

院生雑誌会

M 1 林 航平 (千葉研)

10/27/2010(Wed)

Today is...

*Kinematics Milky Way Satellites
in
a Lambda Cold Dark Matter Universe*

Strigari et al. 2010 MNRAS. tmp. 1311S

論文の内容(ざっくり)

Aquarius Project's subhalo (N-body)

VS

five dwarf galaxies (MW satellites)



1. Λ CDM理論から予想されるdark matter subhaloで、矮小銀河のphotometric & kinematic dataを同時に再現できた！
2. Dark matterの密度profileは中心でcoredであるという制限を消すことができた！(cuspyでもOK)

Motivation

- Cusp & Core problem
- ダークハロー中心部のダークマター密度分布

N-body simulation → cuspy

Observed MW satellites → cored

Inconsistent!!

How does compare with two densities?

- Observation

- Surface brightness**

- Line-of-sight velocity (dispersion)

- Theory

- assumed stellar density profile**

- Jeans equation

- Line-of-sight velocity dispersion

Why is it not MW but MW satellites?

Milky Way

中心部では**バルジや恒星系の分布が支配的**

→ **ダークマター**のみの分布を同定するのは困難

MW satellites (dwarf galaxies)

恒星の表面密度が非常に小さい(M/L大)

中心部でも**ダークマターが支配的**

→ **ダークマター**のみの分布を調べるのに最適

Theoretical Modeling

1. 球対称ポテンシャルを仮定
2. β = 一定 ($\beta=0$: isotropy) を仮定
3. ダークマター質量はN体シミュレーション

「Aquarius Project」

- から得たダークハローの質量を用いた
4. 恒星系の密度は以下のモデルを使う

$$\rho_*(r) \propto \frac{1}{(r/r_0)^a \{1 + (r/r_0)^b\}^{(c-a)/b}}$$

Theoretical Modeling

Line-of-sight velocity dispersion

$$\sigma_{\text{los}}^2(R) = \frac{2}{I_*(R)} \int_R^\infty \left[1 - \beta(r) \frac{R^2}{r^2} \right] \frac{\rho_*(r) \sigma_r^2(r) r}{\sqrt{r^2 - R^2}} dr$$

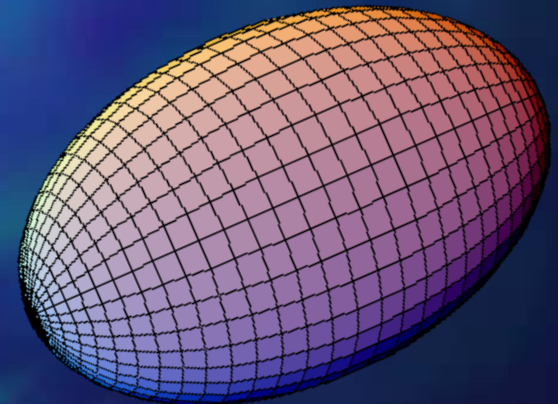
Jeans equation

$$r \frac{d(\rho_* \sigma_r^2)}{dr} = - \frac{\rho_*(r) G M(r)}{r} - 2\beta(r) \rho_*(r) \sigma_r^2(r)$$

