

(天文・天体物理若手夏の学校 @東尋坊, 2012/8/2)

銀河と銀河団の生い立ち

児玉 忠恭 (こだま ただゆき)

国立天文台ハワイ観測所

A galaxy cluster RXJ0152 at $z=0.83$ (Subaru/Suprime-Cam)

内容

- イントロダクション

『銀河の性質と、時間・空間・質量』

- 銀河生態学

『環境に翻弄される銀河の形成と進化』

- 銀河解剖学

『点から面へ：銀河形成を分解する』

内容

- イン트로ダクション

『銀河の性質と、時間・空間・質量』

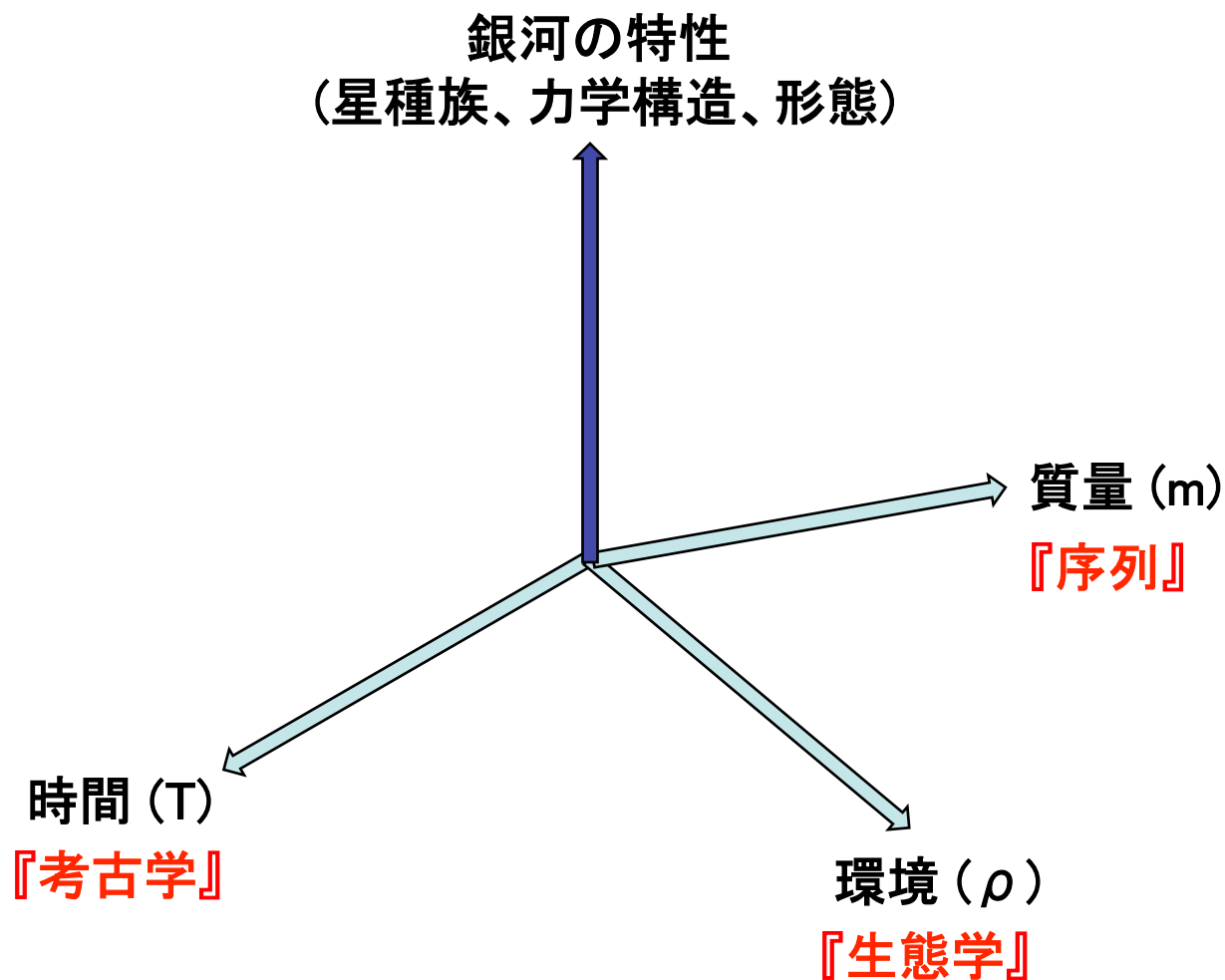
- 銀河生態学

『環境に翻弄される銀河の形成と進化』

- 銀河解剖学

『点から面へ：銀河形成を分解する』

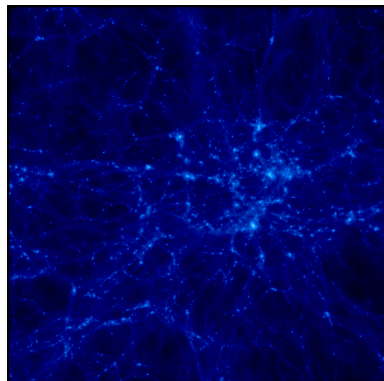
銀河の性質を規定する3つの軸



階層的な銀河・銀河団の形成（理論モデル）

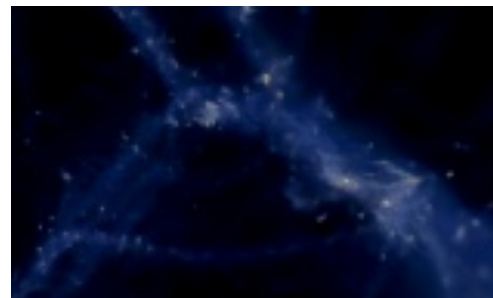
<http://4d2u.nao.ac.jp/>

125億年前

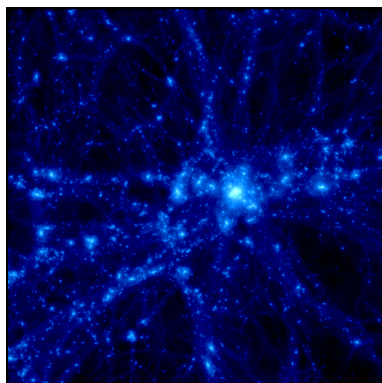


銀河団形成

銀河形成



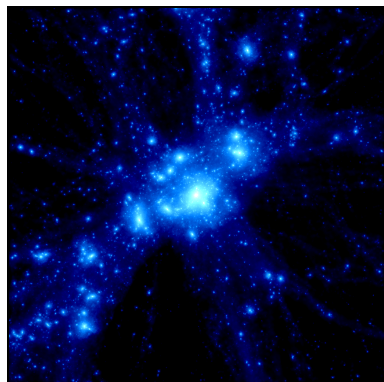
100億年前



movie

movie

現在



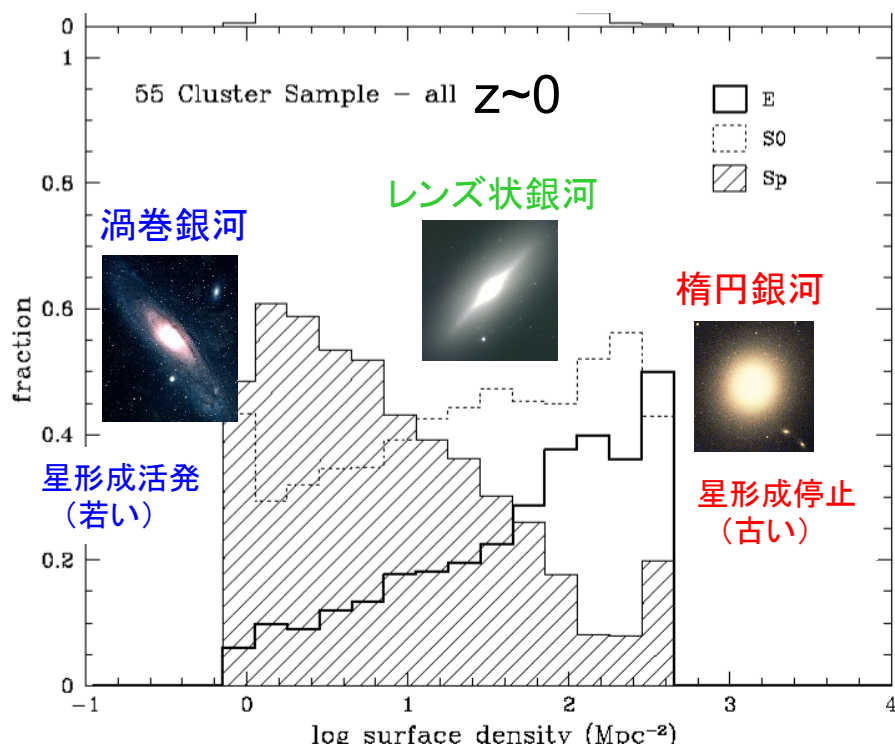
矢作氏ほか

斎藤氏ほか

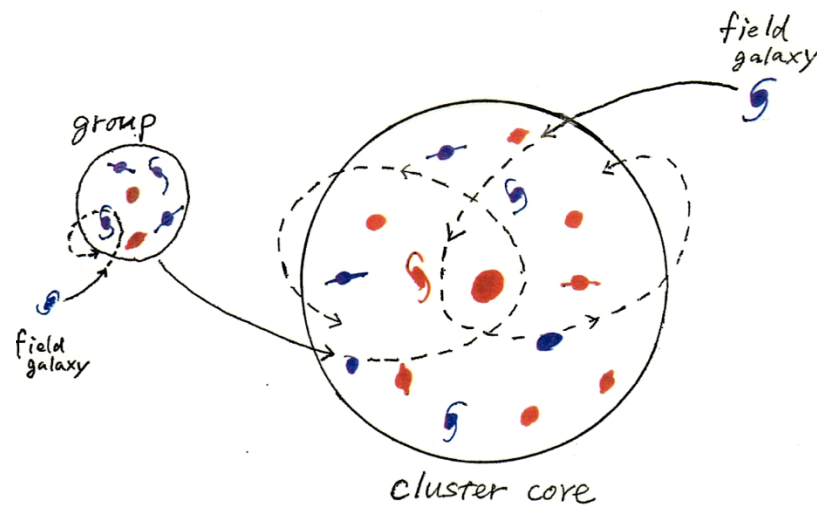
初めに小さな天体がたくさん生まれ、それらが重力で引き合っって集まり、合体を繰り返しながら、より大きな天体へと成長してゆく。

銀河種族のすみ分けの起源は？

銀河の形態－密度関係 (Dressler 1980)



形態(星形成史) - ハロー質量 関係



先天的 (生まれ) ?

楕円銀河は初期宇宙に高密度領域で生まれ、渦巻き銀河は少し遅れてフィールドで生まれる。

後天的 (育ち) ?

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。

銀河の衝突、合体

movie

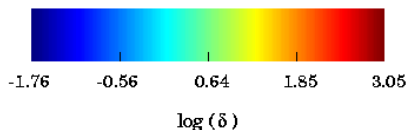
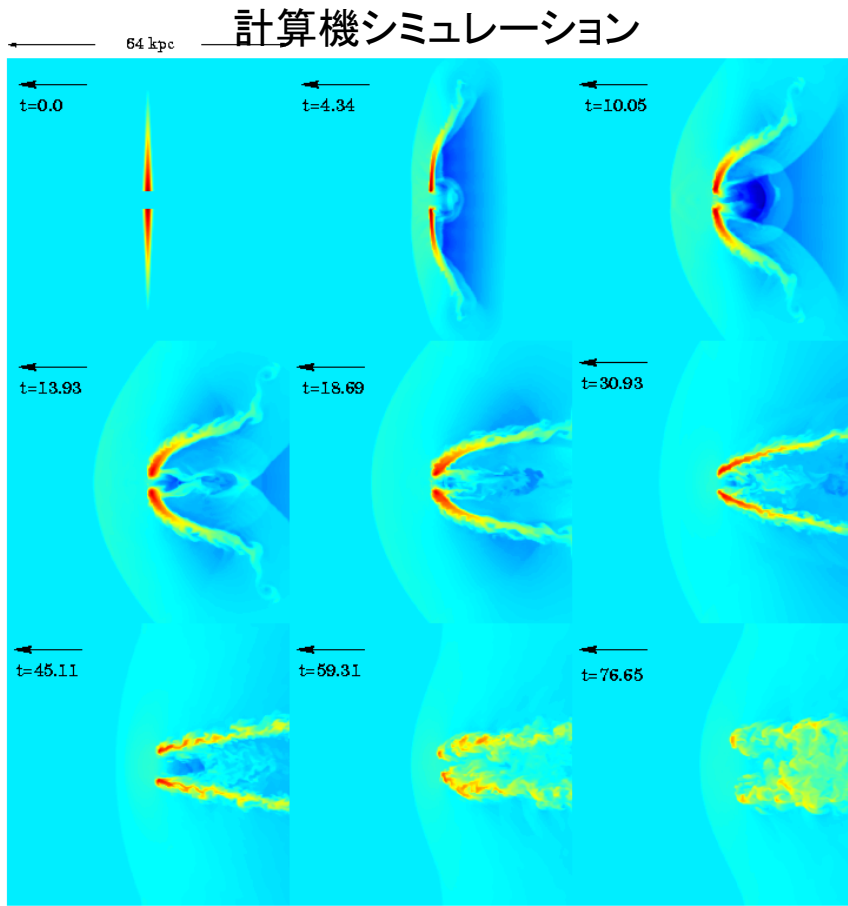
(秒速、数百キロメートル！)



衝突合体中の銀河(ハッブル宇宙望遠鏡)

銀河群環境で最もよく起こる。

銀河団ガスからの動圧による銀河ガスの剥ぎ取り

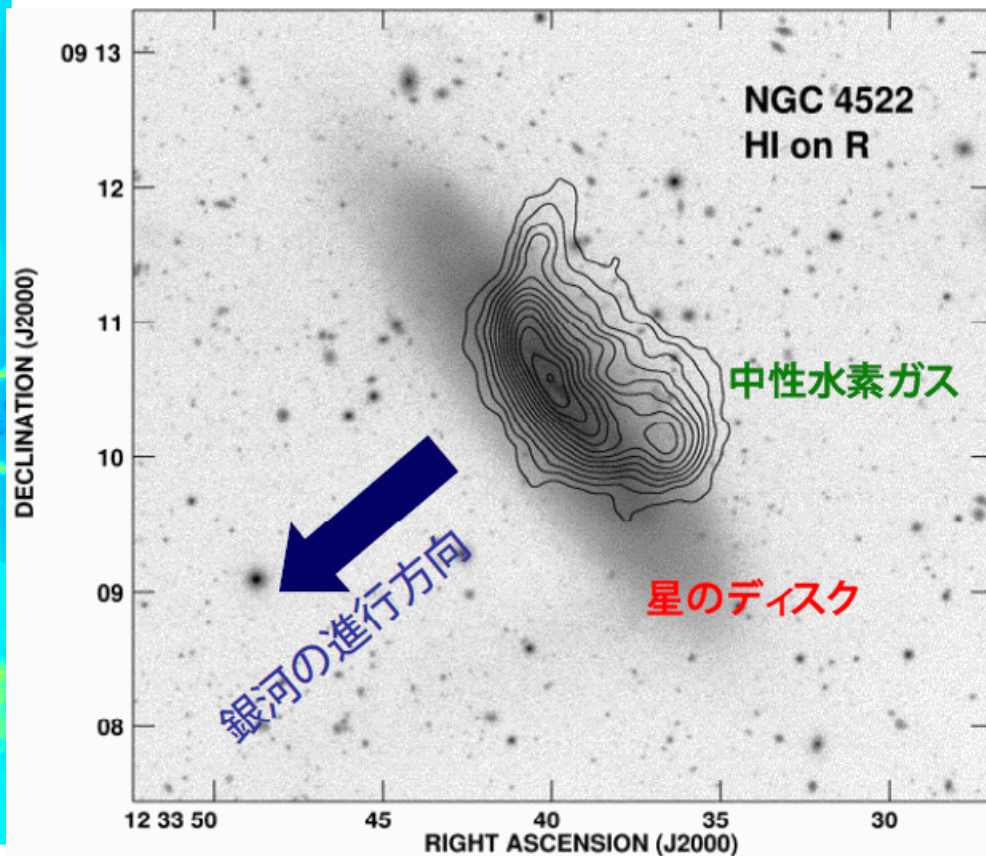


Abadi et al. (1998)

$$P = \rho V^2$$

$V \sim 1000 \text{ km/s}$
(銀河団)

おとめ座銀河団中の銀河



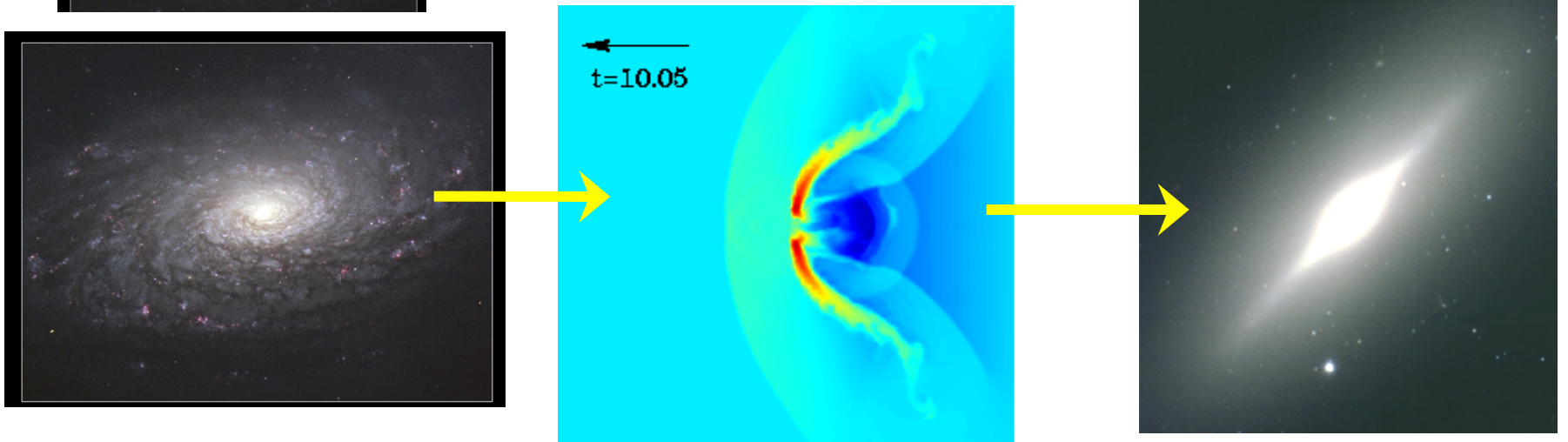
Kenney et al. (2004)

銀河団環境で最も効果的。

銀河の形態は高密度領域で変化する？

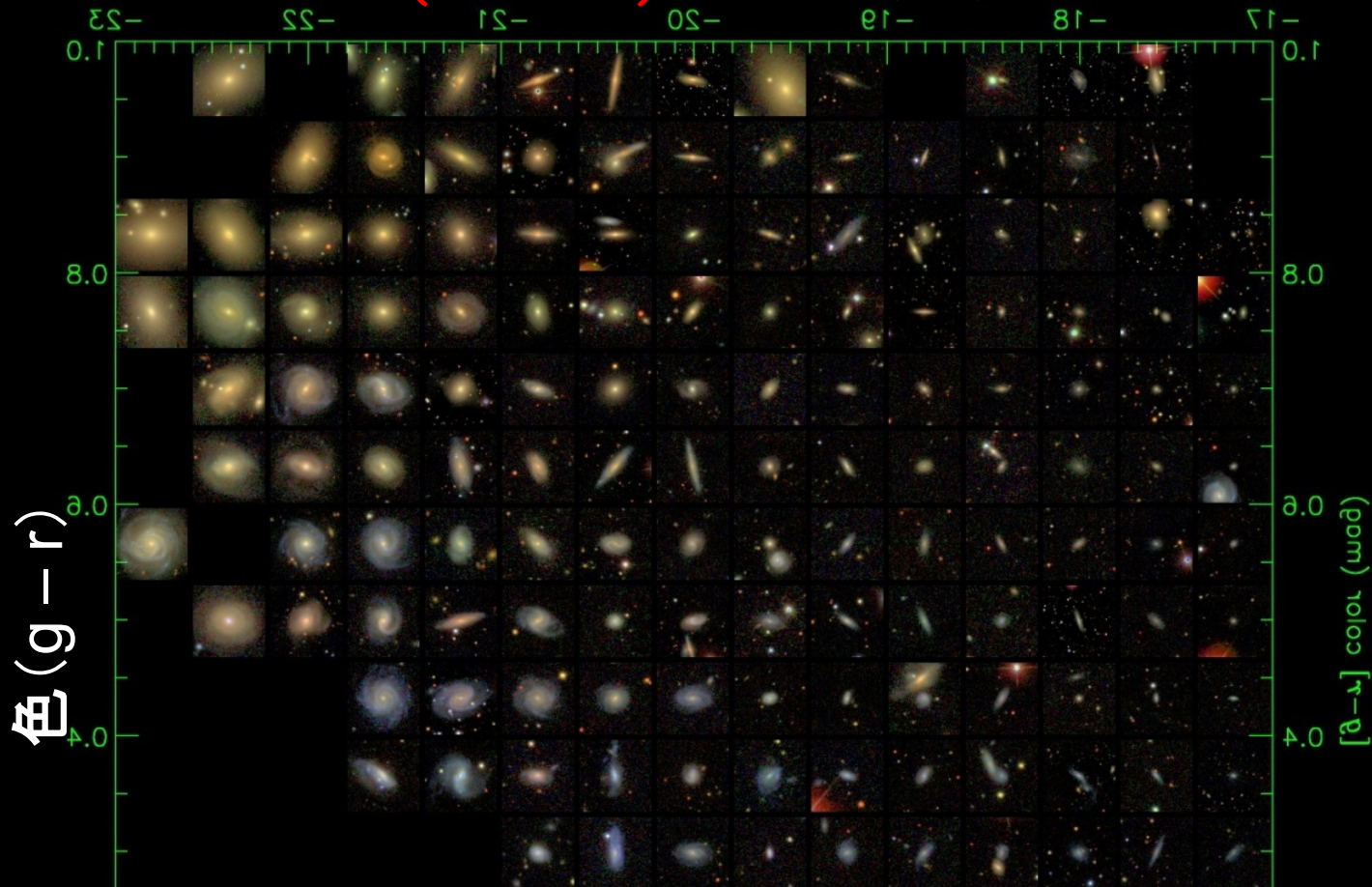


渦巻銀河が合体して楕円銀河になる？



渦巻銀河がガスを剥ぎ取られてレンズ状銀河になる？

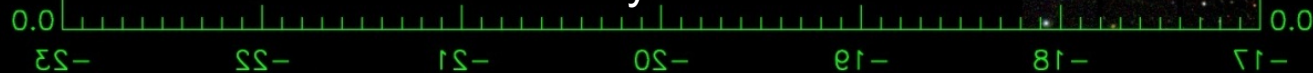
形態(星形成史) - ハロ質量 関係



明るい銀河
赤い銀河ほど
早期型銀河の
割合が高い。

質量の集積過程と、星形成や銀河形態の進化とが、
銀河から銀河団のスケールで密接に関連している！

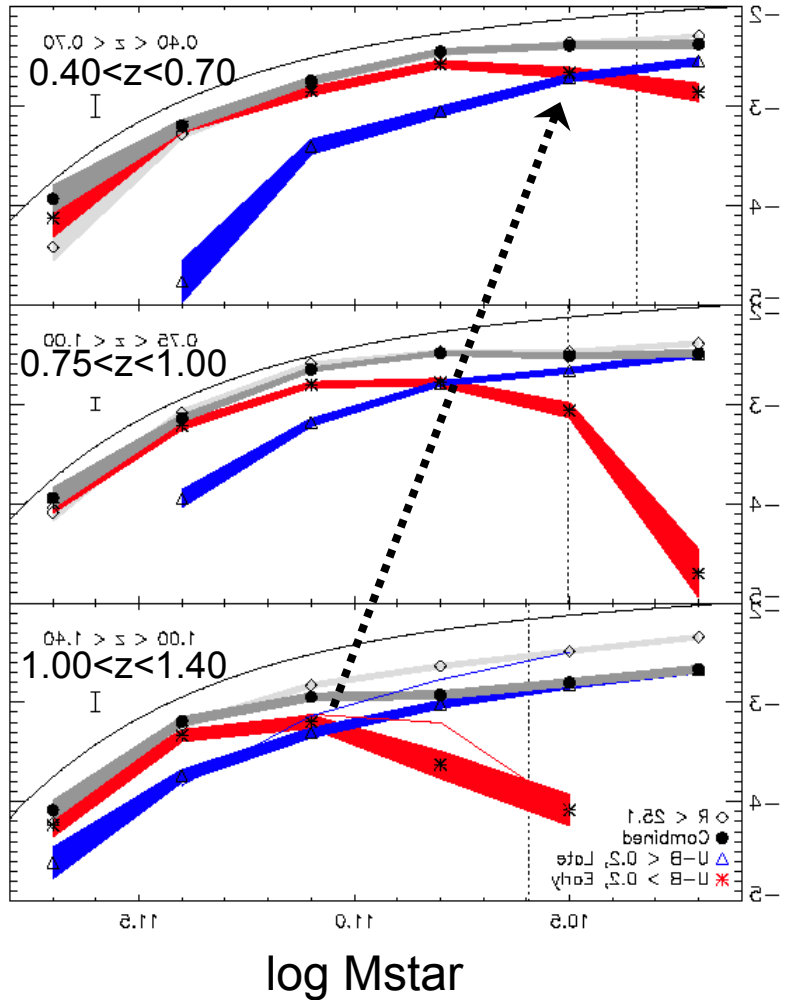
Baldry & Blanton based on SDSS



明るさ (Mi)

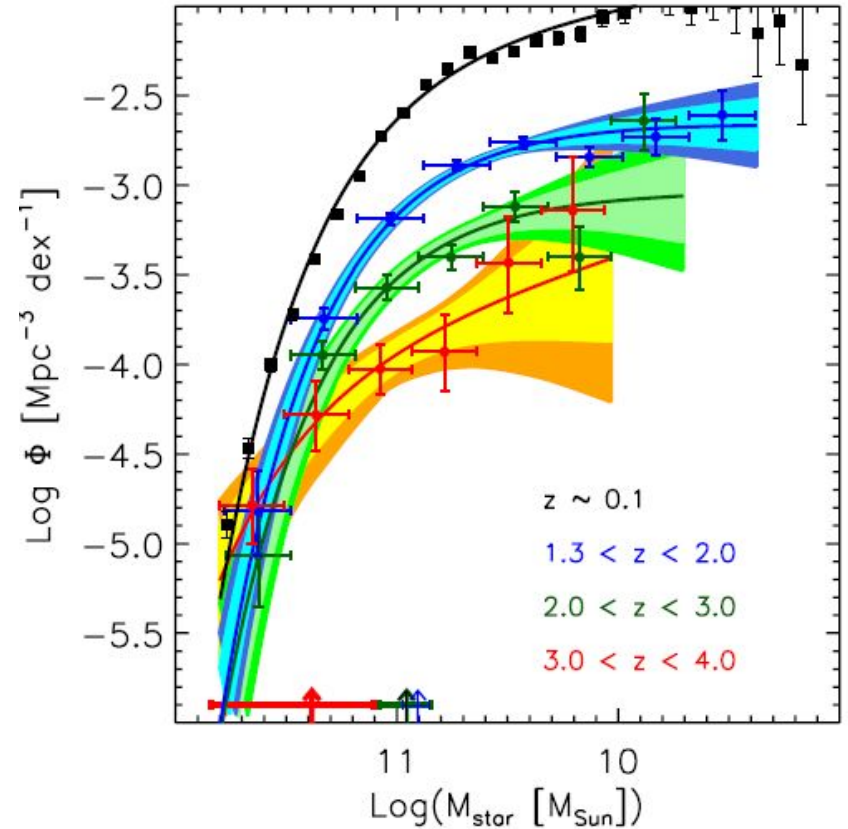
ダウンサイジング

星形成



Bundy et al. (2006)

質量集積



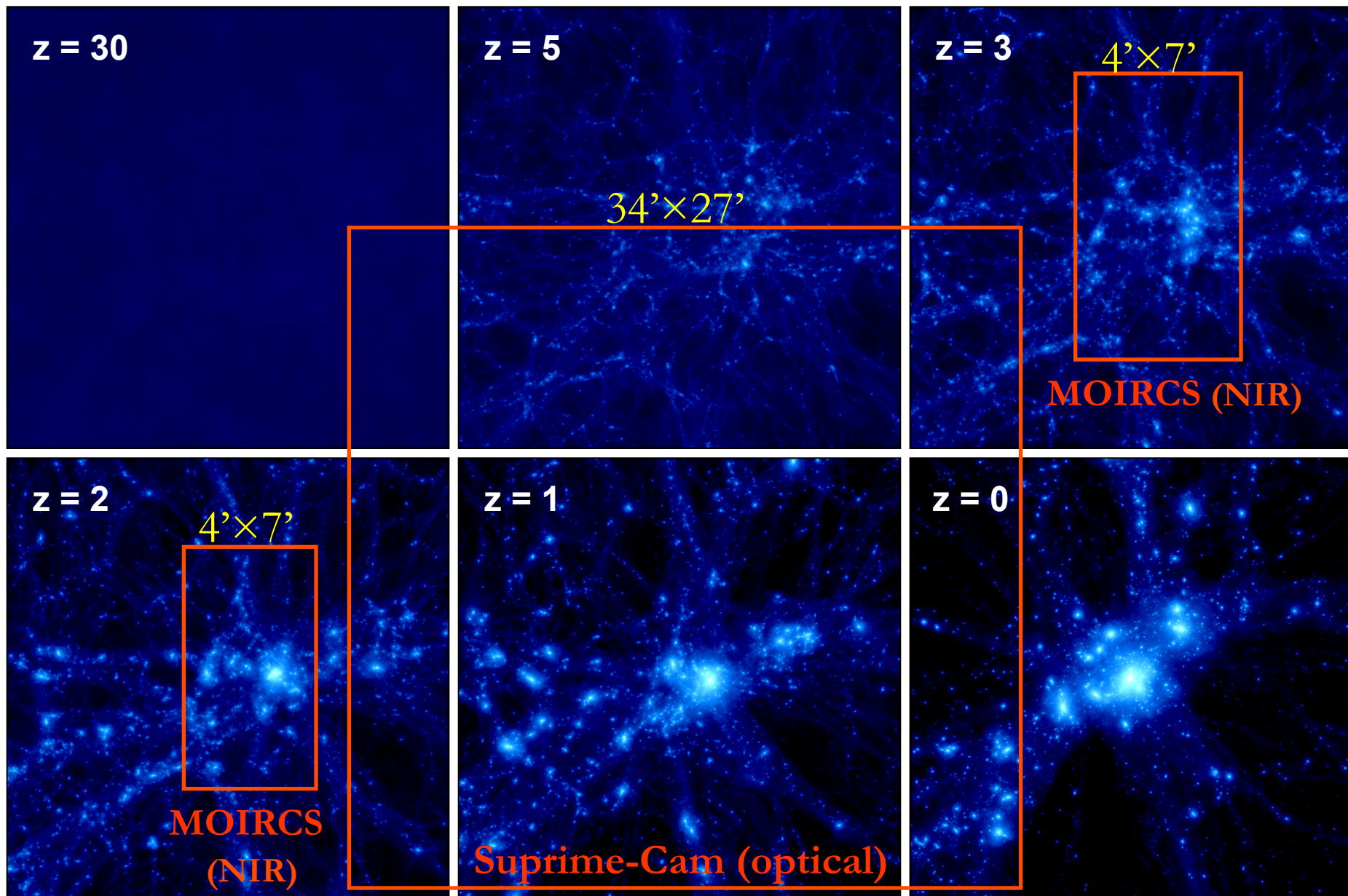
Yale-Chile, GOODS-CDFS
 Marchesini et al. (2009)

大きい銀河ほど形成が早く、小さい銀河ほど遅れて形成される → “Down-sizing”?

内容

- イントロダクション
『銀河の性質と、時間・空間・質量』
- **銀河生態学**
『環境に翻弄される銀河の形成と進化』
- 銀河解剖学
『点から面へ：銀河形成を分解する』

なぜ、すばるか？



Final cluster with $M = 6 \times 10^{14} M_{\odot}$, $20 \times 20 \text{ Mpc}^2$ (co-moving)

(Yahagi et al. 2005; ν GC)



Panoramic Imaging and Spectroscopy of Cluster Evolution with Subaru

10 X-ray clusters at $0.4 < z < 1.5$

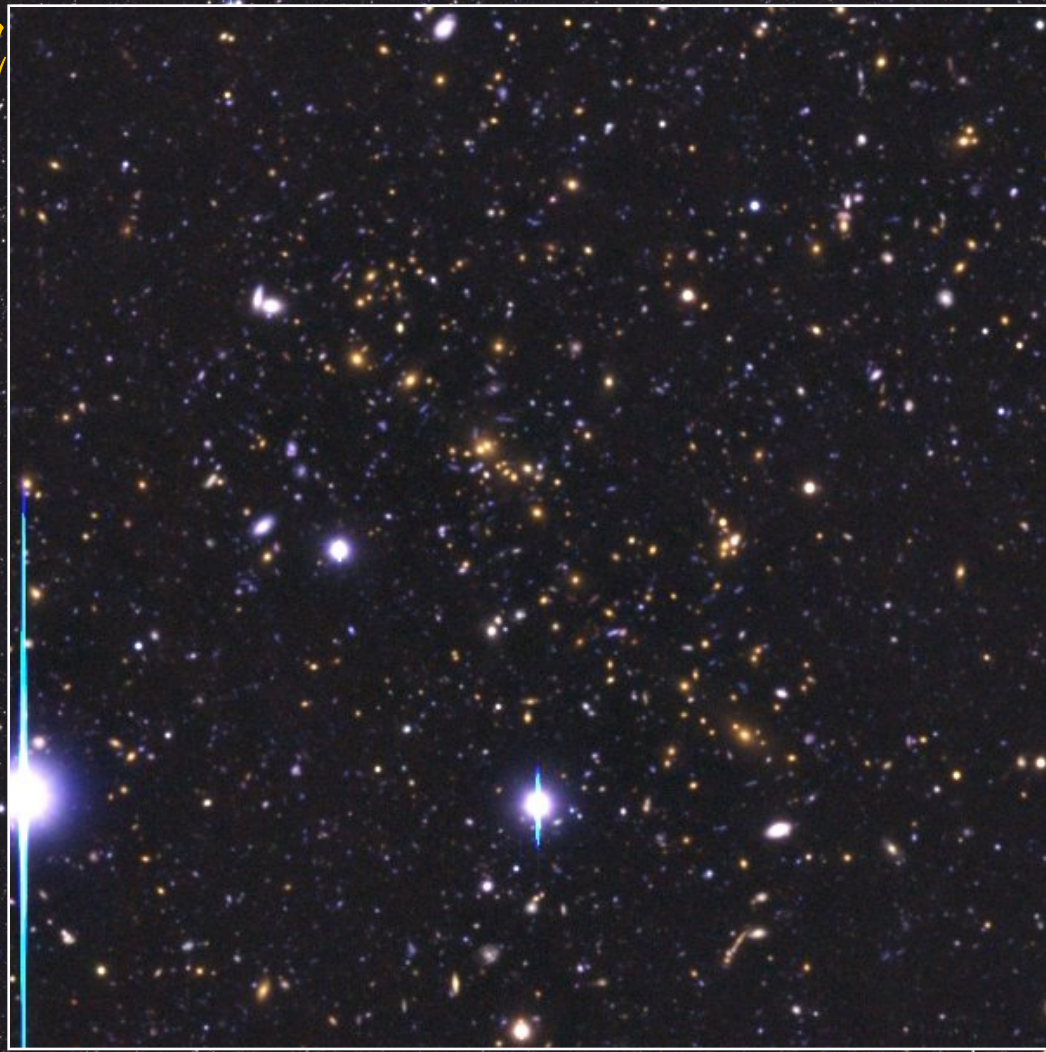
Class (z)	Cluster	RA (J2000)	Dec (J2000)	z	\bar{L}_X 10^{44}
0.4	CL 0024+1652	00 26 35.7	+17 09 43	0.395	3.2
	CL 0939+4713	09 42 56.6	+46 59 22	0.407	9.2
0.55	MS 0451.6–0305	04 54 10.9	–03 01 07	0.550	12.0
	CL 0016+1609	00 18 33.3	+16 26 36	0.541	26.0
0.8	RX J1716.4+6708	17 16 49.6	+67 08 30	0.813	2.7
	RX J0152.7–1357	01 52 41.0	–13 57 45	0.823	16.0
1.2	RDCS J0910+5422	09 10 00.0	+54 22 00	1.110	2.1
	RDCS J1252–2927	12 52 54.4	–29 27 17	1.237	6.6
	RX J0848.9+4452	08 48 56.3	+44 52 16	1.261	2.8
1.5	XMMJ2215.9–1738	22 15 58.5	–17 38 02.5	1.457	4.3

Kodama et al. (2005) +update

ACS/
HST

すい

力



RXJ0152-13 at $z=0.83$

VRizK photometry + 200 spec. objects

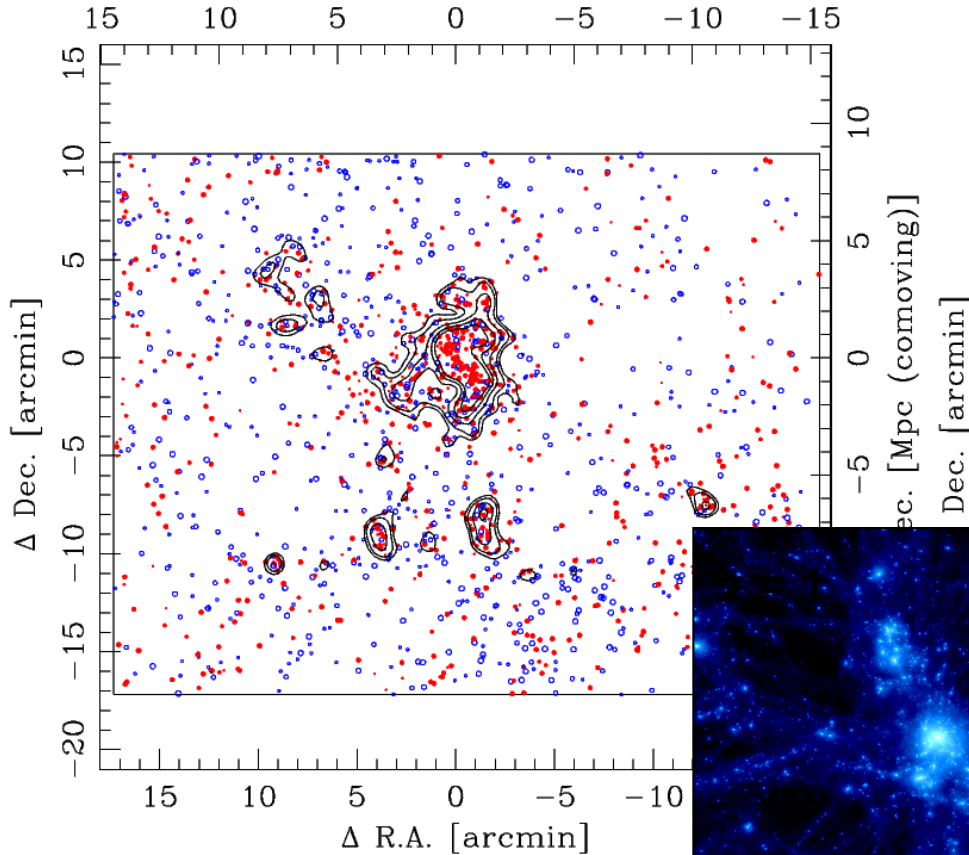




銀河団集積過程のパノラマ

RXJ 0152.7-1357 (VRiz')

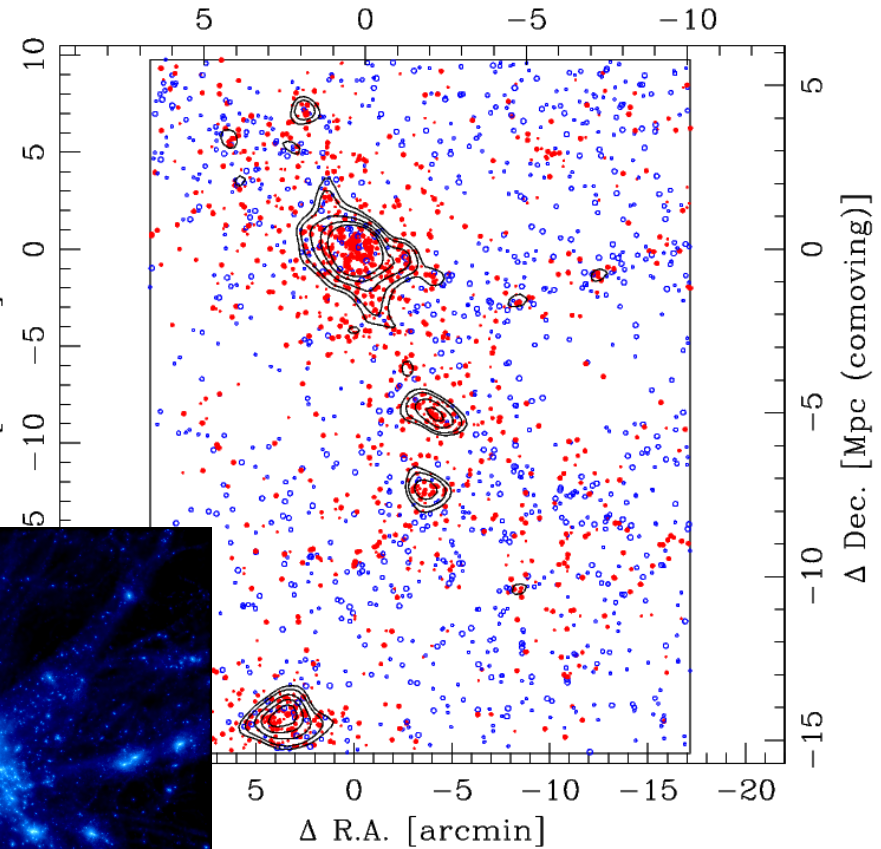
Δ R.A. [Mpc (comoving)]



