

<論文紹介>

What are protoclusters?

--Defining high-redshift galaxy clusters and protoclusters
(Muldrew+2015, MNRAS, 452, 2528)

担当: 斎藤 智樹 @Journal Club, 04 Dec. 2015

Abstract

We explore the structures of protoclusters and their relationship with high-redshift clusters using the Millennium Simulation combined with a semi-analytic model. We find that **protoclusters are very extended, with 90 per cent of their mass spread across $\sim 35/h$ Mpc comoving at $z=2$ (~ 30 arcmin)**. The ‘main halo’, which can manifest as a high-redshift cluster or group, is only a minor feature of the protocluster, containing less than 20 per cent of all protocluster galaxies at $z=2$. Furthermore, many protoclusters do not contain a main halo that is massive enough to be identified as a high-redshift cluster. **Protoclusters exist in a range of evolutionary states at high redshift, independent of the mass they will evolve to at $z=0$** . We show that the evolutionary state of a protocluster can be approximated by the mass ratio of the first and second most massive haloes within the protocluster, and the $z=0$ mass of a protocluster can be estimated to within 0.2 dex accuracy if both the mass of the main halo and the evolutionary state are known. We also investigate **the biases introduced by only observing star-forming protocluster members within small fields**. The star formation rate required for line-emitting galaxies to be detected is typically high, which leads to the artificial loss of low-mass galaxies from the protocluster sample. This effect is stronger for observations of the centre of the protocluster, where the quenched galaxy fraction is higher. This loss of low-mass galaxies, relative to the field, distorts the size of the galaxy overdensity, which in turn can contribute to errors in predicting the $z=0$ evolved mass.

- **protoclusterは非常に広がっている**

- 90%の質量が $\sim 35/h$ cMpc@ $z=2$ まで分布。支配的な‘main halo’を持つものは少数。

- **様々な進化過程のものが存在する**

- 進化過程を考慮しないと質量の見積もりを間違える。M2/M1等で定量化。

- **狭い視野で狭帯域フィルターの観測をするとバイアスがかかる**

- low-mass 側をかなり落とす。quenched fraction の高い中心付近では影響大。

Introduction

- LCDMの枠組みでは、階層的な構造形成が行われる。その結果生まれる銀河団(cluster)は、宇宙で最大の構造体である ($M > 10^{14} M_{\odot}$)。
- 遠方($z > 1.5$)へ行くと、その先祖は今日ほど大きくなり、小規模で重力的にも束縛されていない:
“protocluster” --- その定義は...
 - $z=0$ で銀河団にmergeするハロー - 全て
 - それらのうち最も大質量なハロー → 観測しやすい
- protocluster/遠方銀河団は、X線・S-Z効果等の他、photo-z でも同定されてきている。(e.g., Gobat+11; Stanford+12; Zeimann+12; Fassbender+14; Andreon+14)

Introduction

- 銀河団は比較的新しい時代($z < 1$)で大きく成長したと考えられている (e.g., Chiang+13) → 遠方ではメンバー銀河のかなりの部分は main halo にいない。
- ...そんなわけで protocluster 探しは難しい。
- 最も成功している手法: 電波銀河周辺を観測する (e.g., Le Fevre+96; Pentericci+00; Best+03; Venemans+07; Galametz +10,13; Hatch+11a; Wylezalek+13; Cooke+14) → 最大質量銀河の部類。でも銀河団の中心とは限らない。
- もう一つの手法: photo-z 等を使う。medium-band や narrowband でもいける。aperture window のサイズと protocluster 質量の相関がありそうだ。 (Chiang+13; Muzzin+13; Chiang+14; Haas+12; Muldrew+12)

Methods

基本はMillennium Sim.とSAMの組み合わせ。主として $z=2$ を見る。

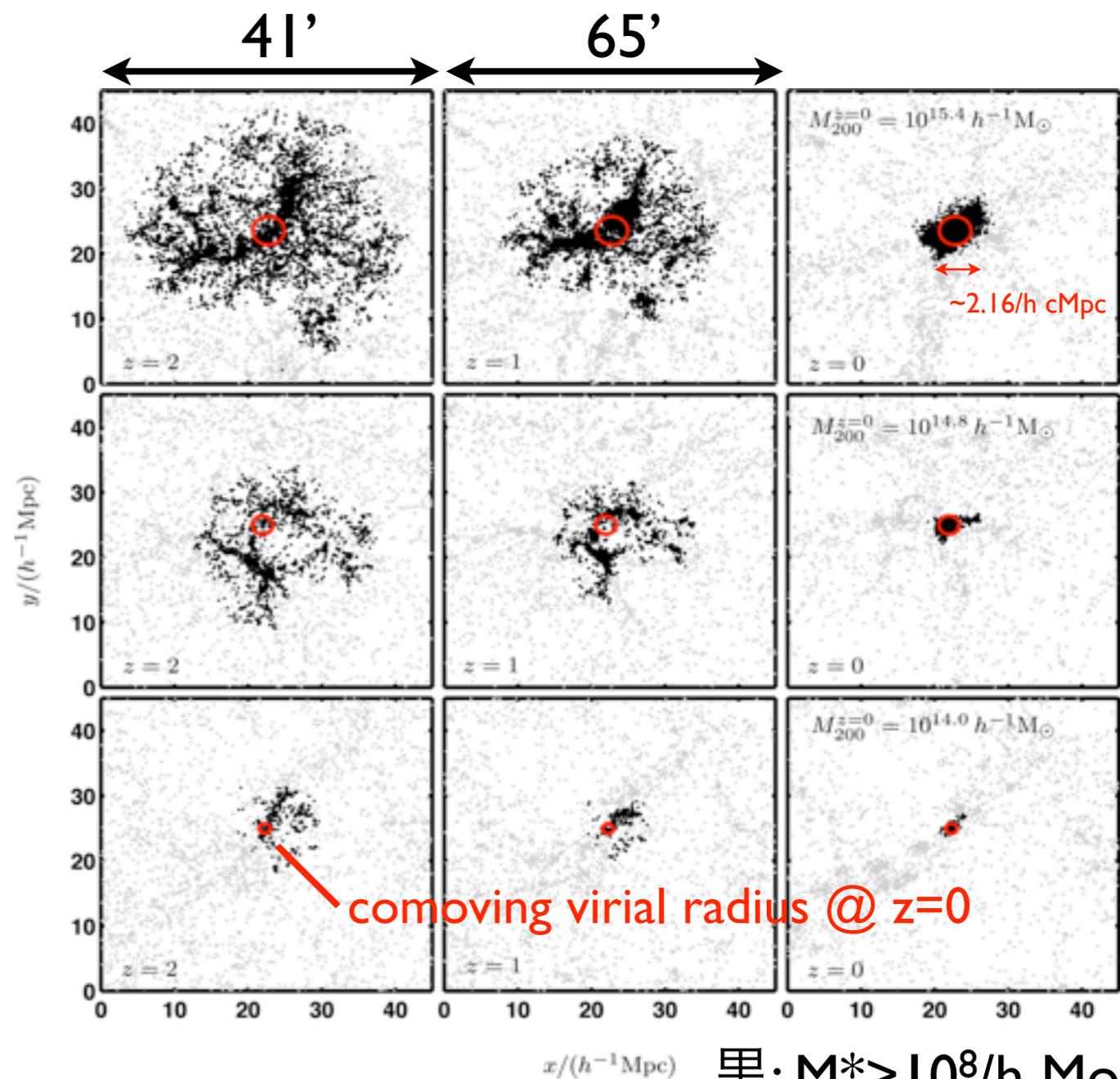
- 出発点: N-body w/ 2160^3 particles in $(500/h \text{ cMpc})^3$ box (Springel+2005)
- ハローはまずFoFで同定、20粒子以上のハローを使って merger tree を組み立てる
- SAM (Guo+2011) を使って銀河を配置。(gas infall, shock heating, cooling, SF, stellar evolution, SN feedback, BH growth & feedback, metal enrichment, mergers, and tidal/ram-pressure strippingを考慮) うち $M^* > 10^8/h \text{ Mo}$ の銀河 を使う。
- $M_{200} > 10^{14}/h \text{ Mo}@z=0$ のハローをclusterとして1938個同定。FoF ハローのメンバーをcluster memberとする。
- merger treeを遡ってclusterになるものをprotocluster memberとする。
(e.g., 1938 protoclusters @ $z=2$, consisting of 639253 haloes w/ central galaxies of $M^* > 10^8/h \text{ Mo}$)

Results:

protocluster 銀河の分布

z=2 protocluster を見ると:

- z=0 clusterよりかなり広がっている。(e.g., $\sim 45/h$ cMpc, $\sim 15/h$ Mpc for $M_{200} = 10^{15.4}/h$ Mo @z=0)
- single collapsed halo とはかけ離れた複雑な構造を持つ。
- 典型的な狭帯域撮像 FoV (e.g., 2.5': Cooke+14, 7': Koyama+13) で見えるのはごく中心のみ。



