

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 9 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24540426

研究課題名(和文) 光格子点の極限量子操作技術が拓く新展開

研究課題名(英文) Novel development of ultimate quantum manipulation techniques in an optical lattice

研究代表者

吉川 豊 (Yoshikawa, Yutaka)

京都大学・理学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：00345076

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、ボース・アインシュタイン凝縮した冷却イッテルビウム原子を3次元の光格子に閉じ込め、光磁気共鳴イメージングと呼ばれる手法を用いて光格子各点の原子に個別にアドレッシングすることに成功した。そして超狭線幅光学遷移を用いた分光スペクトルから、原子集団の超流動-Mott絶縁体転移に伴う励起エネルギーの離散化を直接観測することに成功した。また、光格子点の原子を直接観測するための量子気体顕微鏡の基本設計を行い、その基礎技術を確立した。

研究成果の概要(英文)：In this research, Bose-Einstein condensed ytterbium atoms were loaded into a three-dimensional optical lattice and manipulated site-by-site using an optical magnetic resonance imaging. From spectra of ultra-narrow optical transitions, we directly observed the discretization of excitation energy of the atomic ensemble accompanied with the superfluid-to-Mott insulator transition. We also designed a quantum-gas microscope system, which can directly observe single atoms in each lattice sites, and established its basic technique.

研究分野：量子エレクトロニクス

キーワード：レーザー冷却 量子光学 レーザー分光 原子物理学

1. 研究開始当初の背景

最近数 10 年の間に、中性原子気体のレーザー冷却技術が目覚ましい発展をとげ、温度がマイクロ K レベルの極低温の原子集団を実験室レベルで生成・制御することができるようになった。またこれらの発展が、気体原子ボース・アインシュタイン凝縮(以下ボース凝縮)やフェルミ縮退といった巨視的な量子現象の実現へとつながっていった。さらに最近では、このような極低温原子に対して、光の定在波を加え、原子を定在波の腹の部分に周期的に捕獲する**光格子**と呼ばれる技術が注目を集めるようになった(図 1)。

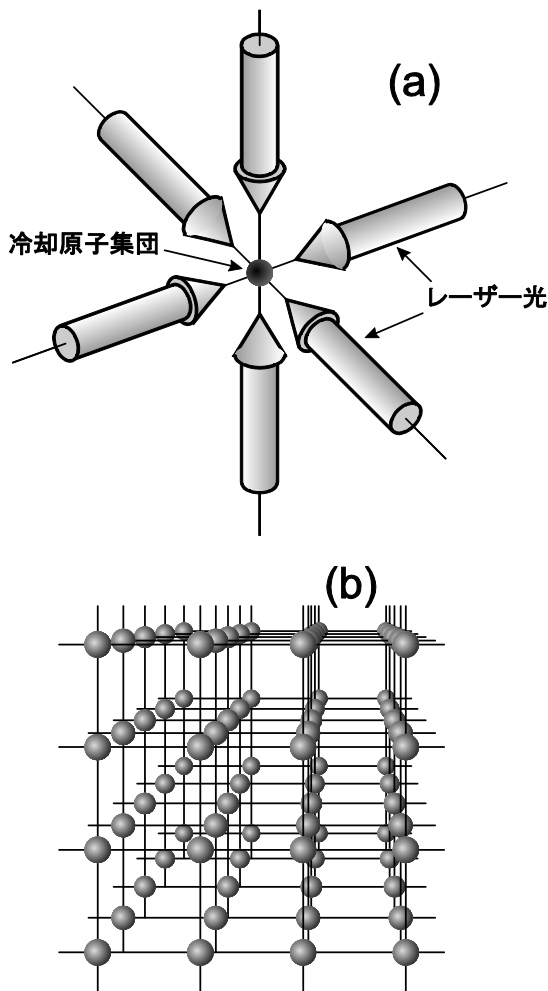


図 1 (a)光格子の実験配置、(b)光格子に捕獲された原子の模式図

その応用は原子物理の枠組みを超えて非常に多岐に渡っている。例えば、光格子に捕獲された原子は、近傍の原子の振舞いに影響を受ける強相関系と見なす事ができる。すなわち、光格子に捕獲される原子集団には、結晶格子に束縛される電子と同様な振舞いが予想される。実際、2002 年に Greiner らによって 3D 光格子中のボース原子において超流動 - モット絶縁体相転移が観測され、続いて 2 つのグループがほぼ同時期にフェルミ原

