

平成30年6月7日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2017

課題番号：26400418

研究課題名(和文) イオンをもちいたハバード模型の量子シミュレーションに関する研究

研究課題名(英文) Study on the quantum simulation of the Hubbard model using trapped ions

研究代表者

豊田 健二 (Toyoda, Kenji)

大阪大学・基礎工学研究科・助教

研究者番号：20314403

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、トラップされたイオンの系を用い、固体中の強く相互作用する電子系の基本的な特徴を捉えるような物理的模型をシミュレートすることに向けて、また振動量子(フォノン)を用いた量子情報処理実現にむけて、基礎的な研究を行った。イオンを個別に高強度で光励起できる光学システムを構築し、それを用いてJaynes-Cummings-Hubbard模型の量子シミュレーションを2-4個のカルシウムイオン配列を用いて行い、モット絶縁体と超流動体間の転移を観測した。また2個のフォノンの量子干渉(ホン・オウ・マンデル効果)、1個のフォノンが4サイトを伝搬する量子ウォークを、いずれも初めて観測することに成功した。

研究成果の概要(英文)：In this study, by using strings of trapped ions, we have conducted basic researches on the quantum simulation of physical models that capture the basic characteristics of strongly interacting electron systems in solids and on phonon-based quantum information processing. We developed an optical system that enabled the excitation of individual ions with high intensities, and by using it we performed the quantum simulation of the Jaynes-Cummings-Hubbard model with 2-4 calcium ions, observing quantum phase transitions between Mott insulators and superfluids. In addition, we observed, for the first time, a quantum interference of two phonons (Hong-Ou-Mandel effect) and a 1-phonon quantum walk in 4 sites.

研究分野：量子エレクトロニクス

キーワード：イオントラップ 量子シミュレーション 量子情報処理

1. 研究開始当初の背景

固体中の相互作用する電子の系を記述する基本的なモデルであるハバード (Hubbard) 模型は、磁性や高温超伝導の機構解明のために重要なモデルであると認識されている。しかし、その理論的扱いは難しく、特に規模/次元が大きい場合や非平衡条件下での系の振る舞いについては未解明のことが多い。このような取り扱いの難しいモデルを、制御性の高い実際の量子系を用いてシミュレートするという量子シミュレーションが近年注目されており、ハバード模型や類似するモデルに対してもこのアプローチは有効であると考えられる。

ハバード模型に関連して、光共振器と原子からなる系を多数結合させて、同様の系をシミュレートする提案が近年なされ、注目されている [Jaynes-Cummings-Hubbard (JCH) 模型]。Jaynes-Cummings (JC) 模型で記述される光共振器中の光電場と結合した原子のサイトを多数個集めて相互接続することでそのような系を構成することができる。この系の中で、光子は原子と結合し「ポラリトン」として振る舞う。

この JCH 模型をトラップされたイオンの系でシミュレートするという理論提案がなされている。

2. 研究の目的

本研究は、トラップされたイオンの系を用い、ハバード模型に代表される量子多体系をシミュレートするための基礎的な研究を行うことを目的とする。特に JCH 模型をシミュレートすること、またフォノン (振動量子) の二粒子干渉を始めとする、フォノン系に関する研究を行う。

1. JCH 模型のシミュレーションの実現: リニアトラップ中のイオンを用いてポラリトンモット絶縁体と呼ばれる状態をイオン系で実現すること、また JCH 模型を 3~6 個のイオンの系に拡張し個数に依存して相転移の鋭さが変化するような有限サイズ効果を観測することを目指す。

2. フォノンの二粒子干渉の観測実験: Bose 系の基本的な性質である二粒子の統計性 (Bose 粒子の群れやすい性質を反映) をフォノンを用いて示すことを目指す。

さらに、ボソン標本化などを行う上で重要なモード間結合の制御、フォノン数分解検出などを行う。

3. 研究の方法

(1) JCH 模型実験に関しては、各イオンを個別に高いラビ周波数で照射することが重要と

なる。このために、光マルチアクセスシステムと呼ばれる各イオンを個別に光照射するシステムを構築する。これを用いてイオンにレッドサイドバンド光を照射し、パラメータを断熱的に変化させることにより、性質の異なる基底状態間の相転移を観測する。

