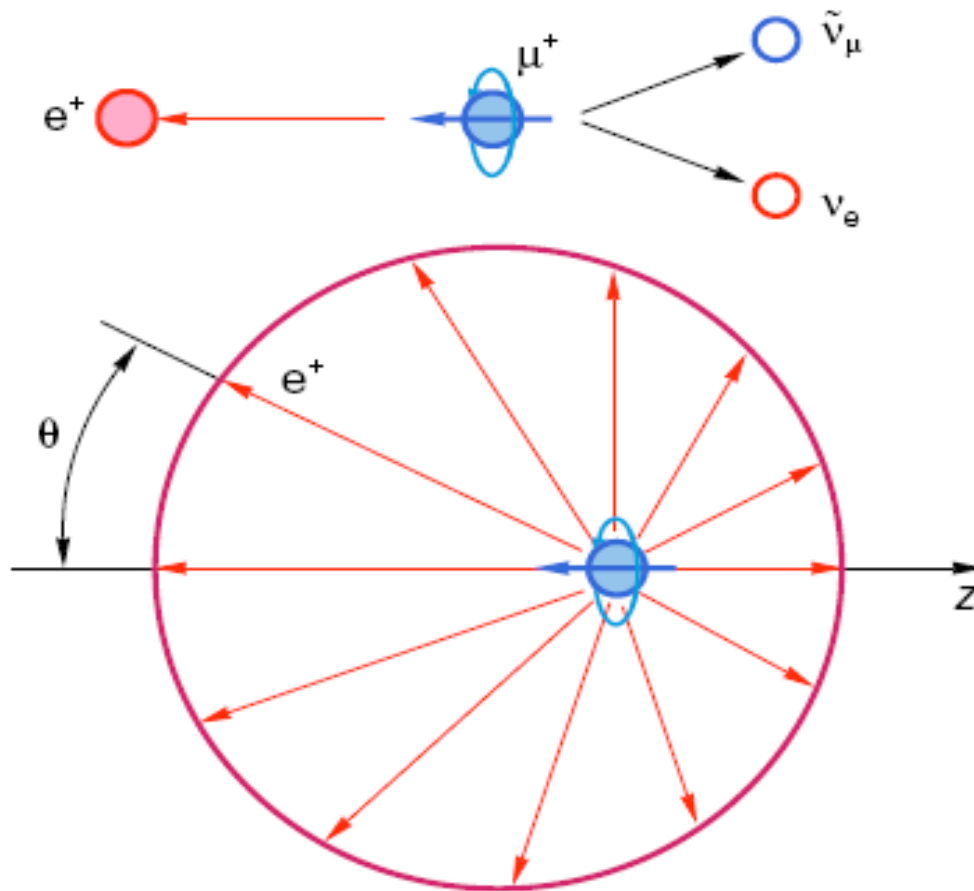
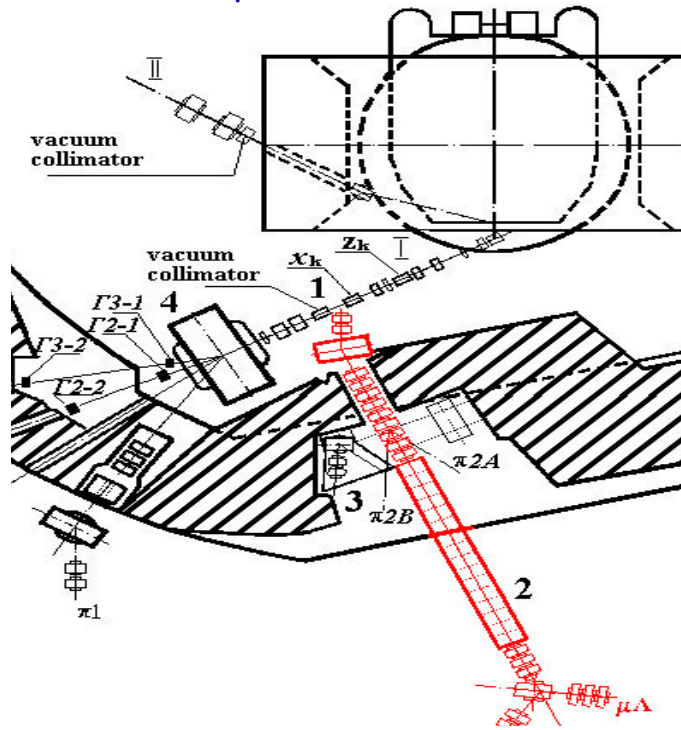


# ■ ИССЛЕДОВАНИЯ В ПИЯФ РАН





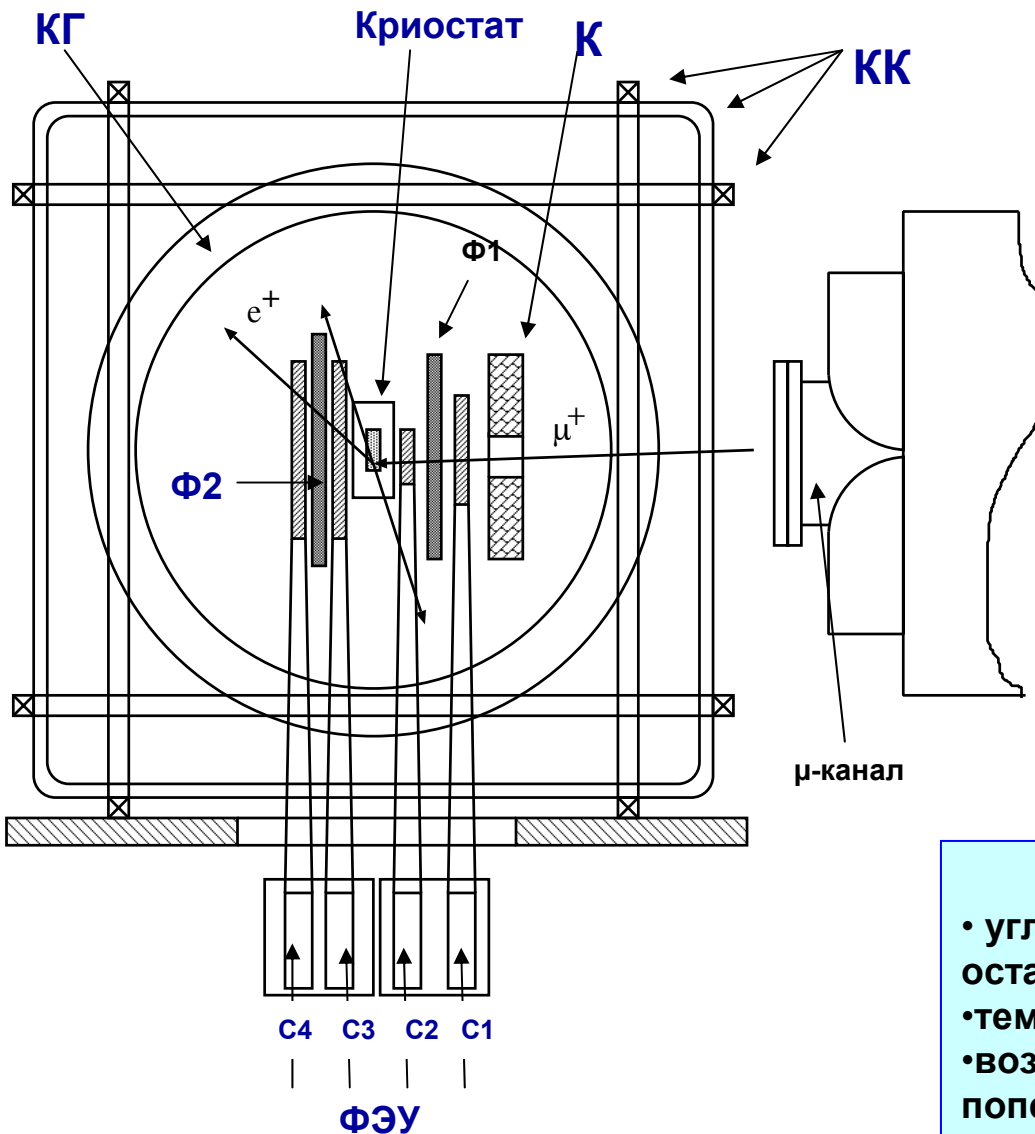
$P_{\mu^+} = 70 \div 130 \text{ МэВ/с}$



$P_{\mu^+} = 70 \div 130 \text{ МэВ/с}$

### Физические параметры $\mu$ -канала:

- интенсивность  $\leq 10^5 \text{ с}^{-1}$ ;  
 $P_{\mu^+} = 70 \div 130 \text{ МэВ/с}$ ;
- продольная поляризация мюонов 95%;
- максимальный размер пучка  $\varnothing 40 \text{ мм}$ ;
- размер исследуемых образцов  $\varnothing 20 \div 50 \text{ мм}$  с толщиной по пучку  $4 \div 10 \text{ г/см}^2$ .



