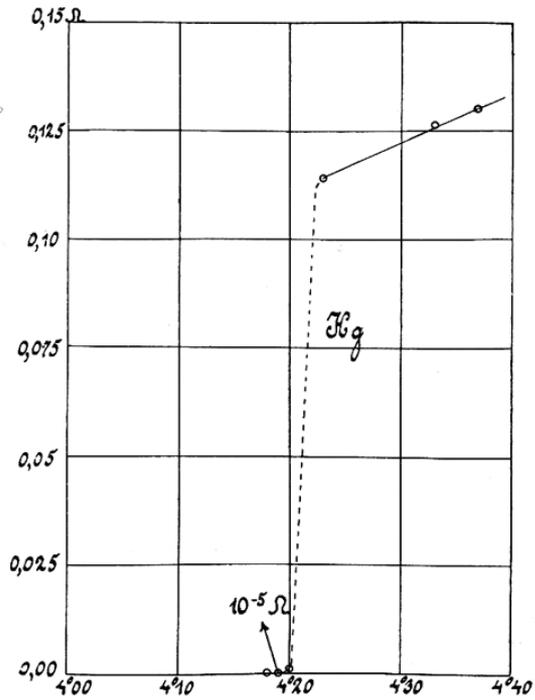


多軌道強相関電子系における エキゾチック超伝導

東京大学 総合文化研究科
日本学術振興会 特別研究員
星野晋太郎

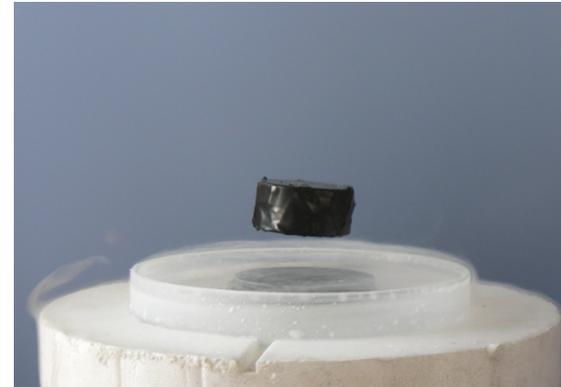
共同研究者： 倉本義夫、Philipp Werner

超伝導



ゼロ抵抗

from Wikipedia



マイスナー効果



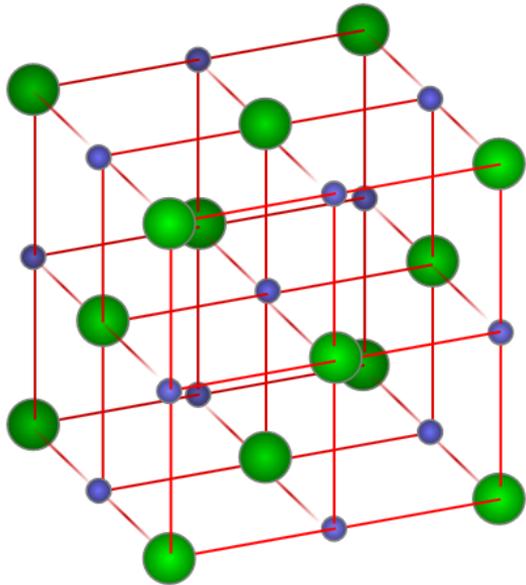
クーパー対

目次

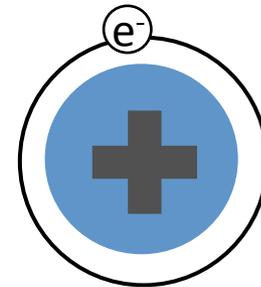
- 1 超伝導状態：クーパー対の実空間、スピン空間の構造
BCS理論
- 2 多軌道電子系：軌道の自由度を導入
Spin-Freezing 現象
多軌道ハバードモデルの超伝導
- 3 クーパー対の時空構造
2チャンネル近藤格子
奇周波数超伝導

固体中の電子

規則的に配列した原子



from Wikipedia

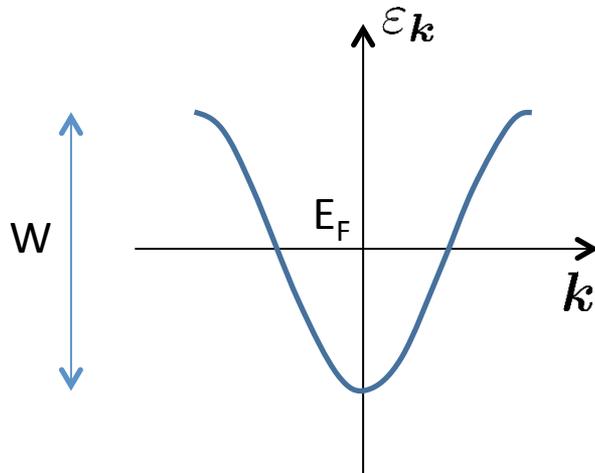
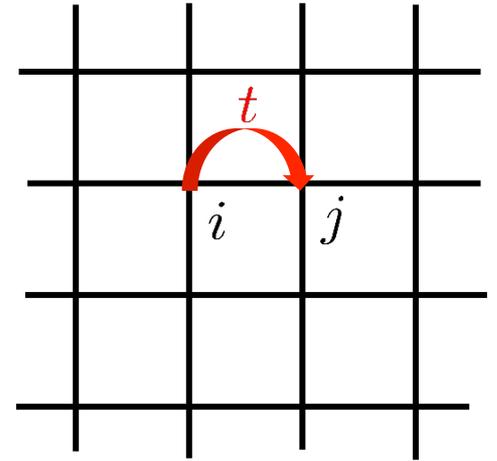


電荷、スピン、
軌道(1s,2s,2p,3s,3p,3d,...)

