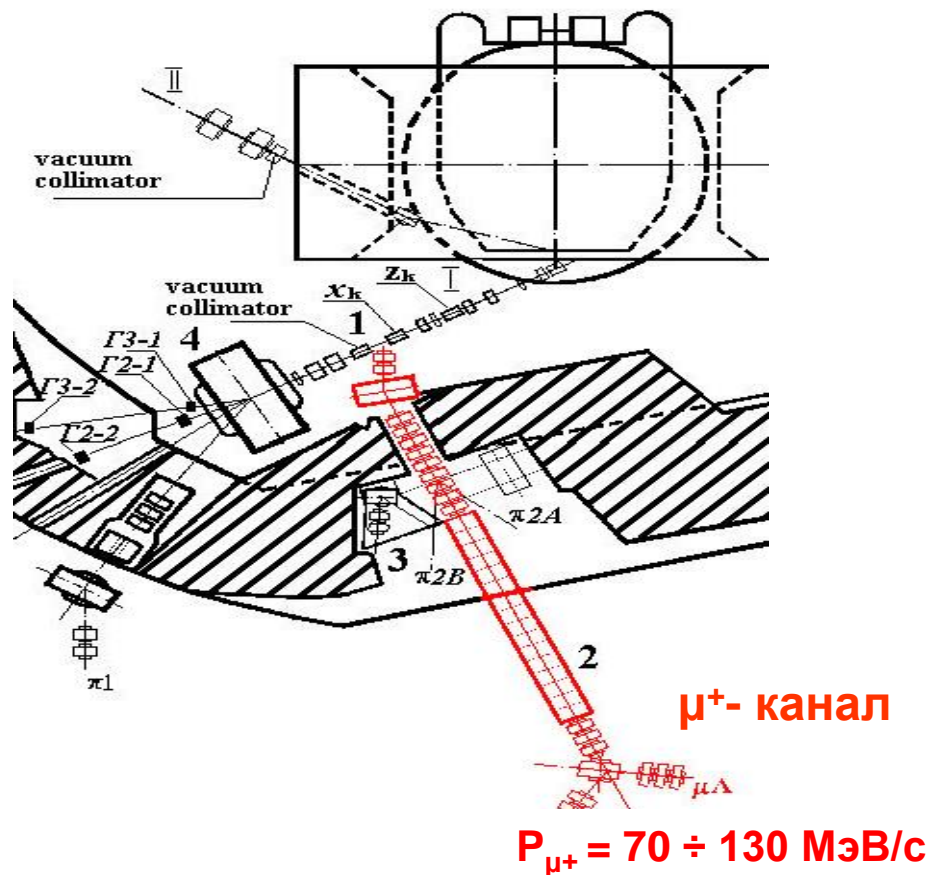
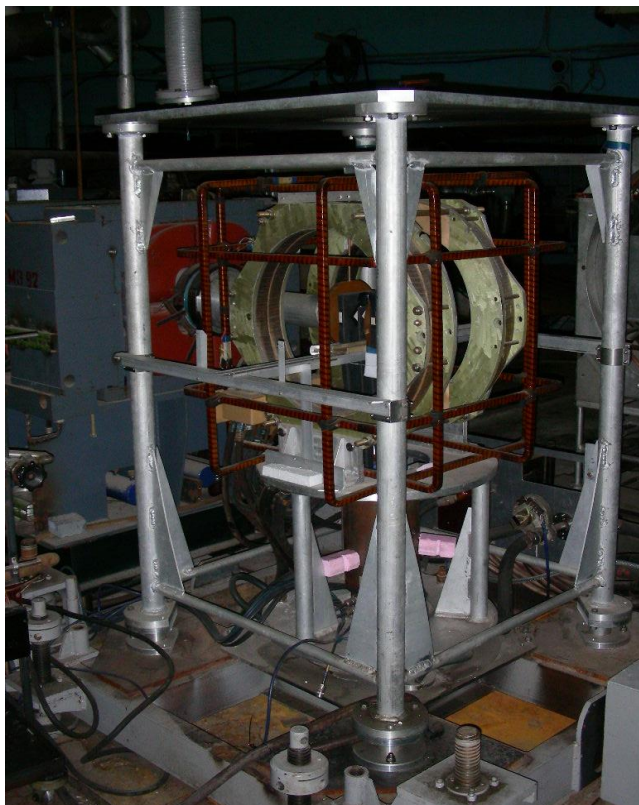


Лаборатория мезонной физики конденсированных сред в 2017 году



Штат лаборатории МФКС:

Воробьев С.И.	– и.о. зав. лаб., к.ф.-м.н.
Щербаков Геннадий Васильевич	– с.н.с.
Геталов Александр Леонидович	– с.н.с., к.ф.-м.н.
Комаров Евгений Николаевич	– с.н.с., к.ф.-м.н.
Котов Сергей Арестович	– с.н.с.
Барсов Сергей Григорьевич	– с.н.с., к.ф.-м.н.
Микиртычьянц Сергей Михайлович	– с.н.с., к.ф.-м.н.
Дзюба Алексей Александрович	– с.н.с., к.ф.-м.н.
Андриевский Дмитрий Сергеевич	– аспирант СПбГУ (0,5 лаб.-исслед.)
Виноградова Людмила Леонидовна	– ст.лаб.
Чёрная Елена Николаевна	– ст.лаб.

Уволились в 2017 году:

Ельцов Леонид Дмитриевич	– стажер-исследователь
Вальдау Юрий Валерьевич	– н.с.
Шиков Егор Николаевич	– м.н.с.

ЛМФКС: Сотрудничество с ИКР(FZ-Juelich)

ANKE-collaboration: Обработка данных, полученных в экспериментах на спектрометре ANKE (этап 2017 г.)

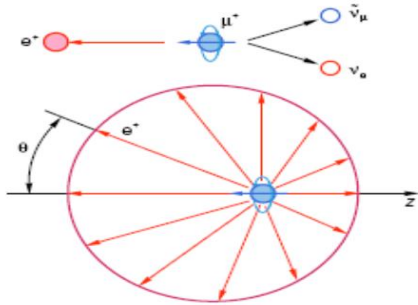
В процессе обработки данных по упругому рп-рассеянию в квазисвободной кинематике выполнена оценка систематической погрешности анализирующей способности и получены сечения квазисвободного рассеяния в области малых углов.

Подготовлен текст статьи и проведено его обсуждение в коллаборации ANKE.

Завершение сотрудничества ЛМФКС с ИКР(FZ-Juelich) планируется в первом полугодии 2018 года.

Проведение работы по устранению неточностей, обнаруженных при обсуждении, после чего статья будет направлена для публикации.

- 1. Spin tune mapping as a novel tool to probe the spin dynamics in storage ring.* A. Saleev et al. Phys. Rev. Accel. Beams, **20** (2017) 072801.
- 2. Phase locking the spin precession in a storage ring.* N. Hempelmann et al. Phys. Rev. Lett., **119** (2017) 014801.



Мюонный метод исследования вещества берет свое начало еще с работы Т. Ли и Ч. Янга, где впервые рассматривался вопрос о несохранении пространственной и зарядовой чётности в слабых взаимодействиях и предлагалось экспериментаторам искать нарушение ранее «незыблемого» закона сохранения природы в β -распаде поляризованных ядер и в распадах мезонов и гиперонов. Опыты, выполненные Ц. Ву, Е. Амблером и др. по изучению β -распада поляризованных ядер ^{60}Co и Р. Гарвина, Л. Лидермана и М. Вейнриха по изучению углового распределения электронов в распаде мюона, явились первыми экспериментальными доказательствами справедливости нарушения закона чётности в слабых взаимодействиях.

