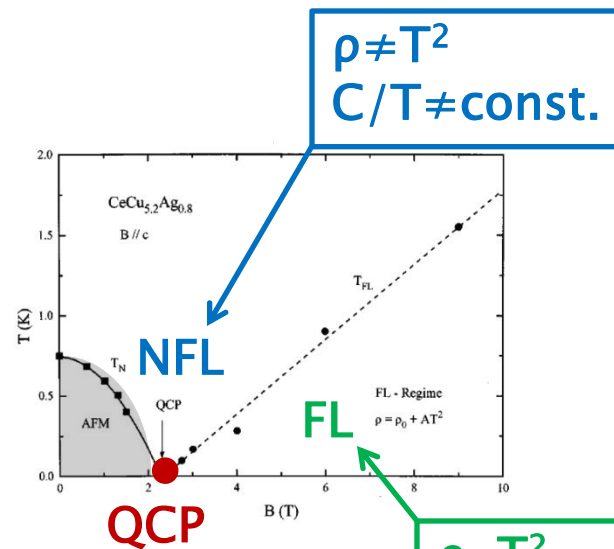
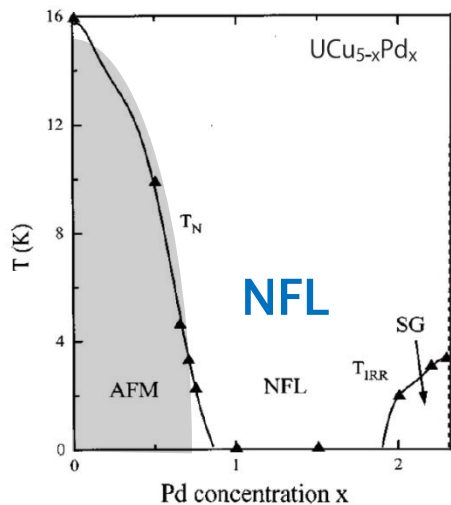
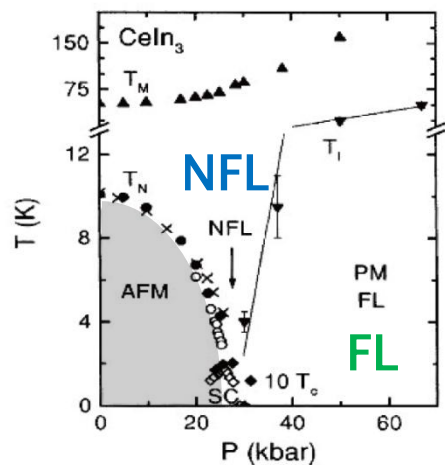




量子臨界点近傍の超伝導

多田 靖啓
京大理

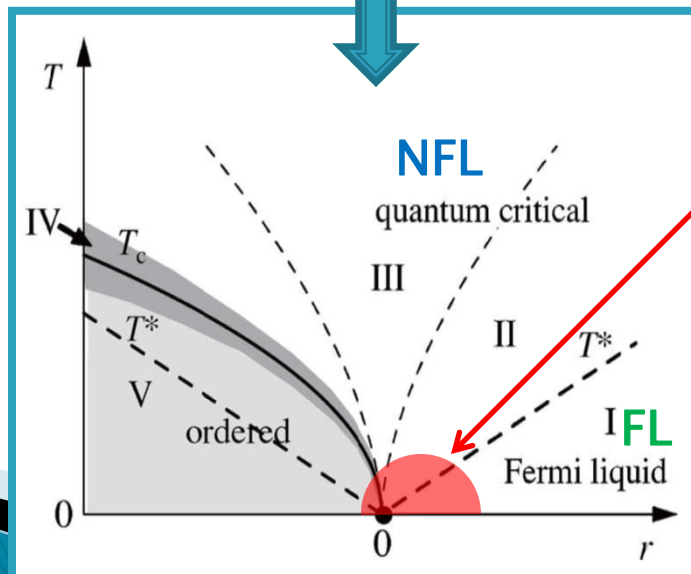
はじめに



圧力

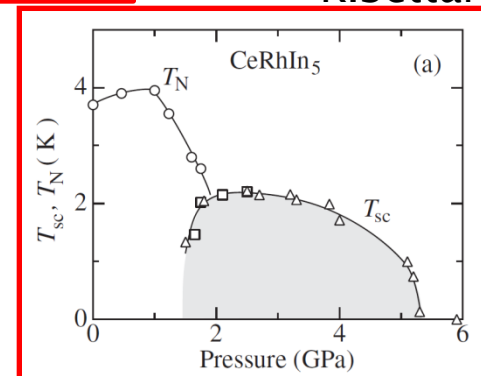
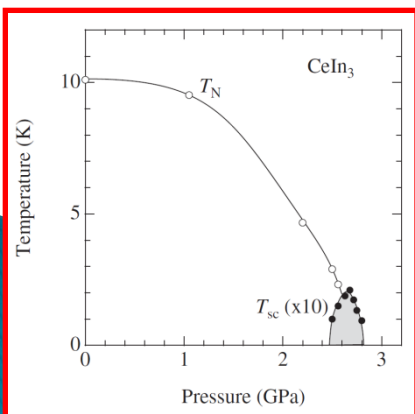
置換

磁場



超伝導

R.Settai et al



①

②

③

④

アウトライン

- ①量子相転移、量子臨界点近傍の相図
 - ・フェルミ液体と「非フェルミ液体」

- ②量子相転移の理論
 - ・Hertz-Millis理論
 - ・SCR理論

- ③強相関電子系の超伝導
 - ・Eliashberg方程式

- ④磁気量子臨界点近傍の超伝導
 - ・強磁性・・・UCoGe
 - ・反強磁性・・・CeCoIn₅, (CeRhSi₃, CeIrSi₃)

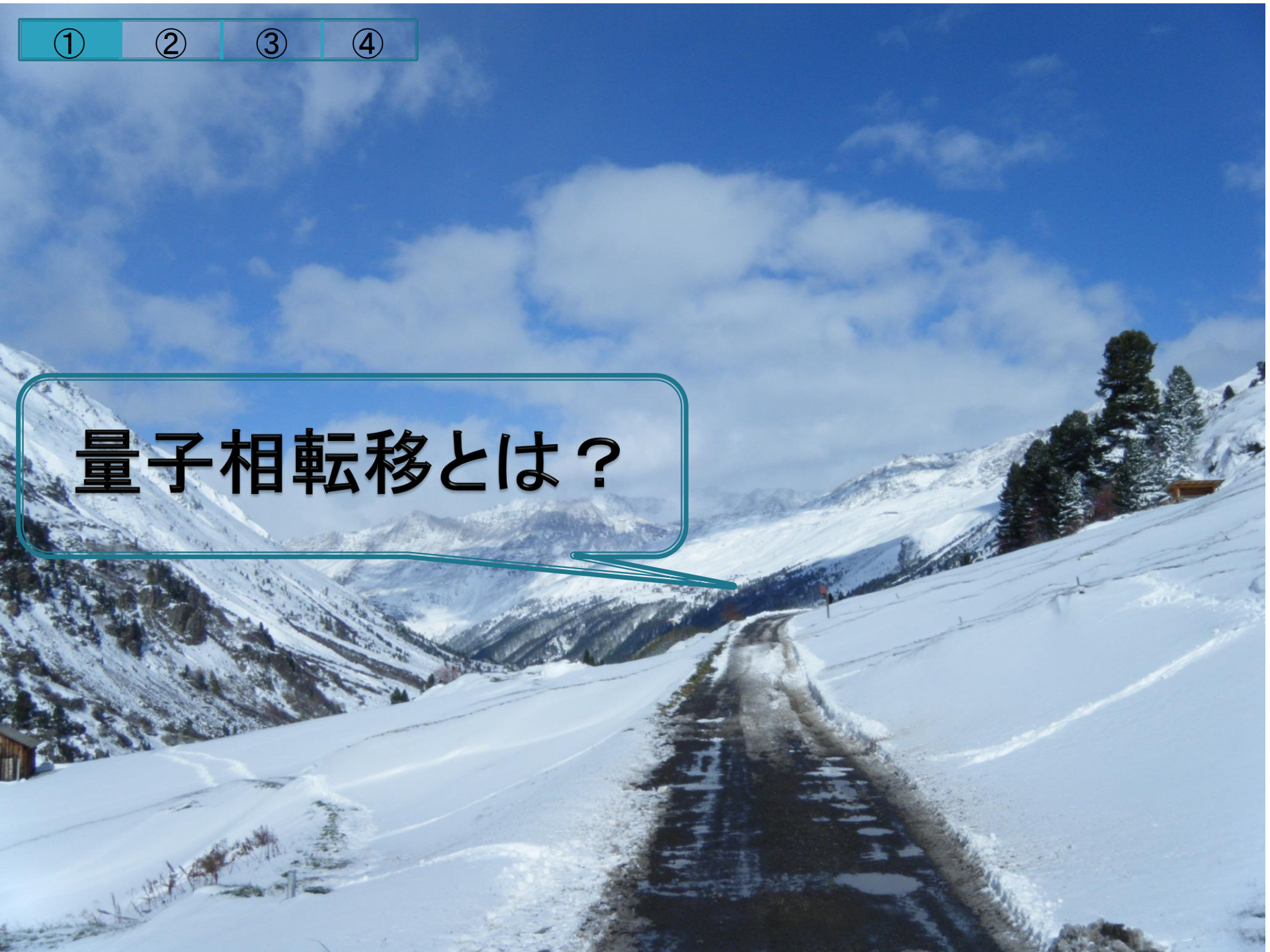
①

②

③

④

量子相転移とは？



①

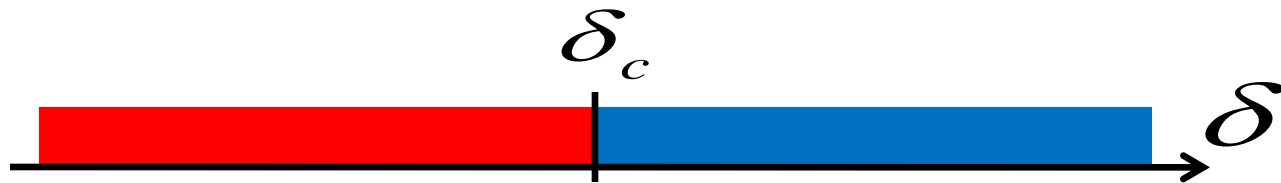
②

③

④

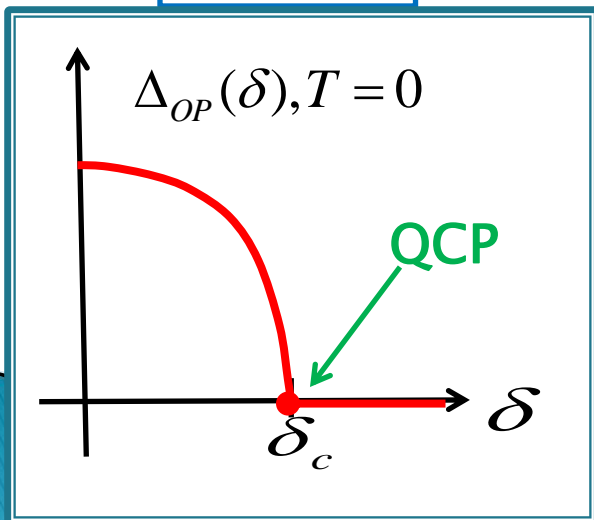
量子相転移

- ・ $T=0$ で起こる相転移
- ・外部パラメータ δ = 圧力、ドーピング、磁場、...

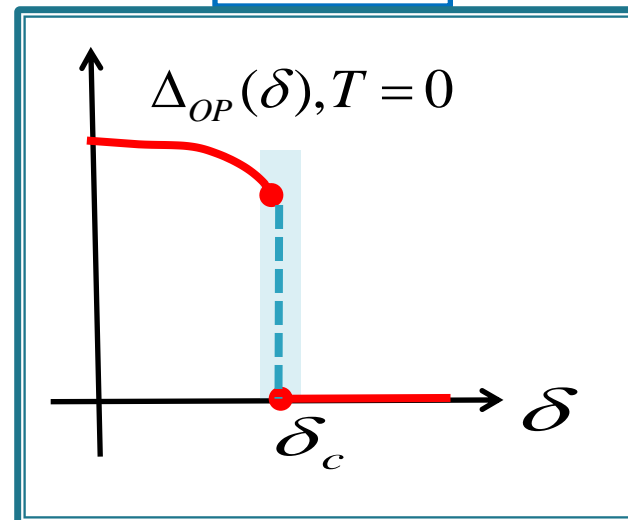


常磁性 \Leftrightarrow (反)強磁性
 金属 \Leftrightarrow 絶縁体
 常伝導 \Leftrightarrow 超伝導

連続転移



1次転移



①

②

③

④

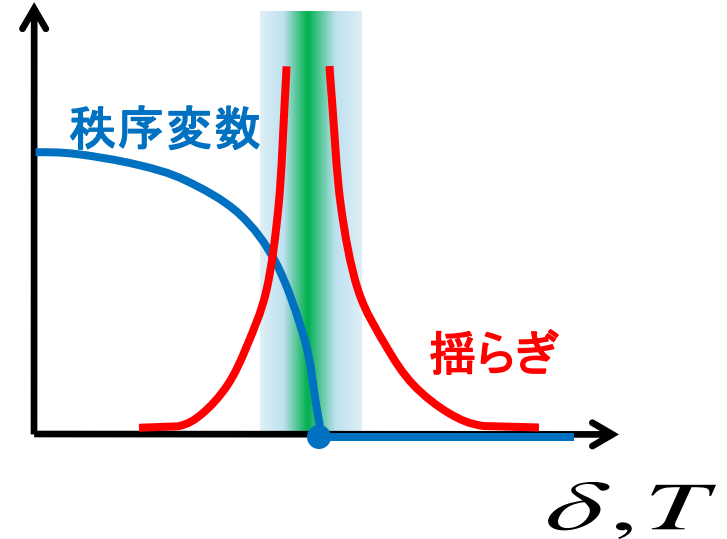
熱揺らぎと量子揺らぎ

連続転移:

状態は連続的に変化 $\rightarrow\rightarrow\rightarrow$ **揺らぎ**

- ・熱揺らぎ (統計力学)
- ・量子揺らぎ (量子力学)

$$H = - \sum_i JS_i^z S_{i+1}^z - h_x \sum_i S_i^x$$

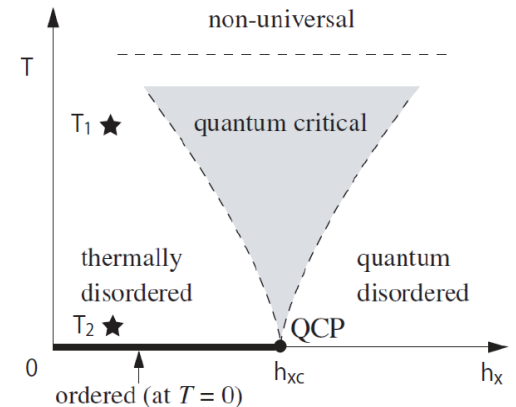
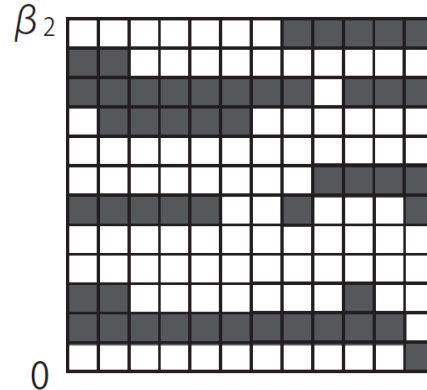
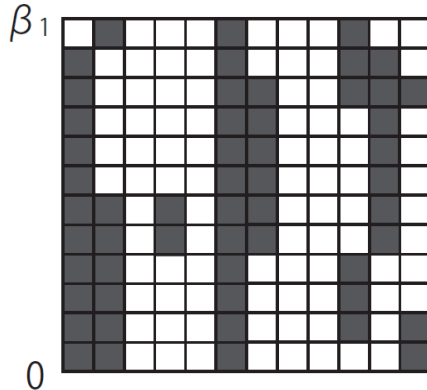


量子揺らぎ

\Rightarrow 量子力学的非可換性のために物理量が揺らぐ (量子力学的性質)

$$[S_i^x, S_i^z] \neq 0$$

虚時間依存性



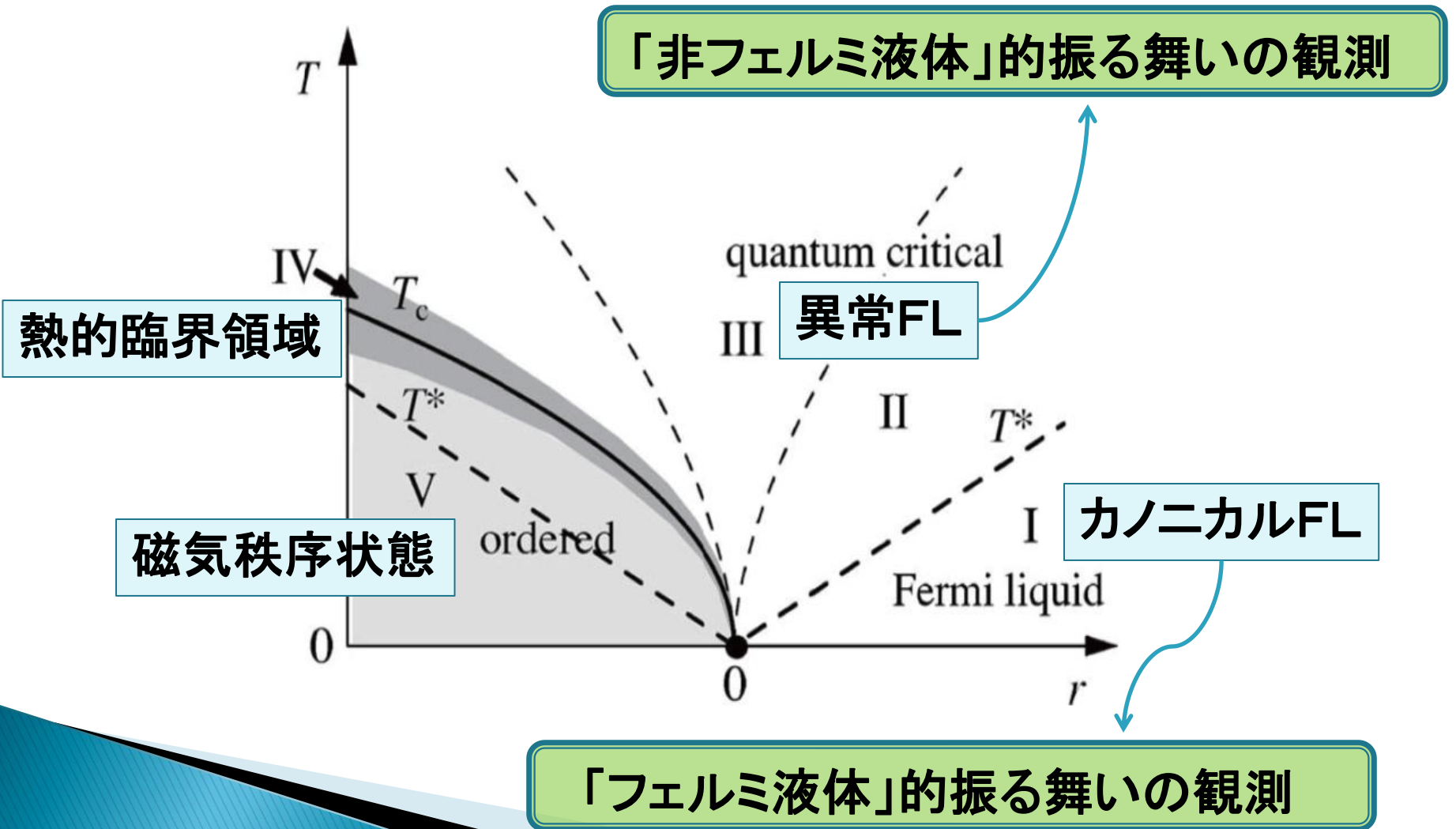
①

②

③

④

量子臨界点近傍の相図



①

②

③

④

カノニカル・フェルミ液体と異常フェルミ液体

? FL = 準粒子寿命が T^{-2} ← より広い状況下でFLは定義されている

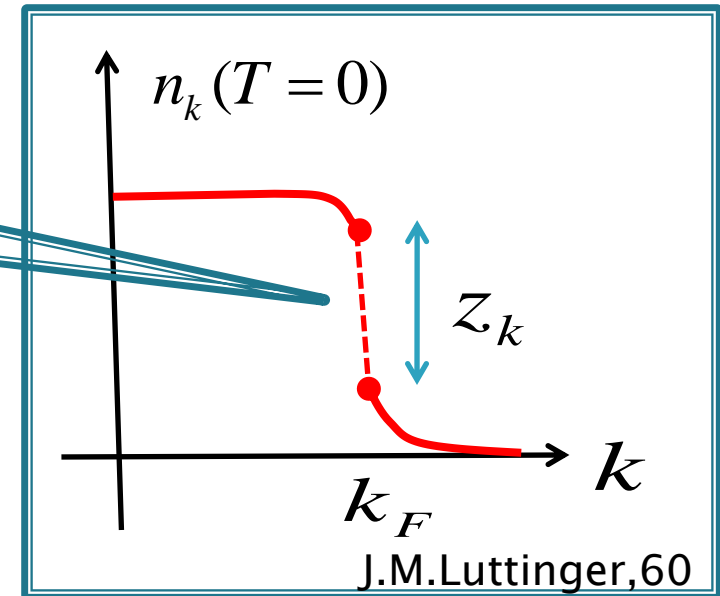
定義:

- ・FL = 「準粒子がよく定義される熱力学状態」
- ・準粒子 = 「寿命 \gg 熱攪乱時間 $1/T$ 」

☆FL = 準粒子寿命が $T^{-\alpha}$, $\alpha \geq 1$

Fermi面に「とび」zがある

- ・CFL = 寿命が T^{-2}
- ・AFL = 寿命が $T^{-\alpha}$, $1 \leq \alpha < 2$



Landauの現象論的FL理論も「準粒子寿命 $\gg 1/T$ 」しか要求していない

①

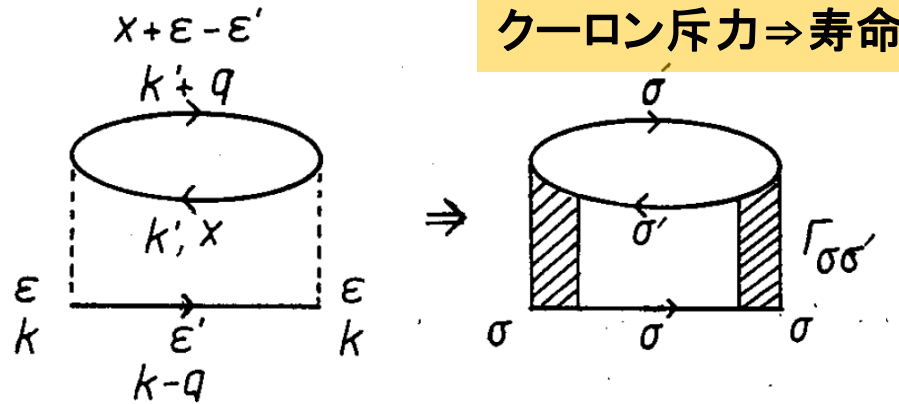
②

③

④

FLにおける準粒子寿命

強い揺らぎがない場合



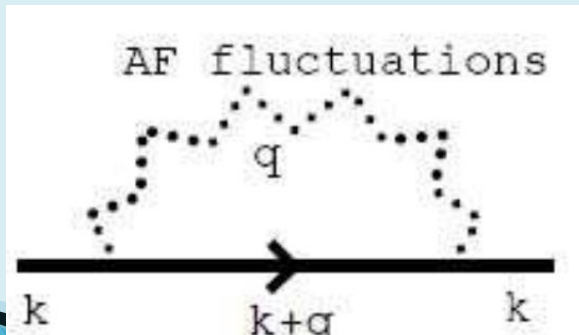
CFL

$$\sim T^2$$

QCPの影響弱い

K.Yamada et al (86)

強い揺らぎが相互作用を支配している場合



$$\sim T^\alpha \quad 1 \leq \alpha \leq 2$$

QCPの影響強い

H.Kontani et al (07)

(クーロン斥力⇒)揺らぎ⇒寿命

①

②

③

④

NFLの例: Tomonaga-Luttinger液体

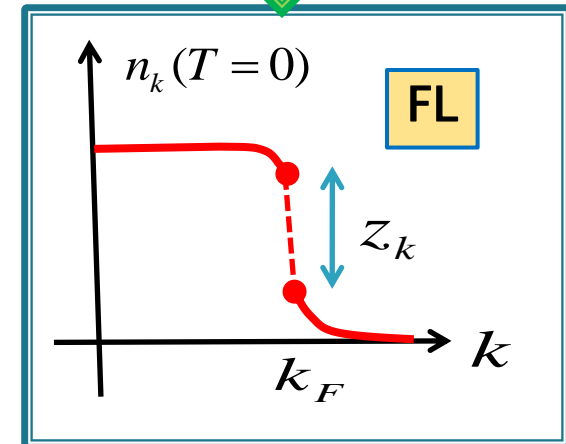
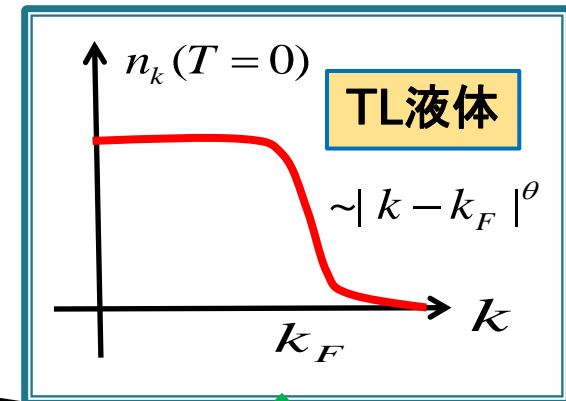
低エネルギー励起 = 「電荷集団励起」 + 「スピン集団励起」

物理量に「ベキ異常」

$n(k)$ に z のとびナシ

準粒子は定義できない

Fermi液体:
低エネルギー励起 = 準粒子励起



①

②

③

④

中間まとめ 1

- ・量子相転移: $T=0$ での相転移
 - ・チューニングパラメータ: 圧力、置換、磁場
 - ・相転移点: 量子臨界点(QCP)
- ・揺らぎ
 - ・熱揺らぎ (有限温度効果)
 - ・量子揺らぎ (量子力学的効果)
- ・FL: $\tau_{qp} \gg \tau_{\text{thermal}}$ が成立条件、準粒子の形成
 - ・CFL: $\tau_{qp} \sim T^{-2}$... QCPの影響弱い
 - ・AFL: $T^{-1} \leq \tau_{qp} < T^{-2}$... QCPの影響強い

①

②

③

④

アウトライン

①量子相転移、量子臨界点近傍の相図

- ・フェルミ液体と「非フェルミ液体」

②量子相転移の理論

- ・Hertz-Millis理論
- ・SCR理論

③強相関電子系の超伝導

- ・Eliashberg方程式

④磁気量子臨界点近傍の超伝導

- ・強磁性・・・UCoGe
- ・反強磁性・・・CeCoIn₅, (CeRhSi₃, CeIrSi₃)

①

②

③

④

量子相転移の理論

①

②

③

④

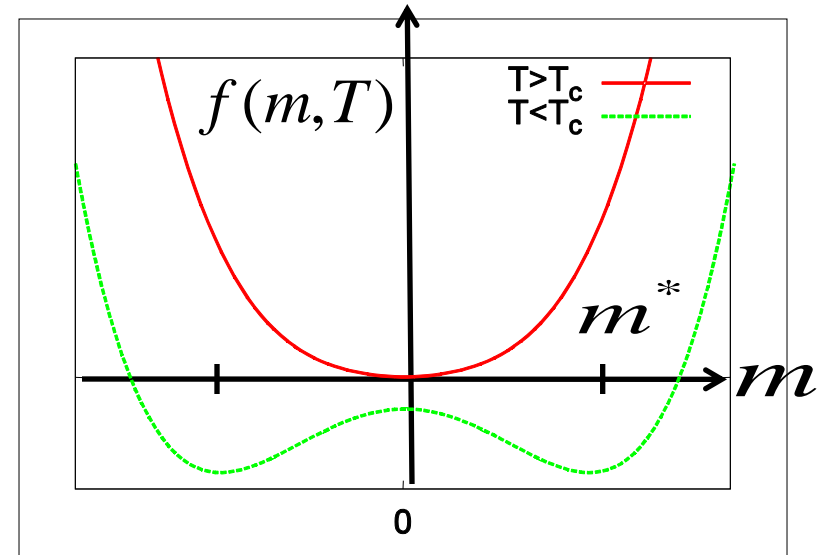
スピン揺らぎの有効理論

Landauの疑似自由エネルギー **電子のスピン自由度のみに注目!**

$$f(m, T) = f_0(T) + a(T)m^2 + bm^4$$

拡張

- ・非一様性 $m \rightarrow \phi(\vec{x}, \tau)$
- ・空間的揺らぎ $\rightarrow \nabla \phi(\vec{x}, \tau)$
- ・時間的揺らぎ $\rightarrow \partial/\partial\tau \phi(\vec{x}, \tau)$



$$S[\phi] = \frac{1}{2} \sum_q \underbrace{\chi^{-1}(q)}_{\text{帯磁率}} \phi_q \phi_{-q} + u_0 \underbrace{\int d\tau \int d^d x [\phi^2(\mathbf{x}, \tau)]^2}_{\text{モード間結合}}$$