遍歴する電子

タイトバインディングモデル

$$\begin{aligned}\mathcal{H} &= -t \sum_{\langle ij \rangle} \sum_{\sigma=\uparrow,\downarrow} (c_{i\sigma}^\dagger c_{j\sigma} + \text{H.c.}) - \mu \sum_{i\sigma} n_{i\sigma} \\ &= \sum_{\mathbf{k}\sigma} (\varepsilon_{\mathbf{k}} - \mu) c_{\mathbf{k}\sigma}^\dagger c_{\mathbf{k}\sigma} \quad (n_{i\sigma} = c_{i\sigma}^\dagger c_{i\sigma})\end{aligned}$$



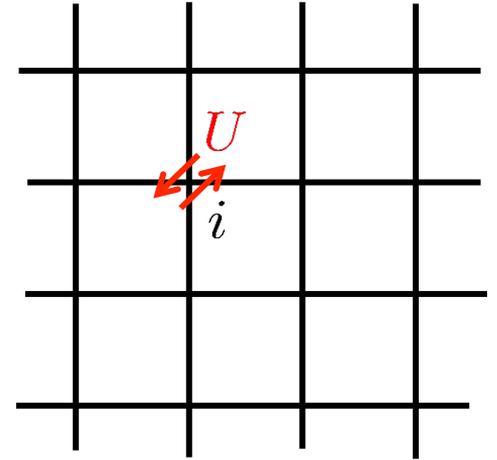
E_F : フェルミエネルギー
 W : バンド幅

$$E_F \sim W \sim t$$

超伝導の平均場理論

引力相互作用

$$\mathcal{H} = -t \sum_{\langle ij \rangle \sigma} c_{i\sigma}^\dagger c_{j\sigma} + U \sum_i n_{i\uparrow} n_{i\downarrow} \quad (U < 0)$$



平均場近似

$$\begin{aligned} U n_{i\uparrow} n_{i\downarrow} &= U c_{i\uparrow}^\dagger c_{i\uparrow} c_{i\downarrow}^\dagger c_{i\downarrow} \\ &\simeq U \langle c_{i\uparrow}^\dagger c_{i\downarrow}^\dagger \rangle c_{i\downarrow} c_{i\uparrow} + U \langle c_{i\downarrow} c_{i\uparrow} \rangle c_{i\uparrow}^\dagger c_{i\downarrow}^\dagger + \text{const.} \end{aligned}$$

秩序変数: ペア振幅(対振幅)

$$p_s = \sum_i \langle c_{i\uparrow}^\dagger c_{i\downarrow}^\dagger \rangle = \sum_{\mathbf{k}} \langle c_{\mathbf{k}\uparrow}^\dagger c_{-\mathbf{k}\downarrow}^\dagger \rangle$$

重心運動量はゼロ
(重心座標の空間変化無し)

超伝導状態の分類

指入れ替えに対する対称性

空間×スピン = odd (フェルミオン)

ペア振幅

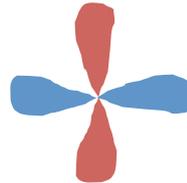
$$p = \sum_{\mathbf{k}} \langle c_{\mathbf{k}\uparrow}^\dagger c_{-\mathbf{k}\downarrow}^\dagger \rangle$$

s波



$$p = \sum_{\mathbf{k}} g_e(\mathbf{k}) \langle c_{\mathbf{k}\uparrow}^\dagger c_{-\mathbf{k}\downarrow}^\dagger \rangle$$

d波



$$p = \sum_{\mathbf{k}} g_o(\mathbf{k}) \langle c_{\mathbf{k}\uparrow}^\dagger c_{-\mathbf{k}\uparrow}^\dagger \rangle$$

p波



参考:s波・同スピン

$$p_s = \sum_{\mathbf{k}} \langle c_{\mathbf{k}\uparrow}^\dagger c_{-\mathbf{k}\uparrow}^\dagger \rangle = 0$$

	空間	スピン
s, d波 (EO)	even	odd
p波 (OE)	odd	even

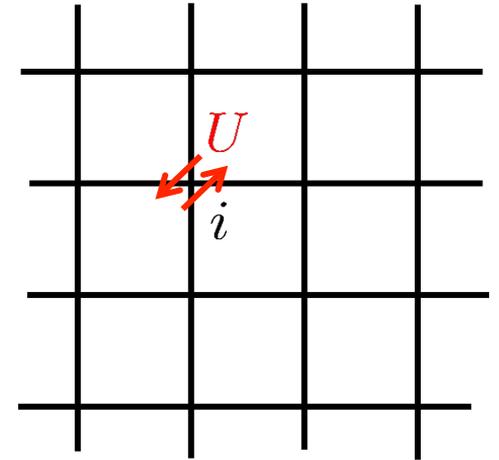
多軌道強相関電子系の超伝導

局在した電子

原子極限 (atomic limit)

$$\mathcal{H} = U \sum_i n_{i\uparrow} n_{i\downarrow} - \mu \sum_{i\sigma} n_{i\sigma} \quad (U > 0)$$

$$(n_{i\sigma} = c_{i\sigma}^\dagger c_{i\sigma})$$



斥力: エネルギーの損



$$E = -\mu$$



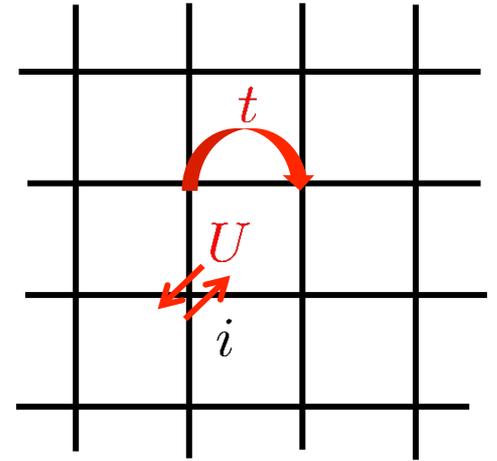
$$E = U - 2\mu$$

スピン自由度のみ活性
(電荷の自由度は消失)