$z=0.83$ (70億年前)

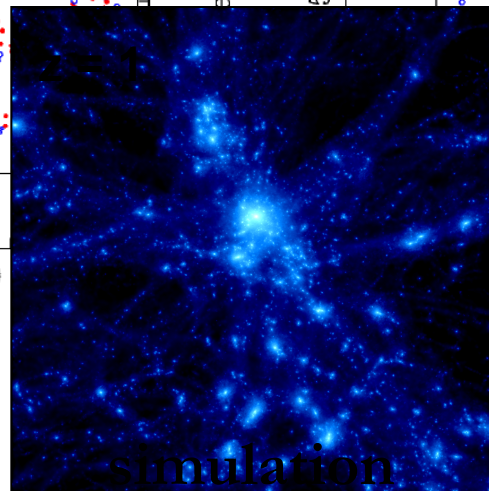
CL 0016+16 (BVRi'z')

Δ R.A. [Mpc (comoving)]

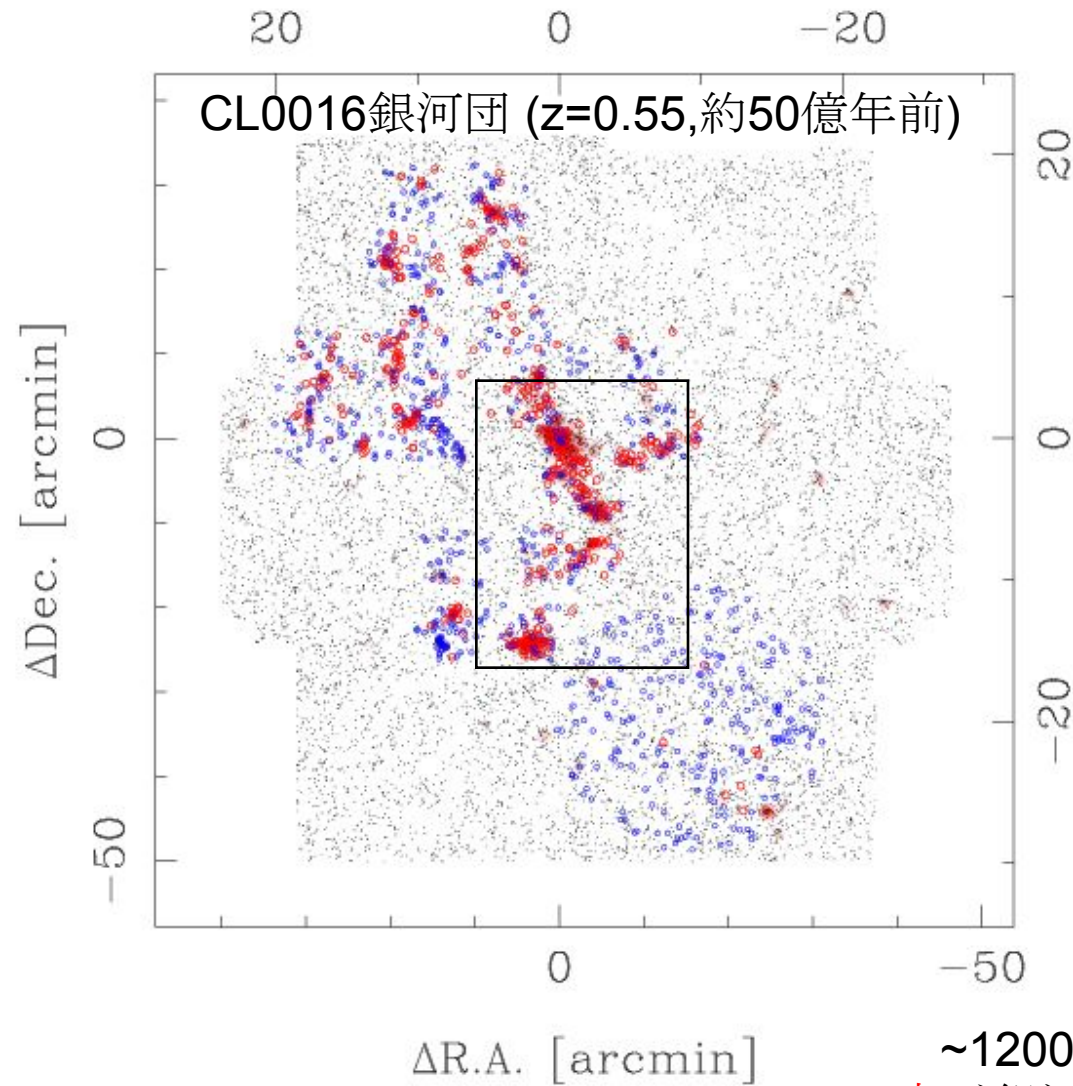


$z=0.55$ (54億年前)

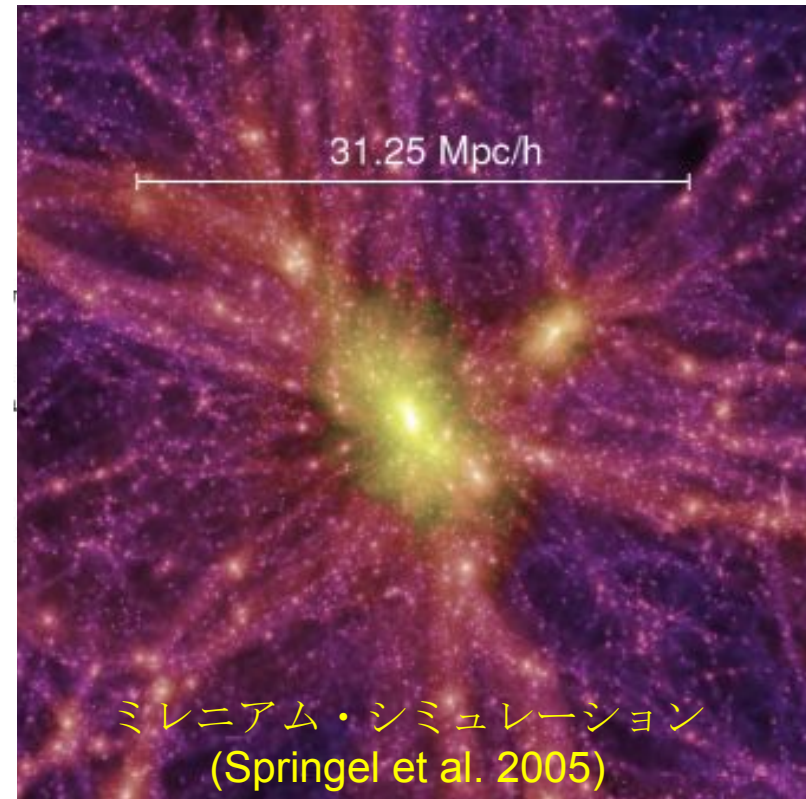
Kodama, et al. (2005)



銀河団の周りに広がる巨大な蜘蛛の巣構造 50 Mpcスケール (80'x80' by 7 S-Cam pointings)



Tanaka, et al., 2009



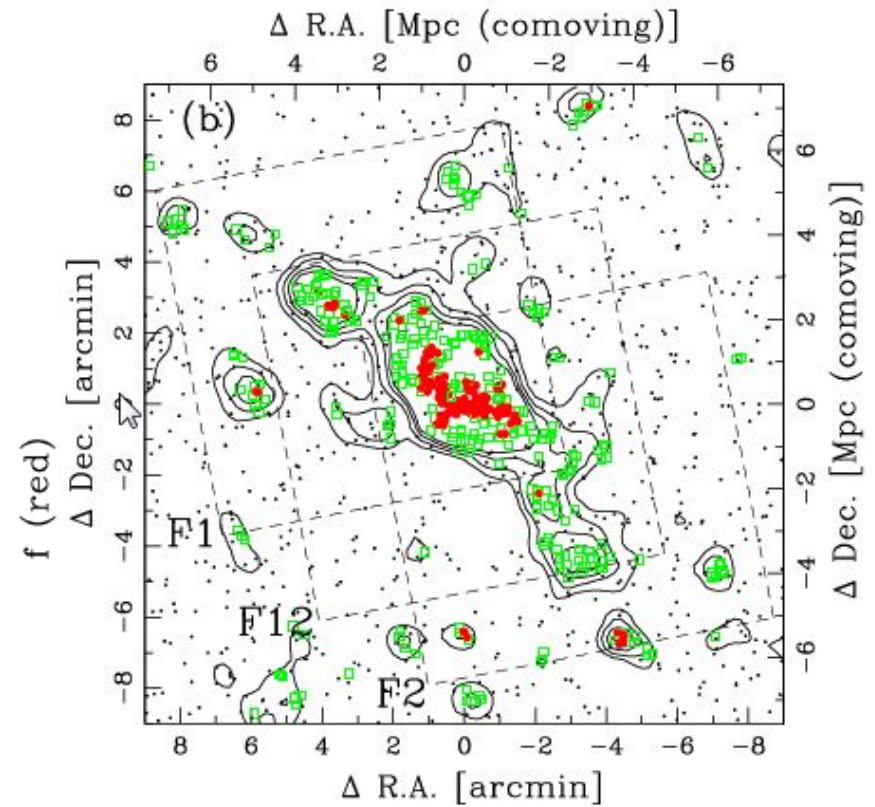
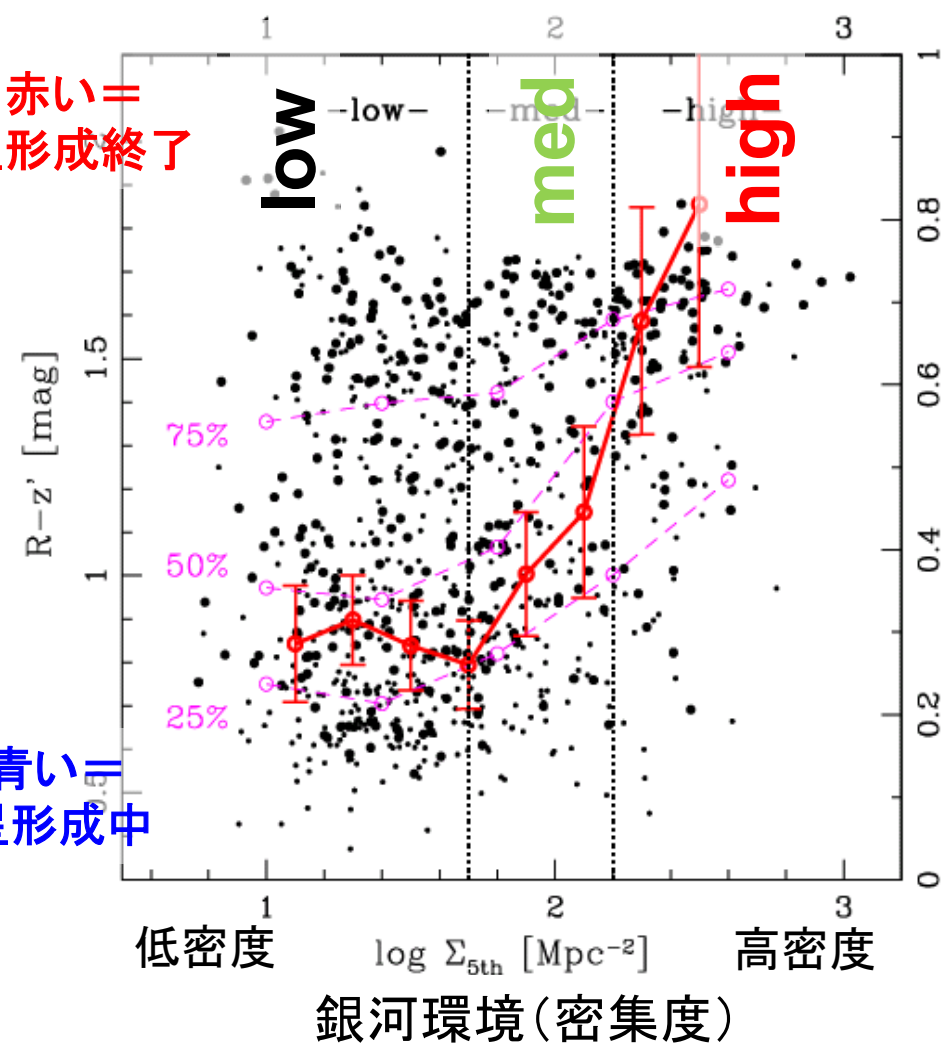
~1200 個の銀河を分光し距離を測定。
赤が銀河団メンバーで、青は非メンバー。

銀河団外縁部や銀河群での急激な色変化

RXJ1716銀河団 (z=0.81、70億年前)

赤い = 星形成終了

青い = 星形成中

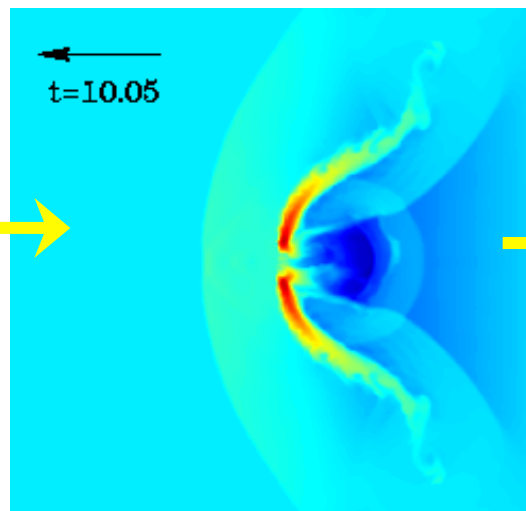


high ~ 銀河団コア
med ~ 銀河群 / フィラメント
low ~ フィールド

何が星形成を止めるのか？

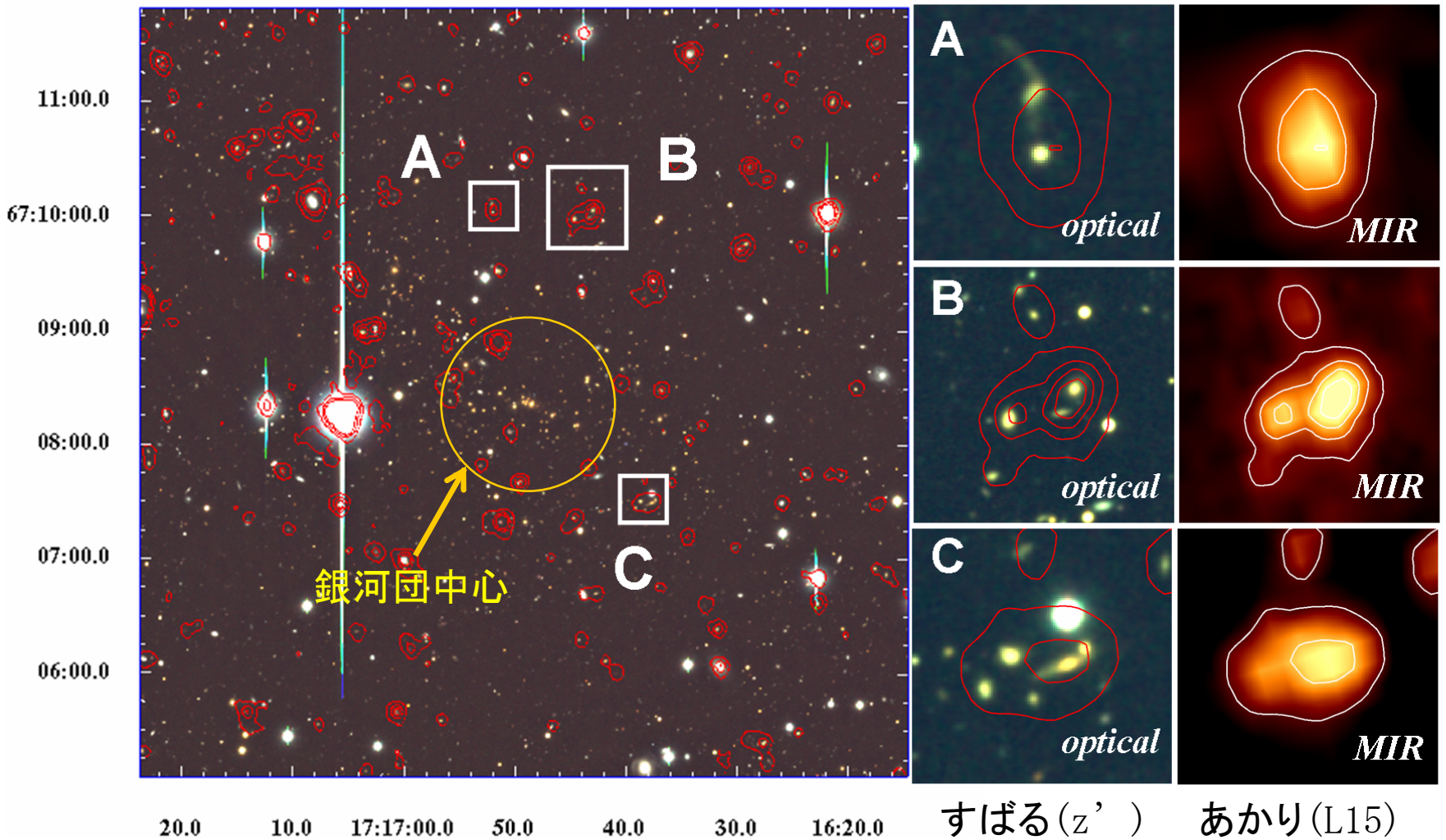


合体時にガスが剥ぎ取られたり、星形成バーストを起こしたりして、ガスが使い果たされる？



動圧によってガスを剥ぎ取られ、星形成が続けられなくなる？

星形成バースト中の相互作用銀河



あかりで明るい星形成バースト銀河の中には、明らかに合体の兆候を示す銀河が見られる。環境効果の主要因か？

RXJ1716 cluster ($z=0.81$)
Koyama et al. (2008)

“MAHALO-Subaru”

MApping H α and Lines of Oxygen with Subaru



狭帯域フィルターを用い銀河激進化時代 ($1.5 < z < 2.5$) の輝線銀河 (星形成活動) をマッピング

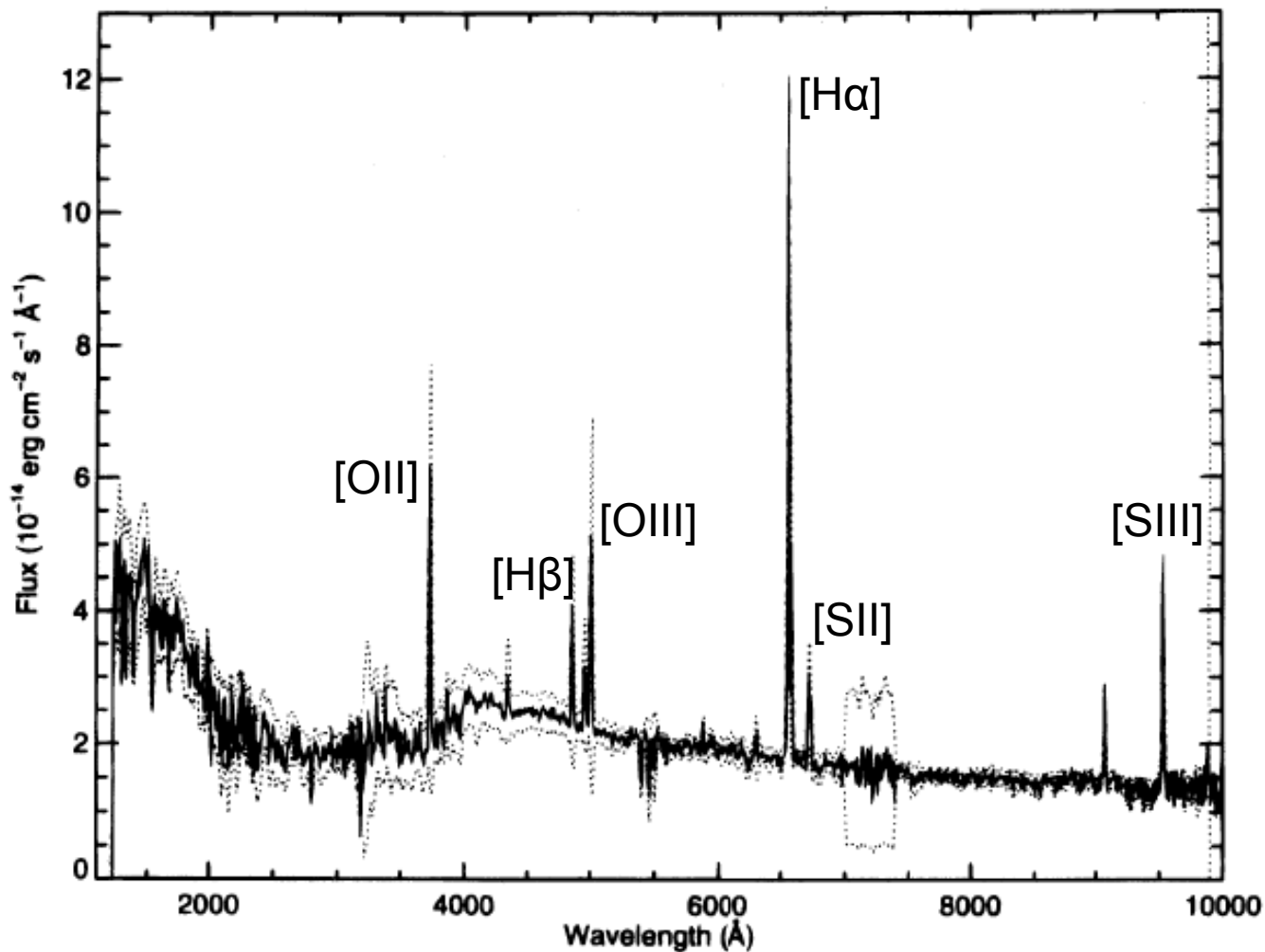
Pilot obs (5 nights) + Intensive (10 nights @S10B-11A) + Normal (3 nights @S11B)

environ- ment	target	z	line	λ (μm)	camera	NB-filter	conti- nuum	status (as of Apr 2012)
Low- z cluster	CL0024+1652	0.395	H α	0.916	Suprime-Cam	NB912	z'	Kodama+'04
	CL0939+4713	0.407	H α	0.923	Suprime-Cam	NB921	z'	Koyama+'11
	RXJ1716+6708	0.813	H α	1.190	MOIRCS	NB1190	J	Koyama+'10
			[O II]	0.676	Suprime-Cam	NA671	R	observed
High- z cluster	XCSJ2215-1738	1.457	[O II]	0.916	Suprime-Cam	NB912, NB921	z'	Hayashi+'10,'11
	4C65.22	1.516	H α	1.651	MOIRCS	NB1657	H	observed
	Q0835+580	1.534	H α	1.664	MOIRCS	NB1657	H	observed
	CL0332-2742	1.61	[O II]	0.973	Suprime-Cam	NB973	y	Hayashi+ in prep.
	CIGJ0218.3-0510	1.62	[O II]	0.977	Suprime-Cam	NB973	y	Tadaki+'11b
Proto- cluster	PKS1138-262	2.156	H α	2.071	MOIRCS	NB2071	K_s	Koyama+ '12
	4C23.56	2.483	H α	2.286	MOIRCS	NB2288	K_s	Tanaka+'11
	USS1558-003	2.527	H α	2.315	MOIRCS	NB2315	K_s	Hayashi+ '12
General field	GOODS-N (62 arcmin ²)	2.19	H α	2.094	MOIRCS	NB2095	K_s	Tadaki+'11a
			H β	1.551	MOIRCS	NB1550	H	not yet
			[O II]	1.189	MOIRCS	NB1190	J	observed
	SXDF (110 arcmin ²)	2.19	H α	2.094	MOIRCS	NB2095	K	Tadaki+ in prep.
			H β	1.551	MOIRCS	NB1550	H	not yet
			[O II]	1.189	MOIRCS	NB1190	J	not yet
	2.53	H α	2.313	MOIRCS	NB2315	K_s	Tadaki+ in prep.	

児玉忠恭 (ハワイ観測所、代表 [Principal Investigator])、林将央 (国立天文台)、
小山佑世 (国立天文台)、但木謙一 (東大・国立天文台)、田中壱 (ハワイ観測所)、他

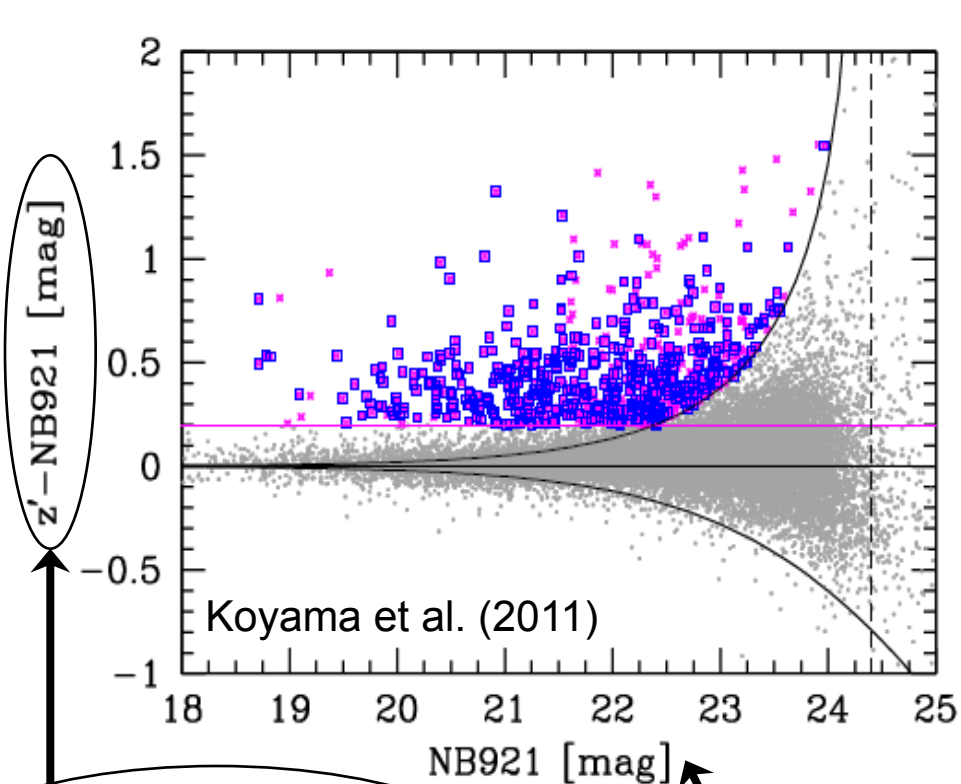
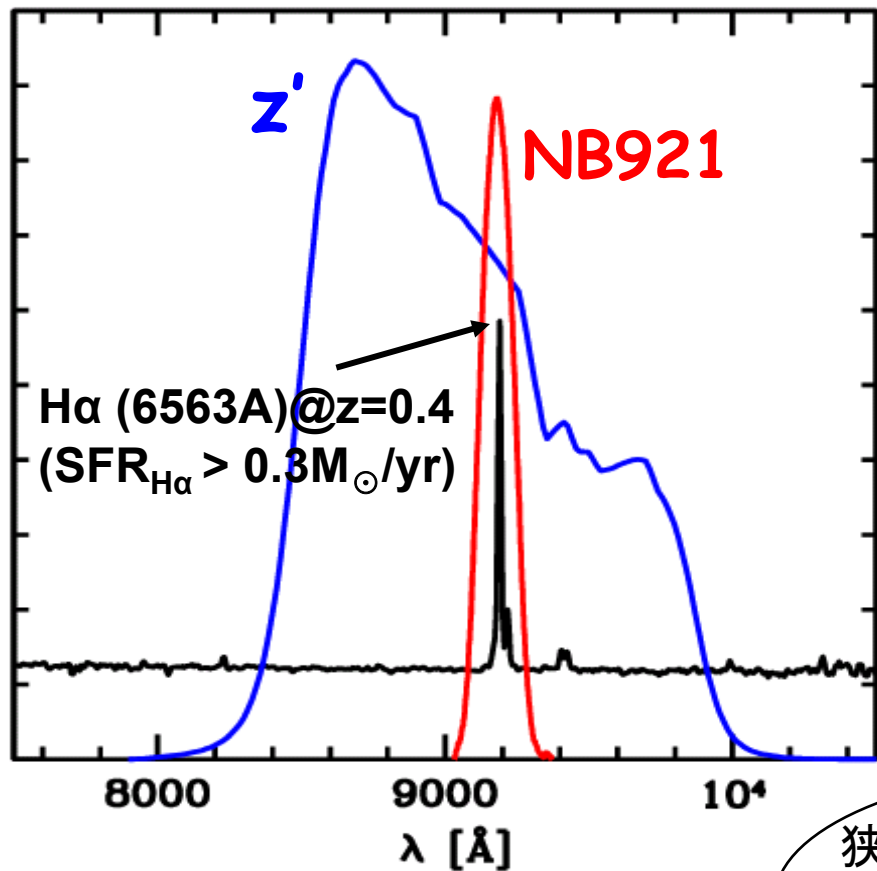
星形成銀河のスペクトル

星からの青い連続光に加えて、星形成領域の電離ガスからの輝線が多く見られる。



Kinney et al. (1996)

狭帯域フィルターを使った撮像観測によって、ある特定の赤方偏移にある輝線銀河（星形成銀河）を一網打尽に捕えることができる。



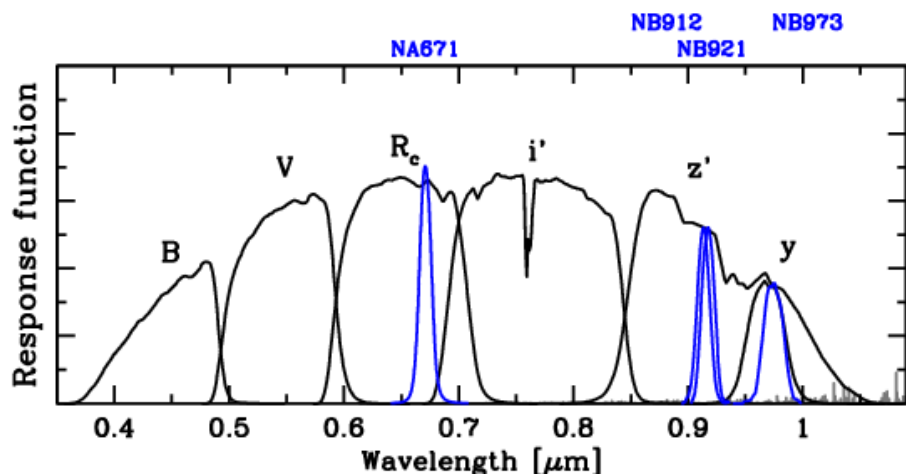
狭帯域フィルター(NB921)と
広帯域フィルター(z')との
明るさの比(対数)に対応

NB921での明るさ

すばる望遠鏡のSuprime-CamとMOIRCSに搭載された多くの狭帯域フィルター

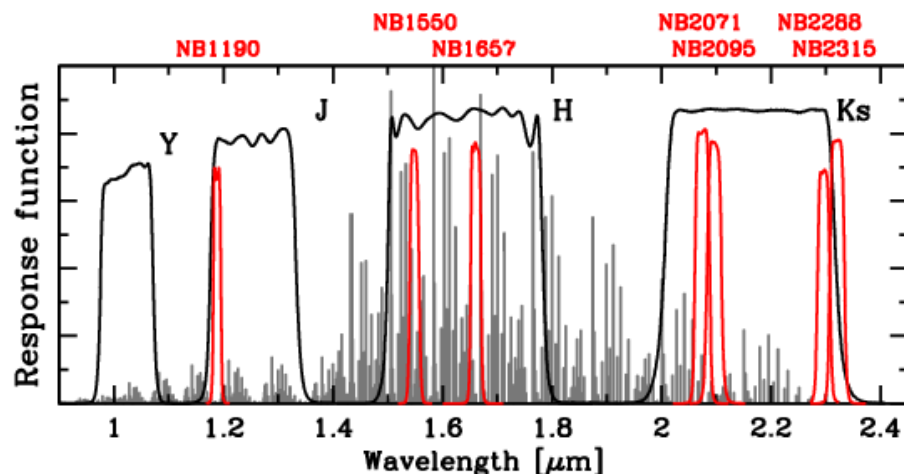
Suprime-Camの既存のNBフィルターが、ちょうど有名な銀河団からの赤方偏移した輝線に適合。
MOIRCSのNBフィルターは、最前線の原始銀河団からの赤方偏移した輝線に適合するように自作。

Suprime-Cam filters



4 narrow-band filters

MOIRCS filters



7 narrow-band filters

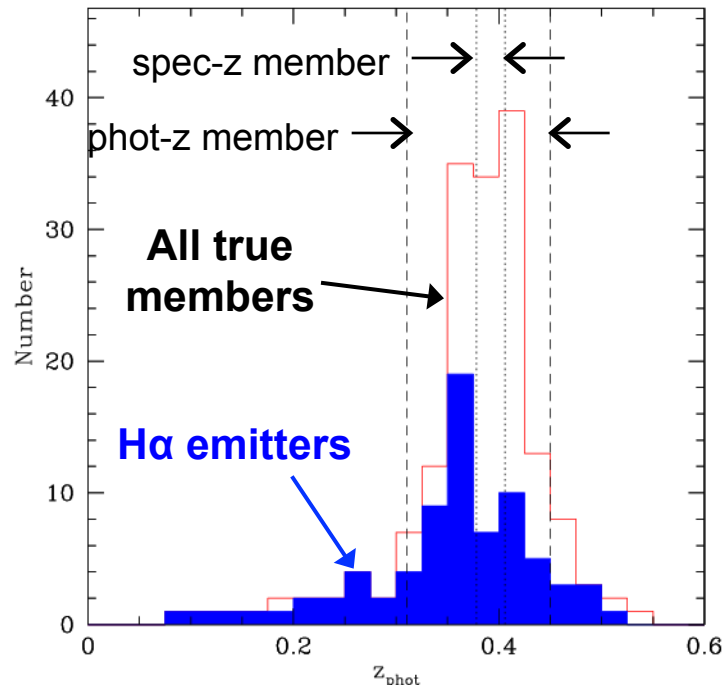
Camera	Filter	λ_c	FWHM
MOIRCS	NB1190	1.189 μm	0.014 μm
	NB1550	1.550 μm	0.018 μm
	NB1657	1.656 μm	0.019 μm
	NB2071	2.068 μm	0.027 μm
	NB2095	2.095 μm	0.025 μm
	NB2288	2.288 μm	0.023 μm
	NB2315	2.313 μm	0.027 μm
Suprime-Cam	NA671	0.6714 μm	0.0130 μm
	NB912	0.9139 μm	0.0134 μm
	NB921	0.9173 μm	0.0132 μm
	NB973	0.9755 μm	0.020 μm
	y	0.9860 μm	0.059 μm

FWHMs correspond
to $\pm 1000\text{-}3000\text{km/s}$

NB (+BB) サーベイの利点

- (1) ほぼ星形成率リミットの星形成銀河をコンプリートに選択。
- (2) UV選択やIR選択のように星形成モードに強く依存しない。
- (3) 赤方偏移がほぼ確実でかつ揃っている。銀河団では特に有力。
- (4) BB選択(phot-z)の受動的銀河と、NB選択の星形成銀河を組み合わせると、よりコンプリートな銀河種族を選択できる！

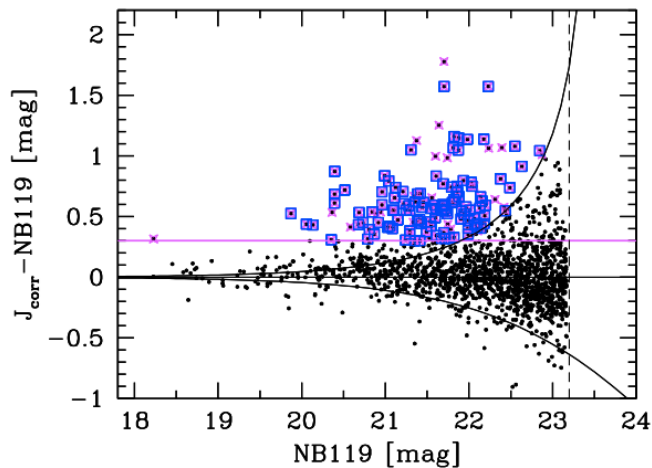
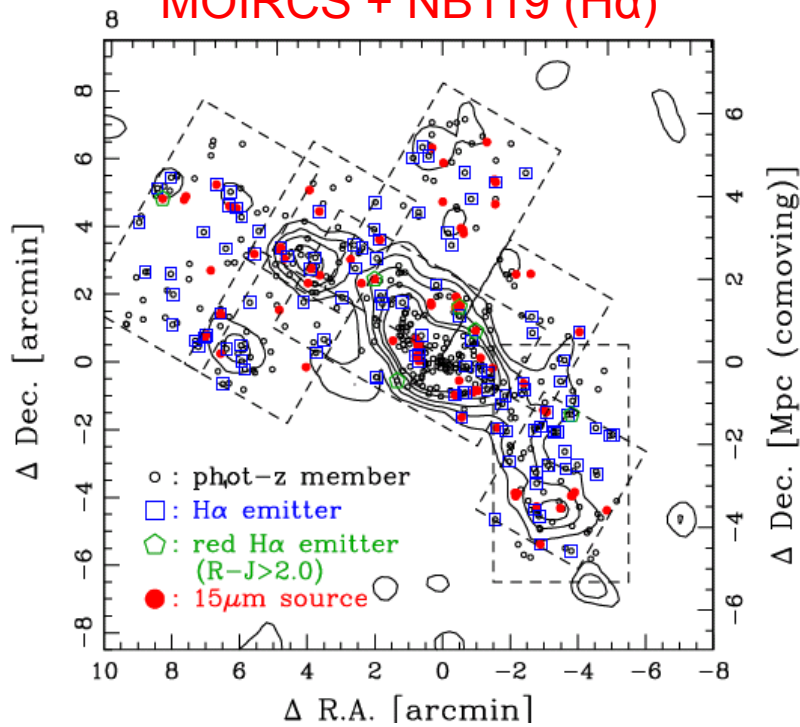
Phot-z distribution of true members



CL0024 cluster ($z=0.4$)
NB912 + Suprime-Cam
Kodama et al. (2004)

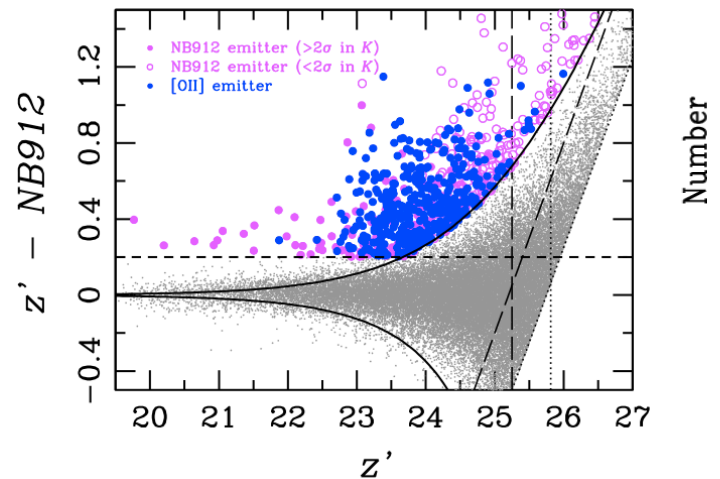
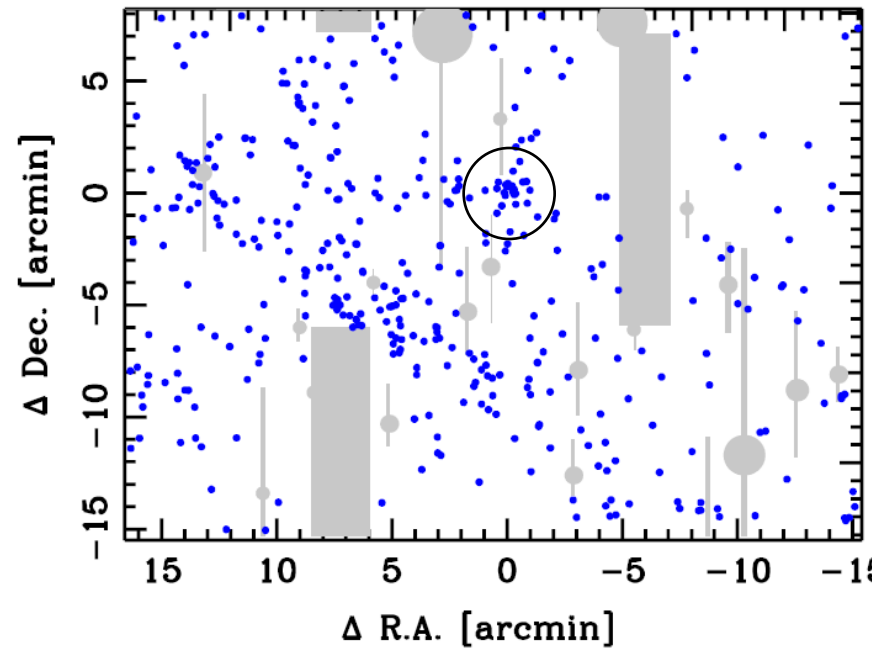
RX J1716.6+6708 ($z=0.81$)

MOIRCS + NB119 ($H\alpha$)



XCS J2215.9-1738 ($z=1.46$)

Suprime-Cam + NB912 ($[OII]$)

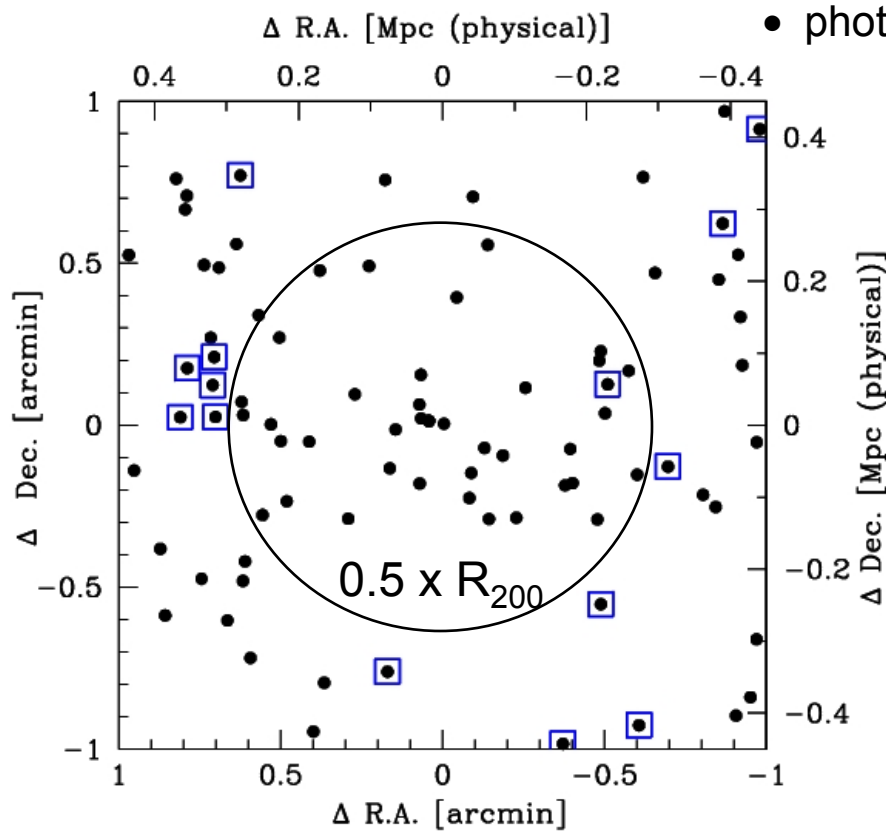


Broad-band colours (phot-z) are used to identify which emission line is in the NB filter.

