

『銀河形成解剖ワークショップ』

"Resolved Views of Galaxy Formation and Evolution"

日時：2012年5月29日(火), 30日(水), 31日(木)

場所：国立天文台ハワイ観測所ヒロオフィス

<http://www.naoj.org/staff/iwata/sci/resolve2012/>

May 29-31, 2012 @ Subaru Hilo-base

<参加者一覧>

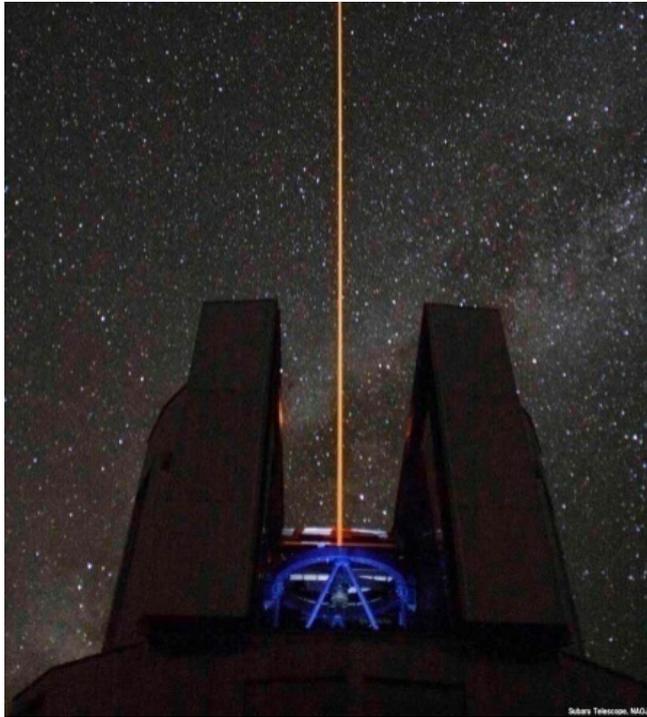
青木賢太郎	ハワイ観測所	河野孝太郎	東京大学
秋山正幸	東北大学	児玉忠恭	ハワイ観測所
有本信雄	ハワイ観測所	小山佑世	ダーラム大学
伊王野大介	国立天文台	済藤祐理子	ハワイ観測所
五十嵐創	東京大学	但木謙一	東京大学
泉拓磨	東京大学	田中幸	ハワイ観測所
今西昌俊	ハワイ観測所	田村陽一	東京大学
岩田生	ハワイ観測所	長島雅裕	長崎大学
植田準子	東京大学	中西康一郎	国立天文台
梅畑豪紀	東京大学	廿日出文洋	京都大学
太田耕司	京都大学	林将央	国立天文台
岡本崇	筑波大学	松田有一	国立天文台
小野寺仁人	チューリッヒ	美濃和陽介	ハワイ観測所
河田大介	ロンドン大学	本原顯太郎	東京大学
		矢部清人	国立天文台

大屋真(ハワイ)、服部亮(ハワイ)、大野良人(東北大学)



Subaru GLAO (Ground Layer Adaptive Optics) Science Workshop

Oct 17-18 @ Hilo office



Subaru-GLAO Science Workshop
10/17 13:30 - 10/18 17:00
Subaru Hilo-Base Room-104

<<10/17(Wed)>>

11:00-12:00 Subaru Seminar by Kim-Vy Tran (Texas A & M University)
"Star Formation in Galaxy Clusters Over the Past 10 Billion Years"
12:00-13:30 Lunch with Kim-Vy@Miyo's

13:30-13:40 児玉 (挨拶)
13:40-14:00 早野 (GLAO計画)
14:00-14:20 大屋 (GLAOシミュレーション)
14:20-14:40 美濃和 (GLAOシミュレーション:撮像)
14:40-15:00 岩田 (GLAOシミュレーション:分光)
15:00-15:15 議論 (GLAO)
休憩 (15:15-15:40)
15:40-16:00 岩田 (観測装置オーバービュー)
16:00-16:20 本原 (近赤外広視野観測装置)
16:20-16:40 秋山 (近赤外多天体IFU)
16:40-17:00 西村 (近赤外多天体IFU)
17:00-17:30 議論 (観測装置、科研費申請、国際協力)
夕食 (各自)

<<10/18(Thu)>>

09:00-09:30 西山 (銀河中心)
09:30-10:00 児玉 (銀河、銀河団)
10:00-10:30 田中賢 (銀河、銀河団)
10:30-11:00 矢部 (銀河)
11:00-11:30 松田 (アウトフロー、ALMAとの連携)
11:30-12:00 渋谷 (アウトフロー)
昼食(12:00-14:00) 各自 1+1, Hilo rice noodle, happy valley
14:00-14:30 秋山 (AGN)
14:30-15:00 本原 (銀河)
15:00-17:00 議論
キーサイエンス、中規模計画ヒアリング、
ホワイトペーパー、科研費申請、国際協力
18:30- 懇親会 (Seaside)

M* (rest-R) SFR (H α) SFRもどき (rest-UV) M*もどき (rest-B)

すばる(現在)

HST

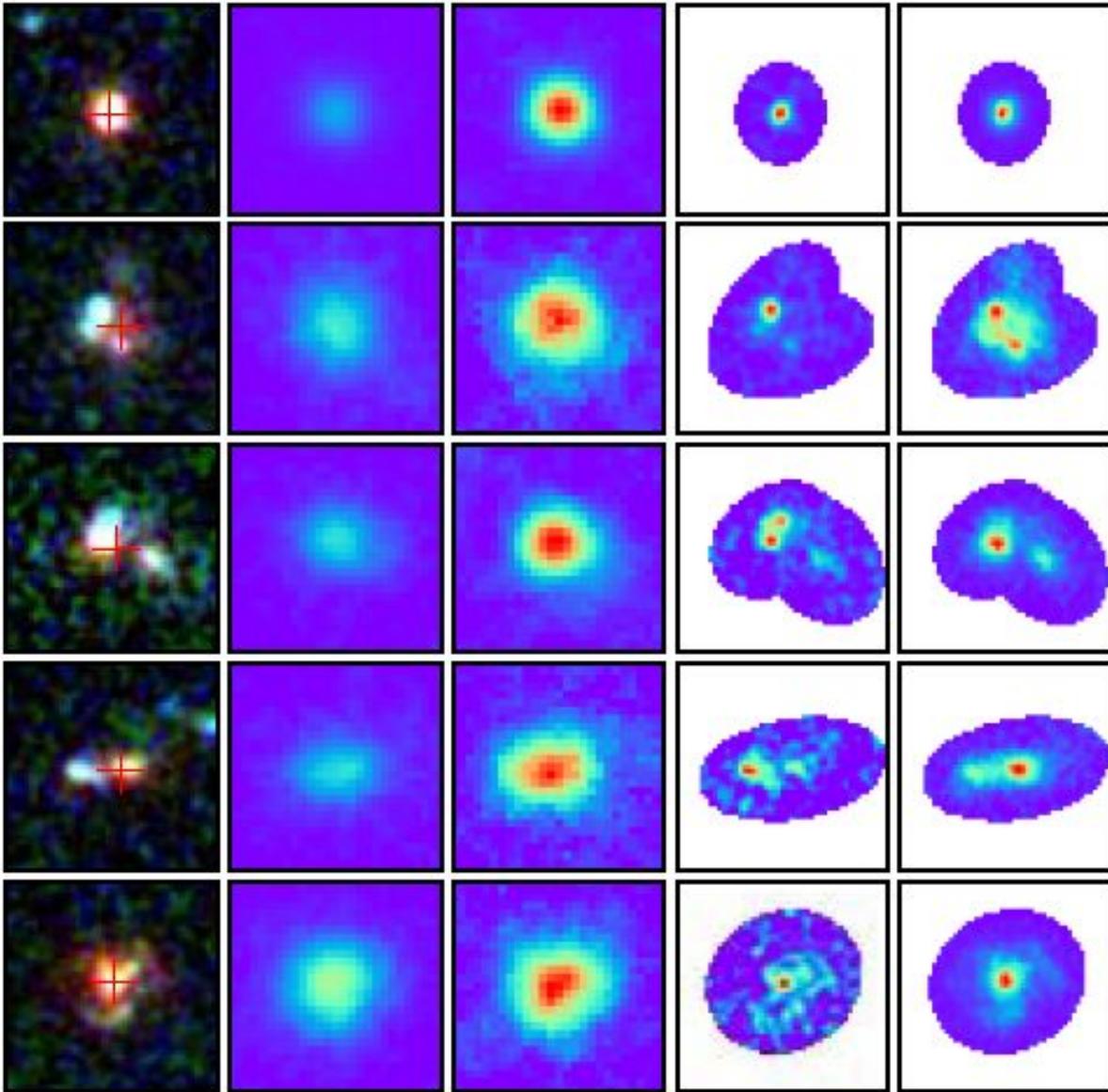
VzH

K

NB

F606

F160



銀河形成最盛期(z~2)の クランピーな星形成銀河

@SXDF-CANDELS

Tadaki et al. (2013), PhD

大質量($>2 \times 10^{10} M_{\odot}$)な星形成銀河の半分以上がクランプ構造を持つ。重力的に不安定なガスが豊富な円盤が分裂した？または合体？

すばる-GLAO

(1) KsとNB(H α)の撮像によって初めて、銀河内部の詳細な星質量分布と星形成分布が、HSTに匹敵する解像度(0.2")で明らかになる！

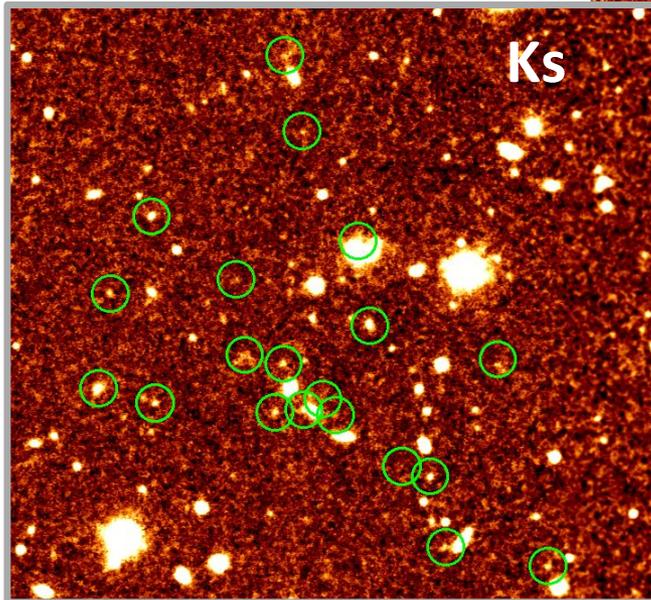
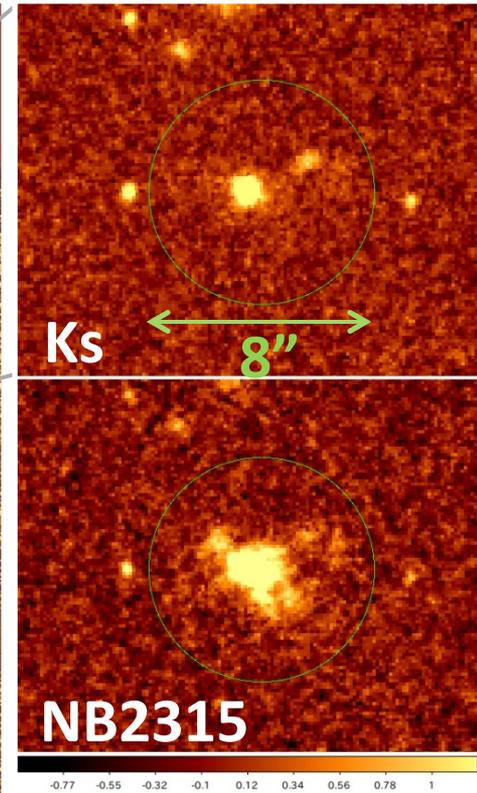
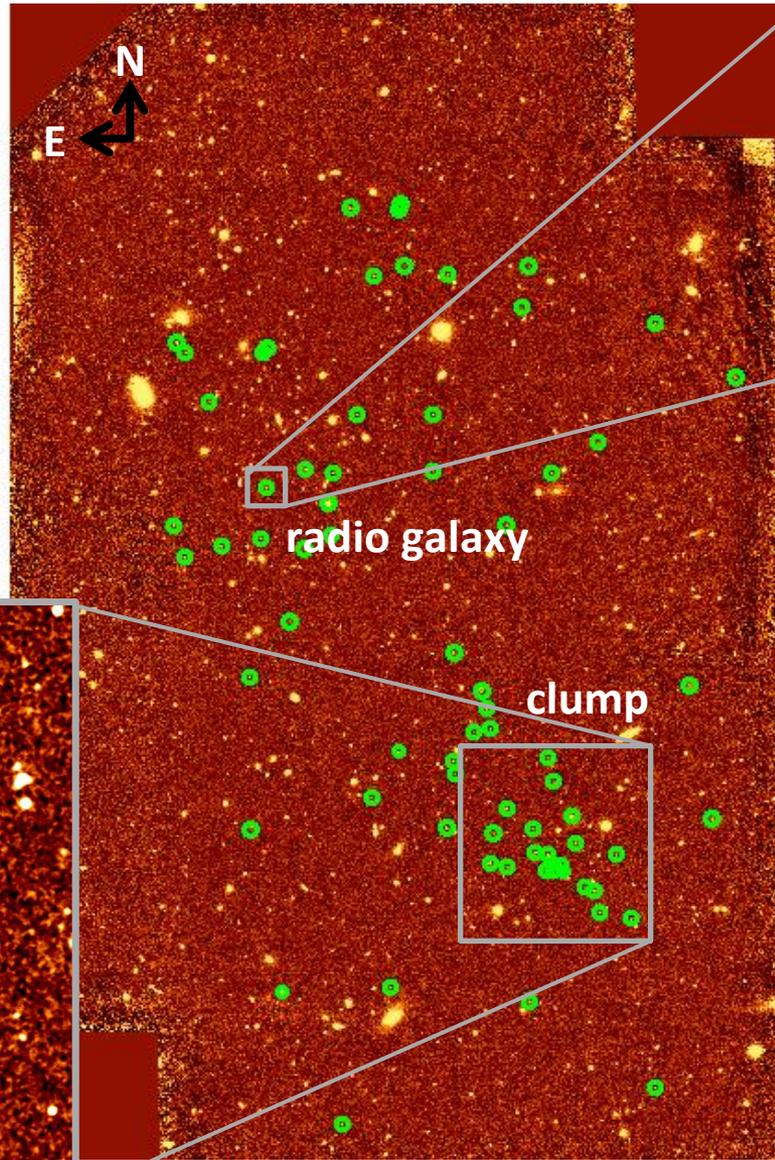
(2) IFU分光によって、内部運動、AGNの寄与、重元素量分布が明らかになる！

形成途上銀河団 USS1558-003 ($z=2.53$)

H α 輝線銀河でみた
原始銀河団
(すばる-MOIRCS)

Hayashi et al. (2012)

新たに見つかった、
非常に高密度な星形成
バースト銀河の集団！



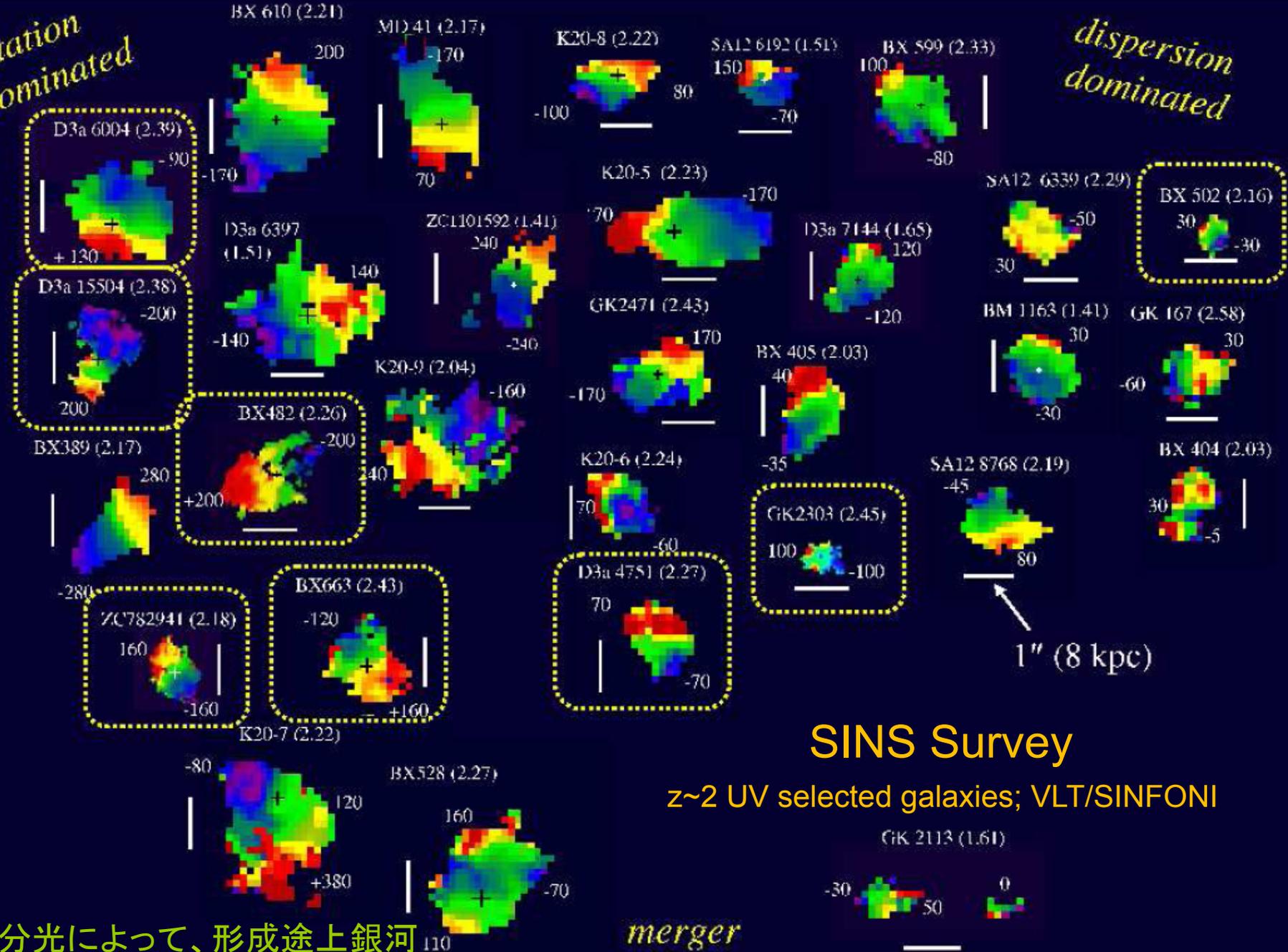
x 24 denser than field

すばるGLAOで無バイ
アスな広視野サーベイ
と原始銀河団を狙った
バイアスサーベイの両
方を行い、環境効果の
初期状態を明らかにする！

銀河団全体で合算した星形成率は、 $10^4 M_{\odot}/\text{yr}$ にもなる！

rotation dominated

dispersion dominated



SINS Survey

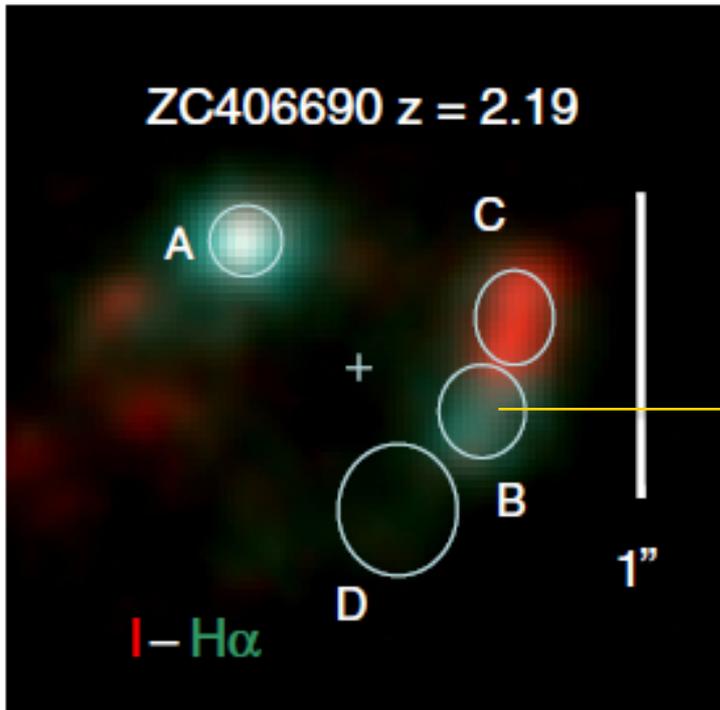
$z \sim 2$ UV selected galaxies; VLT/SINFONI

merger

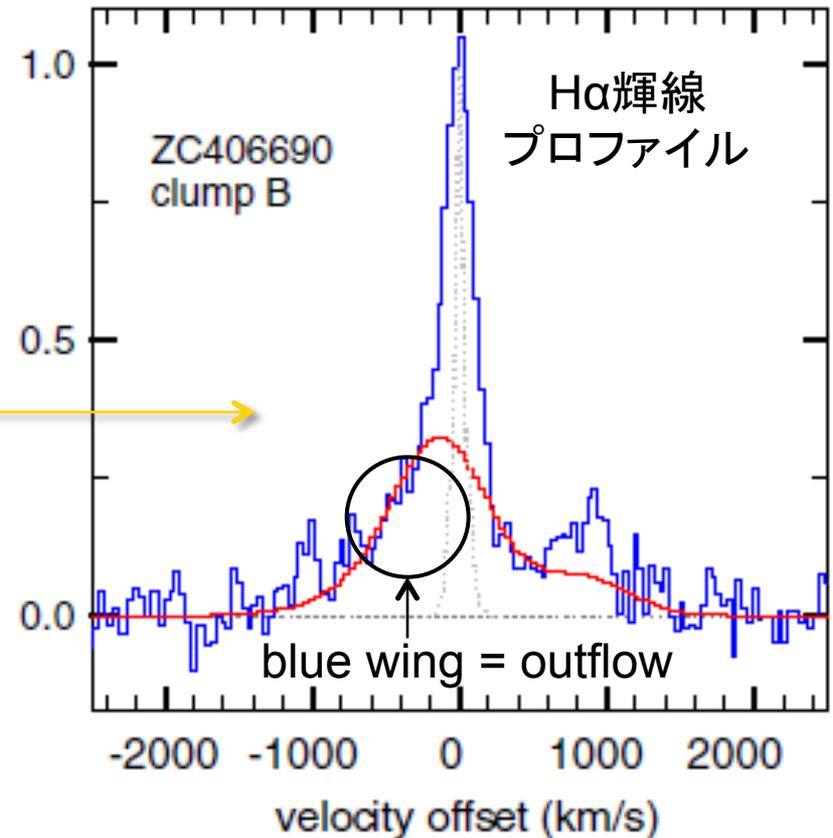
Foerster-Schreiber et al. (2009)

IFU分光によって、形成途上銀河の内部運動や物理過程が詳細に分かる。

クランプ銀河からのガスのアウトフロー (フィードバックの現場)



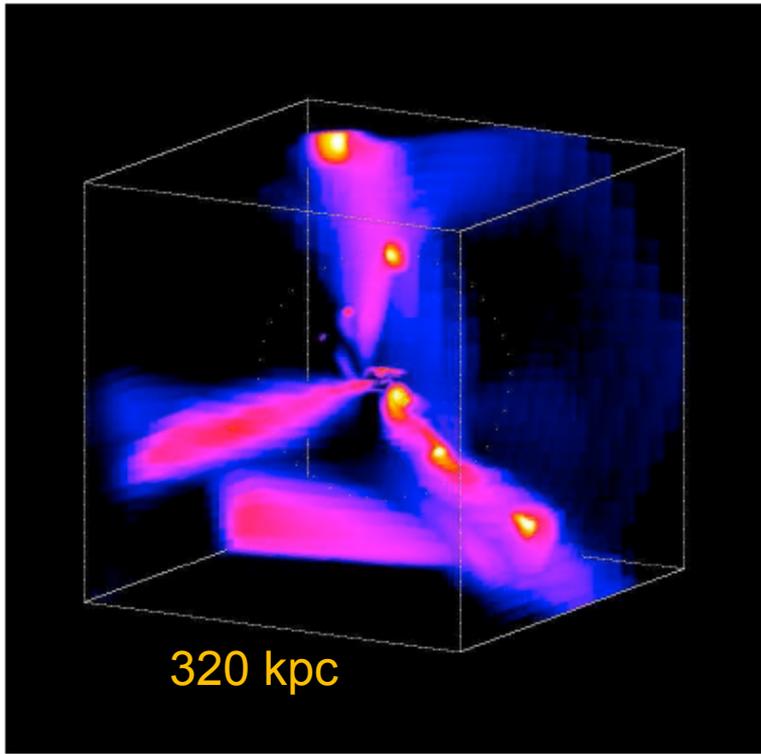
Genzel et al. (2011)



クランプBで起こっている星形成バースト
によるガスのアウトフロー (~500km/s)

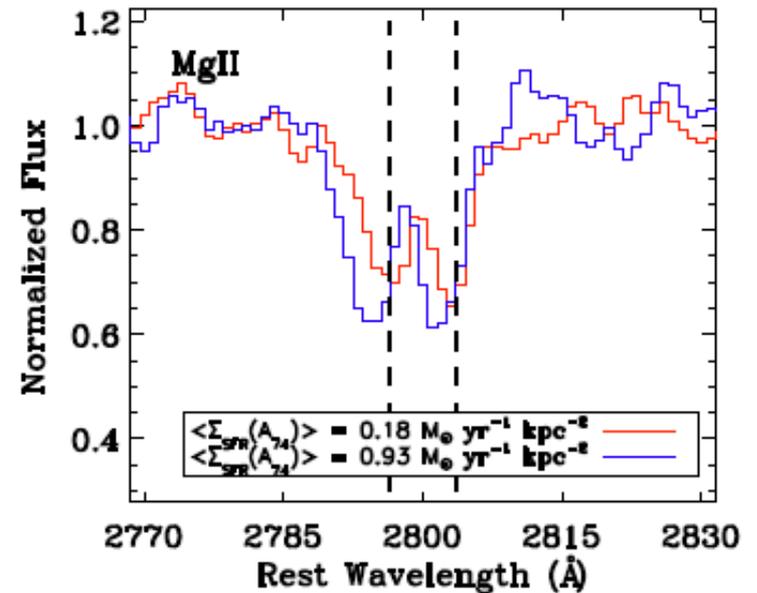
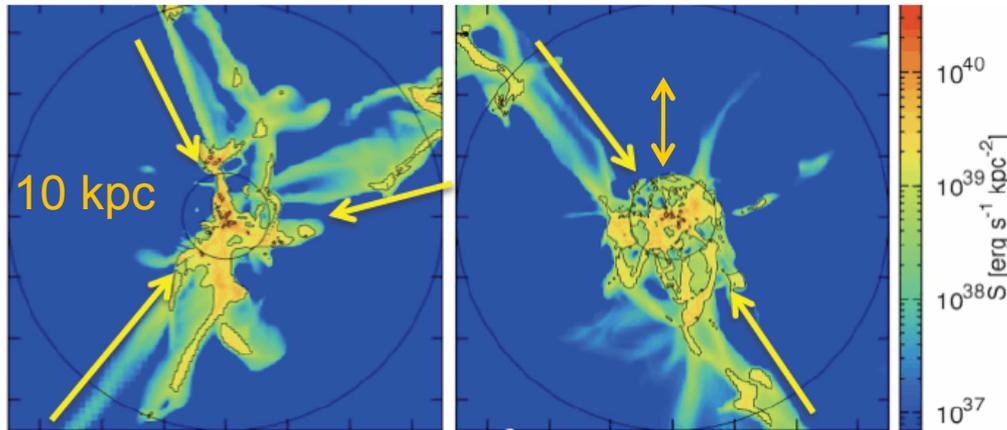
コールド・ストリームの観測的検証 (ガスのインフロー)

シミュレーションによって、大質量銀河形成の初期に、フィラメント構造に沿って冷たい(1万度)のガスが効率的に流入し、ガスが豊富な円盤ができ、星形成バーストを引き起こすと考えられている。



Dekel et al. (2009, Nature)

Goerdt et al. (2010)



上図はアウトフローの例であるが、手前にあるガス(吸収体)によって、赤方偏移した吸収線が見られれば、それはインフローの発見になる！

Signatures of outflows (500-1000km/s)

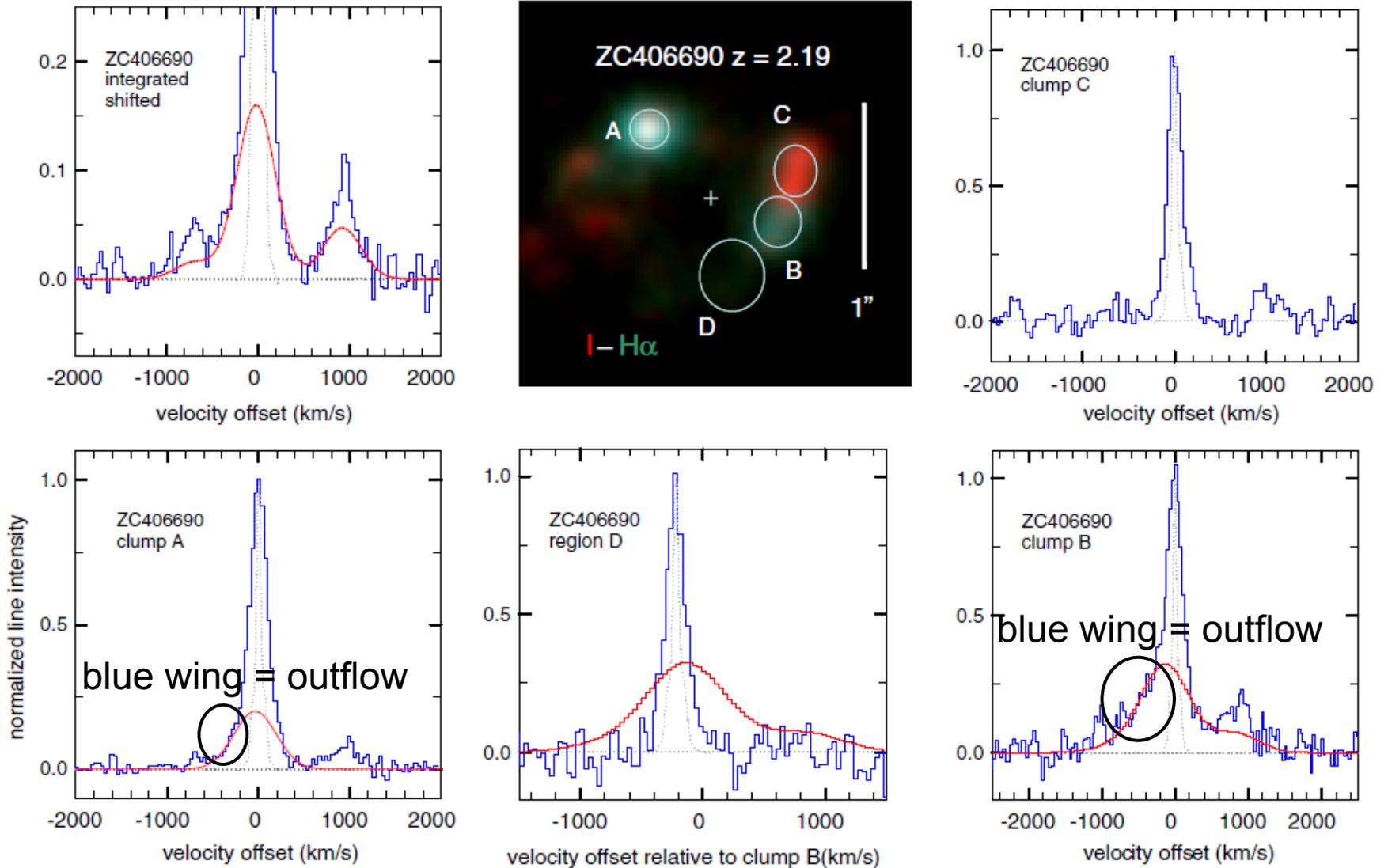


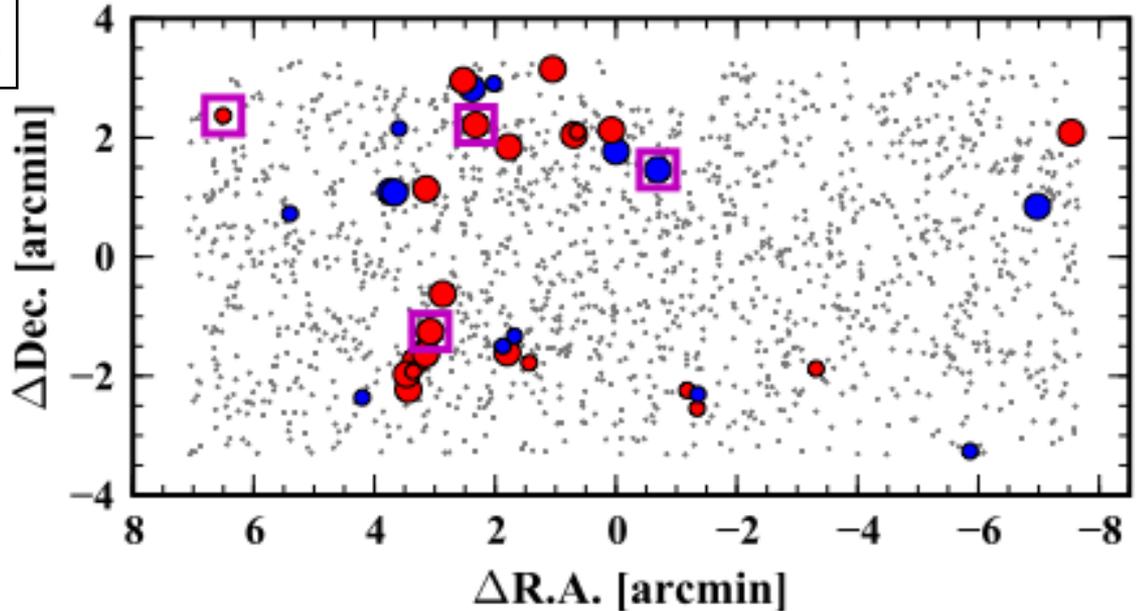
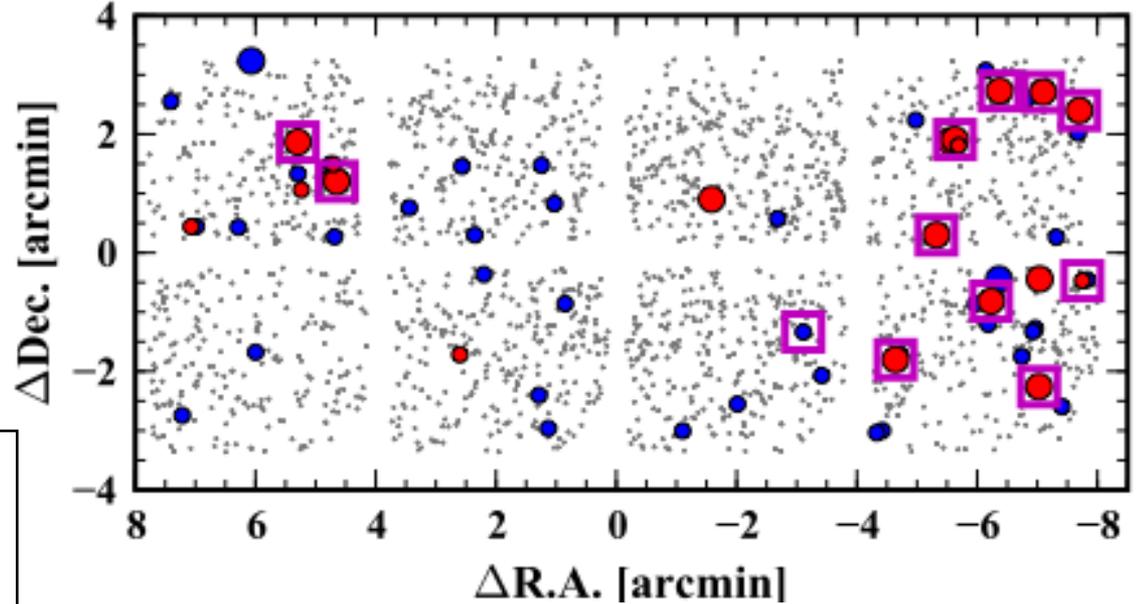
Figure 7. $H\alpha$ spectra of ZC406690 ($z = 2.195$), for the entire galaxy (top left), as well as for selected clumps marked in the central $H\alpha$ -ACS I -band composite (Figure 2). The dotted gray curves in all panels denote the SINFONI spectral response profile measured from OH sky lines. Before 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.

