

# M31 North-West Stream 形成シミュレーション

---

筑波大学 理工学群 物理学類 201210871

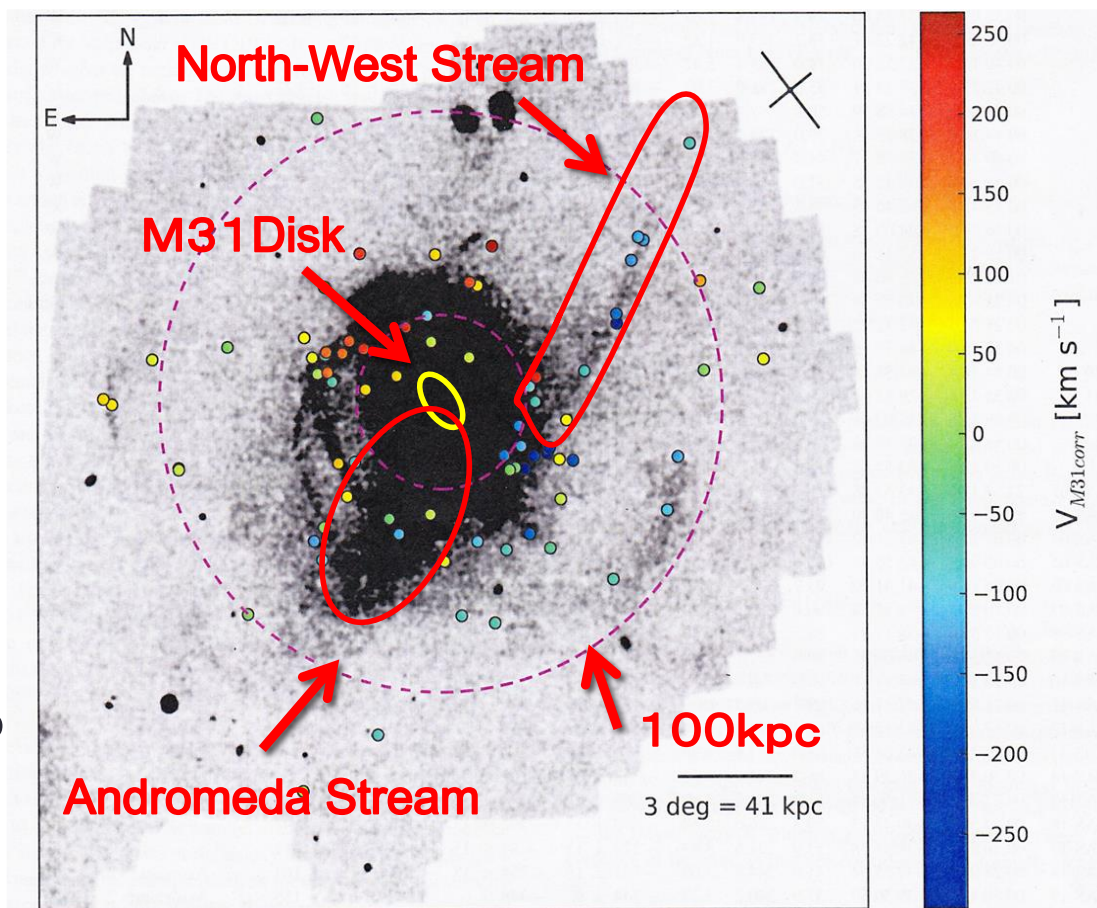
高橋瞭太

# North-West Streamとは？

M31の北西約 $R_{proj} \sim 30 - 130 \text{ kpc}$ に伸びる細長い構造である。

図はmetal-poor  $[\text{Fe}/\text{H}] \leq 1.4$ の星の密度分布(J.Veljanoski et al. 2014)

- North-West Streamがどのようにして形成されたかはまだ分かっていない。
- また、距離の奥行と速度が分かっていない。
- Streamに沿って見つけたGlobular Cluster (球状星団: 以下GC)がStreamとともに運動していると仮定。

