

トポロジカル相におけるエキゾチック準粒子

川上 則雄 / 京都大学大学院理学研究科 教授

本計画研究「トポロジカル相におけるエキゾチック準粒子」の目的は、物質科学の新たな局面を切り開きつつあるトポロジカル量子相とそこに発現するエキゾチック準粒子の基本的性質を理論的に解明し、さらに個々の物質の詳細によらない普遍的な物理現象と法則を探究することである。既存の枠組みを超えた発想と分野を越えた概念の融合により、より広い観点から基礎学理の構築を目指す。特に、トポロジカル物質科学の開拓の鍵となる「強相関」、「対称性」、「ナノサイエンス」に重点を置いた理論研究を展開し、これらの実験研究を推進するA班-C班と緊密に協力することで領域研究全体の連携を推進する横系の役割を担う。対象とする主な系と研究のねらいは以下のとおりである。

- ・強相関物質群における新奇なトポロジカル量子相の理論探索
- ・対称性によって守られたトポロジカル量子相の解明によるトポロジカル物質の実験研究の先導
- ・ナノ構造におけるエキゾチック準粒子の特性の研究を通じたトポロジカル量子相の本質の解明
- ・素粒子物理など他分野とのアナロジーを通じたトポロジカル物質科学の新概念の構築

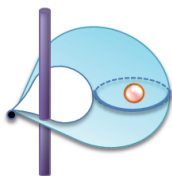
本計画研究メンバーは川上(物性)、上田(冷却原子)、佐藤昌利(場の理論)、西田(原子核)、新田宗土(素粒子)、水島(超流動)、手塚(物性)、段下(冷却原子)と多岐にわたるが、それぞれが独自の観点からトポロジカル量子現象の研究に携わっている。

本プロジェクトで推進する予定の具体的テーマをいくつか列挙すると

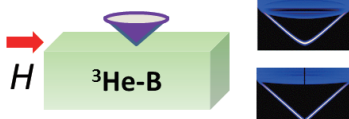
- (1) 強相関系におけるトポロジカル量子相の理論構築(A班と連携): トポロジカルモット絶縁体における強相関効果を解明し、エッジモット状態などの新奇トポロジカル状態の発現機構を探究する。強相関トポロジカル量子相の理論の枠組みを確立する。
- (2) 新奇な量子系におけるトポロジカル相(A班、B班と連携): 結晶対称性によって守られたトポロジカル励起の分類を行い、新奇トポロジカル物質を提案する。ボース・アインシュタイン凝縮の励起バンドがトポロジカルに非自明な構造を持つ条件と観測方法を提案する。原子気体やフェルミ超流動の制限空間におけるトポロジカル相転移を解明する。
- (3) トポロジカル量子相でのエキゾチック準粒子の探索と検証(A班、B班、C班と連携): トポロジカル超伝導・超流動の非平衡ダイナミクスやナノ構造における量子輸送現象の解明により、マヨラナ準粒子の検出法と制御法の提案を目指す。フェルミ超流動の表面や量子渦に局在するマヨラナ粒子やスピノ流がフェルミ液体の基本特性に与える効果を解明する。フェルミ粒子系の普遍的な少数束縛状態がトポロジカル相に及ぼす効果を解明する。
- (4) 領域外への研究展開: 人工ゲージ場と光格子の組み合わせにより、強相関トポロジカル絶縁体を中性原子で理論的にシミュレートすることで系統的に研究する。中性原子気体の超流動、中性子超流動、カラー超伝導におけるトポロジカル励起の研究を行う。下図に、いくつかの研究テーマの例を模式的に示した。

学理の構築

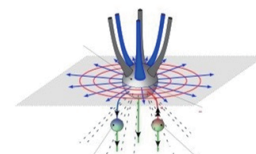
- ・エキゾチック準粒子の性質解明
- ・トポロジカル不変量に基づく新物質・新現象の説明と予言、および普遍的物理現象と法則の探索



冷却原子気体中の量子渦・モノポール共存系



超流体ヘリウムのトポロジカル量子相転移



中性子星・高密度クォーク物質中のトポロジカル励起