

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

レーザーの輻射圧を利用して、中性原子気体を 100nK オーダーの超低温にまで冷却することで、量子縮退状態（ボース凝縮、フェルミ縮退）を実現することができる。量子縮退した原子気体を光定在波によって構成された周期ポテンシャル（光格子）中に捕捉した系は、Hubbard 模型を代表とする各種物理モデルを忠実に反映する理想的なシミュレーターとして機能する。光格子中で発現した物性を探索するにあたり、従来は、ポテンシャルから開放された原子集団が作り出す原子波干渉パターンから、初期の運動量分布に関する情報を抽出していた。ごく最近になり、「光格子原子顕微鏡」と呼ばれる新たな技術が登場し、各サイトに捕捉された原子の実空間分布を直接とらえることが可能となった。本研究の目的は、エキゾチックな性質をもつランタノイド系の原子であるイッテルビウム (Yb)、そしてユウロピウム (Eu) に対して光格子原子顕微鏡を構築し、さらに人工ゲージ場の手法を用いることで、新奇な非平衡現象の観測を行うとともに、その理解を深めることにある。

光格子原子顕微鏡は、これまでアルカリ金属であるルビジウム (Rb) に対してしか実現されていなかった。Yb は Rb と異なり、ボソン・フェルミオン両方の同位体をもつだけでなく、人工ゲージ場を構成する上で有効な超狭線幅光学遷移を有するため、リッチな平衡・非平衡量子物性現象を発現する力をもつ。一方ユウロピウムは基底状態に $7\mu_B$ という大きな磁気モーメントを有しており、短距離・等方的な s 波散乱相互作用だけでなく、長距離・異方的な磁気双極子相互作用を原子間に誘起することができる。加えて基底状態に超微細構造をもつため、適当な周波数のマイクロ波を照射することで、スピンの自由度を活かしたまま、s 波散乱長を制御する Micro-wave Feshbach 共鳴を実現できる可能性がある。磁気双極子相互作用は、「スピンと軌道の結合」を誘起する力を持つため、上記したユウロピウムの利点を最大限に活かすことで、spin texture や質量流を伴う基底状態相、あるいは素励起状態を生成し、量子非平衡現象を探索できると期待している。なおユウロピウムはこれまでレーザー冷却が行われたことのない原子種であり、光格子原子顕微鏡を構築する以前に、冷却・トラップ・凝縮といった諸過程を実現すること自体が高い学術的意義をもつ。

本年度、一つ目の研究目的として、我々は研究室内で既にレーザー冷却、ボース凝縮が実現している Yb を対象とした光格子原子顕微鏡を構築することを目指した。実験系を図 1 に示す。光学顕微鏡の分解能をその屈折率分だけ増大させる固浸レンズの直下、 $1\mu\text{m}$ 程度の平面内で、量子縮退した Yb 原子集団を圧縮してシート状（2 次元量子系）にしたあと(1)、そこに光格子を刻み、各サイトにトラップされた原子からの蛍光を EM-CCD カメラで観測することで顕微画像を得た。本研究がスタートした平成 26 年 4 月の時点では、蛍光画像を 2 次元フーリエ変換することで、原子が周期的にトラッ

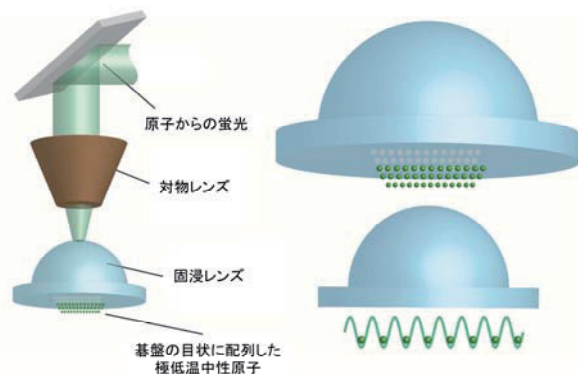


図 1 光格子原子顕微鏡の概略図

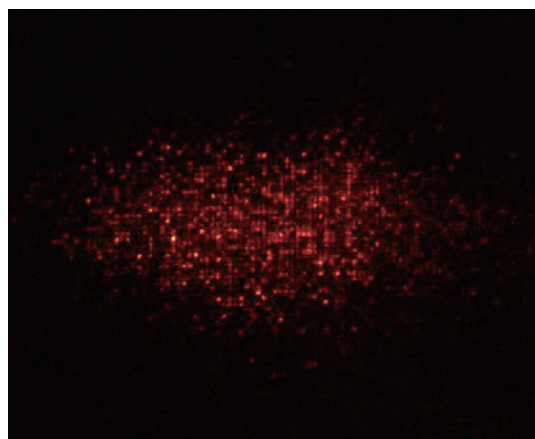


図 2 光格子中の Yb 原子の蛍光画像

プされている様子を辛うじて判断できるという状況であったが、本新学術研究を通して図 2 (raw data) のように各サイトが明確に弁別された顕微画像を得ることが可能となった。光格子の周期は 543nm、得られた空間分解能は 377nm であり、現存する光格子原子顕微鏡の中で最も高い分解能が達成されている。ただし残念ながら、各サイトの原子数までも弁別するには至っていない。サイト内の原子数を弁別するためには、蛍光画像に対して蛍光強度の頻度分布が離散的になる必要があるが、本実験では蛍光撮像時のサイト内の原子の寿命が僅か $17\mu\text{s}$ にとどまり、蛍光量の不足により、離散的頻度分布を得るには至らなかった。ただこの問題は光格子を形成する $1\mu\text{m}$ 帯の光強度と離調を増やすことで原理的に回避が可能であり、現在その方向で系の改築を進めている。

