

重い電子系の物理 ～近藤効果から動的平均場理論まで～

東北大学大学院理学研究科
大槻純也

講義目次

0 概観 [【スライド】](#)

1 近藤効果

- 1.1 抵抗極小現象（近藤理論、アブリコソフ理論）
- 1.2 近藤効果の基底状態（芳田理論）
- 1.3 スケーリング理論
- 1.4 アンダーソン模型のハートリー・フォック近似と磁気モーメントの発生
- 1.5 アンダーソン模型から見た近藤効果

2 エキゾチック近藤効果

- 2.1 オーバースクリーニングによる非フェルミ液体
- 2.2 四極子近藤効果

3 重い電子

- 3.1 周期アンダーソン模型とフェルミ液体
- 3.2 動的平均場理論
- 3.3 動的平均場理論の応用例 [【スライド】](#)
 - RKKY 相互作用による磁気秩序
 - 重い電子の形成と大きいフェルミ面
 - 混晶系（希釈効果）
 - モット絶縁体
- 3.4 動的平均場理論の最近の発展と課題 [【スライド】](#)

0. 概観

金属電子論の歴史 (≒1980)

「金属電子論」 (裳華房1983) 近藤淳 著より



産総研HPより (aist.go.jp)

金属は、その中を自由に動くことのできる電子が存在することで特徴づけられるが、半導体と違って電子の密度が非常に大きいことが重要な点である。そのため、量子効果が重要となり、電子がフェルミ粒子であるために縮退という現象が起こる。金属電子の示す特徴的な振舞のほとんどが、この縮退という現象に関係しているといっても過言ではない。いままでに金属電子の量子論に関して **5つの大きな発展があった**。最初、**縮退**という概念を導入して金属の電子比熱を説明した **Sommerfeld の理論** **①**。ついで電子間のクーロン力の影響を論じた **Bohm - Pines の理論** **②**。よびこれに端を発した多体問題としての取扱いである。次に金属の磁気抵抗効果、de Haas - van Alphen (ドハース - ファンアルフェン) 効果等がそのフェルミ面の形にきわめて敏感に依存することから、それぞれの金属のフェルミ面の形を決定する **フェルミオロジー**が発見し、フェルミ面は金属の顔であるといわれるようになった。金属電子論における最も重要な発展は、**超伝導に対する BCS 理論** **④**。これは物質の新しい存在形態を発見したものともいうことができ、物理学の他の分野にも大きな影響をおよぼした。

⑤ 最後の5番目に**磁性合金の問題**がくる。その発端は、古く1930年代に発見された電気抵抗極小現象にある。金属をヘリウム温度まで冷やしていくと、その電気抵抗ははじめ減少するが、 $\sim 10\text{ K}$ 前後から逆に増大を始めるという現象がしばしば見出された。これは微量の、磁性をもった原子が溶けこんでいるためと判明したが、不純物原子のもつ磁性と、電気抵抗増大との間の関連がよくわからなかった。これは結局、縮退した金属電子に対する磁気モーメントの効果として理解されることになったが、その効果を完全に理解するには多くの人の努力が必要であった。金属電子と磁気モーメントという一見単純にみえる系が、理論的に取扱うときわめて手のこんだものになり、生半可な近似ではその本性を現わしてくれなかった。この問題に対していろいろな取扱いが人知を集集して行われた様子は百花繚乱といってもよく、この分野を物理学の中でも特に内容豊かなものにするとともに、他分野への刺激ともなっている。

近藤効果を学ぶ意義

- ・ 重い電子系の基礎
- ・ くり込み、断熱接続の概念
- ・ 多体効果の扱い

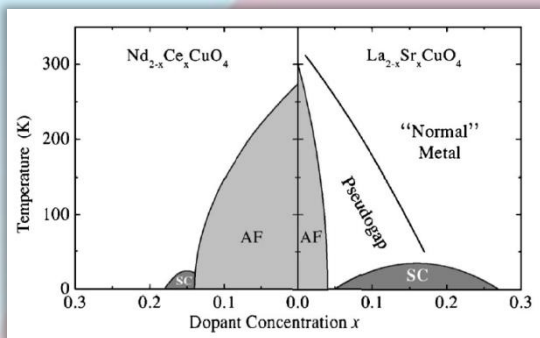
One of two "basic notions of condensed matter physics" by Anderson

強相関電子系 (≥ 1980)

d 電子系 (遷移金属)

