

Prospects of HSC-HSC : The hybrid and extremely wide field cluster survey at $0.5 < z < 1.7$

山元 萌黄(総合研究大学院大学/国立天文台)

児玉忠恭、林将央、利川潤、小山佑世、田中壱(国立天文台)、
但木謙一(MPE)、嶋川里澄、鈴木智子(総研大/国立天文台)

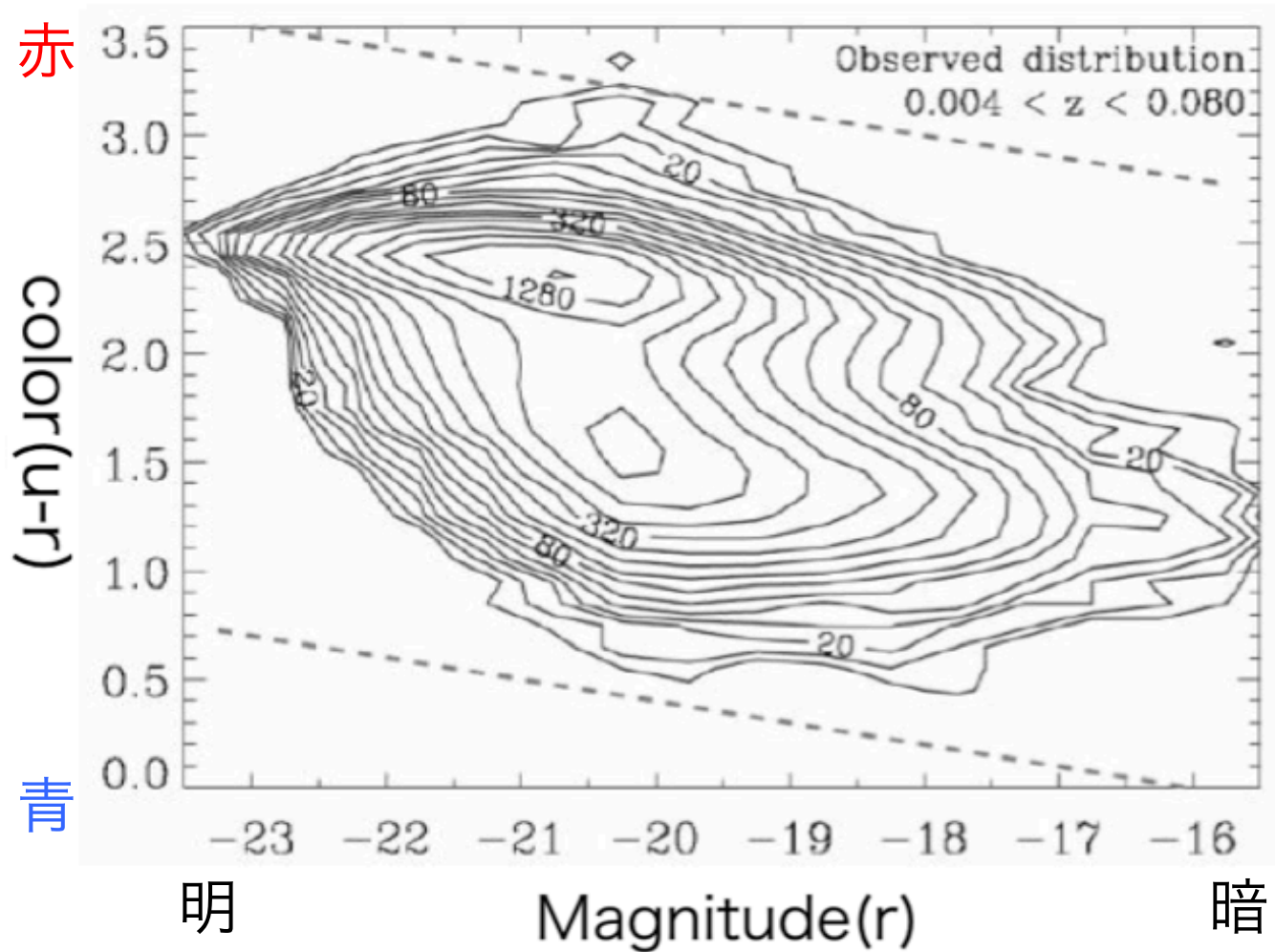
目次

1. 研究背景
2. 銀河団サーベイ: HSC-HSC
3. Red sequenceサーベイの手法
4. 結果
5. 今後の展望
6. まとめ

銀河の色等級関係

1. 研究背景

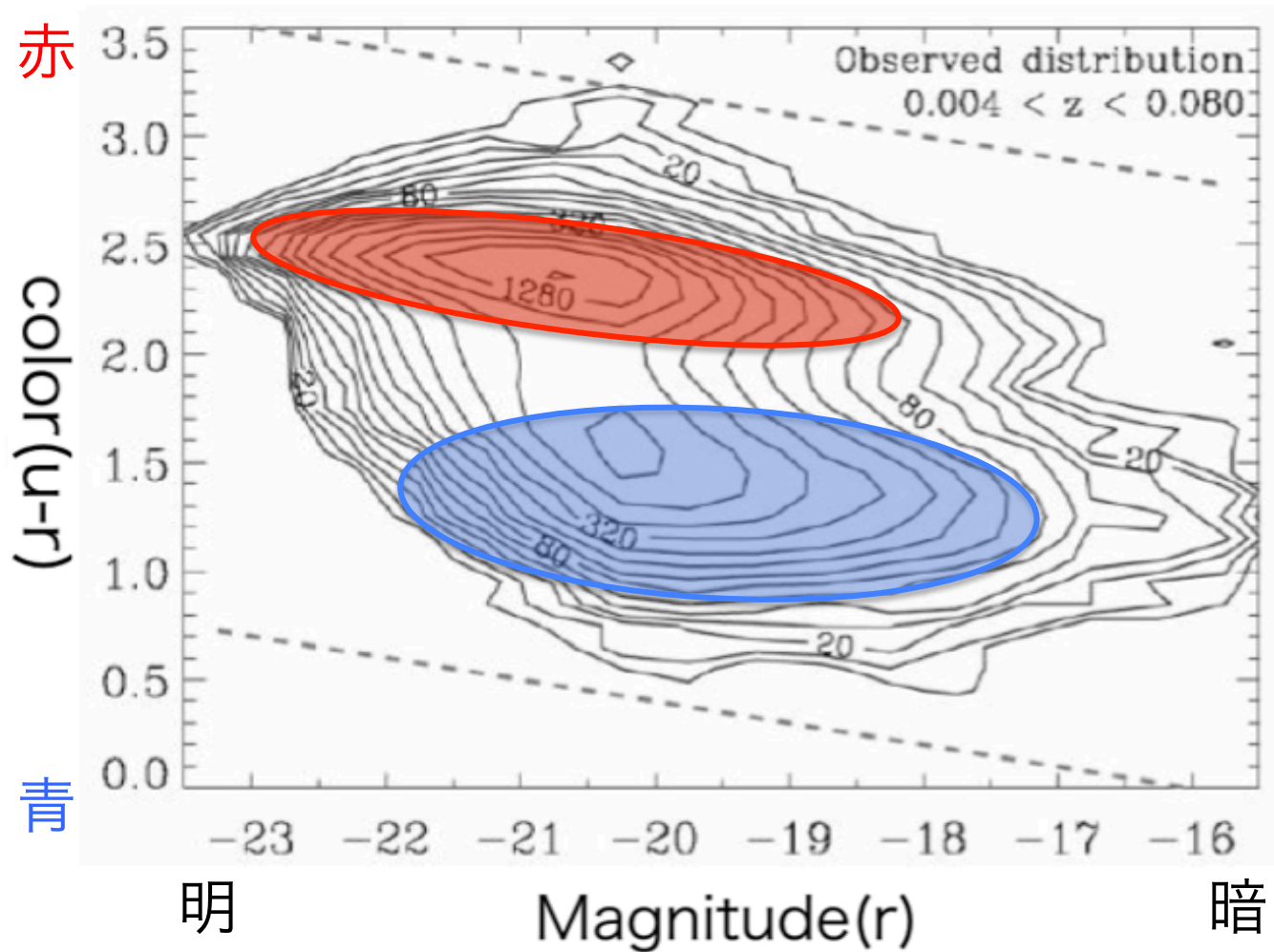
★近傍銀河の色-等級分布(Baldry+04)



銀河の色等級関係

1. 研究背景

★近傍銀河の色-等級分布(Baldry+04)



赤く明るい銀河 + 青く暗い銀河

1. 研究背景

赤く明るい銀河(Red sequence) + 青く暗い銀河(Blue cloud)

銀河団銀河の進化

1. 研究背景

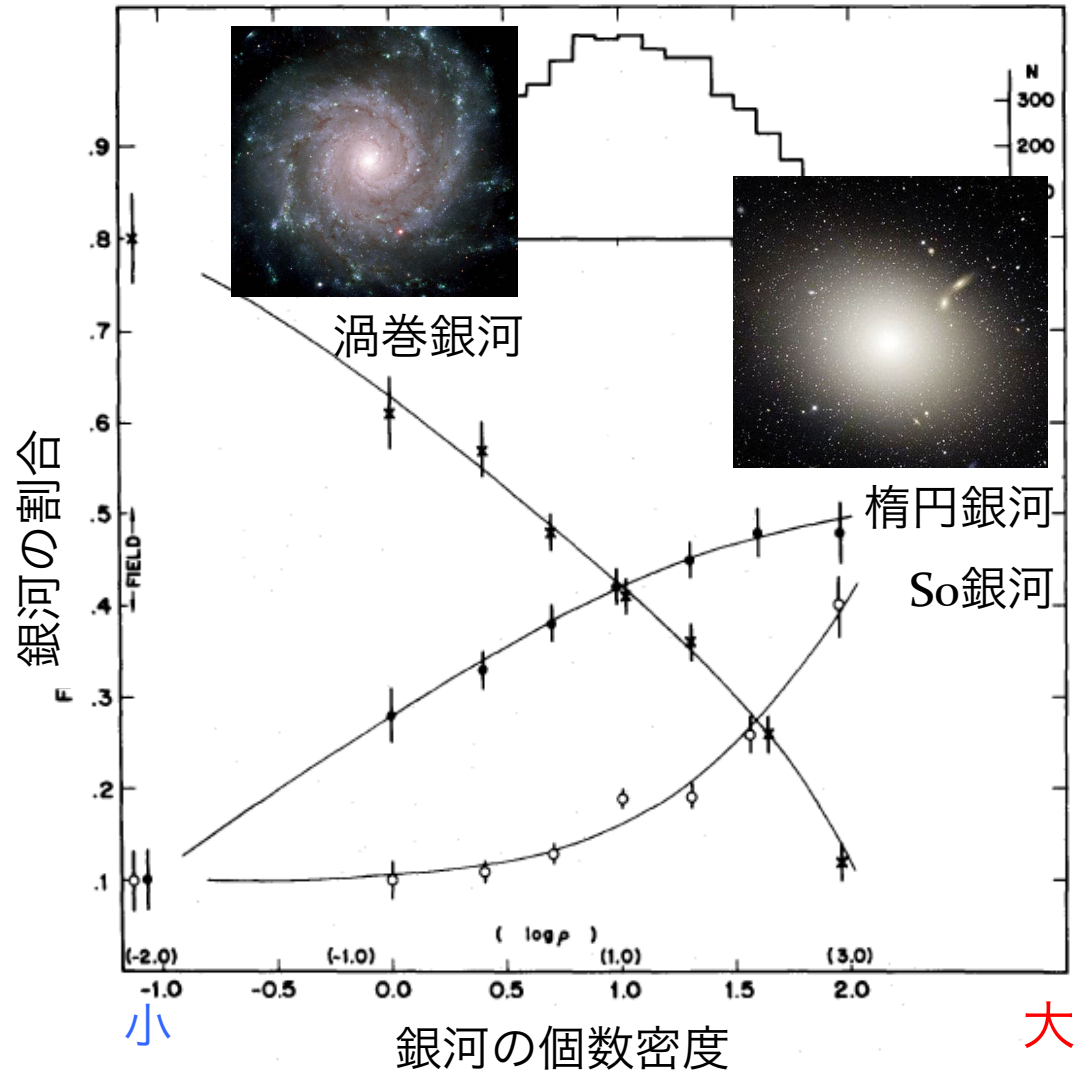
★銀河の形態 - 密度関係(Dressler 1980)

銀河の形態が周辺の
銀河個数密度に依存する



- ・ 渦巻き銀河と楕円銀河の棲み分けの理由
- ・ 楕円銀河の進化を見る

銀河団銀河に注目する必要がある

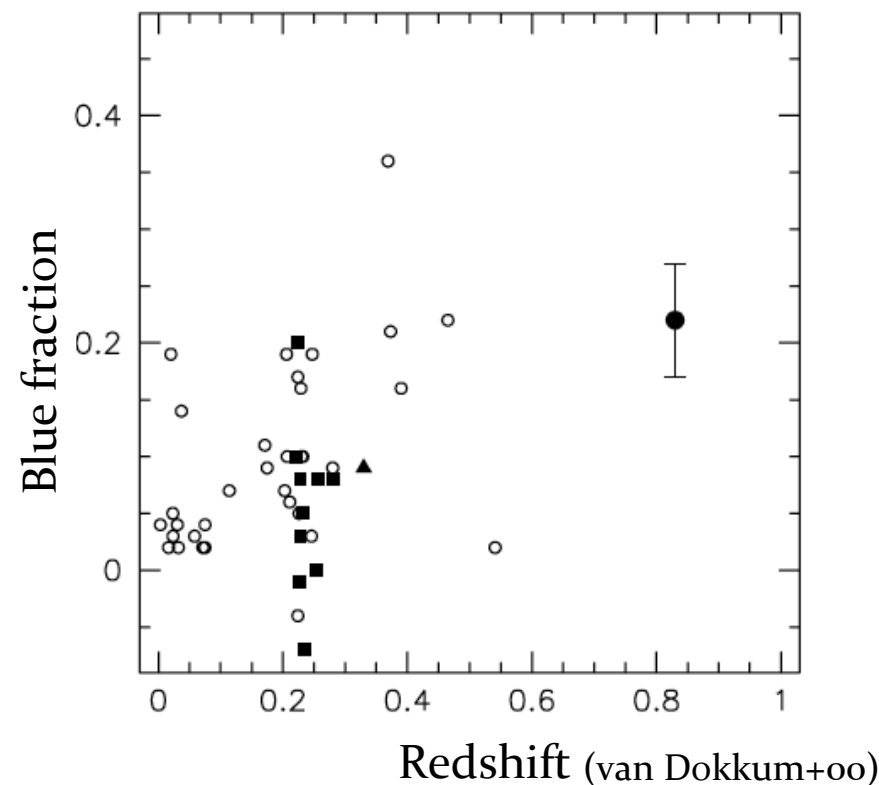
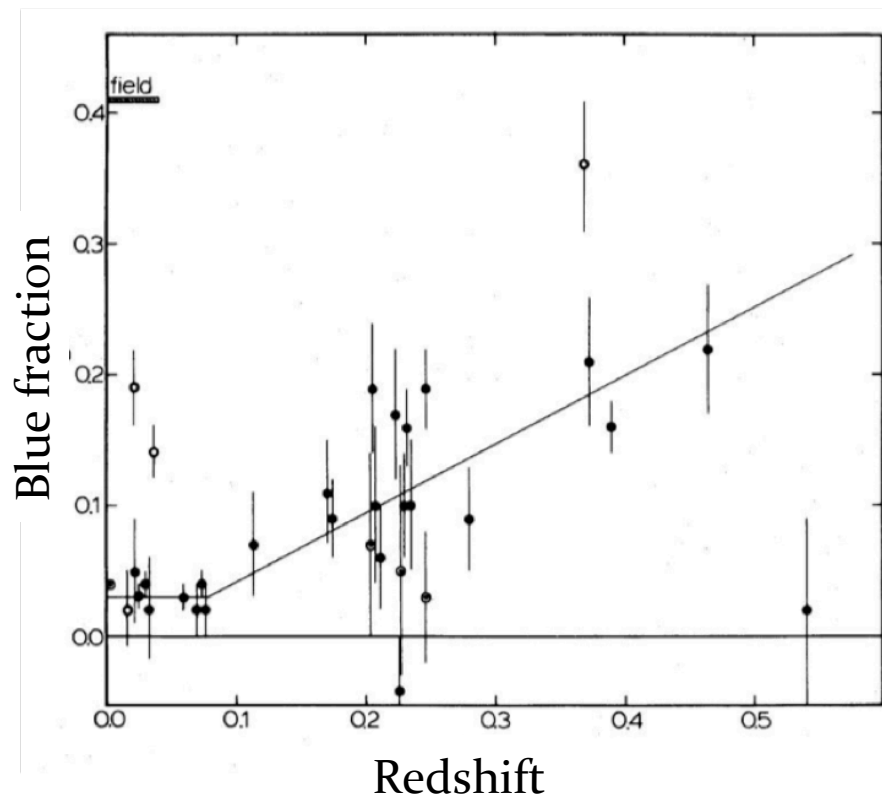


ブッチャー・エムラー効果

1. 研究背景

★ブッチャー・エムラー効果(Butcher & Oemler 1984)

銀河団中心領域の青い銀河の割合は、赤方偏移に従って増加する



青い銀河の割合は、銀河団中心部の星形成活動にも関係する

- 個々の銀河団で精度よく調べるには、詳細な分光観測
もしくは多くのサンプルで統計的な議論が必要

$z \sim 0.8$ まで調べられている

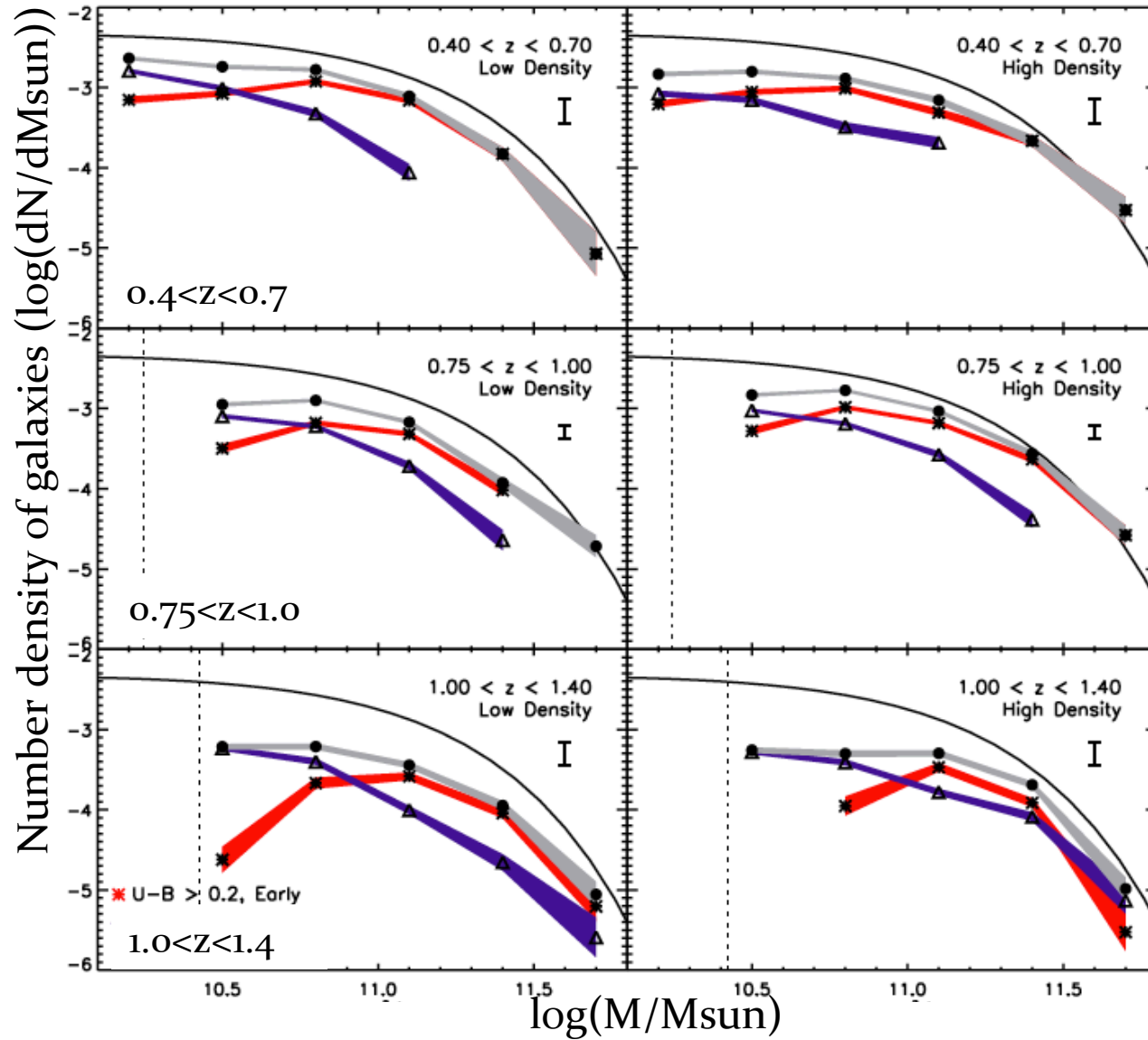
銀河のダウンサイジング成長

1. 研究背景

★青い銀河、赤い銀河の星質量関数(Bundy+o6)

