

VERA を用いた銀河系外縁部回転曲線プロジェクト

¹坂井 伸行, ^{1,2}本間 稀樹, ³中西 裕之, ³坂之上 裕之, ³倉山 智春, VERA プロジェクトメンバー

¹総合研究大学院大学 (SOKENDAI)

²National Astronomical Observatory of Japan (NOAJ)

³鹿児島大学

Abstract

銀河系の質量分布を VERA を用いて正確に求める為に、2009 年 10 月より観測開始した Outer Rotation Curve project について紹介する。プロジェクトの 1 結果として、IRAS 05168+3634 の年周視差と銀河系費運動の結果を提示する。年周視差は、 0.532 ± 0.053 mas と得られこの天体はペルセウスアームに位置する事が分った。特異運動は、 $(U, V, W) = (8 \pm 4, -13 \pm 9, -11, -7 \pm 10, -12)$ km/s が得られた。特にディスクの特異運動に関しては、銀河中心方向に向かい、かつ銀河回転より遅れると言う、過去の VLBI 観測で得られたペルセウスアーム天体の結果と一致する結果となった。この傾向は密度波理論の予測と良く一致するが、共回転半径(CR)の位置に関しては更なる観測結果の蓄積が必要となる。

1. Introduction

銀河系の質量分布は、銀河系を理解する上で最も基本的な物理量の一つと言えるにも関わらず、未だ明らかでない。我々がその中に住んでいるので、天体までの距離測定が他の系外銀河に比べて難しい事が主要な原因である。図 1 (上) は、質量を見積もる際によく使われる回転曲線を示し、天体の回転速度を距離の関数として表したものである。距離 (x 軸) が大きくなるとエラーが大きい事が明白で、回転曲線をもとに質量分布に焼き直した図 1(下)でも同様にエラーが大きい。

上記の問題を解決する方法は、全ての観測装置の中で最高の空間分解能を達成している超長基線電波干渉計を使う事である (e.g. VERA, VLBA)。日本の VERA グループは、天体の位置と運動を精確に測定するアストロメトリーを銀河系全体で推進し、得られた結果を元に銀河系の構造を明らかにする事を目標に掲げている。実際に、5 kpc を超える年周視差計測にも成功し (e.g. Honma et al. 2007, S269)、今後更に観測結果の蓄積が期待される。今回の講演では、VERA の観測結果の一つを紹介するとともに、過去の VLBI 観測の結果を加えた上で、銀河系の質量分布や非円運動について議論を展開する。

