

Galaxy protocluster candidates around $z \sim 2.4$ radio galaxies

N.A.Hatch et al.

[2011MNRAS.410.1537H](#)

2011/7/14

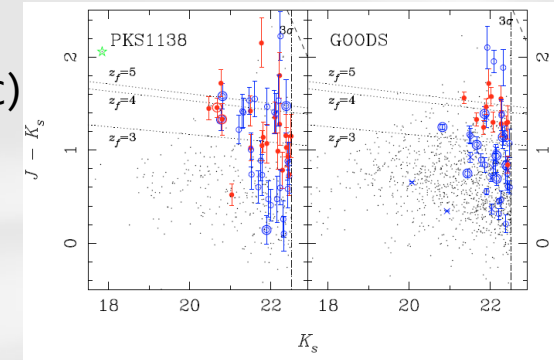
みさゼミ

馬渡 健 (M2)

遠方銀河団の観測：意義

(1) 個々の銀河の形成・進化の場としての銀河団

- ・ 単純に銀河の数が多い=>統計サンプル数を効率的にかせげる
- ・ 現在の銀河団(passiveな銀河ばかり)と違って、
多種多様な銀河種族がいる(e.g. LAE, LBG, SMG, LAB,,, etc)
- ・ 環境依存性が現在と違う
=> 「銀河の形成・進化は環境にどう左右されるか？」



M.Tanaka+10

(2) 大スケール構造としての銀河団

- ・ 階層的構造成長理論：大スケール構造は遅れて形成される
=> $z=3\sim 0$ の銀河団を追うことで構造成長理論・シミュレーションと
比較・検証できる

(例) Hayashino+04：SSA22のLAE数密度超過は、 Λ CDMモデル予測と比較した時に 3σ 以上？！

遠方銀河団の観測：方法

☆広視野分光サーベイ

- ・ 分光 z から3次元空間分布を再現
 - ・ volume-limitedな無バイアスなサンプル
 - ・ 力技
 - ・ SDSS, VVDSなどのサーベイ
- } 比較的近傍までしか不可能

☆narrow-bandフィルター用いた撮像

- ・ 特定 z の輝線銀河だけを捕まえる (NB413 => $z=2.4$ のLy α -emitter)
- ・ 短時間で(撮像だから)、精度のいいphoto- z サンプルがselectできる
- ・ とてもバイアスかかったサンプル(LAE, HAE, [OIII] emitter,,, etc)

☆撮像=>color-select

- ・ 一般的なbroad-bandで撮像し、色等級図や2色図上で特定の z の銀河のみselectする
- ・ LBGなどが代表的
- ・ narrow-bandフィルター撮像よりphoto- z の精度は悪い
- ・ narrow-bandフィルター撮像ほどサンプルにバイアスはかからない
- ・ 上記2つより観測は楽。アーカイブからデータ拾ってきやすい。
(・ follow-up観測として分光)

Abstract

(銀河団の同定)

- ・ $z \sim 2.4$ の6つの電波銀河(HzRG)周辺を近赤外撮像(J,H,Ks)
- ・ JHK color selectionにより $2.2 < z < 2.6$ の銀河の抽出
- ・ 3領域で overdensity \Rightarrow cluster candidate 発見
- ・ correlation function使ったclustering解析 $\Rightarrow z \sim 2.4$ のHzRGと重力的に結びついた系

(見つけた銀河団の性質)

- ・ サンプル数減らさないように、
 $z \sim 2.4$ 銀河の物理性質を統計的に抜き出す手法
- ・ cluster質量 $> 10^{14} \text{ Mpc}$ $\Rightarrow z=0$ までにcollapse・virializeできる系
- ・ color分布がbimodal：青い銀河(77%)と赤い銀河
- ・ これらの銀河団銀河の星形成は $z_f \leq 3$ で行われた

Introduction

・ protocluster とは

“A large-scale overdense region in the early Universe” : 一般的定義はコレだけ
(+α)この論文における定義として

“clusterの総質量が $M > 10^{14} M_{solar}$ を満たし、 $z=0$ までにvirializeできる”

近傍銀河団の質量程度

・ High-z Radio Galaxy(HzRG)まわりでの探査

やみくもに探査すると効率悪い=> 遠方銀河団を見つける目印ほしい
=> HzRG

(理由) 電波銀河は(most) massive.

このようなmassiveな銀河は初期宇宙では高密度な環境(gas豊富)
でしか生まれえないはず

※ $\Omega_M = 0.3, \Omega_\Lambda = 0.7, H_0 = 70 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$, Vega-system

Observation & Reduction

(装置)

VLT/HAWK-I : 近赤カメラ(ナスミス)

J,H,Ks band使用

1shot-FoV=7.5'