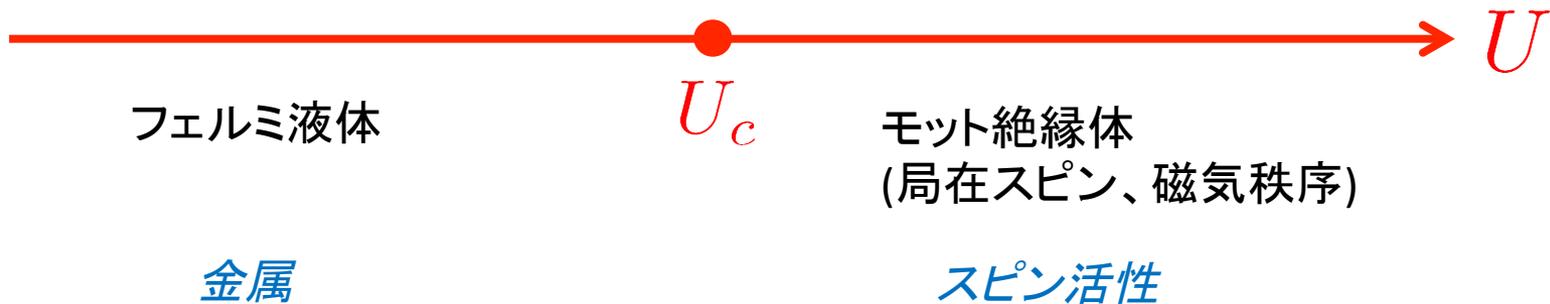
局在スピン

ハバードモデル

$$\mathcal{H} = \sum_{\mathbf{k}\sigma} (\varepsilon_{\mathbf{k}} - \mu) c_{\mathbf{k}\sigma}^\dagger c_{\mathbf{k}\sigma} + U \sum_i n_{i\uparrow} n_{i\downarrow}$$



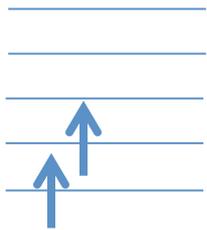
モット転移 (遍歴・局在転移)



軌道の自由度

d電子系

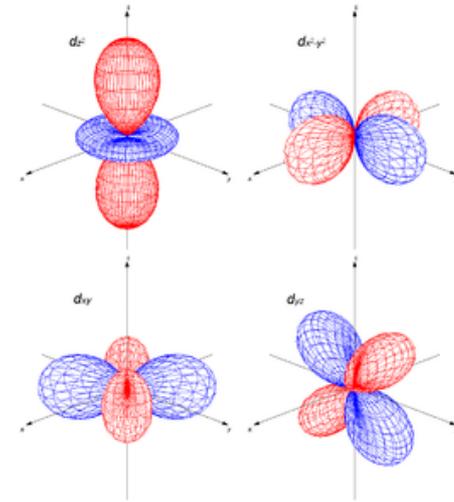
$l=2, s=1/2$



立方対称な
結晶電場



eg



from Wikipedia

t2g

*) t2g軌道 $\gamma=1,2,3$ (ex. SrTcO₃, Sr₂RuO₄, ...)

多軌道ハバードモデル

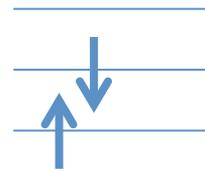
$$\mathcal{H} = \sum_{\mathbf{k}\gamma\sigma} (\varepsilon_{\mathbf{k}} - \mu) c_{\mathbf{k}\gamma\sigma}^\dagger c_{\mathbf{k}\gamma\sigma} + U \sum_{i\gamma} n_{i\gamma\uparrow} n_{i\gamma\downarrow} + U' \sum_{i\sigma, \gamma < \gamma'} n_{i\gamma\sigma} n_{i\gamma'\bar{\sigma}} + (U' - J) \sum_{i\sigma, \gamma < \gamma'} n_{i\gamma\sigma} n_{i\gamma'\sigma}$$

n=2 の場合



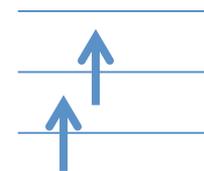
$$E = U$$

同軌道内斥力



$$E = U'$$

異軌道間斥力



$$E = U' - J$$

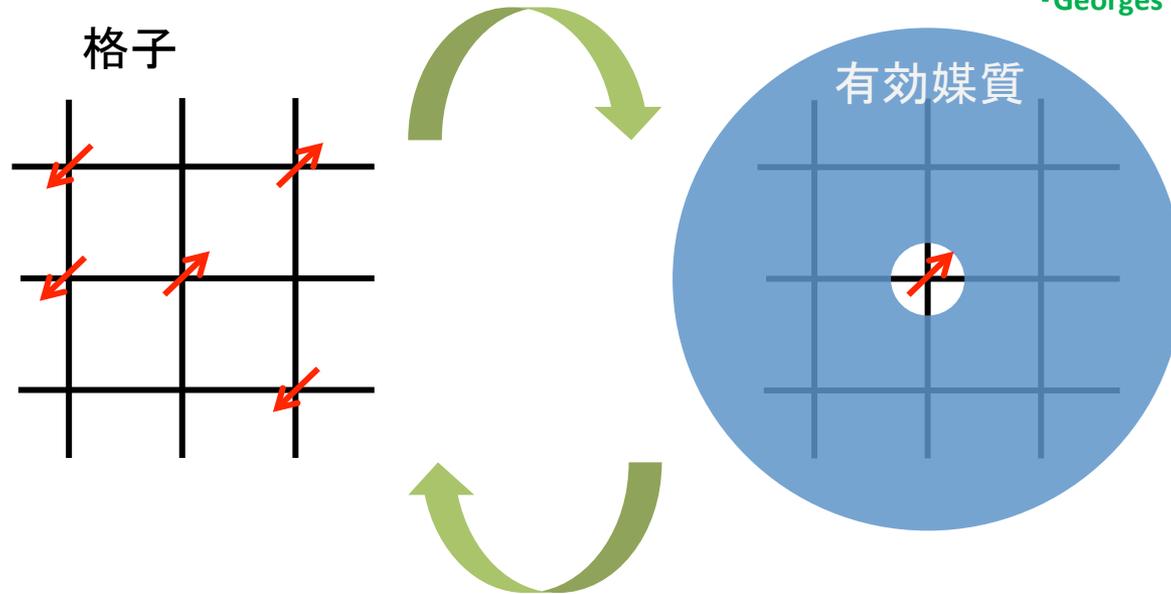
異軌道間斥力 + フント結合

*) 球対称のとき $U' = U - 2J$

*) $J/U \doteq 0.15$ (t2g軌道)

動的平均場理論

- Kuramoto: Springer (1985)
- Metzner& Vollhardt: PRL (1989)
- Muller-Hartmann: Z. Phys. (1989)
- Georges et al: Rev. Mod. Phys. (1996)



