

# Фазовые переходы в присутствии ферми-конденсата.

Попов К.Г.

Отдел математики,  
Коми НЦ, УРО, РАН

# История проекта

- Осень, 2004, 'Progress in Superconductivity Research.', Nova Science Publishers, Inc., USA.
- Весна, 2005, Работа в Теор. отделе СПб. Института ядерной физики.
- Лето, 2005, Написание англоязычного текста.
- Осень, 2005, Написание русскоязычного текста.
- Работа над развитием программ и исследования продолжаются.

# Состав исполнителей проекта

- Шагинян В.Р., Теор.отдел, СПб Институт ядерной физики. Россия – руководитель проекта.
- Амусья М.Я., СПб Физико–технический институт им. А.Ф. Иоффе. Россия.
- Артамонов С.А., СПб Институт ядерной физики. Россия.
- Меззани А.З., Кларковский университет Атланты, США.
- Попов К.Г., Коми НЦ, УрО, РАН, Россия.

# Мотивации проекта

- Изучение сильно коррелированных систем.
- Изучение металлов с тяжелыми фермионами и высокотемпературных сверхпроводников.
- Обоснование понятия ферми-конденсата.
- Дискуссия о методах описания фазовых переходов.
- Технические возможности проведения расчетов.

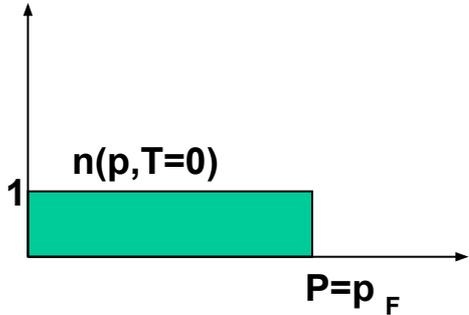
# Теория Ландау ферми-жидкости.

Квазичастица- элементарное возбуждение ферми-жидкости.

Энергия основного состояния- функционал  $n(p, T)$ -функции распределения квазичастиц.

$$\Omega[n(p, T)] = E[n(p, T)] - TS - \mu N.$$

$$S[n(p, T)] = -2 \int \{n(p, T) \ln(n(p, T)) + (1 - n(p, T)) \ln(1 - n(p, T))\} d^3p / (2\pi)^3$$



$$\delta\Omega[n(p, T)] / \delta n(p, T) = \varepsilon(p, T) - \mu - T \ln \{(1 - n(p, T)) / n(p, T)\} = 0.$$

$$\varepsilon(p, T) = \delta E / \delta n(p, T)$$

$$n(p, T) = \{1 + \exp[(\varepsilon(p, T) - \mu) / T]\}^{-1}$$

$$\frac{p_F}{M^*} = \frac{d\varepsilon(p)}{dp_F}.$$

# Уравнение Ландау для эффективной массы квазичастиц

$$\frac{1}{M^*(p, T, B)} = \frac{1}{M} + \int \frac{\dot{p}_F \dot{p}}{p_F^3} f(p_F, p) \frac{\partial n(p, T, B)}{\partial p} \frac{d\dot{p}}{(2\pi)^3}.$$

$$F^1(x) = F^1(p_F, p_F); \quad x = p_F^3 / (3\pi^2).$$

$$\frac{M^*}{M} = \frac{1}{1 - N(0)F^1(x)/3}.$$

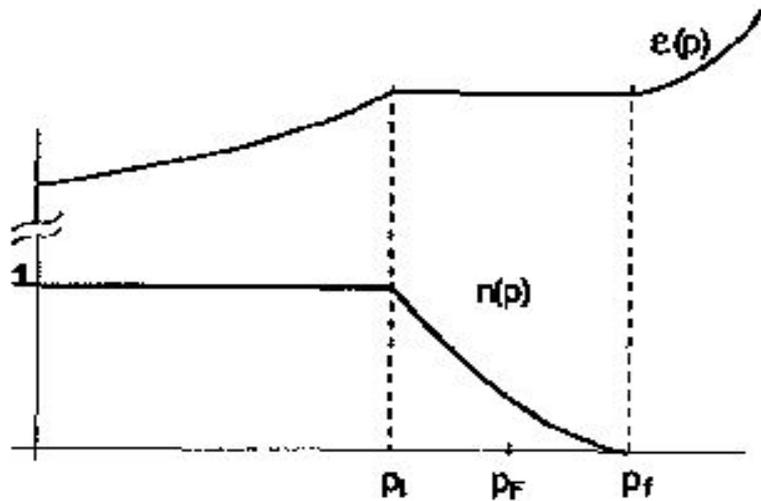
$$\frac{M^*}{M} \propto \frac{1}{x - x_{FC}}.$$

# Ферми-конденсатный квантовый фазовый переход

$$\delta E / \delta n(p) = \mu.$$

$$\varepsilon(p, T) = \delta E / \delta n(p, T) = \mu.$$

$$\varepsilon(p, T = 0) - \mu = 0, \quad \text{if } p_i < p_F < p_f, \quad 0 < n(p) < 1.$$



$$p_i < p < p_f; \quad n(p) \neq 1, 0.$$

$$M^*(x) \propto \frac{1}{x - x_{FC}}$$

$\varepsilon(p, T)$  - энергия квазичастиц

$n(p, T)$  - функция распределения квазичастиц

# Квантовый протекторат

- R.B.Laughlin, D.Pines, The Theory of Everything, PNAS, 97,1, 29, (2000)
- R.B.Laughlin, A Different Universe, (Reinventing Physics from the Bottom Down), 2005

# Точно решаемые модели

1. I.Dzyaloshinskii J.Phys.I (France), 6, 119, (1995)
2. D.Lidsky et al., Phys. Rev. B 57, 1340 (1998).
3. V.Yu. Irkhin, A.A. Katanin, M.I. Katsnelson, Phys. Rev. Lett. 89, 076401 (2002).
4. V.A. Khodel, V.R. Shaginyan, Nucl. Phys. A 555, 33, (1993).
5. V.A. Khodel, V.R. Shaginyan, V.V. Khodel, Phys. Rep. 249, 1 (1994).

