

擬一次元有機超伝導体の圧力下におけるフェルミ面形状の決定

大阪市立大学	吉野治一
派遣期間	2004年9月1日～2005年9月28日
研究機関	Department of Physics, Boston College, 140 Commonwealth Avenue, Chestnut Hill, MA 02467, U.S.A.
研究指導者	Prof. Michael J. Naughton

【序】

(TMTSF)₂ClO₄ や(DMET)₂I₃ などの擬一次元有機伝導体は、三次元的な結晶にもかかわらず、擬一次元的なバンド構造を持つ興味深い伝導体としてよく知られている。1980年代にこれらの系で超伝導が発現することが見出されたことに加えて、擬一次元バンド構造に由来した様々な新規現象も見つかっている。擬一次元的なバンドは、構成分子である TMTSF = tetramethyltetraselena-fulvalene や DMET = dimethyl(ethylenedithio)diselenadithiafulvalene といった平面性の高い有機分子が積み重なってできたカラム構造と対応している。カラムに沿った方向を x 軸、カラム同士が相互作用して伝導面を構成している横方向を y 軸、さらに、この有機分子からなる伝導層と、これらを隔てている ClO₄⁻ や I₃⁻ などのアニオンが xy 面に平行に配列した絶縁層が交互に積み重なった方向を z 軸とすると、電気伝導度は x , y , z の順で高く、典型的な比は 10000:100:1 である。

伝導電子がバンドに中途半端に詰まると系は金属となる。伝導電子の持つ最高のエネルギーがフェルミ準位であり、このエネルギーでのバンドの切り口がフェルミ面である。フェルミ面の形状は電子の運動と対応しているため、フェルミ面の形状や、磁場を印加した際にフェルミ面に対する磁場の向きによって電気抵抗などの物性がどのように変化するかを調べることは、系の性質を理解する上で重要である。

【目的および実験】

擬一次元金属においては、磁場を特定の結晶軸の周りで回転させたときに観測される特異な磁気抵抗の角度依存性が発現することが知られている。吉野らによる「第三角度効果」や本研究の共同研究者による「Lebed 共鳴」, 「Lee-Naughton 振動(LNO)」もその例である。LNO は最良伝導面(xy 面)から少し傾けた面内で磁場を回転させたときに観測される磁気抵抗の振動現象である。その極小の位置において、電子系の次元性が一次元から二次元にクロスオーバーしているという理論的な主張が、近年 Lebed らによってなされた。また、Ha らによってその

理論とよく合う実験結果が 10 T までの磁場下で得られていた. 本研究では同様の傾向がより高磁場まで続くかどうかを調べるために, Boston College において 46-T パルス磁石を用いて磁気抵抗の測定を行った. この測定は 4.2 K というこの種の実験としては比較的高温で行わざるを得なかったので, 補完的な知見を得るために, 30 mK が実現できるヘリウム希釈冷凍機と 33 T の静磁場を発生できる常伝導磁石を組み合わせたシステムを米国国立強磁場研究所(NHMFL)において磁気抵抗を測定した.

【結果】

Fig. 1 に磁場 B が試料の結晶軸となす角度の定義を示す. パルス磁石を用いた実験では, 4.2 K において, $(\text{TMTSF})_2\text{ClO}_4$ の場合は θ (約 0° および約 5°) について, $(\text{DMET})_2\text{I}_3$ では, 1 つの θ (約 5°) で測定を行うことができた. 角度を変化させて磁場依存性をパルス磁場下で繰り返し測定し, 5, 10, 15, 20, ..., 40 T における値を読むことで各磁場強度における角度依存性を決定した. 以下に, $(\text{TMTSF})_2\text{ClO}_4$ についての結果を示す.

