

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 5 日現在

機関番号：24506

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23540467

研究課題名(和文) 光格子中に2種類の冷却フェルミ原子が共存する系における量子多体効果

研究課題名(英文) Quantum many-body effects of two-component cold fermionic atoms in optical lattices

研究代表者

菅 誠一郎 (Suga, Seiichiro)

兵庫県立大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：40206389

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,600,000円、(間接経費) 780,000円

研究成果の概要(和文)：我々は、光格子中の斥力相互作用をする3成分冷却フェルミ原子系における超流動を調べた。まず、2種類の斥力が他の1種類より強い場合、ハーフフィリング近傍に拡張s波超流動が現れる事を明らかにし、温度・斥力比・フィリングに関する相図を得た。次に、斥力の違いを抑制すると、超流動ペア対称性がd波に変化する事を明らかにした。従ってこの系は、超流動ペア対称性が制御可能な量子シミュレータと見做される。この系はまた、3成分6Liフェルミ原子ガスを光格子に置く事で実現可能である。本研究で得られた知見は冷却原子系の分野だけでなく、鉄系超伝導をはじめとする多軌道を持つ相関電子系での超伝導の研究にもインパクトを与える。

研究成果の概要(英文)：We have investigated superfluid of repulsively interacting three-component fermionic atoms in optical lattices. When two of the three repulsions are stronger than the other, extended s-wave superfluid appears close to half filling. We have determined the phase diagrams of the superfluid state in terms of temperature, the ratio of the repulsions, and filling. We have shown that when the difference in the repulsions is reduced, pairing symmetry changes into a d wave. Thus, the system can be regarded as a quantum simulator for controlling pairing symmetry of superfluid. The system can be realized using 6Li fermionic atoms in optical lattices. The findings provide insights into not only the study of cold atoms, but also the study of superconductivity in correlated electron systems with multiorbitals, such as Iron-based superconductors.

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 3成分内部自由度 斥力誘起超流動 クーパーペアの対称性の制御

### 1. 研究開始当初の背景

近年、レーザーで作られた光格子中にフェルミ原子を置いた系の研究が活発に行なわれている。光格子中の冷却フェルミ原子系は、あたかも固体の周期ポテンシャル中を運動する電子のようにみなすことができるが、通常の固体物理で扱う系とは著しく異なる以下の特徴を持つ。

- 1) 光格子は格子振動や乱れのない完全結晶である上、格子の次元、格子ポテンシャルの深さや周期を制御することが出来る。
- 2) フェッシュバハ共鳴を用いて、原子間相互作用を引力から斥力まで制御出来る。

これらの高い制御性を利用することで、通常の固体物理では実験が困難な現象に対する研究が行なわれている。 $^6\text{Li}$  原子で観測された超流動-モット絶縁体転移はその一例である。この観点から、光格子中の冷却フェルミ原子系は量子シミュレータとみなすことが出来、今後、量子シミュレータという観点からの冷却フェルミ原子系に関する研究は、加速度を増して進展すると予想される。ここでは、通常の固体物理では実験が困難な現象に対する研究だけでなく、冷却フェルミ原子に特有な新奇な量子多体効果の研究が活発に行なわれると考えられる。その研究の進展のためには実験研究はもちろん、非摂動論的手法に基づく理論研究が強く求められる。

本研究では、活発に研究され始めた以下の問題に注目する。

最近、 $^6\text{Li}$ - $^{40}\text{K}$ 、 $^{171}\text{Yb}$ - $^{173}\text{Yb}$  など 2 種類の冷却フェルミ原子を混合した系において、引力による新奇な超流動を実現するための実験が行なわれている。さらに、後者の系を光格子中に置く事で、ブリルアンゾーンの観測にも成功している。これら原子の質量比は、それぞれ約 6.7、1 であるが、さらに大きな約 28 の質量比を有する 2 種類の冷却原子  $^6\text{Li}$ - $^{174}\text{Yb}$  を磁気トラップすることにも成功し、2 種類の冷却フェルミ原子が混合した  $^6\text{Li}$ - $^{171}\text{Yb}$ 、及び  $^6\text{Li}$ - $^{173}\text{Yb}$  の実現も視野に入れた研究が進められている。一方、斥力相互作用系に対する研究結果は、私が知る限り発表されていない。それは、斥力に対応する安定な共鳴周波数を得る事の困難さに由来する可能性もあるが、光フェッシュバハ共鳴を使えば原理的に斥力の実現は可能である。

