

## 時間反転対称性の破れた超伝導体の磁氣的性質

東京大学物性研究所 北 孝文

重い電子系の超伝導体  $UPt_3$  では、Cooper 対が異方的かつ内部自由度をもつことが確認され、その内部運動により時間反転対称性 ( $T$ 対称性) が自発的に破れる可能性が指摘されている。[1]-[4] また高温超伝導体の微視的機構についても、 $T$ 対称性を破る anyon 粒子の凝縮によるとする意見がある。[5] 一般に  $T$ 対称性の自発的な破れは磁氣的秩序の出現と結びついており、 $T$ 対称性の破れた超伝導体では磁氣的秩序と超伝導が同時に生じることになる。従って、これらの超伝導体では新たな磁氣的性質が現れることが期待できる。ここでは Cooper 対の内部運動により  $T$ 対称性が破れた例として超伝導 Anderson-Brinkman-Model (ABM) 状態を取り上げ、その磁氣的性質を議論する。[6]

超伝導状態は、2つの Fermi 粒子 (スピン  $S_1 = 1/2, S_2 = 1/2$ ) が Cooper 対という束縛状態 (分子) を作り、Bose 凝縮を起こすことにより出現する。一般に分子の自由度は並進の自由度と内部自由度に分けることができるが、通常の超伝導体では  $S = L = 0$  の状態 ( $S = S_1 + S_2, L$ : 軌道角運動量の大きさ) に凝縮するため Cooper 対の内部自由度はない。秩序パラメータは複素スカラー場  $\Psi(\mathbf{r})$  で表され、その位相は並進の自由度を表す。一方 Cooper 対が  $L \geq 0$  の状態に凝縮すると内部自由度が現れる。特に ABM 状態 ( $L = L_z = 1$ ) では Cooper 対の内部運動による軌道角運動量  $l$  が一方向に揃い、マクロな磁気モーメント  $\propto (\hbar/2)N_S$ 、すなわちマクロな磁場が出現する。 ( $N_S$ : 凝縮している電子の数)。しかし Cooper 対の並進運動すなわち超伝導電流  $J'$  はこの磁場を遮蔽するであろう。それでは一体どのような平衡状態ができるのだろうか。

そこでまず外部磁場 0 のもとでの平衡状態を、系が非常に長い円柱の場合について計算した。結果は London の侵入長  $\lambda$  と円柱の半径  $R$  の大小により異なる。

(1)  $R \lesssim 5\lambda$  の場合には  $l$  が円柱の軸方向に揃った状態が実現する。超伝導電流は円柱の表面層の厚さ  $\lambda$  程度の所を流れ、 $l$  による磁場を遮蔽する。

(2)  $R \gtrsim 5\lambda$  の場合には  $l$  が空間的にゆるやかに変化する状態 (円柱の中心で  $l \propto -z$ ;  $l$  は円柱表面に垂直) が安定になる。超伝導電流は系全体を流れ、 $l$  による磁場を遮蔽する。これは系全体が 1 つの vortex であることを意味する。その特徴は秩序変数の絶対値がいたるところで一定であることである (vortex with nonsingular core)。

次に  $R \gg \lambda$  の円柱を考えこの系での磁化過程を議論した。その結果は以下のとおりである (Fig.1)。

(3)  $H_{c1}$  はない。すなわち nonsingular core を持つ vortex の格子が無限小の外部磁場から形成され始める。これは零磁場ですでに 1 つの vortex ができていることからの帰結である。

(4) ある磁場  $H = H_{ic}$  において singular core を持つ vortex の格子への一次相転移が起こる。この格子の核では秩序変数の絶対値が 0 になる。

(5) さらに  $H = H_{c2}$  において通常の金属に転移する。この臨界磁場  $H_{c2}$  は磁気モーメント  $l$  のために高くなる。

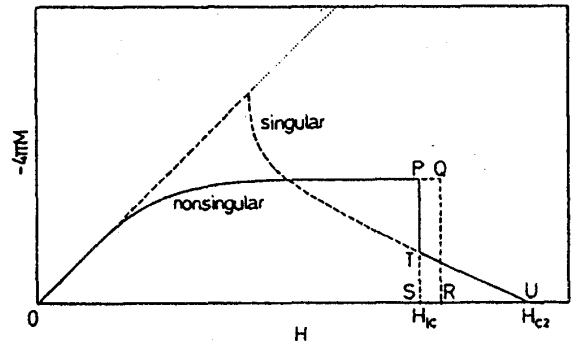


Fig.1

以上、超伝導 ABM 状態の磁氣的性質について述べてきた。ここでは軌道角運動量の方向  $l$  が空間的に変わり得るとしている。しかし現実の系では格子の異方性により  $l$  がピン止めされることが予想される。(また anyon ガスが量子凝縮する場合にも  $l$  が空間変化する自由度はない。) その際には外部磁場 0 での平衡状態 (2) は実現せず、任意の大きさの試料について状態 (1) が安定となるであろう。また磁化過程でも有限の大きさの  $H_{c1}$  が現れ、また nonsingular な核をもつ vortex 格子はエネルギー的に不利となることが予想される。以上の点がこれからの研究課題である。

## Reference

- [1] G.E. Volovik and L.P. Gor'kov, Zh. Eksp. Teor. Fiz. 88, 1412 (1985)  
[Sov. Phys. JETP 61, 843 (1985)].

- [2] M. Sigrist, T.M. Rice, and K. Ueda, *Phys. Rev. Lett.* **63**, 1727 (1989).
- [3] S.K. Sundaram and R. Jont, *Phys. Rev.* **B40**, 8780 (1989).
- [4] T.A. Tokuyasu, D.W. Hess, and J.A. Sauls, *Phys. Rev.* **B41**, 8891 (1990).
- [5] B.I. Halperin, J.M. -Russell, and F. Wilczek, *Phys. Rev.* **40**, 8726 (1989).
- [6] T. Kita: to appear in *Phys. Rev.* **B43** (1991).