

令和 2 年 6 月 10 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17H02934

研究課題名(和文)量子気体顕微鏡を用いた光格子系におけるエントロピー制御

研究課題名(英文)Entropy control in optical lattice system using a quantum gas microscope

研究代表者

上妻 幹旺(Kozuma, Mikio)

東京工業大学・理学院・教授

研究者番号：10302837

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 15,030,000円

研究成果の概要(和文)：Yb原子のボソン、フェルミオン双方に対し、Mott絶縁体相を量子気体顕微鏡によって観測することに成功した。後者については核スピンの6成分と2成分の場合についてMott shell構造を確認するに至っている。これらの成果は、光格子を構成するレーザーに対し強度雑音、周波数雑音を抑圧するとともに、適切な光学アライメントを施すことで得られた。さらに原子1個あたりのエントロピーを0.35kBに比し桁で下げるためにFilter冷却を計画し、その前段階としてデジタルミラーデバイスを用いて光格子に重畳した調和振動子型ポテンシャルを抑圧し、Mott shell半径を増大させることに成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

今回の成果により、Ybのボソン、フェルミオン双方に対して、光格子系において強相関の物性現象が発現する様子を量子気体顕微鏡でとらえることができた。量子気体顕微鏡は、高いNAを有する対物レンズと一体となったシステムであり、系のポテンシャルを制御することで、温度をさらに桁で下げる力をもっている。今回、初期段階として、光格子に重畳する調和ポテンシャルを抑圧することに成功したが、この制御方法を基本としてFilter冷却を施せば、目的とする極低温を実現し、高温超伝導に代表される各種の物理現象の探索の道が拓かれることになる。

研究成果の概要(英文)：We successfully observed the Mott insulator phase for both bosonic and fermionic Yb atoms in an optical lattice. Such an observation was accomplished by suppressing the intensity and frequency noise of the lattice laser light. To lower the entropy per atom sufficiently compared to 0.35 kB, we plan to apply Filter cooling. As a preliminary experiment, we successfully diminished harmonic potential superposed on the lattice potential by using a digital mirror device.

研究分野：量子エレクトロニクス

キーワード：光格子 冷却原子 ボース凝縮 フェルミ縮退 イッテルビウム

1. 研究開始当初の背景

ボース凝縮、或いはフェルミ縮退した中性原子気体は、系のパラメーターを厳密に、かつ広範囲にわたって制御できるという他の系にはない著しい特徴を有する。特に量子縮退した原子気体を光で作られた周期ポテンシャル中に捕捉した「光格子系」は、イオン格子と電子とを光格子と原子とに対応付けることで固体を量子的にシミュレートできるとされ、AMO (原子・分子・光科学) 分野において多大な注目を集めている。しかしその一方で固体物性或いは材料科学の研究者が、光格子を使った実験に必ずしも高い関心を示していないという事実もある。

Science、Nature といった High impact journal に掲載された光格子系の実験論文を見ると、実験と理論とが一致し人工的に作られた結晶が美しく動作する様子が示されている。しかし逆に言えば、これらは「答えあわせ」に過ぎず、「発見」や「解明」ではないという見方もできてしまう。系のパラメーターを本当に自在に制御できるのであれば、理論予測が困難なパラメーター領域で実験データを取得し、理論家にインスピレーションを与え、量子多体系に対する理解を深化させることが可能はずである。絶縁体から擬ギャップを経て高温超伝導へ至る過程、フラストレーション系における磁性現象等を扱えば、分野を超えた研究者がこの系の将来に期待するであろう。現状そうになっていると言いたいのは、大自由度量子多体系といいつつも、光格子系のパラメーターの中に他の物理系に比べ圧倒的に制御性の悪いものが存在することによる。

