

原子線偏極度測定部の磁場についての検討

A. Tamii

ver 1.0 23-NOV-2004

1 序

${}^6\text{Li}$ 原子線の偏極度はレーザー誘起蛍光 (Laser Induced Fluorescence, LIF) により測定する。ここでは、原子線偏極度測定部の磁場について検討する。

2 LIF 測定と超微細準位

${}^6\text{Li}$ 原子の $2S_{1/2}$ 状態から $2P_{1/2}$ 状態へのレーザー励起を行い、脱励起の過程で放出される蛍光の量を光電子増倍管により測定する。測定領域に磁場をかけて $2S_{1/2}$ の 6 つの超微細準位を分離し、特定の準位からのみ励起される様にレーザーの波長もしくは磁場の大きさを合わせた測定を各準位について行うことで、 $2S_{1/2}$ の超微細準位の占有率が測定できる。

$x \equiv B/B_c \ll 1$ (B_c は臨界磁場で、 $2S_{1/2}$ において 81.5 Gauss [1]) の条件を満たす外部磁場 B においては、超微細相互作用が脱結合されておらず、 F, m_F が良い量子数となる。光ポンピングの効率を直接的に測定するという目的ではこの磁場領域の方が都合が良いが、 $2S_{1/2}$ 超微細構造のゼーマン準位のスプリットイング (0.933 MHz/Gauss [1]) が、励起状態である $2P_{1/2}$ の自然幅 (36.9 MHz [1]) に比べて小さい為、各準位を分離して測定することができない。

また $x \sim 1$ の磁場領域は、超微細相互作用の脱結合の臨界付近であり、円偏光レーザー励起の選択則が十分よく成り立たない。

このため、 $x \gg 1$ の磁場を用いることにする。この磁場領域では、超微細相互作用が十分脱結合しており、電子スピンと原子核スピンの磁気量子数 m_J, m_I が良い量子数となる。円偏光レーザー励起の選択側は下記の様になる。

$$\begin{aligned}\Delta m_J &= \begin{cases} +1 & \text{for } \sigma^+ \\ -1 & \text{for } \sigma^- \end{cases} \\ \Delta m_I &= 0 \end{aligned} \quad (1)$$

なお、 $x \gg 1$ における電子の波動関数は、一般には $x \ll 1$ における基底の重ね合わせとして表されることに注意しておく必要がある ([1] 式 (22))。

磁場中での、超微細準位のエネルギーについて図 1 にまとめておく。

となる。

なお、FSU の実績では共鳴状態の幅 (FWHM) は、遷移エネルギー差の 3~5 分の 1 程度である [3]。

3.3 一様性を要する領域

光ポンピングを行う原子線の角度広がりとして 20 mr を想定している [4]。FSU の図をもとにすると、原子線偏極度測定部はノズルから約 800 mm の位置にあるので、この位置での原子線の広がり半径は 16 mm 程度 (32 mm ϕ) となる。余裕をみて半径 20 mm とする。

しかし一方で、光ポンピングの場合のようにレーザー光の角度を広げて原子線の各部と直角に交わる領域を作ると、レーザー光との角度が 90 度からずれた部分で周波数のずれたレーザー光を吸収してしまう原子があるために、共鳴周波数の測定幅が広がって隣の遷移と十分分離できなくなってしまう。

この問題を解決するには、レーザー光を平行ビームとして入射し、レーザー光とほぼ垂直な原子線のみ通す様に、レーザー光に平行な方向 (磁場方向=水平方向) の原子線の角度分布をコリメータにより制限しなければならない。この周波数のずれの全幅 ($\pm\Delta\nu$) の許容範囲を遷移エネルギー差の 5 分の 1 程度とすると、半幅 ($\Delta\nu$) の許容範囲は 10 分の 1 であるから

$$\Delta\nu \leq \frac{1}{84.8} = 8.48 \text{ MHz} \quad (4)$$

ドップラーシフトに関する計算 [5] の式 (5) より、許容水平方向角度範囲 ($\pm\Delta\theta$) は

$$\Delta\theta = \frac{\Delta\nu}{\beta\nu_0} \quad (5)$$

であるから、 $\nu_0=447 \text{ THz}$ (670.78 nm) を代入すると、原子線速度が 1, 2, 3 km/s の時、それぞれ $\Delta\theta = 0.33, 0.16, 0.11^\circ$ となる。

原子線の速度分布については、リチウムオープンやノズル等の条件に依存するため詳しく言及できないが、FSU [2](pp. 59) や Heidelberg [6] のテスト実験では、中心速度が 2-2.5 km/s にある。このため、少なくとも 3 km/s までは想定して角度を制限しなければならないと考えられる。この場合、 $\Delta\theta=0.11^\circ=1.9 \text{ mr}$ より、原子線偏極度測定部の水平方向ビームの広がり半径は $\pm 1.5 \text{ mm}$ 程度となる。余裕をみて、一様性を要する領域を $\pm 5 \text{ mm}$ とする。

原子線の進行方向には、レーザースポットの大きさをカバーする領域にて一様性が達成されていけば良い、 $\pm 5 \text{ mm}$ 程度とする。

なお、磁極の中心にはレーザー光を通す穴が開いている必要がある。上記想定に従うと、鉛直方向に $\pm 20 \text{ mm}$ 、水平方向に $\pm 5 \text{ mm}$ 程度となる。

4 蛍光の発光量の見積もりについて

未検討

5 まとめ

原子線偏極度計の磁場として下記の要請をする。

- 最大使用磁場 1 kGauss
- 磁場一様性 1%
- 一様性を要する領域
 - 磁場と平行な方向 (水平方向) に ± 5 mm
 - 磁場と垂直な方向 (原子線進行方向) に ± 5 mm
 - 磁場と垂直な方向 (鉛直方向) に ± 20 mm

磁極の構造として C 型を想定している。原子線の入射方向、出射方向は開いている必要がある。また、鉛直上側は蛍光測定に使用する予定で、開いている必要がある。このためリターンヨークの方向は鉛直下側もしくは、斜め方向となる。

磁極の中心にはレーザー光を入射する穴が開いている必要がある。対称性の確保およびレーザー光のアラインの為、両方の磁極に同じ大きさの穴を開けることとする。穴の大きさは、鉛直方向に ± 20 mm 以上、水平方向に ± 5 mm 以上である。

実際には、これだけの大きさの穴を開けて磁場の一様性 1%を確保する方針には困難が予想される。

磁石の設計と磁場のシミュレーションを行い、現実的な大きさまで穴を小さくすることを検討する。これとともに一様性を要する領域も小さくなる。穴を小さくすることは、ビームエミッタンス中での偏極度測定を行える領域を小さくすることを意味する。しかし、所詮水平方向はドップラシフトによる広がりを抑えるために ± 1.5 mm 程度まで絞る必要があるため、これを認めるのであれば、鉛直方向を同程度まで絞ることは大きな抵抗はないと考えられる。

参考文献

- [1] A. Tamii, 「 ${}^6\text{Li}$ 原子の超微細構造」, ver 1.1.
- [2] A.J. Mendez, Phd Thesis, Florida State Univ., 1993, unpublished.
- [3] A.J. Mendez *et al.*, Nucl. Instrum. and Methods in Phys. Res. **A329** (1993) 37.
- [4] A. Tamii, 「 ${}^6\text{Li}$ 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」, ver 1.3.
- [5] A. Tamii, 「レーザー光の Doppler Shift」, ver 1.0.
- [6] H. Ebinghaus, *et al.*, Z. Phys. **267** (1974) 15.