黒: $M^* > 10^8/h$ Mo

灰: $M^* < 10^8/h$ Mo

「これまでの観測は、cluster全域を見ていない！」

Results:

protocluster 銀河の分布

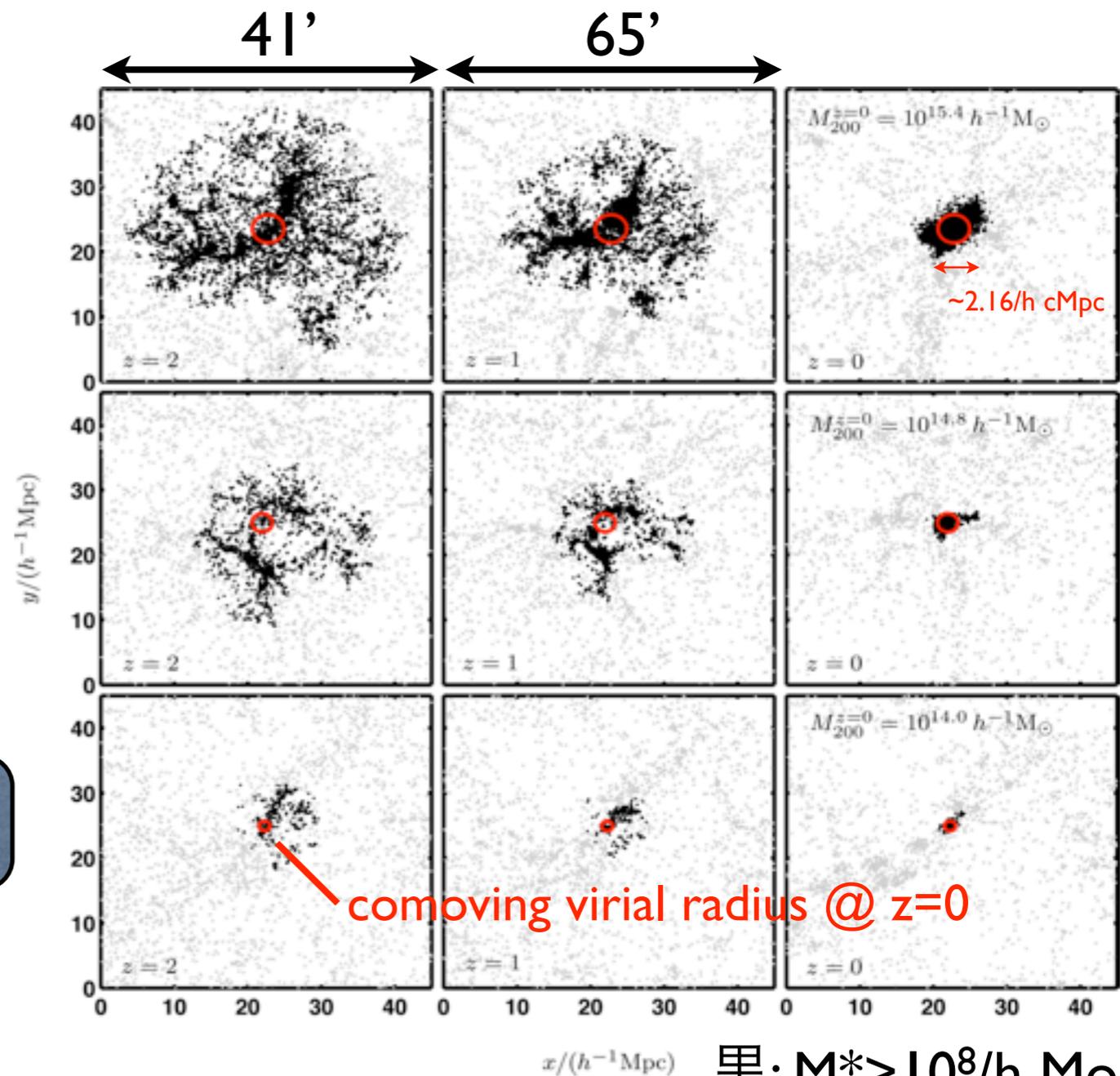
z=2 protocluster を見ると:

- z=0 clusterよりかなり広がっている。(e.g., $\sim 45/h$ cMpc, $\sim 15/h$ Mpc for $M_{200} = 10^{15.4}/h$ Mo @z=0)
- single collapsed halo とはかけ離れた複雑な構造を持つ。

“H α @z~2限定”

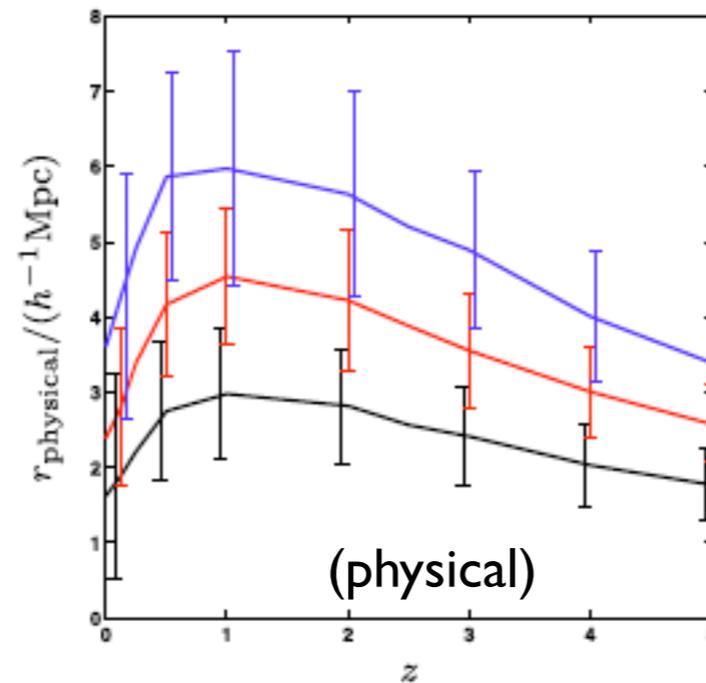
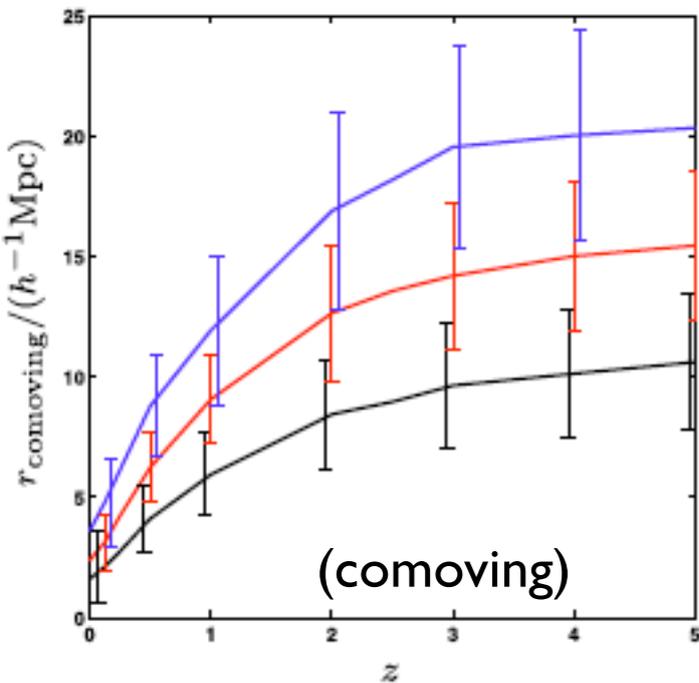
- 典型的な狭帯域撮像 FoV (e.g., 2.5': Cooke+14, 7': Koyama+13) で見えるのはごく中心のみ。

「これまでの観測は、cluster全域を見ていない！」



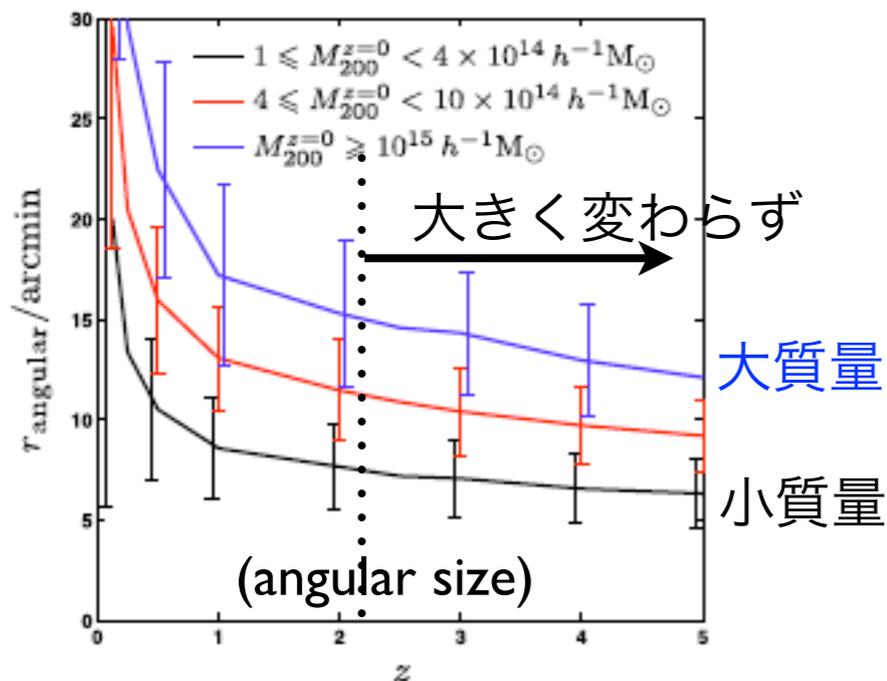
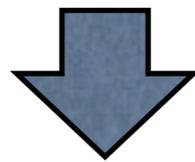
分布:もう少し詳しく

redshift evolution of the cluster size



- 「大質量銀河団は昔も大きなハローだった」 → まあ、当然
- Comoving: 単調減少。でも遠方では一定に近づく。
- Physical: $z \sim 1$ まで Hubble flow に乗って膨張。その後急速に収縮。
- Angular size: $z \sim > 2$ とかではほぼ一様。

