

$z \sim 1-2$ での銀河進化

鍛冶澤 賢

(国立天文台)

2008年2月13日

概要

■ 銀河の星はいつ、どこで形成されたか？

✓ 恒星質量密度、恒星質量関数

✓ 色、星の年齢、星形成率の分布

✓ 形態進化

$z \sim 1-2$ あたりでの観測的研究の現状を紹介

恒星質量進化の研究

- 基本的にスペクトルやmulti broad-band SEDからモデルを介して M/L を見積もって $L \rightarrow M$ を求める

距離 (redshift) 情報、静止系可視 ~ 近赤外での明るさ

✓ Local universe

- SDSS
- 2dF + 2MASS

✓ High-z universe

- COMBO17
- DEEP2
- VVDS
- GDDS
- GOODS

- MUNICS
- NDWFS
- HDF-N
- HDF-S (FIRES)
- HUDF
- FDF

MOIRCS Deep Survey in GOODS-N Region

推進メンバー

PI 市川隆 (東北大)

秋山正幸、田中壺、

東谷千比呂(ハワイ観測所)

浜名崇、鍛冶沢賢(国立天文台三鷹)

大内正己 (OCIW)

岩田生(国立天文台岡山)

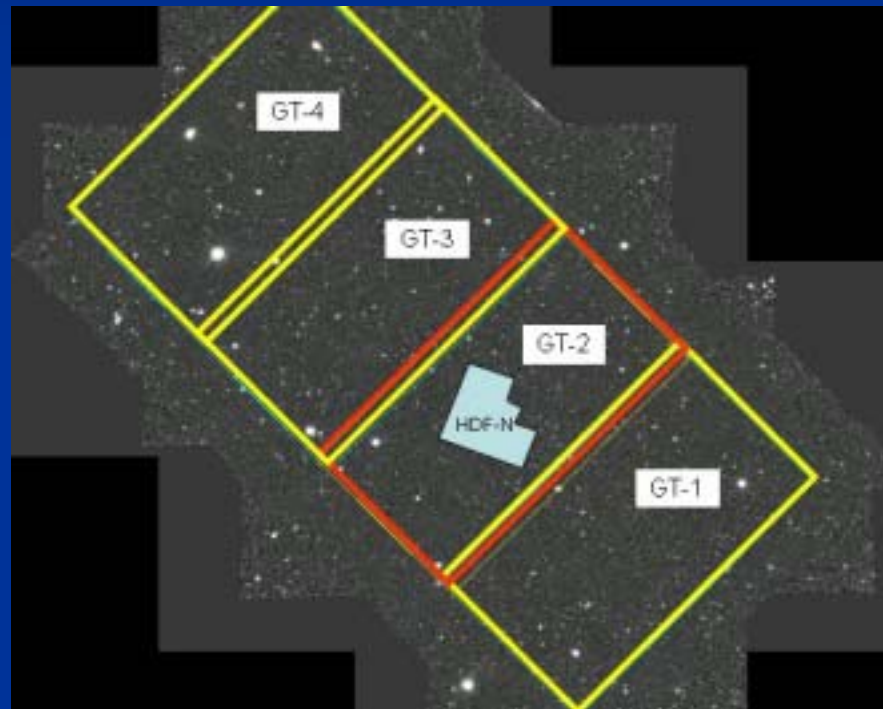
小野寺仁人(ヨンセイ大学)

鈴木竜二(ハワイ観測所/ハワイ大学)

内一・勝野由夏(東大)

小西真広、吉川智裕(東北大/ハワイ観測所)

山田亨、小谷野智雄(東北大)



GOODS-North
JHKs-bands deep imaging

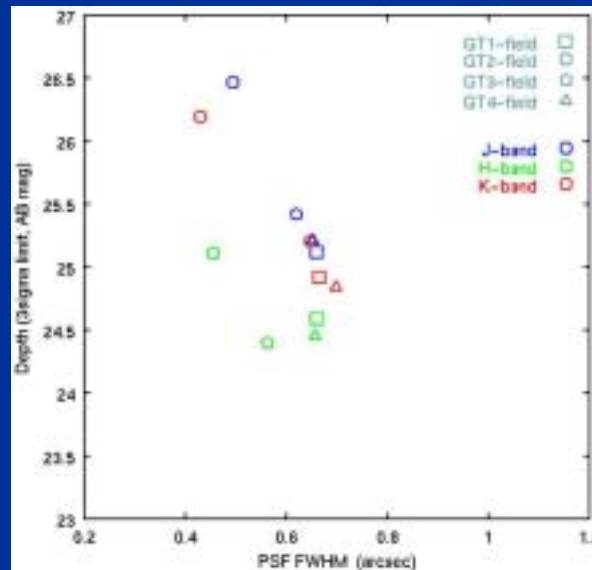
MODS データ (現状)

Deep $K_{\text{Vega}} < 23.5$ (5'), ~ 26 '

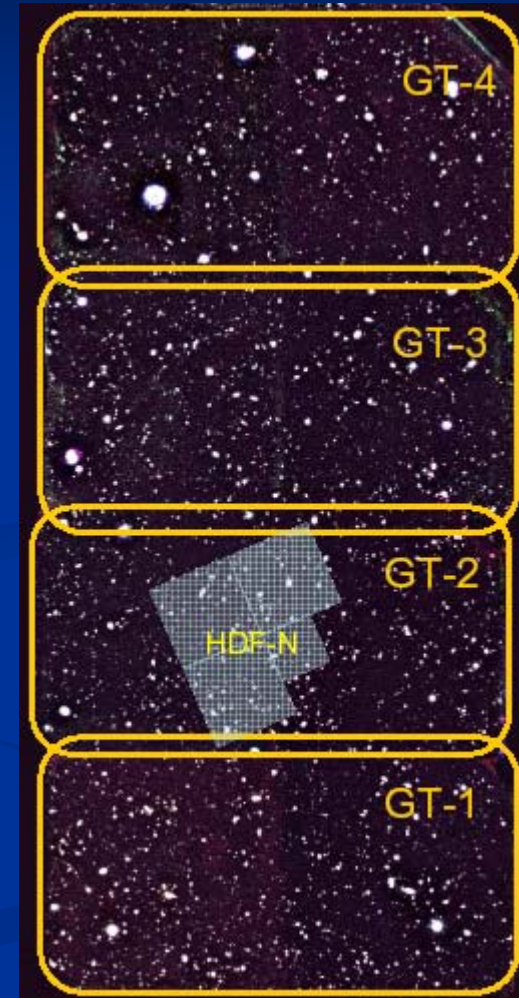
Wide $K_{\text{Vega}} < 22.5$ (5'), ~ 74 '

H-band は浅め

Wide J-band も多少浅め



各視野、バンドの深さとPSF

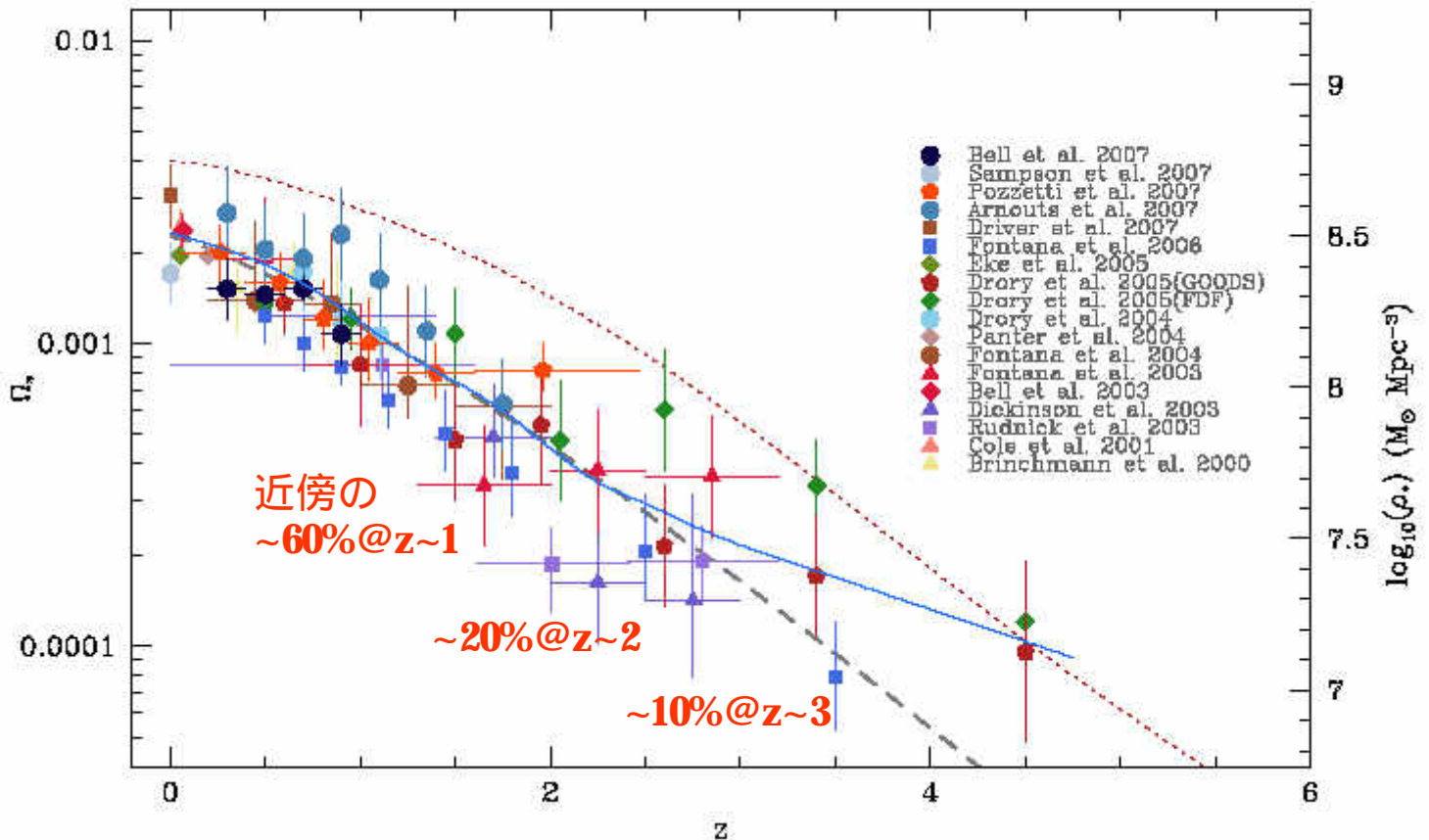


+ HST/ACS(b,v,i,z)、Spitzer/IRAC、KPNO/MOSAIC(U)

JHK3色画像

恒星質量密度進化

恒星質量密度



赤方偏移

Stephen et al. arXiv:0801.1594

$z > 1$ で強い進化

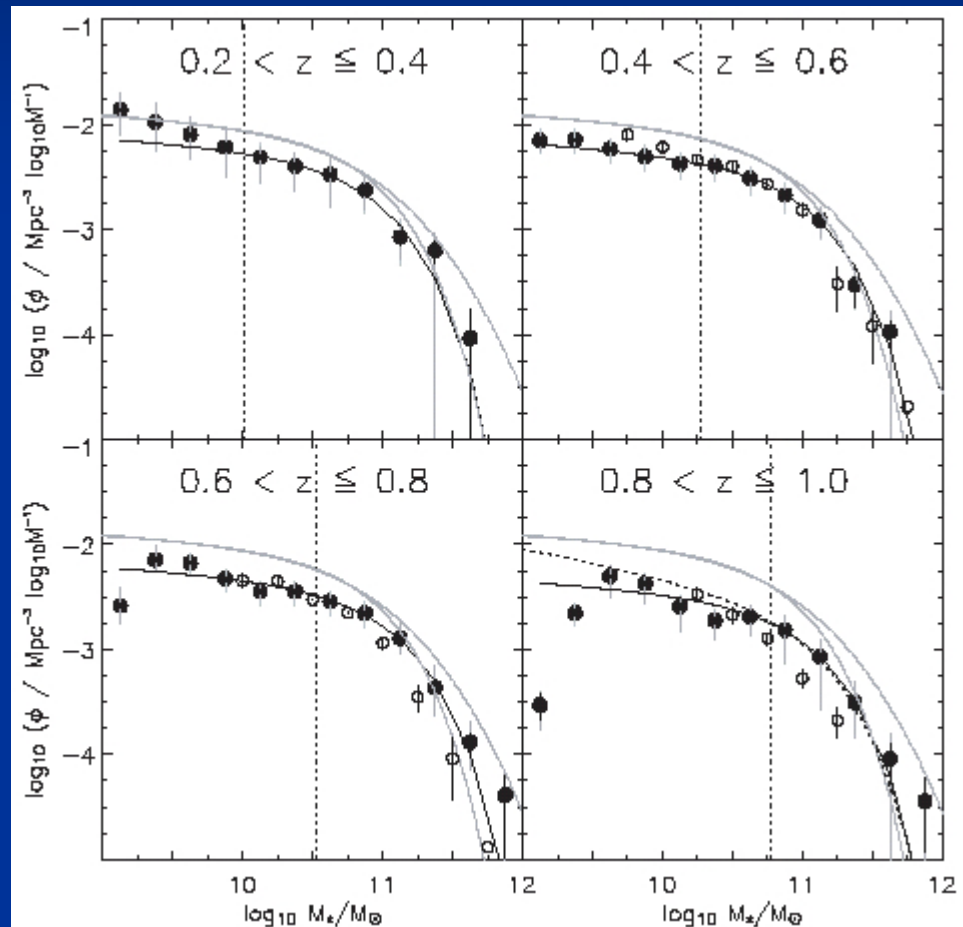
$z \sim 1-2$ の時期にかなりの星ができた

恒星質量関数の進化 ($z < 1$)

