



接点と太陽円のこれらの関係を使うと、天体の距離と固有運動から太陽系の銀河回転を求めることができます\*1。そこで、天体の距離と固有運動を高精度で測定できるVERA (VLBI Exploration of Radio Astrometry) を使って、接点と太陽円に位置する天体を観測しようと考えました。

### 3. VERAによる距離と固有運動の測定結果

筆者らの研究チームはVERAを用いて、2006年より銀河系内の星形成領域 IRAS 18553+0414, G48.61+0.02, ON1, IRAS 20143+3634, ON2N, IRAS 20126+4104に付随する水メーザー源6天体を観測しました<sup>1)-6)</sup>。これらは接点あるいは太陽円に位置すると予測される天体です。この予測は視線速度の情報に基づいています。例えば、太陽円に位置する天体の視線速度は、さきほど述べた特徴を考えると $0 \text{ km s}^{-1}$ になります。したがって、既存の天体リストから視線速度が $0 \text{ km s}^{-1}$ の天体を探し、観測天体を選定すればよいわけです。もちろん、選定した天体が実際に接点・太陽円に位置するかは、VERAの距離測定によって確認する必要があります。

それでは、いよいよVERAによる距離と固有運動の測定結果について紹介しましょう。VERAでは、遠方の銀河系外のクエーサーを位置基準として、ターゲットとなる銀河系内の天体の位置の変化を1年から2年かけて測定します。図2はVERAで観測された天体ON1の位置の変化です。銀河系内の天体の場合、位置の変化は年周視差による楕円運動と固有運動による直線運動であり、一般に螺旋運動となります。実際の観測結果を見ると、きれいならせん運動を示しています。これを、時間に対する直線運動からのずれの変化として表すと、1年周期で変化していることがわかり

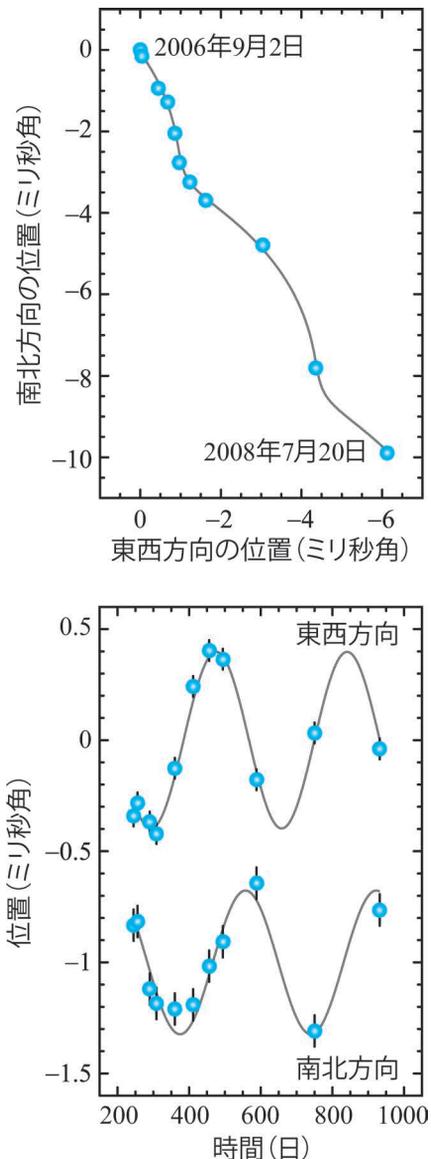


図2 ON1の年周視差・固有運動測定の結果。青色の丸は観測点、灰色の実線は観測点を最もよく再現する年周視差と直線運動の曲線を示す。これから年周視差 $0.404$ ミリ秒角(距離 $8,050$ 光年)が得られた。

ます。ここから、この動きが年周視差であると確かめられます。ON1の場合、変動の振幅から年

\*1 三角関数を使うと、接点の場合は $R_0 = D / \cos l$ ,  $\Theta_0 = v_l / \cos l$ , 太陽円の場合は $R_0 = D / (2 \cos l)$ ,  $\Theta_0 = v_l / (2 \cos l)$ と表せる。銀経 $l$ は既知の値なので、距離 $D$ と固有運動 $v_l$ を測定すれば、銀河中心までの距離 $R_0$ と回転速度 $\Theta_0$ が得られる。

表1 測定された6天体の位置と運動.

