

# KINEMATICS OF THE STELLAR HALO AND THE MASS DISTRIBUTION OF THE MILKY WAY USING BHB STARS

---

PRAJWAL R. KAFLE et al. 2012

2012/11/7 発表者 豊内 大輔(M1)

# Introduction

- 銀河形成史へのアプローチ  
銀河考古学：銀河の歴史を紐解く作業
    - “銀河形成(合体史)の痕跡”を探る
- e.g. ハローの星
- 銀河系でもっとも古い
    - 銀河形成初期から存在
  - 無衝突な系
    - 個々の星の離心率(軌道)は  
ほぼ断熱不変量
    - 運動から合体史にせまれる



# The formation scenario of stellar halo

- ELS scenario

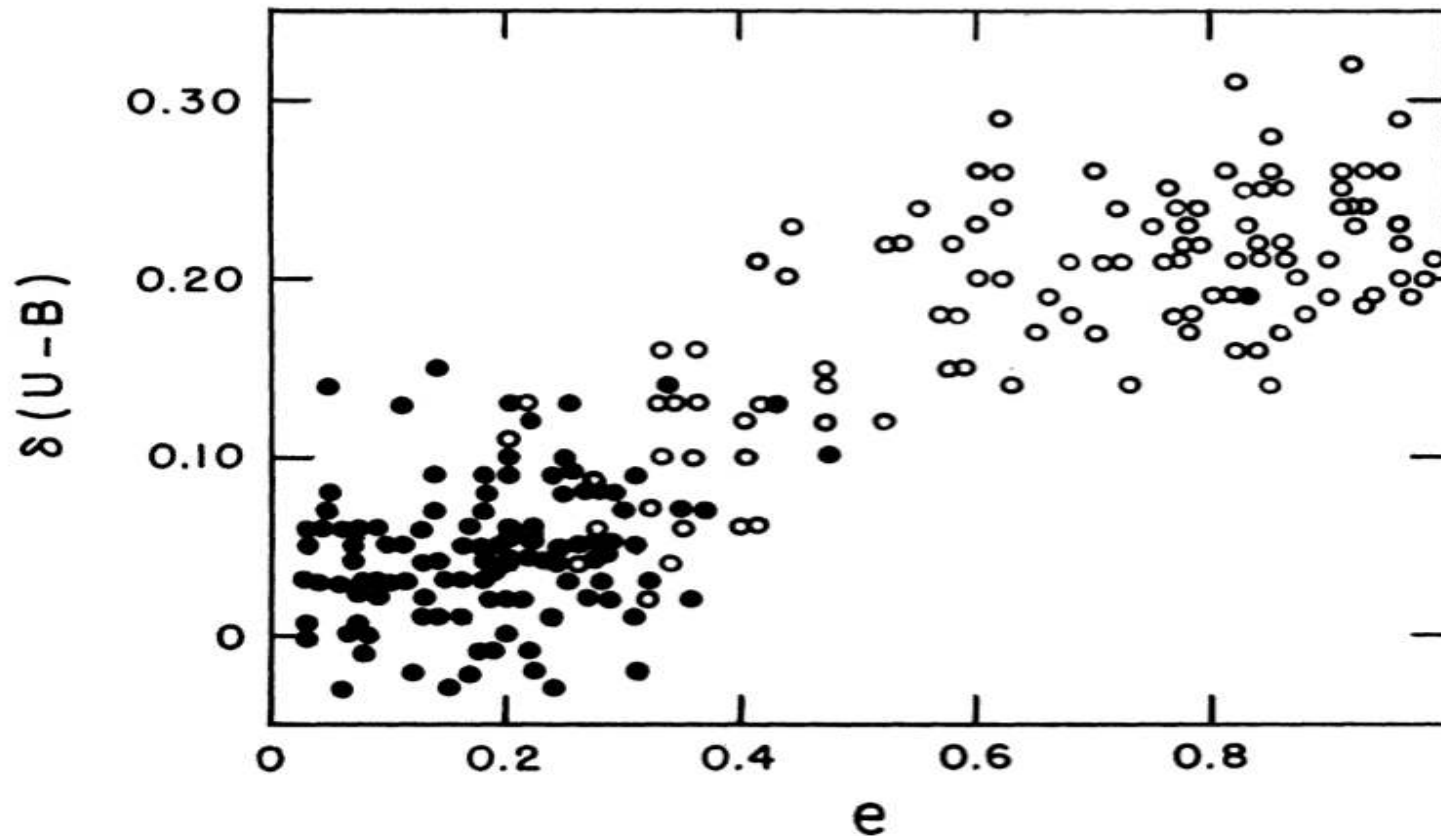
原始銀河系雲の収縮中に出来た星がstellar haloになる



→ 早く生まれた星ほどmetal poor + radial orbit

# The formation scenario of stellar halo

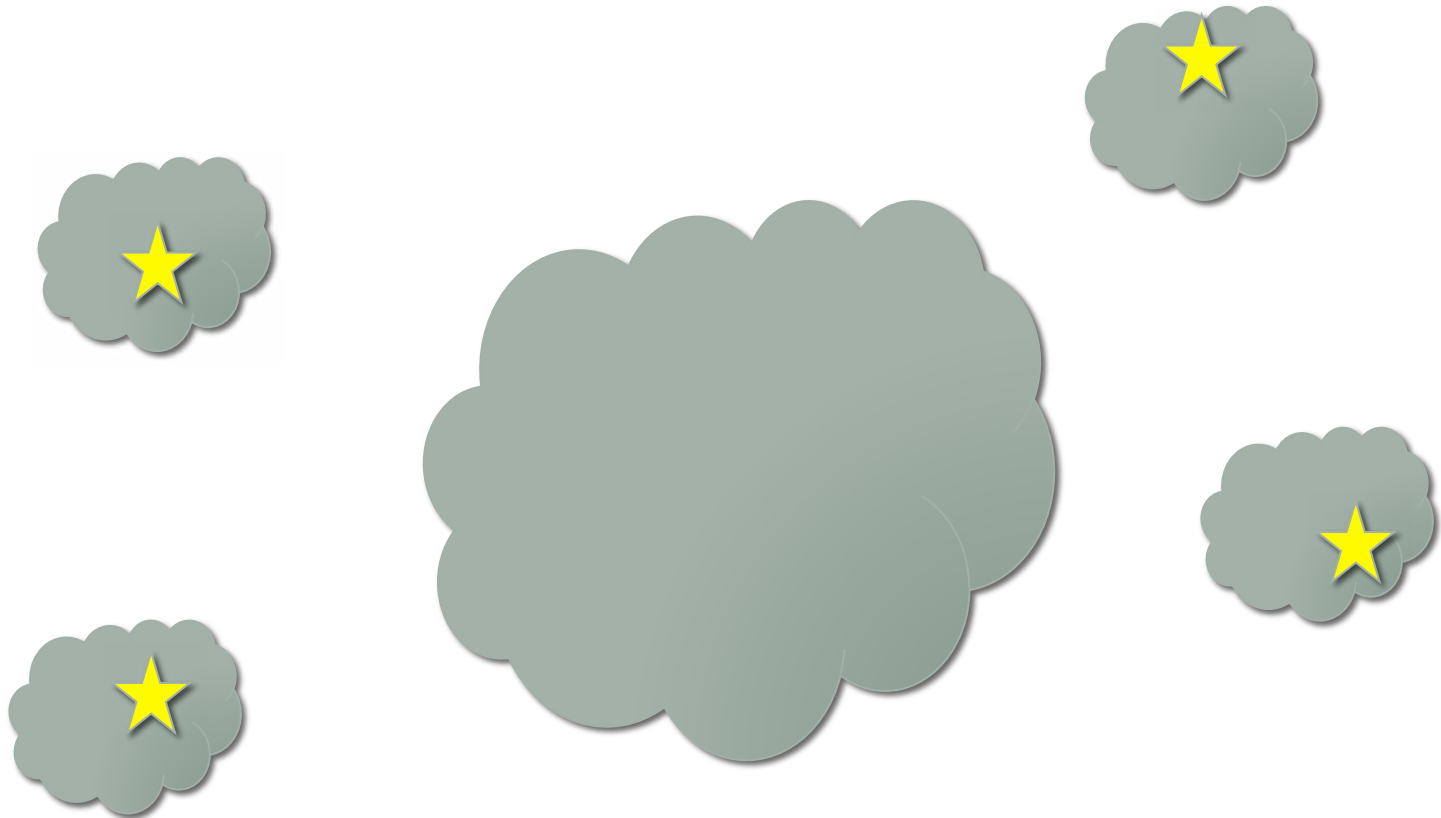
- ELS scenario



# The formation scenario of stellar halo

- SZ scenario

