

科学研究費助成事業（基盤研究（S））公表用資料
〔平成28年度研究進捗評価用〕

平成25年度採択分
平成28年3月31日現在

光格子中イッテルビウム量子気体の究極的操作・観測が拓く
新奇量子凝縮相研究の新展開

New stage of research of novel quantum condensed phase developed by ultimate control and measurement of ytterbium quantum gases in an optical lattice

課題番号：25220711

高橋 義朗 (Takahashi Yoshiro)

京都大学・大学院理学研究科・教授



研究の概要

研究代表者のグループがこれまで研究を進めてきた超低温イッテルビウム原子の系を光格子に導入して、量子凝縮相に関する物性研究を格段に発展させることを目的とする。具体的には、トポロジカル量子物理、量子磁性、新奇超流動現象、非標準型格子、不純物問題の量子シミュレーター、量子気体顕微鏡、の各研究テーマを理論分担者と密接に協力して進める。

研究分野：量子エレクトロニクス

キーワード：原子物理、レーザー冷却、光格子、量子情報

1. 研究開始当初の背景

極めて制御性の良い、光格子と呼ばれる周期的なポテンシャルにナノケルビン台の極低温原子気体を導入した系を用いて、ハバードモデルの量子シミュレーションの研究が注目を集めている。ボース原子の超流動・モット絶縁体転移の観測、フェルミ原子の金属・バンド絶縁体・モット絶縁体転移の観測だけでなく、ボソンとフェルミオンの混合系など、これまでの固体系には存在しない全く新しい系も、対象となってきた。一方、研究代表者はこれまで2電子系であるイッテルビウム (Yb) 原子を対象として、量子縮退研究を推進してきた。

2. 研究の目的

我々のグループがこれまで世界をリードしてきた超低温 Yb 原子の系を光格子に導入して、量子凝縮相に関する物性研究を格段に発展させることを目的とする。

3. 研究の方法

「トポロジカル量子物理」について、トポロジカル超流動の実現、トポロジカルチャージポンプ現象の冷却原子により実現する。また、「量子磁性」「新奇超流動現象」について、新しい手法により冷却原子磁性研究、および新奇量子相の可能性を追求する。さらに、「非標準型格子の特異なバンド構造」としてリーブ型光格子を実現し特異な量子相を解明する。また、「不純物問題の量子シミュレーター」を YbLi(リチウム)混合気体により実現す

る。さらに Yb 原子「量子気体顕微鏡」を開発する。

以上を理論分担者と密接に協力して進める。

4. これまでの成果

研究代表者のグループによる実験研究の成果として、まず、「トポロジカル量子物理」については、 ^{171}Yb について磁場フェッシュバツハ共鳴を発見し、電子基底状態と電子励起状態からなる新しいフェッシュバツハ分子の直接光生成に成功した。また、磁場掃引により 50%以上の効率でフェッシュバツハ分子を生成し、シュテルン・ゲルラッハ法により直接観測した。また、スピン軌道相互作用の実装をスピン・運動量ロッキングを観測することで確認した。さらに、サウレスのトポロジカルチャージポンピングを世界で初めて実証した。

また、「非標準型格子の特異なバンド構造」の研究として、複数の光格子を組み合わせることで、リーブ型光格子を実現し、平坦バンド中での原子の局在性を明らかにし、平坦バンドでの原子の安定性を詳しく調べた。

「新奇超流動現象」に関しても、レーザー分光による超流動・モット量子相転移の観測法を確立した。

さらに、「不純物問題の量子シミュレーター」では、Yb-Li 量子混合翌気体を生成し、Yb 原子のみ3次元光格子に局在し、Li 原子が非局在するという不純物量子シミュレーターの系を準備することに成功した。

また、Yb 原子の「量子気体顕微鏡」を、2

重モラセス法を開発することで実現し、さらに、吸収イメージング法や分散を利用したファラデー量子気体顕微鏡を開発することに世界で初めて成功した。

また、理論研究分担者（藤本）による成果として、まず、人工スピン軌道相互作用の実装によるトポロジカル超流動の理論では、冷却原子系におけるトポロジカル超流動状態を特徴づける新規物理現象の一つとして動的 Axion 現象の理論研究を行い、系の回転と Axion の振動数との共鳴によるマクロな慣性モーメントの増大効果などを予言した。この効果を利用して、将来、トポロジカル超流動状態を実験的に同定することが可能になる。また、トポロジカル超流動に特徴的な Berry 位相の揺らぎに伴う新規ホール効果の理論研究も行き、将来の発見に向けて指針となる結果が得られた。

