

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 29 年度

研究開発課題名：

局所操作を用いた光格子量子シミュレータの開発

研究開発機関名：

国立研究開発法人理化学研究所

研究開発責任者

福原 武

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

光格子中のボース原子気体を用い、新規冷却手法の開発及び非平衡ダイナミクスの研究を行っていくことが本研究開発の課題である。この目的に向けた実験装置を構築する必要があり、平成 28 年度にはルビジウム (Rb) 原子の磁気光学トラップを達成した。平成 29 年度の主要な目標は、 ^{87}Rb 原子のボース・アインシュタイン凝縮体 (BEC) の生成、安定な三角光格子の構築、高分解能イメージング系の実装である。それらに加え光格子中の原子の冷却に関しては、エントロピー分布の操作を行うための光ポテンシャルの準備を行う。また、量子磁性研究のために、原子の内部状態制御を実装する。

冷却原子を用いた実験研究で重要となる問題に対して、理論的な研究も行っていく。

パリティ時間 (PT) 対称な冷却原子系のうち、1 次元系における朝永-ラッティンジャー模型や、2 次元系における Berezinski-Kosteritz-Thouless 模型を含むスピン系を分析することで、従来の概念を超えた普遍性クラスを発見し、それを冷却原子系で実現する具体的な系を提案する。

2. 当該年度の担当研究開発課題の進捗状況と成果

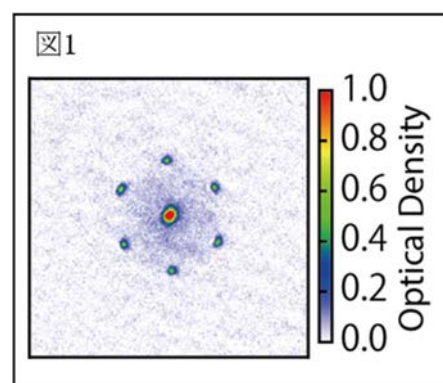
2-1 進捗状況

実験装置の開発においては、三角型の光格子を作成し、 ^{87}Rb 原子の BEC を導入することに成功した。光格子の深さを変えることで、超流動-モット絶縁体転移の観測も行っており、システムが強相関係のシミュレータとして使用できることを確認している。高分解能イメージングについては、同時に導入するフェッシュバッハ共鳴用の磁場コイルの準備が間に合わず実装に至っていない。エントロピー分布の操作に関しては、デジタルマイクロミラー (DMD) を用いて光パターンの動的制御を確認した。また、量子磁性研究に向けて、原子の内部状態を揃える光ポンピングや磁場勾配によるスピン選択を実装し、シュテルン・ゲルラッハ測定でその性能を確認している。

理論的研究に関しては、上記の目標が計画通りにすすんだ。

2-2 成果

レーザー冷却された ^{87}Rb 原子集団を非共鳴光により捕獲し、蒸発冷却を施すことで、原子数が 5×10^4 個程度の BEC を実現している。この BEC が三角形の格子構造を反映した原子波干渉を示すことから光格子が形成されていることを確かめた (図 1)。三角格子の深さに小さな変調を加えることでバンド励起を引き起こし、その周波数を調べることで光格子のポテンシャルの深さを数%以内の精度でキャリブレーションすることができた。更に、ポテンシャルの深さを深くすることで超流動-モット絶縁体転移を観測しており、強相関係シミュレーションを実施する舞台が整った。



機械学習を用いた冷却実験のパラメータの最適化を試みた。偏光勾配冷却（最適化パラメータ：冷却光の強度・周波数、リポンプ光の強度、冷却時間の計 4 個）と蒸発冷却（最適化パラメータ：蒸発冷却の中間段階の計 8 個）に対しベイズ最適化を用いた探索を行い、それぞれの用途において実用的な探索が可能であることを確認した。

理論的研究においては、以下の成果を挙げることができた。

PT 対称なゲイン・ロス構造を持つ非保存冷却原子系において、スペクトル特異性をともなう自発的対称性が破れる現象を見出した（図 2）。これはエルミートなハミルトニアンでは現れない特異な現象である。PT 対称な系は光学系においては様々な提案がなされてきたが、本研究は相互作用をする多体量子系においてなされたという点でユニークである。

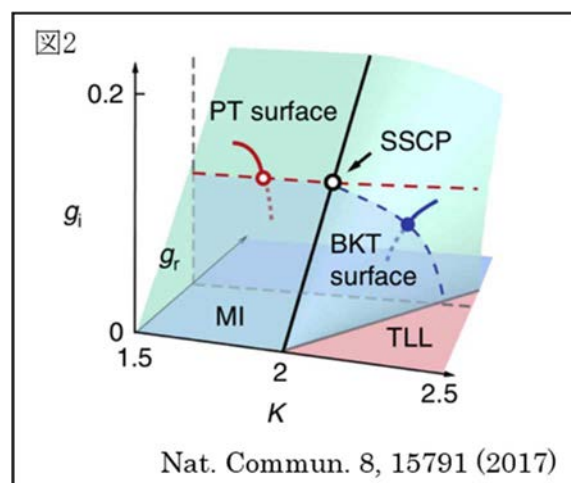


図 2：パリティ時間 (PT) 対称な量子多体系の 3 次元の相図。ここで、 K は粒子間相互作用の強さを表し、 g_r , g_i はそれぞれ複素ポテンシャルの深さの実部と虚部を表している。モット絶縁体相 (MI) と朝永-ラッティンジャー流体相 (TLL) は $K > 2$ の領域で、BKT 転移で、 $K < 2$ では PT 転移によって分離している。SSCP はスペクトルが特異性を持つ臨界点 (spectral singular critical point) という非エルミートな系に特有の臨界点である。

2-3 新たな課題など

量子シミュレーションを行う際のパラメータの制御に関して、フェッシュバハ共鳴を用いてその相互作用の大きさや符号を変化させることを計画している。これに加えて光格子の位相変調によりトンネリングの大きさや符号を変えることができれば、探索可能なパラメータ領域を拡大できる。位相変調によるトンネリングの調整にも取り組んでいく予定である。

3. アウトリーチ活動報告

平成 30 年 3 月 5 日に名古屋市立向陽高等学校において、高校 2 年生を対象に出張授業を行った。授業では、量子力学や原子気体のレーザー冷却などについて紹介し、ImPACT プロジェクトで取り組んでいる量子シミュレーションについて話した。