

The Environmental Dependence of Galaxy Properties at $z=2$

M. Tanaka et al. 2010 arXiv:1005.2253
(accepted for publication in A&A)

Introduction

＊ 銀河の形成・進化は環境に依存している

□ 近傍宇宙において

▶ 形態-密度関係 & 色-等級関係

✓ 赤い楕円銀河はrich clusterにおいてdominant

✓ 青い渦巻銀河はfieldにおいてdominant

✓ cluster銀河はfield銀河より形成時期が早い

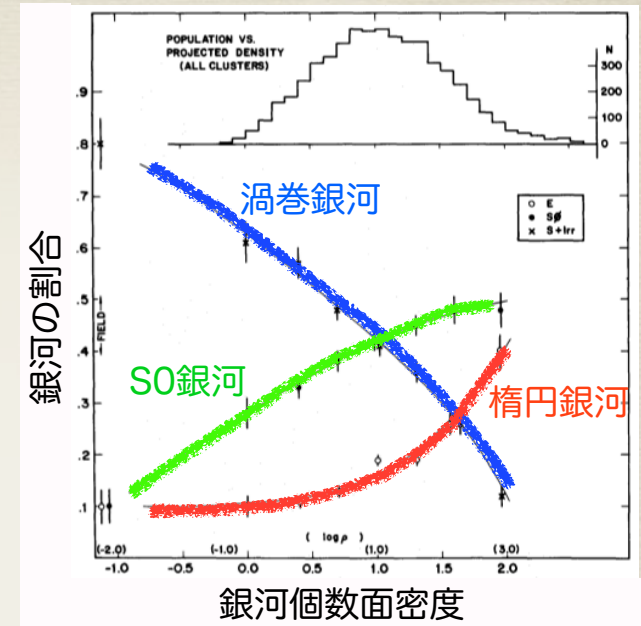
□ $z \sim 1$ でも

✓ clusterでは赤い楕円銀河がdominant

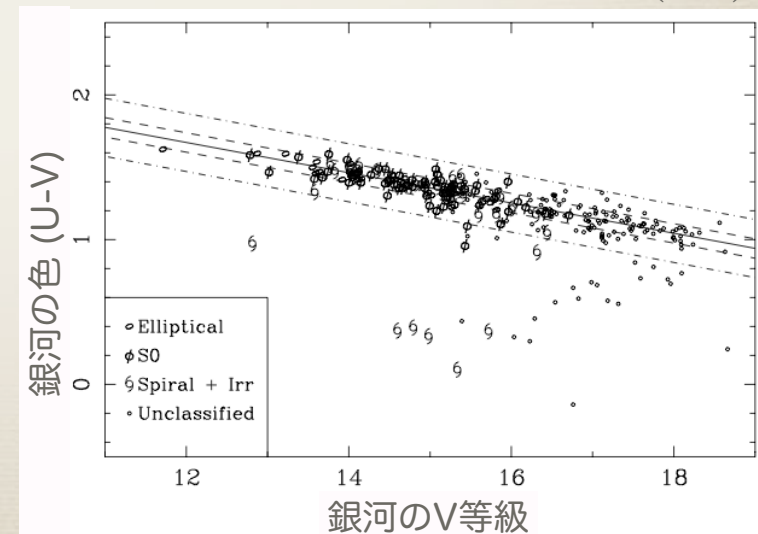
✓ cluster銀河の方が形成時期が早い

＊ もっとhigh- z ではどうか？

Dressler (1980)



Terlevich et al. (2001)



目的

＊ high- z における銀河形成・進化の環境依存性を知りたい

＊ しかし、遠方の銀河団を探すのは難しい

□ 遠方観測の難しさ

□ 形成途中のためclusteringが弱くfieldとの区別が難しい

▶ 現在知られている最遠の銀河団は $z=1.45$ (Stanford et al. 2006)

➡ high- z の電波銀河まわりを探索

✓ ほとんどが周囲に銀河の密度超過を持つ

= proto-cluster

✓ 赤い楕円銀河の密度超過は必ずしもその周囲で確認されてはいないが、low- z の銀河団に進化する可能性あり

➡ PKS1138-26@ $z=2.15$: 電波銀河@ $z=2.15$

▶ 分光観測により確認されているproto-clusterであり、多数の観測データが存在する

▶ fieldとの比較

□ 銀河密度@ $z=2$

- GOODS : $0.64 \pm 0.09 \text{ arcmin}^{-2}$

- SXDF : $0.57 \pm 0.02 \text{ arcmin}^{-2}$

観測データ

* PKS1138

- $8\mu\text{m}$ はlow- z のPAH($7.6\mu\text{m}$)を避けるためにphoto- z では使用しない

* GOODS

- UBVIzJHKs, 3.6, 4.5, 5.8

Band	Instrument	PSF size	50% limit
<i>U</i>	LRIS	1.2''	26.9
<i>g</i>	ACS	0.1''	26.9
<i>R</i>	FORS2	1.0''	25.3
<i>I</i>	ACS	0.1''	26.7
<i>z</i>	FORS2	0.9''	24.1
<i>J</i>	MOIRCS	0.7''	24.9
<i>H</i>	SOFI	0.8''	22.3
<i>K_s</i>	MOIRCS	0.7''	23.3
$3.6\mu\text{m}$	IRAC	$\sim 2.0''$	23.1
$4.5\mu\text{m}$	IRAC	$\sim 2.0''$	22.5
$5.8\mu\text{m}$	IRAC	$\sim 2.3''$	20.9
$8.0\mu\text{m}$	IRAC	$\sim 2.4''$	20.6

* $K_s < 22.5$ (PKSデータでの $\sim 10\sigma$)、かつ、5バンド以上で検出されている天体を使用

* photo- z で各天体の赤方偏移を求めて、そこから $z \sim 2$ の銀河を選んでサンプル作成

* $z \sim 2$ の銀河に対してSEDフィットを行い、clusterとfieldでの銀河の性質を比較

SED Fit

* モデルテンプレート : Bruzual & Charlot (2003)

- ☐ Salpeter IMF
- ☐ solar & sub-solar metallicities ($Z=0.02, 0.008$)
- ☐ $SFR(t) \propto \exp(-t/\tau)$:
 - o(single burst) $< \tau < \infty$ (constSFR)
- ☐ ダスト吸収のoptical depth in V-band $\tau_V : 0 < \tau_V < 10$
- ☐ age (星形成開始から観測時までの時間)

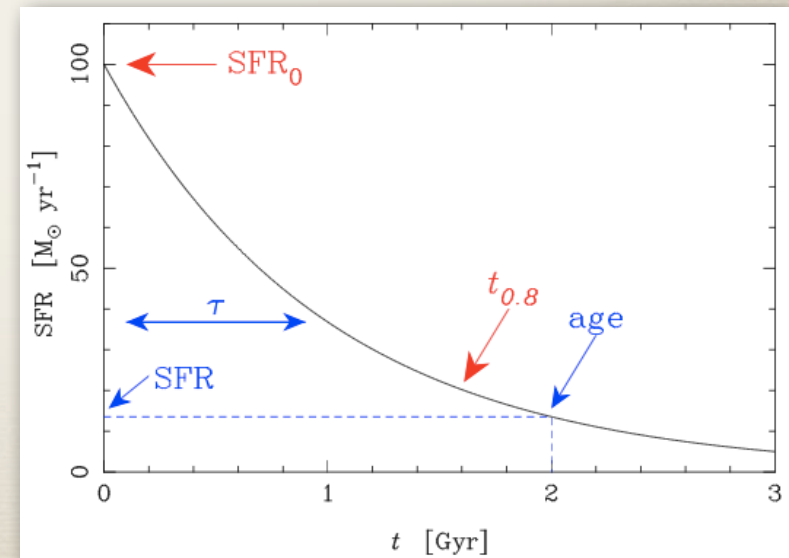
* 銀河系吸収、検出器&filterの応答関数、大気の有無を考慮

* AGNテンプレートも使用

➡ 全部で200万個のテンプレート

➡ Fitにより求められるproperties

- ▶ age
- ▶ star formation time scale (τ)
- ▶ SFR
- ▶ dust extinction (A_V)
- ▶ 星質量



