

# Индукцированная полем фаза Гриффитса в $Mn_{1-x}Fe_xSi$

Самарин А.Н.<sup>1,2</sup>, Junwei Huang<sup>3</sup>, J. Vanacken<sup>3</sup>, Демишев С.В.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Московский физико-технический институт, Россия

<sup>2</sup>Институт общей физики им. А.М.Прохорова РАН, Россия

<sup>3</sup>Левенский католический университет, Бельгия

JETP Letters **104**, 116 (2016)

arXiv:1605.05519 [cond-mat.str-el] (2016)

<http://arxiv.org/abs/1605.05519>



# Magnetization of the $\text{Mn}_{1-x}\text{Fe}_x\text{Si}$ in high magnetic field up to 50 T: possible evidence of a field-induced Griffiths phase<sup>1)</sup>

S. V. Demishev<sup>a, b 2)</sup>, A. N. Samarin<sup>a, c</sup>, J. Huang<sup>d</sup>, V. V. Glushkov<sup>a, c</sup>, I. I. Lobanova<sup>a, c</sup>, N. E. Sluchanko<sup>a, c</sup>,  
N. M. Chubova<sup>e</sup>, V. A. Dyadkin<sup>e, f</sup>, S. V. Grigoriev<sup>e, g</sup>, M. Yu. Kagan<sup>b, h</sup>, J. Vanacken<sup>d</sup>, V. V. Moshchalkov<sup>d</sup>

ISSN 0021-3640, JETP Letters, 2016, Vol. 104, No. 2, pp. 116–123. © Pleiades Publishing, Inc., 2016.

---

**CONDENSED  
MATTER**

---

## Magnetization of $\text{Mn}_{1-x}\text{Fe}_x\text{Si}$ in High Magnetic Fields up to 50 T: Possible Evidence of a Field-Induced Griffiths Phase<sup>1</sup>

S. V. Demishev<sup>a, b, \*</sup>, A. N. Samarin<sup>a, c</sup>, J. Huang<sup>d</sup>, V. V. Glushkov<sup>a, c</sup>, I. I. Lobanova<sup>a, c</sup>,  
N. E. Sluchanko<sup>a, c</sup>, N. M. Chubova<sup>e</sup>, V. A. Dyadkin<sup>e, f</sup>, S. V. Grigoriev<sup>e, g</sup>,  
M. Yu. Kagan<sup>b, h</sup>, J. Vanacken<sup>d</sup>, and V. V. Moshchalkov<sup>d</sup>

<sup>a</sup>Prokhorov General Physics Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, 119991 Russia

<sup>b</sup>National Research University Higher School of Economics, Moscow, 101000 Russia

<sup>c</sup>Moscow Institute of Physics and Technology (State University), Dolgoprudnyi, Moscow region, 141700 Russia

<sup>d</sup>Department of Physics and Astronomy, KU Leuven, B-3001 Leuven, Belgium

<sup>e</sup>Petersburg Nuclear Physics Institute, Gatchina, 188300 Russia

<sup>f</sup>Swiss–Norwegian Beamlines at the European Synchrotron Radiation Facility, 38000 Grenoble, France

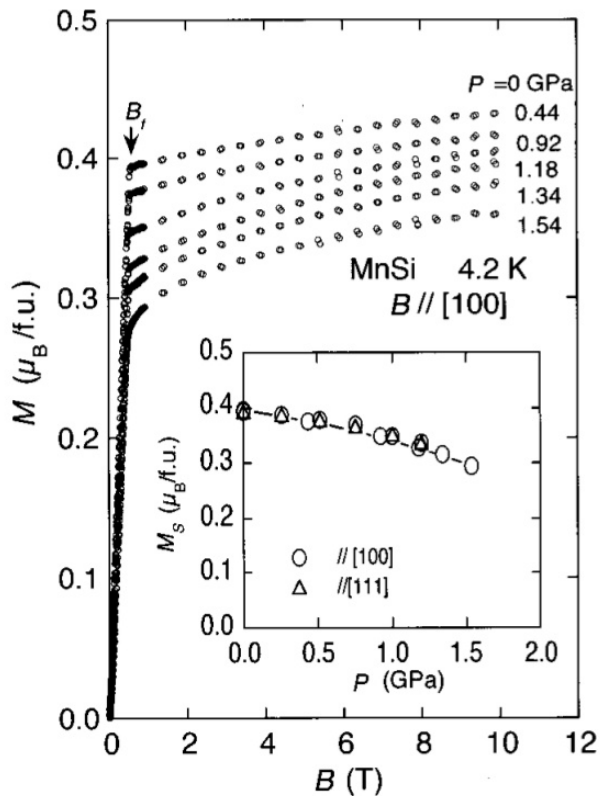
<sup>g</sup>St. Petersburg State University, St. Petersburg, 198504 Russia

<sup>h</sup>Kapitza Institute for Physical Problems, Russian Academy of Sciences, Moscow, 119334 Russia

