

# 第115回院生雑誌会

DATE : 2011.10.05

PLACE : 大輪講室

PRESENTER : 林 航平(千葉研 M2)

# 紹介論文

- A common mass scale for satellites galaxies of the Milky Way  
Strigari et al. 2008, *Nature*, 454, 1096
- Central Mass and Luminosity of Milky Way Satellites  
in the  $\Lambda$  Cold Dark Matter Model  
Maccio et al. 2009, *ApJ*, 692, L109

# 鍵文字(1)

- Dwarf galaxy (矮小銀河)

数十億個以下 ( $<10^9 M_{\text{sun}}$ ) の恒星からなる小さな銀河。

ダークマターが支配的な銀河。

小さなハロー (サブハロー) 内にガスが降着し形成。

- ◇ Dwarf Elliptical galaxy (dE, 矮小楕円銀河)

表面輝度が大きい。ガスがほとんどなく、宇宙のかなり初期からあったかも

- ◇ Dwarf Spheroidal galaxy (dSph, 矮小楕円体銀河)

表面輝度が小さい。星間物質はほとんどなく、星形成も起こっていない。

銀河系の伴銀河のほとんどを占める。

- ◇ Dwarf Irregular galaxy (dIrr, 矮小不規則銀河)

ガスがある程度存在しており、星形成が現在でも行われている。表面輝度は小さい。



## 鍵文字(2)

- Dark Halo: ダークマターの密度揺らぎが重力崩壊して形成されたもの
- Circular velocity(回転速度): 天体のポテンシャルの深さを特徴づける量

$$V_{\text{circ}} = \sqrt{\frac{GM(< R)}{R}}$$

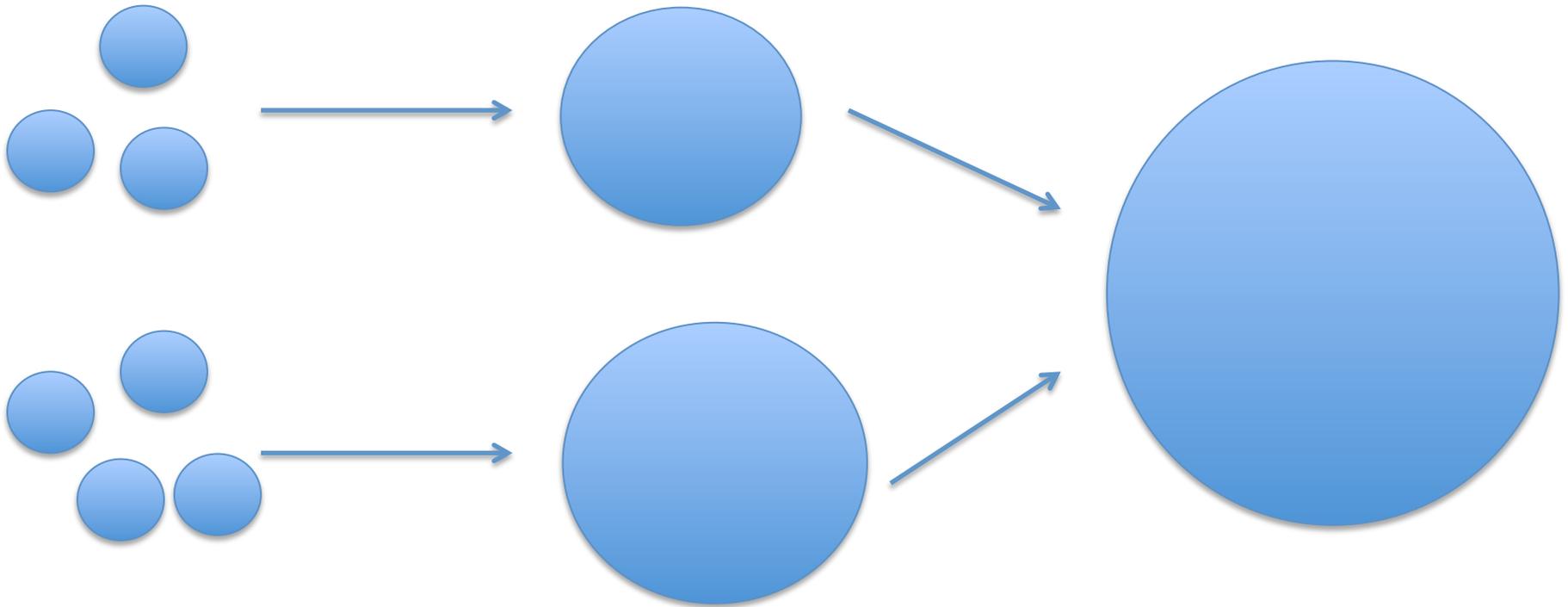
- ビリアル温度: 重力的な平衡状態にある温度。定義的には回転速度と同じ。

$$T_{\text{vir}} \simeq \frac{m_{\text{H}}}{k_{\text{B}}} \frac{GM}{R} \simeq \frac{m_{\text{H}}}{k_{\text{B}}} V_{\text{circ}}^2$$