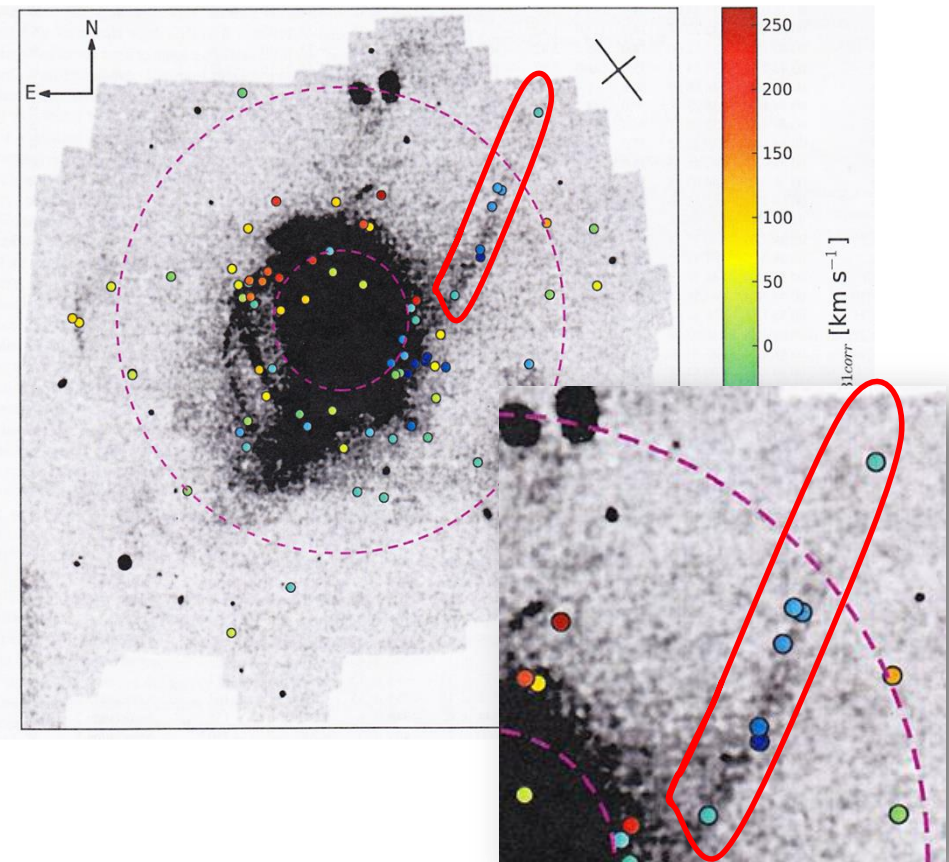


# 本研究について

- 本研究では**M31に矮小銀河が衝突して、North-West Streamが形成されたと仮定**しN体シミュレーションでシミュレートする。
- どういった物理量を持つ矮小銀河か、どのように衝突したかを知る。
- ほかのStreamとの関係はどうなっているのかについて調べる。

# North-West StreamとGCの関係

- North-West Streamにそって7個のGCが観測されていて、それぞれの視線速度は分かっている。
- GCはStreamに沿って運動していると仮定しているのでStreamの視線速度を見積もることができる。
- 図のシンボルはGC  
シンボルの色は視線速度を表している。



# GCのDATA SET

x正=西 y正=北 Position AngleはM31中心を原点に北を  
0° に東方向に回転。

North-West Stream付近のGC(J.Veljanoski et al. 2014)