SED Fit

* モデルテンプレート : Bruzual & Charlot (2003)

- ☐ Salpeter IMF
- ☐ solar & sub-solar metallicities ($Z=0.02, 0.008$)
- ☐ $SFR(t) \propto \exp(-t/\tau)$:
 - o(single burst) $< \tau < \infty$ (constSFR)
- ☐ ダスト吸収のoptical depth in V-band $\tau_V : 0 < \tau_V < 10$
- ☐ age (星形成開始から観測時までの時間)

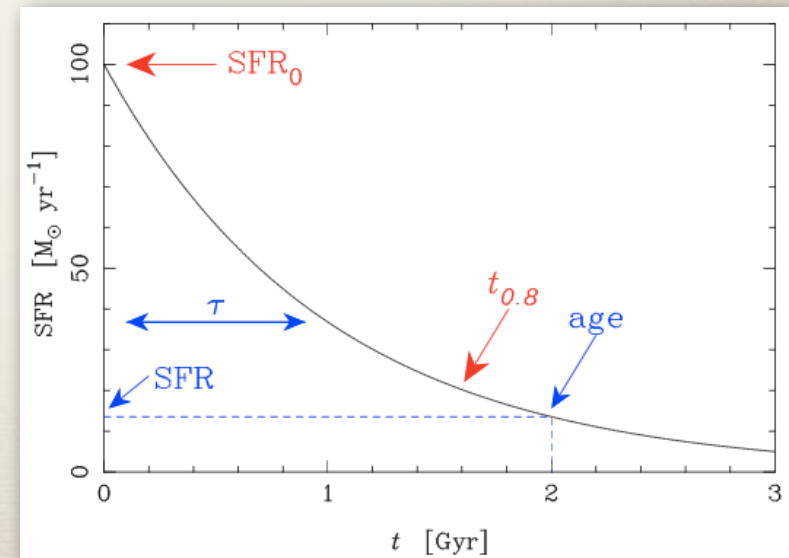
* 銀河系吸収、検出器&filterの応答関数、大気の有無を考慮

* AGNテンプレートも使用

➡ 全部で200万個のテンプレート

➡ Fitにより求められるproperties

- ▶ age
- ▶ star formation time scale (τ)
- ▶ SFR
- ▶ dust extinction (A_V)
- ▶ 星質量



SED Fit

* モデルテンプレート

☐ Salp

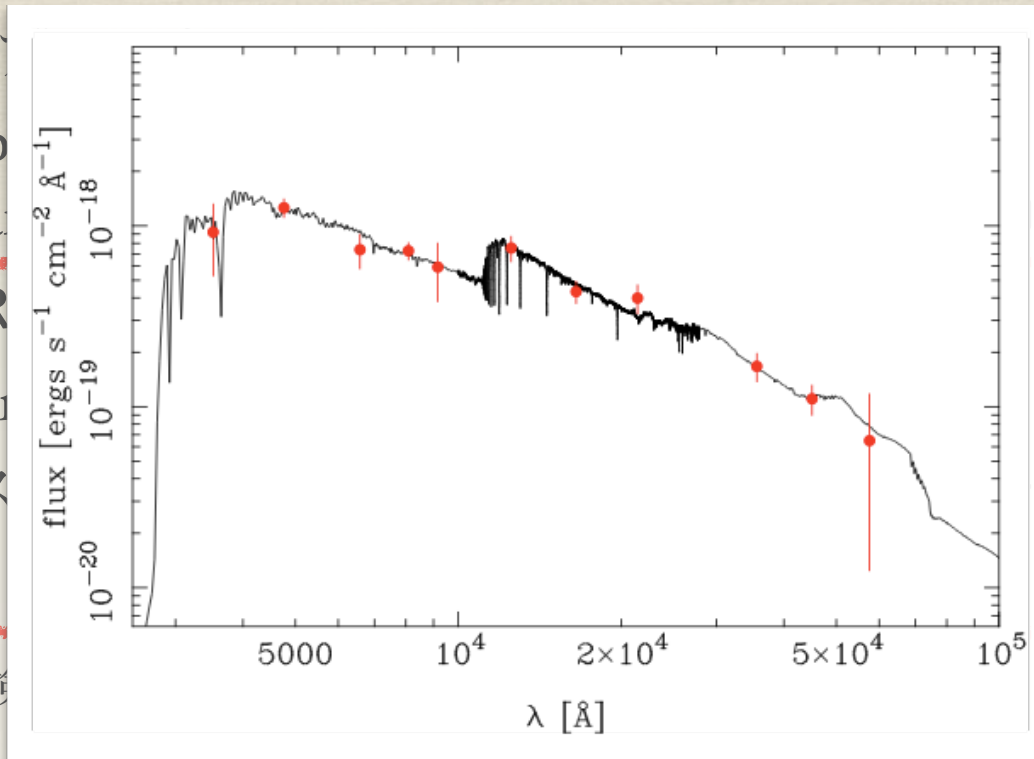
☐ solar

☐ SFR

☐ o(sil

☐ ダス

☐ age



$V < 10$

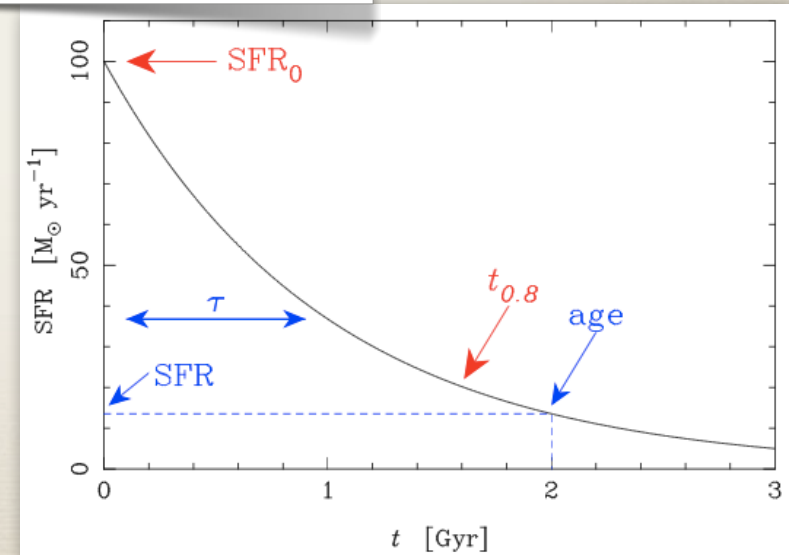
* 銀河系吸収、極

* AGNテンプレートも使用

➡ 全部で200万個のテンプレート

➡ Fitにより求められるproperties

- ▶ age
- ▶ star formation time scale (τ)
- ▶ SFR
- ▶ dust extinction (A_V)
- ▶ 星質量