$$\beta = 1 - \frac{\sigma_t^2}{\sigma_r^2} : \text{anisotropy parameter}$$

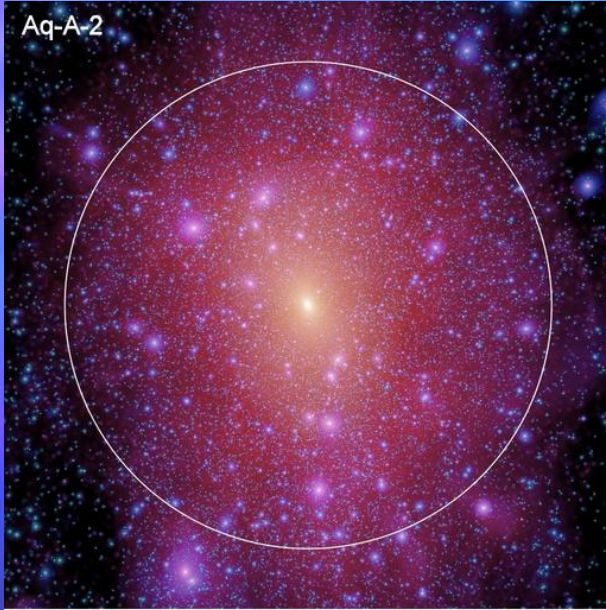
σ_t^2 : tangential velocity dispersion

σ_r^2 : radial velocity dispersion

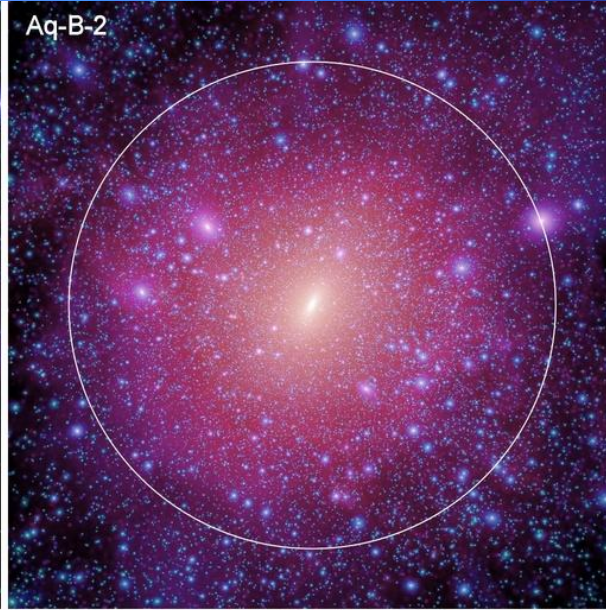


Aquarius project

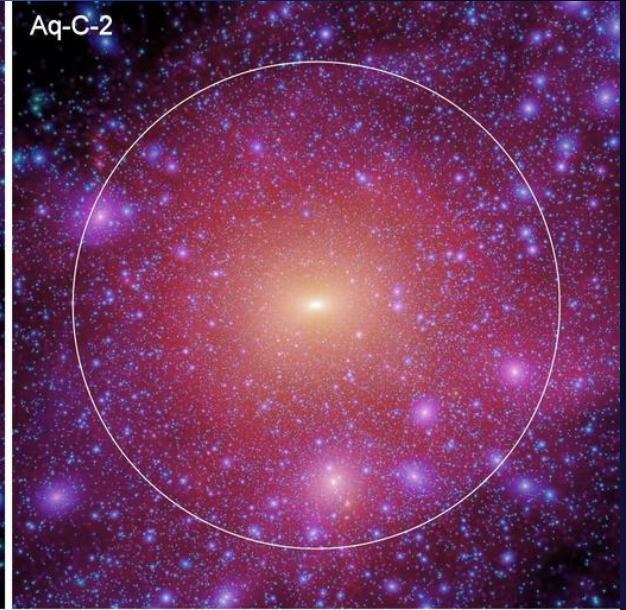
Aq-A-2



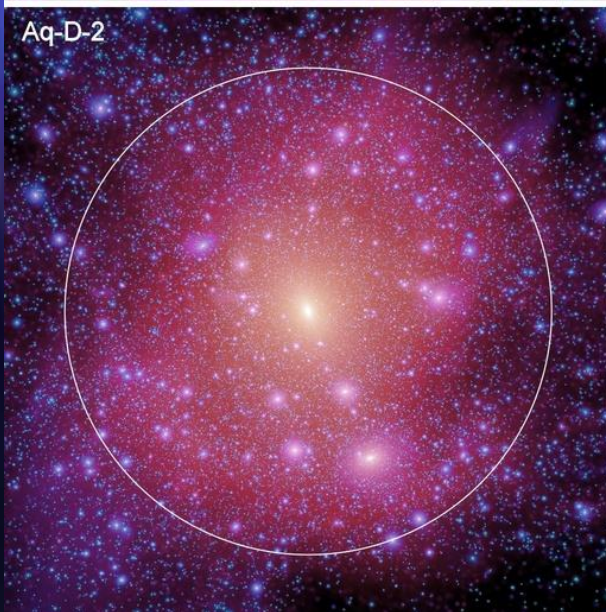
Aq-B-2



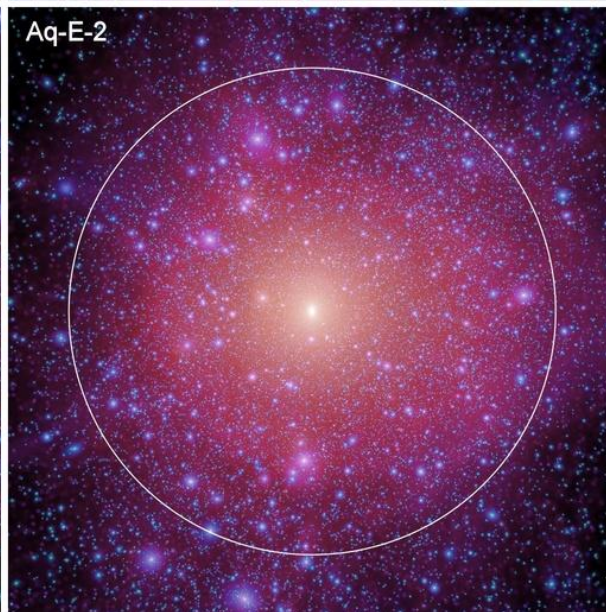
Aq-C-2



