

可視光中分散分光データを用いた Chemical tagging による 銀河系ハロー恒星ストリームの研究

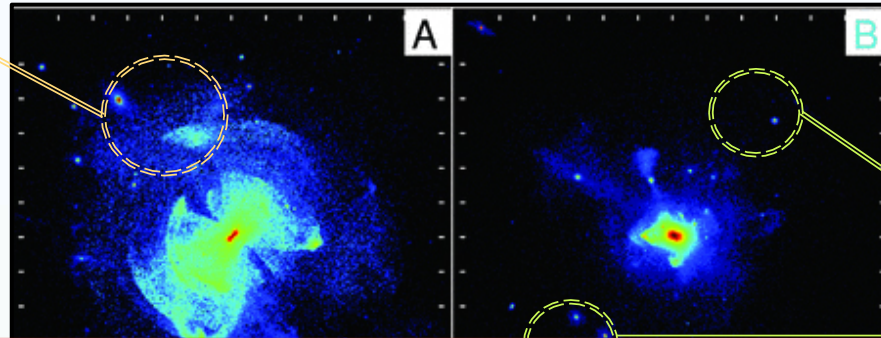
石垣美歩 (IPMU/JSPS)

Co I: Narae Hwang (KASI)、千葉 柊司 (東北大)、青木和光 (NAOJ)、PFS-GA
team、PFS working group

銀河系ハロー—化学力学構造

宇宙論的N体シミュレーションで予測される恒星ハローの表面輝度分布

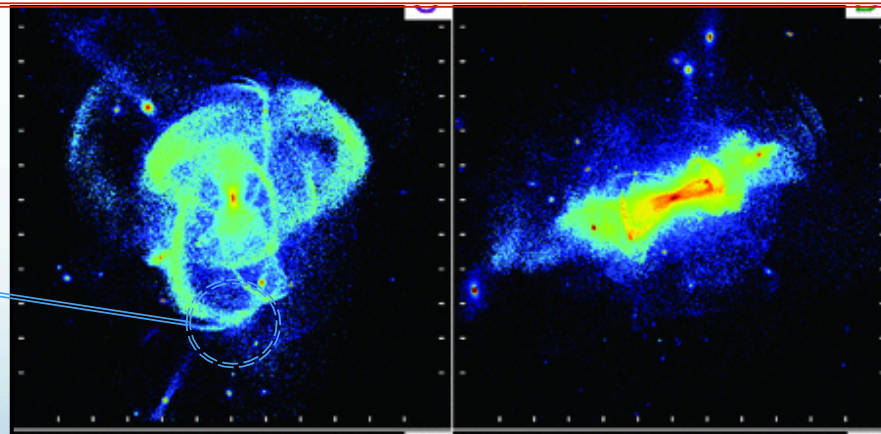
Overdensity



What is the MW size?

e population

Stellar stream



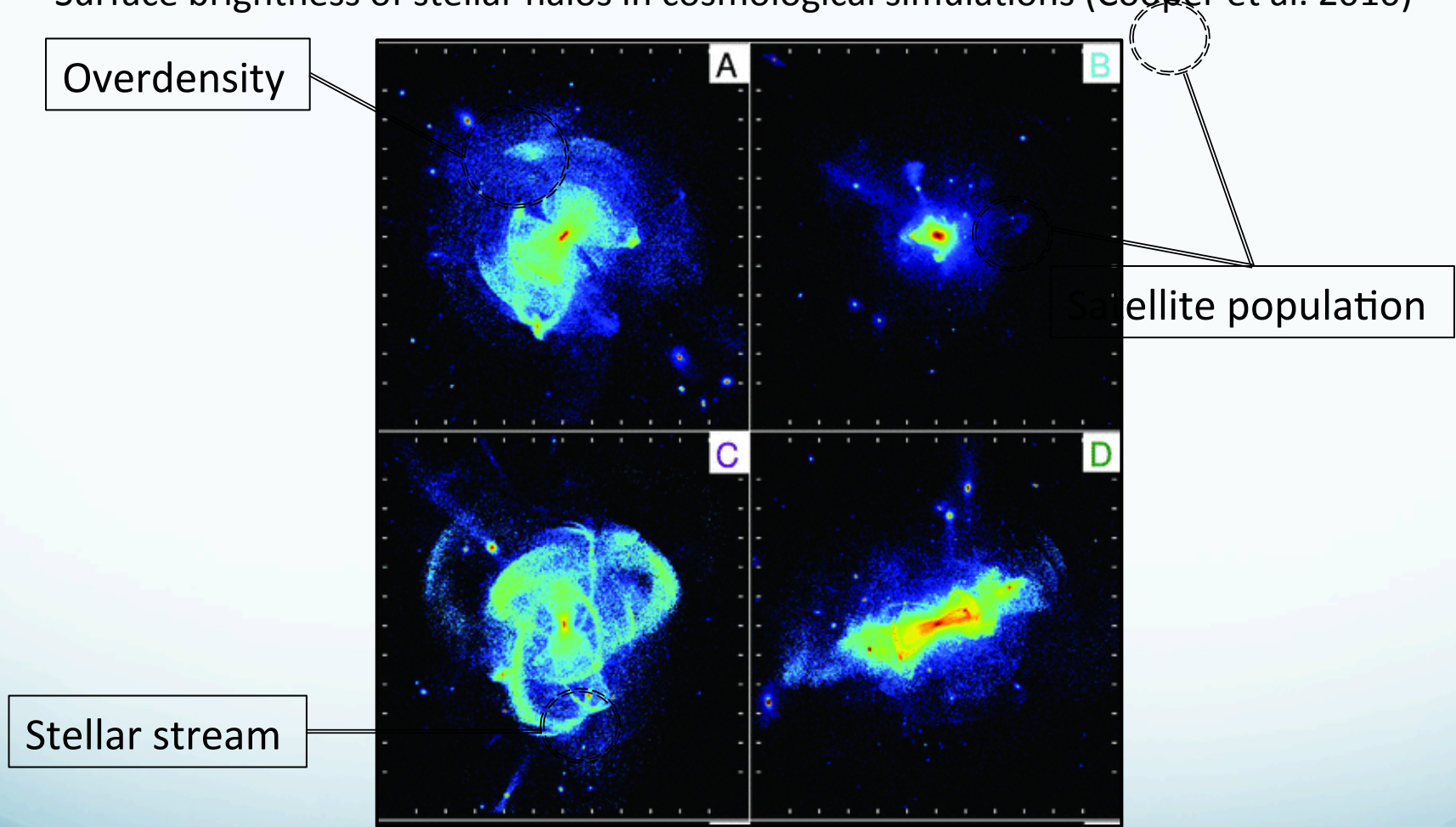
Cooper et al. 2010

位置・速度 (Gaia+**PFS**) + 化学組成(**PFS**)

⇒ 暗黒物質の分布、サブハロー合体史 (⇒ 千葉さん、豊内さん)

