

氏名	水島 健
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2894号
学位授与の日付	平成17年 3月25日
学位授与の要件	自然科学研究科基盤生産システム科学専攻 (学位規則第4条第1項該当)
学位論文の題目	Collective and Individual Excitations of Spatially Inhomogeneous Superfluid Phases in Ultracold Quantum Gases (極低温量子気体における空間的非一様な超流動相の集団及び個別励起)
論文審査委員	教授 町田 一成 教授 原田 勲 教授 大嶋 孝吉

学位論文内容の要旨

We theoretically investigate the low-energy structure of spatially inhomogeneous states due to the presence of vortices and kink structure in the Bosonic and Fermionic superfluid. This thesis can be divided into three categories: (i) the collective modes and their damping processes of a single-vortex line. (ii) The complete collective-excitation spectra of vortex-lattice states are discussed, based on the fully microscopic theory. We have identified and classified the complete collective excitation spectra in single-vortex and vortex-lattice states. In addition, it has been found that the presence of a vortex causes the dramatic change of the collective-excitation spectra and their damping mechanism. Furthermore, (iii) the possibility of the spatially modulated superfluid phase in two-component Fermi gases is also discussed. Flexible key parameters, such as the population difference and the coupling constant, allow us to explore the suitable condition to clearly realize the FFLO state in the extensive range.

論文審査結果の要旨

当研究は中性アルカリ原子気体のボーズ・アインシュタイン凝縮 (BEC) の実験的成功とその後の理論的実験的な研究の発展の中で遂行されたものである。

Rb や Na 等の中性原子を光学トラップを用いて冷却すると原子の超微細状態を生かしたまま BEC 状態を実現することができる。これはスピナー-BEC と呼ばれている。この内部自由度を有する BEC 系は ^3He 超流動と類似の系となっており、興味深い物理の研究対象である。申請者はこの系の渦を考察した。微視的なハミルトニアンから理論を出発させ、3成分グロス・ピタエフスキー(GP)方程式を導いた。それを円筒対称性の仮定の下で解き、Mermin-Ho 渦(或は Skyrmion)と呼ばれる特異な渦構造が安定になることを明らかにした。又、それがトポロジカルに安定に存在し得る物理的理由を考察した。申請者のこの提案は、その後 MIT の Ketterle 等によって Na 原子を用い、磁場反転法で位相を操作することによって実験的に実現した。更に申請者は Mermin-Ho 渦が多数ある場合の渦糸格子を研究した。

Rb 原子を磁氣的にトラップし、系を回転させると量子渦が生成できる。この渦に摂動を加えることによって集団励起を調べることができる。一連のそうした実験を念頭において、GP 方程式と Bogoliubov-de Gennes 方程式を連立して解くことにより、集団励起構造を微視的に研究した。渦一本の場合、渦糸の方向に振動する Kelvin モードを詳しく調べた。特に四重極励起との結合の様子を計算し、Landau 減衰過程を通して Kelvin モードが重要な役割を果たしていることを見出した。これによってフランスの ENS グループが行った実験に一つの説明を与えることに成功した。

渦格子が集団的に振動する Tkachenko モードについても研究を行った。系を高回転状態におき摂動を与えることでこの渦の面内振動モードを実験的に調べることが出来る。実際コロラド大学の Cornell 等によって実験的に観測された。申請者は回転速度の関数として Tkachenko モードのエネルギーを計算し、臨界回転速度に向かうに従って、このモードがソフトになることを示し、実験データを定量的に説明した。

以上の一連の研究は、この分野に新たな知見を加えるものであり、博士の称号に値するものと判断できる。