

# РОЛЬ ФЕРРОМАГНИТНЫХ КОРРЕЛЯЦИЙ В ГЕНЕЗИСЕ ЭЛЕКТРОННОГО СПИНОВОГО РЕЗОНАНСА В СИСТЕМЕ $Ce_{1-x}La_xB_6$ .

А.В. Семенов, А.В. Богач, В.Н. Краснорусский, М.И. Гильманов,  
А.Н. Самарин, С.В. Демишев.  
*Институт Общей физики РАН, Москва, Россия*

В.Б. Филипов, Н.Ю. Шицевалова  
*Институт проблем материалов НАН, Киев, Украина*



# ЭСР в конденсированных Кондо-системах.

**2003:**

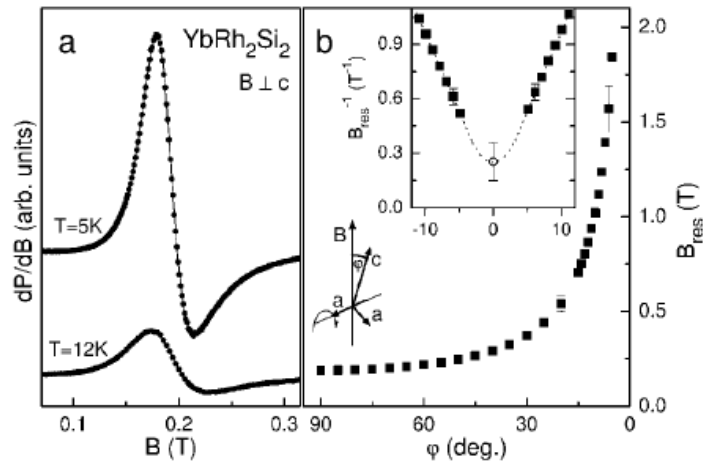
VOLUME 91, NUMBER 15

PHYSICAL REVIEW LETTERS

week ending  
10 OCTOBER 2003

## Low Temperature Electron Spin Resonance of the Kondo Ion in a Heavy Fermion Metal: $\text{YbRh}_2\text{Si}_2$

J. Sichelschmidt,<sup>1</sup> V. A. Ivanshin,<sup>2</sup> J. Ferstl,<sup>1</sup> C. Geibel,<sup>1</sup> and F. Steglich<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>Max Planck Institute for Chemical Physics of Solids, D-01187 Dresden, Germany  
<sup>2</sup>MRS Laboratory, Kazan State University, 420008 Kazan, Russia  
 (Received 12 May 2003; published 6 October 2003)



**Dense Kondo system  $\text{YbRh}_2\text{Si}_2$**   
**Kondo temperature  $T_K = 25\text{ K}$**   
**The line width should be**  
 $\Delta B \sim k_B T K / \mu_B \sim 37\text{ T}$

## Krellner et al., PRL 100, 2008:

Compound	AFM	FM	KL	ESR signal	
CeRuPO	-	✓	✓	Yes	[2008]
CeOsPO	✓	-	✓	No	
YbRh	-	✓	-	Yes	[2008]
$\text{YbRh}_2\text{Si}_2$	-	✓	✓	Yes [3]	[2003]
$\text{YbIr}_2\text{Si}_2$ (I-type)	-	✓	✓	Yes [4]	[2005]
$\text{YbIr}_2\text{Si}_2$ (P-type)	✓	-	✓	No	
$\text{Yb}_4\text{Rh}_7\text{Ge}_6$	✓	-	-	No	
$\text{YbNi}_2\text{B}_2\text{C}$	✓	-	✓	No	
$\text{CeCu}_2\text{Si}_2$ (S/A)	✓	-	✓	No	
$\text{CeNi}_2\text{Ge}_2$	✓	-	✓	No	
$\text{CeCu}_{6-x}\text{Au}_x$ ( $x = 0, 0.1$ )	✓	-	✓	No	

**$\text{CeB}_6$  ✓ - ✓ YES**

Demishev et. al. 2004

$$T_{\text{rel}} \propto \chi_0$$

$$\chi_0 = C / (T + \Theta)$$



$$\Theta \sim 100\text{ mK}$$

$$T.e. m \sim 10^5 m_e$$

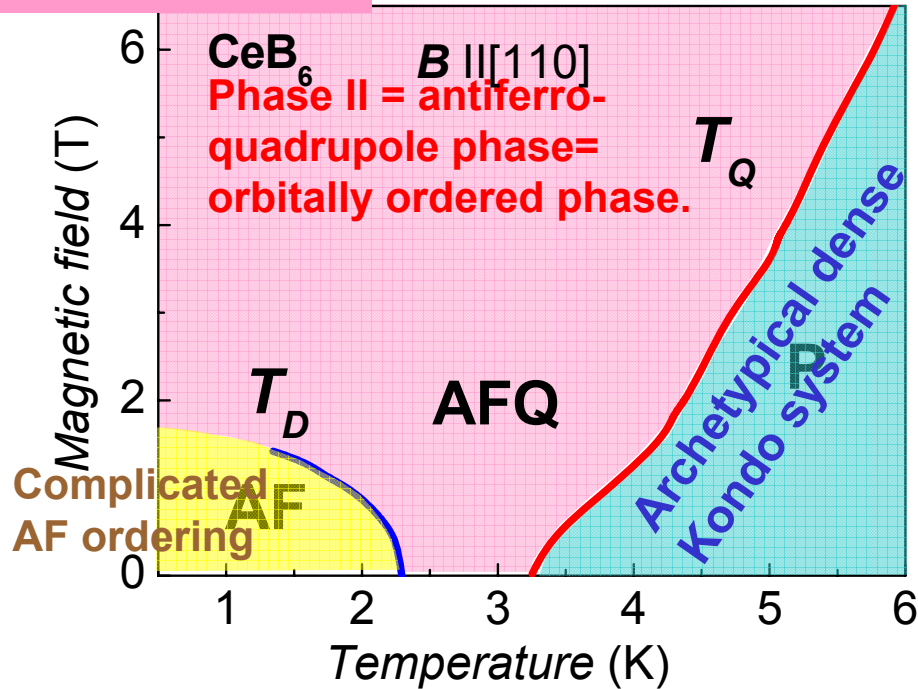
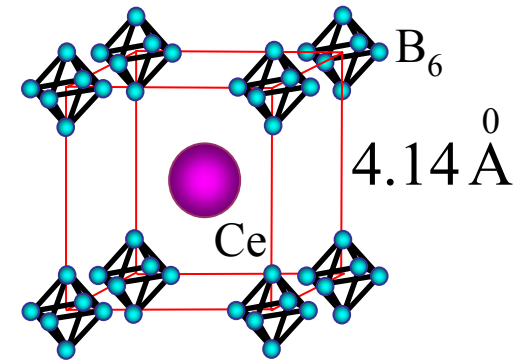
Или

