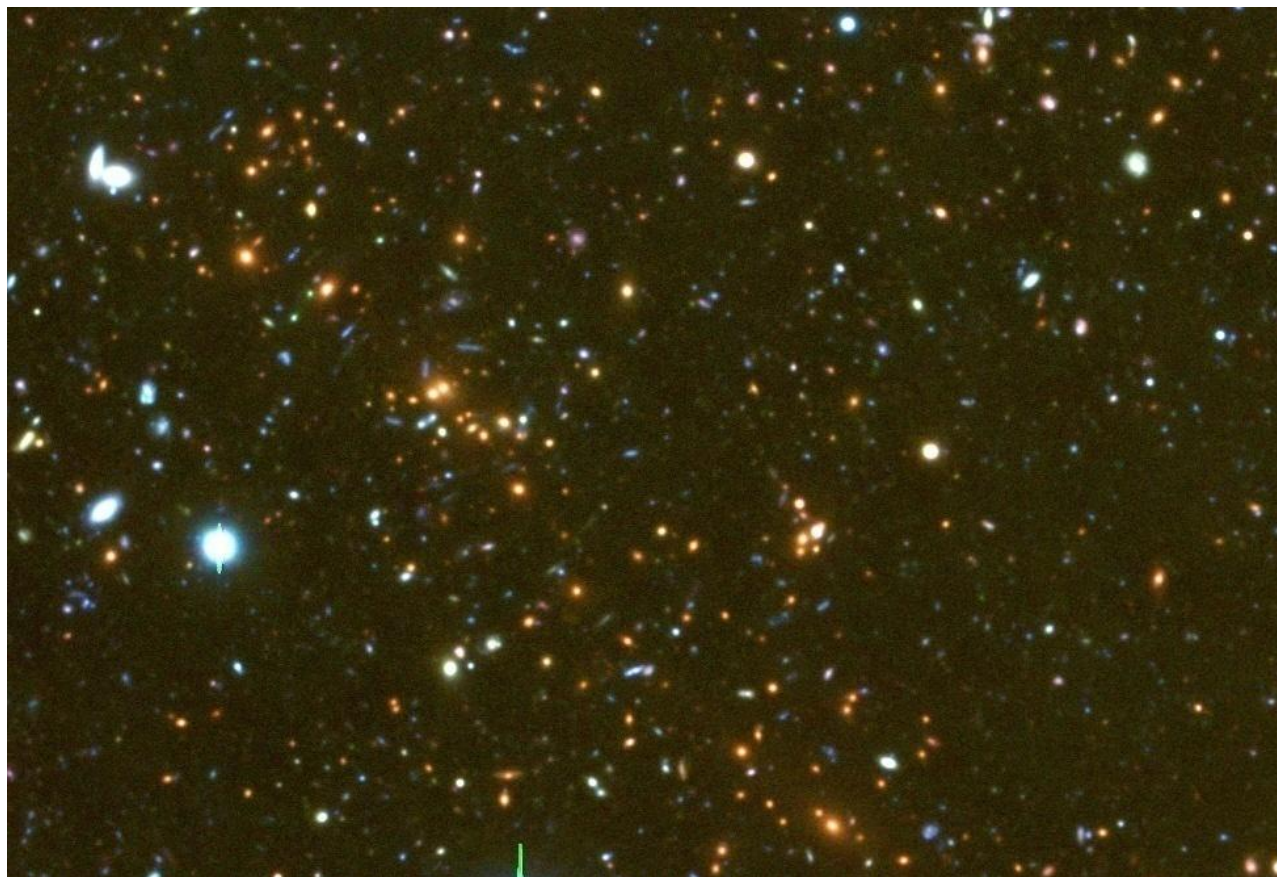


すばる春の学校2011 (2011年5月30日, 国立天文台三鷹キャンパス)

すばる望遠鏡が描き出す、銀河と銀河団の進化



児玉 忠恭 (こだま ただゆき)

国立天文台ハワイ観測所 E-mail: kodama@naoj.org

内容

1. 宇宙の階層構造
2. すばる望遠鏡の特長
3. 銀河団と銀河生態学
4. 銀河形成ピーク期を探る
(マハロ・すばるプロジェクト)

1. 宇宙の階層構造

星は、すばる



プレアデス星団
(すばる)

一つに集まっている、という意味の
「すまる」から転じて「**統る (すばる)**」
と呼ばれるようになった (広辞苑)。

清少納言



『枕草子』 (写本)

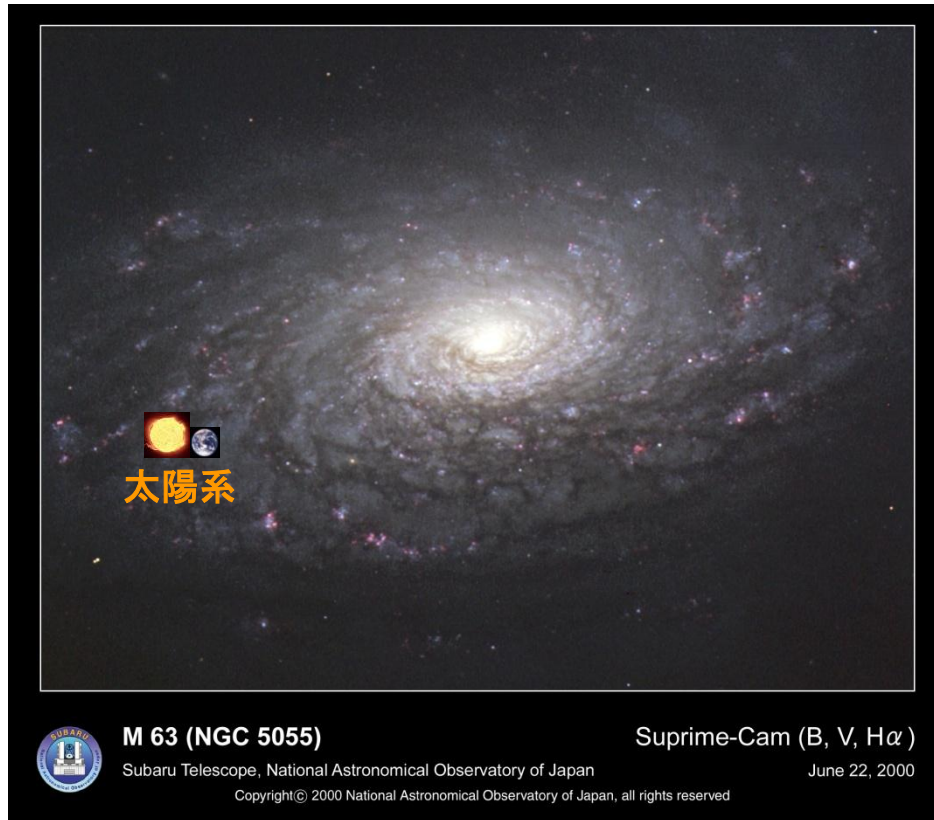


236段：星はすばる。ひこぼし。ゆふつつ。よばひ星、すこしをかし。

尾だになからましかば、まいて。

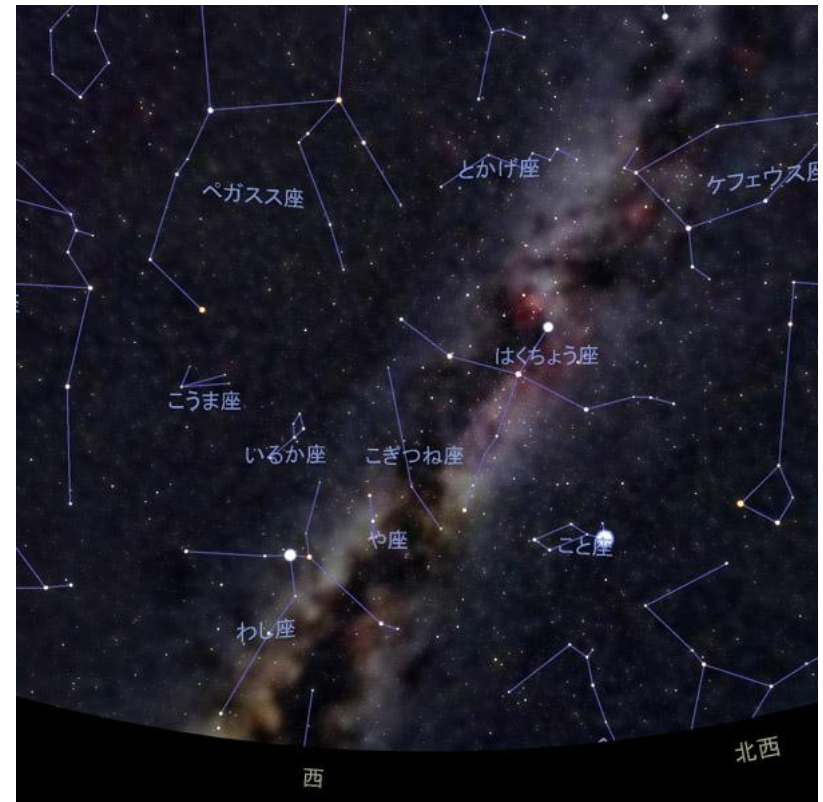
(星といえは、すばる。彦星。宵の明星もいい。流れ星もそれなりに趣きがあって美しい。
でも尾がなければもっといいのに。)

星は、さらに続(すば)る



M63 (従兄弟銀河)

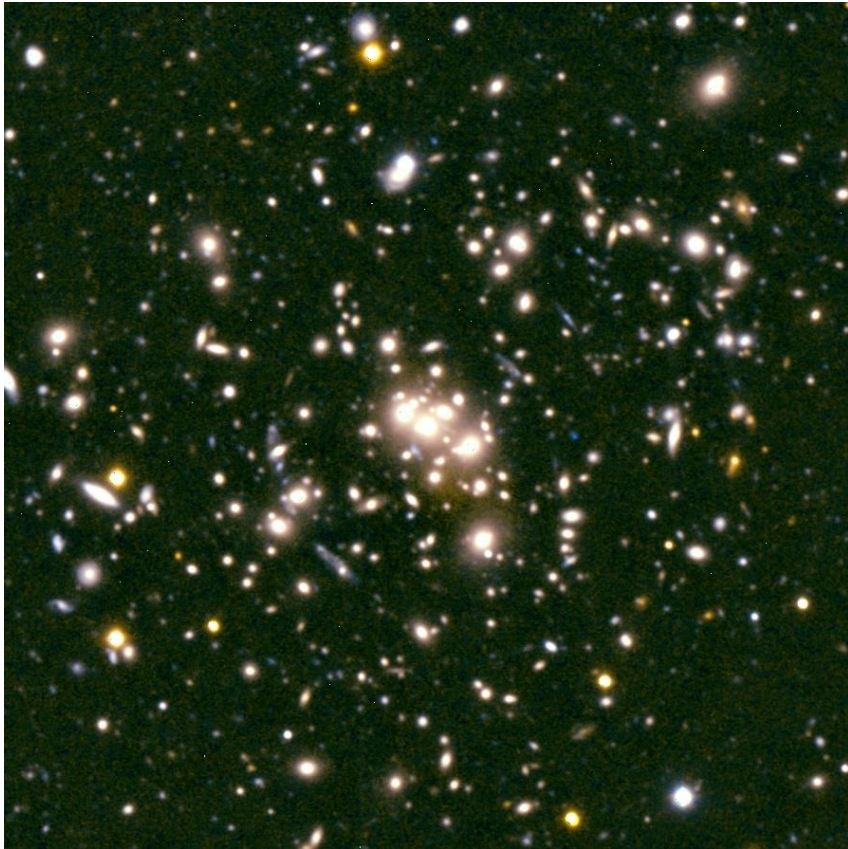
銀河系は太陽のような恒星が数千億個も集まった大集団。太陽は中心から約8kpc (2万5千光年)の所に位置する。



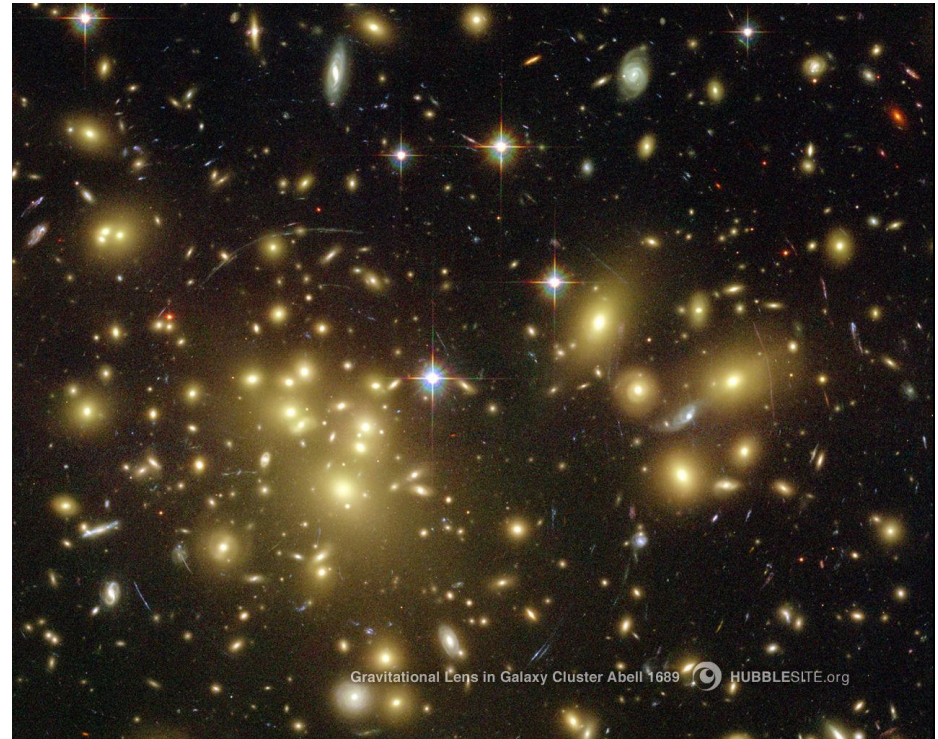
天の川は、銀河系の円盤を横から眺めたもの

銀河は、統(すば)る

銀河団



CL0024銀河団 (42億光年)、すばる望遠鏡



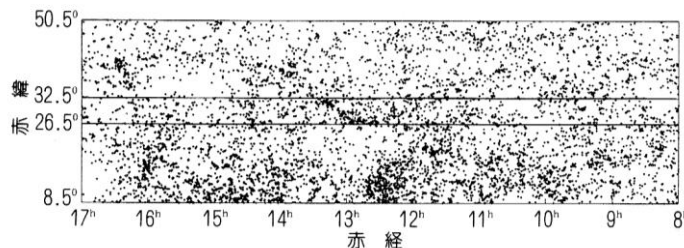
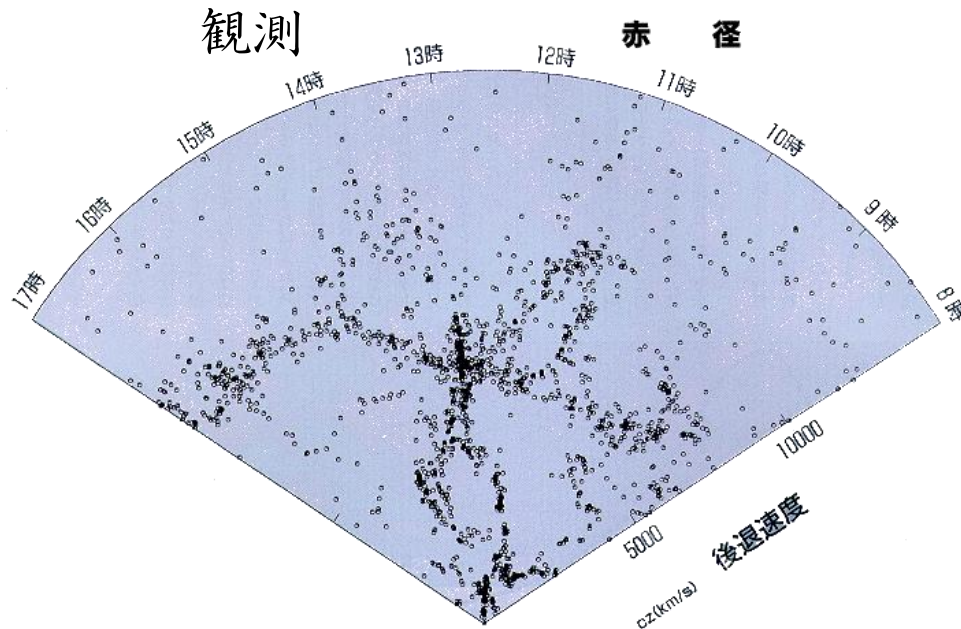
Abell1689銀河団 (22億光年)、ハッブル宇宙望遠鏡

大きさは半径約300万光年～1000万光年、質量は $10^{14-15} M_{\odot}$

銀河は、さらに続(すば)る

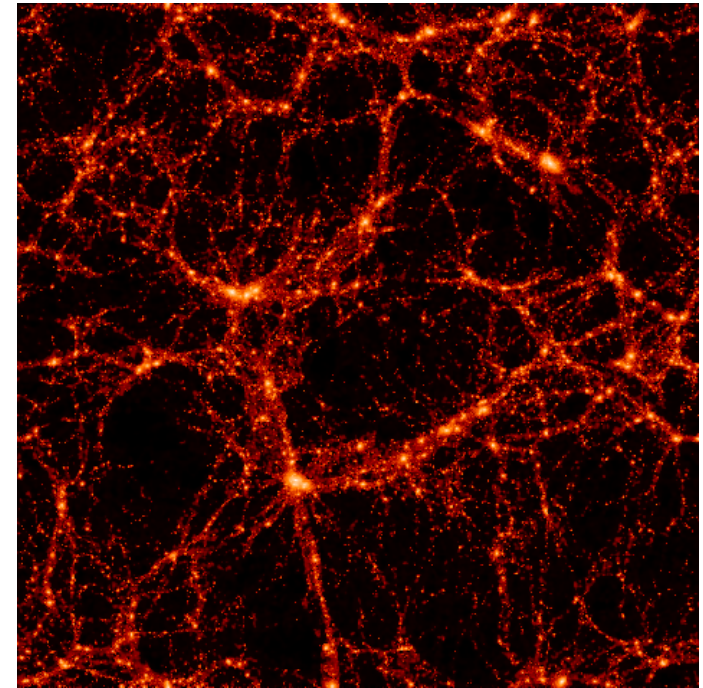
超銀河団 (宇宙大規模構造)

