

# VERAで明らかになった銀河系の基本構造

本 間 希 樹

〈国立天文台 水沢 VLBI 観測所 〒181-8588 東京都三鷹市大沢2-21-1〉

e-mail: mareki.honma@nao.ac.jp



VERAによる銀河系構造研究の最新の結果について紹介します。VERAによる銀河系内電波天体（メーザー放射天体）の距離と運動の計測が進み、さらに、米国や欧州の望遠鏡でも同様な観測が進んだことを受けて、50天体を超える星形成領域を用いて銀河系の構造や運動を議論することが可能になりました。これらを用いて銀河系の大きさや回転速度などの基本尺度を求めると、銀河系の回転速度および質量が従来考えられていたより大きくなることがわかってきました。

## 1. 銀河系を測量する VERA

国立天文台のVERA（VLBI Exploration of Radio Astrometry）はVLBI（超長基線電波干渉計）の高い角度分解能を活かして銀河系スケールの三角測量を行い、銀河系の構造を調べるプロジェクトです<sup>1)</sup>。日本列島上の4カ所に直径20 mの電波望遠鏡を配置し、銀河系の明るい電波天体（メーザー源）の位置天文観測を行います。これによって天体の年周視差（距離）と運動を精密に測り、それを基に銀河系の構造を明らかにすることが目的です。このプロジェクトは国立天文台の水沢VLBI観測所を中心に、鹿児島大学などの大学とも協力しながら観測運用が進められています。VERAに関する記事は今回の特集の別の記事にもありますので<sup>2)-4)</sup>、さらに詳しいことを知りたい方はそちらの記事もご参照ください。

## 2. VERAのこの10年のあゆみ

前項にもありましたように<sup>2)</sup>、VERAは2000年に望遠鏡の建設が始まり、2002年に4局の望遠鏡が完成しています。ですから、昨年2012年はVERAの完成から10年という記念の年でした。10周年というせっかくの機会でもあるので、こ

の記事でも最初にこの間の立ち上げ話も少しだけ書いておきたいと思います。

端的にいうと、プロジェクトというものとはにかく時間のかかるものです。建設して装置の性能評価を行い、科学的成果を出すには5~10年という年月が必要です。VERAの場合、望遠鏡が完成したのは2002年で、プロジェクトが予算化された2000年から数えて2年で建設を終えたこととなります。しかし、完成といっても単一の望遠鏡が（厳密には望遠鏡の形をした構造体が）4台完成しただけであって、そこでいきなり観測や科学研究ができるわけではありません。まずは望遠鏡として1台1台の性能を測る必要があります。正しく天体の方向を向くことができるか（ポインティング測定）、天体からの電波をどれくらい効率よく受信できているか（能率測定）から始めて、干渉計として複数局の信号を掛け合わせるために十分な安定度が達成されているか（位相安定度測定）など、それぞれの局でさまざまな試験をしなければいけません。この試験にも半年から1年の時間が必要で、この間多くの方が実際に観測局にいて昼夜さまざまなデータをとってはそれを解析する作業を繰り返します。余談になりますが、私は非常に幸運なことにVERAの4局のう

ち、石垣島局の立ち上げ責任者を任せられ、そのために性能評価の期間には最長で年間3カ月近くも石垣島に滞在することがありました。石垣島は沖縄県の中でも南西の先島諸島に位置し、珊瑚礁に囲まれた美しい島で、そこでの滞在は非常に印象深いものでした。

単一の望遠鏡として観測ができるようになる、次はいよいよVLBI（干渉計）としての立ち上げになります。干渉計では、別々の望遠鏡で同時に同じ天体からくる信号を観測し、それを掛け合わせることで巨大な望遠鏡と同じ観測性能（分解能）を得ます。VERAの場合は4局の信号を掛け合わせることで、直径2,300 km相当の電波望遠鏡を合成します。VERA最初の干渉計観測も2002年中に行われていますので、ここまでは比較的順調に立ち上げが進んだといえます。しかし、VERAは二つの天体を同時に観測できる「2ビーム」という世界初めての手法を採用しており、初の干渉計観測から「2ビーム」による位置天文観測の達成までは、さらに長い時間を要することになりました。何しろVLBIの観測を用いて10マイクロ秒角（約4億分の1度）台という極めて高い位置測定精度を出すことは、これまで誰もやったことがありませんでした。つまり参考にするべき「手本」がないわけです。このため、どのように精度を出すか、具体的には2ビーム間で発生する機械的な光路長差をどのように計測するか、あるいは2ビーム間の大気の揺らぎや大気の厚みの差をどのように取り除くかなど、かなり観測技術的な部分を深く追求することが必要でした。おかげで、私も天文学というよりは電波干渉計の観測手法的な論文を数編書くことになりました<sup>5),6)</sup>。

