

最近の技術がらみ

中性原子の偏向・集束技術

清水和子

電気通信大学電子物性工学科 〒182 調布市調布ヶ丘 1-5-1

1. はじめに

光による中性原子線の偏向や集束は、レーザー冷却・トラッピングと同じ原理で、共鳴光の吸収、放出に伴う運動量交換によって行うことができる。原子線の広がりを抑え（横冷却）ビーム強度を向上できること以外に、一定速度の原子のみを偏向して選び出したり、基底状態と準安定状態の混合した気体中から、可視光を吸収する準安定状態のみを偏向することが可能である。最近では、エバネッセント波による原子線の反射、偏向の実験も行われている。

2. 偏 向

中性原子に働く力は光の吸収、放出に伴う散乱力と、光強度の勾配がある場合に働く双極子力とがあり、ともに放射圧と呼ばれている。放射圧による偏向のもっとも簡単なものは、原子ビームに直角に原子遷移に共鳴するレーザー光を照射する方法であるが、原子ビームの方向が変化すると原子が共鳴から外れて光を吸収しなくなるので大きく曲がることは難しい。また、ある距離だけ光と相互作用したとき、ビームの進行方向の速度によって、光の吸収、放出の回数が異なるので偏向角が変わってくる。原子ビームと光の波面法線の方向が常に直角になつていれば、原子は光との相互作用を続けることができるので、湾曲した波面を用いて大きな偏向角を得ることができる。光の波長を λ 、原子の励起状態の寿命を τ 、原子が上の準位にいる時間の割合を f とすると、原子に働く力は、フォトンの運動量が h/λ であるから

$$F = (h/\lambda)\tau^{-1}f$$

で表される。光が十分強くて飽和が起り $f=1/2$ である場合を考える。原子が曲率 R の光電場中にに入った時、

$$F = (h/\lambda)(2\tau)^{-1} = mv^2/\rho$$

を満たす速度の原子は、 v は常に力の方向に直角で大きさは変わらないので、半径 ρ の軌道に沿って運動し大きく偏向される。この方法では、波面に沿って集束作用があり、初速度が異なる原子は異なる位置に集束するので

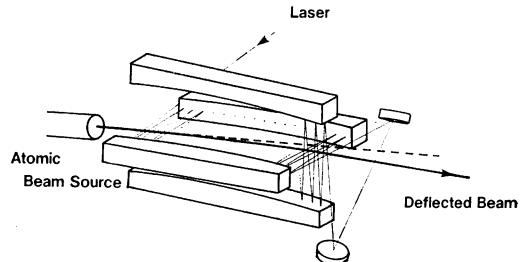


図 1 Ne* ビーム 2 次元偏向集束用光学系。
凹面鏡 $R=1,038$ mm, 凸面鏡 $R=1,000$ mm, 鏡の長さ 100 mm.

効率よく一定速度の原子を集めることができる。

Nellessen らの実験では¹⁾、焦点距離 100 mm のシリンドリカルレンズで $49 \text{ mm} \times 2.2 \text{ mm}$, $R=62 \text{ mm}$ の波面をつくり約 20 mW のレーザー光で初速度 140 m/s のナトリウムビームを 30 度以上曲げることに成功している。われわれは、シリンドリカルレンズのかわりに図 1 に示すような鏡の組み合わせを用いてネオン準安定状態の集束偏向を行っている²⁾。これは $R=1,038$ mm の凹面鏡と $R=1,000$ mm の凸面鏡を曲率中心が一致するように置いたもので、鏡の端からレーザー光を入射し多数回反射させる。鏡の間を通過する原子ビームは両方向からの光と交差するが、凹面鏡で反射され凸面鏡に向かう光の方向は光を吸収して偏向される原子ビームの方向と同期して方向が変わるので原子は常に一方向からの光のみを吸収する。このような鏡を 2 組用いて、ネオン準安定状態の 2 次元の集束、偏向を行い約 30 倍のビーム強度を得ることができた。マイクロチャンネルプレートを用いて測定したビーム強度を図 2 に示す。この方法は、放電で生成した準安定状態の原子を基底状態にある大部分の原子から分離するのに非常に有効である。

3. 集 束

原子ビームの集束は、最初 Bjorkholm らにより³⁾レーザー光の断面の強度分布がガウス分布になっていることをを利用して、原子ビームと同方向に進行し集束するレー

