

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 19 日現在

機関番号：22604

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2009～2014

課題番号：21540410

研究課題名(和文) 光学格子上のボーズ・フェルミ混合原子気体が示す特異な静的及び動的性質

研究課題名(英文) Static and dynamical properties characteristic to Bose-Fermi atoms on optical lattices

研究代表者

森 弘之 (Mori, Hiroyuki)

首都大学東京・理工学研究科・教授

研究者番号：60220018

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：光学格子上のボーズ・フェルミ冷却原子気体を主な対象とし、閉じ込めポテンシャル、ランダムポテンシャル、準周期ポテンシャル、人工磁場、人工スピン軌道相互作用などの影響を、解析的アプローチと数値的アプローチの両面から包括的に理解することを目指した。これにより、閉じ込めポテンシャル中での混合系の局所モット状態およびその内部構造が明らかになり、また、ランダムポテンシャルや準周期ポテンシャルによる局在現象が異種原子間相互作用により変化する様子も理解が深まった。さらに中性原子にも作用するように人工的に作成された磁場やスピン相互作用を混合原子系が持つ場合の特異な振る舞いも明らかにした。

研究成果の概要(英文)：Mixtures of Bose-Fermi atoms on optical lattices were studied by taking account of the influences from confinement potential, random potential, pseudo-periodic potential, artificial magnetic field, and artificial spin-orbit interactions in order to comprehensively understand characteristic behaviors in both analytical and numerical approaches. In the study, a local Mott state of the mixtures in the confinement potential and its internal structure were clarified. Also the role of Bose-Fermi interactions on the localization phenomena of the mixtures in random or pseudo-periodic potentials was unveiled. It was also found how an artificially-created magnetic field and spin-orbit interactions affect the behavior of the mixtures.

研究分野：物性理論

キーワード：冷却原子系 原子気体 ボーズ・フェルミ混合系 量子モンテカルロシミュレーション 光学格子 Mott 転移

1. 研究開始当初の背景

磁場やレーザーにより原子を閉じ込める技術が確立して以来、さまざまな極低温量子凝縮系が作成されてきた。とくにボーズ原子とフェルミ原子の混合系は、異なる量子統計に従う粒子の集まった系として、特異な振る舞いが期待されている。レーザーの定在波により光学格子と呼ばれる周期ポテンシャルが実現したことから、とくにフェルミ原子系については固体物理との対比も進んでいる。しかしボーズ・フェルミ混合原子系は、固体に対比できる系がないということもあり、光学格子中での振る舞いについて詳しい解析が十分に行われていない状況にあった。

2. 研究の目的

本研究は、固体に対比できる系のない光学格子中ボーズ・フェルミ混合原子系の特異な振る舞いに目を向け、さまざまな状況を想定して集中的に解析することを目的とした。その際、解析的アプローチと数値的アプローチの両面から対象に迫ることとした。具体的に明らかにしたい点は以下の通りである。

- (1) 閉じ込めポテンシャル中の局所モット状態
- (2) フェルミ原子が引き起こすボーズ原子のモット状態
- (3) ランダムポテンシャルや準周期ポテンシャル中の局在現象
- (4) 人工磁場が引き起こす特異な現象
- (5) 人工スピン軌道相互作用が引き起こす特異な現象

3. 研究の方法

目的の欄に記載した各項目に沿って方法を示す。

- (1) 相互作用の強い領域でも確定的な結論を得たいため、量子モンテカルロシミュレーションコードを開発し、シミュレーションの実施を行う。
- (2) 実験で確認されているこの現象について、先行研究の不備を指摘し、モデルの導出およびそのモデルに基づいたシミュレーションを行う。
- (3) ランダムネスあるいは準周期性を扱うため、解析的アプローチには困難が伴うことから、シミュレーションを行う。
- (4) 磁場中粒子の振る舞いについて、相互作用を無視した場合には解析的に計算を行い、相互作用を考慮した場合には繰り込み群計算とシミュレーションの両方からアプローチする。
- (5) 電子系に対して開発されている解析手法をボーズ・フェルミ混合系に適用する。

4. 研究成果

目的の欄に記載した項目に沿って成果を報告する。

- (1) 閉じ込めポテンシャル中の局所モット状態はじめに光学格子上の混合原子系に特化した数値手法を開発する目的で、従来の量子モンテカルロシミュレーションの技法をボーズ・フェルミ混合系に拡張し、効率をよいコードを作成した。そしてボーズ・フェルミ混合系に関し、原子間相