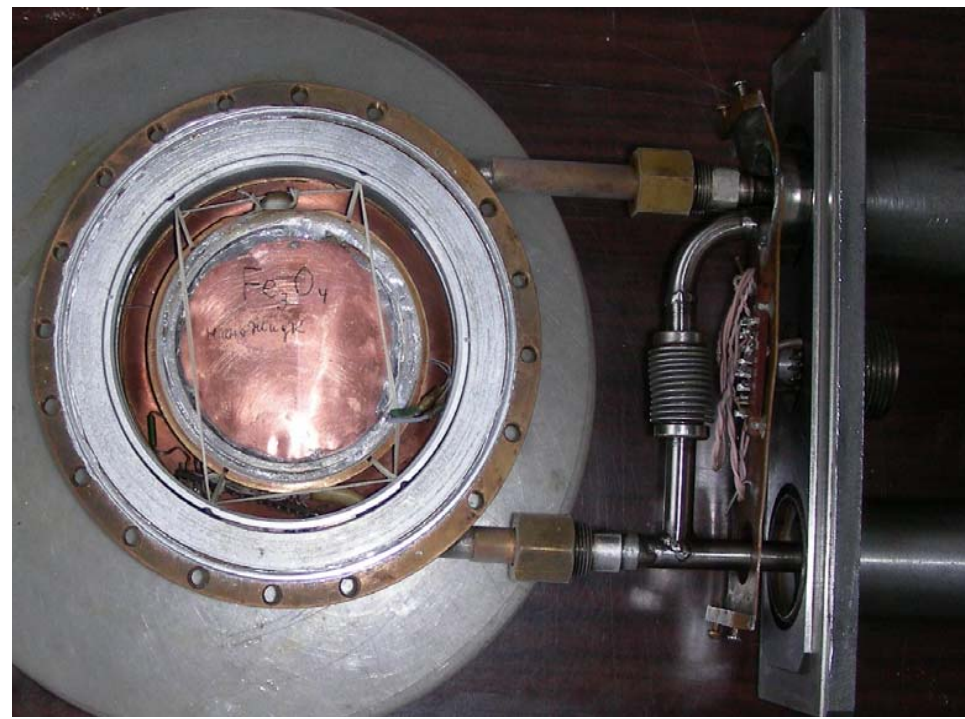
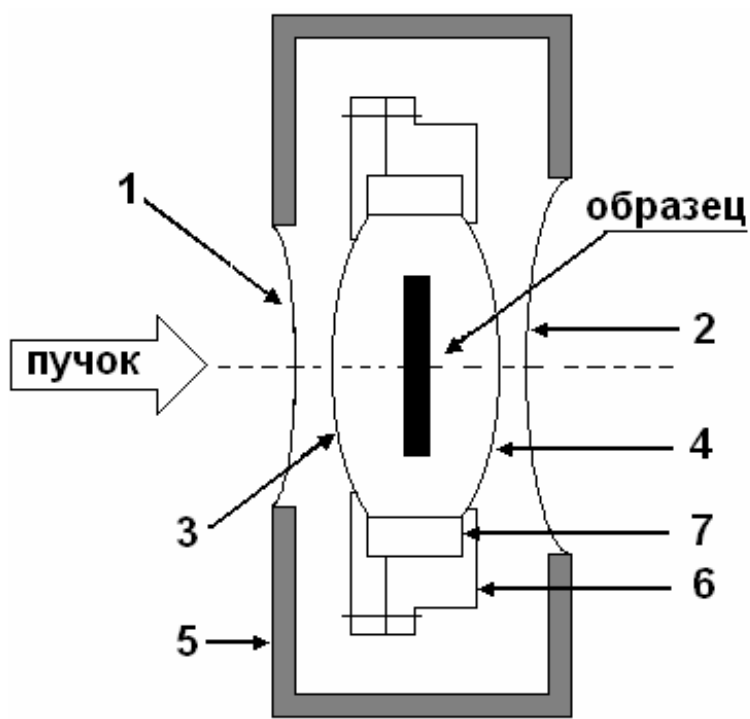
Фотография  
 $\mu$ SR-установки



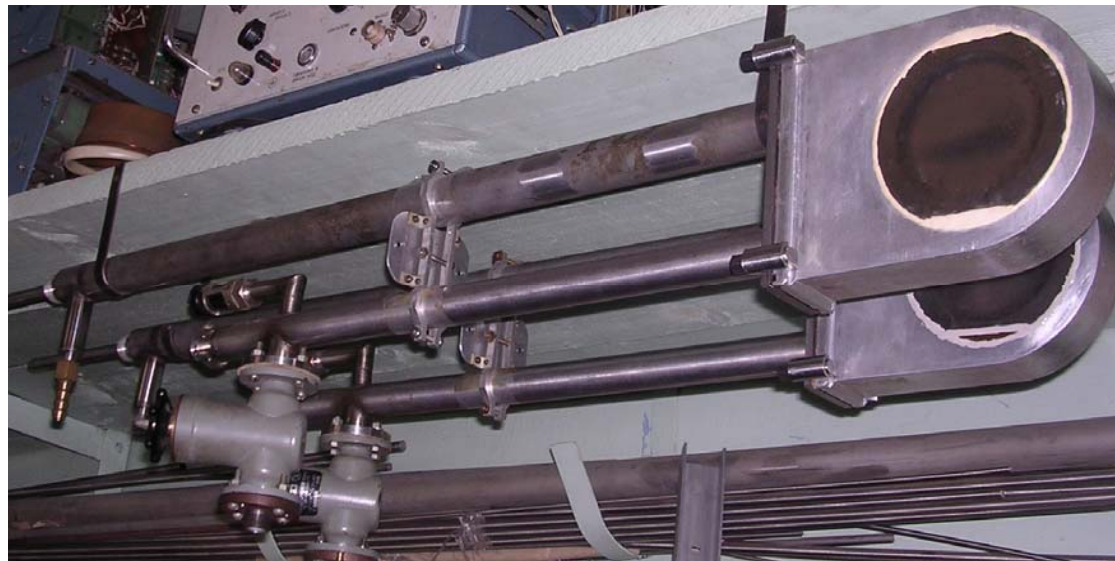
### Особенности $\mu$ SR-установки:

- 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.

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



Криостат и размещение образца в криостате для  $\mu$ 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.



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

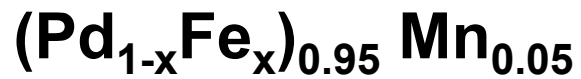
**Установка позволяет проводить μSR-исследования на образцах с поперечными размерами, вписывающимися в окружность диаметром  $2 \div 5$  см и толщиной по пучку  $\geq 4$  г/см<sup>2</sup> в диапазоне температур  $10 \div 300$  К со стабильностью температуры в данном интервале  $\pm 0,1$  К.**

**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  $5 \text{ Э} \div 1,5$  кГс.**

**Однородность внешних магнитных полей в объеме  $200$  см<sup>3</sup> не хуже  $10^{-4}$ ; что позволяет вести измерения при скоростях релаксации не менее  $0,005$  мкс<sup>-1</sup>. Измерения на меди показали, что скорость релаксации спинов мюонов  $\lambda$  составляет  $0,0053(31)$  мкс<sup>-1</sup>, что приемлемо для μSR-исследований.**

# ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ в 2009 году:

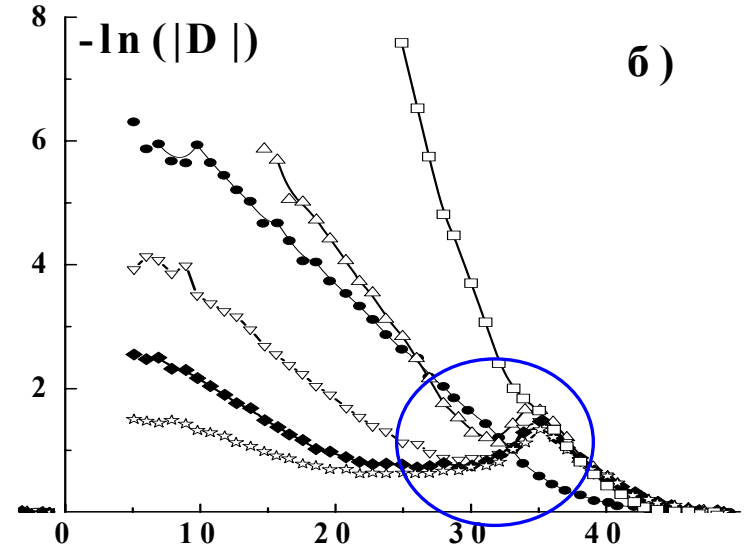
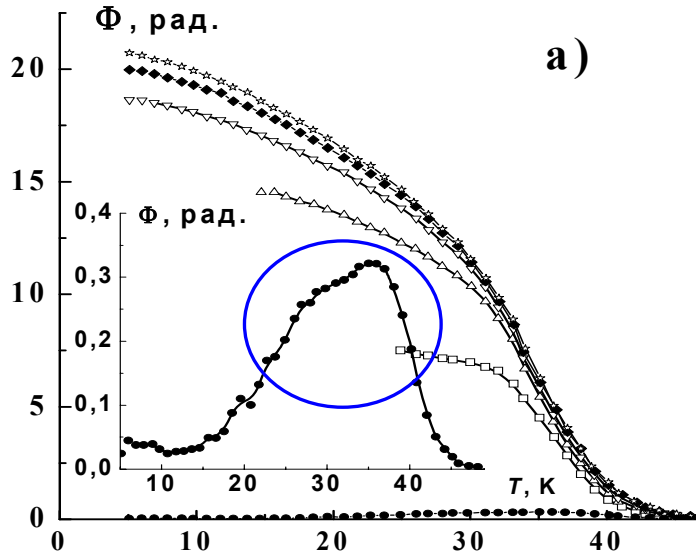
- I. Завершены исследования спин-стекольной фазы в сплавах  $(\text{Pd}_{1-x}\text{Fe}_x)_{0.95}\text{Mn}_{0.05}$  и  $\text{Cu}_{1-x}\text{Mn}_x$ ;**  
(совместно с ОНИ ПИЯФ);
- II. Продолжались исследования магнитных фазовых переходов и распределения локальных магнитных полей в мультиферроиках:  $\text{RMnO}_3$ ;  $\text{RMn}_2\text{O}_5$ ;  $\text{R}_{(1-x)}\text{Ce}_x\text{Mn}_2\text{O}_5$ ;**  
(совместно с МИСиС (Москва) и ФТИ им.А.Ф. Иоффе (СПб));
- III. Исследование свойств феррожидкостей на основе наночастиц  $\text{MeFe}_2\text{O}_4$ , диспергированных в органические или неорганические среды;**  
(совместно с ОИЯИ (Дубна),  
Национальный институт физики и ядерной технологии им. Х.Хулубея (Бухарест, Румыния),  
Центр фундаментальных и передовых технических исследований (Тимишоара, Румыния),  
Институт исследования и развития электротехники (Бухарест, Румыния));
- IV. Проведен первый цикл исследований магнитных свойств новых реакторных материалов (хромистых сталей FeCr, где содержание Cr-12%)**  
(совместно с НИЯУ МИФИ (Москва)).



## Нейтронные исследования показали:

Поведение средней намагниченности (угла поворота вектора поляризации) при охлаждении в  $H=0$  имеет немонотонный характер

В слабых магнитных полях необычное немонотонное поведение нейтронной деполяризации



$T, K$     ●— ZFC    □— FC,  $H=5$  Э    △— FC,  $H=10$  Э     $T, K$   
           ▽— FC,  $H=15$  Э    ◆— FC,  $H=20$  Э    \*— FC,  $H=25$  Э

В связи с этим возникают вопросы:

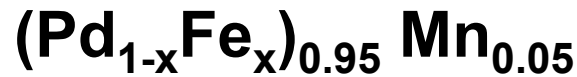
1. Чистый это ферромагнетик?
2. Меняются ли размеры доменов?

$D \sim (H)^2 \cdot d$  - из комбинации  
нейтроннографии и  $\mu\text{SR}$

$D$  - нейтронная деполяризация;

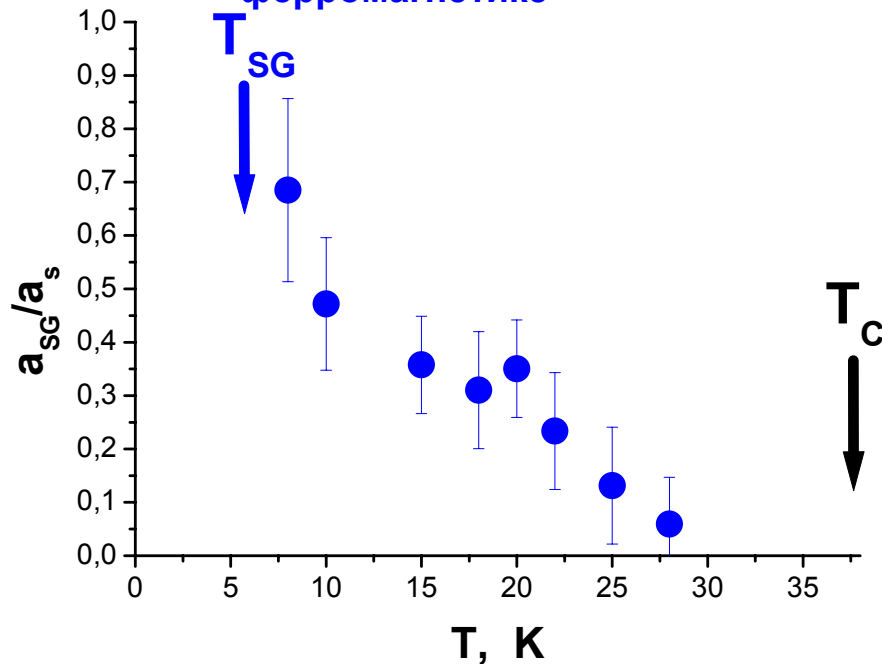
$H$  - локальная намагниченность ( $\mu\text{SR}$ );

$d$  - средний размер домена (или кластера).



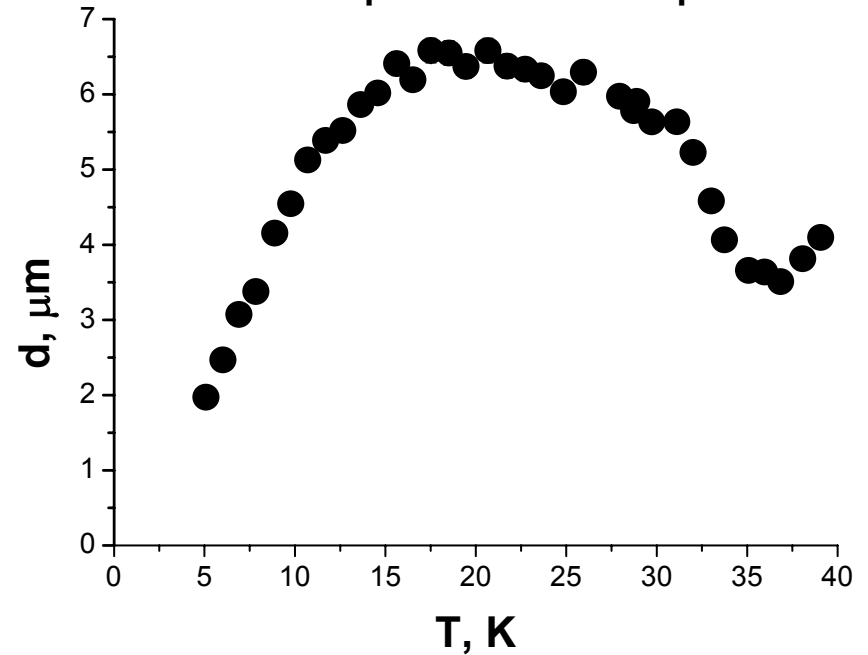
$\mu\text{SR}$ -исследования показали:

Не чистый ферромагнетик,  
происходит возникновение  
фазы спинового  
стекла в упорядоченном  
ферромагнетике



Совместно с данными о  
деполяризации нейтронов определен  
размер магнитных кластеров.

