

レーザー光の Doppler Shift

A. Tamii

ver 1.0 21-SEP-2004

1 序

${}^6\text{Li}$ 原子線に照射するレーザー光の波長は、Doppler Shift により、実験室系と原子線の静止系とで異なる。この Doppler Shift を計算する。

2 Doppler シフト

ここでは、運動するリチウムにレーザー光を照射する場合に、リチウム (観測者) が観測する光の振動数を計算する。

観測者の静止系 (観測系) における光の振動数 ν は、下記の Doppler シフトの式で表される [1]。

$$\nu = \frac{\nu_0}{\gamma(1 - \beta \cos \alpha)} \quad (1)$$

ここで、 ν_0 は光源の静止系での振動数、 β, γ は観測系での光源速度の相対論的因子、 α は観測系での光源の運動方向と光の進行方向が成す角度である。

図 1 の様に観測系および実験室系 (光源の静止系) の座標をとると、両者の角度は下記の式によって変換される。

$$\cos \alpha = \frac{\cos \phi - \beta}{1 - \beta \cos \phi} \quad (2)$$

これを式 (1) に代入して

$$\begin{aligned} \nu &= \nu_0 \frac{1 - \beta \cos \phi}{\gamma(1 + \beta^2)} \\ &= \nu_0 \frac{\gamma(1 - \beta \cos \phi)}{(1 - \beta^4)} \\ &\simeq \nu_0(1 - \beta \cos \phi) \end{aligned} \quad (3)$$

最後の式では、 $\beta \ll 1$ として、 β に関する 2 次以上の項を消去した ($\gamma \simeq 1$)。

実験室系での実験室系でのレーザー光とリチウム原子の速度ベクトルが成す角の、 90° からのずれを次式のように $\Delta\theta$ と定義すると、

$$\Delta\theta \equiv 90^\circ - \alpha \quad (4)$$

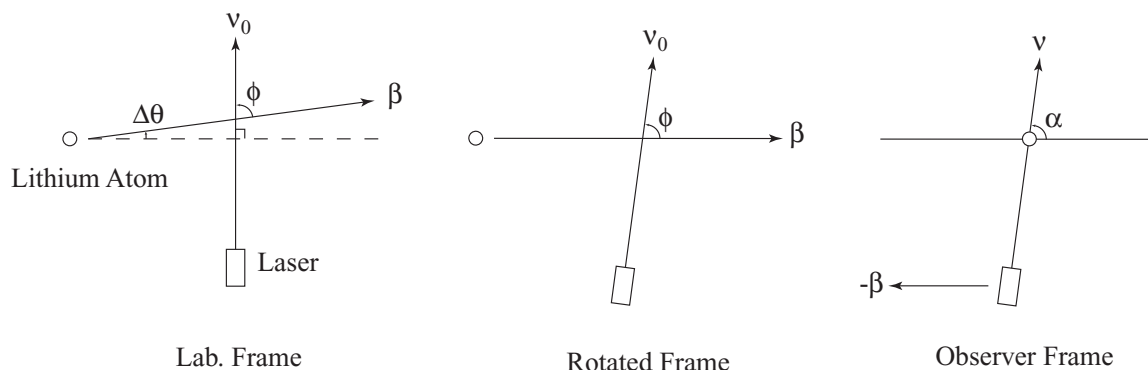


図 1: Doppler シフト計算の座標系。左: 実験室系、中央: 回転した実験室系、右: リチウムの静止系

doppler シフトは下記の式であらわされる。

$$\begin{aligned}\nu &\simeq \nu_0(1 - \beta \sin \Delta\theta) \\ &\simeq \nu_0(1 - \beta\Delta\theta)\end{aligned}\quad (5)$$

最後の式では、 $\Delta\theta \ll 1$ として、 $\sin \Delta\theta \simeq \Delta\theta$ と近似した。この式は、FSU の論文 [2] の式に一致する。

典型的なリチウム原子の速度について、リチウムが観測するレーザー光の周波数のずれの、 $\Delta\theta$ に対する依存性を図 2 にプロットする。

励起状態である $2P_{1/2}$ 状態の自然幅 36.9 MHz であるため、レーザー光はおよそ黒線の範囲内の角度で吸収される。リチウムの速度が 3 km/s の場合で、 $\pm 0.24^\circ$ である。なお、使用予定のレーザーの線幅は 1-3 MHz で、自然幅よりもかなり狭い。

参考文献

- [1] ランダウ, リフシッツ, 「場の古典論」第 6 版 (東京出版, 1978) pp. 132.
- [2] E.G. Myers *et al.*, Nucl. Instrum. and Methods in Phys. Res. B **56/57** (1991) 1156, Eq.(4), in the case of $n=0$.

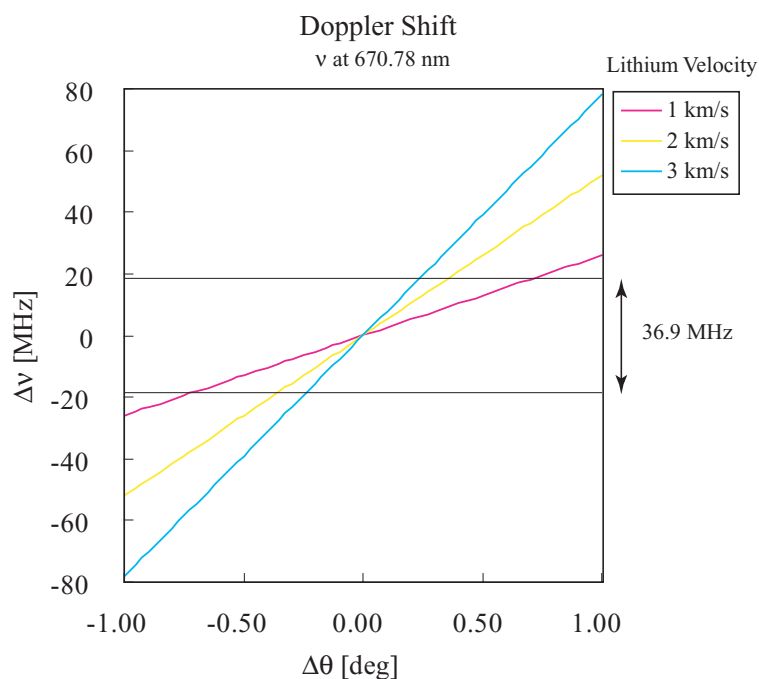


図 2: Doppler シフトの角度依存性。実験室系でリチウムの運動とレーザー光の方向が直行する場合からのずれの角度 ($\Delta\theta$) を横軸にプロットしている。立て軸は、Doppler シフトによる実験室系のレーザー波長 (670.78 nm) からのずれを周波数で表している。リチウムの代表的な速度として、1,2,3 km/s をとった。励起状態である $2P_{1/2}$ 状態の自然幅 36.9 MHz であるため、レーザー光はおおよそ黒線の範囲内の角度で吸収される。なお、レーザーの線幅は 1-3 MHz で、自然幅よりもかなり狭い。