

学 位 審 査 報 告 書

(ふ り が な) 氏 名	ふじはら ゆうすけ 藤原 祐介
学位 (専攻分野)	博 士 (理 学)
学 位 記 番 号	理 博 第 号
学位授与の日付	平成 年 月 日
学位授与の要件	学 位 規 則 第 4 条 第 1 項 該 当
研 究 科 ・ 専 攻	理学研究科 物理学・宇宙物理学 専攻
(学位論文題目) 光格子中の冷却フェルミ原子気体の基底状態の解析	
論 文 調 査 委 員	(主査) 川上 則雄 教授 松田 祐司 教授 高橋 義朗 教授

理 学 研 究 科

(続紙 1)

京都大学	博士（理学）	氏名	藤原 祐介
論文題目	光格子中の冷却フェルミ原子気体の基底状態の解析		
(論文内容の要旨)			
非一様なポテンシャルを持つ系においては、非一様な粒子密度分布を持つことに起因して、種々の量子状態が競合・共存した状態が実現することが期待されている。本論文ではそのような系の1つである光格子系に注目し、トラップポテンシャル中での冷却フェルミ原子気体の基底状態の性質を明らかにしている。特に、低次元系における多体効果に注目し、様々な格子形状、相互作用に対する系統的な解析を行っている。その際、局所近似、平均場近似を超えて相関効果を扱うことができる手法である変分モンテカルロ（VMC）法を用いた解析を行い、空間変調した秩序状態試行関数やサイト依存変分パラメータを導入することで非一様さの効果を扱う方法を提案している。 1次元光格子中で斥力相互作用するフェルミ原子においては、適当な大きさの相互作用の下で、系の特定の領域において局所的にモット絶縁体を実現することが期待される。ここでは様々な変分試行関数を用いて VMC 解析を行うことで、局所的なモット絶縁体領域の実現に対し、サイト依存した局所相関とサイト間相関効果が重要な役割を果たしていることを見出している。また、スピン相関や密度揺らぎなどの種々の物理量の振る舞いについて解析を行い、特定の領域において増大した相関効果により、金属状態とモット絶縁体状態の共存状態が安定化されることを明らかにしている。これらの解析を通じて、トラップポテンシャルを持つ系の解析に対する多変数変分試行関数を用いた VMC 法の有効性と堅牢性を確認している。 2次元光格子の解析においては、斥力相互作用、引力相互作用の下で期待される空間変調した秩序状態に注目して解析を行っている。斥力相互作用を持つ系の解析では空間変調した反強磁性秩序を持つ試行関数に対しサイト間のスピン相関効果を考慮することで、スピン相関によるエネルギー利得がモット絶縁体状態の安定性に重要な役割を果たすことを明らかにしている。一方、引力相互作用の下では、適当な大きさの相互作用の下で超流動状態が実現する。このとき、超流動状態の特定の領域においては、密度波状態に対する強い不安定性を持つことを見出している。この不安定性は原子間の相関効果により増大しており、微小の摂動に対して密度波状態が安定化されるとともに、超固体状態の実現し得ることを示している。加えて、トラップポテンシャルが観測量にどのように影響するかについて解析を行い、ノイズ相関関数に現れる超流動状態の特徴を明らかにしている。 冷却原子系での高温超流動の実現は重要な課題の一つである。トラップ中での超流動状態の安定性を議論するために t-J 模型を用いて梯子型光格子の解析を行っている。この解析により、強い斥力相互作用の下では $d_{x^2-y^2}$ 波的な対称性を持つ超流動状態が実現すること、フェルミ面近傍における局所状態密度を反映したペアポテンシャルが現れることを見出している。また、相関効果を詳細に議論することで、高密度領域における有効的なスピン交換相互作用により超流動状態が実現することを示している。加えて、その領域における運動エネルギーの繰り込みの効果が超流動状態の安定性に重要な役割を果たす、という非一様系に特有な振る舞いを明らかにしている。			

(論文審査の結果の要旨)

本論文で、藤原氏は近年実験的にも理論的にも注目を集めている冷却フェルミ原子気体における相関効果を解析している。特に、光格子フェルミ系に注目し、トラップポテンシャルおよび粒子相関が超流動基底状態に与える影響を明らかにしている。このような「非一様系における相関効果」は、理論的取り扱いの困難な問題として認識されている。藤原氏は、平均場近似を超えてこのような非一様系での相関効果を扱うため変分モンテカルロ法を多変数系に拡張し、これを最適化するアルゴリズムを提案している。この方法を応用し、低次元フェルミ原子系において格子形状や相互作用が超流動基底状態に与える影響を明らかにしている。

藤原氏の提案した手法が強力なものであることは、1次元光格子中における斥力フェルミ原子系の具体的な解析を通して示されている。この系では、粒子間斥力が大きくなると特定の空間領域において局所的にモット絶縁領域が実現する。様々な試行関数を用いることで、サイト依存した粒子相関が基底状態の性質に重要な役割を果たすことを明らかにし、同時にこの解析を通じて本論文で提案した多変数変分モンテカルロ法が空間変調を持つ系の解析に有効であることを示している。

次に、斥力および引力相互作用をもつ2次元フェルミ系の解析を行っているが、特に引力フェルミ系での解析結果が興味深い。引力系では適当な大きさの引力の下で超流動状態が現れるが、特定の空間領域において原子密度波への不安定性が生じること、さらにこの不安定性は原子間の相関効果により増幅されていることを明らかにしている。その結果、微小摂動に対して密度波状態が安定化され、超固体状態が実現し得ることを見出している。実験的な立場に立ち、実測可能なノイズ相関関数を調べ、トラップされた超流動状態がノイズ関数にどのような影響を与えるか明らかにしている点も高く評価される。

さらに、斥力相互作用による非従来型超流動の可能性を議論するため、トラップポテンシャルを含む梯子格子型 t - J 模型の性質を調べている。その結果、斥力相互作用が強い極限で dx^2-y^2 波的な超流動状態が実現すること、さらにペアポテンシャルはフェルミ面近傍の局所状態密度を反映した形状を持つことを見出している。また、高密度領域における交換相互作用によって超流動状態が安定化すること、さらに運動エネルギーの繰り込み効果が超流動状態実現に重要な役割を果たすことを見出している。

このように、本論文は光格子フェルミ系の基底状態に対する相関効果とトラップポテンシャルの効果を明らかにしたものである。この成果は冷却原子系のみならず、空間変調を持つフェルミ系への相関効果の基礎を与える研究として高く評価される。

公聴会においても、藤原氏は入念に準備された明快な発表を行い、基本的な質問や専門的な質問にも丁寧に答え、高い学識を有していることをアピールした。

よって、本論文は博士（理学）の学位論文として価値あるものと認める。また、平成22年1月14日、論文内容とそれに関連した口頭試問を行った。その結果合格と認めた。