



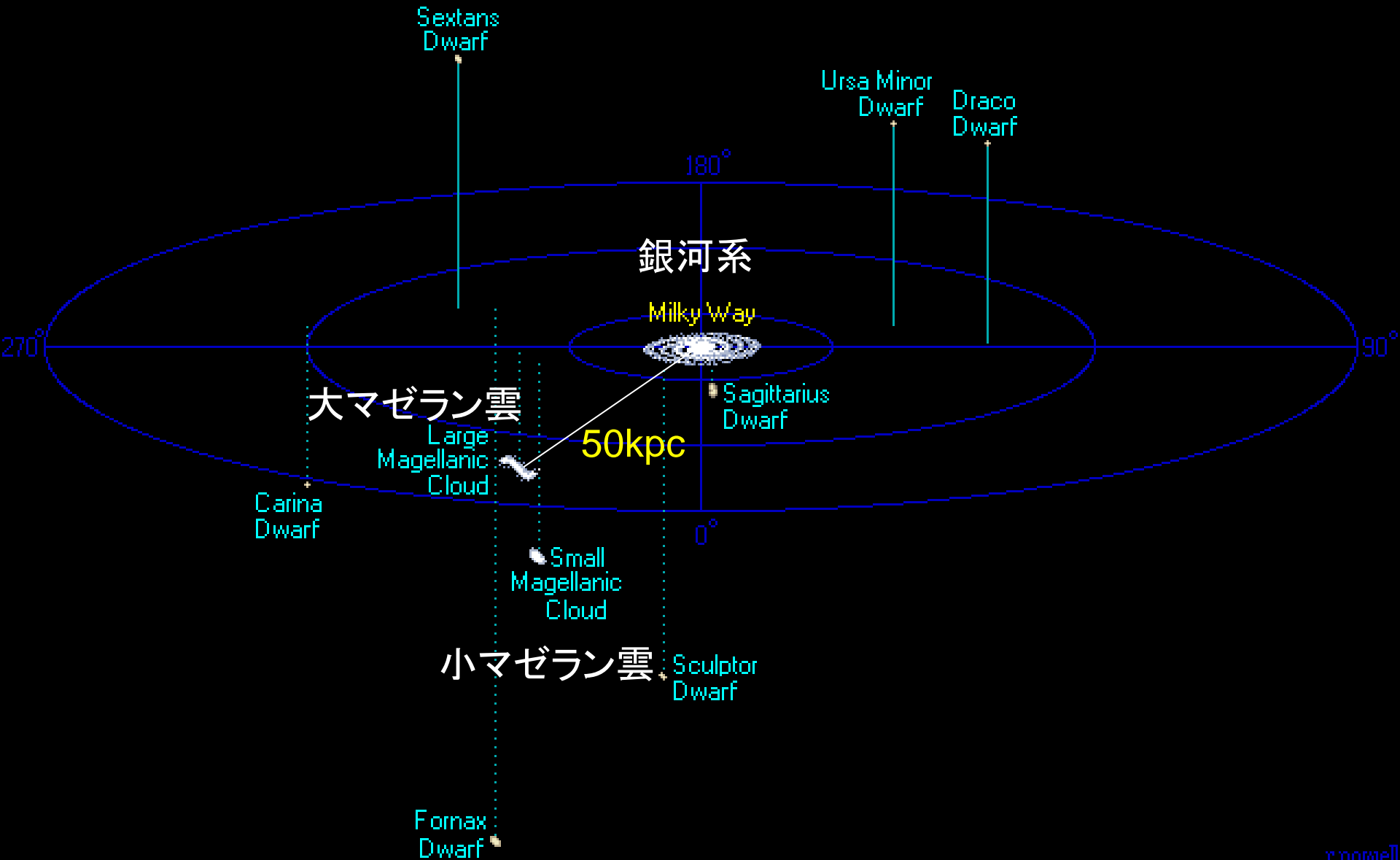
# SKAによる 局所銀河群銀河のダイナミクス

千葉 柁司  
(東北大学)

# 内容

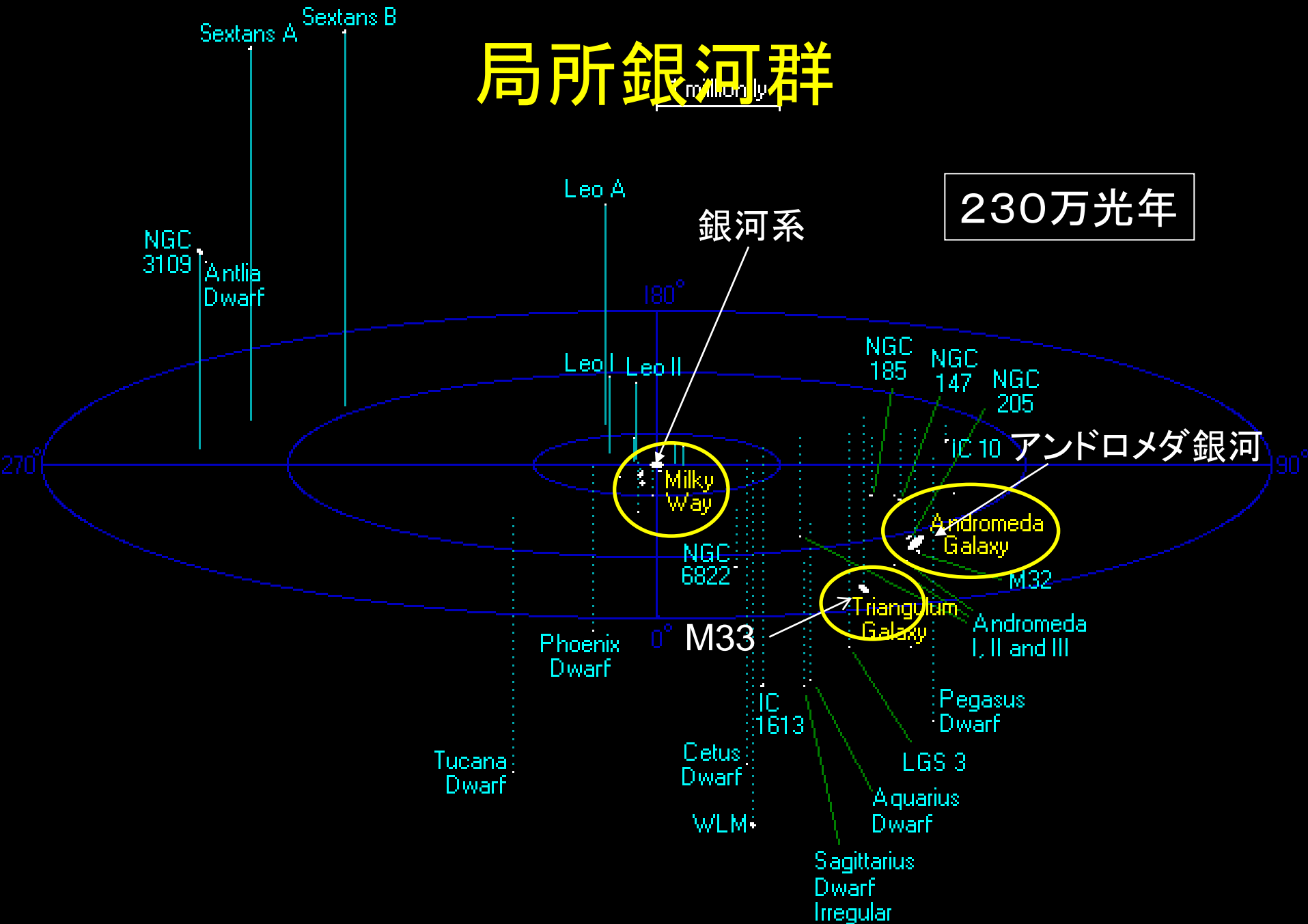
- 局所銀河群とは
- マゼラン雲の運動
- アンドロメダ銀河の運動
- 銀河系質量分布の決定
- まとめ

# 銀河系と衛星銀河



# 局所銀河群

230万光年



# 銀河系の明るい衛星銀河

Name	Type	$l$ [deg]	$b$ [deg]	$D_{\odot}$ [kpc]	$D_{LG}$ [Mpc]	$M_V$ [mag]	$\mu_V$ [mag/'' <sup>2</sup> ]	$\langle [Fe/H] \rangle$ [dex]
Galaxy	S(B)bcI-II	0.00	0.00	8	0.47	-20.9	—	—
Sgr	dSph,N?	6.00	-15.00	28	0.47	-13.8	25.4	-1.0
LMC	IrIII-IV	280.46	-32.89	50	0.49	-18.5	20.7	-0.7
SMC	IrIV/IV-V	302.80	-44.30	63	0.49	-17.1	22.1	-1.0
UMi	dSph	104.95	44.80	69	0.44	-8.9	25.5	-2.2
Dra	dSph	86.37	34.72	79	0.44	-8.6	25.3	-2.1
Sex	dSph	243.50	42.27	86	0.52	-9.5	26.2	-1.7
Scl	dSph	287.54	-83.16	88	0.45	-9.8	23.7	-1.8
Car	dSph	260.11	-22.22	94	0.52	-9.4	25.5	-2.0
For	dSph	237.29	-65.65	138	0.46	-13.1	23.4	-1.3
Leo II	dSph	220.17	67.23	205	0.57	-10.1	24.0	-1.9
Leo I	dSph	225.98	49.11	270	0.63	-11.9	22.4	-1.5
Phe	dIrr/dSph	272.49	-68.82	405	0.60	-9.8	—	-1.8
NGC 6822	IrIV-V	25.34	-18.39	500	0.68	-16.0	21.4	-1.2



Scl

Car

For

Leo II

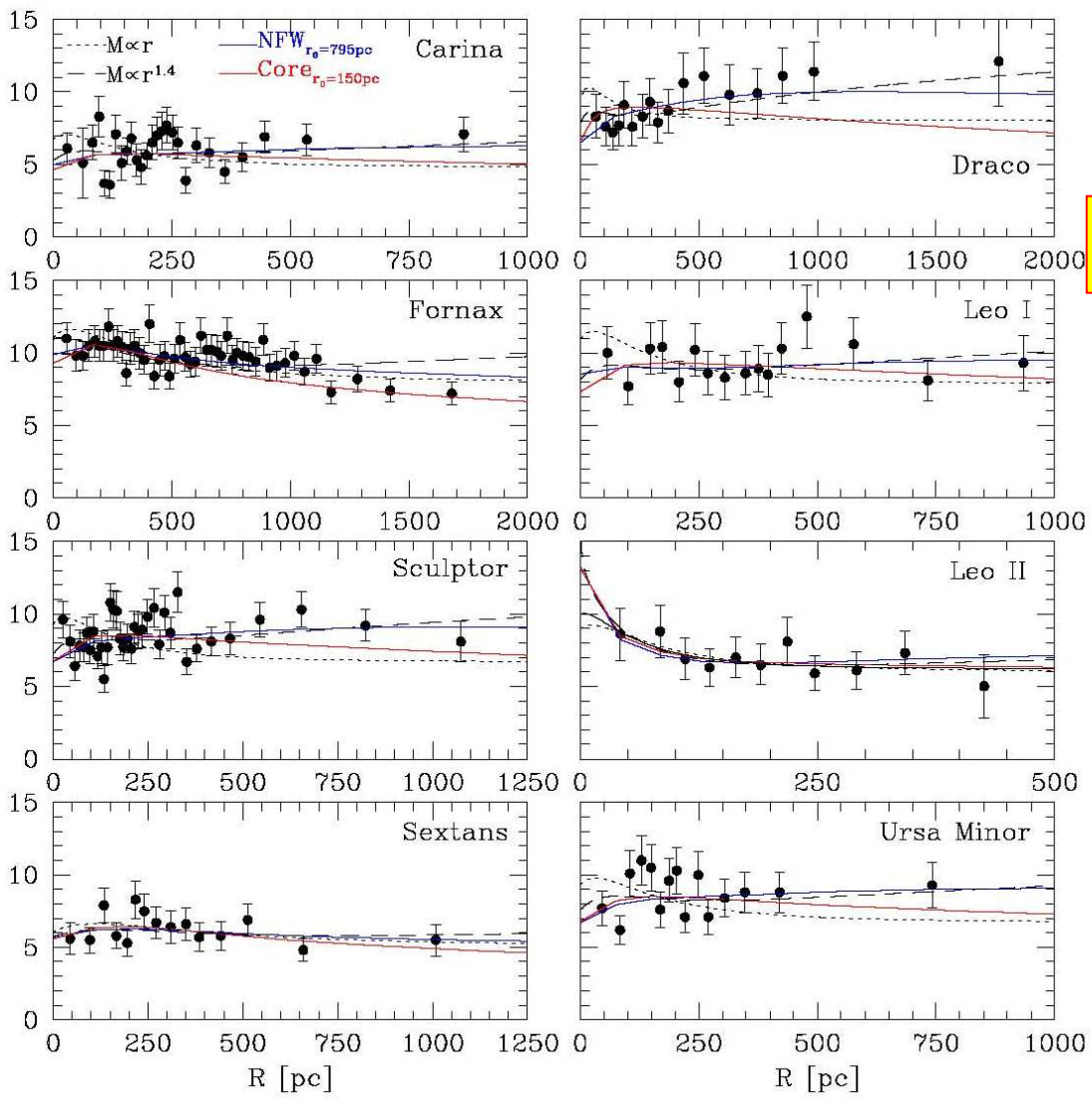
Leo I

Phe<sup>5</sup>

# 銀河系の矮小楕円体銀河 dSphs における恒星の速度分散プロファイル

(Walker+ 2009)

視線速度分散  $\sigma_{\text{los}} \text{ (km/s)}$



恒星系の視線速度分布



質量分布  $M(r)$

$$\frac{1}{v} \frac{d(\overline{v v_r^2})}{dr} + 2 \frac{\overline{\beta v_r^2}}{r} = - \frac{d\Phi}{dr} = - \frac{GM(r)}{r^2}$$

Jeans eq.

