

## 論文審査の結果の要旨

氏名 湯川英美

内部自由度としてスピン自由度を持つボースアインシュタイン凝縮体(BEC)はスピノル BEC と呼ばれ、1998 年に実験的に初めて実現した。スピノル BEC の特長の一つは内部自由度の存在によってもたらされる非自明な動力学的性質である。本論文は、スピン 1 の内部自由度を持つスピノル BEC の動力学的性質に関する新たな定式化と知見を引き出した理論研究をまとめたものである。

本論文は 5 章からなる。第 1 章では研究の背景としてスピノル BEC の概説が与えられている。第 2 章では本研究に密接に関連した先行研究であるスピノル BEC の強磁性状態の流体力学的定式化について説明が与えられている。第 3 章、第 4 章では本研究の主要な結果について記述されている。第 3 章ではスピン 1 スピノル BEC の任意の状態に対する流体力学的定式化の導出が与えられ、第 4 章では、その流体力学的定式化を通して得られる物理的描像と、それに基づいて見出された新たな回転モードについて説明が与えられ、また超流動速度の循環の量子化の破れを表す表式(一般化された Mermin-Ho 関係式)の導出と説明が与えられている。さらにこの章では基底状態まわりの線形化励起の分散関係を求め、Gross-Pitaevskii 方程式に基づく先行研究の結果との比較を行う、先行研究との整合性を確認している。第 5 章にはまとめと結論が述べられている。

スピノル BEC 実現当初から、実験結果が多成分 Gross-Pitaevskii 方程式によってよく記述されることが知られていた。一方で、スピン自由度に関連した非自明な動力学的性質が期待され、内部自由度の動力学をより見通しよく記述し、新たな物理的描像を与え得る別の定式化も試みられている。そのようなものとして流体力学的方程式による動力学の定式化が知られている。スピノル BEC における強磁性状態(空間の各点において、磁気モーメントの大きさが最大値をとり、かつ向きは空間的に変化する状態)における流体力学的方程式はすでに先行研究で与えられ、強磁性体におけるランダウ・リフシッツ方程式と類似の動力学方程式が得られている。しかし、スピノル BEC の任意の状態に適用可能な流体力学方程式はこれまで導かれていなかった。

本研究の主な成果はスピン 1 の BEC の任意の状態で成り立つ流体力学方程式を導出したことにある。それらの方程式系は、質量密度、超流動速度、局所磁化ベクトル、そしてスピン演算子の 2 階対称テンソルで与えられるネマティックテンソルを流体力学的変数とし、4 種の方程式(質量密度、運動量密度、局所磁化ベクトル、ネマティックテンソルに関する「連続の方程式」タイプの方程式)からなる閉じた方程式系をなす。この方程式系は多成分 Gross-Pitaevskii 方程式と等価であり、線形化励起について同等な結果が得られている。

この成果の意義は、第一に BEC でネマティックテンソルが本質的役割を果たす初め

での流体力学方程式である点にある。先行研究で対象とされた強磁性状態のようにスピン空間で一軸対称性を持つ場合には、ネマティックテンソルは磁化ベクトルと独立な情報を与えないので、質量密度、運動量密度、局所磁化ベクトルだけで閉じた流体力学方程式で系の動力学が記述できてしまう。一方スピン空間で一軸対称性を持たない状態ではスピンドYNAMIXにネマティックテンソルが関与し、スピンドYNAMIXも非自明なものになる。その意味でスピン空間で一軸対称性を持たない状態でも成立する本研究成果は重要な意義を持つ。

本研究の成果の第二の意義は、質量密度、超流動速度、局所磁化ベクトル、ネマティックテンソルで閉じた方程式をなすことを示した点にある。これ以上の流体力学変数が現れない理由の一つとして局所磁化ベクトルとネマティックテンソルが閉じた代数をなしていることが挙げられる。

本研究の成果の第三の意義は、導出した流体力学方程式からネマティックテンソルの新たな回転モードを発見し、実験による検出方法を提案したことにある。流体力学的方程式から、磁化がネマティックテンソルに対してトルクを与えることが見て取ることができ、無磁場の（したがってスピンの保存量になる）状態で、磁化が分極した状態におけるネマティックテンソルが空間的に一様に歳差運動する回転モードの存在がただちに示唆される。実際にそのような運動が流体力学方程式から解析的に導かれた。

以上のように本研究成果はスピン 1 BEC が持つ非自明な動力的性質を記述する枠組みを与え、対称性や物理量の代数的性質から、非自明な動力的性質を見通し良く整理することを可能したという意味で学位論文に値するものである。

本論文の研究成果は原著論文として投稿準備中である。本論文で述べられている結果は、上田正仁氏との共同研究の成果であるが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。