Видим резкое уменьшение размеров,  
из-за образования SG – фазы



*ФТТ, том 49, вып. 8, 2007, стр. 1421–1426.*

*40 Зимняя школа ПИЯФ.*

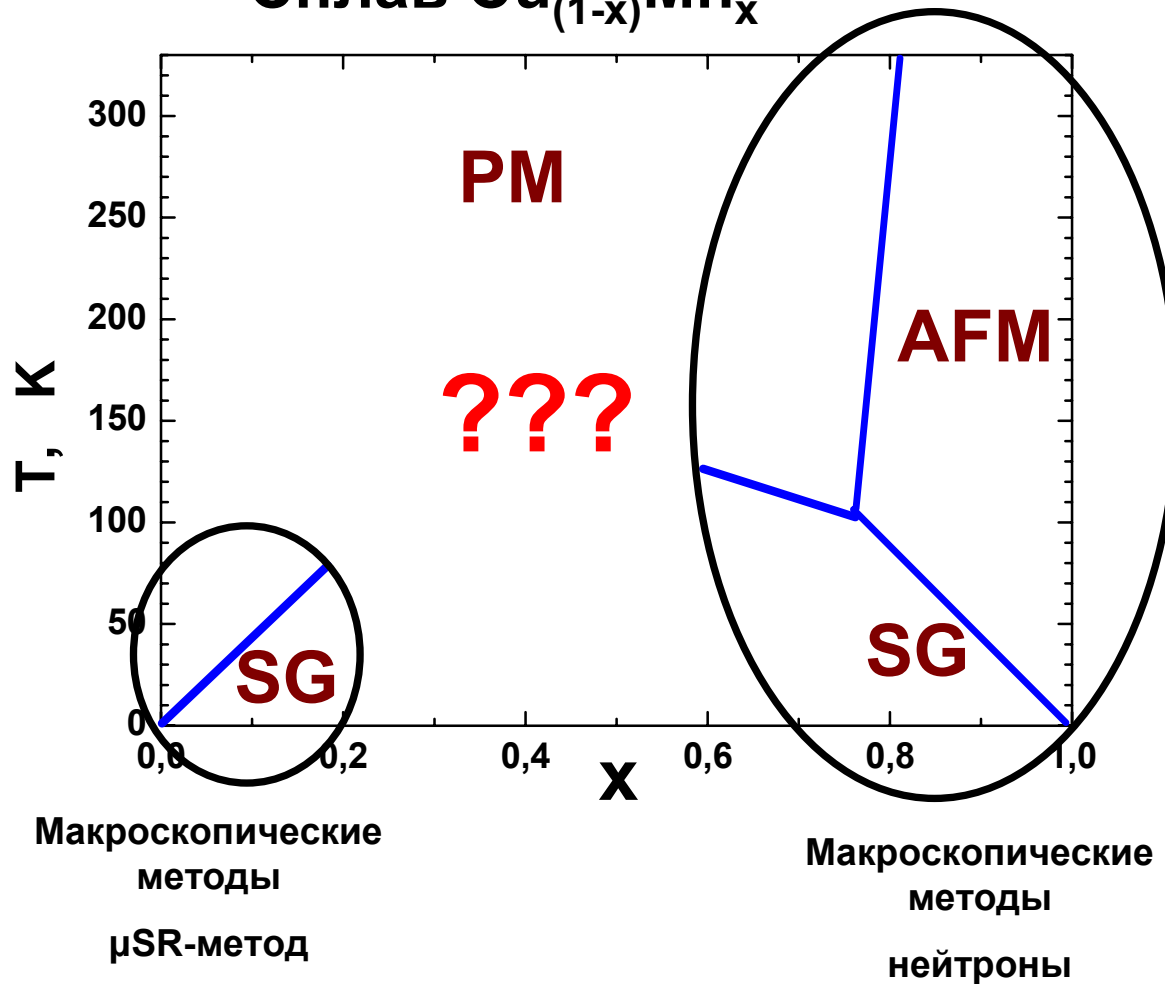
*XI международный междисциплинарный симпозиум «Упорядочение в минералах и сплавах» (ОМА-11).*

*Второй международный, междисциплинарный симпозиум «Среды со структурным и магнитным упорядочением» (MULTIFERROICS-2).*

*Международная научная конференция «Актуальные проблемы физики твердого тела» (ФТТ-2009).*



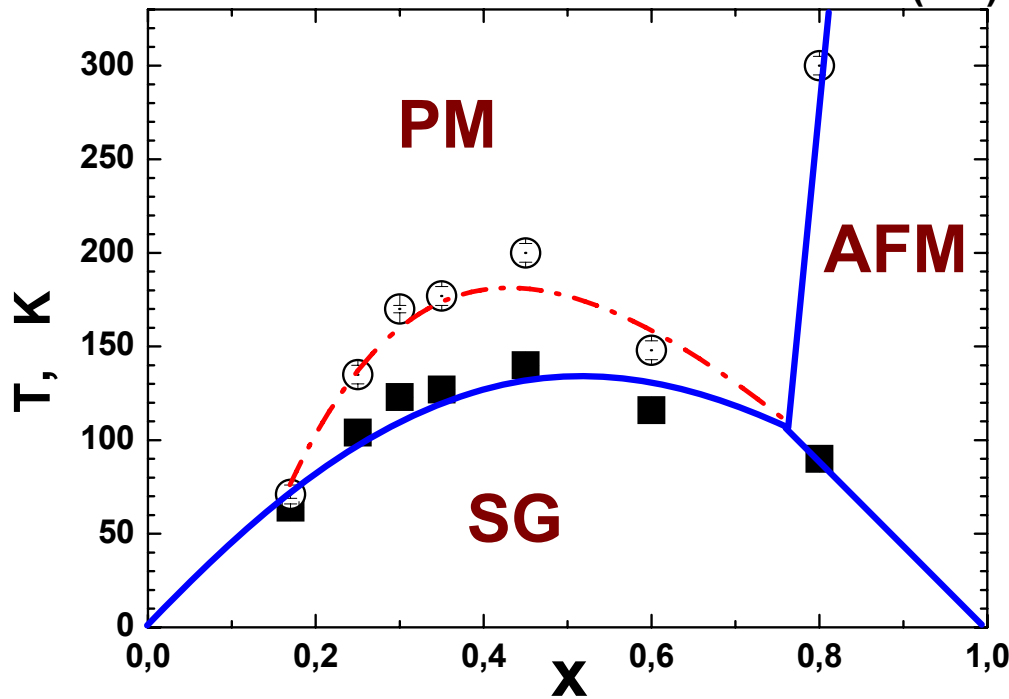
# Сплав $\text{Cu}_{(1-x)}\text{Mn}_x$



## Вопрос:

Что происходит с образцом  $\text{Cu}_{(1-x)}\text{Mn}_x$  при концентрациях  $0.2 < x < 0.6$ ?

# Сплав $\text{Cu}_{(1-x)}\text{Mn}_x$



Фазовая диаграмма гомогенных  
медно-марганцевых сплавов  $\text{Cu}_{1-x}\text{Mn}_x$

$\mu\text{SR}$ -исследования показали:

1. В области концентраций  $0 < x < 0.2$   $\text{PM} \rightarrow \text{SG}$ ,
2. В области концентраций  $0.8 < x < 1$   $\text{AFM} \rightarrow \text{SG}$ ,
3. Впервые показано в области концентраций  $0.2 < x < 0.6$  магнитному фазовому переходу в состояние спинового стекла предшествует **переход в состояние суперпарамагнетика.**

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

XI международный междисциплинарный симпозиум «Упорядочение в минералах и сплавах» (ОМА-11).

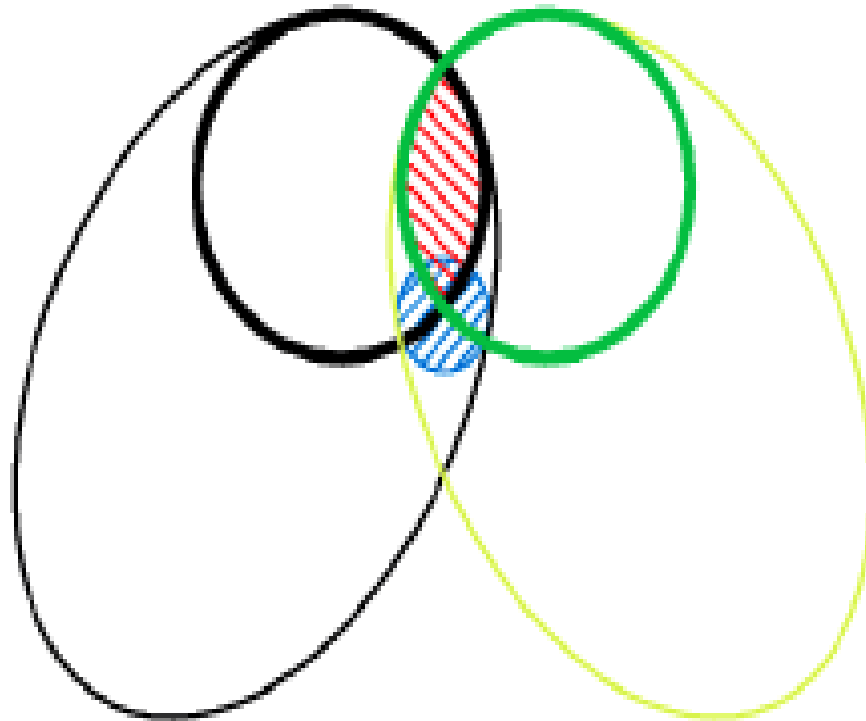
Второй международный, междисциплинарный симпозиум «Среды со структурным и магнитным упорядочением» (MULTIFERROICS-2).

Международная научная конференция «Актуальные проблемы физики твердого тела» (ФТТ-2009).

Данная работа была премирована на конкурсе лучших работ ПИЯФ РАН.

Работа полностью завершена (Диссертация Котова С.А.).

