

超伝導体における磁性不純物効果

講師 名大・理 益 田 義 賀

固体における典型的な多性効果である磁性と超伝導とは相反する性質であるが、磁性不純物を含む超伝導体では両者が共存していることになる。本講義ではこの問題が取り扱われた。以下にその概要を報告する。

超伝導体中の磁性不純物を最初に扱った理論は Abrikosov-Gor'kov (AG) によるものであるが、AG 理論では近藤効果は無視され、不純物スピンは古典的ベクトルとして扱われている。AG によれば T_c は次の式で与えられる。

$$\log (T_c/T_{c0}) = \psi(\frac{1}{2}) - \psi(\frac{1}{2} + 0.14 \alpha T_{c0}/\alpha_{cr} T_c) \quad (1)$$

T_{c0} は磁性不純物のない場合の転移温度、 $\alpha = 2\pi n N(E_F) J^2 S(S+1)$, $\alpha_{cr} = \pi T_{c0}/2\gamma$, $\log \gamma = 0.577 \dots$, n は不純物濃度, J は不純物スピンの交換相互作用の強さ, S は不純物スピンの大きさである。一方, Anderson モデル的な立場からは不純物は磁気モーメントをもつ場合と持たない場合とがある。前者の場合は不純物は対破壊効果をもたらす (AG 的), 後者の場合は BCS 引力を弱めるだけである (BCS 的)。両者の違いを実験的に見るには n を変えて T_c と ΔC (比熱のとび) を測ればよく, 不純物が AG 的である場合は BCS 的である場合に比べて, 同じ T_c に対して ΔC が小さくなる。

超伝導と近藤効果が互いにどのように影響し合うかは非常に興味深い問題であり, 講義の中心題目であった。 $J < 0$ の場合は基底状態は不純物スピンと電子との一重項束縛状態であり, $T=0$ で不純物是非磁性的となる。このように不純物の磁氣的性質は温度変化するので, 不純物による電子散乱の強さも近藤効果をくりこんだ $\tilde{J}$ を用いなければならない。 $J > 0$, および $J < 0$ で $T \gg T_K$ のときは摂動論が適用でき, $\tilde{J}$ は次の Abrikosov の結果で与えられる。

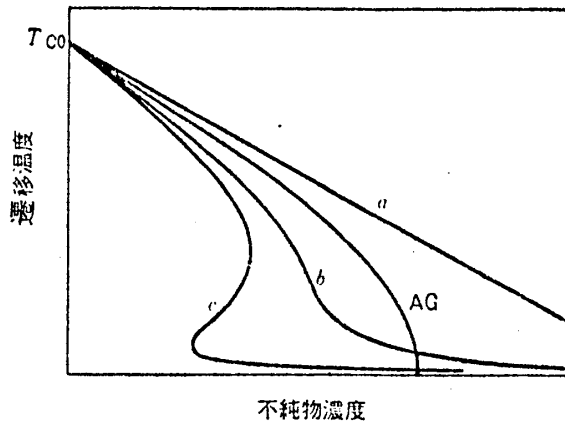
$$\tilde{J} = J \{1 + J N(E_F) \log (E_F/k_B T)\}^{-1} \quad (2)$$

T_K は近藤温度 $k_B T_K = E_F \exp \{-1/|J| N(E_F)\}$ であり, (2) 式は $T = T_K$ で発散する。

Suhl - 長岡近似に基づいた $\tilde{J}$ の計算は Müller-Hartmann と Zittartz によっておこなわれ,

$$\tilde{J} = -N(E_F)^{-1} \{ [\log(T_K/T_c)]^2 + \pi^2 S(S+1) \}^{-1/2} \quad (3)$$

が得られている。 T_c の n 依存性は(1)式の J を $\tilde{J}$ で置き換えた式と(3)式とを連立して解けばよく, T_{c0} と T_K のかねあいでは様子が違ってくる(第1図)。特に三価関数的なふるまいが面白いがまだ実験では見つからず $(La, Ce) Al_2$ と $(La, Ce) Th$ で二価関数的ふるまいが見出されている(第2図)。第2図のように実験では超伝導が完全に破れる臨界濃度 n_{cr} が存在しているが, 第1図の理論曲線では n_{cr} が存在せず, 有限の n では $T_c = 0$ とはならない。これは n が増して T_c が0に近づ