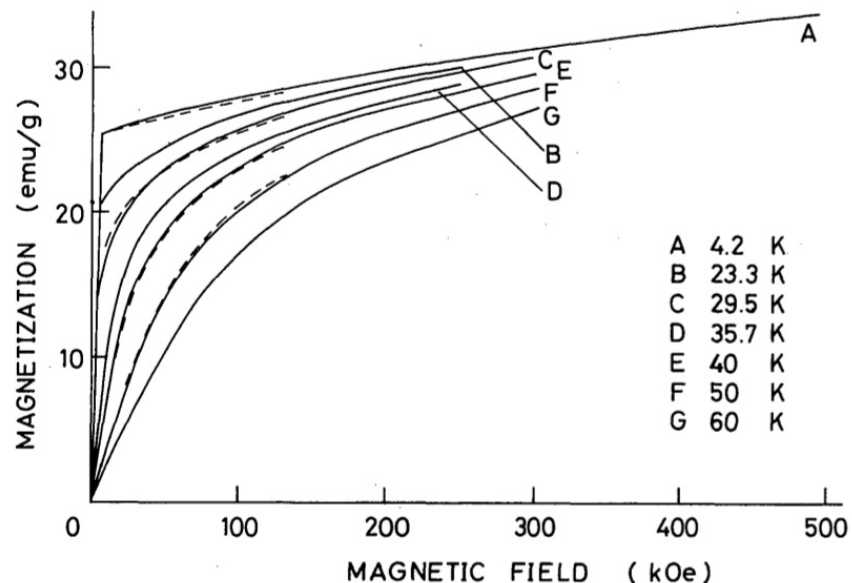
\* e-mail: demis@lt.gpi.ru

Received May 18, 2016; in final form, June 6, 2016

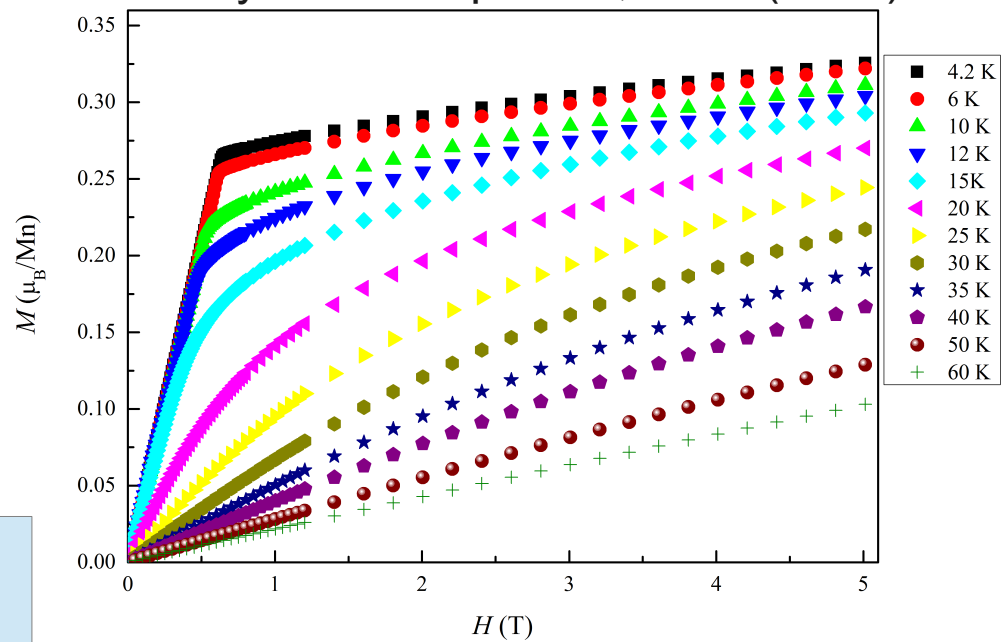




MnSi,  $M(B, P)$ ,  
Koyama et al, PRB **62**, 986 (2000)