低密度領域

高密度領域

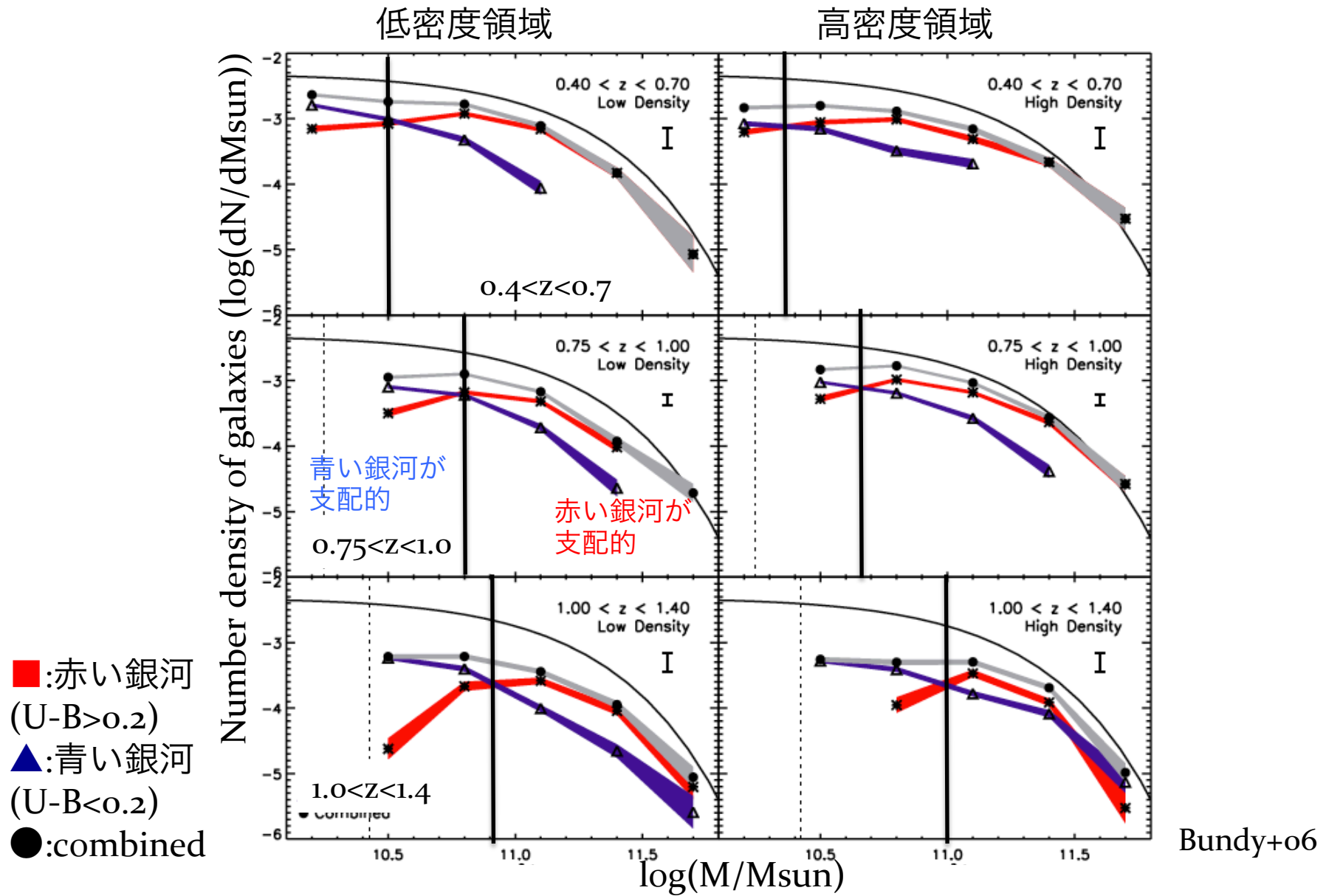


Bundy+o6

銀河のダウンサイジング成長

1. 研究背景

★青い銀河、赤い銀河の星質量関数(Bundy+o6)



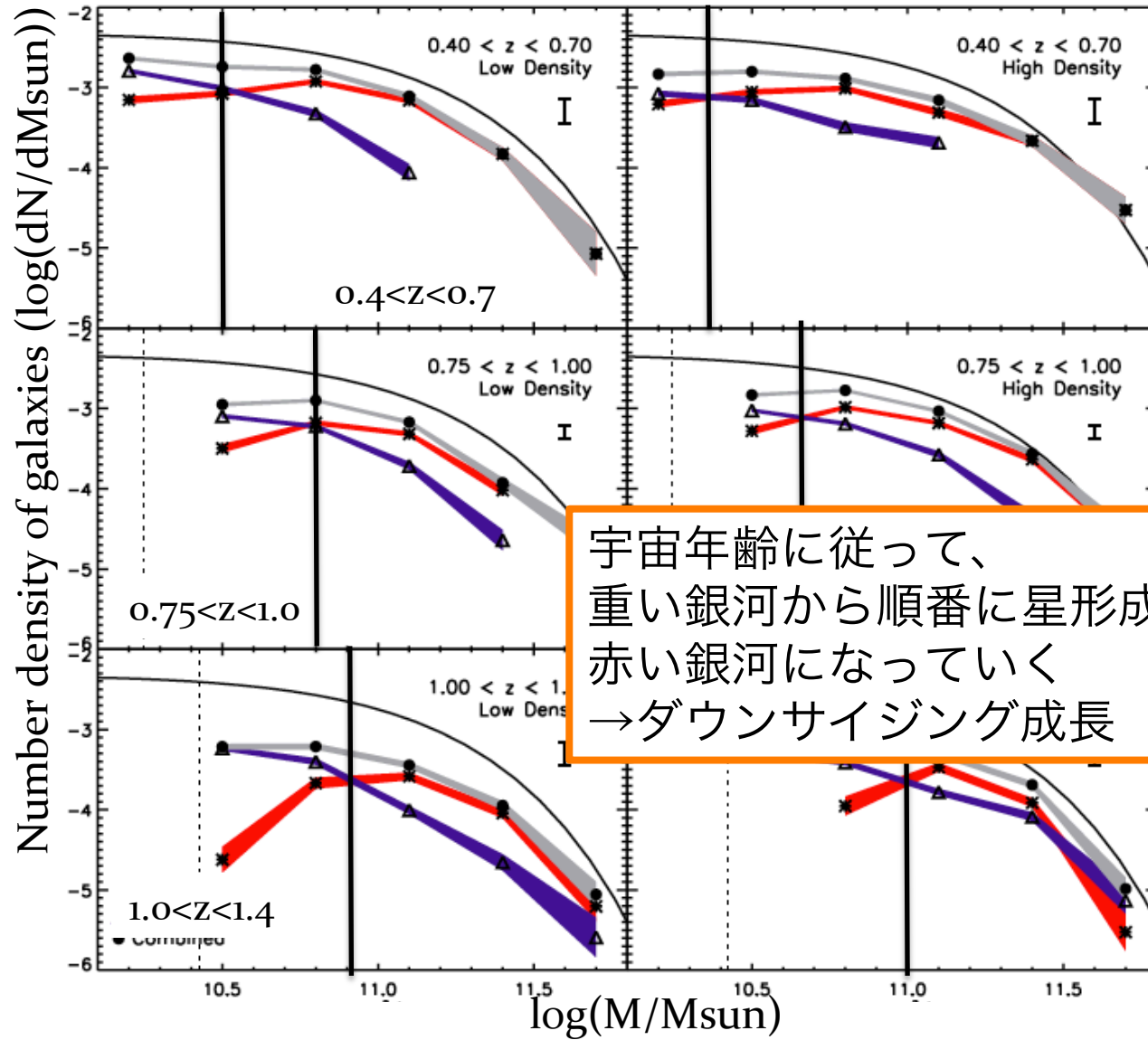
銀河のダウンサイジング成長

1. 研究背景

★青い銀河、赤い銀河の星質量関数(Bundy+06)

低密度領域

高密度領域



宇宙年齢に従って、
重い銀河から順番に星形成を終え、
赤い銀河になっていく
→ダウンサイジング成長

Bundy+06

★これまでの主な銀河団探査方法

- ・ 2次元(天球面)、または3次元(+赤方偏移)で銀河の密集している所を探し、密集の度合いを定量化して判断する
 - SDSSサーベイにより、1万個以上の近傍銀河団を発見
- ・ 重力レンズ効果による検出
 - 質量分布から、質量密度の大きい領域を銀河団候補として同定 (Miyazaki+02 ; Miyazaki+15)
 - 近傍銀河団の質量分布の測定 (Oguri+05)
- ・ 銀河団ガスからの広がったX線放射の観測
 - X線望遠鏡ROSATによる全天サーベイ(可視光による追観測)
 - $z > 1$ でも、XMM-Newton衛星等による観測で、何個かの銀河団が発見されている (Mullis+05 ; Stanford+06)

しかし一方で、 $z > 1$ の銀河団サンプルは

- ・ 10-20 個と非常に少なくなっている
- ・ 大質量な銀河団に限られている

本研究の目的

1. 研究背景

★銀河団中の銀河の星形成史を明らかにする

- 銀河団銀河の性質を、広い赤方偏移範囲で圧倒的な統計精度で議論する
- ・ 銀河団銀河の色等級関係がどのように成長してきたのか？
- ・ 高赤方偏移における銀河団中の青い銀河の割合
 - 赤方偏移依存性：ブッチャー・エムラー効果
 - 等級依存性(光度関数)：銀河進化の質量依存・タイムスケール(down-sizing)

HSC-HSC(Hybrid Search for Clusters with HSC) 2.HSC-HSC

すばる望遠鏡の可視撮像装置Hyper Suprime-Cam(HSC)を使用した、
 $0.5 < z < 1.7$ における大規模銀河団探査

①HSCの戦略的プログラムである大規模サーベイ
- 巨大銀河団サンプルの構築

②2つの銀河種族をプローブとした銀河団探査法
- 銀河種族に対するバイアスが小さい

Red sequenceサーベイ

- 広帯域フィルターを用いて、銀河団銀河特有のred sequence 上の銀河を捉え、
 $z \sim 0.5-1.5$ の星形成を終了した銀河を中心に探査する

Blue cloud サーベイ

- 星形成銀河の放つ輝線を3枚の狭帯域フィルターで捉え、
 $z \sim 0.5-1.7$ の星形成銀河を探査する

広い赤方偏移範囲において

これまでに無く巨大で統計的な銀河団サンプルを構築する

HSC-HSC(Hybrid Search for Clusters with HSC) ₂.HSC-HSC

すばる望遠鏡の可視撮像装置Hyper Suprime-Cam(HSC)を使用した、
 $0.5 < z < 1.7$ における大規模銀河団探査

①HSCの戦略的プログラムである大規模サーベイ
- 巨大銀河団サンプルの構築

②2つの銀河種族をプローブとした銀河団探査法
- 銀河種族に対してバイアスが小さい

Red sequenceサーベイ

- 広帯域フィルターを用いて、銀河団銀河特有のred sequence 上の銀河を捉え、
 $z \sim 0.5-1.5$ の星形成を終了した銀河を中心に探査する

Blue cloud サーベイ

- 星形成銀河の放つ輝線を3枚の狭帯域フィルターで捉え、
 $z \sim 0.5-1.7$ の星形成銀河を探査する

銀河団サーベイの初期段階として、Red sequenceサーベイにおいて
 $z \sim 1$ の銀河団候補の銀河の性質について調べた

HSCの1.77平方度(S-Camのおよそ7倍！)という広い視野と、高い感度を生かして大規模撮像サーベイが進められている(PI: Satoshi Miyazaki)

- ・ BB, NBを用いたWide, Deep, Ultra-Deep の 3 種類のサーベイ
- ・ 2014 年の 3 月にスタートし, 5 年間で 300 晩の観測を予定
- ・ 現在S14B期, S15A期のデータがリリースされている

Layer	Area [deg ²]	# of HSC fields	Filters & Depth	Comoving volume [h ⁻³ Gpc ³]
Wide	1400	916	<i>grizy</i> ($r \simeq 26$)	~ 4.4 ($z < 2$)
Deep	27	15	<i>grizy</i> +3NBs ($r \simeq 27$)	~ 0.5 ($1 < z < 5$)
Ultradeep	3.5	2	<i>grizy</i> +3NBs ($r \simeq 28$)	~ 0.07 ($2 < z < 7$)

★今回使用したデータ Red sequence Blue cloud

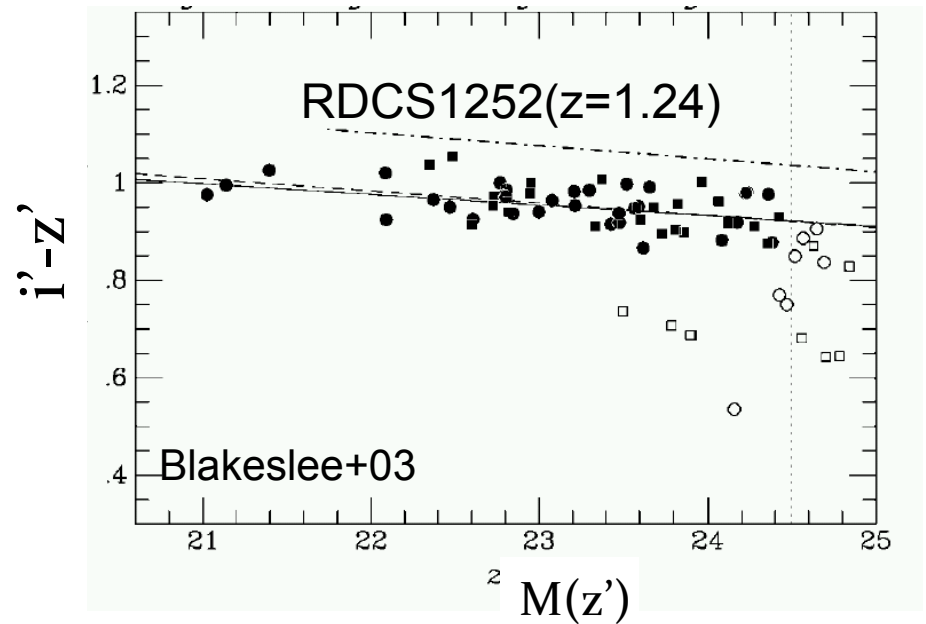
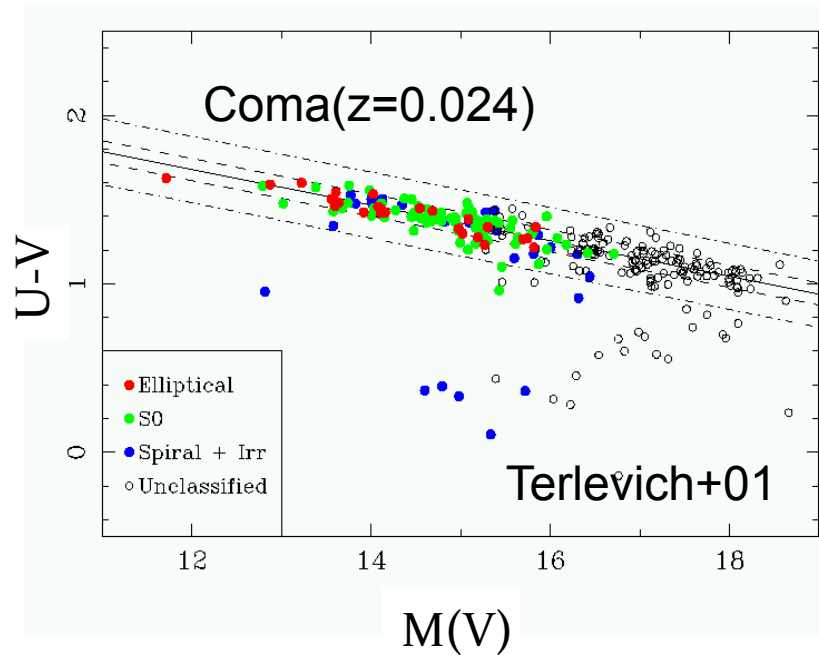
Ultra-Deep(S15A preliminary)

- ・ 領域
COSMOS field(~1 HSC FoV)
- ・ 使用した等級
Kron等級：銀河全体の明るさの把握
aperture02等級：銀河の色の把握(直径2".02)
- ・ 深さ(Kron等級のerrorから計算)
 $z'(\text{Kron})[\text{ABmag}] \sim 25.5 (5\sigma \text{ limit mag: } z \sim 1 \text{ で } M^* + 3.3)$
- ・ シーイング：0".7-0".9(g, r, i', z', y)

Red sequence survey

3. Red sequenceサーベイ

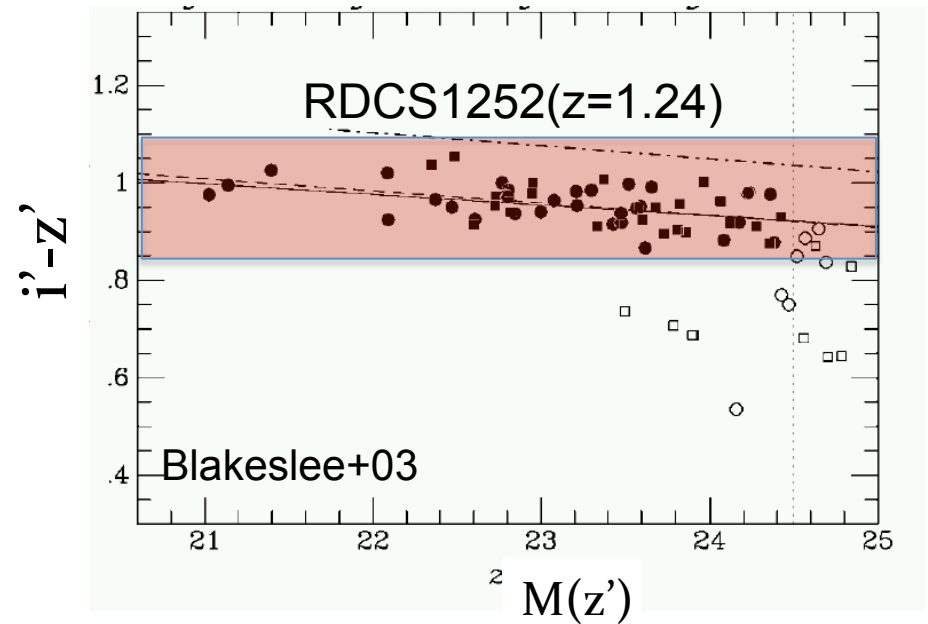
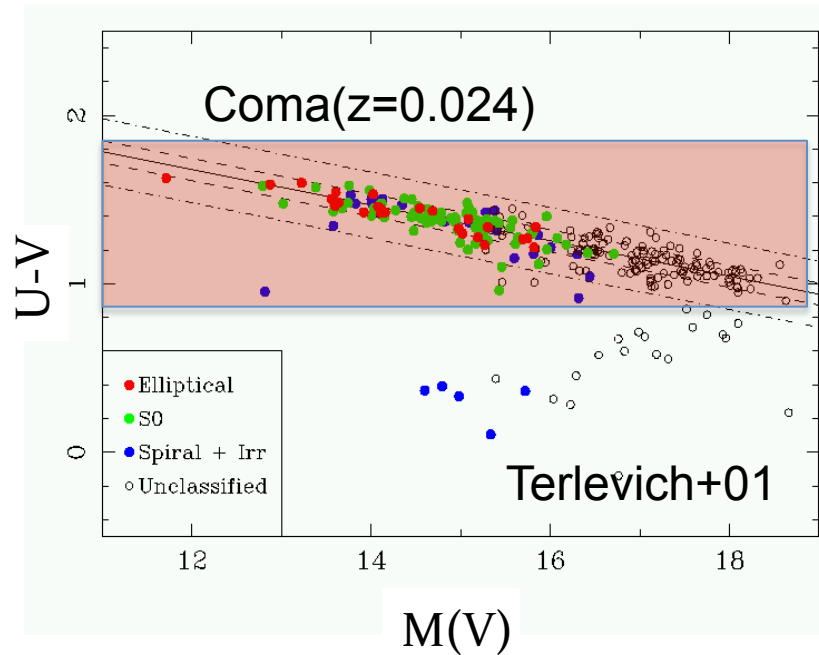
広帯域フィルターを用いて、銀河団銀河特有のred sequence 上の銀河を捉え、 $z \sim 0.5-1.5$ の星形成を終了した銀河をプローブとして銀河団探査を行う



Red sequence survey

3. Red sequenceサーベイ

広帯域フィルターを用いて、銀河団銀河特有のred sequence 上の銀河を捉え、 $z \sim 0.5-1.5$ の星形成を終了した銀河をプローブとして銀河団探査を行う