# 1. Introduction

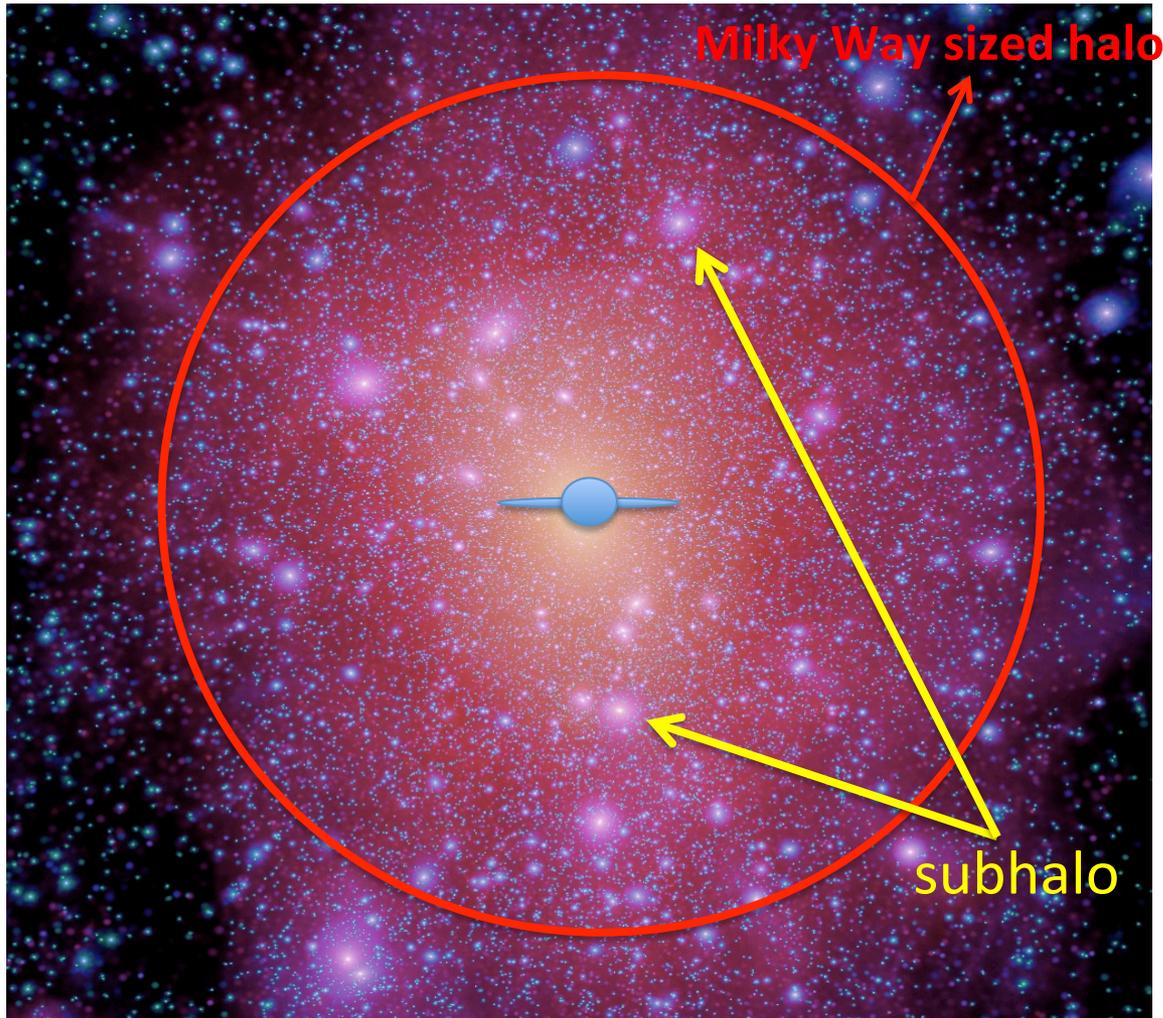
・ $\Lambda$ CDM理論による階層的構造形成

小さなハロー(重力的に束縛されたダークマターの集まり)が集まって、階層的に大きなハローを形成。



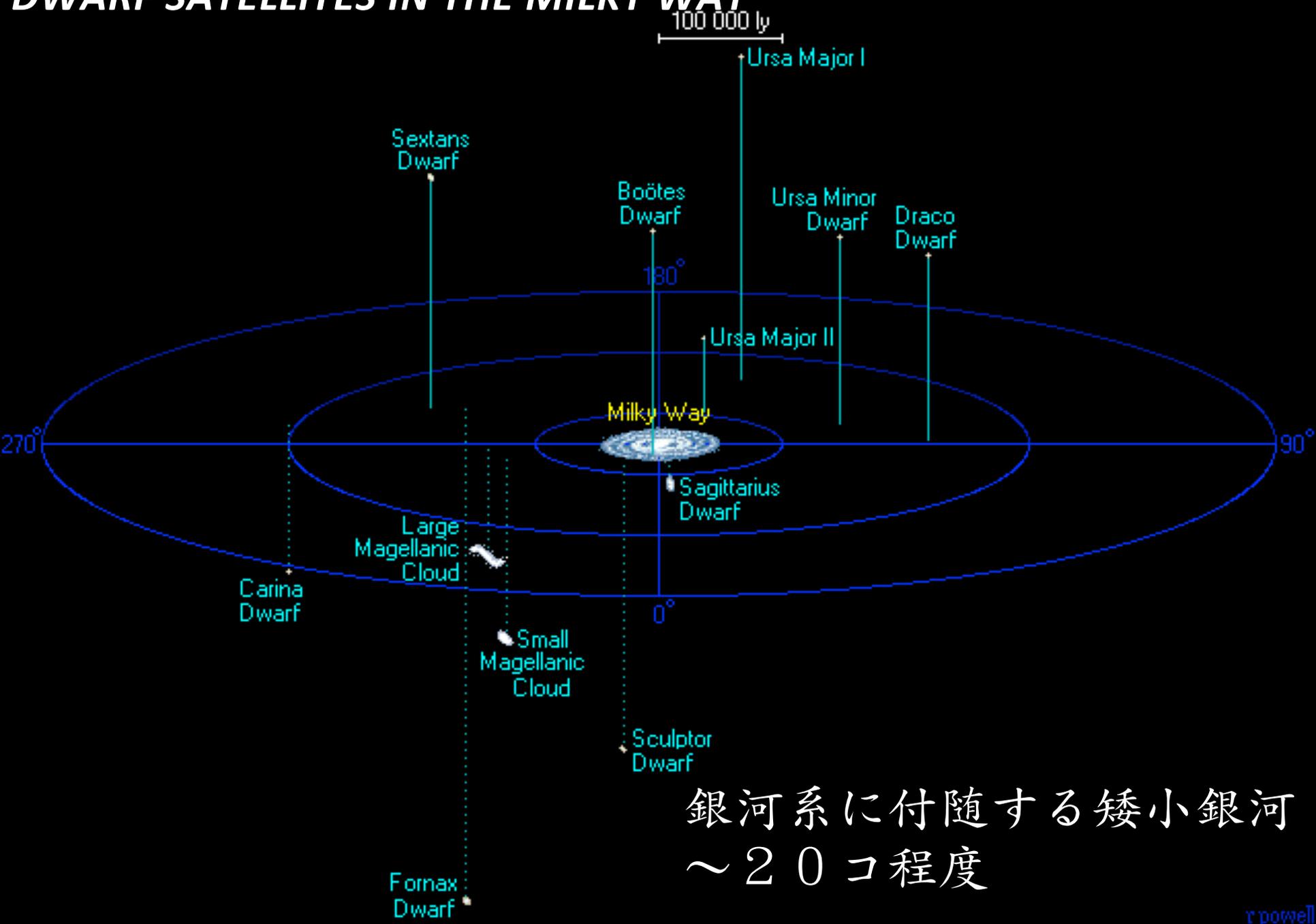
# Aquarius simulation

(Springel et al. 2008)



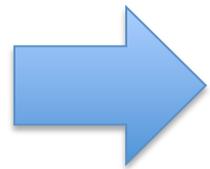
CDM理論に基づく高分解能のN-body simulationによって、MW-likeのハロー内に無数の小さな構造 (subhalo) が存在することが分かっている。

