

# VERA を用いた銀河系外縁部回転曲線 II :

## ペルセウスアームの非円運動

総研大 D1, 坂井伸行

### {要旨}

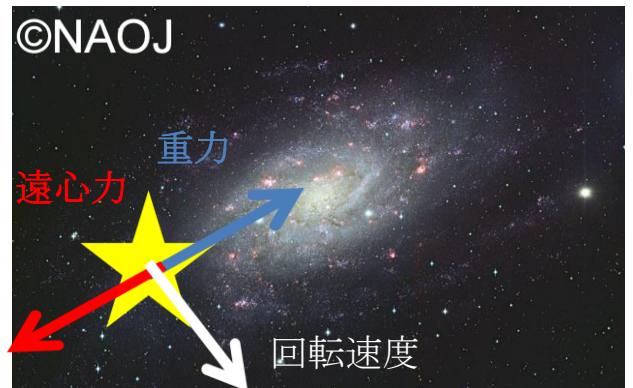
本研究では、銀河系の質量分布を求める為に VERA を用いて高精度位置天文観測を行い、銀河系回転曲線の高精度化を進めてきている。プロジェクト天体である IRAS 05168+3634 は、これまでモデルに依存した運動学的距離 6.08 kpc に対し、我々の直接観測で 1.86 kpc と改訂された。またこの天体は円運動より外れた特異運動を示し、過去の研究で知られているペルセウスアームに見られる特異運動と一致する (e.g. Burton, 1973, Russeil, et al. 2007)。

この特異運動を説明する代表的なモデルに密度波理論が挙げられ、この理論で定義される共回転半径が、ペルセウスアームとアウトアームの間にあると、観測を上手く説明できるとも言われている(Russeil, et al. 2007)。現在まで VLBI 観測されたアウトアームの天体は僅か二天体だが、今後我々のプロジェクトが進むにつれ、質量分布の解明と共に、密度波理論がそもそも正しいのかという事を含めた銀河系の力学が明らかになると期待される。

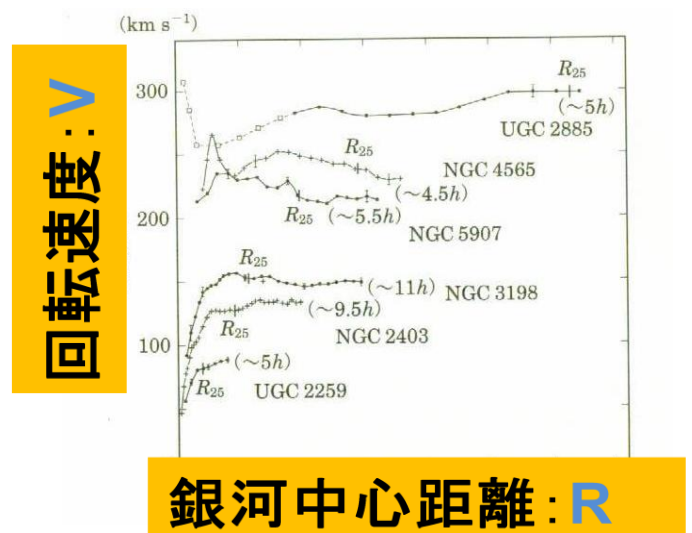
## 1. Introduction

### 1-1. 回転曲線

回転曲線は銀河の質量分布を求める為に一般的に使われる手法で、回転運動している天体に働く重力と遠心力の釣り合いから、ある半径に含まれる銀河の質量を求める事が出来る。



右下図(現代の天文学 4 巻)は多くの系外銀河の回転曲線を示し、平坦(速度一定)な形状が特徴である。これは、多くの(渦巻き)銀河の外側にいたるまで質量が分布している証拠で、ダークマターの存在が取り立たされる契機となっている。



