

## 問題 16 レーザ冷却

この問題は、レーザ冷却に関するものである。レーザ冷却とはイオンを極低温まですばやく効率的に冷却する手法である。一分子の平均運動エネルギー  $E$  は温度  $T$  と  $E = \frac{3}{2}k_B T$  の関係にある。ここで、 $k_B$  はボルツマン定数である。

- a) カルシウム原子が  $600^\circ\text{C}$  のオープンから飛び出してくるとする。 $^{40}\text{Ca}$  原子（相対同位体質量（原子量） $39.96$ ）の平均運動エネルギー、根二乗平均運動量と根二乗平均速度を計算せよ。
- b) 原子はイオントラップに流入し、そこで光イオン化されてトラップされる。このトラップ中で、イオンに波長  $396.96\text{ nm}$  のレーザ光が照射される。この波長の光の周波数と、光子一つあたりのエネルギー、運動量を計算せよ。
- c) イオンは以下の光学的サイクルを繰り返す。イオンはレーザと反対方向に運動しているときに光子を吸収し（これはドップラー効果によって可能になる）、ランダムな方向に光子を再放出する。この過程において、イオンの速度は少しだけ減速される。サイクル一回あたりの平均運動量と平均速度の変化量、及び、イオンをほぼ静止させるために必要な光子数を計算せよ。（実際には、このプロセスによって、 $0.5\text{ mK}$  まで温度を低下させることができる）
- d) 基底電子状態における  $\text{Ca}^+$  イオンの電子配置を書き下し、不対電子の軌道角運動量およびスピン角運動量を計算せよ。
- e) レーザ冷却に関わる励起電子配置への遷移では、不対電子は利用可能な最もエネルギーの低い  $p$  軌道に励起される。その電子配置での不対電子の軌道角運動量とスピン角運動量を計算せよ。
- f) この励起状態において、不対電子は帯電した原子核の周りを運動していることによる磁場を感じる。その電子のスピンは、この磁場に対して平行もしくは反平行に向くことが可能であり、それら二つの状態は少しだ

け異なるエネルギーを持つ。電子の全角運動量に対応する量子数  $j$  は、 $|l-s|$  から  $|l+s|$  まで 1 刻みの値を取る。取りうる  $j$  の値を計算せよ。

- g)** レーザ冷却においては、基底状態から、これら二つの励起状態のうちエネルギーが低いほうの状態への遷移が起こる。基底状態からエネルギーが高いほうの状態への遷移は波長 **393.48 nm** の光に相当する。励起電子配置における二状態間のエネルギー差を計算せよ。