$$\beta = \text{const.} \Rightarrow \overline{v v_r^2} = r^{-2\beta} \int_r^\infty \frac{v GM(r)}{r^2} r^{2\beta} dr$$

$$V_{\text{circ}}(r) = \sqrt{\frac{GM(r)}{r}} \quad \text{Rotation curve}$$

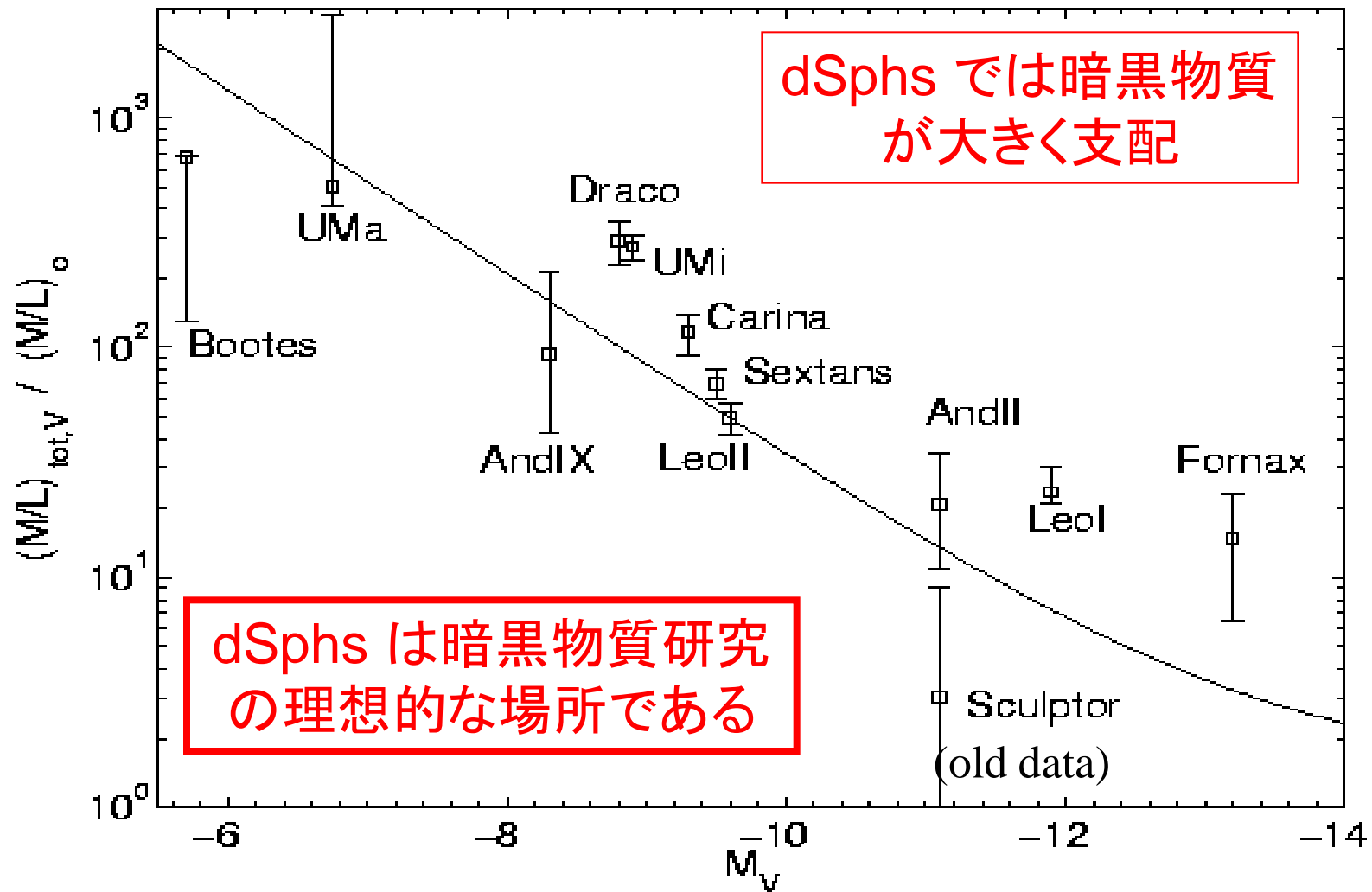


ベストフィット  $M(r)$

暗黒物質の空間分布  
⇒ 暗黒物質の性質

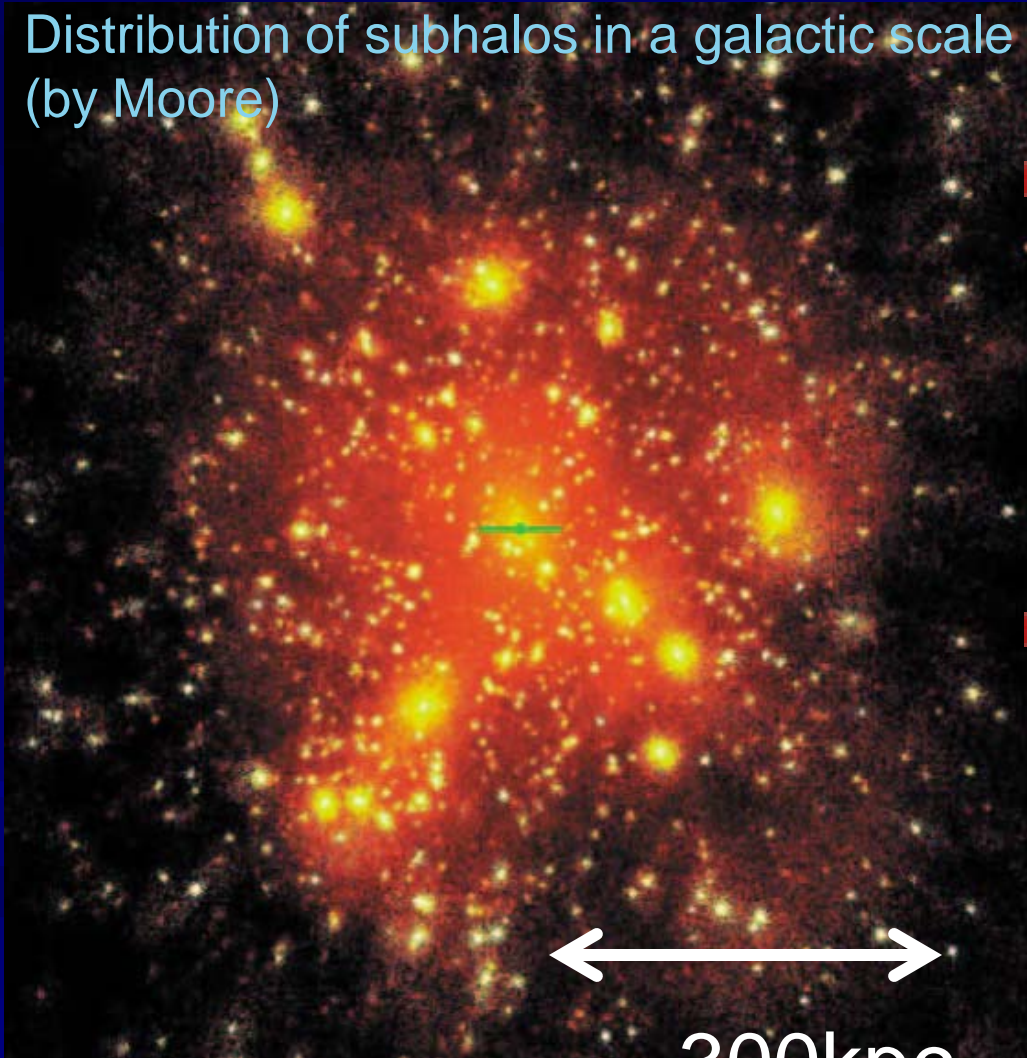
# 恒星系が分布する領域内の質量光度比

Gilmore+ 2007



# ミッシングサテライト問題

Distribution of subhalos in a galactic scale  
(by Moore)



~300kpc

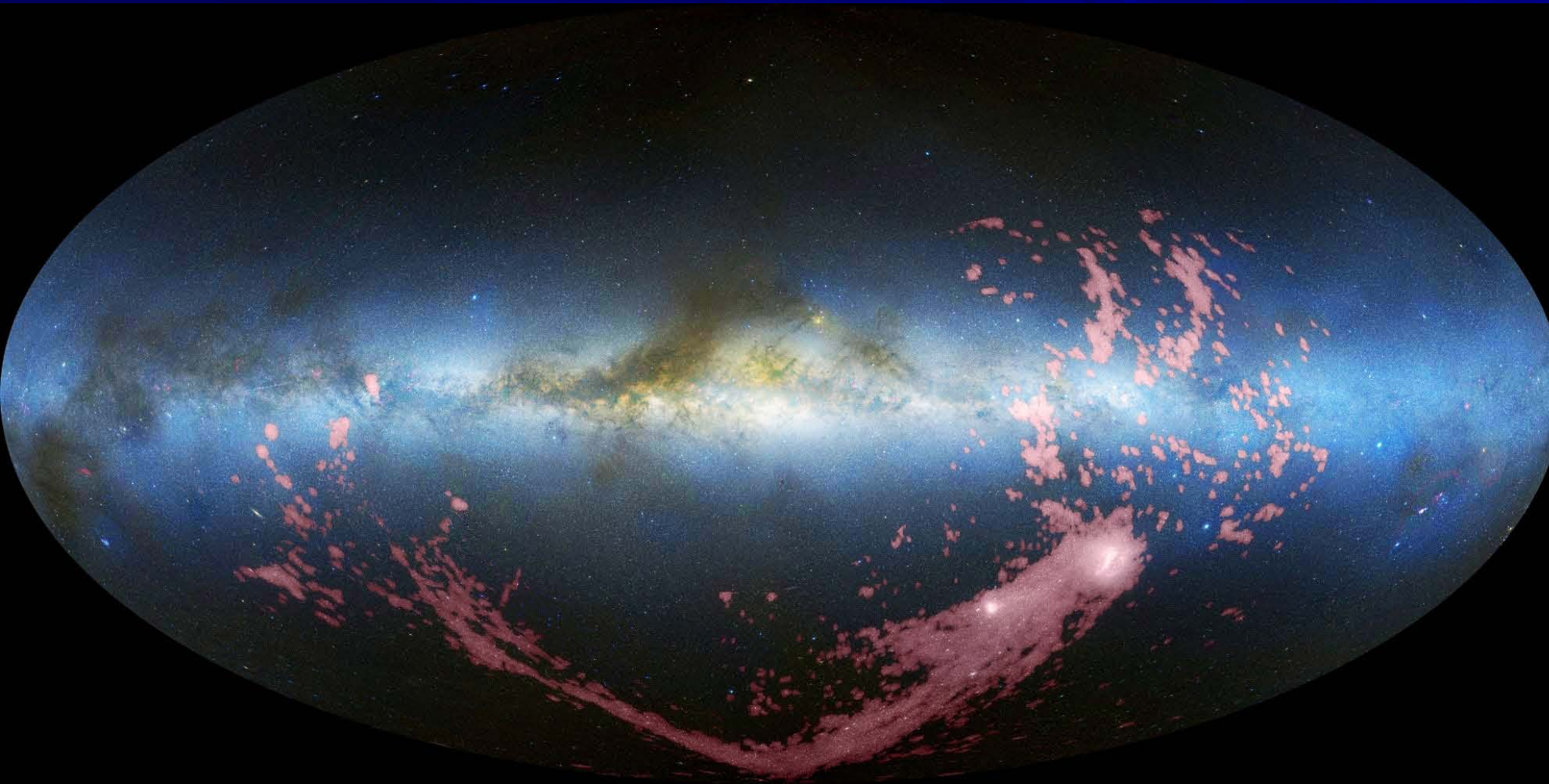
- 銀河系伴銀河の数はサブハローの数に比べて圧倒的に少ない
  - SDSSによって見つかった暗い矮小銀河を含めても20数個程度
- 一方、我々は矮小銀河の多くをまだ観測できていない
  - SDSSは全天の一部のみ観測
  - 遠くて暗い矮小銀河の見落とし
  - 暗い表面輝度の銀河の見落とし



# 内容

- 局所銀河群とは
- マゼラン雲の運動
- アンドロメダ銀河の運動
- 銀河系質量分布の決定
- まとめ

# The Magellanic Stream



b=-45deg

# Tip of The Stream

Stream

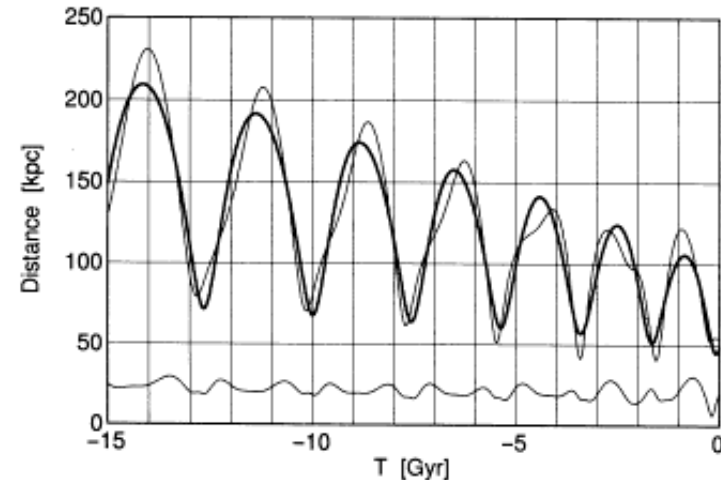
Bridge

LMC

SMC

Leading Arm

Gardiner, Sawa, Fujimoto 94  
Gardiner & Noguchi 96



**Figure 4.** Time variation of the Galaxy-Magellanic Clouds distance and the LMC-SMC separation for the combination of current Magellanic space velocities that gives our 'best' simulation. The perigalactic distance of the LMC is 45 kpc, and the current SMC velocity is  $(40, -185, 171)$  km s<sup>-1</sup>. The curves are the same as in Fig. 3.