Но в 1957 году Р.Л. Гарвин, Л.М. Ледерман и Г. Вейнрих и Дж. И. Фридман, В.Л. Телегди, которые открыли несохранение четности в $\pi \rightarrow \mu \rightarrow e$ распаде, *вряд ли могли предположить, что этот фундаментальный результат в физике элементарных частиц положит начало новому методу изучения свойств вещества* – μ SR-методу. Т.е. в 2017 году μ SR-методу 60 лет!

Суть мюонного метода исследования вещества заключается в возможности изучения локальных микрополей в веществе с помощью легкой нестабильной заряженной элементарной частицы – мюона (как положительно заряженного μ^+ , так и имеющего отрицательный электрический заряд μ^-). Для изучения свойств материи наиболее перспективны положительно заряженные мюоны.

В настоящее время в России существует единственная работающая μ SR-установка, расположенная на выходе мюонного канала синхроциклотрона СЦ-1000, которому в ноябре этого года исполнилось 50 лет с момента запуска.

В ПИЯФ μ SR-метод начал развиваться после 1976 года, когда был пущен в эксплуатацию мюонный канал на синхроциклотроне СЦ-1000, тогда и начались первые экспериментальные исследования. μ SR-методу в ПИЯФ, уже 40 лет!



ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ в 2017 году:

1. Продолжались исследования фазовых переходов и распределения локальных внутренних магнитных полей в образце $Tb_{0,95}Vi_{0,05}MnO_3$ и $TbMnO_3$.

Совместно с ФТИ им. А.Ф.Иоффе РАН, Санкт-Петербург.

Д.С. Андриевский, С.И. Воробьев, А.Л. Геталов, Е.И. Головенчиц, Е.Н. Комаров, С.А. Котов, В.А. Санина, Г.В. Щербаков. *Аномально сильная релаксация поляризации мюонов в магнитоупорядоченном и парамагнитном состояниях мультиферроика $TbMnO_3$. Письма в ЖЭТФ*, 2017, том 106, вып. 5, с. 275 – 281.
D.S. Andrievskii, S.I. Vorob'ev, A.L. Getalov, E.I. Golovenchit, EN. Komarov, S.A. Kotov, V.A. Sanina, and G.V. Shcherbakov. *Anomalously strong relaxation of the polarization of muons in the magnetically ordered and paramagnetic states of the $TbMnO_3$ multiferroic. JETP Letters*, 2017, Vol. 106, № 5, pp. 295–301.

2. Исследование наноструктурированных магнитных систем.

Продолжались исследования изменения частоты прецессии мюона в феррожидкости в зависимости:

от концентрации магнитных наночастиц $CoFe_2O_4$ диспергированных в воде H_2O .

Совместно с ОИЯИ (Дубна);

Horia Hulubei National Institute of Physics and Nuclear Engineering, Bucharest, Romania;

Center for Fundamental and Advanced Technical Research, Timisoara, Romania;

Department of Physics Polytechnika University of Bucharest, Romania.

Подготовлена статья в **Письма в ЖЭТФ**: *Magnetic properties of ferrofluids with the $CoFe_2O_4$ nanoparticles probed with polarized muons*. T.N. Mamedov, D.S. Andrievskii, M. Balasoiiu, A.L. Getalov, K.I. Gritsaj, V.N. Duginov, E.N. Komarov, S.A. Kotov, G.V. Shcherbakov, C. Stan, S.I. Vorob'ev.

TbMnO₃

TbMnO₃ имеет при комнатной температуре орторомбическую симметрию (пр.гр. *Pbnm*) с параметрами решетки $a = 5,3 \text{ \AA}$, $b = 5,68 \text{ \AA}$, $c = 7,49 \text{ \AA}$. Ионы Mn³⁺ находятся в октаэдрическом кислородном окружении и содержат в 3d-оболочке три локализованных t_{2g} -электрона и один делокализованный e_g -электрон.

Основное состояние иона Tb³⁺ (7F_6 , $S=3$, $L=3$) характеризуется большим магнитным моментом ($J=9 \mu_B$), в который вносят вклад как спиновый, так и орбитальный моменты, и имеется сильная спин-орбитальная связь. Обычно ионы Tb³⁺ описываются в крайне сильном анизотропном изинговском приближении, жестко фиксирующем ориентацию их моментов в плоскости ab .

Магнитная структура TbMnO₃ очень сложная. Для нее характерны синусоидальные и циклоидные спиновые состояния в Mn³⁺-подсистеме, а также наличие упорядочения в подсистеме ионов Tb³⁺, связанных с Mn³⁺-подсистемой Tb-Mn обменным взаимодействием.

Магнитная структура подробно была изучена в работах по рассеянию неполяризованных и поляризованных нейтронов, а также по рентгеновскому резонансному магнитному рассеянию.

TbMnO₃ испытывает три фазовых перехода:

-При температуре $T_N = 42 \text{ K}$ устанавливается дальний магнитный порядок в виде синусоидальной антиферромагнитной структуры вдоль оси b .

-При температуре $T_S = 28 \text{ K}$ магнитная структура Mn-подсистемы трансформируется в спиральную циклоиду с вращением спинов в bc -плоскости по мере смещения вдоль b -оси и упорядоченных антиферромагнитно вдоль c -оси. Одновременно при $T \leq T_S$ появляется упорядочение моментов ионов Tb³⁺ с той же периодичностью, что и для спинов ионов Mn³⁺. В Tb³⁺-подсистеме при этом появляется магнитный момент вдоль оси c . При $T_S \approx T_{FE}$ также возникает сегнетоэлектрическое упорядочение вдоль оси c .

-Включение Tb-Tb обмена ниже $T_{N2} = 7 \text{ K}$ приводит к частичной перестройке упорядоченных Mn³⁺- и Tb³⁺- подсистем.

Поликристаллический образец $TbMnO_3$ изучался ранее с помощью μSR -метода [А.А. Nugroho, Risdiana, N. Mufti et al. Physica **B404**, 785 (2009)]. Но методические ограничения не позволили авторам этой работы получить надёжные результаты в области температур магнитоупорядоченного состояния.

Нами с помощью μSR -метода исследован керамический образец $TbMnO_3$ в области температур от 15 K до 290 K. Получена функция релаксации поляризации мюона и найдены ее параметры (асимметрия, релаксация поляризации и частота прецессии спина мюона во внутреннем магнитном поле образца).

Результаты таких исследований оказались качественно отличными от тех, которые были получены для RMn_2O_5 .

В $TbMnO_3$ в магнитоупорядоченном состоянии (ниже температуры $T_N = 42$ K) было обнаружено резкое усиление релаксации поляризации мюонов, затрудняющее исследование необходимостью длительных экспозиций в каждой температурной точке измерений. По этой причине удалось получить лишь оценку параметров релаксации поляризации мюонов, усредненных по области 15 - 30 K.

Выше температуры $T_N = 42$ K в парамагнитной фазе вплоть до 150 K наблюдаемые параметры релаксации поляризации мюонов свидетельствовали о том, что состояние образца не является обычным парамагнитным состоянием. Его удалось описать лишь в предположении существования двухфазного состояния образца, одна из фаз которого содержит ограниченные невзаимодействующие магнитоупорядоченные области с повышенной релаксацией поляризации мюонов во внутренних полях этих областей. Истинное парамагнитное состояние наблюдалось лишь при температурах $T > 150$ K.