レーザー冷却は原子気体の温度を容易に μK にまで下げることが出来るが、単一原子あたりのエントロピー S/N を計算すると、 $10k_B$ というかなり大きな値になる。ボース凝縮の転移温度 T_c や、フェルミ温度 T_F の $1/2$ に至るには、 S/N を $3.6k_B$ にまで下げる必要がある。超交換相互作用が熱揺らぎと同程度になるのは、 $S/N = 0.5\ln 2k_B \sim 0.35k_B$ である。上記した興味深い物性現象に至るには、ここから更に値を一桁下げる必要がある。光格子実験における原子気体の温度は僅か数 nK だが、実は S/N が $0.35k_B$ 近傍にしか至っておらず、反強磁性相関は数サイトに留まり、フェルミオンを使ったフラストレーション系も実現していない (Nature 467, 68; Science 353, 1253 & 1257)。極言すると光格子系は“高温”なのである。我々は 2 次元光格子にイッテルピウム (Yb) 原子を捕捉し、量子気体顕微鏡を用いてサイトを分解して原子を観測しているが、現時点での原子系の温度は 1nK 程度であり、 S/N は $0.6k_B$ と“高温”である。

2. 研究の目的

本研究の目的は、単一原子あたりのエントロピーを $S/N \ll 0.35k_B$ にまで下げ、光格子中で発現する各種の物性現象を探索する基盤技術を確立することにある。 S/N を下げる冷却方法は既に複数提案されているが、中でも Filter 冷却 (PRA 79, 061601; arXiv:0911.5506) は S/N を $10^{-3}k_B$ にまで下げることが出来る。光格子を使った実験では、一般に「冷却を行う過程」と「物性現象を観測する過程」とが時間的にわかれている。これは冷却を行うにあたり光照射やポテンシャル操作といった付加的な過程が入り、現象の観測と相容れないためである。 S/N を幾ら小さくしても、物性現象が発現するまでの間に系が再度加熱してしまえば現象を観測することは出来なくなるため、系の加熱レートを下げることも重要となる。こちらの要件は、原子種や光格子用レーザーの波長を適切に選定するところから始めない限り目的を達成することは難しい。ボソン・フェルミオン双方の同位体に対して量子気体顕微鏡が実現しているのは、Li、K、Yb の 3 種である。よく「軽い原子を短波長のレーザーで作った光格子に捕捉するとトンネルレートが上がり、超交換相互作用が大きくなるので有利だ」といった話をきくが、実際には必ずしもそうではない。図 1 は、figure of merit = 光格子が自然放出によって原子を不可避な形で加熱するレート \times 熱平衡に至る特徴的時間 / 超交換相互作用をプロットしたものである。直感的には、

光格子に導入する原子の S/N を最初にいくら下げても、figure of merit ~ 1 の場合、 $S/N \sim 0.35k_B$ に対応する物性現象までしか観測できない、と考えればよい。ここでオンサイト相互作用、トンネルレート、散乱長は単一バンド近似が成立し、超交換相互作用が最大化する理想的状況を仮定した (Yb については Feshbach 共鳴が使えないため、散乱長は固定であり、近赤外以下の波長では単一バンド近似が崩れる)。図 1 をみると意外なことに、Yb を長波長のレーザーが作る光格子に捕捉した方が有利なことがわかる。但し後述する様に、レーザー波長が長くなると、レーザーの強度・周波数雑音に対する要求は厳しくなる。我々は Yb 原子を使って光格子実験を行っているが、レーザー雑音を抑圧し、Filter 冷却を実装することで、 $S/N \ll 0.35k_B$ の状況で物性現象を探索する基盤技術を確立することを目指した。