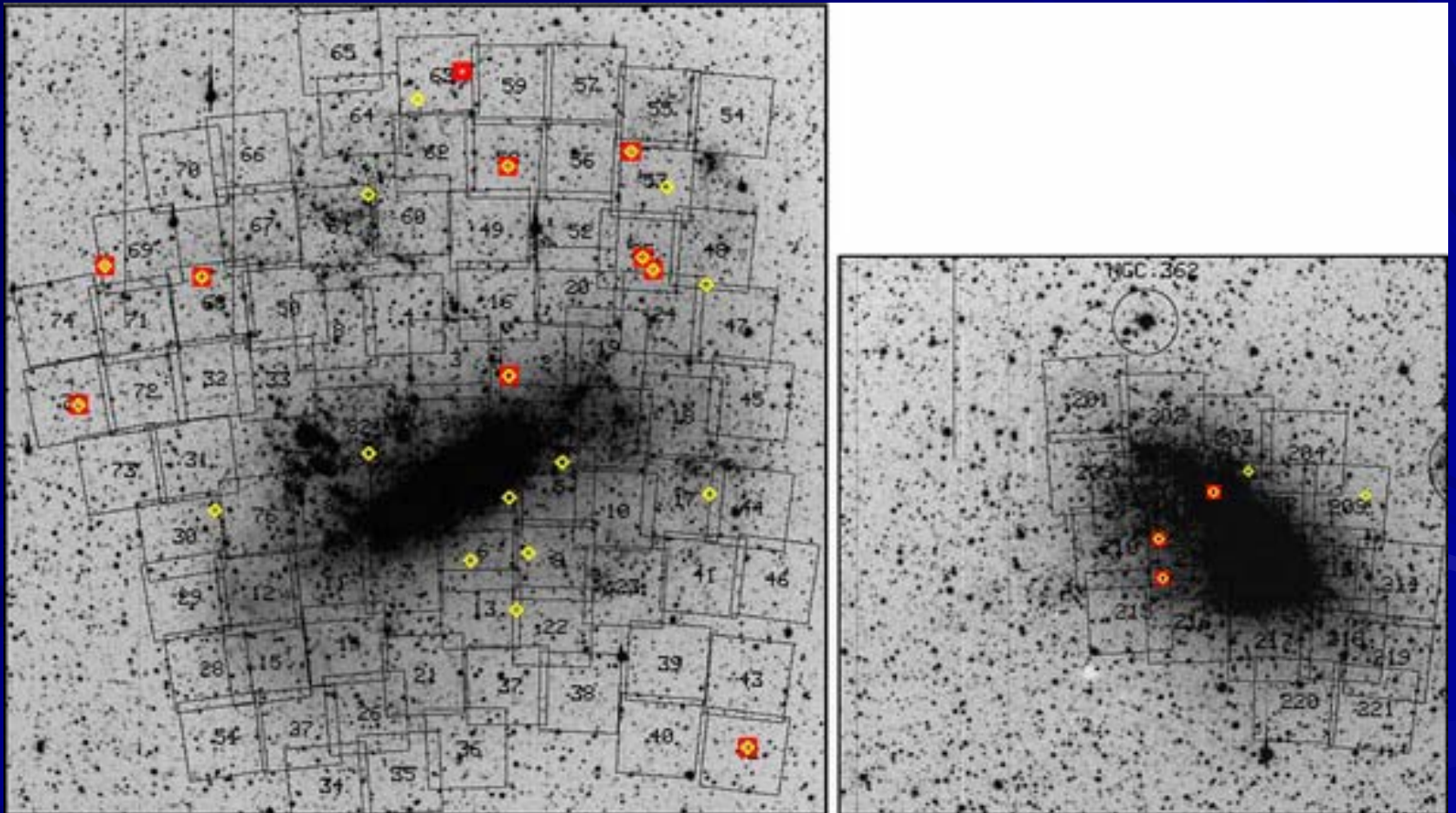
Putman et al.  
(2003)

# HSTによる固有運動決定

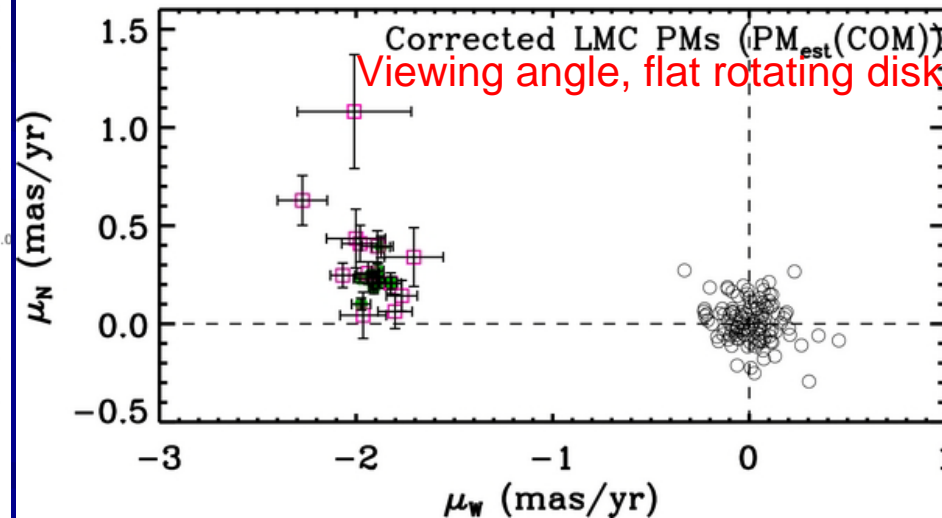
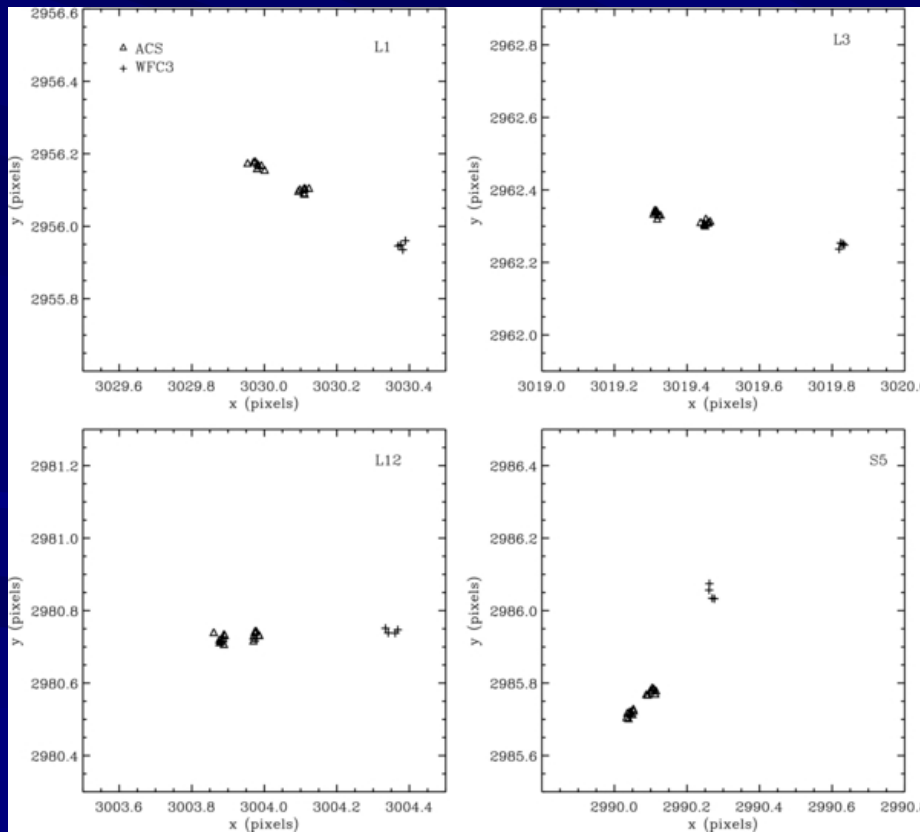
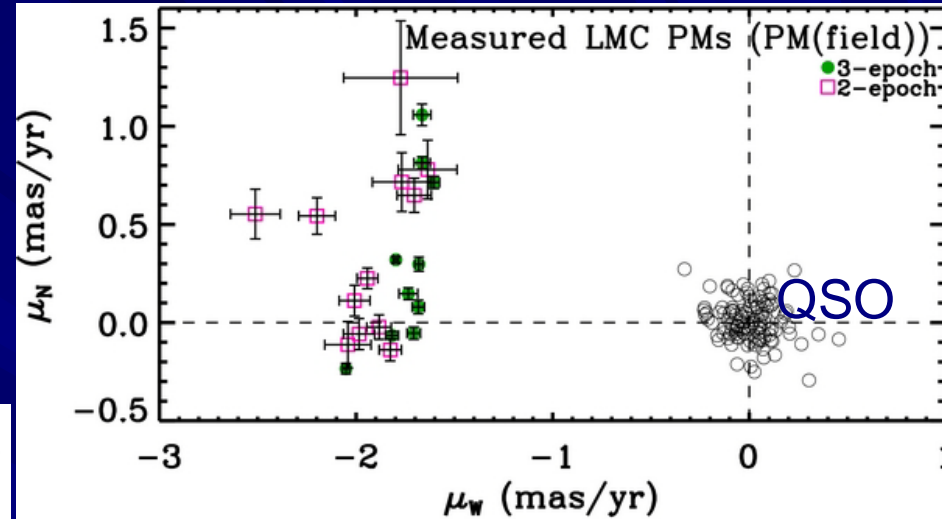
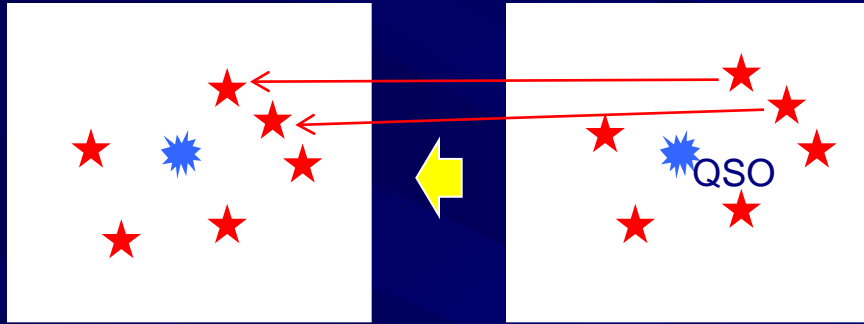
(Kallivayalil+06ab, Kallivayalil+13, van der Marel+13)

54 QSOs behind MCs  $\Rightarrow$  26 QSOs used

2 epochs (2 yrs), 3 epochs (7 yrs)