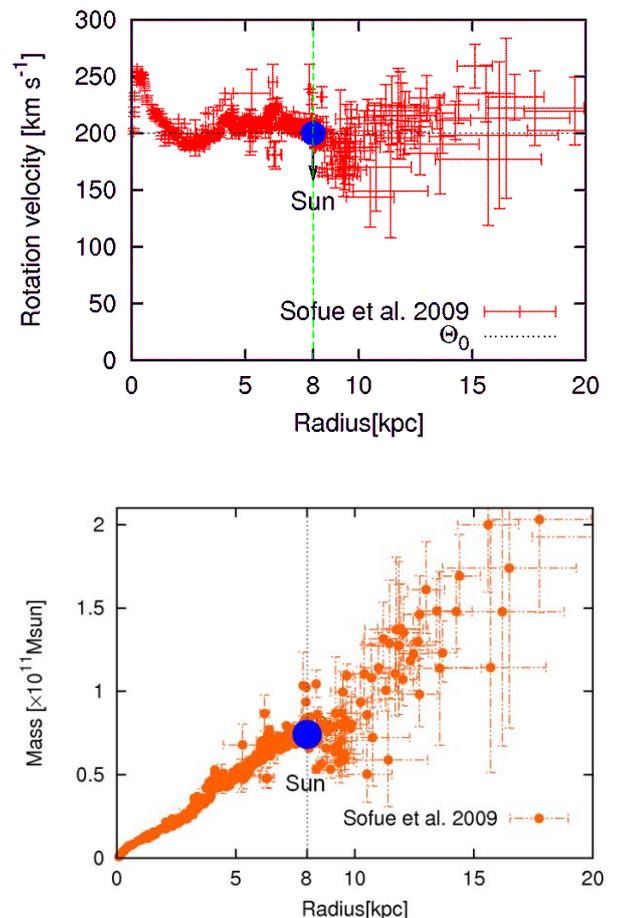


図 1. (上) 銀河系の回転曲線, Sofue et al. 2009. (下) 銀河系の質量分布

2. Observation & Data-reduction

Pre UC HII フェーズ天体である IRAS05168+3634 の距離と固有運動を測定する為に、VERA を用いた位相補償観測を、2009年10月~2011年5月まで11回行った。詳細な観測日は、Day of year (DOY) 276 and 303 in 2009, DOY 25, 80, 142, 234, 297, and 336 in 2010, DOY 28, 101, and 126 in 2012 である。また、位相較正天体として、QSO である J0530+3723 を観測した。目的天体との離角は 2.1° である。更にクロックパラメータの較正を行う為に、J0555+3948 / DA193 のどちらかを各観測日に観測した。観測周波数は 22GHz (K バンド) で、H₂O メーザーがターゲットである。観測波長帯域は、16 MHz/IF の 16 IFs で構成され、ライン天体であるメーザーに 1 IF 割り当て、残りの 15 IFs を較正天体である連続波天体に割り当てた。H₂O メーザーの速度分解能は、0.42 km/s である。各観測局で、1024 Mbps かつ 2 bit 量子化で磁気テープに記録された観測テープは NAOJ へ郵送され、Mitaka FX correlator で相関処理がなされた。相関処理時の積分時間は 1 秒である。

相関処理で得られたデータ(クロススペクトル)から電波マップを描くには、更なるデータ較正が必要である。データ解析には、NRAO で開発されたソフトウェアである AIPS を用いて位相補償解析を行った (e.g. Appendix in Kurayama et al. 2011)。フリッジサーチを AIPS で行い、clock offset や clock rate offset を求める前に、delay model の較正を行った。相関処理で使われた delay model は、精密な astrometry を行うには不十分だからである。具体的には、精度の高い測地モデル、IERS により提供された最新の地球回転パラメータ、各局に置かれた GPS 受信機で測定された天頂遅延 (Honma et al. 2008a)、そして、Bern 大学により 2 時間おきに提供される Global Ionosphere Map (GIM) に基づいた電離層遅延をそれぞれ適用した。較正されたビジビリティを用いてフリッジサーチを行う際、まずは J0555+3948 or DA193 を用いて clock offset を求めた。そこで得られた clock offset を参照する事で、次に位相補償参照天体である J0530+3723 を用いて clock offset と clock rate offset を同時に求めた。J0530+3723 の self calibration を行った上で、residual phase と amplitude の情報を目的天体である IRAS 05168+3634 に渡し、位相補償マップを各観測日ごとに作成した。複素ゲインの情報を J0530 から IRAS 05168 に渡す際、VERA 特有の 2 beam 間の位相差は、horn-dish method で較正している (Honma et al. 2008b)。水メーザーの位置変動に対し

モデルフィッティングを行う事で年周視差と固有運動をそれぞれ求めた。フィッティングには、NAOJ で開発された VEDA (Vera Data Analyzer) を用いた。フィッティングモデルは、線形の固有運動と正弦関数の年周視差を組み合わせた物を仮定している。

3. Results

前述のデータ解析により、IRAS 05168+3634 の年周視差を 0.532 ± 0.053 mas、固有運動を $(\mu_\alpha \cos \delta, \mu_\delta) = (0.23 \pm 1.07, -3.14 \pm 0.28)$ mas/yr とそれぞれ求める事に成功した。図 2 はそれぞれの結果を示す。固有運動を求める際は、各メーザースポットの内部固有運動はランダムだと仮定して、単純に全てのメーザースポットの運動を平均する事で求めた。