Mott転移
軌道自由度

高温超伝導
Bednorz, Müller, 1986



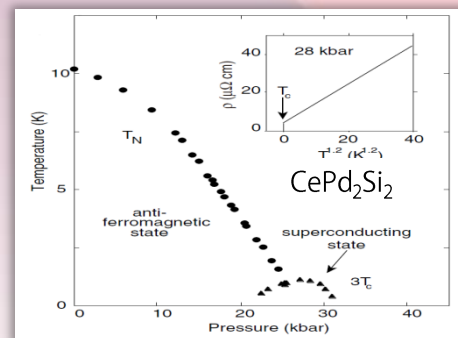
From Damascelli et al. 2003

f 電子系

(希土類、アクチナイド)

重い電子 (近藤効果)
多極子秩序 (RKKY相互作用)

重い電子系超伝導
Steglich et al. 1979



From Mathur et al. 1998

Fe系超伝導

Ru系超伝導

U系超伝導

URu_2Si_2 の隠れた秩序

磁性と超伝導

強相関電子系：重い電子系

The year 1964

東京オリンピック



nippon.com

近藤効果

Progress of Theoretical Physics, Vol. 32, No. 1, July 1964

Resistance Minimum in Dilute Magnetic Alloys

Jun KONDO

*Electro-technical Laboratory
Nagatacho, Chiyodaku, Tokyo*

(Received March 19, 1964)

新幹線



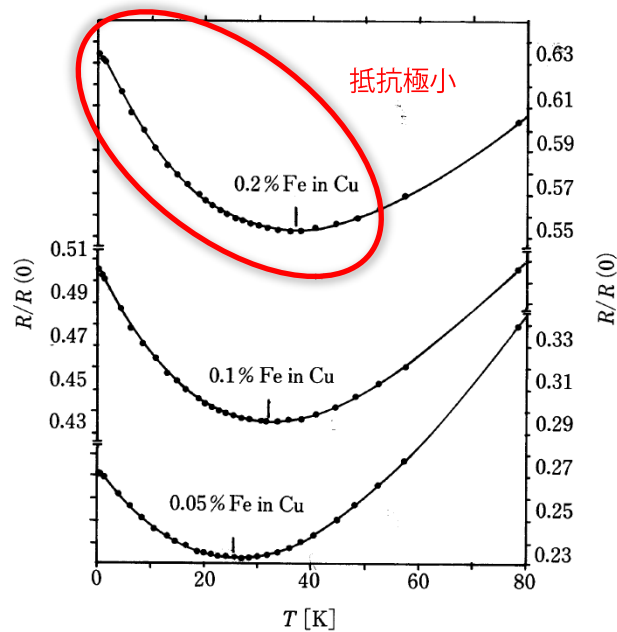
asahi.com

$$\frac{1}{\tau} \propto J^2 [1 - 2J\rho_0 \log T/D]$$

Kondo effect, Kondo singlet, Kondo insulator, Kondo alloy,
multichannel Kondo effect, Kondo volume collapse, Kondo
breakdown, ...

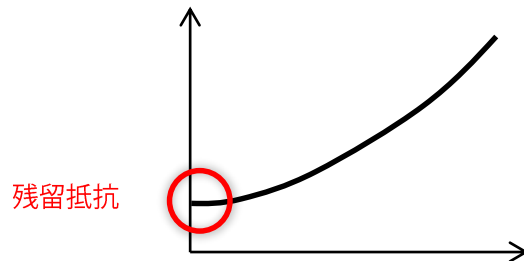
J. Kondo 1964

電気抵抗 (Fe不純物)



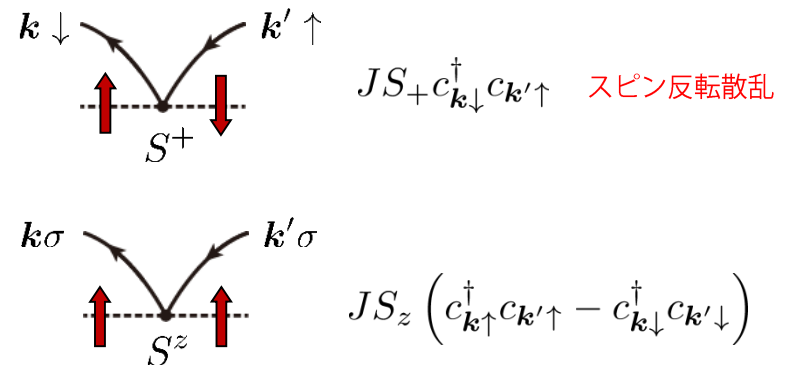
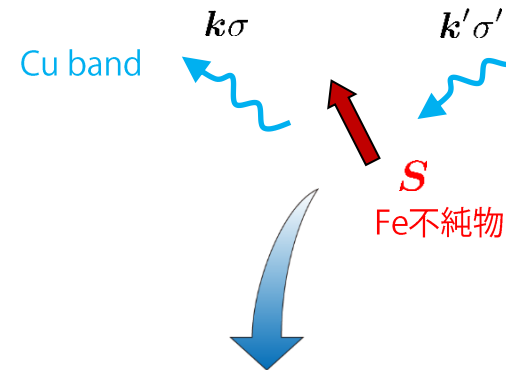
「固体の電子論」 斯波弘行著

c.f. 非磁性不純物



近藤模型 (s-d模型)

