

物質中のマヨラナ粒子の磁気異方性—映進対称性と四極子型の応答—

[1] 要旨

非自明な Z_2 不変量を有する時間反転対称性のあるトポロジカル超伝導体の表面に現れるマヨラナ粒子（クラマース対）の磁気応答が一般的に検討され、マヨラナクラマース対はその個数に依存して特有な磁気異方性を示すことを明らかにされた。特に、映進対称性によって保護された2つのマヨラナクラマース対は四極子に似た磁場応答を生じる。本研究は特異な磁場応答によりマヨラナクラマース対を観測・制御できる可能性を示唆しており注目を集めている。

[2] 本文

マヨラナ粒子はその反粒子が自身と同一の状態としてエッソーレ・マヨラナによって提案された粒子であり、今現在でも探索が続けられている。興味深いことに、近年、物質中の低エネルギー状態が有効的にマヨラナ粒子として振る舞う場合があることが分かってきた。その一つの例が、ある種の異方的超伝導状態であるトポロジカル超伝導体である。通常の超伝導体のエネルギースペクトルにはギャップ（一般にはノードもある）が生じているが、トポロジカル超伝導体の表面ではギャップレスになっており、その零エネルギー状態がマヨラナ粒子として振る舞う。このマヨラナ粒子は表面という2次元空間に局在しているために、非可換統計（状態が粒子の入れ替えの順番に依存する）という特殊な統計性を示す。これを応用すると局所的な摂動に対して安定な量子演算が可能となり、トポロジカル超伝導体とその表面のマヨラナ粒子は応用の観点からも注目を集めている。

マヨラナ粒子は時間反転対称性を破るものと保存するものの2種に大別される。前者は電子正孔対称性（超伝導状態では必ず存在する）のみに起因するものであり、超伝導ギャップより小さい任意の摂動に対して安定である。一方、後者は時間反転対称性によりクラマース縮退（マヨラナクラマース対と呼ぶ）しており、磁場などの時間反転対称性を破るような摂動に対しては不安定である。そのため、この性質を逆に利用すると、外場でマヨラナ粒子を観測・制御できる可能性がある。こういった観点から、時間反転対称性に保護されたトポロジカル超伝導体表面のマヨラナ粒子が外場に対してどのように応答するかを明らかにすることは基礎的にも応用的にも興味を持たれている。しかも、通常の（複素）フェルミ粒子ではないので、極めて異方的な磁気応答を示す。例えば磁場 \mathbf{B} 中のフェルミ粒子のスピン σ のエネルギーは $\sigma \cdot \mathbf{B}$ であるが、マヨラナ粒子のスピンエネルギーは $\sigma_z B_z$ という完全な一軸異方性（マヨラナイジングスピンと呼ばれている）を示すことが知られている。ここでイジングスピンの向き z は系の対称性に依存するが、結晶の空間群とクーパー対の対称性により一意に定まることがこれまでの研究で明らかにされている。さらに、特別な場合として、六方晶（あるいは三方晶）のトポロジカル超伝導体においては、表面マヨラナ粒子がつくる磁気八極子演算子だけが磁場に応答することも分かっている。

最近、名古屋大学大学院理学研究科物質理学専攻と理化学研究所創発物性科学研究センターの研究グループは Z_2 不変量によって保護されるマヨラナクラマース対の有する磁気演算子を一般的に調べ、他のマヨラナ粒子のものより高次の磁気異方性があることを明らかにした。たとえば、映進対称性に保護された2つのマヨラナクラマース対は四極子に似た形状の磁気異方性があることが示された。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2020年4月号に掲載された。

トポロジカル超伝導体の表面に現れるマヨラナ粒子は、その名の通り、超伝導体のもっているトポロジカル不変量と対応しており、 Z あるいは Z_2 の不変量で特徴づけられる。これまでの磁気応答の研究は Z 不変量で保護されたマヨラナクラマース対を主に対象としていたが、本研究では新たに Z_2 不変量で保護されている場合を検討し、磁気応答が 3 タイプあることが示された。タイプ A は時間反転対称性に保護されているもの、タイプ B はそれに加えて結晶の対称性によって保護されているもの、タイプ C は時間反転対称性と映進対称性 [図(a)(b)参照] によって保護された 2 つのマヨラナクラマース対である。

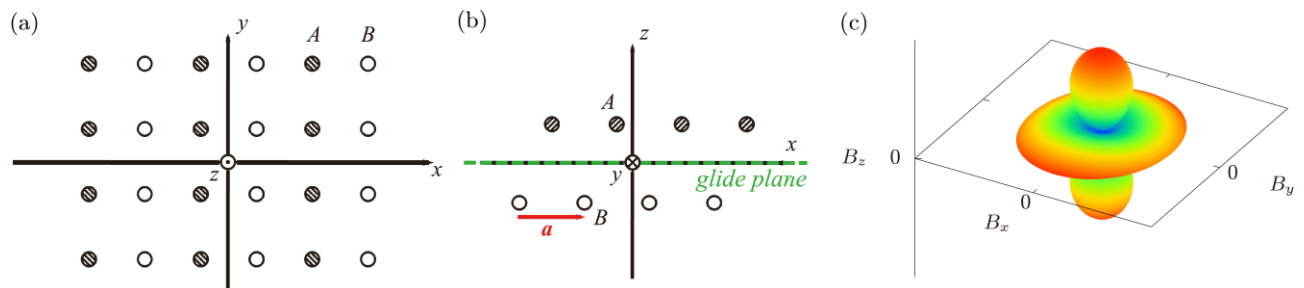


図. (a)(b)映進対称性をもつ構造の例. xy 面についての鏡映と x 方向への半並進を組み合わせた映進に対して不変である. (c)映進対称性に保護された 2 つのマヨラナクラマース対のエネルギー E_M を外部磁場 (B_x, B_y, B_z) に関して極プロットしたもの.

タイプ A と B は一軸的な磁気異方性を示すが、タイプ C はより高次の二軸的な異方性 [図(c)参照] を示す。これまで知られていた Z 不変量で保護されているマヨラナ粒子の応答とは異なり、 Z_2 不変量で保護されているマヨラナクラマース対はその個数に強く依存して特有な磁気応答するのが特徴である。ごく最近、高圧下の $UCoGe$ の表面において映進対称性に保護されたマヨラナクラマース対が現れる可能性が京都大学のグループにより提案されているが、そこでは本研究で示されたような特異な磁気応答が期待される。本理論は結晶とクーパー対の対称性のみに基づいているので、様々な系に簡単に適用することができ、超伝導体およびマヨラナ粒子の物理のさらなる発展に寄与するものである。

原論文(3月30日公開済)

[Magnetic Response of Majorana Kramers Pairs Protected by \$Z_2\$ Invariants](#)

Yuki Yamazaki, Shingo Kobayashi, and Ai Yamakage, *J. Phys. Soc. Jpn.* **89**, 043703 (2020).

<情報提供：山影相（名古屋大学大学院理学研究科）>