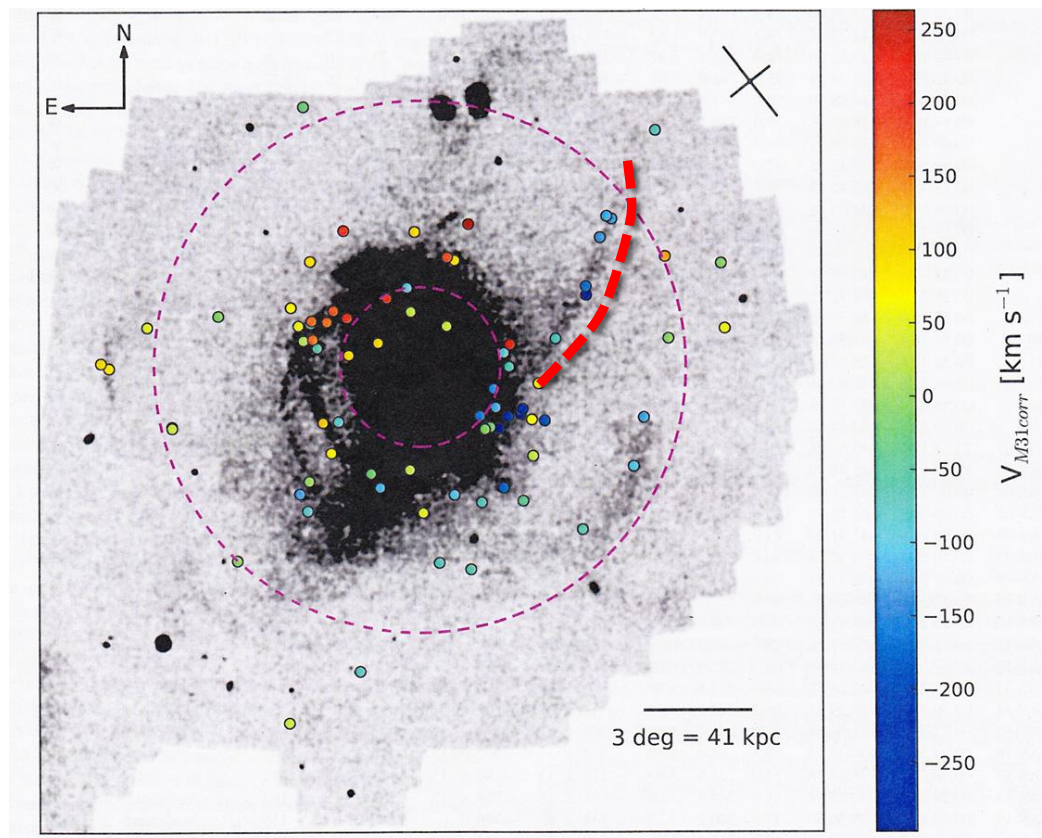
	Rproj(kpc)	PA(deg)	視線速度(km/s)
PAndAs-04	124.6	315.1	-75
PAndAs-09	90.8	307.7	-126
PAndAs-10	90	308.9	-117
PAndAs-11	83.2	305.7	-130
PAndAs-12	69.2	295.9	-157
PAndAs-13	68	293.4	-256
PAndAs-15	51.9	281.8	-74

x (kpc)	y (kpc)
87.9516	88.25914
71.8431	55.52666
70.04188	56.51668
67.56535	48.55063
62.2494	30.22668
62.40731	27.00606
50.80322	10.61335

# 研究準備

- N体シミュレーションの準備として、まず**test particleで軌道シミュレーションをする**。3つのパラメータを決めるのための計算にN体でやっているのは時間がかかるため、1粒子で計算する。

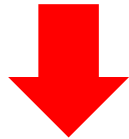
- Test particleで、  
図のような観測に合う  
軌道をシミュレーションで  
描きたい。