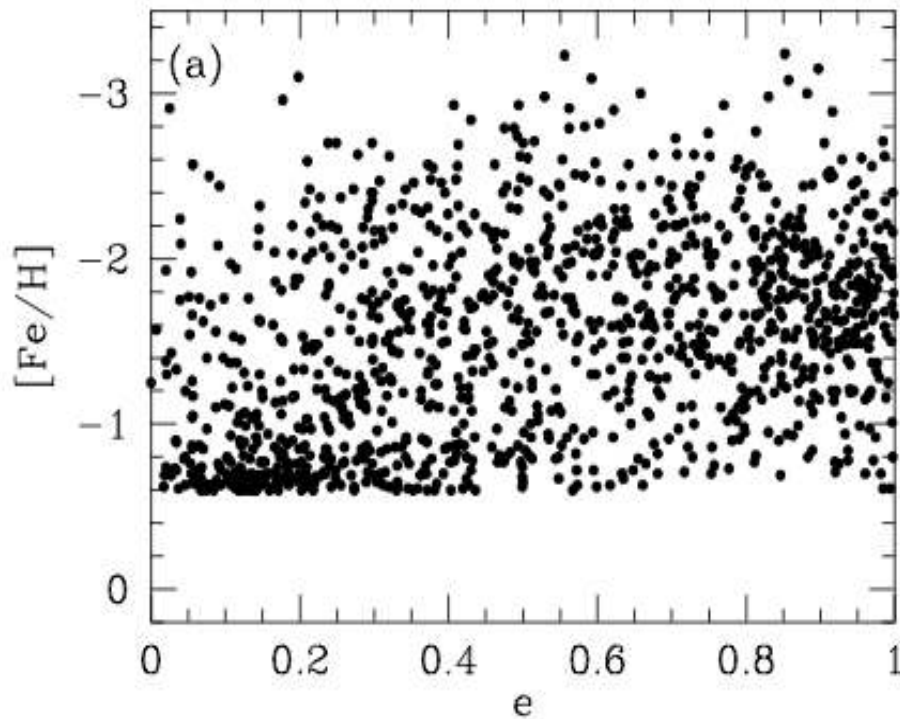
subhaloが降着した際にばらまかれた星がstellar haloとなる



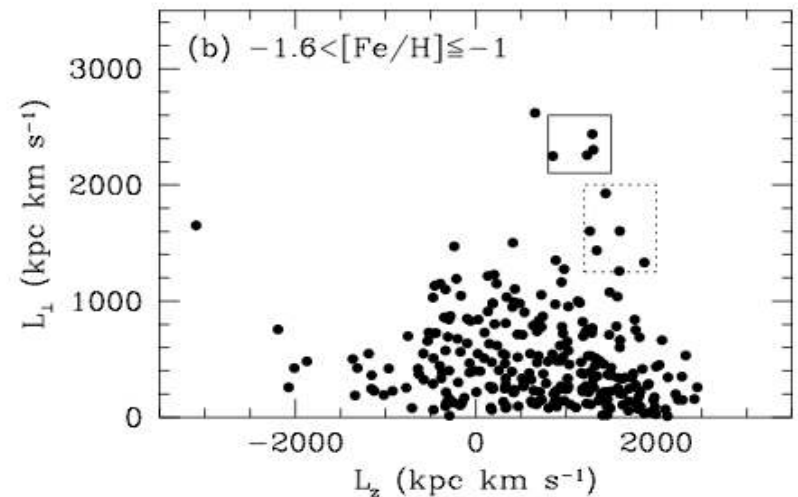
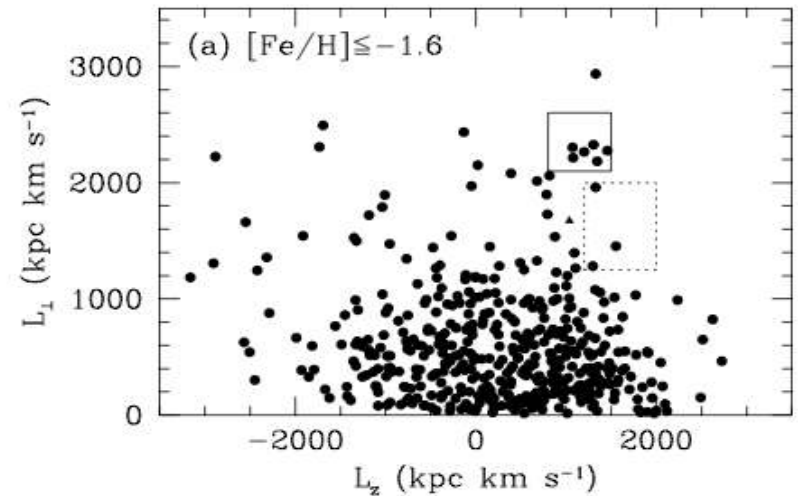
→ 金属量と離心率に相関はない

# The formation scenario of stellar halo

- SZ scenario



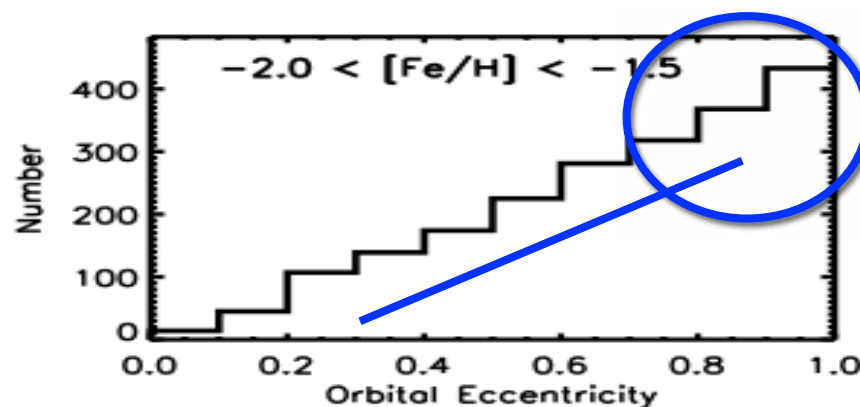
Chiba & Beers (2000)



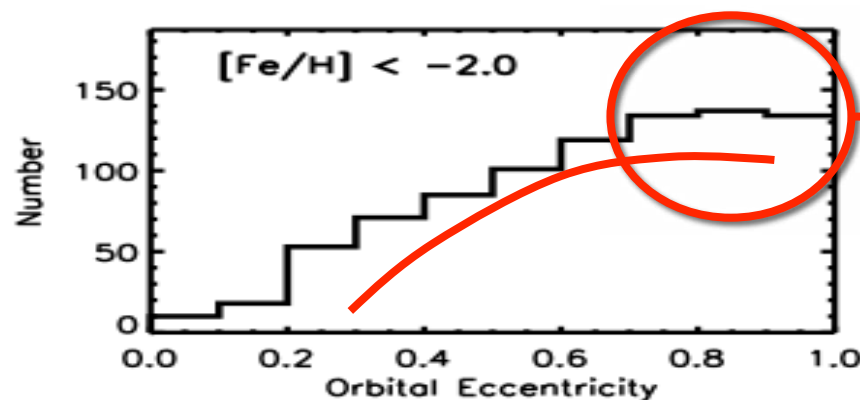
# Two components stellar halo

- Carollo et al. 2010

SDSS/SEGUEで位置・速度が得られた17000天体( $d_{\text{sun}} < 4\text{kpc}$ )を使用



Metal rich & radial orbit

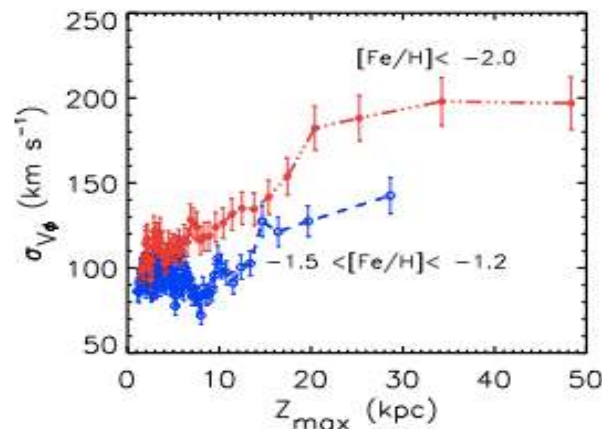
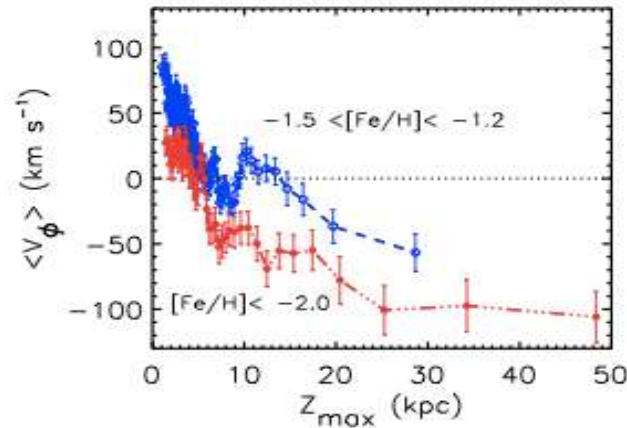
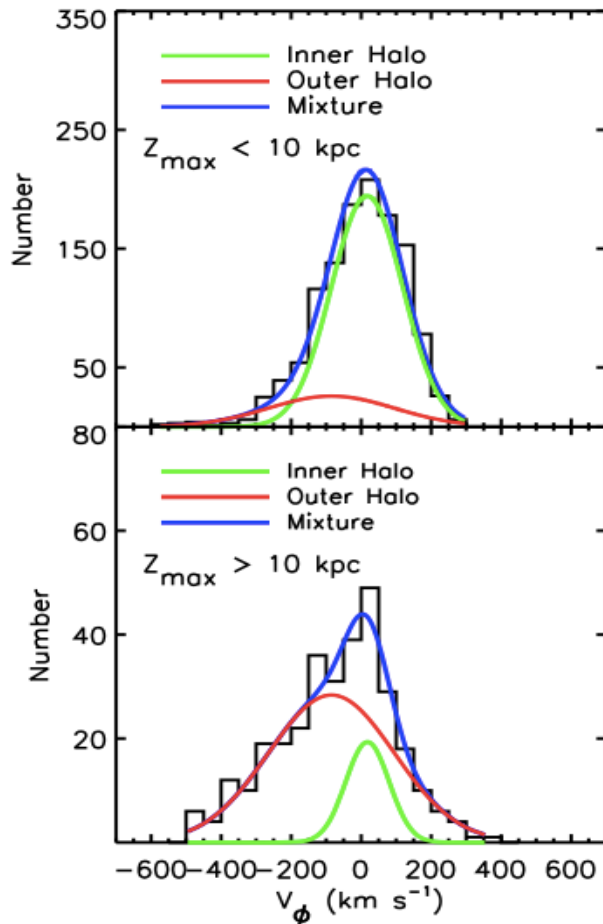


