

# 第149回雑誌会

2013.01.30

林 航平 (千葉研 D1)

# The anisotropic distribution of satellite galaxies

## ~Theory and Observation~

- Reference

### Simulation

- ❖ Zentner et al. 2005 (N-body + semi-analytic)
- ❖ Libeskind et al. 2005 (N-body + semi-analytic)

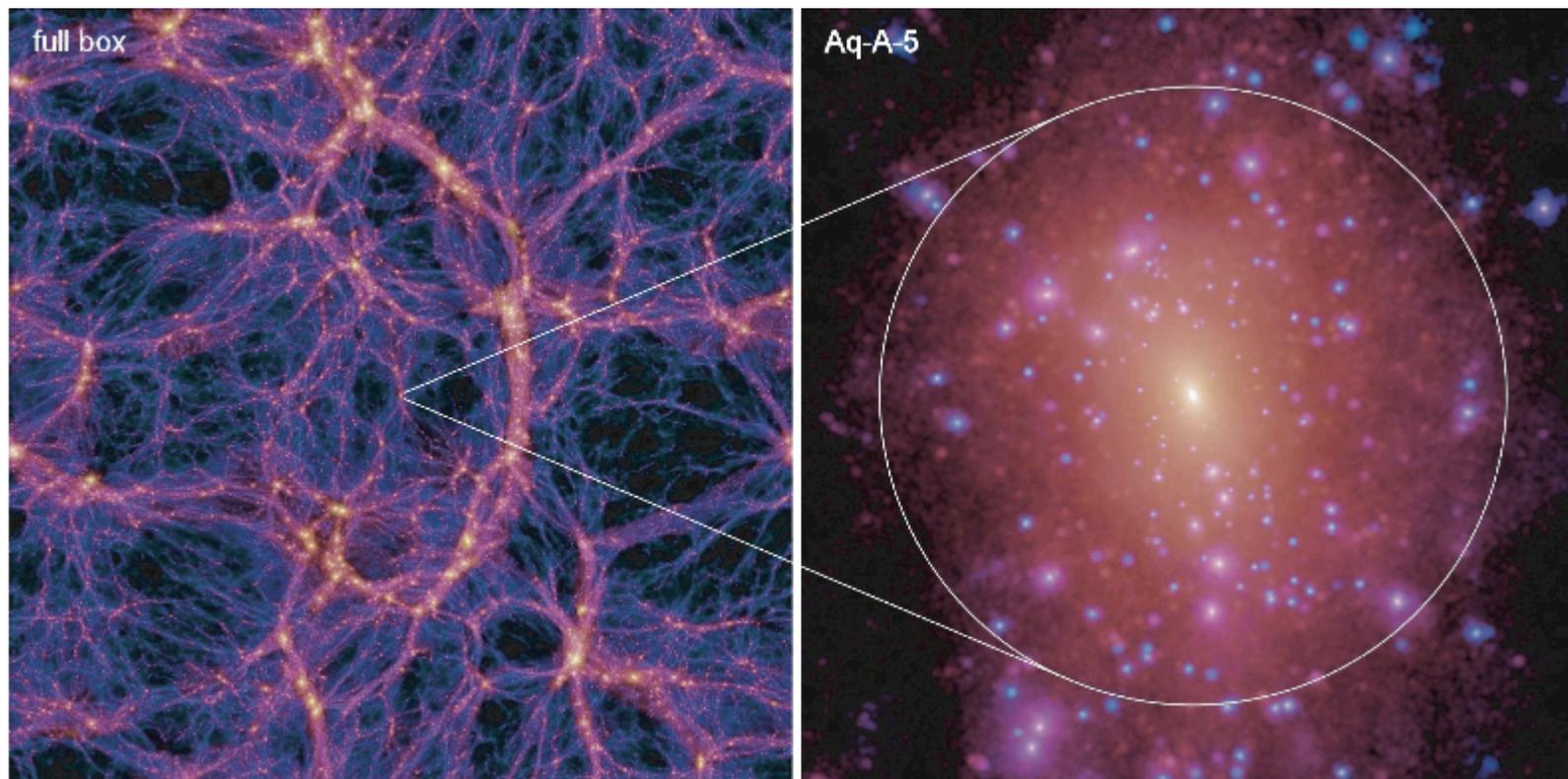
### Observation

- ❖ Agustsson & Brainerd 2010 (SDSS DR7)
- ❖ Nierenberg et al. 2011 (HST GOODS field)
- ❖ Kroupa 2005 (Milky Way)
- ❖ Ibata et al. 2013 (Andromeda)

# Introduction

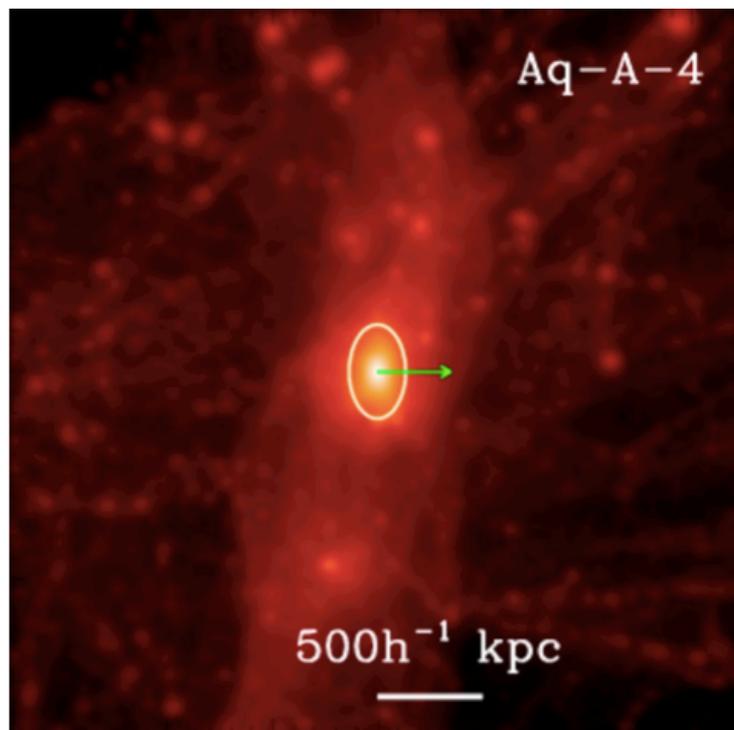
## $\Lambda$ CDM理論に基づく階層的構造形成

小さなハローが集積・合体を繰り返しながら、階層的に大きなハローを形成していく



# Introduction

## Filament 構造とダークハロー

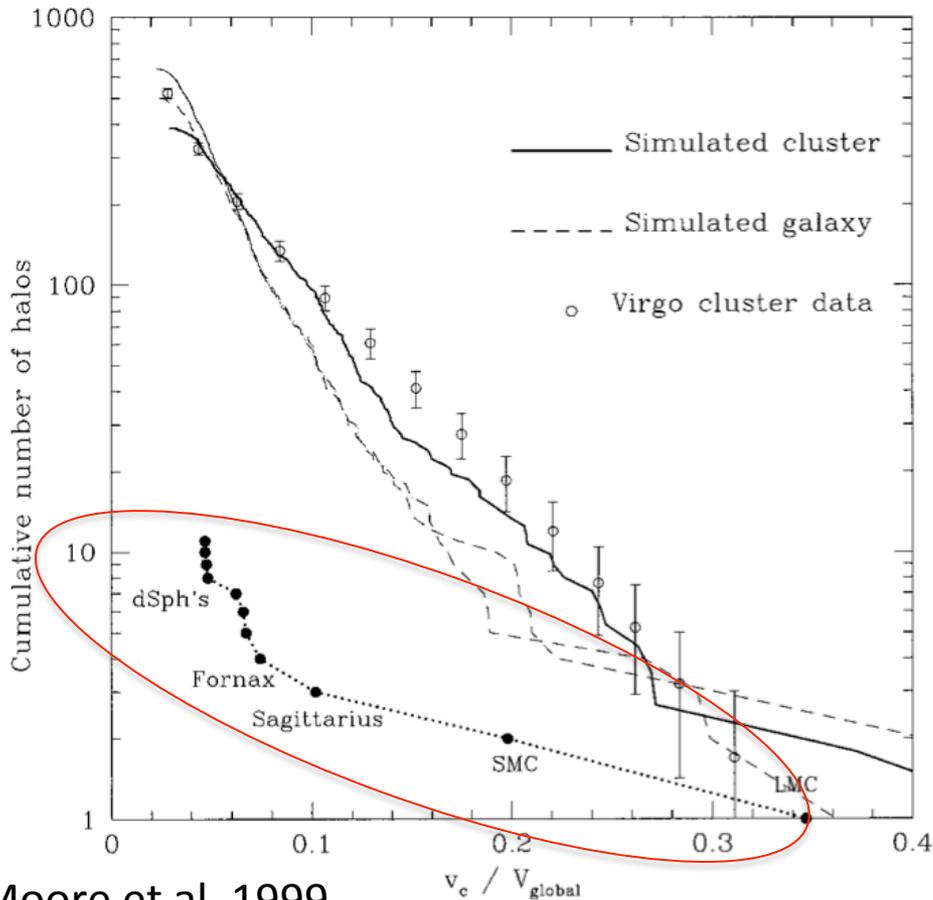


Vera-Ciro et al. 2011

Filamentの方向にダークハローがelongateしている(major axisができる)

