

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 5 日現在

機関番号：14301

研究種目：新学術領域研究(研究領域提案型)

研究期間：2009～2013

課題番号：21102005

研究課題名(和文)冷却原子を用いた量子制御

研究課題名(英文)Quantum control using cold atoms

研究代表者

高橋 義朗(TAKAHASHI, Yoshiro)

京都大学・理学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：40226907

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 97,800,000円、(間接経費) 29,340,000円

研究成果の概要(和文)：光格子系では、SU(6)モット絶縁体状態を生成するなど特徴ある強相関量子多体系の量子シミュレーションを実現した。さらに、アトムチップでは超伝導永久電流アトムチップ上で長寿命なスピノルボース凝縮の生成に成功した。スピン制御では、ボース凝縮を用いたスピン計測・制御法を開発するとともに、冷却原子の核スピン集団に対して、ファラデー回転による量子非破壊測定を実現し、その核スピン集団への高速量子フィードバック制御の開発に成功した。

研究成果の概要(英文)：We have succeeded in the unique quantum simulation such as the formation of a SU(6) Mott insulator state. In addition, we have successfully created long-lived spinor Bose-Einstein condensate on an atom chip using a super-current of superconductors. Furthermore, we have developed a spin measurement and control methods for a Bose condensate, and realized a quantum non-demolition measurement using Faraday rotation and succeeded in developing the fast quantum feedback control.

研究分野：複合新領域

科研費の分科・細目：ナノ・マイクロ科学 マイクロ・ナノデバイス

キーワード：原子・分子物理 超精密計測 超伝導材料・素子 量子エレクトロニクス 量子コンピュータ

1. 研究開始当初の背景

(1)近年、原子の運動状態を制御する技術は飛躍的に進歩しており、特に1995年にアルカリ金属原子のボース凝縮(BEC)が実現されて以来、非常に盛んに行われていて急進展を遂げている。このボース凝縮やフェルミ縮退などの量子縮退した原子集団は、これまでの物理系と違い、制御性に極めて優れた新しい量子多体系として、様々な面から大変注目を集めている。多くの応用の中でも最も有望視されているものの一つが、量子情報研究への展開であり、量子縮退した原子集団は、量子情報の保存と演算処理において、最も優れた物理系となると期待されている。

(2)このような研究動向の中、研究代表者のグループ(高橋、高須)は、これまで主に研究の対象とされてきたアルカリ原子系と大きく異なるユニークな特徴のある原子系として、イッテルビウム原子(Yb)を対象として選り研究を推進してきた。Yb原子では、特に、「基底状態における電子スピンの消失」、「準安定状態における大きな磁気モーメントの存在」、そして「両状態を結ぶ狭線幅光学遷移の存在」、があり、これらの特徴を駆使することにより、それぞれ、「デコヒーレンスの抑制」、「磁気双極子相互作用による量子演算」、そして「量子ビット間相互作用のスイッチングと個別アクセス」、といった、冷却原子を用いた量子情報研究における全く新しい可能性をもたらし得るとの着想を得ていた。

(3)また、研究分担者(向井)は、固体表面上の電気回路を用いる原子トラップ(「アトムチップ」)の技術を発展させ、従来問題とされた熱および電磁気的なノイズの影響を桁違いに抑えた「超伝導永久電流アトムチップ」の開発に成功していた。この超伝導アトムチップを応用することで、「量子レベルの強い原子閉じ込め」を、「周期性を持たない任意の原子配列」に作る事ができるので、「個々の原子への独立な光学的アクセス」が容易になると考えた。さらに、この超伝導アトムチップは、冷却原子の量子状態と超伝導状態とをコヒーレントに結合させる未開拓の領域を研究する上で、当時考え得る最も有効な出発点であると考えた。

(4)また、原子スピンは優れた量子ビットとなるが、研究連携者(平野)は、スピン自由度を持った量子縮退原子の性質について先駆的な研究を行ってきた。

2. 研究の目的

(1)本研究では、物理系として「冷却中性原子」を用いて、原子冷却技術を共通の研究基盤として、「光格子」と「アトムチップ」および「スピン制御」の3つの異なるアプローチから量子コヒーレント制御を目指し、量子