Formation of the MW halo in λ CDM

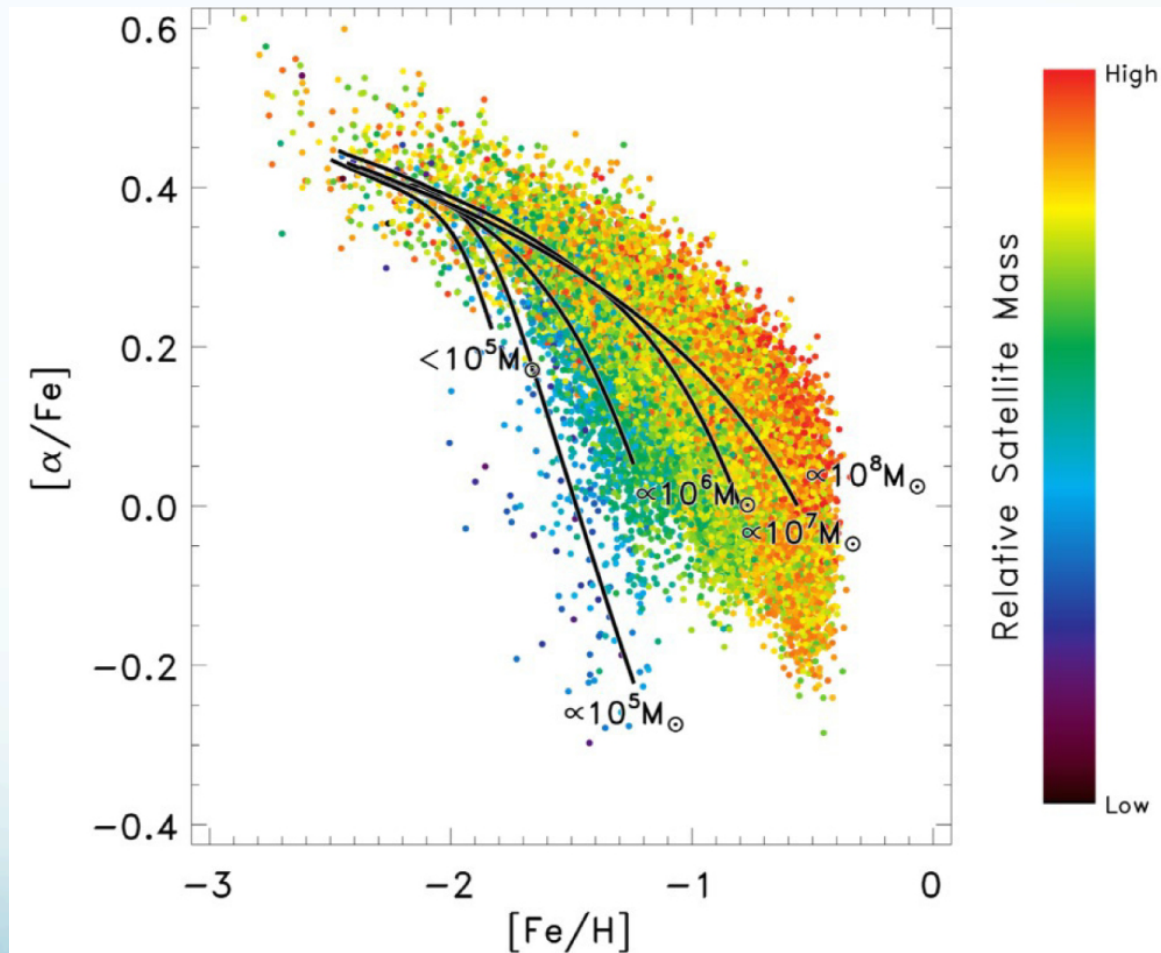
Surface brightness of stellar halos in cosmological simulations (Cooper et al. 2010)



Main/sub-structures in the stellar halo \Rightarrow

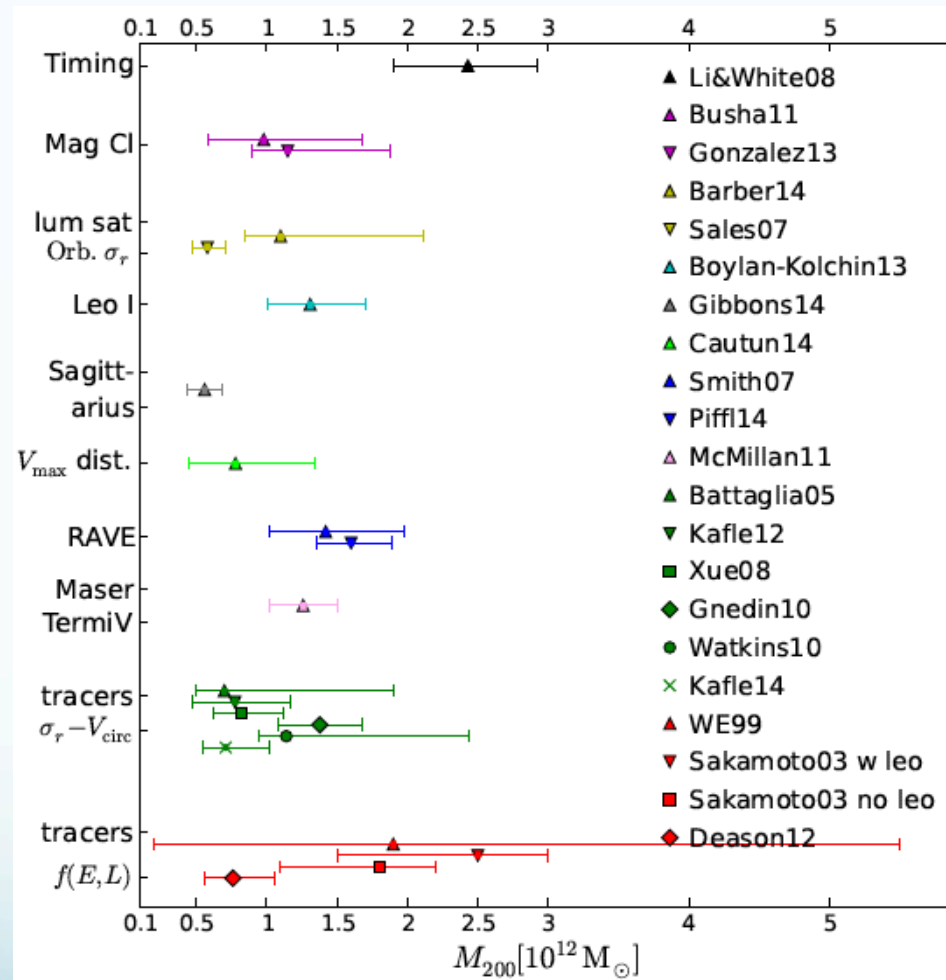
Fossil record of the merging history of the Milky Way