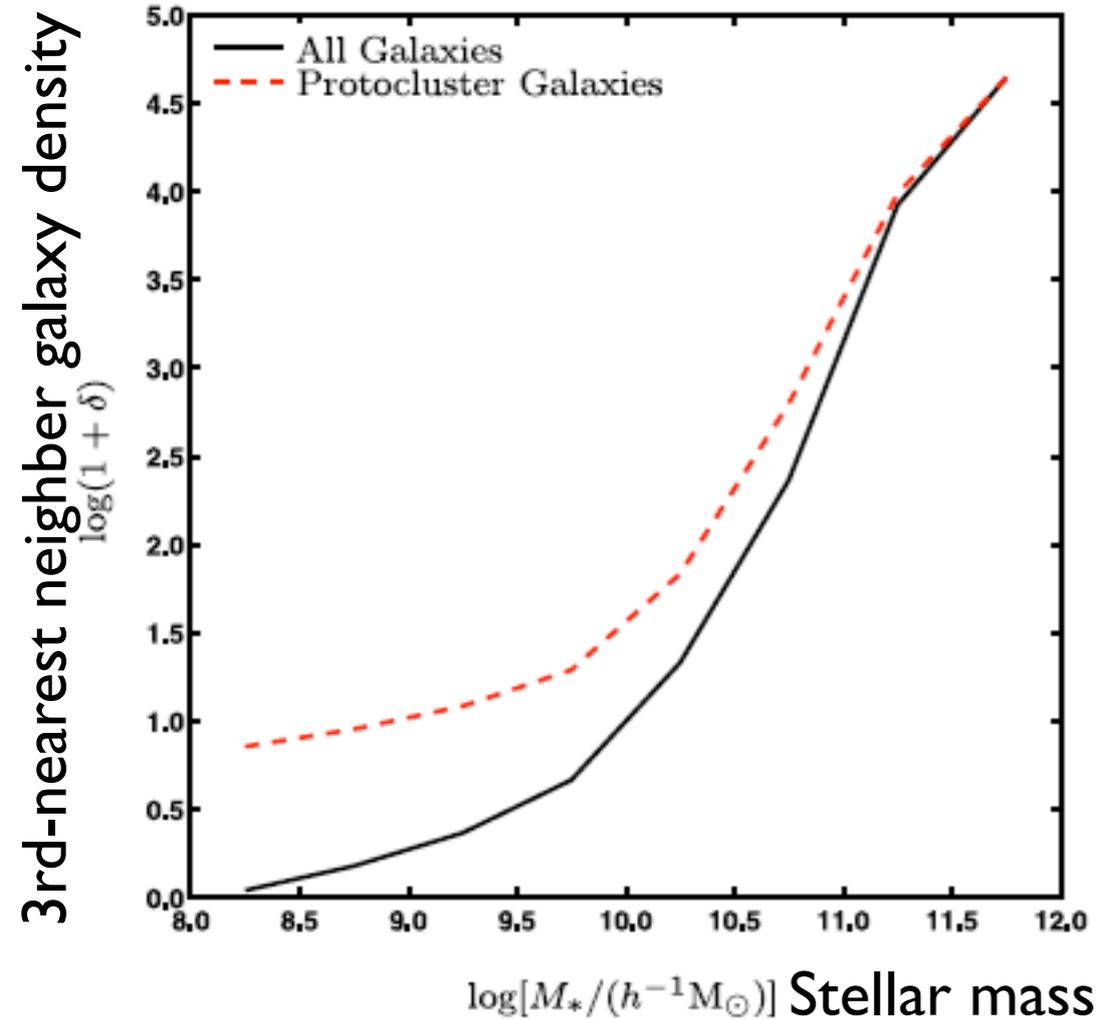
90% stellar-mass enclosed radius vs. z



Protocluster searchに当たっては:

- 質量に応じて aperture を調整すべし。
(赤方偏移には依存せず)
- Field sample は中心から $20'$ 以上離れた場所から取るべし。(それ以下ではメンバー銀河が入る)

Measuring the environment

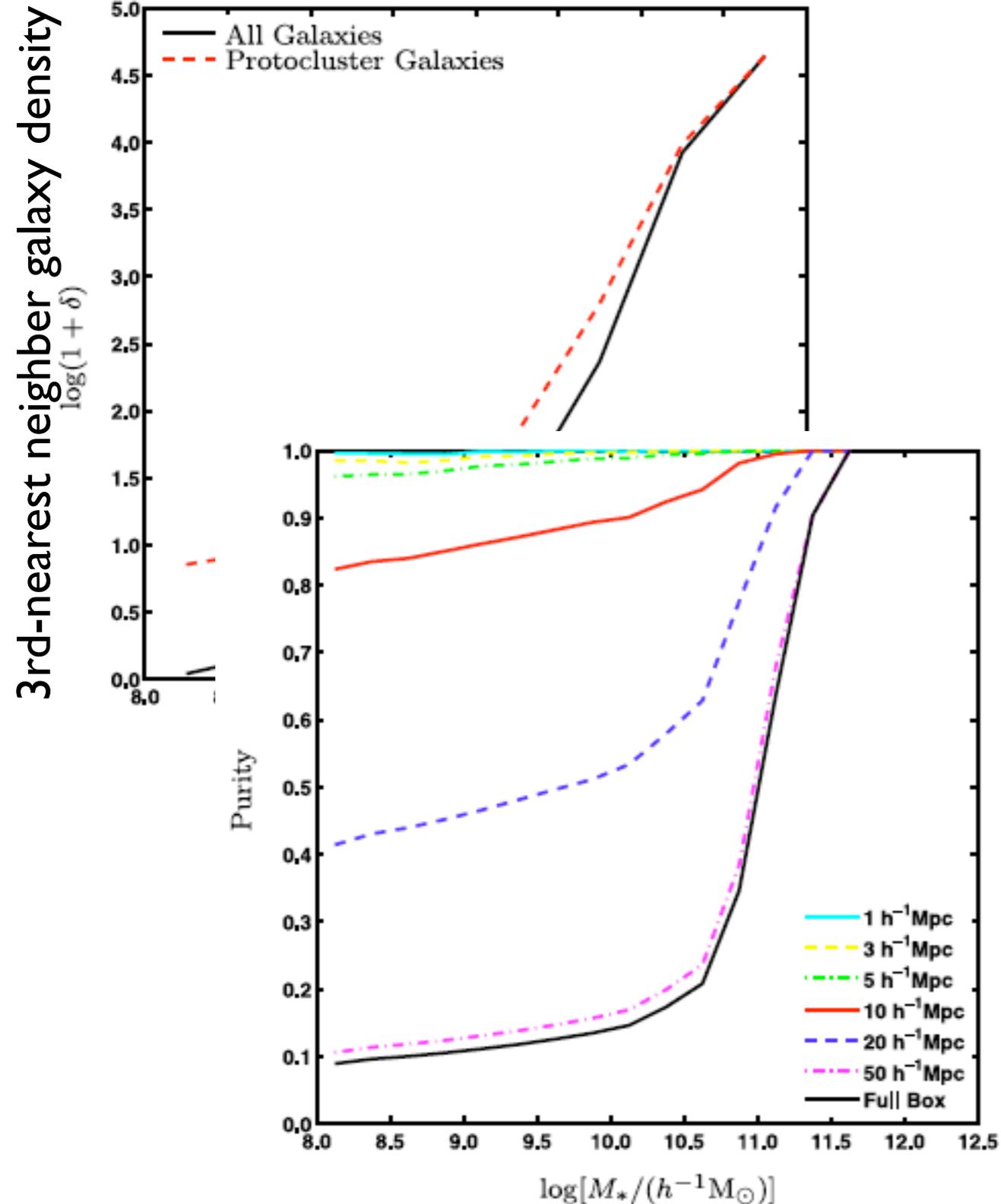


「Protoclusterを探すコツ」

- 遠方では大質量銀河は大多数がprotoclusterに存在する。(上図)
→大質量銀河周辺の小質量銀河の環境を測るとprotoclusterが同定できる。
- 広い視野 (aperture) を用いると、field 銀河のコンタミも増える。(下図)
- H α narrowband の撮像はコンタミ低い
- 視野を広くするとfieldの小質量銀河が数多く紛れ込む。

Cluster の全体像を捉えるのは重要。でも注意。

Measuring the environment



「Protoclusterを探すコツ」

- 遠方では大質量銀河は大多数がprotoclusterに存在する。(上図)
→大質量銀河周辺の小質量銀河の環境を測るとprotoclusterが同定できる。
- 広い視野 (aperture) を用いると、field 銀河のコンタミも増える。(下図)
 - H α narrowband の撮像はコンタミ低い
 - 視野を広くするとfieldの小質量銀河が数多く紛れ込む。

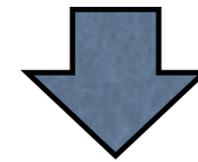
Cluster の全体像を捉えるのは重要。でも注意。

(ここから「Protoclusterの物理」)