①

②

③

④

帯磁率

NMR

$$\chi(\vec{q}, \omega_n) \approx \frac{\chi_Q}{1 + \xi^2 (\vec{q} - \vec{Q})^2 + |\omega_n| / \Omega_q}$$

中性子

量子性！

$$[\xi(T, r)]^{-2} = \delta$$

$$\chi_Q \propto \xi^2$$

$$\Omega_q \propto q^{z-2} / \xi^2$$

at QCP

$$\rightarrow 0$$

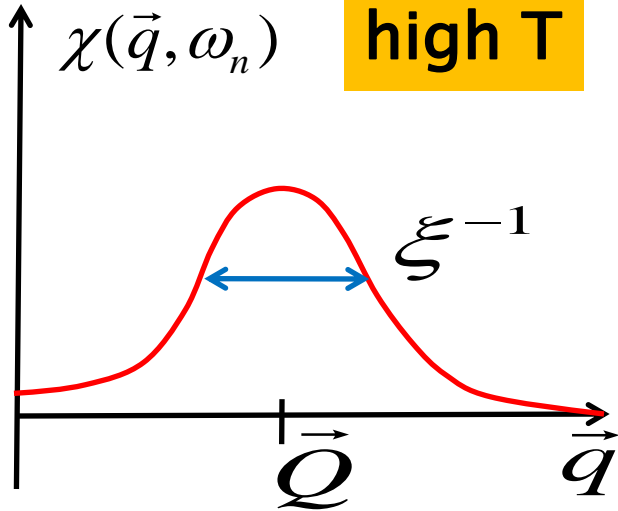
$$\rightarrow \infty$$

$$\rightarrow 0$$

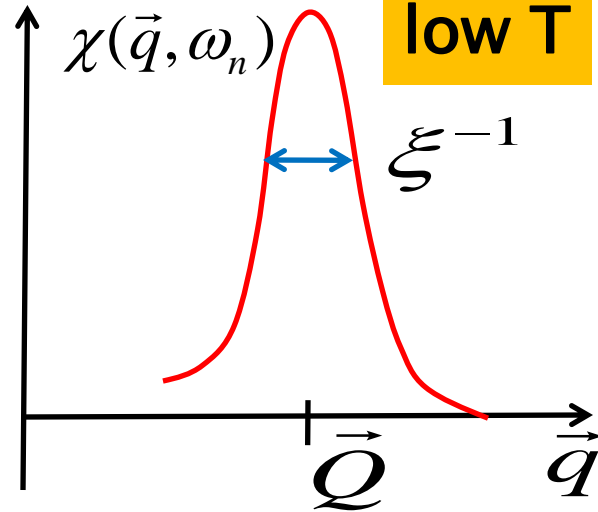
相関長 $\xi(T, r)$ によって特徴づけられる！

 $\chi(\vec{q}, \omega_n)$

high T


 $\chi(\vec{q}, \omega_n)$

low T

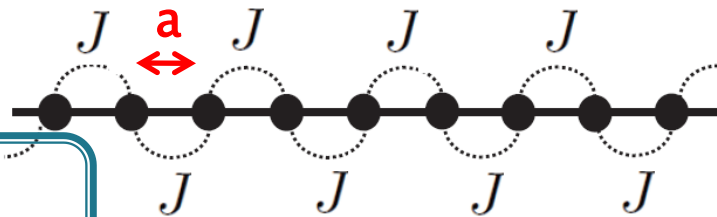


① ② ③ ④

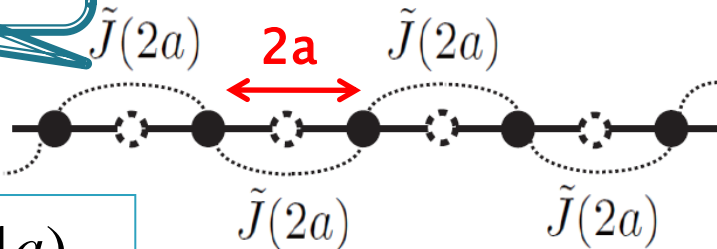
繰り込み群

スケール変換を通して系を解析する

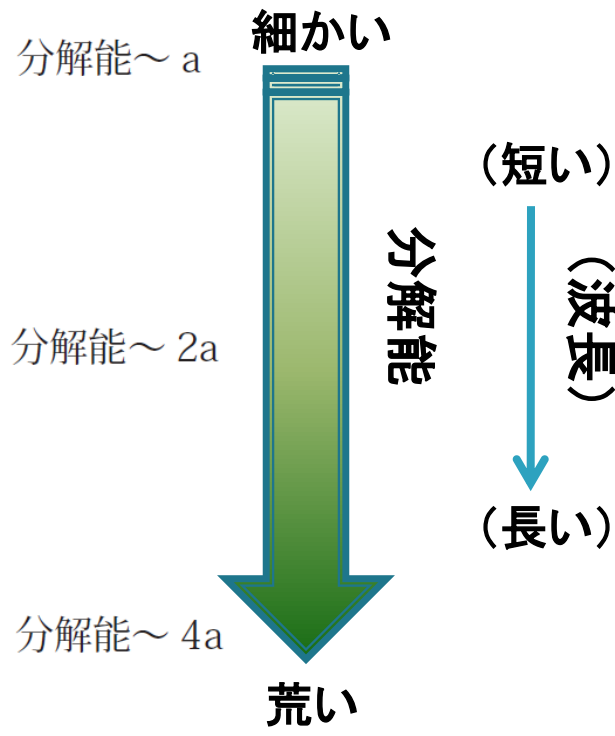
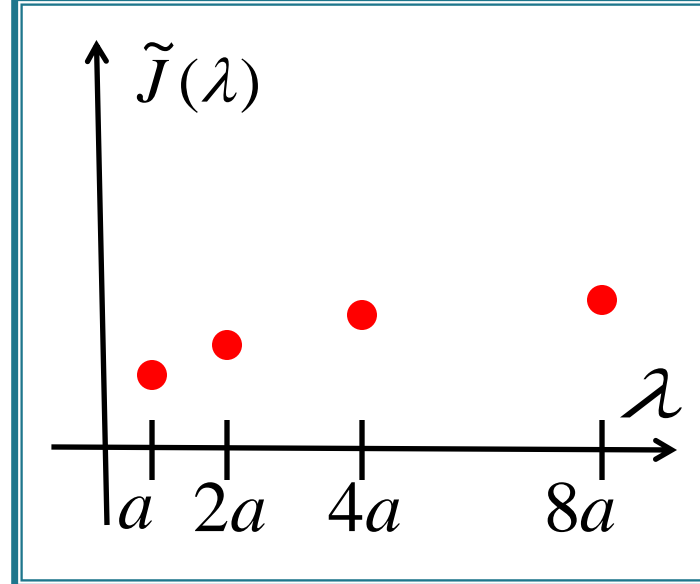
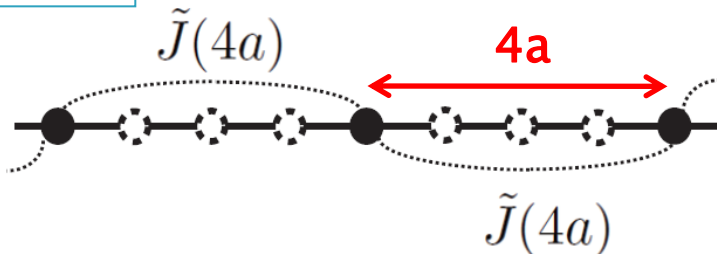
$$H = - \sum_i JS_i^z S_{i+1}^z$$



スピンを「まびいて」
有効的なモデルをつくる



$\tilde{J}(a), \tilde{J}(2a), \tilde{J}(4a), \dots$



分解能 $\sim a$

分解能 $\sim 2a$

分解能 $\sim 4a$

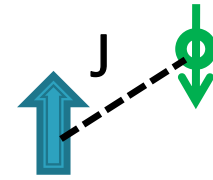
①

②

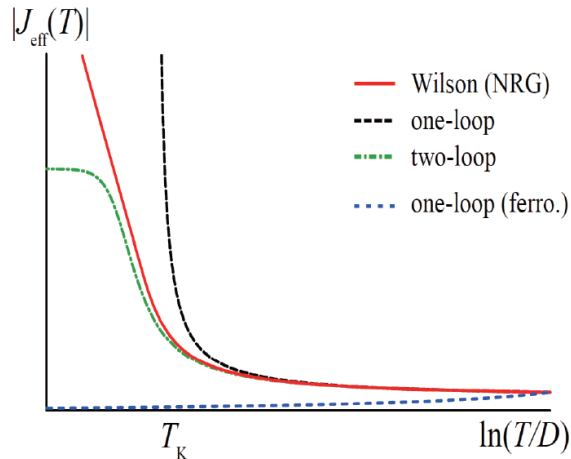
③

④

繰り込み群の例



(a) H.Kusunose



Kondo効果

・ $T \gg T_K$: フリースピン+伝導電子

AFJ を介して遮蔽

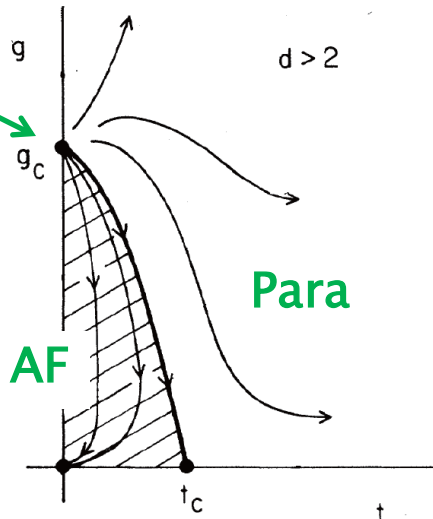
・ $T \ll T_K$: Kondo singlet

weak $J_{eff}(T)$

strong $J_{eff}(T)$

(b) S.Chakravarty et al., 88

QCP



反強磁性体

1 $\xrightarrow{\infty}$ b

$\Lambda \rightarrow \Lambda/b$ エネルギーカットオフを縮める

$\vec{X}(b) = (t(b), g(b))$

t: 温度

g: 1/(スピンスティッフネス)

QCPから高温へフロー

(effectiveに温度上がって見える)



QCPの特異性が高温に染み出してゆく!

①

②

③

④

Hertz-Millis理論

1-loop繰りこみ $\Lambda \rightarrow \Lambda/b$

$$\frac{dT(b)}{d \ln b} = \underline{zT}, \quad \rightarrow \text{温度上昇}$$

$$\frac{d\delta(b)}{d \ln b} = 2\delta + \underline{12uf_2(T, \delta)}, \quad \text{相互作用効果}$$

$$\frac{du(b)}{d \ln b} = \underline{(4 - d - z)u} - 18u^2 f_4(T, \delta).$$

$$d_{\text{eff}} = d + z$$

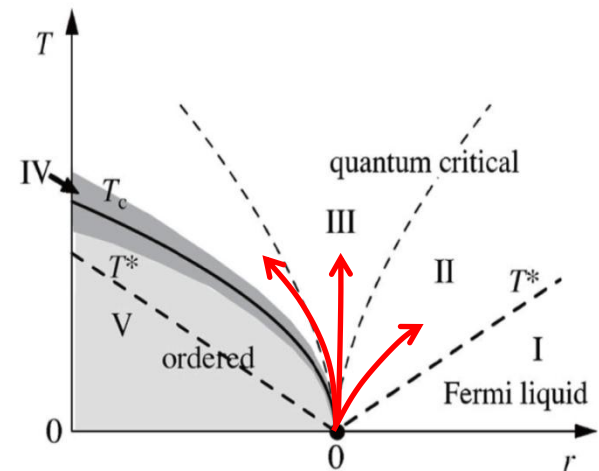
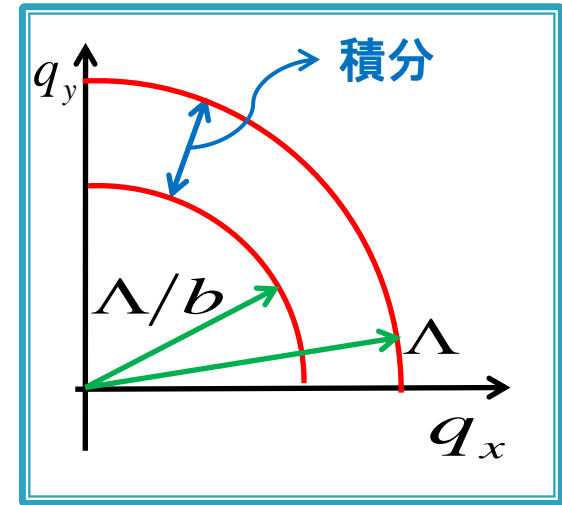


- 2D AFなら $d_{\text{eff}} = 4 \Rightarrow \lim u(b) \neq 0$
- それ以外 $d_{\text{eff}} > 4 \Rightarrow \lim u(b) = 0$

- 温度上昇「速度」= z
- u の減少「速度」= $4 - d_{\text{eff}}$



QCPの特異性が有限温度に染み出る！



①

②

③

④

Self Consistent Renormalization理論

モード間結合を自由エネルギーの変分に取り込む

$$F_{\text{var}} = F_{\delta} + \langle S - S_{\delta} \rangle_{S_{\delta}} \geq F_{\text{true}}$$

変分自由エネルギー

変分変数

真の自由エネルギー

$$S_{\delta} = \frac{1}{2} \sum_q [\delta + (q - Q)^2 + |\omega_n|/\Gamma_q] \phi_q \cdot \phi_{-q}$$

