

銀河形成研究の最前線 (国立天文台, 13/02/2008)

銀河団の進化を俯瞰する



児玉忠恭 (NAOJ)

田中賢幸 (ESO) 小山佑世 (東大)

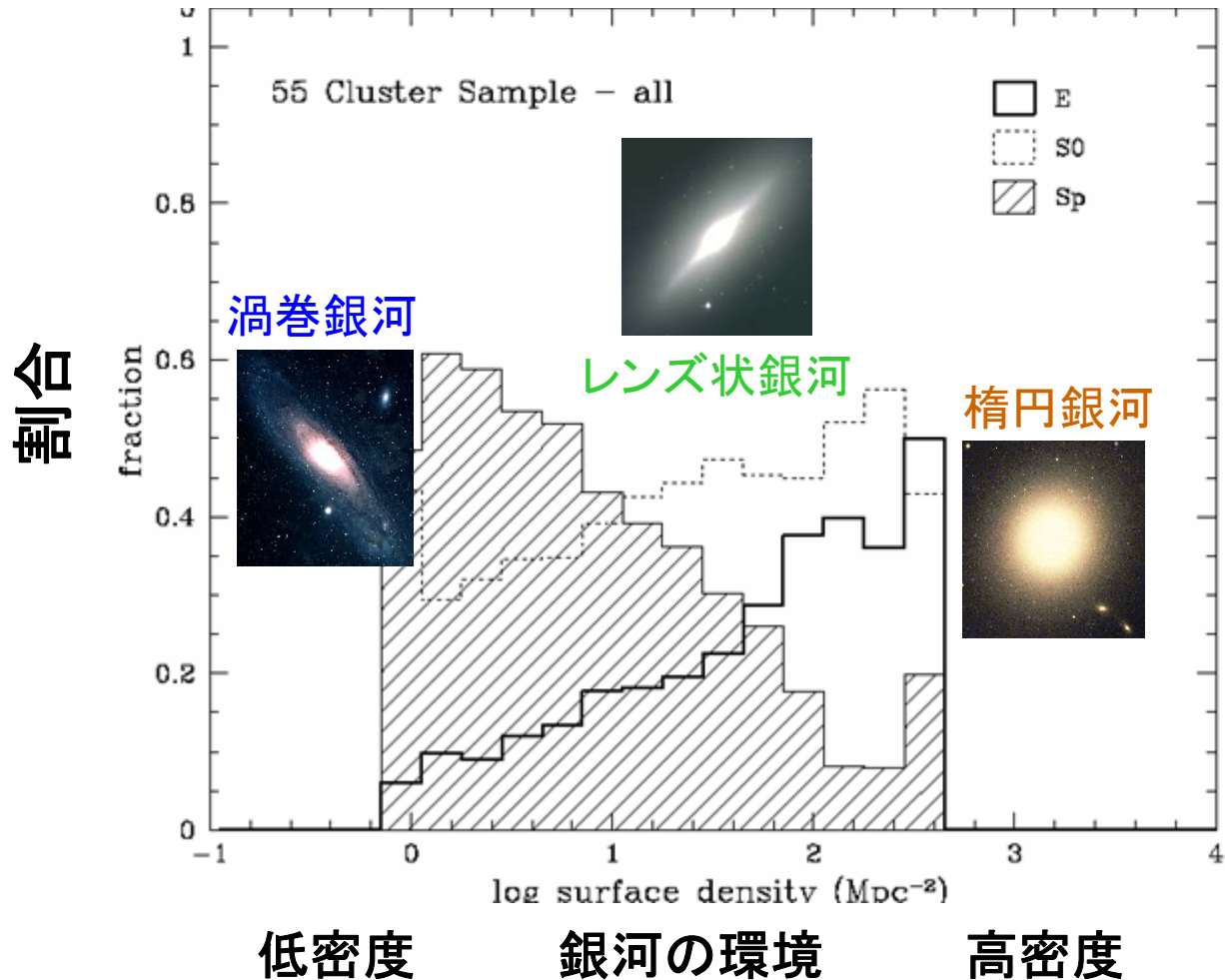
鍛冶沢賢 (NAOJ) 田中壺 (すばる) 他

概要

- 銀河団周辺構造における環境効果
(可視 & スペース赤外、PISCES、 $0.4 < z < 1.3$)
- 原始銀河団における大質量銀河形成
(近赤外、HzRG、 $2 < z < 4$)

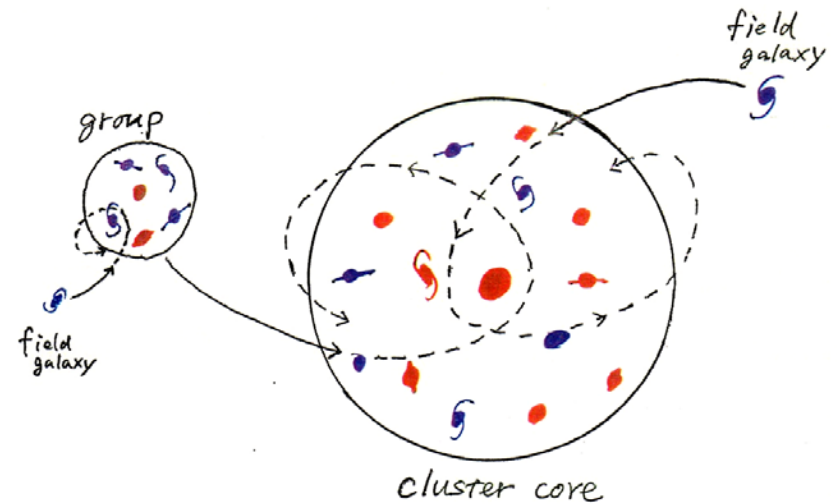
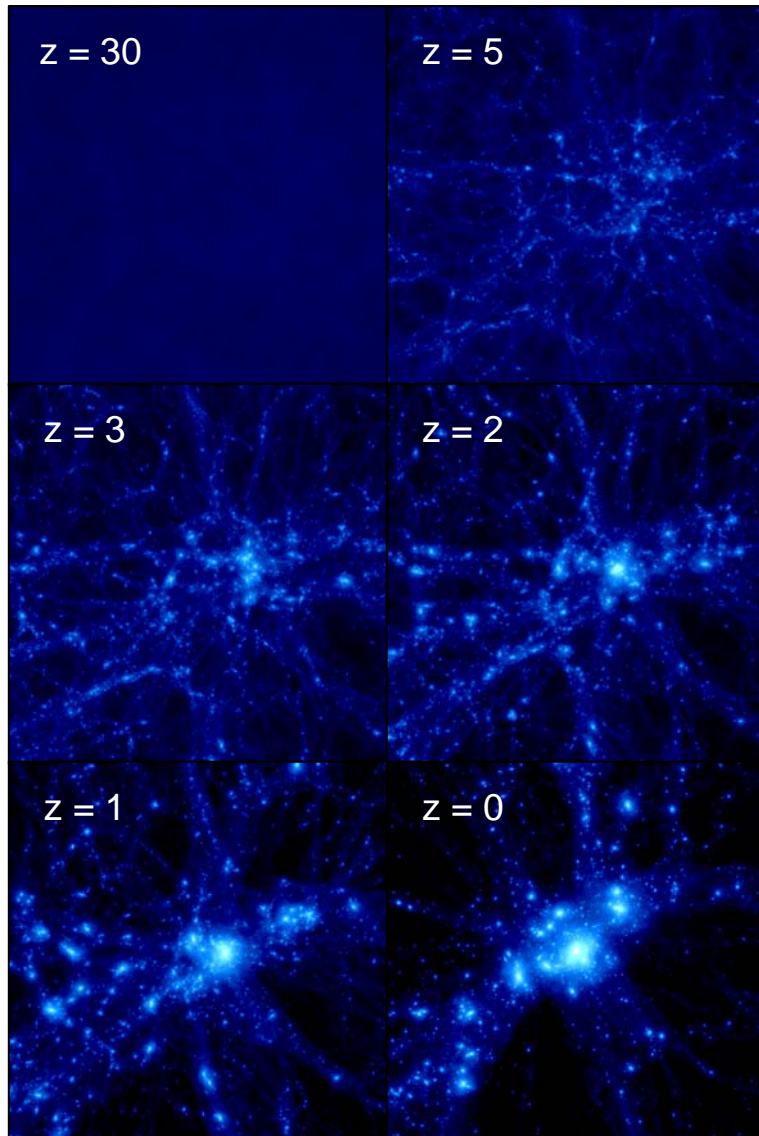
銀河形態の環境依存性

銀河の形態－密度関係 (Dressler 1980)



銀河種族の棲み分けの起源は？

N-body simulation (Dark matter)



先天的？

もともと楕円銀河は初期宇宙に銀河団で生まれ、渦巻き銀河は少し遅れてフィールドで生まれる。

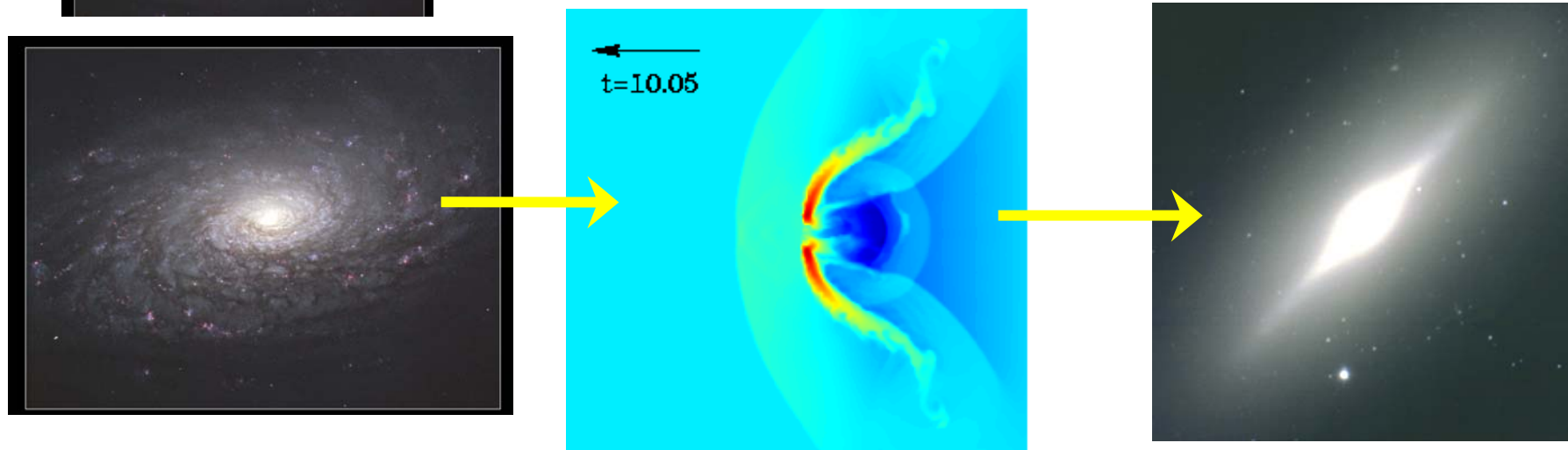
後天的？

集団化の過程で渦巻き銀河が楕円銀河やレンズ状銀河に変化する。

銀河の形態は高密度領域で変化する！？



渦巻銀河が合体して楕円銀河になる！？



渦巻銀河がガスを剥ぎ取られてレンズ状銀河になる！？

遠方宇宙を俯瞰する、すばる望遠鏡

ユニークな広視野装置によって、
遠方宇宙のパノラマ地図が得られる！

- Suprime-Cam ($34' \times 27'$) 可視光線の撮像
- MOIRCS ($7' \times 4'$) 近赤外線撮像と分光
- FMOS ($30' \phi$) 近赤外線の分光

→一般フィールドから銀河団中心部までの大規模構造(銀河環境)を俯瞰し、その中での銀河の生態を見渡す。

すばる望遠鏡の広視野観測装置の威力

$z = 30$ (136億年前)

$z = 5$ (125億年前)

$z = 3$ (115億年前)

$4' \times 7'$

$34' \times 27'$

★S-Camによる可視光研究 ($0.4 < z < 1.3$), *PISCES*

Kodama et al. (2001; 2004; 2005), Tanaka et al. (2005a;b; 2007a;b;c)

$z = 2$

★MOIRCSによる近赤外線研究 ($2 < z < 3$), *HzRG*

Kodama et al. (2007)

$4' \times 7'$

Suprime-Cam

$M = 6 \times 10^{14} M_{\odot}$, $20\text{Mpc} \times 20\text{Mpc}$ (co-moving)

Yahagi et al. (ν GC; 2005)

Panoramic Imaging and Spectroscopy of Cluster Evolution with Subaru

Class	Cluster	RA (J2000)	Dec (J2000)	z	L_x 10^{44}	Bands	Coordination	
$z \sim 0.4$	CL 0024+1654	00 26 35.7	+17 09 43.1	0.39	3.2	BRz' , NB	ACS, XMM, Chandra	
	CL 0939+4713	09 42 56.2	+46 59 12	0.41	9.2	$BVRI$, NB	XMM	
	RX J2228+2037	22 28 36	+20 37 12	0.42	16.5	$BVRi'$	Chandra, S-Z	
$z \sim 0.55$	MS 0451.6-0305	04 54 10.9	-02 58 07	0.54	12.0	$BVRI$	ACS (3.5'), Chandra, S-Z	
	CL 0016+1609	00 18 33.5	+16 26 13.4	0.546	26.0 [†]	$BVRi'z'$	ACS (3.5'), XMM, Chandra, S-Z	
	MS 2053.7-0449	20 56 21.8	-04 37 51.4	0.583	5.0	$BVRi'z'$	ACS (3.5'), XMM, Chandra, S-Z	
$z \sim 0.85$	RX J1716.4+6708	17 16 49.6	+67 08 30	0.813	2.7 [‡]	$VRi'z'$	Chandra, Astro-F target	
	MS 1054.4-0321	10 56 59.5	-03 37 28.4	0.83	20.0	$VRi'z'$	ACS (6'), XMM, Chandra, S-Z	Spitzer
	RX J0152.7-1357	01 52 42.0	-13 57 52.9	0.831	16.0	$VRi'z'$	ACS (6'), XMM, Chandra, S-Z	Spitzer
	RX J1226.9+3332	12 26 58.2	+33 32 49	0.9	53.0	$VRi'z'$	XMM, Chandra, S-Z	Spitzer
	CL 1604+43	16 04 28.3	+43 16 24.0	0.9	2.0	$VRi'z'$	ACS (6'), XMM	Spitzer
$z \sim 1.2$	RDCS J0910+5422	09 10 44.9	+54 22 08.9	1.11	2.1	$VRi'z'$	Chandra ACS(3.5')	Spitzer
	CL 1252-2927	12 52 54.4	-29 27 17.0	1.23	6.6	$VRi'z'$	ACS (6'), XMM, Chandra	Spitzer
	RX J1053.7+5735	10 53 43.4	+57 35 21	1.14	2.0 [‡]	$VRi'z'$	ACS (6') XMM	Spitzer
	RX J0848.9+4452	08 48 46.9	+44 56 22	1.26	2.8	$BVRi'z'$	ACS (6'), XMM, Chandra	Spitzer

[†] 0.4-10 keV, [‡] 0.5-2 keV, others are bolometric X-ray luminosity ($H_0=70$).

