





# ФКС - 2014

## Тайна парамагнитной фазы твердых растворов $Mn_{1-x}Fe_xSi$

***С.В.Демишев<sup>1</sup>, И.И.Лобанова<sup>1,2</sup>, С.В.Григорьев<sup>3</sup>***

*<sup>1</sup> Институт общей физики им. А.М.Прохорова РАН*

*<sup>2</sup> Московский физико-технический институт*

*<sup>3</sup> Петербургский институт ядерной физики им. Б.П.Константинова*



IOF РАН



ISSN 0021-3640, JETP Letters, 2011, Vol. 93, No. 4, pp. 213–218. © Pleiades Publishing, Inc., 2011.  
Original Russian Text © S.V. Demishev, A.V. Semeno, A.V. Bogach, V.V. Glushkov, N.E. Sluchanko, N.A. Samarin, A.L. Chernobrovkin  
Experimental'noi i Teoreticheskoi Fiziki, 2011, Vol. 93, No. 4, pp. 231–237.

**2011**  
JETP Letters, **93(4)**

**2012**  
PRB, **85**, 045131

## Is MnSi an Itinerant-Electron Magnet? Results of ESR Experiments

S. V. Demishev\*, A. V. Semeno, A. V. Bogach, V. V. Glushkov, N. E. Sluchanko,  
N. A. Samarin, and A. L. Chernobrovkin

A.M. Prokhorov General Physics Institute, Russian Academy of Sciences, ul. Vavilova 38, Moscow, 119991 Russia

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

Received October 15, 2010; in final form, January 20, 2011

PHYSICAL REVIEW B 85, 045131 (2012)

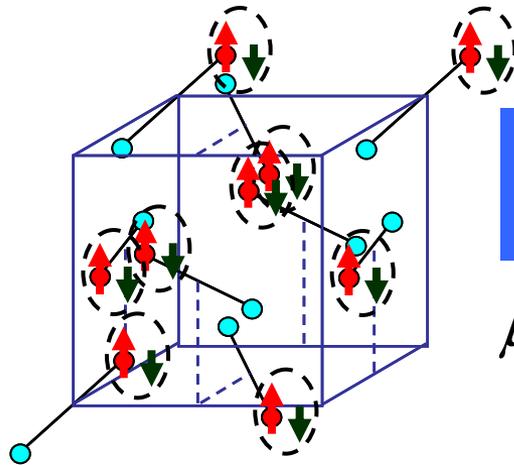


## Magnetic phase diagram of MnSi in the high-field region

S. V. Demishev,\* V. V. Glushkov, I. I. Lobanova,† M. A. Anisimov, V. Yu. Ivanov, T. V. Ishchenko, M. S. Karasev,  
N. A. Samarin, N. E. Sluchanko, V. M. Zimin, and A. V. Semeno

A. M. Prokhorov General Physics Institute of the RAS, 38 Vavilov Street, 119991 Moscow, Russia

(Received 26 December 2011; published 30 January 2012)



● Mn  
● Si

Спиновый полярон малого радиуса  
в MnSi (квазисвязанное состояние  
ЛЛМ марганца и зонного электрона)

$$\mu^* \sim 0.4\mu_B$$

Спиновый полярон =  
феррон

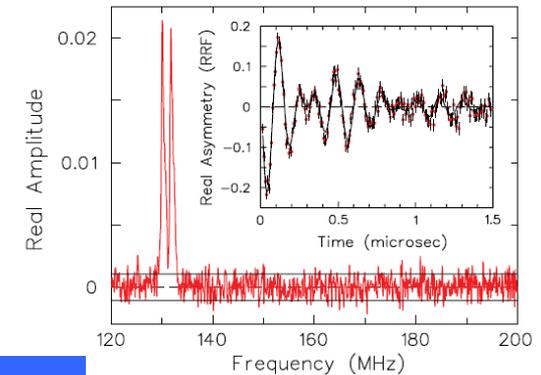


$$\mu^* \sim 24\mu_B$$

PHYSICAL REVIEW B 83, 140404(R) (2011)

## Electron localization into spin-polaron state in MnSi

Vyacheslav G. Storchak,<sup>1,\*</sup> Jess H. Brewer,<sup>2</sup> Roger L. Lichti,<sup>3</sup> Thomas A. Lograsso,<sup>4</sup> and Deborah L. Schlage<sup>4</sup>



**Магнитные кластеры?**



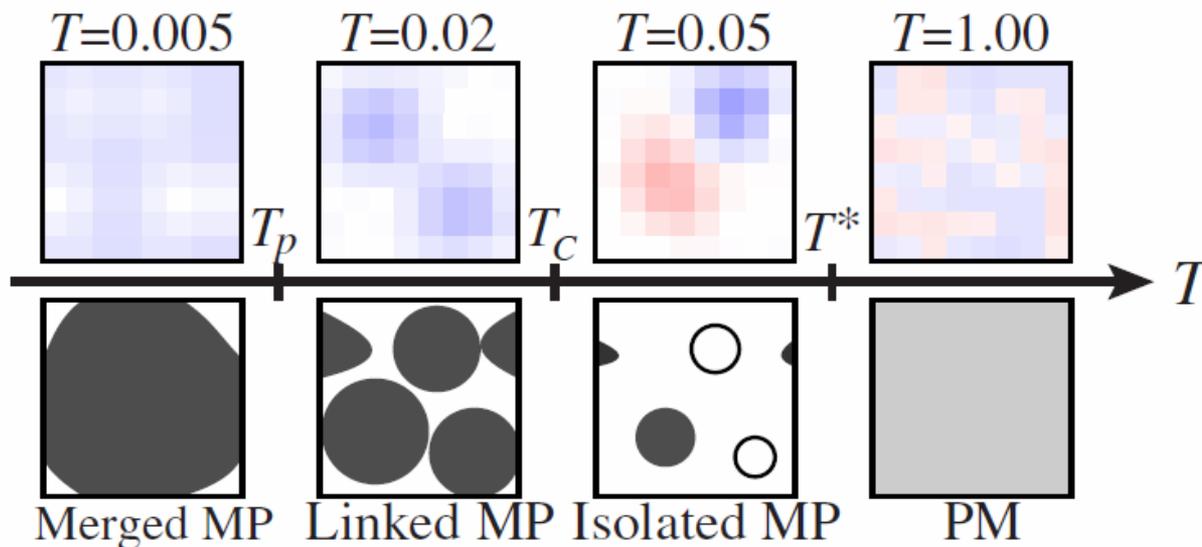
PHYSICAL REVIEW B 74, 094413 (2006)

