

## メタノール分子のマイクロ波ゼーマン効果 II

(富山大理<sup>a</sup>, 国立天文台/ 総研大<sup>b</sup>) ○高木光司郎<sup>a</sup>・常川省三<sup>a</sup>・小林かおり<sup>a</sup>・廣田朋也<sup>b</sup>・松島房和<sup>a</sup>

### Microwave Zeeman Effect of Methanol II

(Univ.of Toyama<sup>a</sup>,NAOJ/SOKENDAI<sup>b</sup>) K. Takagi<sup>a</sup>, S. Tsunekawa<sup>a</sup>, K. Kobayashi<sup>a</sup>, T. Hirota<sup>b</sup> and F. Matsushima<sup>a</sup>

Zeeman effects of microwave methanol transitions have been observed in laboratory at a magnetic field of 7.0 kG produced with rectangular bar magnets of neodymium. Observed lines are of about thirty low  $J, K$  ( $J \leq 10, K \leq 3$ ) rotational transitions including those in the excited torsional states. Their Zeeman effect splittings have been measured with uncertainties of about 5 %, and the four diagonal elements of the rotational  $g$  tensor including the effect of internal rotation of the methyl group have been determined. Using this  $g$  tensor,  $g$  factors of low  $J, K$  levels can be calculated with an uncertainty of about 5 %. Observed transitions include a series of astronomical methanol maser lines,  $J_1 - (J+1)_0 A^+$ . Their Zeeman splitting coefficients have been determined.

**【序】** 前回[1]に続いて同じテーマで報告する。現在までにメタノールの星間メーザーのゼーマン効果はいくつかの遷移で観測されていて[2,3,4,5]、星間雲中での磁場の値が、実験室でのゼーマン効果の結果に基づき、推定されている。ところが実験室での測定は古い“preliminary”な測定値があるだけで[6]、しかもこれはメーザー遷移とは異なる遷移に対するもので、新しい実験室でのゼーマン効果 ( $g$  因子) の測定が必要である。

本研究の目的は、メタノール分子のマイクロ波遷移に対して実験室でゼーマン効果を測定することにより、回転  $g$  因子の成分を決定し、任意の回転遷移に対して数%の精度で正しい  $g$  因子を与えることである。実験方法、観測されたゼーマン効果のシグナルや解析法については、前回に報告したので、今回は主として得られた結果について報告する。

**【実験方法】** 実験は、高感度・高分解能で強い磁場のもとでメタノールのスペクトルを観測することである[1]。分光計は富山大学の光源変調方式のものを用いる。磁場は市販のネオジウム磁石を用いて長さが300 mm、幅7.8 mmの磁場空間を作り、この中に導波管(WRJ 500 等)の吸収セルを入れた。磁場の強さは約7.0 kG (0.70 T) で一様性は長さ方向で $\pm 2.5$  %である。

**【理論】**  $Z$ 方向の磁場  $B$  のもとで、ある回転順位のゼーマン分裂は  $\Delta W = -g_J \mu_n P_z B$  (1) で与えられる。ここで  $\mu_n$  は核磁子で  $\mu_n / h = 0.76226$  MHz / kG である。ある遷移  $2 \leftarrow 1$  の Zeeman 効果は、 $P_z = M$  として  $\Delta \nu = -(g_{J2} M_2 - g_{J1} M_1)(\mu_n / h) B$  (2) であり、 $g_J$  は、Internal Axis Method (IAM) の座標系をとり

$$g_J = \frac{1}{J(J+1)} [g_{aa} \langle P_a \rangle^2 + g_{bb} \langle P_b \rangle^2 + g_{cc} \langle P_c \rangle^2 + g_x \langle P_a p' \rangle] \quad (3)$$

$a, b, c$ : 回転軸,  $p'$ : 内部回転角運動量

で与えられるとした[1]。右辺第4項が内部回転からの寄与を表している。ここで

$$p' = p_a - \rho P_a \quad (4)$$

で、 $p_a$  はメチル基の角運動量の  $a$  軸成分で、これは“internal rotation axes”座標系[7]では  $p'$  となり、相対運動としての内部回転の角運動量を表す (定数  $\rho$  は  $\rho = I_\alpha / I_{aa}$ )。

