

平成 30 年 6 月 18 日現在

機関番号：12608

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2017

課題番号：16K13856

研究課題名(和文) ユロピウム原子のレーザー冷却

研究課題名(英文) Laser Cooling of Europium Atoms

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) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：大きな磁気モーメントをもつ原子のボース凝縮体は、短距離等方的な s 波散乱相互作用に加え、長距離異方的な磁気双極子相互作用を有する。磁気双極子相互作用はスピンと軌道角運動量を結合させるため、スピントクスチャーや超流動渦を伴う基底状態量子相など、興味深い現象の観測につながると期待されている。スピン自由度を維持したまま散乱長を抑圧するうえで、基底状態の超微細構造を利用したマイクロ波 Feshbach 共鳴の活用が考えられる。我々は、大きな質量と磁気モーメントをもち、かつ基底状態に超微細構造を有するユロピウム (Eu) に対し、準安定状態を利用して磁気光学トラップを生成することに世界で初めて成功した。

研究成果の概要(英文)：Atomic species such as Cr, Er, Dy have large magnetic moments which give rise to anisotropic, long-range dipole-dipole interaction as well as isotropic, short-range s-wave scattering. Magnetic, dipole-dipole interactions couple the atomic spin with its angular momentum, which enables one to observe rich phenomena such as the emergence of ground states with spin textures and superfluid vortices. Such unique effects cannot be observed when a Feshbach resonance is employed to suppress the s-wave scattering length, as the spin orientation is fixed to the magnetic field direction. Eu has bosonic isotopes with hyperfine structure in the ground state. By irradiating atoms with a microwave tuned to the hyperfine-splitting, the scattering length can be controlled without the use of a magnetic field. By using the metastable state to decelerate and cool the atoms, we succeeded in creating magneto-optical trapping of Eu atoms.

研究分野：量子エレクトロニクス

キーワード：磁気双極子相互作用 ユロピウム Europium 磁気光学トラップ ボース凝縮 レーザー冷却 dipolar gas

## 1. 研究開始当初の背景

レーザーで冷却されボース凝縮に至った原子気体は、nK台の超低温状態にあるため、原子間相互作用は短距離等方的な s 波散乱によって支配される。近年になり、原子間に新たな相互作用を導入し新奇な物性現象を探索することを目的として、大きな磁気モーメント  $\mu$  をもつ原子をレーザー冷却し量子縮退させる研究が着目されるようになった。一例として、 $\mu = 6\mu_B$  を有するクロム (Cr: 質量数 52) のボース凝縮体に対し、Feshbach 共鳴によって s 波散乱長  $a$  を抑圧し、長距離異方的な磁気双極子相互作用を支配的にすることで d 波崩壊を観測した報告がなされている。磁気双極子相互作用は  $\mu_0\mu^2m/12\pi\hbar^2a > 1$  の領域で顕著となるため、近年になり  $\mu$  に加え、質量  $m$  が大きい原子種であるジスプロシウム (Dy: 質量数 164、 $\mu = 10\mu_B$ ) やエルビウム (Er: 質量数 168、 $\mu = 7\mu_B$ ) に注目が集まることとなった。これらランタノイド系原子種のボース凝縮体を使うことで、拡張 Bose-Hubbard 系の実装、Rosenweig 不安定性の観測など、新奇かつ普遍的な物理現象が報告されるに至っている。しかし、Cr、Dy、Er の s 波散乱長を抑圧するためには、静磁場を印加することで Feshbach 共鳴を起こす必要があるため、スピンの自由

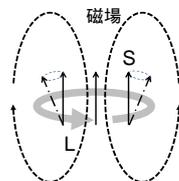


図 1 磁気双極子が作り出す磁場がスピンを回転させると、全角運動量保存により軌道角運動量が変化する。

度は失われてしまう。磁気双極子相互作用は、軌道角運動量とスピンとを結合させる力をもつため(図 1)、スピンの自由度を保ちつつ s 波散乱長が制御できることが、磁性量子気体の研究を推進する上でより好ましい状況だといえる。実際、軌道角運動量とスピンとが結合することで、アインシュタイン・ドハ