$$\Theta < 0$$

Schlottmann, PRB, 2012

$CeB_6$  as a heavy fermion dense Kondo system with peculiar magnetic phase diagram:

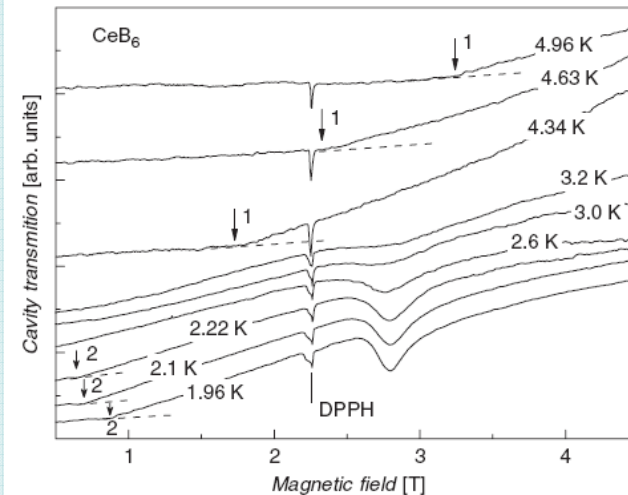
Field induced AF vector  $(\frac{1}{2}, \frac{1}{2}, \frac{1}{2})$ . Ordering of f-orbitals but not of LMM!



$T_K \sim 1K, m \sim 100m_0$



### ЭСР в АФК фазе



Demishev et al.,  
Phys. Stat. Sol., 2005

# Теория ЭСР в $\text{CeB}_6$ .

PHYSICAL REVIEW B **86**, 075135 (2012)

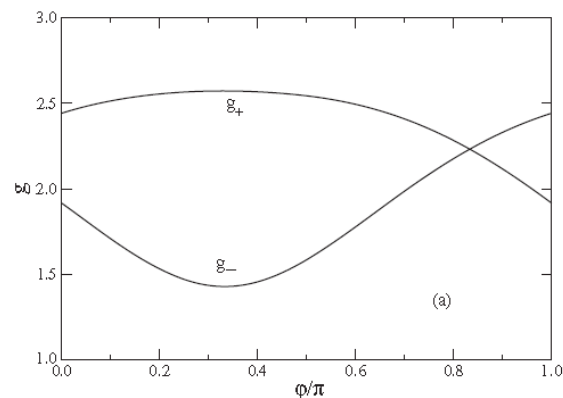
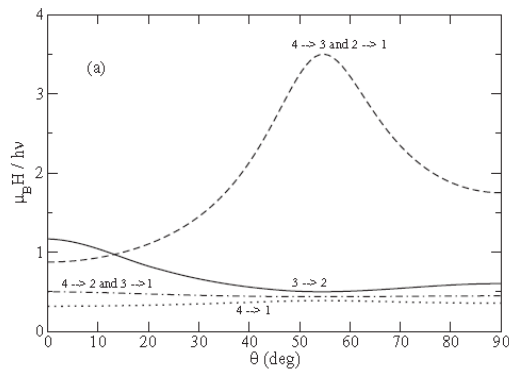
## Electron spin resonance in antiferro-quadrupolar-ordered $\text{CeB}_6$

P. Schlottmann

Department of Physics, Florida State University, Tallahassee, Florida 32306, USA

(Received 17 May 2012; revised manuscript received 19 July 2012; published 21 August 2012)

*-ЭСР на носителях, не на ЛММ  
-ЭСР существует при всех температурах. При низких температурах линия сужается и становится наблюдаемой.*



- Основное состояние  $\Gamma_8$  иона  $\text{Ce}^{3+}$  предполагает возможность наблюдения 4-х анизотропных резонансных мод.
- Антиферроквадрупольное упорядочение  $T < T_Q$  с двумя подрешетками приводит к редуцированию числа резонансных мод до двух, по одной для каждой подрешетки.
- Обобщение результата, полученного для одного иона на всю решетку с подвижными 4f электронами приводит к редуцированию числа мод до одной с усредненным g-фактором.
- Ферромагнитные спиновые корреляции обусловлены квадрупольными корреляциями, что позволяет наблюдать резонансную моду экспериментально.

