

第2種超伝導体における渦糸格子の配向一次相転移の一般論

第2種超伝導体にある大きさ（下部臨界磁場: H_{c1} ）以上の磁場が印加されると、量子化された磁束が渦糸状になって超伝導体に侵入し、渦糸格子が出現する。A.A. Abrikosov によるノーベル賞の対象になった渦糸理論の論文中に渦糸格子の安定構造は四角格子であるという記述があることは有名である。後に W.H. Kleiner 等によってこの部分の結論は誤りであることが指摘され、安定構造は三角格子であることが等方的なフェルミ面と超伝導ギャップをもつ場合には分かっている。実際、三角格子と四角格子のエネルギー差はわずかであり、等方的モデルからのわずかな逸脱はこの差を逆転するのに十分である。十分に低磁場で渦間隔が隔たっている場合、渦芯を剛体円筒に見立て磁場に垂直な2次元面を最密充填させるとき三角格子（菱形単位格子）が安定であることが理解できる。

立方晶、直方晶の超伝導体の4回軸方向、即ち(001)に磁場を印加して渦糸格子のモルフォロジーを中性子回折実験や走査型トンネル顕微鏡で観察すると、低磁場では正三角形であったものが、磁場増加とともに逐次相転移が起きる。このクラスに属する物質としては A-15 型化合物として知られる立方晶 V_3Si 、直方晶のニッケル炭化物 YNi_2B_2C 、重い電子系 $CeCoIn_5$ 等がある。これらの物質共通に図1の下側に示したような経路をたどる逐次転移が観測された。一辺が結晶の(110)に配向した正三角形から出発して、(1) 挟角が60度からずれた二等辺三角形、(2) 配向が45度回転する一次転移、(3) 挟角が開きついには四角格子にロックインする転移が、磁場上昇とともに順に起きる。

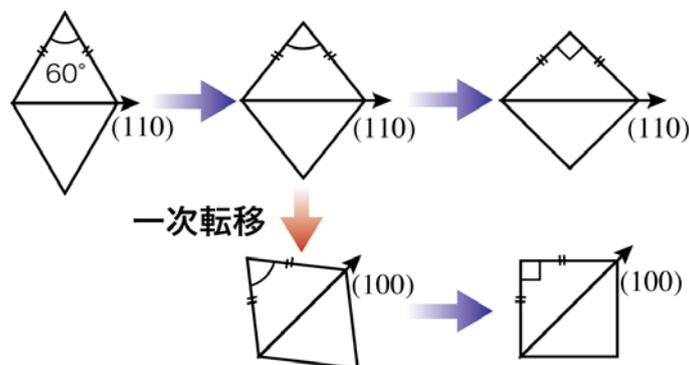


図1. 渦糸格子の配向転移。

各四角形の頂点が渦糸の位置を示し、磁場と垂直方向の断面は各四角形（菱形単位格子）で埋め尽くされている。磁場上昇とともに左から右へ渦糸格子が変形する。上の経路では「誤った」配向の四角格子に到達する。下の経路は配向が45度回転する一次転移を経由して「正しい」配向の四角格子に至る。

最近、岡山大学とモンテネグロ大学の研究グループはこの逐次相転移の原因を微視的理論に基づいて突き止めることに成功した。この研究成果は、日本物理学会が発行する英文誌 *Journal of the Physical Society of Japan (JPSJ)* の2010年1月号に掲載される。

超伝導体には結晶対称性を反映した電子構造や超伝導ギャップに物質固有の対称性が存在

する。4回対称性に基づくフェルミ速度の異方性や、CeCoIn₅の場合のギャップの $d_{x^2-y^2}$ 異方性がそれである。これらの異方性は下地の結晶軸に結びついていて、渦糸格子のモルフォロジーに重要な効果を及ぼす。高磁場で $d_{x^2-y^2}$ 対称性をもつ超伝導体は超伝導ギャップがゼロになるノード方向、即ち(110)に配向した四角格子が安定になることが理論的にも、実験的にも知られている。磁束侵入が生じる最低磁場 H_{c1} での正三角形格子においても一辺をノード方向に配向させた方がエネルギー的に得であることが分かっており、それが図1の上の経路の左端に示した配向である。その配向を固定したまま二等辺三角形の挟角を増加させて四角格子に連続変形させると最近接方向は(100)になる(図1の上の経路)。しかしこれは期待された四角格子の安定な配向ではない。(110)に配向した正三角形から出発して「正しい」四角形の「正しい」配向に到達するには必ず配向が45度回転する一次転移が存在せねばならない(図1の下の経路)。これが一連の物質で観測された逐次相転移のメカニズムである。本研究では、これらの原因を準古典近似の Eilenberger 方程式に基づく微視的計算と非局所 London 方程式に基づく理論を併用して同定し、渦糸まわりの電子状態との関係も議論されている。この現象は普遍的なものであり、4回対称性をもつ超伝導体、例えば銅酸化物高温超伝導体、Sr₂RuO₄、TmNi₂B₂C 等においても検証されることが期待される。

磁場中渦糸格子の配向一次相転移は、4回対称性の下での三角格子の居心地の悪さ、即ち広い意味でのフラストレーション効果の一例と捉えることができる。本研究はそのメカニズムを理論的に明らかにしたものとして多くの研究者の注目を集めている。ところで、最近 Nb の中性子実験が新たになされ、この立方晶物質の4回軸に印加された磁場下において、二等辺三角形ではなく不等辺三角形からなる渦糸格子構造が発見された。Nb という最も「普通(等方的 s 波超伝導)」単体物質超伝導体においてさえ、謎はまだ尽きていない。第2種超伝導体渦糸格子のモルフォロジーの全容解明に向けた研究の今後の進展が期待される。

論文掲載誌: J. Phys. Soc. Jpn. Vol.79, No. 1. p.013702

電子版: <http://jpsj.ipap.jp/link?JPSJ/79/013702> (12月25日公開済)

<情報提供: 鈴木健太、井上謙二、市岡優典、町田一成 (岡山大学)

P. Miranović (モンテネグロ大学) >