また、上述の結果に CS(2-1) 観測 (Bronfman et al. 1996) の systemic velocity ($V_{\text{lsr}} = -15.5$ km/s) を加える事で、この天体の銀河系特異運動を、 $(U, V, W) = (8 \pm 4, -13 \pm 9 \pm 11, -7 \pm 10 \pm 12)$ km/s と求めた。この際、太陽の特異運動は Schonrich, Binney, & Dehnen (2010)、 $R_0 = 8.33$ kpc (Gillessen et al. 2009)、そして $\Theta_0 = 240$ km/s (Reid & Brunthalar 2004) をそれぞれ仮定した。

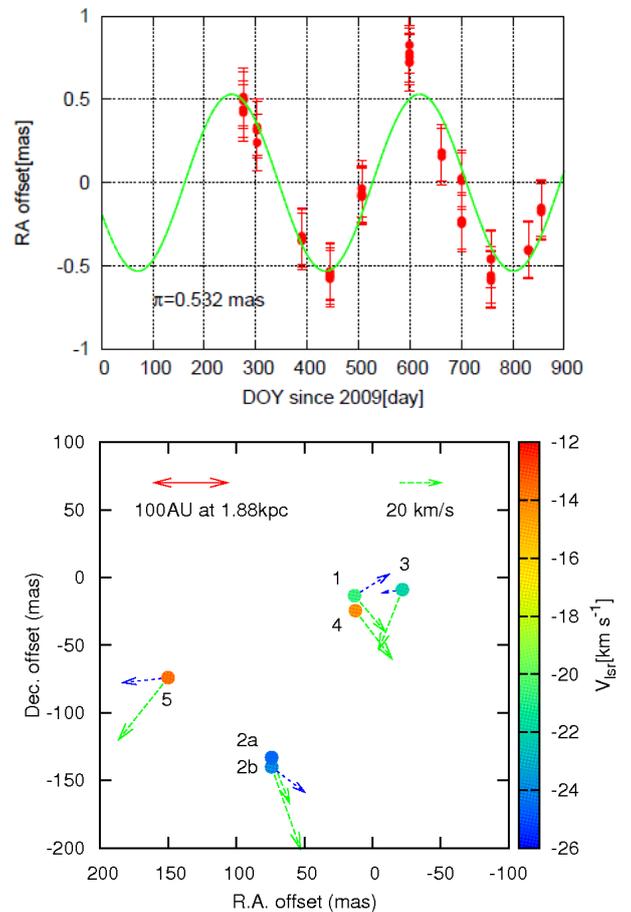


図 2. (上) IRAS 05168 の年周視差(赤径方向の位置変動に対しフィッティングした結果). (下)水メーザーの分布図. 緑の矢印は観測で得られた運動. 青色は内部固有運動を示す.

4. Discussion

4-1 ペルセウスアームの特異運動

IRAS 05168 は年周視差計測の結果により、ペルセウスアームに位置する天体であることが判明した。また、ディスクの銀河系特異運動に注目すると、銀河回転より遅れ、かつ銀河系中心方向に向かって運動している。これは、過去の VLBI 観測で得られたペルセウスアーム天体の特徴と一致している。Russeil et al. 2007 は光学観測を行い、ペルセウスアームとアウトアームの間で銀河回転に対する特異運動(V)の正負が反転している事を指摘している。図 3 は VLBI 観測の結果を用いて、特異運動 V を銀河中心距離の関数として表したものである。図から明らかな様に、Russeil et al. 2007 と同様な傾向が VLBI 観測の結果からも見てとれる。Mel'Nik et al. 1999 では、この様な特異運動を説明する為に密度波理論を用いた議論を行っている。この理論では、共回転半径 (CR) を境に、特異運動の向きが反転する。上記の特徴から、Russeil et al. (2007) は、CR が $V=0$ に位置すると仮定し、 $CR=12.7$ kpc と求めた。同様に VLBI 観測の結果について $V=0$ の位置を求めると、 $CR=12.6$ kpc を得る事に成功した。一見密度波理論で上手く観測を説明できそうだが、VLBI 観測では銀河中心方向の特異運動(U)の測定も行っていて、 V で見られた符号の反転が U では見えていない。また最近の銀河系シミュレーションでは、密度波理論を否定する、ランダムに誘発的星形成が起こる事で観測を再現する結果も提唱されている (Wada et al. 2011)。今後更に VLBI 観測の結果を蓄積し、密度波理論の検証を含めた、銀河系特異運動を説明する理論を構築していかなければならない。