また、強相関効果の典型例であり、かつ量子磁性の基本舞台となるモット絶縁相に関し、1次元モット絶縁体がトポロジカルなスピン液体に転移する機構を明らかにした。

さらに、理論研究分担者（段下）による研究成果として、まず、超伝導流が量子揺らぎによるトンネル効果によって減衰する過程である量子位相滑りの量子シミュレーションを提案した。冷却気体系の実験で量子位相滑りを特定する方法を提案し、現在の理論では定量的な解析の難しい有限温度の量子位相滑りを調べるのが量子シミュレータの興味深い対象になることを指摘した。

また、三角格子スピン-1/2 XXZ 模型の量子相図を決定した。ホッピング符号反転とダイポラー・ボース気体を組み合わせることで、三角格子スピン-1/2 XXZ 模型の量子シミュレータが実現できることを提案した。この模型の基底状態を定量的に解析するための数値計算手法を開発し、XXZ 異方性と縦磁場を変数とした量子相図を初めて定量的に評価した。

さらに、光格子中二成分ボース気体における不連続超流動・絶縁体転移、三重臨界性、表面臨界性を明らかにした。相互作用比を固定してホッピングと化学ポテンシャルを変化した相図上に、一次転移から二次転移に切り替わる三重臨界点があることを指摘した。また、その点を通る相転移の臨界性が通常の希薄ボース気体転移とは異なる普遍性属性を持つことを明らかにした。さらに、系に強いポテンシャル障壁を加えた状況を見ると、一次転移点近傍に表面臨界性と呼ばれる臨界性が現れることを見出した。

また、光格子中ボース気体の Higgs 束縛状態について、系に障壁ポテンシャルがある際に、障壁の周りに局在する Higgs モードの束縛状態が出現することを見出し、その新奇な励起の実験での観測方法を提案した。さらに、もう一つの典型的な集団運動モードである

Nambu-Goldstone モードがこの Higgs 束縛状態を介した Fano 共鳴トンネルをすることを明らかにした。

5. 今後の計画

引き続き、「トポロジカル量子物理」「量子磁性」「新奇超流動現象」「非標準型格子の特異なバンド構造」「不純物問題の量子シミュレーター」「量子気体顕微鏡」の各研究テーマを理論分担者と密接に協力して進める。

特に、これまでの研究で見出した「新しいタイプの近藤効果」、「量子輸送現象」、「孤立量子系の熱化に関する非平衡過程」、などの新しい可能性も追求する。

6. これまでの発表論文等（受賞等も含む）

1. S. Kato, K. Inaba, S. Sugawa, K. Shibata, R. Yamamoto, M. Yamashita, and Y. Takahashi, "Laser spectroscopic probing of coexisting superfluid and insulating states of an atomic Bose-Hubbard system", Nature Communications, (2016)【掲載決定】

2. S. Taie, S. Watanabe, T. Ichinose and Y. Takahashi, "Feshbach-Resonance-Enhanced Coherent Atom-Molecule Conversion with Ultranarrow Photoassociation Resonance", Phys. Rev. Lett. 116, 043202-1-5 (2016)

3. S. Nakajima, T. Tomita, S. Taie, T. Ichinose, H. Ozawa, L. Wang, M. Troyer and Y. Takahashi, "Topological Thouless pumping of ultracold fermions", Nature Physics, published online 1-6 (2016)

4. S. Taie, H. Ozawa, T. Ichinose, T. Nishio, S. Nakajima and Y. Takahashi, "Coherent driving and freezing of bosonic matter wave in an optical Lieb lattice", Science Advances, Vol.1 No.10, e1500854-1-6(2015)

受賞

高橋義朗：2013年12月、2013年仁科記念賞（イッテルビウム超低温量子系の創出）

段下一平：2014年3月、第8回日本物理学会若手奨励賞（領域1、研究題目「光格子中の一次元ボース気体における超流動流の崩壊」）

ホームページ等

<http://yagura.scphys.kyoto-u.ac.jp/index.html>