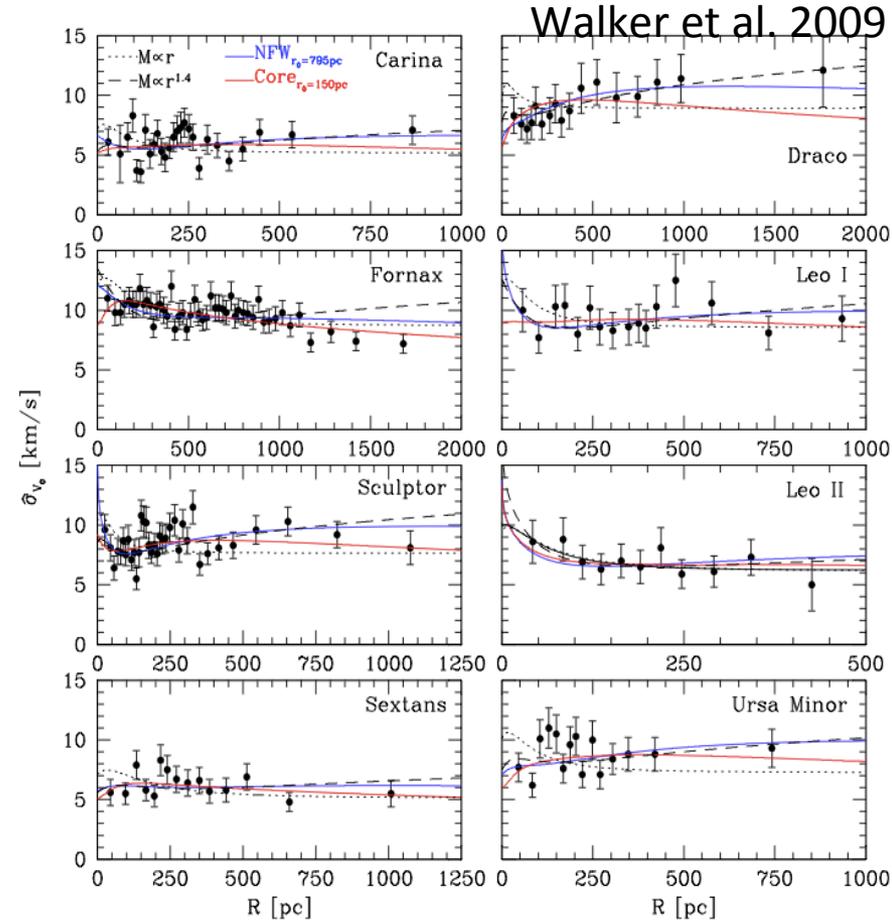
# Introduction

$\Lambda$ CDM理論の(銀河スケールにおける)問題点といえば。。。。



Moore et al. 1999

Missing satellites problem



Core-Cusp problem

# Introduction

そして、もう1つ $\Lambda$ CDMで(当時)説明しきれていない観測結果

## Satellite galaxiesの非等方な空間分布

今日の雑誌会では、  
この問題点を提示した

**Kroupa et al. 2005 “The great disk of Milky-Way satellites and cosmological sub-structure”**

それに対するN-body + semi-analyticの結果

**Liebskind et al. 2005 “The distribution of satellite galaxies: the great pancake”**  
を中心に紹介する。

最後に、

- PAndAS (M31) Ibata et al. 2013
- SDSS(0.01<z<0.15) Agustsson & Brainerd 2010
- HST-goods field (0.1<z<0.8) Nierenberg et al. 2011

の非等方空間分布の結果を簡単に紹介する。

## 概要

銀河系の矮小銀河の空間分布を調べると $\Lambda$ CDM理論から予測されるそれとは一致しないことがわかった。

これは、このスケールでの $\Lambda$ CDM理論の新たな相違点であり、そもそも矮小銀河はサブハローに対応していない可能性も残される。

# 1. Null hypothesis

銀河系の様な銀河をホストにもつサブストラクチャーの空間分布は等方的である。



$\Lambda$ CDM based N-body simulationを見ると、銀河サイズのハローは軸比 $q(c/a)=0.7$ くらいで大きく潰れていない。

さらに、時間進化の中で大きく形が変わることはない。

よって、サブハローはホストハローに満遍なく分布する。

## 2. Disk distribution of MW satellites

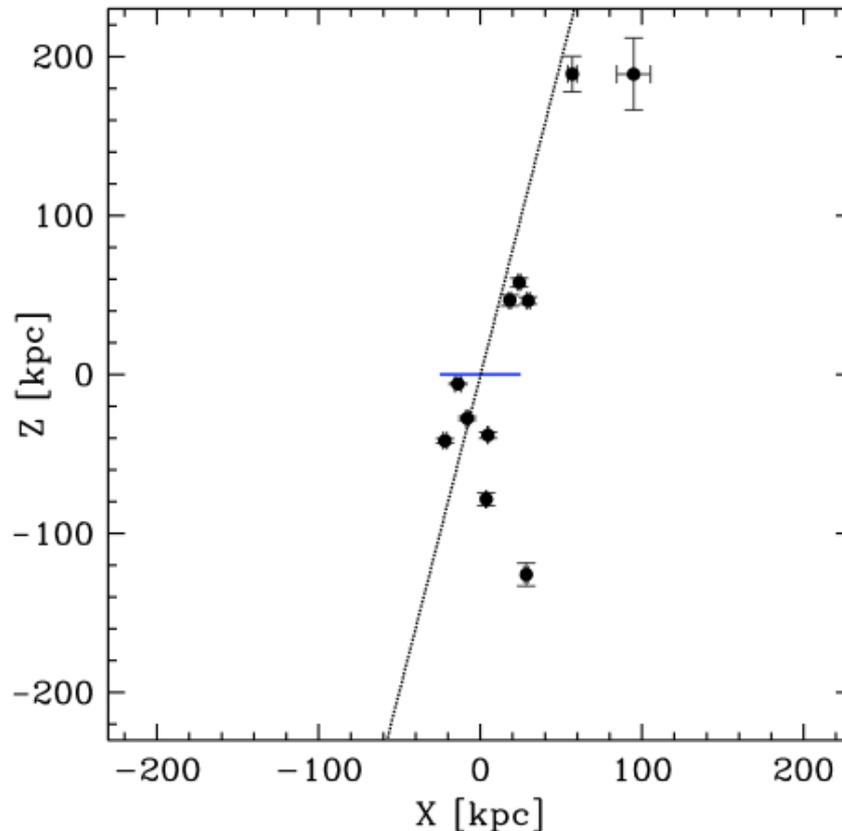
- ・ある銀河がある同一平面上にある条件

$$\mathbf{n} \bullet (\mathbf{x} - \mathbf{p}) = 0$$

n: 法線ベクトル

x: 銀河中心から銀河までのベクトル

p: 銀河中心からある平面までのベクトル



dashed lineが矮小銀河が分布する plane (edge-on)になる。

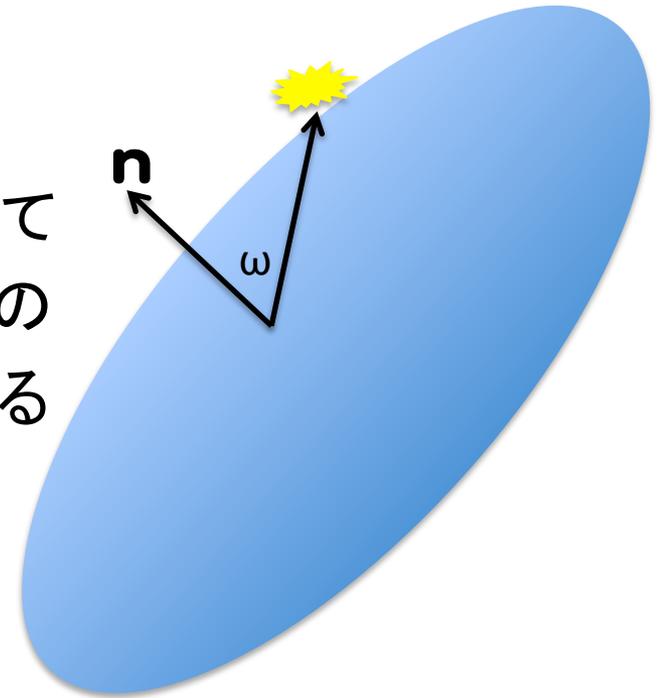
MW satellitesはanisotropicに分布している！  
Galactic diskとほぼ垂直方向に分布している！

# 3. The Likelihood

平面上にある点 $P_{cl}$ からsatellitesへのベクトルと法線ベクトルとの間の角： $\omega$

$\cos(\omega)=1$  : satelliteは平面上にある

cumulativeな $\cos(\omega)$ をMW satellitesについて求め、isotropicに発生させた擬似の $10^5$ 個のsatellitesのそれとK-S検定を用いて比較する



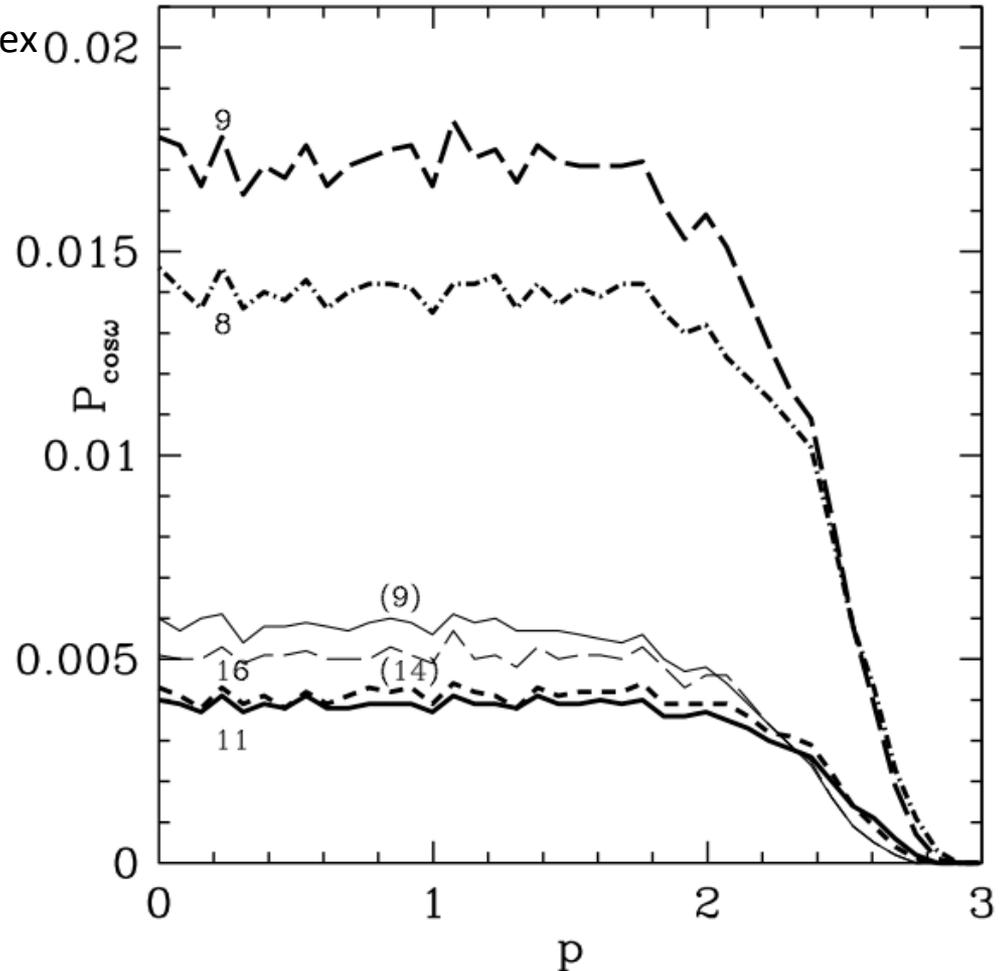
# 3. The Likelihood

横軸にsatellitesの数密度分布のpower-law index  $0.02$   
縦軸にK-S検定による確率:  $P_{\text{cos}\omega}$