Relationship between a protocluster and its main halo

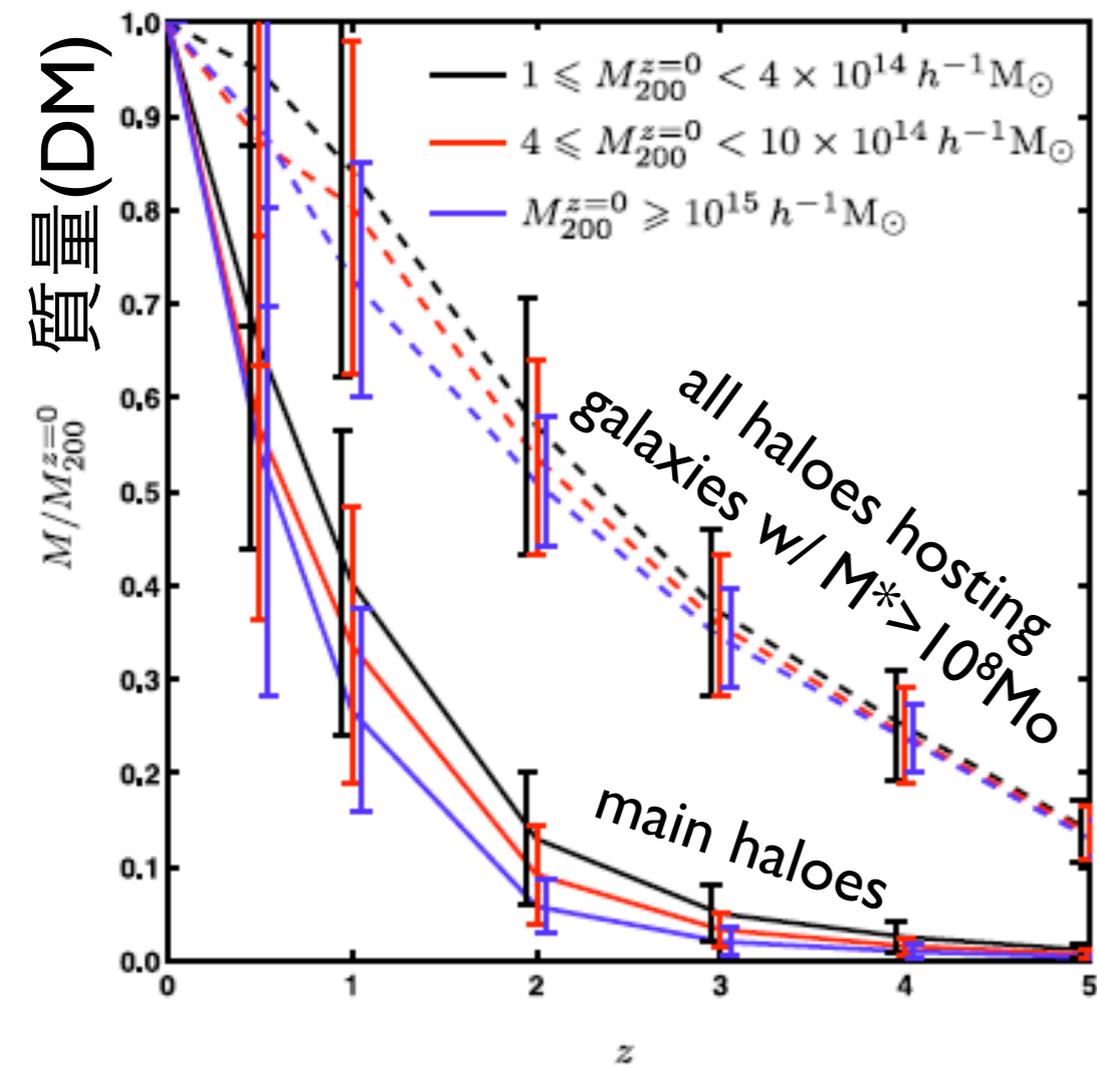
まずはmain haloを定義

「Protoclusterのハロ-のうち最大質量のもの」



その進化を見てみよう。

- Main halo の成長は protocluster halo全体より遅い。
- 大質量ハロ-は僅かに遅い時期に成長。
- $z=2$ で大質量ハロ-の質量は $z=0$ 時点の約10%、小質量ハロ-は約20%。
- $z < 1$ で大質量ハロ-は非常に早く成長。
- 銀河数の進化: main halo は単調増加。それ以外は $z \sim 3$ で極小。→merge to main halo?

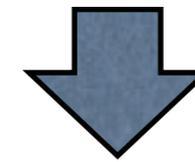


(ここから「Protoclusterの物理」)

Relationship between a protocluster and its main halo

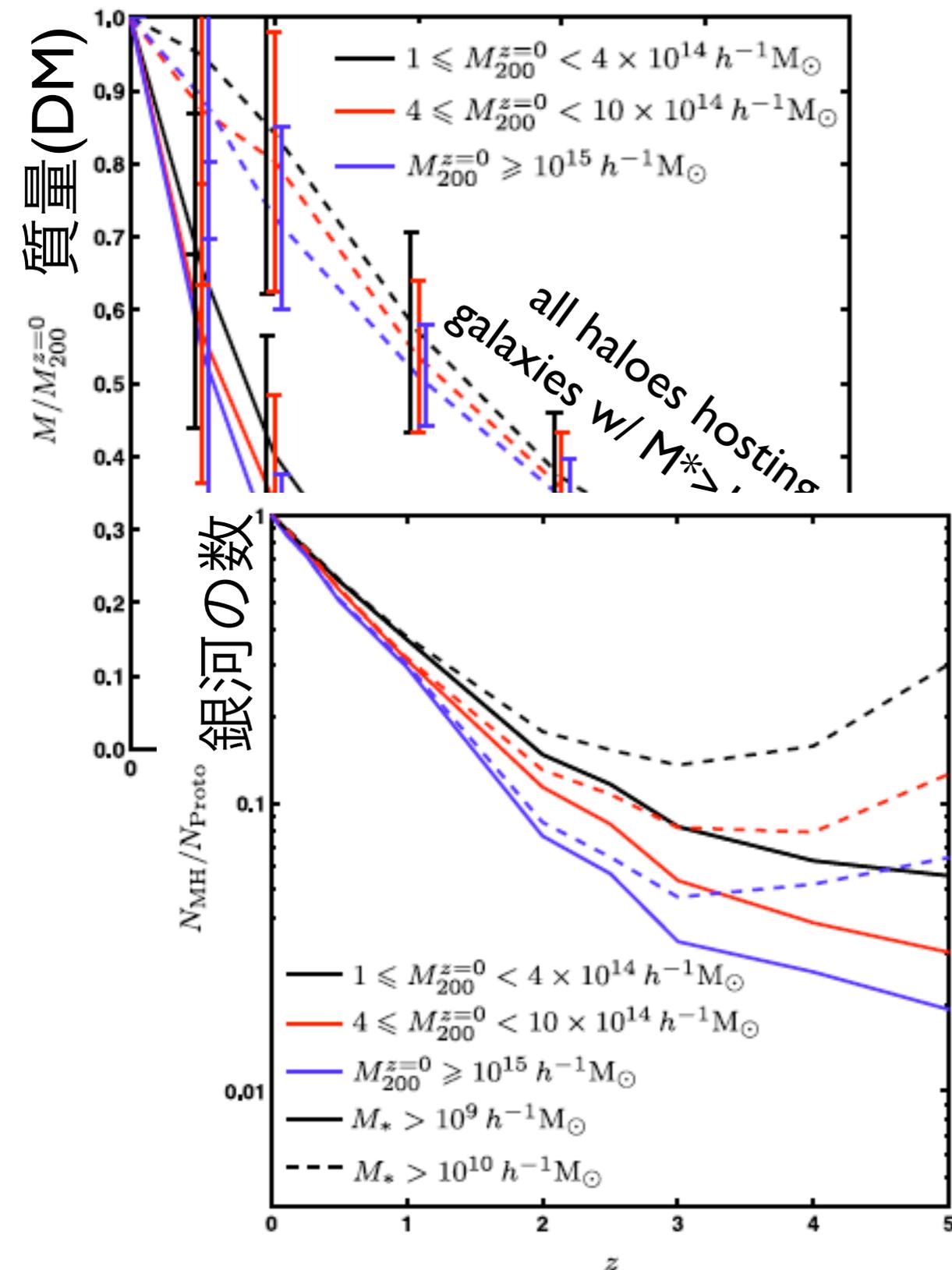
まずはmain haloを定義

「Protoclusterのハローのうち最大質量のもの」

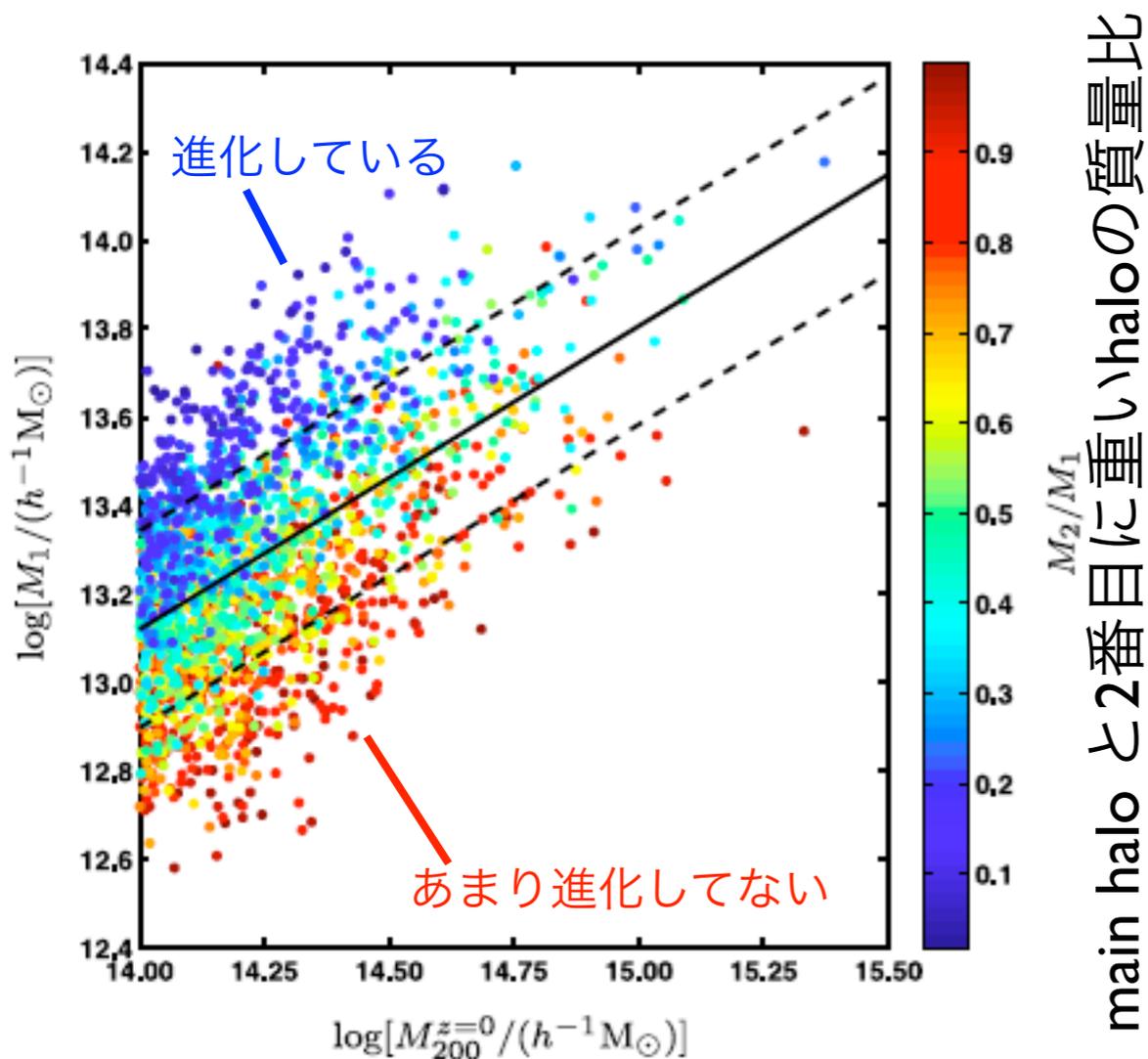


その進化を見てみよう。

- Main halo の成長は protocluster halo全体より遅い。
- 大質量ハローは僅かに遅い時期に成長。
- $z=2$ で大質量ハローの質量は $z=0$ 時点の約10%、小質量ハローは約20%。
- $z < 1$ で大質量ハローは非常に早く成長。
- 銀河数の進化: main halo は単調増加。それ以外は $z \sim 3$ で極小。→merge to main halo?



