

機関番号：24506

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2008～2010

課題番号：20540390

研究課題名(和文) 動的平均場理論に基づく光学格子中の冷却フェルミ原子の研究

研究課題名(英文) Study on cold fermionic atoms in optical lattices based on a dynamical mean field theory

研究代表者

菅 誠一郎(SUGA SEICHIRO)

兵庫県立大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：40206389

研究成果の概要(和文)：動的平均場理論に基づき、光格子中の冷却フェルミ原子を調べた。2軌道を持つ系では軌道間隔と引力に依存して、原子密度波、超流動、バンド絶縁体が現われることを明らかにし、引力から斥力までの相図を得た。また、バンド幅の違いを考慮すると、狭いバンドではBCS-BECクロスオーバーが起こることを示した。次に、3成分内部自由度(カラー自由度)を持つ系を調べ、低温で現れるカラー原子密度波は、温度増加に伴い弱相関領域から強相関領域において、フェルミ流体、カラー選択型モット状態、ペアモット絶縁体へと相転移することを明らかにした。これら2つのモット状態は3成分系に特徴的な新奇なモット状態で、光会合分光により観測可能であることを示した。

研究成果の概要(英文)：We investigated cold fermionic atoms in optical lattices by using a dynamical mean field theory. We showed that in the two-band systems the atomic density-wave, the superfluid, and the band insulating states appear depending on the orbital splitting and the attractive interaction. We obtained the phase diagram from the attractive to the repulsive interactions. We next showed that the band-selective BCS-BEC crossover occurs in the two-band system with the different band-widths. We further investigated three-component (color) cold fermionic atoms in optical lattices. We showed that color density-wave state in the low-temperature region changes into the Fermi liquid state, the color-selective Mott state, and the paired Mott insulator depending on the strength of the repulsive interaction, as temperature is increased. These two Mott states are characteristic of the three-component system and can be detected by a photo-association spectroscopy.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2009年度	500,000	150,000	650,000
2010年度	500,000	150,000	650,000
2011年度	0	0	0
2012年度	0	0	0
総計	2,200,000	660,000	2,860,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・原子・分子・量子エレクトロニクス

キーワード：冷却フェルミ原子、光格子、動的平均場理論、超流動、モット転移

1. 研究開始当初の背景

レーザー冷却されたフェルミ原子系の研

究が国内外で理論・実験の両面から活発に進められている。この系ではフェッシュバハ共鳴により、原子間相互作用を引力から斥力まで変化させることが出来る。さらに、光格子中に冷却原子を置くことも可能になった。乱れの無い結晶である光格子は格子の次元やポテンシャルの深さも制御することも出来る。本研究では、光格子中のフェルミ原子系において初めて超流動を観測した実験に注目した。⁶Li 原子を用いたこの実験では光格子ポテンシャルを深くすると、超流動から絶縁体へと相転移する様子も観測された。実験条件から相互作用の大きさは、最低エネルギーのバンドと第一励起状態のバンド間隔程度である。従って、この実験結果を解析するためには、強相関効果と多バンドの効果を正確に取り入れ、1) 超流動-絶縁体転移を調べその相図を求め、2) 絶縁体がバンド絶縁体かモット絶縁体かを決定し、3) モット絶縁体での磁氣的性質や軌道秩序を調べる必要がある。今後、相互作用を系統的に変化させて光格子中のフェルミ原子における超流動-絶縁体転移を調べ、それぞれの状態の性質を明らかにする実験が行われると考えられる。従って、非摂動的方法に基づく多体効果と多バンド効果の理論研究を進めることは急務の課題である。

2. 研究の目的

動的平均場理論に基づき、光格子中の冷却フェルミ原子の性質を理論的に調べる。動的平均場理論は、強相関電子系における電子相関効果を正確に調べることが出来る非摂動論的方法として知られている。様々な軌道間隔において引力相互作用を弱相関から強相関まで変化させ、超流動-絶縁体転移に伴う次の問題を調べる。

(1) ノーマル状態と超流動状態のエネルギー差を計算して BCS 超流動かフェルミ原子のペ

アボゾンによる BEC かを明らかにし、BCS-BEC クロスオーバーを調べる。

(2) 準粒子励起の繰り込み因子や各バンドのフィリングを調べ、絶縁体がモット絶縁体かバンド絶縁体かを解明する。

(3) 軌道間隔や軌道間相互作用を系統的に変化させて(1), (2)の計算を行い、超流動状態・バンド絶縁体・モット絶縁体に関する相図を得る。

(4) 冷却フェルミ原子に対する閉じ込めポテンシャルの効果を取り入れて、上記の問題を調べる。特に、相関関数を計算してモット絶縁体の磁氣的性質や軌道秩序について調べる。さらに、計算を有限温度に拡張し、実験との対応を議論する。

