



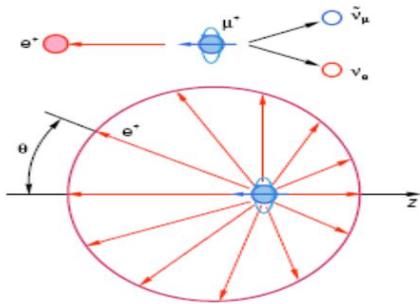
μSR-исследования материалов с различными видами магнитного упорядочения на мюонном канале СЦ-1000

С.И. Воробьев

Ядерный семинар ОФВЭ, 23.01.2024 г.

СОДЕРЖАНИЕ

1. Основные принципы μ SR-метода.
2. Изучение магнитных характеристик сплавов с памятью формы.
3. Изучение магнитных свойств сплавов со случайным конкурирующим взаимодействием.
4. Исследование мультиферроиков.
5. Исследование наноструктурированных магнитных систем.



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.

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 ПИЯФ μ SR-метод начал развиваться после 1976 года, когда был пущен в эксплуатацию мюонный канал на синхроциклотроне СЦ-1000.

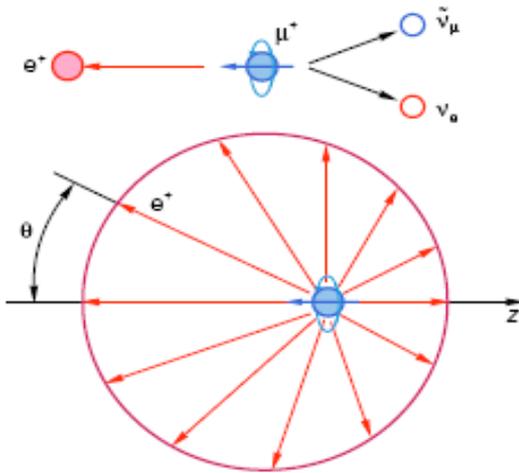
В 1977 году создается установка «МЮОНИЙ», работа на установке «МЮОНИЙ» в началась в 1978 году. В начале 90-х годов XX столетия такая μ SR-установка для измерений в более высоких магнитных полях была создана, а также проведена и полная модернизация экспериментальной аппаратуры. Это позволило уменьшить требуемые размеры образцов и эффективно использовать разработанный в ПИЯФ интегральный метод μ SR-исследований.

В настоящее время в России существует единственная работающая μ SR-установка, расположенная на выходе мюонного канала синхроциклотрона СЦ-1000.



μ SR rotation relaxation resonance

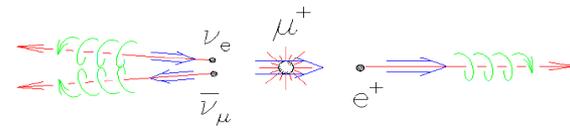
m
u
o
n
s
p
i
n



Использование поляризованных мюонов, получаемых на ускорителях, в качестве своеобразного инструмента для исследования свойств твердых тел обусловлено тем, что имеется возможность довольно простым образом проследить поведение поляризации ансамбля частиц в течение $10 \div 15$ микросекунд после внедрения их в исследуемое вещество. Дело в том, что распад этих однократно заряженных нестабильных частиц с массой $m_\mu \approx 206 \cdot m_e$ и спином $S = 1/2$ относится к классу слабых взаимодействий и происходит с нарушением закона сохранения пространственной чётности. Это приводит к анизотропии вероятности вылета образующего позитрона относительно направления спина покоящегося мюона.

μ SR-метод основан на том, что, наблюдая асимметрию распределения позитронов распада, можно определить, как был направлен магнитный момент мюона в момент его распада. Таким образом, запуская в изучаемый образец поляризованные мюоны, мы получаем возможность следить за поведением магнитного момента мюона в среде, изучать релаксационные процессы для спина мюона, прецессию его в магнитных полях и ряд других важных характеристик.

Метод исследований: μ SR



Основа метода: угловая асимметрия e^+ относительно μ^+ из распада $\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu$.

В эксперименте: продольно поляризованные μ^+ останавливаются в исследуемом образце.

Измеряются:

Относительный выход e^+ : $N_e = \frac{1}{N_\mu} \int n_e(t) dt$

и временное распределение e^+ относительно момента остановки μ^+ : $n_e(t) = n_0 \cdot e^{-\frac{t}{t_\mu}} (1 + a \cdot G(t))$

$a \approx 1/3$ – коэффициент асимметрии;

$t_\mu \approx 2,19711 \cdot 10^{-6}$ с.

Из экспериментальных данных определяется:

$G(t)$ – функция релаксации спина μ^+ -мюона во внешнем магнитном поле $H_{\text{внеш}}$

или локальных магнитных полях образца (λ , H , Δ)

Несколько примеров аналитического вида функции $G(t)$: $G(t) = G_d * G_{st}$

$$G_d = e^{-(\lambda \cdot t)^\alpha}, \quad \alpha < 2 \text{ – фазовый переход;}$$

$$a) G_{st} = c \cos(\gamma_\mu \cdot H \cdot t), \quad \vec{H} \perp \vec{S}_\mu \text{ – внешнее магнитное поле;}$$

$$б) G_{st} = \frac{1}{3} + \frac{2}{3} \cdot c \cos(\gamma_\mu \cdot H \cdot t) \cdot e^{-\frac{(\gamma_\mu \cdot \Delta \cdot t)^\alpha}{2}}, \quad \alpha = 1 \text{ или } 2 \text{ – коллинеарный магнетик;}$$

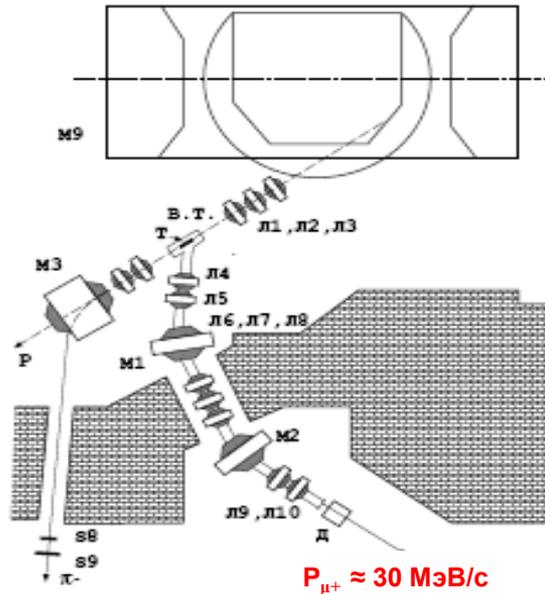
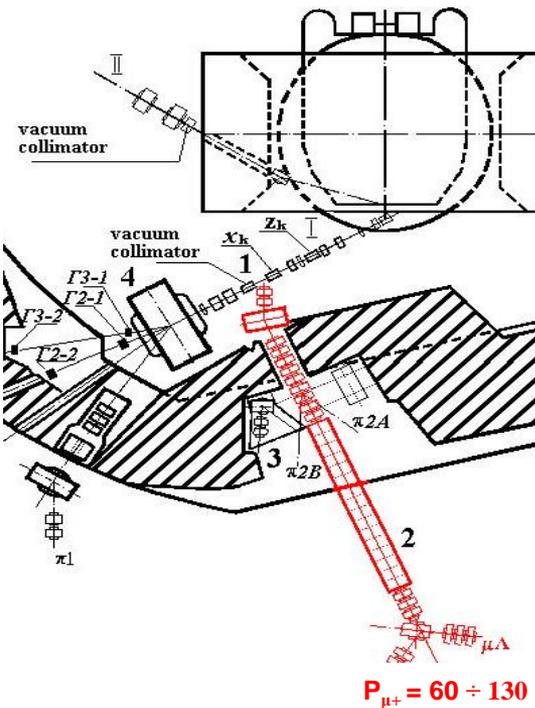
$$в) G_{st} = \frac{1}{3} + \frac{2}{3} \cdot (1 + (\gamma_\mu \cdot \Delta \cdot t)^\alpha) \cdot e^{-\frac{(\gamma_\mu \cdot \Delta \cdot t)^\alpha}{2}} \text{ – спиновое стекло;}$$



(a) $P_{\mu^+} = 60 \div 130 \text{ МэВ/с}$

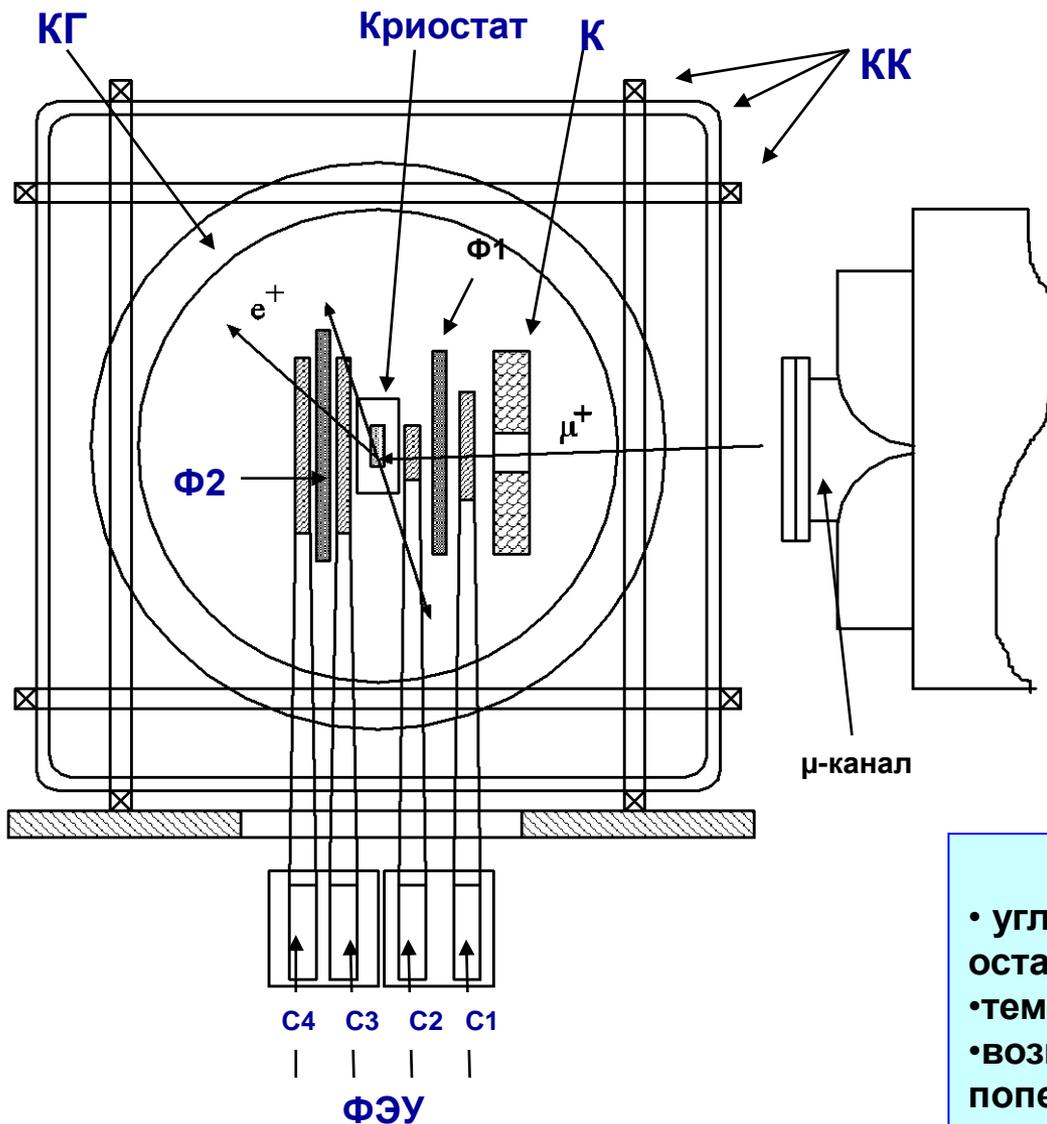


(б) $P_{\mu^+} \approx 30 \text{ МэВ/с}$



Физические параметры μ -канала (а):

- интенсивность $\leq 10^5 \text{ с}^{-1}$;
- $P_{\mu^+} = 60 \div 130 \text{ МэВ/с}$;
- продольная поляризация мюонов 95%;
- максимальный размер пучка $\varnothing 40 \text{ мм}$;
- размер исследуемых образцов $\varnothing 15 \div 60 \text{ мм}$ с толщиной по пучку $4 \div 10 \text{ г/см}^2$.



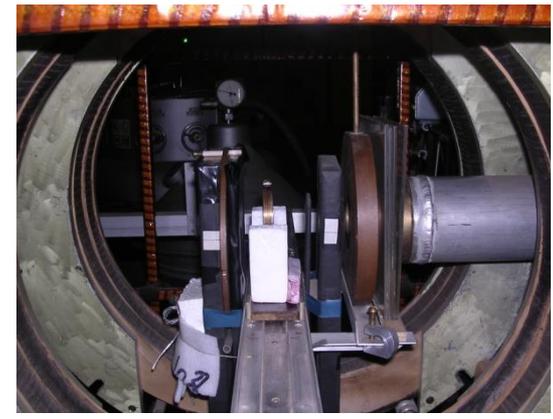
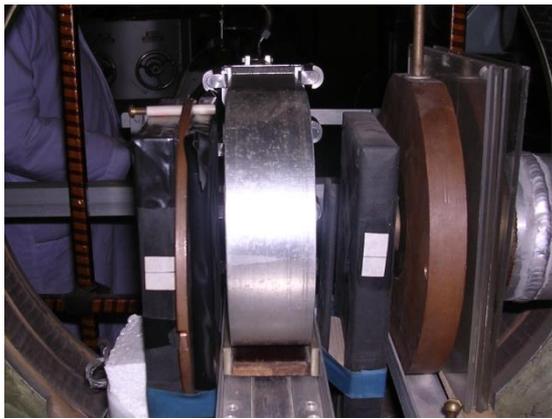
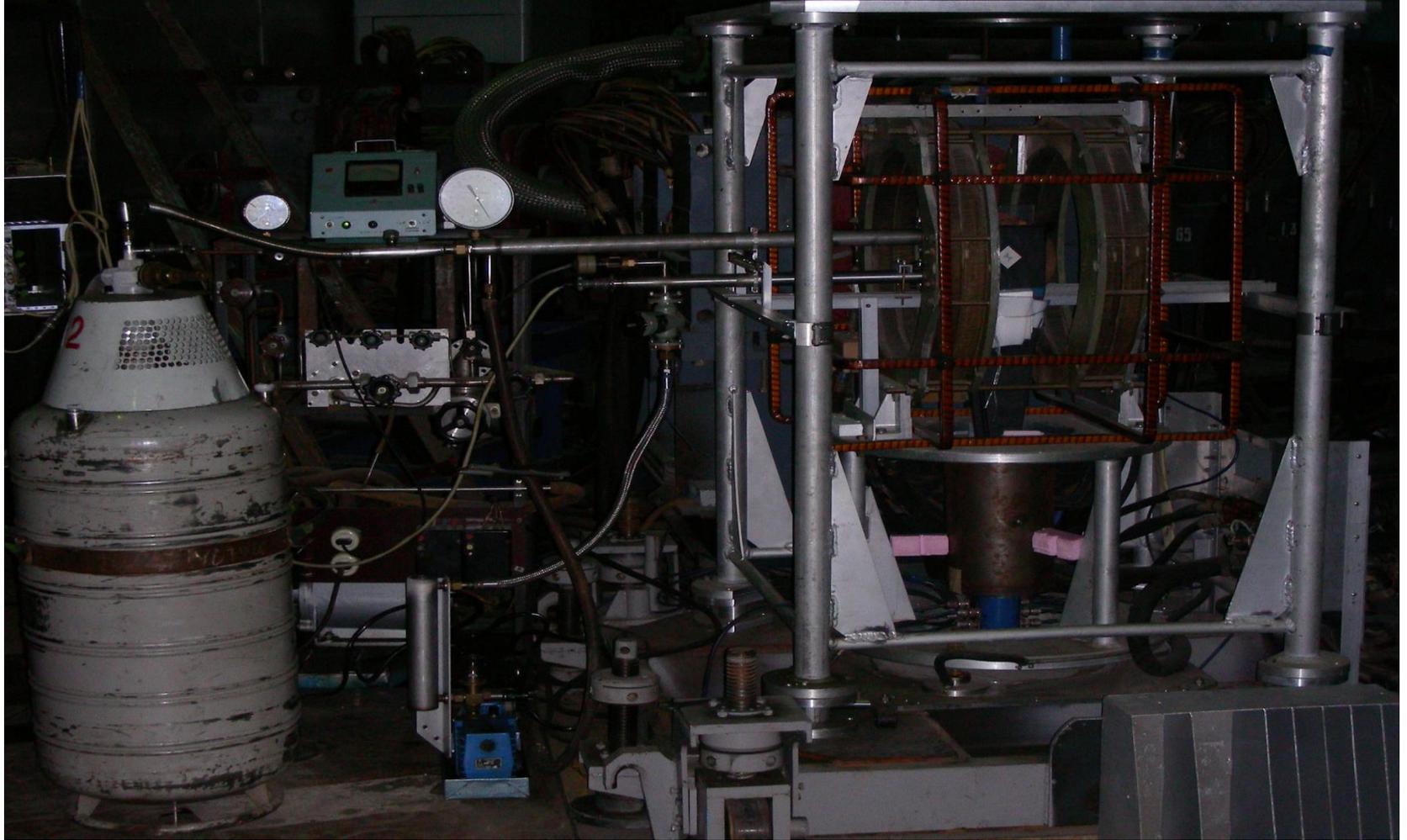
Фотография
μSR-установки



Особенности μSR-установки:

- угловой захват e^+ от распада мюонов, остановившихся в мишени 0,5 стерадиан;
- температурный диапазон 10 ÷ 300 К;
- возможность работать во внешних поперечных магнитных полях до 1,5 кГс;
- анализируемый временной интервал с момента остановки мюона 10 нс ÷ 10 мкс с точностью 0,8 нс.

Рис. Установка для μSR-экспериментов.
(КГ – кольца Гельмгольца; КК – компенсирующие катушки; К – коллиматор; Ф1 и Ф2 – фильтры 1 и 2; ФЭУ – фотоэлектронный умножитель); С1 ÷ С4 – сцинтилляционные счётчики.



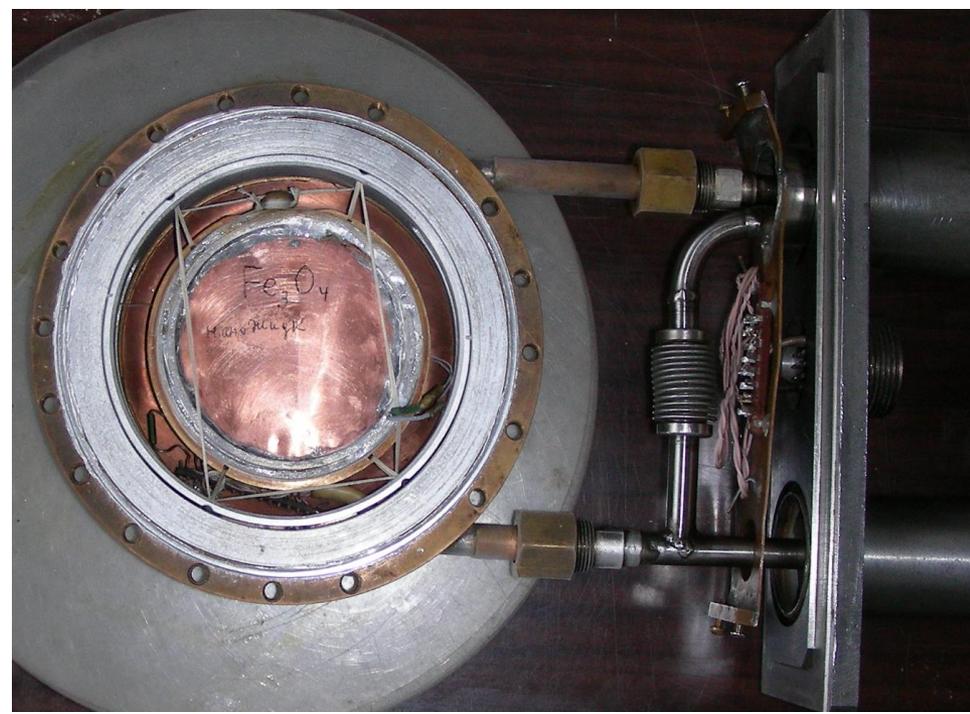
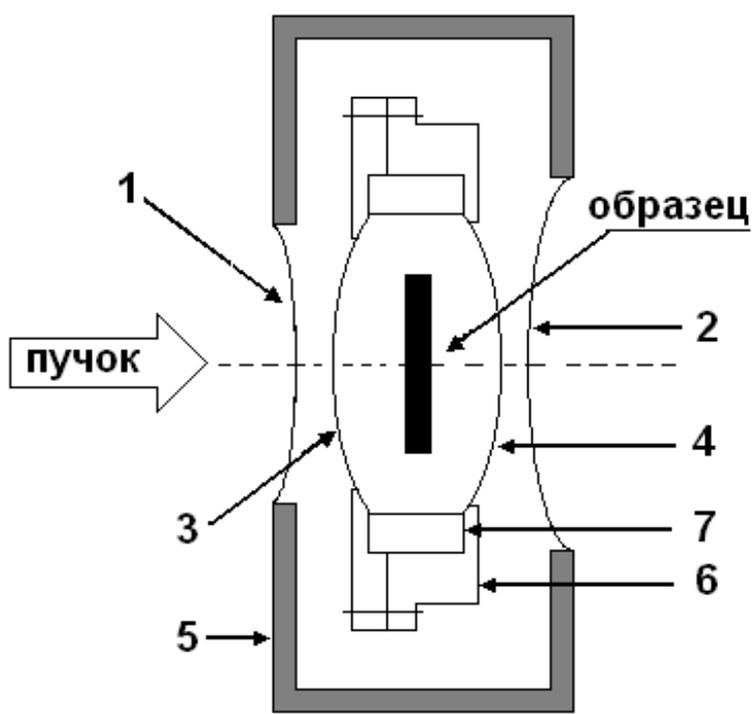
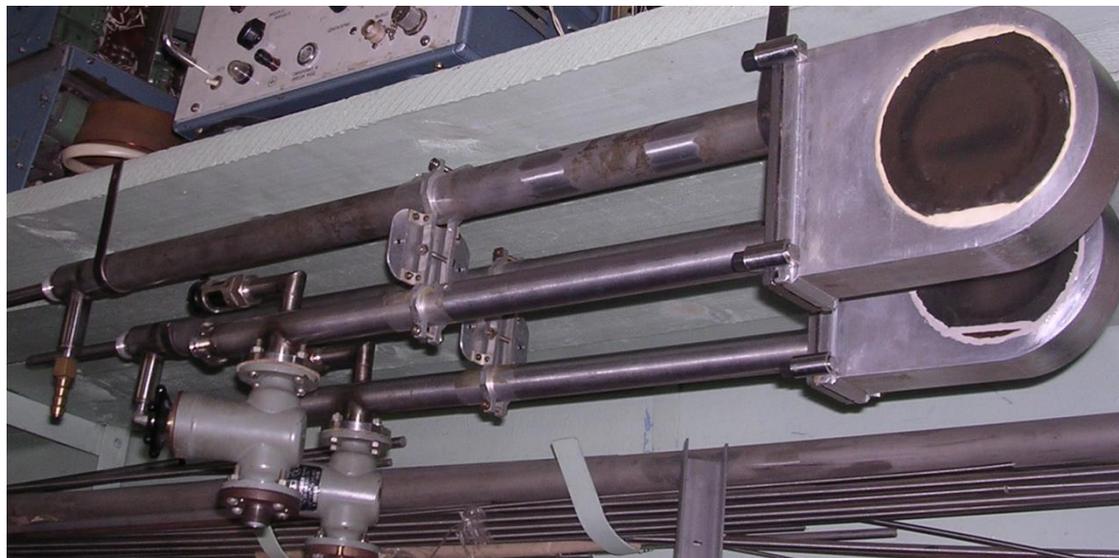


Рис. Криостат и размещение образца в криостате для μ SR-исследований. 1 и 2 (3 и 4)– входное и выходное горячие (холодные) окна соответственно; 5 – корпус криостата; 6 – камера криостата из бериллиевой бронзы; 7 – оправа для крепления образца.







**Благодарим всех
сотрудников
Ускорительного отдела
за их профессионализм и
самоотверженный труд!**



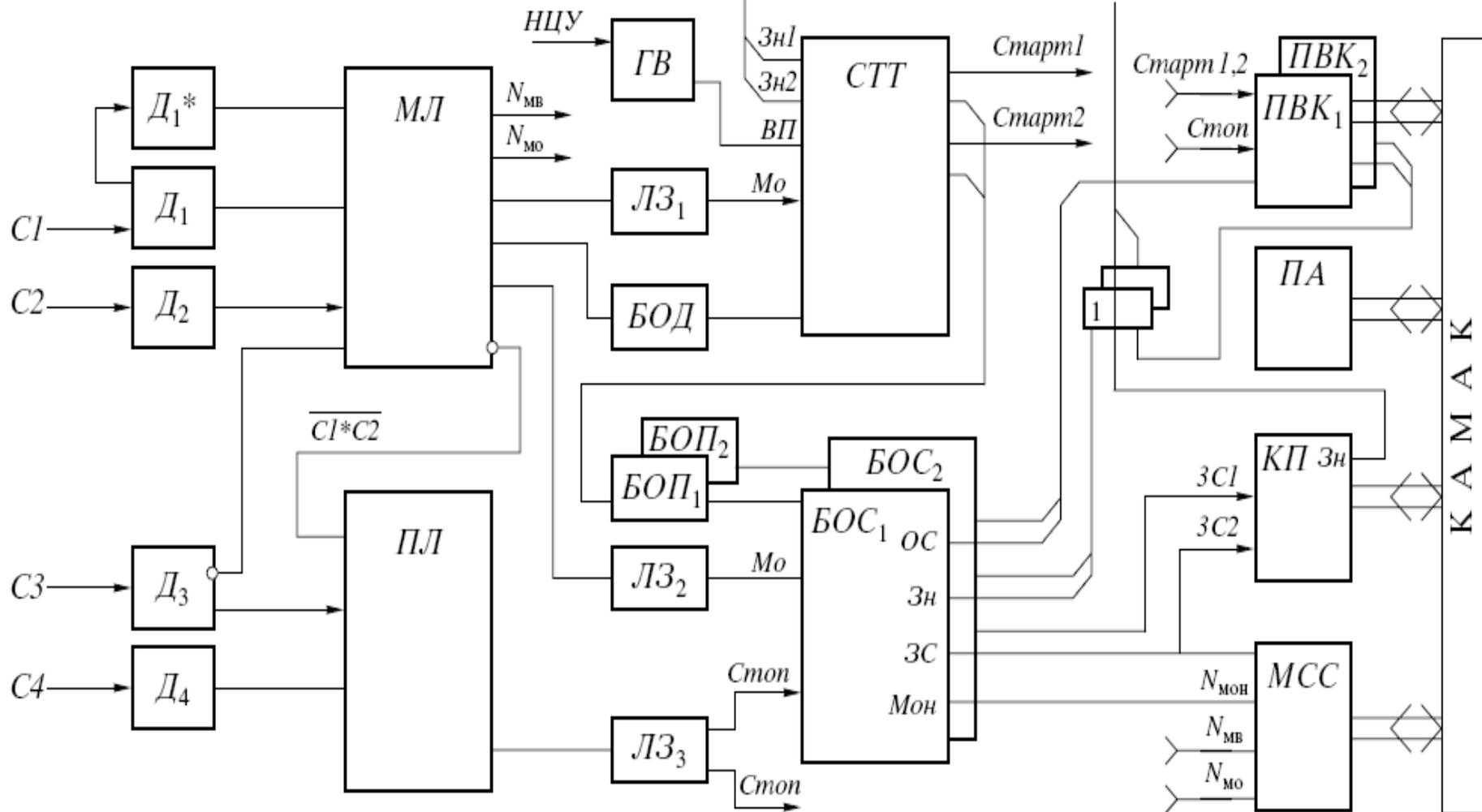
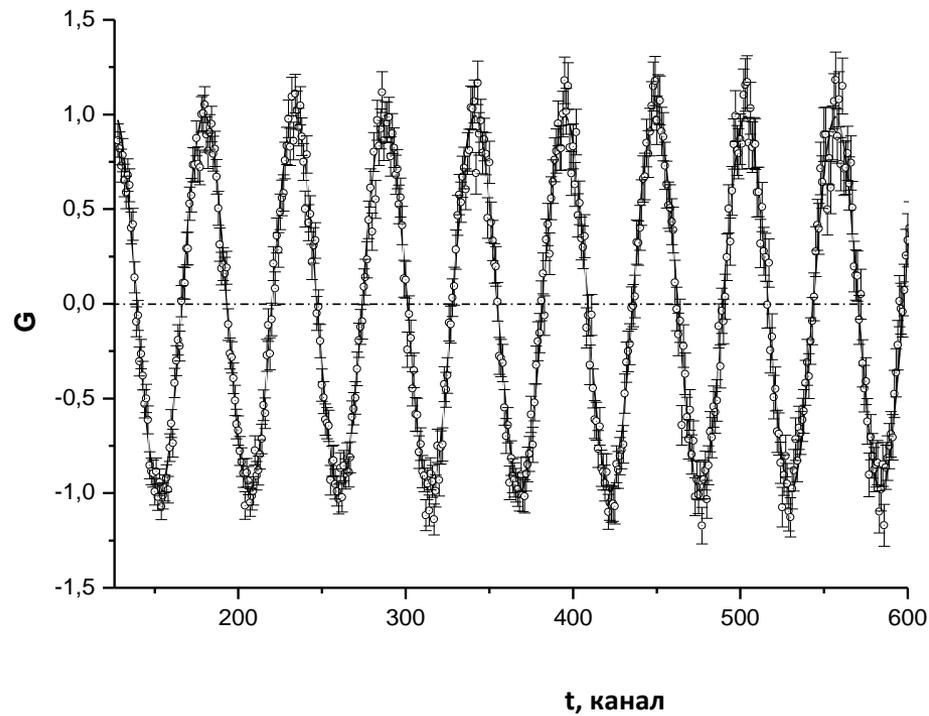
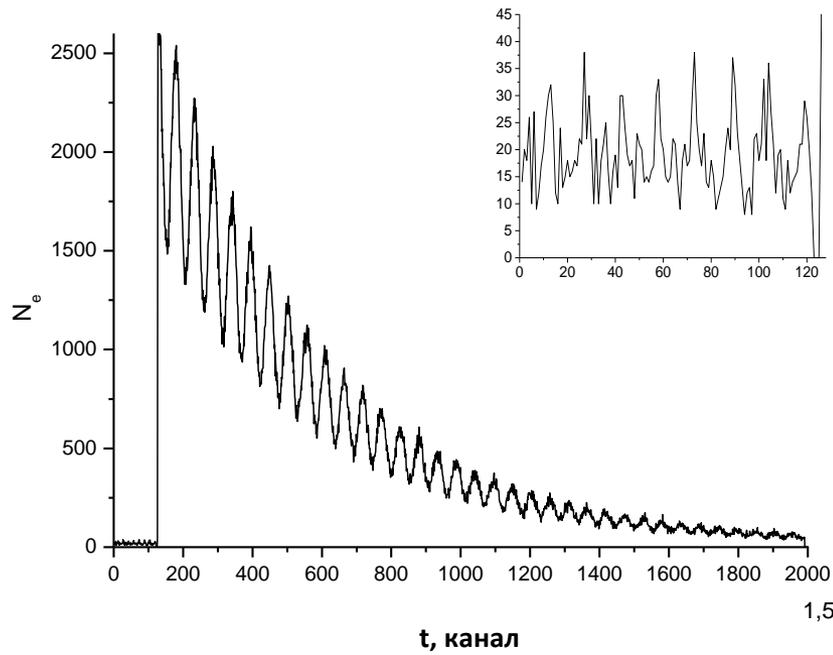
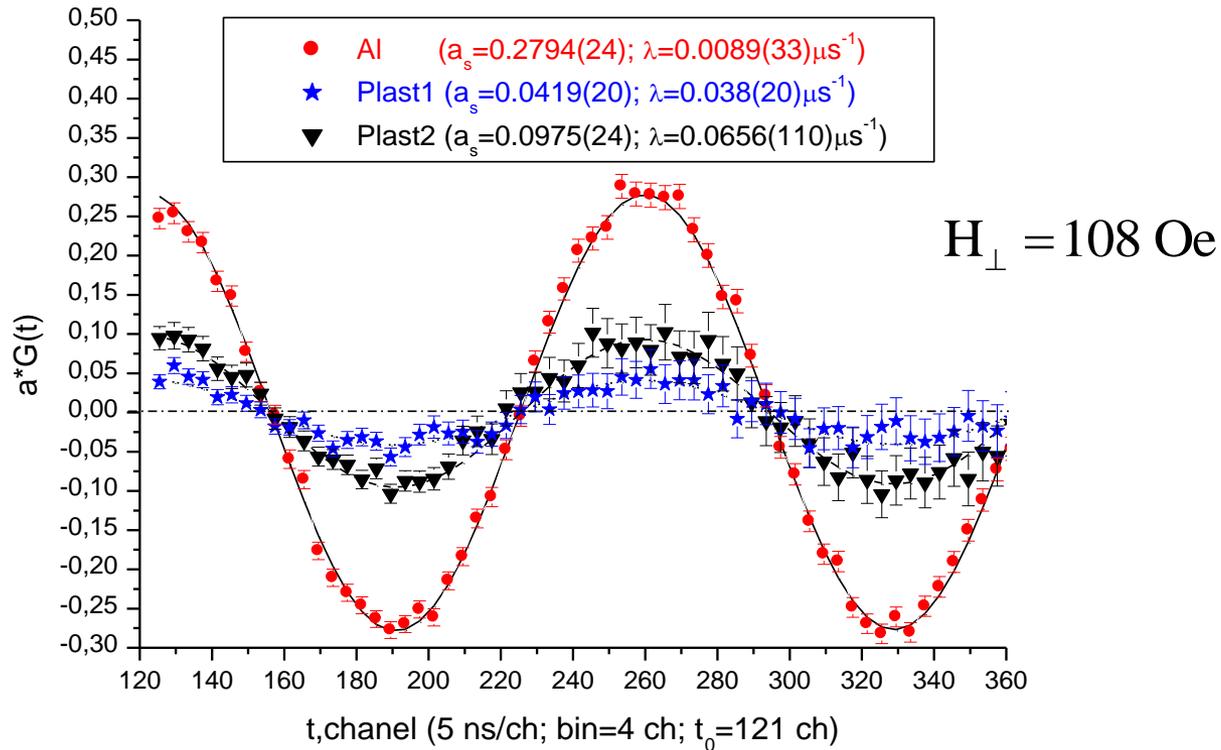


Рис. 3. Функциональная схема формирования триггера μ SR-установки. C_1 – C_4 – сигналы со счетчиков C_1 – C_4 ; D_1 – D_4 , D_1^* – дискриминаторы; ML –мюонная логика; PL –позитронная логика; GV –генератор ворот; LZ_1 – LZ_3 – линии задержки; $СТТ$ – блок формирования стартовых сигналов; $БОД$ – блок охраны “до”; $БОП$ – блок охраны “после”; $БОС$ – блок отбора событий; $ПВК$ –временной преобразователь (преобразователь время-код); $КП$ – контроллер памяти; $ПА$ – память анализаторная; $МСС$ – многоканальная система скалеров. Сигналы: $НЦУ$ – начало цикла ускорения, $Зн$ – занято, $РС$ – режектированное событие, $Мон$ – монитор, $ЗС$ – запись события, $ВП$ – вывод пучка, $Мо$ – мюонная остановка, $Сбр$ – сброс; N_{MB} и N_{MO} – числа мюонных соответственно входов и остановок.

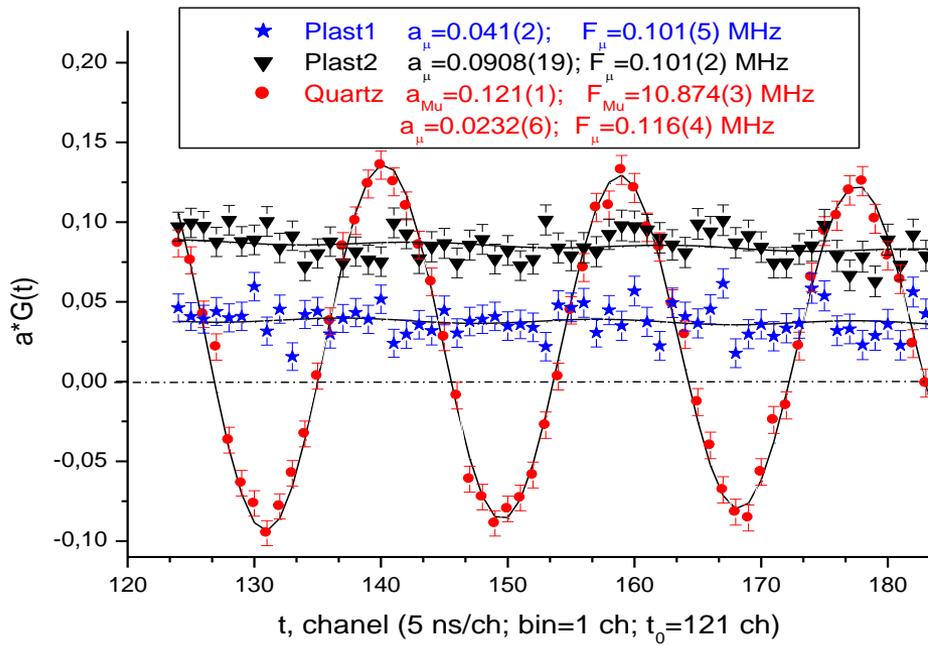


Muon depolarisation in different plastic stintillators

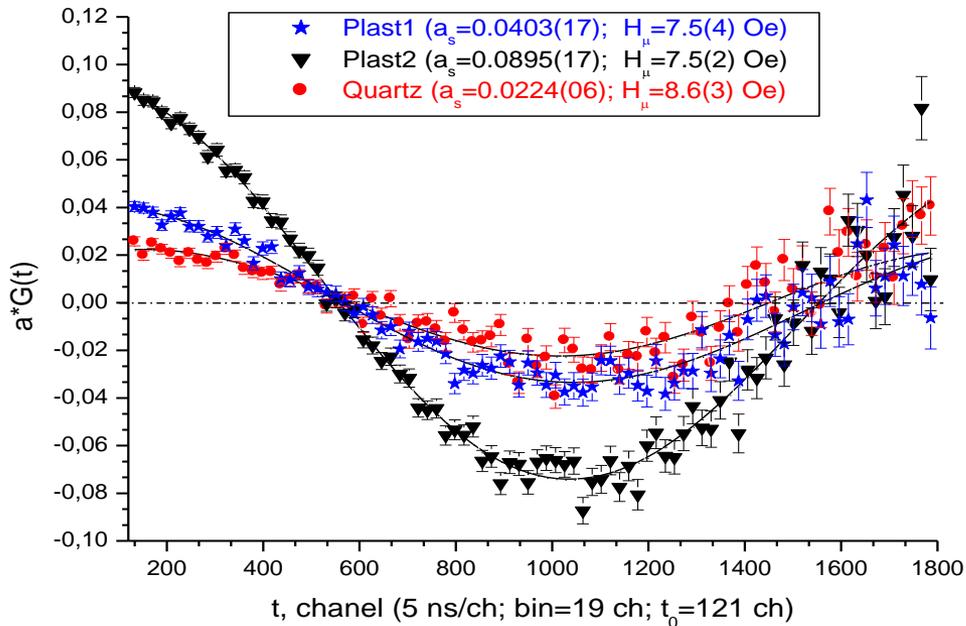


МАТЕРИАЛ	P_{μ}	Работа
Плекс	0.5	<i>Г.Г. Мясничева и др. ЖЭТФ. 56(4), с.1199, (1969)</i>
Полистирол	0.2÷0.24	<i>Г.Г. Мясничева и др. ЖЭТФ. 56(4), с.1199, (1969)</i>
Plast1	0.33	
Plast2	0.15	
Quartz	0.11	

Search for muonium: $H_{\perp} = 7.5$ Oe



Muonium is not seen



MATERIAL	H_{μ} , Oe
Plast1	7.5(4)
Plast2	7.5(2)
Quartz	8.6(3)

1. А.Л. Геталов, С.И. Воробьев, Е.Н. Комаров, С.А. Котов, Г.В. Щербаков. *Программа MSR2016 для набора данных μ SR-эксперимента*. **Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2018615720 от 15.05.2018.**
2. А.Л. Геталов, С.И. Воробьев, Е.Н. Комаров, С.А. Котов, Г.В. Щербаков. *Программа MNK2018 для обработки данных μ SR-эксперимента*. **Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019663498 от 17.10.2019.**
3. А.Л. Геталов, С.И. Воробьев, Е.Н. Комаров, С.А. Котов, Г.В. Щербаков. *Программа READ PSI*. **Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2020661440 от 23.09.2020.**

***Итак, приведем основные параметры
μSR-установки:***

Установка позволяет проводить μSR-исследования на образцах с поперечными размерами, вписывающимися в окружность диаметром $2 \div 5$ см и толщиной по пучку ≥ 4 г/см² в диапазоне температур $10 \div 300$ К со стабильностью температуры в данном интервале $\pm 0,1$ К.

На установке можно проводить исследования как в нулевом магнитном поле, компенсируя рассеянные поля кольцами Гельмгольца до уровня $\sim 0,05$ Гс, так и во внешнем магнитном поле (поперечном или продольном) в диапазоне 5 Гс $\div 1,5$ кГс.

Однородность внешних магнитных полей в объеме 200 см³ не хуже 10^{-4} ; что позволяет вести измерения при скоростях релаксации не менее $0,005$ мкс⁻¹. Измерения на меди показали, что скорость релаксации спинов мюонов λ составляет $0,0053(31)$ мкс⁻¹, что приемлемо для μSR-исследований.