観測



CfA サーベイ (Geller&Huchra 1986)

理論 (計算機)



VIRGO コンソーシアム (Frenk 他)

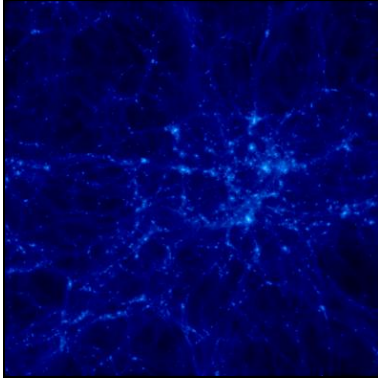
太陽系→銀河系→銀河群・団→超銀河団

『宇宙の階層構造』

階層的な銀河・銀河団の形成（理論モデル）

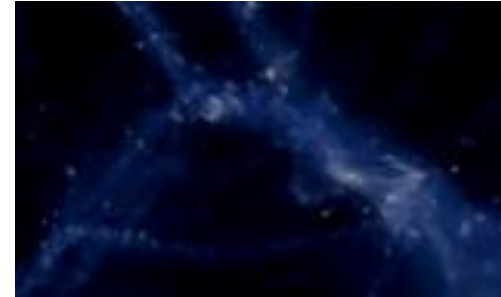
<http://4d2u.nao.ac.jp/>

125億年前

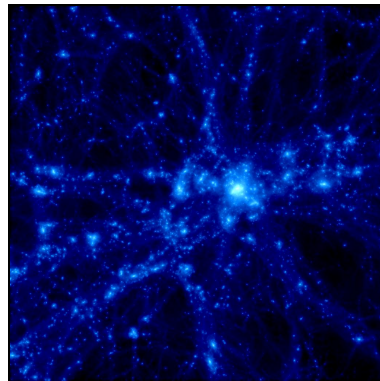


銀河団形成

銀河形成



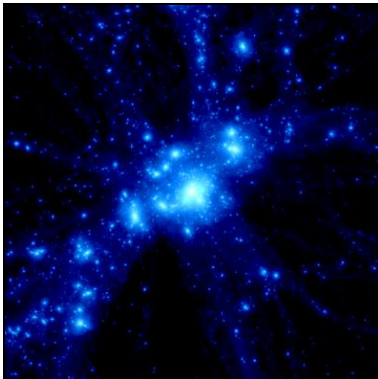
100億年前



movie

movie

現在

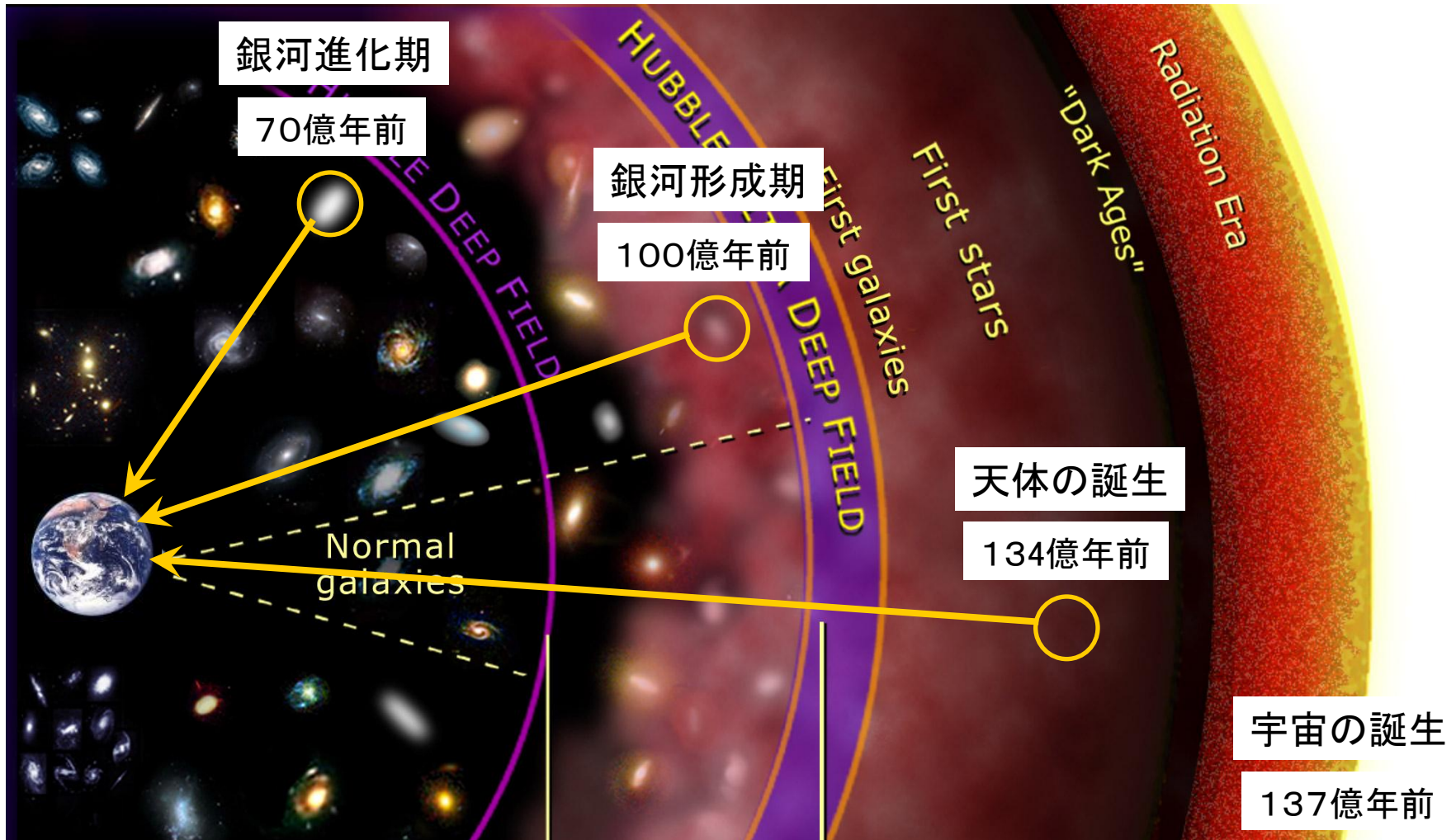


矢作氏ほか

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。

宇宙の歴史を直接探るタイムマシーン



遠くを見れば見るほど、昔の宇宙の姿が見える → 究極の考古学！

2. すばる望遠鏡の特長



望遠鏡も、すばる



ハワイ島マウナケア山頂は、各国の巨大望遠鏡が集まる、世界最大の天体観測基地。

1999年完成。一昨年10周年記念。



標高4200mと高く、酸素は平地の60%しかない。



すばる望遠鏡（国立天文台）
口径8.2メートルは世界最大規模



すばるへの道

マウナケア山頂観測所群(標高4200m)

ハワイ島



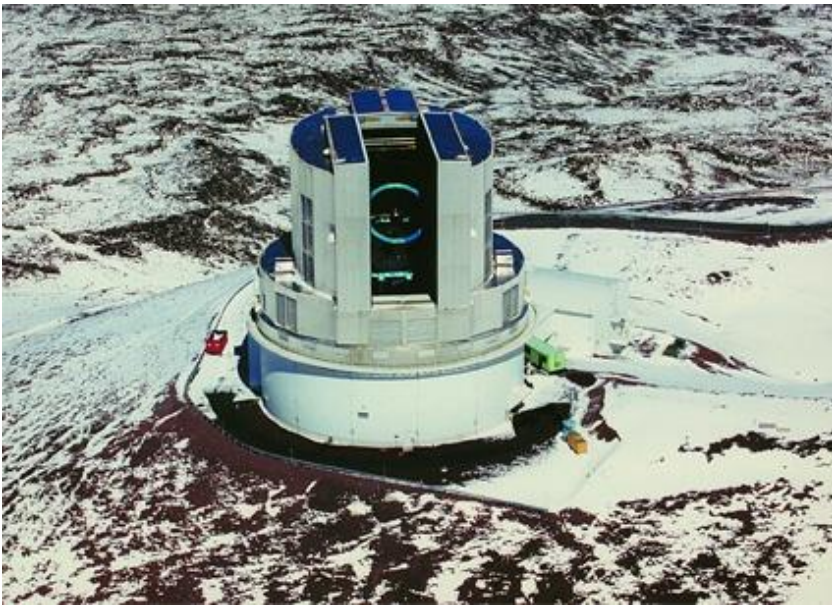
ハレポハク「石の家」
(中間宿泊施設、
標高2800m)



ハワイ観測所ヒロベース(山麓施設)

すばる望遠鏡 vs. ハッブル宇宙望遠鏡

地上



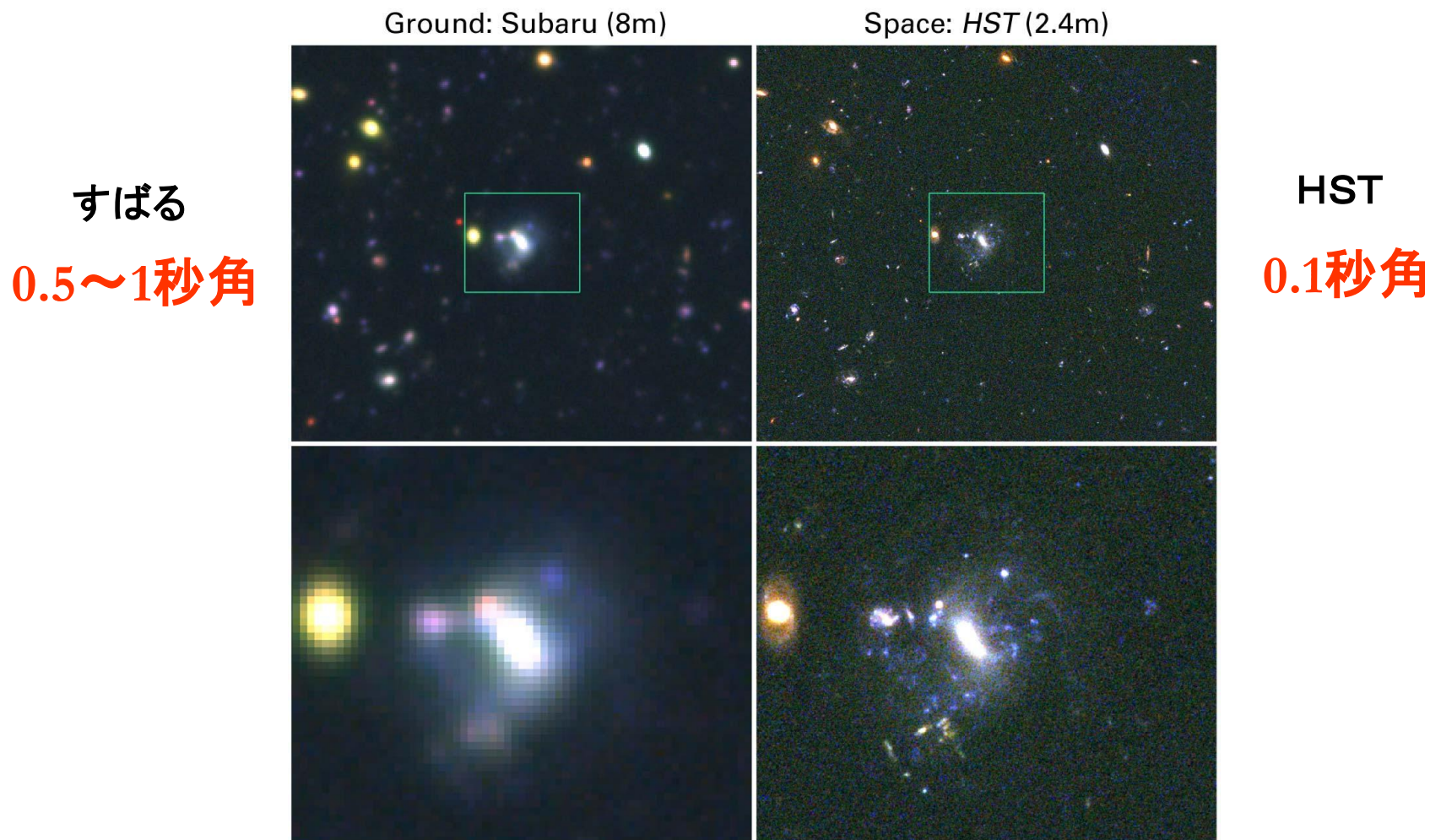
すばる望遠鏡(地上4200m、口径8.2メートル)

スペース



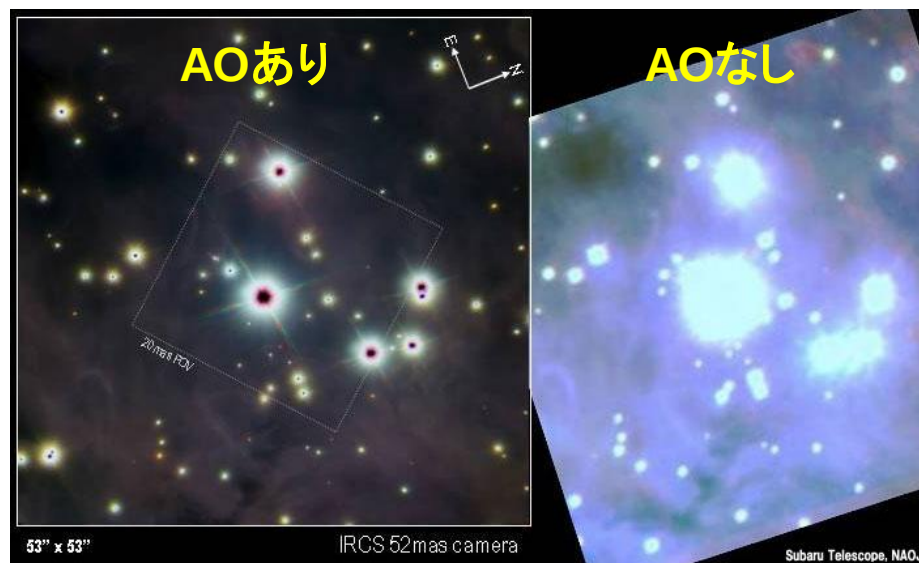
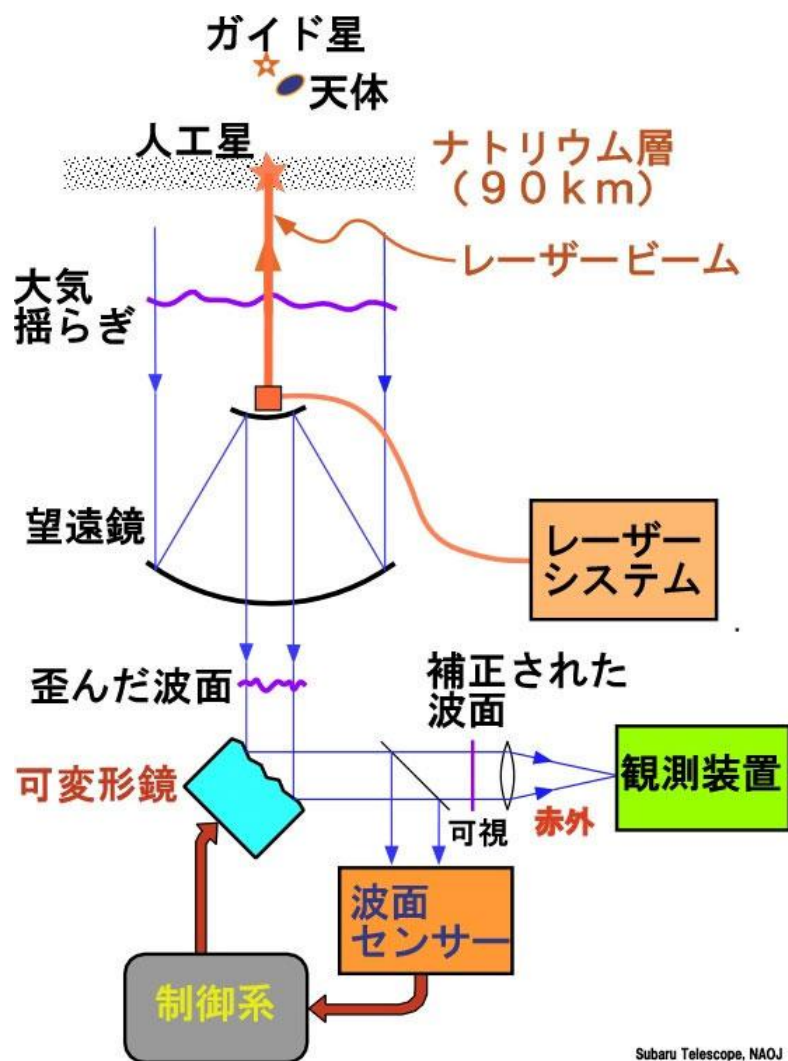
HST (スペース、口径2.4メートル)

すばる望遠鏡 vs. ハッブル宇宙望遠鏡 (解像度)



すばるの解像度は約5~10倍悪い (大気揺らぎのため)

すばる望遠鏡の補償光学システム (AO)