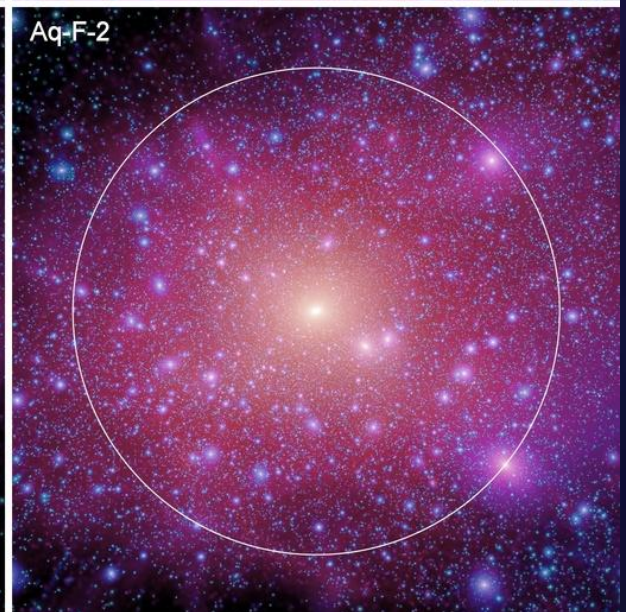
Aq-D-2



Aq-E-2



Aq-F-2



Velocity Distribution

- 観測と比較するもう 1 つの方法
- 「分布関数の形をみる」

$$\hat{f}(v_{\text{los}}; R) \propto \int_R^{r_{\text{los}}} \frac{r dr}{\sqrt{r^2 - R^2}} \int_{\Psi(r) + v_{\text{los}}^2/2}^0 f(\epsilon) d\epsilon$$

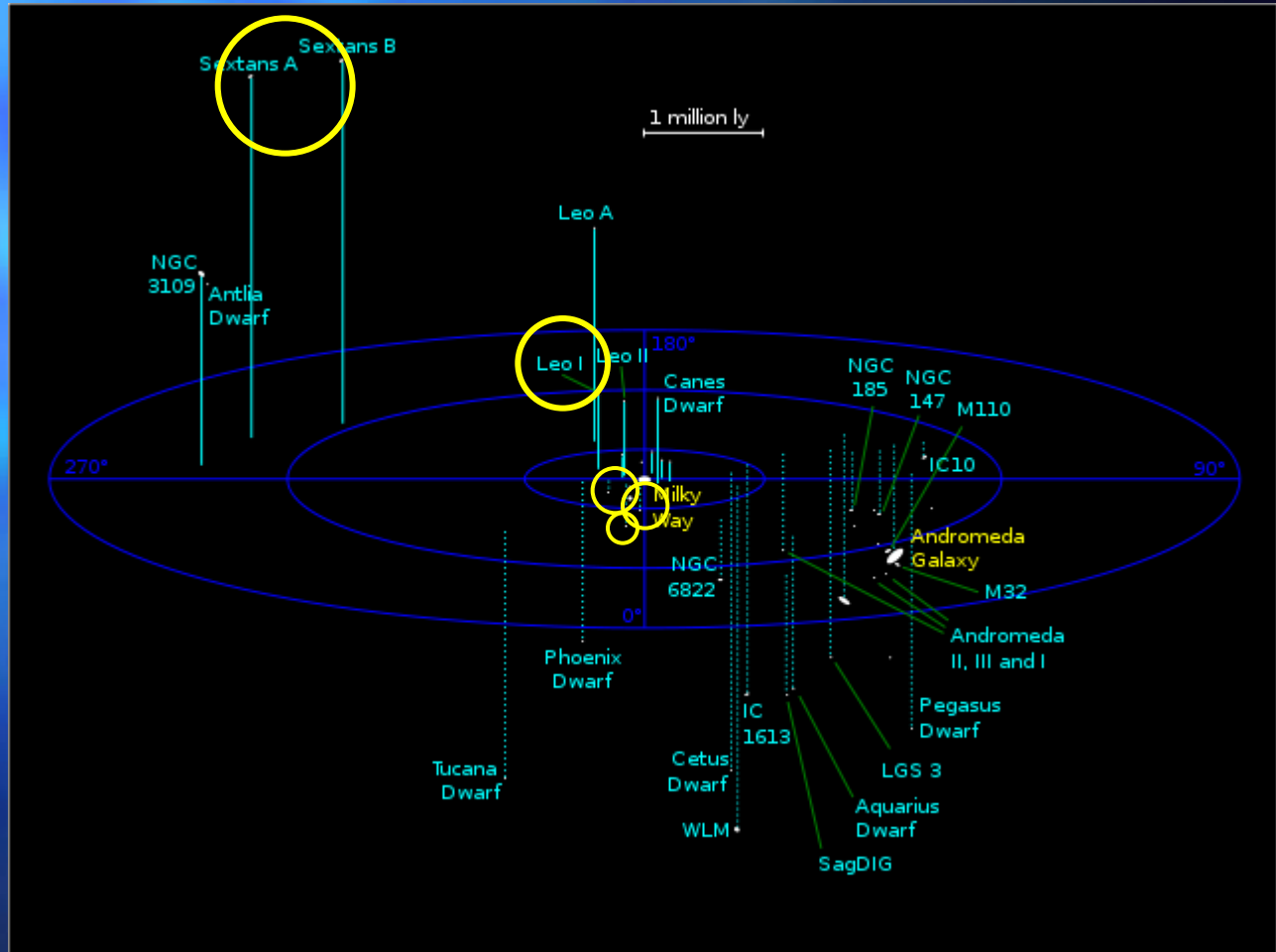
- v_{los} に対して 4 次のモーメントをとってやると **kurtosis** がわかる
- $\rightarrow \beta$ 依存性が確かめられる

