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.
- Мзезане А.З., Кларковский университет Атланты, США.
- Попов К.Г., Коми НЦ, УрО, РАН, Россия.

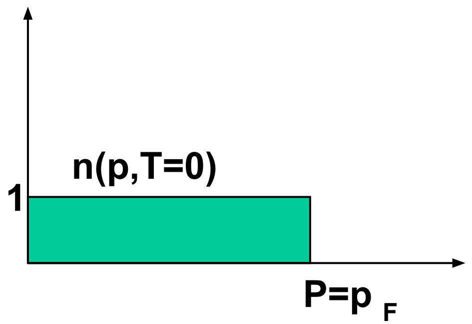
Мотивации проекта

- 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.



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

$$S[n(p,T)] = -2\int \{n(p,T)\ln\left(n(p,T)\right)$$

$$+(1-n(p,T))\ln(1-n(p,T))\}d^3p/(2\pi)^3$$

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

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

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

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

Уравнение Ландау для эффективной массы квазичастиц

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

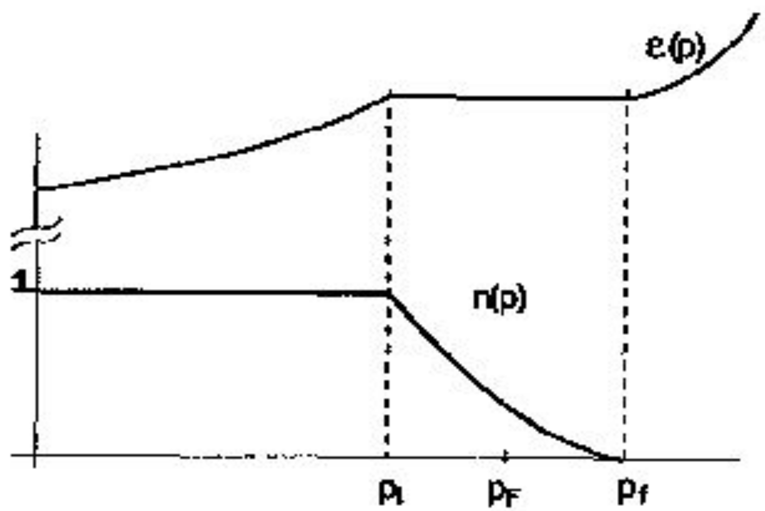
$$F^1(x)=F^1(p_F,p_F);\qquad x=p_F^{\ 3}/(3\pi^2).$$

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

Ферми-конденсатный квантовый фазовый переход

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

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



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

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

$\varepsilon(p,T)$ **- 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.

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

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

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

$$\varepsilon_0(z) = z^2 + \frac{2g}{\beta^2}[1 - (\beta+1)\sinh(z\beta)\frac{\exp(-\beta)}{z\beta}], \;\; at: \;\; z \le 1.$$

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

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

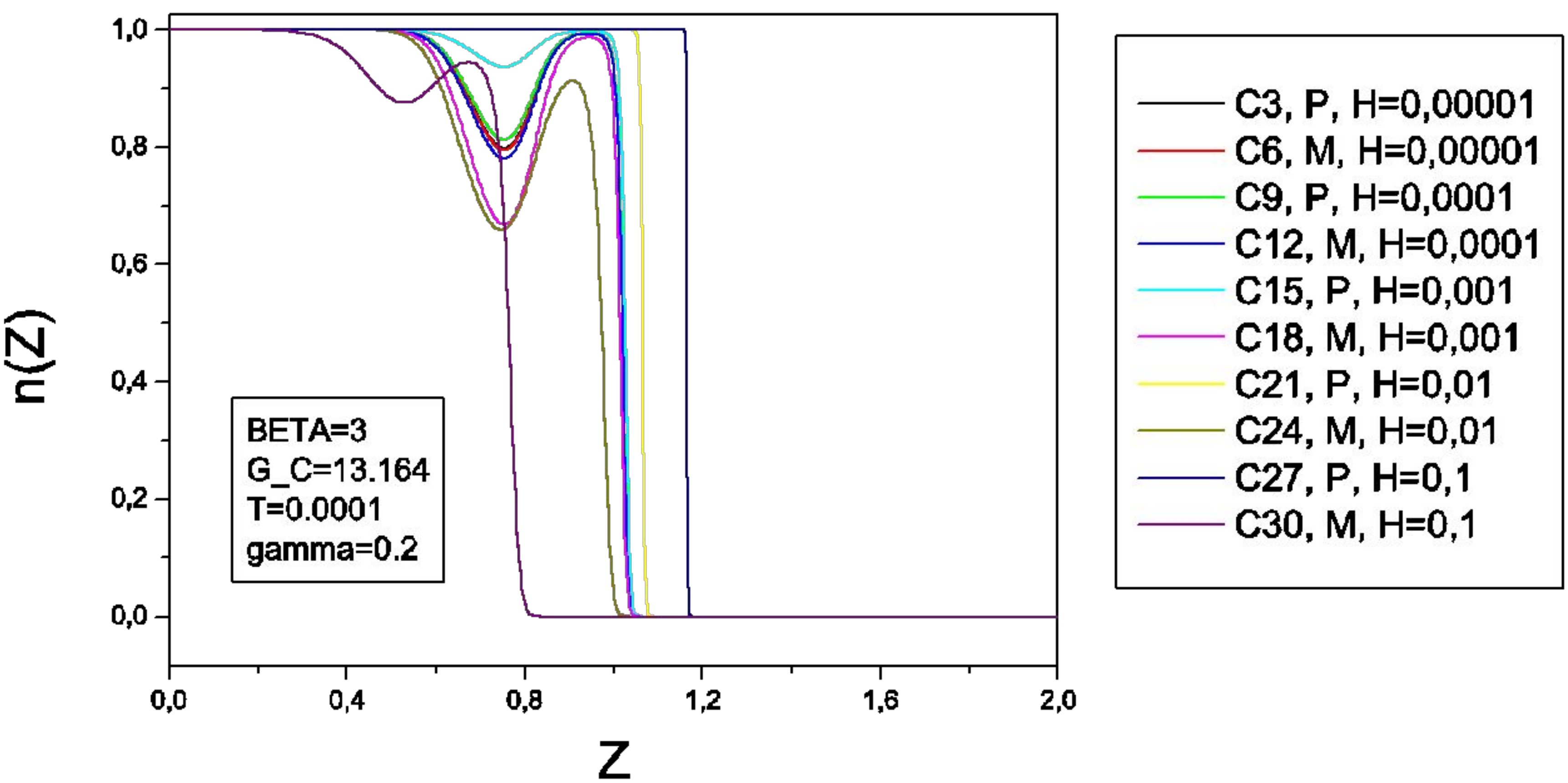
$$\varepsilon(z,T) = z^2 + \frac{g}{\beta z}\int \left[\exp(-\beta|z-z_1|) - \exp(-\beta|z+z_1|)\right] n(z_1,T) z_1 dz_1.$$