連続時間量子モンテカルロ

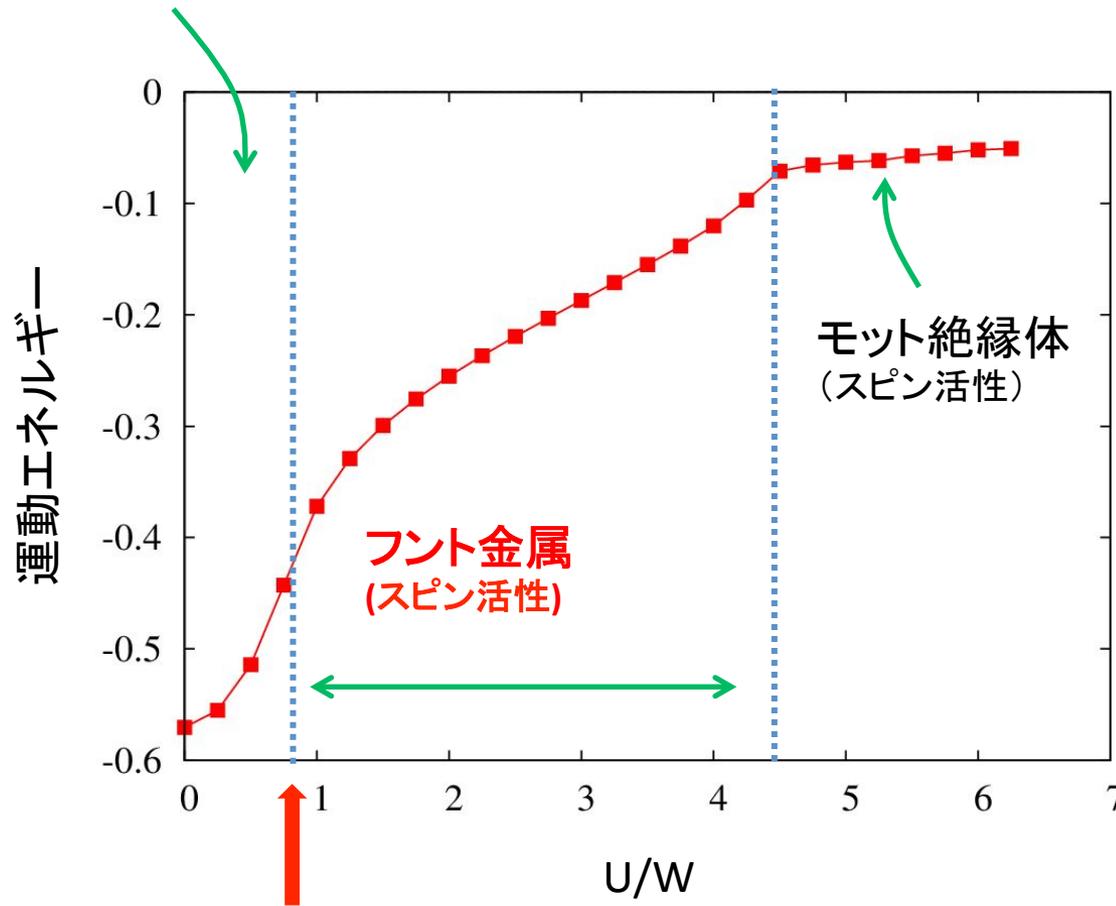
- 局所的な電子相関を正確に扱う
- 非局所相関は平均場レベル
(異方的超伝導は扱えない、s波は可能)

- Rubtsov et al: JETP Lett. (2004)
- Werner et al: PRL (2006)
- Otsuki et al: JPSJ (2007)
- Gull et al: Rev. Mod. Phys. (2011)

Spin-Freezing 現象

Werner et al, PRL (2008)
Georges et al, Annu. Rev. (2013)

フェルミ液体
(金属)



$n=2$
 $J/U=1/4$
 $U'=U-2J$
 $T/W=0.02$
 W : バンド幅

超伝導状態の分類

	空間	スピン	軌道
EOE	even	odd	even
OEE	odd	even	even
EEO	even	even	odd
OOO	odd	odd	odd

どのペアが安定になるか？

超伝導の探索

強磁性帯磁率

$$\chi = \left. \frac{dM}{dH} \right|_{H \rightarrow 0} = \int_0^{1/T} \langle \hat{M}(\tau) \hat{M} \rangle d\tau \quad (\text{線形応答理論})$$

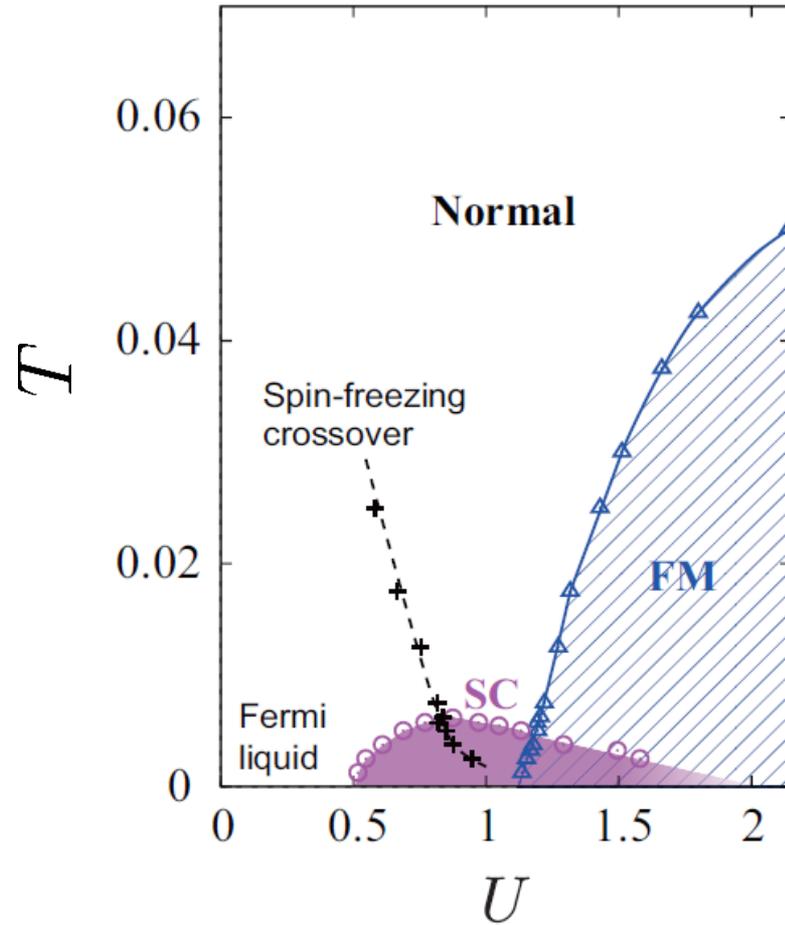
帯磁率の発散 \Leftrightarrow 強磁性転移 (2次転移)