最適化条件

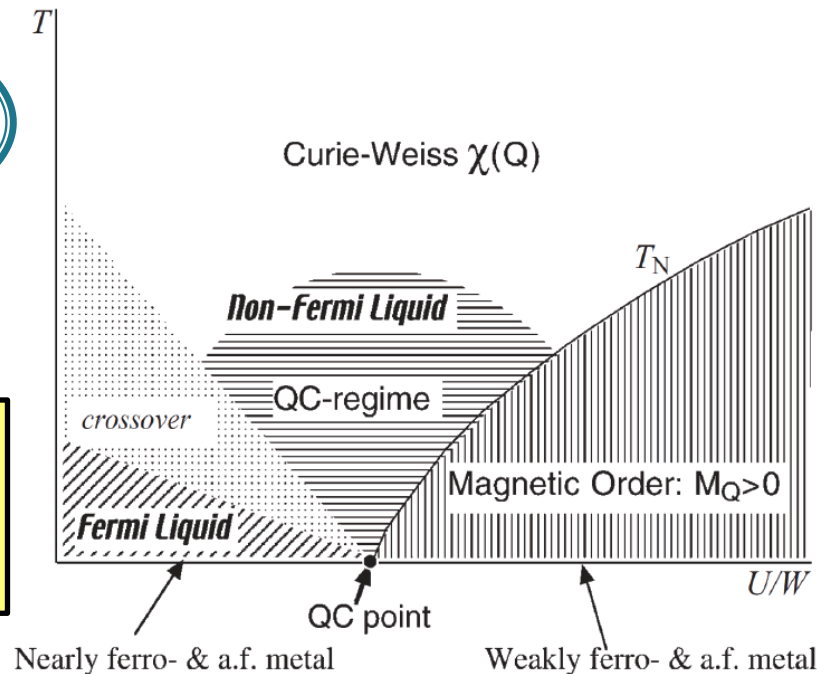
$$\frac{\partial F_{\text{var}}}{\partial \delta} = 0$$

δ の方程式
解= $\delta^*(T, \delta_0)$

- ・極低温: Hertz-Millisと同じ結果
- ・高温: Curie-Weiss的振る舞い

$$\xi^{-2} \sim T + \theta$$

δ_0 に対応



①

②

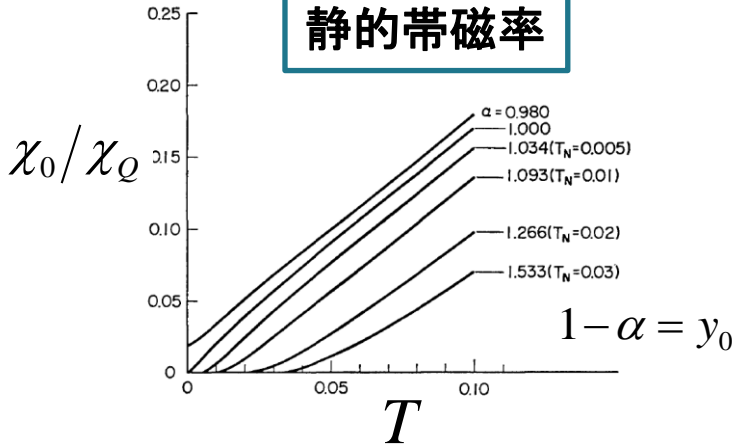
③

④

SCR理論の結果

3D AF

静的帯磁率



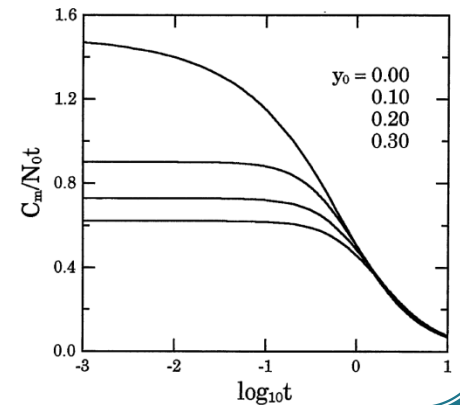
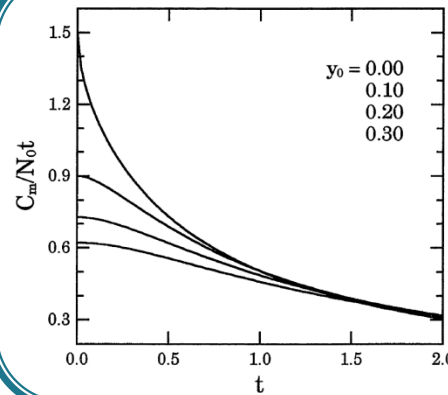
$$1/\chi_Q \propto T^{3/2} \rightarrow T + \theta$$

$$C/T \propto c - T^{1/2} \rightarrow -\ln T$$

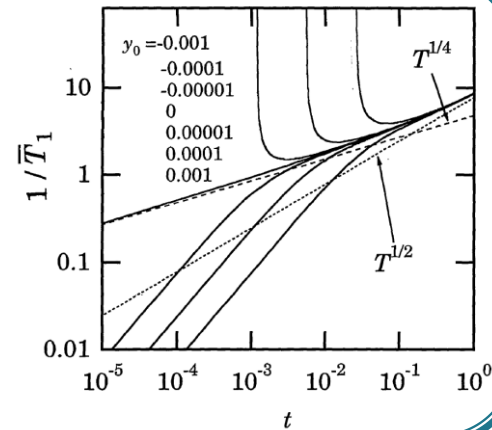
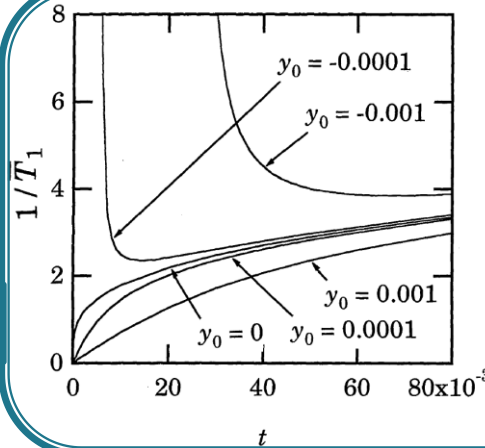
$$1/T_1 \propto T^{1/4} \rightarrow T^{1/2}$$

$$\rho \propto T^{3/2} \rightarrow T$$

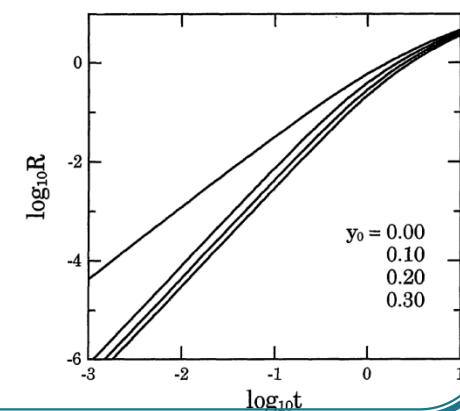
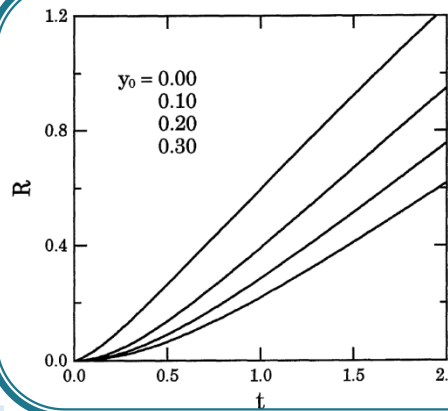
比熱



1/T₁



抵抗



①

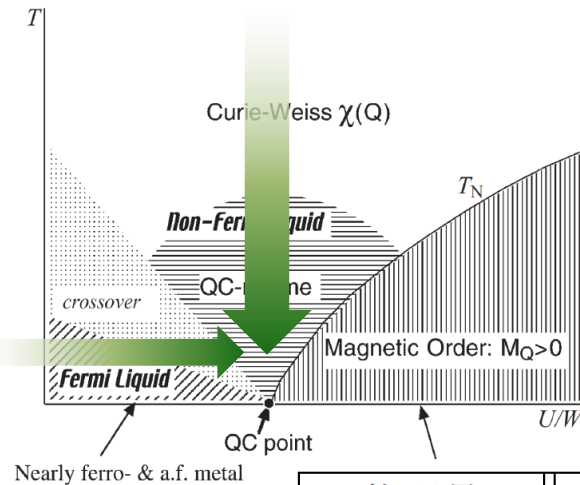
②

③

④

磁気量子臨界点近傍の物性

物理量	FM $d = 3$	FM $d = 2$	AF $d = 3$	AF $d = 2$	CFL
$\xi^{-2} \sim \chi_Q^{-1}$	$T^{4/3} \rightarrow \text{CW}$	$-T \ln T \rightarrow \text{CW}$	$T^{3/2} \rightarrow \text{CW}$	$-T \ln \ln T / \ln T \rightarrow \text{CW}$	$\text{const.} + T^2$
C/T	$-\ln T$	$T^{-1/3}$	$\text{const.} - T^{1/2} \rightarrow -\ln T$	$-\ln T$	const.
$1/T_1 T$	χ_Q	$\chi_Q^{3/2}$	$\chi_Q^{1/2}$	χ_Q	const.
$\Delta\rho$	$T^{5/3}$	$T^{4/3}$	$T^{3/2} \rightarrow T$	T	T^2



- ・バルク量: ロバスト
- ・輸送量: 系の詳細に依存
(サンプルクオリティー、FS)

$$\Delta\rho^{-1} \sim \tau_{qp} \geq T^{-1} \quad \text{FL成立!}$$

物理量	FM $d = 3$	FM $d = 2$	AF $d = 3$	AF $d = 2$
$\xi^{-2} \sim \chi_Q^{-1}$	r	r	r	r
C/T	$-\ln r$	$r^{-1/2}$	$\text{const.} - r^{1/2}$	$-\ln r$
$1/T_1 T$	χ_Q	$\chi_Q^{3/2}$	$\chi_Q^{1/2}$	χ_Q
$\Delta\rho/T^2$	$r^{-1/2}$	r^{-1}	$r^{-1/2}$	r^{-1}

①

②

③

④

中間まとめ 2

- ・Hertz-Millis理論
 - ・QCPの特異性が有限温度に染み出す
→AFL
- ・SCR理論
 - ・極低温はHertz-Millisと同じ結果
 - ・高温はCurie-Weiss

①

②

③

④

アウトライン

①量子相転移、量子臨界点近傍の相図

- ・フェルミ液体と「非フェルミ液体」

②量子相転移の理論

- ・Hertz-Millis理論
- ・SCR理論

③強相関電子系の超伝導

- ・Eliashberg方程式

④磁気量子臨界点近傍の超伝導

- ・強磁性・・・UCoGe
- ・反強磁性・・・CeCoIn₅, (CeRhSi₃, CeIrSi₃)

①

②

③

④

強相関電子系の 超伝導



①

②

③

④

Eliashberg方程式

Gap方程式

$$\Delta(\mathbf{k}) = -\frac{1}{N} \sum_{\mathbf{k}'} V(\mathbf{k}, \mathbf{k}') \frac{\tanh(\beta E_{\mathbf{k}'}/2)}{2E_{\mathbf{k}'}} \Delta(\mathbf{k}')$$

強結合への拡張

- ・周波数依存性 → 相互作用のカットオフ
- ・自己エネルギー → 準粒子ダンピング・繰りこみ

非線形Eliashberg方程式

$$\Delta(\mathbf{k}) = \frac{T}{N} \sum_{\mathbf{k}'} V(\mathbf{k}, \mathbf{k}') F(\mathbf{k}')$$

$$F(\mathbf{k}) = \frac{\Delta(\mathbf{k})}{[i\omega_n - \varepsilon_{\mathbf{k}} - \Sigma_n(\mathbf{k})][i\omega_n + \varepsilon_{\mathbf{k}} + \Sigma_n(-\mathbf{k})] - |\Delta(\mathbf{k})|^2}$$

