

平成 30 年 5 月 17 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(S)

研究期間：2013～2017

課題番号：25220711

研究課題名(和文) 光格子中イッテルビウム量子気体の究極的操作・観測が拓く新奇量子凝縮相研究の新展開

研究課題名(英文) New stage of research of novel quantum condensed phase developed by ultimate control and measurement of ytterbium quantum gases in an optical lattice

研究代表者

高橋 義朗 (TAKAHASHI, YOSHIRO)

京都大学・理学研究科・教授

研究者番号：40226907

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 172,400,000円

研究成果の概要(和文)：光格子と呼ばれる周期的なポテンシャルに、超低温のイッテルビウム原子気体を導入した系を用いて、量子多体系の量子シミュレーションを行い、量子凝縮相に関する物性研究を格段に発展させることができた。具体的には、トポロジカルサウレスポンプの実現、4成分スピン系の反強磁性スピン相関の増強の観測、超流動・モット絶縁体量子相転移に対する散逸の非自明な影響の解明、リーブ型光格子の実現と平坦バンドでの特異な振舞いの観測、近藤効果の研究に応用可能な新たな原子系の発見、新しい方式の量子気体顕微鏡の開発、および上記に関連した最先端理論、である。

研究成果の概要(英文)：By using ultracold ytterbium atoms in an optical lattice which is a periodic potential, we could perform quantum simulation of quantum many-body system and contributed better understanding of quantum condensed matter. In particular, we achieved the following attainments like realization of topological Thouless pump, enhanced anti-ferromagnetic spin correlation in a SU(4) system, revealing the non-trivial effect of dissipation on the superfluid-Mott insulator transition, realization of Lieb optical lattice and observation of novel behavior of atoms in a flat band, revealing a new experimental platform suitable for the study of Kondo effect, development of a new method of quantum gas microscope, and the advanced theories related with the above topics.

研究分野：量子エレクトロニクス

キーワード：原子物理 レーザー冷却 光格子 量子情報

## 1. 研究開始当初の背景

(1)レーザー冷却による量子縮退気体の研究分野で、特に注目を集めている重要な研究テーマとして、光格子と呼ばれる周期的なポテンシャルにナノケルビン台の極低温原子気体を導入した系を用いた量子多体系の量子シミュレーションの研究を挙げることができる。光格子中の冷却原子は、格子点間のトンネリング項と格子点内での原子間相互作用項の2つの項からなるハバードモデルで記述されることが知られている。このハバードモデルは、遍歴磁性や異方性超伝導などの強相関電子系を記述する凝縮系物理にとって大変重要なモデルであり、光格子中の冷却原子系は、極めて制御性の良いハバードモデルの新たな実験系として、大変注目を浴びている。これまでに、アルカリ原子を用いて、ボース原子の超流動・モット絶縁体転移の観測、フェルミ原子の金属・バンド絶縁体・モット絶縁体転移の観測、などが研究されている。また、近年は、この量子シミュレーション研究が高度な領域に到達して、ボソンとフェルミオンの混合系など、これまでの固体系には存在しない全く新しい系も、対象となってきた。そのような系で起こる新たな物理現象を探求することは、先に述べた狭義の量子シミュレーションと同等以上に意義があるといえる。

(2)我々のグループ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ではなく、特に2電子系であるイッテルビウム(Yb)原子を対象として、量子縮退研究を推進してきた。これまでにボース・アインシュタイン凝縮、フェルミ縮退、およびその混合量子気体の生成に成功している。

## 2. 研究の目的

これまでの研究開発状況と成果を踏まえて、これらを有機的に融合・発展させることにより、さらに進化した、極めて特徴ある量子凝縮相の研究が可能であると着想した。設定した研究テーマ、および具体的内容は以下の通りである。

- (1)トポロジカル量子物理
- (2)量子磁性
- (3)新奇超流動現象
- (4)非標準型格子の特異なバンド構造
- (5)不純物問題の量子シミュレーター
- (6)量子気体顕微鏡