ース効果のような量子過渡現象が発生する、或いは spin texture、量子渦を伴うエキゾチックな基底状態量子相が観測できる可能性がある。

## 2. 研究の目的

スピン自由度を維持したまま磁気双極子相互作用が支配的な状況を作る方法として、我々は、J. Dalibard らが理論的に提案した

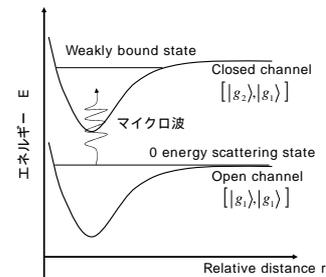


図 2 Micro-wave Feshbach 共鳴

Micro-wave Feshbach 共鳴に着目をした。これは、基底状態の超微細分裂間隔に近いマイクロ波を照射することで、2 原子の衝突時に束縛状態を経由させ、スピン自由度を確保したまま散乱長を制御するという手法である(図 2)。この方法を適用するには、基底状態が超微細構造を有する必要があるが、Cr、Dy、Er のボソン同位体は、いずれも超微細構造をもたない。磁気モーメントと質量数の双方が大きく、かつ基底状態に超微細構造を有する原子種としては、Eu ( $7\mu_B, I = 5/2$ )、Tb ( $10\mu_B, I = 3/2$ )、Ho ( $9\mu_B, I = 7/2$ ) の 3 つをあげることができる。このうち Tb は室温黒体放射の中心波長である  $10\mu\text{m}$  近辺の光学遷移を複数有しており、量子縮退気体を使った実験には向かないと我々は判断した。一方、Ho の磁気モーメントが最大化するのは、基底状態の最もエネルギーが高い準位 ( $F = 11$ ) であり、原子同士が衝突をすると超微細準位間の緩和が生じてしまう(図 3)。Eu の場合、磁気モーメントが最大化するのは、最もエネルギーの低い準位 ( $F = 6$ ) でありこうした問題は発生しない。

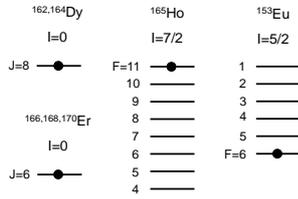


図3 各原子種の超微細構造

Micro-wave Feshbach 共鳴という観点だけでなく、Er や Dy と同様に静磁場を使って Feshbach 共鳴を誘起する場合においても、Eu は物理的に興味深い特性をもつ。Er、Dy の Feshbach 共鳴線はカオス状に発生することが実験的に知られているが、これは基底状態の軌道角運動量が、 $L = 5, 6$  と大きく、二体のファンデルワールス相互作用の係数  $C_6$  が方向依存になり、多数の部分波が関与するためと考えられる。整然とした原子物理の体系にカオスが発生すること自体は興味深いですが、利用する観点からすると問題でもある。Eu は Er、Dy と異なり、基底状態が  $(L = 0)$  であり、Feshbach 共鳴線がカオティックには現れないと予想され、通常の磁場印加による Feshbach 共鳴を利用する際も理想的な振る舞いをするのが期待される。以上の理由により、本研究では Eu を世界で初めてレーザー冷却するとともに、蒸発冷却を通してボース凝縮体を生成し、Eu を用いた磁性量子気体研究を行う基礎を整えることを目的とした。

### 3. 研究の方法

Eu は飽和蒸気圧が低いいため、実験を行うには、数100 に熱したオープン中で原子を昇華させるなければならない。300m/s 程度の速度で出射した原子ビームに、共鳴するレーザーを対向照射することで数 m/s まで減速をする必要がある(ゼーマン減速)。低速の原子ビームさえ得られれば、四重極磁場を印加し、3 方向からレーザーを照射することで冷却原子気体を生成することが出来る(磁気