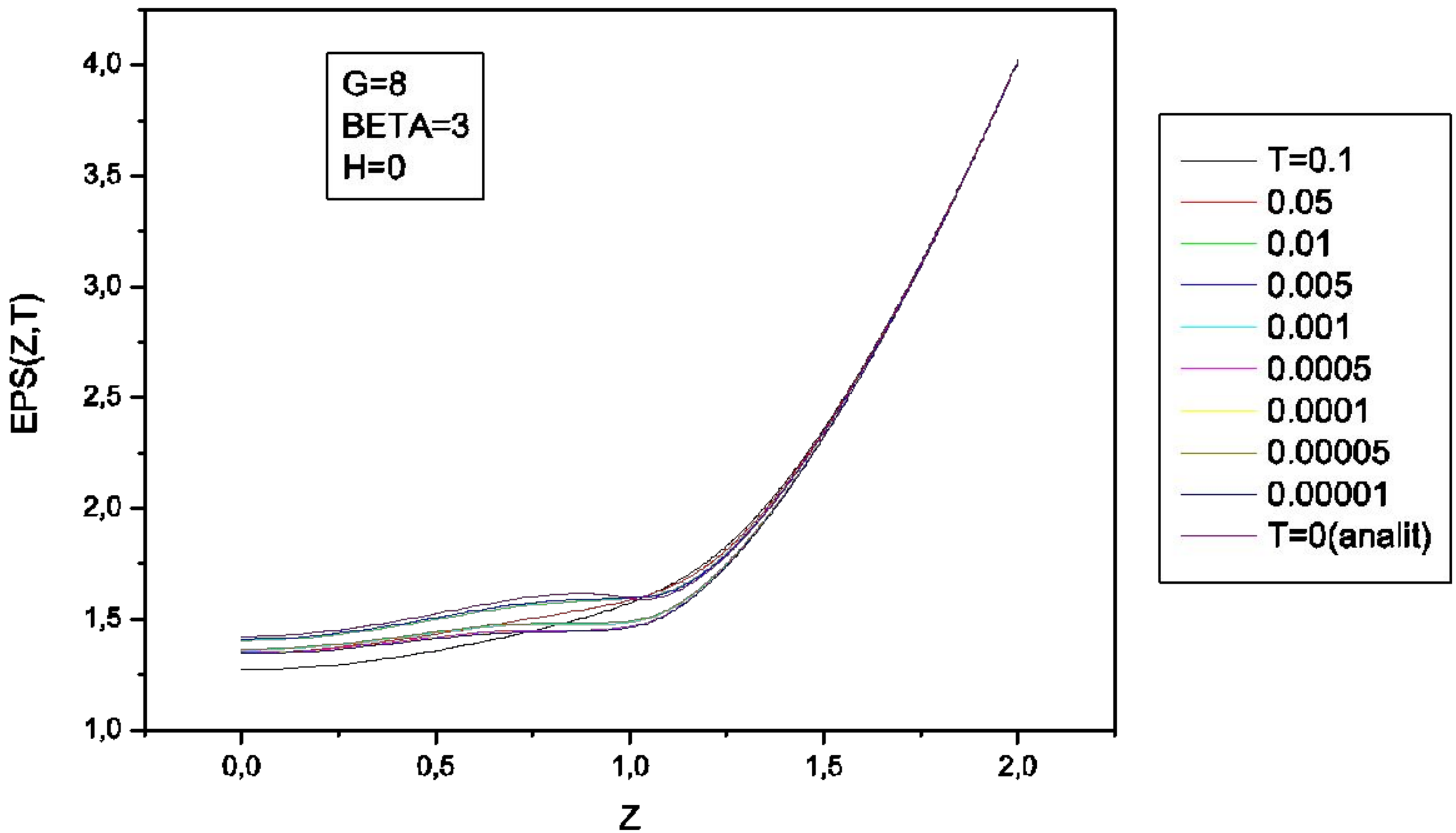
$$n(z,T) = \frac{1}{1+\exp[(\varepsilon(z,T)-\mu)/T]}$$