# DWARF SATELLITES IN THE MILKY WAY



銀河系に付随する矮小銀河  
～20コ程度

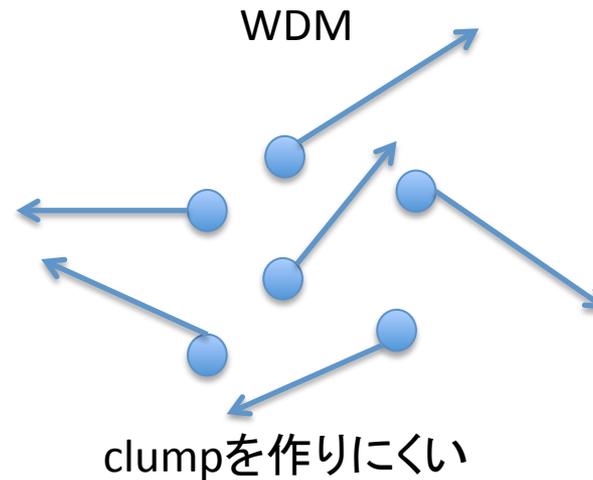
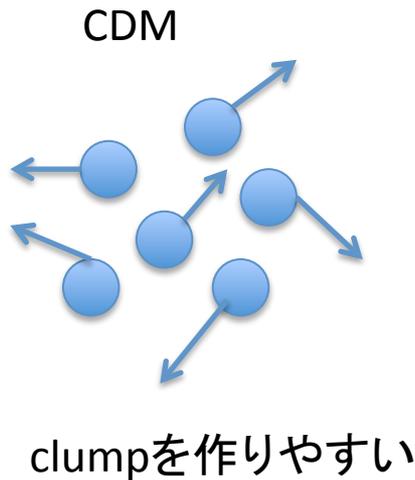
CDM理論で予測される  
サブハローの数と  
観測されているサブハロー  
(=矮小銀河)の数が桁違い  
に違う



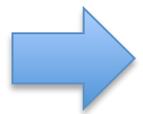
**ミッシング・サテライト問題**

# この問題をどうやって解決するか

- ・サブハロー自体の数を少なくすれば良い！ → Warm Dark Matter  
CDMよりも力学的に**あったかい(速度分散が大きい)**



・・・がしかし、Large scaleでイマイチ合わない



Large scaleで良く合うCDMの方が支持率は高い。

# この問題をどうやって解決するか

・サブハローは沢山あるが銀河が出来ていない！ → 銀河形成の抑制

抑制過程の候補として...

◇ 背景紫外光によるガス加熱機構

◇ SN feedbackによる星形成の抑制

etc...

これらが原因だろうとは考えられてはいるものの、  
明確な答えにはたどり着いていない・・・

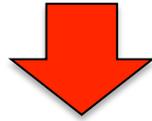
もっとシンプルに、サブハローの質量から  
矮小銀河形成に関するなんらかの情報を得られないのか？

- Strigariさん達のgoal



Strigariさん

矮小銀河形成に一定の制限を与えたい...



サブハローの質量に何か特徴づけるものを見つける！

- どうやって？

矮小銀河にある星の速度(分散)から

サブハローの質量を推定しよう。

# 2. Mass Modeling

球対称ジーンズ方程式：系全体が球対称で平衡状態であると仮定した運動方程式

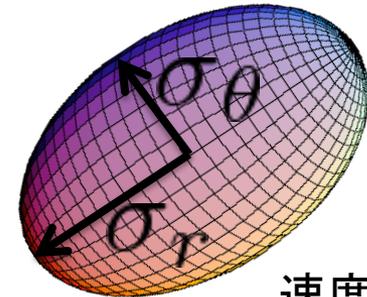
$$r \frac{d(\rho_* \sigma_r^2)}{dr} = -\rho_*(r) \frac{GM(r)}{r} - 2\beta(r) \rho_* \sigma_r^2$$

$\rho_*$  : 恒星系の密度分布 → モデル化

$M(r)$  : ダークハローの質量 → モデル化

$\beta$  : 速度の非等方性

$$\beta = 1 - \sigma_\theta^2(r) / \sigma_r^2(r)$$



速度楕円体

# Stellar Surface Density

King profile: classical dwarf (SDSS以前に発見されている比較的明るい矮小銀河)  
でよくfitしている

$$I_{\text{king}}(R) = k \left[ \left( 1 + \frac{R^2}{r_c^2} \right)^{-1/2} - \left( 1 + \frac{r_{\text{lim}}^2}{r_c^2} \right)^{-1/2} \right]^2$$

Plummer profile: ultra faint dwarf (SDSSで新たに発見されたかなり暗い矮小銀河)  
でよくfitしている

$$I_{\text{pl}}(R) = \frac{4}{3} \frac{\rho_0 r_{\text{pl}}}{[1 + (R/r_{\text{pl}})^2]^2}$$

# Dark Matter Density profile

$$\rho(r) = \frac{\rho_0}{(r/r_0)^a [1 + (r/r_0)^b]^{(c-a)/b}}$$

$$\begin{aligned} r \ll r_0 & \quad \rho \propto r^{-a} \\ r \gg r_0 & \quad \rho \propto r^{-c} \end{aligned}$$

このプロファイルにcut-offを設ける  
 $r_{\text{cut}}$ はRoche限界から決定

$$\rho(r) \rightarrow \rho(r) \exp(-r/r_{\text{cut}})$$

$$r_{\text{cut}} \simeq \left( \frac{GM_{\text{halo}} D^2}{2\sigma_{\text{MW}}^2} \right)^{1/3}$$

$$M_{\text{halo}} = 10^9 M_{\odot} \quad \sigma_{\text{MW}} = 200 \text{ km/s}$$

**$D$** : 矮小銀河中心からの距離

# 2. Data Modeling

確率分布：ガウス分布

$$P(\mathbf{v}|u, \sigma_t) = \prod_{i=1}^N \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_i^2}} \exp \left[ -\frac{1}{2} \frac{(v_i - u)^2}{\sigma_i^2} \right]$$

$$\sigma_i^2 = \sigma_{t,i}^2 + \sigma_{m,i}^2$$

ジーンズ方程式から得られる  
理論的な速度分散

観測の不定性から得られる分散

$v_i$ ：視線方向の速度

$u$ ：系そのものの速度

# 2. Data Modeling

尤度関数

$$\mathcal{L}(m) \propto \int P[\mathbf{v}|u, \sigma_t(\vec{\theta})] \delta(m - M) d\vec{\theta}.$$

$m$  : ある与えられた半径内の質量(300pc)