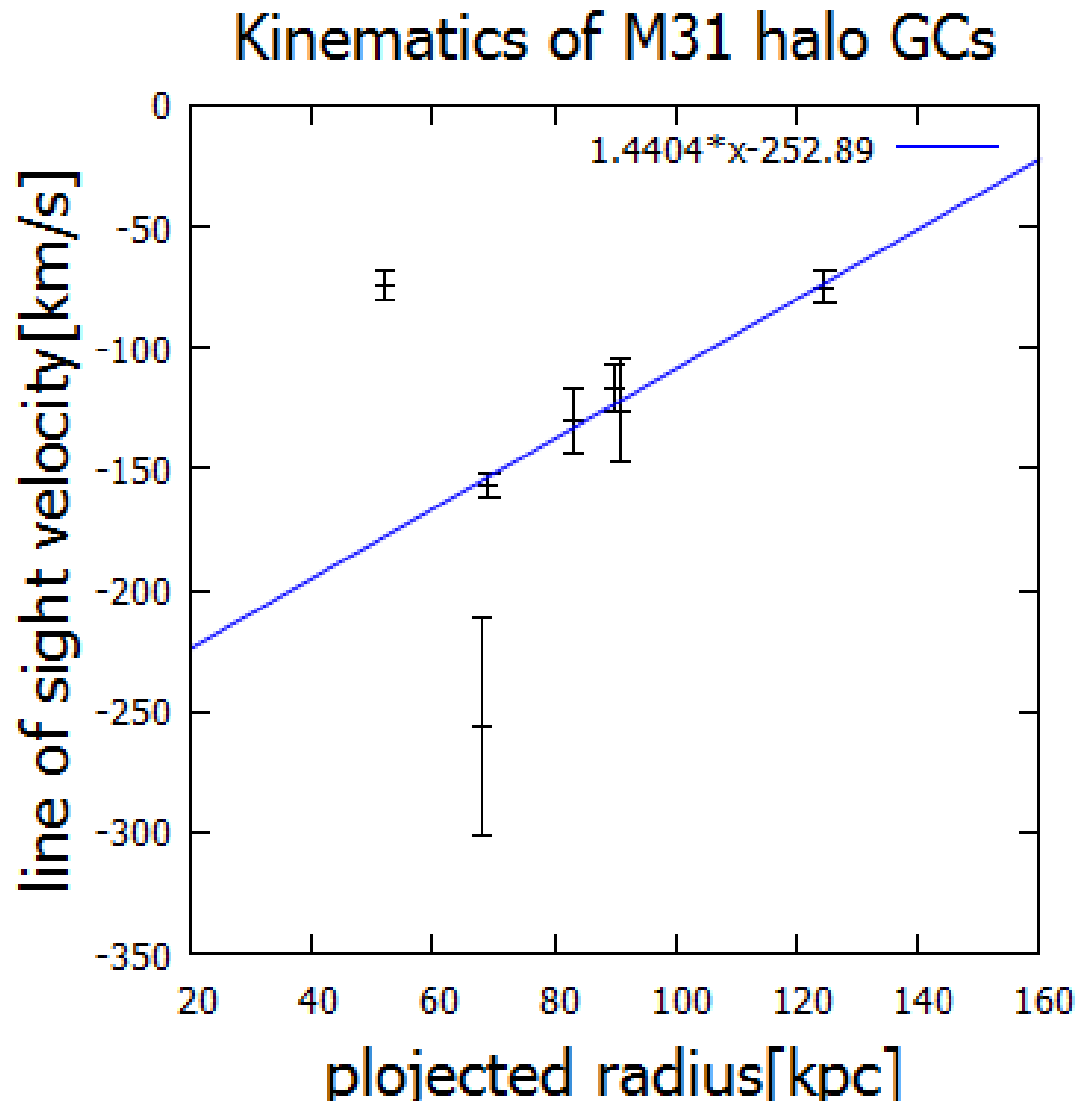
# 研究準備

- 左二つのGCは視線速度が連続ではないため、North-West Streamではない可能性もある。



初めは左から3番目のGCを初期位置とする。

$x_0$	62.25 kpc
$y_0$	30.23 kpc



# 研究準備

- **M31はポテンシャルとして扱う。**(矮小銀河衝突でM31のポテンシャルが変化をしないと仮定)
- M31ポテンシャルにはダークマター・バルジ・円盤モデルがある。
- ただし本研究は初めに**円盤モデルを入れない球対称ポテンシャル**で計算する。(M31の距離より十分遠方しか扱わないため)
- **重力が正しく計算に組み込んでいるかを確認**する。  
(研究されてきたアンドロメダストリームと呼ばれる南東のStreamの再現をすることで確かめる。)



# M31ポテンシャルモデル

- ・ダークマターハローモデル(Navarro, Frenk & White. 1996)

M31ダークマターハローモデルはNFWモデルを導入する。

NFWプロファイルは

$$\rho_{NFW}(r) = \frac{\rho_s}{(r/r_s) (1 + r/r_s)^2}$$

上の式を空間積分して質量分布は

$$M_{NFW}(r) = 4\pi\rho_sr_s^3 \left[ \ln\left(\frac{r+r_s}{r_s}\right) - \frac{r}{r+r_s} \right]$$