(2) 上記と同様の実験系を用い、フォノンを光パルスにより準備した後光を切り、一定の待ち時間後に観測することで、フォノン自体の時間発展を追う。また、終状態の個数分解検出を行う。

4. 研究成果

(1) 光マルチアクセスシステムの構築

JCH 模型の量子シミュレーションを、より大規模な系で行うために、JC 相互作用を引き起こさせるためのレッドサイドバンドパルスの強度を保ち、またイオン間隔を 20 μm 程度に保ちながらサイト数を増やしていくことが必要となる。このために光マルチアクセスシステムという、イオン鎖中のイオンに複数の光ビームを個別に照射するための光学系等を開発し、それを用いて実験を行う。H26 年度中に最大で 4 個に照射できるシステムを構築し (図 1)、3 個のイオンに対してそれぞれキャリアラビ周波数 300kHz を実現した。H27 年度にはハーフビームスプリッターの代わりにエッジミラーを用いたロスのない光学系を新たに構築し、一本当たりキャリアラビ周波数 600kHz 以上を実現した。これはサイドバンドラビ周波数に換算して 20kHz 程度に対応する。これは、イオン間のフォノンホッピング周波数 (数 kHz のオーダー) を十分上回るものであり、JCH 模型の量子シミュレーションの実現・観測に関して十分な値であると予測された。

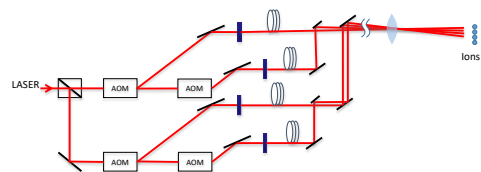


図 1: 光マルチアクセスシステム

(2) JCH 模型における相転移観測実験

前節において開発した光マルチアクセスシステムを用いて、3 サイトの JCH 模型の量子シミュレーションを行い、基底状態間 (Atomic Mott Insulator から Phonon Superfluid) の量子相転移を観測した (図 2)。

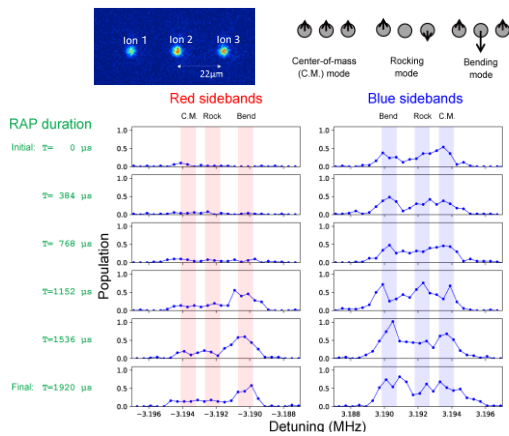


図 2:3 イオン JCH 模型における量子相転移の観測

また同様にして、4 個の Ca イオンに対して量子シミュレーション（高速断熱通過）実験を行い、内部状態、運動状態が期待される基底状態に遷移していることを確認した(図 3)。

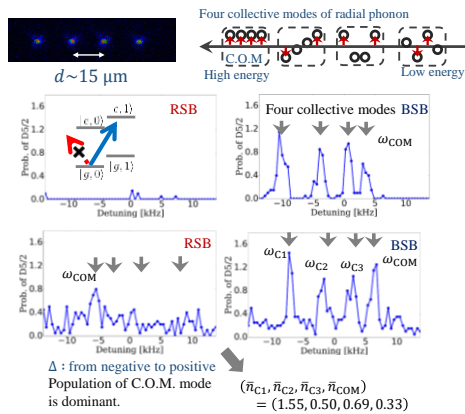


図 3:4 イオン JCH 模型における量子相転移の観測

(3) 量子相転移の詳細な分析のための励起数分散計測・評価手法の開発

量子相転移の観測としては、上記の結果を含めて、2-4 個のイオンでの観測に成功した。ただし、その方法は、始状態と終状態が比較的自明な状態（内部状態とフォノン状態の直積となるような状態）となるようパラメータの軌道を選んで行ったものであった。JCH 模型の励起は一般には内部状態とフォノン状態に分離できないポラリトンの形態をとる。このような状態を適切に評価するための方法として、内部状態・フォノン状態同時検出という手法を導入することにより、転移の判別に必要な局所励起数分散と呼ばれる量を、任意サイト数に拡張可能な方法でより直接的に評価することを試みた。その結果、2 サイトに対して、絶縁体→超流動体の量子相