上記の具体的な本研究課題設定はすべて、独創的なものであり、固体系での難問に対応する。これを本研究により実現・解明することにより、量子シミュレーション研究が飛躍的に発展するのは間違いない。さらには凝縮系理論・計算物理などへの学術的な波及効果や、物質設計に対する重要な指針の提示など、科学技術・産業に幅広い意味でインパクト・貢献が期待できる。

## 3. 研究の方法

(1)「トポロジカル量子物理」については、まず、フェルミ粒子の基底状態 $^1S_0$ と準安定状態 $^3P_0$ および $^3P_1$ との間のフェッシュバッハ共鳴の探索を実施し、理論分担者(藤本)との共著論文において提案した方法に基づいたトポロジカル超流動の実現に向けて、原子の低温化および分子観測等を研究する。さらに、光超格子技術を駆使して、サウレスポンプというトポロジカル量子現象を研究する。

(2)「量子磁性」(3)「新奇超流動現象」では、まずは、 $^{173}\text{Yb}$ 原子および $^{171}\text{Yb}$ 原子の超低温化から始め、スピン自由度、軌道自由度、そして光超格子技術を駆使した新しい手法により冷却原子の量子磁性研究、および新奇量子相の可能性を追求する。

(4)「非標準型格子の特異なバンド構造」については、平坦バンドおよびディラック・コーンを有するリープ型光格子を実現し、特にボース凝縮体および低温フェルミ原子を平坦バンドに導入し、そこでの原子集団の特徴的な振る舞いを調べ、特異な量子相の解明につなげる。特に、平坦バンド中の相互作用する原子集団は非自明な振る舞いが期待されるので、理論分担者(段下)との議論を通して、「量子磁性」「新奇超流動現象」の観点からも新たな可能性を検討する。

(5)「不純物問題の量子シミュレーター」では、巨大質量比を持つYb原子とリチウム(Li)原子の量子混合気体を3次元光格子に導入し、その非弾性および弾性衝突の振舞いを網羅的に調べ上げる。特に、Yb原子のフェッシュバッハ共鳴を有する準位に関しても非弾性および弾性衝突の振舞いを観測し、その振る舞いを明らかにする。

さらに、基底状態 $^1S_0$ と準安定状態 $^3P_0$ の2軌道間のスピン交換相互作用を用いた近藤効果の量子シミュレーションの可能性を探る。

(6)「量子気体顕微鏡」では、Yb原子に対して、波長の異なる2種類の光学遷移が存在するというYb原子の特徴を活用した光格子の超高空間分解能観測技術(=量子気体顕微鏡)を開発する。これまで採用されてきた発光観測による原子のイメージング手法だけでなく、吸収や分散を利用した、新たな原子観測法の確立を目指す。

## 4. 研究成果

(1)実験グループ(高橋、高須)の研究成果として、まず、超低温Yb原子を安定に生成する技術をほぼ確立したことを挙げることができる。これをもとに各項目の研究テーマを推進することができた。

「トポロジカル量子物理」については、トポロジカル超流動の実現に向けて、フェル

ミ粒子  $^{171}\text{Yb}$  について磁場フェッシュバツハ共鳴を原子ロスおよび光格子中の分光測定により発見するとともに、電子基底状態と電子励起状態  $^3P_2$  からなる新しいタイプのフェッシュバツハ分子の直接光生成に成功した[文献 10]。これにより、光による相互作用制御への応用が拓けた。また、磁場掃引により 50%以上の高い生成効率でフェッシュバツハ分子を生成し、シュテルン・ゲルラツハ法を駆使して直接観測することに成功した。一方、スピン軌道相互作用の  $^{171}\text{Yb}$  への実装についても、明瞭なスピン・運動量ロッキング現象を観測することで、確認することができ、トポロジカル超流動の実現に向けて確実に進展させることができた[文献 4]。