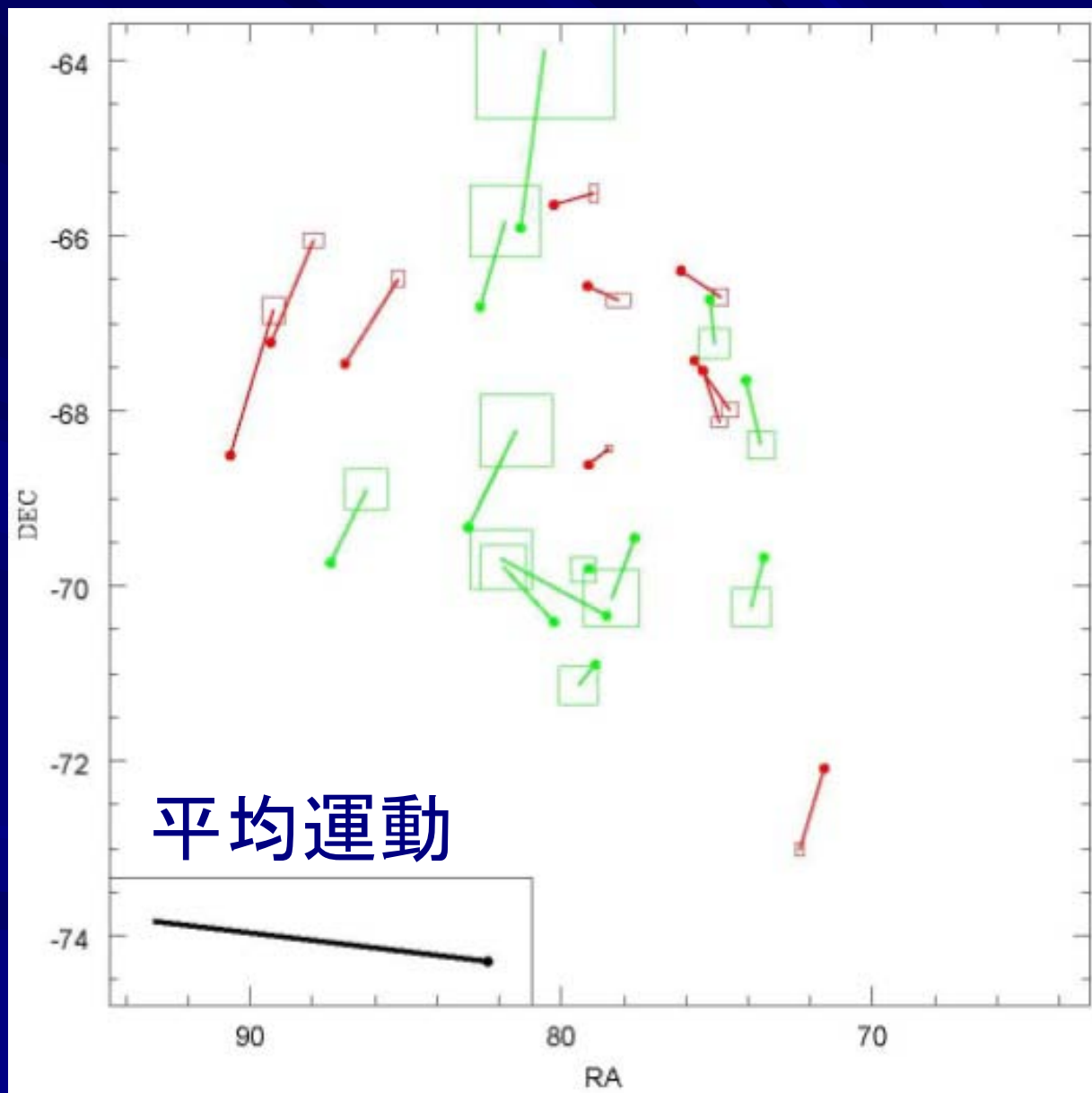


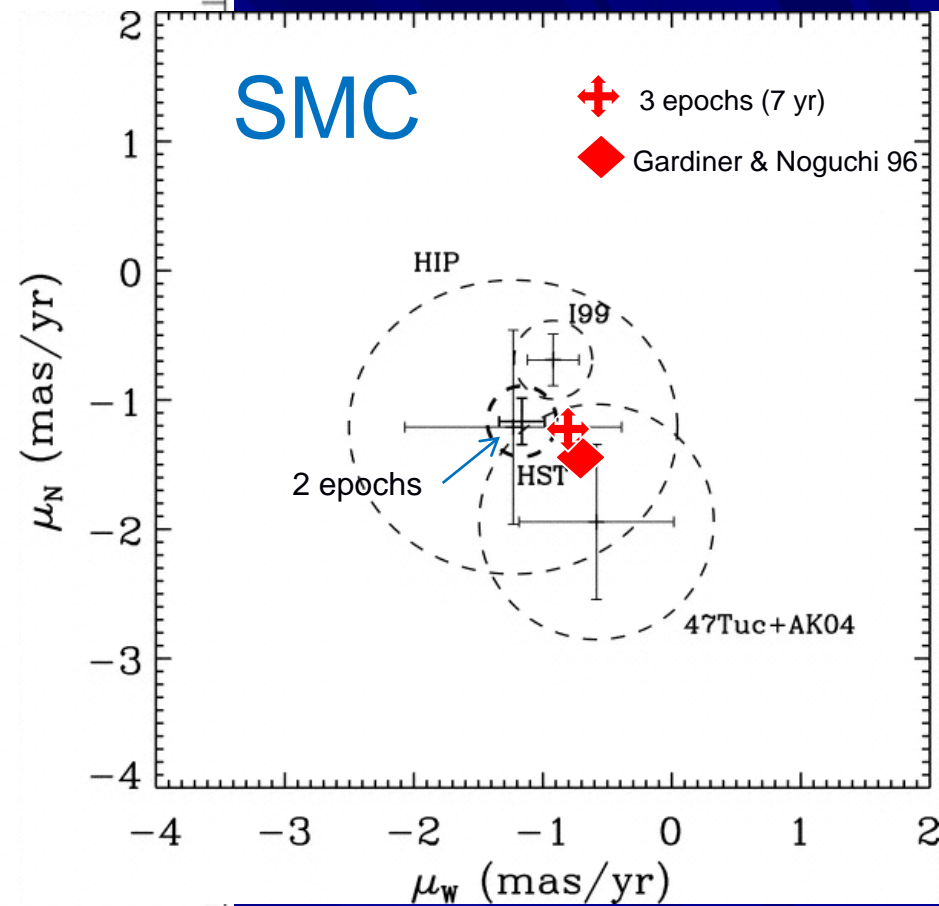
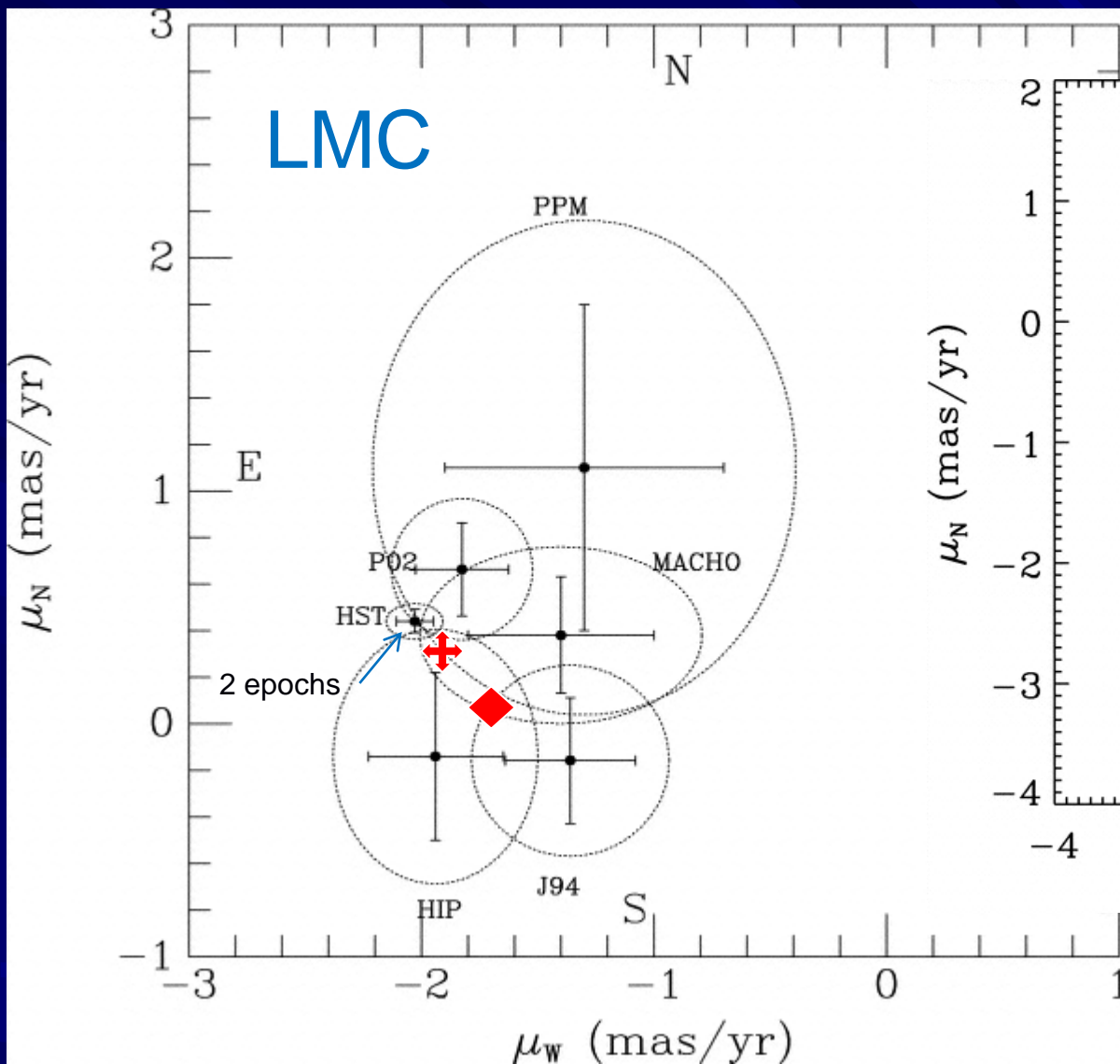
# 固有運動決定



1pix=25mas

# LMCの内部運動(固有運動から)





$$\mu_W = -1.910 \pm 0.020 \text{ mas yr}^{-1}$$

$$\mu_N = 0.229 \pm 0.047 \text{ mas yr}^{-1}$$

$$V_{\text{tot}} = 321 \pm 24 \text{ km/s (3 epochs)}$$

$$\leftarrow 378 \pm 31 \text{ km/s (2 epochs) : GN96: 287 km/s}$$

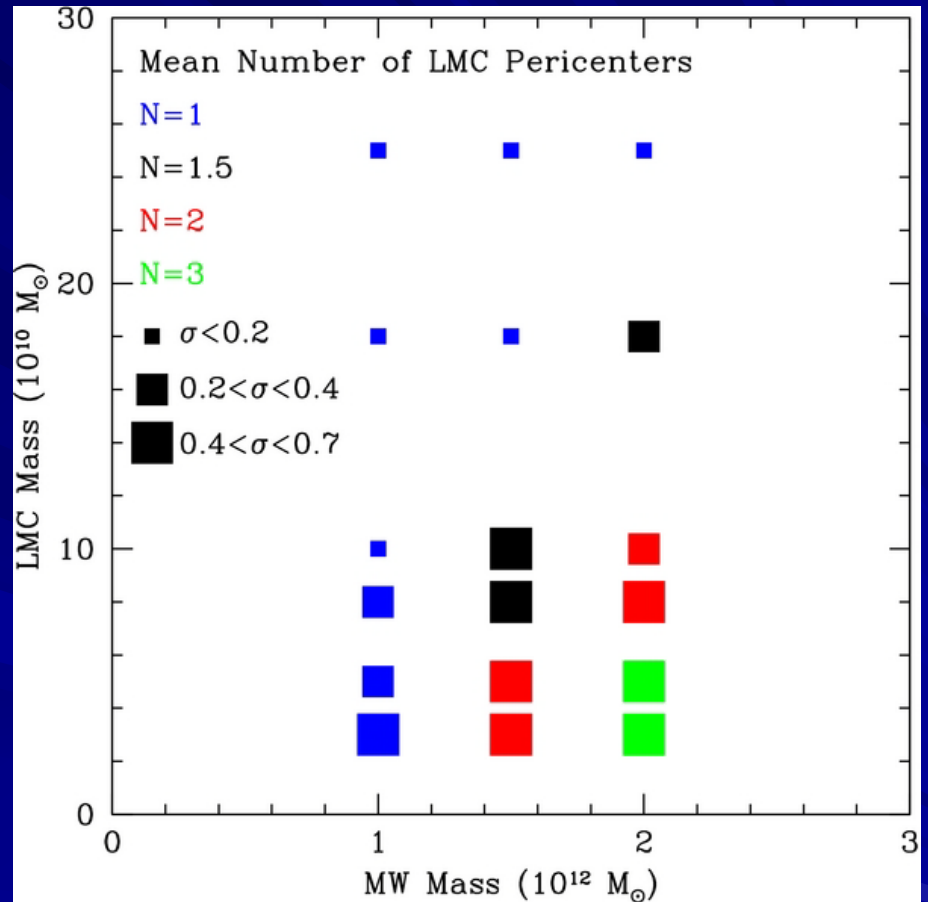
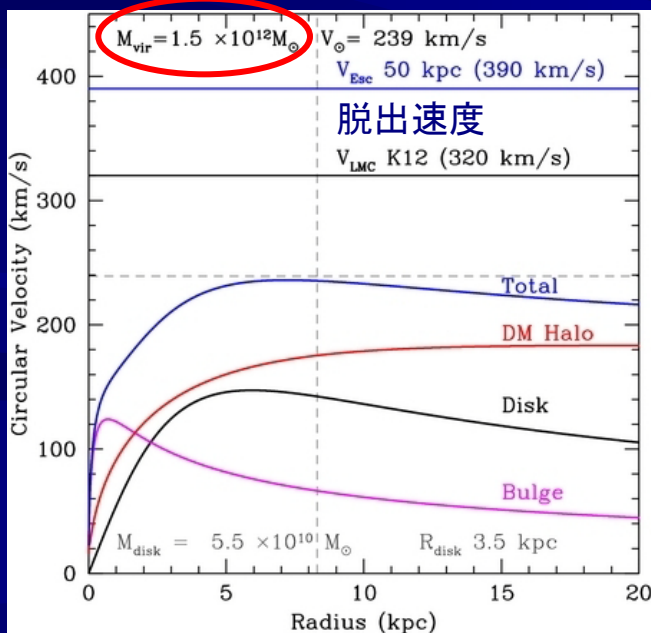
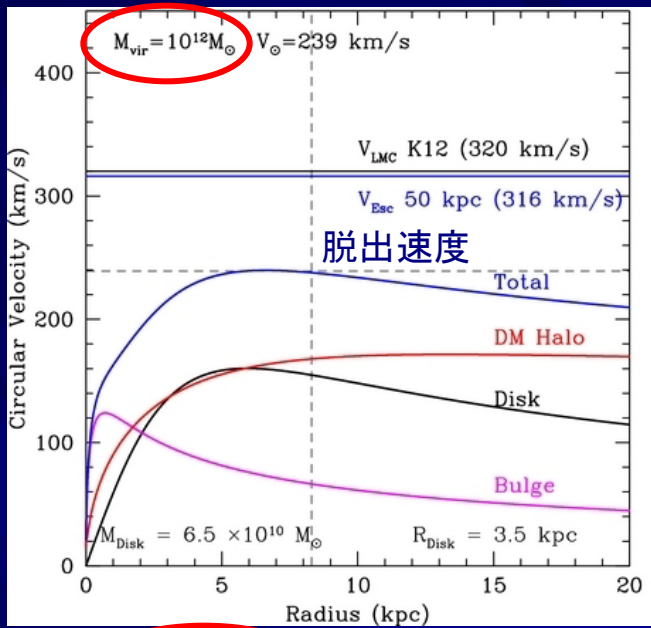
$$\mu_W = -0.772 \pm 0.063 \text{ mas yr}^{-1}$$

