

論文審査の結果の要旨

氏名 ゲン タン フク

冷却原子系は、高度に制御可能な状況で量子力学的な現象を実現できる系として、近年注目を集めている研究対象である。実験技術の長足の進歩による実験研究の急速な進展は、既存の理論の検証の新たな舞台を提供するだけでなく、理論研究に対して新たな興味深い課題も提供している。ボース粒子である原子の冷却によるボース・アインシュタイン凝縮はその代表的な例である。スピンあるいは擬スピンを持つ原子を凝縮させることにより、「スピノルボース・アインシュタイン凝縮体（スピノルBEC）」が実現され、新たな研究分野が開拓された。ボース・アインシュタイン凝縮体の性質は、多くの場合には一種の平均場近似に基づくグロス・ピタエフスキー(GP)方程式によって定量的に記述することができる。しかし、量子ゆらぎが強い場合には、平均場近似が破綻しGP方程式で記述できない現象が存在する。ボース粒子の多体系における量子ゆらぎの効果を相互作用に関する摂動論によって系統的に取り込む理論的枠組として、ベリアエフ理論が知られている。しかし、スピノルBECについては、その計算の煩雑さからか、これまでベリアエフ理論の適用はなされて来なかった。しかし、実験研究の状況からも、スピノルBECにおける量子ゆらぎの理論的解明は急務となっている。本論文は、このような背景のもと、スピノルBECにベリアエフ理論を適用していくつかの興味深い現象を具体的に論じたものであり、以下の8章からなる。

第1章は序論として、本研究の背景と動機を説明している。第2章では、スピノルBECの物理をレビューしており、特にスピノルBECの示す多彩な相とその間の相転移について、平均場理論の範囲での知見を紹介している。第3章では、スカラー（スピンを持たない）BECについてのベリアエフ理論のレビューを行っている。これらに続く以下の4章が本論文のオリジナルな内容である。

第4章では、スピノルBECにおける相転移にベリアエフ理論を適用し、準安定状態の出現する条件を議論している。スピノルBECの示す多彩な相はそれぞれスピン空間において異なる対称性を持つため、異なる相を隔てる相転移は1次転移となる。通常、1次転移は準安定状態の出現を伴うが、量子ゆらぎを線形の範囲で扱うボゴリウボフ理論の範囲内では準安定状態は存在しない。しかし、実験的には準安定状態の存在が示唆されており、高次の量子ゆらぎを取り込んだ理論が必要となる。そこで、スピノルBECに対するベリアエフ理論を定式化し、2次のファインマン図形に対応する寄与を全て取り込んだ解析を行った。その結果、例えば一軸性ネマティック相とサイクリック相の1次転移近傍に準安定状態が出現することを示しただけでなく、準安定状態が存在する相互作用のパラメータ領域を予言することにも成功した。一方、例えば強磁性相とサイクリック相の間の1次転移では大きく状況が異なり、相境界直上で存在する拡大された対称性のために準安定状態の存在が禁止されることを明らかにした。

第5章では、前章で議論した、相境界上の拡大された対称性のために準安定状態が禁止される場合について、相転移近傍でのダイナミクスを解析している。このような場合には、1次転移であるにもかかわらず、2次転移の場合と類似した臨界的な挙動がダイナミクスにも現れることを指摘している。

第6章では、平均場近似の範囲ではギャップレスとなる擬南部・ゴールドストーン(NG)モードが量子ゆらぎによって小さなギャップを獲得することをベリアエフ理論に基づいて示している。このことは定性的には以前から予想されていたが、定量的な解析は本論文ではじめて行われた。その結果、相互作用のパラメータによっては、以前の予想とは異なりギャップがゼロ点エネルギーよりも大きくなり得ることがわかった。

第7章では、スピノルBECにおける種々の準粒子が凝縮体と相互作用して2つの準粒子に崩壊するベリアエフ減衰を議論している。その結果、準粒子の種類によって異なる減衰率を導出した。特に、擬NGモードに対応する励起については保存則の制約により寿命が長くなること、またフォノンの減衰にはスカラーBECには存在しない項が低運動量で支配的になることを見出した。

第8章では、全体のまとめを行っている。

以上のように、本論文ではスピノルBECにベリアエフ理論を適用した系統的な解析を行い、量子ゆらぎによって誘起される準安定状態や擬NGモードのギャップなど多くの定量的な結果を得た。これらは、理論的にも今後の実験的研究の観点からも非常に興味深いものである。本論文は、上田正仁氏らとの共同研究に基づいているが、本人の寄与は主体的で十分であると認められる。

よって、論文審査委員会は全員一致で博士（理学）の学位授与が適当であると認めた。