ただし、同時に問題点として、準安定電子励起状態  $^3P_2$  での非弾性原子ロスの効果が観測されている。これを回避する可能性として、別の準安定電子励起状態  $^3P_0$  と基底状態との間の軌道型フェッシュバツハ共鳴の観測にも成功した。

また、新しいトポロジカル超流動の候補として、軽い原子のボース凝縮中に埋め込まれた重い 2 次元フェルミ原子系が 2017 年に提案されたのを受けて、 $^7\text{Li}$  原子のボース凝縮体に低次元  $^{173}\text{Yb}$  フェルミ縮退を実現することに成功し、大きく前進させることができた。

さらに、冷却原子を用いた新しいトポロジカル量子現象として、理論分担者(藤本)と議論し、サウレスのトポロジカルチャージポンピングを世界で初めて実証することに成功した[文献 11]。さらに、準周期ポテンシャルによる乱れを制御された形で導入し、乱れ誘起トポロジカル相転移を観測することに成功した。

また、トポロジカル物理とも密接に関連する全く新しい取り組みとして、パリティ・時間反転対称 (PT 対称) な光格子の実装とその特異なバンド構造と原子の安定性の研究を構想し初期の実験を開始することができた。

「量子磁性」については、光格子中でエントロピーをスピン配置への再配分によるフェルミ同位体  $^{173}\text{Yb}$  の光超格子中での超冷

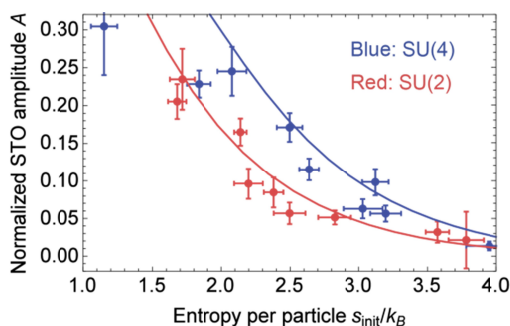


図1 スピン4成分系 (青) とスピン2成分系 (赤) でのスピン 1 重項 3 重項振動の大きさの初期エントロピー依存性。実線は理論曲線。

却を実現した。スピン自由度 4 の  $SU(4)$  系と 2 の  $SU(2)$  系を用意して、スピン-重項 - 3 重項振動の振る舞いを詳細に調べることにより、量子磁性においてもポメラチュク冷却効果が有効に働くことを確認した[図 1 参照、論文投稿中]。ごく最近、等方的な光格子中でも、 $SU(4)$  系では反強磁性スピン相関が発達している証拠を得られた。これは、 $SU(N)$  量子磁性の研究における特筆すべき大きな成果といえる。

また、 $\text{Yb}$  原子の準安定電子励起状態における大きな磁気モーメントの間の磁気双極子相互作用に基づく「量子アニーリング法」に着目し、原子の安定性や量子揺らぎの導入に成功した。これは、現在の商用量子計算機と同じアルゴリズムであり、本手法の理解を進めることで、大規模量子計算機実現に対する重要な示唆を与えると期待できる。

「新奇超流動現象」について、上記「トポロジカル量子物理」のトポロジカル超流動に関する成果が挙げられるとともに、ボース超流動についても成果を挙げることができた。2 体ロスの効果を制御された形でボースハバード系に導入し、実験と理論(段下)で協力して、超流動・モット絶縁体量子相転移に対する散逸の非自明な影響を解明することに成功した[文献 1]。

「非標準型格子の特異なバンド構造」については、複数の光格子を組み合わせることで、平坦バンドおよびディラック・コーンを有するリーブ型光格子を実現し、実際、平坦バンド中のボース凝縮体および低温フェルミ原子について、局在性の観測[文献 12]、相互作用のある系のバンド構造の実測[文献 5]、平坦バンド中の原子の安定性の測定、など、基本的な振る舞いを明らかにした。さらに、リーブ格子の 3 サイト構造とレーザーで結合した 3 準位系とのアナロジーに気づき、空間的断熱移送法を開発し、中間サイトを経ずに離れたサイト間の原子移動を実現した[論文投稿中]。また、この手法を平坦バンドのみにフェルミ粒子を効率よく導入することに応用展開することに成功した。