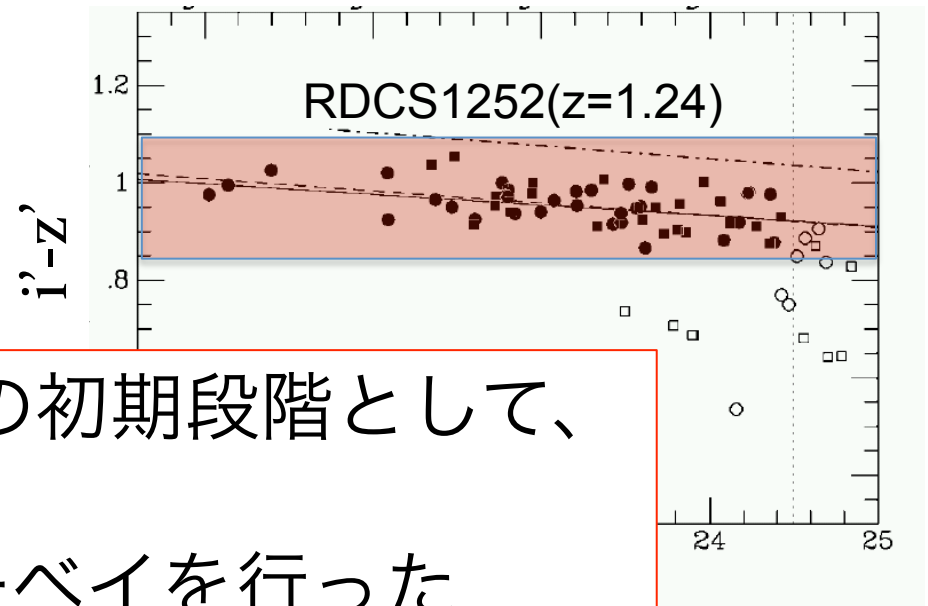
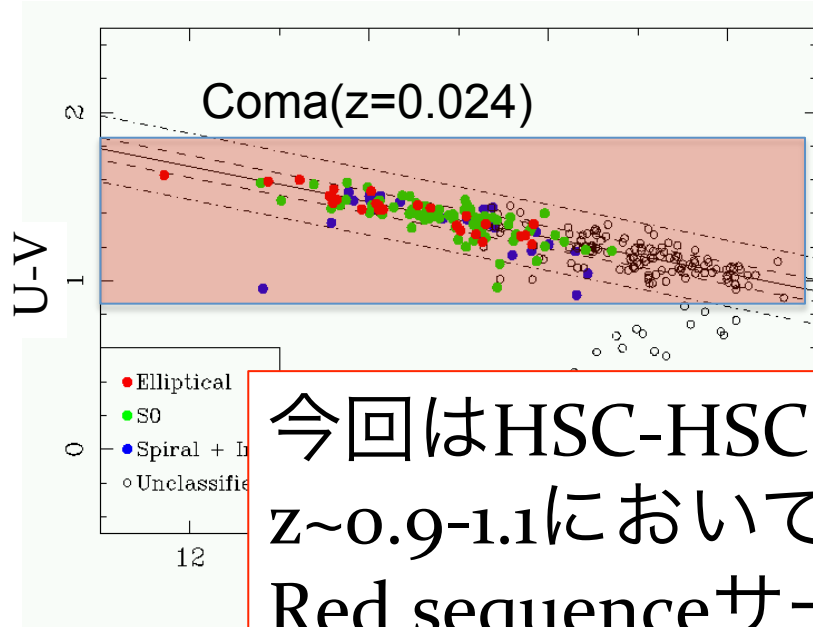


各赤方偏移に対して、red sequenceの色を示す銀河を取り出す

Red sequence survey

3. Red sequenceサーベイ

広帯域フィルターを用いて、銀河団銀河特有のred sequence 上の銀河を捉え、 $z \sim 0.5-1.5$ の星形成を終了した銀河をプローブとして銀河団探査を行う



今回はHSC-HSCの初期段階として、 $z \sim 0.9-1.1$ において
Red sequenceサーベイを行った

各赤方偏移に対して、red sequenceの色を示す銀河を取り出す

色選択法

★ $z \sim 0.9 - 1.1$ のRed sequence上の銀河の色選択法

種族合成モデル

(Kodama & Arimoto 1998)

に基づいた楕円銀河の色進化より、

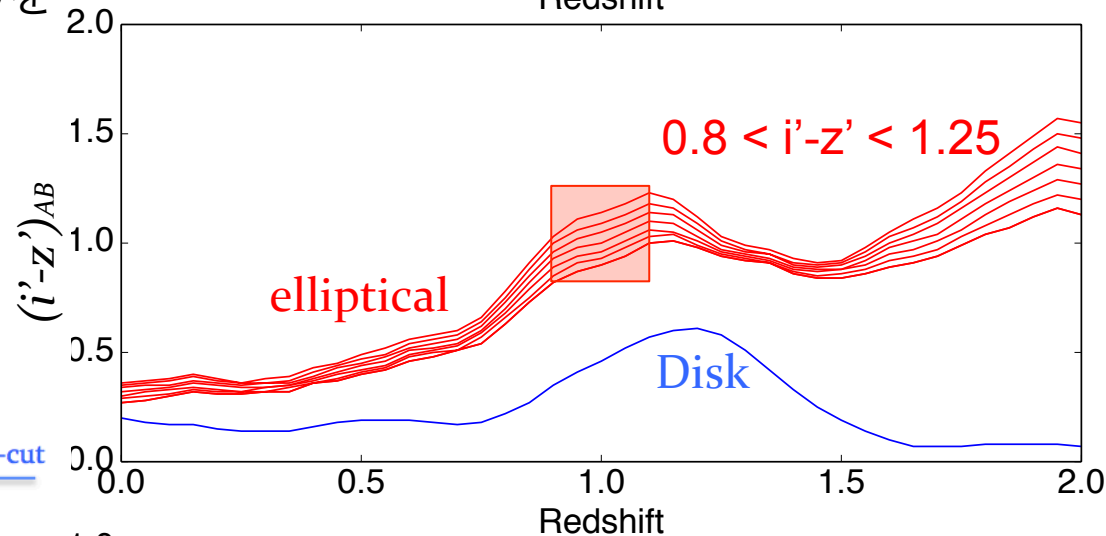
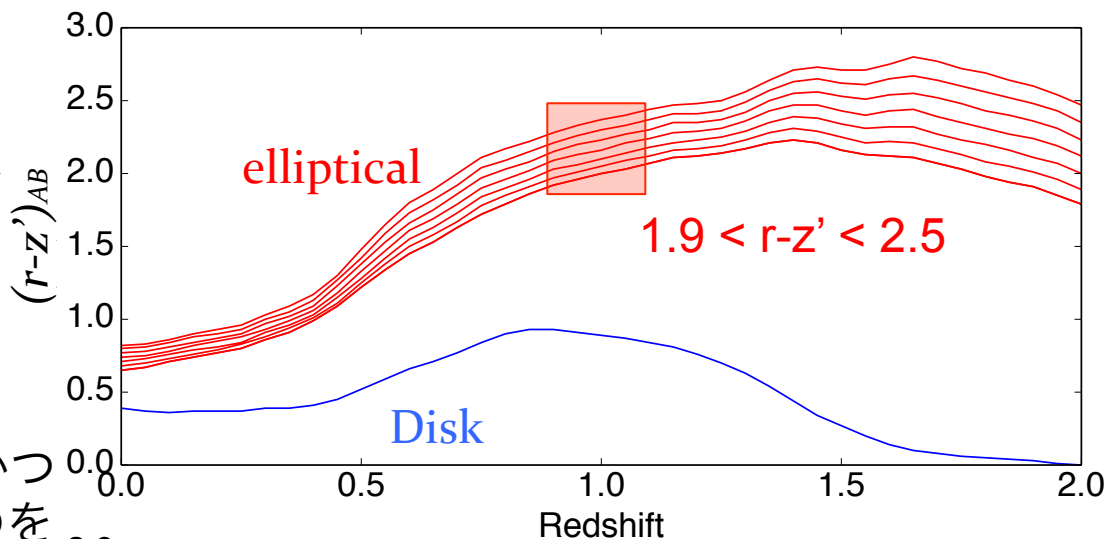
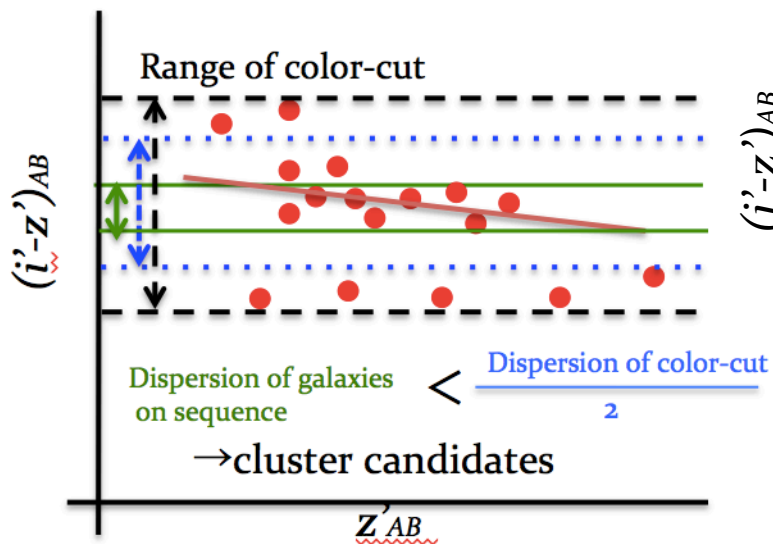
$$-1.9 < r-z' < 2.5$$

$$-0.8 < i'-z' < 1.25$$

★使用する銀河

$$z' < z'(M^*+1) \sim 23.2$$

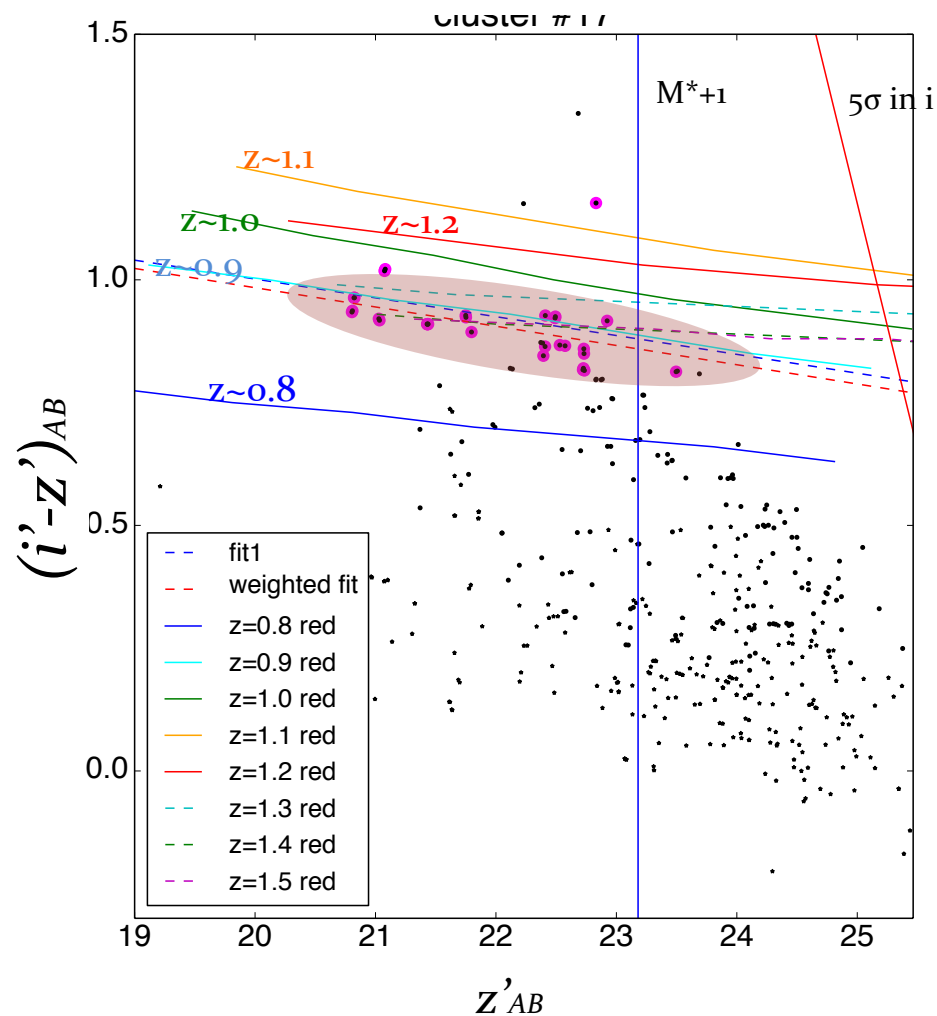
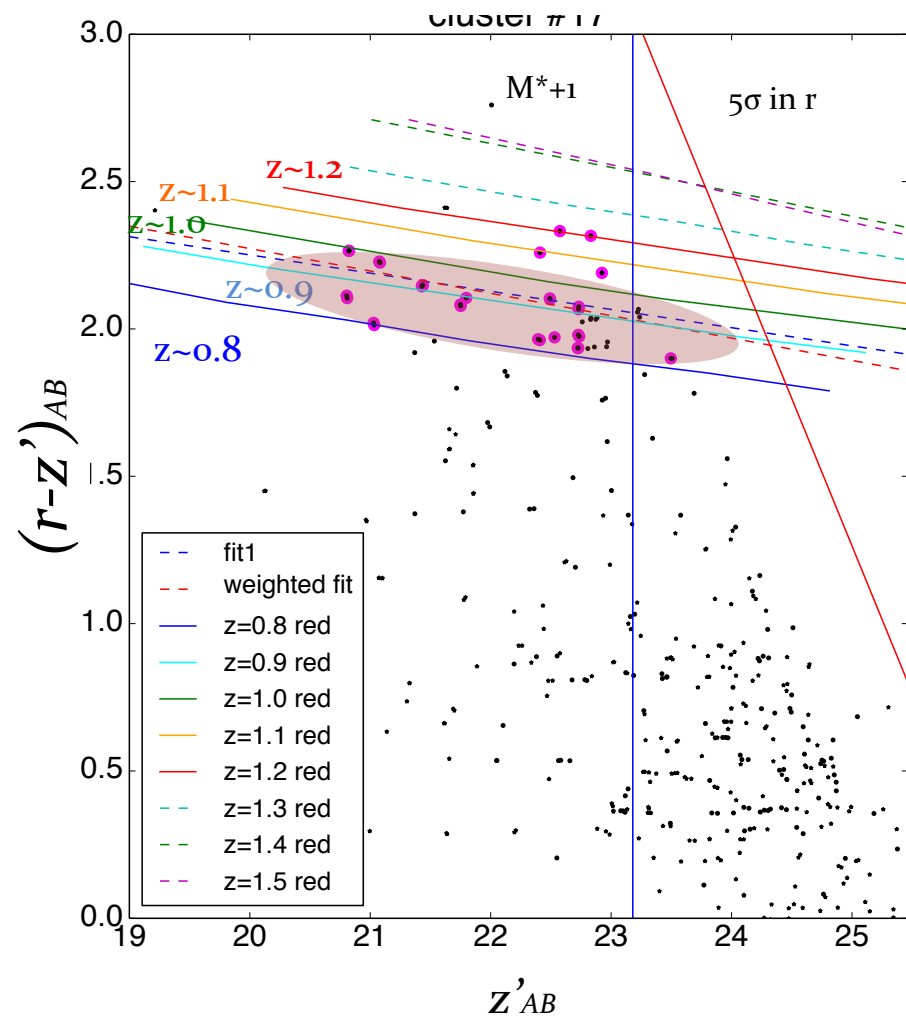
色選択された銀河の高密度領域かつ
タイトなRed sequenceを持つものを
銀河団候補として選び出した



Color evolutionary tracks of galaxies
(Kodama & Arimoto 1998 ; $z_f = 5$)

銀河団候補領域の色等級分布

3. Red sequence サーベ

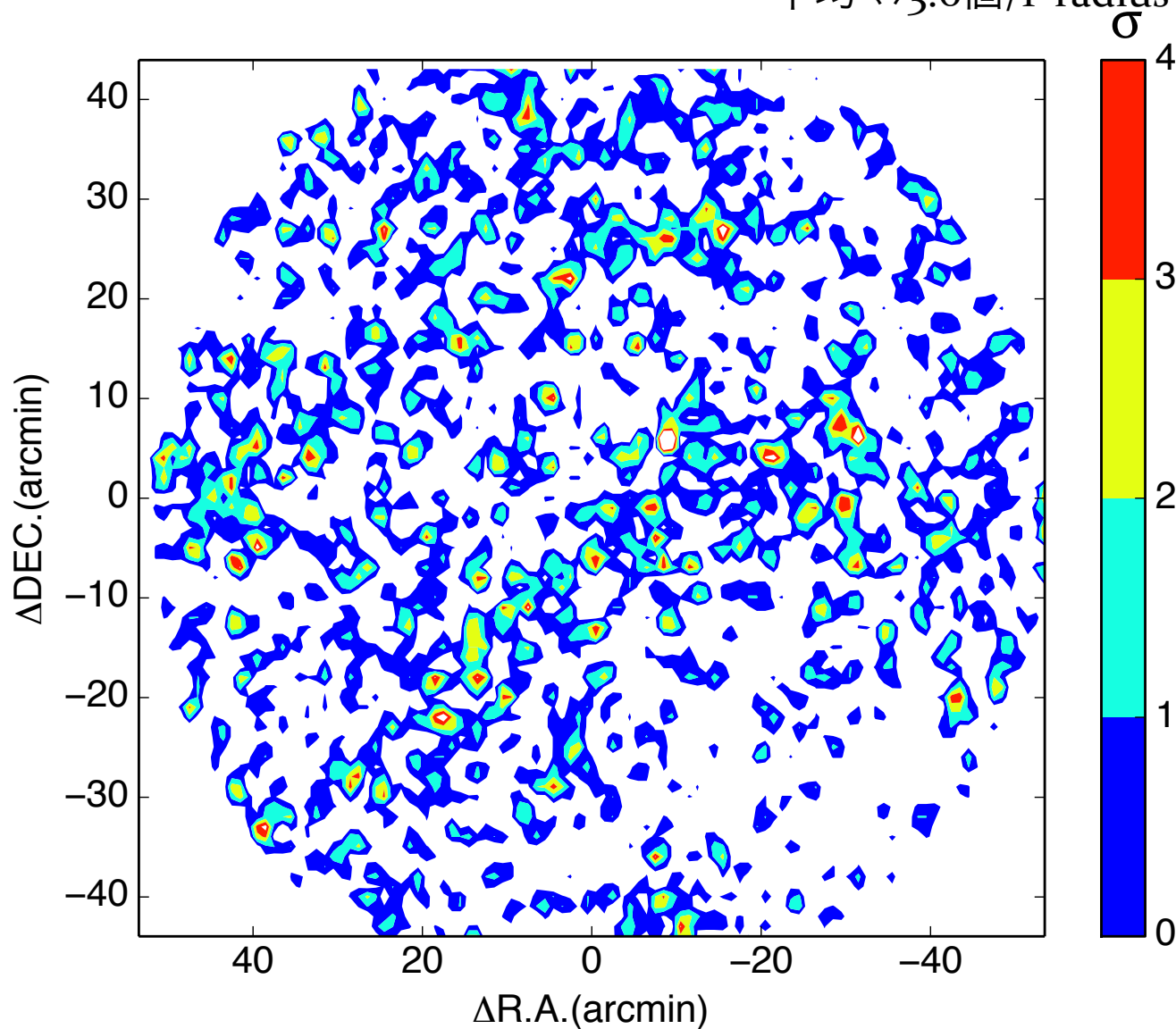


銀河団/銀河群候補の空間分布

4. 結果

★色選択された銀河の空間分布

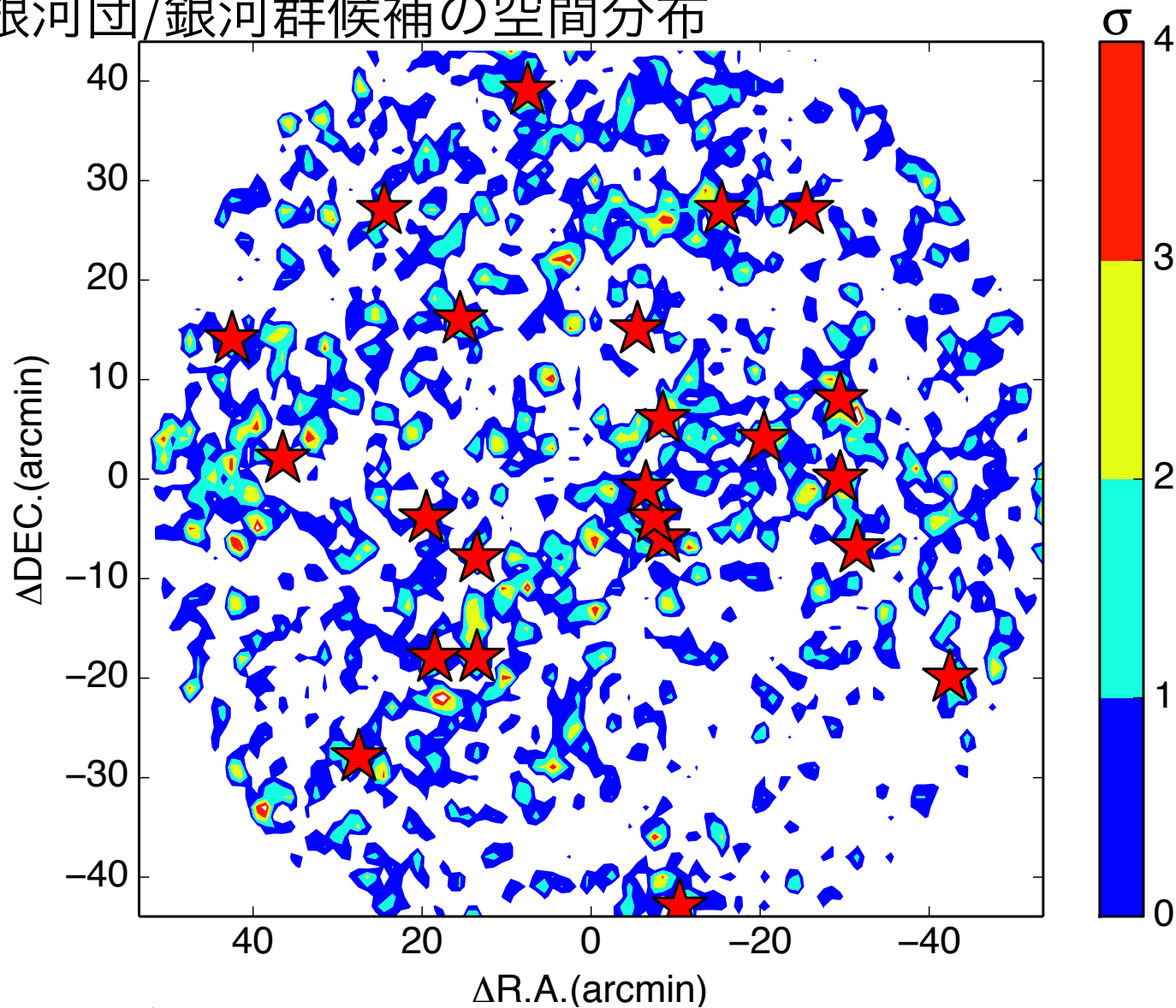
$1\sigma \Leftrightarrow 3.2$ 個/ $1'$ radius aperture
平均 $\Leftrightarrow 3.6$ 個/ $1'$ radius aperture