銀河形成最盛期の星形成銀河@SXDF-CANDELS

$z=2.2$ H α emitter
(MOIRCS-NB2095)

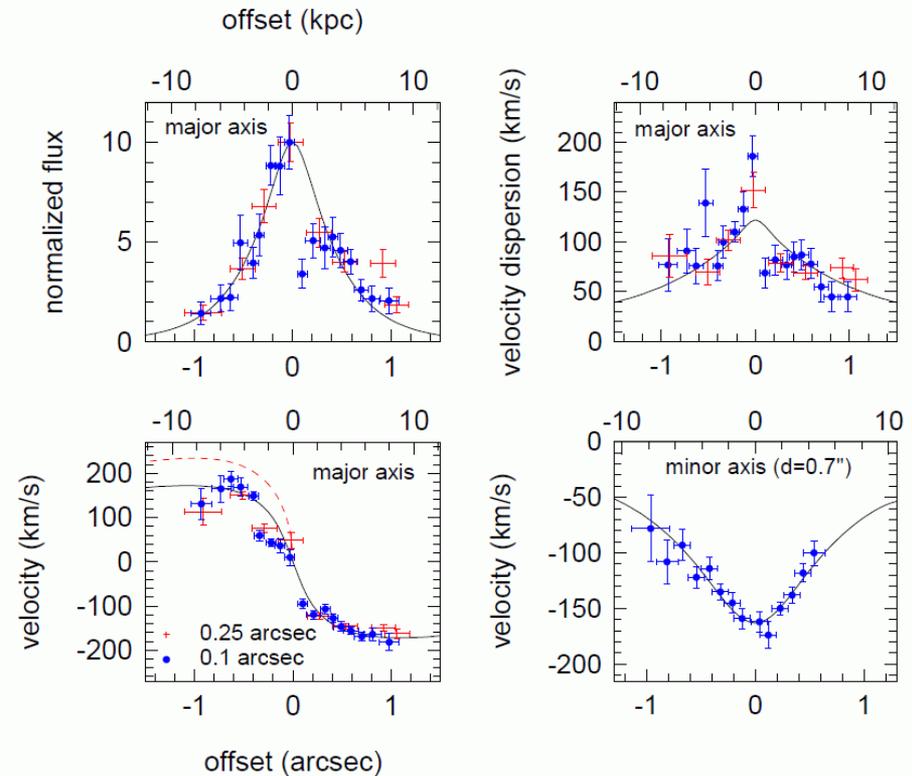
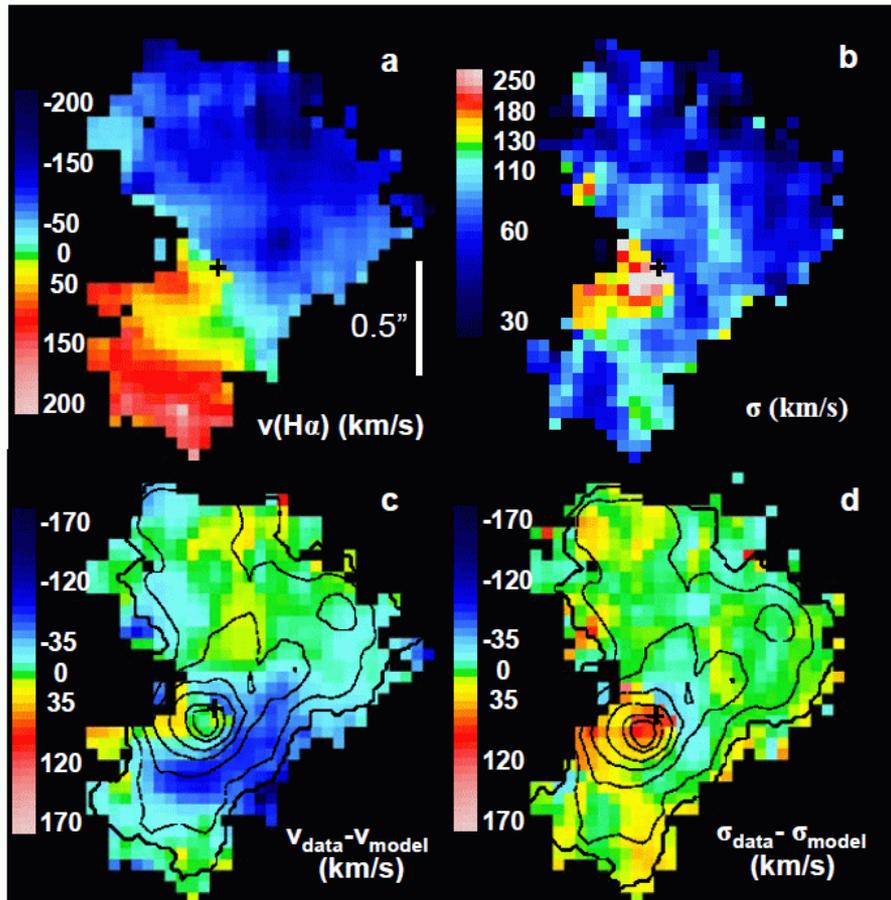
- : 青いHAE ($J-K < 1$)
- : 赤いHAE ($J-K > 1$)
- : MIPSソース
(ダスティな星形成バースト銀河)

$z=2.5$ H α emitter
(MOIRCS-NB2315)



Rotation of distant star forming galaxies

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

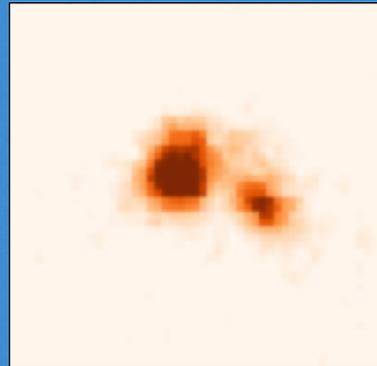
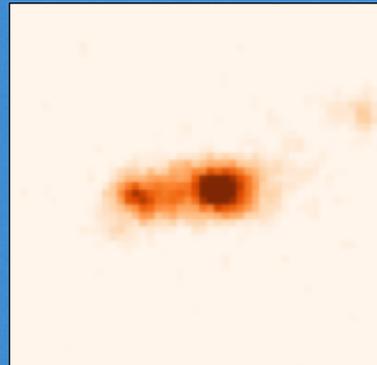
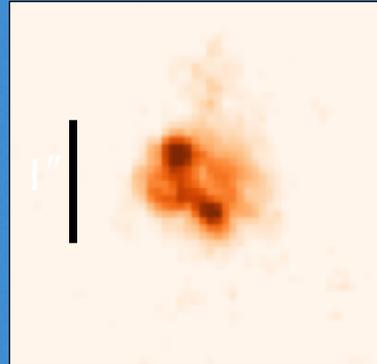


$z=2.38$, $K_s=19.2$, $M_{\text{dyn}}=1.13 \times 10^{11} M_{\odot}$ ($V_c=230\text{km/s}$),
 $M_{\text{stars}}=7.7 \times 10^{11} M_{\odot}$, $R_e=4.5\text{kpc}$, $M_{\text{gas}}(\text{H}\alpha)=4.3 \times 10^{10} M_{\odot}$

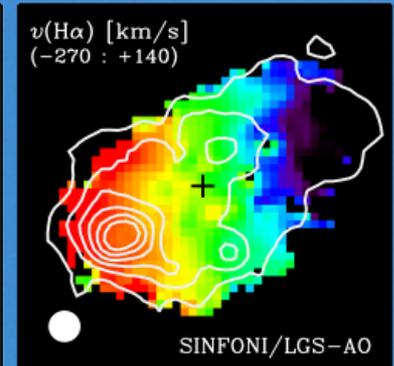
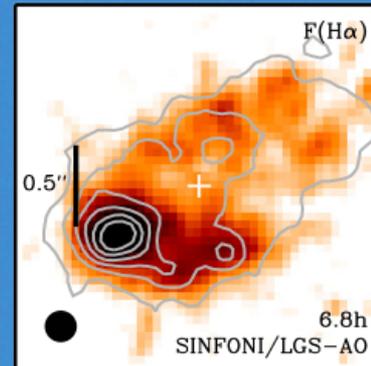
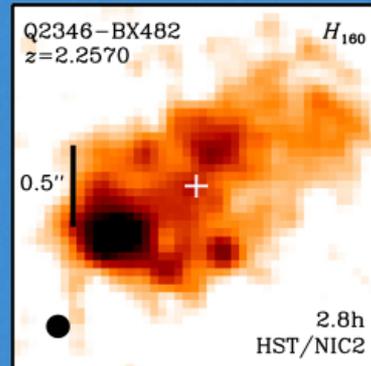
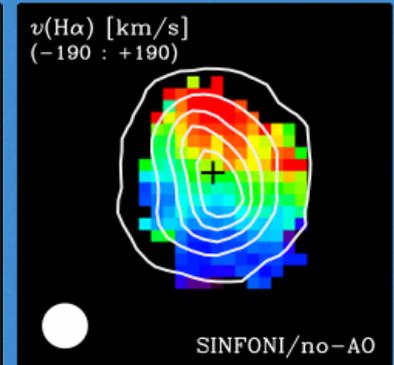
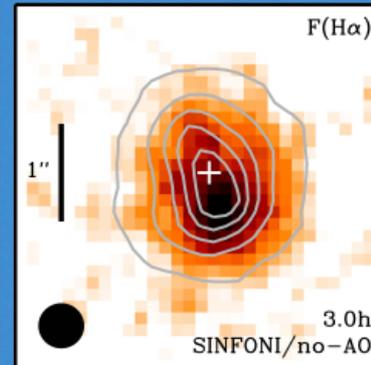
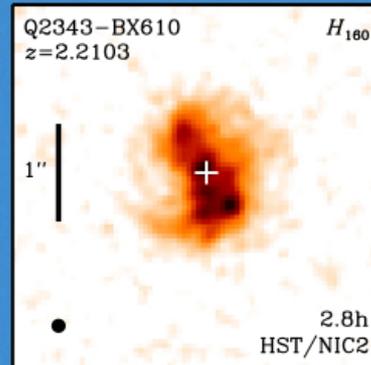
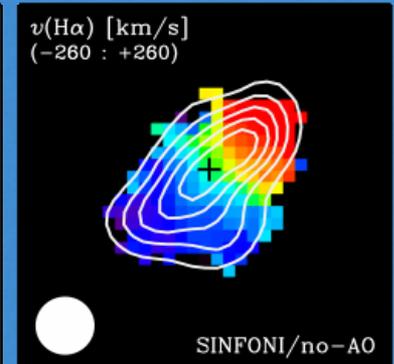
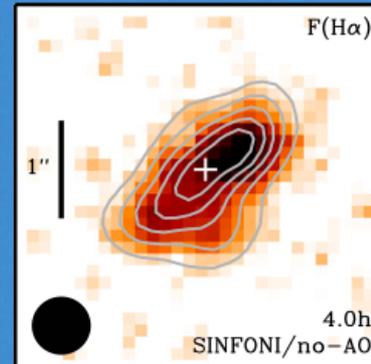
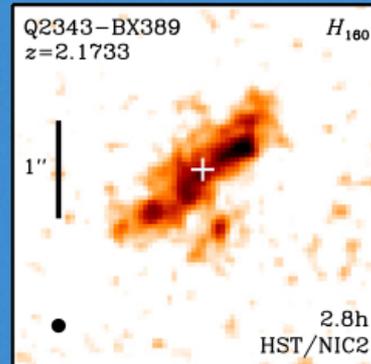
Genzel et al. (2006, Nature)

Merger or Clump ?

Our sample



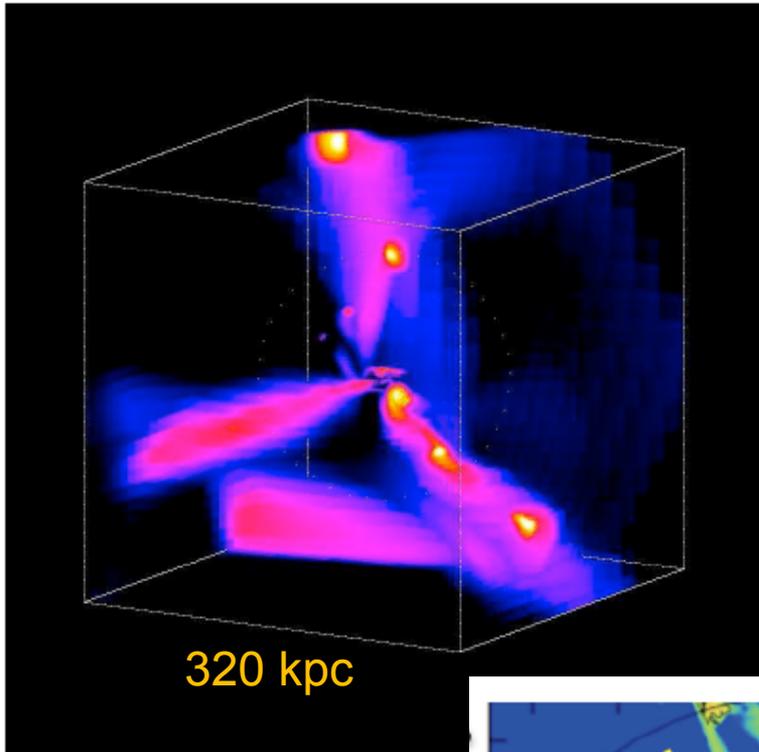
Forster Schreiber et al. 2011



“Cold Streams” along filaments (Inflow)

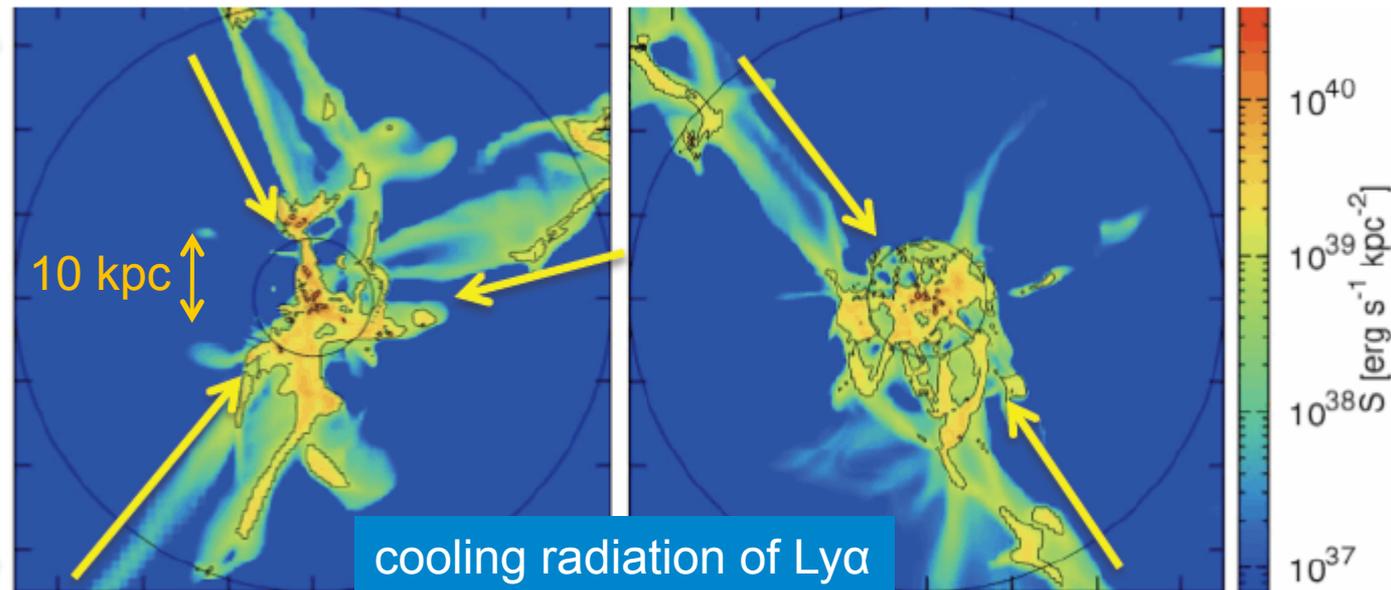
efficient gas supply to form a massive
galaxy on a short time scale at high-z

When does the gas motion turn to “outflow”
due to feedback (SNe and AGN)?

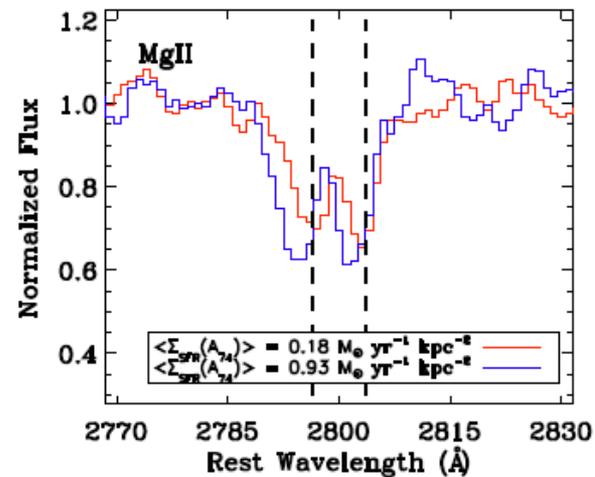
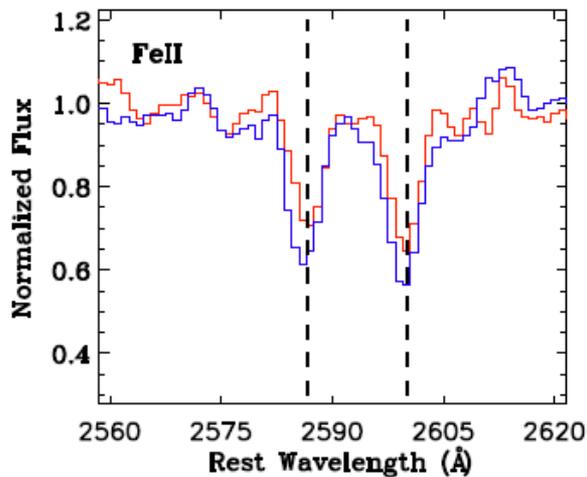
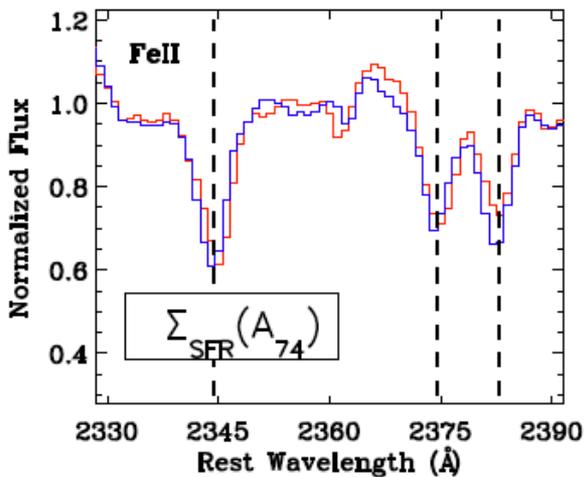


Dekel et al.
(2009, Nature)

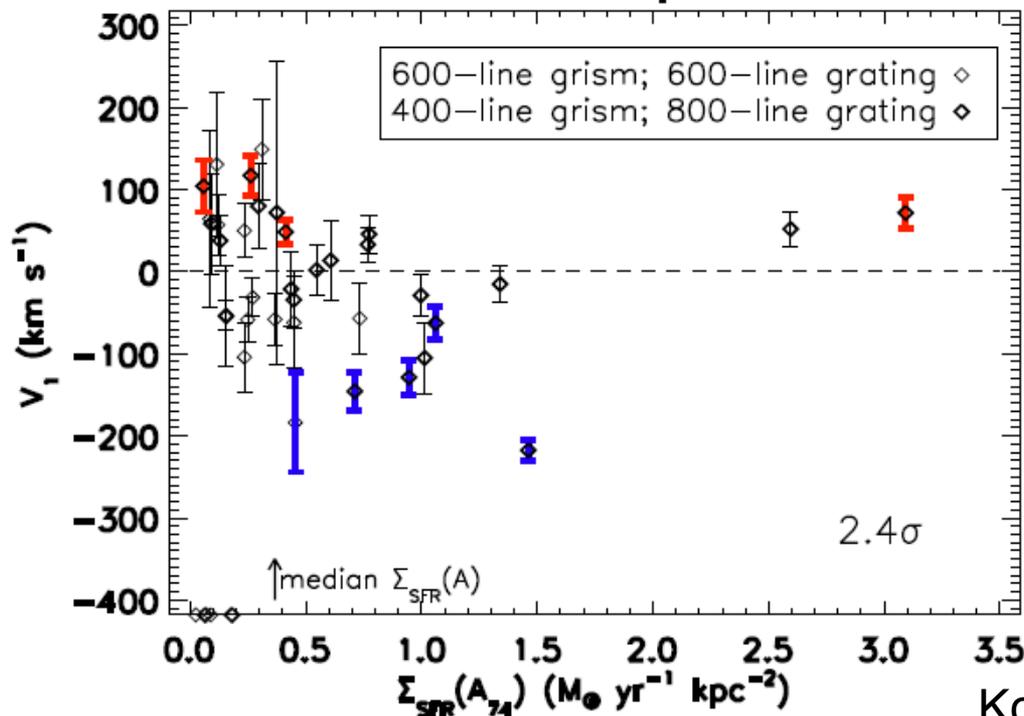
Goerdt et al.
(2010)



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

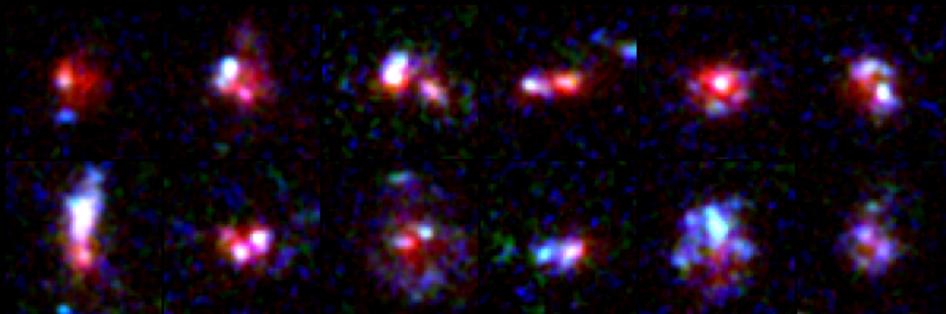


High- $\Sigma(\text{SFR})$

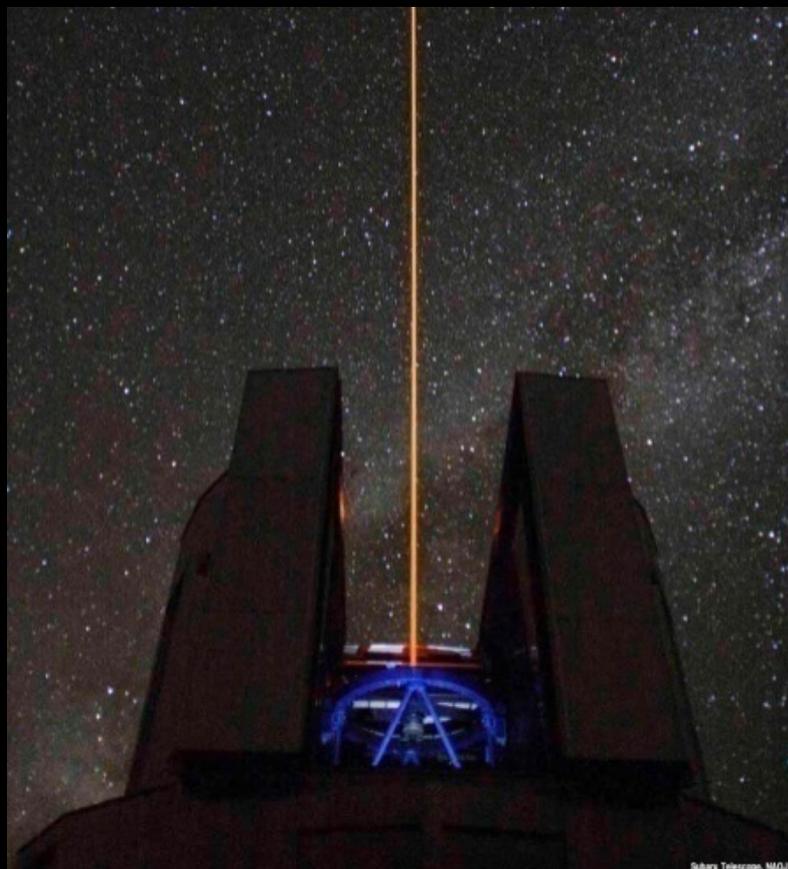
Low- $\Sigma(\text{SFR})$

$z \sim 1$ 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?



遠方銀河、銀河団 のサイエンス



児玉忠恭(ハワイ観測所)

林、小山、但木、他

Resolving power and FoV of our facilities

Subaru+AO188

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

Subaru+GLAO

0.2" @2 μ m (~1.5kpc), 15 arcmin

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)

"MAHALO-Subaru"

MApping H α and Lines of Oxygen with Subaru



NB mapping of star forming galaxies at the peak epoch of galaxy formation

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

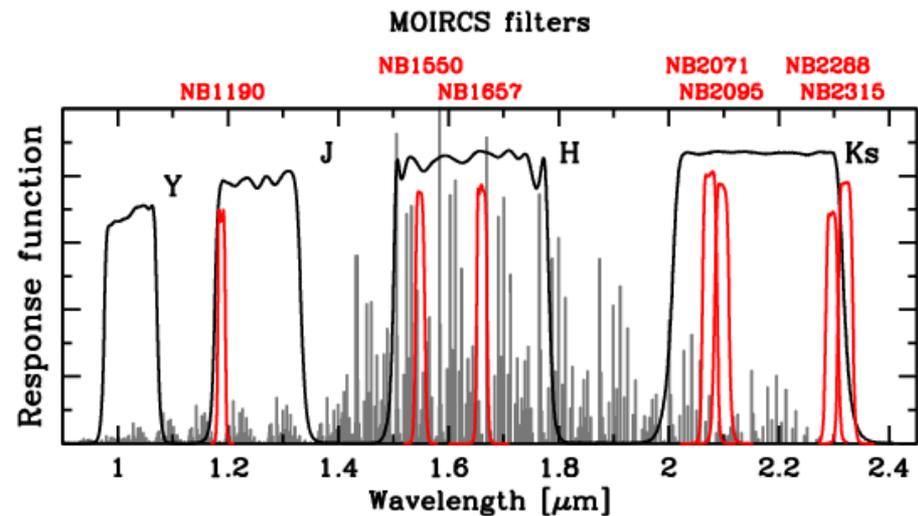
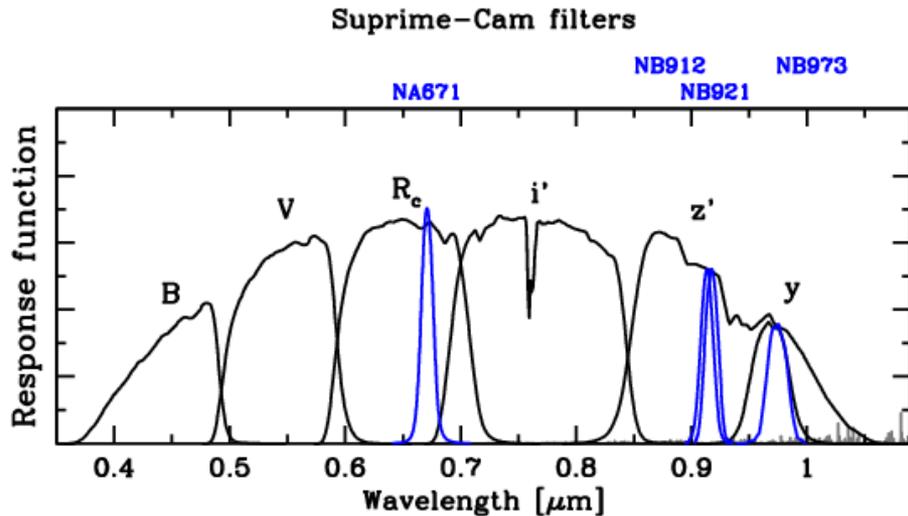
environ- ment	target	z	line	λ (μm)	camera	NB-filter	conti- num	status as of Oct '12
Low- z cluster	CL0024+1652	0.40	H α	0.916	S-Cam	NB912	z'	Kodama+'04
	CL0939+4713	0.41	H α	0.923	S-Cam	NB921	z'	Koyama+'11
	RXJ1716.4+6708	0.81	H α	1.190	MOIRCS	NB1190	J	Koyama+'10 observed
			[OII]	0.676	S-Cam	NA671	R	
High- z cluster	XCSJ2215-1738	1.46	[OII]	0.916	S-Cam	NB912,921	z'	Hayashi+'10,'11 observed
	4C65.22	1.52	H α	1.651	MOIRCS	NB1657	H	
	CL0332-2742	1.61	[OII]	0.973	S-Cam	NB973	y	Hayashi+'13
	CIGJ0218.3-0510	1.62	[OII]	0.977	S-Cam	NB973	y	Tadaki+'12
Proto- cluster	PKS1138-262	2.16	H α	2.071	MOIRCS	NB2071	K_s	Koyama+'12
	4C23.56	2.48	H α	2.286	MOIRCS	NB2288	K_s	Tanaka+'11
	USS1558-003	2.53	H α	2.315	MOIRCS	NB2315	K_s	Hayashi+'12
General field	GOODS-N (70 arcmin ²)	2.19	H α	2.094	MOIRCS	NB2095	K_s	Tadaki+'11
			H β	1.551	MOIRCS	NB1550	H	not yet
			[OII]	1.189	MOIRCS	NB1190	J	observed
	SXDF-CANDELS (92 arcmin ²)	2.19	H α	2.094	MOIRCS	NB2095	K	Tadaki+'13
			H β	1.551	MOIRCS	NB1550	H	not yet
			[OII]	1.189	MOIRCS	NB1190	J	not yet
		2.53	H α	2.315	MOIRCS	NB2315	K_s	Tadaki+'13

Kodama, T., Hayashi, M., Koyama, Y., Tadaki, K., Tanaka, I., Shimakawa, R., et al.

Unique Sets of Narrow-Band Filters on Wide-Field Cameras

Suprime-Cam (optical) and MOIRCS (NIR)

The existing Suprime-Cam NB-filters capture emission lines from known good targets. The MOIRCS NB-filters were specifically designed for good targets at frontier redshifts.



4 narrow-band filters

Camera	Filter	λ_c	FWHM
MOIRCS	NB1190	1.189 μm	0.014 μm
	NB1550	1.550 μm	0.018 μm
	NB1657	1.657 μm	0.019 μm
	NB2071	2.069 μm	0.027 μm
	NB2095	2.095 μm	0.025 μm
	NB2288	2.296 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

7 narrow-band filters

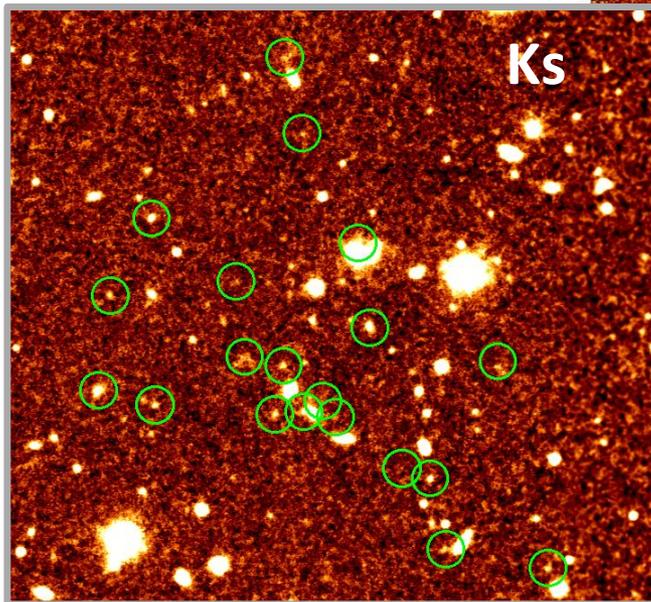
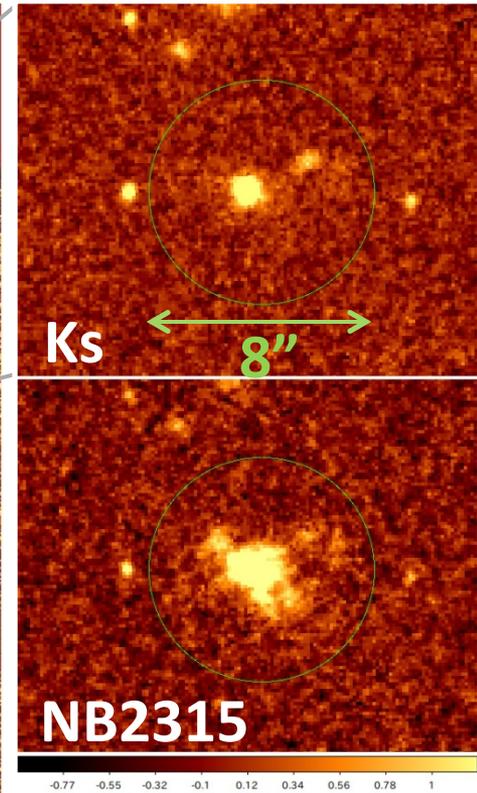
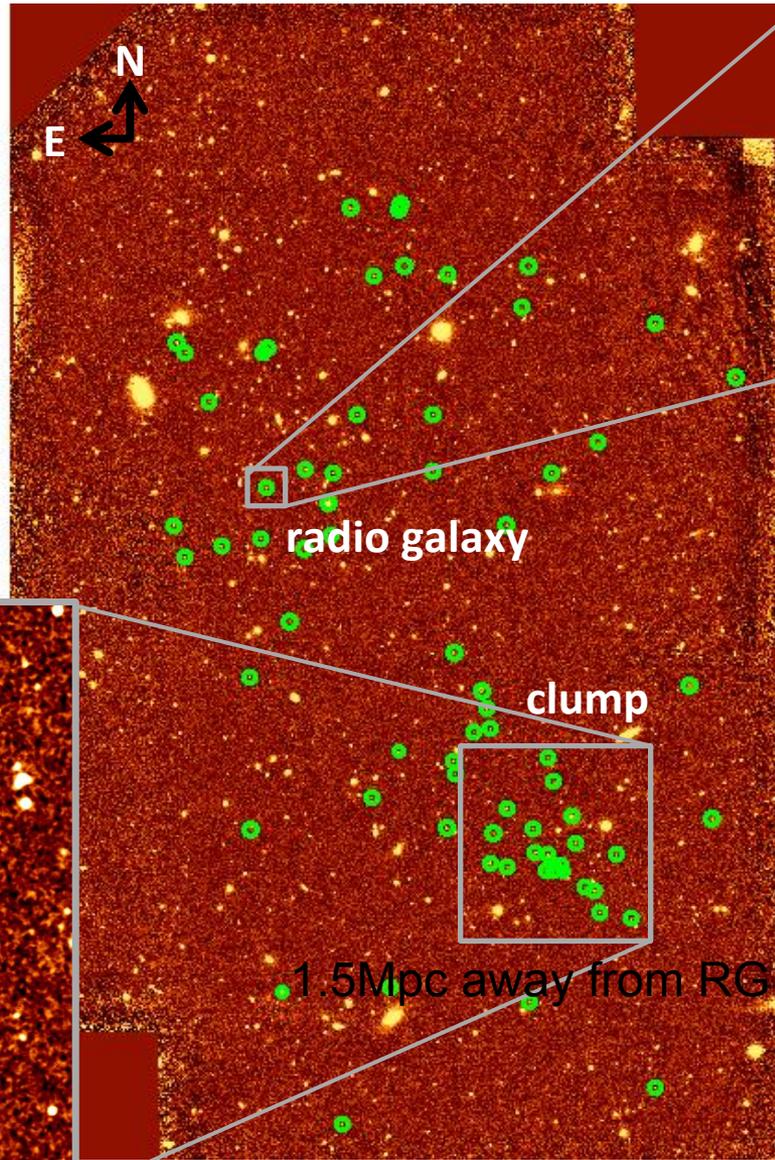
FWHMs correspond to $\pm 1500\text{-}2000\text{km/s}$

USS1558-003 proto-cluster at $z=2.53$

H α emitters

3.4 hrs integration
on NB2315 (H α)

0.4-0.5" seeing

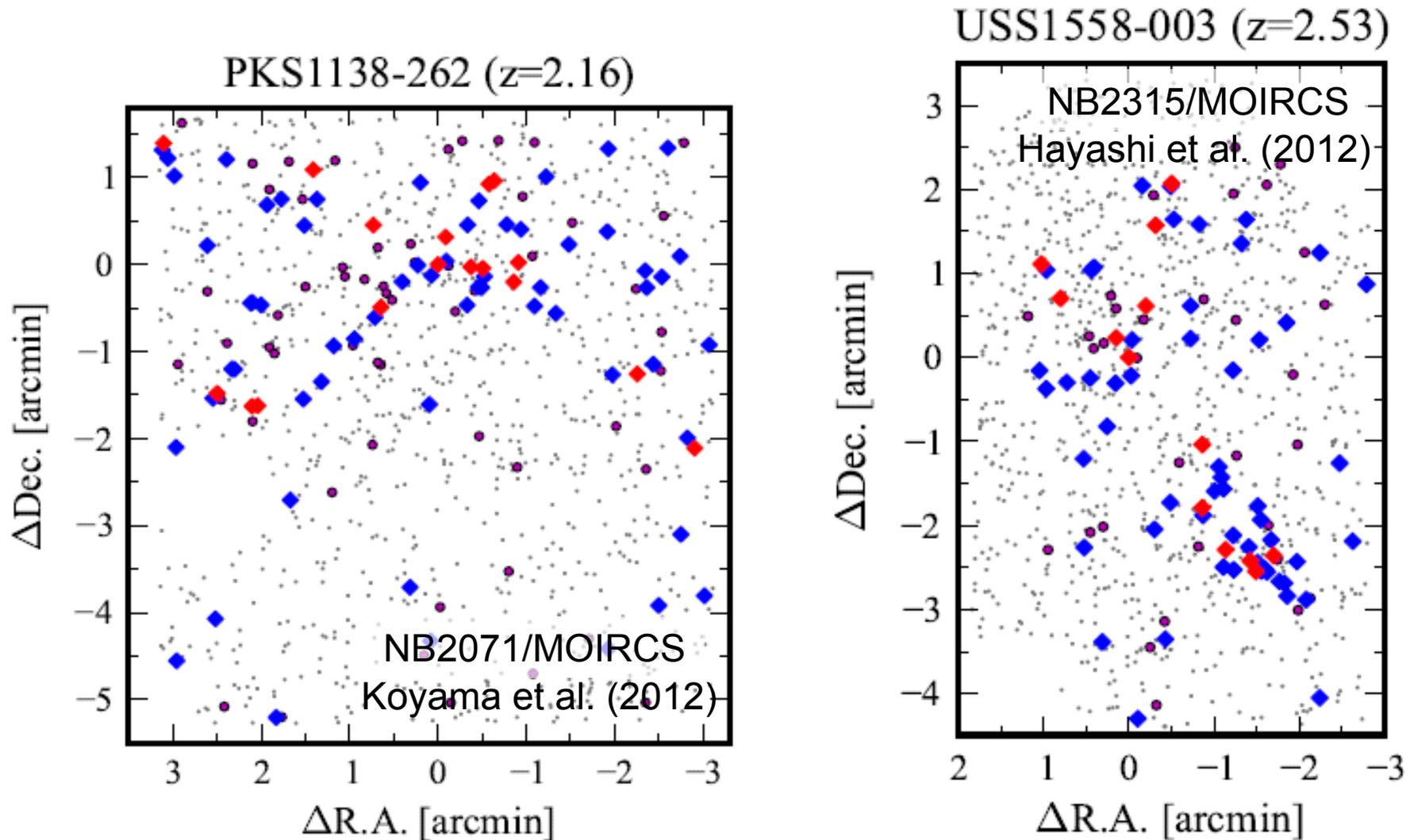


x 24 denser than field

Integrated SFR amounts to $10^4 M_{\odot}/\text{yr}$ over the cluster

Hayashi et al. (2012)

H α emitters in two proto-clusters at $z > 2$

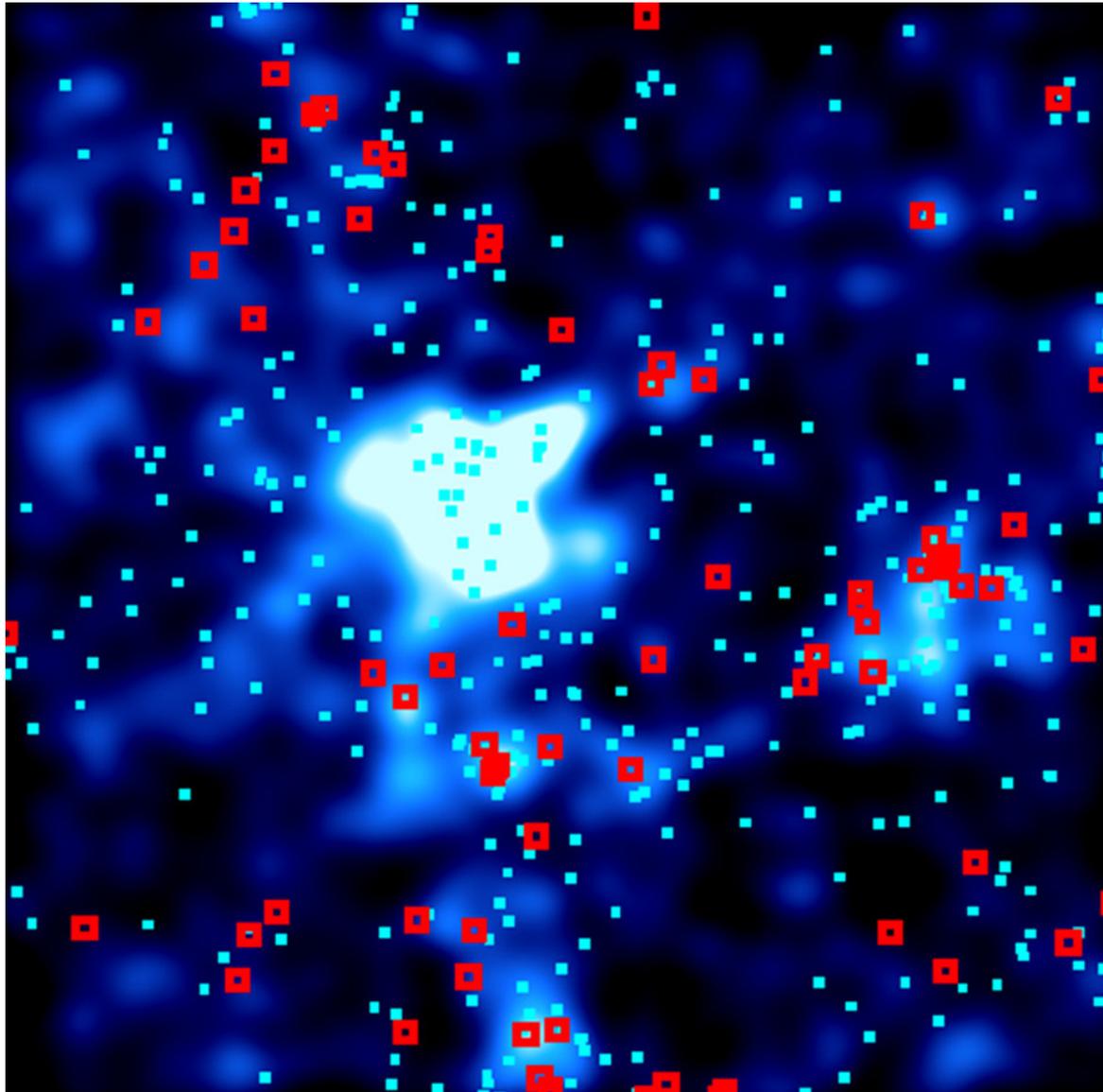


Red H α emitters tend to favor higher density regions!

