

松本尚子(総研大 D3, JSPS特別研究員DC), 本間希樹(NAOJ, 総研大), 磯野靖子(名古屋大学 D1), 氏原秀樹(NICT), 木村公洋(大阪府立大学), 松本浩平(大阪府立大学 M2), 澤田-佐藤 聡子(NAOJ), 土居明広(JAXA), 藤沢健太(山口大学)



naoko.matsumoto@nao.ac.jp

Abstract

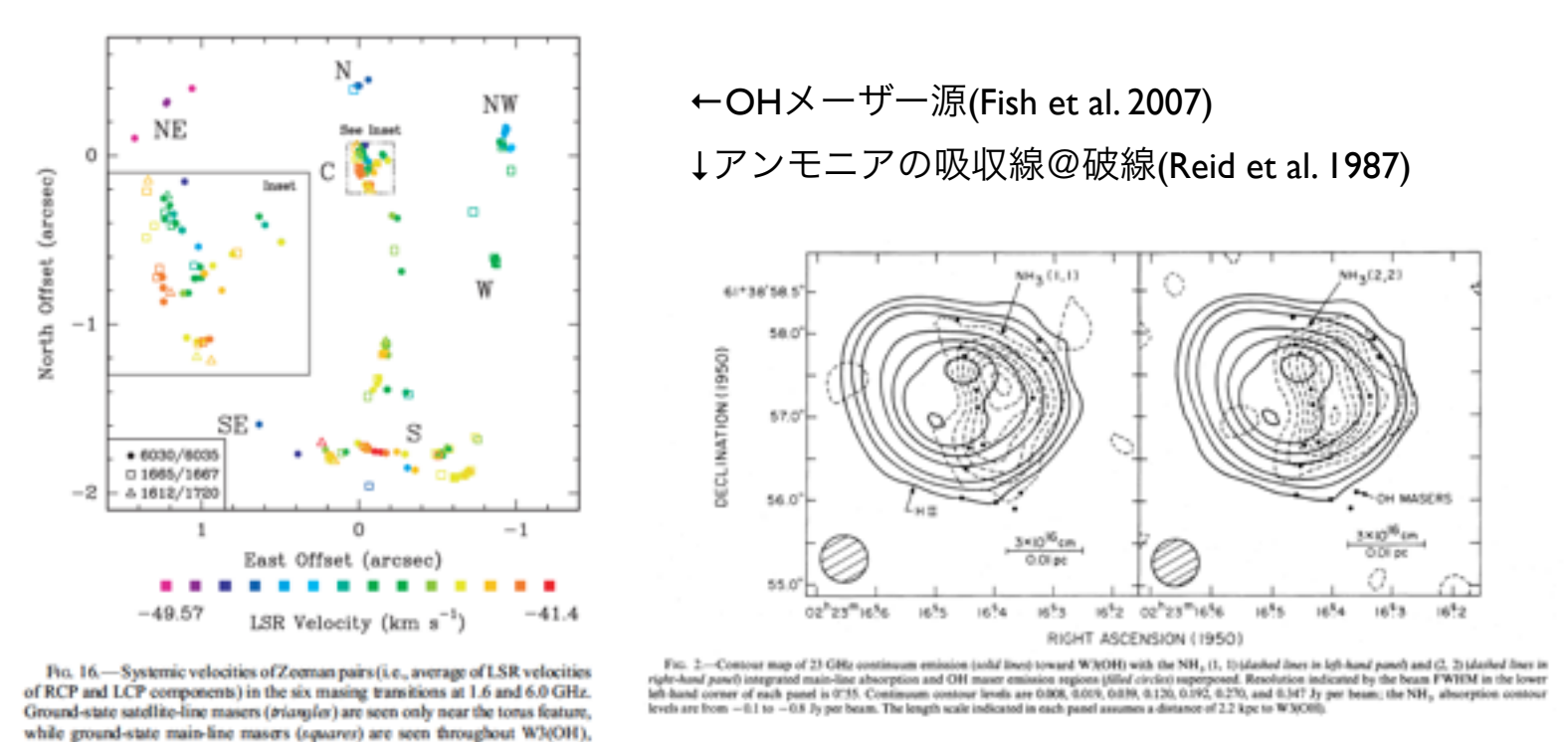
We present the results of multi-epoch VLBI observations for 6.7 GHz methanol maser toward UCHII region of W3(OH) with the Japanese VLBI Network (JVN). Based on phase-referencing VLBI astrometry, we derived the trigonometric annual parallax to be 0.539 ± 0.074 mas, corresponding to a distance of $1.86 \pm 0.29 / -0.23$ kpc. This is the first detection of parallax for 6.7 GHz methanol maser with JVN, and demonstrates that JVN/VERA is capable of conducting VLBI astrometry for 6.7 GHz methanol maser sources within a few kpc from the Sun. Based on in-beam mapping of W3(OH) methanol maser, we also measured the internal proper motions of 6.7 GHz methanol maser of W3(OH) for the first time. The internal proper motions basically show north-south expansion with a velocity of a few km/s, being similar to OH masers. The global distribution and internal proper motions of 6.7 GHz methanol masers suggest a rotating and expanding torus structure surrounding UC HII region.

