

MgB₂における 2 バンド効果と磁束状態の研究

東北大学大学院理学研究科 物理学専攻

低温物質科学 永野 広志

背景と目的

銅酸化物超伝導体を除くと最も高い超伝導転移温度 $T_c (= 39 \text{ K})$ を示す MgB₂ は、B 面の 2 種類の電子軌道からなる伝導バンド (3 次元的 π バンドと 2 次元的 σ バンド) に起因するほぼ独立した 2 つの超伝導ギャップ ($\Delta_\pi \sim 2 \text{ meV}$, $\Delta_\sigma \sim 7 \text{ meV}$) を有することで知られている。これまで、 T_c より十分低温においては、磁場の上昇とともに等方的な π バンドの超伝導への寄与が低磁場 (1 T 付近) でほとんど抑制され、高磁場側では異方的な σ バンドの寄与が超伝導特性を支配することが様々な実験・理論から明らかにされてきた。しかし、この変化が単なるクロスオーバーなのか、それとも相転移現象を伴うものなのかということや、各バンドの寄与が変化することによって磁束系にどのような変化が生じるかということ、さらにそれらの温度依存性はそれほど明らかではない。また、1 バンド超伝導体に不純物をドーピングした際には結晶の disorder によるキャリアの散乱の効果で、コヒーレンス長 ξ が減少し、上部臨界磁場 $H_{c2} = \phi_0 / (2\pi\xi^2)$ が増加することがよく知られている。しかし、MgB₂ のような 2 バンドの超伝導体の不純物効果は、不純物の結晶中での位置により、どのバンドのキャリアが影響を受けるかが異なるため、それほど単純ではない。

MgB₂ では、2 つのバンドが異なった次元性を示すことから、両者の寄与の磁場や不純物による変化は異方性パラメータ $\gamma = (m_c/m_{ab})^{1/2}$ に反映されるはずである (m_c , m_{ab} はそれぞれ c 軸、 ab 面方向の電子有効質量)。またそれが相転移を伴う場合、磁化等の物理量に異常が観測されることが期待できる。そこで本研究では MgB₂ 単結晶、Mg_{1-x}Al_xB₂ 単結晶 ($x = 0.12, 0.21$) のトルク $\tau = \mathbf{M} \times \mathbf{H}$ の角度 θ 、磁場 H 依存性を測定することにより、 γ 及び磁化 $M (= \tau/H)$ の磁場依存性を詳細に測定し、

(i) MgB₂ における 2 つのバンドの超伝導に対する寄与の変化の過程とそれに伴う磁束系の変化

(ii) それらの Al ドーピングによる変化

を調べた。

実験

測定に用いた単結晶試料は 100~50 μm と小さいサイズのため、トルク測定は AFM 用のカンチレバーを用いて行った [1]。各温度、磁場におけるトルクの角度依存性 $\tau(\theta)$ 、ある角度 θ における磁場依存性 $\tau(H)$ を測定した。 $\tau(\theta)$ を Kogan の式 $\tau(\theta) = A(\sin 2\theta/\varepsilon(\theta)) \ln(\gamma\eta H_{c2}/H\varepsilon(\theta))$ [2] によってフィッティングすることによって $\gamma(H)$ を、 $\tau(H)$ の解析より $M(H)$ 、 H_{c2} を求めた。ここで、 $\varepsilon(\theta) = (\sin^2\theta + \gamma^2 \cos^2\theta)^{1/2}$, $\eta \sim 1$, θ は磁場と c 軸のなす角度である。

結果 1 : MgB₂ 単結晶における 2 バンド効果

図 1 に MgB₂ 単結晶の $\gamma(H)$ を示す。全ての温度について γ は磁場とともに上昇し、約 1.5 T 付近の磁場 H_s (図中 $\triangle$ 又は ∇) で $\gamma \sim 4$ のプラトーを持つ。これは等方的な π バンドの寄与が磁場の上昇とともにクロスオーバー的に消失していくことを示す。このプラトー領域よりも低磁場側の磁場 H^* (図中矢印) において、 $\gamma(H)$ にステップ的な上昇が観測された。同様な H^* でのステップ的な変化は $\tau(H)$ から解析した dM/dH の磁場依存性にも観測された。よってこの磁場で、磁束系に何らかの相転移が起こっている