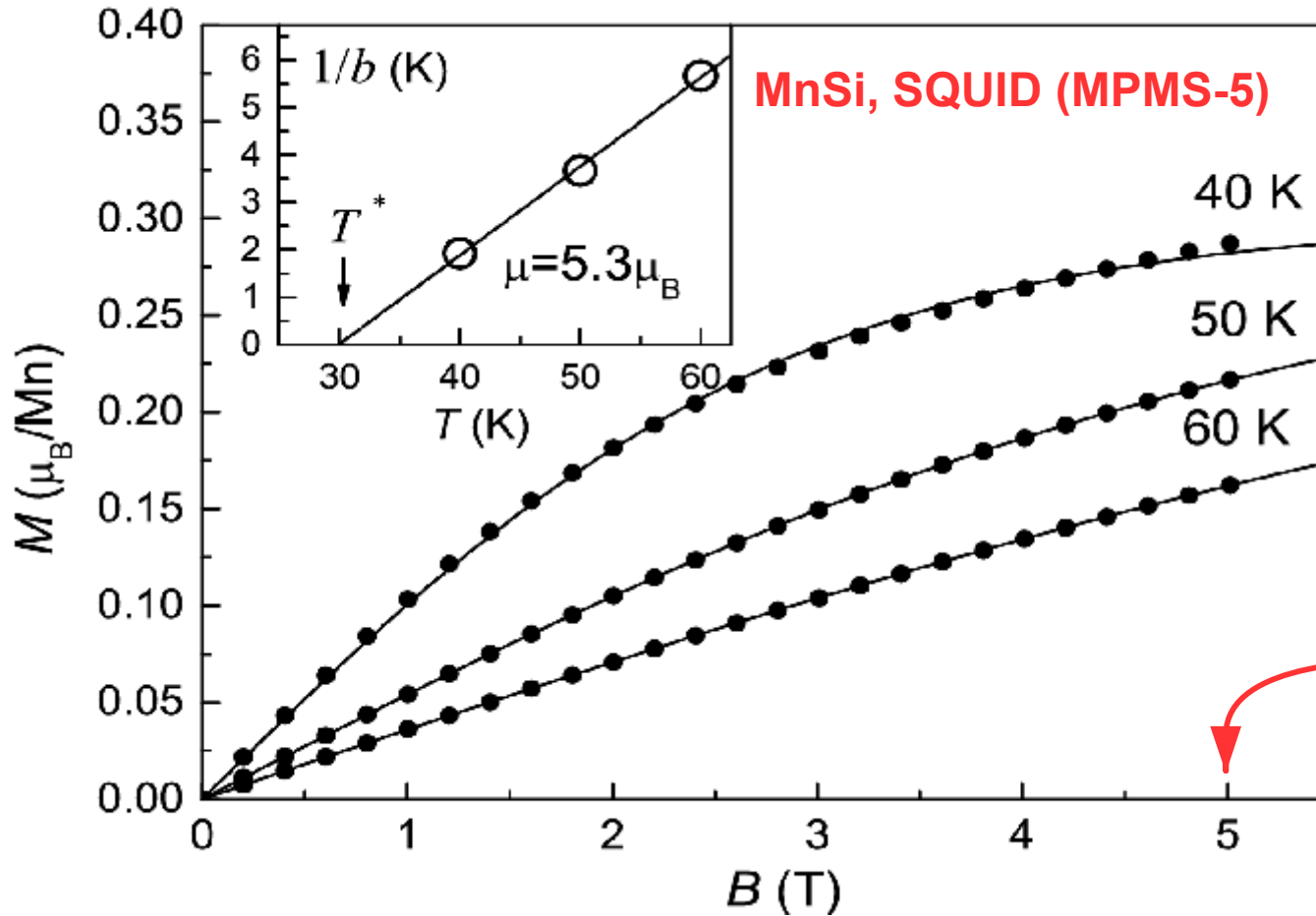
MnSi, Sakakibara et al,  
J. Phys. Soc. Japan **51**, 2439 (1982)



$M(H)$  Mn<sub>1-x</sub>Fe<sub>x</sub>Si при  $x = 0.054$

Проблема #1: нет насыщения





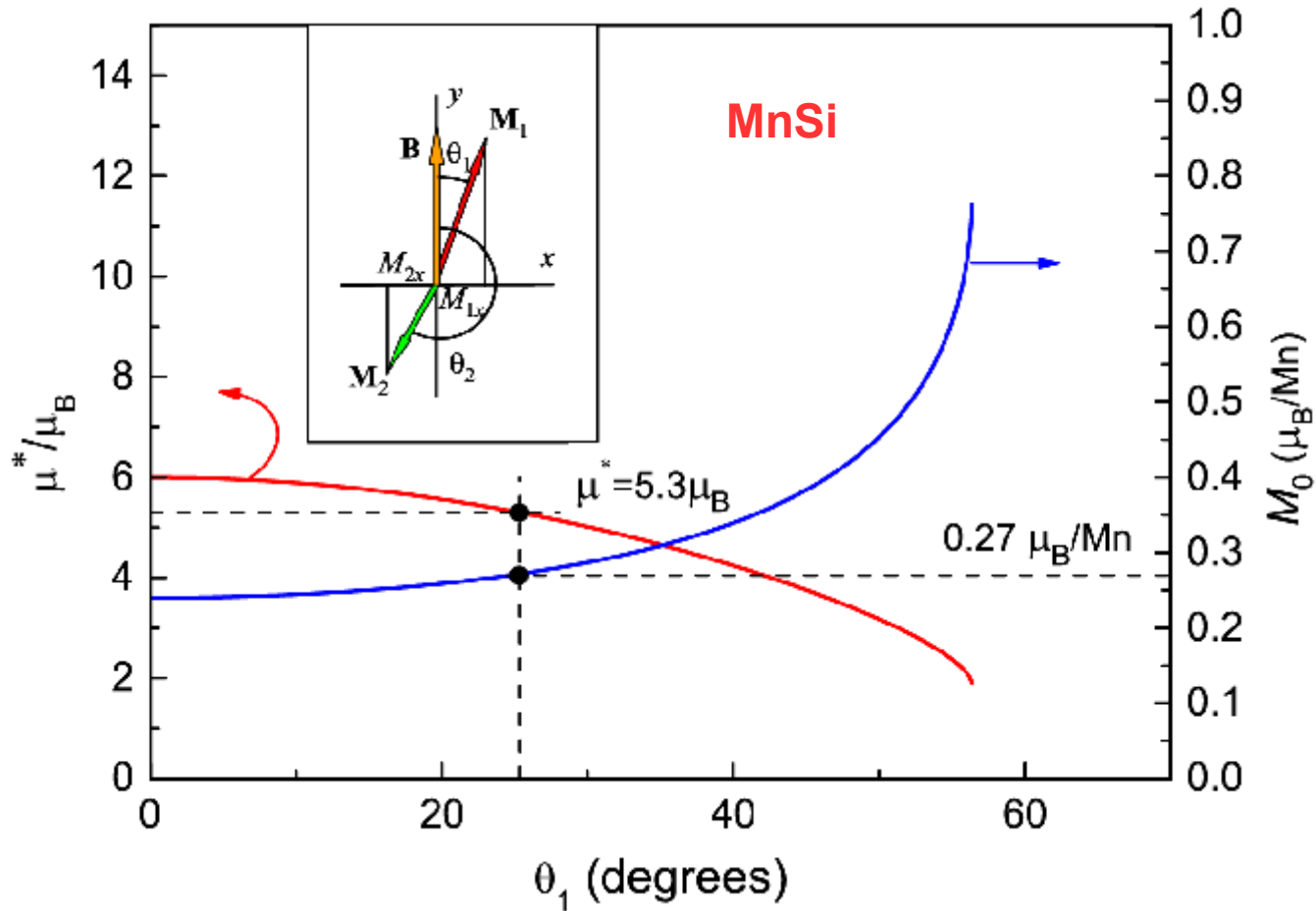
$$\varphi(x) = B_J(x) \quad M(B) = M_0 \varphi(\mu^* B / k_B (T - T^*))$$

