



# 銀河系ハローの星の 軌道離心率分布 から探る銀河系形成史

東京大学 M2 服部 公平

# 「記憶にございません。」

- 歴史を知る最も単純な方法？  
時代の生き証人を探し出す。
- 銀河系の中で、「**生き証人**」  
がたくさんいる場所はどこか？
- 「星の運動」という観点：
  - O: **ハロー**      X: ディスク



# 概観: 銀河系

- 星: 古い, 金属量が少ない
- 星: ランダム運動
- ダークマター
- ガス: 少ない
- **無衝突系**

銀河系形成時の情報が色濃く残っている!

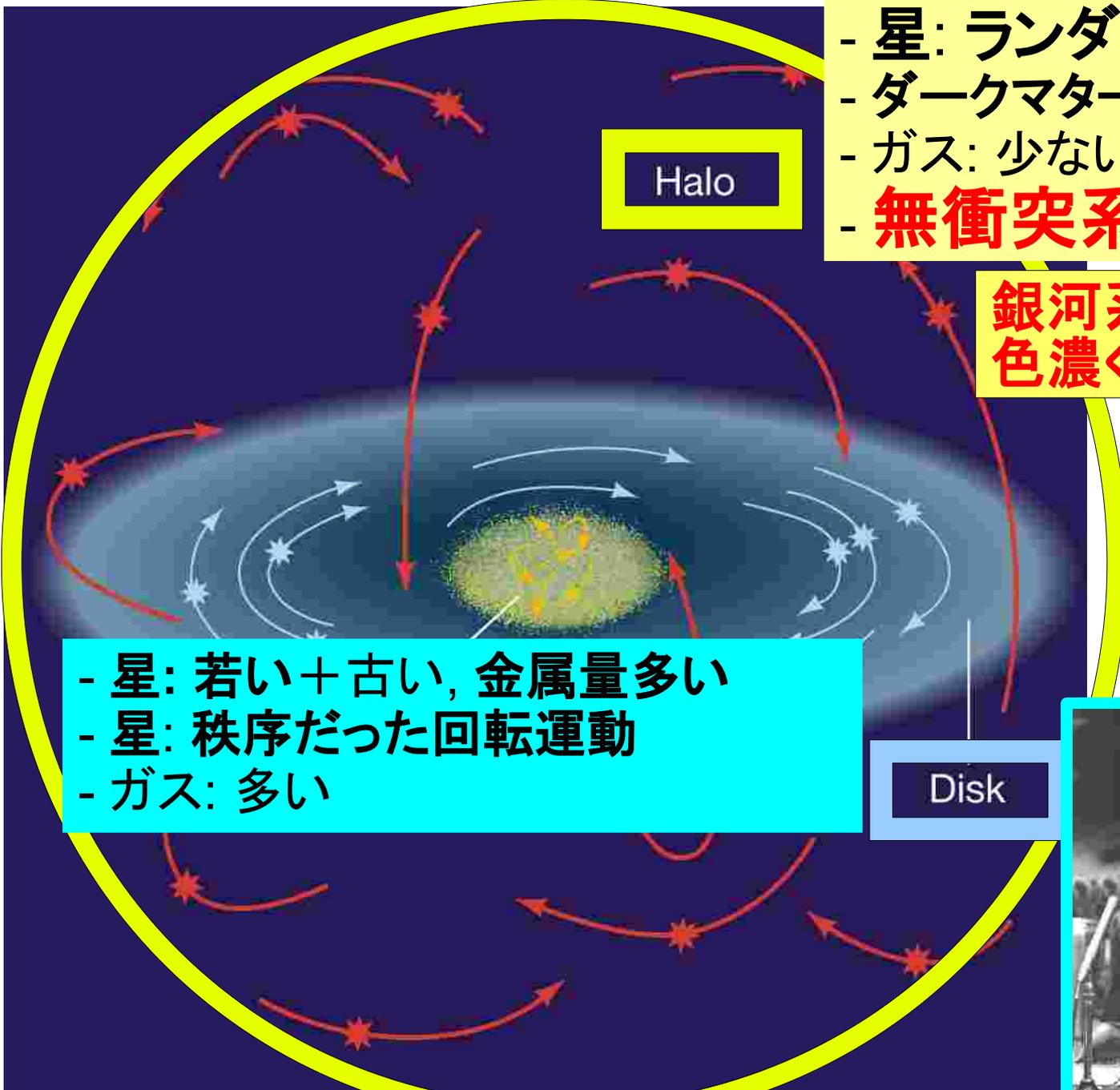


- 星: 若い+古い, 金属量多い
- 星: 秩序だった回転運動
- ガス: 多い