高確率でnull hypothesis(satellites  
はisotropicに分布している)  
はリジェクトされる！



$\Lambda$ CDM理論に対する  
新たな矛盾点!?



# 4. Concluding remarks

- MW-typeの銀河に付随する伴銀河は等方的に分布するという帰無仮説を立て、それを調べた。
- すると、伴銀河の分布はdisk-likeな分布をしており、非等方的であることがわかり、帰無仮説が棄却されることがわかった。
- よって、 $\Lambda$ CDM理論とはinconsistentな結果となる。
- この非等方分布を説明する方法の1つとして、初期に大きなgas-rich satelliteが銀河系に落ちてきて、tidal effectによってガスが剥がされる+圧縮され、dwarf spheroidal galaxyが出来た。それに対応しているのがLMCで、dSphsはその“old children”である。

## 概要

銀河系矮小銀河の非等方分布を $\Lambda$ CDM理論の枠組みの中で再現できるのかをN体+セミアナを用いて調べた。すると、11個の最も明るい矮小銀河がdisk-likeに分布することがわかった。また、このdisk構造は宿主ダークハローのmajor axisとalignすることがわかり、filamentに沿って落ちてきたサブハローが反映していると解釈できる。

# 1. Simulation & galaxy formation model

- ・銀河系サイズのダークハロー6つでN体計算を実行

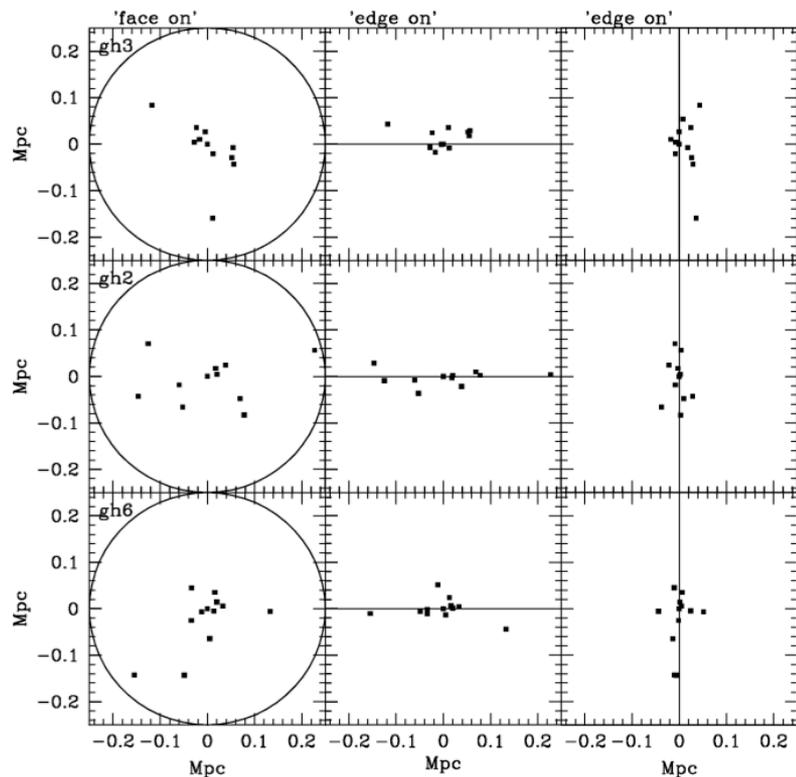
( $M_{\text{particle}}=2.64\times 10^5 h^{-1} M_{\text{sun}}$ ,  $R_{\text{vir}}=110\sim 170 h^{-1} \text{kpc}$ ,  $L_{\text{box}}=35.325 h^{-1} \text{Mpc}$ )

- ・セミアナ (Cole+ 2000 & Benson+ 2002)

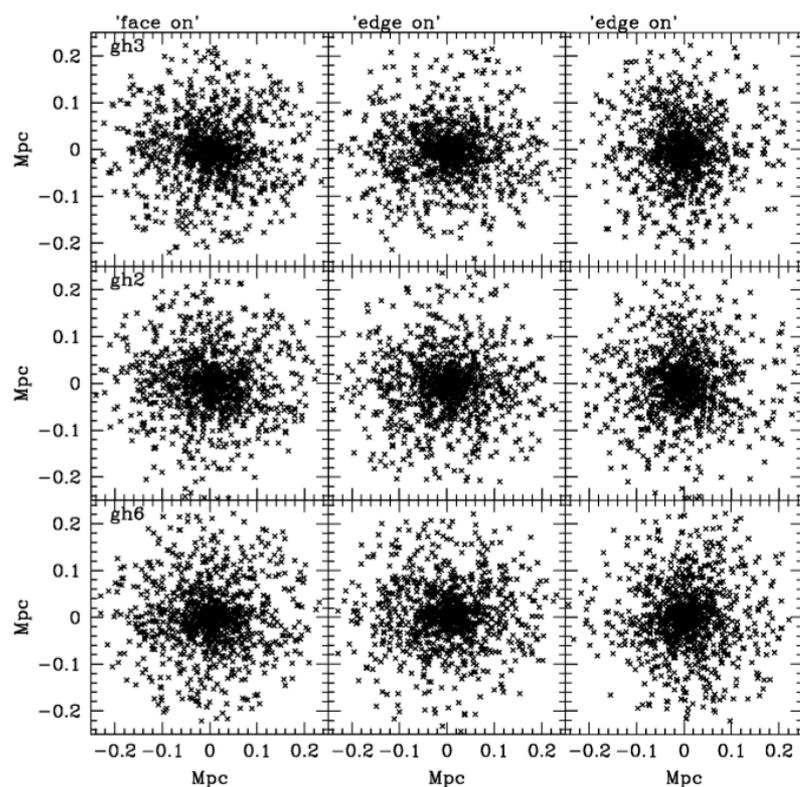
- (i) shock heating & virialization of gas within gravitational potential well.
- (ii) radiative cooling of gas onto a galactic disk
- (iii) the formation of stars from the cooled gas
- (iv) photoionization on the thermal and cooling of the intergalactic medium
- (v) reheating and expulsion of cooled gas through feedback processes
- (vi) the evolution of stellar populations
- (vii) the effects of dust absorption and radiation
- (viii) the chemical evolution of the stars and gas
- (ix) galaxy merger
- (x) the evolution of the size of the disk and bulge

# 2. Results (その1)

最も明るい11個のsatellites



最も重い1000個のsubhalos



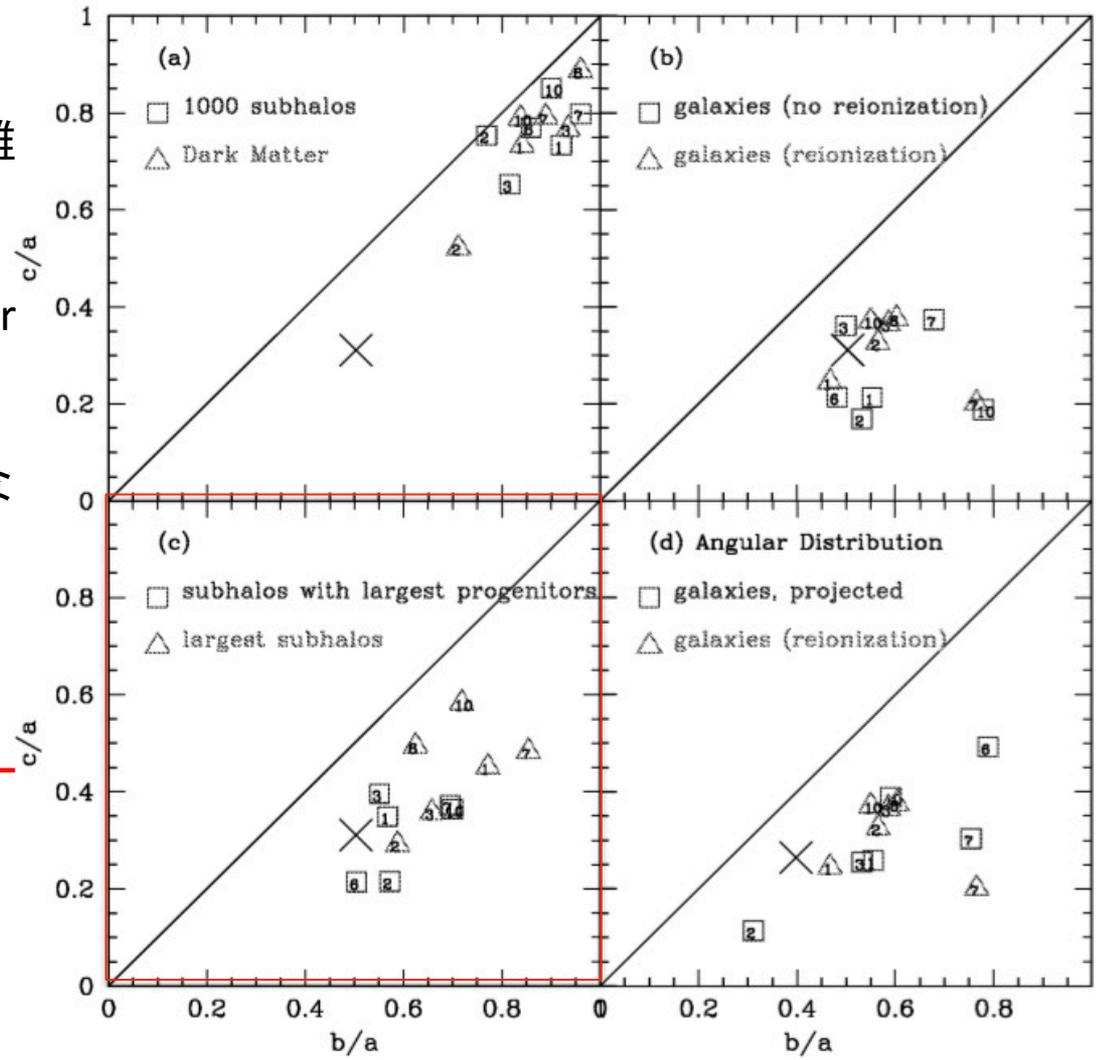
サブハロー自体はtriaxialな分布をしていないが、その中から最も明るいsatellitesを選んでプロットすると、ある軸に沿うようなdisk-likeな分布をしている