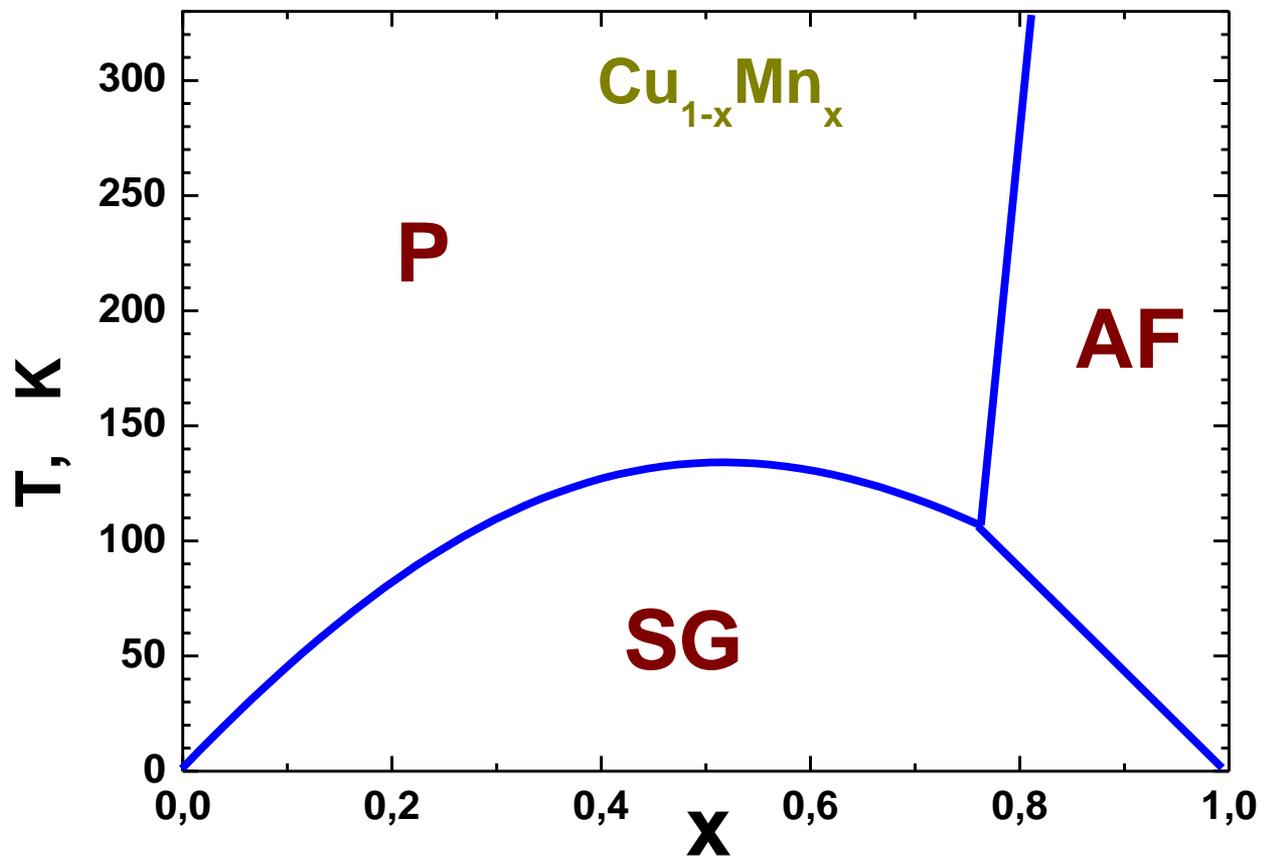
**Исследование магнитных
свойств гомогенных
медно-марганцевых
сплавов**

Сплав $\text{Cu}_{1-x}\text{Mn}_x$ относится к материалам, в которых имеет место явная корреляция коллективных процессов в кристаллической и магнитной подсистемах. В таких материалах наблюдается тесная связь между мартенситным превращением кристаллической решетки и антиферромагнитным упорядочением моментов марганца. В медномарганцевых сплавах температуры мартенситного и антиферромагнитного переходов практически совпадают, несмотря на то, что они сильно зависят от x и степени гомогенности сплава.

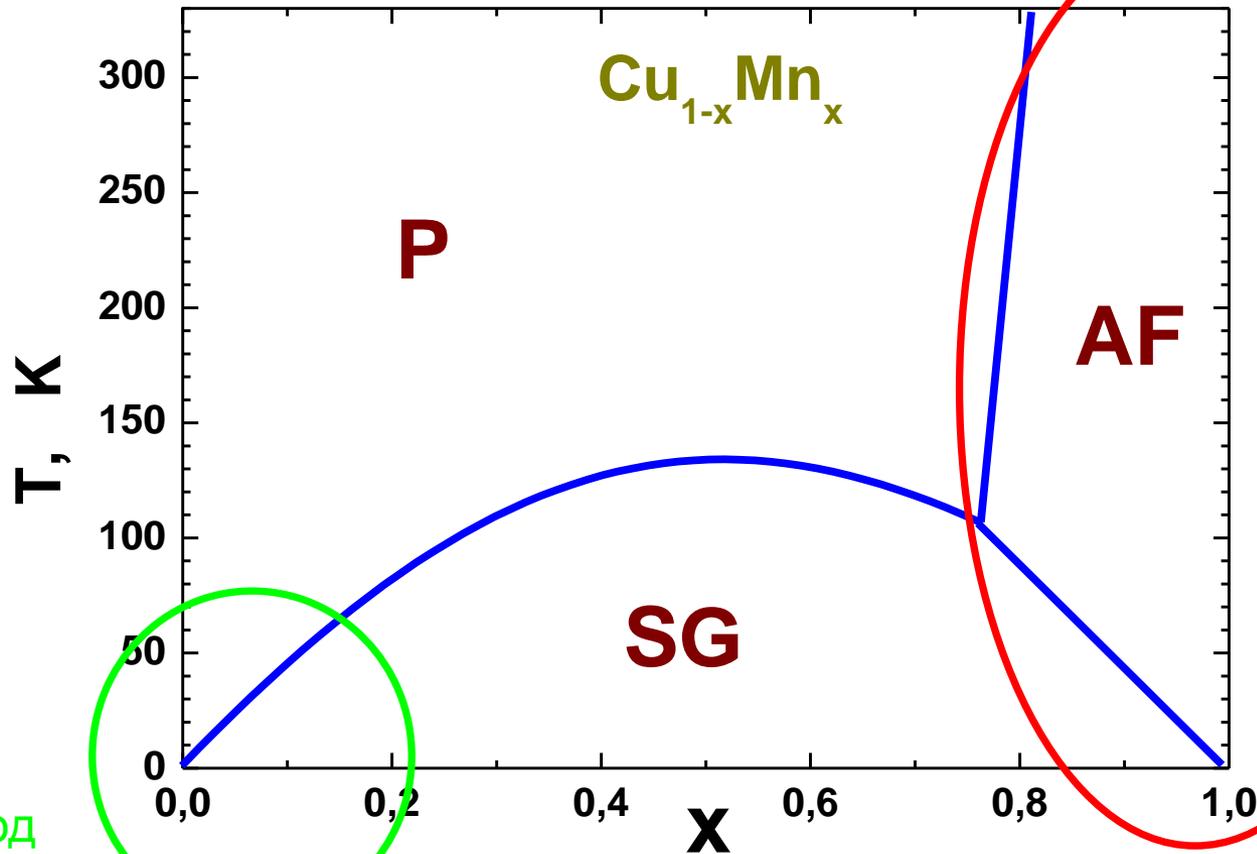
Полученная с помощью дифракции нейтронов фазовая диаграмма магнитных состояний сплава $\text{Cu}_{1-x}\text{Mn}_x$, содержит в области $0,2 \leq x \leq 1$ лишь парамагнитную и антиферромагнитную фазы. В этой работе отмечается, что резкое уменьшение T_N с ростом x , наблюдаемое как в гомогенных ($0,7 \leq x \leq 1$), так и в гетерогенных ($0,5 \leq x \leq 0,6$) сплавах, обусловлено разрушением дальнего магнитного порядка под влиянием немагнитных центров замещения – атомов меди. Следует заметить, что в такой ситуации магнитные системы часто приобретают тенденцию к переходу с понижением температуры в разупорядоченное состояние типа спинового стекла.

В настоящей работе представлены результаты исследования магнитных свойств гомогенных медномарганцевых сплавов, выполненные μSR -методом на синхроциклотроне ПИЯФ и в PSI (Швейцария). Метод μSR достаточно эффективен для изучения разупорядоченных магнитных состояний и процессов спиновой динамики неспиноволновой природы и активно использовался для исследования состояния спинового стекла в сплавах $\text{Cu}_{1-x}\text{Mn}_x$ с $x < 0,1$. Однако в области $x > 0,1$ он применяется впервые.

Фазовая диаграмма



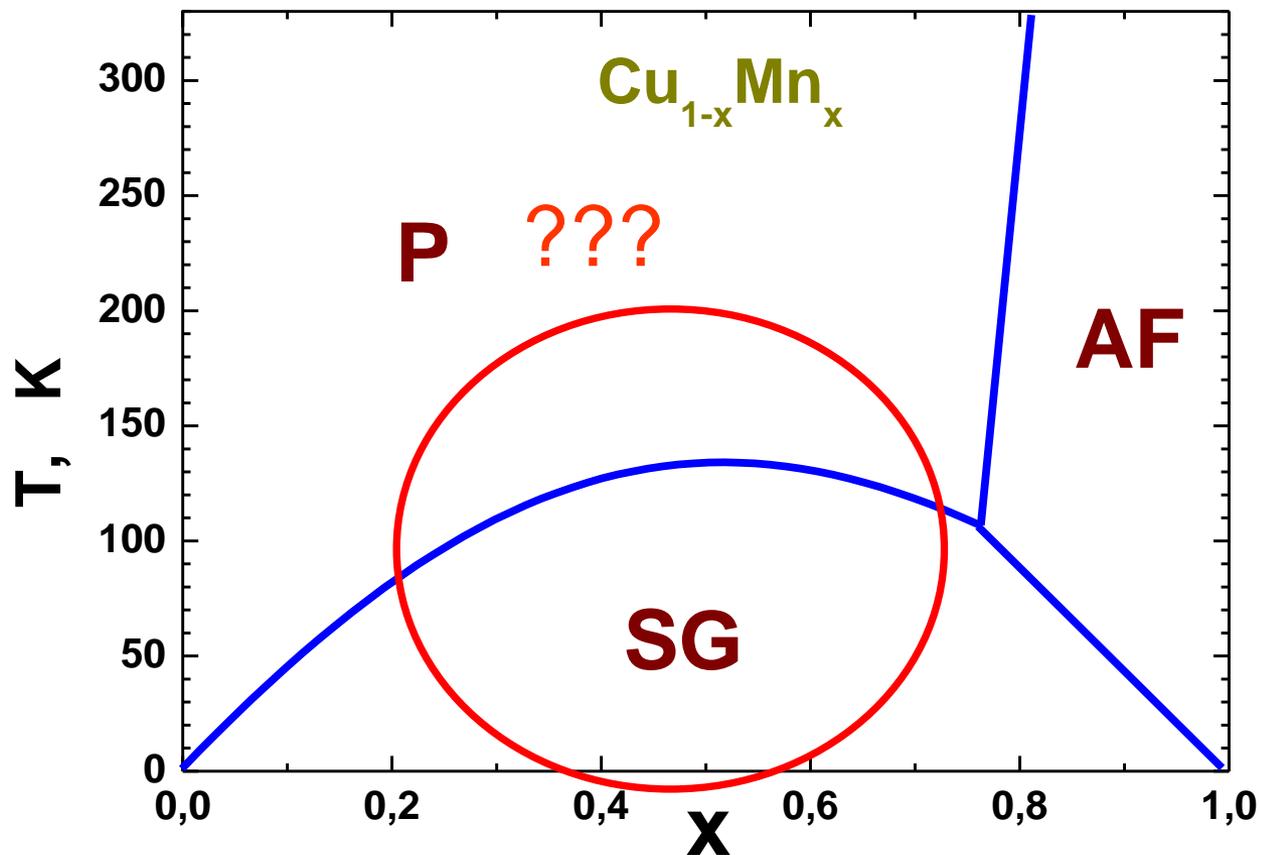
Фазовая диаграмма



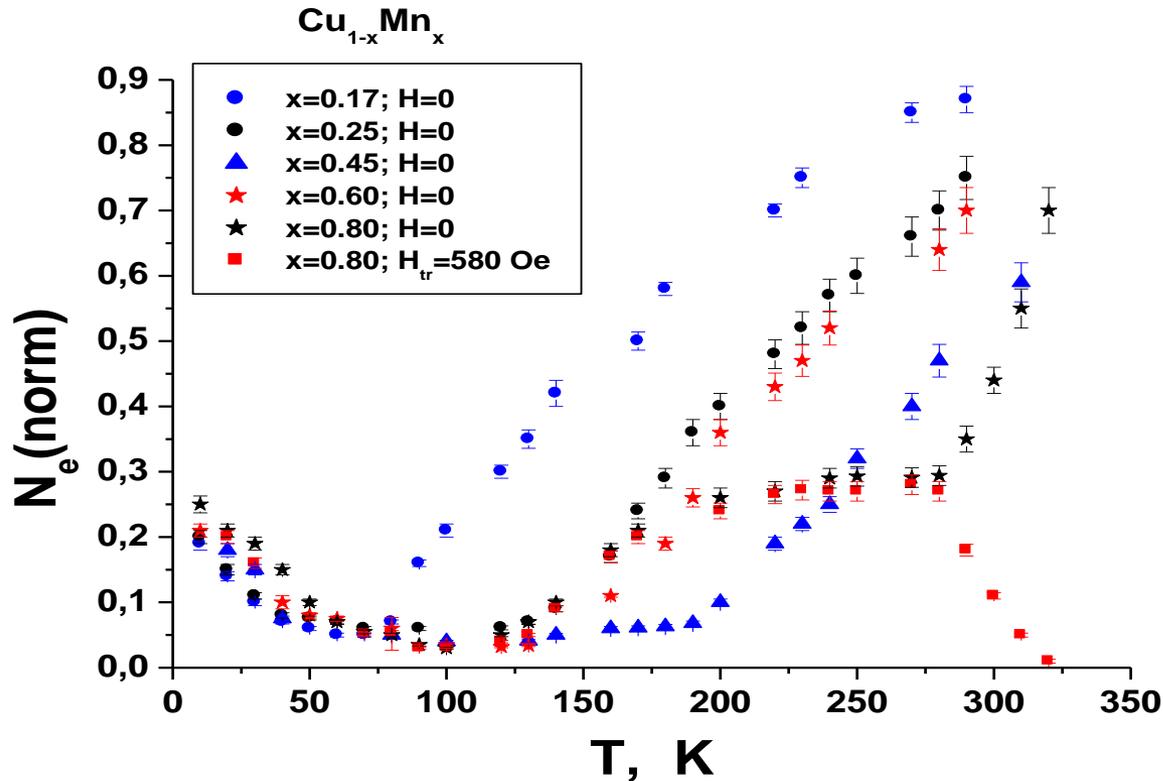
μ SR-метод

Макроскопические методы

Фазовая диаграмма



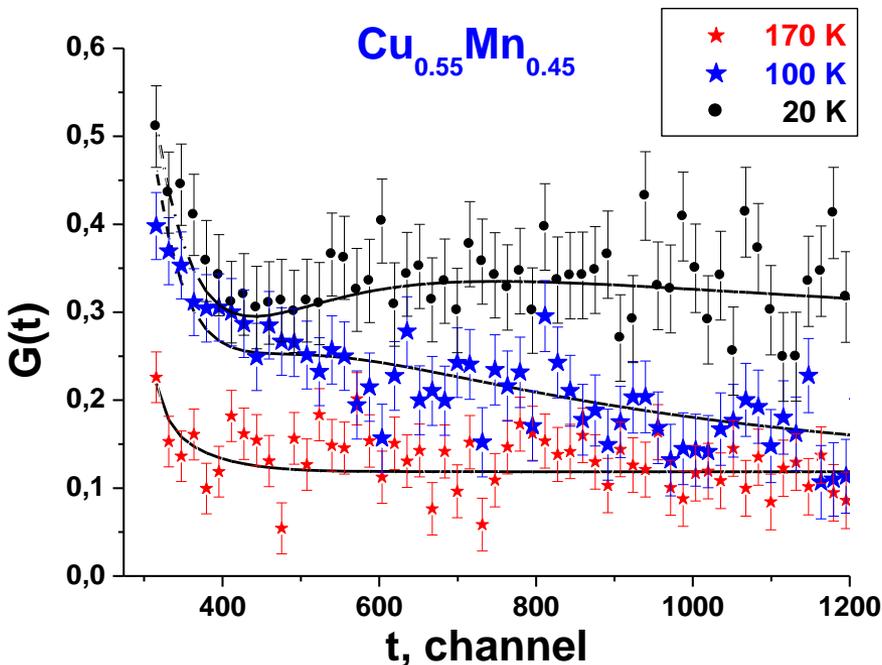
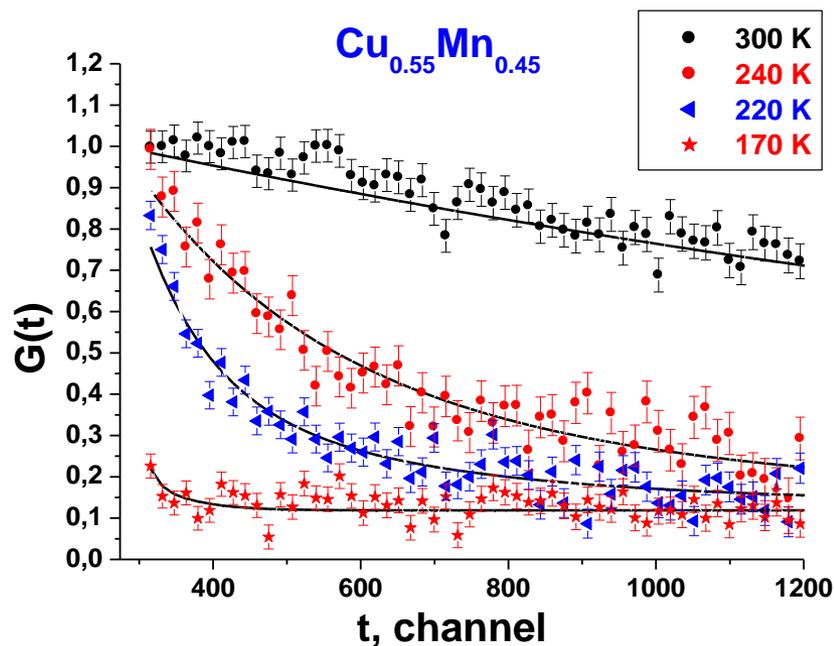
Температурная зависимость поляризации для различных концентраций Mn.



- $x = 0.17$ один фазовый переход P-SG
- $x = 0.8$ два фазовых перехода P-AF-SG
- $x = 0.45$ полная деполяризация при $T = 80 - 180\text{K}$
два фазовых перехода?

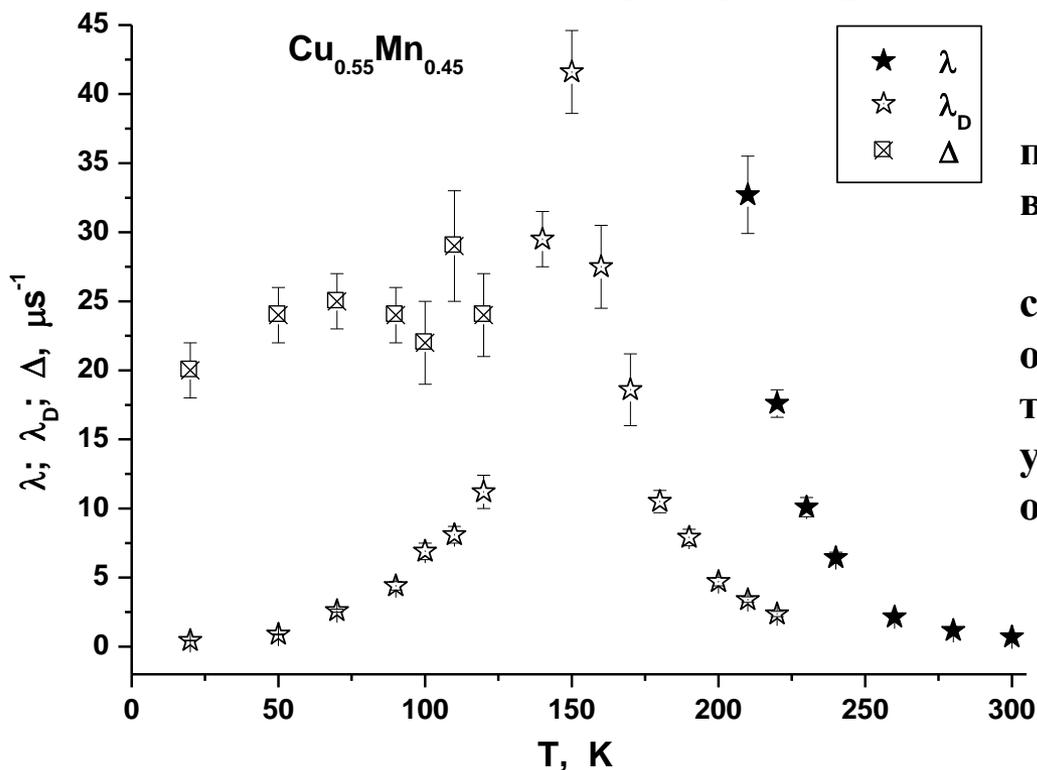
Для всех образцов видим резкое уменьшение $N_e(\text{norm})$ с понижением температуры, что связано с сильной деполяризацией мюонов. Тот факт, что $N_e(\text{norm})$ уменьшается почти до нуля, указывает на флуктуационный характер и довольно большую величину возникающих локальных магнитных полей. Более того, для образца с концентрацией атомов марганца $x=0,45$ наблюдается сначала падение $N_e(\text{norm})$ до некоторой малой величины, после чего в достаточно широком температурном диапазоне (от 200 К до 60 К) нормированный выход позитронов остается практически неизменным. Это является в некотором отношении указанием на то, что в этом интервале температур для данного образца установилось вполне определенное фазовое состояние, характеризующееся сильной спиновой динамикой.

Функция релаксации для образца $\text{Cu}_{0.55}\text{Mn}_{0.45}$ в диапазоне температур (20 ÷ 300) К



Видим, что в области температур (240 ÷ 120) К наблюдается практически полная деполяризация мюонного ансамбля. Уменьшение релаксации происходит только при понижении температуры образца ниже 100 К; при температуре образца 20 К функция релаксации асимптотически приближается к величине $\sim 1/3$, что соответствует случаю изотропной ориентации квазистатических локальных магнитных полей.

На рисунке демонстрируется поведение параметров λ , λ_D и Δ в зависимости от температуры образца.

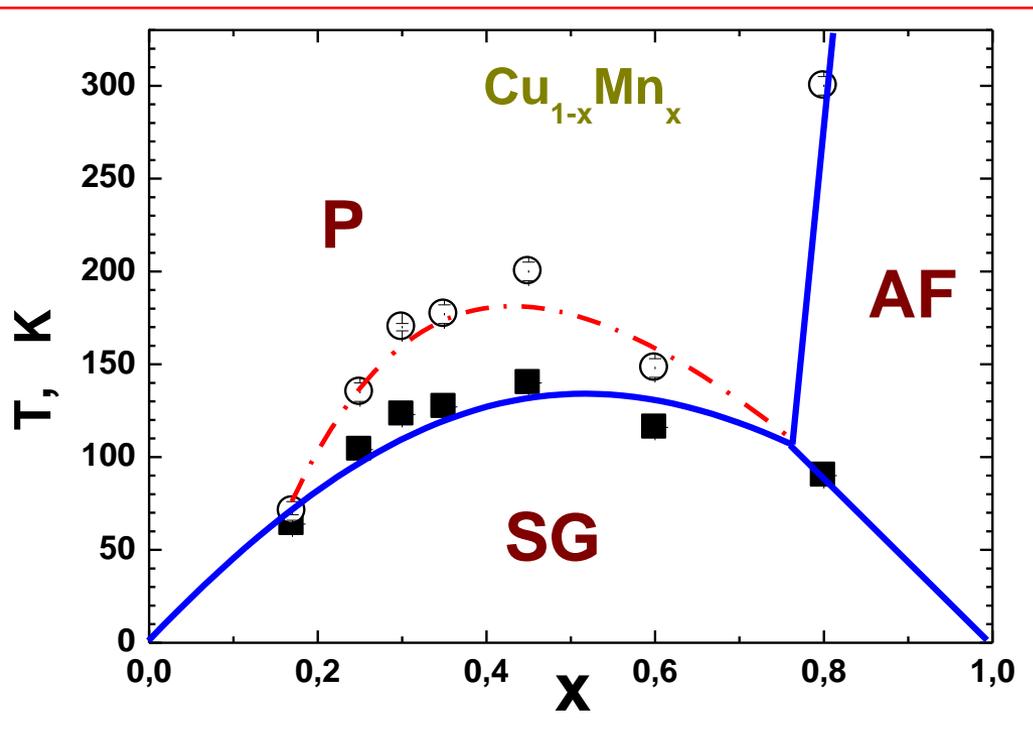


Видим два магнитных перехода: первый – при температуре образца ~ 200 К, второй – в области температур (150 ÷ 130) К.

Следует отметить, что параметр статического поля Δ можно получить из обработки экспериментальных данных только при условии, что $\Delta > \lambda_D$, при этом с уменьшением λ_D растёт достоверность определения параметра Δ .

Представленные результаты показывают, что в гомогенных сплавах $\text{Cu}_{1-x}\text{Mn}_x$ в широкой области концентраций при температурах 100 ÷ 200 К существует фазовый переход в некоторое магнитное состояние. Эта фаза возникает независимо от вида более высокотемпературного состояния пара – или антиферромагнитного. Она характеризуется значительной неоднородностью локальных полей, что, связано с отсутствием дальнего магнитного порядка.

Таким образом, полученные данные позволяют существенно дополнить магнитную фазовую диаграмму гомогенных медно-марганцевых сплавов $\text{Cu}_{1-x}\text{Mn}_x$, которая принимает вид, характерный для систем с конкурирующим обменным взаимодействием.



На приведенной фазовой диаграмме сплошной линией указаны границы между состояниями (P) парамагнетик–антиферромагнетик (AF) – спиновое стекло (SG), построенные на основании известных мировых данных. Данные настоящей работы указаны в виде точек:

ФТТ, том 49, вып. 9, 2007, стр. 1660–1663.

Штриховая линия показывает условную границу существования нового фазового состояния между парамагнитной и спин-стекольной фазой.

Фазовая диаграмма гомогенных медно-марганцевых сплавов $\text{Cu}_{1-x}\text{Mn}_x$
круглые светлые точки– для высокотемпературного перехода;
квадратные темные точки– для низкотемпературного перехода.

Магнитному фазовому переходу в состояние спинового стекла предшествует **переход в состояние суперпарамагнетика.**

Выводы по исследованию сплава $\text{Cu}_{1-x}\text{Mn}_x$

Т.о., концентрационная зависимость $T(x)$, как видно из фазовой диаграммы не противоречит тенденции изменения температуры перехода (T_G) в состояние спинового стекла (SG), что имеет место при $x < 0,15$. Для концентраций $x \sim 0,5$ наблюдается наибольший температурный интервал между двумя переходами.

Измерения показали, что новая фаза характеризуется сильной спиновой динамикой не только вблизи перехода, но при более низких температурах, вплоть до перехода в состояние спинового стекла.

Анализ полученных экспериментальных данных позволяет предположить, что в бинарных сплавах $\text{Cu}_{1-x}\text{Mn}_x$ при сравнительно больших концентрациях магнитных атомов Mn (x) в диапазоне температур от 250 К до 20 К могут реализоваться две фазы магнитоупорядоченного состояния. При более высоких температурах (выше 100 К) возникает состояние с повышенной спиновой динамикой с флуктуирующими случайными полями. В этой фазе параметры λ_D и Δ одного порядка. Описать экспериментальные данные удастся только с использованием более сложного вида G-функции.

При температуре ~ 70 К для всех исследованных концентраций наблюдается переход в фазу спинового стекла без флуктуирующих случайных полей, т.е. в фазу обычного спинового стекла.

Исследование магнитных свойств сплава $(\text{Pd}_{1-x}\text{Fe}_x)_{0.95}\text{Mn}_{0.05}$

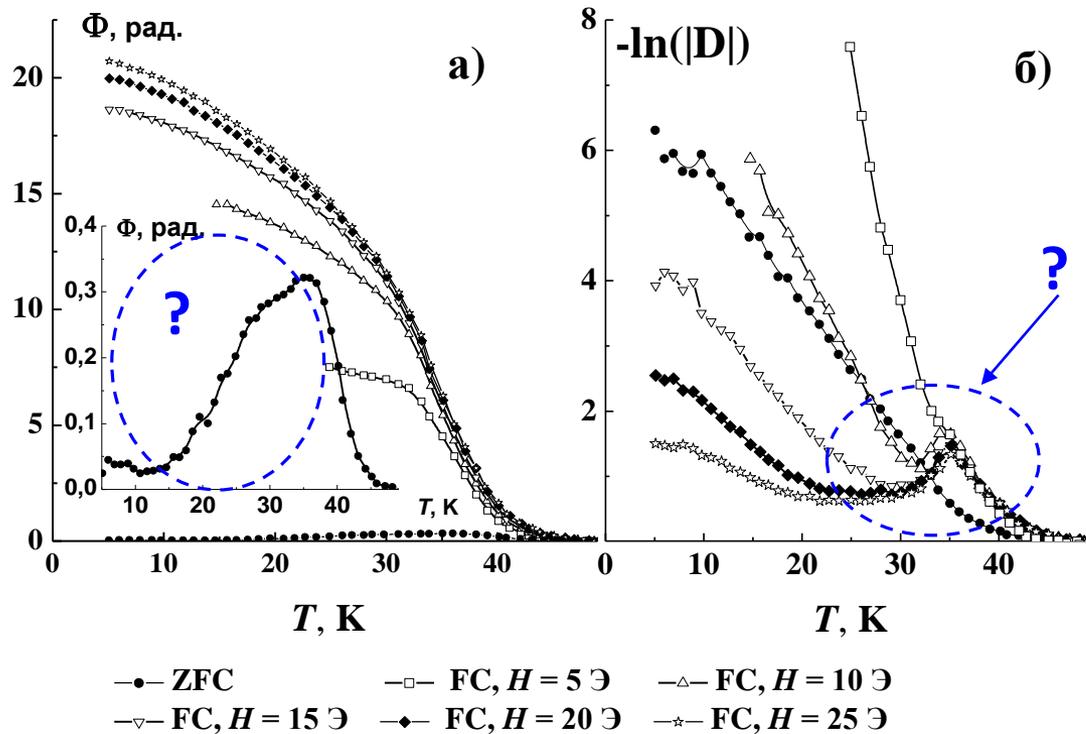
Как известно, сплавы палладия с небольшим количеством атомов Fe и Mn принадлежат к магнитным материалам, магнетизм которых обусловлен взаимодействием магнитных примесей через поляризованную матрицу Pd. Наличие двух типов примесных атомов в сплаве приводит к тому, что обменное взаимодействие между атомами имеет разные знаки: ферромагнитное и антиферромагнитное. В результате конкуренции этих взаимодействий некоторые спины примесей оказываются фрустрированными. Это отражается на корреляциях магнитных моментов атомов примесей, как на микроскопическом, так и на мезоскопическом масштабах длины.

В зависимости от соотношения количества ферро- и антиферромагнитных связей в сплаве могут образовываться различные магнитные мезоструктуры.

Так в сплаве $(\text{Pd}_{1-x}\text{Fe}_x)_{0.95}\text{Mn}_{0.05}$ с $x = 0,016$ при понижении температуры вначале существенную роль играют ферромагнитные связи, и сплав испытывает переход из парамагнитного состояния в ферромагнитное при температуре $T_c = 41$ К. При низких температурах образец переходит в состояние спинового стекла $T_g = 7 \div 10$ К.

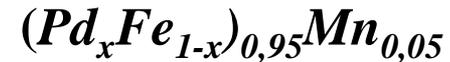
Однако исследования с помощью поляризованных нейтронов показывают, что в данном состоянии имеется значительная коллинеарная составляющая намагниченности, что свидетельствует об асперомагнетизме на микроскопическом уровне.

Поляризованные нейтроны



Температурные зависимости угла поворота

Φ (а) и деполяризации $-\ln(|D|)$ (б).

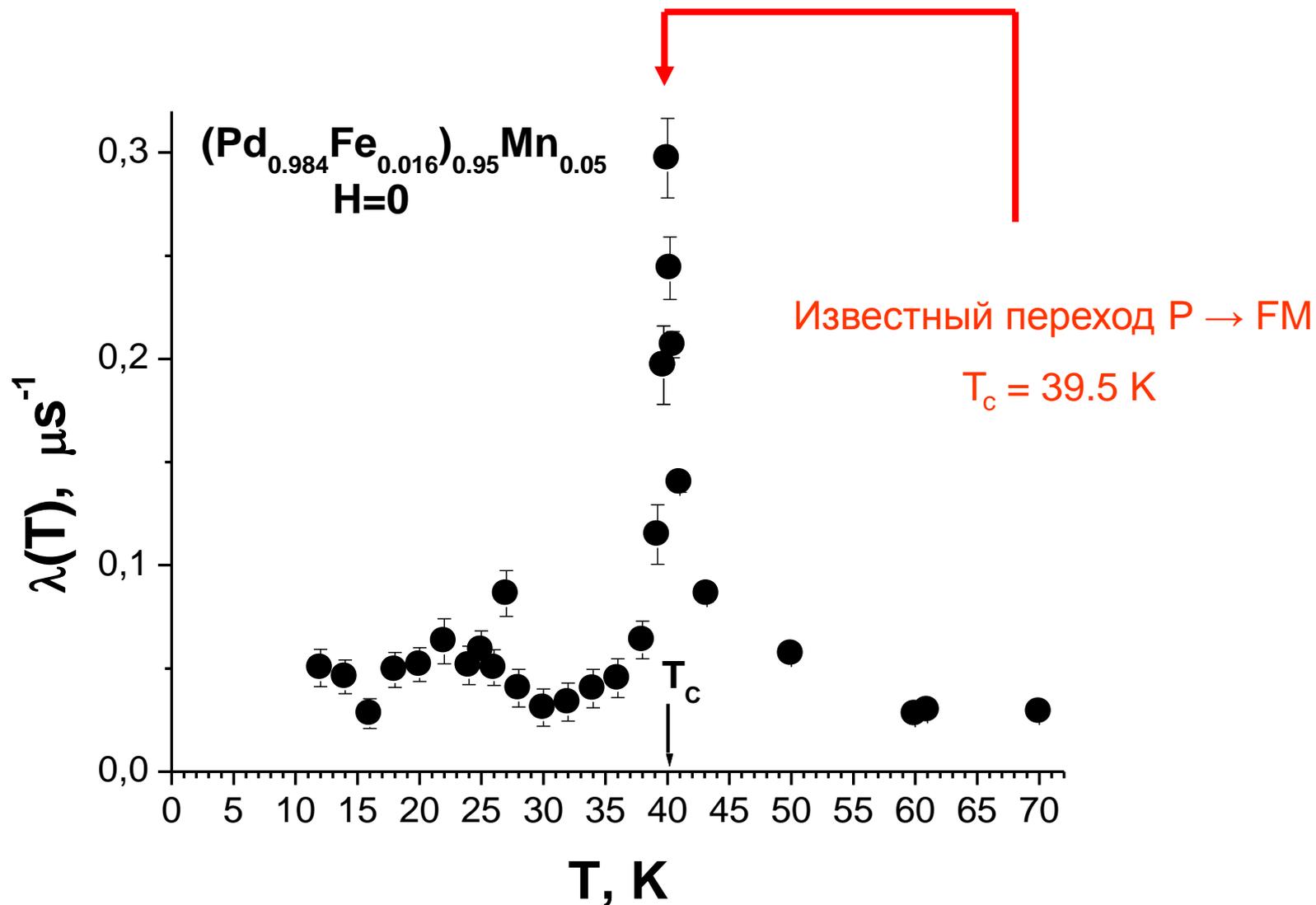


1. Восприимчивость дает два перехода:
 $T = 39$ К (P→FM),
 $T = 7 \div 10$ К (FM→SG).
2. Уменьшение деполяризации нейтронов: при $T < 28$ К
3. Наблюдается гистерезис.

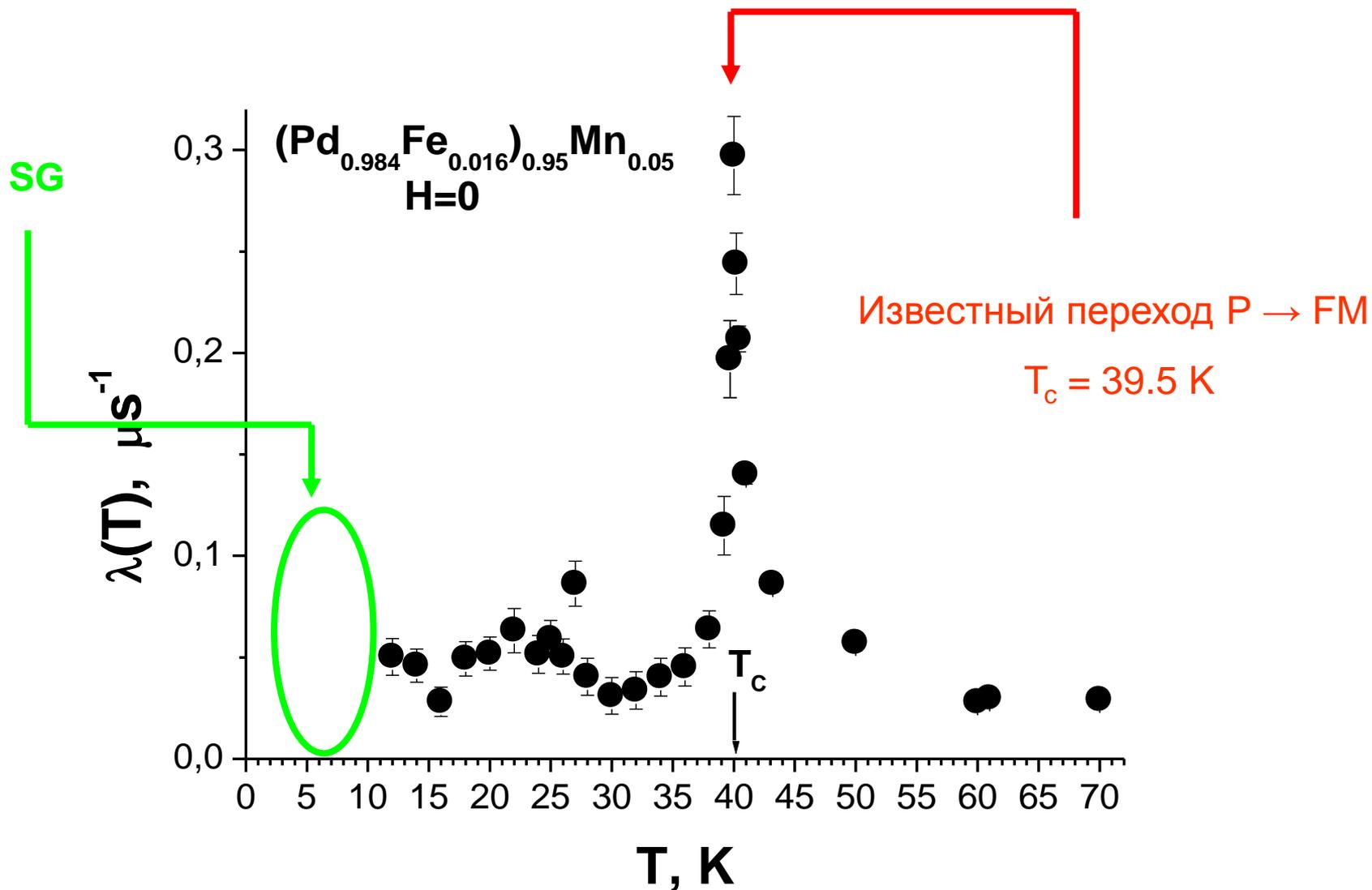
Цель работы:

Детальное исследование этих областей

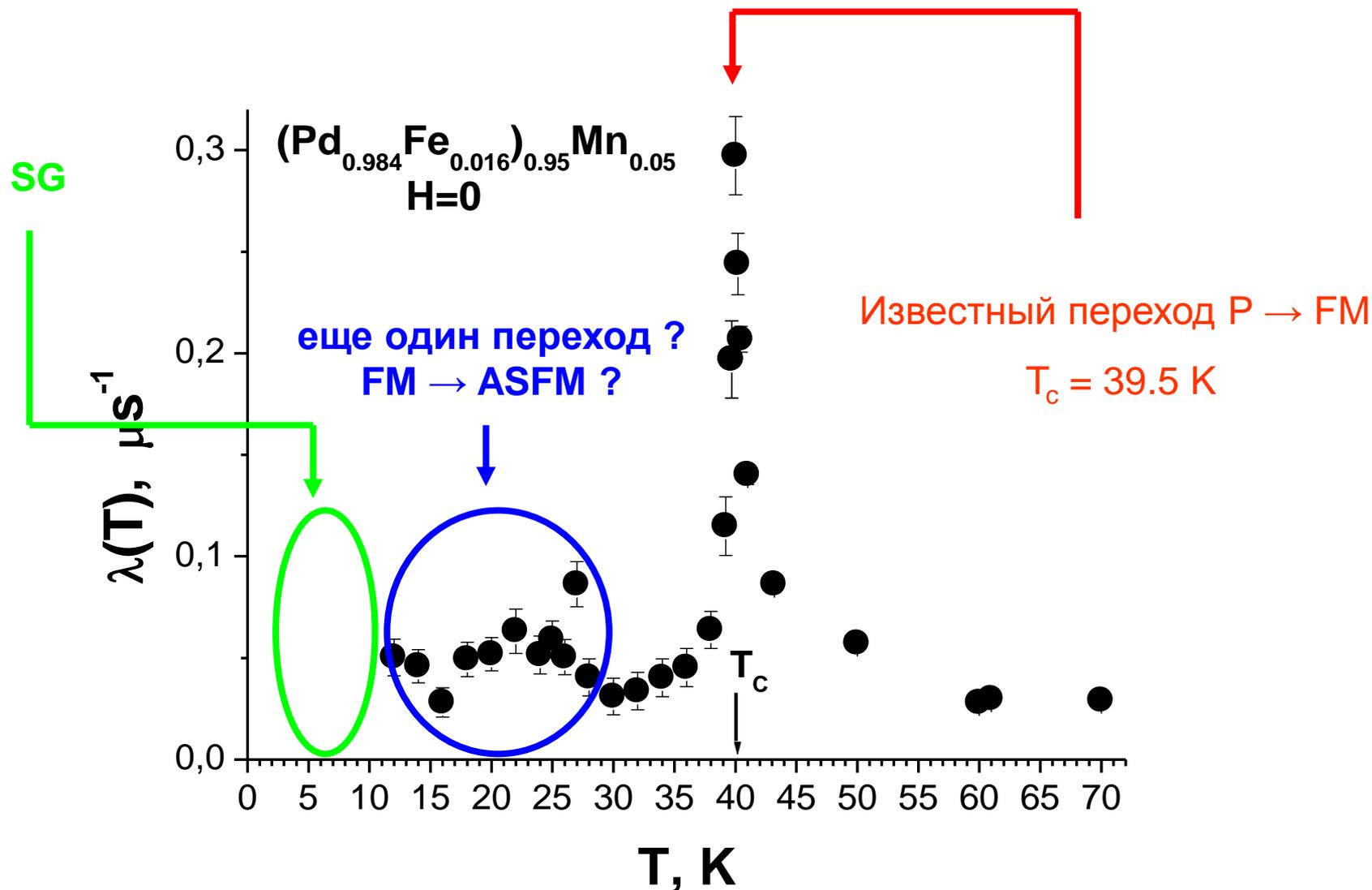
Скорость релаксации

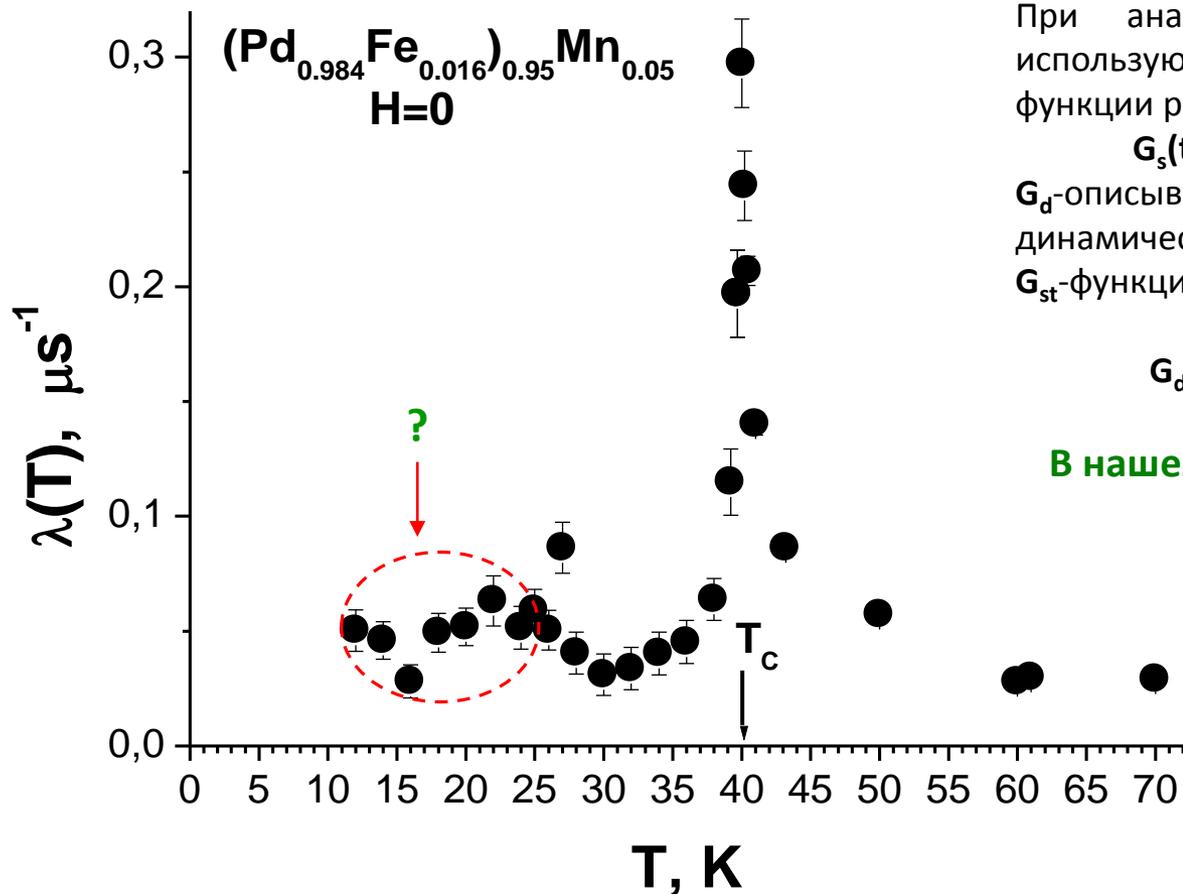


Скорость релаксации



Скорость релаксации





При анализе экспериментальных данных используют предположение о факторизации функции релаксации :

$$G_s(t) = G_d(t) \cdot G_{st}(t)$$

G_d -описывает релаксацию, обусловленную динамическими эффектами;

G_{st} -функция релаксации в статических полях.

$$G_d(t) = \exp(-\lambda \cdot t)^k, \quad k - \text{от } 0 \text{ до } 2.$$

В нашем случае достаточно $k = 1$.