COMBO17

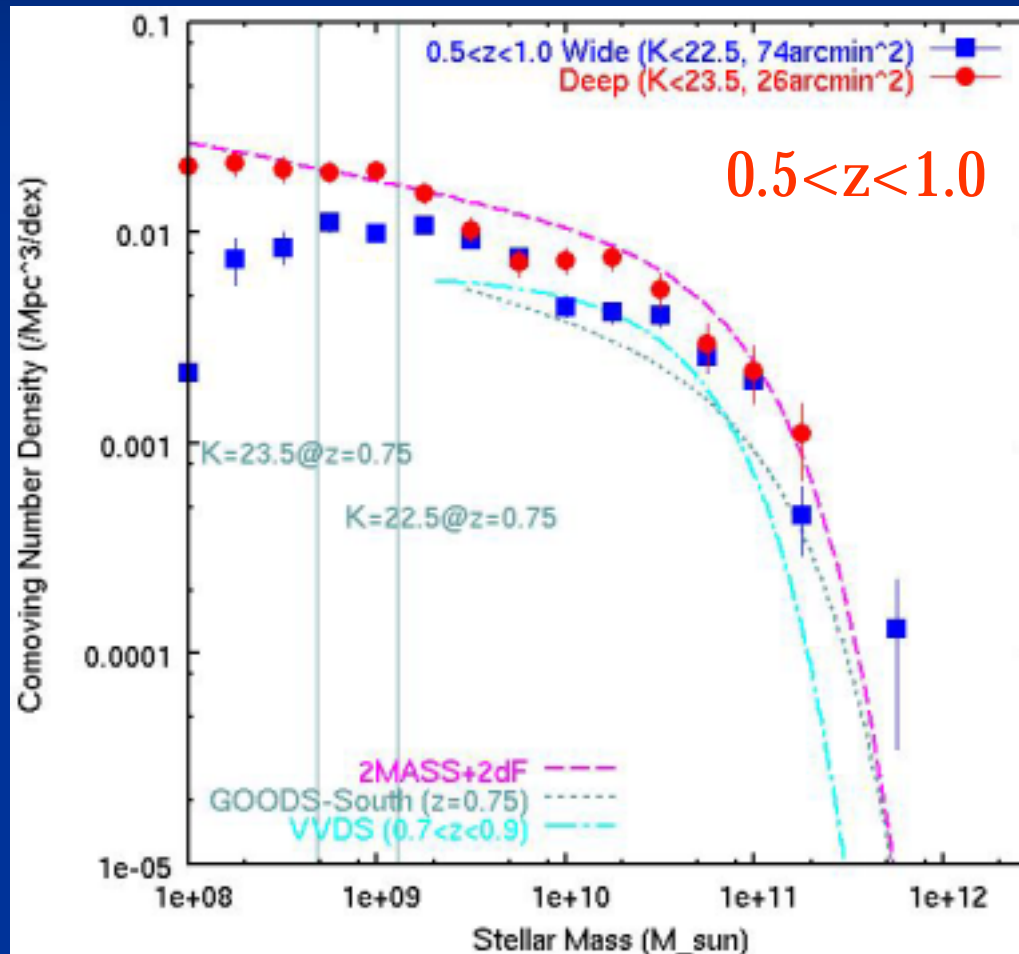
恒星質量関数は $z < 1$ では
緩やかな進化

特に $> 10^{11} M_{\odot}$ の大質量な
銀河の数密度進化は小さい

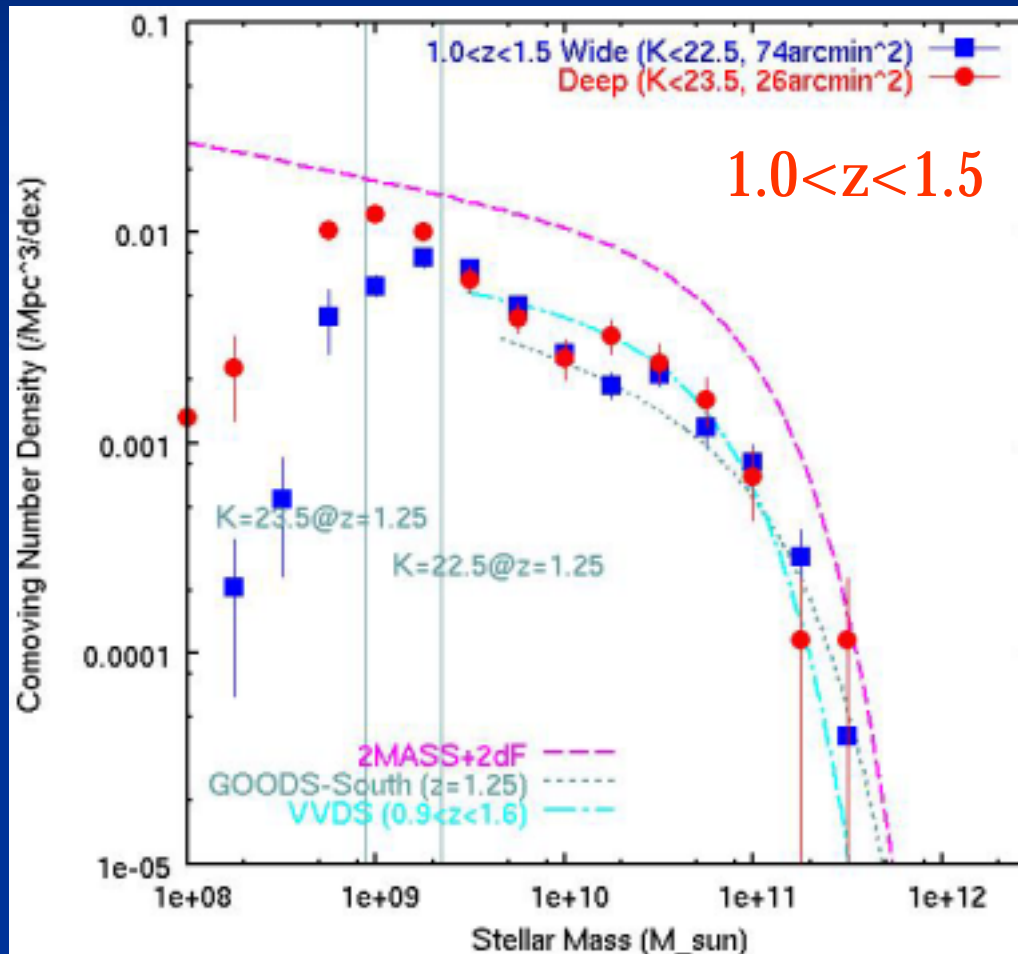


Borch et al. 2006

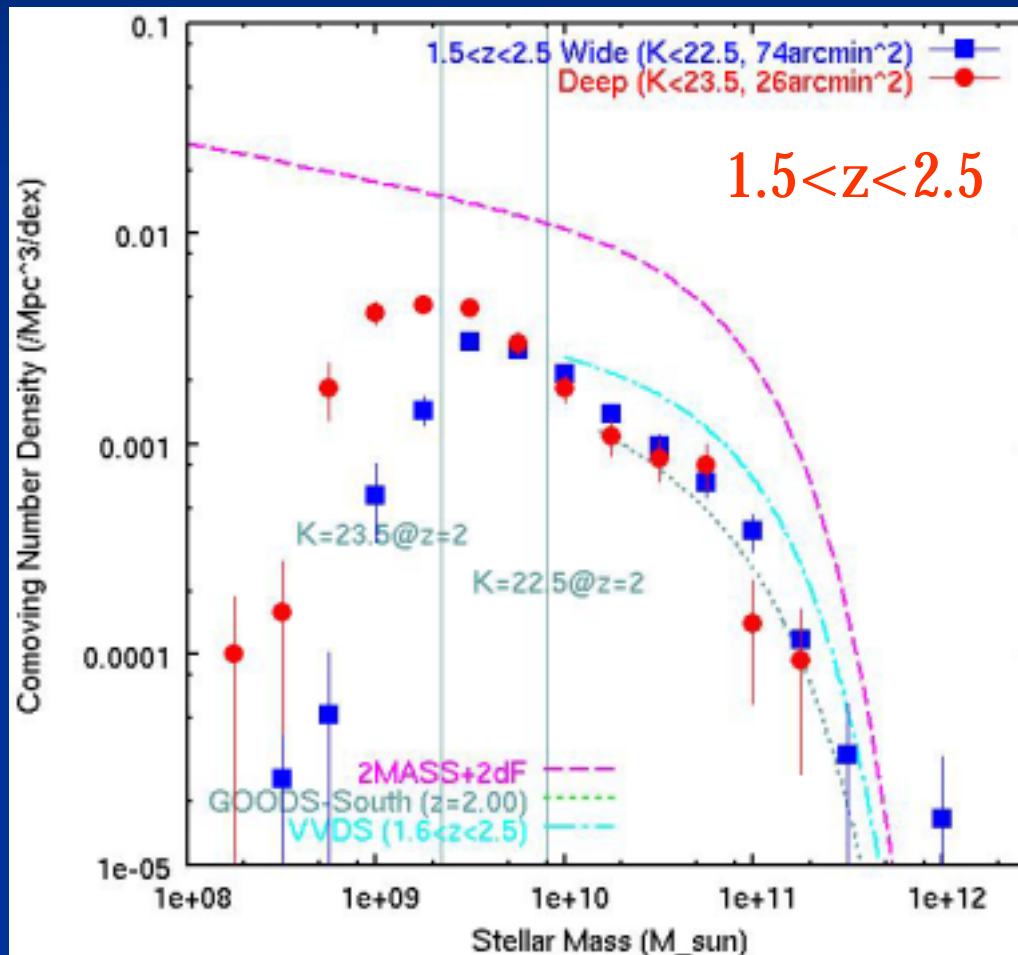
恒星質量関数の進化 ($z > 1$)



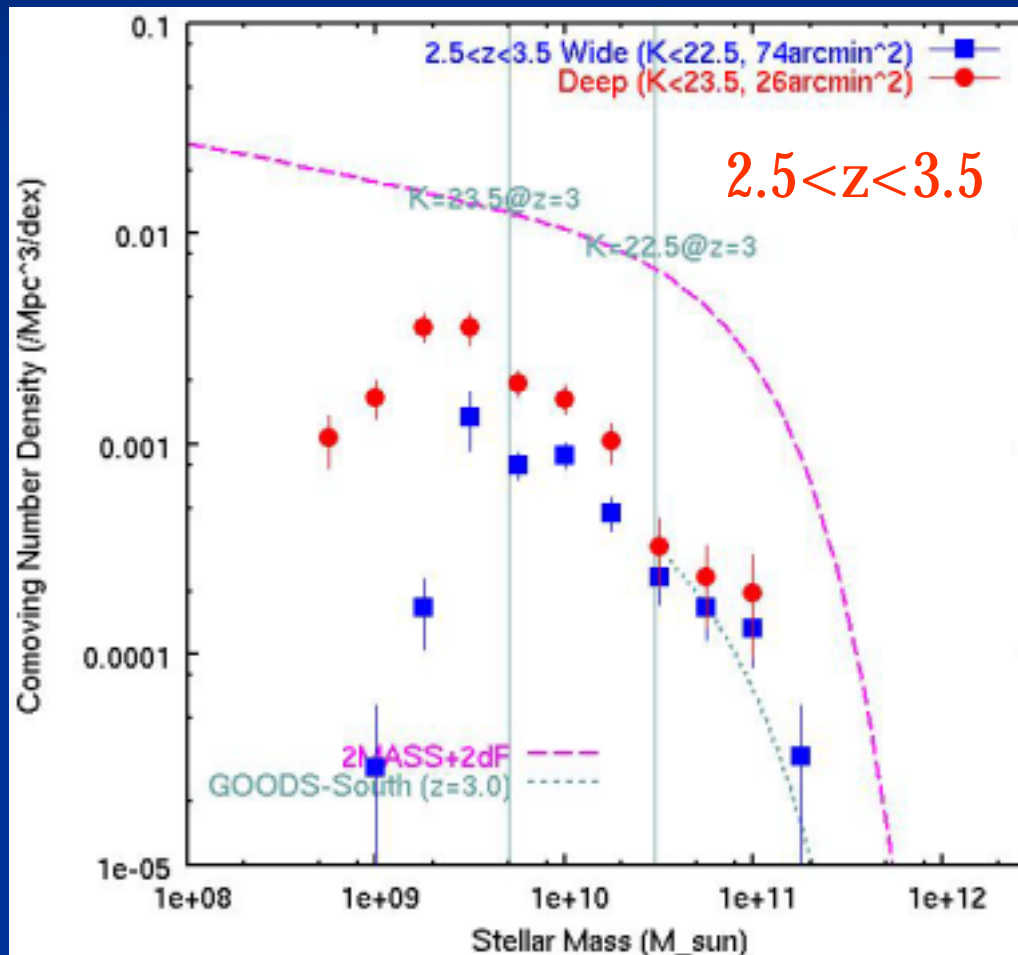
恒星質量関数の進化 ($z > 1$)



