トポロジカル超伝導体の渦糸に現れるスピン偏極マヨラナ粒子

固体は電流の流れやすさの順番に、金属、半導体、絶縁体の三種類に分類できることが知られている。しかし近年、内部は絶縁体で表面が金属であるという四種類目の奇妙な固体（トポロジカル絶縁体）が発見された。しかも、それはトポロジーという数学によって特徴付けられるため多くの研究者が注目している。更に、その物質群は熱起電力が高い等の性質をも有し、廃熱から電気を高効率で取り出す材料として、工学的にも注目されている。このようなトポロジカル絶縁体の一つである Bi_2Se_3 は、銅をドープすることにより約 3K で超伝導転移を起こす事が知られている。そして、この超伝導体は、内部が超伝導体で表面が金属であるという奇妙な超伝導体（トポロジカル超伝導体）である可能性が指摘されてきた。

トポロジカル超伝導体の表面の金属状態では、マヨラナフェルミオンと呼ばれる特異な粒子が現れる。マヨラナフェルミオンは自分自身が反粒子であり、ニュートリノがその候補として期待されているが、現時点ではその実験的証拠はみつかっていない。そのような特異な粒子が、超伝導体中のクーパー対の存在によって電子と正孔が同一視されることで固体中に実現される。この特異なマヨナラ粒子は、超伝導体では、量子化された磁束をもつ渦糸内にも存在できることが知られており、渦糸内にマヨラナゼロモードが存在する場合、その統計性は非可換統計へと変化し、量子コンピュータ等の新しい素子への応用が期待され、注目を集めている。しかしながら、固体中においてもマヨラナフェルミオンを実験的に検出することは難しく、多くの実験及び理論家がその検出法に関して活発に研究を行っている。

最近、日本原子力研究開発機構・システム計算科学センターの研究グループは、トポロジカル超伝導体候補物質 $Cu_xBi_2Se_3$ の強いスピン軌道相互作用が渦糸芯での準粒子束縛状態に与える影響を解析的にも数値的にも調べ上げ、渦糸内にスピン偏極したマヨラナゼロモードが現れることを明らかにした。これは、磁束の周りを回る準粒子の軌道運動がスピン軌道相互作用を通じて準粒子のスピン構造に影響を与える事を意味しており、渦糸研究の長い歴史の中で初めての指摘に当る。この成果は、日本物理学会が発行する英文紙 Journal of the Physical Society of Japan (JPSJ)の 2014 年 6 月号に掲載された。

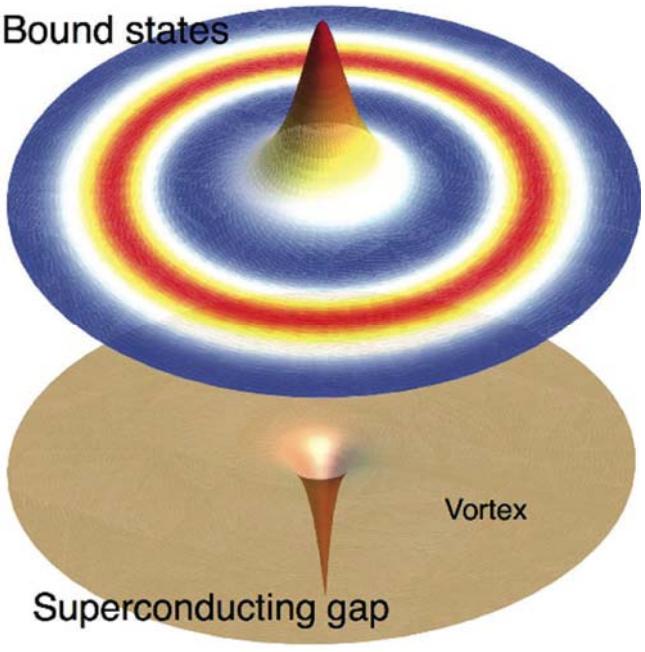

図 1. スピン偏極したマヨラナフェルミオン（色はスピン偏極度を表している）

母物質である Bi_2Se_3 をはじめとするトポロジカル超伝導体の多くは、強いスピン軌道相互作用を持ち、その有効モデルは質量のある相対論的粒子を記述するディラック方程式で記述される。従って、これらの物質がトポロジカル

超伝導体となった場合、固体中における相対論的粒子が超伝導化し、磁束の周りにマヨラナフェルミオンが現れ、興味深い状態の実現が期待できる。しかし、理論的に磁束とその準粒子束縛状態を扱おうとすると、空間的に非一様で自由度（スピンと軌道）が大きくなるため、三次元的な超伝導状態を対象とした場合は、多大な計算量を必要とする。

本研究においては、超伝導ディラック方程式のゼロエネルギー固有値を電子・正孔対称性を利用して解析的に解いた上、さらにチェビシェフ多項式展開法と呼ばれる計算量を劇的に低減可能な並列数値計算手法を用いて第一原理計算に基づいた強束縛模型を数値的に解いた。どちらの計算においても、得られたマヨラナフェルミオンはスピン偏極しており、強いスピン軌道相互作用がその偏極の起源となっていることが分かった。これは、スピン軌道相互作用によって軌道角運動量 L_z もスピン角運動量 S_z も良い量子数では無くなり、その和である全角運動量 $J_z=L_z+S_z$ が良い量子数となったからである。そのため、マヨラナゼロモードは異なる軌道角運動量を持った上向きスピンと下向きスピンの重ね合わせ状態[$(L_z,S_z)=(0,1/2)$と$(1,-1/2)$]となった。こうして、L_z が小さい状態の方がより中心上向き集めている。また、このようなスピン偏極は渦糸芯が磁化することを意味しており、マヨラナフェルミオンを磁気的プローブによって検出できる可能性がある等、今後の研究の展開が大いに期待される。

原論文

Spin-Polarized Majorana Bound States inside a Vortex Core in Topological Superconductors
Yuki Nagai, Hiroki Nakamura, and Masahiko Machida, J. Phys. Soc. Jpn. **83**, 064703 (2014)

問合せ先：永井佑紀　（日本原子力研究開発機構システム計算科学センター）
町田昌彦（日本原子力研究開発機構システム計算科学センター）