## Magnetic-phase transition in the magnetic-polaron system studied with the Monte Carlo method: Anomalous specific heat of $\text{EuB}_6$

Unjong Yu and B. I. Min

$$H = -t \sum_{\langle i,j \rangle \sigma} (c_{i\sigma}^\dagger c_{j\sigma} + \text{H.c.}) - J_H \sum_i \vec{\sigma}_i \cdot \vec{S}_i,$$

Модель Кондо-решетки



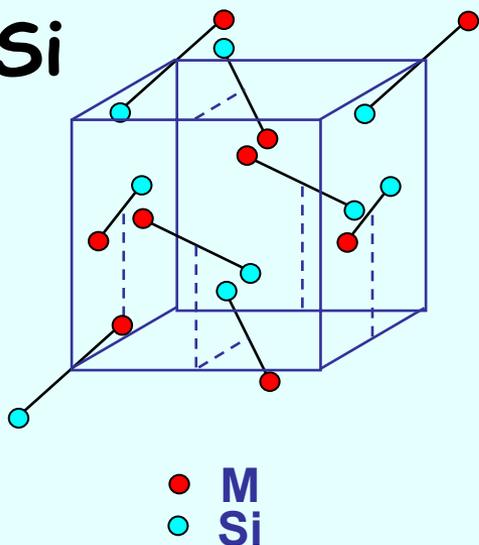
Магнитные фазы сконструированные из спиновых поляронов

Две промежуточные магнитные фазы

Перколяционные эффекты



## $MSi$

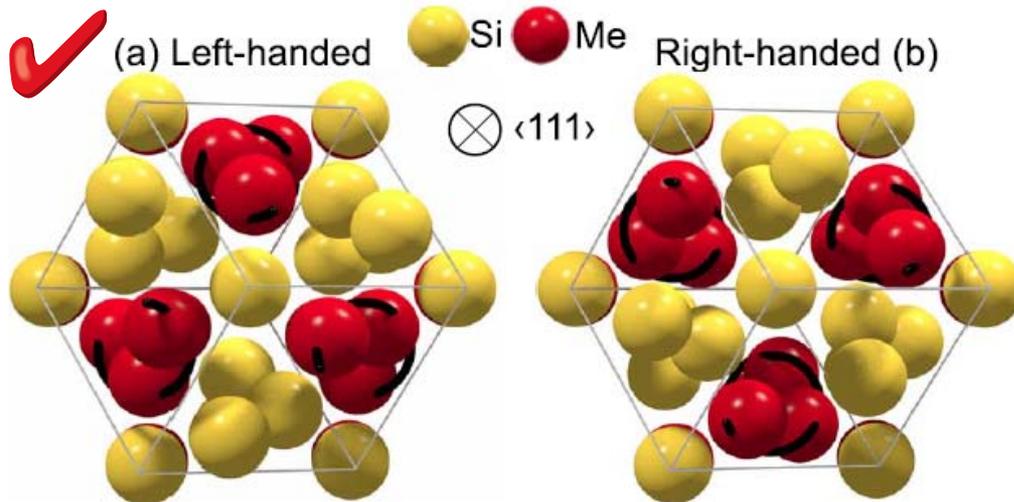


Структура типа B20  
( $T^4-P2_13$ )

4 атома M в элементарной ячейке с кристаллографическими координатами

$(x,x,x)$   $(1/2+x, 1/2-x, -x)$   
 $(1/2-x, -x, 1/2+x)$   $(-x, 1/2+x, 1/2-x)$   
+ 4 атома Si в эквивалентных позициях

## Структура $Mn_{1-x}Fe_xSi$



$x(Mn)=0.137$   
 $x(Si)=0.845$   
 $a=0.45655(8)$  nm

$x(Mn)=0.863$   
 $x(Si)=0.155$   
 $a=0.45642(8)$  nm

PHYSICAL REVIEW B **81**, 012408 (2010)

