

論文審査の結果の要旨

氏名 内野瞬

本論文は8章からなる。第1章では研究の背景が述べられている。第2章、第3章では、それぞれアルカリボース原子の一体問題、多体ボース系についての解説が与えられている。第4章、第5章ではそれぞれ、スピン1ボース・アインシュタイン凝縮体(BEC)、スピン2 BEC の主に基底状態についての成果が述べられている。第6章では南部・ゴールドストーンモード (NG モード) についての解説とスピン1、スピン2のBECにおけるNGモードについての議論が与えられている。第7章ではスピン2 BECのネマティック相における擬南部・ゴールドストーンモードについての研究成果が報告されている。第8章にはまとめと結論が述べられている。

内部自由度としてスピン自由度を持つ BEC は **spinor BEC** と呼ばれ、1998年に実験的に初めて実現した。**spinor BEC** は希薄気体、低温で実現するため、相互作用を擬ポテンシャルの方法で扱うことができ、微視的なハミルトニアンが分かっているという特長を持つ。また相互作用の効果をフェッシュバハ共鳴、光格子などの機構を用いて制御することができるという実験上の特長をも有する。また内部自由度の存在により、基底状態の相図において多彩な相構造、特徴的な励起状態、位相欠陥を有するといった豊かな物理的内容を包含している。本論文は、スピン1、スピン2の **spinor BEC** の基底状態、励起状態に関する新たな知見を引き出した理論研究に関するものである。

第4章で述べられているスピン1の **spinor BEC** の基底状態・励起スペクトルに関する研究において、内野氏らは平均場近似(**tree** 近似)に対する1ループの量子補正までを考慮した基底状態エネルギーを求め、それに基づき相互作用の大きさと二次ゼーマン効果の大きさの平面上で相図を決定した。また各相におけるボゴリューボフ励起の分散関係を求めた。内部自由度のない希薄ボース気体における **Lee-Huang-Yang** のくりこみの処方箋を拡張し、くりこまれた結合定数を用いて物理量の表式が求められた。**spinor BEC** における量子補正を1ループの範囲で初めて求めたこと、基底状態、音速、圧力などの物理量の解析的表式を得たところに本章で述べられた成果の意義が認められる。

第5章では第4章と同様な計算をスピン2の **spinor BEC** に対して行った研究成果が述べられている。その成果の主な意義は、平均場近似における相図と量子補正を入れた相図が異なる点にある。磁場がゼロの場合の基底状態としては、相互作用の大きさによって、平均場近似では強磁性相、サイクリック相、ネマティック相の3つの相が実現し得ることになる。一方量子補正を入れた場合、ネマティック相がさらに一軸性ネマティック相と二軸性ネマティック相に分裂する。このことは先行研究でも数値的には知られていたが、解析的に示したのは本研究が初めてである。

第5章での得られた知見を背景にスピン1、2 **spinor BEC** におけるギャップレス励起の構造をより深く考察したのが第6、7章である。特に重要な論点は、スピン2のネ

マティック相にある。平均場近似では、ネマティック相が実現する相互作用領域で、一軸性ネマティック相、二軸性ネマティック相と二面体相(dihedral phase)の3つの相が縮退していることが指摘され、その結果として5つのギャップレスモードが存在することが指摘された。この場合、5つのモードのすべてがNGモードではなく、うち一つ(2軸性ネマティック相、二面体相の場合)ないし二つ(一軸性ネマティック相の場合)は擬NGモードと呼ばれるモードであると内野氏らは指摘した。擬NGモードは、平均場近似(tree レベル)ではギャップレスだが、量子補正を入れるとギャップが開く励起のことである。このモードは、今の場合、異なる相が、平均場レベルで縮退してしまうことに起因して生じる。本章における成果のうち、特に重要なものとして(1)5章で見出した平均場近似の相図と量子補正を入れた場合の相図の違いを、平均場近似でのいわば「偶然縮退」が量子補正によって解ける、すなわち vacuum alignment 問題と位置づけたこと、(2)そのことに対応して擬NGモードが存在すること、(3)量子効果の有無の物理的帰結のひとつとして位相欠陥の安定性/不安定性を例示したこと、の3点があげられる。

本論文の研究成果は4章、5章については Physical Review A 誌の原著論文一篇として既に報告されており、6、7章の成果については Physical Review Letters 誌1篇の原著論文として既に掲載されており、さらにもう一篇の原著論文として投稿準備中である。

なお、本論文で述べられている結果は、4、5章については小林未知数氏、上田正仁氏との共同研究の成果であり、6、7章について小林未知数氏、新田宗土氏、上田正仁氏との共同研究の成果である。しかし論文提出者が主体となって分析および検証を行ったもので、論文提出者の寄与が十分であると判断する。

したがって、博士(理学)の学位を授与できると認める。