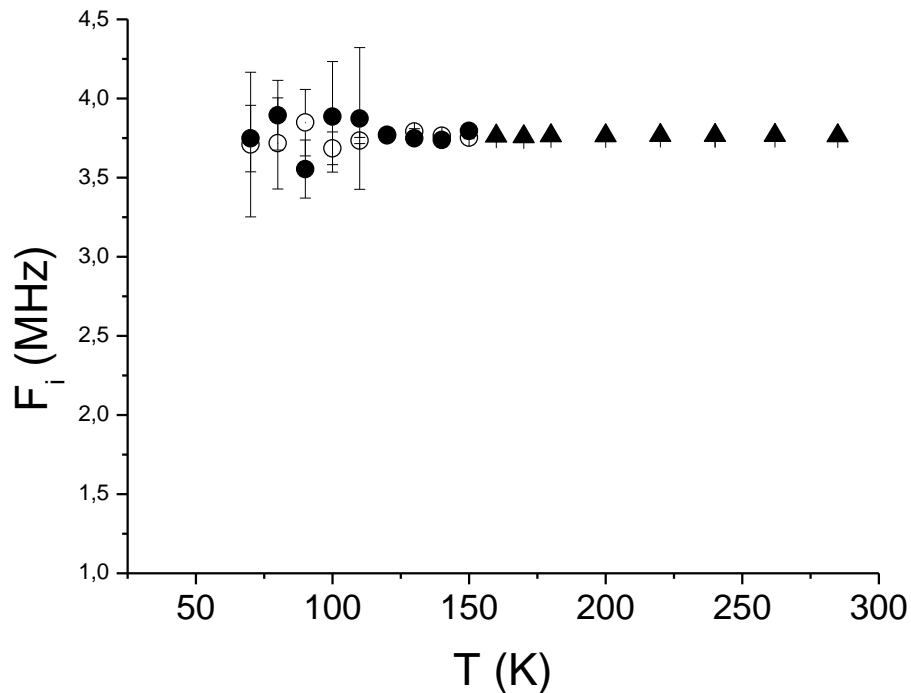


Рис. 1. Температурная зависимость частот F_i ($i = 1, 2$) прецессии магнитного момента мюона во внешнем магнитном поле ($H = 280$ Гс; $T > 150$ К – темные треугольники; $T < 150$ К: $i = 1$ – светлые точки; $i = 2$ – темные точки).

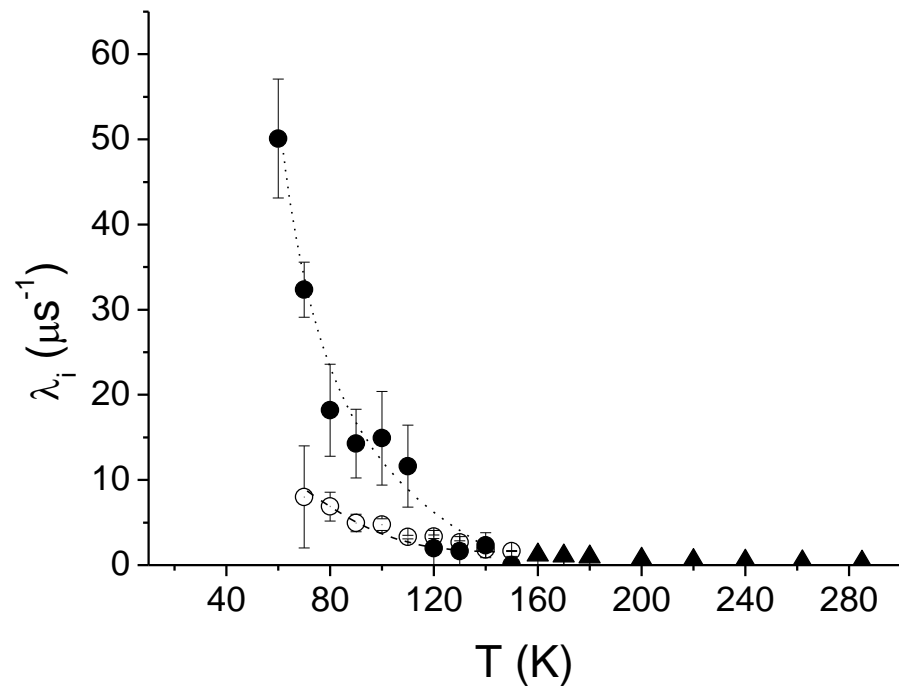


Рис. 2. Температурная зависимость параметра релаксации λ во внешнем магнитном поле ($H = 280$ Гс; $T > 150$ К – темные треугольники; $T < 150$ К: $i = 1$ – светлые точки; $i = 2$ – темные точки).

Наблюдается anomalно сильная релаксация поляризации мюонов в магнитоупорядоченном и парамагнитном состояниях мультиферроика TbMnO_3

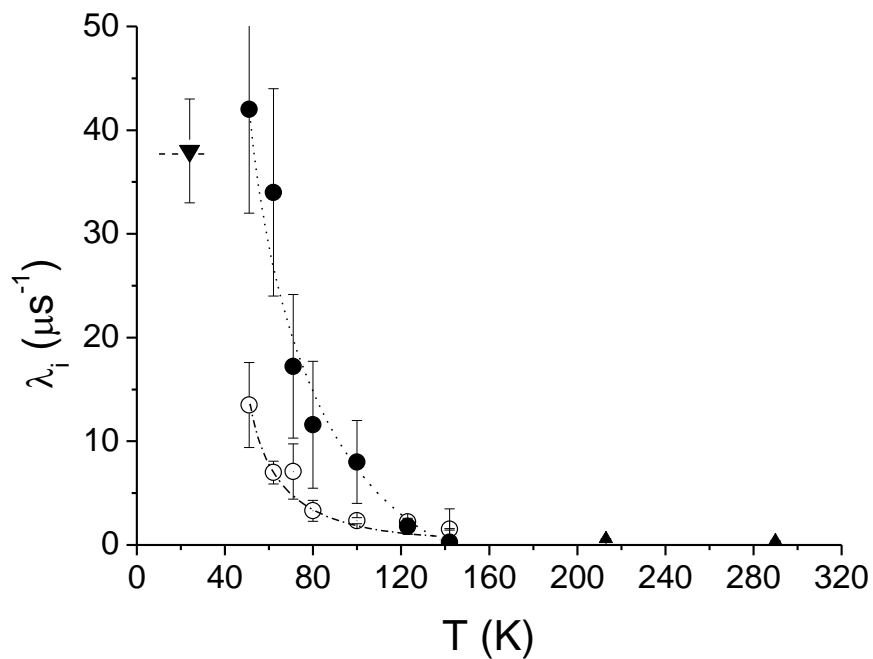


Рис. 3. Температурная зависимость параметра релаксации λ в нулевом внешнем магнитном поле ($H = 0$; $T > 150$ K – темные треугольники; $T < 150$ K: $i = 1$ – светлые точки; $i = 2$ – темные точки; 15 K $< T < 30$ K: темный треугольник соответствует значению параметра λ).