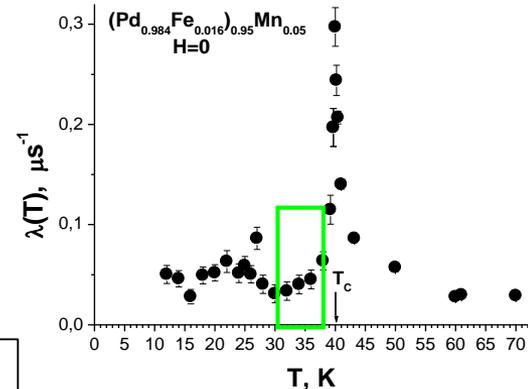
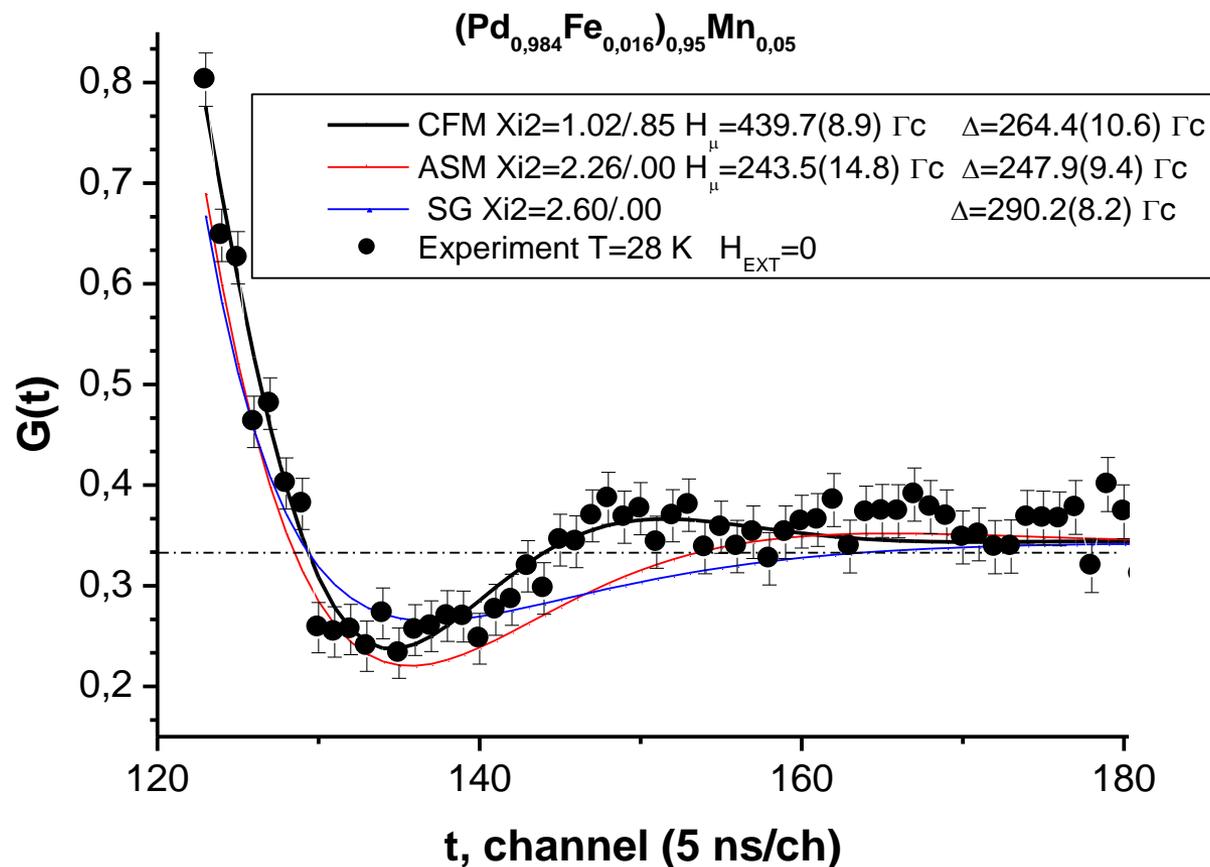
Температурная зависимость динамической скорости релаксации λ .

Внутри FM появляется SG, т.е. еще один переход FM-ASFM при $T < 28 \text{ K}$
 отклонение от ферромагнетика?

Нужно отметить высокую однородность изготовленного образца

CFM или ASM или SG?

(разные G(t))



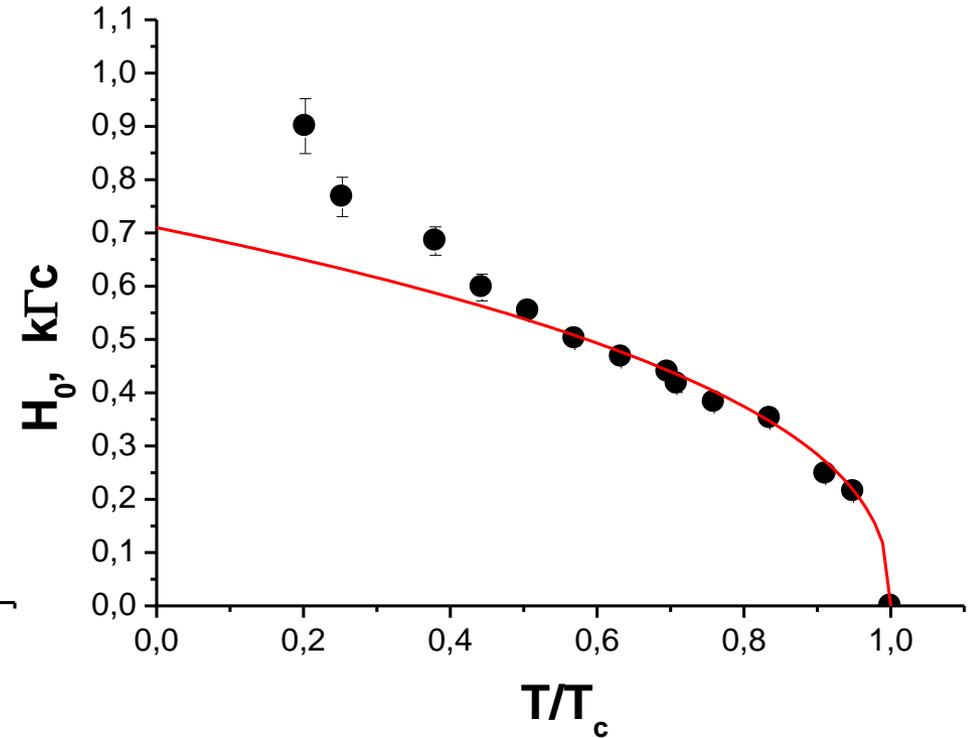
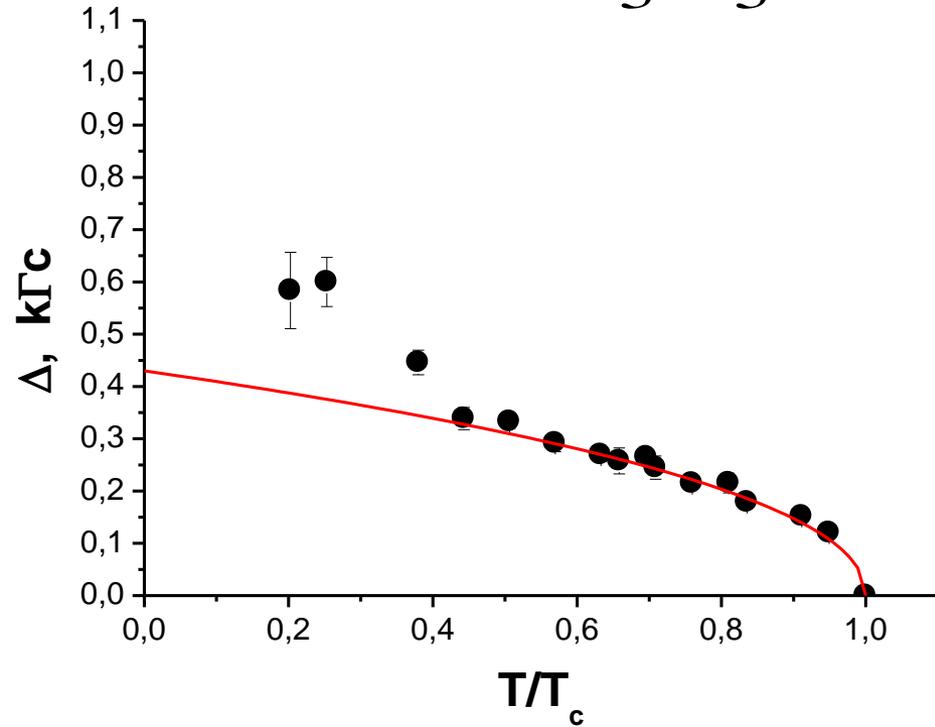
Вид функции релаксации спина мюона при $T = 28$ К в $H_{\text{ext}} = 0$.

Коллинеарный ферромагнетик:
$$G_s(t) = \left[\frac{1}{3} + \frac{2}{3} \cdot (\cos \Omega \cdot t \cdot e^{-\Delta \cdot t}) \right] \cdot e^{-\lambda \cdot t}$$

При $T \geq 28$ К.

Зависимость разброса Δ статических полей и величины среднего поля H от T .

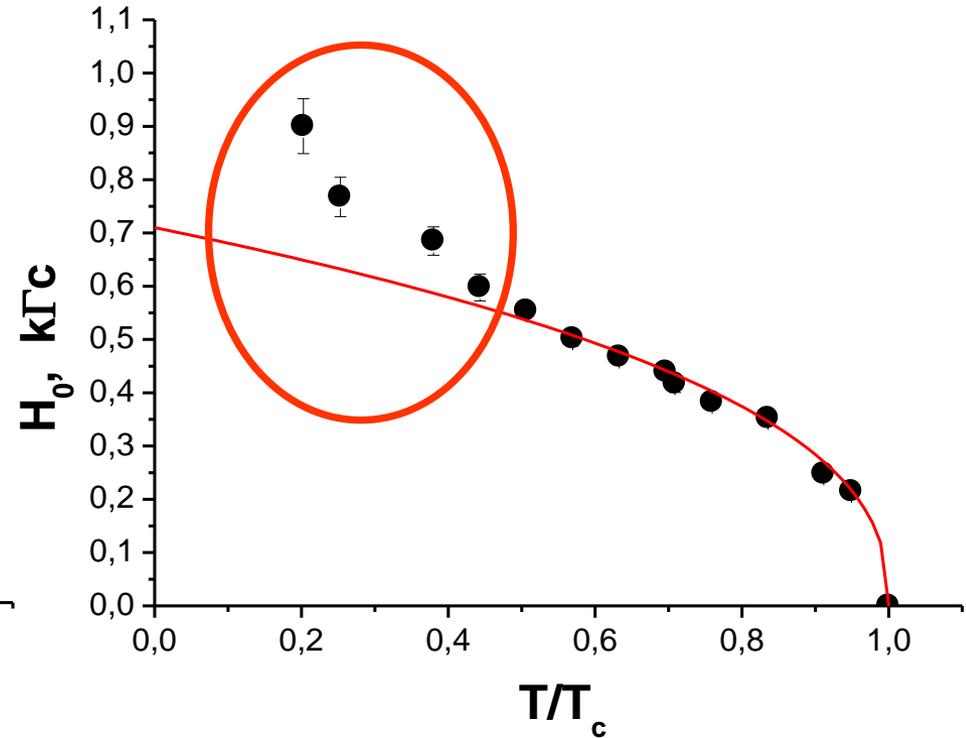
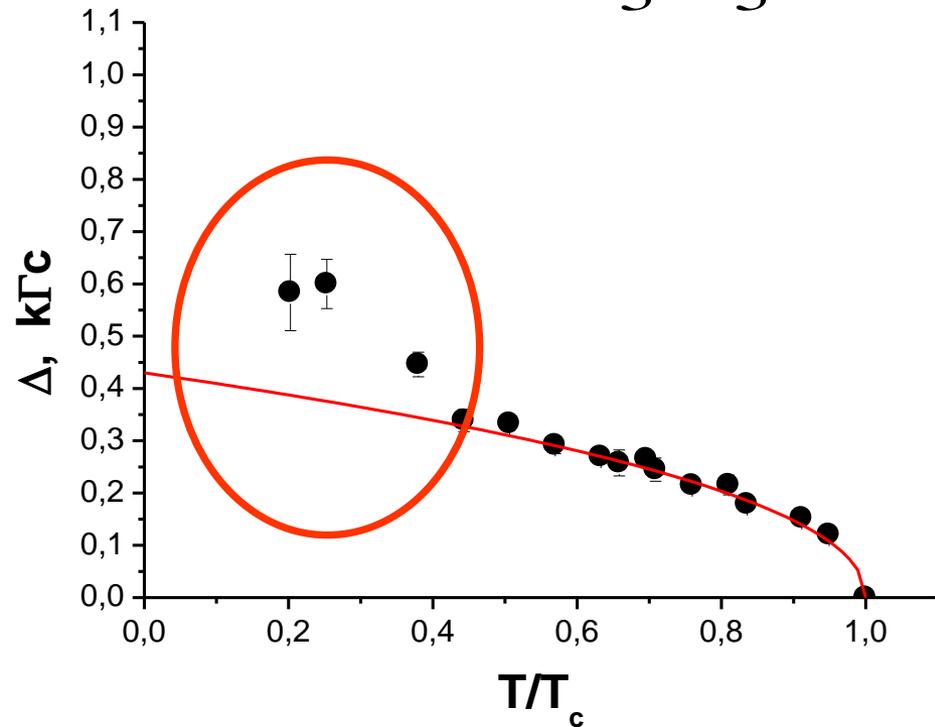
$$G_s(t) = \left[\frac{1}{3} + \frac{2}{3} \cdot (\cos \Omega \cdot t \cdot e^{-\Delta \cdot t}) \right] \cdot e^{-\lambda \cdot t}$$



Кривые есть аппроксимация экспериментальных данных при помощи: H (или Δ) $\sim (1 - T/T_c)^\beta$, где $\beta = 0.40 \pm 0.02$ - это соответствует 3d-магнетику Гейзенберговского типа

Зависимость разброса Δ статических полей и величины среднего поля H от T .

$$G_s(t) = \left[\frac{1}{3} + \frac{2}{3} \cdot (\cos \Omega \cdot t \cdot e^{-\Delta \cdot t}) \right] \cdot e^{-\lambda \cdot t}$$

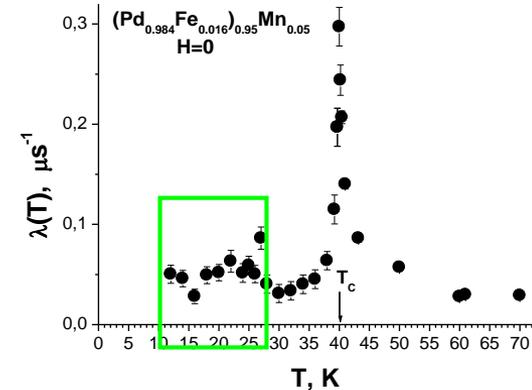
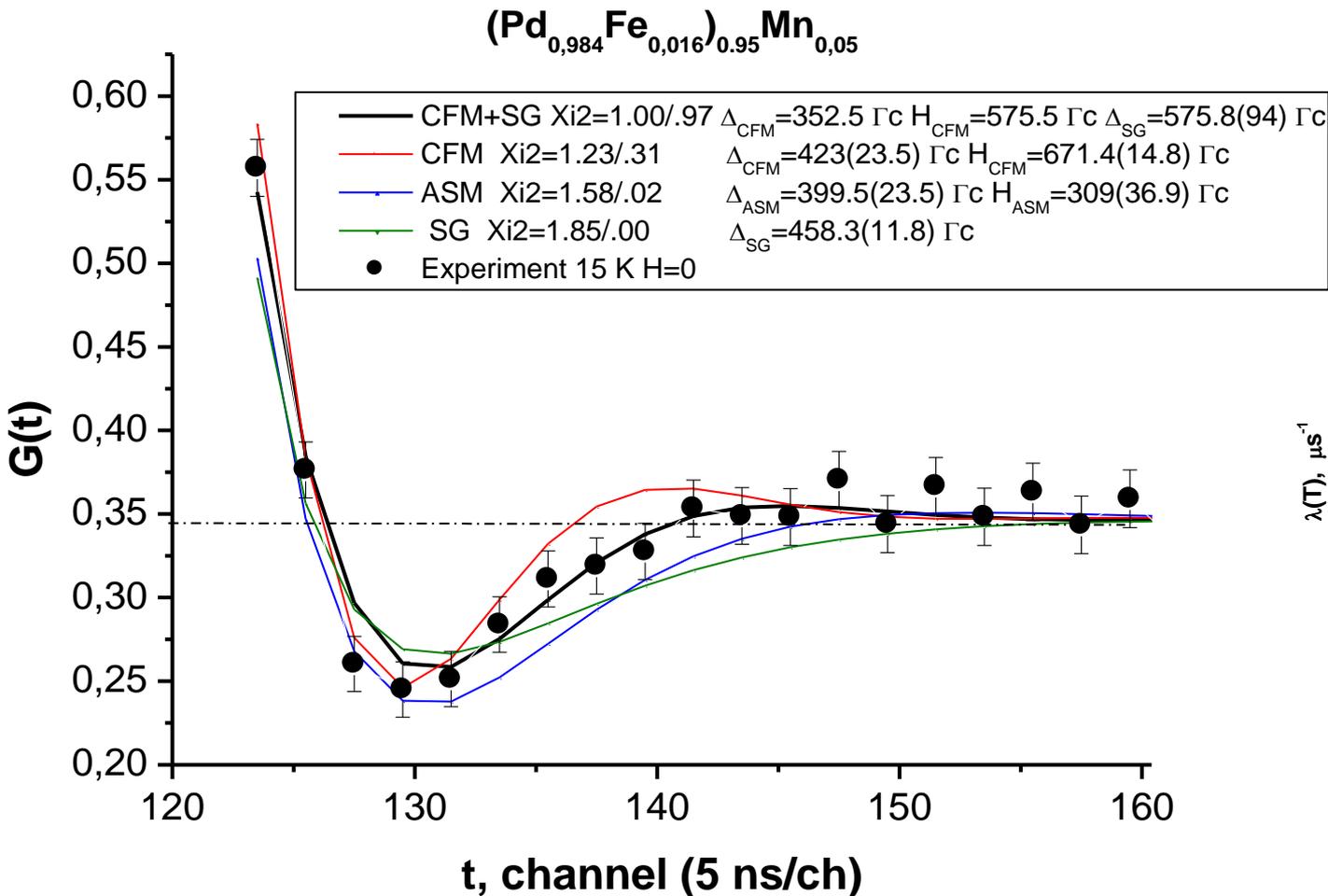


Кривые есть аппроксимация экспериментальных данных при помощи: H (или Δ) $\sim (1-T/T_c)^\beta$, где $\beta=0.40 \pm 0.02$ - это соответствует 3d-магнетику Гейзенберговского типа

При $T < 28$ К видим отклонение от ферромагнетика.

при $T < 28$ К сумма двух функций **CFM + SG**.

$$G_s(t) = a_{FM} \cdot \left(\frac{1}{3} + \frac{2}{3} \cdot \cos(H_0 \cdot t) \cdot e^{-\Delta \cdot t}\right) + a_{SG} \cdot \left(\frac{1}{3} + \frac{2}{3} \cdot (1 - \Delta \cdot t) \cdot e^{-\Delta \cdot t}\right)$$

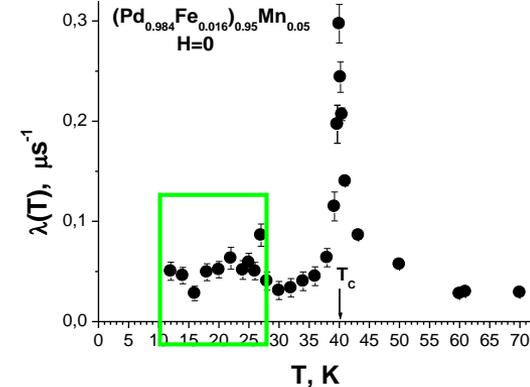
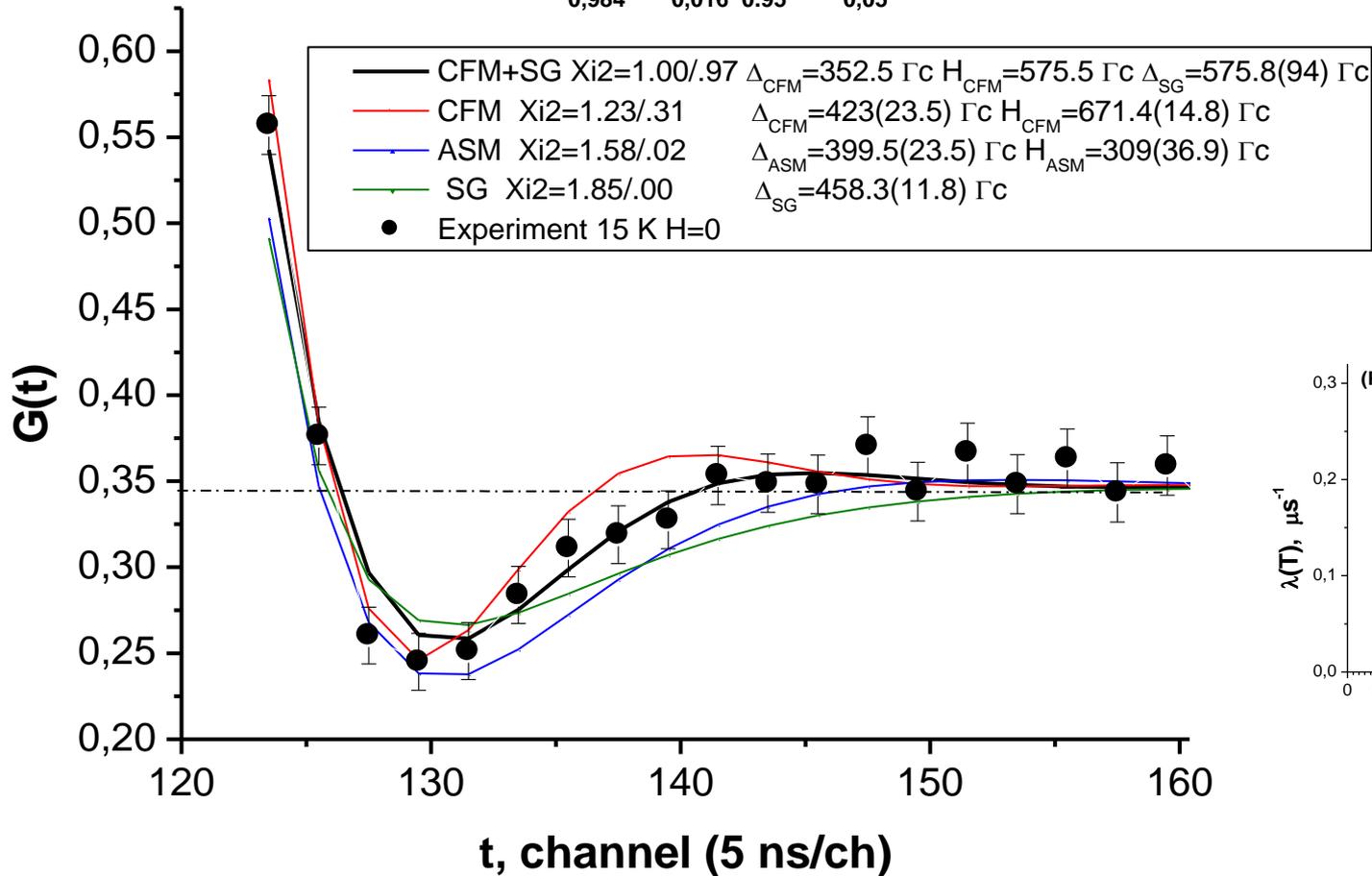


CFM+SG

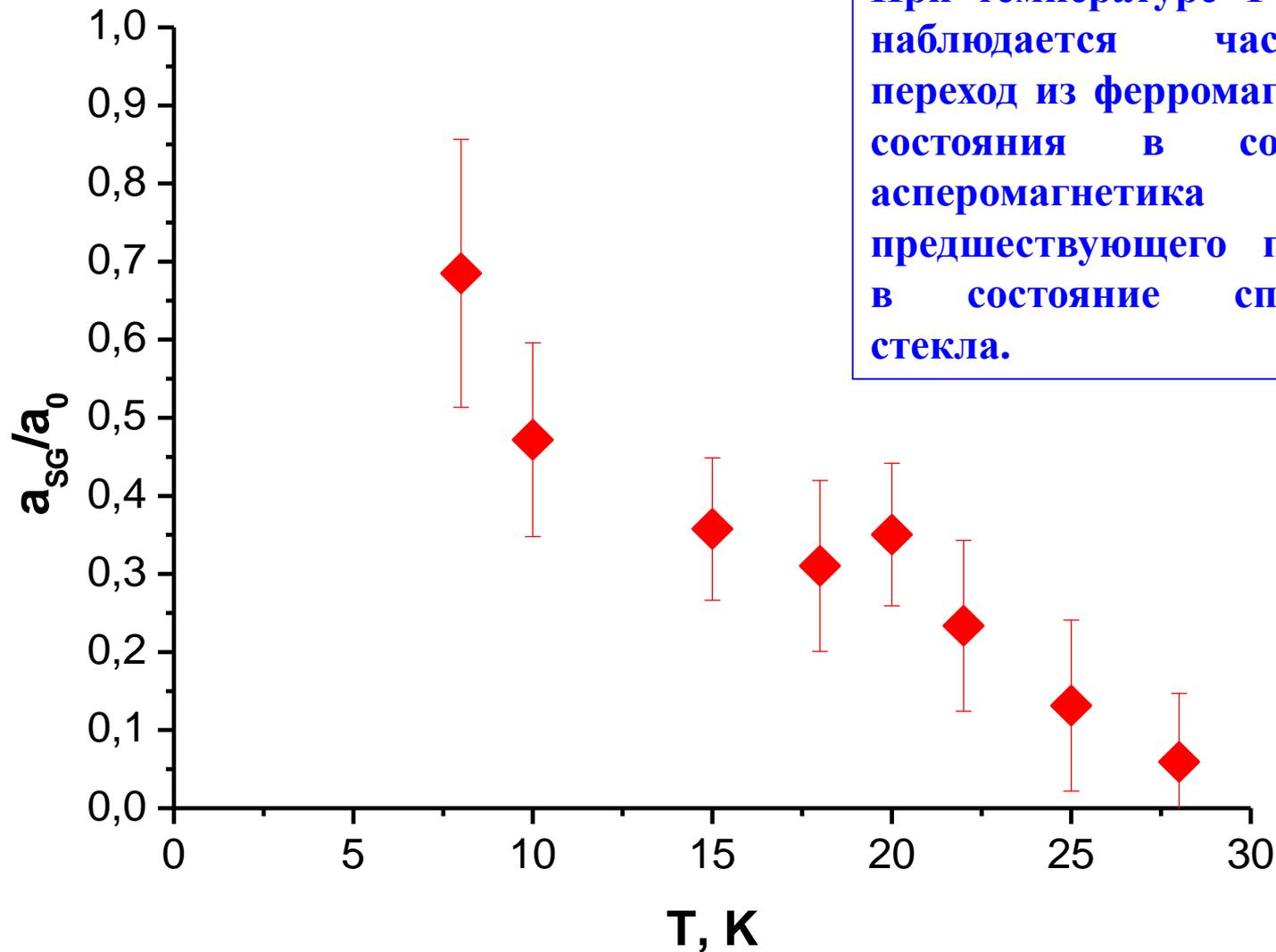
$$G_s(t) = a_{FM} \cdot \left(\frac{1}{3} + \frac{2}{3} \cdot \cos(H_0 \cdot t) \cdot e^{-\Delta \cdot t}\right) + a_{SG} \cdot \left(\frac{1}{3} + \frac{2}{3} \cdot (1 - \Delta \cdot t) \cdot e^{-\Delta \cdot t}\right)$$

$a_{FM} + a_{SG} = a_0$ - начальная асимметрия распада

фоновая компонента уже вычтена

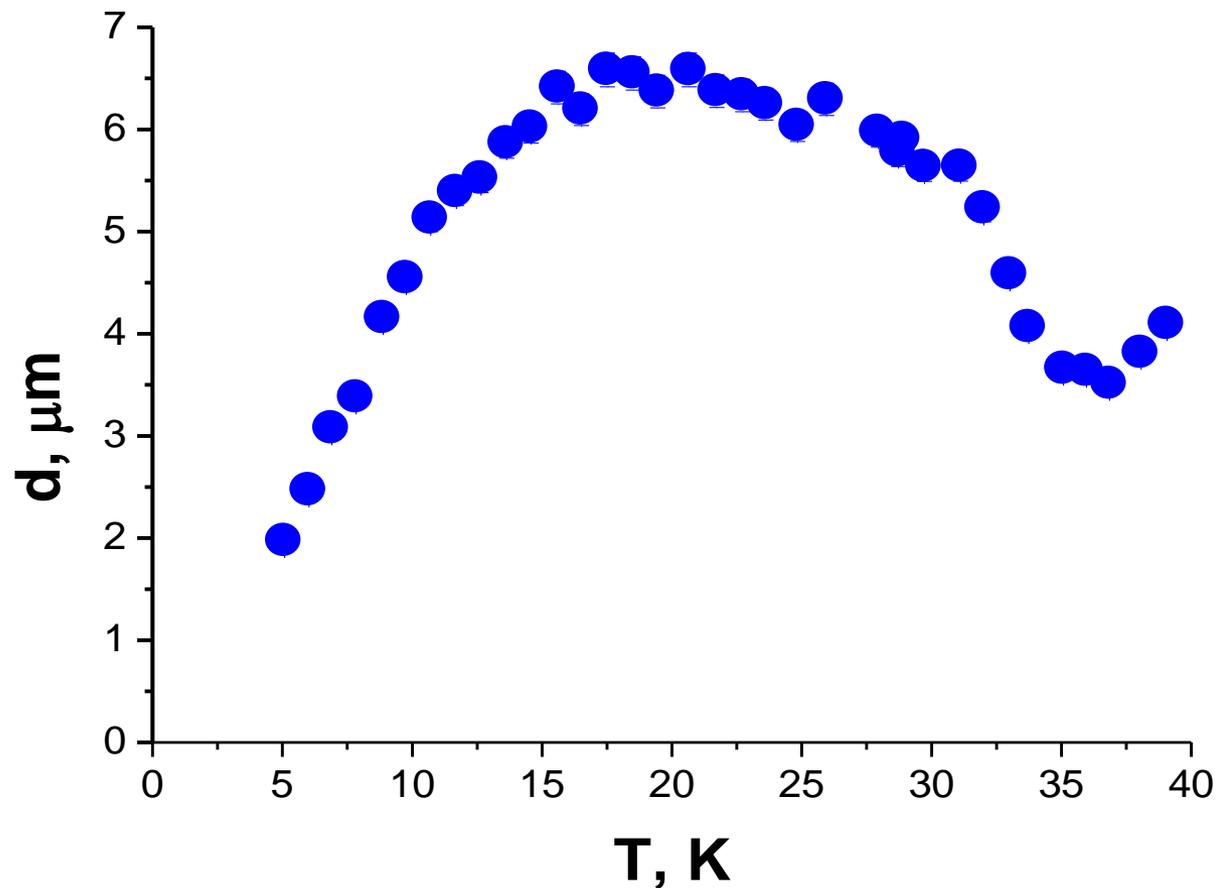


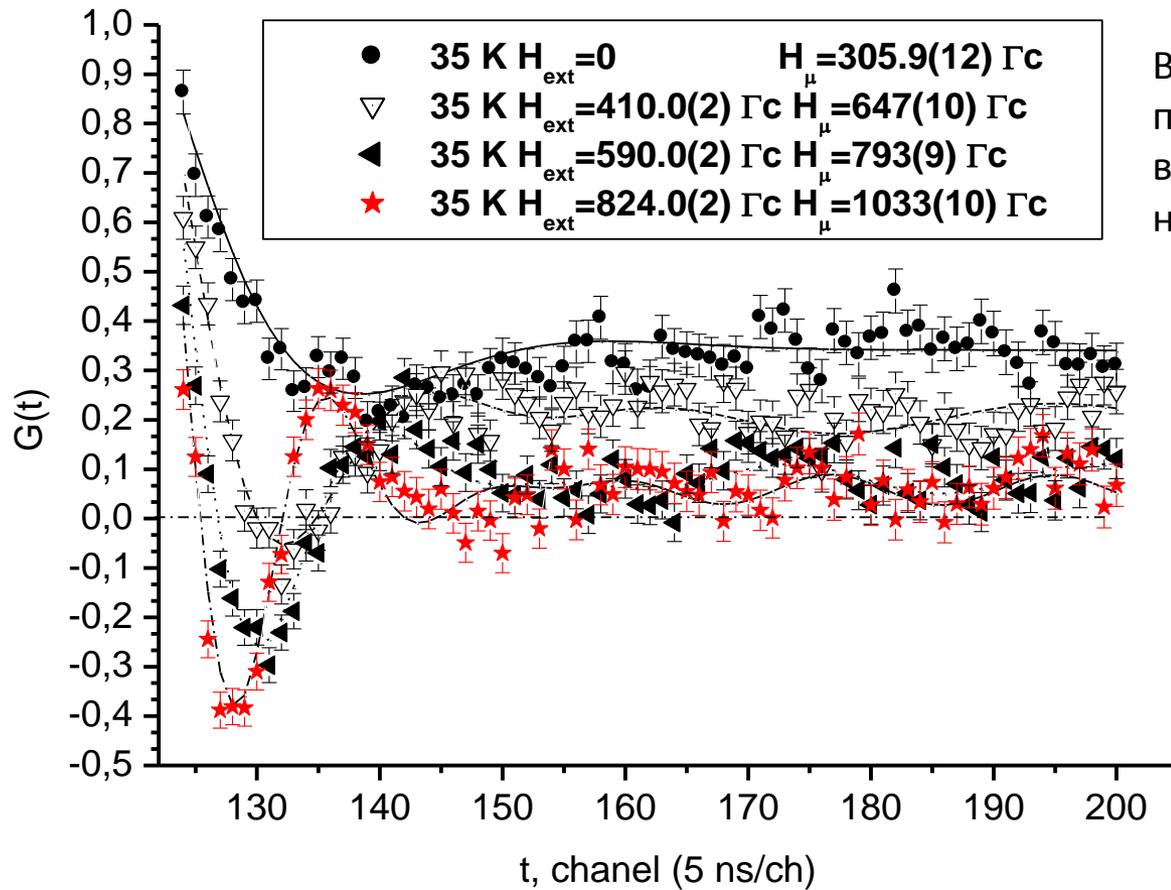
Вид функции релаксации спина мюона при $T = 15$ К описанной через сумму двух функций **CFM + SG**.



Температурная зависимость доли спин-стекольного вклада в деполяризацию ансамбля мюонов.

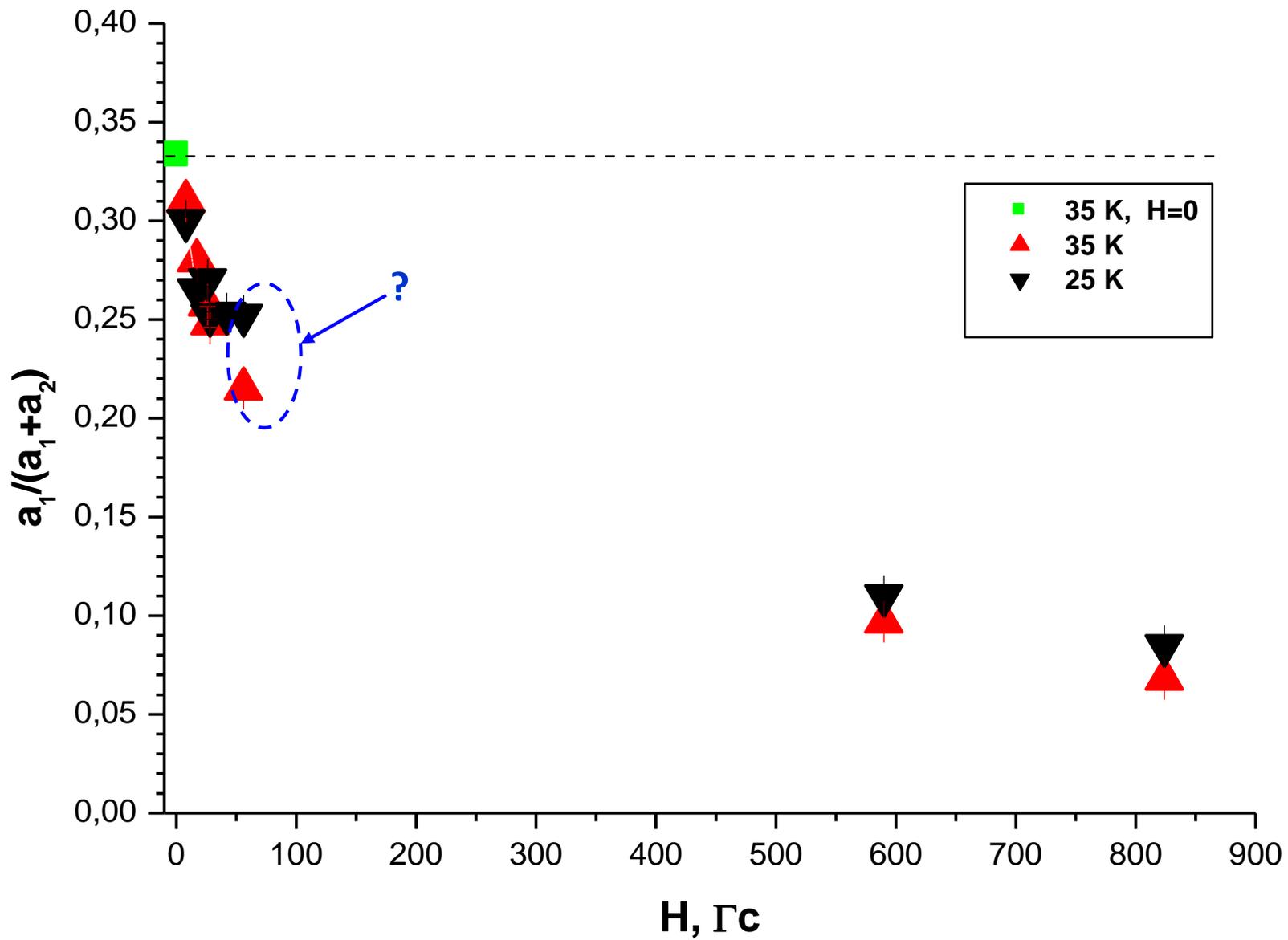
Совместный анализ деполяризации нейтрона и мюона использован для
определения размеров магнитных кластеров





Видно, что при $H_{\perp} \sim 800$ Гс происходит почти полная выстройка доменов по направлению приложенного поля

Вид функции релаксации для различных внешних полей.

