

光赤外将来計画サイエンスWG

『銀河・銀河団、銀河形成』班レポート

Version: 2003.08.21

児玉 忠恭	国立天文台理論天文学研究系（班長）
太田 耕司	京都大学宇宙物理学教室
小林 尚人	東京大学天文学教育研究センター
須佐 元	立教大学物理学教室
西 亮一	新潟大学物理学教室
松原 英雄	宇宙科学研究所赤外線天体物理学部門
山田 亨	国立天文台光赤外天文学研究系

目次

1	全体の方向性	2
2	初代天体の誕生と宇宙の再電離	7
2.1	初代天体の誕生	7
2.1.1	H ₂ 分子輝線	7
2.1.2	Ly α 輝線	10
2.2	宇宙の再電離	10
2.2.1	H α 連続光ブレイク	10
3	黎明期の銀河	12
3.1	原始銀河、 QSO 探査	12
3.2	背景紫外輻射場と銀河形成、 フィードバック	13
3.3	形成途上銀河の内部構造と星形成	14
3.4	ダストに包まれた原始銀河	22
3.5	銀河形態の発現	23
3.6	活動銀河核と銀河形成との関わり	23
3.7	QSO 吸収線系と銀河の初期進化	25
4	銀河宇宙の大局的進化	31
4.1	building blocks から銀河、 銀河団へ	31
4.1.1	銀河スケールのアセンブリー	31
4.1.2	銀河団スケールのアセンブリー	32
4.2	銀河基準平面の形成、 進化	35
4.3	環境効果と銀河特性の変遷	36
4.4	宇宙の大局的星形成史	38
5	まとめ	41

次世代の銀河・銀河団天文学

1. 初代天体の形成と宇宙の再電離 ($5 \lesssim z \lesssim 20$) :

- * 宇宙では最初いつ、どのような天体が生まれたか？
- * それは宇宙全体にどのような影響を及ぼしたか？

⇒スペース 10m / 地上 30m、可視～中間赤外の狭帯域サーベイ、
分光 ($\text{Ly}\alpha$, H_2 , $\text{H}\alpha$)

2. 黎明期の銀河 ($1 \lesssim z \lesssim 10$) :

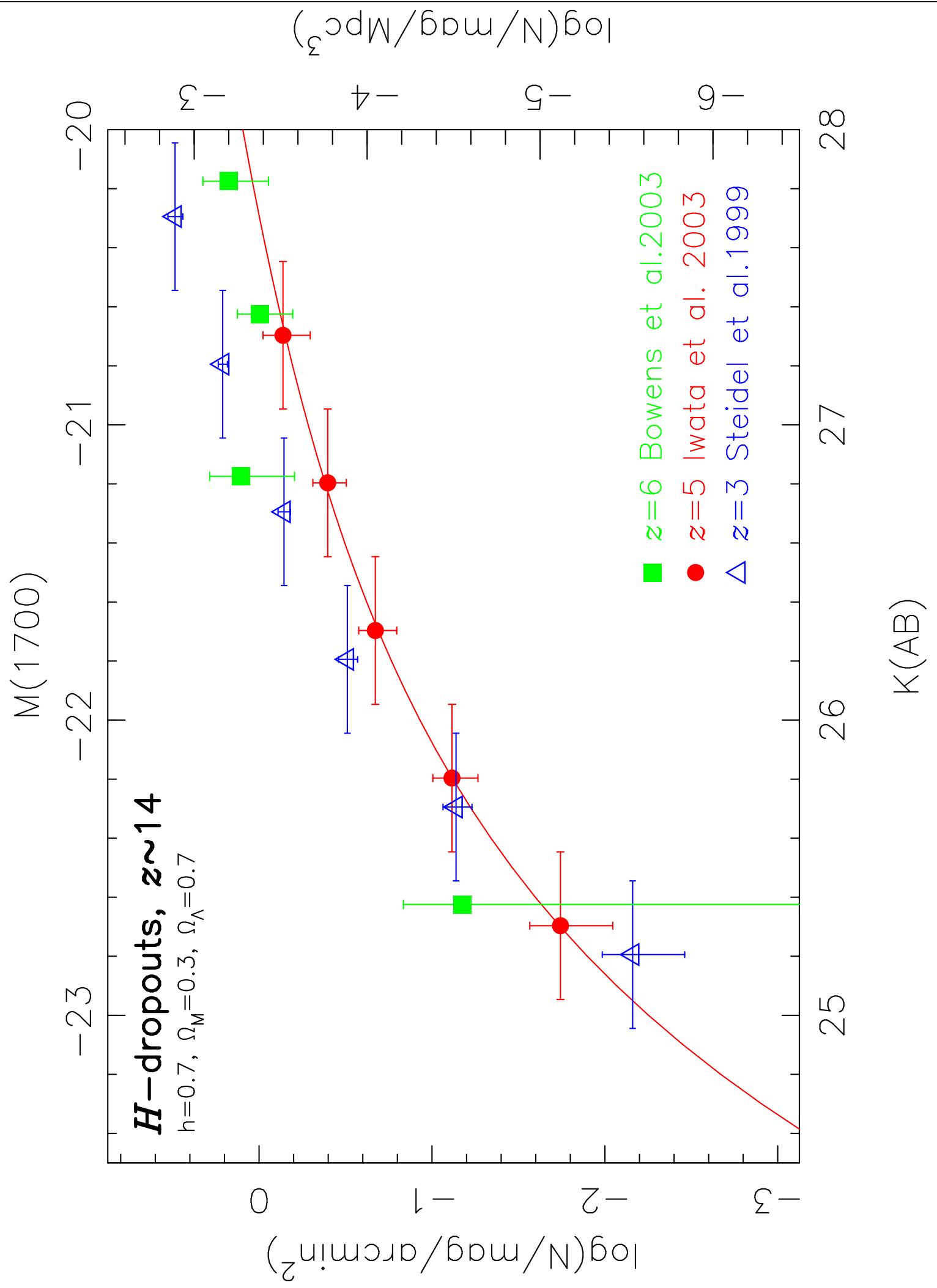
- * 形成途上の銀河はどのような構造、物理状態にあったか？
- * 初期星形成とフィードバックはどのように行われたか？
- * 銀河形態の初期分離はどのように起ったか？

⇒地上 30m / スペース 4m、高空間分解能の面分光 ($R > 3000$)

3. 銀河宇宙の大局的進化 ($0 < z \lesssim 5$) :

- * 銀河はその後どのようにアッセンブリしたか？
- * 銀河はその後どのように星形成を行ったか？
- * 銀河はその後どのように形態変遷を行ったか？

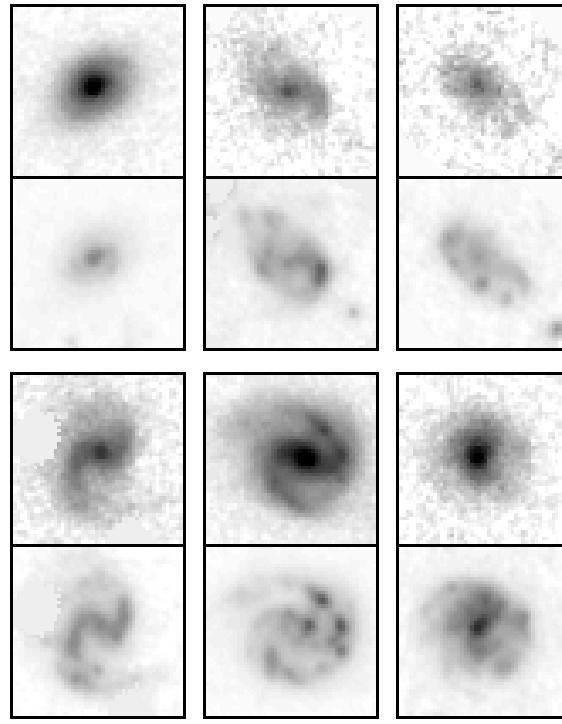
⇒スペース 4m、 $KLMN$ バンド (2~10 μm) の広視野撮像、
 $\text{H}\alpha$ 分光、遠赤外～サブミリのダスト放射