銀河団/銀河群候補の空間分布

4. 結果

★銀河団/銀河群候補の空間分布



21個の銀河団/銀河群候補を発見した

色選択した銀河

→銀河団候補になる高密度領域の指標として使用した

発見した銀河団候補領域の銀河全てを足し合わせ、
銀河団銀河の性質を調べていく

前景・背景銀河の差し引き

4. 結果

各銀河団候補の領域には, 他の赤方偏移の銀河も含まれている
メンバー銀河の平均的な性質を調べるため, 一般領域を使って
前景背景銀河の差し引きを行う

銀河団領域全ての銀河 (銀河団+一般領域) — 一般領域の銀河 = 銀河団銀河

銀河の色分布(各銀河団候補のRed sequenceとの差)

★ 一般領域の定義

色選択された銀河の密度が
 1σ 以下の領域

★ 色分布の二極性

- Red sequence

$\Delta(i'-z') \sim 0$

- Blue cloud

$\Delta(i'-z') \sim -0.2 - -0.5$

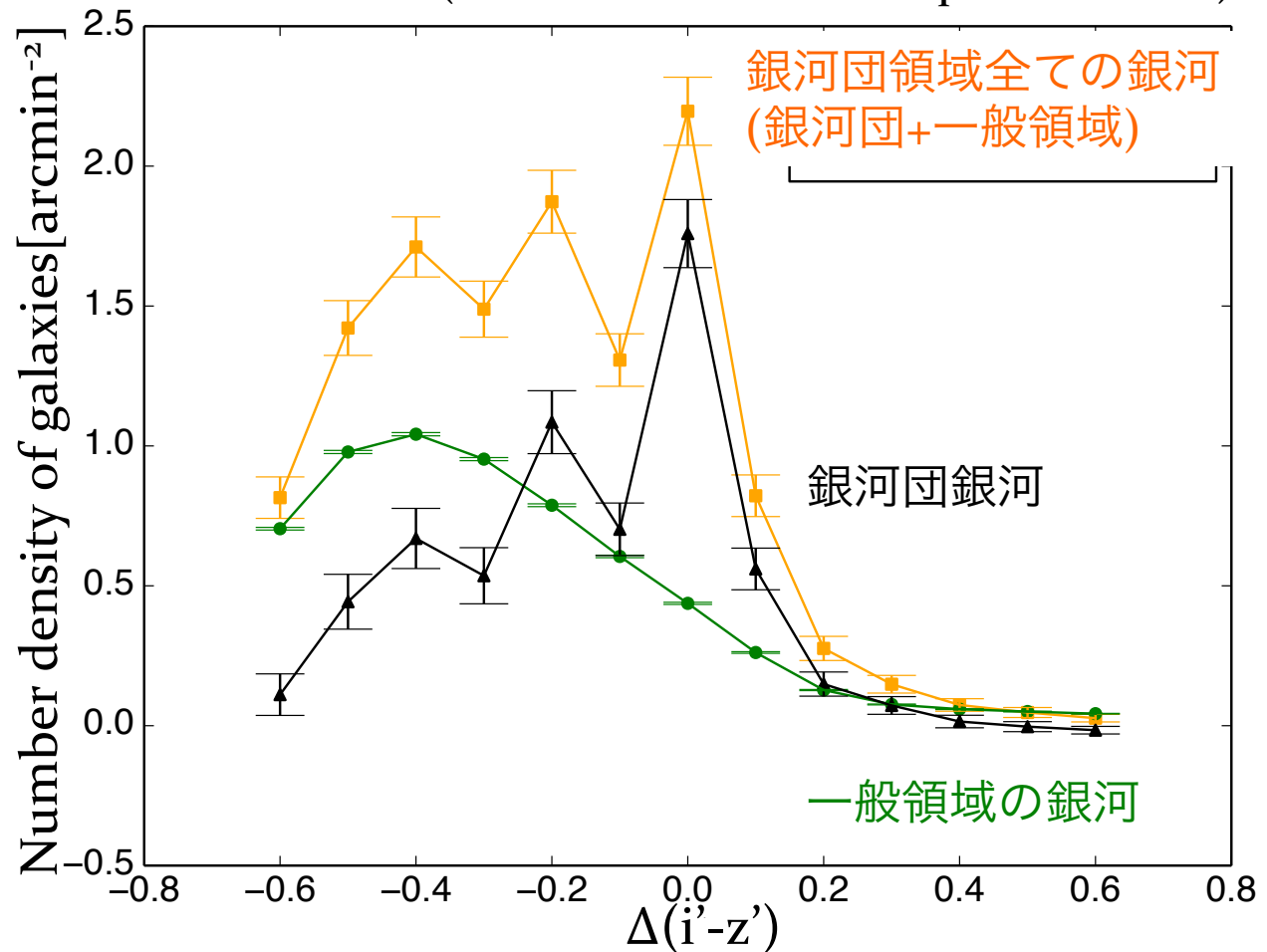
★ 青い銀河の定義

$\Delta(i'-z') < -0.28$

Butcher & Oemlerの

静止系の $\Delta(B-V) < -0.2$ に

最適化した



前景・背景銀河の差し引き

4. 結果

各銀河団候補の領域には, 他の赤方偏移の銀河も含まれている
メンバー銀河の平均的な性質を調べるため, 一般領域を使って
前景背景銀河の差し引きを行う

銀河団領域全ての銀河
(銀河団+一般領域)

一般領域の銀河

=

銀河団銀河

銀河の色分布(各銀河団候補のRed sequenceとの差)

★ 一般領域の定義

色選択された銀河の密度が
 1σ 以下の領域

★ 色分布の二極性

- Red sequence

$\Delta(i'-z') \sim 0$

- Blue cloud

$\Delta(i'-z') \sim -0.2 \sim -0.5$

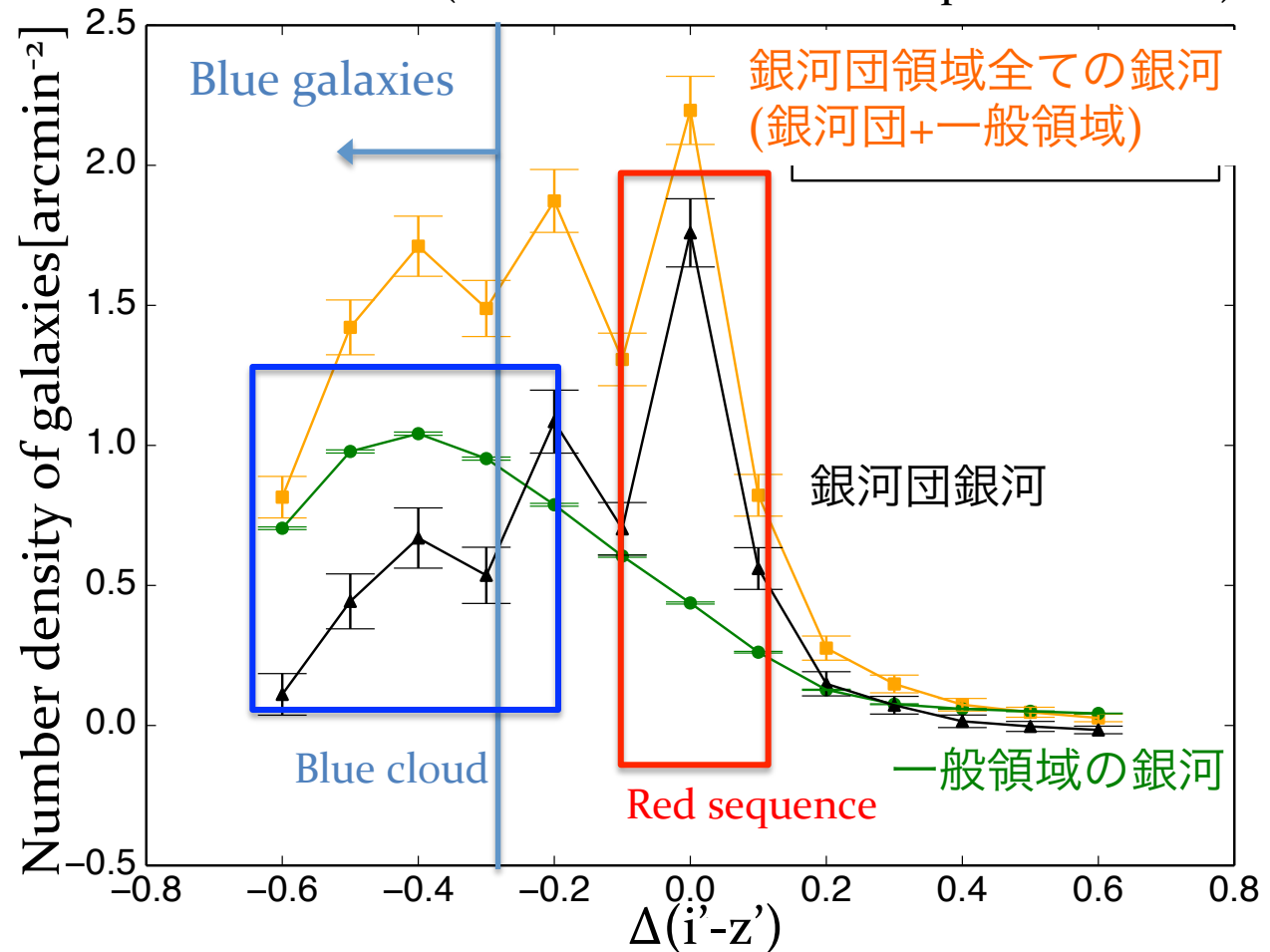
★ 青い銀河の定義

$\Delta(i'-z')_{\text{obs}} < -0.28$

Butcher & Oemlerの

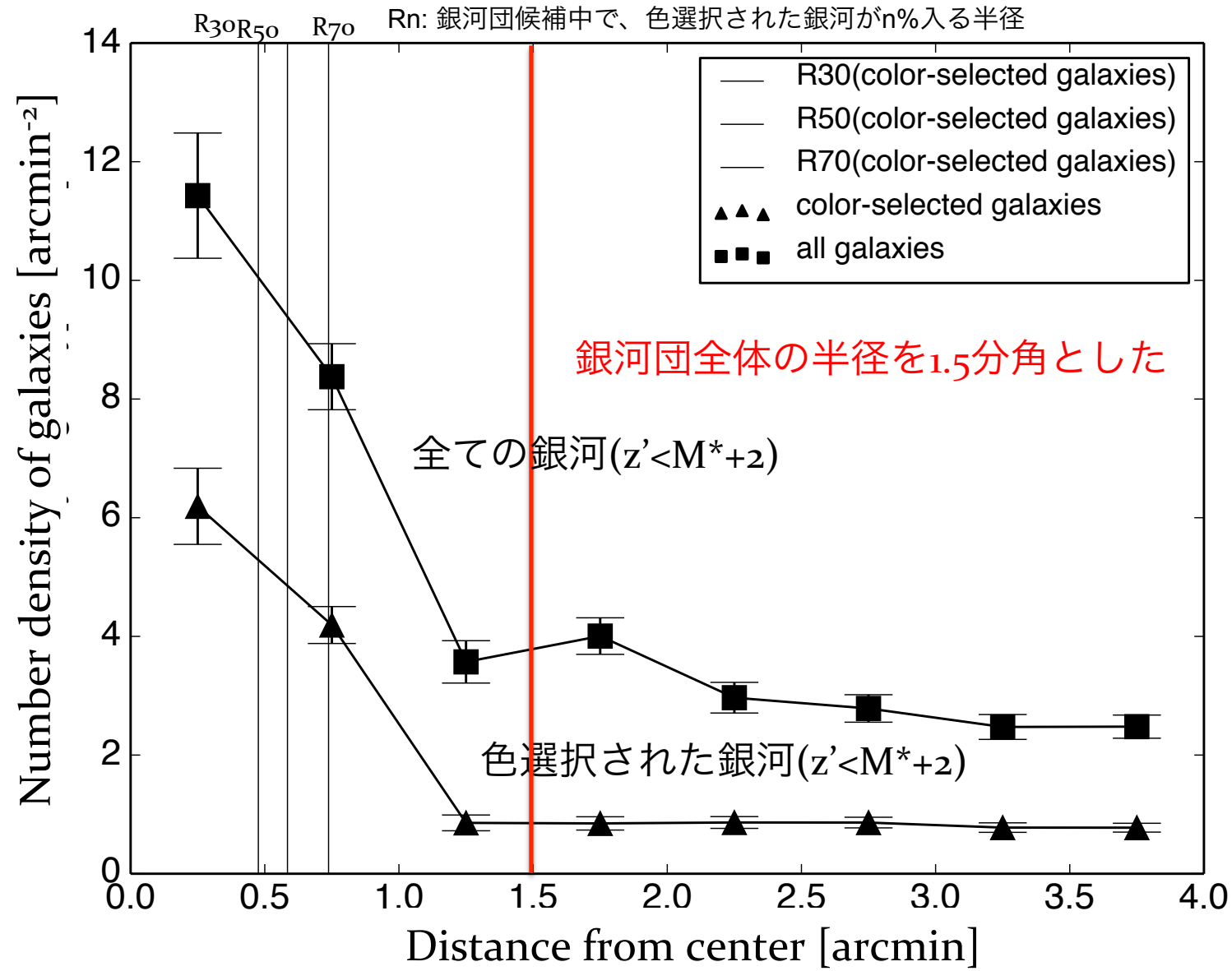
静止系の $\Delta(B-V)_{\text{rest}} < -0.2$

に最適化した

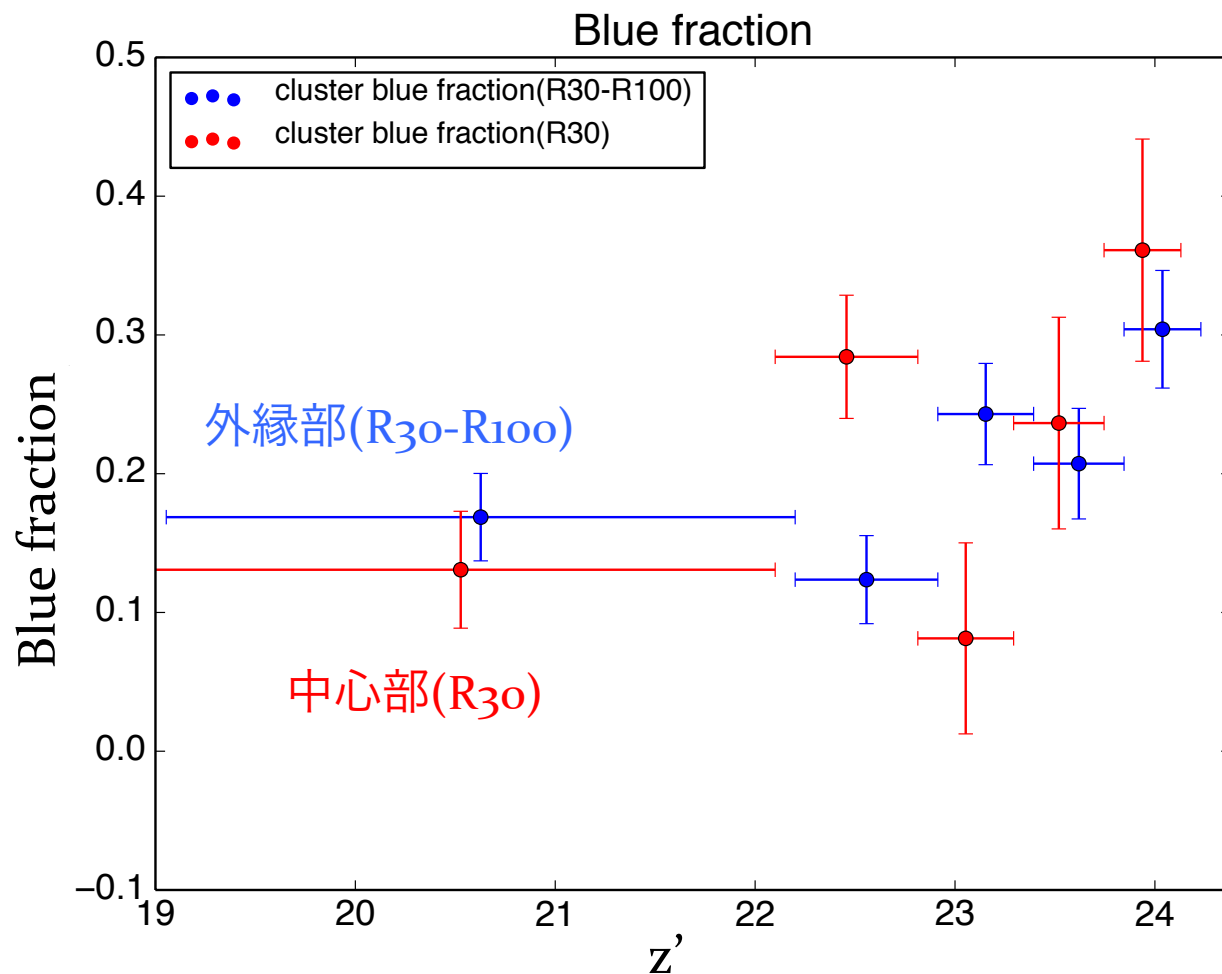


銀河団候補中心からの距離に対する銀河の分布

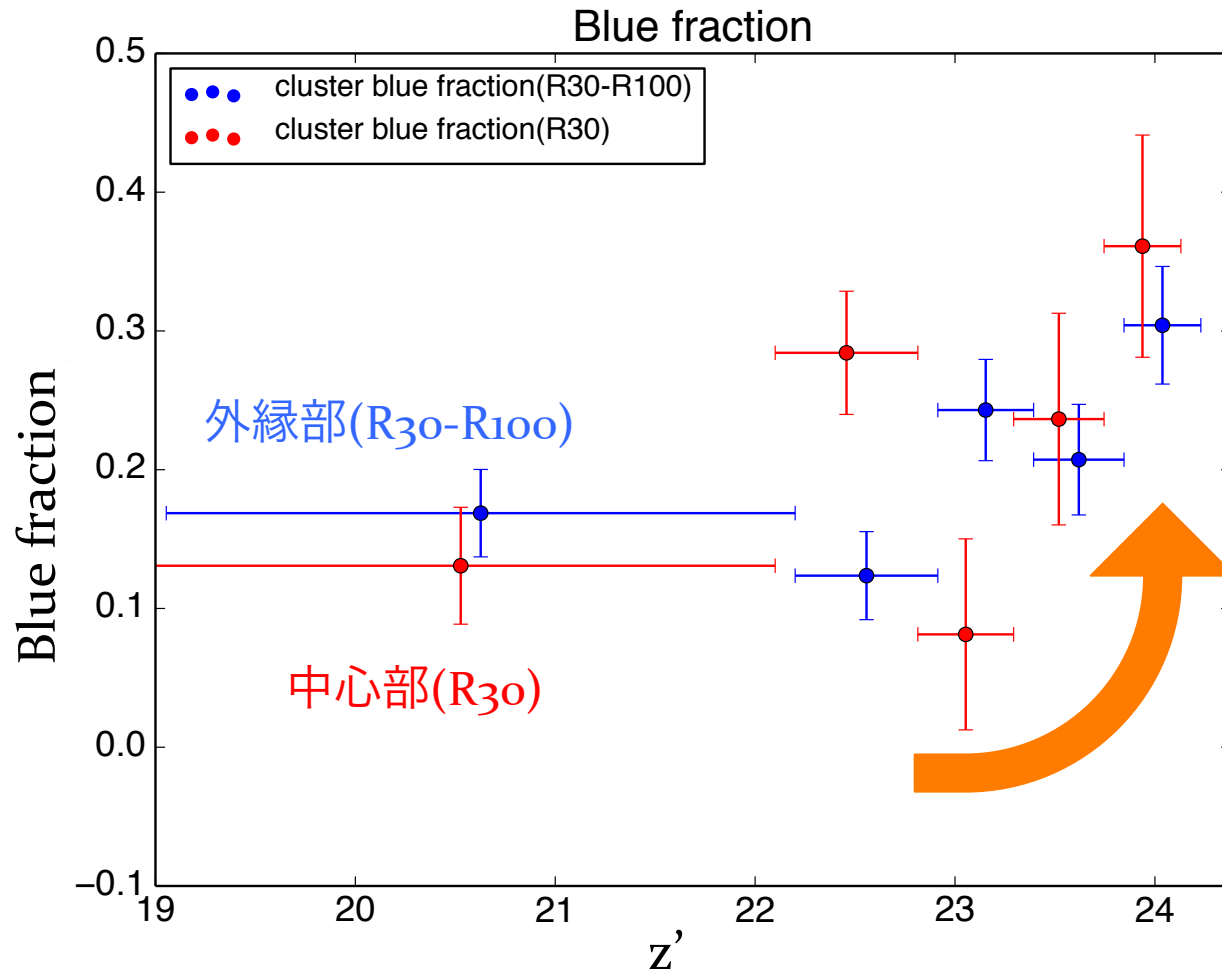
一般領域の差し引きをした後の、銀河団領域の中心からの距離に対する
1 平方分角あたりの銀河の個数密度