Disk



Halo



# Stellar halo : 銀河系形成の「生き証人」



## □ Stellar halo : 無衝突系

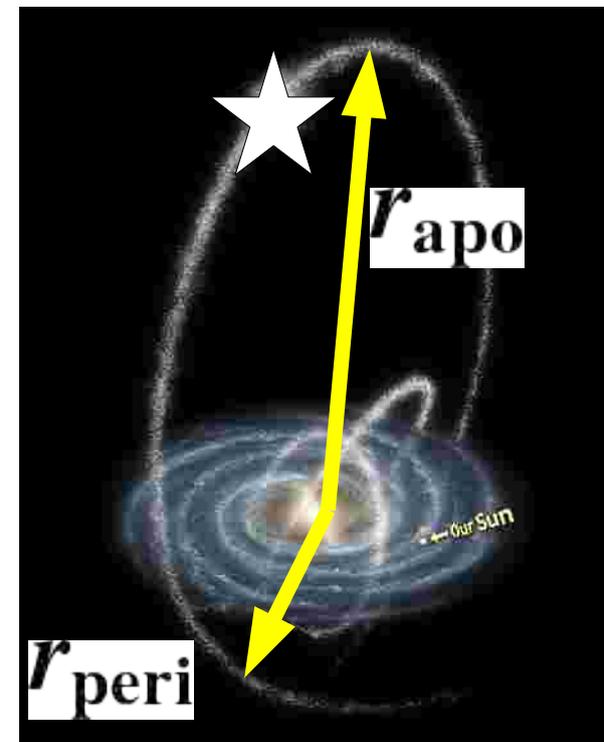
- 二体緩和が効かない
- 古い星は、銀河系形成時の情報を記憶している。

## □ Stellar halo の星の軌道離心率 $e$ は 準・断熱不変量

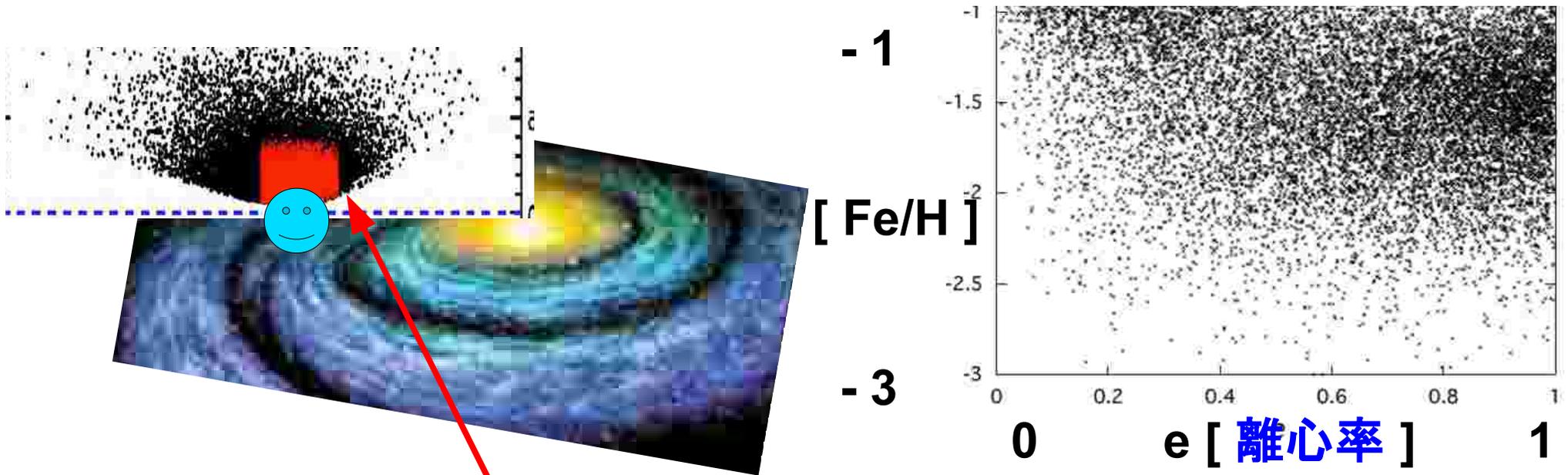
- ゆっくりと時間変動する重力場中では  
離心率は保存量

$$e = \frac{r_{\text{apo}} - r_{\text{peri}}}{r_{\text{apo}} + r_{\text{peri}}}$$