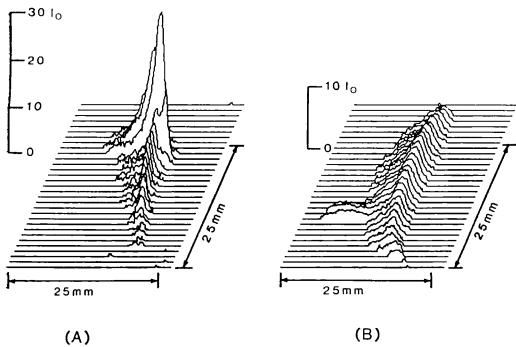


図2 放電管から25cmの位置での Ne^* ビームの強度分布²⁾。(A) 2次元偏向集束, (B) 1次元偏向集束。

レーザー光を用いて行われた。最近は、ビームの進行方向に直角に互いに反対方向に進行するレーザー光を照射して、いわゆる1次元あるいは2次元光モラスを形成して横冷却が行われている⁴⁾。このときレーザー光周波数は共鳴周波数から自然幅程度低周波へずらしておく。この方法では、横方向の広がりは遷移の自然幅で決まる限界温度(ドップラー限界温度)に相当する速度まで冷却できる。Sheehyら⁴⁾は、周波数安定化したダイオードレーザーを用いルビジウムビームのコリメーションを行っている。平均速度400m/sのビームに対し相互作用距離20mm、レーザーパワー8mW、離調-30MHzの場合、検出器位置で6mmのビーム径が1.25mmに集束し強度20倍を得ている。彼らの実験では、横方向の温度として37μKというドップラー限界温度より低い温度が得られているが、これは偏光変調冷却効果が働いていると説明されている。

光モラスでは光強度は強くなく、原子は両方向の光とそれぞれ独立に相互作用をすると考えているが、光が強くなると(飽和パラメーター $s \gg 1$)定波波としての効果を考える必要がある。このような場合を誘導冷却といい、レーザー周波数を共鳴周波数よりも高周波側へ離脱するのが特徴である。セシウムビームの誘導冷却が行われており⁵⁾、70mWのパワーでビーム広がりを1/5にしその時の速度広がりは±40cm/sであった。

本特集号の「原子のトラップと光モラスの物理」で述べられている磁気光学トラップと同じ原理を2次元に適用してもコリメーションを行うことができる。

Nellessenら⁶⁾は、ナトリウムを用いた磁場の傾きが500G/cm、相互作用距離4cm、レーザーパワー20mWの時、直径3mmのビームを43μmに集束することに成功している。このとき集束する前のビームはレーザー

冷却と上に述べた偏向を行っており、並進速度50m/s、ビームの密度は $10^9/\text{cm}^3$ で初期の密度の1,000倍になっている。Riisら⁷⁾は同じくナトリウムで速度3m/s、密度 $10^8/\text{cm}^3$ のビームを得ている。この実験では原子をレーザー冷却した後光モラスを形成しているが、モラスビームのうち1組は周波数が互いに数MHz異なり、原子はこの1組の光のビートに乗って移動している。ビート周波数を変えれば移動速度を変えることができる。このような高密度の超低速の原子ビームをつくるのに有効な方法である。直接レーザー冷却を行ったのでは一般にこのような超低速を作るのは困難である。

4. 反 射

光がガラスと真空の境界面で全反射するときには、真空側にエバネッセント波が生じる。エバネッセント波の電場は半波長程度で減衰するが、ここでは非常に大きな電場勾配ができていて、光の周波数を共鳴より高い側にずらすと、双極子力は原子を光の弱い方に動かすように働く。Balykinら⁸⁾は数百m/sのナトリウムビームをエバネッセント波で偏向し、レーザー周波数を適切に選んで $3S_{1/2}, F=2$ の原子が選択的に反射されることを確かめた。Kasevichら⁹⁾は、レーザー冷却・トラップされたナトリウムをエバネッセント波を生じているプリズム上に自由落下させ2回反射されるのを観測した(彼らはトランボリンと呼んでいる)。

以上最近の原子ビーム制御の例をいくつか紹介したが、これらの実験を成功させる鍵の一つは、スペクトル幅が1MHz程度の周波数安定度の高い周波数可変レーザーであることを強調したい。

文 献

- 1) J. Nellessen, J. H. Muller, K. Sengstock and W. Ertmer: *J. Opt. Soc. Am. B*, **6** (1989) 2149-2154.
- 2) F. Shimizu, K. Shimizu and H. Takuma: *Chem. Phys.*, **145** (1990) 327-331.
- 3) J. E. Bjorkholm, R. R. Freemann, A. Ashkin and D. B. Pearson: *Phys. Rev. Lett.*, **41** (1978) 1361-1364.
- 4) B. Sheehy, S.-Q. Shang, R. Watts, S. Hatamian and H. Metcalf: *J. Opt. Soc. Am. B*, **6** (1989) 2165-2170.
- 5) A. Aspect, J. Dalibard, A. Heidmann and C. Choenn-Tannoudji: *Phys. Rev. Lett.*, **57** (1986) 1688-1691.
- 6) J. Nellessen, J. Werner and W. Ertmer: *Opt. Commun.*, **78** (1990) 300-308.
- 7) E. Riis, D. S. Weiss, K. A. Moler and S. Chu: *Phys. Rev. Lett.*, **64** (1990) 1658-1661.
- 8) V. I. Balykin, V. S. Letokhov, Yu. B. Ovchinnikov and A. I. Sidorov: *Phys. Rev. Lett.*, **60** (1988) 2137-2140.
- 9) M. A. Kasevich, D. S. Weiss and S. Chu: *Opt. Lett.*, **15** (1990) 607-609.

(1991年11月20日受理)