「不純物問題の量子シミュレーター」では、 $\text{Yb-Li}$  量子混合気体を生成し、 $\text{Yb}$  原子のみ 3 次元光格子に局在し、 $\text{Li}$  原子が非局在するという不純物量子シミュレーターの系を準備することに成功した[文献 2]。さらに重力サグの影響を排除する工夫を施すことにより、準安定  $\text{Yb}$  原子と  $\text{Li}$  原子の間の非弾性衝突を精密測定することに成功した。

さらに、ごく最近、近藤効果の量子シミュレーションに応用可能な新しい実験系を見出すことに成功した。 $^{171}\text{Yb}$  原子の 2 軌道  $SU(2)$  系である電子基底状態  $^1S_0$  と準安定状態  $^3P_0$  について、高分解能レーザー分光を様々な磁場で行い、その共鳴周波数を測定することによ

り、2軌道間のスピン交換相互作用が近藤効果発現に要求される反強磁性的なものであることを突き止めた。これは今後につながる大きな成果である。

「量子気体顕微鏡」では、2重モラセス法を開発し、Yb原子の量子気体顕微鏡を開発することに成功し、光格子中の孤立原子を格子点を分解して観測することに成功した[文献9]。また、吸収イメージング法による孤立原子の観測を実現するとともに、より非破壊的な測定である分散を利用したファラア量子気体顕微鏡を開発することに世界で初めて成功した[文献3]。

さらに、この非破壊測定の理論限界を明らかにし、スクイーズ真空を用いた共焦点型顕微鏡により光格子中個別原子の量子非破壊測定が実現できることを明らかにした。これらは、上記の本研究テーマに役立つだけでなく、将来の量子技術にも広く波及することが期待される。

また当初の提案の中から新たに現れた興味深い研究として、

「孤立量子系の熱化に関する非平衡過程」を挙げることができる。まず、平衡状態の量子相について超高分解能レーザー分光を開発し[文献8]、さらにこれを応用し、ハバードモデルの運動エネルギー項および相互作用エネルギー項の観測法を確立した。そして、これを、モット絶縁体相から超流動相などにクエンチした後の量子多体系のダイナミクスの研究に応用展開し、i)短時間での平衡化、ii)全エネルギーの保存、iii)位相コヒーレンスの光円錐的空間伝搬、などを明らかにした。

(2)理論研究分担者(藤本)による研究成果として、人工スピン軌道相互作用の実装によるトポロジカル超流動の理論では、冷却原子系におけるトポロジカル超流動状態を特徴づける新規物理現象の一つとして動的Axion現象の理論研究を行い、系の回転とAxionの振動数との共鳴によるマクロな慣性モーメントの増大効果などを予言した。この効果を利用して、将来、トポロジカル超流動状態を実験的に同定することが可能になると期待される。また、トポロジカル超流動に特徴的なBerry位相の揺らぎに伴う新規ホール効果の理論研究も行い、将来の発見に向けて指針となる結果が得られた。また、SU(6)量子磁性、リーブ格子の遍歴強磁性、アンダーソンハバードモデル等の強相関系に問題を解明するにあたって、強相関効果の典型例であり、かつ量子磁性の基本舞台となるモット絶縁相の理解が重要である。本研究では1次元モット絶縁体がトポロジカルなスピン液体に転移する機構を明らかにした。このような系は光格子中の冷却原子気体で実現できる可能性があり、将来の実験的発見に繋がることを期待される。

また、フェルミ粒子の波数空間における非自明なトポロジーに起因する新規現象を探索してきたが、ワイル・フェルミオンに関するトポロジカルな量子輸送現象について格段に理解が進行し、ワイル超流動状態や、ワイル磁性状態等に展開する端緒を得ることができた。今後の研究の飛躍的發展に繋げて行くことができる成果が得られた。