ハローの古い星の離心率：  
銀河系の形成時の貴重な情報源！



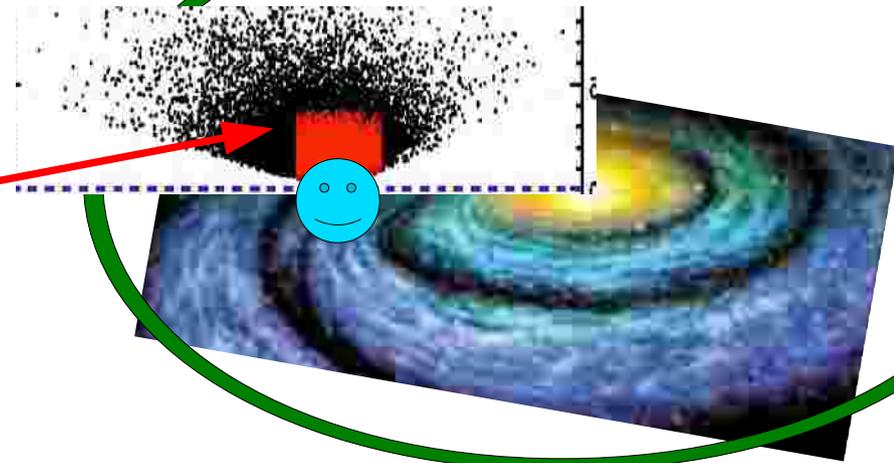
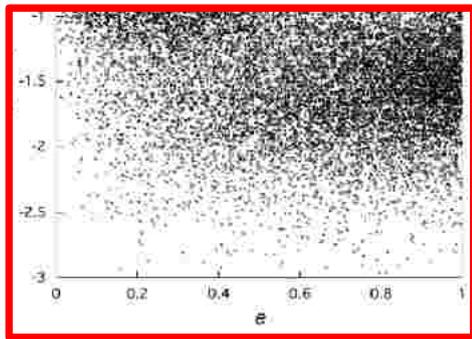
# 最新の観測結果: SEGUE



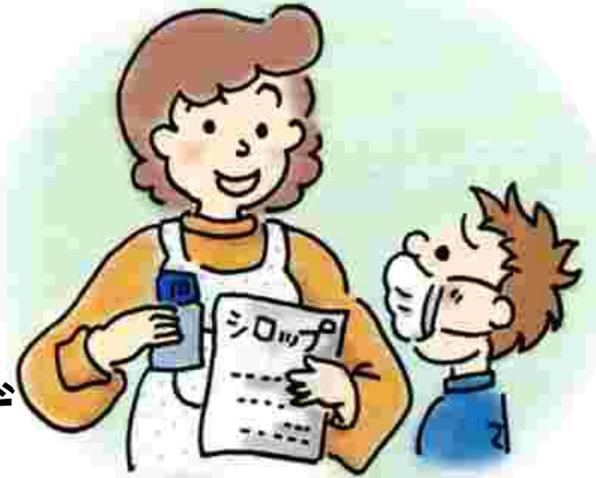
- 太陽近傍 4 kpc の stellar halo の星
- サンプル数 10,000 の離心率が分かっている。  
→ 膨大なデータを正しく取り扱う必要性  
(注) 単純にヒストグラムを作るとバイアスがかかる

