

**Исследование  
фазовых переходов  
в сплавах**

**$\text{Cu}_{(1-x)}\text{Mn}_x$  и  $(\text{Pd}_{1-x}\text{Fe}_x)_{0.95}\text{Mn}_{0.05}$   
с помощью  $\mu\text{SR}$ -метода.**

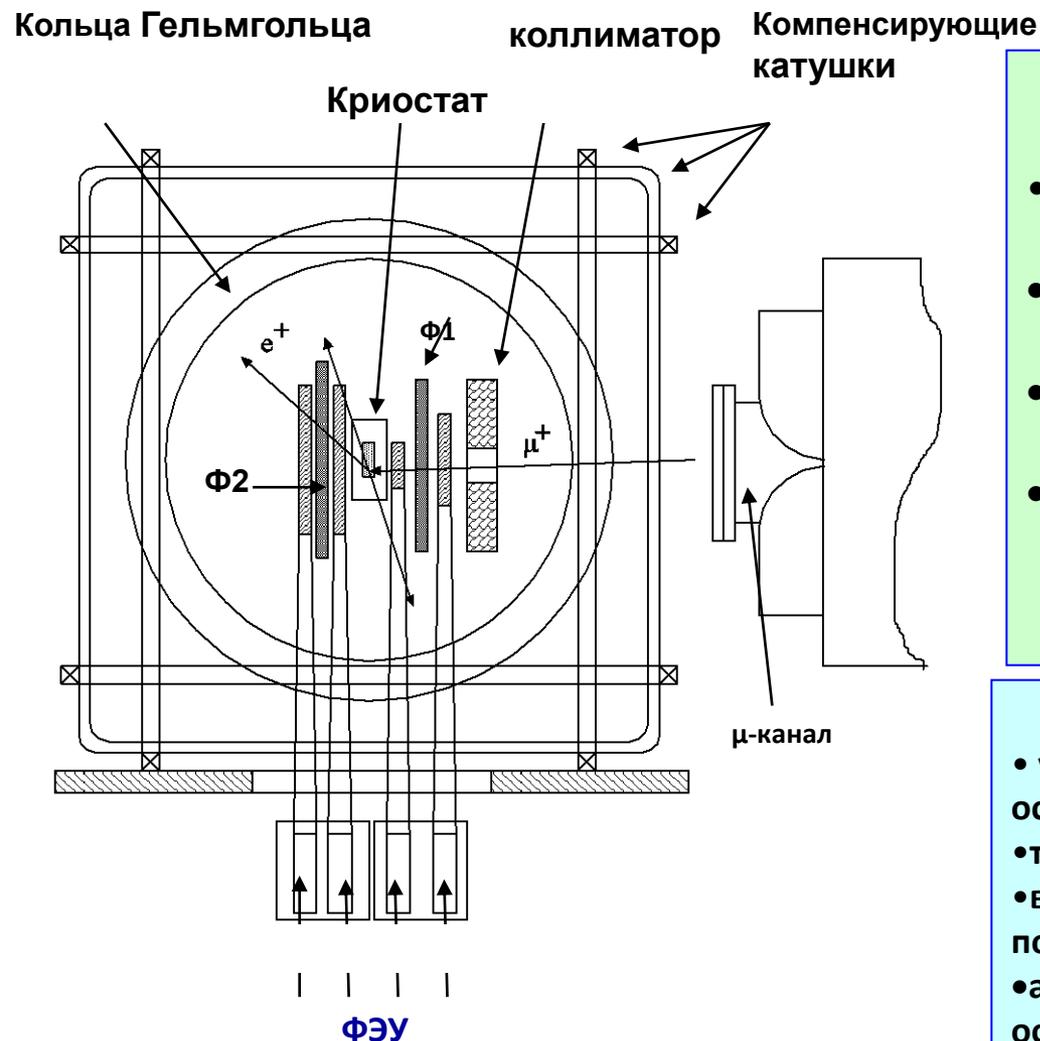
**Котов С.А.**

**Лаборатория мезонной физики конденсированных сред ОФВЭ**

# План доклада

- 1.  $\mu$ SR-установка.
- $\mu$ SR-метод.
- 2. Исследование магнитных свойств гомогенных медно-маргонцевых сплавов.
  - Интегральный метод.
  - Анализ временных спектров.
- 3. Исследование магнитных свойств сплава  $(\text{Pd}_{1-x}\text{Fe}_x)_{0.95}\text{Mn}_{0.05}$   
 $X=0.016$ .
- 4. Выводы

# Схема $\mu$ SR-установки на $\mu$ -канале



## Физические параметры

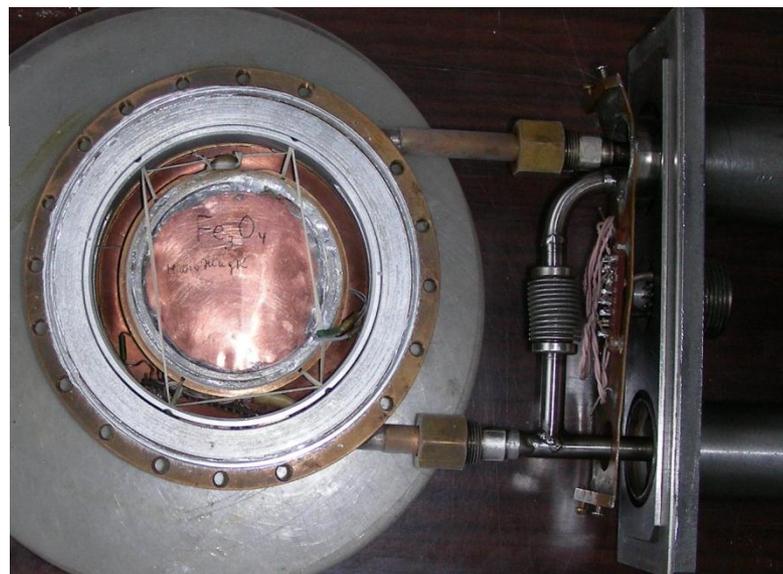
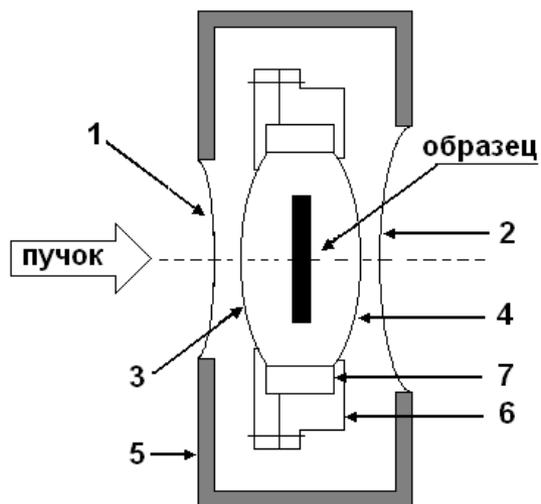
### $\mu$ -канала:

- 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  $4 \div 10 \text{ г/см}^2$ .

## Параметры $\mu$ SR-установки:

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

# $\mu$ SR-установка: криостат



Окна криостата:  
теплые 40мкм  
холодные 100мкм  
Ø 80-120 мм

Размер исследуемых  
образцов Ø20-60мм \*  
10мм

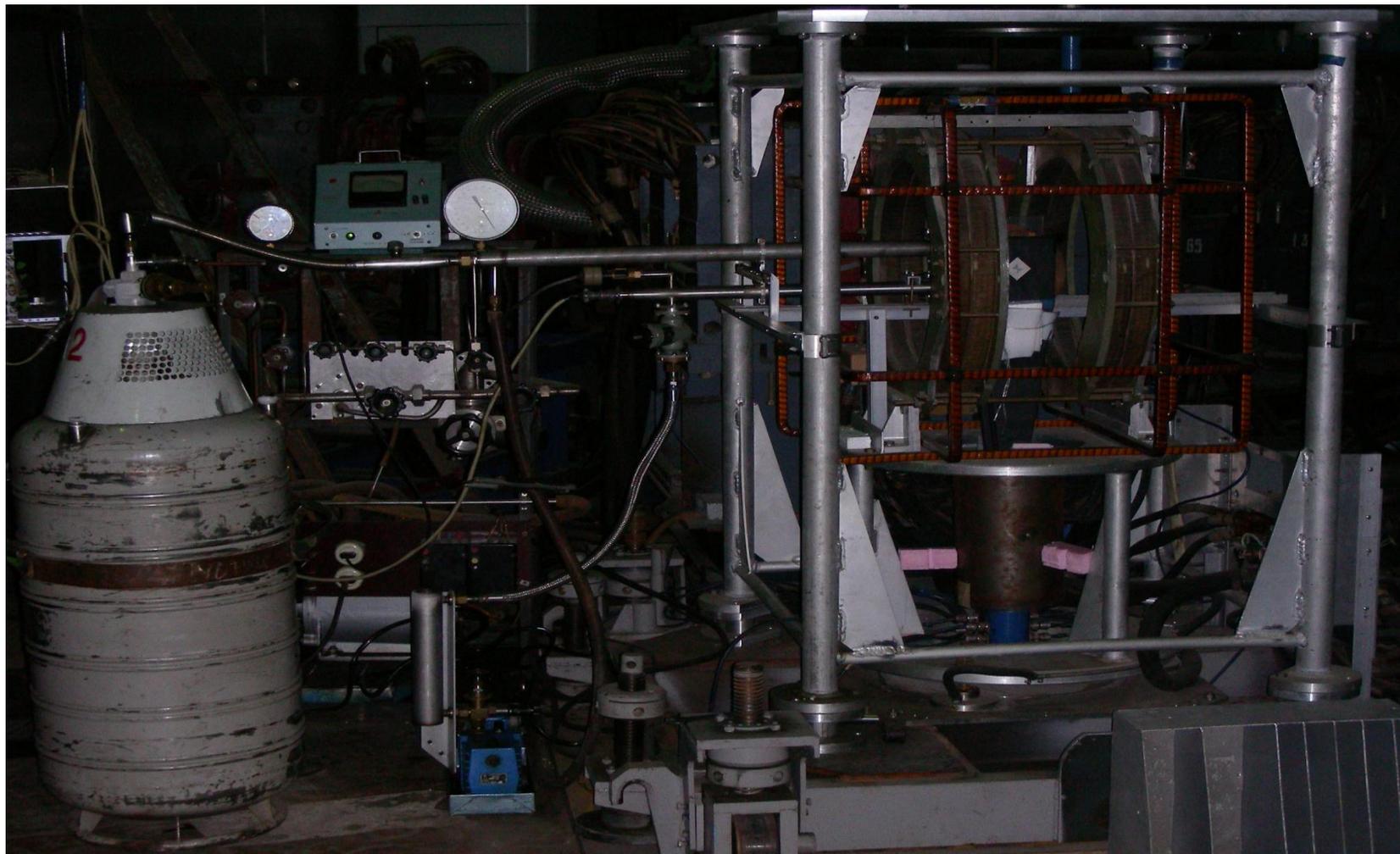
Диапазон рабочих  
температур 5-300K.