# Мультиферроики



## Материалы

- Магнитно поляризуемые
- Ферромагнетики
- Электрически поляризуемые
- Сегнетоэлектрики
- ▨ Мультиферроики
- ▨ Магнитоэлектрики

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

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

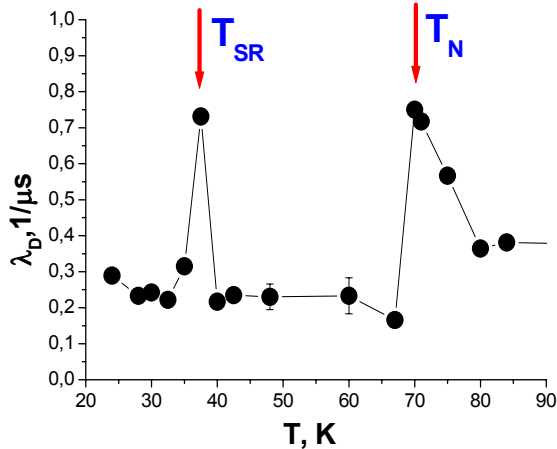
**Наиболее интересны мультиферроики с близкими температурами магнитного и ферроэлектрического упорядочения.**

**Представителями таких соединений, в частности, являются манганиты  $\text{RMn}_2\text{O}_5$  (R – металл редкоземельной группы элементов), AFM и FE порядки в этих материалах реализуются при близких значениях температуры (30 – 40 К).**

# Исследование редкоземельных манганитов

## HoMnO<sub>3</sub>

два перехода:

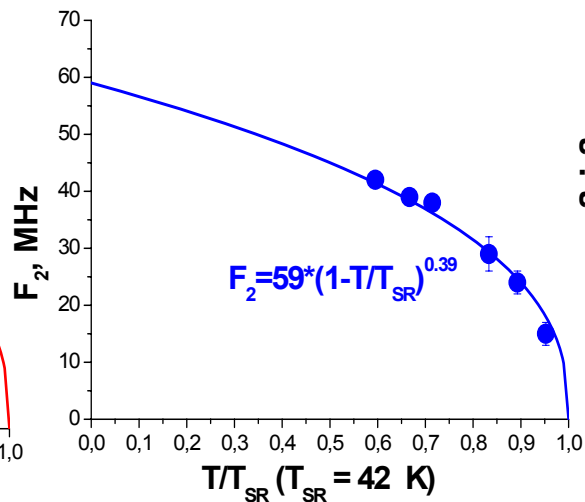
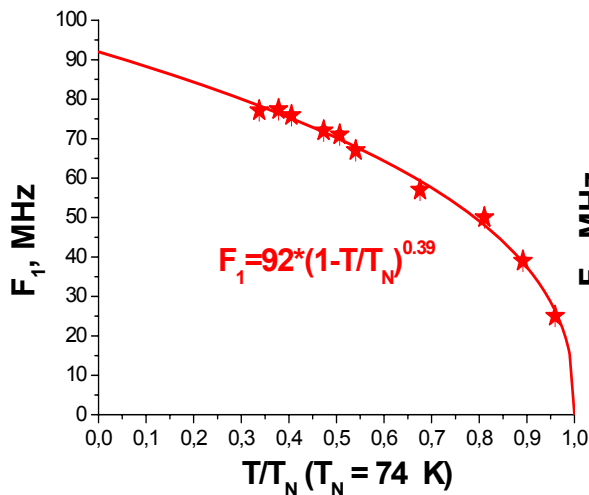


Известны в литературе два перехода:

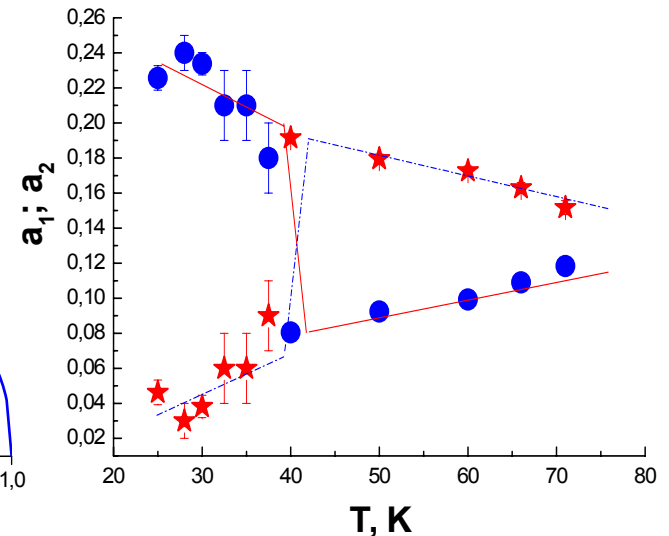
- 1). Слабовыраженный РМ-ФМ при температуре  $T_N$ ;
- 2). Поляризация спина электронов проводимости гексагональной структуры при температуре  $T_{SR}$ .
- 3). В  $T_{SR}$  происходит поворот спинов Mn  $90^\circ$ .

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

две частоты: (3D-магнетик Гейзенберговского типа)



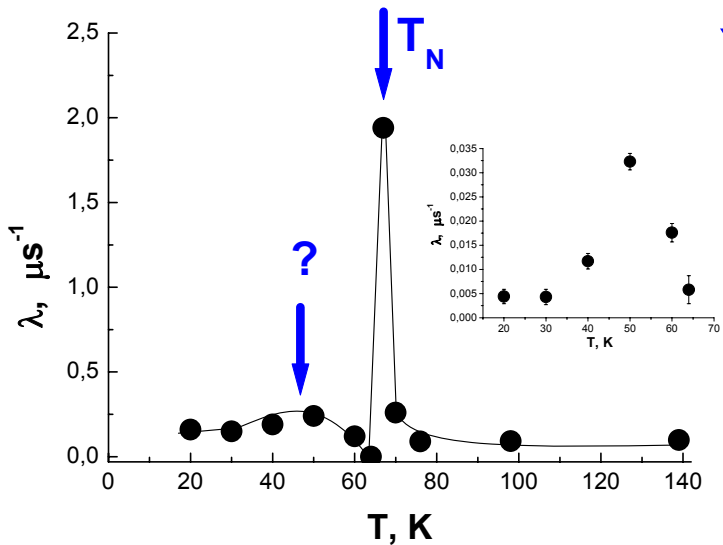
$90^\circ$  разворот спинов Mn приводит к 100% перераспределению вклада частот



# YMnO<sub>3</sub>

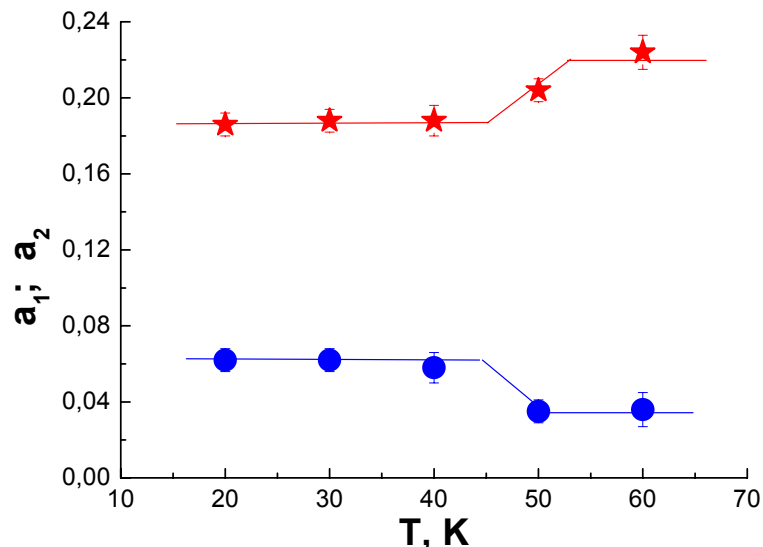
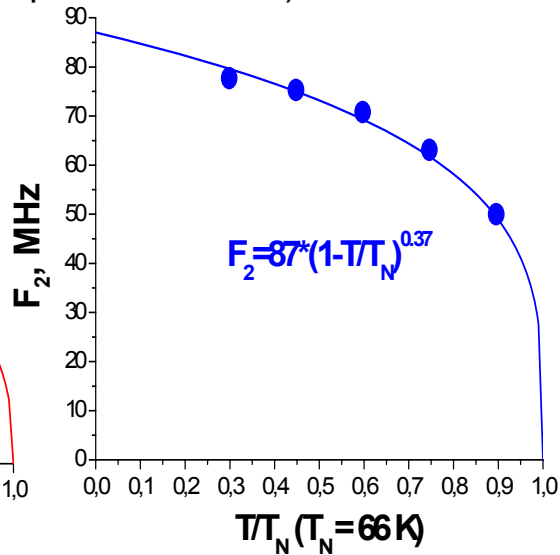
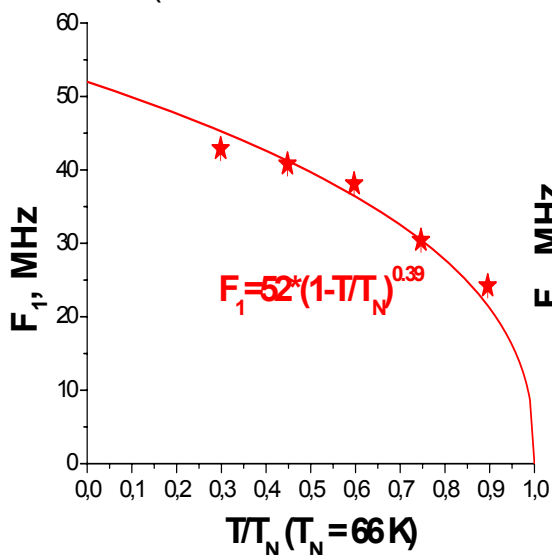
один переход,

но в районе 45 К видим неоднородность связанную, возможно с частичным разворотом спинов марганца, приводящее к 10% перераспределению доль частот.



