

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 16 日現在

機関番号：12608

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2015

課題番号：26800212

研究課題名(和文) スピンに対する射影測定が可能な光格子顕微鏡系

研究課題名(英文) Quantum gas microscope with spin-projective readout

研究代表者

井上 遼太郎 (Inoue, Ryotaro)

東京工業大学・大学院理工学研究科・助教

研究者番号：20708507

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：光格子中の原子を個別に空間分解顕微鏡観測可能な系は、冷却原子を用いた物性研究にあたっての重要なツールとみなされている。本研究では、新しいアイデア・手法に基づいて、Yb原子に対して有効に機能する光格子顕微鏡系を開発した。特別な冷却手法によらない点と、十分な信号レベルを確保するのに必要な時間が極めて短い点が特徴である。さらに、スピン依存の顕微鏡観測に向けて、当該トラップ中での準安定状態のエネルギーシフトを調べた。

研究成果の概要(英文)：Site-resolved imaging of atoms in an optical lattice provide a fascinating tool for investigating condensed matter physics with ultra-cold atoms. We have successfully developed a new type of optical-lattice-microscope for Yb atoms. The microscope does not require any cooling mechanism and long exposure time to reach sufficient signal-to-noise ratio for the site-resolved imaging. Furthermore, we have also investigated the light-shift on metastable states, towards the realization of spin-projective readout with the microscope.

研究分野：量子エレクトロニクス

キーワード：極低温原子 光格子 物性実験

1. 研究開始当初の背景

(1) 光定在波によって形成した周期ポテンシャル（光格子）中に導入された中性原子気体系は、物性研究や量子情報処理研究を行う魅力的な舞台である。光のドップラー効果を利用したレーザー冷却、高温の原子を選択的にトラップから追い出す蒸発冷却等の手法を用いることで、この系では 10nK オーダーにも及ぶ極低温が達成されており、粒子の統計性や相互作用が系の振る舞いを支配する領域にある。

(2) たとえば、Rb 原子を用いて観測された、超流動状態からモット絶縁体状態への量子相転移は、この光格子系が広く注目を集めるきっかけとなった。特に、モット絶縁体状態は高温超伝導の機構と関連していると考えられており、フェルミオンの原子種を用いた同様の実験や特殊な形状の光格子を用いた実験など、様々なパラメータを自在に制御可能なこの光格子系を他の物質に対する量子シミュレータとして用いる新しいアプローチが、この系での物性研究の主題となっている。

(3) 原子に対する観測・操作には、可視～近赤外領域のレーザー光を用いる必要がある。一方で、格子点の間でのトンネリングが有意に影響するような、様々な実験研究において興味深い領域での格子間隔はおおよそ同様の波長程度である。したがって、各格子点に位置する原子に対して実空間での個別の観測・操作を行うにあたっては、回折限界に迫る空間分解能をもった顕微鏡が必要となる。

(4) スピンのオーダーやスピン間量子相関を実空間で観測し、定量的な評価を行うにあたっては、多数のスピンの対して、スピンの向きを識別可能な形で同時に射影測定する技術が必須である。また、スクイズドスピン状態などの有用な集団的スピン状態を光格子中で生成・検証・応用するにあたっては、100～1000 個程度のスピンに対して、スピン数が完全に確定した形でスピンの向きに関する情報が得られることは重要といえる。

(5) 本研究開始の以前に、真空装置中に保持した半球レンズの近傍に準 2 次元的に束縛した極低温 Yb 原子を輸送することに成功し、半球レンズや対物レンズを介して高感度 CCD 上に原子集団からの蛍光を結像する系を構築に成功していた。

2. 研究の目的

(1) Yb 原子に対して有効に機能する光格子顕微鏡を実現する。

(2) スピンに関する測定が可能な光格子顕微鏡を実現する。

3. 研究の方法

(1) 励起状態に深いポテンシャルを形成できるような特殊な光トラップを用いて、新しい設計思想に基づく光格子顕微鏡を実装する。

(2) 基底状態と長寿命の準安定状態とを 2 準位系として利用し、スピン依存の光格子顕微

鏡を実現する。

4. 研究成果

(1) 光格子中の個々の格子点に存在する極低温 Yb 原子に対して、単一サイト (544nm) を超える分解能で蛍光撮像を可能にするシステムを開発・実装した (図 1)。これは、励起状態に深いポテンシャルを形成するという新たなアイデアと手法に基づいて構築された新規系であり、十分な信号レベルを確保するために必要な撮像時間が 40us 程度 (既存手法では 1s 程度) と非常に短時間である点で優位性がある。図 1 に、本研究で実現した光格子顕微鏡によって取得した、光格子中の Yb 原子の蛍光イメージを示した。光格子の各格子点上に原子が整列している様子が見て取れる。