Точность установки  
температуры 0.5K

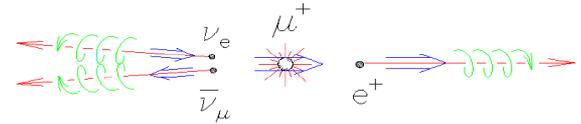
Стабильность по  
температуре  $\pm 0.1$ K



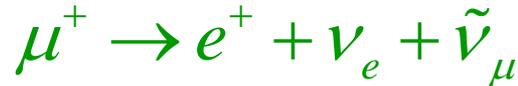
## $\mu$ SR-установка на $\mu$ -канале



# μSR-метод:



- **Временные распределения позитронов  $N_e(t)$ , образовавшиеся при распаде:**



$$N_e(t) = [N_0 \cdot \exp(-t / \tau_\mu)] \cdot [1 + a_s \cdot G_s(t) + a_f \cdot G_f(t)] + \Phi$$

$N_0$  – нормировочная константа;

$\tau_\mu \sim 2,197 \cdot 10^{-6}$  с – время жизни мюона;

$a_s, a_f$  – асимметрия распада мюонов, остановившихся в образце ( $a_s$ ) и её фоновая компонента ( $a_f$ ) (в основном в стенках криостата);

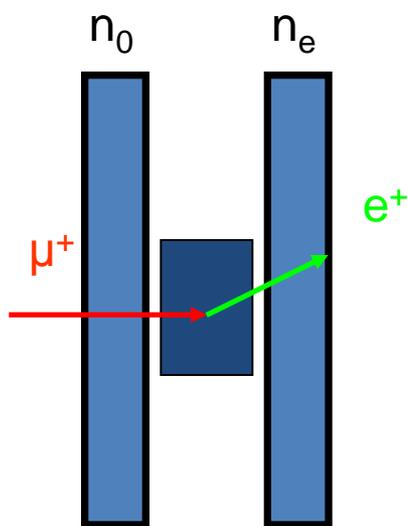
$G_s(t), G_f(t)$  – соответствующие функции релаксации описывающие поведение поляризации для мюонов остановившихся в образце и фоновых источниках;

$\Phi$  – фон случайных совпадений;

**Полная начальная асимметрия:**  $a_{tot} = a_s + a_f$

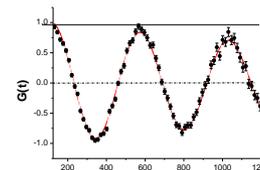
# Интегральный метод

$$N_e \sim 1/n_0 * (\int N_e(t) dt)$$



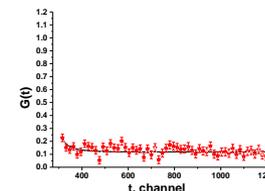
1. Отсутствие деполяризации (парамагнитное состояние)  $\Rightarrow N_e = 1 \quad H = 0$

$$N_e = 0 \quad H > 0$$



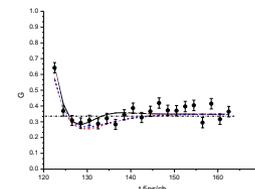
2. Сильная спиновая динамика, быстрая релаксация  $\Rightarrow N_e = 0 \quad H = 0$

$$\Rightarrow N_e = 0 \quad H = 0$$



3. Магнитоупорядоченное состояние, медленная релаксация, изотропное распределение полей  $\Rightarrow N_e(\text{norm}) = 1/3$