# Ферромагнетизм в $\text{CeB}_6$

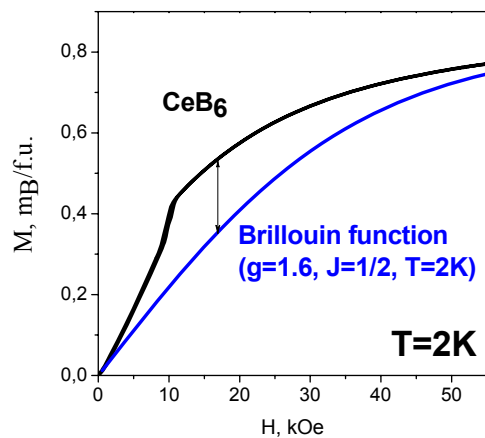
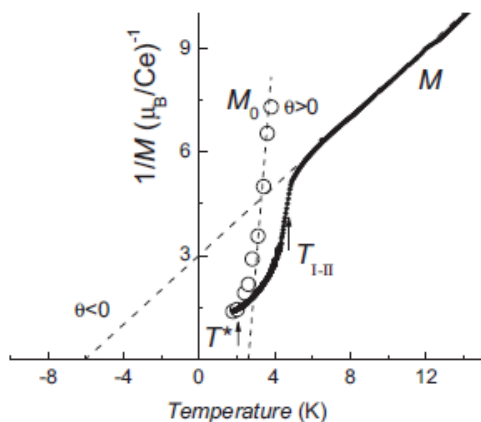
## Первая гипотеза (2009)

PHYSICAL REVIEW B 80, 245106 (2009)

### Magnetic spin resonance in $\text{CeB}_6$

S. V. Demishev,<sup>1</sup> A. V. Semeno,<sup>1</sup> A. V. Bogach,<sup>1</sup> N. A. Samarin,<sup>1</sup> T. V. Ishchenko,<sup>1</sup> V. B. Filipov,<sup>2</sup> N. Yu. Shitsevalova,<sup>2</sup> and N. E. Sluchanko<sup>1</sup>

DEMISHEV *et al.*



## Подтверждение (2014)

nature  
materials

LETTERS

PUBLISHED ONLINE: 11 MAY 2014 | DOI: 10.1038/NMAT3976

### Intense low-energy ferromagnetic fluctuations in the antiferromagnetic heavy-fermion metal $\text{CeB}_6$

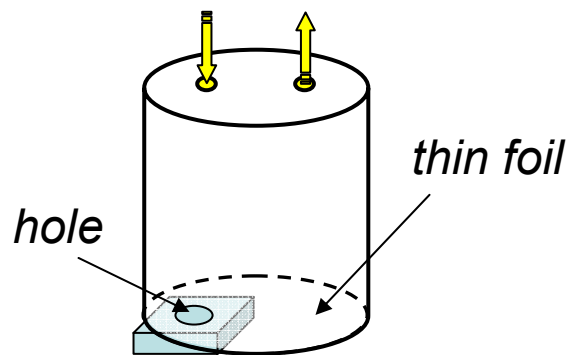
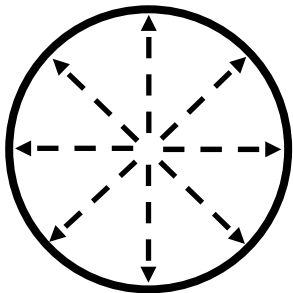
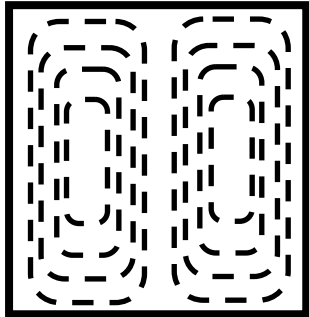
Hoyoung Jang<sup>1,2</sup>, G. Friemel<sup>1</sup>, J. Ollivier<sup>3</sup>, A. V. Dukhnenko<sup>4</sup>, N. Yu. Shitsevalova<sup>4</sup>, V. B. Filipov<sup>4</sup>, B. Keimer<sup>1</sup> and D. S. Inosov<sup>1,5\*</sup>

Конкуренция 2-х механизмов:

-Сильной ФМ моды

-Мод спиновых АФМ волн

**TE<sub>011</sub>**



Микроволновые потери металлического образца:

$$1/Q_{\text{sample}} \sim \text{Re}\{(1-i)(\mu/\sigma)^{1/2}\},$$

$$\mu = \mu_1 + i\mu_2, \quad \sigma = \sigma_1 + i\sigma_2$$

$\sigma$  влияет на форму резонансной линии

Пример:

Модель Друде:  $\sigma = \sigma_0 / (1 + i\omega\tau)$

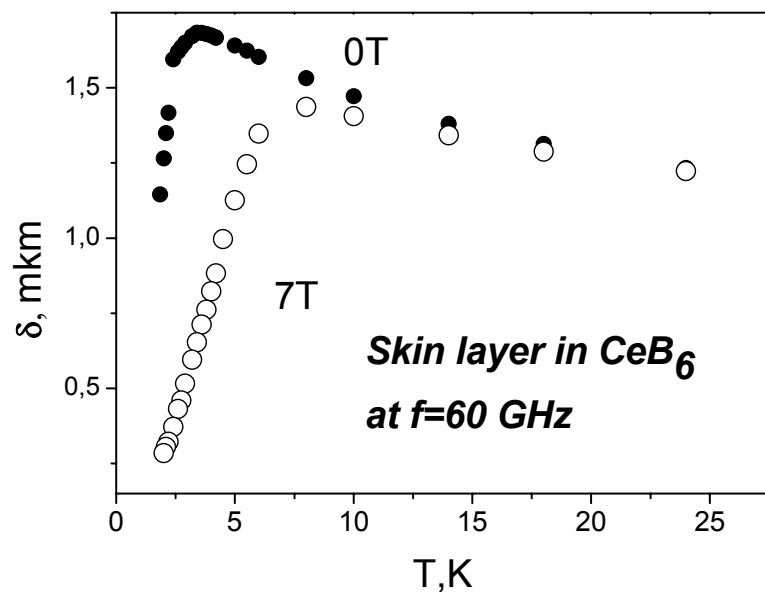
$$1/Q_{\text{sample}} \sim \text{Re}\{(1-i)[\mu(1+i\omega\tau)/\sigma_0]^{1/2}\},$$

При  $\chi_1, \chi_2 \ll 1$ :  $1/Q_{\text{sample}} \sim 1 + A\chi_1 + B\chi_2$  ( $A > B$ ,  
 $A = B = 2\pi$  при  $\omega\tau \ll 1$ )