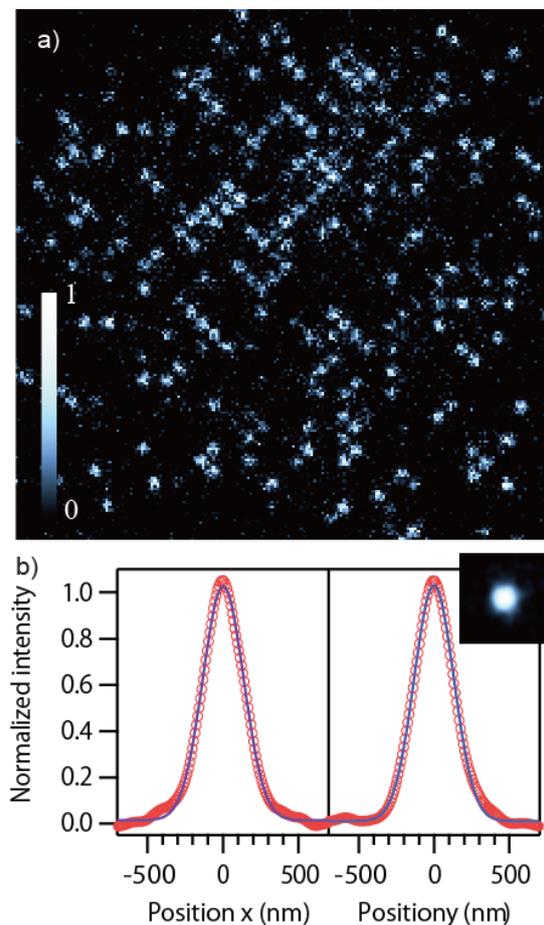


図 1 : (a) 作成した光格子顕微鏡によって撮像された光格子の蛍光イメージ。 (b) 30 個の格子点を重ね合わせ、平均することで作成した単一サイトからの蛍光イメージ。それぞれの半値全幅は $318 \pm 2\text{nm}$, $310 \pm 2\text{nm}$ と見積もられた。

(2) 光格子顕微鏡の信号雑音比を決める要素として、蛍光寿命が重要である。原子は、蛍光を発する際にその反跳によって加熱され、光格子ポテンシャルを乗り越えて光格子から逸脱してしまう。また、光格子を形成するためのレーザー光 (光格子光) 自体を吸収することにより、トラップ不可能なエネルギー準位

にまで励起されてしまうことも問題となる。本研究での加熱の原因を明らかにするために、蛍光強度の時間変化を、様々な光強度、離調のもとで系統的に取得した。蛍光寿命 τ は、蛍光放出に伴う加熱に由来する $\tau_1 = A \cdot P_{lat}$ と、光格子光の吸収に由来する $\tau_2 = B/P_{lat}$ を用いて $\tau = (\tau_1^{-1} + \tau_2^{-1})^{-1}$ で与えられると予想される。 $A \propto \Delta_{lat}^{-0.96(13)}$ および $B \propto \Delta_{lat}^{1.4(4)}$ は、二準位系のモデルから予想される $A \propto \Delta_{lat}^{-1}$ および $B \propto \Delta_{lat}^2$ と矛盾しない。