Morphology Transition between $z = 1$ and $z = 2\text{-}3$ in HDF-N

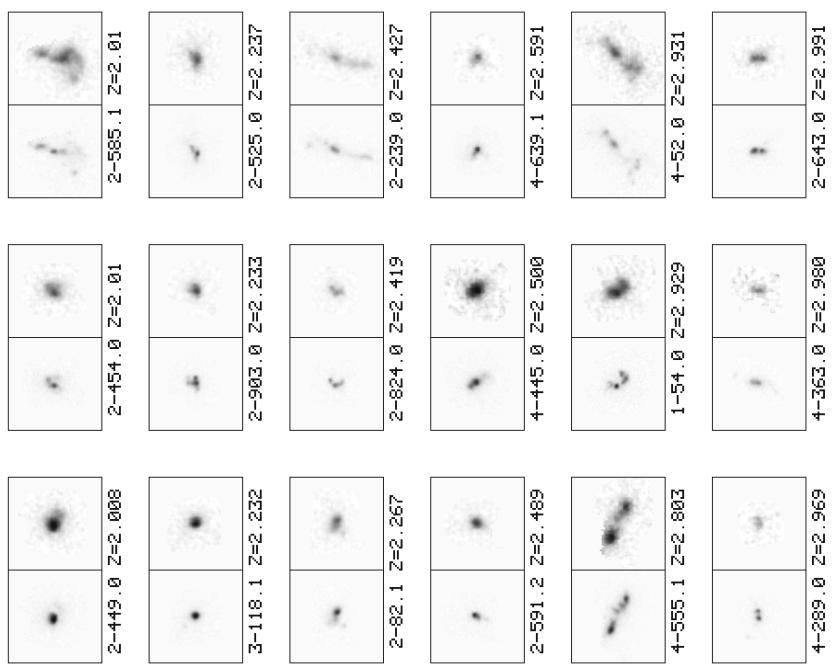
$z \sim 1$ Spirals

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



$z = 2\text{-}3$ LBGs

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

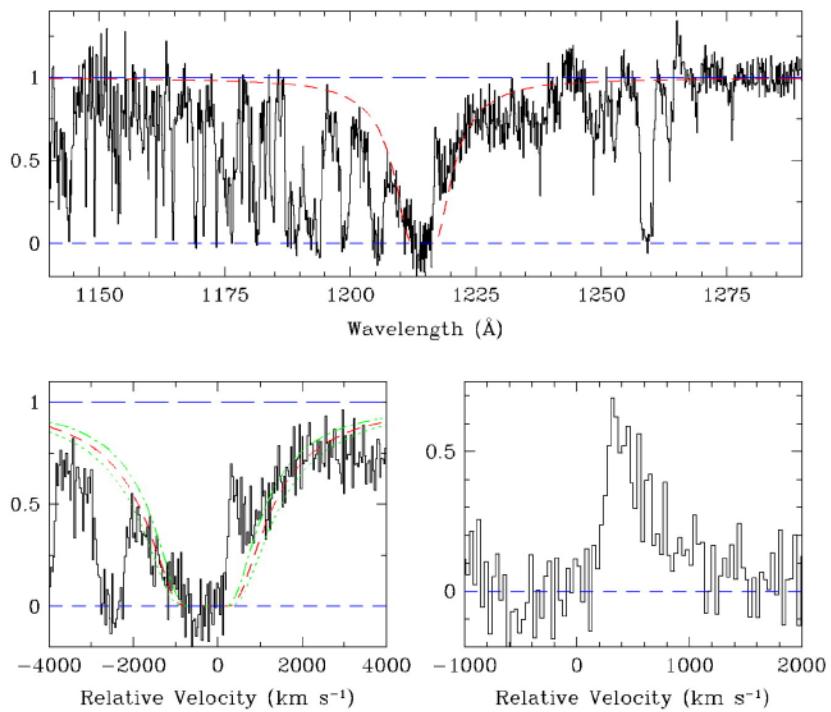


$$4'' = 32 h_{70}^{-1} \text{kpc}$$

Dickinson (2000), astro-ph/0004027, 0004028

Velocity Structure of a Lensed High-z Galaxy

MS1512-cB58 @ $z = 2.73$ ($\times 30$ magnification)

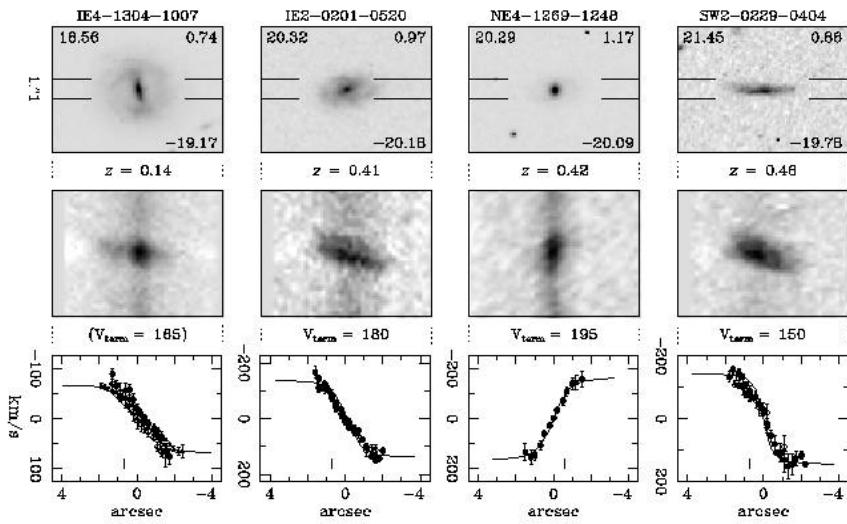


Keck-II, 4hrs, resol.=58km/s, Pettini et al. (2002), ApJ, 569, 742

★ $\Delta v = 1000$ km/s, $M_{\text{baryon}} \sim 10^{10} M_{\odot}$, Outflow ~ 255 km/s

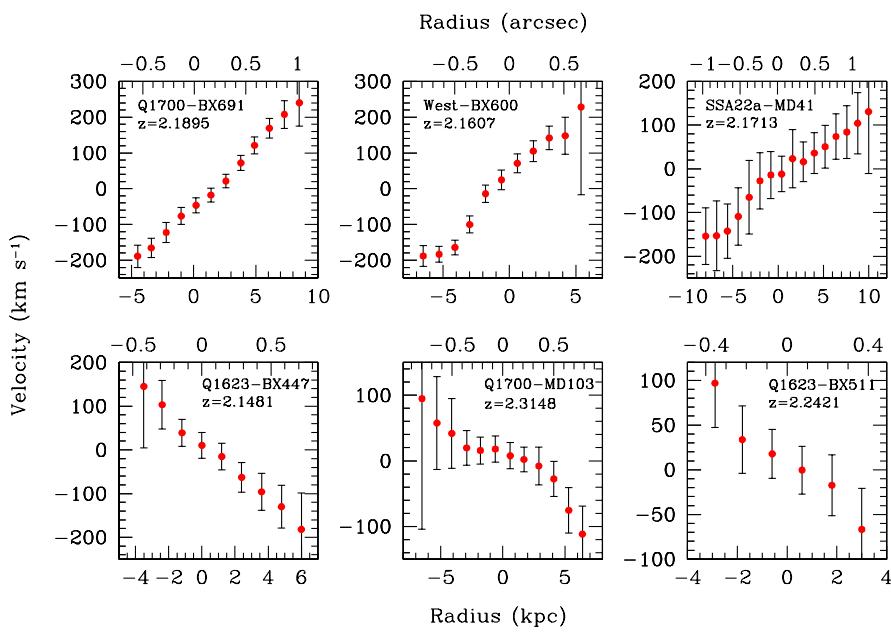
★ (O, Mg, Si, P, S) ~ 0.4 solar, (Mn, Fe, Ni) ~ 0.1 solar

Tully-Fisher Relation at $z \sim 1$ and $z \sim 2.3$



$z = 1$, Vogt et al. (1996; 1997)

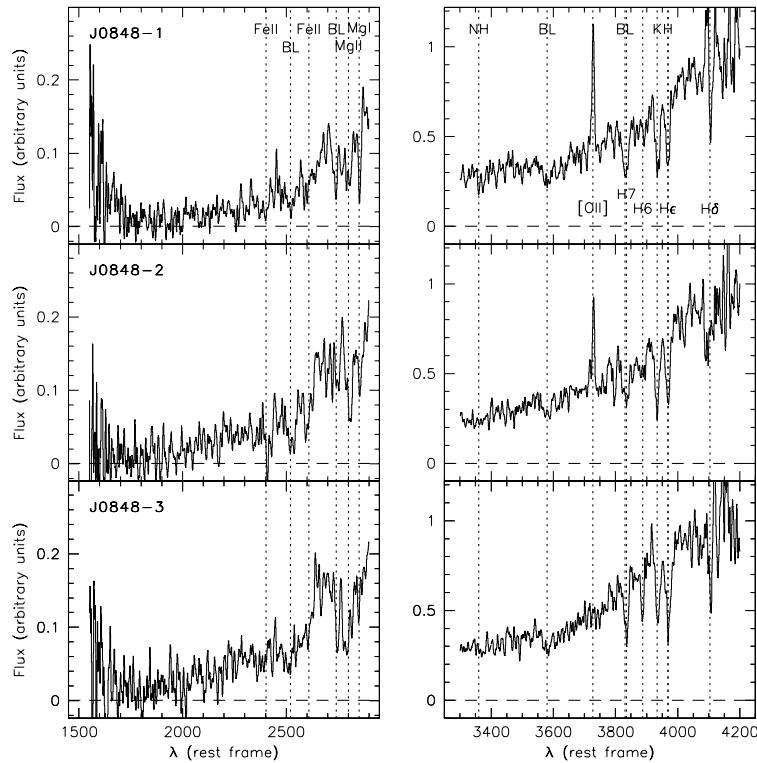
[Figure 1a (N. P. Vogt et al. 1997)]