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

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

Примеры спектров и функций распределения




G=8
BETA=3
H=0
EPS(Z,T)
Z
4,0
3,5
3,0
2,5
2,0
1,5
1,0
0,0
0,5
1,0
1,5
2,0
T=0.1
0.05
0.01
0.005
0.001
0.0005
0.0001
0.00005
0.00001
T=0(analit)

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

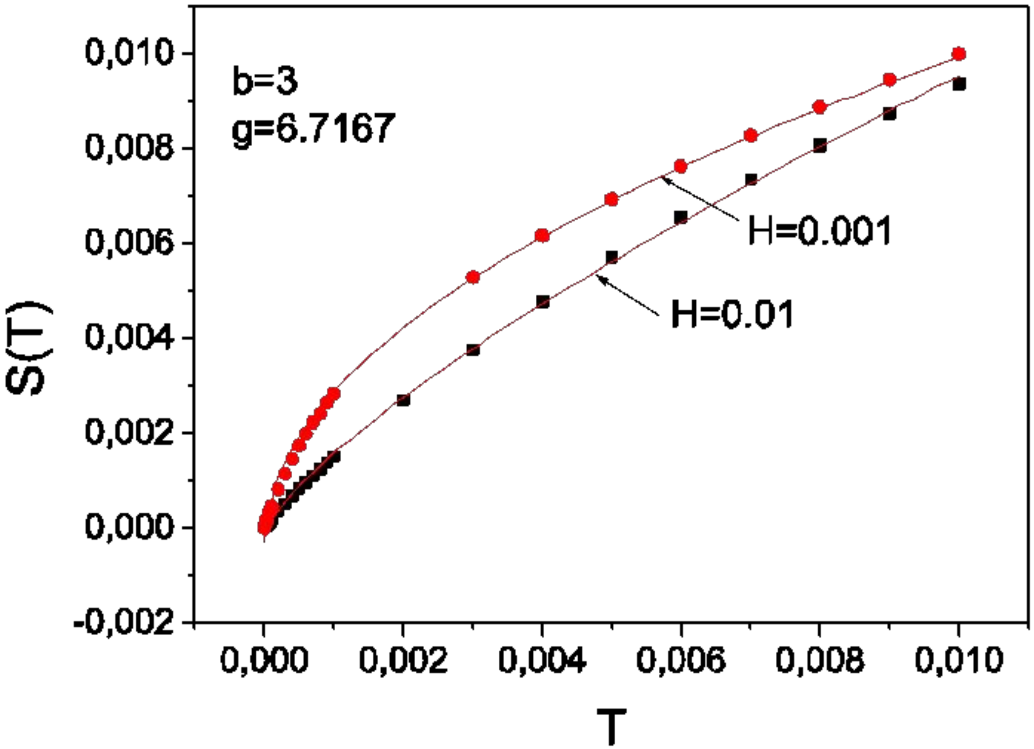
$$C(T) = \gamma_0 T = \frac{dS(T)}{dT}.$$