Imaging: Suprime-Cam-BB

CL0024, CL0939, CL0016, RX1716, RXJ0153, CL1604,
CL1252, RXJ0849, CL0451, MS2054, MS1054, RD0910

Suprime-Cam-NB ($H\alpha$)

CL0024 ($z=0.39$), CL0939 ($z=0.41$)

WFCAM (NIR)

RXJ0153, CL1604, CL1252, RXJ0848

MOIRCS (NIR)

RXJ1716, RD0910

Spectroscopy: FOCAS

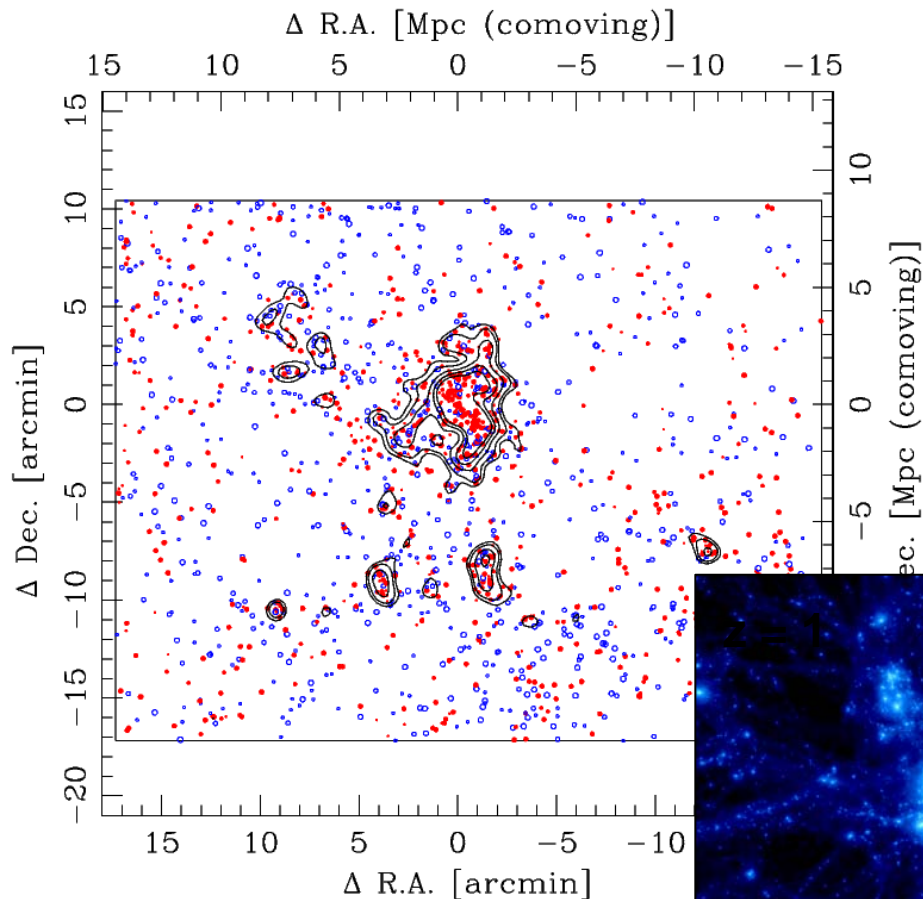
CL0939, CL0016, RXJ0153, CL1252, RXJ0848



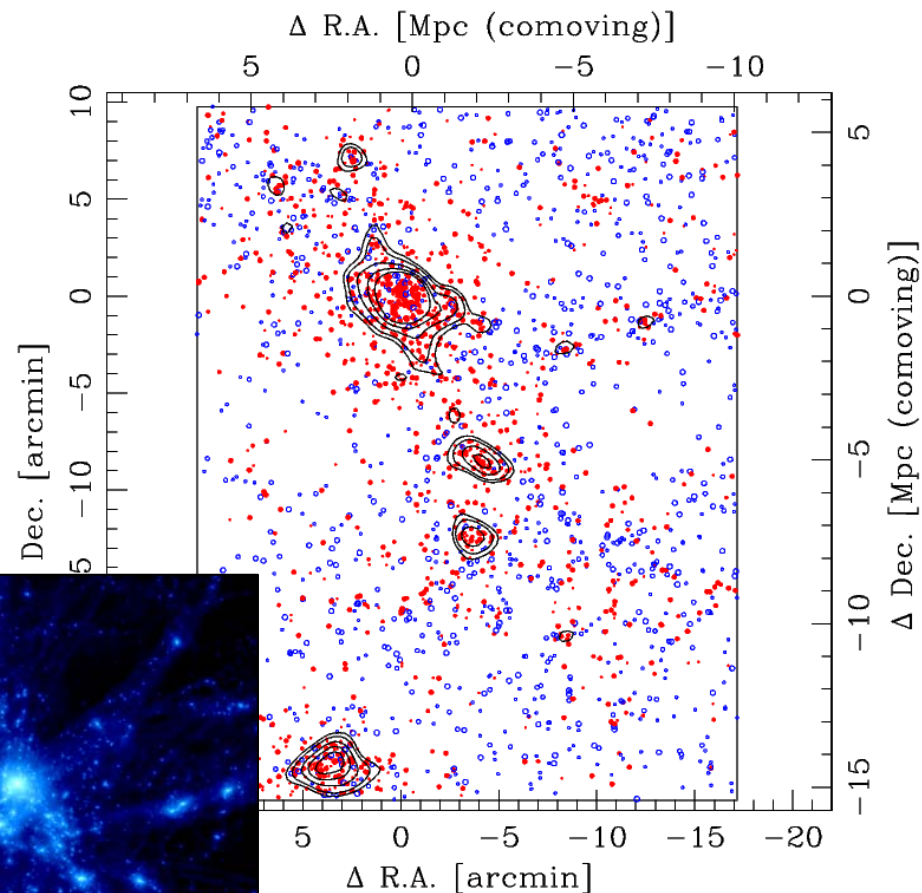


銀河団集積過程のパノラマ

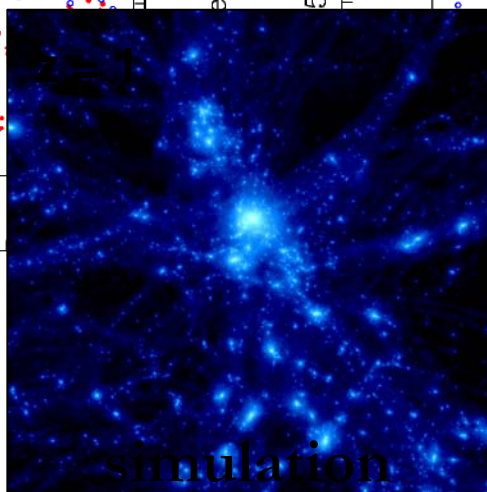
Photometric redshift で選ばれた銀河の2次元分布 ($\Delta z = -0.05 \sim +0.03$)
RXJ 0152.7-1357 (VRIz') CL 0016+16 (BVRi'z')



$z=0.83$ (70億年前)



$z=0.55$ (54億年前)
Kodama, et al. (2005)

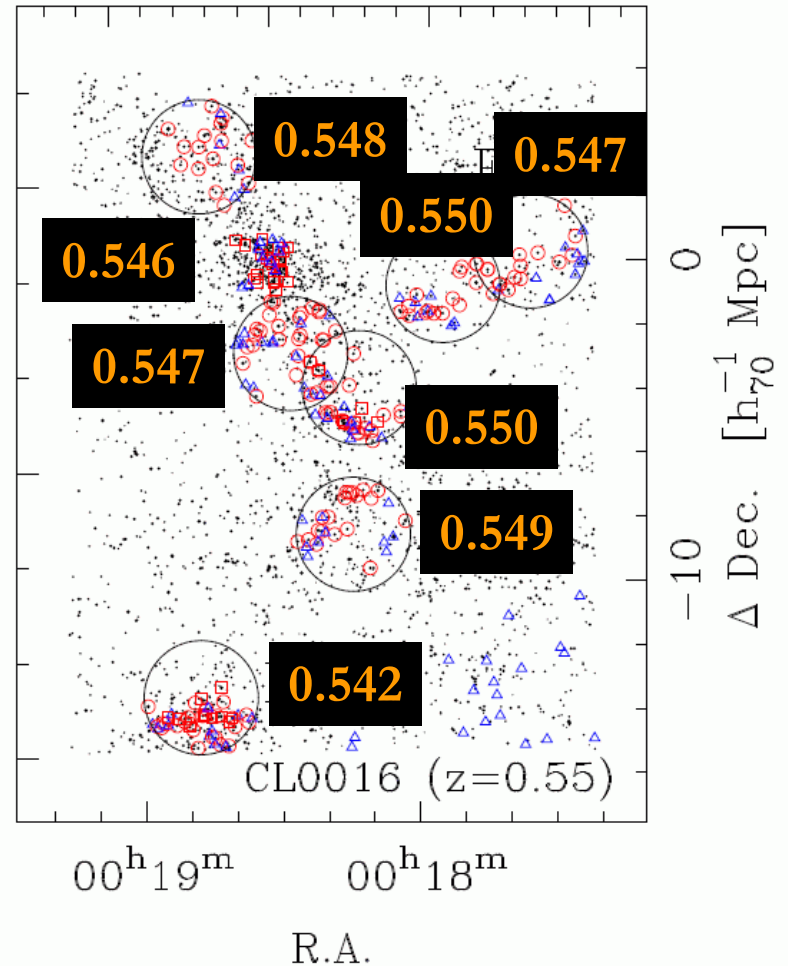
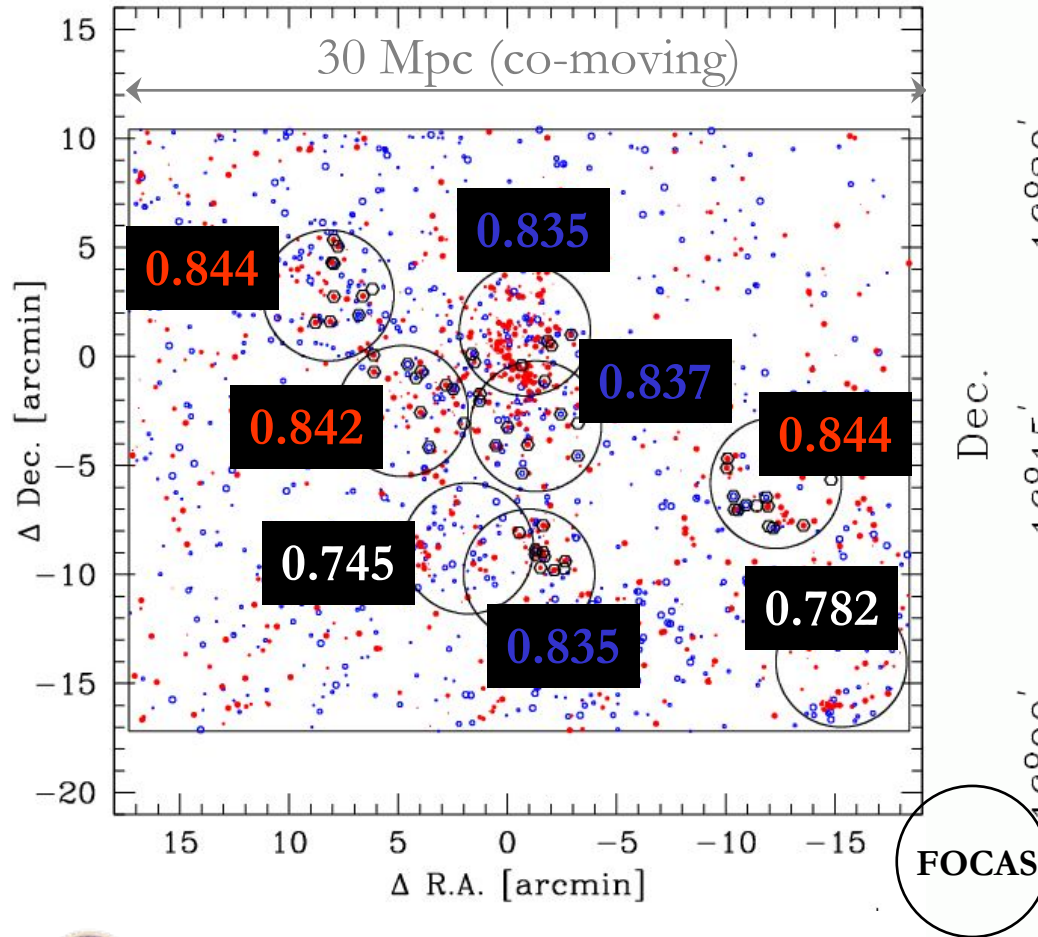


分光観測による大規模構造の確認

RXJ 0152.7-1357 (BVRI)

CL 0016+16 (BVRI'z')

5 0 -5 -10



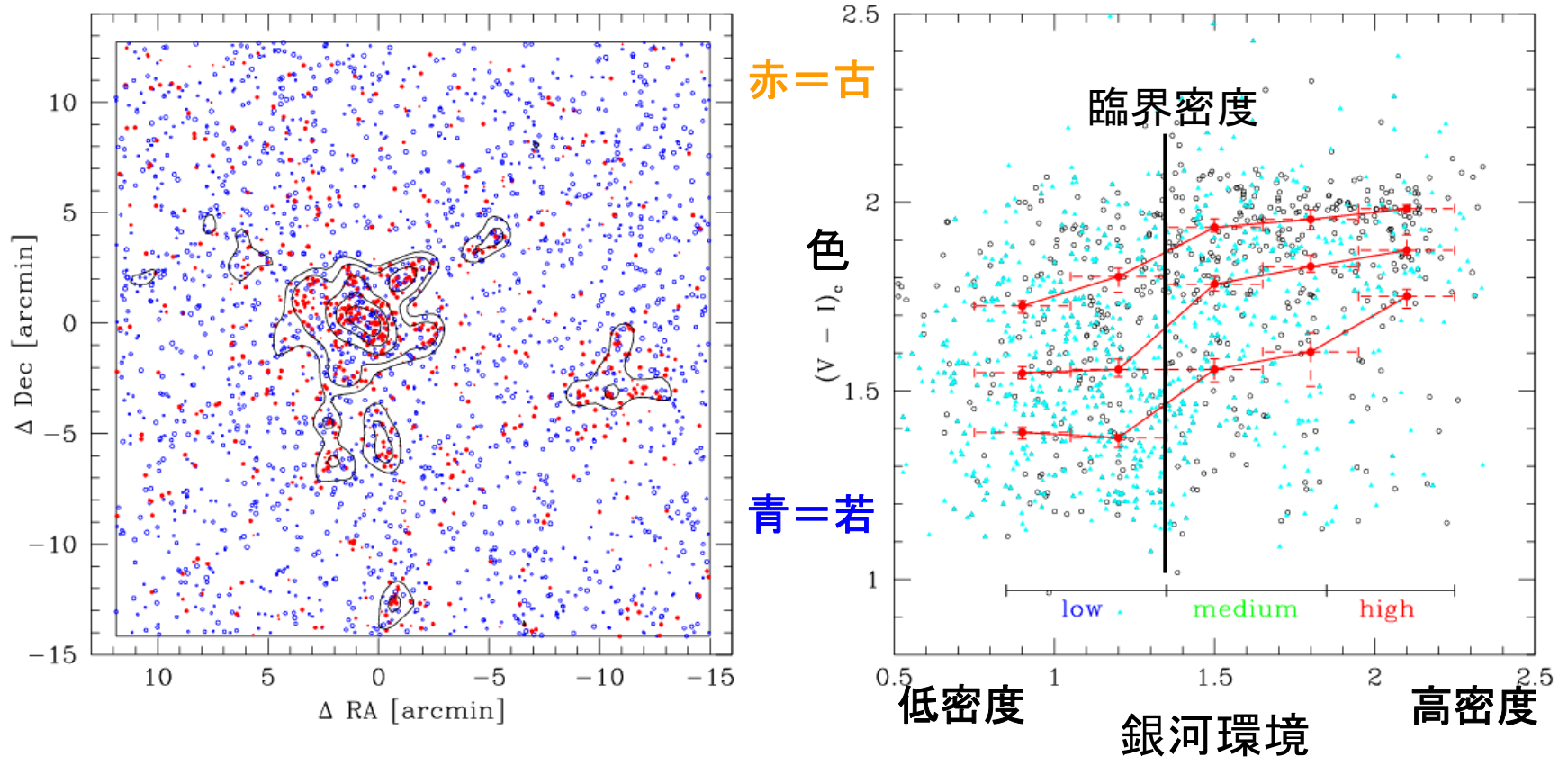
ほぼ全てのクラumpが銀河団本体と同じredshiftにあることを確認。

Tanaka, TK, et al. (2005b; 2007)



星形成活動の環境依存性

CL0939銀河団 ($z=0.41$, 43億年前)

