

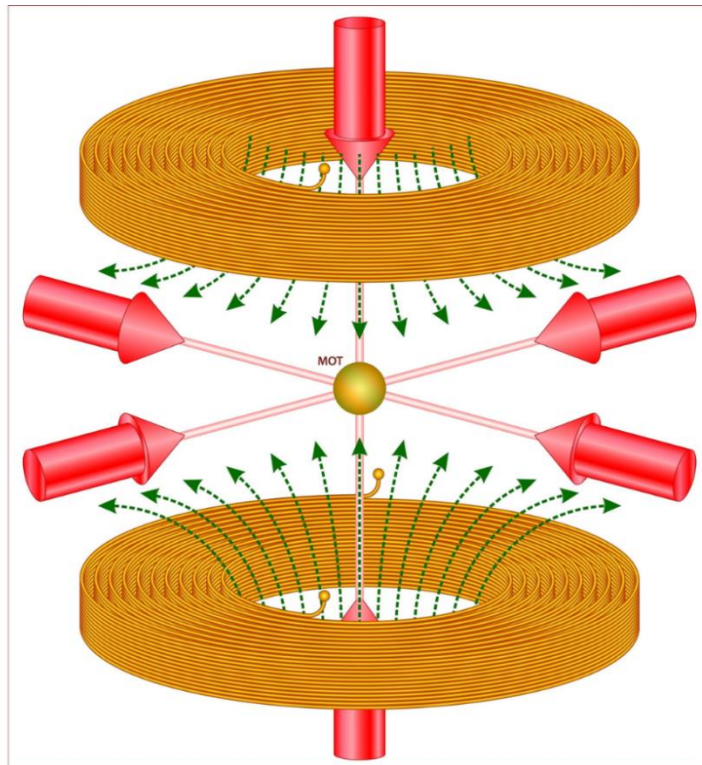
LASER COOLING AND ATOM TRAPPING

レーザー冷却と原子トラップ

原子を超低温まで冷却することで、基礎物理学、精密計測、量子科学の分野で豊富な機会が生まれています。

レーザー冷却とトラッピングの基本原理

1975年に Hansch と Schawlow が開拓したレーザー冷却[1]は、原子操作における大きな進歩となりました。この方法は、ドップラー効果を利用して、反対方向に伝搬するレーザー光線を利用して、原子に向かって移動する原子の周波数シフトを誘発し、光子の散乱を増強して、運動エネルギーを損失させます。Chu らは 1985 年にこの原理を実証し[2]、光子反跳限界に近い非常に低い温度を達成しました。レーザー冷却技術の進歩により、光子反跳限界を超え、非常に低い温度での原子の操作が可能になりました。速度選択ポピュレーショントラッピング[3]や誘導ラマン遷移などの技術により、原子操作の可能性が広がり、画期的な実験への道が開かれました。



レーザー冷却と原子トラッピングの設計コンセプト。

レーザー冷却を補完する原子のトラップには、荷電粒子と中性粒子の両方に合わせた多様な方法が含まれます。荷電粒子トラップは、電場または電磁場におけるクーロン相互作用を利用し、超高精度の分光法を容易にし、量子効果を調査できます。中性原子トラップは、放射圧、磁気、または光双極子力などの相互作用を利用し、それぞれが超低温原子量子物質の実験に独自の利点を提供します。