銀河の光度に対する青い銀河の割合 4. 結果



銀河の光度に対する青い銀河の割合 4. 結果

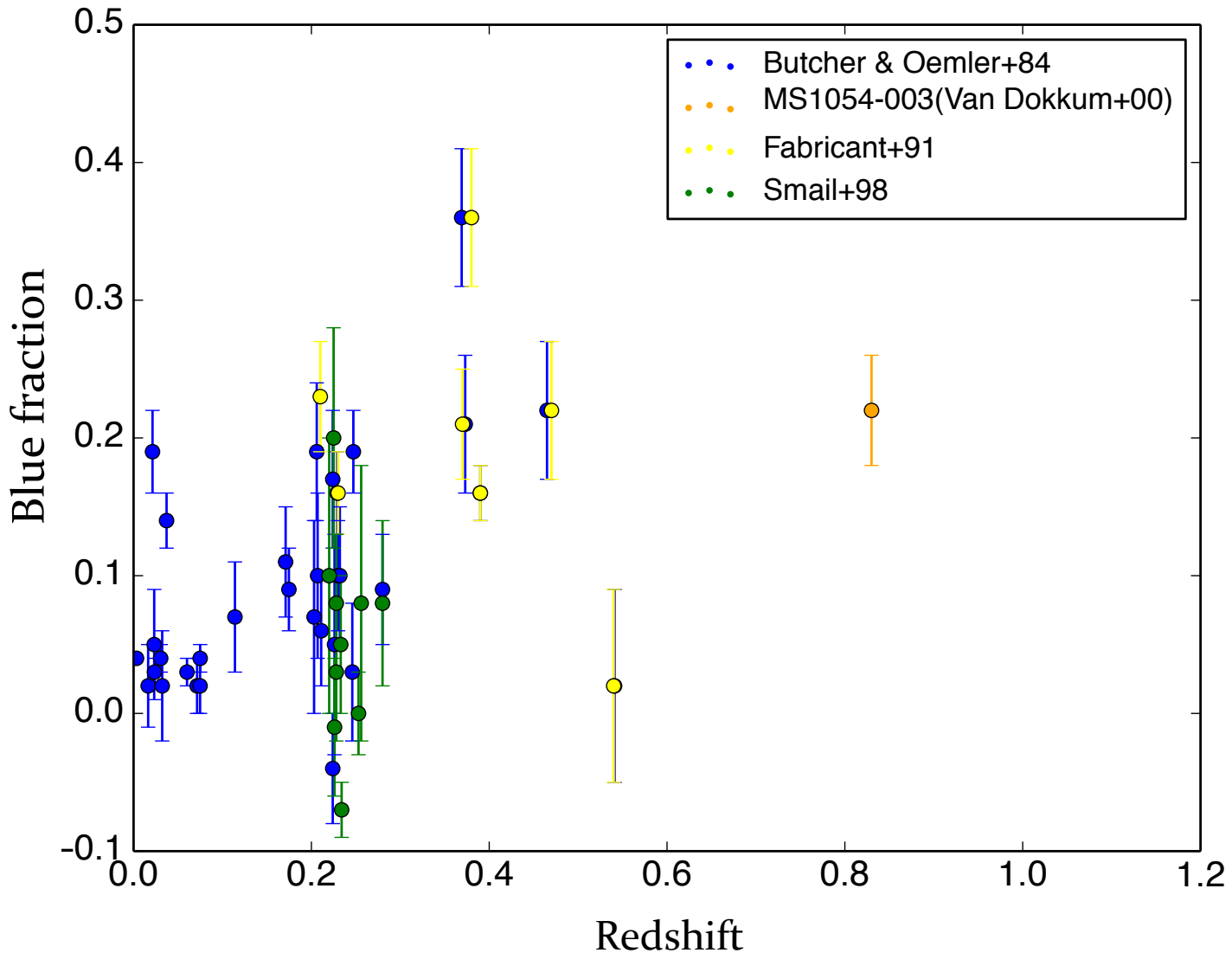


外縁部・中心部共に暗い銀河である程、青い銀河の割合が増加する
→銀河の”ダウンサイジング成長(Cowie+96)”を示唆
- 明るい(重い)銀河から順番に成長し星形成を終え、赤い銀河になる

赤方偏移に対する青い銀河の割合

4. 結果

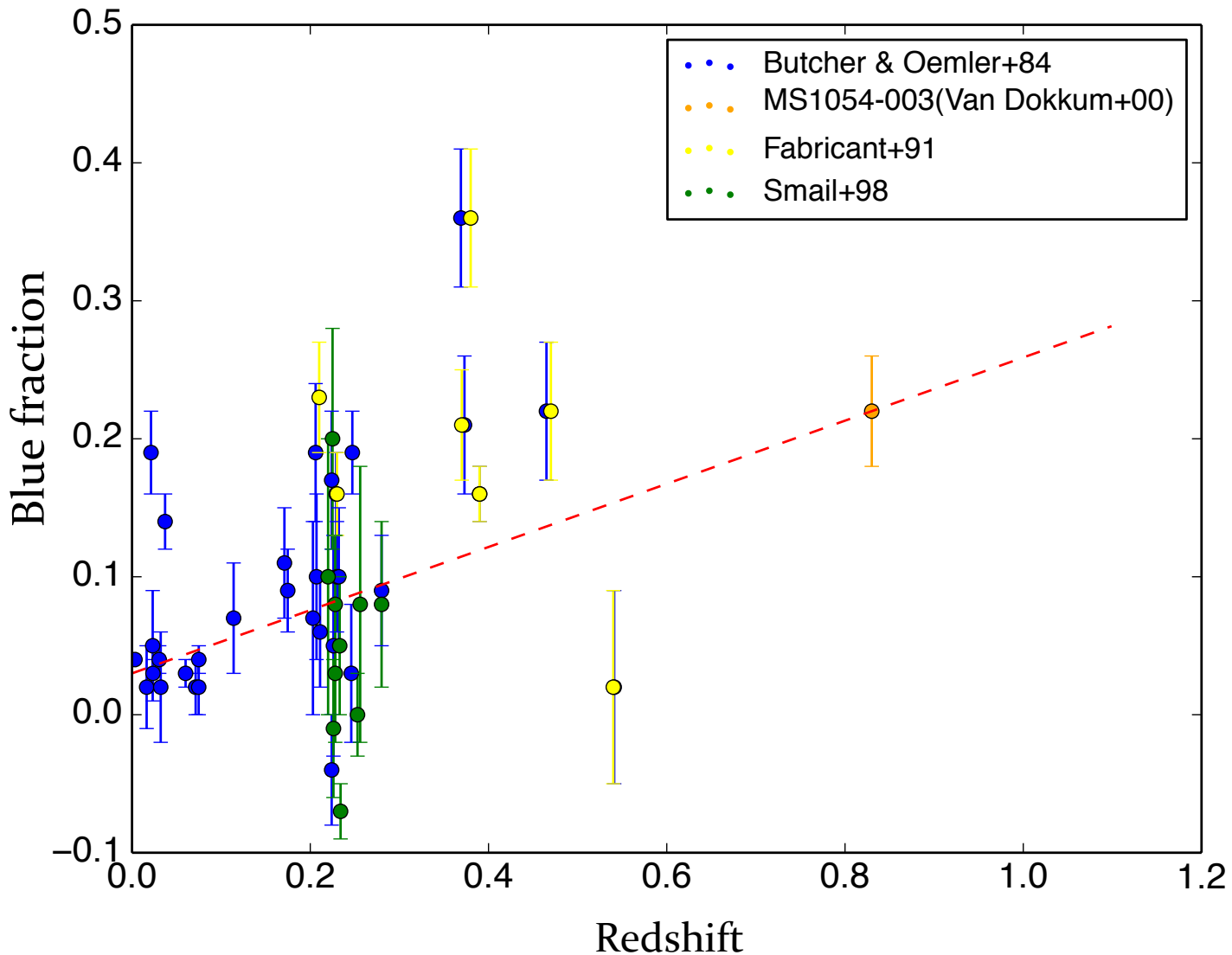
銀河団中心部の青い銀河の割合(in R_{30} , $z' < M^* + 1(23.18)$)



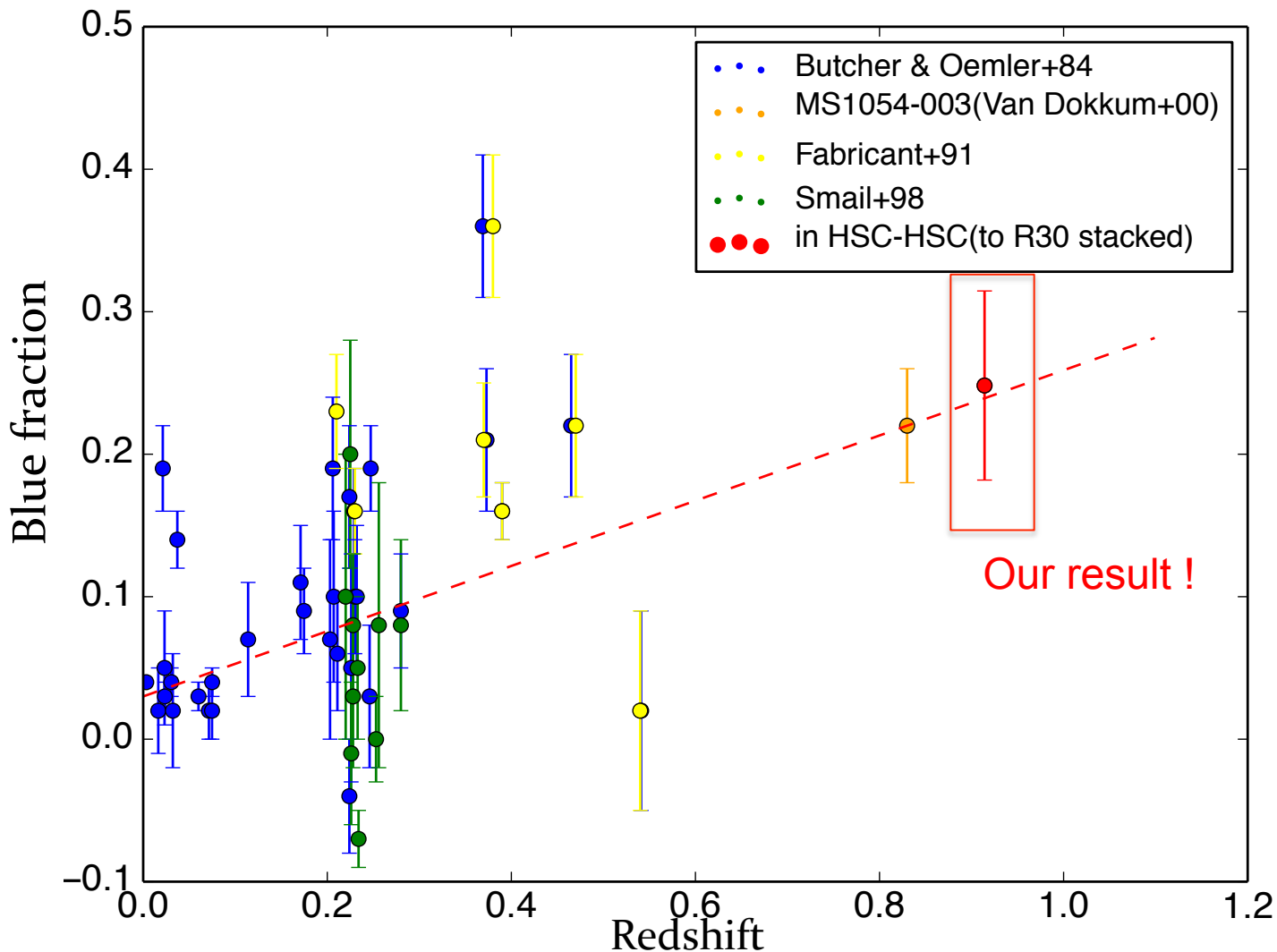
赤方偏移に対する青い銀河の割合

4. 結果

銀河団中心部の青い銀河の割合(in R_{30} , $z' < M^* + 1(23.18)$)



赤方偏移に対する青い銀河の割合

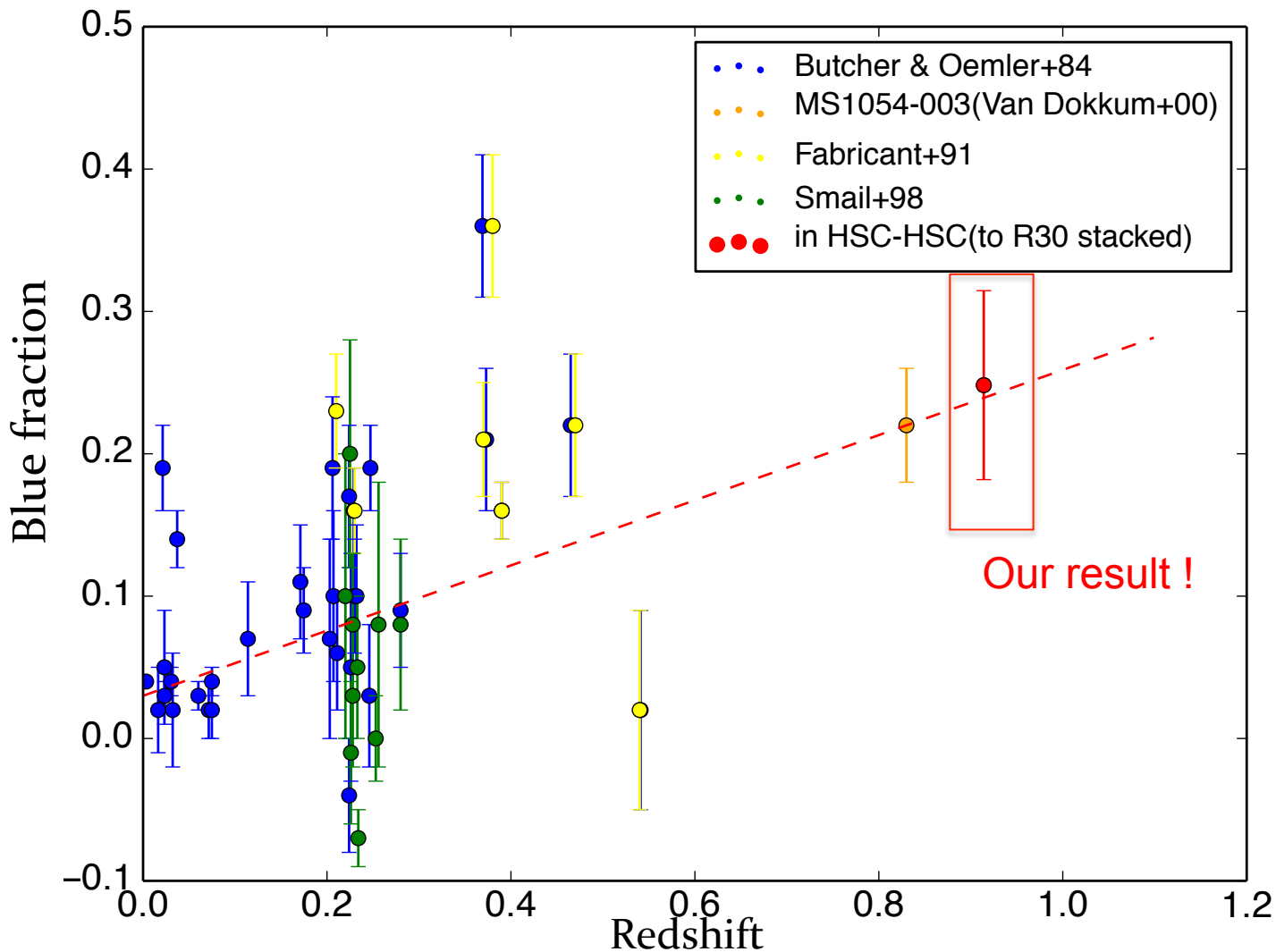
銀河団中心部の青い銀河の割合(in R_{30} , $z' < M^* + 1(23.18)$)

銀河団候補を足し合わせる事で、
今回初めて $z \sim 1$ において統計的に銀河団中心部の青い銀河の割合を測定した

赤方偏移に対する青い銀河の割合

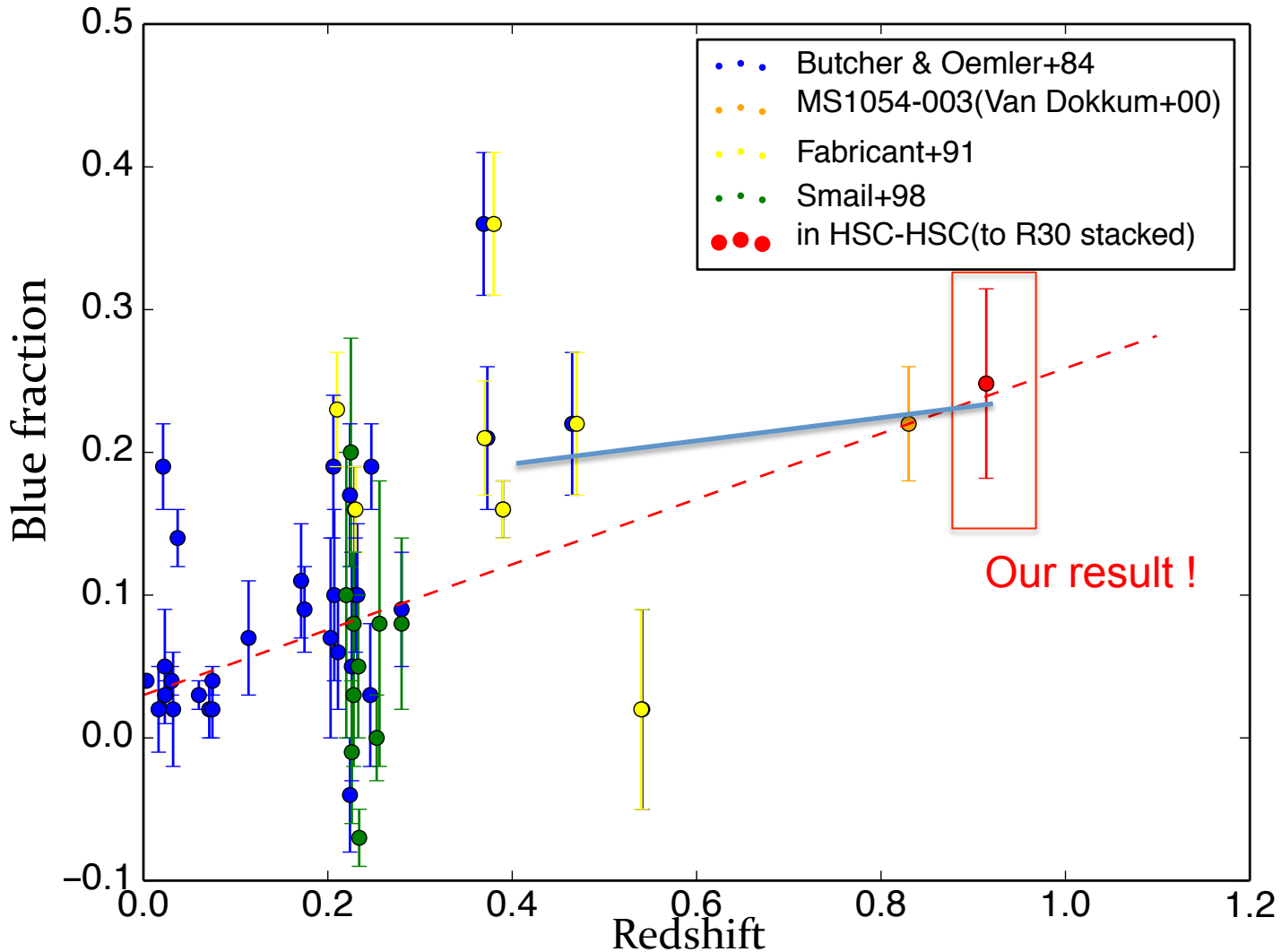
4. 結果

銀河団中心部の青い銀河の割合(in R_{30} , $z' < M^* + 1(23.18)$)



$z \sim 0$ の結果と比較すると青い銀河の割合は緩やかに増加する傾向が見られ、近傍銀河団で見られたブッチャー・エムラー効果が $z \sim 1$ まで続いている？