**Проблема #2:**

$$M_0 \approx 0.3 \mu_B, \mu^* \approx 5.3 \mu_B \quad (J = 1/2, \varphi(x) = \text{th}(x))$$

$$M_0 \approx 0.4 \mu_B, \mu^* \approx 11.6 \mu_B \quad (J \rightarrow \infty, \varphi(x) = L(x))$$





$$\begin{cases} B_{loc1} = B + w_{11} M_1 + w_{12} M_2 \\ B_{loc2} = B + w_{21} M_1 + w_{22} M_2 \end{cases} \quad w_{12} = w_{21} \quad w_{12} (M_{1y} + M_{2y}) + B = 0$$

$$M_{1,2} = M_{10,20} \varphi(\mu_{1,2} B_{loc1,2} / k_B T)$$

$$\begin{cases} \varphi(x \rightarrow 0) = \beta x \\ \varphi(x \rightarrow \infty) = 1 \\ \partial \varphi / \partial x > 0 \end{cases}$$

Demishev *et al*,  
Low Temp. Phys. **41**, 1243  
(2015)



### Измерительная установка

Измерения производились на установке импульсных магнитных полей [1] Левенского католического университета (Бельгия).

Вставка помещена в проточный гелиевый криостат. Во внешнем (азотном) объеме криостата – электромагнит. Работа идет в импульсном режиме: после зарядки массива конденсаторов (запас энергии до 2 МДж) и охлаждения магнита конденсаторы замыкаются на магнит.

Максимальное поле – **50 Тл**.

Время подготовки (охлаждение магнита)

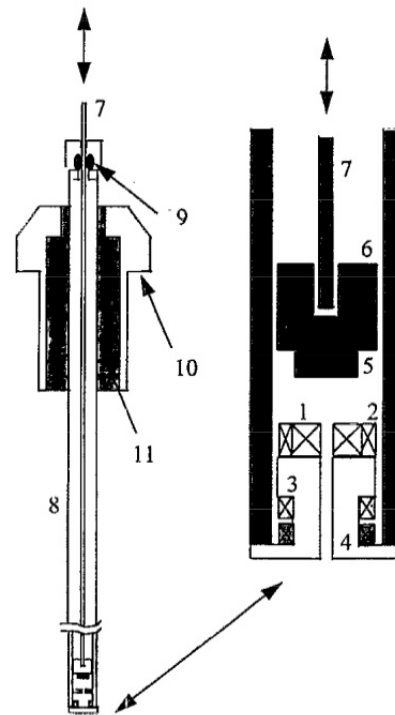
– ок. **2 ч**.

Время измерений – **0.1 с**.