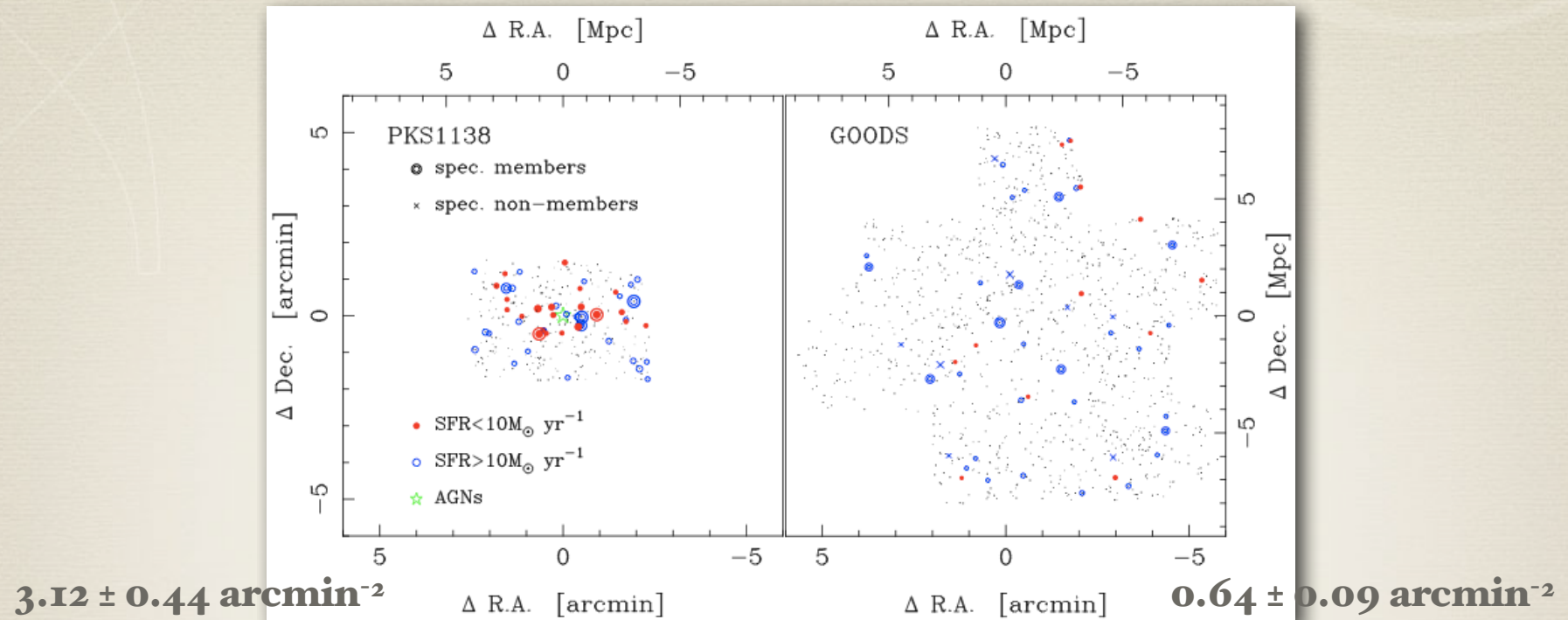




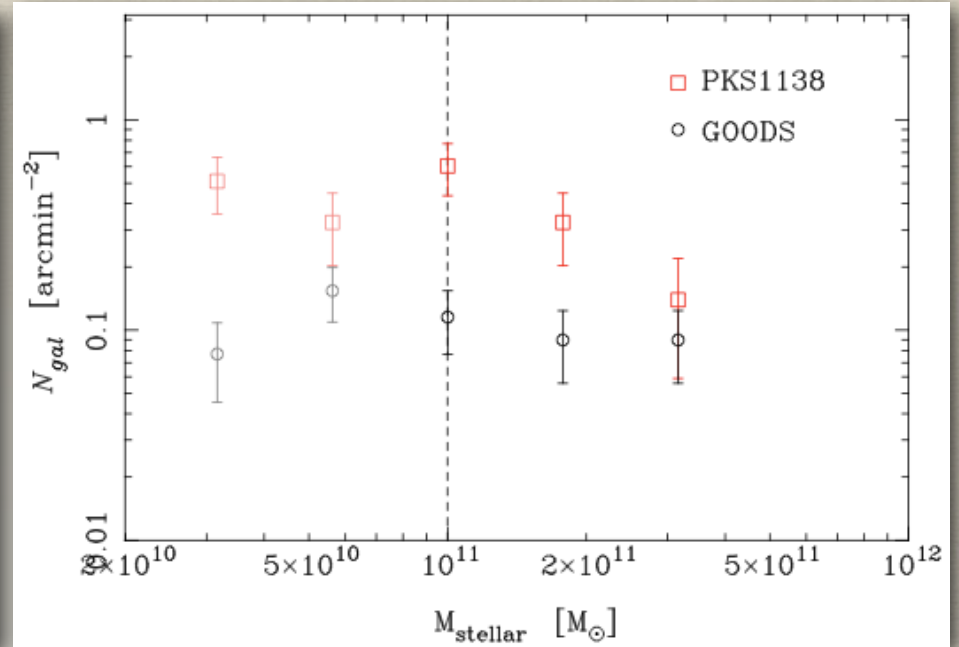
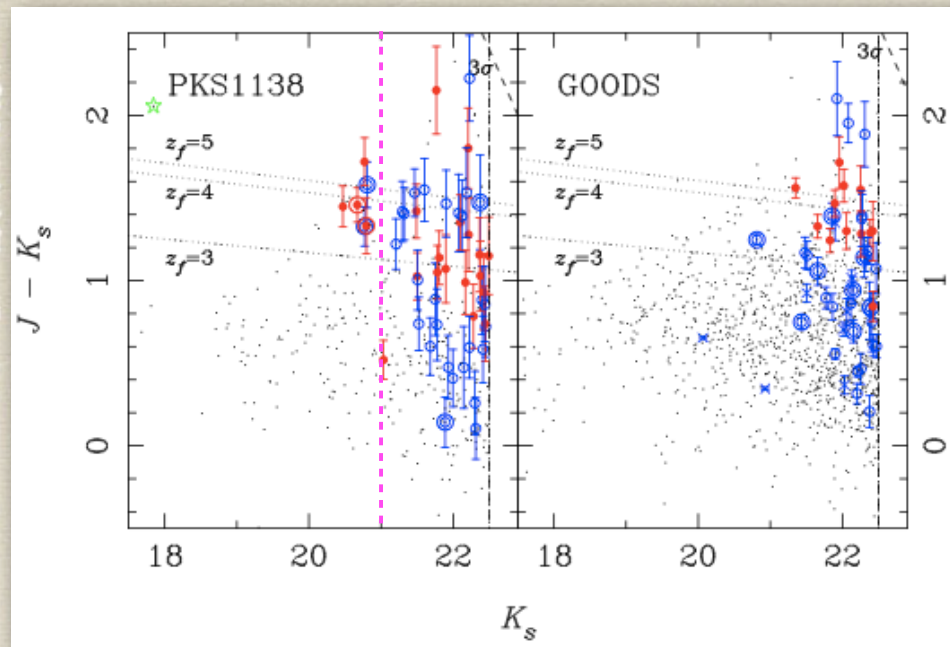
Results

-Over density-

空間分布



- * 電波銀河を中心に東西に広がるフィラメント構造
- * 電波銀河周辺にはSFRが低い銀河が分布している
- * PKS1138ではGOODSに比べてfactor ~ 5 の密度超過 ($\text{H}\alpha$ 銀河では ~ 4)
- * $K_s < 21.5$ の銀河では $0.75 \pm 0.22 \text{ arcmin}^{-2} : 0.08 \pm 0.03 \text{ arcmin}^{-2}$ (factor ~ 9)



＊ 色-等級図

- 近傍銀河団ではred sequenceが見られる
- ▶ PKSでred sequenceがわずかに見られる ($K_s \leq 21$)
 - ➡ $z_f = 4$ のあたりに分布
 - ➡ 星の大部分を $z_f \sim 4$ で形成した?
- ▶ low-SFR と high-SFR が半分ずつくらい
 - ➡ red sequenceは形成中?