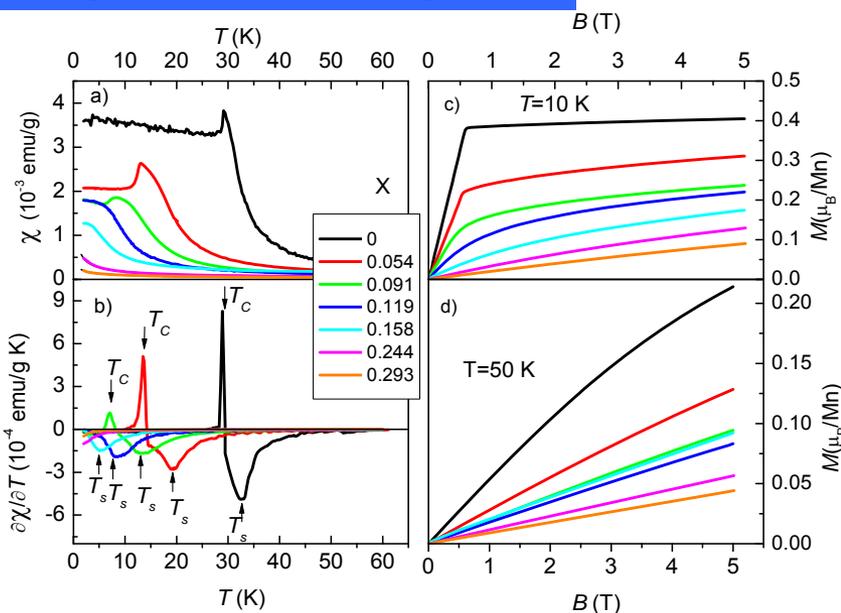
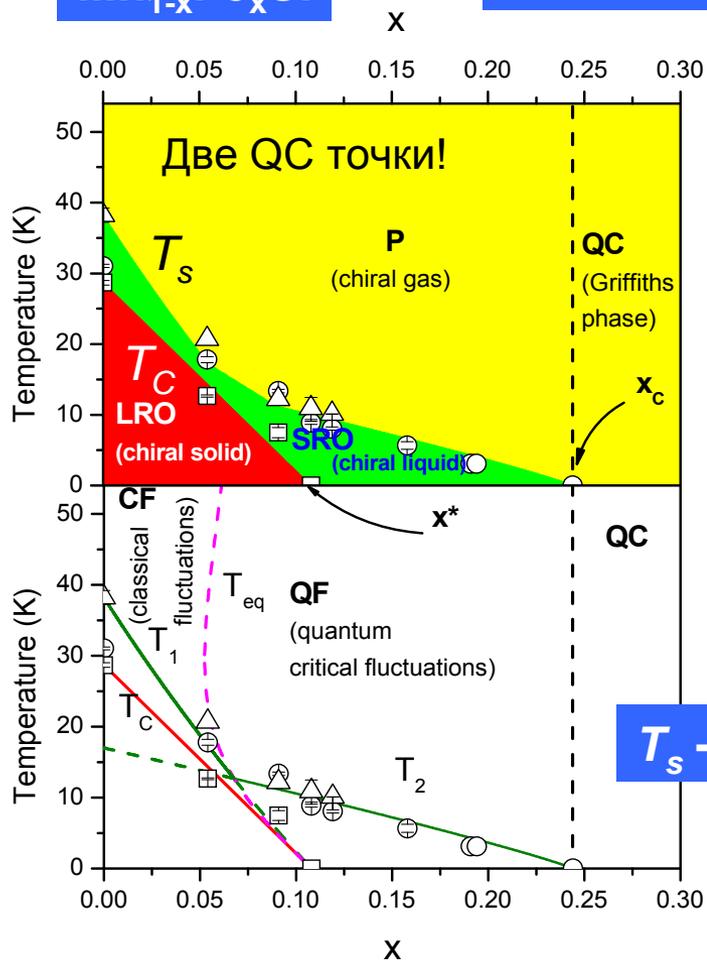
S. V. Grigoriev,<sup>1</sup> D. Chernyshov,<sup>2,3</sup> V. A. Dyadkin,<sup>1</sup> V. Dmitriev,<sup>2</sup> E. V. Moskvina,<sup>1</sup> D. Lamago,<sup>4</sup> Th. Wolf,<sup>5</sup> D. Menzel,<sup>6</sup> J. Schoenes,<sup>6</sup> S. V. Maleyev,<sup>1</sup> and H. Eckerlebe<sup>7</sup>

<sup>1</sup>Petersburg Nuclear Physics Institute, Gatchina, 188300 St. Petersburg, Russia



## Mn<sub>1-x</sub>Fe<sub>x</sub>Si

## Где находится парамагнитная фаза?



## Две характерные температуры $T_s$ и $T_c$

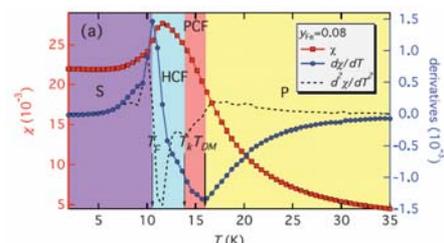
## $T_s$ – кроссовер или истинный фазовый переход?

Pis'ma v ZhETF, vol. 98, iss. 12, pp. 933–937

© 2013 December 25

### Quantum bicriticality in Mn<sub>1-x</sub>Fe<sub>x</sub>Si solid solutions: exchange and percolation effects

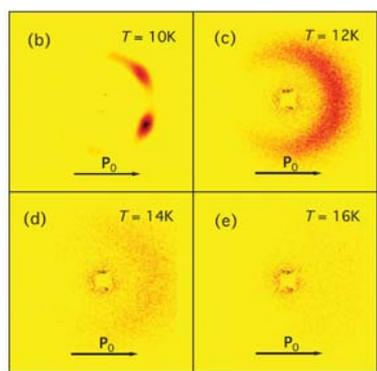
S. V. Demishev<sup>1,3</sup>, I. I. Lobanova<sup>2\*</sup>, V. V. Glushkov<sup>2\*</sup>, T. V. Ischenko<sup>2</sup>, N. E. Sluchanko<sup>2</sup>, V. A. Dyadkin, N. M. Potapova, S. V. Grigoriev