[1] J.Vanacken *et al.*,

J. Low Temp. Phys. **170**, 553–561 (2013)

### Конструкция вставки



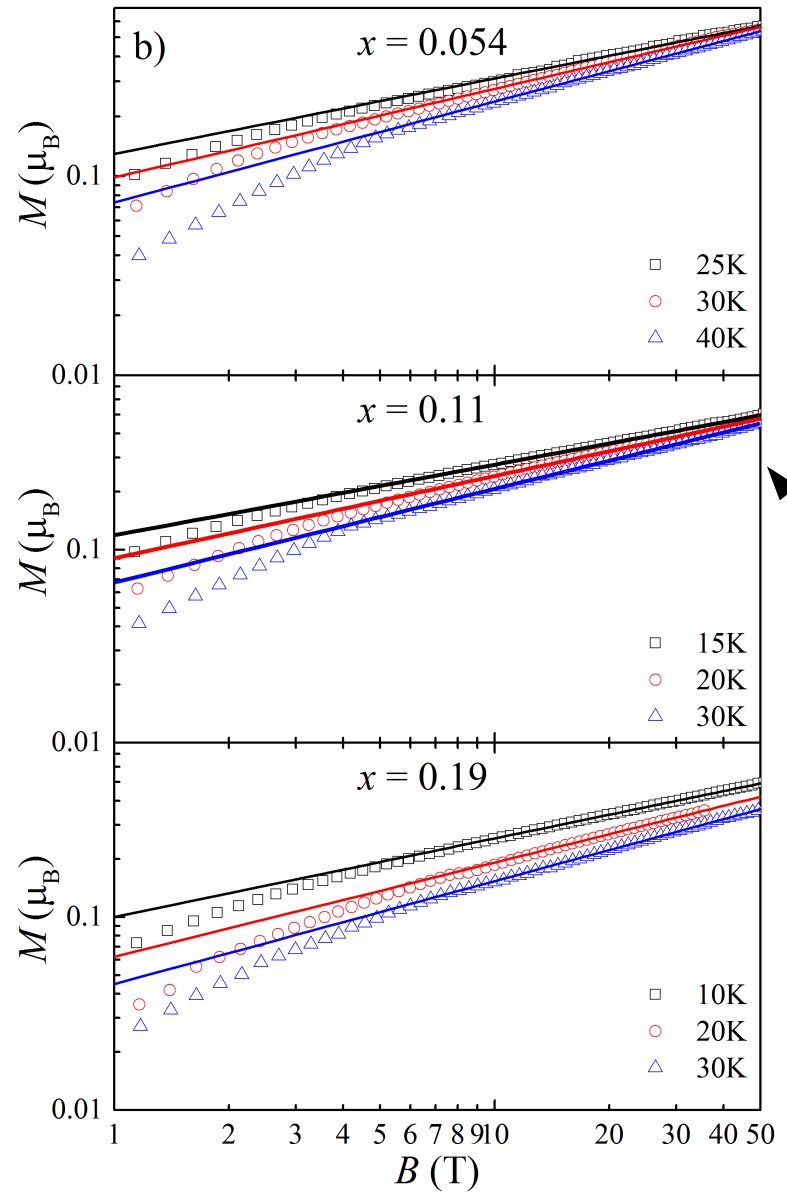
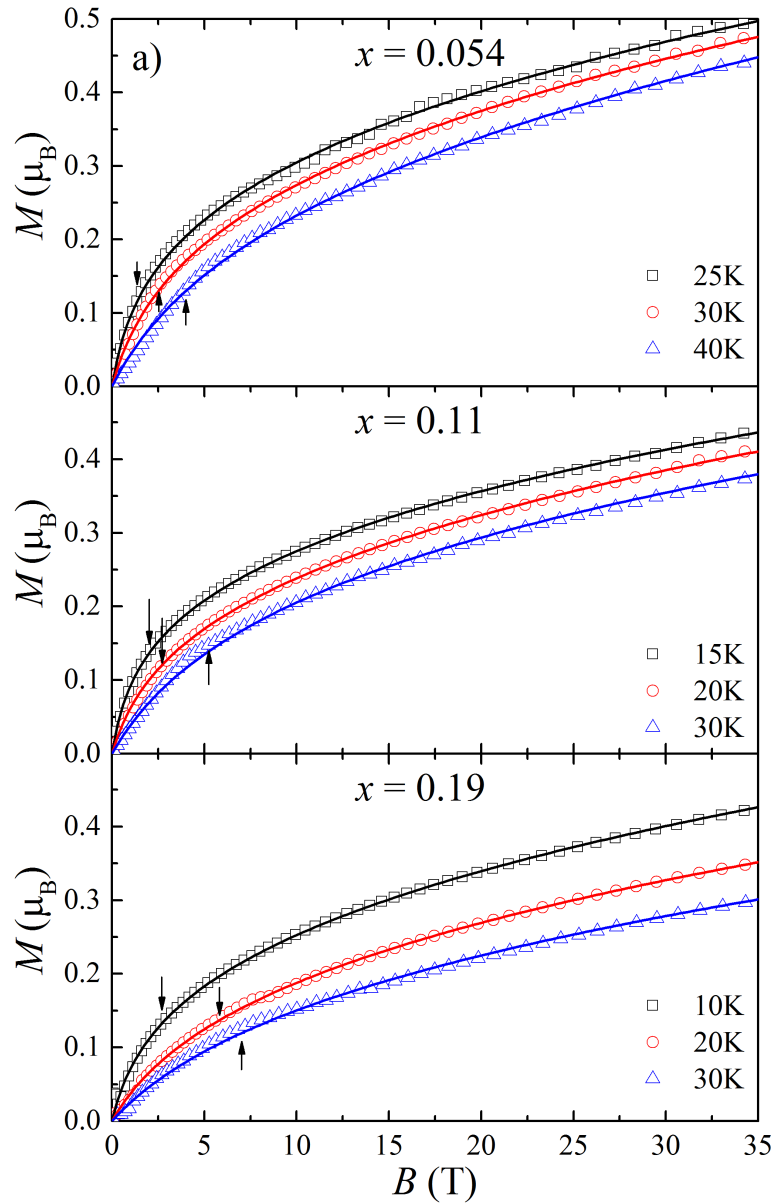
- 1 – измерительная катушка
- 2 – компенсационная катушка
- 3 – катушка датчика поля
- 4 – вспомог. компенс. катушка
- 5 – образец
- 6 – держатель образца
- 7 – кварцевый стержень
- 8 – кварцевая трубка
- 9 – уплотнительное кольцо
- 10 – виброизоляция

Измеряются напряжения на катушках 1 и 3:  
дискретизация **1-2 мкс**, ~**128 тыс.** точек.