$M$  : ダークマターの密度プロファイルから得られた質量

$\vec{\theta}(a, b, c, r_0, \rho_0)$  : パラメータセット

# 3. Results

300pc内の質量の尤度関数



Maximum Likelihoodが $10^7 M_{\text{sun}}$ に集中

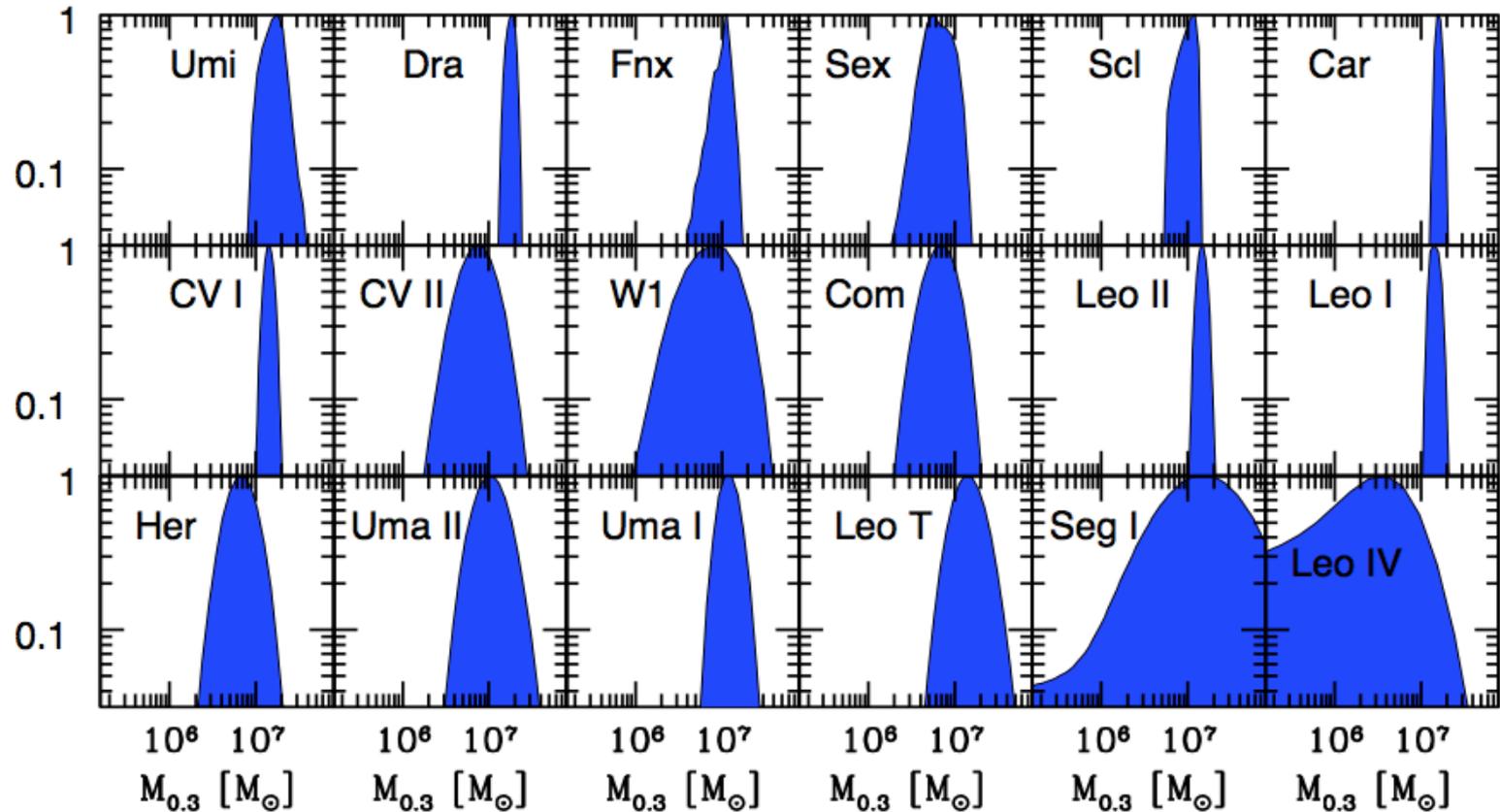


Figure 2: The likelihood function for the integrated mass within 0.3 kpc for 18 of the Milky Way satellites. We marginalize over all parameters as described in the text.

# 3. Results

## $M_{300}$ vs Luminosity

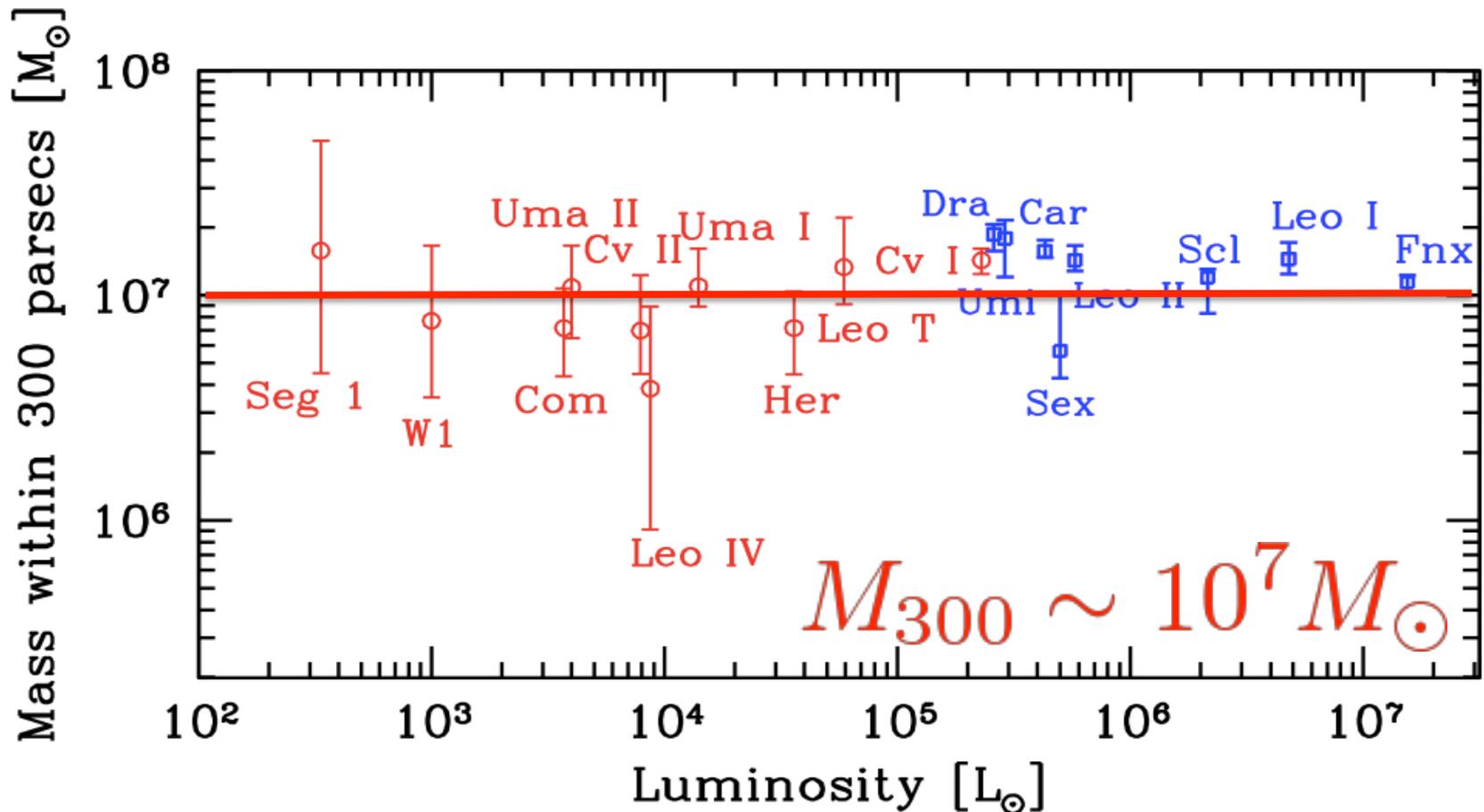


Figure 1: The integrated mass of the Milky Way dwarf satellites, in units of solar masses, within their inner 0.3 kpc as a function of their total luminosity, in units of solar luminosities. The circle (red) points on the left refer to the newly-discovered SDSS satellites, while the square (blue) points refer to the classical dwarf satellites discovered pre-SDSS. The error bars reflect the points where the likelihood function falls off to 60.6% of its peak value.