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

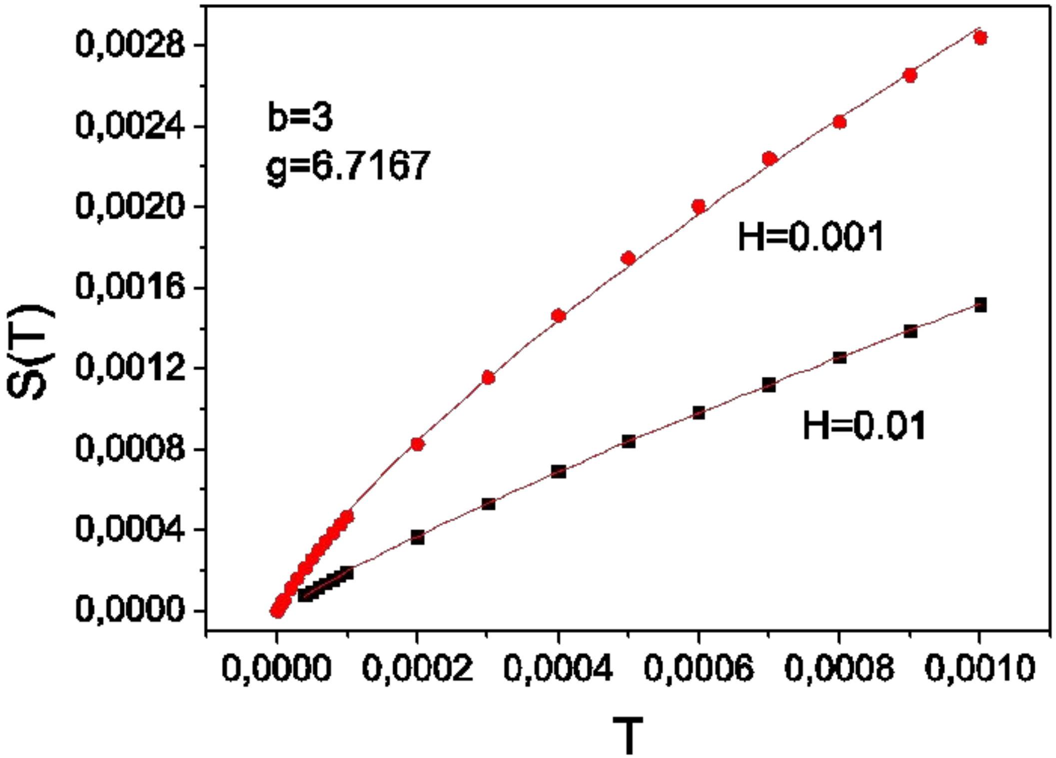
$$M^* T = 2\frac{p_F^3}{\pi^2} \sum_{\pm} \int n(z, \pm H, T)[1 - n(z, \pm H, T)] z^2 dz.$$

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

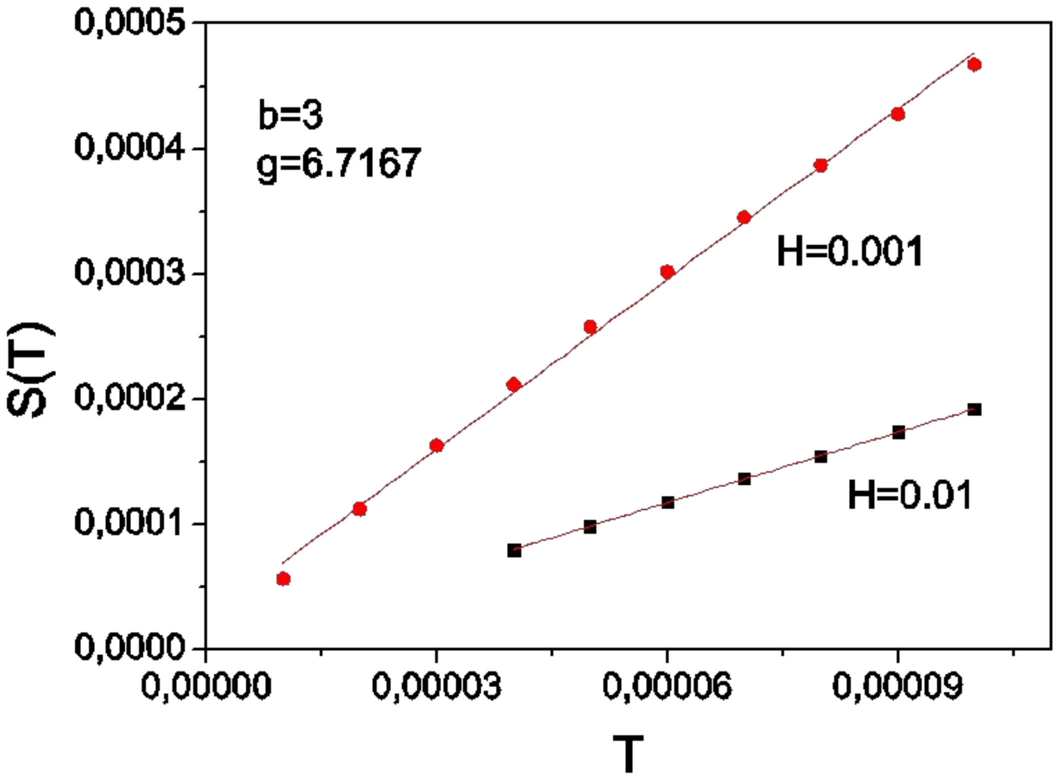
Система в критической точке под действием магнитного поля



b=3
g=6.7167
H=0.01
S(T)=P1+P2*T^P3
P1 -0.00013±0.00003
P2 0.31±0.01
P3 0.75±0.01
-----
b=3
g=6.7167
H=0.001
S(T)=P1+P2*T^P3
P1 -0.00038±0.00003
P2 0.1031±0.0008
P3 0.5±0.1



b=3
g=6.7167
H=0.01
S(T)=P1+P2*T^P3
P1 -0.00003±3E-6
P2 0.52±0.02
P3 0.841±0.005
-----
b=3
g=6.7167
H=0.001
S(T)=P1+P2*T^P3
P1 -0.00004±8E-6
P2 0.51±0.03445
P3 0.75±0.01