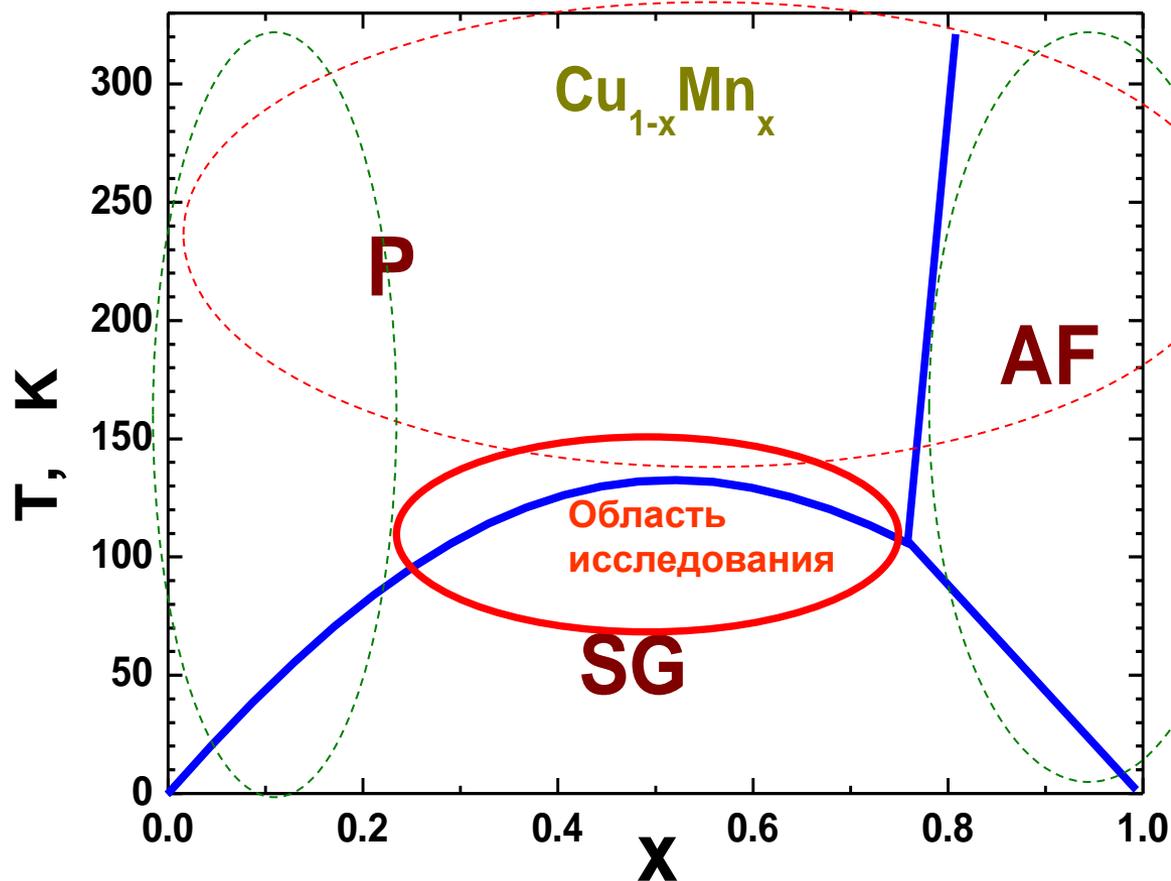
$$\Rightarrow N_e(\text{norm}) = 1/3$$



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

# Фазовая диаграмма\*

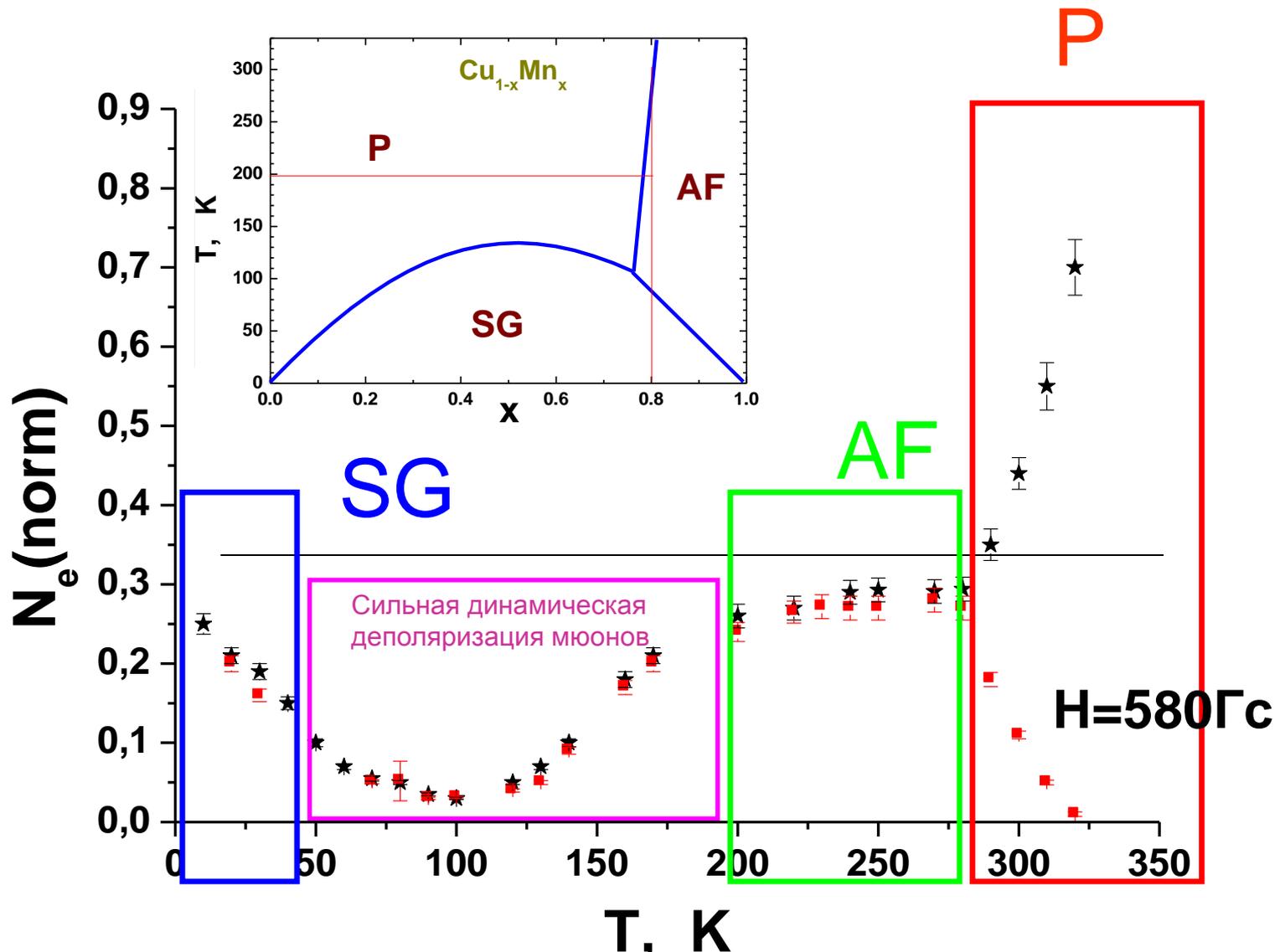
(на момент наших исследований)



**P**-парамагнитная область  
**AF**-область  
антиферромагнетика  
**SG**-область спинового стекла.

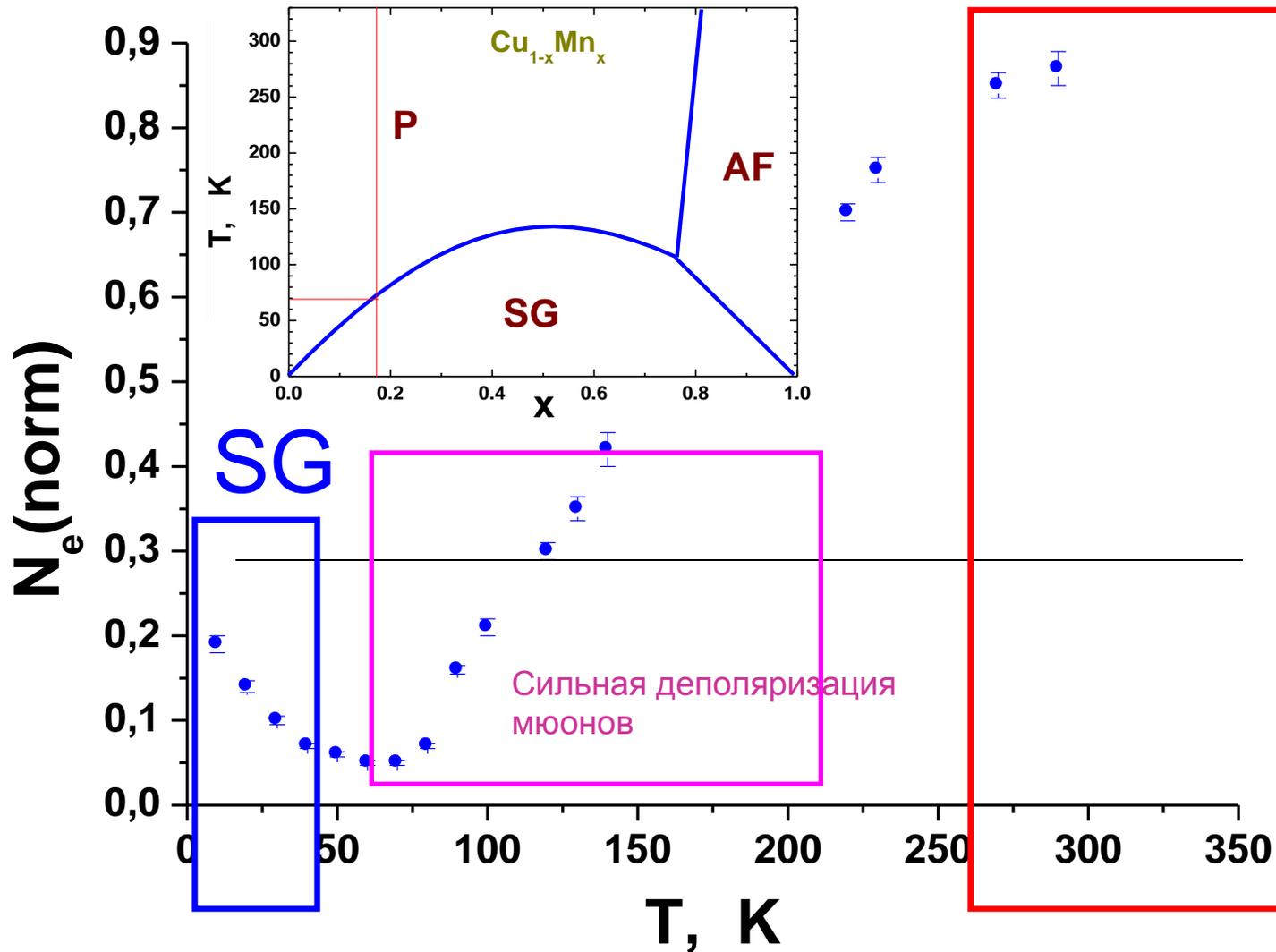
При  $x > 0.6$  эффект  
памяти формы. При  
 $x > 0.8$  совпадение  
температуры  
мартенситного и  
магнитного переходов.

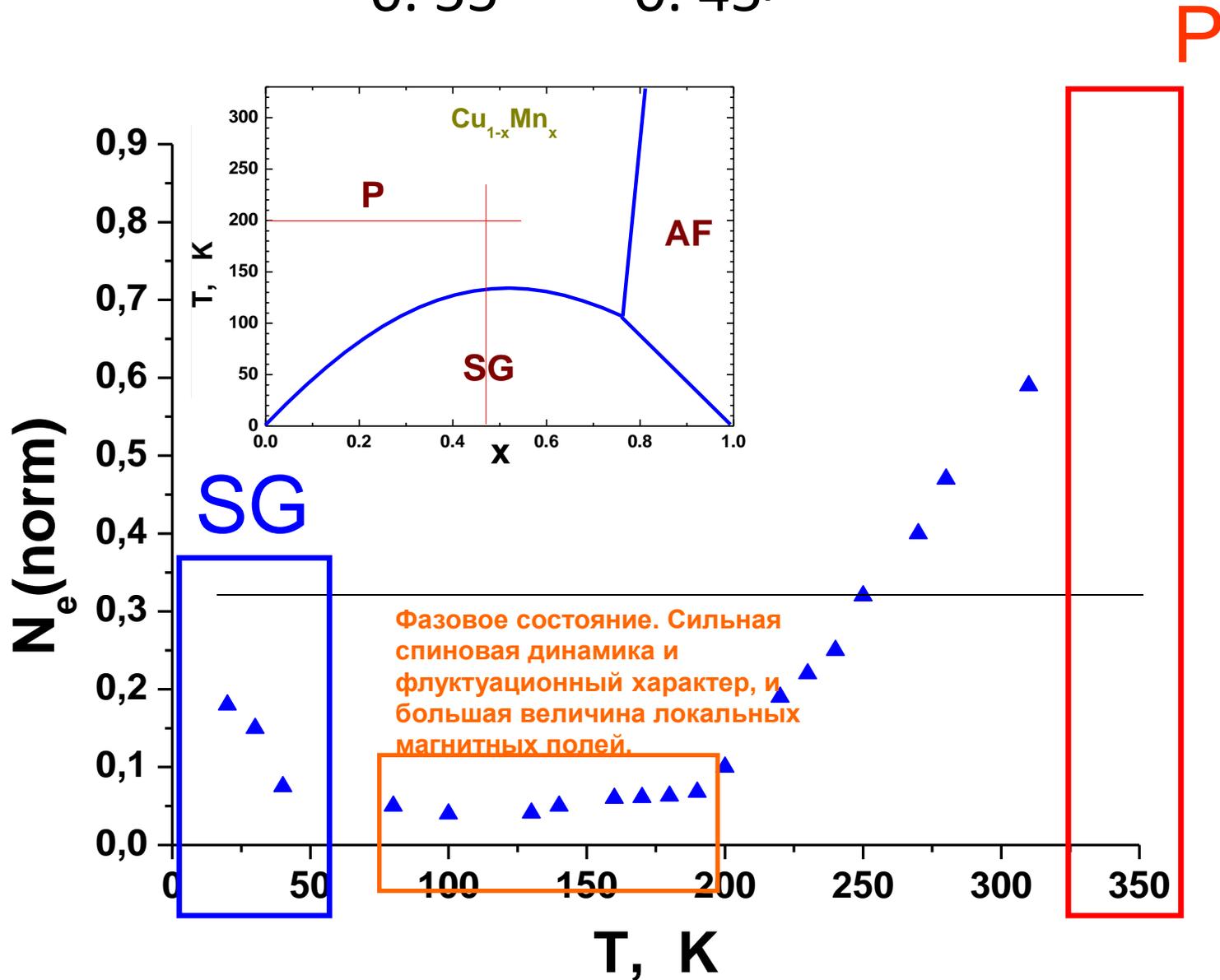
\*Е.З.Винтайкин и др.,//Известия ВУЗов, физика,1985, 5,104  
Е.З.Винтайкин и др.,//Физика металлов и металловедение, 1977,  
44 (Вып.5), 1023.