References

Bloemhof, E. E., Reid, M. J., & Moran, J. M. 1992, ApJ, 397, 500
Campbell, M. F., Lester, D. F., Harvey, P. M., & Joy, M. 1989, ApJ, 345, 298
Dickel, H. R., & Goss, W. M. 1987, A&A, 185, 271
Dreher, J. W., & Welch, W. M. 1981, ApJ, 245, 857
Fish, V. L., Sjouwerman, L. O. 2007, ApJ, 668, 331
Guilloteau, S., Stier, M. T., & Downes, D. 1983, A&A, 126, 10
Hachisuka, K., Brunthaler, A., Menten, K. M., Reid, M. J., Imai, H., Hagiwara, Y., Miyoshi, M., Horiuchi, S., & Sasao, T. 2006, ApJ, 645, 337
Harvey-Smith, L., & Cohen, R. J. 2005, MNRAS, 356, 637
Kawamura, J. H., & Masson, C. R. 1998, ApJ, 509, 270
Reid, M. J., Myers, P. C., & Bieging, J. H. 1987, ApJ, 312, 830
Rygl, K. L. J., Brunthaler, A., Reid, M. J., Menten, K. M., van Langevelde, H. J., & Xu, Y. 2010, A&A, 511, A2
Sugiyama, K., Fujisawa, K., Doi, A., Honma, M., Isono, Y., Kobayashi, H., Mochizuki, N., & Murata, Y. 2008a, PASJ, 60, 1001
Sugiyama, K., Fujisawa, K., Doi, A., Honma, M., Kobayashi, H., Bushimata, T., Mochizuki, N., & Murata, Y. 2008b, PASJ, 60, 23
Xu, Y., Reid, M. J., Zheng, X., & Menten, K. M. 2006, Science, 311, 54
磯野靖子, 修士論文「6.7GHzメタノールレーザーを用いた位置天文観測の基礎研究」(2009)

Introduction

Massive Star Forming Region W3(OH)
今回ターゲットとしたW3(OH)は最も有名なUltra Compact HII 領域の一つで、その名の通りOHレーザー源の観測が盛んに行われている領域である。また、HII領域はO型星によって電離されていることが知られており(Dreher+1981)、その膨張の様子も捉えられている(Kawamura+1998)。しかし、分子ガスが作るその星周構造については降着エンベロープ・回転円盤・トーラス・膨張もしくはcometary bow-shockなど様々な描像が提唱されている。これを十分理解するにはレーザー源の内部固有運動の情報が必要である。しかし、各種レーザー源のスペクトルの視線速度から予測される5km/s程度の運動とそれに対するレーザー源観測の空間分解能の兼ね合いで未だに内部固有運動の情報は十分に得られていない。