遠方銀河団中心部の高い星形成活動性

□ H α emitters at $z=0.81$ (RXJ1716)

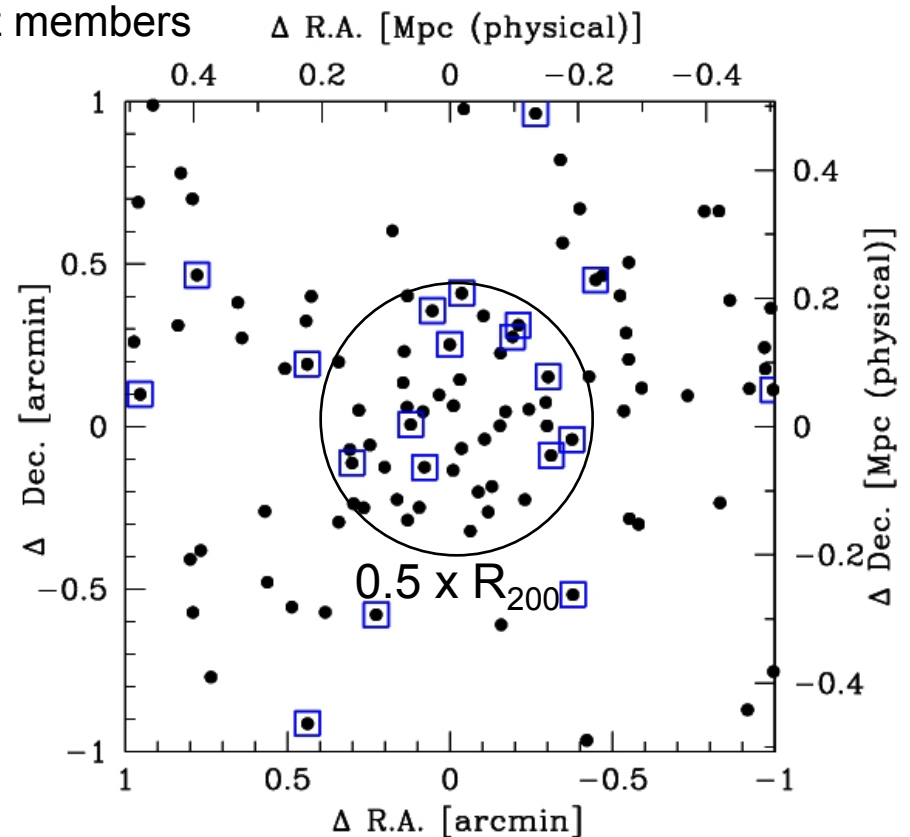
□ [OIII] emitters at $z=1.46$ (XCS2215)



$L_x = 2.7 \times 10^{44}$ erg/s

Koyama, et al. (2010)

□ 星形成中の銀河



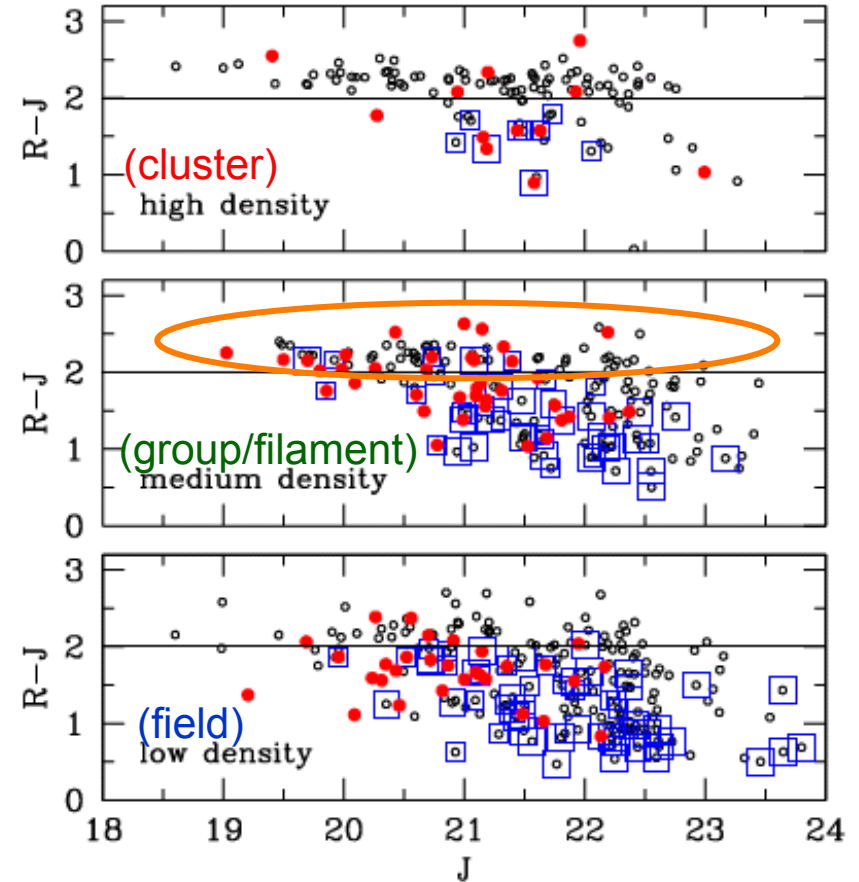
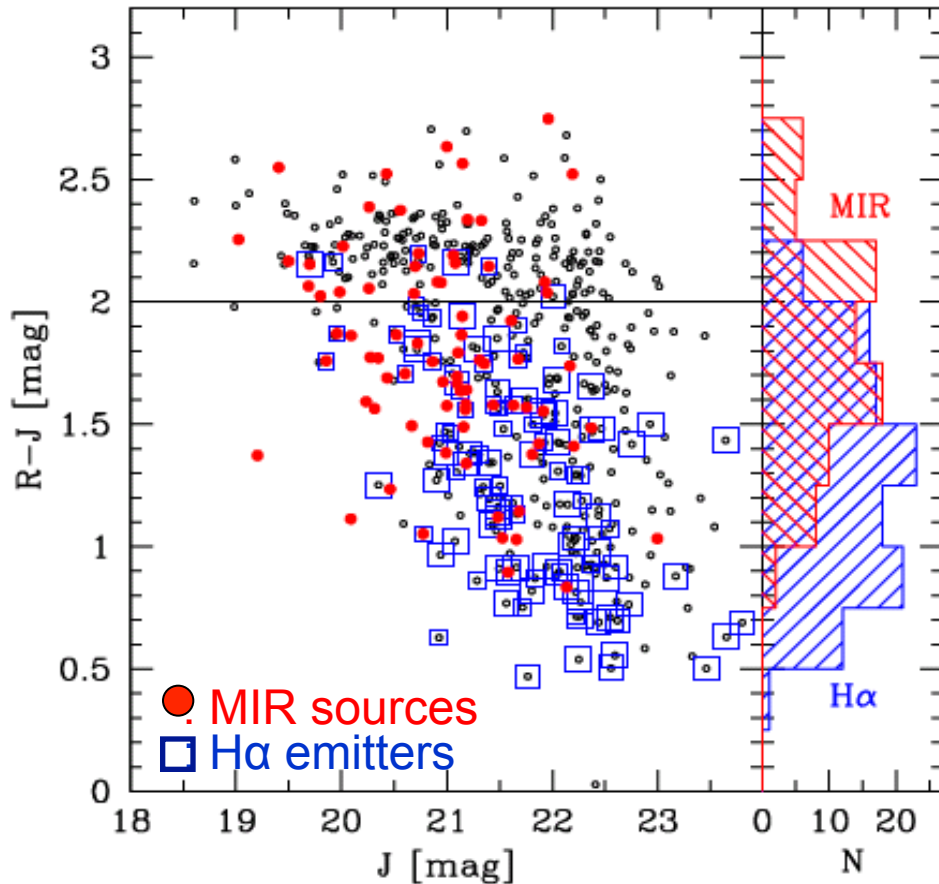
$L_x = 4.4 \times 10^{44}$ erg/s

Hayashi, et al. (2010)

銀河団の形成／進化は、内から外へと進行する。

赤い銀河系列に隠された星形成活動

H α エミッターとあかり15 μ mソースが、いくつか赤い銀河系列にも見られる



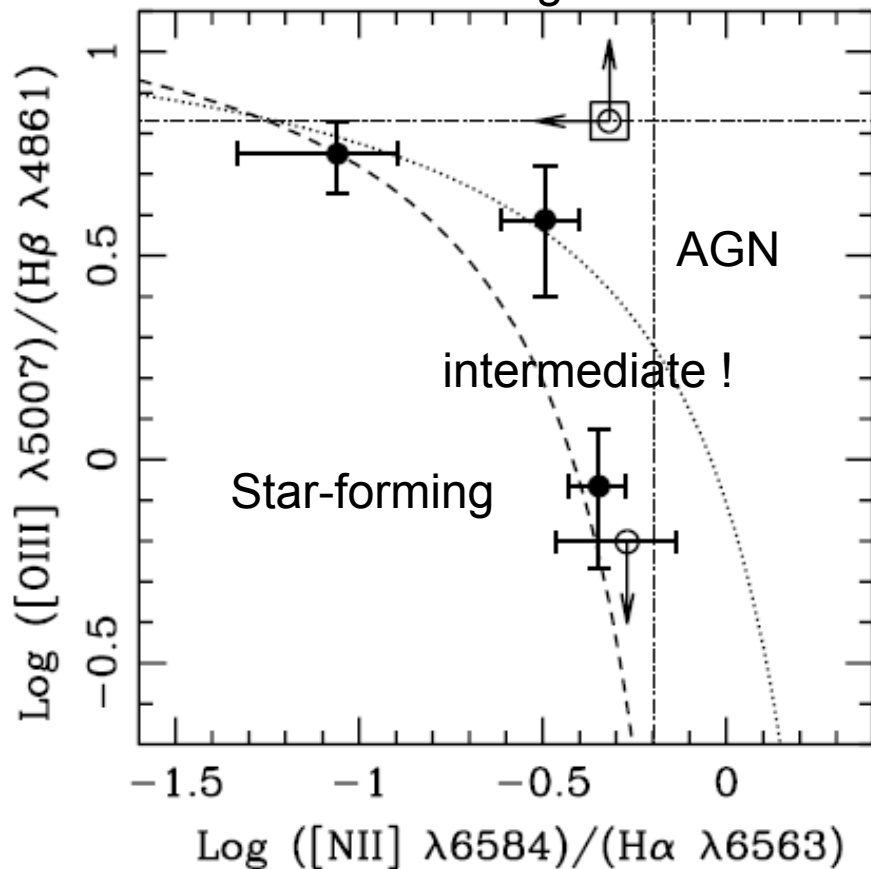
Lots of star formation is likely to be hidden in the optical (rest UV) surveys!

Koyama, TK, et al. (2009)

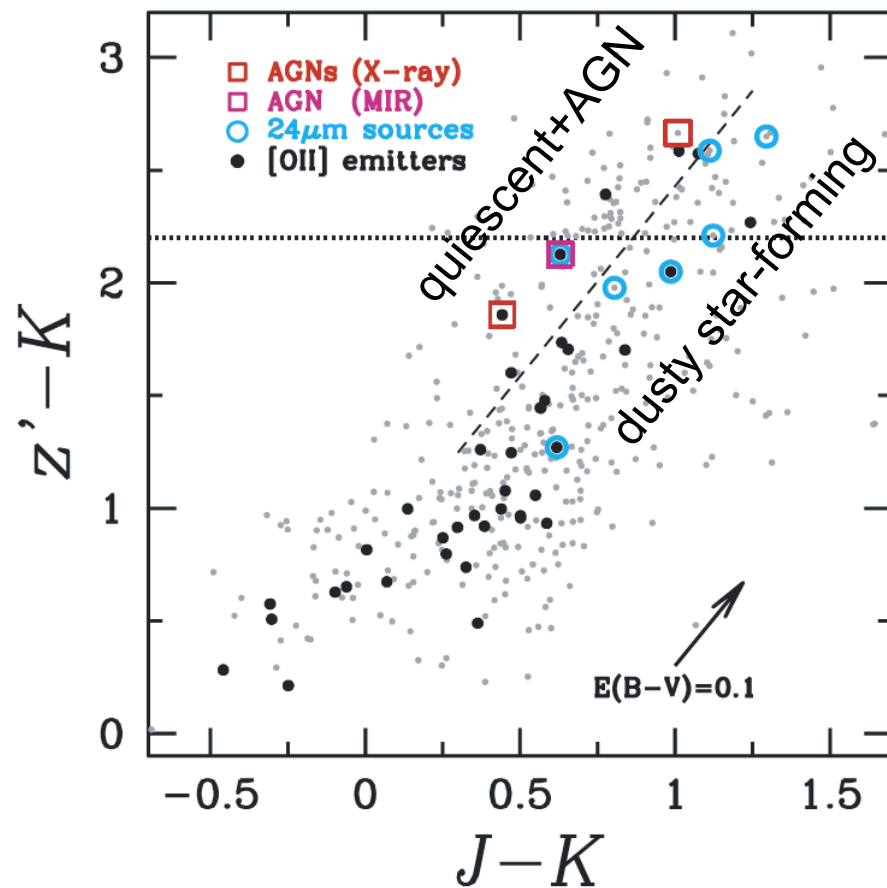
AGN 成分の寄与?

[OII] emitters in XCS2215 cluster ($z=1.46$)

BPT diagram



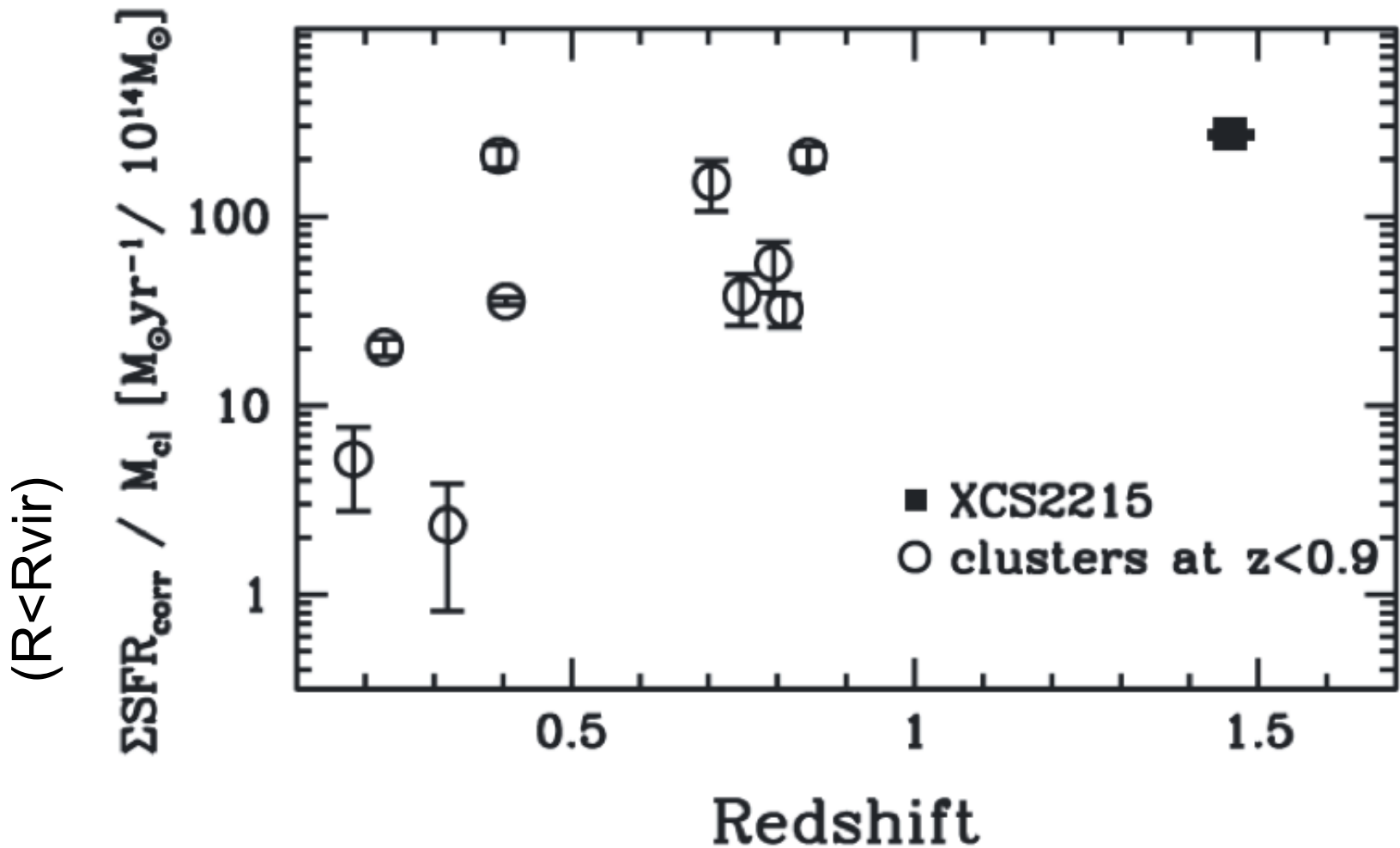
Colour-colour diagram



赤い [OII] エミッターには、AGNの寄与が結構な割合(半分?)ありそう。

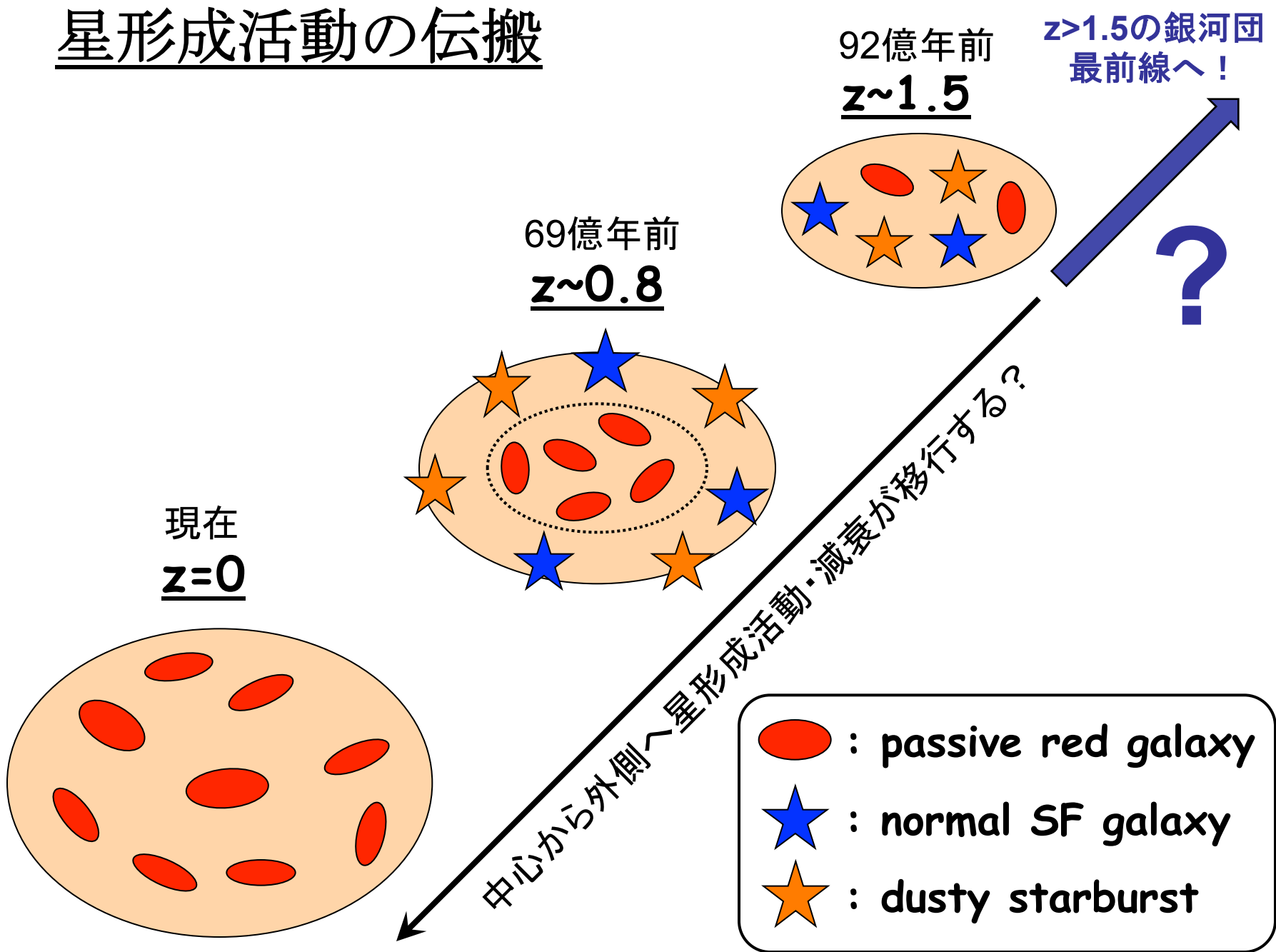
Hayashi et al. (2011)

$\Sigma\text{SFR}/M_{\text{cl}}$ vs. Redshift (z)



銀河団での星形成の活動性はz~1.5から現在までにおよそ2桁も減衰する
(フィールドではおよそ1桁)。

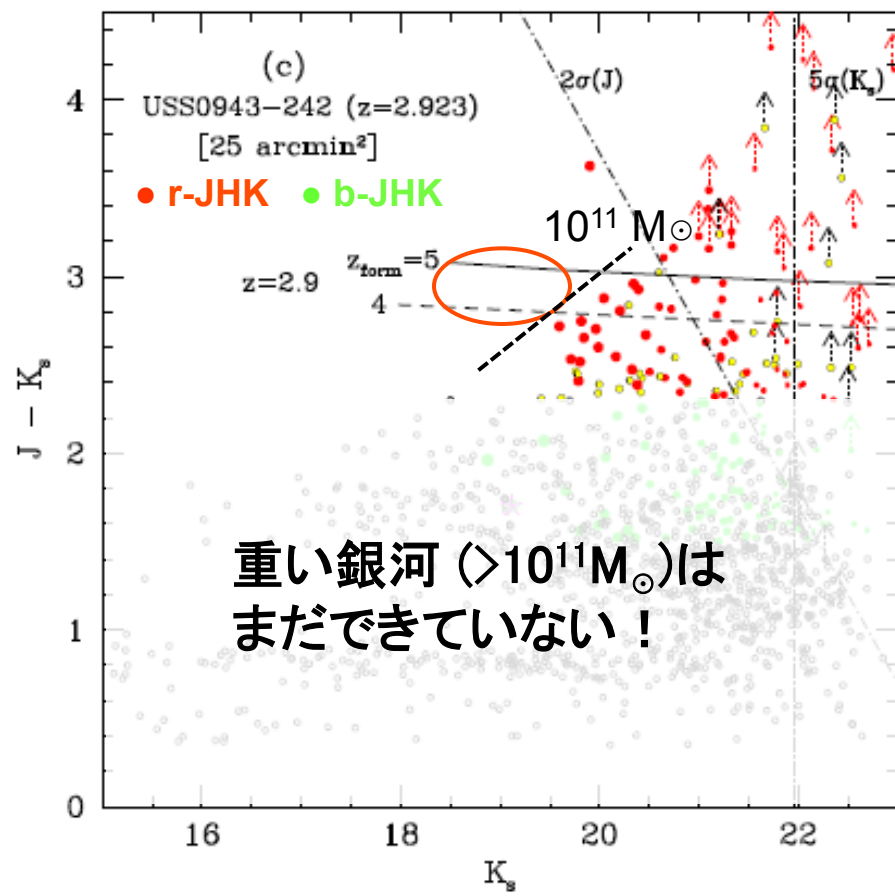
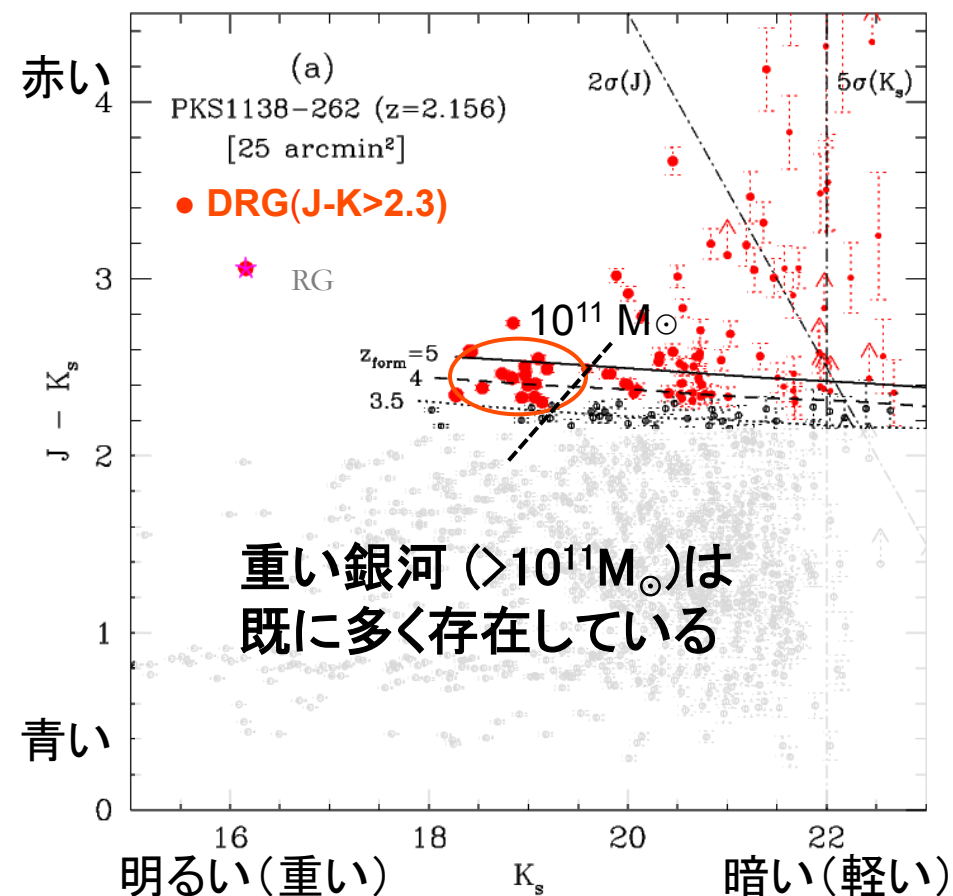
星形成活動の伝搬



重い銀河の急速な成長

原始銀河団($z=2.16$, 105億年前)

原始銀河団($z=2.92$, 115億年前)

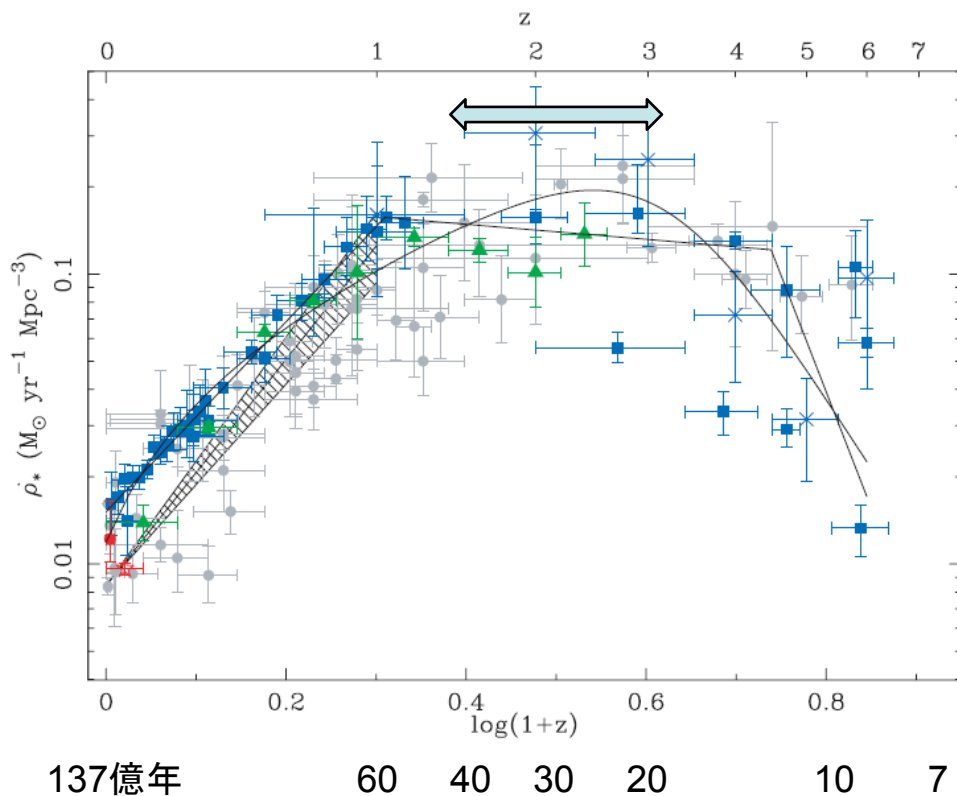


銀河団中の重い銀河は、110億年前頃に急速に出来上がった？

すばる望遠鏡
Kodama et al. (2007)

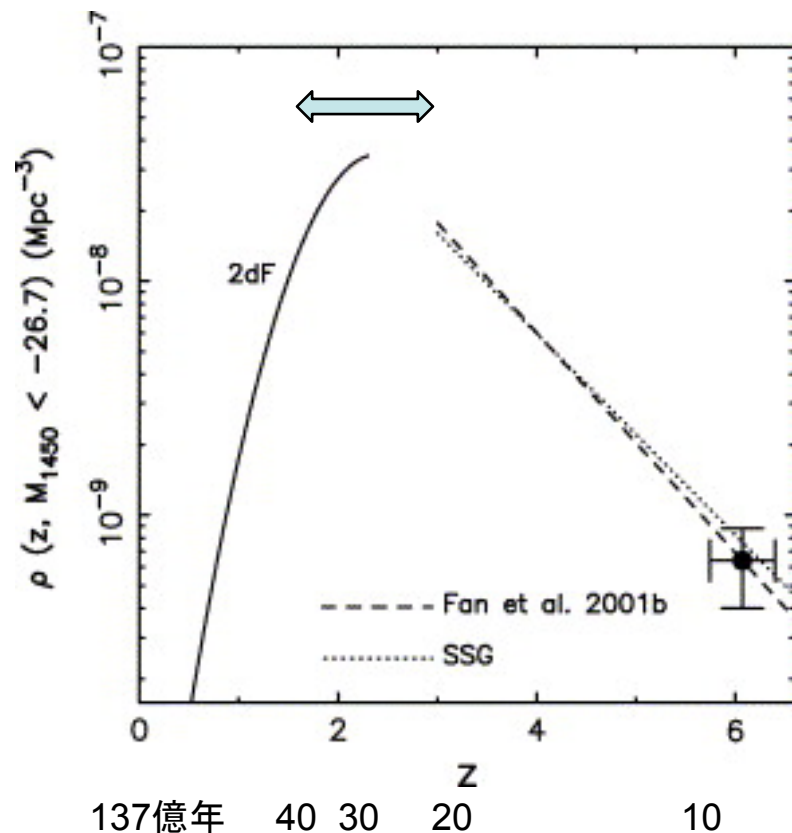
宇宙年齢が20～40億年（今から95～115億年前）の時代は、銀河やブラックホールの活動性が最も高い

宇宙全体の星形成活動の強さ



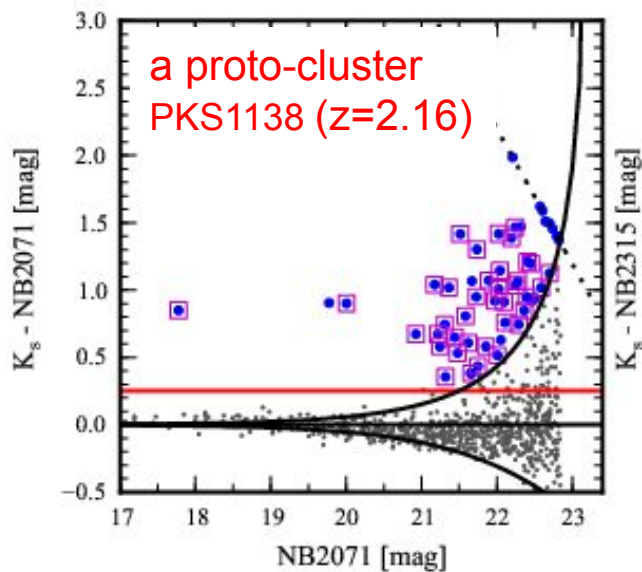
Hopkins and Beacom (2006)

銀河中心のブラックホール周辺部の活動性



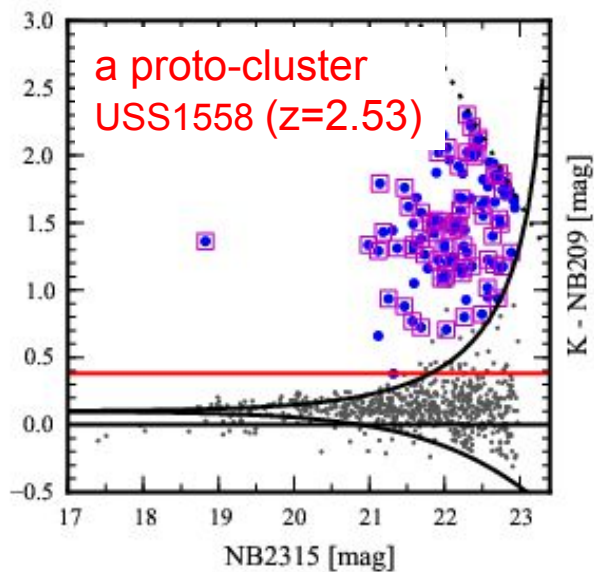
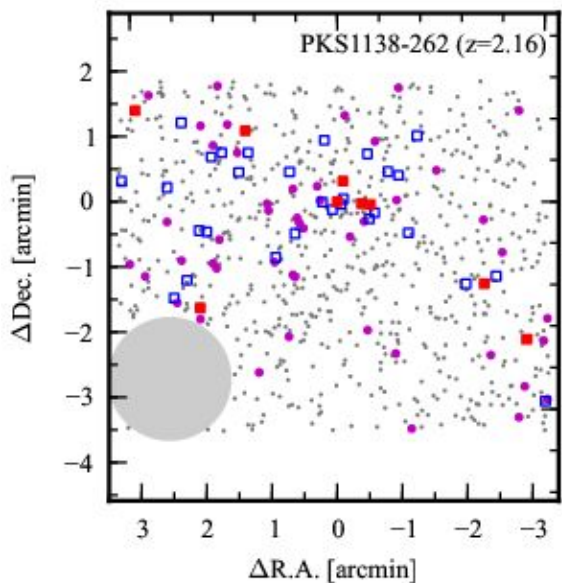
Fan et al. (2006)

$z > 2$ の原始銀河団とフィールドに見つかったH α エミッター



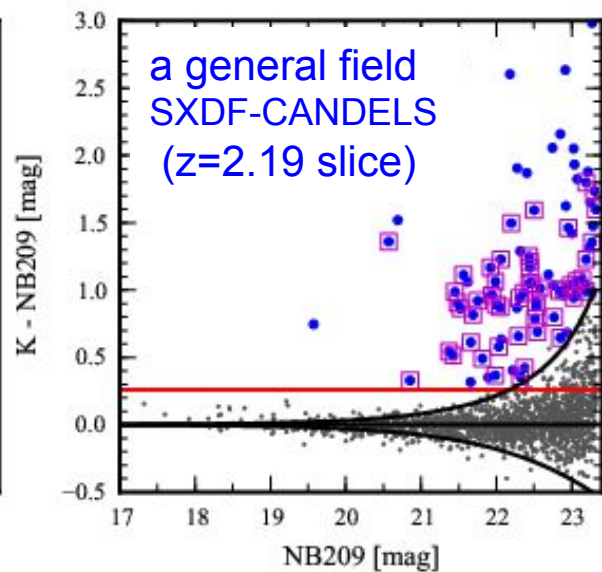
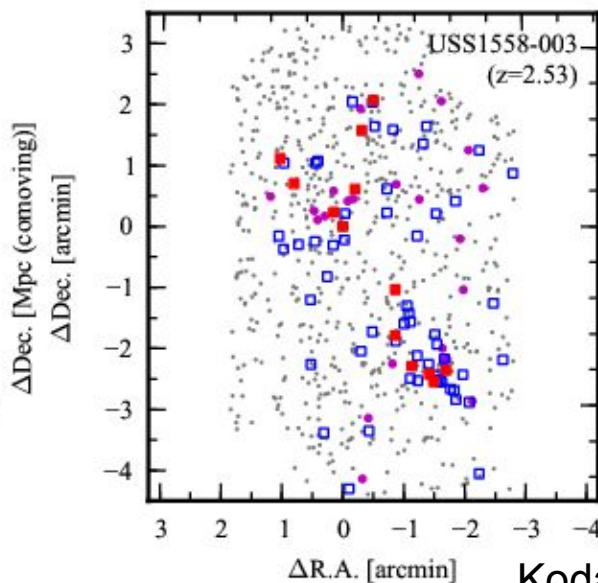
$\Delta R.A.$ [Mpc (comoving)]

5 0 -5



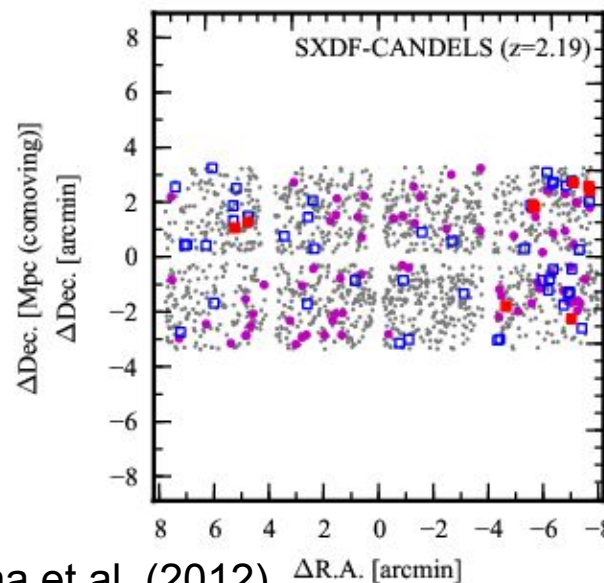
$\Delta R.A.$ [Mpc (comoving)]

5 0 -5



$\Delta \text{Dec.}$ [Mpc (comoving)]