# 4. Discussion

このmass scaleから何が示唆されるのか？

- $10^7 M_{\text{sun}}$ 以下で銀河形成が抑制されている？

高解像度の数値計算(Bullock+ 2001)より、ダークハローの中心領域の質量からハローの重力ポテンシャルの深さを予測すると

$$M_{300} \sim 10^7 M_{\odot} \times (M_{\text{total}}/10^9 M_{\odot})^{0.35}$$

$M_{\text{total}}$  : 銀河系に降着する前の質量

➡  $10^9 M_{\text{sun}}$ が、SN feedbackや再電離で星形成が抑制されるハローの質量かもしれない。

# 4. Discussion

このmass scaleから何が示唆されるのか？

- $10^7 M_{\text{sun}}$ 以下のダークハローは存在しない？

これを仮定すると、矮小銀河は宇宙で最小のダークハローになる。  
WDMは速度分散が大きいのでダークハローの質量は大きくなる。  
ちなみに、1keVの質量をもつWDMの最小質量は $10^9 M_{\text{sun}}$



1keV以下の質量のWDMは除外される。

# 5. Summary

矮小銀河の視線速度から、最尤法でダークハローの質量を決定



矮小銀河のダークハロー質量は光度が4桁違う銀河でも

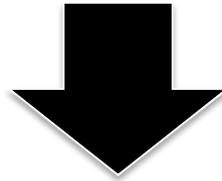
$M_{300} \sim 10^7 M_{\text{sun}}$ で一定である！



矮小銀河形成・ダークマターの正体に制限を与えることができることを示唆できた。

この結果を受けて...

シミュレーションでは、この結果を再現できるのか？  
出来るとしたらどのような条件が必要になるのか？



Maccioさんたちが、数値計算＋セミアナで行って見た！

# 1. 数値計算

N体のtreeコード(PKDGRKV)と、WMAP5の宇宙論パラメータを使用。  
低分解能での計算から、銀河系程度( $M \sim 10^{12} \text{Msun}$ )の3つのハローを選んで、  
高解像度で再計算した。

$z=20$ から $z=0$ までの各時代のスナップショットからビリアル平衡のハローを探して  
 $4 \times 10^6 \text{Msun}$ 以上のダークハローをカタログ化した。

各スナップショットのハローに含まれる粒子をマーキングして時代を遡ることで  
merger treeを作成した。

## 2. semi analytical model

矮小銀河の光度はKang+2005のセミアナモデルから計算。  
数値計算で作ったmerger treeに銀河形成の物理モデルを移植した。

銀河を作る物理プロセス

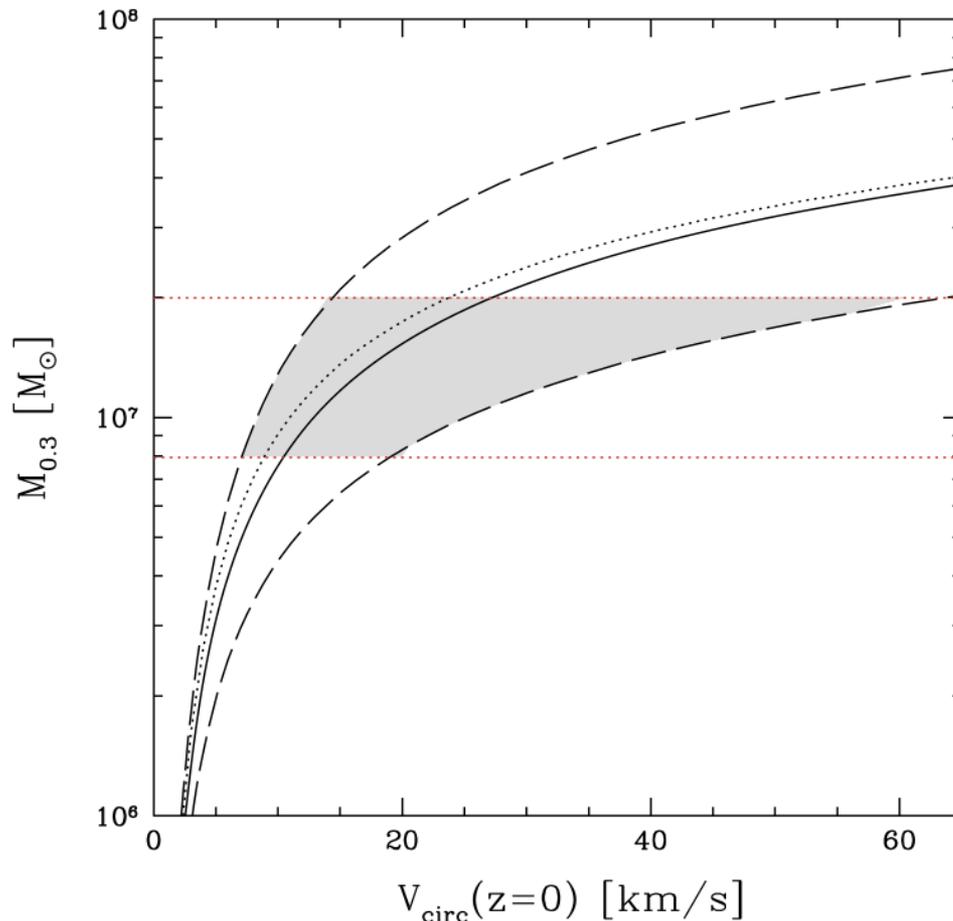
- hot gasのcooling
- star formation
- SNe feedback

低質量のダークハローでの星形成で...