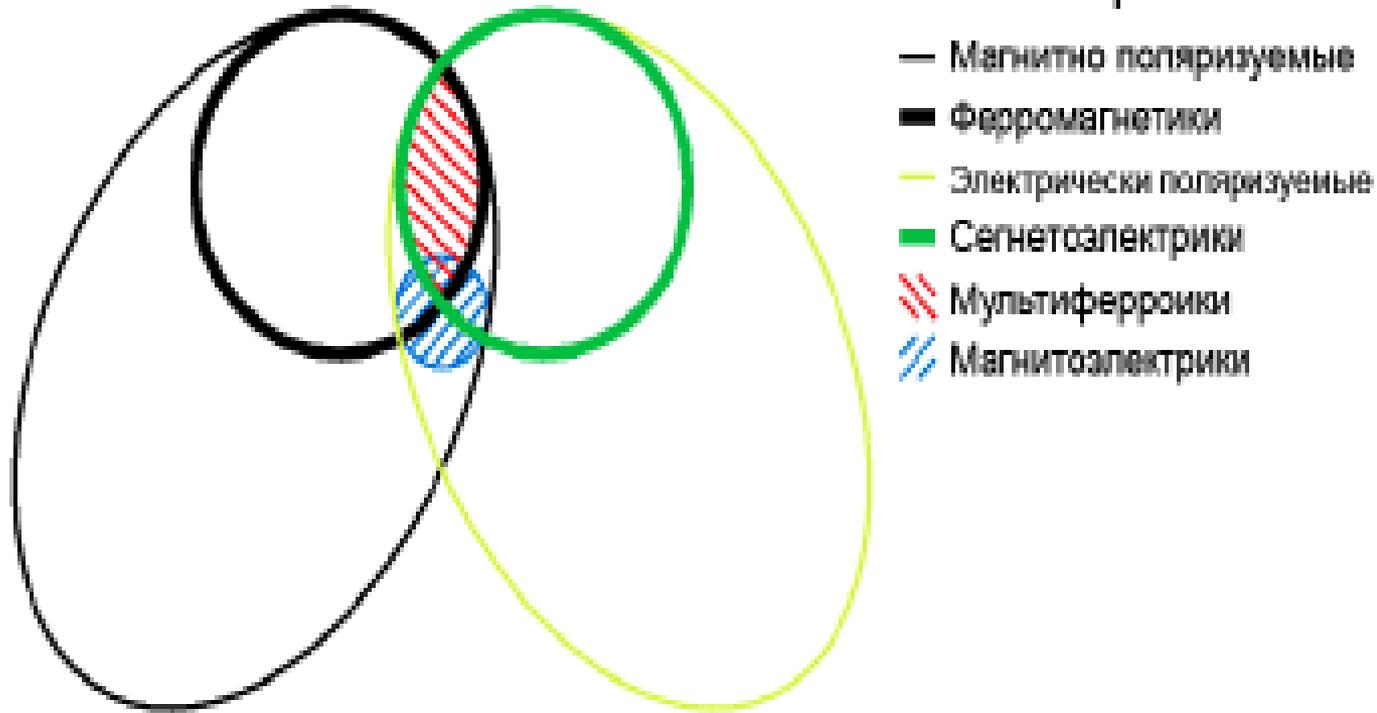


Выводы по исследованию сплава $(Pd_xFe_{1-x})_{0,95}Mn_{0,05}$

- Исследование сплава $(Pd_xFe_{1-x})_{0,95}Mn_{0,05}$ с $x=0,98$ методом μSR еще раз продемонстрировало эффективность этого метода при исследовании магнитных материалов.**
- Была отмечена высокая однородность изготовленного образца.**
- При температуре ниже 39.5 K в нулевом внешнем магнитном поле образец находится в состоянии коллинеарного ферромагнетика с изотропной ориентацией локальных статических магнитных полей.**
- При понижении температуры в образце, на фоне коллинеарного ферромагнетика, появляется фракция спинового стекла, за долго до перехода образца в спин-стекольное состояние при $T_g=7-10\text{ K}$.**
- Приложение внешнего поперечного магнитного поля ведет к постепенному, с ростом величины прикладываемого поля, росту анизотропии образца и приводит к переориентации доменов в направлении приложенного поля.**

Мультиферроики

Материалы



В последние годы интересны материалы, в которых сосуществуют магнитное и электрическое упорядочения.

Применение: для сенсорной техники, магнитной памяти и микроэлектроники, в частности спинтроники,

Наиболее интересны мультиферроики с близкими температурами магнитного и ферроэлектрического упорядочения.

Представителями таких соединений, в частности, являются манганиты RMnO_3 и манганаты RMn_2O_5 (R – металл редкоземельной группы элементов), AFM и FE порядки в этих материалах реализуются при близких значениях температуры (30– 40 K).

Исследование мультиферроиков RMnO_3

HoMnO_3

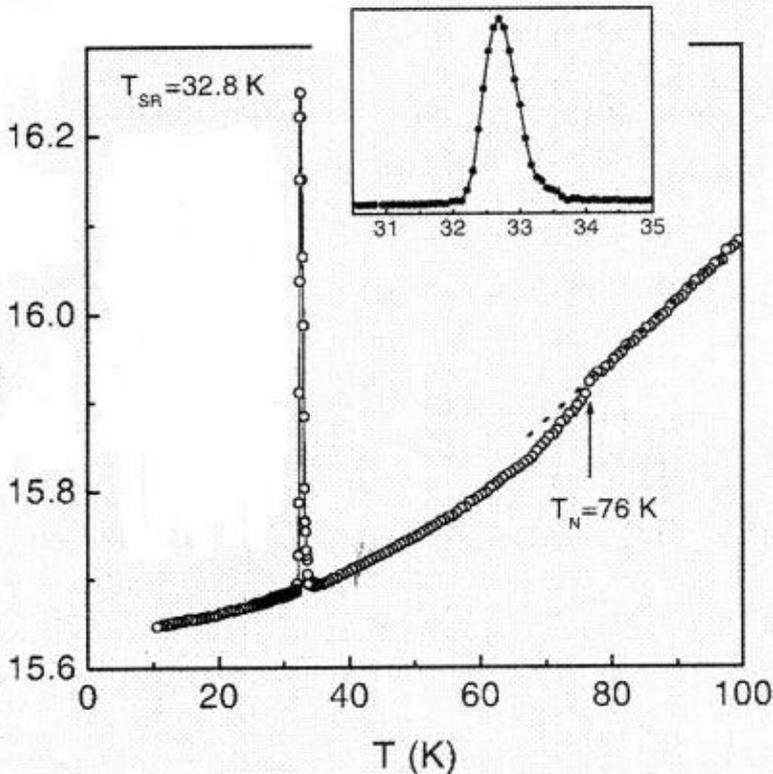


Рис. Температурная зависимость диэлектрической проницаемости ϵ для образца HoMnO_3

Известны в литературе два перехода:

- 1). Слабовыраженный РМ-AFM при температуре T_{N} ;
- 2). Поляризация спина электронов проводимости гексагональной структуры при температуре T_{SR} .
- 3). В T_{SR} происходит поворот спинов Mn на 90° .

Вопрос: каковы внутренние магнитные поля и что происходит в этих переходах???

M.Fiebig, D.Fröhlich, K.Kohn et al., Phys. Rev. Lett. 84, 5620 (2000).

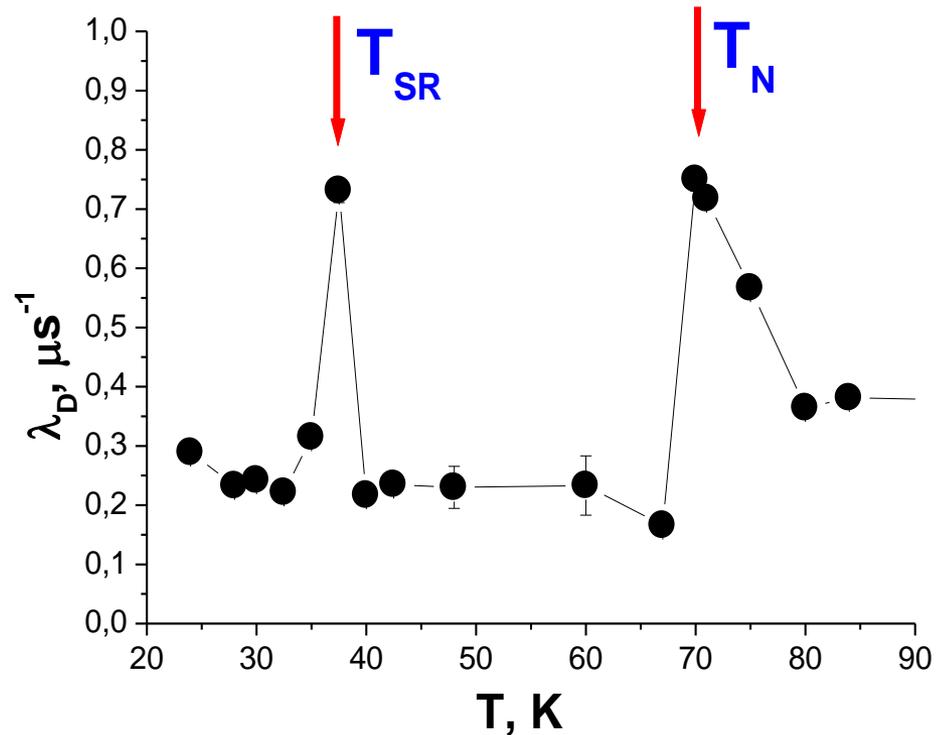
B.Lorenz, A.P.Litvinchuk, M.M.Gospodinov and C.W.Chu. Phys. Rev. Lett. 92, 087204 (2004).

B. Lorenz, Y.Q. Wang, Y.Y. Sun and C.W. Chu. Phys. Rev. B 70, 212412 (2004).

HoMnO₃ (керамика)

Изготовитель образцов МИСиС, Москва

два перехода:



Письма в ЖЭТФ, том 85, вып. 12, 2007, стр. 795-798.

Детальное изучение функции релаксации поляризации мюонов G_s позволяет определить параметры распределения локальных магнитных полей при различных температурах исследуемых образцов.

Так для образца HoMnO_3 функцию релаксации поляризации остановившихся мюонов $G_s(t)$ в нулевом магнитном поле удаётся описать зависимостью:

$$G_s(t) = [a_1 \cdot (1/3 + 2/3 \cdot \cos(\Omega_1 \cdot t) \cdot \exp(-\Delta_1 \cdot t)) + a_2 \cdot (1/3 + 2/3 \cdot \cos(\Omega_2 \cdot t) \cdot \exp(-\Delta_2 \cdot t))] \cdot \exp(-\lambda_d \cdot t),$$

где $a_1 + a_2 = a_s$ – начальная асимметрия распада мюонов, остановившихся в образце;

λ_d – скорость динамической релаксации;

$\Omega_{1,2} = 2 \cdot \pi \cdot F_{1,2}$ – циклические частоты (связанные со средним локальным полем в месте локализации мюона);

$\Delta_{1,2}$ – распределение частот, связанный с разбросом внутренних магнитных полей.

На рисунках 2 и 3, для примера, приведены функции релаксации поляризации $G_s(t)$ для образца HoMnO_3 для двух характерных температур (между первым и вторым фазовыми переходами $T = 50$ К и после второго, спин-ротационного перехода $T = 30$ К).

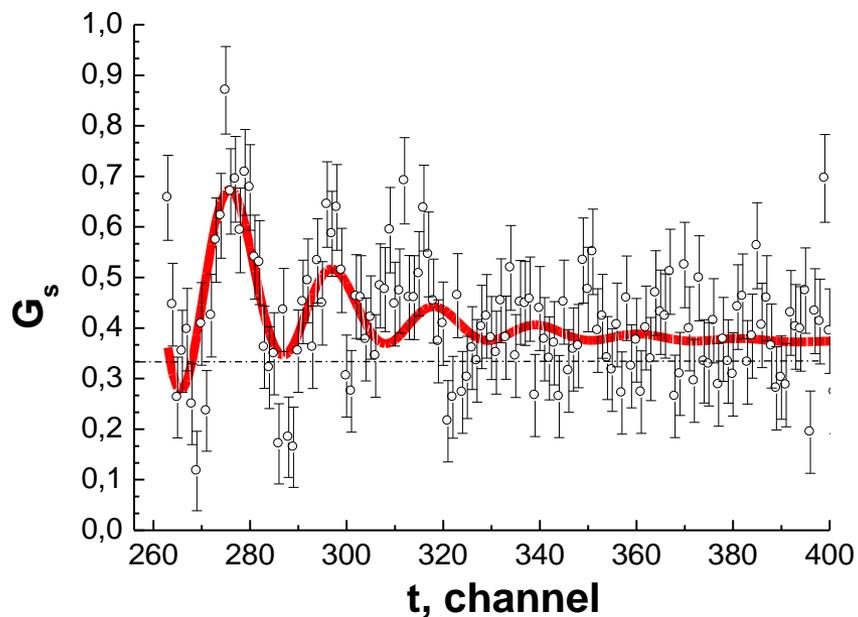


Рис. 2. Функции релаксации поляризации $G_s(t)$ для образца HoMnO_3 в нулевом поле при температуре 50 К; $a_1=0,173(9)$; $a_2=0,099(9)$; $F_1=58(1)$ МГц; $\Delta_1=48(7)$ МГц; $F_2=0$ МГц; $\Delta_2=37(7)$ МГц. По горизонтальной шкале (время t) один канал соответствует 0,8 нс, ноль времени находится в 256 канале.

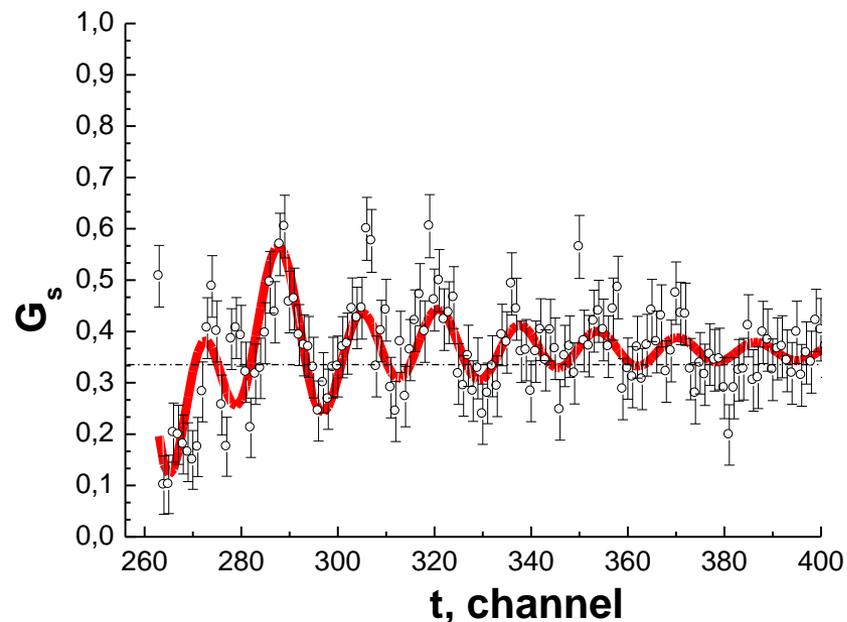


Рис. 3. Функции релаксации поляризации $G_s(t)$ для образца HoMnO_3 в нулевом поле при температуре 30 К; $a_1=0,100(26)$; $a_2=0,172(26)$; $F_1=75(4)$ МГц; $\Delta_1=24(2)$ МГц; $F_2=40(1)$ МГц; $\Delta_2=63(6)$ МГц. По горизонтальной шкале (время t) один канал соответствует 0,8 нс, ноль времени находится в 256 канале.

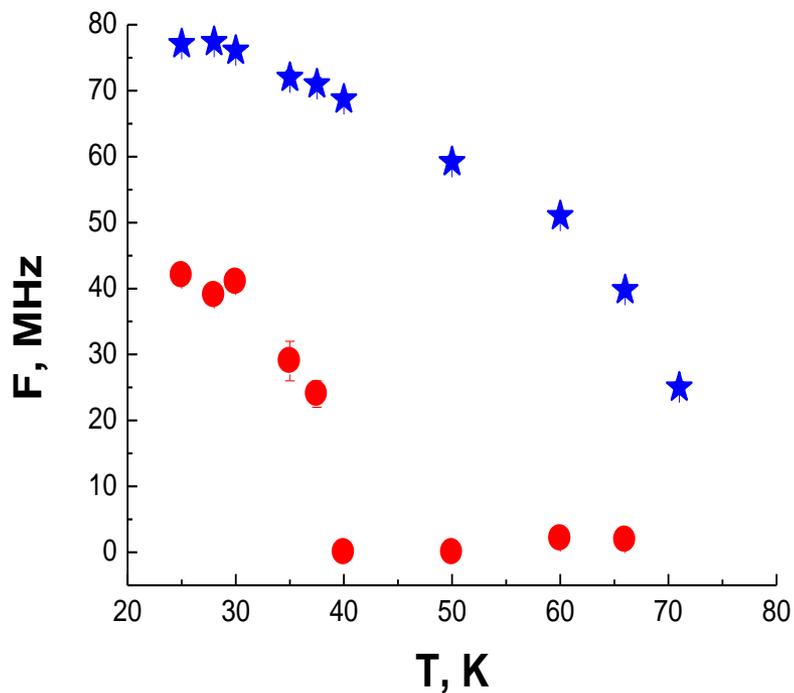


Рис. 4. Поведение частот наблюдаемой прецессии F от температуры образца HoMnO_3 в нулевом поле. Звездочки – F_1 , круглые точки – F_2 .

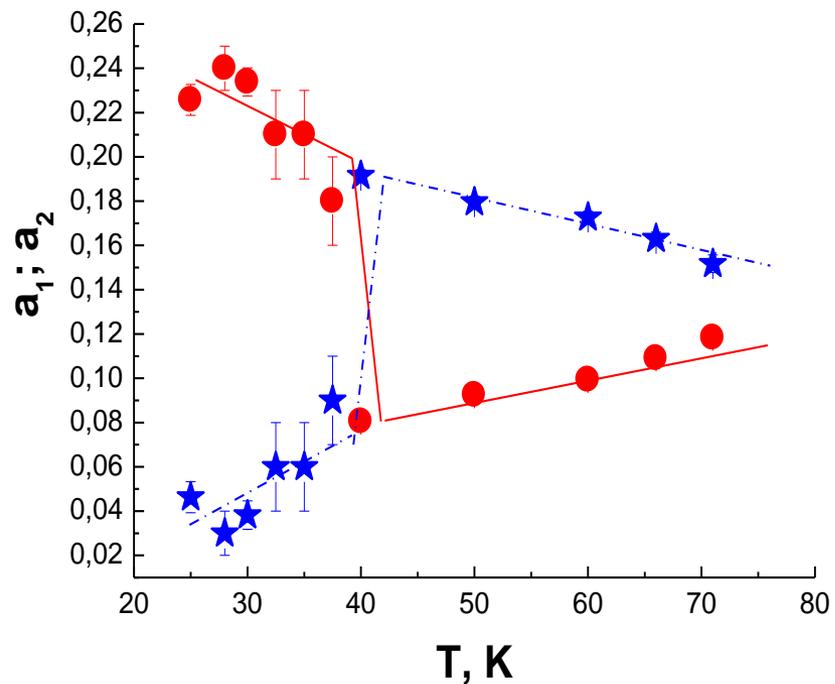


Рис. 5. Зависимость асимметрии от температуры образца HoMnO_3 в нулевом поле. Линии нанесены для наглядности поведения зависимости. Звездочки – a_1 , круглые точки – a_2 , где $a_1 + a_2 = a_s$.

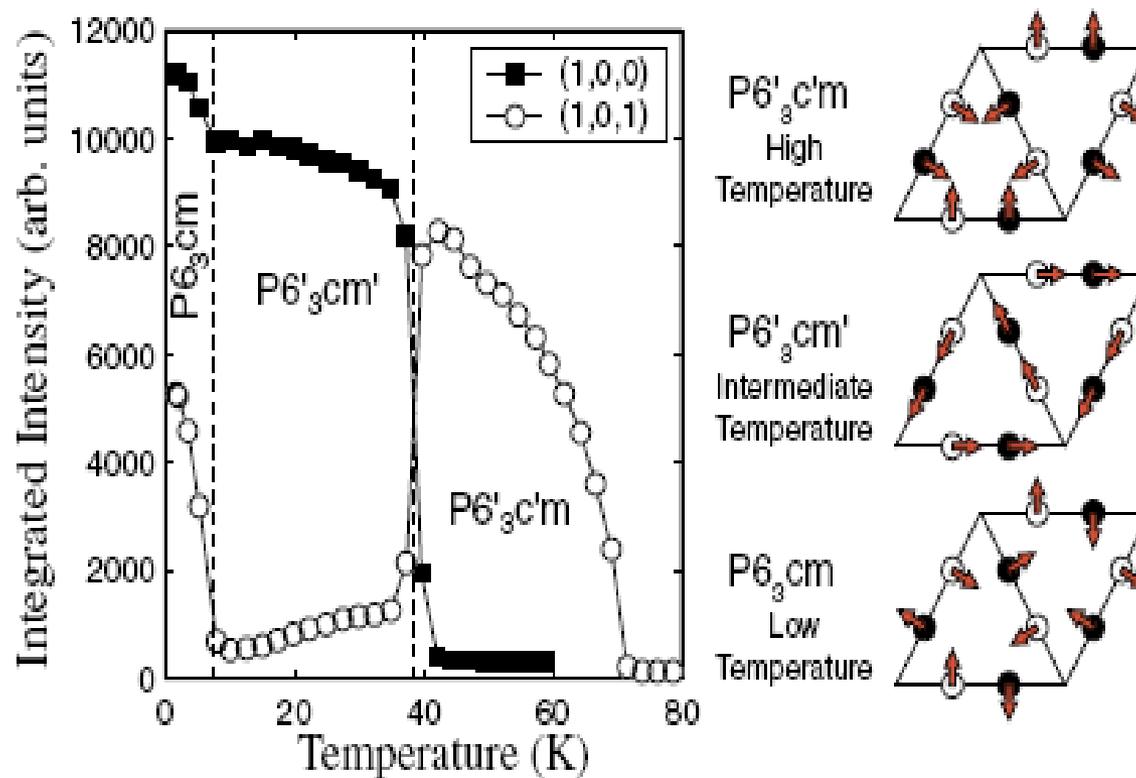
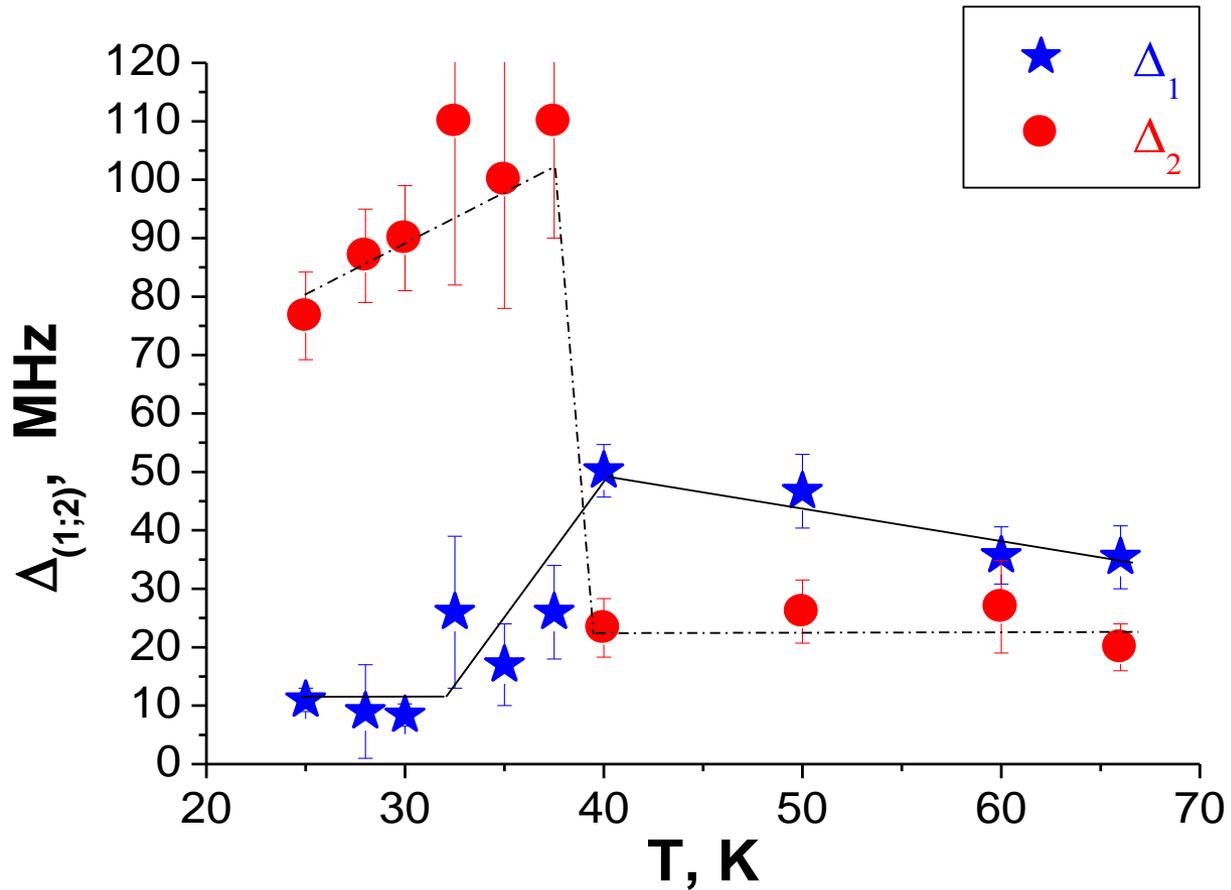


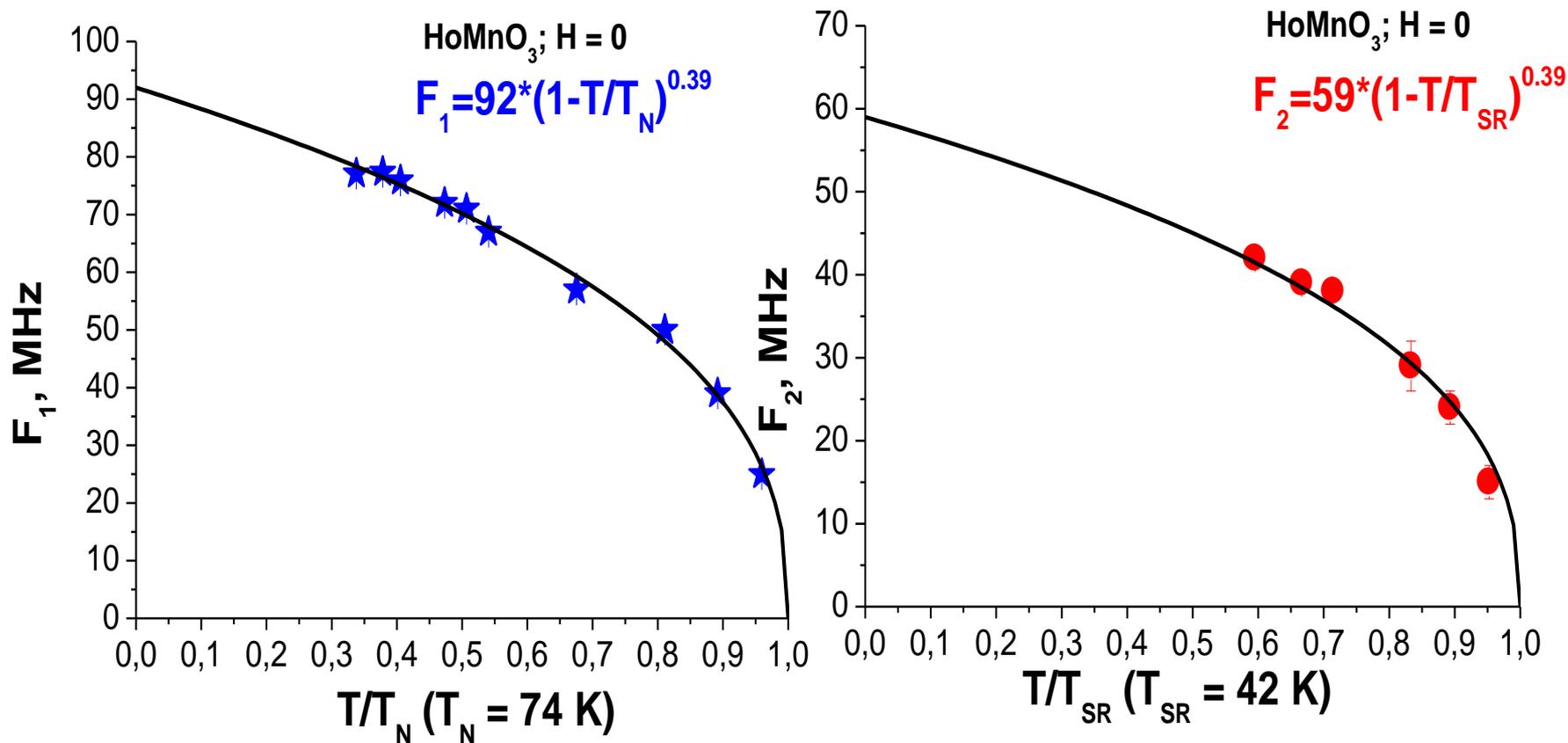
Рис. Температурная зависимость интегральной интенсивности нейтронов.

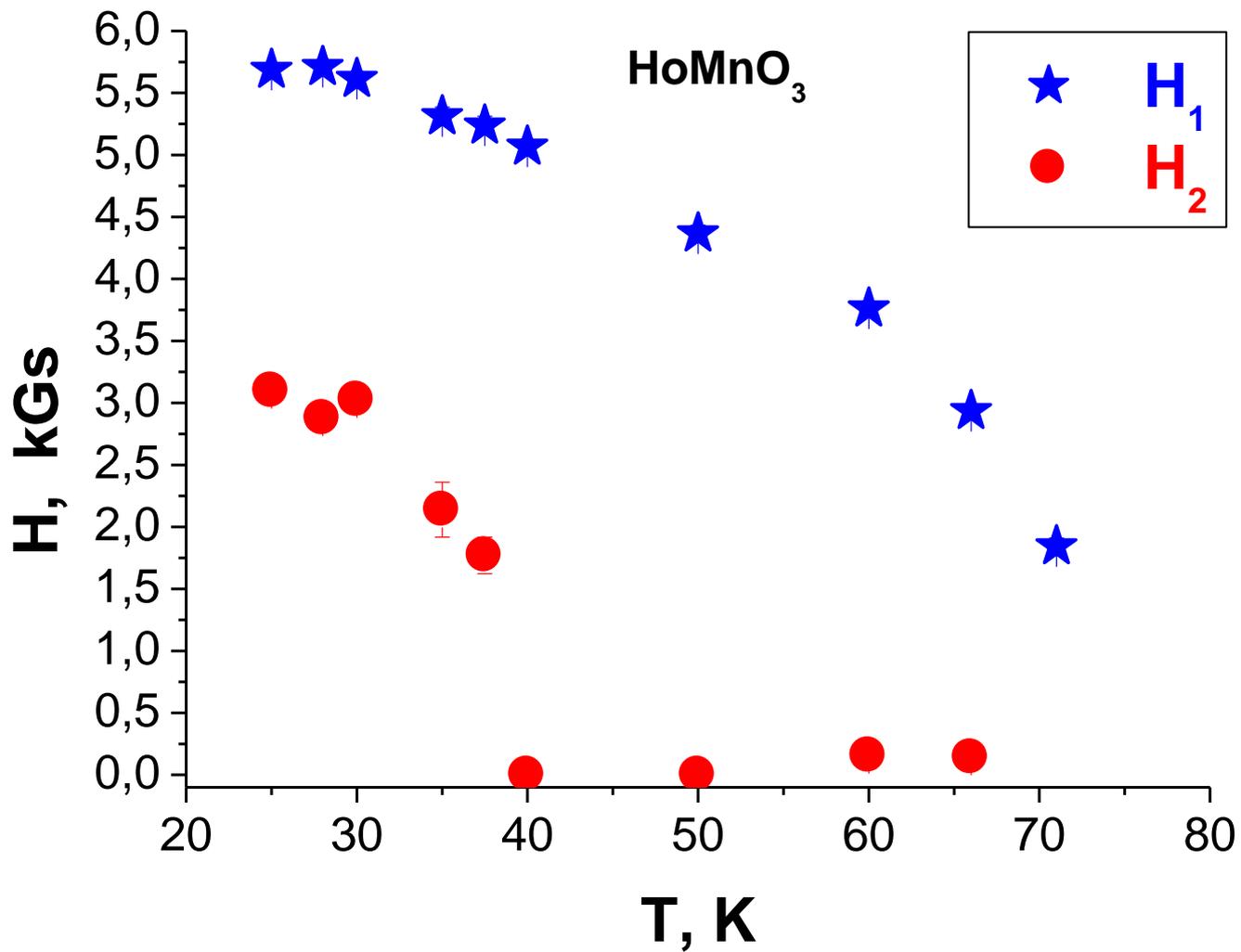
На рисунке демонстрируется поведение параметров Δ_1 и Δ_2 (распределение полей) в диапазоне температур 20 К – 70 К.



Для образца HoMnO_3 зависимость частоты прецессии от температуры хорошо аппроксимируется при помощи кривой Кюри-Вейса:

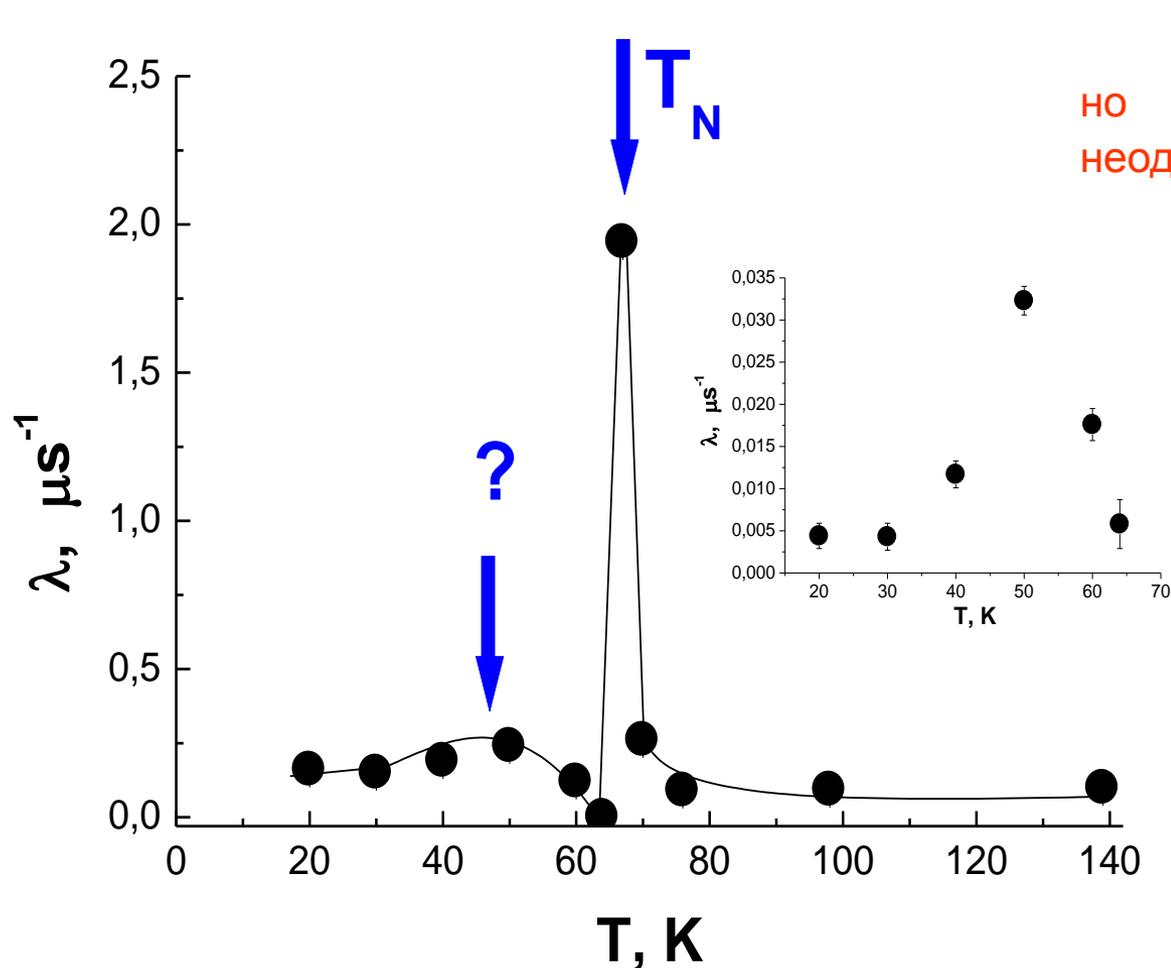
$F \sim F_{\max} \cdot (1 - T/T_0)^\beta$ с показателем $\beta = 0.39 \pm 0.02$, что соответствует модели 3D-магнетика Гейзенберговского типа.





Зависимость внутренних магнитных полей от температуры для образца HoMnO₃.

YMnO₃ (керамика)



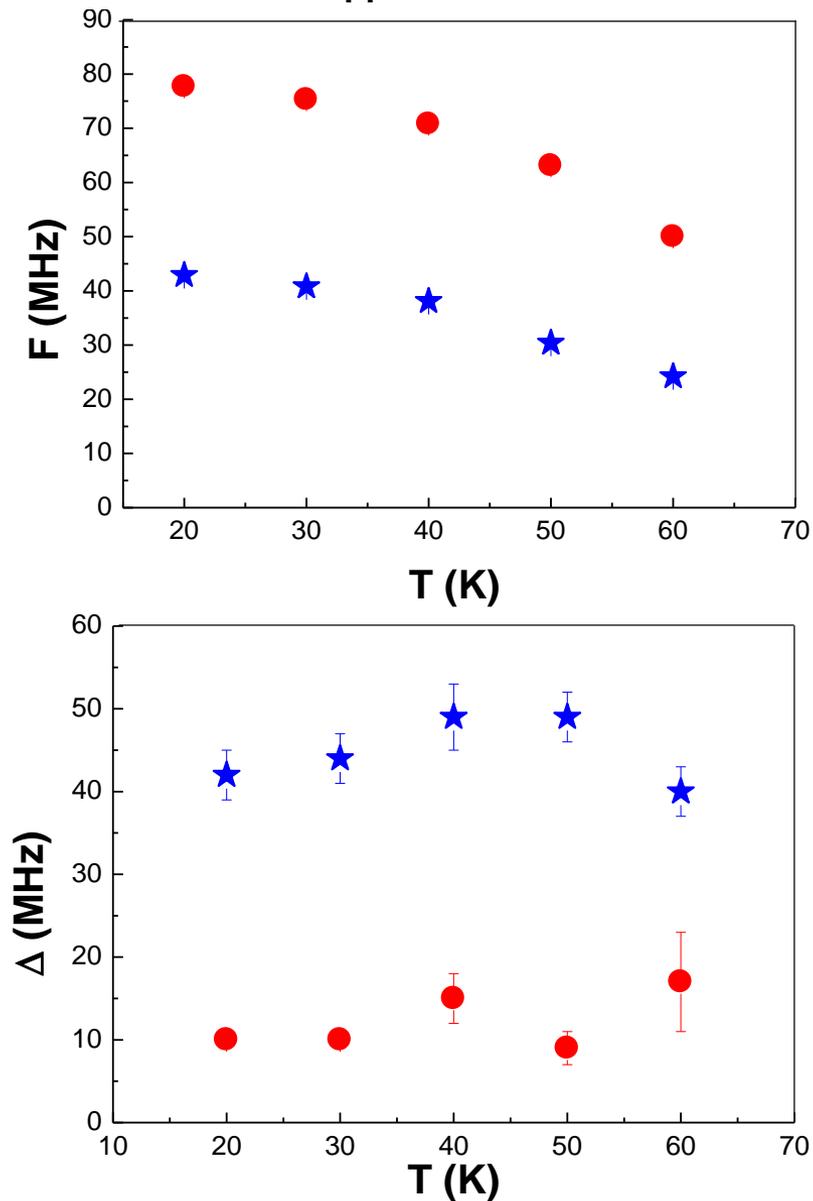
один переход,

но в районе 45 К видим неоднородность.

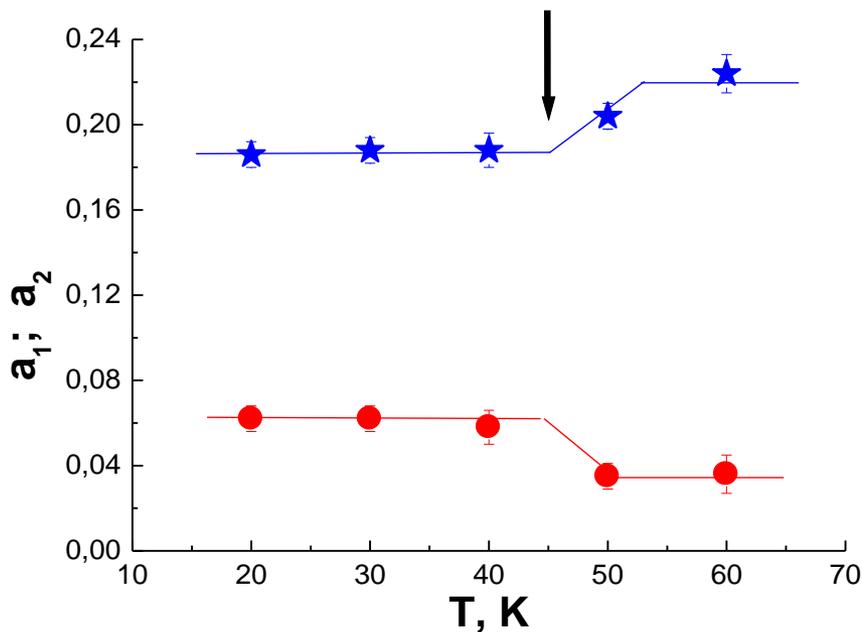
Рис. Скорость релаксации поляризации мюонов, остановившихся в образце YMnO₃ в нулевом магнитном поле.

$$G_s(t) = [a_1 \cdot (1/3 + 2/3 \cdot \cos(\Omega_1 \cdot t) \cdot \exp(-\Delta_1 \cdot t)) + a_2 \cdot (1/3 + 2/3 \cdot \cos(\Omega_2 \cdot t) \cdot \exp(-\Delta_2 \cdot t))] \cdot \exp(-\lambda \cdot t),$$

две частоты:



В районе $T = 45$ К видим неоднородность связанную, возможно с частичным разворотом спинов марганца, приводящее к 10% перераспределению долей частот.



P.J. Brown and T. Chatterji. J. Phys: Condens. Mater, **18**, 10085 (2006).

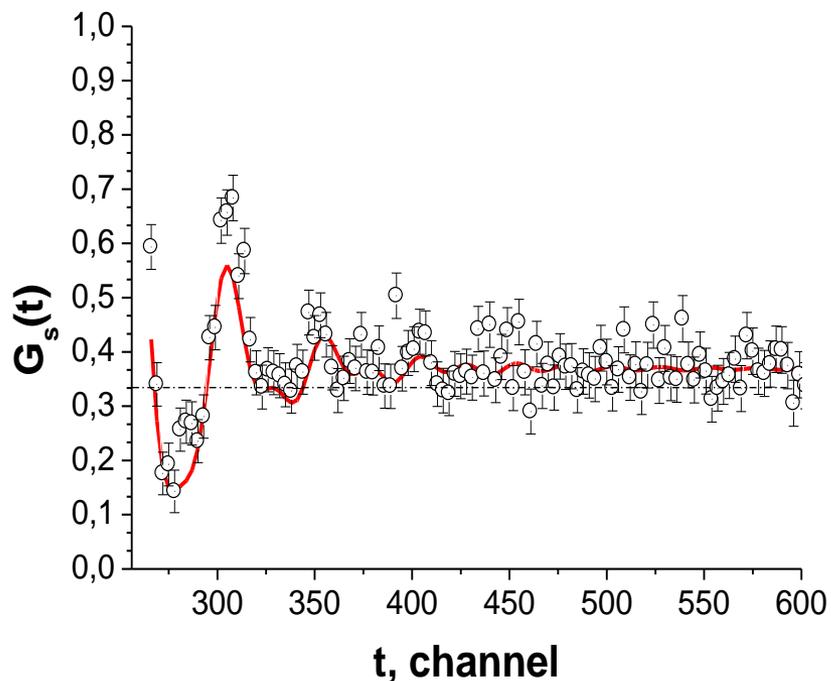


Рис. Функция релаксации поляризации $G_s(t)$ для образца $YMnO_3$ в нулевом внешнем магнитном поле при температуре $T = 60$ К, $a_1=0,223(10)$; $F_1=23,8(4)$ МГц; $\Delta_1=40(3)$ МГц; $a_2=0,041(10)$; $F_2 = 49,9(6)$ МГц; $\Delta_2=17(6)$ МГц; 1 канал по временной шкале соответствует 0,8 нс; ноль времени находится в 256 канале.

