

UPt_3 超伝導混合状態における磁気応答の異方性

北大理 榊原俊郎、天谷健一、網塚 浩
 阪大理 木村憲彰、摂待力生、大貫惇睦
 原研先端研 山本悦嗣、芳賀芳範
 富山県立大工 前沢邦彦

重い電子系物質ではノーマル状態での常磁性磁化率が大きく、そのうちのパウリ常磁性の寄与も一般に大きいと考えられる。このような系の超伝導混合状態の自由エネルギーは当然常磁性エネルギーの影響を受けることになり、その効果は電子対のスピン対称性によって大きく左右されるはずである。1重項超伝導の場合にはこれは「常磁性効果」として知られ、磁場方向によらず H_{c2} の抑制 (paramagnetic suppression) と超伝導磁化の異常 (GLパラメータ κ_2 の低温における減少) が起こる。3重項超伝導の場合には、もし平方スピン電子対であれば常磁性効果は起こり得ないが、異方性によりスピン量子化軸が固定されていれば方向によっては常磁性効果に類似の現象が観測される可能性がある。このような観点から我々のグループでは UPt_3 混合状態の精密磁化測定を行っている[†]。

磁化測定手段として我々はキャパシタンス式ロードセルを用いたファラデー法を使用している。この方法の最大の特徴は測定中の試料の変位が実質的にゼロである点である。このため、一般的な引き抜き法磁化測定でよく問題となる、不均一磁場中を試料が移動することによる磁場の揺らぎの影響は皆無であり、混合状態の不可逆的な磁化過程を正確に測定することができる。用いた試料 (#4) は残留抵抗比が約500の高純度試料である。

図1に60mKにおける磁化曲線を示す。磁束ピンングによる磁化ヒステリシスはこれまで我々が測定した他の物質と比べても非常に小さく、試料が良質であることを示している。 H_{c2} 直下に見られるヒステリシスの極大はいわゆる“ピーク効果”によるものである。ここではピーク効果が消失する磁場で H_{c2} を定義しているが他の実験で得られた相図とは良い一致を示した。磁束ピンングが弱い場合には混合状態の熱平衡磁化 M_{eq} は磁場上昇時と下降時のデータの平均で良く近似でき、その結果を図の実線で示した。この M_{eq} とノーマル状態の常磁性磁化 M_n (図の点線) との差 $\Delta M = M_{eq} - M_n$ が注目すべき量である。

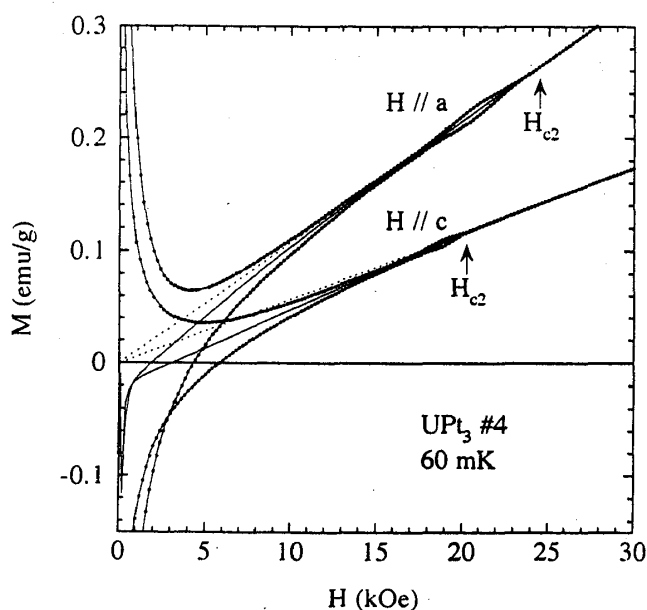


図1 UPt_3 の60mKにおける磁化過程

ΔM には反磁性電流の寄与に加えて、スピン磁化率がペ어링によって失われる効果が(もし存在すれば)含まれていると考えられる。60mKにおける ΔM の拡大図を図2に示す。 ΔM の特徴は $H//c$ と $H//a$ とで磁場依存性が定性的に全く異なる点である。まず $H//a$ では H_{c2} 直下での $|\Delta M|$ の変化が非常に小さい。 $4\pi\Delta M \approx (H - H_{c2})/2\kappa_2^2$ によって κ_2 を見積もると、a軸方向では低温でおよそ140程度の大き

