

PFSによる銀河考古学

Galactic Archaeology with PFS

Masashi Chiba
(Tohoku University)

W. Aoki (NAOJ), J. Cohen (Caltech), M. Ishigaki (NAOJ),
M. Tanaka (Tohoku), N. Hwang (NAOJ) and D. Kawata (UCL)

Key science goals

1. 銀河系構造の形成過程の解明

- ✓ 銀河系のmerging historyは？
- ✓ 銀河系古成分 (thick disk, halo)の形成は？
- ✓ 矮小伴銀河の星形成史は？
- ✓ M31の形成史：銀河系形成史との関連は？

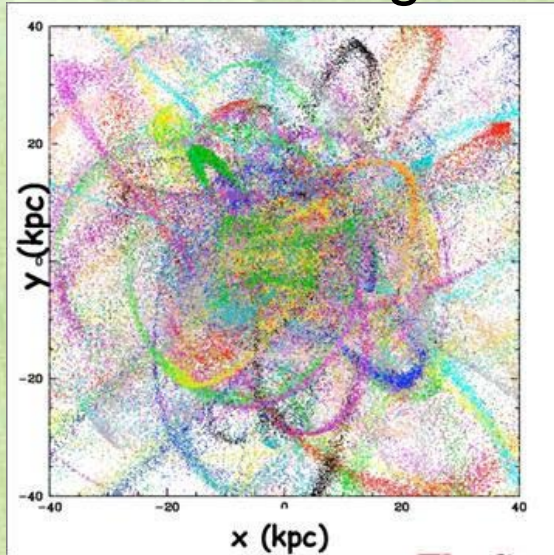
2. 暗黒物質の性質の解明：CDM理論の検証

- ✓ 銀河系全体のダークマター分布は？
- ✓ 矮小伴銀河におけるダークマター分布は？

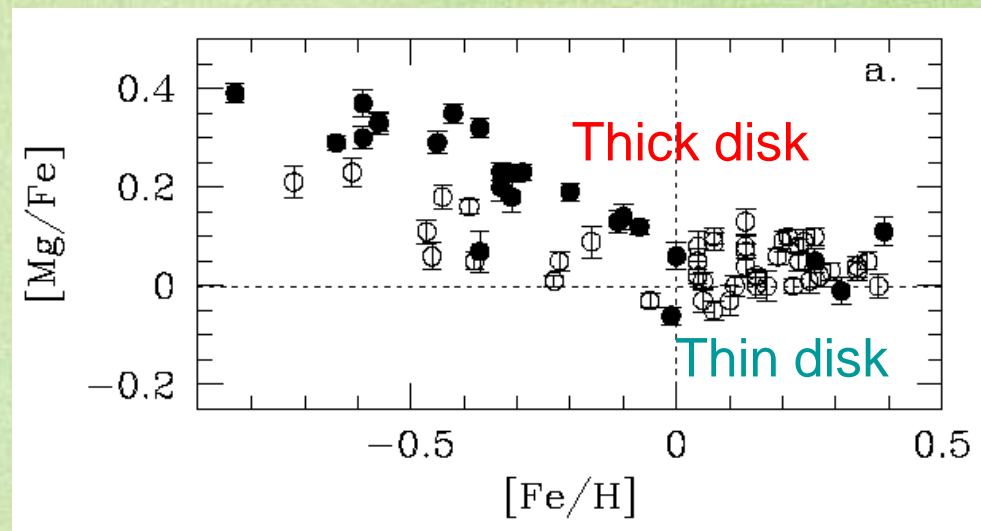
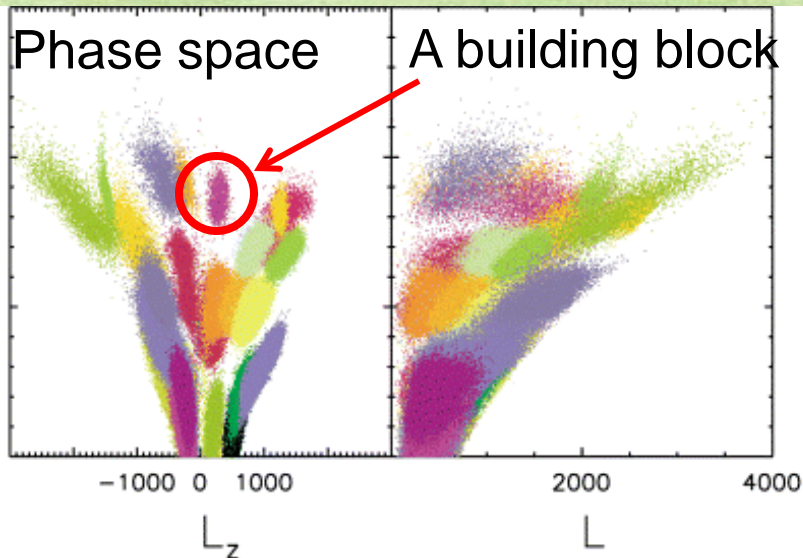
これらは全て古い恒星種族に記録されている

銀河系形成の化石情報

Debris of building blocks



1. 古い恒星種族の空間・速度分布
 - ✓ 銀河収縮・合体過程を反映
 - ✓ ダークマター分布のトレーサー
2. 古い恒星種族の化学元素分布
 - ✓ 星形成・化学進化史



恒星分離に基づく銀河形成史

■ Photometry :

- ✓ 等級、色 (→ 色-等級図)

HSC, SDSS, PanStar

■ Spectroscopy :

- ✓ $[Fe/H]$, V_{rad} (→ 化学動力学)
- ✓ 化学元素パターン (→ 星形成・化学進化)

PFS

■ Astrometry :

- ✓ 固有運動、距離 (→ 6次元位相空間分布)

Gaia

動力学構造、星形成、化学進化の情報

⇒ 銀河の形成と進化

Gaia

(2012~)

Cf. Hipparcos
 $V < 12$, 1mas



Astrometry:

$V=15$, 12~25 μas

$V=20$, ~300 μas

Photometry:

$V < 20$

RV measurement:

$V < 17$ (150M stars)



$R \sim 11,500$,

$\lambda = 8450\text{-}8750\text{\AA}$ (CaT)

$\Delta V_{\text{rad}} \sim 15 \text{ km/s}$

[Fe/H] measurement:

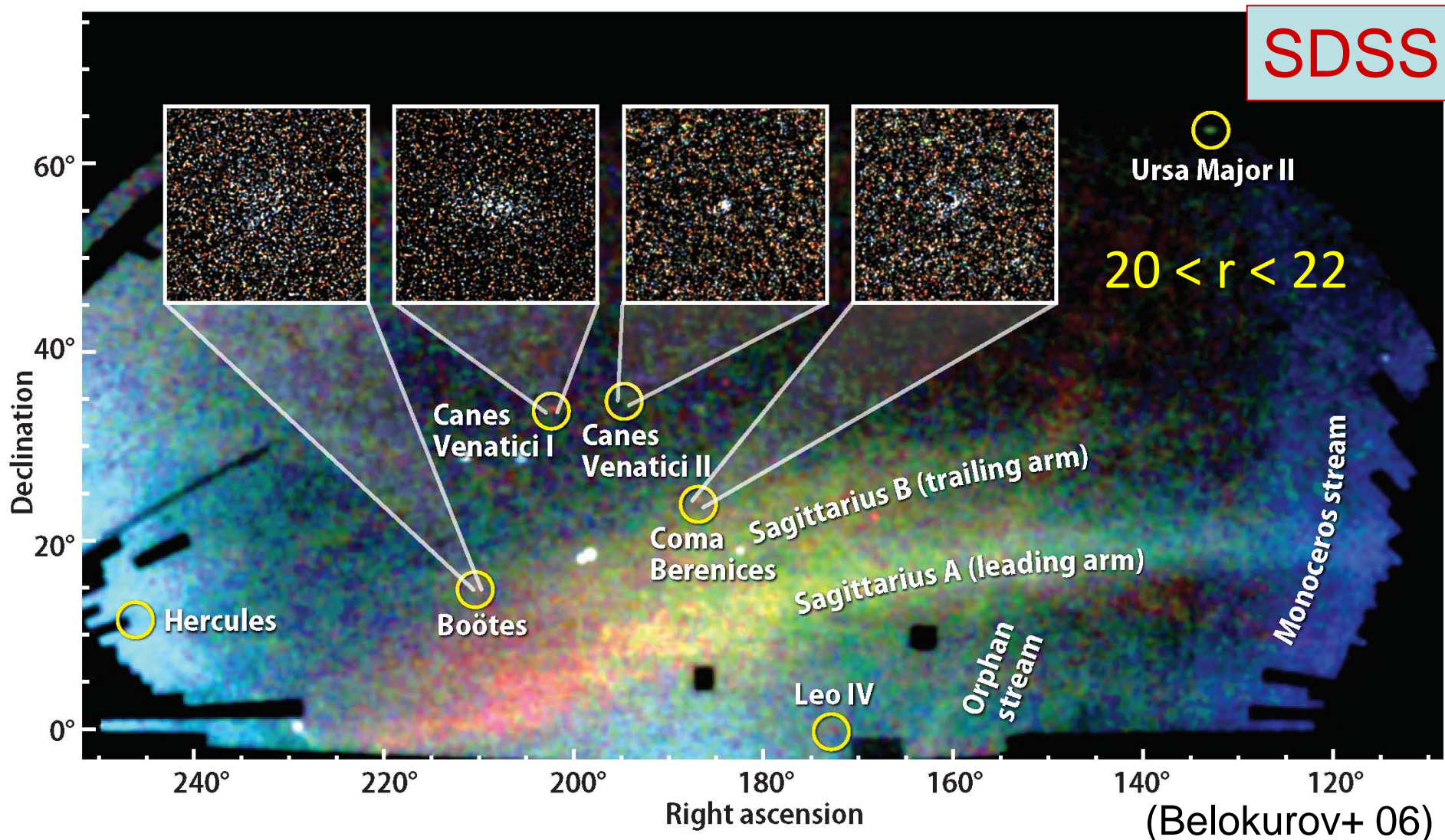
$V < 12$ (2M stars)



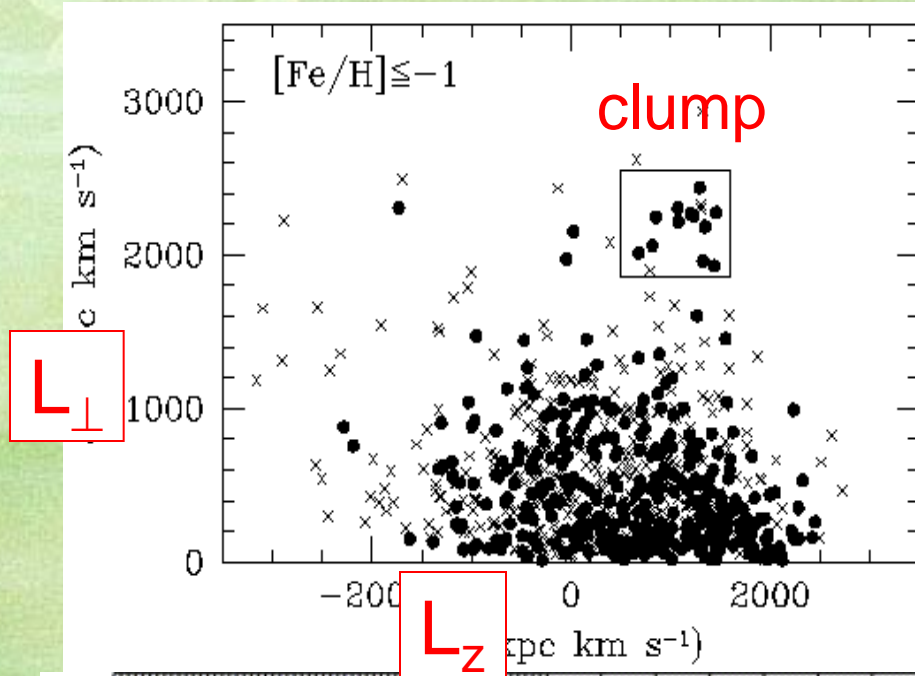
Key science goals

1. 銀河系構造の形成過程の解明

(i) 恒星ストリームの動力学構造



(ii) 位相空間分布に基づく合体史の導出

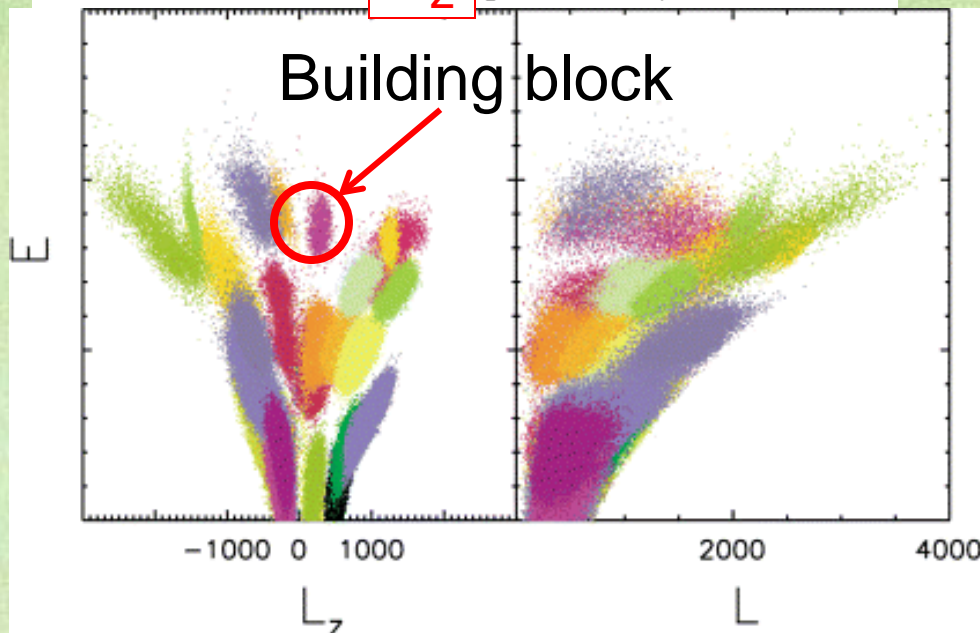


角運動量空間における
ハロー星分布

(Hipparcosデータ)

- a few 100 (kpc km/s)の誤差により部分構造が拡散

MC & Beers 00



Gaiaデータ

(精密な距離と固有運動)