Metal poor & tangential orbit

# Two components stellar halo

- Carollo et al. 2010

SDSS/SEGUEで位置・速度が得られた17000天体( $d_{\text{sun}} < 4\text{kpc}$ )を使用



## Inner halo

metal rich & non-rotating component

↓  
ELS説のような過程で  
形成した星

(In-situ stars)

## Outer halo

metal poor &  
counter-rotating  
component

↓  
SZ説のような過程で  
ばらまかれた星

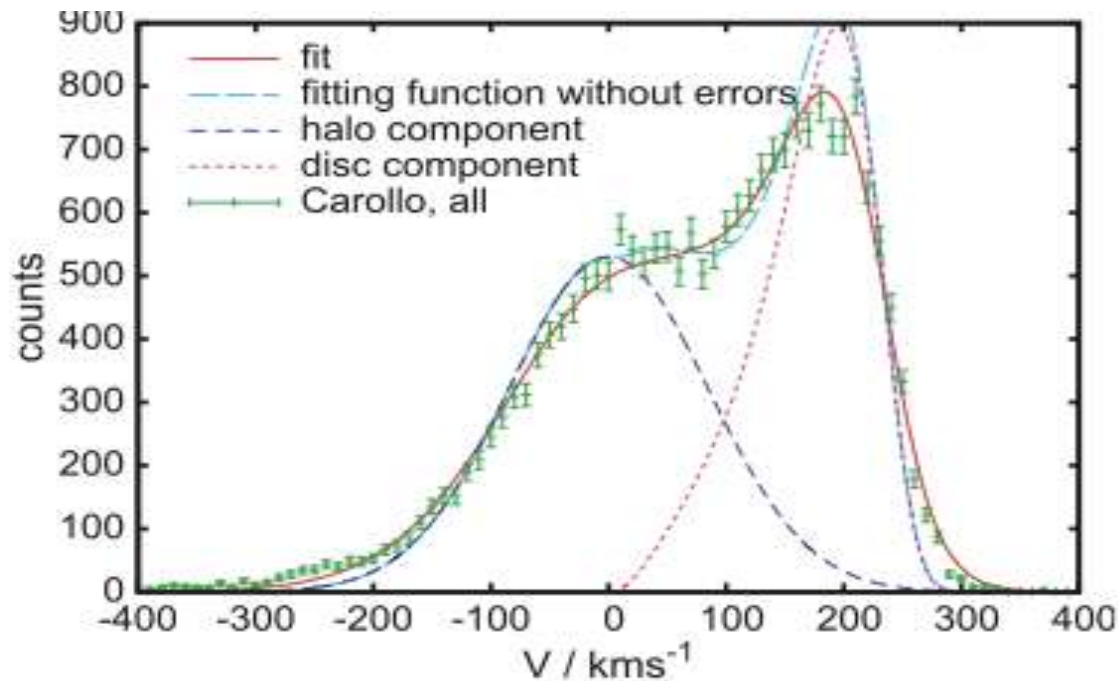
(accreted stars)



# The counterclaim for two components halo

- Schönrich et al. 2011

Carollo+2010は距離の測定誤差が大きい上に、誤差推定が正しくない。  
同じサンプルを用いて独自に再計算。ハローはsingle Gaussianで十分。



→ 2つのハロー成分は本当にある？

# The originality of this work

- サンプルとして **BHB stars** を使用。
  - 明るい + 距離の精度が良い → ハローを調べるのに最適
- 固有運動を使用しない。  $\sigma_{los}$  だけで議論。
  - BHBは遠くまで見える分、固有運動が信頼できない。
- **運動の非等方性 ( $\beta$ )** を銀河中心からの距離  $r$  の関数として導出。
  - **最尤法** を用いて  $\sigma_{los}$  の分布から  $\beta$  を調べる。

$$\beta = 1 - \frac{\sigma_{\theta}^2 + \sigma_{\phi}^2}{2\sigma_r^2}$$

- **シミュレーション (accreted component only)** との比較
  - $\beta$  profile を比較。accreted component だけで説明可能？

# Sample

- Xue et al. 2011で使用されたBHB starsのデータを使用
  - SDSS DR8
  - スペクトル解析によりBS除去済み
  - 距離についてはrecalibration → distance uncertainty ~ 6%
  - $|z| > 4\text{kpc}$ のみ使用 → disk stars除去
  - sample selectionには速度に対する制限はなし
    - 運動に対するバイアスはなし

# Maximum likelihood method

- 分布関数

$$f(r, \vec{v}) = \frac{\rho(r)}{(2\pi)^{3/2} \sigma_r \sigma_\theta \sigma_\phi} \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{v_r^2}{\sigma_r^2} + \frac{v_\theta^2}{\sigma_\theta^2} + \frac{(v_\phi - v_{rot})^2}{\sigma_\phi^2} \right) \right]$$

$$\rho(r) \propto r^{-\alpha} \quad \text{and} \quad \alpha = \begin{cases} 2.4 & (r \leq 27 \text{kpc}) \\ 4.5 & (r > 27 \text{kpc}) \end{cases}$$

これを銀河座標系に変換 + 固有運動使わないので

$$(r, \theta, \Phi, v_r, v_\theta, v_\phi) \rightarrow (l, b, d, v_{los}, v_l, v_b)$$

$$F(l, b, d, v_{los} \mid \sigma_r, \sigma_\theta, \sigma_\phi, v_{rot}) = \iint f(l, b, d, v_{los}, v_l, v_b) dv_l dv_b$$

# Maximum likelihood method

$F(l_i, b_i, d_i, v_{\text{los},i} | \sigma_r, \sigma_\theta, \sigma_\phi, v_{\text{rot}})$  :

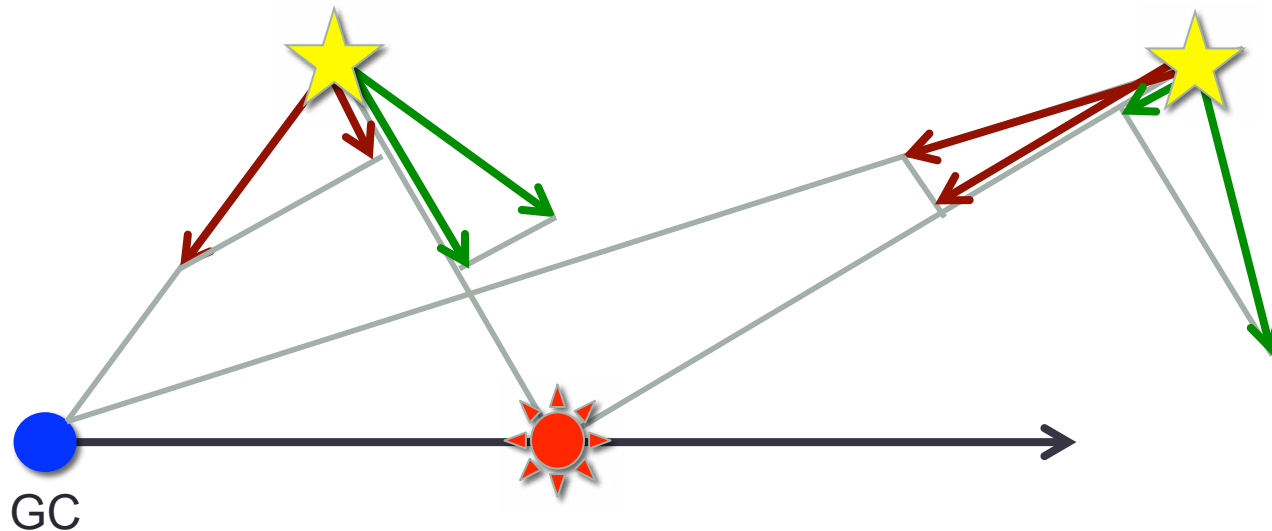
任意のパラメータの組 $(\sigma_r, \sigma_\theta, \sigma_\phi, v_{\text{rot}})$ の下、星  $i$  が $(l_i, b_i, d_i, v_{\text{los},i})$ で観測される確率。