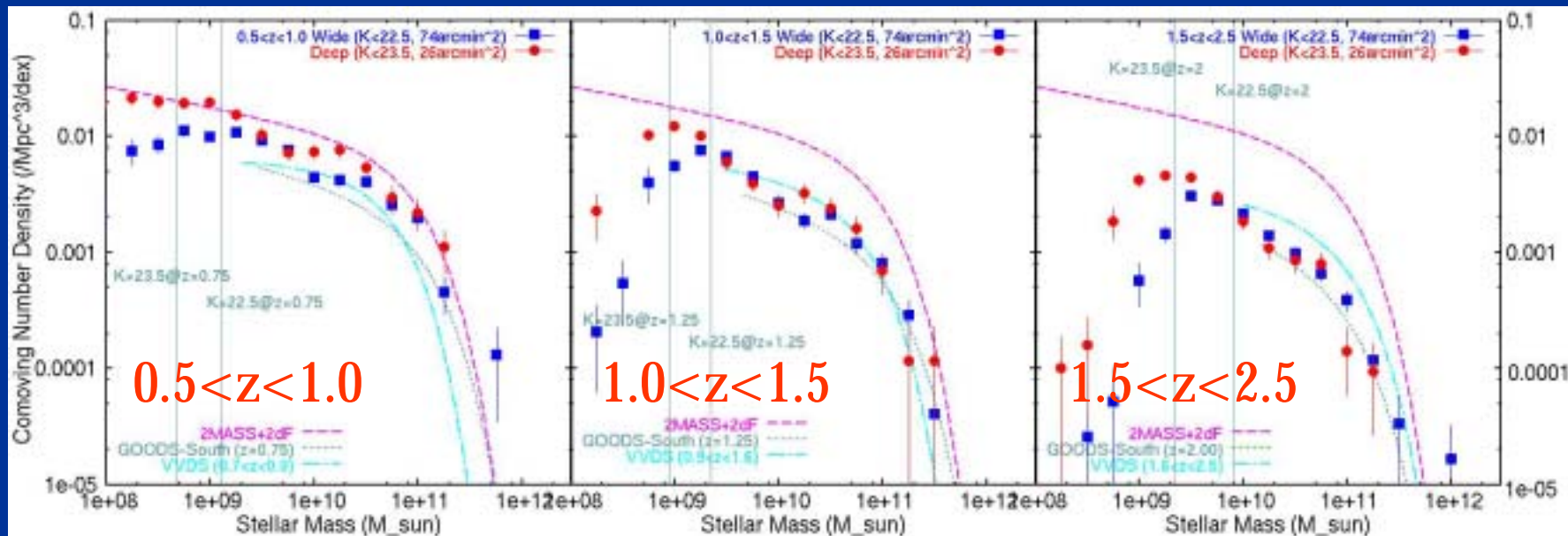
恒星質量関数の進化 ($z > 1$)



恒星質量関数の進化 ($z > 1$)



恒星質量関数の進化 ($z > 1$)



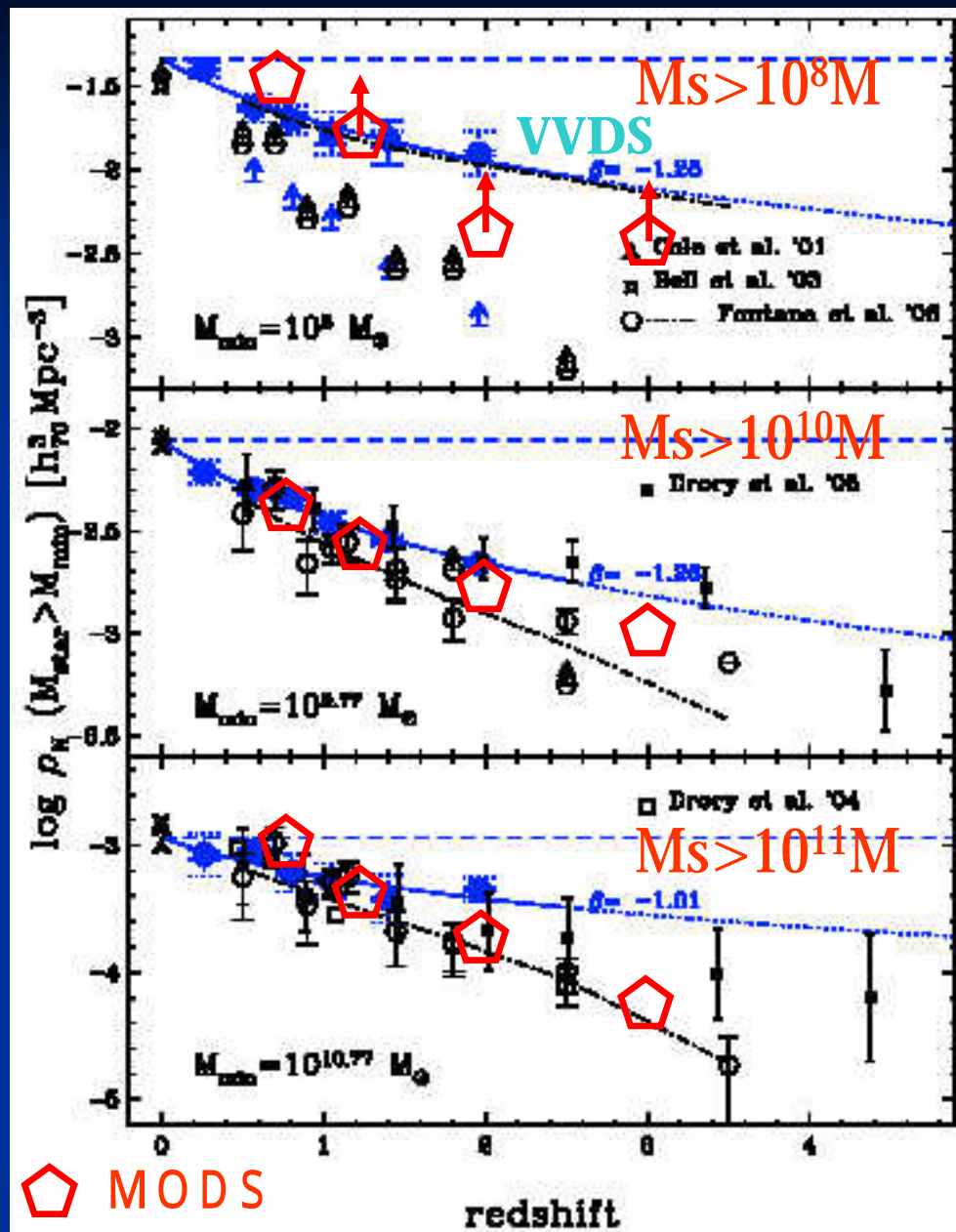
$z > 1$ で広い質量範囲に渡って数密度が減少
Low-mass end slope は多少急かもしれない
 $z \sim 2$ では大質量銀河の数密度も減少している

恒星質量別 数密度進化

どのmass limitでも数密度は
赤方偏移とともに減少

$z < 1 \sim 1.5$ では大質量銀河の
進化は低質量銀河に比べて
緩やか

GOODS-S, MODS(GOODS-N)
では $z > 1.5$ で大質量銀河の数密度
が急速に減少するが、VVDSでは
比較的緩やか

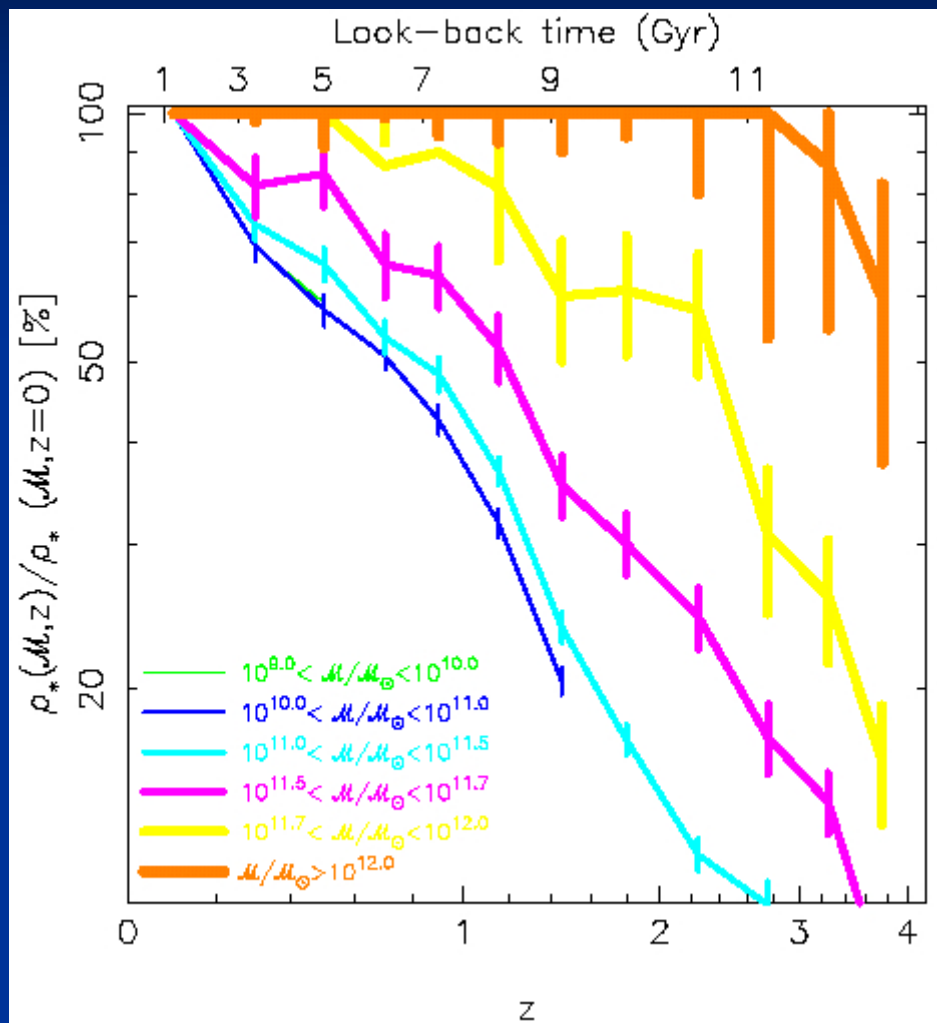


恒星質量別 恒星質量密度

恒星質量が大きい銀河程、昔まで
遡っても数があまり減少しない
(早い時期から形成されていた)

