

# VERA を用いた銀河系中心領域 300 pc 領域に付随する水メーザー源の固有運動測定

酒井 大裕 (東京大学大学院 理学系研究科)

## Abstract

銀河系中心領域は円盤部とは異なり、卓越した非円運動を示している事が知られている。この非円運動を説明するシナリオとして、銀河系のパーポテンシャルによる共鳴軌道や中心ブラックホールの過去の活動による膨張運動などが提案されている。これらのシナリオは銀河系中心部の分子雲の視線速度情報に則ったものであり、そのような 1 次元的速度情報からだけでは 2 つのシナリオを分離する事は出来ず、その実態の解明には至っていない。これら 2 つの可能性を切り分けるために、我々は国内の VLBI 観測網 VERA を用いて、銀河系中心から約 300 pc の距離に存在する Central Molecular Zone に付随する 22 GHz 帯の水メーザー源を長期間観測し、その固有運動を測定した。これにより、今までにない 3 次元的速度情報を得る事が出来るため、運動の解明というここでの目的に対して非常に適している。本講演では、この研究の一例目として行った銀河系中心方向の明るい電波連続波源、Sgr D 領域に付随する水メーザー源の固有運動測定結果について発表する。また、今後の観測計画や、2 つのシナリオの切り分けについても議論する。

## 1 Introduction

銀河系は我々が住む銀河であり、太陽系から最も近い銀河である。それにも関わらず、太陽系自身が銀河系に含まれるために、その全貌を明らかにすることは難しい。中心から約 3 kpc 以上離れた銀河系円盤部に関しては比較的円運動に近い運動をしている渦状腕 (スパイラルアーム) によって構成されていることがわかっているが、中心から約 3 kpc 以内の中心領域に対しては構造が非常に複雑で卓越した非円運動を示しているために理解が進んでいない。銀河系中心領域は非常に複雑な構造を有しており、力学的中心には超巨大ブラックホール Sgr A\*、Sgr A\* から  $\pm 0.6^\circ$  離れた場所には、活発な星形成領域 Sgr B2 や Sgr C などがある。銀河面から離れた方向には、電波アークと呼ばれるフィラメント状の電波構造やフェルミバブルと呼ばれる巨大な  $\gamma$  線源が存在することが知られている。これら構造の原因としては”銀河系の棒構造”、”超巨大ブラックホールの過去の活動”、”銀河系磁場”などが考えられている。特に顕著な構造は、銀河系中心領域から約 300 pc の距離に存在する、星形成を促す多くの巨大分子雲を含む Central Molecular Zone (CMZ) である。この CMZ

中の分子雲は銀河系の中心に存在すると思われている超巨大ブラックホールへの質量供給源であると考えられており、この領域の運動・構造を解明することは銀河の中心の超巨大ブラックホールへの質量降着メカニズムを明らかにする上で非常に重要である (Oka et al. 2012)。

この CMZ の運動を説明するシナリオは大きく 2 つに分けられる。一つ目は、銀河系の棒構造のポテンシャルの影響を受けた Inner Lindblad Resonance 軌道上の運動である。これは Binney et al. (1991) によって提案されたものであり、銀河系の棒構造とほぼ平行に伸びた比較的外側に位置する  $x_1$  軌道群と、それに垂直な方向に伸びた比較的内側に位置する  $x_2$  軌道群によって構成される。この 2 つの軌道群が交差する領域では、それぞれの軌道群に乗って運動している分子雲同士の衝突現象が起こる事が期待され、実際に、正の銀河経度では Sgr B2 で (Hasegawa et al. 1994)、負の銀河経度では Sgr C 近傍 (Matsumura et al. 2012) で衝突によるものと思われる現象が報告されている。また、このシナリオでは衝突によって角運動量が失われることで分子雲がより中心領域に落ち込んでいくため、超巨大ブラックホールへのガス供給メカニズムとしても期待されている。二つ目の

シナリオは、Kaifu et al. (1972) によって提唱された、中心の超巨大ブラックホール Sgr A\* の過去の活動により膨張しながら回転するガスリングのシナリオである。Sgr A\* が過去に活動的であったことは、分子雲による X 線の反射の観測によって指摘されている (Koyama et al. 1996, Ryu et al. 2013)。これらの研究結果は、Sgr A\* が約 100 年以上前まで、今の明るさの 10,000 倍以上の明るさを有していた事を示している。

上に示したどちらのシナリオもこれまでに得られている分子輝線の特徴的な速度構造を説明する事ができるため、2つのシナリオのどちらが正しいかの切り分けには至っていない。この切り分けには、CMZ を構成する分子雲の位置関係やそれぞれの運動を把握する事が不可欠である。Sawada et al. (2004) は、OH 分子の 1667 MHz 帯吸収強度と CO  $J=1-0$  輝線強度の比を用いて CMZ 中の分子雲の奥行き方向の位置関係を明らかにしたが、依然として2つのシナリオの切り分けには不十分であった。我々は電波帯での VLBI 観測によって分子雲内の星形成領域に付随する水メーザー源をモニター観測することで天球面上での固有運動を測定し 3 次元的速度を得ることができる。