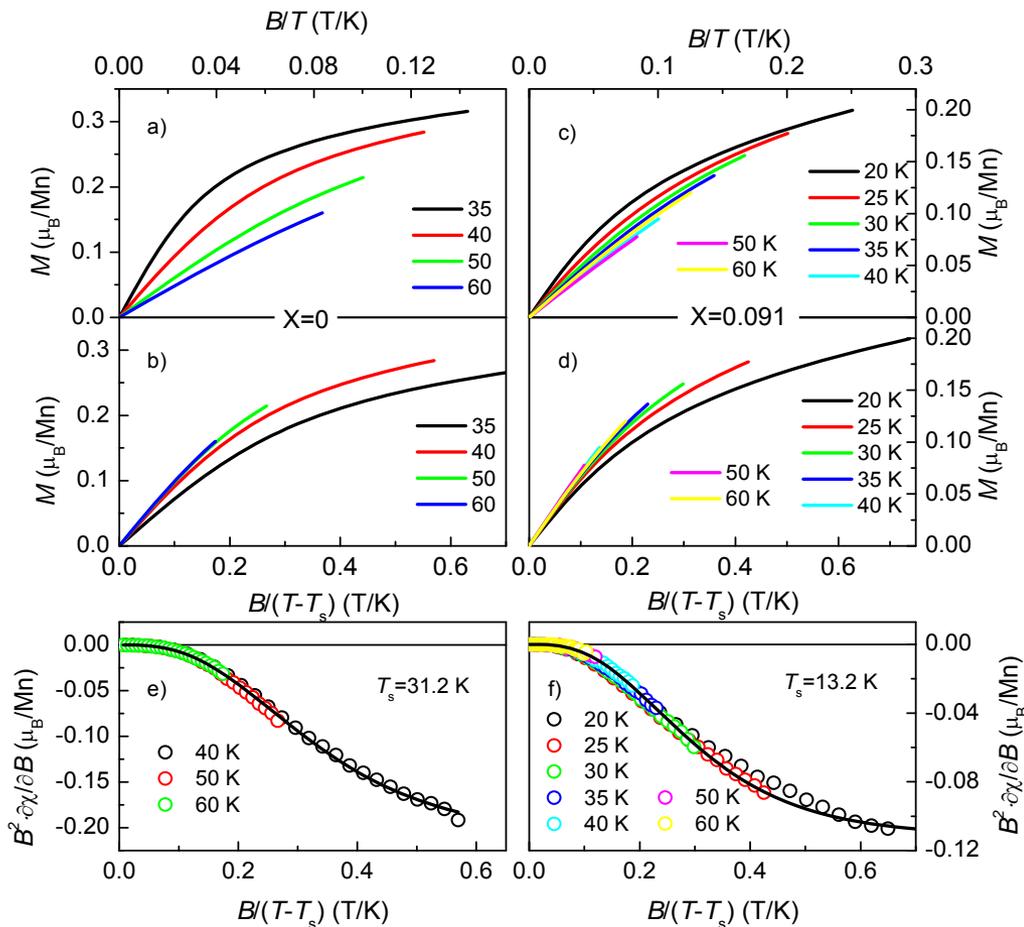


PHYSICAL REVIEW B 83, 224411 (2011)

### Chiral criticality in the doped helimagnets Mn<sub>1-y</sub>Fe<sub>y</sub>Si

Sergey V. Grigoriev,<sup>1</sup> Evgeny V. Moskvina,<sup>1</sup> Vadim A. Dyadkin,<sup>1</sup> Daniel Lamago,<sup>2,3</sup> Thomas Wolf,<sup>3</sup> Helmut Eckerlebe,<sup>4</sup> and Sergey V. Malayev<sup>1</sup>





Существует ли скейлинг намагниченности в парамагнитной фазе?

$$\xi_r = \frac{B}{T}; \quad \xi = \frac{B}{T - T_s}; \quad \xi = \frac{B}{T - T_C}$$

Выбор скейлинговой переменной

Предположение о структуре намагниченности

$$M(B, T) = M_0 \varphi(\xi) + A(T) \cdot B$$

Скейлинговое преобразование

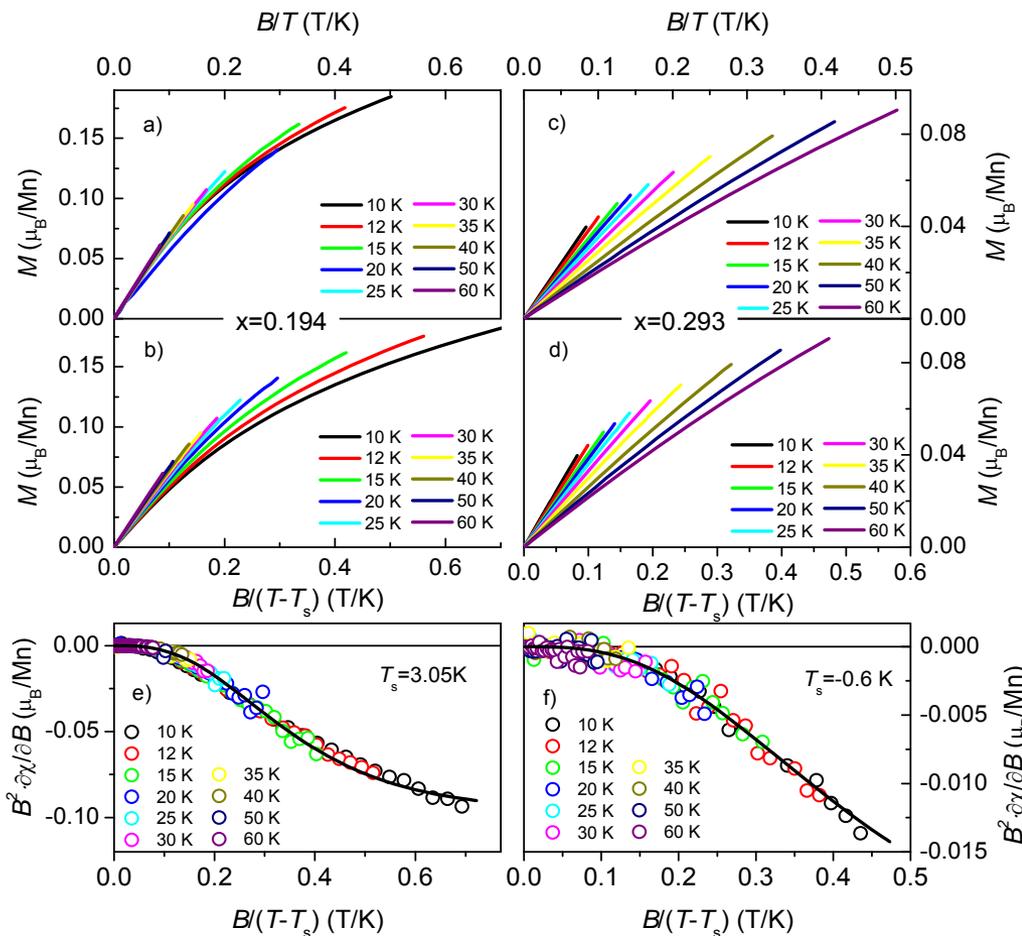
$$\chi = M(B, T) / B$$

$$B^2 \frac{\partial \chi}{\partial B} \equiv B \frac{\partial M}{\partial B} - M = F(\xi).$$