10 5 0 -5 -10

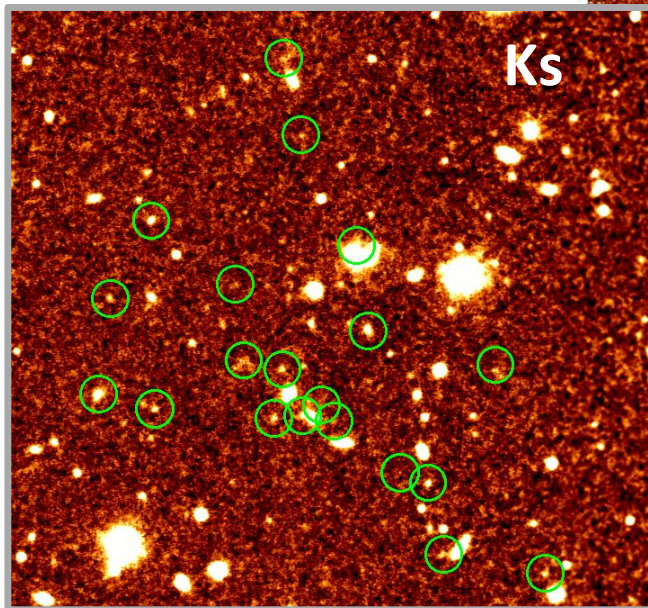
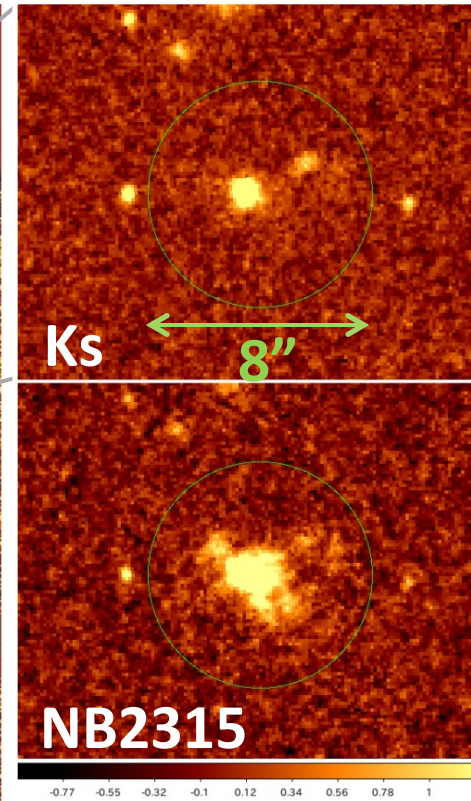
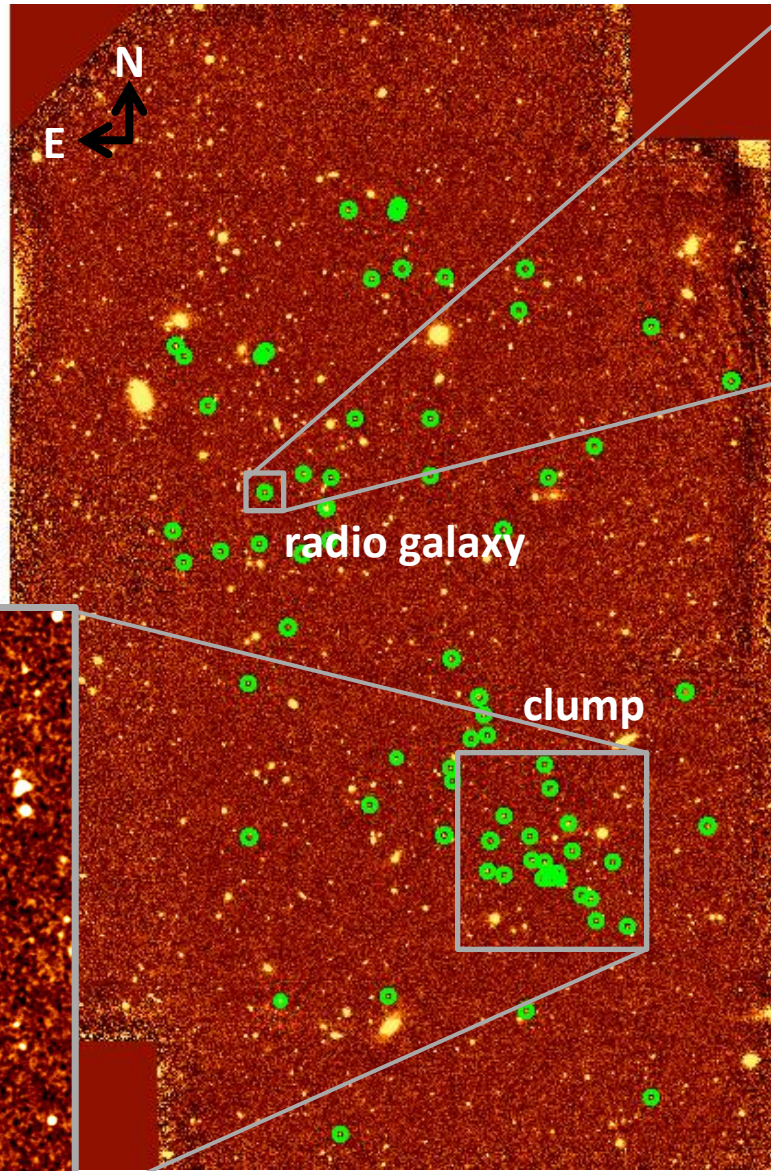


銀河団形成の現場

USS1558-003原始銀河団
($z=2.53$, 110億年前)

特注の狭帯域フィルターNB2315
によって銀河からのH α 線を捕える

各銀河の星形成率
~100 M_{\odot} /年
合計で~10000 M_{\odot} /年



Hayashi et al. (2012)
accepted

USS1558-003 (z=2.53)

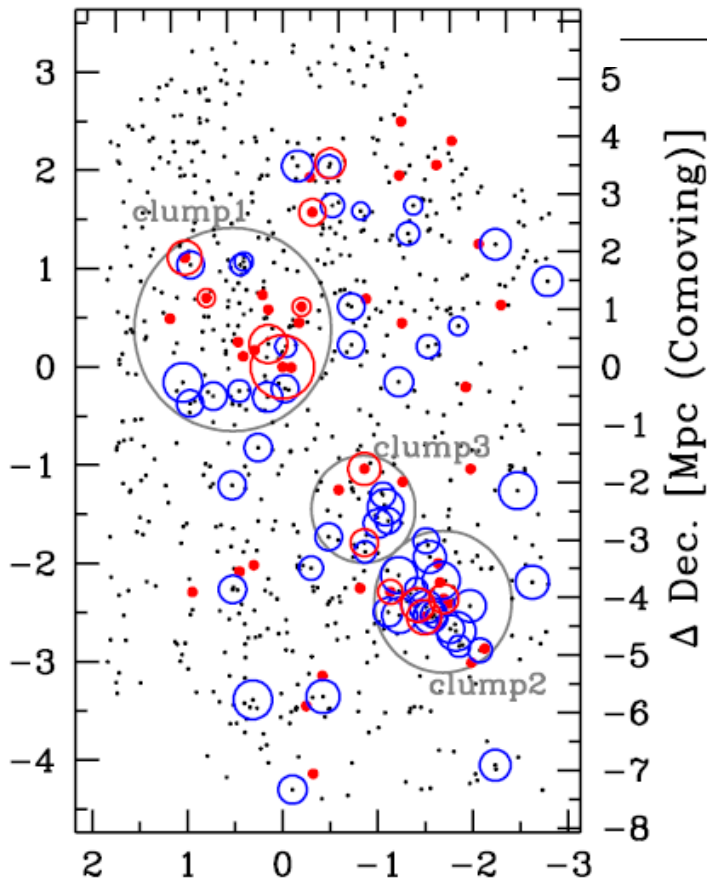
○ blue HAE

○ red HAE

● DRG

Δ R.A. [Mpc (Comoving)]

3 2 1 0 -1 -2 -3 -4 -5



Δ R.A. [arcmin]

Region	Area (arcmin ²)	Number		Density (arcmin ⁻²)	
		HAE	DRG	HAE	DRG
Clump 1	3.36	15	12	4.46	3.57
Clump 2	1.64	20	8	<u>12.20</u>	4.88
Clump 3	0.94	8	3	8.51	3.19
Clumps 1+2+3	5.94	43	23	<u>7.24</u>	<u>3.87</u>
Others	21.16	25	19	1.18	0.90
All	27.10	68	42	<u>2.51</u>	<u>1.55</u>

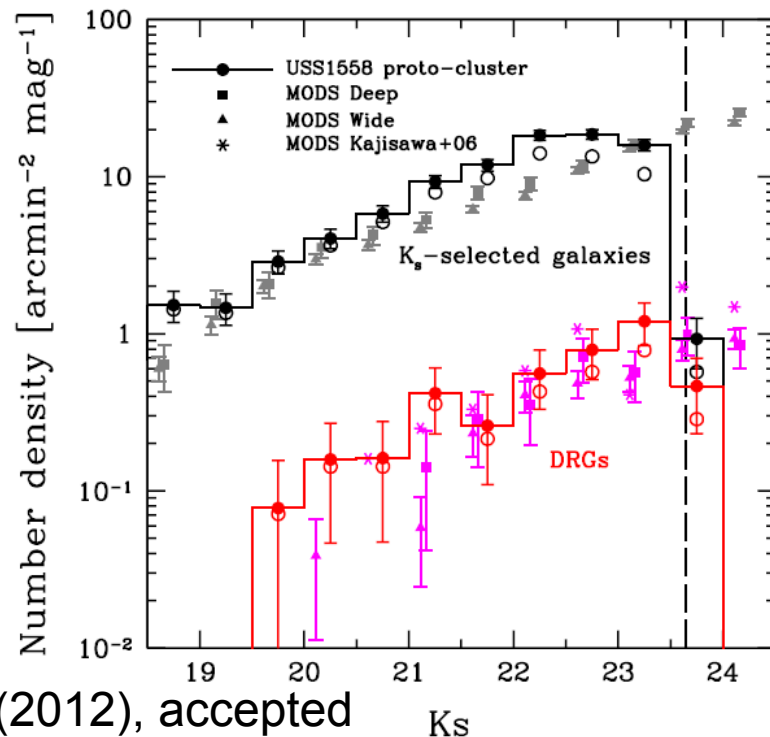
SXDF

110.0

0.5

Excess of HAEs is huge! (x24 in clump2 and x5 in All)

Excess of DRGs is also significant at K<22.



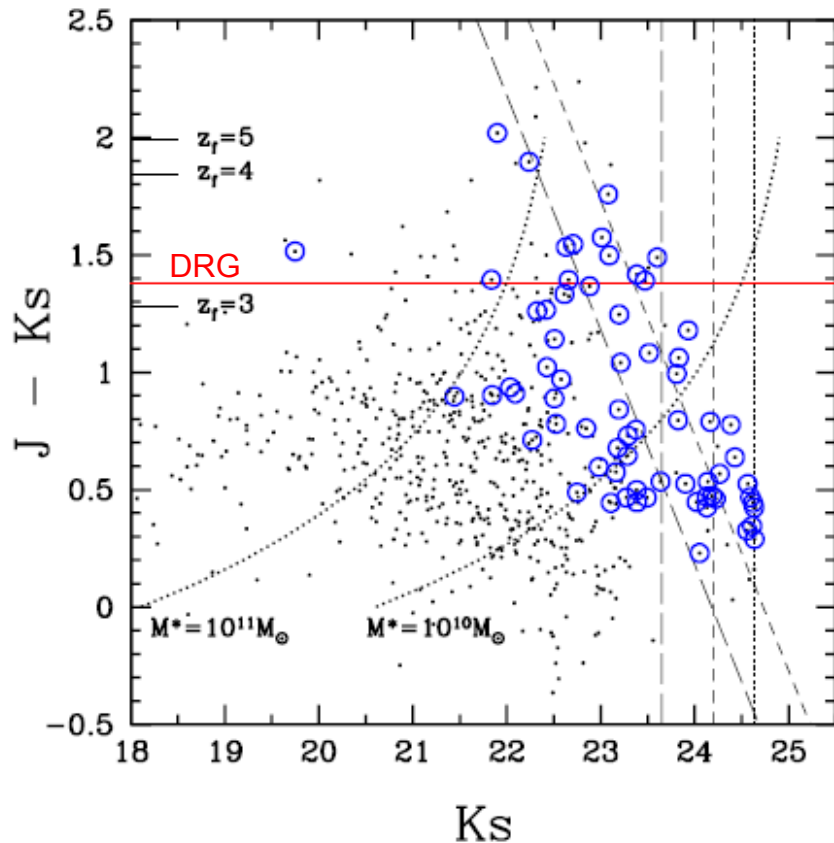
Hayashi et al. (2012), accepted

K_s

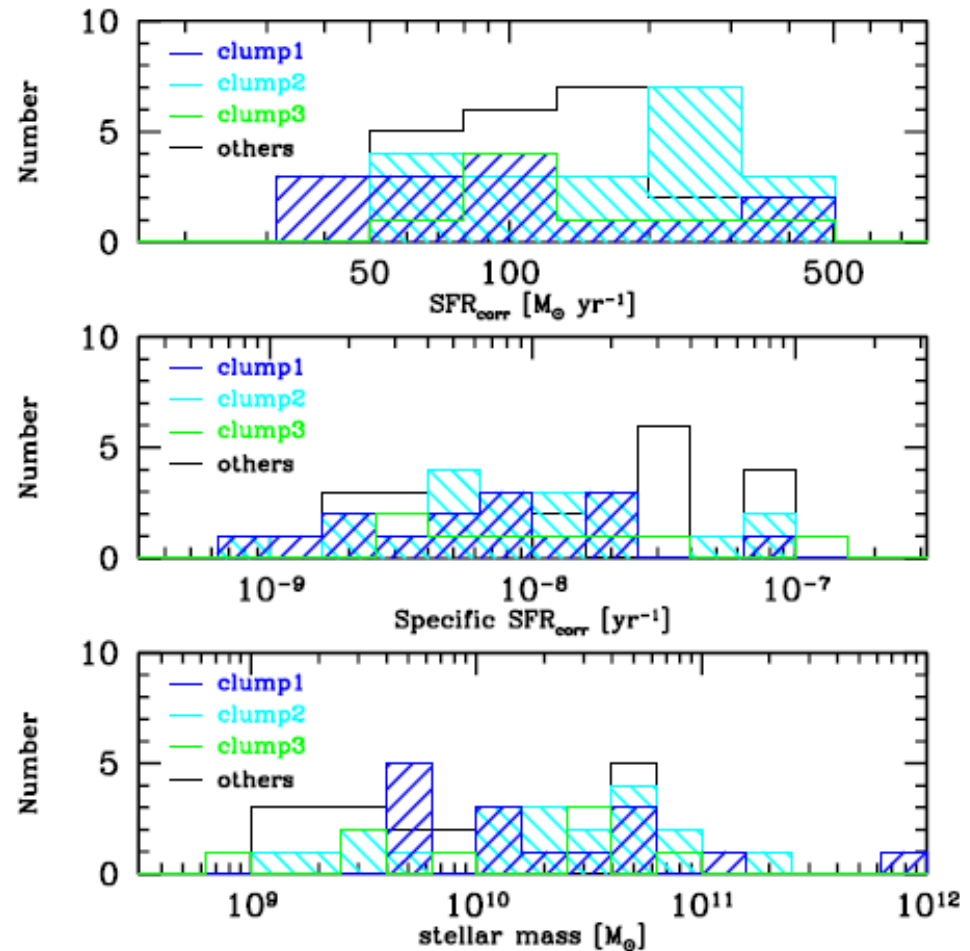
原始銀河団に見つかったH α エミッターの性質

USS1558-003 ($z=2.53$)

Hayashi et al. (2012) accepted



ほとんどは比較的低質量($< 10^{11} M_{\odot}$)。
赤いエミッターの割合が多い。

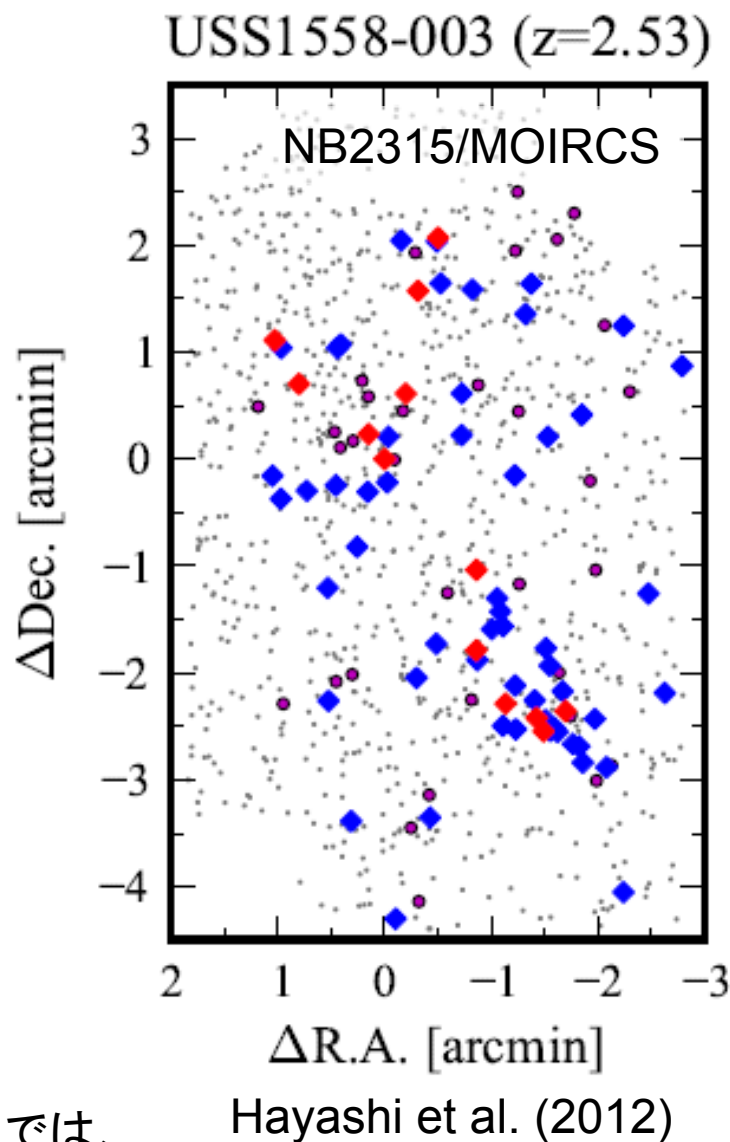
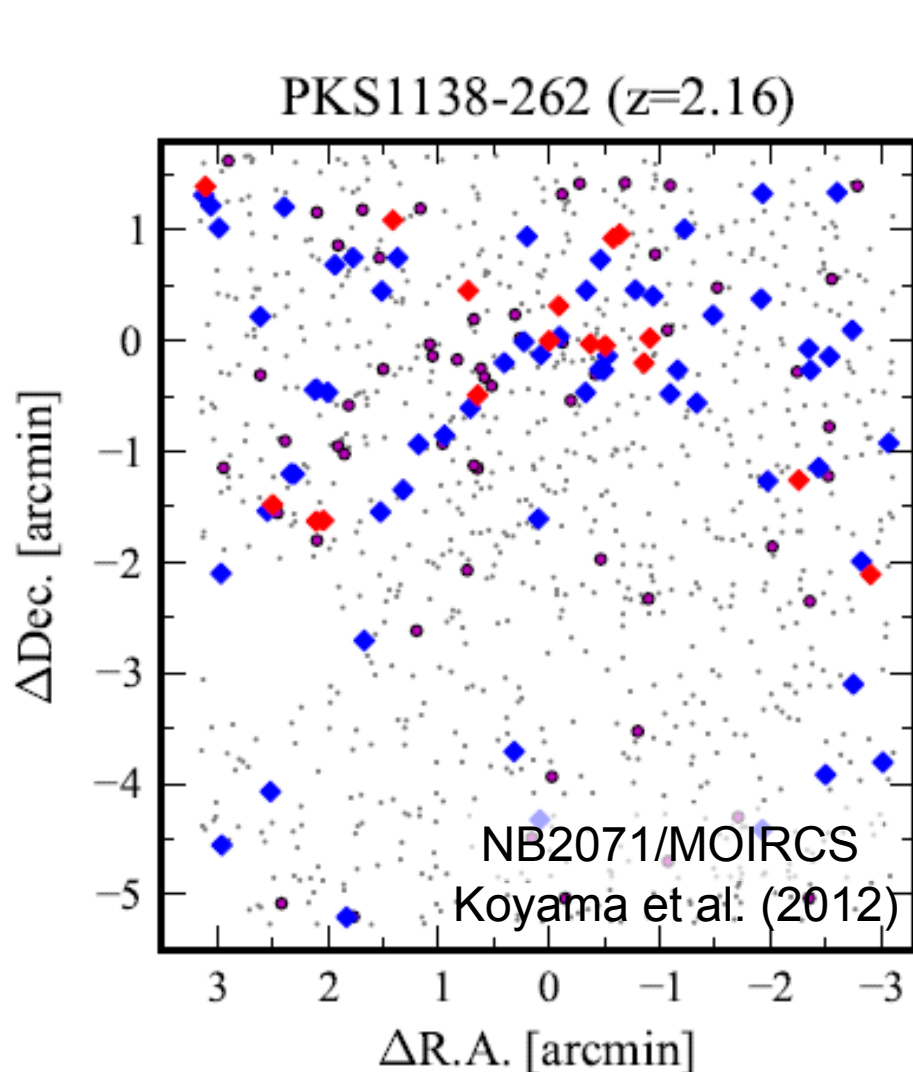


星形成率(SFR)は概して高い!

SFRを合計すると、 $1.1 \times 10^4 M_{\odot}/\text{yr}$ にもなる
Clump-2が若干SFRが高い傾向を示す(2σ)

dust extinction is corrected using the Garn's calibration between $A(\text{H}\alpha)$ and $L(\text{H}\alpha)$.

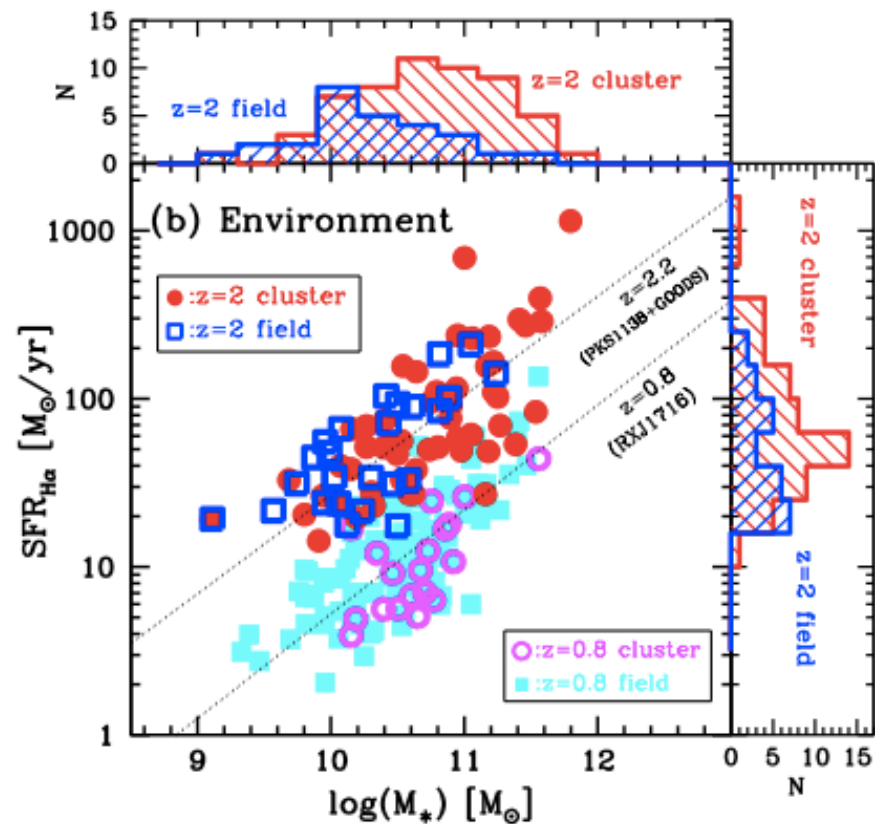
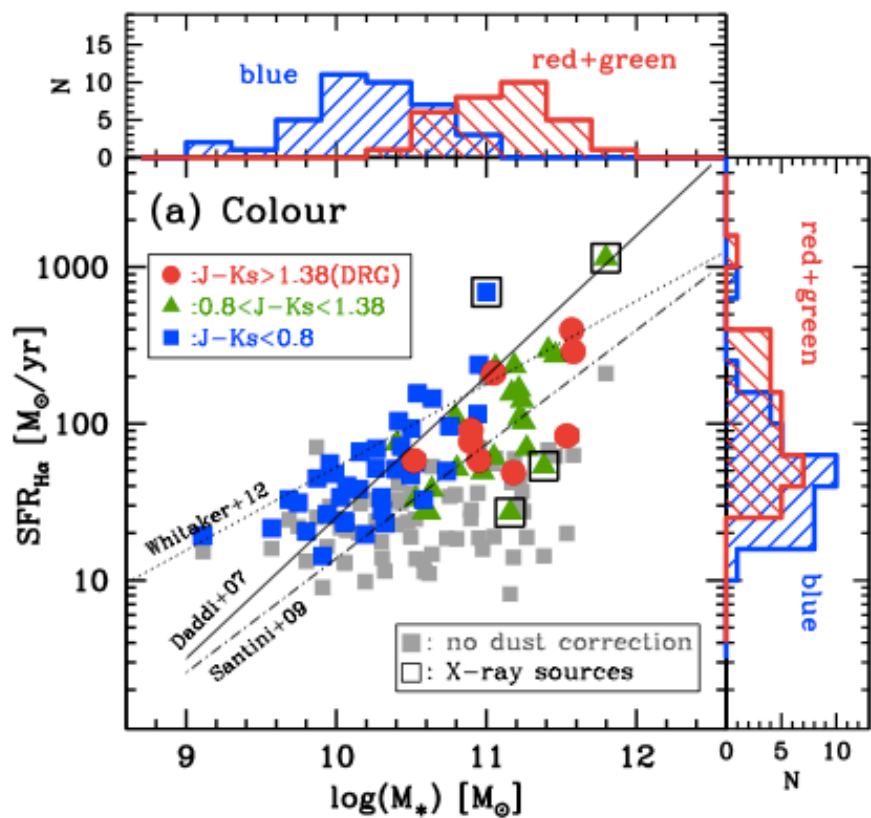
赤いH α エミッターはより高密度な領域に存在する傾向



このような赤いH α エミッターは $z\sim 0.5-0.8$ の銀河団では、中間密度領域(グループなど)に存在する傾向

赤いH α エミッターは、
星質量が重く、星形成率も高い

高密度領域では、早い時期に、
重い銀河が爆発的に成長する！



PKS1138-262 (z=2.156)

Koyama, et al. (2012), submitted

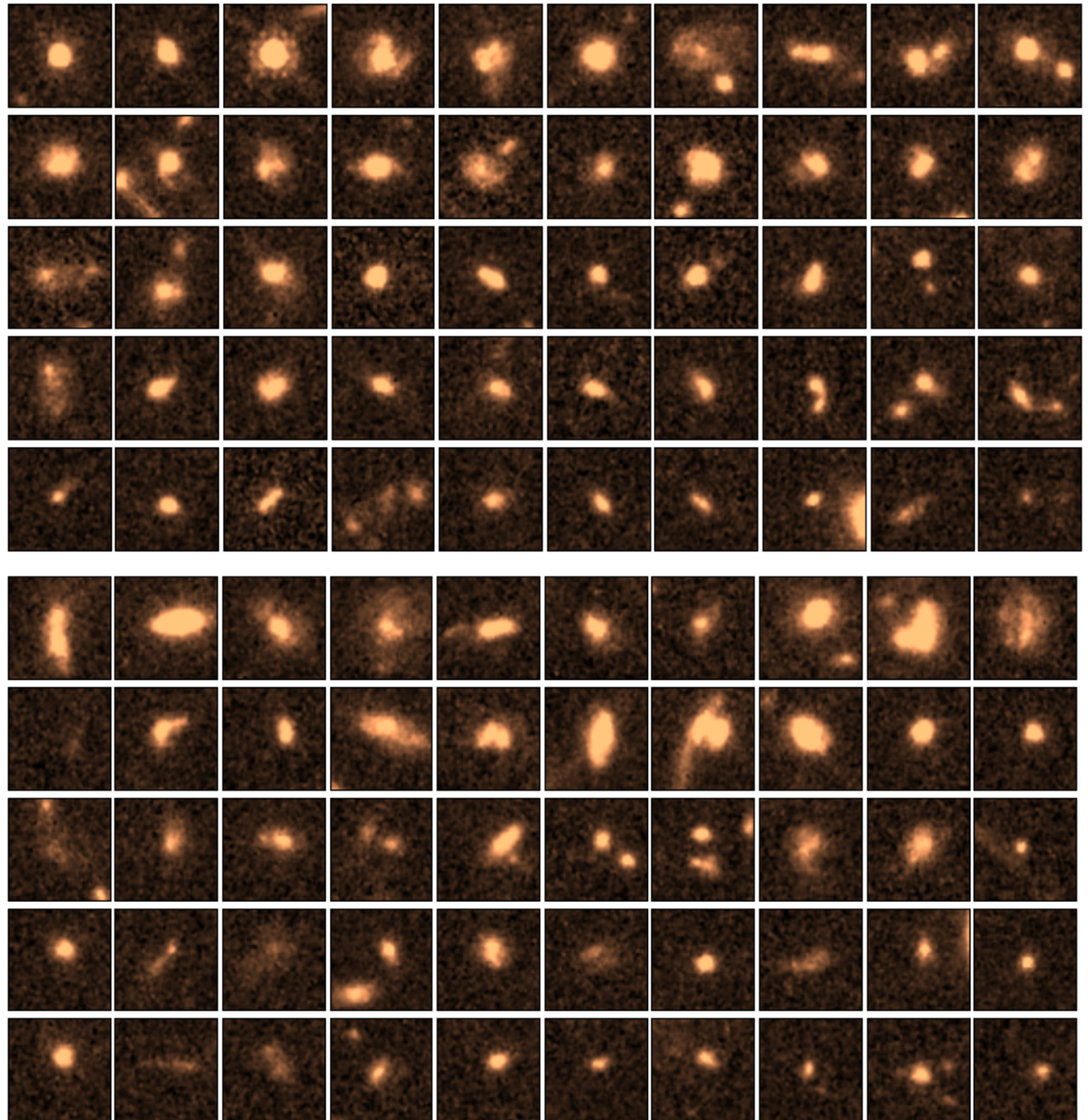
HST/WFC3
F160W images

SXDF/CANDELS

H α emitters
at $z=2.19$
(NB2095)

多くがクランピーもしくは
は合体の兆候を示す！

H α emitters
at $z=2.53$
(NB2315)

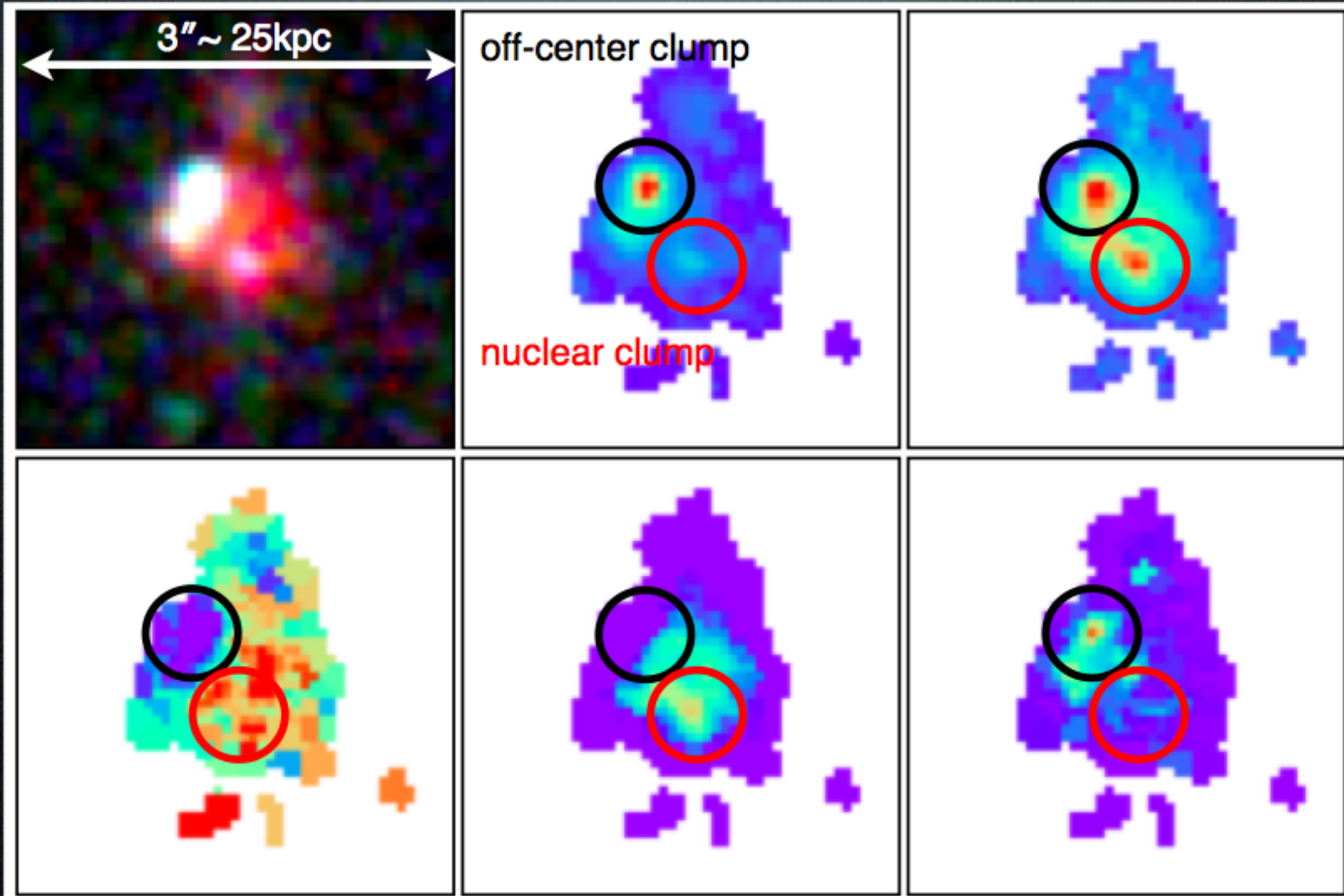


星形成のモードは銀河内部でもクランプごとに異なる！？

HAE @ $z=2.2$ @ SXDF-CANDELS

Z_{814} (UV)

H_{160} (optical)



$Z_{814} - H_{160}$

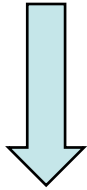
Mass

SFR

Tadaki +
(in prep)

"Mahalo-Subaru"

MApping HA α and
Lines of OxygeN with Subaru



"Gracias-ALMA"

GRAphing CO Intensity
And Submm with ALMA



CO(3 \rightarrow 2) @ z~2.5 @100GHz \rightarrow M_{gas}

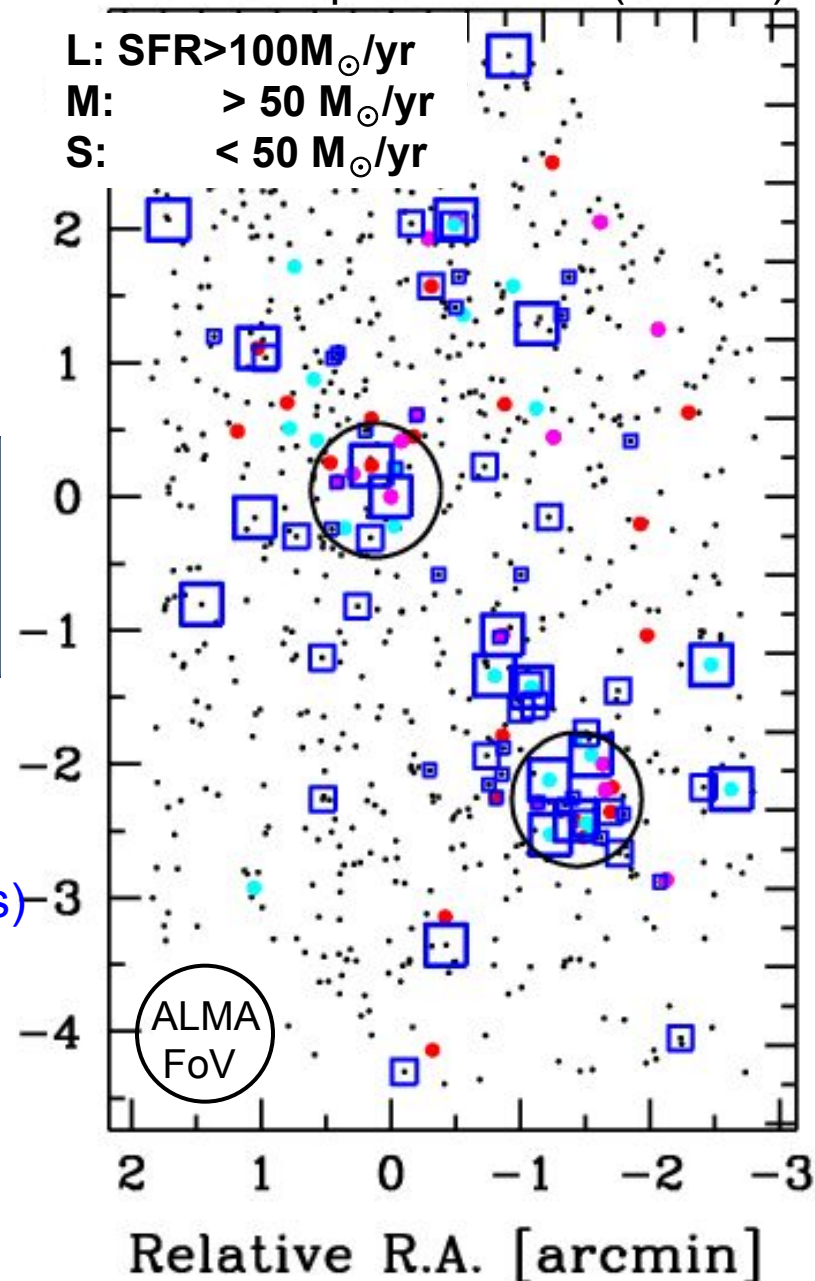
Dust conti. @450 μ m–1.1 mm \rightarrow Dusty SFR

resolving spatially (<0.1"), kinematically (~50km/s)

{ SFE (SFR / M_{gas})
f(gas) (M_{gas} / M_{gas} + M_{star})
Distribution and motion of gas

\rightarrow Merger induced starburst at the center?
or Extended star formation over the disk?

