

Outer Rotation Curve project with VERA

坂井 伸行¹, 中西 裕之², 松尾 光洋², 小出 凖人², 手塚 大介², 倉山 智春³, VERA project member

¹国立天文台, ²鹿児島大学, ³帝京科学大学



概要

nobuyuki.sakai@nao.ac.jp

多くの円盤銀河で、回転速度測定(回転曲線)に基いた質量分布の研究が行われてきた。しかし、天の川銀河は外から観測できない特殊な銀河の為、これまで質量分布を精度良く求める事が出来なかった(距離の不定性が原因)。我々は2009年より、VERAによる精密距離(年周視差)測定から天の川銀河の回転曲線を構築し、質量分布(銀河の基本物理量)を研究している(Outer Rotation Curve project)。

ORCプロジェクトの現時点での結果から、天の川銀河の回転曲線は、~14 kpcまでは平坦である事が分かった。我々は2016-2017年中に、プロジェクトで最終的に得られる約30天体の年周視差結果を、まとめ論文として発表する。

背景：大量のダークマターの発見 & 天の川銀河の回転曲線

1914年: V.M.Slipherが円盤銀河の光学分光観測を行い、銀河の回転運動を検出。

1931年: Karl G.Janskyが宇宙電波を初めて観測し、星が光っていない領域まで広がっているガスが観測可能に。

力学平衡(遠心力=重力)の仮定の下、円盤銀河の質量分布(銀河の基本物理量)の研究が行われる。

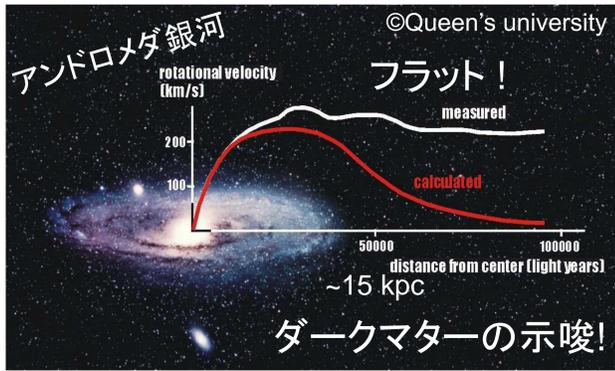
$$M(R) = \frac{RV^2}{G} \propto RV^2, \quad R: \text{銀河中心からの距離}, \quad V: \text{回転速度}, \quad G: \text{重力定数}$$

1970年代: Vera C.Rubinらが、アンドロメダ銀河(お隣の銀河)の回転速度の一定性を指摘

→ **ダークマターの発見!**

2000年前: 天の川銀河の質量分布は、距離測定の不定性により、特に太陽より外側で誤差が大きい。

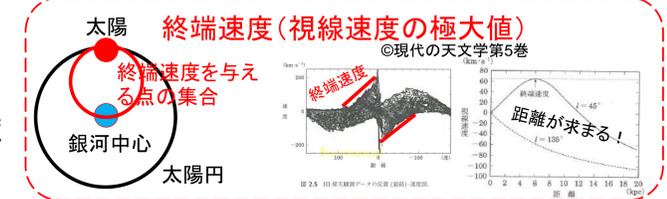
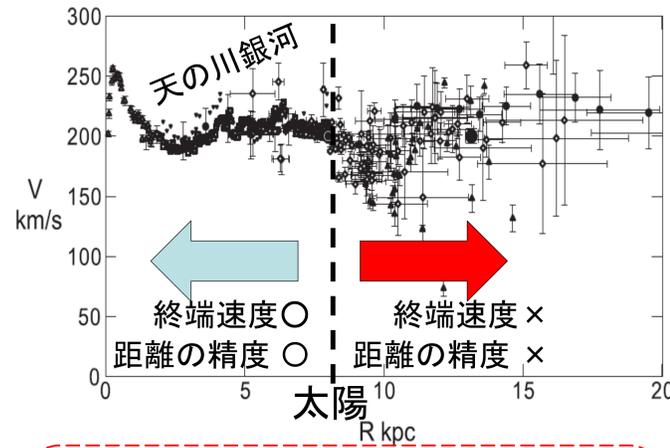
→ **銀河系外縁部の質量分布は良く分かっていない!**



