

# 超流動 $^3\text{He-A}$ における時間反転対称性の破れと固有マグナスカ



池上 弘樹

理化学研究所 CEMS  
hikegami@riken.jp

堤 康雅

東京大学大学院総合文化研究科  
tsutsumi@vortex.c.u-tokyo.ac.jp

河野 公俊

理化学研究所 CEMS  
kkono@riken.jp

自然は並進対称性や回転対称性など様々な対称性を持つ。しかし、多くの物質では自然が本来持っている対称性を自発的に破り、物理的に興味深い状態になる。この自発的対称性の破れとして知られる基本原理は、物性物理から素粒子物理や宇宙物理まで包括するものである。例えば、結晶や強磁性、超流動/超伝導は対称性の破れた典型的な例であり、また物質の質量や宇宙ひもは真空の対称性の破れの結果生じていると考えられている。強磁性では空間の回転対称性を、超流動/超伝導ではゲージ対称性を、巨視的な数の粒子が低温でいっせいに破ることで実現される。その結果、個々の粒子の性質のみからは予想されない新たな性質が生み出される。生み出される性質にはどの対称性がどのように破れるかが強く反映される。

対称性が複雑に破れた状態として知られている超流動  $^3\text{He}$  は、1 mK 以下の超低温で、2つの  $^3\text{He}$  原子がクーパー対を組むことにより実現される ( $^3\text{He}$  原子は核スピン 1/2 を持つフェルミ粒子)。従来型の超伝導では  $s$  波と呼ばれる軌道角運動量とスピンのゼロのクーパー対が形成されるのに対し、超流動  $^3\text{He}$  では、軌道角運動量 1 とスピン 1 を持つ  $p$  波と呼ばれるクーパー対が形成される。初めて実現された非  $s$  波クーパー対状態として 1972 年に発見され、理論、実験の両面から深く研究されてきた。超流動  $^3\text{He}$  では、クーパー対の軌道角運動量と

スピンの向きは任意に選ぶことができるが、実際にはある特定の方向が選ばれる。そのため、ゲージ対称性のみではなく、軌道空間での回転対称性、スピン空間での回転対称性、場合によっては時間反転対称性など、複数の対称性が同時に破れる。それゆえ、超流動  $^3\text{He}$  は、対称性が多重に破れた時に何が起きるかの一般論を構築するためのモデル系として捉えられている。

超流動  $^3\text{He}$  の A 相 ( $^3\text{He-A}$ ) は、クーパー対の軌道運動が時間反転対称性を破るトポロジカルな状態である。この時間反転対称性の破れは  $^3\text{He-A}$  の最も基本的な性質であり、それは間接的には知られていたが、それを直接的に捉えた実験はこれまで存在しなかった。筆者らは、最近、 $^3\text{He-A}$  中を運動する不純物 (本稿では液体  $^3\text{He}$  中に生成した電子) が固有マグナスカという、ローレンツ力のような不純物の速度に垂直な方向に受ける力を発見した。この固有マグナスカは、 $^3\text{He}$  準粒子が不純物により非対称に散乱されることにより生じるものであり、時間反転対称性が破れた結果生じた新しい性質である。この固有マグナスカの観測は、時間反転対称性の破れの直接検証そのものである。さらに、固有マグナスカは、クーパー対の軌道角運動量の向き (カイラリティ) を直接観測するための唯一の手段を与えるとともに、対称性の破れにより生じるトポロジカル欠陥の観測の可能性を拓くものである。

## —Keywords—

### 液体 $^3\text{He}$ :

フェルミ粒子である  $^3\text{He}$  原子は、質量が小さく量子性が強い。そのため、液体  $^3\text{He}$  は常圧下では絶対零度まで固化しない。典型的な強相関フェルミ粒子系であり、1 K 程度の温度でフェルミ縮退し、それ以下の温度ではランダウのフェルミ液体で記述される。約 1 mK で超流動状態に転移する。

### フェルミ粒子系の超流動 :

フェルミ多体系では、フェルミ粒子間に有効的な引力が働くとき、フェルミ粒子が 2 個ずつ対になったクーパー対が低温で形成される。超流動はクーパー対の凝縮により生じる。構成粒子が電子の場合が超伝導に対応する。

### クーパー対の対称性 :

クーパー対の状態は、クーパー対の相対軌道角運動量  $L$  で分類できる。  $L=0, 1, 2, \dots$  の状態は、それぞれ  $s$  波、  $p$  波、  $d$  波、  $\dots$  と呼ばれる。2 つのフェルミ粒子の入れ替えに対して波動関数は反対称なため、  $L$  が偶数の場合、クーパー対の全スピン  $S$  は 0 になり、  $L$  が奇数の場合、  $S=1$  になる。

### 時間反転対称性の破れ :

時間の進む向きを反転させる操作を行う前と後で、状態が不変な場合を時間反転対称性があるという。それに対して、この操作により状態が変わる場合を、時間反転対称性が破れているという。