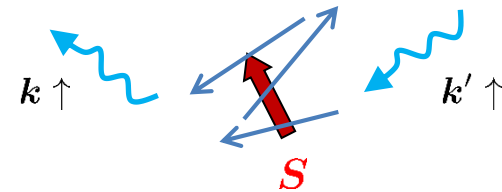
$$H_K = \sum_{\mathbf{k}\sigma} \epsilon_{\mathbf{k}} c_{\mathbf{k}\sigma}^\dagger c_{\mathbf{k}\sigma} + \frac{J}{N} \mathbf{S} \cdot \sum_{\mathbf{k}\mathbf{k}'} \sum_{\sigma\sigma'} c_{\mathbf{k}\sigma}^\dagger \boldsymbol{\sigma}_{\sigma\sigma'} c_{\mathbf{k}'\sigma'}$$



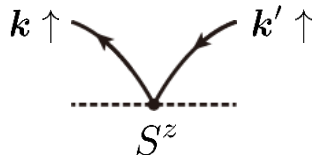
$$H_K = \sum_{\mathbf{k}\sigma} \epsilon_{\mathbf{k}} c_{\mathbf{k}\sigma}^\dagger c_{\mathbf{k}\sigma} + \frac{J}{N} \mathbf{S} \cdot \sum_{\mathbf{k}\mathbf{k}'} \sum_{\sigma\sigma'} c_{\mathbf{k}\sigma}^\dagger \boldsymbol{\sigma}_{\sigma\sigma'} c_{\mathbf{k}'\sigma'}$$

J. Kondo 1964

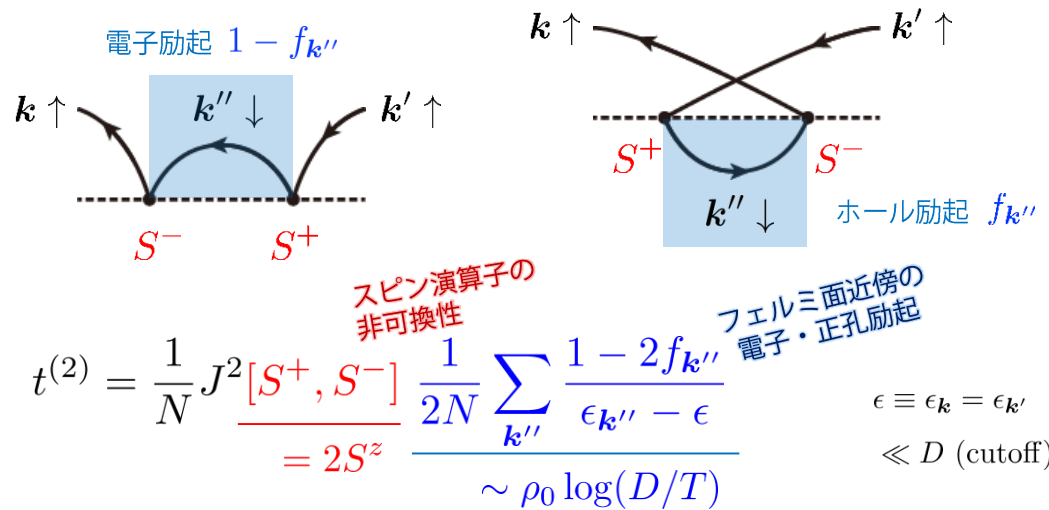
散乱のT行列 $t_{\mathbf{k}\mathbf{k}'} = \langle \mathbf{k} \uparrow | \left(H' + H' \frac{1}{E - H_0} H' + \cdots \right) | \mathbf{k}' \uparrow \rangle$



ボルン近似



$$t^{(1)} = \frac{1}{N} J S^z$$



電子励起 $1 - f_{\mathbf{k}''}$

ホール励起 $f_{\mathbf{k}''}$

スピンの非可換性

フェルミ面近傍の電子・正孔励起

$$t^{(2)} = \frac{1}{N} J^2 \frac{[S^+, S^-]}{= 2S^z} \frac{1}{2N} \sum_{\mathbf{k}''} \frac{1 - 2f_{\mathbf{k}''}}{\epsilon_{\mathbf{k}''} - \epsilon}$$

$\sim \rho_0 \log(D/T)$

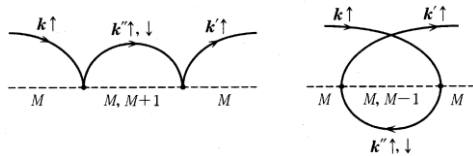
$\epsilon \equiv \epsilon_{\mathbf{k}} = \epsilon_{\mathbf{k}'}$