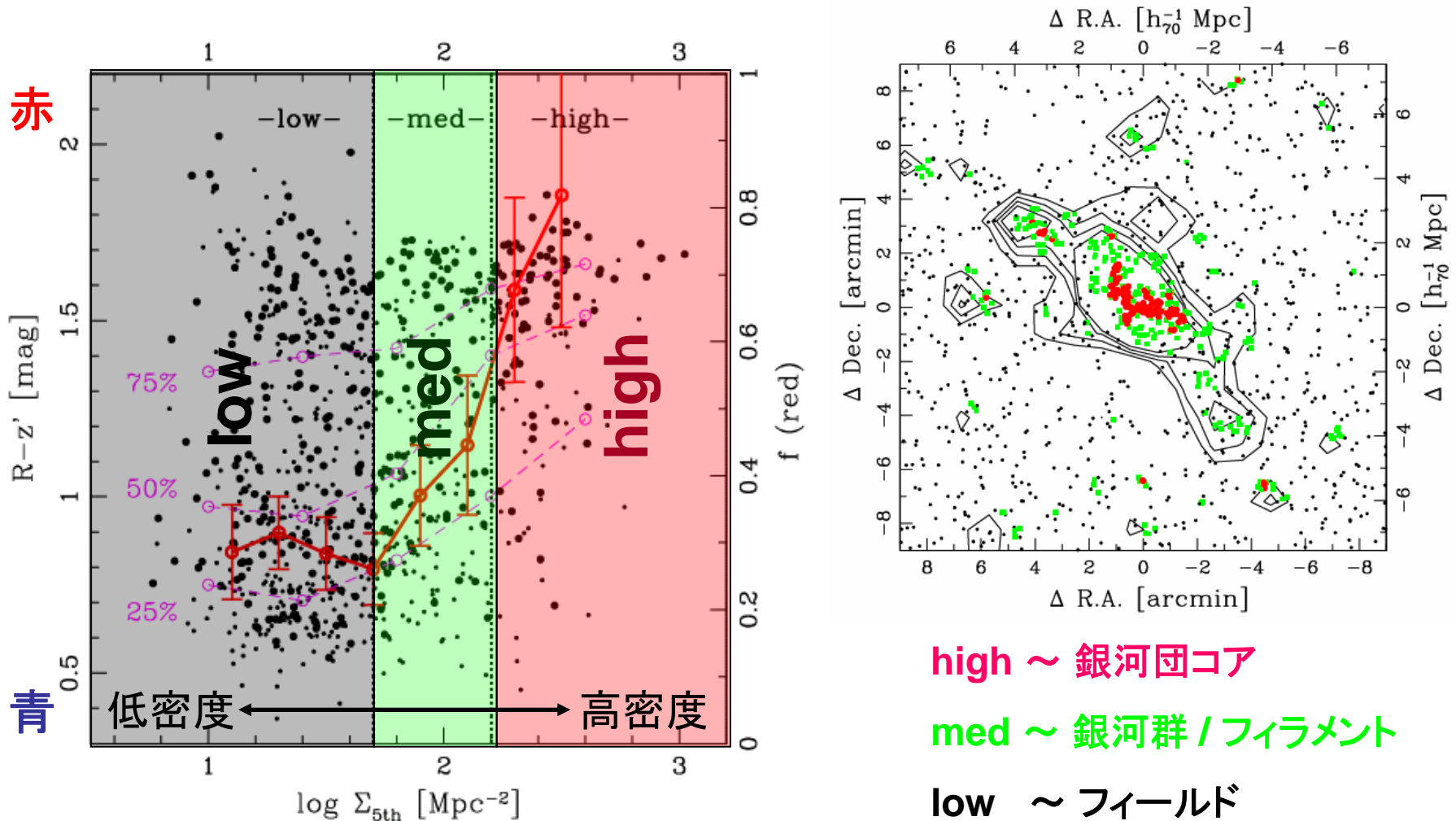


銀河群(蛸足の吸盤)の環境で星形成活動が落ち始める。

Kodama et al. (2001), Tanaka, TK, et al. (2005)

星形成活動の環境依存性

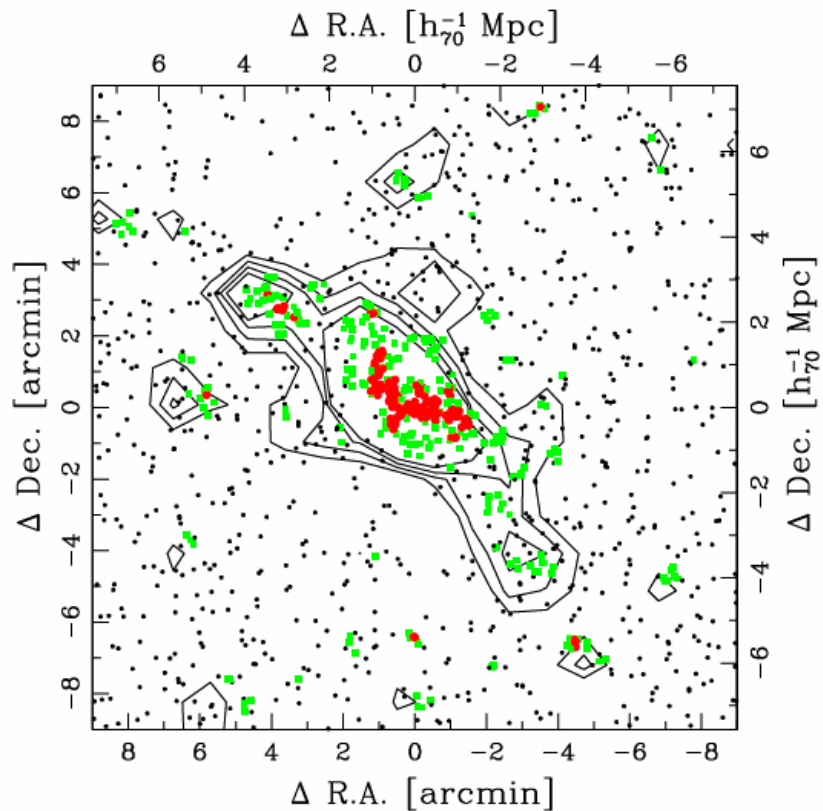
RXJ1716銀河団 ($z=0.81$)



Koyama (2008), Master Thesis, Univ of Tokyo

15 μm ソースが見つかる環境

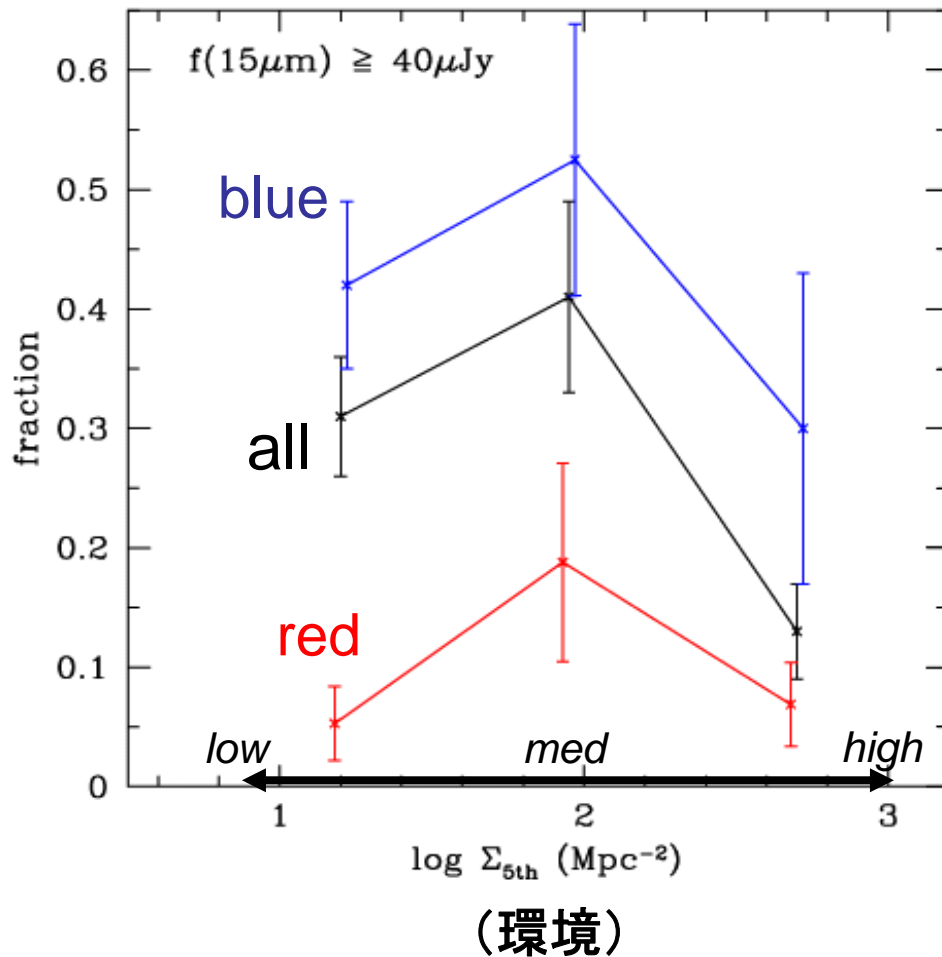
Koyama (2008)



high ~ 銀河団コア

med ~ 銀河群 / フィラメント

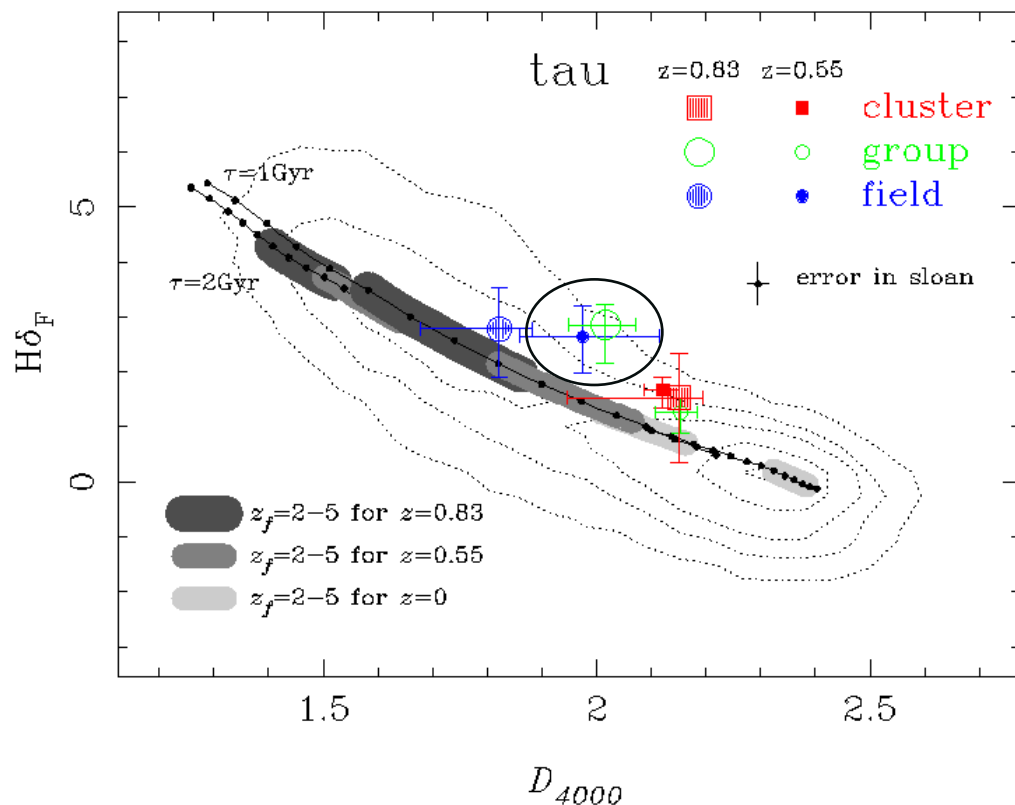
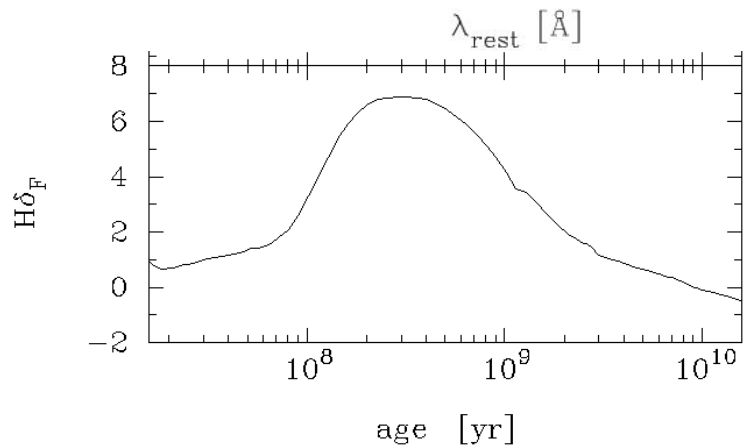
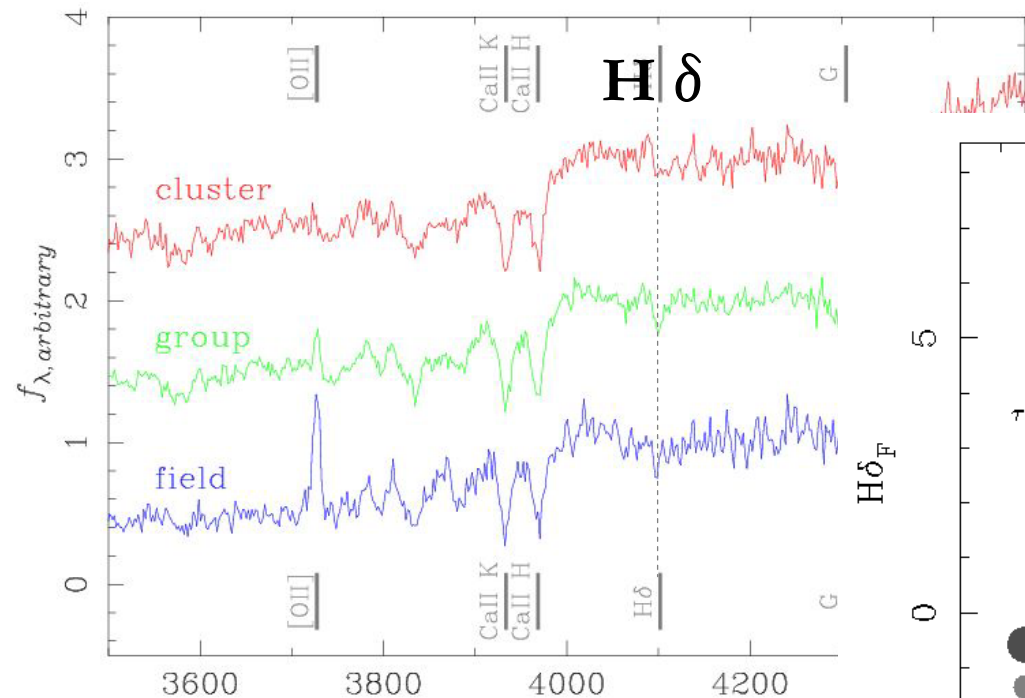
low ~ フィールド



星形成率の大きな銀河が中間的な環境 (= group / filament) で多い

銀河群に見られるポスト・スターバースト銀河

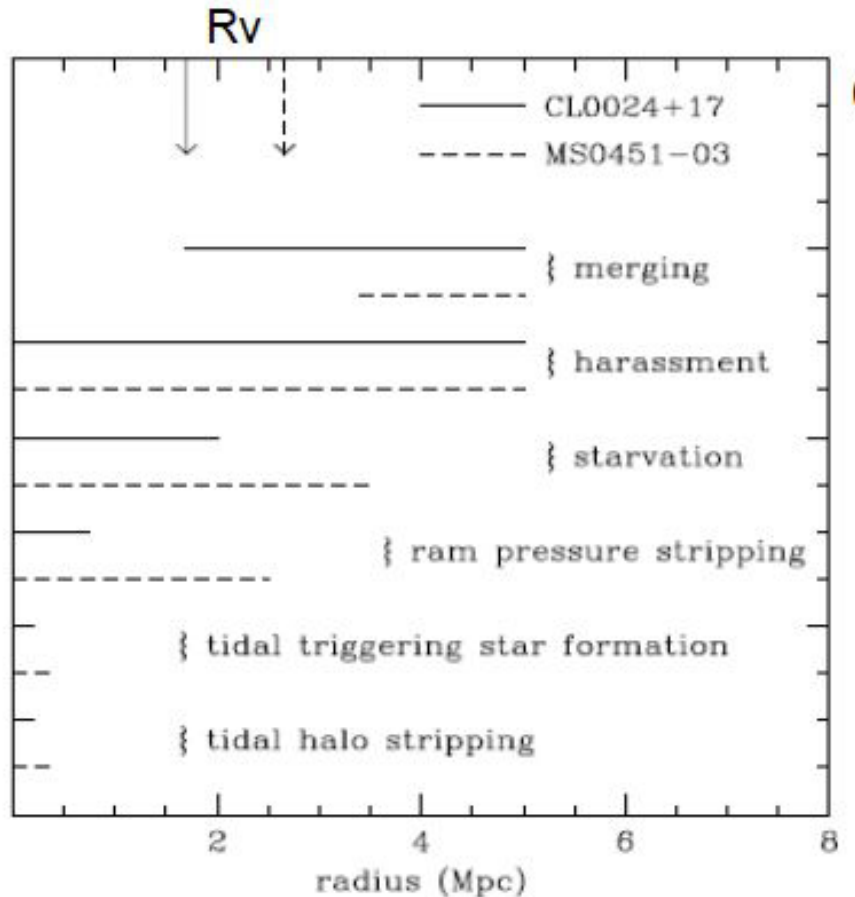
Composite Spectra of Red Galaxies for Cluster/Group/Field



