

光ポンピング領域の磁場に関する検討

A. Tamii

ver 1.2 16-SEP-2004

1 序

開発中の RCNP での偏極 ${}^6\text{Li}^{3+}$ イオン源では、光ポンピング法により ${}^6\text{Li}$ 原子線の偏極を行う予定である。

ここでは、光ポンピングを行う領域での磁場の一様性の要請に関して検討する。

2 概略

原子線と光ポンピング領域の構成について概略する。詳細については別資料 [1, 2] を参照のこと。

${}^6\text{Li}$ 原子線は、約 850°C に熱したリチウムオープンから真空中に吹き出す原子を、スキマー、コリメーターによってコリメートすることによって生成する。検討中のリチウムオープンでの原子線の広がり、典型的にはノズルから 70mm 地点で ± 1.4 mm の円錐状である (図 1) [3, 4]。

この領域で、円偏向したレーザーを原子線に垂直な方向に照射する。レーザーの進行方向と並行に弱い磁場 (10 Gauss 程度) を与える。この磁場は、光ポンピング時の原子の量子化軸を固定するためのものであり、偏極のホールディングフィールドとしての役割も果たす。

リチウム原子の速度によるドップラー効果のため、原子の吸収する波長は原子の速度と方向に依存する。この影響を避ける目的で、レーザー光の角度をリチウム原子の角度広がりと同程度に広げることによって、各々のリチウム原子に対してレーザー光が直角に交わる場所が存在する様にレーザー光を照射する。光ポンピングは、リチウム原子とレーザー光が十分直角に近い角度で交わっている領域でのみ行われるため、偏極に必要なポンピング回数を得るためには、この領域の長さを十分に長くとる必要がある¹。シミュレーションによれば、レーザー光の焦点位置を原子線から 700 mm にとれば、リチウム原子の 95% を特定のレベルに集中させることができる (図 1)[5]。このことから、リチウム原子の進行方向のレーザー照射領域の長さは、レーザー 1 本に対して ± 14 mm 程度となる。後述の様に 2 本のレーザー光を用いるが、10 mm 離せば十分同時に照射可能と考えられるので、照射領域の長さは $14 \times 2 + 10 = 38$ mm となる。

リチウムを効率良く光ポンピングするには、2 種類の波長のレーザーが必要である [1]。これを 2 つのレーザーを用いて生成する方法を検討している。元のレーザー光の強度をフルに利用するため、2 波長の光軸を揃えた光線を 2 本生成してリチウム原子線に照射する。また、さらに効率を上げるため、リチウム原子線を透過したレーザー光をリトロリフレクター²にて反射して再利

¹ 励起状態の寿命が 1 回のポンピング時間に比べて十分短かければ、この長さは関係しなくなる。実際には寿命の長さは無視できない [1]。

² Retro-Reflector。平面鏡 3 枚を互いに垂直に合わせた反射鏡で、入射する光線は 3 枚の鏡それぞれで 1 回反射して出射する。通常の平面鏡が垂直な軸に関する反転 (対称面による鏡像) を生成するのに対して、リトロリフレクターは 3 軸に関する反転を生成することにより特定の点 (対称点) に対するパリティ変換を生成する。この為、対称点を入