$\ll D$ (cutoff)

$$t^{(1)} + t^{(2)} = \frac{1}{N} J S^z [1 + 2J\rho_0 \log(D/T)]$$

Kondo 1964

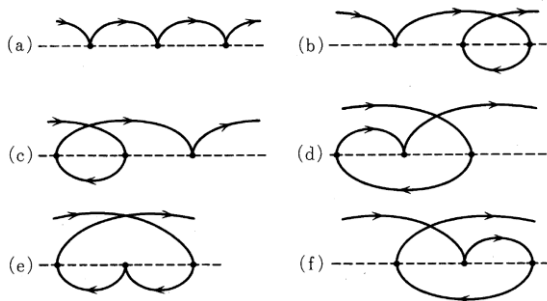
$$J_{\text{eff}} = J[1 + J\rho_0 \log(D/T)]$$



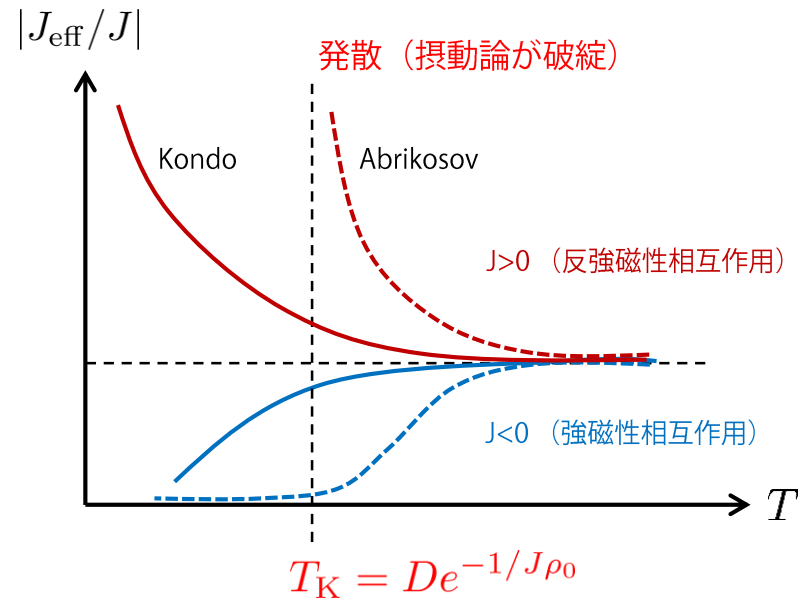
From 芳田磁性

Abrikosov 1965

$$J_{\text{eff}} = \frac{J}{1 - J\rho_0 \log(D/T)}$$

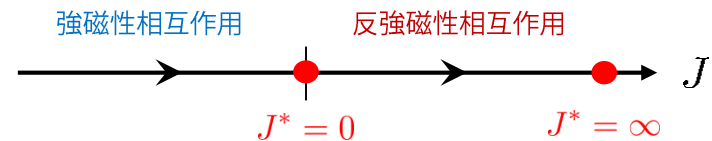


all "parquet" diagrams

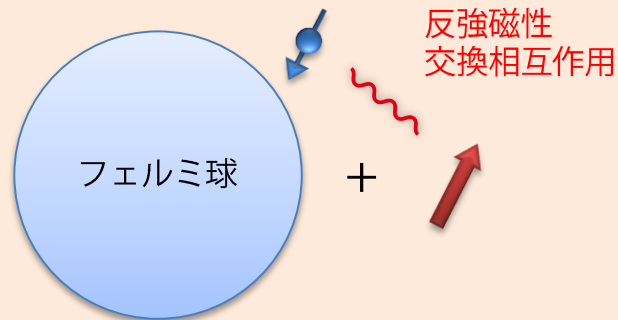


Anderson 1970

"poor man's scaling"