計算および量子シミュレーションの実現につなげることを目的とした。

(2)「光格子」とは光の定在波によって作られる周期的なポテンシャルのことであり、 10^4 を超える多数個の量子ビット系として大変注目を集めている。ただし、これまでの研究では原子集団全体を操作・検出しているのみであった。本研究では、光学スペクトルを用いたコヒーレント操作、単一原子および複数原子間の量子制御・検出を可能にする「単一格子点アクセス可能光格子」を実現することを目指した。さらに、制御性が極めて高い光格子系の特徴を最大限に生かして、固体物性研究において重要なハバードハミルトニアンを量子シミュレーションを行なうことを目的とした。

(3)「アトムチップ」を用いたアプローチでは、現代の微細加工技術を駆使することにより、捕捉した単一原子間のコヒーレント制御を目的とする「新機能・超伝導アトムチップ」を開発すると同時に、将来的な超伝導との連携を考慮した量子制御法を創出し、この実現に向けた基盤技術を開発する。

(4)一方、スピン自由度を持った冷却原子の性質は未解明の部分が多い。スピンの書き込んだ情報は、スピン交換衝突により失われると予測されるので、量子情報処理に応用しようとする際に、その基礎物性の理解は必要不可欠と考えられる。そこで、スピン自由度を持った冷却原子の基礎物性を明らかにするとともに、量子情報処理の媒体としての諸特性を定量的に示すことも目的とした。

3. 研究の方法

(1)「光格子」を用いたアプローチでは、まず、光格子中 Yb 原子に対して、光による高度コヒーレント制御システムを開発する。また、ハバードモデルの量子シミュレーション研究では、原子波干渉、光会合、高分解能分光を組み合わせた、超流動・モット絶縁体転移の解明、高いスピン対称性 SU(6)を有する冷却フェルミ原子系を用いて、SU(6)ハバードモデルを実装する。また、核スピンを分離して観測することが可能な新しい手法の開発を行う。

(2)「アトムチップ」を用いたアプローチでは、熱や電磁気的なノイズの問題を克服した「超伝導永久電流アトムチップ」という、世界に先駆けた独自の技術を最先端微細加工技術と組み合わせることでさらに発展させる。

(3)「スピン制御」では、量子縮退気体を対象とした研究ではアルカリ原子の ^{87}Rb 原子のBECを用いて、交差型光トラップおよび1次元光格子中に多成分のボース凝縮原子を用意し、その振る舞いを、マイクロ波遷移とR

F遷移を利用して調べる。交差型光トラップに導入した系では、相分離ダイナミクスを、1次元光格子に導入した系では、相分離の影響を抑えた状況下でのスピン交換衝突と非弾性衝突を重点的に調べる。さらに、冷却核スピン集団を対象とした研究では、イッテルビウム原子のフェルミ同位体 ^{171}Yb を用いて、量子非破壊測定を行い、かつその測定結果を原子スピン集団に光パルスによる高速フィードバック制御することにより、量子測定に伴う波束の収縮のランダムさを低減する技術「スピン集団の量子フィードバック制御」を開発する。

(4) 特に、本領域では、異なった物理系を対象に量子状態の高度な制御を研究するが、その根幹である量子操作の基本原理は共通であり、したがって領域内での有機的共同研究が十分可能である。そもそも、ボース凝縮した原子集団は、超伝導状態と同様に巨視的な系が量子相転移した状態であり、物理的に共通した背景を持つ。従って、まず超伝導アトムチップを用いたアプローチでは、超伝導の計画研究との有機的な共同研究を行うことにより、冷却原子の量子状態とそのトラップを構成する超伝導の量子状態とをコヒーレントに結合させる研究スキームの創出が可能である。また、量子ビット間の磁気双極子相互作用により2量子ビットゲート操作を行なうことは、分子の計画研究とも密接に関係しているため、有機的な連携により新たな展開が可能である。

4. 研究成果

(1) 「光格子」を用いたアプローチでは、Yb原子の単層2次元量子気体の実現とその2次元および3次元光格子への導入、ほぼ単一原子を検出できる高感度蛍光検出系の開発、ほぼ光格子間隔の空間分解能を持った磁場共鳴イメージング系の構築、2次元量子気体に対するスペクトル情報と空間情報を兼ね備えたスペクトラルイメージング法の開発、およびそのための3Hz程度の安定な励起光源系の開発、などに成功した。

