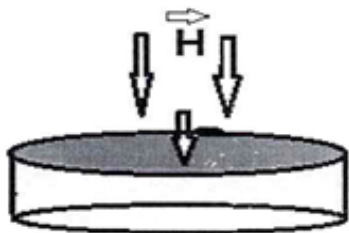


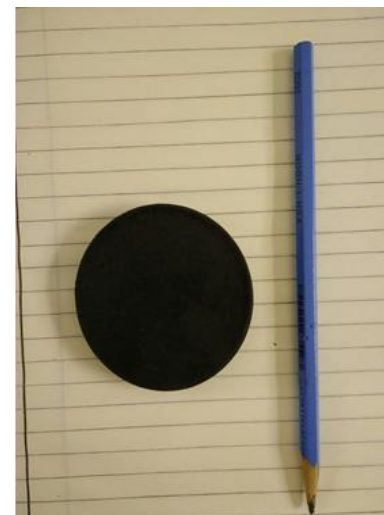
Рис. 1. Образцы эластомеров.

В отличие от феррожидкостей, в эластомерной матрице направление легкой оси магнитных наночастиц друг относительно друга и с макроскопическим образцом фиксированы и не могут быть изменены внешним магнитным и электрическим полями. Однако направление легкой оси наночастиц в образце зависит от условий изготовления образца эластомера. Применение внешнего магнитного поля в процессе отверждения образца может изменить распределение частиц в объеме образца и распределение ориентации легкой оси наночастиц в пространстве.

