

## 最近の技術から

# アルカリ土類原子のトラッピング技術

黒須 隆行

計量研究所 〒305 つくば市梅園 1-1-4

### 1. はじめに

原子をレーザー冷却、トラッピングすると原子と光の相互作用時間を長くとれるので分光分解能が上がり、また、2次のドップラー効果によるシフトも小さくなるので周波数標準の精度を格段に向上させることができる。ナトリウム<sup>11</sup> やセシウム<sup>22</sup>では、トラップした極低温原子を上方に打ち上げ上昇する時と下降する時の2度電磁波と相互作用をさせる原子噴水方式を用いて、基底状態の超微細構造間遷移のスペクトルが従来の方法よりも2桁高い精度で測定された。同様のことは光領域のスペクトルについても期待できる。カルシウムは、異重項間遷移  $^1S_0$ - $^3P_1$  が非常に狭い自然幅 ( $\gamma = 408 \text{ Hz}$ ) を持つため将来の光周波数標準の候補として超高分解能分光の研究が進められてきたが、最近その冷却技術の開発が望まれていた。われわれは、これまでアルカリ原子と希ガス原子にしか適用されていなかったレーザー冷却技術をアルカリ土類原子に応用しカルシウムとストロンチウムを冷却、トラップすることに成功した<sup>33</sup>のでそれについて紹介する。

### 2. エネルギー準位構造

図1にカルシウムのエネルギー準位構造を示す。カルシウムは基底状態  $^1S_0$  と励起状態  $^1P_1$  との間の強い遷移 ( $\lambda = 422 \text{ nm}$ ) を用いて冷却を行うことができる。ただし、この冷却準位はレーザー冷却に必要な閉じた2準位系を構成しておらず、準位  $^1P_1$  に励起された原子の一部は準位  $^1D_2$  に緩和する。この準位の寿命  $\sim 3 \text{ ms}$  は、レーザー冷却に要する平均的な時間  $\sim 0.5 \text{ ms}$  よりずっと長いため  $^1D_2$  状態に遷移した原子は冷却サイクルから脱落し失われる。しかし、 $^1D_2$  状態への遷移確率は基底状態への遷移確率より5桁も小さいためその影響は小さく、光ポンピングレーザーを用いなくとも冷却を行うことができる。一方、トラッピングにおいては  $^1D_2$  状態に遷移した原子はレーザー光と相互作用しなくなる結果ト

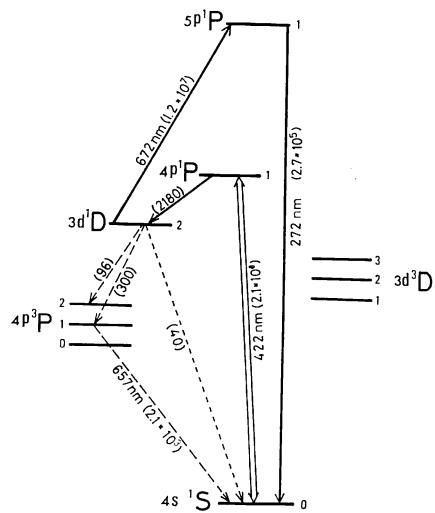


図1 カルシウムのエネルギー準位図。カッコの中の数字は遷移確率 ( $s^{-1}$ ) を表す。

ラップから脱出するため、そのトラップ寿命は他の原子に比べると短い。トラッピングには、光の輻射圧を利用した magneto-optical trap<sup>44</sup> を用いた。このトラップは、多数の原子をトラップすると同時に限界温度近くまで冷却できることが大きな特徴である。カルシウムの冷却限界温度はドップラーリミット ( $T_D = \kappa \Gamma / k_B$ ;  $\Gamma$  は冷却遷移の自然幅) で与えられ、約 1 mK である。ストロンチウムもカルシウムとほとんど同じエネルギー構造をしており、同じ装置を使って実験を行える。

### 3. 実験装置

図2に実験配置図を示す。光源には、紫外発振アルゴンレーザー励起リング色素レーザーを用いた。レーザー出力は減速用とトラップ用の2本のビームに分けられ真空装置に導かれる。オープンで生成された原子線はゼーマン同調ソレノイドでドップラーシフトを補正しながら対向するレーザー光により減速され、4重極磁場の零点で適当な円偏光を持った6本のビームによりトラップさ