光双極子トラップ

光双極子トラップは、電気双極子と遠く離調した光との相互作用を利用して動作する原子トラッピング機構の一種であり、放射圧トラップや磁気トラップ（通常、1 ミリケルビン未満の深さ）などの他のトラッピング機構に比べて弱です。特定の条件に応じて、トラッピング機構は電子基底状態の特定のサブレベルの影響を受けません。これにより、実験で内部基底状態ダイナミクスを長時間にわたって完全に利用することができ、数秒間続く可能性があります。さらに、光双極子トラップはトラッピング形状に柔軟性があり、高度に異方性または多重井戸ポテンシャルを可能にします。歴史的に、双極子トラップの閉じ込め機構としての光双極子力の概念は、プラズマと中性原子の文脈で Askar'yan(1962)の研究で登場し、Letokhov(1968)はこの力を使用して原子をトラッピングするアイデアを提案し、原子遷移周波数から遠く離れた定在波のノードまたはアンチノードでの 1 次元閉じ込めを提案しました。アシュキン(1970)は、放射圧と双極子力の複合効果により、レーザー光でマイクロサイズの粒子を捕捉できることを実証しました。その後、1978 年に中性原子の 3 次元トラップを提案しました。1986 年の Chu らの先駆的な研究[4]に代表されるように、光双極子トラップは汎用性と精度に優れています。これらのトラップは、遠距離から離調した光を利用して、最小限の摂動で原子を保存ポテンシャル内に閉じ込め、長い相互作用時間と高忠実度の実験を可能にします。これらは、原子トラッピングから原子光学まで、さまざまな分野で欠かせないツールとなっています。

さまざまな冷却および捕捉技術の探究

レーザー冷却とトラッピングの分野は目覚ましい進歩を遂げ、基礎研究を推進し、分野を超えた新しい応用を可能にしています。量子の謎を解明することから原子運動に対する前例のない制御を得ることまで、これらの技術は原子物理学の限界を押し広げ続けています。目的の用途に応じて、さまざまなトラッピングと冷却の技術があります。たとえば、磁気トラッピングは原子の磁気モーメントの配列を利用し、集束レーザービームによって生成される誘導双極子モーメントは時間とともに変化する電場を使用して原子をトラップできます。これらの方法は、研究目的でクライオスタットから原子ビーム操作まで応用されています。一方、1975 年に Hänsch によって提案された放射冷却は、光子散乱による原子操作を研究し、原子が繰り返し散乱イベントによってエネルギーと運動量を失い、最終的に並進温度を下げることを可能にします。この冷却プロセスは、分光法とビームコリメーションへの応用に有望です。

荷電粒子と中性粒子を捕捉することは、さまざまなエネルギースケールにわたる科学研究の発展に極めて重要な役割を果たしてきました。特にイオントラップは、イオンの内部構造に依存しない閉じ込めを提供し、多様な実験調査を容易にします。中性原子の場合、放射圧トラップ、磁気トラップ、光双極子トラップなどのさまざまな捕捉メカニズムにより、汎用性と精度が提供され、長い実験時間スケールと高忠実度の実験が可能になります。ドップラー冷却、偏光勾配冷却、蒸発冷却などのさまざまな冷却方法が採用され、効率的なトラップのロードとメンテナンスに必要な低温と高い位相空間密度が実現されます。

2 体および 3 体相互作用を含む衝突は、トラップ損失と熱化に重要な役割を果たし、基本的な衝突プロセスに関する洞察を提供します。ご覧のとおり、各冷却およびトラッピング技術は実験ツールボックスに独自の貢献をしており、さまざまな科学的調査のためにトラップされた粒子の正確な制御と操作を容易にします。

基本的な加熱メカニズム

冷却の反作用メカニズムは加熱です。加熱の主な原因の 1 つは、トラップ光子の自発的散乱から生じます。この散乱のランダムな性質により、放射力に変動が生じます。遠方離調状態を特徴とする双極子トラップでは、散乱は主に弾性的であり、散乱光子のエネルギーは光学遷移ではなくレーザーの周波数と一致します。吸収と自発的再放出の両方のプロセスで変動が生じ、全体的な加熱に寄与します(Minogin および Letokhov、1987[5])。共鳴に近い強力な光場、特に定在波構成では、異なる進行波成分間での光子の再分配が誘発され、著しい加熱が誘発される可能性があります(Gordon および Ashkin、1980[6]、Dalibard および Cohen Tannoudji、1985[7])。双極子トラップの基本的な加熱メカニズムとは別に、技術的な加熱は、トラッピングフィールドの強度変動と指向不安定性から生じます(Savard 他、1997)。前者の場合、特性トラップ周波数の 2 倍で発生する変動がパラメトリックに原子運動振動を駆動し、後者の場合、トラップ周波数での潜在的な振動が運動振幅を増加させます。実験的には、これらの問題は特定のレーザーソースとその技術的なノイズスペクトルに大きく依存します。したがって、相対強度ノイズ(RIN)が極めて低いレーザーソースを使用することが重要です。たとえば、Ampheia™ は、幅広い周波数範囲にわたって極めて低い RIN を示します。