子による金属 - 絶縁体相転移を実現した。このように光格子 + 冷却原子系では、固体系では実現するのが難しいゼロ温度極限や格子欠陥の全くない強相関系が代替的に実現できることから(量子シミュレーションと呼ばれる)、理論・実験の両面から世界中で注目を集めている。光格子のもう 1 つの大きな応用は量子情報処理である。モット転移させた原子集団は各サイトの占有数が完全に固定され、尚且つ、外乱によるデコヒーレンスが非常に非常にクリーンな系となっている。そのため各サイト中の原子を量子ビットと見なすことで、多原子エンタングルメント生成やスワップゲートの実現、スケラブル量子コンピューティングなどの応用研究が世界中で進められている。また同時に、高開口数の光学顕微鏡を光格子系に組み込み、単一サイトを分解して観測したり、単一サイトの個別量子を操作する技術が開発されてきており、上述の様々な応用への期待が高まっている。

2. 研究の目的

そこで本研究では、アルカリ土類金属の 1 つであるイットルビウム(Yb)原子の持つミリヘルツオーダーの非常に線幅の狭いスピン異重項間遷移($^1S_0 - ^3P_2$)に着目し、光磁気共鳴イメージングと呼ばれる手法を用いて、光波長を超える分解能での光格子中の単一サイト操作の実現を目指した。簡単のため 1D 光格子中の Yb 原子に対して、光格子と平行に磁場勾配を印加することを考える。 3P_2 状態はボース磁子の 3 倍という大きな磁気モーメントを持つため、10 ~ 100G/cm 程度の現実的な磁場勾配を印加することで隣接サイトの共鳴スペクトルを周波数軸上で完全に分離することができる。これはすなわち、励起レーザーの周波数を選ぶことで特定のサイトのみを選択的に励起できることを意味する。

より具体的には、はじめに **3D 光格子 + 1D 磁場勾配での光磁気共鳴イメージング**を行い、磁場勾配方向の 1 レイヤー操作の実現を目指した。また、単一サイト操作を直接的に確認するため、光格子中の単一原子を直接観測できる**量子気体顕微鏡の設計・製作**を行い、その性能評価と基礎技術を修得した。

3. 研究の方法

研究の初期段階として、まず光磁気共鳴イメージングの原理検証実験を行った。具体的には最も実験配置の簡単な 3D 光格子 + 1D 磁場勾配での単一レイヤー分光を目標とした。これを行うために、3D 光格子中でボース凝縮した Yb 原子をモット絶縁体に転移させ、中で生じる原子間相互作用などの基礎データを取得した。同時に $^1S_0 - ^3P_2$ 遷移を励起するレーザー光を準備した。このレーザー光は超狭線幅遷移を励起するために 1kHz 程度に発振線幅を狭窄化しなくてはならず、高安定なファブリ・ペロー型光共振器に安定化した。

3D モット絶縁体と 1D 光磁気共鳴イメージングの道具立てができたのち、実際に“単一レイヤーアドレッシング”を試みた。励起原子の検出は、磁気光学トラップと呼ばれる方法で励起原子をレーザーで再冷却・再捕獲し、その際に発する蛍光を超高感度の CCD カメラで撮像して行った。

続いての段階では、2D 光格子の各サイトにいる単一原子を直接撮像することが可能な量子気体顕微鏡の開発に取り組んだ。2D 光格子を実現するために、鉛直方向に対してレーザー光を浅い角度で交差させた傾斜ビーム光格子を用いた。この配置により、この方向の光格子定数は生成直後の量子縮退原子のサイズよりも大きくなり、原子は特定の単一レイヤーにのみ捕獲され、薄い円盤状の密度分布が実現する。これに通常の対向レーザー光による光格子を重ねることで卵パック状の 2D 光格子ポテンシャルを作ることができる。最後に量子気体顕微鏡についてであるが、一般に高分解能・高感度の顕微鏡において最も重要な要素は高開口数・低収差の対物レンズである。しかし本研究では 3mm 程度の厚さを持つ真空ガラスセルを通して原子を観測する必要があるため、市販の対物レンズでは球面収差がきつく光波長以下の分解能を得ることが難しい。そこで専門の光学メーカーに依頼して本研究での必要スペックを満たす特注対物レンズを製作した。これを光格子系に組み込むには振動などの外部ノイズを低減するため、光格子レーザーと同一の光学ボード上に設置する必要がある。これらのボードや支柱、光学素子の配置などはあらかじめ 3D-CAD を用いて細かくシミュレーションし、多数のレーザー光の光学系と顕微鏡を十分安定に設置できるよう検討した。