+ PFSによる

V_{rad} と $[\text{Fe}/\text{H}]$ の測定

- 各部分構造を分離可能
- 各構造の星形成・化学進化

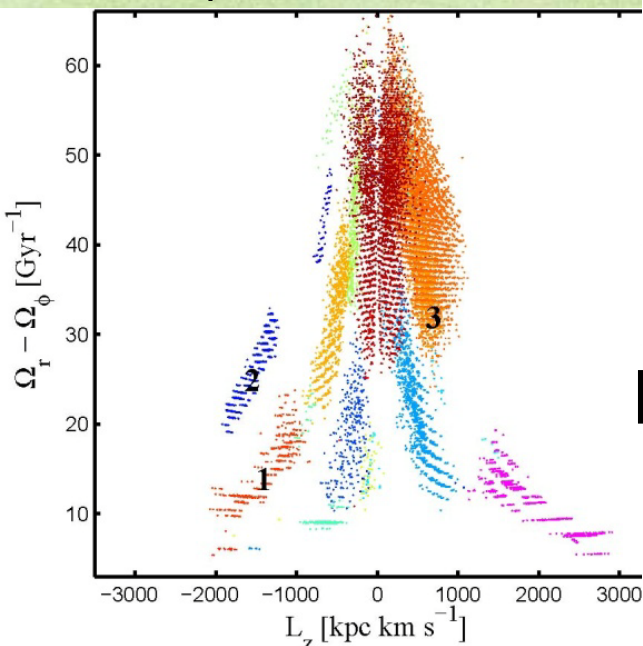
Helmi & de Zeeuw 00

恒星系の軌道振動数分布から 小銀河の合体時刻を決定可能

(McMillan & Binney 2008, Gomez+ 2010)

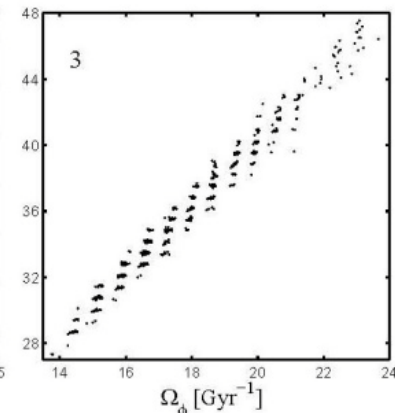
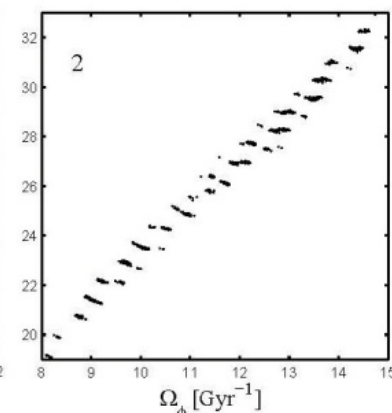
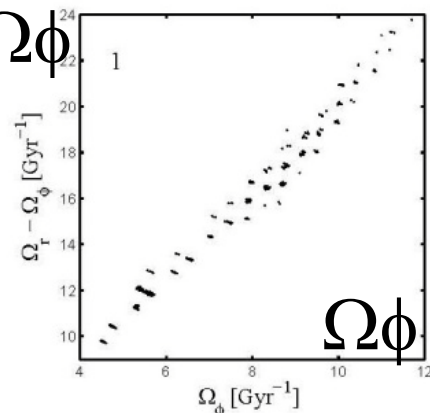
軌道振動数

$\Omega_r - \Omega_\phi$

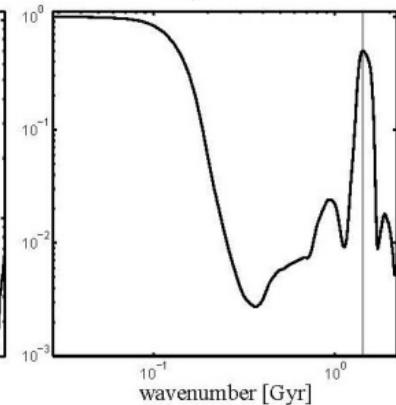
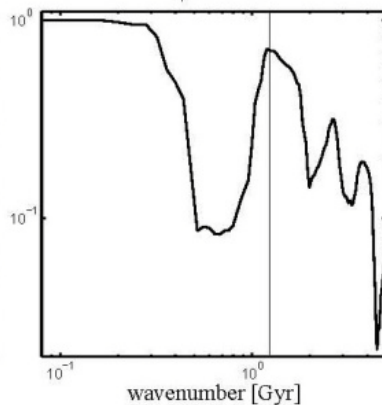
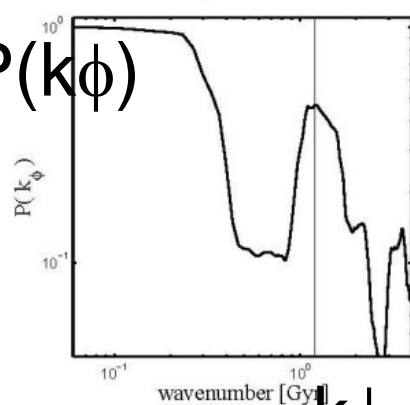