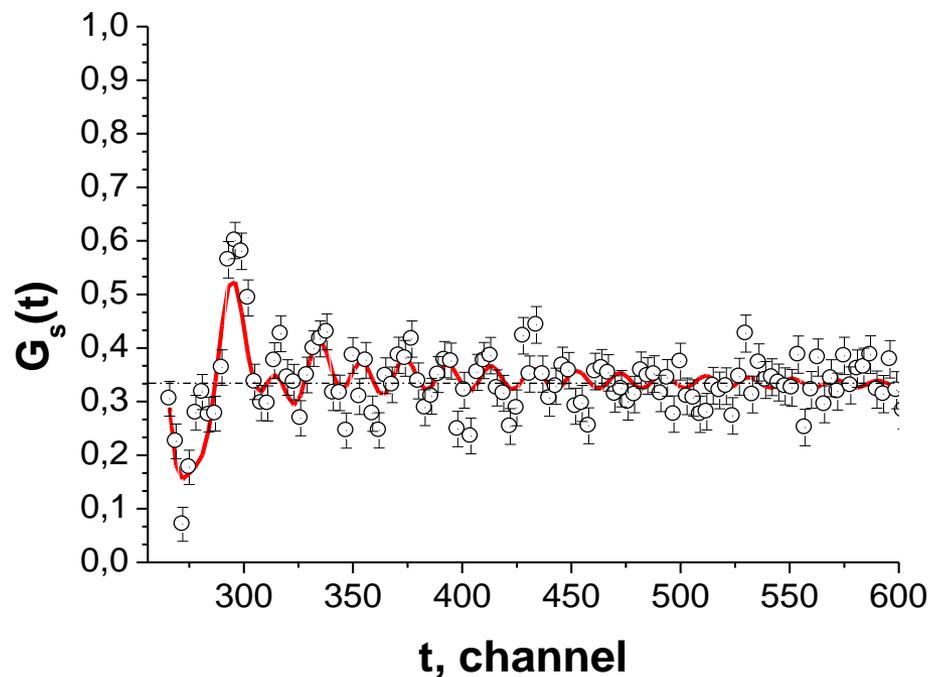


Рис. Функция релаксации поляризации $G_s(t)$ для образца $YMnO_3$ в нулевом внешнем магнитном поле при температуре $T = 50$ К, $a_1=0,235(2)$; $F_1 = 30,4(5)$ МГц; $\Delta_1=49(3)$ МГц; $a_2=0,029(2)$; $F_2 = 63,1(3)$ МГц; $\Delta_2=9(2)$ МГц; 1 канал по временной шкале соответствует 0,8 нс; ноль времени находится в 256 канале.

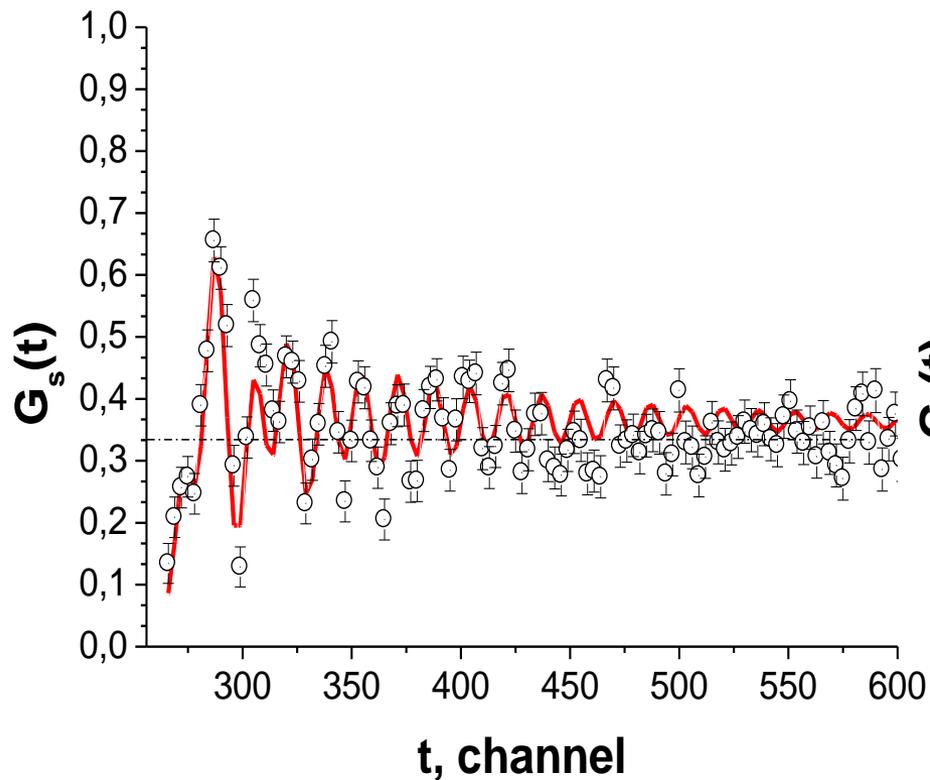


Рис. Функция релаксации поляризации $G_s(t)$ для образца $YMnO_3$ в нулевом внешнем магнитном поле при температуре $T = 30$ К, $a_1=0,1898(66)$; $F_1 = 40,8(5)$ МГц; $\Delta_1=44(3)$ МГц; $a_2=0,074(7)$; $F_2= 75,3(1)$ МГц; $\Delta_2=10(1)$ МГц; 1 канал по временной шкале соответствует 0,8 нс; ноль времени находится в 256 канале.

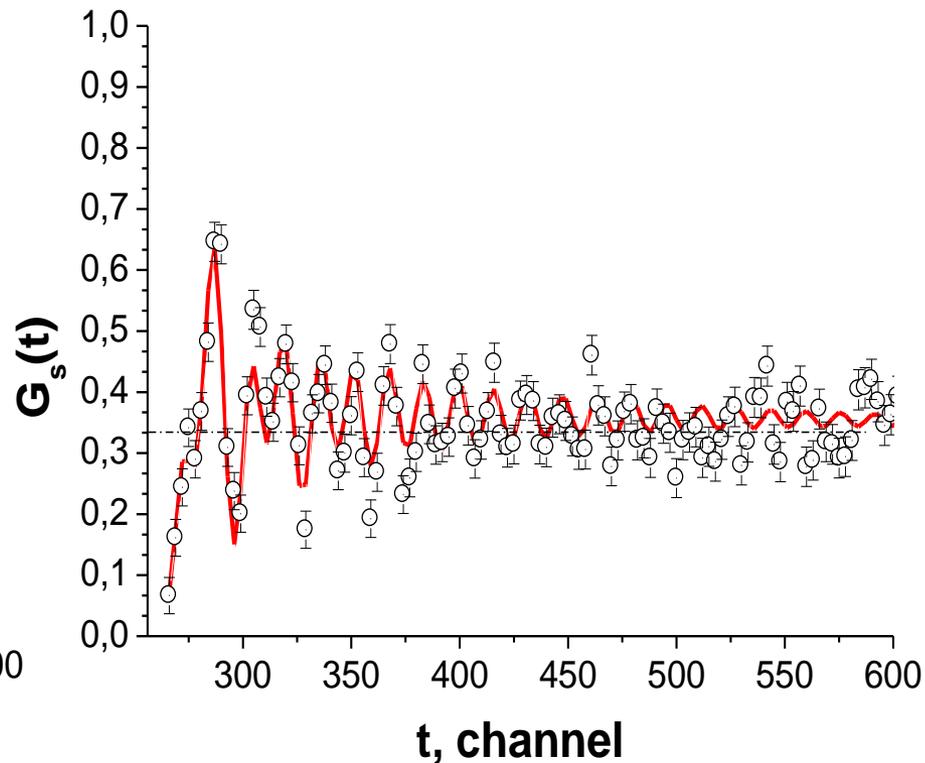
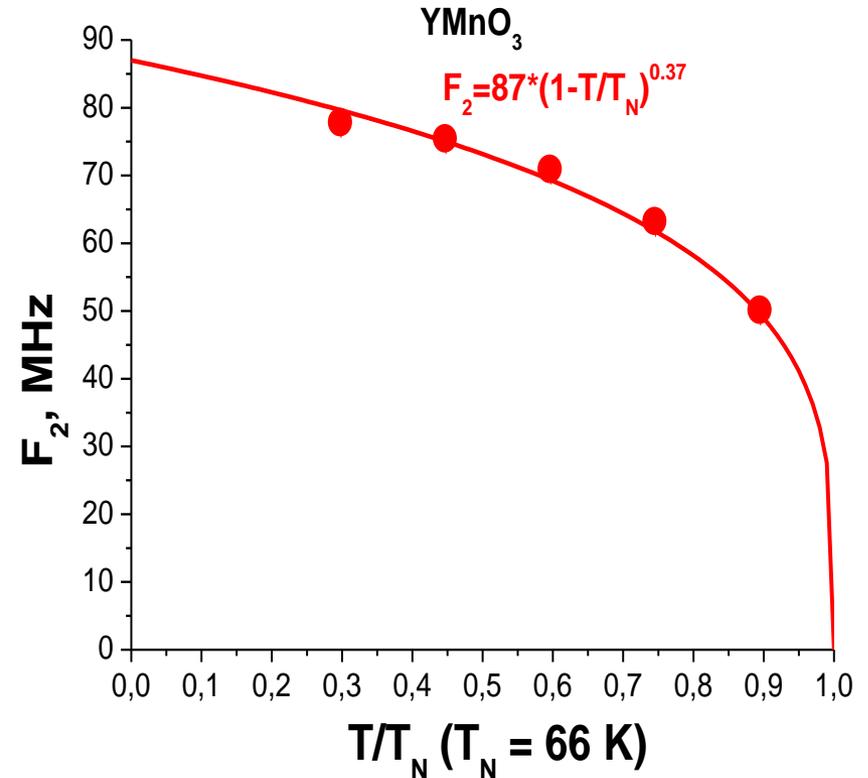
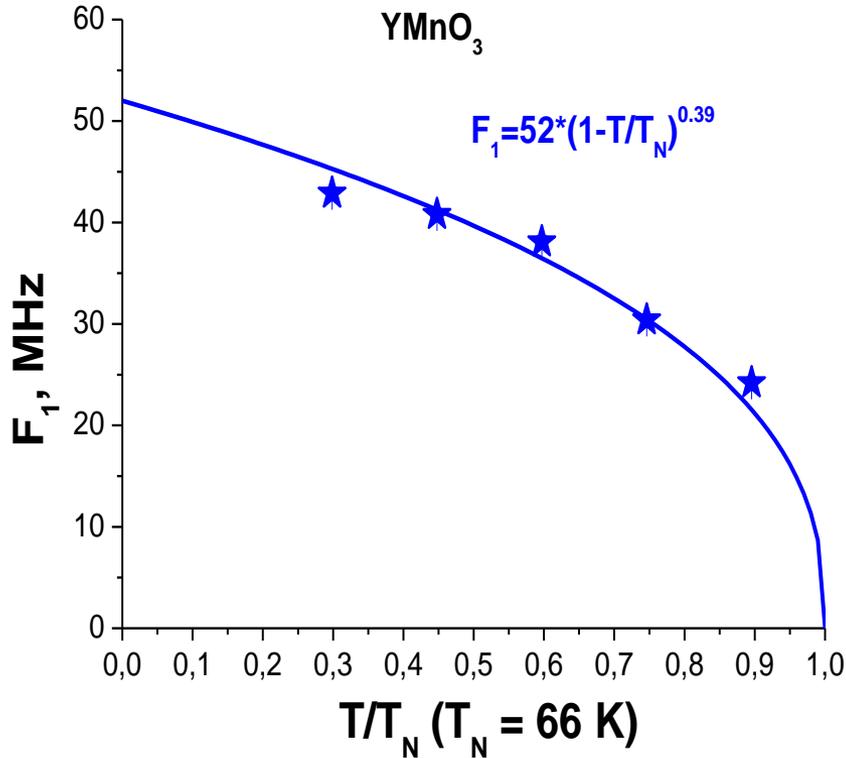


Рис. Функция релаксации поляризации $G_s(t)$ для образца $YMnO_3$ в нулевом внешнем магнитном поле при температуре $T = 20$ К, $a_1=0,189(6)$; $F_1= 42,9(4)$ МГц; $\Delta_1=42(3)$ МГц; $a_2=0,0748(60)$; $F_2 = 77,7(1)$ МГц; $\Delta_2=10(1)$ МГц; 1 канал по временной шкале соответствует 0,8 нс; ноль времени находится в 256 канале.

Для исследованного образца YMnO_3 зависимость частоты прецессии от температуры хорошо аппроксимируется при помощи кривой Кюри-Вейса:

$F \approx F_{\text{max}} \cdot (1 - T/T_N)^\beta$ с показателем $\beta = 0,39 \pm 0,02$, что соответствует модели 3D-магнетика Гейзенберговского типа.



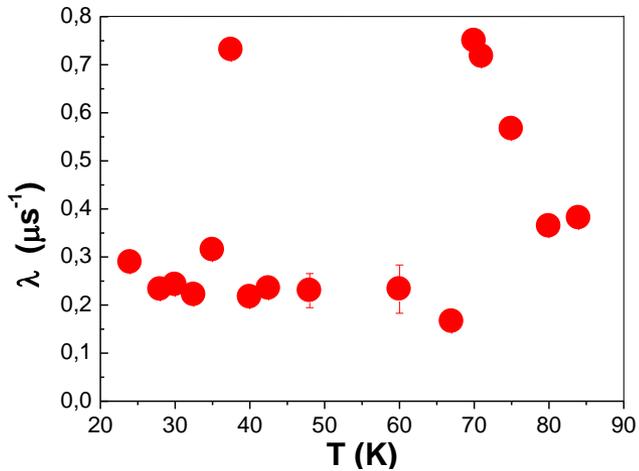


Рис. Скорость релаксации поляризации мюонов, остановившихся в образце HoMnO_3 в нулевом магнитном поле

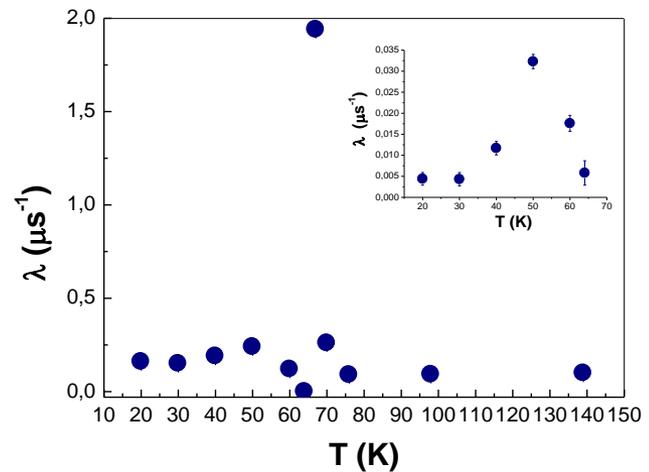


Рис. Скорость релаксации поляризации мюонов, остановившихся в образце YMnO_3 в нулевом магнитном поле

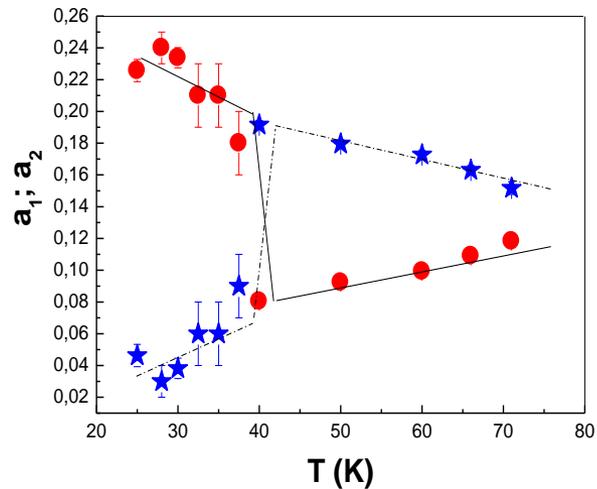


Рис. Зависимость асимметрии от температуры образца HoMnO_3 в нулевом поле. Линии нанесены для наглядности поведения зависимости. Звездочки – a_1 , круглые точки – a_2 , где $a_1 + a_2 = a_3$.

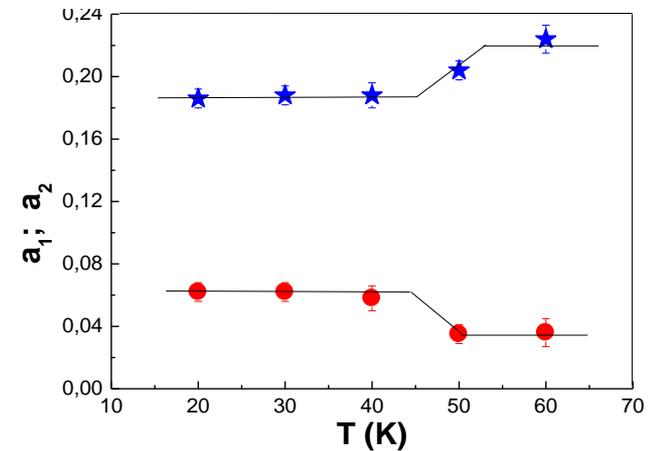
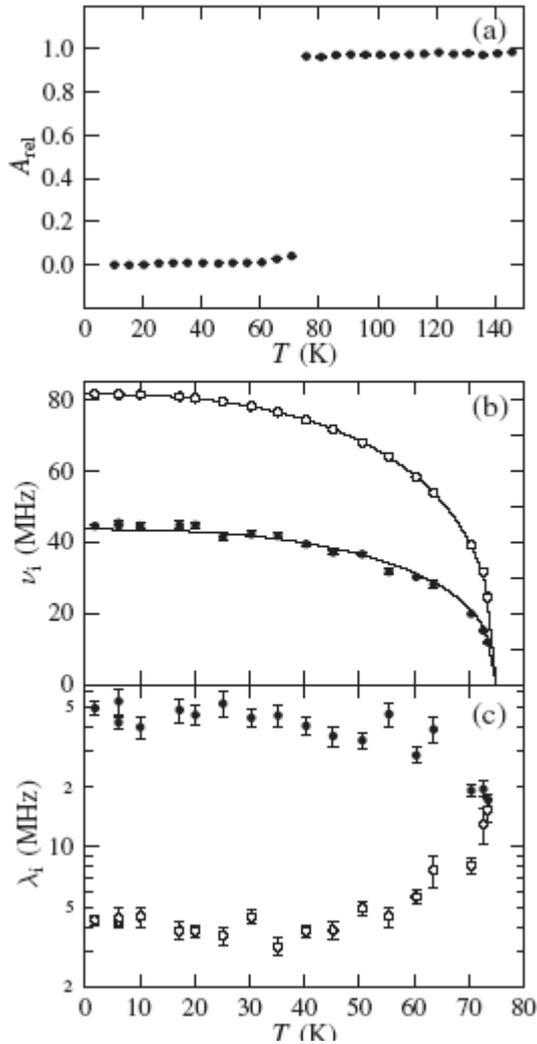


Рис. Зависимость асимметрии от температуры образца YMnO_3 в нулевом поле. Линии нанесены для наглядности поведения зависимости. Звездочки – a_1 , круглые точки – a_2 , где $a_1 + a_2 = a_3$.

M.Fiebig, D.Fröhlich, K.Kohn et al., Phys. Rev. Lett. **84**, 5620 (2000).
 B.Lorenz, A.P.Litvinchuk, M.M.Gospodinov and C.W.Chu. Phys. Rev. Lett. **92**, 087204 (2004).
 B. Lorenz, Y.Q. Wang, Y.Y. Sun and C.W. Chu. Phys. Rev. B **70**, 212412 (2004).

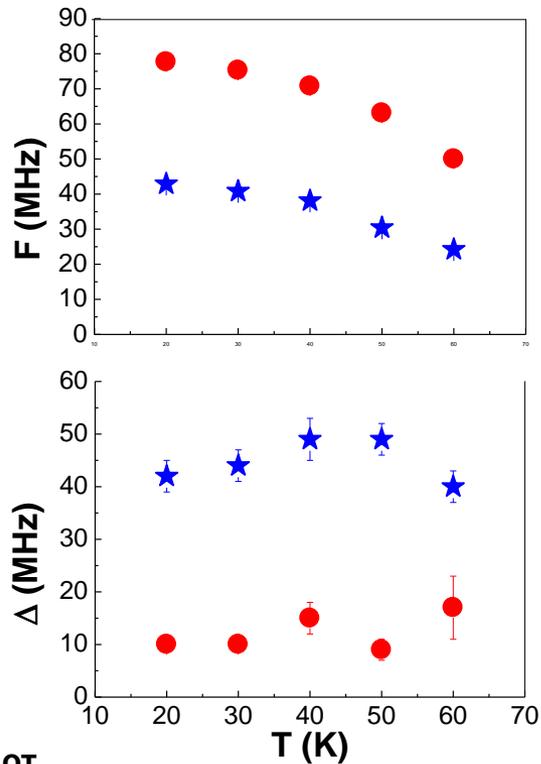
P.J. Brown and T. Chatterji. J. Phys: Condens. Mater, **18**, 10085 (2006).

Монокристалл



(a) – зависимость асимметрии от температуры; (b) – температурная зависимость частоты прецессии; (c) – температурная зависимость разброса частот.

Наши исследования (керамика)



Поведение частот наблюдаемой прецессии F от температуры образца YMnO_3 в нулевом поле. Звездочки – F_1 , круглые точки – F_2 .

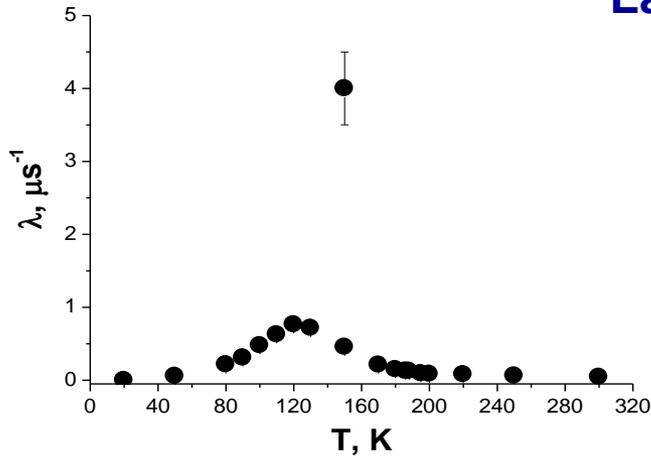
Зависимость Δ_1 ; Δ_2 от температуры T для образца YMnO_3 . Звездочки – Δ_1 , круглые точки – Δ_2 .

Письма в ЖЭТФ, том 85, вып. 12, 2007, стр. 795-798.

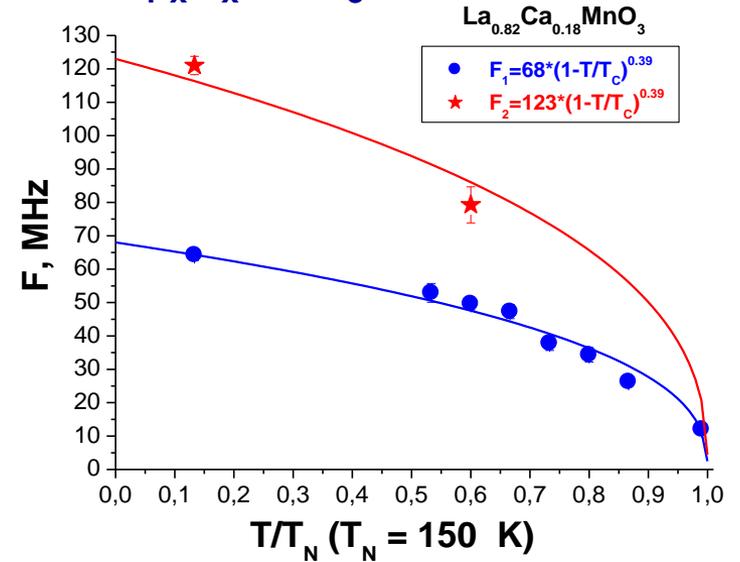
Выводы по исследованию манганитов:

1. Продемонстрирована высокая эффективность μ SR-метода при изучении манганитов. Было показано, что все образцы являются 3D-магнетиками Гейзенберговского типа, т.к. температурная зависимость частоты прецессии хорошо аппроксимируется кривой Кюри-Вейса.
2. С помощью μ SR-метода было показано, что образец HoMnO_3 при температуре $T_N = 74$ К испытывает переход из парамагнитного в антиферромагнитное состояние ($P \rightarrow \text{АФМ}$).
3. Доказано, что при температуре $T_{\text{SR}} = 42$ К (HoMnO_3) имеет место спин-ротационный переход (SR), т.е. спины марганца при этой температуре испытывают поворот на 90° .
4. Показано, что во всех манганитах существуют две частоты, причем вторая частота примерно в два раза выше, чем первая.
5. С помощью μ SR-метода было определено, что в образце YMnO_3 при температуре $T_N = 66$ К происходит фазовый переход парамагнетик–антиферромагнетик.
6. Были обнаружены для манганита YMnO_3 особенности вблизи температуры ~ 45 К, что может соответствовать частичному повороту спинов ионов марганца или малой доли орторомбической фазы в гексагональном образце.

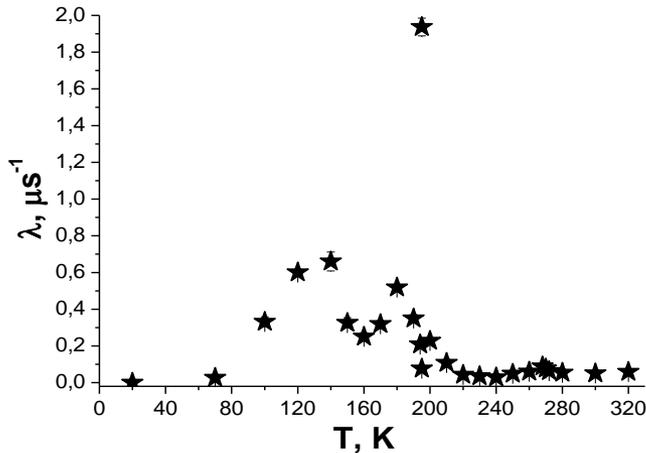
ИССЛЕДОВАНИЕ МАНГАНИТОВ $\text{La}_{1-x}\text{A}_x\text{MnO}_3$



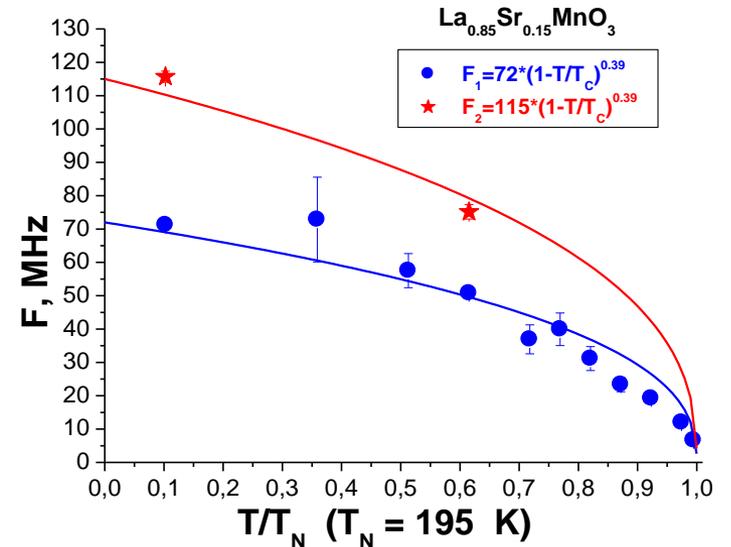
Температурная зависимость параметра λ_d динамической функции релаксации для образца $\text{La}_{0.82}\text{Ca}_{0.18}\text{MnO}_3$ в нулевом внешнем магнитном поле.



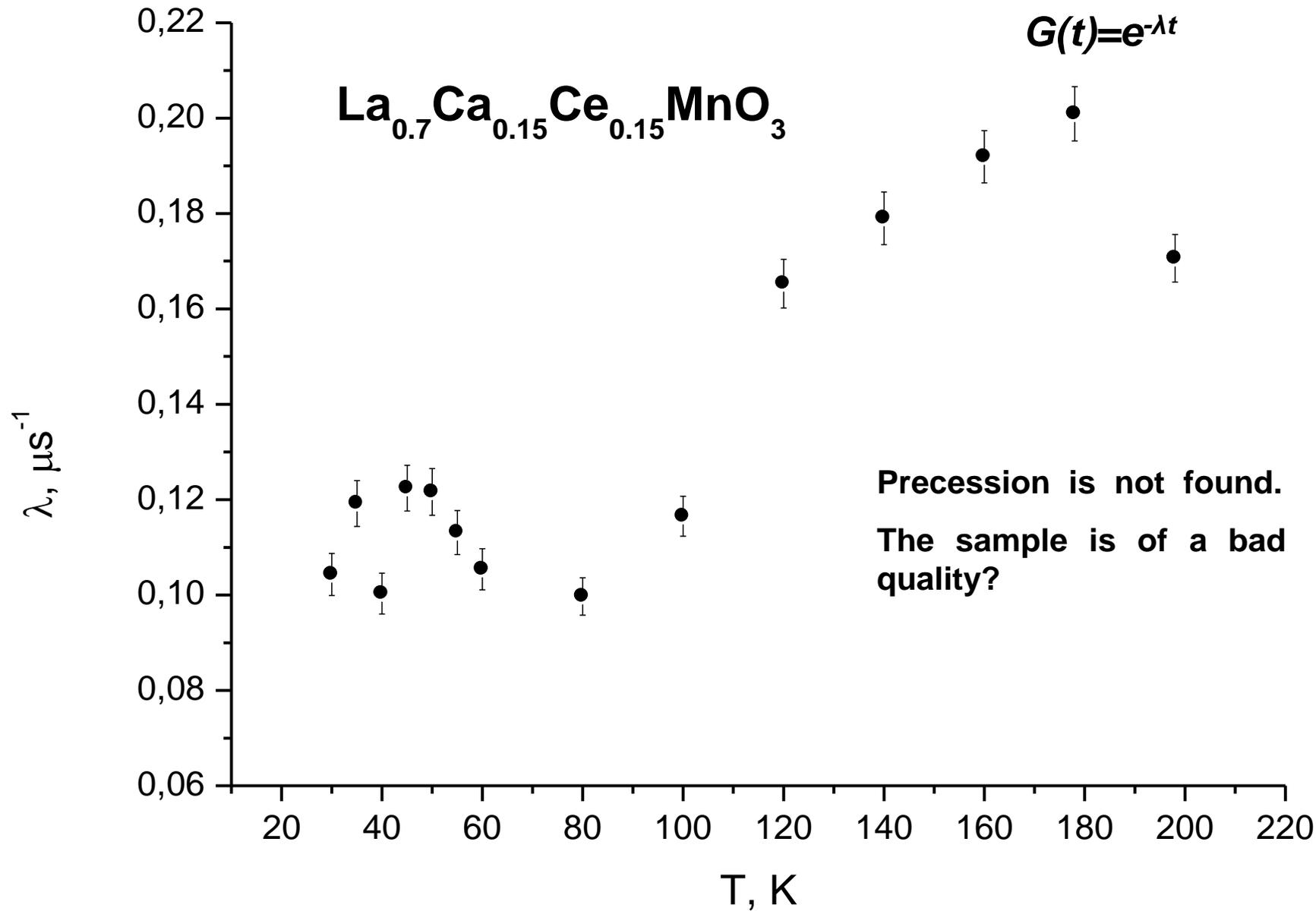
Температурная зависимость частот прецессии для образца $\text{La}_{0.82}\text{Ca}_{0.18}\text{MnO}_3$ в нулевом внешнем магнитном поле.



Температурная зависимость параметра λ_d динамической функции релаксации для образца $\text{La}_{0.85}\text{Sr}_{0.15}\text{MnO}_3$ в нулевом внешнем магнитном поле.



Температурная зависимость частот прецессии для образца $\text{La}_{0.85}\text{Sr}_{0.15}\text{MnO}_3$ в нулевом внешнем магнитном поле.



И с с л е д о в а н и е
р е д к о з е м е л ь н ы х
м а н г а н а т о в

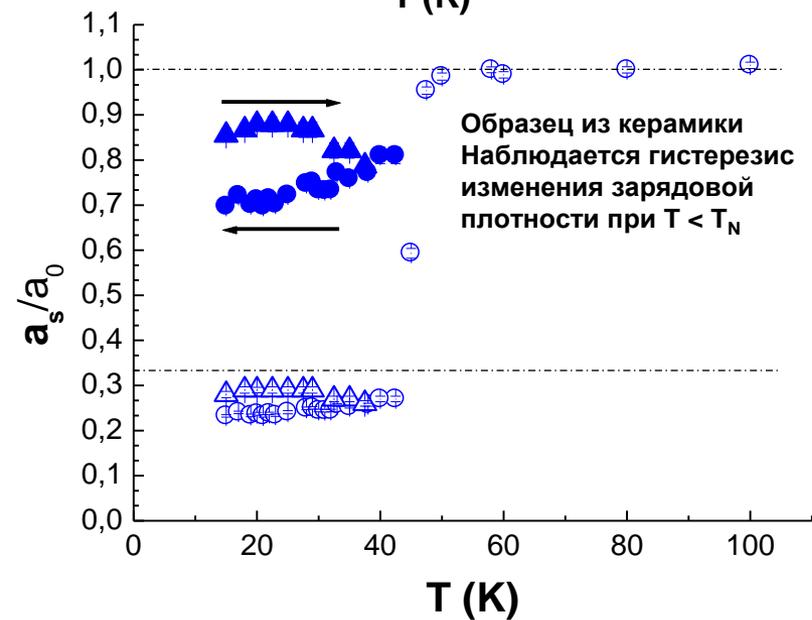
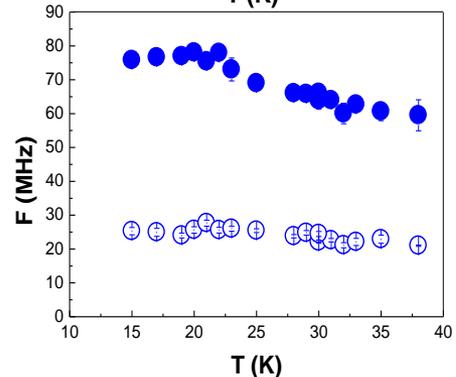
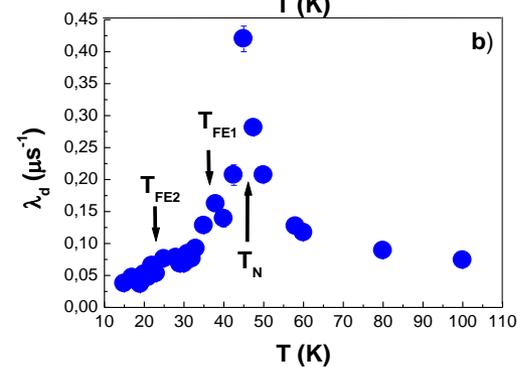
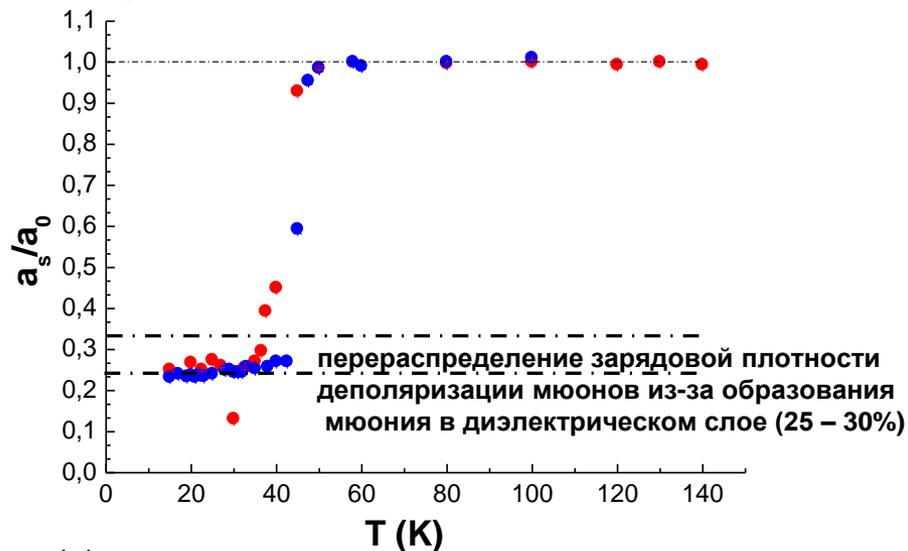
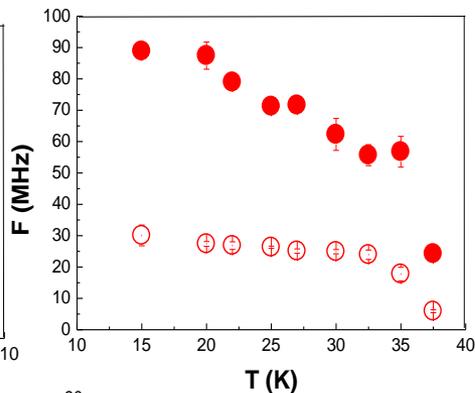
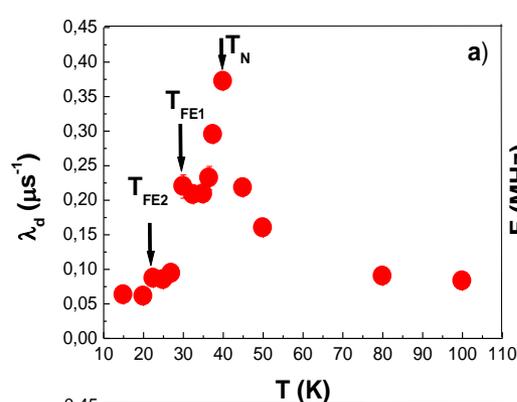
Исследование мультиферроиков $R\text{Mn}_2\text{O}_5$

EuMn₂O₅

a – поликристалл; **b** – керамика

фазовые переходы

две частоты



перераспределение зарядовой плотности
деполяризации мюонов из-за образования
мюония в диэлектрическом слое (25 – 30%)

Образец из керамики
Наблюдается гистерезис
изменения зарядовой
плотности при $T < T_N$

Письма в ЖЭТФ, т. 91, вып. 10, 2010, стр. 561 – 566.
Известия РАН. Серия физическая, 2010, т. 74, № 5,
стр. 738–740.

Выводы:

Таким образом, изучение мультиферроика EuMn_2O_5 μSR -методом еще раз продемонстрировало эффективность этого метода при исследовании магнитных материалов.

Исследования с помощью μSR -метода двух типов образцов EuMn_2O_5 (из монокристаллов и керамики) обнаружили ряд интересных особенностей данного соединения:

1. В обоих образцах при температурах $T < T_N$, по-видимому, происходит локальное изменение зарядовой плотности, что проявляется в дополнительной деполяризации мюонов.

2. Внешнее магнитное поле, приложенное к исследуемым образцам при $T < T_N$, также приводит к потере поляризации. По-видимому, внешнее магнитное поле приводит к дополнительному перераспределению зарядовой плотности в образцах.

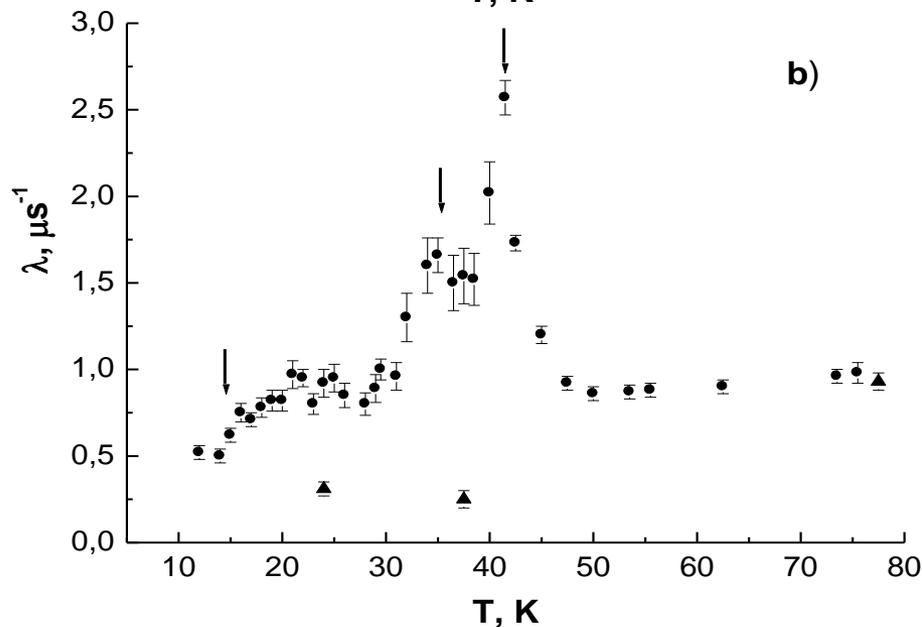
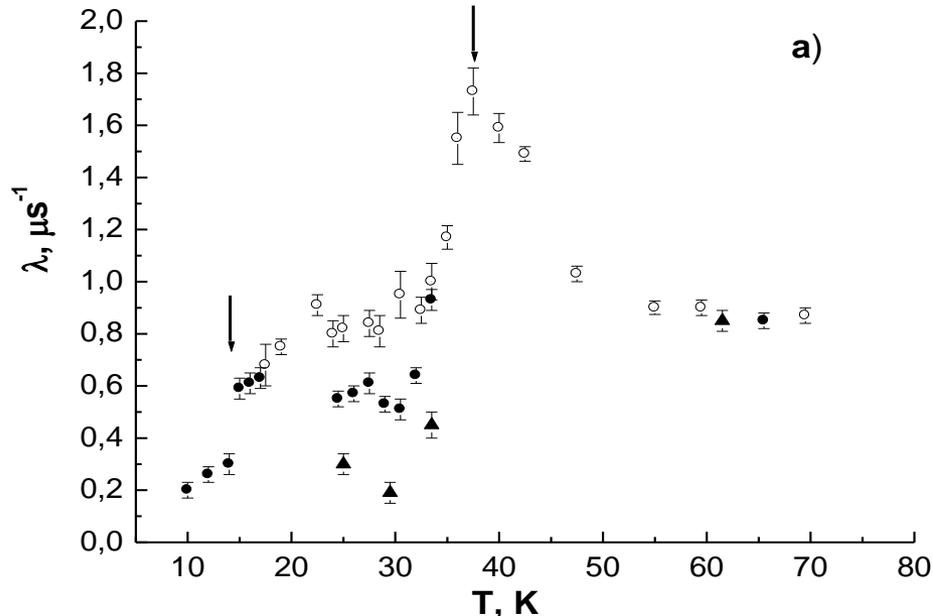
3. В исследованных образцах имеет место эффект «памяти» о воздействии на них внешнего магнитного поля. Время релаксации этой «памяти» зависит от размеров структурных единиц (монокристаллов и зёрен керамики).