$$\mu_N = -1.117 \pm 0.061 \text{ mas yr}^{-1}$$

$$V_{\text{tot}} = 217 \pm 26 \text{ km/s (3 epochs)}$$

$$\leftarrow 302 \pm 57 \text{ km/s (2 epochs)}$$

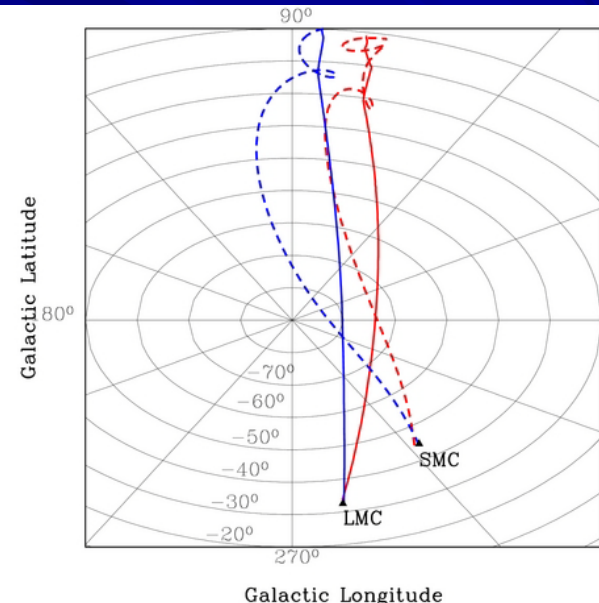
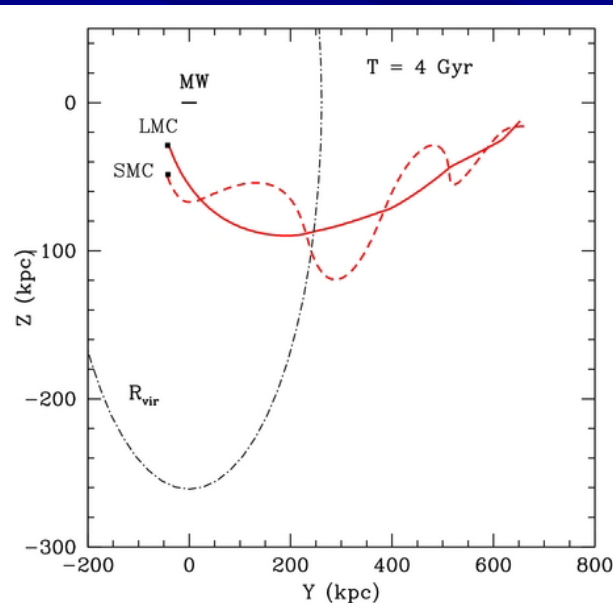
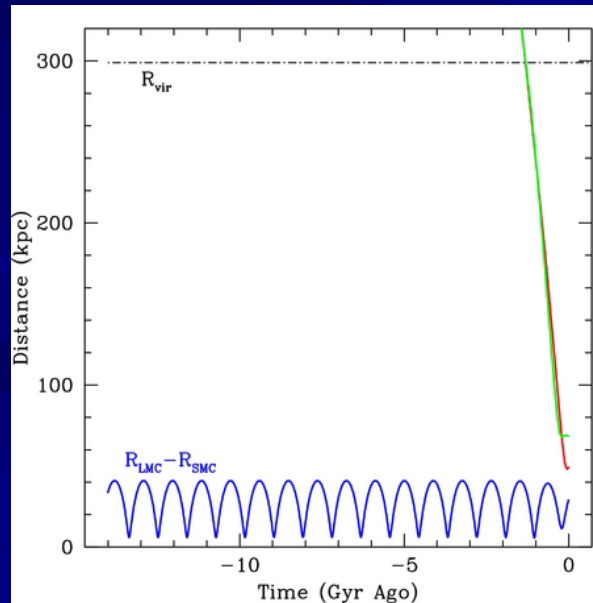
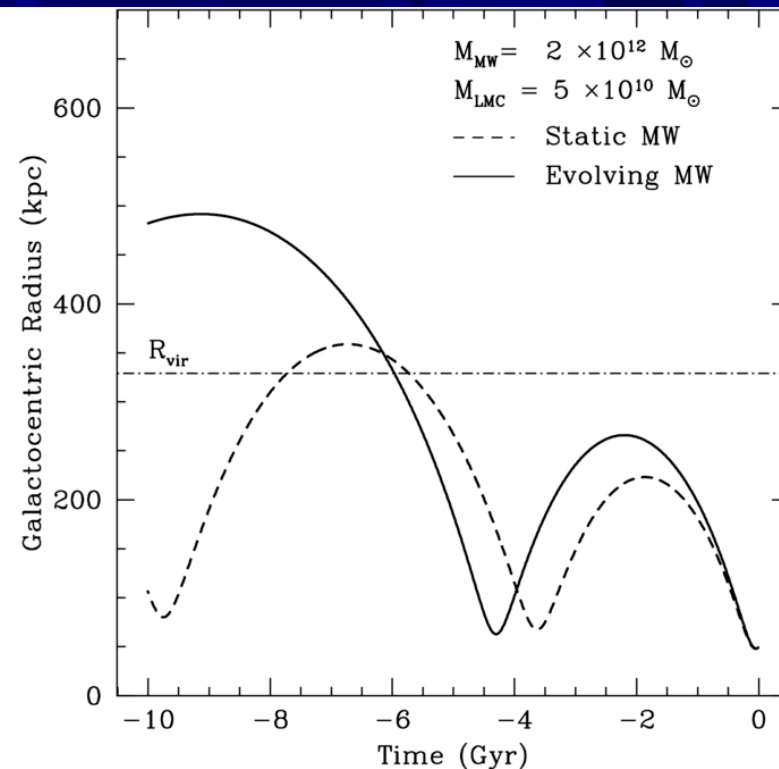
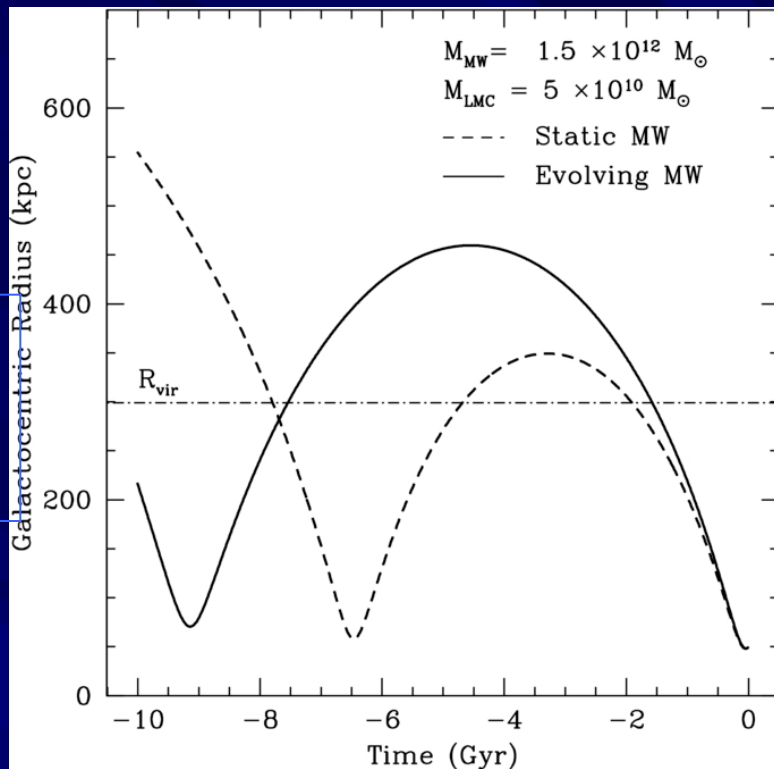
# マゼラン雲の軌道決定



MWの質量次第だが  
 $10^{12} M_{\text{sun}}$ だと  
 $N=1$  (1<sup>st</sup> passage)



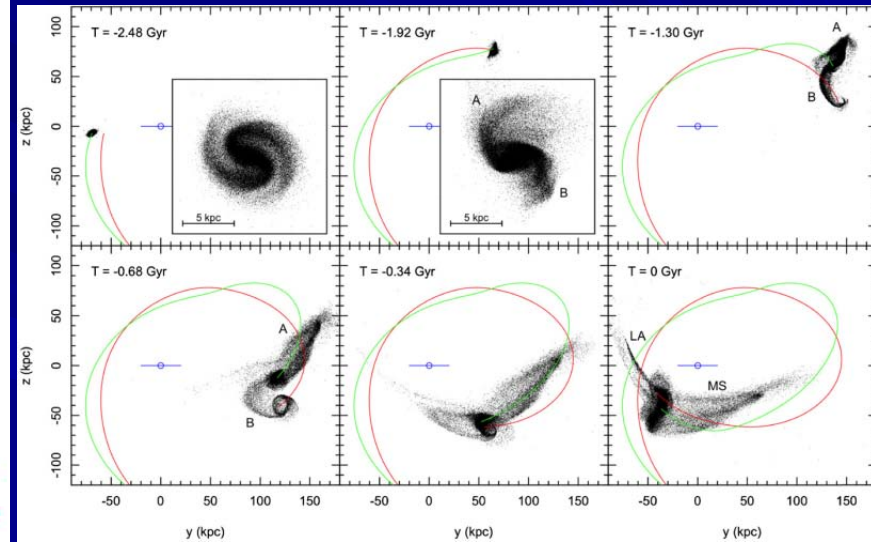
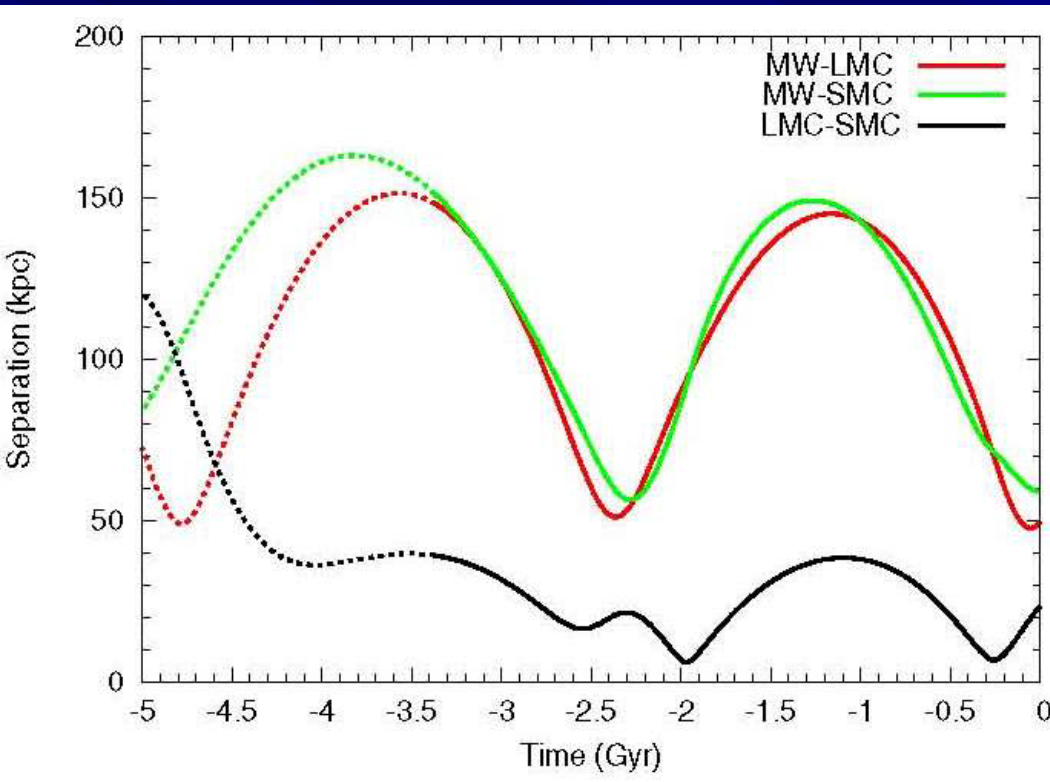
少なくとも  
4Gyr以内では  
今が最初の  
近銀点通過



# Diaz & Bekki 2012

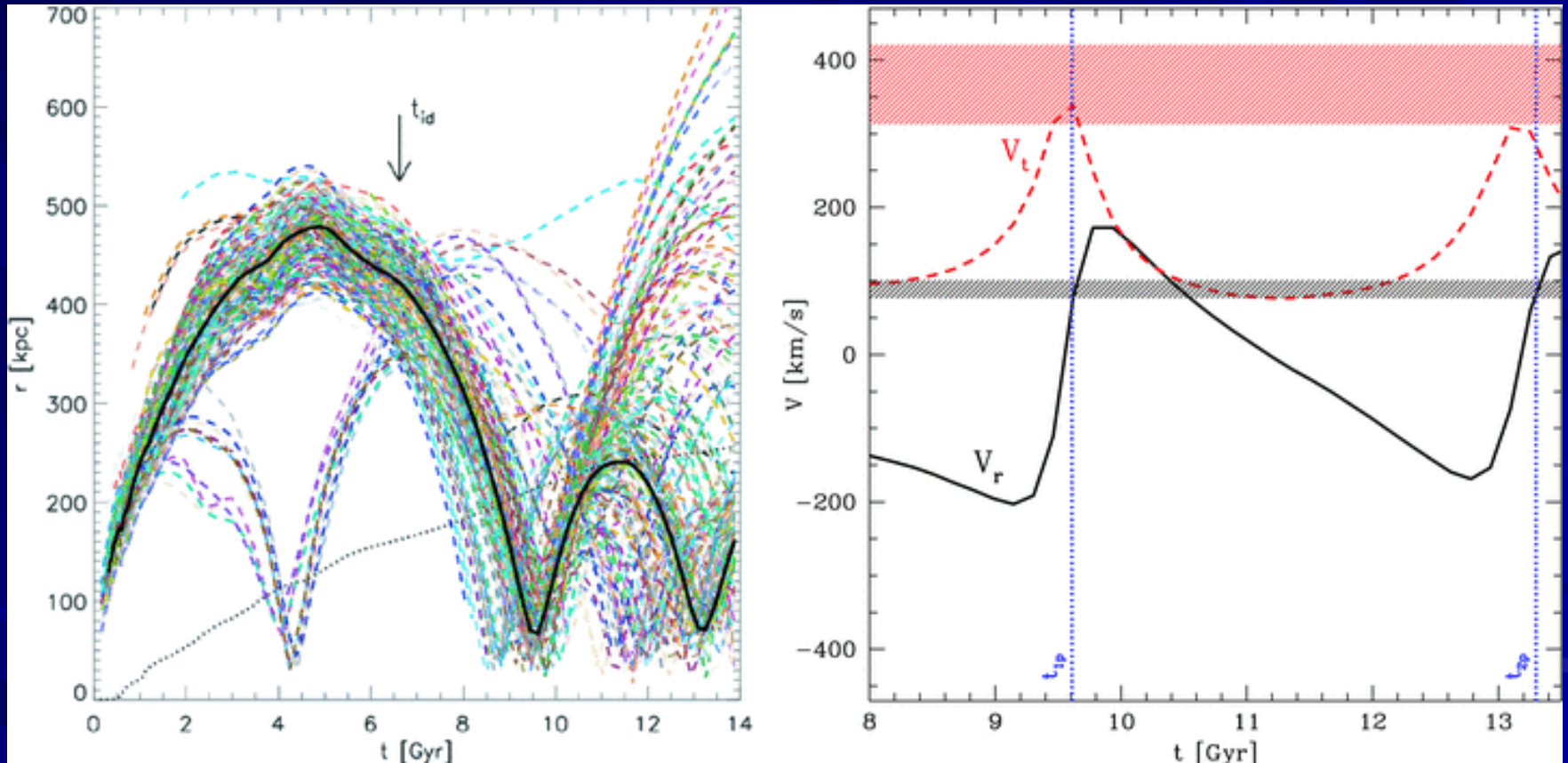
## Magellanic Streamを説明する ベストモデルの軌道

4Gyr 以内に少なくとも2回近銀点通過



どっちが正しいのか？

# 宇宙構造形成シミュレーションに見られる”MW+LMC”の例 (Sales+2011)



$M_{vir} > 1.8 \times 10^{12} M_{sun}$ であれば、  
N=2が可能(これまで2回近銀点を通過)

# 何が問題か？

## SKAによるアストロメトリ

### ■ マゼラン雲の固有運動の系統誤差

- multiple epochsの観測が重要
- 恒星系の内部運動(回転、速度分散)とその空間分布の補正に不定性
- 観測領域がマゼラン雲全体に渡っていない

### ■ 銀河系静止系における速度と銀河質量

- 太陽位置の銀河回転と太陽運動速度の不定性
- 銀河系質量分布、特に中心から50kpcよりも外側の真の質量分布に不定性大。球対称から大きくずれた分布(3軸非対称分布)。