# Модель Ландау.

$$E[n(p)] = \int \frac{p^2}{2M} \frac{dp}{(2\pi)^3} + \frac{1}{2} \int V(\mathbf{p}_1 - \mathbf{p}_2) n(\mathbf{p}_1) n(\mathbf{p}_2) \frac{d\mathbf{p}_1 d\mathbf{p}_2}{(2\pi)^6},$$

$$V(\mathbf{p}, \mathbf{p}_1) = g_0 \frac{\exp(-\beta_0 |\mathbf{p} - \mathbf{p}_1|)}{|\mathbf{p} - \mathbf{p}_1|}.$$

$$\varepsilon(p, T) = \delta E / \delta n(p, T)$$

$$\varepsilon_0(z) = z^2 + \frac{2g}{\beta^2} \left[ 1 - (\beta + 1) \sinh(z\beta) \frac{\exp(-\beta)}{z\beta} \right], \quad \text{at : } z \leq 1.$$

$$\varepsilon_0(z) = z^2 + \frac{2g}{z\beta^3} [\beta \cosh(\beta) - \sinh(\beta)] \exp(-z\beta), \quad \text{at : } z \geq 1.$$

$$\frac{g_c}{\beta^3} (1 + \beta) \exp(-\beta) [\beta \cosh(\beta) - \sinh(\beta)] = 1.$$

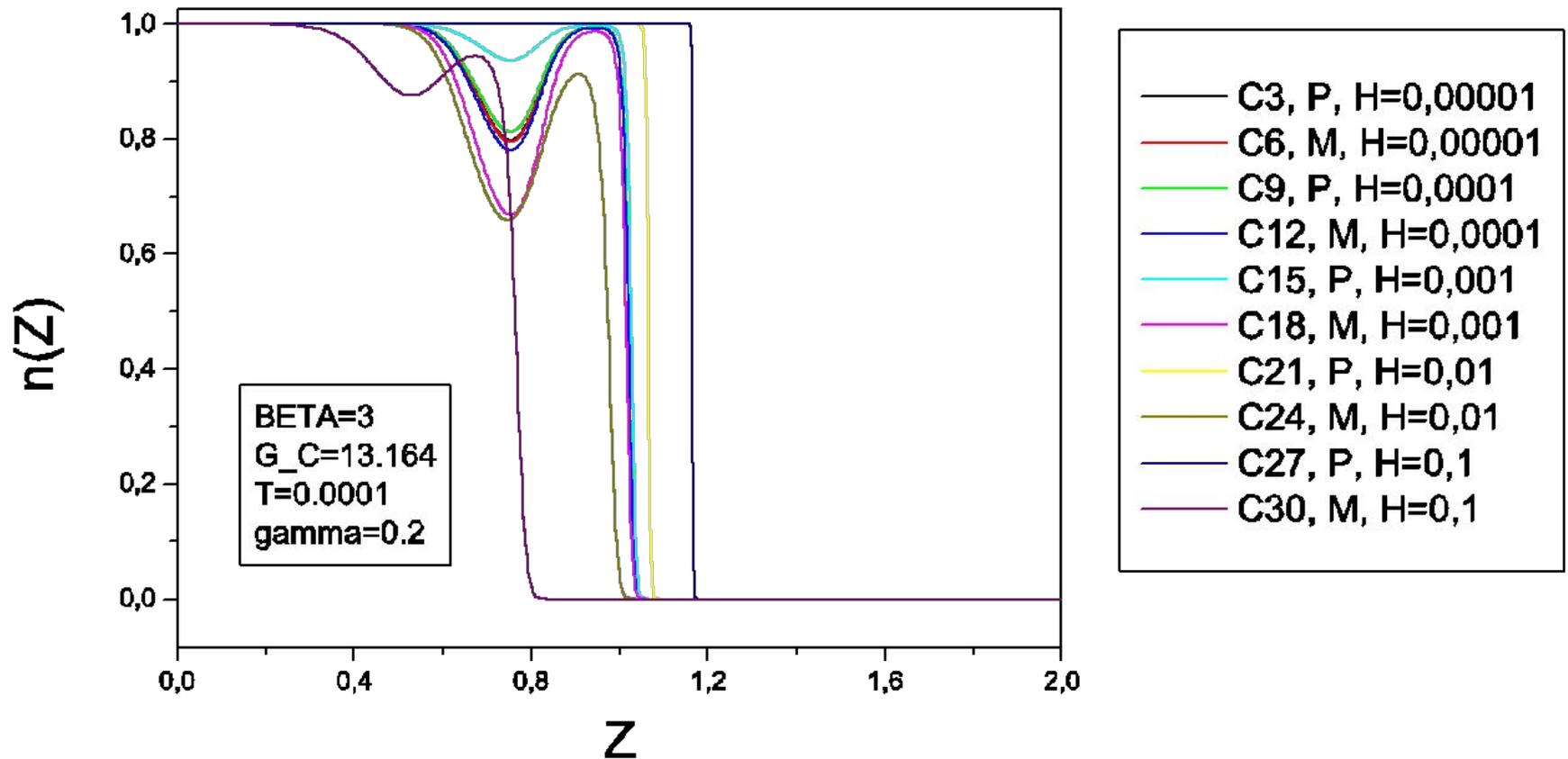
$$\varepsilon(z, T) = z^2 + \frac{g}{\beta z} \int [\exp(-\beta|z - z_1|) - \exp(-\beta|z + z_1|)] n(z_1, T) z_1 dz_1.$$