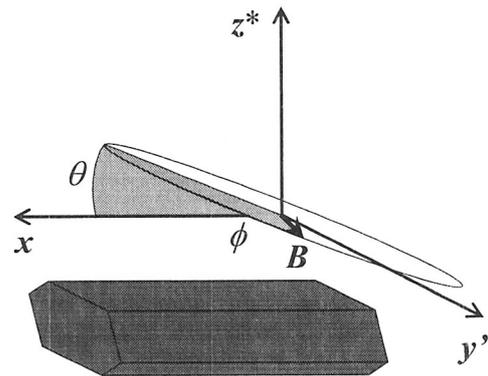


Fig. 1 Definitions of angles θ and ϕ showing the magnetic field (B -) direction relative to the crystal.

$\theta \sim 0^\circ$ においては, 過去の静磁場における角度依存性を再現した. $\theta \sim 5^\circ$ では複雑な振動が 15 T 以上で観測された(Fig. 2). これは LNO であると考えられる. すなわち, パルス磁場を用いて磁気抵抗の角度依存性を測定することに成功した.

角度依存性における磁気抵抗のピーク位置(例 $\theta \sim 5^\circ, \phi = 6^\circ$)では高磁場においても磁気抵抗が増大し続ける傾向が観測された. 一方, 極小の位置, 例えば($\theta \sim 5^\circ, \phi = 0^\circ$)では, ピーク位置とは定性的に異なり, 高磁場ほど勾配が小さくなる傾向が観測された. これらの挙動は Ha らによって 10 T 以下の低磁場で観測された結果とよく一致しているように見える.

しかし, 興味深いことに磁場に対してどのような関数型で変化するかを解析した結果, 極小の位置における磁場依存性は, Lebed による理論的な予測で示さ

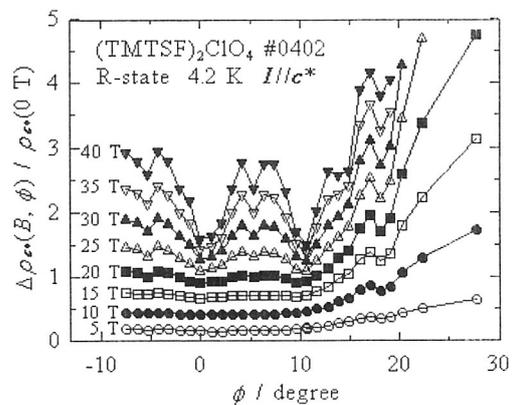


Fig. 2 Angular (ϕ) dependence of normalized magnetoresistance of $(\text{TMTSF})_2\text{ClO}_4$ at 4.2 K and $\theta \sim 5^\circ$.

れた飽和傾向ではなく、5 T 以上では磁場の 1/2 乗に比例する特異なものであることがわかった(Fig. 3).

(TMTSF)₂ClO₄ の場合、24 K で起きる ClO₄⁻ の配向秩序化転移のために、低温では擬一次元的フェルミ面が二対に分裂する。それぞれのフェルミ面の形状は互いに異なっているので、実験と理論の比較を行う際に複雑な状況を考慮する必要があるが、

(DMET)₂I₃ ではこのようなことはなく、低温までフェルミ面は一对あるのみである。(TMTSF)₂ClO₄ で観測された上記の挙動は (DMET)₂I₃ でも同じように観測されたことから、LNO の極小位置における 1/2 乗に比例する磁気抵抗の磁場依存性は擬一次元的金属について普遍的に成立する現象であることが強く示唆される。

Lebed によれば、LNO の極小位置において電子系の次元性がクロスオーバーし、新しい量子状態が出現していると考えられるが、本研究で観測された磁気抵抗の磁場依存性はこの理論が示唆するものとは定性的に異なる。同様の結果は、ヘリウム希釈冷凍機を用いた 33 T までの NHMFL における実験でも観測されたことから、パルス磁石の実験を 4.2 K という比較的高温で行ったことがこの不一致の原因であるとは考えにくい。今後、共同研究者と共にこの現象の解明を進める予定である。