$$\kappa = \frac{\langle v^4 \rangle}{\langle v^2 \rangle^2} - 3$$

Data

5つのdwarf galaxiesのデータを用いた

1. Fornax
2. Leo I
3. Sculptor
4. Sextans
5. Carina



Results

1. Surface density

$$\rho_*(r) \propto \frac{1}{(r/r_0)^a \{1 + (r/r_0)^b\}^{(c-a)/b}}$$

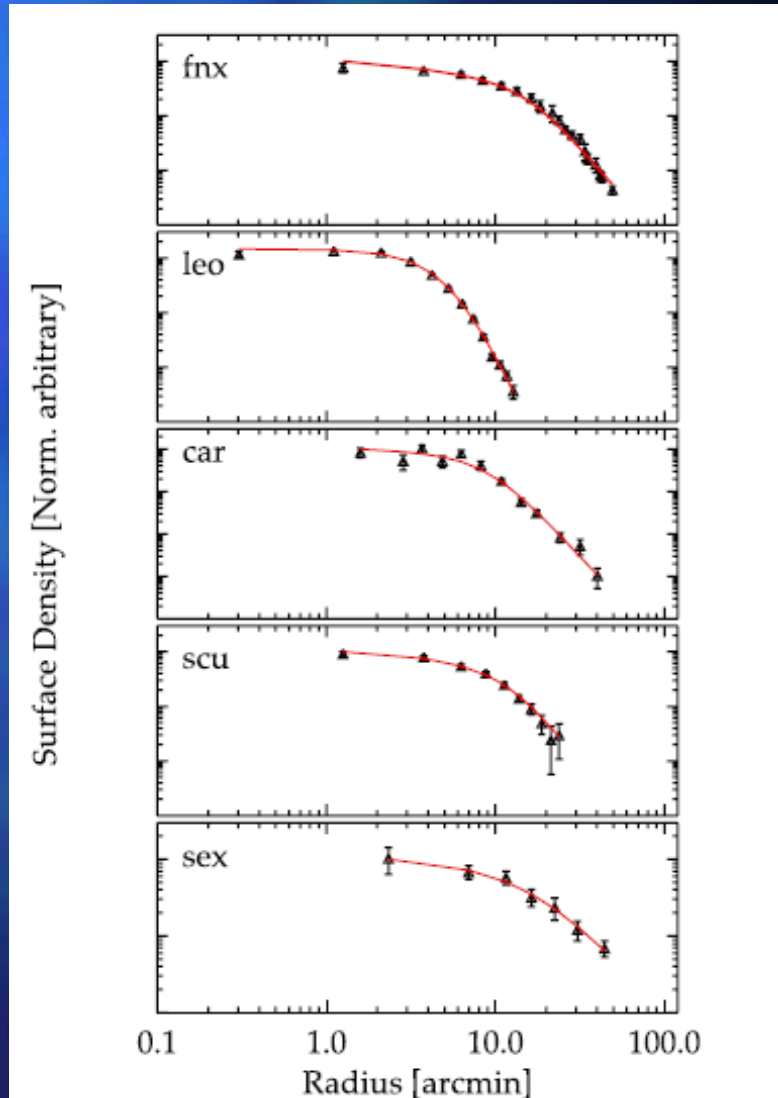
fixed

Satellite	Number of stars	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>r</i> ₀ (kpc)	χ ² /d.o.f.
Fornax	2409	1	4	4.5	0.67	1.0
Leo I	328	0	3	7.5	0.40	1.6
Carina	758	0.5	3	5.3	0.29	1.1
Sculptor	1392	0.5	3	5.5	0.32	0.4
Sextans	424	0.5	3	3.3	0.44	0.1

Results

$\{c, r_0\}$ は χ^2 二乗検定で評価

- **Leo I**はコアである必要アリ
- 他の4つの銀河は、カusp状でも良くfitできる ($0 < a \leq 1$)



