

## 最近の技術から

# 気体原子セルを用いたレーザー冷却・トラッピング

北野正雄

京都大学工学部電子工学科 〒606-01 京都市左京区吉田本町

### 1. まえがき

近年、レーザーによる原子の冷却、閉じ込め技術が急速に進展し、さまざまな方面で利用されるようになってきた<sup>1,2)</sup>。レーザー冷却された原子は、(1)光との相互作用時間が長い、(2)ドップラー効果による共鳴線のシフトがない、(3)ドブロイ波長が長い、(4)容器との接触がない、など従来の原子セル、原子ビームが部分的にしか満たし得なかった特徴をもっている。冷却原子のこれらの特徴を生かした全く新しい測定技術が開発されようとしている。本稿では、小型の封じ切りガラスセルと半導体レーザーを用いた簡便なレーザー冷却の実現方法<sup>3)</sup>について紹介する。

### 2. レーザー冷却とトラップの原理

静止している原子に $+x$ 方向に強度(光子束密度) $\phi$ 、角周波数 $\omega_L = ck$ のレーザーを照射すると、その輻射圧(散乱力)は $F_z = \hbar k \phi \sigma(\omega_L)$ となる。 $\sigma(\omega)$ は原子の吸収断面積で、自然幅を持つローレンツ関数である。同様に、速さ $v_z$ で運動している原子に $\pm x$ 方向から同じ強度のレーザーを照射すると、力は

$$\begin{aligned} F_z/\hbar k &= \phi[\sigma(\omega_L - kv_z) - \sigma(\omega_L + kv_z)] \\ &\sim -2\phi\sigma'(\omega_L)kv_z \end{aligned} \quad (1)$$

となる。ただし、 $\sigma' = d\sigma/d\omega$ 、 $\sigma$ の引数の $\pm kv_z$ はドップラー効果を表している。

$\sigma'(\omega_L) > 0$ なら、すなわち、レーザー周波数が原子の吸収線の長波長側にあれば、 $v_z$ に比例した「粘着力」が働き、原子は減速、冷却される。これを3次元的に構成したものは光の糖蜜(optical molasses)と呼ばれている。しかし、このような機構で減速しても、原子はレーザーの照射領域からすぐに出てしまうので、十分な冷却は期待できない。

そこでレーザーの交差している部分への「復元力」を実現し、原子を補足(trap)する方法が考えられた。Raab<sup>4)</sup>によるZeeman光トラップ(ZOT)は4重極磁場と偏光による遷移の選択則を巧妙に利用したもので、

簡便かつ安定に原子を閉じこめる方法である。1次元モデルで説明しよう。磁場 $B_z = bx$ ( $b$ は定数)をかけて、 $\sigma_{\pm}$ 偏光に対する吸収線のずれ(Zeeman shift)が位置 $x$ に依存するようにする。さらに $\sigma_+$ 偏光を $+x$ 方向に、 $\sigma_-$ 偏光を $-x$ 方向に伝搬させる。すると、原子が受ける力は

$$\begin{aligned} F_z/\hbar k &= \phi[\sigma(\omega_L - \gamma bx - kv_z) - \sigma(\omega_L + \gamma bx + kv_z)] \\ &\sim 2\phi\sigma'(\omega_L)(-\gamma bx - kv_z) \end{aligned} \quad (2)$$

となる。ただし、 $\gamma$ は磁気回転比である。このようにして、 $x$ に比例する復元力が得られ、原子の運動は原点を中心とする減衰振動になる。

ZOTのポテンシャルは深い( $\sim 1K$ )ので、原子をビーム装置を用いて予備冷却しなくとも、室温での速度分布のうちの低速成分を効率よく捕捉して冷却することができる。

### 3. Zeeman光トラップによるRb原子の冷却

Rb原子の冷却には、市販の780 nm帯の半導体レーザーをD<sub>2</sub>線に同調させて用いることができる。実験には少なくとも3台のレーザー(冷却用、リポンピング用、モニター用)が必要とされる。冷却用、モニター用のレーザーについては外部共振器を用いて発振線幅を原子の自然幅より狭くする必要がある(詳細については、本号の香取氏の記事を参照されたい)。

冷却に用いた容器は直径4 cm、長さ12 cmの円筒状のパイレックスガラス製である。真空装置に取り付け、ベーキングしながら $10^{-5}$  Paまで排気し、微小量のRb金属を導入して、封じ切る。封じ切り後は大気中のHeなどがガラス壁を通って侵入するので、これを除くため小型のイオンポンプ(1 l/s)を取り付けてある。常時電圧をかけて動作させておくと、 $1 \times 10^{-7}$  Pa以下の圧力を維持することができる。Rbの密度を調整するため、Rb溜の温度をペルチェ素子で冷却する。