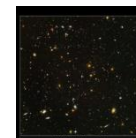
地上望遠鏡でも宇宙望遠鏡に匹敵する（または凌駕する）解像度が得られる！
（ただし、現状のAOでは視野が1分角程度と大きく限られる）

すばる望遠鏡 VS ハッブル宇宙望遠鏡 (視野)

すばる(30分角＝満月)



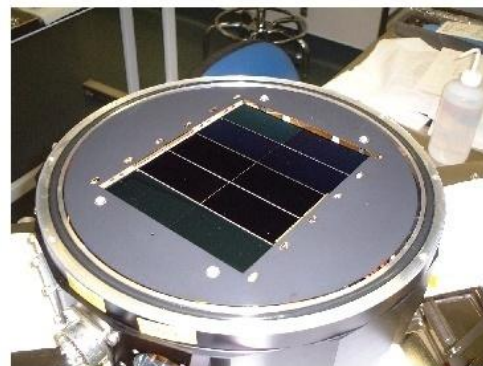
HST(3分角)



HUDF

すばるの視野 (一度に観測できる天域)
は約100倍広い (大型装置が設置可能)

両者は相補的！



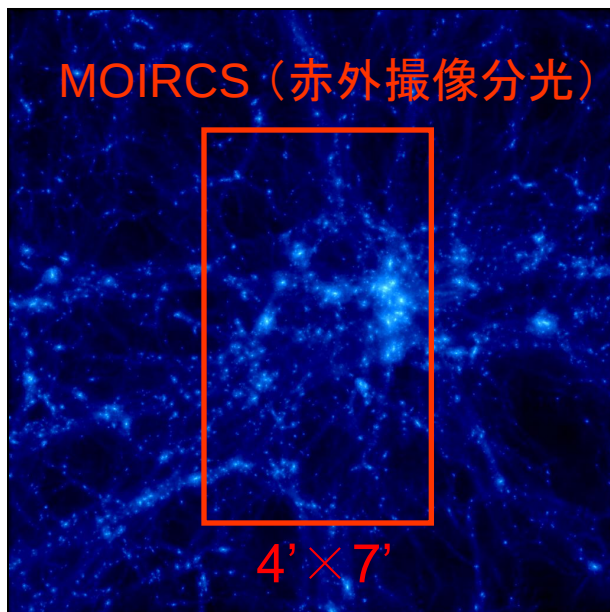
巨大なデジカメ
8400万画素！

すばる望遠鏡の広視野観測装置の威力

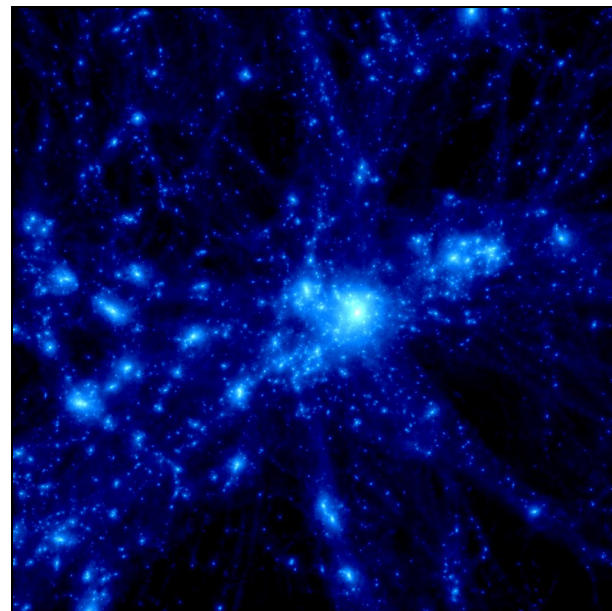
銀河団シミュレーションとの比較

Suprime-Cam (可視撮像)

115億年前 ($z=3$)



80億年前 ($z=1$)



34' × 27'

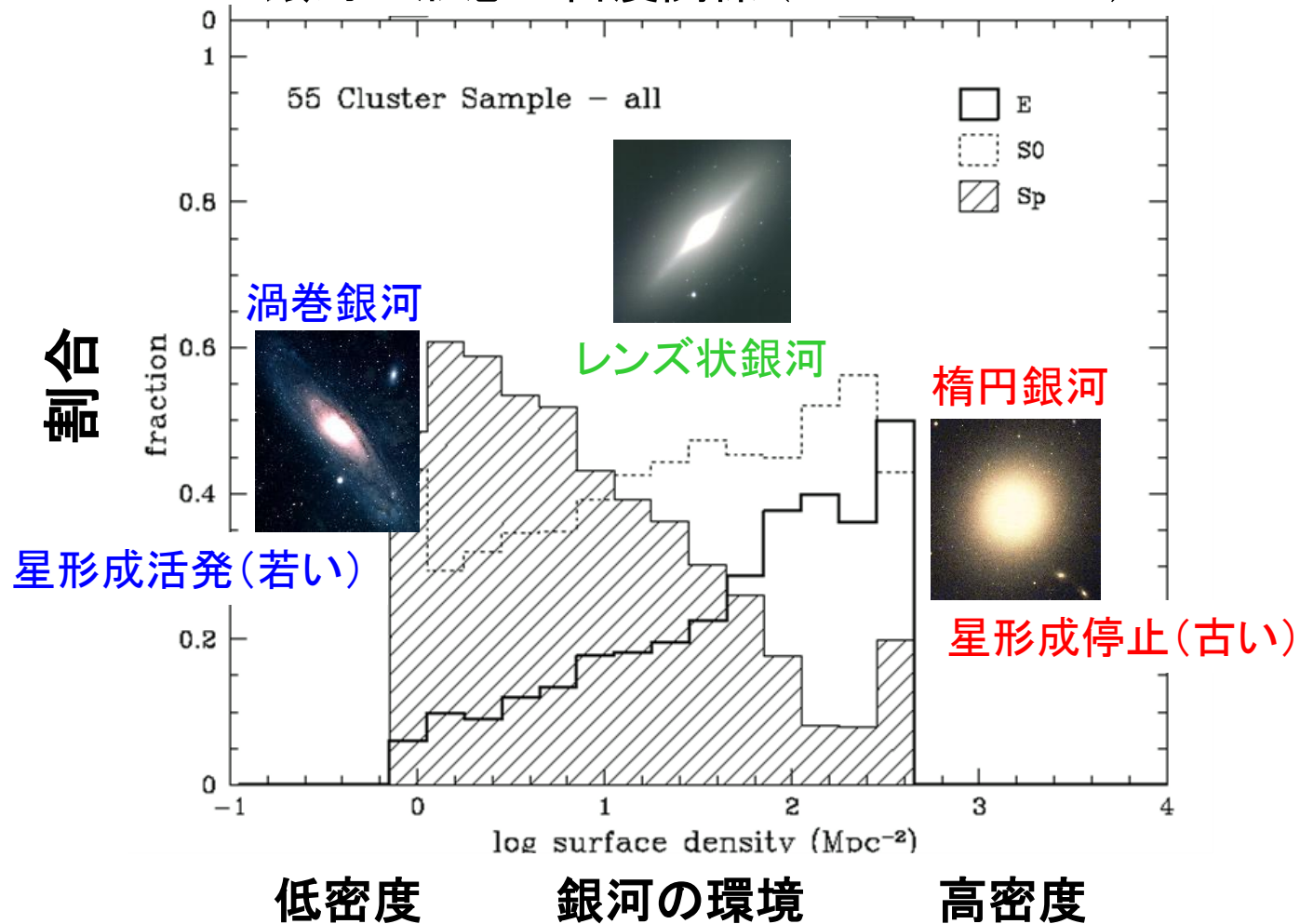
銀河、銀河団は、すばる！

3. 銀河団と銀河生態学

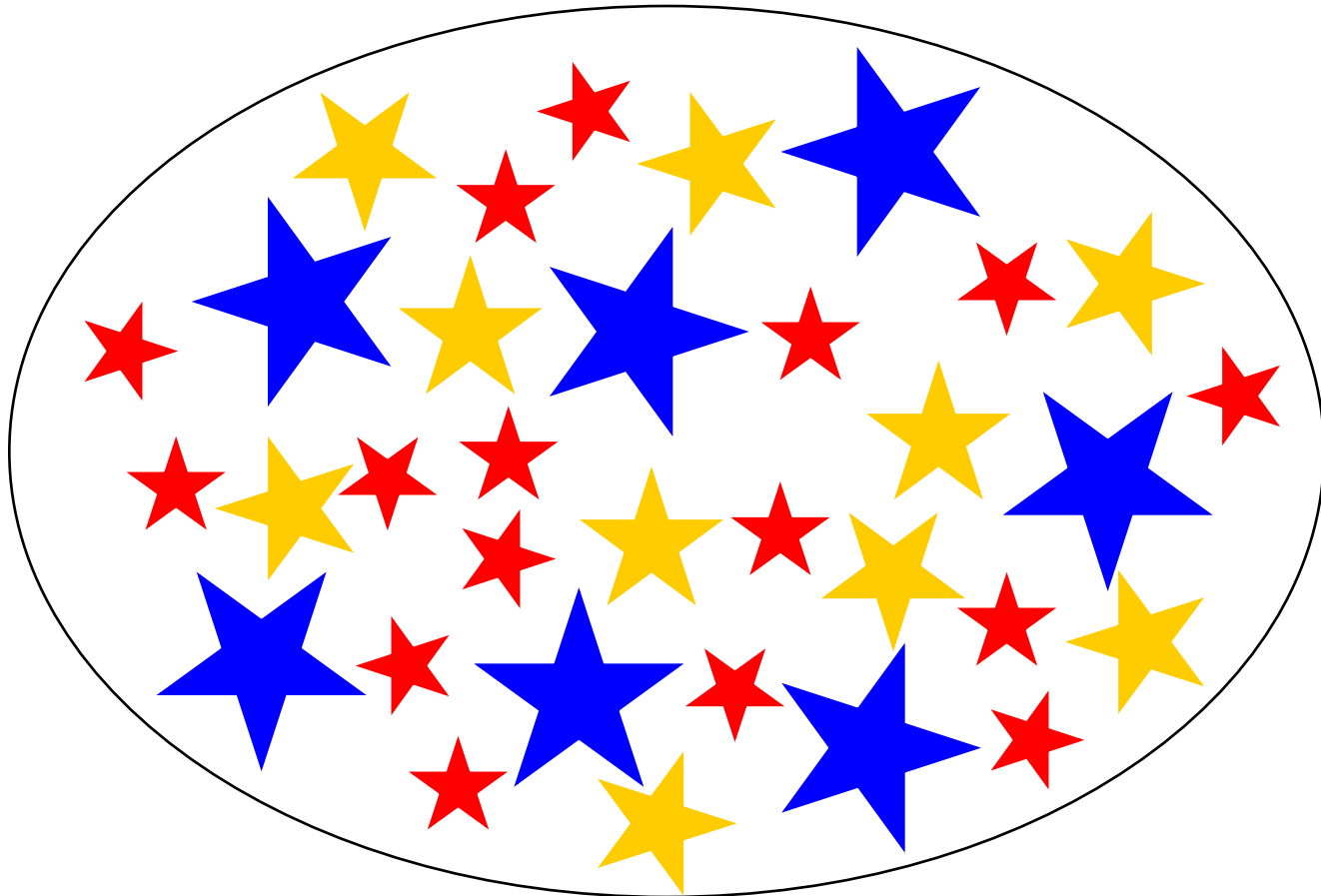
銀河の種族と環境

現在の銀河宇宙

銀河の形態－密度関係 (Dressler 1980)



銀河の色は星の年齢の指標



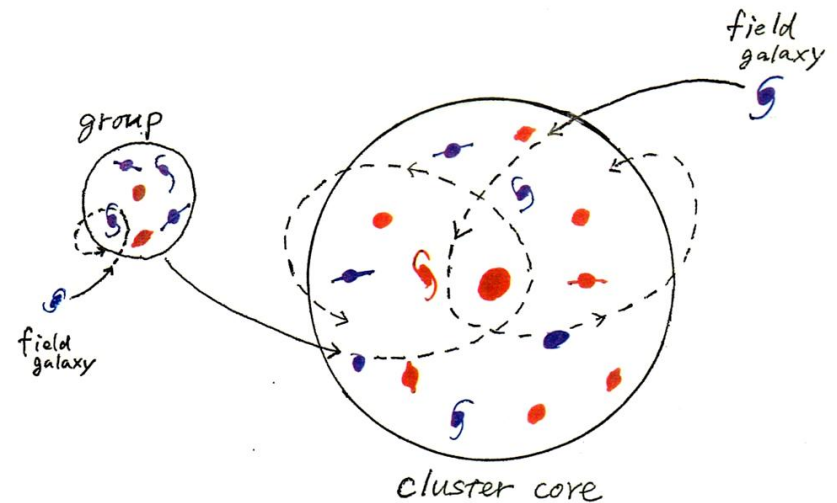
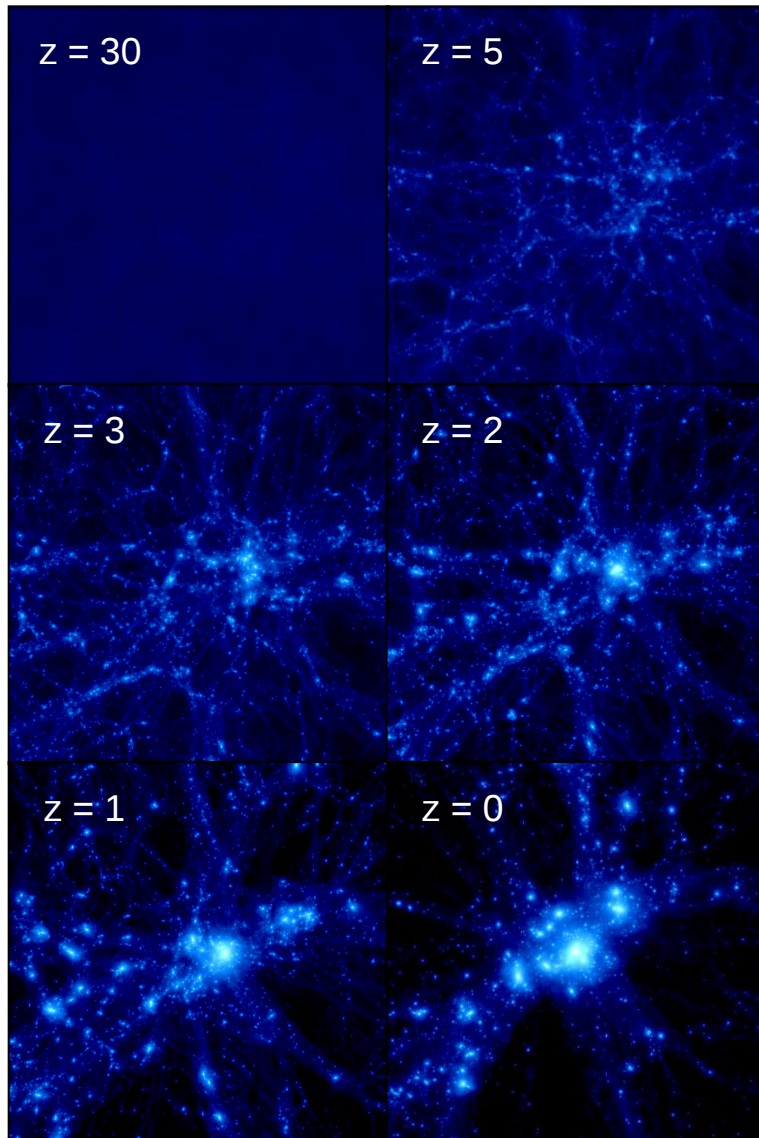
大質量星＝高温＝青い＝短命

中質量星

小質量星＝低温＝赤い＝長命

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。

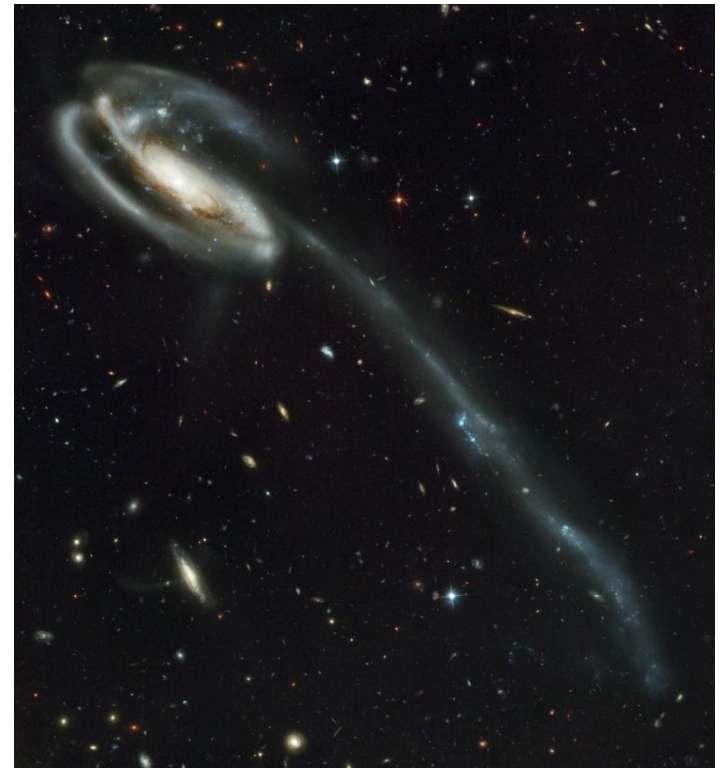
後天的（育ち）？

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)