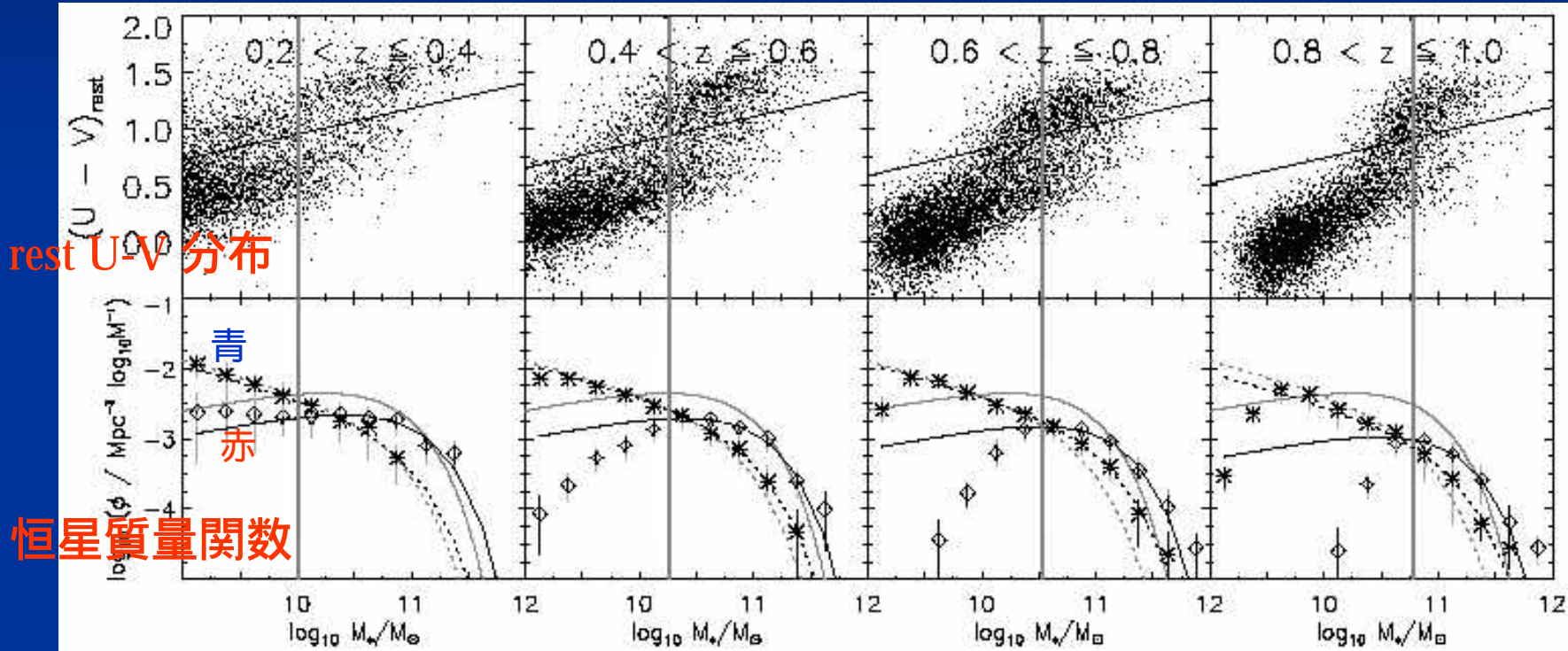
数密度進化におけるDown-sizing

GOODS + Lockman Hole



恒星質量と色分布

COMBO17



Bell et al. 2007

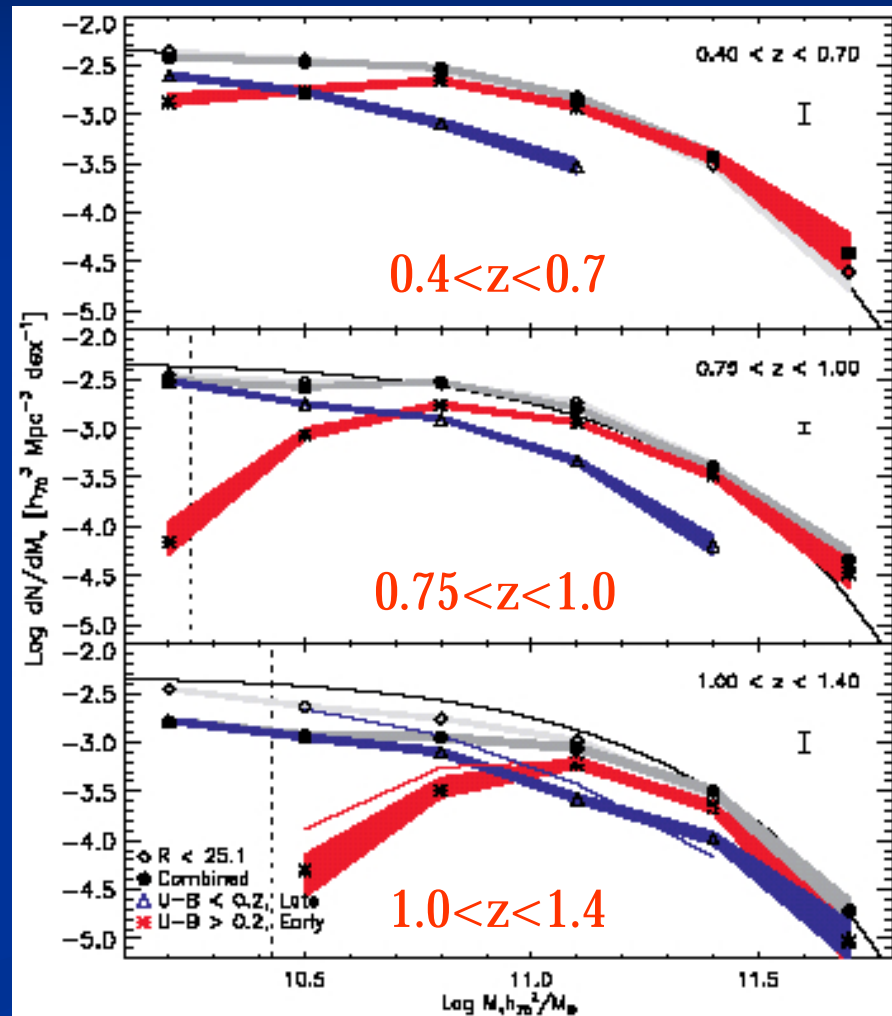
質量が大きいほど赤い色
Bimodal分布 (red sequence & blue cloud)

色別に見た恒星質量関数

DEEP2

低質量側では青い銀河、
大質量側では赤い銀河が支配的

青い色と赤い色の銀河の数の
大小が入れ替わる質量は
赤方偏移とともに大きい方へ
シフトしていく

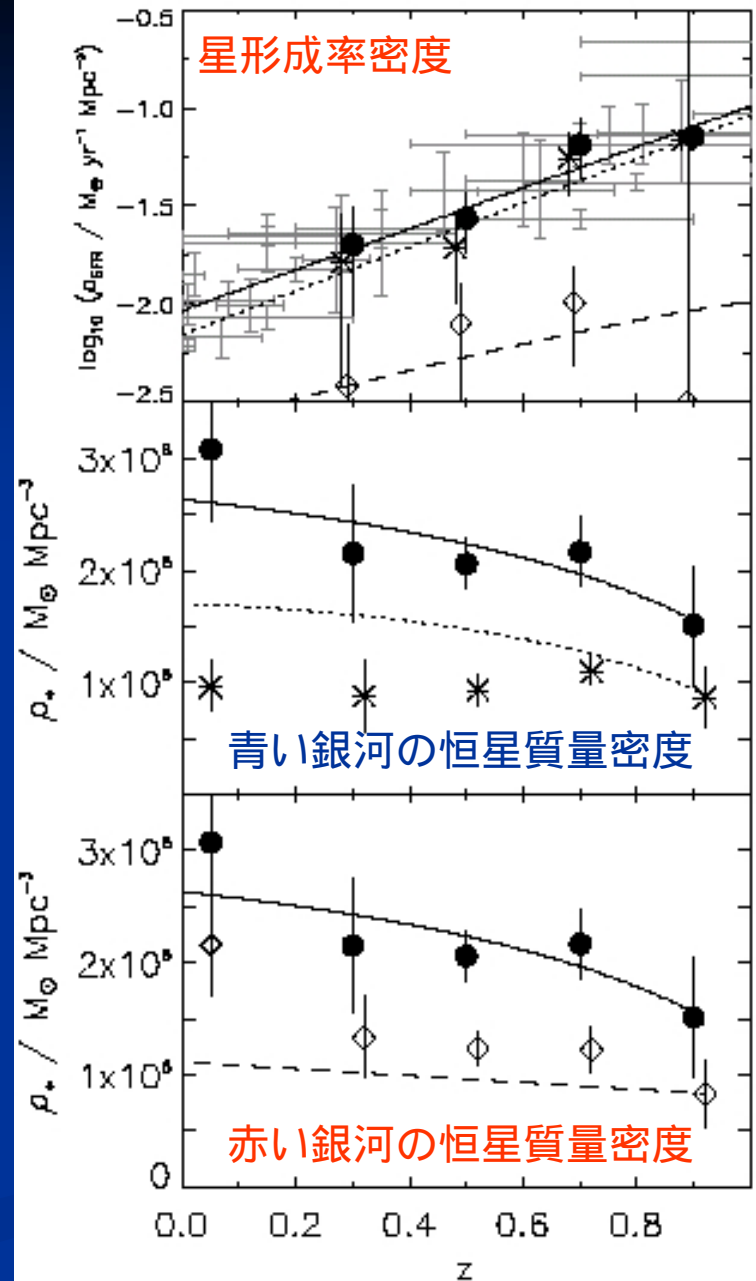


色別に見た 恒星質量密度進化

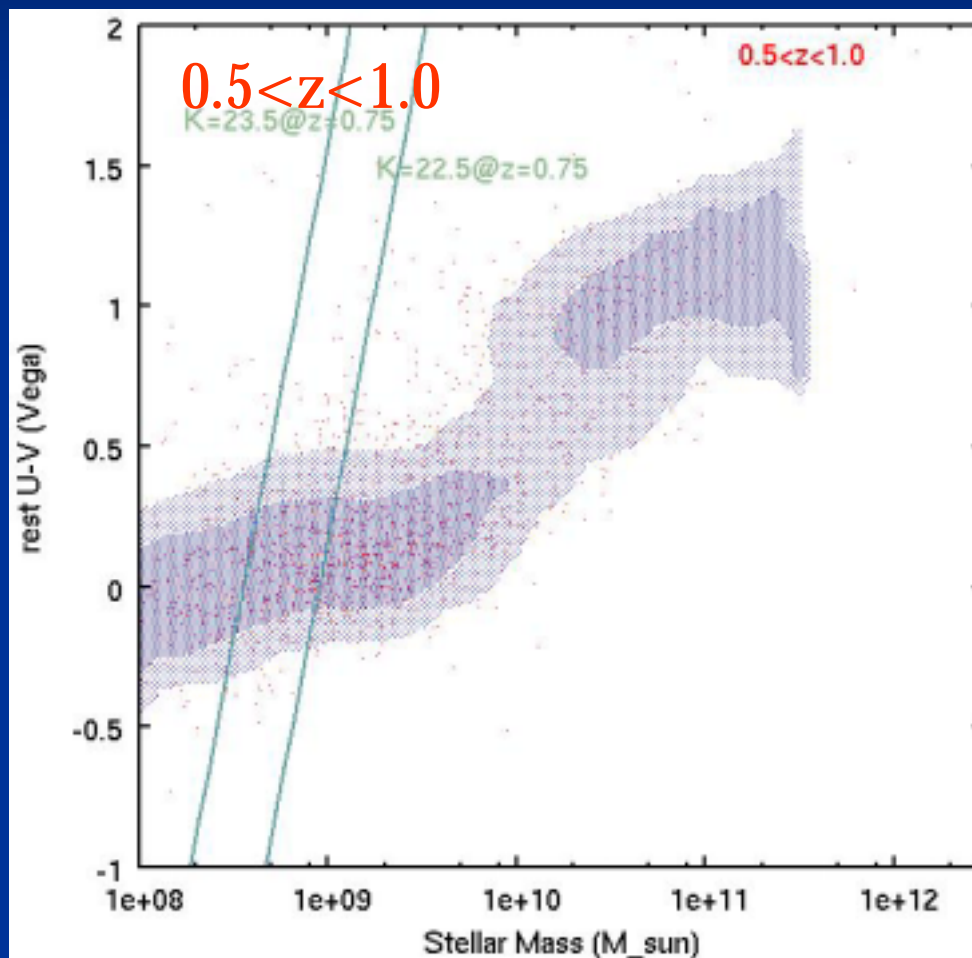
$z < 1$ では青い銀河の恒星質量密度は
強い進化を示さない
赤い銀河は $z = 0 \sim 1$ の間で増加を示す

一方で $z < 1$ での星形成率密度の
大部分を青い銀河が担っていて
星形成により予測される質量密度進化
は青い銀河の方がずっと大きい

青 → 赤のtransitionが起こっている？

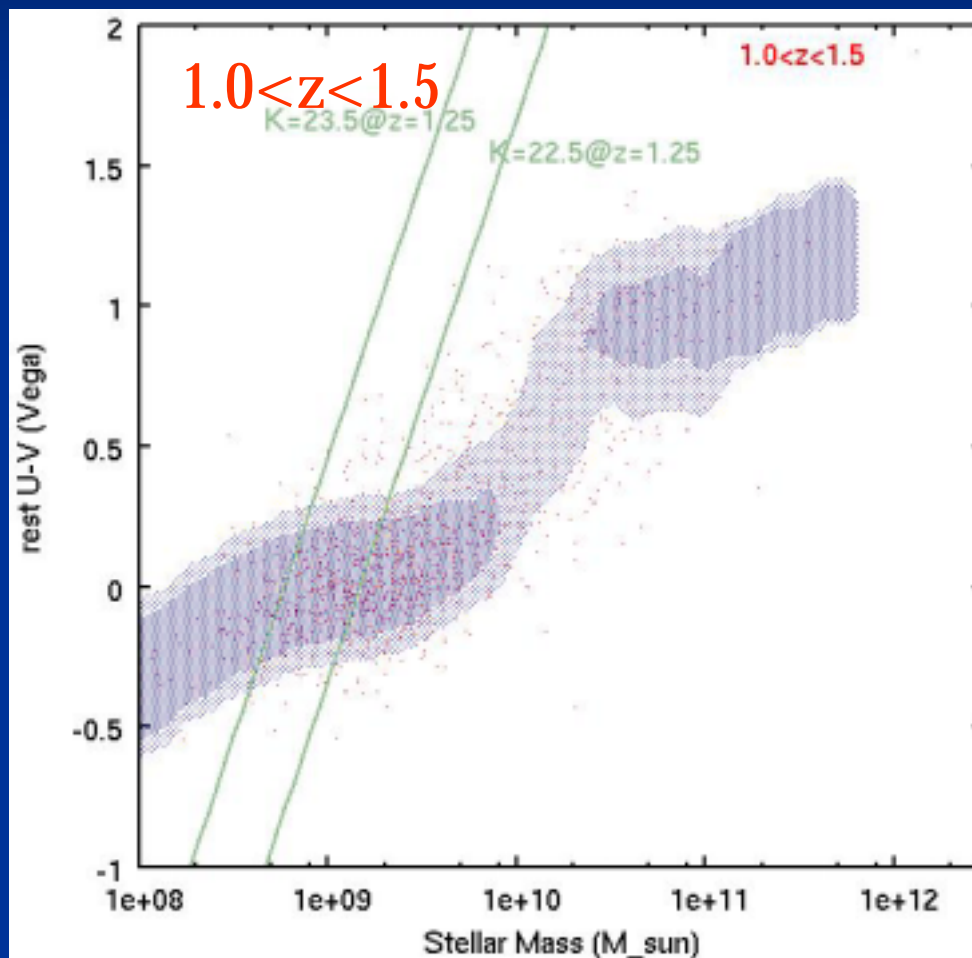


rest U-V 分布の進化 ($z > 1$)



