

6.7 GHz メタノールメーザー源のアストロメトリ観測で探る銀河系バー構造

松本 尚子 (国立天文台水沢VLBI観測所, JSPS PD), 本間希樹 (国立天文台水沢VLBI観測所, 総研大),
他VERAプロジェクトメンバー

1. Abstract

銀河系の棒状構造周辺領域に着目した 6.7 GHz 帯メタノールメーザー源の絶対固有運動計測を 2009年末から継続しておこなってきた。今回はその最新結果を報告する。観測対象天体は 6.7 GHz 帯メタノールメーザー源カタログ Pestalozzi et al. (2005) のうち、銀経 $|l| < 40^\circ$ かつカタログに記載されている銀河系中心からの距離 5 kpc未満の天体の中から、VERA で位相補償観測可能な10天体を抽出した。観測は 2009 年 11 月より VERA で約1年半弱の間に数ヶ月に1回の頻度で行った。この観測から得られた、銀経 l ・銀経方向の絶対固有運動 $\mu_l \cos b$ ・視線速度 V_{lsr} の3つの情報について、過去の文献データも合わせて銀河系の運動学的な検証を行った。その結果、回転速度 220 km/s を仮定した Flat Rotation と比較すると、視線速度に対する銀経方向の固有運動が 1 mas/yr 程度遅い傾向が捉えられた。そして、このような固有運動の傾向を他のモデルで再現できるか考察を行った。その結果、弱いバーポテンシャルをもつFlatな回転曲線を仮定した非円運動モデルによって、得られた遅い固有運動傾向とHI の PV 図上の分布の両方を再現可能であることが示唆された。また、HIやCOの観測から得られた回転曲線を用いた円運動モデルも同様に再現可能であることがわかった。本研究発展のために、今後JVNやVERA+KVN、SKA等によるサンプル増が期待される。

2. Introduction

1960年以降、数多くの観測事実と理論的解釈から、銀河系にはバー構造があると支持されてきた。例を挙げると、近赤外線の光度分布の非対称性 (Binney et al. 1997)、CO/HIガスの l - v 図上の複雑な構造 (Fux 1999; Bissanz et al. 2003; Baba et al. 2010)、標準光源として知られるレッドクランプ星の直線状の並び (Stanek et al. 1997, Nishiyama et al. 2005)、SiOメーザー源の l - v 図中のバーの回転運動傾向 (Izumiura, Deguchi et al. 1995)などがある。ただし、これまでの銀河系の棒状構造に関する研究の中で、3次元かつ複数サンプルのデータを用いて分子ガスの運動からバーの影響を考察した例はない。したがって、VLBI観測によるガスに付随するメーザー源の絶対固有運動計測により、位置・視線速度・固有運動の3次元データで考察することは有効なアプローチの一つと言える。

このVLBI観測の対象となる天体の有力候補として、近年、大規模なサーベイにより1000天体以上発見されてきた 6.7 GHz メタノールメーザー源がある (e.g., Pestalozzi et al. 2005, 2007; Pandian et al. 2009, 2011; Caswell 2009; Wu et al. 2011)。これまで観測されてきた 22 GHz 帯水メーザー源に比べ、約3.3倍周波数が低いため、空間分解能の点からは、6.7 GHz メタノールメーザー源のアストロメトリの精度は劣るものの、これらのメタノールメーザー源は、水メーザー源に次いで強く、内部固有運動は10km/s程度かそれ以下と小さく、寿命は数年から数十年で比較的長寿命という特徴を持つ。これらの点において、銀河系内の構造をVLBI観測によって探る対象として最適な天体の一つと言える。

すでに、国内のVLBI観測網 (大学VLBI連携) で、G9.62+0.19に次いで最も明るいメタノールメーザー源 W3(OH)の年周視差及び絶対固有運動計測に成功している (2008年度 山口大学 磯野氏 修士学位論文; 2010年度 総合研究大学院大学 松本 博士学位論文; Matsumoto et al. 2011)。その結果は、距離 1.67 (+0.21/-0.17) kpc、赤経方向の固有運動 -1.16 ± 0.24 mas/yr、赤緯方向の固有運動 -0.11 ± 0.30 mas/yr である (Matsumoto et al. 2011)。

3. Selection and observations

Pestalozzi et al. (2005)から棒状構造周辺の天体を選出するため、下記の条件で選出した結果、10天体になった (表 1)。

- ・ 銀経 $|l| < 40^\circ$
- ・ 運動学的距離から求められた銀河中心距離 が 5 kpc 程度以内
- ・ メーザー源、位置参照電波源ともにVERAで検出可能な天体