化学組成 ($[\text{Fe}/\text{H}]$, $[\alpha/\text{Fe}]$) 分布



Lee et al. 2015

銀河系暗黒物質ハローの質量

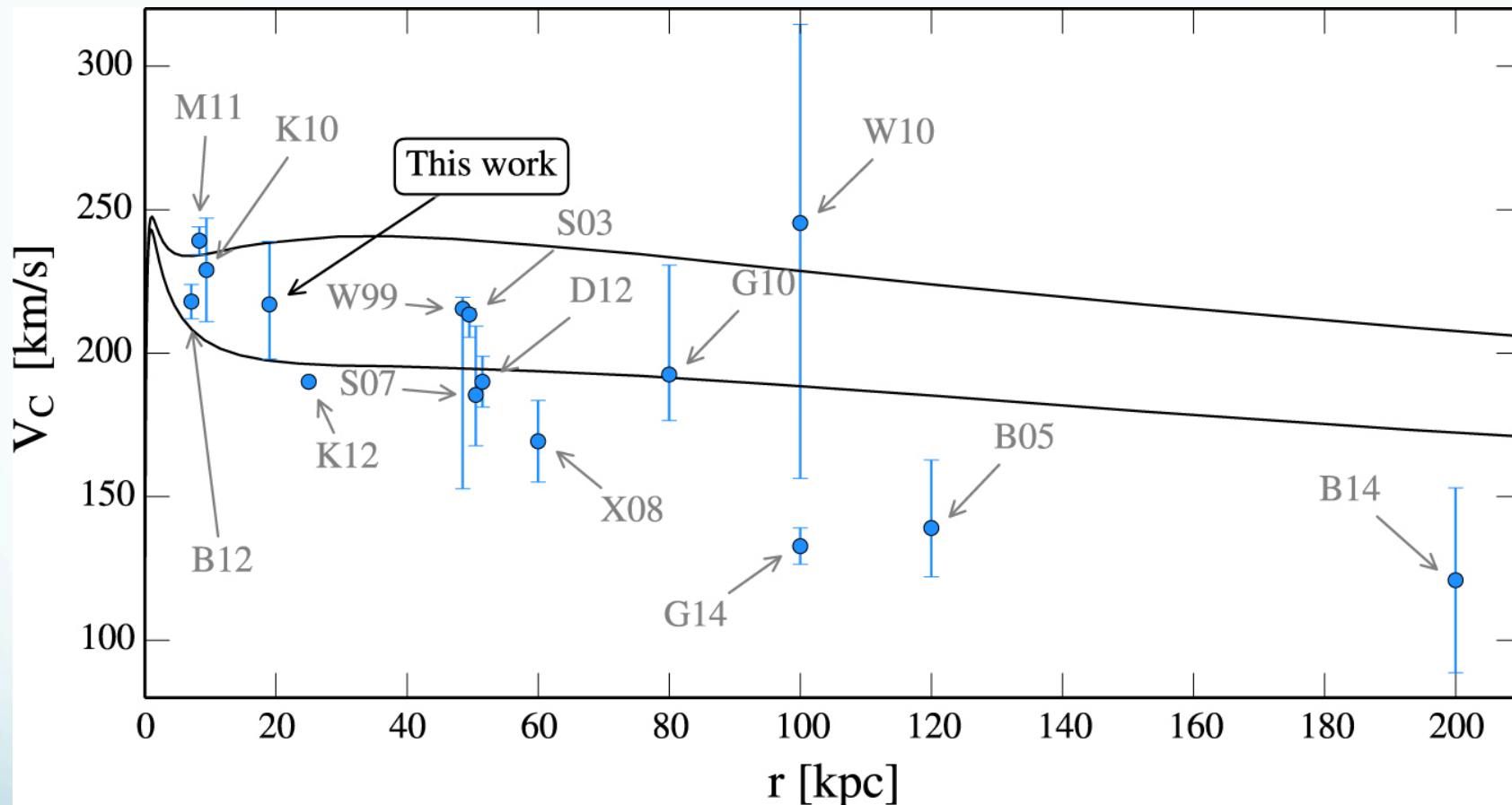


Wang et al. 2015

質量の見積もりが手法によって大きく異なる

銀河系暗黒物質ハローの質量

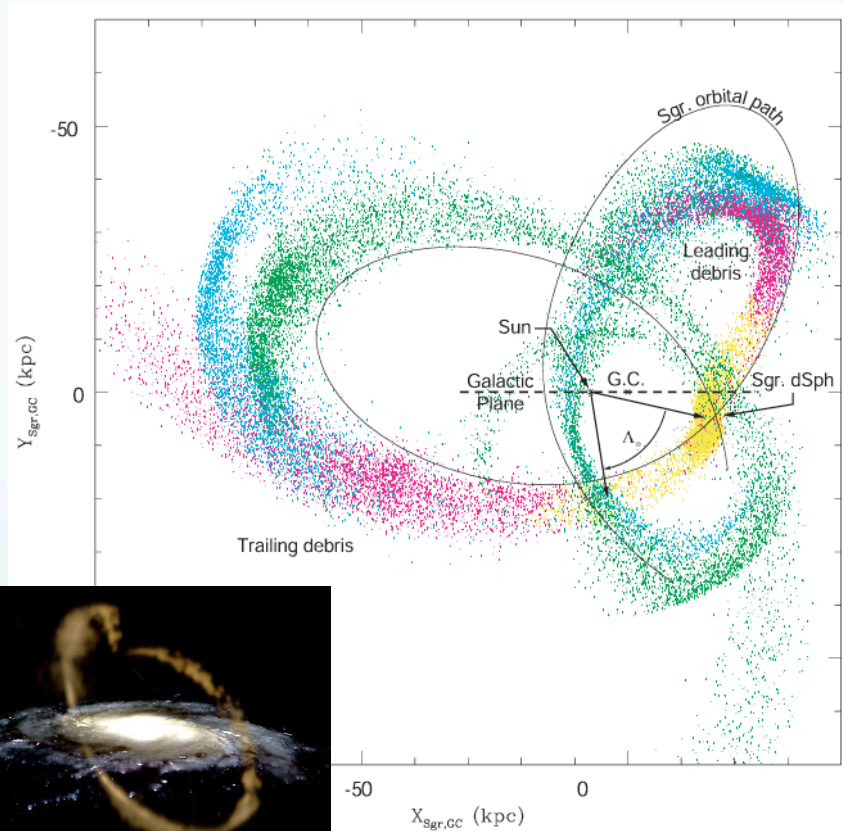
Kupper et al. 2015



外部ハローでは質量のトレーサーとなる明るい天体が少ない
⇒ $M(r < 200 \text{ kpc})$ の不定性は $> 100\%$

恒星ストリーム

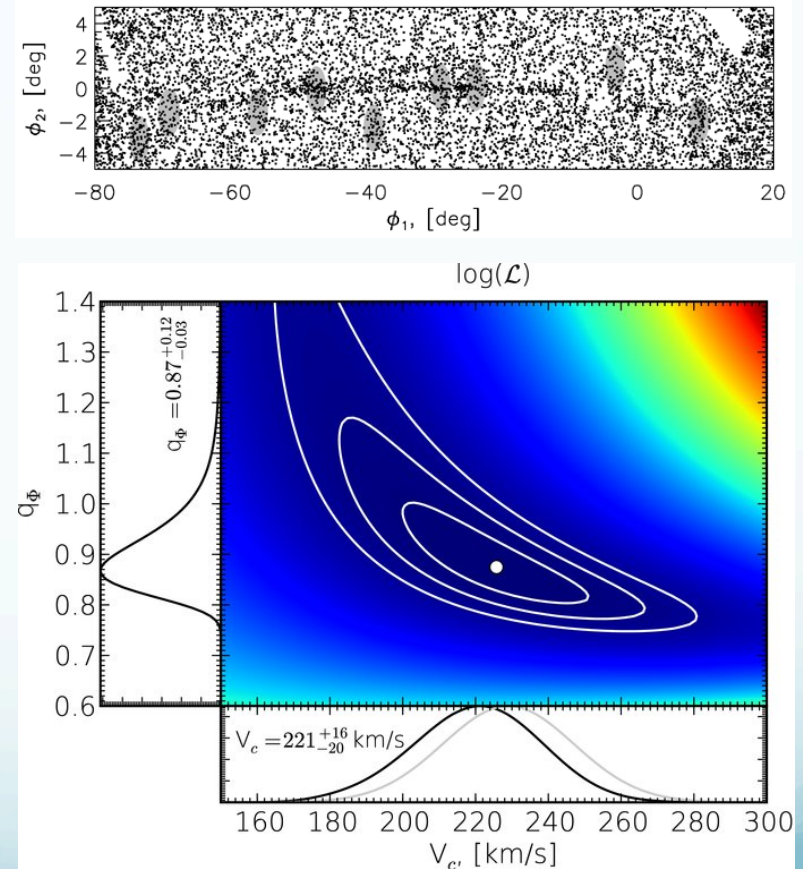
Sagittarius ストリーム



David Martinez-Delgado
(MPIA) & Gabriel Perez (IAC)

Law et al. 2005

GD-1 ストリーム

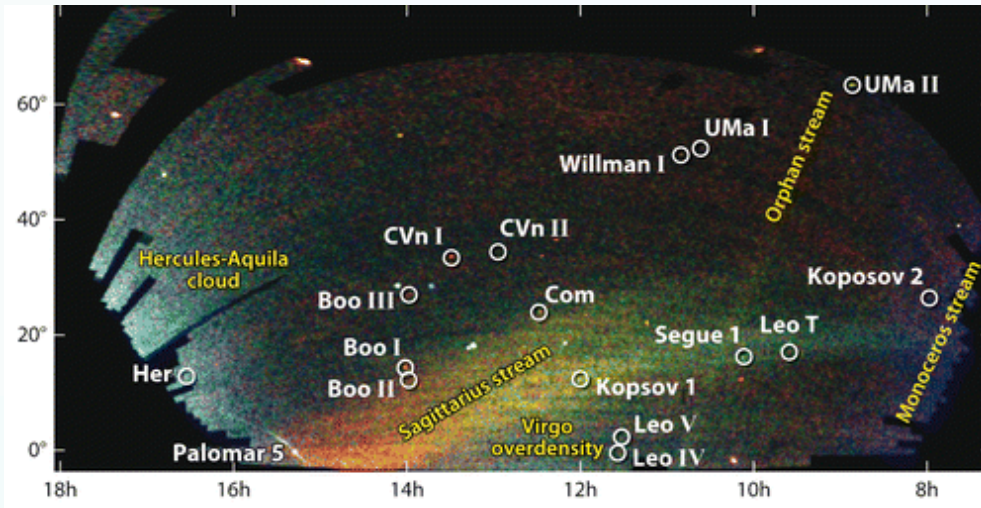


Koposov et al. 2010

銀河系ハローの恒星ストリーム

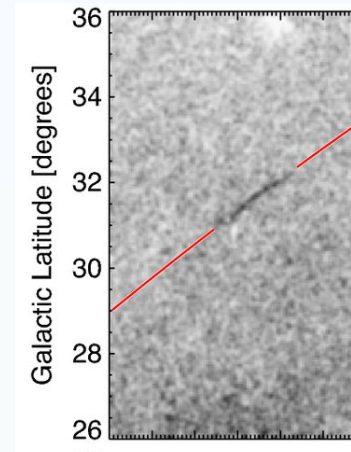
“The Field of streams”