Annual Parallax of W3(OH)
W3(OH)は数千Jyクラスの最も強い6.7GHz帯メタノールレーザー源のひとつであり、すでにVLBAによって数%の精度で年周視差計測が行われている。
・水メタノールレーザー源の観測：
 0.489 ± 0.017 mas (2.04 ± 0.07 kpc) (Hachisuka et al. 2006)
・12GHzメタノールレーザー源の観測：
 0.512 ± 0.010 mas (1.95 ± 0.04 kpc) (Xu et al. 2006)

したがって、十分なレーザー強度・年周視差計測の比較対象と2拍子そろったW3(OH)を観測することで、JVN/VERAによる6.7GHzレーザー源の年周視差計測の妥当性を評価することが可能である。

Observation & Data Reduction

1 ビームスイッチング観測
W3(OH)とリファレンス天体J0244+6228を2分、1.8分ずつスキャンし、5分サイクルのスイッチング観測をJVN/VERAを用いて6観測を行った。1-3観測目はDIR1000系記録(4MHz, 1024分光点)で、4-6観測目はDIR2000系記録(8MHz, 512分光点)で行った。

W3(OH) (J2000, Xu+2006)
RA :02h27m03.81920s, Dec:+61d52'25".2300
J0244+6228(J2000, Ma+1998) Flux~1Jy/beam
RA :02h44m57.69667s, Dec:+62d28'06".5155

データ解析は基本的にAIPSを用いた一般的な手法で位相補償解析とイメージング解析を行った。ただし、1-2観測目は偏波の振幅・位相補正を行った。また、振幅補正はW3(OH)のスペクトルを用いたテンプレート法で行った。Table 1. Summary of the JVN observations.

Epoch	Date	Duration	Telescope*	Synthesized beam†
	YYYY/DOY	[UT]		(mas, deg)
1 [‡]	2008/131	22:00-29:00	M, R ¹ , S, O ¹ , Y, U	5.7x3.4, -36.7
2 [‡]	2008/301	13:00-18:00	M, R ¹ , S, O ¹ , Y, U	6.0x3.3, -40.1
3 [‡]	2009/143	23:05-31:00	M, R, S, O, Y	4.6x3.0, -57.2
4	2009/338	08:15-16:23	M, R, S, O	4.5x2.8, -24.6
5	2010/046	03:30-11:38	M, R, S, O	4.1x2.8, -37.0
6	2010/102	23:44-31:53	M, R, S, O	4.0x2.9, -36.8

* telescope code: M: VERA telescope at Mizusawa station, R: Iriki (VERA), S: Ishigaki (VERA), O: Ogasawara (VERA), Y: Yamaguchi, U: Usuda.
† Synthesized beam size and position angle.
‡ The received signal was linear polarization.
§ The velocity channel resolution of the visibility data is 3.91kHz in these epochs, and 15.63 kHz in other epochs.

Results1

Maser Position and Internal Proper Motion
全体的に、南にred-shift成分、北にblue-shift成分が見られた。ただし、Cでラベル付けされたメーザースポットの混んだ領域では複雑な速度分布が見られている。また、チャンドラX線衛星で捉えられたW3(OH)のO型だと言われている大質量星を南北に横断するように6.7GHzメタノールレーザー源が分布している。内部固有運動は南のメーザークラスタ(E,F,G)が北のリファレンス天体Cに対して有意に速さかっていることがわかった。