既に赤い銀河だが、直前に星形成を止めた兆候が見られる (強い水素バルマー吸収線)

Tanaka, TK, et al. (2005b)

環境効果の物理過程



Passive spiralsが銀河群環境に多く見られる。

銀河群環境では、ram-pressure strippingは卓越的でなく、銀河間相互作用(合体やハラスメント)や銀河ハローのホットガスの剥ぎ取り(弱いICM作用)などが支配的であると考えられる。

Moran et al. (2007)

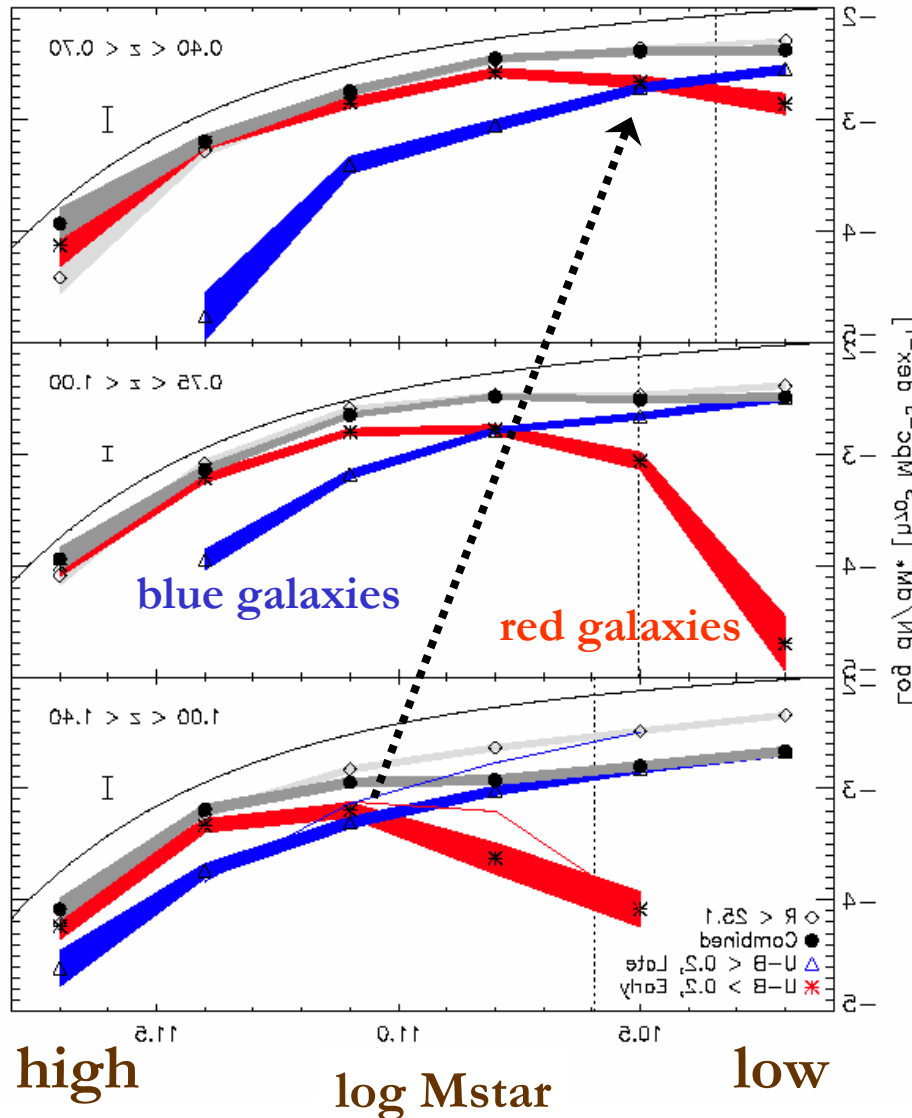
Down-sizing in star formation as a function of Time

8,000 galaxies at $0.4 < z < 1.4$ from DEEP2 Redshift Survey

$0.40 < z < 0.70$
 $4.3 < t(\text{Gyr}) < 6.3$

$0.75 < z < 1.00$
 $6.5 < t(\text{Gyr}) < 7.7$

$1.00 < z < 1.40$
 $7.7 < t(\text{Gyr}) < 8.4$



The critical mass that separate red/blue pops shifts to lower mass as time progresses!



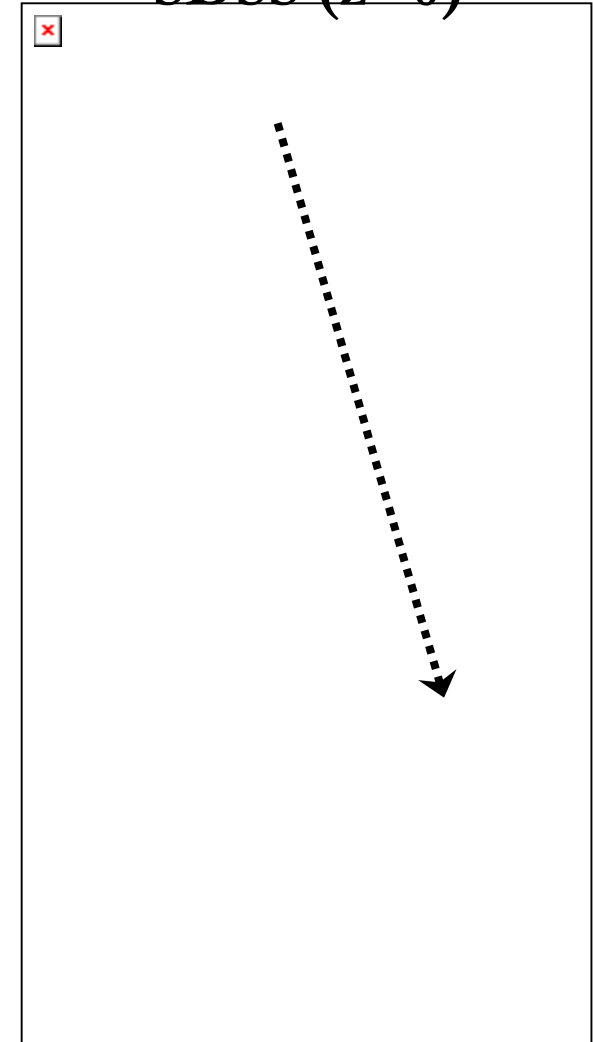
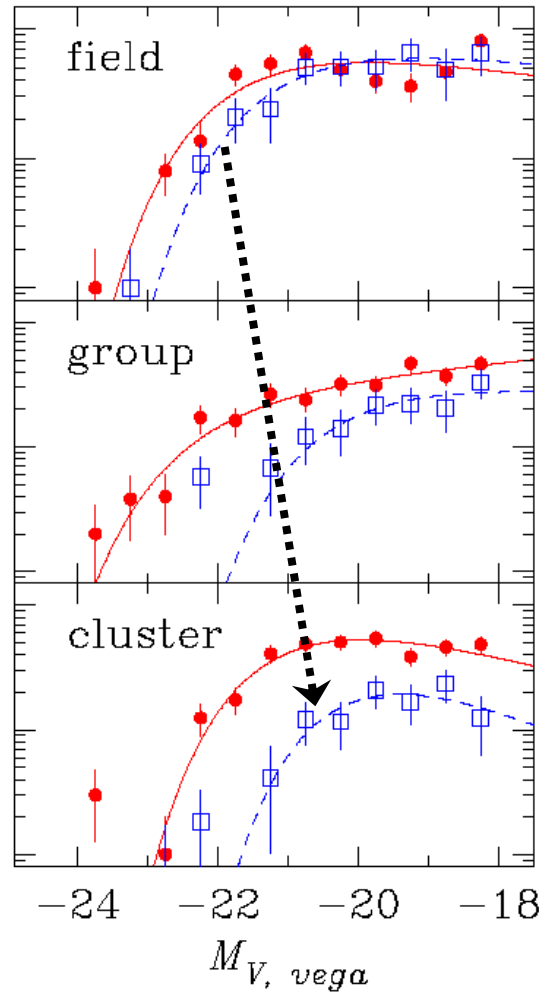
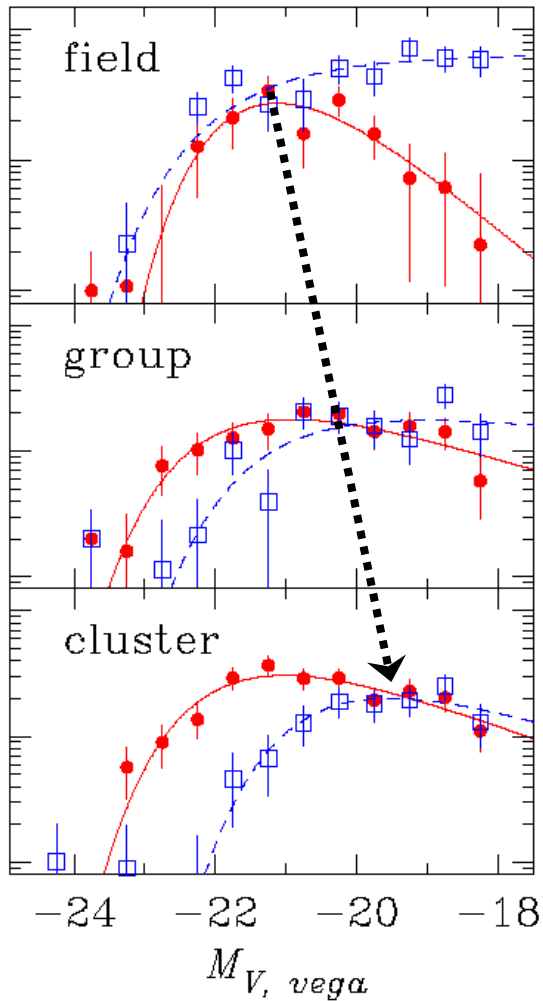
Down-sizing as a function of Environment

red/blue galaxies

RXJ0152 ($z=0.83$)

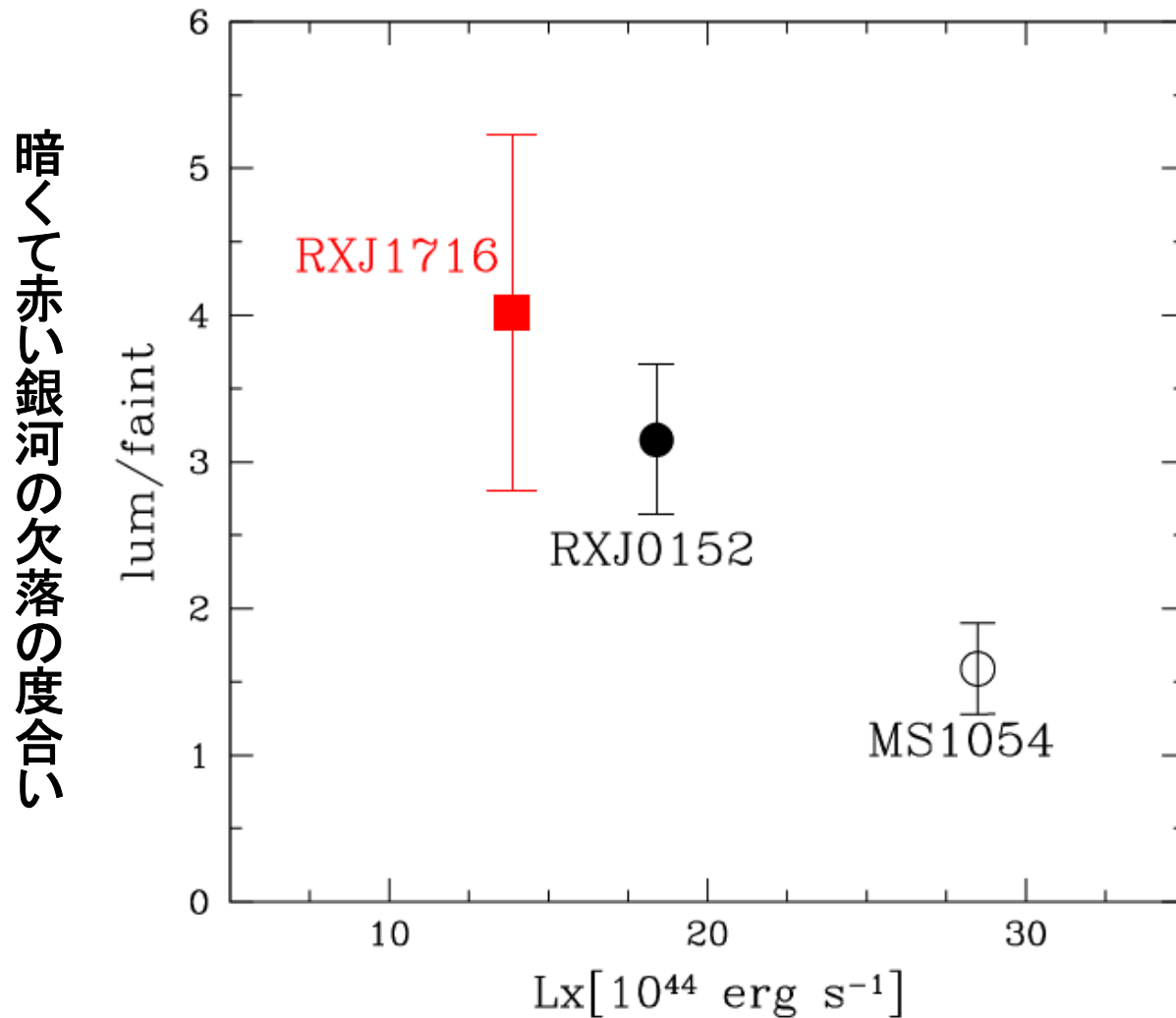
CL0016 ($z=0.55$)

SDSS ($z=0$)



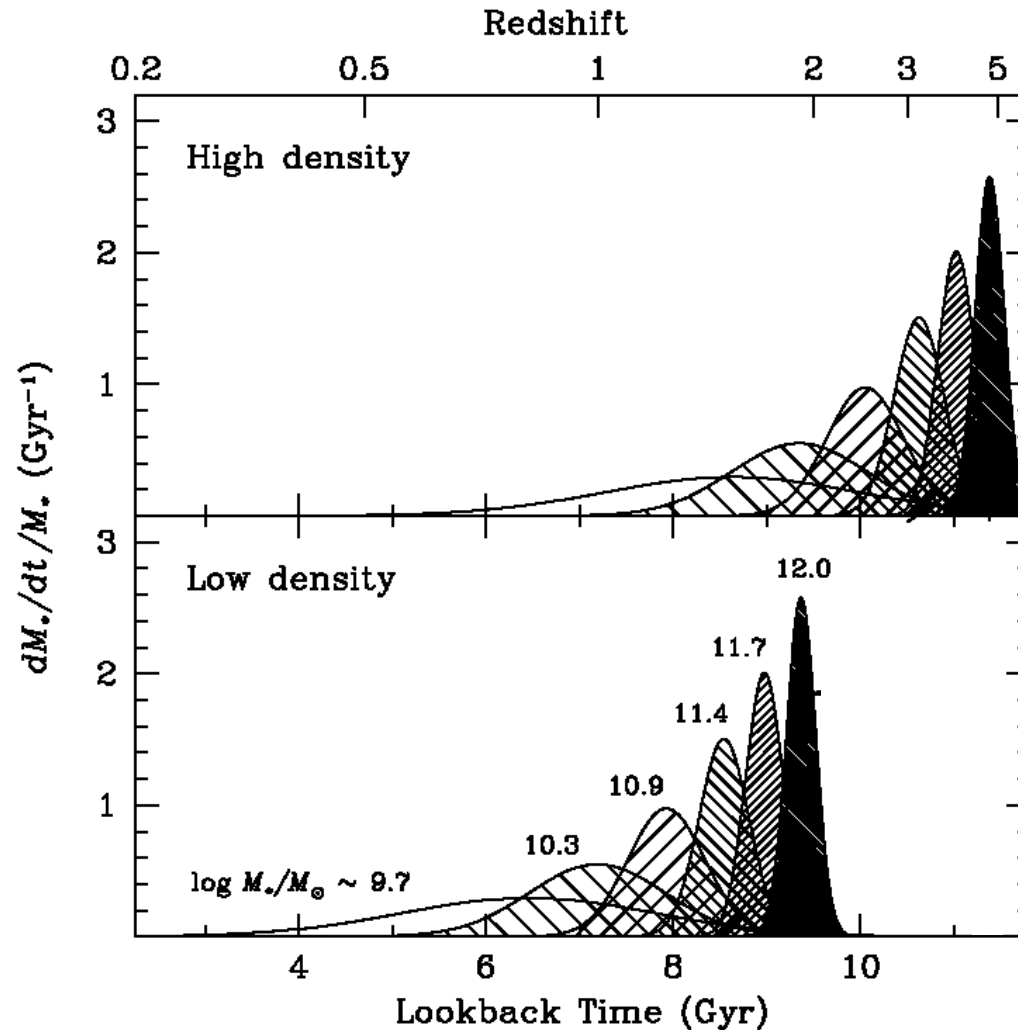
Tanaka, TK, et al. (2005)