# 2. Results (その2)

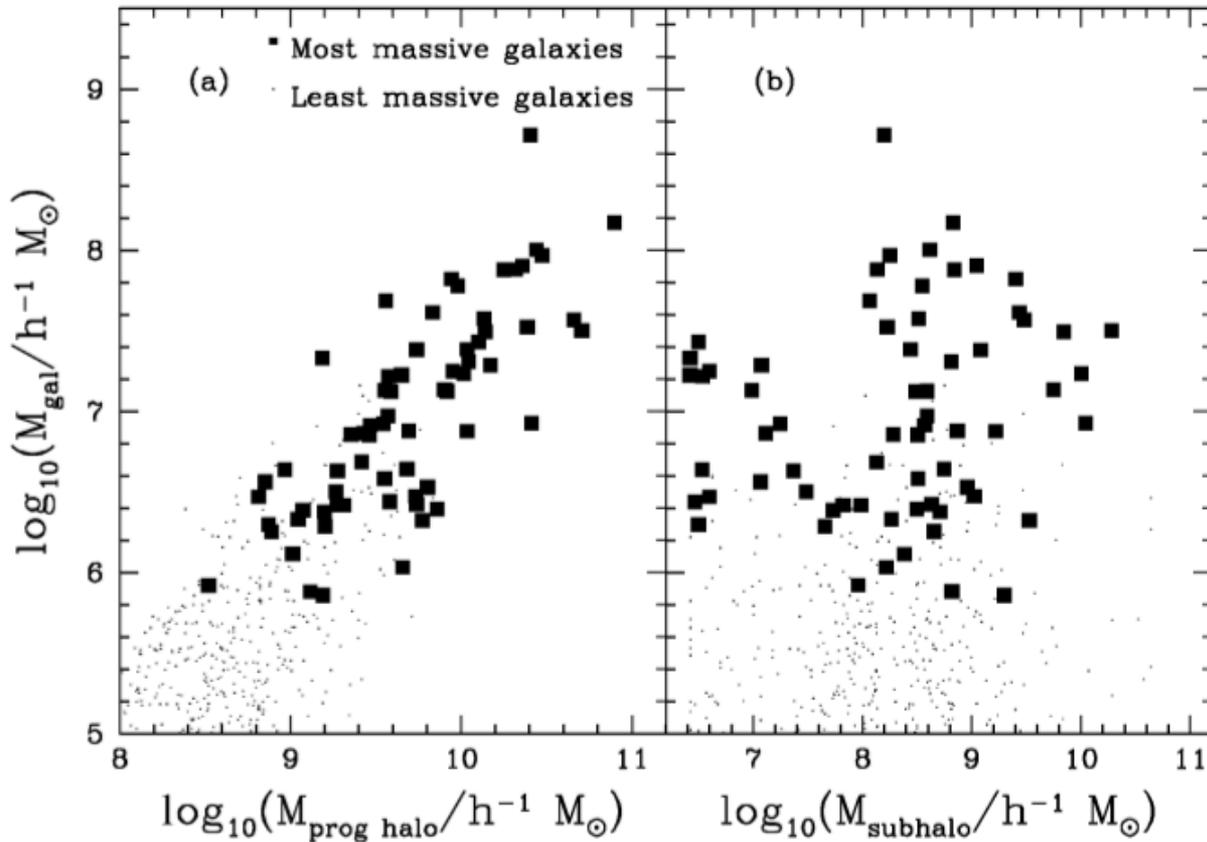
## c/a vs b/a plane

- (a) DM & DM subhaloの分布
- (b) 11個のprogenitorで過去に再電離があったか否か
- (c) most massive subhalo@z=0と most massive subhalo@progenitor

- ・再電離の効果はあまり寄与していない
- ・disk-likeな構造を作っているサブハローにはバイアスがある。
- ・最終的にmassiveなサブハローではなく、過去にmassiveだったサブハローが寄与している！



## 2. Results (その2)



サブハローの重さと星質量の関係。progenitorの質量と現在の星質量には強い相関があるが(a)、 $z=0$ のサブハローの質量と星質量には相関が無い。  
この結果は、前の結果をフォローしている。

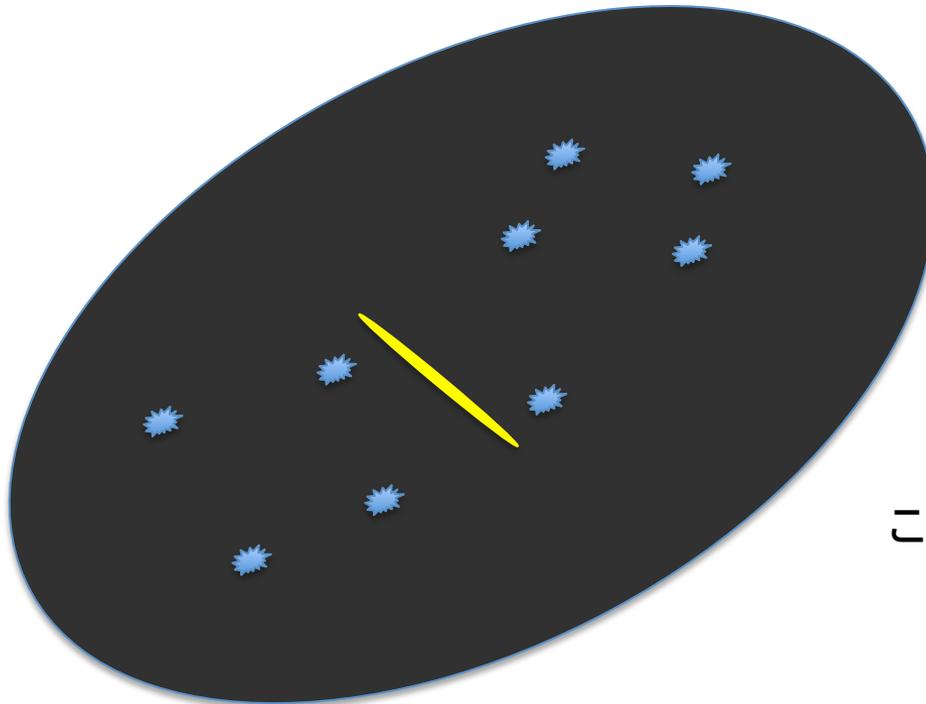
## 2. Results (その3)

disk構造とhost haloのmajor axisとの関係

→ほとんどのハローでmajor axisに沿ってsatellitesが分布している。

MWの場合に従うなら...