プロジェクトの多くのメンバーの努力が実り、三角測量ができるようになったのは2006年頃で、VERAで最初の年周視差計測の成果が出版されたのは2007年のことになります<sup>7),8)</sup>。ですから、望遠鏡の完成から位置天文計測の結果が出るのに5年を要したことになります。これはかなり長い

時間だと感じる方も多くいらっしゃると思いますが、大きなプロジェクトは大概このような時間スケールが必要なのだと思います。「桃栗三年柿八年」という諺もありますが、プロジェクトを軌道に乗せるにはおよそ10年という時間スケールが必要ということを私も身をもって実感させられました。

### 3. 進む銀河系天体の測量

2007年に初めて位置天文観測結果が出たのを受けて、2008年からはプロジェクトで観測すべき天体リストを数百個の規模でリストアップし、その中から順次観測していく体制を作りました。現在もこのような観測運用を続けていて、毎年60~70天体程度のターゲット天体を定常観測しています（1~2カ月に1回程度観測します）。一方、年周視差の計測には1年以上の測定が必要であり、高い精度を得るためにも平均的に1天体当たり1.5年程度の観測を行っています。ここから平均的には毎年40天体程度のペースで計測が完了することになります。

2012年までにすでに150天体程度について観測が進められています。一方、解析についてはさらに時間が必要なためにまだこれらのすべての天体の結果が出そろっているわけではありませんが、すでに30天体を超える天体について年周視差の計測結果が査読雑誌に出版されています。また、年周視差計測に加えて、各天体のイメージングや、参照電波源のサーベイなど、位置天文観測以外の成果も加えると、VERAを用いた科学論文はすでに80編を超えています。特に位置天文観測を含む主要なVERAの結果については、日本天文学会欧文報告（PASJ）で2回の特集号が2008年、2011年に出版されています<sup>9),10)</sup>。

また、世界に目を向けるとVERAと並行して、米国のVLBI装置であるVLBAを用いた位置天文プロジェクトBeSSel (Bar and Spiral Structure Legacy project)<sup>11)</sup>が大型プロジェクトとして走ってお

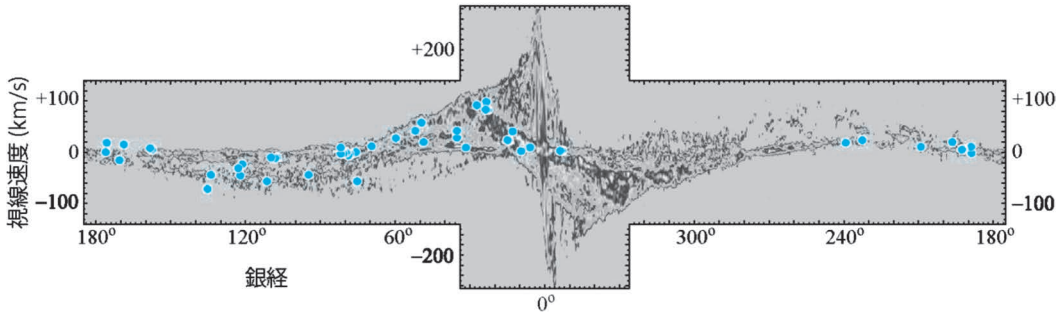


図1 VERAなどで精密測量された天体の、銀河系の位置速度図上での分布。横軸は銀河面に沿った位置（銀経）を表し、縦軸は天体の視線速度を表す。青い丸がVERAなどの観測天体で、背景は一酸化炭素ガスの分布を表す。銀河中心（図中央）に対して左右で速度が反転するのは銀河系が回転していることを表している。