Магнитные и другие свойства, представляющие интерес для практического применения эластомера, могут варьироваться в зависимости от концентрации и распределения наночастиц в объеме образца, а также от простого пространственного распределения наночастиц.



Фотография образца P_0
(0% наночастиц CoFe_2O_4)

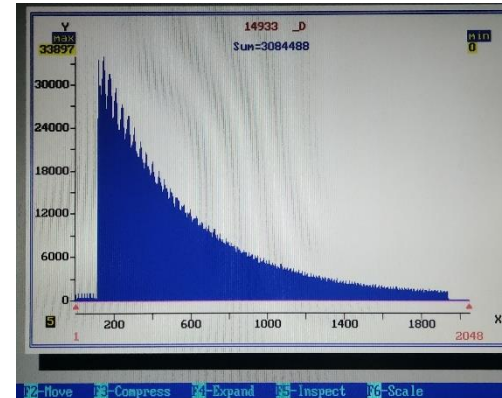
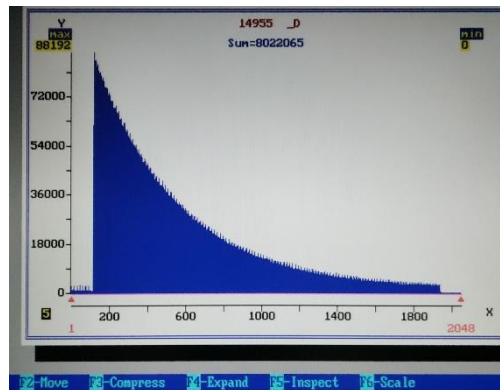
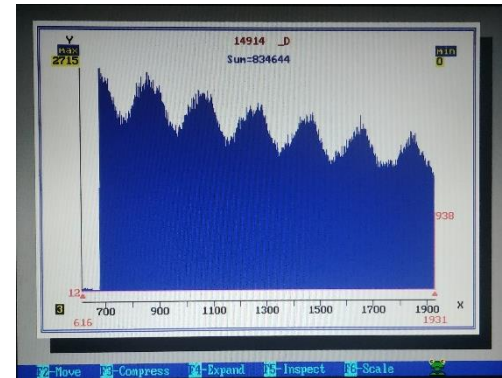
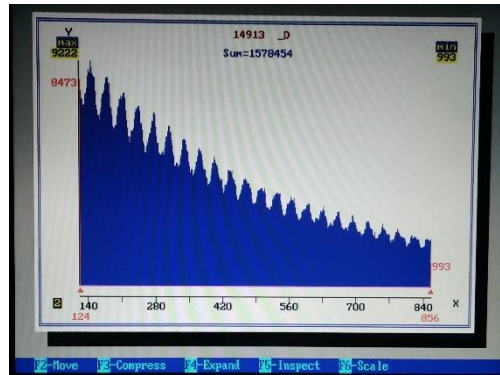
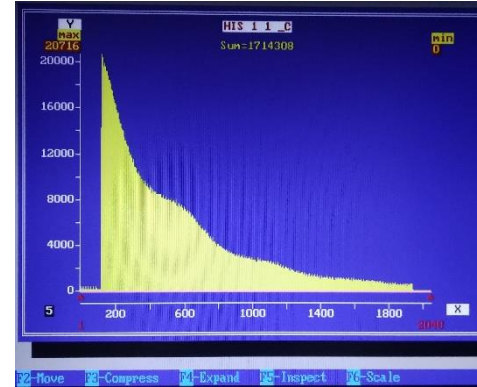
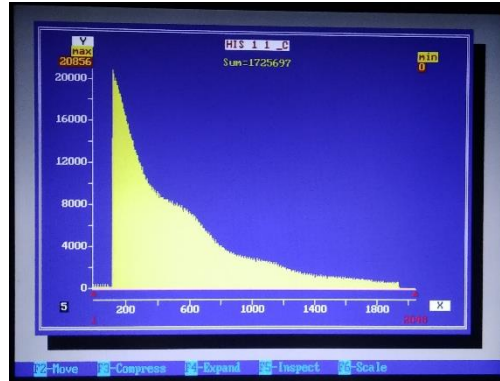