две частоты:

(3D-магнетик Гейзенберговского типа)



Препринт ПИЯФ–2738, Гатчина–2007, 34 стр.  
Письма в ЖЭТФ, том 85, вып. 12, 2007, стр. 795-798.

Первый международный, междисциплинарный симпозиум «Среды со структурным и магнитным упорядочением» (MULTIFERROICS-2007).  
НАУЧНАЯ СЕССИЯ МИФИ–2008.

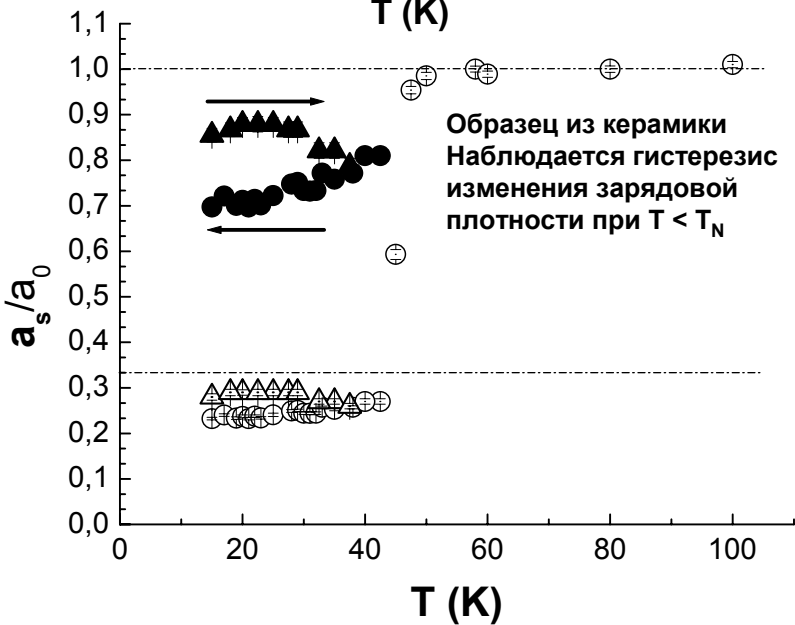
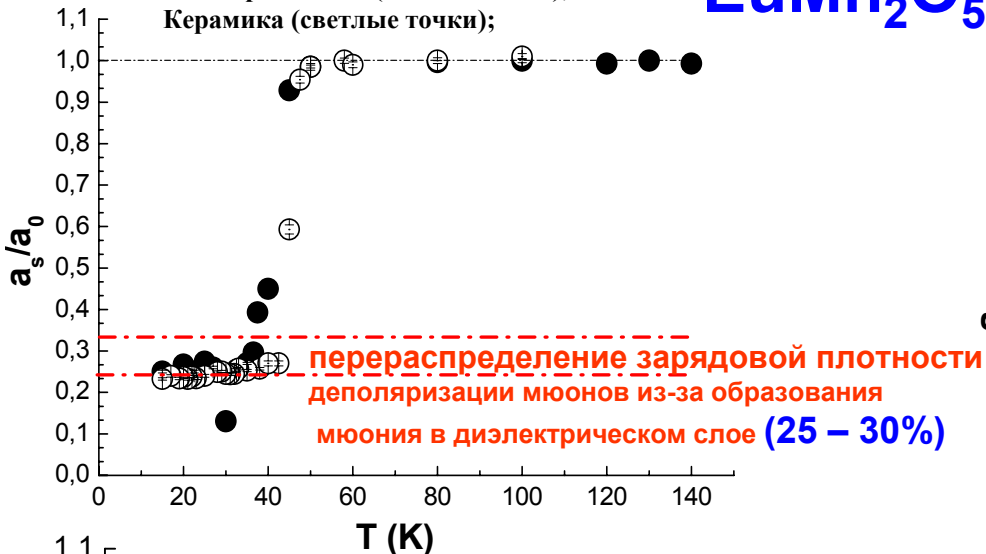
Исследование манганитов HoMnO<sub>3</sub> и YMnO<sub>3</sub> закончены.

В этом году работу планируется подать на конкурс лучших работ ПИЯФ.

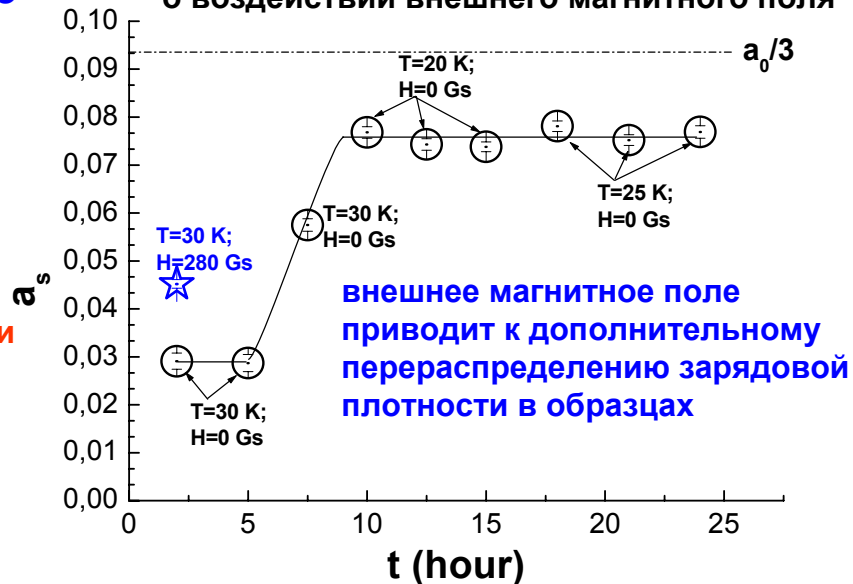
# Исследование редкоземельных манганатов



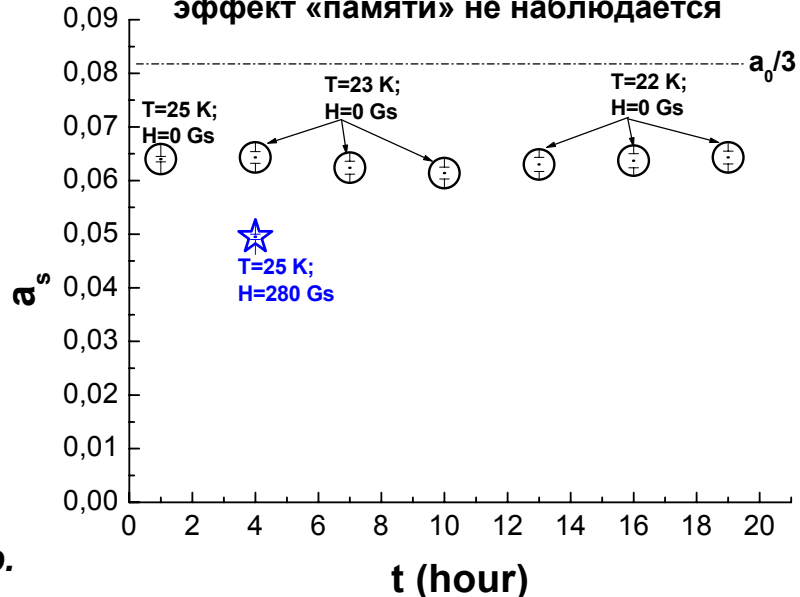
Монокристаллы-(темные точки);  
Керамика (светлые точки);