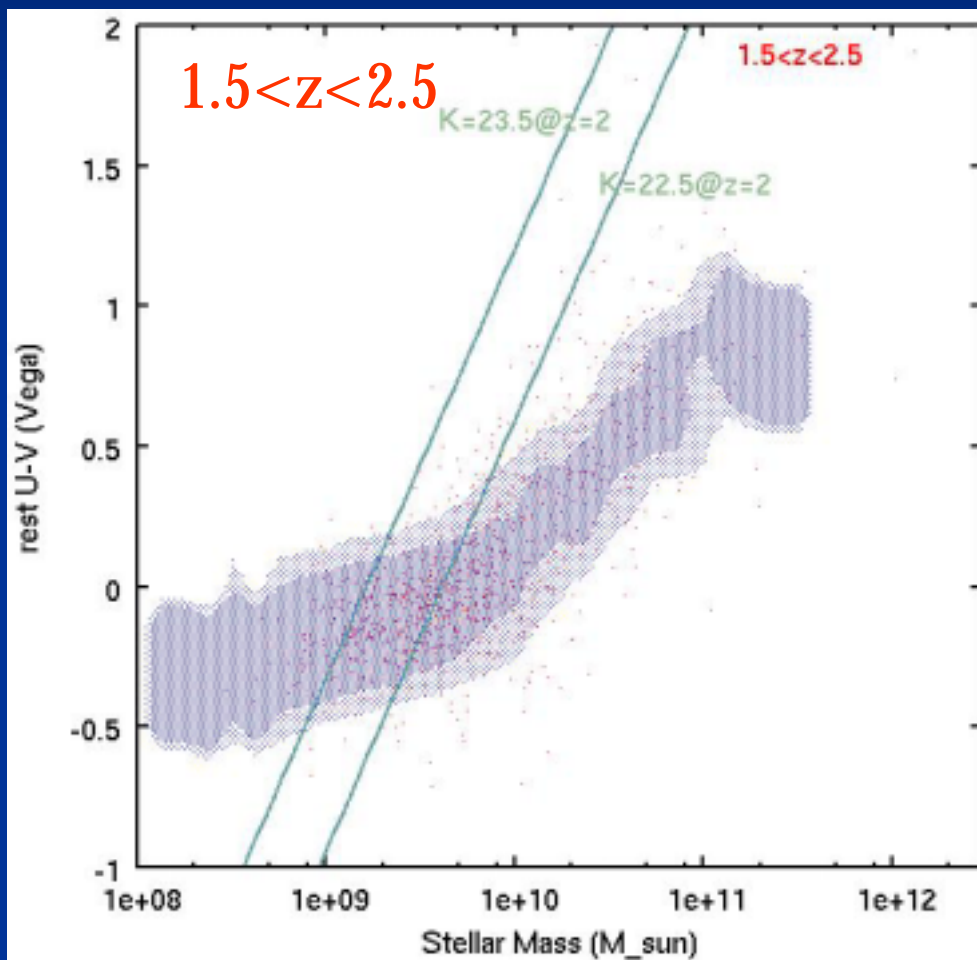
各質量における
静止系色分布

rest U-V 分布の進化 ($z > 1$)



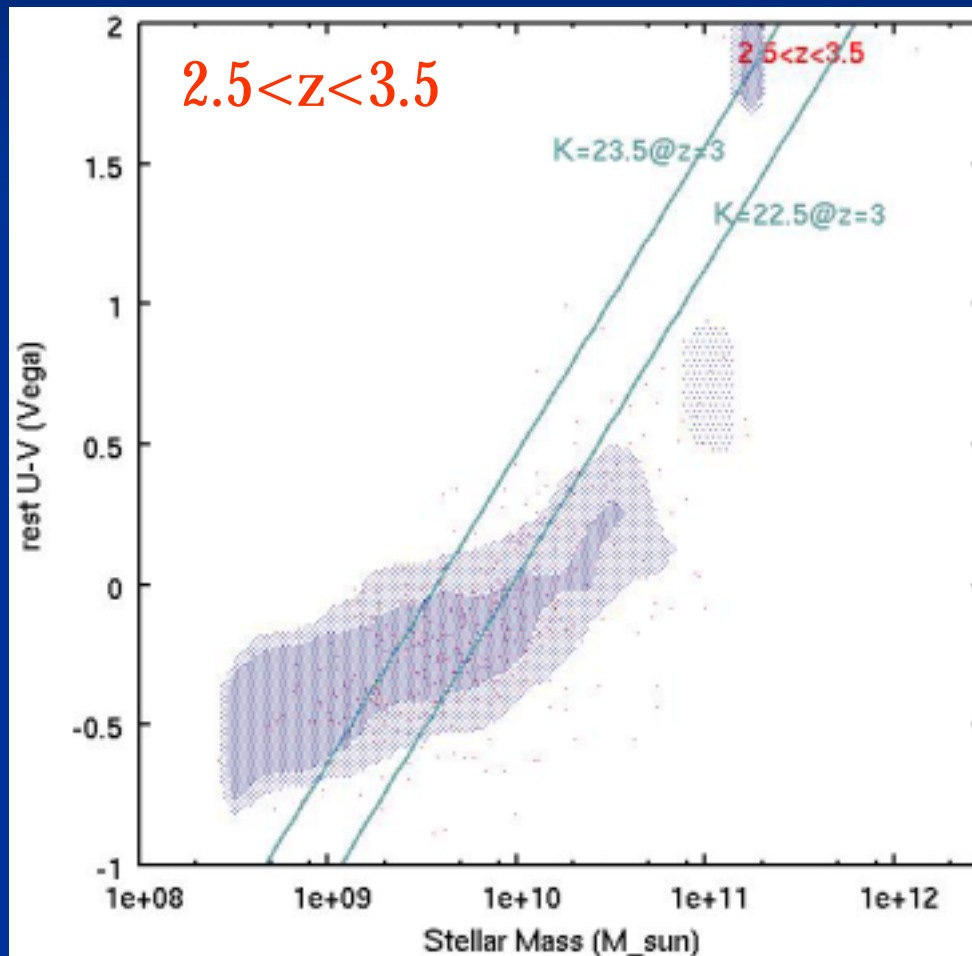
各質量における
静止系色分布

rest U-V 分布の進化 ($z > 1$)



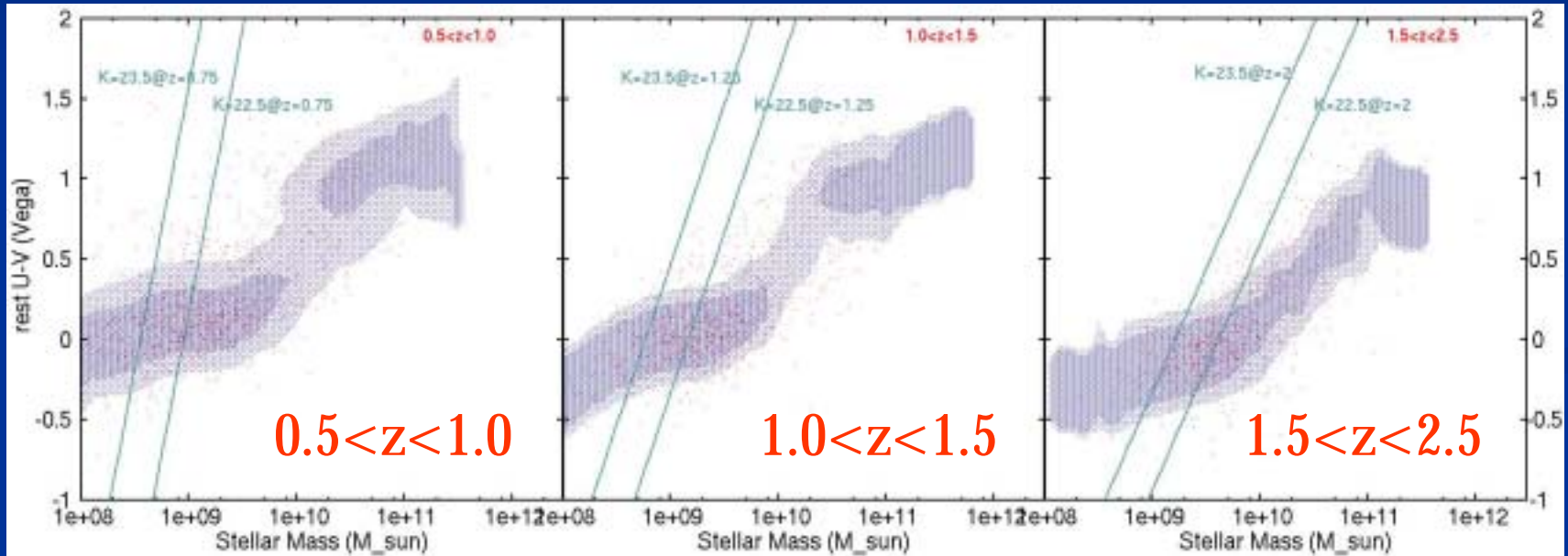
各質量における
静止系色分布

rest U-V 分布の進化 ($z > 1$)



各質量における
静止系色分布

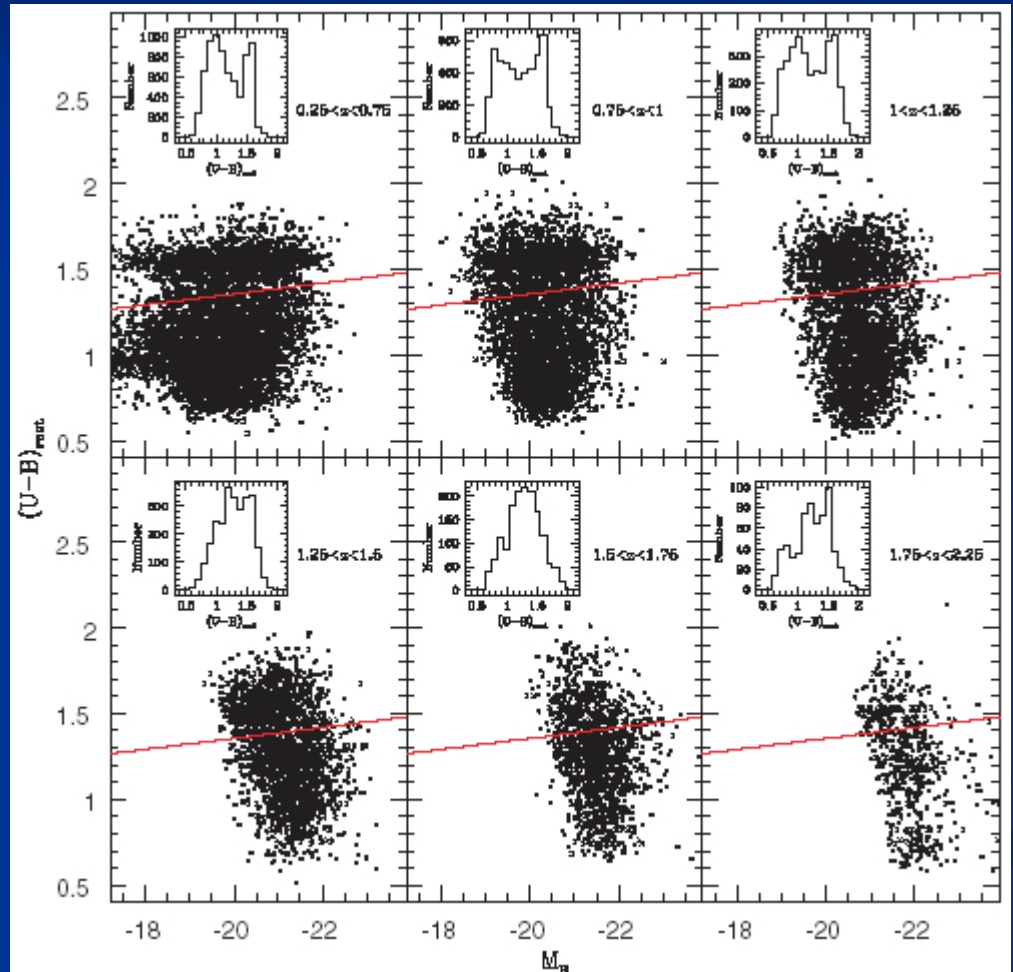
rest U-V 分布の進化 ($z > 1$)



どの赤方偏移でも大質量銀河ほど赤い傾向
低質量銀河の方が強い色進化を示しているようだが
 $z \sim 2$ では大質量銀河もはっきり青くなり始めて、
もはやあまりbimodalという感じではない