# 使用上の注意

- SEGUEのサンプルには「太陽近傍を通過しない星」は含まれず  
(例)  $r = 20 \text{ kpc}$  の円運動をする halo の星



- 「**観測可能領域**」を加味して stellar halo をモデルし、離心率分布の理論的な予想を立てる。



# 離心率を決定する要因：

(1) **星** の離心率？

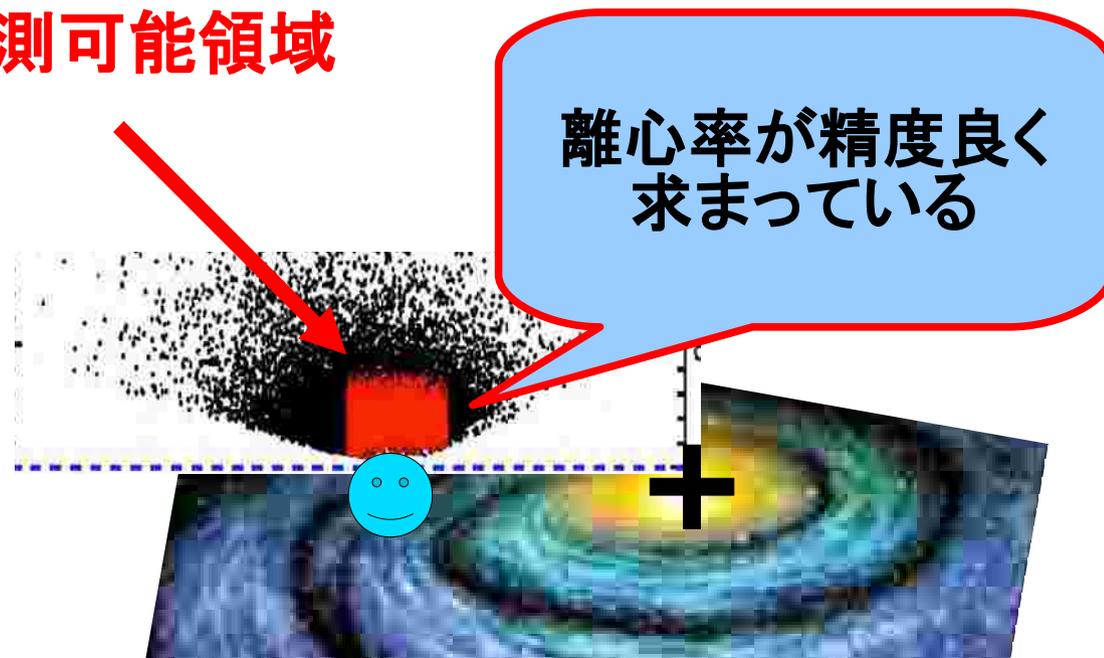
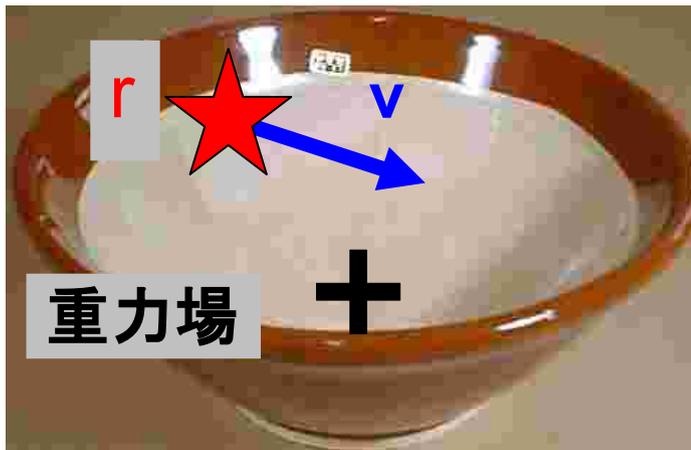
- 重力場 & 星の(位置, 速度) = ( $r$ ,  $v$ )