⇔ comoving 12.8Mpc@z=2.4

※final画像に複雑なeffective exposureパターン

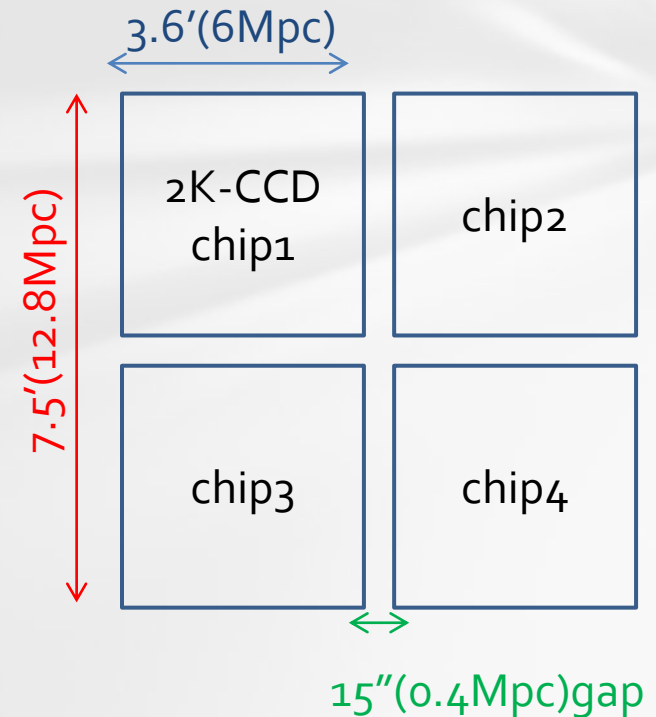
(観測期間)

2008/April ~ September

(ターゲット)

Miley & De Breuck (2008)から

$L_{500MHz} > 10^{28.5} W Hz^{-1}$ を満たすHzRGを6つ



Observation & Reduction

Table 1. Summary of the target fields and the HAWK-I observations. 500-MHz radio luminosities, given in column 3, are from Miley & De Breuck (2008).

Radio galaxy	Radio galaxy coordinates (J2000)	Radio luminosity log(500 MHz)	Centre of field (J2000)	Redshift	Filter	Exposure time (h)	5σ depth (Vega)	Seeing (FWHM)
MRC 1324–262	13:26:54.6–26:31:42	28.46	13:26:51–26:30:55	2.28	<i>J</i>	3.42	24.9	0.7
					<i>H</i>	0.88	23.6	0.7
					<i>K_s</i>	0.42	22.0	0.42
USS 1425–148	14:28:41.7–15:02:28.4	28.66	14:28:53–15:01:43	2.35	<i>J</i>	3.15	25.0	0.65
					<i>H</i>	0.72	23.0	0.6
					<i>K_s</i>	0.56	22.0	0.6
MRC 0406–244	04:08:51.5–24:18:16.7	29.03	04:08:43–24:17:35	2.43	<i>J</i>	3.38	24.8	0.4
					<i>H</i>	0.84	23.5	0.7
					<i>K_s</i>	0.53	22.8	0.74
MG 2308+0336	23:08:25.1 +03:37:03.9	28.51	23:08:28 +03:36:15	2.46	<i>J</i>	3.40	25.5	0.55
					<i>H</i>	0.88	23.4	0.55
					<i>K_s</i>	0.56	22.4	0.5
MRC 2104–242	21:06:58.3–24:05:09.0	28.84	21:06:55–24:04:31	2.49	<i>J</i>	3.38	25.3	0.65
					<i>H</i>	0.67	23.8	0.75
					<i>K_s</i>	1.53	22.6	0.6
MRC 2139–292	21:42:16.6–28:58:38.2	28.74	21:42:10–28:59:32	2.55	<i>J</i>	3.58	25.3	0.45
					<i>H</i>	1.70	24.0	0.55
					<i>K_s</i>	0.53	22.7	0.6
Control field	–	–	01:28:04–26:26:08	–	<i>J</i>	3.18	25.2	0.7
					<i>H</i>	0.84	23.5	0.65
					<i>K_s</i>	0.53	22.7	0.7

(補足データ) UDSサンプル : FoV=0.8deg²

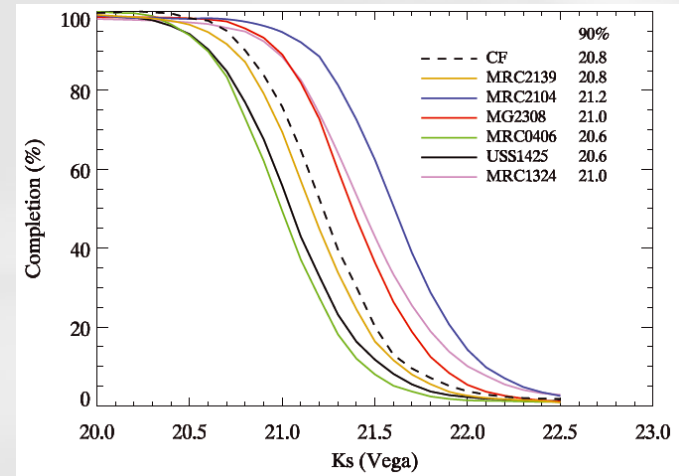
B,V,R,I',z',J,H,K,3.6μm,4.5μm

精度良いphoto-zカタログ (Williams+10)

Observation & Reduction

(final-image quality)

- 3band imageでPSF合わせ=> 最終的には全てPSF=1arcsec
- exposure timeがtotal-exposureの30%以下の領域とK<16magの天体にはmask
- image completeness
 - : 3000個のシミュレーション銀河をランダムにばらまく
 - それに実際のlocalなexposure-timeこみの天体検出かけてcompletion推定 =>=>=>=>