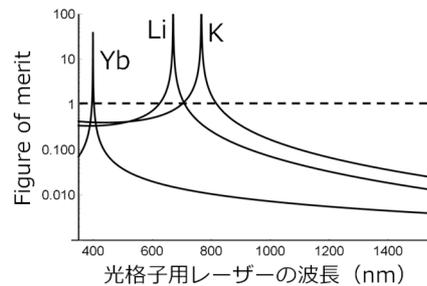


図 1 光格子による加熱レート \times 熱平衡に至る特徴的時間/超交換相互作用

3. 研究の方法

図 1 は「光格子用レーザーの波長が長ければ長いほど良い」ことを示しているが、実際には自然放出以外のレーザー雑音による加熱が存在するため、話はそれほど単純ではない。光格子を構成するレーザーは強度雑音と周波数雑音をもつ。強度雑音は光格子の深さを直接変調し、パラメトリックな加熱をひきおこす。周波数雑音は一見すると加熱と無関係に思えるが、光格子はレーザーをミラーで折り返すことで生成するため、周波数変動に伴い光格子が前後に振動し加熱を生じる。図 2 は、こうしたレーザー雑音が誘起する加熱の効果を加味し、改めて figure of merit をプロットしたものである。図 1 より K は明らかに Li、Yb に比べ劣るため、Li と Yb の比較に限定した。また Li については雑音による加熱がゼロの場合、Yb については 100pK/s、10pK/s の場合を示した。現在、Li を使った量子気体顕微鏡の実験では、波長 1.06 μm のレーザーによって作られた光格子が起用されている。一方我々は、Yb 原子を波長 1.08 μm のレーザーで作られた光格子に捕捉している。レーザー雑音による加熱レートが 100pK/s の場合、Li と Yb はほぼ同じ figure of merit を示すが、値は 0.1 程度であり、本研究の目的を達成する上で十分とは言えない。これを 10pK/s まで下げると、Yb の優位性が明確となり、かつ figure of merit を 0.01 と十分小さな値にできる。

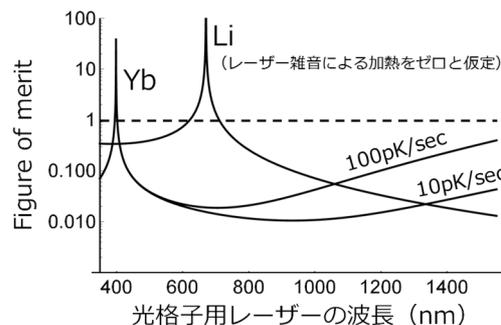


図 2 レーザー雑音による加熱を考慮した figure of merit
Li についてはレーザー雑音による加熱をゼロとおいた

目的値を実現するために、具体的に音響光学素子を使って光格子用レーザーの強度雑音を抑圧し、高 Q 値光共振器を用いた高速電流制御を通して光格子用レーザーのスペクトル線幅を狭窄化することを行う。さらに光格子を作る折り返しミラーと冷却原子集団との距離を極限まで接近させることで、周波数雑音による加熱を出来得る限り抑えることにした。

ボース凝縮にしてもフェルミ縮退にしても、量子縮退した原子気体を生成する場合、蒸発冷却と呼ばれる手法が用いられるが、この冷却は原子同士の衝突を利用しているため、 S/N の低下とともに急速に機能しなくなる。特に Pauli blocking が働くフェルミオンではこの効果がより顕著となるため、 $S/N \ll 0.35k_B$ といった状況を実現するには蒸発冷却とは異なる冷却手法が要求される。その一つが Filter

冷却である。 S/N は光格子中の全エントロピーを全原子数で割った平均値だが、各原子が有するエントロピーは空間依存しており、高いエントロピーをもつ原子を選択的に排除した後、系が熱平衡に至るのを待てば S/N を劇的に小さくできる。

図3を用いてフェルミオンに対する Filter 冷却の一例を紹介したい (PRA 79, 061601)。まずいつも通り、調和振動子型ポテンシャルが重畳した光格子中に原子集団をロードする (a)。続いてポテンシャルの中央部分に、深いディンプルと呼ばれるポテンシャルを導入し、バンド絶縁相を誘起する (b)。ディンプル中の光格子によるバンド間隔は、系の熱エネルギーに比べて十分高く、一つのバンドだけが完全に占有された状態となり、これは $S/N \sim 0$ に相当する。元々系がもっていたエントロピーは全てディンプル型ポテンシャルの外に押し出される形となる。周縁部の原子を何らかの方法で排除した後 (c)、ディンプル型ポテンシャルを断熱的に抜き去れば (d)、 S/N を劇的に低下させることができ、各種の物性探索に利用可能な状態が整うわけである。