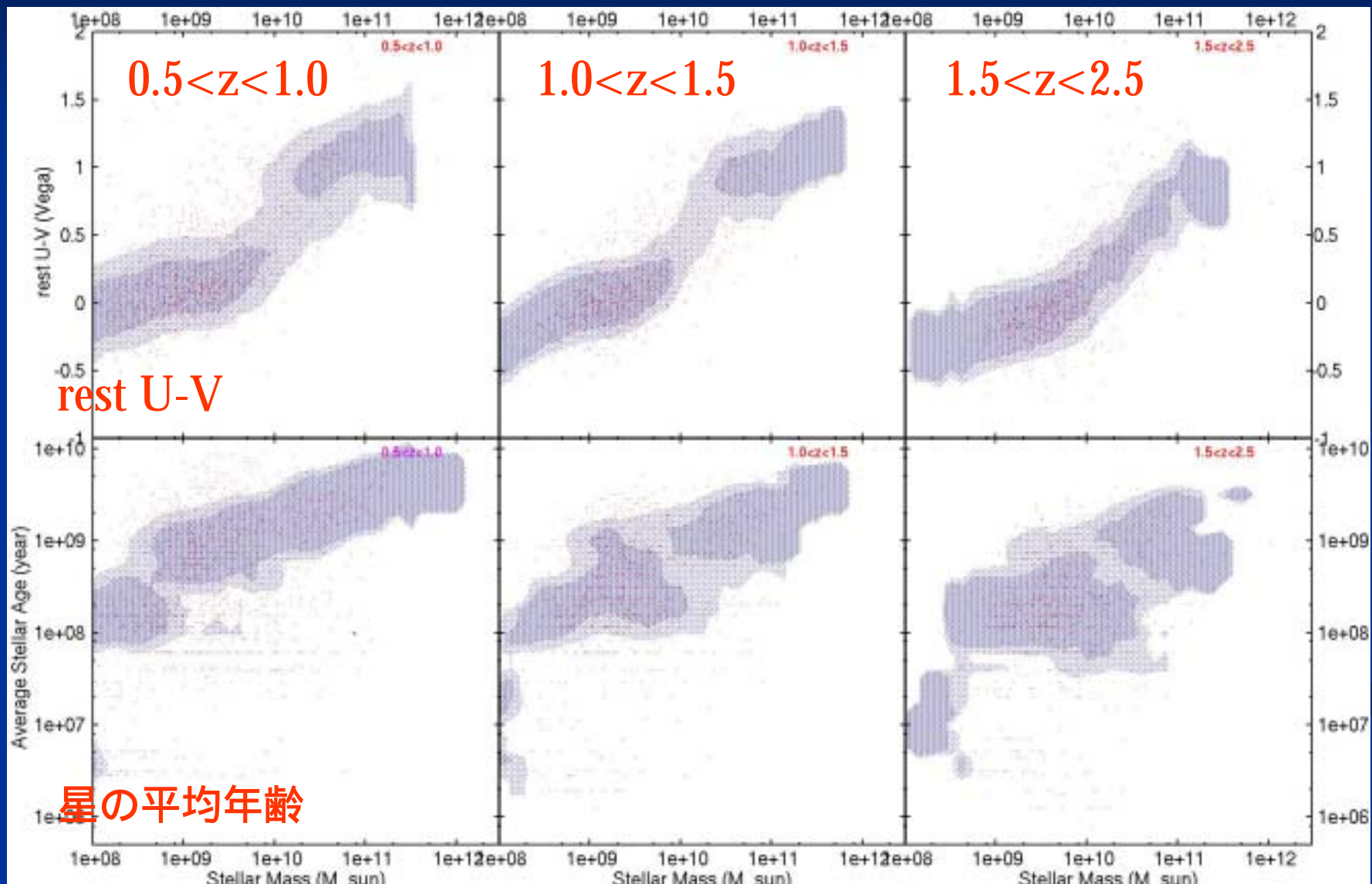
色分布のbimodality

SXDS

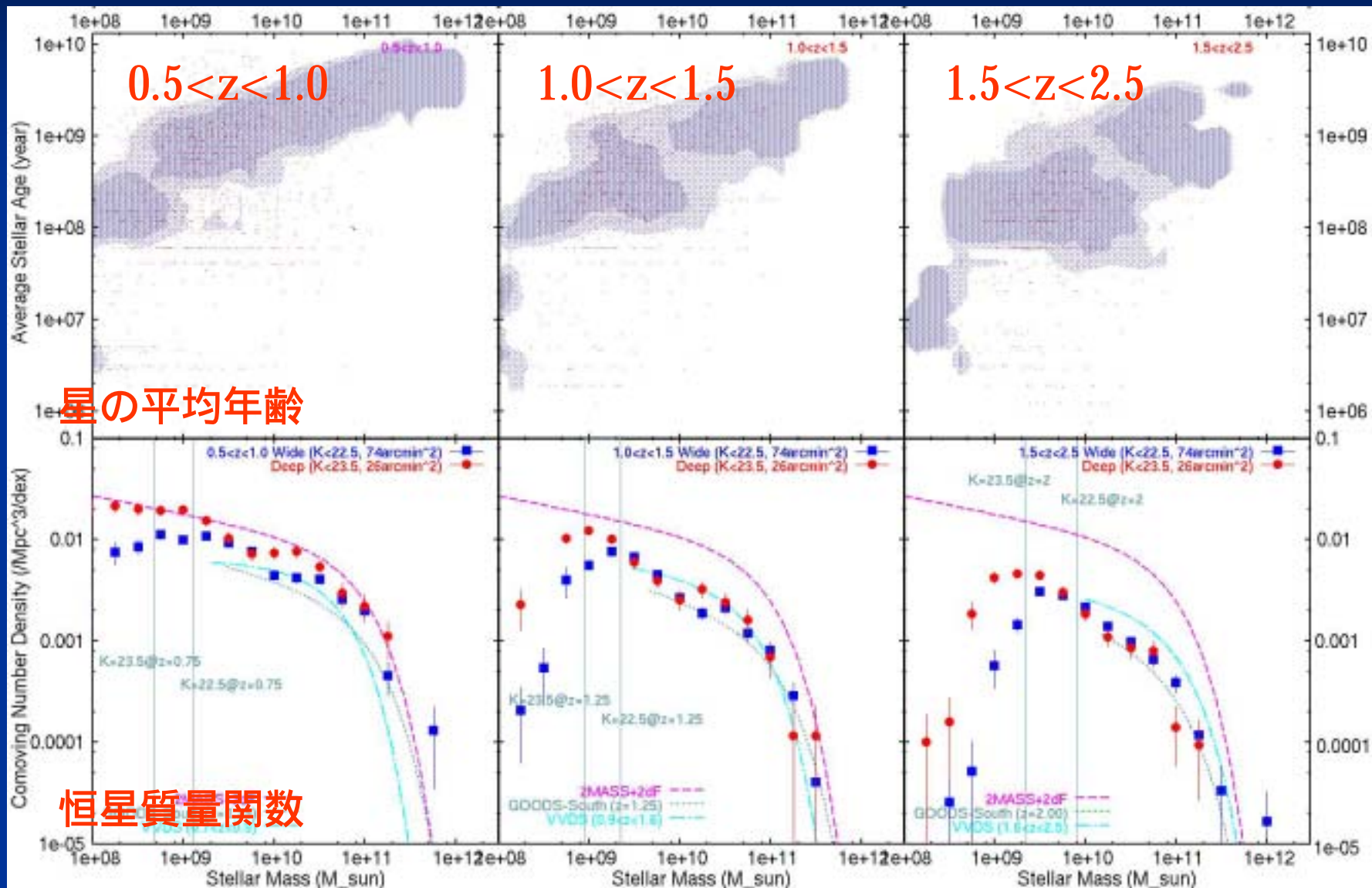


$z > 1.5$ ではbimodalityが
見られなくなる

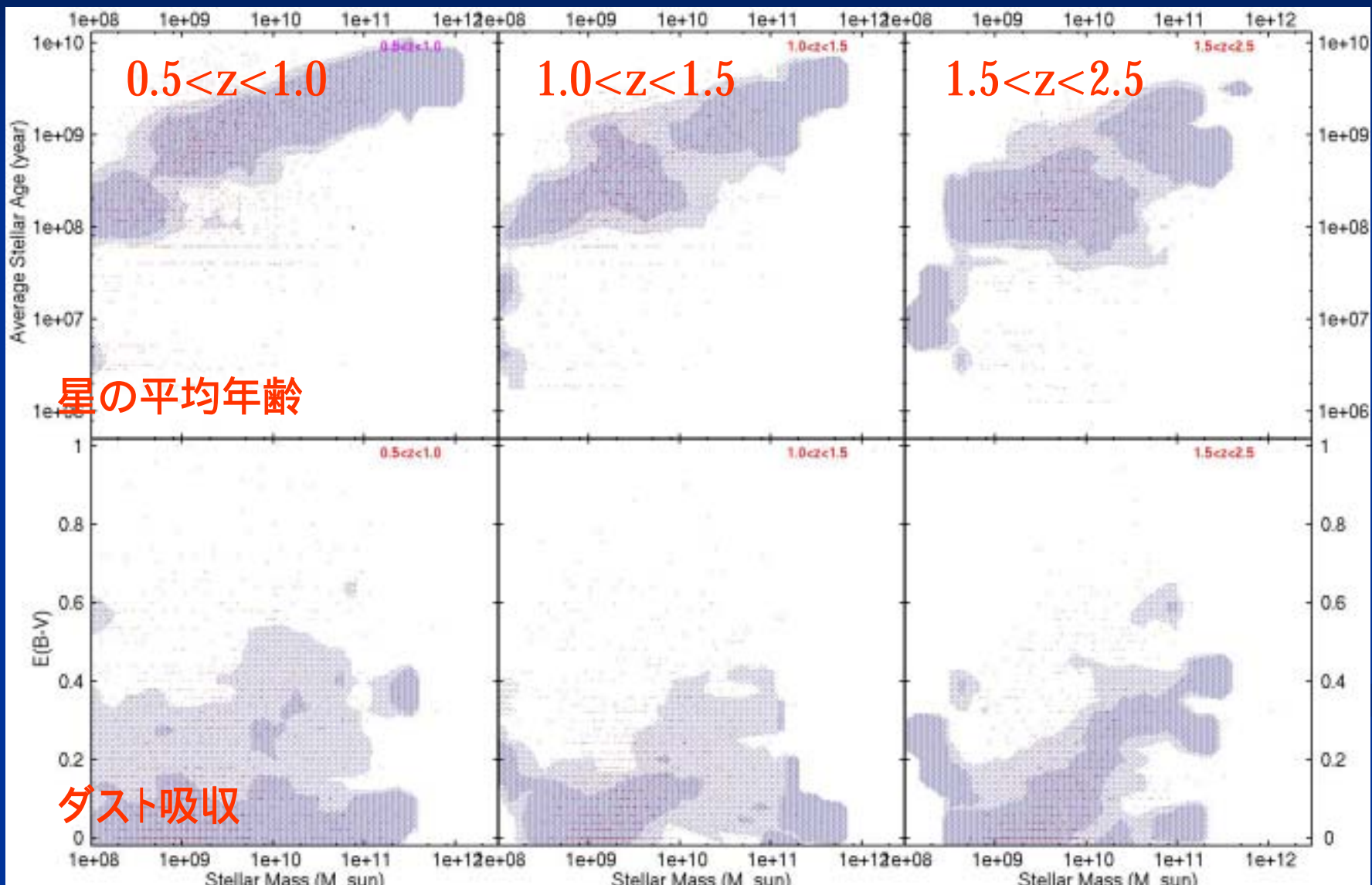
星の平均年齢分布



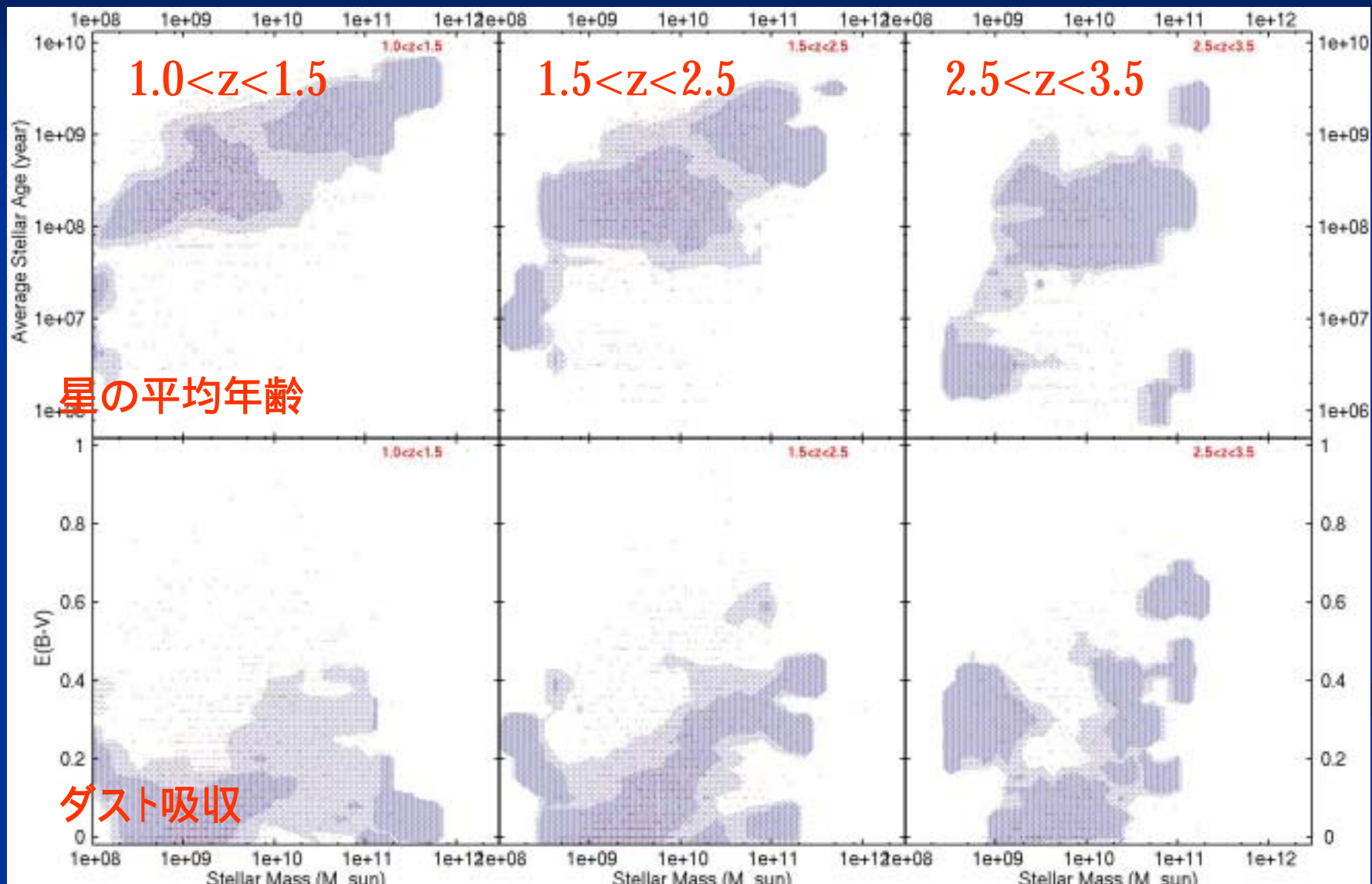
星の平均年齢分布



星の平均年齢とダスト吸収

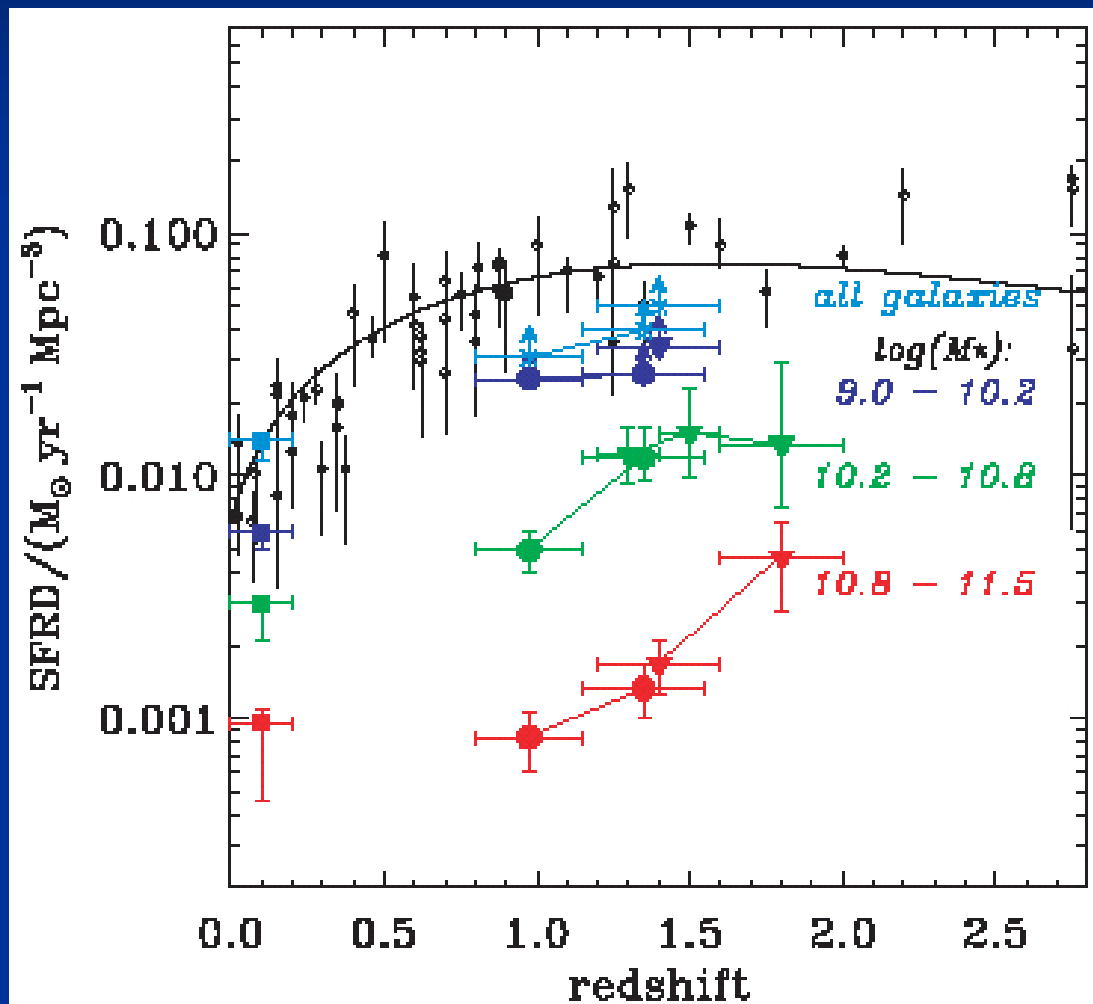


星の平均年齢とダスト吸収



恒星質量別の星形成率密度

GDDS



$z > 1$ へ遡るにつれて、
大質量銀河の星形成が
活発になってくる

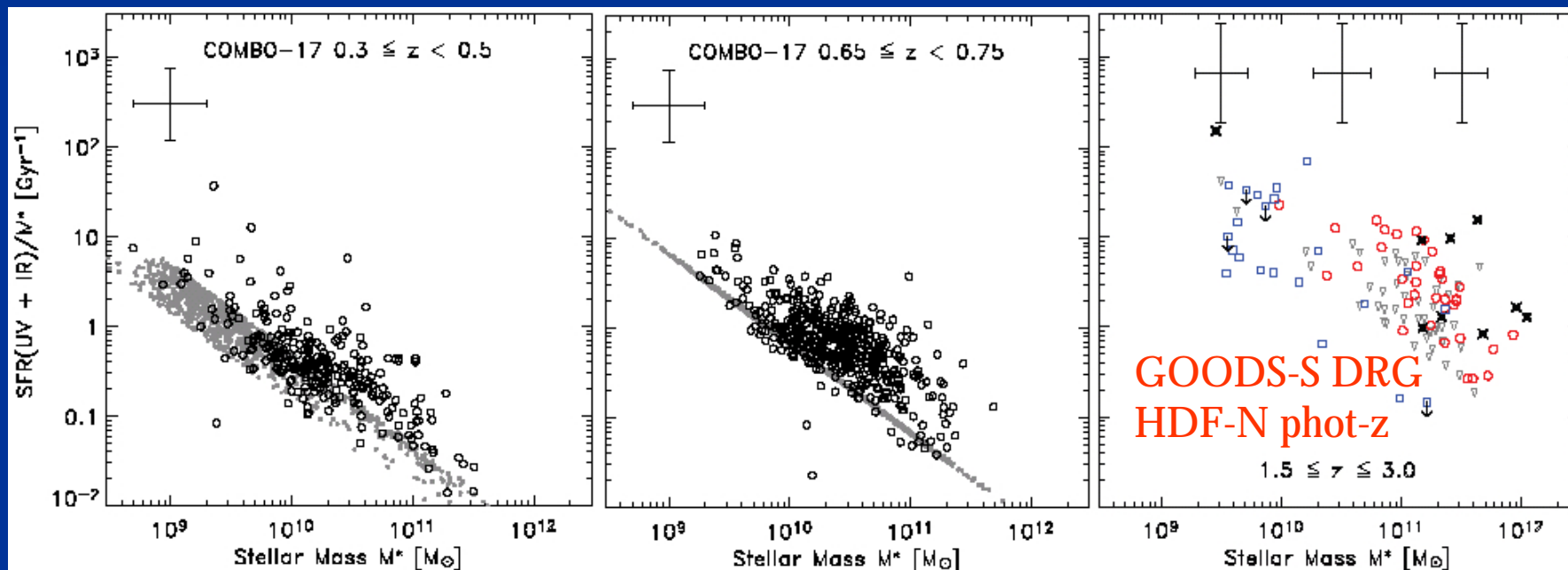