# 内容

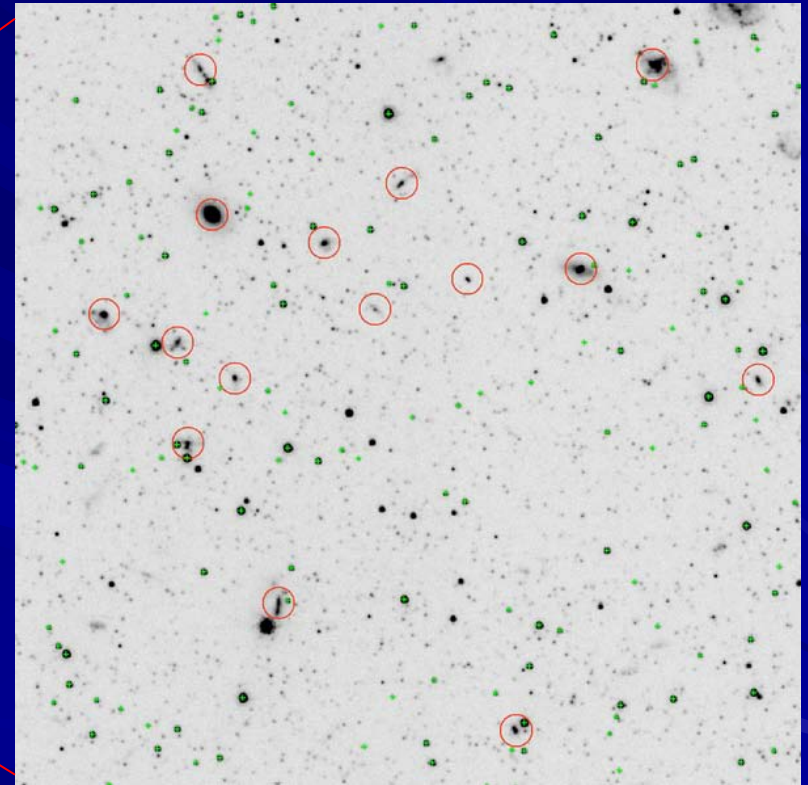
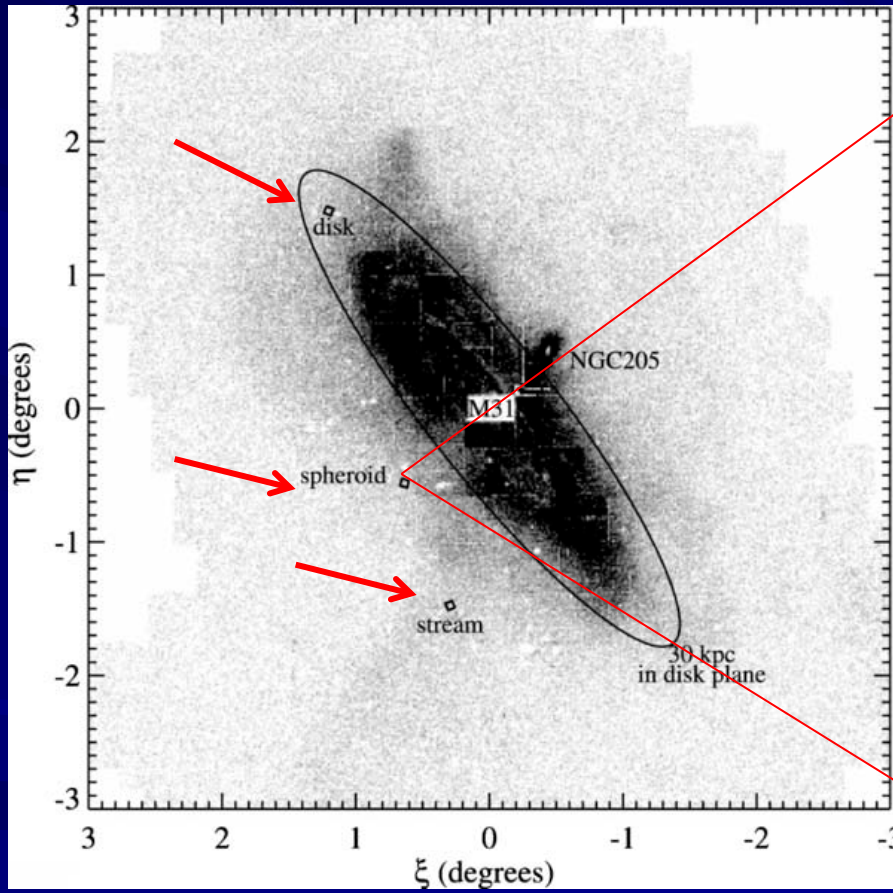
- 局所銀河群とは
- マゼラン雲の運動
- **アンドロメダ銀河の運動**
- 銀河系質量分布の決定
- まとめ

# アンドロメダ銀河の運動

- $D \sim 770 \text{ kpc}$
- $V_{\text{helio}} \sim -300 \text{ km/s}$   
( $V_{\text{GSR}} \sim -100 \text{ km/s}$ )
- $V_{\text{tan}} ?$   
軌道角運動量  
とその起源?
- $M_{\text{tot}} ?$   
Timing argument

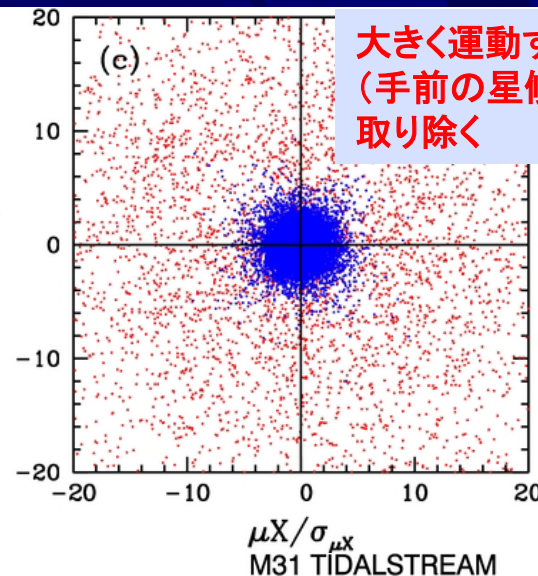
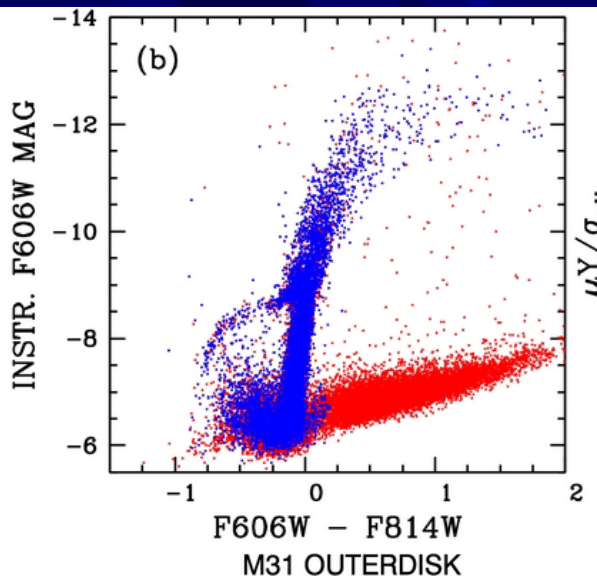
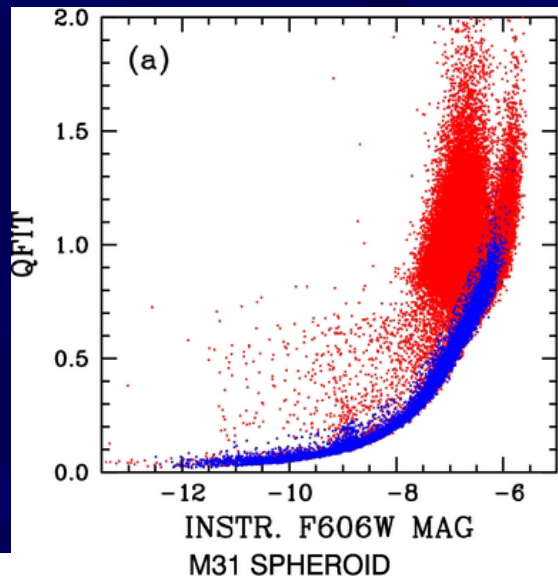


# HSTによる固有運動決定 (Sohn+12, van der Marel+12ab)

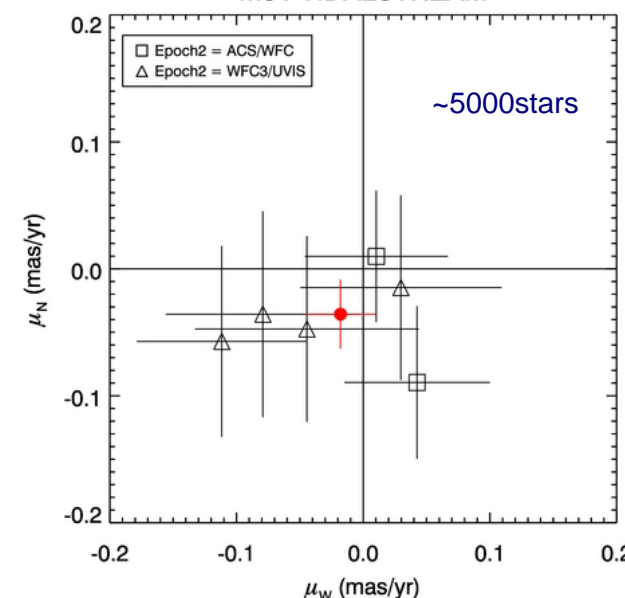
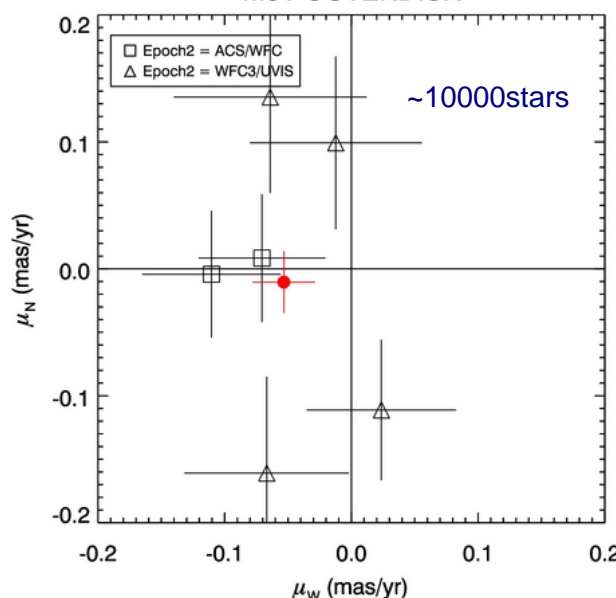
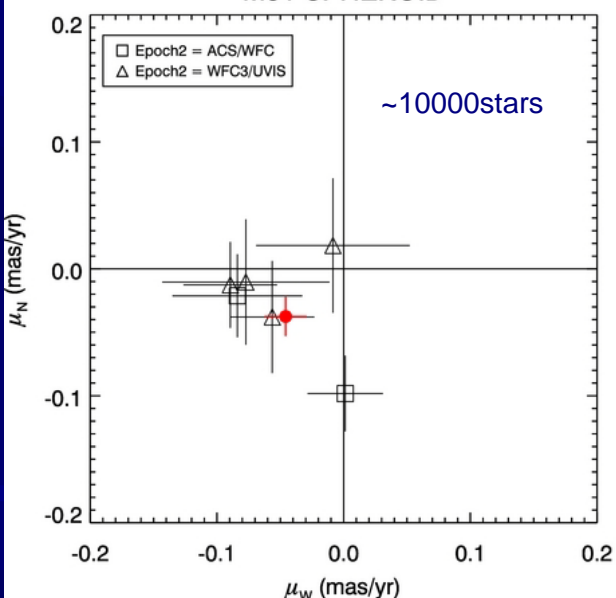


3つのフィールド

多くの背景銀河との相対運動  
 $\Delta T$ : 2 epochs (5~7 yrs)



大きく運動する星  
(手前の星候補)を取り除く

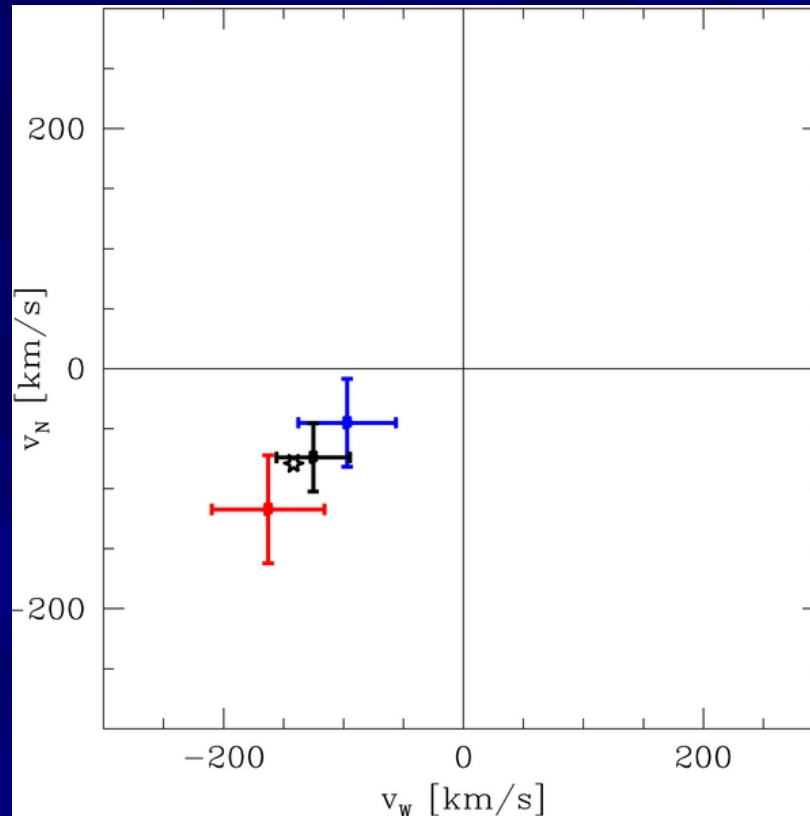


Field	$\mu_W$	$\mu_N$	$\sigma\mu_W$	$\sigma\mu_N$ (mas/yr)
SPHEROID	-0.0458	-0.0376	0.0165	0.0154
OUTERDISK	-0.0533	-0.0104	0.0246	0.0244
TIDALSTREAM	-0.0179	-0.0357	0.0278	0.0272
Weighted	-0.0422	-0.0309	0.0123	0.0117

accuracy  
~12 $\mu$ as/yr



# 内部運動等の補正後の $V_{\text{helio}}$



Red: HST PMs  
 Blue: Satellites  
 Black: average  
 Star: radial orbit

銀河系に対する相対運動

$$R_0 = 8.33 \pm 0.35 \text{ kpc}$$

$$(V_0 + V_{\text{pec}})/R_0 = 30.2 \pm 0.2 \text{ km/s/kpc}$$

$$(U_{\text{pec}}, V_{\text{pec}}, W_{\text{pec}}) = (11.1, 12.24, 7.25) \text{ km/s}$$