①

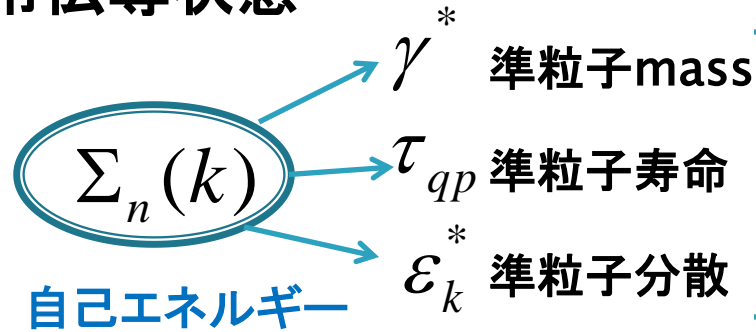
②

③

④

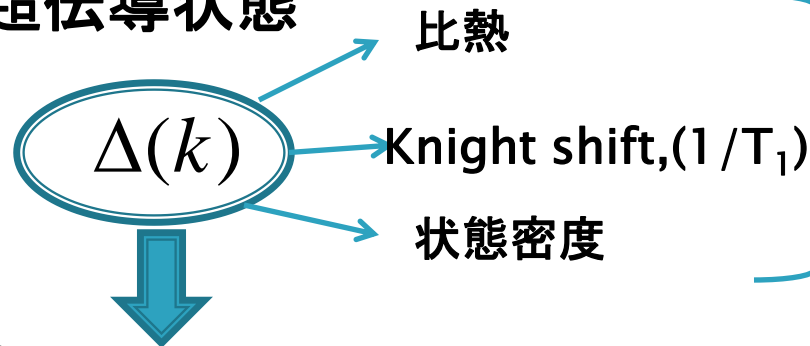
自己エネルギーと異常自己エネルギー

常伝導状態



熱力学的性質の理解

超伝導状態



熱力学的性質の理解

超伝導状態における性質を決める⇒異常自己エネルギー

①

②

③

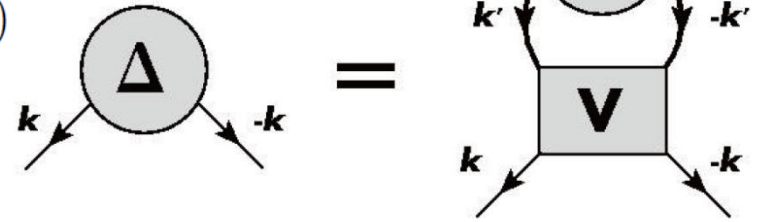
④

Cooper instability

線形Eliashberg方程式

$$\Delta(k) = -\frac{T}{N} \sum_{k'} V(k, k') G(k') G(-k') \Delta(k')$$

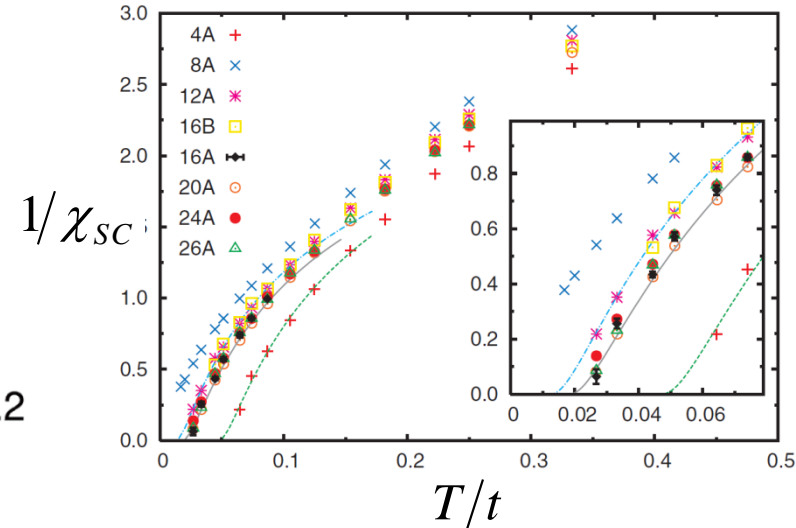
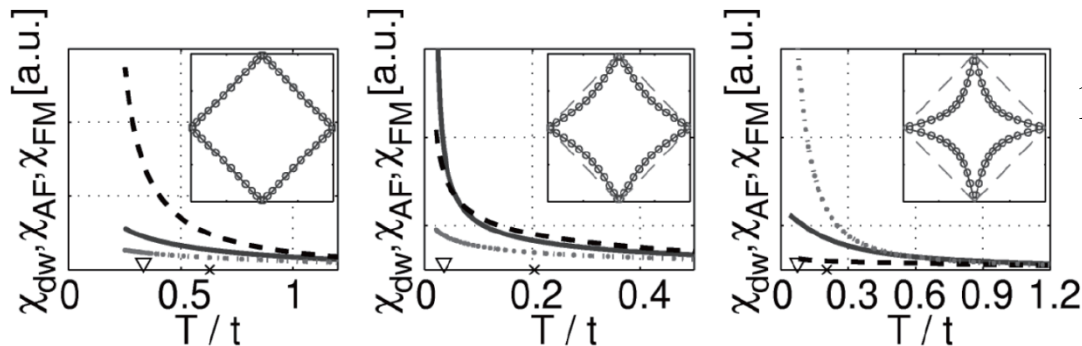
$$G(k) = \frac{1}{i\omega_n - \varepsilon_k - \Sigma_n(k)}$$



$$\chi_{SC}(T) = \text{Loop 1} + \text{Loop 2}$$

超伝導への不安定性を図る指標
(∞ で超伝導へ転移)

T.A.Maier et al,05



①

②

③

④

ペアリング相互作用と超伝導対称性

ペアリング相互作用 V と同じ対称性のgapが生じる

(例) 球対称の場合

$$\left\{ \begin{array}{l} V(\hat{k}, \hat{k}') = \sum_{lm} v_{lm} Y_l^m(\hat{k}) Y_l^{m*}(\hat{k}') \approx v_{lm} Y_l^m(\hat{k}) Y_l^{m*}(\hat{k}) \\ \Delta(\hat{k}) = \sum_{lm} c_{lm} Y_l^m(\hat{k}) \end{array} \right.$$

特定の lm のチャンネルだけ強いとする

$$\text{Gap方程式} \Rightarrow \Delta(\hat{k}) \propto -\langle V(\hat{k}, \hat{k}') \Delta(\hat{k}') \rangle_{k' \in \text{FS}}$$

$$\propto -v_{lm} Y_l^m(\hat{k}) \int d\Omega_{k'} Y_l^{m*}(\hat{k}') \sum_{l'm'} c_{l'm'} Y_{l'}^{m'}(\hat{k}')$$

$$\propto \underline{-v_{lm} c_{lm} Y_l^m(\hat{k})}$$

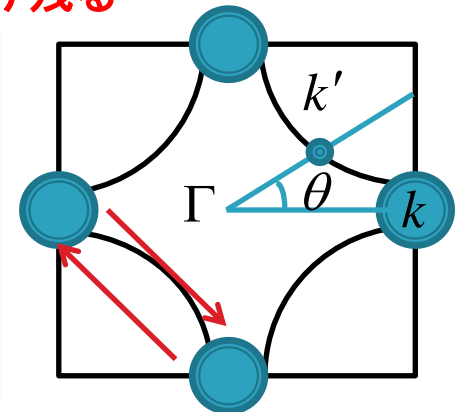
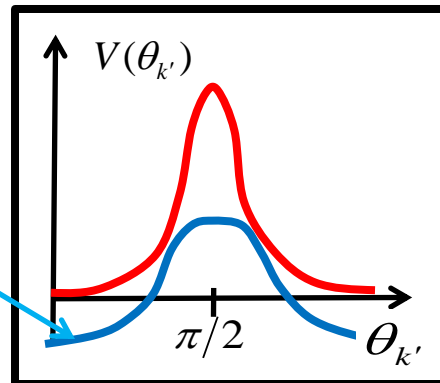
V と同じチャンネルだけ残る

(例) 2D正方格子の場合

$$V(k, k') \approx v(\theta_{k-k'})$$

$(-\pi, 0) \xleftarrow{Q=(\pi, \pi)} (0, \pi)$ が支配的

$$\Delta(k) \propto \cos k_x - \cos k_y \\ \sim \cos(2\theta_k)$$



①

②

③

④

スピン揺らぎと超伝導パリティ

(例) Random Phase Approximation

$$\text{Singlet : } V_0(q) = \cancel{U} + \frac{3}{2}U^2\chi_s(q) - \frac{1}{2}\cancel{U^2}\chi_c(q),$$

$$\text{Triplet : } V_i(q) = -\frac{1}{2}U^2\chi_s(q) - \frac{1}{2}\cancel{U^2}\chi_c(q),$$

$$V_{\text{sin}} \approx -3V_{\text{tri}}$$

If $V_\mu(q) \approx v_\mu(i\omega_n)\delta_{\vec{q},\vec{Q}}$, then

$$d_\mu(\mathbf{k}, i\omega_n) = -T \sum_{\omega_{n'}} v_\mu(i\omega_n - i\omega_{n'}) |G(\mathbf{k} - \mathbf{Q}, i\omega_{n'})|^2 d_\mu(\mathbf{k} - \mathbf{Q}, i\omega_{n'})$$

 $\vec{Q} \neq 0$

singlet \Leftrightarrow AF

Singlet :

favorされる条件: $d_0(\mathbf{k} - \mathbf{Q}, i\omega_n) = -d_0(\mathbf{k}, i\omega_n)$

Triplet :

favorされる条件: $d_i(\mathbf{k} - \mathbf{Q}, i\omega_n) = d_i(\mathbf{k}, i\omega_n)$

 $\vec{Q} = 0$

triplet \Leftrightarrow FM

①

②

③

④

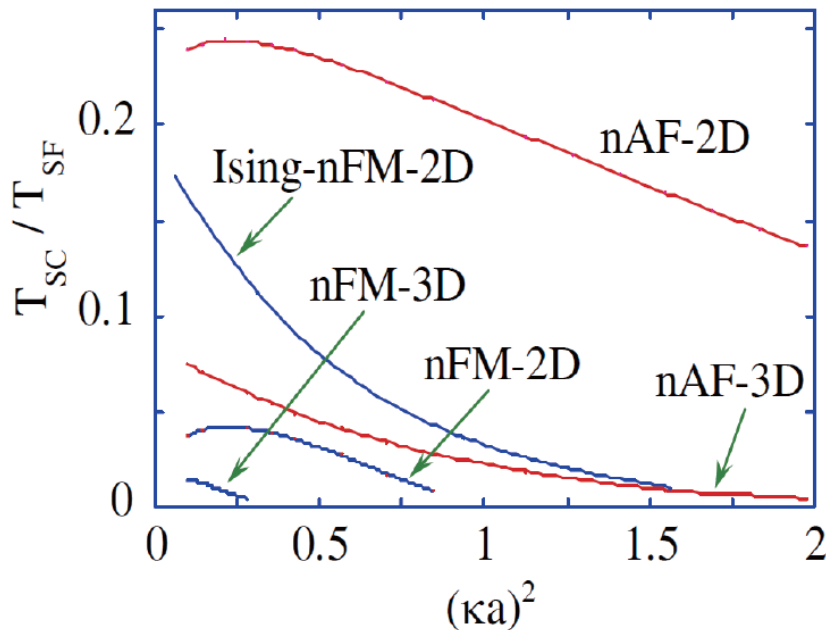
スピン揺らぎと超伝導転移温度

スピン揺らぎ

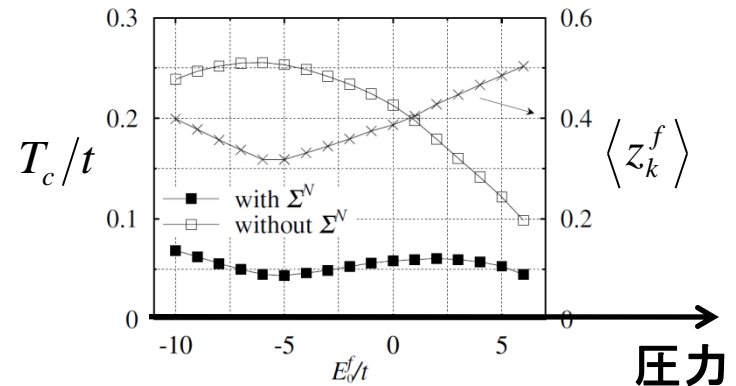
- ・ペアリング=Cooper対をつくる... V
- ・depairing=Cooper対をつくりにくくする... Σ

必ずしもQCPで T_c 最大とはならない

H.Ikeda et al.,02



PAM+3次摂動



加圧

- ・ペアリング相互作用 \Rightarrow 弱まる
- ・coherentなf電子 \Rightarrow 増える

QCPから離れたところで T_c 極大

①

②

③

④

中間まとめ 3

- ・BCSギャップ方程式(弱結合) \Rightarrow Eliashberg方程式
- ・Cooper instabilityを含む
- ・相互作用 V と同じ対称性のギャップ形成
- ・「AF \Leftrightarrow singlet」、 $\text{「FM}\Leftrightarrow$ triplet」
- ・一般には「QCP直上 $\neq T_c$ 最大」

①

②

③

④

アウトライン

①量子相転移、量子臨界点近傍の相図

- ・フェルミ液体と「非フェルミ液体」

②量子相転移の理論

- ・Hertz-Millis理論
- ・SCR理論

③強相関電子系の超伝導

- ・Eliashberg方程式

④磁気量子臨界点近傍の超伝導

- ・強磁性・・・UCoGe
- ・反強磁性・・・CeCoIn₅, (CeRhSi₃, CeIrSi₃)

①

②

③

④

量子臨界点近傍における超伝導



①

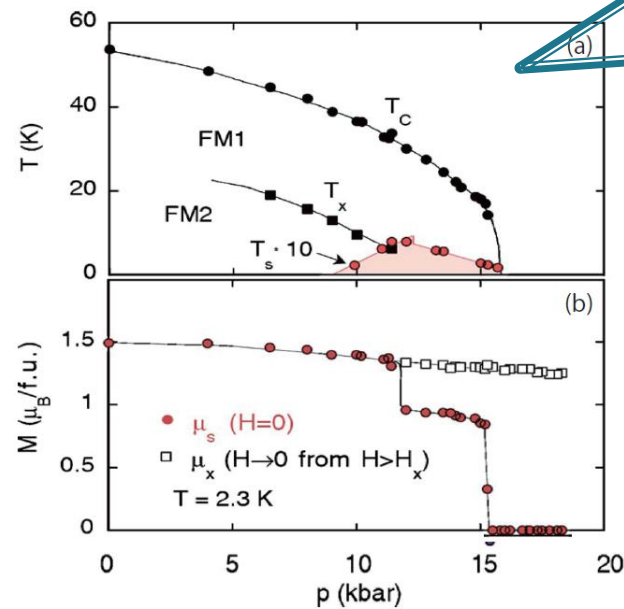
②

③

④

強磁性量子臨界点と超伝導

UGe₂

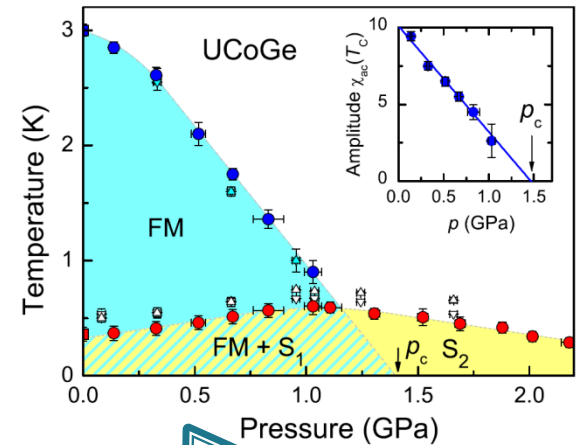


UGe₂:

- 2つのFM
- 1st order (No QCP)
- SC only in FM

C.Pfleiderer et al.,02

E.Slooten, et al.09



UCoGe:

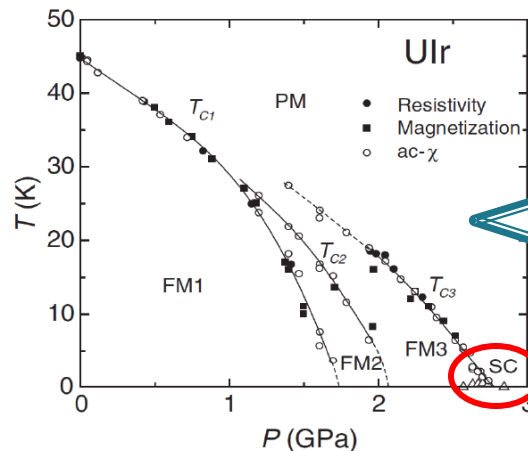
- 2nd order
- SC in FM and PM

URhGe:

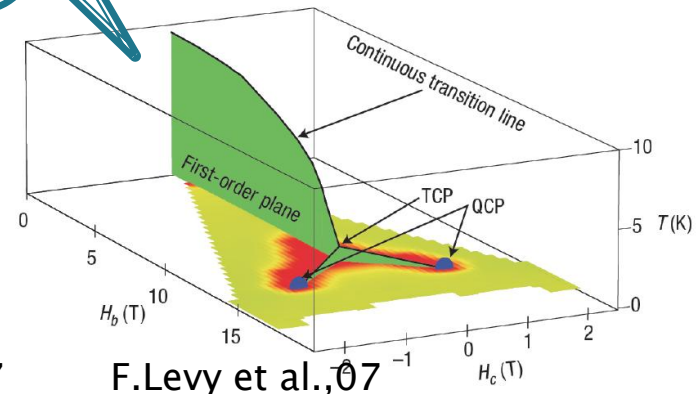
- 1st order ($H_c=0$)
- 2nd order ($H_c \neq 0$)
- ⇒ QCP
- SC in FM