L_z

$\Omega_r - \Omega_\phi$



$P(k_\phi)$



k_ϕ

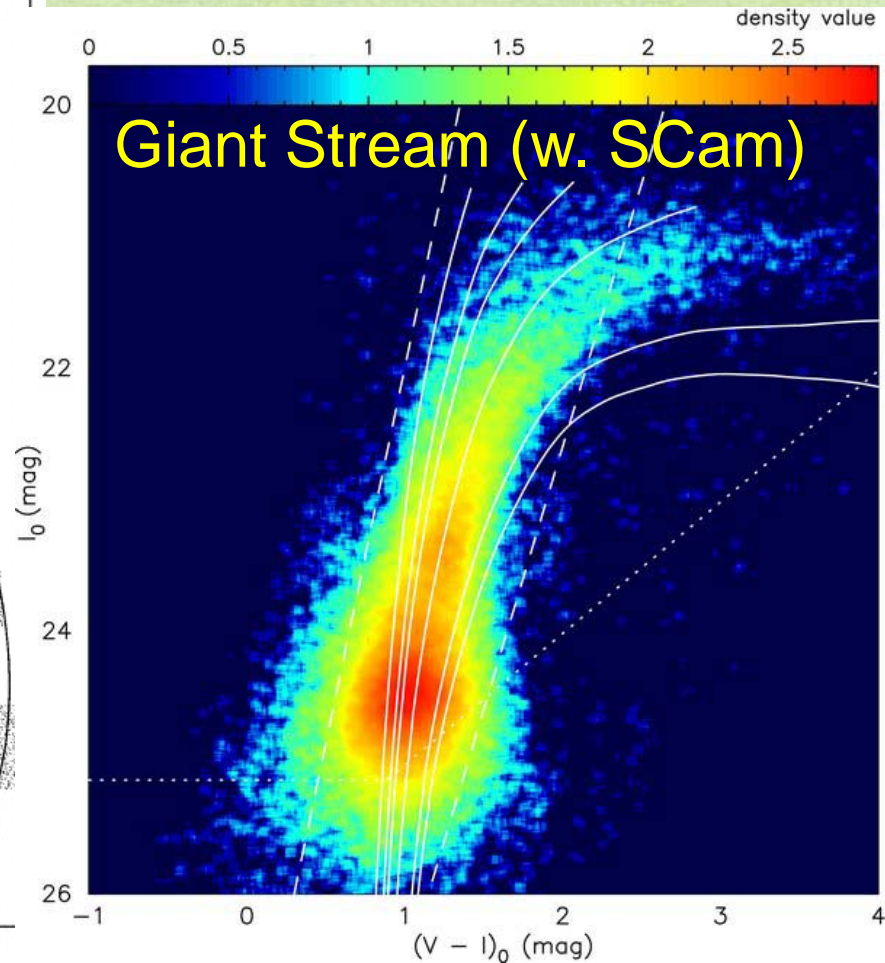
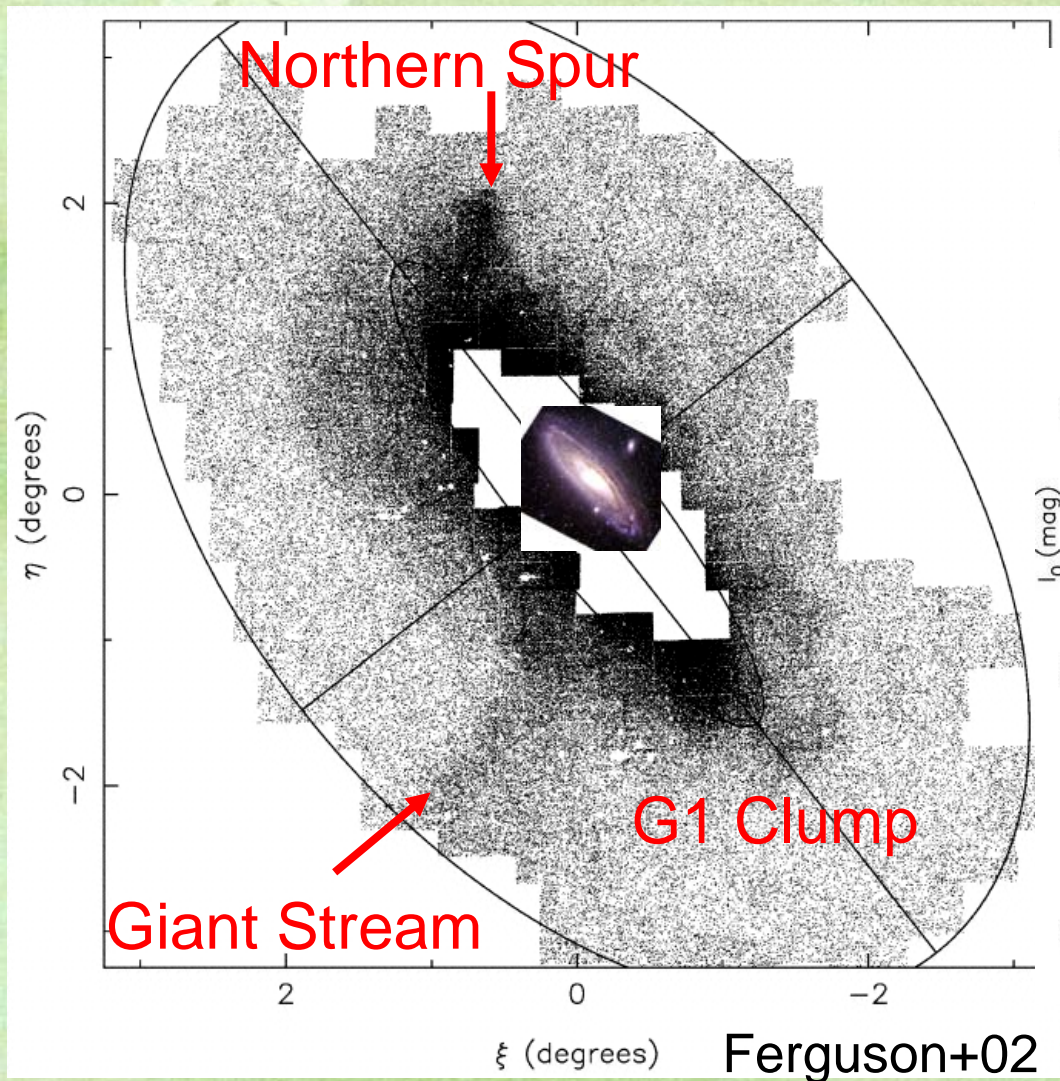
7.9 Gyr

8.9 Gyr

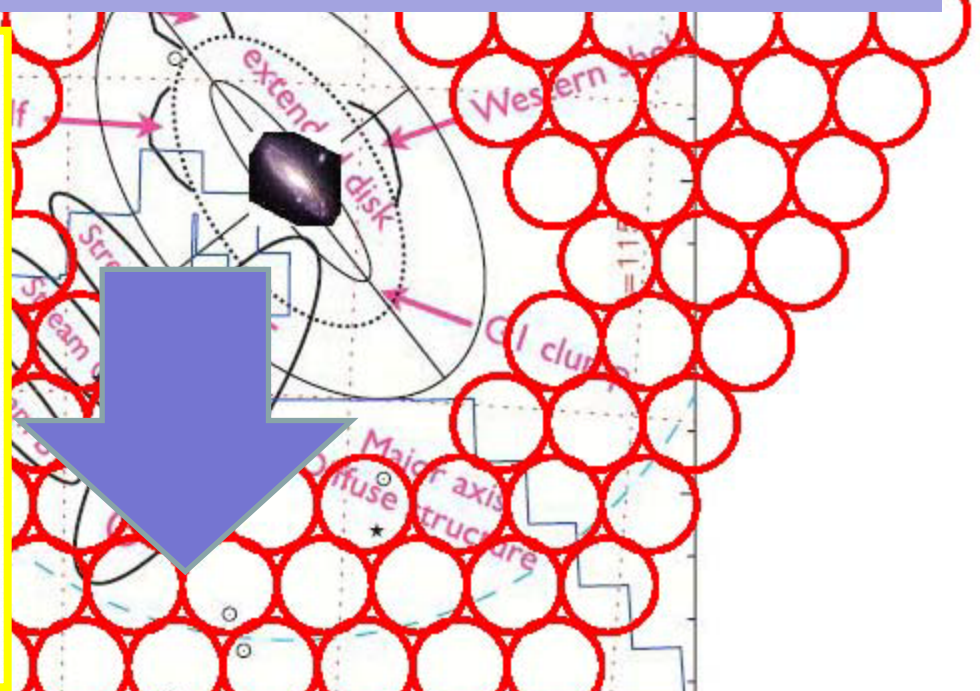
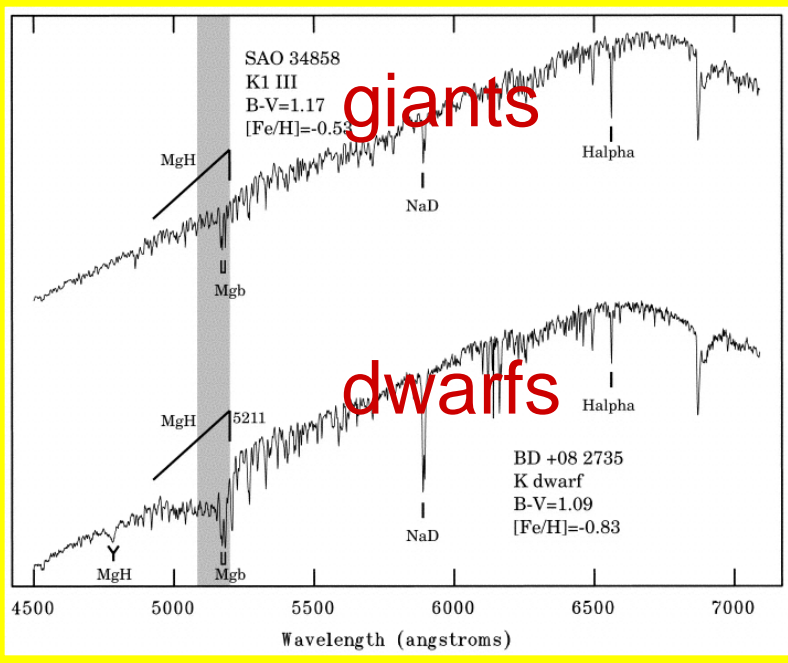
7.6 Gyr