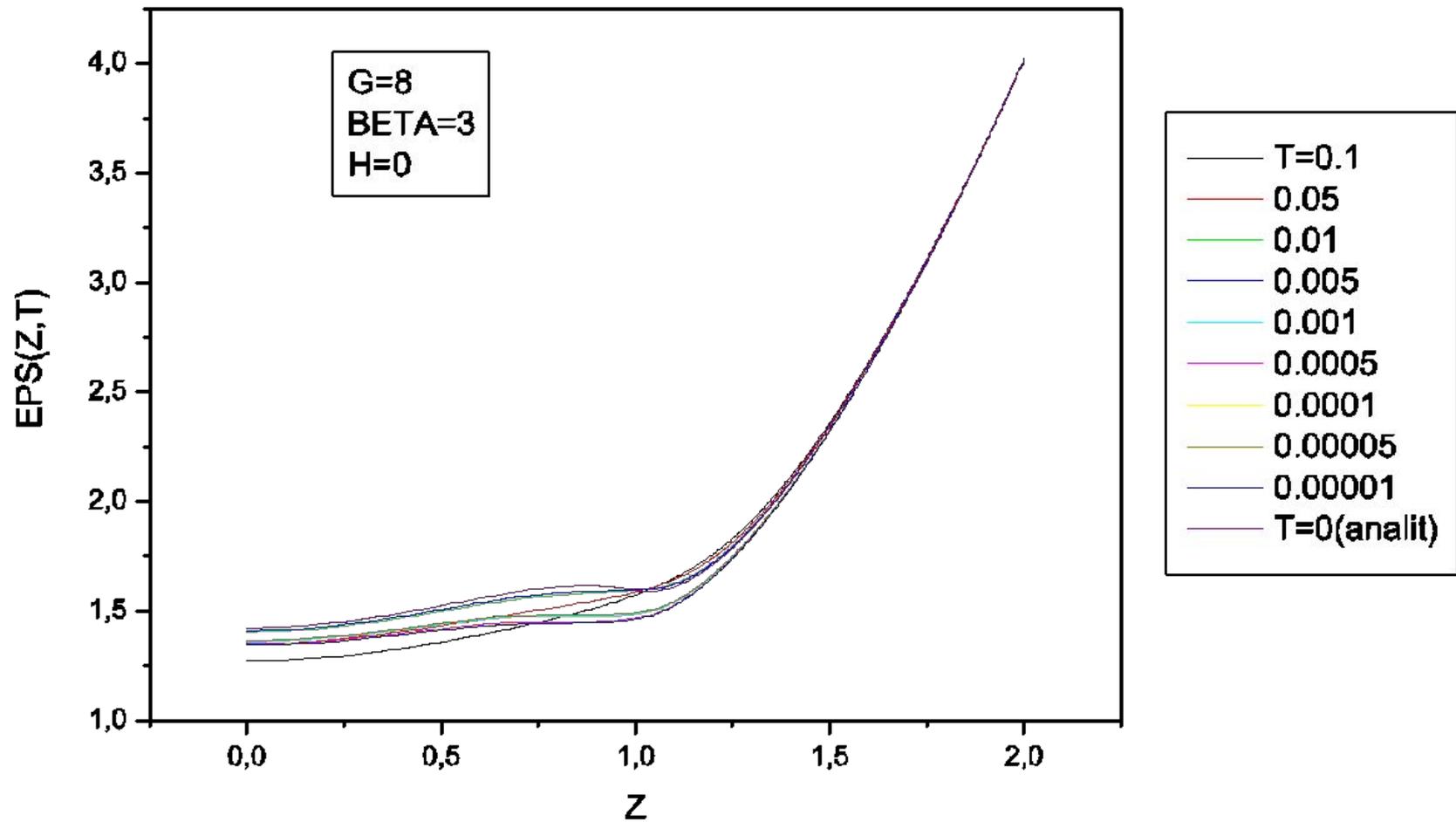
$$n(z, T) = \frac{1}{1 + \exp[(\varepsilon(z, T) - \mu)/T]}$$

$$1 = \rho = 3 \int n(z, T) z^2 dz.$$

$$n(z, T) = \frac{1}{2} \left\{ \frac{1}{1 + \exp[(\varepsilon(z, T) + H - \mu)/T]} + \frac{1}{1 + \exp[(\varepsilon(z, T) - H - \mu)/T]} \right\}.$$

# Примеры спектров и функций распределения





$$S(T) = -\frac{p_F^3}{\pi^2} \sum_{\pm} \int [n(z, \pm H, T) \ln(n(z, \pm H, T)) + (1 - n(z, \pm H, T)) \ln(1 - n(z, \pm H, T))] z^2 dz,$$