Ulr:

- 3つのFM
- 2nd order (T_{c3})
- SC near FM3



T.C.Kobayashi, et al.07



F.Levy et al.,07

①

②

③

④

Heisenberg v.s. Ising

スピン揺らぎ $\begin{cases} \chi^{\parallel} & \text{縦揺らぎ} \\ \chi^{\perp} & \text{横揺らぎ} \end{cases}$

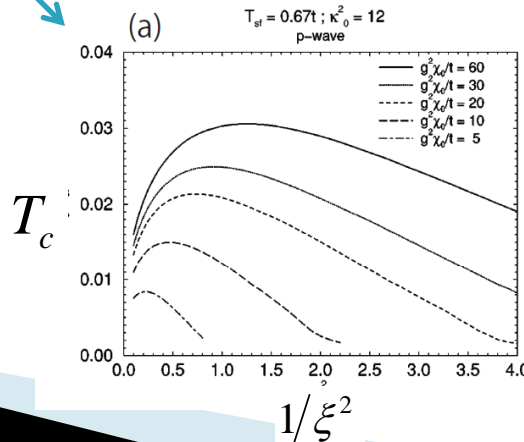
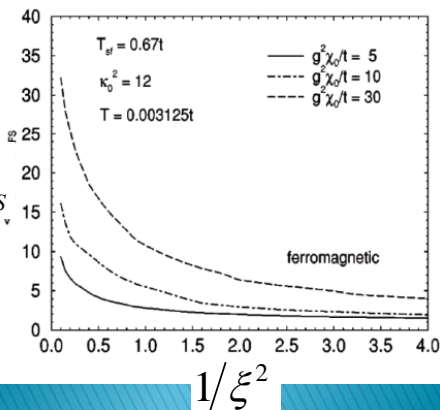
$$\frac{1}{2}\chi^{\perp}(q)[S_q^+ S_{-q}^- + S_q^- S_{-q}^+] + \chi^{\parallel}(q)S_q^z S_{-q}^z$$

自己エネルギー $\Sigma_n(k) = \sum_{k'} \frac{g^2}{3} [\chi^{\parallel}(k-k') + 2\chi^{\perp}(k-k')] G_0(k')$ \Rightarrow 縦・横の両方が寄与

ギャップ(triplet) $\Delta(k) = -\sum_{k'} \frac{g^2}{3} \chi^{\parallel}(k-k') |G(k')|^2 \Delta(k')$ \Rightarrow 縦揺らぎのみが寄与

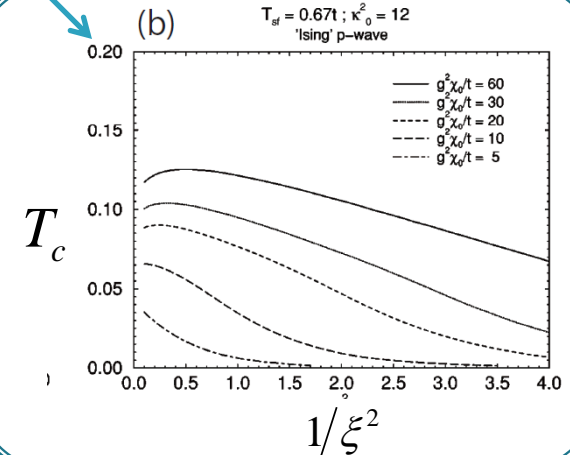
Heisenberg

$$\chi^{\perp} = \chi^{\parallel}$$



$$\chi^{\perp} = 0, \chi^{\parallel} \neq 0$$

Ising



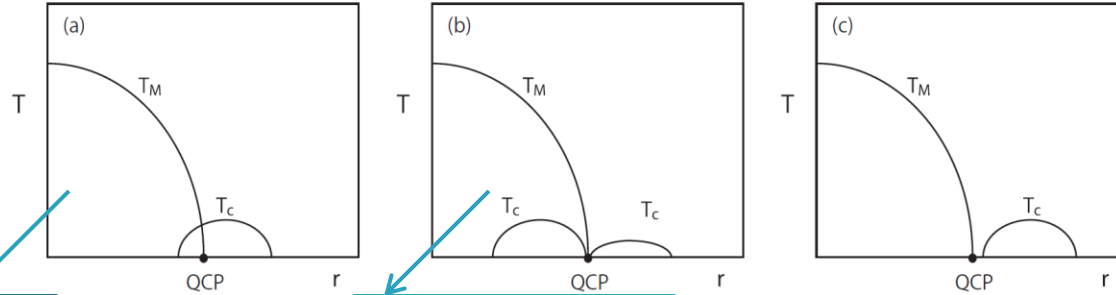
①

②

③

④

FM QCP近傍の転移温度



Ising

Heisenberg

Ising:

PM, FMの両方で $N_{\text{depair}} = N_{\text{pair}} = 1$ $T_c(\text{FM}) \sim T_c(\text{PM})$

Heisenberg:

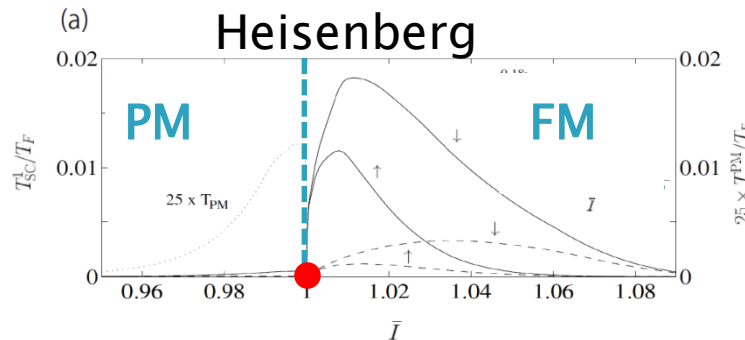
$r > 0$ (PM): $N_{\text{depair}} = 3, N_{\text{pair}} = 1$ $T_c(\text{FM}) > T_c(\text{PM})$
 $r < 0$ (FM): $N_{\text{depair}} = N_{\text{pair}} = 1$

 $\rho_{\text{FM}} \sim \rho_{\text{PM}}$ とする

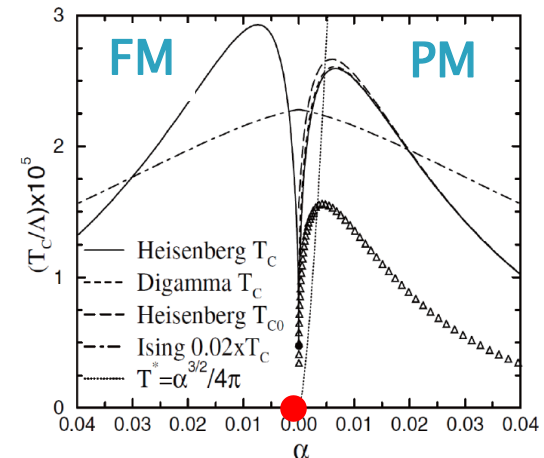
FM相:

横揺らぎ = スピン波

⇒ 超伝導に寄与しにくい



A.Nevidomsky, 05



R.Roussev et al., 05

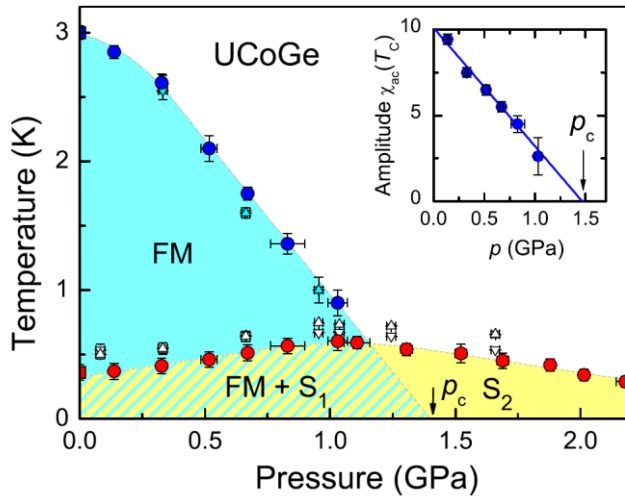
①

②

③

④

UCoGeの上部臨界磁場


 $\mu \parallel c$
 $\gamma \sim 60$ (mJ/mol K²)

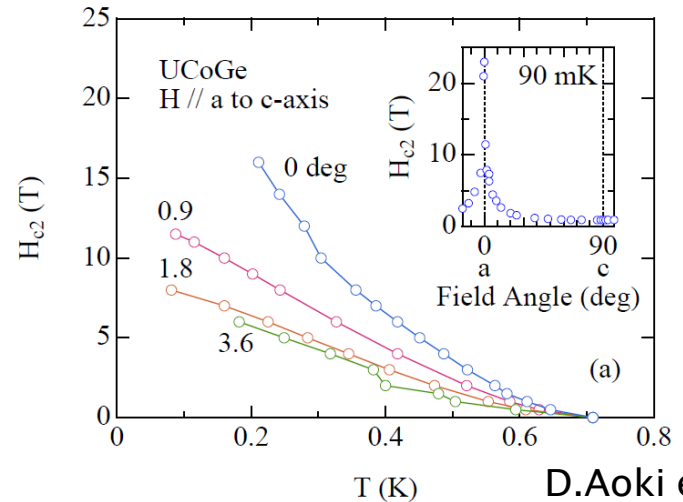
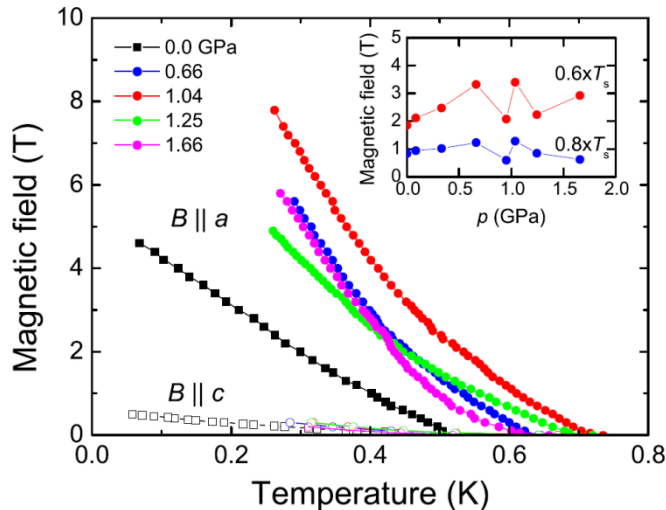
 $\Delta C/\gamma T_c \sim 1$
 $T_c \sim 0.8$ (K)

 $H_p \sim 1$ (T)

 $H_{c2}^a > 15$ (T)

 $H_{c2}^c \sim 1$ (T)

巨大な H_{c2}^a ・・・FM QCPと関係??



D.Aoki et al.,09

①

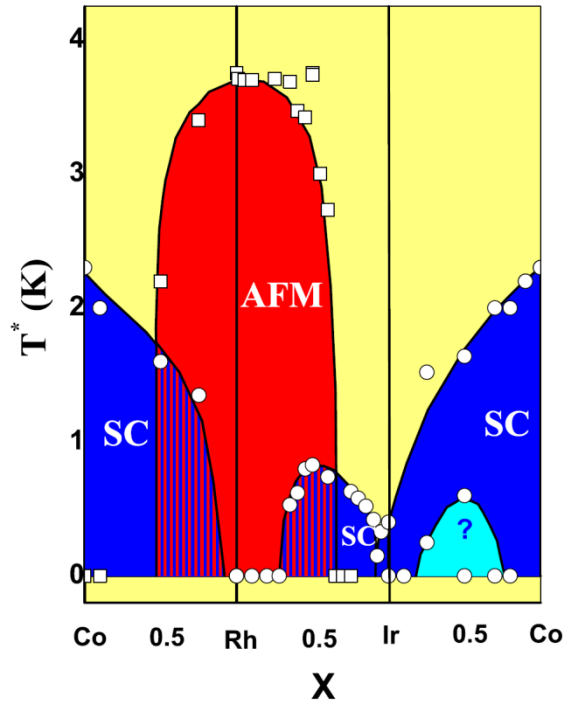
②

③

④

反強磁性量子臨界点と超伝導

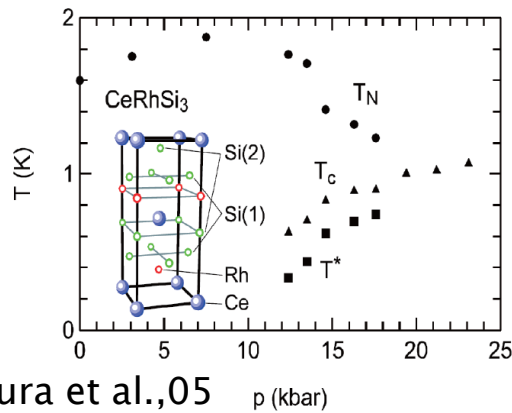
$\text{CeM}_{1-x}\text{M}'_x\text{In}_5$ ($M, M' = \text{Co}, \text{Rh}, \text{In}$) (a)