超伝導転移の場合: 磁化の代わりにペア振幅を考える

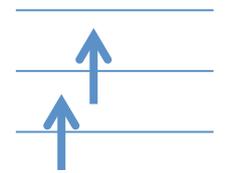
$$\hat{M} \rightarrow \hat{p}_{ab} = \sum_i c_{ia}^\dagger c_{ib}^\dagger + \text{H.c.}$$

感受率の発散 \Leftrightarrow 超伝導転移

相図



$n=2$
 $J/U=1/4$
 $U'=U-2J$



$$E = U' - J$$

	空間	スピン	軌道
EEO	even	even	odd

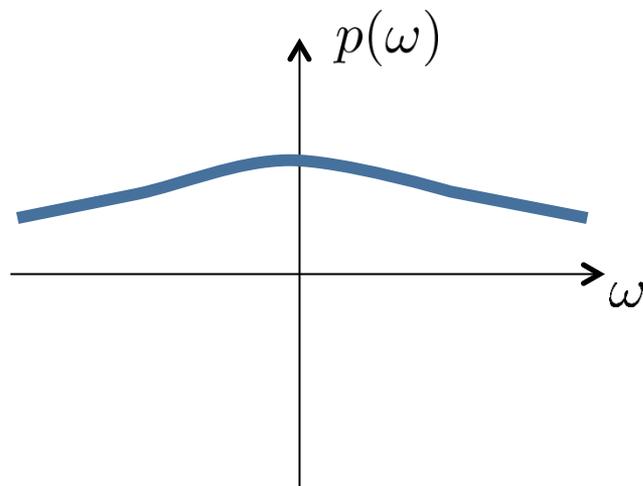
$$p = \langle c_{1\uparrow}^\dagger c_{2\uparrow}^\dagger \rangle + c.c.$$

奇周波数超伝導と 2チャンネル近藤系

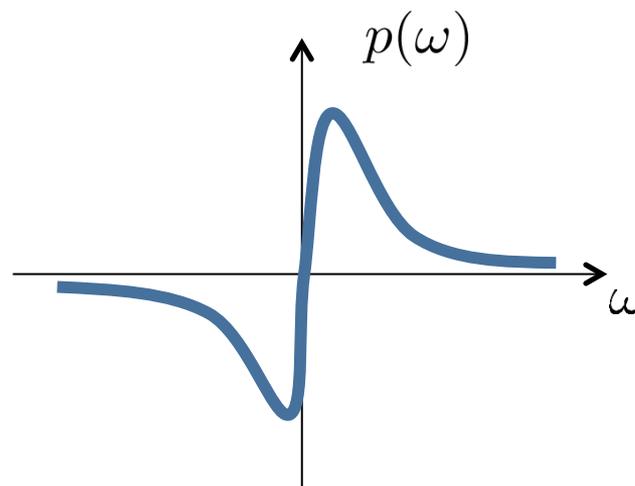
クーパー対の時間の自由度

$$p(t) = \langle c^\dagger(t)c^\dagger \rangle$$

Berezinskii: JETP Lett. (1974)



偶周波数超伝導



奇周波数超伝導

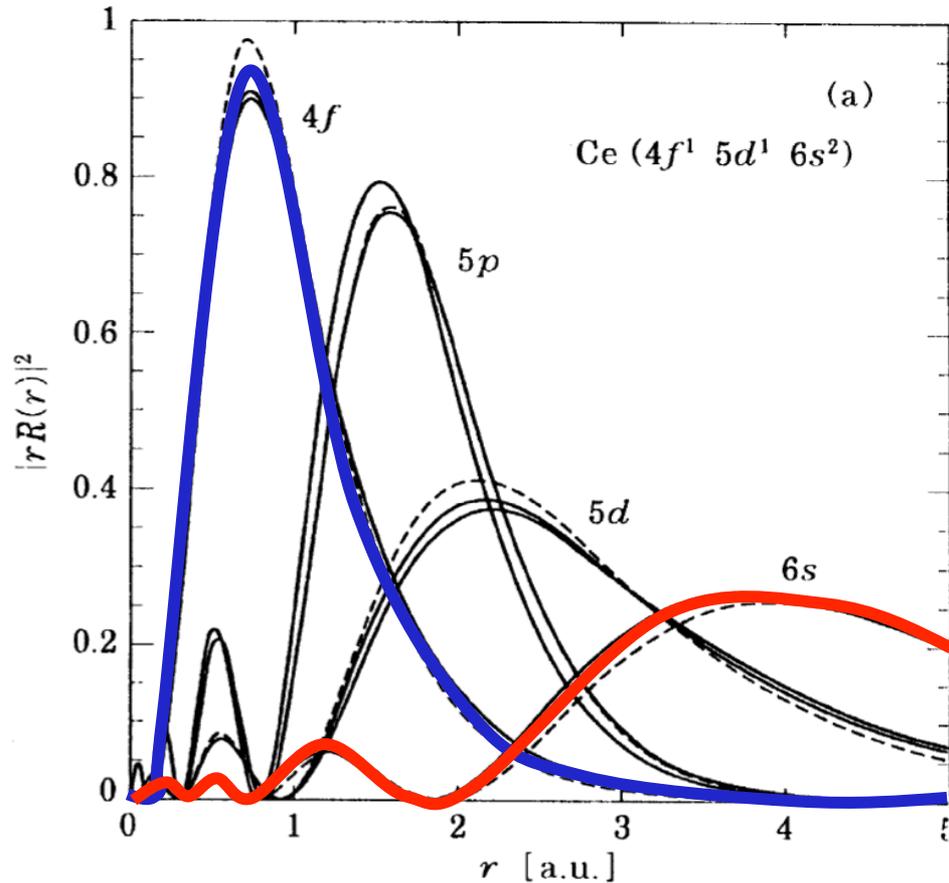
	空間	スピン	時間
EOE	even	odd	even
OEE	odd	even	even
EEO	even	even	odd
OOO	odd	odd	odd