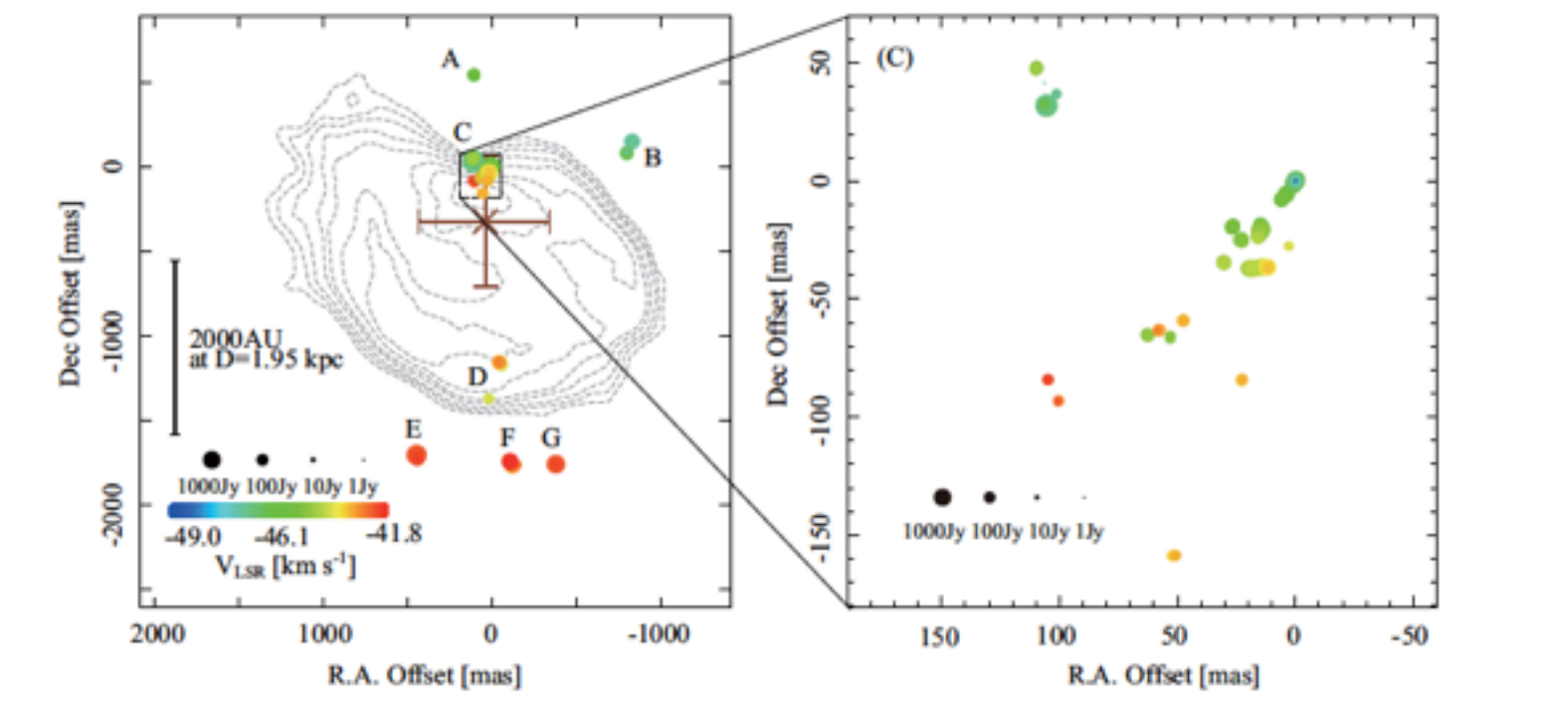


Fig. 1. Left: The distribution of 6.7 GHz methanol maser spots. The size of the plotted circles are proportional to the integrated flux intensity of the spots which was observed on DOY 301 in 2008 (epoch 2), on the logarithmic scale. The error in the positions of the features are smaller than the circle size. Color codes represent the LSR velocity. The dashed line is 15 GHz radio continuum map of the UCHII region (Bloemhof et al. 1992). The position of ionizing star is shown by brown cross with error bar (Fitzelson & Townsley 2008). The origin of this map is $\alpha_{2000.0} = 02^{\text{h}}27^{\text{m}}03^{\text{s}}.81920$, $\delta_{2000.0} = 61^{\circ}52'25''.2300$. Right: Zoom-in view of left panel around the map origin.