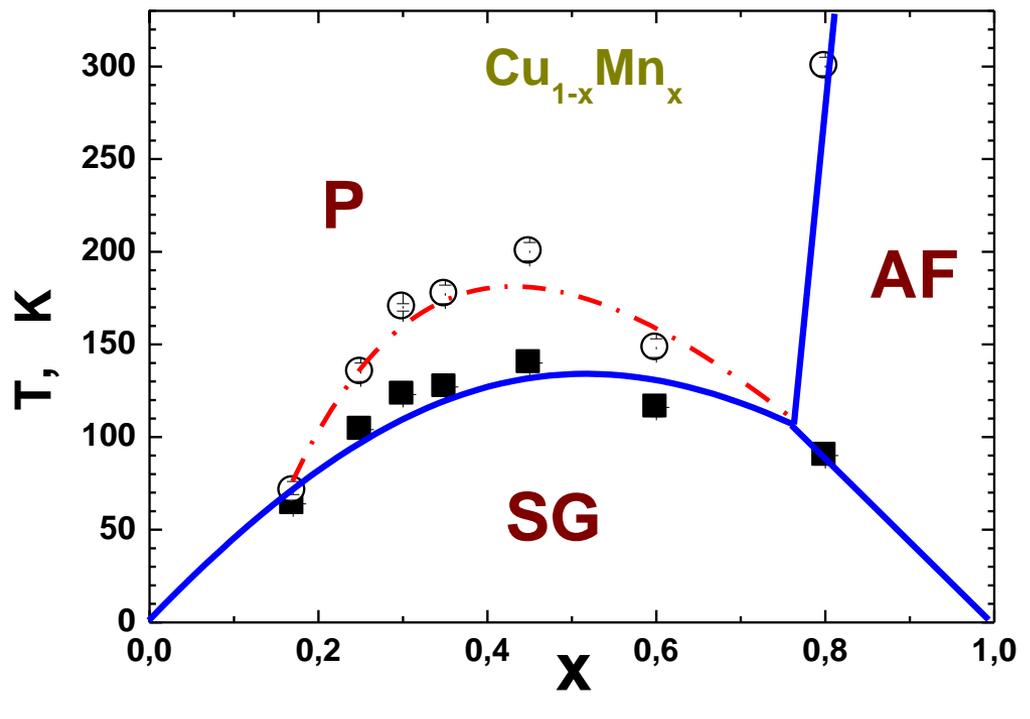
# $\text{Cu}_{0.83}\text{Mn}_{0.17}$ , $H=0$

P





# Фазовая диаграмма дополненная $\mu$ SR-исследованиями



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 границу существования нового фазового состояния между парамагнитной и спин-стекольной фазой.

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

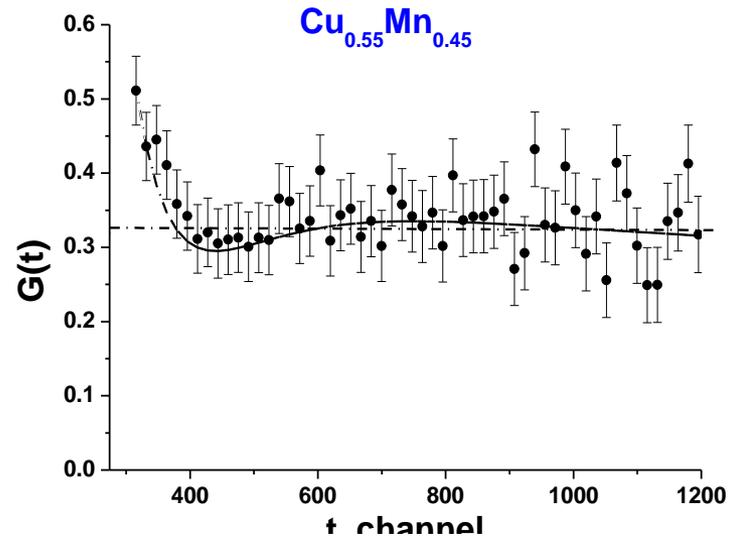
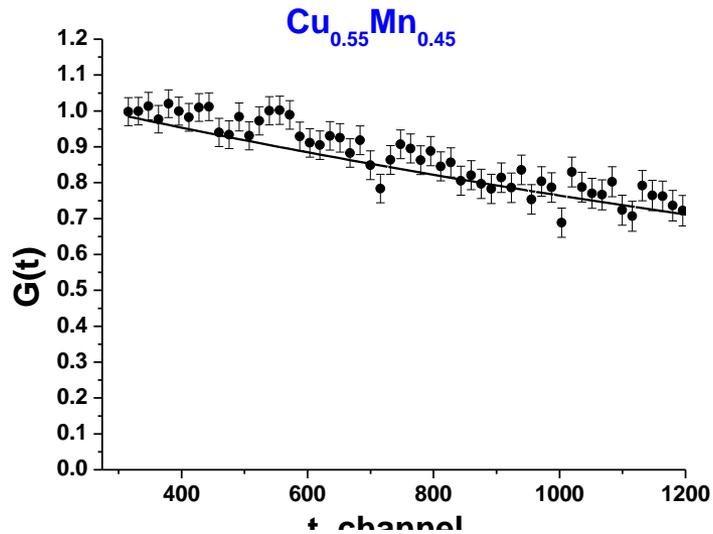
круглые светлые точки– для высокотемпературного  
перехода;

квадратные темные точки– для низкотемпературного  
перехода.

# Анализ временных спектров (описание функции релаксации)

Парамагнетик 300К

Спиновое стекло 20К

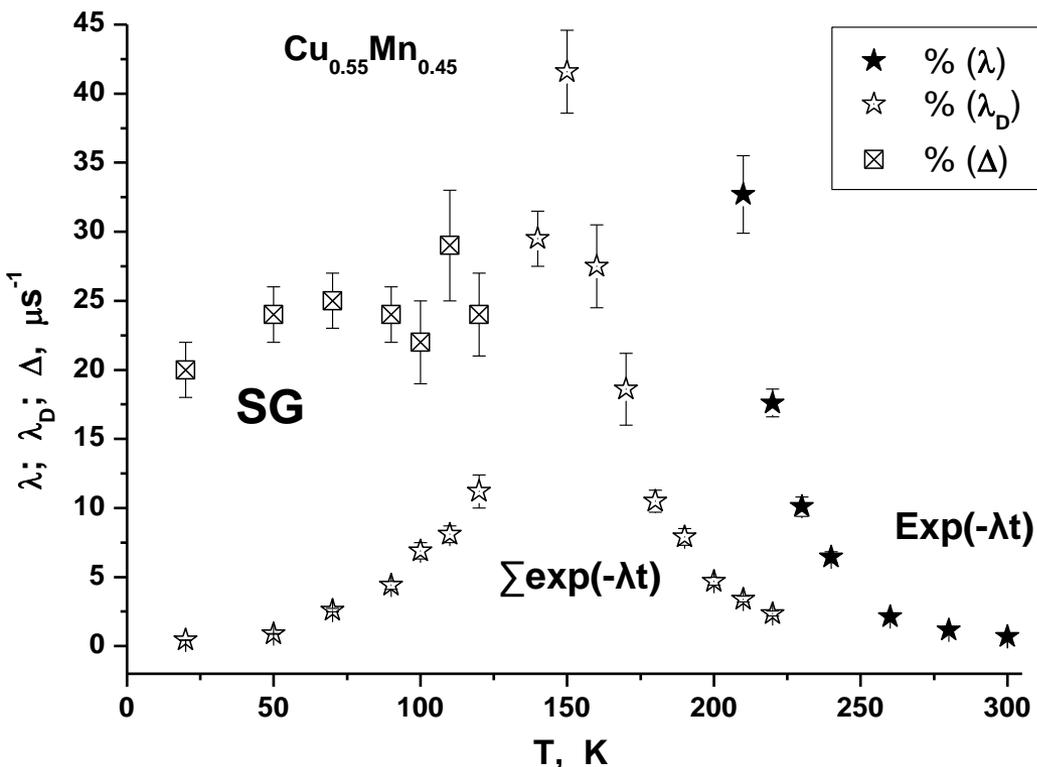


$$G_s(t) = \exp(-\lambda t)$$

$$G_s(t) = \left[ \frac{1}{3} + \frac{2}{3} (1 - \Delta \cdot t) \cdot \exp(-\Delta \cdot t) \right] \cdot \exp(-\lambda_D t)$$

Концентрированное спиновое стекло.

