

Eu原子のレーザー冷却 Laser Cooling of Europium Atoms

H26助自27

代表研究者 上 妻 幹 旺 東京工業大学 大学院理工学研究科 物性物理学専攻 教授
Mikio Kozuma Professor, Department of Physics, Tokyo Institute of Technology
共同研究者 井 上 遼 太 郎 東京工業大学 大学院理工学研究科 物性物理学専攻 助教
Ryotaro Inoue Assistant professor, Department of Physics, Tokyo Institute of Technology

The purpose of this study is to realize laser cooling of lanthanoid europium (Eu) atoms. 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. The ratio of the former to the latter is given by $\mu_0\mu^2m/12\pi\hbar^2a$ which exceeds unit when the scattering length is suppressed using a Feshbach resonance for these heavy atoms with large magnetic moments. Feshbach resonance is the method to tune the scattering length by applying a DC magnetic field to the atoms. Unique phenomena such as d-wave collapse and Rosenweig instability have been successfully observed for the Bose-condensate of these atomic species. The use of Feshbach resonances, however, has disadvantages when investigating the physics of a “magnetic quantum gas”. Magnetic, dipole-dipole interactions couple the atomic spin with its angular momentum, which enables one to observe rich phenomena such as emergence of ground states with spin textures and superfluid vortexes. Such unique effects cannot be observed when a Feshbach resonance is employed, as the spin orientation is fixed to the magnetic field direction. In contrast with other magnetic species, Eu has bosonic isotopes with hyperfine structure in the ground state. By irradiating atoms with a microwave tuned to the hyperfine-splitting, the atom-atom scattering can be mediated by molecular states and the scattering length can be controlled without the use of a magnetic field. Our current major obstacle is that the strong cooling transition in Eu induces a branching from the excited state to several metastable states which disables us to decelerate the atoms. In our recent experiments we successfully measured these branching ratios. This allowed us to plan a new way to approach laser cooling of Eu atoms, which consists in using metastable state to decelerate and cool the atoms.

研究目的

レーザーの輻射圧を利用して、「加熱」ではなく「冷却」を行う技術をレーザー冷却とよぶ。レーザーが原子に与える加速度は、重力加速度のおよそ 10^8 倍であり、室温の原子を一瞬のうちに μK オーダーにまで冷やすことができる。

原子の速度が低下すると2次のドップラー効果が消失するため、レーザー冷却の実現後すぐに、各種精密測定への応用研究が開始された。その後、光トラップ中でエネルギーの高い原子を選択的に排除する「蒸発冷却」が開発され、原子気体の温度を nK オーダーにまで下げること、気体のままボース凝縮、あるいはフェル

ミ縮退をさせることが可能となった。量子縮退した原子気体を光定在波が作り出す周期ポテンシャル中にトラップした系は、イオン格子を光格子に、電子を原子に置き換えた人工的な結晶として振る舞うため、これを利用した固体の量子シミュレーションが新たな分野として注目を浴びることとなった。現在レーザー冷却は、超精密測定、超精密加工、物性研究、量子情報処理といった様々な方面でその威力を発揮している。

本研究の目的は、Eu(ユウロピウム)原子に対してレーザー冷却を世界で初めて実現することにある。Euはランタノイド系の元素であり、基底状態が $7\mu_B$ という大きな磁気モーメントを有する点が最大の特徴である。冷却原子気体の相互作用は、極低温であるがゆえに通常は短距離等方的なs波散乱によって支配される。しかし原子が大きな磁気モーメントを有する場合は、長距離異方的な磁気双極子相互作用に起因して、種々の新奇な物性現象が発現する。実際これまで、クロム(Cr)、エルビウム(Er)、ジスプロシウム(Dy)といった他の大きな磁気モーメントを有する原子種を使った実験を通して、d波崩壊、拡張Bose-Hubbardモデルの実装、Rosenweig不安定性など、新奇かつ普遍的な物理現象が報告されるに至っている。この他にも理論的に予測はされているものの未だ観測に至っていない興味深い現象の一つとして、「超流動渦を伴う基底状態」というものがある。バケツの水の温度を下げていくと、やがて凍りついて動かなくなるのが普通であるが、大きな磁気モーメントをもち、かつ強磁性を示す原子気体の温度を下げていった場合、「回転する超流動の渦」が現れることが予言されている。このような著しく直感に反する現象が起こり得るのは、磁気双極子相互作用を通してスピンと軌道角運動量とが結合することによる。