3. 研究の方法

(1) 光学格子中のフェルミ原子系を 2 軌道 (2 バンド)・引力ハバードモデルで記述する。系を表すパラメータは、跳び移り積分、同一軌道内の引力、異なった軌道間の引力、交換相互作用、バンド間隔である。各サイトの光学格子ポテンシャルを調和ポテンシャルで近似し、これらのパラメータを反跳エネルギー E_r と光格子ポテンシャルの深さ V_0 で表す。実験は E_r と V_0 を制御して行われるため、パラメータは実験と直接対応させることが出来る。2 サイト動的平均場近似を超流動が扱えるよう拡張して、超流動-絶縁体転移に関する以下の問題を調べる。

① 超流動状態とノーマル状態でのエネルギーを比較し、相互作用エネルギーの低下による BCS 超流動か、運動エネルギーの低下によるペアボゾンのボーズ・アインシュタイン凝縮 (BEC) かを明らかにする。そして、超流動の BCS-BEC クロスオーバーが起こるパラメータについて調べる。

② 準粒子励起の繰り込み因子、各バンドのフィリング、超流動秩序パラメータを計算す

る。バンド絶縁体、モット絶縁体、超流動状態ではこれらの量が特徴的な値を取るので、系を表すパラメータを系統的に変化させてこれらを計算し、超流動・バンド絶縁体・モット絶縁体に関する相図を求める。そして実験結果と比較して、

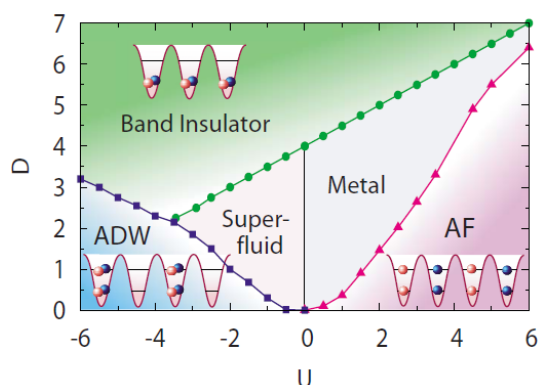
- ・観測された超流動がBCS-BECクロスオーバーのどの領域に当たるか、
- ・観測された絶縁体はモット絶縁体かバンド絶縁体か、
- ・光学ポテンシャルの深さをどのように制御すれば、それぞれの絶縁相が観測されるか、などを明らかにする。

③ 引力相互作用が強い場合はフェルミ原子対がボゾンを作り、そのボゾンの跳び移り積分とボゾン間相互作用の大小関係でモット絶縁体へ転移するかどうか決定されると予想される。このことを確かめるために、元のハミルトニアンを引力相互作用が強い極限から展開して、有効ボゾンモデルを導出する。そして、数値的に求めた②の結果と比較して、超流動-モット絶縁体転移の物理的描像を明らかにする。

4. 研究成果

(1) 光格子中の冷却フェルミ原子気体の超流動-絶縁体転移に対する多軌道の効果を、動的平均場理論を用いて調べた。その結果、ハーフフィリングにおいて引力が弱い領域では、軌道間の分裂幅(D)が小さい場合の基底状態は原子密度波状態であることを明らかにした。Dが増加すると原子密度波から超流動へ1次転移し、さらにDが増加すると原子密度波からバンド絶縁体に2次転移をすることが分かった。引力が強い領域では原子密度波がDの大きい所まで広がっており、Dの増加に伴い原子密度波からバンド絶縁体へと1次転移する。ここで得られた

原子密度波状態が多軌道の効果によることを確かめるため、有効モデルを導出した。そして2個のフェルミ原子によるペアボゾン間の相互作用は、元のフェルミ原子の軌道間相互作用とDで与えられることを示した。さらに有効モデルの基底状態は、ペアボゾンが同一サイトの2軌道を占有し隣接サイトは空の状態、すなわち原子密度波状態に他ならないことを明らかにした。同様の計算を斥力相互作用に対しても行い、引力から斥力に亘る原子間相互作用(U)と軌道間分裂幅に関するハーフフィリングでの相図を以下のように決定した。図中で、ADWは原子密度波状態、AFは反強磁性状態である。異なる色のフェルミ原子は内部自由度の違いを表す。