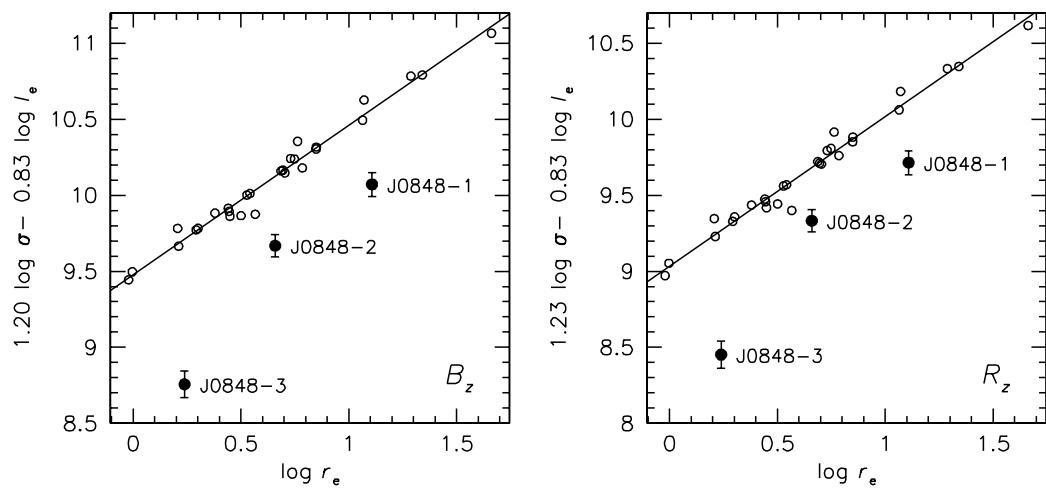
$2 < z < 2.6$, Erb et al. (2003)

Fundamental Plane of Early-Type Galaxies in $z = 1.27$ Cluster

– spectroscopic measure of M_{dyn} and M/L –



$K < 19$, $\Delta\sigma \sim 80$ km/s, Keck 12-hrs



van Dokkum et al. (2003)

Mass Assembly History of Galaxies and Clusters of Galaxies

Quantifying the “**Bottom-Up**” of the CDM Universe on:

- **Galaxy Scale** —

by **NIR Luminosity Function** as a function of Redshift,
in particular, the number density of massive galaxies

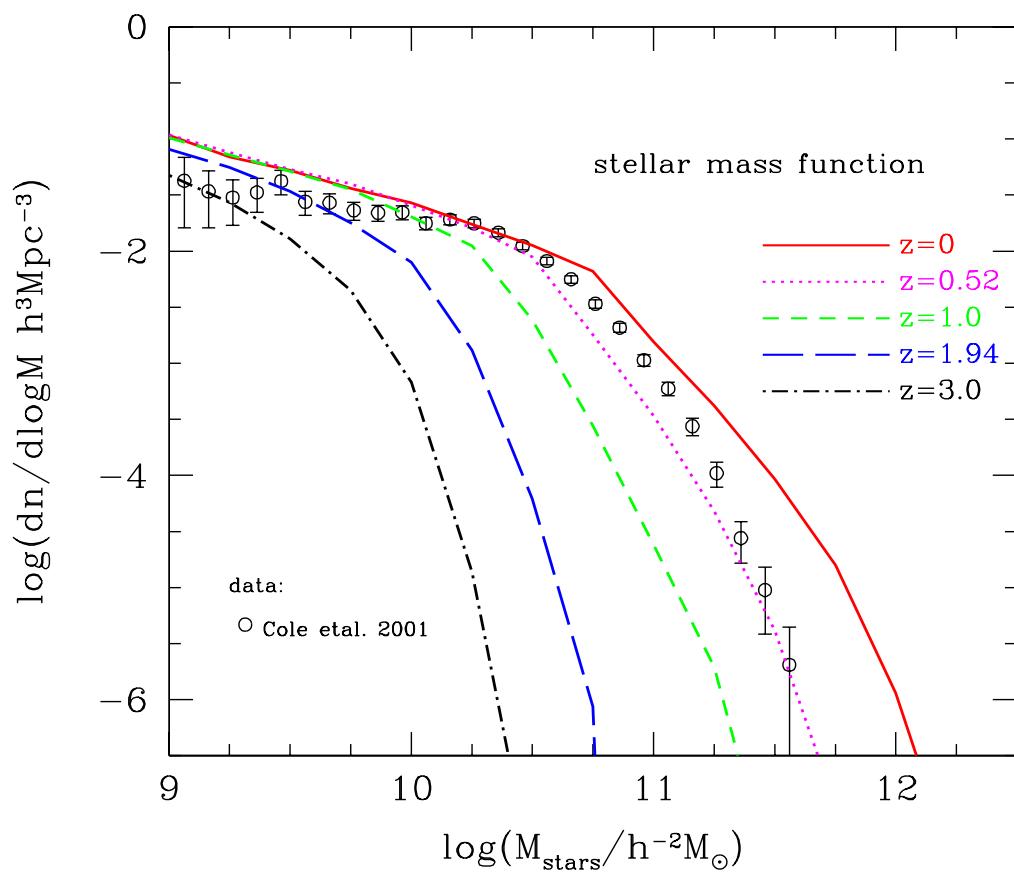
- **Cluster Scale** —

by **Correlation Function / Bias** as a function of Redshift,
of the mass selected galaxies.

— Two Essential Aspects —

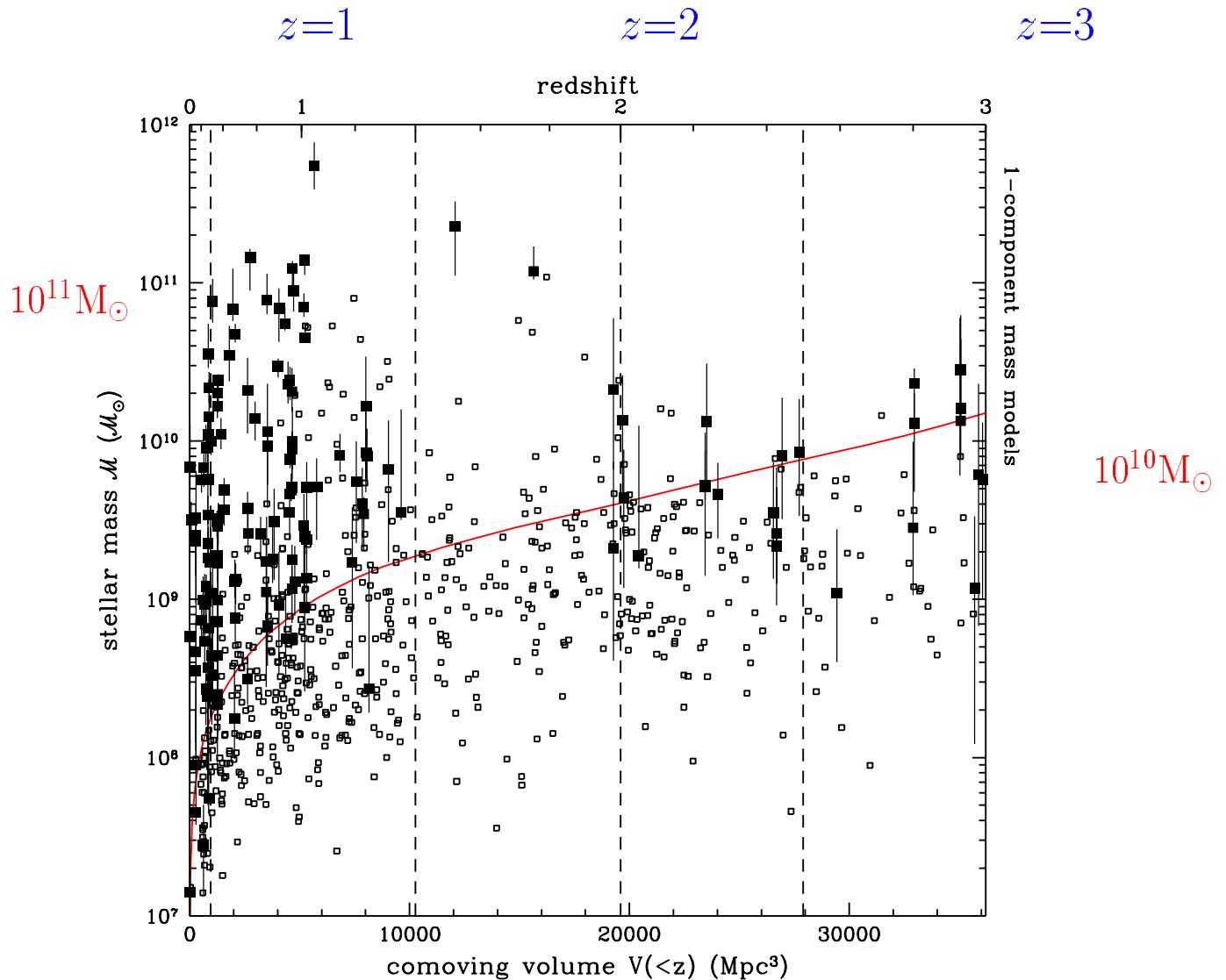
- We should go for **NIR (2–10 μ m)** to get **unbiased views** of the early Universe by **mass-selected galaxies** unlike the UV-selected LBG/LAE’s (SF/dust).
- We should survey **large volume** at least 2-3 deg², preferably 10 deg² to **average over LSS** and/or to have good **statistics** on rare objects (eg., massive galaxies).

