

トポロジカルな絶縁体と超伝導体の分類理論

理化学研究所 開拓研究本部 主任研究員

古崎 昭

(お問い合わせ先) E-MAIL: furusaki@riken.jp



研究の背景

トポロジカル絶縁体は、その内部は電気を通さずに表面のみが金属のように電気を通す物質です。この電気伝導は表面に沿って自由に動ける「ディラック電子」によって担われており(図1)、表面にそのような電子をもたない普通の絶縁体とトポロジカル絶縁体は質的に異なる絶縁体です。この2つの異なる絶縁体は、物質中の電子の波動関数から定義されるトポロジカル数によって区別できます。トポロジカル数で特徴づけられる物質(電子系)の存在は、整数量子ホール系やある種の超伝導体についても知られていましたが、それらを統一的に説明する理論はありませんでした。

研究の成果

私たちは、一般の絶縁体や超伝導体について、金属的な表面状態が安定に存在してトポロジカル数が定義される条件を明らかにし、電子系のもつ対称性と空間次元に応じて、トポロジカル数によって絶縁体と超伝導体を分類する図2のような表を得ました。電子系が属する10組の対称性クラスと空間次元に応じて、絶縁体(または超伝導体)の種類は、2つのみの場合(2値のトポロジカル数: Z_2)、表面状態の数に応じた任意の数の種類がある場合(整数値のトポロジカル数: Z)、1種類しかない場合(0)の3通りがあります。

この表は、3次元と2次元のトポロジカル絶縁体、整

数量子ホール系やp波超伝導体・超流動体などの既知のトポロジカル物質を含んでいるだけでなく、未知のトポロジカル物質の存在も示しています。

今後の展望

トポロジカル絶縁体・超伝導体の分類表は、どのような物質がトポロジカル物質になるかを予想する手がかりになるとともに、励起スペクトルにギャップが開いた自由フェルミ粒子系を分類する基礎理論として重要です。

最近では、固体結晶の持つ回転・鏡映・並進などの空間群の対称性を考慮して電子状態を分類する方向に研究が発展しています。また、トポロジカル超伝導体の端(表面)に存在すると予想される「マヨラナ状態」に関して、量子計算への応用を含む非アーベル統計粒子の物理の研究の進展が望まれています。

関連する科研費

- 2009-2011年度 基盤研究(C)「トポロジカル絶縁体・超伝導体における不純物効果の理論的研究」
- 2012-2014年度 基盤研究(C)「トポロジカル絶縁体の不純物及び電子相関効果の理論的研究」
- 2015-2018年度 基盤研究(C)「対称性によって守られたトポロジカル量子相の理論的研究」

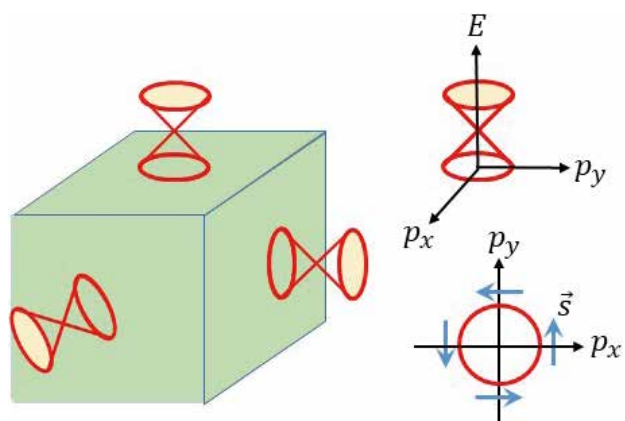


図1 トポロジカル絶縁体の表面に存在する、スピン s と運動量 p の方向が垂直で、線形のエネルギー分散を持つディラック電子。

対称性クラス	整数量子ホール効果		
	1次元	2次元	3次元
A	0	Z	0
AIII	Z	0	Z
AI	0	0	0
BDI	Z	0	0
D	Z_2	Z	0
DIII	Z_2	Z_2	Z
AII	0	Z_2	Z_2
CII	Z	0	Z_2
C	0	Z	0
CI	0	0	Z

トポロジカル絶縁体

図2 絶縁体や超伝導体のトポロジカル数による分類表。時間反転対称性と粒子正孔対称性の有無によって決まる10種類の対称性クラスおよび空間次元について、可能なトポロジカル数のタイプとトポロジカル物質の例を示している。