(2) **Stellar halo** の星 の離心率分布？

- 重力場 & 分布関数  $f(r, v)$

(3) **太陽近傍の Stellar halo** の星 の離心率分布？

- 重力場 & 分布関数 & 観測可能領域



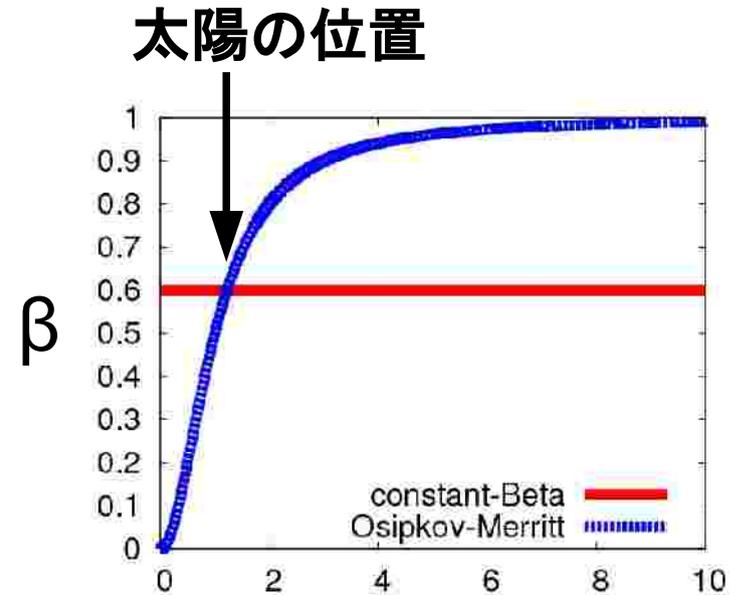
# Stellar halo のモデル

- 重力場:
  - 球対称 NFW ポテンシャル

- 分布関数:
  - 速度非等方性パラメータ

[  $\beta$  : 太陽近傍で 0.6 程度 ] が

- 中心からの距離によらない**モデル**
- 中心からの距離の増加関数となる**モデル**



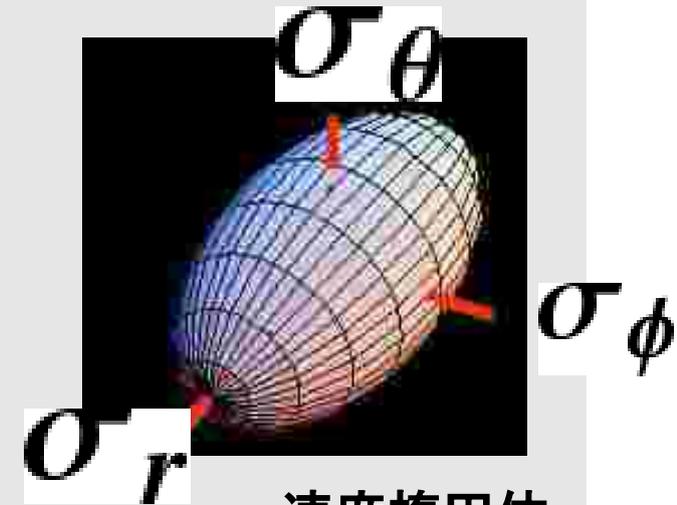
**Constant  $\beta$**

$$f(r, v) = f(E, L) = g(E) L^{-2\beta}$$

**Osipkov-Merritt**

$$f(r, v) = f\left(E + \frac{L^2}{2r_a^2}\right) = A \exp\left[-\frac{E + L^2/2r_a^2}{\sigma_r^2}\right]$$

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



速度楕円体

# Stellar halo のモデル

## □ 重力場:

- 球対称 NFW ポテンシャル

## □ 分布関数:

- 速度非等方性パラメータ

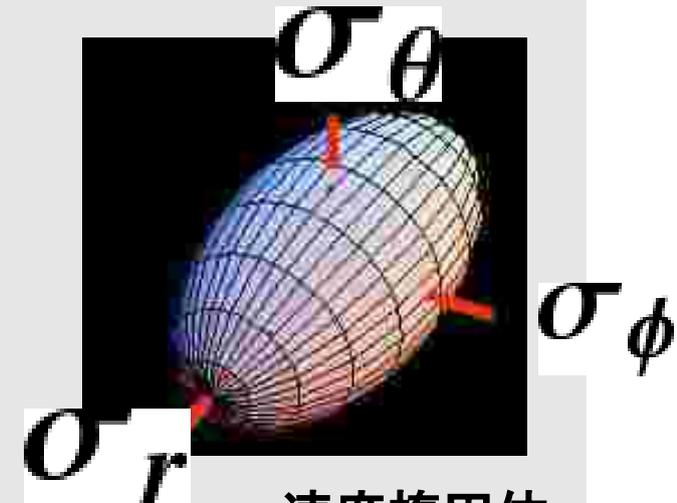
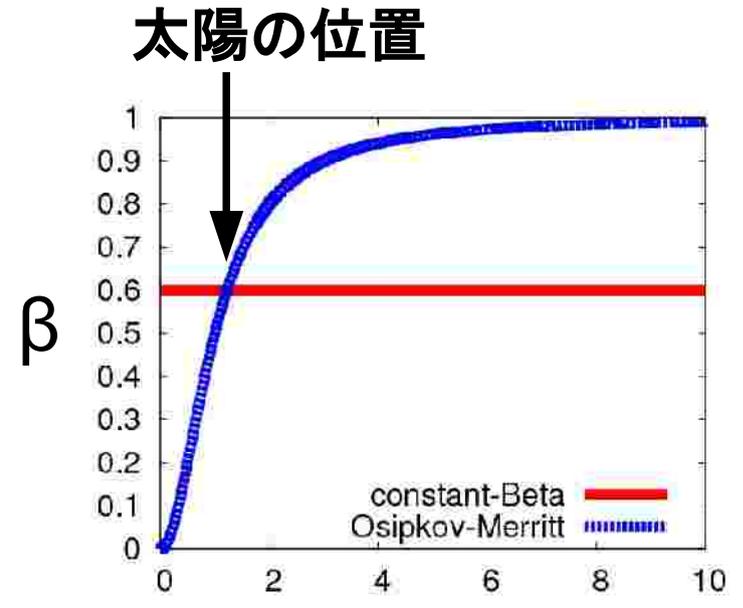
[  $\beta$  : 太陽近傍で 0.6 程度 ] が