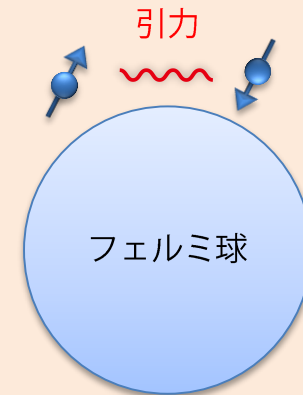
芳田理論



無限小の反強磁性交換相互作用に対して
フェルミ面が不安定

連続変化

c.f. 超伝導のクーパー問題



無限小の引力に対して
フェルミ面が不安定

対称性の破れ

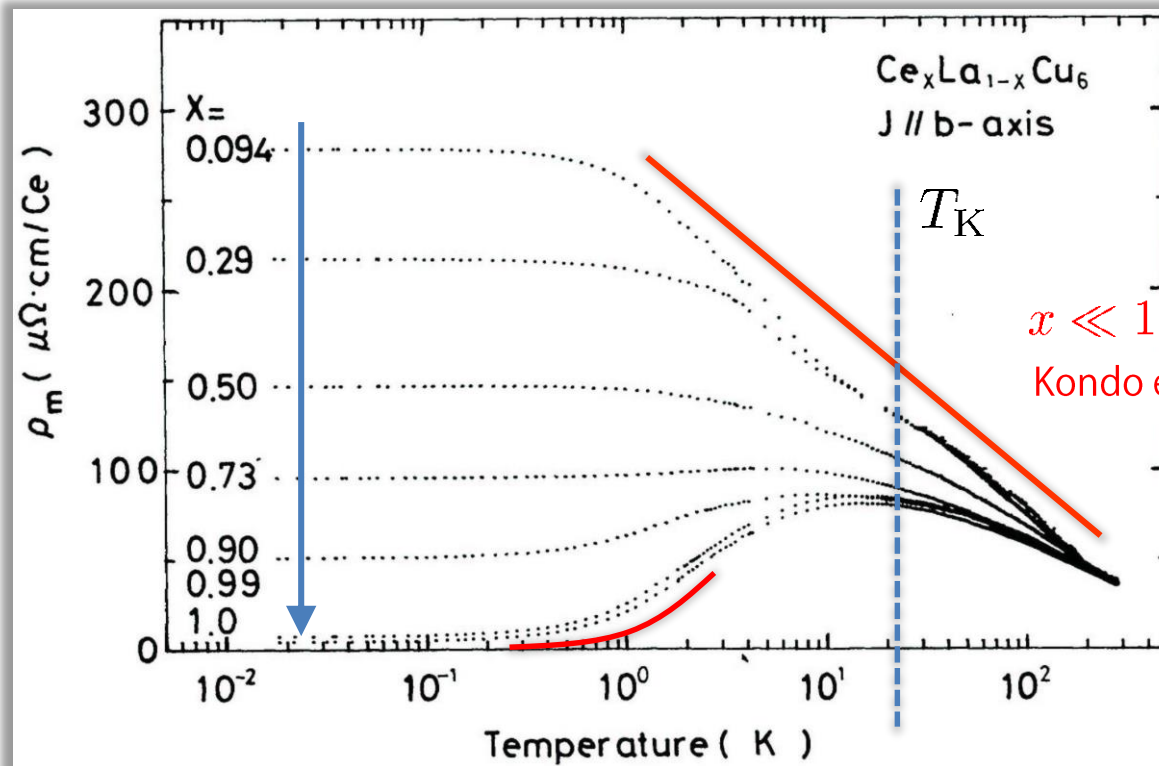
近藤効果から重い電子へ

Electric resistivity in $\text{Ce}_x\text{La}_{1-x}\text{Cu}_6$

$\text{Ce}^{3+}: 4f^1$
 $\text{La}^{3+}: 4f^0$

Sumiyama et al. (1986)

$$\rho_m = (\rho_x - \rho_0)/x$$



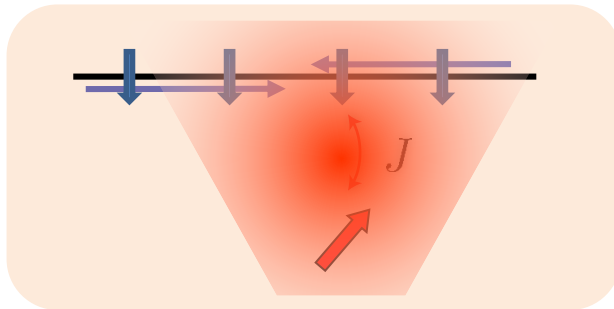
$$\frac{m^*}{m} \sim \frac{E_F}{T_K} \sim 10^2, 10^3$$

Heavy fermions

局在スピンの伝導電子

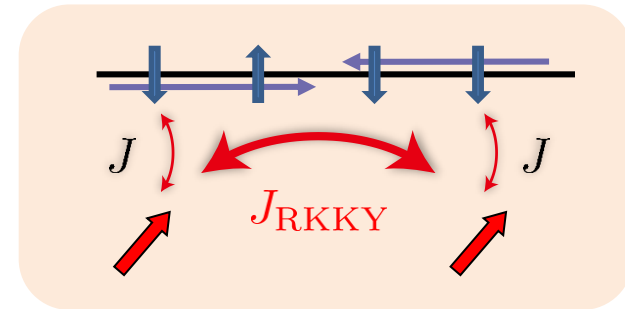
f-electron systems : localized electrons (spins) in a Fermi sea

