

プログラム名：量子人工脳を量子ネットワークでつなぐ高度知識社会基盤の実現

PM名：山本 喜久

プロジェクト名：量子シミュレーション

委 託 研 究 開 発

実 施 状 況 報 告 書 (成 果)

平 成 2 9 年 度

研究開発課題名：

冷却原子量子シミュレーション

研究開発機関名：

国立大学法人京都大学

研究開発責任者

高橋 義朗

I 当該年度における計画と成果

1. 当該年度の担当研究開発課題の目標と計画

光格子中の冷却原子を用いて、銅酸化物などの高温超伝導体に対応したフェルミ・ハバードモデルおよびボーズ・ハバードモデルなどの強相関量子多体系のモデルを実装し、模擬実験によりこれを解く量子シミュレータを開発することが本 ImPACT プロジェクトにおける本グループの全体目標である。特に、相互作用強度、格子形状など基本的なパラメーターを制御して、数値計算では到達できないシミュレーションを実行し、強相関量子多体系の基底状態のみならずその非平衡量子ダイナミクスを解明することを目指す。

上記の全体目標に向けて、平成 29 年度の研究開発プログラムのマイルストーンとして、「原子数 10^4 個以上で、 T/T_F (フェルミ温度) <0.1 の超低温フェルミ縮退したイッテルビウム原子を用いた、リープ型および 2 層正方格子などの非標準型光格子による強相関量子多体系量子シミュレータの実装」を設定した。リープ型光格子および 2 層正方光格子における、強相関量子相の発現において、超低温の実現が非常に重要であるため、光格子中で大きなスピン自由度の活用によるフェルミ原子集団の冷却法の開発を目指した。特に、2 層正方格子においては、超交換相互作用のエネルギースケールよりも低い温度領域までの低温の実現を目標に設定した。

また、非平衡超伝導という新たな可能性に向けた研究の達成目標として、「光格子中の冷却原子の相互作用を制御した非平衡クエンチによる新奇非平衡状態の生成」を設定した。

2. 当該年度の担当研究開発課題の進捗状況と成果

2-1 進捗状況

本年度の研究課題と設定した、「2層型正方格子の研究」、「平坦バンドを有するリープ型格子の研究」、「非平衡量子ダイナミクスの研究」のそれぞれについて、順調に進めることが出来た。「2層型正方格子の研究」では、原子数 10^4 個以上で、スピン 4 成分および 2 成分で $T/T_F \sim 0.1$ 程度の超低温の斥力相互作用する強相関フェルミ原子系を 2 層型正方格子に導入し、反強磁性スピン相関の観測に成功した。「平坦バンドを有するリープ型格子の研究」では、同様に $T/T_F \sim 0.1$ 程度の超低温の斥力相互作用および引力相互作用するフェルミ原子系をリープ格子に導入し、2 重占有数の温度依存性を測定した。また、相互作用するフェルミ粒子について、平坦バンドのみへの導入を空間的断熱移送法により可能にし、その安定性を調べた。さらに、「非平衡量子ダイナミクスの研究」では、ボース粒子系のクエンチ後の位相コヒーレンスの空間伝搬の様子を実験的に明らかにし、理論的に説明されることを確認した。

2-2 成果

まず、光トラップ中において、斥力相互作用(^{173}Yb)および引力相互作用($^{173}\text{Yb}-^{171}\text{Yb}$)する、 $T/T_F \sim 0.1$ の超低温原子集団を生成することに蒸発冷却の最適化により成功した。そして、この超低温原子集団をリープ型光格子および 2 層正方光格子中へ導入して実験を進めた。

まず、斥力相互作用するスピン4成分系とスピン2成分系を光ポンピングを駆使して準備して、これをそれぞれ2層型正方格子に導入し、反強磁性スピン相関が形成されていることを確認した。特に、4成分系の場合により大きな反強磁性スピン相関が実現されていることを確認した。これはスピン自由度にエントロピーを担わせることで系が冷却される、ポメラランチュク冷却効果として理解できることを理論計算により確認した(図1)。