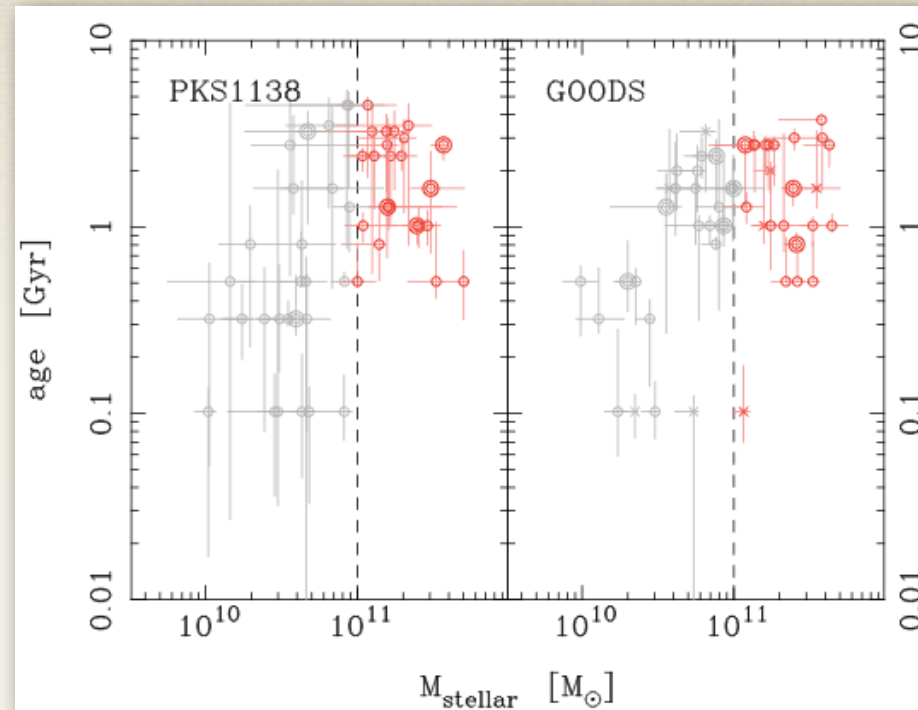
＊ 星質量関数

- ▶ PKSではGOODSより銀河が高密度に分布している
- ➡ PKSとGOODSは $z \sim 2$ において異なる環境である



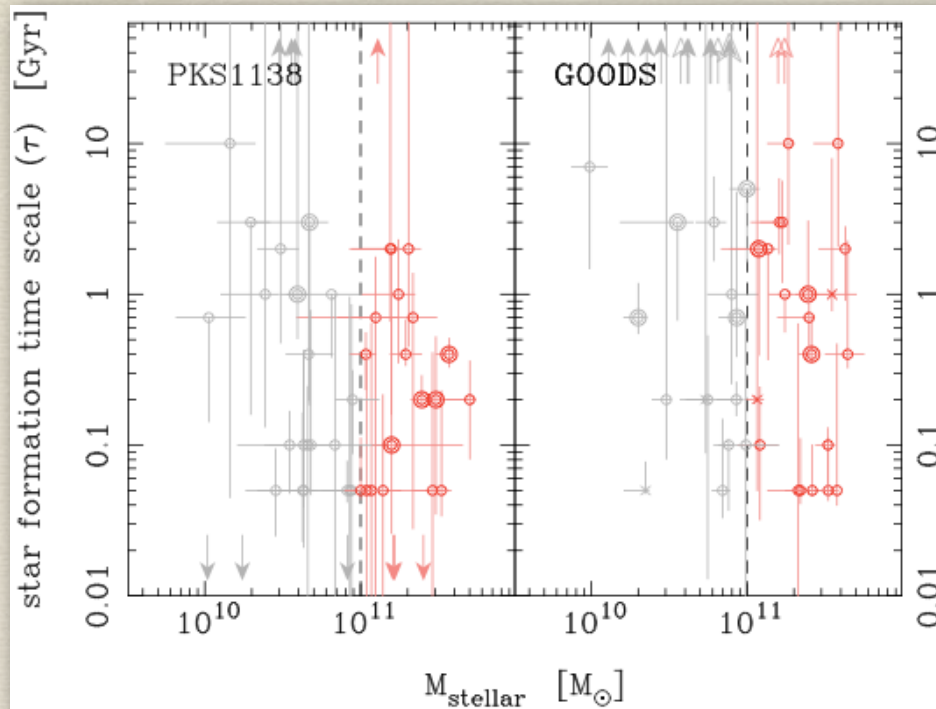
Results -Properties-

Age



- * PKSとGOODSで大きな違いは見られない
 - ▶ 2 Gyr以上のageを持つ銀河の割合
 - PKS : 0.52 ± 0.19
 - GOODS : 0.42 ± 0.16
 - ▶ Steidel et al. (2005)で星形成銀河の高密度領域@ $z=2.3$ を探索
 - ➡ 高密度領域内の星形成銀河はそうでない領域のものより古い