Evolution of Galaxies Stellar Mass Function in the Hierarchical Galaxy Formation Model



Durham semi-analytic model, Baugh et al. (2002)

Stellar Masses of HDF-N Galaxies

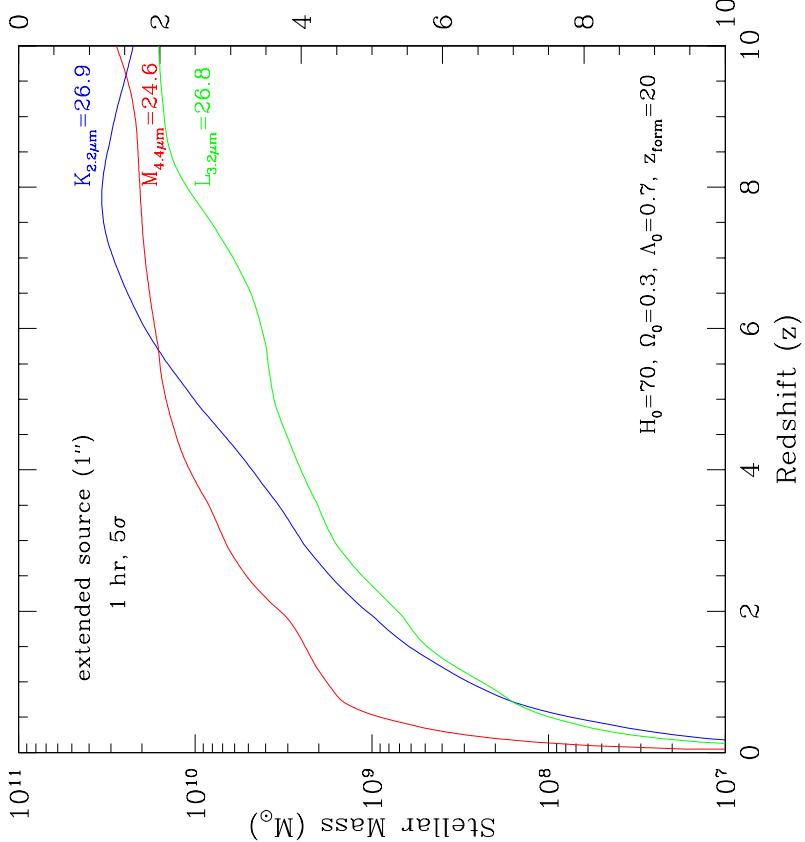
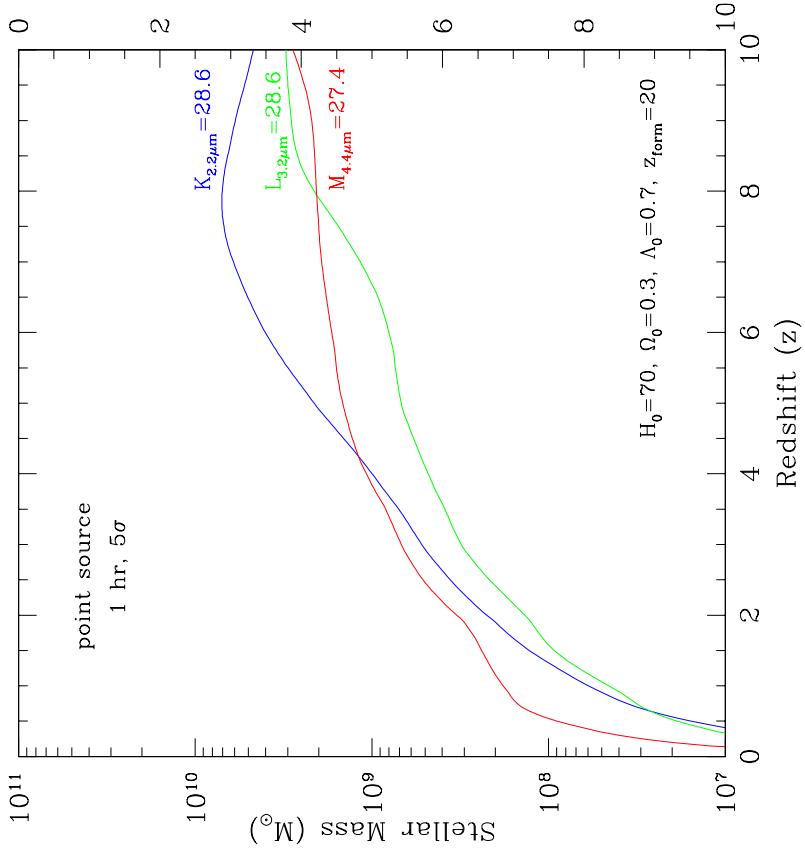


Dickinson et al. (2003)

- LBGs at $z=2-3 \longleftrightarrow \frac{1}{10}$ of mass at $z \sim 0$
- Mass assembly largely completed by $z=1-1.5$
(Field – Pozzetti et al. 2003; Clusters – Kodama & Bower 2003)

