

# ${}^6\text{Li}$ 原子のオプティカルポンピングに必要な レーザー強度に関する検討

A. Tamii

ver 1.3 27-NOV-2003

## 1 序

${}^6\text{Li}$  原子線の最外殻電子の  $2S_{1/2}, F = 1/2 \rightarrow 2P_{1/2}, F = 3/2$  および  $2S_{1/2}, F = 3/2 \rightarrow 2P_{1/2}, F = 3/2$  の2つの遷移を2台の円偏光レーザー光により励起する場合に必要なレーザーの強度について検討する。

## 2 励起断面積

図 reffig:level に  ${}^6\text{Li}$  原子のレベルダイアグラムを示す。レーザー光の線幅が充分狭い場合、励起断面積は次の式で表される。<sup>1</sup> [1]。

$$\sigma(\omega) = \frac{3}{4} \lambda^2 \frac{g'}{g} b a(\omega) \quad (1)$$

ここで、 $\lambda$  は光の波長 ( $\sim 671$  nm)、 $\omega = 2\pi c/\lambda$  は角振動数を表す。 $g, g'$  はそれぞれ基底状態、励起状態の縮退度で、今の場合  $g=6, g'=4$  である。

$b$  は始状態  $|F, M_F\rangle$  と終状態  $|F', M_{F'}\rangle$  の結合強度で、Clebsch-Gordan 係数の2乗で表される。

$$b = | \langle F M_F 1 (M_{F'} - M_F) | F' M_{F'} \rangle |^2 \quad (2)$$

$a(\omega)$  は自発放出 (spontaneous emission) 強度で次式のような Lorentz 型で与えられる。

$$a(\omega) = \frac{2}{\pi} \frac{(\gamma/2)^2}{(\omega - \omega_0)^2 + (\gamma/2)^2} \quad (3)$$

$\gamma$  は  ${}^2P_{1/2}$  から  ${}^2S_{1/2}$  への自発放出レート (spontaneous emission rate) で、今の場合  $3.72 \times 10^7 \text{ s}^{-1}$  である [2]。

具体的な値を代入すると、

$$\sigma(\omega_0) = \frac{3}{2\pi} \lambda^2 b = 1.43 \times 10^{-9} b \text{ cm}^2 \quad (4)$$

が得られる。

---

<sup>1</sup> 偏光軸が磁場の軸に一致していると仮定して3倍のファクターが掛かっている

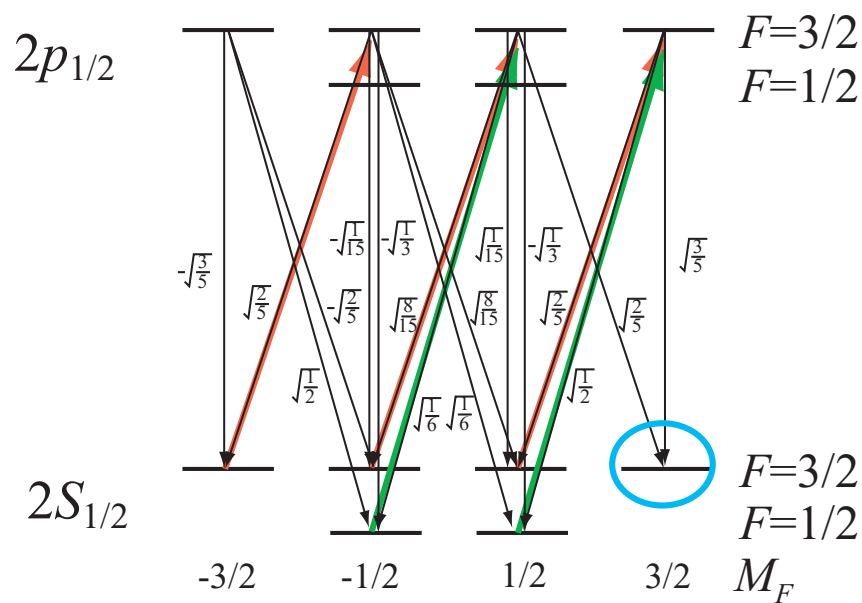
Level Diagram of a  ${}^6\text{Li}$  atom

図 1:  ${}^6\text{Li}$  原子レベルダイアグラム。緑と赤の励起線が、それぞれ波長 670.776 nm と 670.791 nm [2] に対応する円偏光レーザーによる励起。青丸のレベルに溜める。付記されている数値は各線の CG 係数。