USS1558 proto-cluster (z=2.53)



ここまでのまとめ

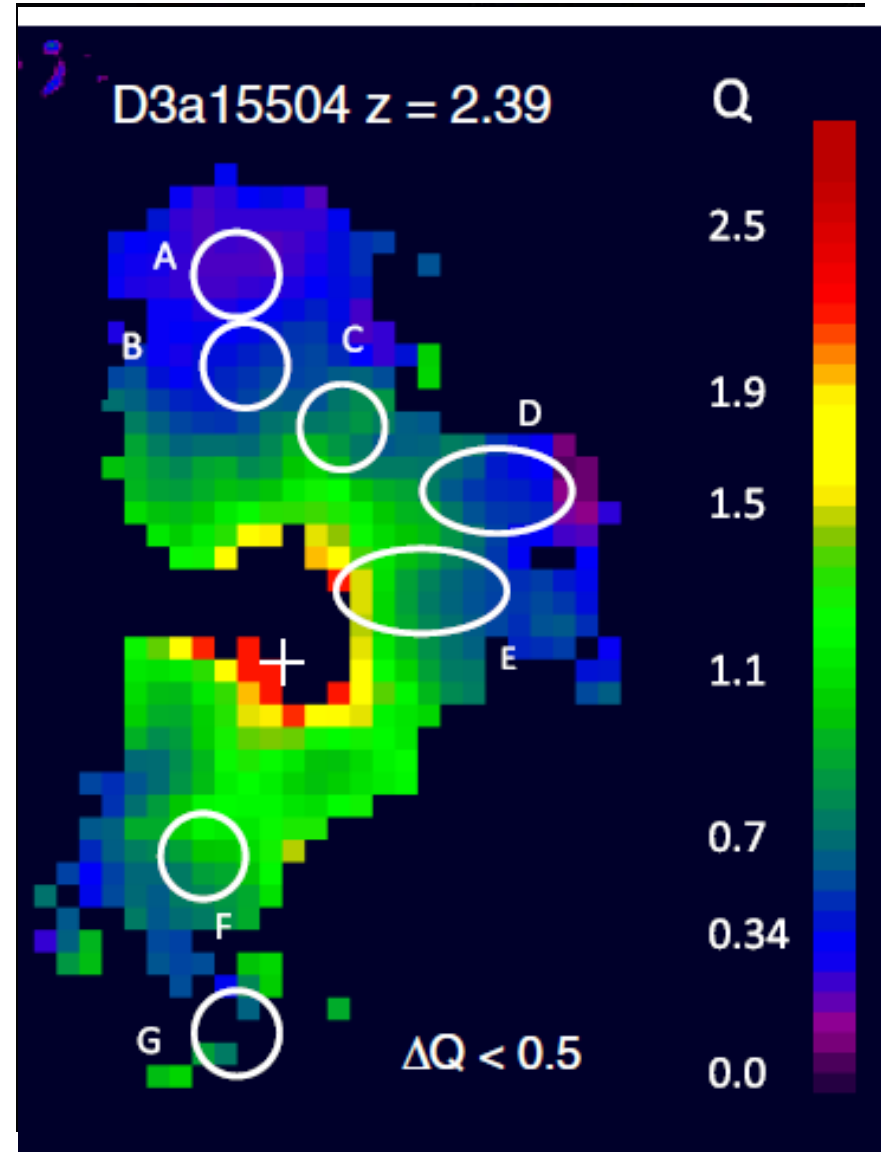
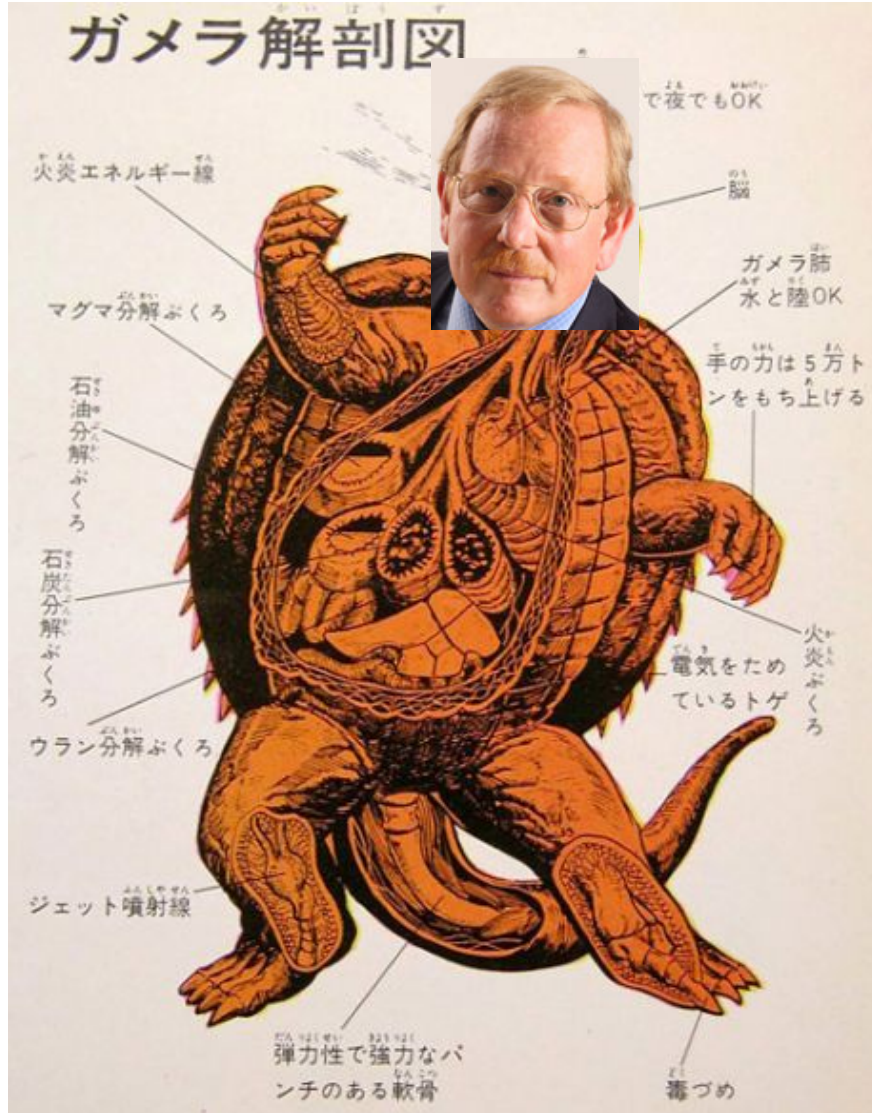
- PISCESプロジェクトによって、銀河団の内外に広がる大規模構造が明らかになった。
- Mahalo-Subaruプロジェクトによって、銀河形成ピーク期の星形成活動が、時間と環境の関数としてマッピングされてきた。
- 銀河団の星形成活動は内側から外側へと進む。
- 銀河団ではフィールドに比べ、重い銀河が早い時期に爆発的に形成される。
- $z > 2$ の星形成銀河はクランピーな構造をしているものが多い。

内容

- イン트로ダクション
『銀河の性質と、時間・空間・質量』
- 銀河生態学
『環境に翻弄される銀河の形成と進化』
- **銀河解剖学**
『点から面へ：銀河形成を分解する』

銀河解剖学

銀河をパーツに分け、物の分布や星形成活動の分布、星やガスの運動を明らかにする。



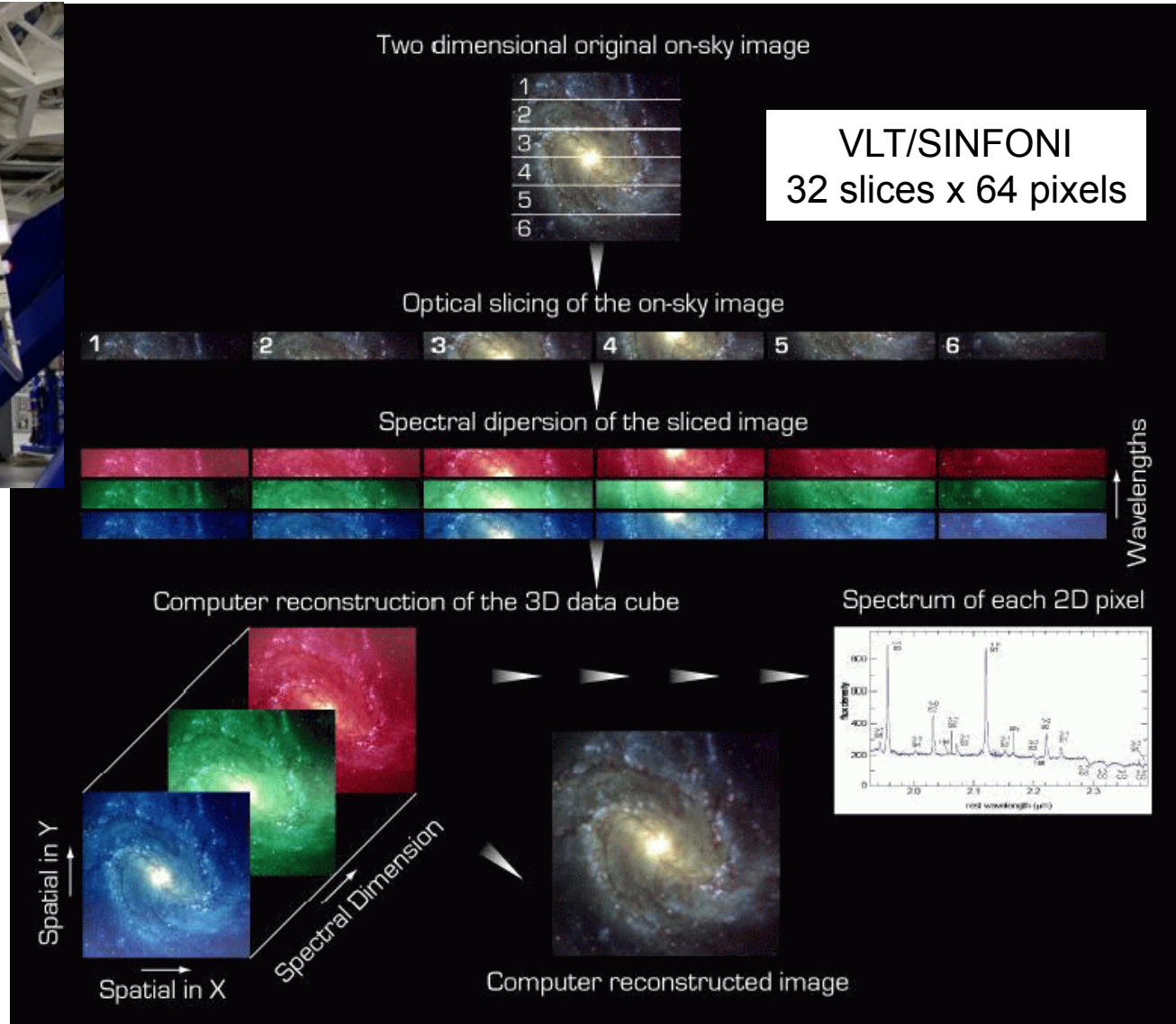
3次元分光(面分光) (Integral Field Unit)



VLT(UT4) / SINFONI

Keck/OSIRIS
Gemini/NIFS

Subaru is lacking this
type of instrumen at NIR



次期観測装置の空間解像度と視野

Subaru+AO188

0.06-0.1" @2 μ m (~0.5-1kpc @z>1), FoV=1 arcmin

Subaru+GLAO

0.2" @2 μ m (~1.5kpc), 15 arcmin (~7.5Mpc)

JWST

0.05" @2 μ m (~0.5kpc), 3 arcmin

TMT+AO

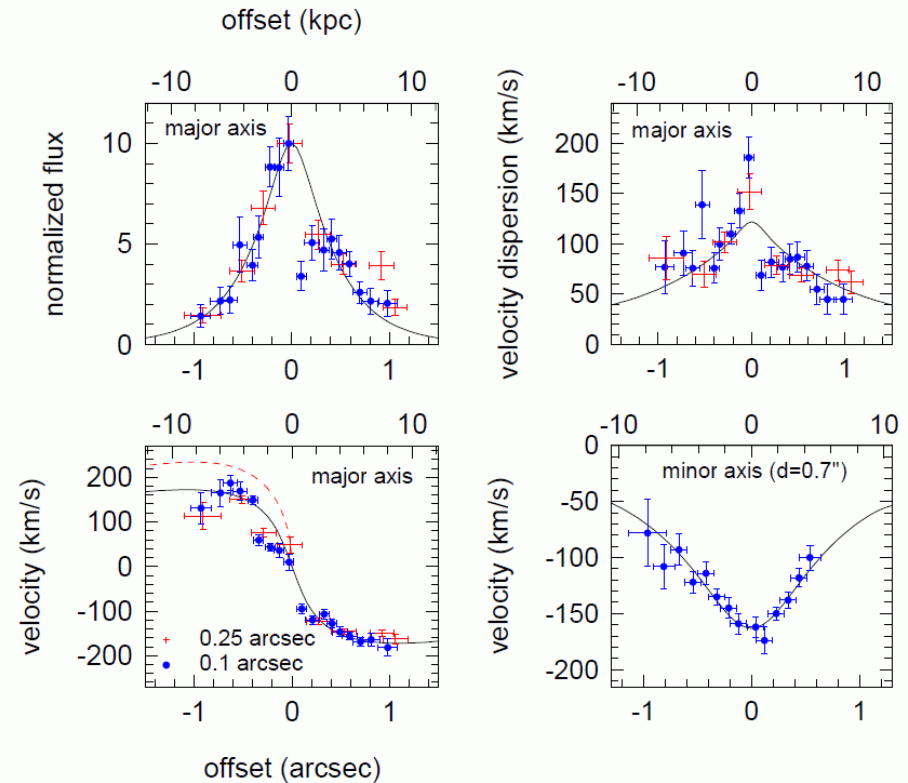
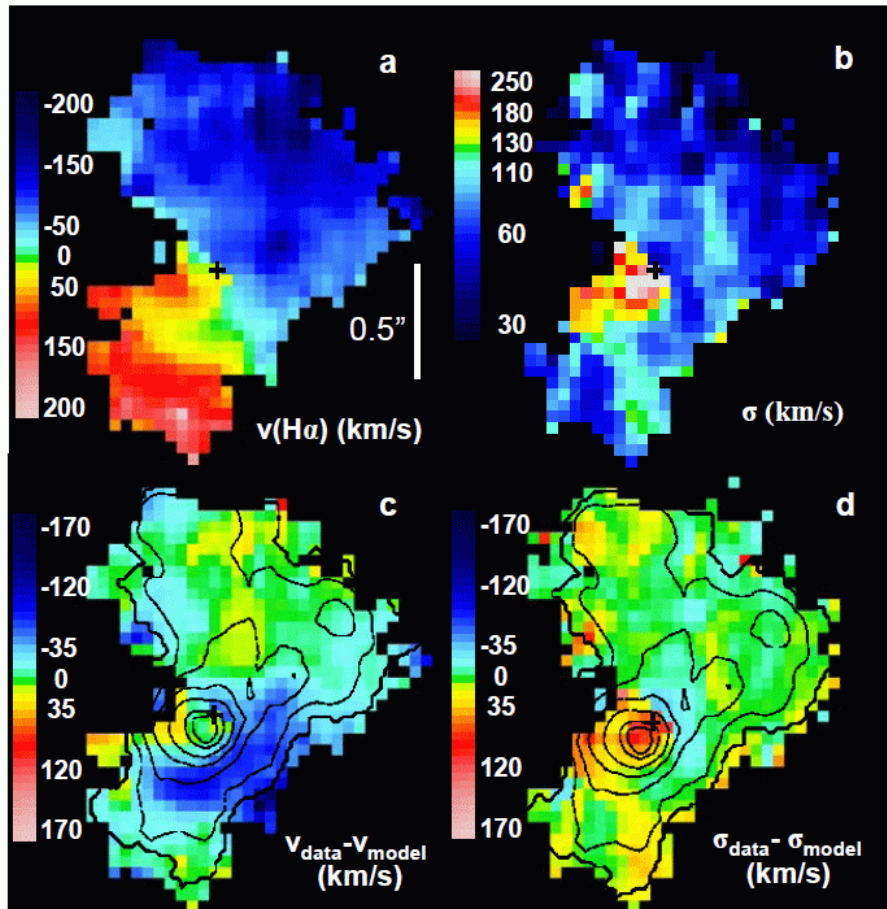
0.015" @2 μ m (~0.1kpc), 15 arcsec

ALMA

0.01-0.1" @Submm (0.1-1kpc), 10arcsec-1arcmin
(0.08-0.6" in cycle-1)

遠方銀河の回転運動

VLT/SINFONI(IFU) + AO \rightarrow 0.15" resolution ($\sim 1.2\text{kpc}@z=2.38$)

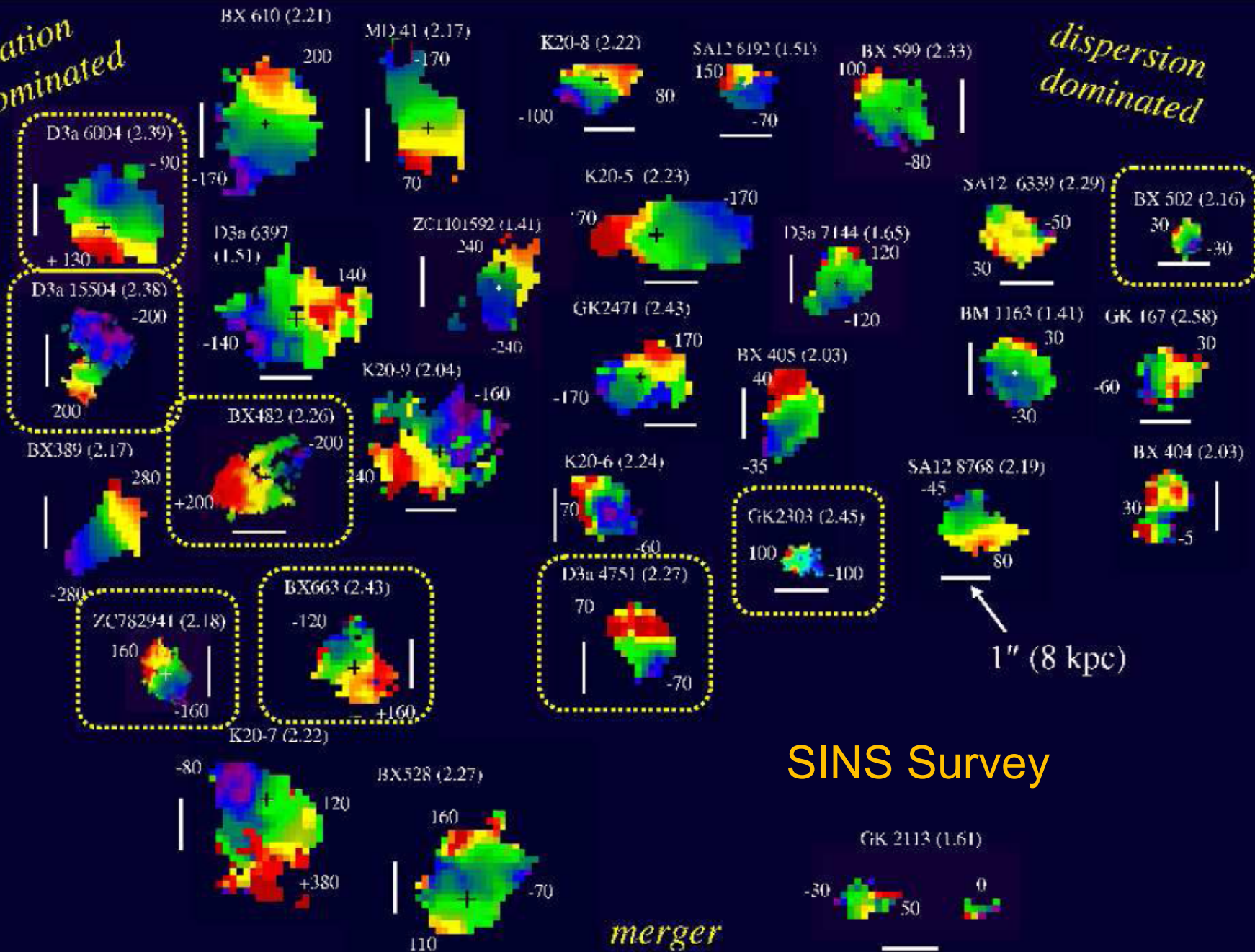


$z=2.38$, $K_s=19.2$, $M_{\text{dyn}}=1.13 \times 10^{11} M_{\odot}$ ($V_c=230\text{km/s}$),
 $M_{\text{stars}}=7.7 \times 10^{11} M_{\odot}$, $R_e=4.5\text{kpc}$, $M_{\text{gas}}(\text{H}\alpha)=4.3 \times 10^{10} M_{\odot}$

Genzel et al. (2006, Nature)

rotation dominated

dispersion dominated

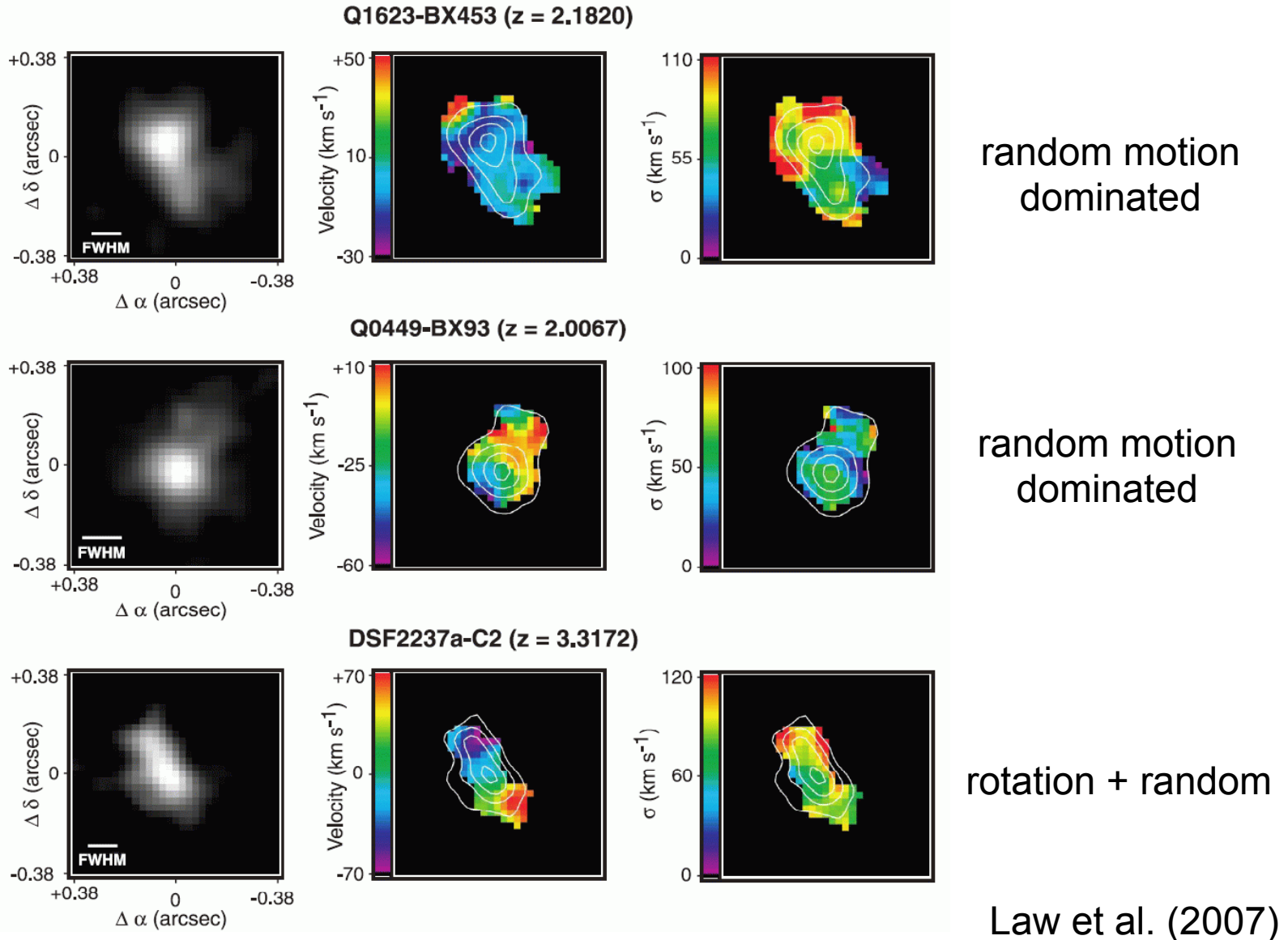


SINS Survey

merger

ランダム運動が卓越する星形成銀河が近傍に比べ多い

Keck/OSIRIS(IFU) + AO \rightarrow 0.11~0.15" resolution ($\sim 1\text{kpc}@z=2\sim 3$)



アウトフローの兆候 (500-1000km/s)

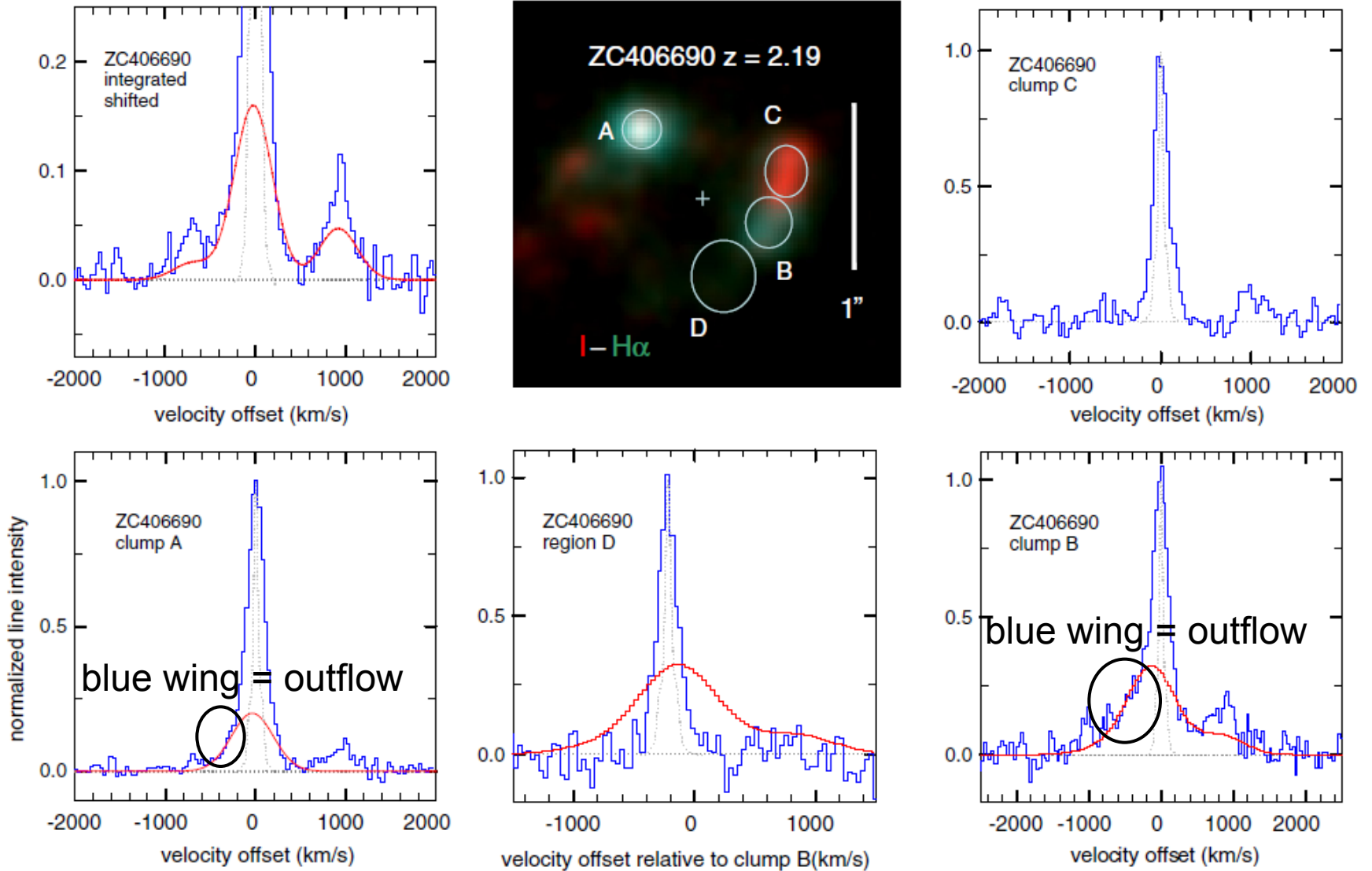
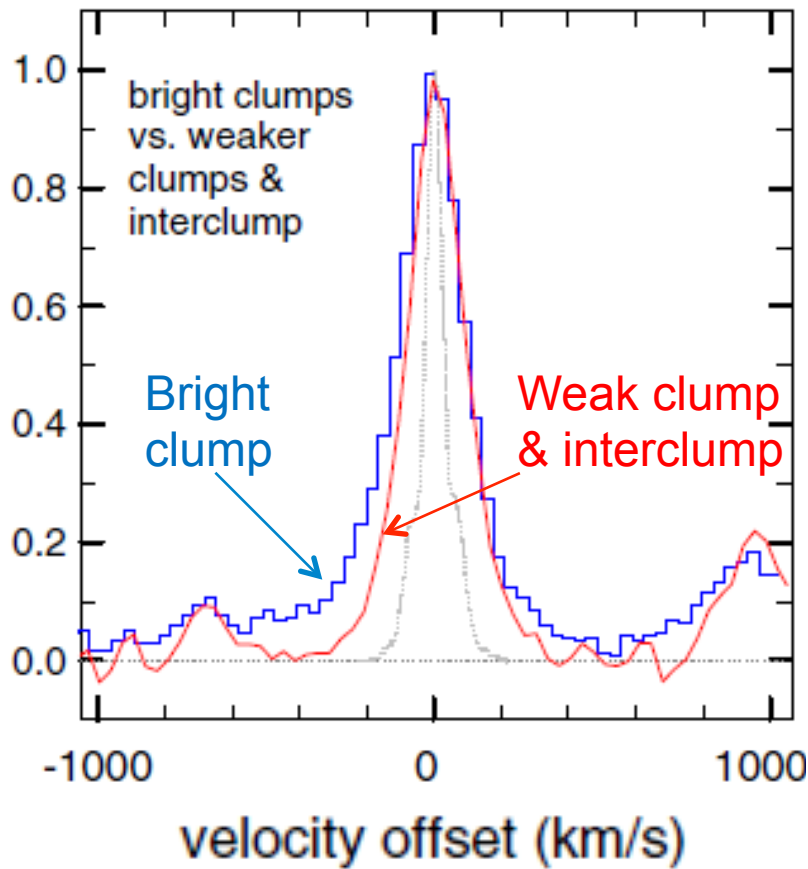
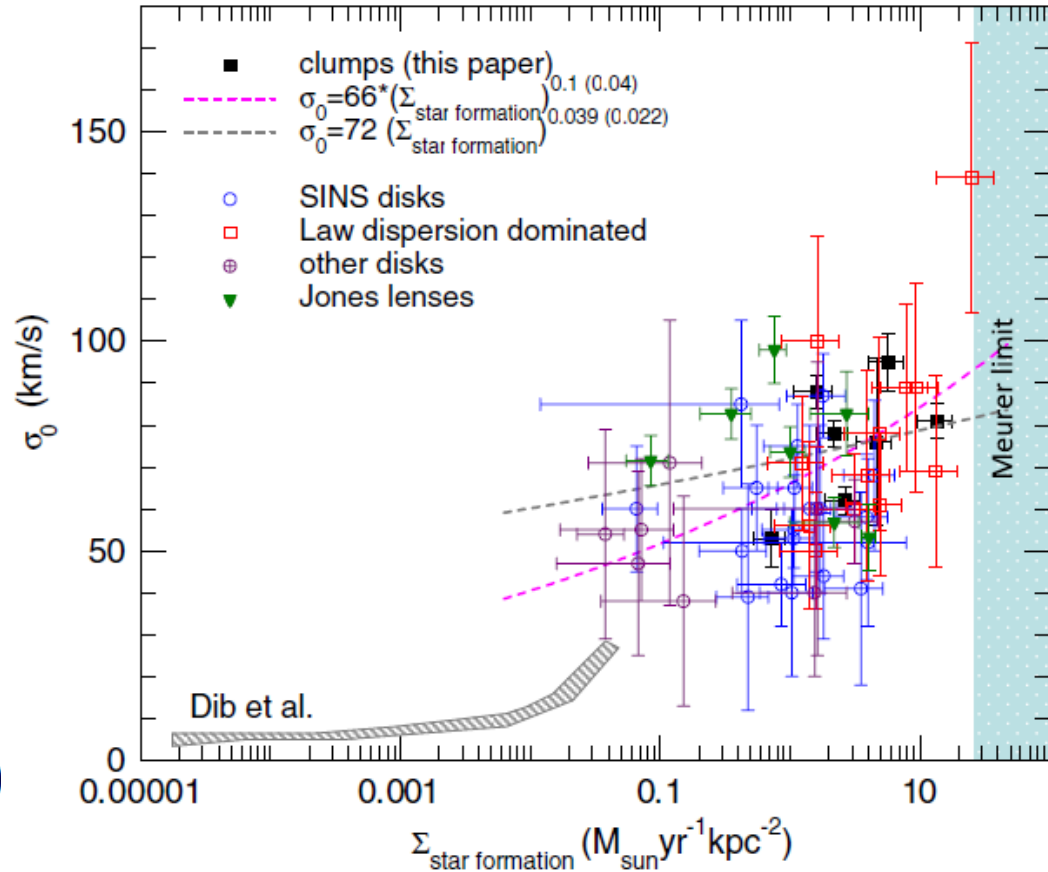


Figure 7. $H\alpha$ spectra of ZC406690 ($z = 2.195$), for the entire galaxy (top left), as well as for selected clumps marked in the central $H\alpha$ -ACS I -band composite (Figure 2). The dotted gray curves in all panels denote the SINFONI spectral response profile measured from OH sky lines. Before construction of the integrated spectrum, the galaxy rotation was removed for each pixel. The thin red curves show the broad $H\alpha$ (clump A) or broad $H\alpha$ + [N II] (integrated spectrum, clump B) components obtained from multi-component Gaussian fits. For region D, the thin red curve is the scaled broad $H\alpha$ component of clump B, and the velocity scale is relative to the systemic velocity of nearby clump B.

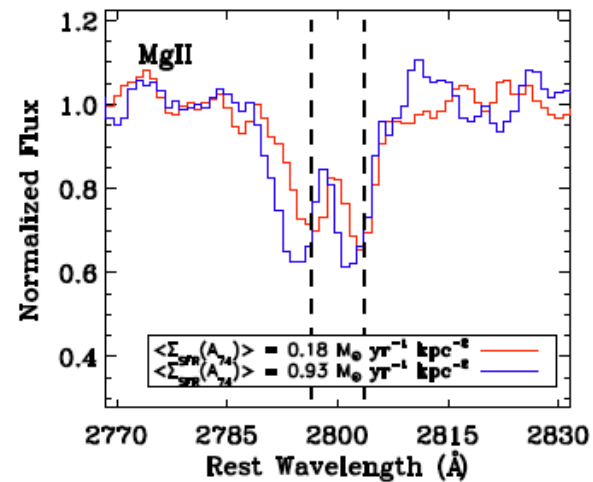
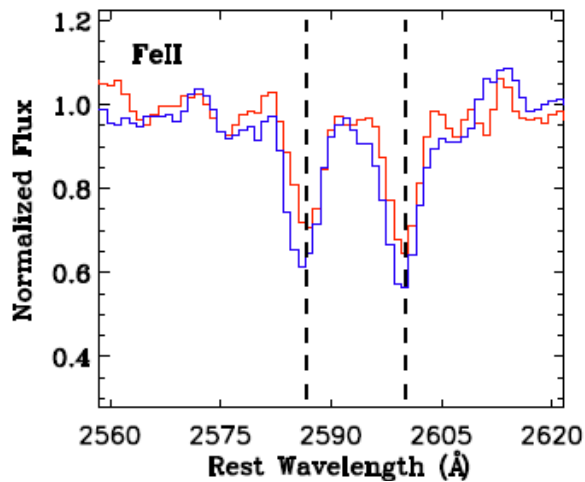
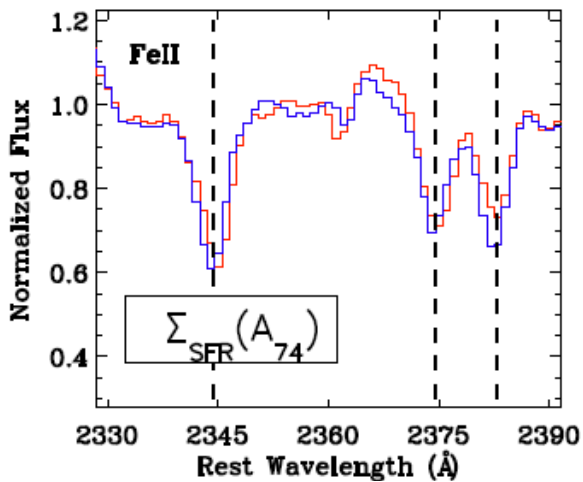


Blue wingは明るいクランプ(SFR大)でより顕著
 → アウトフロー成分が強い

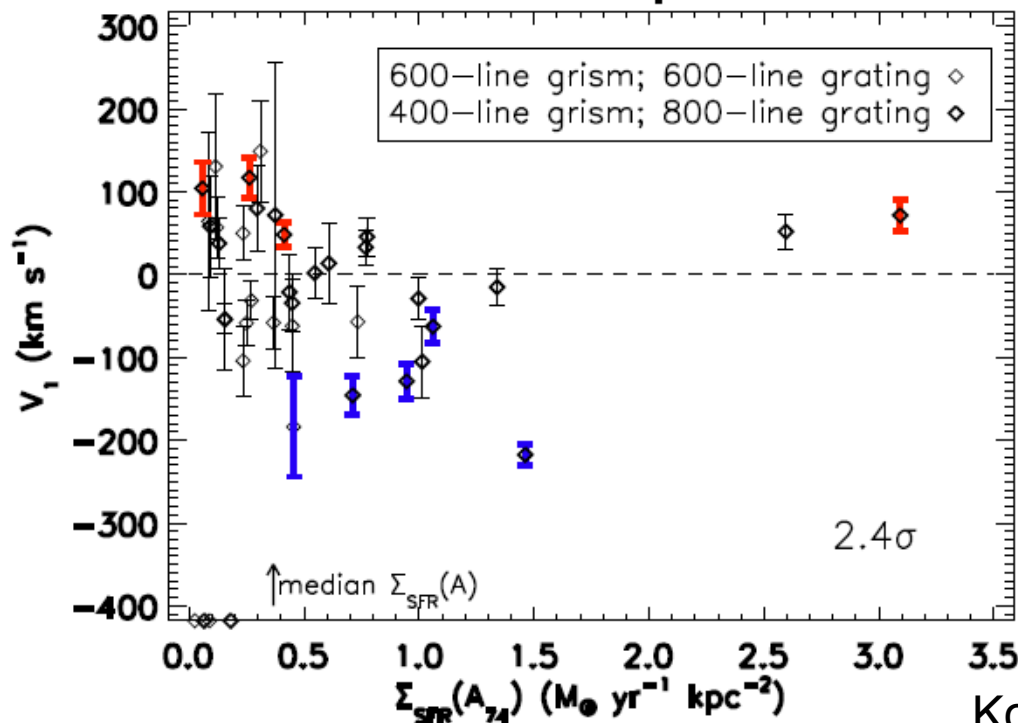


星形成活動と速度分散とはあまり相関がない
 → 大きな速度分散はフィードバックのせいではない？

吸収線で見られるアウトフロー現象(光源の手前に吸収体のガスがある場合)



EGS Sample



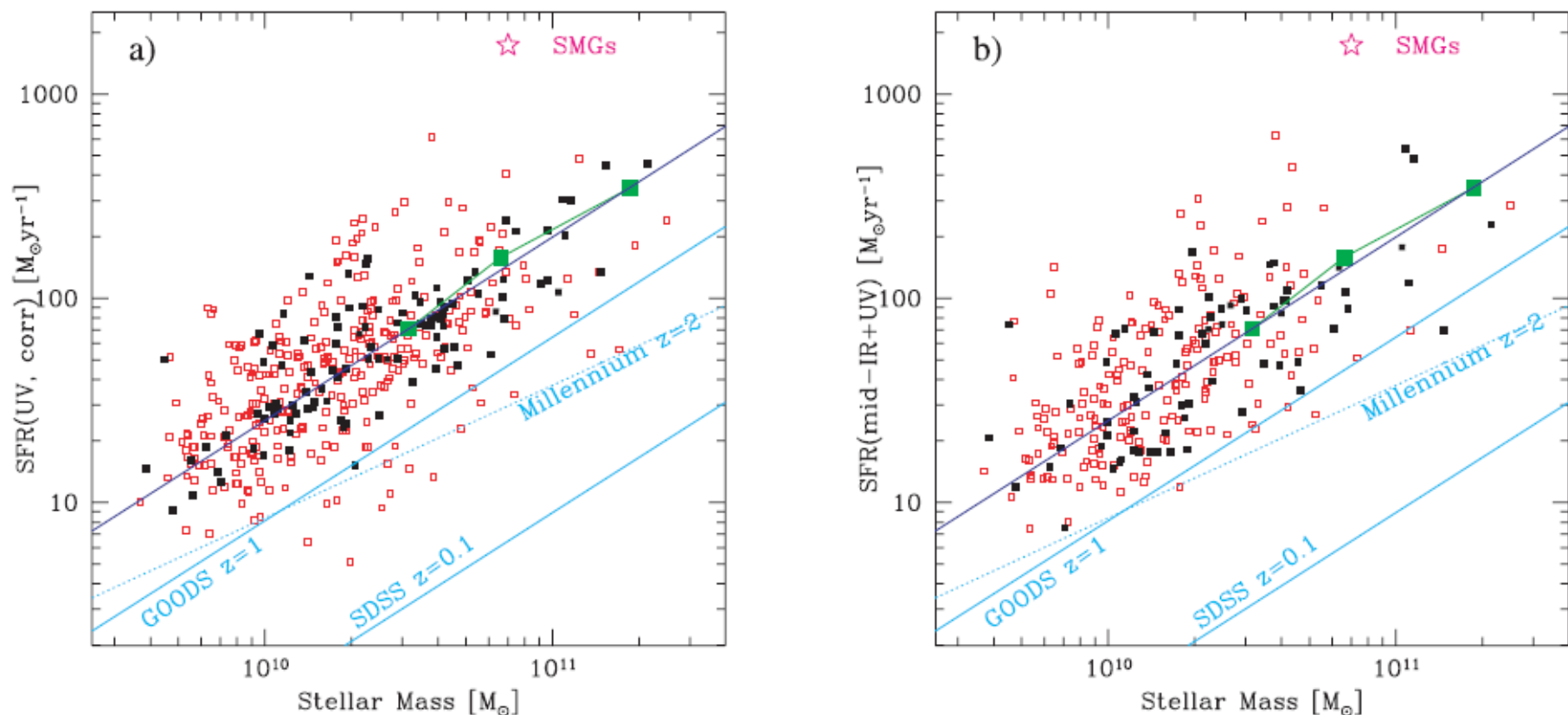
High- $\Sigma(\text{SFR})$

Low- $\Sigma(\text{SFR})$

$z \sim 1$ の明るく青い銀河
を72個Keck/LRISで分光

アウトフロー速度は
 ΣSFR と関係がある?

星形成銀河の主系列 (Main Sequence) at $z \sim 2$



Stellar mass-SFR correlation for $z = 2$ star-forming galaxies in GOODS. Points are taken from the deeper GOODS-S field to $K = 22$. We excluded galaxies: passive/quiescent galaxies are excluded from this analysis. (a) SFRs derived from UV, corrected for dust extinction. (b) The 2 explicitly exclude all mid-IR excess galaxies. The large green squares are the result of the average SFR-mass relation in GOODS-N determined from < 20.5 galaxies in 3 mass bins. The blue line is $\text{SFR} = 200 M_{11}^{0.9} (M_{\odot} \text{yr}^{-1})$, where M_{11} is the stellar mass in units of $10^{11} M_{\odot}$. The cyan solid lines are the best-fit correlations, taken from Elbaz et al. (2007), that have a similar slope of 0.9. The cyan dashed line is a prediction for $z = 2$ from the Millennium II mock light cones of Kitzbichler & White (2007). The magenta star near the top shows the location of typical SMGs in this diagram.