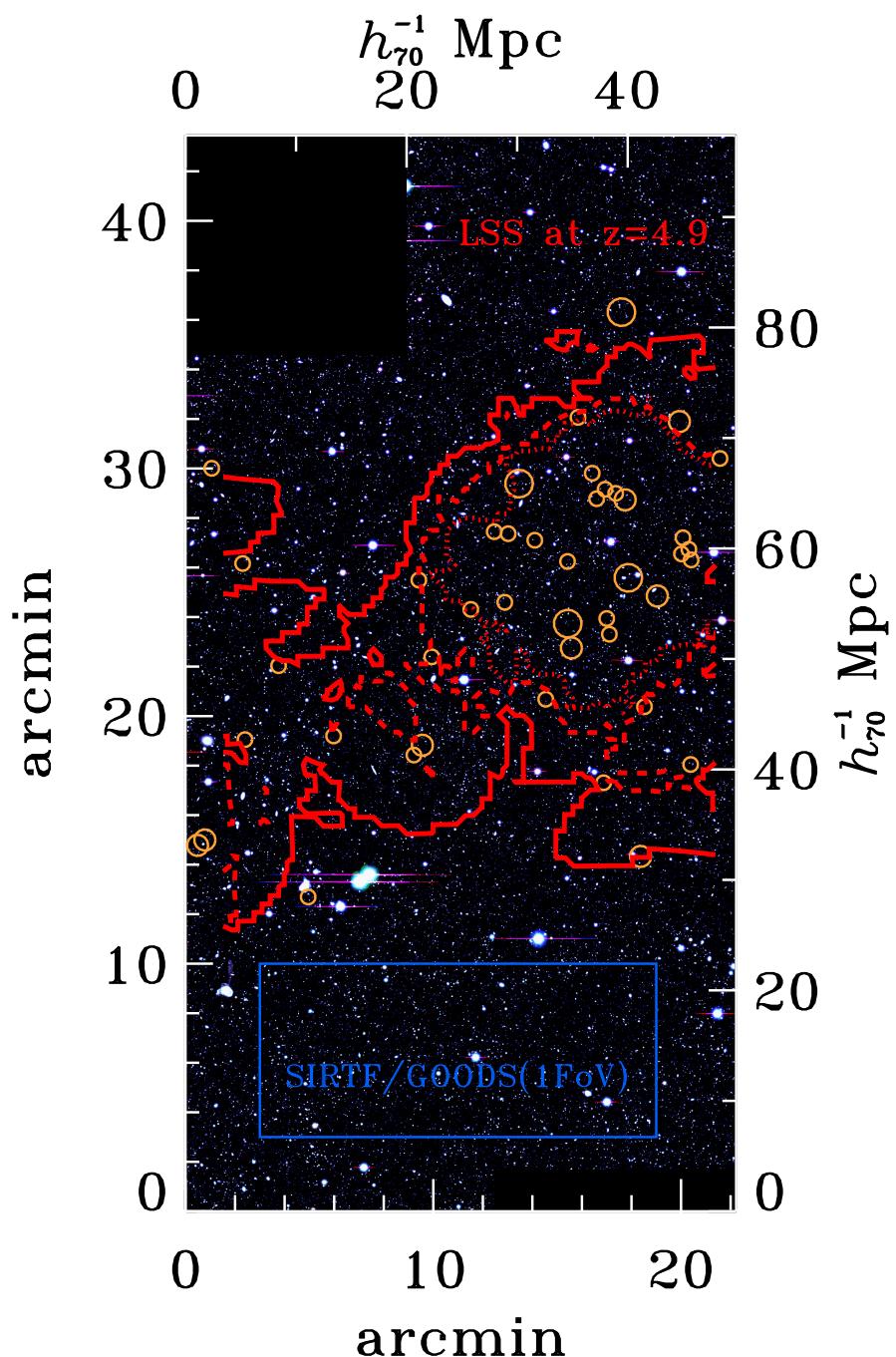
Limiting Mass (Magnitudes) of a 3.5m Space Telescope

Point Sources



Reaching down to $10^9 M_{\odot}$ (building block mass) out to $z=5$.

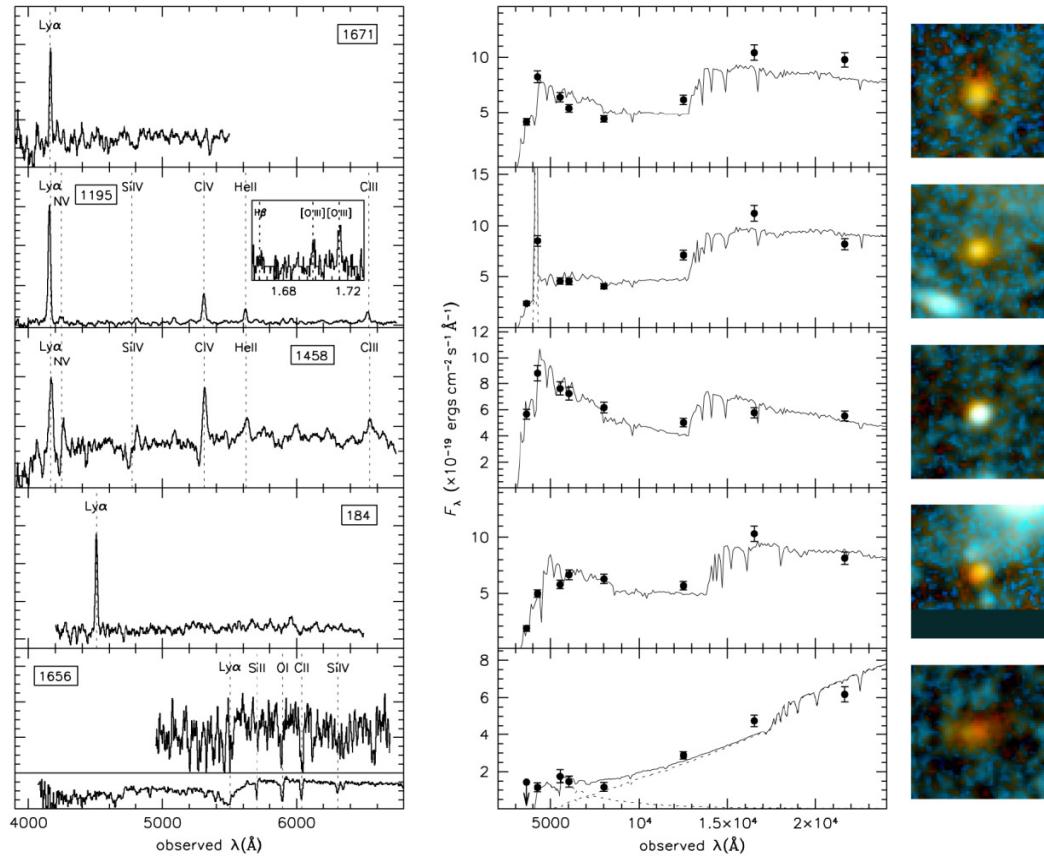
UV-selected High-z Galaxies (Ly α Emitters / LBG's)



Subaru/Suprime-Cam, Shimasaku et al. (2003)

NIR-selected High-z Galaxies

$$J_s - K_s > 2.3 \iff z \gtrsim 2$$



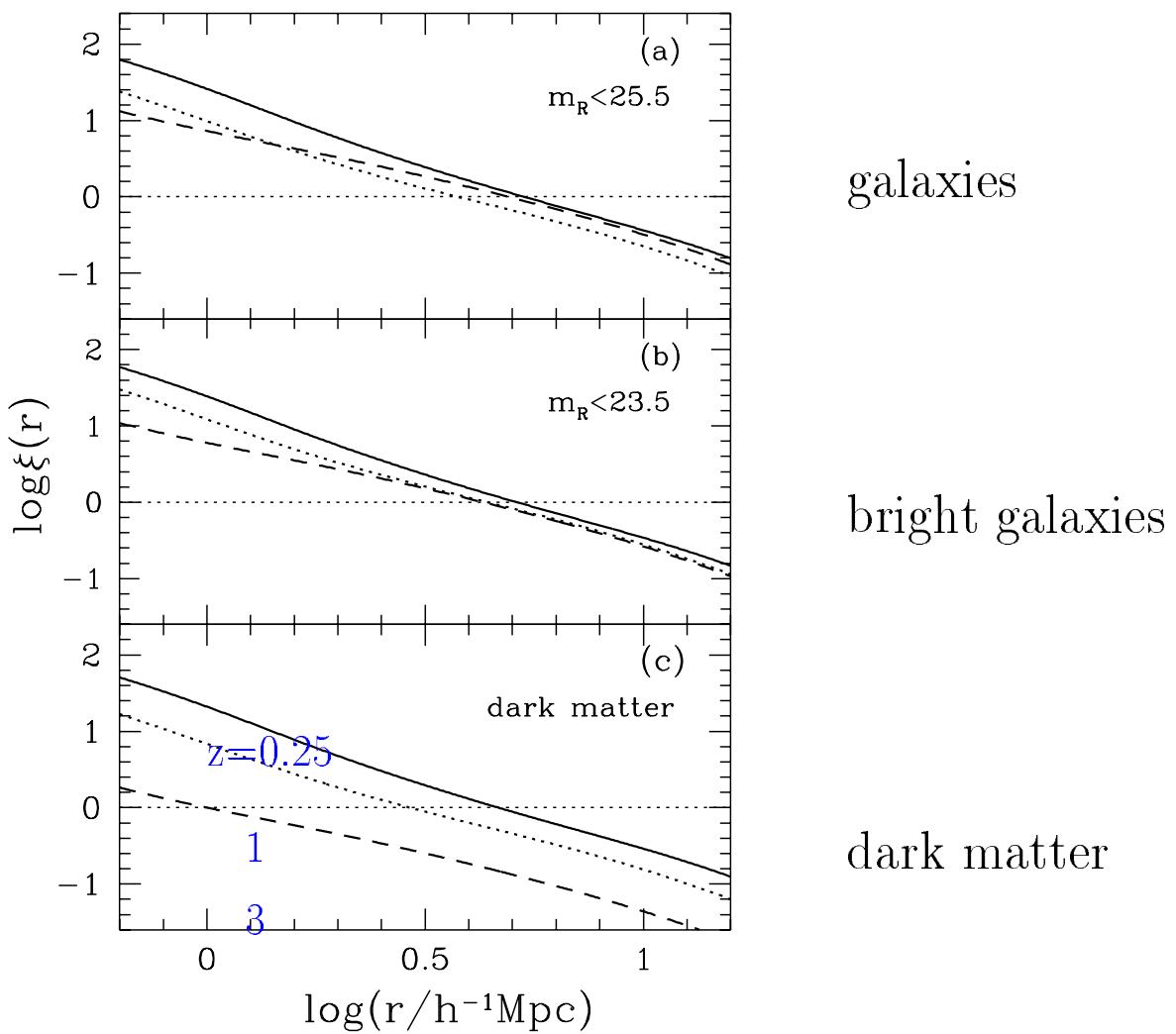
Franx et al. (2003), astro-ph/0303163
 van Dokkum et al. (2003), astro-ph/0303166