(Belokurov et al. 2006; Ivezić et al. 2012)

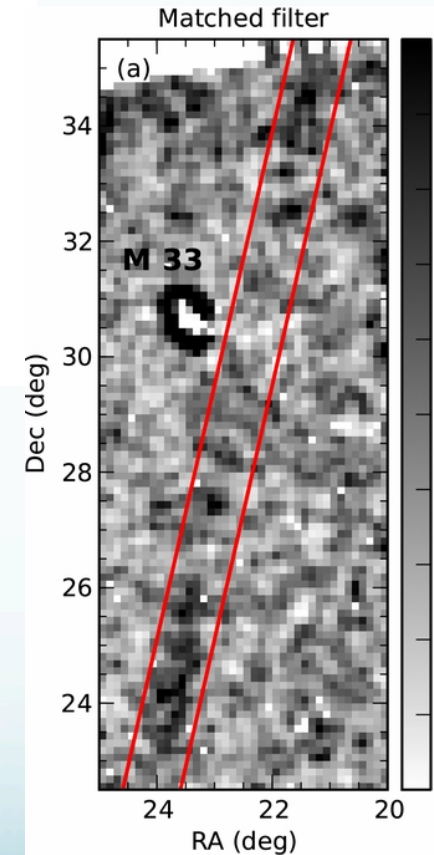


Ophiuchus stream

(Bernard et al. 2014)

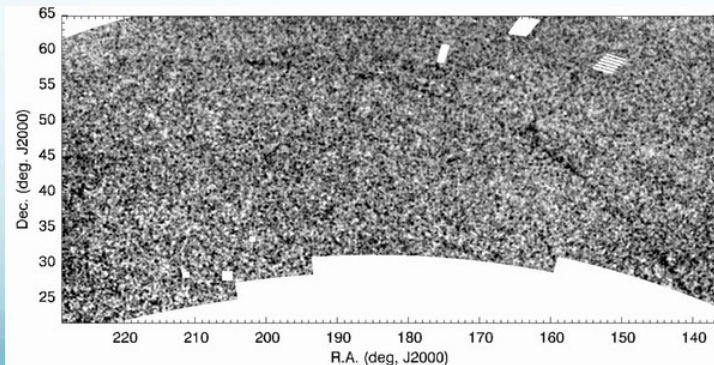


Triangulum stream
(Bonaca et al. 2012)



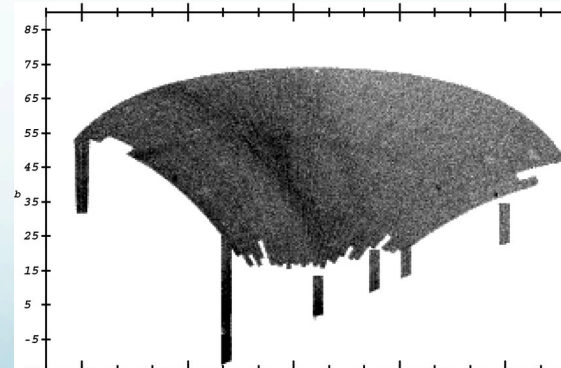
GD-1 stream

(Grillmair & Dionatos 2006)



Orphan stream

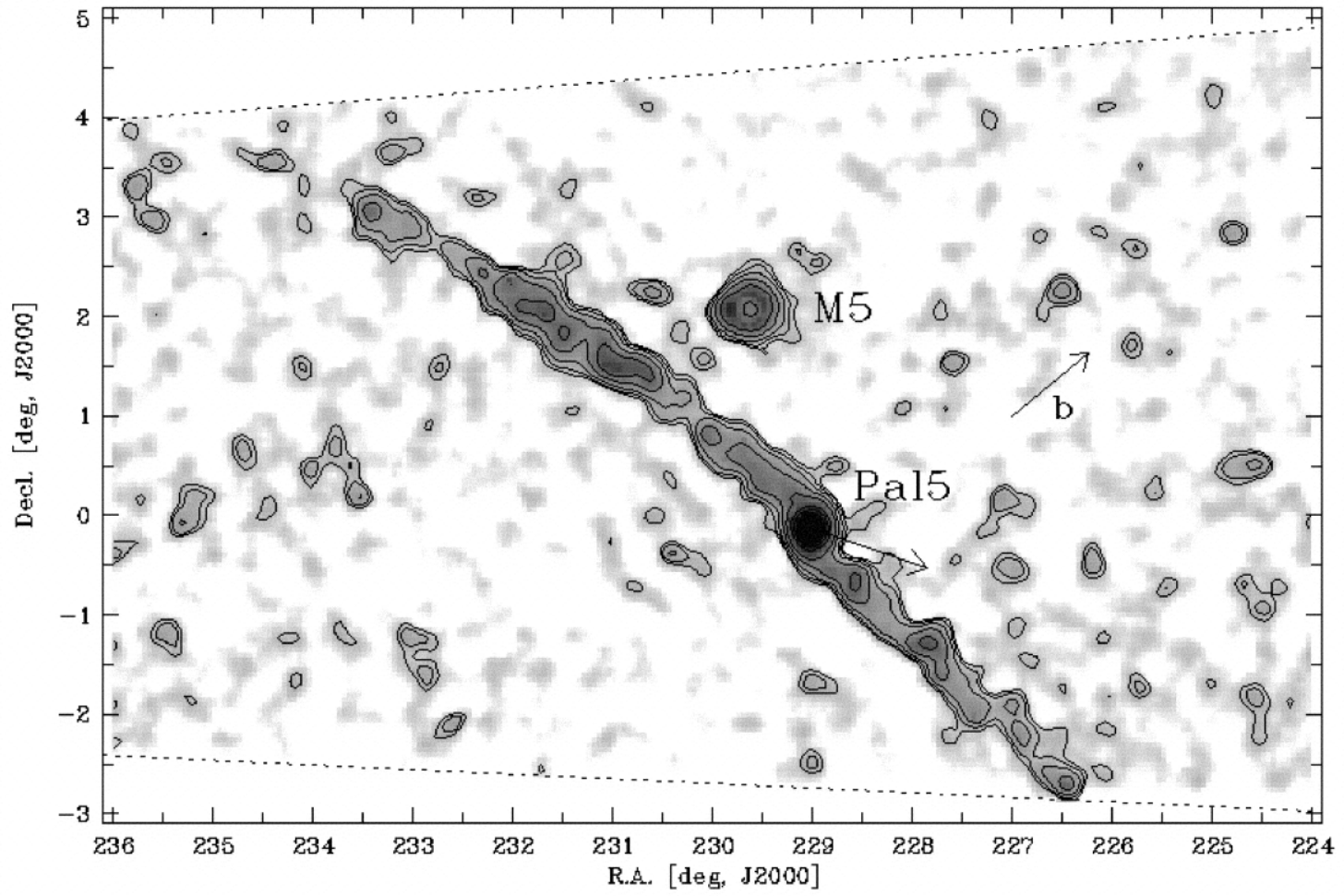
(Newberg et al. 2010)



+ New stream from HSC-SSP survey (⇒岡本さん)