Such red H α emitters are found in groups (medium density regions) at $z \sim 0.5-0.8$.

The "key" populations under the influence of environmental effects!

Red Ha emitters in groups !



□ red HAEs

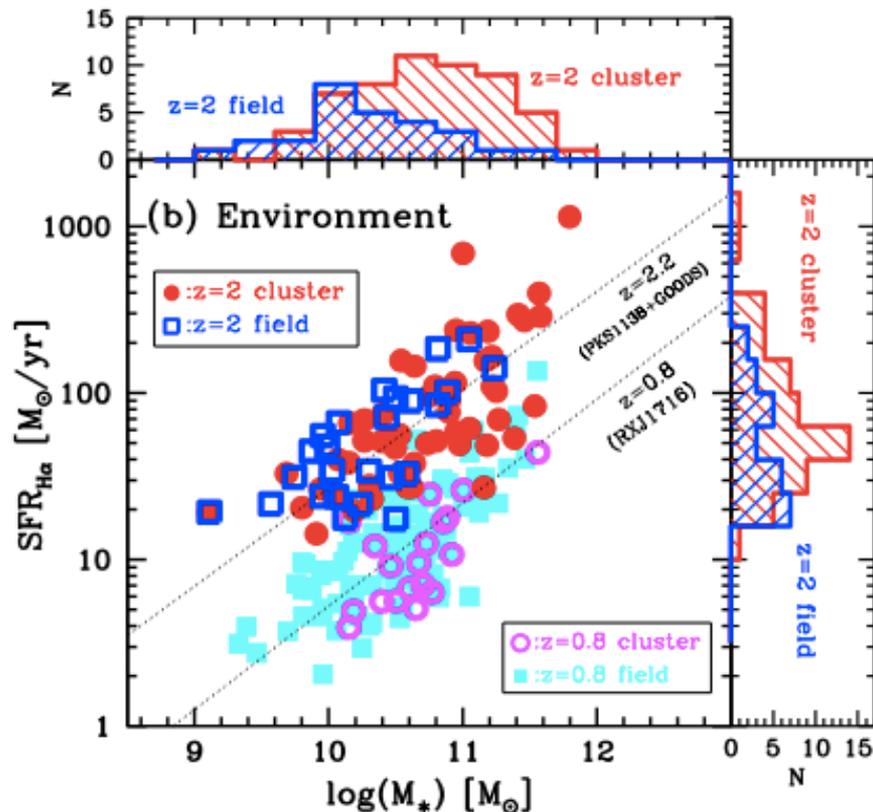
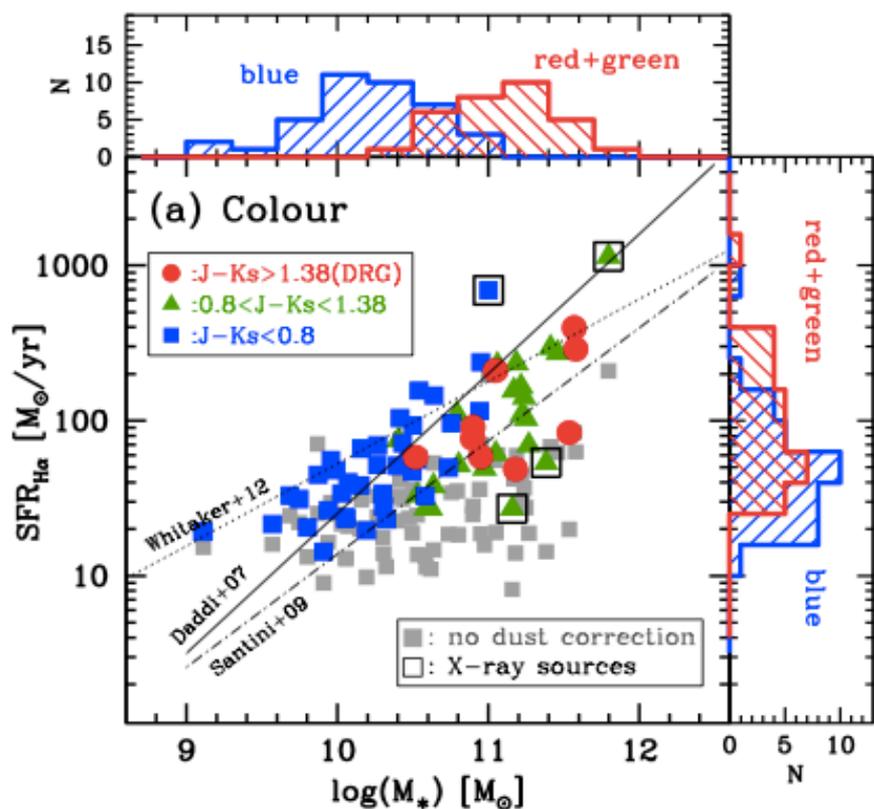
■ blue HAEs

SFR > 0.75 M_⊙/yr

"Octopus cluster" (CL0939@z=0.41)

Koyama et al. (2011)

Red Ha emitters tend to be more massive and more bursty!
 Massive galaxies grow early/rapidly in high density region.



$A(H\alpha)$ is corrected for as a function of M_*

SF galaxies in the cluster apparently follow the same MS as the field relation.
 But dust extinction may be underestimated for the red emitters (MIPS sources),
 which would then raise the intrinsic cluster relation upwards from the field one?

Koyama, et al. (2012)

H α emitter survey in SXDF-CANDELS field

CANDELS WFC3

MOIRCS survey

CANDELS ACS

領域	SXDF-CANDELS ~90 arcmin ²
装置	Subaru/MOIRCS
フィルター	NB2095/NB2315
z=2.2 emitter	60
z=2.5 emitter	38

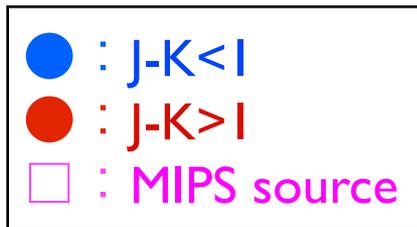
豊富な赤外・サブミリ波データ

- Spitzer MIPS24um
- Herschel SPIRE, PACS
- ASTE/AzTEC 1.1mm

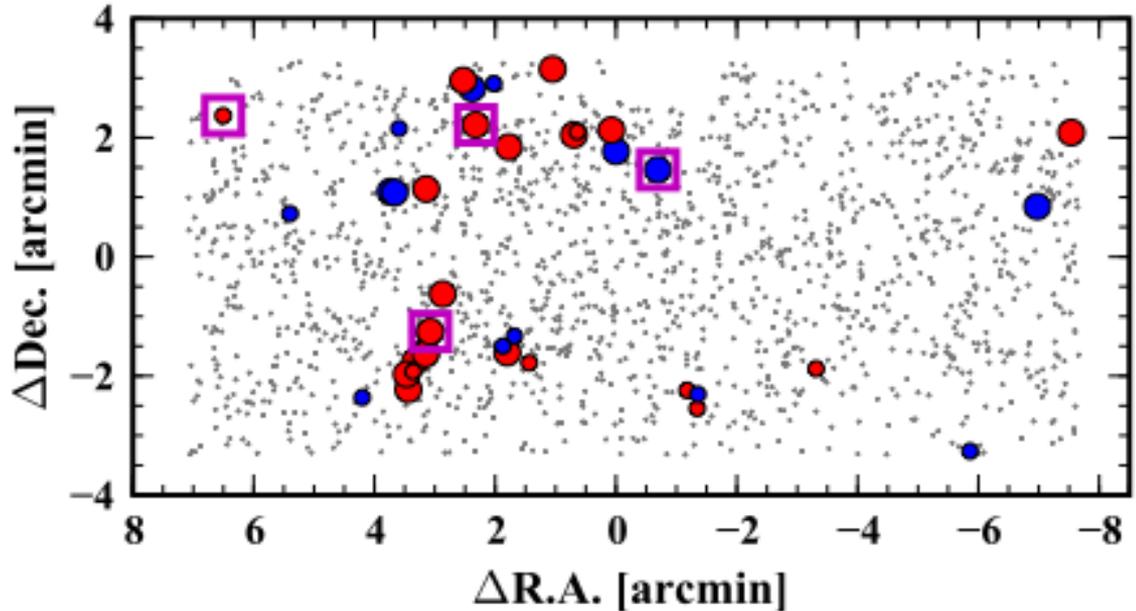
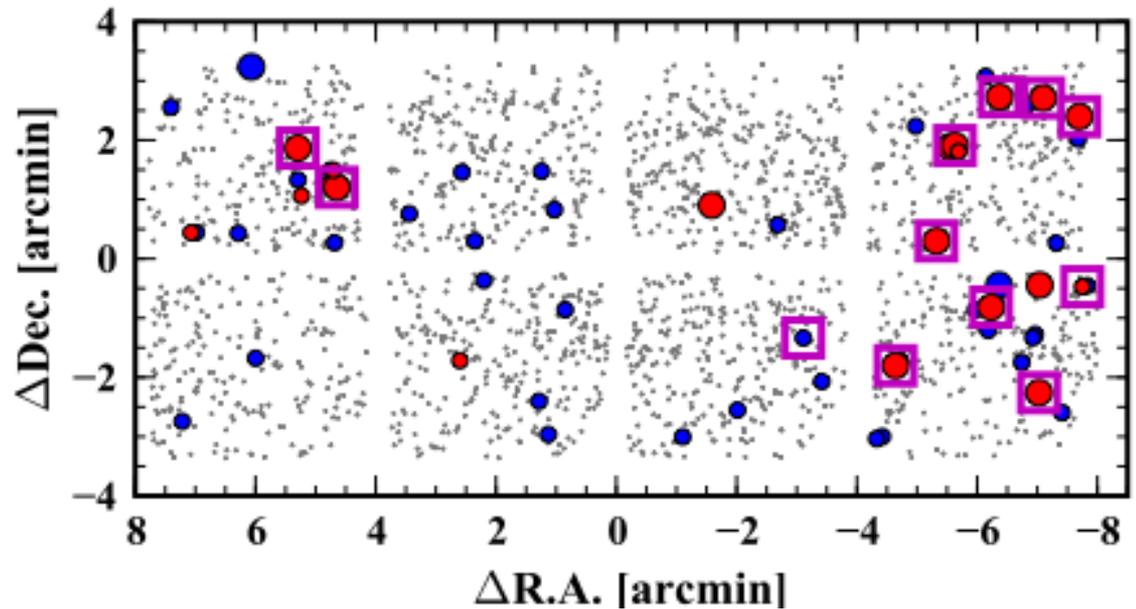
Tadaki et al. (2013)

Spatial distribution

$z=2.2$ H α emitter
(NB2095)



$z=2.5$ H α emitter
(NB2315)



HST/WFC3
F160W images

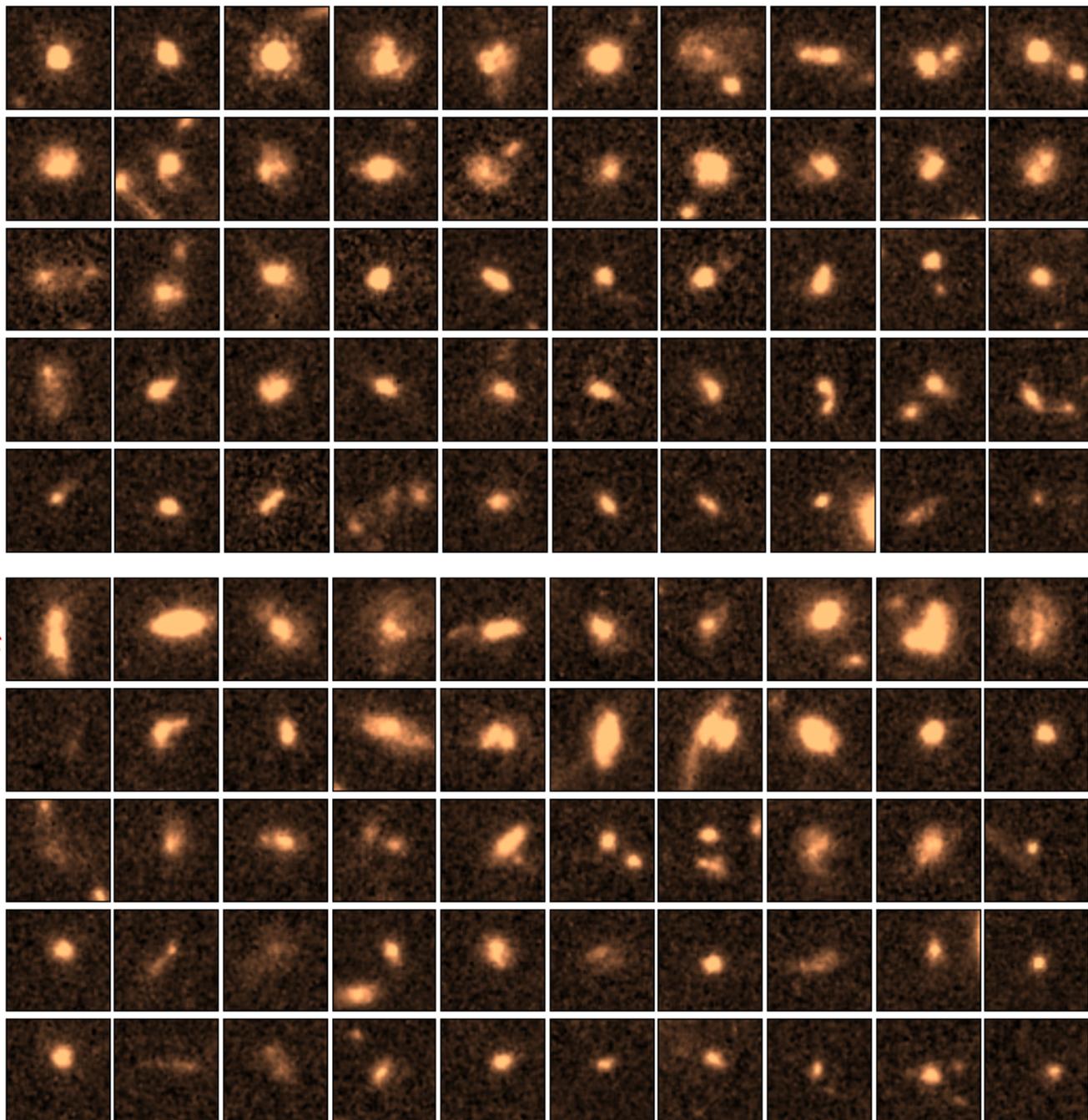
SXDF/CANDELS

H α emitters
at $z=2.19$
(NB2095)

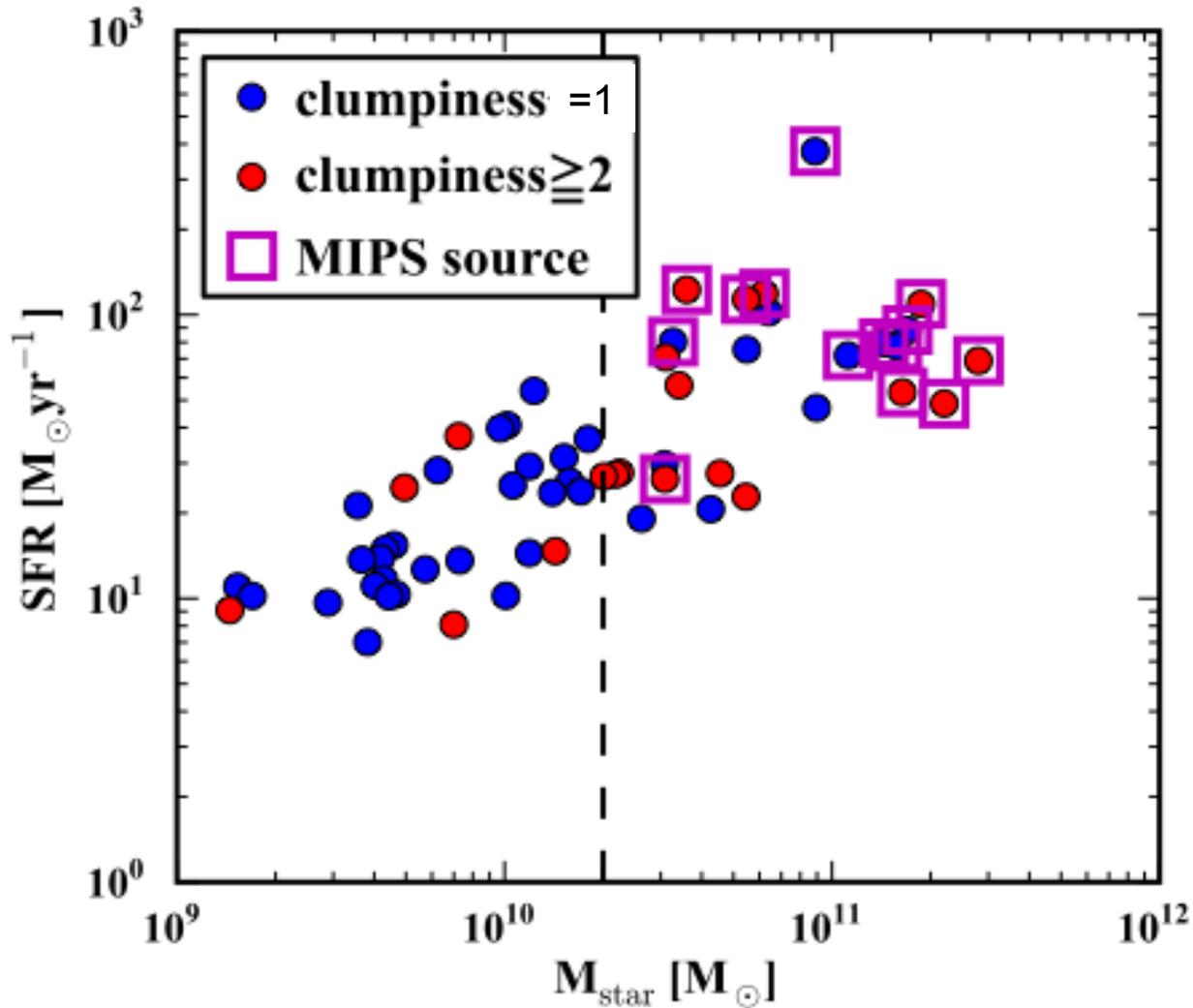
***Many show
clumpy structures
or merger signatures***

H α emitters
at $z=2.53$
(NB2315)

Tadaki et al. (2013)



クランプ銀河は重く、SFRが高く、ダスティー(MIPS)な傾向
IRから求めるとSFRはさらに高く、バースティー

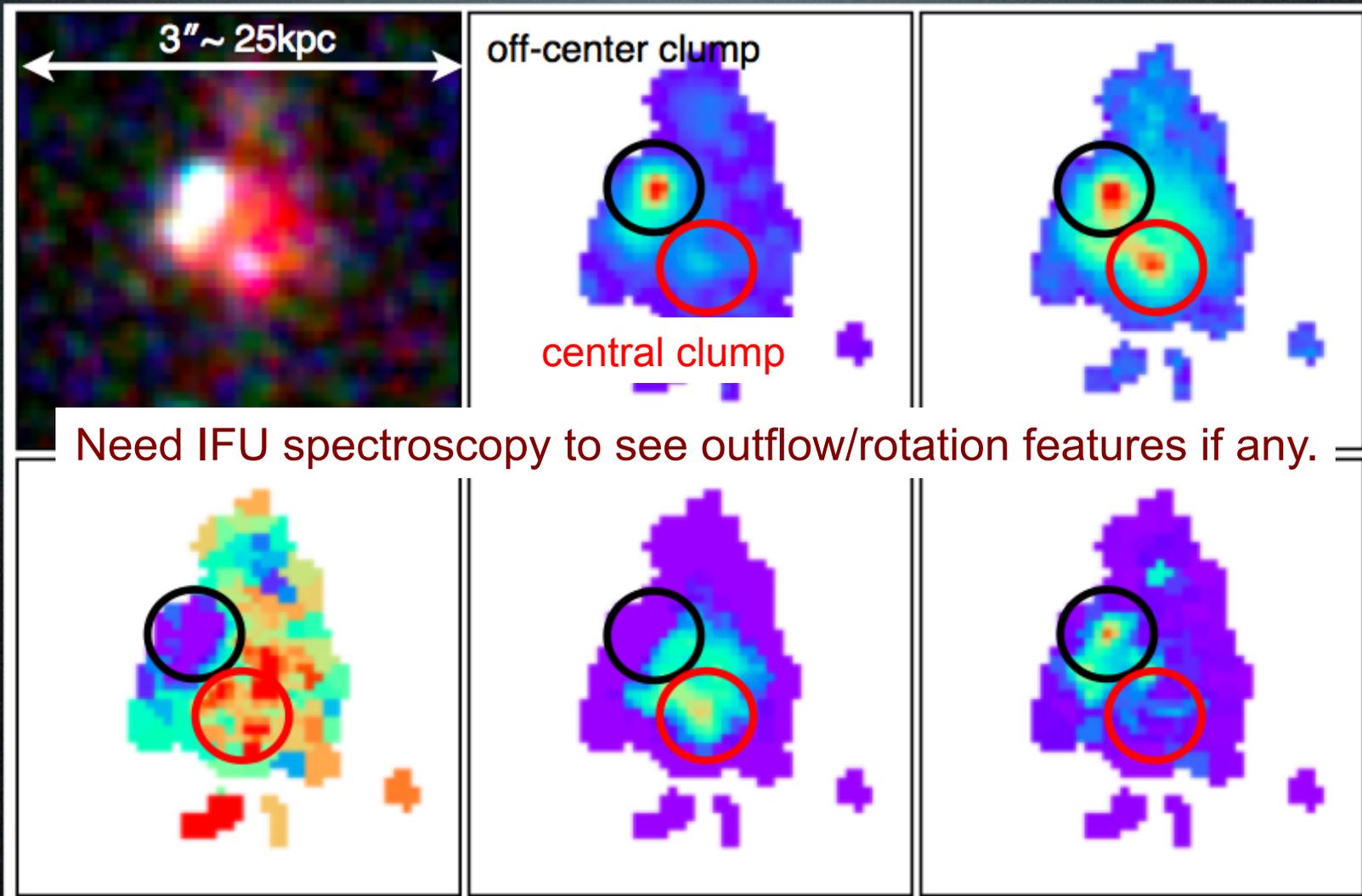


クランプ銀河の中で何が起きているのか？

HAE @ $z=2.2$ @ SXDF-CANDELS

Z_{814} (UV)

H_{160} (optical)



Need IFU spectroscopy to see outflow/rotation features if any.

$Z_{814} - H_{160}$

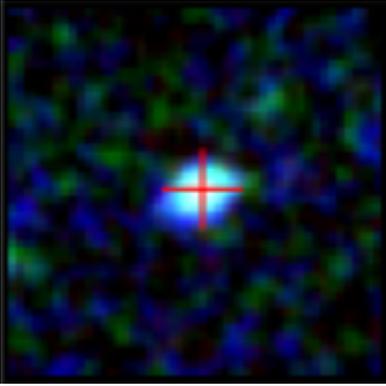
Mass

SFR ($H\alpha$)

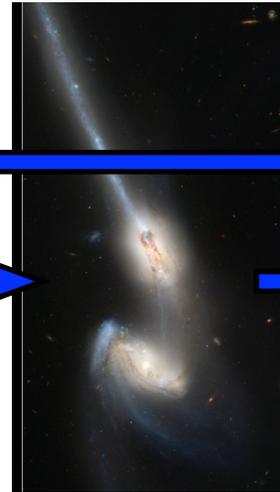
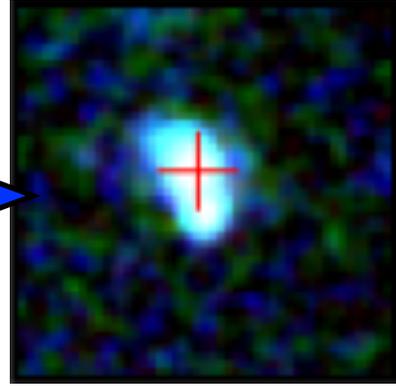
Tadaki +
(2013)

大質量銀河の形成シナリオ

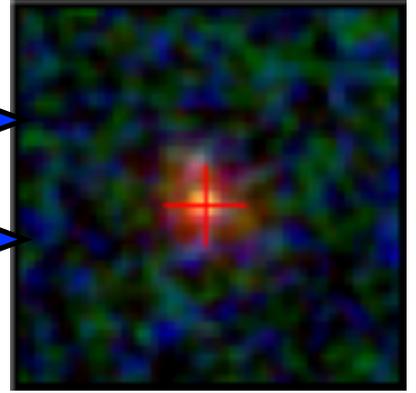
$M=(0.1-2.0)\times 10^{10}M_{\odot}$



$M=(2-10)\times 10^{10}M_{\odot}$

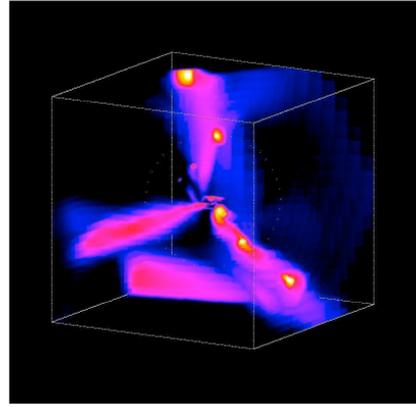


$M > 1 \times 10^{11}M_{\odot}$

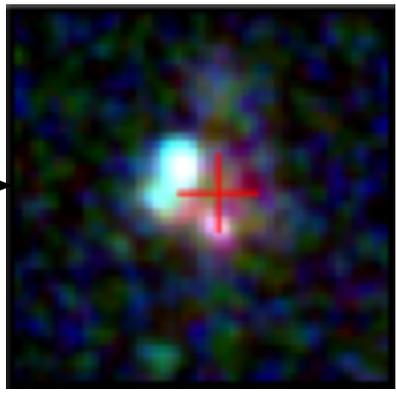


ボトムアップ型 (叩き上げ型)

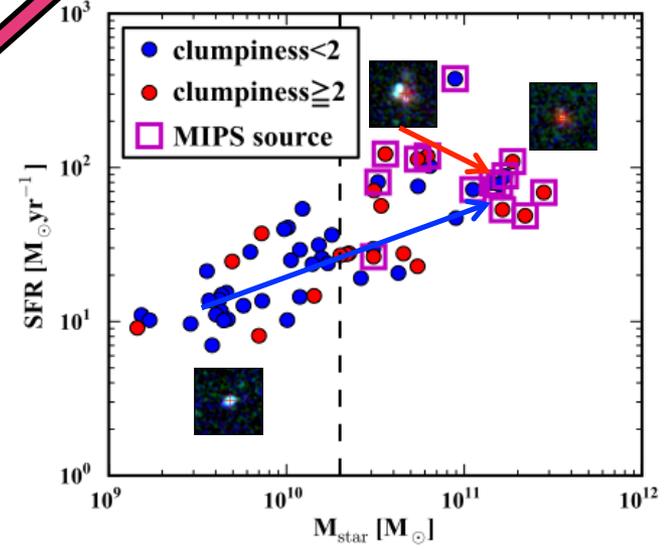
cold stream



$M > 2 \times 10^{10}M_{\odot}$

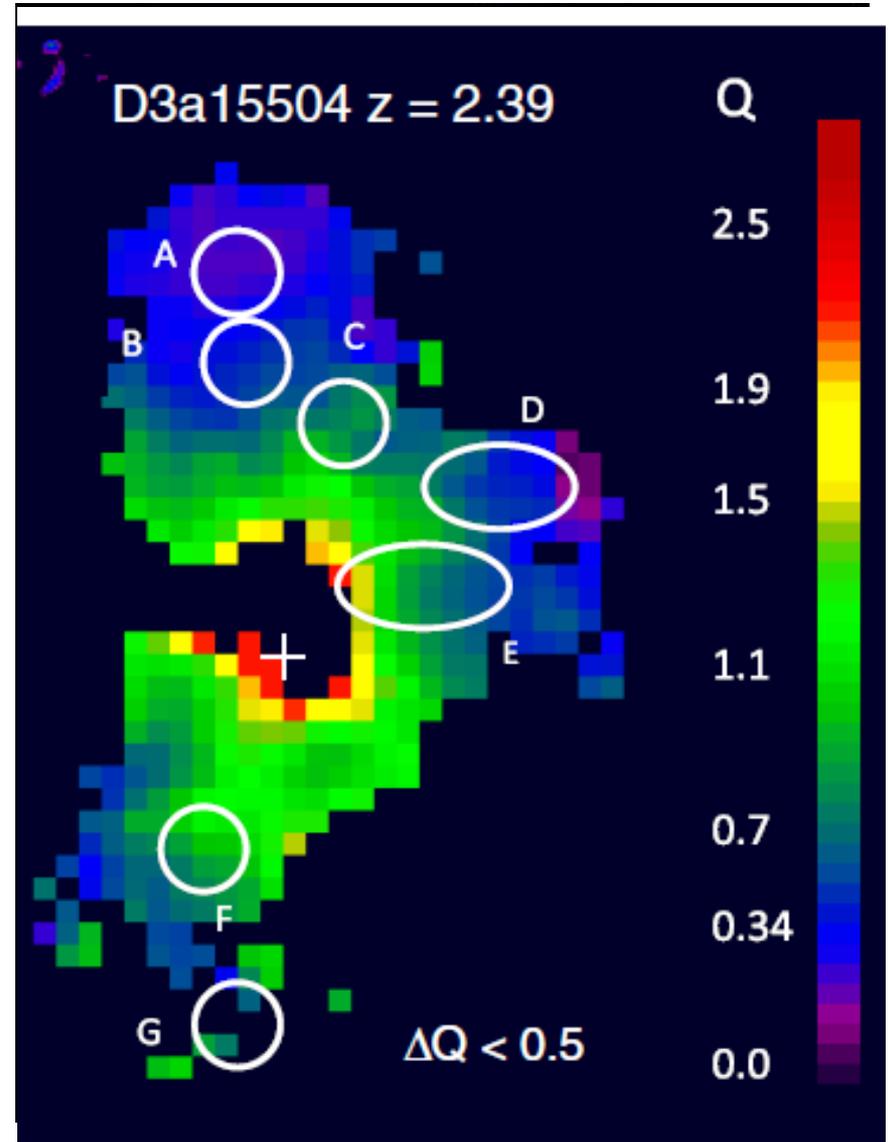
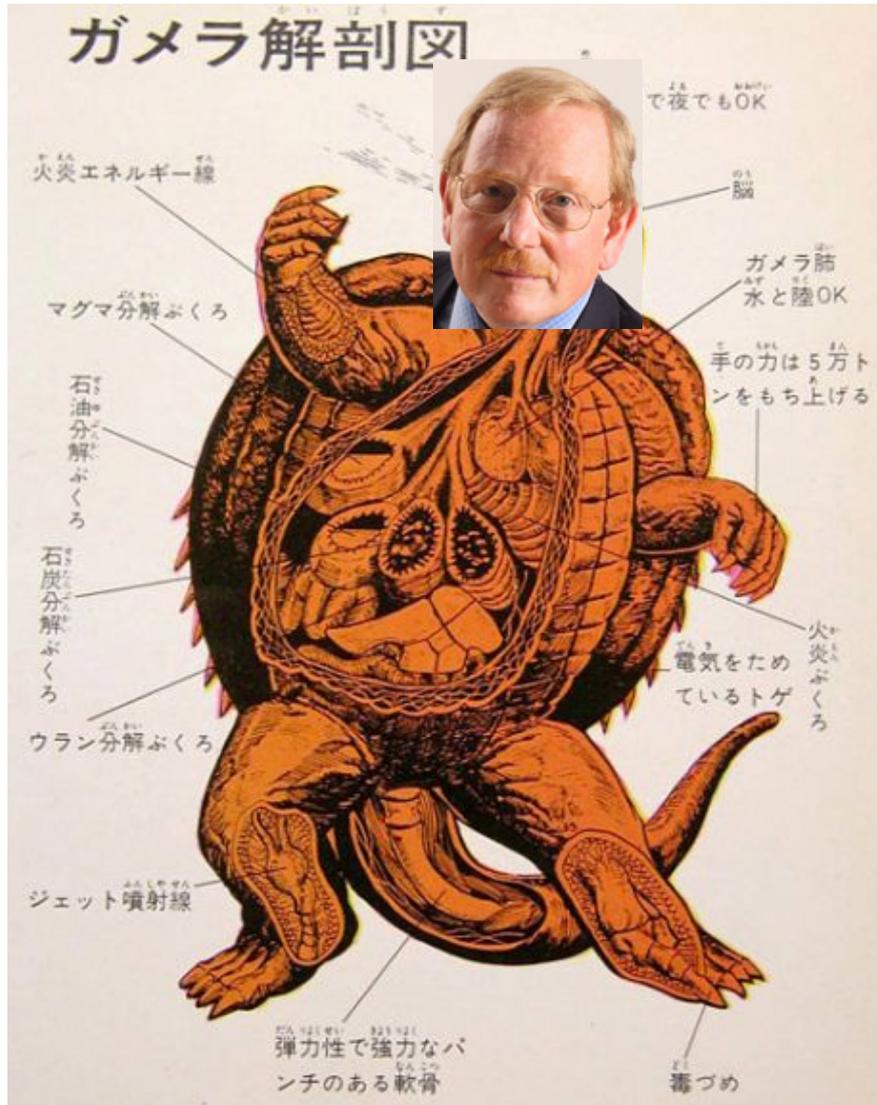


トップダウン型 (もともとリッチ型)



銀河解剖学

銀河をパーツにわけ、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。



We need to **resolve "forming galaxies"**
both **spatially** and **kinematically**,
and at both **Opt-NIR** and **Submm-Radio**

Mergers?

Nucleated dusty starburst + AGN?
Disordered kinematics, central outflow?

Clump-migration?

SF clumps + central starburst + AGN?
Rotational disk, outflows?

Secular evolution?

Disk-wide accretion & star formation?
Rotation/pressure supported?