★ $n_{\text{NIR}} (10^4 \text{ deg}^{-2}) \sim \frac{1}{2} n_{\text{LBG}}$ to $K_s = 22.5$

★ Too faint to be LBG's

Correlation Functions

'Galaxy Formation Bias'



Baugh et al. (1998)

ま と め

1. 初代天体の形成と宇宙の再電離 ($5 \lesssim z \lesssim 20$) :

★ 初代天体 天 or 地

- H₂ 分子輝線 ◆
- Ly α , H α , UV (LBG) ◆ ◇

★ 再電離

- H α 連続光ブレイク ◆

2. 黎明期の銀河 ($1 \lesssim z \lesssim 10$) :

★ 銀河形成現場

- 速度場 (アウトフロー、回転、力学質量) ◇ ◆
- 星形成の局在、タイムスケール (化学進化) ◇ ◆

★ 基本構造の確立 (TF/FP)

★ 形態の発現

3. 銀河宇宙の大局的進化 ($0 < z \lesssim 5$) :

★ 質量アセンブリー ◆ ◇

★ 星形成史

- Ly α , UV (LBG) ◆
- H α ◆
- FIR-Submm (SPICA/ALMA) ◆

★ 形態の変遷 ◆

水素分子輝線 1

◆ 第一世代天体形成時の冷却光子 (銀河雲全体を考える)