相互作用が斥力の際に生じるモット状態を解析した。原子の閉じ込めポテンシャルの影響により、モット状態は局所的に発生するが、その内部にフェルミ原子とボーズ原子の粒子数比に依存した秩序相が見られることを数値シミュレーションにより明らかにした。(シミュレーションで扱ったシステムは 1 次元系であることから、観測された秩序は準長距離秩序である。)

さらに、閉じ込めポテンシャル中で形成される局所的モット状態では、粒子数が保存しない(すなわち隣接する超流動相との粒子の出入りがある)ため、モット状態内部でのボーズ原子とフェルミ原子の粒子数比はエネルギー的に安定な値に選ばれ、具体的には単純な整数比となる。結果として内部に現れる原子配列の準長距離秩序も、比較的単純なものとなることが数値的に示された。

- (2) フェルミ原子が引き起こすボーズ原子のモット状態

光学格子上で極低温まで冷やされた超流動状態にあるボーズ原子系に対しフェルミ原子を追加すると、モット状態に転移する実験が報告されている。この機構について理論的解析がこれまで行われてきているが、確定的な理論が確立されていない。通常、光学格子上の粒子の運動を考える際に用いるのが強結合近似であるが、本現象については強結合近似の範囲内では理論的に再現できないことがすでに知られている。そこで本研究では、強結合近似で従来無視されていた効果を取り入れることでより精密化した強結合近似ハミルトニアンを導出した。その有効性を確認するため、量子モンテカルロシミュレーションを実施したところ、有限のフェルミ原子濃度でボーズ原子系がモット転移の様子が観測された。

- (3) ランダムポテンシャルや準周期ポテンシャル中の局在現象

上述のシミュレーションコードに基づき、とくにランダムポテンシャルや準周期ポテンシャル中でボーズ・フェルミ混合系が示す特徴的な振る舞いの存在を指摘し、メカニズムを議論した。閉じ込めポテンシャルがない場合、ランダムポテンシャルでも準周期ポテンシャルでも局在現象が見られた。ただしボーズ粒子とフェルミ粒子の間の相互作用の符号および大きさによって定性的に大きく異なる振る舞いが発見された。

斥力相互作用の場合は、互いの粒子の存在により、局在が抑制され、金属状態(超流動状態)が実現された。たとえばボーズ粒子で局在状態を作り、そこにフェルミ粒子を導入することで、局在による絶縁体状態から超流動状態への転移が見られた。

一方、引力相互作用の場合は、ボーズ粒子とフェルミ粒子がともに局在するために相互作用を印加すると局在効果が強まるが、ある程度の強さの相互作用になると、新たなメカニズムにより非局在化が起きる。この新たに発見された非局在化のメカニズムについて数値シミュレーションにより明らかにするとともに、統計の異なる 2 種の粒子を混合させることによる単一種粒子と異なる

る物性について考察を行った

次に、解析手法および数値手法の開発を基礎とした、光学格子に閉じ込められたボーズ・フェルミ混合原子系が示す局在状態の成立条件の解析を行った。とくに混合系に特徴的な現象に注目し、その発生原因についてくわしい解析を目指した。上述のこれまで開発してきた効率をよいシミュレーションコードを利用し、ランダムポテンシャルや準周期ポテンシャル中でボーズ・フェルミ混合系が示す特徴的な振る舞いについて詳細な解析を行った。見出した主な特徴は以下の通りである。

・ランダムポテンシャルでも準周期ポテンシャルでも同様の局在現象が見られた。ただしボーズ粒子とフェルミ粒子の間の相互作用の符号および大きさによって定性的に大きく異なる振る舞いが発見された。

・ボーズ粒子とフェルミ粒子の間に斥力相互作用が作用する場合、非局在化現象が見られた。互いの存在により深いポテンシャルから抜け出ることができるためと考えられる。

・ボーズ粒子とフェルミ粒子の間に引力相互作用が作用する場合、引力が強いほど局在が進む。これは、フェルミオンの存在がポテンシャルを実効的に深くするためである。しかし特別な条件が整う環境では、ある強さの引力により非局在化が見られることがわかった。この条件を詳細に検討し、引力領域での非局在化の原因を明らかにした。この非局在化はこれまで指摘されたことのない新たな現象であり、原因も含めて明らかにできたことは高く評価されている。

