
「アルカリ土類原子の極低温・高密度レーザー冷却法の開発」

東京大学 工学部 附属総合試験所 助教授 香取秀俊

レーザー冷却法による中性原子の極低温化の研究は最初の実験が始まってから20年近くの歴史をもつが、近年のレーザー冷却原子を用いたボース・アインシュタイン凝縮 (BEC) の達成に触発されて、新しいコンテキスト - レーザー冷却手法による凝縮体の高速生成 - でのレーザー冷却研究に注目が集まっている。ボース・アインシュタイン凝縮は基礎物理学的な側面が注目され、爆発的な勢いで研究が進み、現在までにアルカリ原子、水素原子、そして今年になって報告された準安定状態ヘリウム原子において凝縮体生成が実現するまでになった。これらの原子ではレーザー冷却等による予備冷却の後、磁気トラップ中で蒸発冷却を行うことによって数百ナノケルビンで生じる量子縮退に到達しているが、この冷却スキームは凝縮体をコヒーレントな原子波源として応用する場合にはいくつかの困難がある。その第一はBECに至るまでに通常は数十秒から数分を要し時間がかかりすぎることである。また一度に捕獲できる原子数も限られてしまう。このことから、BEC原子の研究は基礎物理の研究対象としては活況を呈しているものの、当初期待されたような大きな工学的技術革新 - 原子波レーザーの工学的応用 - につながるかどうかという面では、新しい冷却技術開発の成否が鍵を握っている。

我々が独自の手法で取り組んでいるアルカリ土類原子のレーザー冷却では、常温からわずか数100ミリ秒程度の時間で100ナノケルビンの極低温に到達する高速冷却を実現している。アルカリ土類原子は、基底状態の角運動量が零で、時間標準や原子波干渉計への実用的応用上重要な原子種であることからその分光学的研究は非常に長い歴史をもち、アルカリ土類のレーザー冷却はこれらの精度を飛躍的に向上させる技術として当初から注目されてきた。1989年ころに冷却研究が本格化し、数グループがミリ・ケルビンのオーダーまでの冷却に成功しているものの、その後10年間、冷却技術の進歩は止まっていた。

このような状況の中で、本研究ではアルカリ土類原子をボース・アインシュタイン凝縮やフェルミ縮退の領域まで高速に冷却するための新しい方法として、スピン禁制遷移によるレーザー冷却およびトラップ手法を確立した。“ドップラー冷却”と呼ばれる冷却手法では、原子の到達温度はレーザー冷却に用いる光学遷移の強さに比例することが知られている。スピン禁制遷移では通常のレーザー冷却に使う光学許容遷移よりも4桁近くも遷移強度の弱いことから、高精度に制御されたレーザー光を用いることで、極低温に直接到達できる。このとき、あまりに遷移強度が弱いと、レーザーの輻射圧によって原子を重力に逆らって支えることができなくなるため、地球上でのトラップ実験が行えるちょうど限界の遷移強度をもつ原子として、我々の実験ではストロンチウム原子に注目し実験に着手した。本研究ではこのアイデアを実現するための超安定光源を含む実験装置を独自に開発し、1998年夏に、世界に先駆けてこの原理の実証に成功した。現在では、この手法に触発され、世界の主要な光標準研究グループ、米標準局、独物理工学研究所、ハノーファー大学、仏標準局がMg, Ca, Srのスピン禁制遷移のレーザー冷却法の研究を相次いで開始している。

原子の更なる冷却と高密度化をはかるために、非共鳴の光電場により原子の準位をスピンの異なるそれぞれの状態に独立に結合することによって、空間的な遷移周波数の変化を伴わない光双極子トラップを考案し、原子の高密度化に役立つことをデモンストレートした。この原子トラップは、「トラップポテンシャルによる電子状態への摂動を相殺しつつ、外部自由度のみを制御する」ことを可能とする。これは原子光標準を考えるうえでもまさに理想的な系であることから、現在多くの標準研究者がこの動向に強い関心を払っている。このような一連のユニークなレーザー冷却のアプローチにより、レーザー冷却の手法だけで量子縮退まであと一桁弱に迫る実験結果を発表し、量子縮退達成への新しい手法の可能性を新たに切り開いた。