(2) 2軌道を持つ光格子中の冷却フェルミ原子気体においてバンド幅の違いを取り入れた解析を行なった。引力相互作用をする系のハーフフィリングを調べた結果、引力が弱い領域では超流動が現れ、引力を強くするとフェルミ原子のペアボゾンによるモット絶縁体へと1次転移することを明らかにした。さらに、超流動状態では、バンド幅の違いにより相互作用の繰り込みに違いが現れることを示した。特に、バンド幅の違いが大きい場合、引力が強くなるとフェルミ原

子によるペアボゾンが形成されるため繰り込みは著しく抑制される。そして、狭いバンドでは引力増加に伴い、BCS-BECクロスオーバーが起きる。軌道間隔、バンド幅の違い、引力相互作用を変化させて計算を行い、軌道選択型BCS-BECクロスオーバーを含めた超流動状態、モット絶縁体、バンド絶縁体に関する相図を得た。また、有効モデルを導出して、数値計算結果の定性的な説明を行なった。

(3) 動的平均場理論、および自己エネルギー汎関数法を用いて、3成分内部自由度（カラー自由度）を持ち斥力相互作用をする光格子中の冷却フェルミ原子について調べた。まずハーフフィリングの基底状態を調べた結果、斥力の異方性に依存してカラー選択型反強磁性状態と原子密度波が現われることを明らかにした。両者は等方的相互作用の系で縮退している。次に、有限温度の状態を調べた結果、弱相関領域から強相関領域にかけての原子密度波は、温度増加に伴いフェルミ流体、カラー選択型モット状態、ペアモット絶縁体へと相転移することを明らかにした。ここで、カラー選択型モット状態、ペアモット絶縁体は3成分フェルミ原子系に特徴的なモット状態であり、これらのモット状態は光会合分光により観測可能であることを示した。カラー選択型モット状態では2種類のカラーの原子がモット転移をし、3番目のカラーの原子は系を遍歴している。この遍歴する原子は非フェルミ粒子的振る舞いを示すことを明らかにした。その起源を調べるためにカラー選択型モット状態の低エネルギー有効モデルを導出し、それがファリコフ・キンボールモデルと等価であることを示した。遍歴する原子の非フェルミ流体的性質は、ファリコフ・キンボールモデルの観点から説明される。以上の結果から、光格子中の3成分冷却フ

エルミ原子系はファリコフ・キンボールモデルに対する量子シミュレータとみなすことが出来ることを指摘した。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計28件)

- ① Mott Transitions of Three-Component Fermionic Atoms with Repulsive Interaction in Optical Lattices
K. Inaba, S. Miyatake, and S. Suga, Phys. Rev. A vol. 82, 051602(R) (2010) (査読有)
- ② Three-Component Fermionic Atoms with Repulsive Interaction in Optical Lattices, S. Miyatake, K. Inaba and S. Suga, Phys. Rev. A vol. 81, 021603(R) (2010). (査読有)
- ③ Finite-Temperature Properties of Attractive Three-Component Fermionic Atoms in Optical Lattices, K. Inaba and S. Suga, Phys. Rev. A vol. 80, 041602(R) (2009). (査読有)

[学会発表] (計31件)

- ① 菅誠一郎, 稲葉謙介: "光格子中の3成分フェルミ原子気体のモット相隣傍における性質" 日本物理学会第66回年次大会、2011年3月25日、新潟大学 25aRD-7
- ② 菅誠一郎, 稲葉謙介: "光格子中の3成分斥力フェルミ原子系の有限温度での性質" 日本物理学会 2010年秋季大会、2010年3月24日、大阪府立大学 24aRP-3
- ③ 稲葉謙介, 菅誠一郎: "3成分の内部自由度を持つ冷却フェルミ原子気体の相転移: 有限温度の解析" 日本物理学会 第64回年次大会、2009年3月28日、立教大学 28pSK-14

[図書] (計0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計0件)

名称:

発明者:

権利者:

種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

○取得状況（計0件）

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.eng.u-hyogo.ac.jp/msc/msc11/SugaG.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

菅 誠一郎 (SUGA SEIICHIRO)

兵庫県立大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：40206389

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

()

研究者番号：