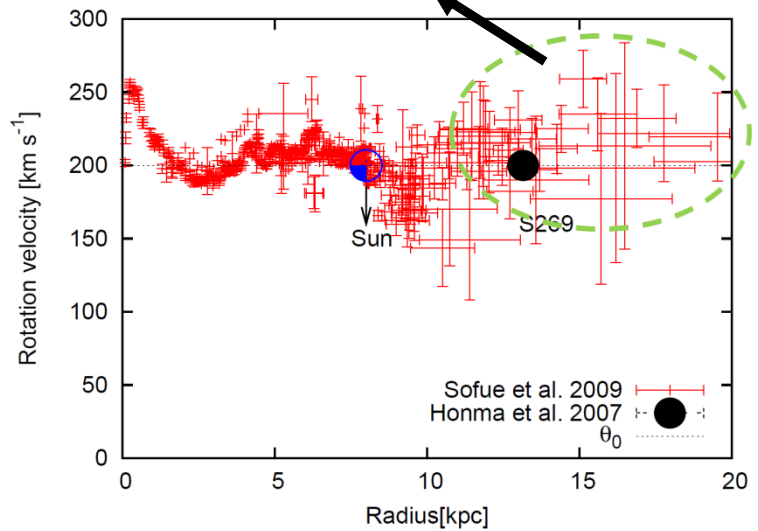
距離の不定性が大きい！

## 1. Introduction

### 1-2. 天の川銀河の回転曲線

我々が住んでいる天の川銀河に関しては、我々がその中に住んでいると言う観測上の制約で、未だ質量分布(回転曲線)が明らかにされていない。

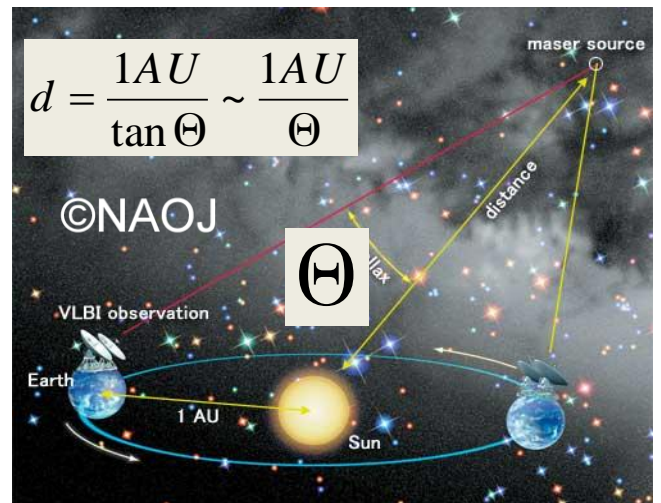
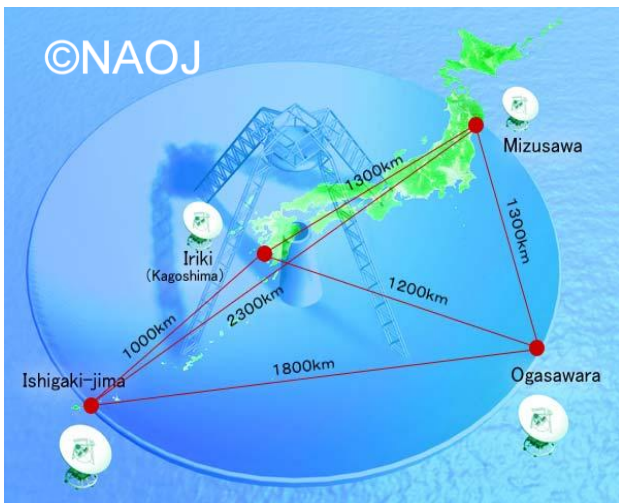
右図は電波観測で得られた天の川銀河の回転曲線で、太陽より外側では誤差が大きい事が見てとれる(Sofue et al. 2009)。



### 1-3. VLBI Exploration Radio Astrometry

天文広域精測望遠鏡 VERA は、VLBI 技術を用いて、銀河系天体の位置と運動を精度よく測定する事が出来る。左下図は VERA の配置図で日本全国に 4 つの 20m 電波望遠鏡が置かれている。その最長基線は 2,300km にも及び、地球の自転を利用して 4 つの電波望遠鏡で一つの天体を観測し続ける事で、直径 2,300km の電波望遠鏡と同様の空間分解能を達成できる。