恒星質量当たりの星形成率

星形成率/恒星質量

$0.3 < z < 0.5$

$0.65 < z < 0.75$

$1.5 < z < 3.0$

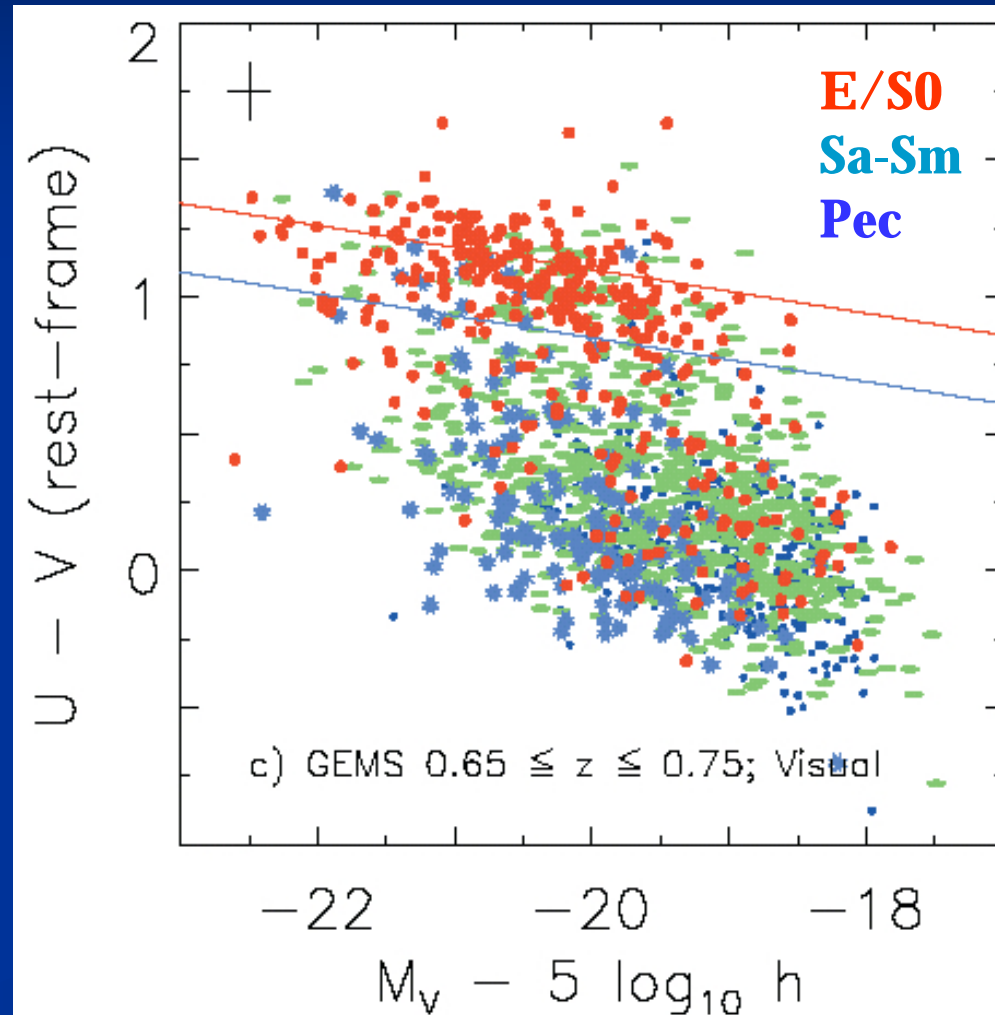


Papovich et al. 2006

$z \sim 2$ では大質量銀河の単位質量あたりの星形成率がかなり大きくなっている

形態進化

GEMS(COMBO17)



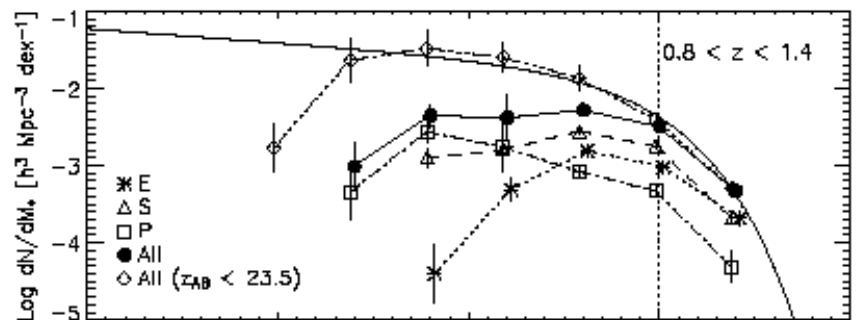
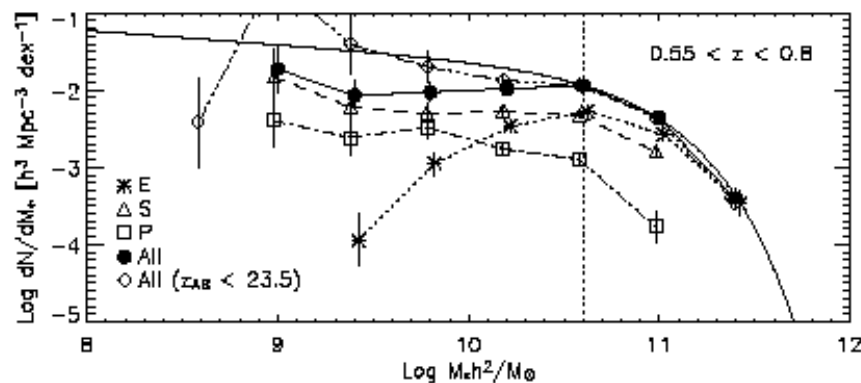
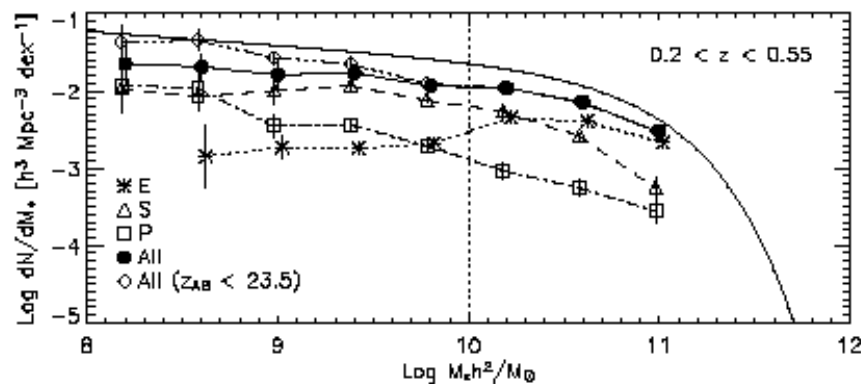
$z \sim 0.7$ でも近傍と同じように
早期型形態の銀河は赤く明るい
(質量が大きい)傾向があり、
晩期型形態の銀河は青い色分布
を示す