The Palomar 5 stream

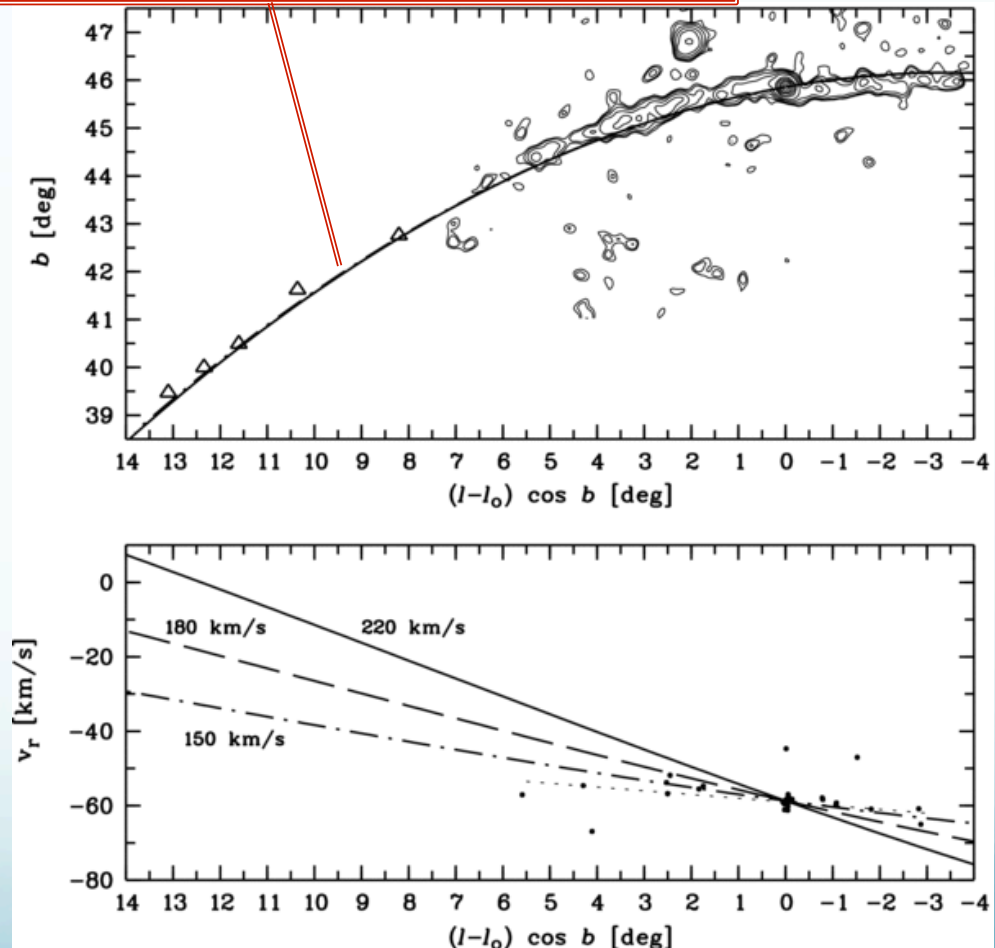
銀河系ハロー($d=23\text{kpc}$)、球状星団(Pal5)に付随する恒星ストリーム



ハロー質量(重力ポテンシャル)への制限

The models with v_c : 220, 180, 150 km/s

- 外部ハロー ($r > 20\text{kpc}$)
での貴重なトレーサー
- 視線速度データが重要
- 赤色巨星の数が少ない、暗い⇒メンバー星
の同定が困難



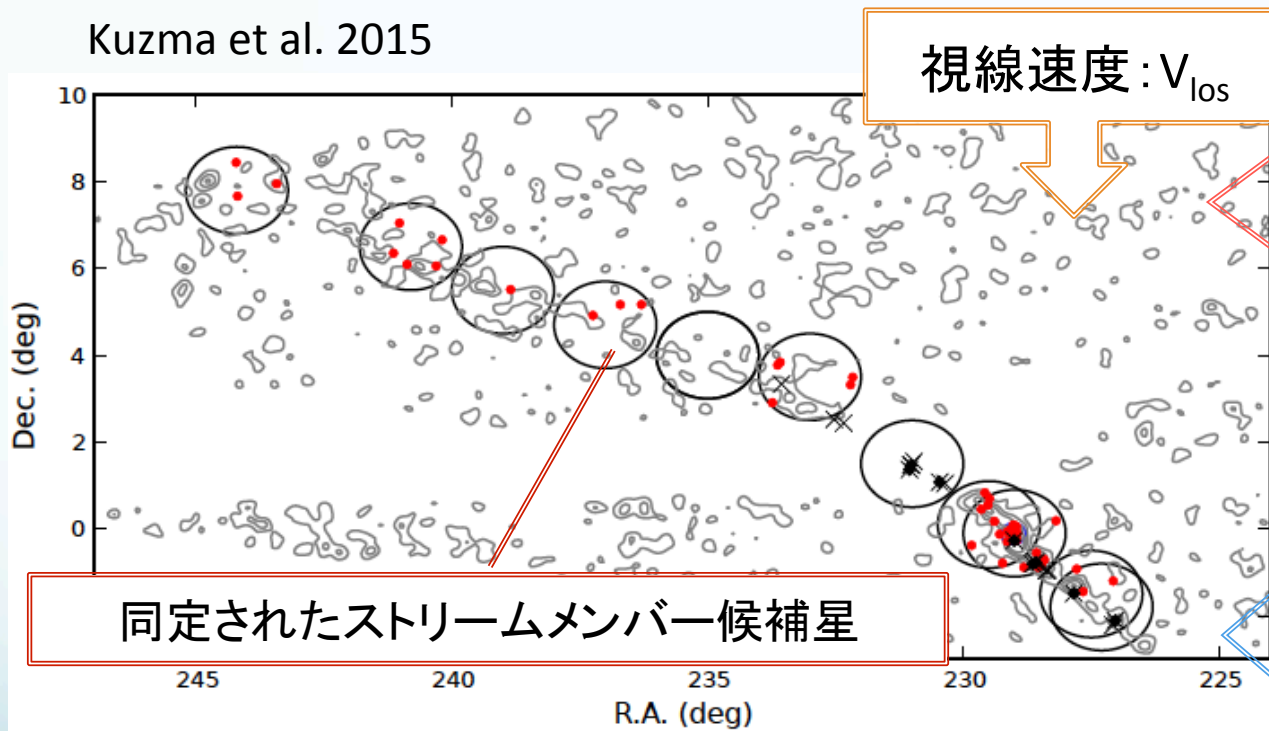
Odenkirchen et al. 2009

“Chemical tagging”

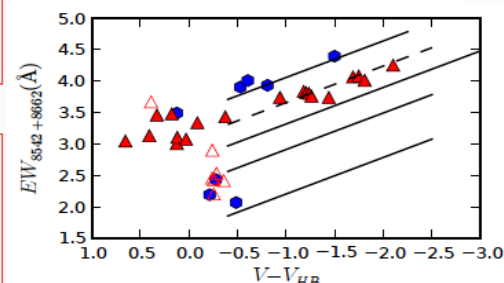
ストリームメンバー星ならPal5星団中心部と同じ化学組成

⇒ Pal5星団中心部と似た化学組成をもつ星を探す

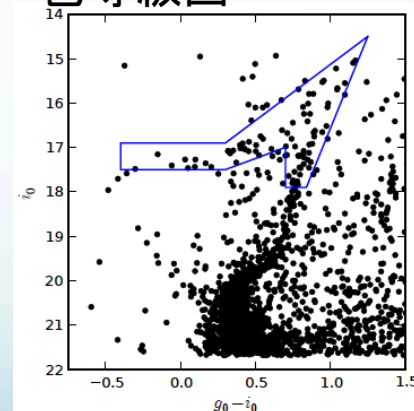
Kuzma et al. 2015



CaT EW \Leftrightarrow [Fe/H]



色等級図



Ca II Triplet による[Fe/H]測定⇒ 明るい星のみに適用可能

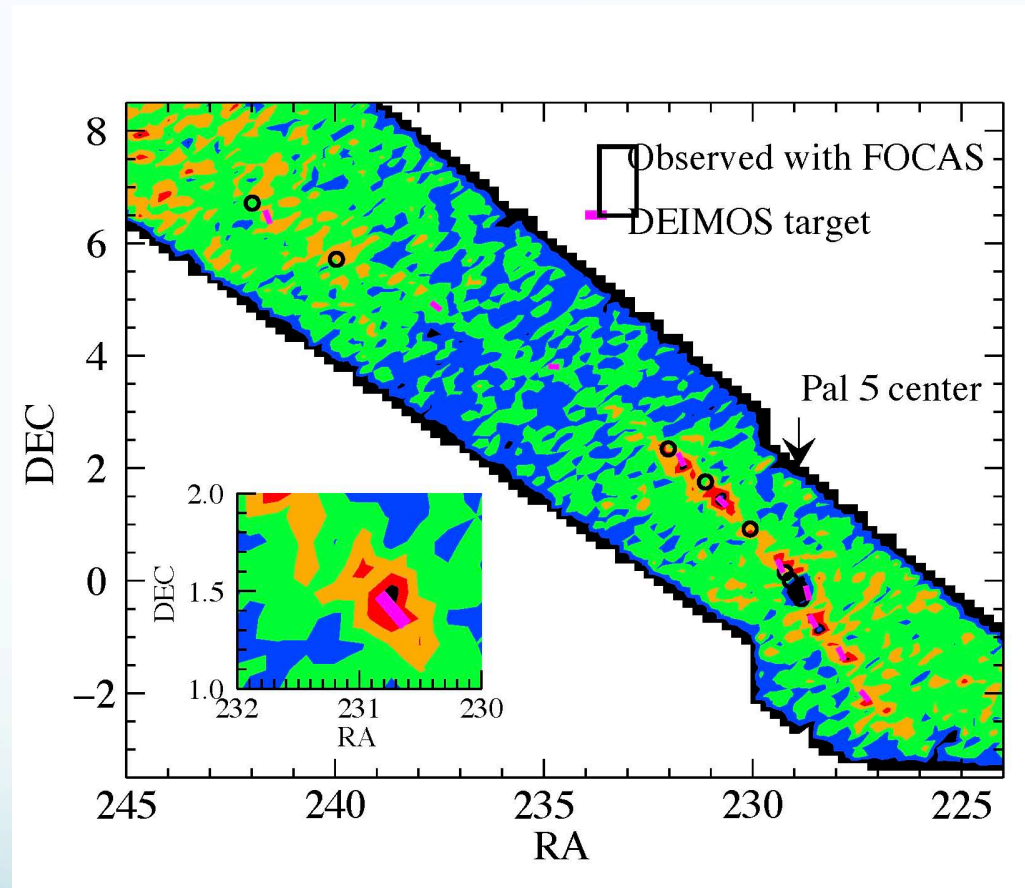
より暗い星までメンバー星を探索し、ストリームの V_{los} に制限をつける
⇒ 化学組成測定精度の向上