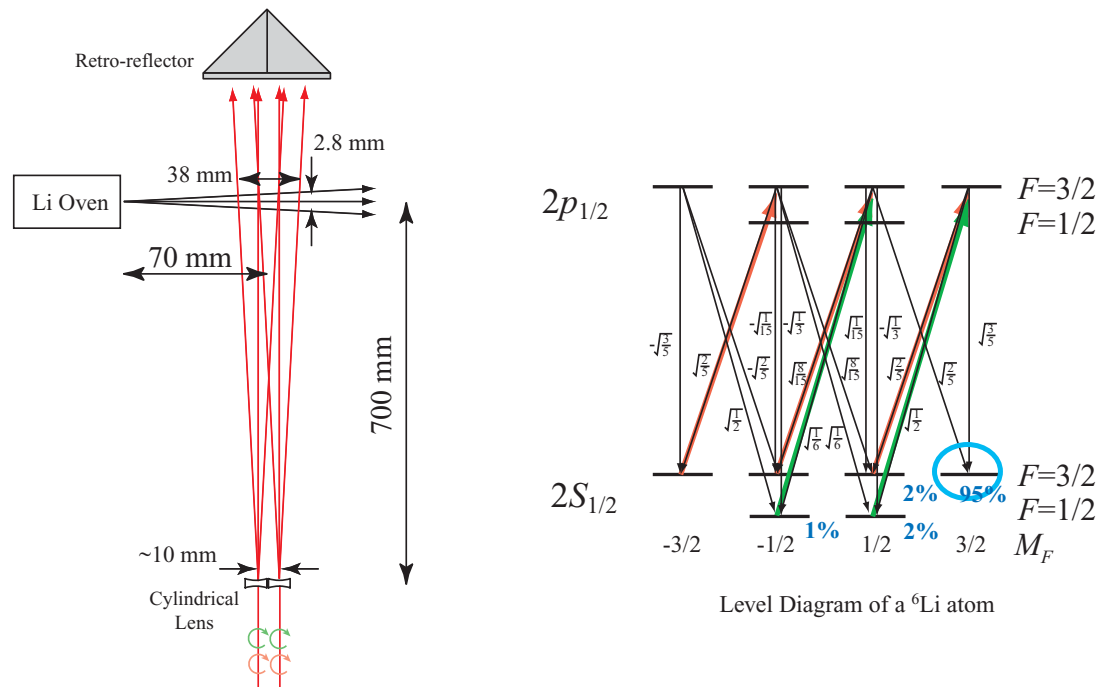


図 1: 光ポンピング領域のセットアップ。右はポンピングのシミュレーション結果 [5]。

用する。図 1 でのポピュレーションのシミュレーション結果はこの条件下での計算である。

3 磁場一様性を要する領域の大きさ

前章の議論から、一様性が必要な領域の大きさは下記のようになる。

- リチウムビームの進行方向に対しては、38 mm よりも大きい必要がある。
50 mm ($=\pm 25\text{mm}$) とする。
- リチウムビームに垂直な方向に対しては、照射最下流部で半径 1.9 mm よりも十分大きい必要がある。
半径 3 mm とする。

4 一様性の要請

磁場の一様性の要求を、下記の 2 点に分けて考察する。

1. 磁場の向きとレーザーの進行方向 (円偏光の軸) との並行性
2. リチウム原子線吸収周波数の変動

射光の軸上に合わせれば、入射方向に依らずに入射光は元の光源に向かって反射する。凹面鏡のように発散する光を収束して戻すことができるメリットがあり、凹面鏡に比べて曲率を合わせる必要がなく、アラインメントも容易である。

以下の議論では下記のような直角座標軸をとる。

- 原子線の進行方向に z 軸をとる
- レーザーの照射方向 (磁場の方向) に x 軸をとる
- x, y, z が右手系を成すように y 軸をとる

4.1 磁場とレーザーの並行性からの要請

偏極 ^3He セルでの Rb 原子の光ポンピングにおいて、磁場とレーザーの並行性を $2\text{-}3^\circ$ 以上の精度で合わせる必要があるという指摘がある [6]。この議論では、緩和時間が長く、比較的光学濃度が高い (厚い) 標的における、レーザーの透過度の角度依存性を問題としている。今回の目的には条件的に当てはまらなると考えられる。なお、レーザーの透過度は、[1] の検討において 90% と見積もっており、実際にはドップラー効果による周波数のミスマッチがあるため、透過度はさらに高い。

したがって、この検討では磁場方向と円偏向軸がずれることにより生じる、光ポンピングの効率低下を議論すれば良いと考えられる。磁場方向と円偏向軸の成す角が θ である時、円偏向の磁場方向成分は下記の様な強度比で分解される [7]。

$$\begin{aligned} f_{\sigma+} &= \cos^4(\theta/2) \\ f_{\pi} &= 2 \cos^2(\theta/2) \sin^2(\theta/2) \\ f_{\sigma-} &= \sin^4(\theta/2) \end{aligned} \quad (1)$$

この式によって表される強度比を入れたシミュレーション結果では、磁場と偏向軸が完全に一致している場合 ($\theta=0$) の光ポンピング後の $2S_{1/2} F=3/2, m_F=+3/2$ 状態のポピュレーションが 95.4% であるのに対し、 $\theta=5^\circ$ で 94.1% 、 $\theta=7^\circ$ で 93.0% 、 $\theta=10^\circ$ で 90.7% である。

有意な変化を生じないために、磁場方向変動を最大 5° とする。

これにより磁場一様性に対する要請は、下記の様になる。

- x 軸に垂直な方向の磁場の大きさを、中心磁場に対して $9\% = \tan(5^\circ)$ 以下とする。

なお、傾いた磁場方向に対して偏極した原子は、光ポンピング領域から下流への連続磁場において、断熱近似の条件化で輸送されるため、最終磁場方向にスピンを揃えたと考えて良い。即ち、ビーム内での偏極方向のばらつきが平均化される効果は考慮しなくて良い。

4.2 リチウム原子線吸収周波数の変動からの要請

磁場中での各準位のエネルギー変化は下記の式によって表される

$$\Delta E = -g_f \mu_B B m_F \quad (2)$$

ここで、 μ_B はボーア磁子、 B は磁束密度、 m_F は電子の全角運動量 \vec{J} と核の核運動量 \vec{I} の結合量 $\vec{F} = \vec{J} + \vec{I}$ の磁場方向成分である。

g_f は、下記の式で表される [8, 9]。

$$\begin{aligned}
 g_f &= g_j \frac{F(F+1) + J(J+1) - I(I+1)}{2F(F+1)} + g_i \frac{\mu_N}{\mu_B} \frac{F(F+1) - J(J+1) + I(I+1)}{2F(F+1)} \\
 g_j &= g_l \frac{J(J+1) + L(L+1) - S(S+1)}{2J(J+1)} + g_s \frac{J(J+1) - L(L+1) + S(S+1)}{2J(J+1)} \\
 &= 1 + \frac{J(J+1) - L(L+1) + S(S+1)}{2J(J+1)} \\
 &\quad (g_l = 1, g_s = 2)
 \end{aligned} \tag{3}$$