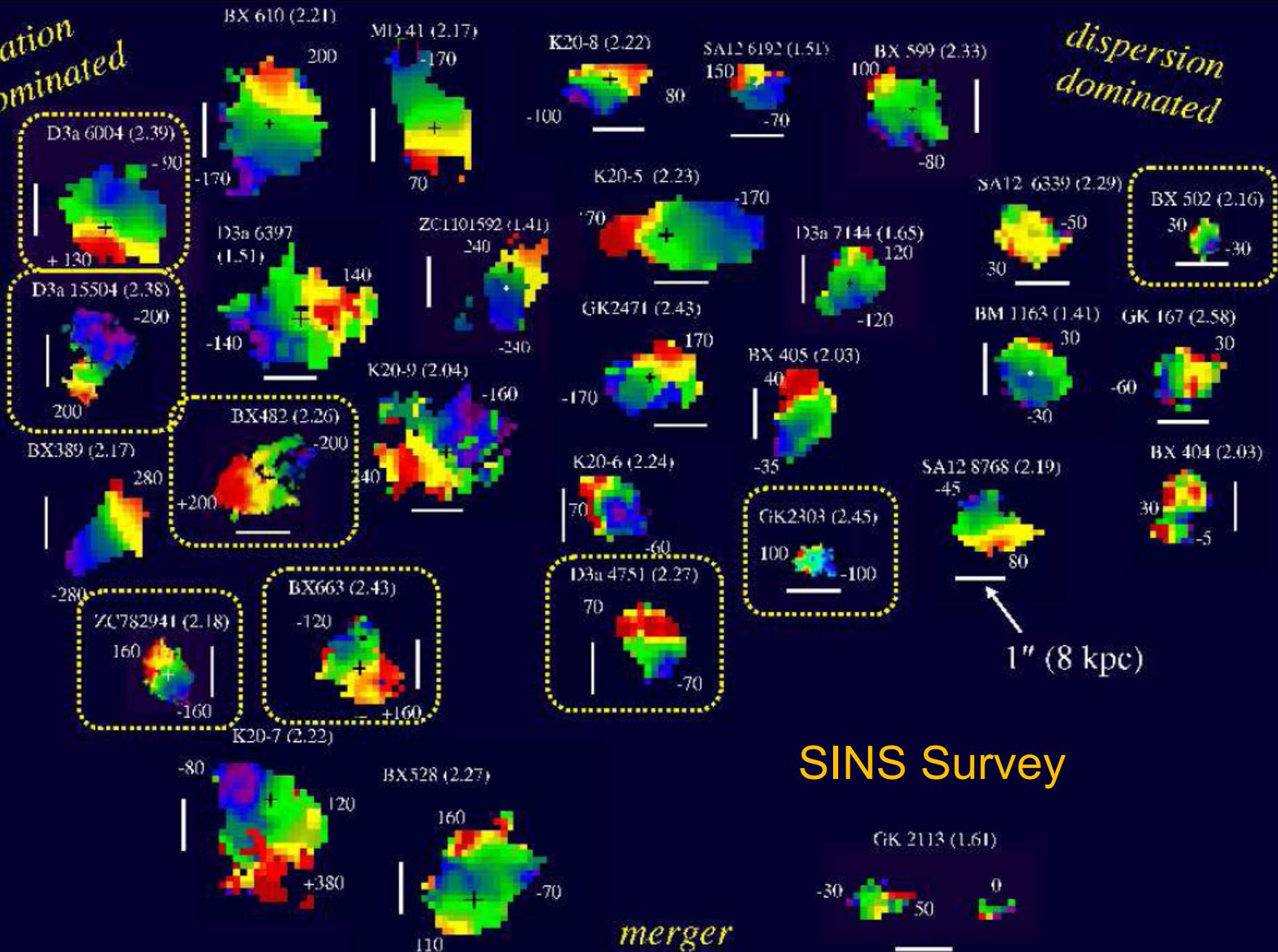
AO imaging at K-band (M^* distribution) and NB-H α (SFR distribution)

IFU (rotation, outflow, velocity dispersion, AGN, chemical evolution)

ALMA (dense gas distribution? SF mode? kinematics?)

rotation dominated

dispersion dominated



SINS Survey

$z \sim 2$ UV selected galaxies; VLT/SINFONI w/o AO; $V_c/\sigma \sim 2-4$

Foerster-Schreiber et al. (2009)

Signatures of outflows (500-1000km/s)

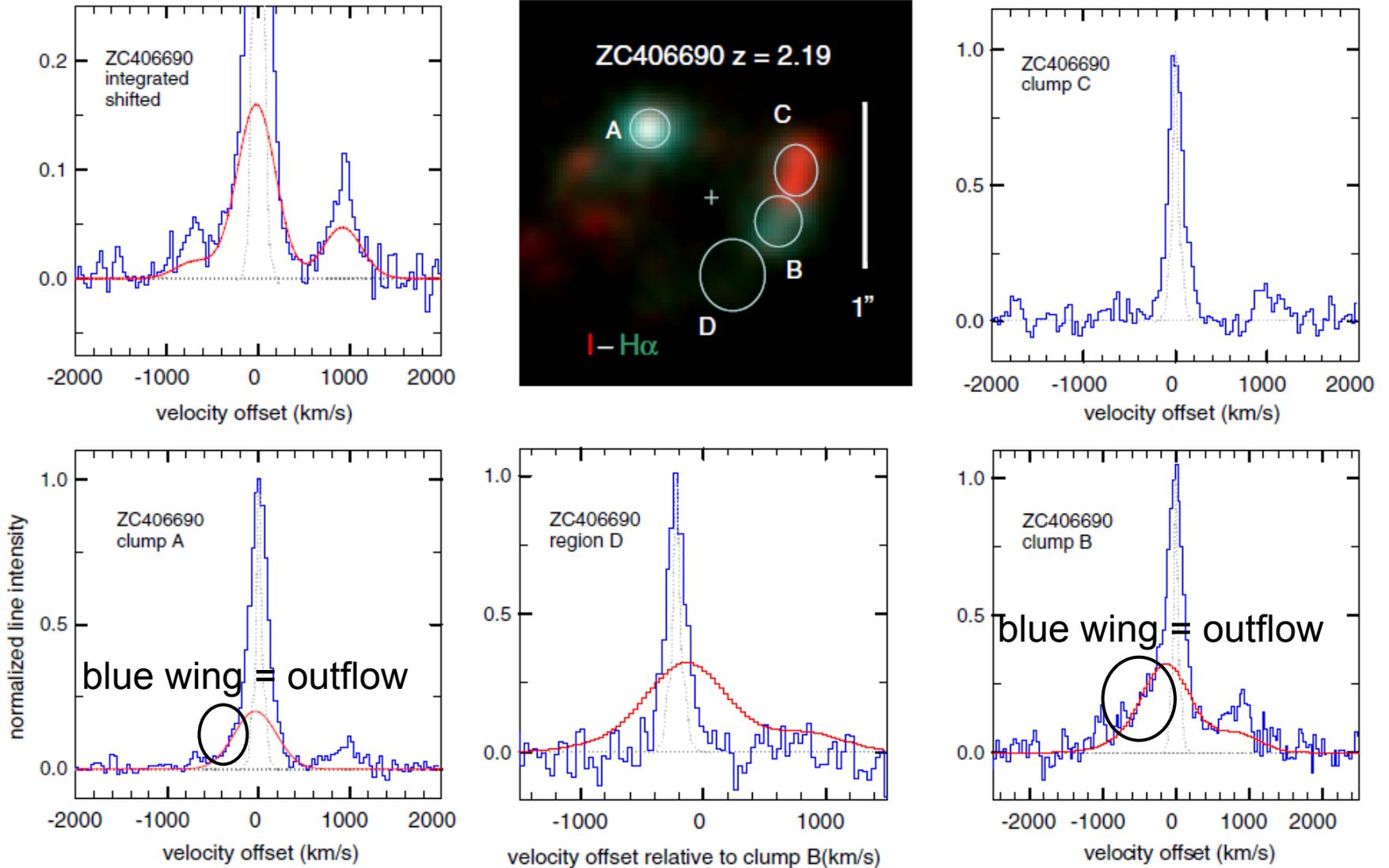
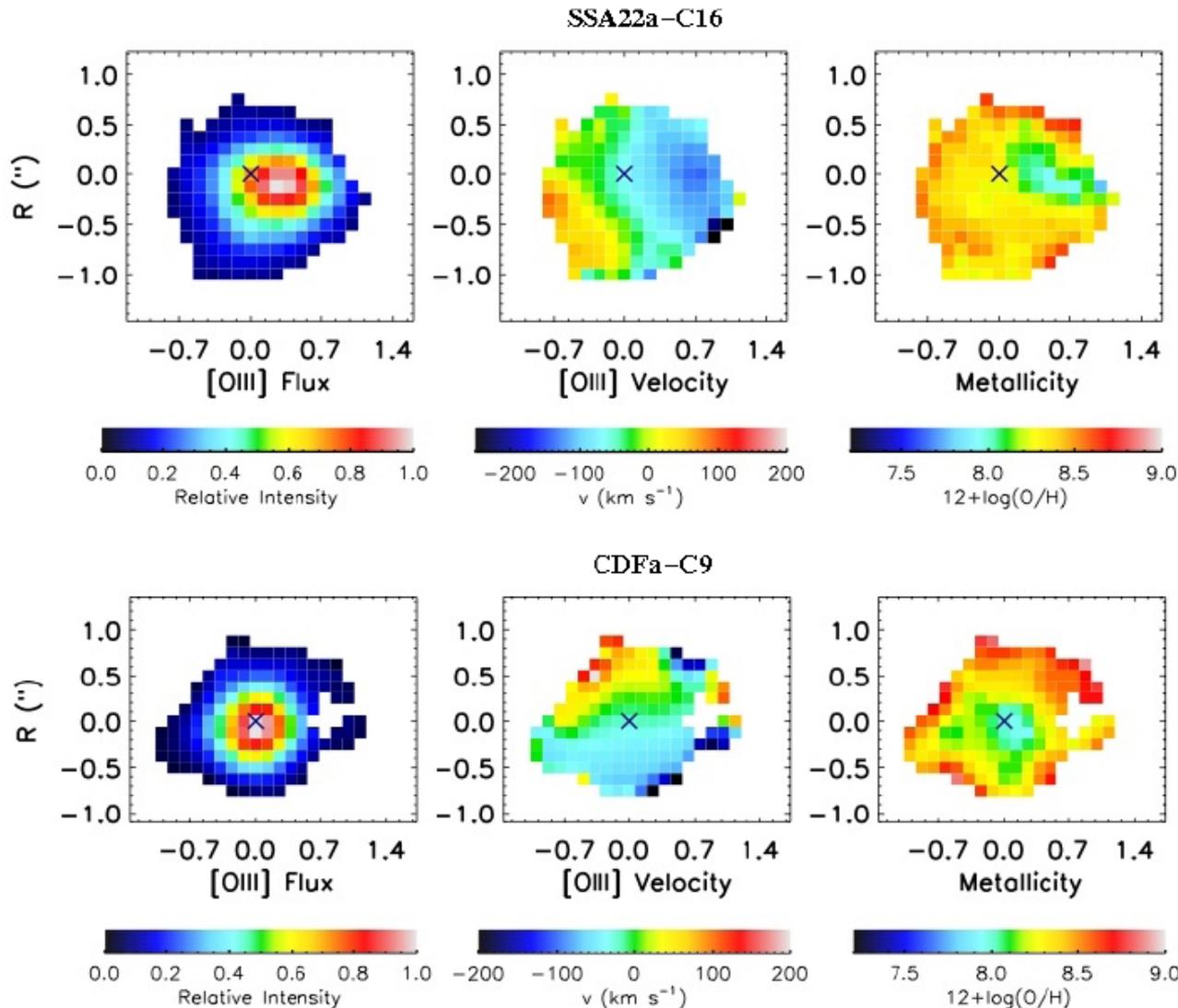


Figure 7. $H\alpha$ spectra of ZC406690 ($z = 2.195$), for the entire galaxy (top left), as well as for selected clumps marked in the central $H\alpha$ -ACS I -band composite (Figure 2). The dotted gray curves in all panels denote the SINFONI spectral response profile measured from OH sky lines. Before 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.

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

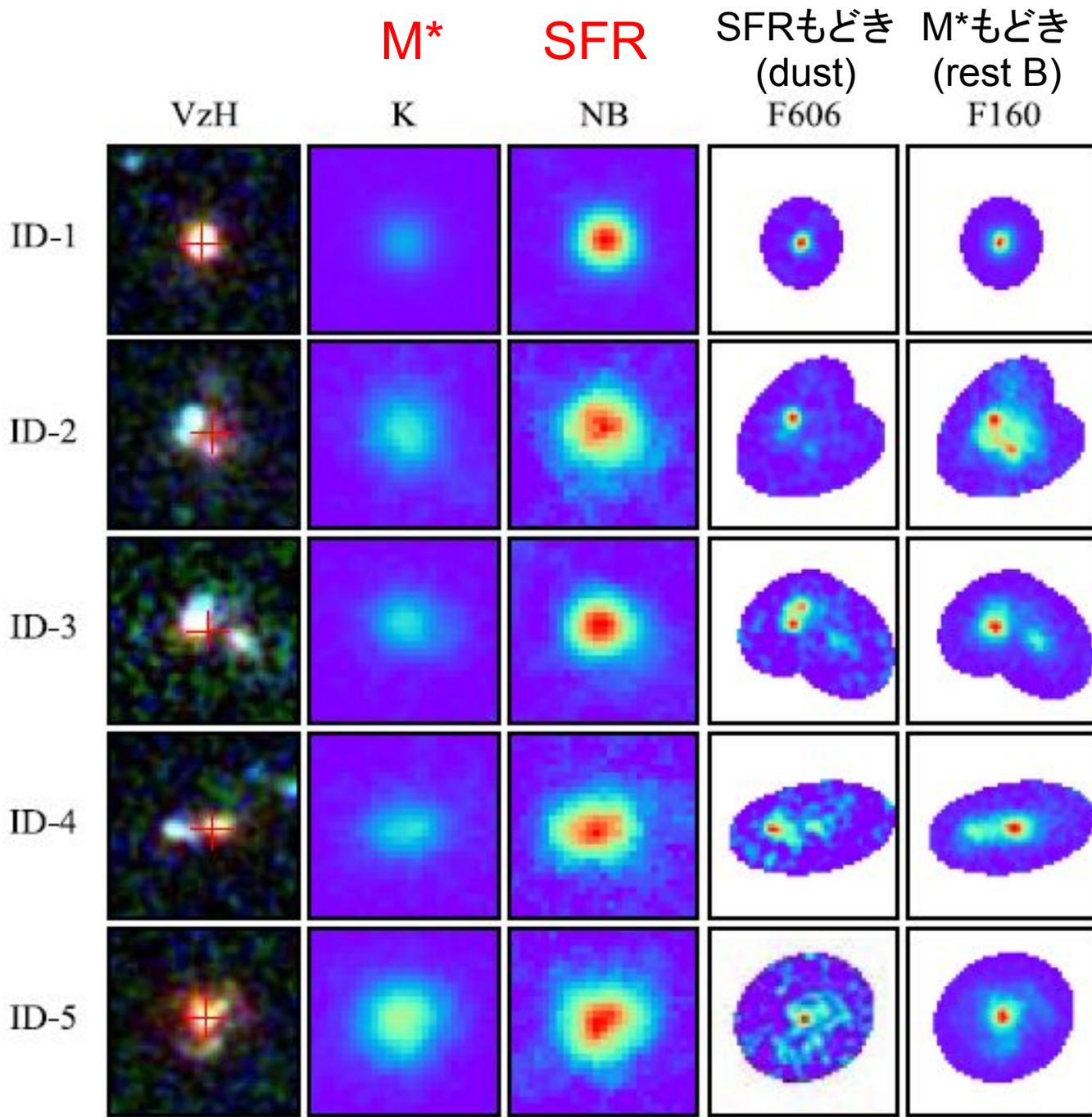


2D map of line ratios
(metallicity indicators)
such as
 $[OIII]/H\beta$ and $[NII]/H\alpha$

VLT/SINFONI
Cresci et al. (2010)

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

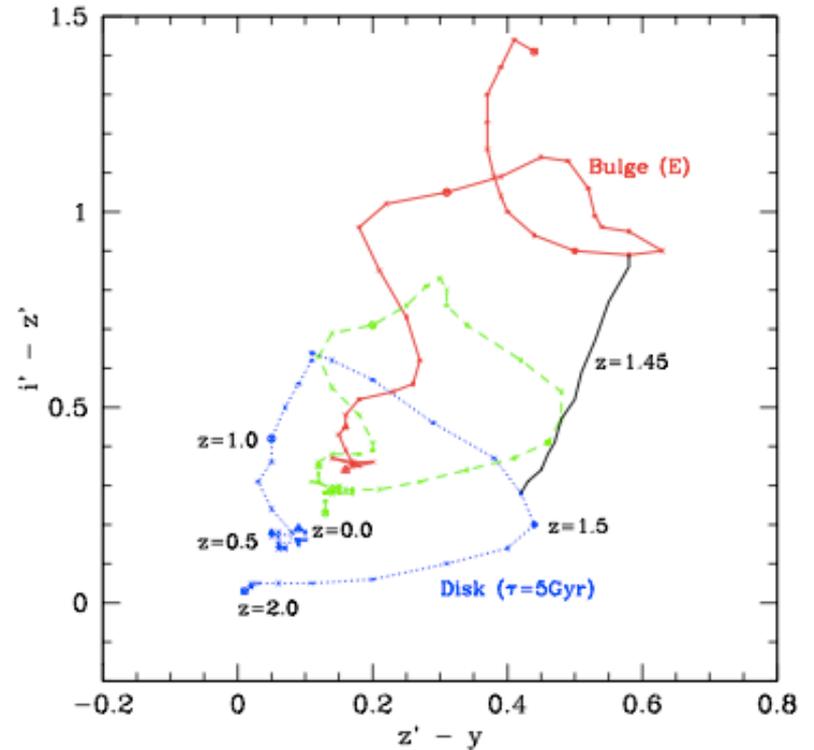
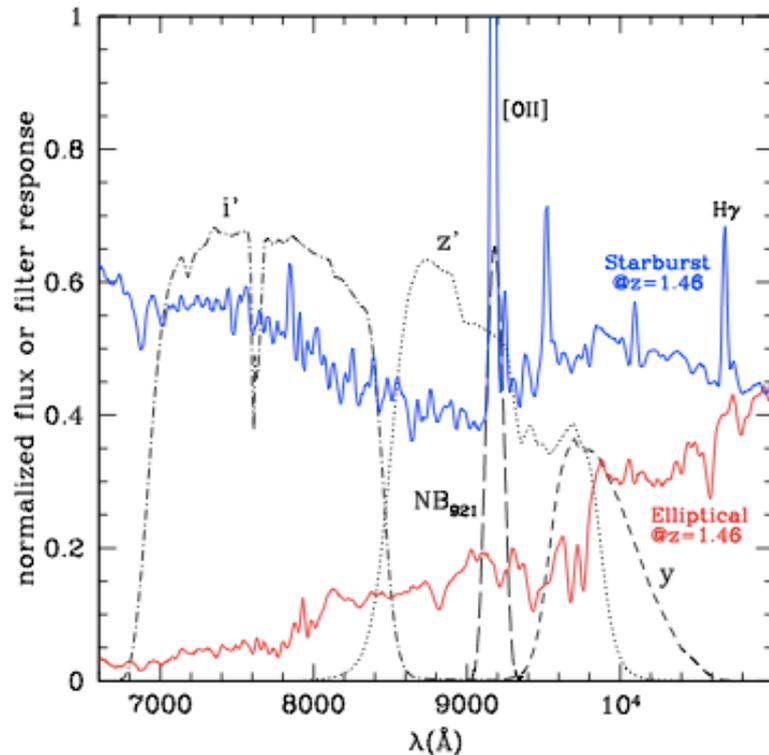
Lower metallicity at the center → Dilution by (almost) metal-free cold streams?



H-bandはK-bandに
比べて、星形成活動に
1.5倍大きく左右される
@ $z=2-2.5$

HSC survey for $1.2 < z < 1.7$ [OII] emitters and $z < 1.6$ galaxies

30平方度のディープサーベイ



Filter	CW [Å]	FWHM [Å]	$z(\text{Ly}\alpha)$	$z([\text{OII}])$	$z(\text{H}\beta)$	$z([\text{OIII}])$	$z(\text{H}\alpha)$
NB816	8160	120	5.711 ± 0.049	1.189 ± 0.016	0.679 ± 0.012	0.630 ± 0.012	0.243 ± 0.009
NB921	9210	131	6.574 ± 0.054	1.471 ± 0.018	0.895 ± 0.013	0.839 ± 0.013	0.403 ± 0.010
NB973	9730	138	7.002 ± 0.057	1.611 ± 0.019	1.002 ± 0.014	0.943 ± 0.014	0.483 ± 0.011
NB101	10095	143	7.302 ± 0.059	1.709 ± 0.019	1.077 ± 0.015	1.016 ± 0.014	0.538 ± 0.011

SWIMS-18 Survey for $0.9 < z < 2.5$ H α emitters and $z < 4$ galaxies

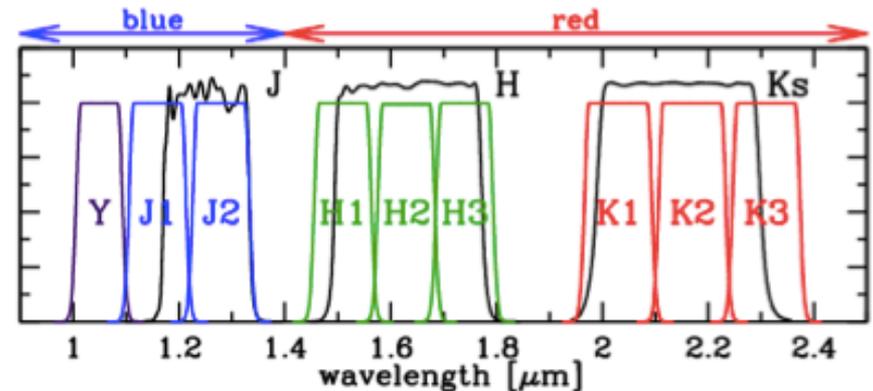
表 1 : SWIMS-18 のフィルター仕様

狭帯域 (narrow-band)			中間帯域 (medium-band)				広帯域 (broad-band)			
Band	λ_0 (μm)	FWHM (μm)	Band	λ (μm)	λ_0 (μm)	FWHM (μm)	Band	λ (μm)	λ_0 (μm)	FWHM (μm)
<i>NB1244</i>	<i>1.244</i>	<i>0.012</i>	Y	1.00–1.10	1.05	0.09	J	1.17–1.33	1.25	0.16
<i>NB1261</i>	<i>1.261</i>	<i>0.012</i>	<i>J1</i>	<i>1.11–1.23</i>	<i>1.17</i>	<i>0.12</i>	H	1.48–1.78	1.63	0.30
<i>NB1630</i>	<i>1.630</i>	<i>0.016</i>	<i>J2</i>	<i>1.23–1.35</i>	<i>1.29</i>	<i>0.12</i>	Ks	1.99–2.30	2.15	0.30
<i>NB1653</i>	<i>1.630</i>	<i>0.016</i>	<i>H1</i>	<i>1.44–1.56</i>	<i>1.50</i>	<i>0.12</i>				
<i>NB2137</i>	<i>2.137</i>	<i>0.021</i>	<i>H2</i>	<i>1.56–1.68</i>	<i>1.62</i>	<i>0.12</i>				
<i>NB2167</i>	<i>2.167</i>	<i>0.021</i>	<i>H3</i>	<i>1.68–1.80</i>	<i>1.74</i>	<i>0.12</i>				
			<i>K1</i>	<i>1.96–2.10</i>	<i>2.03</i>	<i>0.14</i>				
			<i>K2</i>	<i>2.10–2.24</i>	<i>2.17</i>	<i>0.14</i>				
			<i>K3</i>	<i>2.24–2.38</i>	<i>2.31</i>	<i>0.14</i>				

表 2 : 狭帯域フィルターが捕える赤方偏移。

(斜字は本提案が主に対象とする3つの赤方偏移 $z \sim 0.9, 1.5, 2.3$)。

	$z(\text{H}\alpha)$	$z(\text{OIII})$	$z(\text{H}\beta)$	$z(\text{OII})$	$z(\text{Pa}\alpha)$
NB1244	<i>0.895</i>	<i>1.484</i>	1.559	2.337	
NB1261	<i>0.922</i>	<i>1.519</i>	1.595	2.384	
NB1630	<i>1.484</i>	<i>2.256</i>	2.354		
NB1653	<i>1.519</i>	<i>2.302</i>	2.401		
NB2137	<i>2.256</i>	3.268			0.140
NB2167	<i>2.302</i>	3.328			0.156



Mahalo-Subaru, HSC, and SWIMS-18 surveys
will provide:

a nearly-SFR-limited sample of galaxies at $1 < z < 2.5$
a nearly- M^* -limited sample of galaxies at $0.4 < z < 4$
over a wide range in environment.

We will need: high resolution imaging at K-band (M^*),
at NB ($H\alpha$ -SFR), and multi-IFU (kinematics, etc) to
resolve physical processes in these galaxies.

→ GLAO + Wide-field NIR imager with NB and
multi-IFU (or slit scan?) will be the solution!

GLAO + NIR-cam のサーベイ

- 一視野あたり

FoV=200 arcmin²、NB(R=100)

2×10^4 Mpc³

100個のHAE@z~2(>15M_☉/yr) with 3 hrs

- 2平方度の無バイアスサーベイ

7×10^5 Mpc³ (log M_{cluster}>14.5が数個入る)

36 pointings, 3 NB filters +Ks ~ 45 nights

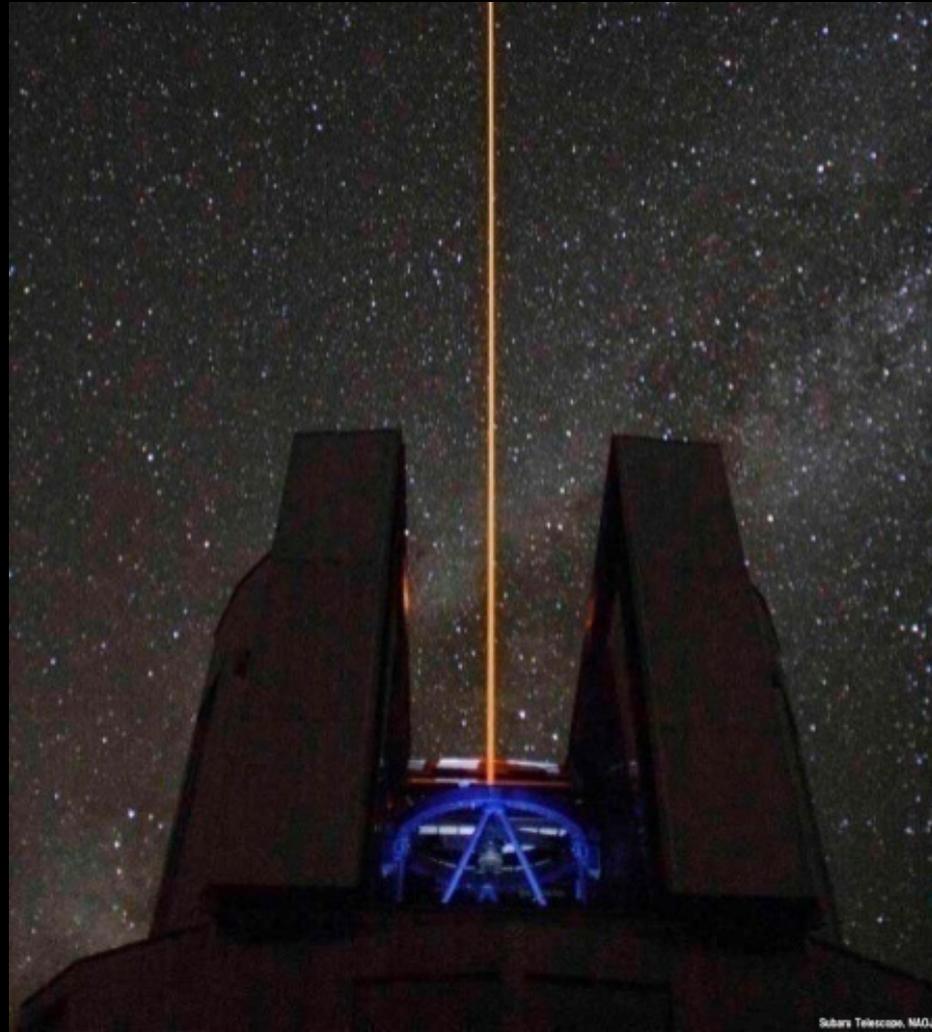
1万個規模の HAE / O2E サンプル (0.8<z<2.5)

IFU follow-up, 5hrs x100ptgs (3K gals) ~50 nights

- 銀河団を狙ったバイアスサーベイ

上記で拾えない大銀河団をカバーし、環境効果を網羅する。

GLAO Science Workshop (Hawaii, 2012/10/17-18)



Welcome to Hilo!

獲得目標

すばる望遠鏡の明夜の将来の鍵を握る、GLAO計画

- GLAO計画の概要、期待されるパフォーマンスを理解する。
- GLAOの性能を最大限に生かせるユニークな観測装置を考える。
- 個々のサイエンス提案を共有する。キーサイエンスを設定できるか？。投資に見合う競争力があるか？

すばるGLAOを、やるのか、やらないのか、決断する。

- 実現までのタイムラインを考える。(TMTとの役割分担)
- 来年度の大規模科研費申請の準備を開始する(チーム、分担)。
- 国際協力を、どこの国や望遠鏡とどう進めるか議論する。

MS上の位置と銀河の性質

Wuyts et al. (2011)

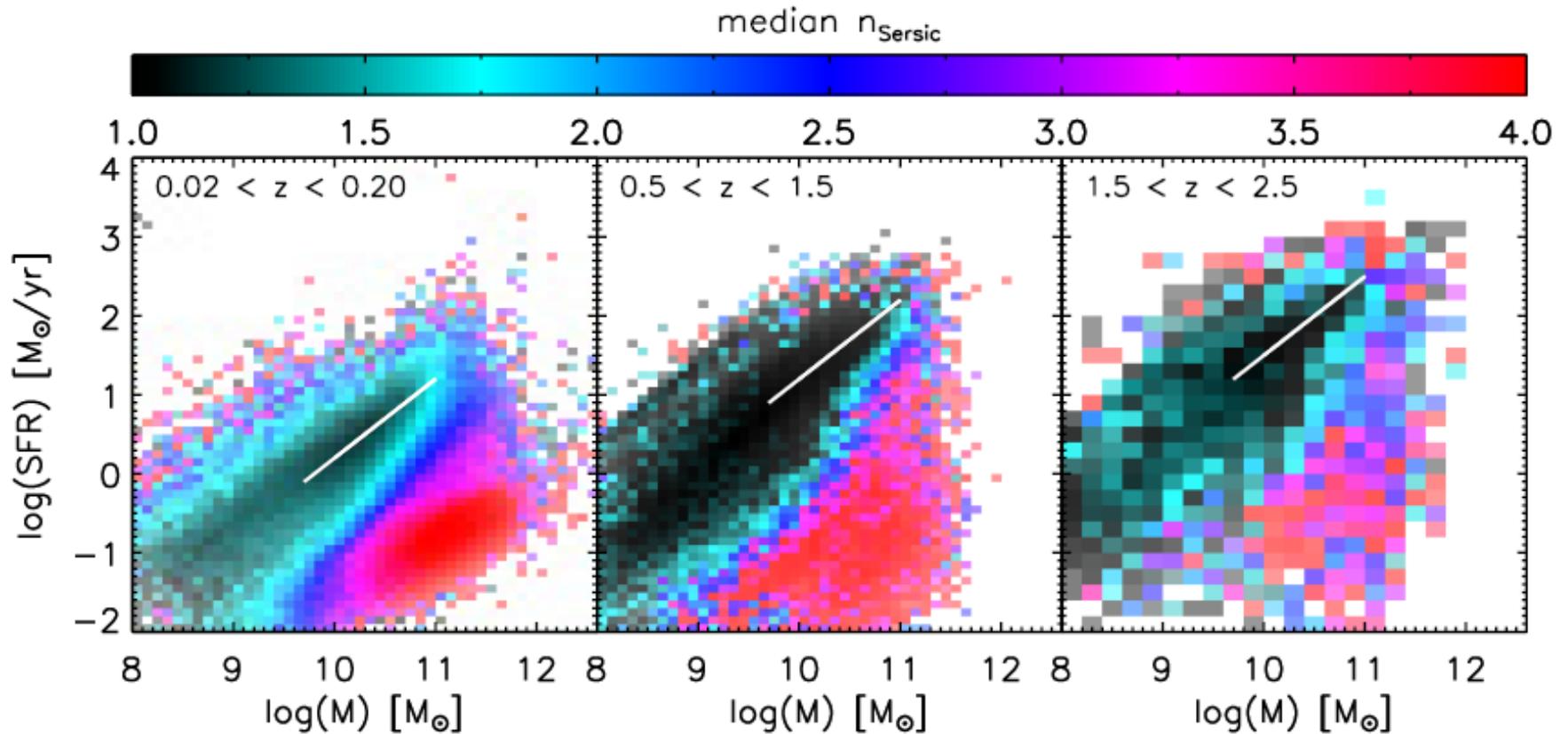
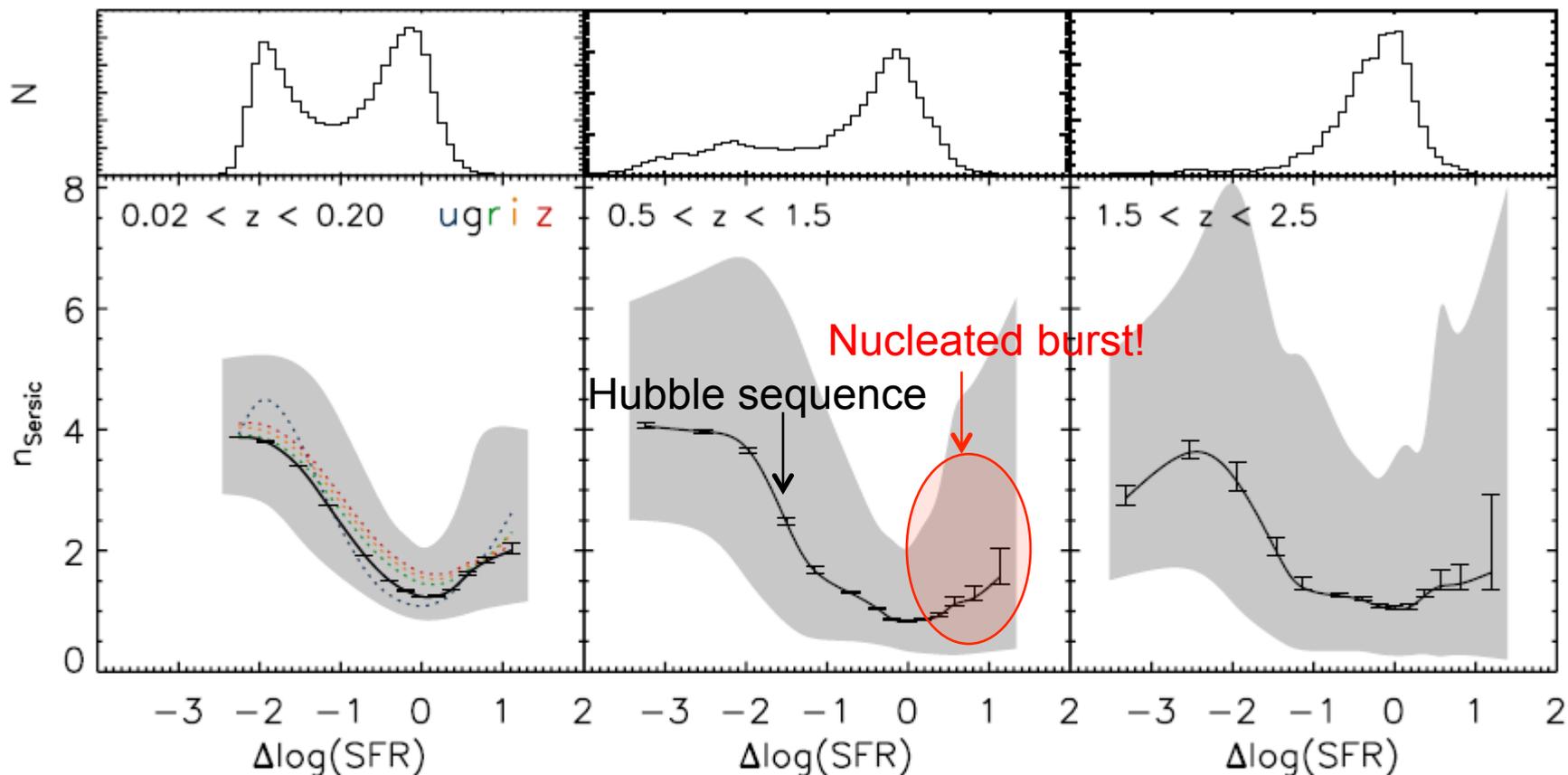


Table 1
Overview Deep Lookback Surveys

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

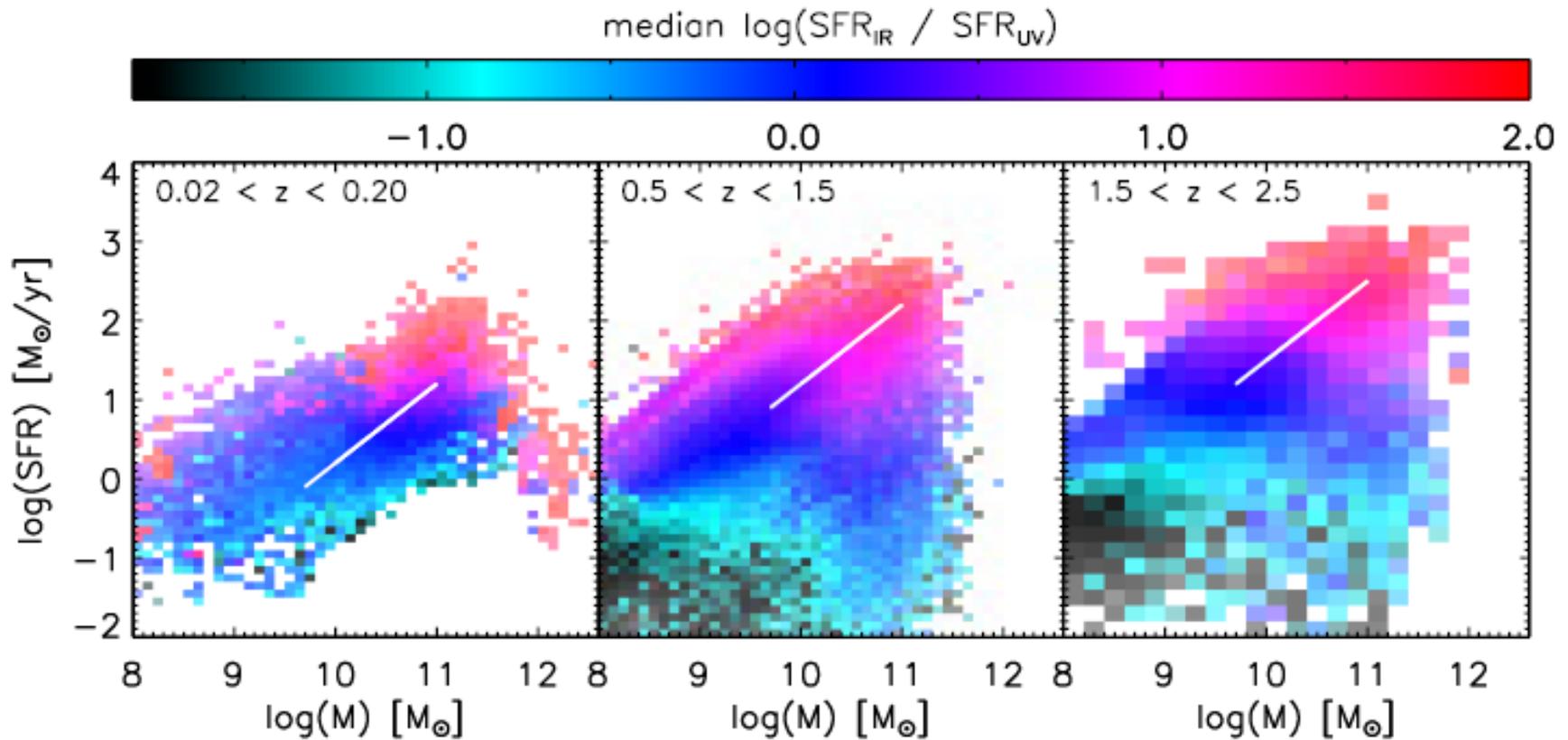
バースト銀河は、銀河中心で星形成が誘発されている！



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SFR(IR) / SFR (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

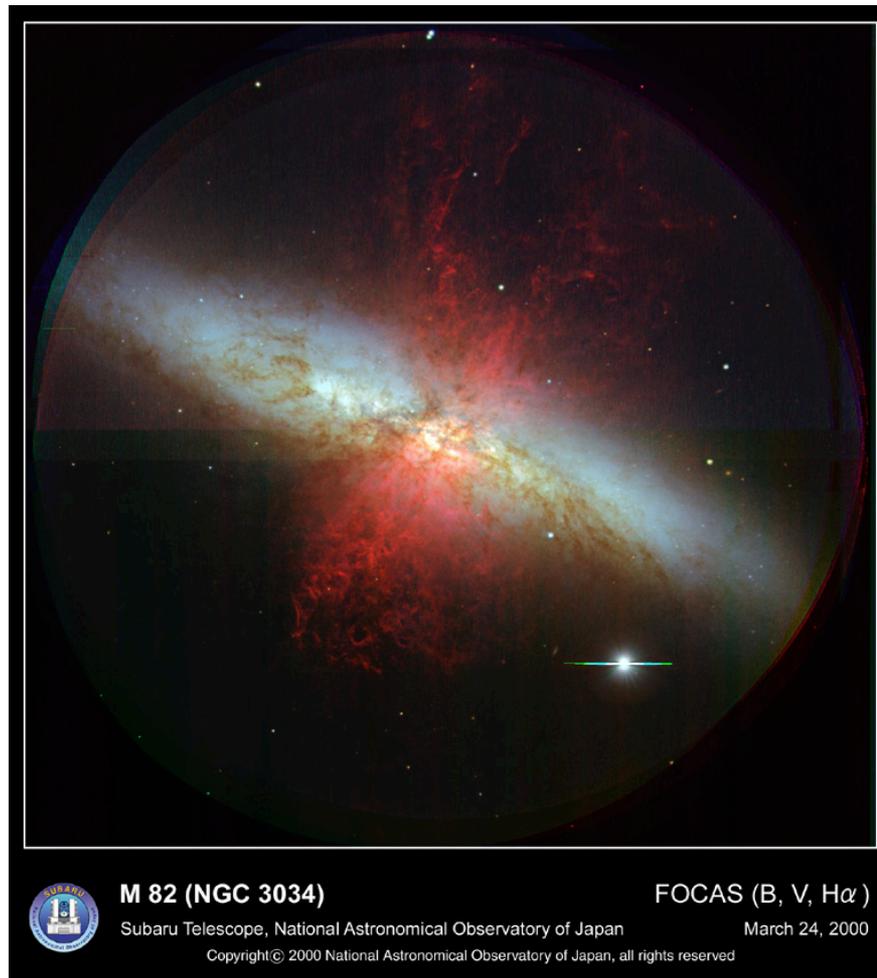
合体によって回転運動が乱され、角運動量を失ったガスが大量に銀河中心に落ち込み、爆発的な星形成を引き起こす。同時に、BH直近の降着円盤にもガスが降り積もり、中心核の活動性が高まる。時として、高温高速のジェットが円盤に垂直方向に吹き出す。また、両者が持っていたブラックホールは、いずれ合体して一つの巨大ブラックホールになる。