Mid-res. spectroscopy

- The Ca II triplet region,
7000-8900Å $R \sim 6000-7000$

\approx PFS mid-res mode

- Subaru/FOCAS
 - Central field
 - Exp. Time 1h
- Keck/DEIMOS
 - Stream fields
 - Exp. Time 1.5h
 - $\sim 40-50\%$ complete
($S/N > 20$) for $14 < r < 20$



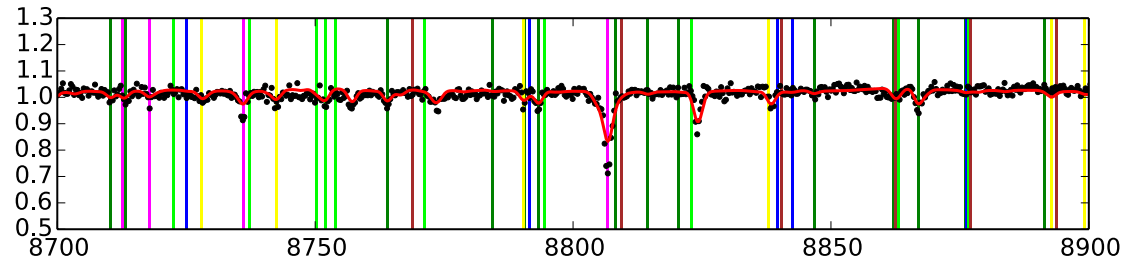
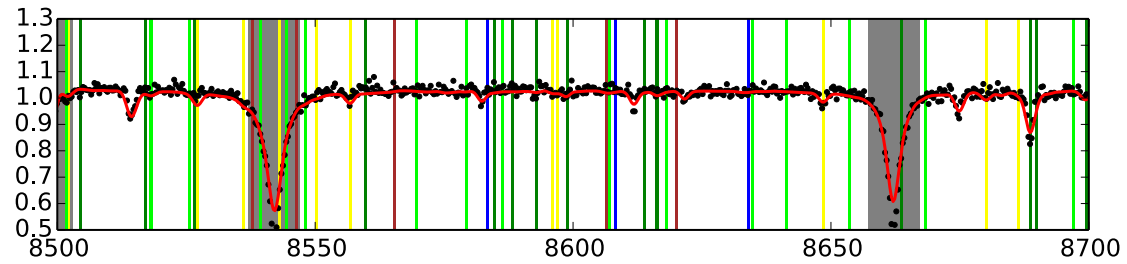
Keck/DEIMOS スペクトルの例

$T_{\text{eff}}=5048\text{K}$

$\log g=4.2$

$[\text{Fe}/\text{H}]=-0.61$

$[\alpha/\text{Fe}]=0.15$

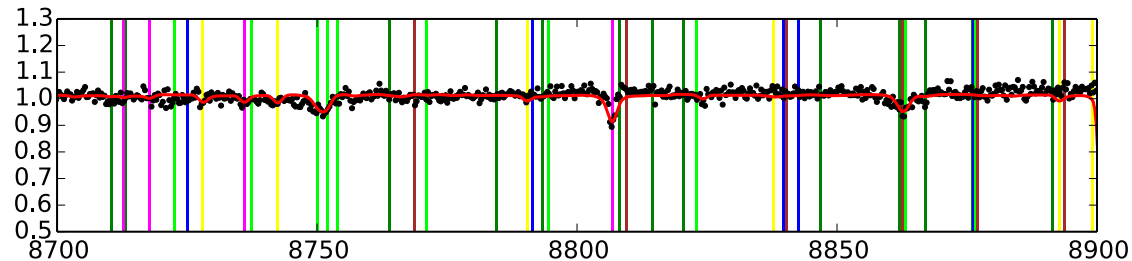
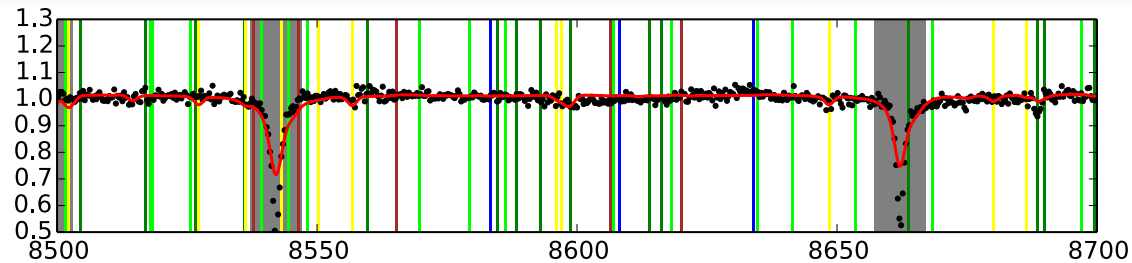


$T_{\text{eff}}=5623\text{K}$

$\log g=3.8$

$[\text{Fe}/\text{H}]=-2.06$

$[\alpha/\text{Fe}]=1.50$

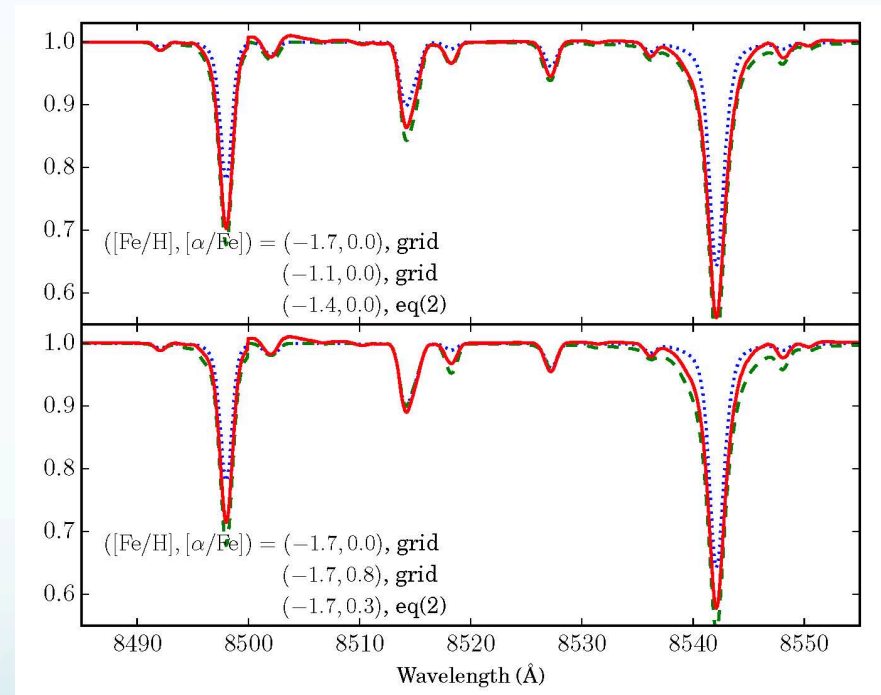


波長(\AA)



