

論文内容の要旨

論文題目 Study of Low-energy Excitations
in Bose-Einstein Condensates
and in Superfluids
Separated by an Obstacle

(障壁により隔てられた
ボース-アインシュタイン凝縮体
及び超流動体における
低エネルギー励起の研究)

氏名 渡部昌平

冷却原子気体におけるボース-アインシュタイン凝縮 (BEC) の実現は、物性物理の分野に大きな衝撃を与えた。液体ヘリウムや冷却原子気体における実験、理論を通して、BEC や超流動の理解が深化しつつある現在において、BEC 及び超流動における基礎的な問題に現代的な視点から再度取り組むことは意義深い事である。そのような背景から、障壁が存在する非一様系における BEC および超流動体の励起について研究を行った。本論文は、その研究成果をまとめたものである。

本論文には、ボース-アインシュタイン凝縮体における励起のポテンシャル障壁に対する散乱、及び屈折と反射の性質の解明、また、超流動の安定性についての新たな研究成果がまとめられている。本研究では、Gross-Pitaevskii 方程式と、そこからの揺らぎを記述する Bogoliubov 方程式といった、平均場理論を用いて解析を行った。

ポテンシャル障壁に対する BEC の励起のトンネル問題は、これまでも研究がなされており、低エネルギー極限で励起はポテンシャルの影響を受けずに完全透過するということが分かっている。初等的な量子力学における一粒子のポテンシャル障壁に対するトンネル問題において、低エネルギー極限における完全反射が知られていたため、この現象は異常トンネリ

ングと名付けられた。その後、対称な形を持つポテンシャルに対して様々な研究がなされている。

しかしながら、3次元の球状のポテンシャルに対する BEC の励起の散乱断面積は、古典波動におけるレイリー散乱と同じ波数依存性を持つことが示され、低エネルギー励起においてポテンシャル障壁の影響が無視される現象は、朝永-Luttinger 液体においても知られていた。したがって、これまで行われてきた非常にシンプルな系における結果からでは、何が BEC の系において本質的なことで、何が他の系と共通なものであるかが分からないままであった。

そこで、我々はより一般的な系を対象とすることで、BEC の励起におけるトンネル問題の研究を行った。具体的には、密度の異なる BEC をポテンシャル障壁の両側に接合した系と、内部自由度を持つ BEC について、その特性を解明した。

密度の異なる BEC を接合した場合の結果は第3章にまとめられている。低エネルギー極限における反射係数、透過係数の特色は、流体における古典波動論の帰結とは異なり、Brewster の法則を満たす点であることをまず解明した。Brewster の法則は、入射角と屈折角の和が 90 度を満たすとき、完全透過を示すという法則で、電磁波の一つの偏光が異なる媒質を屈折するときに見られる。さらに、垂直入射における透過係数は、弱く相互作用する一次元 Bose 系 (Luttinger パラメータが 1 以上の異なる二つの朝永-Luttinger 液体) を接合した時の結果と一致することが分かった。本研究を通して、BEC の低エネルギー励起における Brewster の法則、平均場理論が適用できない一次元系との関連性を見いだした。

一方、内部自由度を持つ BEC として、シンプルな系の一つである spin-1 の BEC を対象に、励起のトンネル問題の研究を行った。この系は、強磁性相とポラー相といった二つの相を持ち、また各相は内部自由度に伴い、スカラー BEC と対応する Bogoliubov 励起や、spin-1 BEC に特徴的なスピン波といった 3 つの励起を持っている。spin-1 BEC の励起に対する散乱問題はこれまでに手が付けられておらず、それぞれの励起がどのように散乱を受けるかは、未知であった。本論文の第4章にはこの研究の成果がまとめられている。

本研究を通し、強磁性相の四重極的スピン揺らぎのモードのみが長波長極限で完全反射を示し、その他のモードは完全透過することを解明した。この強磁性相における四重極的スピン揺らぎのモードの異常は波動関数に顕著にみられ、ポテンシャル障壁の存在により長波長極限における波動関数がゼロとなり、完全反射に至ることを解明した。また、強磁性相のスピン波は Bogoliubov 励起と同様長波長極限で完全透過を示すが、密度の異なる凝縮体を接合することで、その振る舞いが異なることがわかった。強

磁性相のスピン波は Bogoliubov 励起と異なり屈折せず、その透過係数は励起の位相速度によらず障壁の両側に広がっている磁化の密度で決定されることを解明した。また、結合定数や磁場の依存性、可積分条件における透過の性質等の議論をまとめた。

BEC における励起のポテンシャル障壁に対する散乱問題は、超流動が流れている状態においてもなされてきた。この系の特徴は、定常的に安定な超流動体の臨界速度において、励起の完全透過性が失われ、部分透過になることである。これらは、密度揺らぎを表す波動関数の低エネルギー領域における出現によって理解されている。これらの先行研究の知見を用いて、一様系と非一様系における超流動の安定条件について研究を行った。その結果が第 5 章にまとめられている。

一様系の超流動の安定条件は、ランダウの判定条件が知られている。これは、系の励起スペクトルに着目するものである。しかしながら、この判定条件は並進対称性のない非一様系には適用できないことが分かっている。本論文では、動的構造因子を拡張し、空間依存性をあらわに取り入れた局所密度スペクトル関数によって、超流動の安定性を判定することを提案した。提案する判定法は、以下ようになる。「安定な超流動では、低エネルギー領域における局所密度スペクトル関数のエネルギーを底としたときの指数が、系の次元に一致する。臨界速度ではこの指数が次元よりも低いものになる。」この判定法は、エネルギースペクトルの異常であるランダウの判定条件を含んでいるので、一様系、非一様系にも適用可能なものである。また局所密度スペクトル関数と自己相関関数の関係から、自己相関関数の動的な性質をみることで超流動の安定性を議論することができる。このように、一様系、非一様系に対して、局所密度スペクトル関数をもちいて、超流動の安定性を議論した研究はこれまでになく、超流動に対する新たな知見を与えるものである。

本論文の研究成果は、いずれも新たな研究成果を含んでおり、ボース系における励起に新たな視点を与えるものである。