(2) 特に、量子シミュレーション研究として、SU(6)Mott絶縁体のポメラランチュク冷却機構による生成、超流動モット絶縁体転移に対するサイト数分解レーザー分光法の開発、アルカリ原子とYb原子の混合量子縮退系の実現およびその3次元光格子への導入による不純物量子シミュレーターへの展開、異なる電子軌道状態の間の磁気フェッシュバツハ共鳴の発見とフェッシュバツハ分子の直接光会合、リーブ型光格子の実現、3次元光格子中の長寿命分子の生成と観測、などに成功した。

(3) 「アトムチップ」では、固体表面近傍に捕捉した冷却原子を用いた量子制御の研究

を行ない、超伝導永久電流が作る安定な磁場ポテンシャル中で、ルビジウム原子のBEC $|F, mF\rangle = |2, +2\rangle$ を生成し、ラジオ波RFを照射することで、その内部状態を $F = 2$ 内の異なる磁気副順位 (mF) 間でコヒーレントに制御することに成功した。次に、 $|1, -1\rangle$ を初期状態として凝縮体を生成し、マイクロ波とRFを同時に照射することで、1次のゼーマンシフトの差がゼロとなる $|1, -1\rangle - |2, +1\rangle$ 間でのコヒーレントな制御を実現した。磁場ポテンシャルに対する2状態間の不均一性が抑えられたことで、コヒーレンス時間が2桁改善され、 $|2, +1\rangle$ 状態原子間の非弾性衝突による損失が顕著に現れる領域に到達した。これにより、超伝導永久電流アトムチップ上で長寿命なスピノルBECをコヒーレントに生成することが可能になった。その結果、単一の擬1次元ポテンシャルを実現できる超伝導永久電流アトムチップの特徴を利用する「高密度擬1次元量子多体系のシミュレーション」の研究を実施する道が拓けたと考えられる。

(4) 「スピン制御」では光トラップ中の原子BECのスピンを、エコー技術を用いて操作し、DC的な変動磁場や磁場勾配の影響を低減可能な交流磁力計を開発した。この磁力計を用いて環境磁場ノイズを測定し、このノイズを打ち消す磁場を人為的に加え、環境磁場ノイズを1nT以下に低減することに成功した。

(5) さらに、冷却 ^{171}Yb 原子の核スピン集団について、ファラデー回転相互作用による、量子非破壊測定を実現し、その測定結果のスピン系への射影によるスピンスクイズド状態の生成に成功するとともに、その測定結果をもとにした回転操作を高速にスピン系に施すことにより、スピン集団に対する量子フィードバック制御を実現した。

(6) ここで、特筆すべきこととして、領域内外との融合研究の推進を挙げることができる。国内外の外部の理論研究者と積極的に情報交換を行い、人的ネットワークを形成した。また、阪大占部研究室の局所アドレッシング技術や高安定干渉システム技術を移入し、また、阪大北川研究室と、磁氣的相互作用する冷却原子系の磁気相転移の可能性の追求を開始したことなどを、例として挙げることができる。

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 33件)