- **すべての星についてのFの和(あるいは積)  $L$  が最大になるパラメータの組をMCMC法を用いて調べる。**

$$L(l, b, d, v_{\text{los}} | \sigma_r, \sigma_\theta, \sigma_\phi, v_{\text{rot}}) = \sum_i^n \log F(l_i, b_i, d_i, v_{\text{los},i} | \sigma_r, \sigma_\theta, \sigma_\phi, v_{\text{rot}})$$

# Two different binning schemes

- 視線速度から速度分散を調べるとき、接線方向よりも動径方向の方が推測しやすい。



- $\sigma_r$ は中心近くより、外側で精度が良い。(  $R \rightarrow \infty$  で  $\sigma_{los} \sim \sigma_r$  )  
→ 遠くまで推定できる。
- $\sigma_t$ は外側より、中心近くで精度が良い。  
→  $\sigma_r$ ほど遠くまでは推定できない。
- $\sigma_t$ 上図の平面に垂直な方向の成分は検出できない。  
→ 精度あげるには  $\sigma_r$  に比べてたくさんのサンプルが必要。

# Two different binning schemes

- EPE(equi-populated estimator)

sampleを各ビンでoverlapさせないでとる。

– サンプル数が少なくても良い $\sigma_r$ についてはこれで十分

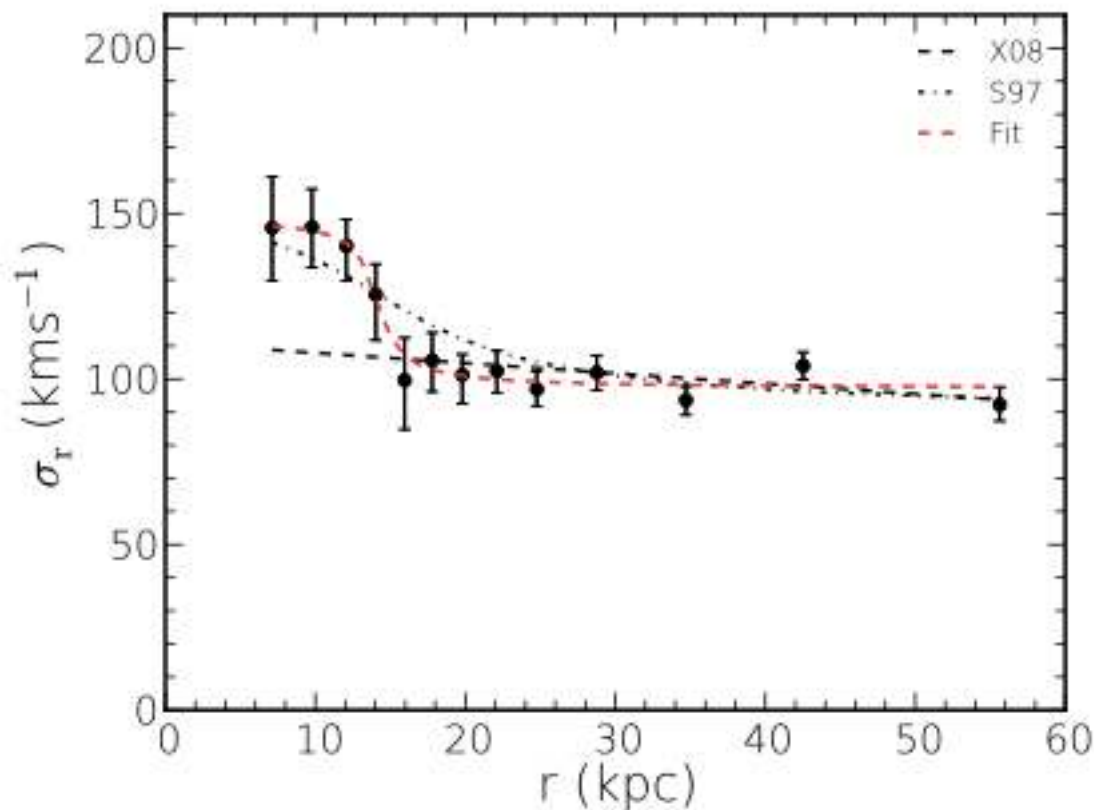
- CME(central moving estimator)

sampleをとんりのビンとoverlapさせながらとる。

– ひとつのビンに含まれるサンプル数をかせぎたい $\sigma_\theta$ 、 $\sigma_\phi$ についてこれを適用。

# Results(1)

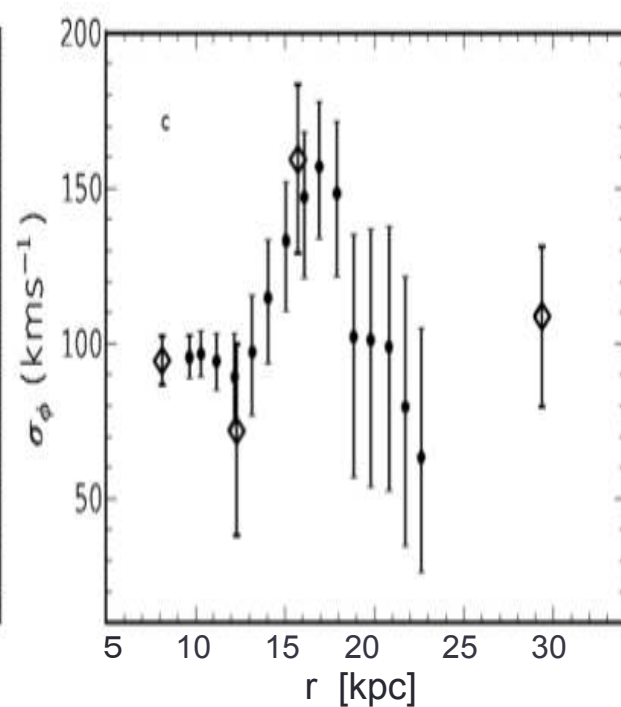
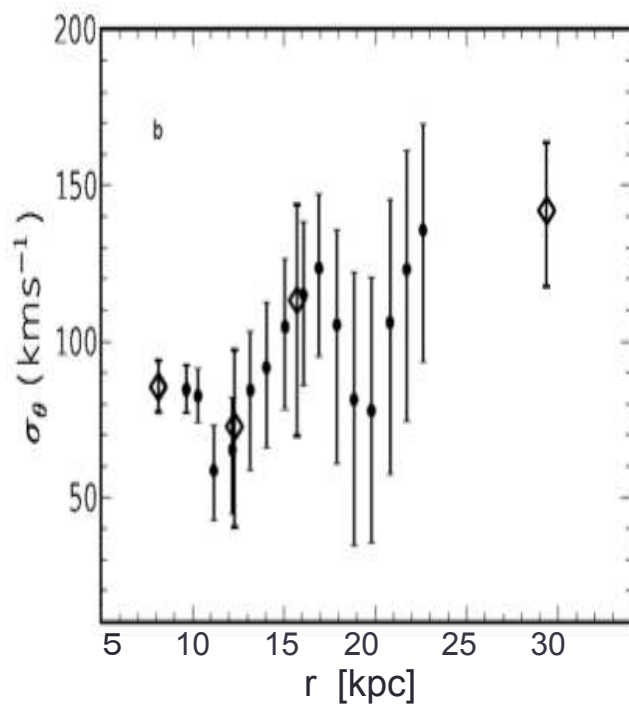
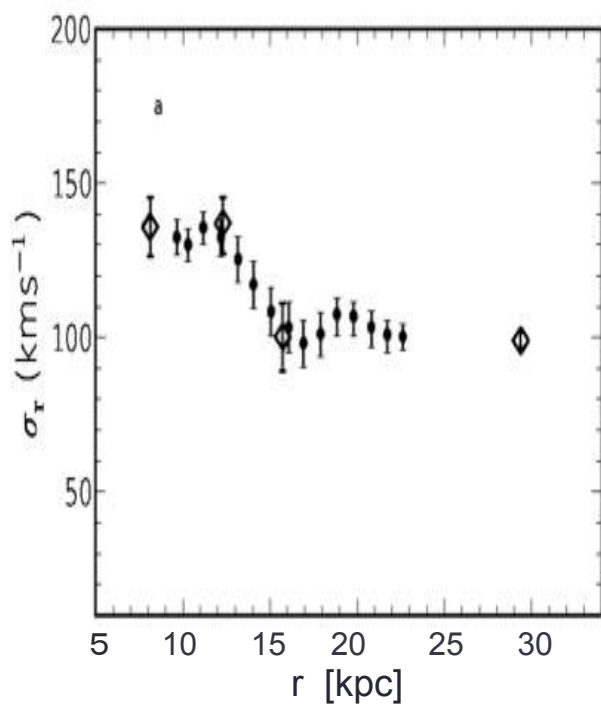
- **EPE** ( $n_{\text{bin}} = 400$ ) で  $\sigma_r$  のプロファイルを調べる。