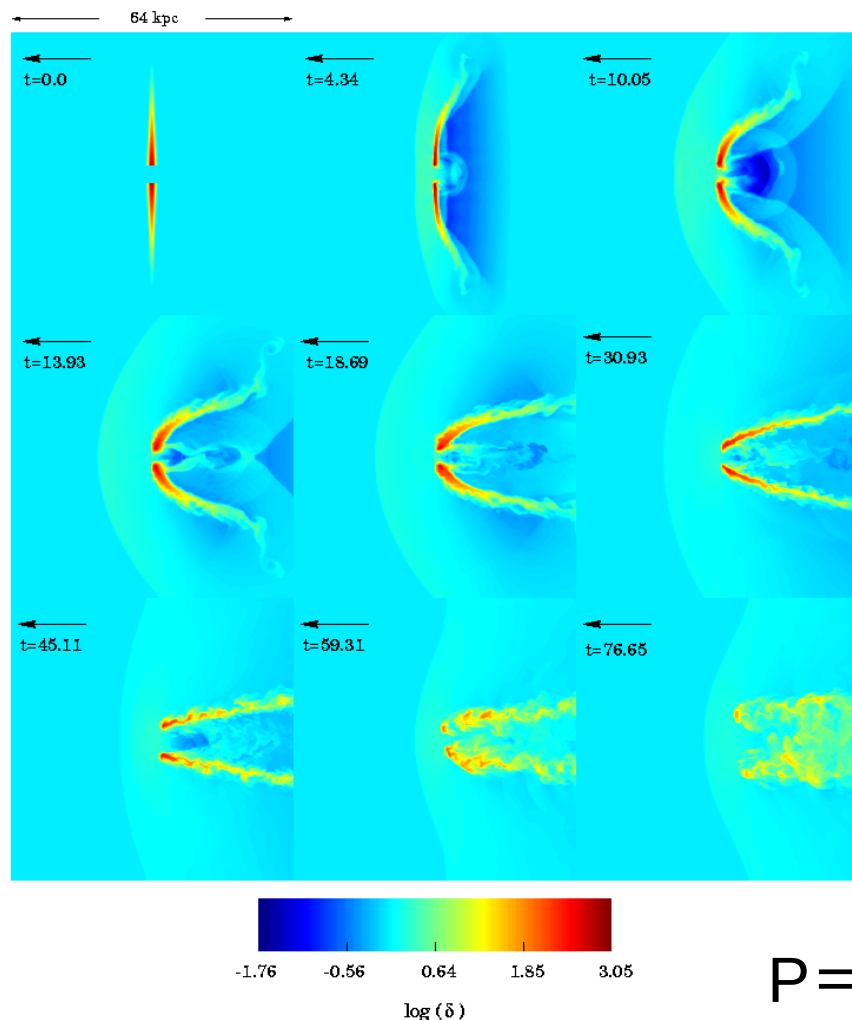
銀河の衝突、合体

(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

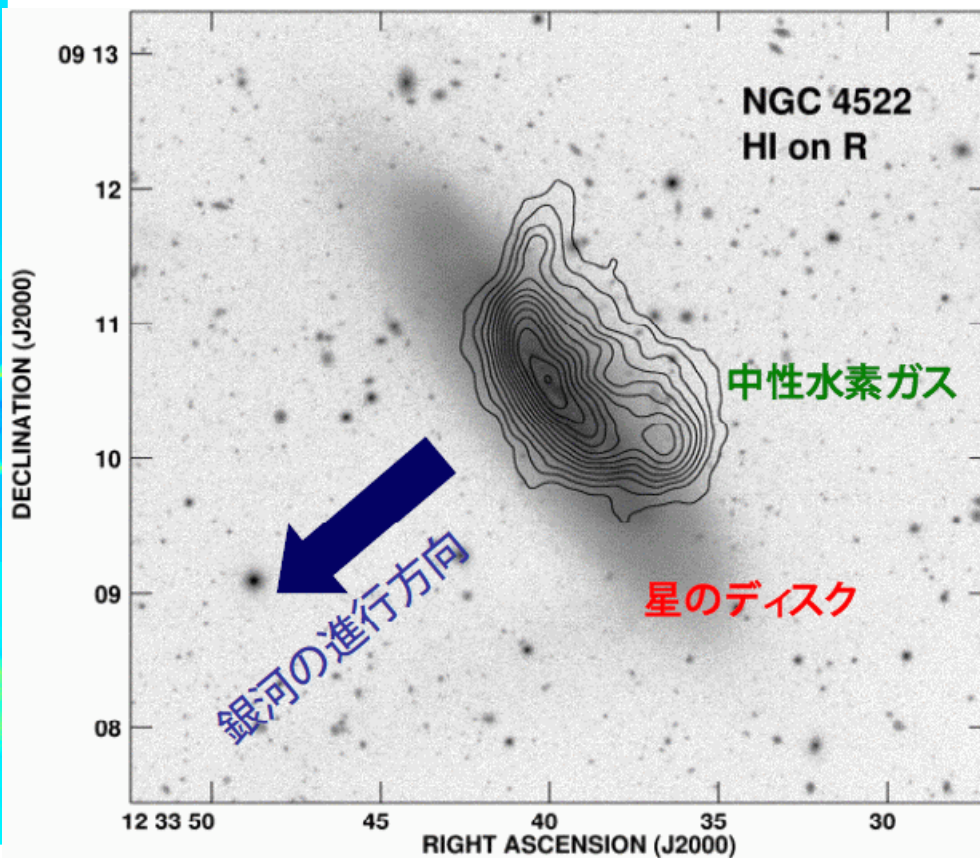


Abadi et al. (1998)

$$P = \rho V^2$$

$V \sim 1000 \text{ km/s}$ (銀河団)

in おとめ座銀河団

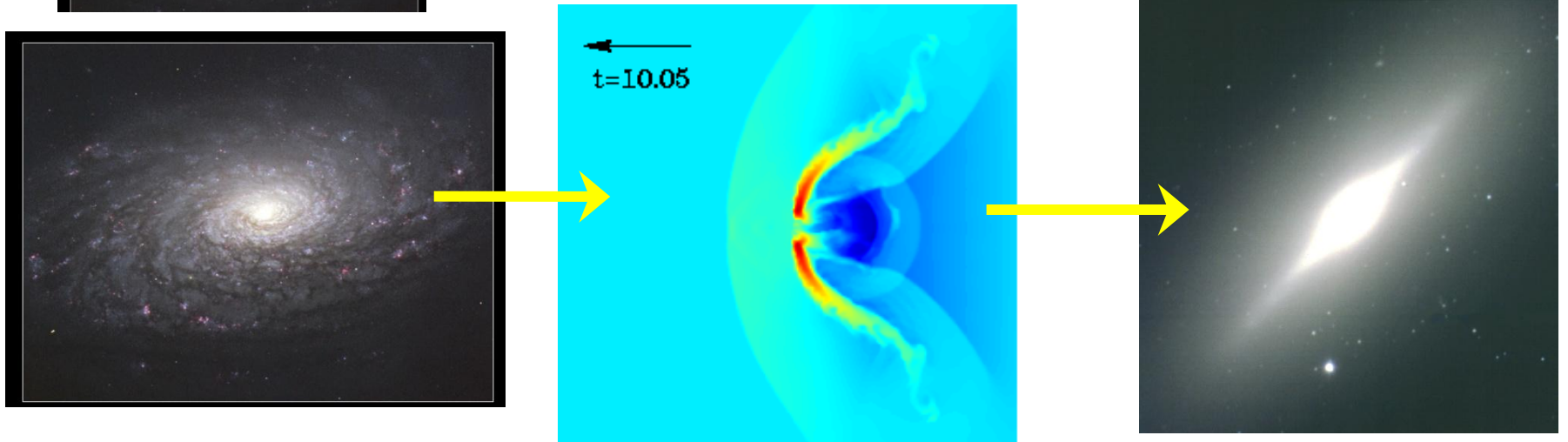


Kenney et al. (2004)

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？

すばるの広視野観測の威力

Panoramic **I**maging and **S**pectroscopy of **C**luster **E**volution with **S**ubaru (**PISCES**)

『うお座』、『魚』



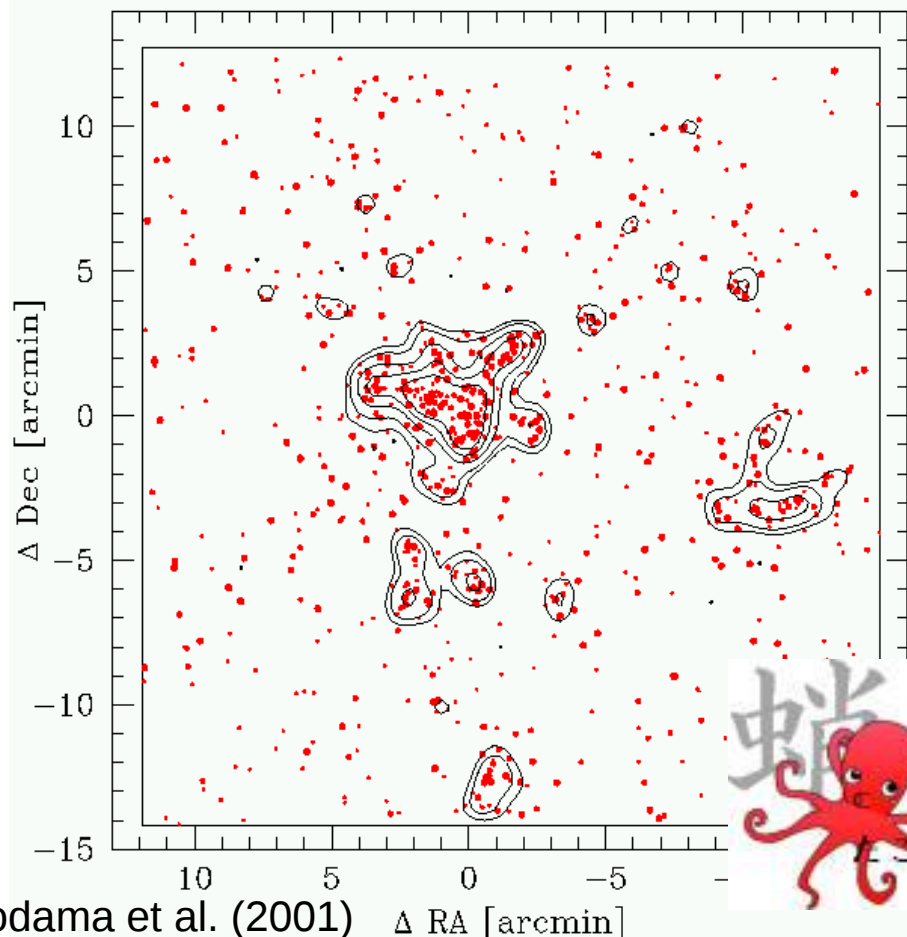
一辺の30分角は
銀河団の距離では
3千万光年にもなる

すばる／Suprime-Camで見たCL0939銀河団 ($z=0.41$ 、43億年前) のパノラマ

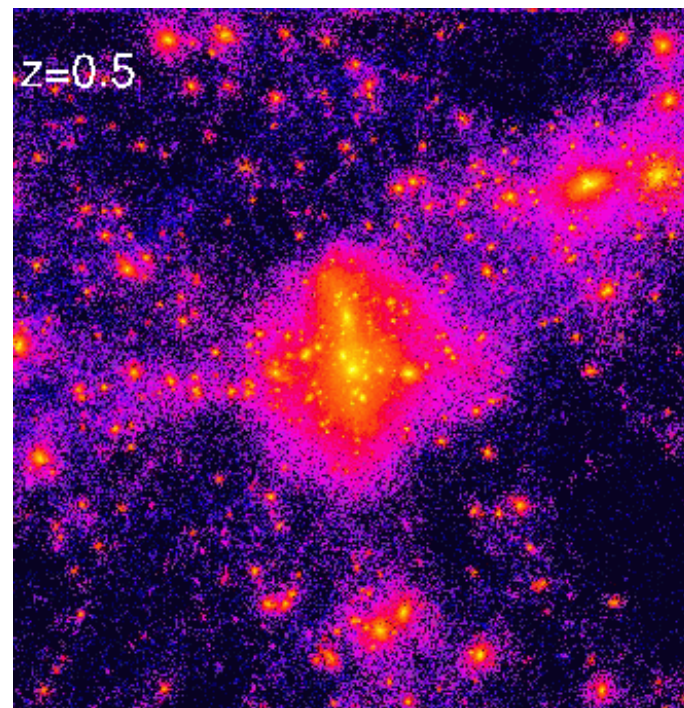
銀河団集積のパノラマ

(43億年前, $z=0.41$)

3千万光年



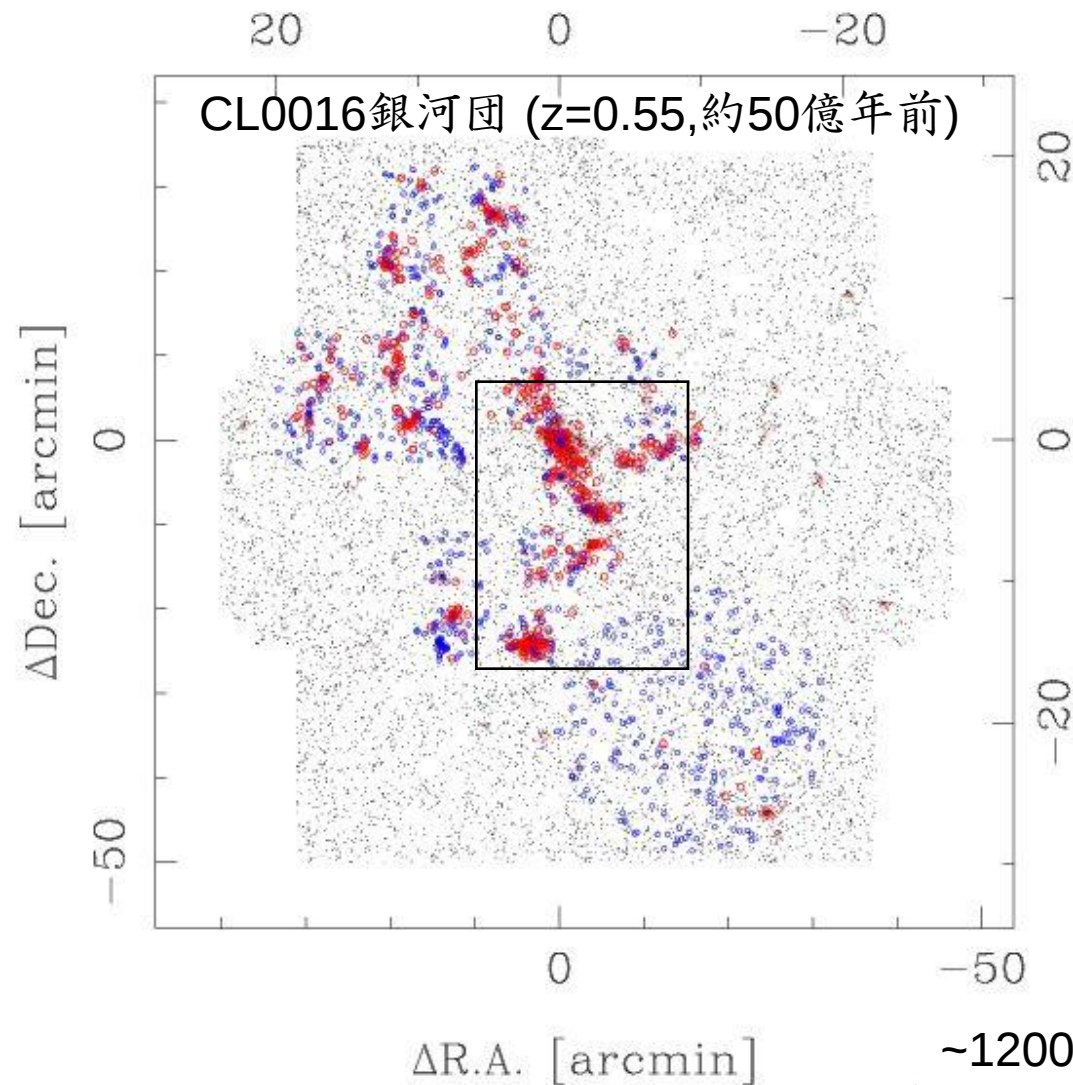
Kodama et al. (2001)



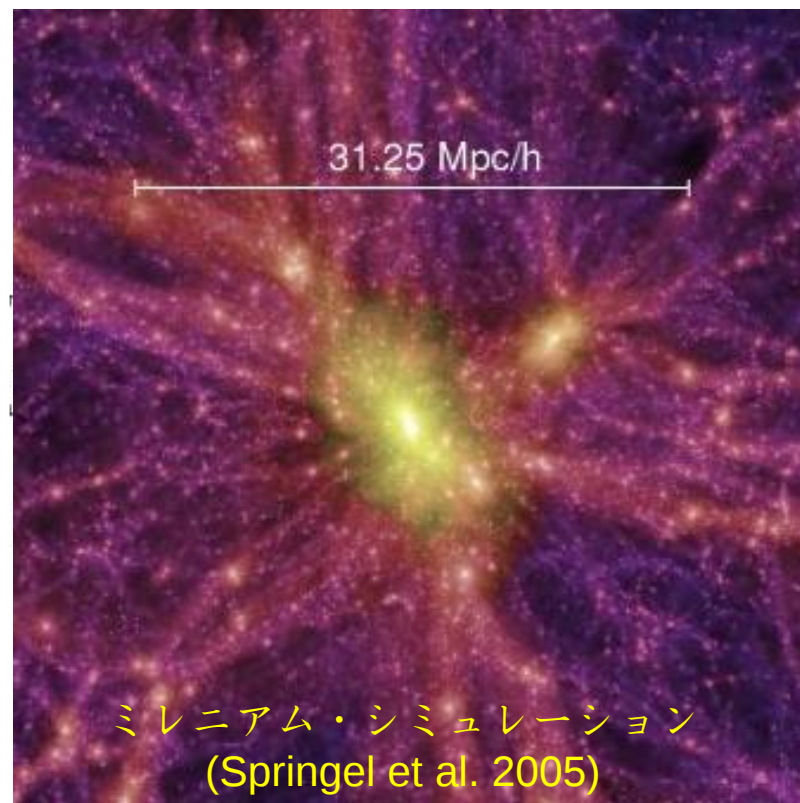
理論シミュレーションとよく似ている

中心に赤い銀河に占められた大きな塊があり、そこから四方八方に向かって
蛸足のようにフィラメント構造が伸びており、それらに沿って銀河の塊が並ぶ。

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)



