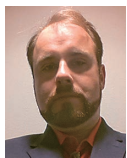


グラフェンのジョセフソン接合における超伝導流



山本 倫久

東京大学大学院工学系
研究科・理化学研究所
創発物性科学研究センター
yamamoto@ap.t.u-tokyo.ac.jp



Ivan V. Borzenets

東京大学大学院工学系研究科
ivan@meso.t.u-tokyo.ac.jp



樽茶 清悟

東京大学大学院工学系
研究科・理化学研究所
創発物性科学研究センター
tarucha@ap.t.u-tokyo.ac.jp

常伝導体と超伝導体とを接合させると、常伝導体の内因的な性質に超伝導体の影響による外因的な性質が付加されて、それぞれの単体では示さないような新しい性質が現れる。代表的な例は、トポロジカル状態と超伝導体との接合で発現する非アーベリアン準粒子である。準粒子の交換によって状態が変わるという性質を利用して、エラー確率が極めて低い量子演算を実行する技術の開発が世界的な規模で進められている。様々な超伝導接合系の中でも、超伝導体-常伝導体(絶縁体)-超伝導体の接合からなるジョセフソン接合は、超伝導デバイスの最も基本的な構成要素として知られている。弱結合(weak link)と呼ばれる常伝導体(絶縁体)部分が十分に短ければ、超伝導状態の浸み出しによってジョセフソン接合に超伝導流が流れる(ジョセフソン効果)。ジョセフソン接合は、量子干渉計、ジョセフソンコンピューター、電圧標準など多岐にわたって既に応用されている。

ジョセフソン接合の性質は、弱結合の性質に強く依存する。例えば、ジョセフソン接合を流れ得る超伝導流の最大値(臨界電流 I_c)は、超伝導ギャップの大きさだけでなく、弱結合におけるコヒーレントな伝導を妨げる要因によって制限される。では、弱結合の清浄度が非常に高く、キャリアが散乱させるまでに進む平均的な距離(平均自由行程)が接合長(弱結合部の長さ)よりも大きくなったらどうなるであろうか?あるいは、清浄な二次元の弱結合において、超伝導状態が破壊されない程度の磁場を印加して、トポロジカル状態の一例として知られる量子ホール状態を発現させたら超伝

導流は流れるであろうか?

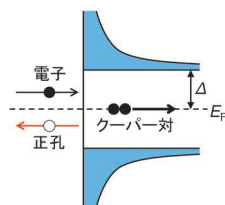
このような問いに応える実験系は長く存在しなかったが、その有力な候補とされてきたのがグラフェンを弱結合として用いたジョセフソン接合である。グラフェンジョセフソン接合は、ゲート電圧によって状態を容易に変えることができること、接合面で良好な電気的コンタクトが得られることなどから、グラフェン発見後の早い段階から大きな注目を浴びてきた。しかし、清浄なグラフェンを用意するための加熱プロセスによって超伝導体とグラフェンとの間の電気的接触が破壊されやすいことから、最近まで清浄なグラフェンを弱結合とするジョセフソン接合は実現していなかった。

最近になり、六方晶窒化ホウ素でグラフェンを挟んで超伝導電極を試料端に取り付けることにより、接合長 L よりも平均自由行程の方が大きな弾道領域のグラフェンジョセフソン接合がようやく実現した。我々の最近の実験では、 L と弱結合部のコヒーレンス長 ξ (浸み出した超伝導状態におけるクーパー対の空間的な広がり)の大小関係に応じて、絶対零度極限での臨界電流が、 $\xi < L$ の場合には $1/L$ に、 $L < \xi$ の場合には $1/\xi$ に比例する様子が観測された。また、高い臨界磁場を持つ超伝導材料MoReを電極に用いることによって量子ホール状態を介して超伝導流を流すことができる。この超伝導流は、グラフェンと超伝導体の接合面の電子正孔混成モードを介してクーパー対を組む2電子がグラフェンの両方の端に分離するという、これまで観測されていなかった機構によって流れる。

—Keywords—

アンドレーエフ反射:

超伝導体と常伝導体の接合において、常伝導体中の電子(エネルギー $E < \Delta$)が超伝導体に入射すると正孔が反射される現象をアンドレーエフ反射と呼ぶ。正孔が入射した場合には電子が反射される。



アンドレーエフ反射の模式図。左:常伝導体, 右:超伝導体。

ジョセフソン接合・ジョセフソン効果:

ジョセフソン接合は、常伝導体あるいは絶縁体の弱結合を介して2つの超伝導体を繋げた構造から成る。弱結合への超伝導状態の浸み出しによって超伝導流が流れる現象は、ジョセフソン効果と呼ばれる。弱結合が常伝導体の場合には、2つの超伝導体-常伝導体接合におけるアンドレーエフ反射によって生じる定在波であるアンドレーエフ束縛状態が超伝導流を担う。

弾道(バリスティック)伝導:

系の寸法に比べて電子の平均自由行程 l_m が大きい場合には、オームの法則に従わない弾道伝導が生じる。接合長が l_m より短いジョセフソン接合も、通常の接合とは異なる振る舞いを見せる。

量子ホール状態:

二次元電子系に垂直磁場を印加することによって電子の軌道が量子化し、試料端のみが伝導に寄与する状態を量子ホール状態と呼ぶ。これはトポロジカル状態の一種であり、ホール伝導度の量子化はトポロジカル不変量に関係付けられる。超伝導体との接合では、アンドレーエフ反射によってクーパー対が分離する。