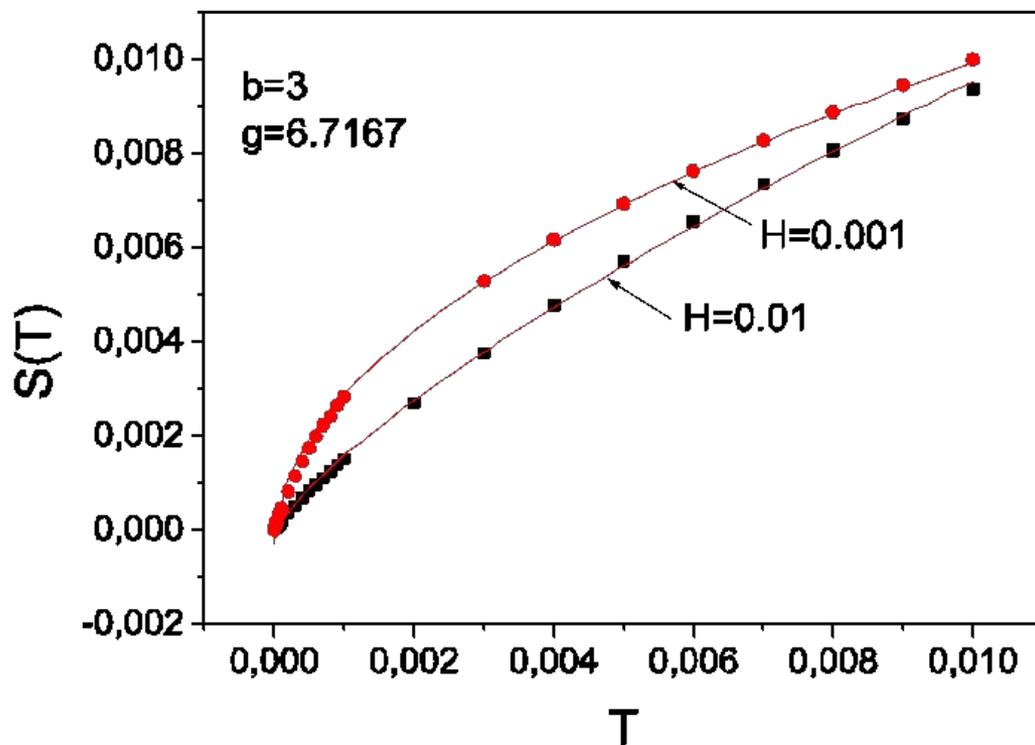
$$C(T) = \gamma_0 T = \frac{dS(T)}{dT}.$$

$$M^*(T) = 3 \frac{S(T)}{p_F T}.$$

$$M^* T = 2 \frac{p_F^3}{\pi^2} \sum_{\pm} \int n(z, \pm H, T) [1 - n(z, \pm H, T)] z^2 dz.$$

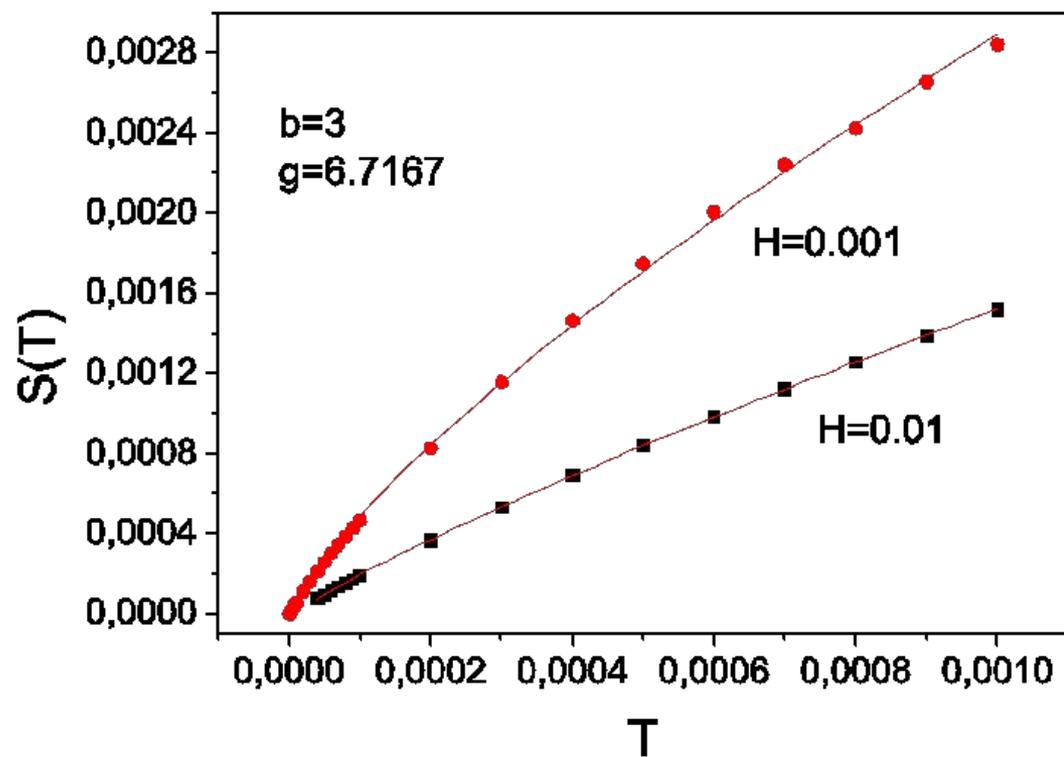
$$\frac{p_F}{M^*} = \frac{d\varepsilon(p)}{dp_F}.$$

# Система в критической точке под действием магнитного поля



$b=3$   
 $g=6.7167$   
 $H=0.01$   
 $S(T)=P1+P2*T^P3$   
P1  $-0.00013\pm 0.00003$   
P2  $0.31\pm 0.01$   
P3  $0.75\pm 0.01$