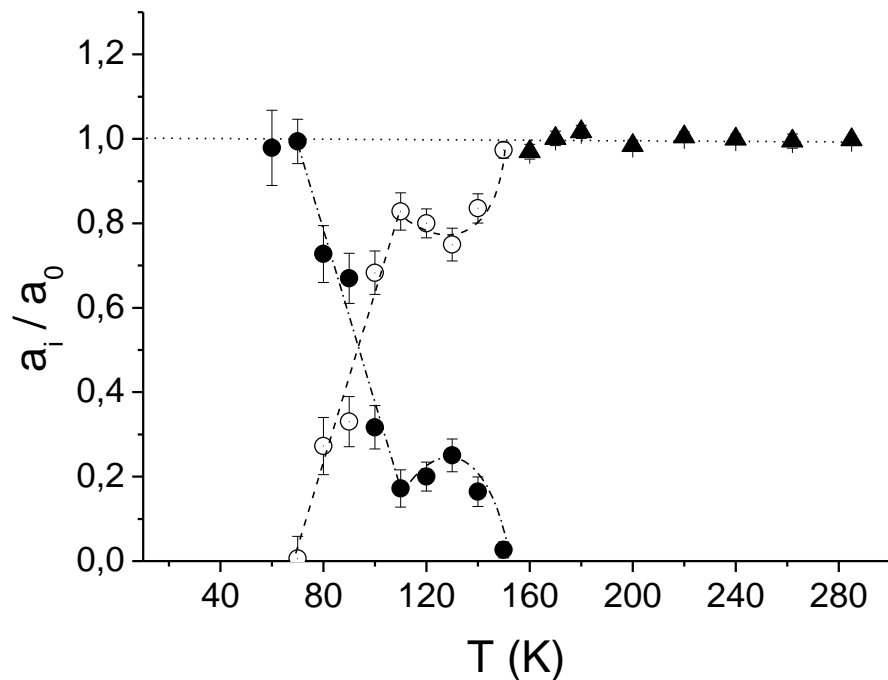


Рис. 4. Температурная зависимость нормированных парциальных вкладов в асимметрию распада мюона во внешнем магнитном поле ($H = 280$ Гс; $T > 150$ K – темные треугольники; 60 K $< T < 150$ K: $i = 1$ – светлые точки; $i = 2$ – темные точки).

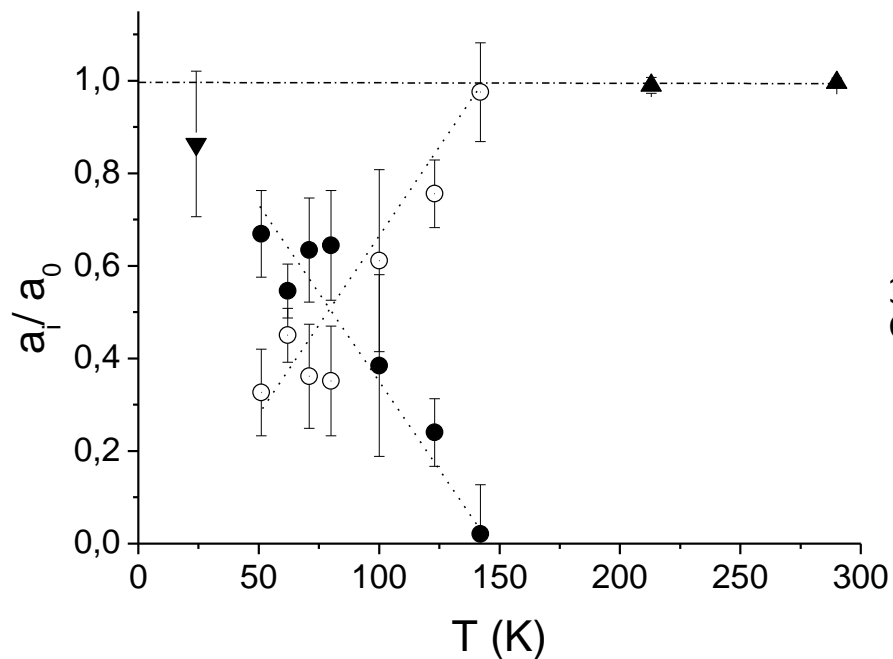


Рис. 5. Температурная зависимость нормированных парциальных вкладов в асимметрию распада мюона в нулевом внешнем магнитном поле ($H = 0$; $T > 150$ K – темные треугольники; 50 K $< T < 150$ K: $i = 1$ – светлые точки; $i = 2$ – темные точки; 15 K $< T < 30$ K: темный треугольник соответствует значению параметра a_s).

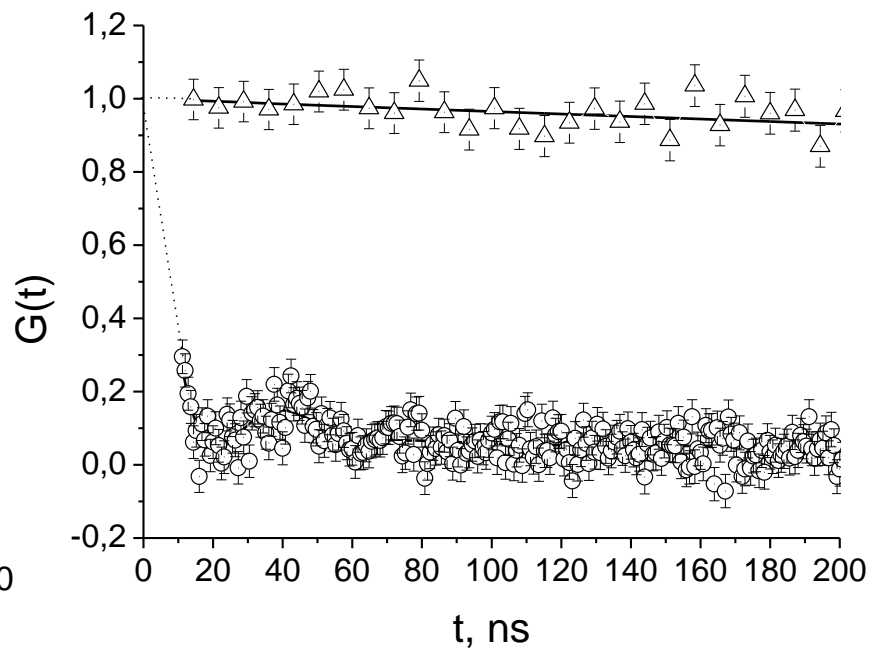


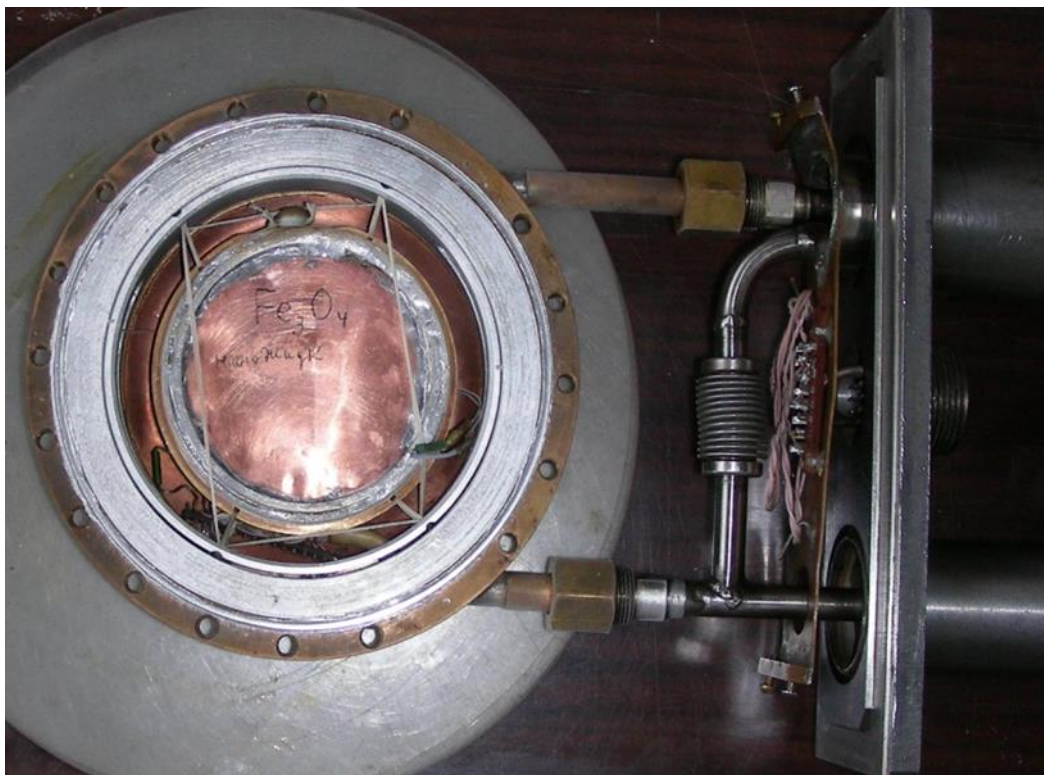
Рис. 6. Функции релаксации $G(t)$ в нулевом внешнем магнитном поле ($H = 0$) при температуре $T = 290$ K (светлые треугольники) и в диапазоне температур $T = 15 - 30$ K (светлые точки); пунктирные линии – экстраполяция к точке $t = 0$ (“0”-времени).