4. 結果

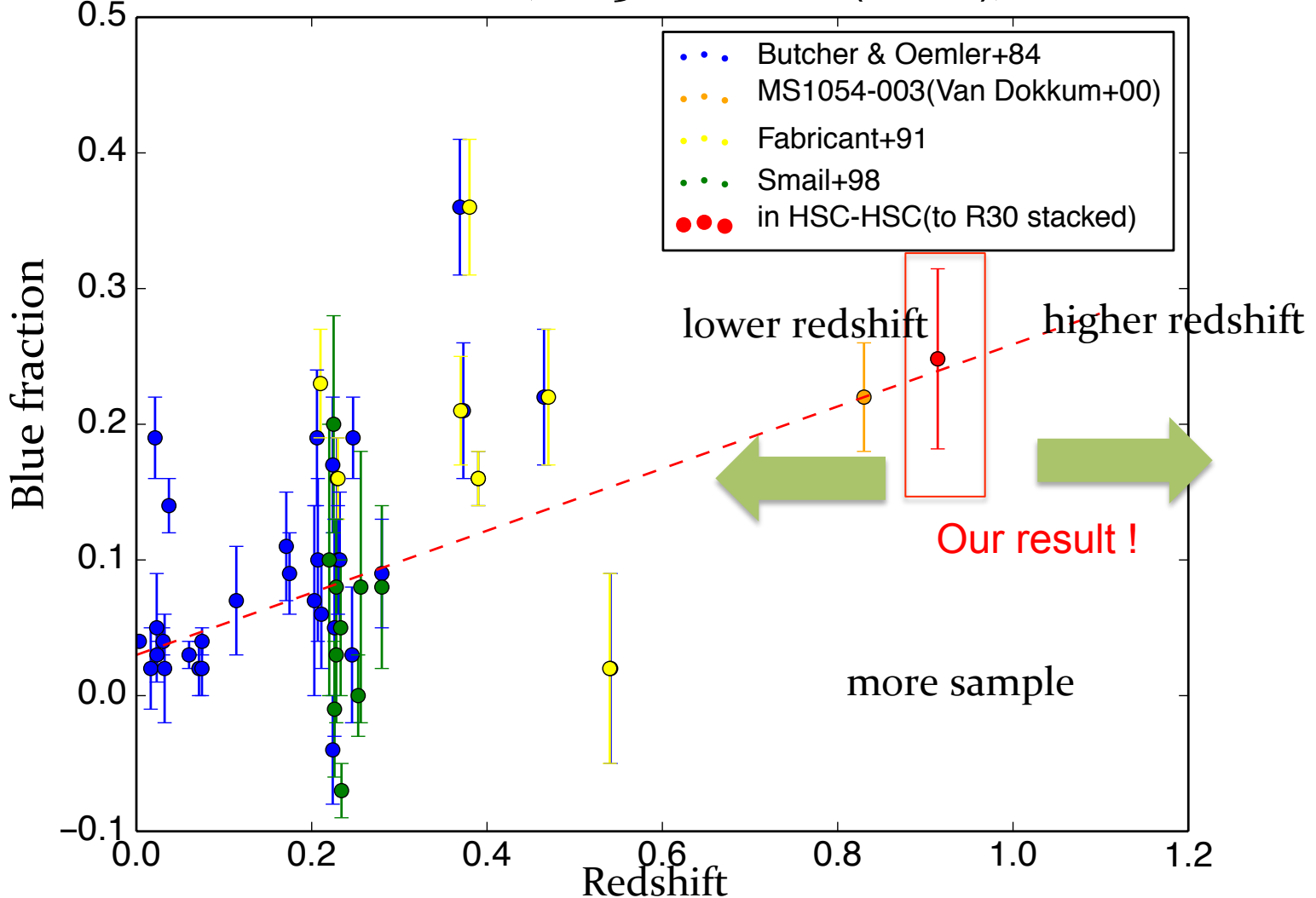
銀河団中心部の青い銀河の割合(in R_{30} , $z' < M^* + 1(23.18)$)

z~0.4の結果と比較すると、それ以降は進化していないとも解釈できる
より多くのサンプルを、別の赤方偏移においても集めて議論

赤方偏移に対する青い銀河の割合

4. 結果

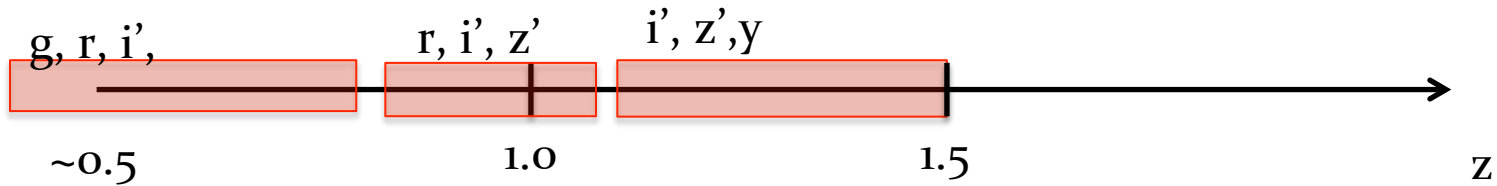
銀河団中心部の青い銀河の割合(in R_{30} , $z' < M^* + 1(23.18)$)



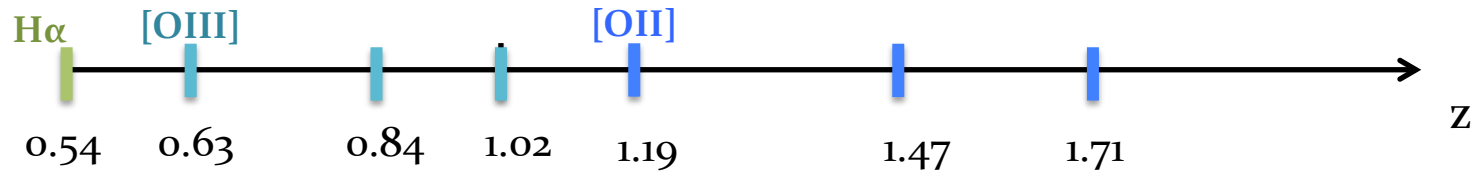
- ・ 青い銀河の割合を、圧倒的なサンプルの大きさにより統計的に測定する
- ・ 赤方偏移範囲の拡大
- ・ 星形成銀河をプローブとしたサンプルも含め、銀河種族に対しバイアスを小さく

★HSC-HSC

Red sequenceサーベイ

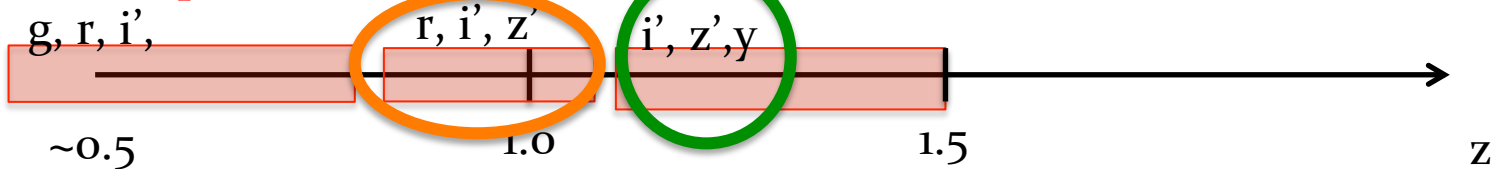


Blue cloudサーベイ

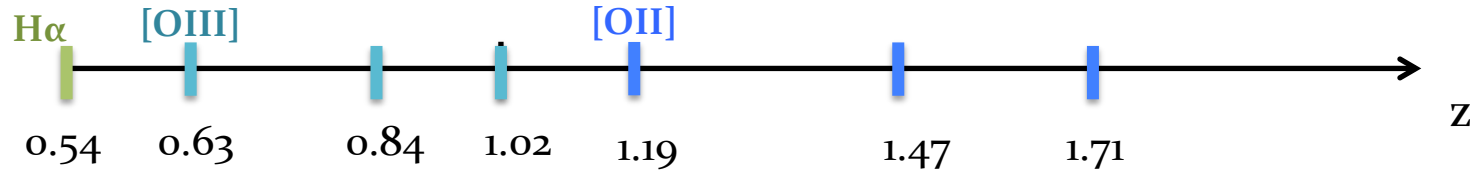


★HSC-HSC

Red sequenceサーベイ



Blue cloudサーベイ



今回までの結果

HSC-SSPの₁視野分のデータを用いて、

- ・ COSMOS領域で $z \sim 0.9-1.1$ の21個の銀河団/銀河群候補を発見
- ・ サンプルのスタッキング+一般領域の差し引きを行い、銀河団銀河の性質を調べた

$z \sim 1.1-1.3$ においても、COSMOS, SXDS領域上で14,17個の銀河群/銀河団候補を発見した

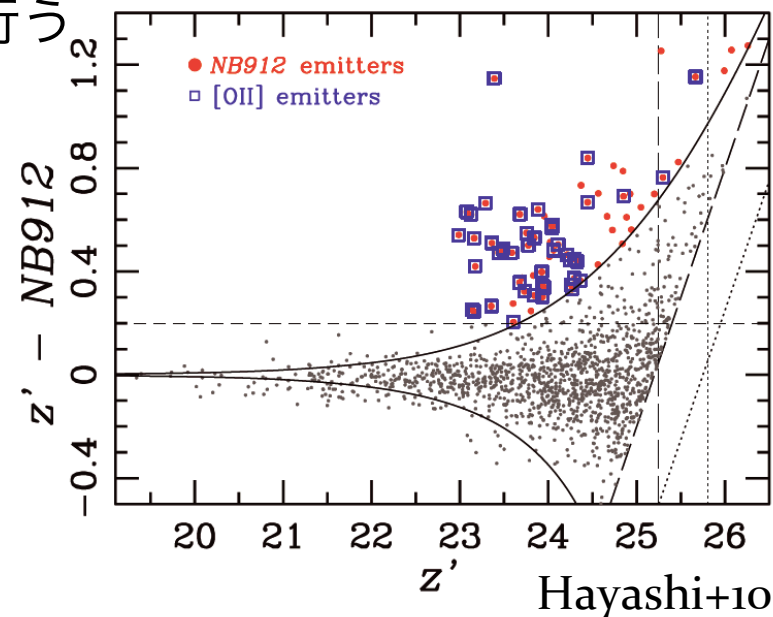
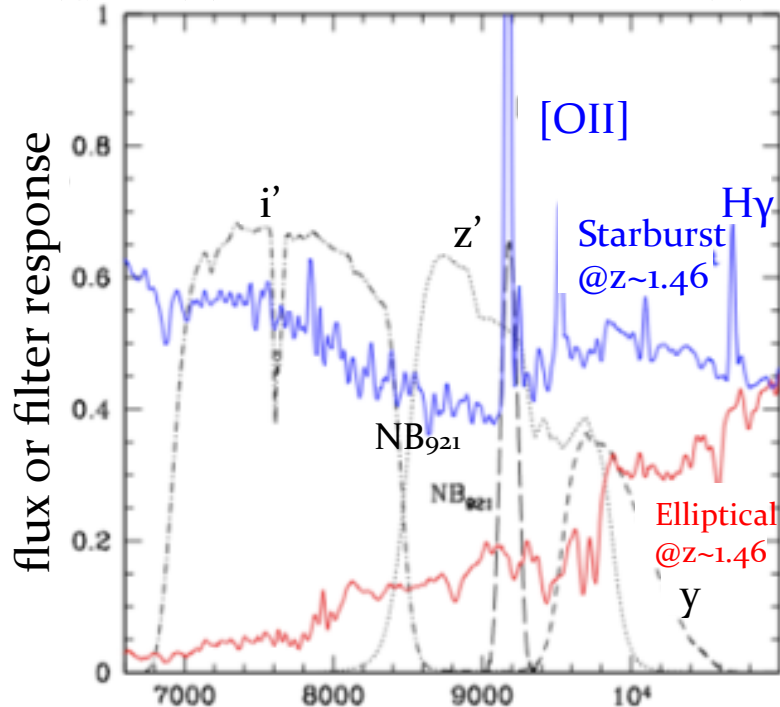
見つけた候補の分光観測→方法論の証明(projectionの効果の見積もりを含む), 力学的質量の測定

- nu-MOIRCS/Subaru, MOSFIRE/keck, GMOS/Gemini(S17A以降)

Blue cloud survey

5. 今後の展望

星形成銀河の電離ガスからの輝線を3枚の狭帯域フィルターで捉え、 $z \sim 0.5-1.7$ の星形成銀河をプローブとして銀河団探索を行う



連続成分(BB)の明るさと比較して、
輝線銀河を取り出す

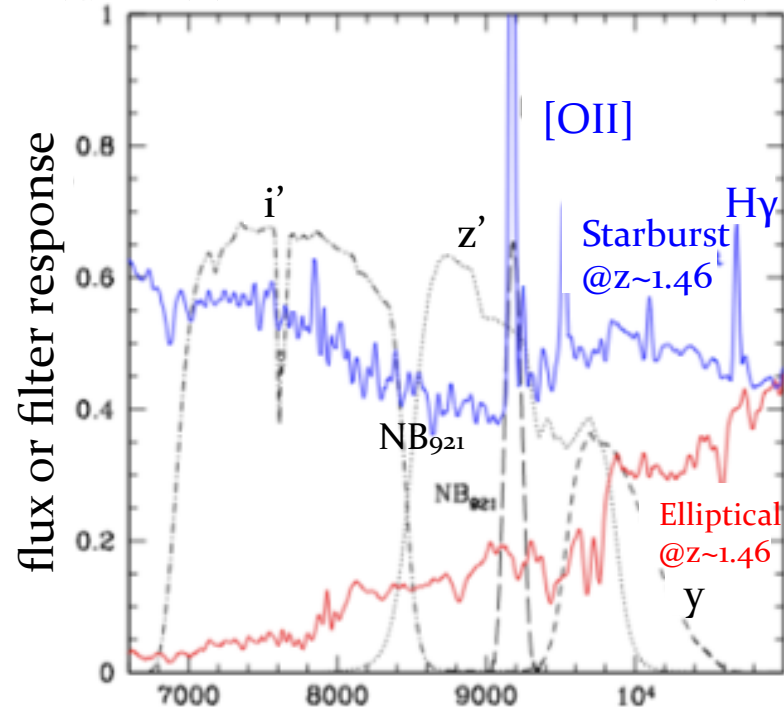
波長(Å)

NB	CW [Å]	FWHM [Å]	$z([\text{OII}])$	$z([\text{OIII}])$	$z([\text{H}\alpha])$
NB816	8160	120	1.19 ± 0.02	0.63 ± 0.01	0.24 ± 0.01
NB921	9210	131	1.47 ± 0.02	0.84 ± 0.01	0.40 ± 0.01
NB101	10095	143	1.71 ± 0.02	1.02 ± 0.01	0.54 ± 0.01

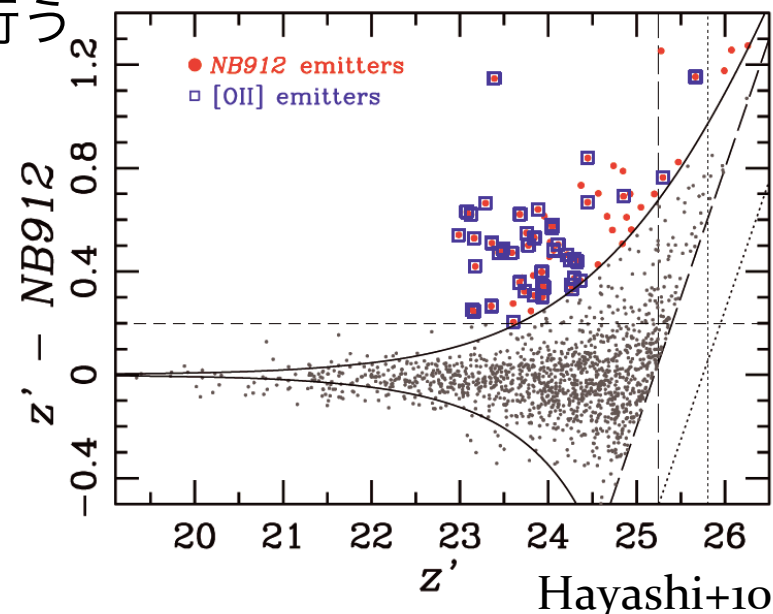
Blue cloud survey

5. 今後の展望

星形成銀河の電離ガスからの輝線を3枚の狭帯域フィルターで捉え、 $z \sim 1.2-1.7$ の星形成銀河をプローブとして銀河団探索を行う



波長(Å)



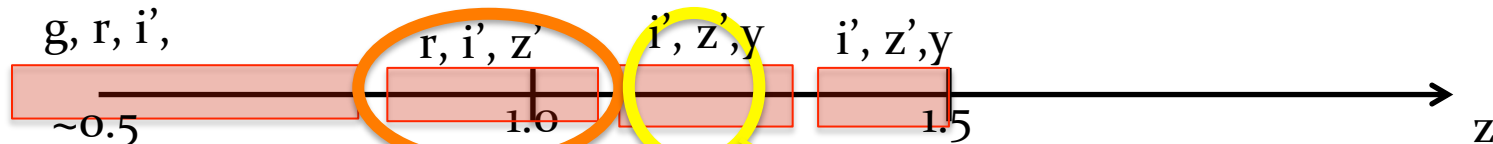
連続成分(BB)の明るさと比較して、
輝線銀河を取り出す

in SXDS U-Deep

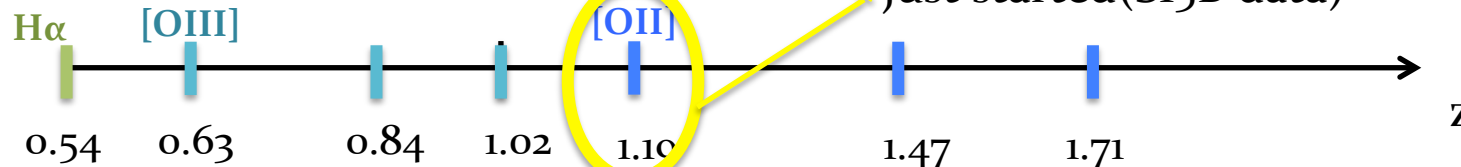
NB	CW [Å]	FWHM [Å]	$z([OII])$	$z([OIII])$	$z([H\alpha])$
NB816	8160	120	1.19 \pm 0.02	0.63 \pm 0.01	0.24 \pm 0.01
NB921	9210	131	1.47 \pm 0.02	0.84 \pm 0.01	0.40 \pm 0.01
NB101	10095	143	1.71 \pm 0.02	1.02 \pm 0.01	0.54 \pm 0.01

★HSC-HSC

Red sequenceサーベイ



Blue cloudサーベイ



Red sequenceサーベイ
受動的銀河 : $z \sim 0.5-1.5$

Blue cloudサーベイ
星形成銀河 : $z \sim 0.5-1.7$

銀河種族に可能な限りバイアスの無い、広い赤方偏移範囲における銀河団サンプル



銀河団銀河の性質、進化についてこれまでに無いレベルの統計的な議論が可能

ex.) 高赤方偏移における銀河団中の青い銀河の割合

- 赤方偏移依存性 : ブッチャー・エムラー効果
- 等級依存性(光度関数) : 銀河進化の質量依存・タイムスケール(down-sizing)
- 空間分布 : 銀河進化の銀河団環境への依存性(inside-out)
- 銀河団銀河の個数に対する依存性

★大規模銀河団サーベイ (HSC-HSC)の初期段階としての成果

- ・ Red sequenceサーベイの方法論を確立
- ・ $z \sim 0.9-1.1$ で21個の銀河団/銀河群候補を発見した
- ・ 見つけた候補で、 $z \sim 1$ において初めて統計的に、
銀河団の青い銀河の割合を調べた
 - 光度依存性
 - 赤方偏移に対する青い銀河の割合

★Future work

HSC-HSC (Hybrid Search for Clusters with HSC)

◎Red sequenceサーベイ

- ・ 分光追観測
- ・ サーベイの拡大

◎Blue cloudサーベイ

- ・ NB撮像により輝線([OII],[OIII], $H\alpha$)を捉え、星形成銀河をプローブとし、銀河団サンプルを構築

$0.5 < z < 1.7$ において、2つの銀河種族をプローブとした巨大銀河団サンプルの構築

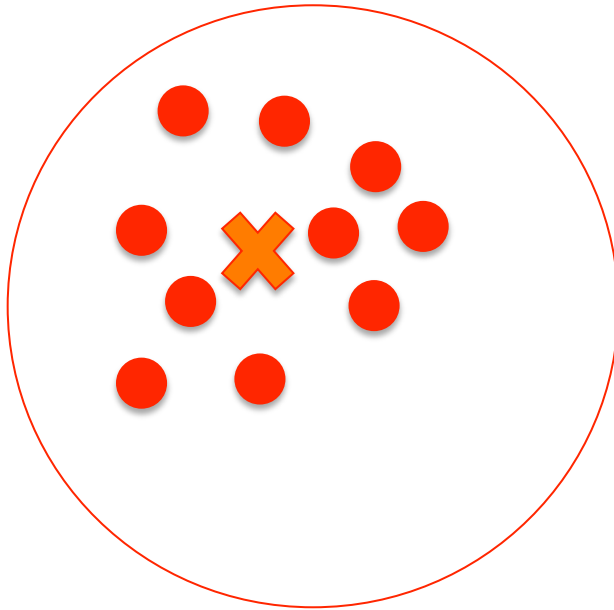
青い銀河の割合をはじめとした銀河団銀河の性質、
進化について高い統計レベルで検証する

Appendix.