2013年度

Kosuke Shibata, Ryuta Yamamoto, Yu Seki, and Yoshiro Takahashi, Optical

spectral imaging of a single layer of a quantum gas with an ultranarrow optical transition, Phys. Rev. A, 査読有, Vol. 89, 2014, pp.031601(R)-1-5
DOI:10.1103/PhysRevA.89.031601
Hiromitsu Imai, Kensuke Inaba, Haruka Tanji-Suzuki, Makoto Yamashita, and Tetsuya Mukai, Bose-Einstein condensate on a persistent-supercurrent atom chip, Applied Physics B, 査読有, (2014.2.14 published online)
DOI: 10.1007/s00340-014-5768-3
Ahmed Abdelrahman, Tetsuya Mukai, Hartmut Häffner, and Tim Byrnes, Coherent all-optical control of ultracold atoms arrays in permanent magnetic traps, Optics Express, 査読有, Vol. 22, No. 3, 2014, pp. 3501-3513
DOI: 10.1364/OE.22.003501
Hideaki Hara, Hideki Konishi, Shuta Nakajima, Yosuke Takasu, and Yoshiro Takahashi, A Three-Dimensional Optical Lattice of Ytterbium and Lithium Atomic Gas Mixture, J. Phys. Soc. Jpn., 査読有, Vol. 83, 2014 pp.014003-1-8
DOI: 10.7566/JPSJ.83.014003
Kosuke Shibata, Ryuta Yamamoto, and Yoshiro Takahashi, High-Sensitivity In situ Fluorescence Imaging of Ytterbium Atoms in a Two-Dimensional Optical Lattice with Dual Optical Molasses, J. Phys. Soc. Jpn., 査読有, Vol. 83, 2014, pp.014301-1-8
DOI:10.7566/JPSJ.83.014301
衛藤 雄二郎, 平野 琢也, ポース・アインシュタイン凝縮体を用いた磁力計, 応用物理, 査読無, 第 82 巻 第 9 号, 2013, pp.769-772,
<http://www.jsap.or.jp/ap/2013/09/ob820769.xml>
Yujiro Eto, Hayato Ikeda, Hirosuke Suzuki, Sho Hasegawa, Yasushi Tomiyama, Sawako Sekine, Mark Sadgrove, and Takuya Hirano, Spin-echo-based magnetometry with spinor Bose-Einstein condensates, Phys. Rev. A, 査読有, Vol.88, 2013, pp.031602-1-4
DOI:10.1103/PhysRevA.88.031602
Mark Sadgrove, Yujiro Eto, Sawako Sekine, Hirosuke Suzuki, and Takuya Hirano, Ramsey Interferometry Using the Zeeman Sublevels in a Spin-2 Bose Gas, Journal of the Physical Society of Japan, 査読有, Vol. 82, 2013, pp.094002-1-6
DOI:10.7566/JPSJ.82.094002
Makoto Yamashita, Shinya Kato,

Atsushi Yamaguchi, Seiji Sugawa, Takeshi Fukuhara, Satoshi Uetake, and Yoshiro Takahashi, Strongly interacting array of Bose-Einstein condensates trapped in a one-dimensional optical lattice, Phys. Rev. A, 査読有, Vol.87, 2013, pp.041604-1-5
DOI:10.1103/PhysRevA.87.041604
Shinya Kato, Seiji Sugawa, Kosuke Shibata, Ryuta Yamamoto, and Yoshiro Takahashi, Control of Resonant Interaction between Electronic Ground and Excited States, Phys. Rev. Lett., 査読有, Vol.110, 2013, pp.173201-1-5,
DOI:10.1103/PhysRevLett.110.173201

2012 年度

Yujiro Eto, Sawako Sekine, Sho Hasegawa, Mark Sadgrove, Hiroki Saito and Takuya Hirano, Control and detection of the Larmor precession of $F=2$ ^{87}Rb Bose-Einstein Condensates by Ramsey interferometry and spin-echo, Applied Physics Express, 査読有, Vol.6, 2013, pp.052801-1-4,
DOI:10.7567/APEX.6.052801
R. Inoue, S. Tanaka, R. Namiki, T. Sagawa, and Y. Takahashi, Unconditional quantum-noise suppression via measurement-based quantum feedback, Phys. Rev. Lett., 査読有, Vol.110, 2013, pp.163602-1-5,
DOI:10.1103/PhysRevLett.110.163602
R. Yamazaki, S. Taie, S. Sugawa, K. Enomoto, and Y. Takahashi, Observation of a p-wave optical Feshbach resonance, PHYSICAL REVIEW A, 査読有, Vol.87,2013, pp.010704-1-5
DOI:10.1103/PhysRevA.87.010704
Shinya Kato, Rekishu Yamazaki, Kosuke Shibata, Ryuta Yamamoto, Hirotaka Yamada, and Yoshiro Takahashi, Observation of long-lived van der Waals molecules in an optical lattice, Phys. Rev. A, 査読有, Vol.86, 2012, pp.043411-1-5
DOI:10.1103/PhysRevA.86.043411
Satoshi Uetake, Ryo Murakami, John M. Doyle, and Yoshiro Takahashi, Spin-dependent collision of ultracold metastable atoms, Phys. Rev. A, 査読有, Vol.86, 2012, pp.032712-1-5
DOI:10.1103/PhysRevA.86.032712
Shintaro Taie, Rekishu Yamazaki, Seiji Sugawa & Yoshiro Takahashi, An SU (6) Mott insulator of an atomic Fermi gas realized by large-spin Pomeranchuk cooling, Nature Physics, 査読有, Vol.8, 2012, pp.825-830

