

1. 研究領域名：(2202) 対称性の破れた凝縮系におけるトポロジカル量子現象
2. 研究期間：平成22年度～平成26年度
3. 領域代表者：前野 悦輝（京都大学・大学院理学研究科・教授）

#### 4. 領域代表者からの報告

##### (1) 研究領域の目的及び意義

本新学術領域研究「対称性の破れた凝縮系におけるトポロジカル量子現象」（H22-H26年度）の目的は、超伝導体や超流動体、絶縁体、冷却原子などの量子凝縮系でしばしば発現する、トポロジカル不変量で特徴付けられる量子現象を分野横断的に研究することで、「トポロジカル量子現象」としての普遍概念を創出し、「トポロジカル量子物理学」という新たな学術分野の形成を目指すことにある。本領域の研究対象は、凝縮体全体すなわち「バルク」の対称性の破れに起因する量子凝縮現象、「エッジ」と呼ばれる表面・界面で発現するトポロジカルな現象、更に、両者の対応関係「バルク-エッジ対応」である。「エッジ」でのトポロジカル量子現象の理解には、「バルク」で創発する量子現象の徹底的な理解が基盤となる。

トポロジカル量子現象の研究は最近多種物質系で同時に急進展しており、異分野交流・連携によって真のシナジー効果が最大限に発揮できるフェイズにある。本領域では当該の各分野で世界の最先端で活躍する研究者を集め、「集中連携研究会」等を通じて異分野連携を格段に強化することで、分野間融合を強力に推し進める。また、「若手相互滞在プログラム」や「若手国際会議」なども通じて、分野横断型の研究視点と国際性をもった若手人材を育成する。トポロジカル量子現象の物理は、純粋にアカデミックな研究対象としての価値に留まらず、スピントロニクスや量子コンピュータなど、将来の高度な応用科学にとっても重要な基礎学理となると期待される。

##### (2) 研究の進展状況及び成果の概要

超伝導体や超流動体、絶縁体、冷却原子気体等でのトポロジカル量子現象の実証を進めた。新学術領域組織ならではの「集中連携研究会」を8回開催し、国際会議 TQP2012 を含む3回の「領域研究会」と「若手国際会議」は公開で開催、また「若手相互滞在プログラム」も10件実施した。

物質系を超えた共通概念形成に関する研究成果として：

(1) バルクのトポロジカル量子状態に対応するエッジ（表面や界面）状態の実証が、トポロジカル絶縁体などで進んだ。また、通常状態からトポロジカル量子状態への転移について、多様な物質系での知見が集積しつつあり、「トポロジカル量子相転移」としての共通認識が育ち始めている；

(2) 「奇周波数ペアリング状態」が、予想を超えて遍在する現象とわかり、トポロジカル・エッジ状態との対応範囲の理解も進んだ。超伝導体/常伝導金属（S/N）接合とのアナロジーから、超流動<sup>3</sup>Heでの実証実験も進めている。接合界面での状態密度と奇周波数振幅との厳密関係式も導けた；

(3) トポロジカル物質の分類「周期表」に対応して、冷却原子のボーズ・アインシュタイン凝縮体（BEC）など、内部自由度をもつ凝縮体の量子渦も分類出来、新奇トポロジカル励起の理解も進んだ。超伝導体では、非可換性が期待される半整数量子渦に関連する状態が観測できた。また、新たなトポロジカル量子状態も指数定理等を用いて基礎付けができ、「周期表」拡張の必要性を生んだ；

(4) その他、超流動<sup>3</sup>He-Aの固有軌道角運動量問題にも遂に解決の糸口が得られた。また、ドーピングによる超伝導トポロジカル絶縁体も「トポロジカル超伝導体」になることを明らかにした。

#### 5. 審査部会における所見

A+（研究領域の設定目的に照らして、期待以上の進展が認められる）

##### 1. 総合所見

本研究領域は、様々な量子凝縮系で発現するトポロジカル普遍量で特徴付けられる量子現象を分野横断的に研究することで、「トポロジカル量子現象」としての普遍概念を創出し、「トポロジカル量子物理学」という新たな学術分野の形成を目指すことを目的としている。当初計画を超えた全体的に内容のある成果が得られつつあり、計画研究、公募研究ともに極めて順調に進展している。共同研究についても着実な成果が認められ、広報や若手育成にも積極的に取り組むなど、意欲的な領域運営は高く評価できる。今後、他分野との連携を進め、本研究領域の成果の波及に努めることが期待される。更に「トポロジカル量子現象」としての普遍的概念の創出の捉え方、他分野への波及効果などに対する具体的なアプローチやゴールをより明確にしていくことが強く望まれる。

## 2. 評価の着目点毎の所見

### (1) 研究の進展状況

「多様な研究者による新たな視点や手法による共同研究の推進により、当該研究領域の新たな展開を目指すもの」としては、分野横断的な研究から世界の物性研究をリードする成果が次々と出始めており、各計画研究、公募研究ともに順調に研究が進展している。計画研究、公募研究間での共同研究の実施についての領域運営上の配慮もなされており、超伝導体、超流動体、絶縁体、冷却原子気体等、多岐にわたる物質系を対象とする各計画研究間での連携が進行し、「奇周波数ペアリング」「半量子渦」「マヨナラ準粒子」「エッジ流」といったキーワードで繋がる対象性の破れに伴う現象の普遍性を明確にする共同研究が進んでいる。

### (2) 研究成果

本研究領域は、「トポロジカル量子物理学」としての統一的・物質横断的理解を深める方向で、予想外の成果も含め、多くの優れた成果を挙げつつある。このことは論文数および国際会議への招待講演数にも現れており、各計画研究で世界水準の成果が順調に出ていると認められる。また論文発表の約30%が複数の計画研究間の共著論文、20%あまりが計画研究と公募研究間の共同研究であることから、異分野間の共同研究が着実に実を結んでいることが認められ、「多様な研究者による新たな視点や手法による共同研究の推進により、当該研究領域の新たな展開を目指す」としては、トポロジカル量子現象を中心概念とする新しい視点や手法が生まれてきていると評価することができ、今後この点のさらなる進展に期待する。一方で、「当該領域の研究の発展が他の研究領域の研究の発展に大きな波及効果をもたらすもの」としては、本研究領域の内容自体がさらに大きく発展し、他領域にも大きな波及効果を及ぼすために、現実の生活に役立つようなデバイスあるいは物質材料を生み出すことに繋がり得る筋道をいくつか示すことも重要だと思われる。今後これまでの研究成果をさらに進展させ、広い領域でより大きなインパクトを持つ成果として結実させることが期待される。

### (3) 研究組織

領域代表者の優れたリーダーシップが発揮され、各計画研究、公募研究の活動をサポートしている。共同研究の推進、震災への対応、広報活動など、領域運営に工夫が見られ、若手相互滞在プログラムや若手国際会議の開催など、様々な取組から若手研究者の育成にも努力していることが理解できる。

### (4) 研究費の使用

大型装置（MBE）費用も最小限に絞られており、効率的に運用されている。

### (5) 今後の研究領域の推進方策

「多様な研究者による新たな視点や手法による共同研究の推進により、当該研究領域の新たな展開を目指すもの」としては、個々の研究、共同研究、領域マネージメントで優れた成果が出てきており、今後さらなる活発な活動を期待する。また「当該領域の研究の発展が他の研究領域の研究の発展に大きな波及効果をもたらすもの」としては、他の分野への波及、連携、領域全体としての方向性を一層意識し、専門外の人間にも分かるような具体性を示すことが望まれる。