$$F(\xi) = \xi \varphi'(\xi) - \varphi(\xi)$$

$$\varphi(\xi) = \tanh\left(\frac{\mu^* B}{k_B(T - T_s)}\right) \quad F(\xi) = M_0 \left( -\tanh(\xi) + \frac{\xi}{\cosh^2(\xi)} \right)$$

Модельный вид скейлинговой функции



Существует ли скейлинг намагниченности в парамагнитной фазе?

$$\xi = \frac{B}{T}; \quad \xi = \frac{B}{T - T_s}; \quad \xi = \frac{B}{T - T_C}$$

Выбор скейлинговой переменной

Предположение о структуре намагниченности

$$M(B, T) = M_0 \varphi(\xi) + A(T) \cdot B$$

Скейлинговое преобразование

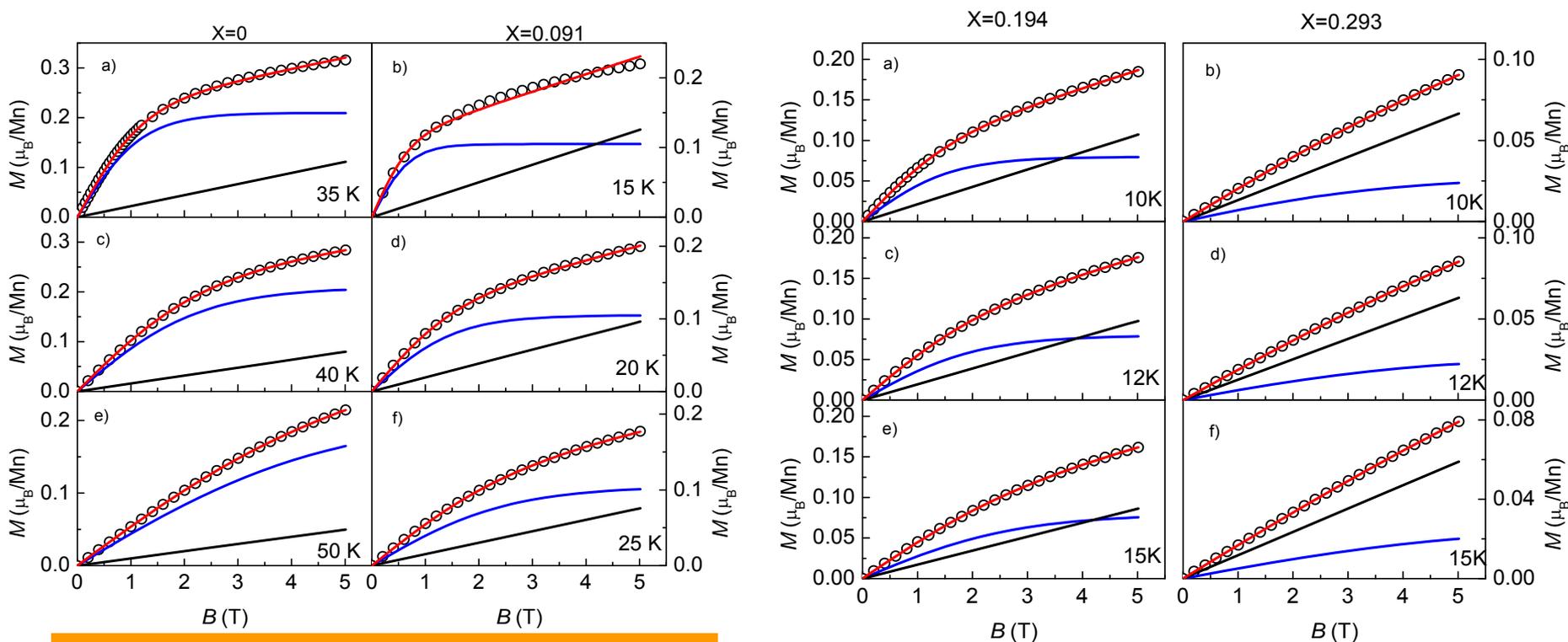
$$\chi = M(B, T) / B$$

$$B^2 \frac{\partial \chi}{\partial B} \equiv B \frac{\partial M}{\partial B} - M = F(\xi).$$

$$F(\xi) = \xi \varphi'(\xi) - \varphi(\xi)$$

$$\varphi(\xi) = \tanh\left(\frac{\mu^* B}{k_B(T - T_s)}\right) \quad F(\xi) = M_0 \left( -\tanh(\xi) + \frac{\xi}{\cosh^2(\xi)} \right)$$

Модельный вид скейлинговой функции



## Два вклада в намагниченность

$$M(B, T = const) = M_0 \tanh(m \cdot B) + A \cdot B \implies m(T) \sim \frac{1}{T - T_s}; \quad A(T) - ?$$