F, J, L, S, I はそれぞれ、 \vec{F} 、電子の全角運動量、電子の軌道角運動量、電子スピン、核スピンの大きさである。 g_i は核の g 因子で、核磁子 μ_N を単位としている。 ${}^6\text{Li}$ の場合は、 $g_i = +0.822047$ である [10]。

光ポンピングに関する ${}^6\text{Li}$ 原子の各電子軌道の g_f の計算値は下記の通りである。

state	g_i	g_f	$\Delta E/Bm_F$ (MHz/Gauss)
$2S_{1/2}, F=1/2$	2	-0.666	+0.933
$2S_{1/2}, F=3/2$	2	+0.667	-0.934
$2P_{1/2}, F=1/3$	2/3	+0.223	-0.312

この計算には下記の値 [11]

$$\frac{\mu_N}{\mu_B} = \frac{3.15 \times 10^{-14} \text{MeV/T}}{5.79 \times 10^{-11} \text{MeV/T}} = 5.44 \times 10^{-4} \tag{4}$$

を用いた。

レーザーによる各遷移のエネルギーの磁場中での変化は下記の通りである。

initial state	final state	$\Delta E/Bm_F$ (MHz/Gauss)
$2S_{1/2}, F=1/2, m_F=-1/2$	$2P_{1/2}, F=3/2, m_F=+1/2$	+0.311
$2S_{1/2}, F=1/2, m_F=+1/2$	$2P_{1/2}, F=3/2, m_F=+3/2$	-0.935
$2S_{1/2}, F=3/2, m_F=-3/2$	$2P_{1/2}, F=3/2, m_F=-1/2$	-1.245
$2S_{1/2}, F=3/2, m_F=-1/2$	$2P_{1/2}, F=3/2, m_F=+1/2$	-0.623
$2S_{1/2}, F=3/2, m_F=+1/2$	$2P_{1/2}, F=3/2, m_F=+3/2$	-0.001

したがって、10 Gauss の磁場下での遷移エネルギー変化は、最大 12.5 MHz であり、励起状態である $2P_{1/2}, F=3/2$ 状態の自然幅 36.9 MHz [12] よりも小さい。逆にそうなるように磁場の大きさを決めているのが実情である。

リチウム原子の吸収周波数の変動からの、磁場の一様性への要請は、(レーザーと直角に交わる時の) 吸収周波数の変動が励起状態の自然幅 36.9 MHz よりも十分小さければ良い事になり、1 Gauss の精度があれば十分である。

なお、使用予定のレーザーの線幅は 1-3 MHz である。

5 一様性の要請のまとめ

以上の考察から、光ポンピング領域の磁場の一様性を、下記の様に要請する。

- 原子線の進行方向に ± 25 mm、垂直方向に半径 3 mm の範囲内で、主磁場 (10 Gauss) 方向 (レーザー照射方向) の磁場変動が 10% (1 Gauss) 以下、主磁場と垂直の方向の磁場の大きさが主磁場の 9% 以下であること。

6 付記

ノズルから 70 mm 下流の位置に光ポンピング領域を設置することができるかどうかについては、スキマー、コリメータの設計に依存する。

参考文献

- [1] A. Tamii, 「 6Li 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」.
- [2] A. Tamii, 「2 本のレーザーの光軸のアラインメントに関して」.
- [3] E.G. Myers *et al.*, Nucl. Instrum. and Methods in Phys. Res. **B56/57** (1991) 1156, written as 'a solid angle of divergence of 1.1 msr'.
- [4] K.W. Kemper, E.G. Myers, and B. Roeder, Private Communication.
- [5] A. Tamii, 「偏極 6Li^3+ イオン源の開発」、核理 I ミーティング報告、2004 年 7 月 22 日.; A. Tamii, 「 6Li 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」 ver 3.0 に記載する予定。
- [6] T. Uesaka and T. Wakui, Private Communication
- [7] B. Chann *et al.*, Phys. Rev. A **66** (2002) 033406.
- [8] 久保、鹿取、「スピンと偏極」、培風館、1994.
- [9] 白土、「原子物理学 II」、日本理工出版会、1984.
- [10] Table of Isotopes 8th Ed. 1998 Update by R.B. Firestone, (Wiley Intescience, 1998, New York) Appendix E.
- [11] Particle Data Group, Review of Particle Physics, Phys. Lett. B **592** (2004) 1.
- [12] Handbook of Chemistry and Physics 84th Ed., (CRC Press LLC, 2003, New York) Sec. 10 Atomic, Molecular, and Optical Physics, NIST Atomic Transition Probability Tables, pp. 10-114 for Li I 6707.8Å.