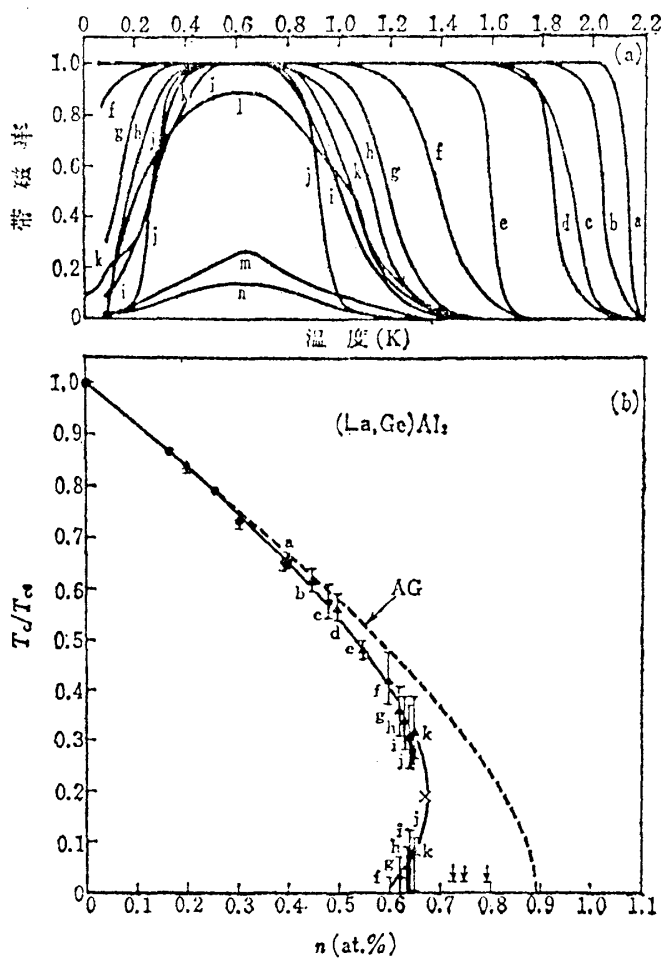
第1図 遷移温度の不純物濃度依存性

(MZ 理論)。a: $T_K \gg T_{c0}$,

b: $T_K \lesssim T_{c0}$, c: $T_K \ll T_{c0}$ 。

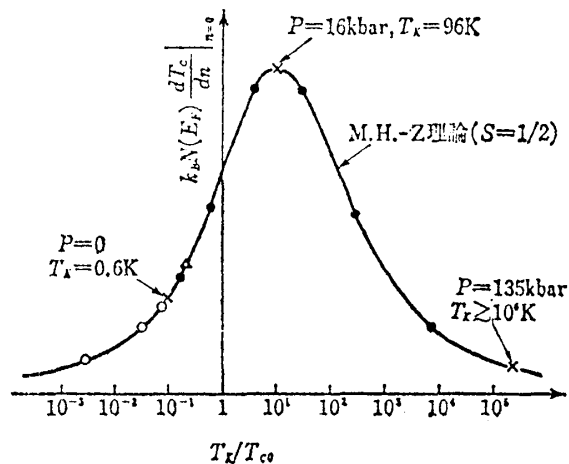
曲線は $n = 0$ における勾配が一致するように規格化した。

くと $\tilde{J}$ も0に近づくからであり, 基底状態が一重項束縛状態であることに対応している。実験と理論とのくい違いを取り除くためにはパラグノン効果と同じ機構が考えられている。 T_c に及ぼす不純物効果を $dT_c/dn|_{n=0}$ としてとらえたのが第3図であり, 母金属の組成変化や圧力変化などの手段によってパラメタ T_K/T_{c0} を変えている。このような手段により不純物の性質を非磁性的極限から磁性的極限へと連続的に変化させて種々の物理量を追跡するのは興味あることで, ΔC や H_{c2} についても数多くの実験がおこなわれている。



第2図 (a) $(\text{La}, \text{Ce})\text{Al}_2$ の
反磁性帯磁率の温度変化。
縦軸の値 1.0 が、完全に
超伝導状態に達したこと
を示す。

(b) $T_c/T_{c0} : n$ の実
験値。点線は AG 理論値。
測定点に付けた文字は(a)
と対応させてある。



第3図 実線は $k_B N(E_F) \frac{dT_c}{dn} \big|_{n=0} : T_K/T_{c0}$ を $S=1/2$
と仮定して M.H.-Z により
計算した理論曲線。× は La
Ce 系における T_c の圧力変
化。圧力を加えるとともに
 T_K/T_{c0} が増加すると、 dT_c/dn
の値は実線にそって左か
ら右へと変化する。二元合金
の組成の変化に伴う T_K/T_{c0}
の変化は、

○ $(\text{La}, \text{Y})\text{Ce}$, $\triangle \text{La}_{3-x}$

$\text{Ce}_x \text{Al}$

● $(\text{La}, \text{Th})\text{Ce}$

についての実験結果を示す。

(文責 岡本清美)