天体名	銀経 (度)	銀緯 (度)	距離 (kpc)	速度 (km s <sup>-1</sup> )		
				銀経方向	銀緯方向	視線方向
IRAS 18553+0414	37.50	0.53	11.8 <sup>+2.5</sup> <sub>-1.8</sub>	-341.7±11.7	-8.6±9.7	10±1
G48.61+0.02	48.61	0.02	5.03±0.19	-139.7±2.4	6.7±1.5	19±1
ON1	69.54	-0.98	2.47±0.11	-70.2±2.6	8.1±2.3	12±1
IRAS 20143+3634	74.56	0.85	2.73±0.27	-76.0±5.1	4.0±6.3	-1±1
ON2N	75.78	0.34	3.83±0.13	-104.6±2.9	1.1±2.6	0±1
IRAS 20126+4104	78.12	3.64	1.81 <sup>+0.22</sup> <sub>-0.19</sub>	-61.1±3.0	18.1±3.0	-4±1

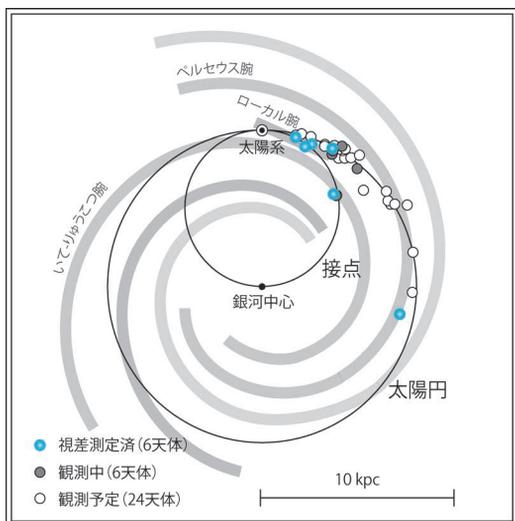


図3 VERAにより測定された天体の銀河系内での位置. 青色の丸は距離測定済の天体, 灰色の丸は現在観測中の天体, 白色の丸は今後観測予定の天体. 灰色, 白色の距離は視線速度から推定される運動学的距離に基づく. それぞれ, 黒色の実線で示される接点と太陽円上に位置することがわかる. 背景の灰色の線は予測されている銀河系の渦状腕構造<sup>12)</sup>.

周視差が0.404 ミリ秒角<sup>\*2</sup>, 距離はその逆数なので, 2.47 kpc<sup>\*3</sup> (8,050 光年) と測定されました.

ON1のほかに5天体について同様の観測を実施し, 合計6天体の年周視差と固有運動の測定に成功しました. 表1に測定された6天体の年周視差と固有運動をまとめます. 太陽系からの距離が2から5 kpcの範囲では10%以下, 10 kpcを超え

る IRAS 18553+0414でも約20%という高い精度で, 距離を測定することに成功しました (IRAS 18553+0414はさらなる高精度化を目指し現在も観測中です).

太陽円上の天体の場合, 固有運動は太陽系と天体の銀河回転の和であるため, 300 km s<sup>-1</sup>を超える大きな値を示すIRAS 18553+0414のような天体もあります. これで, 天体の三次元の位置と運動の情報が揃いました.

天体の銀河系内の位置を調べると, 図3のように接点あるいは太陽円上に位置することがわかります. また, 精度は不十分ながら10 kpcを超える天体の距離測定により, 銀河系の広範囲のデータを集めることができました. 次節ではこれらのデータを用いて太陽系の銀河回転について調べた結果を紹介します.

#### 4. 太陽系の銀河回転角速度

解析の結果, 太陽円と接点に位置する天体の位置天文観測結果を用いて解析すると, 太陽系の銀河回転の角速度  $\Omega_0$  は, さまざまな誤差要因の影響をあまり受けずに正確に求められることがわかりました. この角速度は太陽系と銀河中心の距離  $R_0$  と太陽系の銀河回転速度  $\Theta_0$  の比  $\Theta_0/R_0$  です. 6天体のデータを用いて得られた値 (表2) は27.3から29.9 km s<sup>-1</sup> kpc<sup>-1</sup>の範囲でほぼ一致し, その平均値は28.3±0.8 km s<sup>-1</sup> kpc<sup>-1</sup>となりました.

\*2 角度の単位で1/1,000秒角. 1/3,600,000度というわずかな量.