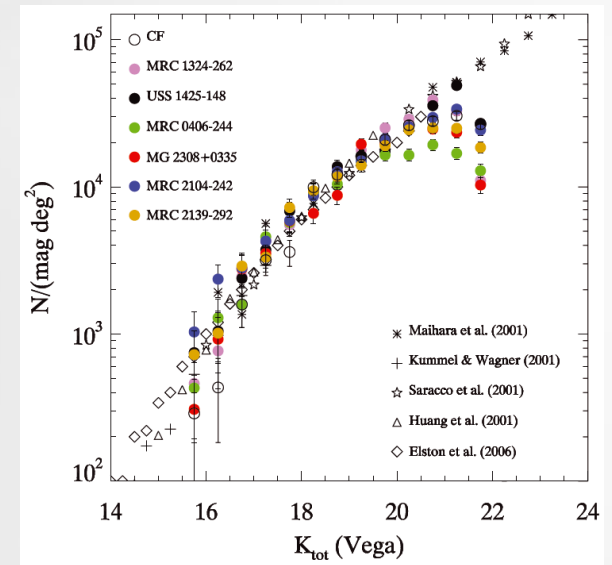


(Source detection)

- 天体検出はKs画像

(Stellar classification)

- 明るい星=>morphologyからselect
- 暗い星=>明るい星のデータから、color-selection
 - : $J - H < 0.55 \cap H - K < 0.85 \cap J - K < 1.15$



Identifying overdensities : color-selection

基本的にはredshiftした $2.2 < z < 2.7$ の 4000 \AA breakをJ,Hバンドで挟む!

(1) JHK法 (Kajisawa method)

$$J - H > H - K + 0.5 \cap J - K > 1.5$$

: $z < 2, z > 3$ の銀河の混入を最も効率的に除外
JHK銀河のうち半分が本当に $2.2 < z < 2.7$
(分光的に確認 : Doherty+10)

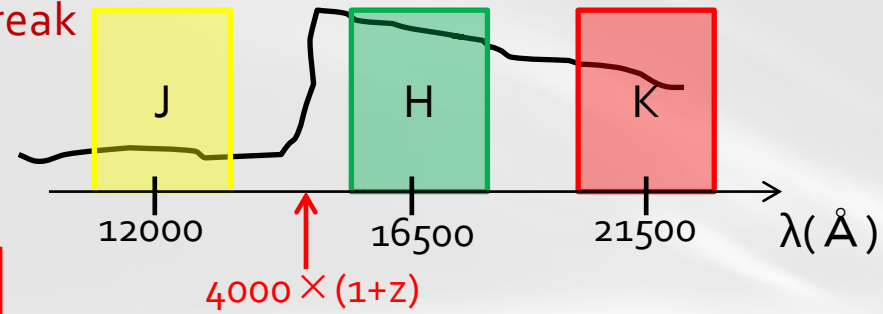
background/foregroundに対する $2.2 < z < 2.7$ 銀河の割合は高いが、 $2.2 < z < 2.7$ 銀河全体の内15%しか見ていない