Fardal et al. (2007)からスケール密度、スケール長をそれぞれ

$$\rho_s = 6.17 \times 10^7 \text{M}_\odot \text{kpc}^{-3} \quad r_s = 7.63 \text{kpc}$$

としている。

# M31ポテンシャルモデル

- M31のバルジモデル(Hernquist, 1990)

バルジはHernquistモデルを用いる。密度分布は

$$\rho_b(r) = \left( \frac{M_b}{2\pi r_b^2} \right) \frac{1}{(r/r_b)(1 + r/r_b)^3}$$

半径 $r$ 以内の質量は上の式を空間積分すると

$$M_b(r) = \frac{M_b r^2}{(r_b + r)^2}$$

Geehan et al.(2006) Fardal et al.(2007)よりバルジの全質量、  
スケール長はそれぞれ

$$M_b = 3.24 \times 10^{10} M_{\odot} \quad r_b = 0.61 \text{kpc}$$

を採用している。

# 数値計算方法

- N体シミュレーション

星やダークマターをN個の粒子として、粒子同士に働く力を計算する手法。粒子質量 $m$ の $i$ 番目の粒子が受ける重力は、

$$a_i = Gm \sum_{j(j \neq i)}^N \frac{x_j - x_i}{\left(|x_j - x_i|^2 + \varepsilon^2\right)^{3/2}}$$

と表すことができる。ポテンシャルの導入は

$$a_i = G\{M_{NFW}(r_i) + M_b(r_i)\} \sum_i^N \frac{x_i}{|x_i|^3}$$

を足すことでできる。 $\varepsilon$ はソフトニングパラメーター。

Test particleであるならば2番目の式だけでよい。

# 数値計算方法

- 積分法

数値積分する際に積分法としてleap-frog法を使う。

leap-frog法は

$$\begin{aligned}v^{n+1/2} &= v^{n-1/2} + \Delta t a(x^n) \\ x^{n+1} &= x^n + \Delta t v^{n+1/2}\end{aligned}$$

で与えられるが、位置と速度が $\Delta t/2$ ずれた時間でしか定義されていない。そこで計算を始める出発用公式として

$$v^{1/2} = v^0 + \Delta t a(x^0)/2$$

終了時同じ時間に合わせるために終了用公式として

$$v^n = v^{n-1/2} + \Delta t a(x^n)/2$$

を使用する。

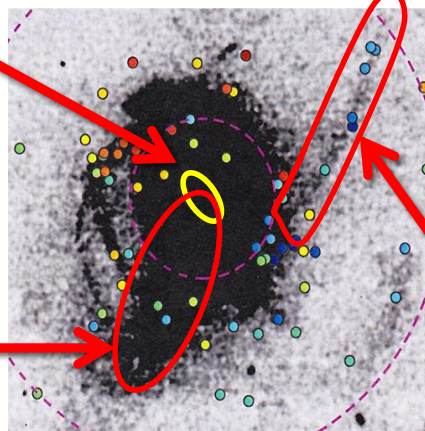
# 計算結果

- この計算はアンドロメダストリームの軌道を再現できるかをチェックするためのもの。
- アンドロメダストリームはこれまでによく研究されてきた。

Fardal et al.(2007) Mori & Rich(2008)

