

光格子超低温原子気体の軌道及びスピン自由度を

駆使した新量子物性の開拓

Exploration of new quantum condensed phase by exploiting orbital and spin degrees of freedom of ultracold atomic gases in an optical lattice

課題番号：18H05228

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（4行以内）

光格子中に導入された超低温原子気体を用いて、特に非標準的な光格子をデザインすることによって初めて可能となる特異な多重軌道の自由度と、2電子系原子のみが特別に有する高スピン対称性 $SU(N)$ に着目し、その二つの自由度が織りなすユニークな新量子物性を開拓することを目的とする。 $SU(6)$ 対称性を有するイッテルビウム原子量子気体を主な対象として進める。

研究分野：量子エレクトロニクス

キーワード：量子エレクトロニクス、冷却原子、量子シミュレーション、光格子

1. 研究開始当初の背景

進展著しいレーザー冷却による量子縮退気体の研究の中で、特に注目を集めている研究テーマとして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た量子多体系の量子シミュレーションの研究を挙げることができる。光格子中の冷却原子は、格子点間のトンネリング項と格子点内での原子間相互作用項の2つの項からなるハバードモデルで記述される。このハバードモデルは、遍歴磁性や異方性超伝導などの強相関電子系を記述する大変重要なモデルであり、光格子中の冷却原子系は、ハバードモデルの極めて制御性の良い新たな実験系として注目を浴びている。

2. 研究の目的

このような背景のもと、光格子中に導入された超低温原子気体を用いた量子物性に関する独創的な研究として、特に、非標準的な光格子をデザインすることによって初めて可能となる特異な多重軌道の自由度と、2電子系原子のみが特別に有する高スピン対称性 $SU(N)$ に着目し、その二つの自由度が織りなすユニークな新量子物性を開拓することを目的とする。原子系として、 $SU(N=6)$ 対称性を有するイッテルビウム (Yb) 原子量子気体を主な対象とし、非標準型格子として、「平坦バンドを有するリーブ格子」、「基底電子状態と準安定電子状態からなる局在・非局在混

合軌道系」、などを系のパラメーターを高度に実時間制御して生成し実験を遂行する。さらに、光格子の超高空間分解能観測・制御技術を開発して上記研究に適用することにより、量子凝縮相の研究における全く新しい高度な量子シミュレーターを実現する。

3. 研究の方法

具体的には、Yb 原子量子気体のハバードモデルを実装し、A) 「光リーブ格子の平坦バンドで発現する物理の解明」、B) 「局在・非局在混合軌道系による局在不純物の物理の解明」、C) 「巨大スピンの $SU(N)$ 量子磁性の物理の解明」、D) 「ユニークな軌道自由度を駆使した新しい可能性の追求」の4つの研究項目を設定して研究を行う。

4. これまでの成果

設定した研究課題 A)–D) について研究を進め、それぞれにおいて成果を上げることに成功した。具体的には以下の通りである。

A) 平坦バンドを有するリーブ型光格子

平坦バンドは、複数の副格子間のホッピングが量子力学的干渉効果により打ち消しあうことにより生じる。本研究では、平坦バンドのこの特異性を示す現象として「空間断熱移送」という、質量をもった量子力学的粒子を、空間的に離れた2地点間で、その中間位置を経由せずに移動させる現象を初めて実証することに成功した。

B) 局在・非局在混合軌道系

まず、フェルミ同位体 ^{171}Yb 原子のスピン交換相互作用の決定を超高分解能レーザー分光により行い、近藤効果に必要とされる反強磁性スピン交換相互作用を有していることを発見した。さらに、局在された不純物スピンを導入することに成功し、遍歴原子系に誘起されたダイポール振動への影響やスピン交換衝突の振る舞いを明瞭にとらえることに成功し、理論グループとの密接な議論を行い、定性的な理解を得ることに成功した。また、スピン自由度に着目した新奇な量子輸送の研究に着手し、局在スピンによる「スピン輸送」現象を捉えることに成功した。