$$V_0 = 239.3 \pm 10.3 \text{ km/s}$$

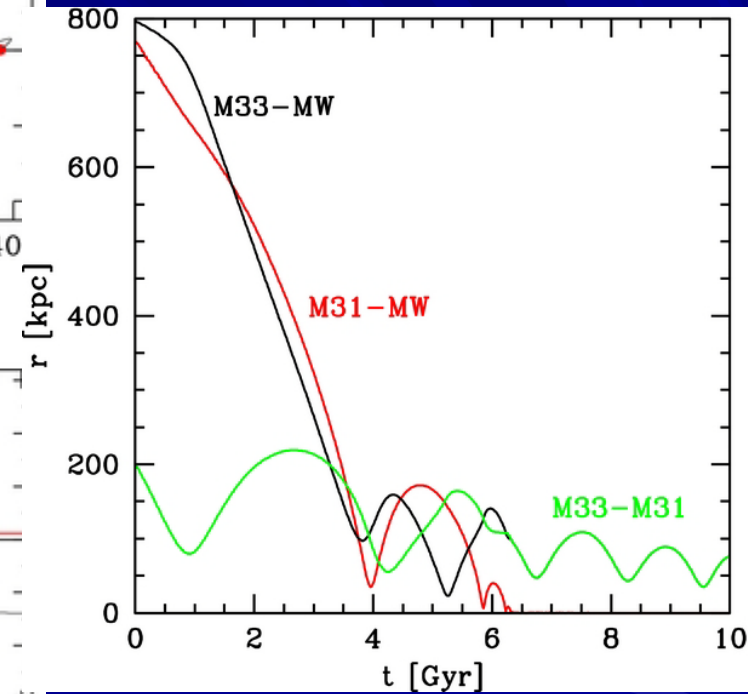
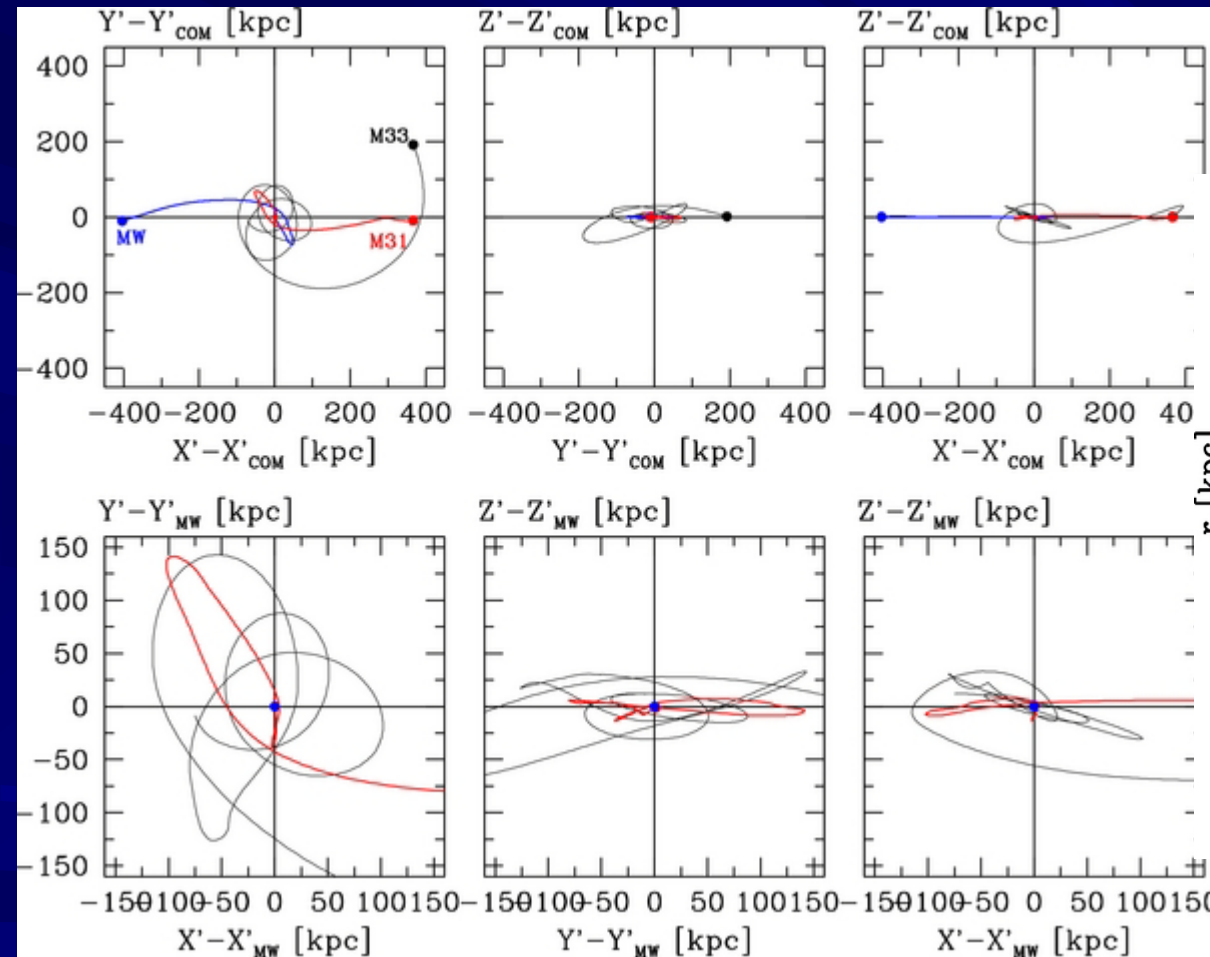
$$V_{\text{rad, M31}} = -109.3 \pm 4.4 \text{ km s}^{-1}$$

$$V_{\text{tan, M31}} = 17.0 \text{ km s}^{-1}$$

$$M_{\text{LG}} \equiv M_{\text{MW, vir}} + M_{\text{M31, vir}}$$

$$= (4.93 \pm 1.63) \times 10^{12} M_{\odot}.$$

# M31/M33とMWの軌道運動



# 何が問題か？

## SKAによるアストロメトリ

- アンドロメダ銀河の固有運動の系統誤差
  - multiple epochsの観測が重要
  - 恒星系の内部運動(回転、速度分散)とその空間分布の補正に不定性
  - 観測領域が銀河全体に渡っていない
- 銀河系静止系における速度と銀河質量
  - 太陽位置の銀河回転と太陽運動速度の不定性

# SKAによる系外銀河の固有運動決定

- ターゲット:メーザー源等の電波源
  - マゼラン雲、アンドロメダ、M33、NGC6822、IC10  
(High Velocity Cloudsで何かできないか...?)
- 広域に渡るターゲット天体の相対位置測定
- (恒星に比べて)速度分散小のガス成分の運動
  - 内部運動とその空間分布の補正に重要
- Multiple epochsに渡る系統的な観測

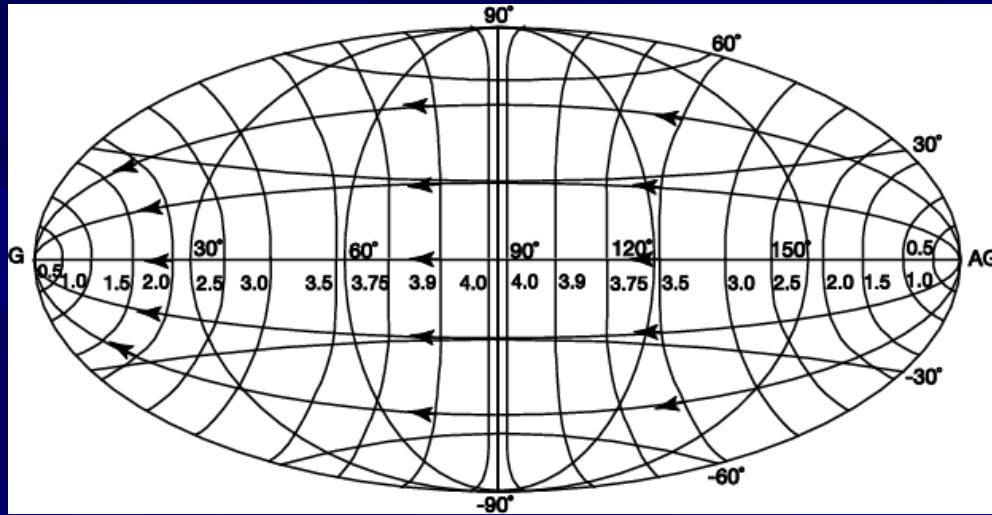
# SKAによる銀河系内部運動の決定

- 多数の系内電波源のアstrometri観測
  - 局所静止基準の確定
- 系外電波源の光行差による固有運動観測
  - 銀河系内における太陽の加速度運動を反映
    - 非円運動軌道の影響がない(軌道の形は関係ない)
    - $\Delta\mu = \omega V_{\text{circ}}/c = V_{\text{circ}}^2/R_0 c \sim 5.0 \pm 1.0 \mu\text{as/yr}$
  - この加速度に対応する円運動速度 $V_{\text{circ}}$ が局所静止基準
  - 質量分布の非軸対称性?

Titov+ 2011

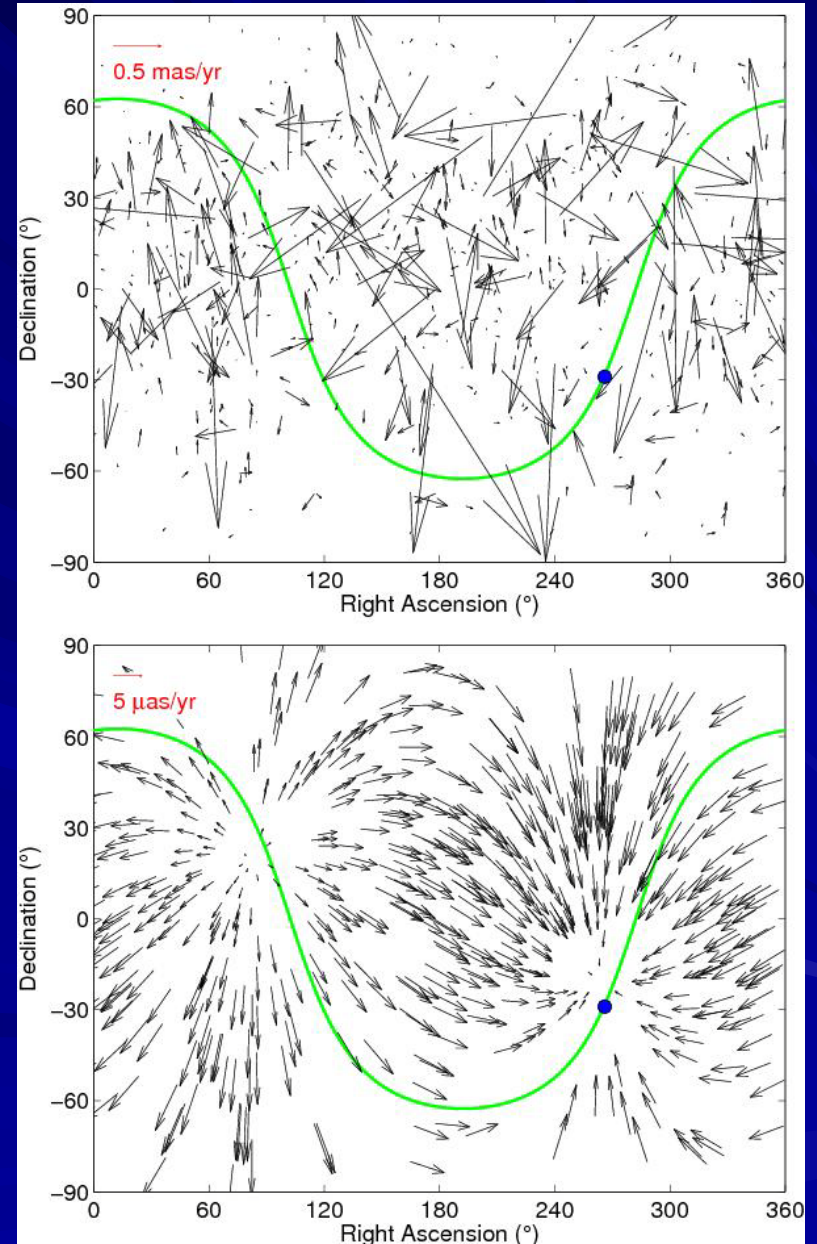
(555 sources over 1990-2010)

Kovalevsky 2003



Dipole comp

$\Delta\mu = \omega V/c \sim 6.4 \pm 1.5 \mu\text{as/yr}$   
Towards  $(\alpha, \delta) = (263^\circ, -20^\circ)$



