氏　　名	倪 放
学 位 の 種 類	博 士 （ 理学 ）
学 位 記 番 号	博 甲 第 8943 号
学位授与年月日	平成 31年 3月 25日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
審 査 研 究 科	数理物質科学研究科
学 位 論 文 題 目	

Requantization of time-dependent mean field for pairing collective motion in superfluid nuclei
(超流動核における対励起集団運動に対する時間依存平均場再量子化)

主　　査	筑波大学教授	理学博士	矢花一浩
副　　査	筑波大学教授	博士(理学)	中務 孝
副　　査	筑波大学教授	博士(理学)	小沢 顕
副　　査	筑波大学講師	理学博士	橋本幸男
副　　査	新潟大学教授	理学博士	松尾正之

論　文　の　要　旨

本論文は、時間依存平均場理論に基づいて微視的な波動関数を構成する新しい理論を提唱し、さらにそれを対相関模型に適用して、原子核において対相関が引き起こす集団現象を解析することで、理論手法の有用性を示している。

陽子と中性子の数が偶数である原子核（偶々核）の低エネルギー励起スペクトルには、不思議な性質を示すスピン・パリティが $J^\pi = 0^+$ の量子数を持つ励起状態が数多く観測され、核構造研究における謎の一つとされている。この謎の解決に向け、これまで多くの研究が行われてきたが、解決に至っておらず、困難かつ重要な課題であると言える。これまでの理論的・実験的研究から強く示唆されるのは、中重核領域における偶々核の励起 $J^\pi = 0^+$ 状態には、対相関が強く関わっているということである。対相関とは、核子が $J^\pi = 0^+$ の対（ペア）を組んでエネルギーを下げようとする比較的短距離の核子間相互作用に由来する相関である。重い原子核において対相関が重要な役割を果たす $J^\pi = 0^+$ 励起の微視的記述には、未解決の課題が多く残され、新たな理論の開発が求められており、本論文における研究動機の一つはここにある。

原子核において、陽子同士あるいは中性子同士の核子クーパー対が凝縮することで、基底状態のエネルギーを下げることは良く知られており、Bardeen-Cooper-Schrieffer (BCS) 理論、あるいはその一般化である Hartree-Fock-Bogoliubov (HFB) 理論によって記述することができる。これは、固体中の電子が低温においてクーパー対を作って凝縮することで超電導になるのと類似した現象で、核子超流動（nuclear

superfluidity）と呼ばれる。基底状態がこのような凝縮相にあると、特徴的な素励起モードとして、対回転と対振動に代表される「対励起モード」が期待される。これらの対励起モードを特徴付ける観測量としては、陽子や中性子の数が2個異なる原子核の基底状態間、あるいは基底状態と励起状態を繋ぐ核子対励起の遷移確率が挙げられ、実験的には、2核子移行反応を用いてその性質を調べることができる。理論的には、対回転は秩序変数（ギャップ・パラメータ）の位相の回転運動、対振動はギャップ・パラメータの振幅（絶対値）の振動に対応する集団運動と理解されているが、原子核のように顕著な殻効果が現れる有限多体系において、これらの単純な描像がどこまで正しいか自明ではない。本論文では、これらの対励起状態に対して、ハミルトニアンの対称性を保存した微視的記述を与えている。

対励起モードの理論的な記述としては、これまで、準粒子乱雑位相近似と、対ギャップ・エネルギーを集団変数と仮定した集団模型が主に用いられてきた。しかし、前者は微小振幅近似に基づいているために、現実の原子核で観測されている多くの低励起状態の性質を再現することができない。一方後者は、原子核の四重極変形・振動・回転の記述に成功したボーア模型に類似したアプローチであり、ギャップ・パラメータを集団変数とした模型ハミルトニアンを用いるため、集団性の弱い対励起モード（特に対振動）の定量的な記述には成功していない。そこで、本論文では、時間依存 Hartree-Fock-Bogoliubov (TDHFB)理論に基づく新たなアプローチとして、EBK(Einstein-Brillouin-Keller)量子化条件を満たす TDHFB 軌道を用いて、基底状態・励起状態の波動関数を一般化スレーター行列式の重ね合わせとして記述する方法を提唱している。これは、経路積分で記述した波動関数を、停留位相近似（SPA）で求めることに対応しており、TDHFB 理論で計算されたダイナミクスを再量子化することでエネルギー固有状態を決定する方法であると言える。しかし、EBK 量子化は、可積分系に対してのみ適用可能であるため、一般の非可積分系への応用が次の大きな課題となる。この問題を解決する方法として、本論文は、断熱型自己無撞着集団座標(ASCC)法を用いて集団部分空間を抜き出すことで、近似的な可積分系を抽出する方法を提唱している。さらに、この ASCC+SPA 法を、対相関ハミルトニアンに適用し、厳密解と比較することで、提唱した理論手法の有用性を示している。また、鉛の原子核の低励起 $J^{\pi} = 0^{+}$ 状態の解析に応用し、中性子対振動状態の性質を予言している。最後に、この手法を現実的な系に応用する際の問題点についても述べられており、将来に向けた課題や解決へのヒントが議論されている。

審　査　の　要　旨

〔批評〕

本論文は、フェルミ粒子多体系のエネルギー固有状態（基底状態・励起状態）に対する微視的な波動関数を一般化スレーター行列式の重ね合わせとして構築する理論手法を提唱しており、これを用いて、不定性なく、様々な物理量や異核種の原子核を繋ぐ遷移強度を計算することができるようになった。微小振幅近似に依らずに、集団運動状態の波動関数を構築する一般的な手法として、これまでの理論の問題点を克服する理論手法だと言える。一般化スレーター行列式の重ね合わせとしてエネルギー固有波動関数を記述する理論としては、生成座標法(GCM)が古くから有名であるが、GCM は基本的に、与えられたヒルベルト空間においてハミルトニアンを対角化することで波動関数を決定している。しかし最近、GCM を現実的な密度依存有効相互作用へ応用する際に、対角化に伴う多くの問題（特異性、連続極限など）

があることが明らかになった。このため、重い原子核に対するGCM計算は近年ほとんど行われていない。本論文で提唱する理論は、GCM のこれらの問題を回避する新たな手法としても、大きな意味があると言える。本論文では、特に原子核における対相関に焦点を当てた解析を行っているが、より一般的・汎用的なエネルギー密度汎関数を用いた TDHFB 理論に対しても適用可能な理論であり、今後の更なる発展が大いに期待できる成果だと言える。

〔最終試験結果〕

2019 年 2 月 18 日、数理物質科学研究科学位論文審査委員会において審査委員の全員出席のもと、著者に論文について説明を求め、関連事項につき質疑応答を行った。その結果、審査委員全員によって、合格と判定された。

〔結論〕

上記の論文審査ならびに最終試験の結果に基づき、著者は博士（理学）の学位を受けるに十分な資格を有するものと認める。