Galactic diskはdisk構造とほぼ垂直方向あるはずである。



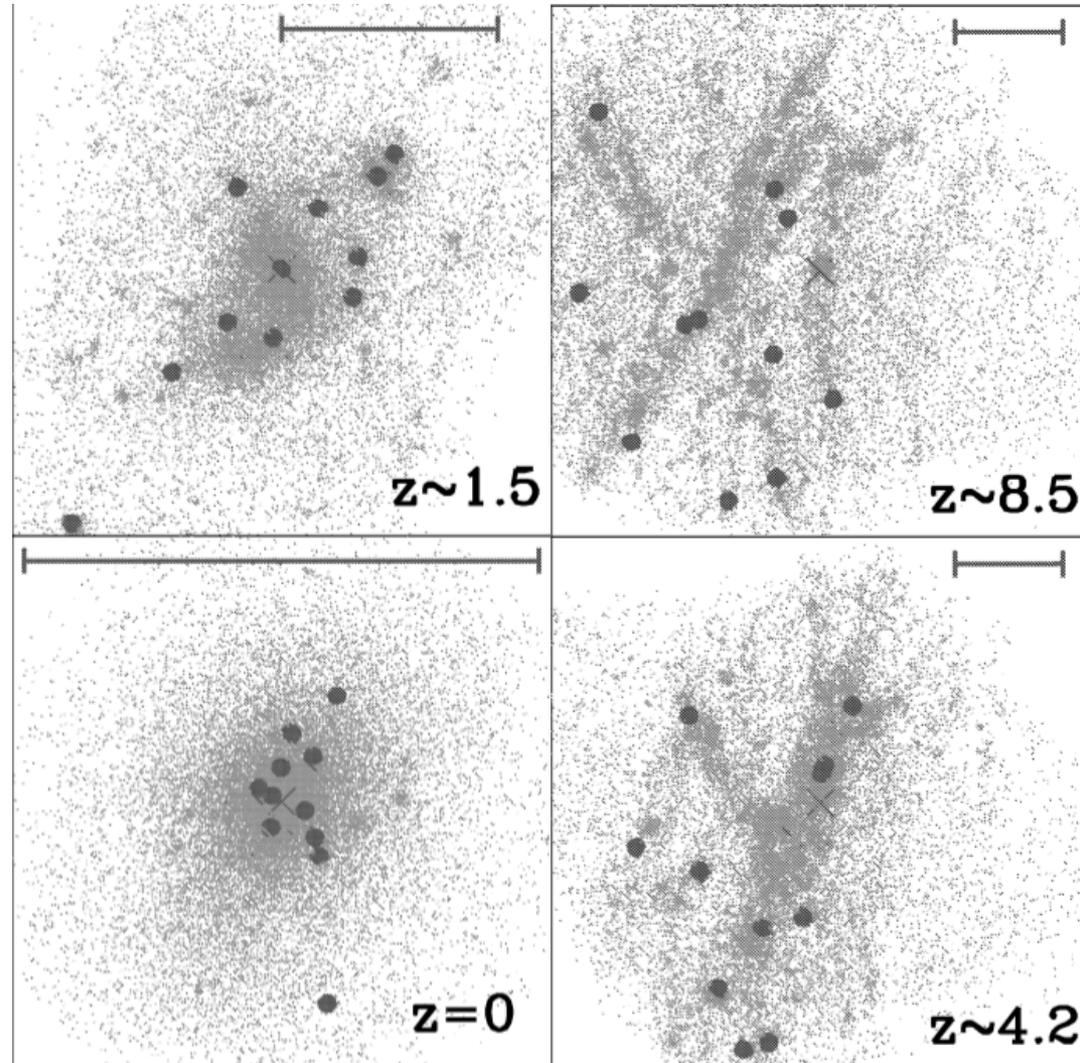
こんな感じ。。。

# 3. Interpretation

そもそも、明るいsatellitesのprogenitorは、1つか2つのcosmic web filamentsに沿ってaccreteしてきている。

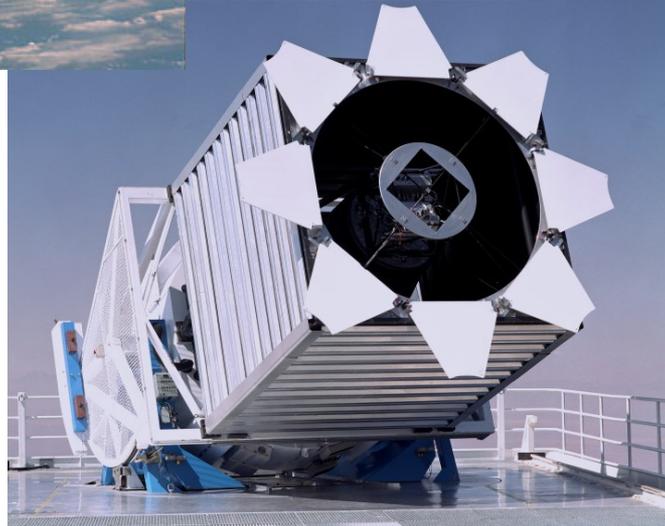
大きいサブハローは中心に近づいた時に受ける散乱が小さいため、filament方向に沿った分布は保存される。

小さいサブハローはその散乱が大きいため、広がった分布をしている。



## 4. Conclusion

- N体+セミアナを使ってsatellitesの非等方分布を再現できるか調べた。
- 最も明るい11個のsatellitesの分布を見るとdisk-likeな分布をしていることが分かり、MWのそれを再現できた。
- この非等方分布の起源として、most massiveな progenitorがfilamentに沿って降着している事が考えられる。
- Kroupa+ 2005の結果は、帰無仮説自体が間違っており、 $\Lambda$ CDM理論でもこの非等方性を再現することができる。



# 近年の観測結果

## 概要

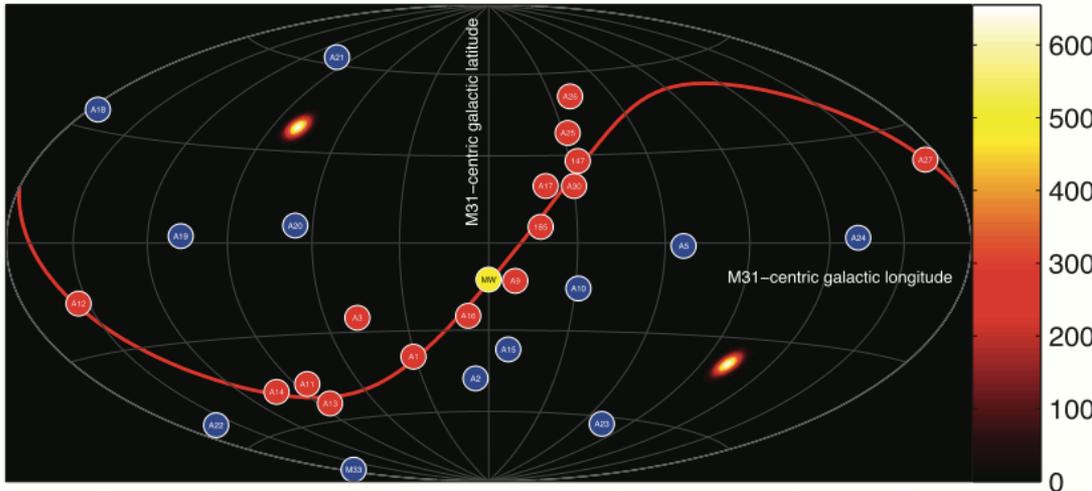
PAndASで得られたM31のdwarf satellitesの位置と速度を用いて、その空間分布と大局的な運動を調べた。

### その結果

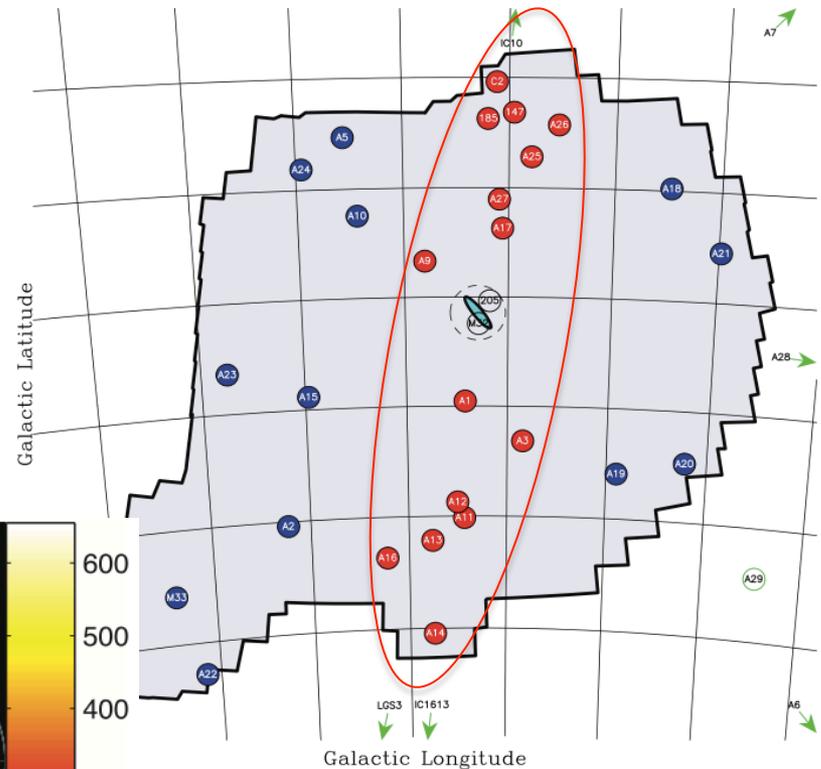
- (i) 約半分のsatellitesが同一平面上に分布しており、その構造は400kpcにもおよぶ大きな構造(厚さは $<14.1$ kpc)である事がわかった。
- (ii) また、その構造にあるsatellitesの運動を調べると大局的な回転運動をしていることがわかった。
- (iii) その平面構造の軸とMW diskの軸がほぼ垂直の関係にあることもわかり、これを現在の銀河形成の枠組みの中でどう解釈するかが問題になる。

# Results

M31のsatellitesの50%が、同一平面上にあり回転している。さらに、この平面とMWのdiskがほぼ垂直(81°)にあることがわかった。



Satellite galaxy positions as viewed from Andromeda



Map of the Andromeda satellite system

# Agustsson & Brainerd 2010

## 概要

SDSS DR7とMillennium Run Simulation(MRS)を用いて、isolated host galaxyのsatellitesの空間分布を調べた。

### その結果

- (i) red, massive, and low-SSFRなhost galaxyのsatellitesはhost galaxyのmajor axisに沿って分布する。一方でblue, less-massive, and high-SSFRなhost galaxyの場合はisotropicに分布する。
- (ii) red, massive, and low-SSFRなsatellitesはhost galaxyのmajor axisに沿って分布する。一方でblue, less-massive, and high-SSFRなsatellitesの場合はisotropicに分布する。
- (iii) red, blue satelliteがhostにaccreteしてくる時間を見ると、blueの方が最近accreteしていることがわかった。
- (iv) そのため、blue satelliteはred satelliteより遠くに分布しており、コンタミの影響が強くなる。この影響がanisotropyの度合いは低くしているが、それを考慮してもred satellitesのanisotropyまでにはならない。