dust減光(A_V)の影響受けづらいcriteria

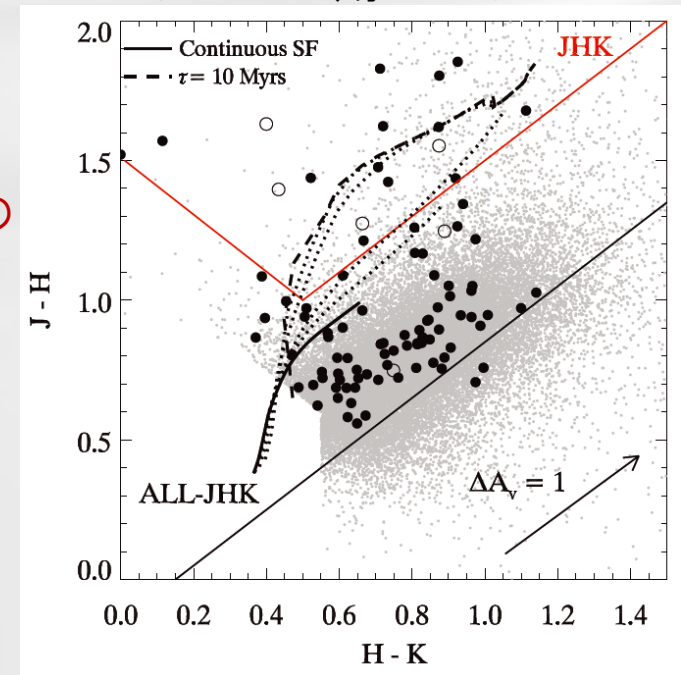
(2) ALL-JHK法

$$J - H > H - K - 0.15,$$

: $2.2 < z < 2.7$ 銀河のほぼ全てがこのcriteria満たすが、contaminationも圧倒的に大きい



UDSサンプル用いたテスト



grey : UDSサンプル filled : $2.2 < z < 2.7$
open : 6 HzRGs

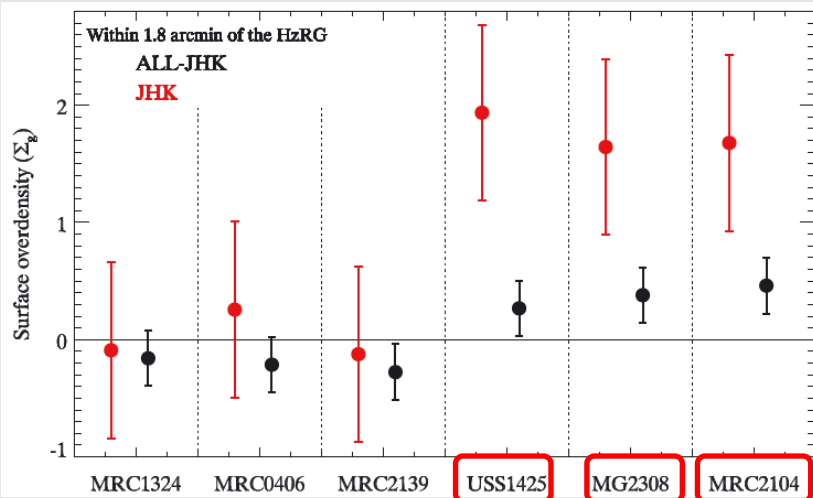
Identifying overdensities : using JHK galaxies

HzRGから半径1.8arcmin(~ 3 Mpc)の円内で、 $17.5 < K_{tot} < 20.6$ のJHK銀河をselect
 \downarrow
image completion > 90%

密度超過の推定 : $\Sigma_g = (\Sigma_{obs} - \bar{\Sigma}) / \bar{\Sigma}$ (※HzRG自体は数に入れない)

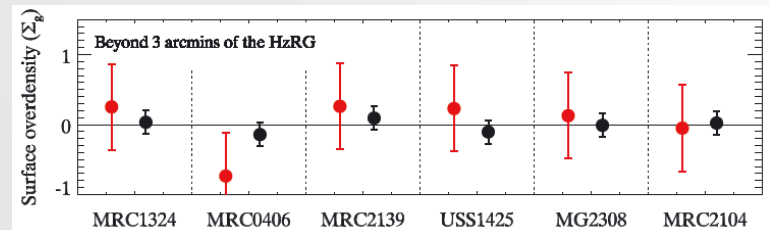


Field	MRC 1324-262	USS 1425-148	MRC 0406-244	MG 2308+0336	MRC 2104-242	MRC 2139-292
Type of galaxy						
<i>ALL-JHK</i>	-0.2 ± 0.2 (65)	0.3 ± 0.2 (91)	-0.2 ± 0.2 (66)	0.4 ± 0.2 (110)	0.5 ± 0.2 (115)	-0.3 ± 0.2 (58)
<i>JHK</i>	-0.1 ± 0.7 (2)	<u>1.9 ± 0.8 (6)</u>	0.3 ± 0.7 (3)	<u>1.6 ± 0.7 (6)</u>	<u>1.7 ± 0.7 (6)</u>	-0.2 ± 0.7 (2)
Fraction of 1.8 arcmin radius UDS cells as dense as HzRG field	0.38	0.003	0.26	0.004	0.003	0.43