Results

2. Line-of-sight velocity dispersion

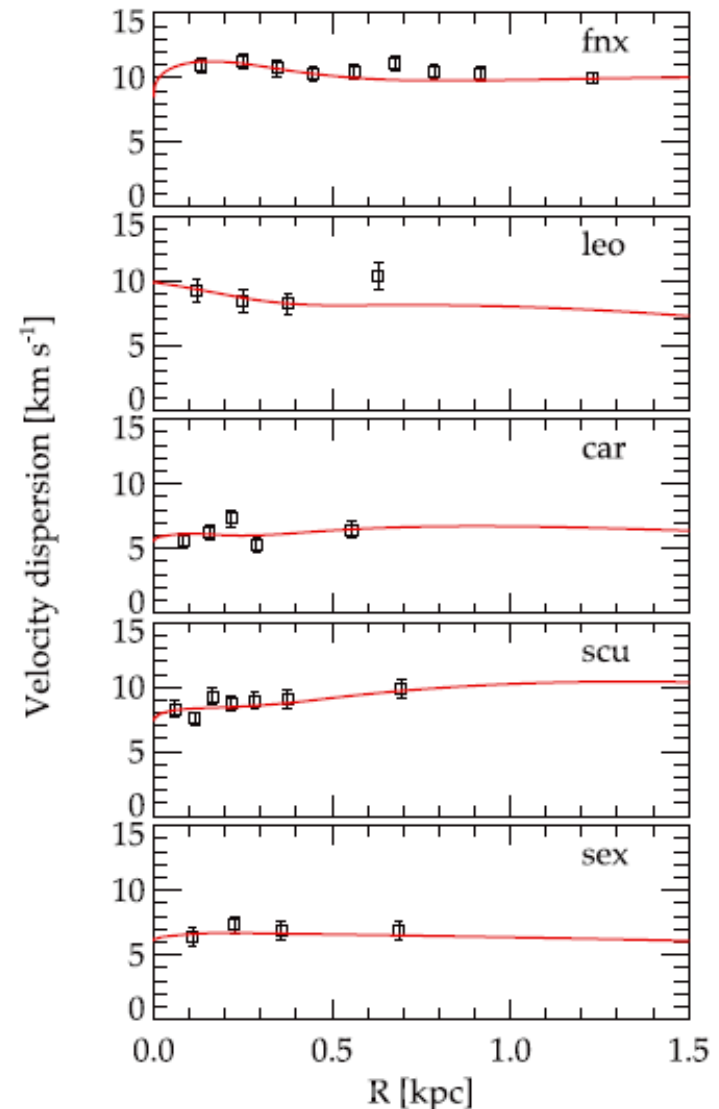
$$r \frac{d(\rho_* \sigma_r^2)}{dr} = - \frac{\rho_*(r) G M(r)}{r} - 2\beta(r) \rho_*(r) \sigma_r^2(r)$$

Aquarius subhaloから質量を算出

$$\sigma_{\text{los}}^2(R) = \frac{2}{I_*(R)} \int_R^\infty \left[1 - \beta(r) \frac{R^2}{r^2} \right] \frac{\rho_*(r) \sigma_r^2(r) r}{\sqrt{r^2 - R^2}} dr$$

Results

- ・ 星数が同じになるように円環を切る
- ・ その円環内での σ_{los} を χ^2 乗検定で評価
- ・ beat-fitしたsubhaloのポテンシャルを用いて速度分散プロファイルを描く(右図)