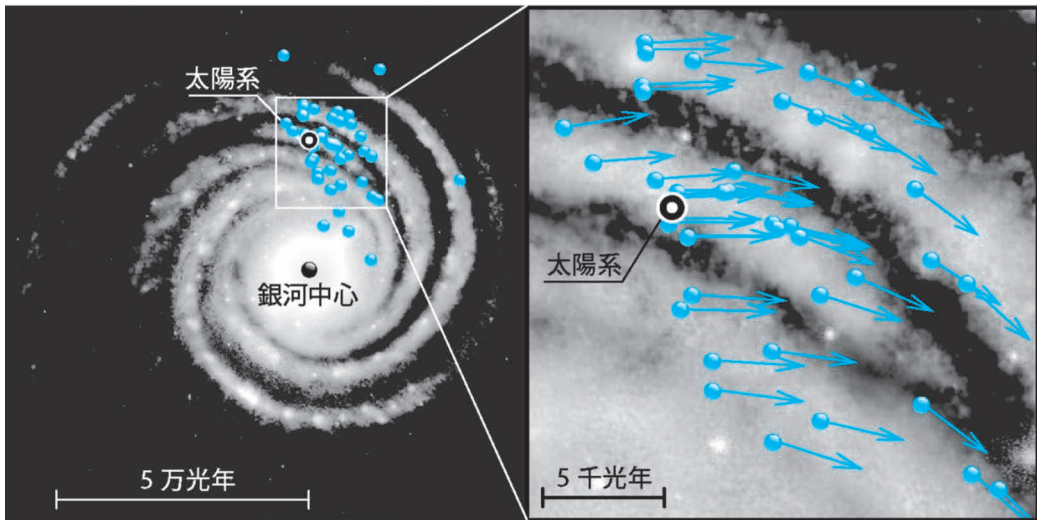


図2 VERAなどで位置と運動が計測された52個の星形成領域の銀河系上での分布。太陽系を中心に数万光年先まで計測できていることがわかる。右側は太陽系近傍の拡大図に天体の運動を表すベクトル（矢印）を加えたもので、銀河系が回転している様子が明確にとらえられている。

り、こちらでも数十天体の年周視差や固有運動計測が得られています。また、欧州のVLBIであるEVN (European VLBI Network) でも数は少ないものの、いくつかの天体についてVERAやBeS-SeLと同様な観測が行われています。これらを総合すると、2012年の段階で50個を超える銀河系内の天体について精密な測量が行われています。図1、図2は、VERAやVLBA、EVNで観測結果が得られている52個の星形成領域について、銀河系内での位置を示したものです<sup>12)</sup>。図1は位置

速度図と呼ばれる図で、横軸に銀河面に沿って測った銀経、縦軸に天体の視線速度を示しています。青い点がVERAなどによる観測天体で、背景の画像は星が生まれる材料となる冷たい一酸化炭素ガスの分布です。この図はやや専門的なので難しいかもしれませんが、その場合は図2を見るほうがより直観的です。図2の左には銀河系の模式図（想像図）の上に、VERAなどが距離と運動を測定した天体を重ねて示してあります。図2からもわかるように、太陽系からの距離が1万光年

を超えるような銀河系スケールで天体の距離と運動決定ができていくことがわかります。1990年台後半に活躍したヒッパルコス衛星の場合、精密に距離計測できた領域が太陽系から500光年以内に限られていたことを考えると、これは劇的な進歩ということが出来ます。

#### 4. 見えてきた銀河系の基本構造

このように多くの天体について精密な距離と運動が決まると、これらの天体の分布や平均的な運動を用いて銀河系の基本的な構造を決めることができます。直観的にこれを説明するには図2の右図を見てもらうのが良いでしょう。この図には、太陽から観測された天体の位置に加えて、運動のベクトル（運動の向きと大きさ）が矢印で書いてあります（厳密には太陽自身の運動を差し引いた差分が直接の観測量ですが、ここではわかりやすくするために太陽運動を補正して、銀河系の中心に対する回転運動として表示しています）。このベクトルの並びを見れば直観的に銀河が回転している様子が一目瞭然です。また、その回転の中心がどのあたりにあるかも一見ただけでおおよそ検討をつけることができます。ですから、このような銀河系スケールでの距離と運動の計測結果から、銀河系の回転速度や銀河系中心までの距離など、銀河系の基本構造を決定することができるのです。