さらに、ワイル・フェルミオンに特徴的なカイラル異常に起因する新規量子輸送現象を理論的に提唱し、確立した。トポロジカル織目構造が生み出す創発的電磁場によって、平衡流が生じ、カイラル異常が実験で観測可能な現象として実現されることを明らかにした。この結果は電荷を持たない原子気体にも応用できる可能性がある。

(3)理論研究分担者(段下)による研究成果として、まず、超伝導流が量子揺らぎによるトンネル効果によって減衰する過程である量子位相滑りの量子シミュレーションを提案した。冷却気体系の実験で量子位相滑りを特定する方法を提案し、現在の理論では定量的な解析の難しい有限温度の量子位相滑りを調べることが量子シミュレータの興味深い対象になることを指摘した。

また、三角格子上スピン-1/2 XXZ 模型の量子相図を決定した。三角格子の反強磁性量子スピン系はフラストレーションを持つ系の典型である。符号問題が存在するため量子モンテカルロ法による解析が困難であり、長年理論的に興味を集めてきた。冷却気体系の実験では、量子スピン模型の実現には至っていない。本研究では、ホッピング符号反転とダイポラー・ボース気体を組み合わせることで、三角格子上スピン-1/2 XXZ 模型の量子シミュレータが実現できることを提案した。この模型の基底状態を定量的に解析するための数値計算手法を開発し、XXZ 異方性と縦磁場を変数とした量子相図を初めて定量的に評価した。得られた相図は実験の量子シミュレータと比較するためのベンチマークとなる。

さらに、光格子中二成分ボース気体における不連続超流動・絶縁体転移、三重臨界性、表面臨界性を明らかにした。相互作用比を固定してホッピングと化学ポテンシャルを変化した相図上に、一次転移から二次転移に切り替わる三重臨界点があることを指摘した。また、その点を通る相転移の臨界性が通常の希薄ボース気体転移とは異なる普遍性属性を持つことを明らかにした。さらに、系に強いポテンシャル障壁を加えた状況を見ると、一次転移点近傍に表面臨界性と呼ばれる臨界性が現れることを見出した。

また、光格子中ボース気体の Higgs 束縛状態について、系に障壁ポテンシャルがある際に、障壁の周りに局在する Higgs モードの束縛状態が出現することを見出し、その新奇な励起の実験での観測方法を提案した。さらに、もう一つの典型的な集団運動モードであ

る Nambu-Goldstone モードがこの Higgs 束縛状態を介した Fano 共鳴トンネルをすることを明らかにした。

さらに、光格子中一次元 Bose 気体の二重極振動の減衰を解析した。新たに導出した計算公式を用いて、二重極振動の減衰率を計算した。結果として、実験結果と定量的な一致を示した。これによって、光格子量子シミュレータで超流動トランスポートを調べるといった応用の道を切り拓いた。

さらに、実験グループとの密接で有機的な協力を推進し大きな成果を挙げることができた。まず、制御可能な二体散逸項を持つボースハバード模型について、実験と理論計算の定量的な一致を確認することに成功した。ここでの二体散逸項の導入法は光会合技術を利用した一般的なものなので、Bose 粒子系以外の様々な系に応用可能である。さらに、実験グループが観測したボースハバード模型のクエンチ・ダイナミクスに関して、テンソルネットワーク法 (1D に対して) と切断 Wigner 近似法 (3D) を用いた理論解析を実施し、実験結果を定量的に説明することに成功した。

## 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 45 件) 全て査読有

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", *Sci. Advances*, **3**, 2017, e1701513 (1-8), DOI: 10.1126/sciadv.1701513

F. Schaefer, H. Konishi, A. Bouscal, T. Yagami, and Y. Takahashi, "Spin dependent inelastic collisions between metastable state two-electron atoms and ground state alkali-atoms", *New J. Phys.*, **19**, 2017, 103039(1-7), DOI: 10.1088/1367-2630/aa8cec