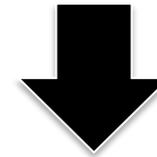
- $T_{\text{vir}} < 10^4 \text{K}$ でのhot gasのcooling rateは非常に低く、 $\text{H}_2$ ガスを冷やせない  
→  $V_{\text{circ}} < 20 \text{km/s}$ の目に見える矮小銀河が存在しない
- cooling rateが低いのは、低質量ハローでは背景紫外光による光電離  
→ この効果によってバリオン質量を半分失ってしまうようなハローの質量(filtering mass)は銀河系に降着するredshift毎に異なることがわかった

### 3. 結果

### $M_{300}$ vs $V_{\text{circ}}$



この図から、観測される質量は  
様々な $V_{\text{circ}}$ で再現可能なため、  
回転速度と $M_{300}$ の関係は  
よくわからない。。



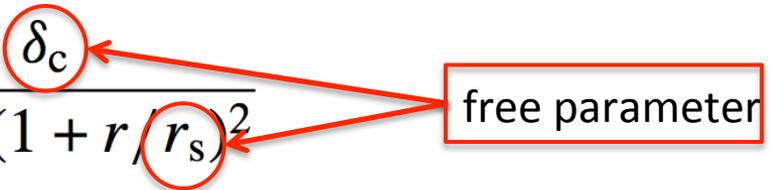
Strigari+08の結果と直接比較したい！

solid & dashed lines : median &  $2\sigma$  scatter  
red dotted line : Strigari+08の結果のmass range

### 3. 結果 $M_{300}$ vs Luminosity

質量を求める為に...

N体計算から得られるハローを構成するダークマターの密度分布にNFWモデルを  $\chi^2$  フィッティング

$$\frac{\rho(r)}{\rho_{\text{crit}}} = \frac{\delta_c}{(r/r_s)(1+r/r_s)^2}$$


これを用いて300pc内の質量を計算する。

$$M_{0.3} = \int_0^{r_{0.3}} 2\pi t^2 \rho(t) dt = 4\pi \rho_{\text{crit}} \delta_c r_s^3 \left( \log(1+x) - \frac{x}{1+x} \right) \quad x \equiv r_{0.3}/r_s$$

ただし、

密度分布が降着時から現在まで時間変化しないと仮定

### 3. 結果

## $M_{300}$ vs Luminosity

ただし、

密度分布が降着時から現在まで時間変化しないと仮定

Kazantzidies+2004 or Penarrubia+2008

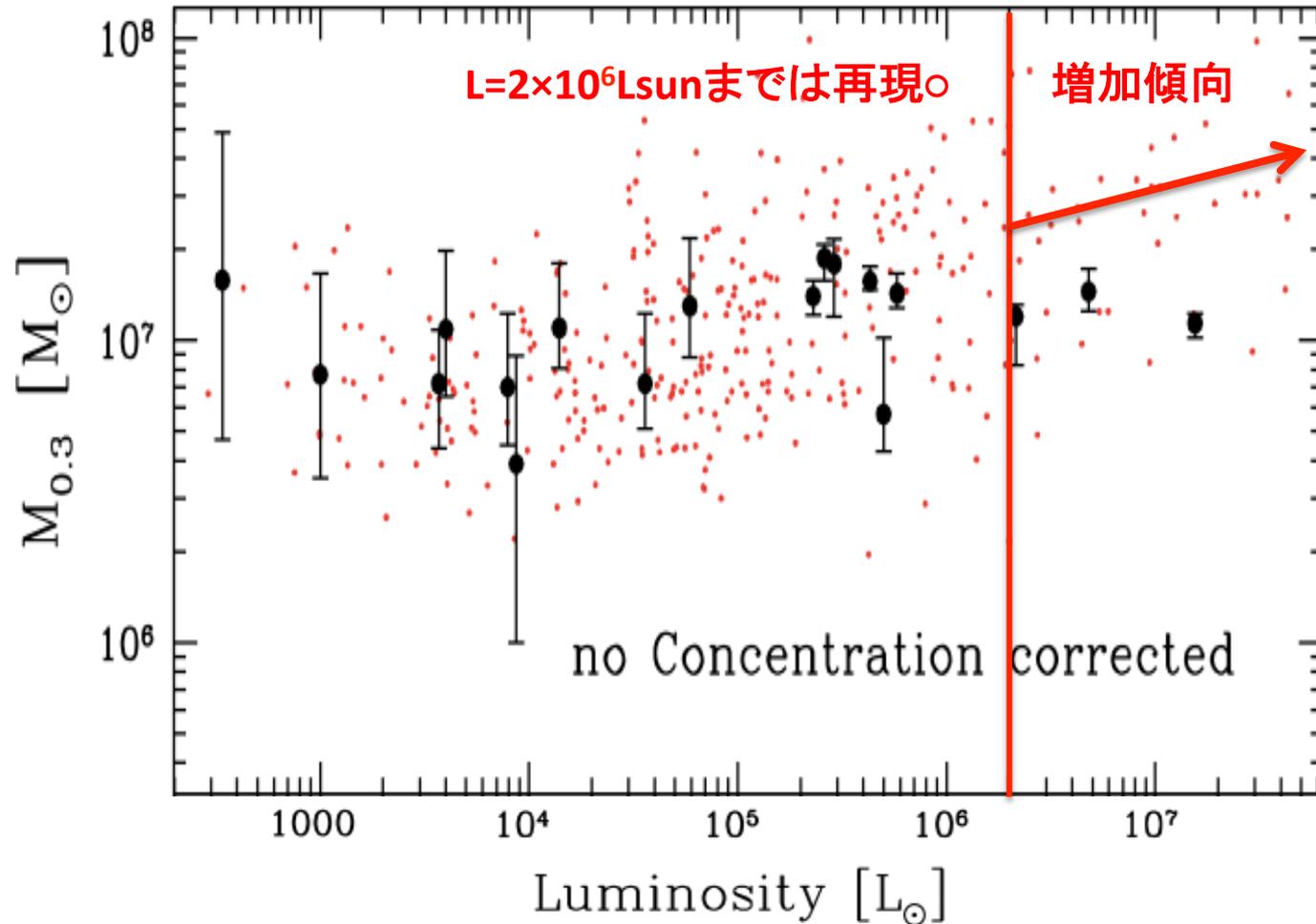
ハロー内部の密度分布は安定していて、潮汐効果でハローの質量が多くはぎ取られても大きな変化はない。

特に、中心集中度の高いハロー( $c > 20$ : luminosityがそれほど大きくない銀河)は何度か潮汐効果を受けてもプロファイルを保持

一方、中心集中度の高くないハロー( $c \sim 9$ : luminosityが大きい銀河)はハローの密度超過 $\delta_c$ が降着時から現在にかけて1/2程度になる。