Выводы:

- ❑ Исследование керамического образца $TbMnO_3$ с помощью μSR -метода обнаружило ряд особенностей, которые до сих пор не наблюдались при изучении других мультиферроиков-манганитов.
- ❑ Близкая по величине аномально сильная релаксация поляризации мюонов обнаружена, как в магнитоупорядоченном состоянии ниже температуры $T_N = 42$ К, так и в ближней парамагнитной области при $T > T_N$. Такая релаксация обусловлена сильной неоднородностью внутреннего магнитного поля и спин-спиновым взаимодействием мюона с e_g -электронами ионов Mn, связанных двойным обменом.
- ❑ Благодаря фрустрациям магнитного состояния $TbMnO_3$ в парамагнитной фазе возникают области ближнего порядка при $T > T_N$. В результате двухфазное состояние с различающимися параметрами релаксации поляризации мюонов наблюдается в парамагнитной фазе. По мере повышения температуры области ближнего порядка разрушаются термическими флуктуациями.
- ❑ Истинное парамагнитное состояние возникает лишь при $T > 150$ К.

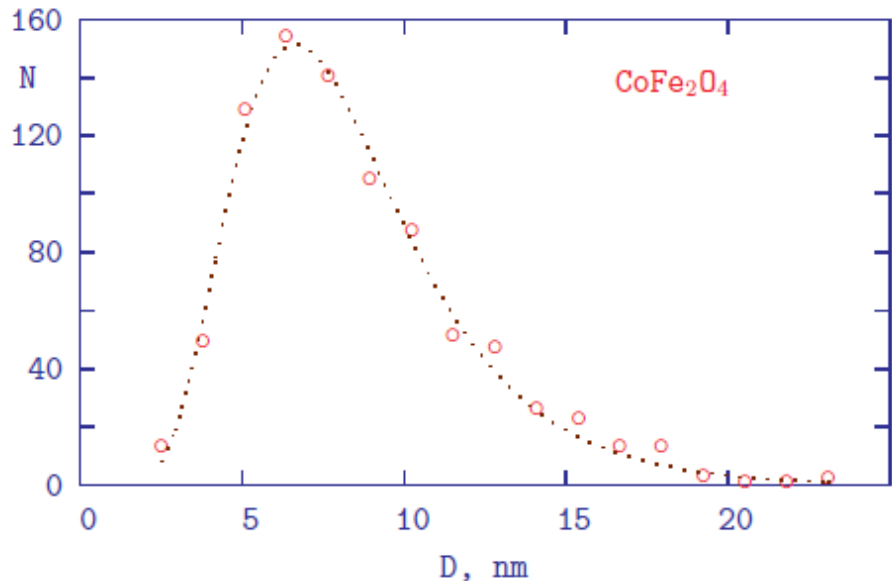
Исследование МАГНИТНЫХ ЖИДКОСТЕЙ

Проведены эксперименты по изучению феррожидкости с концентрацией наночастиц CoFe_2O_4 в воде равной 0.5% и 3.0%



Образцы феррожидкости
 $\text{CoFe}_2\text{O}_4/\text{LA}/\text{DDS-Na}/\text{H}_2\text{O}$

представляли собой суспензии нанодисперсного феррита кобальта CoFe_2O_4 в бидистиллированной воде H_2O , стабилизированные двумя слоями ПАВ (диэтилдитиокарбомат натрия (DDS-Na) и лоуриновая кислота(LA)). Объемная концентрация магнитных частиц составляла 0,5%, 3%. Средний диаметр 85 Å. При концентрации 3% в 1 мл феррожидкости содержалось 0,17г феррита кобальта, а на 1 г CoFe_2O_4 приходилось 0.25 г ПАВ.



Распределение частиц по размерам было исследовано в Московском центре современной технологии с использованием трансмиссионного электронного микроскопа высокого разрешения LOE 912 AB OMEGA (HRTEM) с ускоряющим напряжением 120 кВ. Капли водной суспензии феррожидкости наносили на покрытую углеродом медную сетку, просушивали и регистрировали микроизображения на фотопленке.

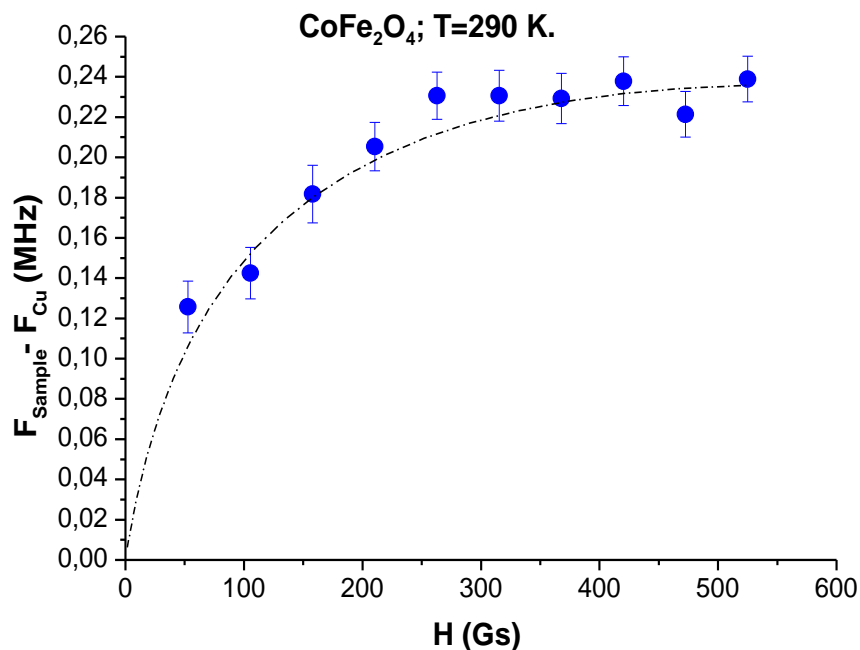
Были найдены следующие значения:

$$D_0 = 7.8 \pm 0.1$$

$$\sigma = 0.40 \pm 0.01$$

$$\bar{D} = D_0 \cdot e^{\sigma^2/2} = 8.5$$

$$(D, \bar{D}, \text{ и } D_0 \text{ в нм})$$



Экспериментально установлено, что при малых концентрациях (менее 6-7%) наночастиц, намагниченность образца, как у парамагнетиков, хорошо описывается функцией Ланженевена.

Определён средний размер наночастицы: 8 ± 0.2 нм.