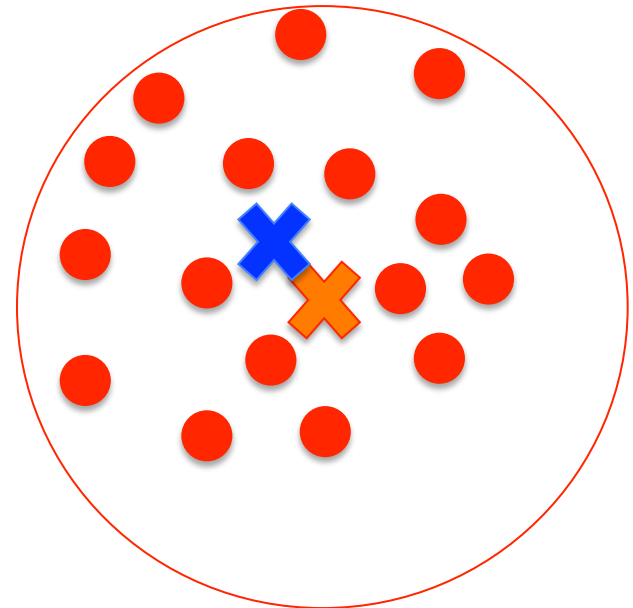
高密度領域の定義

1. 半径 r' の円を、観測領域に隙間無く敷き詰め、各円内の銀河の個数を計算し、平均の個数とその分散(σ)を求める
2. 3σ 以上の密度をもつ円について、その内部に含まれる銀河の重心をとる
3. さらにその重心から半径 r' 以内に存在する銀河の重心をとり、この座標を高密度領域の中心とする

2.



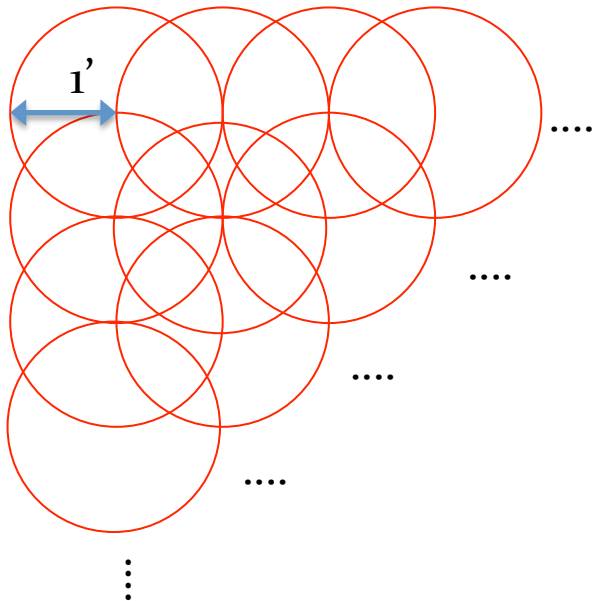
3.



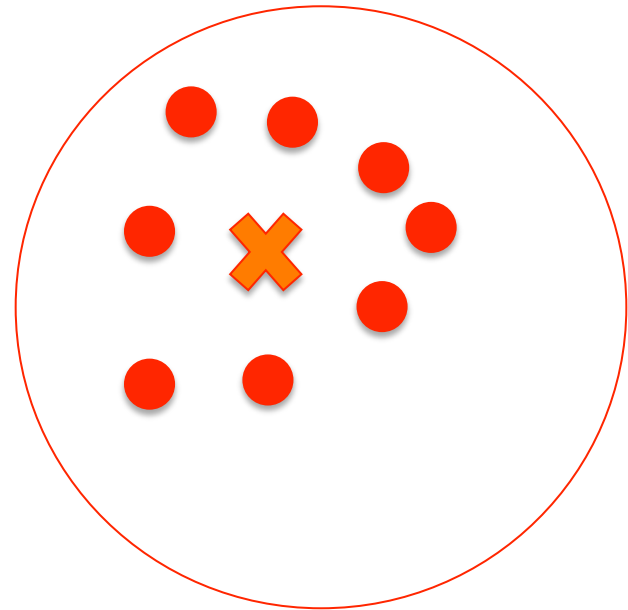
高密度領域の定義

1. 半径 r' の円を、観測領域に隙間無く敷き詰め、各円内の銀河の個数を計算し、平均の個数とその分散(σ)を求める
2. 3σ 以上の密度をもつ円について、その内部に含まれる銀河の重心をとる
3. さらにその重心から半径 r' 以内に存在する銀河の重心をとり、この座標を高密度領域の中心とする

1.



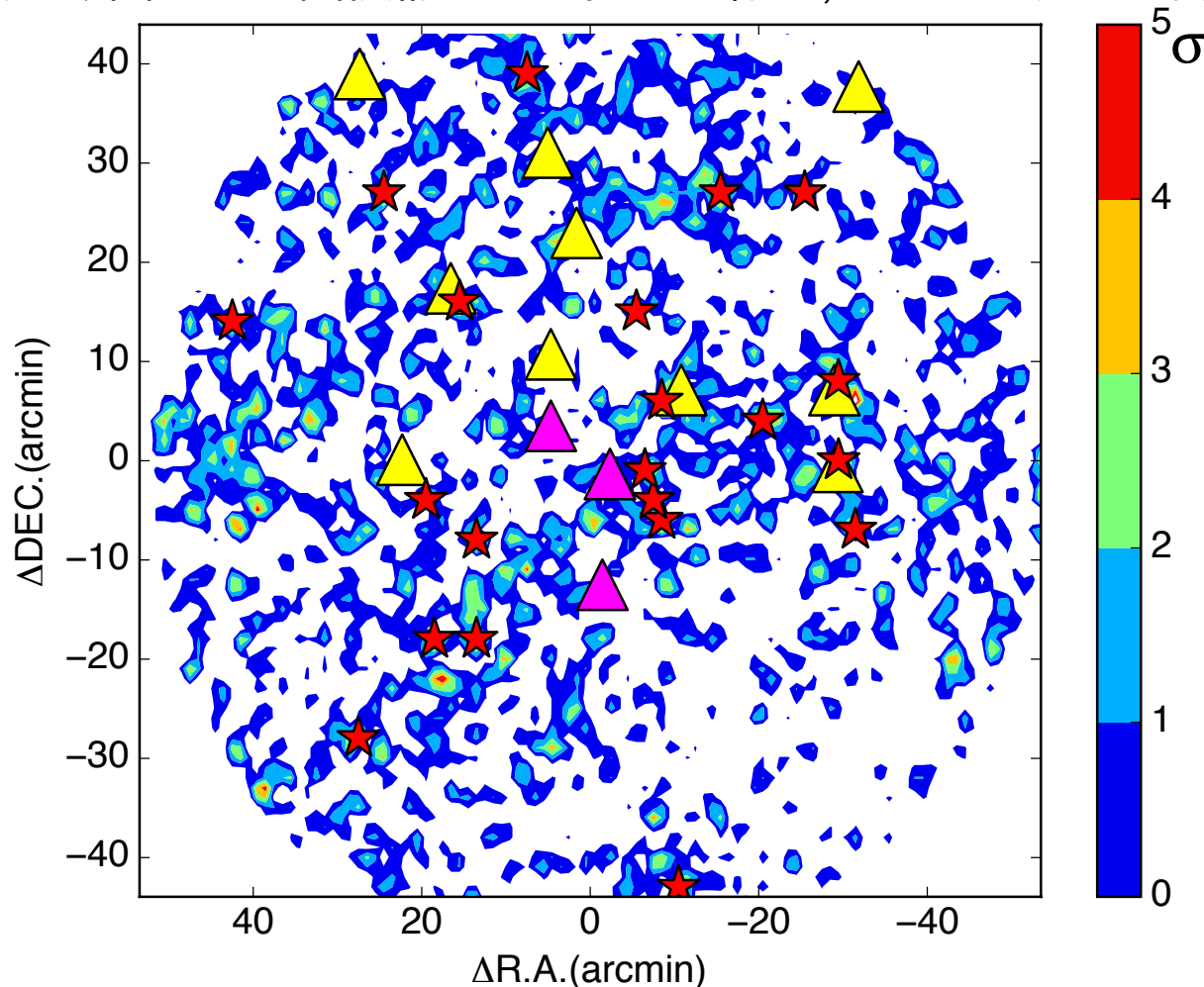
2.



他銀河団との比較

★XMM-Newtonにより発見された銀河団(Finoguenov+07)

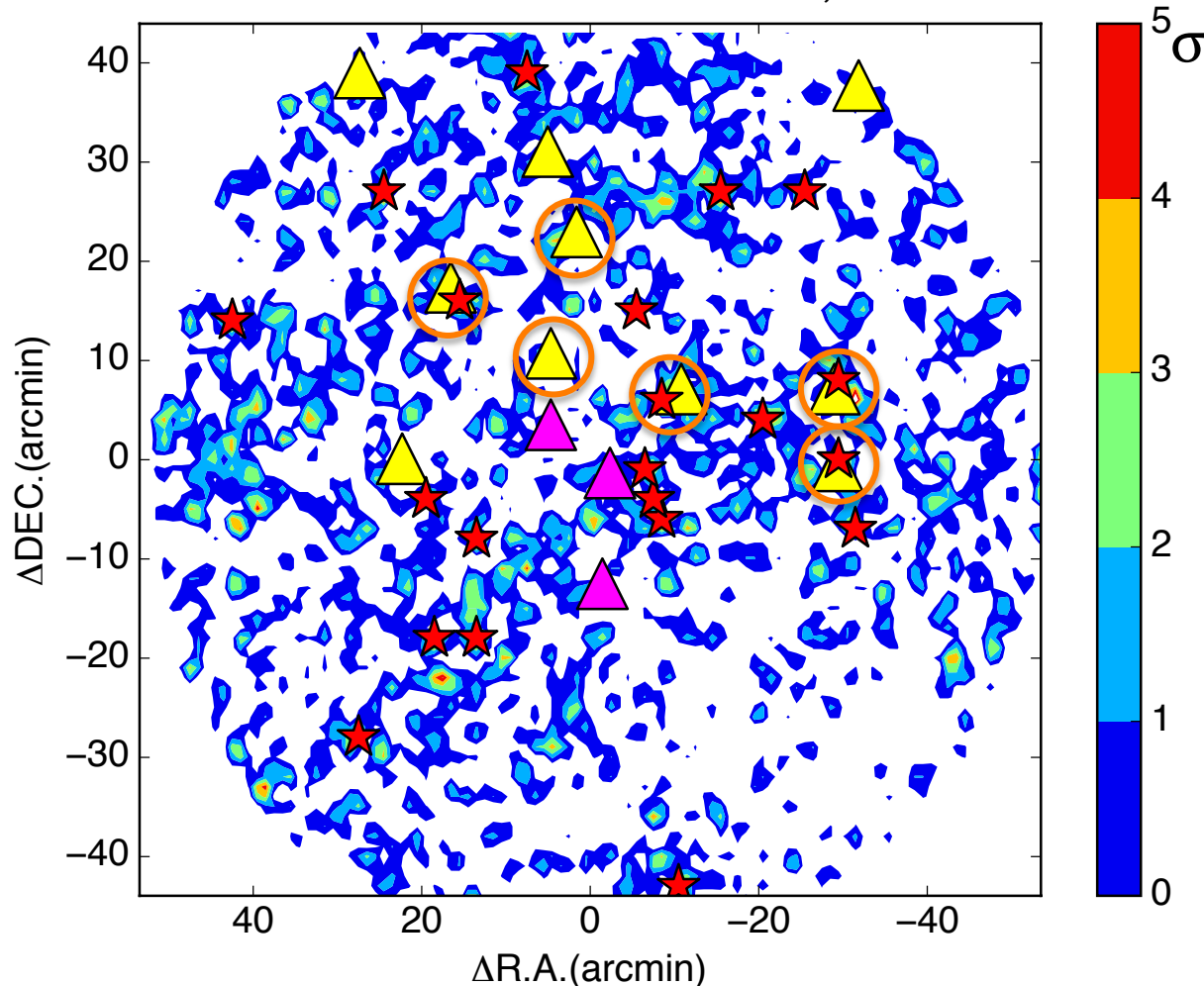
- ・分光確認された3個の銀河団($z \sim 0.9$, ▲)
 - 全て 2.5σ 以上の密度の領域に存在
- ・photo-zのみ測定されている9個の銀河団($z \sim 0.9-1.0$, ▲)
 - 4個は今回の銀河団候補とほぼ同じ座標に, 2つは 3σ 以上の密度の領域に存在



他銀河団との比較

★XMM-Newtonにより発見された銀河団(Finoguenov+07)

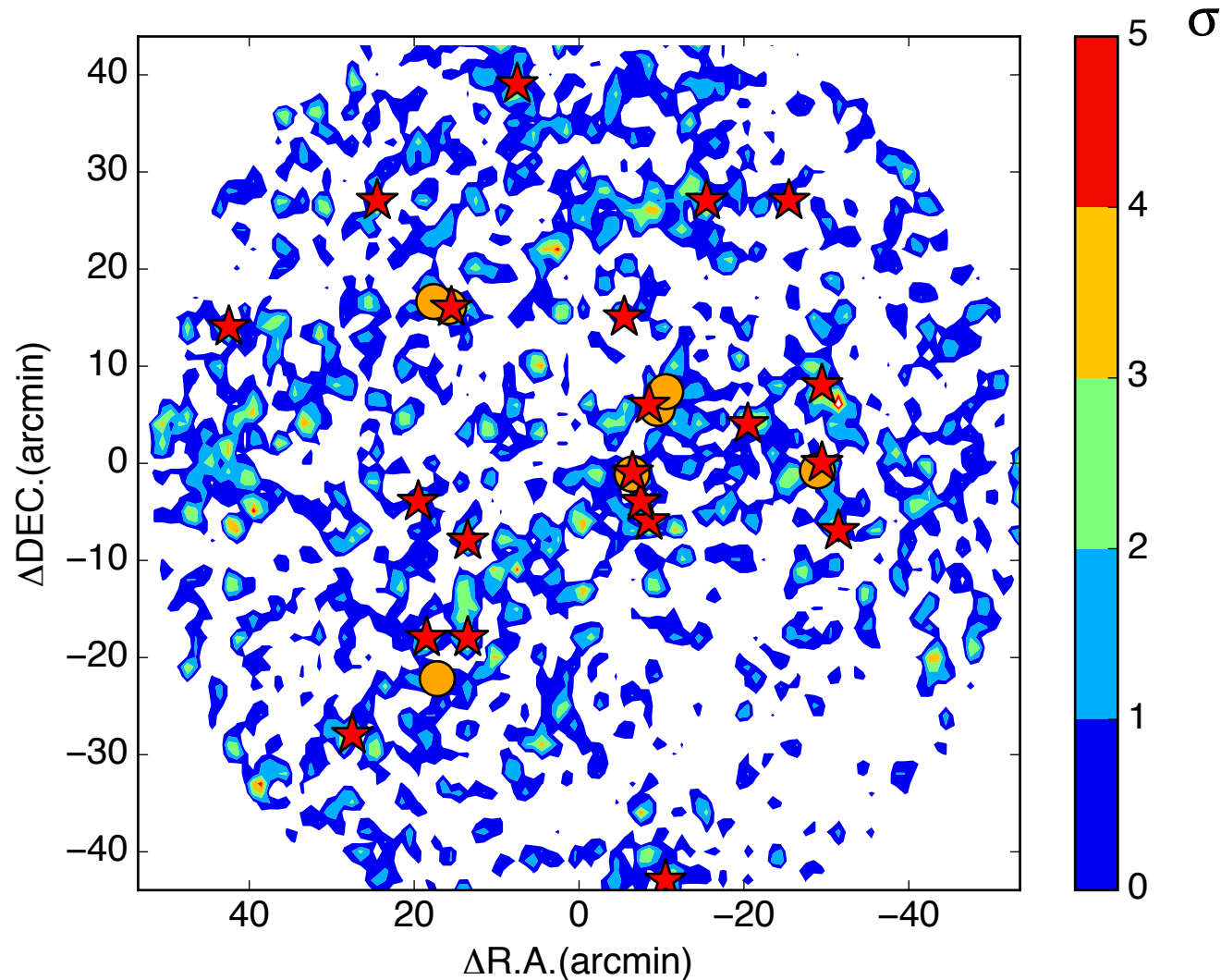
- ・ 分光確認された3個の銀河団($z \sim 0.9$, \blacktriangle)
 - 全て 2.5σ 以上の密度の領域に存在
- ・ photo-zのみ測定されている9個の銀河団($z \sim 0.9-1.0$, \blacktriangle)
 - 4個は今回の銀河団候補とほぼ同じ座標に, 2つは 3σ 以上の密度の領域に存在



他銀河団/銀河群との比較

★GMOS/Geminiにより分光同定された銀河群(Balogh+12)

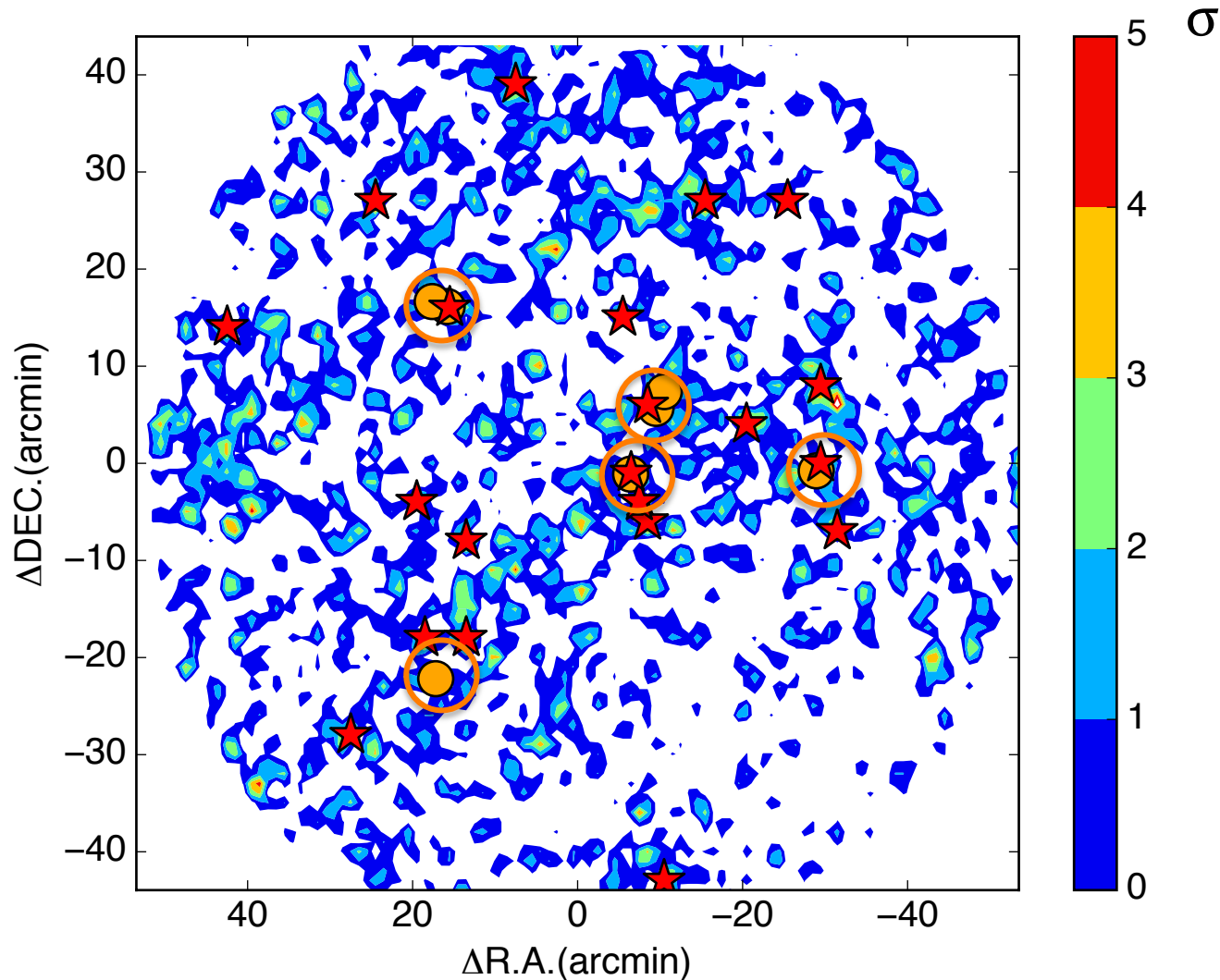
- ・ 分光確認された7個の銀河群($z \sim 0.8-0.95$, ●)
- 全て 3σ 以上の領域に存在



他銀河団/銀河群との比較

★GMOS/Geminiにより分光同定された銀河群(Balogh+12)