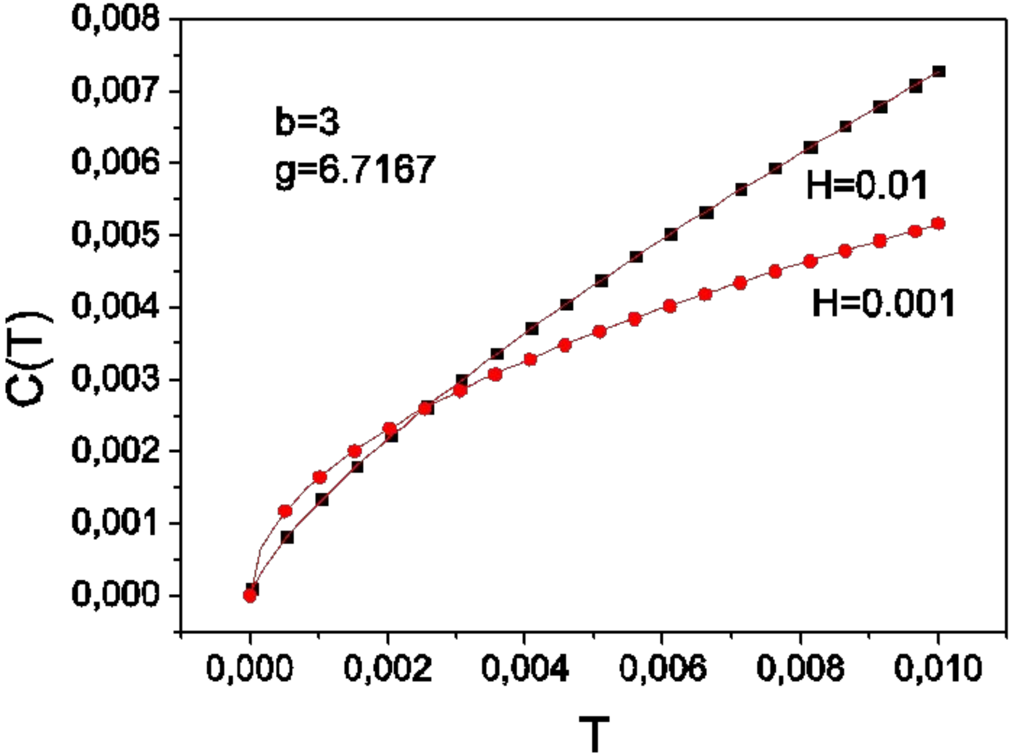
b=3
g=6.7167
H=0.01
S(T)=P1+P2*T

P1	4E-6±4E-7
P2	1.878±0.006

----

b=3
g=6.7167
H=0.001
S(T)=P1+P2*T

P1	0.000020±5E-6
P2	4.53±0.08



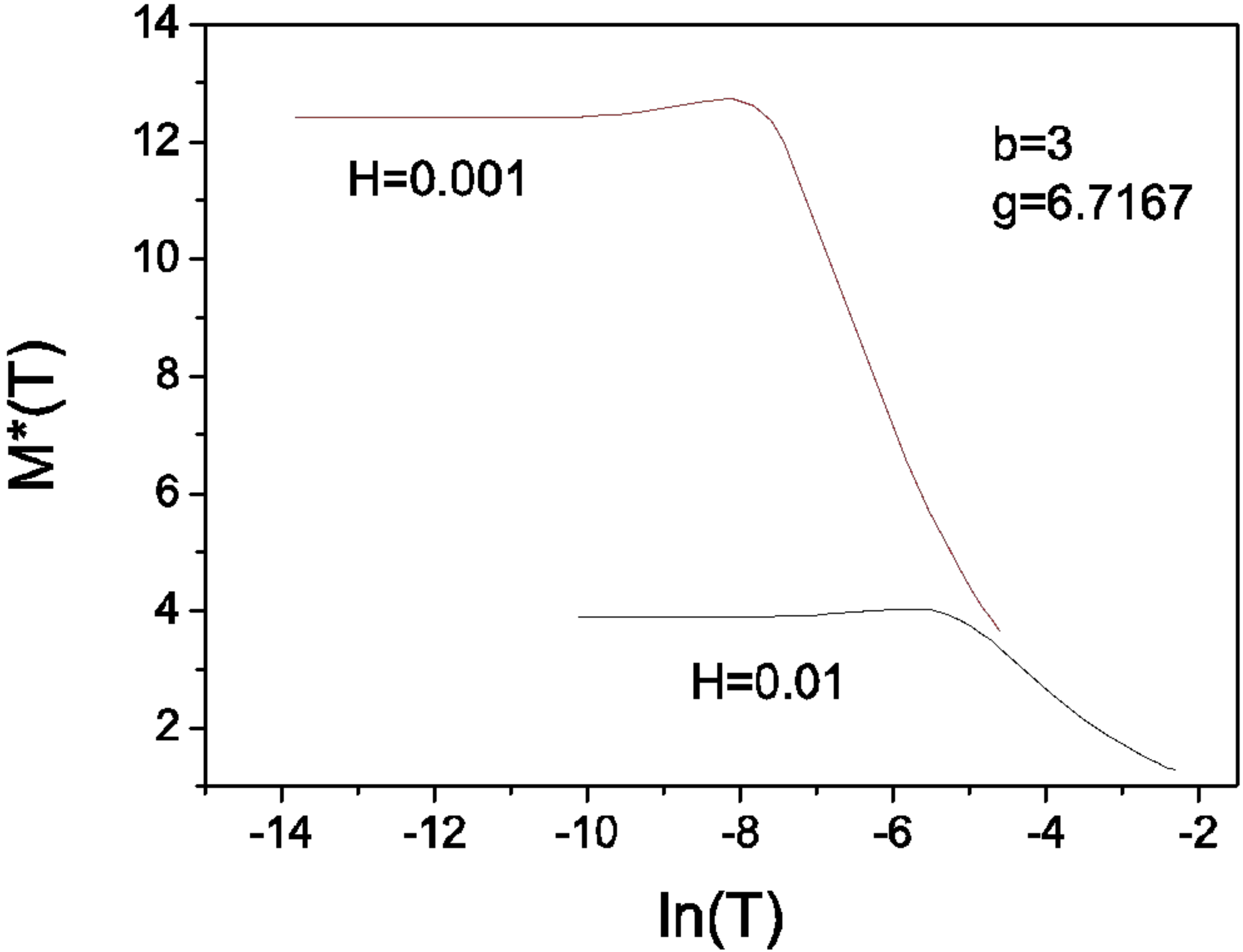
b=3
g=6.7167
H=0.01
S(T)=P1+P2*T^P3

P1	-0.00002±5E-6
P2	0.229±0.001