もちろん、実際の解析はこのような直観によって決めるのではなく、統計的な手法を用いて最適な値を求めます。今回の研究ではマルコフ連鎖モンテカルロ法（MCMC法：Markov-Chain Monte Carlo Method）を用いて、銀河系の基本構造定数の値を求めました<sup>12)</sup>。具体的には、銀河系中心までの距離、太陽系近傍での銀河系回転速度に加えて、後述する回転曲線の形状を表すパラメーターや、回転運動からの系統的なずれを表すパラメーターなどで銀河系内の天体の運動を記述するモデルを考えます。この多次元のパラメーター（今回の研究では主に6~7次元）で最適値を効率

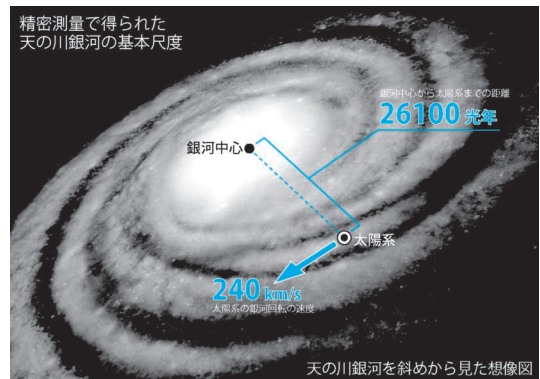


図3 今回の研究で得られた銀河系の基本尺度を表す模式図。

よく探す方法がMCMC法で、この手法は最近天文学のさまざまな分野でよく使われています。

このような解析の結果<sup>12)</sup>、銀河系中心までの距離は $8.05 \pm 0.45$  kpcと求まりました（図3）。これは光年になおすと約26,100光年になります（ $1 \text{ pc} = 3.26$  光年）。1985年以来使われている国際天文連合（IAU）の推奨値は8.5 kpcであり、また最近の研究でも8-8.5 kpcの値を提示するものが多いので、今回われわれが得た値もこれらの値とおおむね一致していると言えます。一方、太陽系における銀河系回転速度は、 $240 \pm 14 \text{ km s}^{-1}$ と求まりました。これは、国際天文連合の推奨値 $220 \text{ km s}^{-1}$ に比べると約10%大きな値になっています。これは、この次の記事にある太陽円上の天体の運動を用いた結果とも一致しています<sup>3)</sup>。今後より精密な値を得る必要はありますが、銀河系回転速度は上方修正される可能性が高いこととなります。この結果は、後述するように、銀河系の質量分布にも変更を迫る結果で、暗黒物質の研究にも大きく影響するものです。

また、今回の解析から銀河系の回転曲線（銀河の回転速度を、銀河中心からの距離の関数として表示したもの）も得ることができました。図4には今回得られた銀河系の回転曲線を示してあります。これによれば、銀河系の回転曲線はほぼ平坦であり、銀河系と同規模の系外銀河の回転曲線と

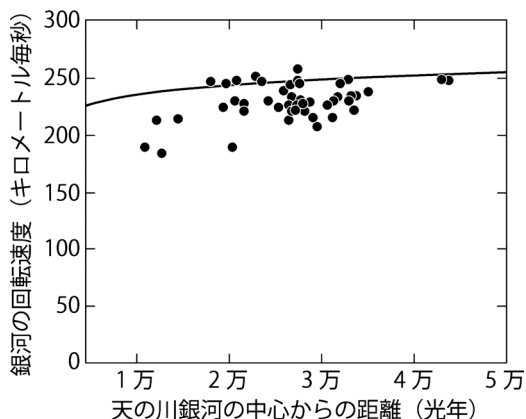


図4 銀河系の回転曲線。●が観測点、実線がモデル曲線を表す。モデル曲線が平均的に観測点よりも上にずれているのは、各天体が銀河回転運動に対して平均的に遅れて見える効果を補正したため。