- ・ 分光確認された7個の銀河群($z \sim 0.8-0.95$, ●)
 - 全て 3σ 以上の領域に存在

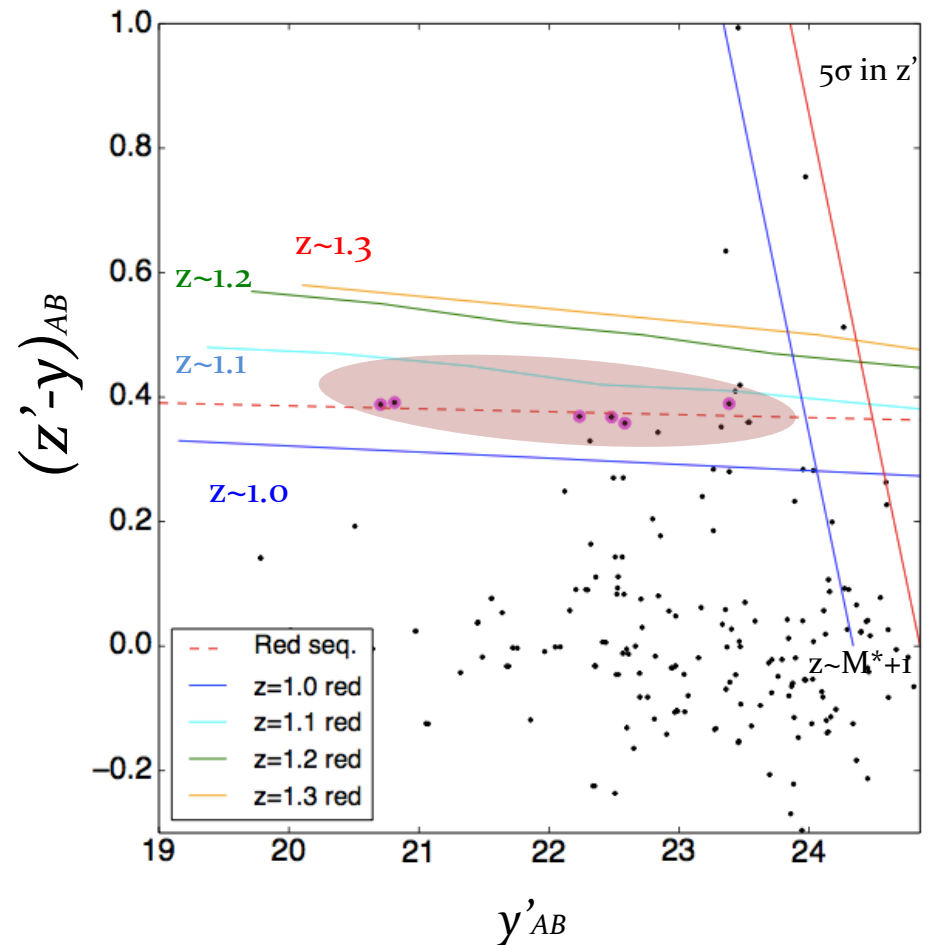
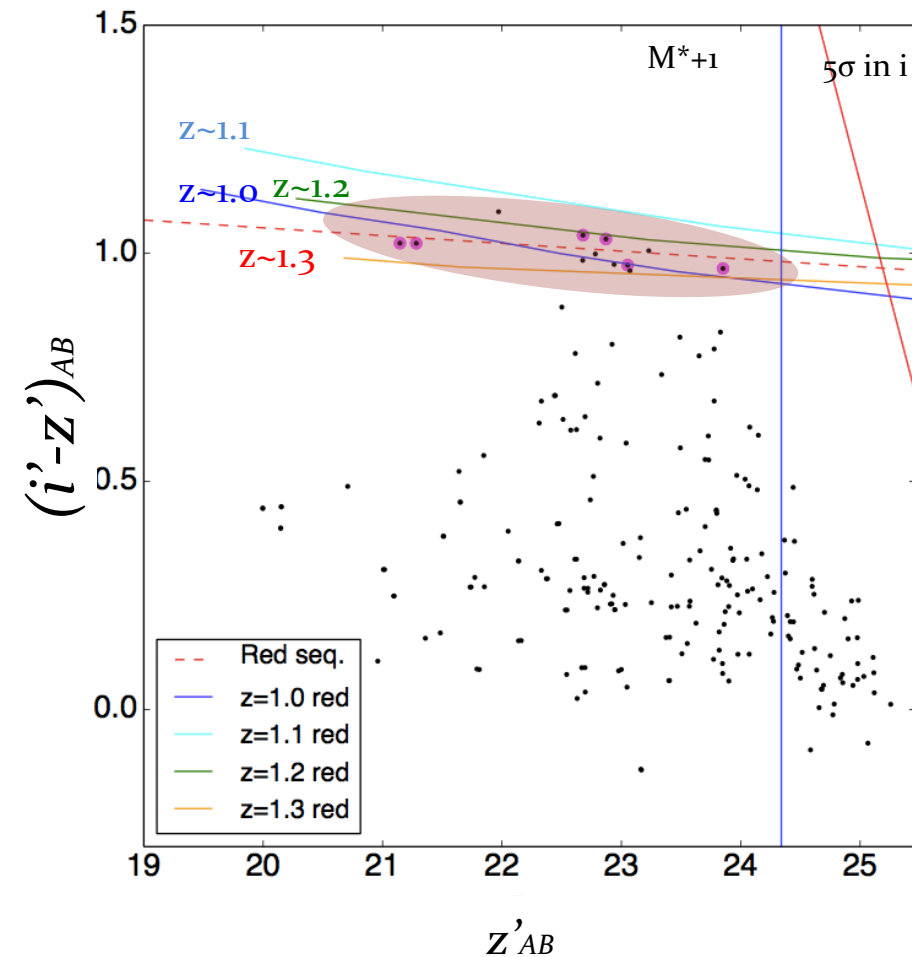


Appendix.

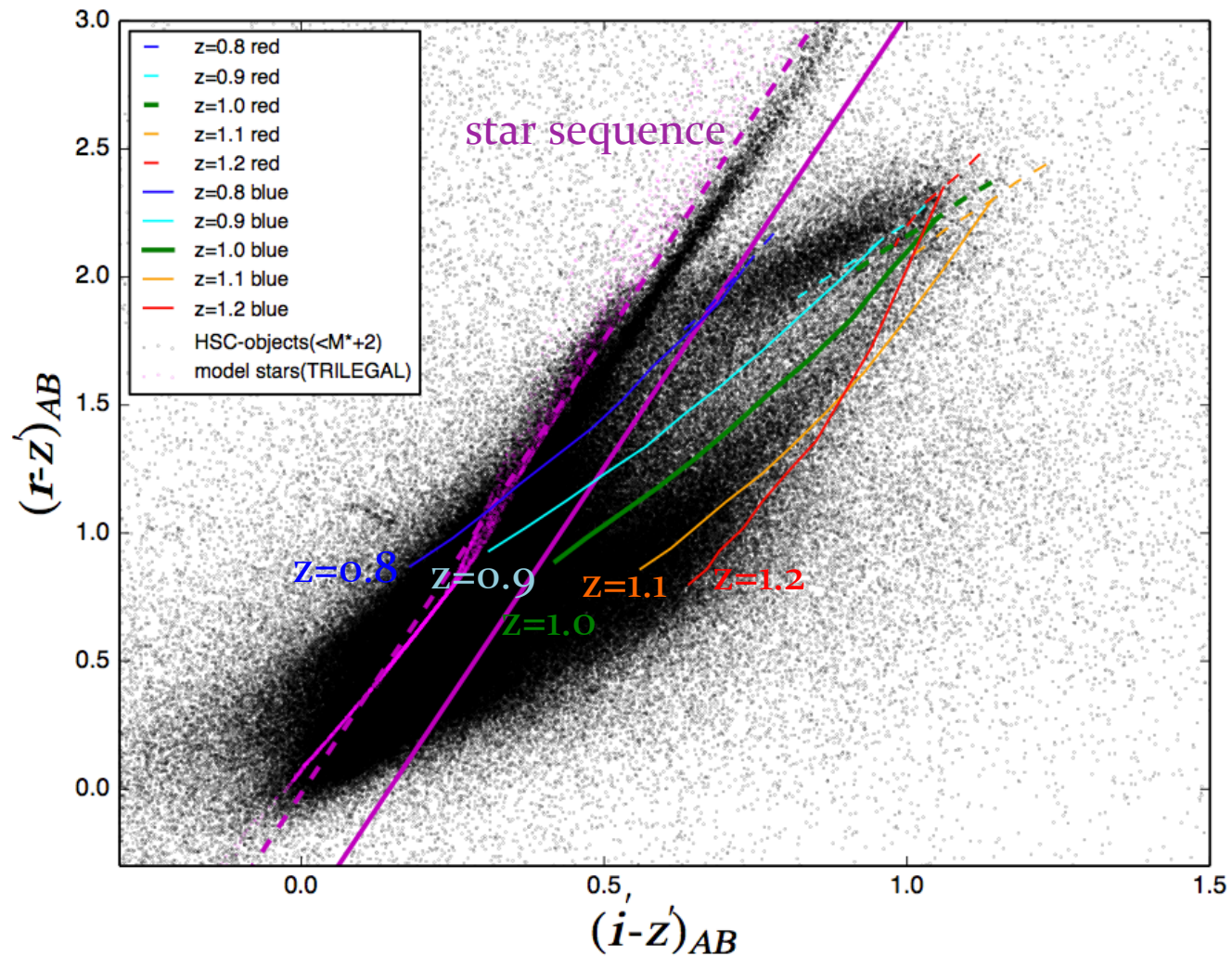
★ Color-cut for $z \sim 1.1 - 1.3$ galaxies on the red sequence

- $0.9 < i' - z' < 1.25$
- $0.35 < z' - y' < 0.6$

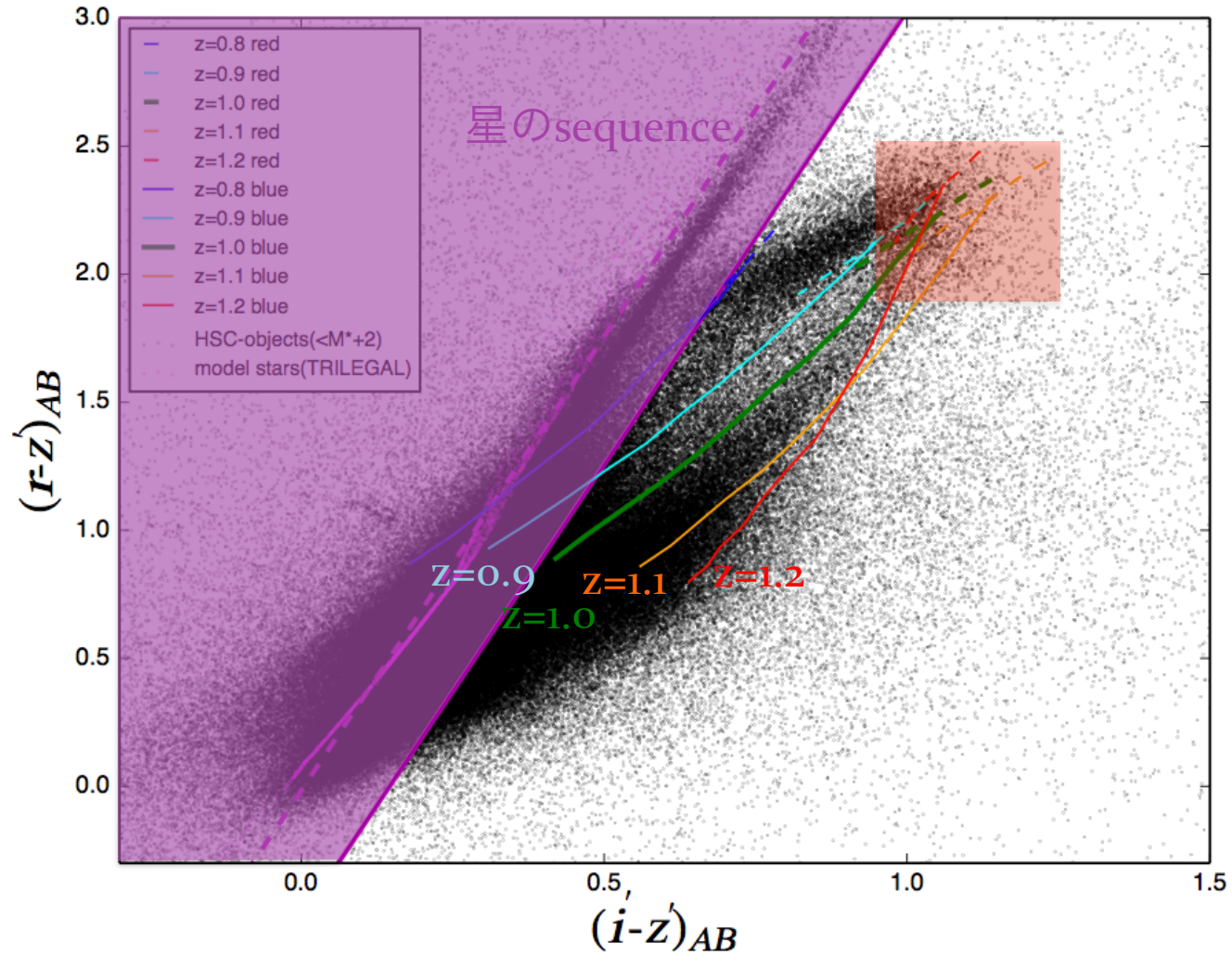
★ C-M diagram of a cluster candidate at $z \sim 1.1 - 1.3$



appendix



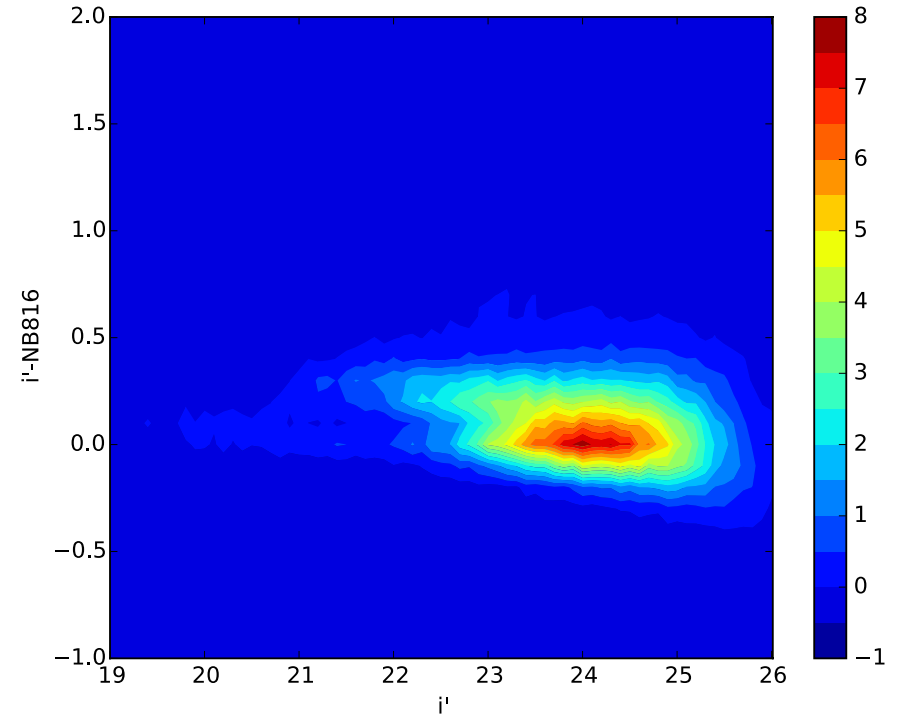
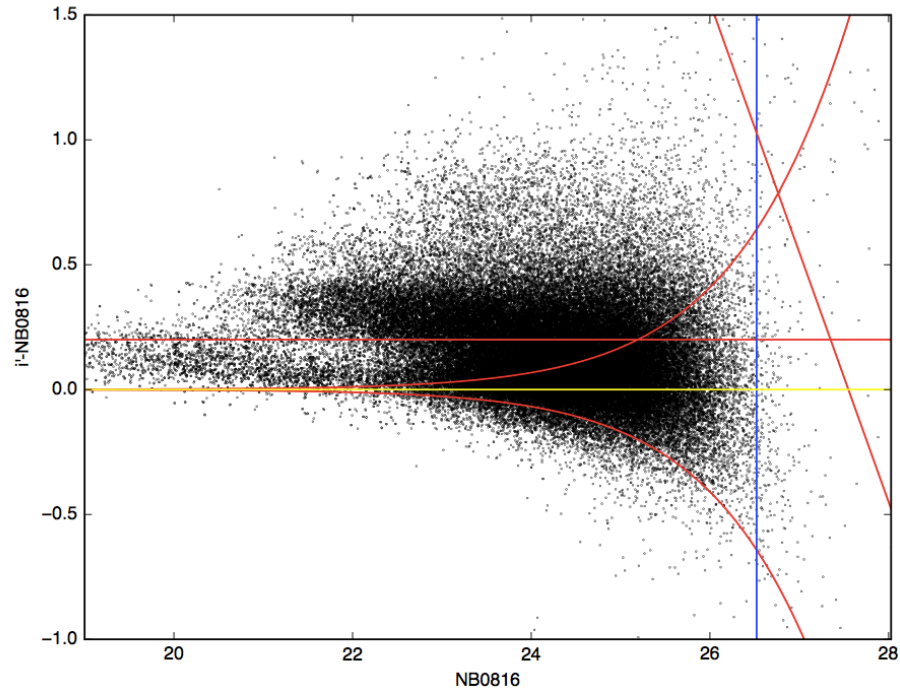
appendix



appendix

★ i' -NB816 vs NB816の色等級図

- 明るい方に伸びた分布が見られる.....

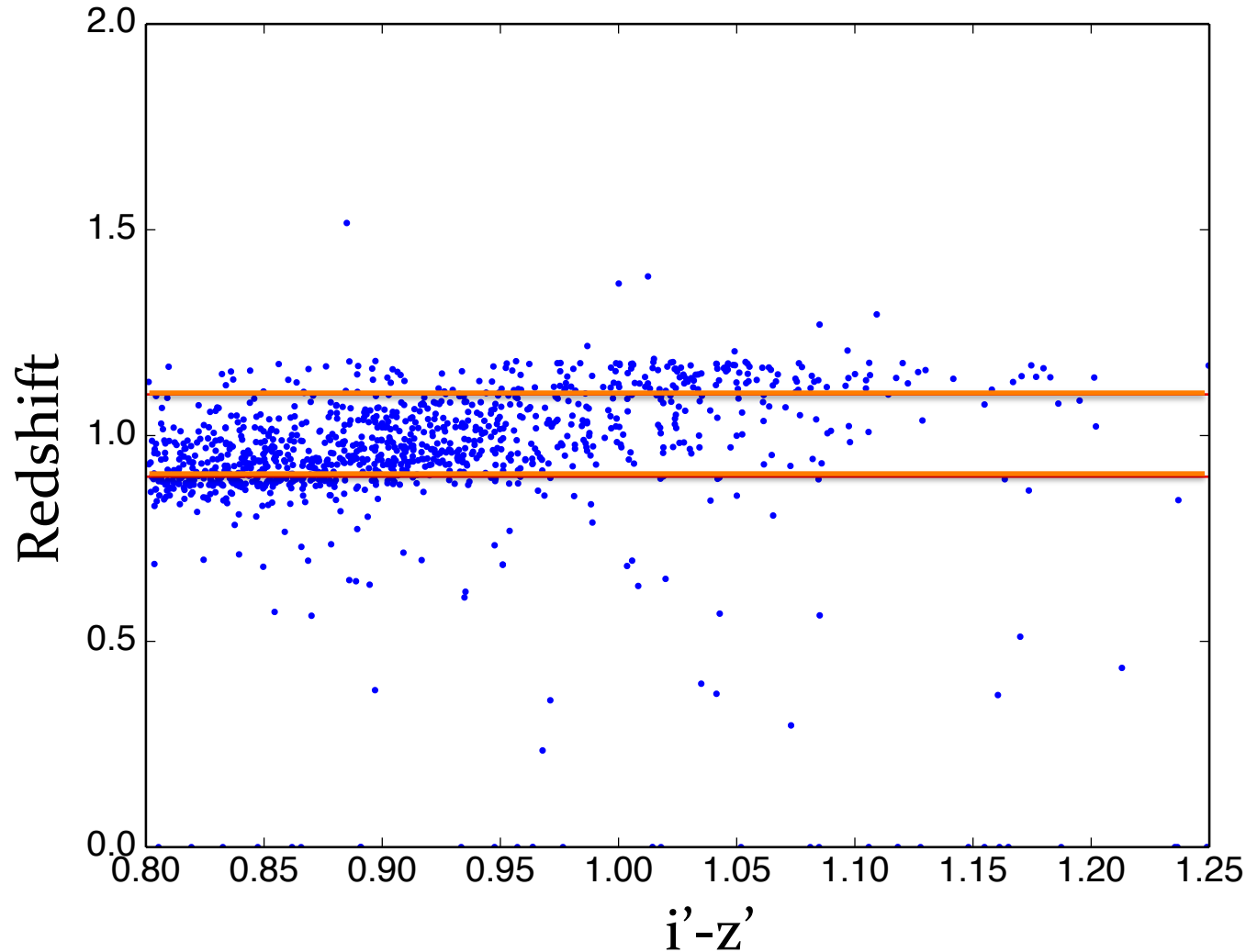


分光同定された天体と色選択

4. 結果

★UltraVISTAによる分光サンプル

今回の色選択の範囲($0.8 < i' - z' < 1.25$, $1.9 < r - z' < 2.5$)の色を示す銀河の赤方偏移分布



主に今回目的としている赤方偏移($z \sim 0.9 - 1.1$)に分布している