

## 熱電効果で探る二次元超伝導体の量子ゆらぎ

家永紘一郎\* (東京科学大学(当時 東京工業大学)理学院 ienaga@yamaguchi-u.ac.jp)

大熊 哲 (東京科学大学理学院 okuma.s.aa@m.titech.ac.jp)

量子相転移とは、絶対零度近傍で磁場や圧力などの非熱的な外部パラメータの変化に対して生じる、基底状態間の相転移である。温度の変化によって誘起される熱的相転移が**秩序変数**の熱ゆらぎによって生じるのに対し、量子相転移は**量子ゆらぎ**によって生じる。相境界である量子臨界点では秩序変数の強い量子ゆらぎに起因した特異な量子相が出現する場合があります。磁性体、強相関電子系、二次元電子系など幅広い物理系において重要な研究課題となっている。

量子相転移の典型例として、**二次元超伝導体**で生じる超伝導-絶縁体(SI)転移が挙げられる。熱ゆらぎが抑制された極低温で磁場を増加させると、**超伝導秩序変数の量子ゆらぎ**が強まり、超伝導相が破壊される。二次元系では局在効果により金属的な基底状態が存在できないため、超伝導相から絶縁体相への転移が生じることになる。このSI転移は、乱れの効果が強いアモルファスの超伝導薄膜や、銅酸化物超伝導体の原子層などで観測されている。

ところが、乱れの効果が比較的弱いタイプのアモルファス超伝導薄膜や、単結晶の原子層超伝導体などでは、超伝導相と絶縁体相の間の広い磁場範囲で、常伝導抵抗を大幅に下回る残留抵抗が生じる異常金属状態が観測され、その起源が長らく議論されている。いくつかの理論では、量子臨界点近傍の強い量子ゆらぎによって、超伝導体を貫く**量子化磁束**が絶対零度における液体状態(量子磁束液体)を形成することで、この異常金属状態が生じると予想されている。しかし、磁束液体が電流駆動されて発生する電気抵抗と、常伝導電子に由来する電気抵抗とを区別することは困難であるため、この予想は実証されてこなかった。

そこで我々は、超伝導秩序変数のゆらぎが温度勾配に対して大きな電圧応答を示す

ことに着目し、異常金属状態が観測されるアモルファス超伝導体  $\text{Mo}_x\text{Ge}_{1-x}$  の薄膜に対して、磁気熱電効果(ネルンスト効果)の測定を実施した。磁束液体は超伝導秩序変数の位相のゆらぎが顕著な状態であり、ネルンスト効果では常伝導電子の寄与と明確に区別されて検出される。その結果、極低温までの磁束状態の相図が完成し、異常金属状態では磁束液体が極低温まで存在して量子磁束液体を形成していることが明らかになった。

さらに、超伝導相と絶縁体(常伝導)相の間に異常金属状態が生じる機構を解明するために、常伝導相内で生じる超伝導秩序変数の振幅のゆらぎを調べた。超伝導転移温度(= 2.36 K)の約2倍の高温から0.1 Kまでの広い温度範囲で、広い磁場範囲にわたってネルンスト効果を測定することで、電気抵抗では検出できなかったゆらぎの包括的相図が完成し、熱ゆらぎと量子ゆらぎのクロスオーバー境界線の検出に成功した。その結果、異常金属状態の内部に量子ゆらぎが最も強くなる量子臨界点が存在することが明らかとなった。この結果は、SI転移の量子臨界点の広がり量子磁束液体をもたらすという理論的予想を支持している。

本研究によって、二次元超伝導体における異常金属状態が、臨界的性質を持つ量子磁束液体によって生じることが明らかになった。この結果は、二次元物質の物性研究、特に相転移の検出に対して熱電効果が非常に優秀なプローブとなることを示している。また近年、磁気フラストレーションのある強相関電子系において、広がりを持った量子臨界状態が観測され、そこでは量子スピン液体の可能性が議論されている。これらの異なる系の間類似性を議論することで、量子相転移の機構の理解が進展すると期待される。

## 用語解説

## 秩序変数:

相転移における秩序度の指標となる物理量。例えば、強磁性転移では磁化が、超伝導転移では電子対の凝縮によって生じる巨視的波動関数  $\psi(\mathbf{r}) = |\psi(\mathbf{r})| \exp[i\theta(\mathbf{r})]$  が秩序変数となる。

## 量子ゆらぎ:

量子力学的な不確定性原理に基づいたゆらぎ。熱ゆらぎが抑えられる絶対零度付近で支配的となる。

## 二次元超伝導体:

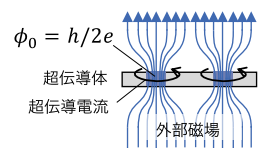
厚さが超伝導コヒーレンス長よりも薄い超伝導体。秩序変数のゆらぎの効果が強くなり、厚い超伝導体とは大きく異なる性質を示す。

## 超伝導秩序変数のゆらぎ:

熱ゆらぎ、または量子ゆらぎによって、超伝導秩序変数の位相  $\theta(\mathbf{r})$  や振幅  $|\psi(\mathbf{r})|$  がゆらぐこと。超伝導の強さが時間-空間的に不均一になる効果として観測される。位相のゆらぎは主に「磁束液体」という形で、振幅のゆらぎは常伝導相内で生じる「超伝導状態の泡」として現れる。

## 量子化磁束:

第二種超伝導体に磁場を印加すると、内部に侵入した磁束線は渦状の超伝導電流によって磁束量子  $\phi_0 = h/2e$  の単位で束ねられる。これは、巨視的波動関数  $\psi(\mathbf{r})$  が一価関数であるという条件から、位相  $\theta(\mathbf{r})$  が閉曲線に沿って  $2\pi$  の整数倍だけ巻きつくことに由来する。この構造は渦糸、量子渦、ボルテックスなどとも呼ばれる。



\* 現所属: 山口大学大学院創成科学研究科