A.S. Lagutin *et al.*,  
Rev. Sci. Instrum. **66**, 4267 (1995)

MnSi – магнитокалорический эффект → Mn<sub>1-x</sub>Fe<sub>x</sub>Si





Насыщения в поле **50 Тл** нет!  
Зависимость – степенная.



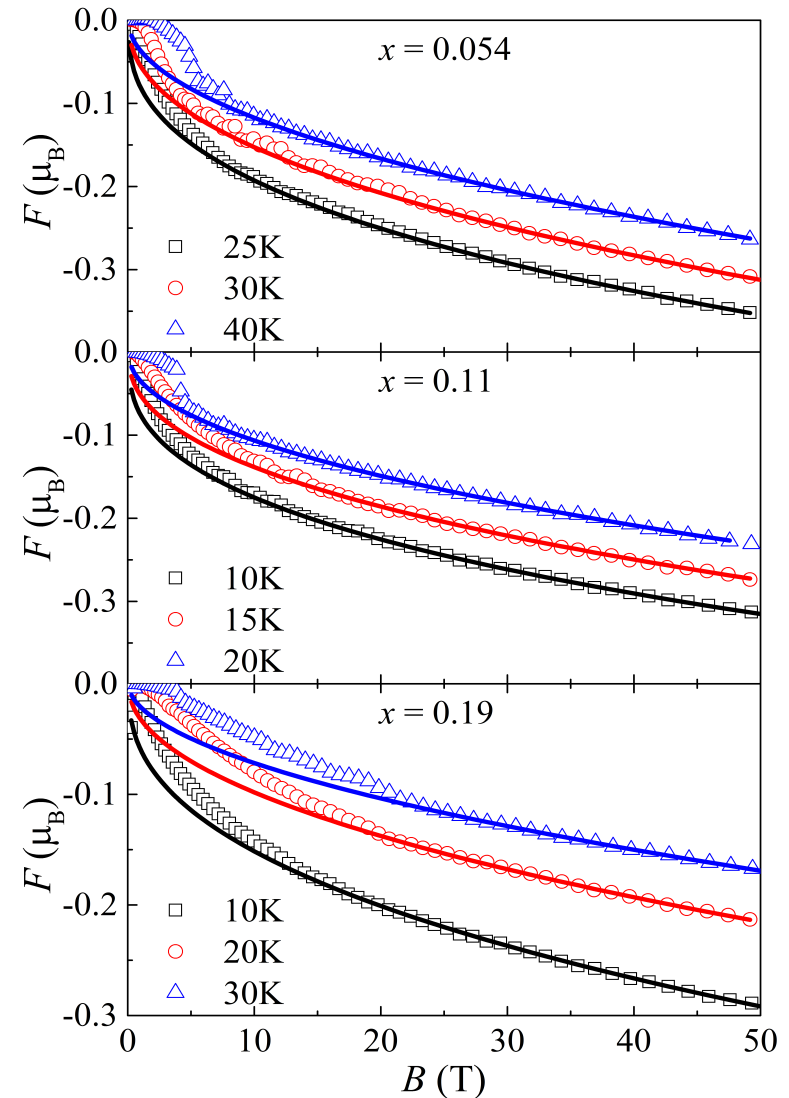
Предположение:  $M(B) = M_0 \varphi(B) + \chi_c B$

$B \rightarrow \infty$ :  $\varphi(B) \rightarrow 1, \varphi'(B) \rightarrow 0$   
 $B \rightarrow 0$ :  $\varphi(B) = \chi_0 B$

$$F(B) = B^2 \cdot \frac{\partial(M/B)}{\partial B} = B \cdot M'(B) - M(B)$$

$M(B) = \varphi(B), B \rightarrow \infty$ :  $F(B) \rightarrow -1$   
 $M(B) = B^\alpha$ :  $F(B) = (\alpha - 1)B^\alpha$

- 1) кривые  $F(B)$  не выходят на насыщение и
- 2) степенная зависимость  $B^\alpha$  в сильном поле сохраняется.



**Вывод: линейного вклада в намагниченность нет**





Для описания перехода от линейной кюри-вейсовской зависимости  $M \sim B$  в слабом поле к степенной зависимости  $M \sim B^\alpha$  в сильном поле предложена следующая интерполяционная формула:

$$M(B) = \frac{C}{T - \theta} \cdot \frac{B}{[B/B_c + 1]^{1-\alpha}}$$

где  $B_c$  – поле перехода между асимптотиками,  $C$  и  $\theta$  получены из анализа намагниченности в слабом поле,  $B_c$  и  $\alpha$  – параметры аппроксимации.