アンドロメダ銀河の形成史：銀河系との比較

Halo substructures as merging remnants



HSCサーベイ (NB515の使用) M31ハローのRGB星($g < 22.5$)分布の導出



PFSサーベイ M31ハロー一星と伴銀河の金属量と視線速度

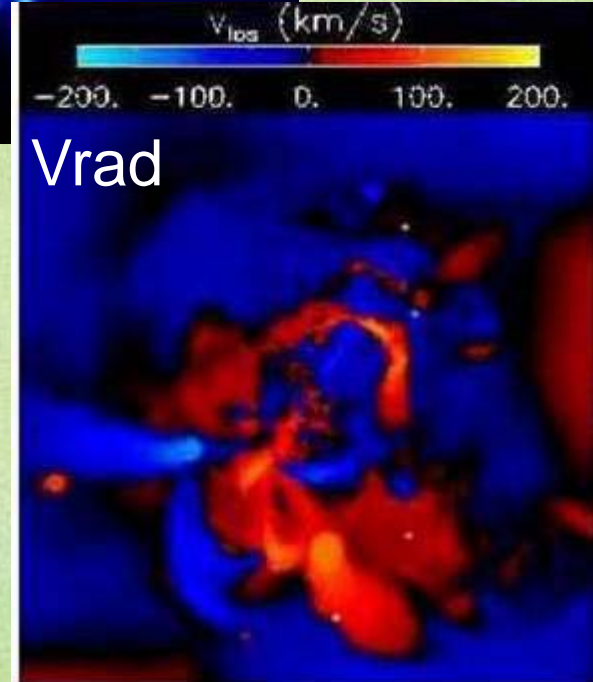
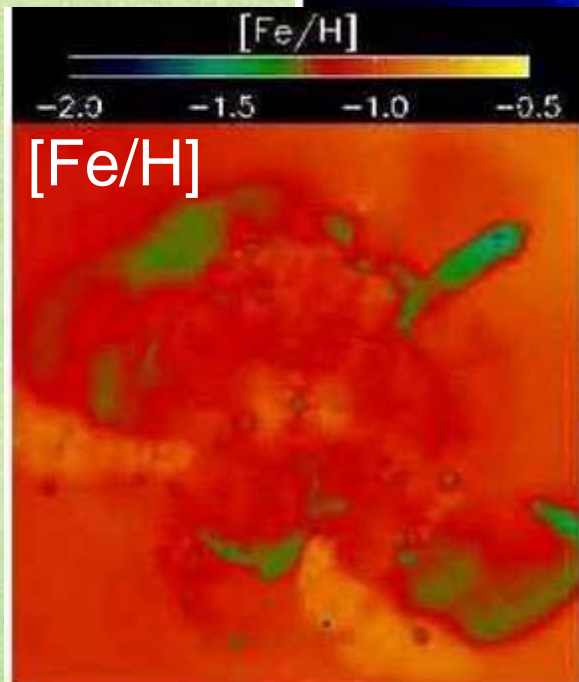
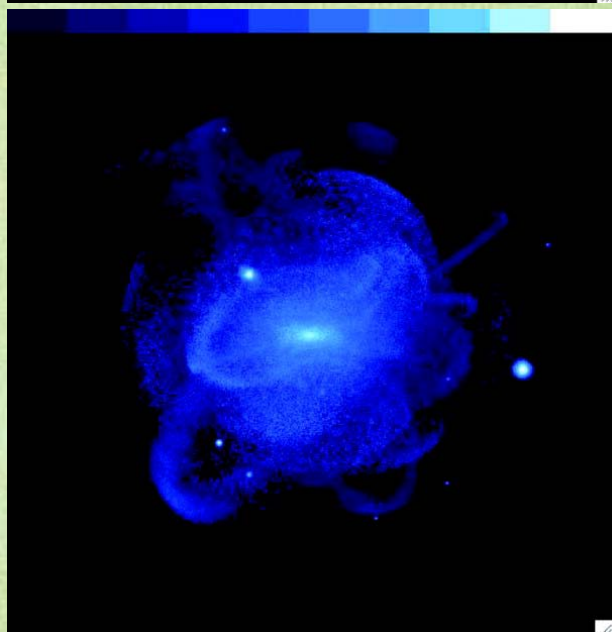
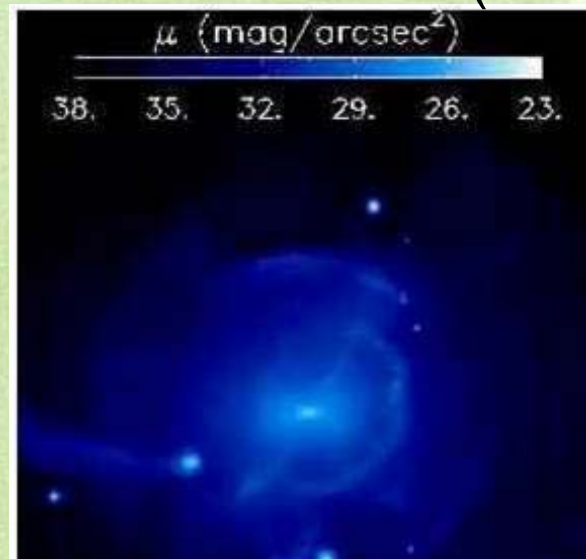
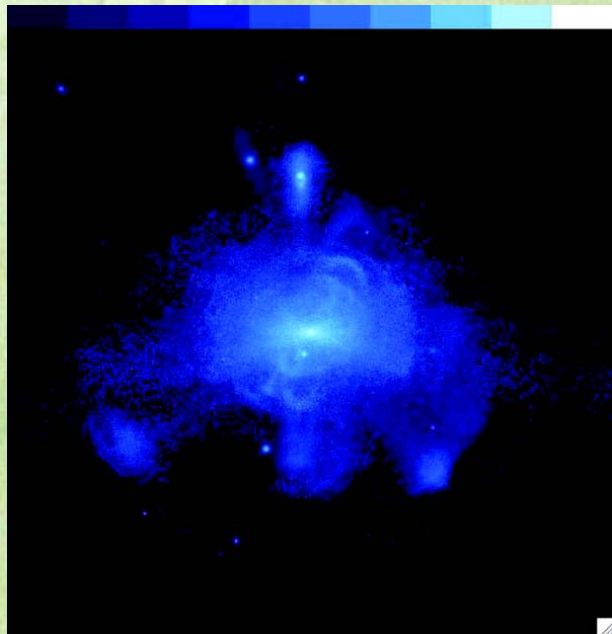
ξ (degrees)

130 pointings

$I_{TRGB}=20.5$

CDM 理論から期待される恒星ハロー

(Johnston+08)

