

戦略的創造研究推進事業 CREST
研究領域「量子状態の高度な制御に基づく革新的
量子技術基盤の創出」
研究課題「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」

研究終了報告書

研究期間 2016年10月～2022年3月

研究代表者：高橋 義朗
(京都大学大学院理学研究科 教授)

§ 1 研究実施の概要

(1) 実施概要

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」について研究を進め、まず、発光検出による 2 次元光格子中のサイト分解・単一原子観測法、すなわち量子気体顕微鏡の開発に成功し、さらに、分散型の相互作用であるファラデー効果を用いたファラデー量子気体顕微鏡を新たに開発することに成功した。また、量子フィードバック・制御の実証の一つとして、原子集団の分布の一部が、局所操作のレーザー光源の照射により取り除かれる様子を、照射前後の量子気体顕微鏡の画像から確認することができた。さらに、固浸レンズを利用した高空間分解能を実現する装置への改良を進め、格子間隔よりも高い空間分解能で単一原子を観測することができ、SU(N)量子気体顕微鏡に向けて開発を前進させることができた。さらに、魔法波長の光格子やスクイズド真空を利用した量子非破壊型量子気体顕微鏡法を考案し論文を出版した。また、リドベルグ原子トラップアレーを用いた量子シミュレーション・量子計算の研究開発を進め、原子観測・フィードバックによる再配置可能な 2 次元光音響偏向器による 100 スポット以上の 2 次元光トラップアレーの生成に成功し、この光トラップアレーに単一原子をトラップすることに成功した。また、リドベルグ状態励起のための高安定光源 (507nm 及び 325nm) を開発し、通常の 2 光子励起方式に内在するデコヒーレンス問題を克服する 1 光子遷移のリドベルグ状態励起に成功した。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、まず散逸ハバードモデルという新規な量子多体系に対する量子シミュレーション実験を行った。まず散逸ボースハバードモデルについて理論グループと共同で行い、強い散逸過程が、強相関モット絶縁体状態から超流動状態への移行を著しく遅らせることを理論グループと実験グループの共同研究で明らかにすることに成功し論文を出版した。また、散逸フェルミハバードモデルという新規の系を構築し、散逸によるスピン相関の反強磁性から、負温度量子磁性に相当する強磁性への変化を系統的に測定し理論予測との良い一致を確認するとともに、多体エンタングル状態である Dicke 状態の生成を示唆する結果を得た。

さらに非平衡での量子多体系の振舞いについても実験グループと理論グループで共同で研究を進め、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について、i) 3 次元系での運動および相互作用エネルギーの時間発展の振舞いを切断 Wigner 近似法を用いた新しい理論解析により、実験結果を定量的に説明することに成功、ii) 1 および 2 次元系での位相コヒーレンスの空間伝搬の様子を初めて実験で観測し、信頼性の高い計算手法を開発して定量的に説明することに成功、また、iii) 1 および 2 次元系での光円錐的な伝搬の定性的な理解、などの成果を得ることができ、論文として出版した。

これ以外にも、PT-対称量子系の実現、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。リープ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、その中間地点を經由せずに移動させることに初めて成功した。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。光格子実験グループでの実験を想定した非ユニバーサル量子計算についての研究も理論グループにより進展させた。

全体研究項目(3)「SU(N)/2 軌道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、SU(N)系の隣接スピン相関を観測する手法を新たに開発し、それを 2 重井戸系および一様な格子系に適用した。米国の理論グループと国際共同研究を行い、SU(N=6)スピン系について系統的に観測した量子磁性測定結果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モデルの最低温度を更新していることを確認し、高いスピン自由度に基づくポメランチュク冷却が原因であることを突き止めた。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確認した。

また、2 軌道系の量子輸送に関する量子シミュレーションでは、実験系の構築をほぼ最初から始

めるところから始めて研究成果を挙げることができた。まず、 ^{171}Yb 原子が近藤効果に必要とされる反強磁性的なスピン交換相互作用を有することを高分解能レーザー分光により明らかにし、さらに励起状態の $3P_0$ 状態のみ局在し、基底状態 $1S_0$ は遍歴する混合次元光格子系を実現し、スピン交換相互ダイナミクスの直接観測に成功した。理論グループでは、双極子振動を観測することで近藤効果を特定できることを提案し、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善し、これらの結果について論文を出版した。さらに、不純物スピンによって誘起されるスピン空間量子輸送シミュレーターを実現した。また、この 2 軌道実験プラットフォームの量子計測への展開の可能性を追求し、その結果、 100pK に相当するわずかなエネルギー差を検知することが可能な究極の量子センサーとして基礎物理研究に応用展開することができ、論文としてまとめた。

(2) 顕著な成果

< 優れた基礎研究としての成果 >

1. Hideki Ozawa, Shintaro Taie, Yosuke Takasu, and Yoshiro Takahashi,

“Antiferromagnetic Spin Correlation of $SU(N)$ Fermi Gas in an Optical Superlattice”,

Physical Review Letters **121**, pp.225303-1-5(2018).