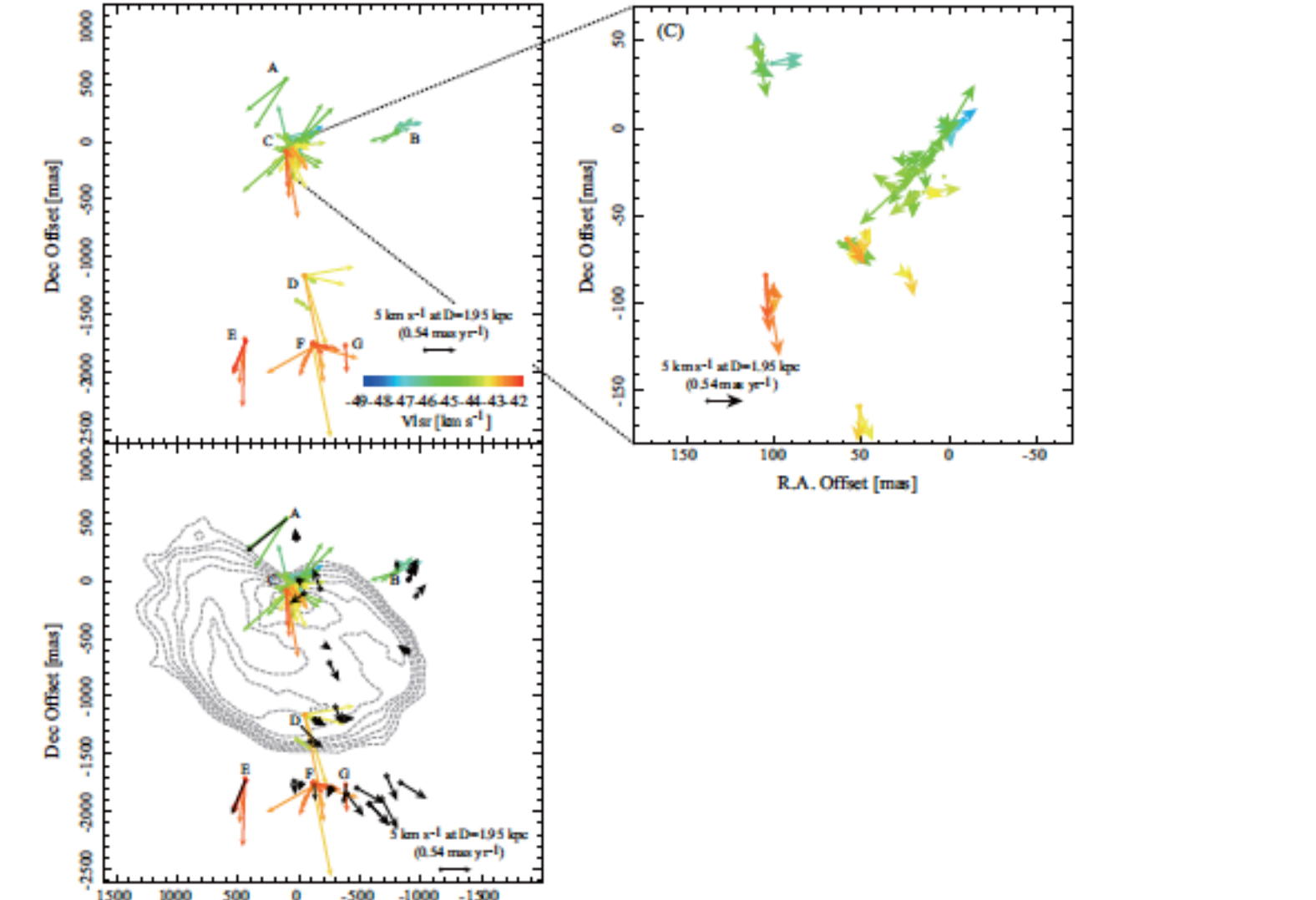


Fig. 2. Left: The internal proper motion for 6.7 GHz methanol maser spots toward W3(OH). Color codes represent the LSR velocity. The colored vectors show directions and amplitudes of relative proper motions on the sky plane to the reference spot with -45.4 km s^{-1} LSR velocity. The scale of vector is presented by a black colored thin vector. Right: Zoom-in view of left panel around origin. Bottom-left: The colored vectors are same to top-left one. The black thick vectors show averaged relative proper motion at each A-G cluster to the C cluster around origin. The proper motion vectors of 1665 MHz OH maser and the contour map of 15 GHz radio continuum emission of the UCHII region taken from figure 7 of Bloemhof et al. (1992) are also shown as outlined black vectors and broken lines, respectively.