転移において分散が増加する振る舞いが的確に評価できていることを確認した(図 4)。

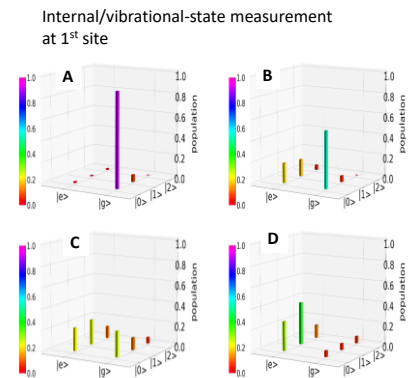


図 4: 同時計測による 2 イオン JCH 模型の量子相転移の評価

(4) ポラリトンモット絶縁体→超流動体転移観測に向けた研究

一般にハバード模型では、粒子間相互作用と飛び移り相互作用の兼ね合いによって、モット絶縁体→超流動体転移という特徴的な量子多体現象が起こることが知られている。JCH 模型では、特に複合粒子であるポラリトンがこの転移を起こすことが予想され、大きな特色となっている。この転移の検出方法の確立がこれまで課題であったが、今回位相を制御した解析パルスによる新たな分析法を導入し、2 サイトの場合に転移の検出を試みた。その結果、ポラリトンモット絶縁体領域、フォノン超流動体領域を区別して検出することに成功し、解析パルスの動作について検証することができた。この方法を用いてポラリトン超流動体の検出、ひいてはポラリトン量子相転移の検出を行うことが今後の課題である。

(5) 2 フォノンの量子干渉（ホン・オウ・マンデル効果）の観測

2 個のイオンに動径方向フォノンを 1 個ずつ準備し、それらを自由に時間発展（ホッピング）させたとき、ホッピング相互作用の効果がちょうどハーフビームスプリッターの効果と同等となるような時間で、2 つのサイトのフォノン同時係数確率がゼロとなる現象（ホン・オウ・マンデル効果）を観測することに成功した(図 5)。これはビームスプリッターの 2 つの出力ポートのいずれかに粒子がまとまって出力されることに対応しており、ボース粒子特有の現象である。この結果は Nature 誌に論文発表した [Toyoda *et al.*, Nature 527, 74 (2015)]。

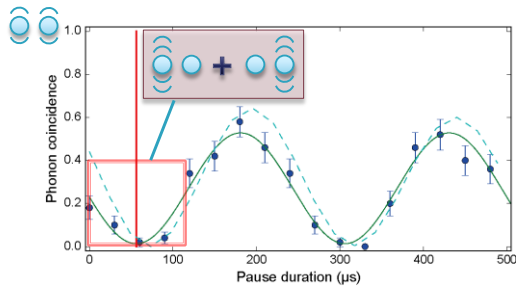


図 5: 2 フォノン干渉 (ホン・オウ・マンデル効果) の観測

(6) フォノン系の結合実験

フォノン系のマニピュレーションに関する実験として、リニアトラップの単一イオンの動径 2 方向間の結合を引き起こす実験を行った。トラップ電極に印加する電圧を連続的に変化させることで、x 方向の振動モードに準備した熱的なフォノンを断熱的に y 方向の振動モードに移送することに成功した。

印加する電圧の変化速度に対して、モード間の遷移効率は、理想的にはランダウ・ツェナーの公式にしたがって変化することが期待される。実験では、印加する電圧を連続的に変化させる速度を変えた場合に、遷移確率がその速度に依存するような振る舞いを観測することに成功した。