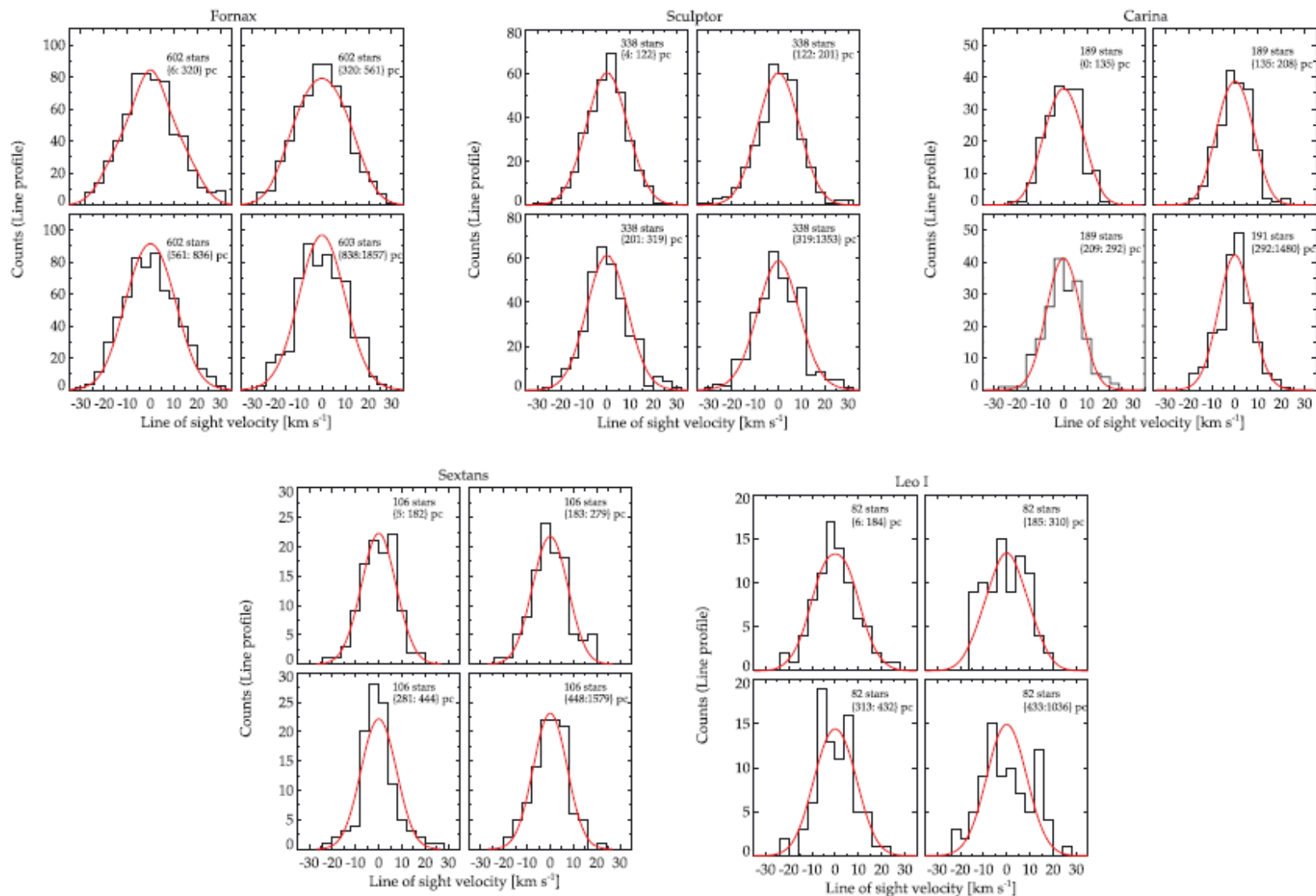
Results

3. Velocity distribution

$$\hat{f}(v_{\text{los}}; R) \propto \int_R^{r_{\text{los}}} \frac{r dr}{\sqrt{r^2 - R^2}} \int_{\Psi(r) + v_{\text{los}}^2/2}^0 \boxed{f(\epsilon)} d\epsilon$$

- Gaussianを仮定する
- 各ビンで速度分布を比較する (KS-test)
- Kurtosisを用いて、 β 依存性を見る

Results



KS probabilities

Satellite	Bin 1	Bin 2	Bin 3	Bin 4
Fornax	0.05	0.15	<u>0.003</u>	<u>0.02</u>
Leo I	0.46	0.52	0.31	<u>0.003</u>
Carina	0.51	0.44	0.29	0.34
Sculptor	0.32	0.68	0.62	0.67
Sextans	0.41	0.81	0.03	0.97

確率がかなり低い



Fornaxは統計量多いため

Results

Kurtosisの比較(右図)