# 内容

- 局所銀河群とは
- マゼラン雲の運動
- アンドロメダ銀河の運動
- 銀河系質量分布の決定
- まとめ

# 銀河系質量分布の決定

Gaia

恒星の高精度位置天文観測

2013~

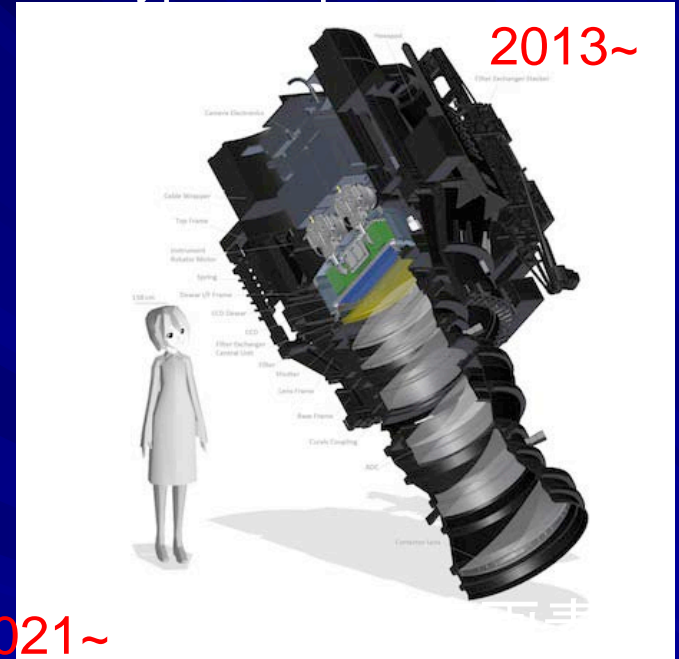


すばる望遠鏡



超広視野撮像カメラ  
Hyper Suprime Cam

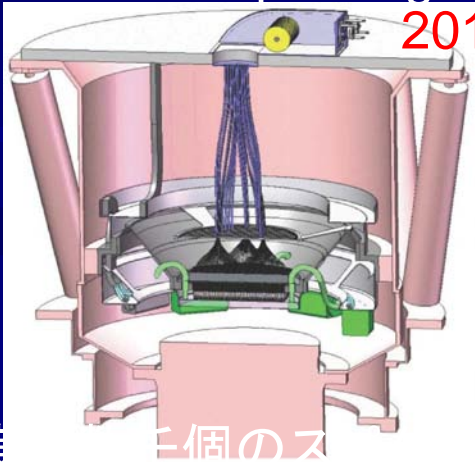
2013~



広視野多天体分光器

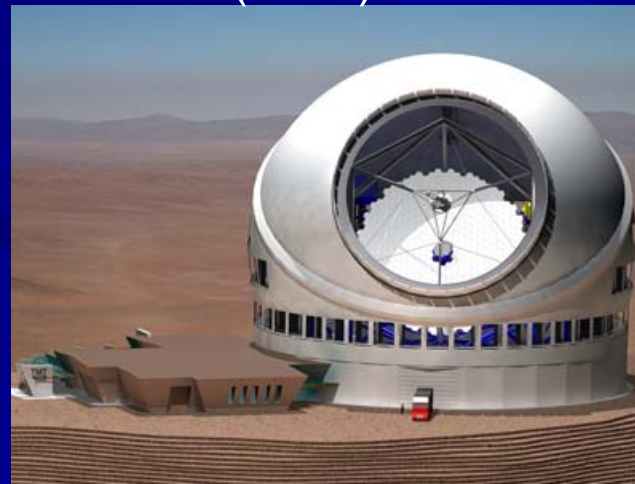
Prime Focus Spectrograph

2016~



30m望遠鏡

(TMT) 2021~

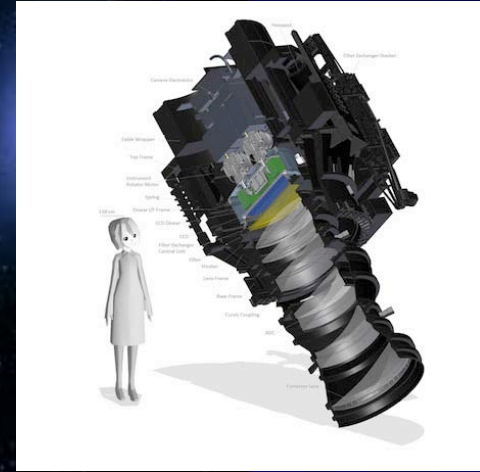


銀河形成史の  
解明へ

一度、数千個のスペクトル



# Hyper Suprime-Cam (HSC)

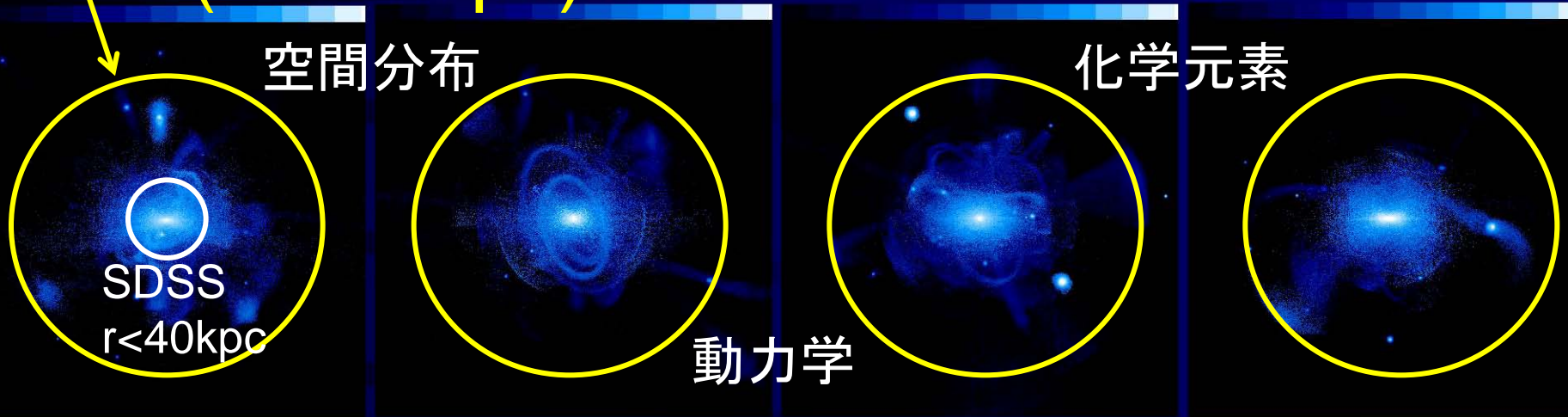


# 銀河系ハローの広域マッピング

恒星系ハロー形成の数値シミュレーション

HSC( $r < 400 \text{ kpc}$ )

Bullock & Johnston 2005



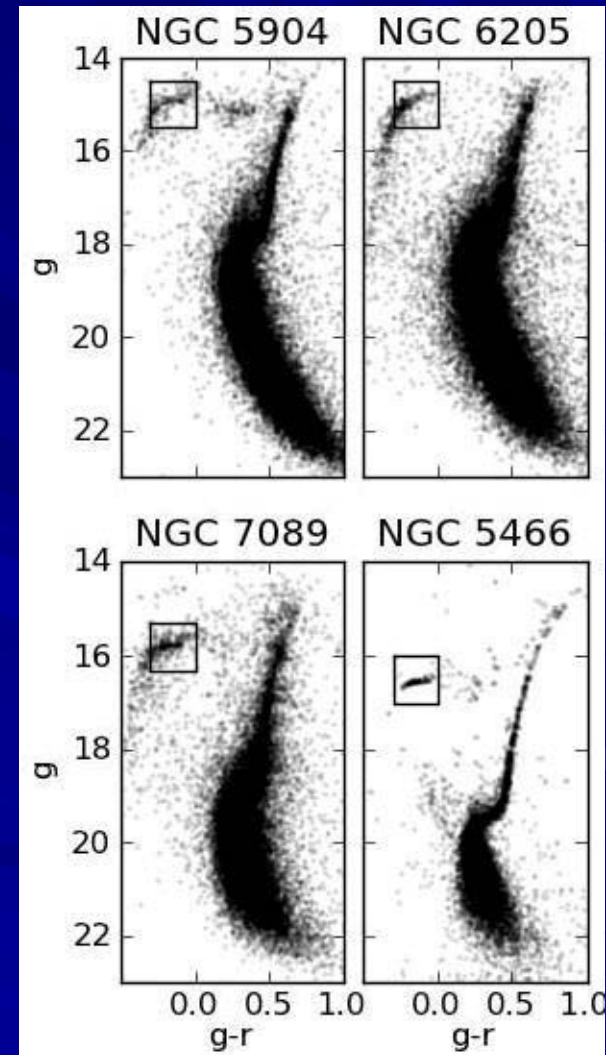
- 階層的合体を伴う銀河形成過程
- 暗黒物質の動力学構造

BHB星に基づく銀河系構造と形成史

# Blue Horizontal Branch (BHB) stars 銀河系ハロー構造とダイナミクスのトレーサー

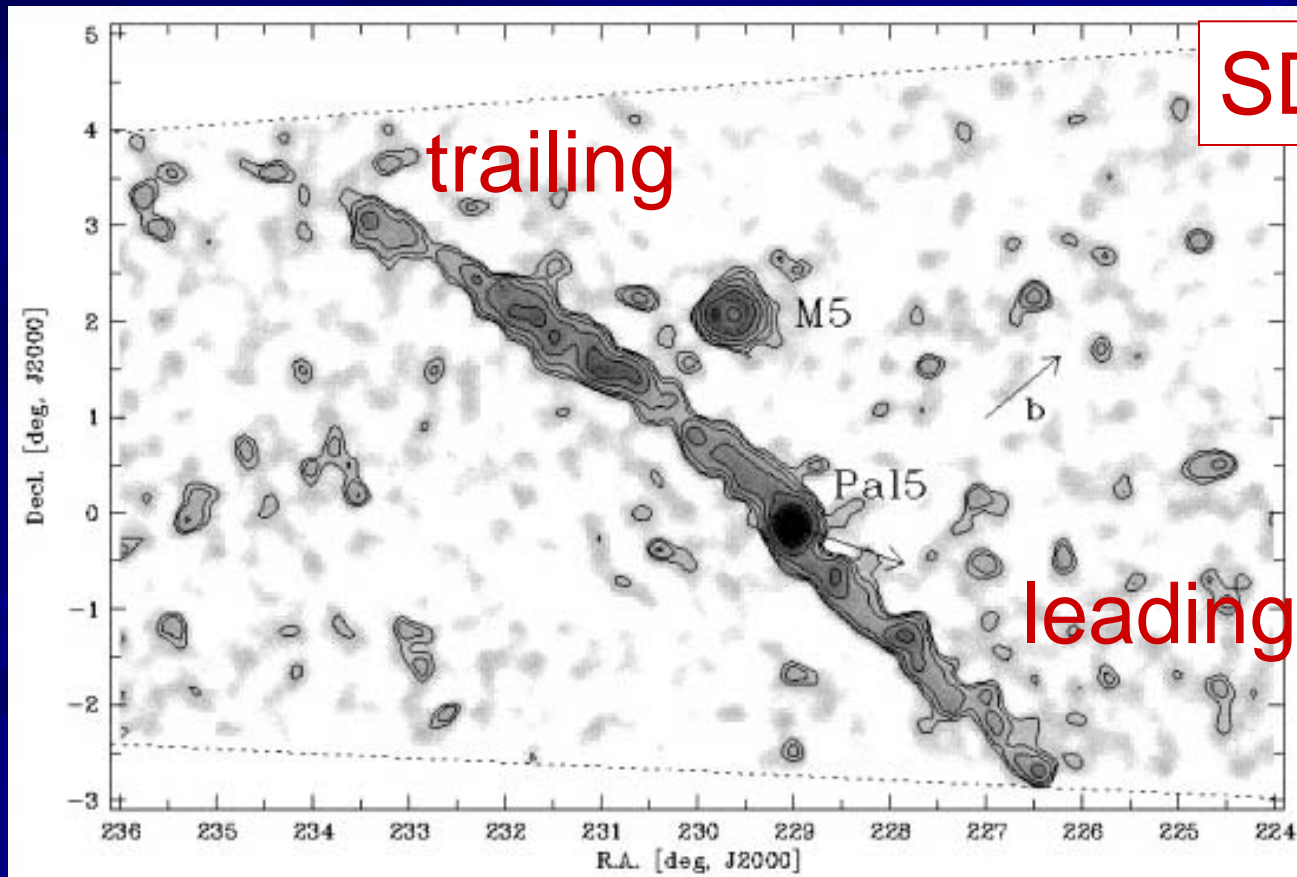
- 明るい。たくさん存在。  
( $M_{g,BHB} \sim 0.7 \text{ mag}$ )
- 正確な距離決定可能。  
D~400kpcまで、つまり  
(これまでよりも10倍遠い)  
銀河系の端までマッピング

Subaru/PFSによる分光観測  
によって、視線速度分布決定  
⇒ダークハローの質量分布

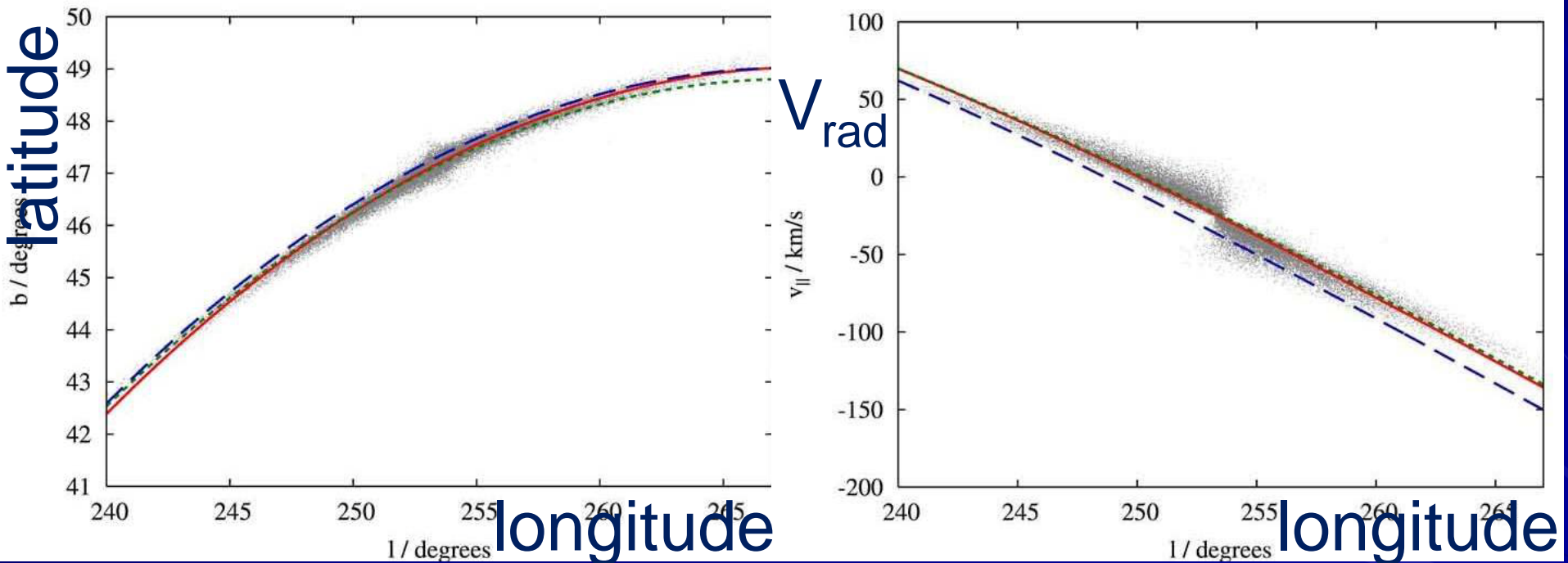


# 恒星ストリームに基づいた 銀河系重力ポテンシャルの決定

Palmer 5: 潮汐力で引き延ばされた球状星団  
@  $d=25\text{kpc}$  (Odenkirchen+ 2003)



# 様々なストリームを組み合わせた 銀河系ポテンシャルと質量分布決定



Eyre & Binney 2009

広い領域に渡るストリーム分布  
と視線速度分布が必要  $\Rightarrow$  Subaru/PFSへ

# まとめ

- SKAによる系外、系内電波源のアstrometri観測
  - マゼラン雲、アンドロメダ銀河の正確な固有運動
  - 正確な銀河回転+太陽運動決定
  - 銀河系静止系に対する正確な3次元速度
- すばる望遠鏡HSC(撮像)+PFS(分光)によるハロー天体の動力学観測
  - 銀河系質量分布の決定
  - マゼラン雲、アンドロメダ銀河の軌道決定