DOI:10.1038/nphys2430

2011年度

- Yosuke Takasu, Yutaka Saito, Yoshiro Takahashi, Mateusz Borkowski, Roman Ciurylo, and Paul S. Julienne, Controlled Production of Sub-Radiant States of a Diatomic Molecule in an Optical Lattice, *Physical Review Letters*, 査読有, Vol.108(17), 2012, pp.173002-1-5
DOI:10.1103/PhysRevLett.108.173002
- S. Kato, K. Shibata, R. Yamamoto, Y. Yoshikawa and Y. Takahashi, Optical magnetic resonance imaging with an ultra-narrow optical transition, *Applied Physics B*, 査読有, Vol.108, 2012, pp.31-38
DOI:10.1007/s00340-012-4893-0
- Mateusz Borkowski, Roman Ciurylo, Paul S. Julienne, Rekishu Yamazaki, Hideaki Hara, Katsunari Enomoto, Shintaro Taie, Seiji Sugawa, Yosuke Takasu, and Yoshiro Takahashi, Photoassociative production of ultracold heteronuclear ytterbium molecules, *Physical Review A*, 査読有, Vol.84, 2011, pp.030702-1-5
DOI:10.1103/PhysRevA.84.030702
- R. Namiki, S.-I.-R. Tanaka, T. Takano, and Y. Takahashi, Measurement schemes for the spin quadratures on an ensemble of atoms, *Applied Physics B*, 査読有, Vol.105, 2011, pp.197-201
DOI:10.1007/s00340-011-4717-7
- 21 Seiji Sugawa, Rekishu Yamazaki, Shintaro Taie, and Yoshiro Takahashi, Bose-Einstein condensate in gases of rare atomic species, *Physical Review A*, 査読有, Vol.84, 2011, pp.011610-1-4
DOI:10.1103/PhysRevA.84.011610
- 22 Seiji Sugawa, Kensuke Inaba, Shintaro Taie, Rekishu Yamazaki, Makoto Yamashita, and Yoshiro Takahashi, Interaction and filling-induced quantum phases of dual Mott insulators of bosons and fermions, *Nature Physics*, 査読有, Vol.7, 2011, pp.642-648
DOI:10.1038/nphys2028
- 23 Hideaki Hara, Yosuke Takasu, Yoshifumi Yamaoka, John M. Doyle, and Yoshiro Takahashi, Quantum Degenerate Mixtures of Alkali and Alkaline-Earth-Like Atoms, *Physical Review Letters*, 査読有, Vol.106, 2011, pp.205304-1-4
DOI:10.1103/PhysRevLett.106.205304

2010年度

- 24 S. Taie, Y. Takasu, S. Sugawa, R. Yamazaki, T. Tsujimoto, R. Murakami, and Y. Takahashi, Realization of a

$SU(2)*SU(6)$ System of Fermions in a Cold Atomic Gas, *Phys. Rev. Lett.*, 査読有, Vol.105, 2010, pp.190401-1-4
DOI:10.1103/PhysRevLett.105.190401

- 25 Masatoshi Sato, Yoshiro Takahashi, and Satoshi Fujimoto, Non-Abelian topological orders and Majorana fermions in spin-singlet superconductors, *Phys. Rev. B*, 査読有, Vol.82, 2010, pp.134521-1-28
DOI:10.1103/PhysRevB.82.134521
- 26 A. Yamaguchi, S. Uetake, S. Kato, H. Ito, and Y. Takahashi, High-resolution laser spectroscopy of a Bose-Einstein condensate using the ultranarrow magnetic quadrupole transition, *New J. Phys.*, 査読有, Vol.12, 2010, pp.103001-1-13
DOI:10.1088/1367-2630/12/10/103001
- 27 R. Yamazaki, S. Taie, S. Sugawa, Y. Takahashi, Submicron Spatial Modulation of an Interatomic Interaction in a Bose-Einstein Condensate, *Phys. Rev. Lett.*, 査読有, Vol.105, 2010, pp.050405-1-4
DOI:10.1103/PhysRevLett.105.050405