恒星大気パラメータと金属量の測定

- V_{los} : 観測されたスペクトルとテンプレートとの相関を最大化するように決める
- 星の合成スペクトル(Aoki-san's code)を T_{eff} , $\log g$, $[\text{Fe}/\text{H}]$, $[\alpha/\text{Fe}]$ 等の関数として近似

$$\begin{aligned} f(\log T_{\text{eff}}, \log g, [\text{Fe}/\text{H}], \xi, [\alpha/\text{Fe}]) = & \\ & a_0 + a_1 \log T_{\text{eff}} + a_2 \log g + a_3 [\text{Fe}/\text{H}] + a_4 \xi + \\ & a_5 [\alpha/\text{Fe}] + a_6 \log T_{\text{eff}}^2 + a_7 \log g^2 + a_8 [\text{Fe}/\text{H}]^2 + \\ & a_9 \xi^2 + a_{10} [\alpha/\text{Fe}]^2 + a_{11} \log T_{\text{eff}} \log g + \\ & a_{12} \log T_{\text{eff}} [\text{Fe}/\text{H}] + a_{13} \log T_{\text{eff}} \xi + \\ & a_{14} \log T_{\text{eff}} [\alpha/\text{Fe}] + a_{15} \log g [\text{Fe}/\text{H}] + \\ & a_{16} \log g \xi + a_{17} \log g [\alpha/\text{Fe}] + \\ & a_{18} [\text{Fe}/\text{H}] \xi + a_{19} [\text{Fe}/\text{H}] [\alpha] + a_{20} \xi [\alpha/\text{Fe}] \end{aligned}$$



高分散分光データとの比較

Starname	parameters	TW ^a	HR ^b
HD 111721	T_{eff} (K)	4916	4947
	 $\log g$	2.5	2.63
	$[\text{Fe}/\text{H}]$	-1.4	-1.33
	$[\alpha/\text{Fe}]$	0.5	0.35
HD 186478	T_{eff} (K)	4770	4540
	 $\log g$	1.8	0.65
	$[\text{Fe}/\text{H}]$	-2.4	-2.78
	$[\alpha/\text{Fe}]$	0.8	0.45

超金属欠乏星 ($[\text{Fe}/\text{H}] < -2.5$) では検出できるスペクトル線が少なく、
恒星パラメータの誤差が大きい

⇒ 精度の向上が必須: e.g. MATISSE (Recio-Blanco et al. 2006),
SSPP (Lee et al. 2008)

星団中心部

- Pal5星団中心部13天体

- $\langle [\text{Fe}/\text{H}] \rangle = -1.25 \pm 0.04$

c.f. $[\text{Fe}/\text{H}] = -1.28 \pm 0.03$ by high-res. spectroscopy (Smith+02)

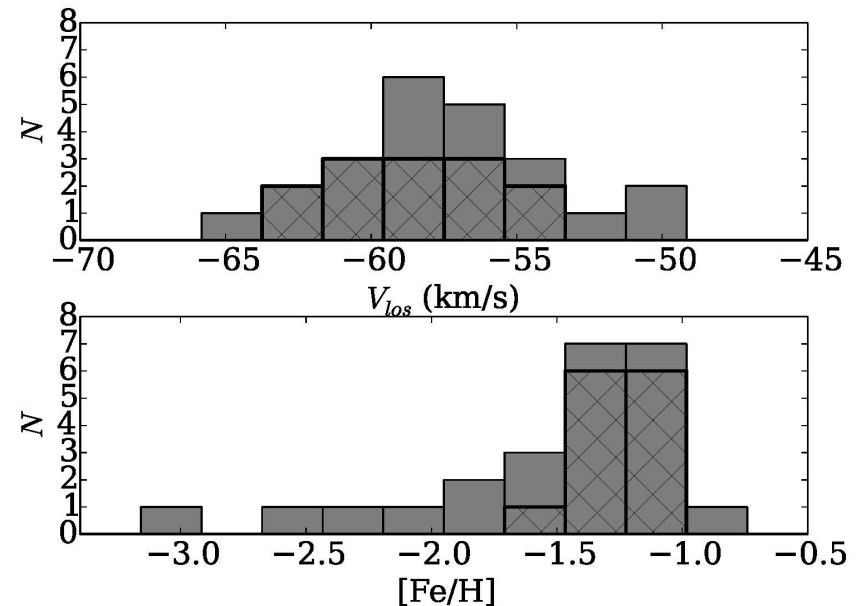
- $\langle V_{\text{los}} \rangle = -58.6 \pm 0.7 \text{ km s}^{-1}$

c.f. $V_{\text{los}} = -58.7 \pm 0.2 \text{ km s}^{-1}$ by high-res. spectroscopy (Odenkirchen+09)

- 誤差

- $\sigma[\text{Fe}/\text{H}] = 0.3 \text{ dex}$

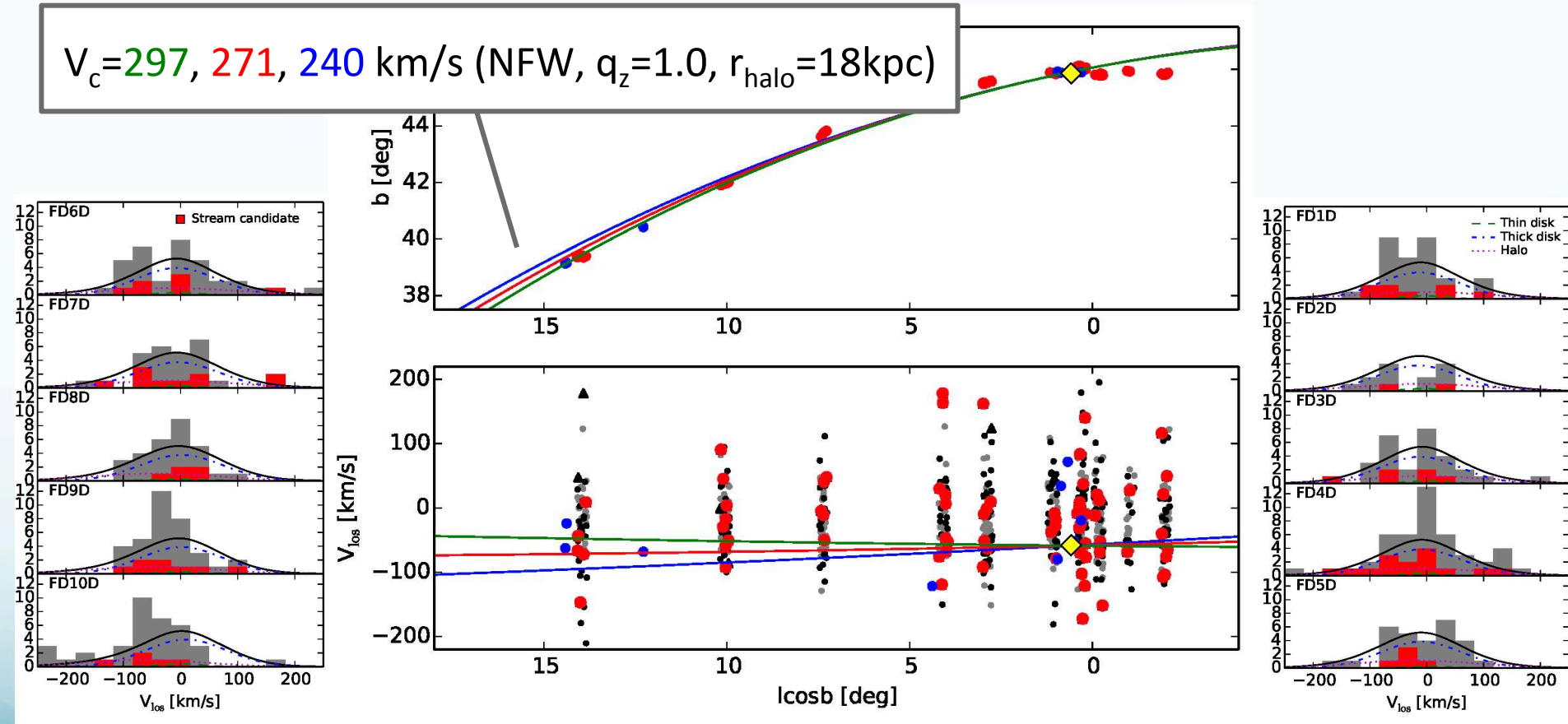
- $\sigma V_{\text{los}} = 3.0 \text{ km s}^{-1}$