# Sample selection

## Criteria

To host:  $r_p < 700 \text{ kpc}$  で他の銀河の2.5倍明るい、 $|dv| < 1000 \text{ km/s}$

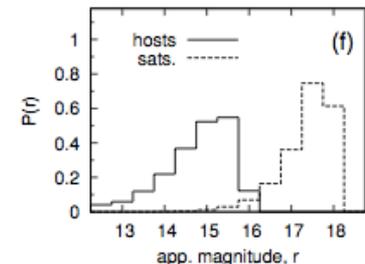
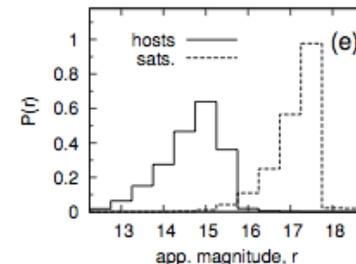
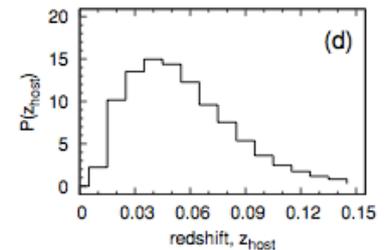
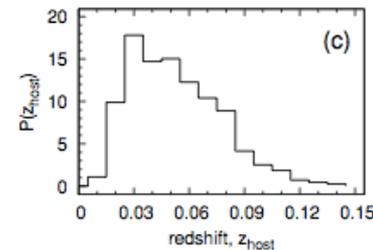
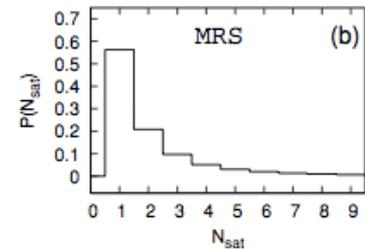
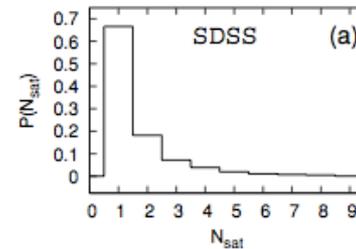
To satellites: hostより6.25倍暗い、 $r_p < 500 \text{ kpc}$ 、 $|dv| < 500 \text{ km/s}$

- satellitesのtotal luminosityがhostのそれより小さい
- 1つのhostあたりのsatellitesの数は9個まで

一方、MRSを用いてmock SDSS survey dataを作り、それを上記の条件で samplingする。

また、bulge-to-disk ratioからhost galaxyがellipticalかnon-elliptical (disk) かに分ける。

Galaxy Sample	SDSS		MRS	
	Hosts	Satellites	Hosts	Satellites
Primary sample (all galaxies)	4487	7399	70882	140712
Galaxies with known $M_{\text{stellar}}$	4412	7296	70882	140712
Galaxies with known SSFR	2421	4004	47157	79812
Red galaxies	2926	2334	37022	86178
Blue galaxies	1561	5065	33860	54534



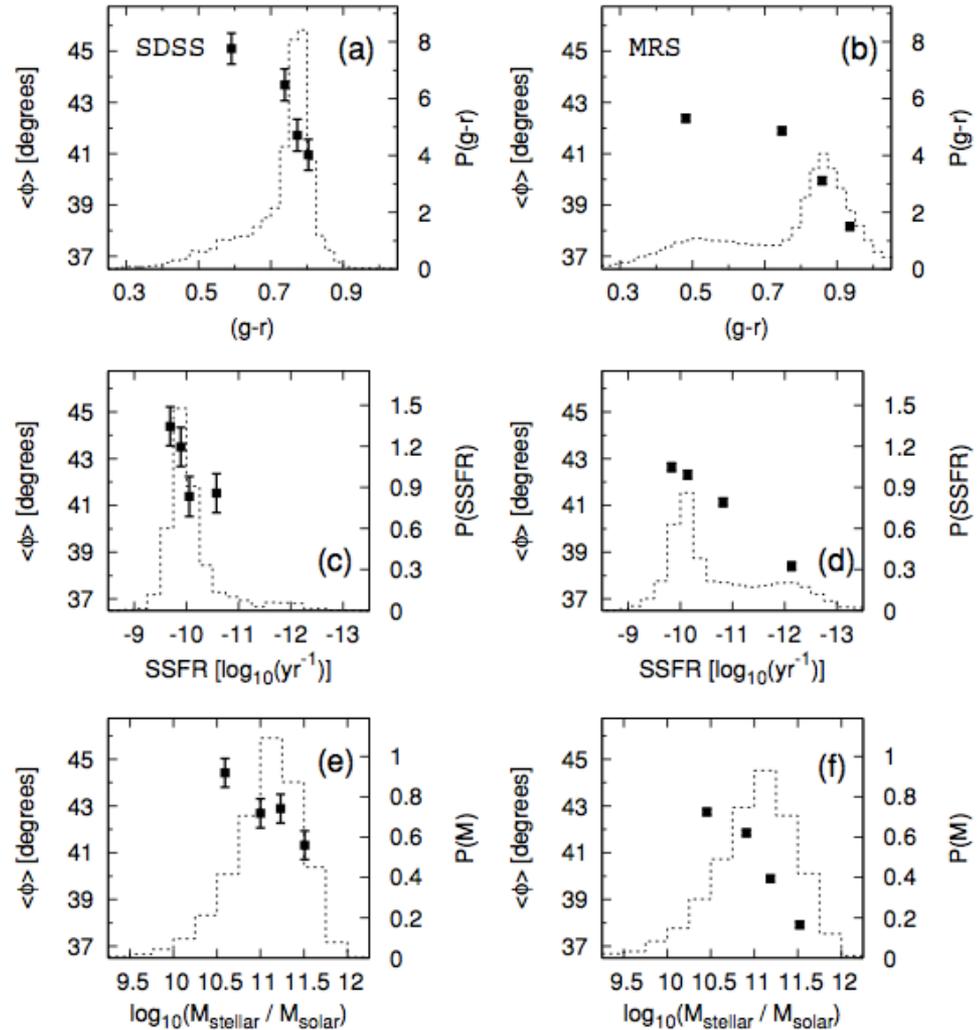
# Results(1)

(a),(b): より赤いhost galaxyは $\langle\Phi\rangle$ が小さい、即ちmajor axis方向にsatellitesが多く分布している。

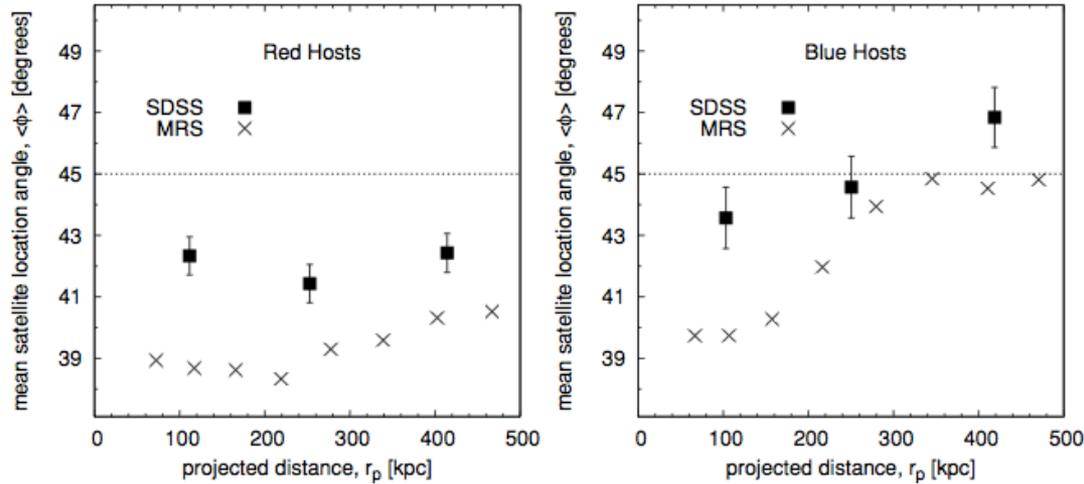
(c),(d): より星形成率が低いhost galaxyは $\langle\Phi\rangle$ が小さい。