Star Formation Time Scale : τ



* PKS-銀河の τ はGOODS-銀河よりも短い傾向

▶ $\tau < 0.5$ Gyrの銀河の割合

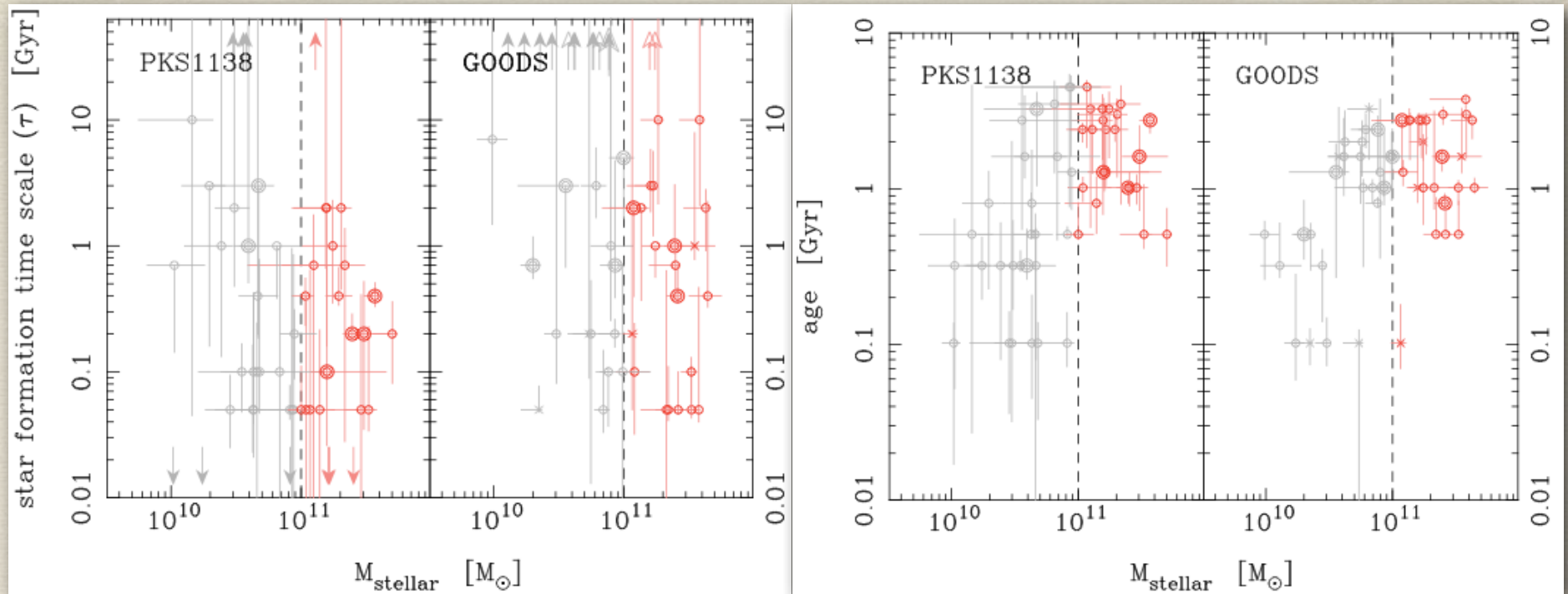
- PKS : 0.70 ± 0.23

- GOODS : 0.43 ± 0.16

▶ 両領域においてほとんどが $\text{age} > \tau$

➡ すでに大部分の星形成を終えている

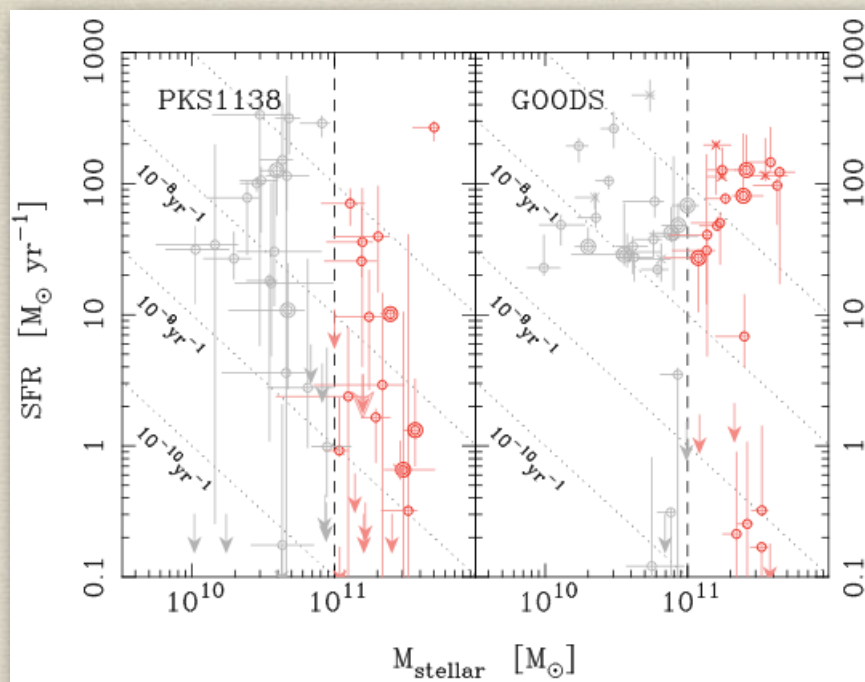
Star Formation Time Scale : τ



＊ PKS-銀河の τ はGOODS-銀河よりも短い傾向

- ▶ $\tau < 0.5$ Gyrの銀河の割合
 - PKS : 0.70 ± 0.23
 - GOODS : 0.43 ± 0.16
- ▶ 両領域においてほとんどが $\text{age} > \tau$
 - ➡ すでに大部分の星形成を終えている

SFR

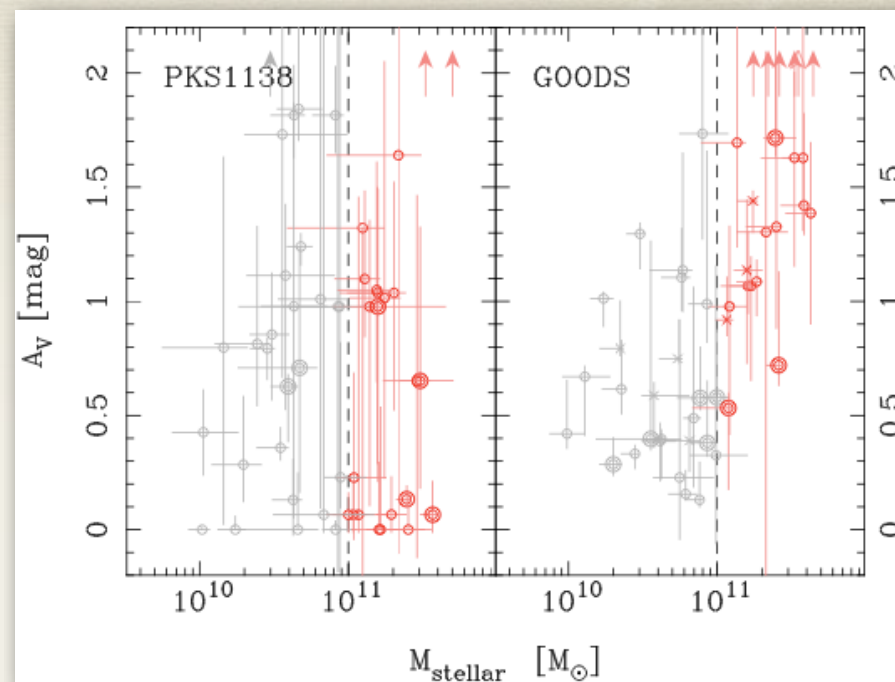


* PKS-銀河はGOODS-銀河に比べて星形成活動性が弱く、specific SFRが低い

▶ SFR < 10 M_{sun}/yr の銀河の割合

- PKS : 0.74 ± 0.24
- GOODS : 0.33 ± 0.14

Dust Extinction



* PKS-銀河はGOODS-銀河に比べてダストが少ない

▶ $A_V < 1$ の銀河の割合

(近傍星形成銀河の典型的な値 $A_V = 1$)

- PKS : 0.61 ± 0.21
- GOODS : 0.17 ± 0.09

SEDフィットのまとめ

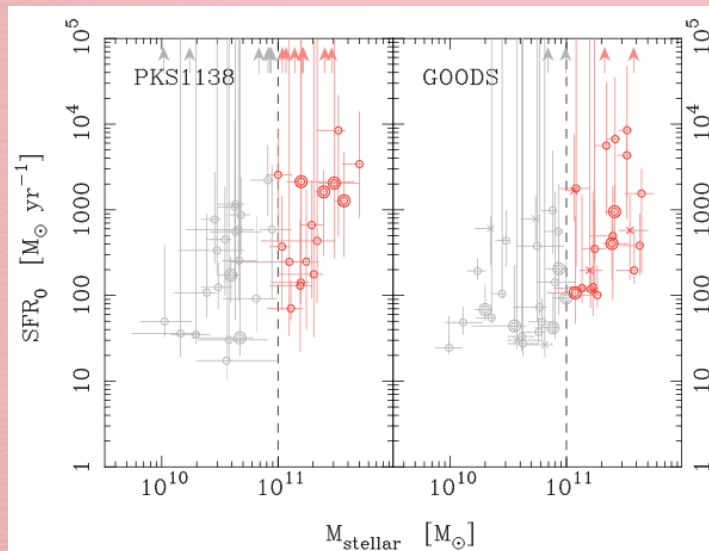
＊ SEDフィットの結果、PKS-銀河はGOODS-銀河と比較して

- 1) 同じくらいのage
- 2) 短い星形成タイムスケール
- 3) 低いSFR
- 4) 少ないダスト量

同じ時期に星を作り始めたが、PKS-銀河では星形成がより急速に進んだ

SFR $\Leftrightarrow$ ダスト量の比例関係
(Hopkins et al. 2003)