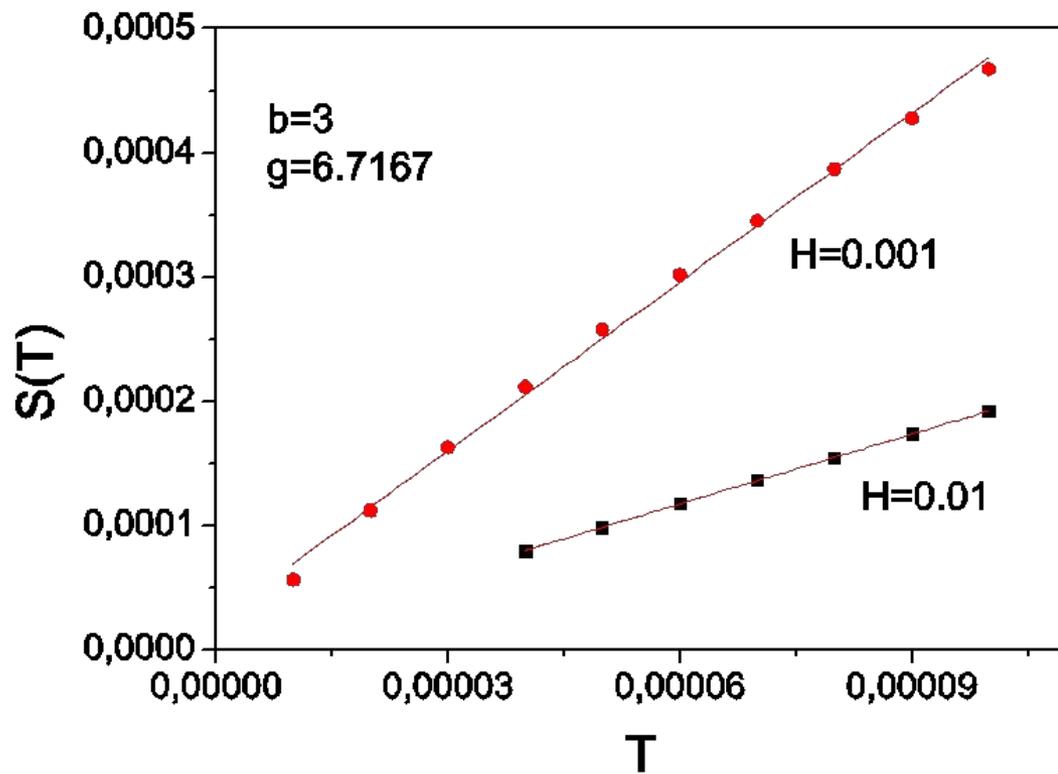
-----  
 $b=3$   
 $g=6.7167$   
 $H=0.001$   
 $S(T)=P1+P2*T^P3$   
P1  $-0.00038\pm 0.00003$   
P2  $0.1031\pm 0.0008$   
P3  $0.5\pm 0.1$



$b=3$   
 $g=6.7167$   
 $H=0.01$   
 $S(T)=P1+P2*T^{P3}$   
 P1  $-0.00003\pm 3E-6$   
 P2  $0.52\pm 0.02$   
 P3  $0.841\pm 0.005$

---

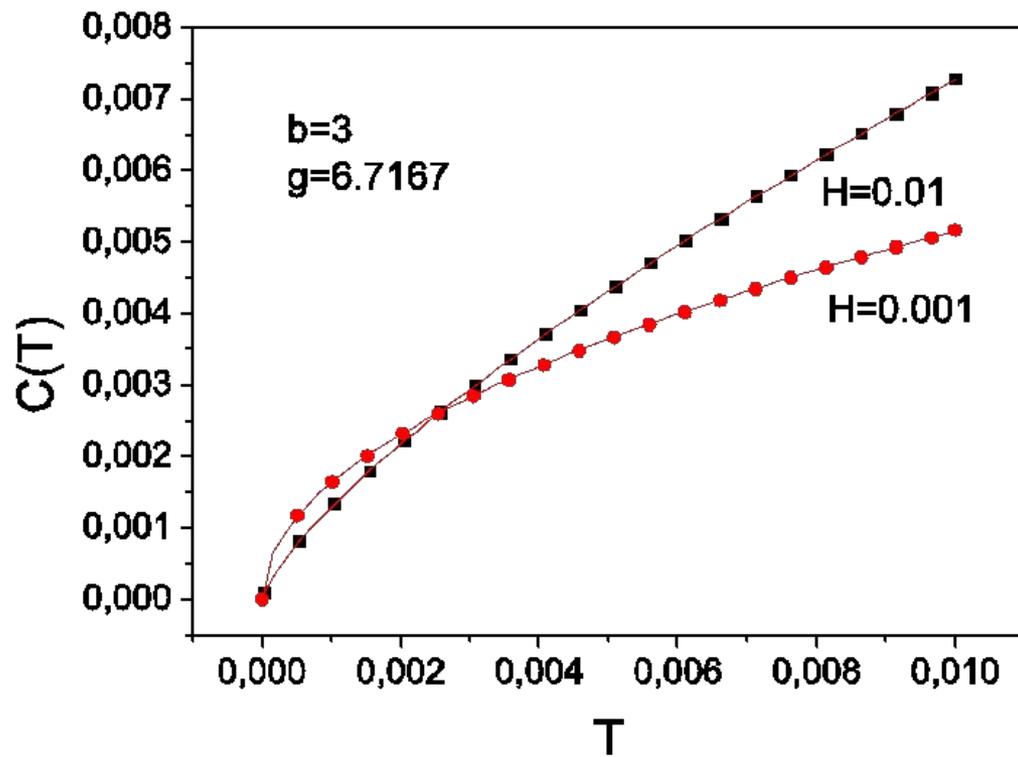
$b=3$   
 $g=6.7167$   
 $H=0.001$   
 $S(T)=P1+P2*T^{P3}$   
 P1  $-0.00004\pm 8E-6$   
 P2  $0.51\pm 0.03445$   
 P3  $0.75\pm 0.01$



$b=3$   
 $g=6.7167$   
 $H=0.01$   
 $S(T)=P1+P2*T$   
 $P1 \quad 4E-6\pm4E-7$   
 $P2 \quad 1.878\pm0.006$

---

$b=3$   
 $g=6.7167$   
 $H=0.001$   
 $S(T)=P1+P2*T$   
 $P1 \quad 0.000020\pm5E-6$   
 $P2 \quad 4.53\pm0.08$