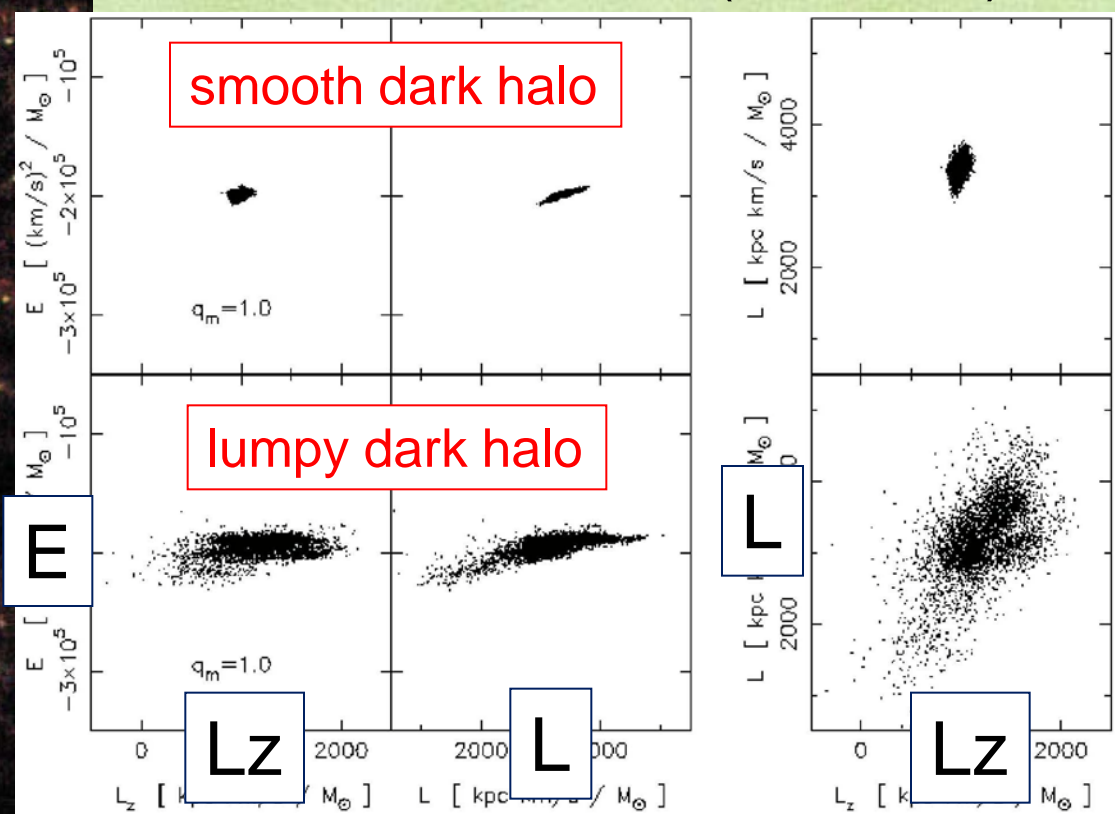
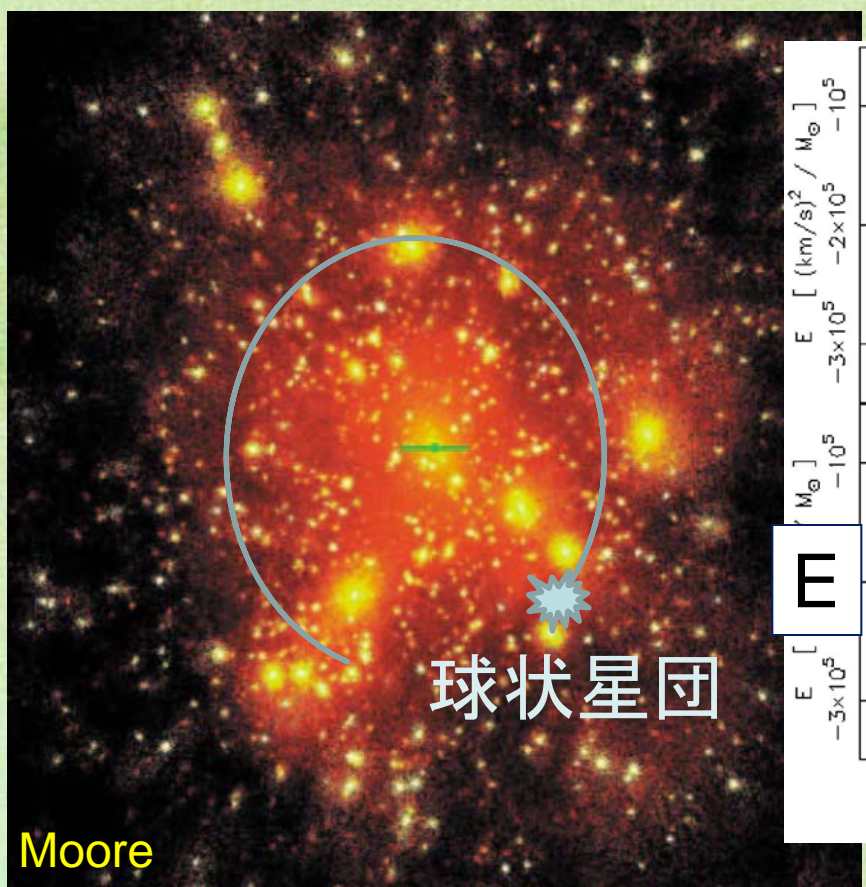


2. 暗黒物質の性質の解明

(i) Missing satellites problem?

銀河におけるCDMハロー

球状星団ストリームの位相空間構造 (Ibata+02)