銀河とBHの
『共進化』

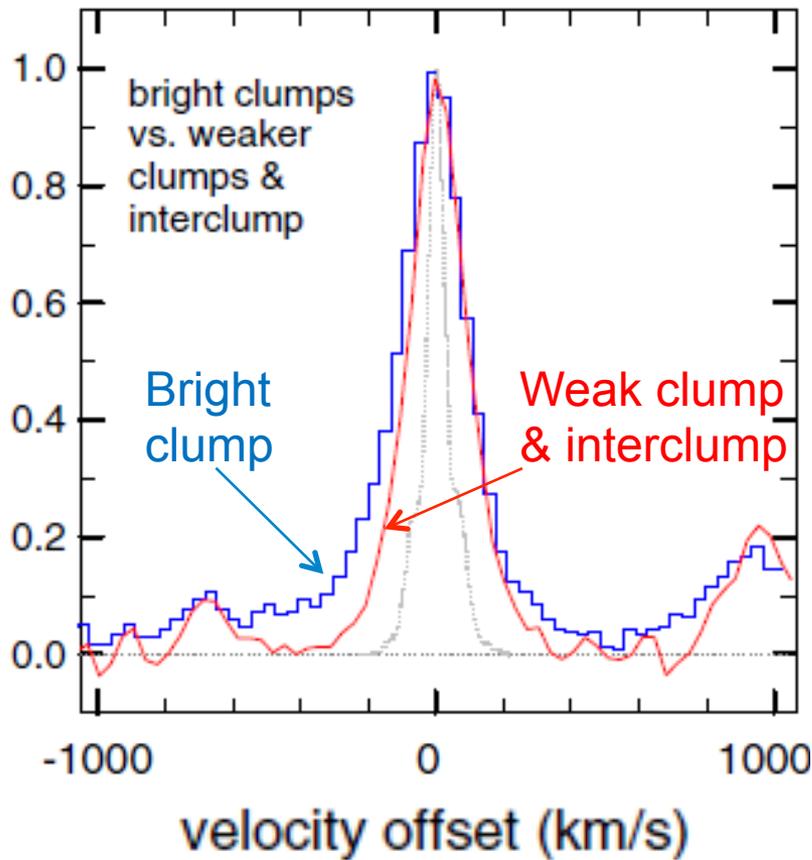
星形成バーストやAGNジェットによる銀河のアウトフロー

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。

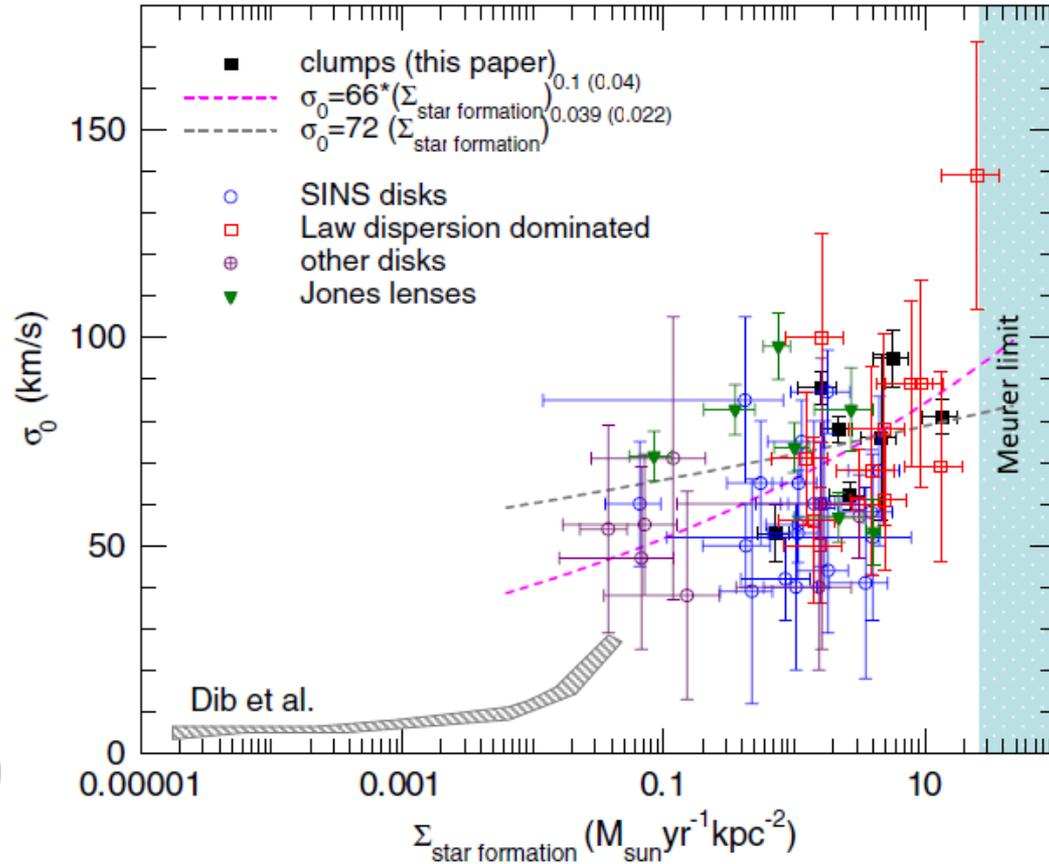


Herschel-PACSでみた合体銀河(ULIRG)から噴き出す分子ガスのアウトフロー
Sturm et al. (2011)

すばるが見た、星形成バースト銀河からのアウトフロー

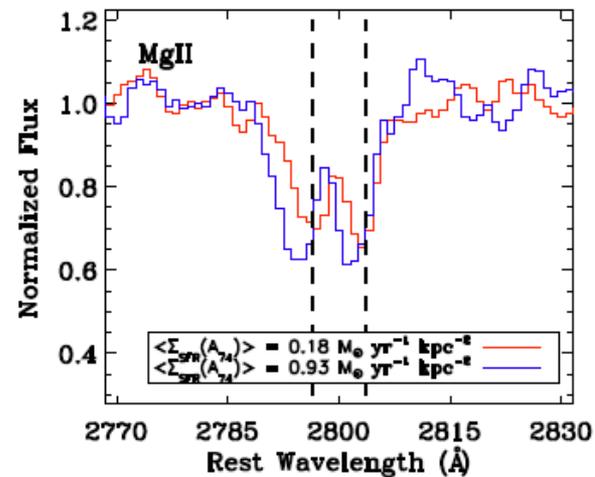
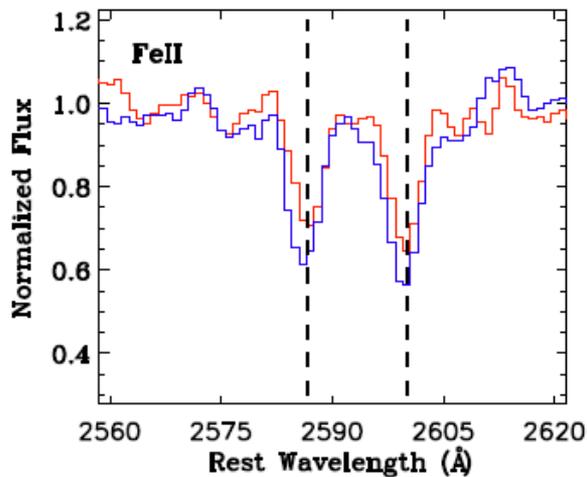
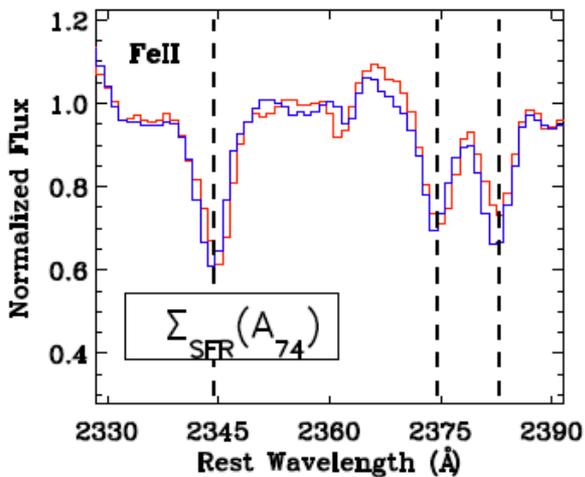


Blue wingは明るいクランプ(SFR大)でより顕著
 → アウトフロー成分が強い

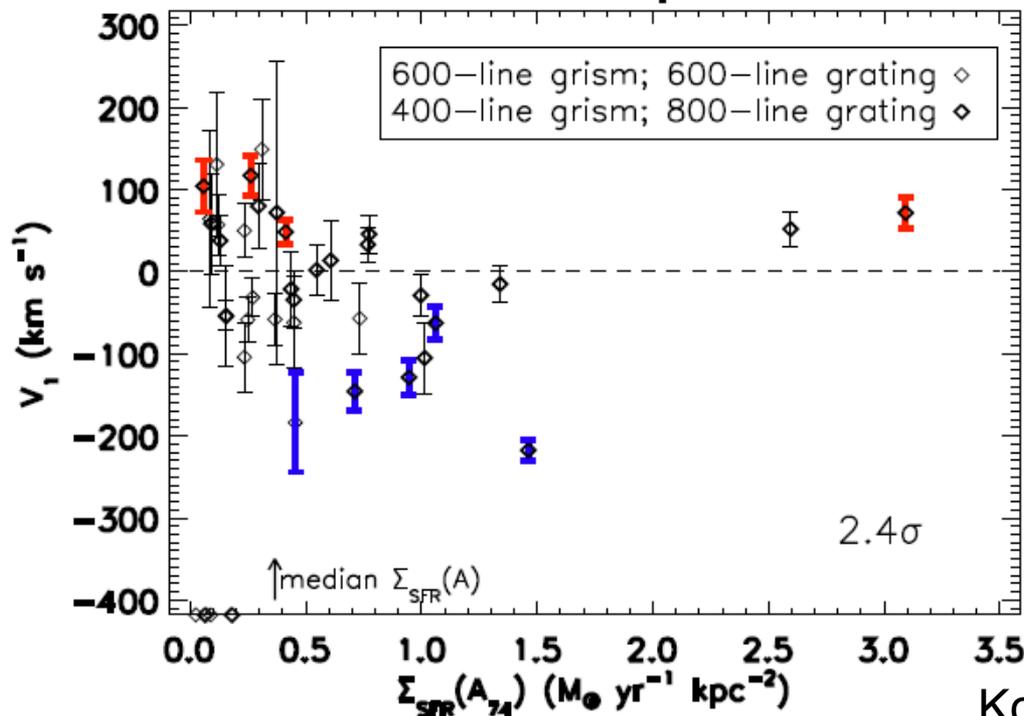


星形成活動と速度分散とはあまり相関がない
 → 大きな速度分散はフィードバックのせいではない？

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

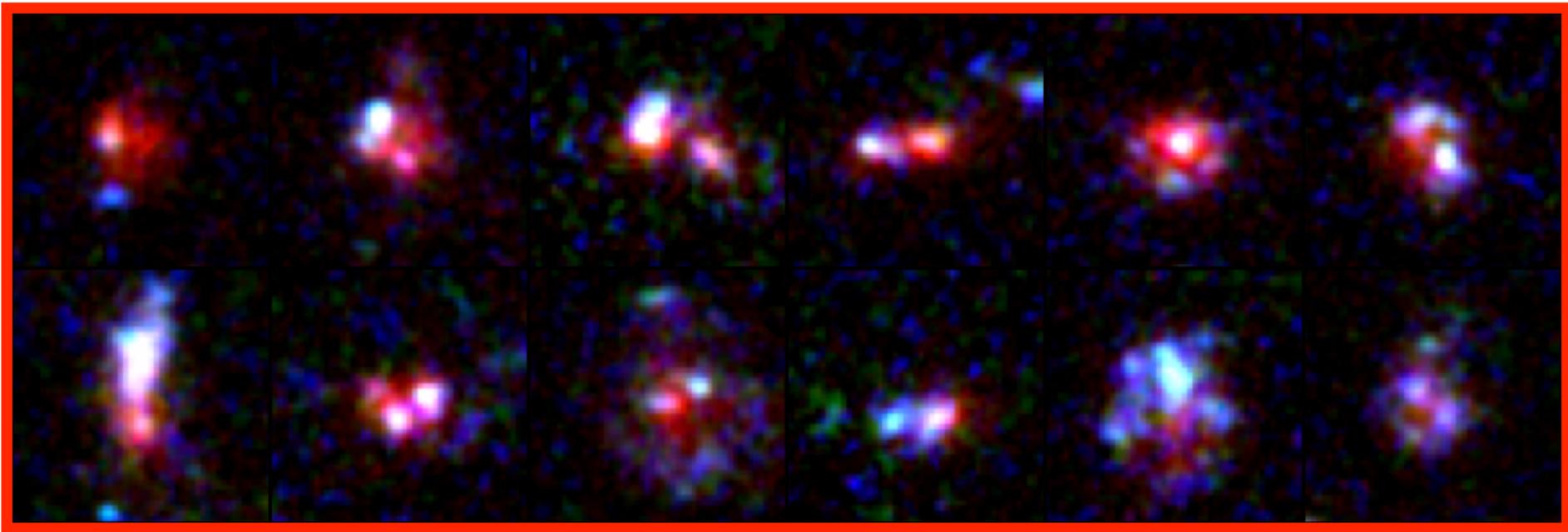


High- $\Sigma(\text{SFR})$

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

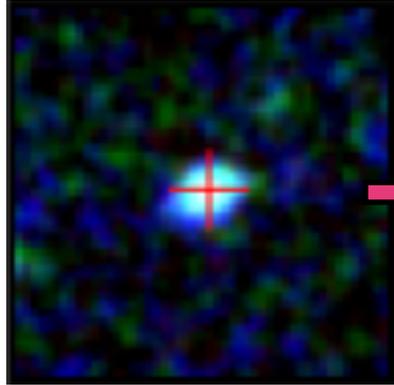
$z \sim 1$ の明るく青い銀河
を72個Keck/LRISで分光

アウトフロー速度は
 ΣSFR と関係がある?

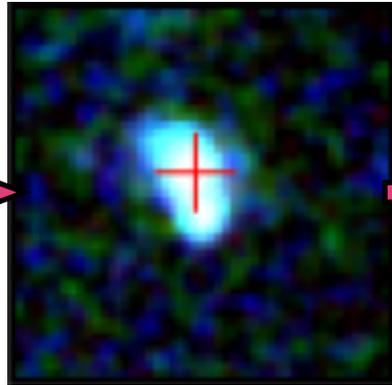


星形成銀河の進化シナリオ

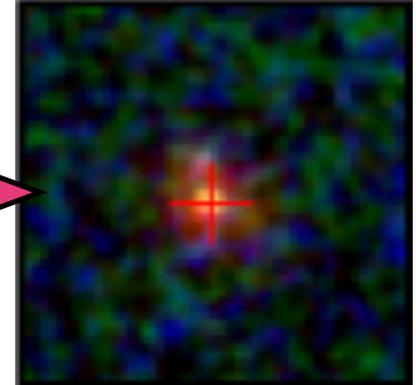
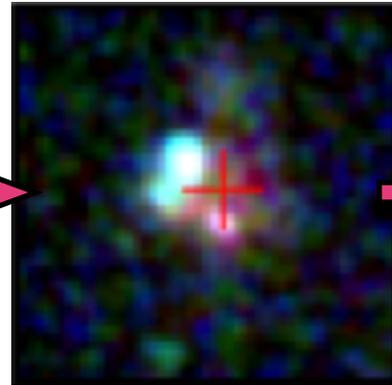
$M=(0.1-2.0)\times 10^{10}M_{\odot}$



$M=(2-10)\times 10^{10}M_{\odot}$



$M>1\times 10^{11}M_{\odot}$

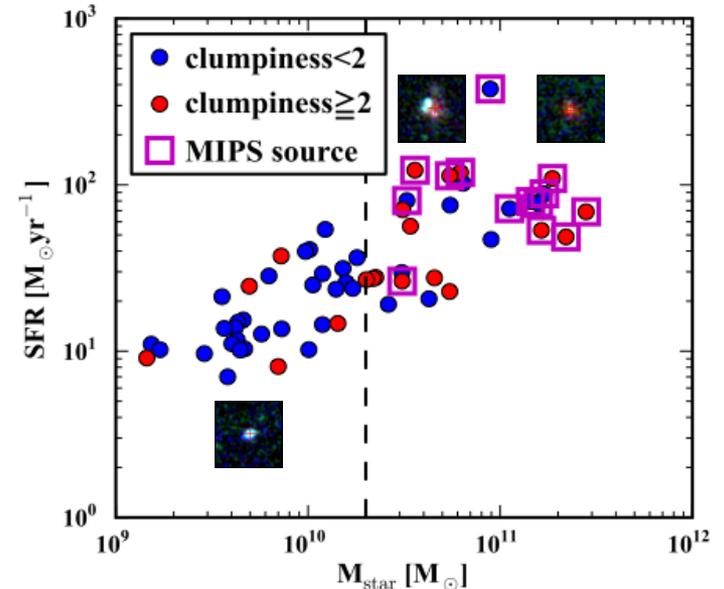


ここで星形成のモードが切り替わるMIPSで検出されているような銀河

Phase 1. 円盤全体で星形成

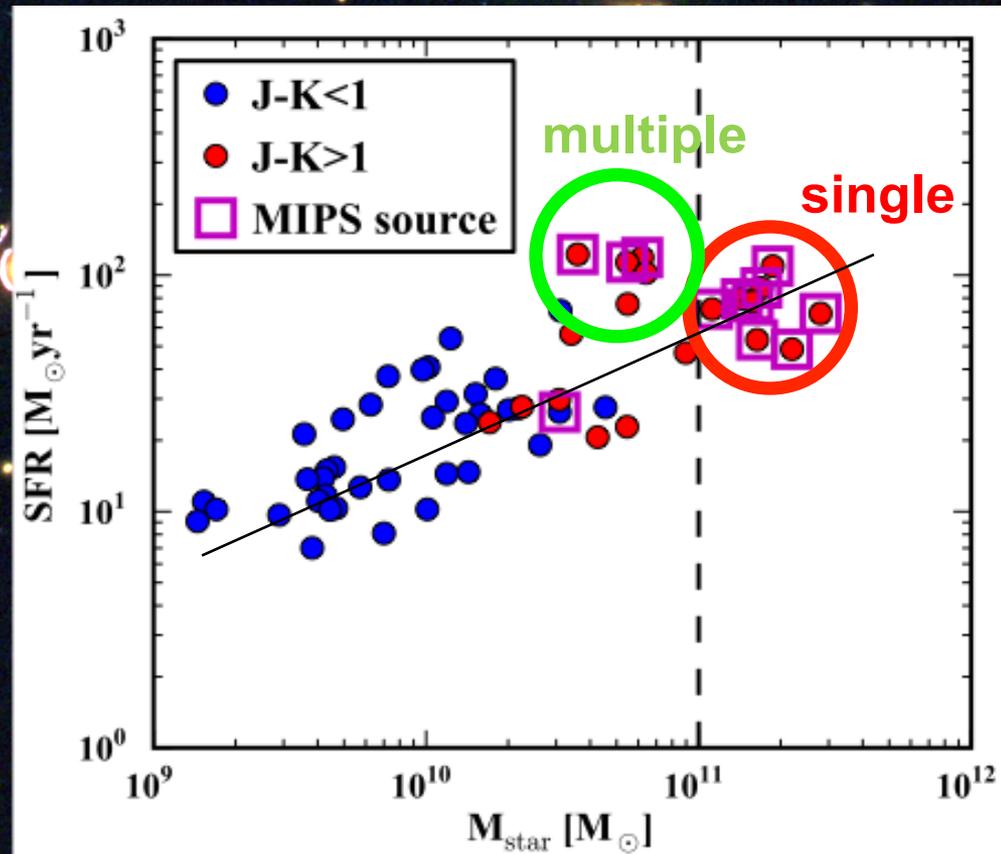
Phase 2. cold streamによって、 Σ diskが大きくなり、重力不安定性によってクランプが形成される。

Phase 3. 形成したクランプの一部が銀河中心に落ち込み、nuclear starburstが起こる。



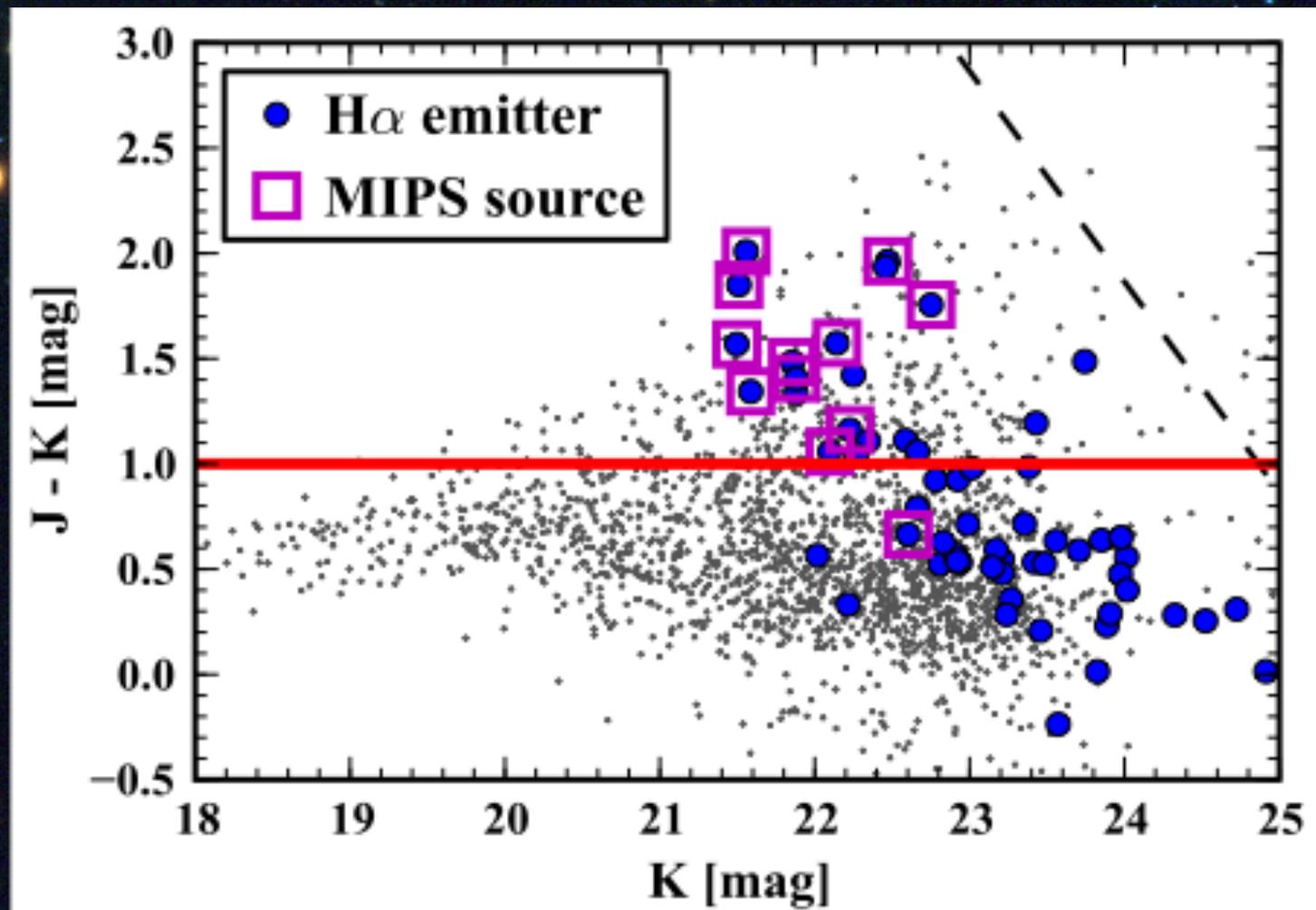
Global properties of H α emitters at z=2.2

星質量 vs 星形成率



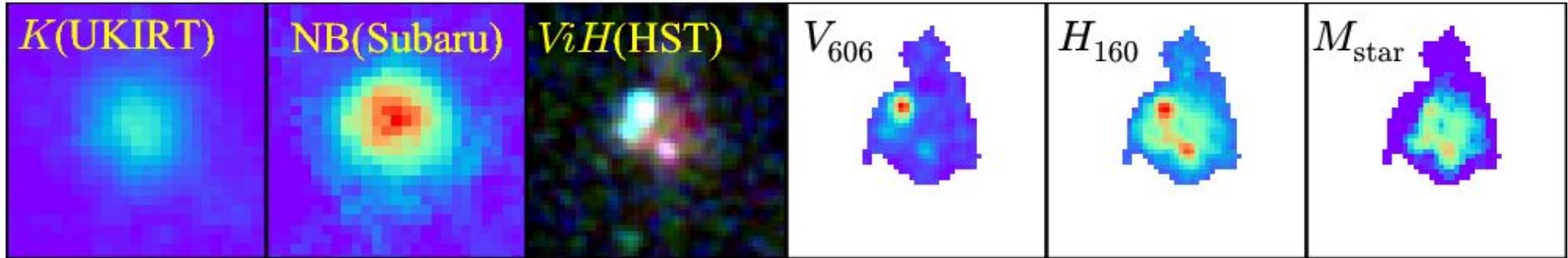
1. massive ($M_{\text{star}} > 10^{11} M_{\odot}$), low specific SFR
2. less massive ($10^{10.5} M_{\odot} < M_{\text{star}} < 10^{11} M_{\odot}$), high specific SFR

色一等級図



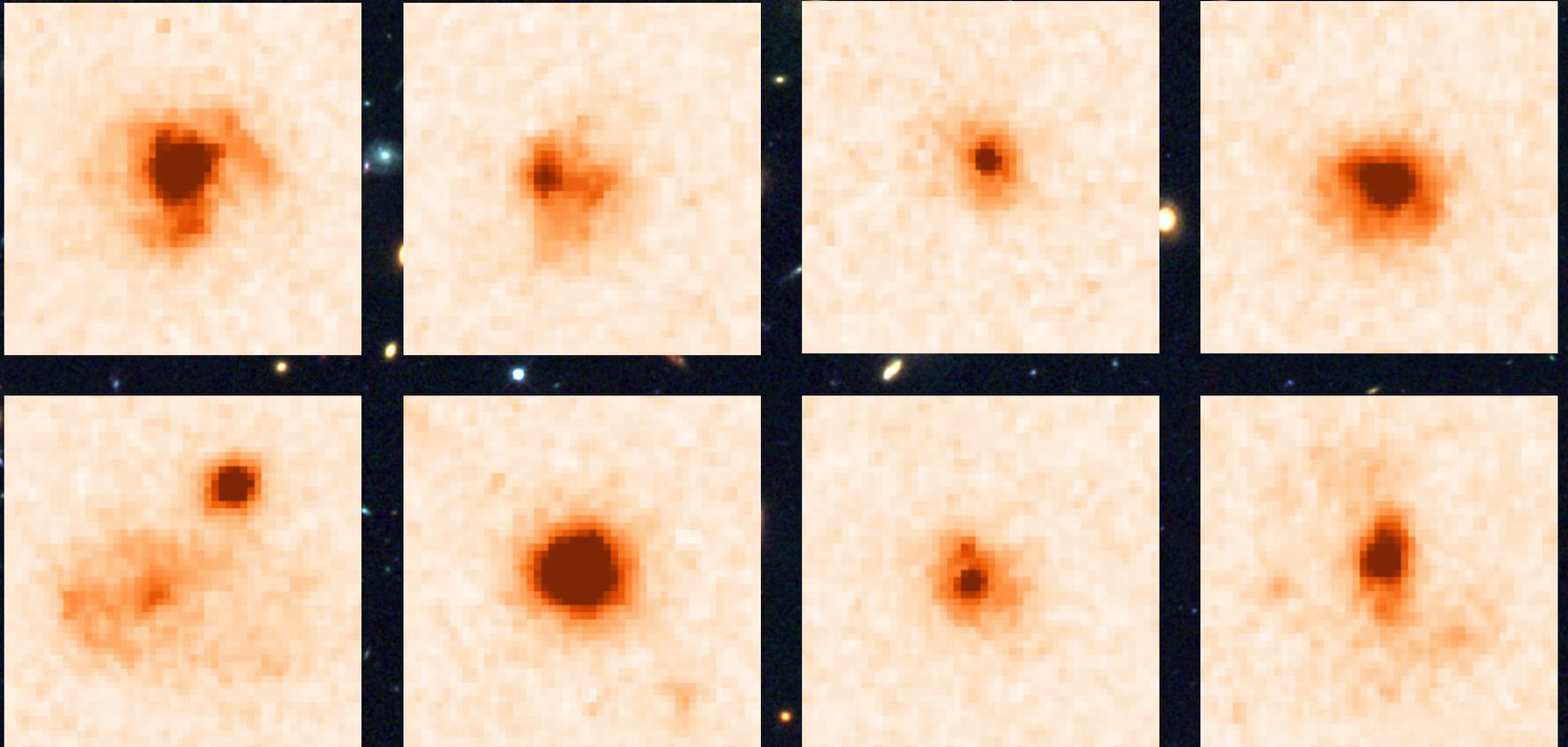
赤いエミッターのほとんどがMIPS24 μ mで検出
IRAC colorもSMGと同じ色をしている

ダスティなスターバースト銀河



WFC3 H₁₆₀ 画像

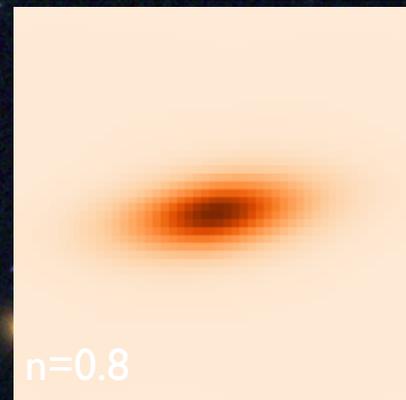
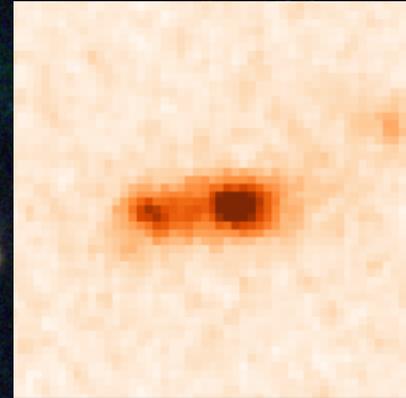
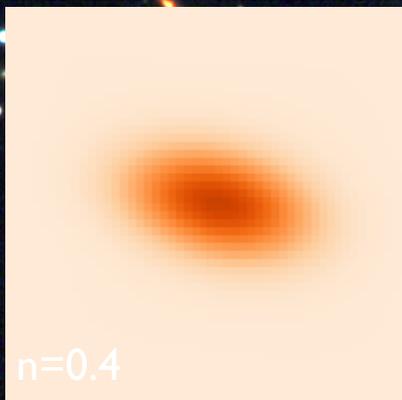
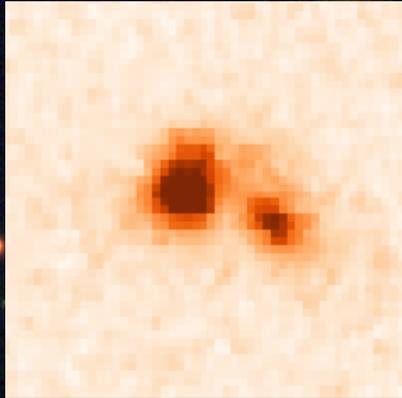
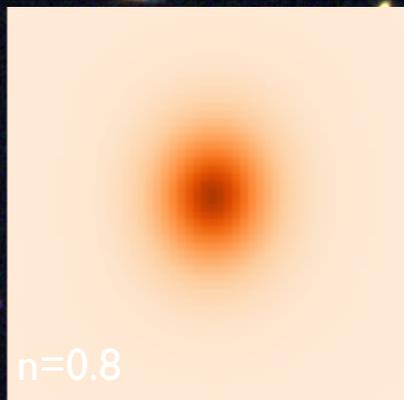
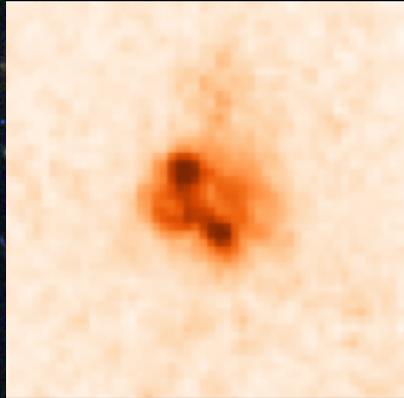
赤くMIPSで検出された H α emitters ($M_{\text{star}} > 10^{11} M_{\odot}$)



single core

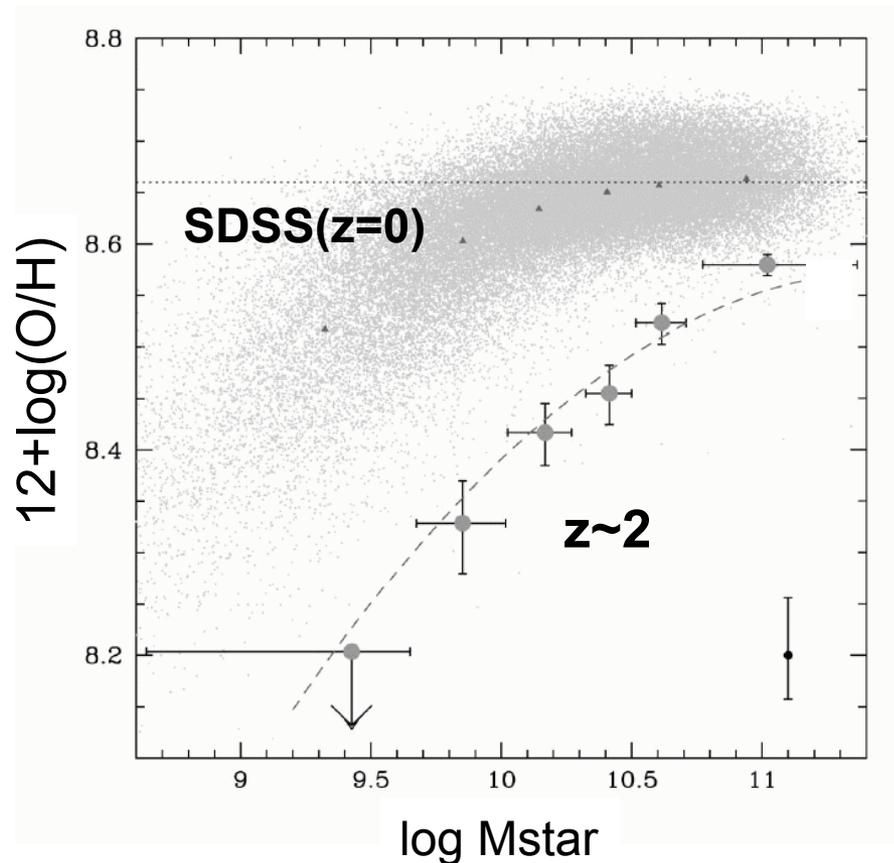
WFC3 H₁₆₀ 画像

赤くMIPSで検出された H α emitters ($10^{10.5}M_{\odot} < M_{\text{star}} < 10^{11}M_{\odot}$)



2つのコア → merger or clump ?