星形成銀河の2つの系列: “disk” mode + “starburst” mode

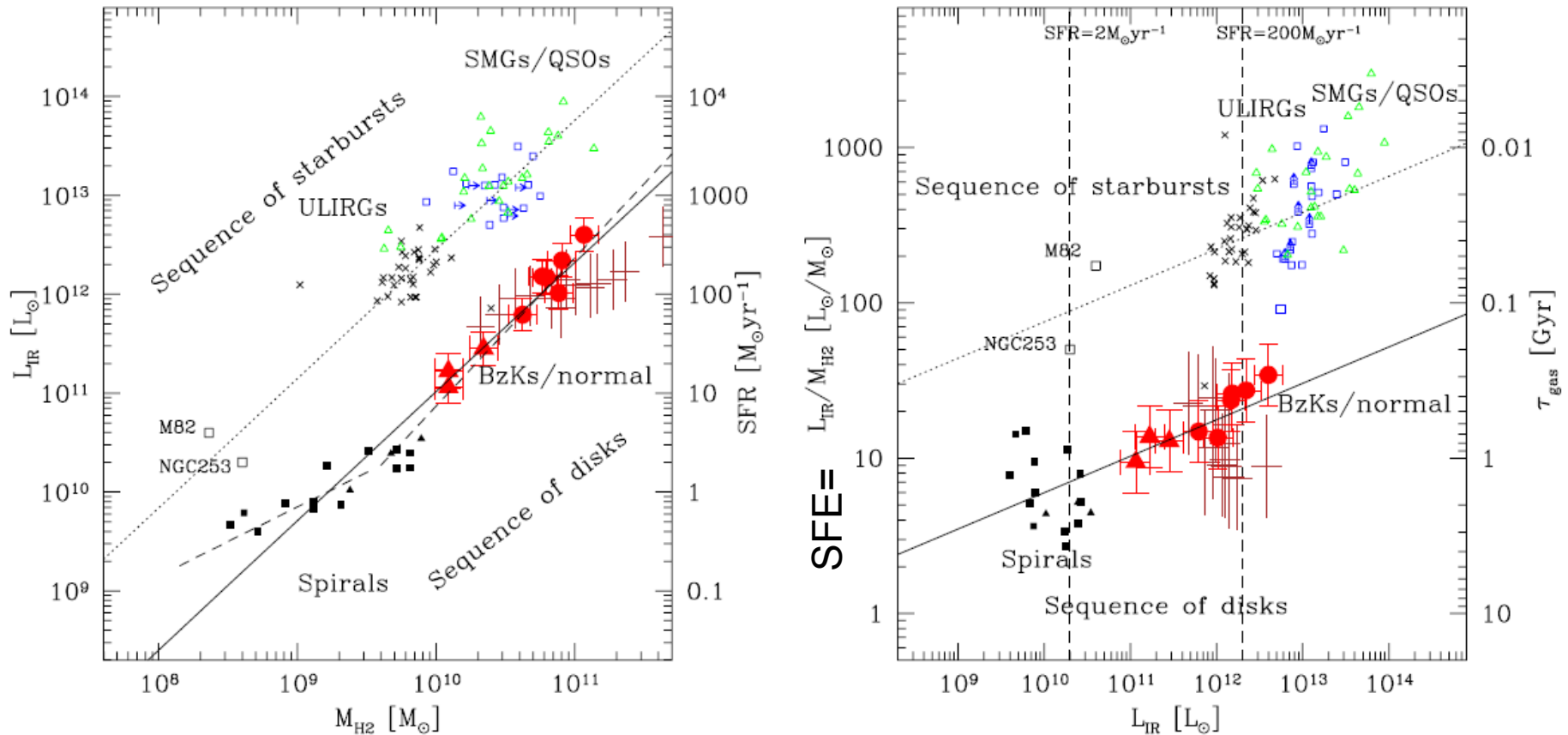
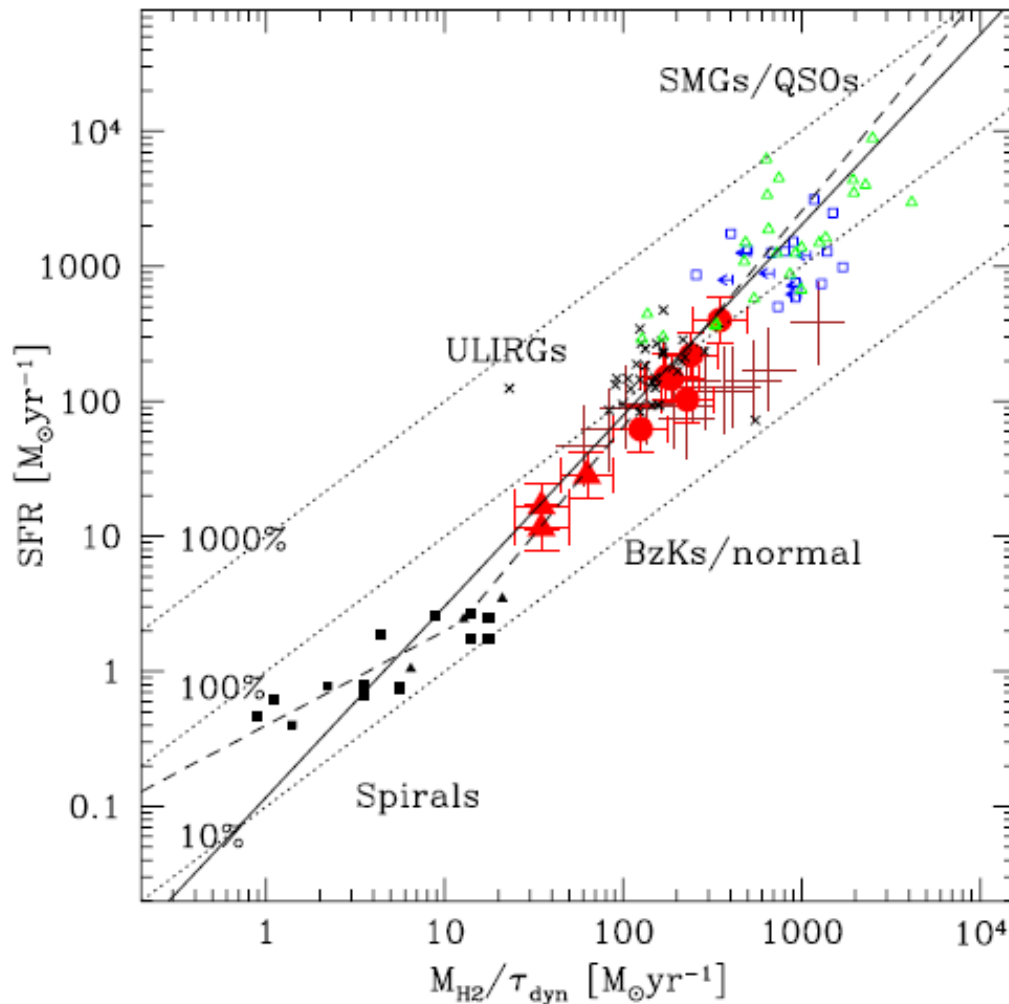


Figure 1. Comparison of molecular gas masses and total IR bolometric luminosities: BzK galaxies (red filled circles; D10), $z \sim 0.5$ disk galaxies (red filled triangles; F. Salmi et al. 2010, in preparation), $z = 1\text{--}2.3$ normal galaxies (Tacconi et al. 2010; brown crosses), SMGs (blue empty squares; Greve et al. 2005; Frayer et al. 2008; Daddi et al. 2009a, 2009b), QSOs (green triangles; see Riechers et al. 2006), local ULIRGs (black crosses; Solomon et al. 1997), and local spirals (black filled squares, Leroy et al. 2009; black filled triangles, Wilson et al. 2009). The two nearby starbursts M82 and the nucleus of NGC 253 are also shown (data from Weiß et al. 2001; Houghton et al. 1997; Kaneda et al. 2009). The solid line (Equation (1), slope of 1.31 in the left panel) is a fit to local spirals and BzK galaxies and the dotted line is the same relation shifted in normalization by 1.1 dex. The dashed line in the left panel is a possible double power-law fit to spirals and BzK galaxies. For guidance, two vertical lines indicate $\text{SFR} = 2$ and $200 M_{\odot} \text{yr}^{-1}$ in the right panel.

バーストモードは、SFEが高い？ IMFがフラット？ $\alpha(\text{CO})$ が違う？ Daddi et al. (2010)

力学的タイムスケールを考慮すれば、単一関係になる。



$M(\text{H}_2) / \tau$ (dyn) (global rotation)

バーストモードの銀河の分子ガスは密度が高く、 τ (dyn)が短く、星形成効率が低い。

(τ はIMFに依らないので、先のスプリットはIMFの違いではない)

*ただしこのタイムスケールは銀河全体の値(回転速度)であり、ローカルな分子雲のタイムスケールではない。むしろ相関があるのは驚き？

MS上の位置と銀河の性質

Wuyts et al. (2011)

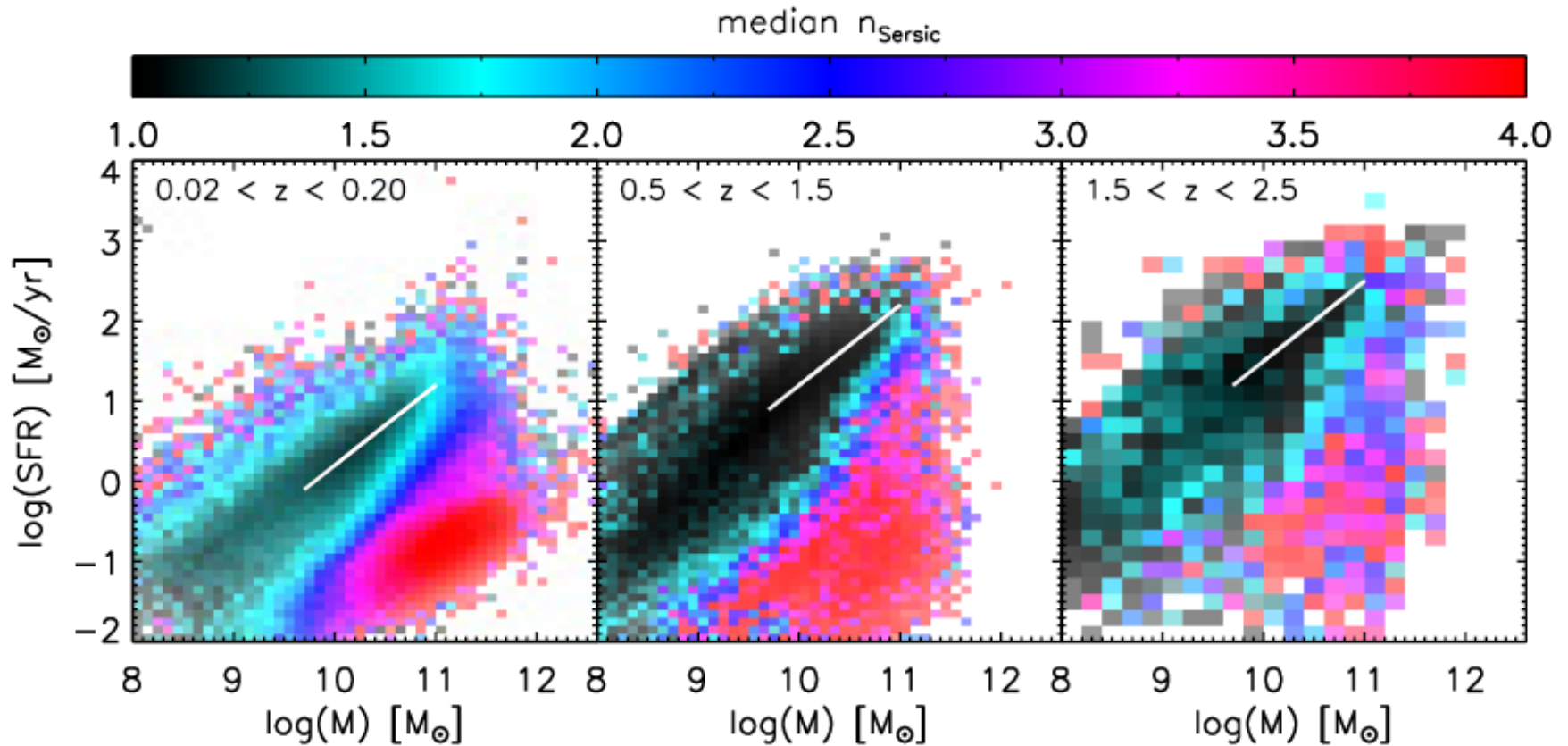
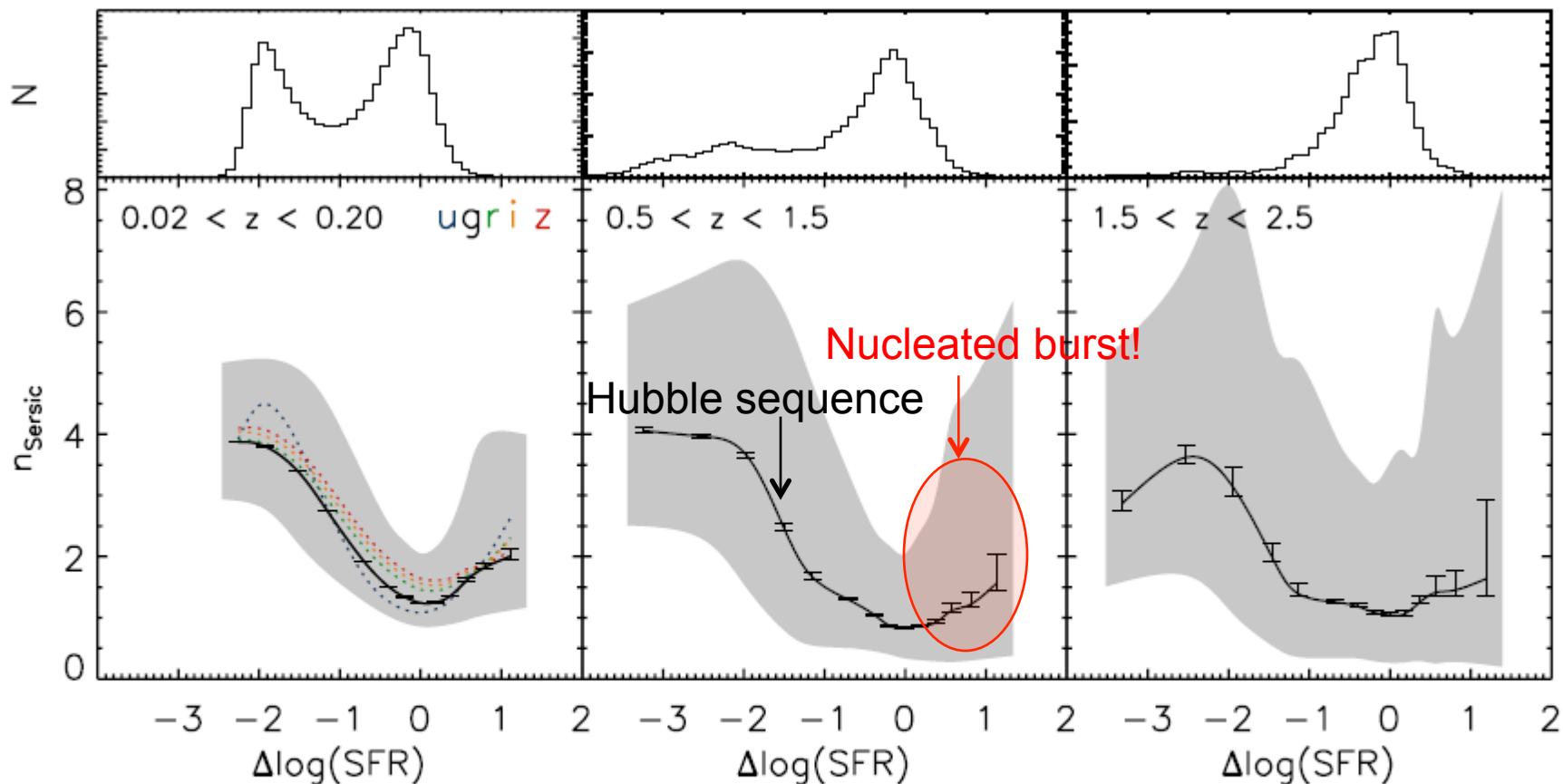


Table 1
Overview Deep Lookback Surveys

Field	Area (deg ²)	Filter _{morph}	Image Depth ^a (AB mag, 5 σ)	Sample Depth ^b (AB mag)	$N_{0.5 < z < 1.5}$ ^c	$N_{1.5 < z < 2.5}$ ^c
COSMOS	1.480	I_{814}	27.2	25.0	106080	21430
UDS	0.056	H_{160}	26.7	26.7	10443	6796
GOODS-S	0.041	H_{160}	27.0	27.0	7008	3973
GOODS-N	0.042	z_{850}	27.6	26.8	8797	3450

MS銀河はexponential disk銀河で、MSから外れるほど中心集中度が高い

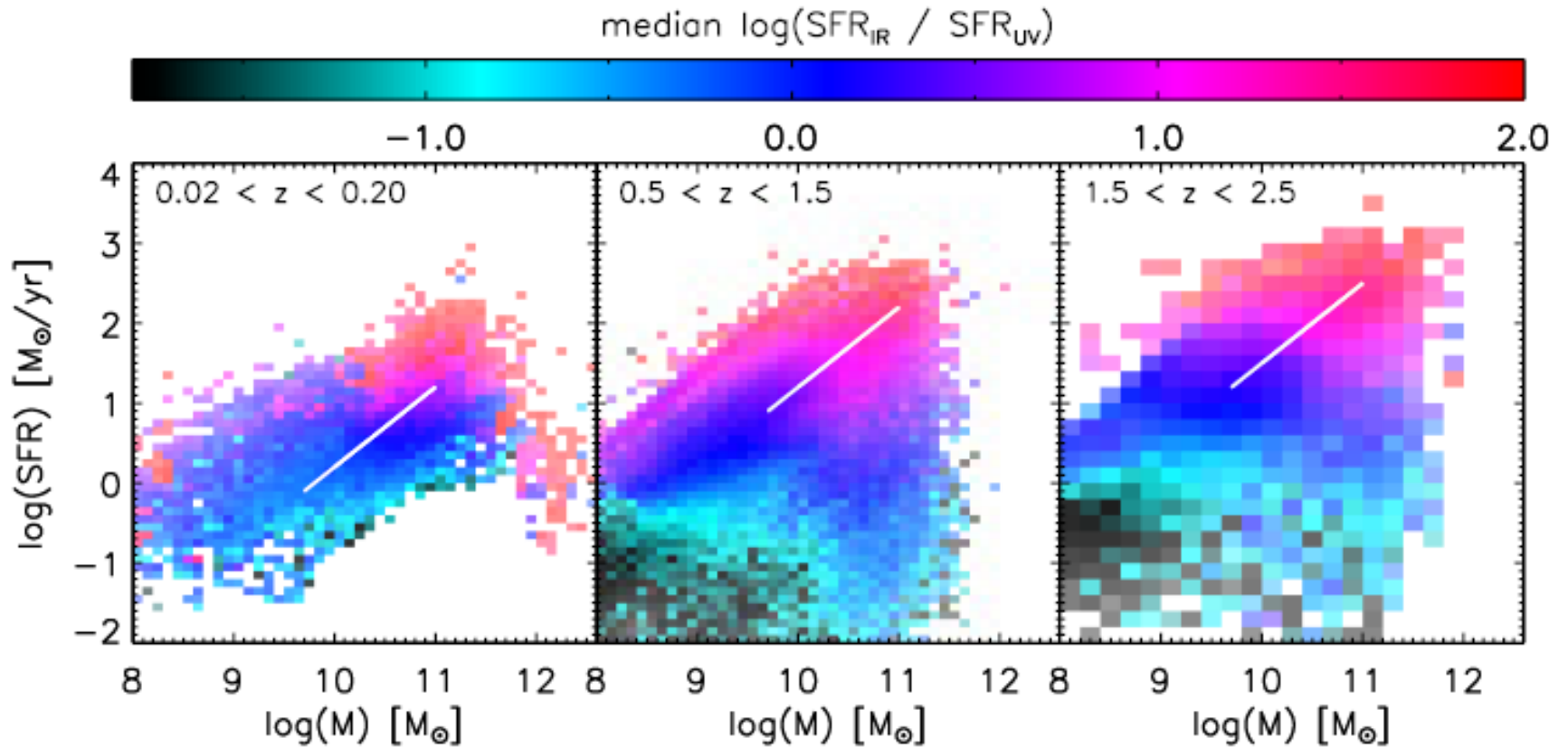
バースト銀河は、銀河中心で星形成が誘発されている！



panels: SFR histograms relative to the “structural main sequence” for galaxies in the mass range $5 \times 10^9 M_{\odot} < M < 10^{11} M_{\odot}$. Bottom row: profiles of deviation from the MS, measured along the SFR axis, for the same $10^{9.7} - 10^{11} M_{\odot}$ mass slice. The black curve and error bars show the median profile and respective errors in the median. The gray polygon marks the central 68th percentile of the distribution. Colored dots illustrate how the $z \sim 0.1$ relation changes when adopting structural measurements performed at shorter/longer wavelengths than the MS, a correlation between profile shape and star-forming activity is present and looks similar at all epochs. The relation is not monotonic at the high-SFR end.

スターバースト銀河は $\text{SFR}(\text{IR}) / \text{SFR}(\text{UV})$ が高い傾向

星形成バースト領域(銀河中心付近)がコンパクトでダスト吸収が強い。



銀河合体中に高まる、星形成と中心核の活動性

合体によって回転運動が乱され、角運動量を失ったガスが大量に銀河中心に落ち込み、爆発的な星形成を引き起こす。同時に、BH直近の降着円盤にもガスが降り積もり、中心核の活動性が高まる。時として、高温高速のジェットが円盤に垂直方向に吹き出す。また、両者が持っていたブラックホールは、いずれ合体して一つの巨大ブラックホールになる。

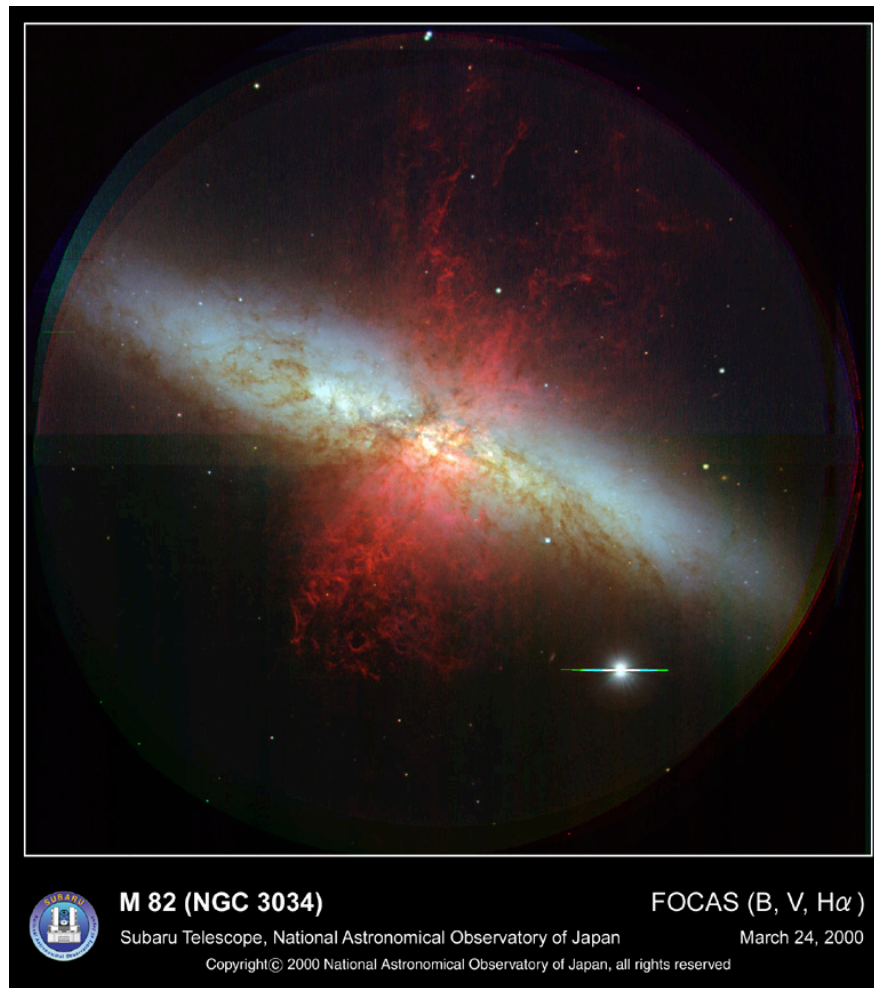


想像図

銀河とBHの
『共進化』

星形成バーストやAGNジェットによる銀河のアウトフロー

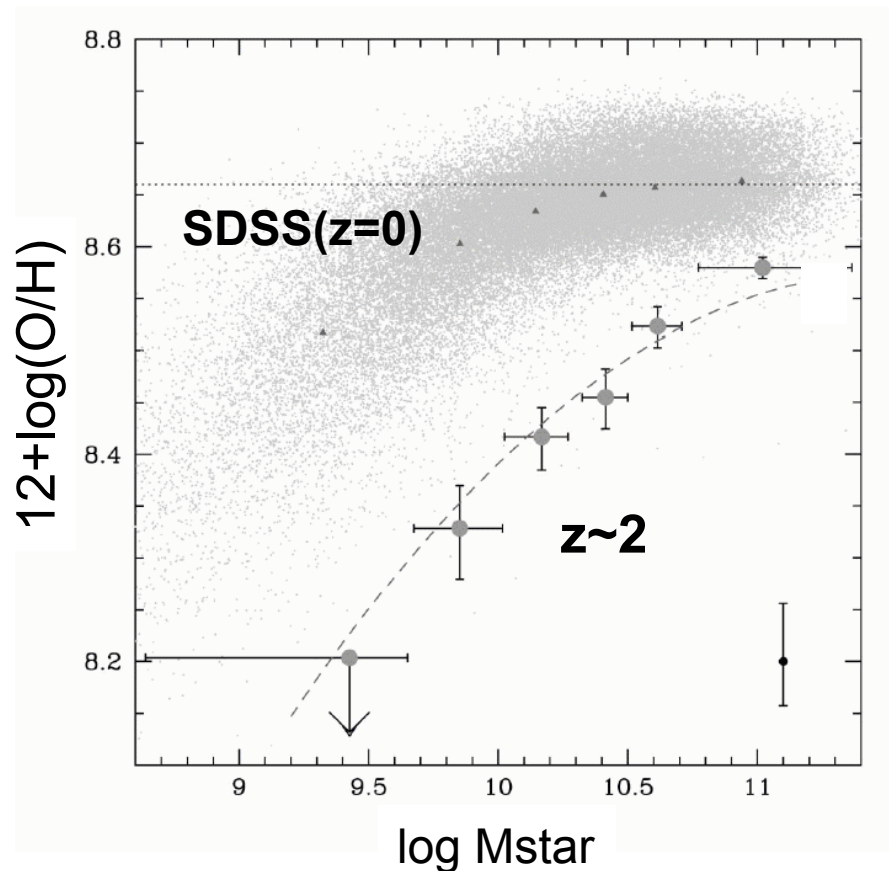
銀河中心領域での星形成バーストに伴う超新星爆発や、BH周辺のAGNから出るジェットによって、銀河のガスが外に噴き出す、アウトフロー現象がみられる。



Herschel-PACSでみた合体銀河(ULIRG)
から噴き出す分子ガスのアウトフロー
Sturm et al. (2011)

すばるが見た、星形成バースト銀河からのアウトフロー

星形成銀河のMass-Metallicity関係



Erb et al. (2006)

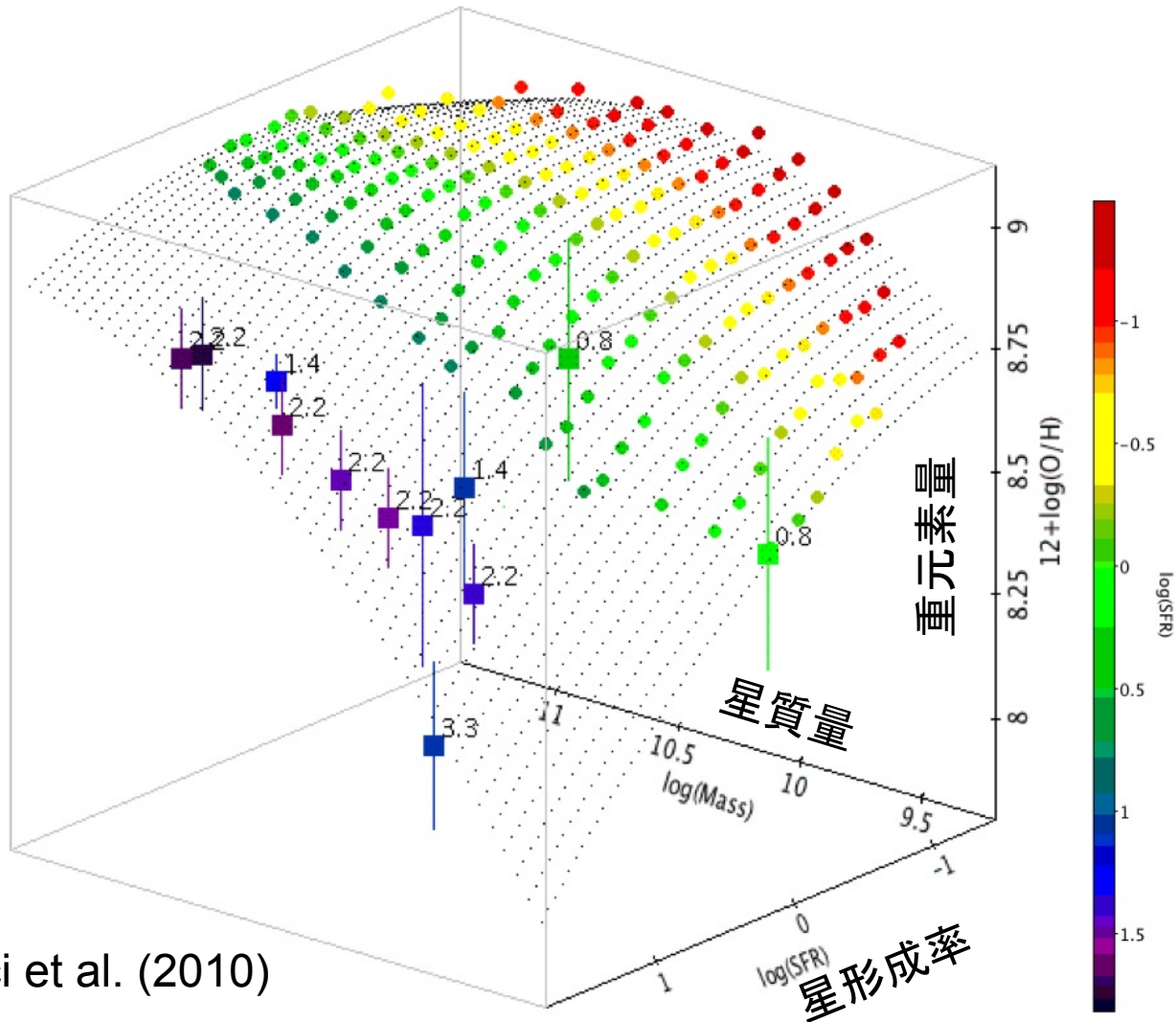
$$\log R_{23} \equiv \frac{I_{[\text{O II}]\lambda 3727} + I_{[\text{O III}]\lambda 4959} + I_{[\text{O III}]\lambda 5007}}{I_{\text{H}\beta}}$$

or $[\text{NII}] / \text{H}\alpha$ (N2index),
or $[\text{OIII}] / [\text{NII}]$ (O3N2 index)

近赤外分光によって、輝線強度比から、HII領域の重元素量を推定できる。

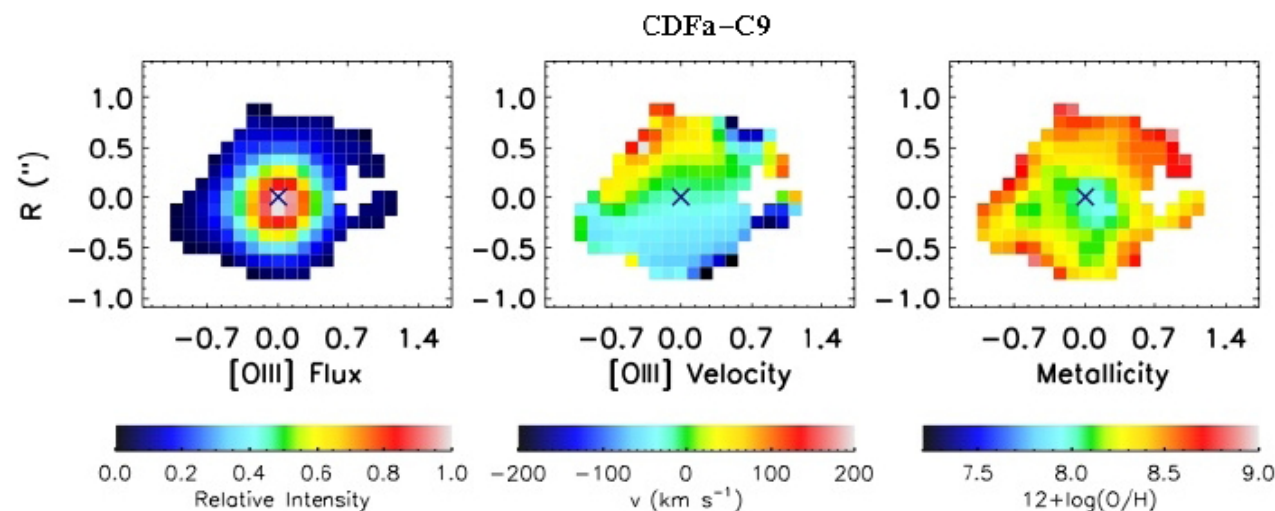
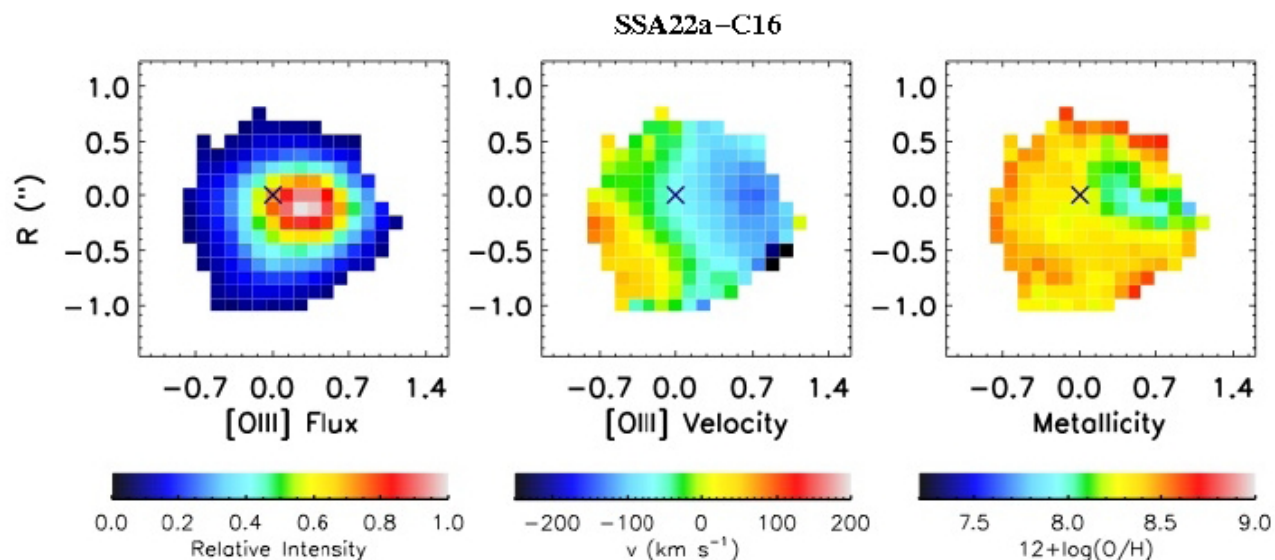
Fundamental Metallicity Relation

銀河の重元素量は、星質量だけでなく (mass-metallicity relation)、星形成率にも依存する。星形成率が高いものは、ガスが多く進化段階が若いいため、化学進化があまり進んでいない。



Mannucci et al. (2010)

銀河内部の星形成マップや化学進化から、星形成の伝搬 (中心バースト?inside-out?)やガスの流入(cold-stream?)を探る



2D map of line ratios
(metallicity indicators)
such as
 $[OIII]/H\beta$ and $[NII]/H\alpha$

VLT/SINFONI
Cresci et al. (2010)

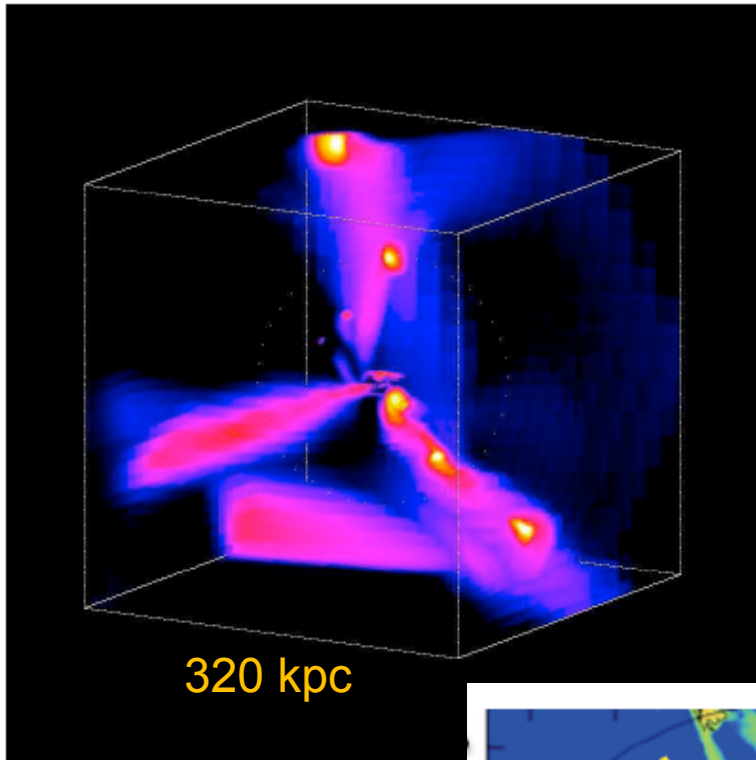
see also
Jones et al (2010)
With Keck2/OSIRIS

Lower metallicity at the center → Dilution by (almost) metal-free cold streams?