Miki et al.他

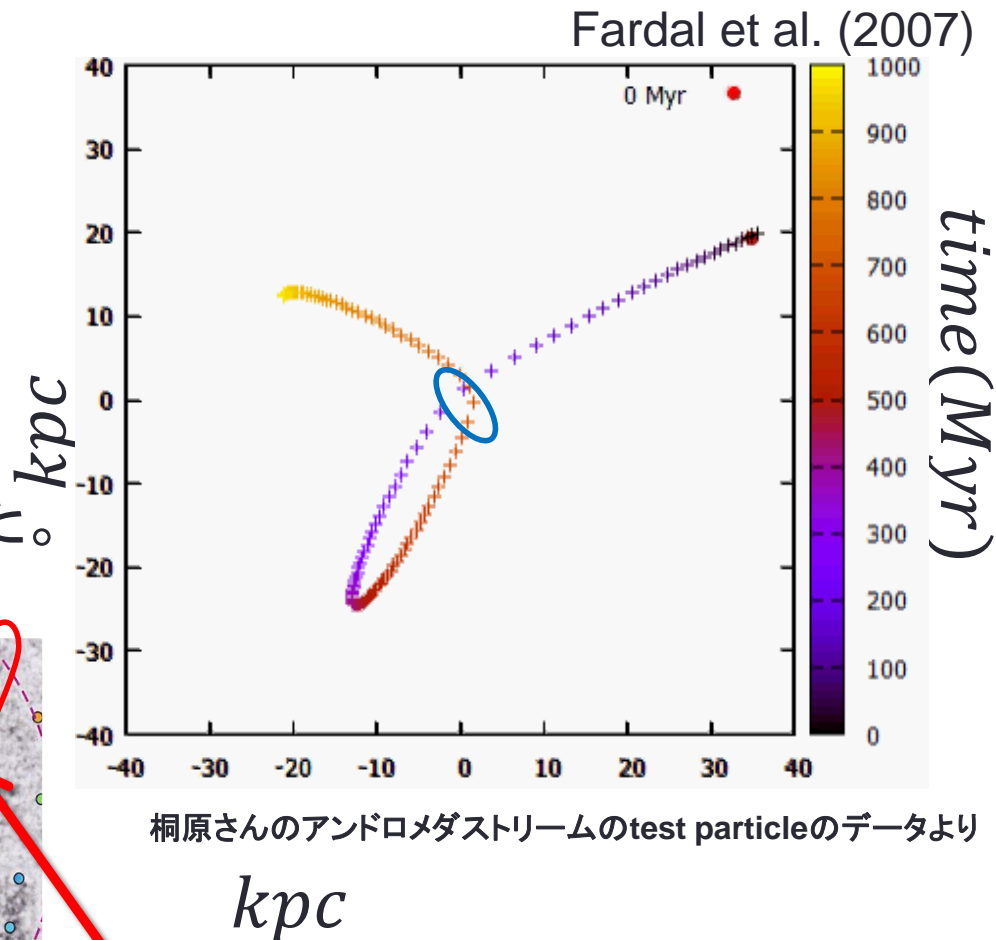
M31 Disk



Andromeda Stream

North-West Stream

$x_0$	-34.75 kpc	$V_{x0}$	$67.34 \text{ km s}^{-1}$
$y_0$	19.37 kpc	$V_{y0}$	$-26.12 \text{ km s}^{-1}$
$z_0$	-13.99 kpc	$V_{z0}$	$13.50 \text{ km s}^{-1}$



桐原さんのアンドロメダストリームのtest particleのデータより

# 計算結果考察

- 重力が正しく計算にとりいれられていることが確かめられた。

円盤に直接衝突した時( $t \sim 200$  Myr)は円盤の有無により軌道がずれるが、遠方の時( $t = 0 \sim 200$  Myr)で軌道がほぼ重なり、時間もほぼ一致している。

North-West Stream形成シミュレーション時では十分遠方(30kpc $\sim$ 130kpc)な軌道計算になるため、**円盤の影響を無視できると仮定できる。**

# 今後について

test particleでNorth-West Streamの軌道計算をすることで**未知の初期値に制限を付ける**。

(未知の初期値＝奥行方向の距離、視線速度以外の速度パラメータ)



plummerモデルを矮小銀河に導入し、test particleで制限を付けた初期値で**N体シミュレーションを行う**。



# まとめ

- North-West Streamの観測事実を整理した。
- N体シミュレーションコードを作成した。
- 今回はN体シミュレーションの準備としてtest particleの初期位置を決めて重力計算がきちんと行われているかの確認をした。

# 参考文献

- J.Veljanoski et al.(2013)
- J.Veljanoski et al.(2014)
- 桐原さん 修士論文
- N体シミュレーション小寒の学校教科書2014.1.15-17
- van der Marel & Guhathakurta(2008)
- Fardal et al.(2007)