光学トラップ)。Eu で問題となるのは、前者のゼーマン減速である。ゼーマン減速は多数回の自然放出を要求するため、閉じた光学遷移が必要となるが、Eu の場合、基底状態の全角運動量  $J$  に対して、励起状態のそれが  $J+1$  となる許容遷移が3つしかない(図4中、パリティの偶・奇を白・黒で表した)。その中

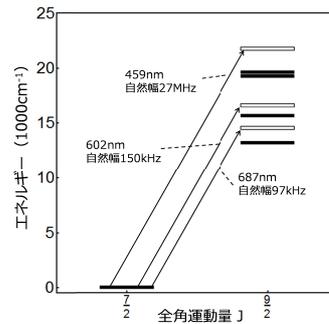


図4 基底状態からの  $J \rightarrow J+1$  遷移

でも、自然幅 27MHz、波長 459nm の光学遷移が最も良い候補となるが、本研究開始前に我々が行った分光測定を通し、励起状態から他の準安定状態への分枝が  $1.05(2) \times 10^{-3}$  もあることがわかっており[2]、条件を

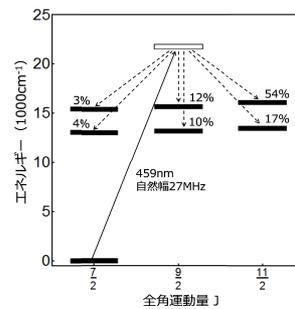


図5 Eu の分枝

満たさない(図5)。波長 602nm、687nm の光学遷移の場合、準安定状態への遷移波長が長く分枝は問題にならないと予想されるが、自然幅が 100kHz 程度と極端に細く、ゼーマン減速に 20m 以上の距離を要するため、こちらも条件を満たさない。

そこで我々は以下のアイデアを用いて上記の問題を回避することを計画した。まず図6のように、オープンから出射した直後の原子ビームに対して、波長 459nm、513nm の

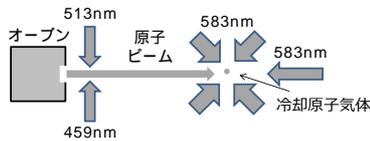


図6 Euをゼーマン減速、磁気光学トラップする方法

二つのレーザーを垂直方向から照射する。我々が行った分光結果によると、波長459nmのレーザーを照射することで、 $J=11/2$ の最低エネルギー状態に17%の原子が緩和する(図5)。波長513nmのレーザー照射により、このうち8割の原子が $J=13/2$ の準安定状態に緩和する(図7)。幸いなことに、

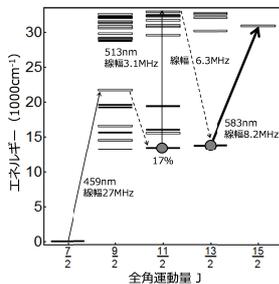


図7 分枝の問題を回避するレーザー冷却のアイデア

$J=13/2$ と $15/2$ とを結ぶ閉じた光学遷移(波長583nm)が存在し、しかもその線幅が8.2MHzと太いため、ゼーマン減速が可能となる。減速された原子ビームに四重極磁場を印加し、3方向から同波長のレーザーを照射することで、冷却原子気体を生成することが可能となる。準安定状態のEuを対象とした磁気光学トラップが生成出来たら、波長 $1.5\mu\text{m}$ の高出力レーザーを絞りこむことで原子を光トラップする。その後、適切な波長のレーザーを照射することで準安定状態の原子を全て基底状態に移行し、蒸発冷却を施すことで、世界初のEu原子のボース凝縮を目指すことにした。