При  $B \ll B_c$  формула дает закон Кюри-Вейсса

$$M(B) = C / (T - \theta).$$

При  $B \gg B_c$  формула дает степенной закон

$$M(B) = C B^\alpha B_c^{1-\alpha} / (T - \theta) = A(T) B^\alpha.$$

R. B.Griffiths, Phys. Rev. Lett. **23**, 17 (1969)

A. J. Bray, Phys. Rev. Lett. **59**, 586 (1987)

S. V. Demishev, Phys. Status Solidi B **247**, 676 (2010)

C. Dasgupta and S. Ma, Phys. Rev. B **22**, 1305 (1985)

( $0.2 < \alpha < 0.6$ )

D. S. Fisher, Phys. Rev. Lett. **69**, 534 (1992)

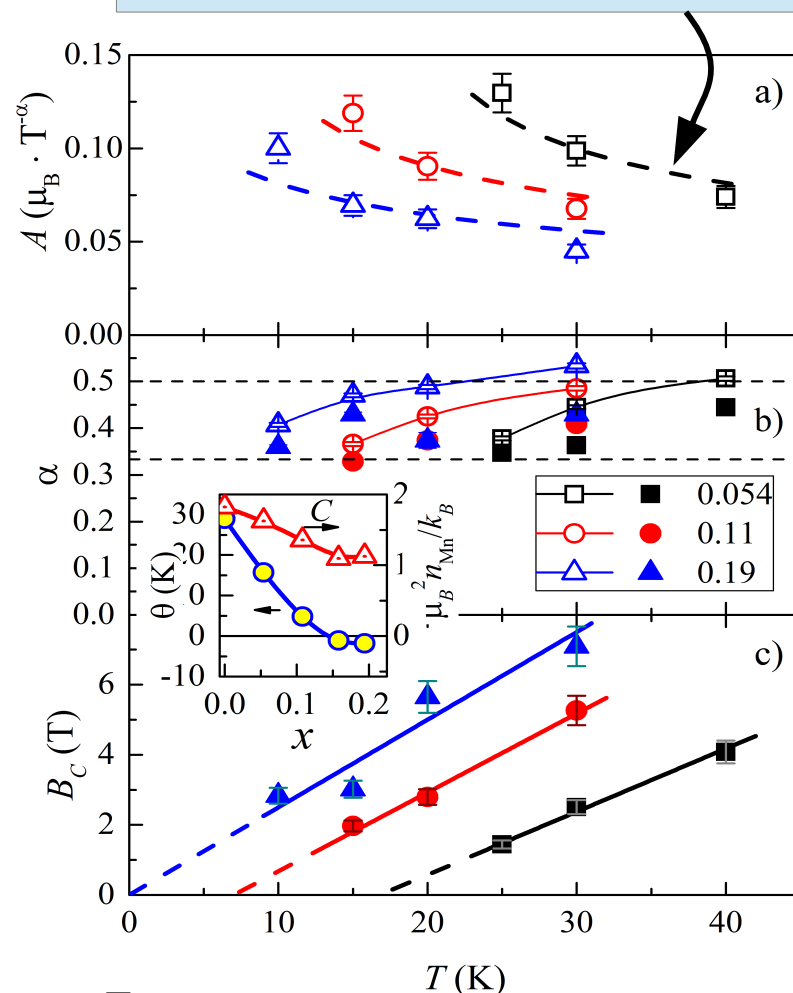
D. S. Fisher, Phys. Rev. B **51**, 6411 (1995)

( $1/3 < \alpha < 1/2$ )

Bulaevskii et al, Sov. Phys. JETP **35**, 384 (1972)

$$M(B) \sim B \quad \rightarrow \quad M(B) \sim B^\alpha$$

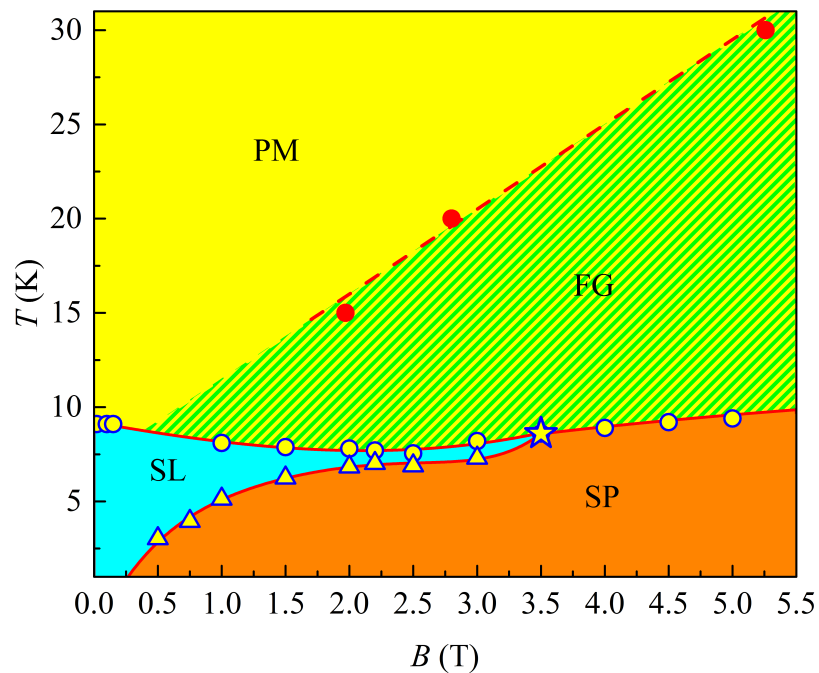
$$M(B) = A(T) B^\alpha, \quad \langle \alpha \rangle = 0.38 \pm 0.04$$