表1. 観測天体

天体名	位置参照電波源	離隔
G9.98-0.02	J1755-2232	3.64°
G23.01-0.41	J1825-0737	2.63°
G24.78+0.08	J1825-0737	2.66°
G25.65+1.04	J1825-0737	2.71°
G25.70-0.04	J1834-0301	3.51°
G28.14+0.00	J1834-0301	2.45°
G29.95-0.02	J1834-0301	2.98°
G30.76-0.05	J1834-0301	3.52°
G351.41+0.64	J1733-3722	2.74°
G353.4-0.36	J1733-3722	2.95°

これらの天体を2009年11月から2011年5月まで、VERA 4局で各天体それぞれ数ヶ月毎に位相補償観測を行った。観測した輝線は 6.7 GHz 帯メタノールメーザー源(CH₃OH 5₁→6₀A⁺, 6.668518 GHz)で、メーザー源と位置参照電波源を4分サイクルでスイッチング観測し、DIR2000記録(8MHz 512分光点+16MHz 32分光点×14 IF)を行った。

4. Results

10天体中6天体について、3-6点のデータ点で銀経方向の固有運動を3 σ 以上で有意に検出した(表2)。また、G25.65+1.04は年周視差が見えてきており、現段階で年周視差 0.544±0.120 mas (誤差22.1%)。距離に直すと、1.84 (-0.33/+0.52) kpc。

表2. VERAによる観測結果

採用	天体名	視線速度	銀経方向の固有運動 [mas/yr]	銀緯方向の固有運動 [mas/yr]
	G9.98-0.02	42.0 (8)	-7.99 (2点fit)	-5.76 (2点fit)
	G23.01-0.41	75.0 (16)	-4.33 (0.42)	-0.30 (0.18)
◎	G24.78+0.08	113.5 (9)	-6.13 (0.45)	-0.42 (0.08)
◎	G25.65+1.04	41.9 (6)	-2.10 (0.54)	-2.18 (0.05)
	G25.70-0.04	95.3 (12)	-4.81 (2点fit)	3.32 (2点fit)
◎	G28.14+0.00	101.0 (13)	-6.04 (0.25)	-0.12 (0.05)
◎	G29.95-0.02	95.5 (37)	-5.76 (0.59)	-0.11 (0.11)
◎	G30.76-0.05	91.0 (7)	-5.17 (0.79)	0.01 (0.22)
	G351.41+0.64	-10 (5)	---	---
	G353.4-0.36	-20.2 (4)	---	---

※視線速度内の()は速度幅、固有運動内の()は最小二乗フィッティングの誤差。

---は位相補償によるメーザー源の同定未成功。

5. Discussion

表2の◎印のデータに表3のデータを加えた、8天体分の3次元のVLBIデータを用いて、同じ次元で各種モデルとの比較を行った。その結果、Flat rotation モデルは他のモデルに比べVLBIデータを再現するのに適していないことが分かった。一方、CO/HIのTerminal Velocityを用いた円運動モデルと、摂動項を持つ非円運動モデルとの比較において、自由度で割ったカイ二乗値から、やや非円運動モデルの方が有利であるものの、明白な差は見られなかった。ただし、非円運動モデルから、やや大きめではあるが、他の研究と矛盾しない約50°の傾きを持つバーの存在が示唆された。

表3. 今回の選出条件に合致する過去にVLBAでVLBI観測されたデータ

採用	天体名	視線速度	銀経方向の固有運動 [mas/yr]	引用文献
◎	G23.01-0.41	81.5 (15)	-4.45 (0.28)	Bruntheler et al. 2009
◎	G23.44-0.18	97.6 (6)	-4.54 (0.11)	Bruntheler et al. 2009
◎	G23.65-0.127	83.0 (10)	-3.24 (0.04)	Bartkiewicz et al. 2008

5.1. 円運動モデル (μ - v 上のカイ二乗値 : Flat 22.77, HI 7.17, CO 7.20)

$\Theta(R)=220$ km/s の flat rotationモデル とCO/HIガスの terminal velocity から得られた回転速度 $\Theta(R)$ の円運動について比較した。ただし、銀河定数 $R_0=8$ kpc、 $\Theta_0=220$ km/s を仮定。

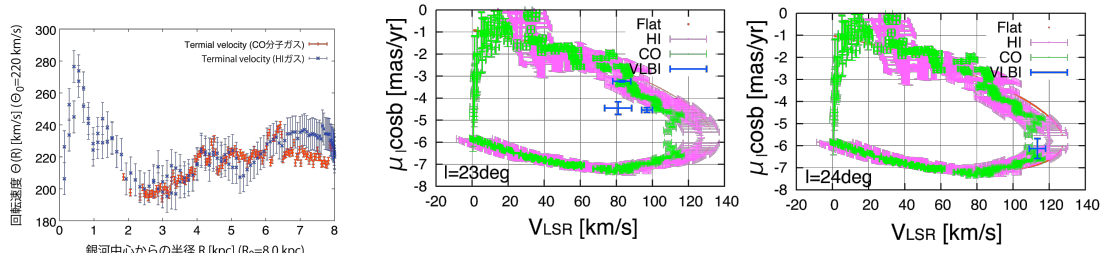


図1 左: CO/HIの回転曲線 $\Theta(R)$

(文献 CO: Clemens 85, HI: Levine+08, McClure-Griffiths+05, Burton&Listz 93, McClure-Griffiths&Dickey 07)