$L \sim 10^{37} \text{ erg/s}$ @ $10\text{-}40 \mu\text{m}$

1Kpc^3 くらいの領域 $n=1\text{cm}^{-3}$ くらいのガスが光るとする。

$F \sim 10^{-23} \text{ erg/s/cm}^2$ @ $z=10$

密度が3～4桁ほどあがった方がより効率が高い

10³倍くらい

それでも、かなり厳しい。

水素分子輝線 2

◆ First Star 形成時の冷却光子

質量降着期に最大

$L \sim 10^{35.5} \text{ erg/s}$ @ $10\text{-}40 \mu\text{m}$

第一世代天体($10^8 M_{\text{sun}}$)のガスの内10%が
同時に星になり

かつ全部100太陽質量とする。——1万個

$F \sim 10^{-20} \text{ erg/s/cm}^2$ @ $z=10$

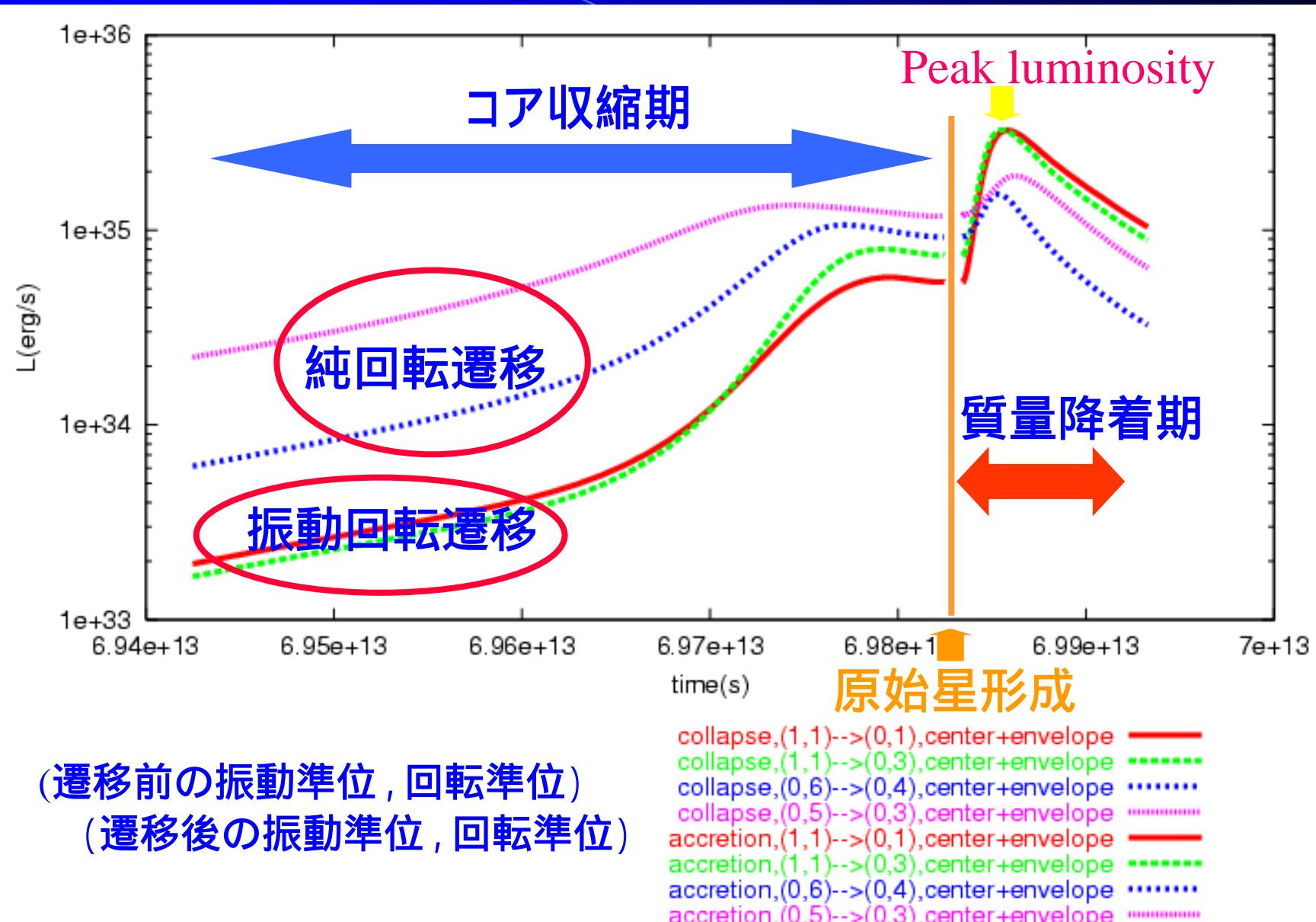
小質量星の方が多少効率が高い。 $1M_{\text{sun}}$ ぐらい。

大質量天体なら可能性。

中心部はあまり変わらないので，stellar core 形成期は
同程度。よって， $1/10 \times 100 = 10$ 倍程度。

やはり苦しいか。Ly alpha で見つけて深く見る。

水素分子輝線光度の時間変化



水素分子輝線 3

◆ 第一世代天体でのSN

超新星爆発による衝撃波後面で水素分子形成

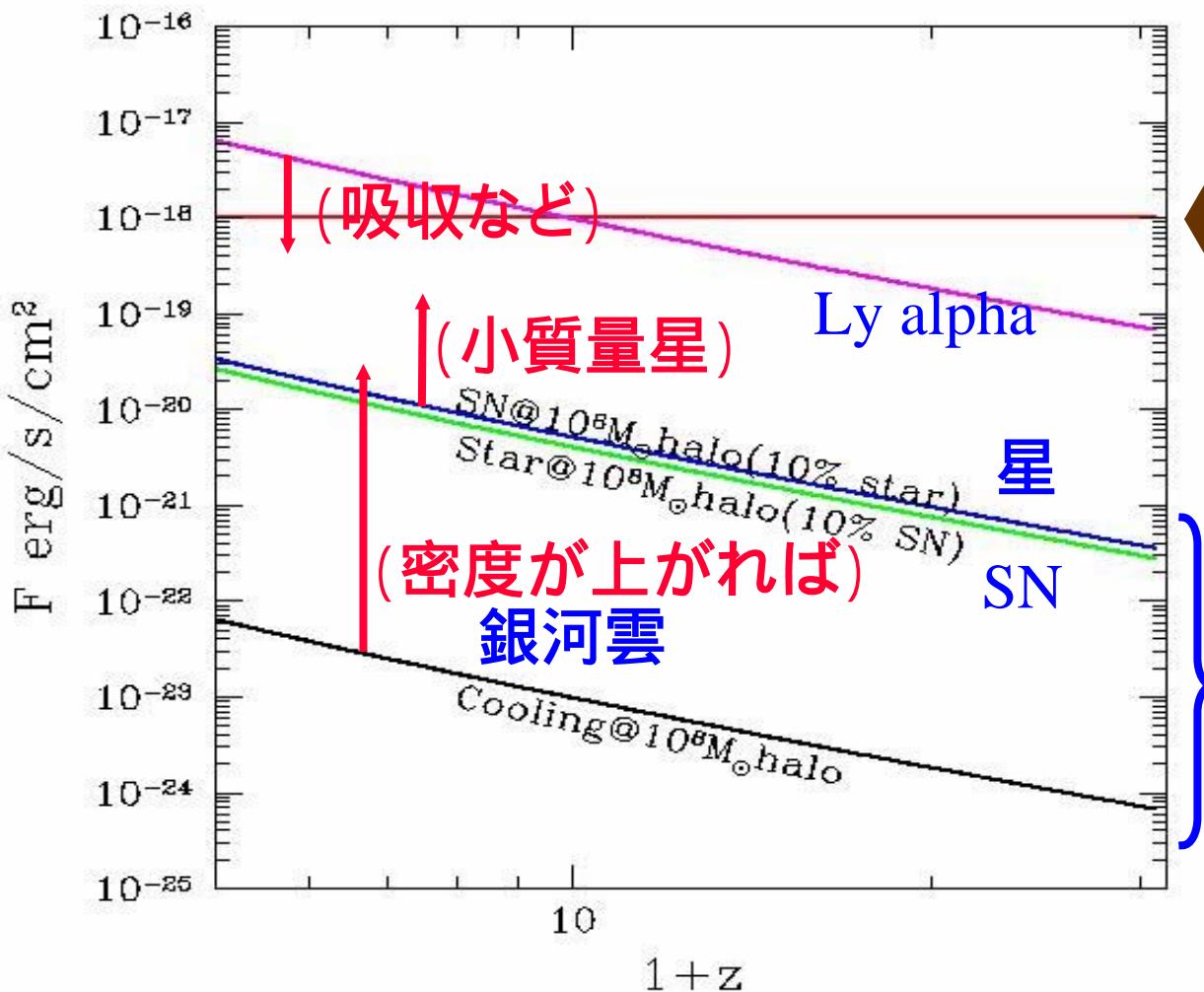
天体のバリオンの10%が星になり、さらにそのうち
100M_{sun}に1個がSNになるという仮定 (~ Salpeter IMF)

$$L \sim 10^{40} M_8 \text{ erg/s} \text{ (Ciardi \& Ferrara 2001)}$$

$$F \sim 10^{-20} \text{ erg/s/cm}^2 @ z=10$$

TOP Heavy IMF、HyperNovaなどを考えることによって
1 - 2桁大きくなるかも知れない。

第一世代天体からの水素分子輝線など



水素分子

水素原子など

◆ Ly- 冷却光子(ダスト吸収と銀河間吸収が問題)

- $L \sim 10^{42} \text{ erg/s}$ @ $1-2 \mu$
- $F \sim 10^{-18} \text{ erg/s/cm}^2$ @ $z=10$
- PSによる 10^9 太陽質量以上の個数の評価は $z=10$ でおよそ0.1個 Mpc^{-3} (Comoving)
- 10^9 太陽質量以上のもの(10^{42} erg/s)が全部見えるとするとおよそ一平方度当たりおよそ数百個

◆ H の再結合線(Oh 1999)

- Starburst銀河におけるHII領域からの再結合線
- $L \sim 10^{41} M_9 \text{ erg/s} \longleftrightarrow \sim 10^{53} \text{ photons}$
- $F_V \sim 600 \text{ nJy } M_9 (R/1000) @ 7 \mu, z=10$
- 数はNGST f.o.v($4' \times 4'$)、3hr、 $z=10$ で100個程度

◆ UV連続光(Oh 1999)

- 同じくStarburst銀河のUV連続光(1500-2800 Å)
- $L_V \sim 10^{28} \text{ erg/s/Hz}$ ($\text{SFR}/(\text{太陽質量}/\text{yr})$)
- $F_V \sim 16 M_9 \text{ nJy} @ 2 \mu, z=10$

残念ながら

- ◆ 第一世代天体からのH₂の輝線を観測するのは
SPICAではかなり困難。
Ly alpha の冷却輝線で見つけた天体で
頑張るしかなさそう。 ← JWST?
- ◆ H_β、UV連続光は期待ができる。
しかし、
第一世代天体としての物理的インパクト？
JWSTとの競合

SPICAでねらうなら

◆Z=4程度の天体形成

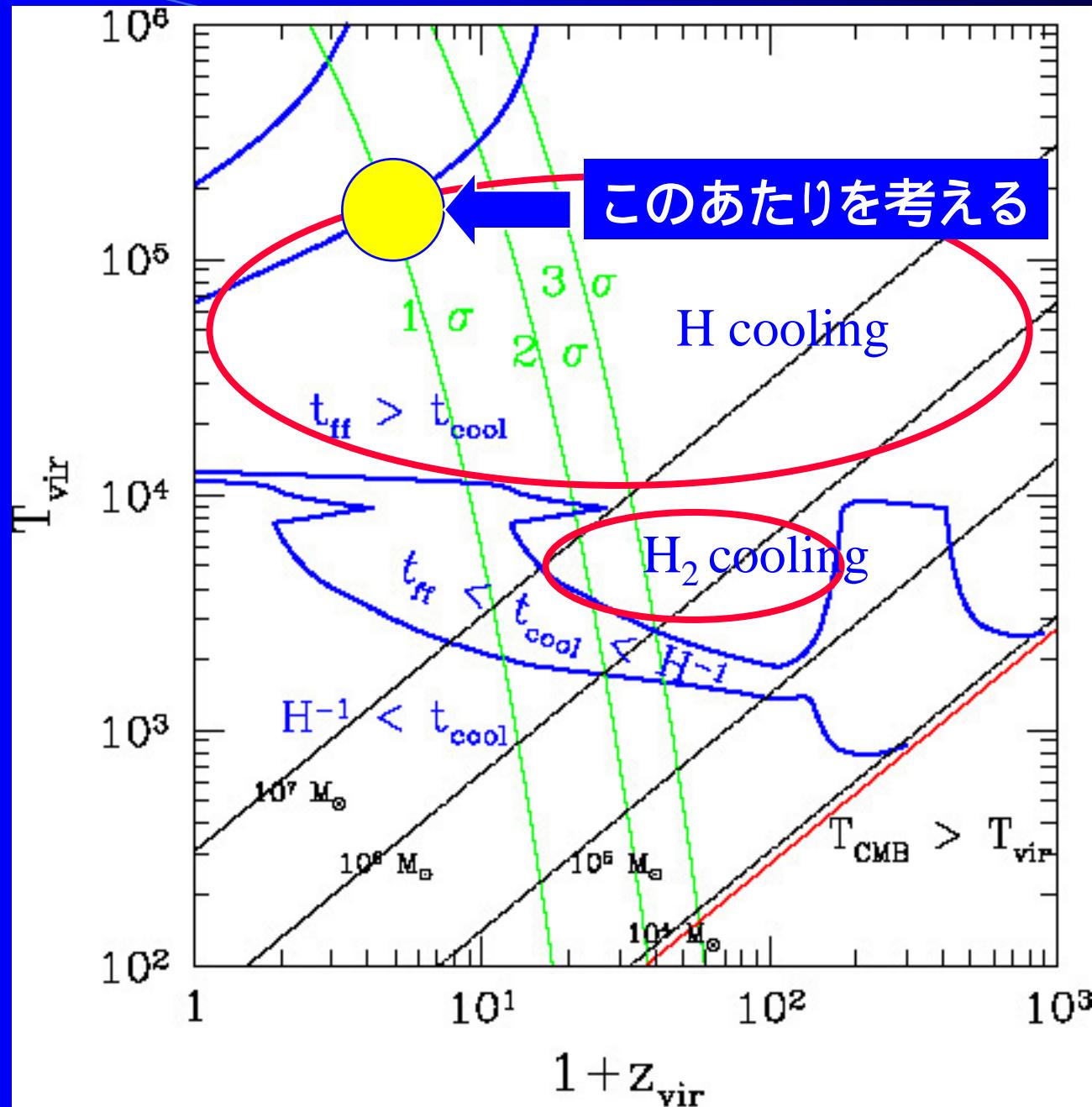
多くの揺らぎはこのあたりで収縮

まず, H cooling が効いて, その後分子形成
で星形成

ガスの全質量は $10^{10} M_{\text{sun}}$ 程度

SFR が $30 M_{\text{sun}} / \text{yr}$ で小質量星生成なら
観測可能(銀河雲の冷却光子も可能性有)