も似た振る舞いを示していることがわかりました。

## 5. 暗黒物質研究へのインパクト

天体の回転を測ると、そこから天体の質量を決めることができます。なぜなら天体の回転運動は、重力と遠心力の釣り合いから決まっているからです。例えば、中心天体が重ければ重いほど周囲の天体の回転速度も大きくなります。このような単純な関係から銀河系回転速度を質量に換算することができます。式は省略しますが、質量は回転速度の2乗に比例するので、銀河系の回転速度が10%増えると銀河系の質量は約20%増加します。一方、銀河系の質量は主に、光で見える星と、光では全く見えない正体不明の暗黒物質（ダークマター）からなっています。光で見えている星の数は今回の研究で変わりませんから、今回銀河系の質量が重くなったということは、暗黒物質の量がこれまで考えられていたよりも多いということになります。

暗黒物質は現代の天文学・宇宙物理学における最大の謎の一つで、その正体はいまだ不明です。これまでの研究から天文学的な暗黒天体（褐色矮星やブラックホールなど）の可能性はほぼ否定さ

れていて、多くの研究者は暗黒物質がミクロな素粒子であると考えています。実際、暗黒物質素粒子の直接検出を目指した実験も行われています。日本では東京大学の宇宙線研究所が中心になって、暗黒物質を直接とらえる実験が岐阜県の神岡実験施設で進められています。このような実験で暗黒物質粒子の候補が見つかった際には、銀河系の回転速度の精密な値がその正体解明に非常に重要な役割を果たします。なぜなら、銀河系の回転速度が、地球に降り注ぐ暗黒物質粒子の数と速さを決めるからです。ですから、VERAなどを用いた銀河系の精密測量は天文学だけでなく、素粒子物理実験にも大きなインパクトを与えることになるのです。

## 6. さらにその先へ

上にまとめたように、VERAは建設から10年を経ていよいよ銀河系の基本構造をとらえるところまで到達しました（10年といえば長いと感じるかもしれませんが、最初の成果からはまだ5年ですので、まずまずのところではないでしょうか?）。ここでまとめたのは銀河系の基本構造を決めるといふ銀河系研究の「最初の一步」の話でしたが、すでにその先を見据えた研究も進められています。この後の項でも紹介されるように<sup>4)</sup>、銀河系の渦巻き構造や、それに付随した非円運動もとらえられており、今後は渦巻き理論の検証なども期待できます。また、VERAは現在隣国の韓国や中国の電波望遠鏡との共同観測も進めており、さらなる精度向上も目指しています。今後もVERAやVLBAなどでさらに観測を進めるとともに、オーストラリアなど南半球の望遠鏡を用いた南天の銀河系の観測も国際協力で行いたいと考えています。一方、2013年には欧州の位置天文衛星GAIAが打ち上げ予定で、その最終カタログが出ると期待される2020年ごろまでには、VERAやVLBAとGAIAの観測結果を合わせて、銀河系の理解が飛躍的に進むと期待されます。

## 参考文献

- 1) VERA プロジェクトのホームページ  
<http://veraserver.mtk.nao.ac.jp/index.htm>
- 2) 川口則幸, 2013, 天文月報 106, 304
- 3) 永山 匠, 2013, 天文月報 106, 316
- 4) 坂井伸行, 2013, 天文月報 106, 321
- 5) Honma M., et al., 2008, PASJ, 60, 935
- 6) Honma M., et al., 2008, PASJ, 60, 951
- 7) Honma M., et al., 2007, PASJ, 59, 889
- 8) Hirota T., et al., 2007, PASJ, 59, 897
- 9) PASJ VERA 特集号, 2008, PASJ 60, Vol. 5
- 10) PASJ VERA 特集号, 2011, PASJ 63, Vol. 1
- 11) BeSSeL プロジェクトのホームページ  
<http://www3.mpifr-bonn.mpg.de/staff/abrunthaler/BeSSeL/index.shtml>
- 12) Honma M., et al. 2012, PASJ 64, 136

**Galactic Fundamental Structure Revealed by VERA****Mareki HONMA***Mizusawa VLBI Observatory, National Astronomical Observatory of Japan, 2-21-1 Osawa, Mitaka, Tokyo 181-8588, Japan*

Abstract: Based on the recent high-precision astrometry with VERA and other arrays, we have determined the fundamental structure of the Galaxy. The Galactic rotation velocity requires upward modification by 10%, which impacts not only on the Galactic structure, but also on the research of dark matter.