4. Фазовые переходы, наблюдаемые при температурах $T < T_N$, не проявляются в распределении внутренних локальных магнитных полей. Они видны только в температурной зависимости динамической скорости релаксации $\lambda_d(T)$.

5. Перераспределение электронной плотности происходит в точке фазового перехода при температуре T_N . Возможно, механизм мультиферроичности связан именно с этим явлением.

GdMn₂O₅

фазовые переходы



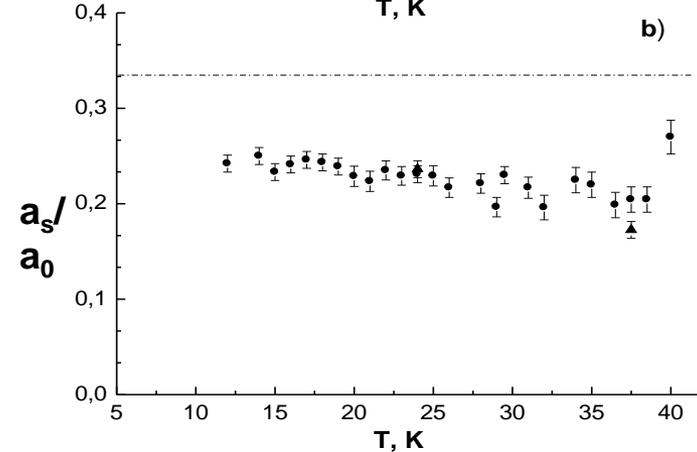
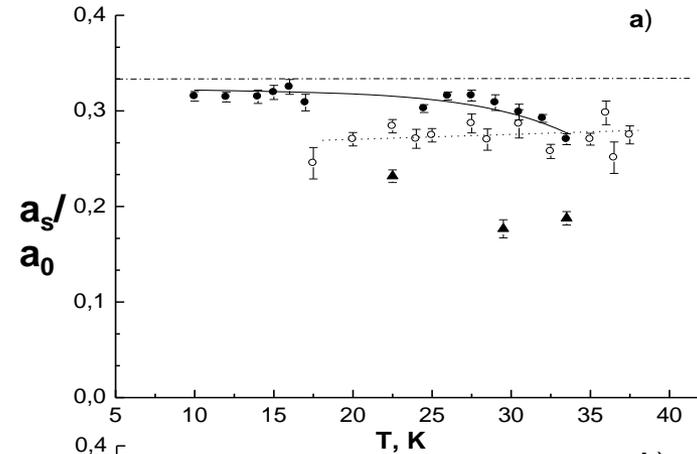
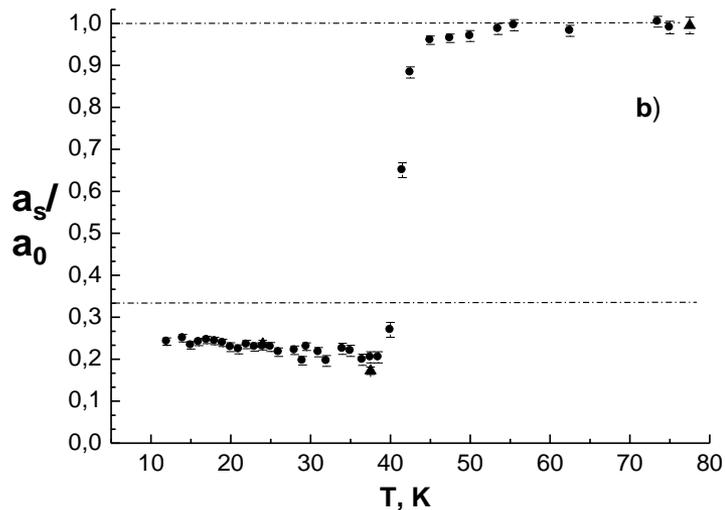
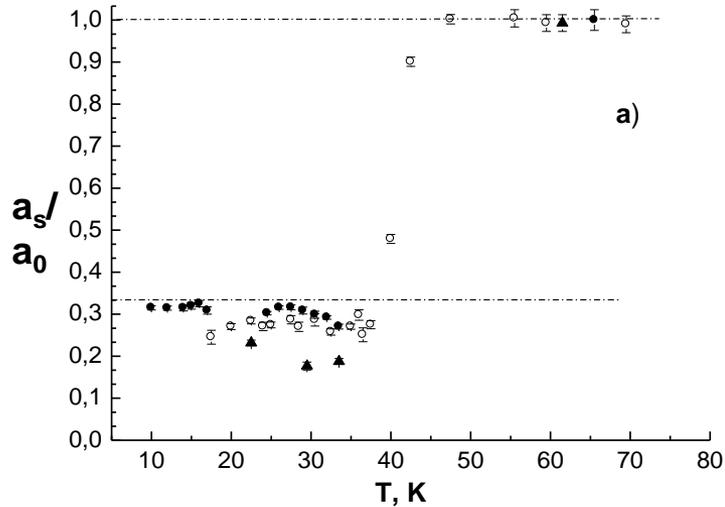
Temperature dependence of dynamic relaxation rate (a – the ceramic sample; b – the sample assembled from small single crystals); the solid circles refer to heating; the open circles refer to cooling; the triangles refer to measurements in the external magnetic field $H = 280$ Oe; the phase transition temperatures are marked by the arrows.

Сообщение ПИЯФ – 2845.

ФТТ, том 55, вып. 3, 2013, стр.422–430.

GdMn₂O₅

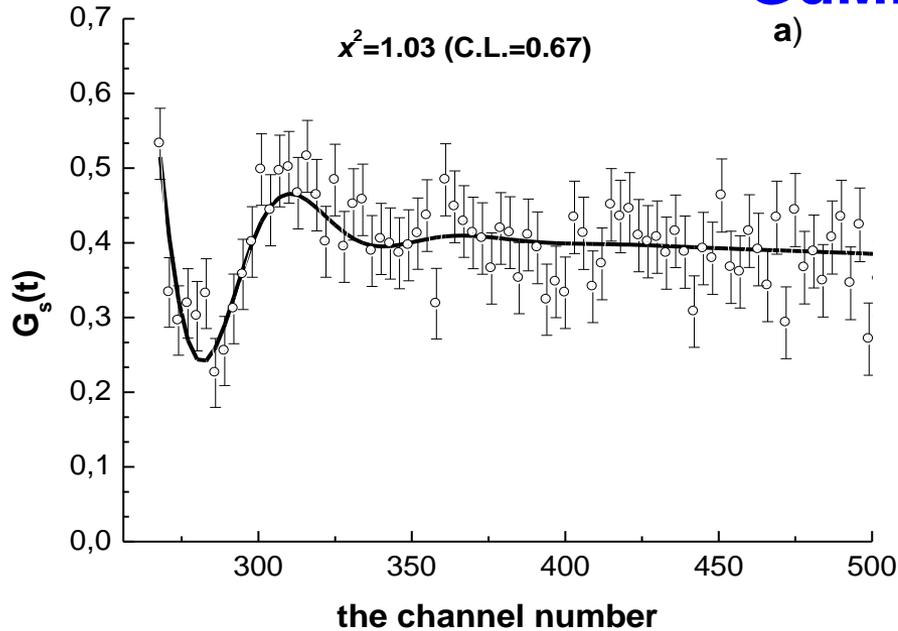
перераспределение зарядовой плотности (25 – 30%)



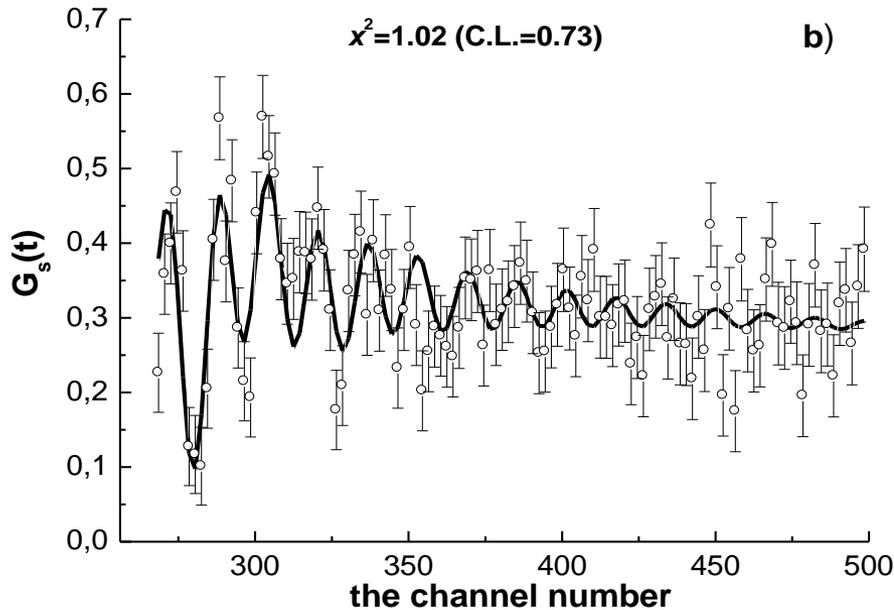
Residual asymmetry a_s normalized to the full asymmetry a_0 as a function of temperature: a – the ceramic sample; b – the sample assembled from small single crystals (the solid circles refer to heating, the open circles refer to cooling); the measurements in the external magnetic field $H = 280$ Oe are marked by the triangles.

Normalized residual asymmetry as a function of temperature; a – the ceramic sample; (the solid circles refer to heating, the open circles refer to cooling); the solid and dotted curves are guides for the eye; b – the sample assembled from single crystals; the measurements in the external magnetic field $H = 280$ Oe are marked by the triangles.

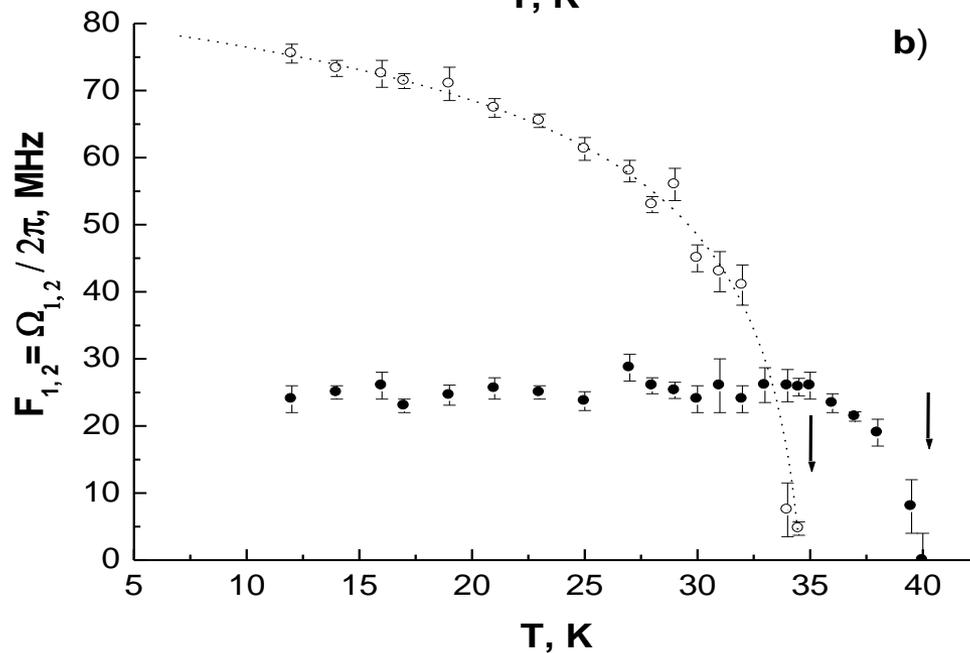
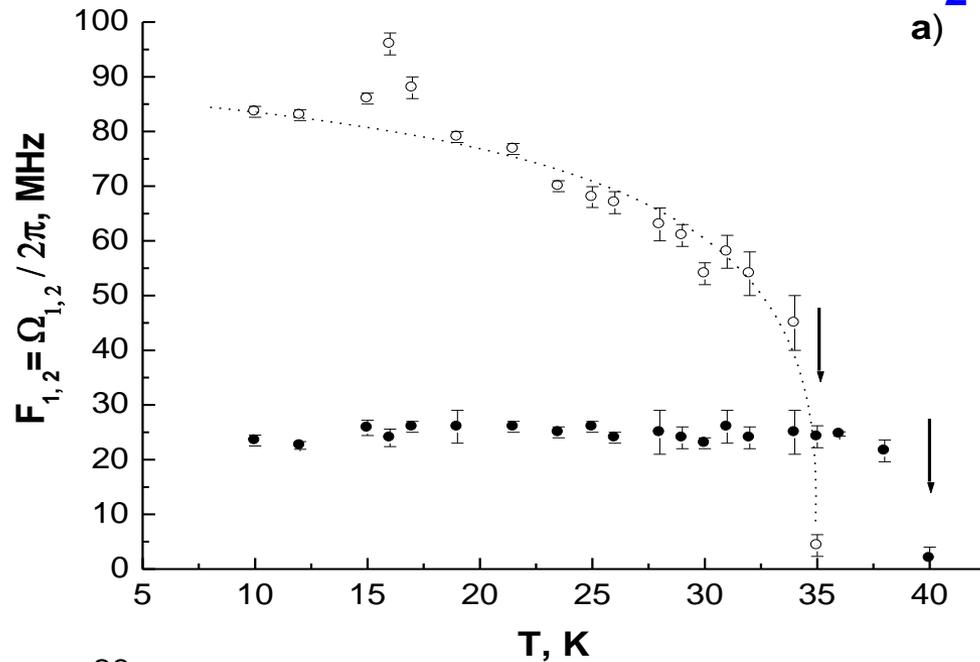
GdMn₂O₅



Relaxation function $G_s(t)$ at $T_L = 35$ K (a) and $T_{C2} = 22$ K (b); the solid curves are the fits taking into account the precession contribution with one (a) or two (b) frequencies; one channel corresponds to 0.8 ns.



GdMn₂O₅



Temperature dependence of precession frequencies of the muon spin in the internal magnetic field (a – the ceramic sample; b – the sample assembled from single crystals); the solid circles refer to the F_1 frequency and the open circles refer to F_2 ; the arrows mark the features corresponding to the phase transition points; the dotted curves are the fits by $F_2 \sim (1 - T/T_L)^\beta$; $T_L = 35$ K; $\beta = 0.39 \pm 0.02$.

Выводы по исследованию GdMn_2O_5

При температуре $T_{N1} = 40\text{--}42$ К образцы испытывают фазовый переход из парамагнитного состояния в состояние с дальним магнитным порядком.

При температуре $\sim 30\text{--}35$ К изменяется характер дальнего магнитного порядка.

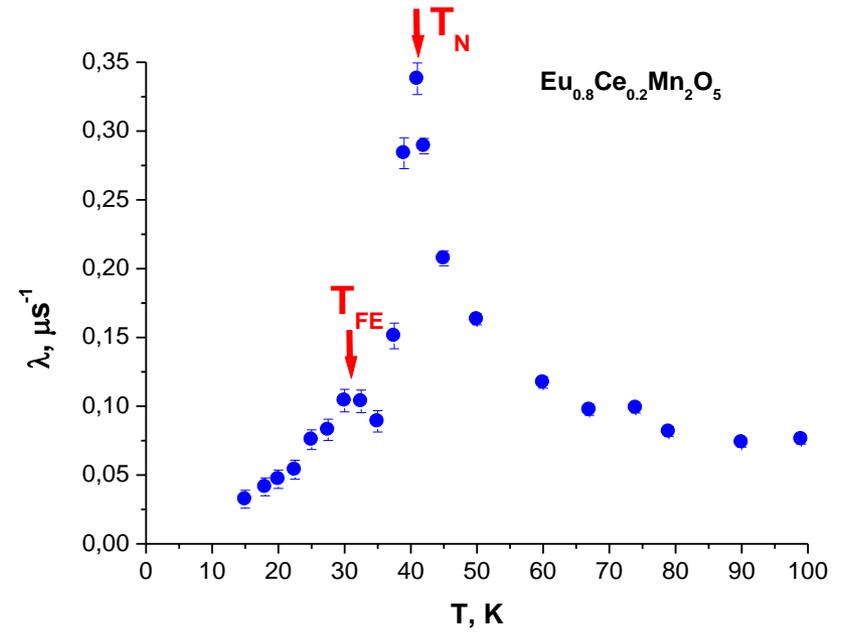
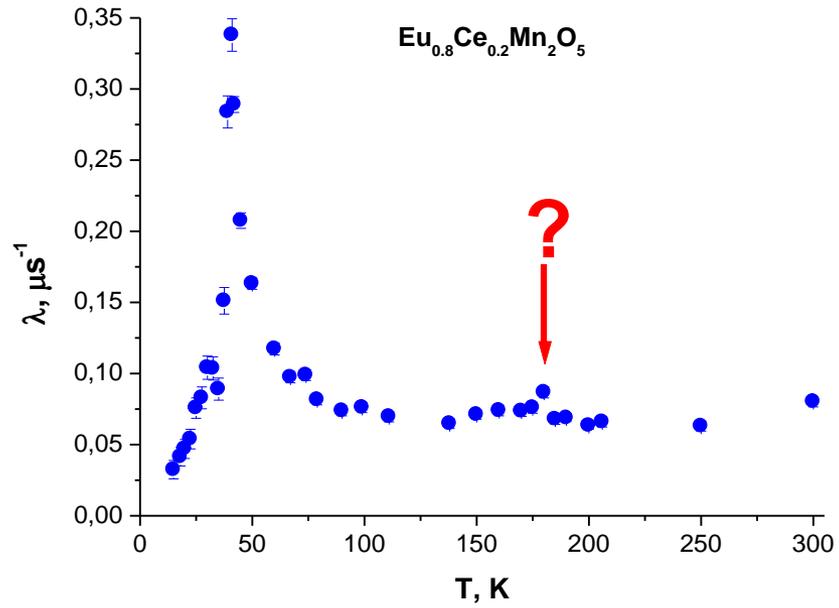
При температуре $T_C = 22$ К происходит структурный фазовый переход, при котором происходит изменение локальных углов связи и расстояний между ионами марганца и кислорода (соответствующих, согласно литературным данным, ферроэлектрическому фазовому переходу).

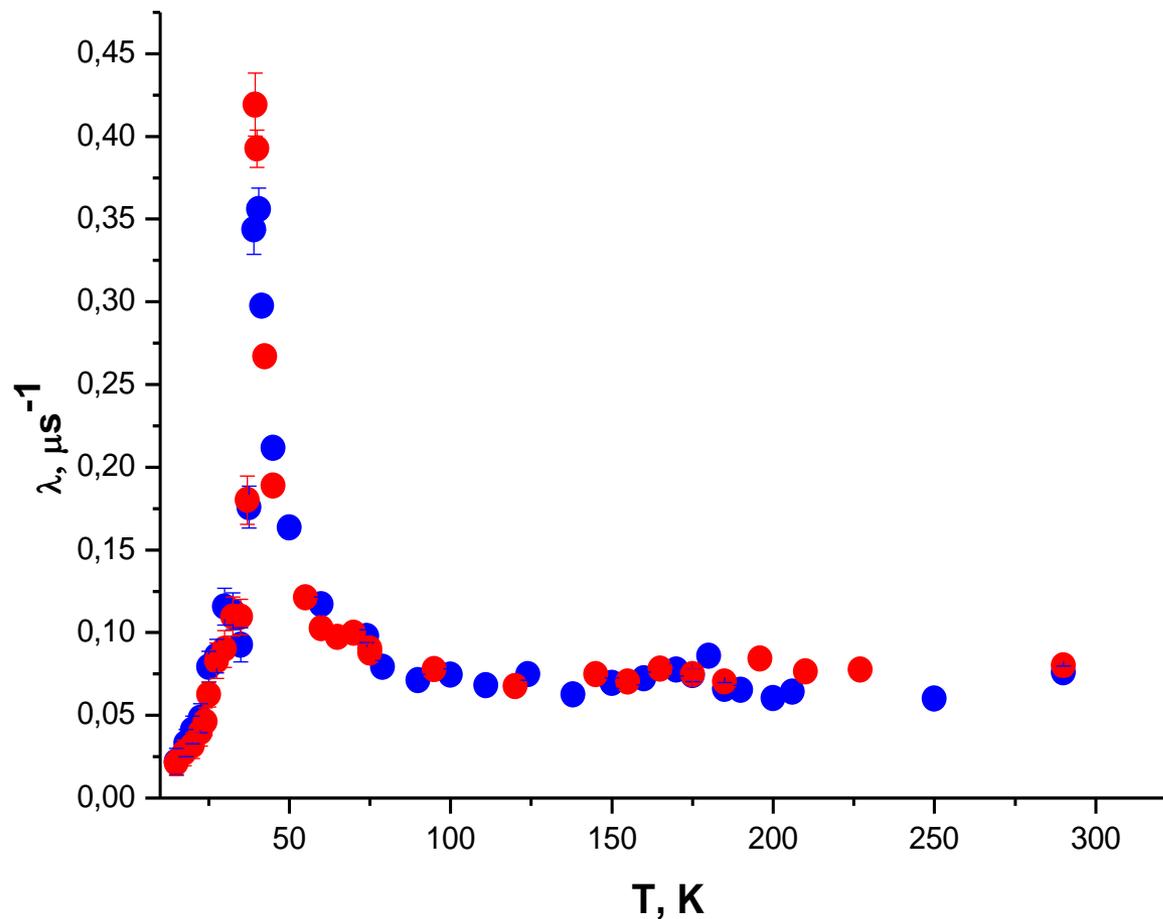
При температуре $T_{N2} = 15$ К возникает магнитное упорядочение ионов Gd^{3+} (FM-типа).

Зависимость от температуры высокой частоты прецессии описывается функцией $F_2 \sim (1 - T/T_{N,C})^\beta$, которая характерна для 3D-магнетиков Гейзенберговского типа, с показателем $\beta = 0,39$. В свою очередь слабая температурная зависимость частоты F_1 определяется изолированными ферромагнитными парами Mn^{4+} и ферромагнитными ионами Gd^{3+} .

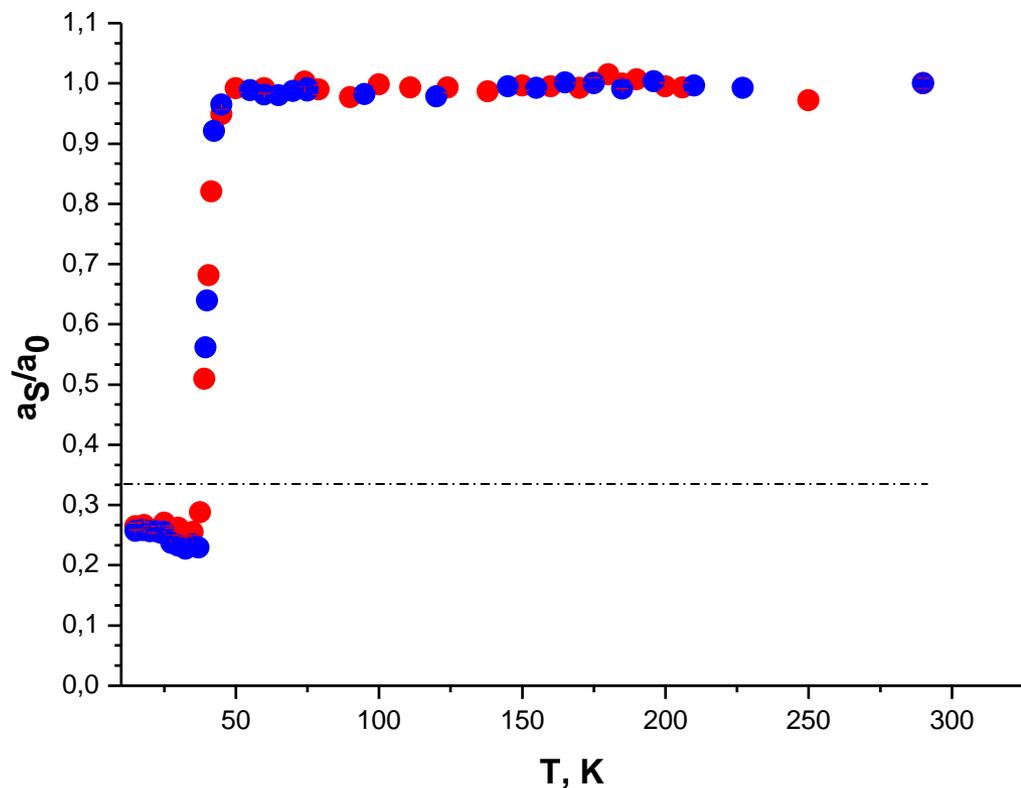
Потеря полной асимметрии ниже температуры установления дальнего магнитного порядка $T_{N1} = 40\text{--}42$ К свидетельствует об образовании мюония. Это указывает на важную роль процессов переноса заряда в формировании дальнего порядка в изученном мультиферроике GdMn_2O_5 .

Керамика $\text{Eu}_{0.8}\text{Ce}_{0.2}\text{Mn}_2\text{O}_5$





Температурная зависимость скорости динамической релаксации λ (красные точки – керамический образец $\text{Eu}_{0.8}\text{Ce}_{0.2}\text{Mn}_2\text{O}_5$; синие точки – керамический образец EuMn_2O_5)



Температурная зависимость остаточной асимметрии a_s , нормированной к полной асимметрии a_0 ; (красные точки – керамический образец $\text{Eu}_{0.8}\text{Ce}_{0.2}\text{Mn}_2\text{O}_5$; синие точки – керамический образец EuMn_2O_5); уровни нормированной асимметрии $a_s/a_0 = 1/3$ ($T < T_{N1}$) и $a_s/a_0 = 1$ ($T > T_{N1}$) отмечены штрих-пунктирными линиями

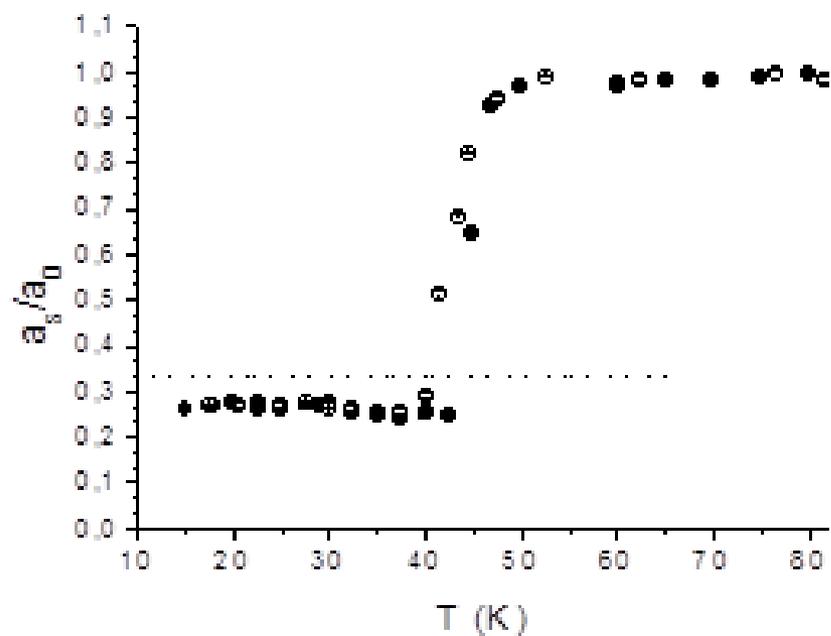


Рис. 1. Температурная зависимость нормированной остаточной асимметрии для образцов **ESMO** (светлые точки) и **EMO** (тёмные точки) в режиме *RUNI*; пунктирной линией отмечен уровень $a_s/a_0=1/3$.

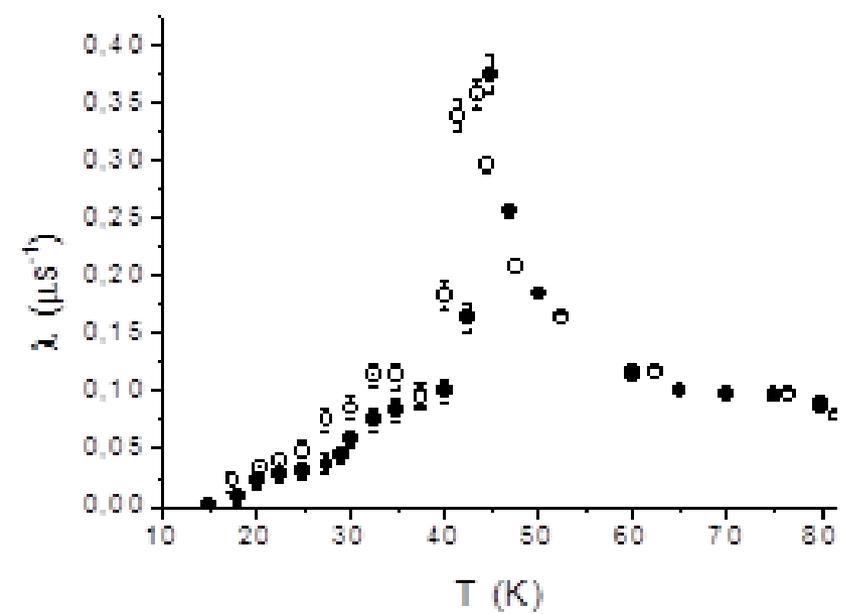


Рис. 2. Температурная зависимость скорости релаксации поляризации мюонов, остановившихся в образцах **ESMO** (светлые точки) и **EMO** (тёмные точки) в режиме *RUNI*.

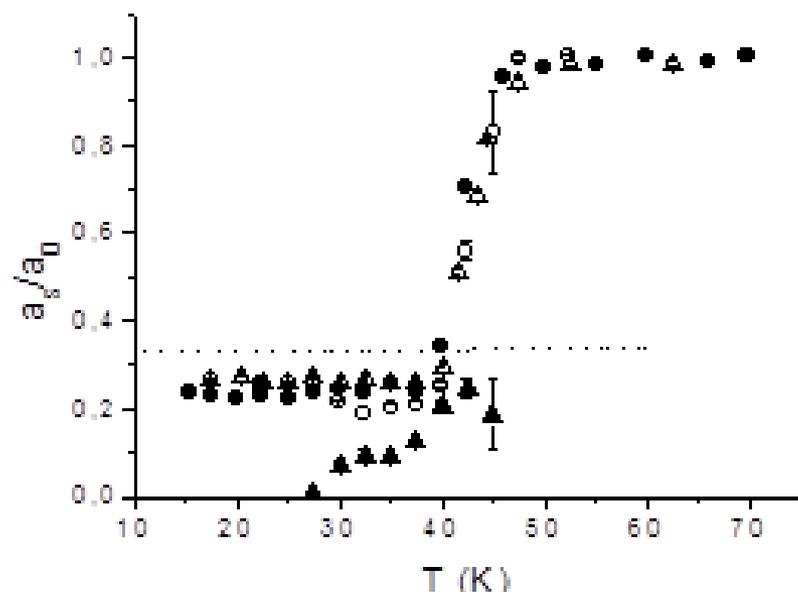


Рис. 5. Температурные зависимости нормированной остаточной асимметрии для образца **ECMO**; *RUN1*-светлые треугольники; *RUN2* - светлые точки; *RUN2*- (светлые точки - медленно релаксирующая компонента, тёмные треугольники - быстро релаксирующая компонента); пунктирной линией отмечен уровень $a_s/a_0=1/3$.

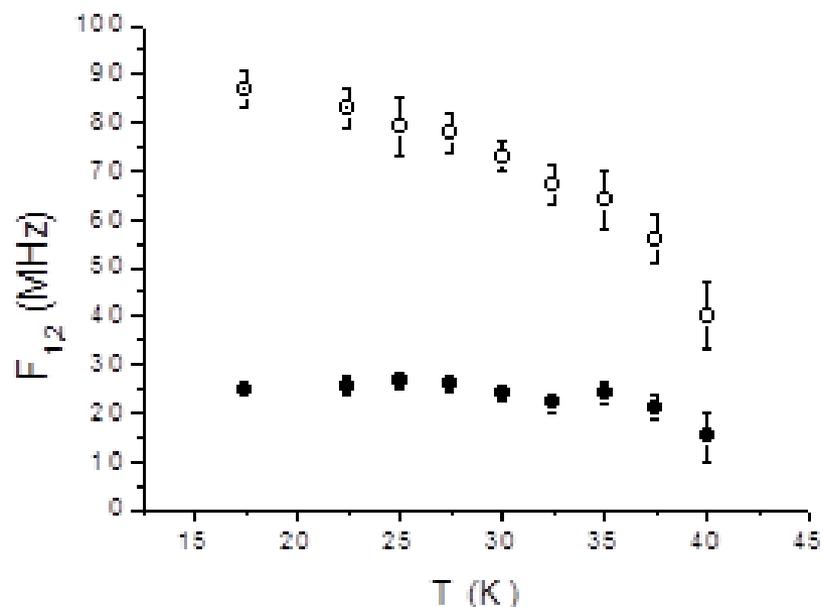


Рис. 6. Температурная зависимость двух наблюдаемых частот прецессии спина мюона для образца **ECMO**, измеренная в режиме *RUN2* (F_1 - тёмные точки, F_2 - светлые точки).

Выводы.

Проведено сравнительное изучение релаксации поляризации мюонов в керамических образцах ЕСМО и ЕМО.

Обнаружен ряд общих для обоих образцов эффектов, относящихся к общей исходной матрице ЕСМО и ЕМО, а также ряд различий в релаксации поляризации мюонов, обусловленных областями фазового расслоения, содержащих ферромагнитные пары ионов Mn^{3+} и Mn^{4+} и перезаряжающие их электроны.

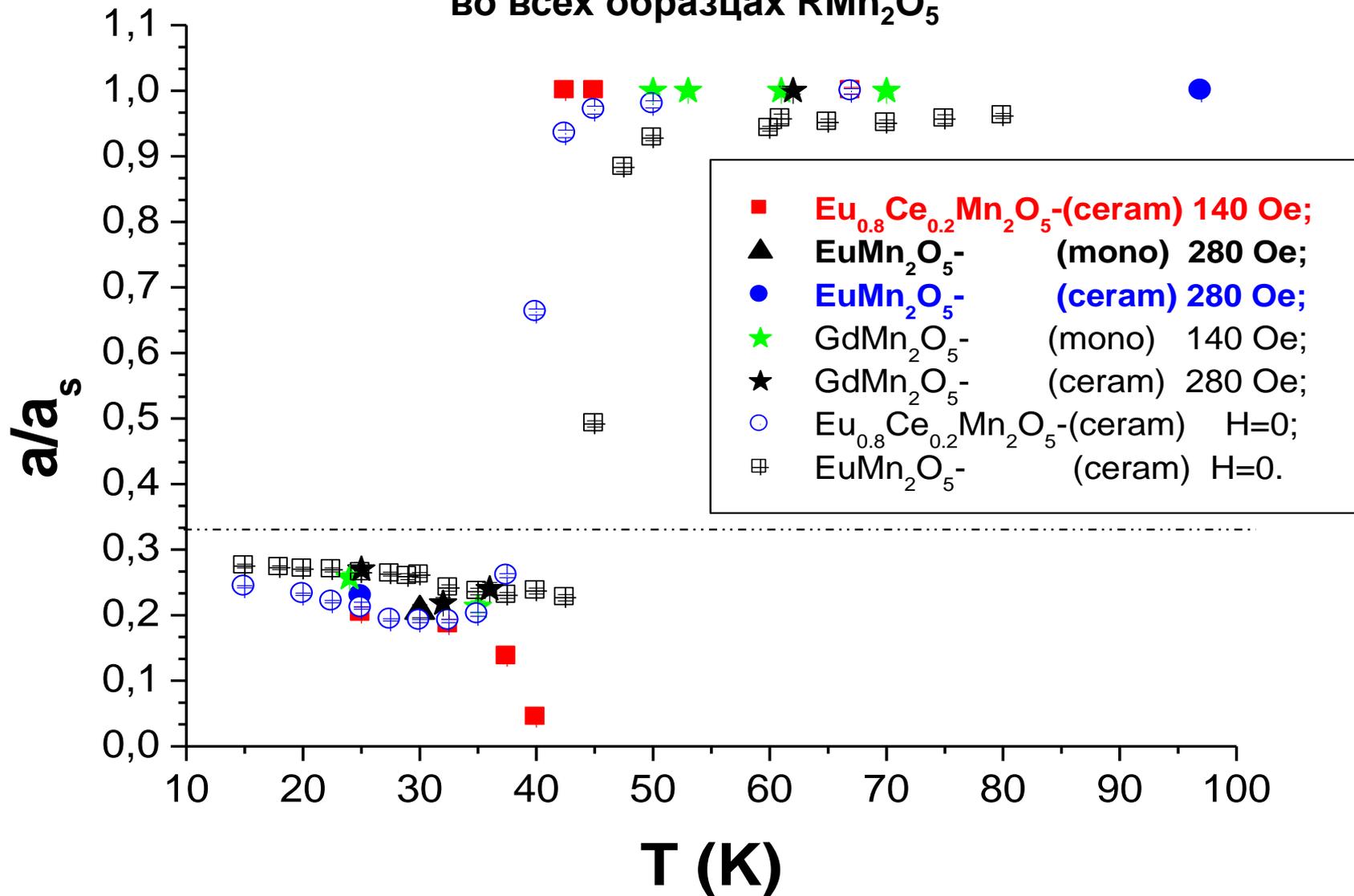
Объем областей фазового расслоения в легированном образце значительно больше чем в исходном. В основной матрице обоих образцов наблюдается максимум релаксации мюонов вблизи магнитного фазового перехода при T_N и ряд более слабых аномалий при температурах более низкотемпературных переходов.

В обоих образцах обнаружены близкие по величине потери поляризации мюонов при температурах ниже T_N . Этот эффект обусловлен образованием ферромагнитных мюонных комплексов $Mn^{4+}-Mn^{4+}+\mu$ в результате двойного обмена между ферромагнитными парами $Mn^{3+}-Mn^{4+}$, расположенными вдоль оси b в основном объеме образцов. Области фазового расслоения существуют при всех температурах и вносят независимый от температуры вклад в релаксацию поляризации мюонов во всей исследованной температурной области вплоть до комнатной температуры.

При $T < 30-35$ К области фазового расслоения представляют собой $1D$ сверхрешетки с чередующимися ферромагнитными диэлектрическими слоями и слоями с $2D$ электронным газом. Эти проводящие слои приводят к значительному усилению релаксации поляризации мюонов в легированных образцах ниже 35 К.

Наблюдаемые особенности и различия в поведении параметров функции релаксации легированного образца в области температур $25\div 40$ К при разных режимах его охлаждения связаны с влиянием скорости охлаждения образца на проводимость областей фазового расслоения. При быстром охлаждении растет проводимость в слоях сверхрешеток при низких температурах, что усиливает релаксацию мюонов.

Перераспределение зарядовой плотности наблюдается
во всех образцах RMn_2O_5



ИССЛЕДОВАНИЕ МАНГАНИТОВ

$TbMnO_3$ И $Tb_{0,95}Bi_{0,05}MnO_3$

μ SR-МЕТОДОМ

Исследованы два однофазных керамических образца: $TbMnO_3$ и допированный $Tb_{0,95}Bi_{0,05}MnO_3$. Обнаружено, что температуры перехода в магнитоупорядоченное состояние у них одинаковы ($\sim 40K$). В обоих образцах наблюдается значительный рост скорости релаксации поляризации (λ). В области температур 15-40K в обоих образцах наблюдается потеря поляризации: в образце $Tb_{0,95}Bi_{0,05}MnO_3$ – 50%, а в образце $TbMnO_3$ – 100%.

Есть намерение продолжить исследование образца $Tb_{0,95}Bi_{0,05}MnO_3$ μ SR-методом.

При исследовании мультиферроика Tb_{0.95}Bi_{0.05}MnO₃ с помощью μ SR-метода был обнаружен ряд особенностей, которые не наблюдались при изучении других мультиферроиков-манганитов, в том числе и TbMnO₃.

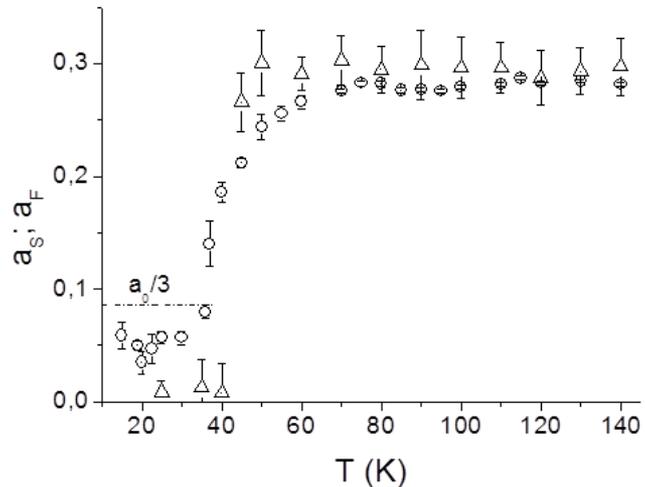
Так, под действием слабого внешнего магнитного поля (~300 Гс) в диапазоне температур 80 – 150 К появилось расслоение образца на две фракции по динамике внутренних магнитных корреляций. В одной из фракций (~50% образца), которую мы относим к областям фазового расслоения, время жизни превышает время измерения (10 мкс) и фазовое расслоение обусловлено появлением в образце ионов марганца различной валентности (Mn³⁺ и Mn⁴⁺).

Величина 50% образца согласуется с относительным содержанием ионов Mn⁴⁺, которые появились в результате замещения ионов Tb³⁺ ионами Bi³⁺, если учесть, что каждый ион Bi³⁺ может вызывать появление восьми ионов Mn⁴⁺. Вторая фракция в этом же диапазоне температур формируется парными корреляциями ионов (Mn³⁺-Mn³⁺) в областях ближнего магнитного порядка в матрице исходного кристалла, на которые магнитное поле 290 Гс слабо влияет.

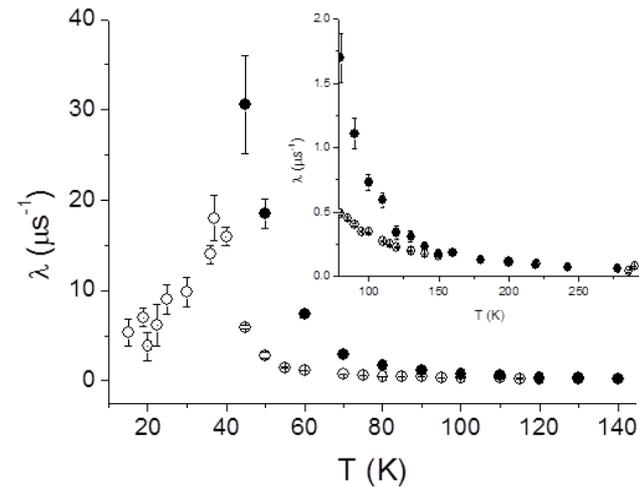
В области температур магнитоупорядоченного состояния $T < T_N = 40$ К наблюдались два мюониевых канала релаксации поляризации мюонов.

Первый канал связан с образованием мюонных ферромагнитных комплексов (Mn³⁺-Mu-Mn⁴⁺) в областях фазового расслоения. В этих комплексах мюон теряет поляризацию в результате сверхтонкого взаимодействия в мюонии за время меньше 10⁻⁸ с.