## Свойства поверхности в $\text{Ce}_{1-x}\text{La}_x\text{B}_6$

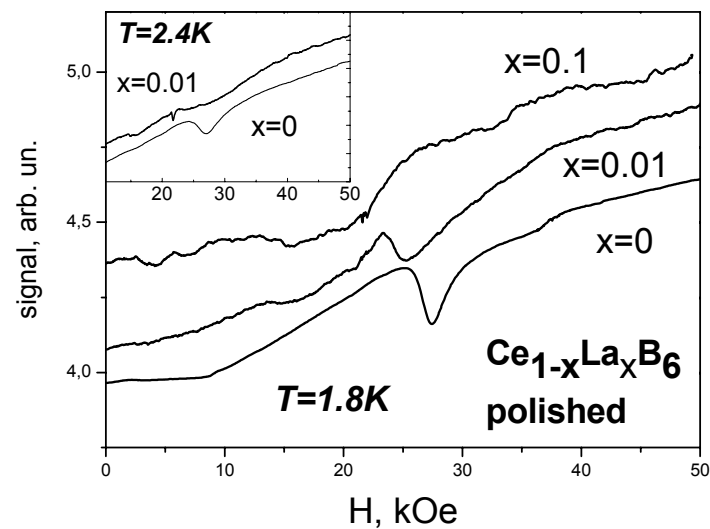
Микроволновых измерения чувствительны к поверхности образца (скин-слой).



В  $\text{CeB}_6$  свойства поверхности не зависят от обработки (травления) и соответствуют объемным.

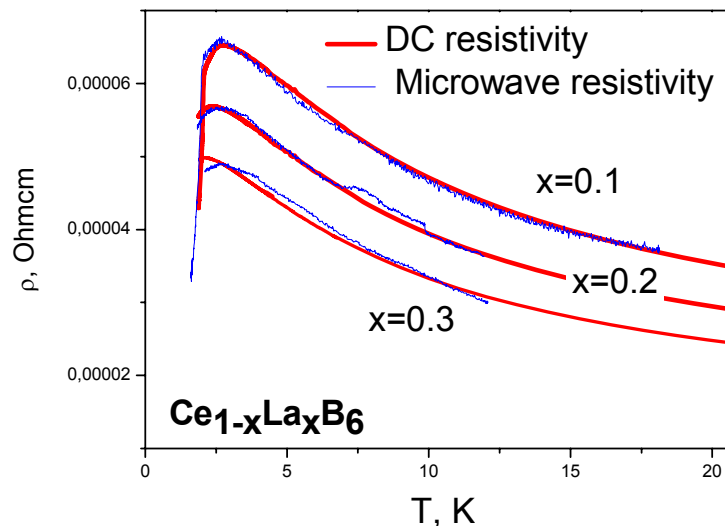
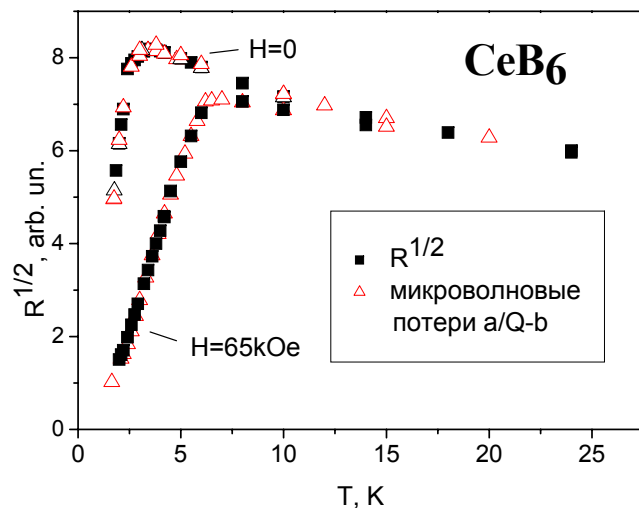
*Demishev et.al., Phys.Stat.Sol., 2005*

В  $\text{Ce}_{1-x}\text{La}_x\text{B}_6$  свойства поверхности сильно зависят от обработки (травления). Необходимо сопоставление с объемными свойствами.

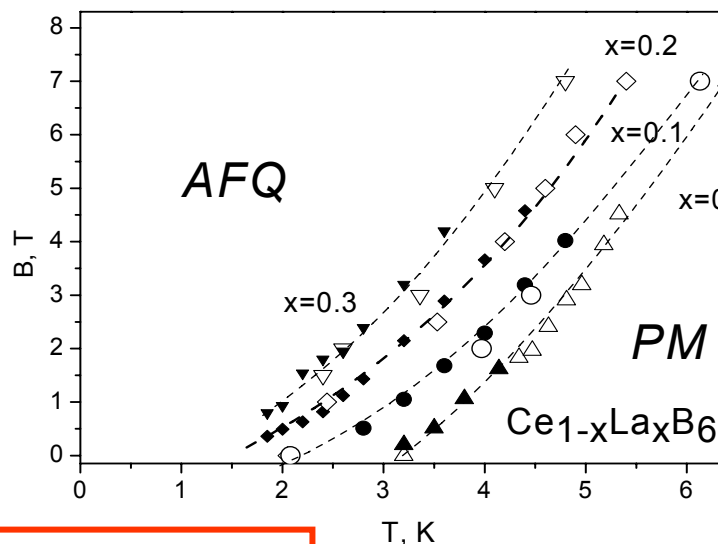
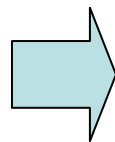


## Образцы $\text{Ce}_{1-x}\text{La}_x\text{B}_6$ после травления

Микроволновые потери металла при  $\mu=1$  and  $\sigma$ -действительная:  
 $1/Q_{\text{sample}} \sim 1/\sigma^{1/2} \sim \rho^{1/2}$