Balatsky & Abrahams: PRB (1992)

奇周波数超伝導の提案

Berezinskii	^3He	JETP 1974
Emery & Kivelson	two-channel Kondo systems	PRB 1992, PRL 1993
Balatsky & Bonca	t-J model	PRB 1993
Coleman et al.	Kondo lattice	PRL 1993, PRB 1994
Zachar et al.	Kondo lattice	PRL 1996
Jarrell et al.	two-channel Kondo lattice	PRL 1997
Vojta & Dagotto	frustrated electron system	PRB 1999
Anders	two-channel Anderson lattice	PRB 2002
Fuseya et al.	AFM phase near QCP	JPSJ 2004
Yada et al.	Extended Hubbard model near SDW QCP	arXiv 2008
Shigeta et al.	Extended Hubbard model with spin-orbit coupling	PRB 2009
Hotta	FM phase near orbital order QCP	JPSJ 2009
Kusunose et al.	electron-phonon system	JPSJ 2011
Yanagi et al.	frustrated electron system	JPSJ 2012
Shigeta et al.	quasi-one dimensional system	JPSJ 2011, JPSJ 2013
Hoshino & Kuramoto	two-channel Kondo lattice	PRL 2014

f電子を持つ物質群：重い電子系



K. Ueda & Y. Onuki:
Shokabo (1998)

遍歴(伝導)電子

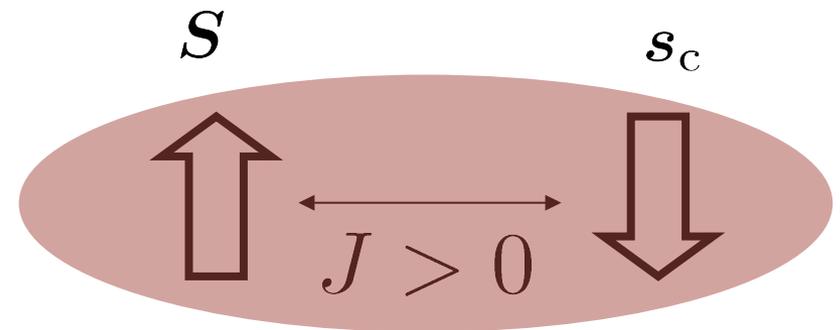
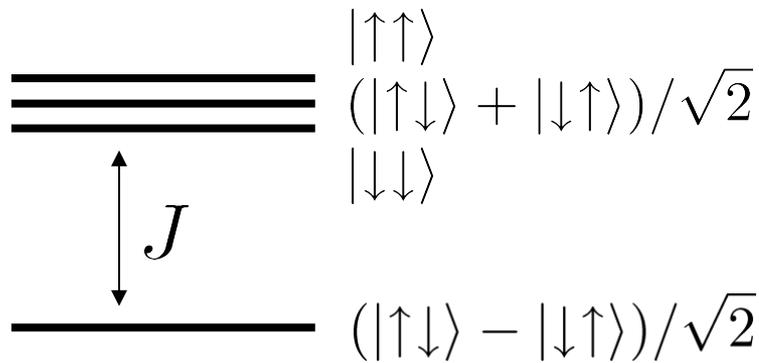
局在電子(f電子)

重い電子系 \div 局在電子(スピン) + 伝導電子

スピンの相互作用: 2スピン系

$$\mathcal{H} = JS \cdot s_c$$

S : 局在スピン
 s_c : 伝導電子スピン

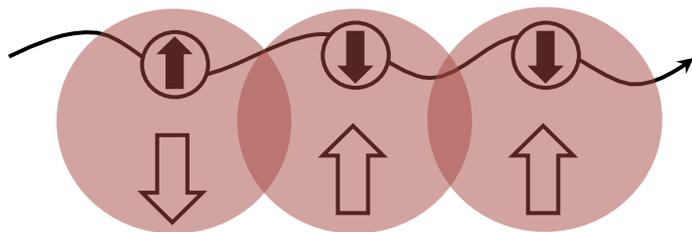
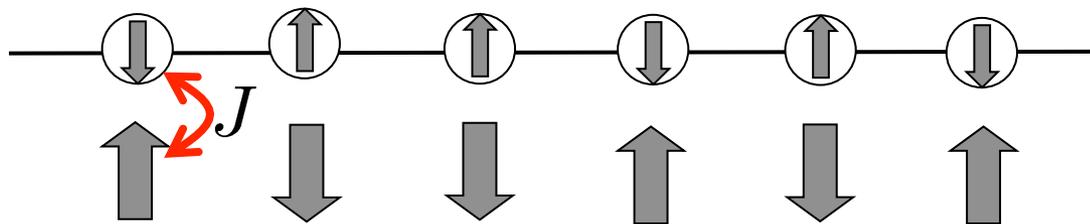


スピンー重項

近藤格子

$$\mathcal{H} = \sum_{\mathbf{k}\sigma} (\varepsilon_{\mathbf{k}} - \mu) c_{\mathbf{k}\sigma}^\dagger c_{\mathbf{k}\sigma} + J \sum_i \mathbf{S}_i \cdot \mathbf{s}_{ci}$$