図2-3 中,右: 図1の回転曲線を元にした円運動モデルと、VLBI観測データの各銀経における、銀経方向の固有運動—視線速度図の例

5.2. 非円運動モデル— Damped oval orbit model (μ - v 上のカイ二乗値 : 5.52)

バーポテンシャルを入れた平坦な回転曲線を用いた線形摂動軌道モデル。(Sakamoto, Wada et al. 1999)

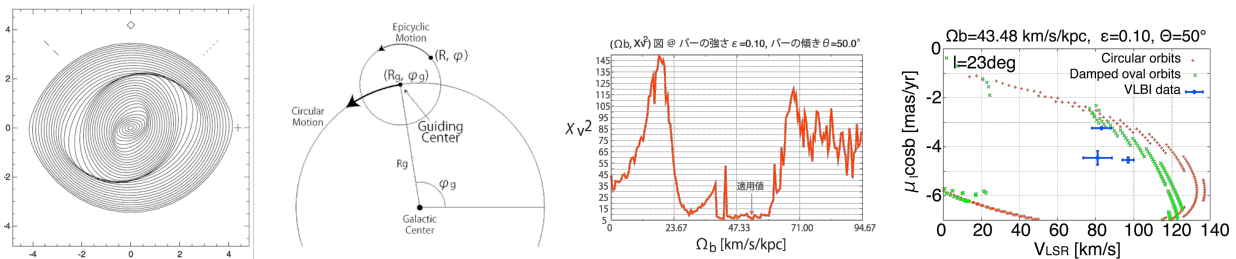


図4 左: Sakamoto, Wada et al. 1999より、モデルの軌道の例。図5 中左: モデル概念図。図6 中右: モデルとVLBIデータ間の自由度で割ったカイ二乗値。図7 右: 平坦な回転曲線の円運動モデル (Circular orbits) とVLBIデータとの最小二乗フィットで得られたパラメータをも散った Damped oval orbitsとVLBIデータの比較の例。

5.3. 距離に関して

今回、距離情報までは得られていないが、特異運動を捉えるのに距離の情報も重要である。

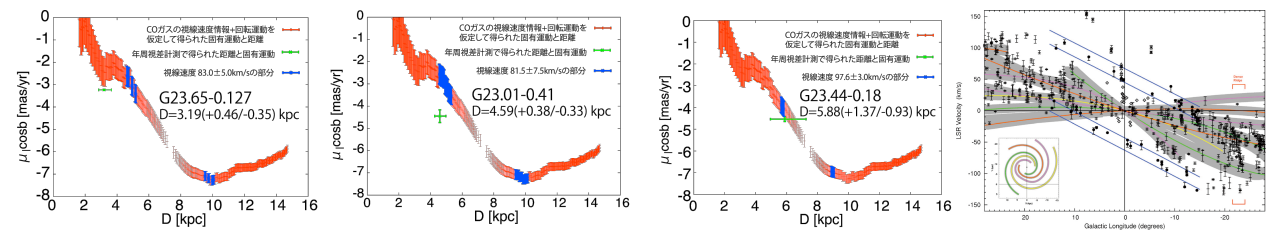


図8-10 左-中右: 過去のVLBI観測ですでに年周視差が検出されている天体について、運動学的距離/そこから予測される固有運動と、実際の距離/固有運動との比較。図11: Green et al. (2011)より、 l - v 図中のメタノールメーザー源の銀河系構造予測。

6. Future work

今回、ガスの固有運動を含む3次元情報から銀河系棒状構造の証拠をつかむ試みを初めて行ったが、ガスがもつランダムな運動も考慮すると、VLBIデータ1点1点と各種モデルとの比較では明確な差がでなかった。したがって、個々のデータ点の精度をあげるよりも、データ点数を増やして本研究を進めて行くことが有効である。現状は天体の銀経上の分布が局所的であり、銀河系棒状構造周辺全体にわたるデータを得ることを目標とし、JVNやVERA+KVN、SKA観測も視野に入れ、天体数を増やしていく。また、Baba et al. (2009) を始めとするN体シミュレーション結果が示唆する、密度波理論によらない構造形成も視野に入れ、従来の円運動を仮定して行われてきた研究の妥当性に関する考察も、現在唯一、VLBI観測によって得られるガスの固有運動の情報からアプローチして行きたい。