Фазовая диаграмма

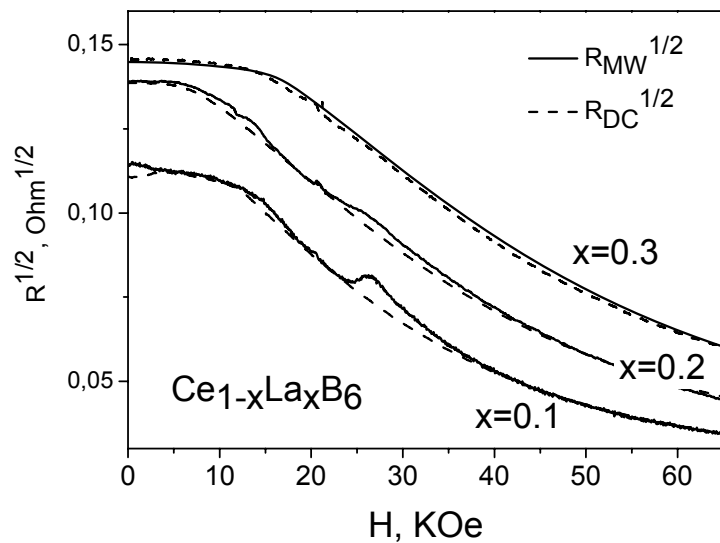


Свойства скин-слоя соответствуют объемным.



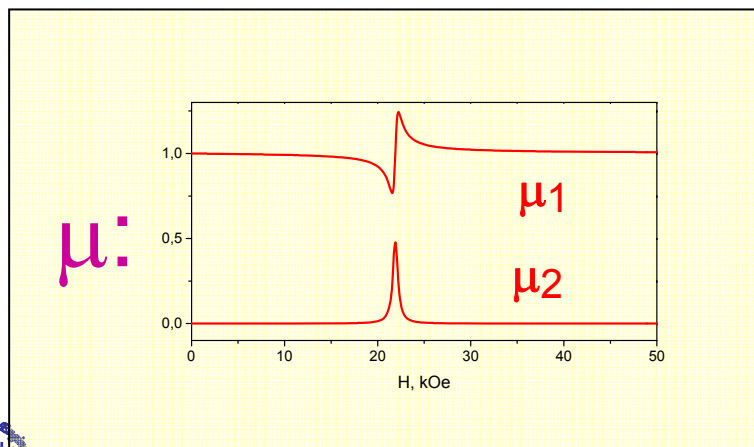


# Экспериментальная линия поглощения в $\text{Ce}_{1-x}\text{La}_x\text{B}_6$

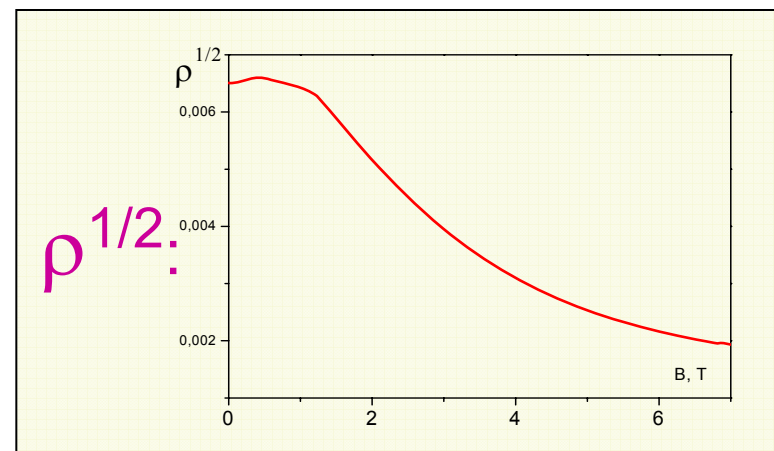


$$1/Q_{\text{sample}} \sim \text{Re}\{(1-i)\mu^{1/2}\} * \rho^{1/2},$$

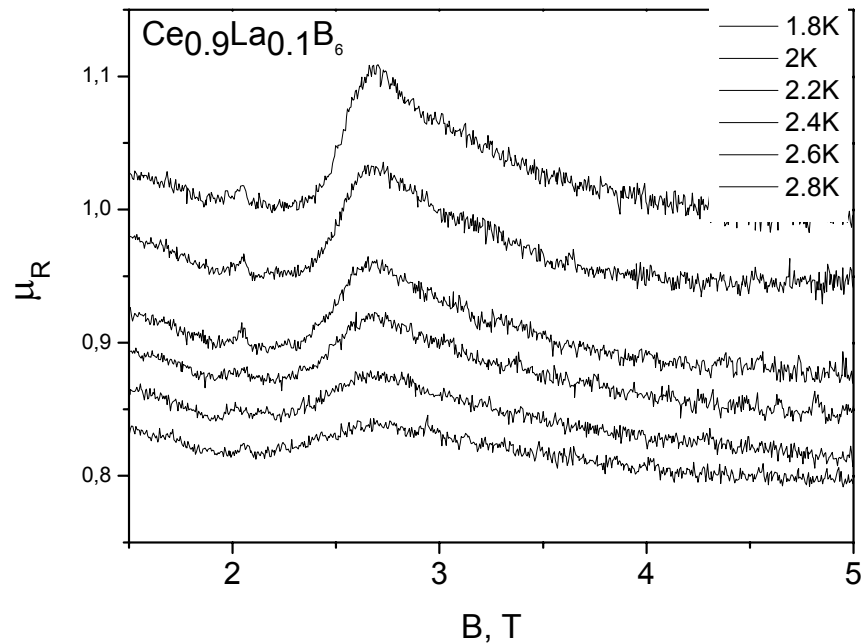
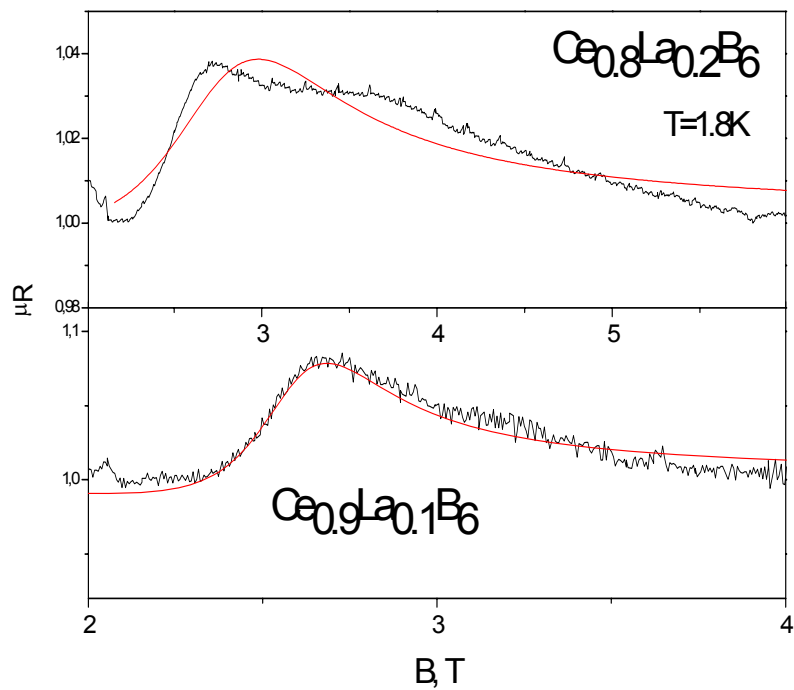
в системе  $\text{Ce}_{1-x}\text{La}_x\text{B}_6$   $\sigma$ -действительная