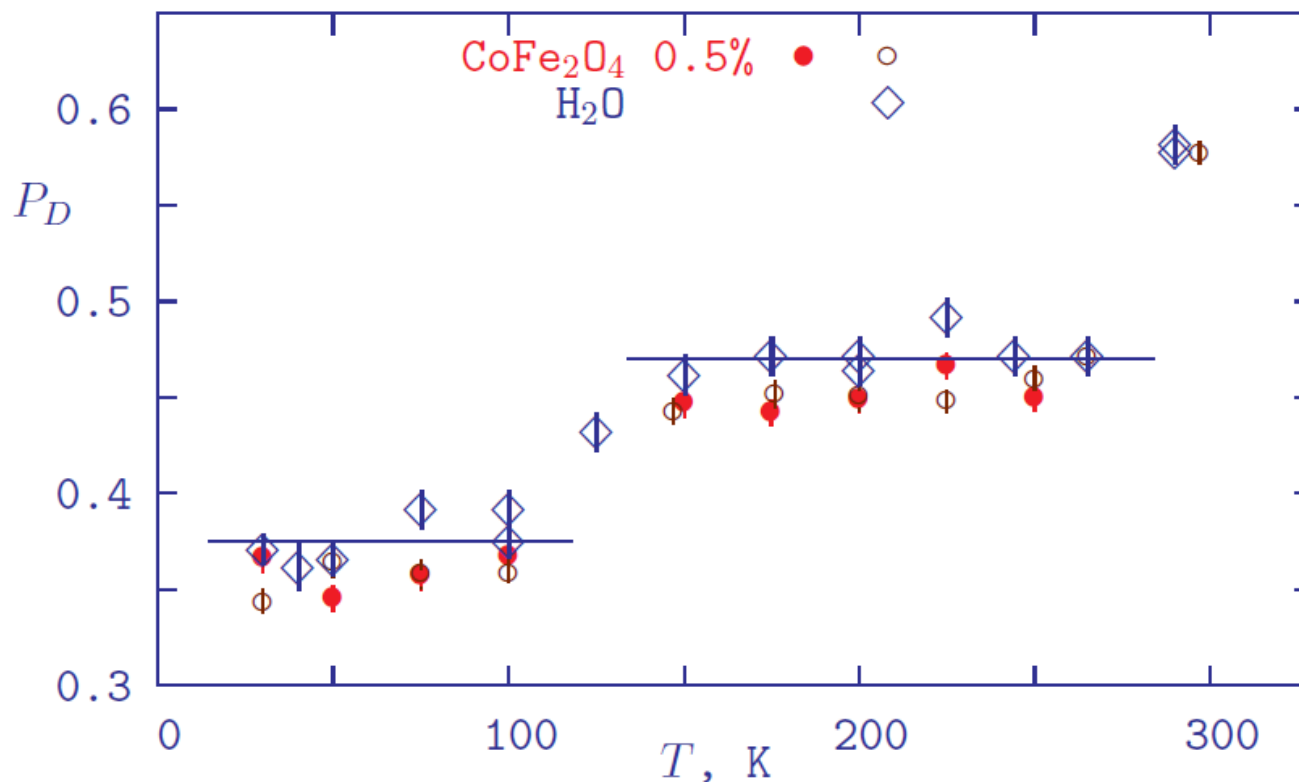
μ SR-метод дает возможность установить размер магнитных нановкраплений в парамагнитной матрице.

На рис. представлены температурные зависимости диамагнитной фракции мюонной поляризации для H_2O и образца 0,5% как $P_D = a/a_{Cu}$. Температурные зависимости диамагнитной доли поляризации для образцов 0,5% практически одинаковы, близки к данным для воды и не зависят от условий охлаждения феррожидкости

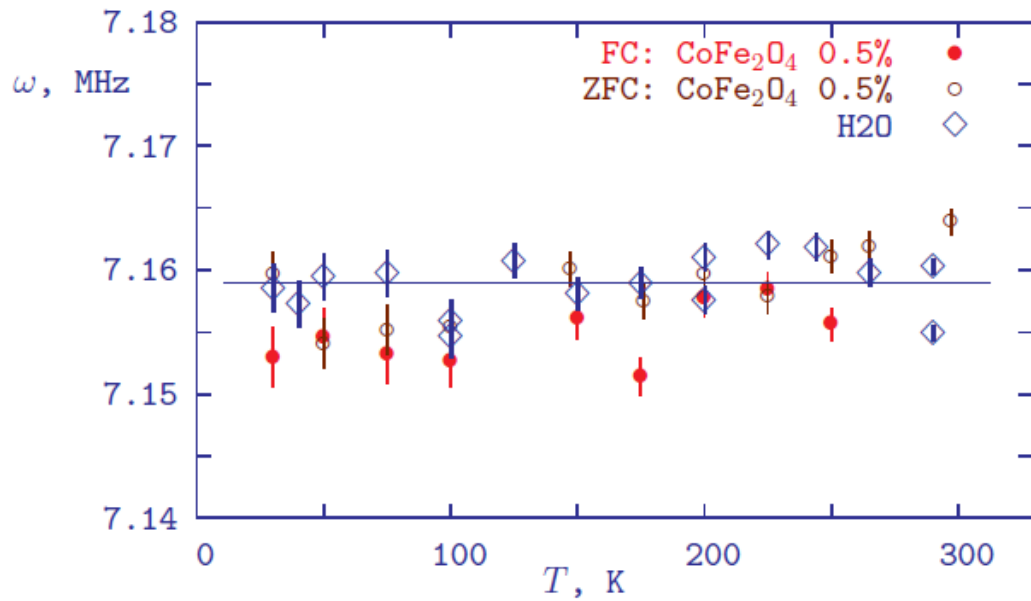
(FC – образец охлаждается в магнитном поле,

ZFC – образец сначала охлаждается в нулевом магнитном поле, а затем включается магнитное поле).

Измерения в воде проводились при FC. Наши результаты для диамагнитной доли поляризации мюонов в воде согласуются с литературными данными.

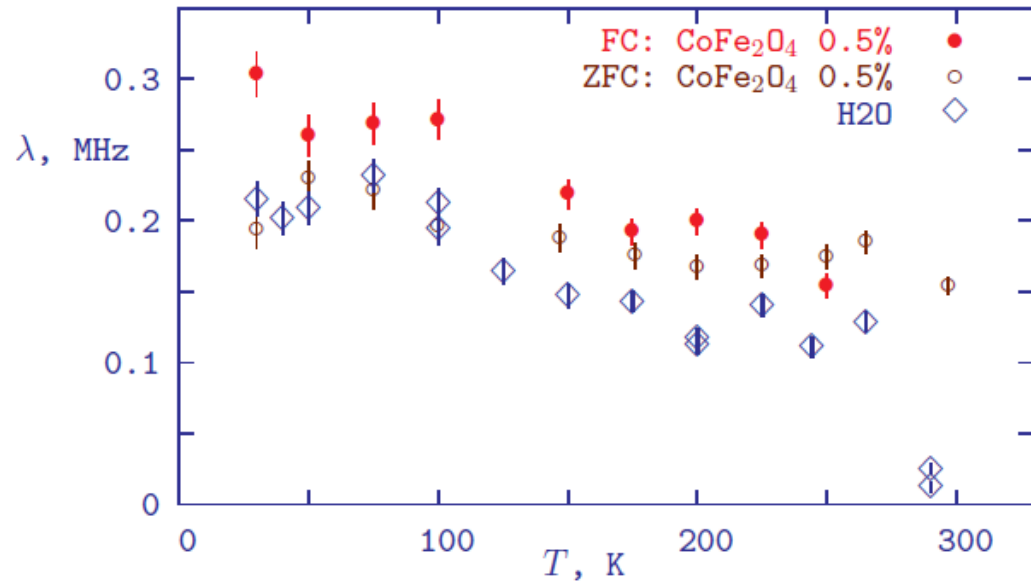


Температурная зависимость диамагнитной фракции поляризации мюонов в воде и в образце 0,5% в магнитном поле $H \approx 525$ Гс. Открытые кружки соответствуют ZFC измерениям.