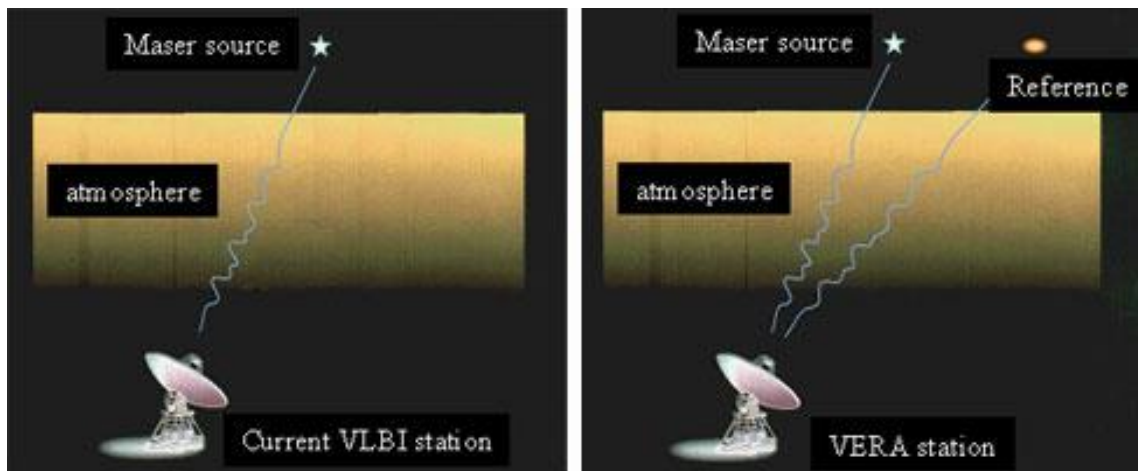
具体的に VERA の目標位置精度は 10 マイクロ秒角で、視力で例えると 6,000,000、距離に直すと 10kpc の距離を 10%のエラーで測れる事に相当する。これは、銀河系の回転曲線を高精度に構築する上で、極めて有用な観測手法となりえる。



## 2. Observation

観測の設定は以下のテーブルのとおり。尚、VERA は一台のアンテナに受信機が二台積んであり、2 ビーム同時観測を各アンテナが行う事で、天頂大気による電波の位相遅延をリアルタイムで補正している。

Mode	観測周波数	帯域幅	周波数分解能	速度分解能	観測期間	観測天体
Dual (2-beam)	22.235GHz (Kバンド)	256 MHz (1 IF for Maser, 15 IF for QSO)	31.25 kHz	0.42 km/s	2009/10~	11 天体 (開始時期はバラバラ)



(Credit : NAOJ, 右が VERA による 2 ビーム同時観測. 右は通常の観測)

## 3. Results

これまでのプロジェクト観測実績は以下のテーブルの通り。観測開始時期、観測回数共にバラバラだが、いくつかの天体については順調に年周視差測定が行われており、回転速度の測定に成功した天体もある。

観測天体(IRAS)	年周視差(mas)	回転速度(km/s)	備考
1. 04579+4703	0.498+/-0.363		プレリミナリー
2. 05168+3634	0.537+/-0.038	$230^{+17}_{-19}$	ペルセウスアーム天体
3. 07024+1102			観測期間 1 年 3 カ月
4. 21379+5106	0.340+/-0.030		プレリミナリー
5. 21413+5442			観測期間 6 カ月
6. 22480+6002	0.363+/-0.043		プレリミナリー
7. 22555+6213			観測期間 1 年 2 カ月
8. 22556+5833			観測期間 6 カ月
9. 22566+5830			観測一回のみ
10. 23004+5642			観測一回のみ
11. 23385+6053			観測中断

### 3. Results (continued)

下図は、前ページのテーブルをグラフで図示したものである。我々の年周視差測定(●)の結果は、これまで良く使われている運動学的距離(モデル、●)よりも小さく計測されている。