На рисунке демонстрируется поведение параметров  $\lambda$ ,  $\lambda_D$  и  $\Delta$  в зависимости от температуры образца.

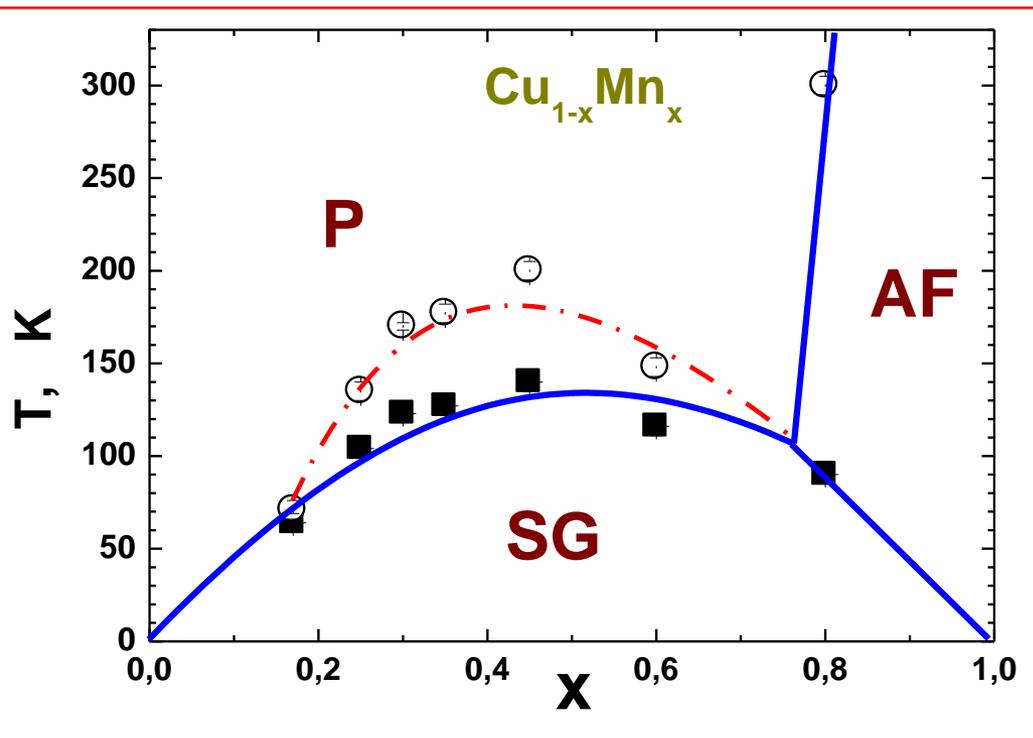


Видим два магнитных перехода: первый – при температуре образца  $\sim 200$  К, второй – в области температур (150 ÷ 130) К.

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

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:

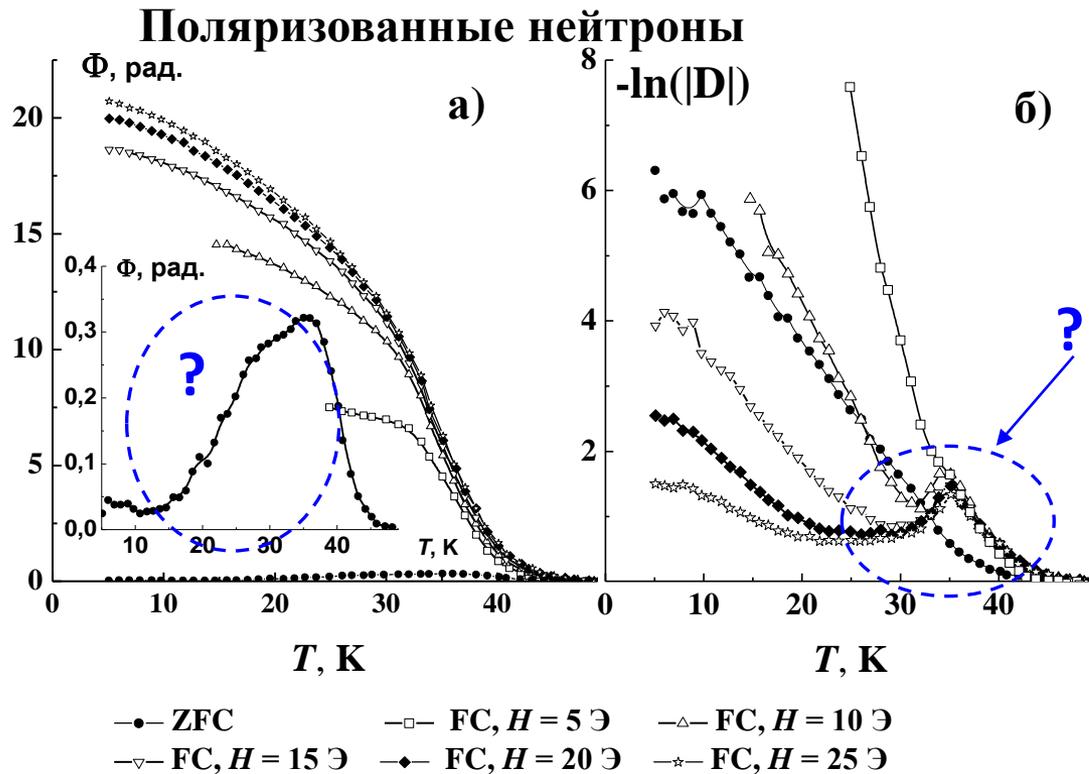
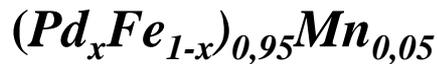
ФТТ, том 49, вып. 9, 2007, стр. 1660–1663.  
Physica B 289-290 (2000) 221-224.  
ЖТФ, т. 66, № 11, стр. 62-71, 1996.

**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.

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

**Исследование магнитных свойств  
сплава  $(\text{Pd}_{1-x}\text{Fe}_x)_{0.95}\text{Mn}_{0.05}$   
 $x=0,016$**



Температурные зависимости угла поворота  $\Phi$  (а)  
и деполяризации  $-\ln(|D|)$  (б).

1. Из макроскопических исследований известно два перехода:

$T = 39$  К (P→FM),

$T = 7 \div 10$  К (FM→SG).

Исследования поляризованными нейтронами показывают наличие значительной спин-стекольной составляющей. Подтверждение этого требует привлечение других методов. (G.P.Gordeev et al., Phys. B 335 (2003) 127-129)

2. Используя результаты нейтронной деполяризации и  $\mu$ SR-исследований существует возможность определить размер магнитных неоднородностей.

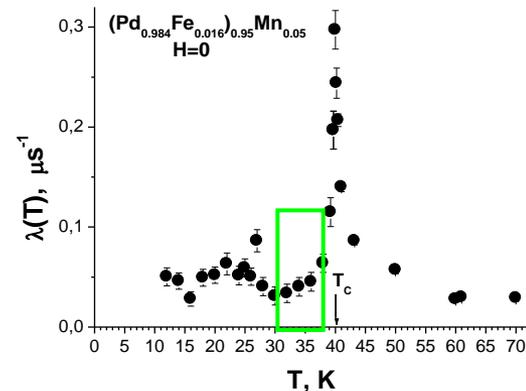
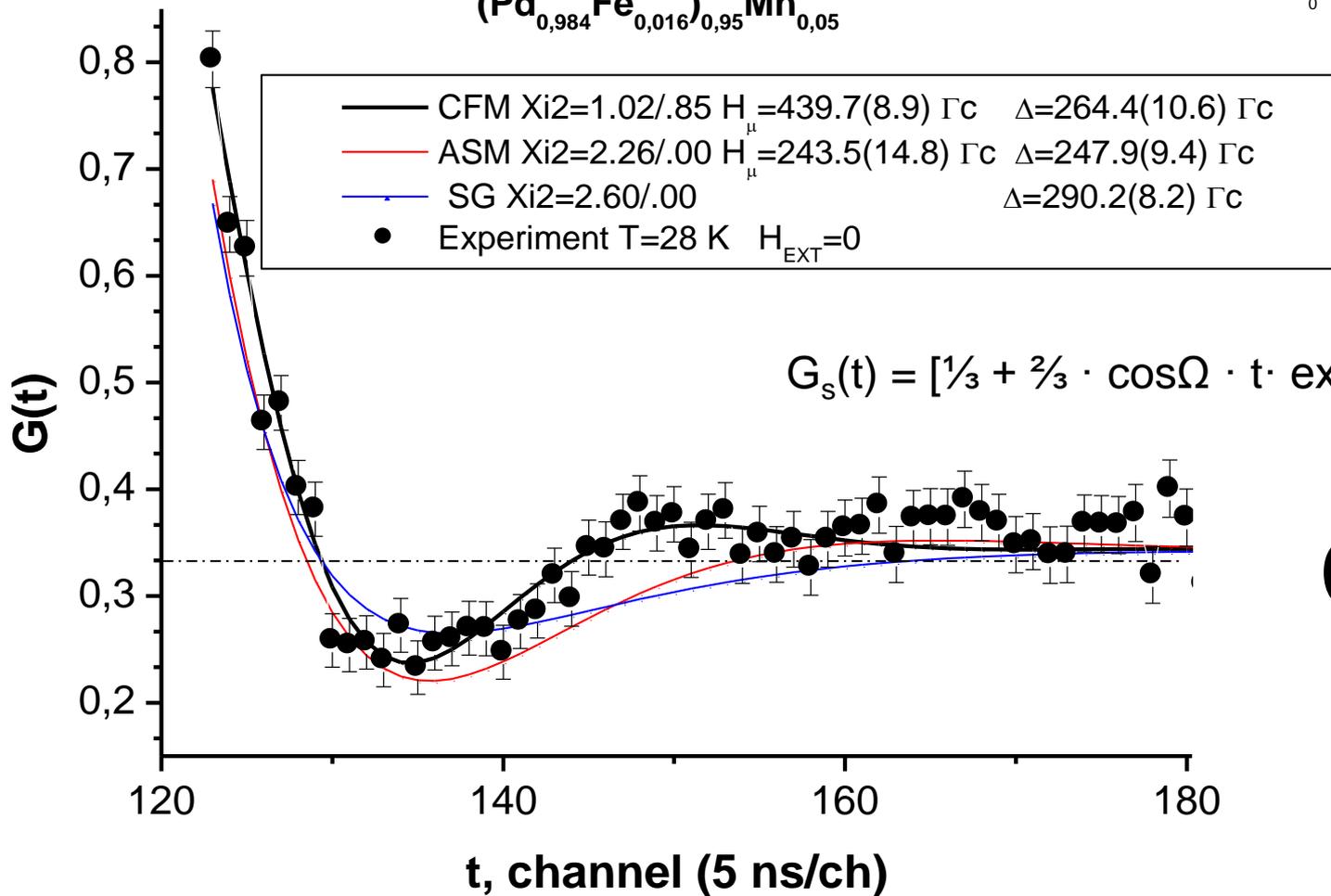
$$\Delta P \sim (M_{inh})^2 \delta$$