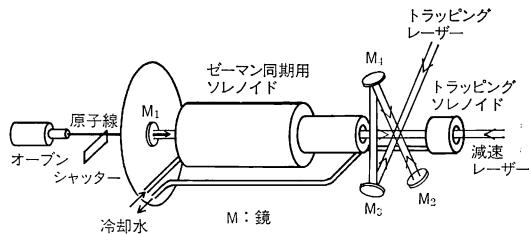


図2 実験配置図。M<sub>1</sub>とM<sub>2</sub>には、表面を無反射、裏面を100%コートしたλ/4板が用いられている。

れる。4重極場は、ゼーマン同調ソレノイドから2cm隔てて置かれたソレノイドに逆向きの電流を流すことによって作られている。ゼーマン同調ソレノイドは、1/8インチの銅パイプを丸めたものを2段重ねて作っており、その内径は2cm、全長は30cmである。減速に必要な放物型に変化する磁場プロフィールは、コイルのピッチを微妙に変化させることで作りだした。280Aの電流で最大磁場1,600ガウスが得られ、最高速度960m/sの原子を減速することができる。この時の発熱量は2kWに及ぶので4気圧に加圧した水をパイプ中に流してその冷却を行っている。

本装置では、減速用レーザー光を位相反転鏡を用いて折り返すことで原子線方向のトラッピングビームとしても用いている。こうすることで1台のレーザーで原子線の減速とトラッピングを連続的に行うことができる。この方法は、減速中の原子は前後から進行する2本のレーザー光と相互作用をするという点で従来のゼーマン同調を用いた減速法とは異なっている。一方のレーザーは原子を減速し他方は加速する効果を持つが、レーザー周波数は負に離調されているため原子は前方から来るレーザー光を後方から来るレーザー光より共鳴に近く感じ、より多く吸収する結果その減速が起こる。

#### 4. 実験結果

レーザー周波数を同調することによりカルシウム、ストロンチウム各々4種類の同位体がトラップされた。図3にレーザー周波数とトラップ蛍光強度の関係を示す。最大トラップ原子数は<sup>40</sup>Caで6×10<sup>7</sup>、<sup>88</sup>Srで5×10<sup>5</sup>であった。

トラップ寿命を測定したところ、カルシウムで約12ms、ストロンチウムで約8msであった。この値は、準位<sup>1</sup>D<sub>2</sub>へ緩和した原子がすべてトラップから脱出すると考えたときに見積られる値よりも3~4倍大きな値である。<sup>1</sup>D<sub>2</sub>状態の原子は、直接にあるいは<sup>3</sup>P<sub>1</sub>状態を経て

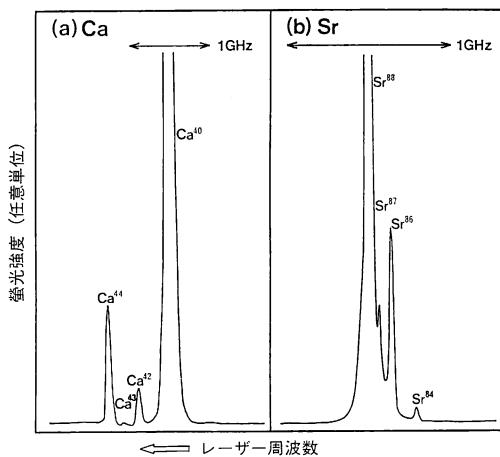


図3 レーザー周波数と蛍光強度の関係

約3msの寿命で基底状態に戻るが、ほとんどの原子はこの間にレーザービーム(Φ6mm)の外側にまでは移動しないで基底状態に戻ったときに再びトラップされてしまう。一方、準位<sup>3</sup>P<sub>2</sub>は準安定状態なのでこの準位に遷移した原子は確実にトラップから脱出していく。以上の各遷移を考慮してトラップ寿命を計算すると測定値と非常に良い一致が得られた。

トラップ原子は、time of flight法によりその2乗平均速度が80cm/s程度にまで冷却されていることがわかった。この値は、ドップラーリミットの約2倍であり、アルカリ土類原子のトラッピングは寿命は短いけれど原子を冷却するのに非常に有効な手段であることを示している。

#### 5. むすび

今回、強い遷移<sup>1</sup>S<sub>0</sub>-<sup>1</sup>P<sub>1</sub>を使ってトラッピングを行うことでカルシウムとストロンチウムを数mK程度に冷却することに成功したが、これを弱い遷移<sup>1</sup>S<sub>0</sub>-<sup>3</sup>P<sub>1</sub>を使ってさらに冷却すればnKオーダーの温度が期待できる。トラップ原子の中にはフェルミ粒子である<sup>43</sup>Caと<sup>87</sup>Srも含まれており、集団量子効果の観測等の点からもより低い温度の実現に興味がもたれる。

#### 文 献

- 1) M. A. Kasevich, et al.: Phys. Rev. Lett., **63** (1989) 612.
- 2) A. Clairon, et al.: Eur. Phys. Lett., to be published.
- 3) T. Kurosu, et al.: Jpn. J. Appl. Phys., **29** (1990) L 2127.
- 4) E. L. Raab, et al.: Phys. Rev. Lett., **59** (1987) 2631.

(1991年10月11日受理)