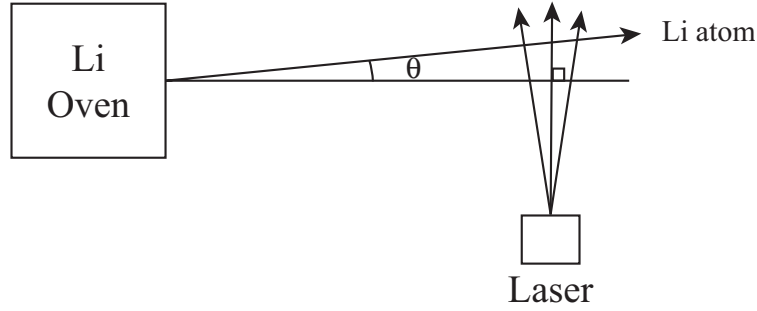


図 2: 実験室系における原子線とレーザー光の角度。 $\theta$  は紙面内の傾きを表す。紙面に垂直な方向の傾きは無視できる。

### 3 Li原子線と Doppler Shift

Max Plank Institute [3] および Florida State University [4] の偏極 Li イオン源に関するデータをもとに、Li オープン (温度  $850^\circ\text{C}$ 、ノズル径  $0.5\text{ mm}\phi$ ) から吹き出す Li のパラメータとして

$$\begin{aligned} \text{速度:} & \quad 3.0 \times 10^5 \text{ cm/s} \\ \text{角度広がり:} & \quad \pm 20 \text{ mr} \\ \text{ビーム量:} & \quad 50 \text{ p}\mu\text{A} = 3.1 \times 10^{14} \text{ s}^{-1} \end{aligned}$$

を仮定する。

原子線束に対して直角方向から角振動数  $\omega_0$  のレーザーを照射した場合、原子線束の中心に対して  $\theta$  の傾きを持った方向に速度  $v=c\beta$  を持つ原子が吸収する光の角振動数  $\omega$  は、Doppler Shift により、

$$\omega = \gamma(1 - \beta \sin \theta)\omega_0 \simeq (1 - \beta\theta)\omega_0 \quad (5)$$

と表される。最後の式では、 $\beta \ll 1$  より  $\beta$  に関する 2 次の項を落とし、 $\theta \simeq 0$  より  $\sin \theta = \theta$  と近似した。

式 (1) により、主に光が吸収されるのは、 $\omega$  が  $\omega_0$  の前後  $\pm\gamma/2$  の範囲にある場合であるので、 $\theta$  の範囲の制限として

$$\Delta\theta \leq \frac{1}{\beta} \frac{\gamma}{2\omega_0} = 0.66 \text{ mr} \quad (6)$$

が得られる。

以下の計算では  $\theta$  に  $\pm\Delta\theta$  の制限をかけることにより式 (1) の  $\omega$  依存性を無視して  $\omega = \omega_0$  とする (式 (4))。<sup>2</sup>

### 4 Li原子の平均励起回数

Li オープンのノズルから  $7\text{ cm}$  の位置 [4] に  $10\text{ mW}$  のレーザー光を照射するとする (図 3)。この地点では、Li 原子線は  $\pm 1.4\text{ mm}$  程度に広がっている。原子線の角度広がり ( $\pm 20\text{ mr}$ ) と同程

<sup>2</sup> 正しく計算すると、レーザーによる励起強度は  $\frac{\pi}{2}$  倍になる。

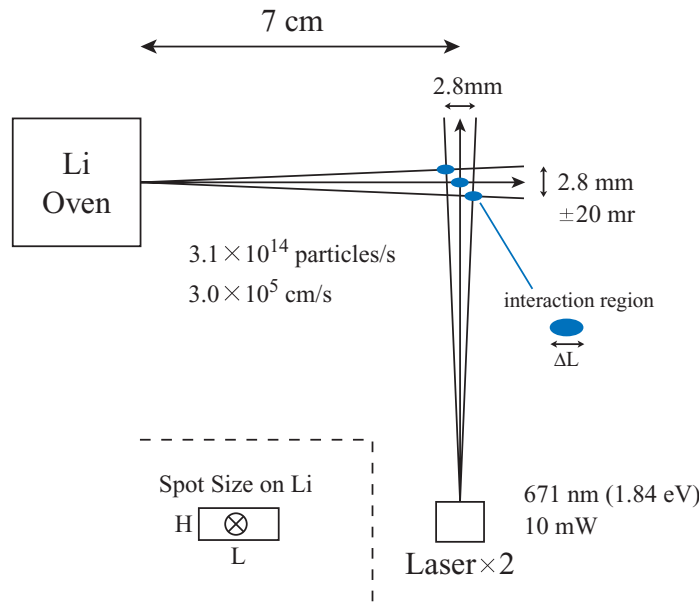


図 3:  ${}^6\text{Li}$  原子線とレーザーの位置関係。Doppler 効果の補正を行うため、レーザを広げて原子線にあてる。2 本のレーザーの相互作用領域 (interaction region) は一致している必要がある。