$b=3$

$g=6.7167$

$H=0.01$

$S(T)=P1+P2*T^P3$

P1  $-0.00002\pm 5E-6$

P2  $0.229\pm 0.001$

P3  $0.749\pm 0.001$

---

$b=3$

$g=6.7167$

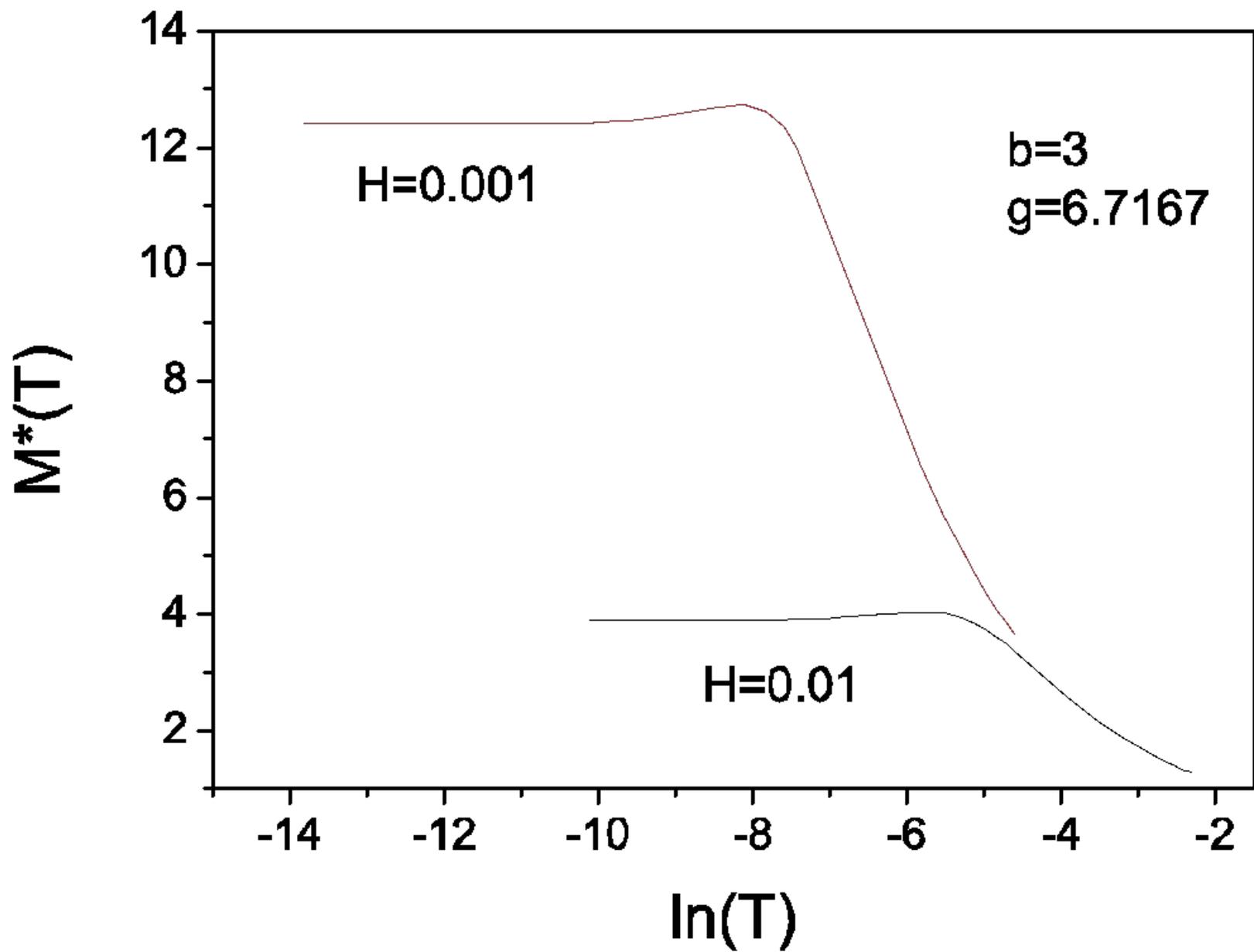
$H=0.001$

$S(T)=P1+P2*T^P3$

P1  $-0.000040\pm 9E-6$

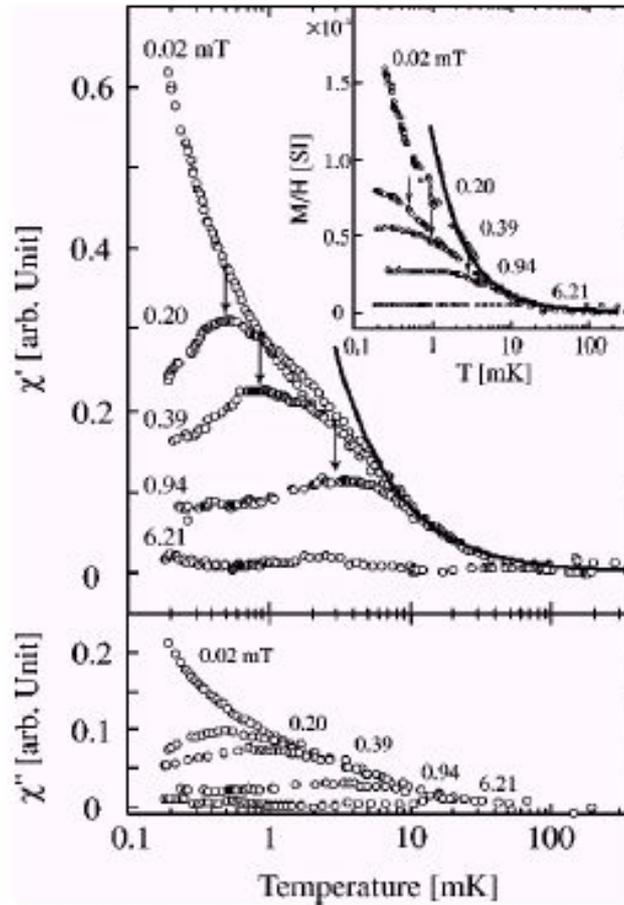
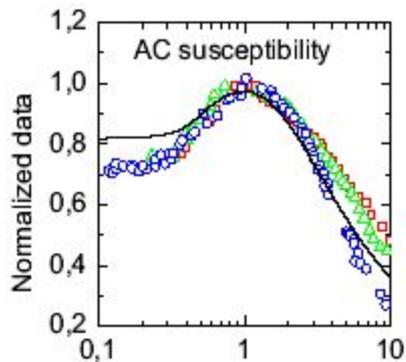
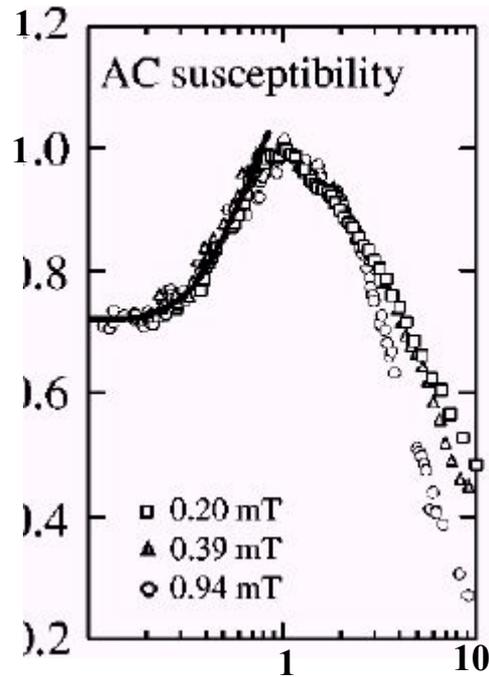
P2  $0.0504\pm 0.0004$