### 3. 結果

## $M_{300}$ vs Luminosity

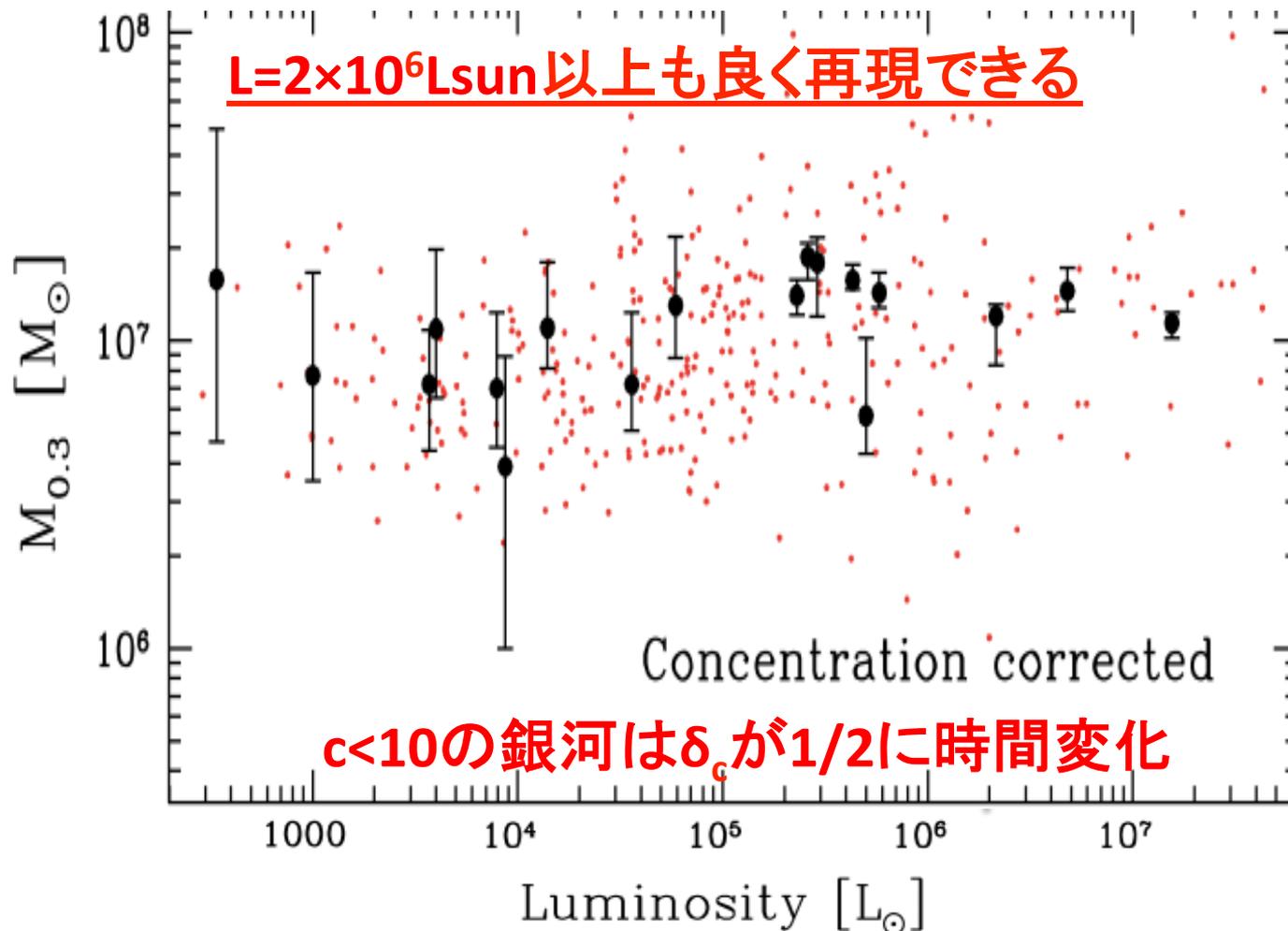


black dots: 実際の観測値

red dots: 計算結果(SDSSの検出限界( $\log(R/\text{kpc}) < 1.04 - 0.228M_V$ )以上の天体)

### 3. 結果

### $M_{300}$ vs Luminosity

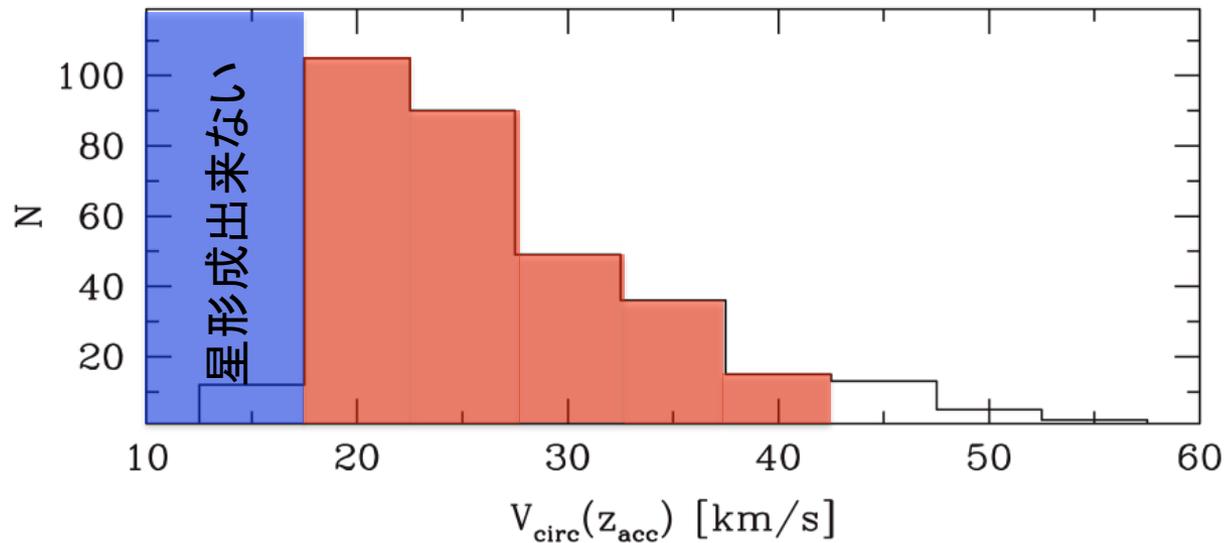


black dots: 実際の観測値

red dots: 計算結果(SDSSの検出限界( $\log(R/\text{kpc}) < 1.04 - 0.228M_V$ )以上の天体)