#### 4. 研究成果

まず、外部共振器型半導体レーザー(ECLD)の2次高調波をとることで、波長459nm、

出力200mWの光源を準備した。波長513nmの光源についても同様にECLDを作成した。実際の実験ではこれに加えて、 $J=9/2$ に緩和した原子を目的とする準安定状態 $J=13/2$ に光ポンピングすることを目的として波長507nmのECLD光源も準備した。ゼーマン減速、磁気光学トラップに使用する波長583nmの光源については、色素レーザーを用いることにした。これらの光源を用いて準安定状態のEu原子に対して世界で初めて磁

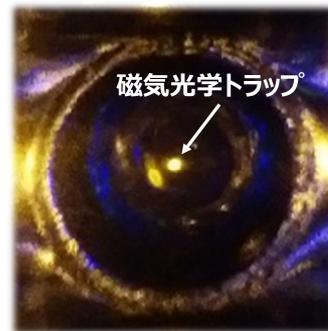


図8 準安定状態Eu原子の磁気光学トラップ

気光学トラップを行った結果を図8に示す[1]。冷却され、一箇所に集まったEu原子気体が波長583nmの蛍光を発している様子がみとれる。吸収撮像法により原子気体の個数が最大で $1 \times 10^7$ であることを確認した。このときレーザー離調は $\Delta/\Gamma = -2.4$ 、磁場勾配は $\text{dB}/\text{dz} = 17.5\text{G}/\text{cm}$ 、レーザー強度は $1.3I_s$ であった。ここで $I_s \cong 2.7 \times 5.4\text{mW}/\text{cm}^2$ は飽和強度をあらわし、係数2.7はゼーマン副準位に原子が等しく分布し、かつ磁気光学トラップ中においてあらゆる偏光成分が存在することを考慮している。上記パラメーターにて磁気光学トラップを行った後、冷却光を遮断し原子気体を自由拡散させたところ、異なる温度を有する二つの原子気体が混在していることが確認された。両者の温度はそれぞれ $230(21)\mu\text{K}$ 、 $1.1\text{mK}$ であった。使用したレーザー強度、離調から算出されるDoppler冷却温度はおよそ $500\mu\text{K}$ である。磁場勾配を下げることで温度をさら

に下げることとも可能であり、例えば  $dB/dz = 5G/cm$ 、 $\Delta/\Gamma = -1.1$  では、 $41(4)\mu K$ 、 $410(80)\mu K$  が得られた。

続いて捕捉原子数を最大化するパラメーターにて、磁気光学トラップ中の一体ロス、二体ロスを評価した。波長 460nm のレーザーを遮断すると、 $J=13/2$  準安定状態の原子の供給が絶たれる。この状態で磁気光学トラップからの蛍光を時間の関数として取得し、フィッティングをかけることで、一体のロスレートが  $\gamma = 1.9s^{-1}$ 、二体のロスレートが  $\beta = 1 \times 10^{-10} cm^3/s$  と見積もられた。図 9 は

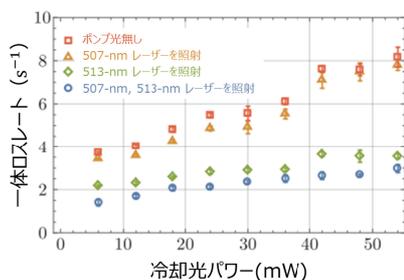


図 9 一体ロスレートのポンプ光及び、冷却光パワー依存性

各種ポンプ光源の有無、及び冷却光パワーに応じて、一体ロスが変化する様子を測定した結果である。一体のロスレート  $\gamma$  はポンプ光、特に波長 513nm の光の有無に強く依存している。また冷却光のパワーを増やすことでもロスが増大することから、我々はレーザー冷却サイクルの上準位 ( $J=15/2$ ) から準安定状態  $J=11/2$  への緩和過程が存在すると考えている。図 7 には記載されていないが、レーザー冷却サイクルの下準位については、 $J=11/2$  準位への赤外波長遷移 (波数:  $1800cm^{-1}$ ) が存在する。黒体輻射によってこの遷移が励起され、 $J=11/2$  の最低エネルギー準位に緩和する過程も考えられる。実際、図 9 をみると、冷却光の強度が十分に弱い状況においても波長 513nm のポンプ光の有無により一体のロスレートが大きく変化していることがわかる。こうした一体ロス機構は、一見するとデメリットにしかならないように思えるが、実際には準安定状態で磁気光学