星形成銀河のMass-Metallicity関係



Erb et al. (2006)

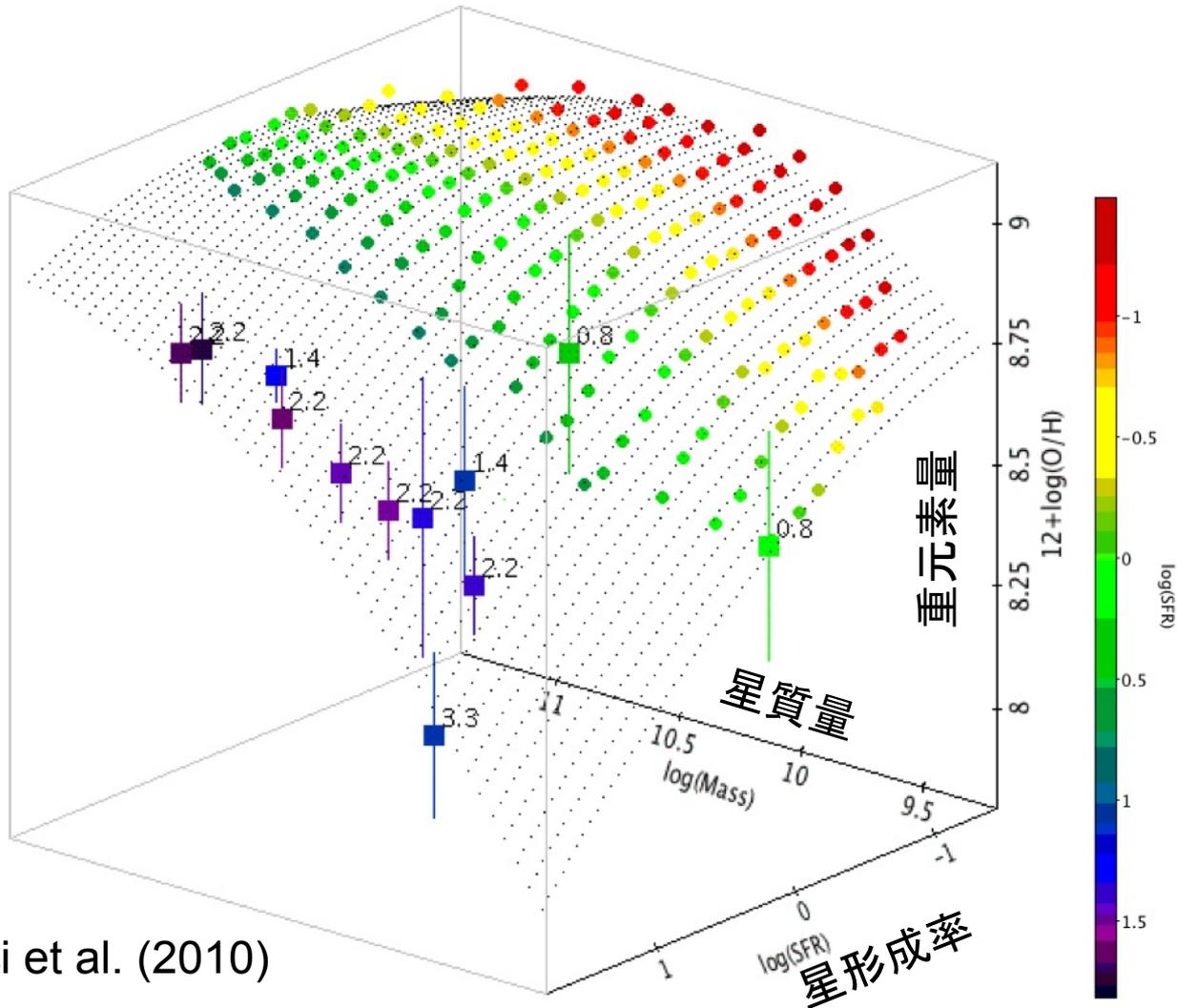
$$\log R_{23} \equiv \frac{I_{[\text{O II}]\lambda 3727} + I_{[\text{O III}]\lambda 4959} + I_{[\text{O III}]\lambda 5007}}{I_{\text{H}\beta}} \quad ; \quad \text{or } [\text{NII}] / \text{H}\alpha \text{ (N2index),}$$

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。

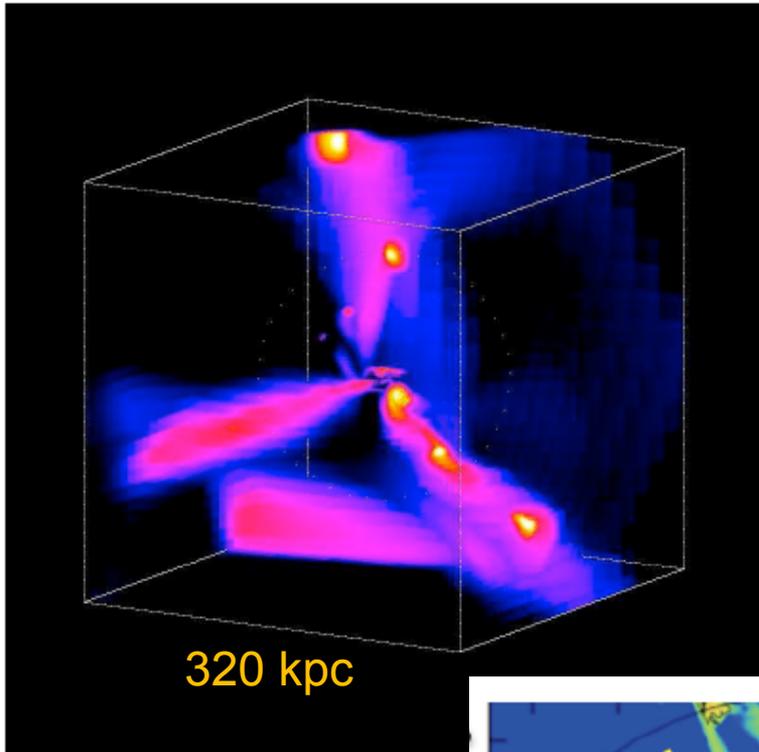


Mannucci et al. (2010)

“Cold Streams” along filaments (Inflow)

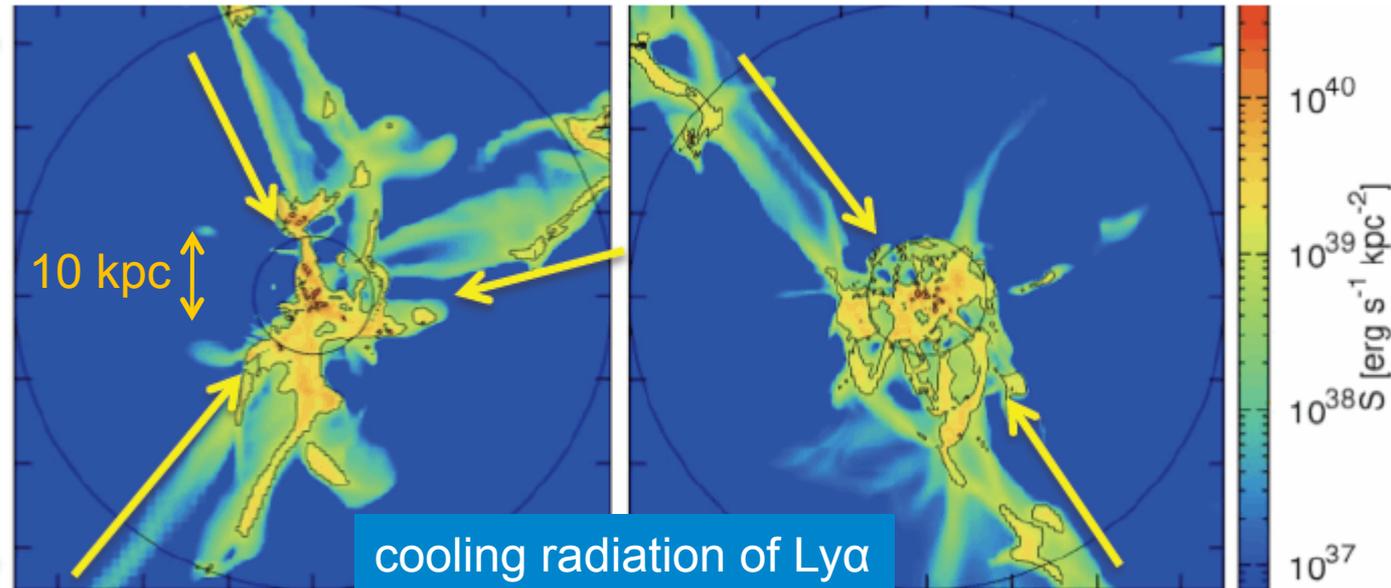
efficient gas supply to form a massive galaxy on a short time scale at high-z

When does the gas motion turn to “outflow”
due to feedback (SNe and AGN)?



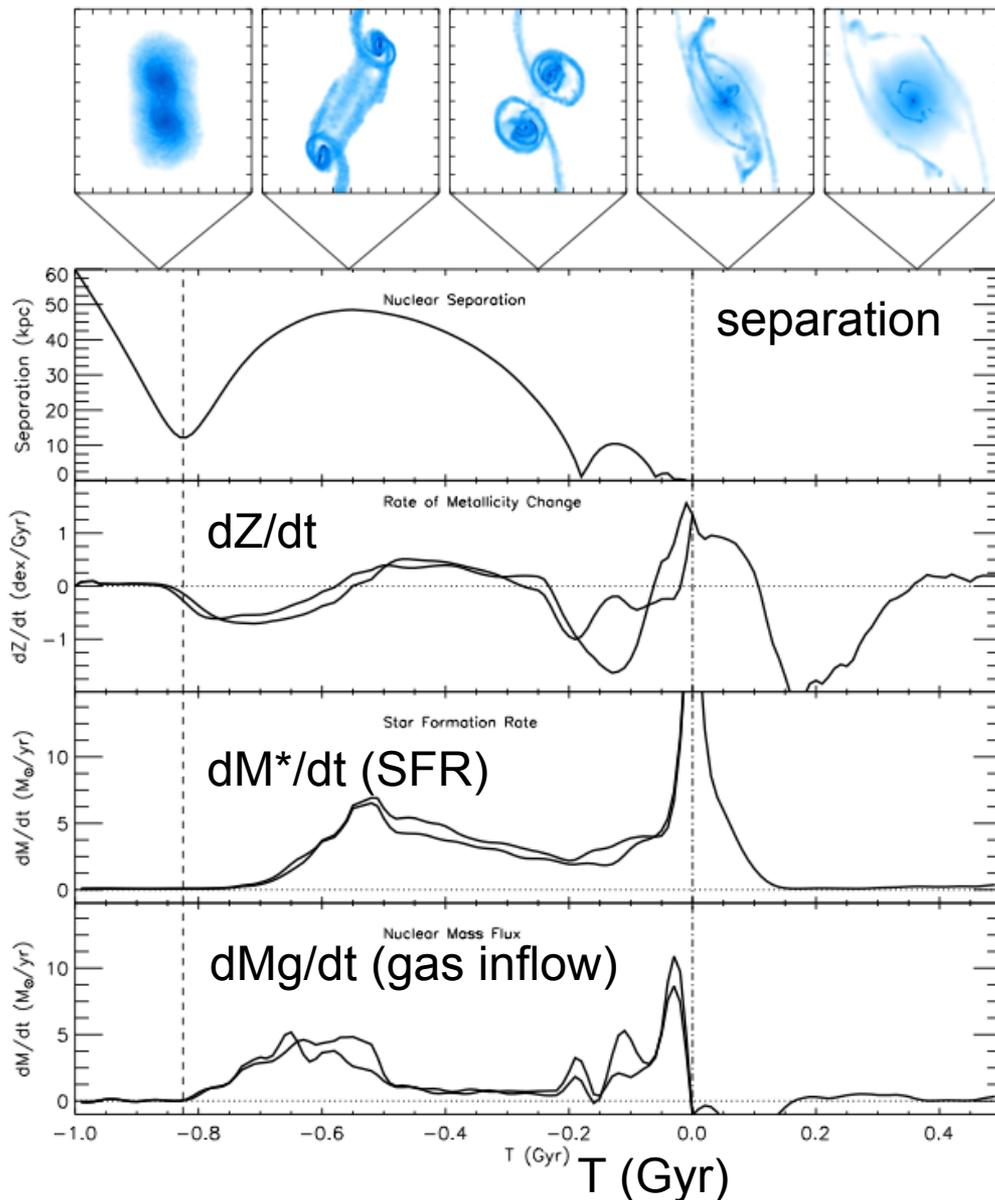
Dekel et al.
(2009, Nature)

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。

We need to **resolve "forming galaxies"**
both **spatially** and **kinematically**,
and at both **Opt-NIR** and **Submm-Radio**

Mergers (environment)? Nucleated starburst + AGN ?
Disordered Kinematics ?

or

Secular evolution? Disk-wide accretion & starburst?
Rotation/pressure supported?

AO and HST/JWST imaging (mergers or disk?)

IFU spectroscopy (outflow? AGN? chemical evolution?)

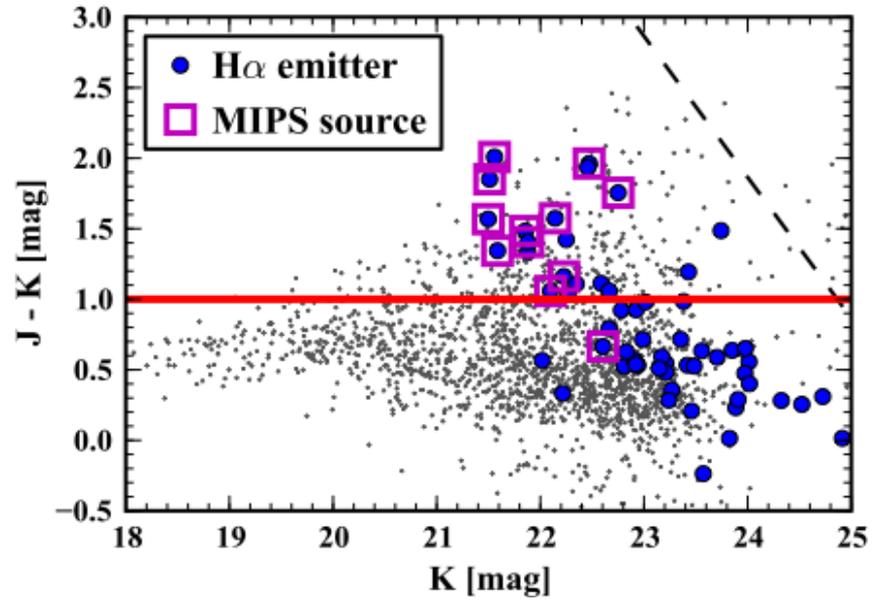
ALMA (dense gas distribution? SF mode? kinematics?)

The End

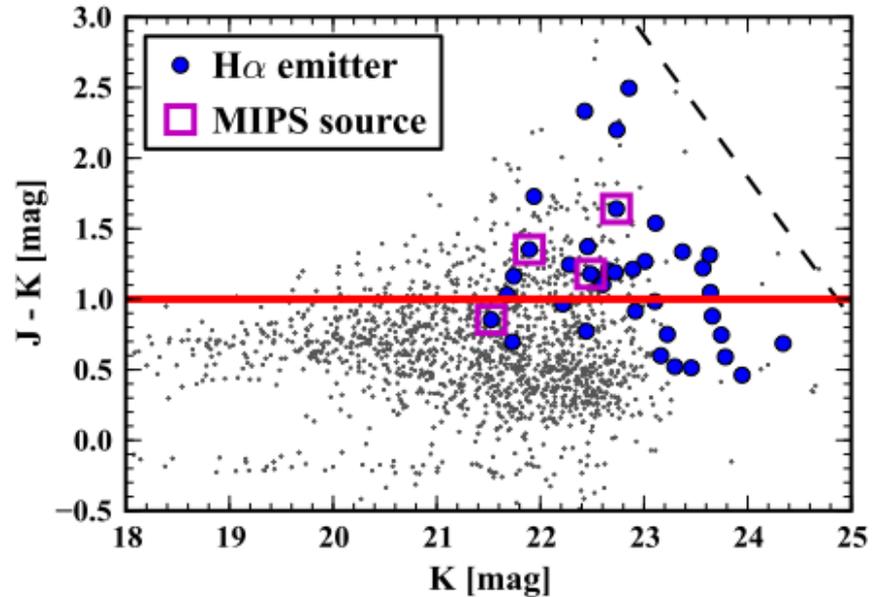


Color-magnitude diagram

$z=2.2$ $H\alpha$ emitter

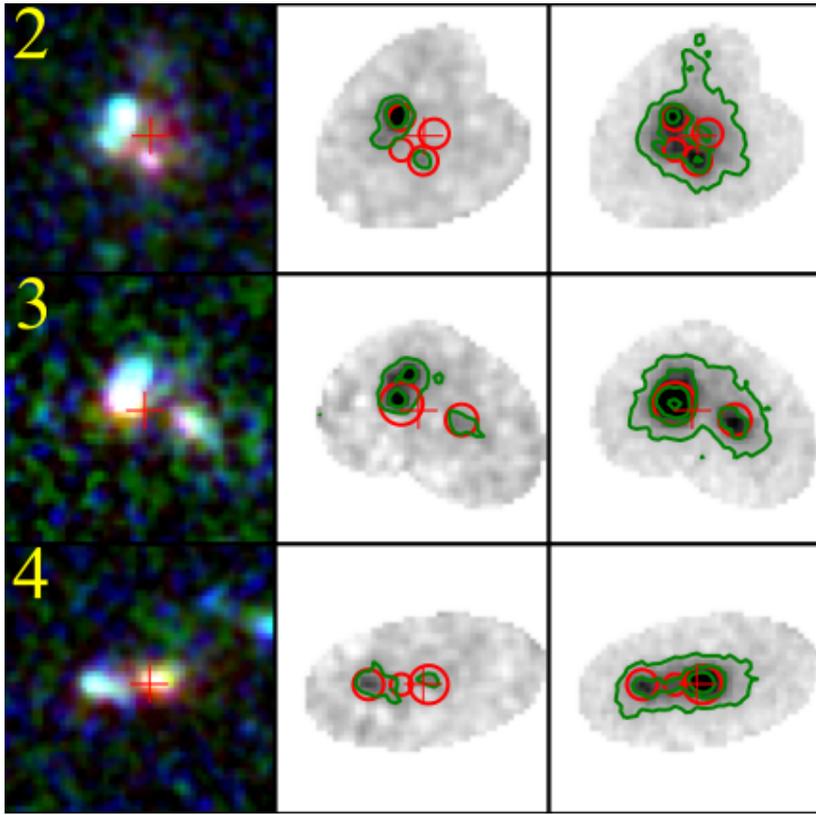


$z=2.5$ $H\alpha$ emitter

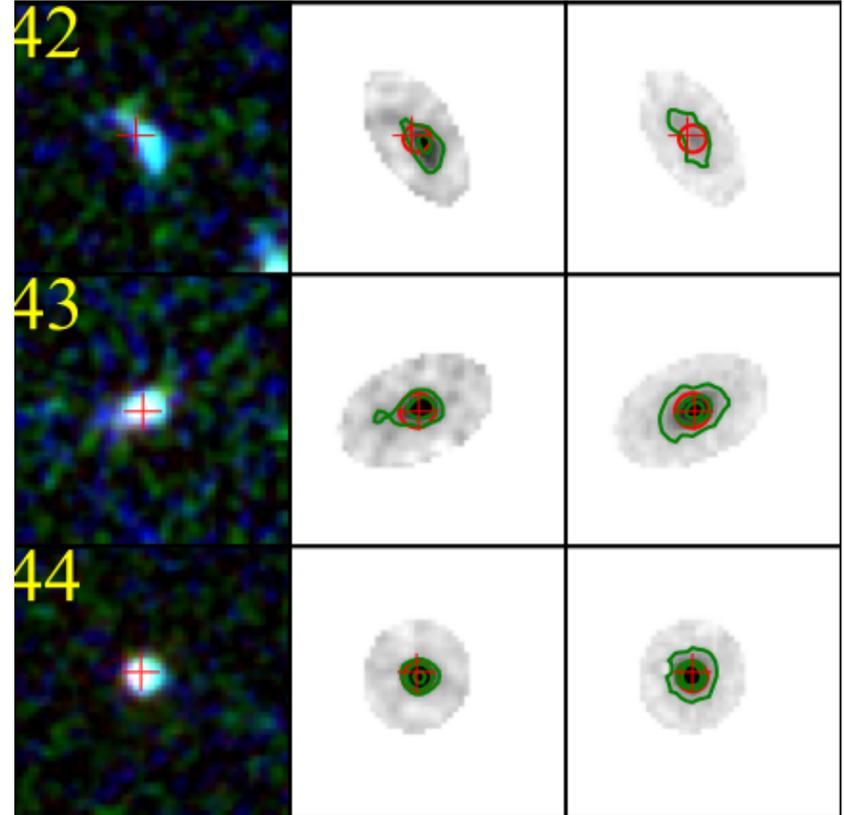


Clumpiness

Clumpiness > 1

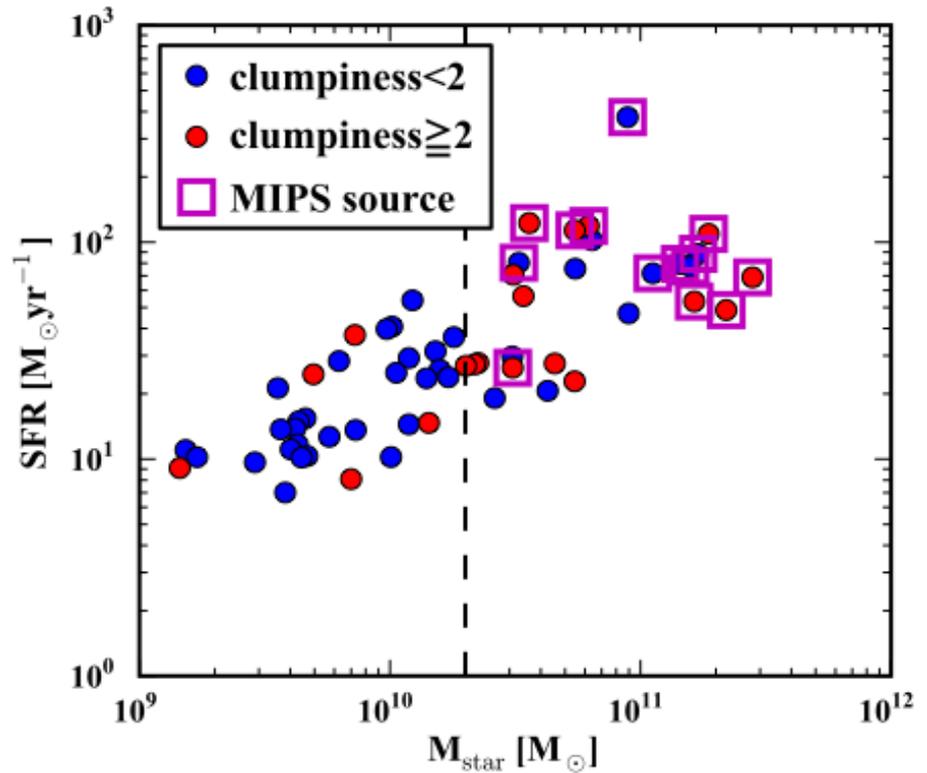


Clumpiness = 1

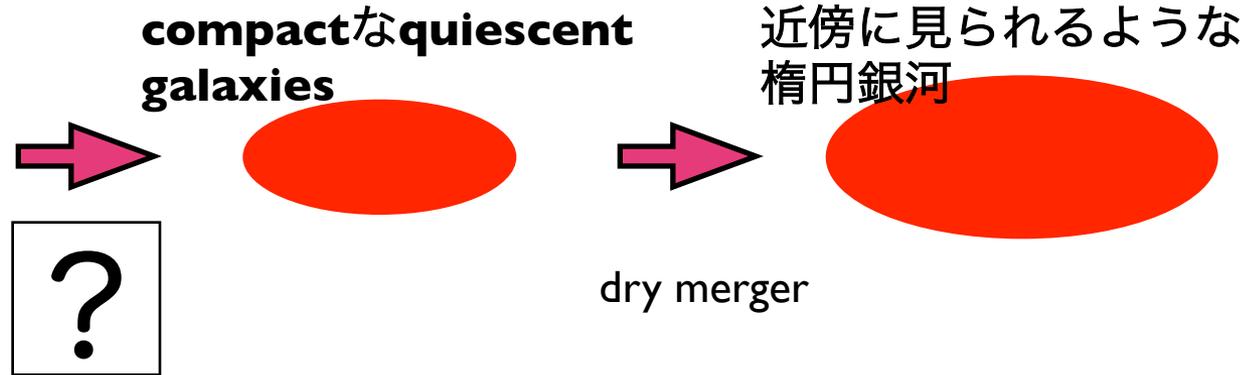
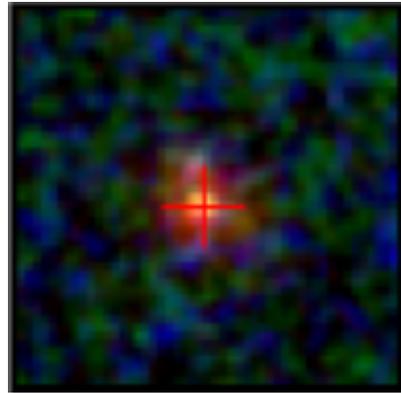


Stellar mass-SFR

	$M < 2 \times 10^{10} M_{\odot}$	$M > 2 \times 10^{10} M_{\odot}$
fraction of clumpy galaxy	14% (5/35)	56% (15/27)
fraction of mips source	0% (0/35)	52% (14/27)
fraction of clumpy or mips source	14% (5/35)	78% (21/27)



その後の進化



nuclear starburstを起こしている銀河（**phase 3**銀河）はどのように星形成を止め、形態を変えたのか？

星形成の**quenching**が先か形態の変化が先か？

我々の**phase 3**銀河のセルシック指数は $n \sim 1-2$ を示している。

中心だけ強く減光を受けているため、真の**profile**が得られていない可能性がある。

IRCS+K-band撮像の**proposal**を出すと良いかも。

予想としては、**nuclear starburst**によって中心に星がたくさん作られるので、

n が大きくなり、有効半径の小さい銀河ができる。

その後ガスを消費尽くし、スターバーストが終わると**compactなquiescent**銀河となる

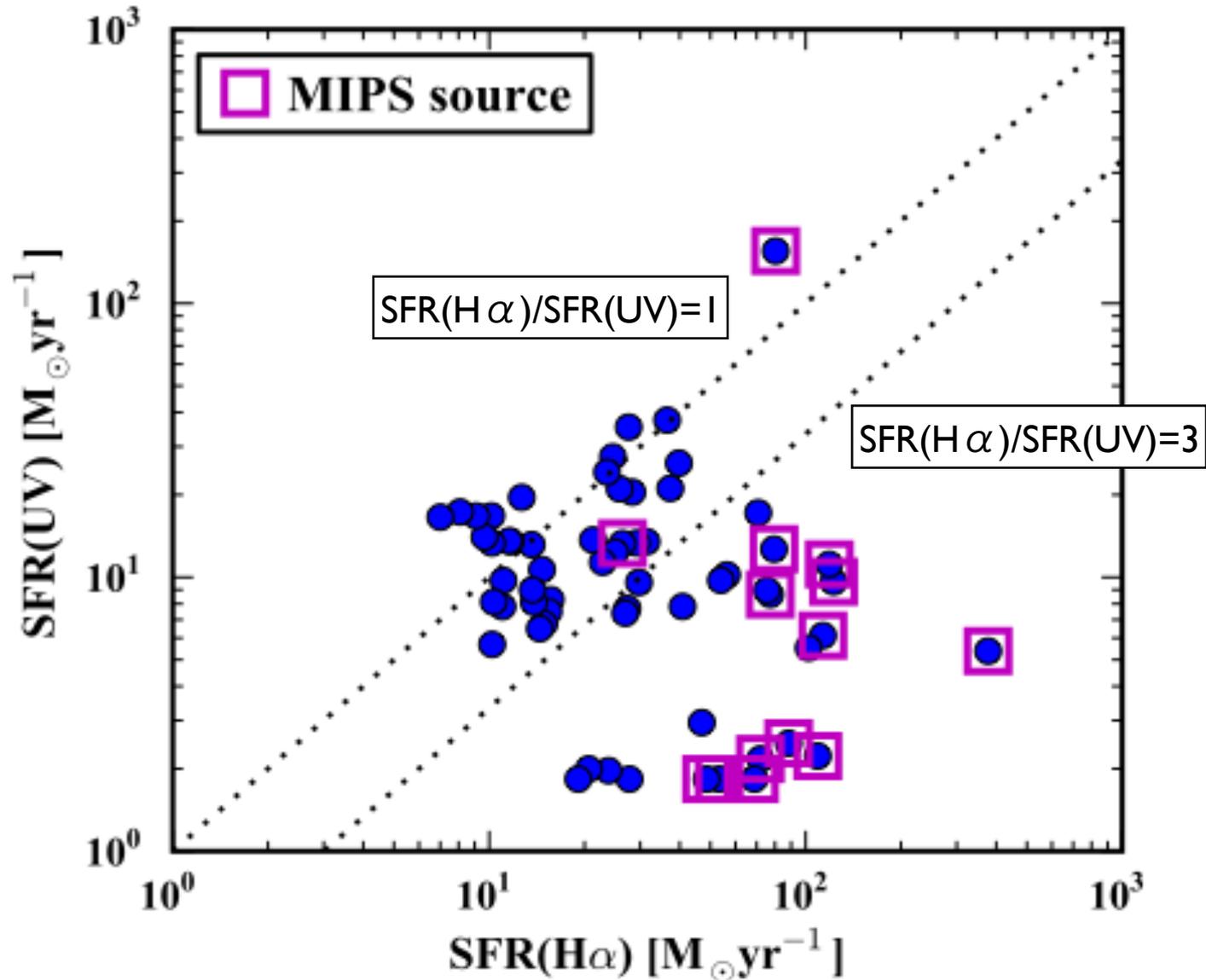
形態の指標

Clumpiness : clumpの数で定義。single coreはclumpiness=1

Dustiness : $SFR(H\alpha)/SFR(UV)$ で定義。

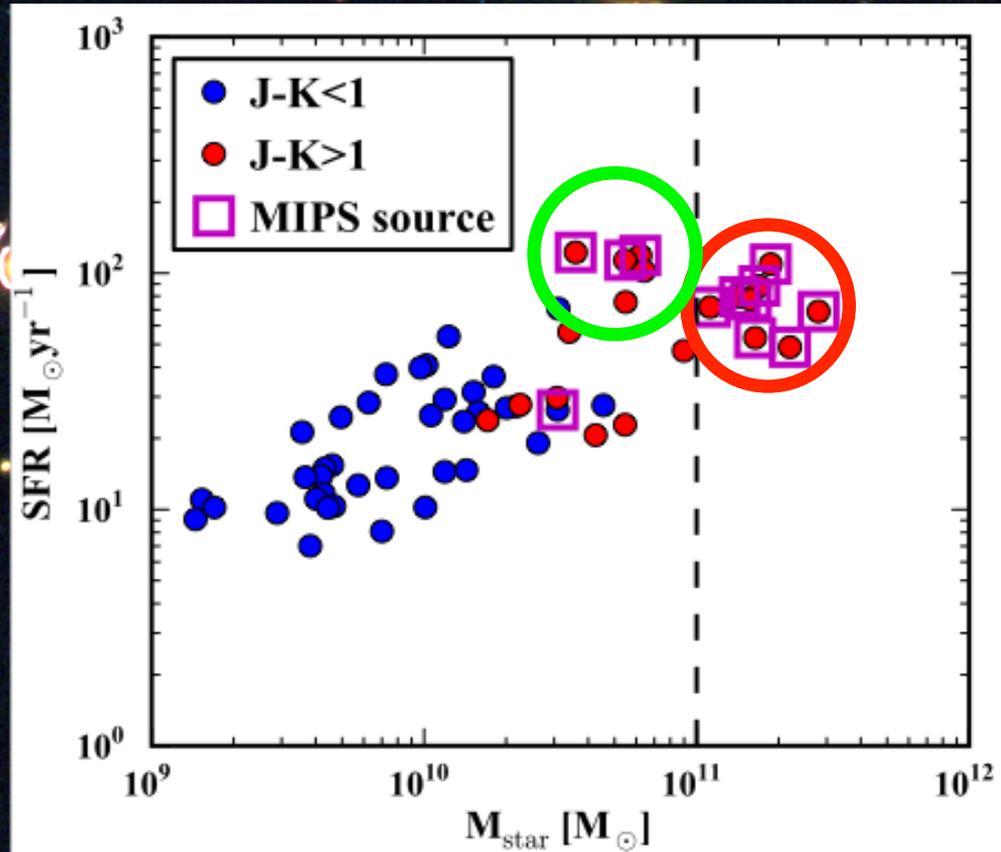
Compactness : ΣM_{star} で定義。

Dustiness



Global properties of H α emitters at z=2.2

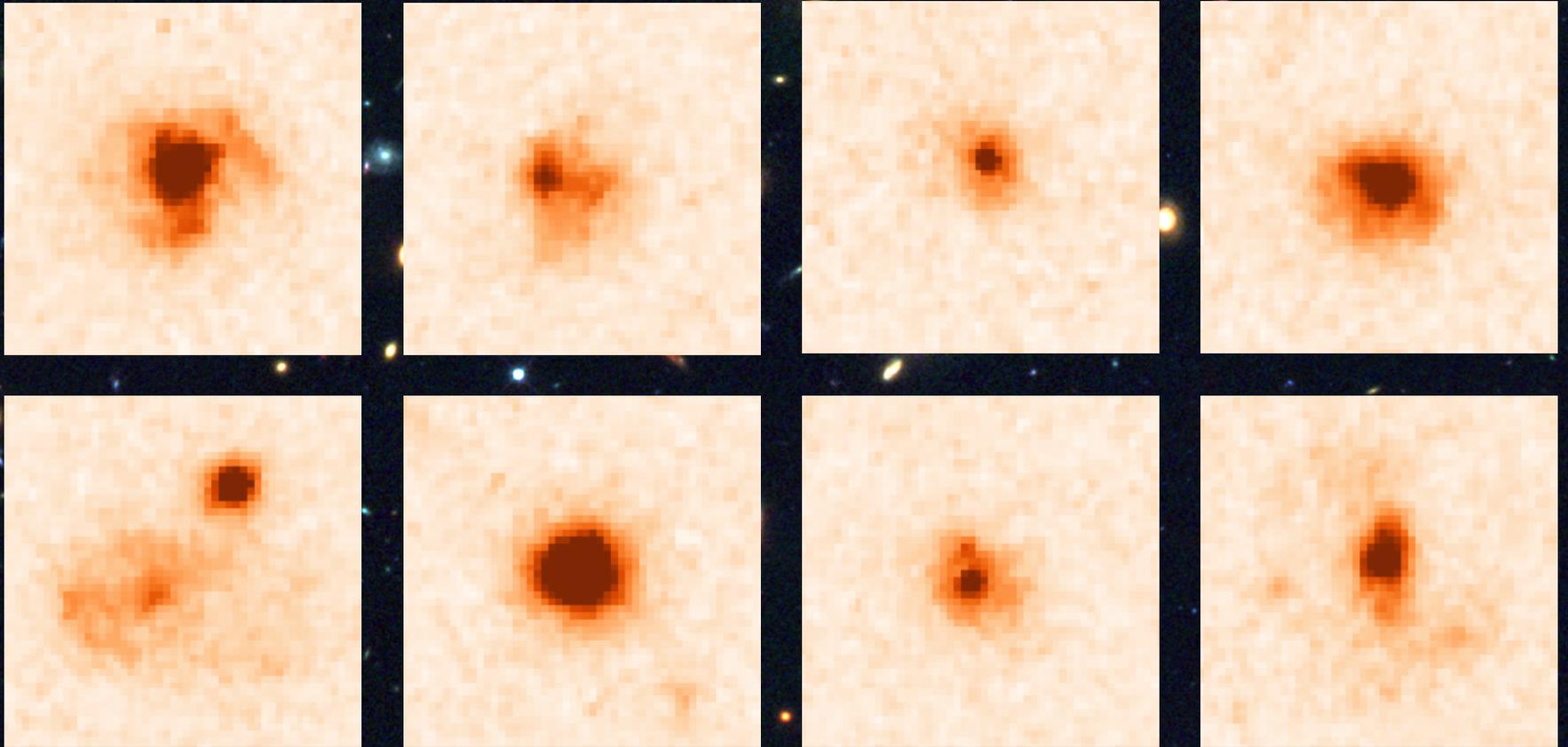
星質量 vs 星形成率



1. massive ($M_{\text{star}} > 10^{11} M_{\odot}$), low specific SFR
2. less massive ($10^{10.5} M_{\odot} < M_{\text{star}} < 10^{11} M_{\odot}$), high specific SFR

WFC3 H₁₆₀ 画像

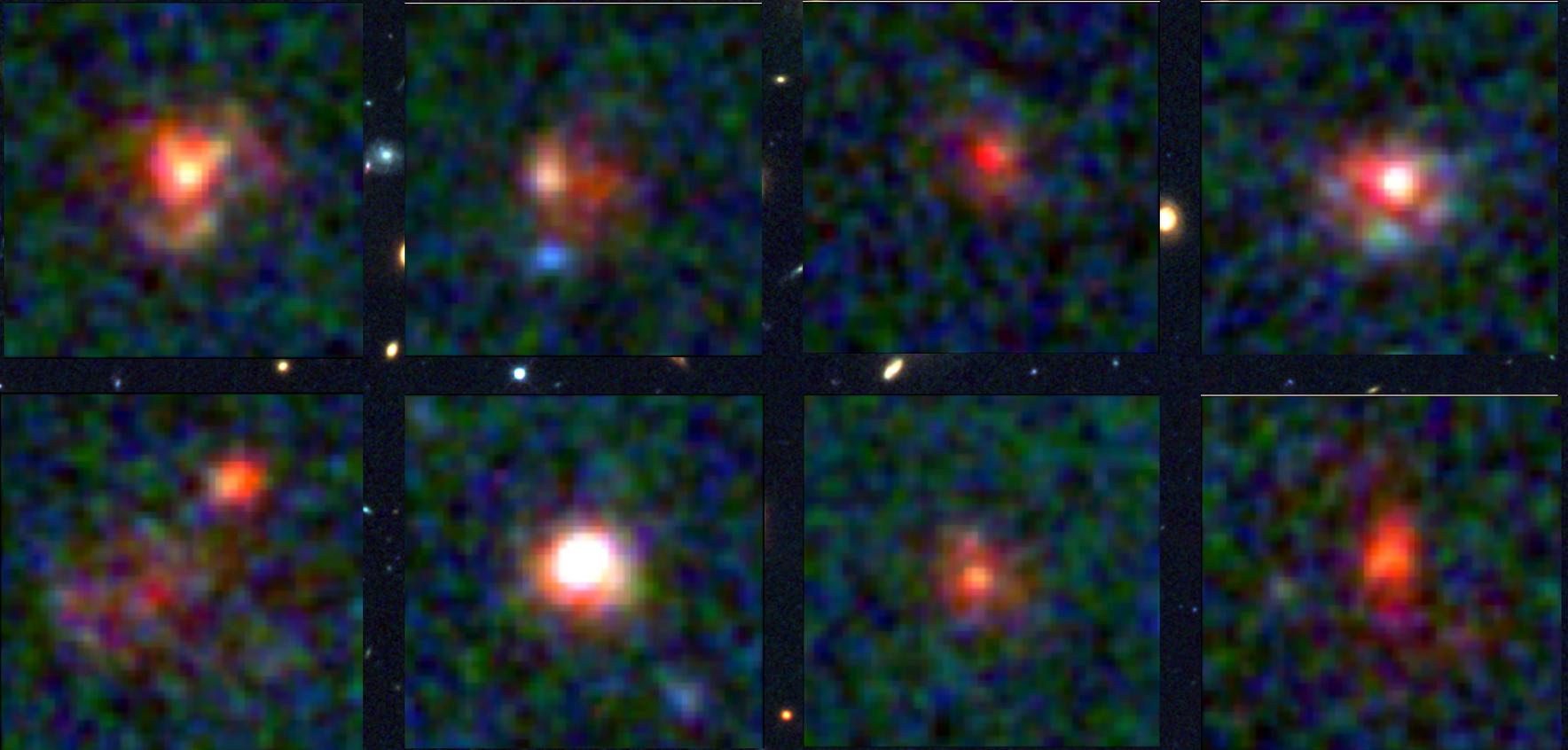
赤く MIPS で検出された H α emitters ($M_{\text{star}} > 10^{11} M_{\odot}$)



single core

ACS V₆₀₆, i₈₁₄ + WFC3 H₁₆₀ 画像

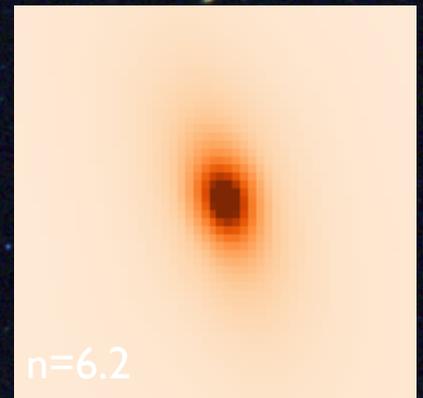
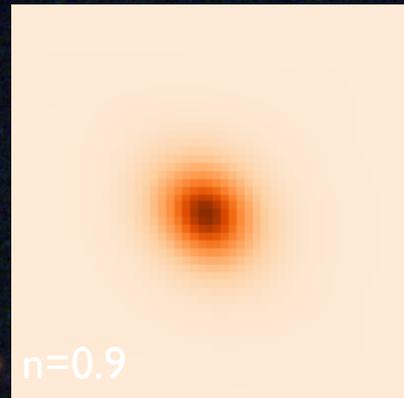
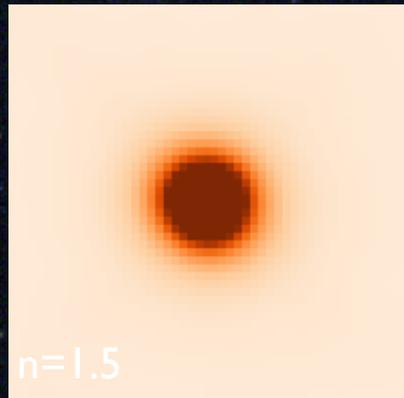
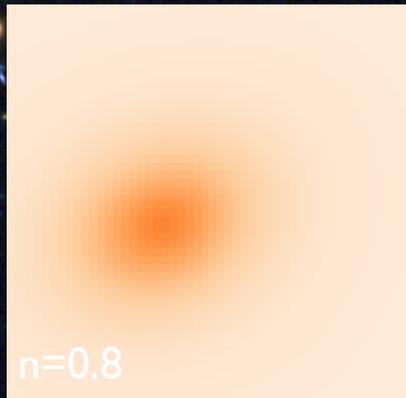
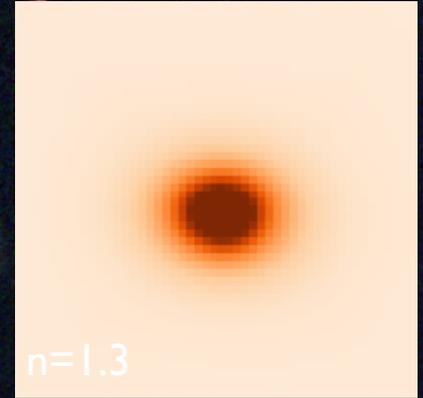
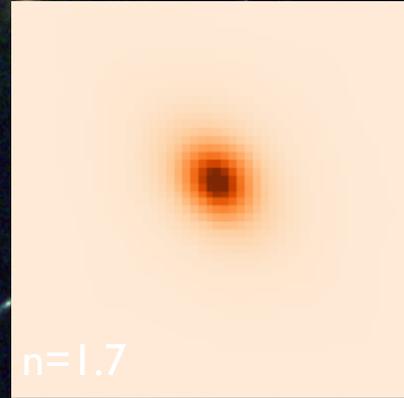
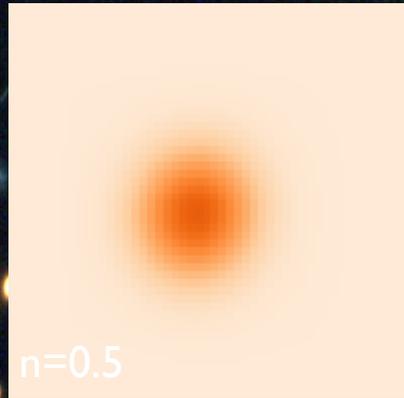
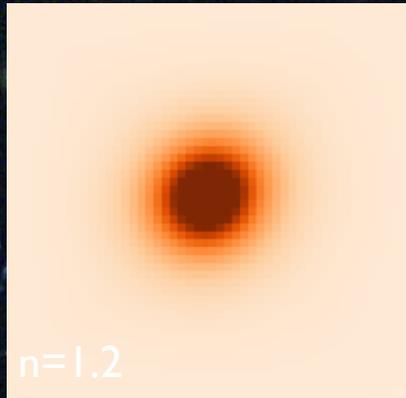
赤く MIPS で検出された H α emitters ($M_{\text{star}} > 10^{11} M_{\odot}$)