【"Highlights of 2017" collection】

R. Yamamoto, J. Kobayashi, K. Kato, T. Kuno, Y. Sakura, and Y. Takahashi, "Site-resolved imaging of single atoms with a Faraday quantum gas microscope", *Phys. Rev. A*, **96**, 2017, 033610(1-7), DOI: 10.1103/PhysRevA.96.033610

Y. Takasu, Y. Fukushima, Y. Nakamura, and Y. Takahashi, "Magnetoassociation of a Feshbach molecule and spin-orbit interaction between the ground and electronically excited states", *Phys. Rev. A*, **96**, 2017, 023602(1-9), DOI: 10.1103/PhysRevA.96.023602

## 【EDITORS' SUGGESTION】

H. Ozawa, S. Taie, T. Ichinose, and Y. Takahashi, "Interaction-Driven Shift and Distortion of a Flat Band in an Optical Lieb Lattice", *Phys. Rev. Lett.*, **118**, 2017, 175301(1-5), DOI: 10.1103/PhysRevLett.118.175301

M. Kunimi and I. Danshita, "Thermally activated phase slips of one-dimensional Bose gases in shallow optical lattices", *Physical Review A*, **95**, 2017, 033637(1-11) DOI:10.1103/PhysRevA.95.033637

H. Sumiyoshi and S. Fujimoto, "Torsional Chiral Magnetic Effect in a Weyl Semimetal with a Topological Defect", *Phys. Rev. Lett.*, **116**, 2016, 166601(1-6) DOI:10.1103/PhysRevLett.116.166601

S. Kato, K. Inaba, S. Sugawa, K. Shibata, R. Yamamoto, M. Yamashita, and Y. Takahashi, "Laser spectroscopic probing of coexisting superfluid and insulating states of an atomic Bose-Hubbard system", *Nat. Commun.*, **7**, 2016, 11341 (1-8) DOI:10.1038/ncomms11341

R. Yamamoto, J. Kobayashi, T. Kuno, K. Kato and Y. Takahashi, "An ytterbium quantum gas microscope with narrow-line laser cooling", *New J. Phys.*, **18**, 2016, 023016(1-10) DOI:10.1088/1367-2630/18/2/023016

【New Journal of Physics, Perspectives】

S. Taie, S. Watanabe, T. Ichinose and Y. Takahashi, "Feshbach-Resonance-Enhanced Coherent Atom-Molecule Conversion with Ultranarrow Photoassociation Resonance", *Phys. Rev. Lett.*, **116**, 2016, 043202(1-5), DOI:10.1103/PhysRevLett.116.043202

S. Nakajima, T. Tomita, S. Taie, T. Ichinose, H. Ozawa, L. Wang, M. Troyer and Y. Takahashi, "Topological Thouless pumping of ultracold fermions", *Nature Physics*, **12**, 2016, 296-300 DOI:10.1038/nphys3622

S. Taie, H. Ozawa, T. Ichinose, T. Nishio, S. Nakajima and Y. Takahashi, "Coherent driving and freezing of bosonic matter wave in an optical Lieb lattice", *Science Advances*, **1**, No.10, 2015, e1500854(1-6) DOI: 10.1126/sciadv.1500854

D. Yamamoto, G. Marmorini, and I. Danshita, "Microscopic Model Calculations for the Magnetization Process of Layered

Triangular-Lattice Quantum Antiferromagnets", *Phys. Rev. Lett.*, **114**, 2015, 027201(1-5), DOI: 10.1103/PhysRevLett.114.027201

T. Yoshida, R. Peters, S. Fujimoto and N. Kawakami, "Characterization of a Topological Mott Insulator in One Dimension", *Phys. Rev. Lett.*, **112**, 2014, 196404(1-5) DOI: 10.1103/PhysRevLett.112.196404

