レーザー光による原子冷却技術の高効率化に関する研究

Efficient Generation of Cold Atoms Using a Laser Radiation

プロジェクト代表者: 大向 隆三(教育学部・准教授)

Ryuzo Ohmukai (Associate Professor, Faculty of Education)

1 はじめに

近年のレーザー冷却に関する技術の飛躍的な進歩によって、原子気体を対象にボーズ・アインシュタイン凝縮(BEC)と呼ばれる巨視的な量子状態を達成することができるようになった。BECから得られる原子(物質)波を利用すれば、物理定数の精密測定や量子コンピューティング、さらには新しいリソグラフィー技術が展開できるなど広範囲にわたる学術的・応用的波及効果が期待されている。我々は実際に応用展開可能なBECの発生技術を開発することを研究の最終目的としている。本研究では、そのための第一段階として、ドップラー冷却された原子を高効率に発生させる技術を確立することを狙った。

2 実験配置

本実験では今までにBECの発生報告例のあるルビジウム(Rb)原子を使用した。本実験で用いた真空チャンバーと磁気光学トラップ(MOT)の実験装置をFig.1に示す。MOTは四重極磁場(反ヘルムホルツコイルにより供給)と3組の円偏光レーザー光ペアで構成され、レーザー光と磁場の作用によって原子をドップラー冷却限界温度にまで冷却し、ほぼ静止した状態の原子を四重極磁場の中心に捕獲することができる実験技術[1]である。この実験では、前述の目標を達成するためにMOTのレーザービーム径を可能な限り大きくとるよう光学配置を工夫した。これにより原子の冷却・捕獲領域が飛躍的に拡大し、冷却原子数は従来に比べて大幅に増大すると期待される。Rb原子はアンプルから真空層へ供給される。光源は単一周波数

のリングレーザー(出力500 mW)と半導体レーザ ー(出力5 mW)を使用した。両方のレーザーとも、 参照共振器を用いて発振周波数を安定化している。 リングレーザーは冷却・捕獲用、半導体レーザー はリポンプ用光源として使用した。光ビーム径は レンズのペアとアパーチャーを用いて直径25 mm まで拡大したあとビームスプリッタで3本に等分 割し、それらのビームを真空チャンバー中へ互い に垂直な3軸(x,y,z軸)方向から照射させ、チ ャンバーを出たあと全反射ミラーで再帰反射さ せた。



Fig. 1 実験配置 (QWP は波長板を示す。)

3 実験結果

真空チャンバーに備えたビューポートから CCD カメラを使い Rb 原子の捕獲・冷却の様子を観察した。その結果を Fig.2 に示す。加えた磁場勾配は 10 G/cm である。中央の白い部分が Rb 原子の放つレーザー誘起 蛍光である。原子がほぼ静止した状態でこの位置に集められ局在化しているために、Rb 原子が MOT のレー ザー光を吸収して蛍光を発し、強い蛍光スポットとして観測されている。MOT による原子の冷却・捕獲が 確認された。この蛍光スポット(原子雲)のサイズを計測したところ、10mm×7mm×7mmであった。

次に、この原子雲に存在する原子の空間密度を決定するため、冷却 Rb 原子雲による共鳴プローブ光(強度2 mW/cm²)の吸収率を計測した。このときの計測結果を Fig.3 に示す。Fig.3の横軸は時間を表しており、t = 0 (ms)までは MOT 動作、t = 0 (ms)に MOT を遮断し、それ以降原子が空間的に拡散することを示す。縦軸はプローブ光の透過率である。冷却 Rb 原子雲による透過率は t = 0 (ms)直後(ここでは 0.5 (ms) とした)における透過率の値なので 15%(吸収率は 85%)であった。この透過率から MOT 原子雲の空間原子密度は 1 × 10⁹ (1/cm³)と見積もることができた。この密度の値と前述の原子雲サイズを用いて我々の MOT で捕獲・冷却できた原子の総数を算出すると、5 × 10⁹ という値が得られた。通常の MOT による捕獲原子数 は 10⁶ 個程度であるから、本実験では捕獲原子数を従来よりも 2 桁以上増加できたことになる。



また、Fig.3 において MOT 遮断後における透過率の時間変化から、MOT での原子の到達温度も求めること ができる。我々の計算の結果、冷却原子の温度は1 mK であると見積もられた。この値は Rb 原子のドップ ラー冷却限界温度である150 µKに比べて1桁大きいが、このように見積もった温度が高くなった原因は、 共鳴プローブ光の強度が Rb 原子の飽和光強度 (1.6 mW/cm²)程度にまで大きかったために、冷却原子が共 鳴プローブ光を吸収して加速されたことによると考えられる。

4 まとめ

我々は光ビーム径を25 mm まで拡大することによって、MOT で5×10[®] 個の冷却原子を生成できることを 実験的に確認した。この結果は従来のMOT 実験における典型的な捕獲原子数である1.0×10[®] に比べて2桁 大きな値であり、我々の当初の目標どおり冷却原子生成の高効率化を達成することができた。

現在のBEC生成法が、まずMOTで捕獲・冷却された原子を対象にして、蒸発冷却などのさらなるレーザ ー冷却法で冷却・凝縮していくプロセスであることを考えると、本研究成果は極めて意義深い。最初にMOT で捕獲できる原子数を増大させると、最終目標地点であるBECに到達可能な原子数もそれに応じて増加す ると考えられる。さらにMOTの捕獲原子数を多くして原子雲が大きくなれば、複数の地点で同時に蒸発冷 却を実施することも可能になる。今後はこのようにMOTからBECへ至る物理的プロセスの効率化技術に焦 点を当て、BECの高効率発生を目指した研究を継続する予定である。

(参考文献)

[1] E. L. Raab, M. Prentiss, A. Cable, S. Chu, D. Pritchard: Phys. Rev. Lett. 59 (1987) 2631.