1 spin: Kondo screening (Kondo 1964)



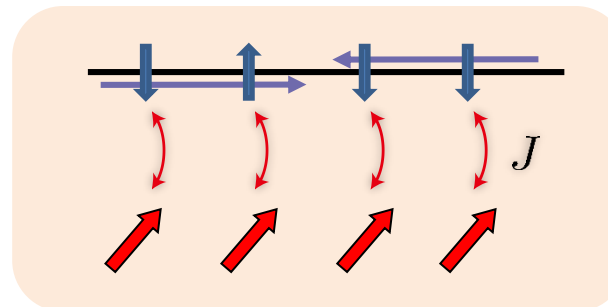
2 spins: RKKY interaction

(Ruderman, Kittel 1954, Kasuya 1956, Yosida 1957)



Paramagnetic ground state
(Heavy fermions)

Periodic systems

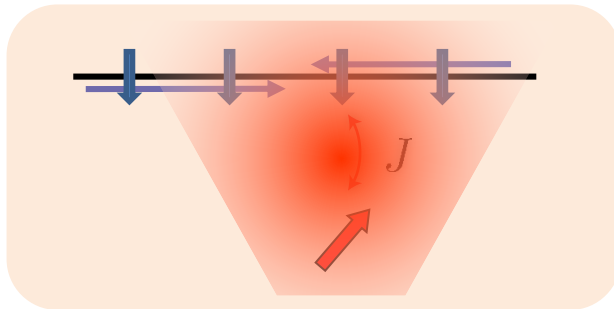


Magnetic phase transition

局在スピンの伝導電子

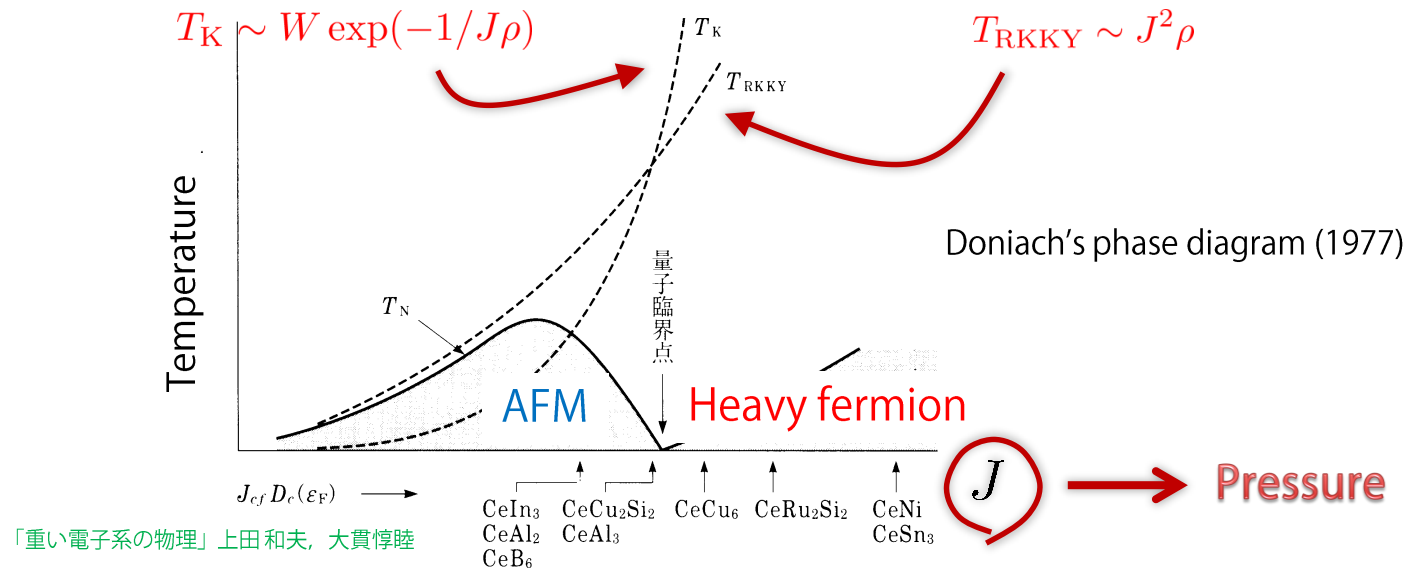
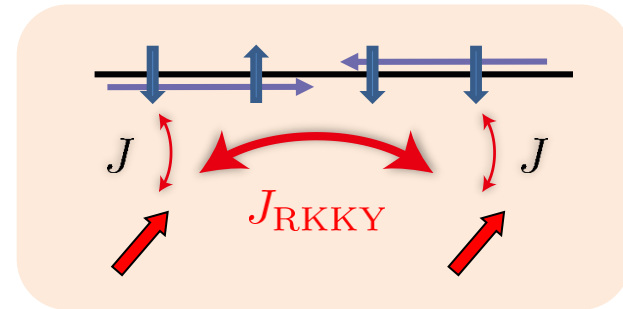
f-electron systems : localized electrons (spins) in a Fermi sea