P3  $0.49361\pm 0.00184$



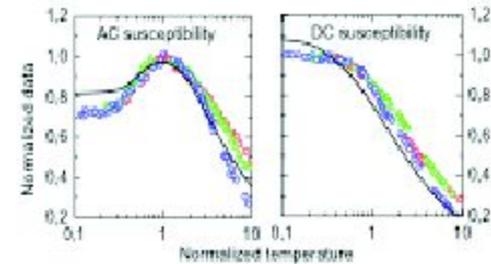
$$\chi(H) \propto M^*(B) \propto (B - B_c)^{-2/3}.$$

Temperature dependence of the magnetic susceptibility at different applied fields.



CeRu<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>

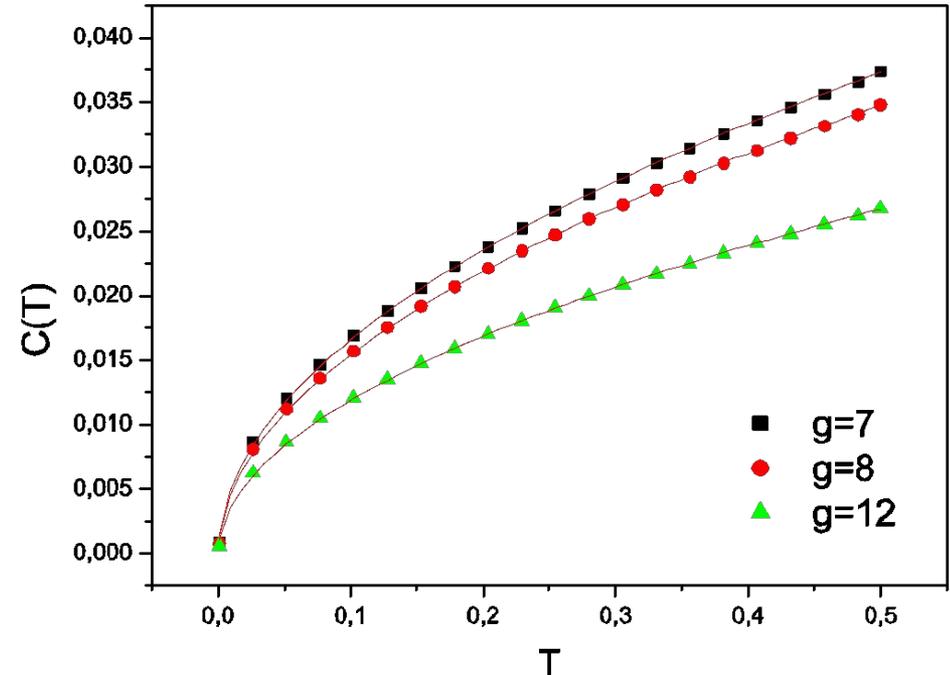
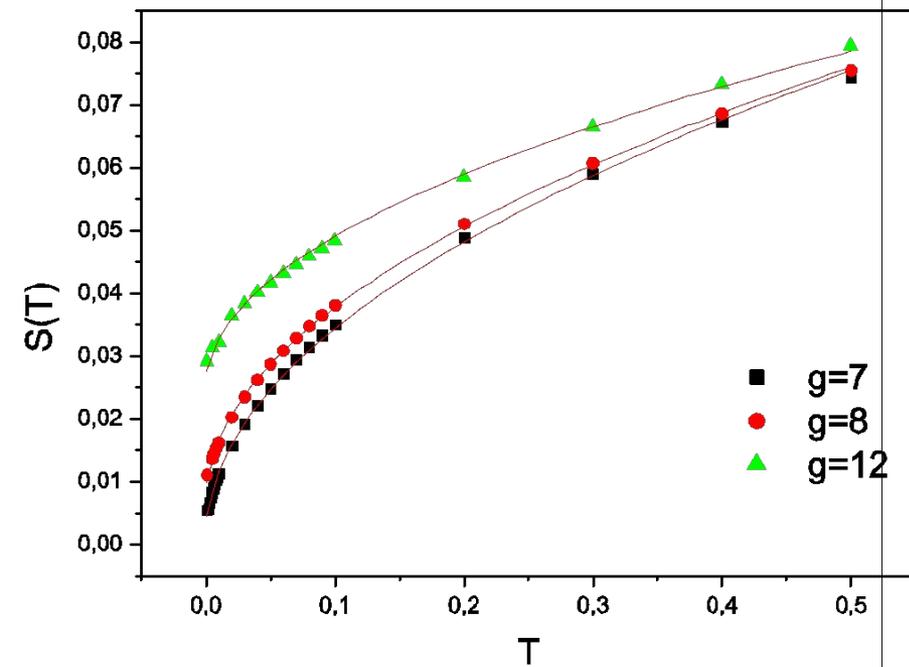
$B_c = 0$



V.R. Shaginyan, JETP Lett. 79, 344 (2004).