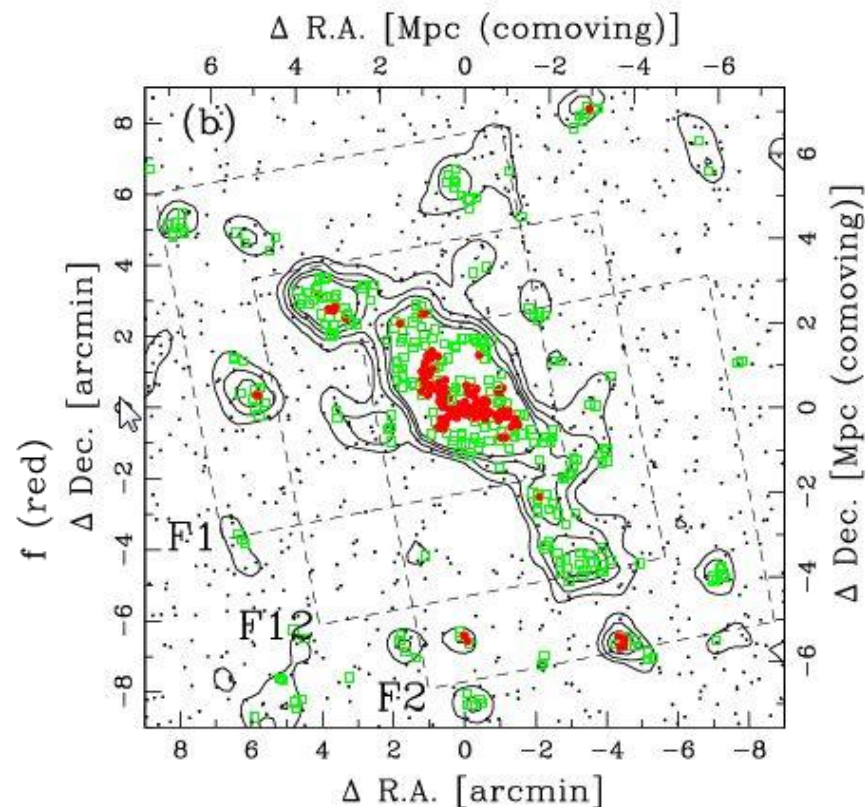
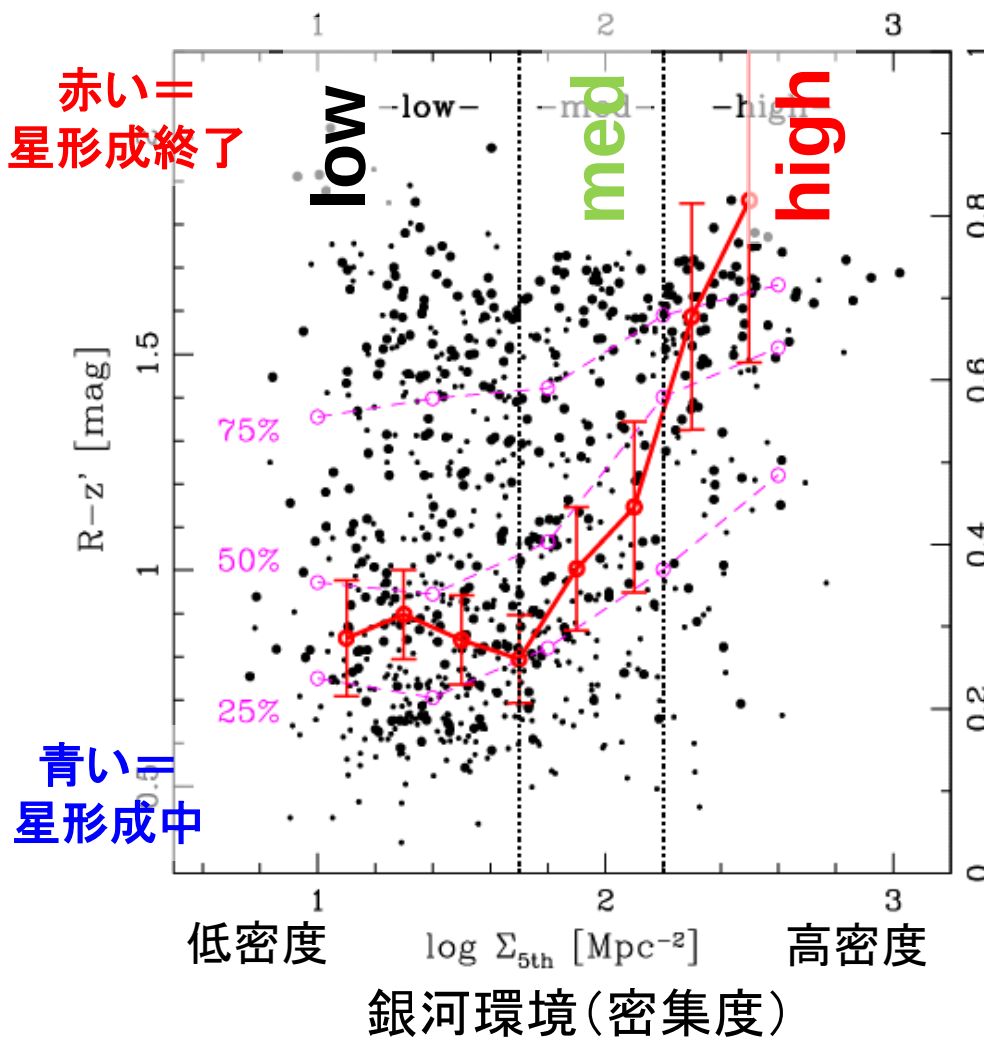
Tanaka, et al., 2009



~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)



high ～ 銀河団コア

med ～ 銀河群 / フィラメント

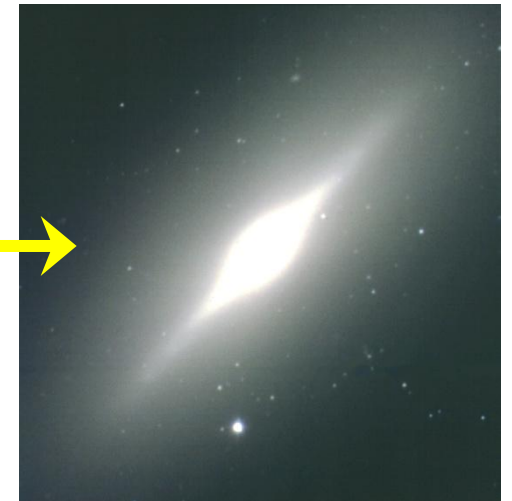
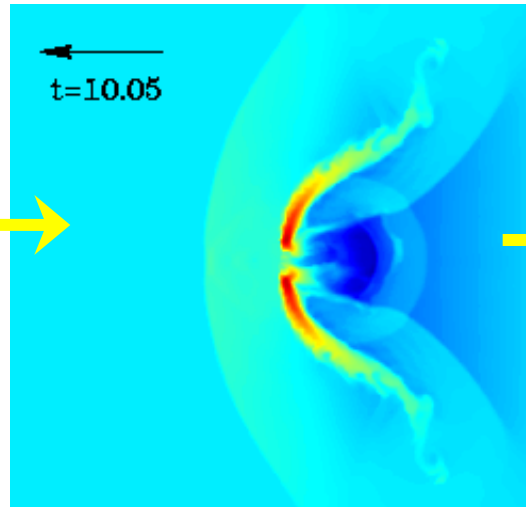
low ～ フィールド

Koyama, TK, et al. (2008)

何が星形成を止めるのか？

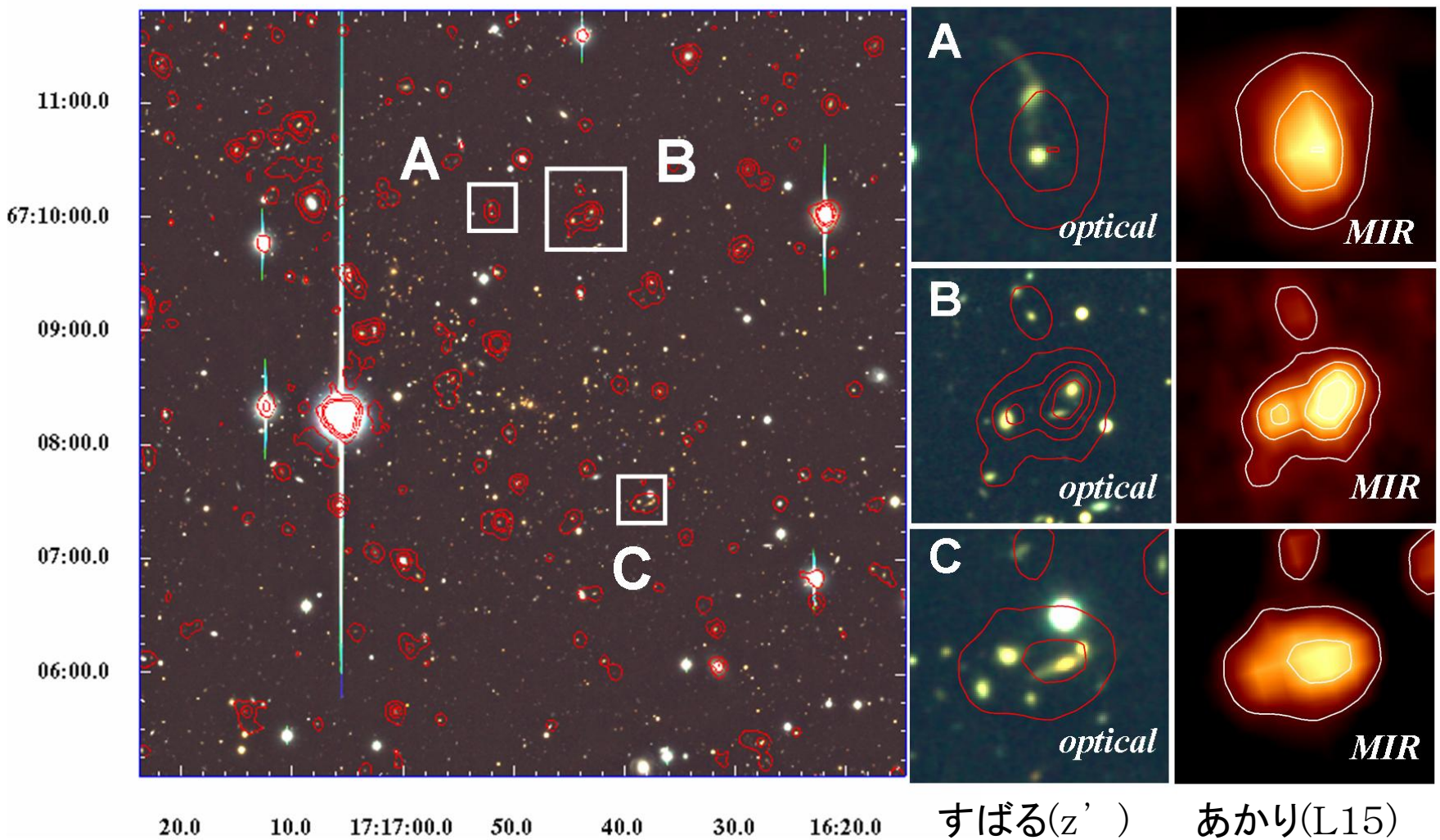


合体時にガスが剥ぎ取られたり、星形成バーストを起こしてガスが使い果たされる？



動圧によってガスを剥ぎ取られて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



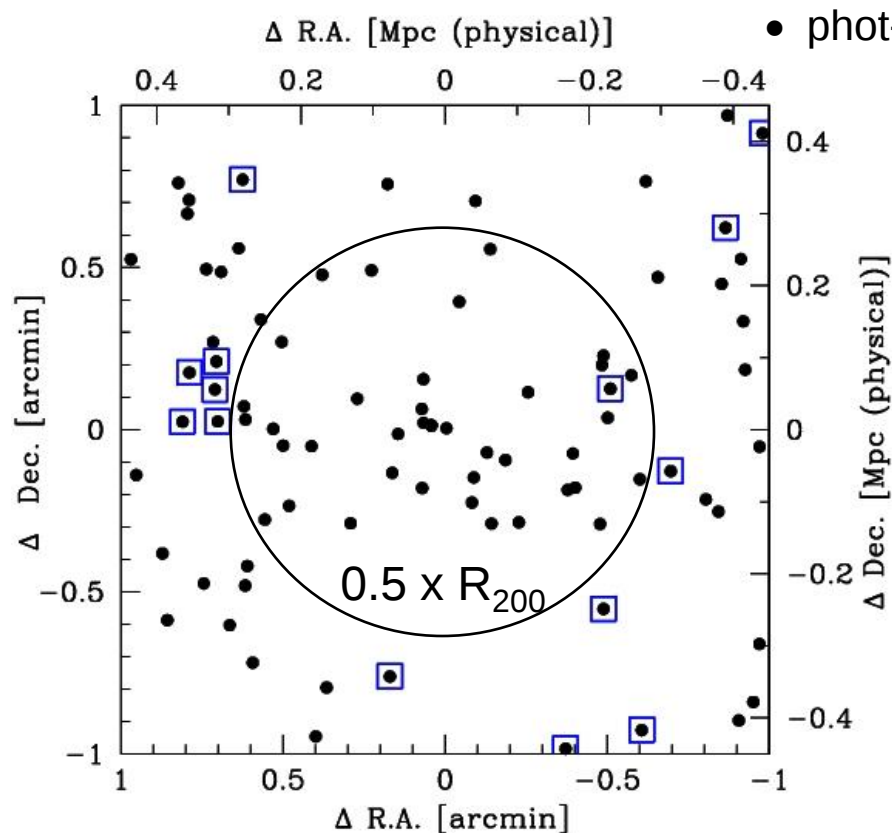
あかりで明るい星形成バースト銀河の中には、明らかに
合体の兆候を示す銀河が見られる。環境効果の主要因か？

Koyama et al. (2008)

遠方銀河団中心部の高い星形成活動性

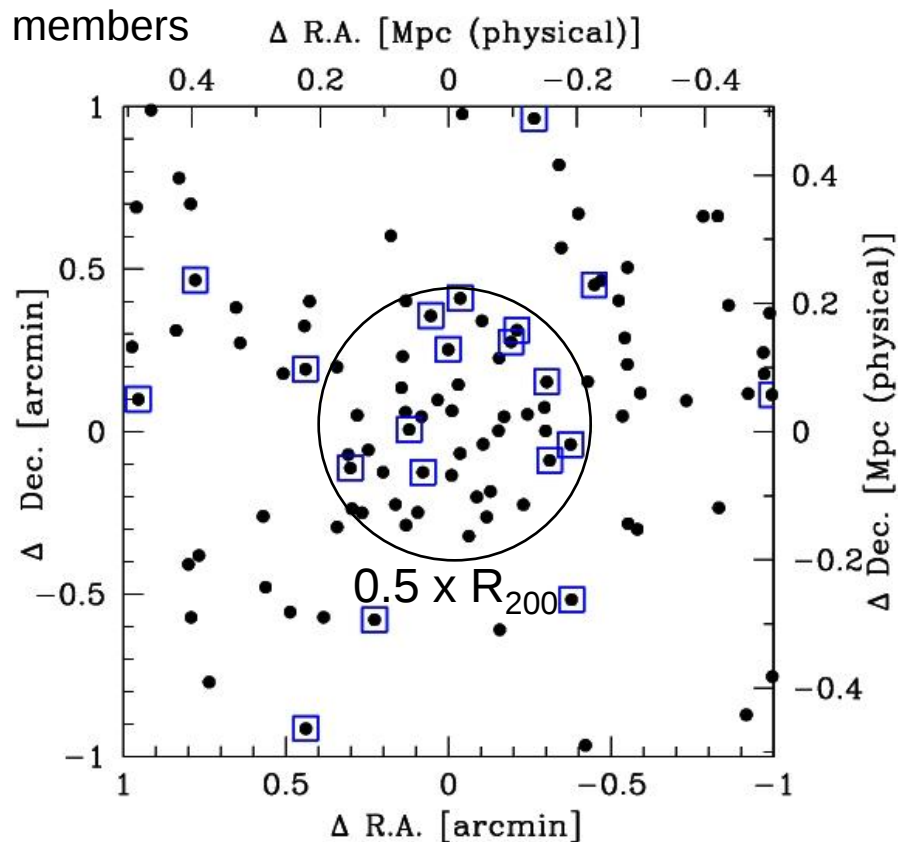
□ H α emitters at $z=0.81$ (RXJ1716)

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



69億年前の銀河団

Koyama, et al. (2010)