「磁性量子気体」特有の物性を発現させるためには、長距離異方的な相互作用が短距離等方的な相互作用に比べて支配的となる、すなわち、その比 $\mu_0\mu^2m/12\pi\hbar^2a$ が1に比べて十分大きくなるのが必須となる。当然、磁気モーメントの大きさ μ と質量 m の双方が大きい原子種を選定することが肝要となるが、それだけでは不十分であり、Feshbach共鳴と呼ばれる手法を使って、散乱長 a を小さくしなければならない。二つの原子が衝突をする際、相対運動の波動関数の位相がどの程度ずれるかを示す指標を散乱長とよぶ。散乱長の符号と絶対値が、相互作用の符号とその大きさにそれぞれ対応する。原子が束縛状態を経由するような共鳴的散乱をする場合、散乱長は符号も含めて大きく変化する。通常、自由な2原子のエネルギーと2原子分子のそれは一致していないが、両者の磁気モーメントが異なる場合、静磁場を印加することでエネルギーを揃え、共鳴的な散乱を人工的に誘起することが出来る。これにより、散乱長を制御する手法をFeshbach共鳴と呼ぶ。但しこの方法を使って散乱長 a を小さくした場合、原子の磁気モーメントの向きが印加した静磁場の方向に固定されてしまうため、磁気双極子相互作用の本領ともいえる「スピンと軌道の結合」に由来する物性現象は一切観測出来なくなってしまう。これまで研究の対象となってきたクロム(Cr)、エルビウム(Er)、ジスプロシウム(Dy)の場合、いずれも静磁場を印加することで散乱長を制御せざるを得なかった。

Euは磁気モーメントが $7\mu_B$ 、質量数が151、153であり、双方ともに周期律表中、最大級の値をもつ。さらに、Cr、Er、Dyとは異なり、ボソン同位体が核スピンをもつため、基底状態が超微細構造を有している。超微細分裂間隔に近いマイクロ波を照射した状態で原子同士を衝突させれば、原理的には、異なる超微細状

態からなる2原子分子を経由した散乱を誘起することが出来るので、散乱長の制御が可能となる。このRF-Feshbach共鳴を利用することで、ゼロ磁場下においてs波散乱長を制御し、磁性量子気体がつりつちな物性現象を余すことなく探求出来ると我々は考えた。

室温におけるEuの飽和蒸気圧は極端に低く、十分な数の原子気体を準備するには、500°C程度のオープン中で昇華させることが必須となる。この時、原子ビームは300m/s程度の速度をもつことになるため、共鳴するレーザーを対抗照射し、数m/sにまで事前に減速することが肝要となる。低速の原子ビームに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と考えられる。但し、ランタノイド系の元素は複雑なエネルギー構造を有するため、原子ビームの減速中に、励起状態から複数の準安定状態に緩和してしまい、期待する減速が実現出来ない可能性もある。従って本研究では、適切な光学遷移の選定、光源の開発を行うだけでなく、励起状態から準安定状態への分枝を測定するといった地道な作業が求められる。その結果次第では、Euをレーザー冷却することは不可能、という非常にネガティブな結論がでる可能性も無いとは言いきれず、リスクはかなり大きいともいえる。しかし逆に成功すれば、これまで実現できなかった新しい磁性量子気体研究を遂行できるため、本課題にとりくむことにした。

概 要

本研究は、ランタノイド系の元素であるユウロピウム (Eu) に対してレーザー冷却を実現し、磁性量子気体を使った物性研究の新たな道を切り拓くことを目的としている。長距離異方的な磁気双極子相互作用が短距離等方的なs波散乱相互作用に比べて支配的になるためには、