4. 研究成果

単一サイトアドレッシングの研究では、分光用の超狭線幅レーザー光源の準備、磁場勾配を生成するための超高安定な電流制御システムの構築などを行ったのち、3D 光格子 + 1D 磁場勾配での単一レイヤー分光に取り組み、期待通りの結果を得ることに成功した。実験で得られたスペクトルを図 2 に示す。横軸はレーザー周波数で、磁場勾配によって位置換算することができる(上部横軸)。縦軸が CCD カメラによって原子が検出された確率である。曲線は光格子と原子のパラメータから予想される確率分布で、ヒストグラムが実際の実験結果を表す。実験結果の各ピークの高さの比、ピーク間の間隔などの特長が理論曲線とよい一致を示していることが分かる。この結果では、得られた空間分解能は 200nm 程度であり、従来の光学顕微鏡の回折限界(光波長程度)を超えることが確認できた。

また、この超狭線幅遷移を用いることで超流動-モット絶縁体相転移に伴う励起エネルギーの離散化を分光学的に検出することにも成功した。図 3 が得られた周波数スペクトルで、モット転移に伴って図中矢印で示した新たなピークが出現している。このピーク周波数からモット状態の基本的性質や原子間相互作用の強さを正確に見積もることができ、固体系の物理を冷却原子系で再現する「量子シミュレーション」と呼ばれる最新の研究分野において幅広い応用が期待される。

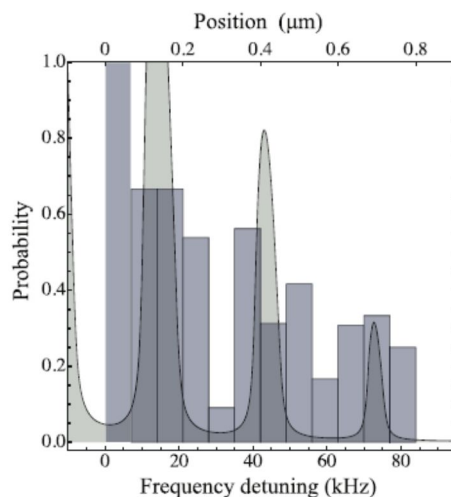


図 2 3次元光格子中の単一レイヤー分光スペクトル

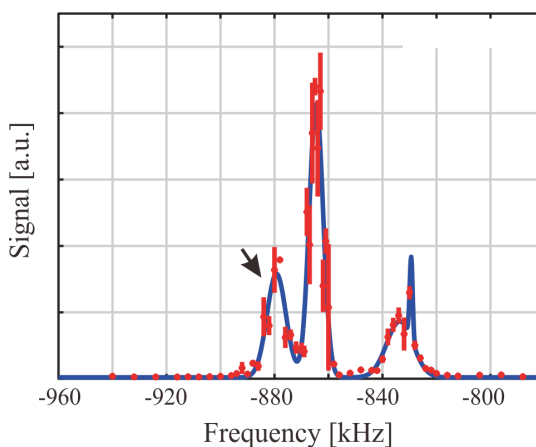


図 3 モット転移に伴う原子の光学励起スペクトルの離散化

一方、量子気体顕微鏡の開発においては、特注した対物レンズを実際のボース凝縮体生成装置に組み込み、光格子の各サイトを分解するのに十分な空間分解能を有していることを確認した。さらに、レーザー光を浅く交差させることで作った長周期の光格子を顕微鏡の光軸方向に設置し、磁場勾配による光磁気共鳴イメージングによってその層を一層ずつ分解して撮像することに成功した。この結果から今回作製した量子気体顕微鏡

で2次元光格子中の原子を観測可能なことが保証されたことになる。また、蛍光観測時の自然放出による原子の加熱を低減するために、狭線幅の光学遷移でレーザー冷却を同時に行い、単一原子蛍光を検出するのに十分な時間、原子を光格子中に捕獲できるようになった。さらに、顕微鏡の対物レンズの微調整やモラセス光のパラメータ最適化、実験データから単一原子を認識するための解析プログラムの準備を行い、2次元光格子中の単一原子と思われる非常に局所的な位置(～200nm程度)から発せられる蛍光信号を高いS/N比で検出することに成功した。今後さらに詳細な分析を行い、得られた信号が単一サイト中の単一原子からのものであるとの確証をつかむと共に、量子情報処理や量子シミュレーションなどの応用研究に進んでいきたいと考えている。

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 1件)

Shinya Kato, Kousuke Shibata, Ryuta Yamamoto, Yutaka Yoshikawa, Yoshiro Takahashi, “Optical magnetic resonance imaging with an ultranarrow optical transition,” Applied Physics B 108, 31-38 (2012). DOI 10.1007/s00340-012-4893-0

[学会発表](計 1件)

Yutaka Yoshikawa and Yoshiro Takahashi, “Creation of artificial gauge fields in ultracold ytterbium atoms,” International conference on topological quantum phenomena, 名古屋大学, 2012.5.17

[その他]

ホームページ等

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

6. 研究組織

(1)研究代表者

吉川 豊 (YOSHIKAWA, Yutaka)

京都大学・大学院理学研究科・助教

研究者番号：00345076