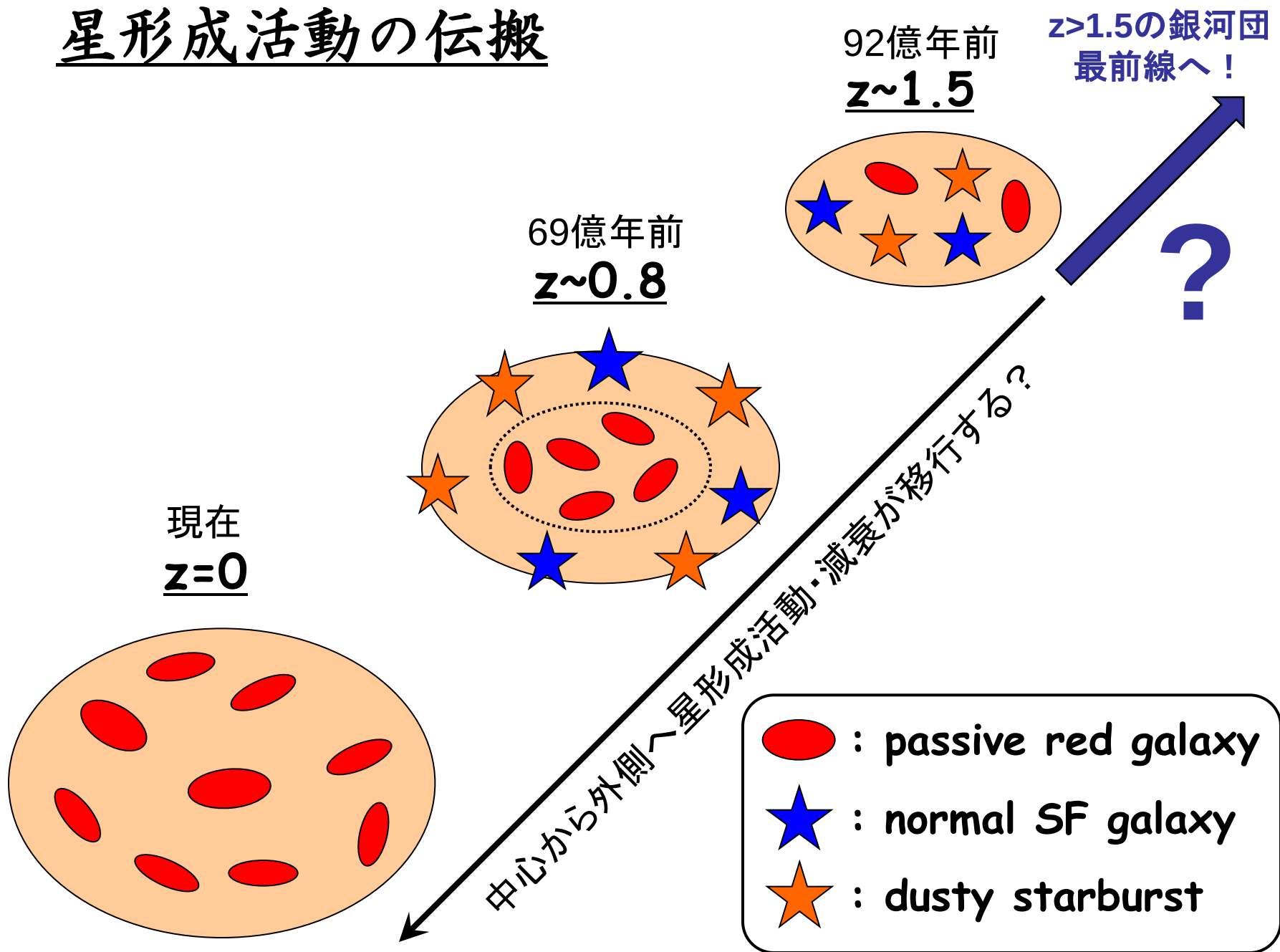


92億年前の銀河団

Hayashi, et al. (2010)

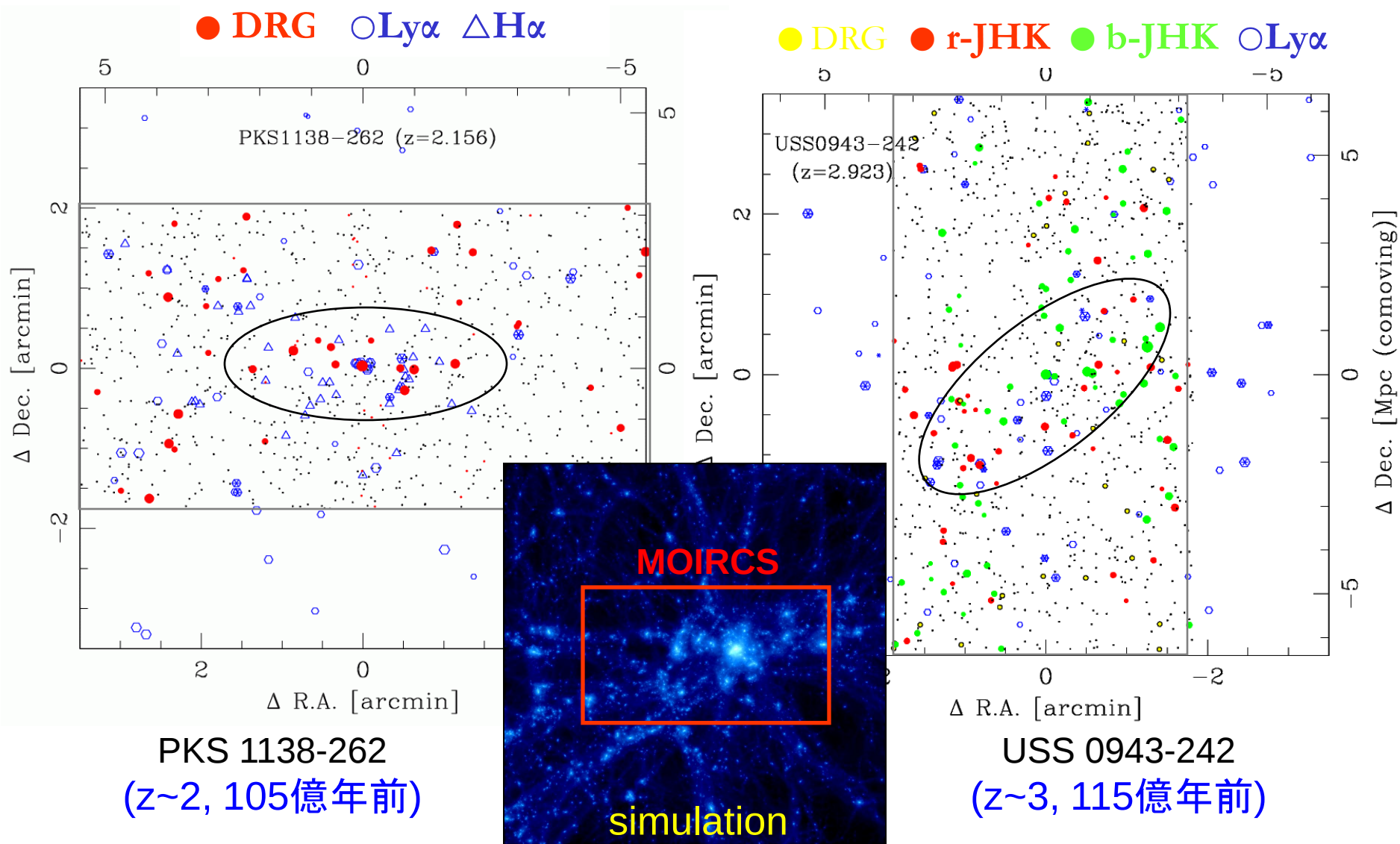
昔の銀河団の方が銀河団中心部での星形成活動性が高い

星形成活動の伝搬

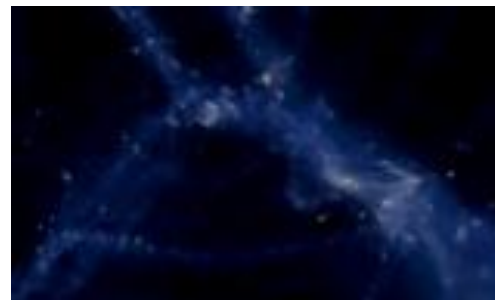
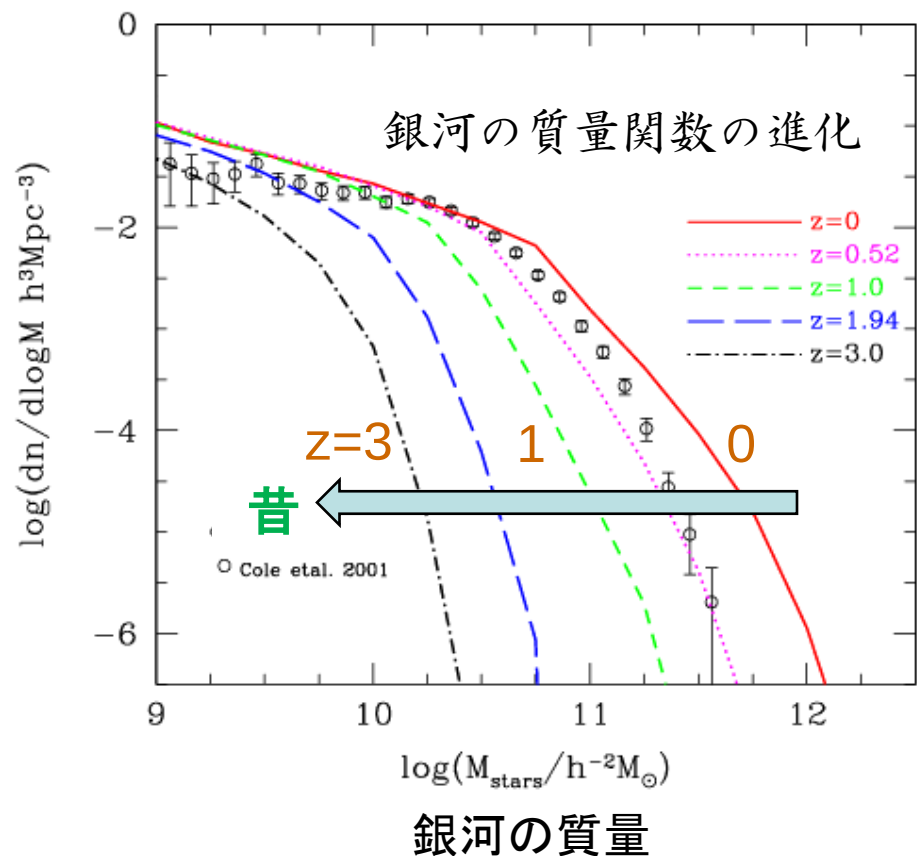


原始銀河団のすばる近赤外線観測

Kodama, et al. (2007)



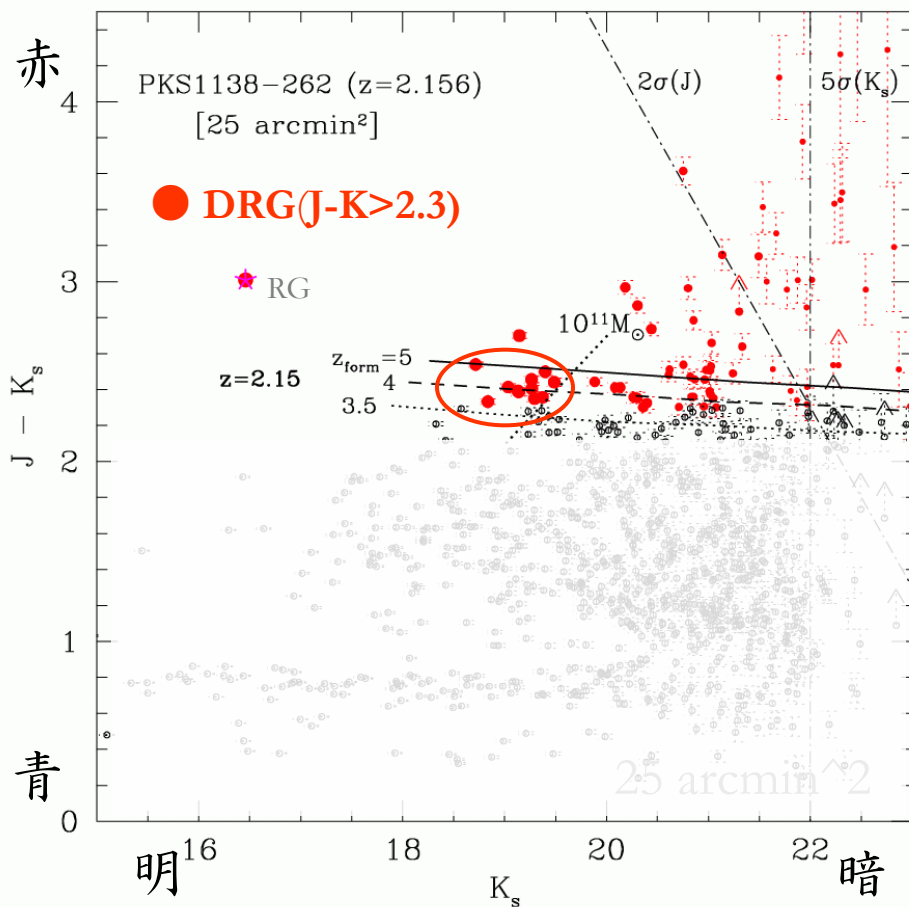
銀河の質量成長 (理論)



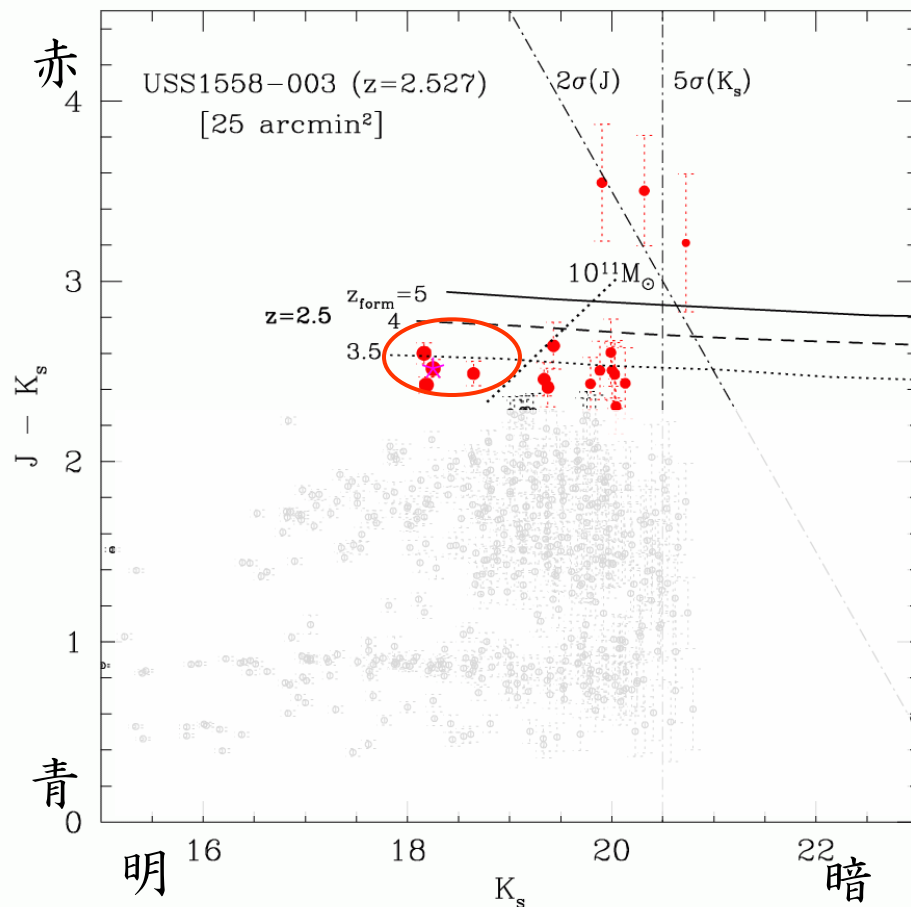
階層的銀河形成モデルでは、大質量銀河の割合が昔に行くと激減する。

約105億年前($z=2\sim 2.5$)の銀河団

PKS1138 ($z=2.16$)



USS1558 ($z=2.53$)