×



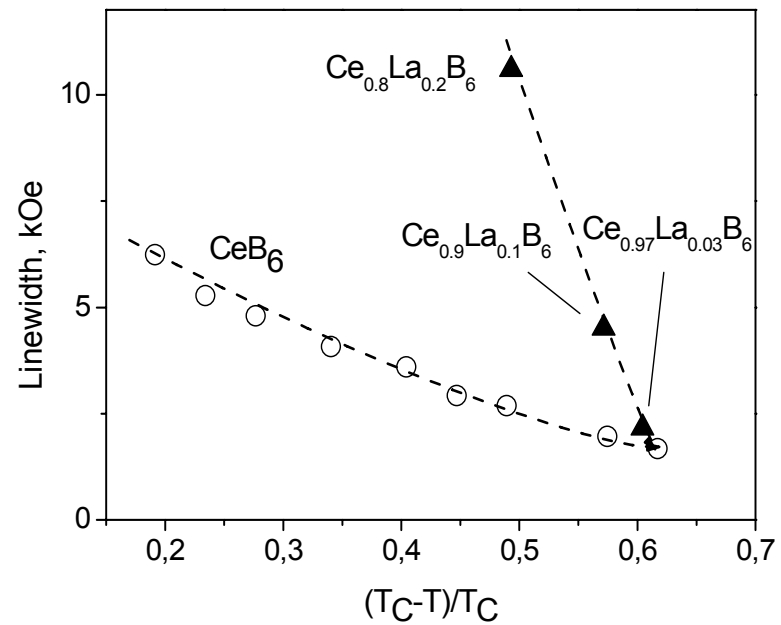
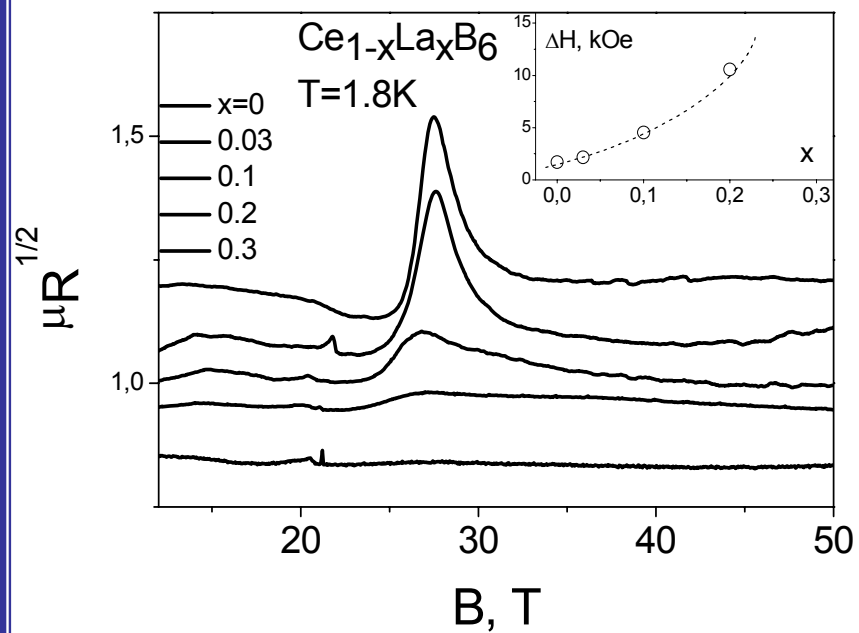
## ЭСР в $Ce_{1-x}La_xB_6$



- Сильное уширение резонансной линии при легировании лантаном
- Сложный спектр резонанса при концентрации лантана 30%



## ЭСР в $Ce_{1-x}La_xB_6$



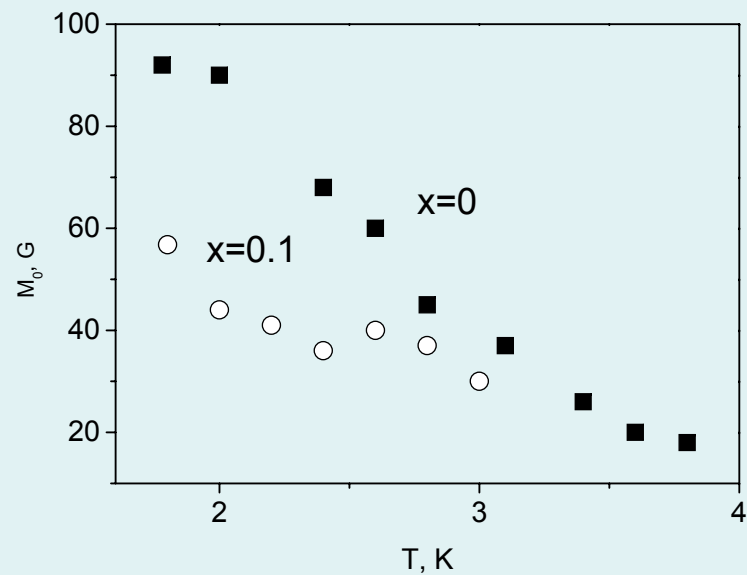
Уширение линии ЭСР не обусловлено близостью к границе АФК-ПМ фазового перехода.