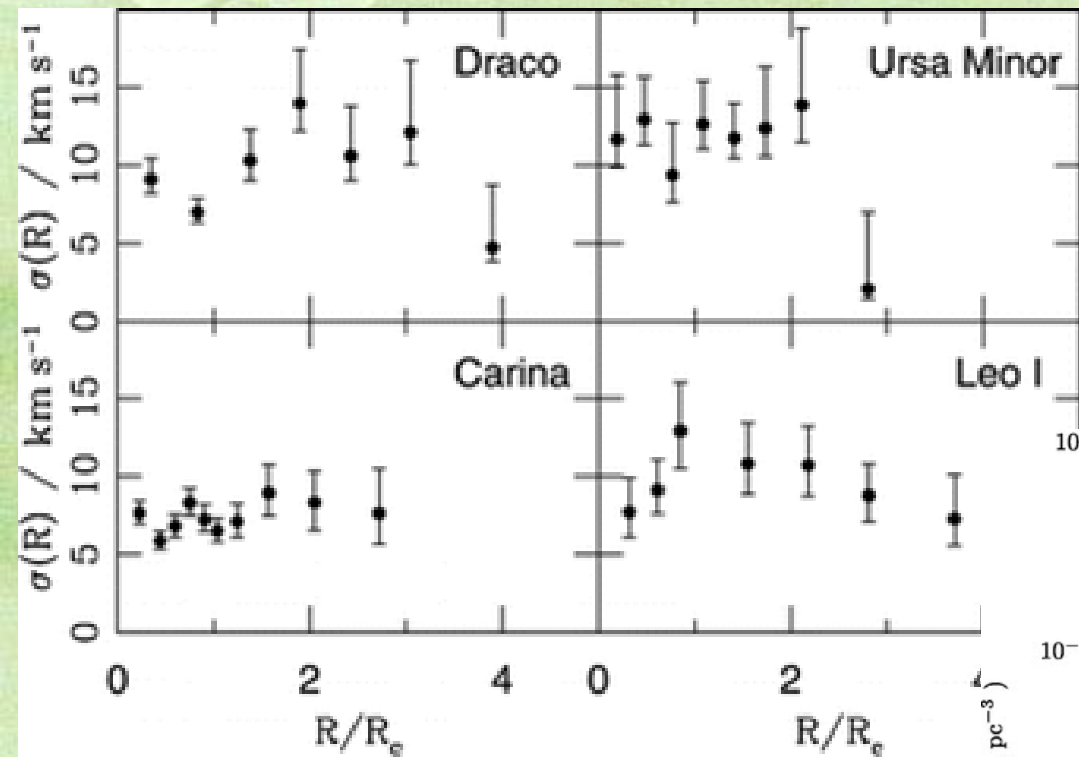


Gaia+PFS で検出可能

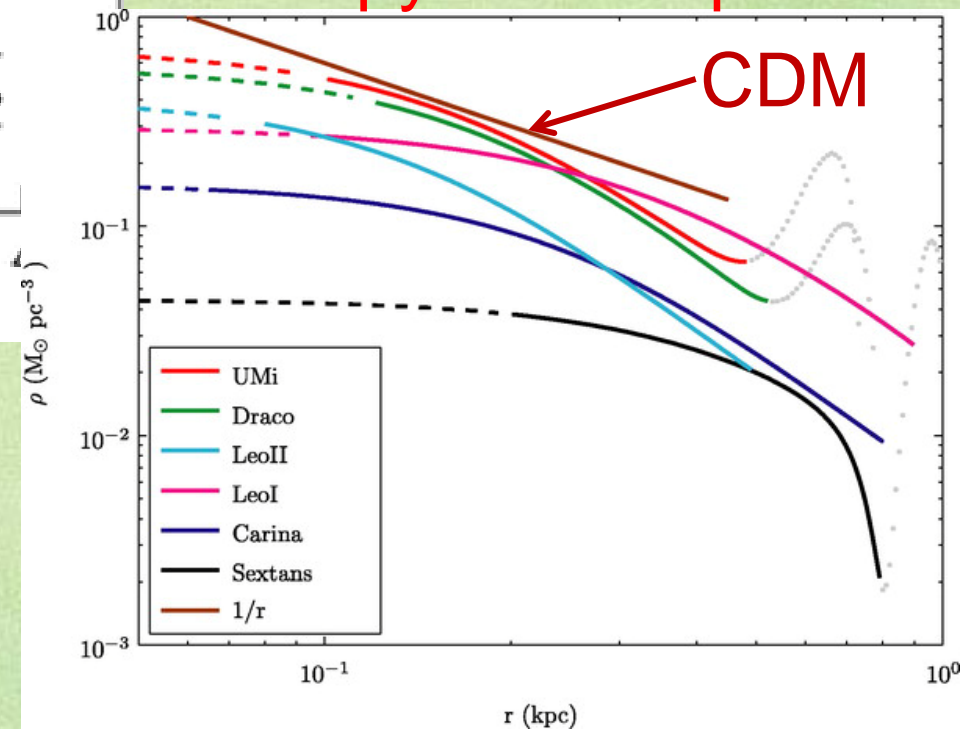
(ii) Cuspy density profile?

矮小銀河のダークマター分布

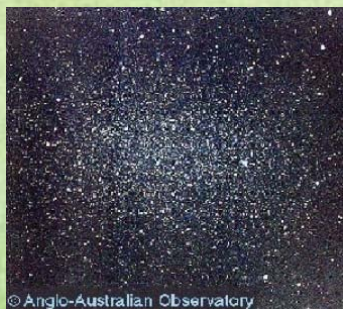
Gilmore+07



- DM dominated
(M/L) = $10^2 \sim 10^3$
- $\sigma \sim$ a few to 10 km/s
- **Cuspy or core profile?**

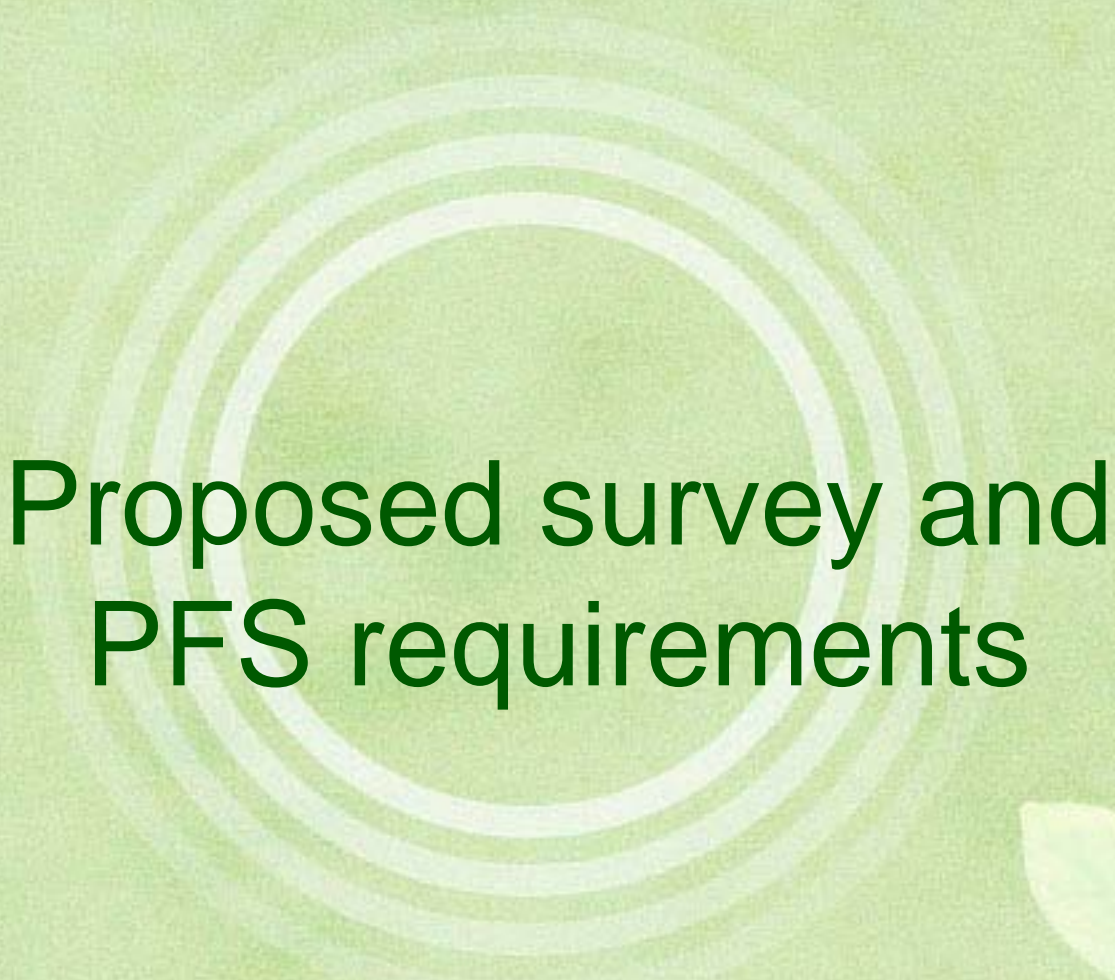




Car



Leo I

© Anglo-Australian Observatory



Proposed survey and PFS requirements

PFSに望むこと

- Gaia とのシナジー
 - V_{rad} for $17 < V < 20$ が必要
 - $[\text{Fe}/\text{H}]$ for $12 < V < 20$ が必要
- 広い波長域をカバーすることで、 $[\text{Fe}/\text{H}]$ ($\Delta \sim 0.2$ dex) と他の恒星大気パラメータの決定。 V_{rad} を $\Delta \sim$ 数km/sで決定。
 - 青 ($\lambda=3,900\text{-}6,700\text{\AA}$), $R \sim 2,000$
Call HK ($\lambda 3933\text{\AA}$) と Mgb ($\lambda 5150\text{\AA}$)を含む
(SEGUE/SDSS pipelineの使用)
ターゲット：銀河系の金属欠乏星
 - 赤 ($\lambda=6,500\text{-}9,900\text{\AA}$), $R=3,000$
Call triplet ($\lambda 8400\text{-}8700\text{\AA}$) を含む
ターゲット：銀河系外側ハローとM31のRGB星
- M31ハローとその伴銀河星を分光可能
 - $I_{\text{TRGB}}=20.5$, i.e., $V_{\text{lim}} \sim 21.5$