**[ゼーマン効果の観測]** 磁場：0.70 T、温度：ドライアイス温度で、約 30 個の low- $J, K$  遷移(振れ振動の励起状態  $n = 1, 2$  を含む)のゼーマン効果の  $\sigma$ -パターン( $\Delta M = \pm 1$ ) 及び  $\pi$ -パターン( $\Delta M = 0$ )を観測し、ゼーマン分裂 (大きさは 0.5 ~ 6 MHz) を測定し、Eq.(3) を用いて解析し、4 個の  $g$  tensor の対角成分 を決定し、表 1 に示した。

**Table 1 Rotational  $g$  tensor of Methanol<sup>a</sup>**

$g_{aa}$	0.305(0.006)
$g_x$	-0.425(0.003)
$g_{bb}$	-0.060(0.004)
$g_{cc}$	-0.038(0.004)

Notes

<sup>a</sup> The sign of  $g_{aa}$  is presumed to be positive. Values in the parentheses are  $1\sigma$  errors of the fitting.

Eq.(4) での  $p_\alpha$  (メチル基の角運動量の  $a$  軸成分)に対する  $g$  を  $g_\alpha$  とすると  $g_\alpha$  は

$$g_\alpha = g_{aa} + (1 - \rho)g_x = 0.224(0.010) \quad (5)$$

で与えられる ( $\rho = 0.809745$  [8])。対称コマ分子の  $g_{||}$  (メチル基の  $g$ ) は  $g_{||} = 0.245(0.008)$  [9] である。  $g_\alpha$  が  $g_{||}$  に相当するので、我々が求めた  $g_\alpha$  の符号は正であると仮定した。この仮定では、表 1 の数値の符号はそのまま正しい。

**[星間メーザー線のゼーマン効果]**

**Table 2 Observed Values for Zeeman Splitting Coefficient  $z$  for  $J_1 - (J+1)_0 A^+$  transitions**

Transition	Frequency (MHz)	$s^a$ (MHz)	$z^b$ (Hz/mG)
M1 $1_1 - 2_0$	205791	2.97(0.05)	0.42
M2 $2_1 - 3_0$	156602	2.26(0.06)	0.32
M3 $3_1 - 4_0$	107013	1.75(0.03)	0.25
M4 $4_1 - 5_0$	57032	1.47(0.05)	0.21
M5 $5_1 - 6_0$	6668	—	(0.19)*
M6 $7_0 - 6_1$	44069	1.32(0.04)	0.19
M7 $8_0 - 7_1$	95169	1.22(0.03)	0.17
M8 $9_0 - 8_1$	146618	1.21(0.02)	0.17
M9 $10_0 - 9_1$	198403	1.16(0.04)	0.17

表 2 の  $A J_0 - (J+1)_0 J$  遷移では、幾つかの遷移が星間メーザー線として観測されていて、 $J = 5$  と  $6$  ではゼーマン効果が観測されている。これらの遷移について、表 2 でゼーマン分裂係数  $z$  を与えた。天文観測では最初 M5 と M6 に対して  $z = 1.0$  Hz/mG が用いられたが [2, 3]、その後  $z = 0.1$  Hz/mG など が用いられている。

Notes

<sup>a</sup> Observed splitting of the outermost components at  $B = 7000$ G.

Values in parentheses are uncertainties of observed values.

<sup>b</sup> Zeeman splitting coefficient :  $z = s / B$  \*calculated.

**References** [1] 高木,常川,小林,廣田,松島, 分子分光研究会(2017). [2] W. H. T. Vlemmings, A&A. **484**, 773 (2008). [3] A.P. Sarma & E.Momjian, ApJ, **730**, L5 (2011). [4] W. H. T. Vlemmings et al. , A&A. **529**, A95(2011). [5] E.Momjian & A.P.Sarma, ApJL, **834**,168(2017). [6] C. K. Jen, Phys. Rev. **81**, 197(1951). [7] C.C.Lin & J.D.Swalen, Rev. Mod. Phys, 31,841 (1959) . [8] E.Herbst et al., J. Mol. Spectrosc.108,42(1984). [9] D. H. Sutter & W. H. Flygare, Topics in Curr. Chem. (Springer Verlag) 1976. p89