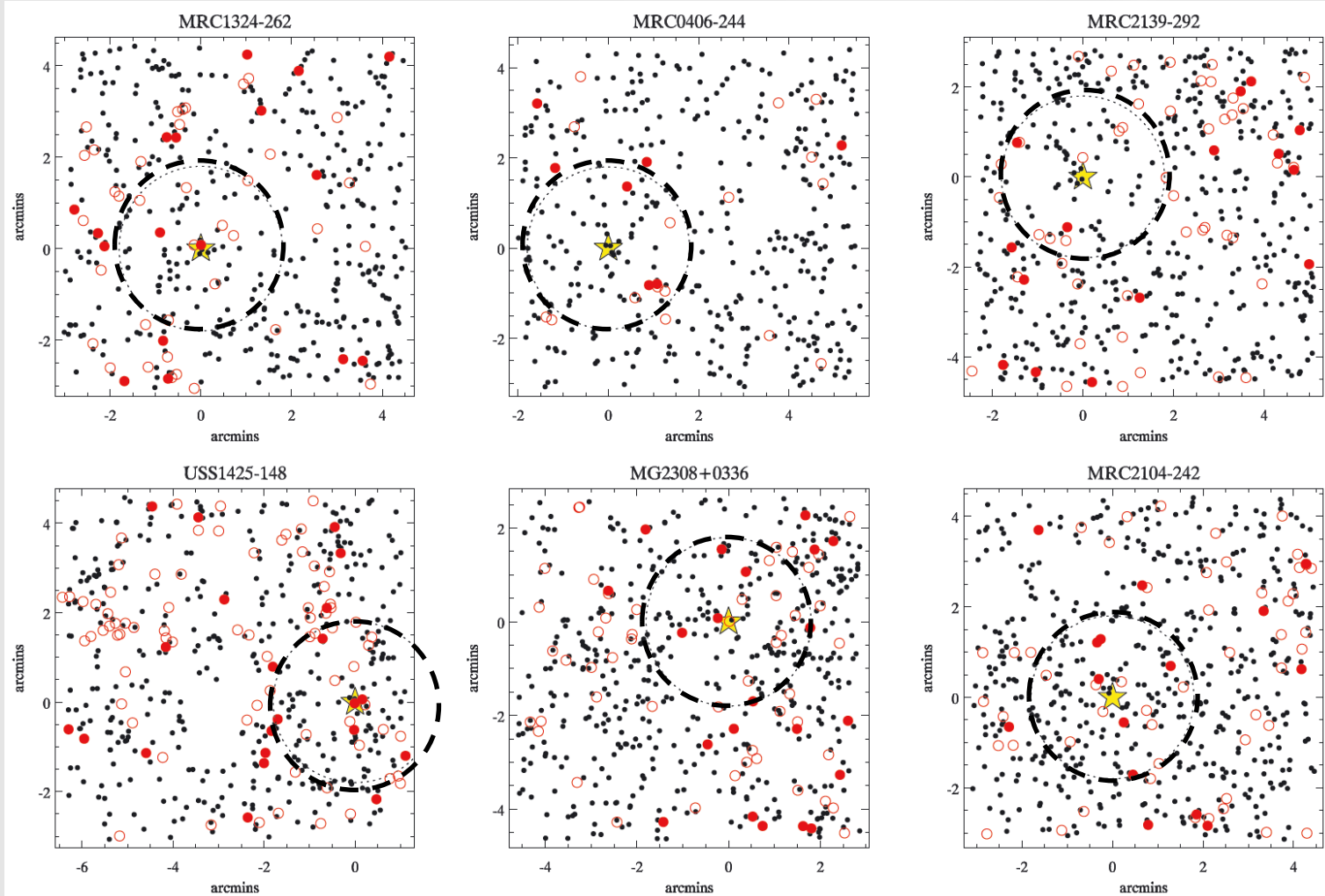
← HzRG中心の半径1.8'円内の密度超過

↓ HzRGから3'(5Mpc)以上離れた領域



Identifying overdensities : using JHK galaxies

- : JHK 銀河
with
 $K < 20.6$
- : ALL-JHK
with
 $K < 20.6$
- : JHK 銀河
with
 $K > 20.06$



(結果) USS 1425-148, MG 2308+0336, MRC 2104-242
が proto-cluster 候補

Identifying clusters : correlation analysis

前述のoverdensityの構成銀河は $2.2 < z < 2.7$ と視線方向に広がりがあるので、本当に(物理的に)clusteringしているのか、偶然そう見えているだけなのか不明



correlation function analysis (2点相関)

(補足) 二点相関関数

距離 r だけ離れた銀河ペア存在確率のランダム分布からのズレ

$$: P(r)dV_1dV_2 = \bar{n}^2\{1 + \xi(r)\}dV_1dV_2$$

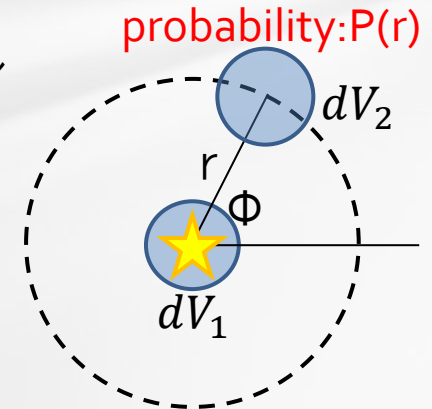
(\bar{n} : 領域毎の平均密度)

⇔ “銀河分布の相関具合を表す”

- ・ もし密度超過がcosmic-varianceによる偶然なら銀河分布の相関関数は一般領域と変わらないはず (より observational には 「角度相関関数」)

$$\delta P = \sum_{\text{obs}}^2 [1 + w(\theta)] \delta\Omega_1 \delta\Omega_2$$

$$\Rightarrow w(\theta) = \frac{DD(\theta) - 2DR(\theta) + RR(\theta)}{RR(\theta)}$$



- ①ある1コの銀河に着目し r だけ離れた dV_2 の中の銀河数を数え上げる
- ② Φ 方向に平均操作
- ③空間全体で平均操作

(Landy & Szalay 1993)

Identifying clusters : correlation analysis

(データサンプル:D)

- ・ JHK銀河だと数少なすぎ . . .
 - ・ ALLサンプルだと数多すぎて、cluster銀河のクラスタリングがかき消されて何も見えなくなる . . .
- => "J-H > H-K + 0.25" で新たにサンプル作ってやると程よいサンプルになると期待

(ランダムサンプル: R)

- ・ Dの100倍のサンプルをばらまき、ペア数数えあげてから規格化 ($\Sigma_{\theta} DR(\theta) = \Sigma_{\theta} RR(\theta) = \Sigma_{\theta} DD(\theta)$)