[学会発表](計 146件)

- Y. Takahashi, “Quantum Simulator of Strongly Interacting Quantum Many-Body Systems Using Atoms”, International Molecule-type Workshop on New correlations in exotic nuclei and advances of theoretical models, 2014.3.18, Yukawa Institute, Kyoto University, Kyoto (招待講演)
- 2 Y. Eto, Y. Tomiyama, S. Hasegawa, S. Iwade, H. Tokita, and T. Hirano, Control of Spins of Bose-Condensed Atoms, FIRST International Symposium on Topological Quantum Technology, 2014.1.29, Hongo campus of The University of Tokyo
- 3 Tetsuya Mukai, Superconducting Atom Chip in NTT, The 2nd Atom Chip Workshop in Pangkil, 2012.12.04, Pangkil (Indonesia) (招待講演)

[図書](計 5件)

- 中島秀太・高橋義朗, アグネ技術センター, 固体物理<量子コンピュータへの道> 特集号, Vol.48, No.11, pp679-pp687, 冷却原子を用いた量子シミュレーション, 2013
- S. Sugawa, Y. Takasu, K. Enomoto and Y. Takahashi, *World Scientific*, Chapter1 “Ultracold Ytterbium: Generation, Many-body Physics, and Molecules”, in *Annual Review of Cold*

Atoms and Molecules: Volume 1.(edited by K. W. Madison, Y. Wang, Ana Maria Rey, and K. Bongs, 2013, 49 頁 (全 540 頁)
田家慎太郎, 素川靖司, 山崎歴舟, 高橋義朗, 株式会社 アグネ技術センター, 固体物理 動的な光物性の新展開 特集号, Vol.46, No.11 光格子を用いた量子シミュレーション, 2011, pp216 (pp121-128)
植竹智, 高橋義朗, (社)レーザー学会, 超狭線幅遷移を用いた量子気体の高分解能レーザー分光「レーザー研究」, 2010, pp487
素川靖司, 高橋義朗, 応用物理学会, 光格子を用いた量子シミュレーション「応用物理」第 79 巻、第 2 号, 2010, pp0140-0144

〔産業財産権〕

出願状況 (計 1 件)

名称：原子捕捉装置および原子捕捉方法
発明者：向井哲哉、丹治はるか
権利者：日本電信電話株式会社
種類：特許
番号：特願 2011-270105
出願年月日：2011 年 12 月 9 日
国内外の別： 国内

取得状況 (計 1 件)

名称：原子捕捉装置および原子捕捉方法
発明者：向井 哲哉
権利者：日本電信電話株式会社
種類：特許
番号：5475491
取得年月日：2014 年 2 月 14 日
国内外の別： 国内

〔その他〕

研究内容・研究成果ホームページ

高橋義朗

<http://yagura.scphys.kyoto-u.ac.jp/index.html>

高いスピン対称性を持った新しい量子状態を極低温の原子気体を用いて作り出すことに成功

http://www.kyoto-u.ac.jp/ja/news_data/h/h1/news6/2012/120924_1.htm

極低温の原子気体を用いて物質の新しい量子状態を作り出すことに成功～量子シミュレーター実現への道をひらく～

http://www.kyoto-u.ac.jp/ja/news_data/h/h1/news6/2011/110728_1.htm

向井哲哉

<http://www.br1.ntt.co.jp/people/tetsuya/exp/index-j.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

高橋 義朗 (TAKAHASHI, Yoshiro)
京都大学・大学院理学研究科・教授
研究者番号：40226907

(2) 研究分担者

向井 哲哉 (MUKAI, Tetsuya)
日本電信電話株式会社 NTT 物性科学基礎研究所・量子光物性研究部・主任研究員
研究者番号：70393775

(3) 研究分担者

高須 洋介 (TAKASU, Yosuke)
京都大学・大学院理学研究科・助教
研究者番号：50456844

(4) 連携研究者

平野 琢也 (HIRANO, Takuya)
学習院大学・理学部・教授
研究者番号：00251330