(e),(f): よりmassiveなhost galaxyは $\langle\Phi\rangle$ が小さい。

MRSのほうがmore anisotropicなのは、コンタミのないデータで行なっているから。

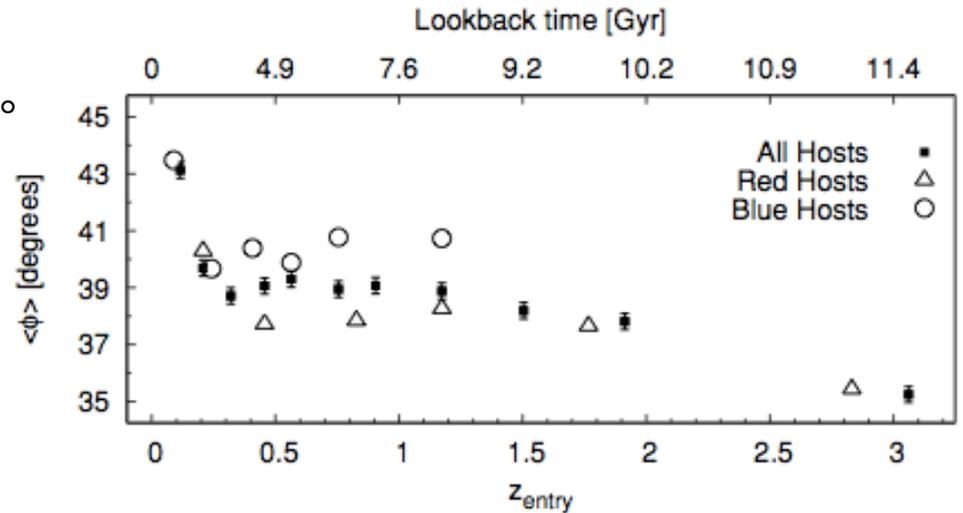


# Results(2)



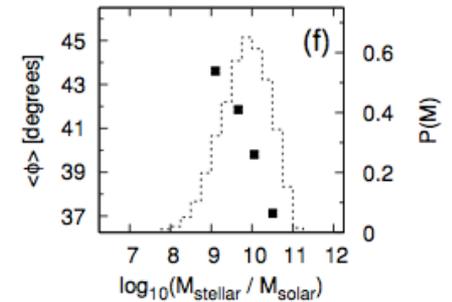
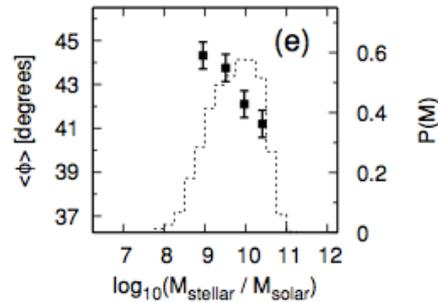
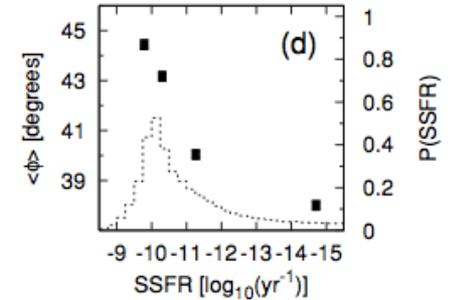
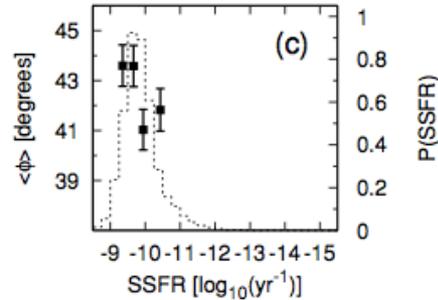
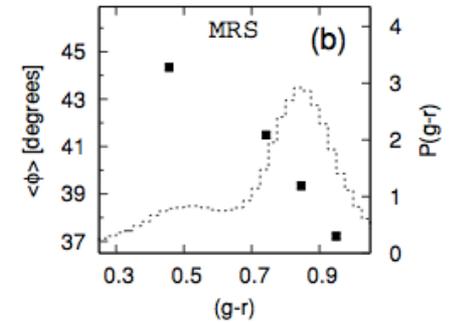
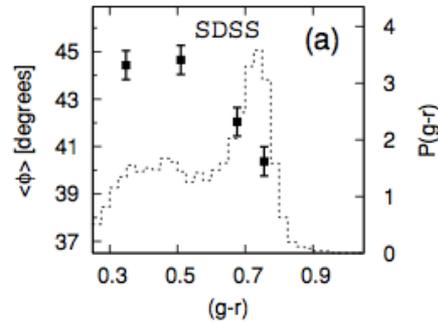
$\langle\Phi\rangle$  とprojected radiusの関係。  
**Red host**は $r_p$ に依存せず、major axis側に沿った分布をしている。  
**Blue host**は内側でその様な分布だが、外側でminor axis側に移動する。

$\langle\Phi\rangle$  とhost haloに落ちてくる時間との関係。  
**Red host**はより昔から降着している。これはred satelliteに対応している。  
**Blue host**は $z < 1.5$ から降着が始まっており、red hostに比べるとより最近である。



# Results(3)

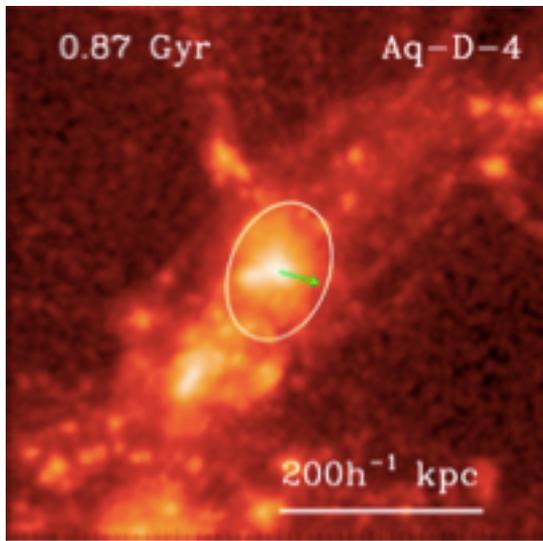
(a),(b): より赤いsatellitesは $\langle\Phi\rangle$ が小さい、即ちmajor axis方向にsatellitesが多く分布している。  
(c),(d): より星形成率が低いsatellitesは $\langle\Phi\rangle$ が小さい。  
(e),(f): よりmassiveなsatellitesは $\langle\Phi\rangle$ が小さい。



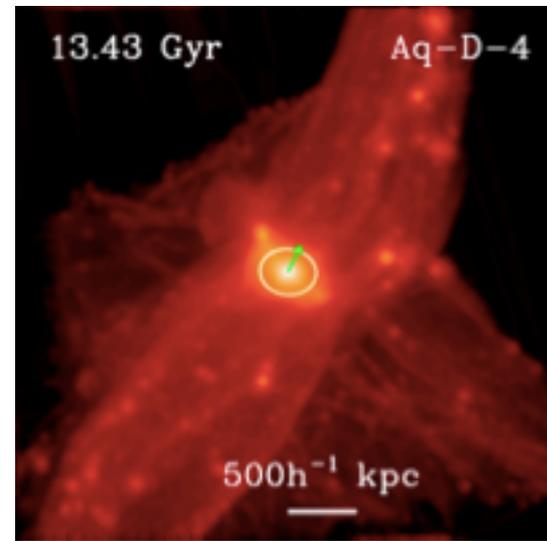
# Discussion

なぜ、host galaxy/satelliteがred, massive, low-SSFRだと、anisotropicになるのか？  
論文には特に書いてなかったの。。。私の考え。

たぶん、satelliteがaccreteしてくる時期が一番効いている？



宇宙初期



現在

過去のほうが、filament自体も成長していない為、accretionの指向性が強い。  
一方、最近ではfilamentが十分に成長しているため、isotropicにaccretionする可能性が高い。

# Summary

1. host galaxyがred, massive, low-SSFRだと、satellite distributionはmore anisotropically (along major axis of host galaxy)
2. satellite galaxyがred, massive, low-SSFRだと、satellite distributionはmore anisotropically (along major axis of host galaxy)
3. red host galaxyのsatellitesはrpに依存しないが、blue host galaxyのsatellitesはrpの関数で $\langle\Phi\rangle$ が大きくなる。若い銀河はaccreteしてくる銀河が多く、外側ほどisotropicな分布をしている。
4. blue satellitesはごく最近にaccreteしてきており、逆にred satellitesは昔にaccreteしている。よって、red satellitesの分布はmore anisotropicになる。
5. (SDSSの結果を再現するには、hostがellipticalがnon-elliptical (thin disk)かの区分けをしないとイケない。)

# Nierenberg et al. 2011

## 概要

GOODS field にある $0.1 < z < 0.8$ のearly-type galaxyに付随する satellitesの空間分布を調べた。

### その結果

- (i) Early-type galaxyはhostより5.5mag( $\Delta m = 5.5$ )だけ暗い satellitesを平均1.7個持つ。これは、MWのそれと一致している。
- (ii) satellitesの平均的なradial distributionはisothermal的になっている( $\gamma_p = -1.0$ )。
- (iii) satellite distributionはhighly anisotropicで、host galaxyのmajor axisに沿って( $\Phi < 44^\circ$ )分布している

# Host galaxy sample & subtraction

## Sampling

0.1 < z < 0.8 の early-type galaxy を select  
host と satellites の mag の 差 を  $\Delta m = \{5, 5.5, 6\}$  と 設定 し、  
satellite を サンプ リング ( $\Delta m = 5.5$  が S/N 最大)。

## Subtraction

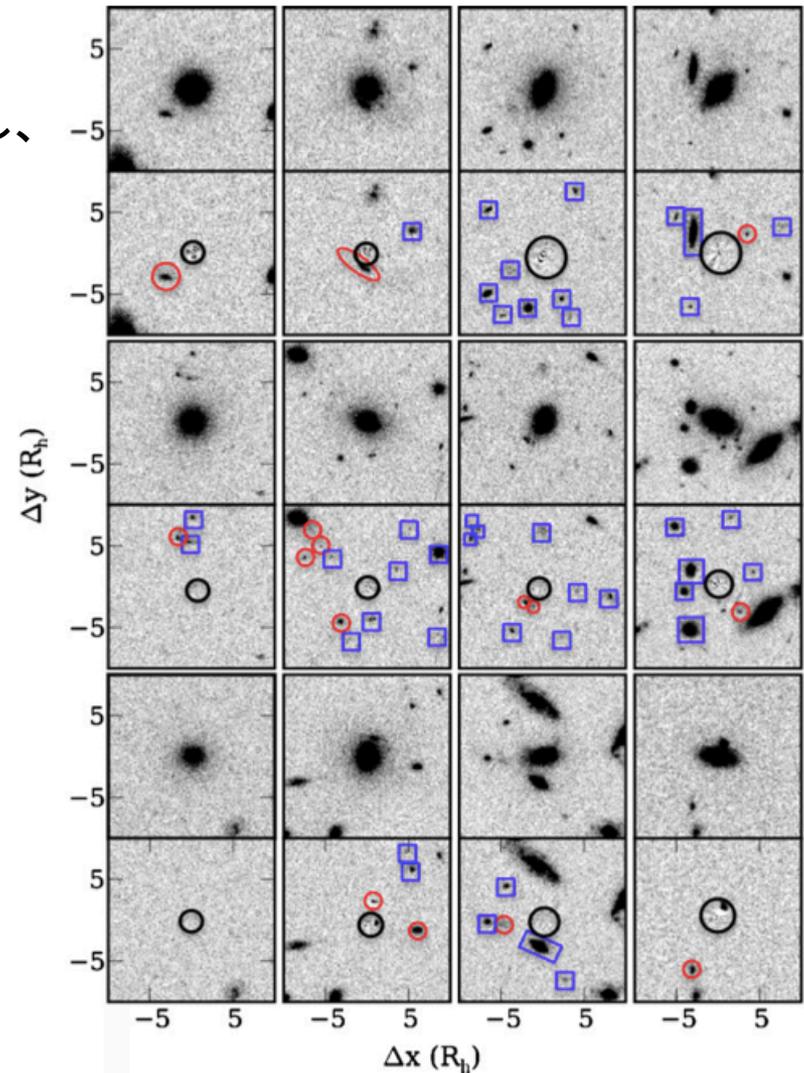
SEXTRACTOR の B-spline model を 用い て、host galaxy の light profile の モデル を 作り、それ を 用い て masking する (右 図)。