\*3 距離の単位で「キロパーセク」と読む. 1 kpcは約3,260光年.

この値は、近年の他の解析手段による値<sup>7)-9)</sup>と誤差範囲で一致する一方、1985年より国際天文学連合 (IAU) が推奨する従来考えられていた値  $25.9 \text{ km s}^{-1} \text{ kpc}^{-1}$  (距離  $R_0=8.5 \text{ kpc}$  と速度  $\Theta_0=220 \text{ km s}^{-1}$  の比<sup>10)</sup>) より約10%大きいことがわかりました。この回転速度が10%大きいという結果は、今回の特集号の別記事で紹介されている結果<sup>11)</sup> と一致します。角速度  $\Omega_0=28.3 \pm 0.8 \text{ km s}^{-1} \text{ kpc}^{-1}$  という値は、1年間に  $(1.66 \pm 0.05)$

$\times 10^{-6}$ 度の割合で太陽系が銀河中心の周りを回転することに対応します。つまり太陽系は銀河系内をおよそ2億2千万年で1周するというわけです。

銀河系の運動を理解するうえで、太陽系の銀河回転角速度を高精度で測定することは、最も重要なことの一つです。これは、私たちが太陽系から観測しており、観測される銀河系内のすべての天体の運動には、太陽系の銀河回転が含まれているためです。筆者らの測定方法はたくさんの天体を観測することでさらに信頼性を増すので、現在も観測を継続中です。図3に示すように、6天体以外にも現在観測中の天体や今後観測予定の天体があり、これらも合わせると、さらに正確に結果がわかると期待されます。

さらに図3をよく見ると、いくつかの天体がローカル腕、いて・りゅうこつ腕、ペルセウス腕と呼ばれる銀河系の渦状腕に沿って分布することがわかります。渦状腕は若くて青い星々が輝き、

表2 各天体のデータから得られた太陽系の銀河回転角速度  $\Omega_0$ .

天体名	$\Omega_0 \text{ (km s}^{-1} \text{ kpc}^{-1}\text{)}$
IRAS 18553+0414	$28.0 \pm 1.7$
G48.61+0.02	$27.8 \pm 0.5$
ON1	$28.7 \pm 1.3$
IRAS 20143+3634	$27.9 \pm 1.9$
ON2N	$27.3 \pm 0.8$
IRAS 20126+4104	$29.9 \pm 1.7$
平均	$28.3 \pm 0.8$

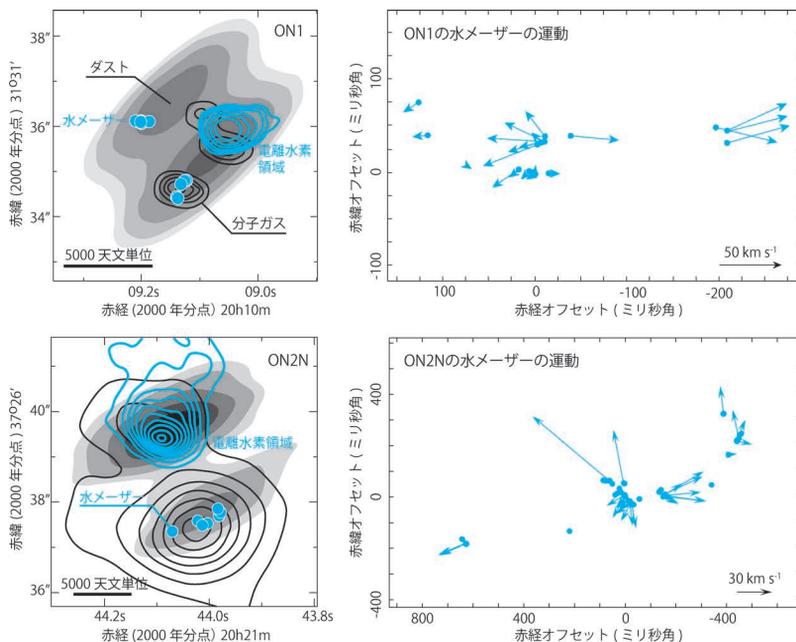


図4 天体ON1とON2Nの水メーザーの分布と運動。左側の二つの図は水メーザーと他波長の観測結果との比較。青色の丸は水メーザー、青色の等高線は電離水素領域、黒色の等高線は分子ガス、灰色の濃淡はダストの分布を示す。右側の二つの図は固有運動測定により得られた水メーザーのアウトフローの運動 (青矢印)。