4つの θ bin毎に、 $w(\theta)$ 求めた

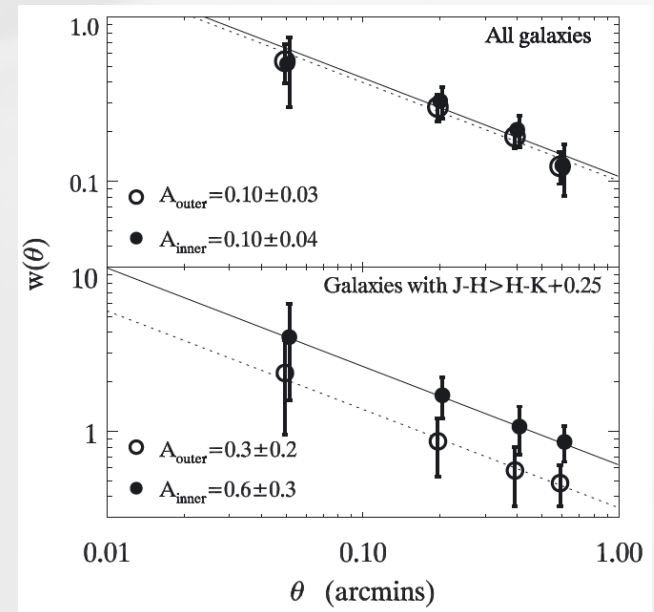
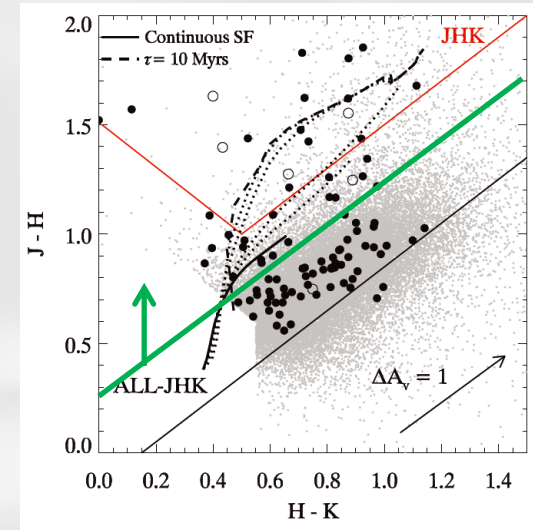
※inner(1.8'円内)とouter(3'円外)の2パターン

結果

$w(\theta) = A_w \theta^{-\beta} - IC$ でモデルフィットした時 (β, IC is fixed)

$$A_{inner} \sim 2 \times A_{outer}$$

=> 3つの密度超過領域は物理的にassociated!



Statistical properties of the protocluster galaxies

proto-clusterの構成銀河を個別に見ていくことは不可能

(JHK銀河は $2.2 < z < 2.7$ の銀河全体の15%未満。ALL-JHKは70%がcontamination)



Statistical subtraction

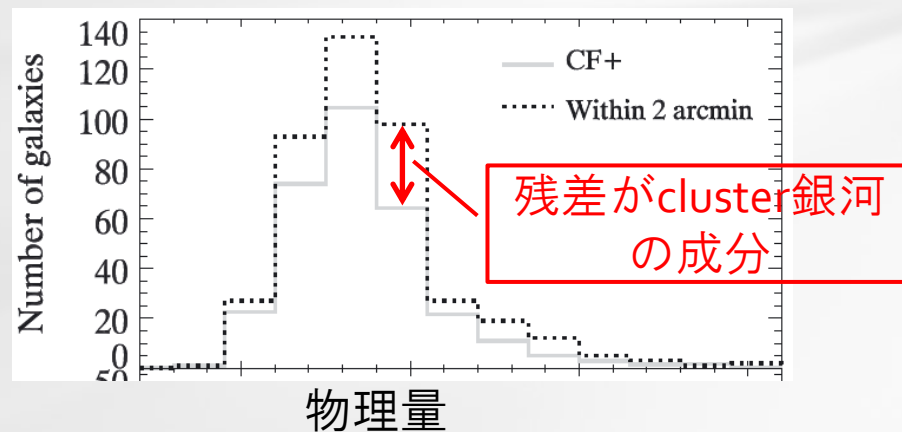
・ ALL-JHKサンプルに含まれる70%のcontaminationを統計的に除外する

・ 物理量を横軸にとったヒストグラムをproto-clusterとCF+でそれぞれ作り、差をとる



残差ヒストグラムはproto-cluster銀河の分布と考えられる

しかもflux-limitedサンプル($K < 20.6$)!



※エラーバー

・ UDSサンプルからランダムに $2.1'$ 円と

230 arcmin^2 領域をとってきてstatistical-

subtractionをするモンテカルロシミュレーションから

Statistical properties of the protocluster galaxies

Radial extent & volume of the clusters

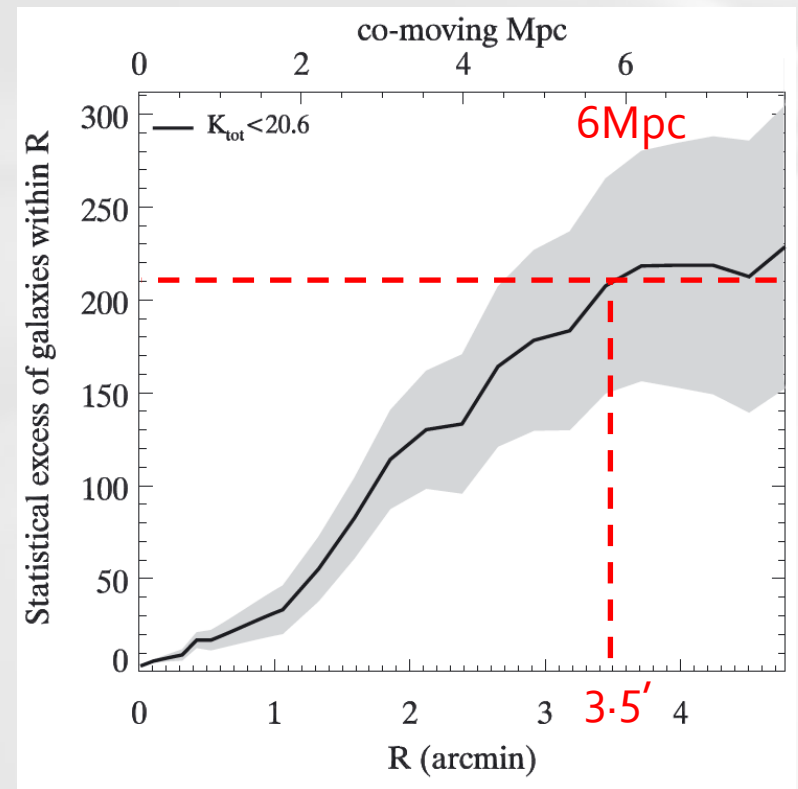
「横軸にR、縦軸に半径Rの円内に含まれるALL-JHK銀河数(3領域分の総和)」
のヒストグラム