(7) フォノン個数分解検出の実現

フォノンを用いたボソン標本化などの量子情報処理にむけては、光子に対する光子数分解検出に対応するフォノン数分解検出を実現することが重要である。これに関して、1 サイトの場合に 80%程度の効率で個数分解検出を行うことに成功した。また 2 サイトに関しては、サイト間の相関を検出することに成功し、既存の方法を上回る情報を得ることに成功した。

(8) 1 フォノンの 4 サイトにおける量子ウォーク

4 個のイオンからなるイオン配列のいずれかのサイトに動径フォノン 1 個を生成し、それが隣接サイト間ホッピングにより配列全体にわたって伝搬していく様子を観測することに、初めて成功した (図 6)。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 3 件)

- (1) Miho Fujieda, Tetsuya Ido, Hidekazu Hachisu, Tadahiro Gotoh, Hiroshi Takiguchi, Kazuhiro Hayasaka, Kenji Toyoda, Kenji Yonegaki, Utako Tanaka, and Shinji Urabe, "Frequency Measurement System of Optical Clocks

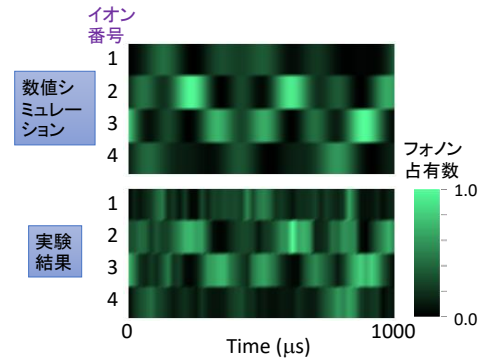


図 6: 1 フォノンの 4 サイトにおける量子ウォークの観測

Without a Flywheel Oscillator" IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control 63/12, 2231 - 2236 (2016)

- (2) Kenji Toyoda, Ryoto Hiji, Atsushi Noguchi, and Shinji Urabe, "Hong-Ou-Mandel interference of two phonons in trapped ions", Nature 527 (7576), 74-77 (05 November 2015)
- (3) Atsushi Noguchi, Yutaka Shikano, Kenji Toyoda, and Shinji Urabe, "Aharonov-Bohm effect in the tunneling of a quantum rotor in a linear trap", Nat. Commun., 5, 3868 (2014)

[学会発表] (計 17 件)

(国際学会招待講演)

- (1) K. Toyoda, "Quantum simulation with an array of Jaynes-Cummings systems using trapped ions", The 1st Asia-Pacific Workshop on Trapped Quantum Systems (APTQS2017), December 8-10, 2017, (Sun Yat-sen University, Zhuhai campus, Zhuhai, China; 2017.12.9)
- (2) K. Toyoda and S. Urabe, "Quantum information processing and quantum simulation based on phonons in trapped ions", ECTI 2016 - European Conference on Trapped Ions, August 29 - September 2, 2016 (Waldhotel National Arosa, Switzerland; 2016.8.31)
- (3) Kenji Toyoda, Atsushi Noguchi, Shinji Urabe, "Jaynes-Cummings-Hubbard model and bosonic-particle system using trapped ions", Satellite Meeting of AQIS' 15 - 15th Asian Quantum Information Science Conference (KIAS, Seoul, Korea; 2015.8.29)
- (4) K. Toyoda, A. Noguchi and S. Urabe, "Quantum Simulation of the Jaynes-Cummings-Hubbard Model Using Trapped Ions", TCP 2014 - The sixth

international conference on Trapped Charged Particles and Fundamental Physics (Kagawa International Conference Hall, Takamatsu Symbol Tower; 2014. 12. 5)

(国際学会講演)

- (1) "Phonon-number-resolving detection of multiple radial phonon modes with trapped ions", Yuichi Maruhashi, Fukukai Ryu, Kenji Toyoda, The 24th Congress of the International Commission for Optics, Keio Plaza Hotel, Tokyo (21-25 August 2017); (August 23, 2017) (口頭発表)
- (2) Fukukai Ryu, Yuichi Maruhashi, Kenji Toyoda, "Quantum simulation of the Jaynes-Cummings-Hubbard model with four trapped ions", International Conference on Laser Spectroscopy, Palais des Congres, Arcachon, France (July 2 - 8, 2017); July 3-4, 2017 (ポスター発表)
- (3) Yuichi Maruhashi, Fukukai Ryu, Kenji Toyoda, "Phonon-number-resolving detection of radial vibrational modes in trapped ions", International Conference on Laser Spectroscopy, Palais des Congres, Arcachon, France (July 2 - 8, 2017); July 3-4, 2017 (ポスター発表)