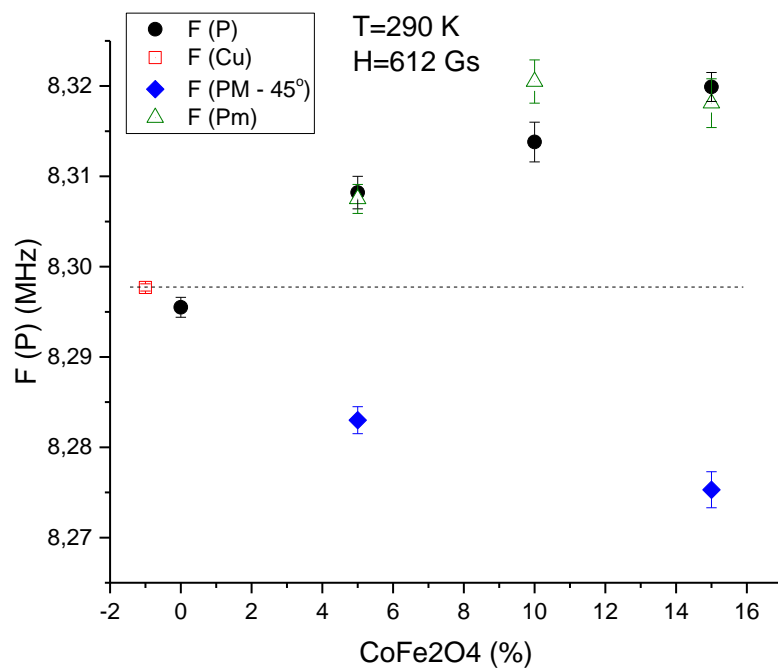
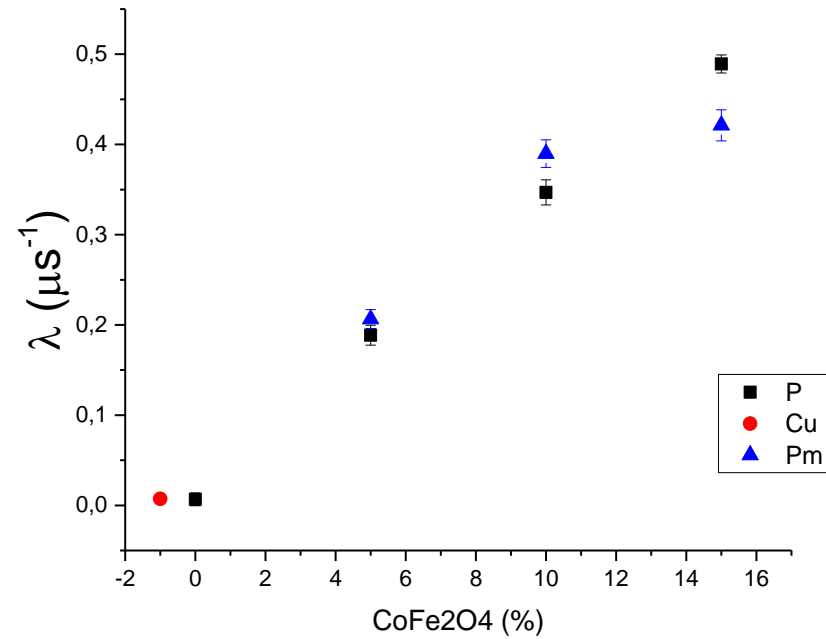
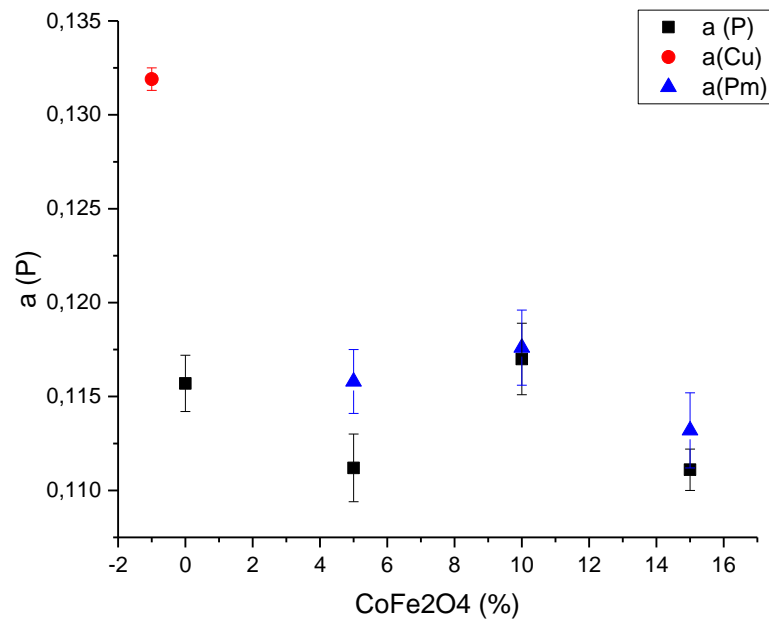
Фотография образца P_4
(15% наночастиц CoFe_2O_4)