Estimating the $z=0$ cluster mass



「Main halo の質量が求められたとして $z=0$ の時点での質量を知りたい。」

- 第一義的には Main halo mass と $z=0$ cluster mass は相関するはず。(上図)
- まあ当然。でも scatter が大きい。(黒の実践: best fit for median)
- 色んな進化段階の protocluster が混ざっている。 M_2/M_1 を指標にできそう。(色の違い)
- 進化段階 (M_2/M_1) の違いを考慮して相関を取ると、より精度よく $z=0$ の質量を見積もれる。(下図)

Cluster が「進化」しているとは:

「ひとつにまとまっている」

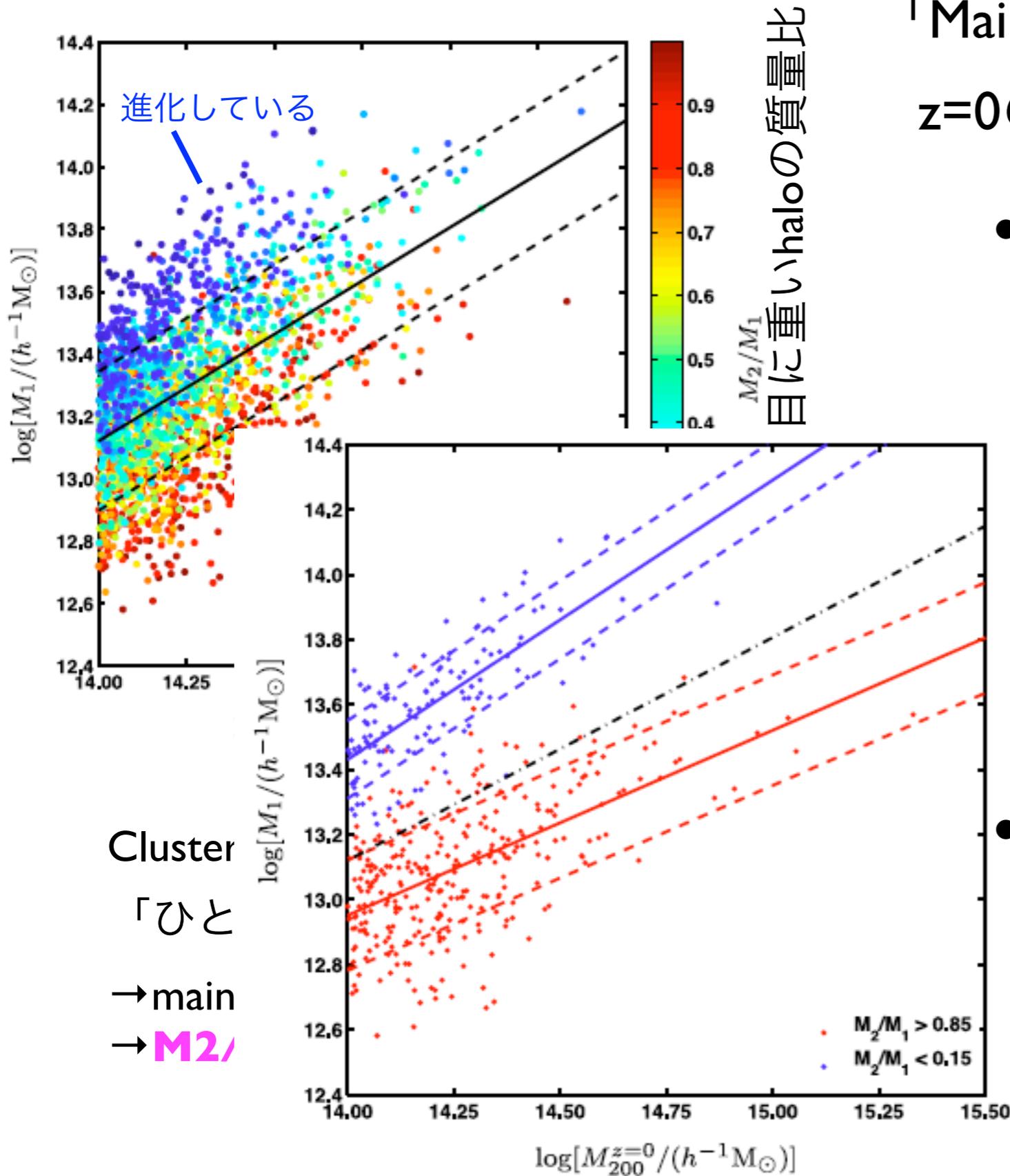
→ main halo dominates the cluster

→ **M_2/M_1 が小さい**

但し、観測的には結構難しい

Estimating the $z=0$ cluster mass

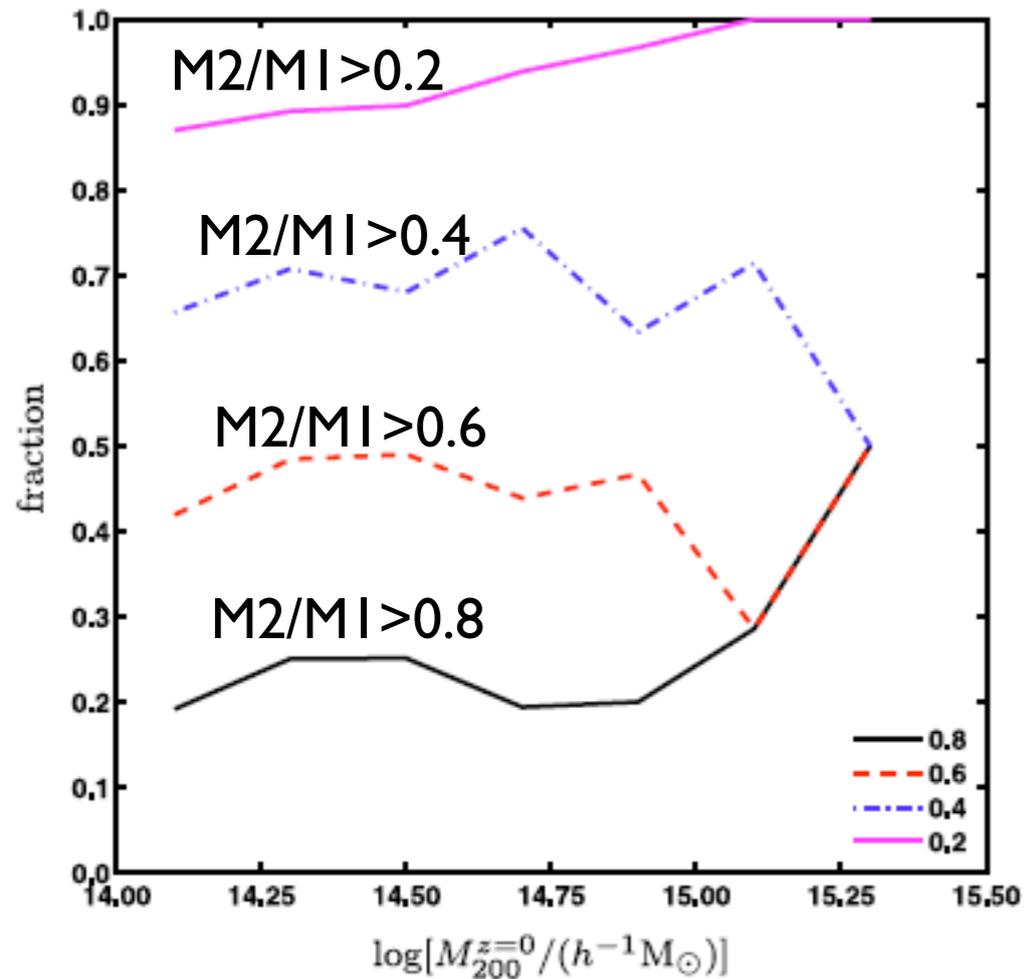
「Main halo の質量が求められたとして $z=0$ の時点での質量を知りたい。」



- 第一義的には Main halo mass と $z=0$ cluster mass は相関するはず。(上図)
- まあ当然。でも scatter が大きい。(黒の実線: best fit for median)
- 色んな進化段階の protocluster が混ざっている。 M_2/M_1 を指標にできそう。(色の違い)
- 進化段階 (M_2/M_1) の違いを考慮して相関を取ると、より精度よく $z=0$ の質量を見積もれる。(下図)

但し、観測的には結構難しい

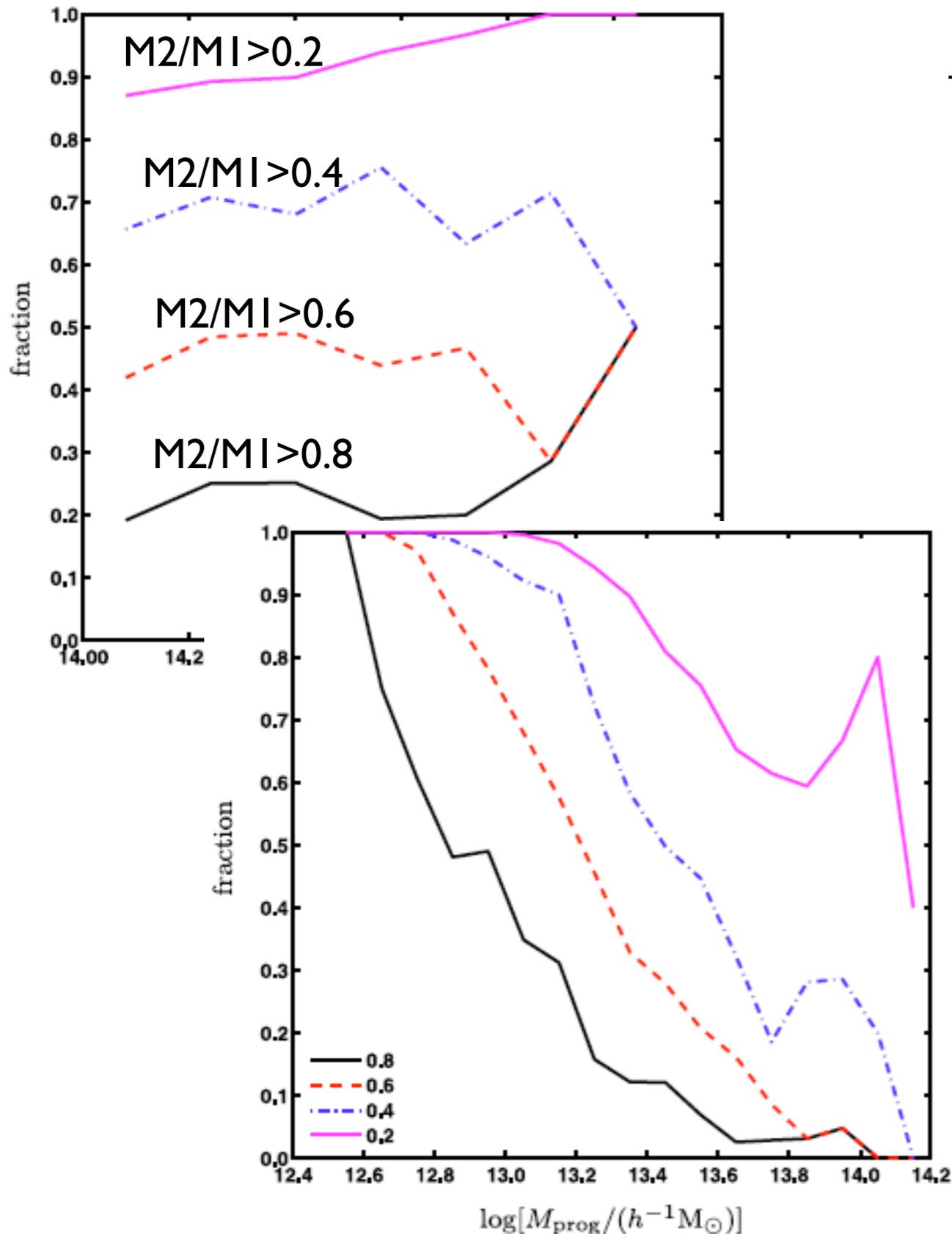
Cont'd: $M2/M1$ はどれくらい使える?