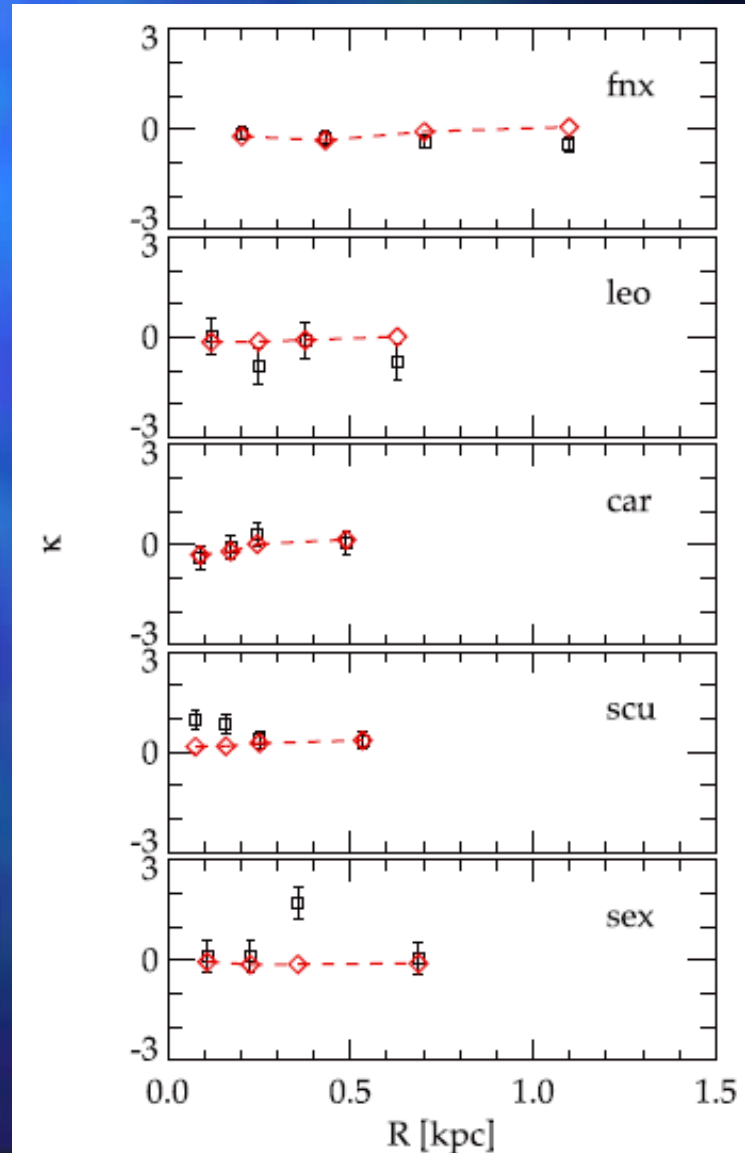
どの銀河でも $\kappa \sim 0$



β の依存性はほとんど無



速度分散は等方的という
仮定でも再現できる



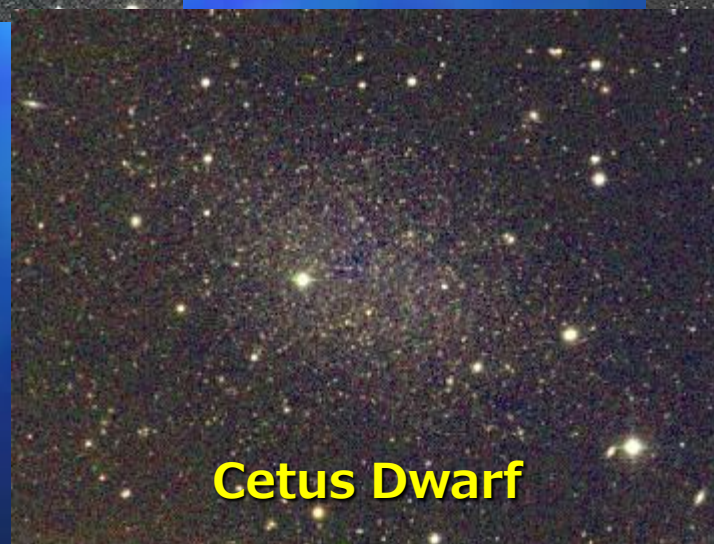
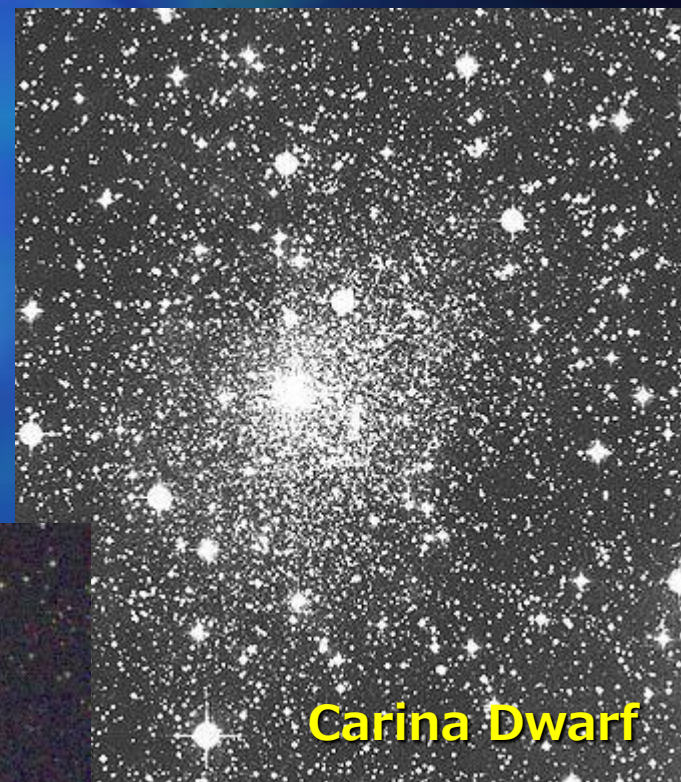
まとめ

- Λ CDM理論から考えられるsubhaloと5つの矮小銀河を比較すると、ほとんど良く一致していることが明らかになった
- 矮小銀河の密度分布は中心で「コア」である必要は無いことがわかった

このstudyの問題点

- ポテンシャルは**球対称**で良いか？
- 速度分散の非等方性 β は**ゼロ(等方)**なのか？
- ゼロでは無くとも **β =一定**で良いのか？
- そもそも統計量が少ない