本集録では、Section 2 で固有運動によるシナリオの切り分けの方法と VLBI 観測を述べ、Section 3 では既に得られた結果、Section 4 では観測結果をもとに議論をし、Section 5 でまとめと将来的な展望について述べる。

## 2 Methods and Observations

### 2.1 Diagnosis for the dynamics in the Galactic Center

Section 1 で述べた 2 つのシナリオを切り分けるために、我々は CMZ 中の分子雲に付随する水メーザー源の天球面上での固有運動を測定した。それに先立ち、それぞれのシナリオにおいて固有運動でどの程度違いが現れるか、また CMZ 中のどの領域を観測すれば切り分けが可能になるかを明らかにするために、シンプルなモデルを用いて比較を行った。図 1 に示されているように、従来の視線速度情報のみで

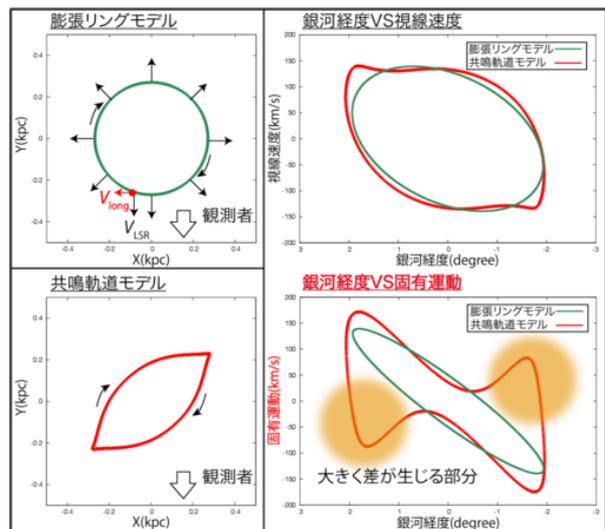


図 1: (赤) 共鳴軌道モデル (緑) 膨張リングモデル。左上) 膨張リングモデルの幾何学的モデル, 左下) 共鳴軌道モデルの幾何学的モデル, 右上) 銀河経度 vs 視線速度上の軌道, 右下) 銀河経度 vs 固有運動上の軌道

は共鳴軌道モデルと膨張リングモデルの 2 つのシナリオの間に大きな差は現れない。一方、我々の研究で測定することが出来る天球面上での固有運動では特に銀河経度が  $-2^\circ < l < -1^\circ$  と  $+1^\circ < l < +2^\circ$  の領域では非常に大きな差が現れていることがわかる。この事はつまり、この差が現れている領域に付随している水メーザー源の固有運動を測定する事で 2 つのシナリオを切り分ける事が可能である事を示している。

### 2.2 Observations of Sgr D HII region with VERA

Section 2.1 で示した方法に沿った最初の観測として、我々は銀河経度  $l = 1^\circ.14$  に位置する明るい電波源 Sgr D 領域に付随する 22 GHz 帯の水メーザー源を長期に渡って観測した。観測は 2008 年から 2011 年にかけて 11 epoch 観測された。各観測 epoch に対して、Sgr D 領域は約 4.5 時間観測された。VERA ではメーザー源の絶対位置を測定するために、メーザー源と同時に位置がよくわかっている銀河系の QSO を位置参照天体として観測する。本観測では、

この位置参照天体として J1745-2820 を用いた。メーザーは 16 MHz の帯域幅で 512 ch の分光点数で観測された。これは 22 GHz 帯において  $0.42 \text{ km s}^{-1}$  の速度分解能に相当する。

### 3 Results

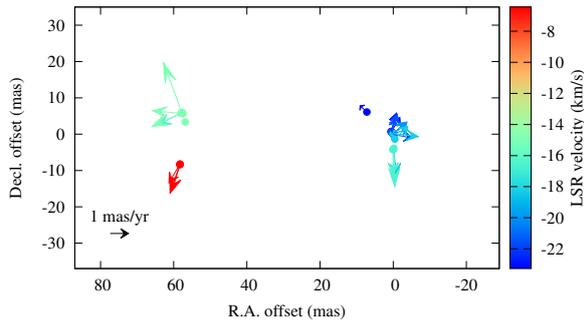


図 2: 検出されたメーザースポットの分布とそれぞれのスポットの運動。カラースケールはスポットの視線速度を表しており、矢印の大きさは運動の大きさを示している。

図 2 は Sgr D 領域に付随する水メーザー源の分布と観測期間中の内部固有運動を表している。メーザーは東西に分かれて分布しており、東側にレッドシフト成分、西側にブルーシフト成分が分布している。メーザー源の広がり約 60 milli arcsec(mas) で、これは銀河系中心までの距離 8 kpc では 500 AU に相当する。メーザー源同士の相対的な運動はおよそ  $1 \text{ mas/yr}$  であり、8 kpc の距離では  $38 \text{ km s}^{-1}$  に相当する。

