

## 水素型原子・イオンの偏極保持に必要な critical field

磁場  $B$  中での摂動ハミルトニアンは

$$H' = a\mathbf{I}\cdot\mathbf{J} - g_J\mu_B\mathbf{J}\cdot\mathbf{B} - g_I\mu_I\mathbf{I}\cdot\mathbf{B}$$

ここで磁気双極子超微細構造定数  $a$  は、水素型原子の場合

$$a = \begin{cases} \frac{\mu_0}{4\pi}\mu_B\frac{2l(l+1)}{j(j+1)}\frac{\mu_I}{I}\langle r^{-3} \rangle & \text{for } l > 0 \\ \frac{\mu_0}{4\pi}\frac{16\pi}{3}\mu_B\frac{\mu_I}{I}|\psi(0)|^2 & \text{for } l = 0 \end{cases}$$

で与えられる [1, 2]。水素型原子の波動関数が

$$\psi_{nljm}(\mathbf{r}) = a_B^{-3/2} R_{nl}(r) [Y^l(\hat{\mathbf{r}}) \otimes \chi^{1/2}]_m^j$$

$$a_B = \frac{\hbar^2}{Zm'e^2}, \quad \rho = \frac{r}{a_B}$$

$$n = 1 : R_{1s} = 2e^{-\rho}$$

$$n = 2 : R_{2s} = \frac{\sqrt{2}}{2} \left(1 - \frac{1}{2}\rho\right) e^{-\rho/2}, \quad R_{2p} = \frac{\sqrt{6}}{12} \rho e^{-\rho/2}$$

$$n = 3 : R_{3s} = \frac{2\sqrt{3}}{9} \left(1 - \frac{2}{3}\rho + \frac{2}{27}\rho^2\right) e^{-\rho/3}, \dots$$

⋮

である事を使うと

$$a[1S] = \frac{4}{3} \frac{m_e m'_e}{m_p} \alpha^4 g_I Z^3, \quad a[2S] = \frac{1}{8} a[1S], \quad \dots, \quad \alpha = \frac{1}{137.04}$$

水素型原子の  $s$  軌道の場合は  $j = 1/2$  なので、超微細構造の共鳴周波数は

$$h\nu = E(F = I + j) - E(F = I - j) = \begin{cases} a & \text{for } I = \frac{1}{2} \\ \frac{3}{2}a & \text{for } I = 1 \end{cases}$$

critical field  $B_C$  は、 $H'$  の第 2, 3 項の寄与が  $h\nu$  と同程度となる条件で与えられる。

$$B_C = \frac{h\nu}{g_J\mu_B - g_I\mu_N} \simeq \frac{h\nu}{2\mu_B}$$

以上を使って、種々の原子・イオンに対して  $\nu$  および  $B_C$  を計算すると

atom	state	$\nu$	calc. $B_C$	$\nu$	exp. $B_C$	$\mu_I/\mu_N$
$^1\text{H}$	1s	1422.586	508.204	1420.406	507.591	+2.7928
	2s	177.823	63.525	177.557	63.450	
$^2\text{H}$	1s	327.564	117.019	327.384	116.842	+0.8574
	2s	40.945	14.627	40.924	14.605	
$^3\text{H}$	1s	1517.387	542.071	1516.702	542.059	+2.9790
	2s	189.673	67.759	189.594	67.759	
$^3\text{He}^+$	1s	8669.430	3097.062			-2.1275
	2s	1083.679	387.133			
$^6\text{Li}^{2+}$	1s	8479.169	3029.093			+0.8220
	2s	1059.896	378.637			

(MHz)      (Gauss)      (MHz)      (Gauss)

水素同位体に関しては実験値 (文献 [3] から引用) と良く一致しているので、この計算を信用して考察する事にする。理研の重陽子偏極イオン源の場合、2.45 GHz マイクロ波の ECR なので磁場は 874 Gauss である。 $^6\text{Li}$  の 1s 電子に関してのみ同程度の decoupling が得られれば良いとすれば、磁場は  $\sim 2.4$  T で良い事になる。

1s 以外の状態は (距離が離れるので当然だが) 核スピンとの結合は弱く、問題にならない。スピン軌道相互作用は確かに  $Z^4$  に比例するが、影響を受けるのは電子スピン偏極のみと考えられる。荷電交換によって電子スピン偏極を核スピンの移行する場合には問題になっても、イオン化過程では (途中で一時的に励起状態を経るにしても) 深刻な問題ではないのではないだろうか。実際、SATURNE では磁場 5 T の EB ionizer で偏極度 70% の  $^6\text{Li}^{3+}$  ビームが得られていた [4]。

## 参考文献

- [1] I. Lindgren and A. Rosen, “*Relativistic Theory of Atomic Hyperfine Interaction*” (North Holland, 1974).  
(日本語訳: <http://nucl.phys.s.u-tokyo.ac.jp/yam/study/HCI/HFS/lindgren/>)
- [2] ランダウ=リフシッツ「量子力学 2」(東京図書)
- [3] G.G. Ohlsen, J.L. McKibben, R.R. Stevens, Jr. and G.P. Lawrence, Nucl. Instr. and Meth. **73** (1969) 45.
- [4] P.A. Chamouard, A. Courtois, J. Faure, R. Gobin, J.M. Lagniel, J.L. Lemaire, P.A. Leroy, B. Visentin, and P. Zupranski, in *Proc. of 7th International Conference on Polarization Phenomena in Nuclear Physics*, p. 565.