(4)人工磁場が引き起こす特異な現象

冷却原子気体は中性原子であることから実磁場には応答しないが、空間変化するポテンシャルをさまざまな手法で生成することで、一様磁場に対応するベクトルポテンシャルと同じポテンシャルを作る出すことが実験的に可能になってきた。そのため、(仮想)磁場中の原子気体の問題が最近脚光を浴びている。そこで、2次元光学格子上のボーズ原子系に仮想磁場が印加された状況を想定し、ボーズ凝縮を起す転移温度の磁場依存性を解析した。具体的には、光学格子として正方格子を仮定し、1セル当りの磁束 ϕ を磁束量子 ϕ_0 を単位として $1/2$ 、 $1/3$ 、 $1/4$ 、 $1/5$ 、 $1/6$ にさまざまに変化させたケースについて転移温度を数値的に求めた。これにより転移温度の磁場依存性が明らかになり、ボーズ凝縮がもっとも安定化する磁場の大きさについても議論した。

また、電子系ではリング状の系に磁場を印加すると永久電流が生じることが知られている。リング形状に冷却原子系を閉じ込める技術や中性原子に仮想的な磁場を印加する技術が確立したことにより、磁場中低次元粒子系が原理的に作成可能になった。これにより、金属リングにおける永久電流と同様の現象が、冷却原子系でも観測される可能性が出てきた。そこで固体物理に対比できる系が存在しない1次元ボーズ・フェルミ混合系における永久電流の諸性質について理論的に解析を行った。とくに、量子モンテカル

ロシミュレーションにより得られた原子間相互作用の影響について、繰り込み群計算により解析的に検証したところ、定性的な理解を得ることに成功した。

(5)人工スピン軌道相互作用が引き起こす特異な現象

電荷を持たない中性原子はスピン軌道相互作用しないが、レーザーによる人工ゲージ場の作成に成功して以来、人工的なスピン軌道相互作用が実現可能となった。スピン軌道相互作用の効果は、電子系においては多くのことが調べられてきたが、ボーズ系、さらにはボーズ・フェルミ混合系については知見がほとんどなかった。そこでもっとも解析が遅れているボーズ・フェルミ混合系において、スピン軌道相互作用の効果調べた。とくに絶対零度での相図を思考関数を用いた変分法により解析し、混合の効果を明らかにした。

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11件)

(1) S. Suga, T. Egawa, A. Masaki, and H. Mori: Persistent Current in Bose-Fermi Mixture on a Ring, J. Phys. Soc. Jpn. 83, 024007 (2014). (査読あり)

(2) A. Masaki and H. Mori: Mott Transition of Bose-Fermi Mixtures in Optical Lattices Induced by Attractive Interactions, J. Phys. Soc. Jpn. 82 (2013) 074002. (査読あり)

(3) A. Masaki and H. Mori: Localization of Bose-Fermi Mixtures in One-Dimensional Incommensurate Lattices: J. Physics, 362 (2012) 112. (査読あり)

(4) A. Masaki and H. Mori: Quasi-Long-Range-Order in Mott State of Bose-Fermi Mixtures on One-Dimensional Optical Lattice, J. Phys. Soc. Jpn. 78 (2009) 064303. (査読あり)

(学会発表)(計41件)

(1) S. Suga, T. Egawa, A. Masaki, and H. Mori: Bose-Fermi Mixture on Ring Threaded by Magnetic Flux, Strongly Correlated Electron Systems, University of Tokyo, Tokyo, August 2013.

(2) A. Masaki and H. Mori: Localization of Bose-Fermi Mixtures in One-dimensional Incommensurate Lattices, 26th International Conference on Low Temperature Physics, Beijing, China, 8.10-17, 2011.

(3) A. Masaki and H. Mori: Mott Transition of Bose-Fermi Mixtures in Optical Lattices Induced by Attractive Interactions, 22nd International Conference on Atomic Physics, Cairns, Australia, 7.28, 2010.

(4) 正木晶子、森弘之: 幅広い相互作用領域に

おける光学格子上ボーズ・フェルミ混合系の数値解析、日本物理学会第64回年会、2009年3月27-30日(立教大学池袋キャンパス, 東京).

(図書)(計0件)

(産業財産権)

○出願状況(計0件)

○取得状況(計0件)

(その他)

ホームページ等

6. 研究組織

(1)研究代表者

森 弘之(MORI, Hiroyuki)

首都大学東京・理工学研究科・教授

研究者番号:60220018

(2)研究分担者

なし

(3)連携研究者

なし