$M_{inh}$  - остаточная намагниченность,  
 $\delta$  - средний размер домена.

(S.V. Maleyev, J. Phys. 43 (1982) 7-23.)

# CFM или ASM или SG?

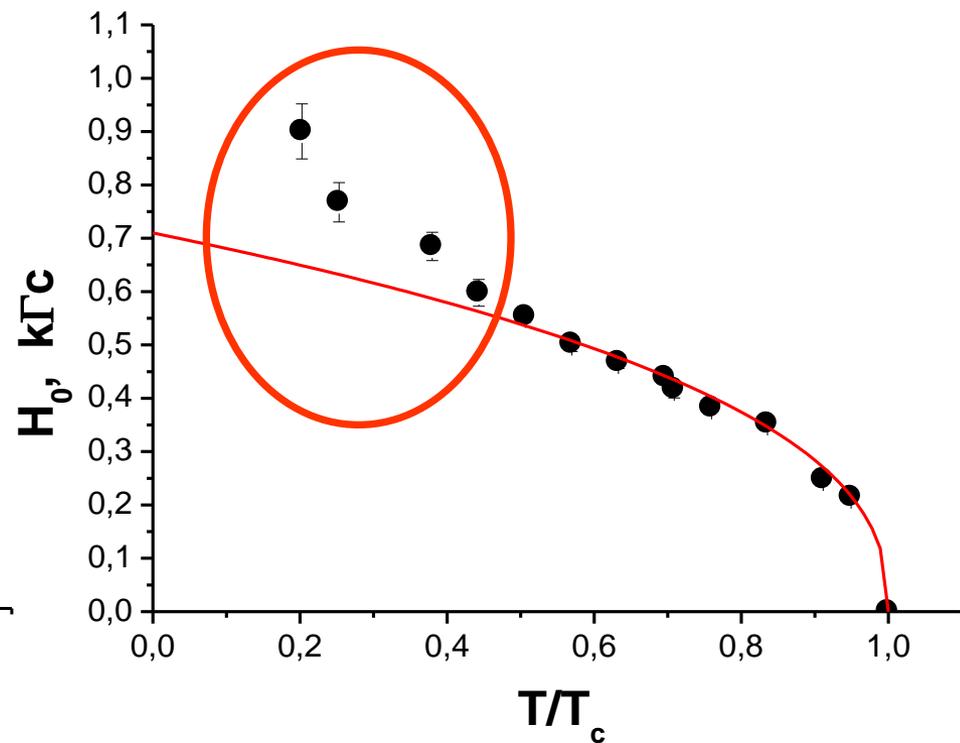
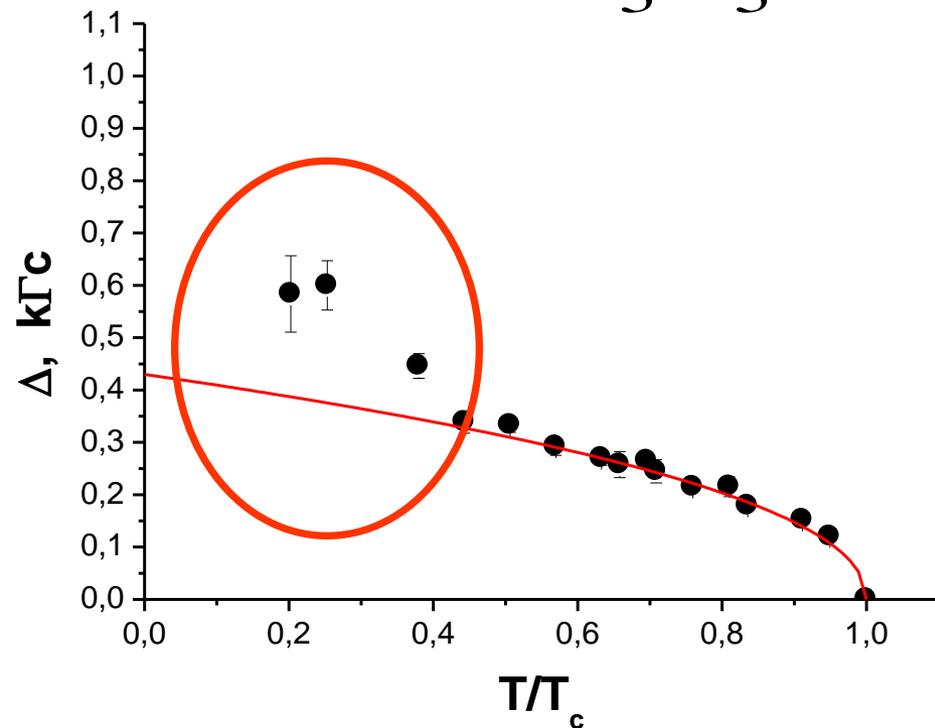
(разные функции релаксации  $G(t)$  и однородность сплава)



**CFM !!!**

# Зависимость разброса $\Delta$ статических полей и величины среднего поля $H_0$ от $T$ .

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

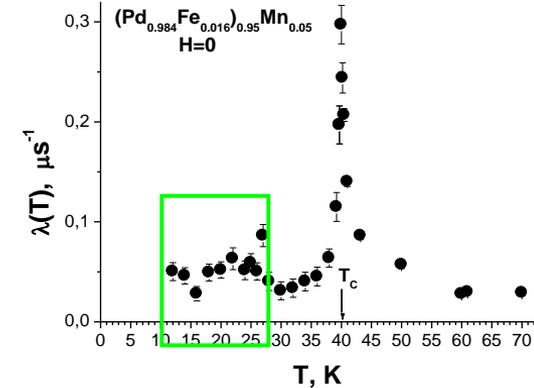
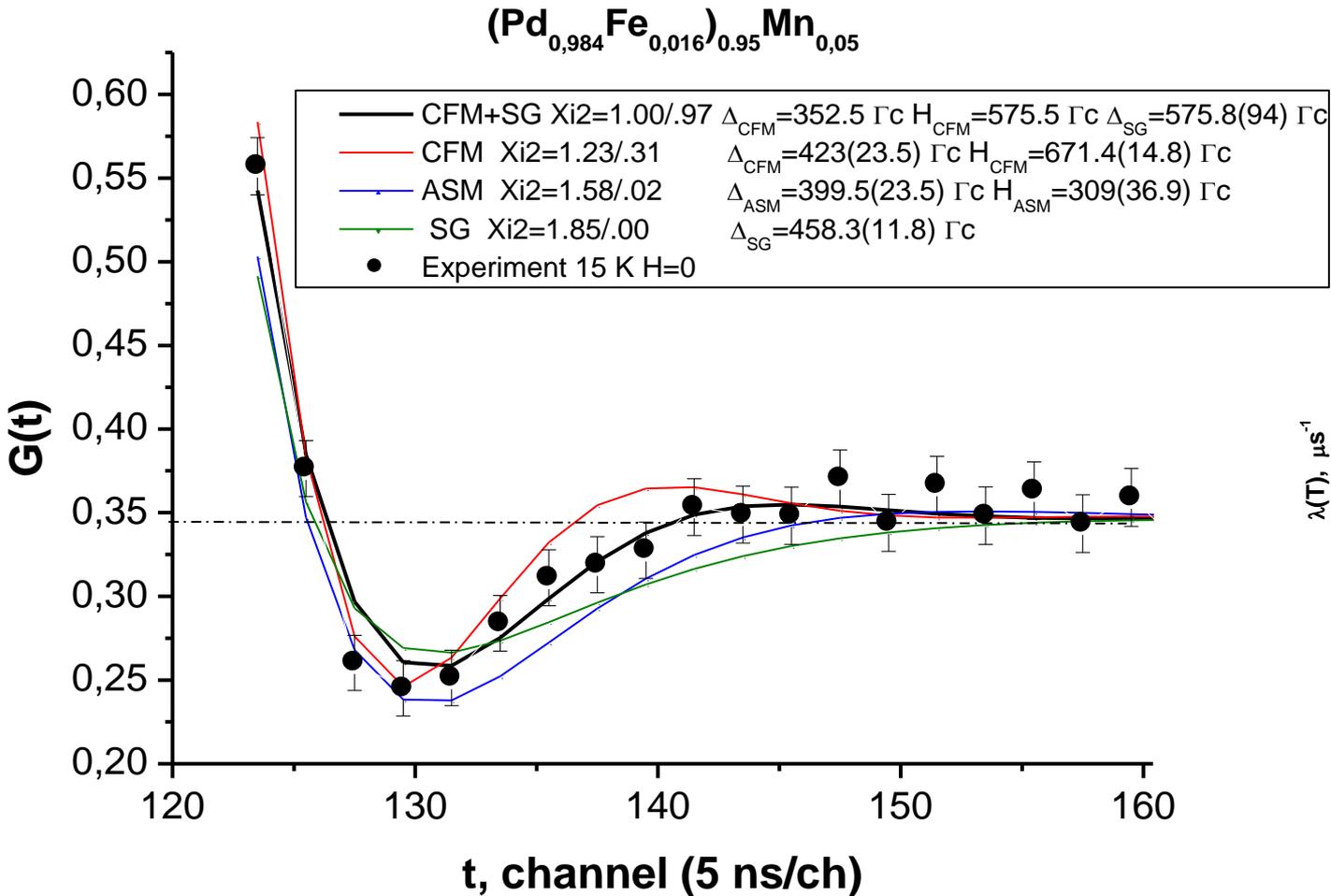