- 中心からの距離によらない**モデル**
- 中心からの距離の増加関数となる**モデル**

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

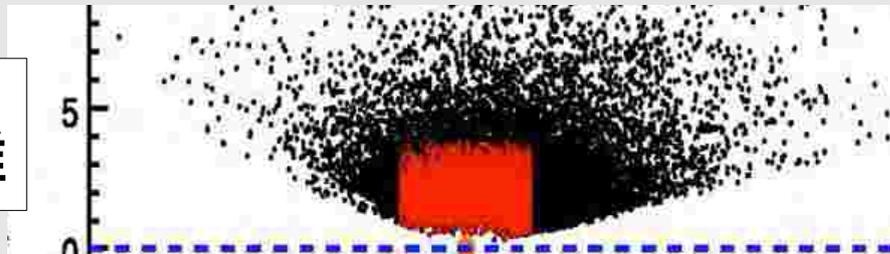
## □ 観測可能領域:

- $7 < r < 10$  kpc : 太陽近傍、**SEGUE**と同程度



速度楕円体

ディスク面  
からの距離

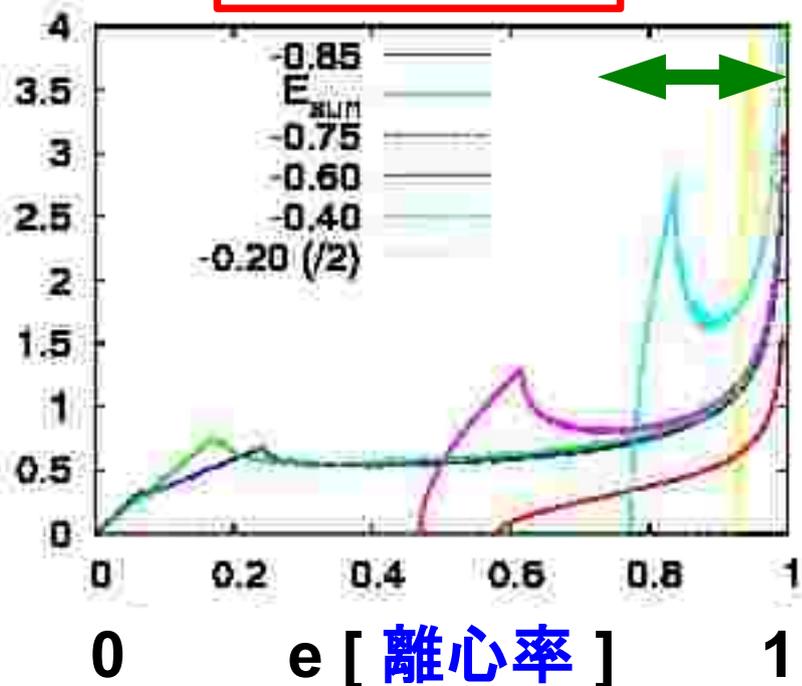


銀河中心からの距離

# 結果

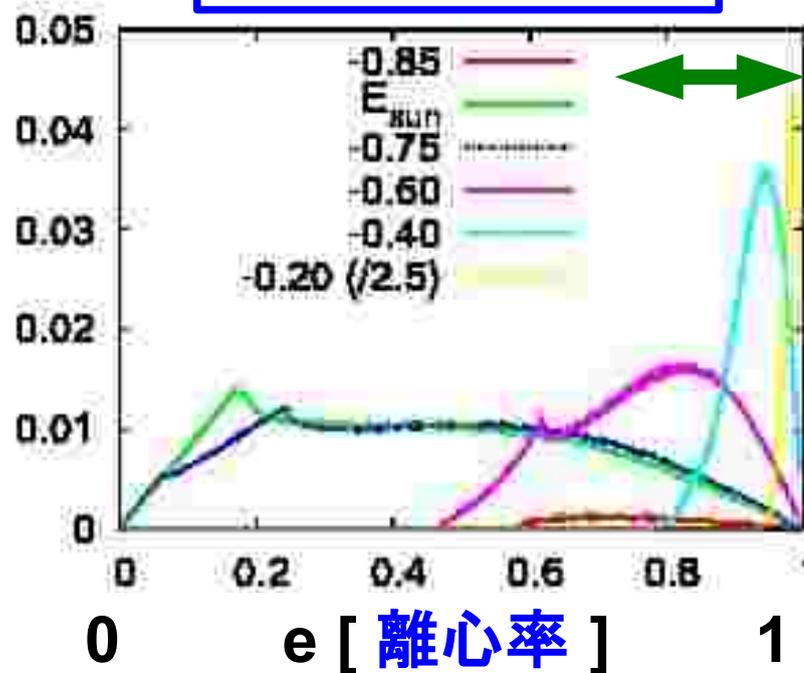
Constant  $\beta$

星の個数



Osipkov-Merritt