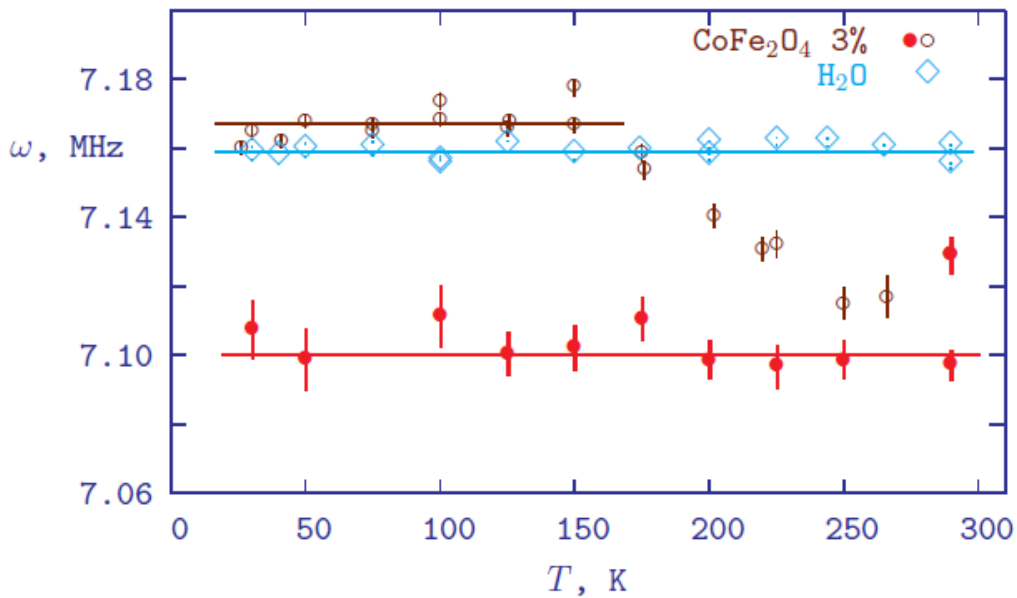
Температурные зависимости частоты прецессии и скорости релаксации спина мюона в 0,5% и в эталонном образце H_2O представлены на рис.

В FC измерениях скорость релаксации в образце систематически несколько выше, а частота прецессии спина мюона меньше, чем в воде.

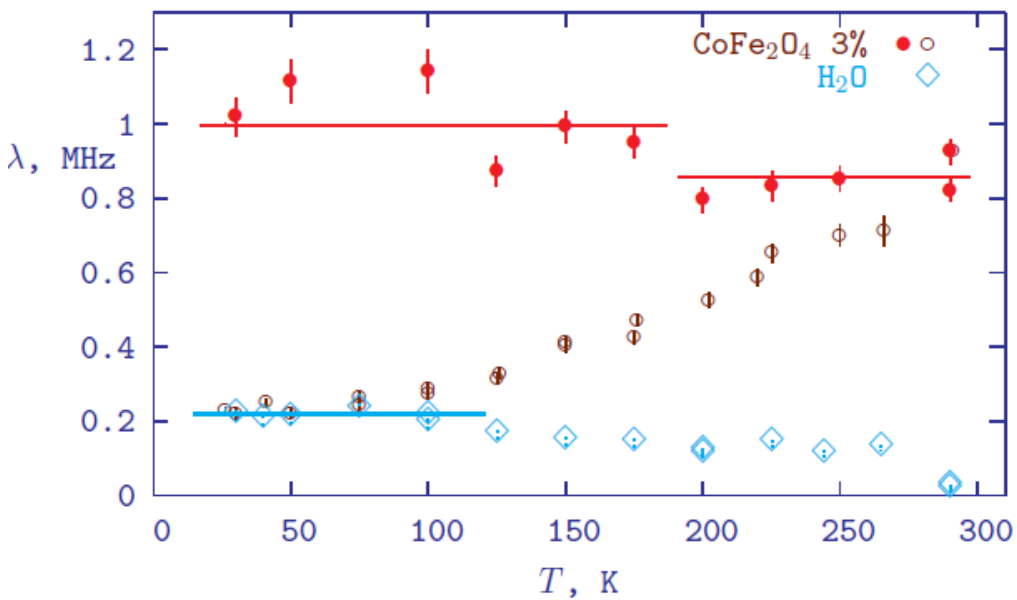


В случае ZFC измерений частота прецессии спина мюона близка к ее значению в воде.

Температурная зависимость частоты и скорости релаксации спина мюонов в воде и в образце 0,5% в магнитном поле $H \approx 525$ Гс. Открытые кружки соответствуют ZFC измерениям.



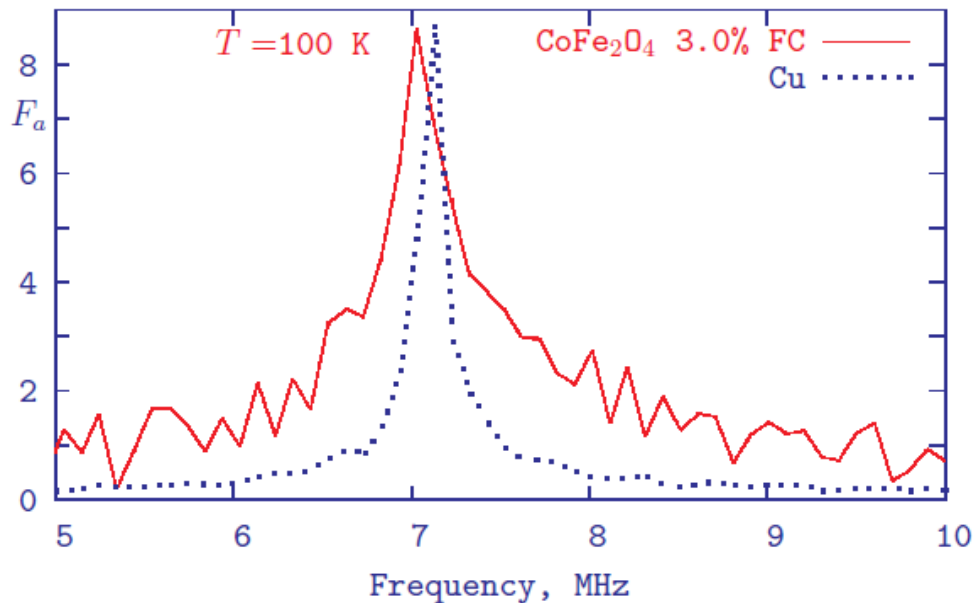
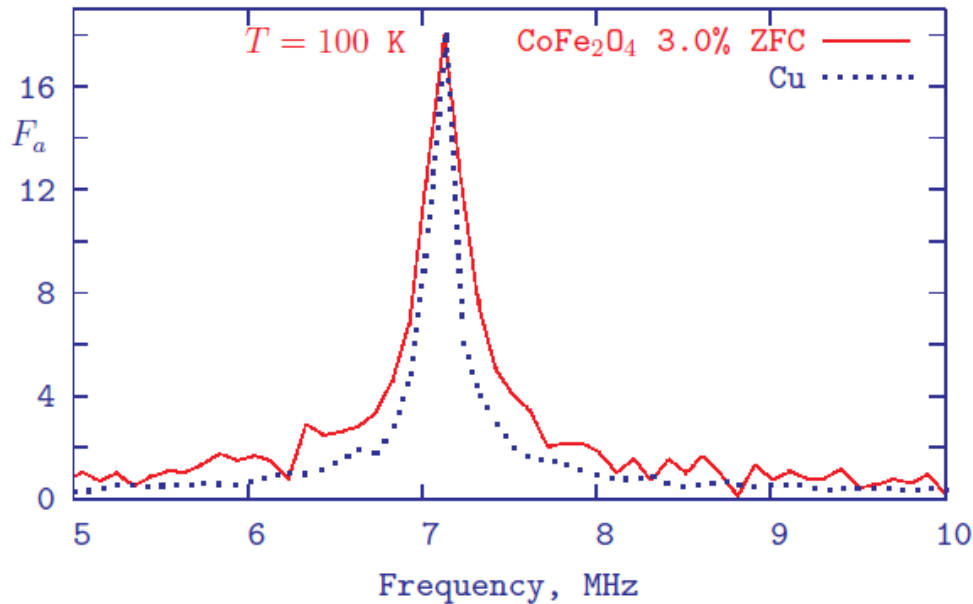
Существенная разница наблюдается в скорости релаксации и в частоте прецессии спина мюона для образца 3% между FC и ZFC измерениями. Температурные зависимости скорости релаксации и частоты прецессии спина мюона для образца с концентрацией наночастиц 3% представлены на рис.