Fraction of $(M2/M1) > X$ をプロット

- 赤方偏移にはあまり依存しない。(上図)
- どの質量($z=0$)でも割と使える。
- >0.8 が20%、 <0.2 は~10%以下。
dynamic range はそんなものか。
- Main halo mass には強く依存。(下図)
- Halo massが求まりさえすればいい。
- というかmain halo mass だけで充分?

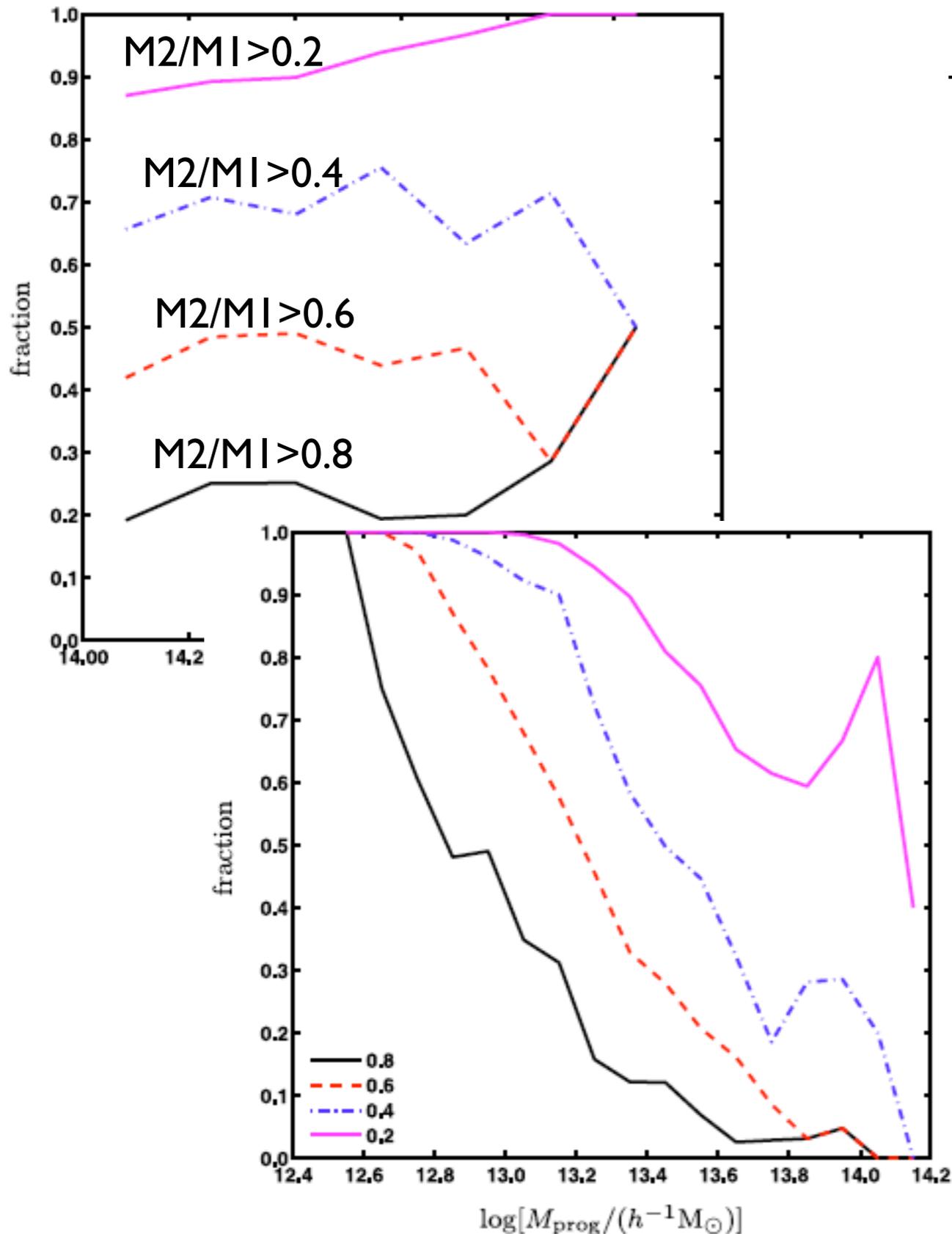
Cont'd: $M2/M1$ はどれくらい使える?



Fraction of $(M2/M1) > X$ をプロット

- 赤方偏移にはあまり依存しない。(上図)
- どの質量($z=0$)でも割と使える。
- >0.8 が20%、 <0.2 は~10%以下。
dynamic range はそんなものか。
- Main halo mass には強く依存。(下図)
- Halo massが求まりさえすればいい。
- というかmain halo mass だけで充分?

Cont'd: M2/M1 はどれくらい使える?



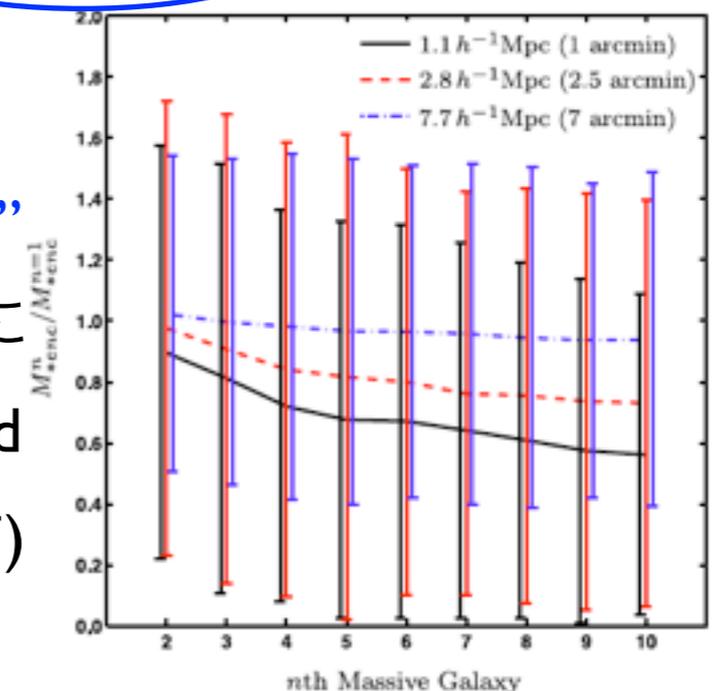
Fraction of $(M2/M1) > X$ をプロット

- 赤方偏移にはあまり依存しない。(上図)
- どの質量($z=0$)でも割と使える。
- >0.8 が20%、 <0.2 は~10%以下。
dynamic range はそんなものか。
- Main halo mass には強く依存。(下図)
 - Halo mass が求まりさえすればいい。
 - というか main halo mass だけで充分?

割と不定性大。

e.g., “centering effect”

「どの銀河を中心に取るか」に enclosed mass が依存する(右)



Cont'd: M2/M1 はどれくらい使える?

Fraction of $(M2/M1) > X$ をプロット

- 赤方偏移にはあまり依存しない。(上図)
- どの質量($z=0$)でも割と使える。
- >0.8 が20%、 <0.2 は~10%以下。
dynamic range はそんなものか。