↓
CF+ヒストグラムからの残差

3つのclusterの平均半径は
3.5' ⇔ 6Mpc

~> volume = (12Mpc)³ ~ 1700Mpc³

1 clusterはこのvolume内に
K<20.6の銀河を
平均75 ± 20個持つ



Statistical properties of the protocluster galaxies

Colors of the cluster galaxies

proto-cluster 銀河のカラー分布

：各領域で半径 $2.1'$ ($3.5 Mpc$) の円内の ALL-JHK 銀河使い、その総和

CF+ 銀河のカラー分布

：領域内の全 ALL-JHK 銀河使うが、視野面積が proto-cluster と一致するように規格化

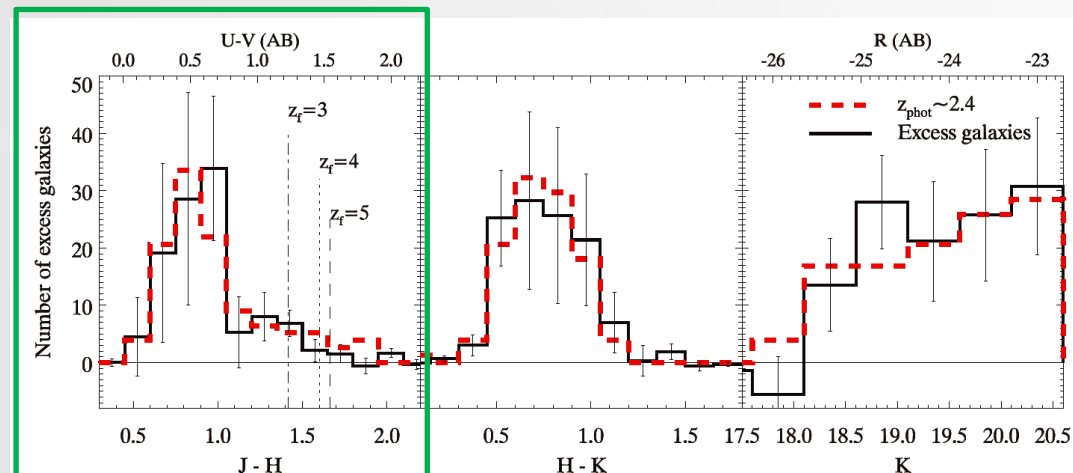
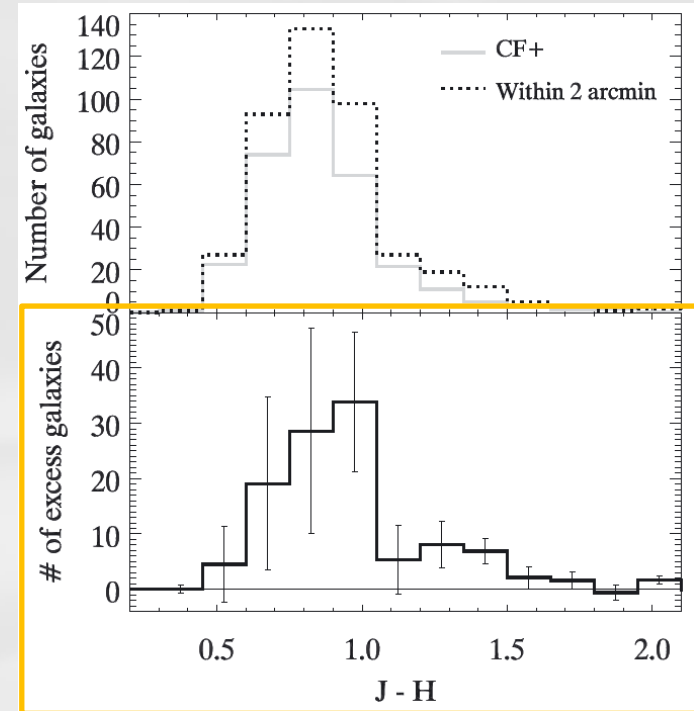
$z_{photo} \sim 2.4$ field 銀河のカラー分布との比較

UDS カタログの内の $2.2 < z < 2.7$ 銀河

・ KS テスト \Rightarrow 2 つの分布一致
($p=0.82$)

- ・ red-tail
- ・ blue-peak

(discussion で詳しく . . .)



