

渦糸液体の凍結による超伝導

[1] 要旨

不純物や不均一性を全く有さない超伝導体が磁場下に置かれたときの低温相である渦糸固体相では、電流に伴う渦糸の散逸運動により電気抵抗は有限であるというのが通常理解であった。しかし実際の十分良質な単結晶の電気抵抗データは、渦糸液体から固体相への凍結が「超伝導」転移、つまり電気抵抗消失の原因であることを示している。銅酸化物超伝導体などで以前から見られていたこの一見奇妙な現象が今回、繰り込まれた超伝導揺らぎの理論の拡張による詳細な計算により理解できるようになった。

[2] 本文

ゼロ磁場下で現れる超伝導相はゼロ電気抵抗で特徴づけられるが、これは完全反磁性（マイスナー効果）の結果である。いわゆる第二種超伝導物質では、印加磁場が増えると量子渦糸（ヴォルテックス）というトポロジカル励起の形で磁束が侵入し、渦糸格子（渦糸固体）が形成されるため、静的なマイスナー効果はなくなる。また、磁場に垂直な一様な電流下で渦糸格子全体が散逸運動（渦糸フロー）を起こし、位相コヒーレンスを壊すため、渦糸固体は電気抵抗ゼロの超伝導相ではないことになる。しかし、物質中の欠陥や不均一性による渦糸のピン止めがあれば、電気抵抗がほぼゼロの状態になれる：これが第二種超伝導体の超伝導混合状態（渦糸状態）の古典的な描像であった。これが正しければ、電気抵抗の消失はより良質な試料においてより低温で起こると予想される。ところが、'90年代に盛んに行われた銅酸化物超伝導体の良質な試料については、比熱や交流帯磁率の実験などから渦糸固体の融解（渦糸液体の凍結）という1次転移が起こっているとされていた温度・磁場において電気抵抗は急激に消失していた。これは、きれいな（ピンニング効果がゼロではないが弱い）超伝導物質における磁場下の超伝導発現は相転移の問題であり、そこでは渦糸間斥力による多体効果が重要な渦糸固体への凍結と弱い渦ピンニングとの間の相乗効果が本質的な役割を担っていることを意味している。実際、銅酸化物超伝導の研究以後、磁場下の実験での電気抵抗の消失温度は不可逆線と呼ばれ、（きれいな系における）渦格子融解転移線とほぼ一致すると実験的には信じられている。一方、きれいな系の混合状態（渦糸状態）における電気抵抗の消失の理論は、'90年代にその枠組みが提案されていたものの、詳細な理論計算を通して確立させるには至っていなかった。

京都大学大学院理学研究科物理学・宇宙物理学専攻の凝縮系理論研究グループは、渦糸固体の凍結（秩序化）の傾向を記述できる形に改良された高磁場超伝導揺らぎの理論に渦糸グラス秩序化による電気抵抗消失を記述する手法を組み込ませることにより、渦ピンニング効果の弱い系では渦糸固体融解転移直上で電気抵抗が消失することを示すのに成功した。この成果は、JPSJの2024年5月号に掲載された。

元来、渦糸をピン止めする不均一性の配置はランダムであることが多く、その場合渦糸ピンニング効果は乱れた系の問題として扱われることになる。乱れが強い系では磁場下の超伝導転移（電気抵抗の消失）である渦糸グラス転移の理論により、渦糸状態において起こる電気抵抗の消失が説明できることは以前から知られていた。今回の研究では、乱れが弱く渦糸固体生成の兆候がはっきり見える系では、渦糸の密度相関関数のブラッグピークの成長が渦糸グラス転移を誘発するため、渦糸液体から固体への凍結が事実上超伝導転移になっていることが具体的に示された。ただし、このような電気抵抗の急激な消失は3次元系では明確に見えるが、2次元系では電気抵抗に渦糸固体生成の様子はほとんど反映されないことも併せてわかった。これらの特徴は、図1に示されている。

現在では、銅酸化物超伝導体と同様に、上部臨界磁場 $H_{c2}(T)$ を超伝導転移とする平均場近似の結果とは大きく異なる超伝導相図を示す超伝導物質が、鉄系超伝導体 FeSe など数多く見出されている。真の超伝導相図という超伝導の基礎について包括的な理解を得るためには、高磁場で重要となるパウリ常磁性や量子超伝導揺らぎを含む形で理論がさらに拡張される必要がある。今後の進展に期待したい。

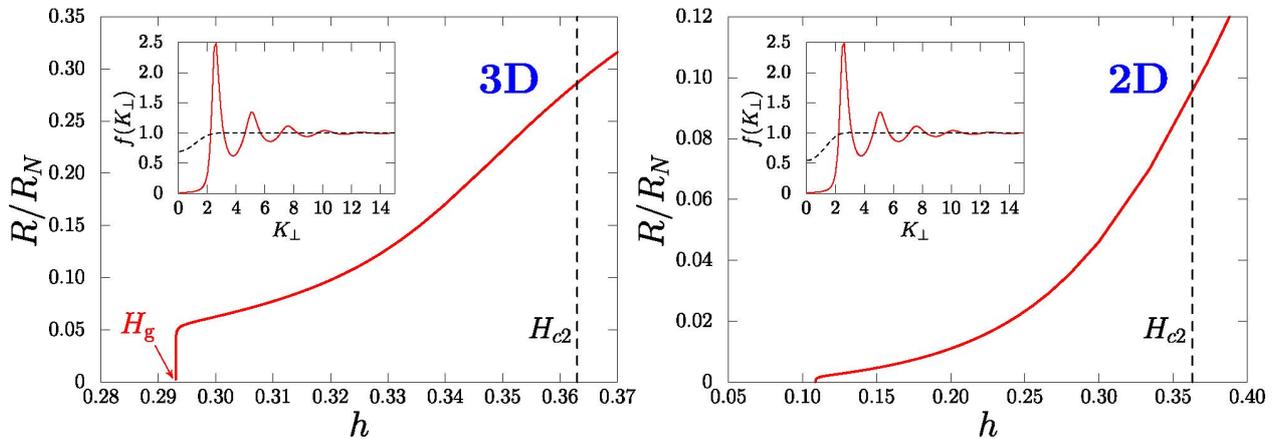


図 1. (左図) 3次元の場合に一定の温度で得られた磁場(h)対電気抵抗 (R/R_N) 曲線 (赤実線)。渦固体生成磁場近傍 H_g で電気抵抗が急激に消失する。点線は平均場近似での超伝導転移磁場である上部臨界磁場 H_{c2} 。インセットは、 H_g (赤実線) と H_{c2} (点線) における構造因子 (渦密度相関関数のフーリエ変換)。(右図) 同じパラメタ値で2次元の場合に得られた抵抗曲線と構造因子。

原論文 (2024年4月26日公開済)

Vanishing of Resistivity upon Freezing of Vortex Liquid in Clean Superconductors

N. Nunchot and R. Ikeda, J. Phys. Soc. Jpn. **93**, 054712 (2024).

< 情報提供 : 池田隆介 (京都大学大学院理学研究科) >