フィラメント構造に沿ったコールド・ストリーム (ガスのインフロー)

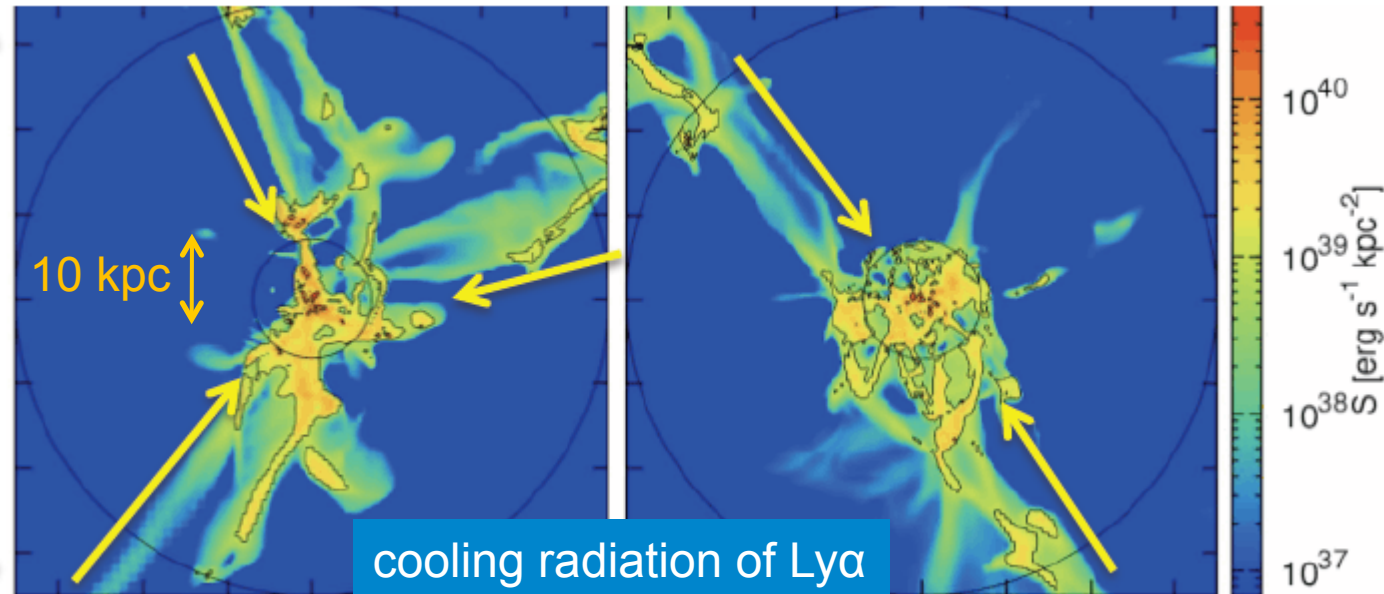
初期の宇宙で、大質量銀河を短いタイムスケール
で形成するために、効率的にガスを供給できる。

いずれは、超新星やAGNのフィードバック
によって、アウトフローフェーズになる？
インフローとアウトフローの共存(方向に依存)？



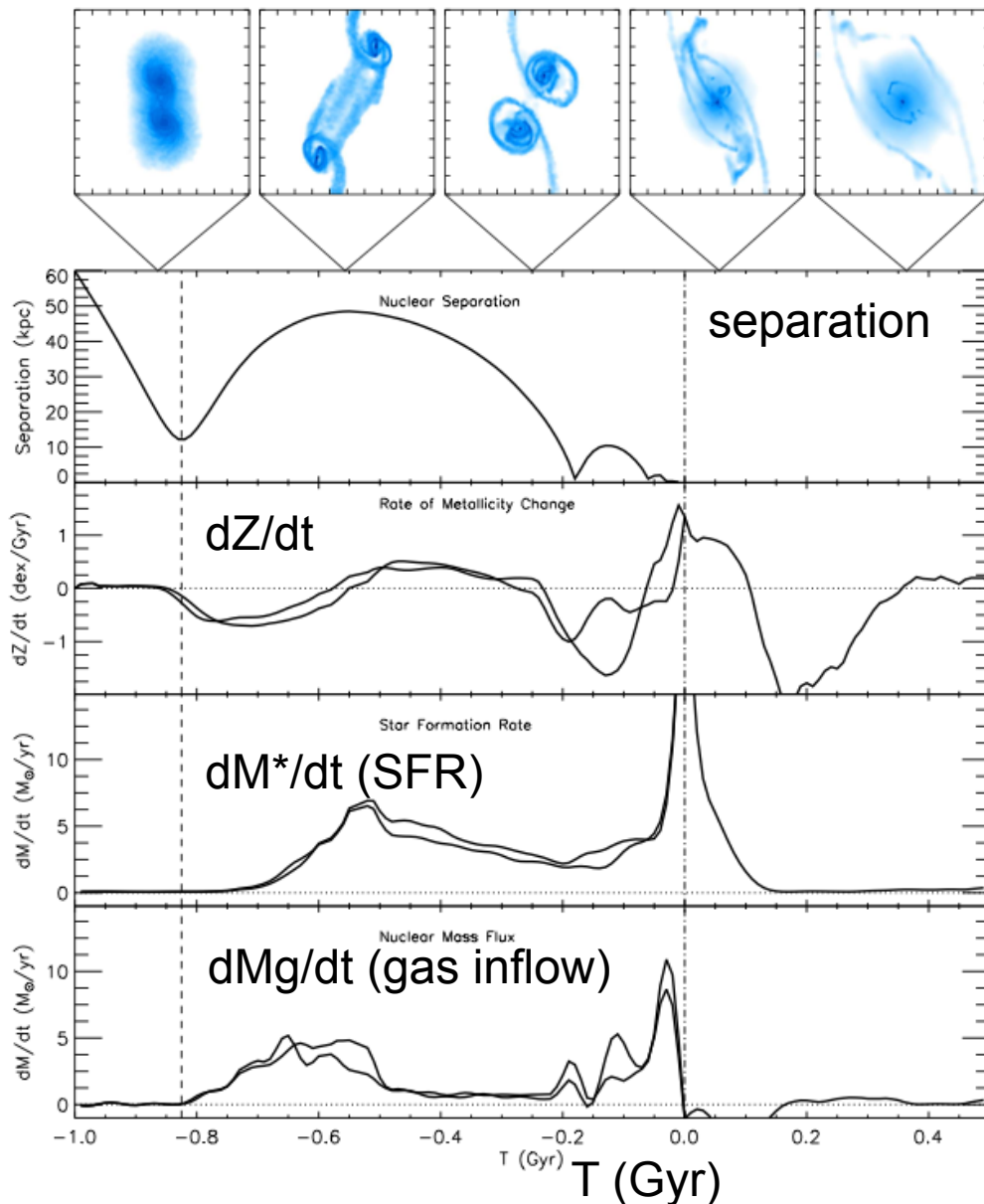
Dekel et al.
(2009, Nature)

Goerdt et al.
(2010)



衝突合体銀河中の星形成と化学進化

N-body/SPH (GADGET-2) Simulation
Torrey et al. (2011)



銀河衝突で角運動量を失ったガスが中心に流入し重元素量が薄まる効果と、そこで起こる星形成バーストによって重元素量が上昇する効果とが拮抗する。

形成途上銀河を、空間および速度方向に分解せよ！ 可視～近赤外とサブミリ波の両方で

銀河間相互作用(合体)? 中心部での星形成バースト+AGN?
乱された不規則な内部運動

それとも

自発的進化? ディスク規模でのガス降着と星形成?
秩序ある回転やランダム運動

AO や HST/JWST による撮像 (合体か円盤か?)

IFU 分光 (アウトフロー? AGN? 化学進化?)

ALMA (高密度ガスの分布? 星形成モード? ガスの運動?)

銀河解剖学のまとめ

形成途上銀河を『点』ではなく『面』として捕える。

- **星形成活動の場所と推移、星形成効率の分布**
中心での星形成バーストとディスクでのノーマルな星形成
- **化学進化の進行**
化学組成勾配(組成比も)、ガスの中心への落ち込み、IMF
- **ガスの流れ**
インフロー(コールドストリーム)とアウトフロー(フィードバック)の観測
- **AGNの活動性**
星形成バーストと中心核の活動性との同期? AGNフィードバック?
- **銀河形態の確立**
合体(メジャー、マイナー)の効果は? 他の環境効果は?

まだこんなに分かっていない! 明るい将来、激しい競争!

内容

- イン트로ダクション

『銀河の性質と、時間・空間・質量』

- 銀河生態学

『環境に翻弄される銀河の形成と進化』

- 銀河解剖学

『点から面へ：銀河形成を分解する』

The End



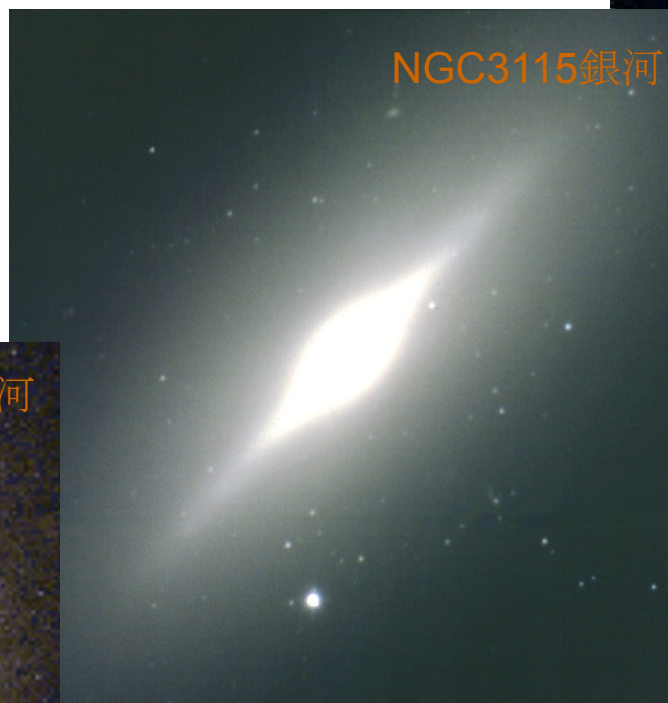
Backup Slides

現在の銀河

アンドロメダ銀河



NGC3115銀河



楕円銀河

M87銀河



渦巻銀河

レンズ状銀河

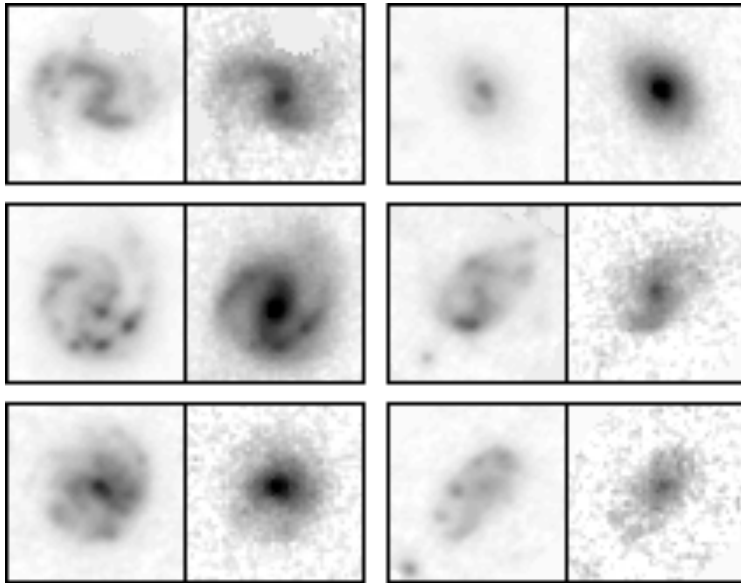
我々の住む銀河系は「渦巻銀河」の一つ。

昔の銀河

$z \sim 1$ (80億年)

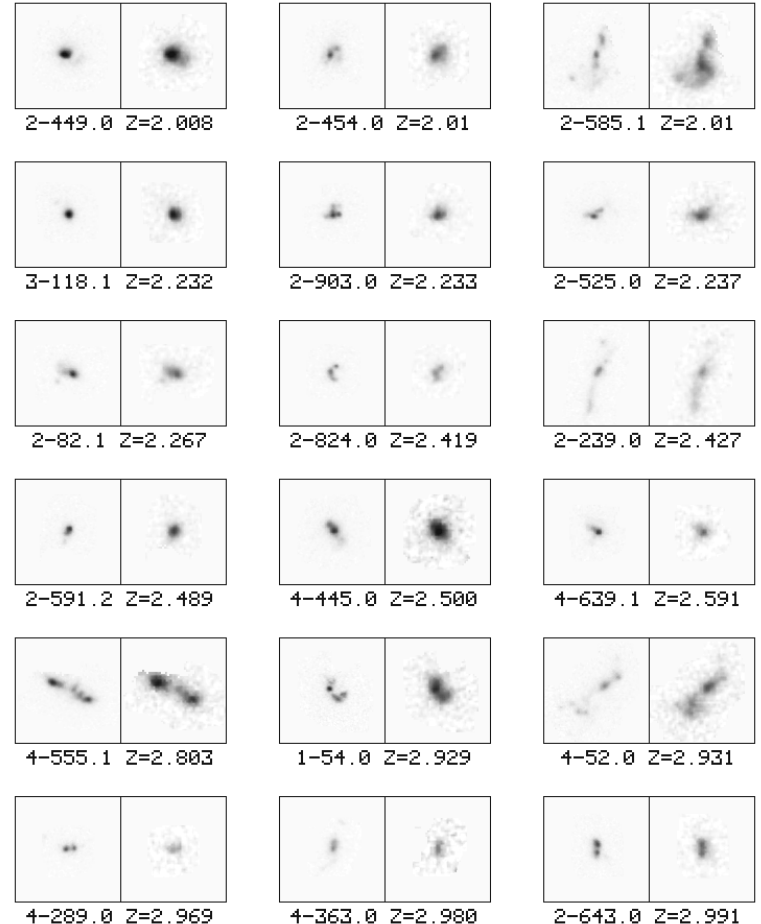
$z \sim 2-3$ (100~110億年前)

$\lambda_{\text{rest}}=3000\text{\AA}, 6500\text{\AA}$



$\lambda_{\text{rest}}=1700\text{\AA}, 4300\text{\AA}$

LBGs



マスの大きさ: 4秒角四方 (~30kpc)

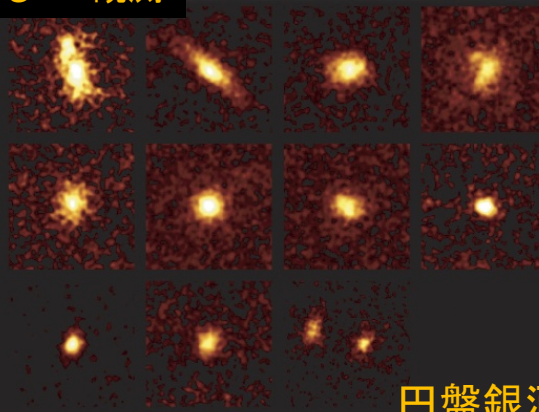
Dickinson (2000), HDF-N
ハッブル宇宙望遠鏡

銀河は小さくなっている! (まだ成長しきっていない)

銀河の形態進化

110億年前
の宇宙の銀河

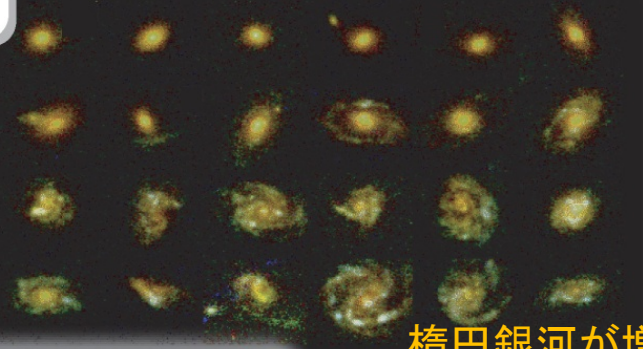
すばるAO観測



円盤銀河が多い

80億年前
の宇宙の銀河

HST画像



110億年前から80億年前の
間に銀河の衝突、合体を経て楕円
銀河の形が出来てきた。

楕円銀河が増えてくる

80億年前から現在までの間の
銀河の形の進化は穏やかだった。

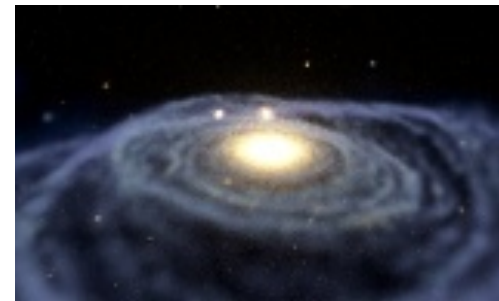
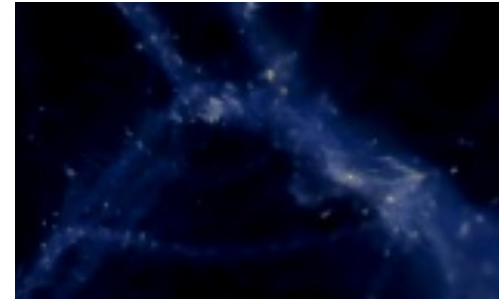
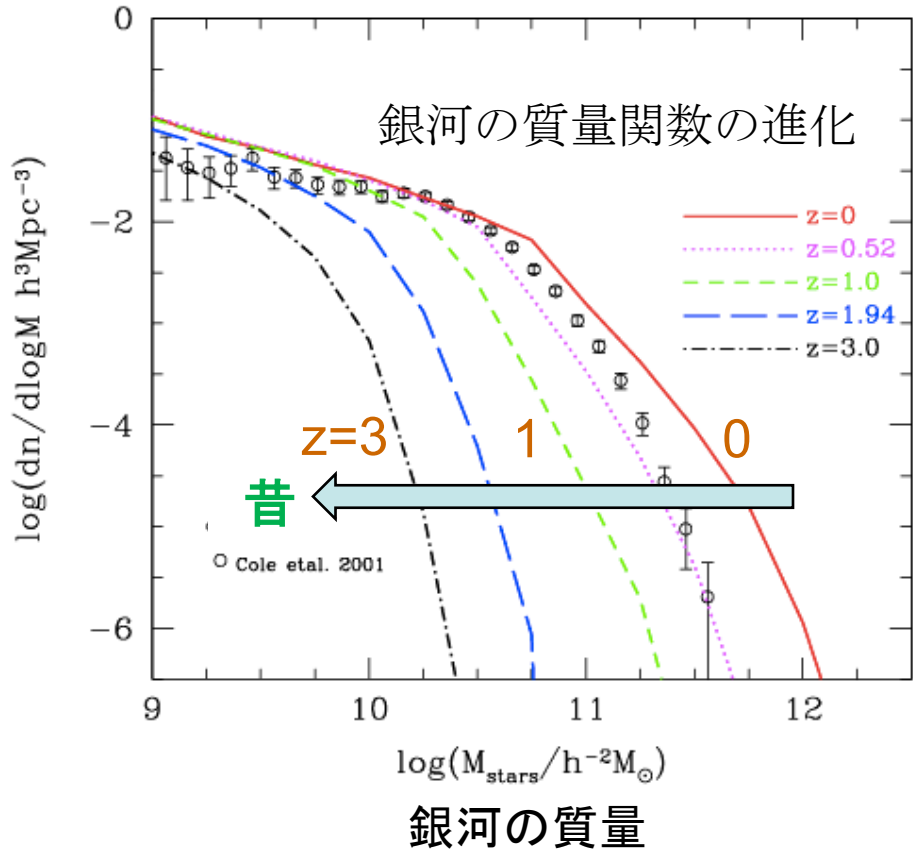
現在
の宇宙の銀河



楕円銀河と円盤銀河が混在

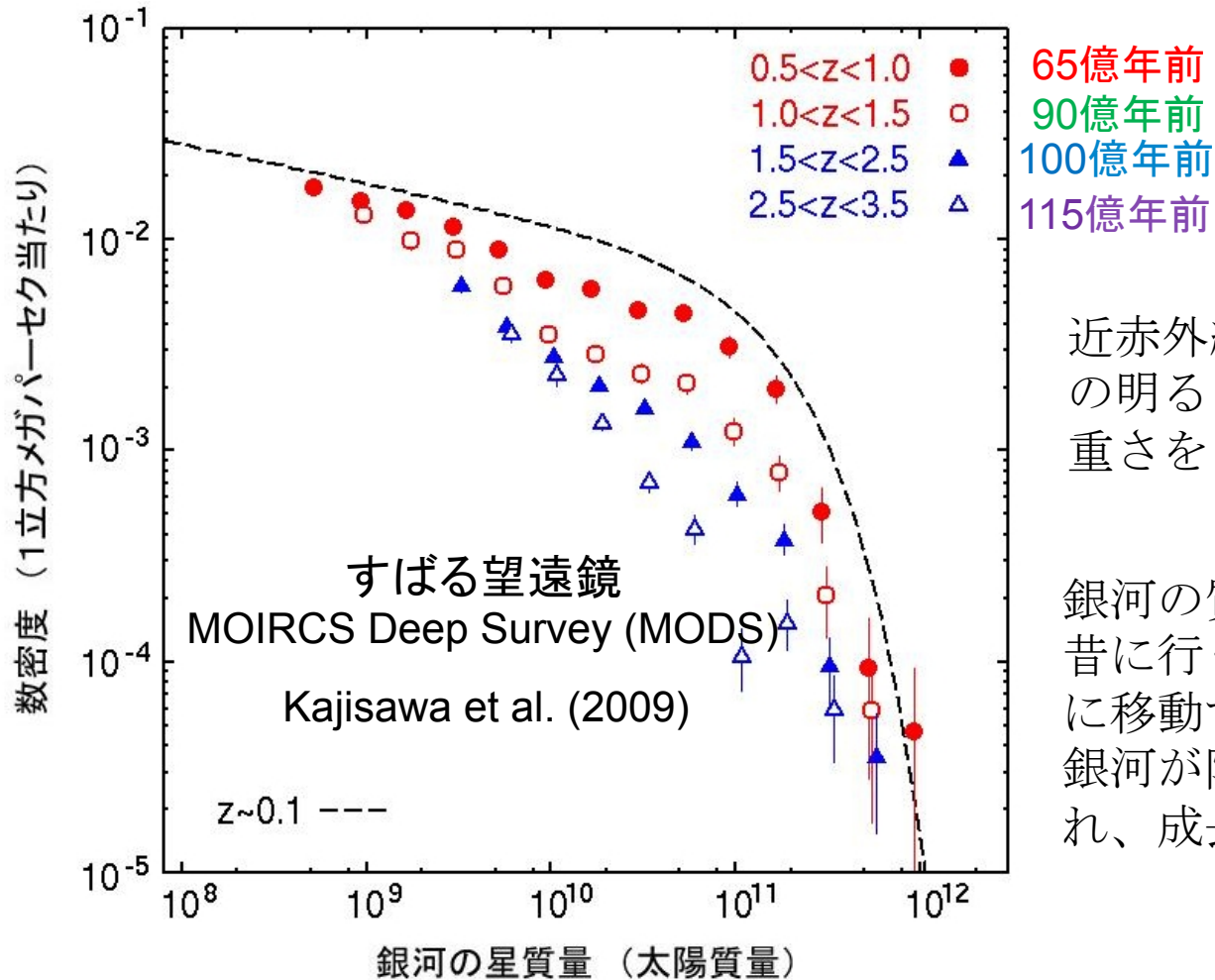
Akiyama et al. (2007)

銀河の質量成長 (理論)



階層的銀河形成モデルでは、大質量銀河の割合が昔に行くときと激減する。

銀河の星質量関数の進化

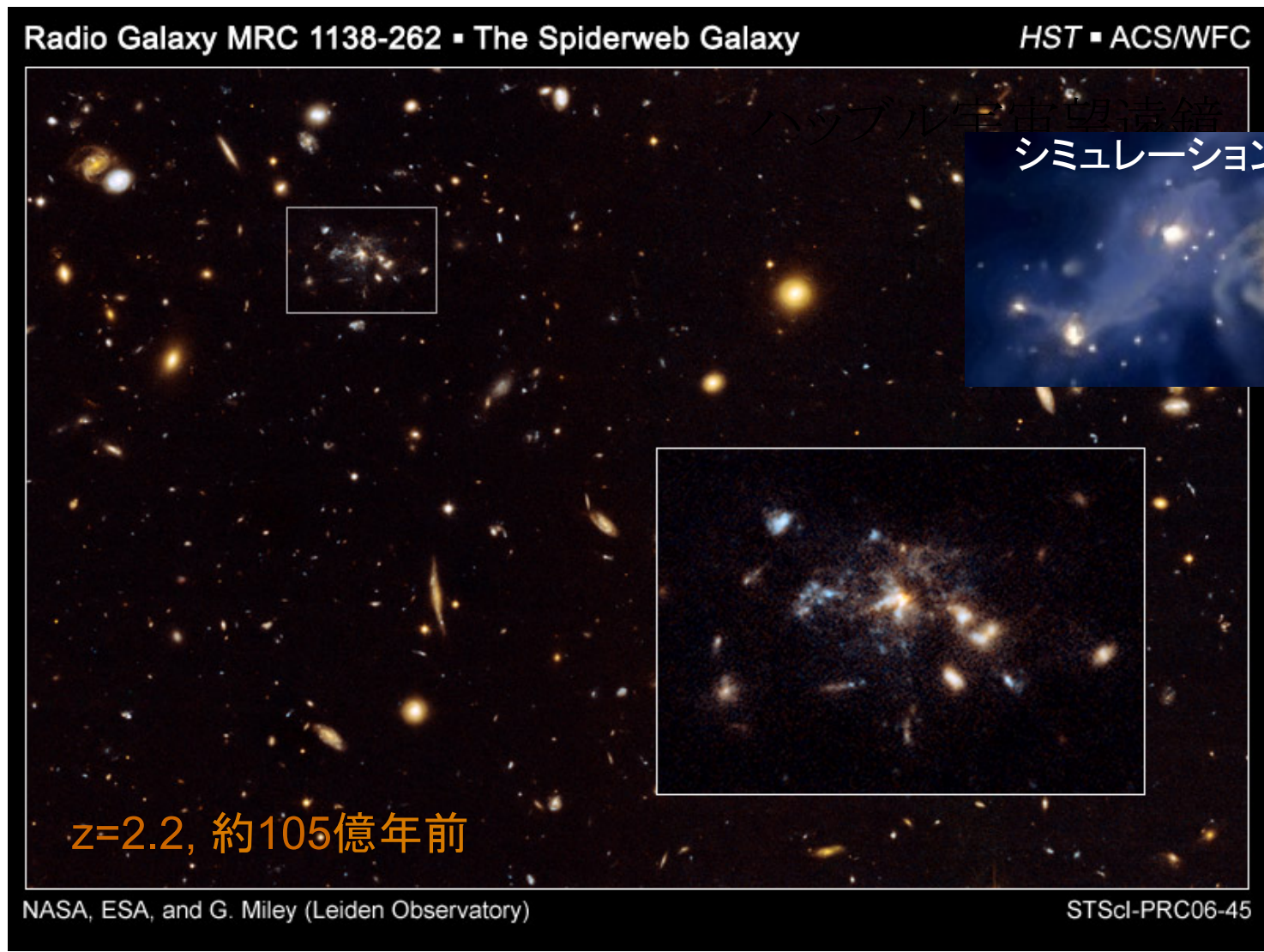


近赤外線でみた銀河の明るさは、銀河の重さをよく表す。

銀河の質量関数は、昔に行くほど軽い方に移動する。銀河が階層的に生まれ、成長した証拠。

しかし、理論的予測と量的には必ずしも合っていない。
銀河の成長が思ったよりも早い傾向？

蜘蛛の巣銀河 (銀河集積過程の現場)

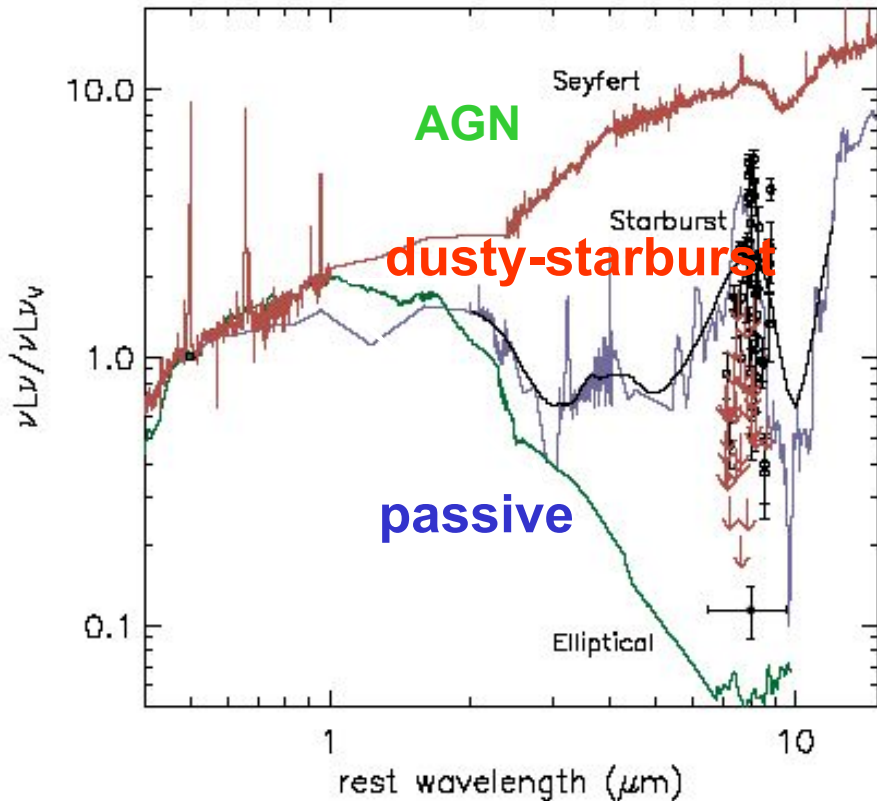


ハッブル宇宙望遠鏡

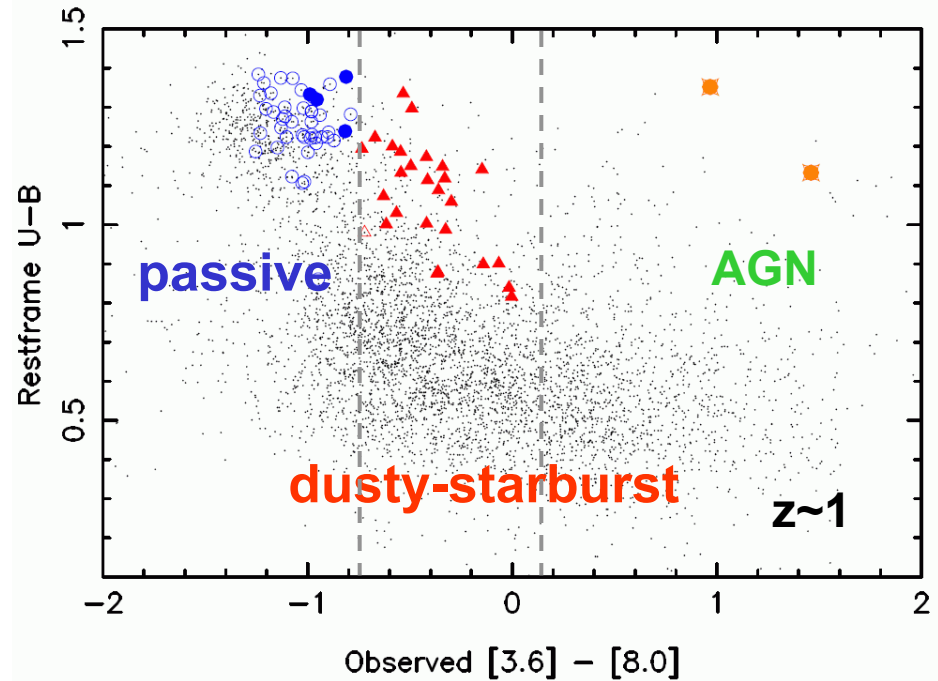
Miley et al. (2006)

AGN/Starburst/Passive separation

Webb et al. (2006)



Wilson et al. (2006)



SED slope at 1~5 μm (rest-frame) can discriminate AGN / SB / E.

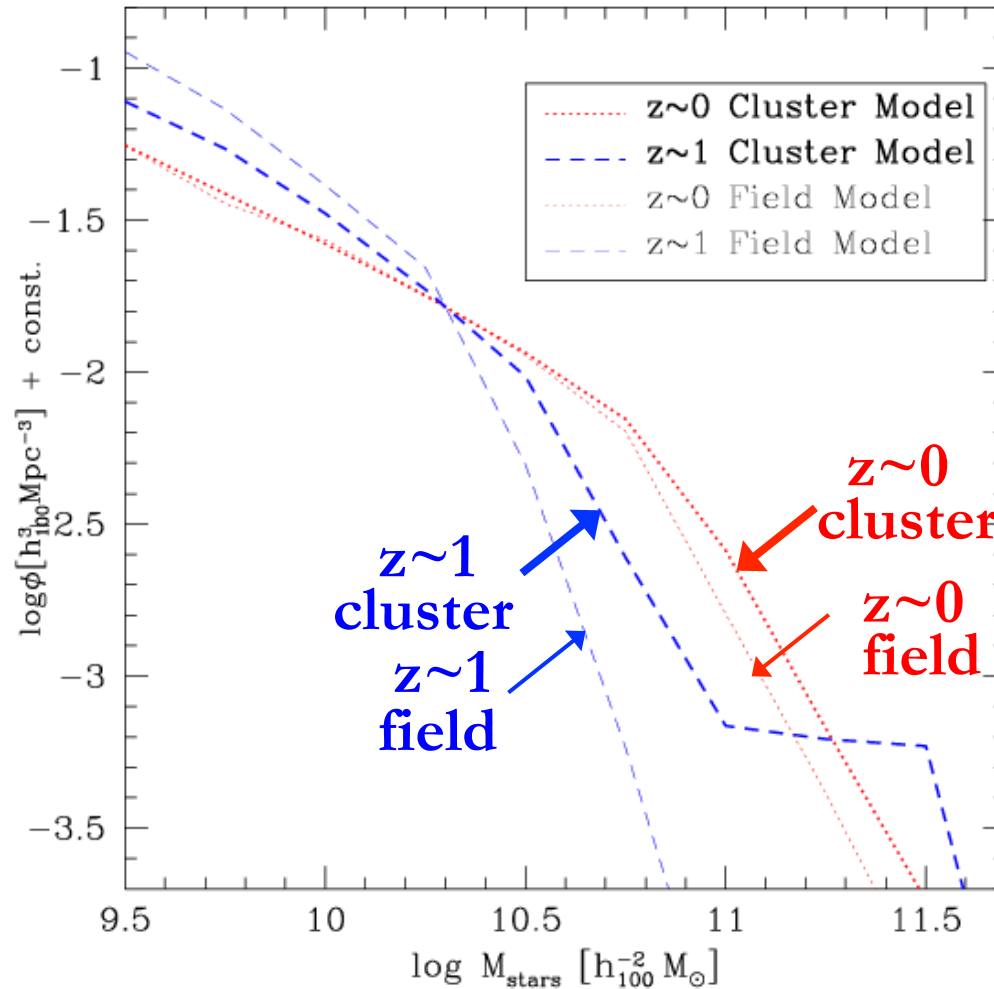
次世代地上大型望遠鏡計画：Thirty Meter Telescope (TMT)

サイトはマウナケア山頂に決定。日本は25%の寄与を目指して活動中！

口径30メートル！

星質量関数の環境依存性(モデル)

銀河団の方が銀河質量が早く成長する



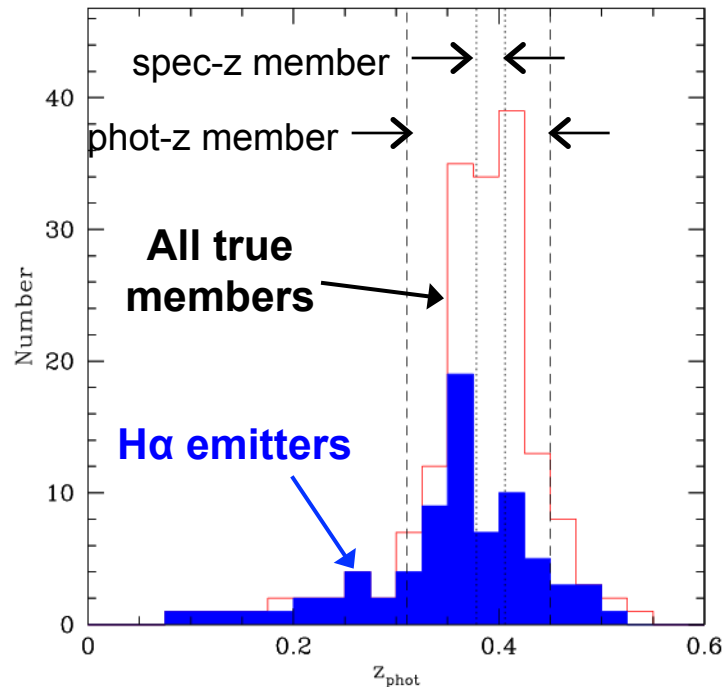
Baugh et al.

BB selection (**passive**) + NB emitters (**active**)

Advantages of NB survey:

- (1) Good indicators of SFR, especially H α (low reddening, well calibrated)
- (2) “**Unbiased**” sample (no pre-selection of targets is required).
- (3) “**Complete**” census of star forming galaxies to a certain limit in SFR.
- (4) Membership can be confirmed by the presence of emitters in NB + colours.
- (5) On top of the phot-z selected members (e.g. “**passive**” galaxies), we can pick out “**active**” galaxies which tend to be missed by phot-z selection.

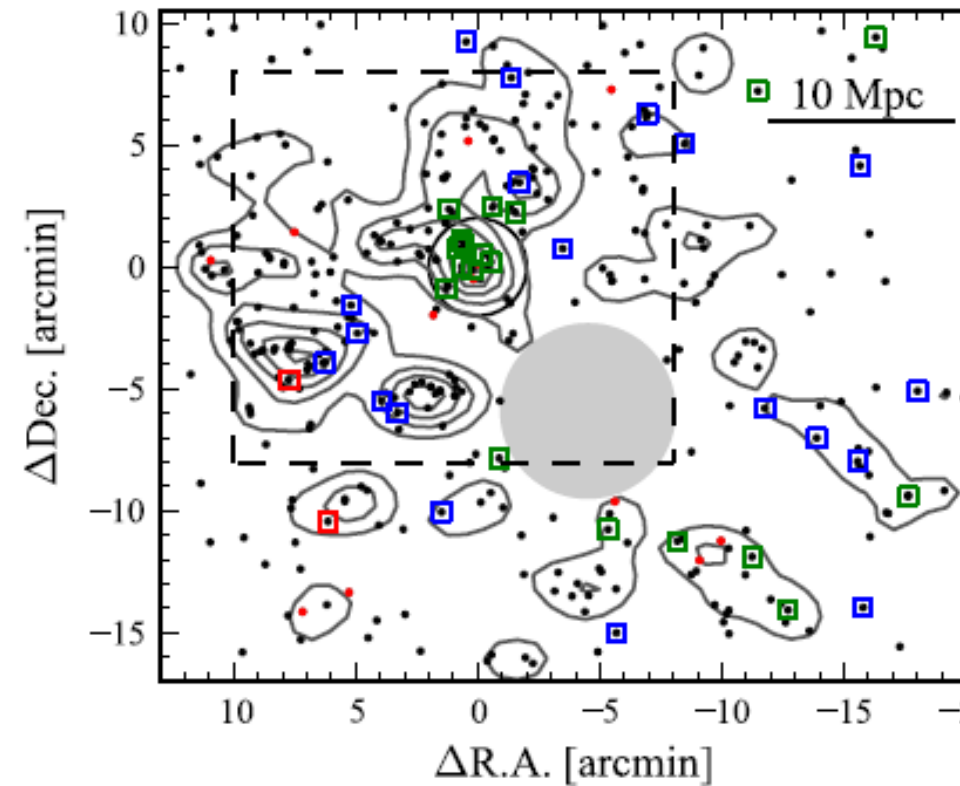
Phot-z distribution of true members



CL0024 cluster ($z=0.4$)
NB912 + Suprime-Cam
Kodama et al. (2004)

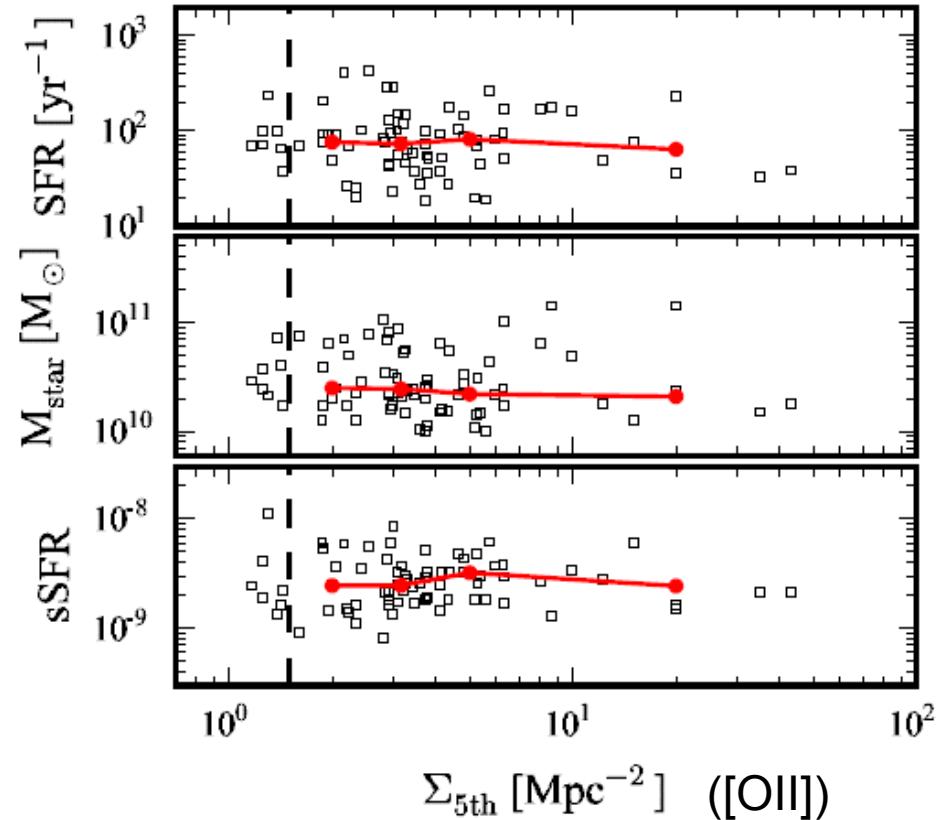
CIG J0218.3-0510 (z=1.62) in SXDF-UDS

[OII] emitters are traced by Suprime-Cam/NB973-filter



- [OII] emitters
- Red [OII] emitters
- □ □ spectroscopically confirmed members (including FMOS!)

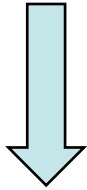
The cluster is embedded in LSS of a scale of ~ 20 Mpc.



No environmental dependence
is seen at z~1.6?