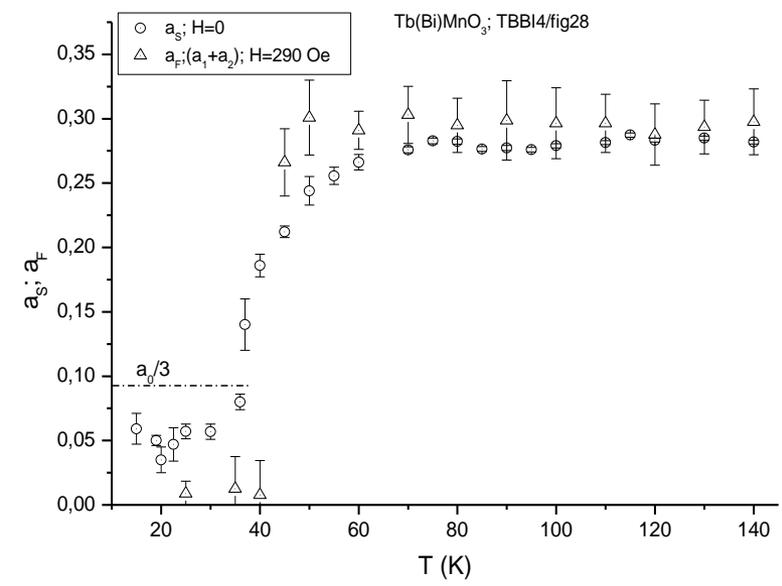
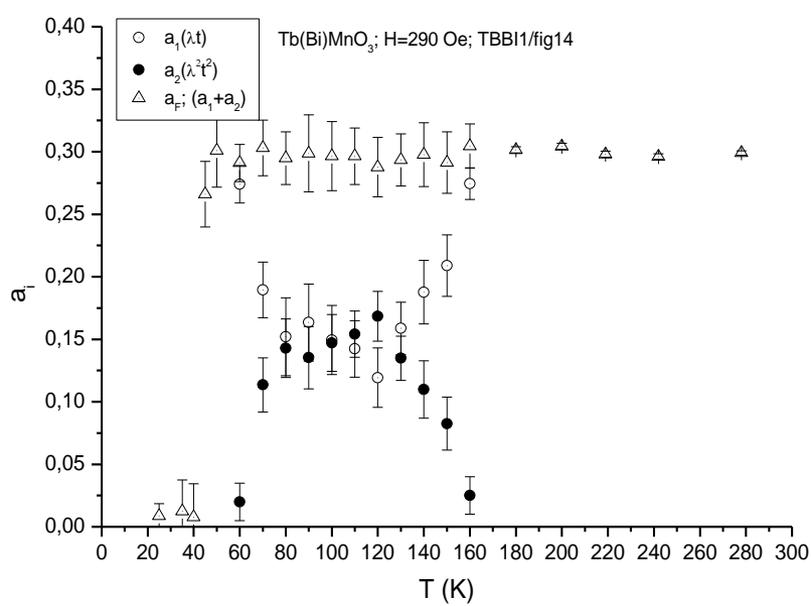
Второй канал возникает из-за образования мюонии с разорванной сверхтонкой связью в исходной матрице образца. В этом случае скорость релаксации поляризации большая, но мюон остаётся квазисвободным при взаимодействии с локальными магнитными полями циклоиды. Вклады в деполяризацию мюонов этих двух каналов примерно одинаковы.



Температурная зависимость асимметрии: a_s - светлые точки (H=0); a_F - треугольники (H=290 Гс).



Температурная зависимость скорости релаксации поляризации мюона; λ_s – светлые точки (H=0), λ_F – тёмные точки (H=290 Гс).

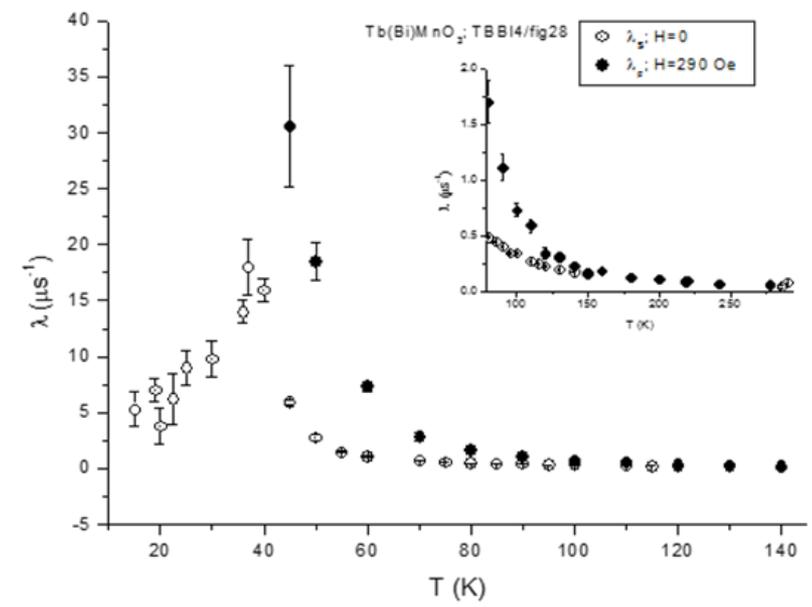


При измерениях во внешнем магнитном поле в области температур (70 ÷ 150) K наблюдается расщепление функции релаксации на две компоненты по форме затухания: *лоренцевского* и *гауссова* типа.

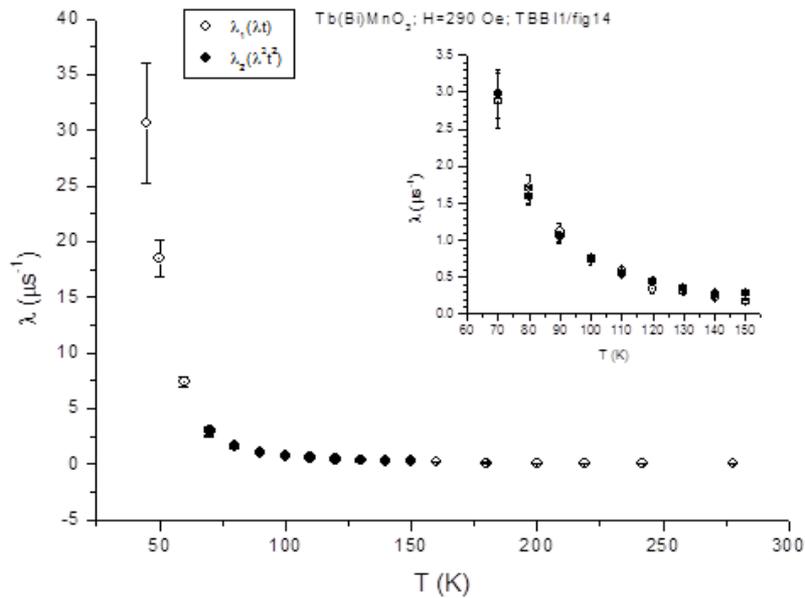
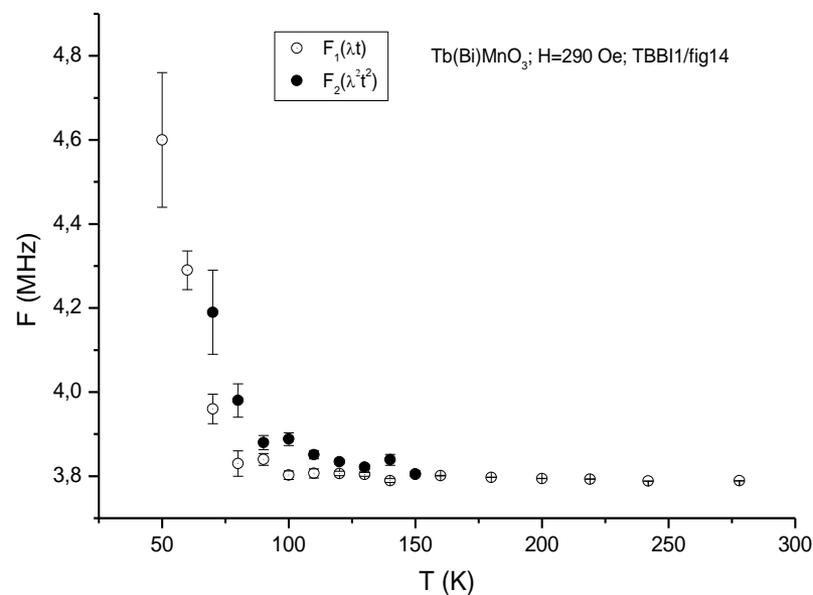
Лоренцевское затухание связано с воздействием на мюон локальных полей с высокой динамикой, когда параметр $\lambda_F = \sigma^2 \tau_c$ и $\tau_c \ll t$, где τ_c – время корреляции поля с магнитным моментом мюона, t – время измерения.

Когда $\tau_c \geq t$, $\lambda_F = \sigma^2 t$ и в функции релаксации появляется компонента $\exp(-\lambda^2 t^2)$, т. е. примесь гауссова затухания.

Наши измерения во внешнем магнитном поле при $T=290 \text{ K}$ показали, что примерно для 50% остановившихся мюонов наблюдается гауссово затухание поляризации. Всё это наблюдается только во внешнем магнитном поле.



Важно отметить, что сумма парциальных амплитуд $a_1 + a_2 = a_F$ для всех температур исследованного образца выше температуры Нееля $T = 40 \text{ K}$. Это указывает на то, что никаких других каналов релаксации поляризации не существует в этом диапазоне температур.



Наблюдается заметный рост частот прецессии спина мюона в области критических флуктуаций при температурах образца $T < 70$ K. При этом соотношение между частотами сохраняется ($F_2 > F_1$) при всех температурах, при которых наблюдается расщепление функции релаксации на две компоненты.

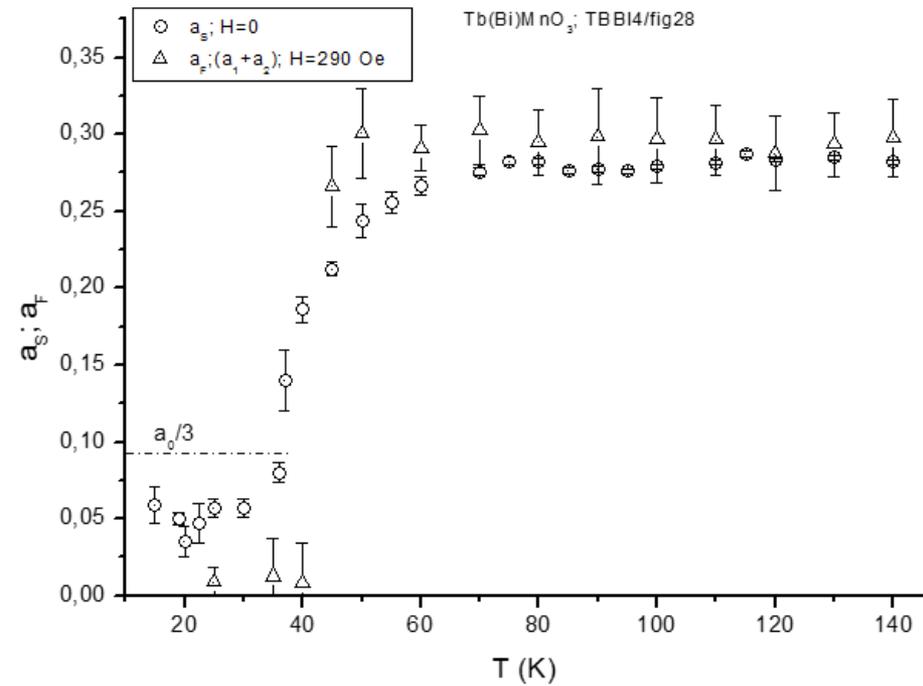
Примерное равенство параметров $\lambda_1 \approx \lambda_2$ сохраняется практически во всём диапазоне температур, где они наблюдаются. Оба параметра растут по мере понижения температуры образца. При температурах $T < 70$ K виден заметный рост скорости затухания.

Наблюдается постепенное увеличение потери поляризации за счёт быстрой релаксации при понижении температуры образца, начиная с температуры $T = 70$ K. Сравнительный анализ поведения параметров (λ_s и λ_F) при изменении температуры образца показывает, что в интервале температур (150÷290)K $\lambda_s \approx \lambda_F$, а различие между ними появляется при температурах меньших $T = 150$ K. Разница ($\lambda_F - \lambda_s$) увеличивается с понижением температуры образца. Это может быть связано с воздействием внешнего поля на динамику внутренних локальных магнитных полей. Ослабление динамики локальных полей приводит к увеличению τ_c , что в свою очередь увеличивает λ_F .

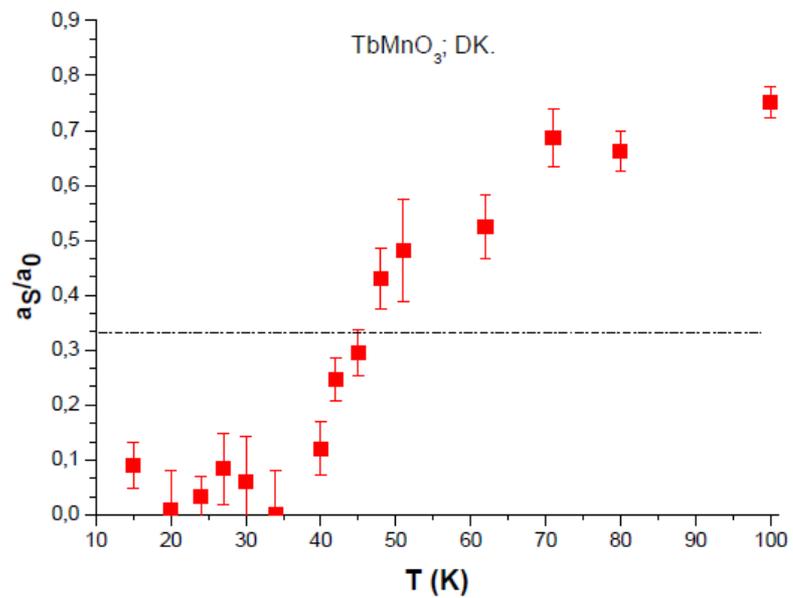
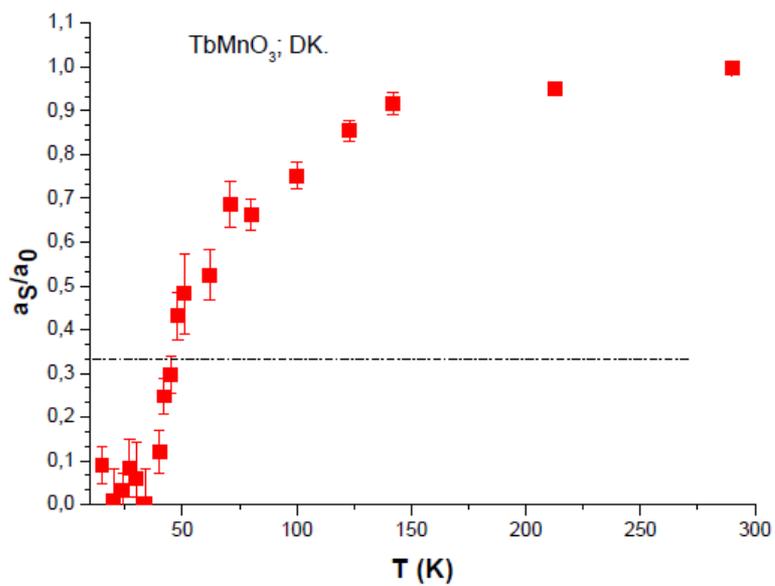
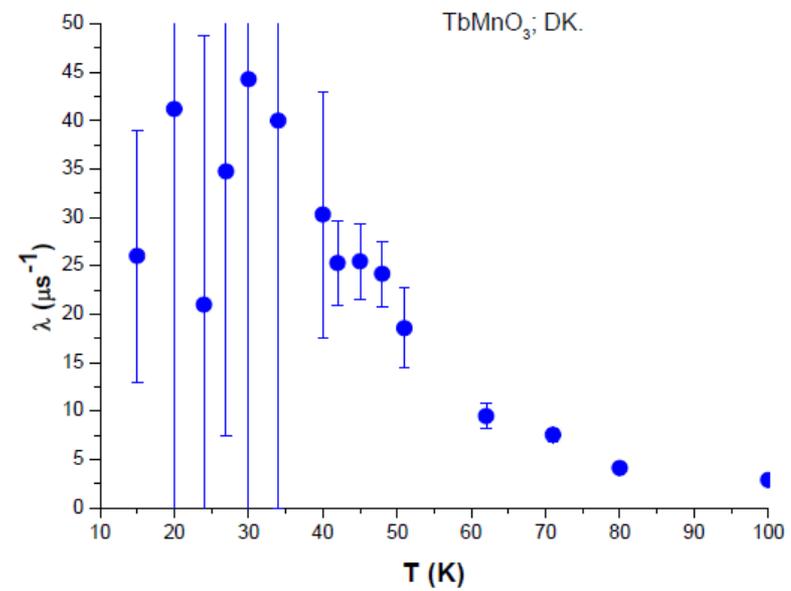
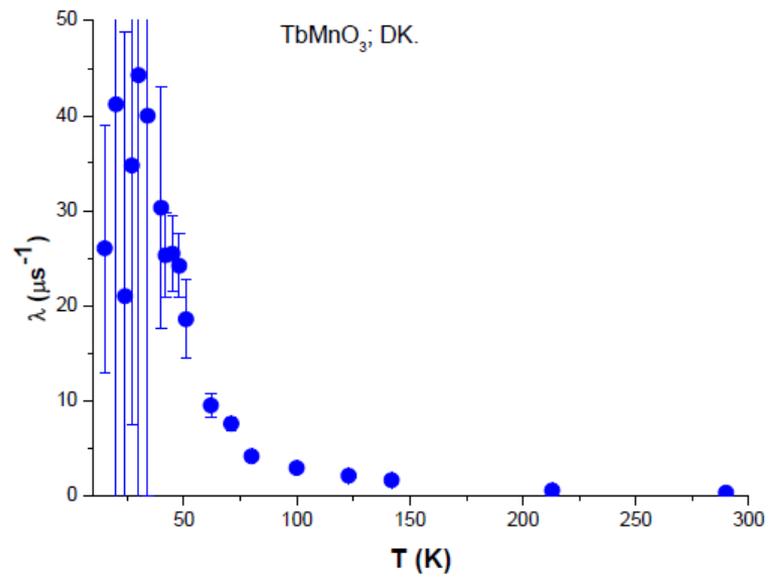
Таким образом, можно уверенно сказать, что внешнее магнитное поле приводит к двум наблюдаемым эффектам: появляется расщепление в функции релаксации по форме самого затухания и заметно растёт скорость релаксации при температурах образца меньших $T = 150$ K.

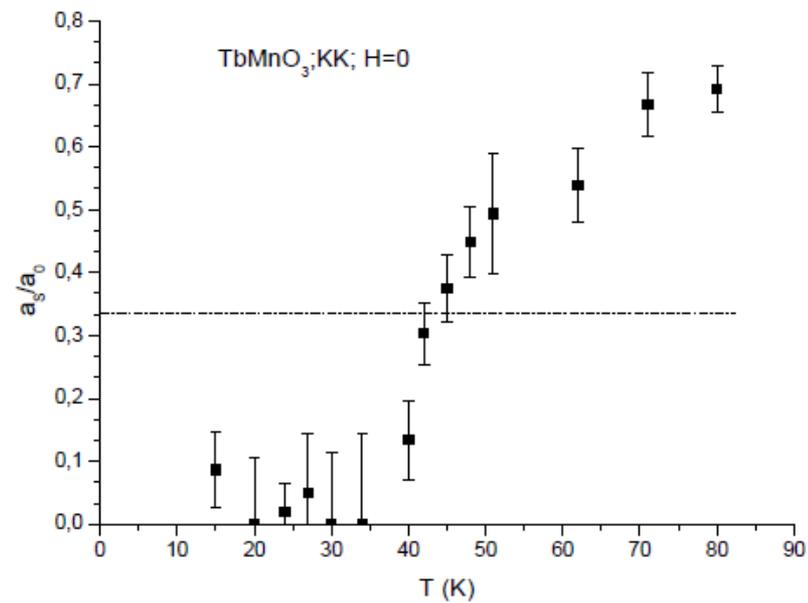
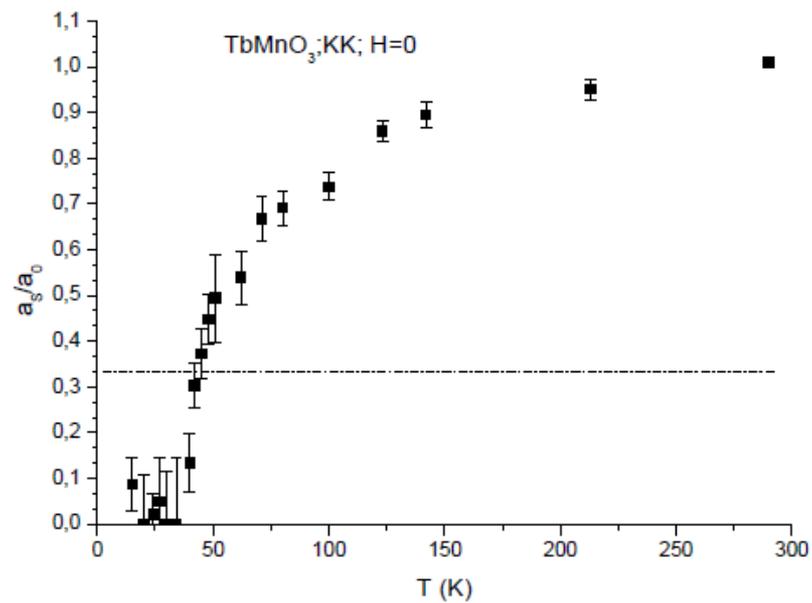
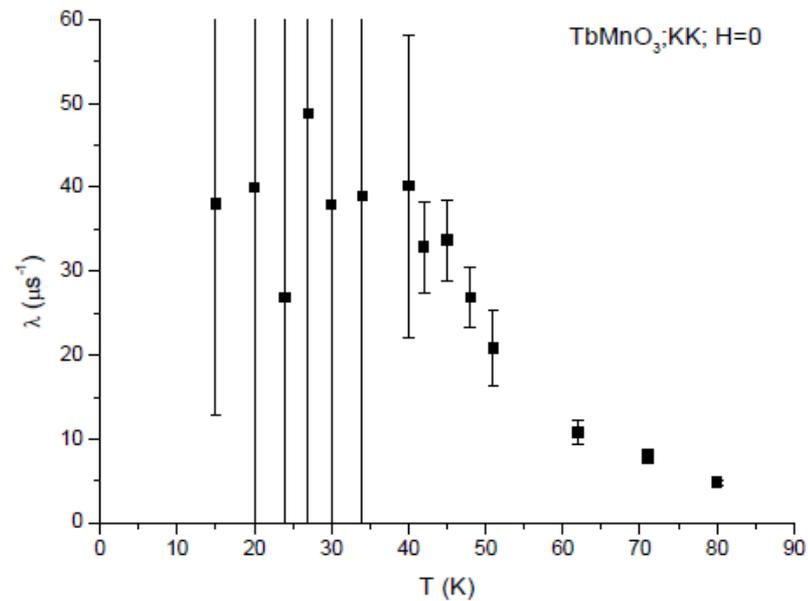
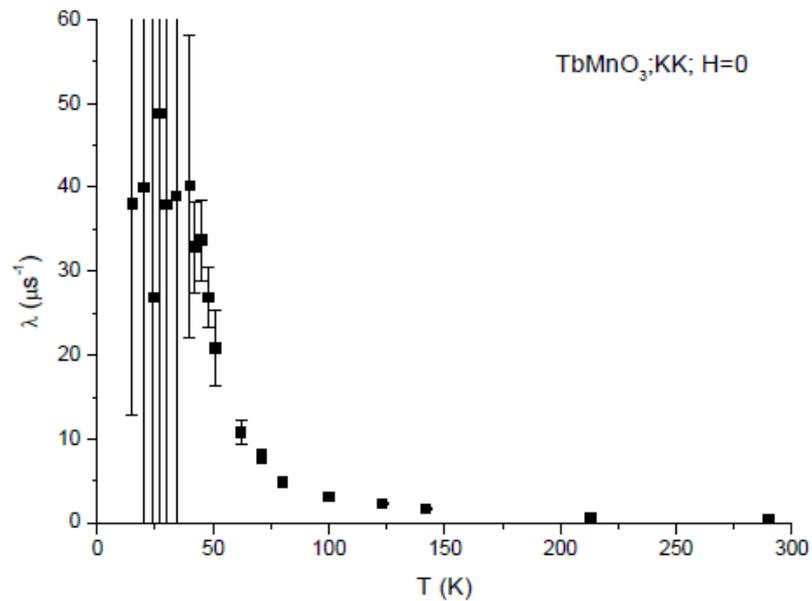
Ниже температуры $T_N = 40 \text{ K}$ в исследованном образце возникает магнитоупорядоченное состояние.

При этом исчезает амплитуда прецессии спина мюона на частоте внешнего магнитного поля (a_F). Наблюдаемая асимметрия a_s оказалась существенно меньше ожидаемой величины $a_0/3$. Появился дополнительный канал быстрой деполяризации за счёт образования мюонных ферромагнитных пар. Такие пары образуются из-за двойного обмена между двумя соседними ионами Mn^{+3} и Mn^{+4} . Такой эффект наблюдался при исследовании образцов RMn_2O_5 . Этот же механизм, по-видимому, приводит к наблюдаемому уменьшению a_s при приближении к температуре к температуре T_N со стороны высоких температур. Количество таких пар увеличивается и время жизни их так же растёт. Всё это происходит в тех случаях, когда мюоны останавливаются вблизи разновалентных пар ($Mn^{+3}-Mn^{+4}$).

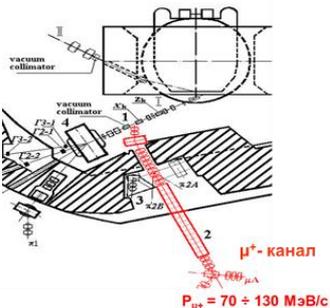


Мюониевый канал релаксации поляризации возникает и в случаях остановок мюонов вблизи пар ионов марганца с одинаковой валентностью ($Mn^{+3}-M^{+3}$). Мюон попеременно взаимодействует с двумя e_g -электронами. Т.о., двойной обмен между соседними ионами ослабляется в циклоиде незначительно по сравнению с ферромагнитным состоянием и существует возможность образования мюония. Характерная частота для двойного обмена составляет $\nu = 6.6 \cdot 10^{13}$ Гц. Частота сверхтонкого расщепления в свободном атоме мюония $\nu_0 = \omega_0/2\pi \approx 4.46 \cdot 10^9$ Гц. В случае быстрого обмена, когда $\nu \gg \nu_0$, сверхтонкая связь в мюонии разрывается. Возникает прямое взаимодействие спинов мюонов со стохастическими внутренними магнитными полями циклоиды.





Изучение феррожидкости на основе Fe_3O_4 (4,7%) в D_2O и $CoFe_2O_4$ (0,5%, 3% и 4,7%) в H_2O



Исследуемая феррожидкость $Fe_3O_4/2DBS/D_2O$ представляла собой суспензию нанодисперсного магнетита Fe_3O_4 в тяжелой воде D_2O , стабилизированного ПАВ – додецилбензолсульфанатовой кислотой 2DBS. Магнитные частицы вместе с окружающей их стабилизирующей кислотой имели средний диаметр $d = 118,9 \text{ \AA}$ со стандартным отклонением $\sigma = 6,7 \text{ \AA}$. Объемная концентрация магнитных частиц составляла 4,7%. Магнитное ядро из Fe_3O_4 имело средний диаметр 70 \AA . В 1 мл феррожидкости- 0,244 г магнетита, а на 1 г Fe_3O_4 приходится 0,3 г ПАВ. Феррожидкость находилась в кювете из меди с суммарной толщиной стенок 100 мкм. Количество исследуемого вещества в направлении пучка составляло около $1,2 \text{ г/см}^2$

Образцы феррожидкости $CoFe_2O_4/LA/DDS-Na/H_2O$ 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% и 4,7%. Средний диаметр 85 \AA . При концентрации 3% в 1 мл феррожидкости содержалось 0,17г феррита кобальта, а на 1 г $CoFe_2O_4$ приходилось 0.25 г ПАВ.

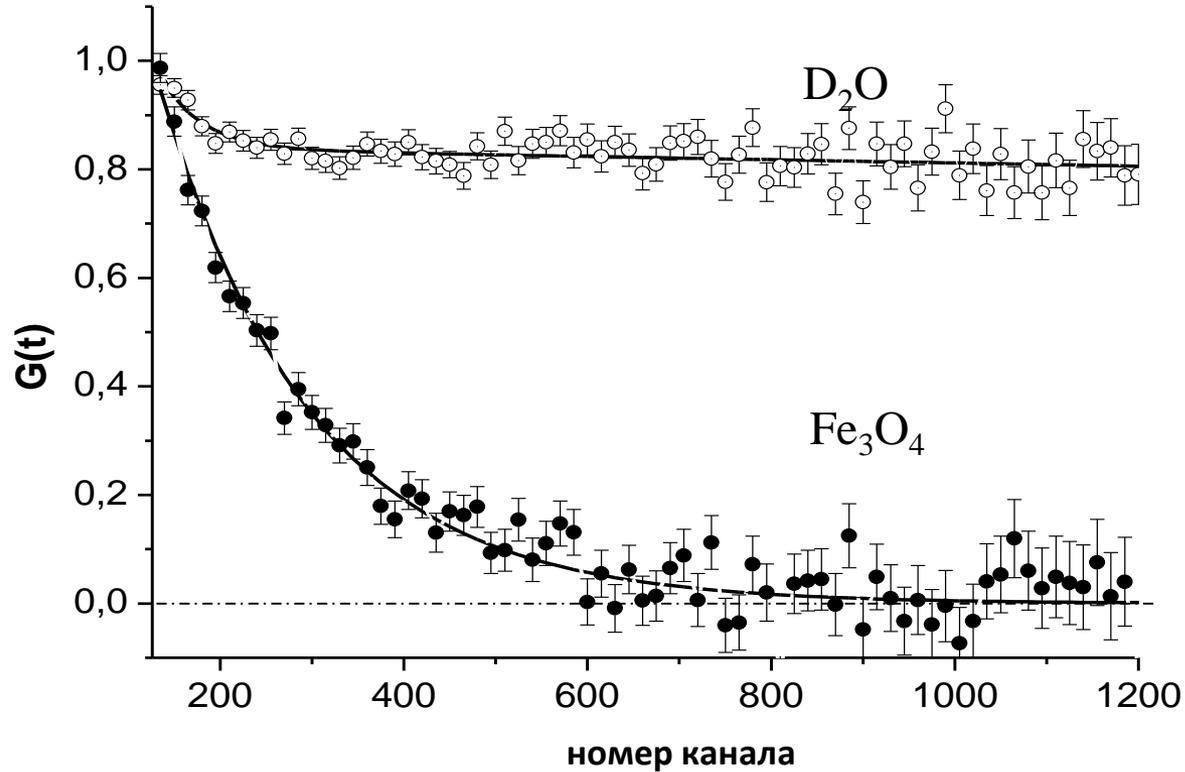
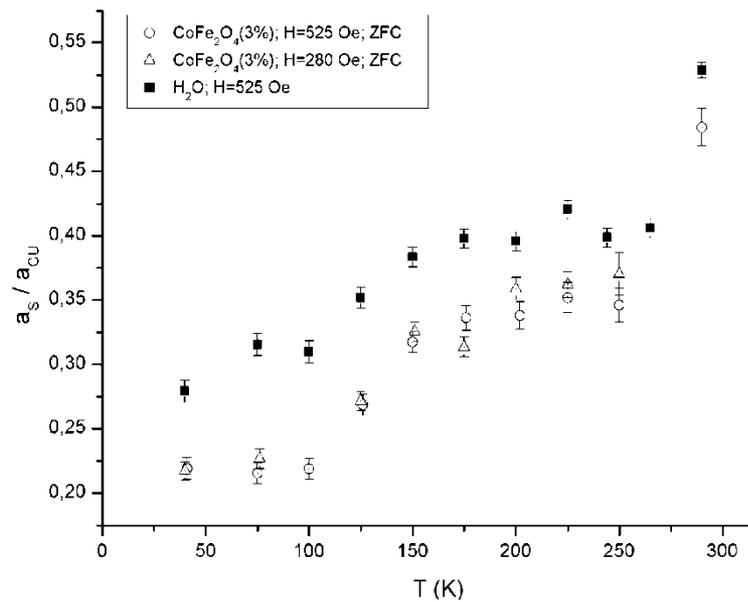
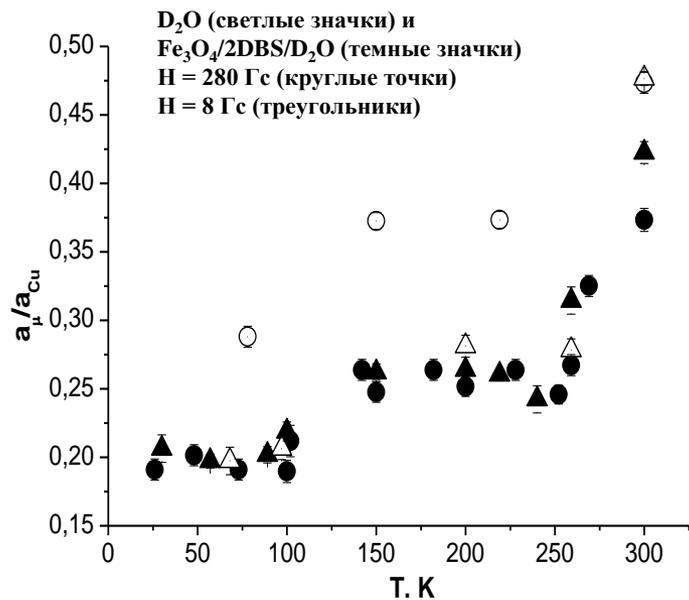


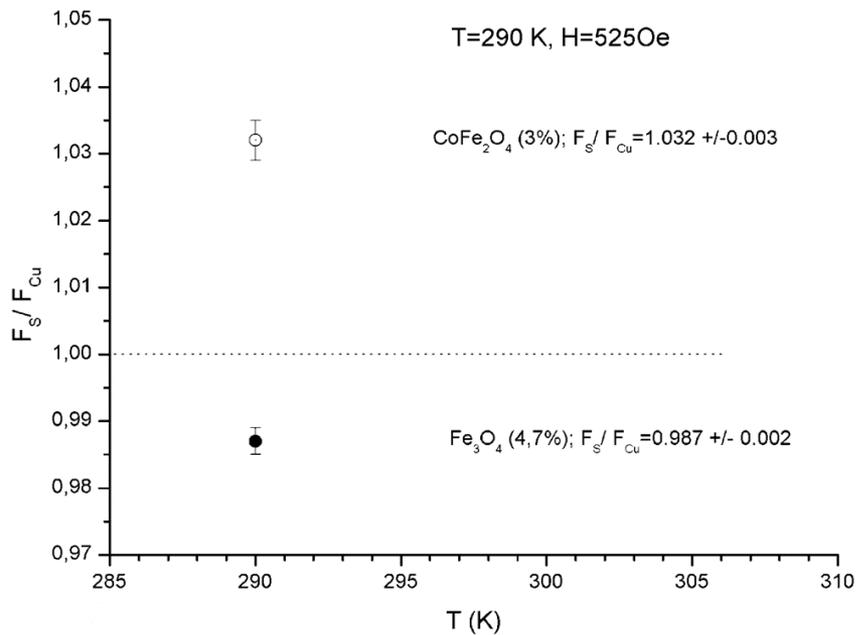
Рис. Функции релаксации поляризации мюонов, остановившихся в образцах D_2O (светлые значки) и феррожидкости Fe_3O_4 (черные точки) при температуре 300 К в нулевом внешнем магнитном поле; 1 канал = 4,9 нс;

$$a_1 = 0,030 \pm 0,004; \quad a_2 = 0,104 \pm 0,004;$$

$$\lambda_1 = 0,08 \pm 0,04 \text{ мкс}^{-1}; \quad \lambda_2 = 1,5 \pm 0,1 \text{ мкс}^{-1}.$$



Зависимость доли асимметрии мюонной компоненты от температуры в образцах



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 $\text{NaCH}_3(\text{CH}_2)_{11}\text{OSO}_3$ (SDS) и слоя лауриновой кислоты, $\text{C}_{11}\text{H}_{23}\text{COOH}$ (LA)).

Sample volume=32cm³

P₀ : $\Phi_1=0\%$ at H=0kA/m;

P₁ : $\Phi_1=1\%$ at H=0kA/m;

P₂ : $\Phi_1=5\%$ at H=0kA/m;

P₃ : $\Phi_1=10\%$ at H=0kA/m;

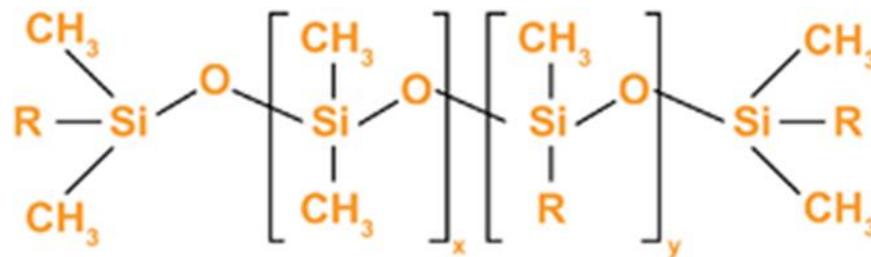
P₄ : $\Phi_1=15\%$ at H=0kA/m.

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

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

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

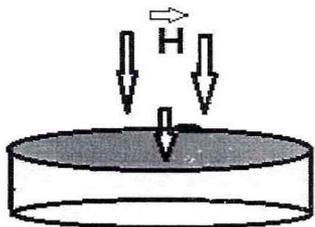
P_{4m} : $\Phi_1=15\%$ at H=80kA/m.



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

В отличие от феррожидкостей, в эластомерной матрице направление легкой оси магнитных наночастиц друг относительно друга и с макроскопическим образом 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.



Состав материала простой – это **композит магнитного наполнителя в эластичной полимерной матрице.**

В целом данный материал относится к разряду так называемых «умных материалов» **“smartmaterials”** – *материалов способных обратимо изменять свои свойства под внешним воздействием.* После многочисленных исследований выяснилось, что материал обладает широким набором интересных свойств, прояснился механизм явлений, появились модели, пытающиеся описать наблюдаемые явления.

На сегодняшний день при исследовании **магнитоактивного эластомера** выявлено **ДВЕНАДЦАТЬ** основных свойств.

Материал проявляет:

- *магнитореологический эффект,*
- *магнитодеформационный,*
- *магнитострикционный эффект,*
- *эффект памяти формы,*
- *магнитоэлектрореологический эффект,*
- *магниторезистивный эффект,*
- *пьезорезистивный,*
- *магнитопьезорезистивный эффект,*
- *магнитооптический, магнитодиэлектрический,*
- *магнитоакустический эффект,*
- *пьезоэлектрический эффект.*

Таким образом, магнитоактивный эластомер, исследования свойств которого началось 20 лет назад с магнитореологического эффекта, на сегодняшний день проявляет уже двенадцать различных эффектов, которые в будущем могут найти практическое применение.

Магнитные эластомеры, или магнитные полимеры, могут использоваться в биомедицинских областях: магнитно-резонансной томографии, разделении ДНК, доставки лекарств, кардиологии и нейрохирургии [*Ramanujan R.V. Magnetic particles for biomedical applications // Biomedical materials. 2009. P. 477–491*].

Очень большое внимание в применении эластомеров уделяется управляемой доставке лекарств [*Brazel C.S. Magneto thermally-responsive nanomaterials: combining magnetic nanostructures and thermally-sensitive polymers for triggered drug release. // Pharm. Res. 2009. 26, № 3. P. 644–656; Stimuli-responsive magnetic particles for biomedical applications / Medeiros S.F. et.al. // Int. J. Pharm. Elsevier B.V. 2011. 403, № 1-2. P. 139–161*].

Использование железных частиц или частиц магнетита в качестве наполнителя в эластомерах приводит к их нагреву в переменном магнитном поле, что хорошо для гипертермии. Восприимчивые полимерные эластомеры могут адаптироваться к условиям окружающей среды, контролировать транспорт ионов и молекул, изменять смачиваемость и адгезионные свойства, преобразовывать химические и биохимические сигналы в оптические, электрические, тепловые, механические, и наоборот [*Emerging applications of stimuli-responsive polymer materials / Stuart M. et.al. // Nat. Mater. Nature Publishing Group. 2010. 9, № 2. P. 101–113*].

Интересны исследования в области самоорганизующихся магнитных наночастиц, которые могут формировать в полимере одномерные, двумерные и трехмерные пространственные структуры под действием магнитных полей. Управление структурой композитного материала позволяет рассматривать его в качестве основы хранения или записи информации [*Magnetically-responsive self assembled composites / Dai Q., Nelson A // Chem. Soc. Rev. 2010. 39, № 11. P. 4057–4066*].

Область применения магнитных эластомеров очень широка. Однако до сих пор остаются открытыми вопросы физических механизмов формирования свойств этих материалов.

Распространенными являются публикации, в которых рассматриваются материалы с наполнителем из частиц железа и магнетита, однако работ, посвященных исследованию свойств эластомеров с другими типами частиц, очень мало.

Sample volume=32cm³

P₀ : Φ₁=0% at H=0kA/m;

P₁ : Φ₁=1% at H=0kA/m;

P₂ : Φ₁=5% at H=0kA/m;

P₃ : Φ₁=10% at H=0kA/m;

P₄ : Φ₁=15% at H=0kA/m.

P_{1m} : Φ₁=1% at H=80kA/m;

P_{2m} : Φ₁=5% at H=80kA/m;

P_{3m} : Φ₁=10% at H=80kA/m;

P_{4m} : Φ₁=15% at H=80kA/m.

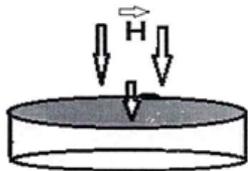


Рис. 1. Образцы эластомеров.



Фотография образца P0
(0% наночастиц CoFe₂O₄)



Фотография образца P4
(15% наночастиц CoFe₂O₄)

Для исследования μ SR-методом магнитных свойств магнито-реологических эластомеров были изготовлены образцы в виде дисков диаметром 64 мм и толщиной 9 мм.

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 CH₃(CH₂)₁₁SO₄Na с плотностью $\rho = 1.01$ г/см³ и лауриновой кислоты C₁₁H₂₃COOH с плотностью $\rho = 0.88$ г/см³. Один мл феррожидкости содержал 0.17 г феррита кобальта, а на 1 г CoFe₂O₄ приходилось 0.25 г ПАВ.

Исследованные образцы были синтезированы в Институте технической химии УО РАН. Предварительно проводилось двукратное сепарирование наночастиц по размерам на центрифуге «Biofuge 15R» в течении 60 минут при 6000 об/мин.

Распределение частиц по размерам было исследовано в Центре перспективных технологий (Сколково) с использованием трансмиссионного электронного микроскопа высокого разрешения LEO 912 AB OMEGA с ускоряющим напряжением 120 кВ.