P3	0.749±0.001

-----

b=3
g=6.7167
H=0.001
S(T)=P1+P2*T^P3

P1	-0.000040±9E-6
P2	0.0504±0.0004
P3	0.49361±0.00184

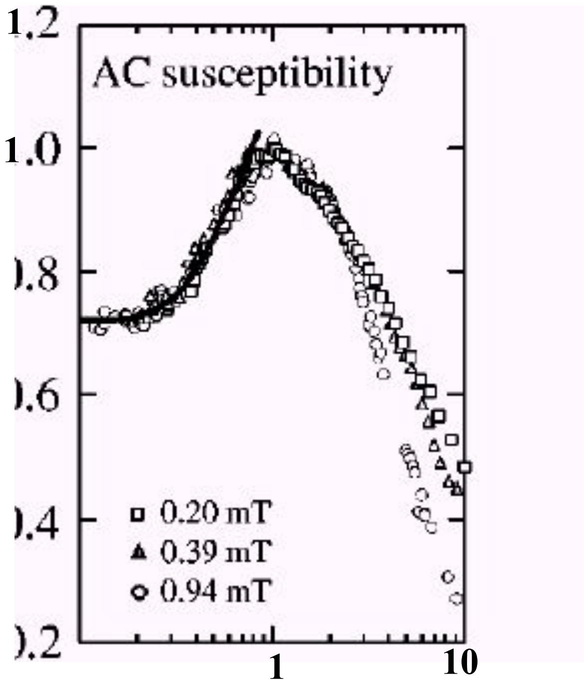


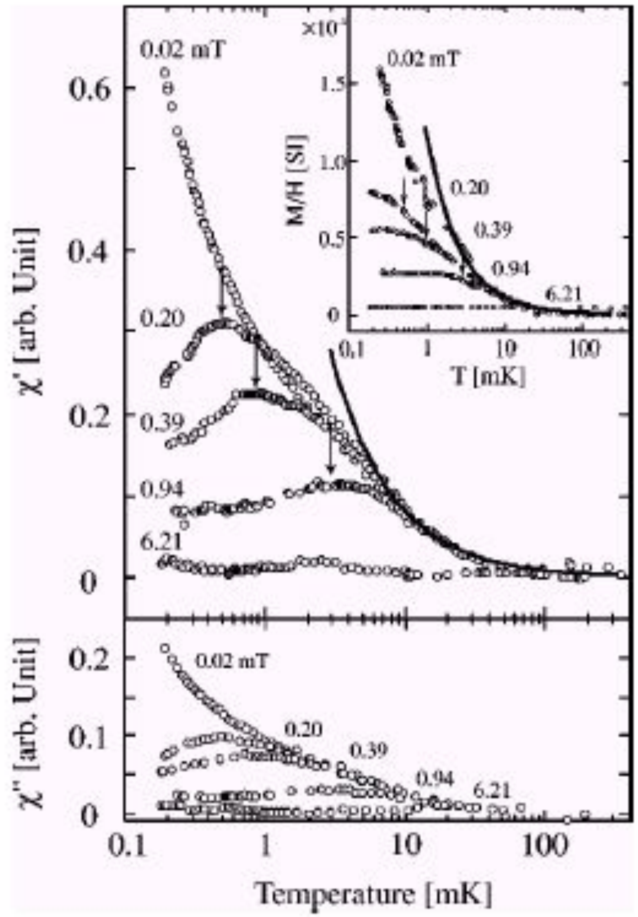
M*(T)
ln(T)
H=0.001
H=0.01
b=3
g=6.7167
14
12
10
8
6
4
2
-14
-12
-10
-8
-6
-4
-2

