

氏名	川上 拓人
授与した学位	博士
専攻分野の名称	理学
学位授与番号	博甲第4754号
学位授与の日付	平成25年 3月25日
学位授与の要件	自然科学研究科 先端基礎科学専攻 (学位規則第5条第1項該当)
学位論文の題目	ボーズ・フェルミ超流動体のトポロジカル構造の微視的理論研究
論文審査委員	教授 市岡優典 教授 鄭 国慶 教授 大嶋孝吉 准教授 岡田耕三

## 学位論文内容の要旨

本論文には、非可換ゲージ場中の Bose-Einstein 凝縮(BEC)に関する理論研究(I) と、超流動  $^3\text{He}$  における秩序変数の空間構造とゼロエネルギー束縛状態に関する理論研究(II) の結果がまとめられる。

### (I) 非可換ゲージ場中の BEC の基底状態の研究

近年、中性原子気体へのレーザーを用いた"人工的な"非可換ゲージ場と、それに伴うスピン軌道相互作用の制御が実現しつつある。この系では、ゲージ場を外部から制御することによる、新しいトポロジカル相の実現や、BEC が非自明な空間変調を持つという観点から注目を集めている。

本研究の目的は、人工ゲージ場中の BEC で、新奇な秩序変数の空間構造を持った基底状態が実現すること、またその形成のメカニズムを明らかにすることである。本研究では、Rashba 型をより一般化した形式の非可換ゲージ場の下で現れる秩序変数の空間構造を统一的に理解することができる新しい概念"ヘリカル変調"を導入した。ヘリカル変調とは、スピン空間の秩序変数の回転角度が、回転軸方向に沿って実空間で変調する、秩序変数の空間構造である。

本論文では、この概念を応用することにより、(I-1)3 次元非可換ゲージ場中での  $F=1/2$  BEC の、安定なスカーミオン構造と、(I-2)2 次元非可換ゲージ場中での  $F=2$  BEC の秩序変数の空間構造という、2つのトピックスを明らかにした。特に、3 次元スカーミオンと呼ばれる構造は、素粒子論の世界である種の理論的な粒子として定義されて以来、未だ実現されていないトポロジカル構造である。(I-1)では、このような 3 次元スカーミオンと呼ばれるトポロジカル構造が熱力学的に安定となる可能性を初めて指摘することで、非可換ゲージ場中の BEC が、素粒子の理論の実験的検証の舞台となり得る可能性を示したものである。また(I-2)では、5 成分の BEC を取り扱うことで、ヘリカル変調の概念をさらに拡張し、 $1/3$  量子渦格子などの非自明な秩序変数の空間構造が実現しうることをしめした。

### (II)超流動 $^3\text{He}$ の秩序変数の空間構造と、ゼロエネルギー束縛状態の理論研究

スピン自由度がないカイラル  $p$  波超流動/超伝導状態の渦は、渦中心に Majorana ゼロエネルギー準粒子状態を束縛し、渦は、非可換統計性と呼ばれる非自明な統計性に従う。一方、スピン自由度がある場合、このような超流動/超伝導体では、半整数量子渦(HQV)と整数量子渦(SV) が実現する可能性があり、非可換統計性が実現するかどうかは、自明でない。というのも HQV が実現する場合、非可換統計性を持つことが知られているが、(II-1)HQV が熱力学的に安定解となりうるかどうかは非自明な問題であり、また(II-2) SV に関しては、Majorana ゼロエネルギー準粒子がスピンの自由度を持つため、このスピン自由度がどこまで渦の統計性に効くかが知られていないためである。本論文ではこれらの問題を、現象論的 Ginzburg-Landau (GL) 理論と微視的 Bogoliubov-de Gennes 理論を相補的に用いて明らかにした。問題(II-1)に関しては、GL 理論に組み込まれる強結合補正効果が HQV を不安定化される要因になるという問題点を初めて指摘し、そのような不安定性を克服して HQV を実現するためには、強磁場中で異なるスピン成分の Fermi 面を Zeeman 分裂させれば良いということを提案した。また、問題(II-2)に関しては、BdG 方程式を数値的に解析することで、極めて強磁場中では SV も非可換統計性に従う可能性があることを明らかにした。

## 論文審査結果の要旨

本学位論文では、ボーズ粒子とフェルミ粒子それぞれの冷却原子気体や超流動ヘリウムで実現する多成分超流動状態において、渦やスカーミオン構造などの興味深いトポロジカル構造について微視的理論研究を行なった。主な研究成果は以下の通りである。

### (I) 非可換ゲージ場中のBose-Einstein凝縮(BEC)の基底状態に関する理論研究

近年、中性原子気体において、レーザーを用いた人工的な非可換ゲージ場導入とスピン軌道相互作用の制御が実現しつつある。この系では、ゲージ場を外部から制御することにより、新しいトポロジカル相が実現する可能性があり注目を集めている。本研究では、人工ゲージ場中のBECで実現する新奇な秩序変数の空間構造を持つ基底状態について、ヘリカル変調の構造に着目して研究を行なった。これにより、

(1) 3次元的非可換ゲージ場中でのスピン $F=1/2$ のBECにおける安定なスカーミオン構造を調べ、3次元スカーミオンと呼ばれるトポロジカル構造が熱力学的に安定となる可能性を初めて指摘した。そして、その3次元的多成分秩序変数の空間構造を具体的な計算により特定した。

(2) 2次元的非可換ゲージ場中でのスピン $F=2$ でのBECの5成分秩序変数の空間構造を詳細に解明し、 $1/3$ 量子渦格子など非自明な秩序変数の空間構造が実現しうることを示した。

### (II) 超流動ヘリウム3の秩序変数の空間構造とゼロエネルギー束縛状態に関する理論研究

カイラル $p$ 波超流動の渦状態は、渦中心にMajorana型のゼロエネルギー準粒子状態を束縛し、渦が非可換統計性と呼ばれる非自明な統計性に従うため注目されている系である。本研究では、この系がスピン自由度を持つ場合の渦状態について研究を行なった。これにより、

(3) 非可換統計性を持つ半整数渦が熱力学的に安定解となりうる条件について強結合補正効果を考慮して評価し、高磁場中であれば半整数渦が実現することを示した。

(4) 通常の整数渦も、極めて強磁場中であれば非可換統計性に従う可能性があることを明らかにした。

学位審査は、学位論文、および、審査会での口頭発表と質疑応答により行なった。本学位論文の成果は、超伝導・超流動における興味深いトポロジカル状態に関する研究の発展に寄与する成果を報告しているといえる。よって、博士(理学)の学位に値する内容であると判定する。