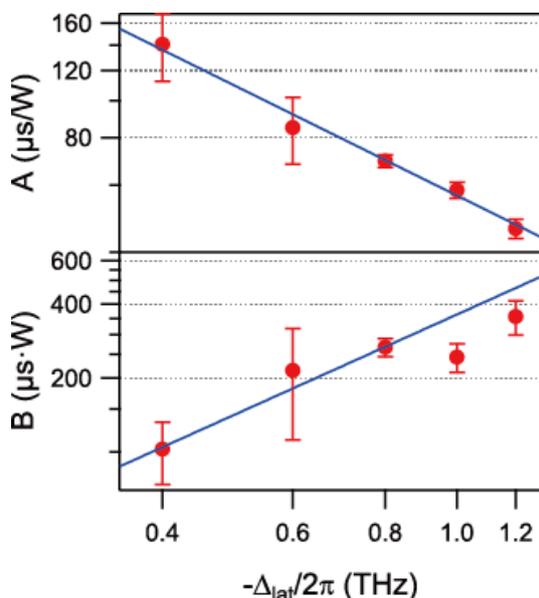


図2：蛍光寿命の光格子光離調(Δ_{lat})、光格子光強度(P_{lat})依存性。蛍光寿命 τ は、蛍光放出に伴う加熱に由来する $\tau_1 = A \cdot P_{lat}$ と、光格子光の吸収に由来する $\tau_2 = B/P_{lat}$ を用いて $\tau = (\tau_1^{-1} + \tau_2^{-1})^{-1}$ で与えられる。

(3) 光格子を顕微鏡測するにあたって、蛍光を発している間に原子が隣接サイトへ移動してしまう確率を評価することは必須である。しかし、本研究によって実現した新規手法においては、撮像時間が十分短いために様々な利点がある一方で、従来と同様の手法での評価が非常に難しいという困難がある。この困難は、スピン依存測定を行うことで克服できると期待される。当初計画においては、前述の背景に基づいて、核スピン自由度を持った特定の同位体に対してスピン依存の顕微鏡測を実現すれば十分であろうと考えていたが、核スピンをもたない同位体においてもスピン依存測定を実現すべく、長寿命の 3P_2 準安定状態と基底状態とで二準位系を構成し、スピン系として利用することを新たに計画・実施した。

(4) 光格子中でのスピン操作に向けて、基底状態から準安定状態へ励起するための超狭線幅 507nm 光源をセットアップし、光トラップ中での分光を実施した。分光結果の典型的な一例を図3に示した。 3P_2 状態は5つの磁気副準位を持つため、それぞれに対応した5か所で原子数の共鳴的な減少が観察できる。

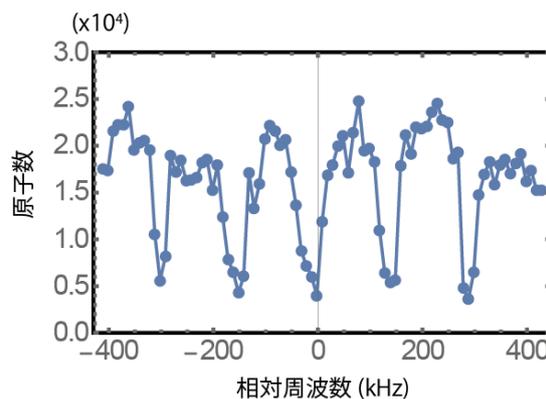


図3：準安定状態への超狭線幅光学遷移に関する分光結果。5つの磁気副準位に対応して、5か所の共鳴的な原子ロスが観測された。

(4) スピンに関する測定が可能な光格子顕微鏡を実現するうえでは、光格子中のいたるところで、所望のスピン状態にある原子を選択的に、まとめて励起してやる必要がある。このためには、基底状態と準安定状態とで同じ深さの光格子が形成できることが要求される。しかし、特定の励起状態に深いポテンシャルを形成する必要がある本研究においては、光格子光の波長が強く制限されてしまう。そのため、光格子光の偏光および外部磁場を新たな自由度として導入し、本研究で用いた光格子光のもとで、準安定状態のポテンシャル深さを制御することを考えた。外部磁場の向き、大きさを制御し、様々な強度の光格子光のもとで図3に相当する分光を行い、共鳴周波数のシフト量をまとめた結果を図4に示した。実線は理論モデルによるフィッティングの結果であり、光格子光強度に対する非線形的な周波数シフトも含めて、このモデルで説明できていることがわかる。加えて、特定の磁気副準位に関しては、周波数シフトの傾きがほとんどゼロに制御できていることも確認でき、超狭線幅光学遷移を用いて、光格子中の原子のスピン制御に着手する準備が整ったと結論できる。