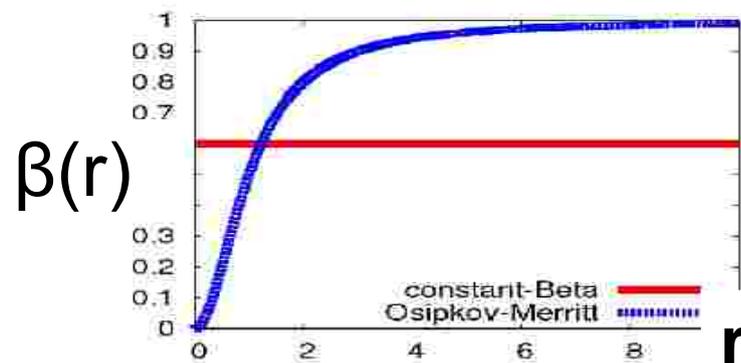
星の個数



- 軌道エネルギーごとの離心率分布をモデルごとに比較。
- 離心率の大きい側の振る舞いが顕著に異なる。

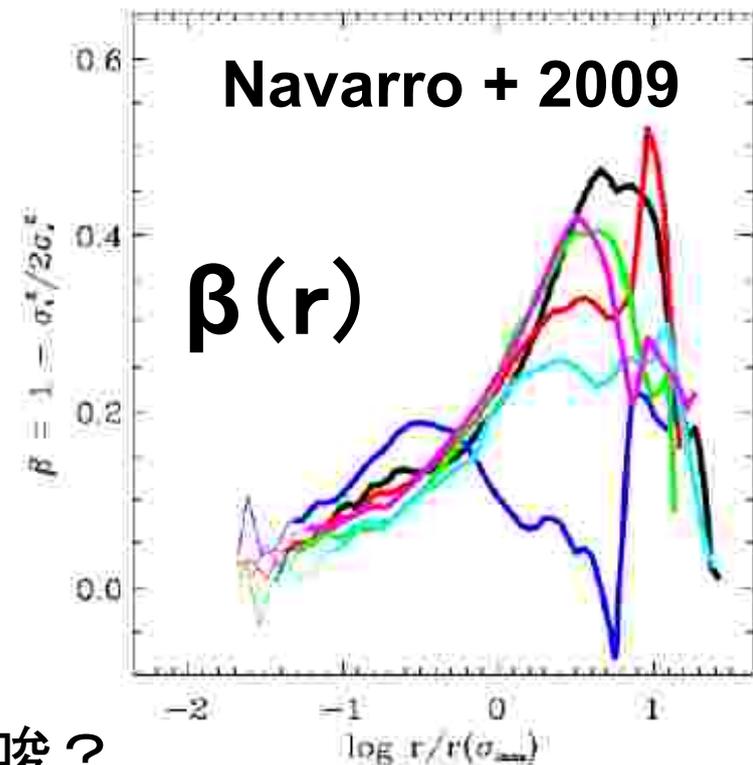


- 観測と比較することで、 $\beta(r)$  の関数形がテストできる。



# 考察

- 速度分散の非等方性  $\beta(r)$  の振る舞い
  - 銀河形成に対する有用な情報源。  
(例) シミュレーションと比較
    - 銀河系形成における merger / accretion の重要度？
    - disc と halo の共進化過程に関する示唆？
    - (注) ダークマター粒子の  $\beta(r)$  の有用性？