### 2. 研究の目的

当初の目的は、光格子中で斥力相互作用をする 2 種類のフェルミ原子が共存する系の性質を調べる事であった。ところが、研究を進めるうちに、斥力相互作用をする 3 種類のフェルミ原子が共存する系：光格子中の 3 成分斥力フェルミ原子において、斥力誘起超流動の可能性を見出した。この系は質量が等しい 3 種類のフェルミ原子の混合系とみなすことができる。光格子中の多成分斥力フェルミ原子系での超流動は、冷却原子系に特有な新奇な量子多体効果として興味深い。さらに、

鉄系超伝導に代表される、多軌道を持つ相関電子系での超伝導のメカニズムの解明とも深く関わると考えられる。この問題は、固体物理で最も活発に研究されているテーマの一つである。そこで、結果のインパクトを考えてこちらの研究を優先した。

### 3. 研究の方法

まず、動的平均場理論を用いて超流動秩序変数を計算した。そして、温度・フィリング・3 種類ある斥力の比と強さを変えながら系統的に計算して、超流動の相図を得るとともに、有効引力の起源を明らかにした。次に、エリアシュベルグ方程式を用いて、超流動のペア対称性を調べた。そして、光格子中の 3 成分斥力フェルミ原子系における超流動の観測可能性を議論した。

### 4. 研究成果

光格子中の 3 成分 (カラー自由度) 斥力フェルミ原子の絶対零度から有限温度に亘る状態を系統的に調べた。2 種類の斥力が他の斥力より強い場合、ハーフフィリングの基底状態は「カラー原子密度波」である事を我々は既に示している。ハーフフィリングからフィリングをシフトした場合の状態について、ソルバーに拡張反復摂動法を用いた動的平均場理論、および自己エネルギー汎関数法を用いて調べた。その結果、以下のことを明らかにした。

- 1) 斥力が強くなるとハーフフィリング近傍において、フェルミ流体から超流動へと連続転移する事を明らかにした。この超流動では最も弱い斥力が働く 2 種類の原子がクーパーペアを作り、残りの 1 種類の原子はフェルミ流体になっている。すなわち、引力系でのカラー超流動に類似の性質を持つ。
- 2) ダイアグラム展開から、有効引力はクーパーペアを作らないカラーの原子の密度揺らぎである。
- 3) 斥力をさらに強くすると、ペア原子とペアを作らない原子に相分離する。相分離状態のペア原子相では有効引力が誘起されないため、超流動は現れない。すなわち超流動状態は、弱相関領域のフェルミ流体と強相関領域の相分離状態の間に安定に存在する。
- 4) フィリング・斥力の比と強さ・温度を変えて、超流動・フェルミ流体・相分離に関する相図を以下のように求めた。

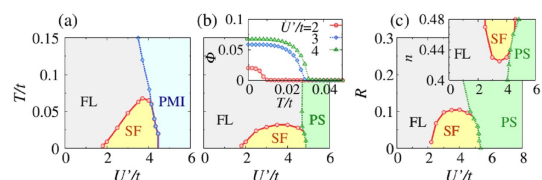


図 1. FL: フェルミ流体、SF: 超流動、PS: 相分離。斥力は  $U$ ,  $U$ ,  $U'$  としている。(a) ハーフフィリング  $n=0.5$ 。(b)  $n=0.48$ ,  $U/U'=0.1$ 。は超流動秩序変数。(c)  $n=0.48$ ,  $T/t=0.03$ ,  $R=U/U'$ 。挿入図で  $R=0.1$ 。t は跳び移り積分。

5)自己エネルギー汎関数法で3重占有率を調べた結果、超流動のパラメータ領域では3重占有率が著しく抑制されることを明らかにした。このことは、3体ロスが抑制されることを示唆する。