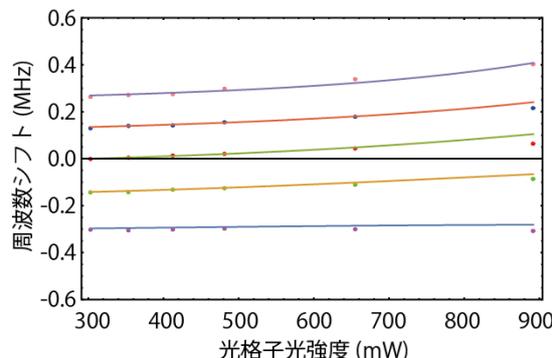


図4：さまざまな光格子光強度のもとで測定された、超狭線幅光学遷移の周波数シフト。

(5) まとめ
本研究成果と同時期に、複数のグループから様々な原子種に対して実装された光格子中の原子系に対する顕微鏡が報告されている。こ

のように、冷却原子を用いた実験研究における光格子顕微鏡は重要かつ新規なツールとして期待されている。本研究で考案し、また本研究によって初めて実装された新しいコンセプトに基づく光格子顕微鏡は、特別な冷却手法に依存しない点と、十分な信号雑音比を確保するに要する時間が短いために安定度に対する要求が少ない点が特徴としてあげられる。一方で、この光格子顕微鏡の性能評価にあたっては、特に撮像中に原子が移動してしまう確率に関して十分な評価が達成できたとは言いがたい。しかしながら、本研究ではこの顕微鏡に関して現状の性能を制限する要素を明らかにし、その解決策を実施するための準備までを完了させた。スピン依存測定が可能な新しい光格子顕微鏡を用いてこの評価を完遂することを今後の目標としたい。

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 2件)

- ① T. Hosoya, M. Miranda, R. Inoue, M. Kozuma, Injection locking of a high power ultraviolet laser diode for laser cooling of ytterbium atoms, *Review of Scientific Instruments*, 査読有 vol. 86, 2015, p. 073110.

<http://dx.doi.org/10.1063/1.4927132>

- ② M. Miranda, R. Inoue, Y. Okuyama, A. Nakamoto, M. Kozuma, Site-resolved imaging of ytterbium atoms in a two-dimensional optical lattice, *Physical Review A*, 査読有, vol. 91, 2015, p. 063414.

<http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevA.91.063414>

[学会発表] (計 10件)

- ① 井上遼太郎, 量子フィードバックと光格子顕微鏡, 第4回量子論の理論及び実験に関する研究会, 2015年1月12日, 高知工科大学(高知県・香美市)
- ② 井上遼太郎, 冷却原子系での量子情報処理実験, 量子系における統計的推測第6回インフォーマルミーティング, 2015年3月22日, 早稲田大学(東京都・新宿区)
- ③ Miranda Martin, 井上遼太郎, 中本顕正, 奥山勇貴, 上妻幹旺, Yb原子量子気体顕微鏡の実現, 日本物理学会第70回年次大会, 2015年3月23日, 早稲田大学(東京都・新宿区)
- ④ Ryotaro Inoue, Quantum Gas Microscope with Ytterbium, International symposium on Fluctuation and structure out of Equilibrium 2015, 2015年8月21日, 京都大学(京都府・京

都市)

- ⑤ 反保尚基, 正村泉, ミランダ・マルティン, 荻野嵩大, 井上遼太郎, 上妻幹旺, Yb量子気体顕微鏡を用いた超流動-Mott絶縁体相転移の観測, 日本物理学会第71回年次大会, 2016年3月19日, 東北学院大学(宮城県・仙台市)
- ⑥ 正村泉, 反保尚基, ミランダ・マルティン, 荻野嵩大, 井上遼太郎, 上妻幹旺, Yb量子気体顕微鏡における3P2準安定状態の利用に向けたラビ振動の評価, 日本物理学会第71回年次大会, 2016年3月19日, 東北学院大学(宮城県・仙台市)

[その他]

ホームページ等

<http://www.kozuma.phys.titech.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

井上 遼太郎 (INOUE, Ryotaro)

東京工業大学・大学院理工学研究科・助教
研究者番号: 20708507