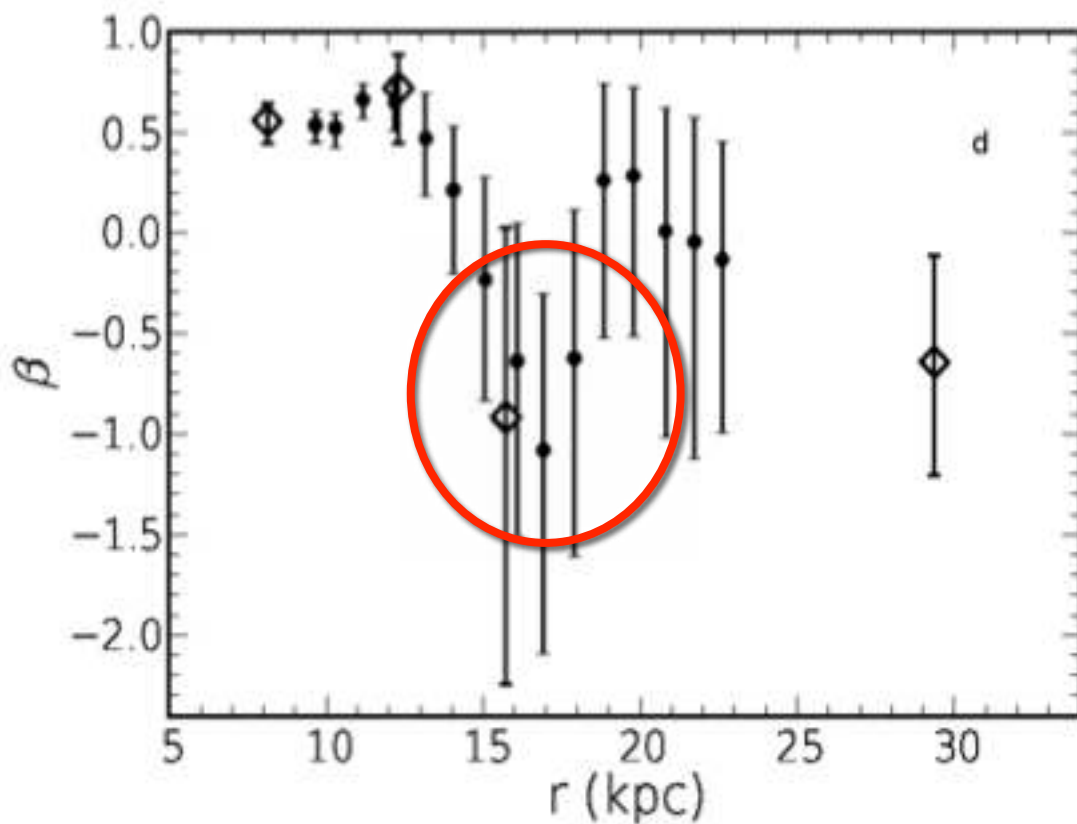
# Results(2)

- CME ( $n_{\text{bin}} = 1200$ ) で  $\sigma_r$ 、 $\sigma_\theta$ 、 $\sigma_\phi$  を調べる。  
(ひし形は EPE、 $n_{\text{bin}} = 700$ )



# Results(3)

•  $\sigma_r$ 、 $\sigma_\theta$ 、 $\sigma_\phi \rightarrow \beta$



□  $r < 13\text{kpc} \rightarrow \beta \sim 0.5$

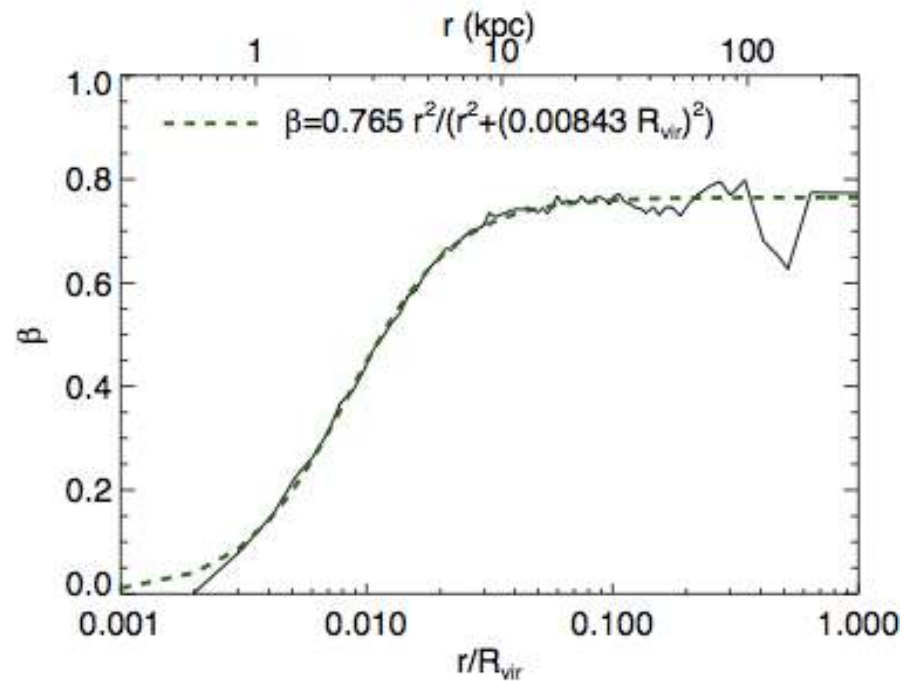
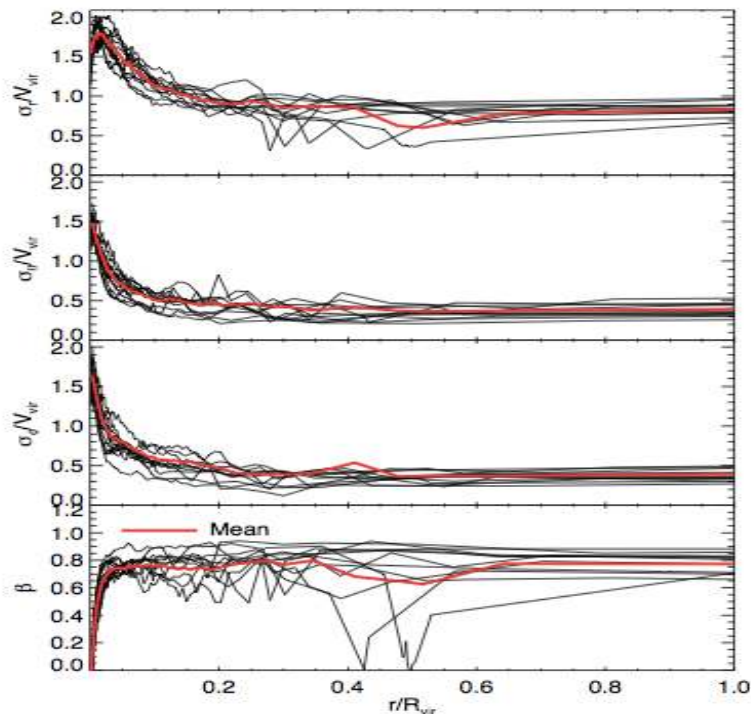
□  $r \sim 17\text{kpc} \rightarrow$  'dip' が存在  
inner halo  $\rightarrow$  outer halo ?