Кривые есть аппроксимация экспериментальных данных при помощи:  $H_0 \sim H_{\max} \cdot (1 - T/T_c)^\beta$ , где  $\beta = 0.40 \pm 0.02$  - это соответствует 3d-магнетику Гейзенберговского типа

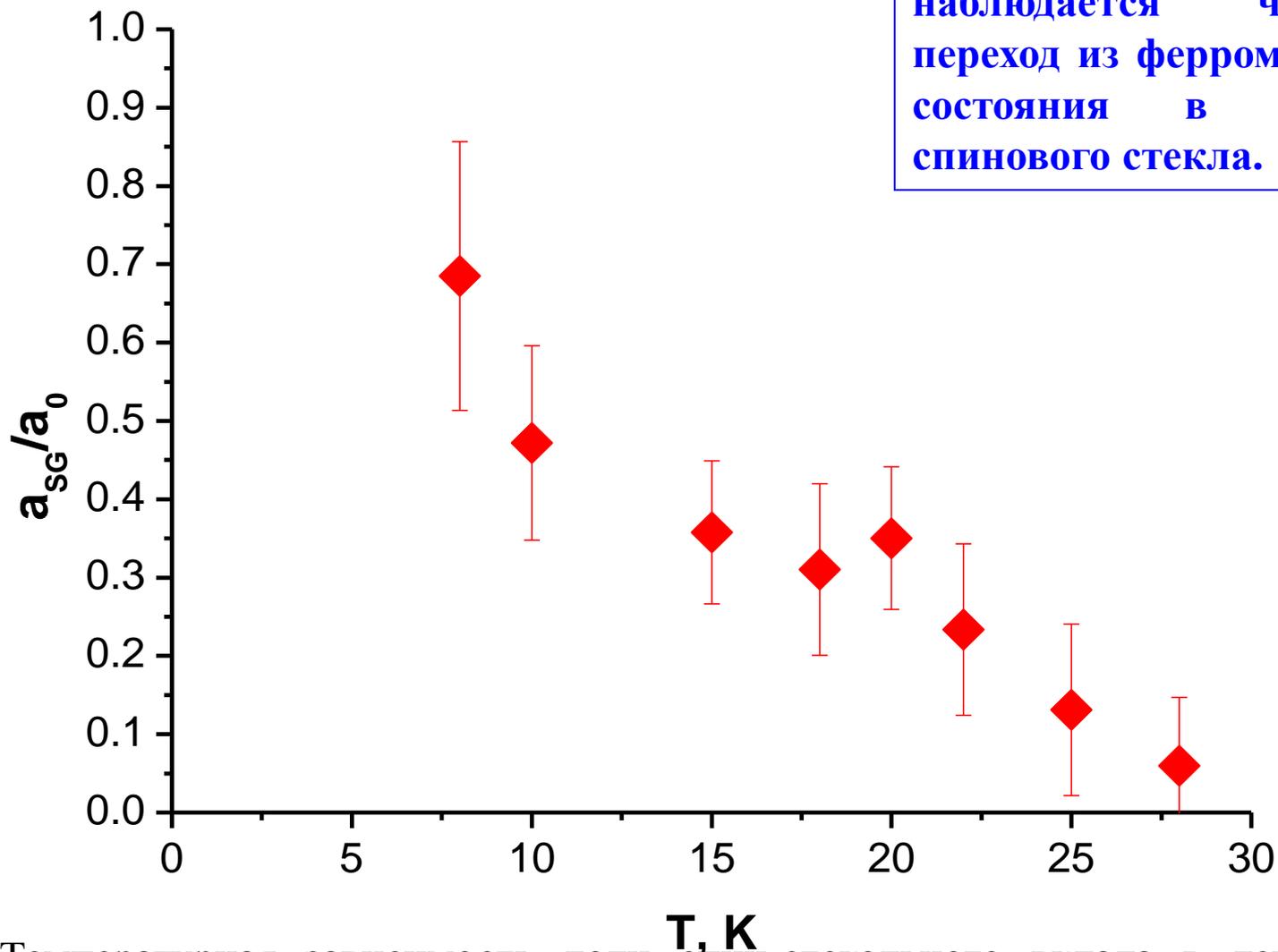
**При  $T < 28$  К отклонение от ферромагнетика.**

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

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



При температуре  $T \sim 28$  К  
наблюдается частичный  
переход из ферромагнетного  
состояния в состояние  
спинового стекла.

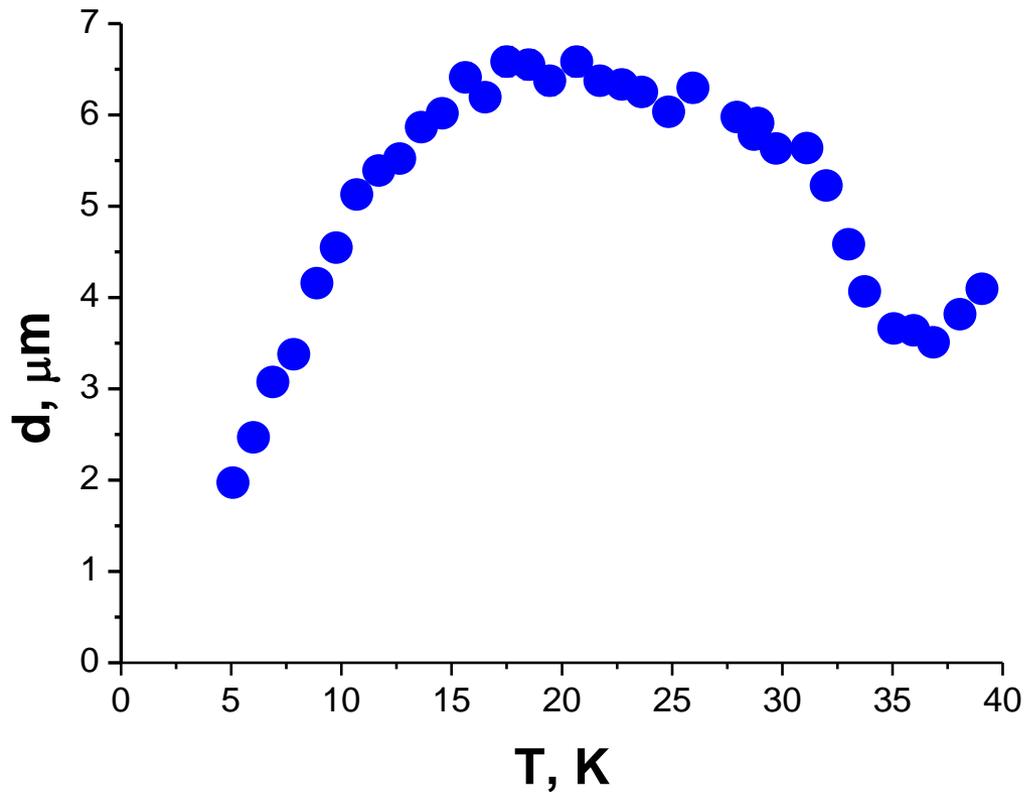


Температурная зависимость доли спин-стекольного вклада в деполяризацию ансамбля мюонов.

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

$$\Delta P \sim (M_{inh})^2 \delta$$

S.V. Maleyev, J. Phys. 43 (1982) 7-23.



