

量子コンピュータの基礎となる材料を求めて

物性物理およびその関連分野

研究者所属・職名 : 自然科学学域・教授

ふりがな てい こくけい

氏名 : 鄭 国慶

主な採択課題 :

- [基盤研究\(A\)「スピン三重項超伝導物理の開拓」\(2019-2022\)](#)
- [基盤研究\(B\)「六方晶や三角格子等の特殊構造が生み出す新奇超伝導のNMR法による研究」\(2016-2018\)](#)
- [新学術領域研究\(研究領域提案型\)「空間反転対称性を破る電子流体の新奇現象」\(2010-2014\)](#)

分野 : 物性物理学、材料物理学

キーワード : スピン三重項超伝導、トポロジカル超伝導、量子コンピュータ、核磁気共鳴

課題

● **なぜこの研究をおこなったのか？ (研究の背景・目的)**

これまで、物質の状態は対称性で分類されてきた。しかし、近年このような概念を超えた物質、すなわちトポロジカル物質の存在が認識されるようになった。トポロジカル絶縁体やトポロジカル超伝導体はその構成員である。特に、トポロジカル超伝導体の表面や渦糸の中心にはマヨラナ励起と呼ばれる状態が現れ、量子コンピュータに応用できると期待されている。マヨラナ励起が実現する舞台として従来型超伝導/トポロジカル絶縁体などの人工構造が試みられてきたが、バルクの非従来型超伝導体(スピン三重項超伝導体)の実現が望まれている。このようなスピン三重項超伝導体を探索するのが本研究の目的である。

● **研究するにあたっての苦労や工夫 (研究の手法)**

我々はトポロジカル絶縁体にキャリアをドーピングした超伝導体 $\text{Cu}_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$ や、遷移金属を含み電子間相互作用が強い $\text{A}_2\text{Cr}_3\text{As}_3$ (Aはアルカリ金属)等の単結晶を作製し、核磁気共鳴法を中心とした実験手法でトポロジカル超伝導の探索及び実証を行っている。

量子コンピュータの基礎となる材料を求めて

物性物理およびその関連分野

研究成果

●どんな成果がでたか？どんな発見があったか？

トポジカル絶縁体 Bi_2Se_3 の層間にCuを挿入すると、電流を運ぶキャリアがドーピングされ、約4Kで超伝導が実現する。我々は超伝導状態でスピン回転対称性が自発的に破れていることを発見した。図1に示すように、スピン磁化率はSe(Bi)原子が形成する六角晶の面内においてある特定の方向でのみ消滅する。すなわち、三回対称の結晶に対して、スピン磁化率が二回対称性を持つことが明らかになった。これはスピン三重項超伝導のみが示す性質であるが、これを観測したのはすべての超伝導体を通じてこれが最初である。

Bi_2Se_3 の結晶構造に空間反転対称性があるため、電子のフェルミ統計性から、スピン三重項は超伝導の軌道波動関数の奇パリティを意味する。このことにより、 $\text{Cu}_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$ が示す超伝導はトポジカル超伝導であることが明らかになった (Nat.Phys. **12**,852(2016))。

さらに、Cuの組成を0.4よりも大きくすると、超伝導ギャップが等方的になり、物理量に二回対称性が消える(図2)。これは、別のタイプのトポジカル超伝導(カイラル超伝導)が実現していると考えられるが、今後の詳細な研究を待たなければならない。

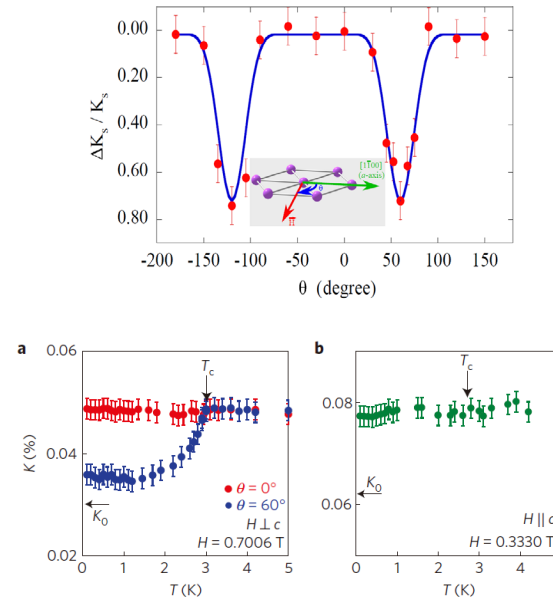


図1 トポジカル超伝導体 $\text{Cu}_{0.3}\text{Bi}_2\text{Se}_3$ におけるスピン磁化率の温度及び角度依存性

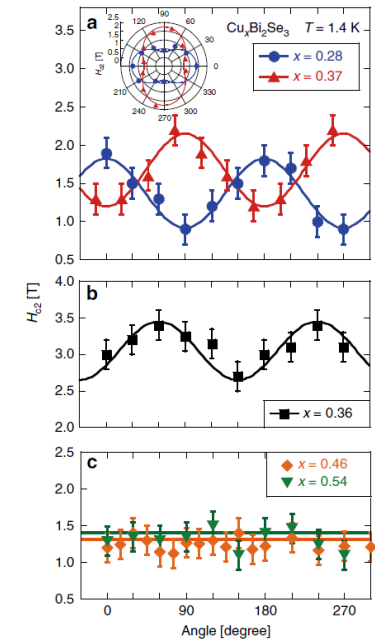


図2 上部臨界磁場の測定から明らかになったギャップ対称性の変遷 (Nat. Commun. **11**, 235 (2020))

今後の展望

●今後の展望・期待される効果

トポジカル超伝導体の渦糸中心や表面にマヨナラ励起が存在し、このような状態は散乱に強く非アベル統計に従うため、量子コンピュータに応用できる。今後は $\text{Cu}_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$ におけるマヨナラ状態の同定や、 $\text{A}_2\text{Cr}_3\text{As}_3$ 等においてより高温で実現するスピン三重項超伝導の開拓に注力する。