clusterと**field**では銀河形成の道筋が異なる



＊ PKS-銀河ではGOODS-銀河よりSFR₀が高い

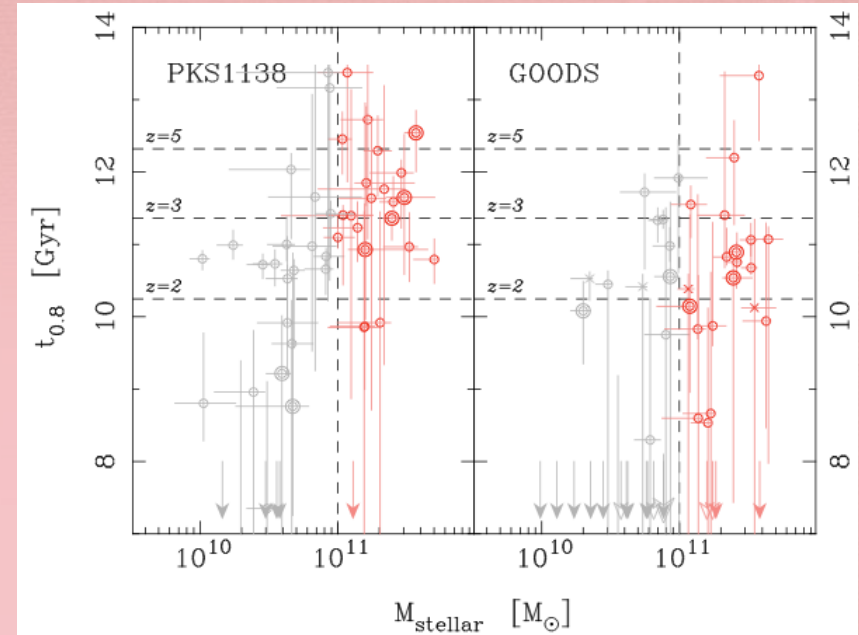
▶ SFR₀ > 1000 M_{sun}/yrの銀河の割合

- PKS : 0.61 ± 0.21

- GOODS : 0.39 ± 0.15

* PKS-銀河はGOODS-銀河に比べて $z=0$ の80%の星を形成する時期が早い

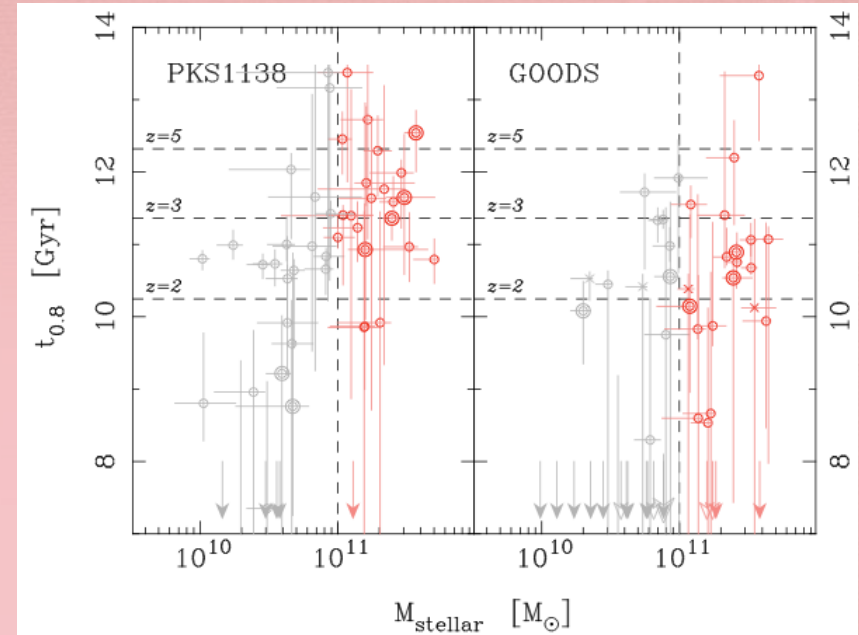
- PKS : $z \geq 3$
- GOODS : $z < 3$
 - ➡ red sequence : $z_f \sim 4$ と合う
- ▶ $z > 3$ で星の大部分を形成済みの銀河の割合
 - PKS : 0.61 ± 0.21
 - GOODS : 0.17 ± 0.09



以上の結果をまとめると..

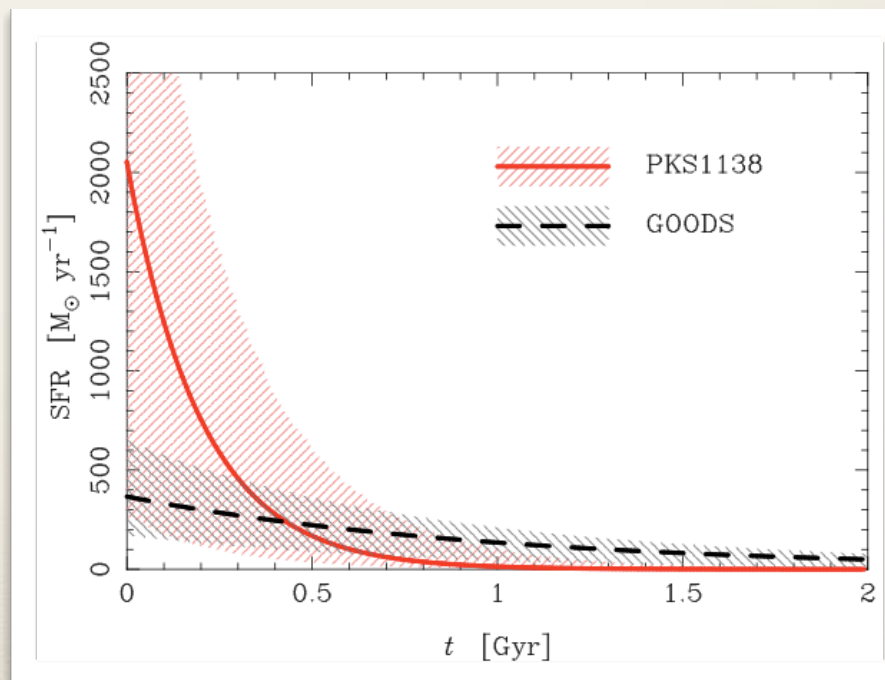
* PKS-銀河はGOODS-銀河に比べて $z=0$ の80%の星を形成する時期が早い

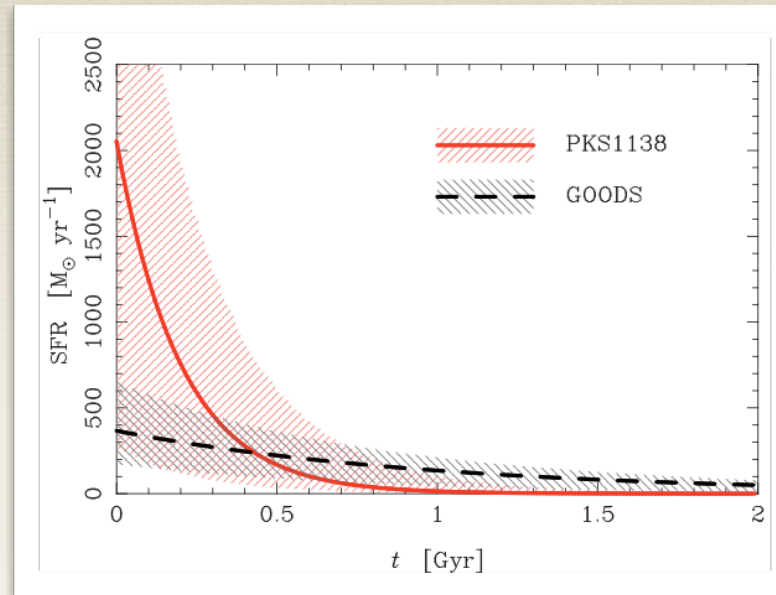
- PKS : $z \geq 3$
- GOODS : $z < 3$
 - ➡ red sequence : $z_f \sim 4$ と合う
- ▶ $z > 3$ で星の大部分を形成済みの銀河の割合
 - PKS : 0.61 ± 0.21
 - GOODS : 0.17 ± 0.09



以上の結果をまとめると..