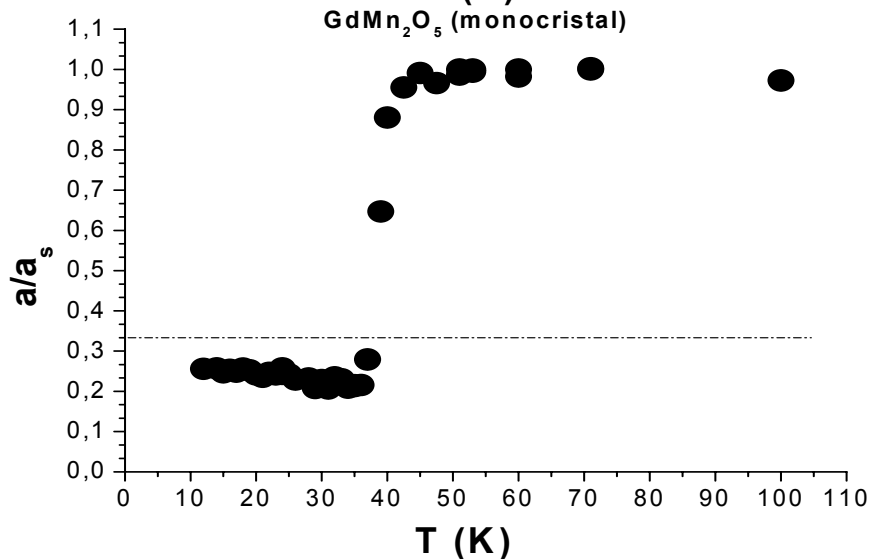
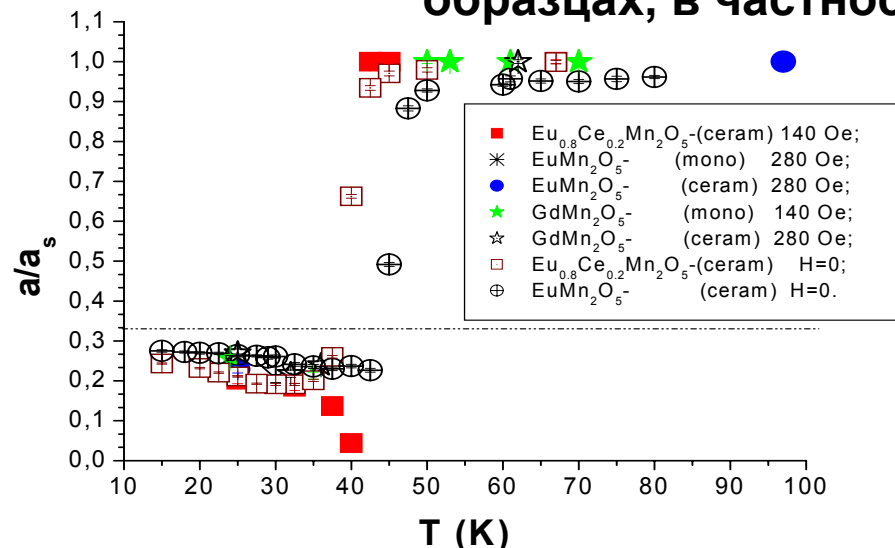
**Образец из монокристаллов Наблюдается эффект «памяти» о воздействии внешнего магнитного поля**



**Образец из керамики эффект «памяти» не наблюдается**



# Перераспределение зарядовой плотности наблюдается и в других образцах, в частности, в $GdMn_2O_5$ .



*XI международный междисциплинарный симпозиум «Упорядочение в минералах и сплавах» (ОМА-11).*

**НАУЧНАЯ СЕССИЯ МИФИ-2008.**

*Второй международный, междисциплинарный симпозиум «Среды со структурным и магнитным упорядочением» (MULTIFERROICS-2).*

*Международная научная конференция «Актуальные проблемы физики твердого тела» (ФТТ-2009).*

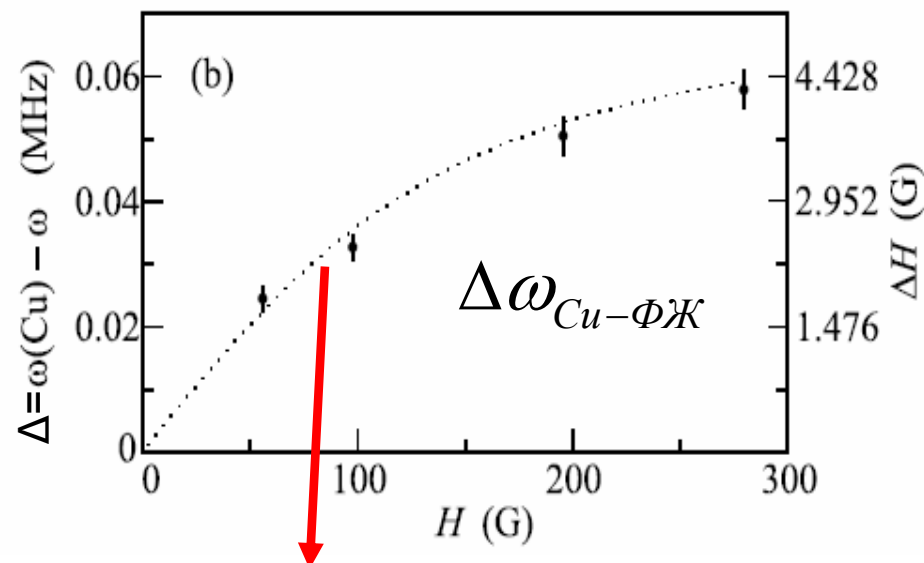
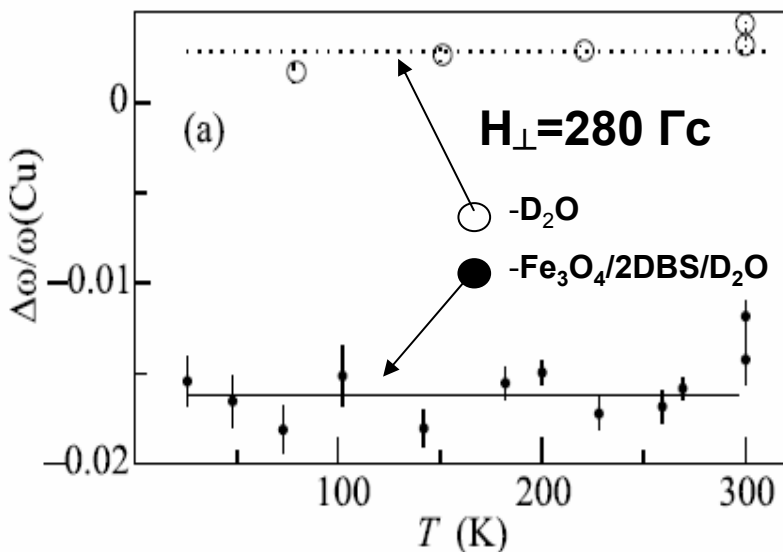
*Конференция (школа-семинар) по физике и астрономии для молодых ученых Санкт-Петербурга и Северо-Запада «Физика. СПб».*

*Фазовые переходы, упорядоченные состояния и новые материалы, № 8, 2009.*  
<http://www.ptosnm.ru/catalog/s/46>.

*«Известия РАН. Серия физическая», 2010, т. 74, вып. 5.*

**Исследование манганатов планируется закончить в 2010 году.  
(Диссертация Воробьева С.И.)**

# Феррожидкость ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ + PAV(2DBS) + $\text{D}_2\text{O}$ )



Полученные результаты позволили определить размер наночастиц  $\sim 12$  нм, что хорошо согласуется с размером изготовленного образца (11.5 нм)!

**ВЫВОД:**  $\mu\text{SR}$ -метод дает возможность установить размер магнитных нановкраплений в парамагнитной матрице!

Письма в ЖЭТФ, том 88, вып. 3, 2008, стр. 243-247.

4th International conference "Physics of liquid matter: modern problems" (PLMMP-Kyiv-2008).

Исследования феррожидкости на основе  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  закончены.

В этом году работу планируется подать на конкурс лучших работ ПИЯФ.



# Конструкционные материалы для реакторов

ферритно-мартенситные стали;

Низкоактивируемые хромистые стали ЭК181 ( $\text{Fe}_x\text{Cr}_{1-x}$ );

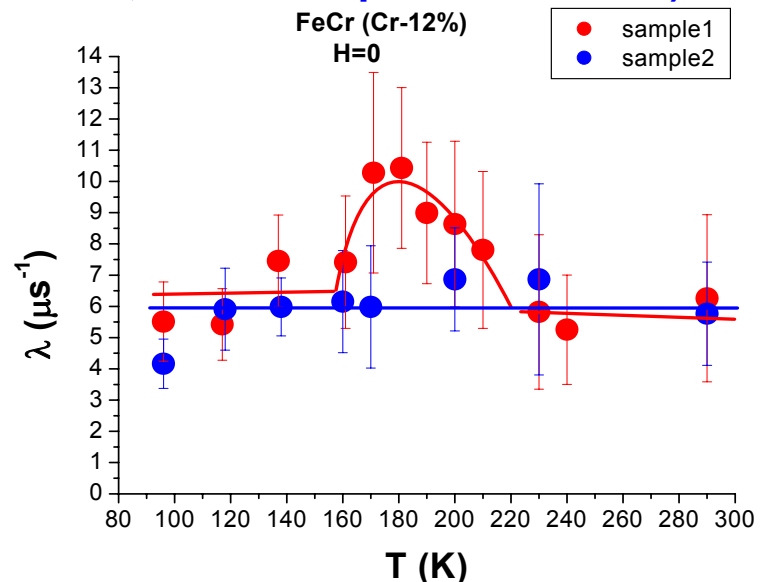
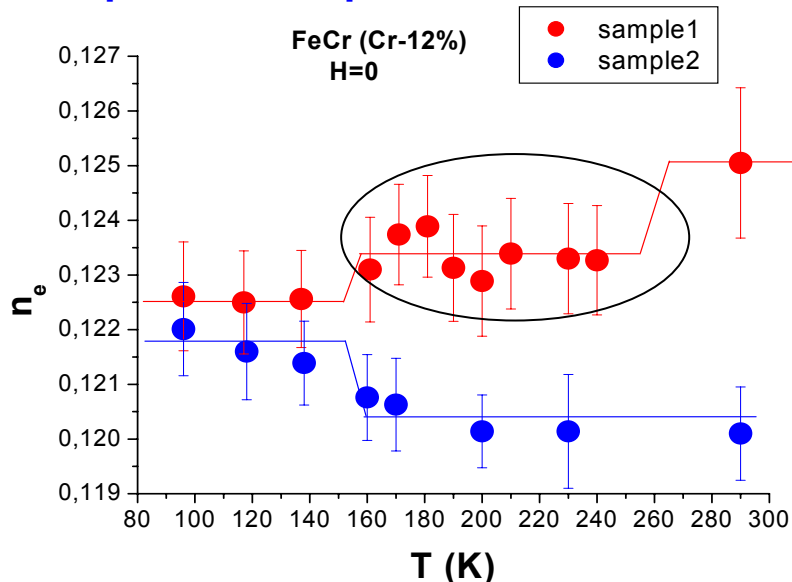
сплавы ванадия.