以上より、光格子中に質量の等しい3種類の斥力フェルミ原子が存在する系の超流動状態は、相分離、および3体ロスに対して安定であることが明らかになった。

次に、この超流動状態のペア対称性をエリアシュベルグ方程式に基づき調べ、以下のことを明らかにした。

- 1)3種類ある斥力のうち、2種類が他の1種類より著しく強い場合、超流動のペア対称性は拡張s波である。この超流動状態は、相図においてハーフフィリングでのペアモット相に隣接しているにもかかわらず、斥力系でナイーブに予想されるd波超流動ではなく、拡張s波超流動であるという著しい特徴を示す。有効相互作用の解析から、その起源はカラー密度波の量子揺らぎである。
- 2)3種類の斥力の違いを抑制すると、超流動のペア対称性は、ノードを持つs波  $d_{\{xy\}}$  波  $d_{\{x^2-y^2\}}$  波と変化する。この超流動ペア対称性の変化は、競合する3種類の量子揺らぎの中で支配的な量子揺らぎが、ペアを作らないカラーの原子の密度揺らぎ カラー原子密度波揺らぎ カラー反強磁性揺らぎと移り変わる事に起因する。最初の量子揺らぎは局所揺らぎで、2、3番目の量子揺らぎは長距離揺らぎである。
- 3)斥力の違いが大きい領域で現れる拡張s波超流動の超流動秩序変数を解析した結果、通常のs波成分に対して拡張s波成分の寄与は数%以下であった。この事は、この拡張s波超流動には局所揺らぎが本質的な寄与をしている事を意味する。すなわち、拡張s波超流動は、動的平均場理論に基づいて求めた上記の相図で良く記述される。

3成分フェルミ原子ガスは ${}^6\text{Li}$ 原子で実現している他、 ${}^{171}\text{Yb}$ - ${}^{173}\text{Yb}$ フェルミ原子混合系でも実現可能と考えられる。これらを光格子に置いた系では相互作用を制御できる上、波数に分解した1励起粒子スペクトル、2重占有率も観測可能である。従って、特定の波数における超流動ギャップの有無を観測する事で、斥力比の変化に伴う超流動ペア対称性の変化を観測する事は可能である。

以上より、光格子中の3成分冷却フェルミ原子系は、超流動ペア対称性を制御可能な量子シミュレータとしての役割を果たすと考えられる。

本研究で得られた知見は冷却原子系の分野に寄与するだけでなく、固体物理で最も活発に研究されている分野の一つである鉄系超伝導をはじめとする、多軌道を持つ相関電子系の超伝導の研究にもインパクトを与え

ると考えられる。

## 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5件)

Superfluid state of repulsively interacting three-component fermionic atoms in optical lattices, K. Inaba and S. Suga, Phys. Rev. Lett. **108**, 255301-1-5 (2012). (査読有)

Superfluid, Staggered State, and Mott Insulator of Repulsively Interacting Three-Component Fermionic Atoms in Optical Lattices (invited Review article), K. Inaba and S. Suga, Modern Phys. Lett. B **27**, 1330008-1-24 (2013). (査読有)

Three-body losses of repulsively interacting three-component fermionic atoms in optical lattices, S. Suga and K. Inaba, J. Phys. Conference ser. (2014). (査読有)

[学会発表](計17件)

菅誠一郎, 稲葉謙介, 大井俊宗: "光格子中の強相関フェルミ原子混合系における局所揺らぎに起因した超伝道のペア対称性", 日本物理学会第69回年次大会, 2014年3月27日-30日, 東海大学 30aPS-21.

S. Suga and K. Inaba: "Pairing symmetry of superfluid state in repulsively interacting three-component fermionic atoms in optical lattices", International Conference on Strongly Correlated Electron Systems, Univ. of Tokyo, August 5-9 2013, Tokyo 7P-E-1-6.

菅誠一郎, 稲葉謙介: "斥力相互作用をする光格子中の3成分フェルミ原子系における超流動状態", 日本物理学会第2012秋季大会, 2012年9月18日-21日, 横浜国立大学 20aAL-11.

[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/index.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：