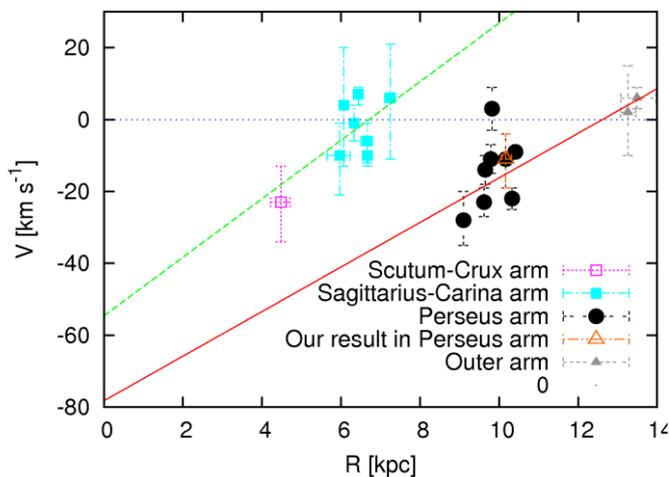


図 3. VLBI 観測で構築した、銀河回転方向の特異運動 (V). 横軸が銀河中心距離(kpc)で、縦軸が特異運動 V (km/s). 過去の VLBI 観測の結果に、我々の観測結果を加えている。

5. Conclusion & Future work

現在まで、銀河系の質量分布を正確に求める Outer Rotation Curve project は継続中で、今回はその中から IRAS 05168+3634 の年周視差計測の結果を紹介した。VLBI 観測の結果から、銀河系ディスクの非円運動を示す観測結果が蓄積されていて、これらを説明する理論の構築が急務となってきている。

図 4 は VLBI 観測の結果で構築した、銀河系の質量分布を表したものである。単純な指数ディスクモデルでは観測を再現できない事は明白で、今後更に遠方の VLBI 観測を進める事で、正確なダークマター質量を求めて行く事も課題となって来る。

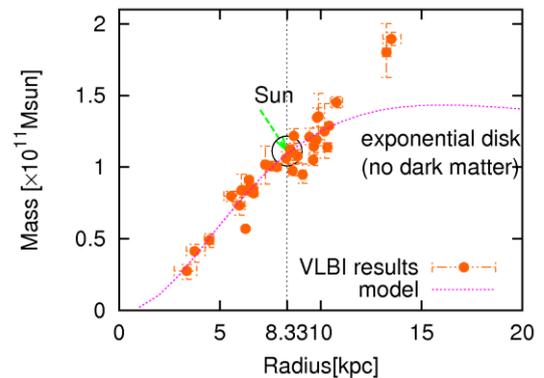


図 4. VLBI 観測の結果で構築した銀河系の質量分布。横軸は銀河中心距離で、縦軸が質量($\times 10^{11} M_{\text{sun}}$)。

References

- Bronfman, L., Nyman, L. -Å., & May, J. 1996, A&A, 115, 81
- Gillessen, S. et al. 2009, ApJ, 692, 1075
- Honma, M., Tamura, Y., Reid, M. J. 2008b, PASJ, 60, 951
- Honma, M., et al. 2008a, PASJ, 60, 935
- Honma, M., et al. 2007, PASJ, 59, 889
- Kurayama, T., et al. 2011, PASJ, 63, 513
- Mel'Nik, A. M., Dambis, A. K., & Rastorguev, A. S. 1999, Astron. Lett, 25, 518
- Reid, M. J., & Brunthaler, A., 2004, ApJ, 616, 872
- Russeil, D., Adami, C., & Georgelin, Y. M. 2007, A&A, 470, 161
- Schonrich, R., Binney, J., & Dehnen W., 2010, MNRAS, 403, 1829
- Sofue, Y., Honma, M., & Omodaka, T. 2009, PASJ, 61, 227
- Wada, K., Baba, J., & Saito, T. R. 2011, ApJ, 735, 1