論文審査の結果の要旨

氏名　遠藤晋平

本論文は６章から成り、第１章では緒言と研究の背景が述べられている。

第２章では、本論文で研究されている冷却原子の少数系を扱う理論的基礎が詳述されている。　まず、２体散乱における散乱長が発散するユニタリー領域において、普遍的に現れる３体束縛状態としての Efimov トライマーについて､それを記述する基礎方程式と普遍性の起源を解説したのち、質量に非対称性がある場合の３体フェルミ粒子系に現れる Kartavtsev-Malykh トライマーの存在とその普遍性が論じられている。さらに、ゼロレンジの２体相互作用を用いて Efimov トライマーを記述する場合に必要な３体パラメータに関する実験と理論の現状が解説されている。

第３章、第４章、および第５章は、本論文の核心部分となっている。

第３章では、質量の異なる２種類のフェルミ粒子からなる３体系に焦点を当て、これまで知られていた Efimov トライマーと Kartavtsev-Malykh トライマーが､質量比の関数としてどのように関連しているかが研究されている。特に、ゼロレンジ相互作用の 3 体問題を扱うのに適した Skorniakov--Ter-Martirosian 方程式を数値的に解析することで、Kartavtsev-Malykh トライマーと Efimov トライマーを連続的に繋ぐ新しいトライマー（クロスオーバートライマー）の存在を見出している。この新しいトライマーは、s 波散乱長と３体パラメータのみで決まるという意味で普遍性を持っていることが示されている。さらに、このクロスオーバートライマーが現れる領域が、質量比と 3 体パラメータの空間で同定されている。

第４章では､Efimov トライマーの記述に本質的な３体パラメータについての研究がなされている。３体パラメータの起源は何か、なぜ３体パラメータには普遍性があるのか、という問題に焦点を当て、低エネルギーFaddeev 方程式に基づいた解析が行われている。特に３粒子が互いに近づくと、波動関数の非断熱的変形が２体力の短距離部分により引き

起こされ、その結果として強い３体斥力が誘起されることが示されている。さらに、この機構のもとで、様々な有限レンジ２体相互作用について、３体パラメータと２体散乱の有効距離に強い相関があることが示されている。

第５章では、縮退した１成分フェルミ粒子からなる媒質に埋め込まれた重い粒子の N 体束縛状態について、重い粒子間の相互作用が媒質の高密度極限でゼロになることが、ボルン-オッペンハイマー近似のもとで厳密に証明されている。この結果は、フェルミ粒子からなる媒質中では、Efimov 効果をはじめとする少数系特有の現象が抑制されることを示している。

第６章では、本論文で得られた結果のまとめと、今後の展望が記述されている。

本論文では、ユニタリー領域にある質量バランスが崩れた３粒子系に関して、異種のトライマーを繋ぐ新しいクロスオーバートライマーの存在が示されるとともに、３体パラメータの普遍性に関する物理的背景が明らかにされている。さらに、フェルミ粒子からなる媒質中にある重い粒子間の相互作用に関する定理が証明されている。これらの成果は、少数量子系について新たな知見をもたらし、冷却原子を用いた実験的検証の可能性を拓くものとして大きな意義を持つ。

なお、本論文の主要部である第３章、第４章および第５章の内容は、上田正仁氏、Pascal Naidon 氏との共同研究であるが、論文提出者が主体となって理論的解析を行ったもので、論文提出者の寄与が十分であると判断する。

以上の観点から、申請者に博士（理学）の学位を授与できると認める。