□  $r > 19\text{kpc} \rightarrow \beta \sim 0$

※  $r > 15\text{kpc}$ ではエラーバー大きい。どこまで信頼できる結果かは不明。

# The comparison with simulation(1)

- The simulation of Bullock & Johnston (2005)
  - 11個のMW size halo
  - stellar halo = accreted component only

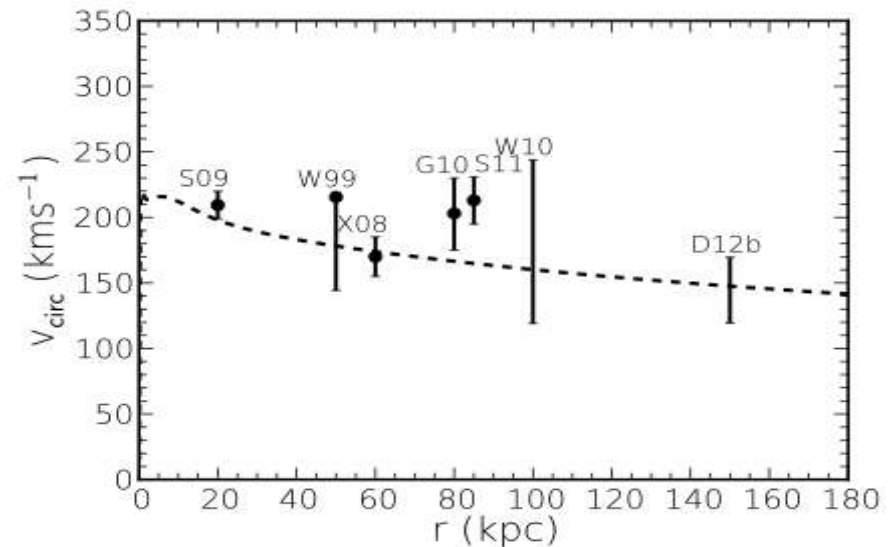
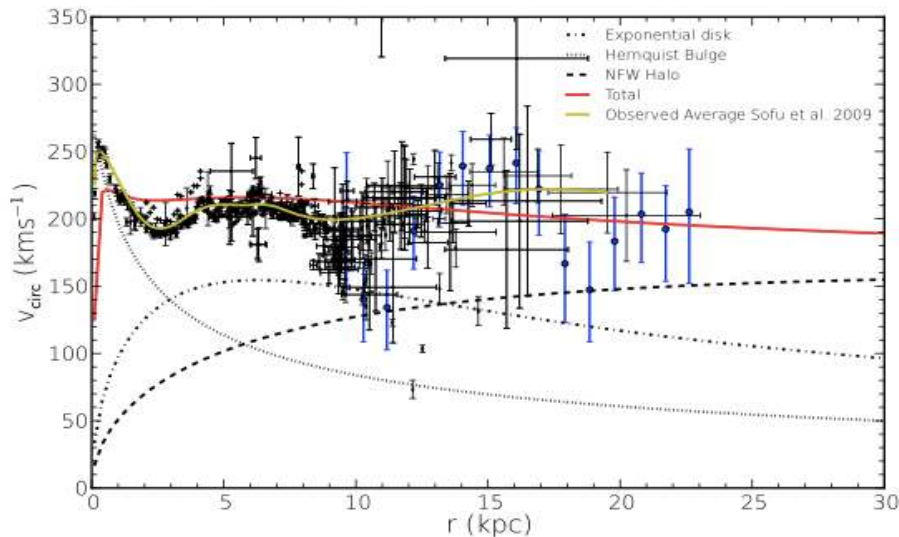


# The comparison with simulation(2)

- Deriving circular velocity curve from Jeans equation

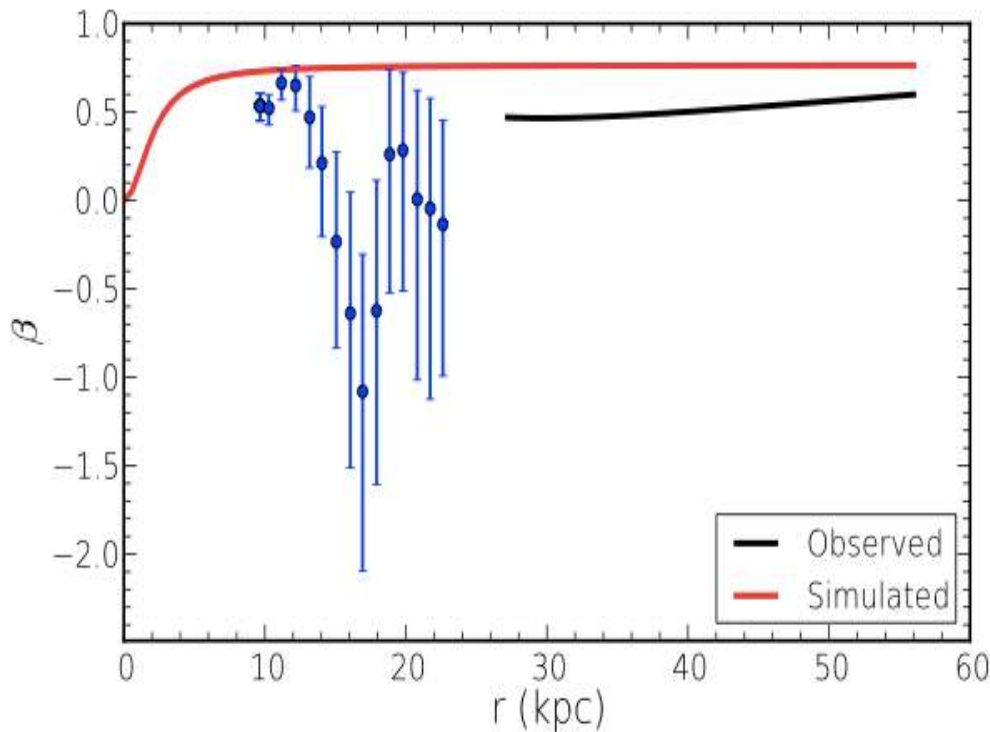
$$v_{circ}^2(r) = -\sigma_r^2 \left[ \frac{d \ln \rho}{d \ln r} + \frac{d \ln \sigma_r^2}{d \ln r} + 2\beta \right]$$

$\sigma_r$ 、 $\beta$  profile  $\Leftrightarrow$  circular velocity curve  
 $\rho$  given



# The comparison with simulation(3)

- $v_{\text{los}}$  の分布から求めた  $\beta$  とシミュレーションの結果を比較  
( $r > 23\text{kpc}$  の  $\beta$  は circular velocity curve から推定)



- $r < 13\text{kpc}$   
シミュレーションと一致
  - $r > 27\text{kpc}$   
シミュレーションと一致(若干低い)
  - $r \sim 17\text{kpc}$   
このシミュレーションでは説明できない
- In-situ star を考慮しなければ説明不可能??

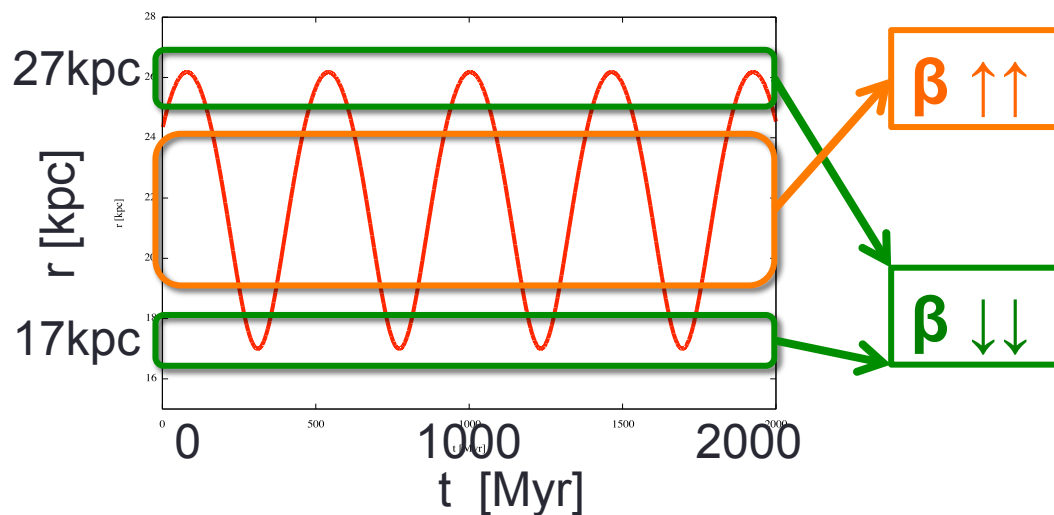
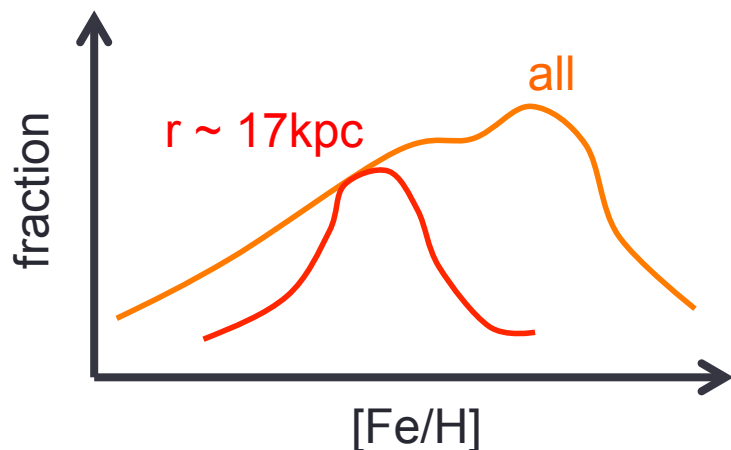
# Summary & Discussion

- BHB starsの視線速度分布からハロー星の $\beta$  profileを調べた。
- $r \sim 17\text{kpc}$ でtangential velocity dispersionが卓越することがわかった。(  $\beta$  profileの'dip')
- inner halo から outer halo への転換点？
- dipをaccreted component onlyのシミュレーションでは説明できない。
- multi-components halo(In-situ stars)必要？