Discussion1

予測される星周構造

今回の6.7GHzメタノールレーザー源の観測結果から得られた空間分布は各種OHレーザー源やアンモニアの吸収線と類似するものであった。このことから、下図のような膨張トーラスによって運動する6.7GHzメタノールレーザー源の描像が考えられるかもしれない。より確信をもった描像を得るにはさらに長期間に渡る観測を行い、各スポットの固有運動の測定精度を上げる必要がある。また、内部固有運動計測によってガスの構造を知るには、なるべく多くのスポットをひろう事が効果的なため、山口・白田の大口径アンテナの参加が重要。

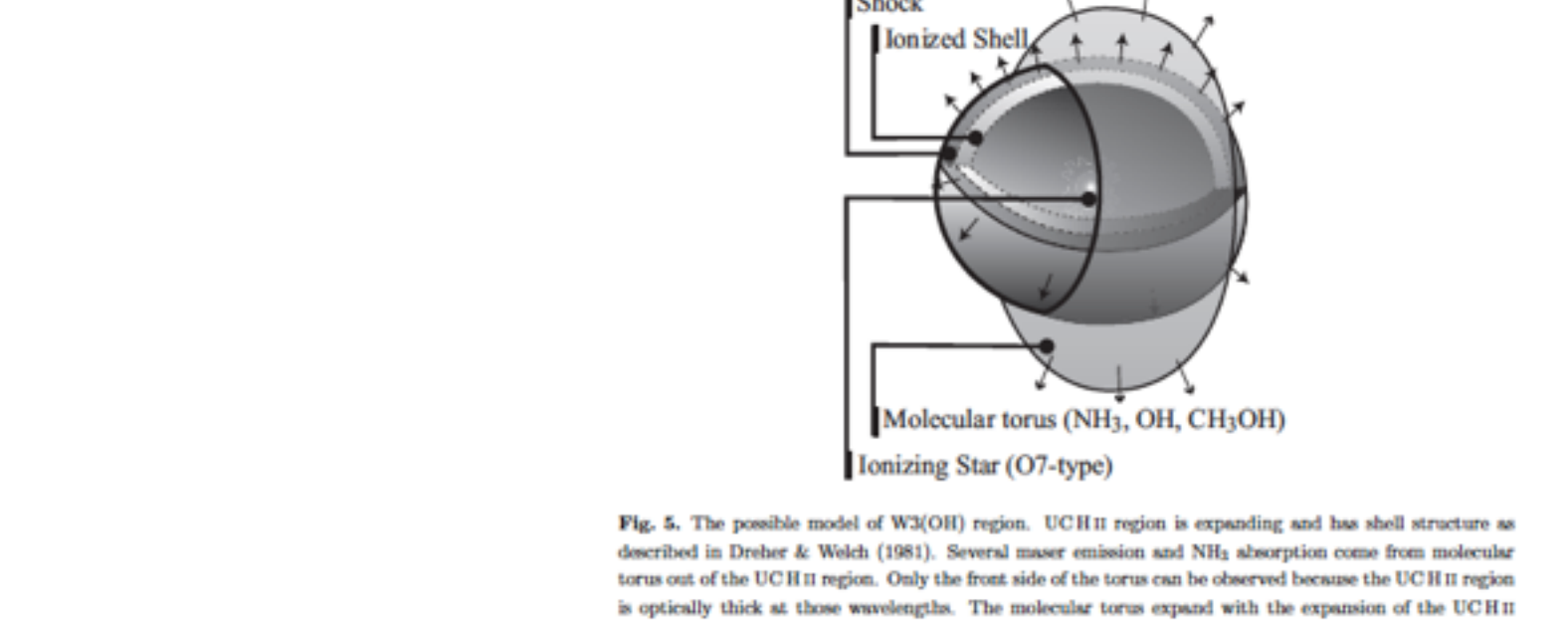


Fig. 3. The possible model of W3(OH) region. ICHII region is expanding and has shell structure as described in Dreher & Welch (1981). Brown color arrows and OH absorption lines from molecular torus out of the UCHII region. Only the front side of the torus can be observed from the UCHII region in optically thin at these wavelengths. The indicated stars appear with the position of the UCHII region.