Распределение наночастиц по размерам аппроксимировано функцией логарифмически нормального распределения и определены следующие значения параметров: $D_0 = 7.8 \pm 0.1$ нм, $\sigma = 0.40 \pm 0.01$ нм с математическим ожиданием $\bar{D} = D_0 \cdot \exp(\sigma^2/2) = 8.5$ нм.

Подготовлено два набора образцов с концентрацией 0, 5, 10 и 15% с неупорядоченной и с упорядоченной ориентацией магнитных моментов наночастиц CoFe₂O₄.

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

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.

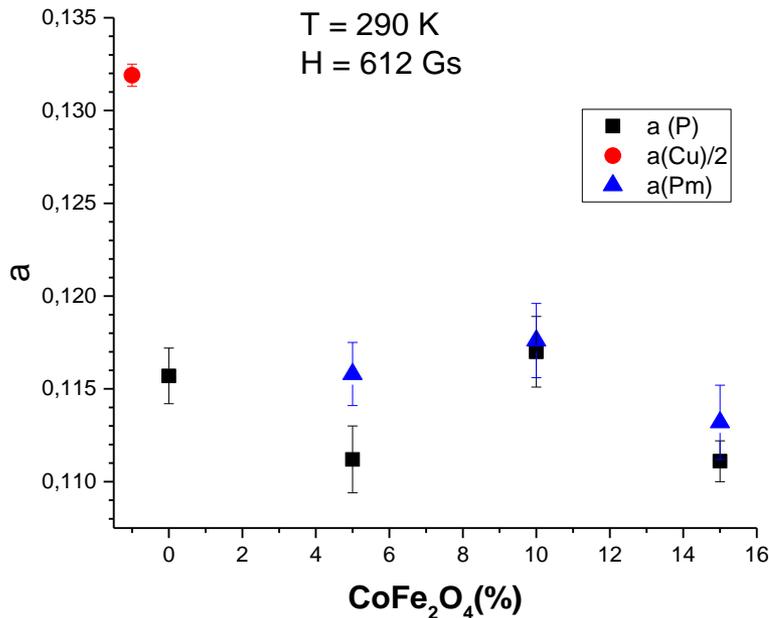


Рис. 1. Зависимость амплитуды прецессии спина мюона от величины концентрации CoFe_2O_4 .

На рисунке 2 показано поведение параметра λ в зависимости от концентрации магнитных наночастиц в образцах. Наблюдается устойчивый рост скорости релаксации поляризации мюонов, остановившихся в образце, по мере увеличения количества наночастиц CoFe_2O_4 в исследуемых образцах. В образцах P_m с упорядоченным состоянием магнитных моментов наночастиц наблюдается небольшое замедление роста параметра релаксации поляризации с увеличением количества примесных наночастиц.

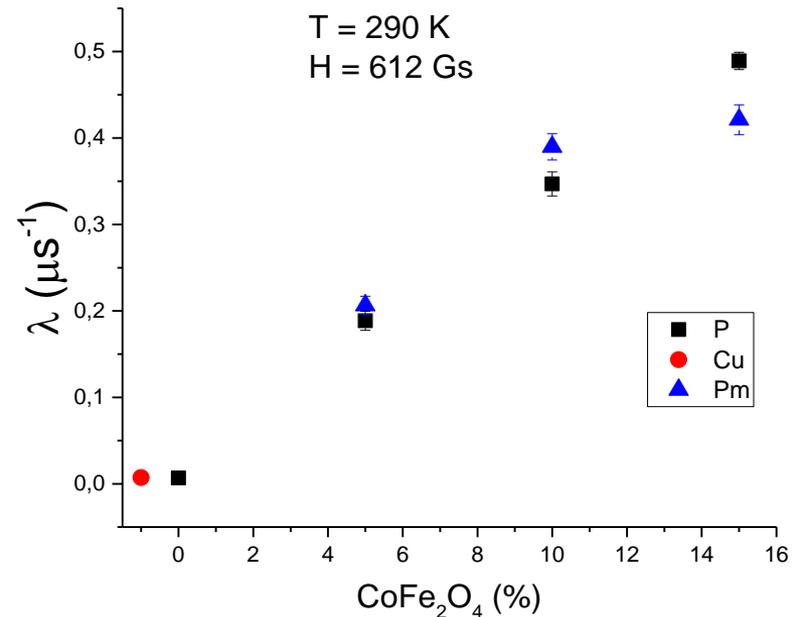


Рис. 2. Зависимость скорости релаксации поляризации мюона от концентрации наночастиц CoFe_2O_4 : чёрные квадраты – P образцы, синие треугольники – P_m образцы и красная точка – медный образец.

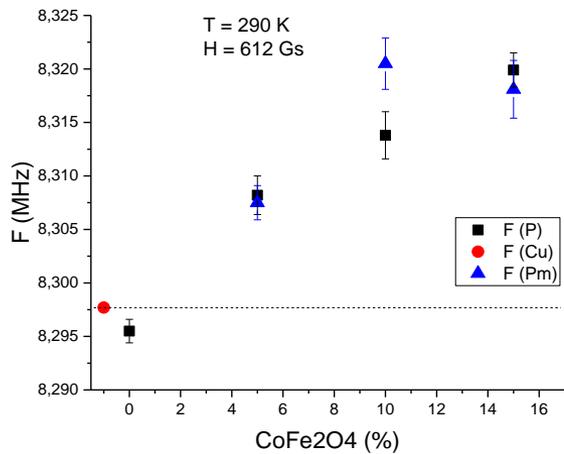


Рис. Зависимость частоты прецессии спина мюона от концентрации наночастиц CoFe_2O_4 при температуре 290 К в магнитном поле $H = 612$ Гс: чёрные квадраты – P образцы, синие треугольники – P_m образцы и красная точка – медный образец.

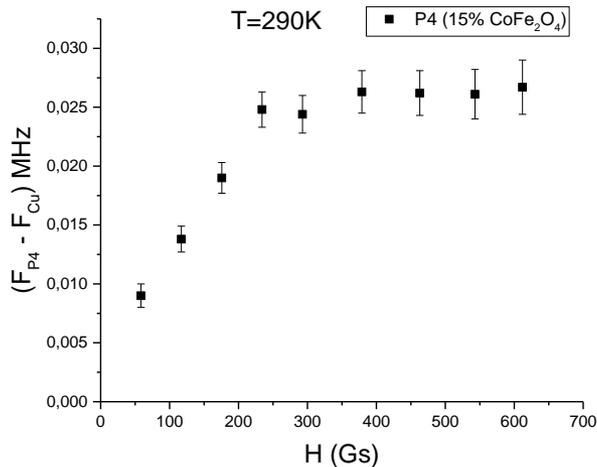


Рис. Зависимость сдвига частоты прецессии спина мюона от величины внешнего магнитного поля при $T = 290$ К в эластомере P4 (15% CoFe_2O_4). Вид этой зависимости характерен для парамагнетика (суперпарамагнетика) во внешнем поле. Добавка к внешнему полю достигает почти 2 Гс (1.96(17) Гс).

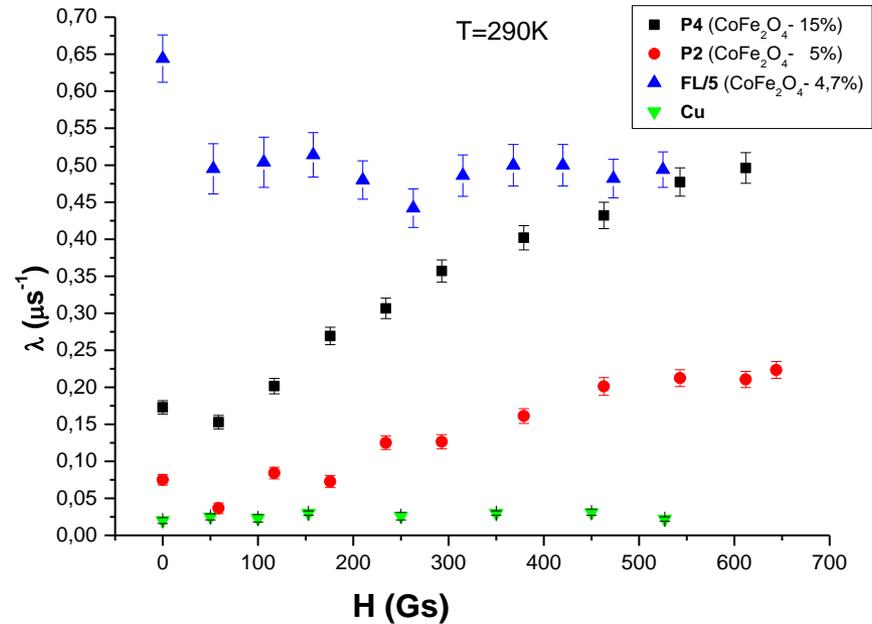
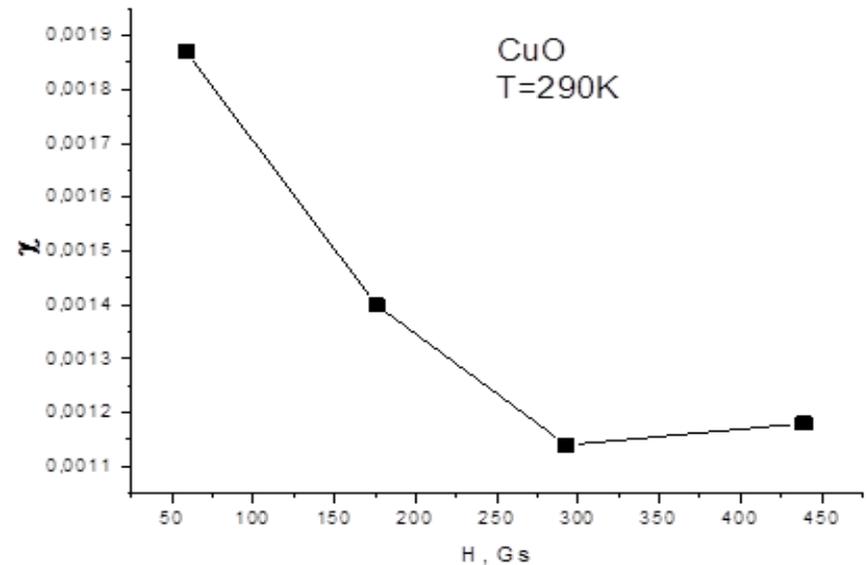
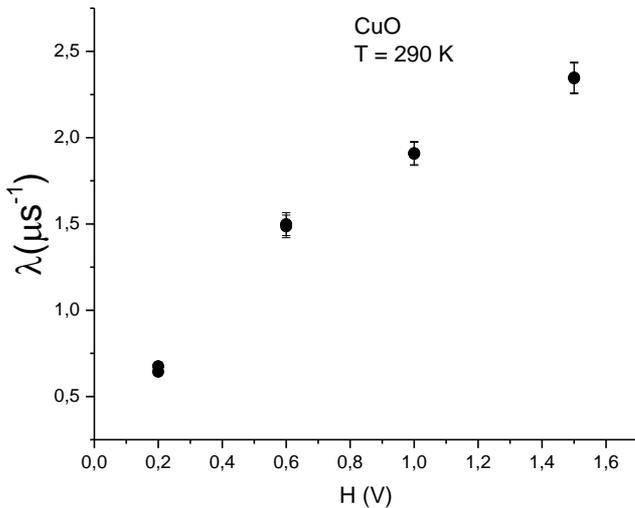
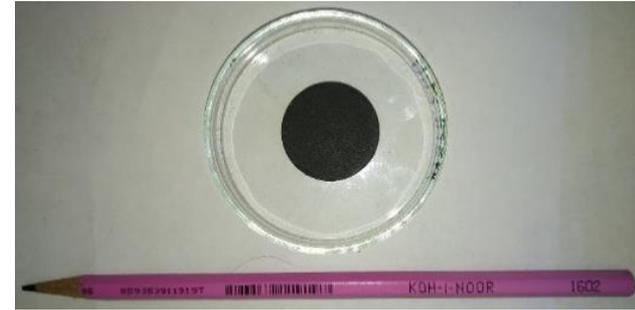
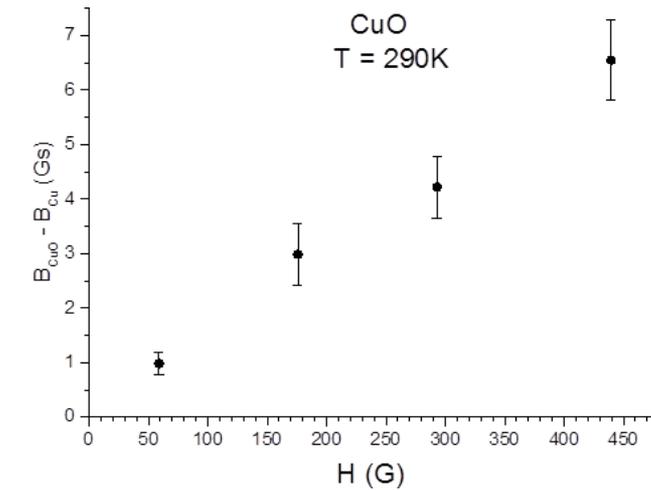


Рис. Зависимость скорости деполяризации мюона от магнитного поля: квадраты – эластомер P4 (15% CoFe_2O_4), красные точки - образец эластомера P2 (5% CoFe_2O_4), синие треугольники - феррожидкость 3% CoFe_2O_4 , делённые на 5, зелёные треугольники – Cu.

Исследования необходимо продолжить

μSR-эксперименты по исследованию наноструктурного образца CuO



Образец оксида меди CuO впервые был изготовлен по новой технологии путем электродугового испарения графитового электрода, содержащего медь. Получены предварительные результаты измерения магнитной восприимчивости χ .

Исследования будут продолжены для температур ниже комнатной. Параллельно проводятся измерения магнитной восприимчивости χ на имеющемся в лаборатории криомагнетометре, позволяющем проводить исследования в магнитных полях до 0,5 кГс при температурах 180-300 К.

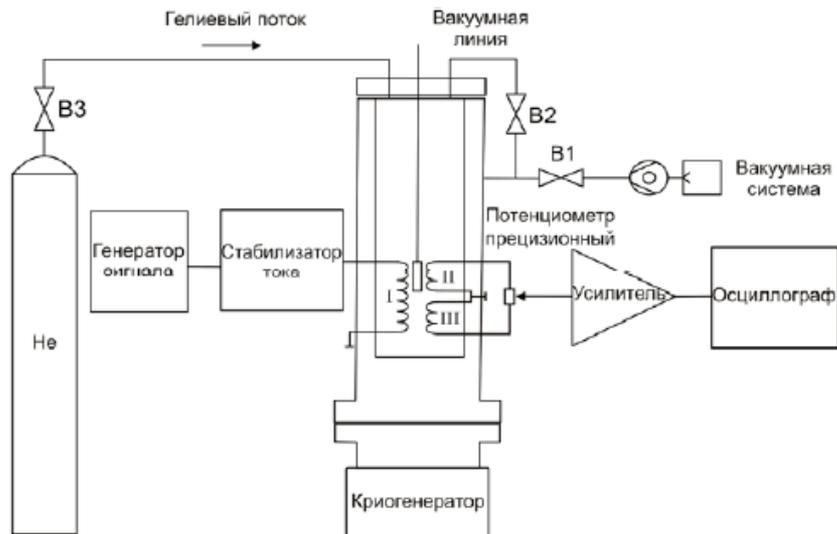


Рис. 1. Принципиальная схема экспериментальной установки

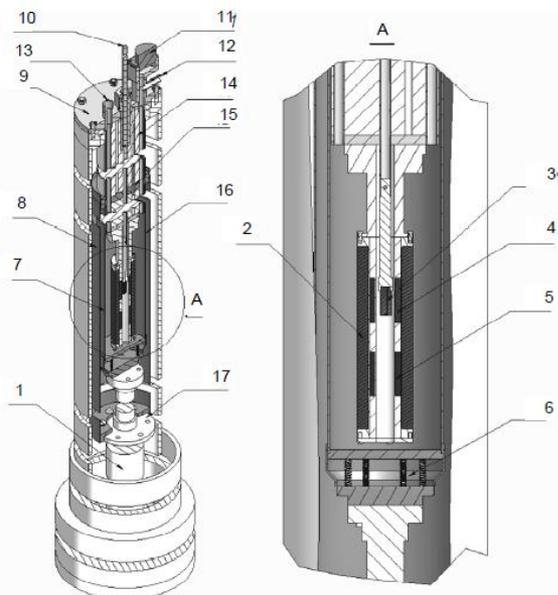


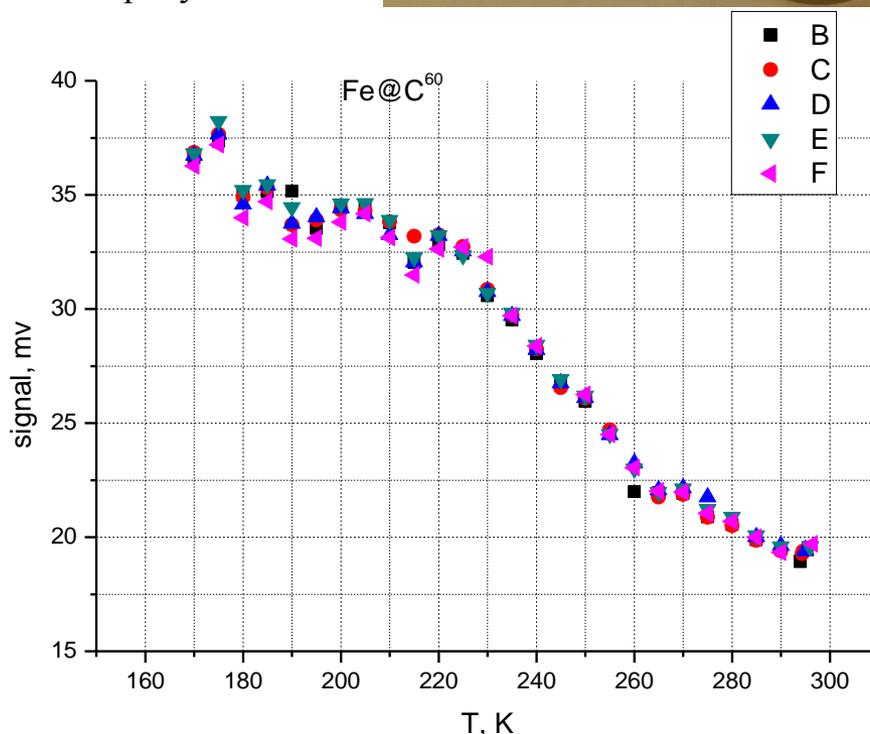
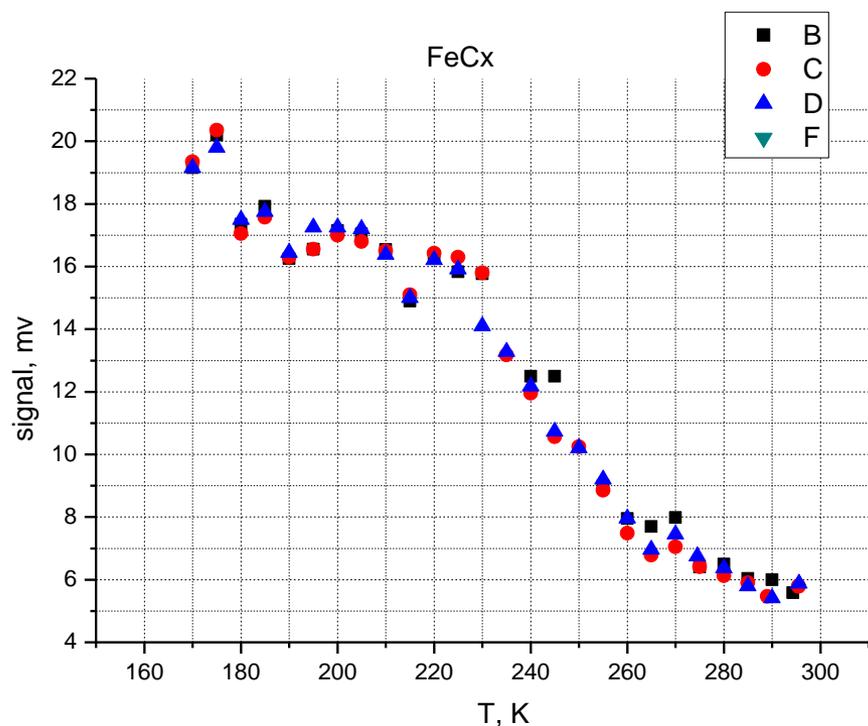
Рис. 2. Схема конструкции магнитметра: 1 – криогенатор; 2 – задающий соленоид; 3 – исследуемый образец; 4 – измерительный соленоид; 5 – опорный соленоид; 6 – вибрационная развязка; 7 – биметаллическая шахта криостата; 8 – вакуумная изоляция; 9 – верхний фланец криостата; 10 – держатель трансформатора взаимной индукции; 11 – разъем для сигнальных проводов; 12, 13 – штуцеры для подвода и откачки хладагента; 14 – тепловая изоляция; 15 – тепловой переход; 16 – экран для перехвата теплового излучения; 17 – первая ступень криогенатора



И.Ю. Иванов, А.А. Васильев, М.Е. Взнуздаев, С.И. Воробьев, А.Л. Геталов, С.А. Котов, П.А. Кравцов, А.В. Надточий, В.А. Трофимов. *Измерение динамической магнитной восприимчивости сталей в криогенных условиях.*

Налажено сотрудничество с Лабораторией химии и спектроскопии углеродных материалов Отдела наноструктурированных материалов ОНР. Исследования посвящены изучению магнитных свойств наноструктурных образцов оксида меди CuO и эндометаллофуллеренов C⁶⁰@Fe (в перспективе и с редко-земельными ионами).

К настоящему моменту есть результаты измерения магнитной восприимчивости прекурсора FeC^x, а также образца эндометаллофуллерена Fe@C⁶⁰ в диапазоне температур 170К – 300К в нулевом магнитном поле. Результаты демонстрируются на рисунках:



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 μ SR-измерения на ускорителе ПИЯФ.



Interparticle magnetic interactions in synthetic ferrihydrite: Mössbauer spectroscopy and magnetometry study of the dynamic and static manifestations

Yu.V. Knyazev^{a*}, D.A. Balaev^{a,b}, S.V. Stolyar^{a,b,c}, A.A. Krasikov^a, O.A. Bayukov^a, M.N. Volochaev^a, R.N. Yaroslavtsev^{a,c}, V.P. Ladygina^c, D.A. Velikanov^a, R.S. Iskhakov^a

^a Kirensky Institute of Physics, Federal Research Center KSC SB RAS, Akademgorodok 50, bld. 38, Krasnoyarsk 660036, Russia
^b Siberian Federal University, Svobodnyy 79, Krasnoyarsk 660041, Russia
^c Krasnoyarsk Scientific Center, Federal Research Center KSC SB RAS, Akademgorodok 50, Krasnoyarsk 660036, Russia



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.

Идея такая - с помощью вращения спина мюона посмотреть магнитную релаксацию образца с взаимодействиями и без них. И попробовать по разнице спектров оценить влияние взаимодействий на динамику спинов.



Условия образования ферригидрита существенно влияют на физические свойства его наночастиц, в частности, на его кристалличность и взаимодействия между отдельными частицами. Магнитные свойства, и соответственно применение, сильно зависят от структуры частицы. Плотное ядро обеспечивает наночастицам лучшие магнитные свойства и делает его более подходящим для применения в медицине, к примеру, для доставки лекарств или точечного теплового воздействия на очаги заболеваний в организме», — прокомментировал результаты исследования Юрий Князев, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник Института физики им. Л.В. Киренского Красноярского научного центра СО РАН.

https://ksc.krasn.ru/news/razmer_vazhen_tolko_krupnye_nanochastitsy_iz_bakteriy_mogut_primenyatsya_v_meditisine/?ysclid=lqlz9amc4h162159450

Статьи в журналах:

1. μ SR-study of a 3% CoFe_2O_4 nanoparticle concentration ferrofluid. **Magnetochemistry**, 2021, 7, 104.
2. μ SR-исследование динамики внутренних магнитных корреляций в мультиферроике $\text{Tb}(\text{Bi})\text{MnO}_3$ в магнитоупорядоченном и парамагнитном состояниях. **Письма в ЖЭТФ**, 2019, том 110, вып. 2, с. 118 – 125.
3. Аномально сильная релаксация поляризации мюонов в магнитоупорядоченном и парамагнитном состояниях мультиферроика TbMnO_3 . **Письма в ЖЭТФ**, 2017, том 106, вып. 5, с. 275 – 281.
4. Исследование мультиферроиков $\text{Eu}_{0.8}\text{Ce}_{0.2}\text{Mn}_2\text{O}_5$ и EuMn_2O_5 с помощью μ SR-метода. **ЖЭТФ**, 2016, том 150, вып. 6 (12), стр. 1170–1178.
5. 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.
6. Исследование мультиферроика GdMn_2O_5 μ SR-методом. **ФТТ**, 2013, том 55, вып. 3, стр. 422–430.
7. Исследование потерь поляризации мюонов в пластических сцинтилляторах и кварце μ SR-методом. **Письма в ЖЭТФ**, 2013, том 97, вып. 12, стр. стр. 763 – 765.
8. Исследование редкоземельных манганитов и манганатов с помощью μ SR-метода. **Известия РАН. Серия физическая**, 2010, т. 74, № 5, стр. 738 – 740.
9. Исследование EuMn_2O_5 с помощью μ SR-метода. **Письма в ЖЭТФ**, 2010, том 91, вып. 10, стр. 561 – 566.
10. Исследование свойств наноструктурированных магнитных систем на основе Fe_3O_4 μ SR-методом. **Письма в ЖЭТФ**, том 88, вып. 3, 2008, стр. 243-247.
11. Изучение магнитных свойств сплава $(\text{Pd}_x\text{Fe}_{1-x})_{0.95}\text{Mn}_{0.05}$ с помощью поляризованных мюонов и нейтронов. **ФТТ**, том 49, вып. 8, 2007, стр. 1421–1426.
12. Исследование магнитных свойств гомогенных медно-марганцевых сплавов. **ФТТ**, том 49, вып. 9, 2007, стр. 1660–1663.
13. μ SR-установка на мюонном пучке синхроциклотрона ПИЯФ РАН. **ПТЭ**, том 50, № 6, 2007, стр. 36–42.
14. Исследование гексагональных манганитов HoMnO_3 и YMnO_3 с помощью мюонного метода. **Письма в ЖЭТФ**, том 85, вып. 12, 2007, стр. 795-798.

РИД:

1. Программа *READ PSI*. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2020661440 от 23.09.2020.
2. Программа *MNK2018* для обработки данных μ SR-эксперимента. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019663498 от 17.10.2019.
3. Программа *MSR2016* для набора данных μ SR-эксперимента. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2018615720 от 15.05.2018.

Препринты, сообщения, сборники:

1. *μ SR studies of multiferroics and ferrofluids at the NRC «Kurchatov institute» - PNPI. High Energy Physics Division: Main scientific activities 2018–2022». pp. 229–238, Gatchina–2023.*
2. *Исследование феррожидкости с 3%-ной концентрацией наночастиц CoFe_2O_4 с помощью поляризованных мюонов. Препринт НИЦ «Курчатовский институт» - ПИЯФ–3049, Гатчина–2021, 14 стр.*
3. *μ SR-исследование динамики внутренних магнитных корреляций в мультиферроике $\text{Tb}(\text{Bi})\text{MnO}_3$ в магнитоупорядоченном и парамагнитном состояниях. Сборник «Основные результаты научной деятельности 2019». - Гатчина Ленинградской обл.: Издательство НИЦ «Курчатовский институт» - ПИЯФ, стр. 53, 2020.*
4. *μ SR investigations at PNPI. В сборнике ОФВЭ «HEPD: Main scientific activity 2013–2018». pp. 308–314, Gatchina – 2019.*
5. *μ SR-исследования магнитных свойств легированных манганитов лантана. Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук, 2018, № 6 (113), стр. 8 – 12.*
6. *Исследование мультиферроиков $\text{Eu}_{0.8}\text{Ce}_{0.2}\text{Mn}_2\text{O}_5$ и EuMn_2O_5 с помощью μ SR-метода. Сборник «Основные результаты научной деятельности 2016». - Гатчина Ленинградской обл.: Издательство НИЦ «Курчатовский институт» - ПИЯФ, 2017. Стр. 65.*
7. *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.*
8. *Исследование мультиферроика $\text{Eu}_{0.8}\text{Ce}_{0.2}\text{Mn}_2\text{O}_5$ с помощью μ SR-метода. Сборник «Основные результаты научной деятельности 2014». - Гатчина Ленинградской обл.: Издательство ФГБУ «ПИЯФ» НИЦ «Курчатовский институт», 2015. Стр. 57.*
9. *Исследование манганата GdMn_2O_5 с помощью μ SR-метода. Сообщение ПИЯФ – 2845, Гатчина – 2010, 18 стр.*
10. *Исследование мультиферроиков RMn_2O_5 с помощью μ SR-метода. Фазовые переходы, упорядоченные состояния и новые материалы, 2009, № 8.*
11. *Исследование манганита EuMn_2O_5 с помощью μ SR-метода. Сообщение ПИЯФ – 2826, Гатчина – 2009, 18 стр.*
12. *Исследование свойств наноструктурированных магнитных систем на основе Fe_3O_4 μ SR-методом. Препринт ОИЯИ P14-2008-89, Дубна, 2008, 9 стр.*
13. *Исследование магнитных фазовых переходов и распределения локальных магнитных полей μ SR-методом. В сборнике: «Основные результаты научных исследований ПИЯФ РАН в 2005 – 2006 годах». ПИЯФ РАН, Гатчина, 2007, стр. 122–123.*
14. *Исследование магнитных фазовых переходов и распределений локальных магнитных полей в манганитах редкоземельных металлов μ SR-методом. Препринт ПИЯФ–2738, Гатчина–2007, 34 стр.*
15. *μ SR-investigations at PNPI. В сборнике ОФВЭ «HEPD: Main scientific activity 2002–2006». pp. 233–240, Гатчина – 2007.*
16. *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.*
17. *Исследование потерь поляризации мюонов в пластических сцинтилляторах и кварце μ SR-методом. Препринт ПИЯФ–2668, Гатчина–2006, 11 стр.*
18. *Изучение магнитных свойств сплава $(\text{Pd}_x\text{Fe}_{1-x})_{0.95}\text{Mn}_{0.05}$ с помощью поляризованных мюонов и нейтронов. Препринт ПИЯФ–2688, Гатчина–2006, 17 стр.*
19. *μ SR-установка на мюонном пучке синхротрона ПИЯФ РАН. Препринт ПИЯФ–2694, Гатчина–2006, 17 стр.*

Тезисы конференций:

1. *Предварительное исследование эластомеров с различной концентрацией наночастиц $CoFe_2O_4$ с помощью поляризованных мюонов.* Сборник тезисов **Всероссийской конференции «Неделя науки ФизМех»**, Санкт-Петербург, СПбПУ, 3-7 апреля 2023 года.
2. *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.
3. *Study of the ferrolíquids 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).
4. *Исследование манганитов $TbMnO_3$ и $Tb_{0,95}Bi_{0,05}MnO_3$ μSR -методом.* **Научная сессия НИЯУ МИФИ-2015.** Аннотации докладов. В 3 томах. Т.1. Фундаментальные исследования и физика частиц. Атомная энергетика и ядерные технологии. Ядерные системы и материалы. Физика неравновесных атомных систем и композитов. М. НИЯУ МИФИ, 2015, стр. 178.
5. *Исследование мультиферроика $Eu_{0,8}Ce_{0,2}Mn_2O_5$ μSR -методом.* **Научная сессия НИЯУ МИФИ-2015.** Аннотации докладов. В 3 томах. Т.1. Фундаментальные исследования и физика частиц. Атомная энергетика и ядерные технологии. Ядерные системы и материалы. Физика неравновесных атомных систем и композитов. М.: НИЯУ МИФИ, 2015, стр. 175.
6. *Исследование мультиферроика $TbMnO_3$ с помощью μSR -метода.* Сборник тезисов, программа и список участников. **II конференция молодых учёных и специалистов ПИЯФ (КМУС-2015)**, 11 – 13 ноября 2015 г. Гатчина, стр. 16.
7. *Исследование мультиферроика $GdMn_2O_5$ с помощью μSR -метода.* Сборник тезисов, программа и список участников. **I конференция молодых учёных и специалистов ПИЯФ (КМУС-2014)**, 13 – 14 ноября 2014 г. Гатчина, стр. 10.
8. *Исследование мультиферроика $Eu_{0,8}Ce_{0,2}Mn_2O_5$ с помощью μSR -метода.* Сборник тезисов, программа и список участников. **I конференция молодых учёных и специалистов ПИЯФ (КМУС-2014)**, 13 – 14 ноября 2014 г. Гатчина, стр. 20.
9. *Исследование манганитов $TbMnO_3$ и $Tb_{0,95}Bi_{0,05}MnO_3$ μSR -методом.* **Научная сессия НИЯУ МИФИ-2014.** Аннотации докладов. Том 2, стр. 192.
10. *Исследование мультиферроика $Eu_{0,8}Ce_{0,2}Mn_2O_5$ μSR -методом.* **Научная сессия НИЯУ МИФИ-2014.** Аннотации докладов. Том 2, стр. 193.
11. *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.
12. *Исследование мультиферроика $Eu_{0,8}Ce_{0,2}Mn_2O_5$ с помощью μSR -метода.* **Научная сессия НИЯУ МИФИ-2013.** Москва. Аннотации докладов, том 1, стр.183.
13. *Исследование магнитных фазовых переходов и распределений локальных магнитных полей в манганитах редкоземельных металлов μSR -методом.* **Научная сессия НИЯУ МИФИ-2013.** Аннотации докладов, том 1, стр.182.
14. *Исследование мультиферроика $GdMn_2O_5$ с помощью μSR -метода.* **VI Международная научная конференция «АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ФИЗИКИ ТВЕРДОГО ТЕЛА» (ФТТ-2013): сборник докладов Международной научной конференции, Минск, 15-18 октября 2013 г. В трех томах. Т. 1, стр. 118-120.**
15. *Исследование мультиферроика $Eu_{0,8}Ce_{0,2}Mn_2O_5$ с помощью μSR -метода.* **VI Международная научная конференция «АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ФИЗИКИ ТВЕРДОГО ТЕЛА» (ФТТ-2013): сборник докладов Международной научной конференции, Минск, 15-18 октября 2013 г. В трех томах. Т. 1, стр. 227-229.**
16. *Исследование фазовых переходов в сплавах $(Pd_{1-x}Fe_x)_{0,95}Mn_{0,05}$ и $Cu_{(1-x)}Mn_x$ с помощью μSR -метода.* **IV Международный, междисциплинарный симпозиум «Среды со структурным и магнитным упорядочением» (MULTIFERROICS-4).** 4-7 сентября 2013 г. г. Ростов-на-Дону- г. Туапсе, Краснодарский край. Труды Четвертого международного междисциплинарного симпозиума «Среды со структурным и магнитным упорядочением» (Multiferroics-4), Ростов на-Дону, г. Туапсе, 4-7 сент. 2013 г., Выпуск 4. – Ростов н/Д: Изд-во СЛНЦ ВШ ЮФУ АПСН, 2013.
17. *Исследование мультиферроика $Eu_{0,8}Ce_{0,2}Mn_2O_5$ с помощью μSR -метода.* **IV Международный, междисциплинарный симпозиум «Среды со структурным и магнитным упорядочением» (MULTIFERROICS-4).** 4-7 сентября 2013 г. г. Ростов-на-Дону- г. Туапсе, Краснодарский край.
18. *Исследование мультиферроика $GdMn_2O_5$ с помощью μSR -метода.* **Научная сессия НИЯУ МИФИ-2012.** Аннотации докладов. В 3 томах. Т.1 Инновационные ядерные технологии. Высокие технологии в медицине. М.: НИЯУ МИФИ, 2012. Стр. 190.
19. *μSR 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. <http://www.nipne.ro/eunpc2012/>.
20. *Исследование мультиферроиков RMn_2O_5 с помощью μSR -метода.* **Научная сессия НИЯУ МИФИ-2011.** Аннотации докладов. В 3 томах. Т.1 Инновационные ядерные технологии. М.: НИЯУ МИФИ, 2010. Стр. 194.

21. 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.
22. Применение мюонного метода (μ SR-метода) для исследования магнитных свойств вещества. **Научная сессия МИФИ-2010**. Аннотации докладов. В 3 томах. Т.1 Ядерная физика и энергетика. М.: МИФИ, 2010. Стр. 215.
23. Исследование редкоземельных манганатов с помощью μ SR -метода. **Научная сессия МИФИ-2010**. Аннотации докладов. В 3 томах. Т.1 Ядерная физика и энергетика. М.: МИФИ, 2010.Стр. 217..
24. Исследование магнитных свойств медно-марганцевых сплавов. **Научная сессия МИФИ-2010**. Аннотации докладов. В 3 томах. Т.1 Ядерная физика и энергетика. М.: МИФИ, 2010. Стр. 217.
25. Изучение магнитных свойств сплава $(Pd_{1-x}Fe_x)_{0,95}Mn_{0,05}$ с помощью поляризованных мюонов и нейтронов. **Научная сессия МИФИ-2010**. Аннотации докладов. В 3 томах. Т.1 Ядерная физика и энергетика. М.: МИФИ, 2010. Стр. 218.
26. Исследование фазовых переходов и распределения локальных магнитных полей μ SR-методом. **НАУЧНАЯ СЕССИЯ МИФИ-2009**. Аннотации докладов. В 3 томах. Т. 1. Ядерная физика и энергетика. М.: МИФИ, 2009. Стр. 272.
27. Исследование редкоземельных манганитов и манганатов с помощью μ SR-метода. **Второй международный, междисциплинарный симпозиум «Среды со структурным и магнитным упорядочением» (MULTIFERROICS-2)**. – Ростов-на-Дону, п. Лоо, 23-28 сентября 2009 г.: Труды симпозиума. – Ростов-на-Дону: Изд-во СКНЦ ВШ ЮФУ АПСН, 2009. стр. 48 – 50.
28. Исследование спин-стеклольной фазы в сплавах $(Pd_{1-x}Fe_x)_{0,95}Mn_{0,05}$ и $Cu_{(1-x)}Mn_x$ с помощью μ SR-метода. **Второй международный, междисциплинарный симпозиум «Среды со структурным и магнитным упорядочением» (MULTIFERROICS-2)**. – Ростов-на-Дону, п. Лоо, 23-28 сентября 2009 г.: Труды симпозиума. – Ростов-на-Дону: Изд-во СКНЦ ВШ ЮФУ АПСН, 2009. стр. 80 – 82.
29. Исследование редкоземельных манганитов и манганатов с помощью μ SR-метода. **Актуальные проблемы физики твердого тела (ФТТ-2009)**: сборник докладов международной научной конференции, 20-23 октября 2009 г., Минск. В трех томах. Т. 1/ редкол.: Н.М. Олехнович и др. – Минск: Вараксин А.Н., 2009. Стр. 117 – 119.
30. Исследование спин-стеклольной фазы в сплавах $(Pd_{1-x}Fe_x)_{0,95}Mn_{0,05}$ и $Cu_{(1-x)}Mn_x$ с помощью μ SR-метода. **Актуальные проблемы физики твердого тела (ФТТ-2009)**: сборник докладов международной научной конференции, 20-23 октября 2009 г., Минск. В трех томах. Т. 1/ редкол.: Н.М. Олехнович и др. – Минск: Вараксин А.Н., 2009. Стр. 98 – 100.
31. Исследование фазовых переходов и распределения локальных магнитных полей μ SR-методом. **Конференция (школа-семинар) по физике и астрономии для молодых ученых Санкт-Петербурга и Северо-Запада «Физика. СПб»**. Тезисы докладов, 29-30 октября 2009 г., Санкт-Петербург. – Санкт-Петербург: Изд-во Политехнического университета, 2009. Стр. 107 – 108.
32. Применение мюонного метода (μ SR-метода) для исследования магнитных свойств вещества. **НАУЧНАЯ СЕССИЯ МИФИ-2009**. Сборник научных трудов. Т. 2. М.: МИФИ, 2009. Стр. 221 – 224.
33. Исследование редкоземельных манганитов с помощью μ SR-метода. **НАУЧНАЯ СЕССИЯ МИФИ-2008**. Сборник научных трудов. В 15 томах. Т. 4. Молекулярно-селективные и нелинейные явления и процессы. Химическая физика, горение и детонация. Физика, химия и компьютерная разработка материалов. Прикладная ядерная физика. М.: МИФИ, 2008. Стр. 118–119.
34. Исследование мультиферроиков RMn_2O_5 с помощью μ SR-метода. **Труды XI международного междисциплинарного симпозиума «Упорядочение в минералах и сплавах» ОМА-II**. – Ростов-на-Дону - п. Лоо, 10-15 сентября 2008 г., Том I. стр. 124 – 125. – Ростов-на-Дону: Издательство СКНЦ ВШ ЮФУ АПСН, 2008.
35. INVESTIGATION OF THE MAGNETIC PROPERTIES OF THE HOMOGENEOUS COPPER-MANGANESE ALLOYS. **Труды XI международного междисциплинарного симпозиума «Упорядочение в минералах и сплавах» ОМА-II**. – Ростов-на-Дону - п. Лоо, 10-15 сентября 2008 г., Том I. стр. 277 – 280. – Ростов-на-Дону: Издательство СКНЦ ВШ ЮФУ АПСН, 2008.
36. THE STUDY OF THE MAGNETIC PROPERTIES OF THE $(Pd_{1-x}Fe_x)_{0,95}Mn_{0,05}$ ALLOY. **Труды XI международного междисциплинарного симпозиума «Упорядочение в минералах и сплавах» ОМА-II**. – Ростов-на-Дону - п. Лоо, 10-15 сентября 2008 г., Том I. стр. 281 – 283. – Ростов-на-Дону: Издательство СКНЦ ВШ ЮФУ АПСН, 2008.
37. Muon and muonium fractions behavior in ferrofluids. **Moscow International Symposium on Magnetism**, M. V. Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia. (2008), p. 401.
38. 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.
39. Исследование магнитных фазовых переходов и распределения локальных магнитных полей в мультиферроиках $HoMnO_3$ и $YMnO_3$ с помощью мюонного метода исследования вещества (μ SR-метод). **Первый международный, междисциплинарный симпозиум «Среды со структурным и магнитным упорядочением» (MULTIFERROICS-2007)**. – Ростов-на-Дону, п. Лоо, 5-10 сентября 2007 г.: Труды симпозиума. – Ростов-на-Дону: ИПО ПИ ЮФУ, 2007. стр. 72 – 75.
40. Применение мюонного метода (μ SR-метода) для исследования магнитных свойств вещества. **Первый международный, междисциплинарный симпозиум «Среды со структурным и магнитным упорядочением» (MULTIFERROICS-2007)**. – Ростов-на-Дону, п. Лоо, 5-10 сентября 2007 г.: Труды симпозиума. – Ростов-на-Дону: ИПО ПИ ЮФУ, 2007. стр. 76 – 79.
41. Доклад на **40^{ой} Зимней школе ПИЯФ**. μ SR-studies of local magnetic field distributions in $(Pd_xFe_{1-x})_{0,95}Mn_{0,05}$.

Спасибо за внимание!!!