PFSによるGAサーベイ

1. The Milky Way survey

- Sample:
 - i. **Gaia sample:** $\sim 10^6$ MW stars with $18 < V < 20$
(Halo $\sim 55\%$, Thick disk $\sim 40\%$, Thin disk $\sim 5\%$)
 - ii. **Faint sample:** stars in 8-9 stellar streams and $\sim 10^5$ stars in the outer halo with $18 < V < 21.5$
- Total area: $1000 + 180 \text{ deg}^2$ ($560 + 100$ pointings)
- Survey time: $\sim 30 + 20 = \underline{50 \text{ nights}}$

2. The M31 halo survey

- Sample: RGBs, $V < 21.5$
- Total area: $\sim 230 \text{ deg}^2$ (~ 130 pointings)
- Survey time: $\sim \underline{30 \text{ nights}}$

3. Dwarf galaxy survey

- Sample: RGBs, $V < 21.5$
- Survey time: $\sim \underline{8 \text{ nights}}$

高分散分光の必要性 (将来の課題)

各ビルディングブロックの化学組成
(Chemical Tagging)
⇒ 詳細な化学進化史の導出

1. Spectral resolution など

- $R = 35,000$, $S/N \sim 100$, $V < 17$
- Any of $\lambda = 4112-4322\text{\AA}$, $5015-5268\text{\AA}$, $6280-6593\text{\AA}$, $6456-6779\text{\AA}$, $8380-8804\text{\AA}$

2. Fibers

- ~200 fibers

他国の計画

- AAO/RAVE

- 1.2m UKST, $R=8,500$, 150fibers, $9 < l < 12$

- AAT/HERMES

- 3.9m, $R=28,000$, 392fibers, $\lambda 4708-4893A, 5649-5873A, 6481-6739A, 7590-7890A$, $10 < V < 14$

- LAMOST

- 4m, $R=1,800$, 4,000fibers, $\lambda 3700-5900A, 5700-9000A$

- VLT/FLAMES

- 8.2m, $R \sim 5,000$, 20,000, 130fibers, $V < 16$ for [Fe/H], $V < 19$ for RVs, 10^5 stars

- CFHT/GYES

- 3.6m, $R=20,000$, 500fibers, $\lambda 3900-4500A, 5880-6700A$, $V < 16 \sim 18$

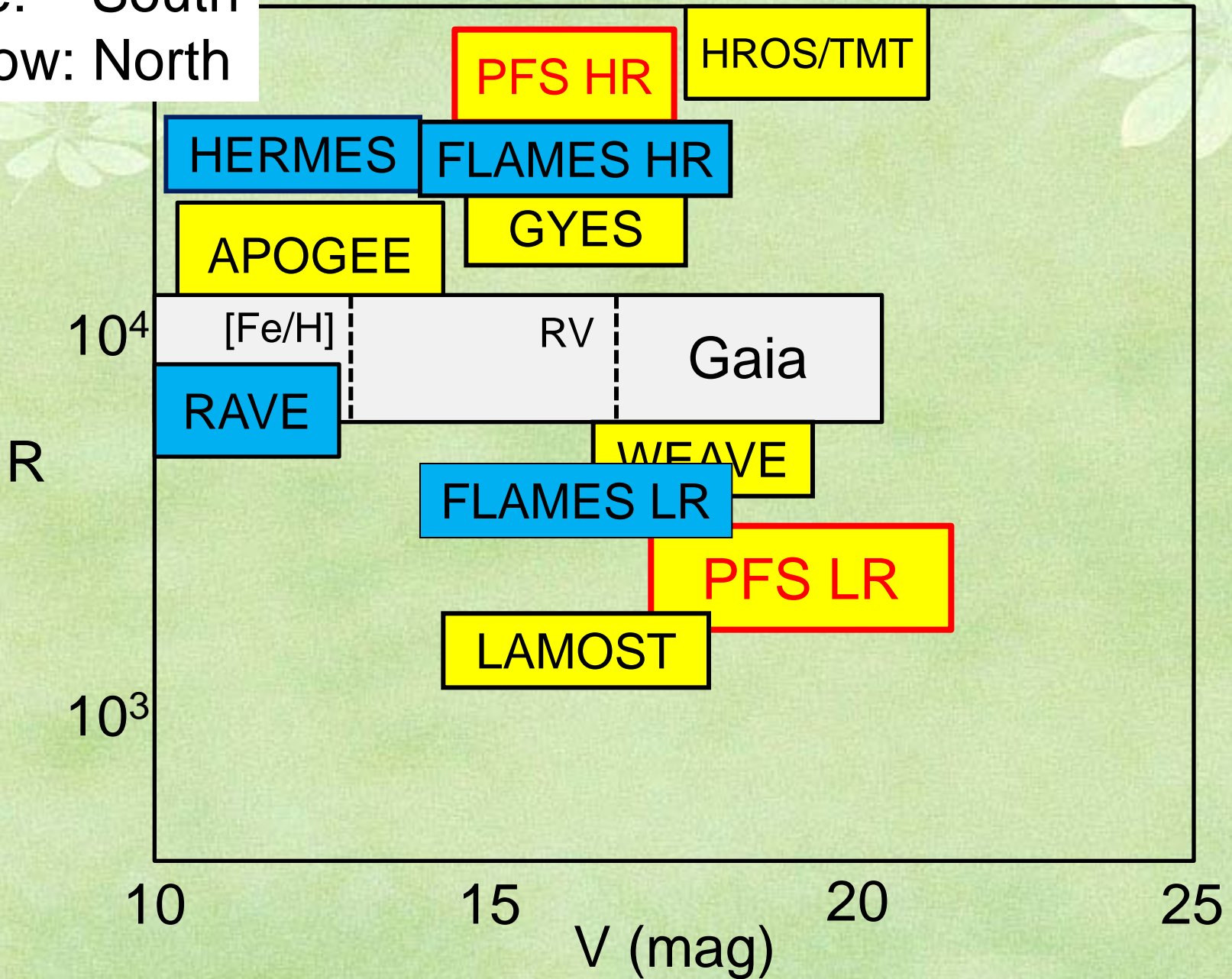
- WHT/WEAVE

- 4.2m, $R=5,000 + 20,000$, 800fibers, $\lambda 4000-9500A$, 2sq.deg, $V < 20?$

- VISTA

- 4m, $R=3-5,000 \& 20,000$, 1500fibers, 2sq.deg, $V?$

Blue: South
Yellow: North



GAサーベイのまとめ

Survey	Magnitude range (mag)	Exposure time (hrs)	Area (deg ²)	Survey Time (nights)	Comments
1. The Milky Way	$18 < V < 20$	0.5	1000	30	Gaia sample
	$18 < V < 21.5$	2.0	180	20	Faint sample
2. M31 halo	$18 < V < 21.5$	2.0	230	30	
3. Dwarf galaxy	$18 < V < 21.5$	2.0	53	8	Dwarf satellites
Total				88	

1. 銀河系形成のマーキングヒストリーの解明
2. 暗黒物質の性質の解明