# 4. 議論 なぜ $M_{300} \sim 10^7 M_{\text{sun}}$ なのか？

$M_{300}$  vs Luminosity でプロットした銀河の降着前の  $V_{\text{circ}}$



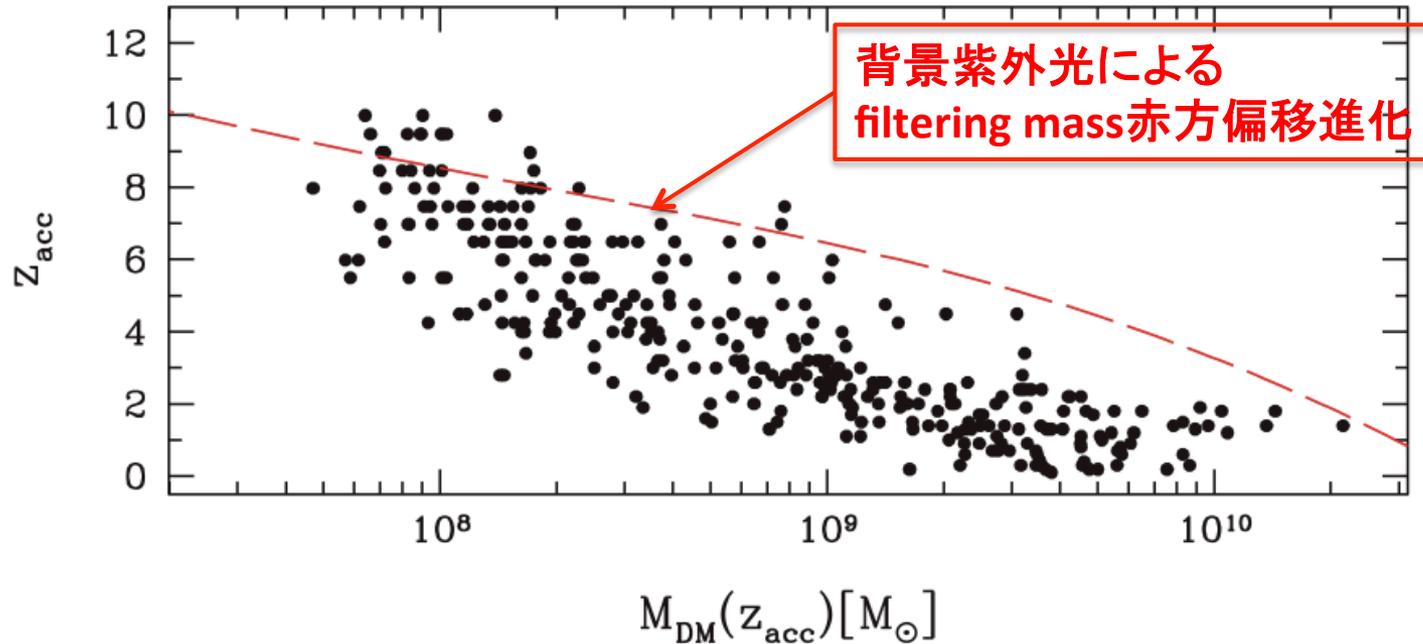
$M_{300}$  が降着してから時間進化しないという仮定下では、 $z=0$  でも  $V_{\text{circ}}$  は  $20 \sim 40 \text{ km/s}$



**矮小銀河の300pc内の質量は  $10^7 M_{\text{sun}}$  である！**

# 4. 議論 なぜLuminosityに幅があっても一定なのか？

降着時の $M_{DM}$ とredshift



同じ質量でも降着する時期に幅があり、そのredshiftでのfiltering massの違いによってバリオン質量が異なる

➡ 星形成に使えるガスの量→現在の光度が異なる

＝同じ質量でもLuminosityに幅ができる！

## 4. まとめ

Strigari+2008の(衝撃的)結果を受けて、それがシミュレーション上でも再現出来るかを確認めた

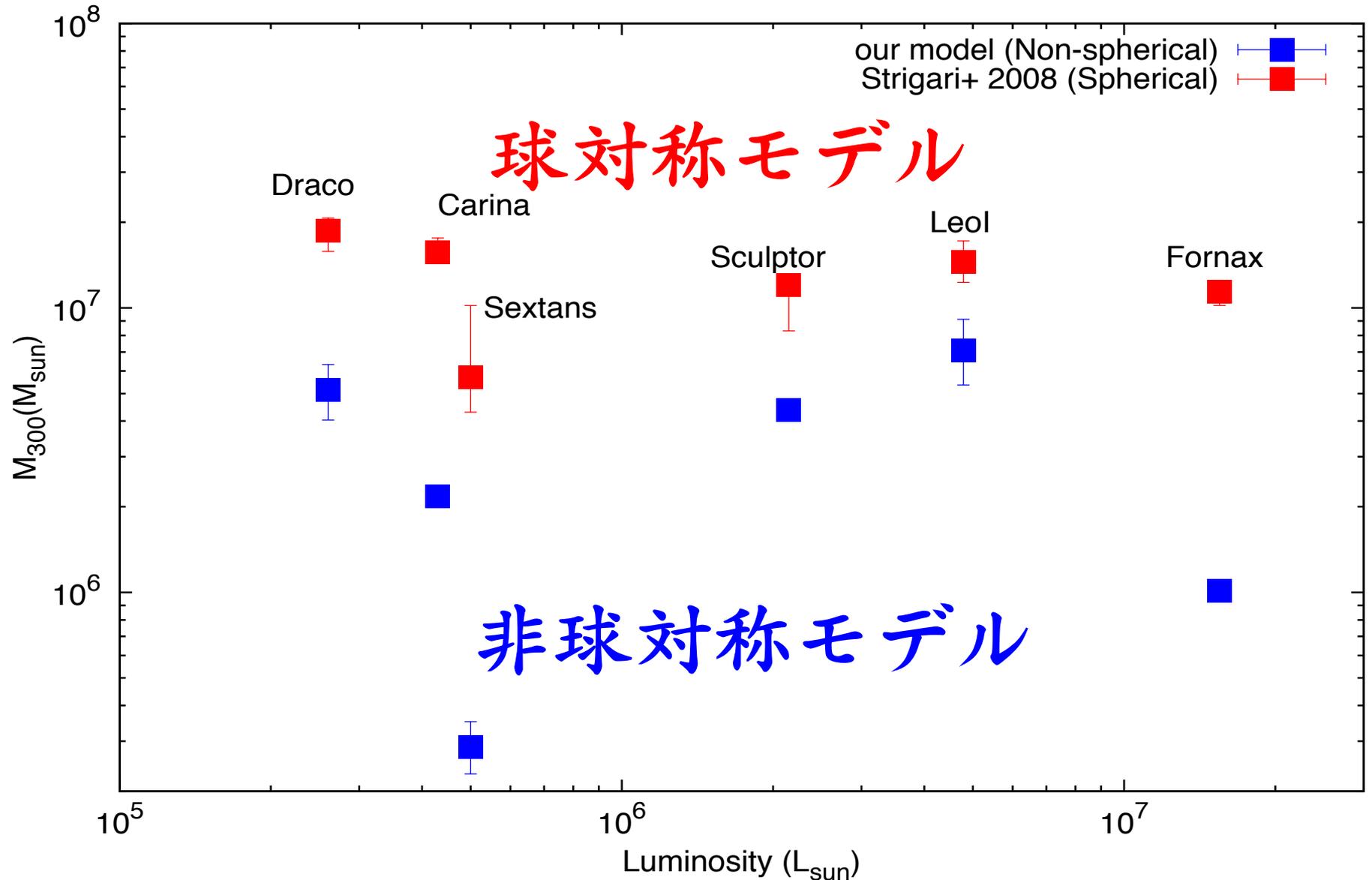


ダークハローの密度分布が時間変化しなかったり、中心集中度の低い銀河にはちょっと手を加えたりしたが、 $M_{300} \sim 10^7 M_{\text{sun}}$ を再現できた



この関係が成り立つ要因として、降着時の $M_{300}$ の $V_{\text{circ}}$ が20~40km/sで星形成出来る範囲にあり、幅広い光度は降着時時期の違いであることがわかった

# dSphs Mass within 300 pc



*fin*