この傾向は、これまでの VLBI 観測の結果と一致しており(Reid et al. 2009)、個々の天体が円運動より外れた特異運動を持っている事を示唆する。

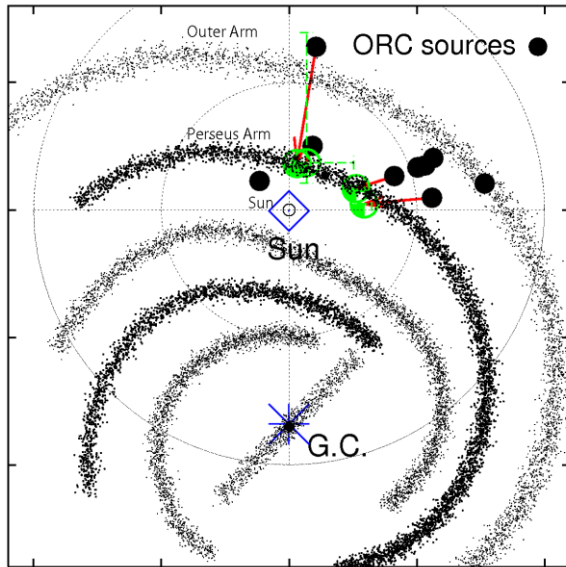


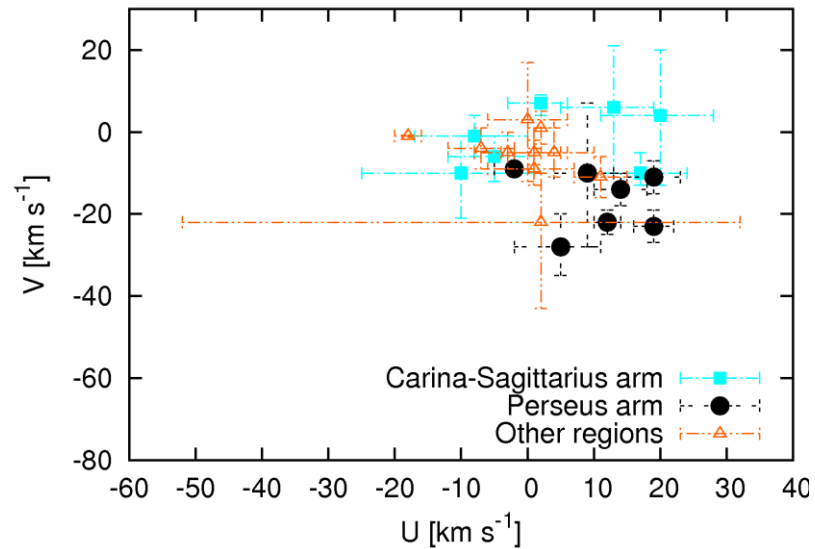
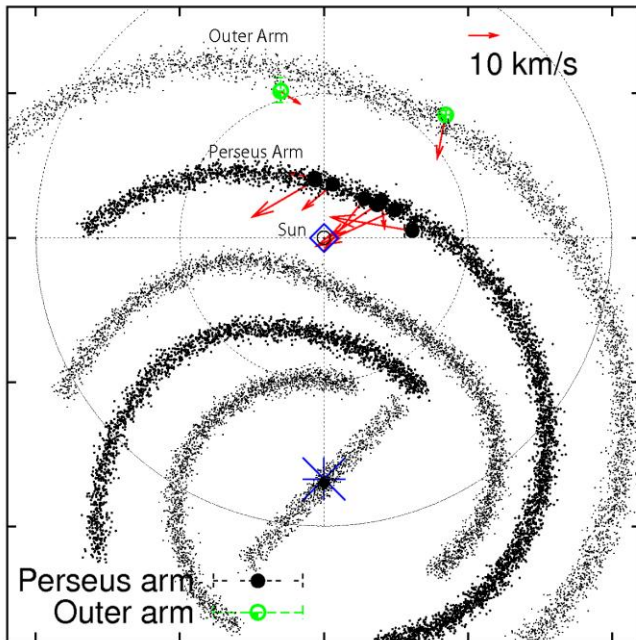
図 : Georgelin & Georgelin (1976)の銀河面の図に、我々のORCプロジェクト天体を重ねた。  
●=運動学的距離、●=年周視差計測  
●が我々の距離測定で、モデル依存の距離測定 (●) のエラーを改善してきている。

### 4. Discussion : Peculiar motion in the Perseus arm

Result で紹介した IRAS 05168+3634 は我々の年周視差計測により、これまでアウターアームの天体と思われていたが実はペルセウスアームの天体であることが分った。また VERA の観測で 3 次元運動を計測し、円運動からのズレ (特異運動) を評価した。するとこの IRAS05168 は、銀河中心方向 (U 方向) に  $9 \pm 5$  km/s、銀河回転方向 (V 方向) に対し  $-10^{+17}_{-19}$  km/s、北銀極方向 (W 方向) に対し  $-6^{+19}_{-21}$  km/s とそれぞれ特異運動を示す事が分った。若干誤差が大きい、この結果を過去の観測と比べてみても、ペルセウスアームでは系統的な特異運動が見られる事が分った。

次ページ左図では、先ほど紹介した銀河面に特異運動ベクトルを表示した。ペルセウスアームの 7 天体については 1 天体を除き、銀河中心方向に向かい、かつ銀河回転より遅れる系統的な特異運動が見られている。次ページ右図も同様に特異運動を示し、ペルセウスアームの天体は特定の領域 (U が正で V が負の領域) に固まっているようにも見える。

これらの運動を説明する代表的な理論として、密度波理論が挙げられる。この理論によると、密度波で形成されるスパイラルアームをガスが通る際に銀河衝撃波が起こりガスの軌道が曲げられる (streaming motion, Burton 1973)。



左図：Georgelin & Georgelin (1976)の銀河面の図に、ペルセウスアーム天体の特異運動(●)と、アウターアーム天体の特異運動(●)を示した。