概要: スピン 4 成分のフェルミ粒子系について、これを 2 重井戸に導入し、交換相互作用により誘起される原子間の反強磁性スピン相関を観測することに成功した。これまで密度分布においてのみ実証されていた大きなスピン自由度によるポメラチュク冷却効果が、量子磁性においても有効に機能していることを初めて実証し、新たな冷却機構としての重要性を示した。

2. S. Goto, I. Danshita, “Quasi-Exact Kondo Dynamics of Fermionic Alkali-Earth-Like Atoms at Finite Temperatures”, **Physical Review Letters** **123**, 143002-1-6, 2019

概要: 近年、アルカリ土類型原子気体を用いて近藤不純物模型や近藤格子模型のアナログ量子シミュレーターを作る実験研究が代表者グループを含む世界各地の主導的な実験グループによって進められている。本研究では、この量子シミュレーターで近藤効果(電気抵抗極小現象)を観測するための具体的な方法を提案した。その方法の妥当性を厳密な数値計算から示すために、有限温度の一次元量子多体系を記述する数値計算手法の計算効率を大幅に改善した。

3. Shintaro Taie, Eduardo Ibarra-Garcia-Padilla, Naoki Nishizawa, Yosuke Takasu, Yoshihito Kuno, Hao-Tian Wei, Richard T. Scalettar, Kaden R. A. Hazzard, and Yoshiro Takahashi, “Observation of antiferromagnetic correlations in an ultracold $SU(N)$ Hubbard model”, **arXiv: 2010.07730**, **ICAP2018**他国際会議発表

概要: 量子多体問題の最高峰に位置するフェルミハバードモデルの中でも特にユニークで興味を持たれていると同時に古典計算が極めて困難である $SU(N)$ フェルミハバードモデルの系について、最大 $N=6$ について、近距離量子磁性を観測する手法を確立し、系統的な測定と行うと同時に、最先端の理論計算と比較することにより、冷却原子フェルミハバードモデルの系で、最低温度を実現した。また、高次元系では理論計算が非常に困難な超低温の領域に達した。

< 科学技術イノベーションに大きく寄与する成果 >

1. 量子シミュレーター上で実現可能なシンプルな量子ダイナミクスを用いた機会学習を行う量子回路学習法の提案(量子情報理論グループ)

概要: 量子ダイナミクスを用いた機会学習を行う量子回路学習法を提案した。IBM の超伝導量子コンピュータにおいて既に実証実験が行われている。特に、量子回路学習において利用されている量子回路の解析微分による勾配の取得とそれを用いたパラメータ調整法は、IBM や Rigetti だけでなく、Xanadu(カナダ)、本源量子(中国)、QxBranch(米国)、Zapata computing(米国)など量子コンピュータのソフトウェアを提供するスタートアップ各社が利用している。これら、量子回路学習法及びパラメータ調整法は京大・阪大共同出願で取得しており、PCT も行っている。

2. 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)

概要: 非標準型リーブ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。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り、また質量を持った量子系に対する、新たな量子制御技術として今後の発展に寄与すると期待できる。

3. S. Nakajima, N. Takei, K. Sakuma, Y. Kuno, P. Marra, and Y. Takahashi, "Competition and interplay between topology and quasi-periodic disorder in Thouless pumping of ultracold atoms", **Nature Physics**, vol. 17, 844-849 (2021).