推測される 星形成史





＊どうやってPKS-銀河のように短時間で大質量銀河に成長するのか？

- ▶ 一般的には、星形成により周囲のガスが電離され、その後の星形成が抑制される
- ▶ AGNを持っていればさらに抑制が利く

➡ mergingが必要

➡ 銀河が高密度に分布しているのだからmergingのチャンスは多いはず

merging → 星質量の大きな銀河になる → starburstを起こす

→ 星質量がさらに増加 → starburstがおさまりSFRが低い状態に

→ SFRの低い大質量銀河を観測することになる

環境依存性の発生メカニズム

環境依存性の発生メカニズム

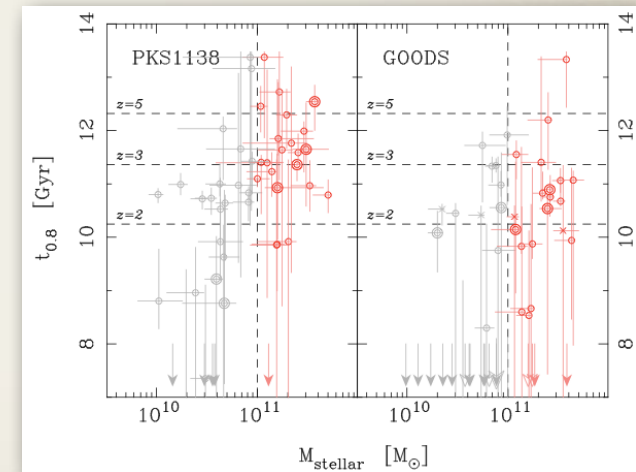
*環境依存性を形作る効果

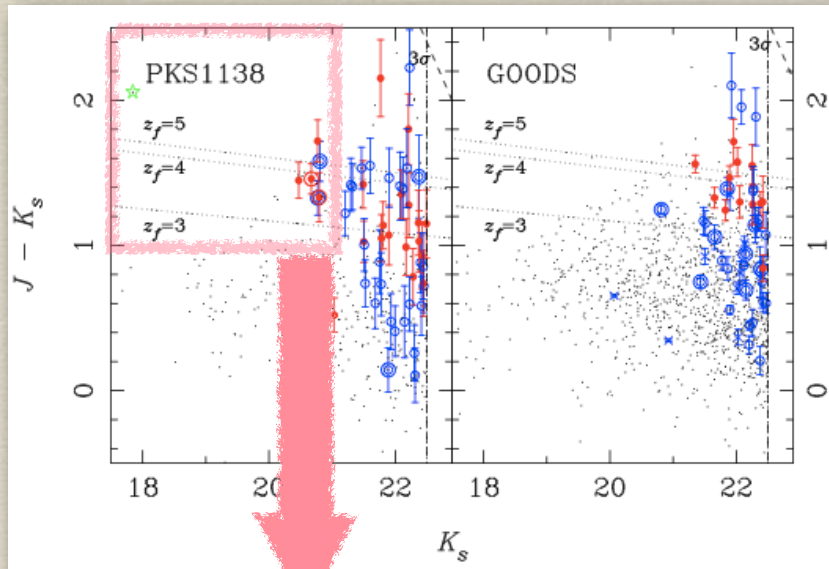
- ▶ nature effects (先天的要因) : early-epoch mergers
(clusterの最初のcollapse時に起こるmerging)
- ▶ nurture effects (後天的要因) : late-epoch mergers
(その後起こるmerging)

*PKS clusterが大部分の星を形成してから～1 Gyr

- ▶ clusterの速度分散 : 400 km/s
- ▶ clusterのビリアル半径 : 0.32 Mpc
 - ➡ crossing time scale ~ 1 Gyr
 - ➡ nurture effectsはまだ十分には作用していない
 - ➡ nature effects (early-epoch mergers)が環境依存性の基礎を形成する？

◎ もしそうなら、少し前にinteractionした形跡 & post-starburstの銀河がfieldに比べて多く観測されるはず



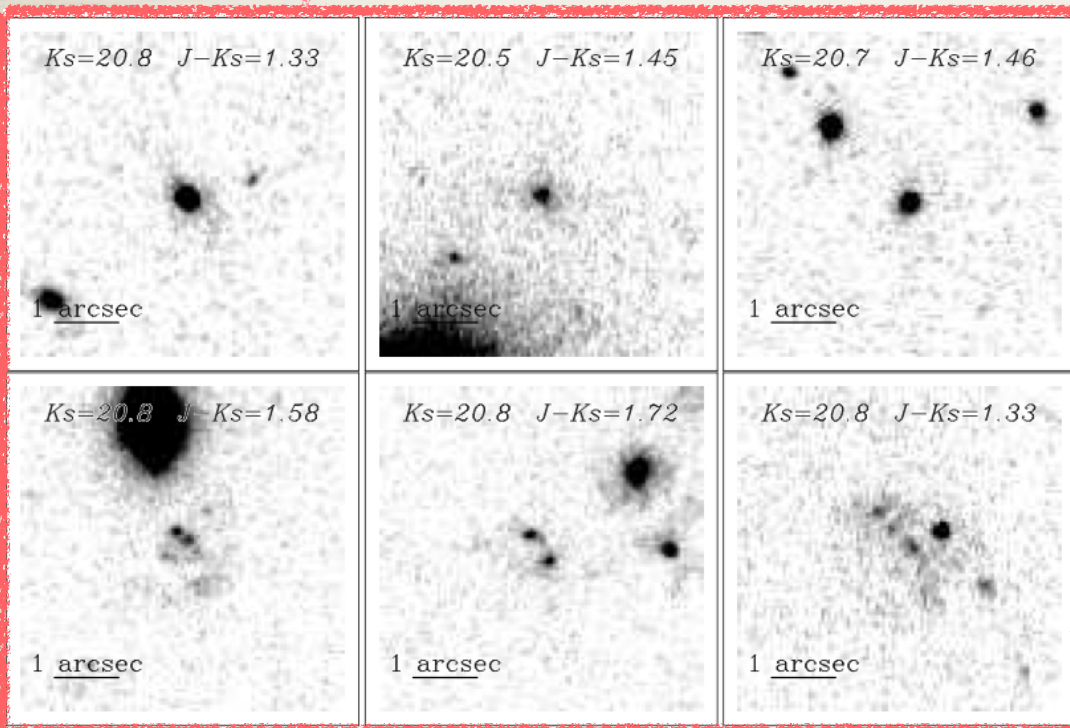


* Bright Red galaxies ($K_s < 21$, $J-K_s > 1$)

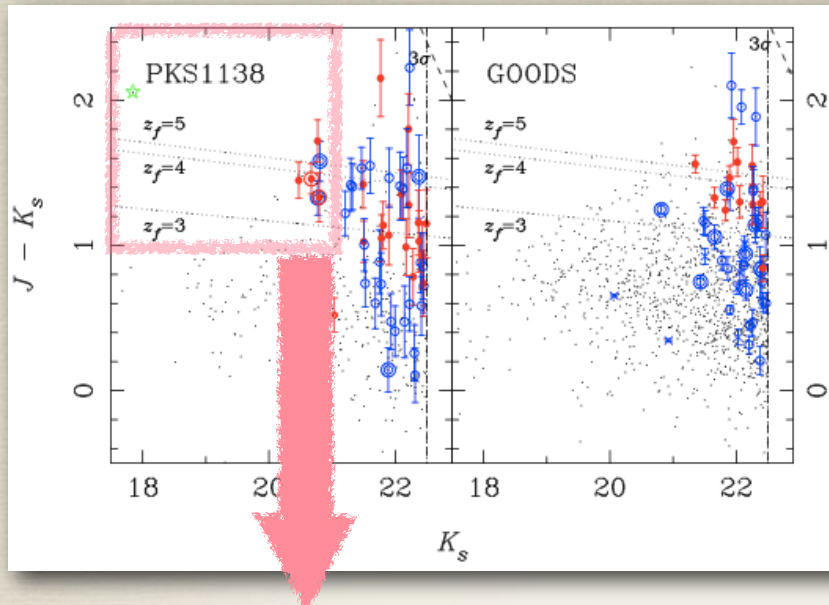
➡ 3 / 6 がdisturbedなmorphology & コンパニオンを持っている

* red sequenceは**massive end**から形成される (e.g. Tanaka et al. 2005, 2007)

early-epoch mergersによってred sequenceが形成されているところを見ている？



* red sequenceの**low-mass end**は遅れてlate-epoch mergersやnurture effectsにより形成されていくのではないか