ことが予測される。図2に H_s 、 H^* の温度依存性を $\theta = 10^\circ$ の $H_{c2}(T)$ とともにプロットした。 H_s は温度に依存せず約1.5 Tの値をとるが、 H^* は低温で1 Tの値をとり、温度の上昇とともに緩やかに減少した後、約0.4 Tで $H_{c2}(T)$ 線と交わる。 H^* の値と温度依存性は、近年、小角中性子散乱の実験[3]で報告された磁束格子の回転現象のものとよく一致する。磁束格子の方向はフェルミ面の形状(π バンドでは $v_{Fx} < v_{Fy}$ 、 σ バンドでは $v_{Fx} > v_{Fy}$)に敏感であることより、この回転現象は、超伝導へのメインの寄与が $H^*(T)$ で π バンドから σ バンドへと入れ替わることによっておきるものと解釈できる。しかし、 π バンドの寄与は H^* 以上でも少し残っており、その後 H_s 以上の磁場で σ バンドのみの超伝導になるものと考えられる。

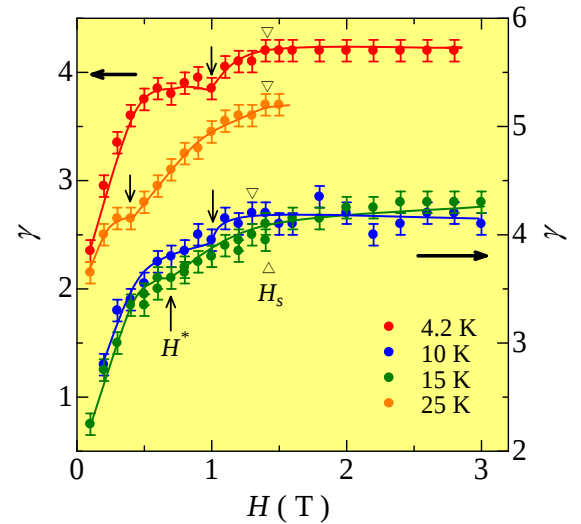


図1 MgB₂単結晶の各温度における異方性パラメータ γ の磁場依存性

結果2：Alドーピングによる不純物効果

Mg_{1-x}Al_xB₂単結晶についても同様の実験をした結果を図3に示す。Alドーピングにより、 T_c は30.6 K($x = 0.12$)、26.7 K($x = 0.21$)へと減少するが、 T/T_c で規格化してプロットすると H_{c2} には大きな変化は見られないことが分かる。これに対し、 H_s の値は x の増加とともに上昇する。これは π バンドの寄与が存在する領域が x とともに広がることを意味する。以上の結果は、Alドーピングによるキャリアの散乱の効果が σ バンドにはほとんど現れず π バンドにのみ働き、その結果 π バンド超伝導のコヒーレンス長が小さくなった(π バンドの H_{c2} が大きくなった)ことを示すものと解釈できる。

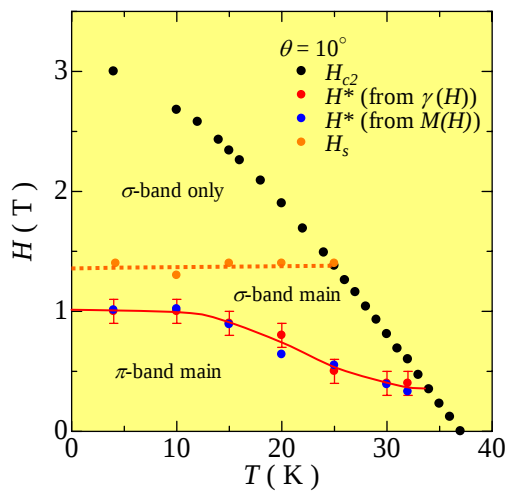


図2 MgB₂単結晶の H - T 相図

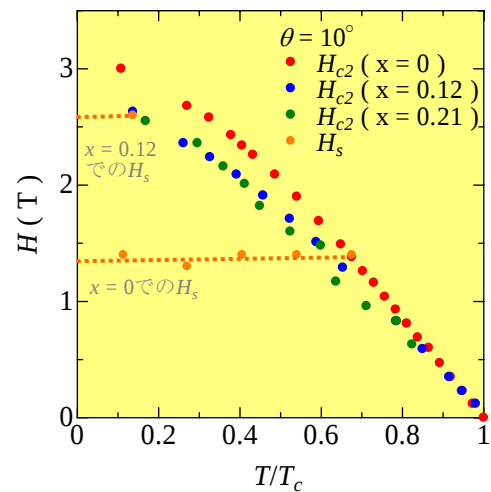


図3 MgB₂単結晶とMg_{1-x}Al_xB₂単結晶の T/T_c で規格化した H - T 相図

参考文献

- [1] Ohmichi & Osada Rev. Sci. Instr. (2002)
- [2] V. G. Kogan PRB. 38 (1988)
- [3] M. E. Zhitomirsky et al., PRB. 69 (2004) 054508.