銀河で最も目立つたいへん興味深い構造です。筆者らが観測する天体は大質量の星々がたくさん生まれる領域で、この渦状腕をよくトレースすると考えられています。今後観測を進めれば、このような渦状腕の構造が浮かび上がってくることも期待されます。

## 5. 星形成領域の研究

VERA では、1 ミリ秒角の超高分解能観測により、星形成領域の原始星近傍のミリ秒角から秒角スケールの細かい構造を調べることができます。図4は星形成領域 ON1, ON2N の水メーザーの分布と運動です<sup>3)-13)</sup>。

水メーザーの分布と連続波や分子輝線の観測結果を比較すると、水メーザーを放射する励起星の特徴がわかってきます。これら2天体の観測結果の比較では、水メーザーの位置にダストや分子ガスがある一方、電離水素領域が付随しないことがわかります。このことから水メーザーの励起星は、電離水素領域を形成する前のダストや分子ガスに埋もれた若い段階の原始星であることが示唆されます。

また固有運動測定からは、星形成領域内での水メーザーの内部運動を調べることが可能です。ON1, ON2N の場合、それぞれ約  $50 \text{ km s}^{-1}$ ,  $30 \text{ km s}^{-1}$  で中心星から膨張するアウトフローの存在が明らかになりました。実はこの水メーザーの内部運動を把握することは、前述の銀河回転を詳細に調べるために非常に重要です。銀河回転を調べるには、まず星形成領域の系統運動を得る必要があります。多数の水メーザーを検出しその重心の運動を求めることで、初めて銀河回転を精密に調べることが可能となります。

## 謝 辞

本稿の内容は、日本天文学会欧文報告に掲載された論文<sup>3), 5)</sup>に基づいています。詳しくはそちらをご覧ください。本研究は、永山 匠 (国立天

文台)、面高俊宏 (鹿児島大学)、半田利弘 (鹿児島大学)、砂田和良 (国立天文台) を中心に、VERA プロジェクトにかかわるスタッフと学生の協力で進めています。鹿児島大学では学生が精力的に観測データを解析し、卒業・修士・博士論文として多数まとめています。

## 参考文献

- 1) 宮崎竜之介, 他, 2013, 日本天文学会春季年会 R03c
- 2) Nagayama T., Omodaka T., Handa T., et al., 2011, PASJ 63, 719
- 3) Nagayama T., Omodaka T., Nakagawa A., et al., 2011, PASJ 63, 23
- 4) 半田利弘, 他, 2012, 日本天文学会秋季年会 R02a
- 5) Ando K., Nagayama T., Omodaka T., et al., 2011, PASJ 63, 45
- 6) 永山 匠, 他, 2013, 日本天文学会春季年会 R02a
- 7) Honma M., Nagayama T., Ando K., et al., 2013, PASJ 65, in press
- 8) Reid M. J., Brunthaler A., 2004, ApJ 616, 872
- 9) Reid M. J., Menten K. M., Zheng X. W., et al., 2009, ApJ 700, 137
- 10) Kerr F. J., Lynden-Bell D., 1986, MNRAS 221, 1023
- 11) 本間希樹, 2013, 天文月報 106, 310
- 12) Russeil D., 2003, A&A 397, 133
- 13) Nagayama T., Nakagawa A., Imai H., Omodaka T., Sofue Y., 2008, PASJ 60, 183

## Astrometry of Solar Circle and Tangent Point Sources

Takumi NAGAYAMA

Mizusawa VLBI Observatory, National Astronomical Observatory of Japan, 2-21-1 Osawa, Mitaka, Tokyo 181-8588, Japan

Abstract: We performed the astrometry of Galactic star-forming regions located on the Solar circle and at the tangent points with VERA. We measured the trigonometric parallaxes and proper motions of 6 sources. By using their astrometric results, the angular velocity of Galactic rotation at the Sun can be determined to be  $\Omega_0 = 28.3 \pm 0.8 \text{ km s}^{-1} \text{ kpc}^{-1}$ . This value is larger than the IAU recommended value of  $(220 \text{ km s}^{-1}/8.5 \text{ kpc}) = 25.9 \text{ km s}^{-1} \text{ kpc}^{-1}$ .