本年度、二つ目の研究目的として、ユウロピウム原子のレーザー冷却に必要な超高真空装置、並びにレーザー光源を開発するとともに、そもそも Eu 原子のレーザー冷却が可能であるか否かを分光的に見極める実験を行った。中性原子気体の量子縮退は、1. ゼーマン減速、2. 磁気光学トラップ、3. 蒸発冷却、の 3 ステップを通して生成される。そこでまず、原子オープン、ゼーマン減速器、磁気光学トラップ領域を有する真空装置を作成し、 10^{-11}Torr 台の真空度を得た。 μK オーダーの磁気光学トラップを実現するためには、初速 300m/s 程度の原子ビームを数 m/s 程度にまで予めゼーマン減速する必要がある。数 10cm のわずかな距離で原子を減速するには光吸収・放出サイクルが短い、すなわち自然幅が太い光学遷移を利用する必要があり、我々は $a^8\text{S}_{7/2} - y^8\text{P}_{9/2}$ 遷移 (波長 459 nm、自然幅 27 MHz) に着目をした。光帰還形半導体レーザーを使って基本波を構成し、テーパアンプにて強度を増幅した後、PPKTP 結晶を使ったボウタイ共振器で倍波をとることで、出力 260mW の光源を準備した。この光源を用いて原子ビーム分光を行い、超微細構造の帰属付を行った。Eu はランタノイド系の原子であり、そのエネルギー構造は複雑であり、 $y^8\text{P}_{9/2}$ 励起状態から準安定状態への緩和 (分枝) は無視できず、分枝の大きさによっては、第一段階のゼーマン減速がそもそも機能しなくなる危険性がある。とはいえ、4f 軌道に 7 つもの電子が存在する原子に対して Relativistic Hartree-Fock 近似等を使って数値計算を行い、分枝を予測するのは無理がある (4f 軌道の電子が 12 個、つまり実効的な粒子数が 2 個の Er ですら、理論と実験に 1 桁程度の誤差がでる)。そこで我々は、図 3 のような装置を用いて、原子ビームからの蛍光を CCD カメラで撮像し、それを数値シミュレーションと比較することで、これまで不明であった励起状態から準安定状態への分枝比を測定した。その結果、分枝比の上限が 1×10^{-4} であることが判明し、ゼーマン減速が有効に働くことが詳らかとなった。また実際にゼーマン減速光を原子ビームに対抗方向から照射し、ゼーマン減速実験を行ったところ、低速度原子のポピュレーションが増大したと思われる予備的な結果を得るに至った。

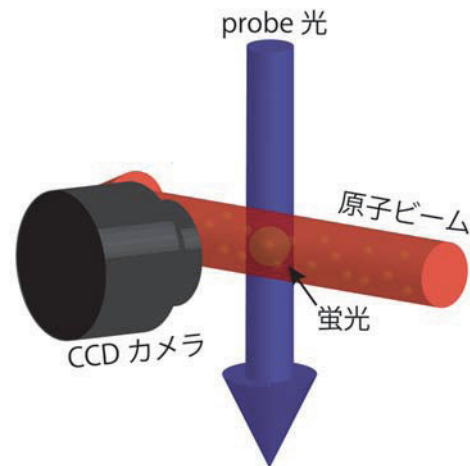


図 3 Eu $y^8\text{P}_{9/2}$ 励起状態の分枝比測定系

ゼーマン減速に続き、原子を μK オーダーにまで冷却するには、自然幅の細い遷移を使って磁気光学トラップを行う必要がある。我々は、 $a^8\text{S}_{7/2} - z^{10}\text{P}_{9/2}$ 遷移 (波長 687nm、自然幅 97 kHz) に着目し、半導体レーザーの光帰還によって光源を作成するとともに、原子ビーム分光による帰属付を行った。本遷移の $z^{10}\text{P}_{9/2}$ 励起状態については分枝が無視できるため、平成 27 年度は、いよいよ Eu 原子の世界初の磁気光学トラップに挑む予定である。

参考文献:

- (1) M. Miranda, A. Nakamoto, Y. Okuyama, A. Noguchi, M. Ueda and M. Kozuma, *Phys. Rev. A* **86**, 063615 (2012).
- (2) M. Miranda, R. Inoue, Y. Okuyama and M. Kozuma, *arXiv*:1410.5189 (2014).