Пустые символы – аппроксимация в сильных полях ( $A$  – своб. параметр), сплошные – аппроксимация всей кривой.



$$x = 0.11$$



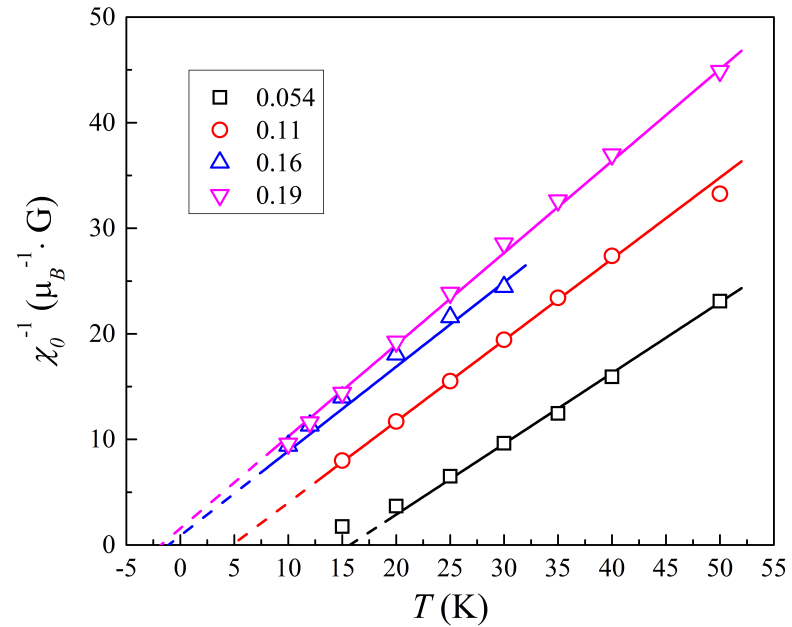
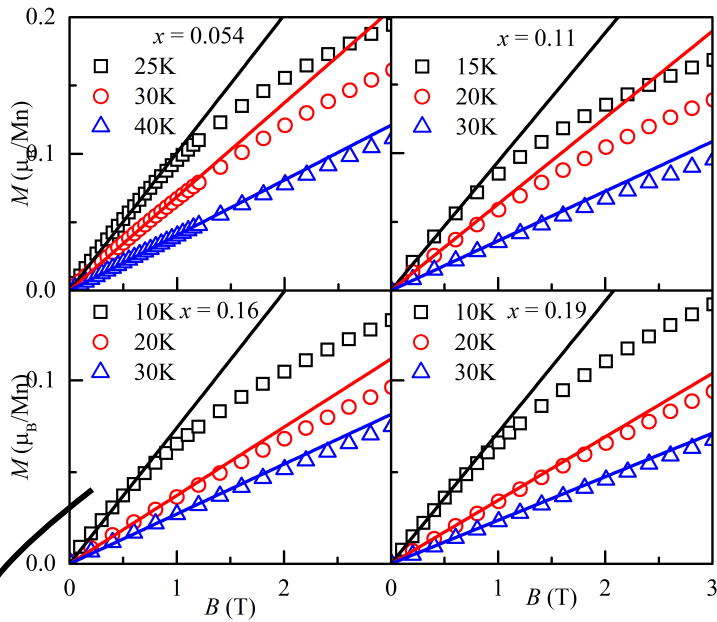
Поле  $B_c$  растет практически линейно с температурой, причем экстраполяция к  $B = 0$  дает температуру близкую к температуре Кюри. Предполагается, что при  $B > B_c$  формируется новая магнитная фаза и параметр  $B_c$  связан с амплитудой спиновых флуктуаций. При  $B < B_c$  в  $\text{Mn}_{1-x}\text{Fe}_x\text{Si}$  спиновые флуктуации сильны и система находится в ПМ фазе. При  $B > B_c$  магнитное поле ослабляет спиновые флуктуации и возникает фаза Гриффитса, которая характеризуется степенной зависимостью  $M(B)$ .

PM — парамагнитная фаза,  
 SL — спиновая жидкость,  
 SP — спин-поляризованная,  
 FG — индуцированная полем фаза Гриффитса.

S.V. Demishev *et al.*, JETP Letters **103**, 365 – 371 (2016)

Работа поддержана программами РАН «Электронный спиновый резонанс, спин-зависимые электронные эффекты и спиновые технологии» и «Электронные корреляции в системах с сильным взаимодействием».





$$C = n_{Mn} \mu_{Mn}^2 / k_B$$

$$n_e / n_{Mn} < (\mu_{Mn} / \mu_e)^2$$

$$\mu_{Mn} = (1.1 - 1.3) \mu_B$$

$$\mu_{Mn} = 1.2 \mu_B$$

Спин-поляронная модель MnSi,  
Demishev *et al*,  
Low Temp. Phys. **41**, 1243 (2015)

$$n_e / n_{Mn} = 0.9$$

Hall effect,  
Glushkov *et al*, PRL **115**, 256601  
(2015)

LDA,  
Corti *et al*, PRB **75**, 115111 (2007)