アンドロメダ銀河の、回転速度(V) vs 半径(R) 回転曲線と呼ばれる。

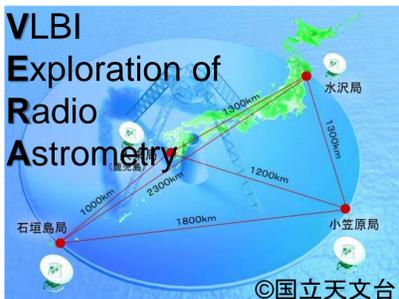
赤線: 星の輝度が質量に比例していると仮定して得られたモデル(十分外側ではケプラー回転 = $V \propto R^{-1/2}$ に従う)。

白線: 実際の観測結果。星が無い領域でも回転速度が一定 → **大量のダークマターの示唆**



研究手法 & 目的：VERAによる銀河系外縁部回転曲線の構築・質量分布の解明

銀河系天体までの距離を最も精度よく求める方法は、年周視差測定である。銀河系スケールで視差測定を行うには、**視力6万(空間分解能~1ミリ秒角に相当)程度が必要**。



VERA望遠鏡
視力10万の

VERAで銀河系外縁部の星形成領域の年周視差測定を行い、銀河系外縁部の質量分布を解明する。

※天体選定には、Arcetriカタログ(Valdettaro+01), Sunada+07, Wouterloot+89 & 91を引用した。

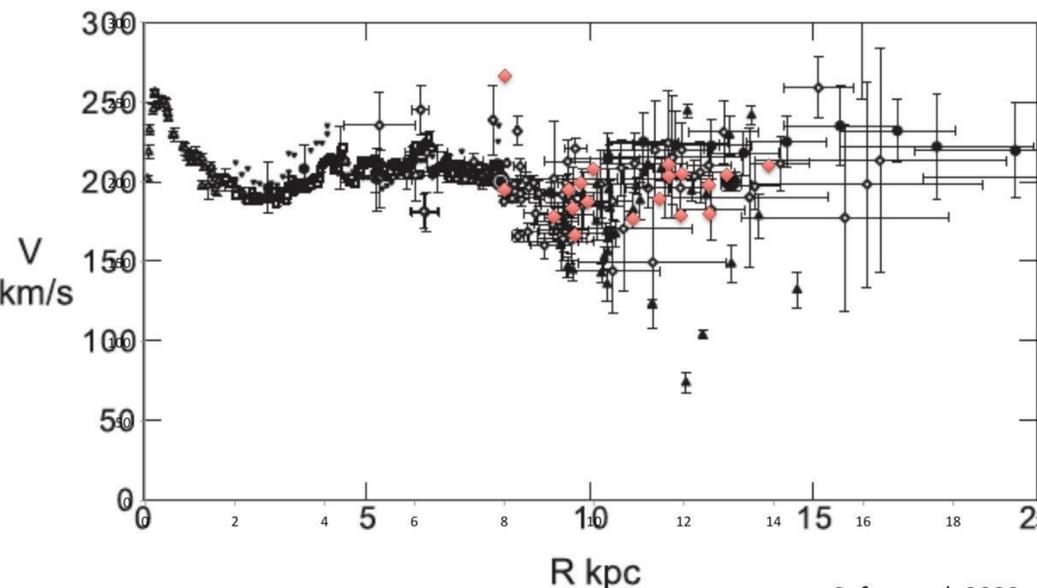
Outer Rotation Curve project

Target (IRAS)	Alias	R.A. (hh:mm:ss)	Decl. (dd:mm:ss)	Parallax (mas)	$\mu_{\alpha} \cos \delta$ (mas yr ⁻¹)	μ_{δ} (mas yr ⁻¹)	v_{LSR} (km s ⁻¹)	N_{obs}	Refs.	Memo
1	00259+5625	00:28:45.51	+56:41:56.9	0.412±0.123	-2.48±0.32	-2.85±0.65	-38±5	13	(7)	Superbubble
2	01123+6430	01:15:40.80	+64:46:40.8	0.131±0.015	-1.44±0.60	-0.19±0.59	-37±9	11		1st Draft (Koide, M2)
3	02395+6244	02:43:28.57	+62:57:08.4	0.167±0.011	-1.22±0.30	0.46±0.36	-72±3	14	(5)	
4	02541+6208	02:58:13.18	+62:20:32.9	0.183±0.012	-0.73±0.14	0.01±0.17	-50±0.4	14		Analyzed by Nagayama
5	03101+5821	03:14:06.4	+58:33:10.0				-38±5	14		Variable source
6	04579+4703	05:01:40.24	+47:07:19.0	0.244±0.004	0.87±0.35	-1.32±0.29	-18±5	18	(5)	
7	05188+3054	05:20:22.07	+30:37:56.6	0.332±0.053	0.29±0.07	-3.14±0.28	-16±2	11	(6)	
8	05137+2919	05:17:13.74	+29:22:19.9	0.216±0.022	0.59±0.03	-1.26±0.11	-27±5	22	(2), (5)	Re-analyzed by ORC
9	05335+3609	05:36:52.47	+36:10:58.3	0.582±0.070	-0.05±0.34	-1.69±0.10	-24±5	06		Analyzed by Nagayama
10	05345+3556	05:38:00.26	+35:59:01.1				-20±5	15		Analysis in progress
11	05358+3543	05:39:13.10	+35:45:52.1	1.150±0.068			-30±5	12		Analyzed by Mizukubo
12	06416+0026	06:47:13.33	+00:26:05.9				36±5	03		
13	06469+0333	06:49:37.20	+03:30:30.5	0.452±0.051	-0.69±0.07	0.83±0.13	14±5	10	(5)	Analyzed by Nagayama
14	06501+0143	06:52:45.32	+01:40:23.1	0.228±0.007	-0.89±0.24	0.71±0.26	45±5	11		