Down-sizing as a function of Cluster Richness



Koyama, TK, et al. (2007)

Star Formation Histories of Galaxies vs. Mass and Environment



Thomas et al.
(2005)

high-mass/high-density \rightarrow *low-mass/low-density*

PISCES ($0.4 < z < 1.3$) のまとめ

➤ 銀河団の集団化過程

周辺に大規模なフィラメント構造 ($> 10 \text{ Mpc}$) が見られ、銀河団スケールの集団化の現場を見ていると考えられる。

➤ 銀河星形成史の環境依存性の起源

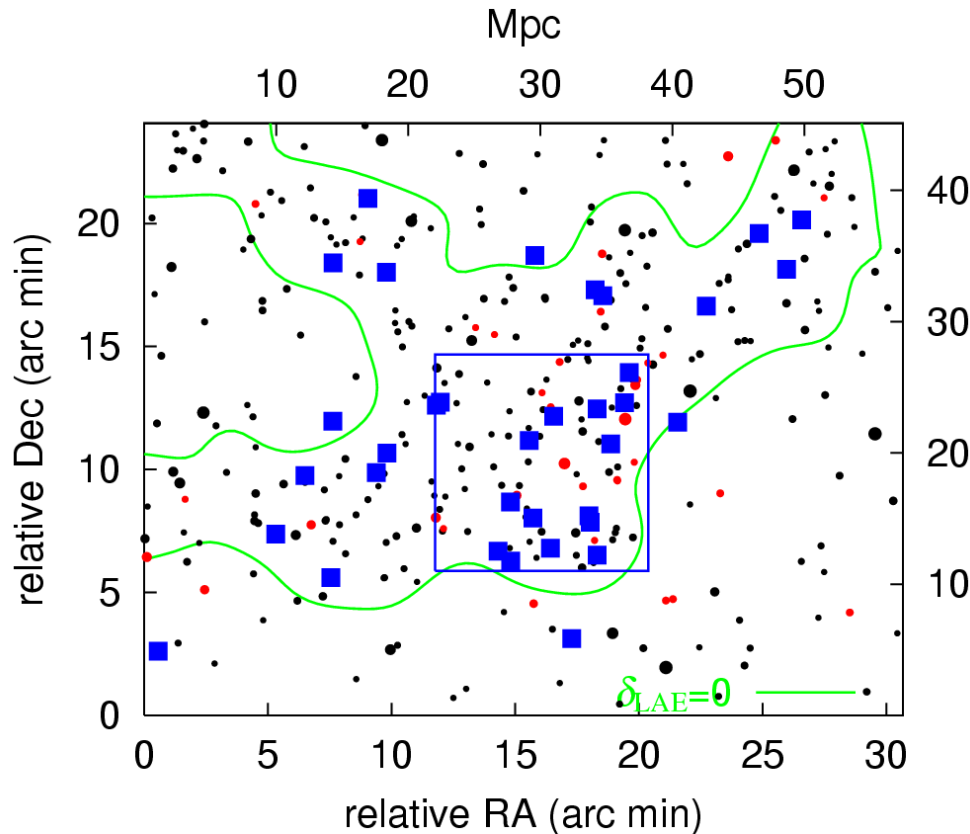
星形成活動性の増大と急激な減衰は中間密度領域 (銀河群) で見られる。銀河間相互作用が原因か？

➤ ダウンサイジングの環境依存性

銀河形成 & 進化のタイムスケールは質量と環境に依存する。大質量・高密度 \rightarrow 小質量・低密度へ

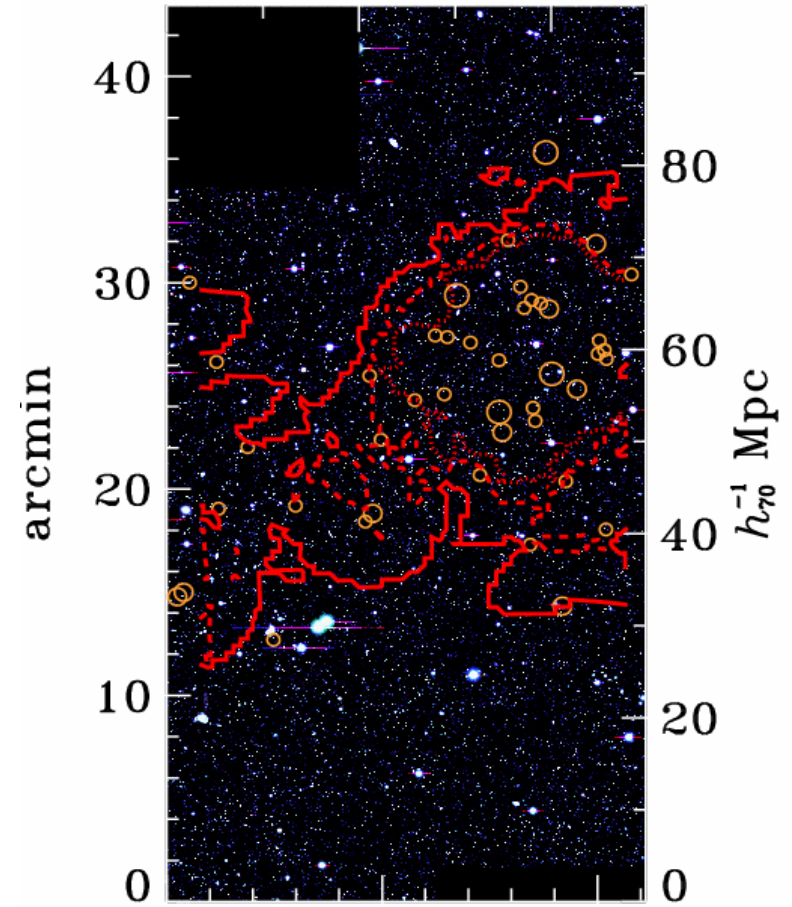
Ly α 輝線銀河探査によって見つかった 初期宇宙の大規模構造

$z \sim 3.09$ (~ 20 億年)



SSA22 (Matsuda et al. 2005)

$z \sim 4.86$ (~ 13 億年)

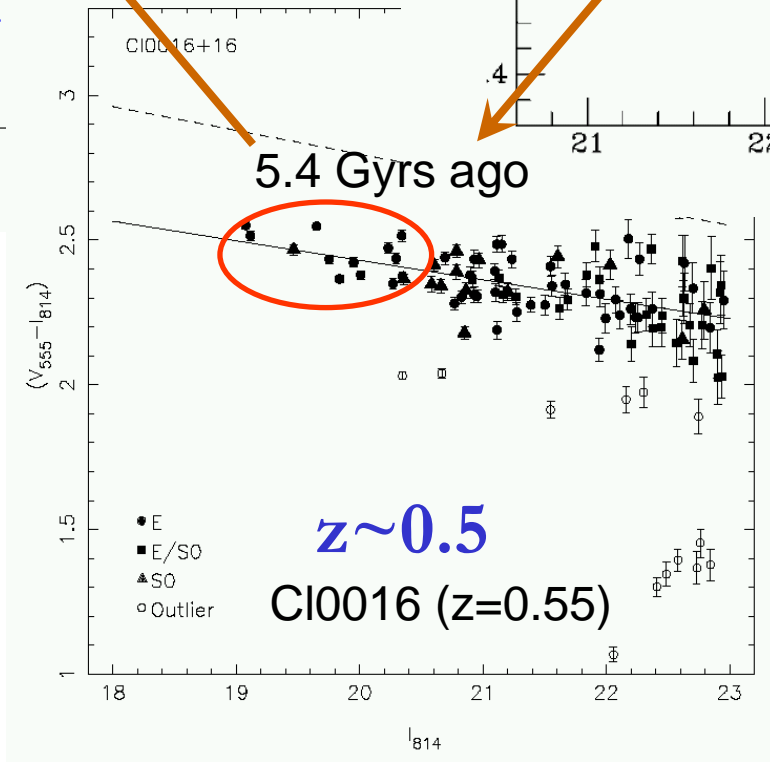
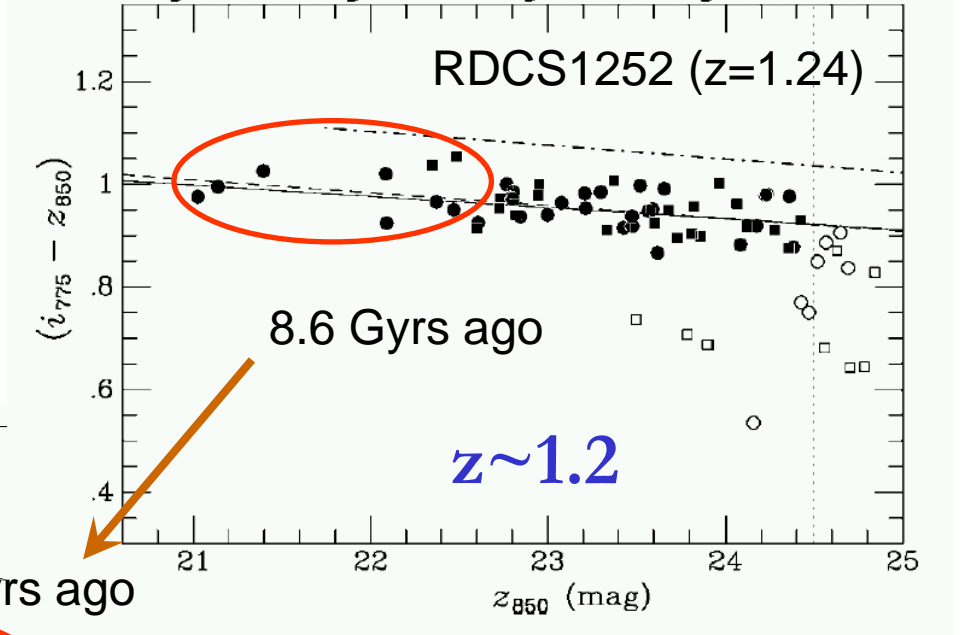
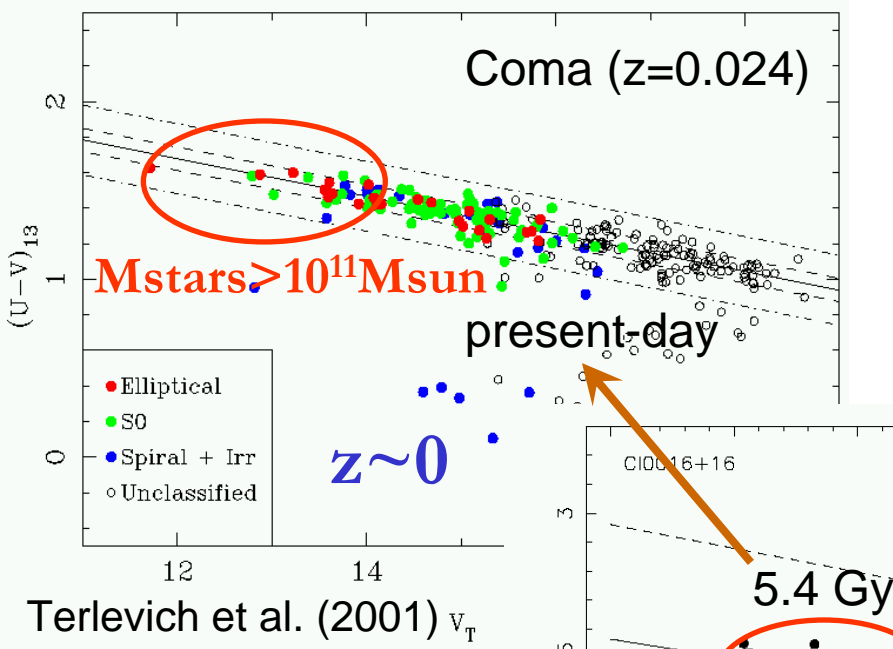


SDF (Shimasaku et al. 2003)

可視光サーベイ (Ly α 銀河など) から 近赤外線サーベイ (星質量分布) へ

- 可視光 (銀河の座標では紫外線) でのサーベイ (Ly α 輝線) では、若くて活発な星形成中の銀河のみ捕らえることができる。
- しかし原始銀河団の全体像を得るには、星形成率の低くなった銀河も含めて星質量全体の分布を知る必要がある。
- それには、近赤外線 (銀河の座標で可視光) での観測が重要である。すばるの広視野近赤外線カメラ (MOIRCS) が生かされる。

When does the red-sequence of galaxies eventually break down ?



Blakeslee et al. (2003)

$z(\text{SF}) > 2$

$z(\text{assembly}) > 1$

Ellis et al. (1997)

電波銀河周りの原始銀河団 ($2 < z < 3$) の広視野近赤外撮像観測

Subaru/MOIRCS observations (except for 1558)

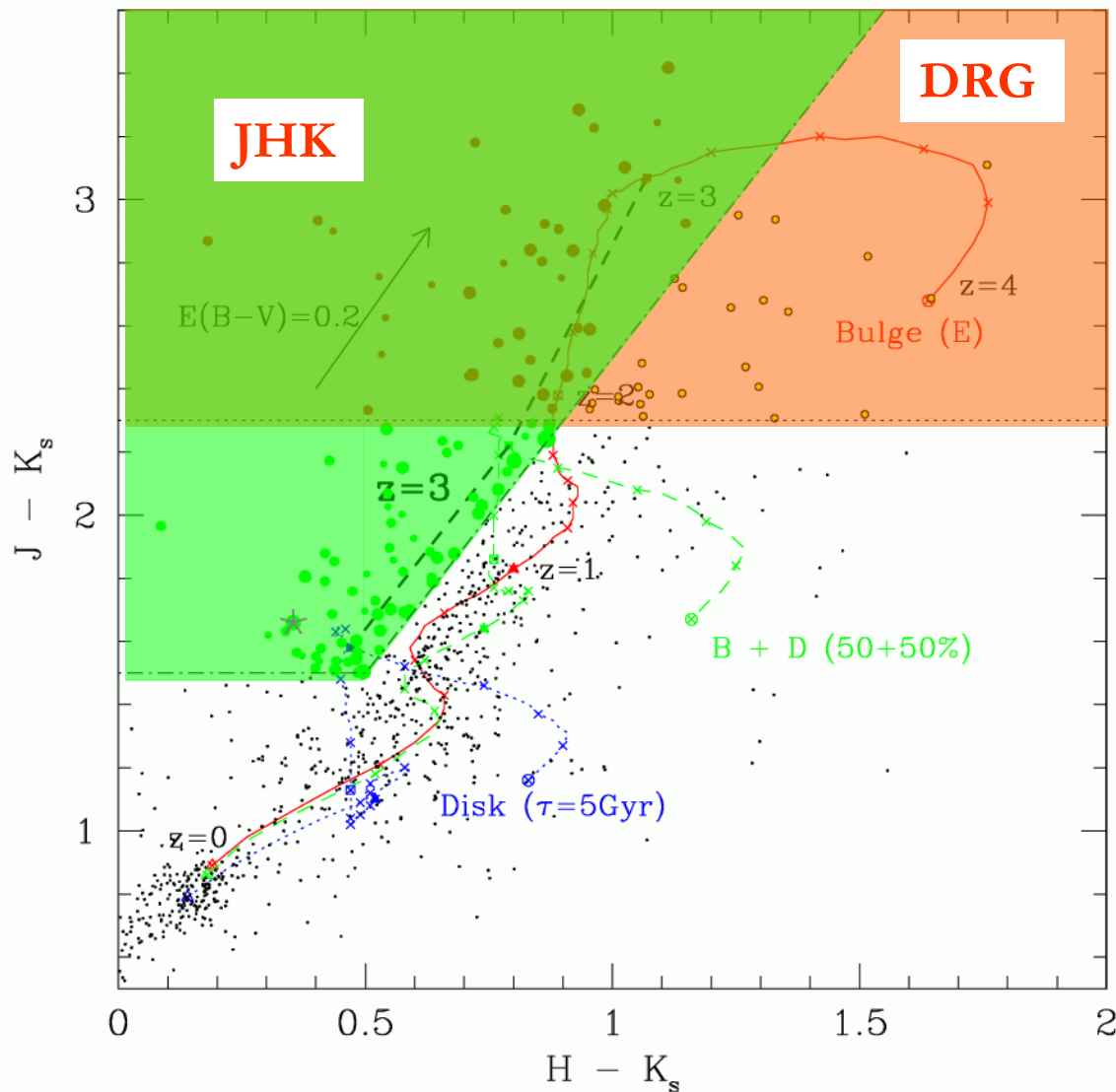
4.0' × 7.0' (0.117' / pix), 7' = 10-15 Mpc @ $z = 2-3$

Targets (radio galaxies)	redshift (z)	J	H	Ks	PSF
PKS 1138-262	2.156	83 min	—	55 min	0.5"~0.7"
USS 1558-003 (5' x 5')	2.527	180min (SOFI)	—	175min (SOFI)	0.7"
USS 0943-242	2.923	118min	68 min	63 min	0.4"~0.6"
MRC 0316-257	3.130	78 min	60 min	55 min	0.6"~0.7"

J=23.5, H=22.3, K=22.0 (5 sigma, Vega)

Kodama et al. (2006) in prep.

