MgB2単結晶の渦糸相における過冷却現象

東北大学大学院理学研究科 物理学専攻

低温物質科学グループ 長徳 峰美

背景及び目的

MgB₂は高い超伝導転移温度 T_c (=39 K)を持つだけでなく、異方性($\gamma \sim 2^{-5}$) やGLパラメータ($\kappa \sim 5^{-35}$)が比較的大きい第2種超伝導体である。これらのパラメータは磁場中超伝導状態(渦糸状態)における熱ゆらぎに大きな影響を与えることから、高温超伝導体で観測されるような渦糸系の相転移がMgB₂でも顕著に観測されることが期待されている。実際にこれまで、低温での磁化の磁場依存性 M(H)の測定において、渦糸系の秩序相(ピニングの弱い渦糸格子相)から無秩序相(ピニング力が強くなった渦糸グラス相)へ一次相転移(order-disorder 転移)の存在が明らかになりつつある。しかしこの相転移の詳細(一次相転移性の証拠や転移前後での各相のふるまい)については不明な部分が多い。

一方、 MgB_2 は π バンド(3次元的)、 σ バンド(2次元的)といった2つのバンドから発生するほぼ 独立した2つの超伝導ギャップ($\Delta_{\pi} \sim 2 \text{ meV}, \Delta_{\sigma} \sim 7 \text{ meV}$)を持つ特殊な超伝導体でもある。この物質 の渦糸状態を考える時、現われる性質は2つのギャップの強弱を反映したものになることが予測される が、そのような視点から渦糸系を捉えた詳細な研究はほとんどない。

そこで本研究では、

①MgB2における渦糸系相転移(特に order-disorder 転移)に対し新しい知見を得ること

②2つのギャップの磁場変化が渦糸相および渦糸相転移に与える影響を調べること

を目的とし、MgB2単結晶の様々な磁化特性(熱的非平衡および平衡磁化 Mの温度 T、磁場 H依存性) を詳細に測定した。

実験方法

測定に用いた試料は 3GPa 下の高圧合成法によって作成された良質な MgB_2 単結晶である (韓国 Sogang 大 S.I. Lee 教授より提供)。図1に原理 図を示すよう AFM 用のカンチレバーを用いた磁気トルク測定法により、 磁化測定を行った。これは、カンチレバーに張り付けた試料の c軸を磁場 に対して角度 θ だけ変化させたときに発生するトルクt(= M_{\times} H)をカンチレ バーの微少変位 (ピエゾ抵抗の変化により測定)より求める方法である。



実験結果及び考察

図2に典型例として、トルク測定によって得られた θ =70°における各温度 *T*での *M*(*H*)曲線を示す(\triangle は上部臨界磁場 *H*₆₂)。25 K 以下の低温、高磁場(θ =70°では以上)領域において、*M*(*H*)ヒステリシスのピーク効果が観測される。これは先に述べた order-disorder 転移に伴う渦糸ピニングの増大現象であり、磁化 *M*($\propto d$ *H*)の傾きが最大となる磁場 *H**(図中▼)を転移磁場として定義できることが分かっている(*H* < *H**: 秩序相、*H* > *H**: 無秩序相)。

θ=70°における各磁場 *H*での *M*(*T*)曲線の典型例を図 3 に示す。

(i)ZFC(ゼロ磁場冷却後、磁場中で温度上昇)→(ii) FC (磁場中冷却)→(iii)FW(磁場中で温度上昇) の3つの過程において測定を行った(▽は磁場中臨界温度 T_{c2} を示す)。M(H)測定でピーク効果の起き ない低磁場領域ではほとんどヒステリシスのない M(T)が観測される(図3中 H= 2.6 T のデータ)。 注目したいのは、ピーク効果が観測される H=2.8 T 以上の高磁 場では、FC 過程において、磁化が温度 T_{irr} (\checkmark) 以下で ZFC 過程の経路からずれ、order-disorder 転移線 $H^*(T)$ 上の温度(図 3 中赤い破線)より低い温度 T_2^* (\checkmark) で不連続に減少すること である。M(T)のこのような異常なふるまいは、本研究で始めて 発見されたものである。同様な現象は、広い磁場方向の角度範 囲(30° < θ < 88°) で観測された。

図4に*M*(*H*)、*M*(*T*)測定より求められた*H**(*T*)、*T*₂*(*H*)、*T*_{irr}(*H*) を H-T平面上に示す。高温低磁場領域で H*(T)と T₂*(H)はほ ぼ一致していることから、T₂*も order-disorder 転移と関連する 特性温度であることがわかる。図3の $T_2^* < T < T_{irr}$ において M(T)が一定値を保つこと(これは渦糸系が Tirr で出現するピニ ング力の強い無秩序の状態を、T(H*)以下でも保ち続けることを 意味する)、さらに図2の M(H)には T₂*(H)線上の磁場(青い破 線)には異常が見られないことから判断すると、*M(T)*の FC 過 程における特異なふるまいは、過冷却された無秩序相が、温度 T2*で flux jump とともに order 相へ転移することを示す現象で あると結論される。実際に、小さな交流磁場(振幅 = 10~40 G) を印加しながらの M(T)測定(shaking 法)では、ヒステリシス と T₂*での flux jump が消えた熱平衡磁化が得られる (図 3 中赤 でプロット)。これは、渦糸に対する小さな動的刺激によって、 熱的不安定な過冷却状態が消えたことを意味する。以上の結果 は order-disorder 転移が一次相転移であることの証拠となる。

図 5 に shaking 法で得られた 10 K での熱平衡磁化 M(H)を 1 バンド超伝導体の GL モデルでフィッティングした結果を示 す。フィッティング曲線は H_{c2} 近傍ではデータと一致している がある磁場 H_{d} 以下で徐々にずれ始める。これは、MgB2の超伝 導特性は高磁場側では σ バンドによって支配されているが、磁場 の減少とともに π バンドの寄与が出現し始めることを示してい る。 $H_{d}(T)$ を図 4 の H-T相図にプロットすると、 $T_{2}^{*}(H)$ とそれ ほど離れていない。このことから、 π バンドの超伝導への寄与の 出現と無秩序相の過冷却状態の消滅には相関があることがわか った。

成果論文

M. Chotoku, T. Nojima, A. Ochiai, H. Aoki, H.-G. Lee, S.-I. Lee, "Anomalus flux jump and supercooling phenomenon around the order-disorder transition in MgB₂ single crystals" to be published in Physica C.