右図：U(銀河中心方向の特異運動)―V(銀河回転方向の特異運動)平面に、ペルセウスアームの天体、サジタリウスアームの天体、そしてその他の領域の天体を重ねた。ペルセウスアームは、右下の領域に固まっているように見える。

また密度波理論では、パターン速度(=定数)と呼ばれるスパイラルアームの回転角速度を記述するパラメータがある。この角速度とガスの角速度が一致する場所では共鳴が起こり、ガスの速度分散が大きくなる。またCRの内側と外側では、ガスの軌道運動の様子が異なる事も報告されている(Russeil, et al. 2007)。

VLBI観測の結果としては、アウターアームの天体は僅か二天体で、CRの位置を特異運動の観測結果から判別する事は難しい。今後観測データが蓄積される事で、密度波理論がそもそも正しいのかという事も含め、理論との比較・検証が可能になると期待される。

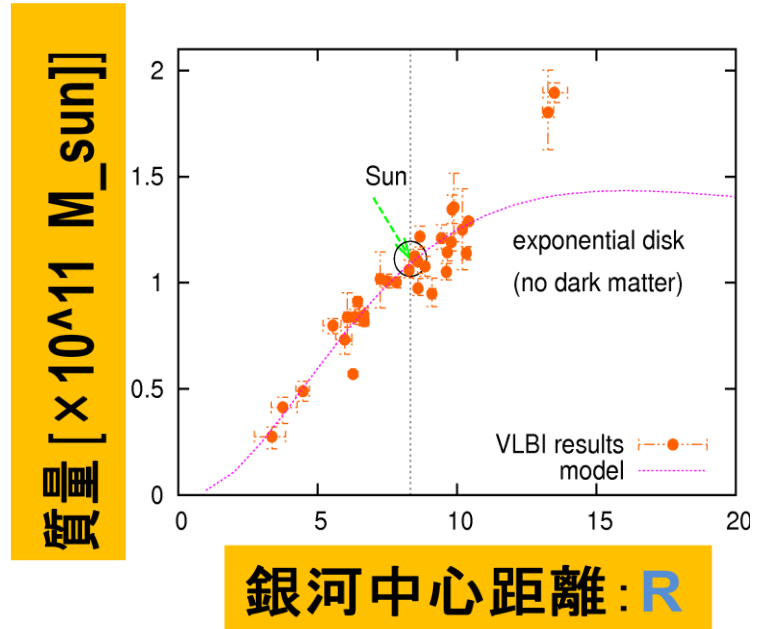
アウターアームでも一天体に関しては系統的な特異運動が見えなかった。これは、銀河衝撃波がアームの内側から外側にかけて減っていく事を考えると、この天体だけアームの外側に居たとも考えられる。また、そもそも密度波理論以外の理論を考えなければいけない事を示唆しているのかもしれない。

密度波理論ではスパイラルアームが定常であると仮定しているが、そもそもスパイラルが定常ではないと言うシミュレーションの結果(e.g. Wada, et al. 2011)も報告されている。今後観測を最もうまく再現する理論を探す事は重要なテーマと言える。

## 5. Future Work : Outer Rotation Curve project

今後三年間のプロジェクトの戦略としては、(i)より遠方の天体を観測する事で、銀河系のバリオンとダークマターの比を明らかにしていく事と、(ii)回転曲線を多天体(N体)で構築する事で $\sqrt{N}$ で誤差を減らしていくと言う、二段階戦法が考えられる。

右図は、回転曲線より求めた質量を距離の関数で表したものである。破線は指数ディスクと呼ばれる星の輝度分布と質量分布の比が同じと仮定して求めた質量分布モデルである。より外側ではこのモデルは観測結果に合わず、更に外側ではどのような様になっているのかという事は今後のプロジェクトの重要なテーマである。



次の右図は、我々の観測結果を含む、これまでの VLBI 観測で構築した天の川銀河の回転曲線である。水平な点線は、他の銀河で見られる平坦な回転曲線のモデルである( $V(R)=240 \text{ km/s} = \text{一定}$ )。

このモデルから大きく逸脱しているのは、銀河系中心付近にあると言われるバー構造のポテンシャルの影響を受けている天体や、超新星爆発などで局所的に影響を受けている天体などである。今後の観測で天体数を増やす事で、天体が持っている系統的な運動(streaming motion, 乱流運動)が回転曲線に表れてくると期待されるし、銀河中心距離 8~10kpc 辺りには既に dip な構造が見えている。

