

高橋 義朗

国立大学法人京都大学 大学院理学研究科
教授

冷却原子の高度制御に基づく革新的光格子量子シミュレーター開発

§ 1. 研究成果の概要

全体研究項目(1)「光格子中原子の個別観測・量子フィードバック制御技術の開発」について、まず、イッテルビウム(Yb)原子の量子気体顕微鏡技術の高度化に向けた準備を行った。特に、固侵レンズを使用した方式に改良し、固侵レンズ表面上で形成した光格子に原子を導入することに成功し、トラップされた原子の吸収および発光イメージング画像を得ることに成功した。また、SU(N)量子気体顕微鏡に向けて、基底状態の核スピン 6 成分の全てを選別して測定する手法を考案し、その実現可能性を、実験パラメーターを見積もることにより評価し、現状の実験条件で十分実現可能であることを確認した。さらに、魔法波長の光格子やスクイーズド真空を利用した量子非破壊型量子気体顕微鏡法について論文を出版した。さらに、2 軌道系へ適用するのに必要な 3Hz 以下の線幅の 578nm の時計遷移の光源を開発し、論文として出版した。

また、リドベルグ原子実験用の光トラップアレーのための光源開発を進めた。特に、100 スポット以上の光トラップアレーを 2 次元の光音響偏向器を用いて生成することに成功し、また、各トラップ中での原子の検出結果に基づいて光トラップを再構築する量子フィードバック法について、2 次元の光音響偏向器と高速プログラムを用いた光によるシミュレーション実験に成功した。

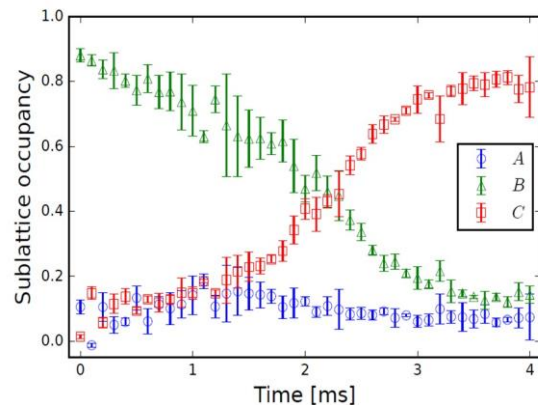
次に、全体研究項目(2)「量子多体系の革新的量子シミュレーター開発」について、まず、量子スピン多体系の実験に必要な実験技術の開発を進めた。大きな磁気モーメントを有するエルビウム原子の 500 nK までのレーザー冷却に成功し、また Yb 原子のリドバルク状態に対応する共鳴を複数観測することに成功した。

また、非平衡・開放系の量子多体系の振舞いについても研究を進めた。光格子深さを急激に減少させるクエンチ操作後の、モット絶縁体相から超流動相などへ移行する非平衡ダイナミクス過程の量子シミュレーションについては、これまでの実験結果をまとめた論文を完成させた。さらに、1次元フェルミハバード模型の系に、2 体の散逸過程を導入することで、隣接サイト間のスピン相関を反強磁性から強磁性に変化させることに成功し、負温度量子磁性を実験的に実現した。

さらに、非標準型光格子の実時間制御についても進展させた。リーブ型光格子における隣接サイト間のトンネル現象の量子力学的な干渉を実時間操作することで、質量を持った量子力学的粒子について、空間的に離れた 2 地点間を、その中間地点を経由せずに移動させることに初めて成功した(図 A 参照)。これは量子光学で知られている STIRAP(誘導ラマン断熱通過)を、凝縮系物理学で知られている平坦バンドに適用した基本的な現象である。

さらに、全体研究項目(3)「SU(N)量子シミュレーターの開発」について、まず、基底状態の SU(N)量子磁性実験では、米国の理論グループと国際共同研究を行い、SU(N=6)スピン系について実験で観測した量子磁性の定量的評価を行い、1次元系の冷却原子フェルミハバード模型の最低温度を更新していることを確認した。さらに、隣接するサイト間のみトンネル結合が許されている 4 サイトからなる「プラケット」構造に SU(6)フェルミ原子系を導入することで、4 つの異なるスピンの量子エンタングルした SU(4)一重項状態が生成されていることを、数値計算と比較することで、確認することができた。

また、2 軌道 SU(2)系の量子輸送に関する量子シミュレーションでは、まず、反強磁性的なスピン交換相互作用を有することが判明した ^{171}Yb 原子系を用いた実験を進めた。励起状態の $^3\text{P}_0$ 状態のみ局在し、基底状態 $^1\text{S}_0$ は遍歴する特異な実験系を実現し、特に、スピン交換ダイナミクスのスピン選択測定による直接観測、および、局在原子による双極子振動の抑制の観測、に成功した。理論グループでは、この双極子振動の減衰という光格子中冷却気体における典型的なダイナミクスの温度依存性について、量子シミュレーション実験で近藤効果を特定できることを提案した。また、空間一次元の量子多体系の有限温度ダイナミクスを数値計算するための手法の効率を大幅に改



図A リーブ型光格子を用いた空間断熱移送。通常、粒子は空間的に離れたBサイト(緑)からは、必ずAサイト(青)を中間地点として経由してからCサイト(赤)へ移動するが、平坦バンドを利用すると、図で明らかなように中間のAサイトをほとんど経由せずに空間移動が可能となる。

善し、これらの結果について論文を出版した。

【代表的な原著論文】

- [1] S. Taie, T. Ichinose, H. Ozawa and Y. Takahashi, “Spatial adiabatic passage of massive quantum particles in an optical Lieb lattice”, Nature Communications, vol. 11, 257–1–6, 2020
- [2] Shimpei Goto and Ippei Danshita, “Quasiexact Kondo Dynamics of Fermionic Alkaline–Earth–Like Atoms at Finite Temperatures”, Physical Review Letters, vol. 123, pp. 143002–1–6, 2019
- [3] D. Okuno, Y. Amano, K. Enomoto, N. Takei and Y. Takahashi, “Schemes for nondestructive quantum gas microscopy of single atoms in an optical lattice”, New Journal of Physics, vol.22, 013041–1–9, 2020

§ 2. 研究実施体制

(1) 光格子実験グループ(研究機関別)

- ① 研究代表者:高橋 義朗 (京都大学大学院理学研究科 教授)
- ② 研究項目
 - ・ 個別観測技術の開発
 - ・ 量子フィードバック技術の開発
 - ・ 量子磁性実験
 - ・ 散逸下の非平衡過程の実験
 - ・ 非ユニバーサル量子計算の実験
 - ・ SU(N)スピン量子シミュレーション実験

(2) 光格子理論グループ(研究機関別)

- ① 主たる共同研究者:段下 一平 (近畿大学工学部 准教授)
- ② 研究項目
 - ・ 散逸的 Bose-Hubbard 模型の理論 (量子物性理論グループ)
 - ・ 非ユニバーサル量子計算の理論 (量子情報理論グループ)
 - ・ 孤立量子系の緩和模型、光格子量子誤り訂正理論 (量子情報理論グループ)
 - ・ 時間依存相関関数の観測法提案 (量子物性理論グループ・量子情報理論グループ)
 - ・ SU(N)スピンの量子物性理論 (量子物性理論グループ)