P.G.Pagliuso et al.,02

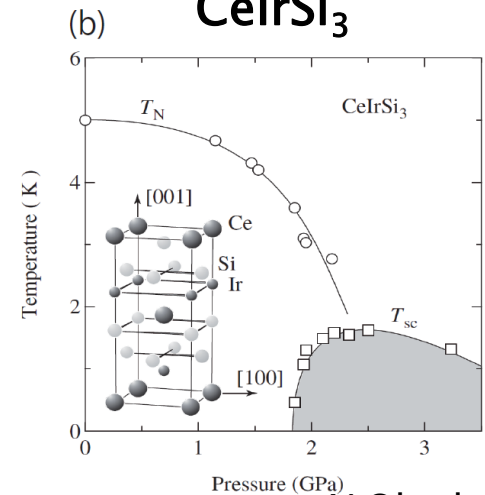
H.Q.Yuan et al.,06

CeRhSi_3



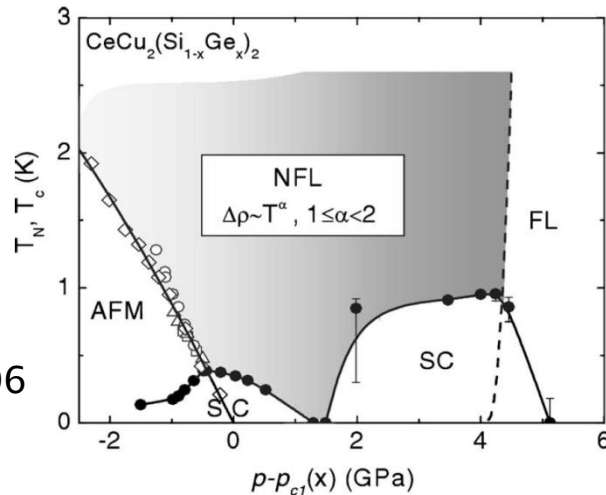
N.Kimura et al.,05

CeIrSi_3

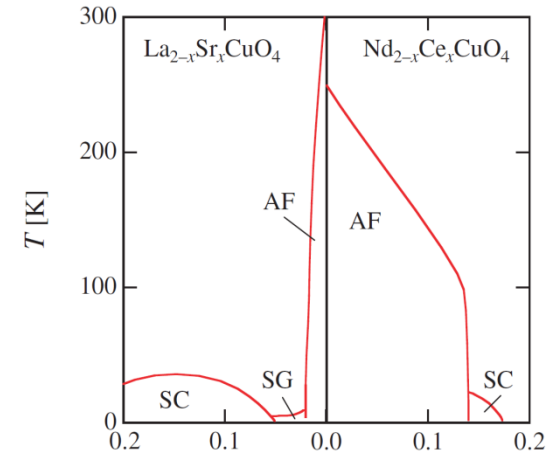


Y.Okuda et al.,05

$\text{CeCu}_2(\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x)_2$



HTSC



T.Moriya et al.,03

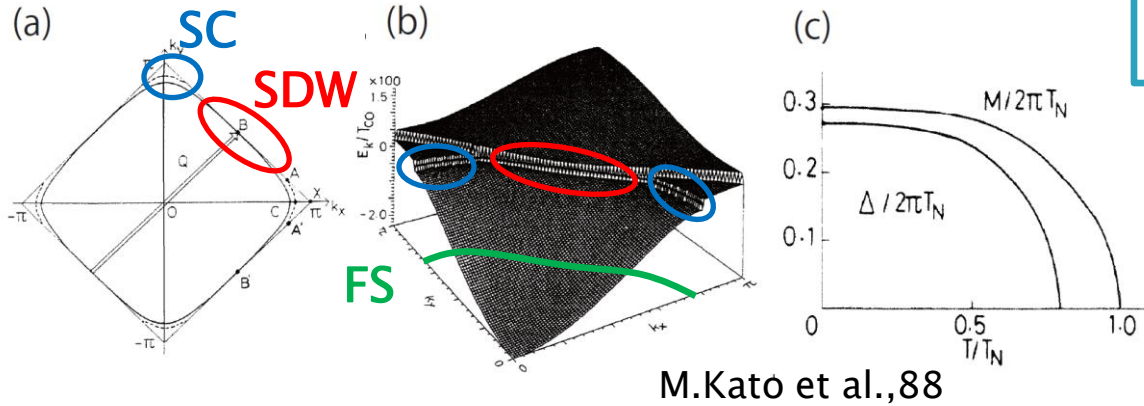
①

②

③

④

SDWとSCの共存性



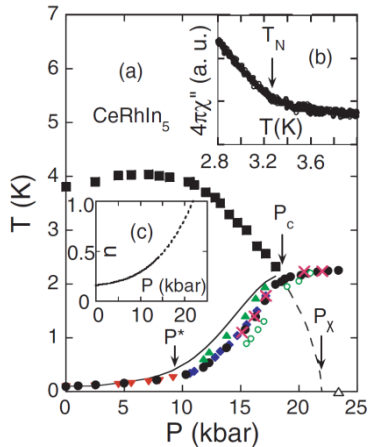
- SDWギャップ:
MBZとFSの交差するあたり
- SCギャップ:
 $\Delta(k+Q)=-\Delta(k)$

If, FS上で住み分け
⇒AFとSC共存

BUT, 系の詳細に強く依存

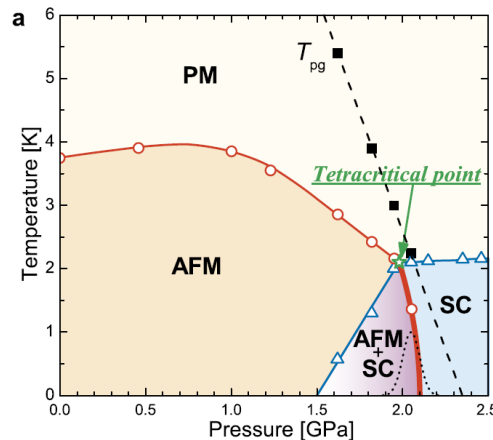
CeRhIn₅

ac帯磁率



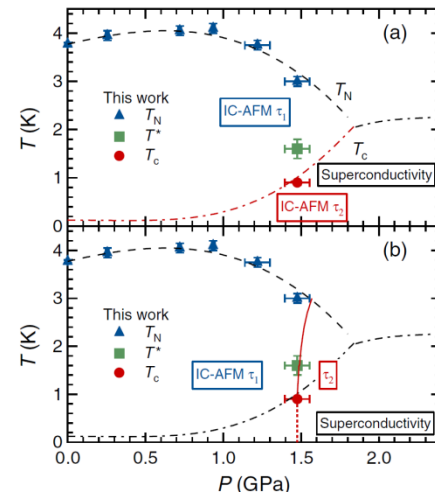
G.F.Chen et al.,06

In-NQR



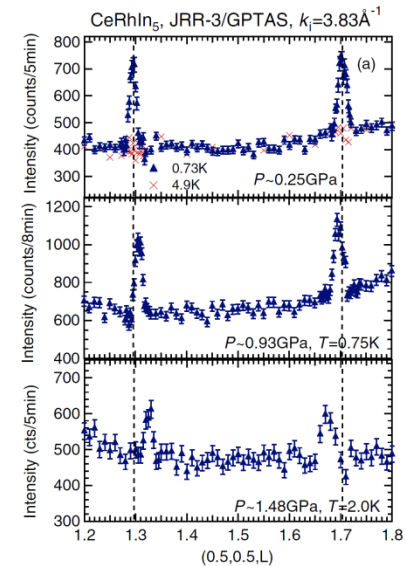
M.Yashima et al.,07

neutron



$$Q_1 = (0.5, 0.5, 1.362)$$

$$Q_2 = (0.5, 0.5, 1.391)$$



N.Aso et al.,09

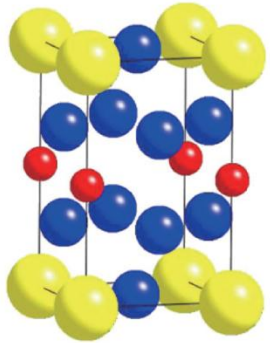
①

②

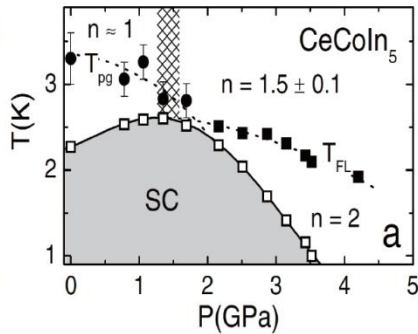
③

④

CeCoIn₅

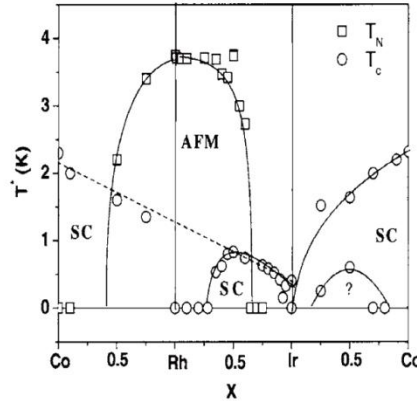


$$\rho \sim T^n$$

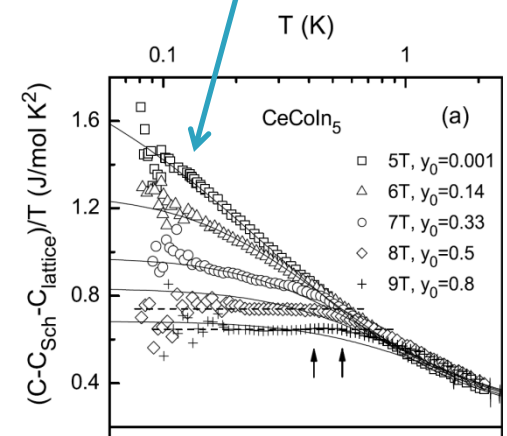


J.L.Sarrao. et al.07

AFの近くに超伝導



SCRでfit $C/T \sim -\ln T$

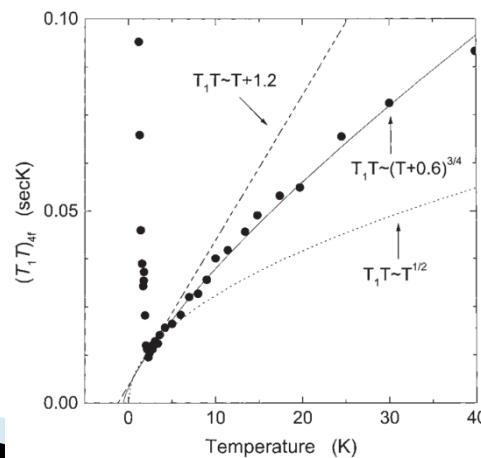
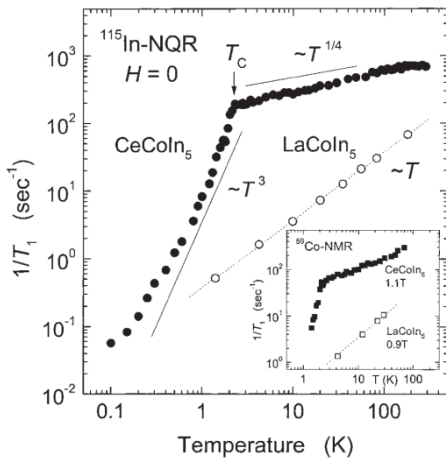


A.Bianchi,03

 $H_{c2} = 4.95T$

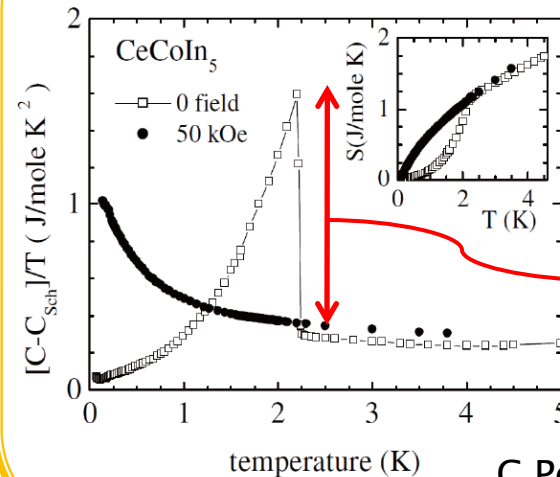
$$1/T_1 \sim T/(T + \theta)^{3/4} \quad \text{2-3D AF スピン揺らぎ}$$

$$1/T_1 \sim T^3 \quad (\text{ラインノード, } d_{x^2-y^2})$$



Y.Kawasaki et al.,03

巨大な比熱のとび



$$\Delta C / \gamma T_c = 4.5$$

BCSの3倍

C.Petrovic et al.,01

①

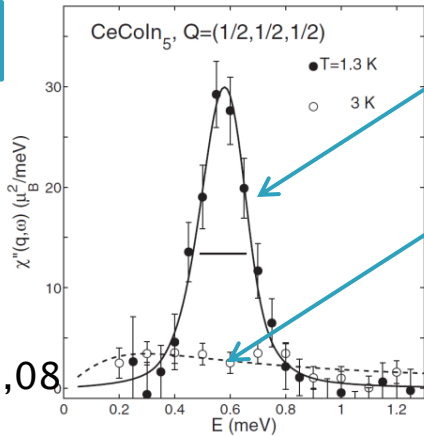
②

③

④

CeCoIn₅における強結合超伝導

$T_c = 2.3\text{K}$



$T = 1.3\text{K}$

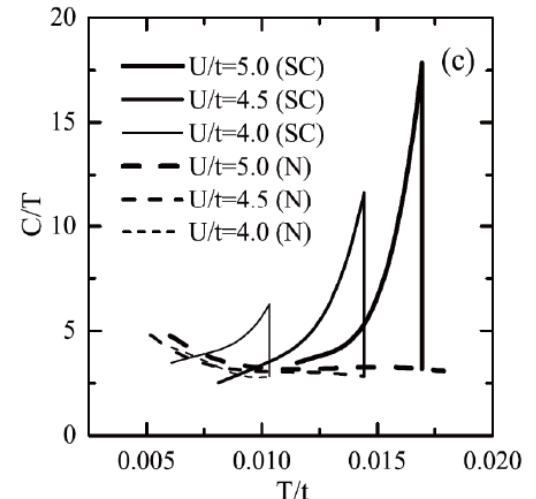
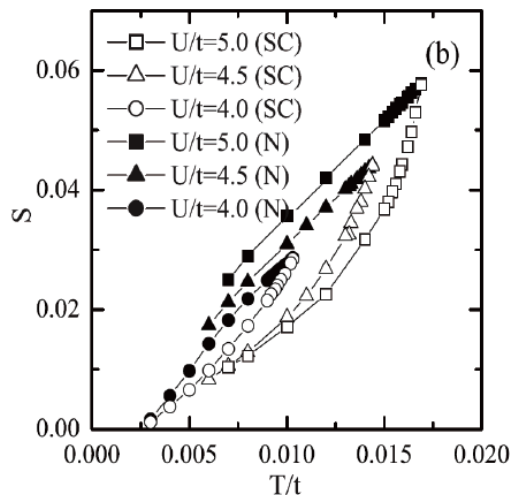
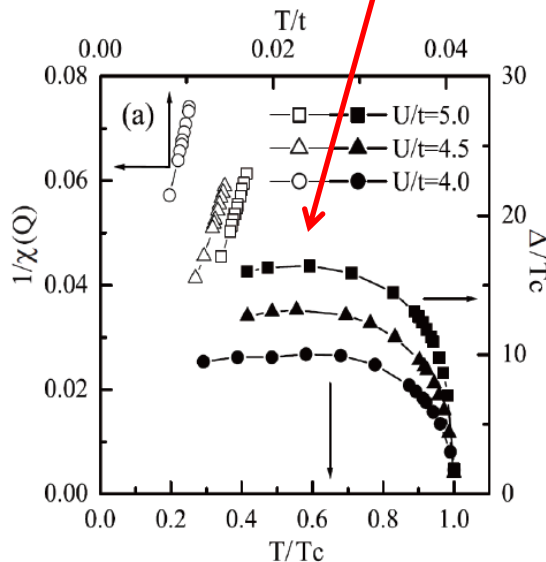
$T = 3\text{K}$