Discussion : cluster mass & collapse time

- average mass enclosed in the clusters

$$M = \bar{\rho} V (1 + \delta_m) \quad : \text{DM 込みの cluster 質量}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} V \sim (12 \text{ Mpc})^3 \sim 1700 \text{ Mpc}^3 \\ \bar{\rho} = (\text{宇宙の平均物質密度}) = 1.9 \times 10^{10} (M_{sun} / \text{Mpc}^3) \\ \delta_m = \frac{\delta_g}{b} \sim 14 \end{array} \right.$$

$$M \sim 2 - 7 \times 10^{14} M_{sun}$$

現在の cluster と同程度

(Wuyts+09) $z \sim 2.4$ の $M > 4 \times 10^{10} M_{sun}$ の銀河の平均数密度 = $3.3 \times 10^{-4} \text{ Mpc}^{-3}$

今回の proto-cluster 領域で mass ヒストグラム作って statistical-subtraction

$\Rightarrow M > 4 \times 10^{10} M_{sun}$ の銀河の数密度超過は

$$141 \times 10^{-4} \text{ Mpc}^{-3}$$

$$\delta_g \sim 42 \pm 21 \leftarrow$$

$b \sim 3$ from Quadri+07

- collapse time

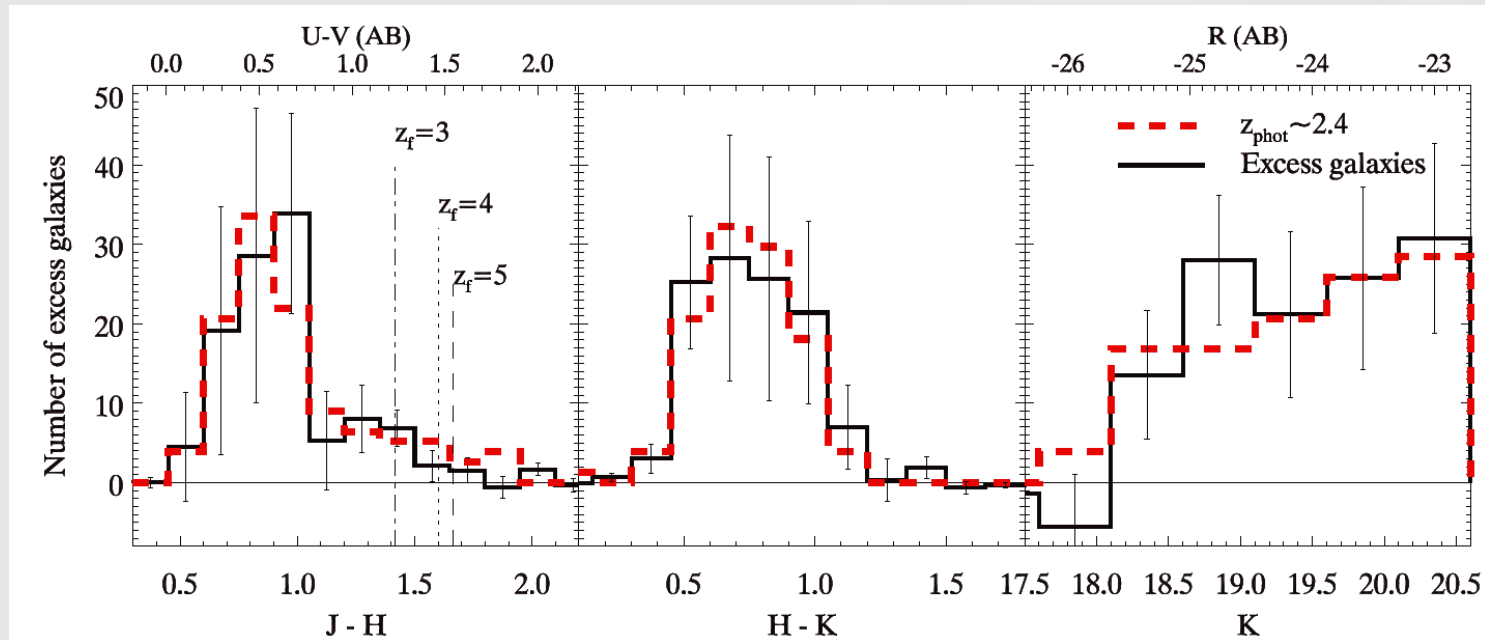
膨張宇宙における collapse タイムスケール

$$\Rightarrow \sim (1 / 6\pi G \rho)^{1/2} \quad (\text{Peacock+99})$$

今回の proto-cluster の場合

$\sim 6 \text{ Gyr} \Rightarrow z=0$ までに collapse できる

Discussion : colors of cluster galaxies



- color bimodality $\left\{ \begin{array}{l} \text{blue peak - dominant, 近傍Irrに似た色} \Rightarrow \text{星形成銀河} \\ \text{red tail - few, } z \sim 3 \text{ に形成, red-sequence とまでは言えない} \end{array} \right.$
 \Rightarrow 「 $2 < z < 3$ の proto-cluster は star-burst phase っぽい」
という他研究結果と consistent
- proto-cluster 領域と一般領域でカラー分布に違いない
 $\Rightarrow z = 2.4$ では環境効果あまりない？

Conclusion

- ・ JHK法による $2.2 < z < 2.7$ 銀河の選び出し
=> 高密度領域を3つ発見
- ・ clustering解析により本当にclusteringしている構造であることを確認
- ・ statistical subtraction
=> proto-clusterのサイズ ~ 12Mpc
銀河数 $\sim 75 \pm 20$ (*with* $K_{tot} < 20.6\text{mag}$)
mass $> 10^{14} M_{sun}$
現在の銀河団のprogenitorと考えられる系
カラー分布がbimodal, blue銀河がdominant
proto-clusterは $2 < z < 3$ では星形成中