T. Kasuya: PTP (1956)

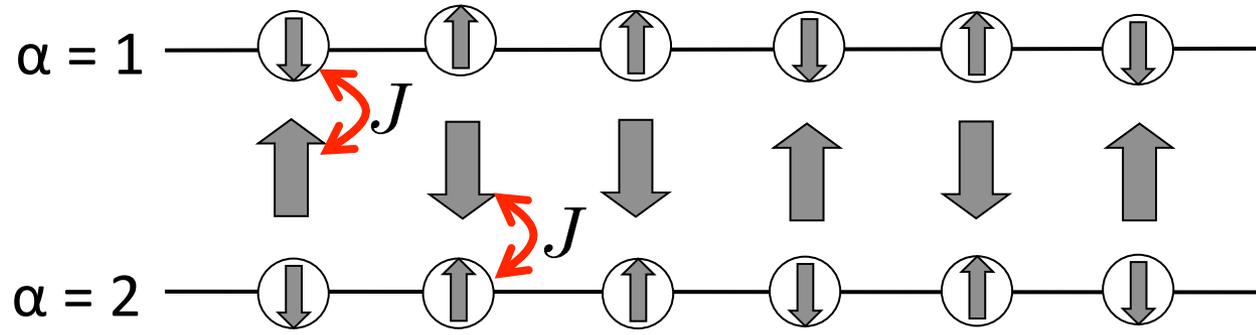


重い電子状態
(集団的スピン重項)

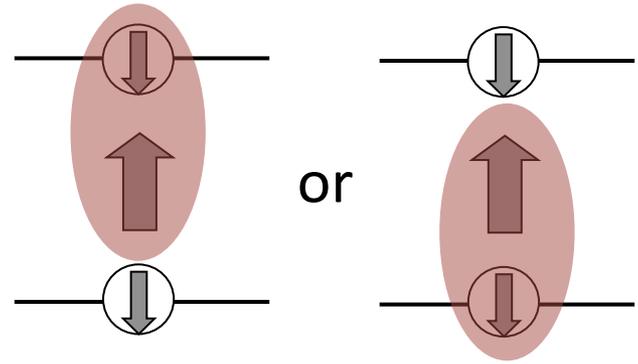
2チャンネル(軌道)近藤格子

$$\mathcal{H} = \sum_{k\sigma} (\varepsilon_k - \mu) c_{k\sigma}^\dagger c_{k\sigma} + J \sum_{i,\alpha=1,2} \mathbf{S}_i \cdot \mathbf{s}_{ci\alpha}$$

Jarrell et al: PRL (1996, 1997)



どちらのチャンネル($\alpha=1, 2$)と
スピン-重項を作るか??



超伝導状態の分類

	空間	スピン	チャンネル (軌道)	時間
EOEE	even	odd	even	even
OEEE	odd	even	even	even
EEOE	even	even	odd	even
OOOE	odd	odd	odd	even
E000	even	odd	odd	odd
OEOO	odd	even	odd	odd
EEEE	even	even	even	odd
OOEO	odd	odd	even	odd

実は、上記の奇周波数ペアは実現しない

熱力学的不安定性

Heid: Z. Phys. B (1995)

Kusunose et al.: JPSJ (2011)

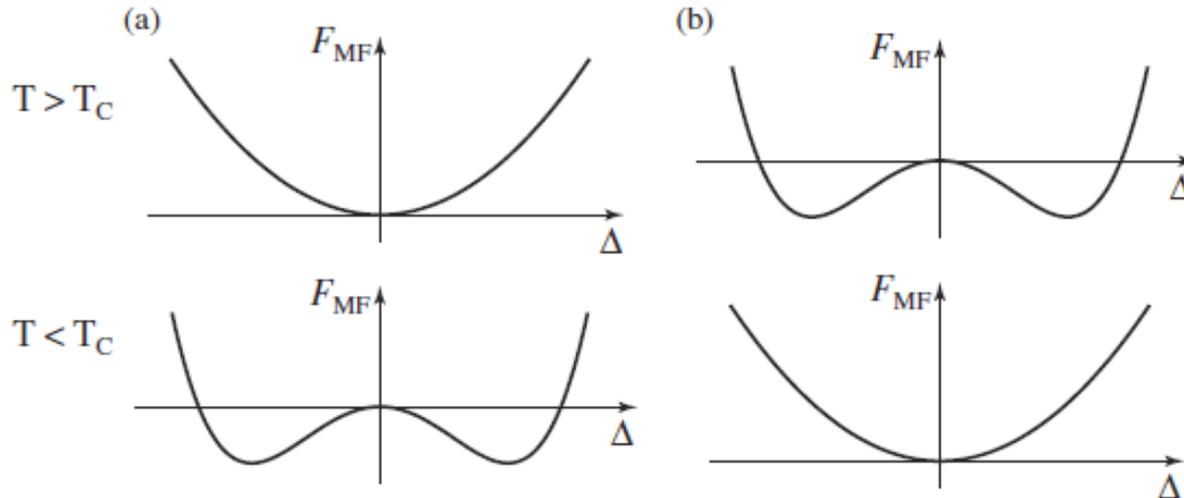
偶周波数超伝導

$$p(-\omega) = +p(\omega)$$

奇周波数超伝導

$$p(-\omega) = -p(\omega)$$

余分な負符号



奇周波数超伝導は安定に存在できない？

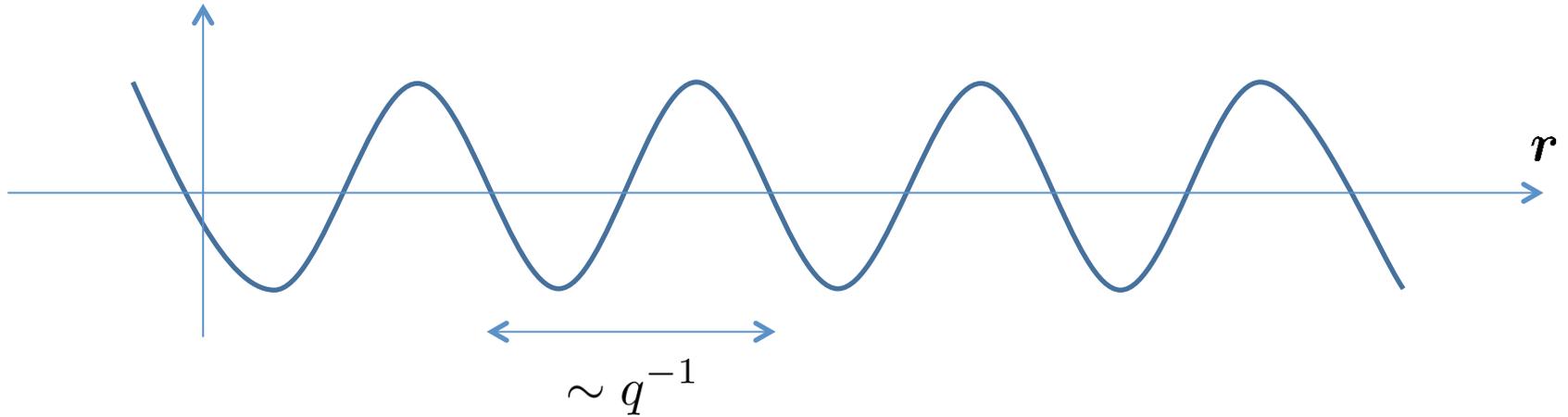
(cf. 界面で誘起される奇周波数超伝導)