Сдвиг частоты, наблюдаемый в случае FC относительно случая ZFC и относительно H_2O показывает, что магнитное поле в образце 3% отличается от внешнего.

Сдвиг частоты пропорционален магнитному полю, создаваемому наночастицами в коллоиде.

Температурные зависимости скорости релаксации и частоты прецессии спина мюона в образце 3% и в H_2O в магнитном поле $H \approx 525$ Гс. Открытые кружки соответствуют ZFC измерениям.



Результаты преобразования Фурье μSR данных для Cu и для образца с концентрацией наночастиц $\text{CoFe}_2\text{O}_4 \text{ 3\%}$. Образец измерялся при 100 K в случае ZFC (верхний рисунок) и FC (нижний рисунок).

Из сравнения средних значений частоты прецессии мюонного спина в FC измерениях в температурном интервале $30\text{--}250 \text{ K}$ и в ZFC измерениях в температурном интервале $26\text{--}175 \text{ K}$ (см. рис. на слайде выше) следует, что во внешнем магнитном поле 525 Гс , наночастицы создают в образце дополнительное среднее магнитное поле около

$$B = (\omega_{\text{ZFC}} - \omega_{\text{ZF}})/\gamma_{\mu} = 4.7 \pm 0.2 \text{ Э.}$$

Фурье анализ μSR данных показывает, что в феррожидкости магнитное поле отличается от внешнего поля не только по средней величине, но имеет место увеличение его дисперсии.

Как видно из рис. для образца с 3.0% концентрацией наночастиц, положение пика в Фурье спектре при ZFC измерениях совпадает с таковым для меди, при этом пик слегка расширен.

В FC измерениях имеет место значительное уширение и сдвиг пика в феррожидкости по сравнению с медью.

Выводы:

- ❑ Были исследованы магнитные свойства феррожидкостей с концентрацией наночастиц CoFe_2O_4 в воде равной 0.5% и 3.0%.
- ❑ Результаты FC и ZFC измерений свидетельствуют о том, что однодоменная наночастица с размером около 8.5 нм имеет высокую константу анизотропии примерно равную 10^6 эрг/см³ при 270 К.
- ❑ Величина дополнительного магнитного поля, создаваемого в феррожидкости наночастицами CoFe_2O_4 в случае FC измерений во внешнем магнитном поле 525 Гс для образца $\text{CoFe}_2\text{O}_4/\text{LA}/\text{SDS}/\text{H}_2\text{O}$ с объемной концентрацией CoFe_2O_4 в H_2O равной 3.0% при 270 К составила 4.7 Э.
- ❑ Впервые дана оценка дисперсии магнитного поля, создаваемого наночастицами в феррожидкости. Определили, что дисперсия магнитного поля равна $\sigma \approx 1.9$ Э и ≈ 6.9 Э для ZFC и FC измерений соответственно.

Публикации:

1. Д.С. Андриевский, С.И. Воробьев, А.Л. Геталов, Е.И. Головенчиц, Е.Н. Комаров, С.А. Котов, В.А. Санина, Г.В. Щербаков. *Аномально сильная релаксация поляризации мюонов в магнитоупорядоченном и парамагнитном состояниях мультиферроика TbMnO₃*. **Письма в ЖЭТФ**, **106**, вып. 5 (2017) 275 – 281.

D.S. Andrievskii, S.I. Vorob'ev, A.L. Getalov, E.I. Golovenchit, E.N. Komarov, S.A. Kotov, V.A. Sanina, and G.V. Shcherbakov. *Anomalously strong relaxation of the polarization of muons in the magnetically ordered and paramagnetic states of the TbMnO₃ multiferroic*. **JETP Letters**, **106**, № 5 (2017) 295–301.

2. A. Saleev et al. *Spin tune mapping as a novel tool to probe the spin dynamics in storage ring*. **Phys. Rev. Accel. Beams**, **20** (2017) 072801.

3. N. Hempelmann et al. *Phase locking the spin precession in a storage ring*. **Phys. Rev. Lett.**, **119** (2017) 014801.

Доклады:

1. Duginov V.N., Andrievskii D.S., Balasoiu M., Fluerasu D., Getalov A.L., Gritsaj 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).

2. Д.С. Андриевский, С.И. Воробьев, А.Л. Геталов, Е.И. Головенчиц, Е.Н. Комаров, С.А. Котов, В.А. Санина, Г.В. Щербаков. *Аномально сильная релаксация поляризации мюонов в магнитоупорядоченном и парамагнитном состояниях мультиферроика TbMnO₃*. Сборник тезисов 4-го ежегодного молодежного научного форума **Open Science -2017**, 15-17 ноября 2017 г., г. Гатчина, стр. 34.

Семинары ОФВЭ:

6 июня 2017 года, С.И. Воробьев. *μSR- исследования мультиферроиков-манганитов на синхротроне НИЦ Курчатовский институт-ПИЯФ*.

10 октября 2017 года, А.А. Дзюба. *Физика очарованных адронов в эксперименте LHCb*.

План на 2018 год:

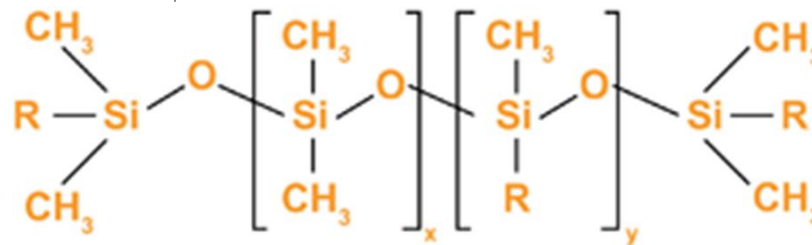
1. Продолжение исследований фазовых переходов и распределения локальных внутренних магнитных полей в образце $Tb_{0,95}Vi_{0,05}MnO_3$ и сравнение с $TbMnO_3$. *Совместно с ФТИ и.м.А.Ф.Иоффе, Санкт-Петербург.*

2. Исследование наноструктурированных магнитных систем.

Изучение распределения магнитных наночастиц в эластомерной матрице.

Образцы эластомера с объемной концентрацией 0%, 1%, 5%, 10%, 15% однодоменных наночастиц $CoFe_2O_4$ (покрытых слоем додецилсульфата натрия $NaCH_3(CH_2)_{11}OSO_3$ (SDS) и слоя лауриновой кислоты, $C_{11}H_{23}COOH$ (LA).

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.



R = -OH, -CH=CH₂, -CH₃, or another alkyl or aryl group

Совместно с ОИЯИ (Дубна);

Horia Hulubei National Institute of Physics and Nuclear Engineering, Bucharest, Romania;

West University of Timisoara, Timisoara, Romania;

University Politehnica of Bucharest, Romania.

