

論文審査の結果の要旨

氏名 高橋大介

本論文は 8 章からなる。第 1 章、第 2 章では非線形シュレーディンガー方程式（グロス・ピタエフスキー方程式）とボゴリューボフ方程式についての基本事項と先行研究の成果がまとめられている。第 3 章では本論文の後半部で述べられている研究に関連した話題に関する概説が与えられており、ボース・アインシュタイン凝縮系を非線形シュレーディンガー方程式で記述した場合のジョゼフソン接合系の先行研究と、凝縮体の素励起（ボゴリューボフ励起）の透過特性に関する先行研究（いわゆる異常トンネル効果と呼ばれる現象に関する理論研究）についてまとめられている。第 4 章から第 7 章までに申請者による研究成果が述べられている。第 4 章にはボース・アインシュタイン凝縮系にポテンシャルステップが存在する場合のボゴリューボフ励起の透過特性に関する研究成果が記述されている。第 5 章には非線形シュレーディンガー方程式におけるダークソリトンに散乱体としたときのボゴリューボフ励起の透過特性についての研究成果、第 6 章にはスピンを内部自由度として持つボース・アインシュタイン凝縮系に関連する可積分非線形シュレーディンガー方程式とその定常解周りのボゴリューボフ励起に関する成果、第 7 章には、スピン 1 の内部自由度を持つボース・アインシュタイン凝縮系に対する多成分非線形シュレーディンガー方程式に関する成果が述べられている。第 8 章にはまとめと今後の展望が述べられている。

非線形シュレーディンガー方程式は、特に空間一次元の系に関しては可積分系の一つとして数多くの研究がすでになされている。超伝導体、磁性体、量子光学、冷却原子系のボース・アインシュタイン凝縮体と関連するという意味において、物理や工学の文脈においても非線形シュレーディンガー方程式の解の導出とその性質の吟味、方程式の一般化は重要である。非線形シュレーディンガー方程式をボース・アインシュタイン凝縮体の時間発展を記述する方程式とみなしたとき、定常解まわりの微小振動、あるいは素励起を記述するのがボゴリューボフ方程式である。本論文は非線形シュレーディンガー方程式とボゴリューボフ方程式に関する理論的研究をまとめたものである。

第 4 章で述べられているポテンシャルステップのボース・アインシュタイン凝縮体のボゴリューボフ方程式の透過特性については、これまではポテンシャルステップがある系においてボース・アインシュタイン凝縮体も部分反射を受け、ボゴリューボフ方程式の透過特性（低エネルギー極限での部分透過）もそれとの関連で理解できると議論されてきた。高橋氏はポテンシャルステップがある系において凝縮体もポテンシャル差の値によっては完全に透過する（無反射透過）ことを示した。ボゴリューボフ励起の透過特性に関する先行研究の物理的解釈に批判を与えた点に本章で述べられた成果の意義が認められる。

第 5 章で述べられているソリトンを散乱体とみなした状況におけるボゴリューボフ

励起の透過係数のエネルギー依存性の結果の意義は、非線形項をより一般化した非線形シュレーディンガー方程式に関する結果であること、またソリトンが非自明な臨界速度を持つ場合、臨界速度近傍におけるボゴリューボフ励起の透過反射特性に、非線形方程式の分岐点近傍に現れる動的スケール則が成り立つことを見出したこと、の2点である。

第6章における可積分な多成分非線形シュレーディンガー方程式の再定式化とそれに関連したボゴリューボフ励起の解析的表現の導出については、ボゴリューボフ方程式のスピン1のボース・アインシュタイン凝縮体のダークソリトンの解の周りでの一般解を導出した点が高橋氏のオリジナルな寄与と認められる。

第7章におけるスピン1のボース・アインシュタイン凝縮体を記述する非線形シュレーディンガー方程式については、質量流とスピン流がともに存在する場合の定常解を構成し、その安定性条件を得た点、それをもとに障壁を導入したジョゼフソン接合系におけるスピン流と質量流がともに存在するジョゼフソン定常流解を構成した点に高橋氏のオリジナルな寄与があると認められる。

本論文の研究成果は5章、6章についてはそれぞれ *Physica D* 誌、*Journal of the Physical Society of Japan* 誌に単著論文として既に報告されており、4、7章の成果については投稿準備中である。

なお、本論文で述べられている結果のうち、7章については新田宗土氏との共同研究の成果である。しかし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（学術）の学位を授与できると認める。