(国内学会招待講演)

- (1) 豊田健二、イオン配列中フォノンの光制御と情報処理への応用 応用物理学会・量子エレクトロニクス研究会「光操作の最前線」(2017年12月14日(木)～12月16日(土)) (講演日:2017. 12. 16)

(国内学会講演)

- (1) 田村昌也、田中歌子、向山敬、豊田健二、冷却イオンを用いた局所フォノンのホッピングダイナミクスの観測、日本物理学会第73回年次大会(2018年)(東京理科大学野田キャンパス) 講演番号: 23pK101-5
- (2) 冨桝豪、田中歌子、向山敬、豊田健二、イオンを用いた Jaynes-Cummings-Hubbard 模型におけるポラリトン数分散の評価、日本物理学会2017年秋季大会(岩手大学上田キャンパス) 講演番号: 22pA10-12
- (3) 冷却イオンを用いた4サイト Jaynes-Cummings-Hubbard 模型の量子シミュレーション、劉福海、丸橋裕一、豊田健二、日本物理学会第72回年次大会(2017年)(大阪大学豊中キャンパス) 講演番号: 20aH31-5
- (4) イオンを用いた複数動径振動モードのフォノン数分解検出、丸橋裕一、劉福海、

豊田健二、日本物理学会第72回年次大会(2017年)(大阪大学豊中キャンパス) 講演番号: 20aH31-6

- (5) 個別アクセス光ビームを用いた Jaynes-Cummings-Hubbard モデルの局所操作、村上慶、比治諒人、豊田健二、占部伸二、日本物理学会第71回年次大会(2016年)(東北学院大) 講演番号: 22pBK-5
- (6) イオンの振動量子状態のモード間結合の実現、洲崎景介、戸次翔太、豊田健二、占部伸二、日本物理学会2015年秋季大会(関西大学千里山キャンパス) 講演番号: 19aBA-11
- (7) 仲介水素レーザーが不要な衛星リンク遠距離絶対周波数測定、井戸哲也、藤枝美穂、後藤忠広、瀧口博士、早坂和弘、豊田健二、米垣賢治、田中歌子、占部伸二、日本物理学会第70回年次大会(2015年)(早稲田大) 講演番号: 24pAG-1
- (8) 搬送波位相衛星双方向比較による $^{40}\text{Ca}^+$ イオンの $4s^2S_{1/2}-3d^2D_{5/2}$ 遷移周波数の測定、米垣賢治、豊田健二、田中歌子、占部伸二、藤枝美穂、早坂和弘、井戸哲也、日本物理学会第70回年次大会(2015年)(早稲田大) 講演番号: 24pAG-2
- (9) 光マルチアクセスによる Jaynes-Cummings-Hubbard 模型の量子シミュレーションの多サイト化、河野修久、比治諒人、野口篤志、豊田健二、占部伸二、日本物理学会第70回年次大会(2015年)(早稲田大) 講演番号: 24pAG-3

[図書] (計1件)

- (1) Shinji Urabe, Kenji Toyoda, Atsushi Noguchi, "Quantum Simulation with Trapped Ions--Experimental Realization of the Jaynes-Cummings-Hubbard Model--" in Lecture Notes in Physics, Volume 911, pp 325-340 (2016), "Principles and Methods of Quantum Information Technologies", Editors: Yoshihisa Yamamoto, Kouichi Semba., (Springer Japan, Tokyo, 2016)

[その他]

ホームページ等

<http://www.qe.ee.es.osaka-u.ac.jp/>

6. 研究組織

- (1) 研究代表者
豊田健二 (TOYODA, Kenji)
大阪大学・基礎工学研究科・助教
研究者番号: 20314403