D. Takahashi *et al.*, Phys. Rev. B 67, 18407 (2003).

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

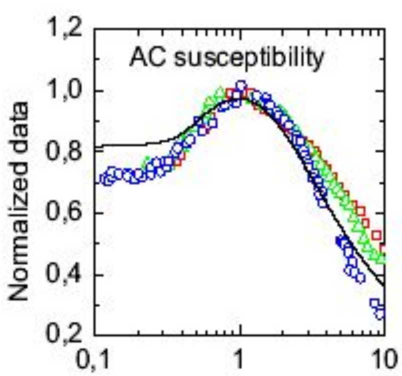
Temperature dependence of the magnetic susceptibility at different applied fields.

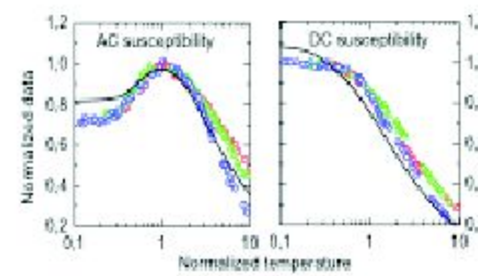




CeRu$_2$Si$_2$

$$B_c = 0$$

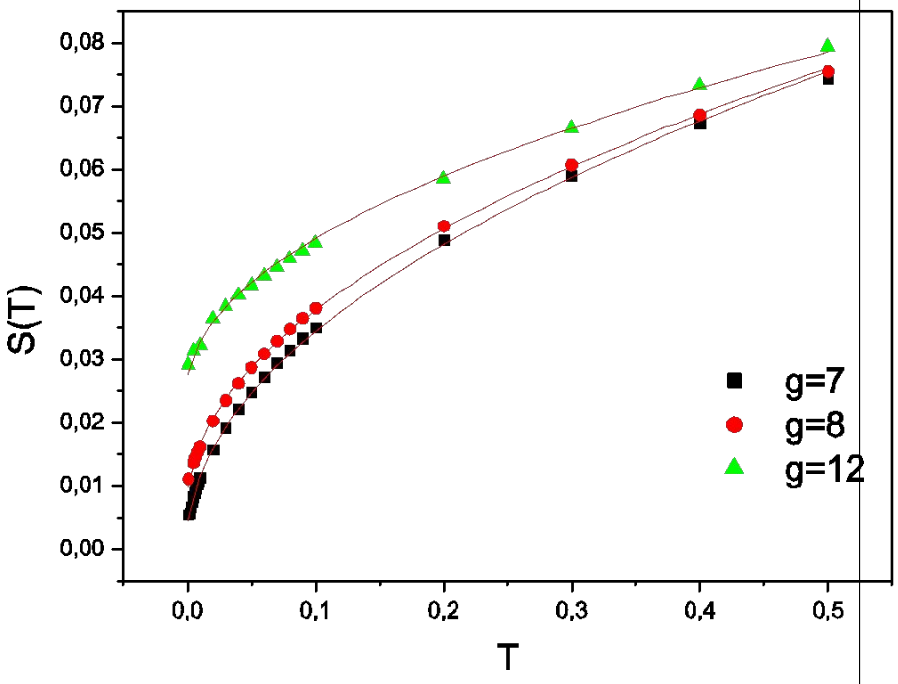


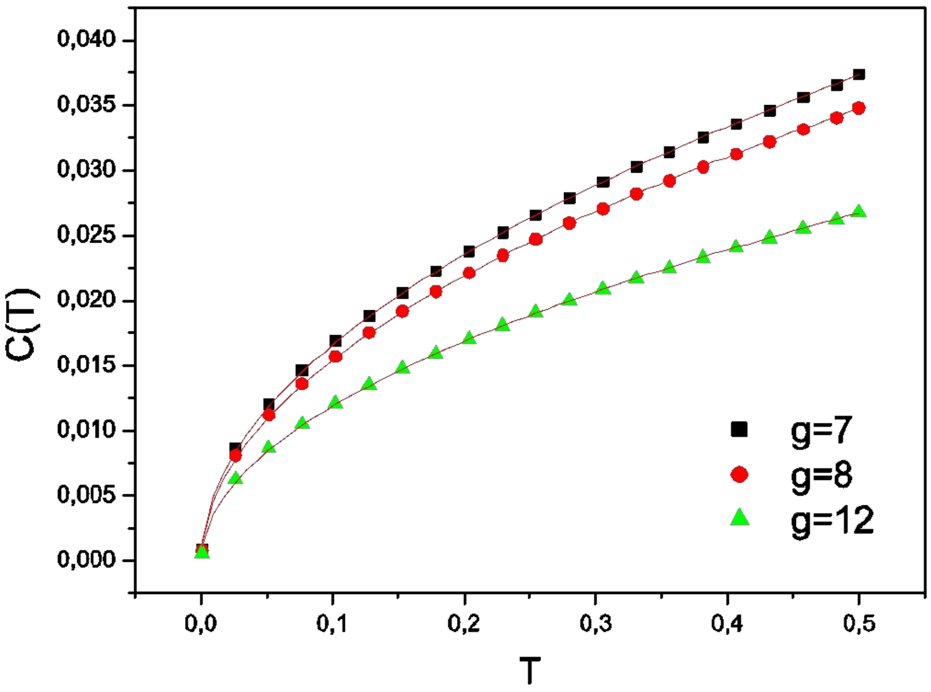