形態別 恒星質量関数

Low-z ではmassive-endでは早期型、
低質量側では晩期型形態の銀河が
卓越している

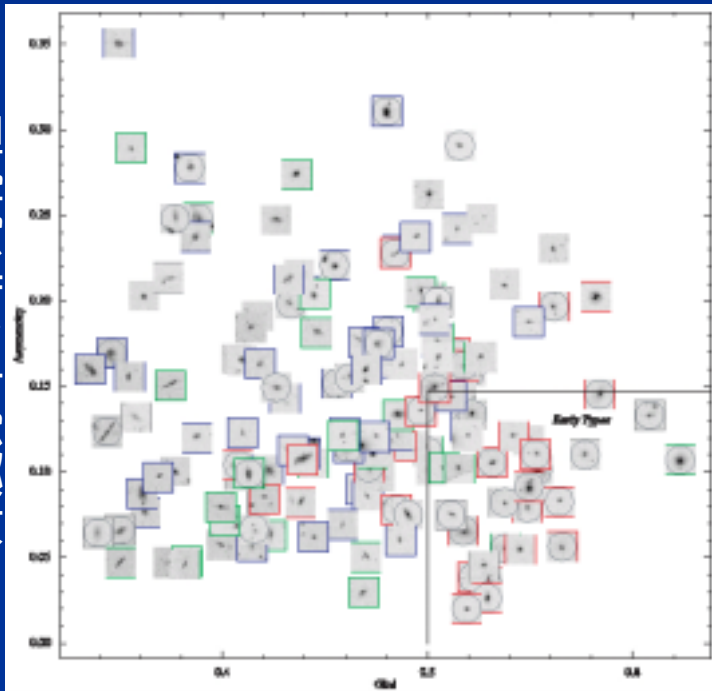
$z > 1$ へ遡ると、massive-endでの
早期型銀河の割合が減って、
ディスク銀河の方が卓越してくる

GOODS



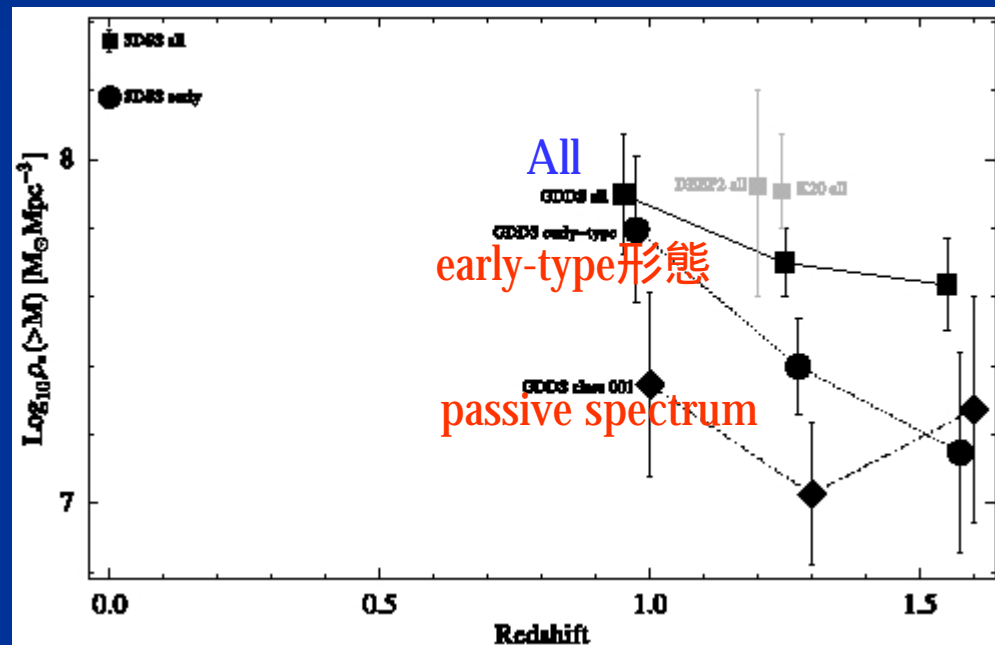
early-type 銀河の質量密度進化

形態分類



Gini 係数 (輝度集中度の目安)

$M_s > 10^{10.5} M_\odot$ の銀河の恒星質量密度進化

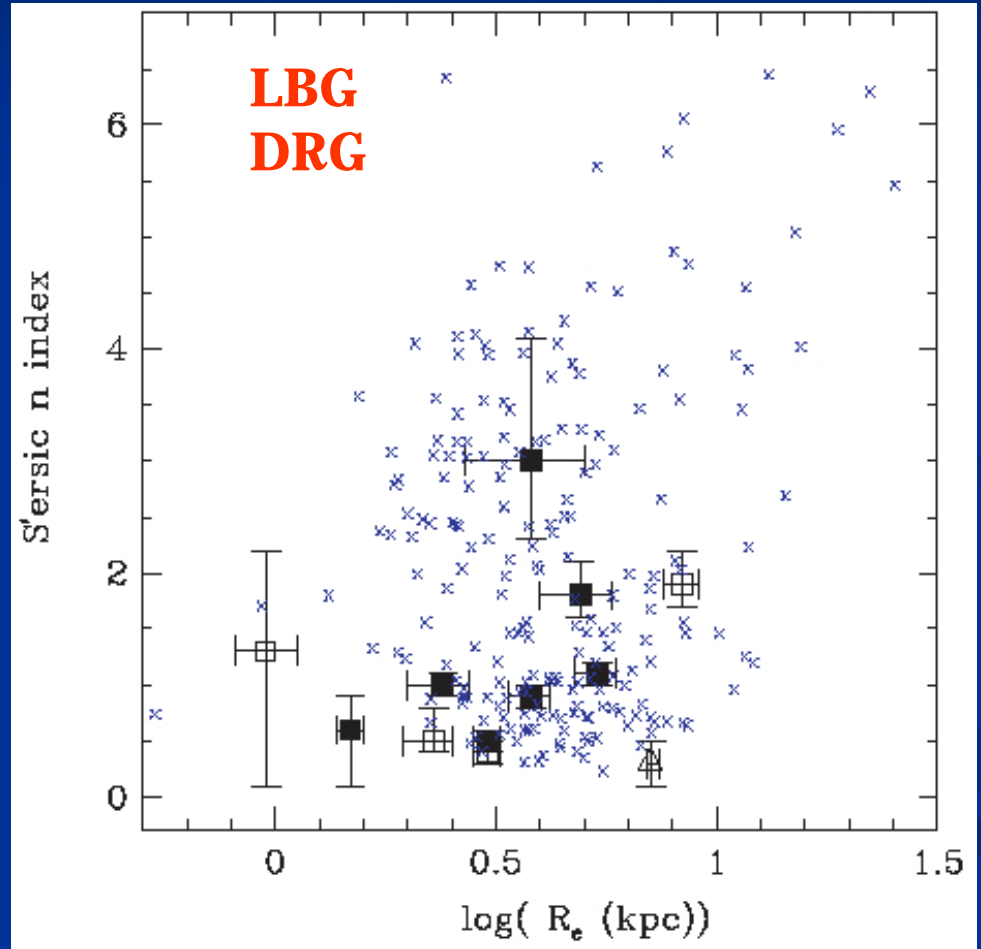


GDDS

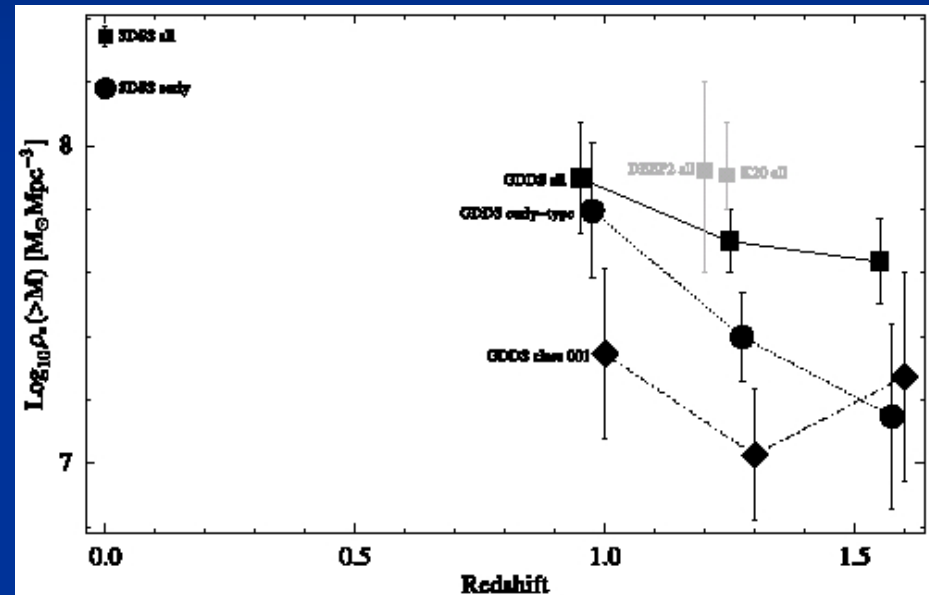
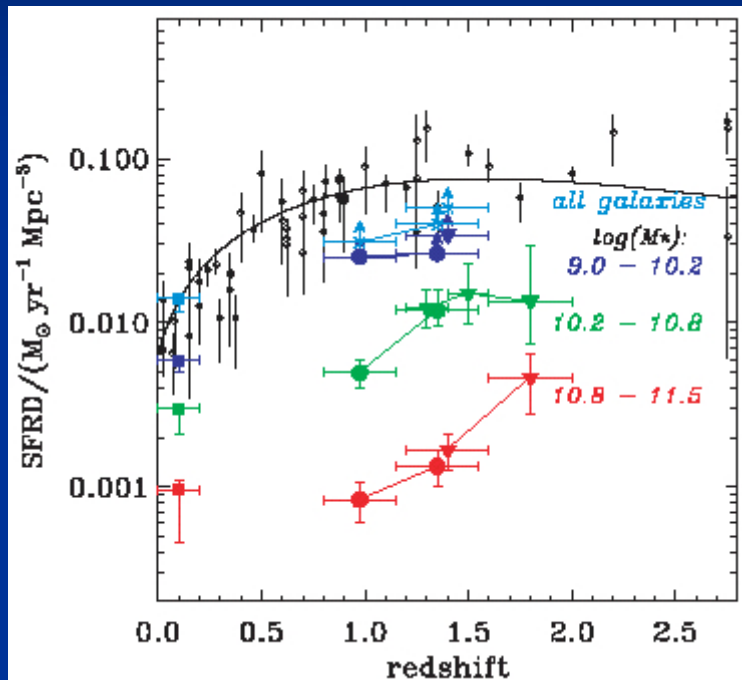
Abraham et al. 2007

$z \sim 3$ での形態分布

LBG、DRGの静止系可視域での形態はほとんどがディスク的な輝度分布を持っている



星形成とearly type形態



大質量銀河の星形成活動が弱まってきた時期
(しかし大質量銀河の数密度は増加している)に
早期型銀河の数が急速に増加した？

爆発的星形成が終わってから少し時間が経ってから早期型形態ができる？
Gas reservoir が少なくなった状態でmergingすると早期型形態ができる？

まとめ

- 恒星質量密度は $z > 1$ で強く進化しているようで、 $z \sim 1-2$ で現在の宇宙の星の半分程度が形成された可能性がある
- 恒星質量関数の進化を見ると、 $z > 1$ では大質量銀河も低質量銀河と同様に数密度が減少しているようだ
- 色分布は $z > 1$ でも大質量銀河ほど赤いという傾向は維持したまま、赤方偏移とともに青い方へシフトしていく($z \sim 2$ では大質量銀河も強い色進化)
- $z \sim 2$ では大質量銀河も(ダスト吸収をともなって)活発に星形成を行っている
- 早期型形態は $z \sim 1-1.5$ あたりで急速に形成された可能性がある

これから

■ 広さと深さ

広さ: Field-to-field variance、環境の影響

深さ: 恒星質量関数の形、質量密度計算の精度、大質量銀河の形成

■ 分光観測

正確な赤方偏移: 恒星質量関数の進化、星の年齢、ダスト吸収
phot-zのキャリブ (特に近赤外分光による赤い銀河)

ガスの速度情報、instantaneous SFR、金属量情報

■ 高解像度撮像

深く、広く --- HST/JWST, 地上AO

■ ガス

各銀河がどれだけのガスを持っているか --- ALMA, SKA?