При вычислении  $\delta$  была учтена магнитная изотропность образца, а среднее значение намагниченности неоднородностей  $M_{inh}$  принято равным величине среднего магнитного поля  $H$

# Основные результаты и выводы

1.  $\mu$ SR-методом обнаружено новое фазовое состояние в гомогенных сплавах  $\text{Cu}_{1-x}\text{Mn}_x$  в широкой области концентраций при температурах 100-200К. Оно характеризуется сильной спиновой динамикой и значительной неоднородностью локальных магнитных полей.
2. Полученные  $\mu$ SR-методом результаты позволили существенно дополнить магнитную фазовую диаграмму гомогенных медно-марганцевых сплавов  $\text{Cu}_{1-x}\text{Mn}_x$ .
3. Исследование сплава  $(\text{Pd}_{1-x}\text{Fe}_x)_{0,95}\text{Mn}_{0,05}$  с  $x=0,016$  методом  $\mu$ SR показало, что при температуре ниже 39.5 К в нулевом внешнем магнитном поле образец находится в состоянии коллинеарного ферромагнетика с изотропной ориентацией локальных статических магнитных полей.
4. При понижении температуры в образце, на фоне коллинеарного ферромагнетика, появляется фракция спинового стекла, задолго до перехода образца в спин-стекольное состояние при  $T_g=7-10$  К.
5. Используя результаты нейтронной деполяризации и  $\mu$ SR-исследований определен размер магнитоупорядоченных областей.

## Публикации в реферируемых журналах, препринтах и сборниках:

1. С.Г. Барсов, С.П. Беляев, А.Л. Геталов, Р.Ф. Коноплева, В.П. Коптев, С.А. Котов, Л.А. Кузьмин, В.А. Лихачев, С.М. Микиртычьянц, И.В. Назаркин, В.Л. Соловей, Г.В. Щербаков. *Механическое поведение, структурное и магнитное превращение в марганцемедном сплаве*. **ЖТФ**, т. 66, № 11, с.62-71, 1996.
2. С.Г. Барсов, А.Л. Геталов, В.П. Коптев, С.А. Котов, Л.А. Кузьмин, С.М. Микиртычьянц, В.А. Удовенко, Г.В. Щербаков. *Новое магнитное состояние в гомогенных медномарганцевых сплавах*. **Препринт ПИЯФ-2147**, Гатчина-1997, 15 с.
3. S.G. Barsov, A.L. Getalov, V.P. Koptev, S.A. Kotov, S.M. Mikirtychyants, G.V. Shcherbakov. *Evidence for a new magnetic phase in polycrystalline  $Cu_{(1-x)}Mn_x$  alloys by  $\mu SR$* . **Physica B** 289-290 (2000) 221-224.
4. С.Г. Барсов, А.Л. Геталов, В.П. Коптев, С.А. Котов, С.М. Микиртычьянц, Г.В. Щербаков. *Изучение магнитных характеристик гомогенных медно-марганцевых сплавов*. **Препринт ПИЯФ-2632**, Гатчина-2005, 14 с.
5. С.Г. Барсов, А.Л. Геталов, В.П. Коптев, С.А. Котов, С.М. Микиртычьянц, Г.В. Щербаков. *Исследование магнитных фазовых переходов и распределения локальных магнитных полей в системах с конкурирующим взаимодействием методом*. **В сборнике: «Основные результаты научных исследований ПИЯФ РАН в 2000-2004 гг.»**. Гатчина, ПИЯФ РАН, 2005, стр. 151.
6. С.Г. Барсов, С.И. Воробьев, В.П. Коптев, С.А. Котов, С.М. Микиртычьянц, Г.В. Щербаков, Л.А. Аксельрод, Г.П. Гордеев, В.Н. Забенкин, И.М. Лазебник. *Изучение магнитных свойств сплава  $(Pd_xFe_{1-x})_{0.95}Mn_{0.05}$  с помощью поляризованных мюонов и нейтронов*. **Препринт ПИЯФ-2688**, Гатчина-2006, 17 стр.
7. С.Г. Барсов, С.И. Воробьев, В.П. Коптев, С.А. Котов, С.М. Микиртычьянц, Г.В. Щербаков.  *$\mu SR$ -установка на мюонном пучке синхроциклотрона ПИЯФ РАН*. **Препринт ПИЯФ-2694**, Гатчина-2006, 17 стр.
8. С.Г. Барсов, С.И. Воробьев, В.П. Коптев, С.А. Котов, С.М. Микиртычьянц, Г.В. Щербаков, Л.А. Аксельрод, Г.П. Гордеев, В.Н. Забенкин, И.М. Лазебник. *Изучение магнитных свойств сплава  $(Pd_xFe_{1-x})_{0.95}Mn_{0.05}$  с помощью поляризованных мюонов и нейтронов*. **ФТТ**, том 49, вып. 8, 2007, стр. 1421-1426.
9. С.Г. Барсов, С.И. Воробьев, В.П. Коптев, С.А. Котов, С.М. Микиртычьянц, Г.В. Щербаков. *Исследование магнитных свойств гомогенных медно-марганцевых сплавов*. **ФТТ**, том 49, вып. 9, 2007, стр. 1660-1663.
10. С.Г. Барсов, С.И. Воробьев, В.П. Коптев, С.А. Котов, С.М. Микиртычьянц, Г.В. Щербаков.  *$\mu SR$ -установка на мюонном пучке синхроциклотрона ПИЯФ РАН*. **ПТЭ**, том 50, № 6, 2007, стр. 36-42.
11. S.G. Barsov, S.I. Vorobyev, V.P. Koptev, E.N. Komarov, S.A. Kotov, S.M. Mikirtychyans, and G.V. Shcherbakov.  *$\mu SR$ -investigations at PNPI*. **В сборнике ОФВЭ «NEPD: Main scientific activity 2002-2006»**. pp. 233-240, Гатчина - 2007.

## Апробация результатов работы:

1. С.П.Беляев, В.А.Лихачев, С.Г.Барсов, А.Л.Геталов, В.П.Коптев, С.А.Котов, Л.А.Кузьмин, С.М.Микиртычьянц, Г.В.Щербаков, Р.Ф.Коноплева, И.В.Назаркин, В.Л.Соловей. *Комплексное исследование мартенситного и магнитного переходов в сплаве  $Cu_{54}Mn_{46}$ . Материалы с эффектом памяти формы*, сборник докладов часть 3, стр.1-10, Санкт-Петербург 1995.
2. С.П.Беляев, В.А.Лихачев, С.Г.Барсов, А.Л.Геталов, В.П.Коптев, С.А.Котов, Л.А.Кузьмин, С.М.Микиртычьянц, Г.В.Щербаков, Р.Ф.Коноплева, И.В.Назаркин, В.Л.Соловей. *Комплексное исследование мартенситного и магнитного переходов в сплаве  $Cu_{54}Mn_{46}$ . I Российско-Американский семинар и XXXI семинар "Актуальные проблемы прочности"* 13-17 ноября 1995 года Санкт-Петербург.
3. S.G.Barsov, A.L.Getalov, V.P.Koptev, S.A.Kotov, S.M.Mikirtychyants, G.V.Shcherbakov. *Evidence for a new magnetic phase in polycrystalline  $Cu_{(1-x)}Mn_x$  alloys by  $\mu SR$ . 8-th Int. Conference on  $\mu SR$* , Les Diablerets, Switzerland, 30.08 - 03.09.1999.
4. Доклад на 40<sup>ой</sup> Зимней школе ПИЯФ.  *$\mu SR$ –studies of local magnetic field distributions in  $(Pd_xFe_{1-x})_{0,95}Mn_{0,05}$* . S.G. Barsov, S.I. Vorobyev, A.L. Getalov, V.P. Koptev, S.A. Kotov, S.M. Mikirtychyants, G.V. Scherbakov.
5. S.G. Barsov, S.I. Vorobyev, V.P. Koptev, E.N. Komarov, S.A. Kotov, S.M. Mikirtychyans, and G.V. Shcherbakov. *INVESTIGATION OF THE MAGNETIC PROPERTIES OF THE HOMOGENEOUS COPPER-MANGANESE ALLOYS. Труды XI международного междисциплинарного симпозиума «Упорядочение в минералах и сплавах» ОМА-11.* – Ростов-на-Дону - п. Лоо, 10-15 сентября 2008 г., Том I. стр. 277 – 280. – Ростов-на-Дону: Издательство СКНЦ ВШ ЮФУ АПСН, 2008.
6. S.G. Barsov, S.I. Vorobyev, V.P. Koptev, E.N. Komarov, S.A. Kotov, S.M. Mikirtychyans, and G.V. Shcherbakov. *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-11.* – Ростов-на-Дону - п. Лоо, 10-15 сентября 2008 г., Том I. стр. 281 – 283. – Ростов-на-Дону: Издательство СКНЦ ВШ ЮФУ АПСН, 2008.
7. С.Г. Барсов, С.И. Воробьев, В.П. Коптев, Е.Н. Комаров, С.А. Котов, Г.В. Щербаков. *Исследование спин-стекольной фазы в сплавах  $(Pd_{1-x}Fe_x)_{0,95}Mn_{0,05}$  и  $Cu_{(1-x)}Mn_x$  с помощью  $\mu SR$ -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.
8. С.Г. Барсов, С.И. Воробьев, В.П. Коптев, Е.Н. Комаров, С.А. Котов, Г.В. Щербаков. *Исследование спин-стекольной фазы в сплавах  $(Pd_{1-x}Fe_x)_{0,95}Mn_{0,05}$  и  $Cu_{(1-x)}Mn_x$  с помощью  $\mu SR$ -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.*
9. Барсов С.Г., Воробьев С.И., Комаров Е.Н., Коптев В.П., Котов С.А., Щербаков Г.В. *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.

*Спасибо за внимание!*