Tanaka, Sato, Nagaosa: JPSJ (2012)

クーパー対の重心運動量

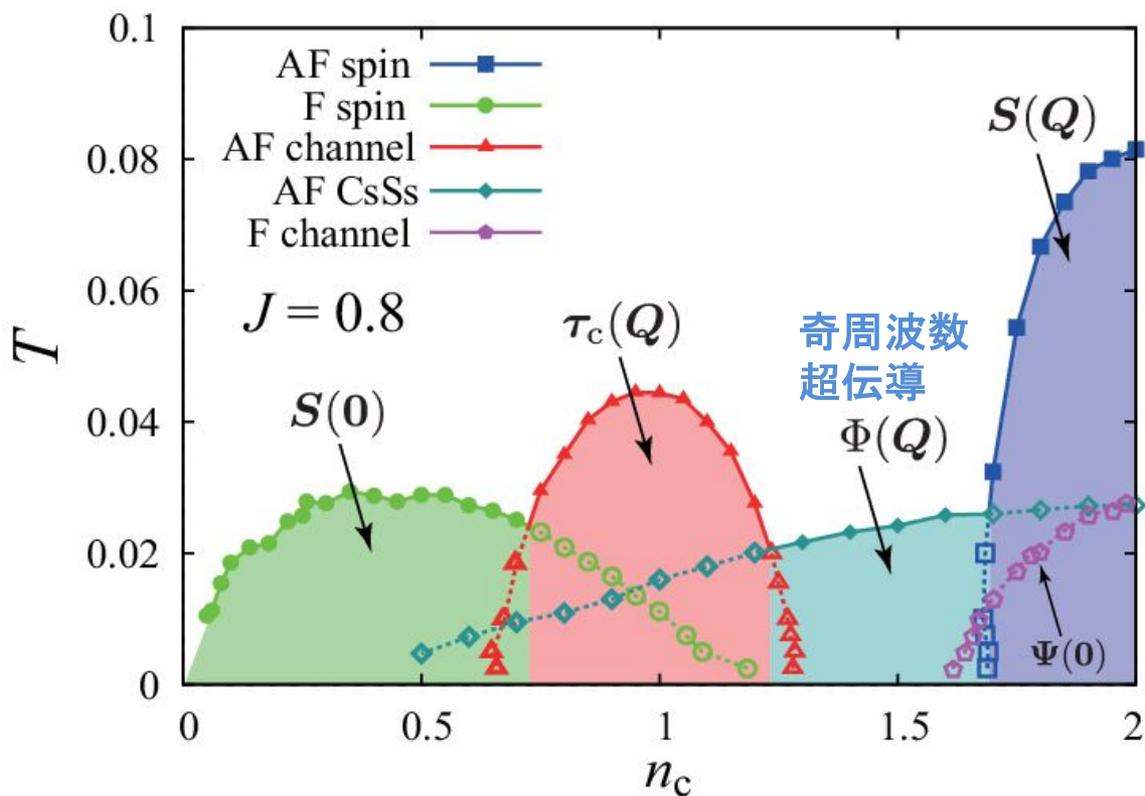
空間変調するペア振幅

$$p(\mathbf{r}) = p_0 e^{i\mathbf{q}\cdot\mathbf{r}}$$



	空間	スピン	チャンネル (軌道)	時間	重心運動量 (秩序ベクトル)
EOEE-0	even	odd	even	even	0
OEEE-0	odd	even	even	even	0
EEOE-0	even	even	odd	even	0
OOOE-0	odd	odd	odd	even	0
E000-0	even	odd	odd	odd	0
OEOO-0	odd	even	odd	odd	0
EEEE-0	even	even	even	odd	0
OOEO-0	odd	odd	even	odd	0
EOEE-Q	even	odd	even	even	$Q=(\pi,\pi,\pi)$
OEEE-Q	odd	even	even	even	Q
EEOE-Q	even	even	odd	even	Q
OOOE-Q	odd	odd	odd	even	Q
E000-Q	even	odd	odd	odd	Q
OEOO-Q	odd	even	odd	odd	Q
EEEE-Q	even	even	even	odd	Q
OOEO-Q	odd	odd	even	odd	Q

相図



D=1: 半バンド幅

	空間	スピン	チャンネル (軌道)	時間	重心運動量 (秩序ベクトル)
E000-Q	even	odd	odd	odd	Q

まとめ

クーパ対の多様な内部構造



	空間	スピン
s, d波スピン重項 (EO)	even	odd
p波スピン三重項 (OE)	odd	even

	空間	スピン	チャンネル (軌道)	時間	重心運動量 (秩序ベクトル)
E0E0-0	even	odd	even	even	0
O0E0-0	odd	even	even	even	0
E0E0-1	even	even	odd	even	0
O0O0-0	odd	odd	odd	even	0
E0O0-0	even	odd	odd	odd	0
O0O0-0	odd	even	odd	odd	0
E0E0-1	even	even	even	odd	0
O0E0-1	odd	odd	even	odd	0
E0E0-Q	even	odd	even	even	Q
O0E0-Q	odd	even	even	even	Q
E0O0-Q	even	even	odd	even	Q
O0O0-Q	odd	odd	odd	even	Q
E0O0-Q	even	odd	odd	odd	Q
O0E0-Q	odd	even	odd	odd	Q
E0E0-Q	even	even	even	odd	Q
O0E0-Q	odd	odd	even	odd	Q

- 多軌道電子系: 軌道の自由度を導入

Spin-Freezing 現象

多軌道ハバードモデルの斥力誘起超伝導

- クーパ対の時空構造 + 重心運動量

2チャンネル近藤格子

奇周波数超伝導