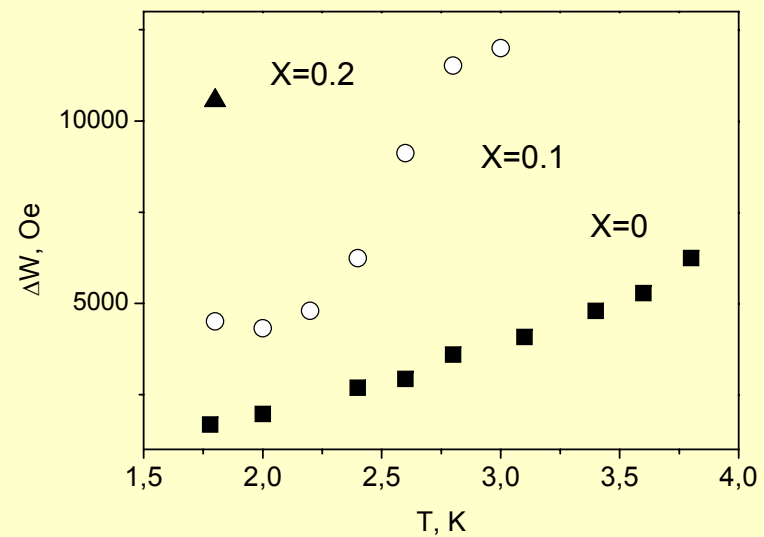
## Параметры линии ЭСР

Как и в случае  $\text{CeV}_6$  в  $\text{Ce}_{0.9}\text{La}_{0.1}\text{V}_6$   $g$ -фактор  $g \approx 1.6$

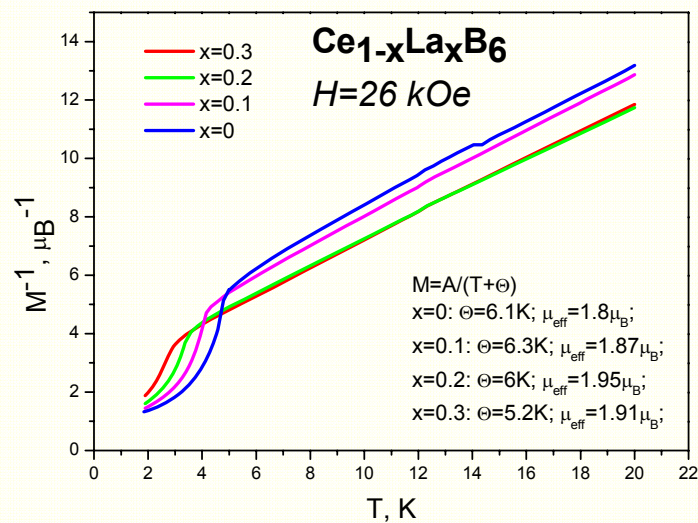
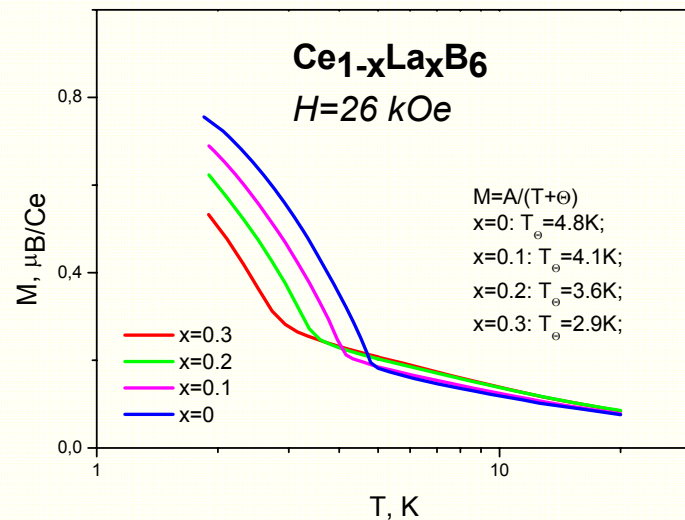
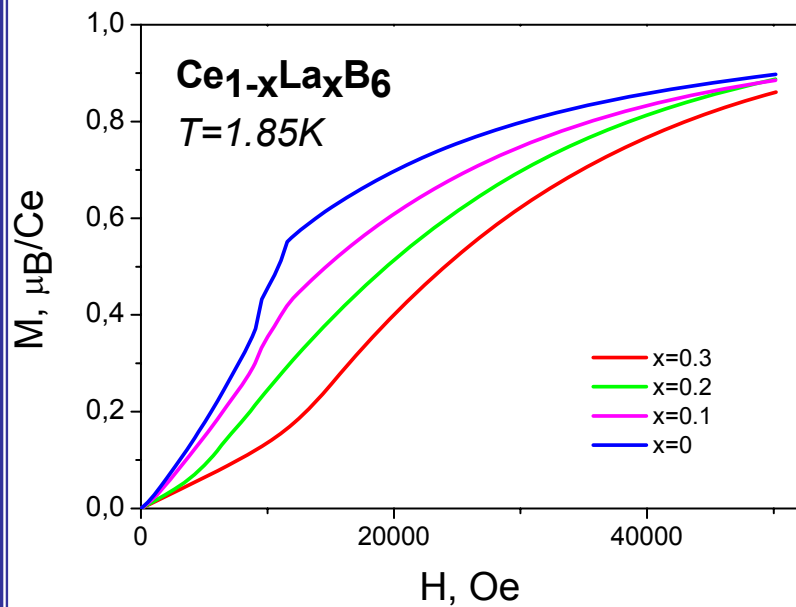
### Осциллирующая намагниченность