Проблема: изменение механических свойств при химическом и радиационном воздействии из-за хрупко-вязкого перехода (ХВП).

Задача: выяснить возможность применения  $\mu\text{SR}$ -метода для контроля смещения ХВП от радиационного воздействия (эффект радиационного охрупчивания) на материалы с разным содержанием хрома.

Следует отметить еще одну особенность метода: он дает возможность определять концентрацию и тип дефектов в материале, а также контролировать его магнитную текстуру, при производстве данных материалов.

## Проведен первый цикл исследований FeCr, с концентрацией Cr-12%



VII Курчатовская молодежная научная школа, 10 – 12 ноября 2009 г.

# Планы на будущее!

**В 2010 году планируется:**

**I.** Провести исследования редкоземельного манганита  $TbMnO_3$  с орторомбической структурой.

Продолжить исследования свойства кристаллов  $RMn_2O_5$  (R–редкоземельный ион от Pr до Lu, Y или Bi) с различным размером структурных единиц.

Определить, существует ли эффект перераспределения зарядовой плотности в других манганитах, например  $RMnO_3$ , или это есть особенность кристаллов  $RMn_2O_5$  с двумя разновалентными ионами марганца.

Провести подробные  $\mu SR$ -измерения локальных магнитных полей в нулевом внешнем магнитном поле в образцах  $R_{(1-x)}Ce_xMn_2O_5$  (R= Eu, Gd с  $x=0,2$  и  $0,25$ ) в диапазоне температур  $10 \div 50$  К.

**II.** Продолжить исследования с помощью  $\mu SR$ –метода феррожидкостей на основе  $CoFe_2O_4$  с заполнением  $D_2O$  и  $H_2O$  в зависимости от размера гранул и их концентрации, получить оценки размера наночастиц.

**III.** Продолжить исследования  $Fe_xCr_{1-x}$  с целью выявления природы хрупко-вязкого перехода в зависимости от концентрации Cr.

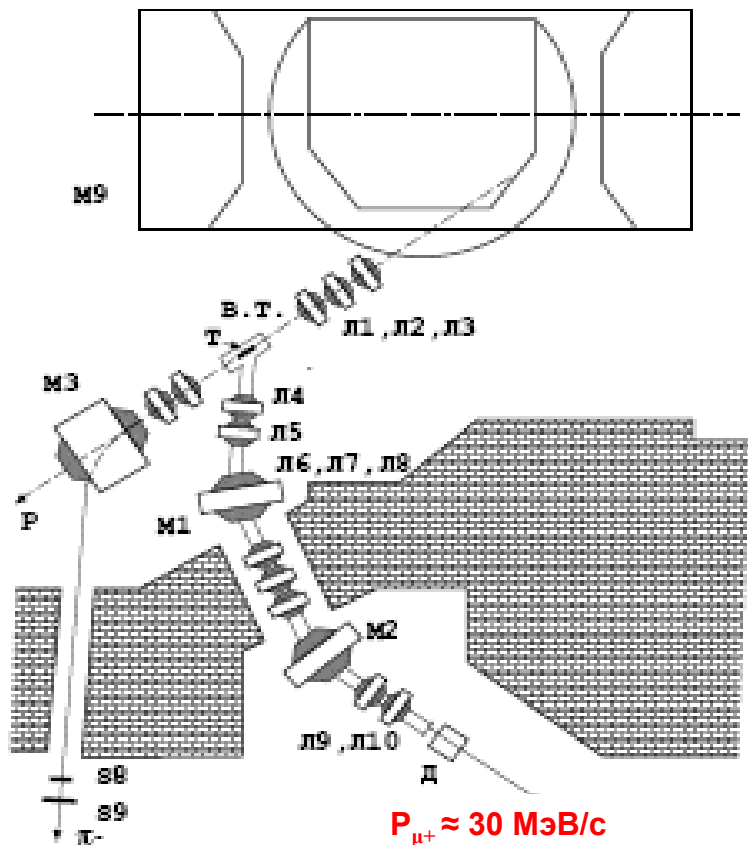
## **В рамках научной программы НИЦ «Курчатовский институт»**

**Во время реализации проекта предполагается не только проведение исследований, но и модернизация установки:**

- а). Улучшение в 10 раз вакуума в канале и модернизация водоснабжения. Это позволит увеличить интенсивность пучка  $\sim 10$  раз, уменьшить размеры пучка  $\sim 1,5$  раза и уменьшить импульс  $\mu^+$ -мезонов до  $50 \div 60$  МэВ/с, что позволит проводить  $\mu$ SR-исследования более тонких и меньших по размеру образцов.**
- б). Создание новых более мощных катушек Гельмгольца для получения внешних продольных и поперечных магнитных полей в диапазоне от 5 Гс до 2.5 кГс в объеме  $1000 \text{ см}^3$  с однородностью не хуже  $10^{-3}$  и полная модернизация электроники.**
- в). Создание дополнительных сцинтилляционных счетчиков с соответствующей электроникой.**

# Также в ПИЯФ существует принципиальная возможность создания пучка медленных мюонов, используя существующий канал низкоэнергетических мезонов.

канал низкоэнергетичных мюонов



Ранее этот канал использовался для исследования сечения рождения низкоэнергетических  $\pi$ -мезонов и прецизионного измерения времени жизни пионов и каонов. В процессе этих исследований была показана принципиальная возможность получения на этом канале достаточно интенсивного пучка мюонов с уровнем продольной поляризации порядка 100% и интенсивностью  $2 \cdot 10^4$  1/с.

Это так называемые «поверхностные» мюоны с импульсом  $\sim 30$  МэВ/с. Их использование позволит существенно расширить область  $\mu$ SR-исследований, обеспечив работу с монокристаллами и тонкими пленками.

# Для использования этого канала для $\mu$ SR-исследований необходима модернизация:

- создание специализированного устройства вакуумного типа с дополнительным охлаждением,
- улучшение вакуумных условий,
- очистка от значительной примеси пучковых позитронов с помощью дополнительного магнита с большим углом поворота ( $\sim 60^\circ$ ) и четырех квадрупольных линз,
- создание специализированной  $\mu$ SR-установки, позволяющей работать с низкоимпульсными мюонами.

**Появилась возможность организовать в ПИЯФ РАН практическую подготовку молодых специалистов для прохождения преддипломной и постдипломной практики и проведения научных исследований в области конденсированных сред с использованием пучка поляризованных мюонов для студентов и аспирантов обучающихся на кафедрах МФТИ (Кафедра теоретической физики) и НИЯУ МИФИ (24 кафедра: Прикладная ядерная физика) и других учебных заведений, где в настоящее время читается курс лекций по  $\mu$ SR-спектроскопии.**

**В 2009 году, в летнюю сессию, совместно принимали зачёт по теории  $\mu$ SR-метода у студентов 4-го курса НИЯУ МИФИ;**

**В 2009 году проходили обучение аспиранты и студенты:**

1. Курельчук Ульяна Николаевна – аспирантка 1-го курса НИЯУ МИФИ (её задача - теоретические расчеты для наших  $\mu$ SR-исследований, научные консультанты Коптев В.П., Мищенко А.Ю., Воробьев С.И.);
2. Вернер Анна Владимировна – студентка 5-го курса НИЯУ МИФИ (руководители НИРС – Мищенко А.Ю. и Коптев В.П.);
3. Морослип Александр – студент 4-го курса физико-технического факультета НИЯУ МИФИ. Предполагаемое место прохождения практики и дипломного проектирования – ЛМФКС ОФВЭ ПИЯФ РАН (руководители НИРС – Мищенко А.Ю. и Щербаков Г.В.);
4. Суворова Анна – студентка 4-го курса НИЯУ МИФИ (руководители НИРС – Мищенко А.Ю. и Воробьев С.И.);
5. Воробьева Ирина Ивановна – студентка 5-го курса Института математики и естественных наук СГПА (её задача – программное обеспечение для наших  $\mu$ SR-исследований, руководители НИРС Коптев В.П., Воробьев С.И., Щербаков Г.В.).

**Проблема: ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЖИЛЬЁМ НА ВРЕМЯ ПРЕБЫВАНИЯ У НАС!!!  
И возможной оплаты труда.**

Спасибо за внимание!!!