

空間的に離れた零エネルギーマヨラナフェルミオン対による

非局所的ブロッキング効果

本論文ではトポロジカル超伝導体における零エネルギーマヨラナフェルミオンは、その本質的な非局所性によって、テレポーテーション的なプロセスを媒介することが可能であることを示した。この効果は、トポロジカル超伝導体の端にある零エネルギーマヨラナフェルミオンのスピンの向きが反対の端における電子トンネルに影響を与える、という非局所的ブロッキング効果に顕著に表れる。

非局所性はミクロなレベルではよくある現象であるが、古典的には直感的に真実だと受け取られている局所性の概念とは反している。これまで、非局所性は量子光学系でのみ議論されてきたが、今日ではいくつかの固体中でも実現できるようになってきた。その一つの現れはマヨラナフェルミオン (MF) (より正確にはマヨラナ束縛状態) である。それらはトポロジカル超伝導体の欠陥や境界に現れるが、空間的に分離された非局所的な状態である。二つの MF は一体となって一つの零エネルギー状態を構成し、それは非局所的に量子情報を保持することが出来るが、非局所性のため環境からのデコヒーレンスから保護されている。こうした性質はトポロジカル量子計算の実現に必要とされる性質である。二つの MF 間の結合の強さによって、MF は零エネルギーMF(ZMF)、あるいは non-zero エネルギーMF(NMF)に分類される。二つの分離された NMF は相関が最大であるといわれているが、ZMF に関してはまだわかっていないことも多い。二つの結合した ZMF が関与する輸送現象において相関は発達しないと考えられている。いくつかの研究で、離れた量子ドット間のテレポーテーション的な電子の輸送が ZMF によって媒介されるという予言がなされているが、その数は少ない。

遵義師範大学のメンバーを中心とするグループは ZMF 間の非局所的な交差相関を示す直接的な方法を提案した。その基本的なアイディアは、局所的なプロセスを制限することにより、ZMF で媒介される非局所的でテレポーテーション的なプロセスが顕在化してくるという事である。二つの半金属が一次元的なトポロジカル超伝導体で結ばれている系を考え(図 1)、トポロジカル超伝導体の両端に空間的に分離した二つの MF があるとする。二つの MF のスピンの向きは鏡映対称であるとする。図 1(a)に示したように、二つの半金属のスピン分極の向きがちょうど右側の ZMF のスピン分極と反対向きの場合、左側の半金属から電子は超伝導体に入ることができず反射される。このとき、左側の半金属と左側 ZMF のスピン分極が反平行ではないことに注目されたい。これは、左側における散乱過程が右側の ZMF によって非局所的に影響を受けていることを示唆している。これが、非局所的スピンのブロッキング効果と呼ぶ所以である。実際、半金属のスピン分極の向きが、二つの ZMF のいずれかのスピンの向きと反平行であれば、局所的、非局所的いずれのプロセスも禁止される。たとえば図 1(b)では、左側の半金属から入射された電子のスピン分極が左側の ZMF と反平行の場合であるが、この場合左側の局所的なアンドレエフ反射が禁止されるだけでなく、右側のトンネルプロセスが関与する同時トンネリング、または交差アンドレエフ反射も禁止される。

このテレポーテーション的なスピントロニクス効果は量子エンタングルメントの反映である。つまり、粒子が遠く離れていても、それぞれの粒子の状態は他の粒子と独立に記述することが出来ない、むしろ分割できない全体として記述されなければならないのである。

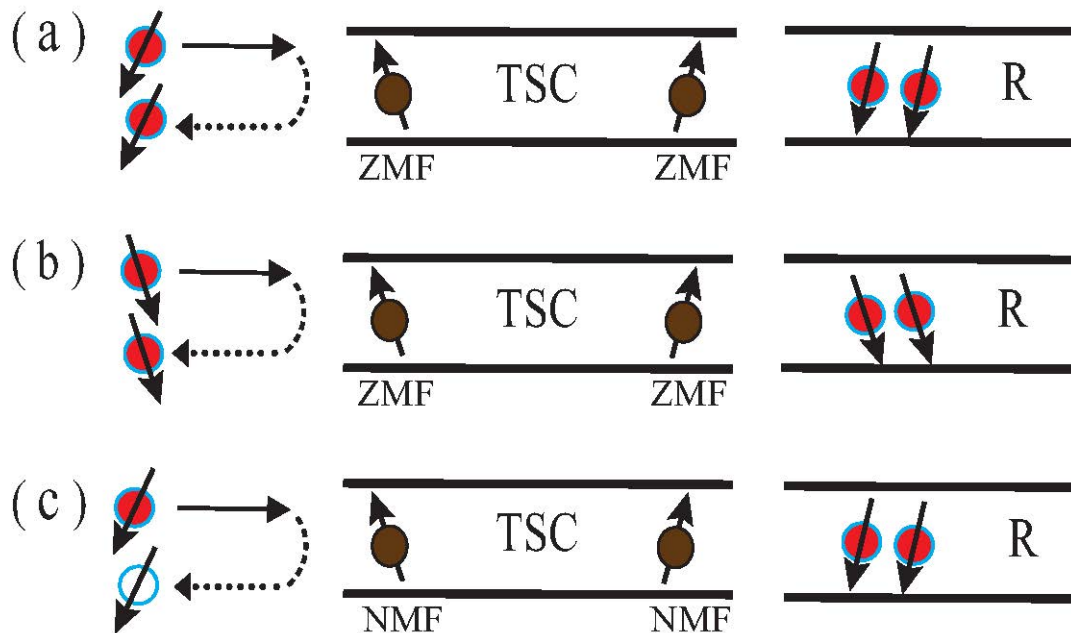


図 1 (a)右側の半金属が右側の ZMF と反平行のスピンスピン分極を持つため、左側の半金属からの電子は、完全に反射される。(b)左側の半金属からの電子は、左側の ZMF と反平行のスピンスピン分極をもつため、完全に反射される。(c)右側の半金属が右側の NMF と反平行のスピンスピン分極を持つため、左側の半金属からの電子は局所的な共鳴アンドレエフ反射を受ける。

NMF については話は異なる (図 1(c))。図 1(a)と同じスピンスピン配置であっても、左側の半金属から来た電子は超伝導体に入ることができ、ホールだけが反射される。これは、右側の NMF と右側の半金属間の反平行スピンスピン配置は、非局所的な同時トンネリング・交差アンドレエフ反射プロセスを禁止するだけで、左側における局所的なアンドレエフ反射に影響を与えないことを意味している。実際、空間的に離れた二つの NMF 間にはある程度非局所的相関があるが、それは秩序変数が有限の相関長を持つことからくる自明の効果であってマヨラナフェルミオンに固有の非局所性によるものではない。したがって、二つの端点にある NMF は本質的に二つの独立な状態であるのに対し、二つの ZMF は非局所的な分布にもかかわらず一つの状態として扱う必要がある。以上のような興味深い量子エンタングルメント的な現象は近い将来実験的に実現されることが期待される。

この成果は、日本物理学会が発行する英文誌 Journal of the Physical Society of Japan (JPSJ) の 2017 年 12 月号に掲載された。

原論文

Non-Local Spin Blocking Effect of Zero-Energy Majorana Fermions
Chongdan Ren, Jianglan Yang, Jin Xiang, Sake Wang, and Hongyu Tian:
J. Phys. Soc. Jpn **86** (2017) 124715.

問合せ先 : Chongdan Ren (Zunyi Normal University)