レーザートラッピングと冷却の未来:その先に何が待ち受けているのか？

レーザートラッピングと冷却の将来は、レーザー技術の継続的な改良によって、目覚ましい進歩を遂げようとしています。この分野の主な課題の1つは、冷却機構の効率を損なう可能性のあるノイズ誘起加熱の管理です。しかし、相対強度ノイズ(RIN)が極めて低いレーザー光源の開発により、これらの障害はますます克服可能になっています。これらの高度なレーザーは、変動と不安定性を最小限に抑えるために不可欠な安定した正確な光場を提供することで、加熱に関する基本的および技術的な問題を大幅に軽減します。これらの技術をさらに改良することによって、レーザートラッピングと冷却において前例のないレベルの制御と精度を達成する可能性がさらに現実的になり、実験物理学と実用的アプリケーションの新たな境地が開かれます。この進歩により、極低温を維持する能力が向上するだけでなく、これまでアクセスできなかった現象を探索できるようになり、量子力学の研究と応用における新しい時代の到来を告げています。

[Learnalsoabouttheroleoflasersinthepreparationofatomicqubits.](#)

冷却とトラッピングに最適なレーザーは何ですか？

レーザー冷却とトラッピングでは、レーザーソースの相対強度ノイズ(RIN)が極めて低く、線幅が極めて狭く(kHz)、出力(ワット)が高く、ビーム品質が優れている($M^2 < 1.1$)ことが極めて重要です。原子を冷却できる範囲はレーザーの性能によって制限されます。ノイズが高く線幅が広いと、原子は依然として動いているため、冷却できる温度が制限されます。ルビジウム、セシウム、ストロンチウム、カルシウム、イッテルビウムなどの原子に基づく量子ビットは、安定した量子操作に必要な低温を実現するためのレーザー冷却技術から大きな恩恵を受けます。コンパクトなチューナブルレーザーは、効果的な量子ビット操作と実用的な量子コンピューティングシステムへの統合に必要な精度、安定性、柔軟性を提供することで、このプロセスで重要な役割を果たします。Cobolt Qu-T は、650〜950nm の範囲で単一周波数 CW 放射、中心波長の本質的に高い柔軟性、完璧な TEM00 ビームを備えたコンパクトで広範囲に調整可能なレーザーです。10kHz の線幅を持ちながら、最大 500mW の電力と非常にクリーンなスペクトルを提供します。各放射波長は、数 nm にわたってギャップなしで粗調整でき、高速ピエゾ制御を使用して外部参照にアクティブにロックできます。この特性は、冷却する特定の原子の励起周波数をターゲットにできるため、レーザー冷却に最適です。レーザーは、複数のレーザーをペアにするために周波数コンバイナと統合でき、非常にコンパクトです。Ampheia™超低ノイズファイバーレーザーは、kHz 領域の線幅とともに広範囲の周波数で非常に低い RIN を備え、1064nm で最大 50W の電力を提供するため、イオンまたは原子の捕捉に最適です。

[Learnmoreaboutquantumtechnologies](#)

関連製品



C-WAVE シリーズ

広範囲に波長選択可能な CW レーザー

波長: 450nm–1900nm

出力: 200mW–1000mW

応用分野: ナノフォトニクス、量子研究、ラマン分光法(TERS)

[Readmore](#)



Ampheia™ファイバー増幅装置:

超低ノイズ単一周波数ファイバー増幅装置

波長: 1064.2±0.6nm

出力: 20W,40W,50W

応用分野: 原子トラップ、粒子分析、光学計測、レーザー干渉計、周波数変換、量子センシング

[Readmore](#)



Cobolt Qu-T™シリーズ

小型波長選択レーザー-単一周波数-モードホップフリーチューニング

波長: 707nm, 780nm, 813nm

出力: >500mW

応用分野: 量子研究、量子コンピューティング、原子冷却、原子時計研究、ラマン分光法

[Readmore](#)