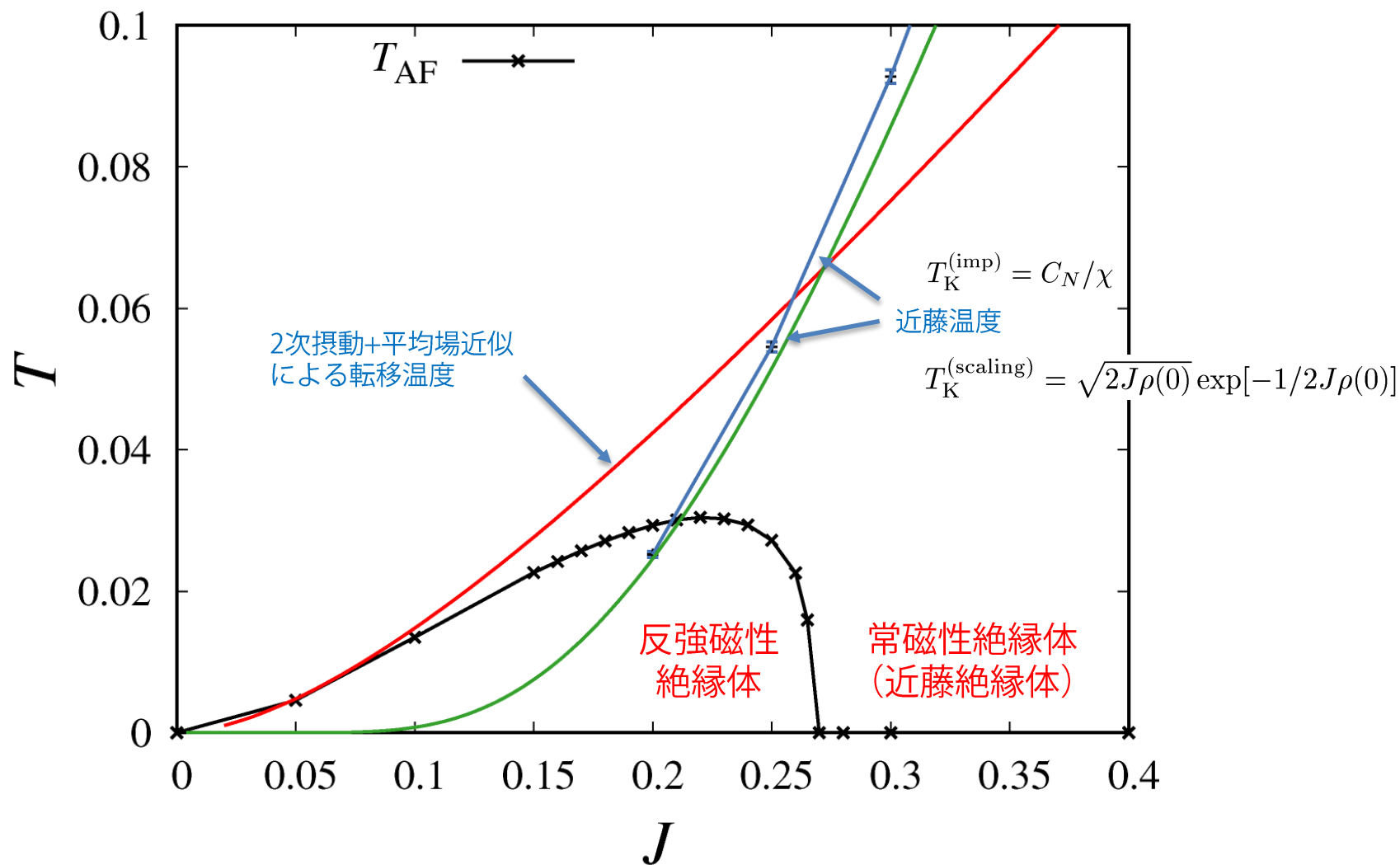
1 spin: Kondo screening (Kondo 1964)