ストリームメンバー星の推定

金属量(+固有運動)によるメンバー星候補の絞り込み

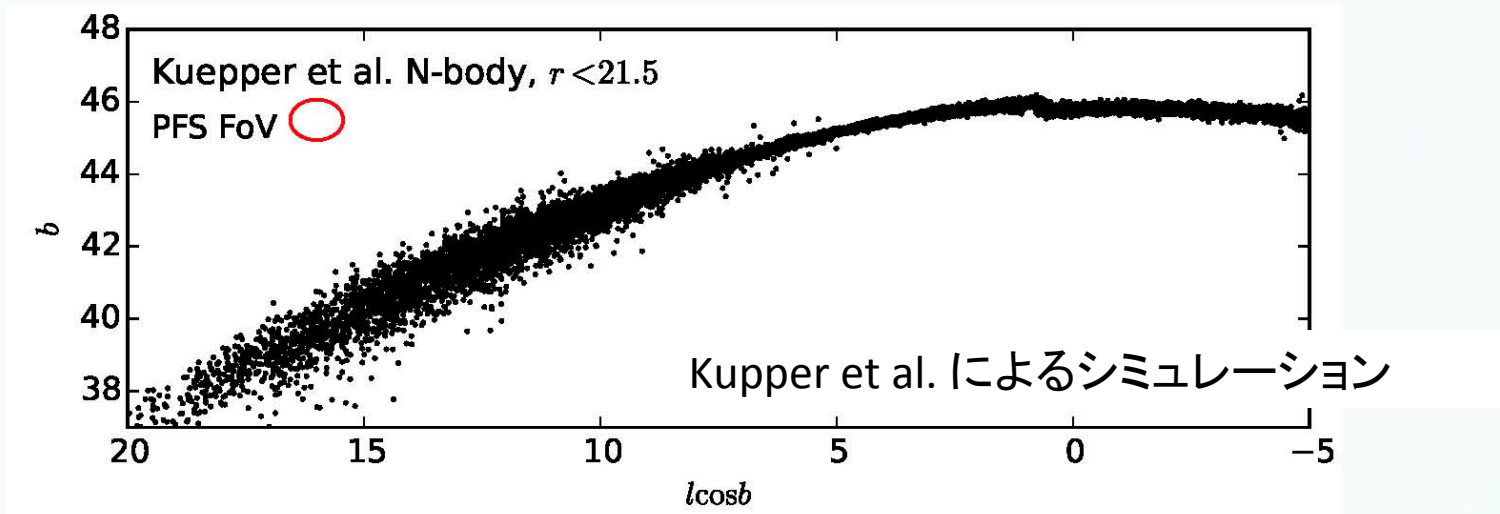
$V_c = 297, 271, 240$ km/s (NFW, $q_z = 1.0$, $r_{\text{halo}} = 18$ kpc)



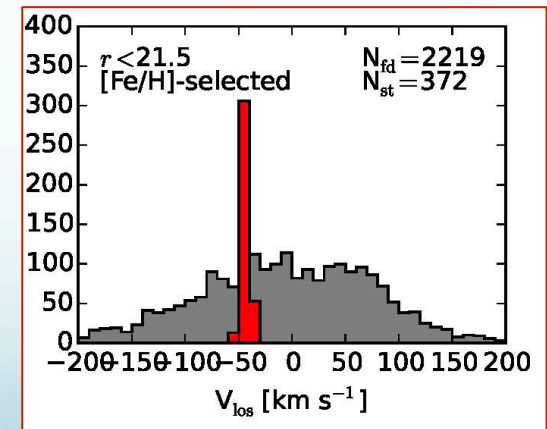
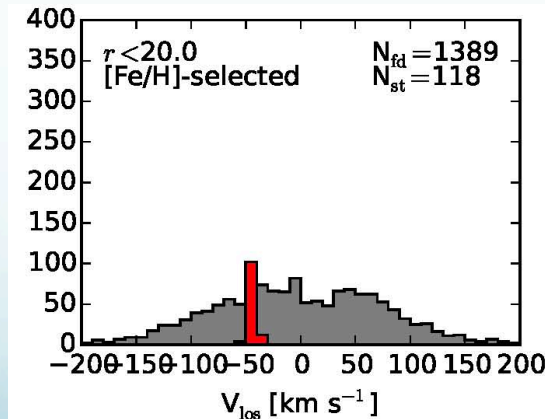
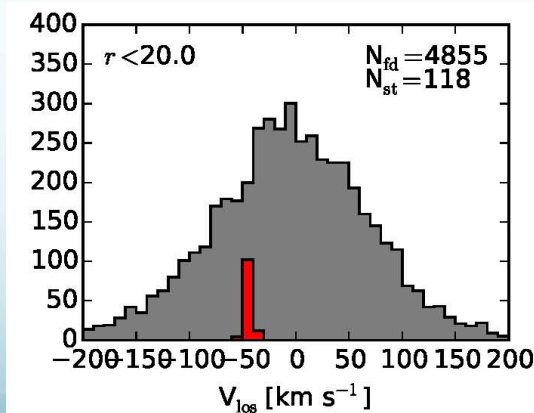
PFS広視野・深分光探査により銀河系背景星とストリーム星の視線速度分布を分離
⇒ 暗黒物質ハロー質量への制限

PFS-FoV (1deg^2)で期待される成果

ストリーム星と前景星を統計的に分離 \Rightarrow 暗黒物質ハロー質量への制限





グレー: 前景星 (Besancon model) 赤: ストリーム星

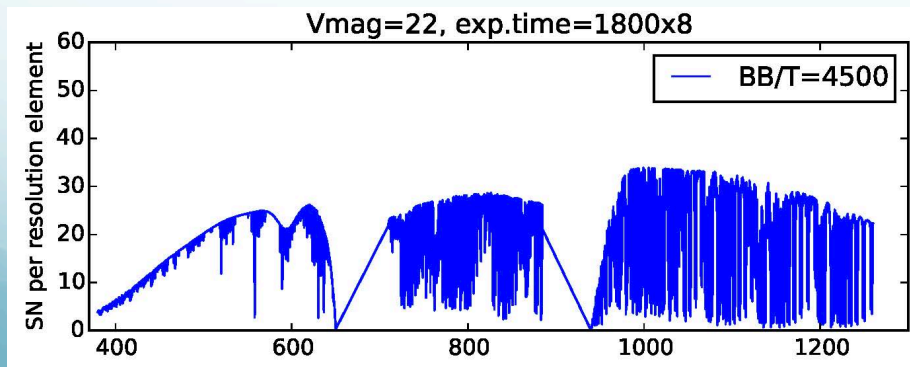


PFS深分光サーベイ($r < 21.5$)による視線速度+[Fe/H]測定が必須
c.f. <4-m望遠鏡プロジェクトでの限界等級: $V < 19$ from SSP doc.

その他のストリーム vs PFS



	d[kpc]	r_TO [mag]	Length [°]	Progenitor
Palomar 5	23	<u>~20.5</u>	>22	GC
Orphan	>20	<u>~20.5</u>	~50	(dwarf?)
GD1	~10	~18.5	~60	(GC?)
NGC5466	16	~19.5	~4	GC
Triangulum	26	<u>~20.5</u>	~12	(GC?)
Ophiucus	9	~18.5	2.5	(GC?)



外部ハローの暗いストリームの探査には**PFS**が必要

V=22mag, Red giant \Rightarrow ~4時間積分
(ETC: C. Hirata, 矢部さん, 森谷さん)

まとめ

- 恒星ストリーム：銀河系暗黒物質ハローの重力ポテンシャル（質量・形）のトレーサー
- Chemical tagging: 化学組成（金属量）の測定でメンバー星を同定することが、ストリームの視線速度推定にとって重要
- 中分散分光（Subaru/FOCAS, Keck/DEIMOS）にもとづく恒星パラメータの決定
 - 金属量は（ $[\text{Fe}/\text{H}] > -2$ 程度であれば）よく決まっている
 - 超金属欠乏星（ $[\text{Fe}/\text{H}] < -2$ ）の場合、恒星パラメータに大きな誤差
- 外部ハローのストリームの視線速度測定には、PFSの広視野、集光力を生かした分光サーベイが有効