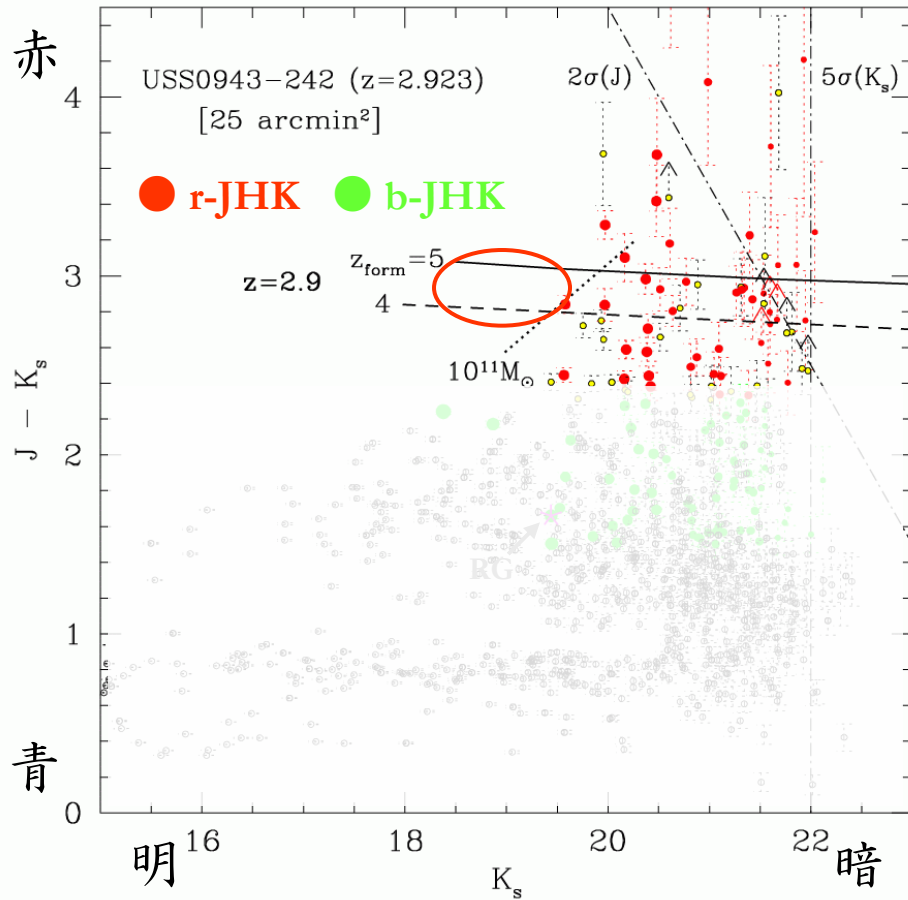


大質量銀河 ($>10^{11}M_{\odot}$) は既に存在している。

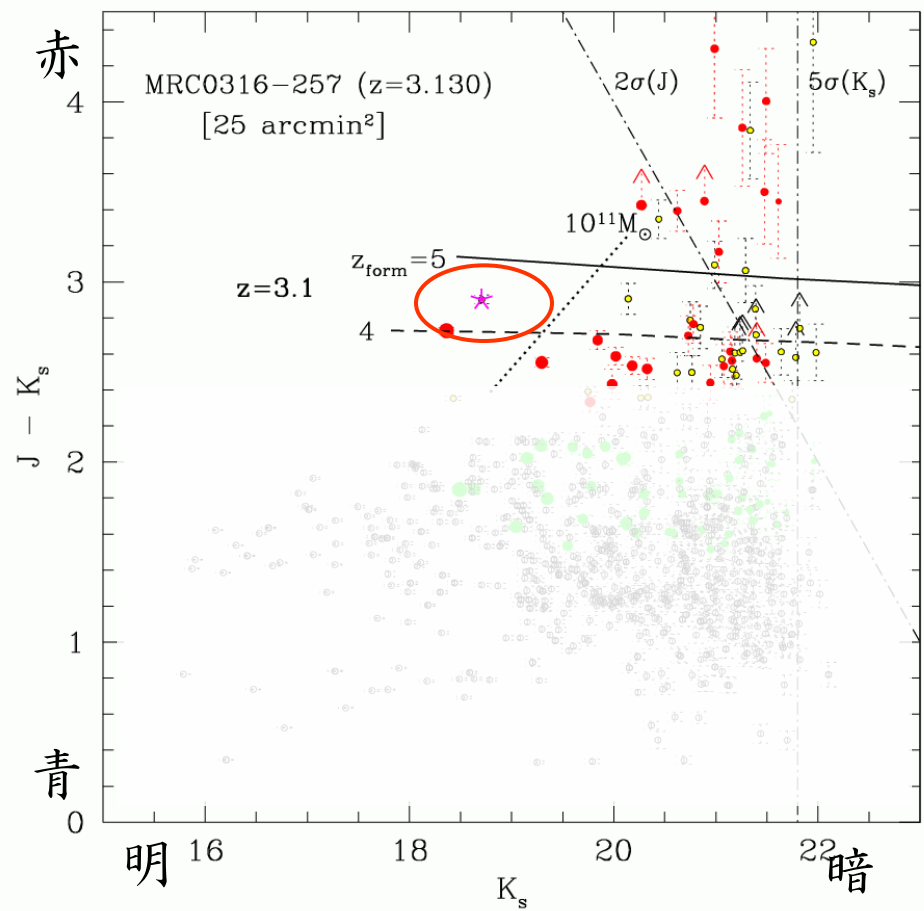
Kodama et al. (2007)

約115億年前($z=3$)の銀河団

USS0943 ($z=2.92$)



MRC0316 ($z=3.13$)



大質量銀河 ($>10^{11}M_{\odot}$) が突然ほとんどいなくなる！ Kodama et al. (2007)

重い銀河は宇宙年齢が20億年から30億年の間に急成長したと考えられる。

4. 銀河形成ピーク期を探る (マハロ・すばるプロジェクト)

“MAHALO-Subaru”

MApping HAlpha 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

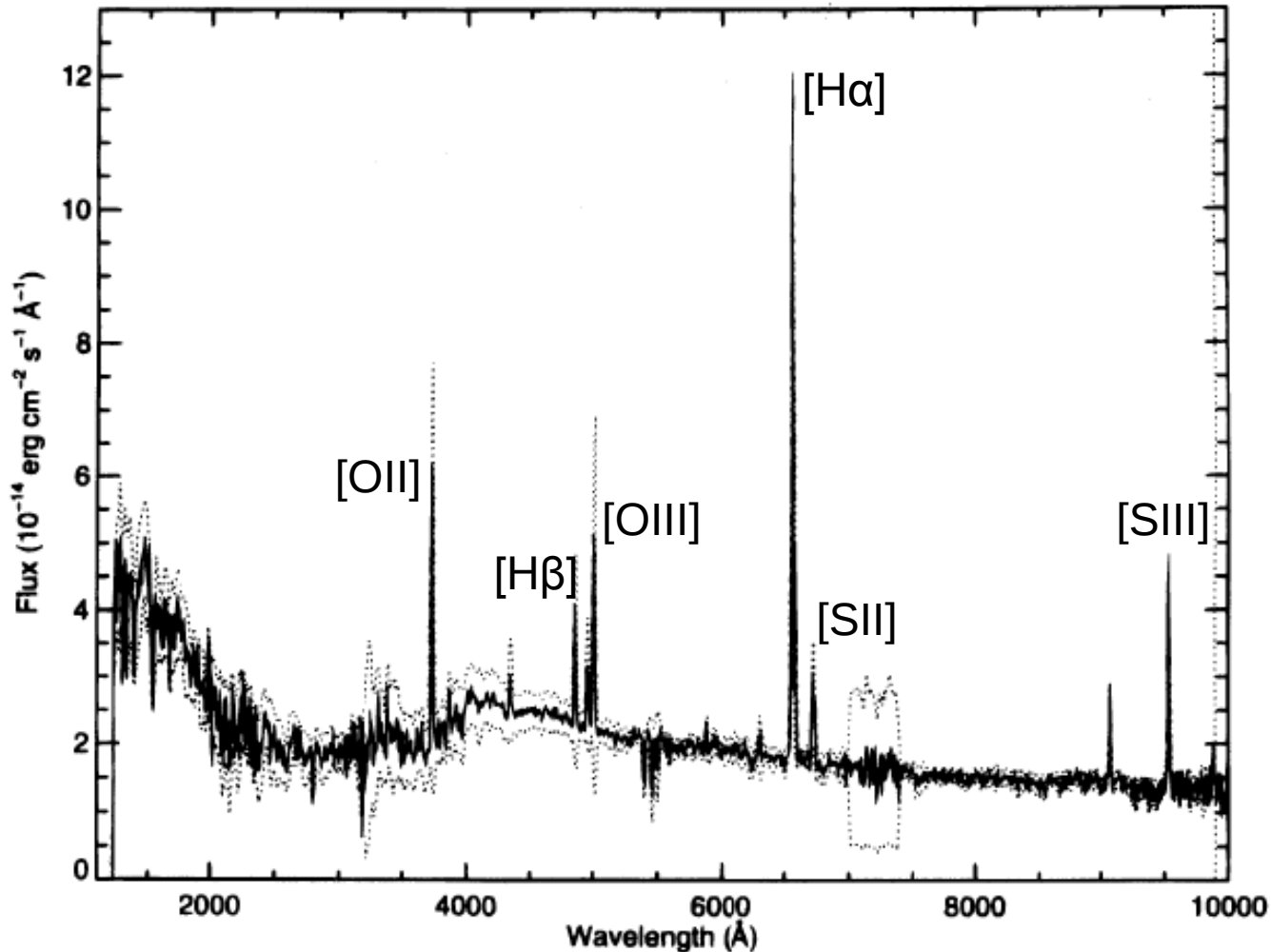
すばるインテンシブ・プログラム

environ- ment	target	z	line	λ (μm)	camera	NB- filter	conti- nuum	ALMA visibility	status
Low- z Cluster	CL0024+1652	0.395	H α	0.916	S-Cam	NB912	z'	Yes	Kodama+ '04
	CL0939+4713	0.407	H α	0.923	S-Cam	NB921	z'	No	Koyama+ '11
	RXJ1716+6708	0.813	H α	1.190	MOIRCS	NB1190	z', J	No	Koyama+ '10
High- z Cluster	XCSJ2215-1738	1.457	[OII]	0.916	S-Cam	NB912	z'	Yes	Hayashi+ '10
	4C65.22	1.516	H α	1.651	MOIRCS	NB1657	H	No	not yet
	Q1126+101	1.517	H α	1.652	MOIRCS	NB1657	H	Yes	not yet
	Q0835+580	1.534	H α	1.664	MOIRCS	NB1657	H	No	observed
	CL0332-2742	1.61	[OII]	0.973	S-Cam	NB973	z, y	Yes	observed/analysed
	CIGJ0218.3-0510	1.62	[OII]	0.977	S-Cam	NB973	z', y	Yes	observed/analysed
Proto- Cluster	PKS1138-262	2.156	H α	2.071	MOIRCS	NB2071	K_s	Yes	scheduled in S11A
	4C23.56	2.483	H α	2.286	MOIRCS	NB2288	K_s, K_{cont}	Yes	Tanaka+ '11
	USS1558-003	2.527	H α	2.315	MOIRCS	NB2315	K_s, K_{cont}	Yes	scheduled in S11A
General Field	GOODS-N	2.19	H α	2.094	MOIRCS	NB2095	K_s	No	Tadaki+ '11
	(2.5 pointings)		[OII]	1.189	MOIRCS	NB1190	z', J	No	Tadaki+ '11
	SXDF	2.19	H α	2.094	MOIRCS	NB2095	K	Yes	observed
	(3 pointings)		H β	1.551	MOIRCS	NB1550	H	Yes	not yet
			[OII]	1.189	MOIRCS	NB1190	z', J	Yes	not yet

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)、田中壺 (ハワイ観測所)、他

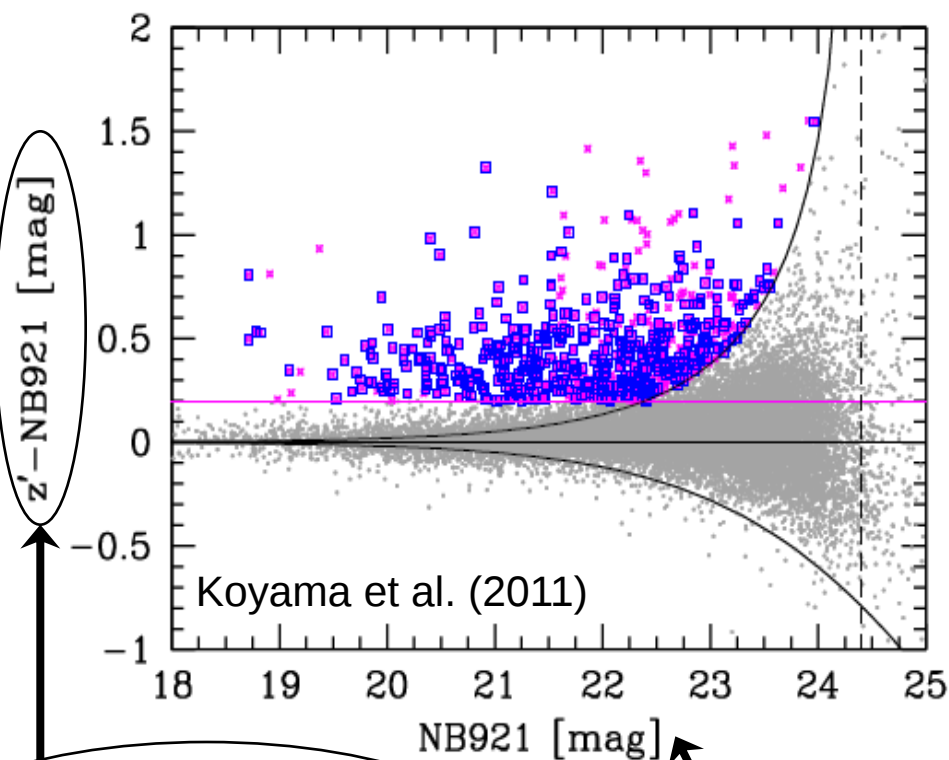
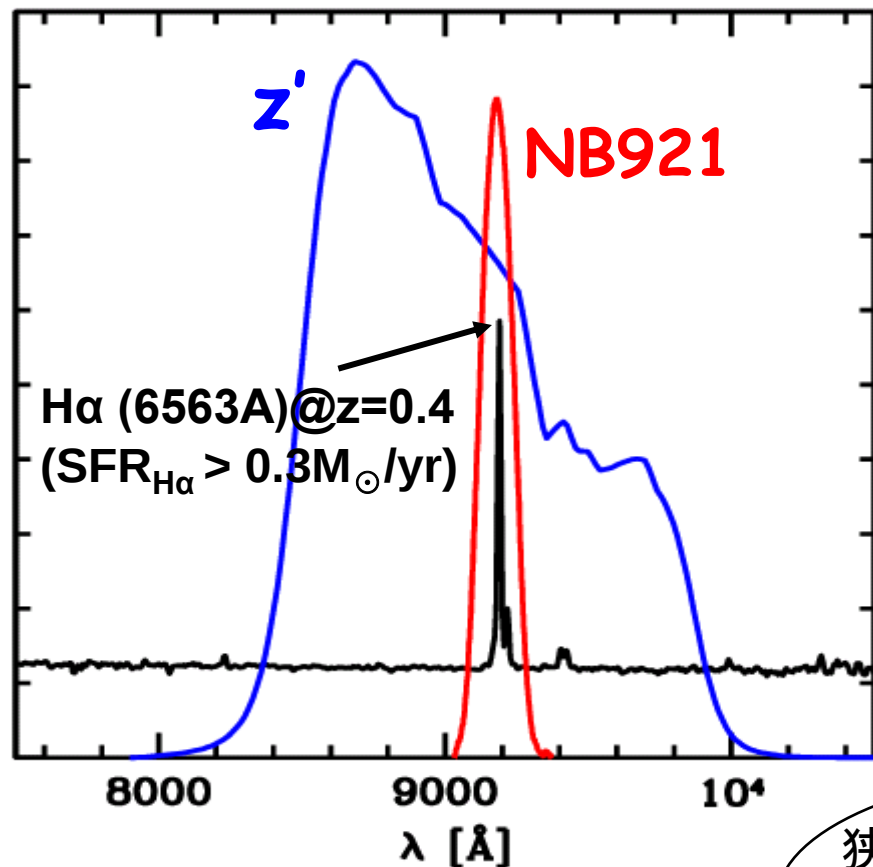
星形成銀河のスペクトル

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。



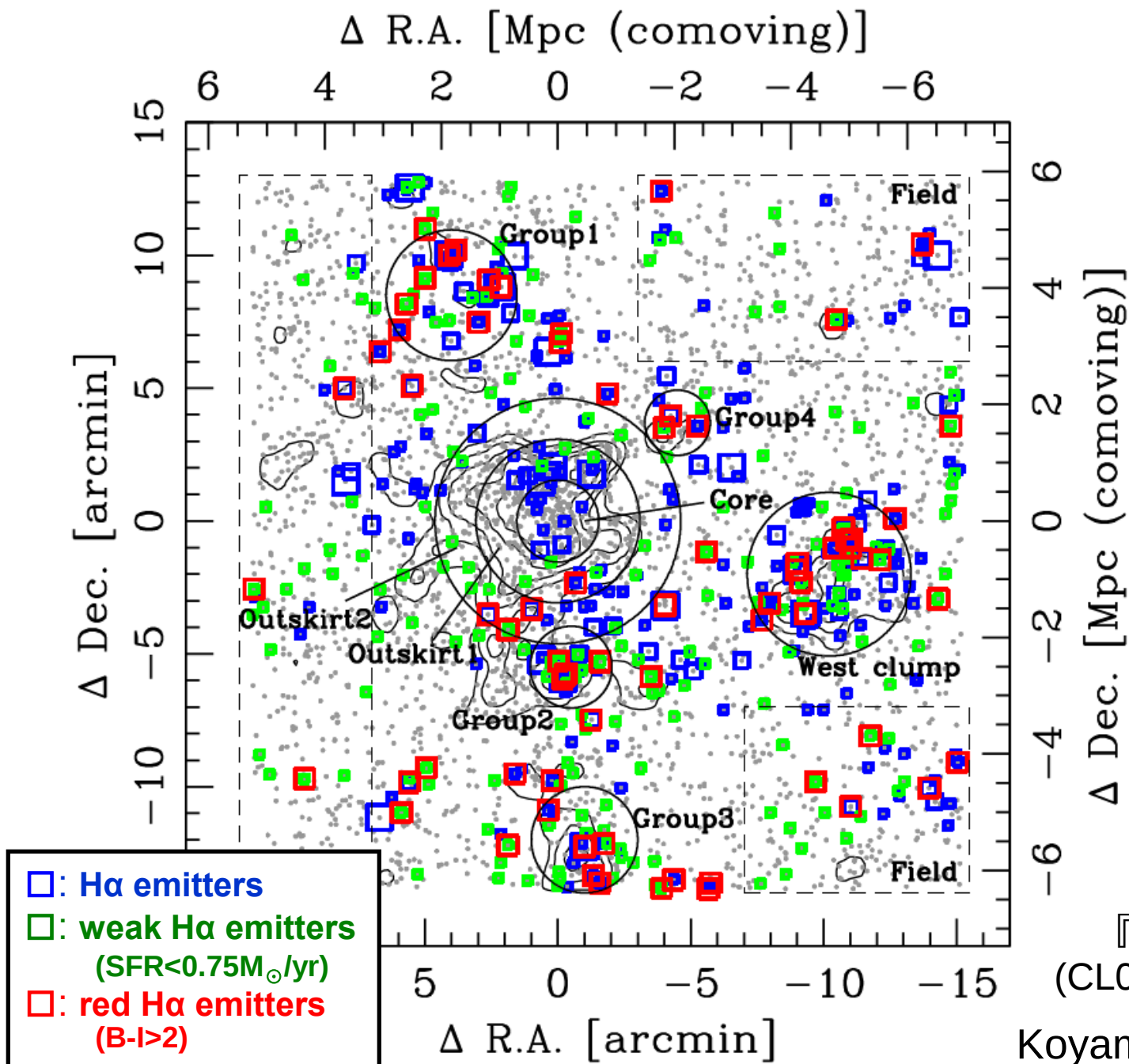
Kinney et al. (1996)