【成果発表】

○学会発表

1. “Pulsed Field Studies of Unconventional Magnetoresistance in Q1D Conductors”, H. Yoshino, Z. Bayindir, J. Roy, B. Shaw, H.I. Ha, A.G. Lebed and M.J. Naughton, American Physical Society (APS) 2005 March Meeting, 3/21-25/2005, X31.8.
2. “Pulsed Field Studies of Angular Dependence of Unconventional Magnetoresistance in (TMTSF)₂ClO₄”, H. Yoshino, Z. Bayindir, J. Roy, B. Shaw, H.I. Ha, A.G. Lebed and M.J. Naughton, 24th International Conference on Low Temperature Physics (LT24), Orland (USA), PD-F-207, 2005/8/10-17.
3. “Unconventional Field Dependence of Magnetoresistance of (TMTSF)₂ClO₄ Studied by 46-T Pulsed Magnetic Field System”, H. Yoshino, Z. Bayindir, J. Roy, B. Shaw, H.I. Ha, A. Lebed and M. J. Naughton,

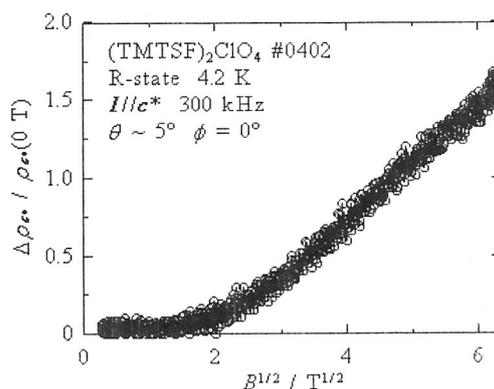


Fig. 3 Magnetic field dependence of normalized magnetoresistance of (TMTSF)₂ClO₄ at 4.2 K, $\theta \sim 5^\circ$ and $\phi \sim 0^\circ$ plotted against $B^{1/2}$.

Sixth International Symposium on Crystalline Organic Metals, Superconductors, and Ferromagnets (ISCOM2005), Key West (USA), Thu15, 2005/9/11-16.

4. “(TMTSF)₂ClO₄ および(DMET)₂I₃ の磁気抵抗の特異な磁場依存性”,

吉野治一, Z. Bayindir, J. Roy, B. Shaw, H.I. Ha, M.J. Naughton, A.G. Lebed,
西川浩之, 菊地耕一, 村田恵三,

日本物理学会第 61 回年次大会, 28pRB-6, 松山, 2006/3/27-30.

5. “Pulsed Magnetic Field Study of Unconventional Magnetoresistance of
Q1D Superconductors (TMTSF)₂ClO₄ and (DMET)₂I₃”,

H. Yoshino, K. Murata, Z. Bayindir, J. Roy, B. Shaw, M.J. Naughton, H.I. Ha, A.G.
Lebed, H. Nishikawa, K. Kikuchi,

Yamada Conference LX on Research in High Magnetic Fields (RHMF2006), Sendai
(Japan), SAP61, 2006/8/16-19.

○出版(予定を含む)

6. “Pulsed Field Studies of Unconventional Magnetoresistance in Q1D Conductors”,

H. Yoshino, Z. Bayindir, J. Roy, B. Shaw, H.I. Ha, A. Lebed and M. J. Naughton,

To be published in American Institute of Physics (AIP) Conference Proceedings (2006).

7. “Unconventional Field Dependence of Magnetoresistance of (TMTSF)₂ClO₄
Studied by 46-T Pulsed Magnetic Field System”,

H. Yoshino, Z. Bayindir, J. Roy, B. Shaw, H.I. Ha, A. Lebed and M. J. Naughton,

To be published in J. Low Temp. Phys. (2006).

8. “Pulsed Magnetic Field Study of Unconventional Magnetoresistance of
Q1D Superconductors (TMTSF)₂ClO₄ and (DMET)₂I₃”,

H. Yoshino, K. Murata, Z. Bayindir, J. Roy, B. Shaw, M.J. Naughton, H.I. Ha, A.G.
Lebed, H. Nishikawa, K. Kikuchi,

To be published in Journal of Physics: Conference Series, Institute of Physics (IOP).