また、質量比の大きな量子気体混合系による局在・非局在混合次元の系を新たに構築することに成功した。 Yb 原子と ^7Li 原子を光格子に導入し混合次元系を実現し、また、 Li 原子や Yb 原子との間の相互作用についてフェッシュバッハ共鳴を利用可能な Er 原子のレーザー冷却にも成功した。

C) $\text{SU}(N)$ 系量子磁性の観測

2重井戸、等方的1次元、2次元、3次元の光格子のそれぞれで $\text{SU}(4)$ および $\text{SU}(6)$ 系の反強磁性スピン相関を観測することに成功し、この実験結果を米国の理論研究者と協同で相互比較することによりフェルミハバード模型の最低到達温度の更新を確認した。

また、プラケット構造の光格子を構築し $\text{SU}(6)$ フェルミ粒子を導入することで、4スピン系エンタングル状態である $\text{SU}(4)$ 一重項状態を生成することに成功したことを系統的なスピン相関の測定により明らかにした。

また、制御された2体の散逸を導入することによりスピン相関を反強磁性から強磁性に動的に遷移させることに成功した。これは散逸による負温度量子磁性実現に相当する。

D) ユニーク軌道自由度

上記以外にも、「空間反転・時間反転 (PT) 対称な格子の実現とその緩和現象の解明」、「軌道の局在・非局在の実時間制御とその非平衡相関伝搬の解明」、「 Yb 原子リドベルグ軌道励起」、「サウレスポンプの乱れ誘起局在・非局在転移観測」、など、多くの成果を挙げることができた。

以上は当初計画したものだけでなく、当初の計画の想定を超えた成果も含まれる。

5. 今後の計画

今後は、上記 A)-D) の各課題を予定通り進めていく。特に、1) 局在・非局在軌道の物理について、スピン自由度に着目した新しい量子スピン輸送の実験に取り組むとともに、関連理論研究者とともに実験結果の解析を進める。また、2) $\text{SU}(N)$ 量子磁性の直接観測を可能とする新しい方式の固浸レンズの手法を導入した高空間分解能でスピン敏感な量

子気体顕微鏡の開発を進める。これらを推進することで研究をさらに加速させる。また、すべての研究テーマに関して、理論の研究分担者（段下）および国内外の理論共同研究者と密接な議論を行いながら進める。

6. これまでの発表論文等（受賞等も含む）
論文：17件（下記重要論文5件を含む）

1. "Spatial adiabatic passage of massive quantum particles in an optical Lieb lattice" S. Taie, T. Ichinose, H. Ozawa and Y. Takahashi, **Nat. Commun.** 11, 257, 1-6, (2020)

2. "Quasiexact Kondo Dynamics of Fermionic Alkaline-Earth-Like Atoms at Finite Temperatures", S. Goto and I. Danshita, **Phys. Rev. Lett.**, 123, 143002-1-6 (2019)

3. "Dissipative Bose-Hubbard system with intrinsic two-body loss", T. Tomita, S. Nakajima, Y. Takasu, and Y. Takahashi, **Phys. Rev. A** 99, 031601(R)1-6(2019)

[Rapid Communication]

4. "Antiferromagnetic Spin Correlation of $\text{SU}(N)$ Fermi Gas in an Optical Superlattice" H. Ozawa, S. Taie, Y. Takasu, and Y. Takahashi, **Phys. Rev. Lett.** 121, 225303(2018)

5. "Experimental realization of ultracold $\text{Yb-}^7\text{Li}$ mixtures in mixed dimensions", F. Schäfer, N. Mizukami, P. Yu, S. Koibuchi, A. Bouscal, and Y. Takahashi, **Phys. Rev. A** 98, 051602(R)1-6(2018)

[Editors' Suggestion]

[Rapid Communication]

7. ホームページ等

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