JHK selection of $2 \lesssim z \lesssim 3$ galaxies

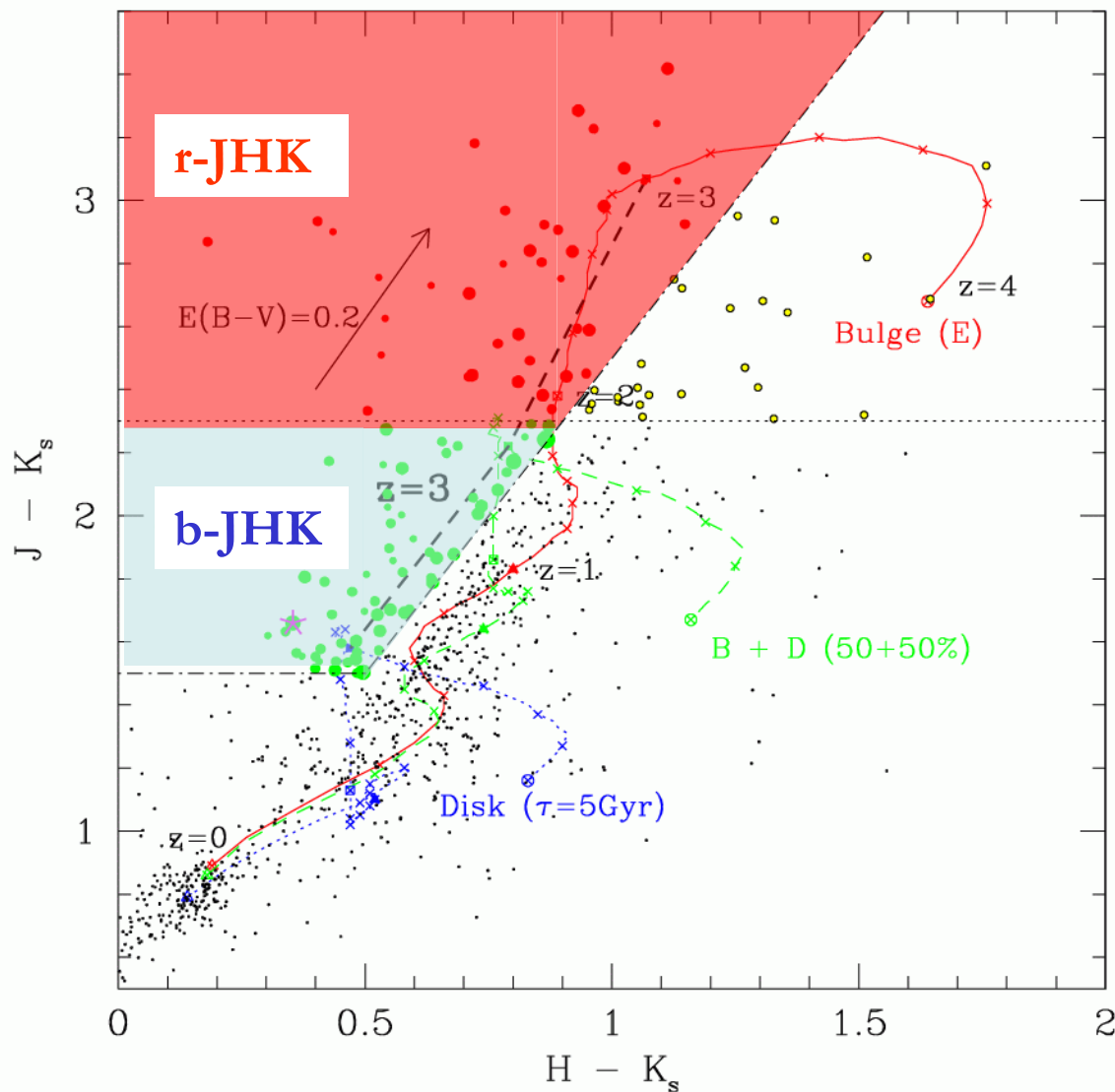


Common criteria (DRG):
 $J-K > 2.3$
passive/dusty gals at $z > 2$



Our new criteria (JHK):
 $(J-K) > 2(H-K) + 0.5$
&& $J-K > 1.5$
passive/dusty ($2 < z < 3.3$) +
star-forming ($2.4 < z < 3.1$)

JHK selection of $2 \lesssim z \lesssim 3$ galaxies



Common criteria (DRG):
 $J-K > 2.3$
passive/dusty gals at $z > 2$



Our new criteria (JHK):
 $(J-K) > 2(H-K) + 0.5$
&& $J-K > 1.5$
passive/dusty ($2 < z < 3.3$) +
star-forming ($2.4 < z < 3.1$)

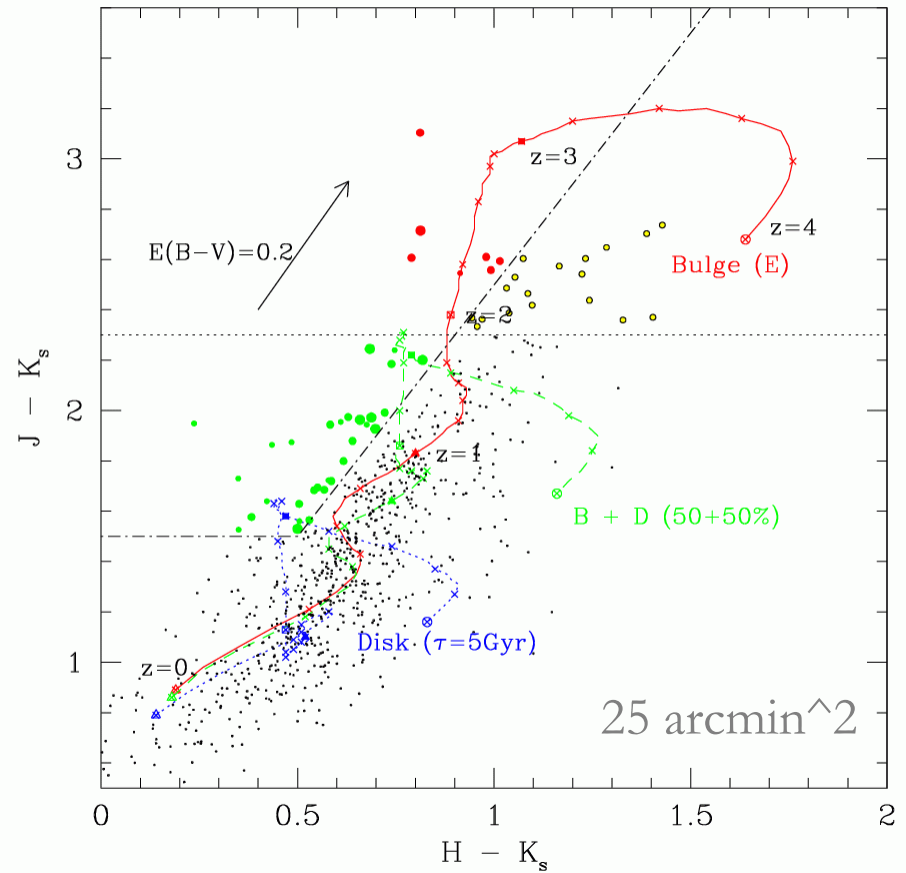
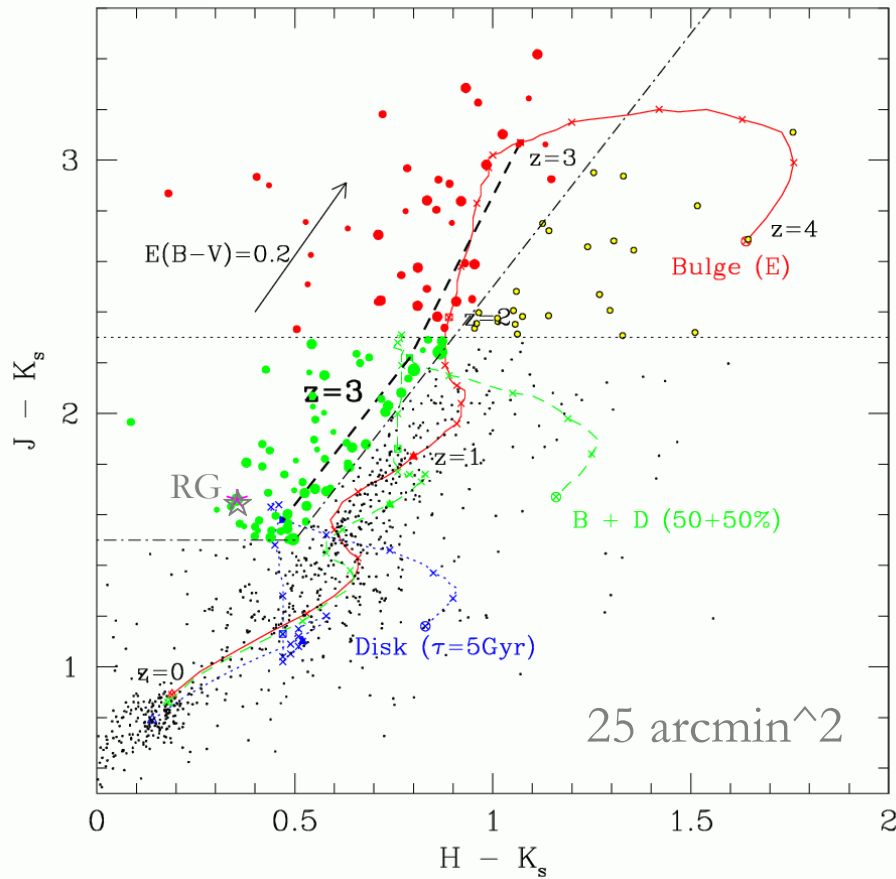
$J-K > 2.3$ -- r-JHK

$J-K < 2.3$ -- b-JHK

JHK diagram (0943 @ z=2.923)

USS0943 (z=2.923)

GOODS-S (blank field)

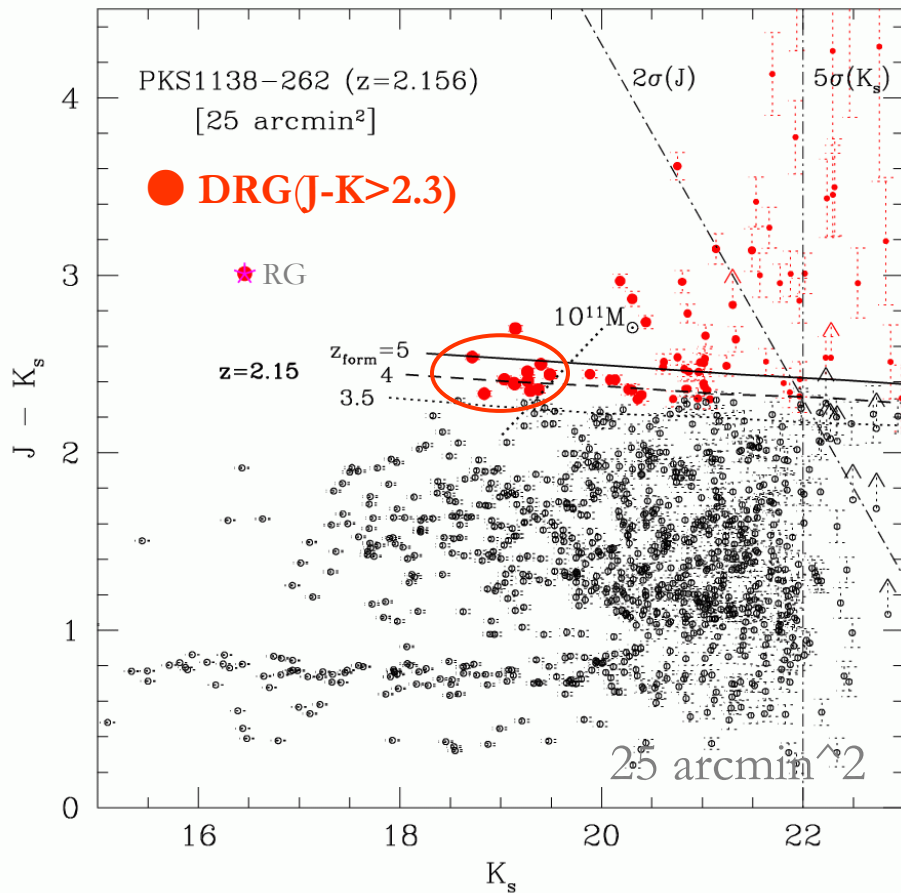


Statistical excesses of both r-JHK and b-JHK are clearly seen (factor=2~4).

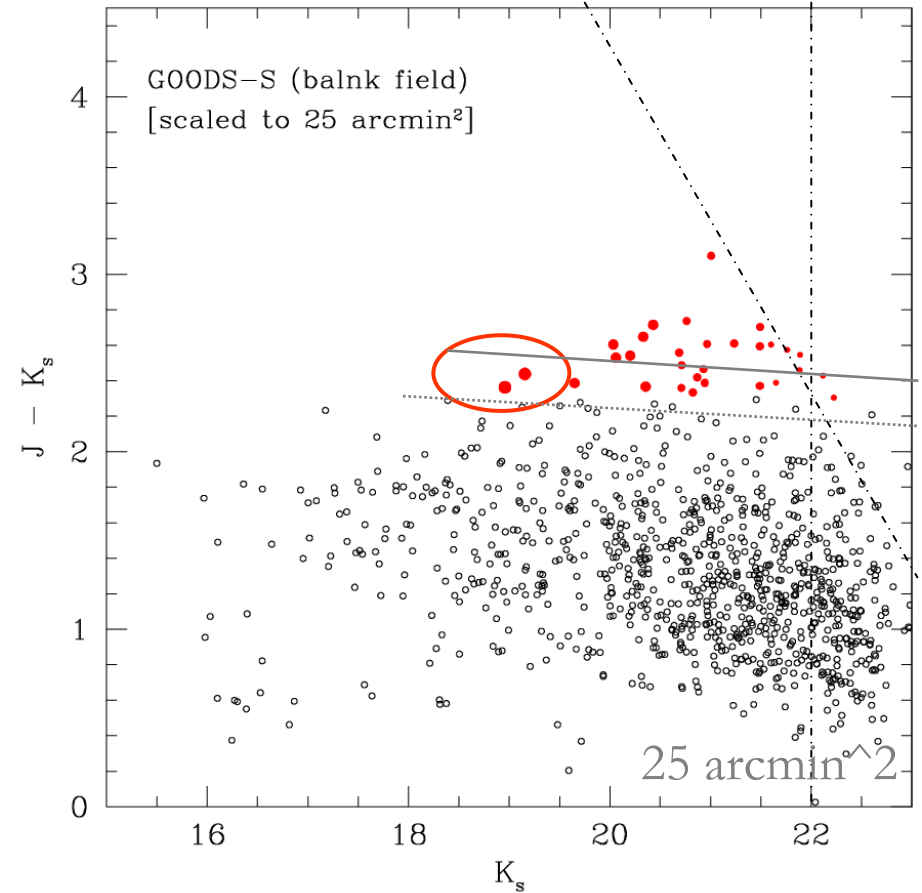
Kodama et al. (2007)

原始銀河団中の銀河 ($z \sim 2$, 105億年前)

PKS1138 ($z=2.156$)



GOODS-S (blank field)