次に、図 3 は位置参照天体 J1745-2820 を用いて絶対位置を測定された絶対固有運動を示している。この結果は、このメーザー源が太陽系に対して東西方法に対して  $\mu_{\text{east}} = -2.29 \pm 0.12 \text{ mas yr}^{-1}$ 、南北方法に対して  $\mu_{\text{north}} = -4.16 \pm 0.26 \text{ mas yr}^{-1}$  の速度で運動していることを示している。

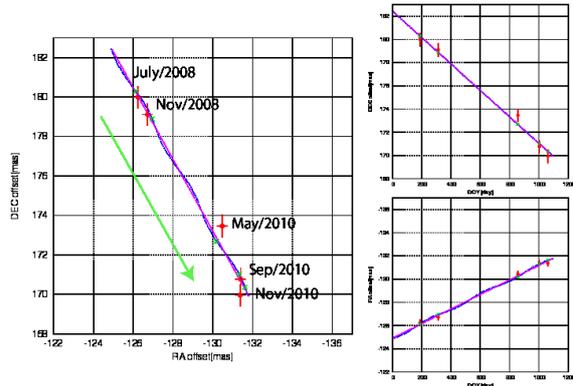


図 3: 左) 天球面上での絶対固有運動, 右上) 時間 vs 東西方向の固有運動, 右下) 時間 vs 南北方向の固有運動

### 4 Discussion

ここでは、Section 3 で得られた絶対固有運動をもとにこの天体の運動や距離について議論する。まず、Section 3 で得られた絶対固有運動は銀河規模の運動に加えて天体内部の運動を含んでいるため、これを差し引く必要がある。そのために、内部固有運動の結果を用いる。この効果を差し引いた絶対固有運動は  $(\mu_{\text{east}}, \mu_{\text{north}}) = (-1.95 \pm 0.15 \text{ mas yr}^{-1}, -4.44 \pm 0.28 \text{ mas yr}^{-1})$  となる。また、ここで得られた絶対固有運動は太陽に対する水メーザー源の運動であるため、銀河系中心に対しての運動を議論するためには、太陽系に対する銀河系中心の運動  $(\mu_{\text{east}}, \mu_{\text{north}}) = (-3.151 \pm 0.018 \text{ mas yr}^{-1}, -5.547 \pm 0.026 \text{ mas yr}^{-1})$  を差し引く必要がある (Reid & Brunthaler 2004))。この結果から、銀河座標系での運動は  $(\mu_l, \mu_b) = (+1.57 \pm 0.32 \text{ mas yr}^{-1}, -0.42 \pm 0.27 \text{ mas yr}^{-1})$  であることがわかった。この正の銀河経度方向への運動は、このメーザー源が銀河系中心に対して手前側に位置する事を示している。この運動は、8 kpc の距離で  $59.7 \pm \text{ km s}^{-1}$  の速度に相当する。また、メーザー輝線の視線速度は  $-18 \text{ km s}^{-1}$  であることから、このメーザー源は明らかに非円運動の影響を受けている。このことから、Sgr D 領域が存在する場所の候補は手前側の 3 kpc arm が CMZ に絞られた。今後、定量的な解析を行う事により、距離の決定を行う必要がある。

## 5 Summary

- 銀河系の中心領域は円盤部とは異なり非常に卓越した円運動を示している。銀河系中心領域の運動を明らかにする事は中心ブラックホールへの質量供給メカニズムを解明する上で非常に重要である。
- 視線速度のみの情報では現在提唱されている共鳴軌道シナリオと膨張円盤シナリオを分離する事は出来ないが、天球面上での固有運動を測定する事により2つのシナリオを分離する事が可能である。
- 第一例目の観測として Sgr D HII 領域に付随する水メーザー源を VERA により観測。結果として、この天体が銀河系中心に対して正の銀河経度の方向に運動しており、中心に対して手前側に位置していることが明らかになった。また、非円運動の大きさから手前側の 3 kpc arm が CMZ に位置する事が示唆された。
- さらに観測天体数を増やす事で銀河系中心領域の運動を解明する事が可能になることが期待される。

## Reference

- J. Binney, O. E. Gerhard, A. A. Stark, J. Bally, and K. I. Uchida, 1991, MNRAS
- T. Hasegawa, F. Sato, J. B. Whiteoak, and R. Miyawaki, 1994, ApJ
- N. Kaifu, T. Kato, T. Iguchi, 1972, Nature Physical Science
- K. Koyama, Y. Maeda, T. Sonobe, T. Takeshima, Y. Tanaka, and S. Yamauchi, 1996, PASJ
- S. Matsumura, T. Oka, K. Tanaka, M. Nagai, K. Kamegai, and T. Hasegawa, 2012, ApJ
- T. Oka, Y. Onodera, M. Nagai, K. Tanaka, S. Matsumura, and K. Kamegai, 2012, ApJS
- M. J. Reid, and A. Brunthaler, 2004, ApJ
- S. G. Ryu, M. Nobukawa, S. Nakashima, T. G. Tsuru, K. Koyama, and H. Uchiyama, 2013, PASJ
- T. Sawada, T. Hasegawa, T. Handa, R. J. Cohen, 2004, MNRAS