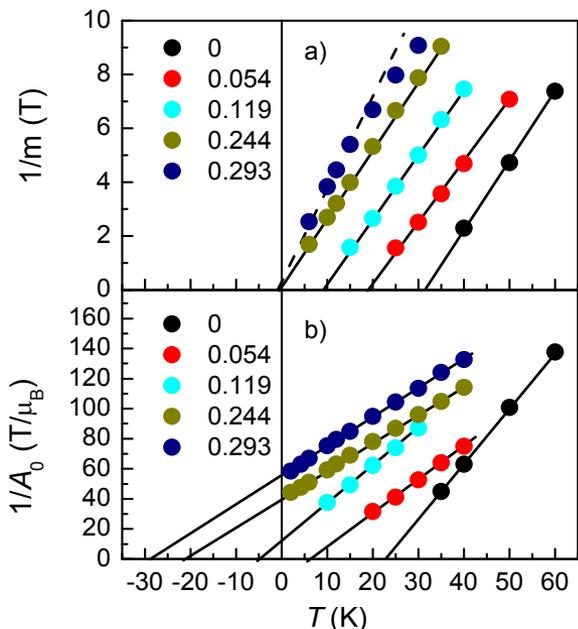
Хорошее описание полевых зависимостей намагниченности

Амплитуды линейного и насыщающегося по скейлинговой переменной вкладов сравнимы!



## Температурные зависимости коэффициентов

$$M(B, T = const) = M_0 \tanh(m \cdot B) + A \cdot B$$



$$A(T) = \frac{a_0}{T - T^*} \Rightarrow T^* a_0$$

$$m(T) \Rightarrow T_s, \mu^*$$

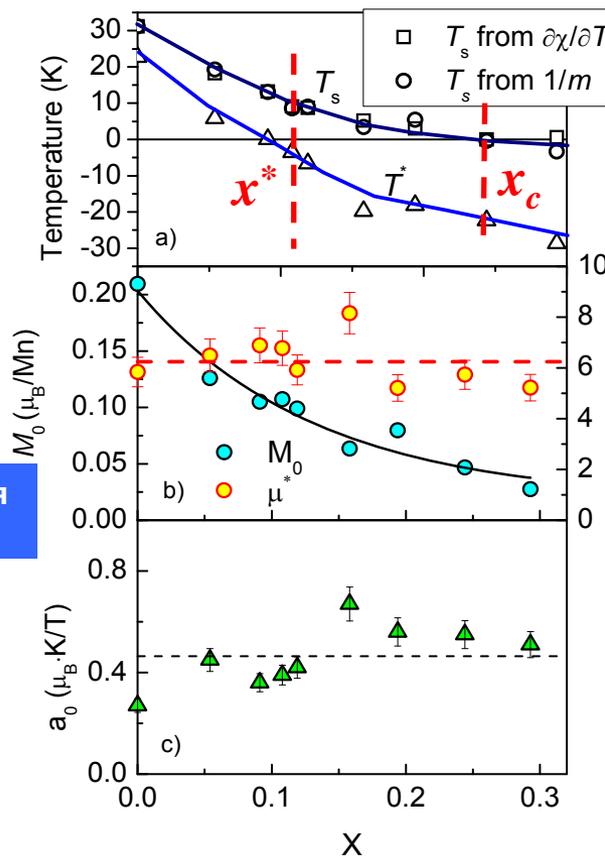
Новая характерная температура  $T^*$

Независимая оценка  $T_s$  и оценка эффективного магнитного момента

## Аналитическая аппроксимация намагниченности в парамагнитной фазе ( $T < 60$ К, $B < 5$ Тл)

$$M(B, T) = M_0 \tanh\left(\frac{\mu^* B}{k_B(T - T_s)}\right) + \frac{a_0}{T - T^*} B$$

Корректность процедуры разделения вкладов (значения  $T_s$  совпадают)



Особенности  $T_s$  и  $T^*$  в окрестности квантовых критических точек. Магнитные взаимодействия двух различных типов.

$$\mu^* \sim 6\mu_B$$

$M_0$  убывает более чем в 4 раза при изменении  $x$  от 0 до 0.3.

При этом  $\mu^*(x) \approx const$  и  $a_0(x) \approx const$ .



Закон Кюри-Вейсса у  $Mn_{1-x}Fe_xSi$  не выполняется ( $T < 60$  K).

Мы НЕ ЗНАЕМ, чему равен локализованный магнитный момент Mn.

«Визуализация» скрытой квантовой критической точки  $x^*$ .

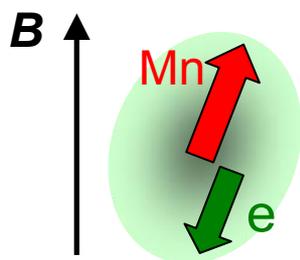
Структуру намагниченности можно объяснить в спин-поляронной модели...

При  $T_s$  действительно происходит фазовый переход (сингулярность знаменателя  $\varphi(\xi)$ ).

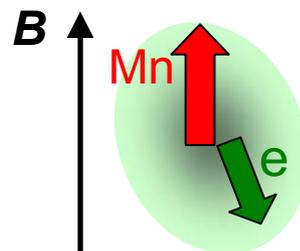
С. В. ВОНСОВСКИЙ

### МАГНЕТИЗМ

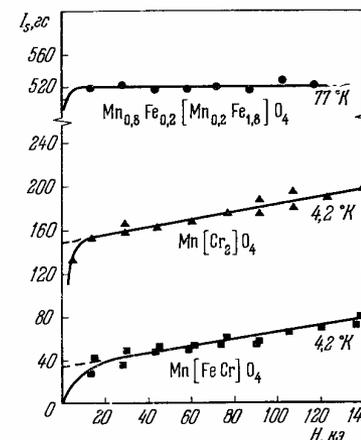
МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА ДИА-, ПАРА-, ФЕРРО-, АНТИФЕРРО-, И ФЕРРИМАГНЕТИКОВ