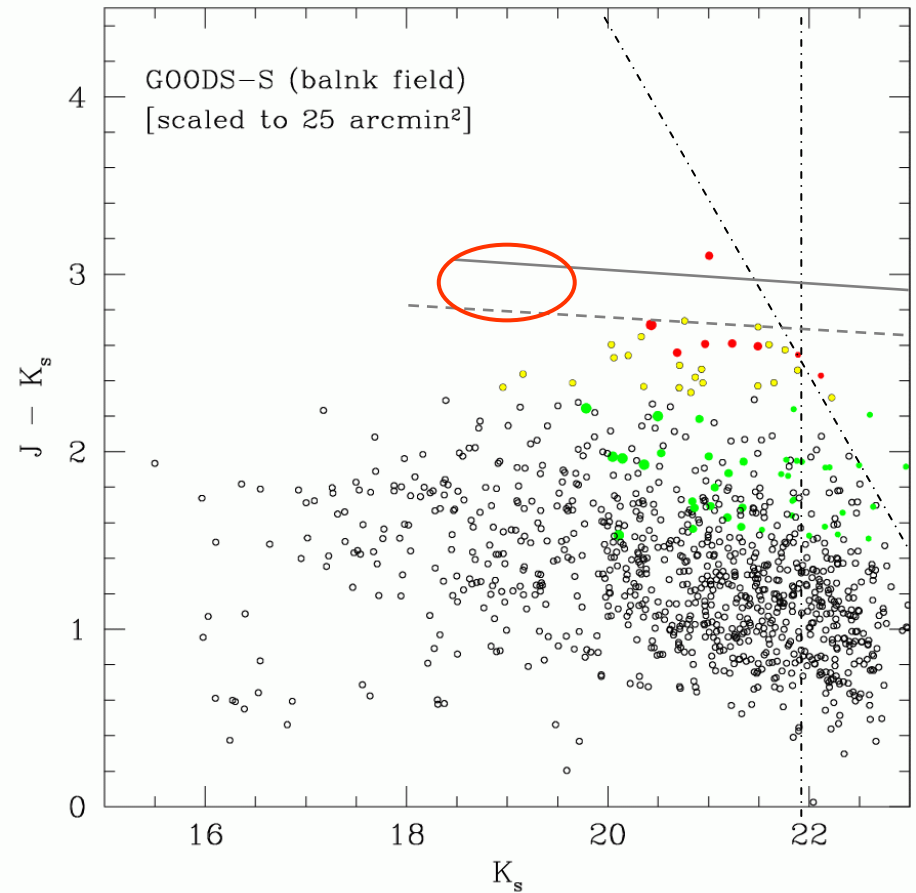
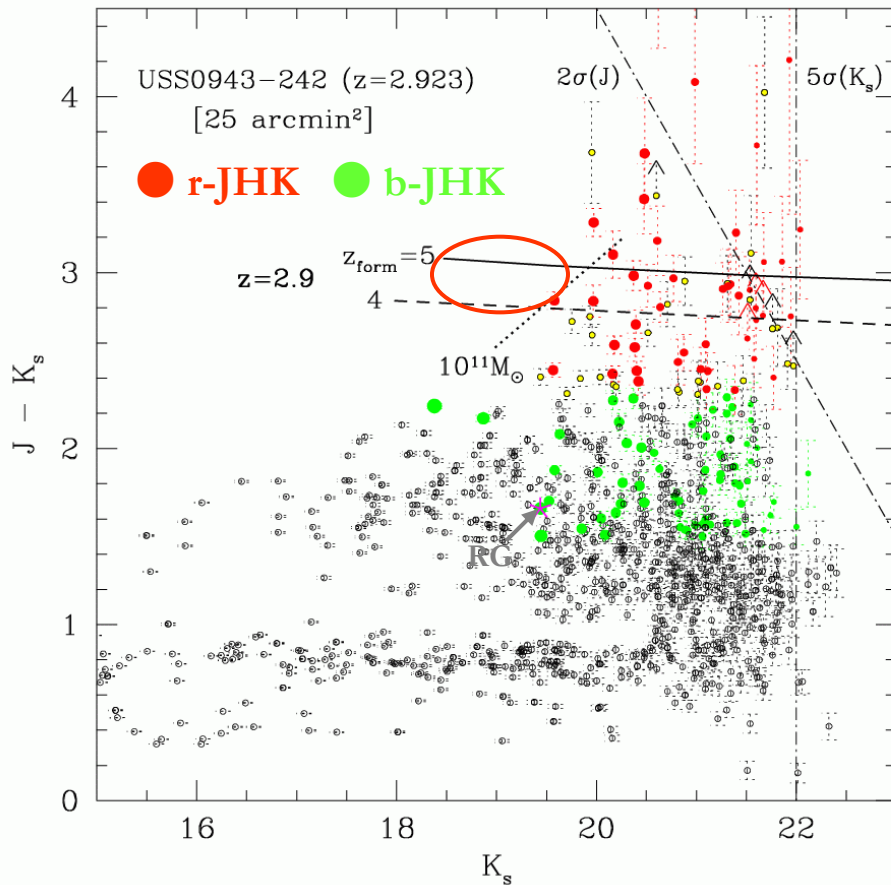


重くて赤い銀河の系列がはっきり見られ (星質量 $> 10^{11} M_{\odot}$)、
すでに大質量銀河が形成されている。

原始銀河団中の銀河 ($z \sim 3$, 115億年前)

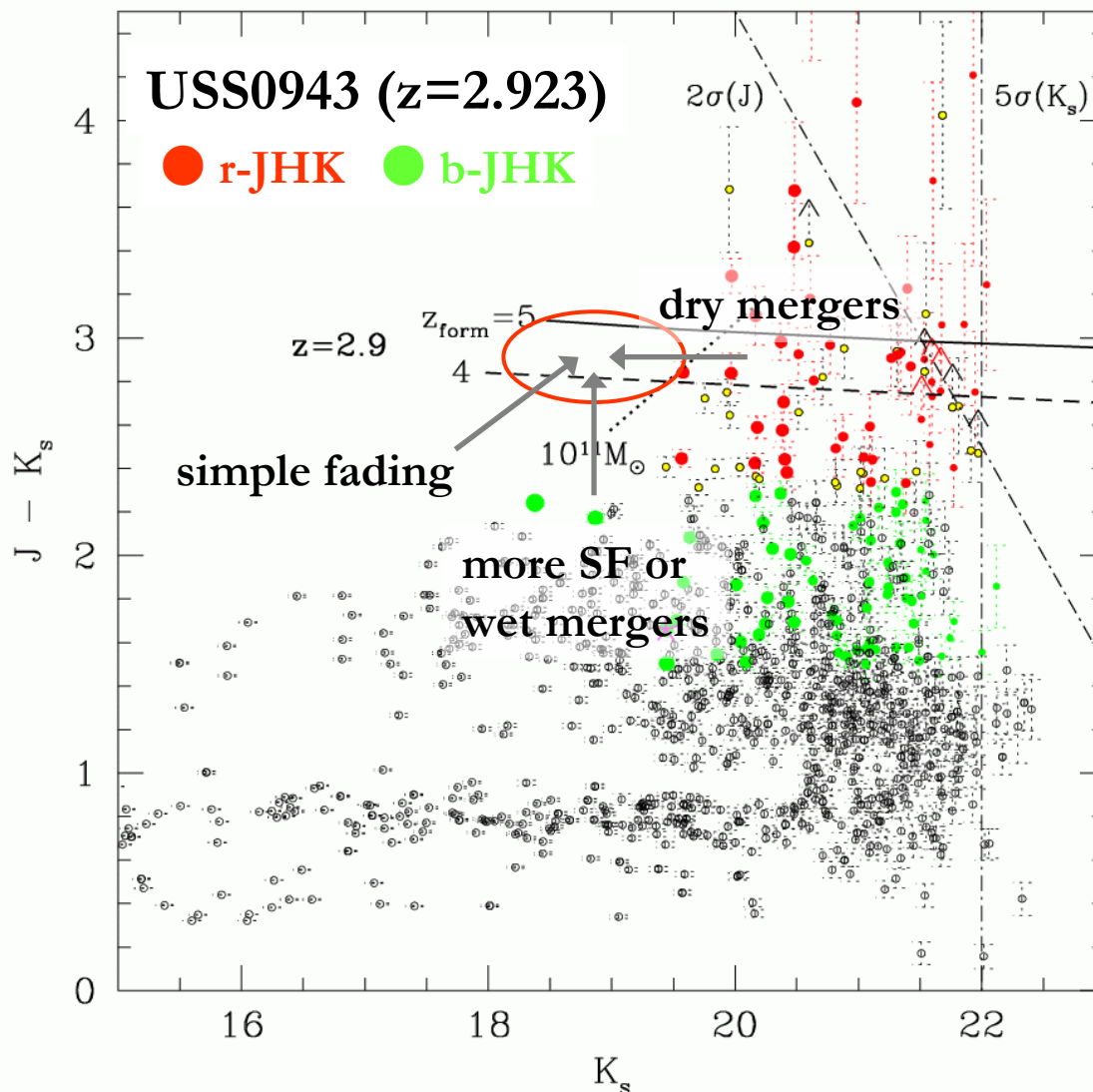
USS0943 ($z=2.923$)

GOODS-S (blank field)



赤い銀河の密度超過は顕著に見られるが、
重い銀河はまだ出来ていない (星質量 $< 10^{11} M_{\odot}$)。

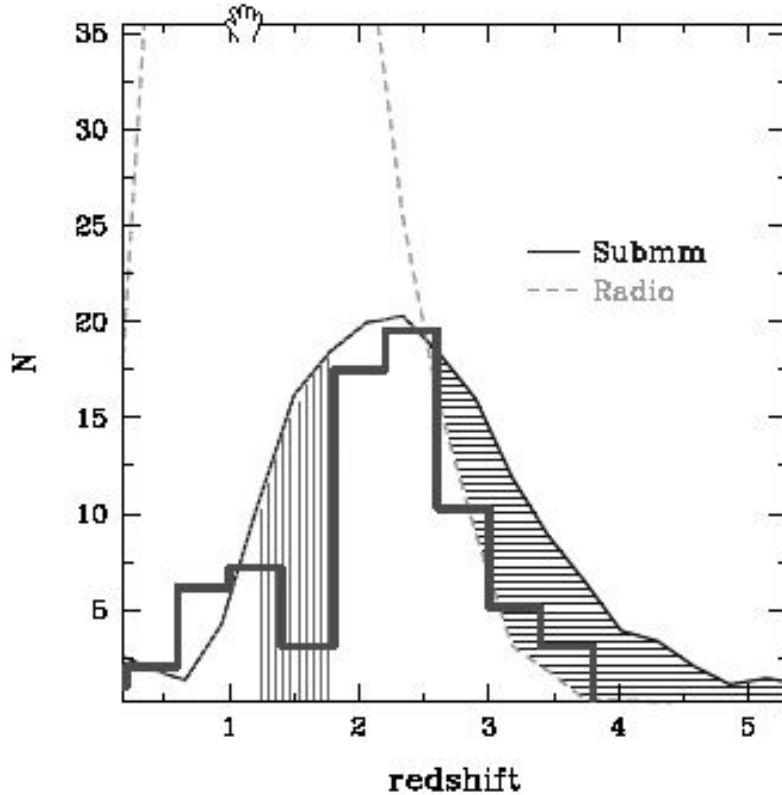
$z \sim 2$ の重い銀河の $z \sim 3$ での祖先は？



単に星形成を止めるだけでは駄目。活発な星形成や合体・降着が必要。

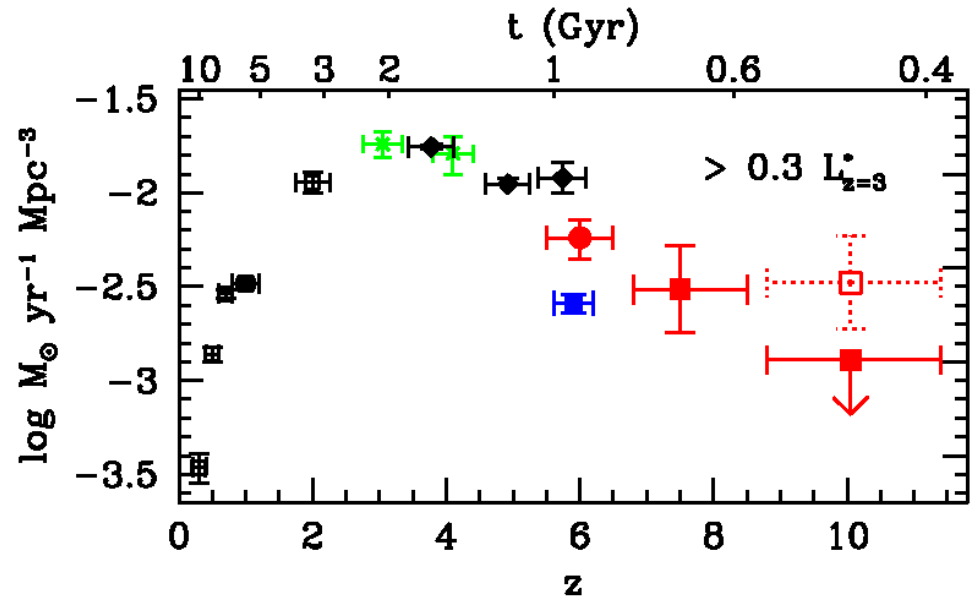
z=3から2の間の活発な星形成活動？ ($T_{\text{univ}} = 20\sim 30$ 億年)

サブミリ銀河の出現ピーク (z~2.4)



Chapman et al. (2005)

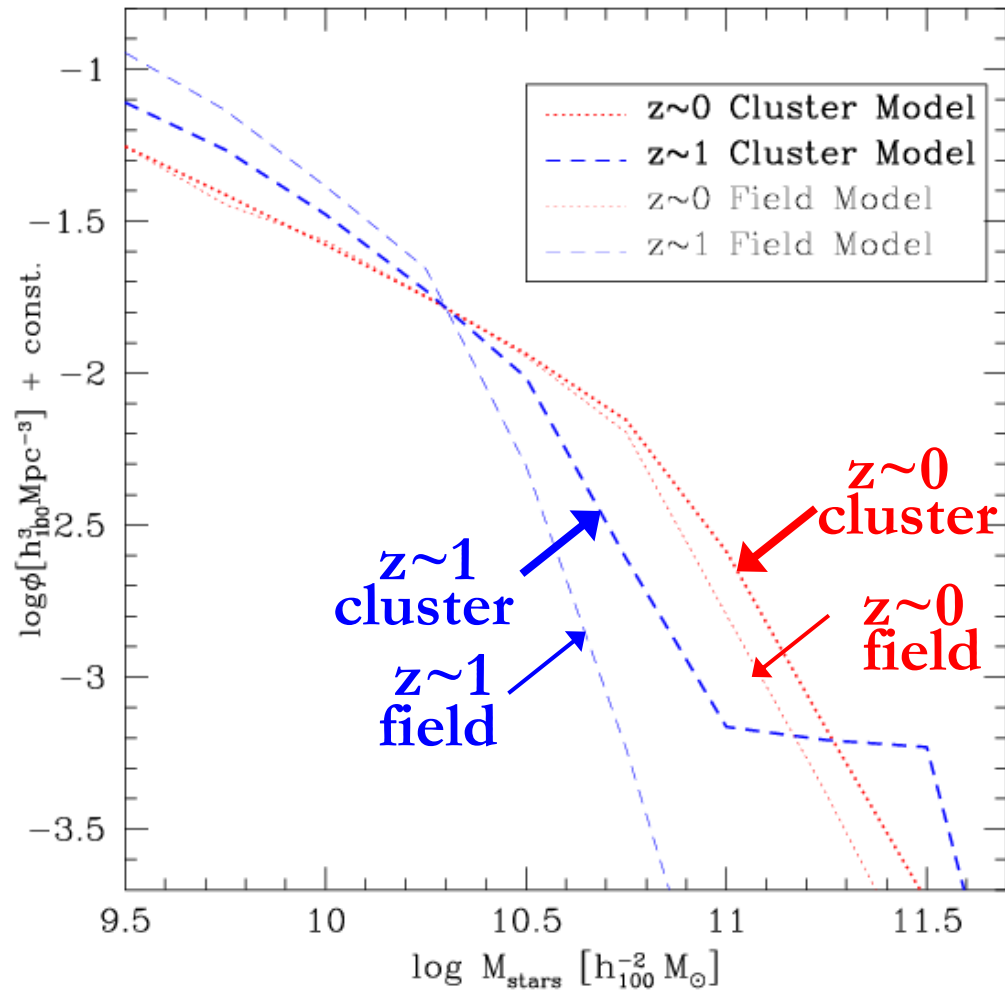
宇宙の大局的星形成率のピーク (z~3)