Было проведено несколько экспериментальных сеансов на мюонном канале синхроциклотрона СЦ-1000 по исследованию образцов. Для каждого образца измерения проводились во внешнем поперечном магнитном поле 29, 58, 116, 174, 232, 290, 348, 406, 464 и 527 Гс.

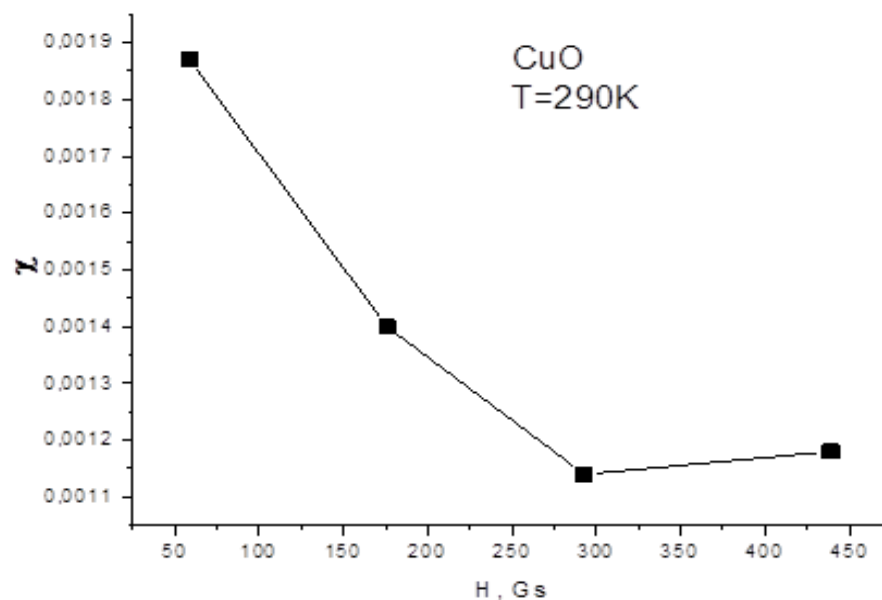
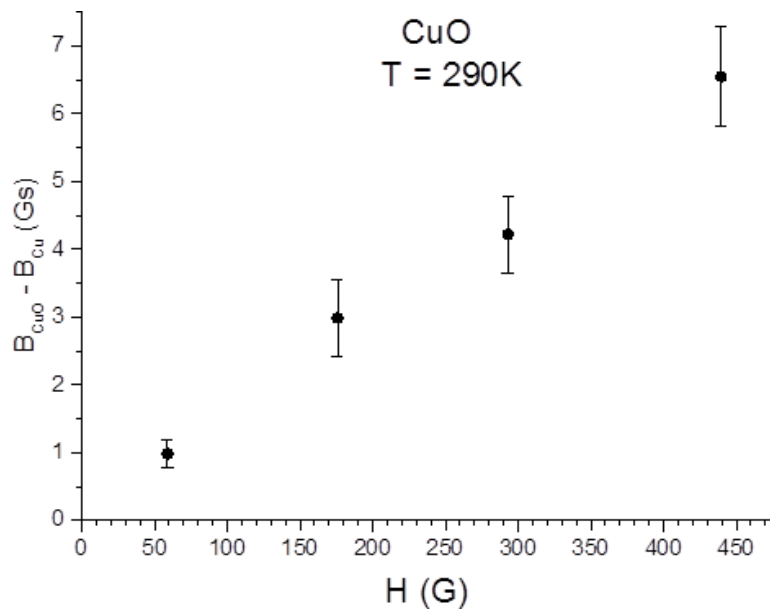
Для каждой полевой точки набрана статистика 1-3 млн. полезных событий.

Идёт обработка данных.

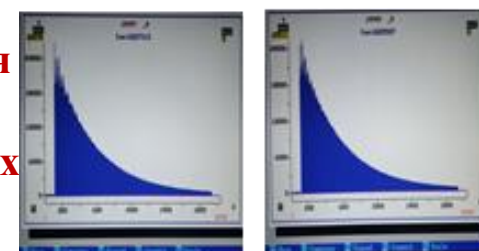
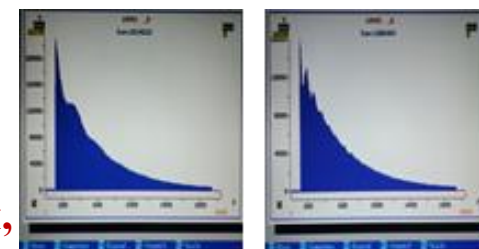




Предварительные μ SR-эксперименты по исследованию наноструктурного образца CuO



Образец оксида меди CuO впервые был изготовлен в ПИЯФ по новой технологии путем электродугового испарения графитового электрода, содержащего медь. Получены предварительные результаты измерения магнитной восприимчивости χ . Микроскопической структуры образца в зонах электроотрицательных ионов кислорода, где предпочтительно останавливается мюон.



Исследования будут продолжены для температур ниже комнатной, для этой цели изготовлена и вводится в эксплуатацию криогенная установка замкнутого цикла. Параллельно будут проведены измерения магнитной восприимчивости χ на имеющемся в лаборатории криомагнетометре, позволяющем проводить исследования в магнитных полях до 1 кГс при температурах 180-300 К.



С Новым годом!

adama