銀河全体が赤い

Single-component Models with GALFIT (Peng+10)

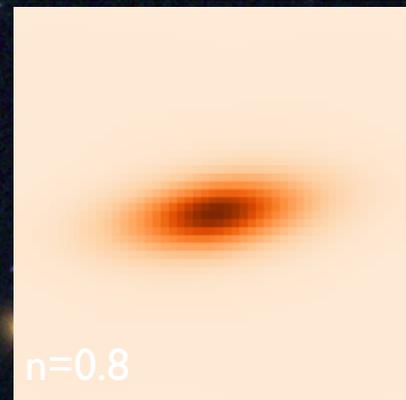
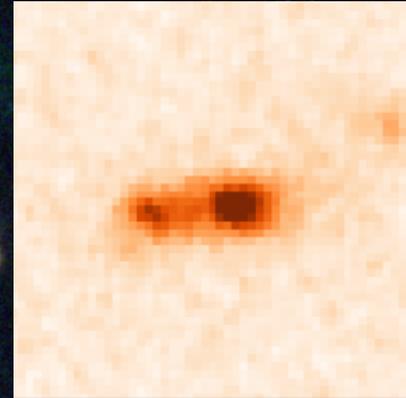
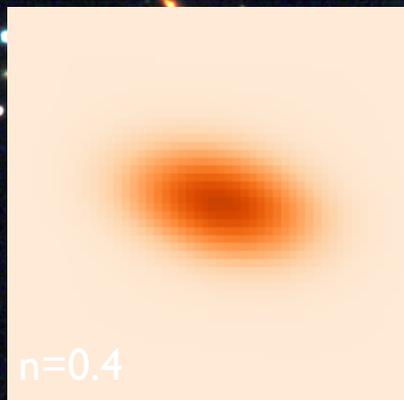
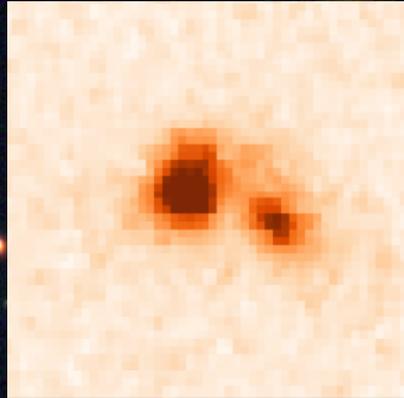
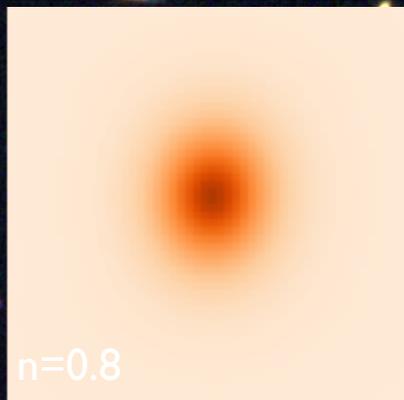
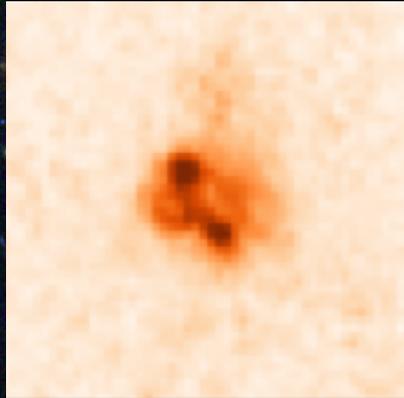
赤くMIPSで検出された $H\alpha$ emitters ($M_{\text{star}} > 10^{11} M_{\odot}$)



赤いエミッターはダスティなスターバースト銀河だと思われるが、major mergerやinteractionの兆候は見られない。

WFC3 H₁₆₀ 画像

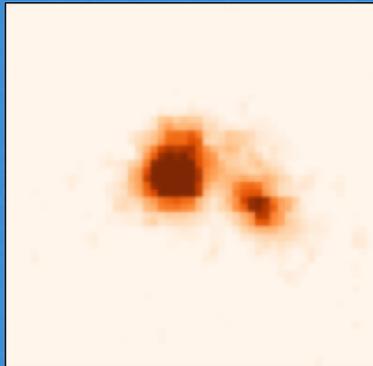
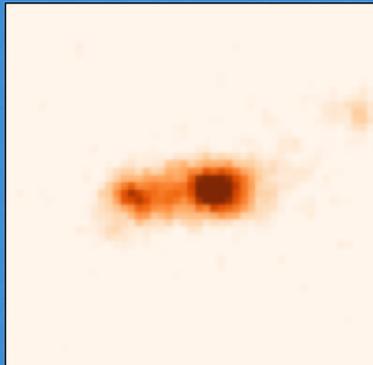
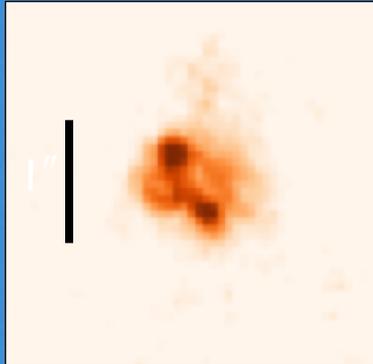
赤くMIPSで検出された H α emitters ($10^{10.5}M_{\odot} < M_{\text{star}} < 10^{11}M_{\odot}$)



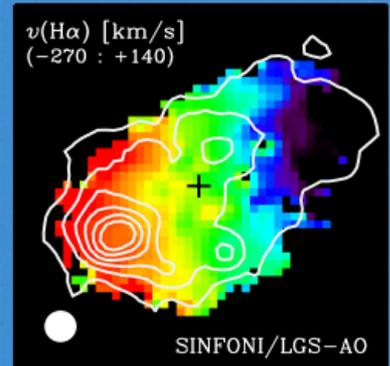
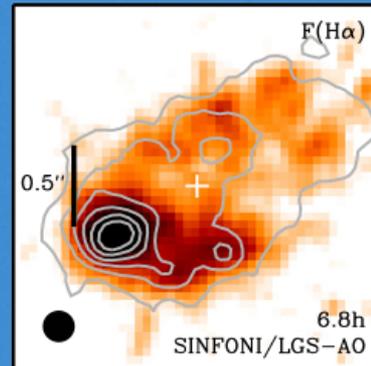
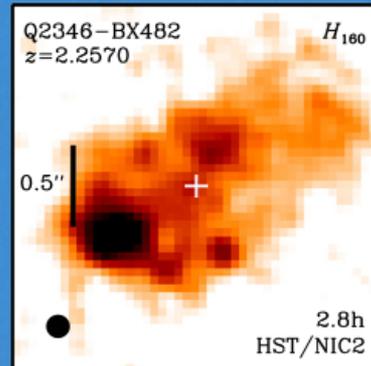
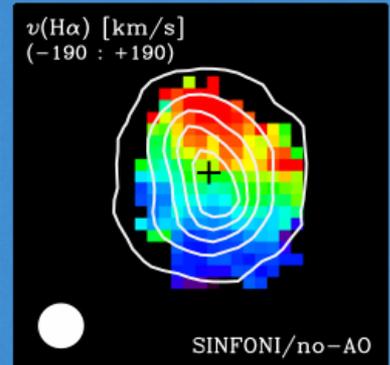
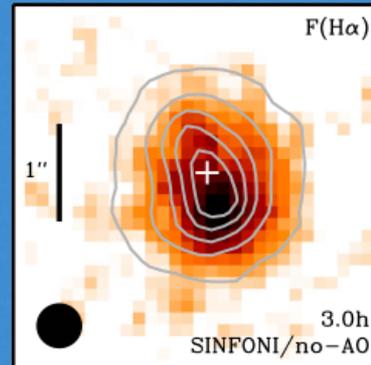
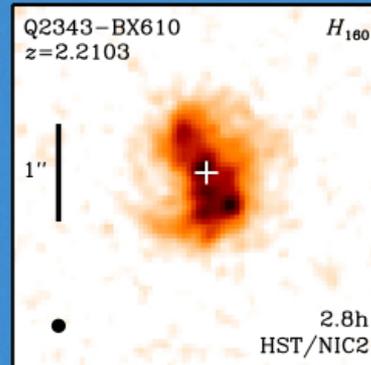
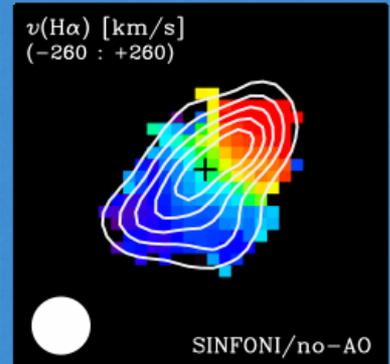
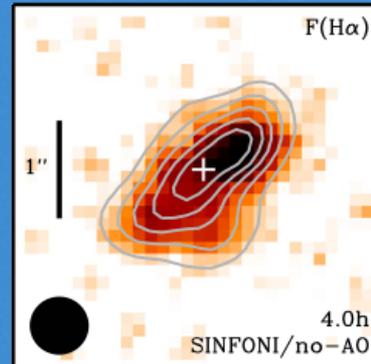
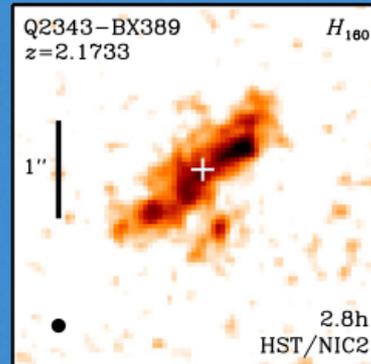
2つのコア → merger or clump ?

Merger or Clump ?

Our sample



Forster Schreiber et al. 2011



Clump Analysis

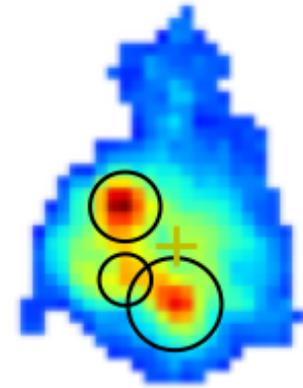
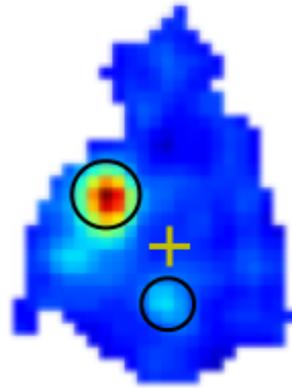
3色画像 ($V_{606}, i_{814}, H_{160}$)

ACS V_{606}

WFC3 H_{160}

青いクランプ

赤いクランプ



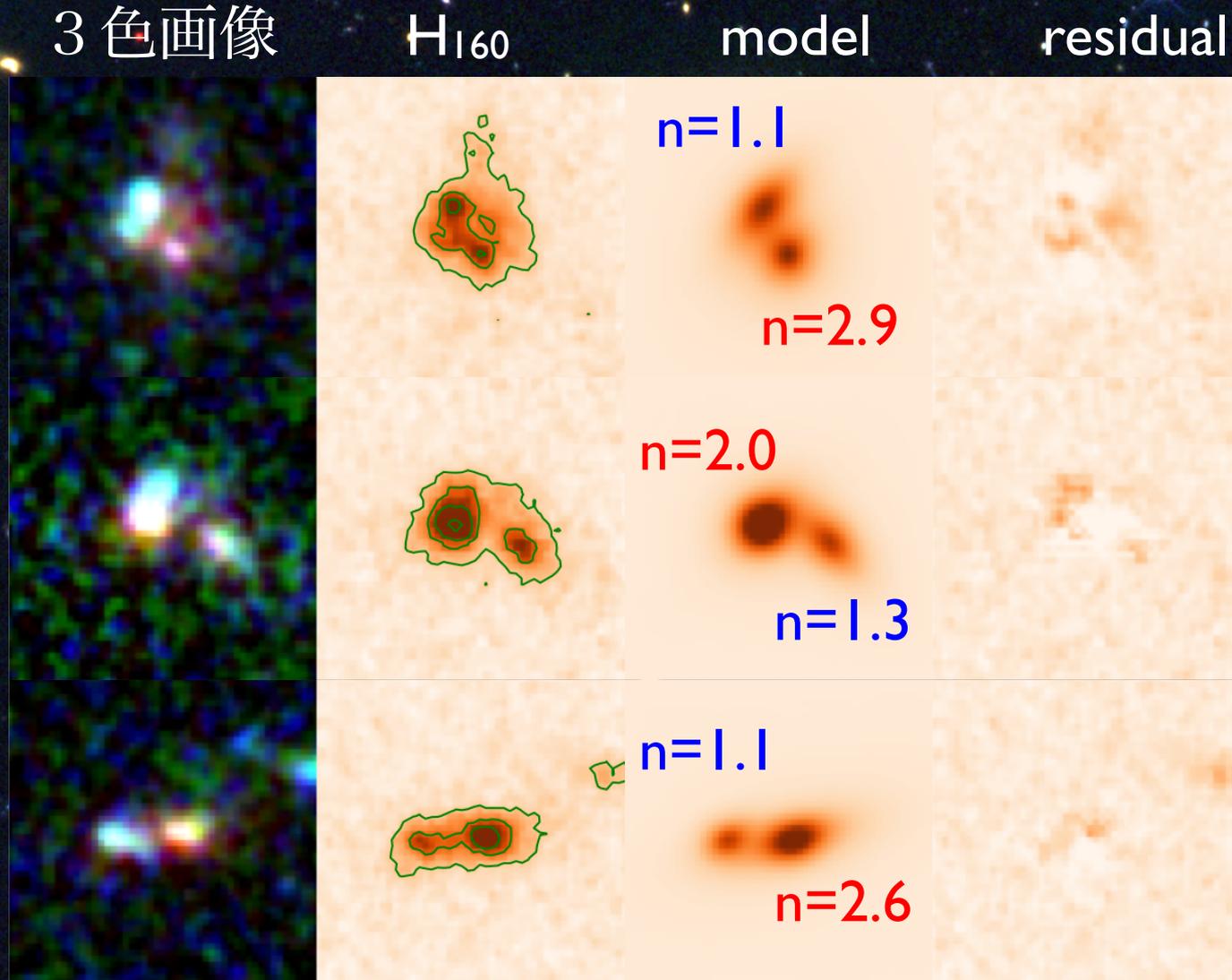
静止系紫外

静止系可視

赤いクランプと青いクランプから成っている

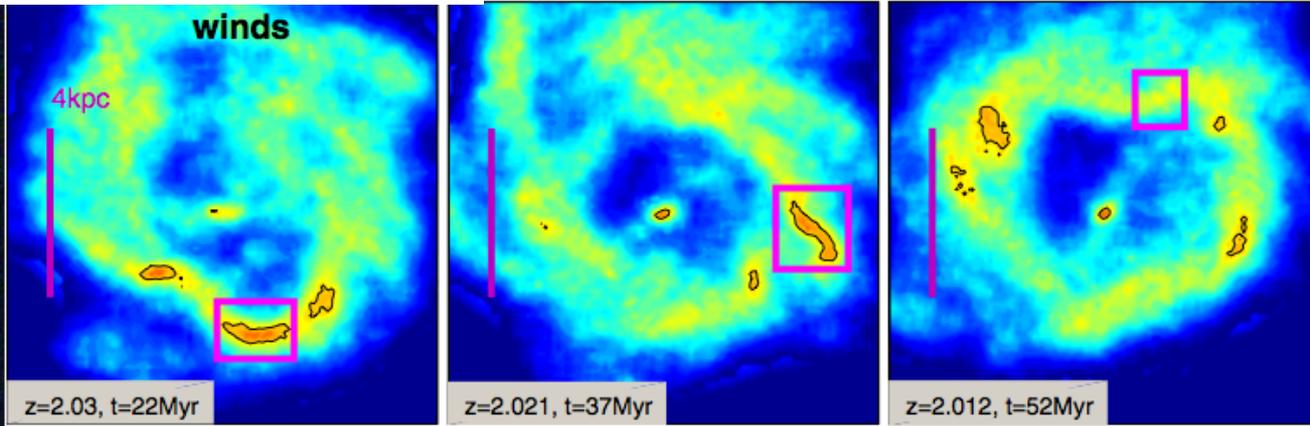
→赤い色の起源はこの赤いクランプ

2-component Models with GALFIT (Peng+10)

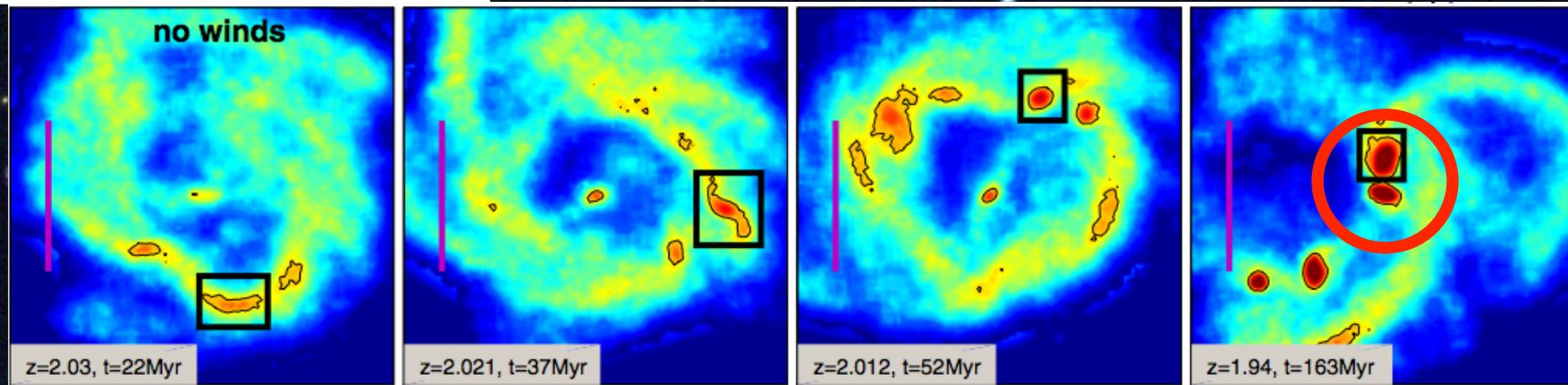


赤いクランプは高いセルシック指数を示している。

Simulation



Genel et al. 2012



時間

Summary

狭帯域フィルター探査によって得られた、赤いエミッターの形態を調べた。
これらの多くはMIPSで検出されていることからダスティなスターバースト銀河だと考えられる。

1. specific SFRが小さい赤いエミッター

コア1つ+全体的に赤い+セルシック指数が1近く

→ extreme case of disk star-forming galaxies

2. specific SFRが大きい赤いエミッター

赤いクランプと青いクランプ

→intense star-formation is triggered by minor merger or clump migration

銀河団環境ではどうだろうか？

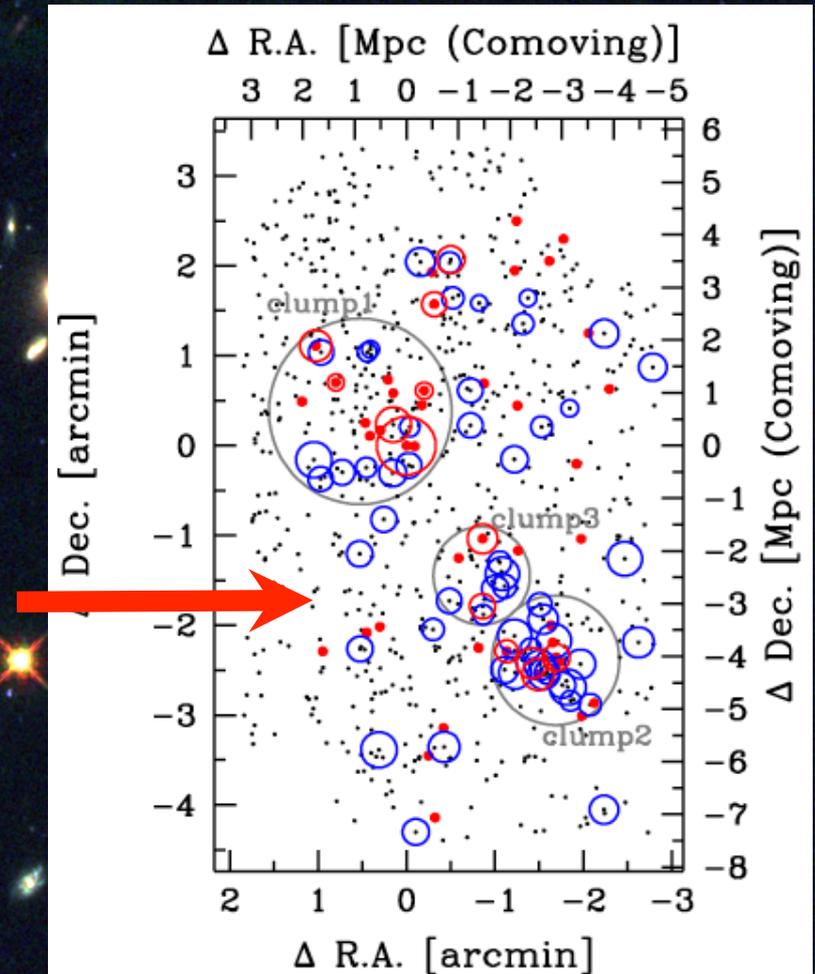
高密度環境ではmajor mergerやinteractionが起りやすそうだけど。。。

MAHALO Subaru project

MApping H α and Lines of Oxygen with Subaru (PI: Taddy Kodama)

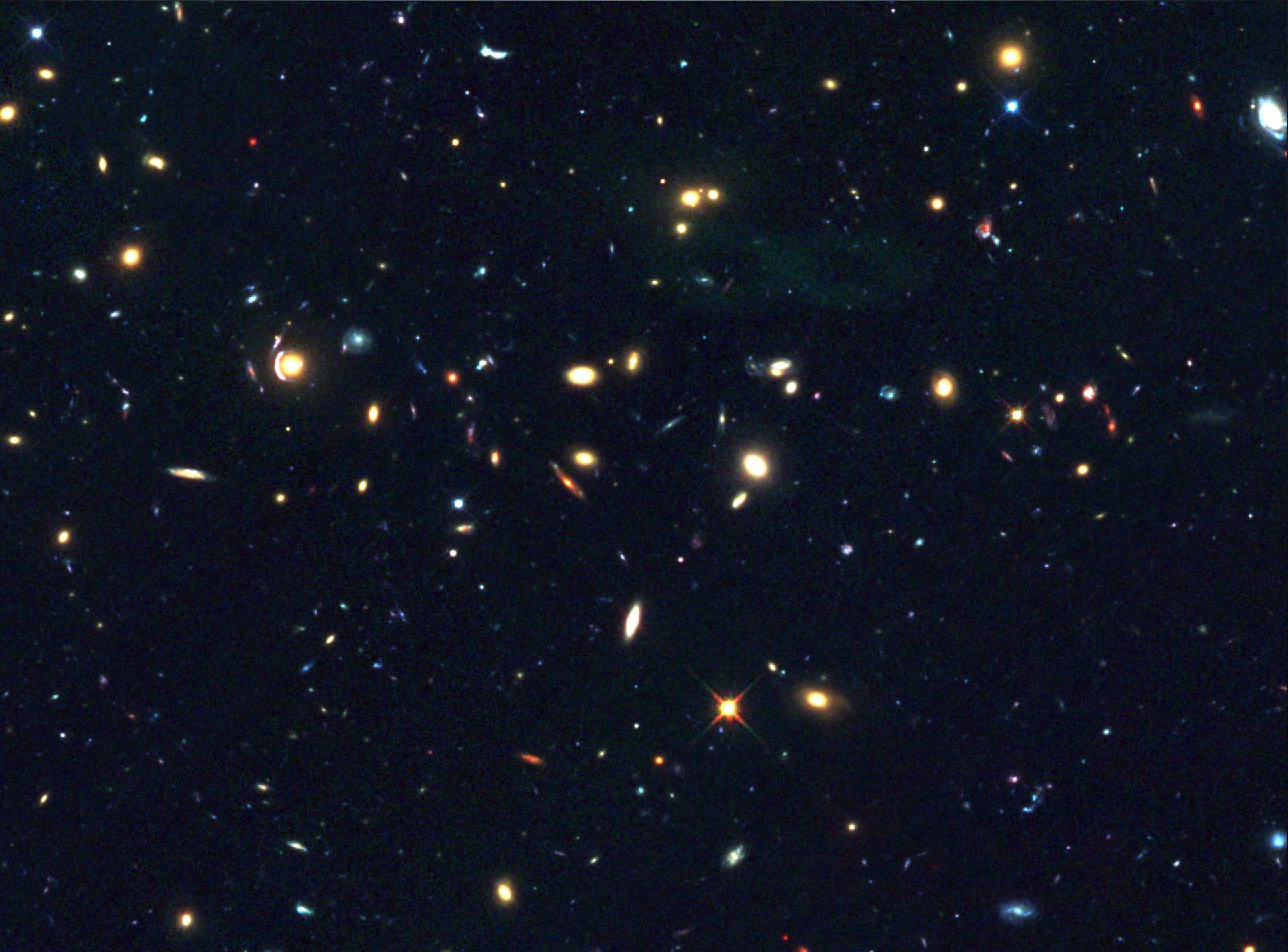
$z=2.5$ にある原始銀河団USS1558+003 (Hayashi et al. 2012)

Target	Redshift	Reference
XCSJ2215	1.46	Hayashi+10,11
4C65.22	1.52	Koyama+
Q0835	1.53	Shimakawa+
CL0332	1.61	Hayashi+
CIG J0218	1.62	Tadaki+12
PKS1138	2.16	Koyama+12
4C23.56	2.48	Tanaka+11
USS1558	2.53	Hayashi+12



赤いクランプと赤いクランプのペア

→major mergerという環境効果が見られる？



Code and setup

個々のハローに絞った“zoom in” cosmological simulationを行った。

1. ダークマターの宇宙論的シミュレーションから個々のハローを取り出す。

72h⁻¹ Mpc cosmological dark matter simulation (Oser et al. 2010)

条件: z=2、M~10¹²M_⊙、dM/dt>500M_⊙/yr、major mergerしていない

2. 1で取り出したハローの初期条件(~5Mpc)を用いて、バリオンも考慮し再計算をする。

resolution: 8x10⁵M_⊙(バリオン)、5x10⁶M_⊙(ダークマター)

code: Gadget-2 (Springel et al. 2005) ← N-body

詳細はOppenheimer & Dave (2006, 2008)

ionization and heating by a uniform background radiation (Haardt & Madau 2001) in the optically thin limit, atomic cooling down to $T = 10^4$ K from hydrogen and metals, star formation and feedback, as well as mass loss and metal enrichment from asymptotic giant branch stars and supernovae of Types II and Ia.

* このシミュレーションのポイント・・・galactic wind起源のstellar feedback

$$\frac{\dot{M}_W}{SFR} \equiv \eta = \frac{\sigma_0}{\sigma}$$

η: mass loading factor

η=1なら星形成と同程度の質量を放出していることになる。

今回はη=4を採用 ← 強いstellar feed backをいれている

観測での値(Genzel et al. 2011)と概ね一致しているが、観測から得られるηには大きな不定性がある。

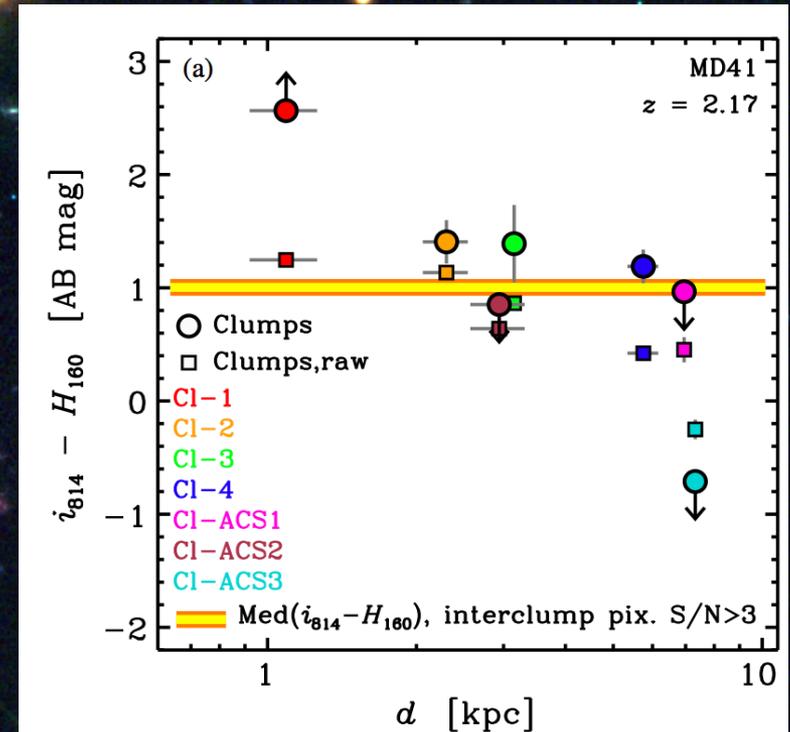
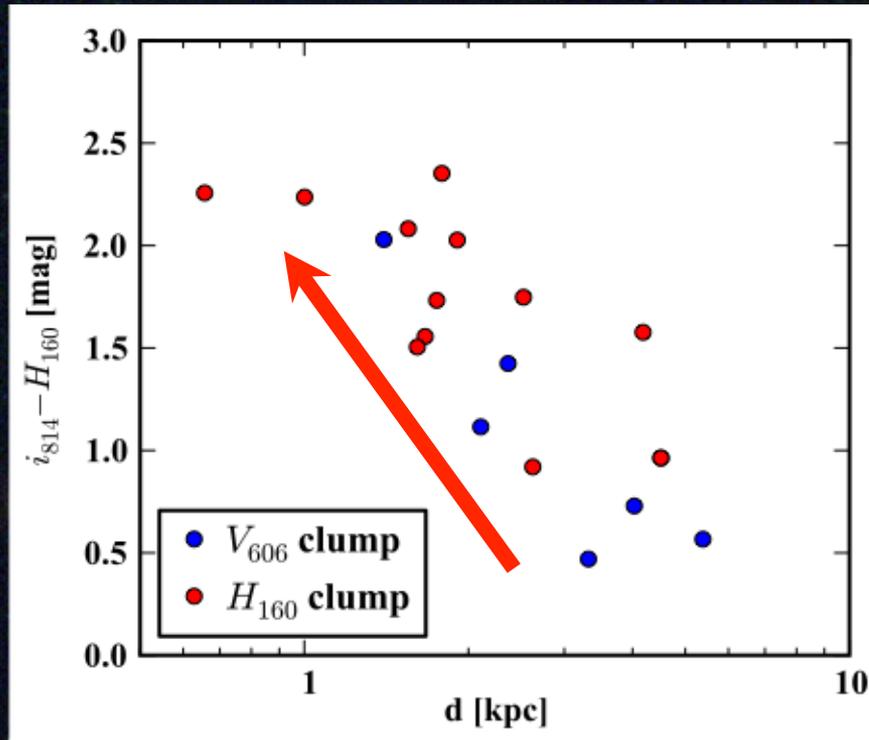
とは言え、強いgalactic windは観測から得られる様々な特徴と合う。

1. 金属量や電離状態などの銀河間物質の性質 (Oppenheimer & Dave 2006, 2009, Dave et al. 2010)

2. 銀河の質量-金属量関係 (Finlator & Dave 2008, Dave et al. 2011a)

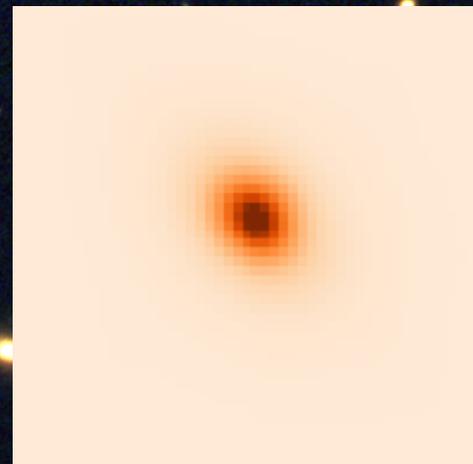
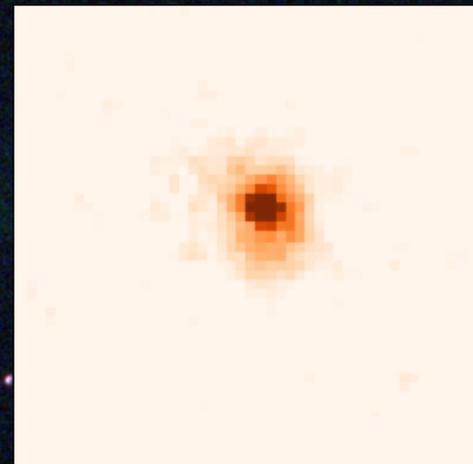
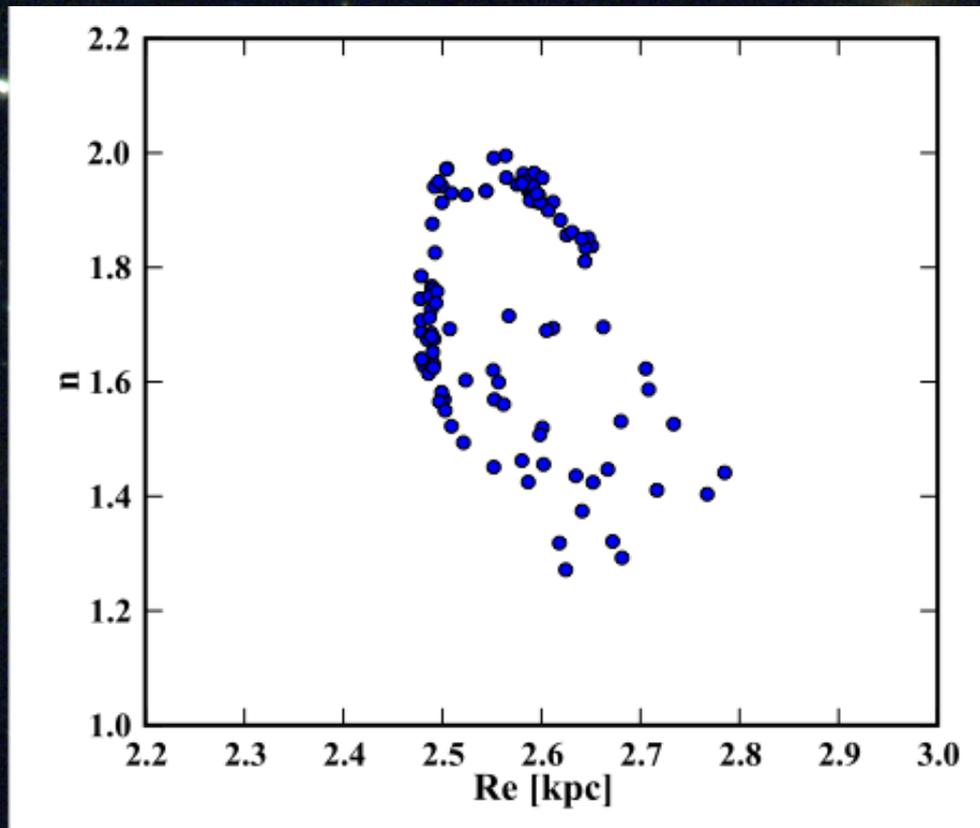
Radial Color Gradient of Clumps