・・・ホンマか？

# My opinion

- In-situ componentを考慮したくらいでこの'dip'が再現できるとは到底おもえない。(案外、accretionだけで説明できるのでは?)
- 位相空間中でしかみえてこないようなsubstructureの可能性(ただし、固有運動は信用できないので位相空間中の分布は調べることは出来ない。)
  - もしそうなら?
  - $[\text{Fe}/\text{H}]$ の分布を調べれば、 $\sigma_{[\text{Fe}/\text{H}],\text{all}} \gg \sigma_{[\text{Fe}/\text{H}],r\sim 17\text{kpc}}$ となるはず。



# Appendix : Is this dip real ?

- $r \sim 17\text{kpc}$ にみられるdipがrealな結果かどうか検証

1. 分布関数の影響

2. substructureの影響

3. bin sizeの影響

4.  $v_{\text{LSR}}$  &  $R_{\odot}$ の影響



# Effect of assumed distribution function(1)

- 今回、使用した分布関数は**速度楕円体の軸**が必ず**座標系の軸**と一致するというモデルである。この影響は小さいと思われるが現実的ではない。(ただし**ポテンシャルを考慮にいれずに $\beta$ を求められるという利点**はある。)
- 比較するモデル

E : エネルギー , L : 全角運動量 (スカラー)

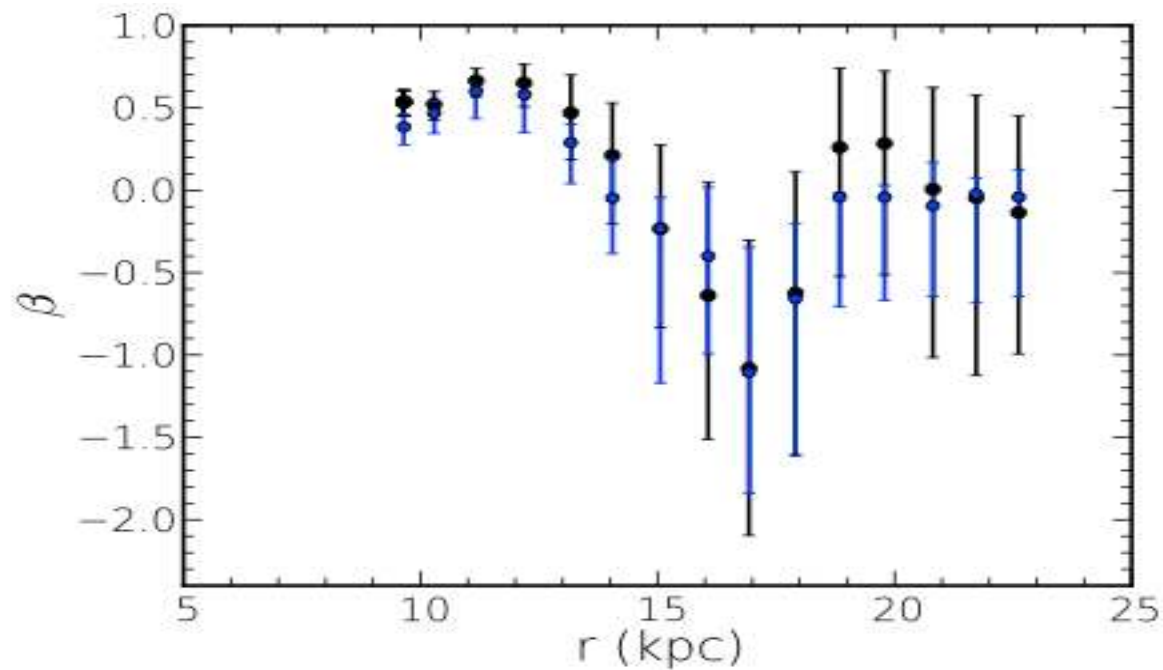
→ 二つは球対称での**運動の積分**

$$f(E, L) \propto E^{(\beta(\gamma-2)/\gamma)+(\alpha/\gamma)-3/2} L^{-2\beta} \quad \text{and} \quad \Phi(r) = \Phi_0 r^{-\gamma}$$

→  $\beta$ 、 $\gamma$ 、 $\Phi_0$ をパラメータとして最尤法を行う

## Effect of assumed distribution function(2)

- 二つの分布関数から求めた $\beta$  profileの比較  
(黒点 :  $f(r, v_r, v_\theta, v_\phi)$ 、青点 :  $f(E, L)$ )



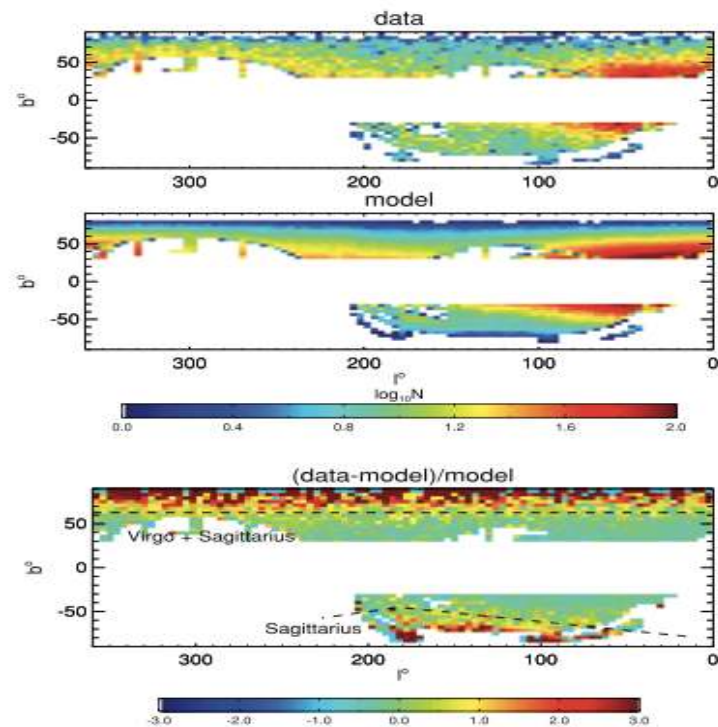
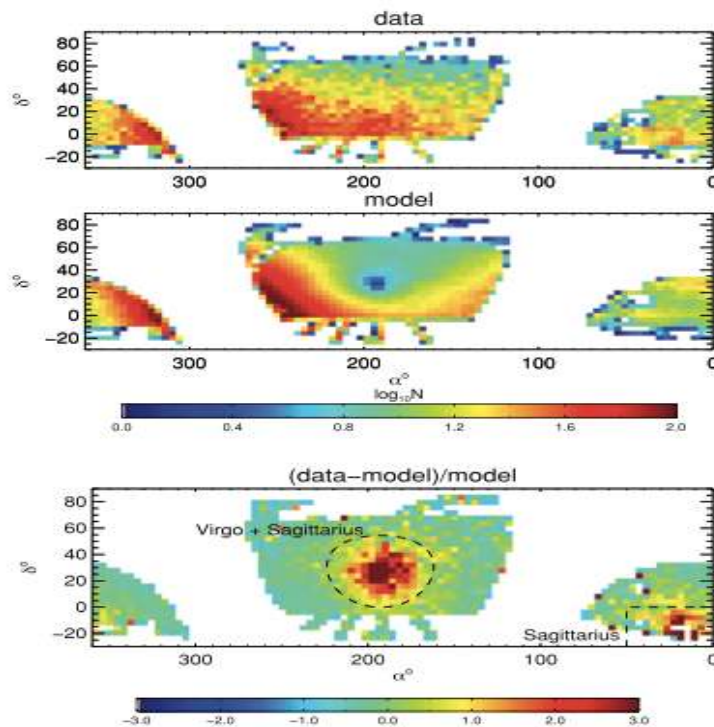
→ 大きな違いなし

# Effect of substructure(1)

- substructureの星が多く含まれるビンの $\beta$ はそのストリームの運動を反映してしまう。  
→ 今回、トレースしたいのはなめらかなハロー成分の運動。  
ストリームは取り除くべき。