### Ширина линии ЭСР

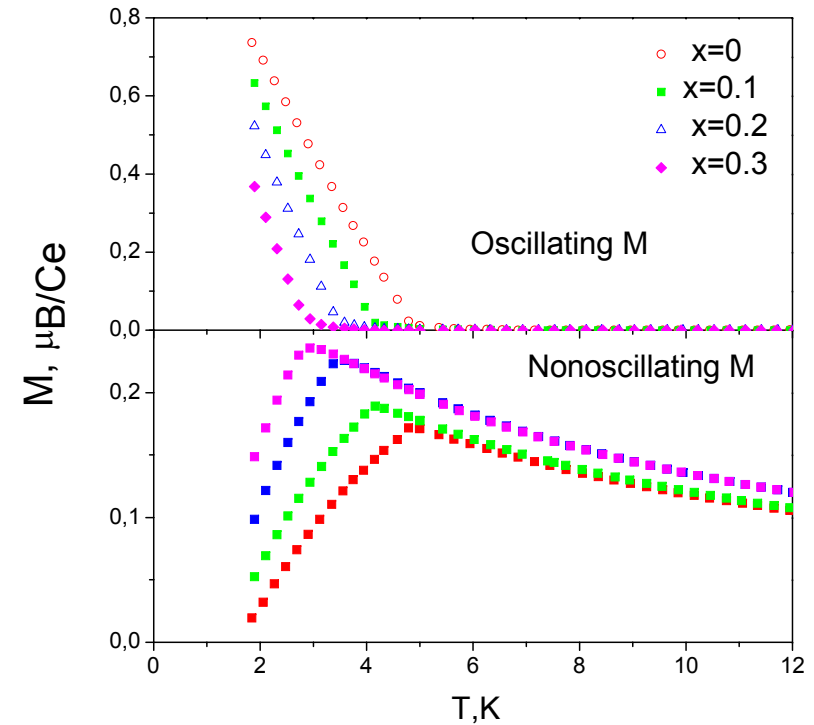
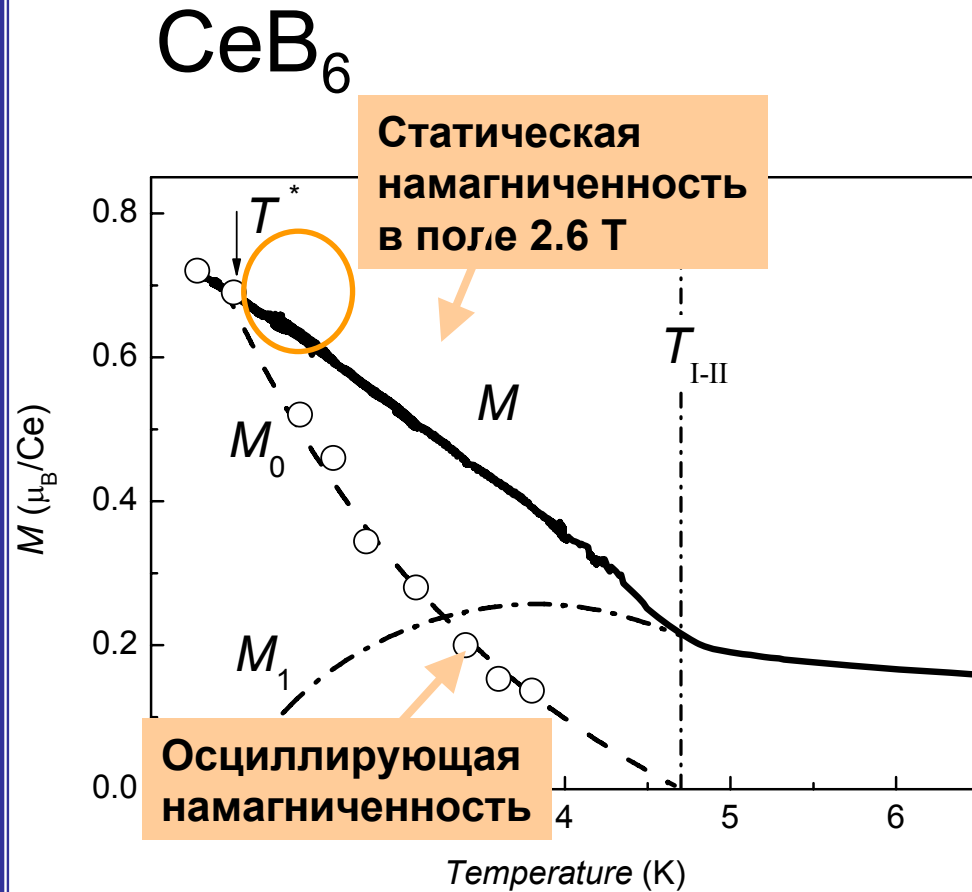


# Магнитные характеристики $Ce_{1-x}La_xB_6$



## Осциллирующая намагниченность ( $\text{CeV}_6$ ).

Два вклада в намагниченность !



Ниже  $T_{\text{I-II}}$  появляются ЭСР-активные центры  
Ниже  $T^*$  величины статической и осциллирующей намагниченностей совпадают.



## *Основные результаты.*

-Магнитный резонанс – свойство объема образца. Фазовая диаграмма  
Подтверждается в микроволновых экспериментах.

-Наблюдение магнитного резонанса в квадрупольно-упорядоченной  
фазе обусловлено формированием ЭПР-активных  
магнитных моментов.

-Уширение линии ЭСР с увеличением степени легирования  $\text{Ce}_{1-x}\text{La}_x\text{V}_6$  необусловлено близостью к фазовой границе ПМ-АФК.

-Подтверждается идея о ключевой роли ферромагнитных  
корреляций для наблюдения ЭСР в  $\text{Ce}_{1-x}\text{La}_x\text{V}_6$ .