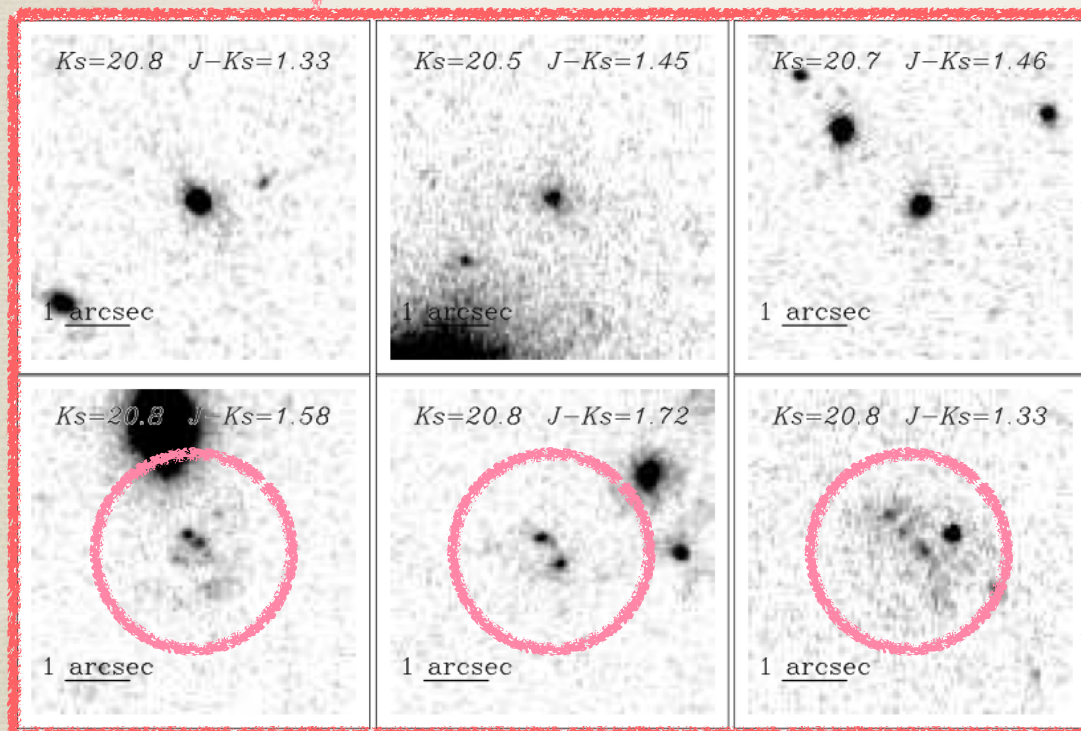


* Bright Red galaxies ($K_s < 21$, $J-K_s > 1$)

➡ 3 / 6 がdisturbedなmorphology & コンパニオンを持っている

* red sequenceは**massive end**から形成される (e.g. Tanaka et al. 2005, 2007)

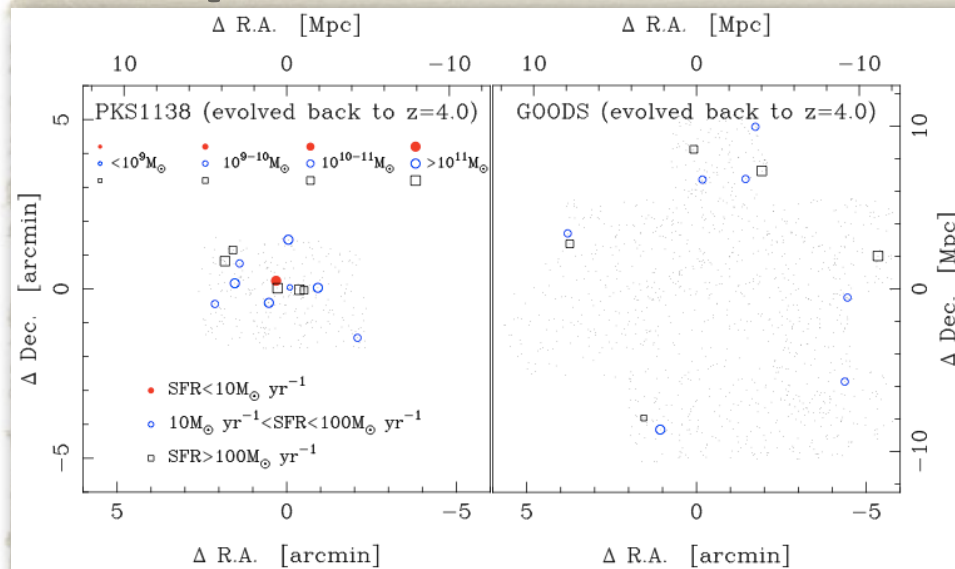
early-epoch mergersによってred sequenceが形成されているところを見ている？



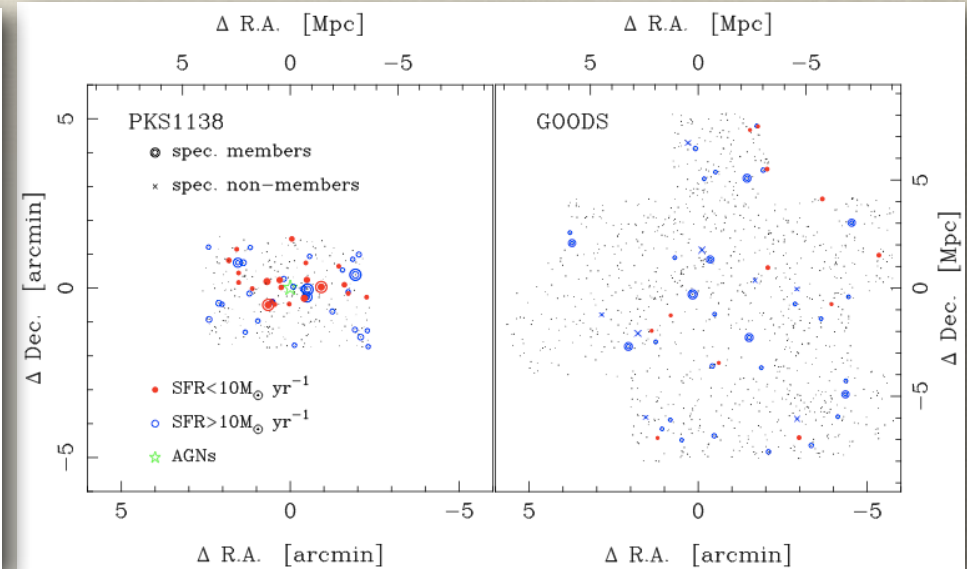
* red sequenceの**low-mass end**は遅れてlate-epoch mergersやnurture effectsにより形成されていくのではないか

過去の空間分布

@z=4



@z=2



* $z \sim 2$ に比べて星形成の活発な銀河が多い

* PKSではGOODSより星形成の活発な銀河が多い

$\Leftrightarrow z \sim 2$ ではPKSでlow-SFR銀河が多かった

➡ 形成期のcluster領域ではスターバースト銀河の密度超過が見られると予測される

* PKSではlow-SFR銀河が見られる

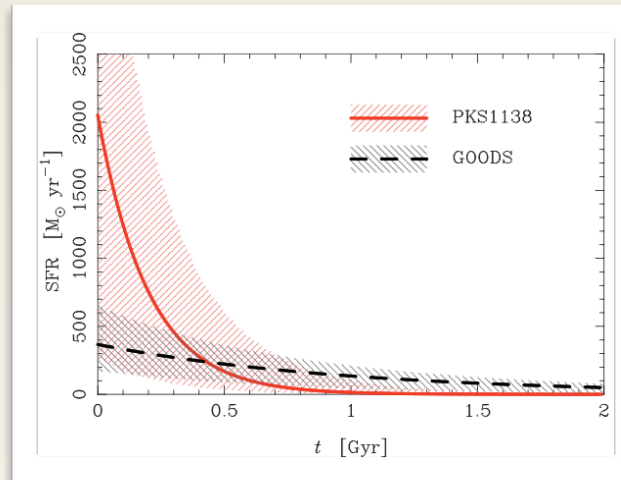
➡ 形成期のcluster領域ではスターバースト銀河とlow-SFR銀河が共存している？

まとめ

* PKS(proto-cluster)とGOODS(field)で銀河のプロパティの環境依存性@ $z \sim 2$ を調べた

* 環境依存性は少なくとも部分的には $z \sim 2$ で存在しているよう

* 推測される星形成史：



* PKSは若いcluster

➡ 環境依存性の形成に強く影響しているのは**nature effects**

* cluster領域での頻繁なmergingが関係しており、星形成タイムスケールが短くなる要因にもなっていると考えられる

* 確認するには $z > 2$ での探査が必要