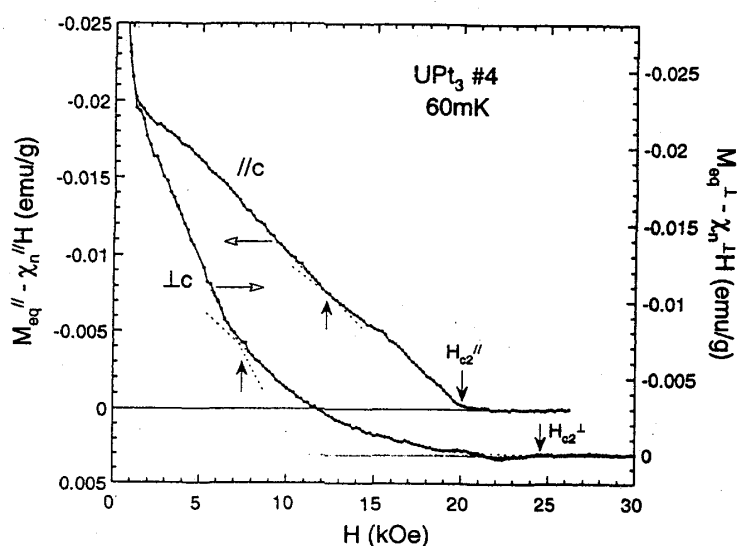


図2 超伝導磁化の磁場依存性

さになる。この値は温度とともに急激に減少し、 T_c 近傍では60程度にまで下がる。これらは常磁性効果がない場合のcleanな第二種超伝導体で期待される挙動である。このことはノーマル状態での $H//a$ のスピン磁化率がゼロでない限り一重項超伝導で説明することは困難であり、3重項超伝導を強く示唆する。一方、 $H//c$ に対する H_{c2} 直下の ΔM の変化ははるかに大きい。同様に見積もった κ_2 はc軸方向に対して低温で40程度と小さいが、温度とともに上昇し T_c 近傍では70程度と逆に大きな値となる。これは弱い常磁性効果がある場合に期待される挙動に良く類似している。このような κ_2 の異方的な温度依存性は極めて異常であり、 H_{c2} の異方性の逆転の問題と深く関係していると考えられるが、その理由は完全には明らかではない。1つの可能性として3重項超伝導でペアスピンのc軸方向を困難軸とする異方性があれば定性的には理解できる。最も単純にc軸方向に対してノーマル磁化率が H_{c2} 以下で一様に失われていると仮定して、 ΔM を積分して得られる凝縮エネルギー($H_c \sim 260$ Oe)と常磁性エネルギー($\chi_n H_{c2}^2/2$)との比較から大雑把にその減少分を見積もると、高々1%程度のオーダーである。

最近のNMRの実験によると、 $H//c$ に対してB相の弱磁場領域ではナイトシフトの減少が見られ、ペアスピンの異方性が確かに存在していることがわかっている。しかし $H > H_{crit} \sim 3$ kOeではナイトシフトの減少は見られない。この結果は H_{crit} においてdベクトルの回転が起きていることを示唆しており、この場合、高磁場領域で見られる ΔM の異方性をどう理解するかは問題として残る。dベクトルの回転に伴って磁化にも異常が現れることが予想されるが、現在のところ実験の精度内で観測されていない。この点についてはスピン磁化率の割合が小さい(NMRの結果) ことに加えてdベクトルの回転が連続的であるために変化量が小さく検出できていない可能性はある。

† K. Tenya et al., Phys. Rev. Lett. 77 (1996) 3193.