Насыщающийся вклад – ориентация спинового полярона как целого магнитным полем



Линейный вклад – изменение ориентации ЛММ внутри спинового полярона



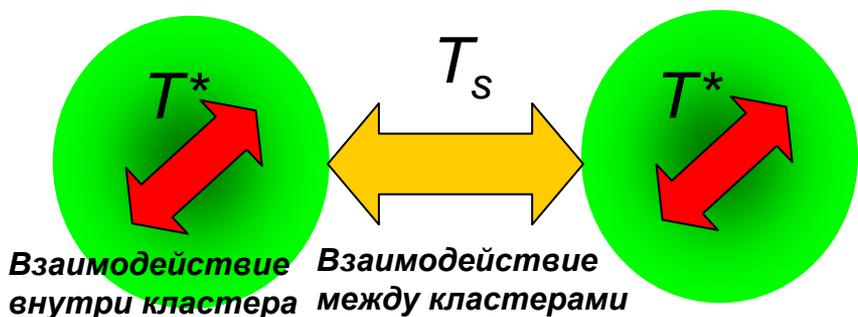
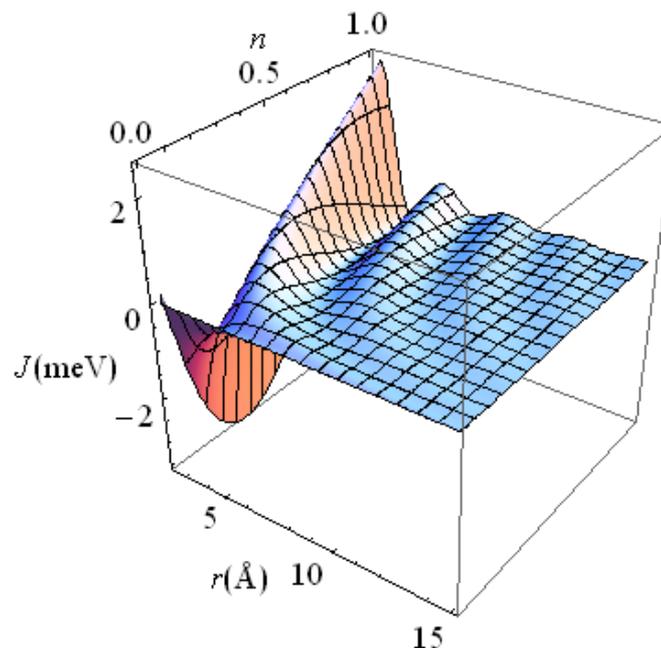
... или в модели ферримагнетика.



Две характерные температуры «закрывают» применимость зонной модели для  $Mn_{1-x}Fe_xSi$ .



Две характерные температуры = два разных типа магнитных взаимодействий = пространственная неоднородность.



Разные взаимодействия на разных пространственных масштабах – РККИ механизм обмена. Управляющий параметр – концентрация электронов.

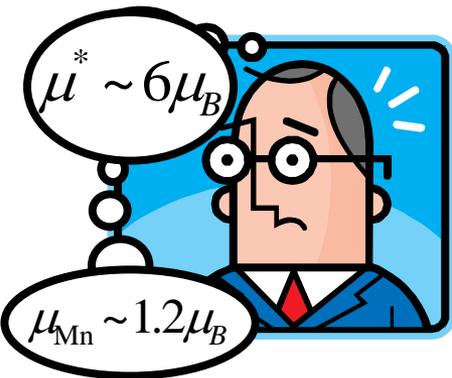
Модель спинового полярона на одном центре из двух спинов, по-видимому, неприменима. (Как быть со средним полем?)



Замечание. В учебниках ничего не написано о полевой зависимости намагниченности ферромагнетика (не говоря уже о спиновом поляроне).

Увеличение эффективного магнитного момента → спиновый кластер?

Предположим, что в парамагнитной фазе существуют фрагменты магнитной структуры, состоящие из  $n$  спинов...



Оценка намагниченности кластера- «ферромагнетика»

$$M \approx N_{Mn} \mu_{Mn} \varphi\left(\frac{n \mu_{Mn}}{\theta(T)} (B + \alpha M)\right) - N_e \mu_e \varphi\left(\frac{\mu_e}{\theta(T)} (B + \alpha n M)\right)$$

$n = 1, 2, 3, \dots$

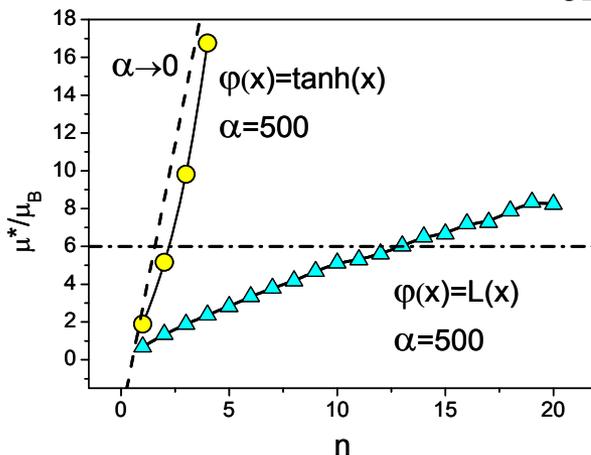
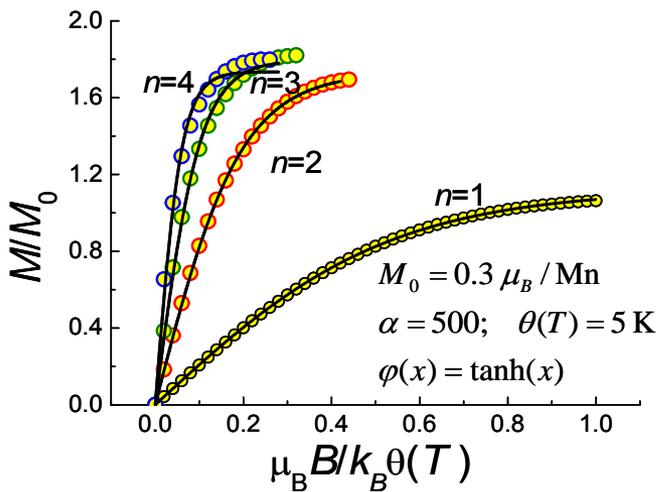
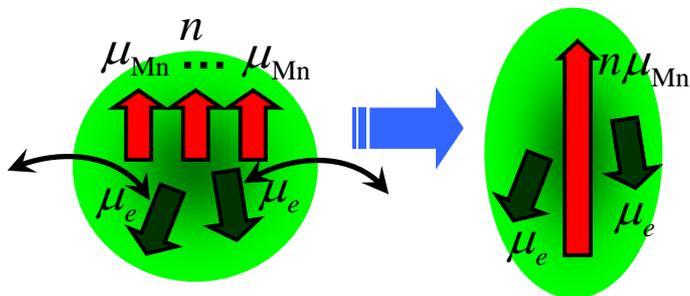
Размерный эффект

