

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 7 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。特に平成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。

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

室温超伝導につながる可能性のある量子シミュレータの設計について、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、平坦バンドを有するリープ型格子と2層型正方格子の2つの候補に絞りこむことを行った。

また、実験技術について、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進めた。

また、非平衡量子ダイナミクスの研究に対しても、強相関量子多体系のクエンチダイナミクスの研究に着手することができ、さらに、新たな観測法も含めて、量子気体顕微鏡の開発を、順調に進めることが出来た。

2-2 成果

まず、室温超伝導につながる可能性のある理論モデルについて、これまでに提案されたものの検討を行い、2 層構造正方格子の系が、1) 銅酸化物の高温超伝導体に対応する、d-波超伝導を発現するモデルよりも高い転移温度を予言している、2) 光格子系による実装が容易

である、などの点から、適していることを見出し、その実現に向けた実験を始めた。まず、波長が2倍異なる二つの光格子を組み合わせることで2層型正方格子を生成した。この2層正方格子にイッテルビウム原子のボース・アインシュタイン凝縮を実際に導入して、物質波干渉の測定およびブラッグ分光を行い、実際に2層型正方格子が形成できていることを確認した。さらに、イッテルビウム原子のフェルミ縮退気体を2層正方格子に導入し、バンドギャップを適当な値にチューニングすることにより、鉄系超伝導体と同様の2つのフェルミ面からなる構造をしていることを、バンドマッピング法および時間飛行分光法から明らかにした。

また、平坦バンドを有するリープ格子に着目した実験研究も進めた。本 ImPACT プロジェクトの理論グループの研究に対応して、フェルミ粒子を平坦バンドに導入する研究を行った。特に、これまでのボース・アインシュタイン凝縮を用いた位相刷り込みの手法ではなく、断熱的な変化により平坦バンドのみに導入する方法を新たに開発した。そのような極めて非平衡な状況でも、平坦バンド中でのフェルミ粒子の寿命が数 100ms 程度と十分長くなることを明らかにした。

さらに、膨大な計算量を必要とする3次元ボース・ハバードモデルの非平衡量子ダイナミクスの研究に対しても、強相関量子多体系であるモット絶縁体状態の超流動状態へのクエンチダイナミクスの実験研究に着手した。これまで、観測することが出来なかった粒子数分布を、「原子数射影分光法」を新たに開発することにより、実際に観測することを可能にし、飛行時間測定法による運動量分布の測定と組み合わせ、この系が孤立量子系である直接的証拠であるエネルギー保存を初めて確認することに成功した。

さらに、ダイナミクスを調べる上で重要な手法である量子気体顕微鏡の開発を進めた。従来の発光を検出する方法ではなく、分散型相互作用を用いたファラデー量子気体顕微鏡の開発に初めて成功し、単一原子を単一サイト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、その実験的研究に着手した段階で、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 27年7月24日に、須磨学園の男子 13 名、女子 2 名の 15 名を、さらに、平成 27年 11月13日に、三国ヶ丘高校の生徒約 15 名を対象に、京都大学大学院理学研究科物理学宇宙物理学専攻物理学教室の量子光学研究室において、研究・実験の説明を行った。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。