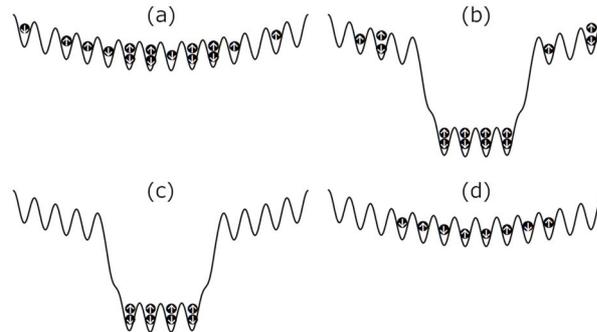


図3 Filter 冷却の一例

4. 研究成果

光格子用レーザーについて、強度雑音を抑圧し、さらに ULE 共振器を周波数標準として用いることでスペクトル線幅を 1kHz 程度まで狭窄化した。また折り返し用ミラーと冷却原子との間隔を 50mm まで狭めた。これに加え、各種光学アライメントや蒸発冷却過程の最適化を行うことで、 ^{174}Yb (ボソン同位体) を対象とした Mott 絶縁体状態における S/N を、研究開始時に比べて半分程度にまで落とすことに成功した (図4)。

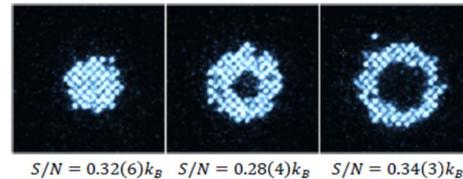


図4 ^{174}Yb 原子気体の Mott shell の観測

我々の最終目標は、ボソンではなくフェルミオンを対象とした実験において、 $S/N \ll 0.35k_B$ を実現することにある。そこで Filter 冷却の実験を開始する前に、 ^{173}Yb (フェルミ同位体) を対象とした実験を開始した。 ^{173}Yb を蒸発冷却しフェルミ縮退に至らせた後、光格子に導入し量子気体顕微鏡を使って Mott 絶縁体状態を観測した結果が図5である。 ^{173}Yb の核スピンは $I = 5/2$ であり、合計 6 つの核スピン成分を有する。6 つの核スピン状態が同程度混合した気体を使って Mott 絶縁体状態を誘起した結果が (a)、光ポンピング過程を通してスピン成分を $m = \pm 5/2$ の 2 成分に限定した後、Mott 絶縁体状態を誘起した結果が (b) である。我々は光会合過程を利用してサイト内原子数の偶奇を判定しているが、スピンを弁別することまではできない。そのため、サイト内粒子数の揺らぎについて S/N を評価したところ、それぞれ (a) $S/N = 0.41k_B$ 、(b) $S/N = 0.60k_B$ であった。

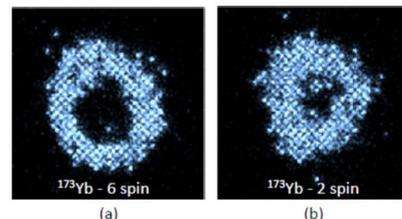


図5 ^{173}Yb 原子気体の Mott shell の観測

ボソン、フェルミオン双方について Mott 絶縁体状態の生成に成功したので、次の段階として Filter 冷却の実装に挑むこととした。その予備段階として、調和振動子型ポテンシャルが重畳した光格子に、デジタルミラーデバイス (DMD) によって成形された光を照射することで、平坦なポテンシャルを実現することを目指した。ここで真空槽内の乱反射を通して不要な干渉が起こるのを避けるため、光源としては中心波長 650nm、スペク

トル幅 6nm の Superluminescent light emitting diode (SLED) を起用した。実験は冷却が比較的容易なボソン同位体を対象として行った。図 6 において、DMD から光を照射しない状態(a)に比べ、DMD から光を重畳することにより(b)、(c)、Mott shell 半径が増大する様子が確認できる。本研究期間内では DMD を使って調和振動子型ポテンシャルを抑圧するところで研究期間が終了したが、ポテンシャルを成形する基盤技術を整えることができたので、今後 Filter 冷却を実装し、目的とする S/N の実現を目指す。