D. Yamamoto, G. Marmorini, and I. Danshita, "Quantum Phase Diagram of the Triangular-Lattice XXZ Model in a Magnetic Field", *Phys. Rev. Lett.*, **112**, 2014, 127203(1-5) DOI:10.1103/PhysRevLett.112.127203; Erratum: *Phys. Rev. Lett.* **112**, 2014, 259901 DOI:10.1103/PhysRevLett.112.259901

Y. Kato, D. Yamamoto, and I. Danshita, "Quantum Tricriticality at the Superfluid-Insulator Transition of Binary Bose Mixtures", *Phys. Rev. Lett.*, **112**, 2014, 055301(1-5) DOI: 10.1103/PhysRevLett.112.055301

K. Shibata, R. Yamamoto, and Y. Takahashi, "High-Sensitivity In situ Fluorescence Imaging of Ytterbium Atoms in a Two-Dimensional Optical Lattice with Dual Optical Molasses", *J. Phys. Soc. Jpn.*, **83**, 2013(published online), 014301(1-8), DOI: 10.7566/JPSJ.83.014301

**【JPSJ Papers of Editors' Choice Award】**

I. Danshita, "Universal Damping Behavior of Dipole Oscillations of One-Dimensional Ultracold Gases Induced by Quantum Phase Slips", *Phys. Rev. Lett.*, **111**, 2013, 025303(1-5) DOI: 10.1103/PhysRevLett.111.025303

〔学会発表〕(計 185 件) 招待講演 69 件(国際 49 件・国内 20 件) 一般講演・ポスター: 116 件(国際 26 件・国内 90 件)

S. Fujimoto, "Dynamics of Spin Textures and Weyl Quasiparticles in Heterostructures", TMS-EPIQS 2nd Alliance Workshop: Topological Magnets and Topological Superconductors, 2018

I. Danshita, "Engineering Dissipation in strongly correlated ultracold gases", Ultracold Atomic Gases and Quantum Control, 2017

Y. Takahashi, "Topological Charge

Pumping with Cold Atoms", APS March Meeting 2016, 2016

Y. Takahashi, "Quantum simulation using ultracold ytterbium atoms", ICAP2014(The 24th International Conference on Atomic Physics), 2014

〔図書〕(計 5 件)

Y. Takahashi, AAPPS BULLETIN FEBRUARY 2017 27-1, "Quantum Simulation Using Ultracold Ytterbium", 2017, pp17-pp21

〔その他〕

KURENAI URL:

<http://hdl.handle.net/2433/228300>

京都大学 HP: 見られていると絶縁体が安定化する - 観測による量子多体状態の制御技術を確立 -

<[http://www.kyoto-u.ac.jp/ja/research/research\\_results/2017/171223\\_2.html](http://www.kyoto-u.ac.jp/ja/research/research_results/2017/171223_2.html)>

KURENAI URL:

<http://hdl.handle.net/2433/201982>

京都大学 HP: レーザーで作る光の結晶格子で平坦バンドを実現 - 難解な磁性の問題の解明へ新たな道を拓く -

<[http://www.kyoto-u.ac.jp/ja/research/research\\_results/2015/151120\\_3.html](http://www.kyoto-u.ac.jp/ja/research/research_results/2015/151120_3.html)>

京都大学 HP: 冷却原子系を用いて超高精度電流源の基本原理を実証

<[http://www.kyoto-u.ac.jp/ja/research/research\\_results/2015/160119\\_1.html](http://www.kyoto-u.ac.jp/ja/research/research_results/2015/160119_1.html)>

RIKEN Research Highlight:

<http://www.riken.jp/en/research/rikenresearch/highlights/7974/>

ホームページ等

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

## 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

藤本 聡 (FUJIMOTO, Satoshi)  
大阪大学・大学院基礎工学研究科・教授  
研究者番号: 10263063

### (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) 研究分担者

段下 一平 (DANSHITA, Ippei)  
京都大学・基礎物理学研究所・助教  
研究者番号: 90586950