Bouwens et al. (2005)

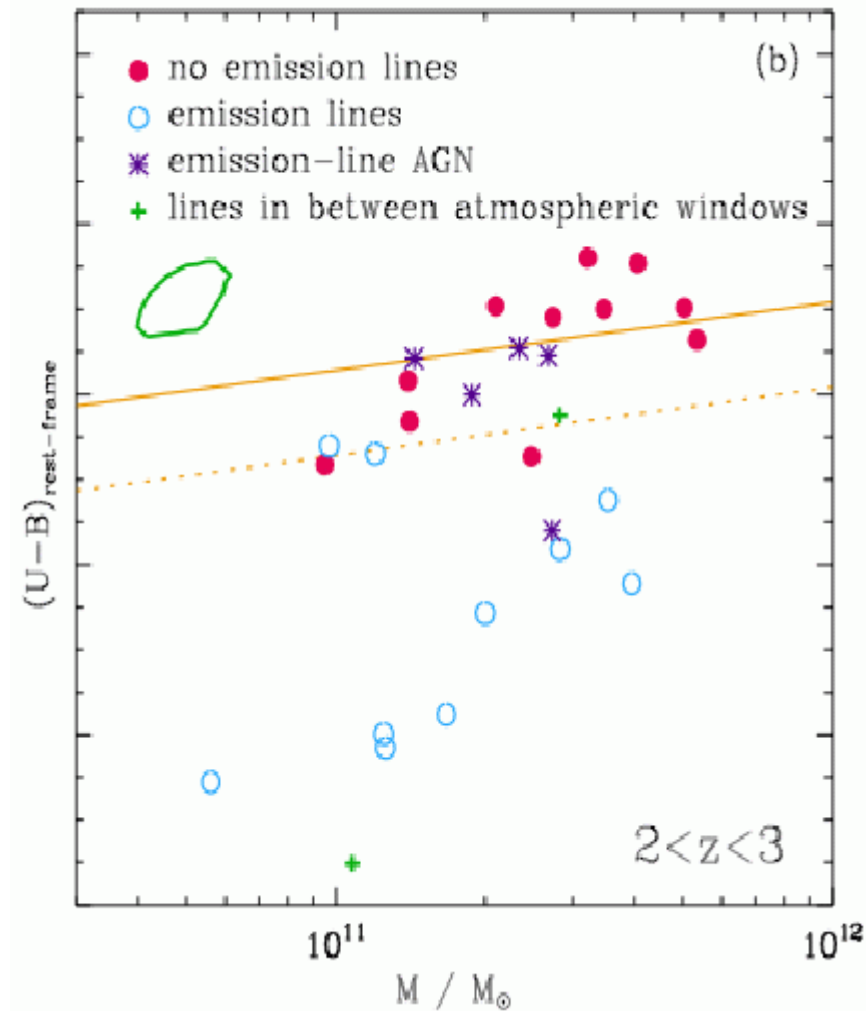
$$\Delta t(2 < z < 3) \\ 10^{11} \text{ Msun} / 1 \text{ Gyr} = 100 \text{ Msun/yr}$$

Environmental dependence of stellar mass function: Theory



Baugh et al.

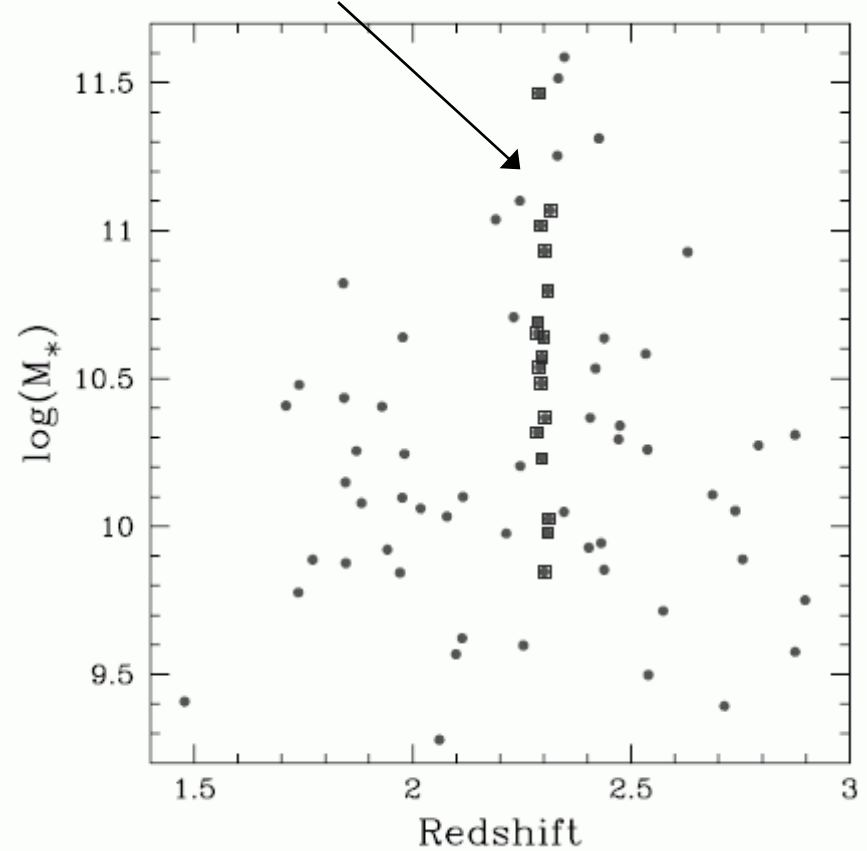
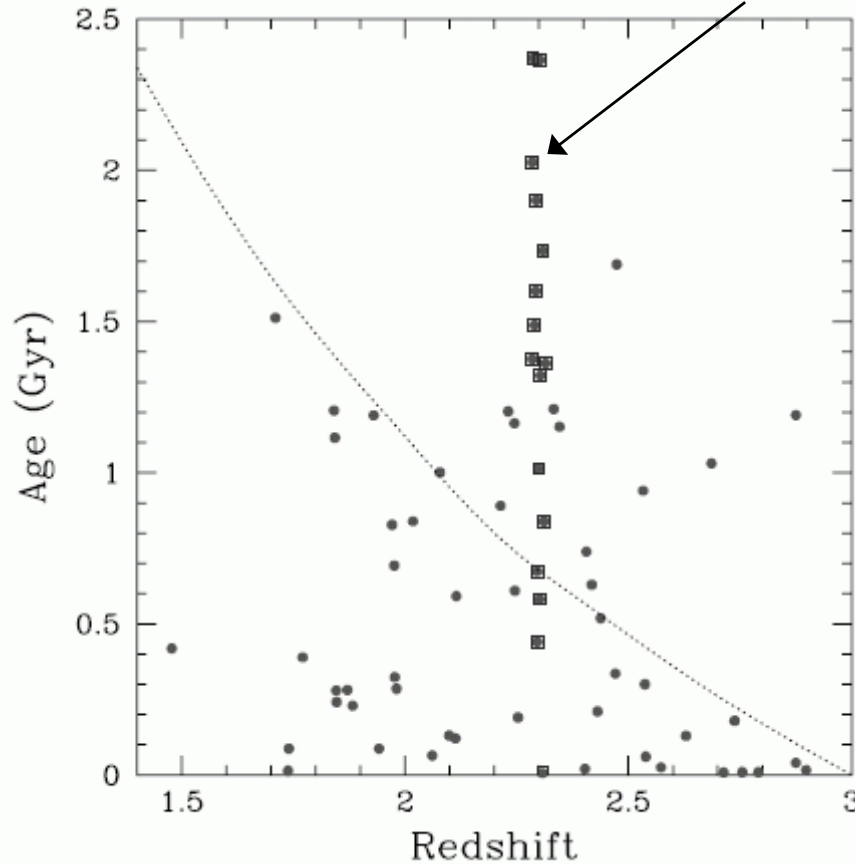
Red sequence at $z \sim 2.3$ in the Field



Kriek et al. (2008)

Environmental dependence of age and stellar mass: Observation

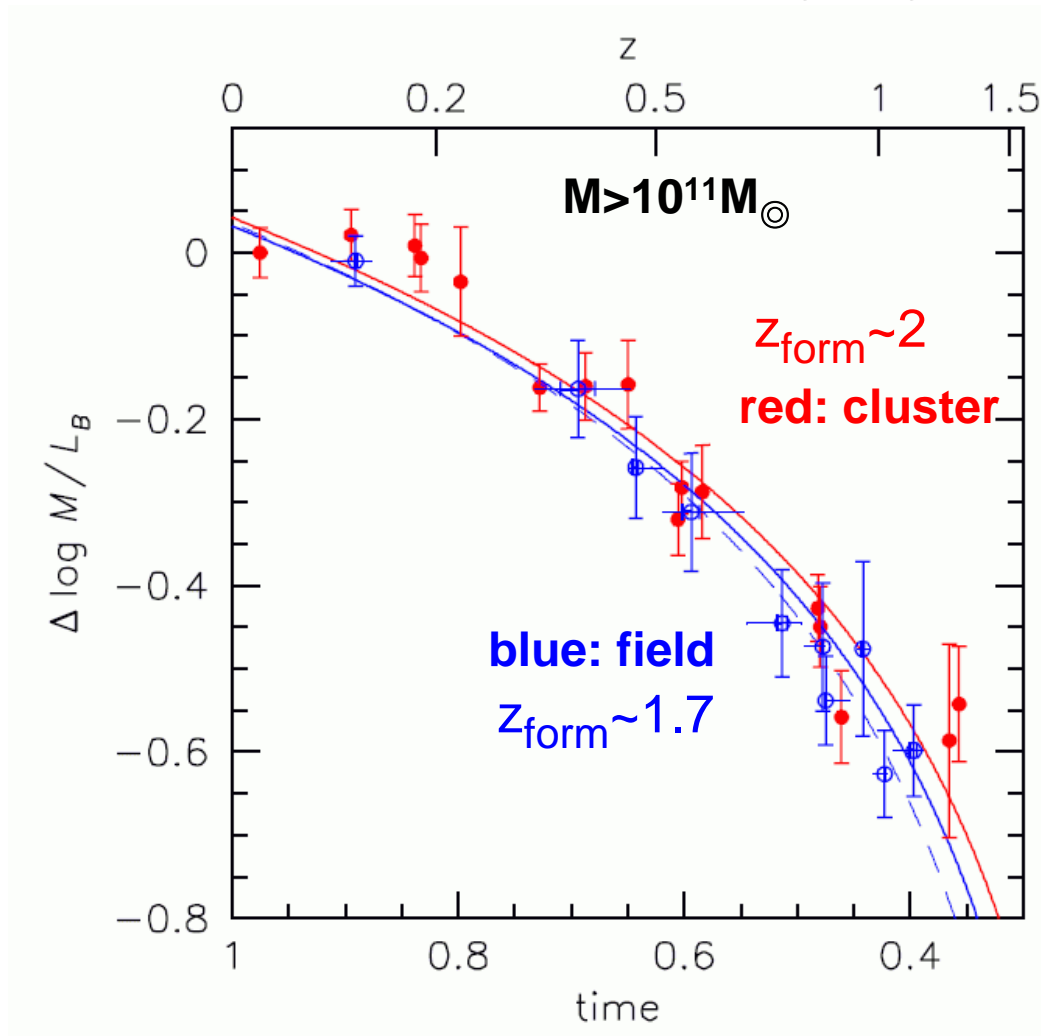
A proto-cluster at $z=2.3$



Ages and stellar masses of galaxies in the protocluster are 2 times larger than in the Field.

Steidel et al. (2005)

Small environmental dependence of star formation epoch in early-type galaxies?



Only 4% (~ 0.4 Gyr)
difference in the
present-day age.



But this is boosted
at high redshift...

van Dokkum and van der Marel (2006)

原始銀河団(HzRG)-近赤外撮像のまとめ

➤ 原始銀河団の集団化過程

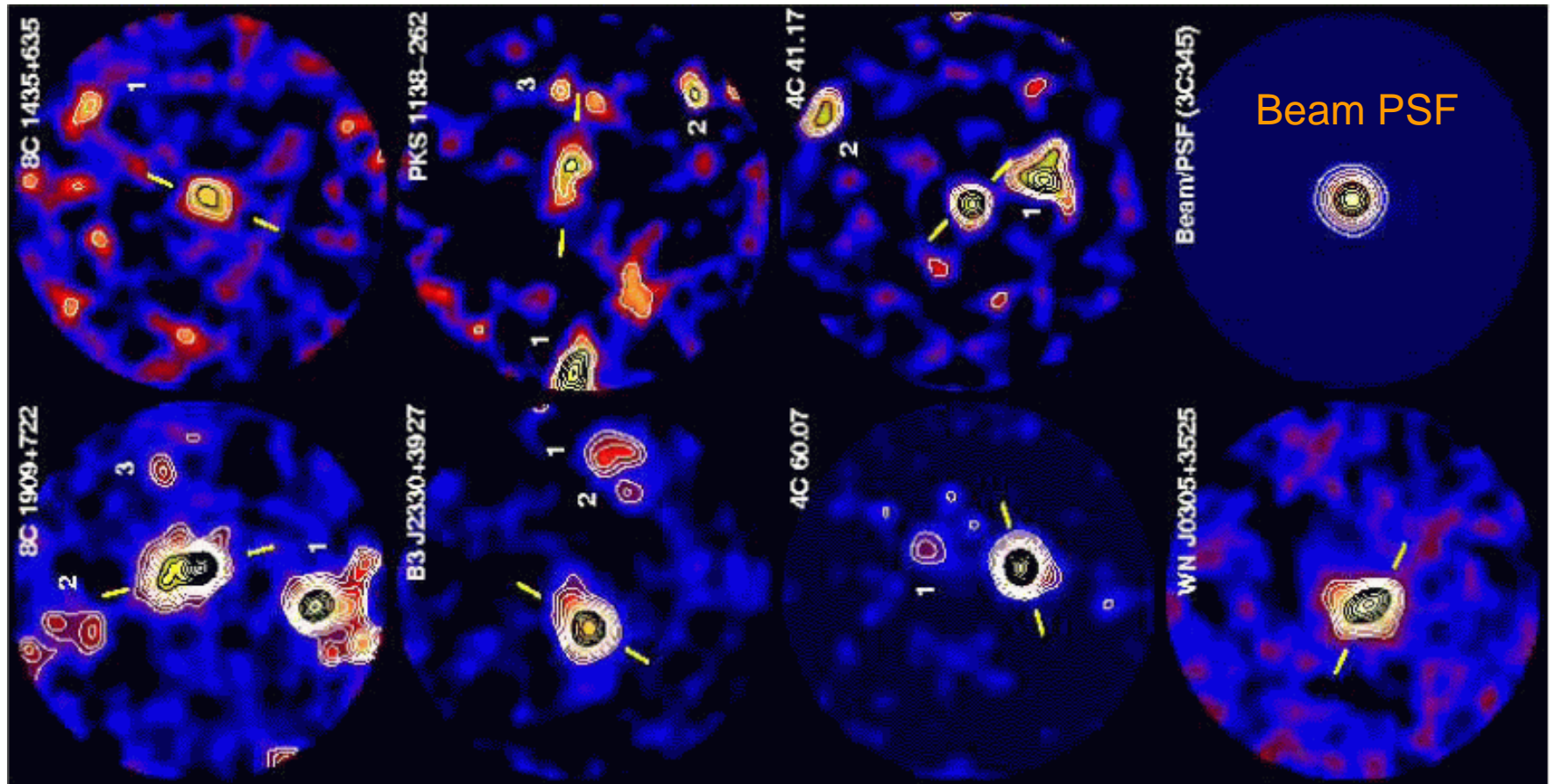
電波銀河の周りに多数の赤い銀河がバンド状の大構造(>10Mpc)をしている。銀河団スケールの集団化の初期段階を見ていると考えられる。

➤ 大質量銀河の形成現場

大質量銀河(>10¹¹M_☉)がzが3~2の間(20~30億年)に急速に作られたようである。環境依存性は？

→ 今後は、大質量銀河の形成現場を、多波長で観測し、星形成バーストと合体と、どちらが効いているかを突き止める必要。

Submm sources in 7 proto-clusters ($2.1 < z < 4.3$) around radio galaxies



Stevens et al. (2007)

Summary for the Distant Clusters Surveys with Subaru

- Groups in the outskirts of clusters are the key hierarchy for truncation/transformation of galaxies.
 - Formation of S0s (and some Es)
- The redshift interval of $2 < z < 3$ is the key era for the formation of massive galaxies in high-density regions.
 - Formation of Es (and some S0s)