Подмагничивание квазисвязанных электронов

$$M_0 \sim N_{Mn} \mu_{Mn} - N_e \mu_e$$

Область применимости

$$\frac{\partial M}{\partial B} > 0$$



Если  $\varphi(x) = \tanh(x)$ , то

$$n \sim 3$$

Если  $\varphi(x) = L(x)$ , то

$$n \sim 12 - 14$$



Парамагнитная фаза  $Mn_{1-x}Fe_xSi$  может рассматриваться как «туман», состоящий из ферромагнитных «нанок капель» имеющих размеры порядка постоянной решетки.

Это позволяет по-новому взглянуть на аналогию между спиральными магнетиками и жидкими кристаллами...

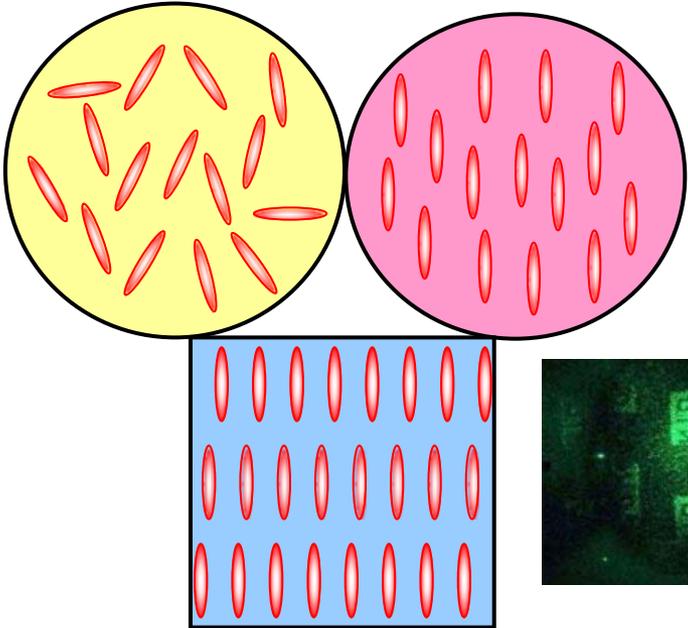
PRL 96, 047207 (2006)

PHYSICAL REVIEW LETTERS

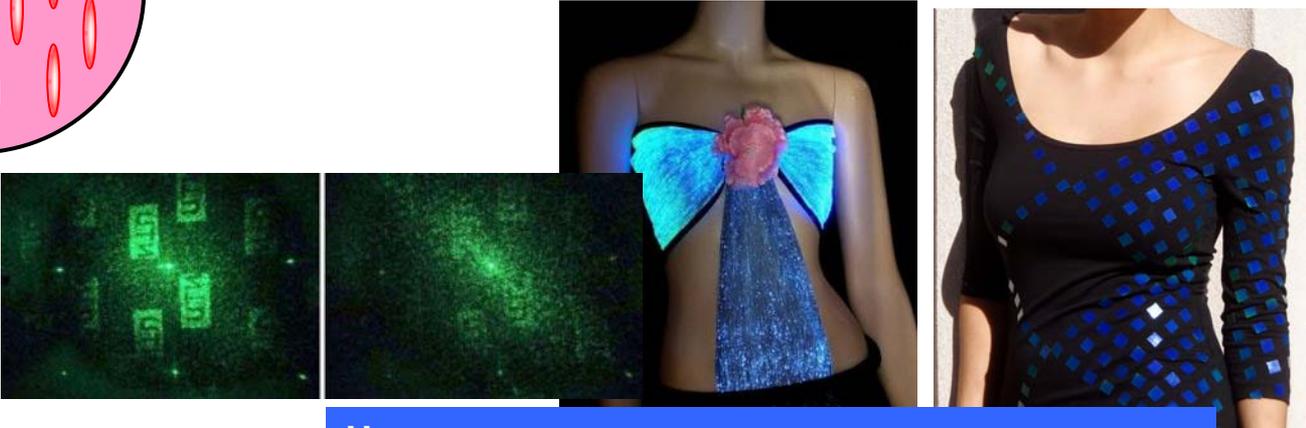
week ending  
3 FEBRUARY 2006

Blue Quantum Fog: Chiral Condensation in Quantum Helimagnets

Sumanta Tewari,<sup>1,2</sup> D. Belitz,<sup>1,3</sup> and T.R. Kirkpatrick<sup>1,2</sup>



Парамагнитная фаза= изотропная жидкость.  
Промежуточные фазы- аналог нематика и смектика  
Фаза спиновой жидкости= голубая фаза



Новые приложения магнитных аналогов жидких кристаллов в области спинтроники...

Благодарности.  
Работа поддержана программой РАН «Сильно коррелированные электроны» и грантом РФФИ 13-02-00160.

**СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!**