概要: 基本的なトポロジカル量子現象であるサウレスポンプと呼ばれる量子輸送現象系に対して、準周期的な乱れポテンシャルをその大きさは準周期性を制御して状態で導入し、トポロジカル現象の堅牢性とその限界を明らかにすると同時に、乱れによって初めてポンプが誘起される現象を世界に先駆けて実証した。これは乱れに対する堅牢性のために社会への様々な応用が期待されているトポロジカル現象全般に指針を与える重要な結果である。

< 代表的な論文 >

1. T. Tomita, S. Nakajima, I. Danshita, Y. Takasu, and Y. Takahashi, "Observation of the Mott insulator to superfluid crossover of a driven-dissipative Bose-Hubbard system",

Science Advances 3, e1701513-1-8 (2017)

概要: 制御された 2 体散逸過程を 2 原子間の光会合過程により 3 次元光格子中のボース原子に導入することで、強い散逸過程が、強相関モット絶縁体状態から超流動状態への移行を著しく遅らせることを実験的に明らかにすることに成功し、この振る舞いが理論グループの最新の理論計算により説明できることを確認した。これは従来の孤立系における量子シミュレーションを開放系に拡張することに成功したことを意味するものである。

2. Y. Takasu, T. Yagami, H. Asaka, Y. Fukushima, K. Nagao, S. Goto, I. Danshita, and Y. Takahashi, "Energy redistribution and spatiotemporal evolution of correlations after a sudden quench of the Bose-Hubbard model", **Science Advances** 6, eaba9255, 2020.

概要: 古典計算が困難な問題として知られるボース・ハバードモデルのクエンチ後のエネルギーおよび原子相関の時間発展について、イッテルビウム光格子量子シミュレーターを用いて実験的解答を提供することに成功した。特に、数値計算可能な 1 次元系において理論との整合性を確認し、2 次元以上の系について最新の理論計算手法の妥当性を議論することができた。今後、ベンチマークテストとして様々な計算手法の発展に寄与すると期待される。

3. Koki Ono, Toshiya Higomoto, Yugo Saito, Shun Uchino, Yusuke Nishida, and Yoshiro Takahashi, "Observation of spin-space quantum transport induced by an atomic quantum point contact", **Nature Communications**, DOI:10.1038/s41467-021-27011-2 (2021).

概要: 2 軌道量子シミュレーターの特徴を活かしたユニークな量子シミュレーション実験として、量子輸送現象の研究を行い、準安定状態に局在する原子が量子ポイントコンタクトとして機能する 1 次元フェルミ粒子系に対する量子輸送の実験系を、スピン空間という人工次元で実現することに成功した。特に、SU(N)スピン自由度に着目した、制御性の高い Y-ジャンクションの系を実現することに成功した。

§ 2 研究実施体制

(1) 研究チームの体制について

① 光格子実験グループ

研究代表者: 高橋 義朗 (京都大学 大学院理学研究科 教授)

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

主たる共同研究者: 段下 一平 (近畿大学工学部 准教授)

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)

(2) 国内外の研究者や産業界等との連携によるネットワーク形成の状況について

高橋は、国内研究者との連携として、特に理論研究者とのネットワークを積極的に構築した。東大の蘆田祐人准教授、中川大也助教、といった量子物性理論の若手研究者と頻りに会合を重ねた。特に、非エルミート量子系に関して共著論文を完成および準備中である。このほか、上田正仁東大教授、青木秀夫東大名誉教授、初貝安弘筑波大教授、戸塚圭介京大基礎物理学研究所准教授らとも定期的に情報交換を行った。NTTの稲葉健介研究員と山下眞氏 (現阪大教授)ともボース・ハバードモデルの量子シミュレーターについて共同研究を行い、共著論文を作成した。東工大の西田祐介准教授および日本原子力研究所の内野瞬研究員とも 2 軌道系の量子輸送について共同研究を行い、共著論文を作成した。また、量子シミュレーションの可能性を広げる試みとして、原子核物理実験の中村隆司東工大教授らとも定期的に情報交換を行った。さらに、量子シミュレーションの実験系を用いた量子センサーの新たな応用の可能性として、素粒子理論の阪大田中実助教と台湾の山本康裕研究員と議論を重ね、共著論文を完成させた。

国外研究者との連携として、まず、フィンランド Aalto University の Paivi Torma 教授とのリープ格子に関する共同研究の一環で、当該グループの Sebastiano Peotta 博士を 2018 年 3 月に 1 週間京都大学に招聘し集中的に議論を行った。また、2018 年 7 月から 8 月にかけての約 2 週間、アメリカの国立研究所である National Institute of Standards and Technology の Carlos Sá de Melo 氏 (Georgia Institute of Technology との兼任)を京都大学に招聘し、「SU(N)量子磁性とそのドーピング下での振る舞い」、「非等方長距離相互作用するフェルミ粒子系の物理」について議論を重ね、有意義な方向性を見出し、今後のより長期にわたる共同研究のための基礎を築いた。また、2018 年 9 月より 3 ヶ月間、韓国の国立研究所 Korea Research Institute of Standards and Science(KRISS) の principal research scientist である Jongchul Mun 博士を研究室に招聘し、超狭線幅遷移を駆使した 2 軌道量子シミュレーターについて共同研究を行っている。また、中国 Renmin University の Peng Zhang 教授を 2017 年に京大に招聘し、2 軌道量子シミュレーター、特に近藤効果の可能について集中議論を行った。この他にも海外の理論研究者 (デンマーク Aarhus University の Georg M. Bruun 教授、ポーランド Nicolaus Copernicus University の Mateusz Borkowski 博士)とも 2017

