

# 論文審査の結果の要旨

氏名 吉田 周平

冷却原子気体の実験的研究の発展に伴い、量子力学的な少数多体系の多彩な状況での精密観測が可能となり、理論的研究の機運も高まっている。量子力学的な少数多体系においては、相互作用の到達距離よりも大きなスケールで普遍性が発現することが知られており、理論的にも実験的にも興味が持たれている。本論文は、このような背景のもと、量子力学的な少数多体系におけるいくつかの普遍的な現象を論じたもので、7章からなる。

第1章では、序論として、量子力学的な少数多体系において普遍性が発現する機構と基本的な例であるユニタリーフェルミ気体を紹介し、論文の構成を示している。第2章では、冷却原子系において相互作用を制御する強力な手法であるフェッシュバッハ共鳴をレビューし、またフェッシュバッハ共鳴の近傍で相互作用する原子系の有効模型を構成して後の議論の準備を行っている。

第3章から第6章が本論文の主要部分であり、独自の研究成果の報告が行われている。第3章では、異方的な $p$ 波相互作用を行うフェルミ気体における普遍的関係式を論じている。先行研究で扱われた $s$ 波相互作用を行うフェルミ気体では運動量 $p$ の大きな領域における運動量分布関数が普遍的に $p$ の-4乗に比例するが、このときの比例係数はエネルギーを散乱長の逆数で微分して得られる量と等しくTan's contactと呼ばれている。本論文で扱う $p$ 波相互作用を行うフェルミ気体では運動量分布が普遍的に運動量 $p$ の-2乗に比例するが、軸対称性が破れた一般的な $p$ 波相互作用系では、このときの比例係数は複数のチャンネルの存在に対応してTan's contactをテンソルに拡張したもので与えられることを見出した。また、同じテンソルがエネルギーを散乱体積の逆数で微分しても得られることも示した。さらに、2光子ラマン過程を利用して散乱体積を制御・測定し、普遍的関係を実験的に検証する方法も提案している。

第4章では、ボース粒子系に、ボース粒子と質量の等しい不純物粒子を加えたときに生じる束縛状態を論じている。ボース粒子と不純物粒子の間のみ $s$ 波相互作用が働くとしても、不純物粒子が複数のボース粒子と3量体や4量体などの束縛状態を形成することがある。本論文では、近距離における相互作用の詳細が異なる2つのモデルによってこれら束縛状態のエネルギーを計算した結果、ユニタリー極限においてもモデルの詳細に依存する値を得た。しかし、束縛状態のエネルギーなどの物理量の適切な比を取った無次元量は、モデルによらず普遍的であることを示した。

第5章では、第4章で議論した不純物粒子の質量が無限大の極限を論じている。この極限では、系をボース粒子版のアンダーソン不純物模型に帰着させることができ、解析的な取り扱いが可能となる。その結果、束縛状態のエネルギーが散乱長に対して対数的な依存性を普遍的に示すことを見出した。

第6章では、ボース気体中の不純物粒子を論じている。不純物粒子は周囲のボース粒子と相互作用するため、単独の粒子とは異なった性質を持つ。これを、結晶格子中の電子が形成するポーラロンとのアナロジーでボース・ポーラロンと呼ぶ。ボース・ポーラロンのエネルギーは、ボース気体の密度を含む様々なパラメータに依存する。しかし、本論文では、ボース気体の密度を三体相互作用のパラメータでスケールすれば、低密度領域では適切にスケールしたエネルギーがモデルによらない普遍的なふるまいを示すことを見出した。特に、低密度の極限では、第4章で議論した最低エネルギー状態である4量体のエネルギーに漸近する。4量体のエネルギーと有限密度でのボース・ポーラロンのエネルギーのずれは、より多体の相関を反映しており、第4章の議論の一般化になっている。さらに、この章で考察したような不純物系のエネルギーを、パルス電磁波による超微細状態間の遷移を用いて実験的に測定する方法についても論じている。

第7章では全体のまとめが行われ、今後の展望が論じられている。

以上のように、本論文では、冷却原子系に現れうるいくつかの具体的な状況で、量子力学系における少数多体効果を理論的に精緻かつ定量的に解析を行っている。さらに、物理量自体は相互作用のモデル化の詳細による場合も、適切なスケールリングを行うと、モデルの詳細によらない普遍的なふるまいが見いだせることを指摘した。これは、少数多体系の物理として理論的に興味深いのみならず、今後の実験的研究にも有用な示唆を与えるものである。なお、本論文は上田正仁氏、Meera M. Parish氏らとの共同研究に基づいているが、本人の寄与は主体的で十分であると認められる。よって、論文審査委員会は全員一致で博士（理学）の学位授与が適当であると結論した。