15	07024+1102	07:04:45.62	+11:07:14.0	0.860±0.053			17±5	14		Analyzed by Matsuo
16	07207+1435	07:23:01.84	+14:41:32.8	0.221±0.014	-1.34±0.70	0.81±0.70	47±10	14	(5)	Variable source
17	07279+2038	07:30:05.22	+20:44:23.0					10		Variable source
18	07427+2400	07:44:51.92	+24:07:41.5	0.185±0.027	-1.79±0.32	2.60±0.17	68±5	09	(5), (8)	
19	21144+5430	21:15:55.90	+54:43:31.0				-83±5	11		Analysis in progress
20	21306+5540	21:32:12.43	+55:53:49.7	0.133±0.017	-2.94±0.29	-2.48±0.29	-73±5	12	(5)	1st Draft (Teruka, M2)
21	21379+5106	21:39:40.50	+51:20:32.6	0.262±0.031	-2.74±0.08	-2.87±0.18	-38±5	10	(4), (5)	
22	21413+5442	21:43:01.10	+54:56:15.0				-6±3	13		Inverse PR required
23	21479+5510	21:49:40.7	+55:24:49				-72±5	03		Variable source
24	21558+5907	21:57:25.19	+59:21:56.7	0.171±0.014	-2.57±0.03	-2.04±0.07	-88±5	11	(3)	Analyzed by Nakanishi
25	22180+6002	22:19:58.88	+60:17:56.7	0.400±0.025	-2.58±0.33	-1.91±0.17	-49±5	07		Inverse PR required
26	22512+6109	22:53:12.35	+61:17:00.0					11		Inverse PR required
27	22525+6033	22:54:30.70	+60:49:18.2					12		Inverse PR required
28	22555+6213	22:57:29.81	+62:29:46.8	0.314±0.070	-2.04±0.35	-0.66±0.36	-63±6	11	(1)	
29	22566+5828	22:58:47.10	+58:45:11.0					08		Variable source
30	22566+5830	22:58:42.6	+58:47:45				-51±5	13		Variable source
31	23091+5912	23:02:32.08	+59:57:51.4	0.309±0.010	-2.45±1.00	-3.00±0.70	-54±5	11	(5)	Variable source

References: (1)Chibuzse et al. 2011, (2)Honma, et al. 2011, (3)Imai et al. 2012, (4)Nakanishi et al. 2015, (5)Reid et al. 2014, (6)Sakai et al. 2012, (7)Sakai, et al. 2014, (8)Sakai, et al. 2015.

結果 & 考察 & 今後

ORCプロジェクトの結果(◆)



Sofue et al. 2009

※Sofue et al. (2009)の結果に、ORCプロジェクトの結果(◆)を重ねた。

銀河系外縁部回転曲線の分散が小さくなった。

→ ~14 kpcまでは平坦である。

→ Reid+14と同じ結論。

※ORCの結果から、Reid+14の結果を、独立したデータを使って補強する事に成功した。

視差が未検出だった7天体の視差計測に成功。

→ ORCの結果を使って、個々の星形成領域の物理量を詳細に求められる。

2016-2017に、ORCのまとめ論文を投稿・出版

約30天体分の年周視差測定の結果を、2016-2017年中に投稿・出版することが目標。

銀河系質量分布(基本物理量)を基に新たなサイエンスを展開(今後の課題)