V.R. Shaginyan, JETP Lett. 79, 344 (2004).

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

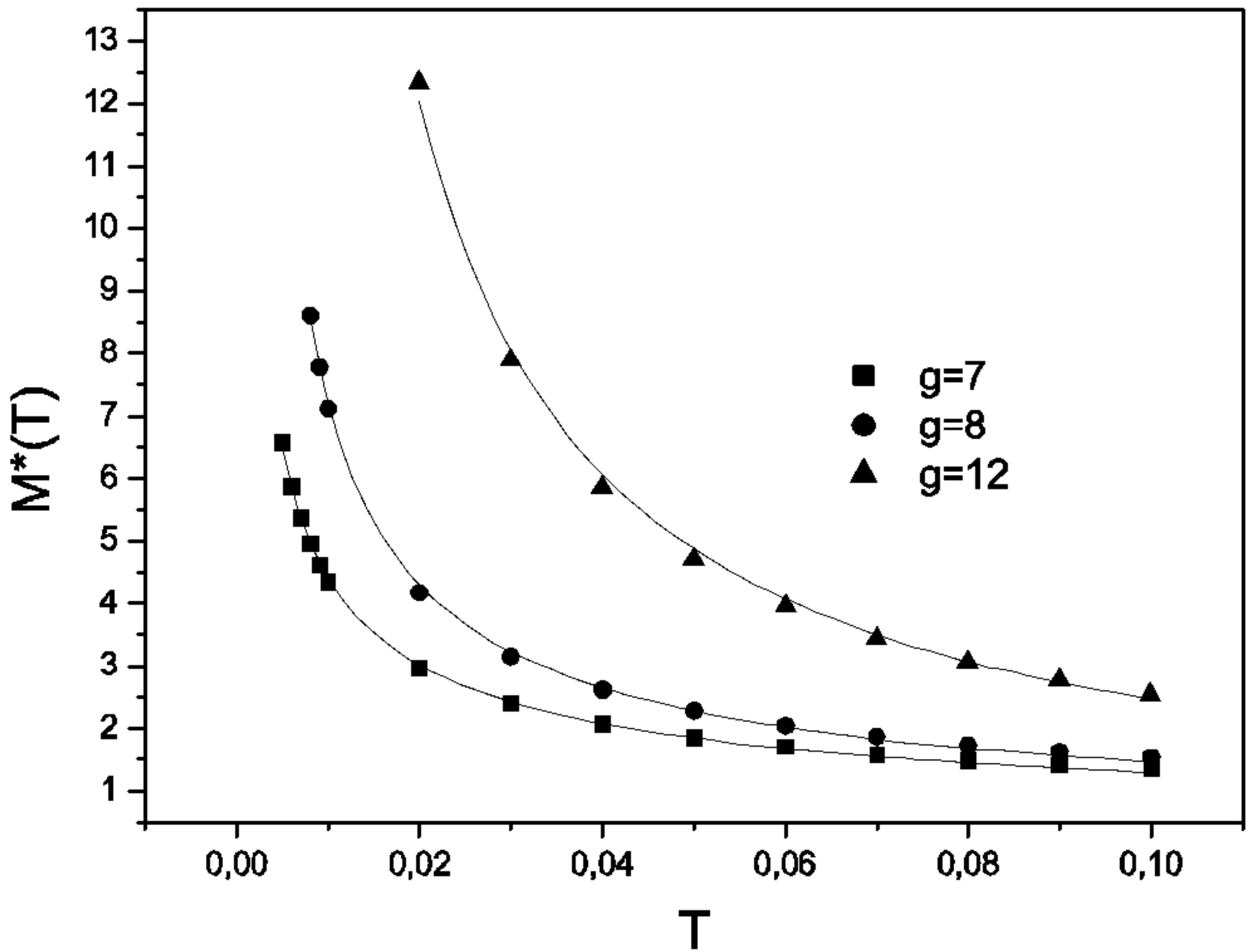
Система после фазового перехода





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

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



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

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.