

A02 光格子原子顕微鏡で探索する人工ゲージ場が織り成す非平衡現象

東京工業大学大学院理工学研究科 上妻 幹旺
東京工業大学大学院理工学研究科 井上 遼太郎

量子縮退した中性原子気体を光で作られた格子中に捕捉した系は、Hubbard 模型に代表される各種物理モデルを忠実に反映する量子シミュレーターとして機能する。系のパラメータを正確に把握できるだけでなく、時間的に変化させることも出来るため、相転移と同時に非平衡状態を生成するクエンチを誘起し、スケーリング則を議論することも可能である[1]。このように光格子系は、各種物理モデルにおける基底状態量子相を詳らかにする上でも、また非平衡現象を誘起・観測する上でも強力なツールになると期待されている。

光格子系で発現する各種の物性現象をとらえる上で、量子気体顕微鏡（光格子原子顕微鏡）と呼ばれる新技術に注目が集まるようになってきた[2]。光格子系に高分解能の蛍光顕微鏡を組み合わせることで、従来から行われてきた原子波干渉を利用した初期運動量分布の測定に加え、光格子中に捕捉された原子の実空間分布を、各サイトを分解して観測することが可能となった。

本公募研究がスタートした時、量子気体顕微鏡は、アルカリ金属であるルビジウム (Rb) 原子に対してしか実現されていなかった。Rb はボソン同位体しかもたないため、ボソン・フェルミオン双方を対象とした実験を行うために、我々はランタノイド系の原子種であるイッテルビウム (Yb) に着目をした。平成 26 年度の公募研究を通して、我々は光格子中に捕捉された Yb 原子を、各サイトを分解して蛍光観測することに成功した。光格子の周期 544nm に対して、得られた空間分解能は 377nm であり、原子が周期的に分布している様子を明確にとらえることができた。しかしながら、得られた画像の蛍光強度を横軸に、対応するサイトの数を縦軸にとった頻度分布は一つのピークしかもたなかった。これは、原子の密度分布が光格子によって周期的な変調を受けていることは観測できても、各サイトにおける原子の有無までは判定出来ないことを意味している。これでは Yb 原子に対する量子気体顕微鏡を実現したとは言えず、実際このシステムを使ってどのような量子相が発現しているかを判定することは出来ない。

各サイトにおける原子の有無を判定出来ないのは、蛍光撮像時における原子の寿命が僅か $17\mu\text{s}$ にとどまっていたことによる。各サイトにおける原子の有無を判別するためには、各原子が放出する蛍光量のばらつきを抑える必要性があり、共鳴周波数のレーザーを照射する時間を、寿命に比べて十分に短くしなければならない。しかし寿命が $17\mu\text{s}$ と極端に短い状態でレーザー照射時間を制限すると、十分な S/N をもった蛍光画像を得ることが出来なくなってしまう。そこで平成 27 年度、我々は蛍光撮像時における原子寿命を制限する要素を詳細に調べ、最終的に寿命を 3 倍以上に増大させることに成功した。このようにして得た原子の蛍光画像の一例を図 1 (raw data) に示す。孤立した原子の蛍光画像を多数回平均したものは、本顕微システムの点拡がり関数 (PSF) に相当すると考えられる (図 2)。図 3 に、PSF を用いた画像処理の手続きを示す。得られた蛍光画像 (a) に対して PSF を用いて逆畳み込み積分を施すと、光格子中における原子位置を推定することができ、そこから光格子の位置も

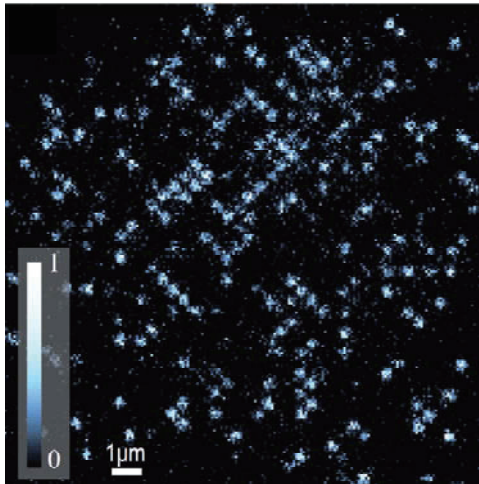


図1 光格子中に捕捉された原子の蛍光画像 (raw data)