MIPS-detected $H\alpha$ emitters



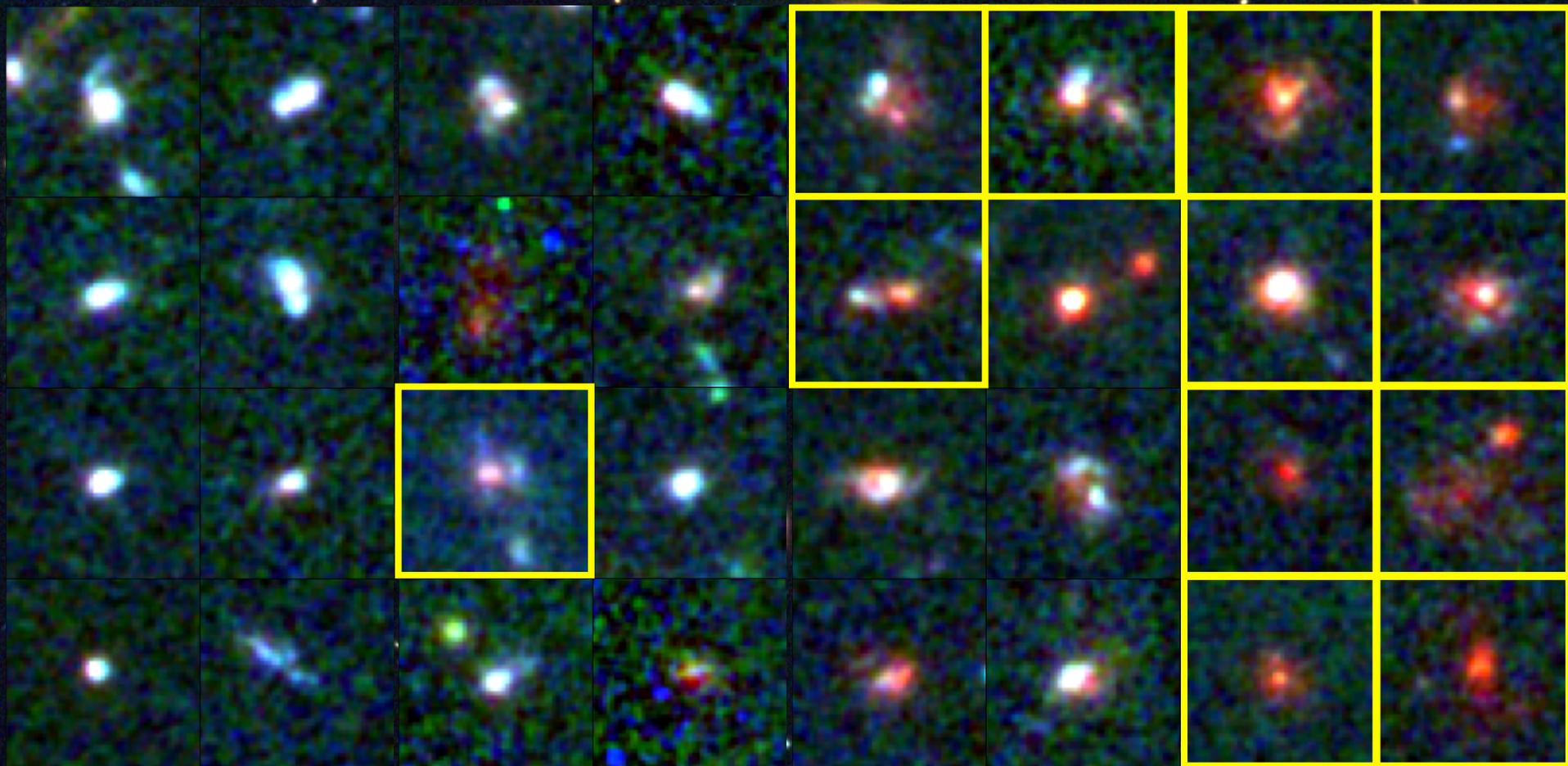
Forster Schreiber et al. 2011

銀河の中心のクランプほど赤い



Morphologies of star-forming galaxies

□ : MIPS source



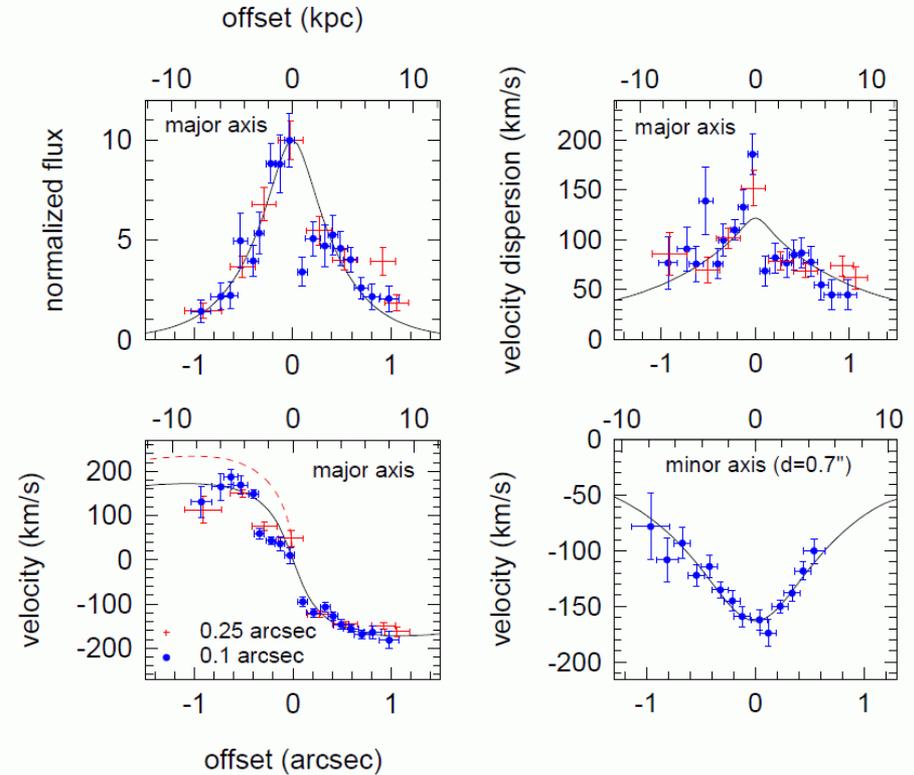
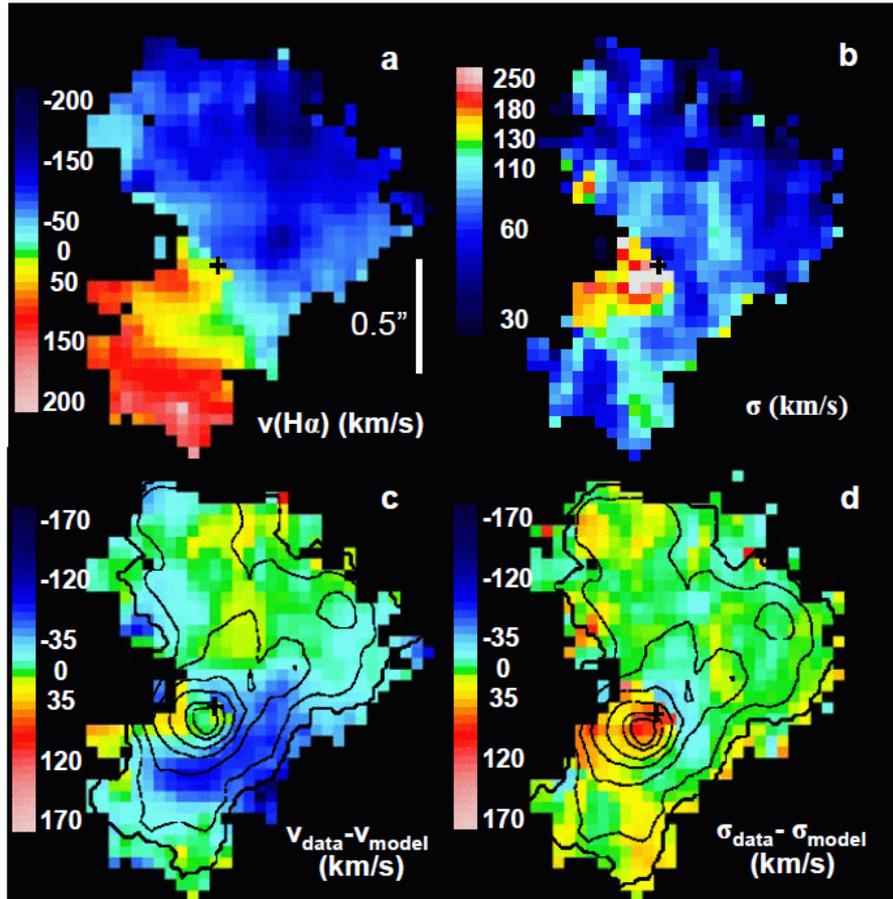
10^{10}

Stellar mass [M_{\odot}]

10^{11}

Rotation of distant star forming galaxies

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

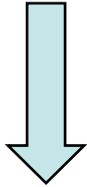


$z=2.38$, $K_s=19.2$, $M_{\text{dyn}}=1.13 \times 10^{11} M_{\odot}$ ($V_c=230\text{km/s}$),
 $M_{\text{stars}}=7.7 \times 10^{11} M_{\odot}$, $R_e=4.5\text{kpc}$, $M_{\text{gas}}(\text{H}\alpha)=4.3 \times 10^{10} M_{\odot}$

Genzel et al. (2006, Nature)

"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}

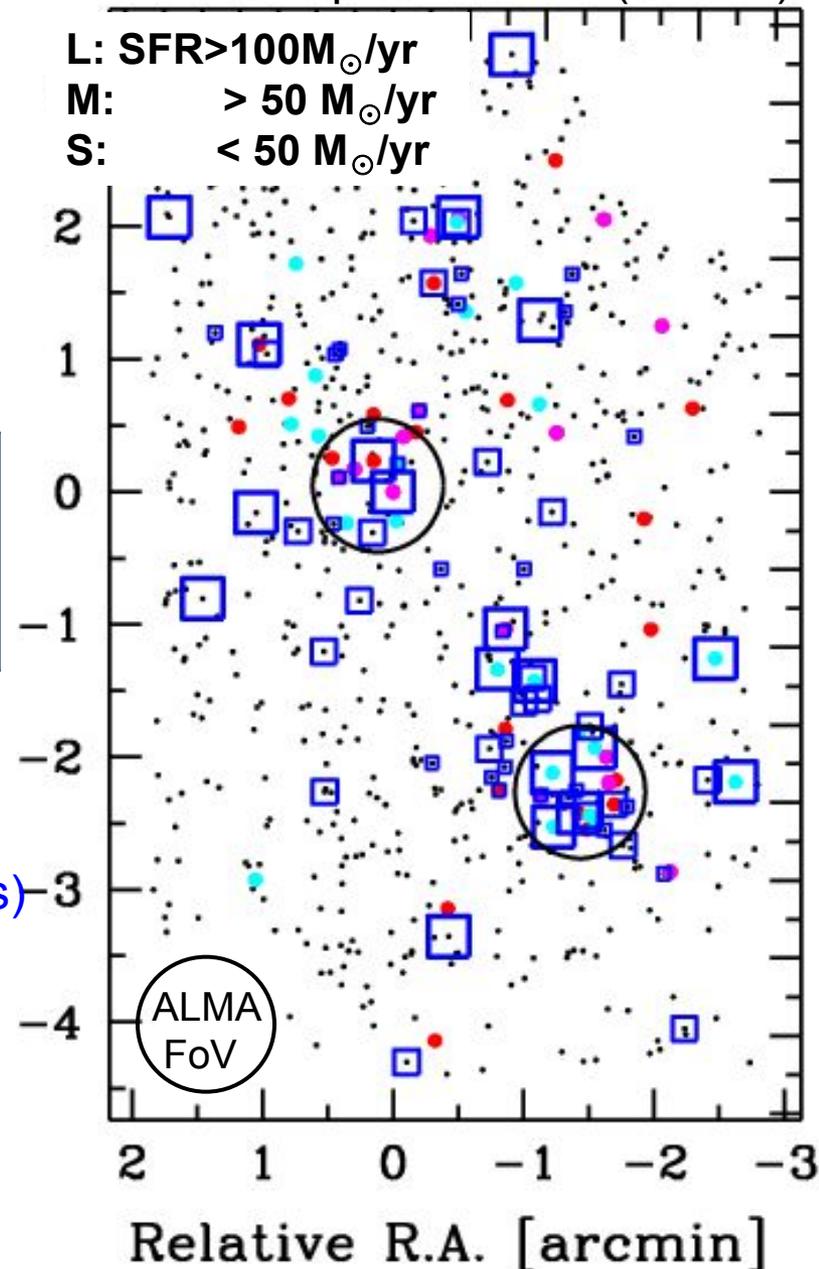
Dust conti. @450 μ m–1.1 mm \rightarrow Dusty SFR

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)



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

インフローフェーズ(コールドストリーム?)からアウトフローフェーズ(フィードバック)への切り替わり

- AGNの活動性

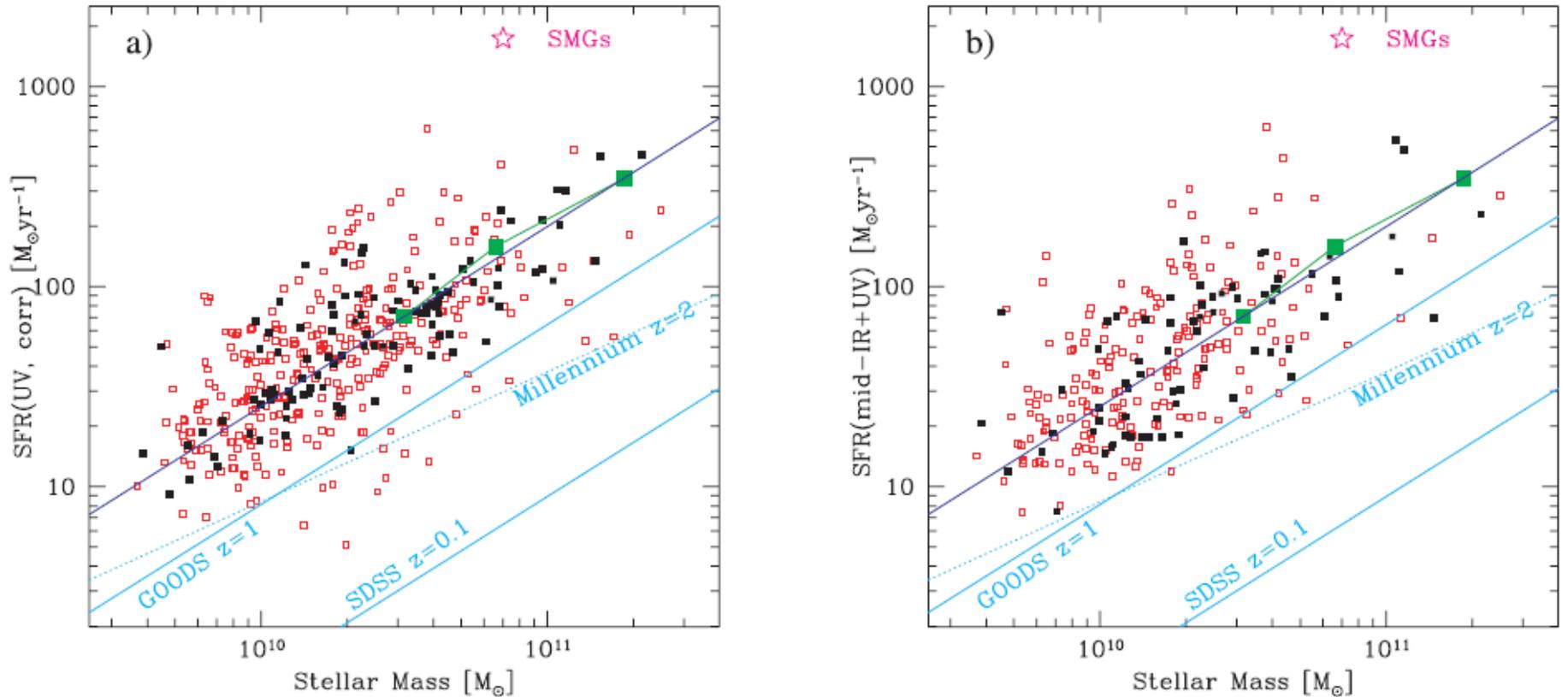
星形成バーストと中心核の活動性との同期? AGNフィードバック?

- 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!

“Main Sequence” of Star Forming Galaxies 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 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 mock light cones of Kitzbichler & White (2007). The magenta star near the top shows the location of typical SMGs in this diagram.

Double Sequence: “disk” mode + “starburst” mode

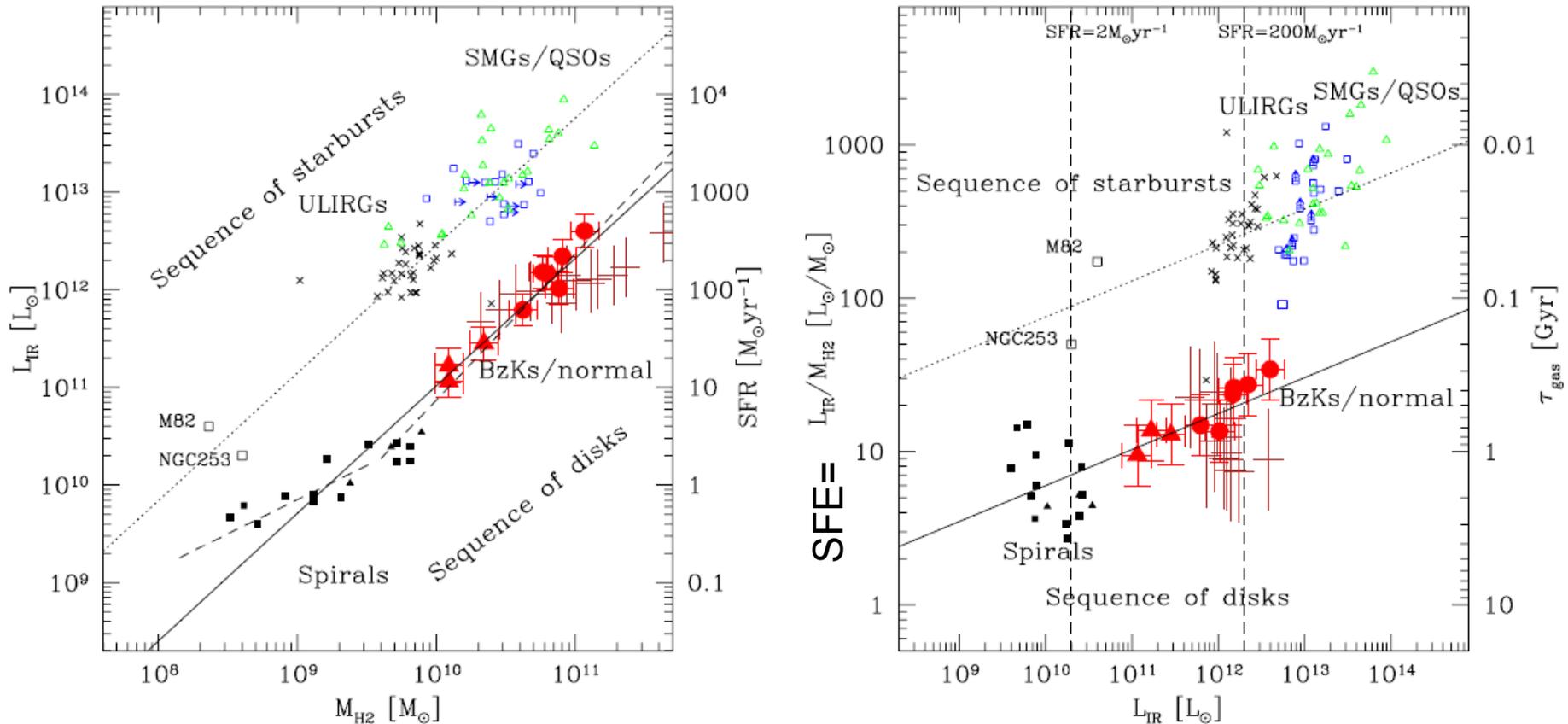


Figure 1. Comparison of molecular gas masses and total IR bolometric luminosities: BzK galaxies (red filled circles; D10), $z \sim 0.5$ disk galaxies (red filled triangles; F. Salmi et al. 2010, in preparation), $z = 1\text{--}2.3$ normal galaxies (Tacconi et al. 2010; brown crosses), SMGs (blue empty 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？ α (CO)が違う？ Daddi et al. (2010)

16,000 pair galaxies based on SDSS-DR7
 Sep < 80 kpc, $\Delta v < 300$ km/s, mass ratio (0.1-10)

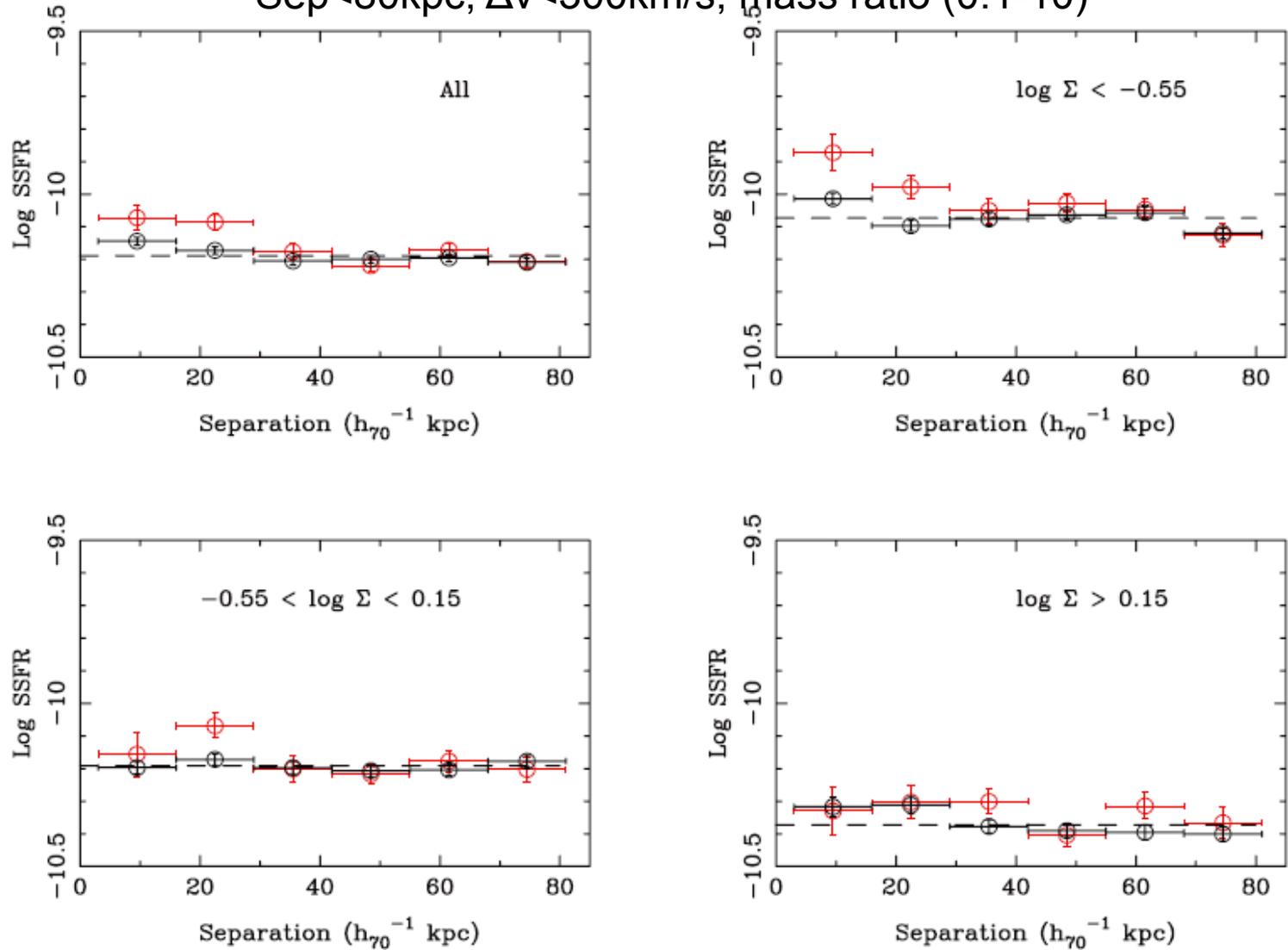


Figure 6. SSFR for pair galaxies with $\Delta v < 200$ km s⁻¹ as a function of projected separation (red points). The upper-left panel shows the full sample, other panels are split by local density $\log \Sigma < -0.55$ (upper right), $-0.55 < \log \Sigma < 0.15$ (lower left) and $\log \Sigma > 0.15$ (lower right). The median value of SSFR for the appropriate density control galaxies are shown as horizontal dashed lines. Black points show the control galaxies in projected separation bins that correspond to the pair to which they are matched.

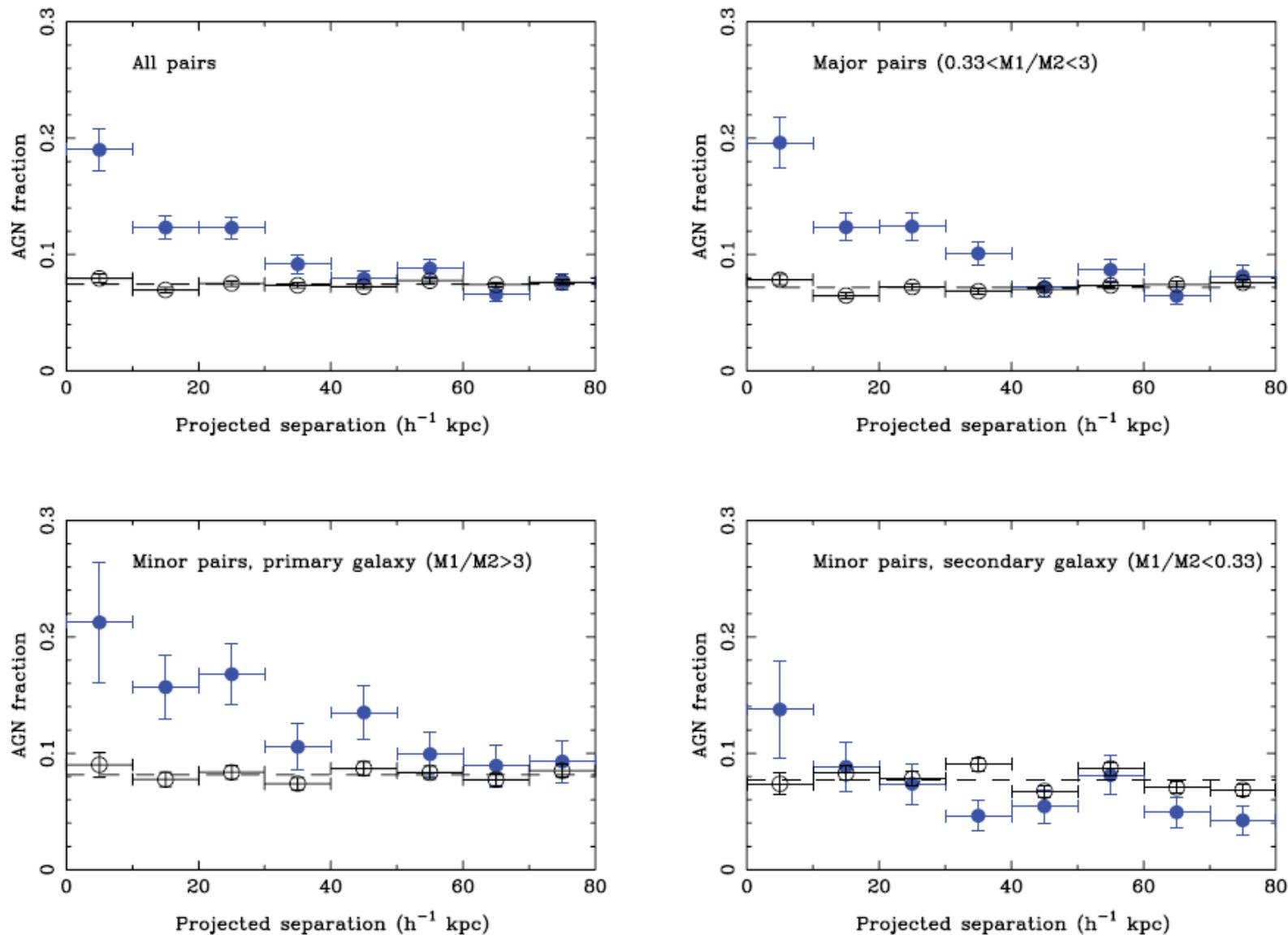


Figure 4. The fraction of pair galaxies (solid points) classified as AGN according to the S06 diagnostic as a function of projected separation. Open points show the AGN fractions for the control galaxies matched to the pairs in each bin of projected separation. The panels show the full pairs sample (top left), only the approximately equal-mass (major) pairs (top right), the greater (bottom left) and lower mass (bottom right) in unequal-mass (minor) pairs.

(IAUS 295 @ Beijing, China 2012/8/27)

MAHALO-Subaru

Mapping star formation at the peak epoch of massive galaxy formation

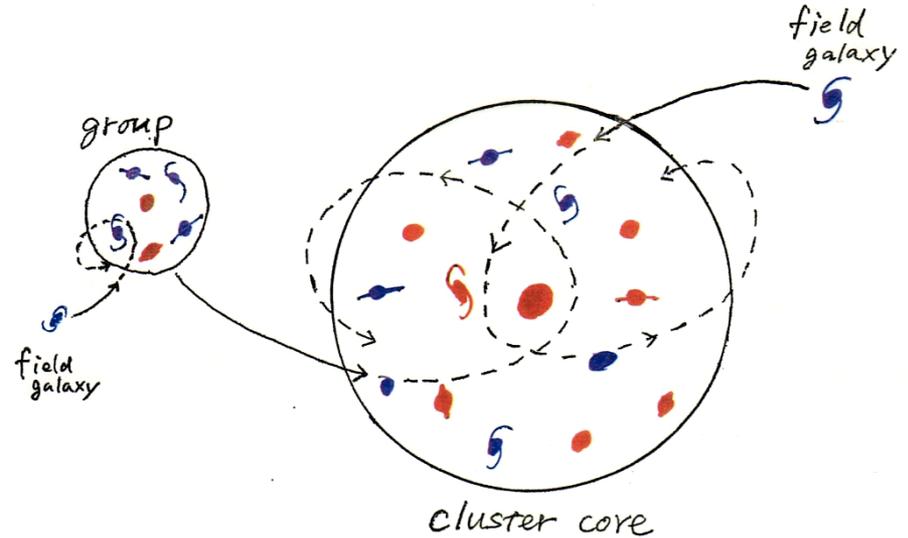
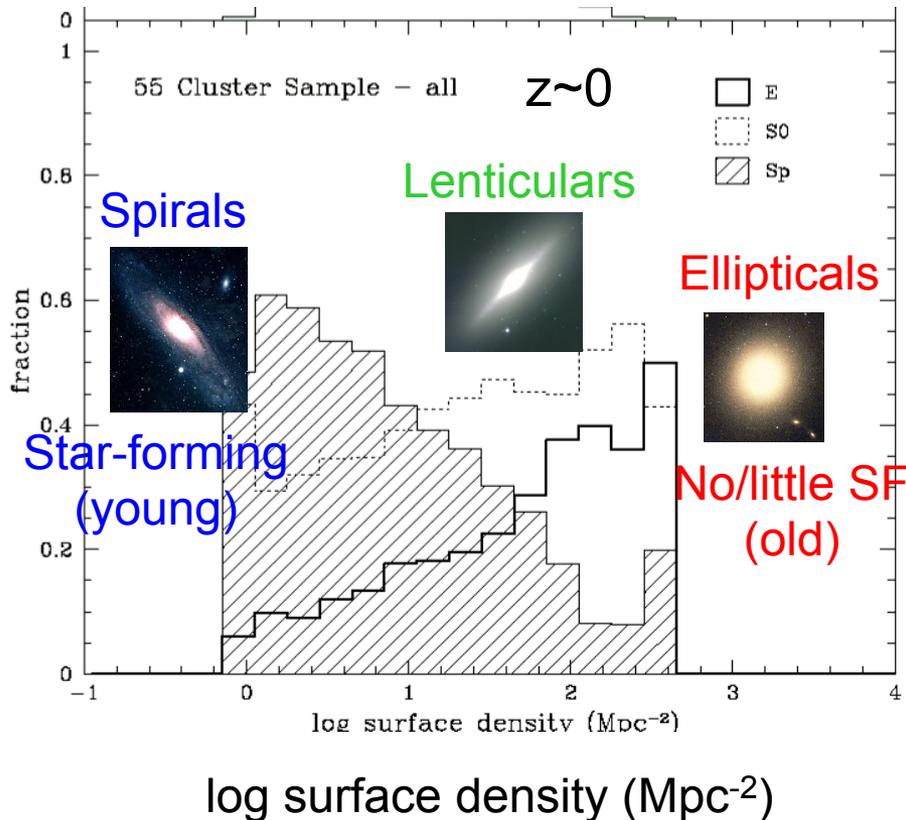
Taddy Kodama (Subaru), Masao Hayashi (NAOJ),
Yusei Koyama (Durham Univ./NAOJ), Ken-ichi Tadaki
(Univ. of Tokyo/NAOJ), Ichi Tanaka (Subaru),
Rhythm Shimakawa (NAOJ), and Mahalo-Subaru Team

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

What's the origin of the environmental dependence?

Morphology(SFH) - M_{halo} relation

Morphology - Density relation
(Dressler 1980)



Nature? (intrinsic)

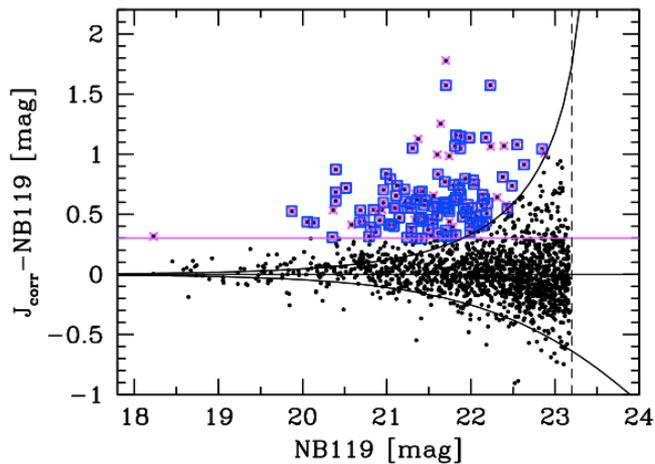
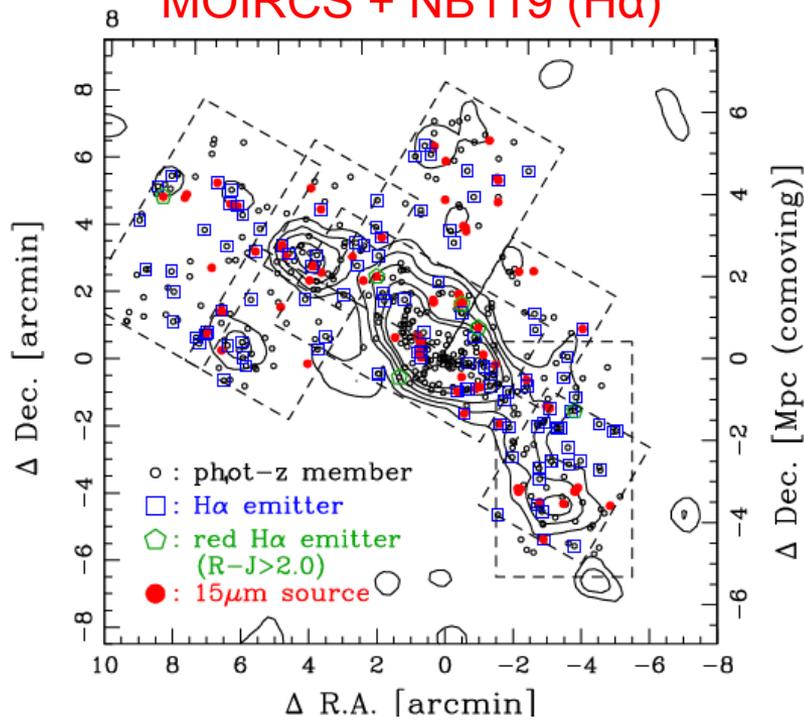
Need to go higher redshifts when it becomes more evident.

Nurture? (external)

Need to go outer infall regions to see directly what's happening there.

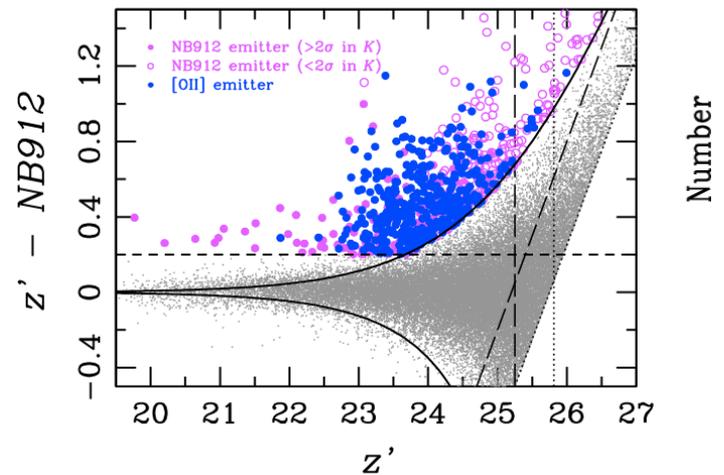
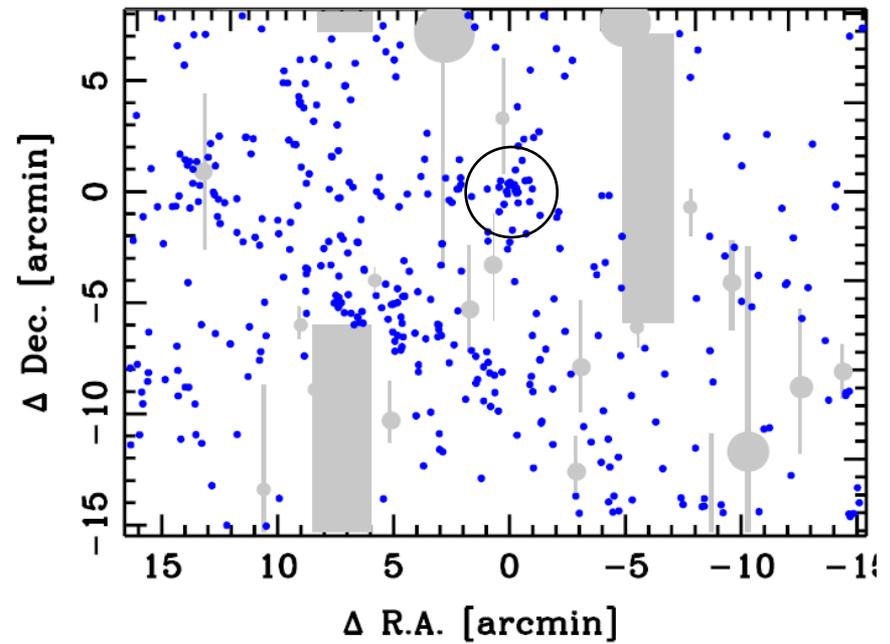
RX J1716.6+6708 ($z=0.81$)

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.

Summary

- **Mahalo-Subaru** is mapping out star formation activities across time and environment at the peak epoch of galaxy formation and evolution.
- **Inside-out** propagation of SF in clusters.
- **Red emitters** are the key populations under the influence of environmental effects.
- **SF galaxies in the proto-cluster** (PKS1138) tend to be more massive, bursty, and dustier than those in the field.
- **Clumpy nature** of HAEs at $z > 2$.
- **Gracias-ALMA + IFU** will reveal the mode of SF and kinematics within the forming galaxies in proto-clusters.