Main haloを正しく捉えたい

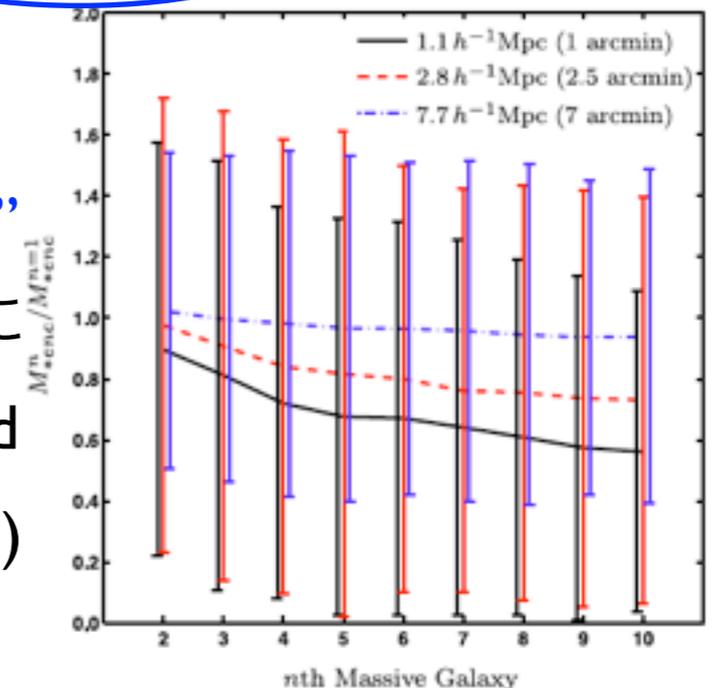
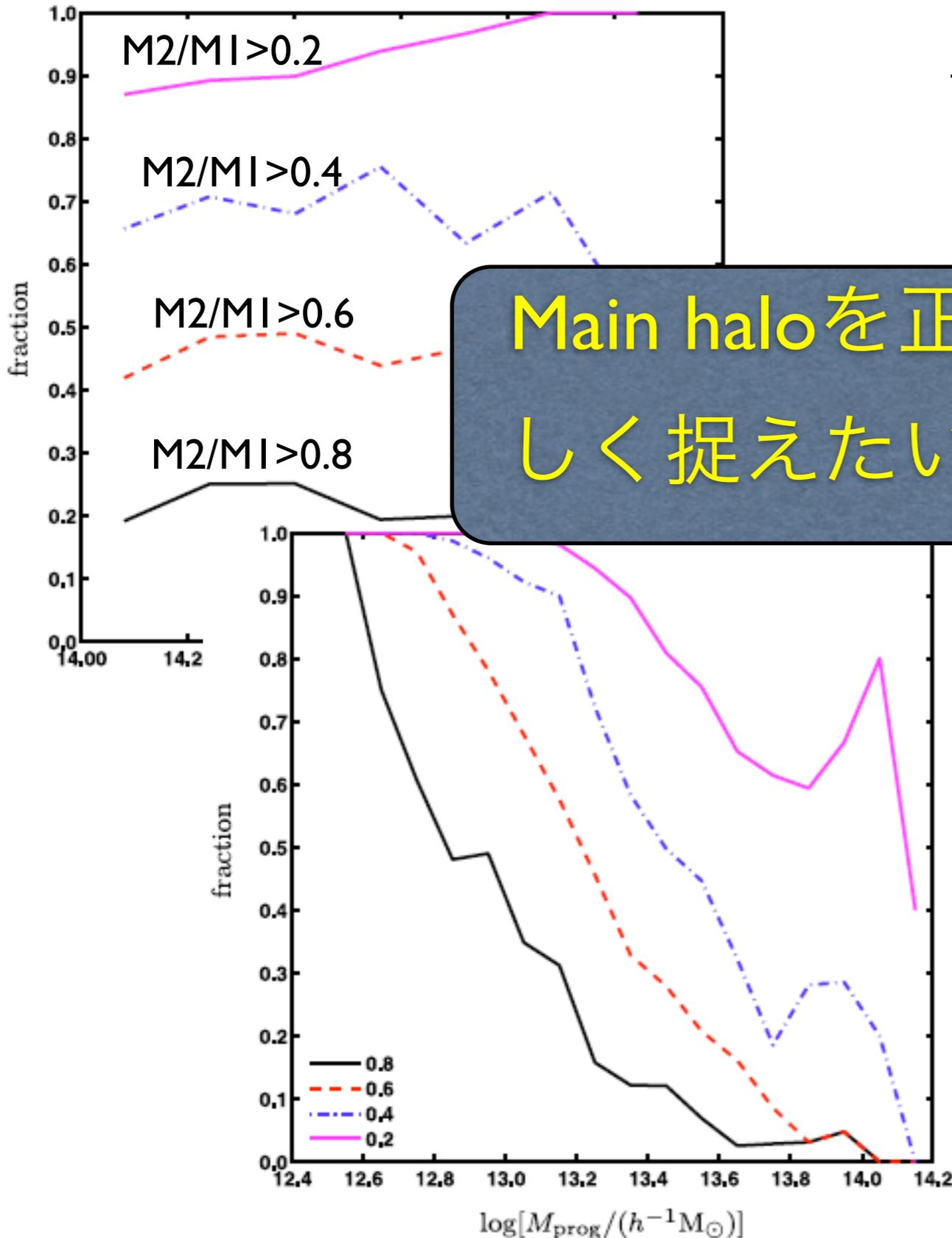
Main halo mass には強く依存。(下図)

- Halo mass が求まりさえすればいい。
- というか main halo mass だけで充分?

割と不定性大。

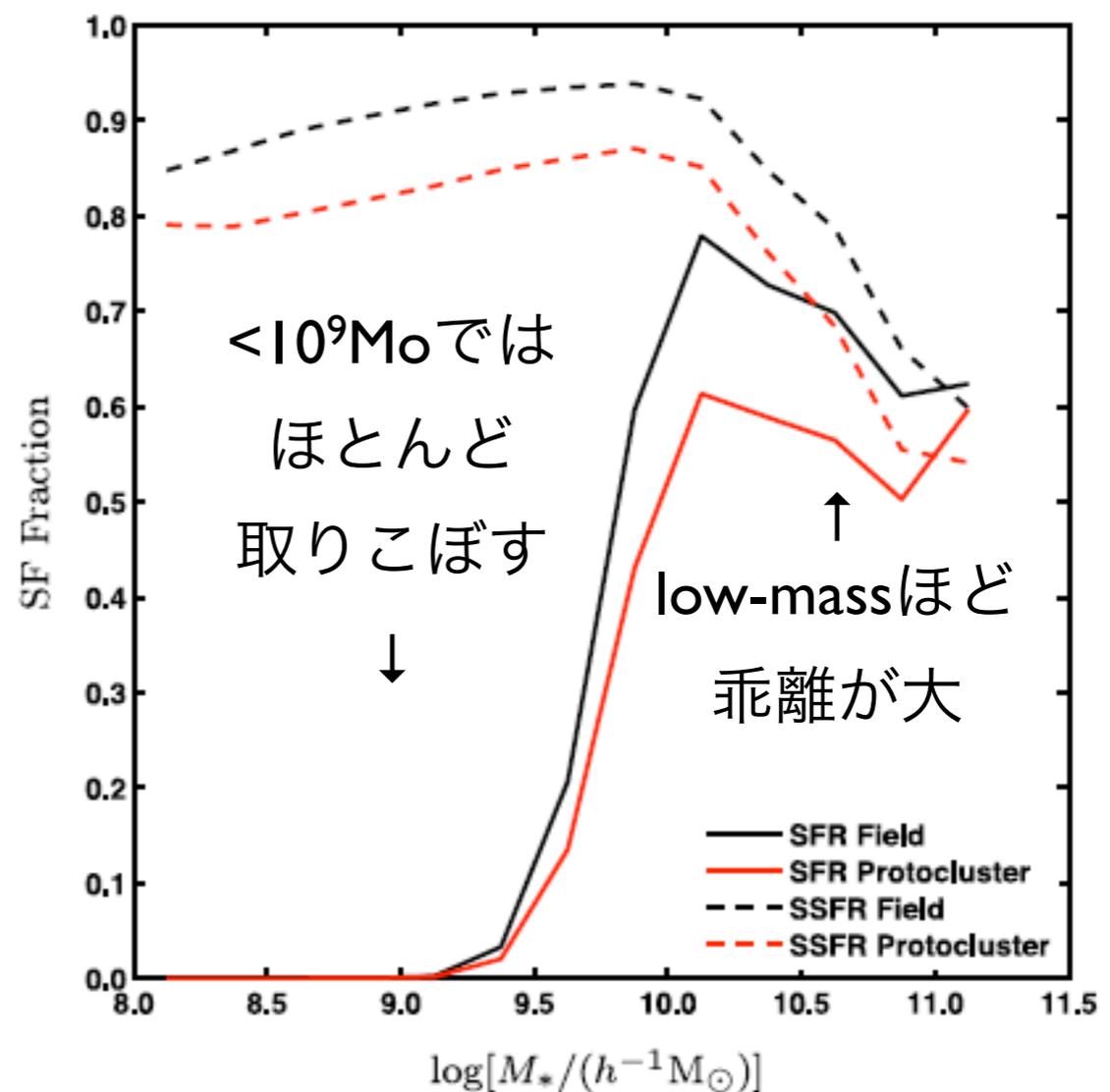
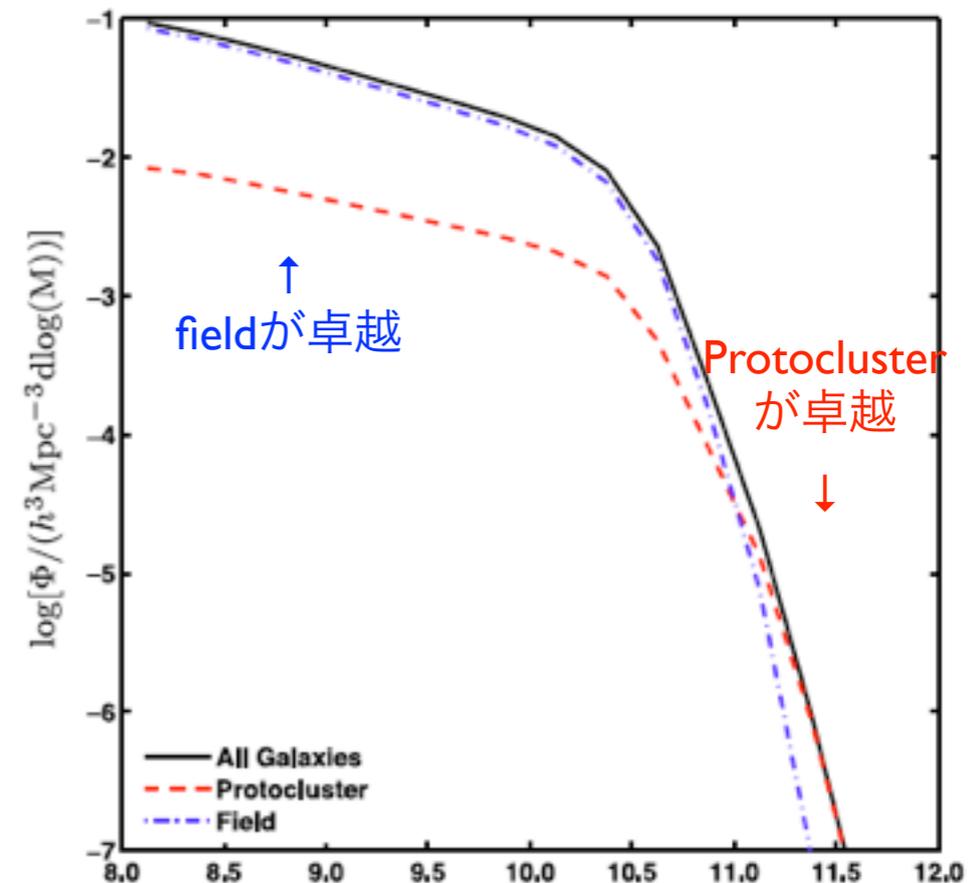
e.g., “centering effect”