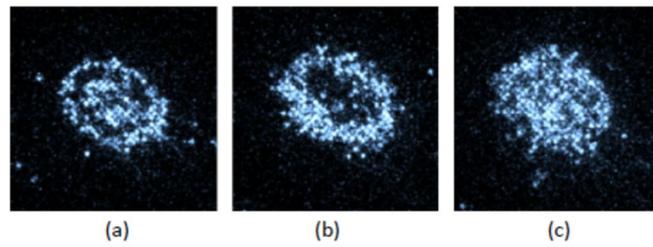


図 6 DMD による調和振動子型ポテンシャルの抑圧

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 上妻幹旺	4. 巻 Vol.47, No.7
2. 論文標題 量子気体顕微鏡による光格子中に捕捉された原子の観測	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 光学	6. 最初と最後の頁 295-300
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Ryotaro Inoue, Yuki Miyazawa and Mikio Kozuma	4. 巻 97
2. 論文標題 Magneto-optical trapping of optically pumped metastable europium	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review A	6. 最初と最後の頁 61607
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） https://doi.org/10.1103/PhysRevA.97.061607	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Miranda Martin, Inoue Ryotaro, Tambo Naoki, Kozuma Mikio	4. 巻 96
2. 論文標題 Site-resolved imaging of a bosonic Mott insulator using ytterbium atoms	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Physical Review A	6. 最初と最後の頁 43626
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） https://doi.org/10.1103/PhysRevA.96.043626	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 4件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 上妻幹旺
2. 発表標題 レーザー冷却とその応用
3. 学会等名 システムナノ技術に関する特別研究専門委員会第4回研究会「量子センシング、次世代フォトニクスの最前線」（招待講演）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Mikio Kozuma
2. 発表標題 Laser cooling and its application to inertial navigation
3. 学会等名 OPTICS & PHOTONICS International Congress 2019 (IoT Enabling Sensing/Network/AI and Photonics Conference 2019) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 上妻幹旺
2. 発表標題 冷却原子を用いた量子シミュレーションと量子慣性センサー
3. 学会等名 公益財団法人応用物理学会第147回微小光学研究会 (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 上妻幹旺
2. 発表標題 レーザー冷却の基礎と応用
3. 学会等名 日本原子力研究開発機構 原子力科学研究部門 先端基礎研究センター 第691回ASRC (招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 井口賢人, 高木將登, ミランダ・マルティン, 井上遼太郎, 上妻幹旺
2. 発表標題 173Yb原子系におけるMott絶縁体相の実空間観測
3. 学会等名 日本物理学会 第73回年次大会
4. 発表年 2018年

1 . 発表者名 R. Inoue, M. Miranda, N. Tambo, and M. Kozuma
2 . 発表標題 Noncooled site-resolved imaging of a Mott-insulator
3 . 学会等名 Bose-Einstein Condensation 2017 (国際学会)
4 . 発表年 2017年

1 . 発表者名 M. Miranda, R. Inoue, N. Tambo, K. Iguchi, M. Takagi and M. Kozuma
2 . 発表標題 Noncooled site-resolved imaging of a Mott insulator
3 . 学会等名 International Conference on Optics, Lasers and Spectroscopy (ICOLS 2017) (国際学会)
4 . 発表年 2017年

1 . 発表者名 M. Takagi, K. Iguchi, M. Miranda, R. Inoue and M. Kozuma
2 . 発表標題 Site-resolved imaging of a fermionic Mott insulator using 173Yb
3 . 学会等名 26th International Conference on Atomic Physics (ICAP2018)
4 . 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

上妻研究室HP http://www.kozuma.phys.titech.ac.jp/ Kozuma laboratory HP http://www.kozuma-eng.sci.titech.ac.jp/ 光格子を用いた物性研究 http://www.kozuma.phys.titech.ac.jp/research_category/entry7.html

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
連携 研究者	井上 遼太郎 (Ryotaro Inoue) (20708507)	東京工業大学・理学院・特任准教授 (12608)	