球对称？

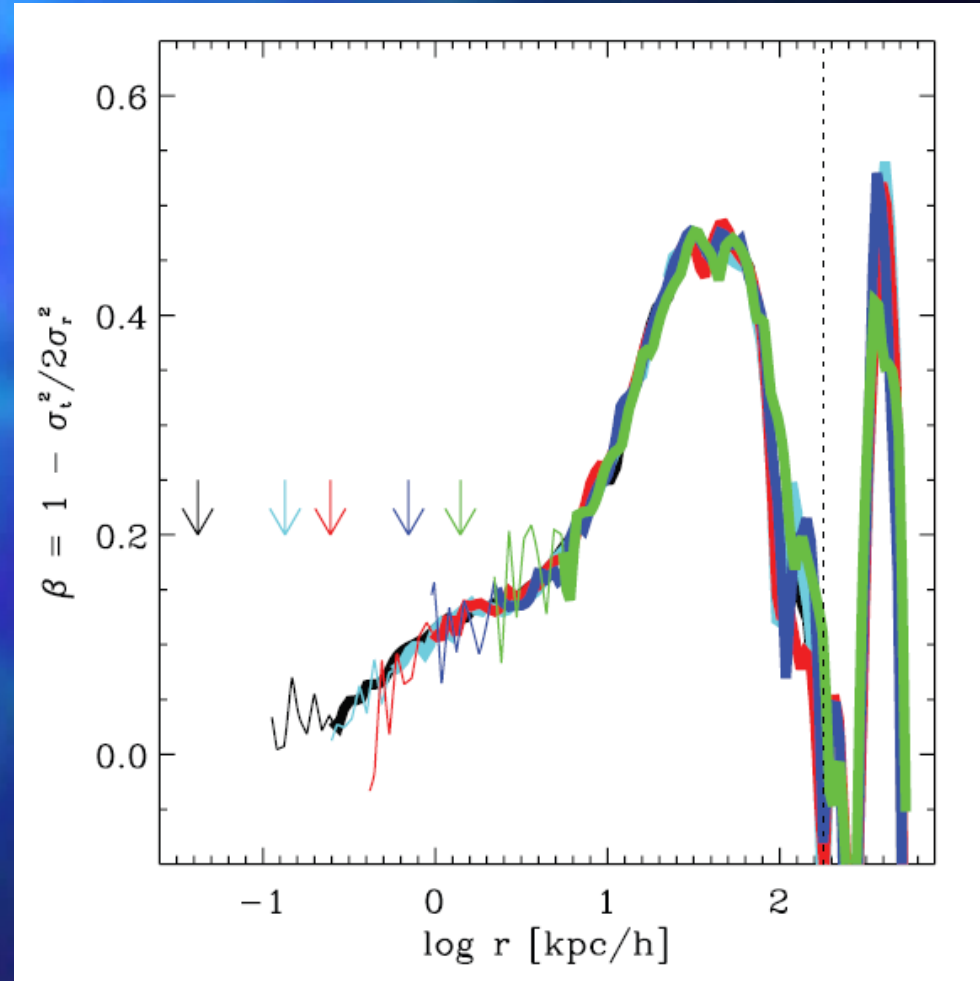


$\beta = 0$ or constant?

Navarro+ 2010(右図)

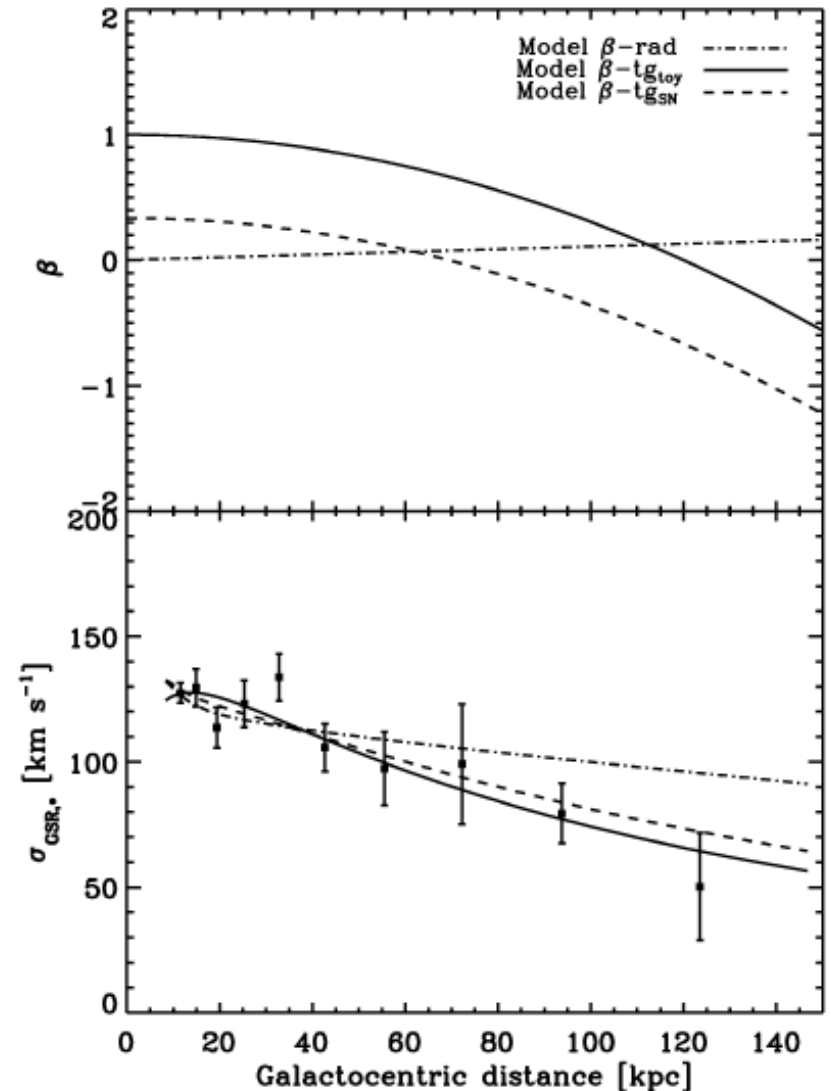
シミュレーションから β は
nonzeroで**動径依存性**を持
つことがわかった

(中心ではisotropy、遠く
なるにつれradialな
anisotropyに)



$\beta = 0$ or constant?

Battaglia+ 2005(右図)
太陽近傍の星を観測して
MWの速度分散profileを再
現。その際、 β に動径依存
性を考慮すると、
tangentiallyで良くfitする
ことが分かった。



これらを考慮したモデル構築が必要！

TMTやPFSによる統計量の改善



どれくらいの統計量が見積もられれば、
カスプ問題や β にどれくらいの制限がかけられる
のか？

…という事を中心に研究を進めています！

おわり

Kolmogorov-Smirnov test

- ある観測された分布が理論的な分布とどの程度一致しているのか（1標本KS検定）、あるいは2つの観測された分布が同一の母集団から取られているのかどうか（2標本KS検定）を判断する統計的検定
- 2つの標本についてそれぞれ累積確率分布曲線 $S(x)$ と $S'(x)$ を作ってやり、その距離が最大になるところ X における差 D を求める ($D = |S(X) - S'(X)|$)
- 有意確率を求める

$$Prob(D\sqrt{N} < z) = 2 \sum_{j=1}^{\infty} (-1)^{j-1} \exp(-2j^2 z^2)$$