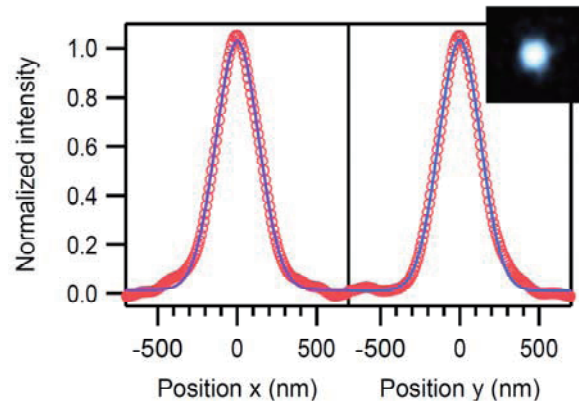


図2 原子からの蛍光を平均した結果。グラフは、直交する軸方向の中心を通る強度分布。

推定出来る (b)。横軸に各サイトにおける蛍光強度を、縦軸に対応するサイト数をとって頻度分布を表すと (d) のようなダブルピークが得られ、各サイトにおける原子の有無が判定可能であることが理解される。適切な閾値をもうけて各サイトの原子の有無を表示したのが (c) である。統計処理を通して我々のシステムのパフォーマンスを評価したところ、サイトに原子が存在しないとき、これを判定できる確率は99%以上、サイトに原子が存在するとき、これを判定できる確率は92%であることがわかった。これらの値は超流動-Mott 絶縁相転移を代表とする各種物性を評価する上で十分な値であり、これをもってYb原子に対する量子気体顕微鏡を、世界で初めて実現することが出来たと判断した[3]。

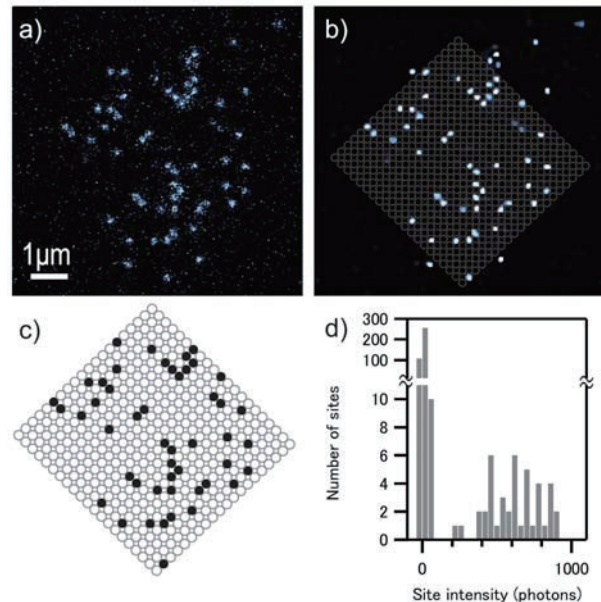


図3 (a) 蛍光画像、(b) PSF を用いた原子位置の推定結果、(c) 原子の有無を判定した結果、(d) 各サイトにおける蛍光強度の頻度分布

参考文献：

- (1) D. Chen, M. White, C. Borries and B. DeMarco, *Phys. Rev. Lett* **106**, 235304 (2011).
- (2) W. S. Bakr, J. I. Gillen, A. Peng, S. Folling and M. Greiner, *Nature* **462**, 74 (2009).
- (3) M. Miranda, R. Inoue, Y. Okuyama, A. Nakamoto and M. Kozuma, *Phys. Rev. A* **91**, 063414 (2015).