"Mahalo-Subaru"

MApping HA α and
Lines of O α with Subaru



"Gracias-ALMA"

GRAphing CO Intensity
And Submm with ALMA



CO(3 \rightarrow 2) @ z~2.5 @100GHz \rightarrow M $_{\text{gas}}$

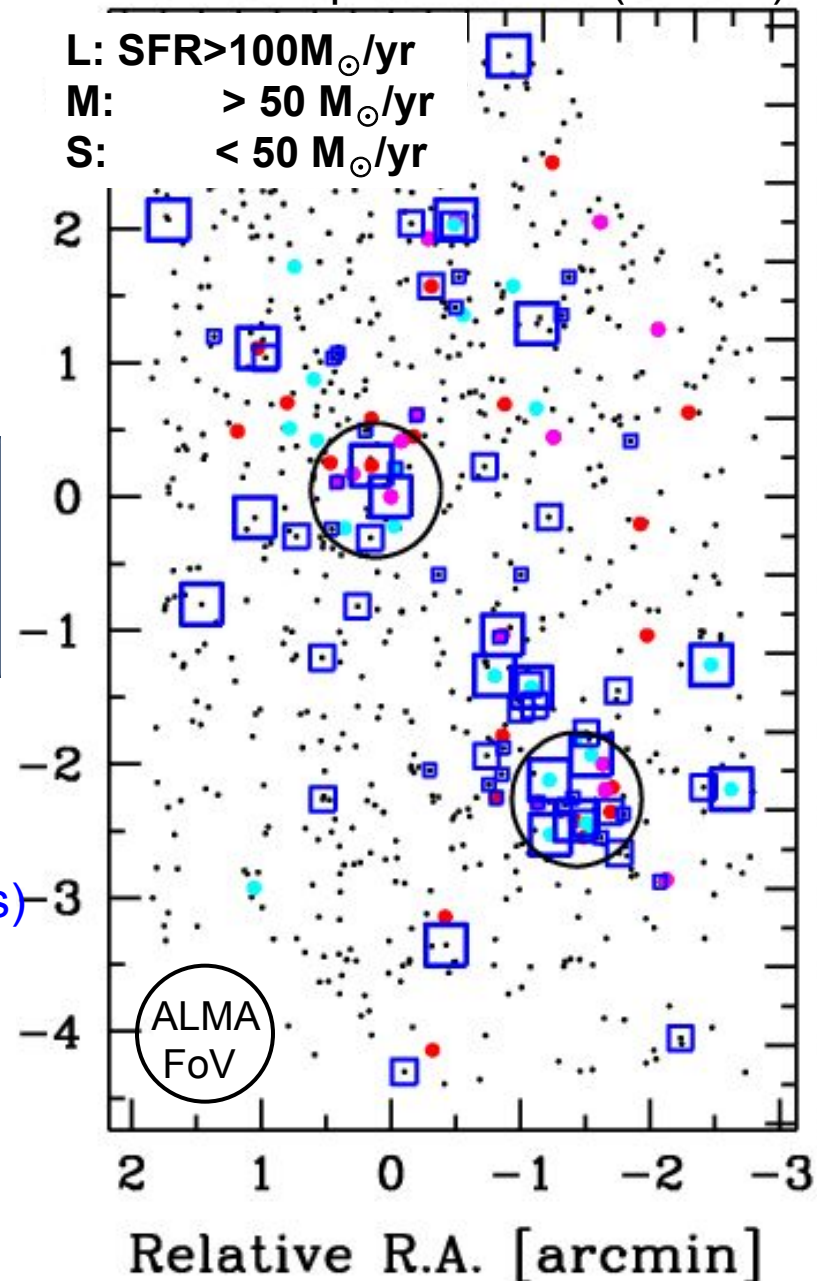
Dust conti. @450 μ m–1.1 mm \rightarrow Dusty SFR

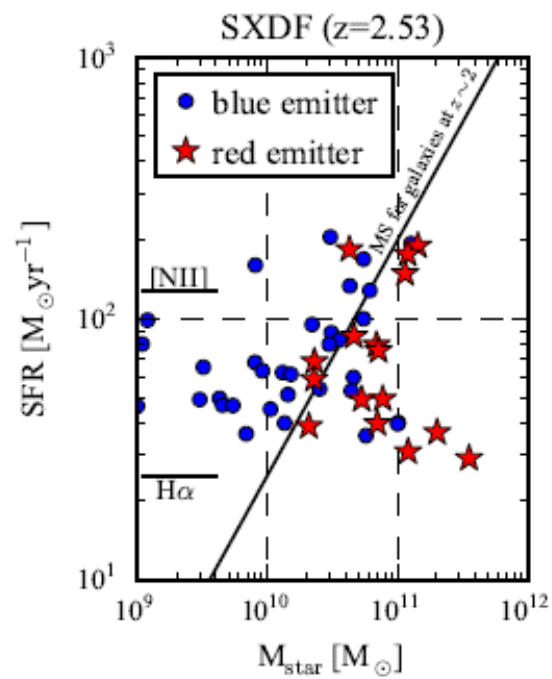
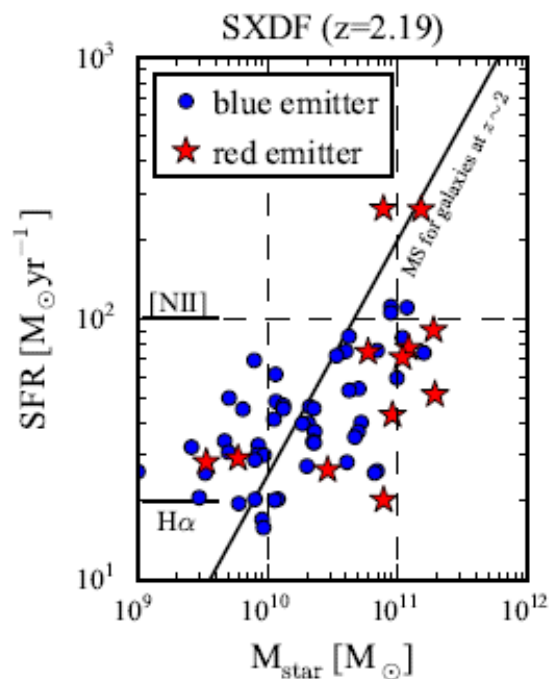
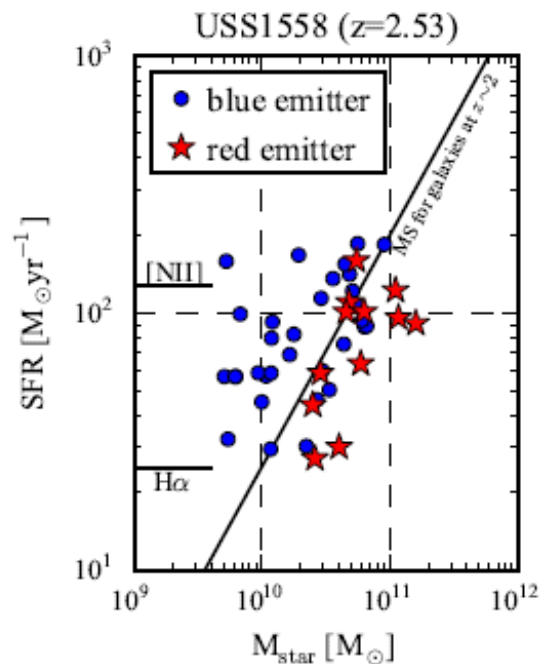
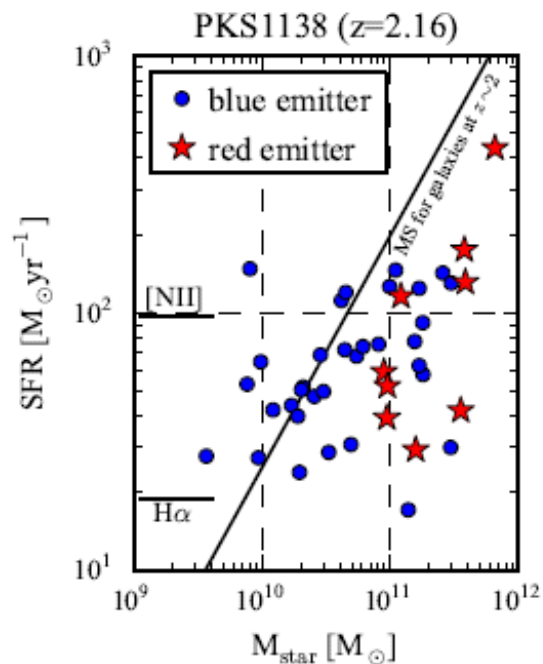
resolving spatially (<0.1"), kinematically (~50km/s)

{ SFE (SFR / M $_{\text{gas}}$)
f(gas) (M $_{\text{gas}}$ / M $_{\text{gas}}$ + M $_{\text{star}}$)
Distribution and motion of gas

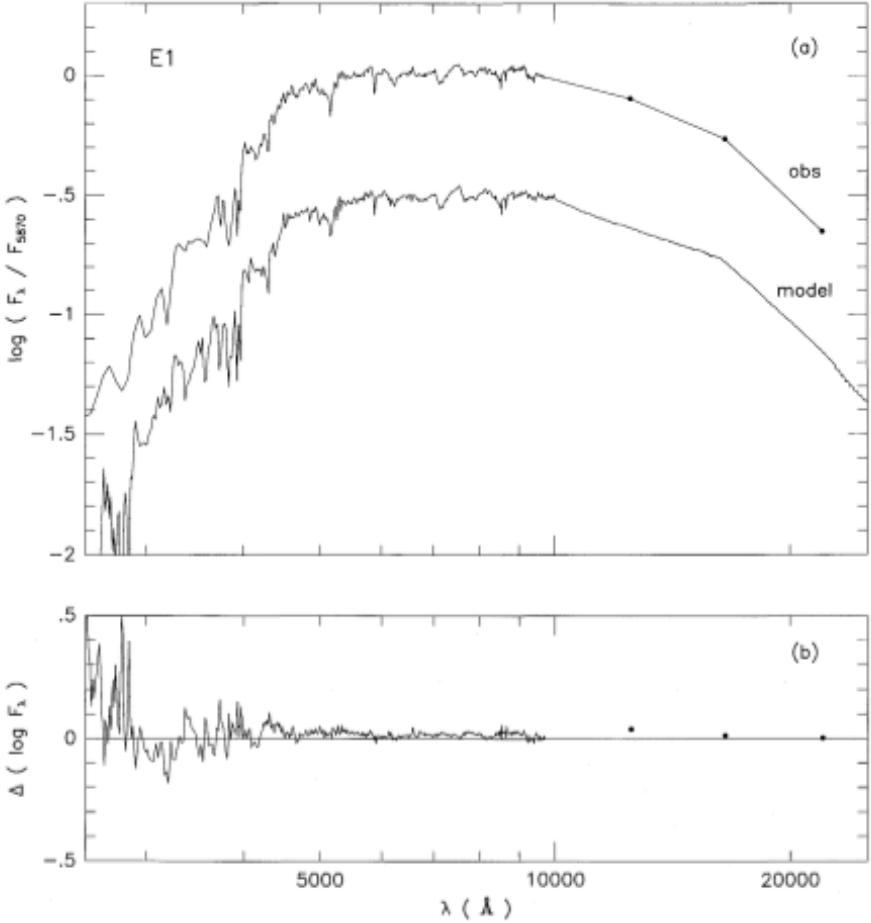
\rightarrow Merger induced starburst at the center?
or Extended star formation over the disk?

USS1558 proto-cluster (z=2.53)



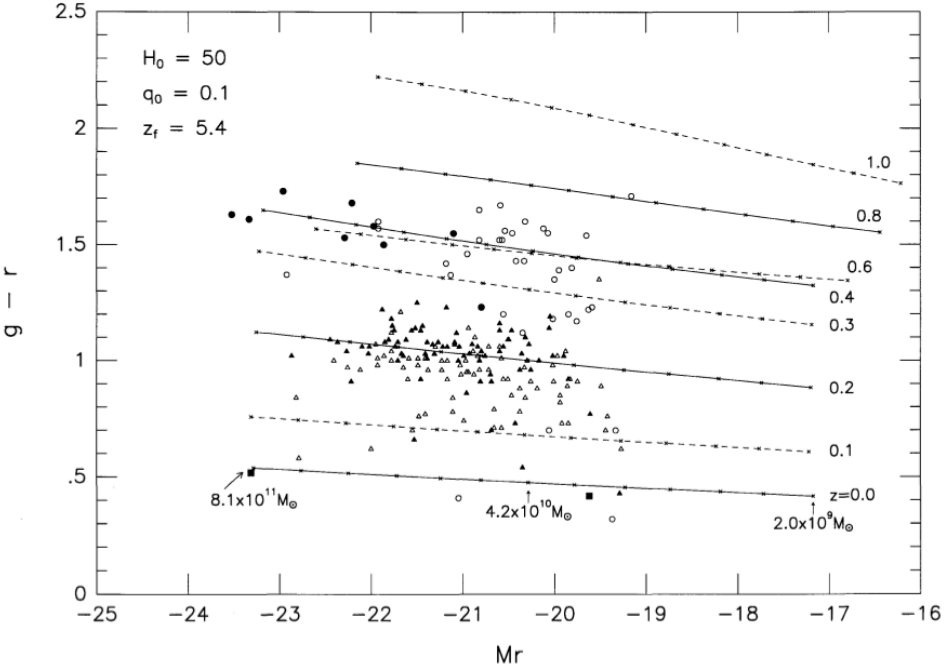


Chemical evolution and spectral synthesis of early-type galaxies



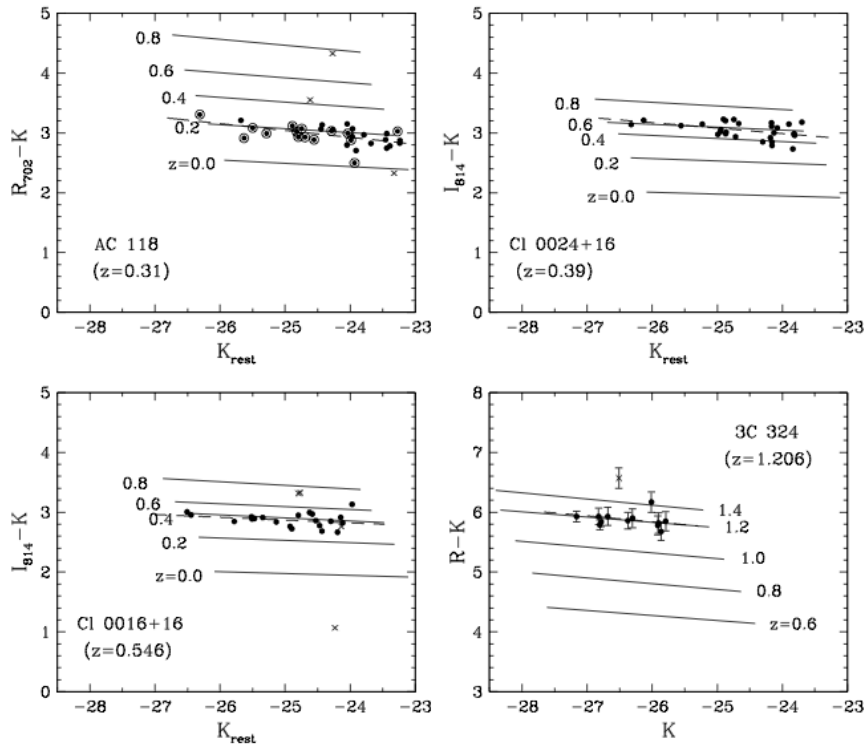
Kodama & Arimoto (1997)

PhD Thesis at Univ of Tokyo

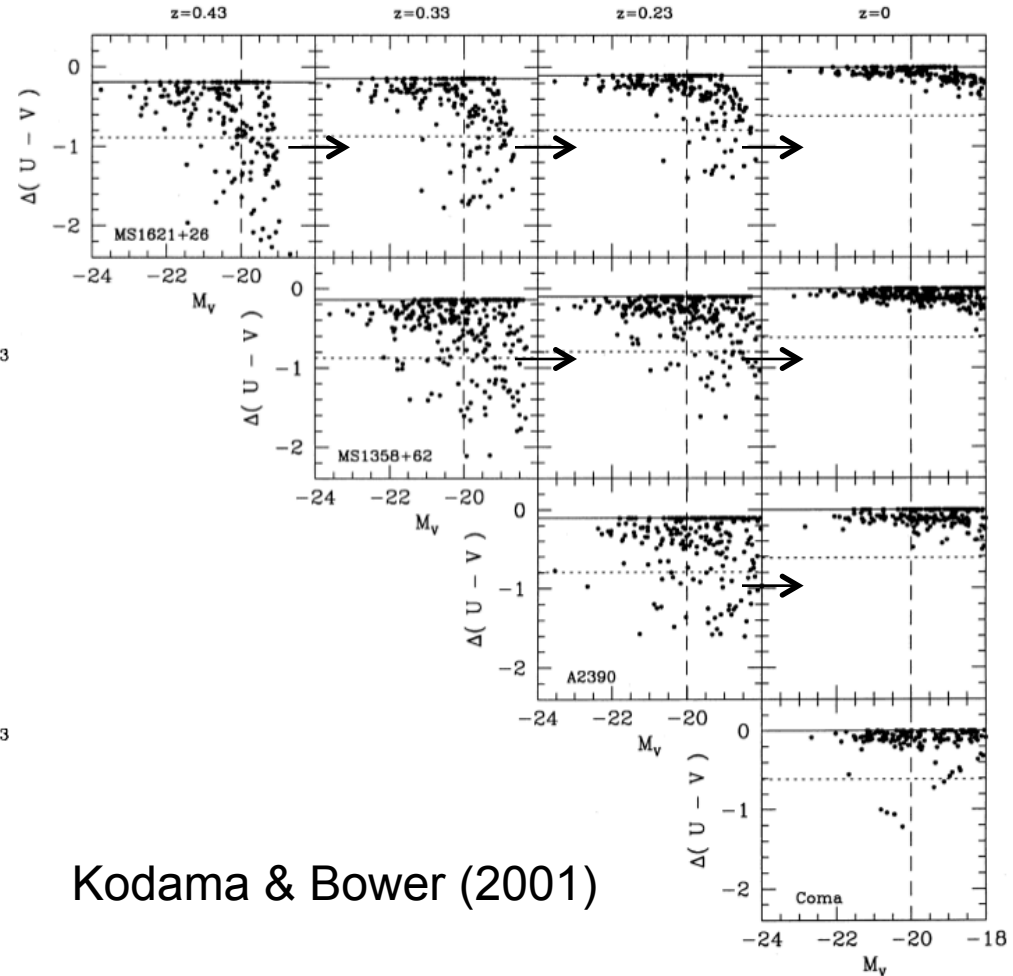


Photometric evolution of cluster galaxies

Evolution of the red-sequence



Evolution of the whole population



Kodama, Arimoto,
Barger, Aragon-Salamanca (1998)

Cambridge, UK

Kodama & Bower (2001)

Durham, UK



Panoramic Imaging and Spectroscopy of Cluster Evolution with Subaru

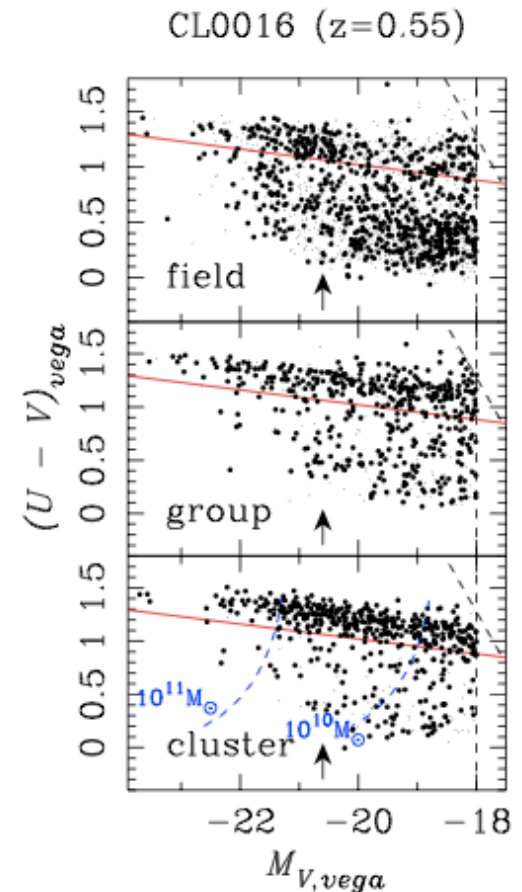
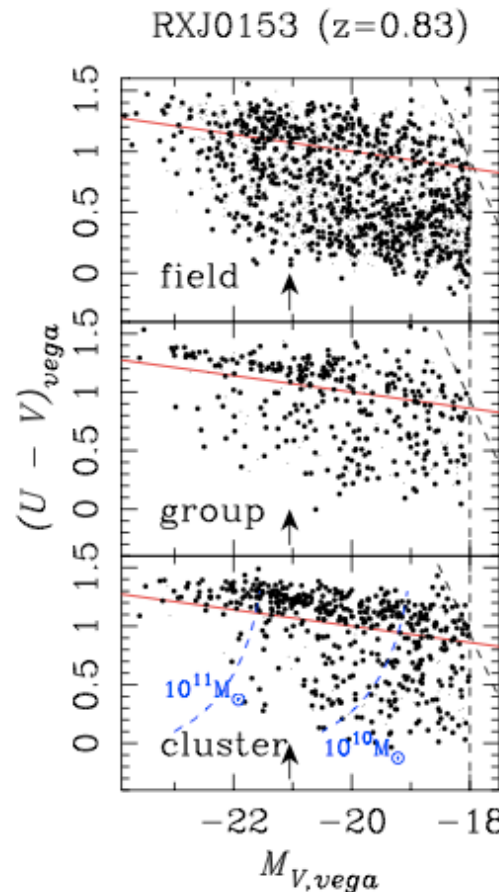
Class (z)	Cluster	RA (J2000)	Dec (J2000)	z	L_X 10^{44}
0.4	CL 0024+1652	00 26 35.7	+17 09 43	0.395	3.2
	CL 0939+4713	09 42 56.6	+46 59 22	0.407	9.2
0.55	MS 0451.6-0305	04 54 10.9	-03 0		
	CL 0016+1609	00 18 33.3	+16 2		
0.8	RX J1716.4+6708	17 16 49.6	+67 0		
	RX J0152.7-1357	01 52 41.0	-13 5		
1.2	RDCS J0910+5422	09 10 00.0	+54 2		
	RDCS J1252-2927	12 52 54.4	-29 2		
	RX J0848.9+4452	08 48 56.3	+44 5		
1.5	XMMJ2215.9-1738	22 15 58.5	-17 38		

Tanaka, Kodama,
Arimoto, et al. (2005)

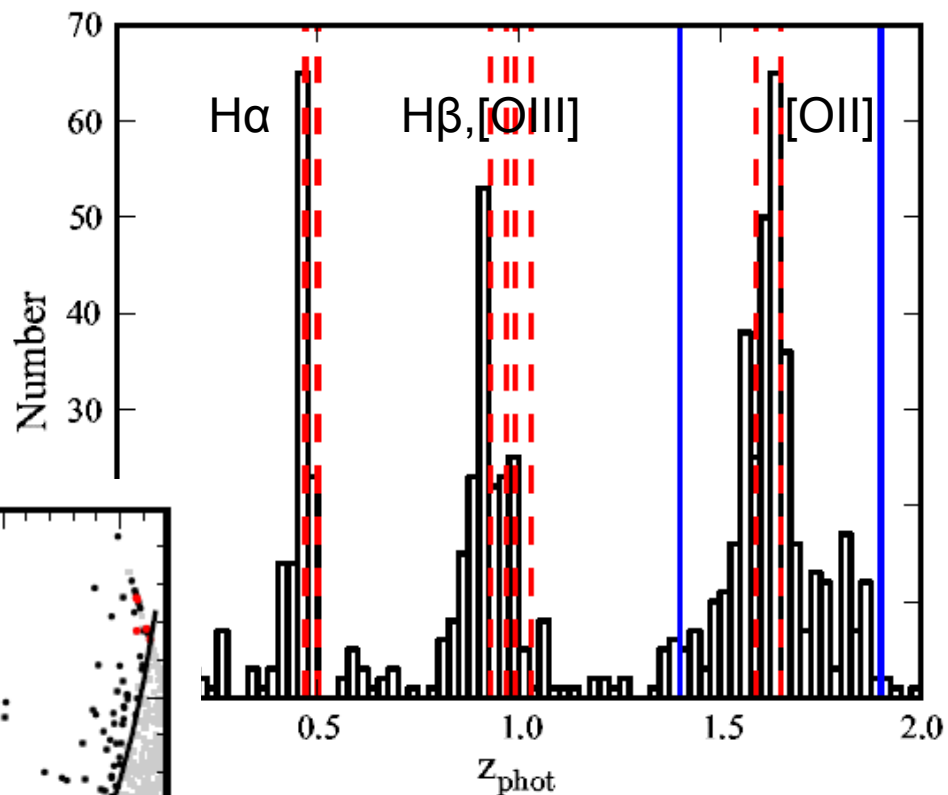
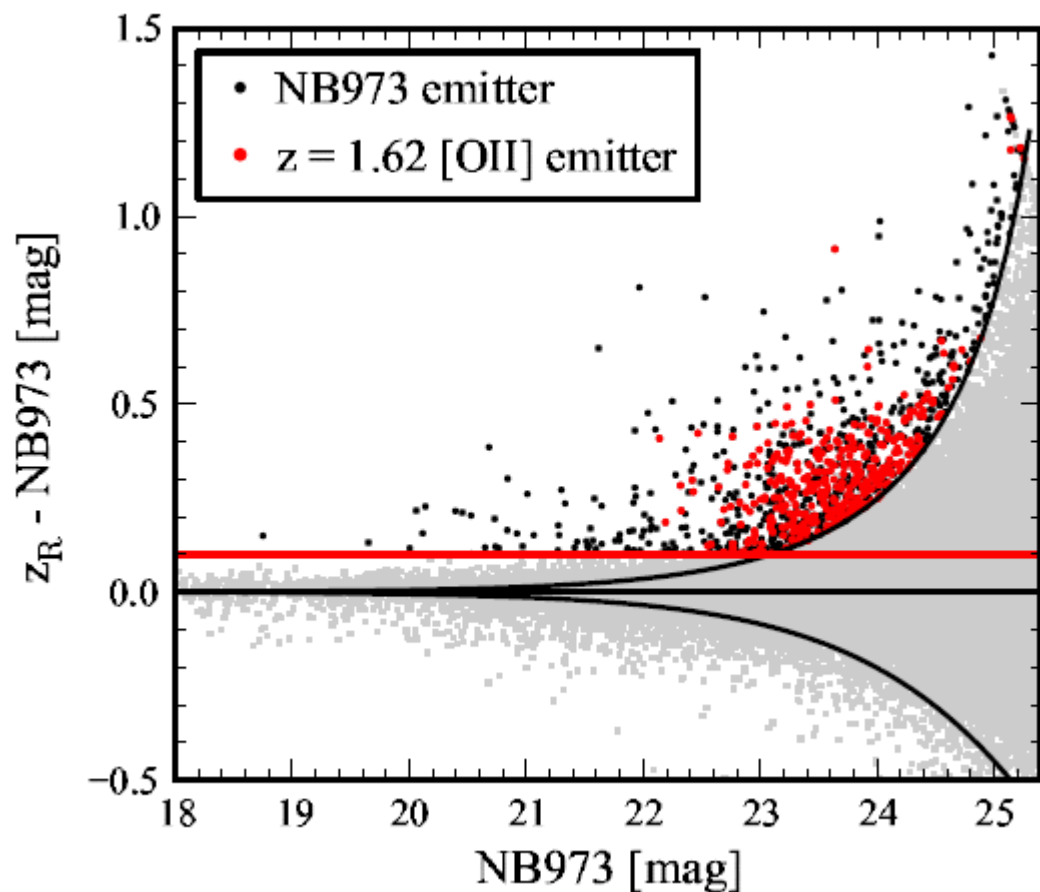
10 X-ray clusters at $0.4 < z < 1.5$

Kodama, et al.,
Arimoto, et al. (2005)

Back in Tokyo



CIG J0218.3-0510 ($z=1.62$) in SXDF-UDS



(*BVRi'z'JHK*)

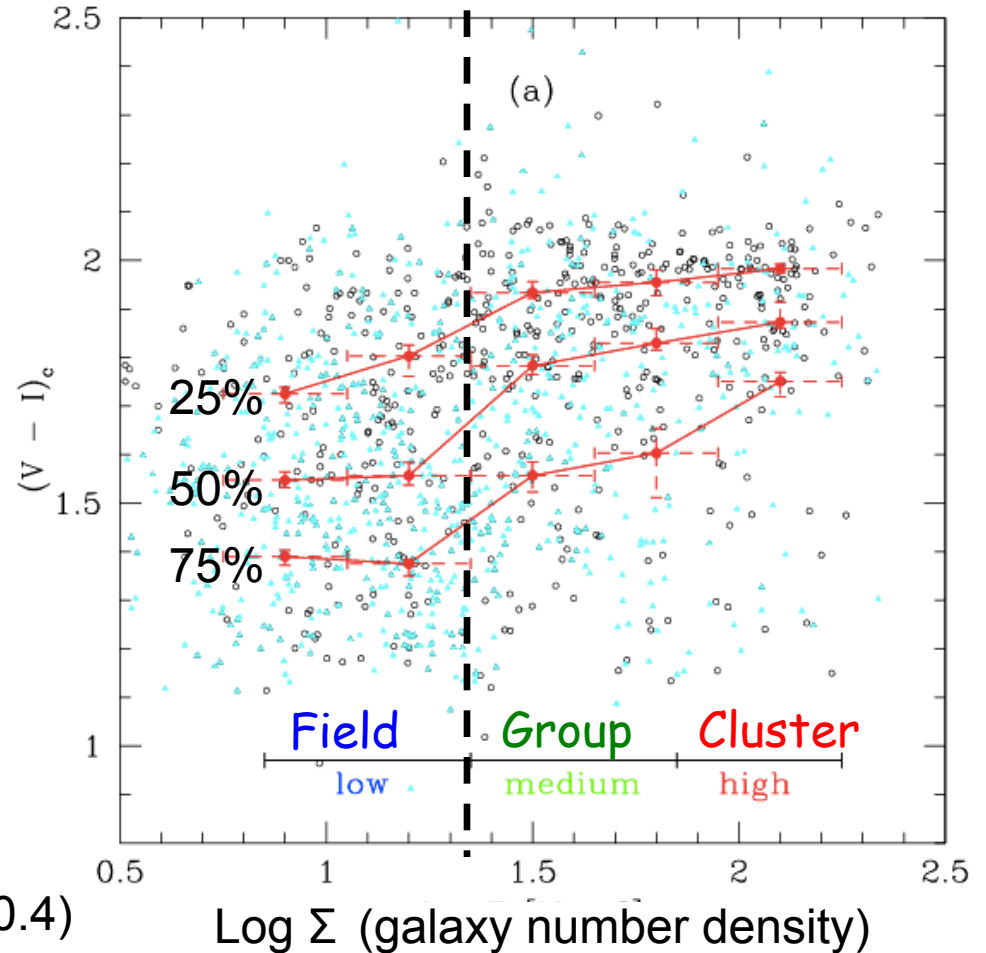
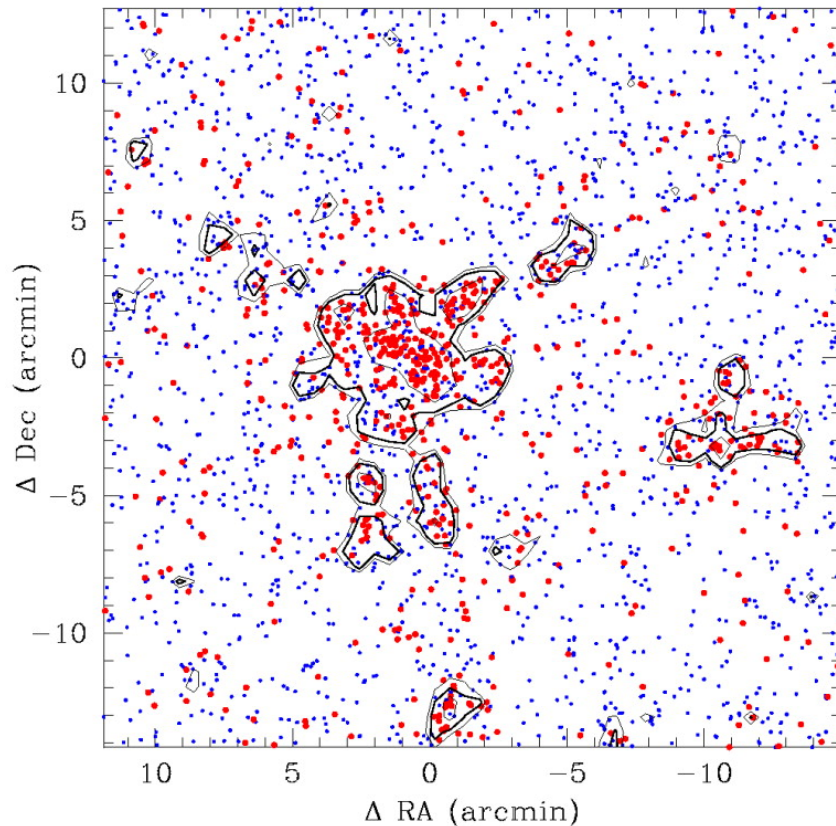
NB973: ~10 hrs (Ota et al.)

zR: 5.5hrs



Cluster outskirts is the key environment for environmental effects

Sharp color transition in the "medium-density" regions (i.e. cluster outskirts / groups / filaments)



“Octopus cluster “ (CL0939 cluster at $z=0.4$)

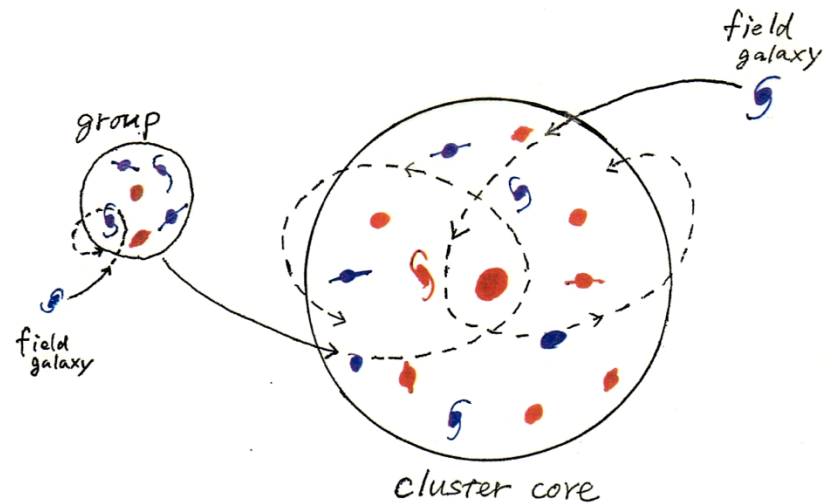
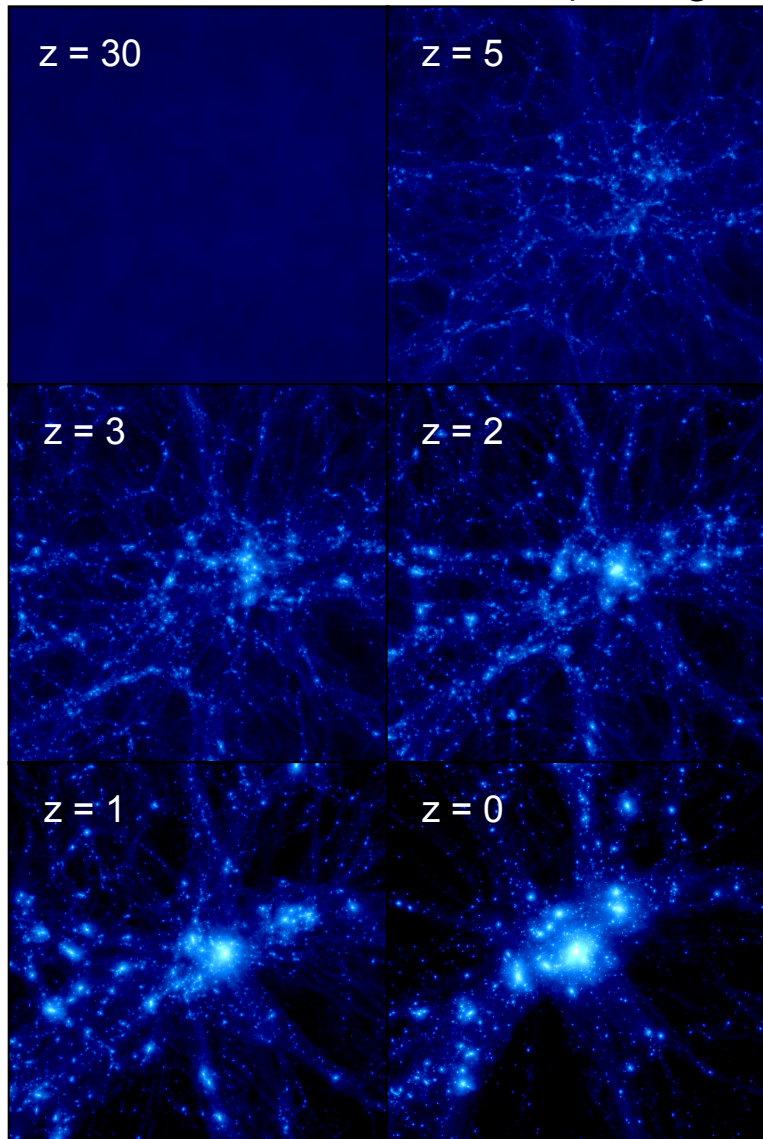
Kodama, Smail, et al. (2001), see also Tanaka+05 and Koyama+08

The End



銀河種族のすみ分けの起源は？

銀河団のN体シミュレーション(Yahagi+05)



先天的（生まれ）？

楕円銀河は初期宇宙に高密度領域で生まれ、渦巻き銀河は少し遅れてフィールドで生まれる。

後天的（育ち）？

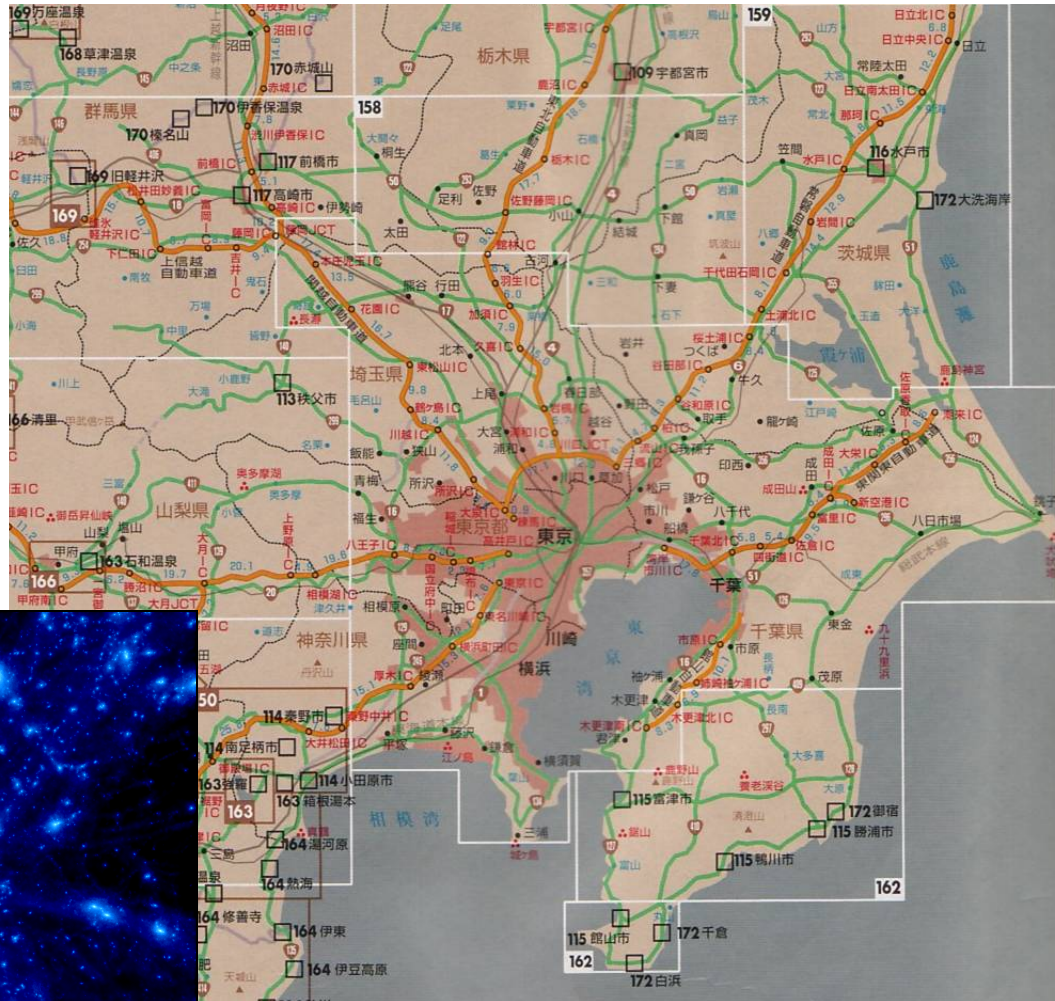
集団化の過程で渦巻き銀河が楕円銀河やレンズ状銀河に変化する。

$M=6 \times 10^{14} M_{\odot}$ $20 \times 20 \text{Mpc}^2$ (共動座標)

銀河の生態

- ・ **銀河は群れる**：銀河は、お互いの重力によって引き合い、銀河群、銀河団へと集団化し、より大きな構造を作ってゆく。
- ・ **銀河は個性が変わる**：群れ集まる過程では、銀河はお互いの衝突や、ガスの剥ぎ取りなどを経験し、その形態や星形成活動に変化を来たす。

銀河界と人間界の類似



都市構造

人口流入

年齢格差

相互作用

世間の風

個性喪失