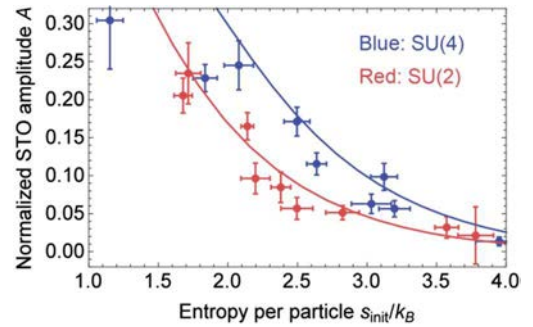


図1 スピン4成分系(青)とスピン2成分系(赤)でのスピン1重項—3重項振動の大きさの初期エントロピー依存性。実線は理論曲線。

さらに、 $T/T_F \sim 0.1$ 程度の超低温の斥力相互作用および引力相互作用するフェルミ原子系をリープ格子に導入し、その特異な熱力学的性質を解明する第一歩として、2重占有数という熱力学量の温度依存性の測定を行った(図2)。また、これまでボース凝縮体や相互作用のないフェルミ粒子系においてのみ実証していた、平坦バンドのみへの空間的断熱移送法による導入を、引力および斥力相互作用するフェルミ粒子にも適用し、特に斥力相互作用する系において、相互作用のない系と同程度以上の寿命をもつことを新たに見出した。

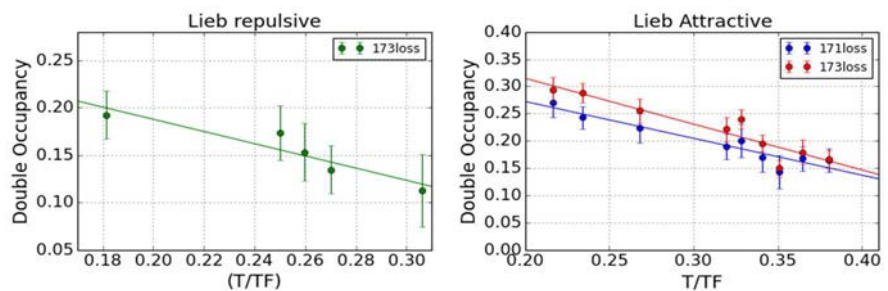


図2 リープ格子中に導入された斥力相互作用(左)および引力相互作用(右)するフェルミ粒子の2重占有率の初期温度依存性。

また、非平衡量子相の研究として、クエンチ後の非平衡ダイナミクスの研究を進めた。まず、図3に示すように、ボース粒子系のモット絶縁体相からのクエンチ後の位相コヒーレンスの空間伝搬の様子を実験的に明らかにし、新しく開発された理論計算手法により定量的に説明できることを確認した。さらに、相互作用するフェルミ粒子系の非平衡ダイナミクス研究に向けて 1S_0 状態と 3P_0 状態の軌道型フェッシュバツハ共鳴を確認した。

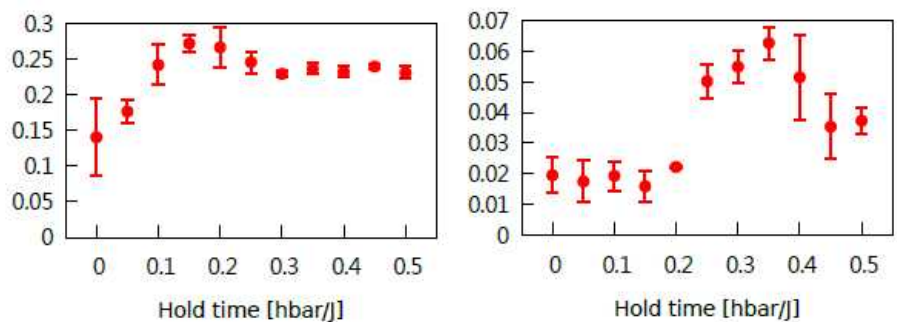


図3 クエンチ後のxy2次元光格子中の位相コヒーレンスの時間発展(時間はホッピング J を単位とした)。左図はy軸方向の最近接サイト間、右図はx軸方向に2サイト、y軸方向に2サイト離れたサイト間、での位相コヒーレンス。

2-3 新たな課題など

光格子中の原子温度が超流動転移温度よりも高いことが、引き続き大きな課題である。大きなスピン自由度に再配分するポメラシユク冷却法は4成分系においては有効であることが当該年度の研究により確認されたが、これを今後、最大の6成分系にまで拡張することを検討している。さらに、量子気体顕微鏡装置などを利用してエントロピーを空間的に再配分する方法などを組み合わせることを検討している。

3. アウトリーチ活動報告

研究成果に関するものはなし。