1. 磁気モーメントが大きく、2. 質量数が大きく、3. 散乱長を制御できる、ことが重要となる。これまで磁性量子気体研究に起用されてきたCr、Er、Dyは、上記3つの条件全てを満たすが、3を実現する上で静磁場を加える必要性があり、それが物性研究の幅を大きく狭めていた。磁気双極子相互作用は、スピンと軌道角運動量とを結合させ、スピントクスチャーや超流動渦を伴う新奇な物性現象を誘起する源と成り得るが、それらはゼロ磁場下でしか発現しないからである。Euはボソン同位体が基底状態に超微細構造を有するという特徴をもつため、RF-Feshbach共鳴を使って、ゼロ磁場下でもs波散乱長を制御できる可能性を秘めている。従って、Eu原子に対してレーザー冷却、ボース凝縮を実現することは、磁性量子気体研究を進める上で重要なマイルストーンとなる。

μK オーダーにまで冷却されたEu原子気体を生成するためには、まずオープンから300m/s程度の速度で出射した原子ビームに、対向方向からレーザーを照射し、数m/sまで減速をさせなければならない。1m程度の常識的な距離で原子ビームを減速するためには、MHzオーダーの自然幅を有する閉じた光学遷移が必要であるが、Euの場合、波長459nm、自然幅27MHzの $a^8S_{7/2} \rightarrow y^8P_{9/2}$ 遷移のみがこれに相当する。実際には、 $a^8S_{7/2}$ 基底状態と $y^8P_{9/2}$ 励起状態の間には複数の準安定状態が存在するため、完全に閉じた光学遷移とはならない。原子ビームを数m/sにまで減速するためには 10^5 回程度の光子吸収が必要であるため、分枝比が 10^{-5} に比べて小さいことが好ましいが、残念ながら $y^8P_{9/2}$ 励起状態から複数の準安定状態へ分枝する比率については、分光学的な調査が行われていない。そこで、波長459nmの光源を作成し、各準安定状態への分枝比を調査した結果、6つの準安定状態に同程度の割合で分枝が起こり、し

かも分枝比の合計が 10^{-3} 程度とかなり大きな値となることが明らかとなった。これは原子ビームにレーザーを対抗照射させても、その速度を僅か5m/sしか減速出来ないことを意味する。準安定状態に緩和した原子にレーザーを照射し基底状態に戻せば、原理上は原子ビーム減速が可能となるが、そのためには6つの異なる波長をもつ光源を準備し、超微細構造の関係で、合計12個の異なる遷移を励起しなければならない。得られた結果は、研究開始前に想定していた状況の中で最悪のものであった。

この問題を解決するために我々は、励起状態からの分枝比が大きいことを欠点としてとらえるのではなく、むしろ逆に利用することを考えた。より具体的には、「準安定状態に対してレーザー冷却を行った後、基底状態に戻す」という全く新しい手法を考えた。 $y^8P_{9/2}$ 励起状態の分枝先である6つの準安定状態($J=7/2, 9/2, 11/2$)は、残念ながらレーザー冷却に適切な光学遷移をもたない。しかし、 $J=13/2$ の準安定状態は、 $J=15/2$ への完全に閉じた光学遷移(波長583nm)を有しており、しかも遷移の自然幅が8.2MHzとゼーマン減速を行う上で理想的であることが判明した。また459nmのレーザー照射によって $J=11/2$ 準安定状態に分枝した原子に対し、波長513nmのレーザーを照射するだけで、目的とする $J=13/2$ 準安定状態に高効率で移行できることもわかった。実際に、波長513nmの半導体レーザー光源を開発し、波長459nmのレーザーと共に原子ビームに照射することで、目的とする $J=13/2$ 準安定状態を準備することに成功した。

既に原子ビーム減速に必要な波長583nmの色素レーザーについても準備が終了した状態にある。今後、色素レーザーからの出力光を照射することで、原子ビーム減速を行い、四重極磁場中で同光源の光を3方向から照射すること

で、 μK オーダーの冷却原子気体を生成しようと考えている。原子温度が μK オーダーともなると、ドップラー効果がほぼ消失するため、各種ラマン過程の効率が劇的に増大する。よって、原子の内部状態を高効率で $J=13/2$ 準安定状態から、 $J=7/2$ 基底状態に戻すことも可能となる。研究期間内にEuのレーザー冷却が実現出来なかったことは大変残念であるが、当初の予想を超える大きな問題が発生したにも関わらず、その問題を利点として活用するという逆転の発想に立ち、Euをレーザー冷却する道を切り拓くことが出来たことは、大きな成果だといえる。

— 以下割愛 —