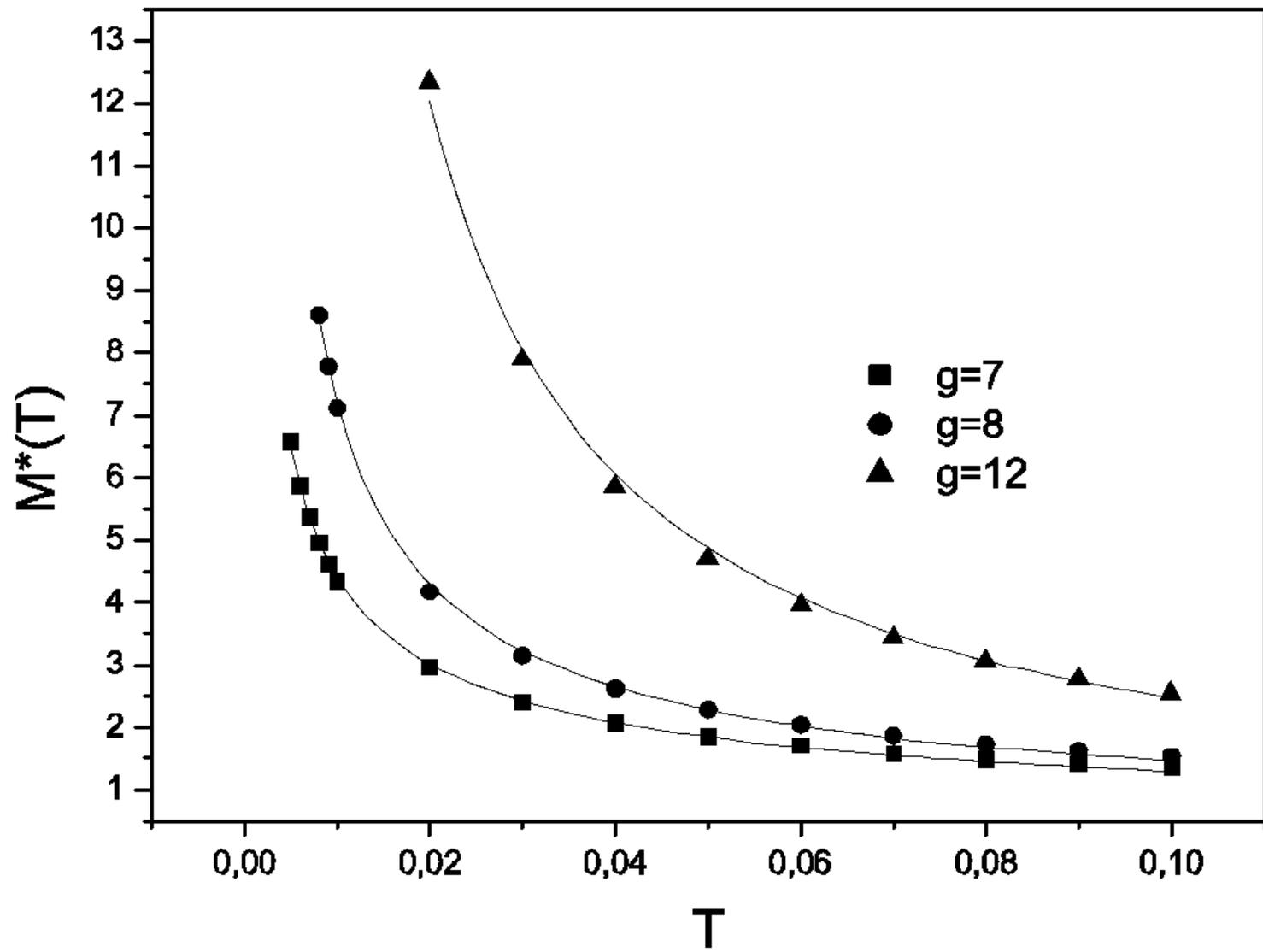
M.V. Zverev, V.A.Khodel, JETP Lett. 79, 772 (2004).

# Система после фазового перехода



$$S_{NFL}(T) \simeq S_0(r) + a\sqrt{\frac{T}{T_f}} + b\frac{T}{T_f},$$

$$C(T) \propto \sqrt{T}.$$



$$M^*(T) \propto a_1/T + a_2\sqrt{T} + a_3.$$

## Выводы

В отличие от стандартных квантовых фазовых переходов, физика которых определяется термическими и квантовыми флуктуациями и характеризуется отсутствием квазичастиц, поведение ферми-систем до и после ферми-конденсатного фазового перехода определяется квазичастицами, отличающимися от квазичастиц Ландау. Такое поведение является внутренним свойством сильно коррелированных систем.

В отличие от квазичастиц Ландау эффективная масса новых квазичастиц сильно зависит от температуры, магнитного поля, плотности и т.д. Эта система квазичастиц имеет демонстрирует универсальные свойства.

Такое поведение является внутренним свойством сильно коррелированных систем.

**Спасибо за внимание.**