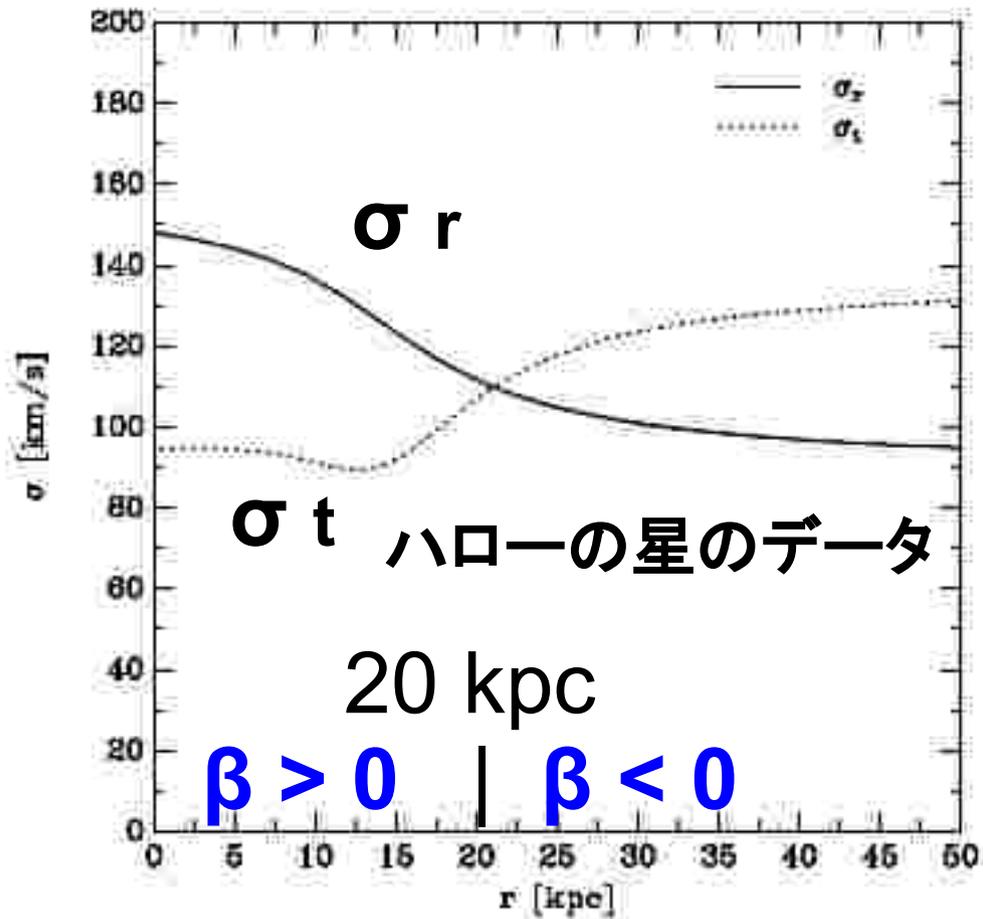


$$\beta = 1 - \frac{\sigma_{\theta}^2 + \sigma_{\phi}^2}{2\sigma_r^2}$$

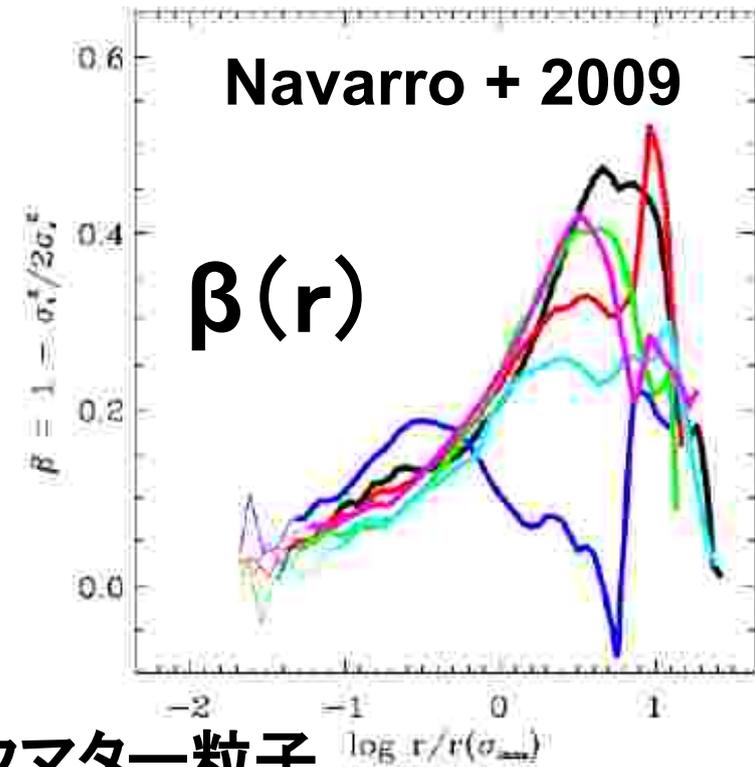
(例)  $\beta(r)$  + Radial 方向の速度分散 [ $\sigma_r$ ]

- Tangential 方向の速度分散 [ $\sigma_t$ ]  
の位置依存性への示唆？

Sommer-Larsen + 1996



Navarro + 2009



ダークマター粒子  
(シミュレーション)

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

(例)  $\beta(r)$  + Radial 方向の速度分散 [ $\sigma_r$ ]

- Tangential 方向の速度分散 [ $\sigma_t$ ]

の位置依存性への示唆?

# まとめ & future work

- 球対称な銀河系ハローをモデルし、太陽近傍のハローの星の離心率分布を理論的に予想。
- 理論予想を観測結果と比較することで、銀河系ハローの大局的な力学情報を引き出すことが可能。
- シミュレーションによる銀河形成の理論研究と相補的なアプローチ
- 今後はSDSS/SEGUEのデータと比較