赤 (new) と 青 (already) が detect され た satellites  
host から の 距 離 が  $1.5R_h < R < 45R_h$  ( $R_h \sim 3\text{kpc}$ ) に ある  
satellites を select した。

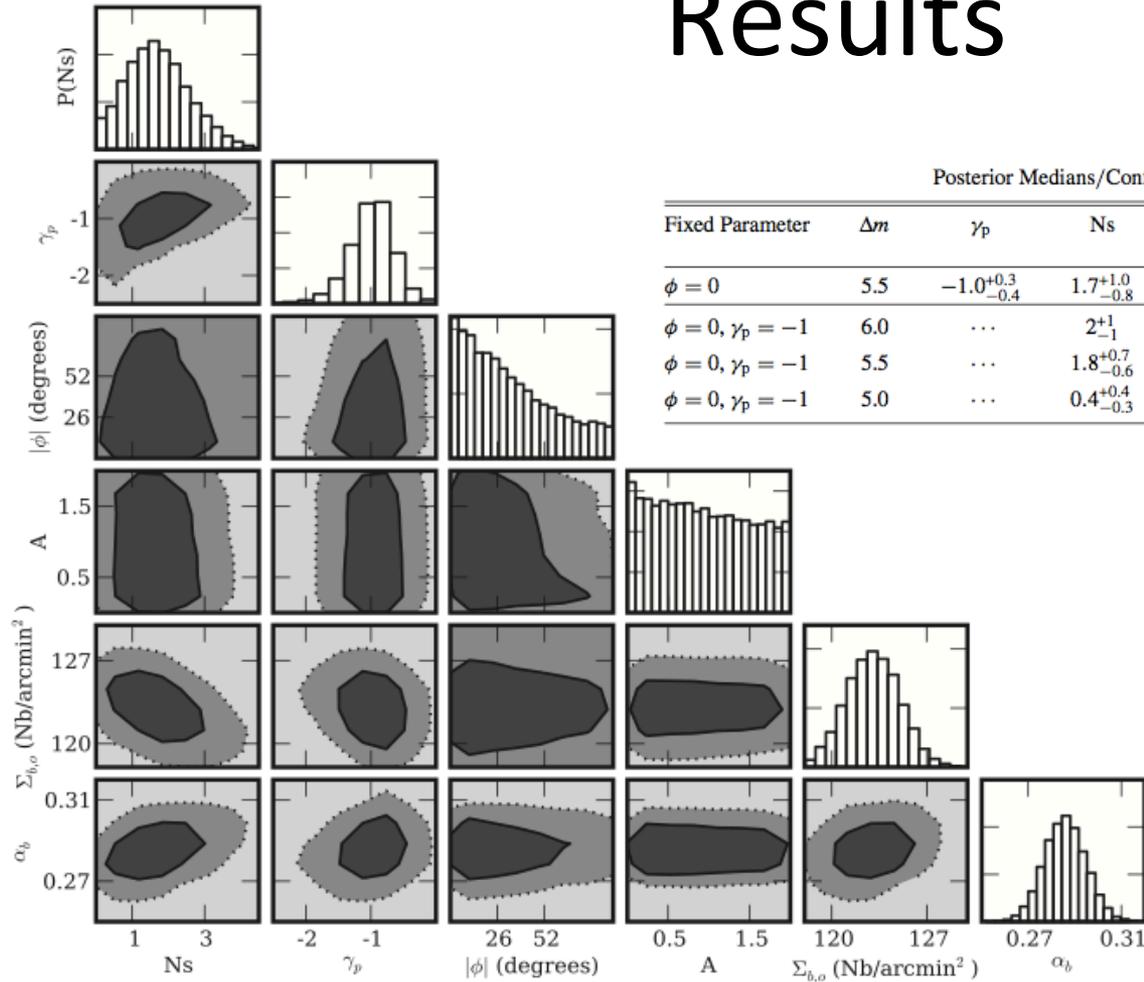
## Background/Foreground

Background/Foreground は Chen+2006 の  $\Lambda$ CDM simulation から 求 め る 方 法 を 用 い る。

$$\Sigma_{b,j} = \Sigma_{b,0} 10^{\alpha_b(m_{h,j} + \Delta m - m_{\text{lim}})} \quad \alpha = 0.28 \pm 0.01$$



# Results



**Table 3**  
Posterior Medians/Confidence Intervals with Fixed Parameters

Fixed Parameter	$\Delta m$	$\gamma_p$	Ns	A (68% Confidence Level)	$\Sigma_{b,o}(N_b/\text{arcmin}^2)$	$\alpha_b$
$\phi = 0$	5.5	$-1.0^{+0.3}_{-0.4}$	$1.7^{+1.0}_{-0.8}$	$>0.73$	$123^{+2}_{-2}$	$0.286^{+0.009}_{-0.009}$
$\phi = 0, \gamma_p = -1$	6.0	...	$2^{+1}_{-1}$	$>0.83$	$124^{+2}_{-2}$	$0.285^{+0.009}_{-0.009}$
$\phi = 0, \gamma_p = -1$	5.5	...	$1.8^{+0.7}_{-0.6}$	$>0.72$	$124^{+2}_{-2}$	$0.288^{+0.008}_{-0.008}$
$\phi = 0, \gamma_p = -1$	5.0	...	$0.4^{+0.4}_{-0.3}$	$>0.73$	$124^{+2}_{-2}$	$0.281^{+0.008}_{-0.008}$

(i) Early-type galaxyはhostより5.5mag( $\Delta m=5.5$ )だけ暗いsatellitesを平均1.7個持つ。これは、MWのそれと一致している。

(ii) satellitesの平均的なradial distributionはisothermal的になっている( $\gamma_p=-1.0$ )。

(iii) satellite distributionはhighly anisotropicで、host galaxyのmajor axisに沿って( $\phi < 44^\circ$ )分布している

# Minor merger rate between $0.1 < z < 0.8$

- Minor merger rateはhost haloとsubhaloのvirial massに依存する (Fakhouri+ 2010)
- 今回のhost galaxy sampleの星質量は  $M^* \sim 10^{10.5} M_{\text{sun}}$   
これは  $M_{\text{halo}} \sim 10^{12} M_{\text{sun}}$ に対応 (Behroozi+ 2010)
- 一方、satellitesの星質量は星のM/Lから  $M^* \sim (0.6-2) 10^8 M_{\text{sun}}$   
これは  $M_{\text{halo}} \sim (2-8) 10^8 M_{\text{sun}}$ に対応 (Behroozi+ 2010)
- Fakhouri+2010のmerger rateの計算式を用いると、、、

60%のhost galaxyが $0.1 < z < 0.8$ の間に0.4-0.5回のmergerを経験していることになった。

やはり、minor mergerはearly-type galaxyの進化に重要な役割を担っているのかもしれない。。。

# 総まとめ

- ✓ 近傍銀河(MW, M31)では、diskに対してminor axis方向にpreferentialな分布をする。
  - ✓ 遠方銀河( $0.01 < z < 0.8$ )では、early-type galaxyのmajor axis方向にpreferentialな分布をする。
  - ✓ Simulationでは、host dark haloのmajor axis方向に、satelliteは分布する。
- 
- そもそも、MWやM31は本当にその様な分布なのか？ (観測的バイアスがないか？)
  - diskとearly-typeでの違いは本当なのか？ (high-zでこの2つを同定できるか？)
  - 実際の銀河でのdark haloの質量構造はどうなっているのか？ (Hayashi & Chiba 2013 in prep)
  - さらにhigh-zの銀河ではどうなっているのか？ (satelliteの分布まで議論できるか？)
  - filament構造、cold accretion、minor mergerとの関連性を明確にできないか？
  - とにかく、このあたりの議論でプロポーザルを書きたい！

究

## 2. Disk distribution of MW satellites

satellite number	$D$ [kpc]	$eD$ [kpc]	$l$ [deg]	$b$ [deg]	$R$ [kpc]	Name	$R_{\text{cut}}$ [kpc]	$\Delta$ [kpc]	$\Delta/R_{\text{cut}}$	$D_P$ [kpc]	$\Delta_2$ [kpc]
1(1)	24	2	5.6	-14.1	16	Sgr	-	-	-	-	-
2(2)	50.8	2.2	280.5	-32.9	50	LMC	-	-	-	-	-
3(-)	59.7	2.2	302.8	-44.3	57	SMC	-	-	-	-	-
4(-)	66	3	105.0	+44.8	68	UMi	68	2.5	0.04	0.6	23
5(3)	79	4	287.5	-83.2	79	Sculptor	79	11.8	0.15	3.0	27
6(4)	82	6	86.4	+34.7	82	Draco	82	11.0	0.13	3.2	28
7(5)	86	4	243.5	+42.3	89	Sextans	89	13.5	0.15	1.2	30
8(6)	101	5	260.1	-22.2	103	Carina	103	14.2	0.14	1.4	34
9(7)	138	8	237.1	-65.7	140	Fornax	140	23.9	0.17	2.0	47
10(8)	205	12	220.2	+67.2	208	LeoII	208	23.2	0.11	1.9	69
11(9)	250	30	226.0	+49.1	254	LeoI	254	26.4	0.10	1.9	85
12(10)	445	30	272.2	-68.9	445	Phoenix	445	32.0	0.07	2.1	148
13(11)	490	40	25.3	-18.4	483	NGC 6822	483	86.4	0.18	3.5	161
14(12)	690	100	196.9	+52.4	695	Leo A	695	100	0.14	3.5	232
15(13)	880	40	322.9	-47.4	875	Tucana	875	123	0.14	3.5	292
16(14)	955	50	94.8	-43.5	956	Pegasus	956	159	0.17	3.3	319

fittingしたplaneの高さ方向のズレ

isotropicに発生させたsatellitesを用いた場合のズレ