トラップを行いつつ、漏れた原子に適切なレーザーを照射して連続的に原子を基底状態に戻す目的で利用することもできる。

2 年間の研究期間中に、最終目的とするボース凝縮体の生成には至らなかったものの、準安定状態の Eu 原子に対する磁気光学トラップに世界で初めて成功する、トラップ中のロスを定量的に明らかにするなど、マイルストーンとなる成果をだすことができた。今後、原子を基底状態に戻すとともに、光トラップ、蒸発冷却を施すことで、目的とするボース凝縮体の生成が可能になると考えている。

## 5 . 主な発表論文等

[雑誌論文](計 2 件)

[1] “Magneto-optical trapping of optically pumped metastable europium”, Ryotaro Inoue, Yuki Miyazawa and Mikio Kozuma, arXiv:1803.06475 (2018). Accepted by Phys. Rev. A, Rapid Communications. [査読有り]

[2] “Measuring the branching ratios from the  $y^8P_{9/2}$  state to metastable states in europium”, Y. Miyazawa, R. Inoue, K. Nishida, T. Hosoya, and M. Kozuma, Optics Communications **392**, 171 (2017). [査読有り]  
<https://doi.org/10.1016/j.optcom.2017.01.059>

[学会発表](計 8 件)

[1] 上妻幹旺, 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, 公益社団法人応用物理学会第 147 回微小光学研究会「光と  $\times \times$  の相互作用」, 2018 年 3 月 1 日, 上智大学, 2018 年 3 月 1 日.

[2] 上妻幹旺, レーザー冷却の基礎と応用, 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 Seminar, 東海村, 2017 年 7 月 21 日.

[3] 宮澤裕貴, 多賀俊祐, 井上遼太郎, 上妻幹旺, 准安定状態にあるユウロピウム原子の磁気光学トラップ, 日本物理学会 第 72 回年次大会, 大阪, 2017 年 3 月 18 日.

[4] 上妻幹旺, 量子計算と量子シミュレーション, スペシャルサイエンスセミナー, 群馬県立高崎高等学校, 2016 年 12 月 15 日.

[5] Yuki Miyazawa, Ryotaro Inoue, Toshiyuki Hosoya, Keiji Nishida, Takuya Ogata and Mikio Kozuma, Magneto-optical trapping of metastable europium atoms, Seoul, Korea, July 24-29 (2016).

[6] Mikio Kozuma, Laser cooling experiments with Yb, Eu and Rb, CEMS Topical Meeting on Cold Atoms, Tokyo, Japan, June 10-11(2016).

[7] Yuki Miyazawa, Ryotaro Inoue and Mikio Kozuma, Laser cooling of europium atoms, International Summer Workshop for Young Scientists, Tokyo Japan, June 6-10 (2016).

[8] Mikio Kozuma, Laser cooling & atomic species, International Summer Workshop for Young Scientists, Tokyo, Japan, June 6-10 (2016).

[図書](計 0 件)

[産業財産権]

出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

[その他]

ホームページ等

[http://www.kozuma.phys.titech.ac.jp/research\\_category/entry8.html](http://www.kozuma.phys.titech.ac.jp/research_category/entry8.html)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

上妻 幹旺 (KOZUMA, Mikio)

東京工業大学・理学院物理学系・教授

研究者番号: 10302837

### (2) 連携研究者

井上 遼太郎 (INOUE, Ryotaro)

東京工業大学・理学院物理学系・助教

研究者番号: 20708507