

超流動 $^3\text{He}$ におけるトポロジーと対称性の協奏

水島 健 (大阪大学大学院基礎工学研究科 mizushima@mp.es.osaka-u.ac.jp)

近年、トポロジーを基軸とした新たな物質観が広がりを見せている。ここでいうトポロジーとは電子状態の「連続的にほどこくことのできない捻れ」の尺度であり、輸送係数の量子化やギャップ励起状態といった量子現象として顕在化する。量子ホール効果やベリー位相の発見に端を発するこの物質観は「対称性の破れ」などで説明できない量子相の物理を説明してきたが、現在では、対称性というエッセンスを加えることで物質の詳細によらない普遍的な視野を与えるものとして注目されている。対称性の破れによって生じる量子現象の好例である超伝導・超流動相にもこの概念は適用され、マヨラナ粒子のようなトポジカルな背景を持つ準粒子が物質の新しい機能性をもたらすと期待されている。

本稿では、超流動 $^3\text{He}$ を基軸として、トポロジーと対称性が密接に絡み合った量子現象を紹介する。典型的なフェルミ液体である $^3\text{He}$ はスピンと実空間における独立な $\text{SO}(3)$ 回転対称性という高い対称性を保つ。超低温下では、スピン $S=1$ 、軌道角運動量 $L=1$ の内部自由度を持ったクーパー対形成が起こり、A相とB相という多重超流動相が実現する。B相はBalian-Werthamer (BW) 状態とよばれ、自発的対称性の破れを通してスピン・軌道相互作用が発現する。この状態に内在する非自明なトポジカル構造については1988年にSalomaa-Volovikによって明らかにされたが、近年になり時間反転対称性や粒子・正孔対称性との関係性が明示され、3次元トポジカル超流体の典型例としてその学術的価値が再認識されている。一方で、時間反転対称性を自発的に破ったA相の低エネルギー準粒子はワイル粒子のように振る舞うことが1980年代中頃からVolovikにより指摘されており、実際にカイラル異常に起因した量子現

象を検出したとの実験報告がなされている。また、トポジカル物質研究の芽生え以前から、 $^3\text{He}$ ではアンドレーエフ束縛状態の研究が盛んに行われてきた歴史がある。マヨラナ粒子はトポジカルな起源を持つ特殊なアンドレーエフ束縛状態である。ゆえに、これまでの $^3\text{He}$ における表面状態の研究は基盤的知見として重要である。

このような背景を踏まえながら、本稿では磁場中のBW状態に現れるトポジカル相とそれに付随する新しいタイプの量子相転移を紹介する。時間反転対称性が破れる磁場下においてもトポジカル相とその帰結である表面マヨラナ粒子が存在するが、一方で、臨界磁場において非トポジカル相へ相転移する。このトポジカル相転移は磁場中のBW状態で保たれていた離散対称性の自発的破れと、それに伴う「イジング秩序の形成」に起源を持つ。この臨界磁場は自発的な対称性の破れと同時にトポジカル相転移が起こる奇妙な量子相転移点であり、さらに、そこでは表面マヨラナ粒子が有限の質量を獲得する。本稿では、この新奇量子相転移の詳細に加え、このトポジカル相に現れる表面マヨラナ粒子の磁場応答とその背後にある離散対称性との不可分な関係性を明らかにする。

$^3\text{He}$ は異方的超伝導の雛形として長い研究の歴史を持ち、バルク超流動相に関する曖昧さのない確固とした知見が蓄積されてきた。さらに、等方的なフェルミ液体であるがゆえの高い対称性、 $^4\text{He}$ 原子層のコーティングによる表面の鏡面性の制御、さらには、ナノスケールの制限空間への閉じ込めによる多彩な超流動相の実現などという著しい特徴を持つ。このように、超流動 $^3\text{He}$ は様々な量子凝縮系に発現するトポジカル量子現象研究の格好の舞台である。

—Keywords—

**超流動 $^3\text{He}$  :**

希ガスで質量の小さいHe原子は大きな零点運動の寄りのため大気圧下では固化せず、絶対零度近くまで液体のままである。He原子の基底状態は電子スピンを持たないが、 $^3\text{He}$ 原子は $1/2$ の核スピンを持つためフェルミ統計に従う。フェルミ縮退温度である1K以下では典型的なフェルミ液体として振る舞い、1mK程度でスピン3重項p波超流動状態へ転移する。

**トポジカル超伝導 :**

量子渦は秩序変数の位相が実空間で非自明に捻られることで現れるトポジカル励起である。一方で、トポジカル超伝導では、準粒子波動関数が運動量空間で非自明に捻られている。この捻れの尺度を表すのが巻き付き数などのトポジカル不変量である。超流動体に生じた量子渦の渦度は整数に量子化されており、古典流体と異なり、渦が連続的に現れたり消えることはできない。同様に、超伝導体に内在するトポジカル構造を連続的に変化させることはできない。

**マヨラナ粒子 :**

1937年にEttore Majoranaによって存在が指摘されたフェルミ粒子であり、粒子自身がその反粒子と等価であるという性質を持つ。トポジカル超伝導の持つ非自明なトポロジーを反映して磁束芯や表面などに束縛された準粒子状態として現れる。非可換統計に従うなど著しい特徴を持つことが指摘されている。