Results2

Annual Parallax
今回の観測から $1.86(+0.29/-0.23)$ kpcという結果が得られた。年周視差フィッティング時の重み付けは χ^2 乗が1になるような値を均等に与えている(Table 3の $\sigma\alpha$ と $\sigma\delta$)。エポック3のRA方向のエポック3のデータには何か系統的なオフセットがのっている。

ID	$\Delta\alpha\cos\delta^*$ [mas]	$\Delta\delta^*$ [mas]	V_{LSR} [km s ⁻¹]	Epochs used [†] for fitting	F_{RCA} [Jy beam ⁻¹]	$\mu_{\alpha\cos\delta}$ [mas yr ⁻¹]	μ_{δ} [mas yr ⁻¹]
1	-0.8	-15.9	-43.10	123456	56 - 141	-1.34 ± 0.30	-0.02 ± 0.12
2	7.8	-20.8	-43.80	123456	58 - 117	-0.93 ± 0.30	-0.34 ± 0.12
3	2.2	-2.7	-44.50	12**456	54 - 196	-1.48 ± 0.31	0.13 ± 0.13
4a [‡]	-12.2	17.7	-45.91	**456	123 - 181	-1.88 ± 2.04	0.47 ± 0.87
4b [‡]	-12.2	17.6	-45.30	123456	116 - 384	-1.28 ± 0.30	0.07 ± 0.12

* The relative coordinates to the phase center at epoch 1.
† Spots in a same maser feature.
‡ The signal-to-noise ratio of the spot is lower than 10, is marked by ** in this column.

Parallax π [mas]	0.539 ± 0.074
Distance D [kpc]	$1.86^{+0.29}_{-0.23}$
σ_{α} [mas]	0.50
σ_{δ} [mas]	0.20