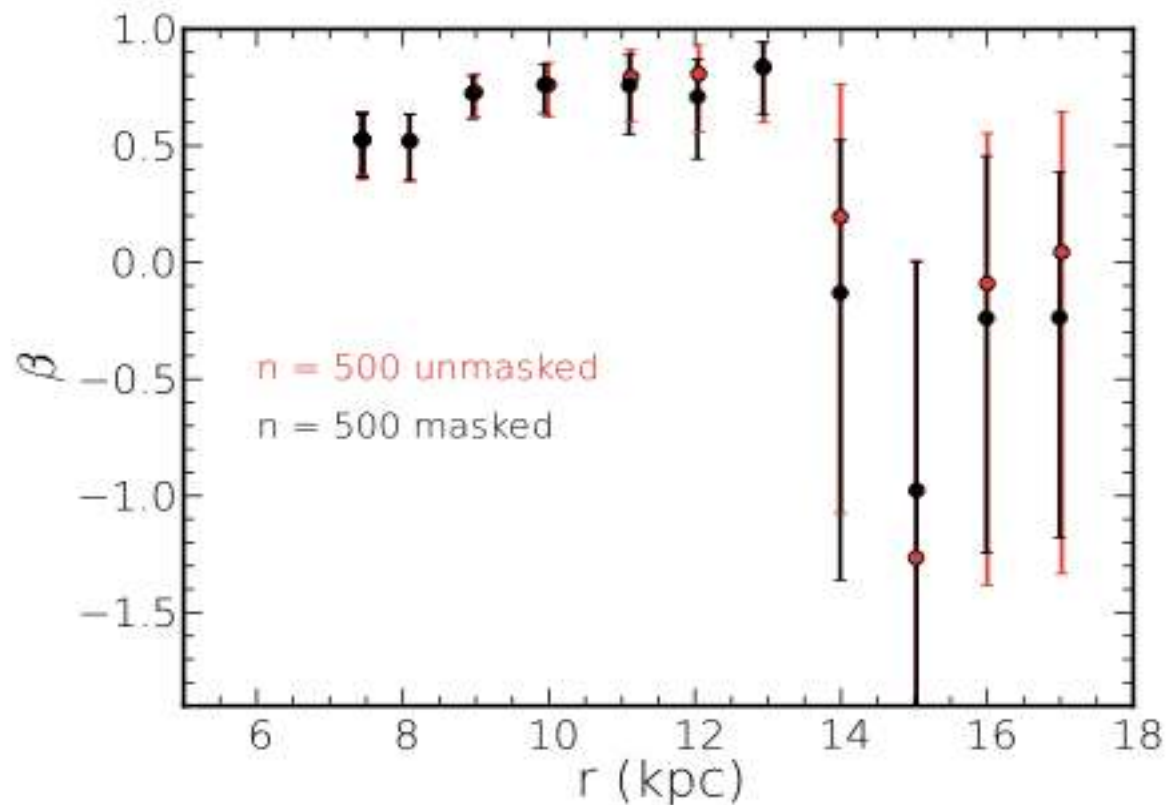
# Effect of substructure(2)

- とりあえず目に見えて存在するSagittarius stream + Virgo over densityの部分の星は使わない(maskする)
  - 左下図の黒点線の内側はsubstructureなのでmask



# Effect of substructure(3)

- substructure mask(黒点) と unmask(赤点) の比較



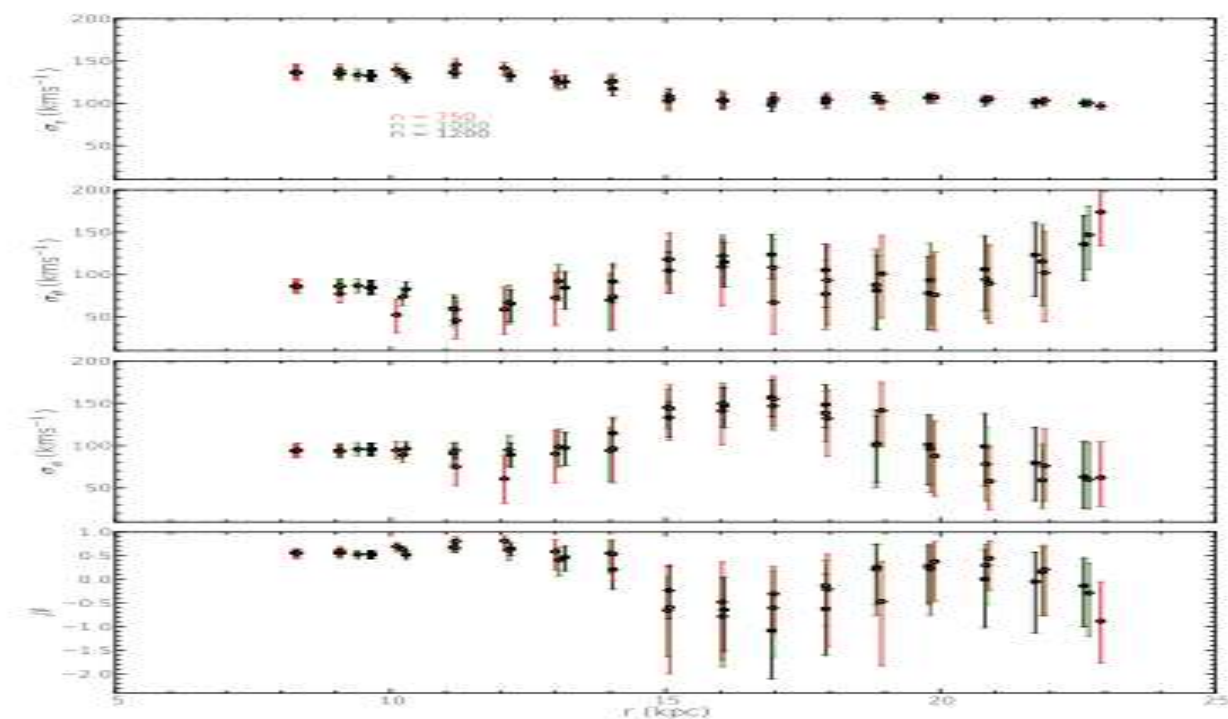
→ 大きな違いなし

# Effect of the bin size(1)

- スライド中で紹介したように各ビンに含まれている星の数によって測定精度が変動する可能性が存在する。さらにひとつのビンに多く星を含むとその値は**広い $r$ の範囲の平均値**であり注意が必要。  
→ いくつかのビンの切り方(色々な $n_{\text{bin}}$ の値)で結果が変化しないか検証する。

# Effect of the bin size(2)

- CMEで $n_{\text{bin}}$ の値だけかえて比較(赤点： $n_{\text{bin}} = 750$ 、緑点： $n_{\text{bin}} = 1000$ 、黒点： $n_{\text{bin}} = 1200$ )



→ 大きな違いなし

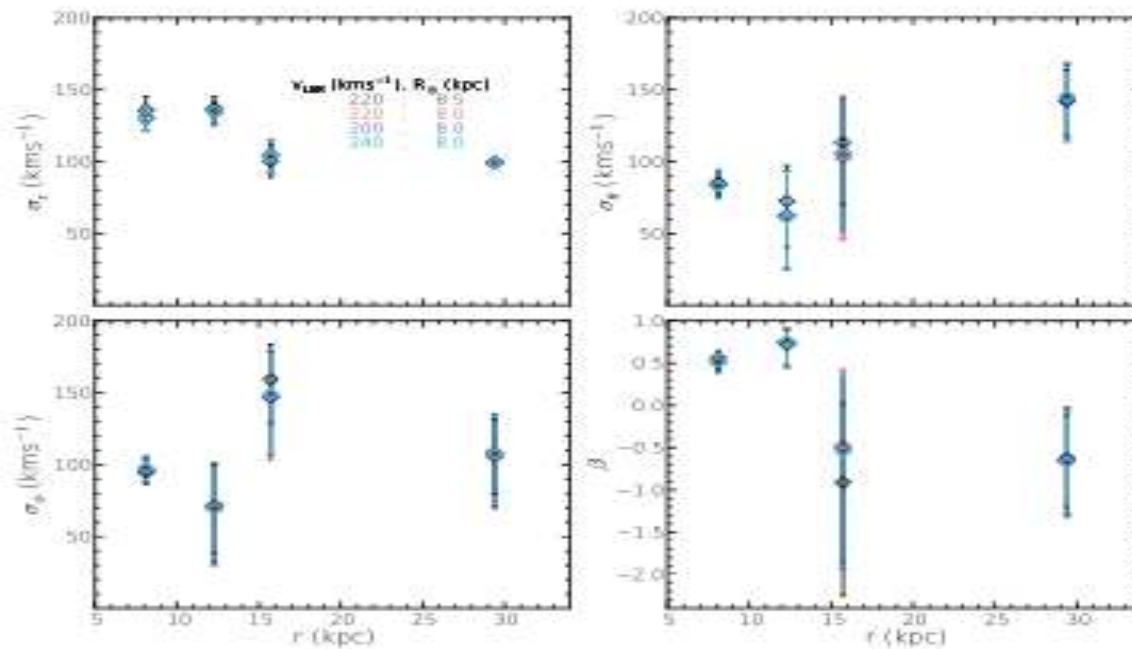
# Effect of $v_{\text{LSR}}$ and $R_{\odot}$ (1)

- 今回は  $(v_{\text{LSR}}, R_{\odot}) = (220\text{km/s}, 8.5\text{kpc})$  を使用。一般的にこの値を変えると個々の星の運動は大きく変わるが、その効果が全体に与える影響を検証する。



# Effect of $v_{\text{LSR}}$ and $R_{\odot}$ (2)

- 4つの( $v_{\text{LSR}}$ ,  $R_{\odot}$ )の組について $\beta$  profileを比較(黒点 : (220,8.5)、赤点 : (220,8.0)、青点 : (200,8.0)、水色点 : (240,8.0))



→ 大きな違いなし