「どの銀河を中心に取るか」に enclosed mass が依存する(右)



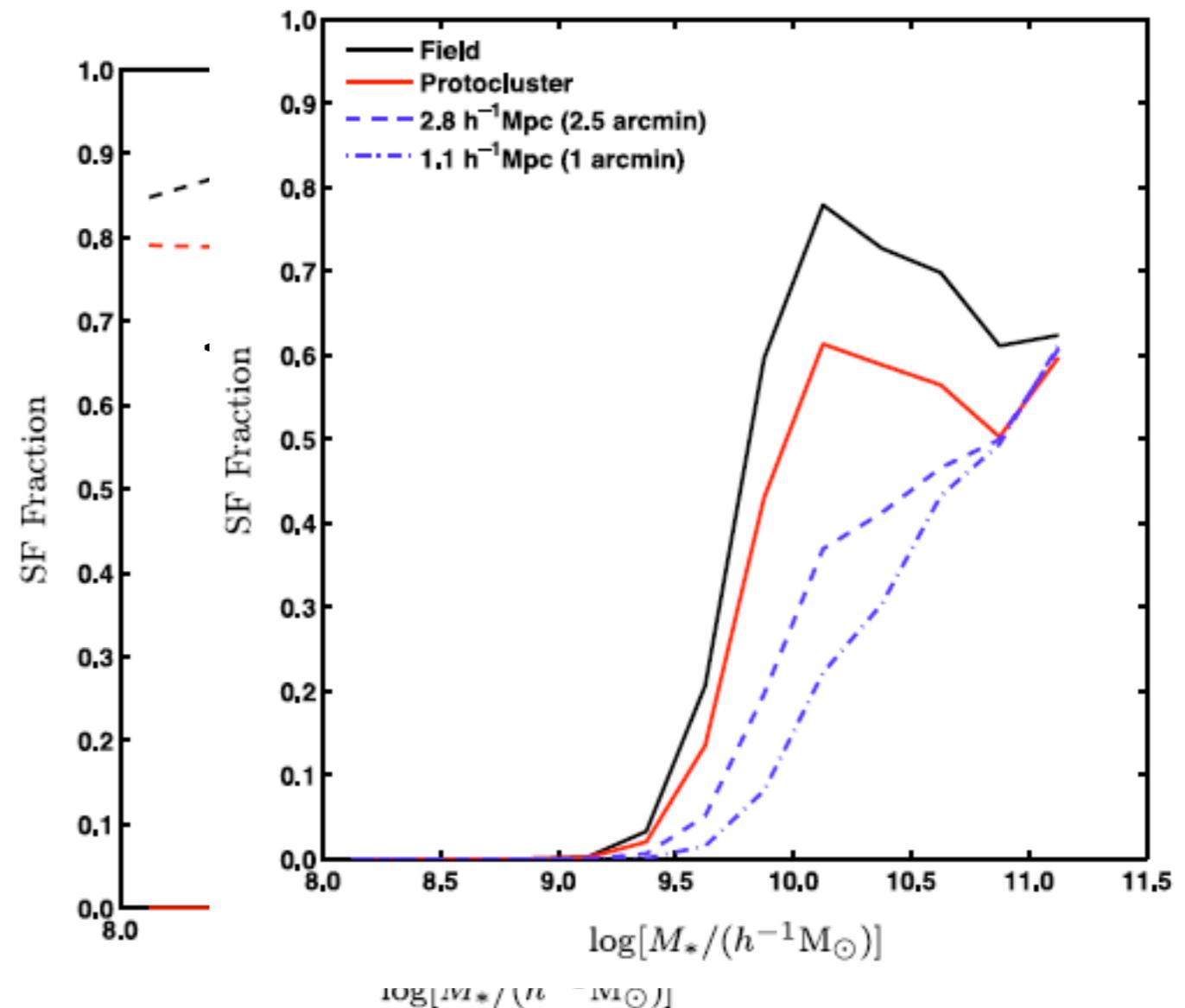
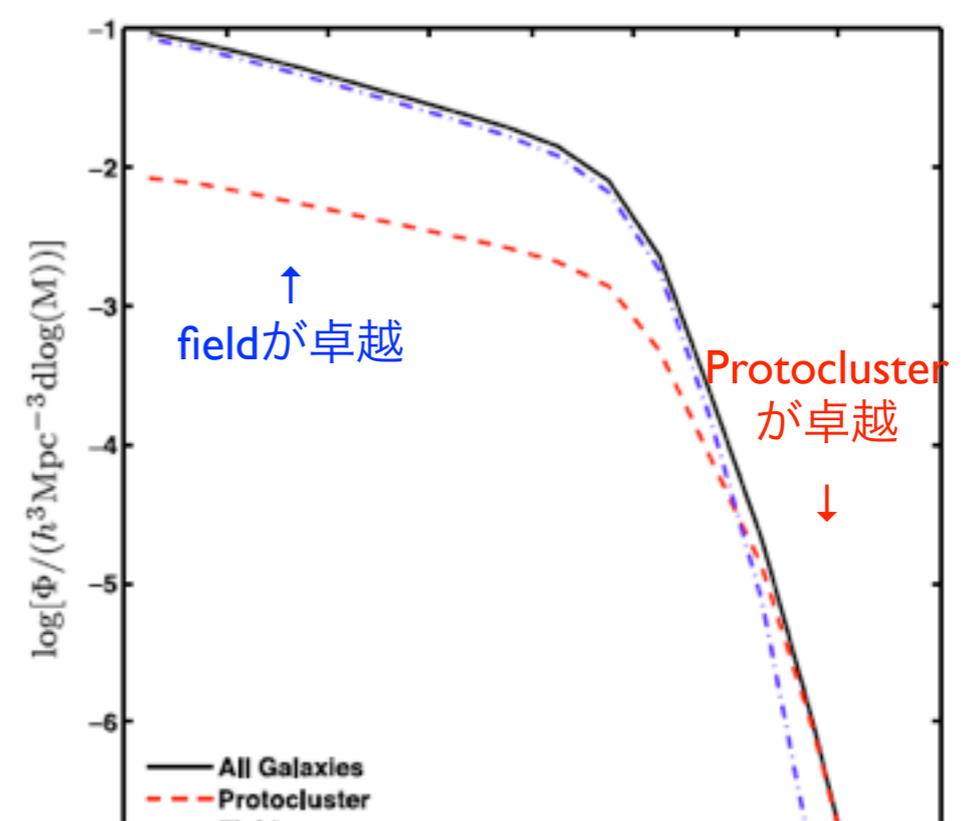
Observational bias 云々

- 最も一般的なprotoclusterの同定法は、狭帯域で輝線を捉える撮像観測。(e.g., Venemans+07; Koyama+13)
- 但し、activeな星形成銀河しか捉えられない。そもそもprotoclusterには大質量銀河が多い(上図)。
- 実際にbiasの様子を見てみる。(下図)
 - “active”の指標は sSFR。でも観測は SFR-limited。小質量ほど乖離が大。
 - さらに、FoV の制限も入る。大質量銀河は元々中心に多いため、小質量ほど影響が大。



Observational bias 云々

- 最も一般的なprotoclusterの同定法は、狭帯域で輝線を捉える撮像観測。(e.g., Venemans+07; Koyama+13)
- 但し、activeな星形成銀河しか捉えられない。そもそもprotoclusterには大質量銀河が多い(上図)。
- 実際にbiasの様子を見てみる。(下図)
 - “active”の指標は sSFR。でも観測は SFR-limited。小質量ほど乖離が大。
 - さらに、FoV の制限も入る。大質量銀河は元々中心に多いため、小質量ほど影響が大。



その他、兼・まとめ

- $z=0$ で $10^{14}/h$ Mo以上のハローをclusterとし、その祖先を辿った。それらのうち最大質量のハローをmain haloと定義、cluster/protocluster全体との関連を調べた。
- protocluster は $z=0$ で見られるより非常に広がっており、 $z=2$ で $\sim 35/h$ cMpc (~ 30 arcmin)にもなる。多くの輝線銀河探索はごく中心部にしか注目していない。
- protocluster内部は複雑な構造を示し、一様ではない。今日のcluster memberも、それぞれ環境効果を受けてきた時間の長さが違うだろう。
- main halo は遠方ではメンバー銀河のごく一部しかホストしていない ($z>2$ では $M^*>10^9$ Moの2割以下)。遠方でcluster coreにいる銀河だけでなく、もっと広く観測することが、cluster/protoclusterの理解には重要。
- main halo が支配的な protocluster はごく一部 ($z=2$ でも10%以下)。支配的な main halo を持つかどうかは $z=0$ での質量には依存しない。但し main halo が非常に大質量であれば(high-z group/clusterとして受かるものであれば)、それはきっと dominant haloである。既存のprotocluster検出法はそうしたものにバイアスしている。 →かなりのprotocluster (w/o dominant halo) は見つかっていないはず。

その他、兼・まとめ (続)

- かなりの数が見つかっていない→銀河団データを用いた宇宙論の結果に影響。小さく密集した銀河団はconfusionで大きな単一の銀河団に見える。dark matter simulationの結果と食い違いが出ているのかも。(怪?)
- 既にprotocluster内部で銀河の質量関数(SMF)が違っている事が指摘されている。(e.g., Steidel+05; Hatch+11b; Koyama+13; Cooke+14)→protocluster内部のSMFはfield SMFのスケール・バージョンではない。(星形成)銀河のバイアスが、環境に依存しているのか。
- SAMの予測では、これはquenchingの効果。~10/h cMpcを超える広視野の観測なら影響は小さいだろう。

実は Saito+2015 のメインの結果の一つも、LF の形の変化。

視野は~50/h cMpc @ z=4.1、電波銀河周辺。

Ly α LF のbright endのため、AGN が大きく寄与と推測。