

論文審査の結果の要旨

氏名 渡部 昌平

本論文は「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」(Study of Low-energy Excitations in Bose-Einstein Condensates and in Superfluids Separated by an Obstacle)と題し、7章からなる。第1章はイントロダクションであり、研究の背景および本論文の主目的について述べている。第2章では後の議論に必要な理論的な枠組みを概観している。3章以下がオリジナルな研究である。第3章は、密度が異なるボース凝縮体接合の透過および反射の問題を議論している。密度の異なるボース凝縮体をポテンシャル障壁に対して接合した系を考え、励起の反射と屈折の性質を解明した。得られた低エネルギー極限における透過係数の表式は、電磁気学における Brewster の法則と類似の法則が成立することを明らかにした。また、一次元系を記述する朝永ラッティンジャー液体の超伝導相では、ポテンシャル障壁に対する完全透過性が知られていた。異なるラッティンジャーパラメータを接合した結果と本研究の結果を比較し、同一の表式で記述されることを示した。また、その背後に位相の励起があることを指摘した。第4章では、スピン1のBECにおける励起のトンネル問題を議論している。励起のトンネル問題を多角的に調べるため、スピン1ボース系の性質を調べた。まず、各固有モードが散乱を通じて混ざらない事を示し、各固有モードの透過係数を求めた。結果として、強磁性相における四重極モード以外は長波長極限で完全透過することを明らかにした。また、この研究を通して、次のような一般的な性質が解明された。まず、励起として、外場によらない本質的なエネルギーギャップをもつものは完全反射し、そうでなければ分散関係によらず完全透過する。完全透過する励起の波動関数は、凝縮体波動関数と同じ形を長波長極限で持つ。一方、完全反射の原因は、その振幅がポテンシャル障壁の影響でゼロになることである。また、Bogoliubov 励起とスピン波は、オーダーパラメータの振幅がインピーダンスとなって透過係数に現れることを明らかにした。第5節では、超流動の安定性を議論している。超流動カレントが流れている状態での励起のトンネル問題をもとに、超流動体の臨界速度における励起の振る舞いを研究し、非一様な超流動体における密度の動的応答を調べている。動的応答は、動的構造因子を用いて通常調べられるが、これは一様系に特化したものである。ポテンシャル障壁に対して流れる超流動体の性質を調べるには、動的構造因子を実空間に拡張した局所密度スペクトル関数を用いるのが都合がよい。これを用いて、超流動の安定条件を議論している。安定な超流動状態では、スペクトル関数の低エネルギーにおける指数が系の次元に一致し、臨界速度においてその指数が次元よりも小さくなる。この指数の減少は、臨界速度で密度揺らぎの質が定性的に変化し、増大することを意味する。第6章では、今後の展望について議論している。まず、ポテンシャル障壁に対する励起のトンネル問題について、冷却原子気体を用いた実験の可能性について議論している。また、スピン1でのトンネル問題と超流動の安定性における課題を考察し、また、超流動性の判定条件に関しては、渦を放出する場合、また非線形物理における分岐理論との関係、平均場理論を超えた強相関ボース系へ適用する可能性、超固体ではどうなるかという問題を提起した。第7章では、本研究で得られた結果を要約している。

なお、第3章から第7章までの研究は、加藤雄介氏との共同研究であるが、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ものと認める。