スピン揺らぎ: $T < T_c$ で定性的変化

- depairing
 $\omega \sim 0$ のスピン揺らぎ $\Rightarrow \Delta$ で抑えられる
- pairing
 $\omega < \Omega$ の積分 $\Rightarrow T < T_c$ でも強い

大きなギャップ振幅 = 強結合超伝導体の特徴

2D Hubbard FLEX (H.Ikeda, 05)



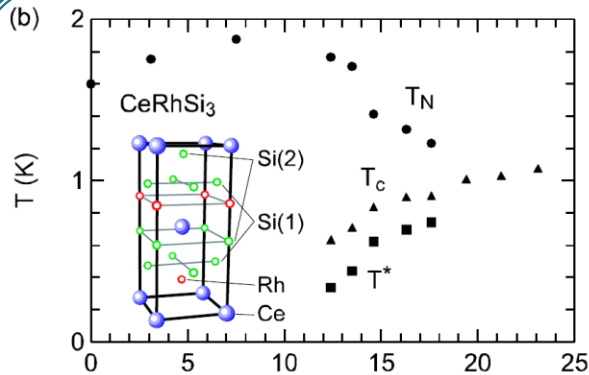
①

②

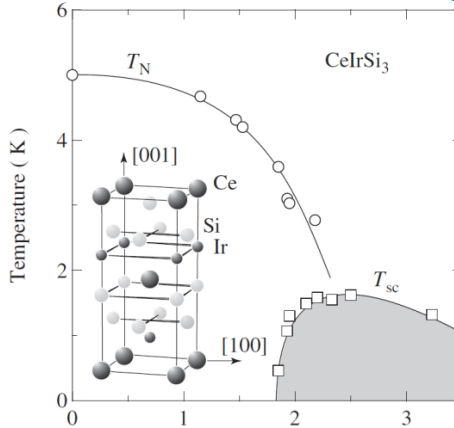
③

④

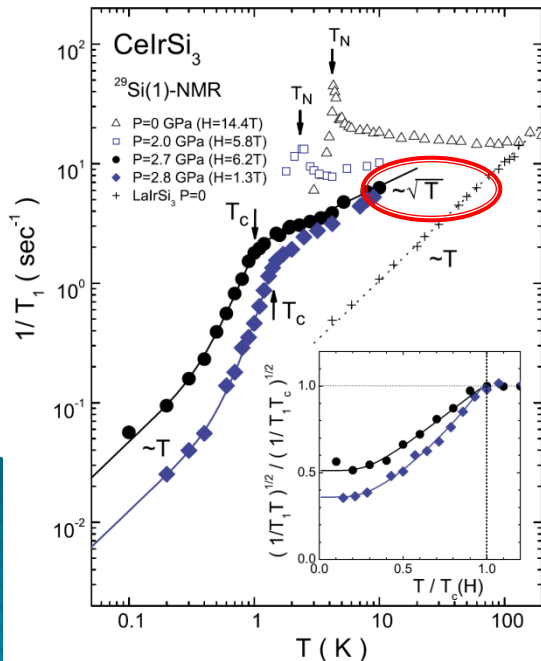
CeRhSi₃, CeIrSi₃ (noncentrosymmetric)



N.Kimura et al., 05



R.Settai et al., 07



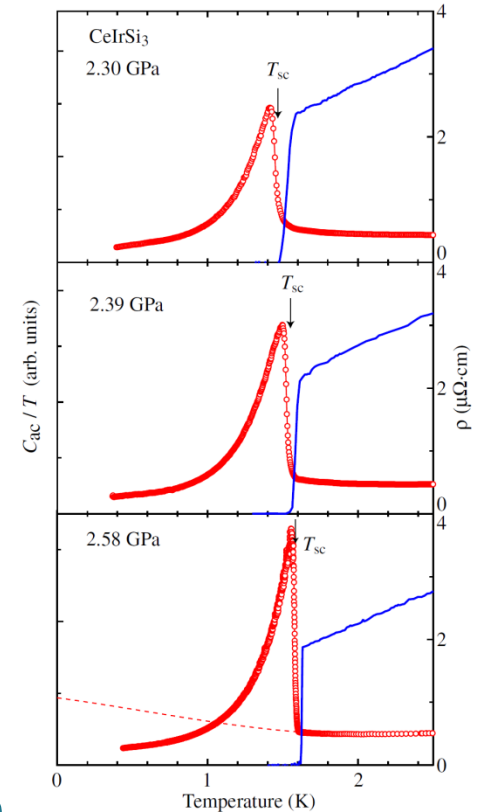
3D AF

$$1/T_1 \propto T \sqrt{\chi_Q} \propto T / \sqrt{T + \theta}$$

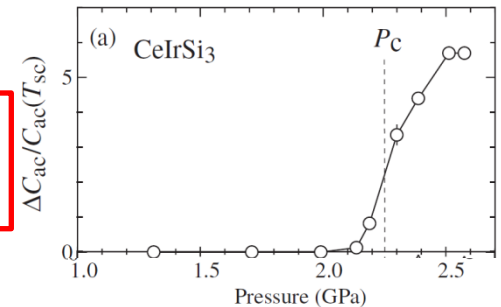
3D AFによる強結合超伝導

P=P_c付近で巨大な比熱ジャンプ

H.Mukuda et al., 08



N.Tateiwa et al., 07



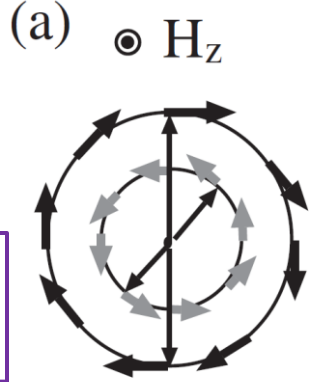
- ①
- ②
- ③
- ④

H || c

$E_F \sim 500$ (K)

$$\xi(T) = \tilde{\xi} \sqrt{\frac{t_1}{T + \theta}}$$

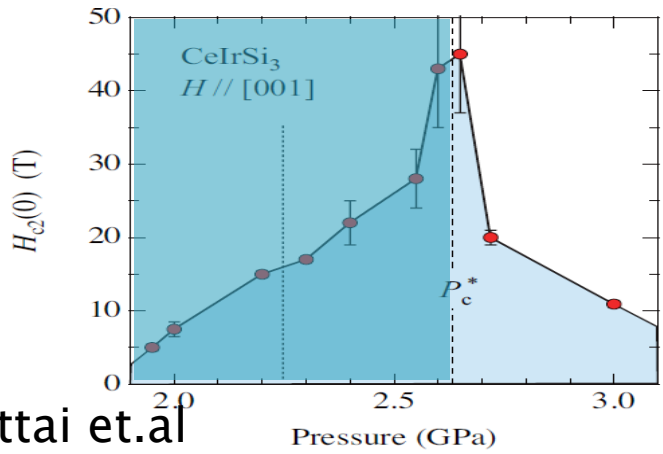
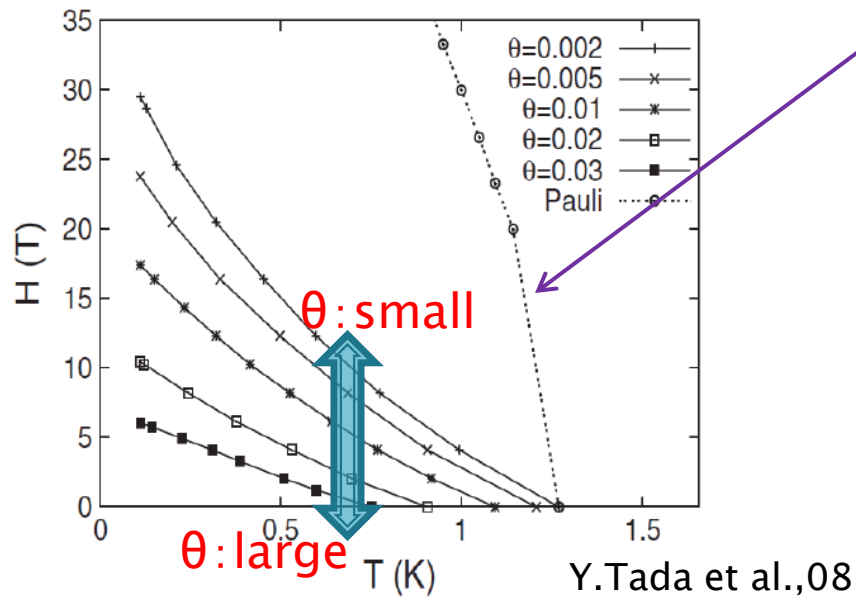
$\theta_m \sim 0.2$ (K)
 $\theta_M \sim 3.0$ (K)



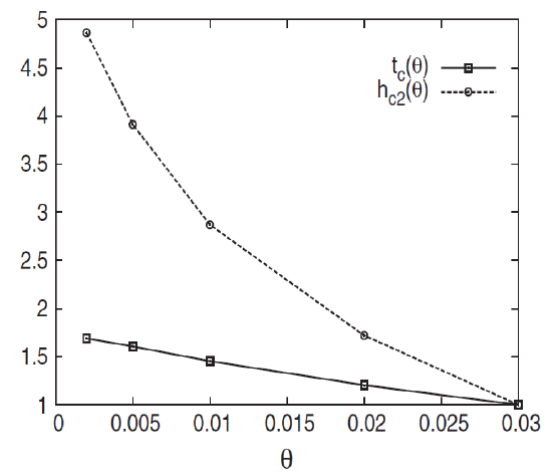
巨大なPauli limit
 ← 異方的SO相互作用

$$H_{c2} \doteq H_{orb}$$

- 20-30(T)
- θ に強く依存
- 下凸



定性的一致



- ①
- ②
- ③
- ④

H ⊥ c

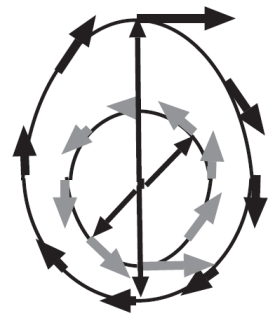
$$\xi(T) = \tilde{\xi} \sqrt{\frac{t_1}{T + \theta}}$$

$\theta_m \sim 0.2$ (K)
 $\theta_M \sim 3.0$ (K)

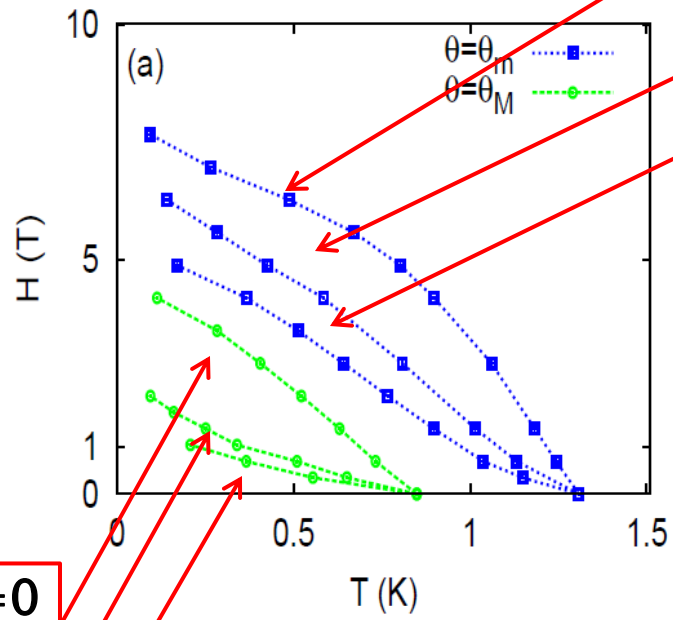
$E_F \sim 500$ (K)

- N=0
- N=1
- N=2

(b) $\rightarrow H_x$



FS変形 $\rightarrow H_{c2} \sim H_{Pauli}$

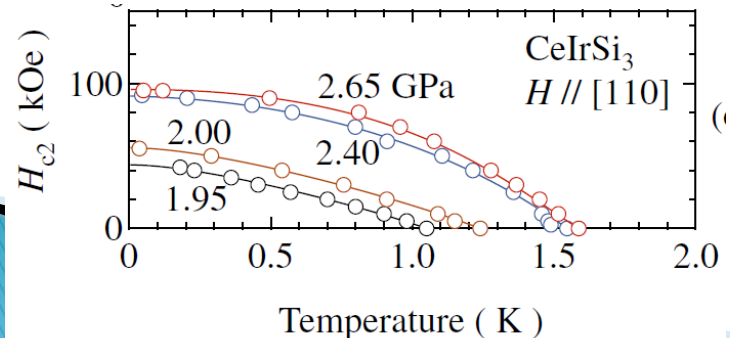


N=0

N=1

N=2

- H_{c2} は N=0 LL で決まる
- $\sim 8(T)$
- 弱い圧力依存性

$$\frac{H_{c2}^{\perp}(T=0, \theta_m)}{H_{c2}^{\parallel}(T=0, \theta_m)} \sim \frac{1}{3}$$


①

②

③

④

中間まとめ 4

- ・強磁性
- ・反強磁性
- ・UCoGe
 - ・FM QCP近傍の異常な H_{c2}
- ・CeCoIn₅
 - ・AFスピン揺らぎ ⇒ 強結合超伝導
- ・Ce(Rh,Ir)Si₃
 - ・AF揺らぎ + SO相互作用 = 巨大な $H_{c2} || c$
 - ・Rashba相互作用 = 異方的 H_{c2}

さいごのまとめ

①量子相転移、量子臨界点近傍の相図

- ・フェルミ液体と「非フェルミ液体」

②量子相転移の理論

- ・Hertz-Millis理論
- ・SCR理論

③強相関電子系の超伝導

- ・Eliashberg方程式

④磁気量子臨界点近傍の超伝導

- ・強磁性・・・UCoGe
- ・反強磁性・・・CeCoIn₅, (CeRhSi₃, CeIrSi₃)

QCP近傍の強い揺らぎ



- ・異常フェルミ液体
- ・超伝導