

平成 2 7 年 3 月 3 1 日

プログラム名：量子人工脳を量子ネットワークでつなく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 6 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

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ス・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、本研究開発の課題であるが、特に平成26年度、および平成27年度は、全研究期間を通じて行う冷却原子量子シミュレータ開発において、その基盤的実験技術および設計方針の確立を行うことを目標に掲げた。

具体的には、まず、量子シミュレータの設計については、本 ImPACT「量子シミュレーション」の理論チーム、および必要に応じて他の理論研究者との議論を通じて、ターゲットとする理論モデルの選定を慎重に行い、その意義の明確化を行う。

また、実験技術については、これまでのイッテルビウム原子のレーザー冷却・トラップの手法に新たな改善を施し、量子縮退温度を大きく下回る超低温に冷却する技術を新たに開発することを目標に掲げた。特に、フェルミ・ハバードモデルの実装に使用するフェルミ粒子 ^{173}Yb について、フェルミ温度の18%以下の超低温の実現を目指すこととした。

さらに、格子系としては、高温超伝導物質との対応関係がある興味深い非標準型光格子で、d-pモデル型光格子に特に着目し、その安定性の向上を図るとともに、超低温のフェルミ粒子およびボース粒子を実際に導入して、特に、平坦バンドと呼ばれる分散のないエネルギーバンドにおける粒子の基本的振る舞いに関する研究を行うことを設定した。

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

量子シミュレータの設計については、本 ImPACT「量子シミュレーション」の理論チームとの議論を中心に、現在進行中である。

また、実験技術についても、今後の超低温実験に向けたレーザー冷却・トラップの技術開発の準備を中心に進めていて、予定通り進行中である。

d-pモデル型/リープ型光格子実験は、平坦バンド中の原子の振る舞いに関する本格的な研究に着手することが出来た。また、量子気体顕微鏡の開発も、順調に進めることが出来た。

2-2 成果

まず、イッテルビウム原子について、量子縮退温度を大きく下回る超低温に冷却する技術の開発については、これまでの光トラップへの導入方法を改善することにより、引き続き蒸発冷却の性能を向上させ、結果として、フェルミ粒子である ^{171}Yb および ^{173}Yb 原子についてフェルミ温度の15%以下の超低温を実現することに成功した。さらに超低温を可能にする光トラップ中での冷却方法として、超狭線幅遷移を用いたドップラー冷却法の開発に着手し、線幅100Hzを下回る狭線幅の光源を準備することに成功した。今後、速やかに実装予定である。

また、非標準型光格子であるd-pモデル/リープ型格子について実験を行い、格子形状が測定中変化しないような安定な光路長安定化システムを構築し、フェルミ粒子およびボース粒

子の平坦バンドでの振る舞いを調べた。平坦バンドが第 2 励起状態に相当するため、特に、ボース粒子を平坦バンドに導入することは、非平衡状態を作り出すことに相当し、工夫が必要となる。そこで我々は、位相刷り込みの方法を開発することにより、基底バンドのボース凝縮をコヒーレントに平坦バンドに導入することに成功した。さらに、導入直後からボース凝縮体が平坦バンド内におよび基底バンドへ、緩和していく非平衡状態ダイナミクスを観測することに成功した。また、リーブ格子の平坦バンドは、4 つのサイトが位相を交互に反転した状態で特徴づけられるが、これが局在状態に対応して、バンドの平坦性の原因となるわけであるが、サイトマッピングという手法を新たに開発することにより、この局在性を、直接的に観測することに成功した(図1参照)。

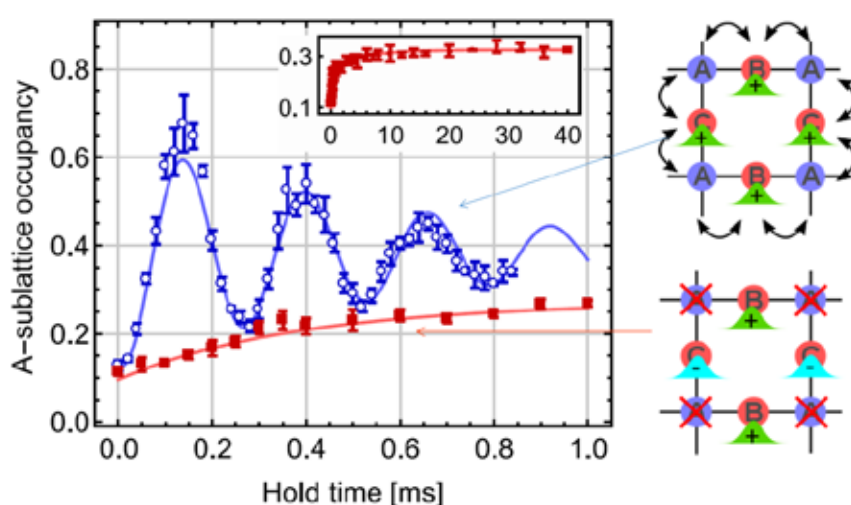


図1 リーブ格子中の平坦バンドの局在状態の観測。赤□が平坦バンド中の局在状態、青○が通常の分散バンド中の非局在状態、についての、Aサイトの占有数の変化。

さらに、光格子中原子の有効な実空間分布測定法である、量子気体顕微鏡の開発を進め、ボース粒子およびフェルミ粒子に対して、単一原子の感度で、格子定数以下の空間分解能で観測することに成功した。

2-3 新たな課題など

現在は、理論研究者との議論を通じて、ターゲットとする理論モデルの選定を慎重に行い、また、今後の実験に向けた実験技術開発の準備を中心に進めている段階で、新たに発生した大きな困難な課題はない。

3. アウトリーチ活動報告

平成 26 年 11 月 20 日の仁科記念講演会において、「冷却原子を用いた量子シミュレーション」というタイトルで、講演を行った。また、平成 26 年 11 月 29 日の京都大学大学院理学研究科物理学宇宙物理学専攻・京都大学基礎物理学研究所主催市民講座「物理と宇宙」第2回において、「冷えた原子でつくる新しい物質の状態」というタイトルで講演を行った。ともに、冷却原子を用いた量子シミュレーション研究の最前線についてのアウトリーチ活動である。