反ヘルムホルツコイルによって容器の中央部に4重極磁場をつくり、その中心に6方向からの円偏光レーザー

光（ビーム径 8 mm）を交差させた（図 1）。レーザーの周波数を共鳴線（Rb D<sub>2</sub> 線）付近に同調させると、中心に直径 1 mm ほどの非常に明るい輝点が観測された。これは、トラップに捕捉、集積された低速原子からの蛍光である。この輝点の部分をモニター用のレーザーで分光したところドップラー広がりはほとんど観測されず、実際に冷却されていることが確認できた。線幅や time-of-flight 法で温度を見積もったところ、1~1.5 mK という結果が得られた。また、蛍光の強度から、トラップ内の原子数は 10<sup>7</sup> 個と見積もられた。

#### 4. Vortex トラップ

ZOT により位置および運動量が揃った原子の集団状態をつくることができる。しかし、原子の内部状態、すなわちスピンは揃っていない。ZOT の磁場や偏光の配置ではスピンを揃えることは不可能である。これを克服するために考案されたのが、vortex トラップ<sup>5)</sup>である。

原理を簡単なモデルで説明しよう。土 x 方向に伝搬しているビームを y 方向に少し ( $\pm d$ ) ずらした場合、原子が受ける x 方向の力は

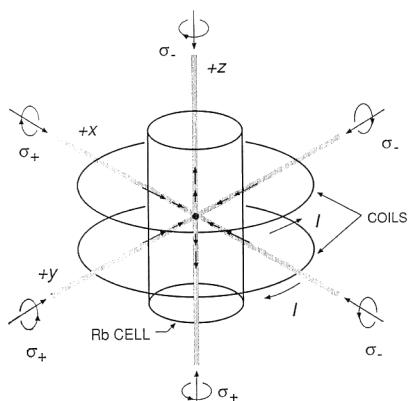


図 1 Zeeman 光トラップにおける偏光と  
磁場の様子

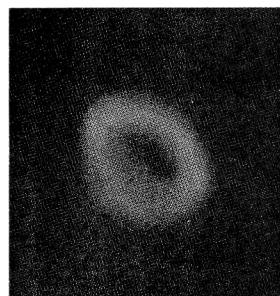


図 2 Vortex トラップからの蛍光

$$\begin{aligned} F_z/\hbar k &= \phi(y+d)\sigma(\omega_L - kv_z) - \phi(y-d)\sigma(\omega_L + kv_z) \\ &\sim 2\phi'(d)\sigma(\omega_L)y - 2\phi(d)\sigma'(\omega_L)kv_z \end{aligned} \quad (3)$$

のように y に比例した項を含むものになる。±y 軸方向のビームも x 方向に ±d ずらせると、

$$F_y/\hbar k \sim -2\phi'(d)\sigma(\omega_L)x - 2\phi(d)\sigma'(\omega_L)kv_y \quad (4)$$

となる。このような力のもとで原子は回転運動をするが、第 2 項の摩擦力のため減速しながら原点に巻き付いてゆく。ZOT の場合とは異なり Zeeman 効果を利用してないので、磁場の配置や偏光が自由に選べる、例えば、トラップ中心に比較的大きい x 方向の磁場をかけ、±x から同じ偏光を加えれば、光ポンピングによりスピニ偏極をつくることができる（z 方向については ZOT を使う必要があるが、x 方向のスピニにはほとんど影響を与えない）。

図 2 に vortex トラップにトラップされた Rb 原子からの蛍光を示す。渦巻きの様子がよくわかるようにビームのずれを大きめにしてある。実際、プローブレーザーにより、原子が輪に沿って 1 m/s 程度の速度で回転していることが確かめられた。レーザー強度などの条件が同一の場合、温度、原子数は ZOT の場合よりいずれも 1 枠程度劣っている。

#### 5. おわりに

封じ切りのガラスセルと半導体レーザーによって運動状態と内部状態がよく制御された原子の集合を準備できることがわかった。レーザー冷却された原子は時間標準、周波数標準への応用が有望視されている。また、冷却原子を用いた原子波干渉計もジャイロスコープなどへの応用が盛んに試みられている。

本稿で紹介した装置は小型化が可能であり、可搬型の高感度センサーなどの実現に役立つものと期待される。

#### 文 献

- 1) 清水富士夫：“原子のレーザー冷却とその周辺技術”，応用物理，60 (1991) 864-874.
- 2) 清水富士夫：“原子干渉計”，応用物理，62 (1993) 871-880.
- 3) C. Monroe, W. Swann, H. Robinson and C. Wieman: “Very cold trapped atoms in a vapor cell,” Phys. Rev. Lett., 65 (1990) 1571-1574.
- 4) E. L. Raab, M. Prentiss, A. Cable, S. Chu and D. E. Pritchard: “Trapping of neutral sodium atoms with radiation pressure,” Phys. Rev. Lett., 59 (1987) 2631-2634.
- 5) T. Walker, P. Feng, D. Hoffmann and R. S. Williamson, III: “Spin-polarized spontaneous-force atom trap,” Phys. Rev. Lett., 69 (1992) 2168-2171.