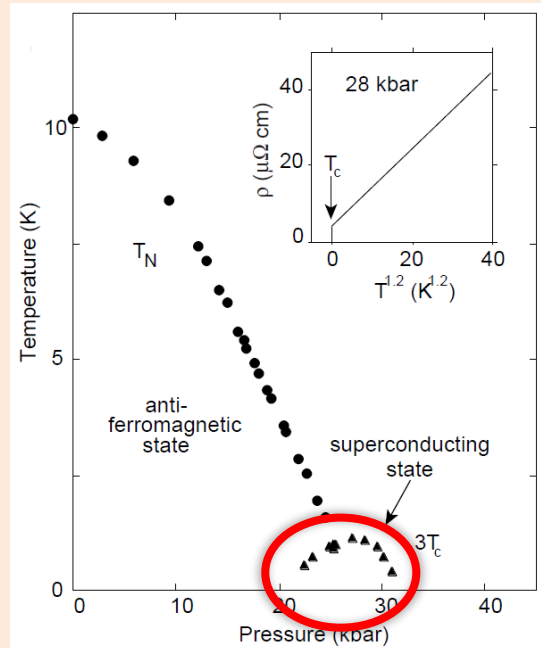
2 spins: RKKY interaction

(Ruderman, Kittel 1954, Kasuya 1956, Yosida 1957)

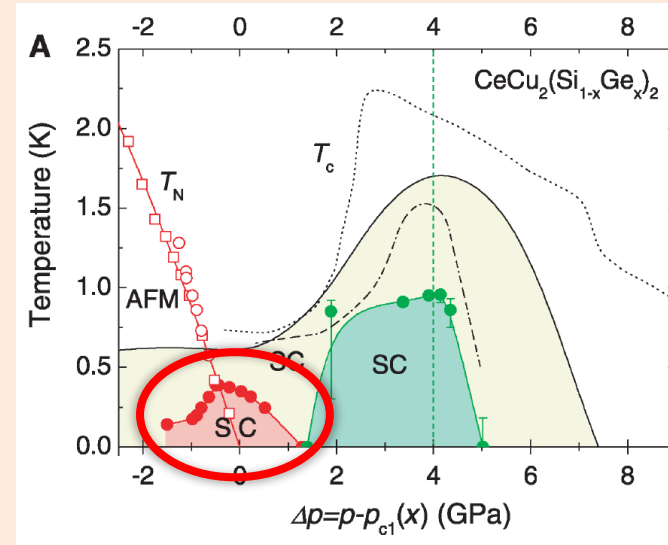




CeIn_3 Mathur et al. 1998



CeCu_2Si_2 Steglich et al. 1979, Yuan et al. 2003



Unconventional SC ?
d-wave in analogy with cuprates ?

動的平均場理論の適用範囲

d 電子系
(遷移金属)

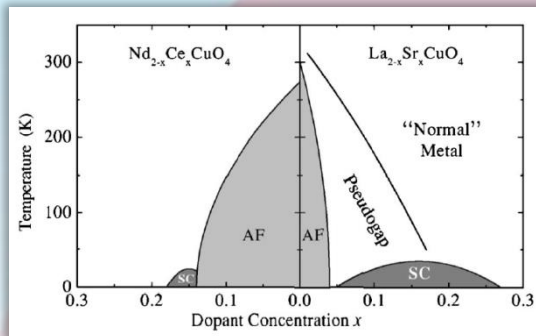
動的平均場理論

f 電子系
(希土類、アクチナイド)

Mott転移
軌道自由度

重い電子 (近藤効果)
多極子秩序 (RKKY相互作用)

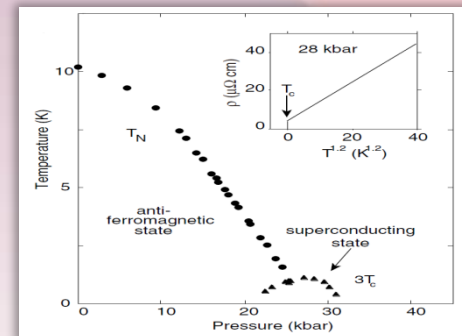
高温超伝導
Bednorz, Müller, 1986



From Damascelli et al. 2003

拡張理論

重い電子系超伝導
Steglich et al. 1979



From Mathur et al. 1998

Fe系超伝導

Ru系超伝導

U系超伝導

URu₂Si₂の隠れた秩序

磁性と超伝導

1. 近藤効果

- 摂動論 (J展開)
 - Kondo 1964 → Abrikosov 1965 → Suhl 1965, Nagaoka 1965
 - 基底状態
 - Yosida 1966
 - スケーリング、くり込み理論
 - Anderson, Yuval, Hamann 1970, Anderson 1970 → Wilson 1975 → Nozieres 1974
 - U展開
 - Yamada, Yosida 1975
 - 厳密解
 - (近藤模型) Andrei 1980, Wiegmann 1981
 - (アンダーソン模型) Kawakami, Okiji 1981, Wiegmann Tsvelick 1983
-
- 非フェルミ液体 (オーバースクリーニング)
 - Nozieres, Blandin 1980, Cox 1987
 - 高濃度近藤問題 (重い電子系) → 超伝導
 - 1980年代以降