度にレーザー光を広げるとすると、Doppler 効果により Li 原子の励起に寄与する光の割合  $\epsilon$  は、

$$\epsilon = \frac{2 \times \Delta\theta}{2 \times 20 \text{ mrad}} = \frac{1.3}{40} = 3.3\% \quad (7)$$

となる。レーザースポットの大きさを、原子線の進行方向に  $L$ 、垂直方向に  $H$  とおくと、平均励起回数  $n$  は

$$n = \text{rate} \times \text{time} = \frac{W}{E_{\text{photon}}} \frac{\sigma}{HL} \epsilon \times \frac{L}{v} = \frac{W}{E_{\text{photon}}} \frac{\sigma}{Hv} \epsilon \quad (8)$$

となる。 $W=10 \text{ mW}$ 、 $E_{\text{photon}}=hc/\lambda=1.84 \text{ eV}$ 、 $H=3 \text{ mm}$  を代入すると、

$$n = 18b \quad (9)$$

を得る。

## 5 レーザー光の吸収による減衰

上記の計算では、Li 原子の光の吸収による、レーザー光の減衰の効果を無視している。以下で Li 原子線中の透過前後の減衰度  $\eta$  を見積もる。

レーザーを照射する地点での Li の密度  $\rho$  は

$$\rho = \frac{n_{\text{Li}}}{\pi r^2 v} = \frac{3.1 \times 10^{14} \text{ s}^{-1}}{\pi (0.14 \text{ cm})^2 \times 3.0 \times 10^5 \text{ cm/s}} = 1.7 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3} \quad (10)$$

厚さは  $T=0.28 \text{ cm}$  であるので、減衰度  $\eta$  は ( $b=1$  の場合)

$$\eta = \exp(-\sigma \rho T \epsilon) = \exp(-0.22) = 0.80 \quad (11)$$

よって、光の減衰は無視できないが、平均励起回数を最大 0.9  $(=(1+0.80)/2)$  倍に下げる程度である。

透過光をミラーにより反射させることにより、再度励起に利用できる可能性がある。

## 6 自発的脱励起とレーザー光の幅

4節の平均励起回数の計算では、レーザースポットの原子線進行方向の長さ  $L$  は寄与しなかった。しかし実際には、励起した Li 原子が脱励起するまでに進む距離 ( $l$ ) の間はポンピングが行えない。また、レーザーによる誘導放出 (stimulated emission) が自発的脱励起に比べて相対的に強い場合にはポンピングの効率が下る<sup>3</sup>。

このことから 1 回の励起を行うのに必要な長さ ( $\Delta L/n = \epsilon L/n$ ) は、励起した Li 原子が脱励起するまでに進む距離 ( $l$ ) よりも長い必要がある (誘導放出のレートは励起のレートに等しい)。

Li 原子の自発放出レートは  $\gamma = 3.72 \times 10^7$  であるから、その間に進む距離  $l$  は

$$l = \frac{v}{\gamma} = 0.08 \text{ mm} \quad (12)$$

である。

一方、光源の距離を 7 cm にとると、 $L = 2.8$  mm であるので、 $\epsilon L/n = 0.09/n$  mm となり短かすぎる。光源の距離を  $n$  倍以上に遠くにとることで  $L$  を大きくすることができる。これに対応してレーザーのスポットは原子線の進行方向に長くする必要がある。

## 7 まとめ

Li 原子を  $n=4$  回程度以上励起させれば充分な偏極が得られる<sup>4</sup> と考えられる [4]。

それぞれ 10 mW の 2 つの波長のレーザーを照射できれば、4 節および 5 節の計算より、 $18b \times 0.90 = 16b$  回の励起が行われるのでかなりの偏極が得られると予想される。具体的な偏極度の値については、シミュレーションが必要である。

## 参考文献

- [1] I.I. Sobelman, Atomic Spectra and Radiative Transitions (Springer, 1992) Chap. 9.
- [2] NIST Atomic Spectra Database, <http://physics.nist.gov/PhysRefData/> .
- [3] E. Steffens *et al.*, Nucl. Instrum. and Methods **143** (1977) 409.
- [4] E.G. Myers *et al.*, Nucl. Instrum. and Methods B **56/57** (1991) 1156.

<sup>3</sup> 偏光レーザーによる誘導放出は図 1 のレーザー励起の矢印を逆方向に辿ると考えられる。

<sup>4</sup> シミュレーションによるチェックが必要