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



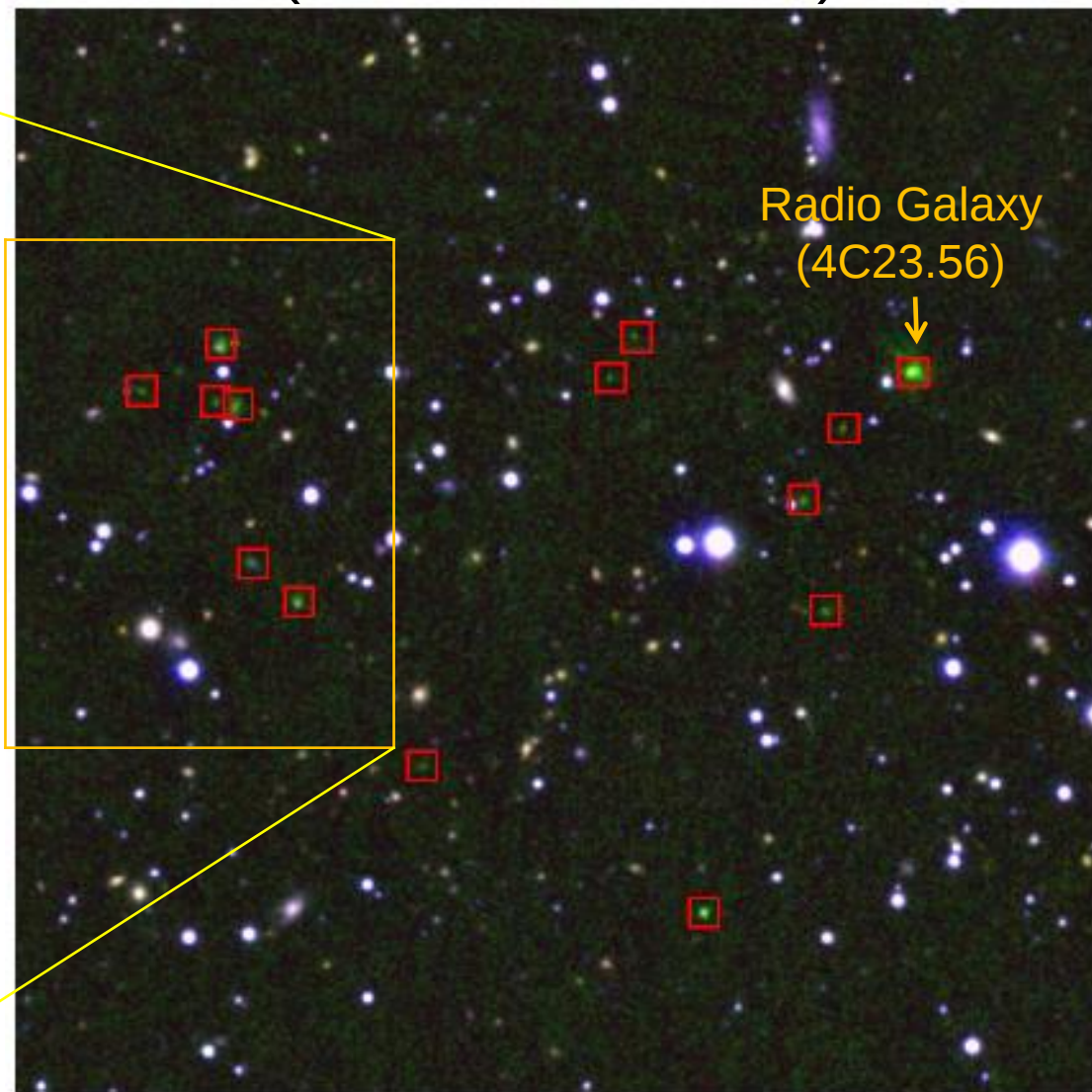
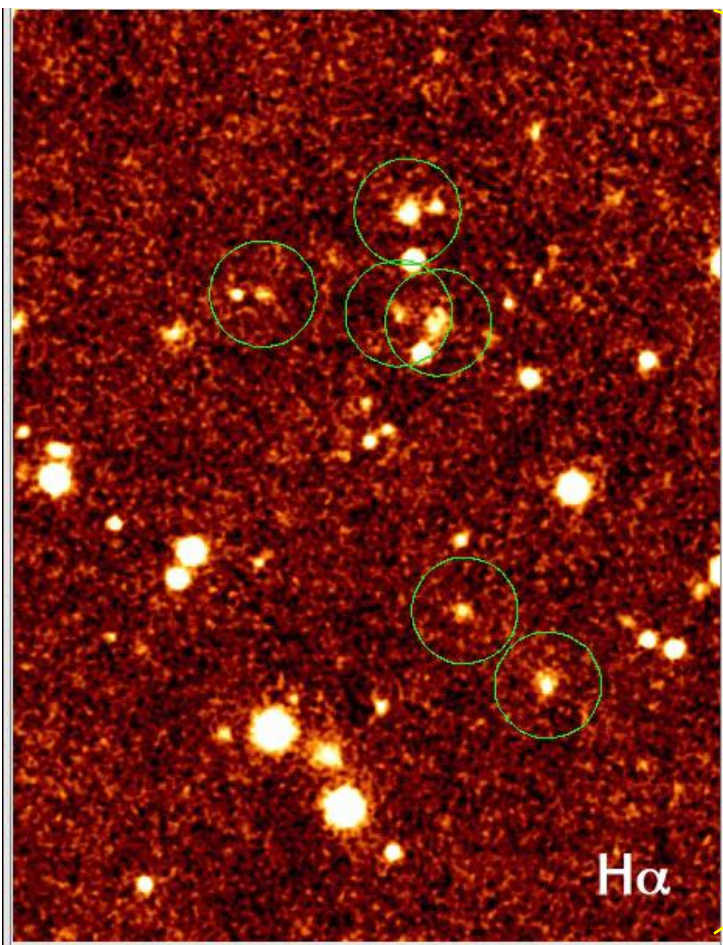
『蛸』銀河団
(CL0939@z=0.41)

Koyama et al. (2011)

銀河団形成の現場

Subaru/MOIRCS
NB2288(H α) / Ks

原始銀河団 4C23.56
($z=2.48$, 110億年前)



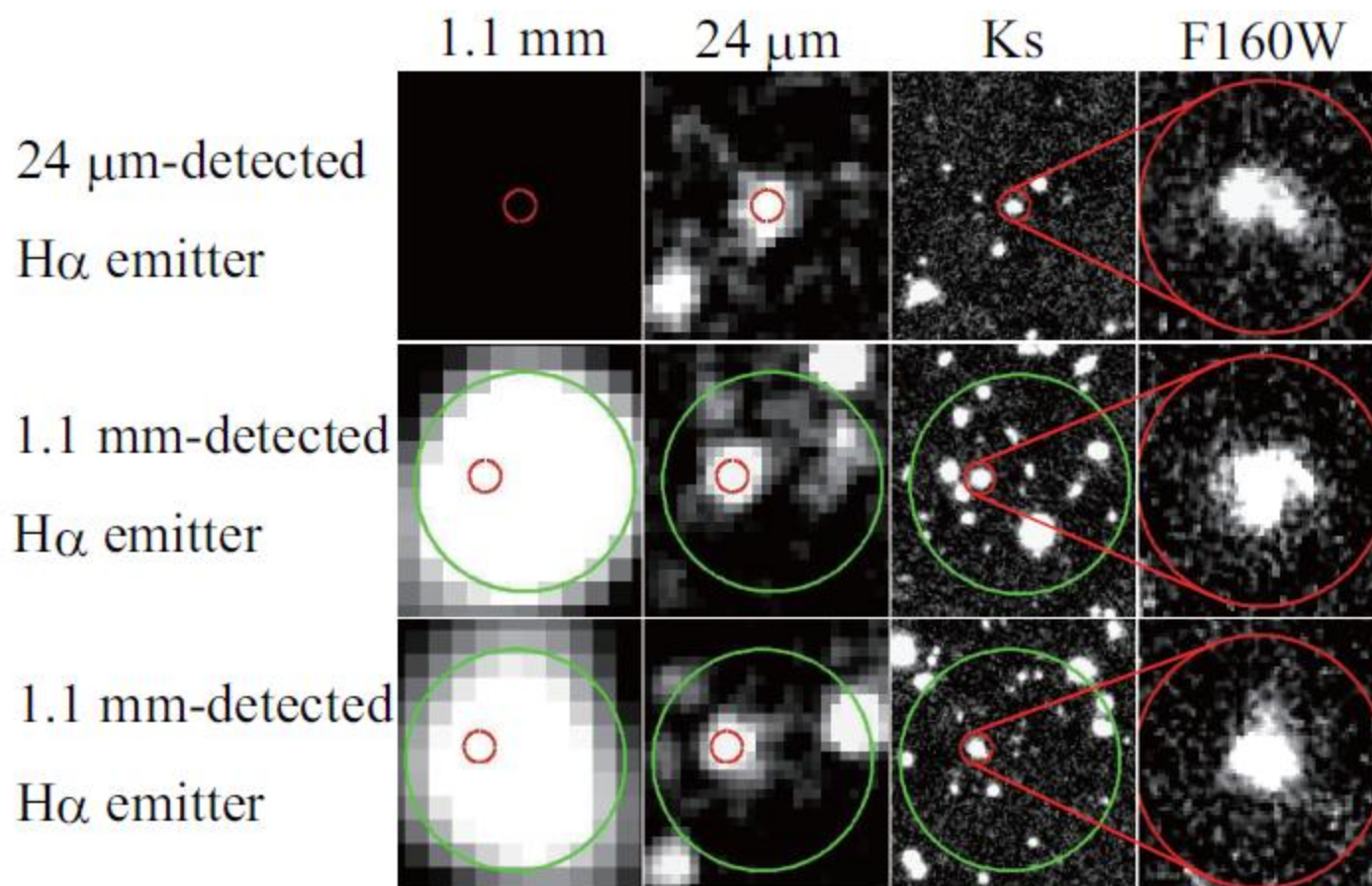
H α で見ると広がっている！

SFR=100~1000 $M_{\odot}$ /yr !

3arcmin = 1.3Mpc

Tanaka, I., et al. (2011)

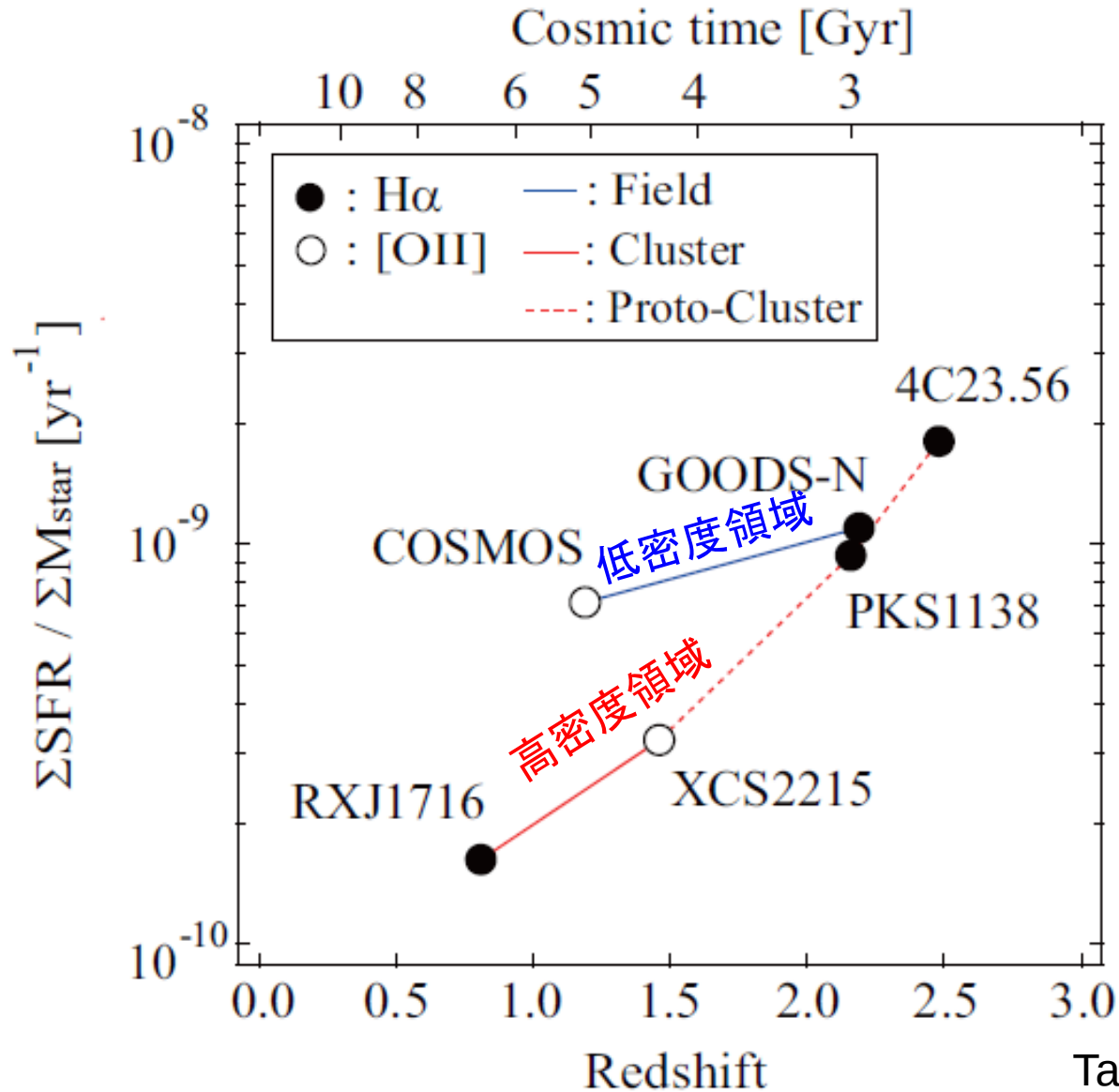
$z=2.2$ の相互作用している $H\alpha$ 輝線銀河



マハロ図

星形成の活動性を時間と環境の関数として表す

輝線銀河の平均的な
星形成の活動性



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

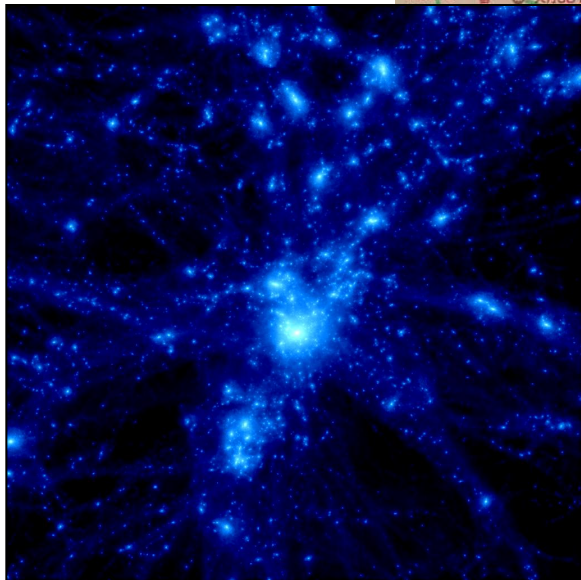
人口流入

年齢格差

相互作用

世間の風

個性喪失



国立天文台すばるグループによる 銀河研究の例

- **再電離期 ($z>6$) の超遠方銀河探査** (家、柏川)
狭帯域撮像 (可視・赤外) による $\text{Ly}\alpha$ 輝線銀河探査
- **銀河形成初期 ($3<z<6$) の大規模構造と星形成活動** (柏川)
可視 (静止UV) 選択銀河のクラスタリングとUV光度関数
- **銀河形成ピーク時 ($1.5<z<3$) の質量集積と星形成** (児玉、有本)
近赤外 (静止可視) 選択銀河の星質量関数、大規模構造、
星形成率 ($\text{H}\alpha$ 輝線)、ガス重元素量 (輝線強度比)
- **銀河団集積時代 ($0.4<z<1.5$) の環境効果** (児玉)
大規模構造、色 (SED) や輝線・吸収線強度の環境依存性
- **活動銀河核 ($z\sim 0$) と銀河の共進化、遠方QSO ($z>4$)** (今西)
- **局所銀河群銀河 ($z=0$) の星形成史**
恒星分離 (HR図) による場所ごとの星年齢と星重元素量
(有本、青木、小宮山)

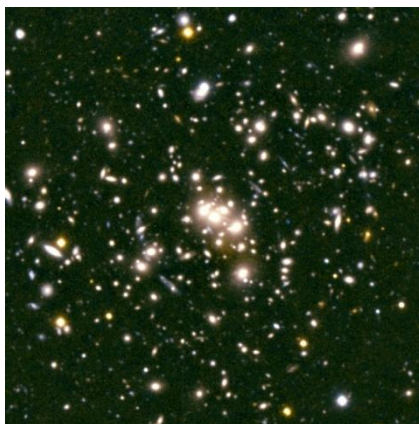
次世代地上大型望遠鏡計画: Thirty Meter Telescope (TMT)

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！

TMTサイエンス検討会報告書(2011.02)、表紙より

銀河は、統(すば)る、すばる



すばる、アルマ、そしてTMTで、
銀河天文学を研究しませんか！