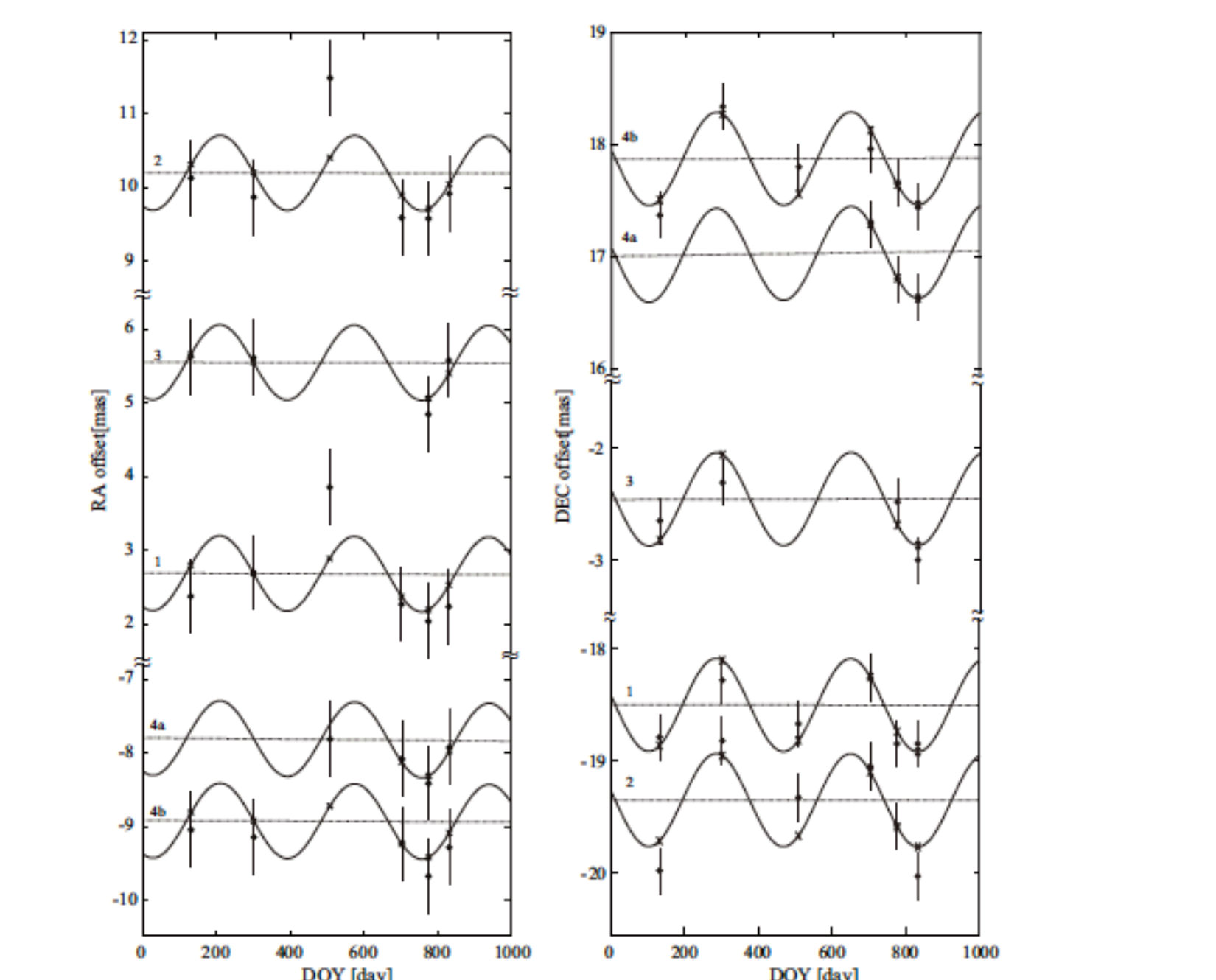


Fig. 4. Results of positional offsets variation for the maser spots of $v_{\text{LSR}} = -43.10, -43.80, -44.50, -45.91, -45.30 \text{ km s}^{-1}$ after subtracting the best-fit proper motions. Left: The movement in right ascension as a function of time. 1st day is corresponding to New Year's day of 2008. Black circles represent the position offset of the spots with vertical bars as fitting weight. Black x-marks represent the ideal position offset of the spots on the least-square fitting. Solid lines and broken lines represent the modulation in the position due to the annual parallax, and the results of subtracting the best-fit absolute proper motion for the spots, respectively. Right: The same as left in declination. For details to table 2 and 3.

Discussion2

年周視差の測定精度比較

今回得られた結果と過去の観測結果とを比較したところ、データ取得の手法など直接比較できない部分もあるが、ビームサイズの違いが年周視差の測定精度の違いに大きく寄与していることが示唆される。

比較対象	今回の結果	Hachisuka+06	Xu+06
最大基線長	2300km	8611km	8611km
観測周波数	6.7GHz	22GHz	12GHz
予測されるビームサイズ比	1	1/12	1/6.7
フィットに用いたデータ	25点 スポット5個x5観測	63点 スポット9個x7観測	135点 スポット9個x15観測 リファレンス天体
実際の見積もり誤差(比)	13.7% (9.8)	3.5% (2.5)	1.4% (1)

Conclusion & Future Works

大学連携VLBIで数kpcの距離にある天体の年周視差計測が可能
今回の観測天体W3(OH)とそのリファレンス天体J0244+6228は強度・観測時の仰角ともに非常に観測しやすい天体ではあるが、本結果より大学連携アレイで数kpcの距離にある天体の年周視差計測が可能であることがわかった。

W3(OH)の6.7GHzメタノールレーザー源の内部固有運動・分布はOHレーザー源に近い傾向
今回の観測結果からは1665MHz OHレーザー源の内部固有運動・空間速度分布と良く似た傾向が得られた。

JVN/VERAを用いた6.7GHzメタノールレーザー源のアstrometri計画
6.7GHzメタノールレーザー源は銀河系の中でも特に銀河系中心方向(銀経約±30度以内)に数多く発見されている。そこで、銀河系力学構造の研究の一環として、3kpcアームもしくは molecular ringと呼ばれるような領域の天体を主なターゲットに、現在10天体のアstrometri観測を行っている。