年、2018年の国際会議で直接会って議論を進めその後も頻繁に情報交換を行っており幅広く共同研究ネットワークを形成した。さらに、米国 Harvard University の John Doyle 教授のグループと、長距離相互作用を有する冷却分子を用いた量子シミュレーションの可能性について、定期的に議論を行った。米国 Rice 大学の Kaden Hazzard 教授のグループとは、より直接的に、SU(N)ハバードモデルについて密な共同研究を行い、我々の実験結果に対応する高度な理論計算を行うことにより複数の共著論文を完成させた。リモート量子シミュレーションの可能性についても、米国 ColdQuanta 社の Dana Anderson CEO やデンマークの Aarhus University の Jacob Sherson 教授のグループと議論を重ね、国際ネットワークを築いた。

また、産業界との関係の可能性も積極的に探り、特に 2018 年に、冷却原子を用いた量子計算機の開発・利用に興味を持つ複数の民間企業の研究者と情報交換を行い、ネットワークを構築している。特に、日亜化学の高野哲至主任研究員とは共著論文を完成させた。

段下は、2018年2月から4週間、研究参加者である長尾一馬氏(京都大学基礎物理学研究所博士後期課程3年)を Boston University の Anatoli Polkovnikov 教授のグループに派遣し、「Fermi 粒子系に対する切断 Wigner 近似法」という国内には使用者のいない最先端の数値計算手法の共同研究・開発プロジェクトを開始した。CREST の国際強化支援策を利用して、2018年10月に再び2週間ほど長尾氏を同グループに派遣し、この共同研究をさらに推進した。

さらに段下は、量子縮退気体分野でのプレゼンスを急速に拡大している中国の研究者とのネットワーク形成を積極的に進めている。具体的には、2017年10月に東京大学、2018年8月に清華大学で開催された二国間研究会「Tokyo-Beijing Workshop on Ultracold Atoms」に参加した際に、主催者である清華大学の翟薈教授(Zhai, Hui)および東京大学の上田正仁教授と交流し、段下が次回の研究会の主催を務めることになった。また、2017年11月に組織委員として企画した「Novel Quantum States 2017」で招待した香港科技大学の曹圭鵬助教授(Jo, Gyu-Boong)とその後交流を継続し、共同で冷却気体を用いた量子シミュレーションに関する研究会の開催を企画し2019年に開催した <http://ias.ust.hk/events/201905qs/overview.php>。さらに、Tsinghua Univ. の Zhai 氏、Univ. Tokyo の Ueda 氏とのネットワークを活かして2019年度に冷却気体に関する国際研究会を開催した <http://www2.yukawa.kyoto-u.ac.jp/~ultracold2019/index.php>。

山本はアメリカの国立研究所である National Institute of Standards and Technology の Carlos Sá de Melo 氏 (Georgia Institute of Technology との兼任) および Ian Spielman 氏との共同研究を行っている。Sá de Melo 氏は冷却原子気体を主な専門とする理論研究者であり、Spielman 氏は世界で初めて冷却原子気体に人工的なスピン軌道相互作用を導入することに成功した実験研究者である。両氏との共同研究として行ったスピン軌道相互作用を有する光格子 Bose 原子気体の理論研究は Physical Review A 誌の Rapid Communications として採択され出版されている。現在も引き続き新たな共同研究を行っている。また、光格子を用いた量子磁性の量子シミュレーション研究に関連し、磁性絶縁体物質の強磁場測定を行っているドイツ Helmholtz-Zentrum Berlin の Oleksandr Prokhnenko 氏との共同研究も行っている。同氏の率いる実験グループでは数十テスラの強磁場中での非弾性中性子散乱実験を行っている。本共同研究で得られた磁性絶縁体物質に対する知見は、今後の量子磁性の量子シミュレーション研究において活かしている。