Ly alpha で場所を探せる



◆第一世代星形成過程とわかるか

第一世代星では、水素分子輝線による
冷却で星形成

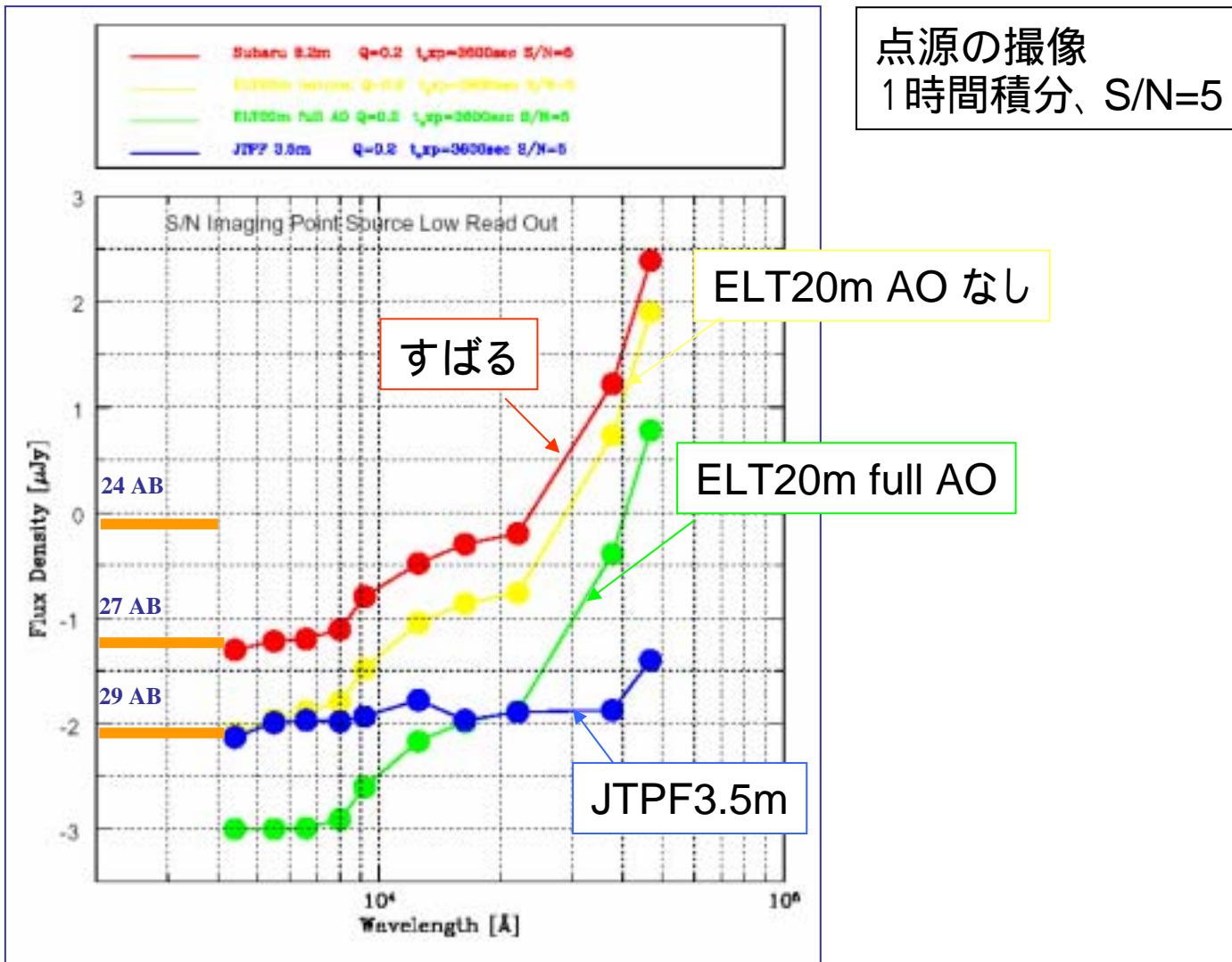
特に原始星形成前後では振動遷移輝線
が効く



非常に重元素が少ないときのみ

$$(z / z_{\text{sun}} < 10^{-5})$$

よって振動準位輝線の相対強度を
観測すれば、判定可能



$z=20$ 付近で宇宙を最初に再電離し始めた天体は検出可能か？

Pop III galaxies @ $z \sim 13$

10^7 - $10^{10} M_{\text{sun}}$ のハローにおける星形成に
付随する、大質量星の紫外線

$$L = 1 \times 10^7 (c_{H_2}^*/0.002) (M/10^6 M_{\text{sun}}) L_{\text{sun}}$$

$$L = 1 \times 10^{10} (c_{HI}^*/0.002) (M/2 \times 10^7 M_{\text{sun}}) L_{\text{sun}}$$

予測の一例： Cen et al. (2003)

$$S = 1.45 (L/10^9 L_{\text{sun}}) [\text{n Jy}]$$

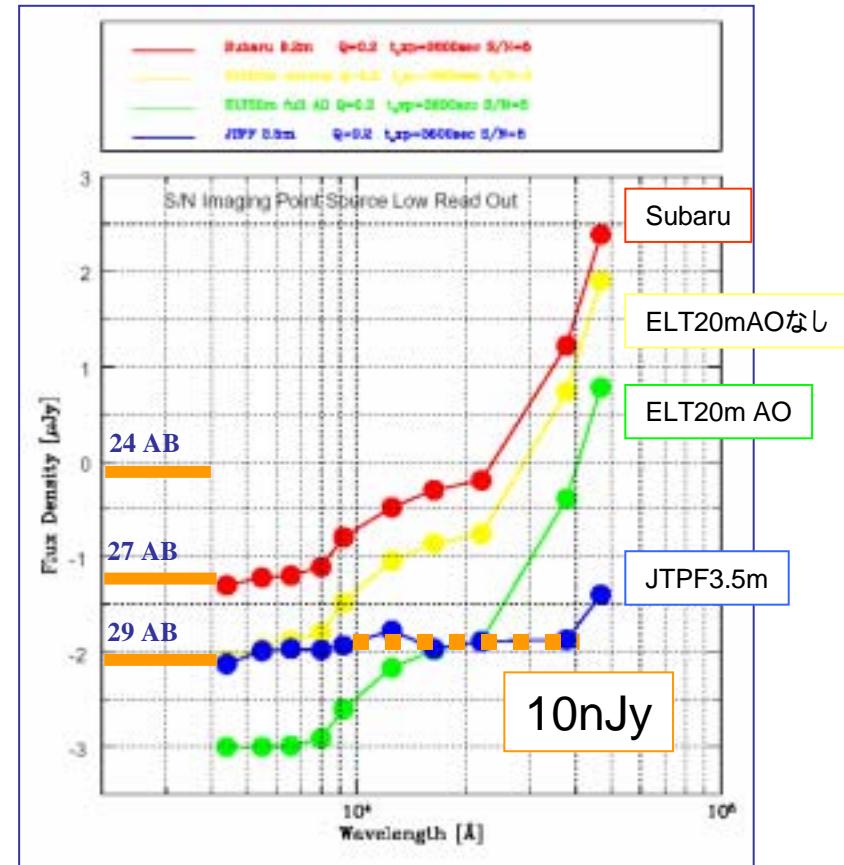
波長 $1\text{-}5 \mu\text{m}$ で、 $1\text{-}10 \text{nJy}$

Pop III Hyper Novae @ $z \sim 13$

$$\Sigma_{HN} = 1.3 \times 10^{16} \frac{\Delta t_{HN}(1+z)}{t_H} \frac{1}{4\pi \times 1.2 \times 10^7 \text{ arcmin}^2}^{0.60} \\ \approx 2.3 \text{ arcmin}^{-2}, \quad (24)$$

$$L(HN) \sim 10^{10} L_{\text{sun}}$$

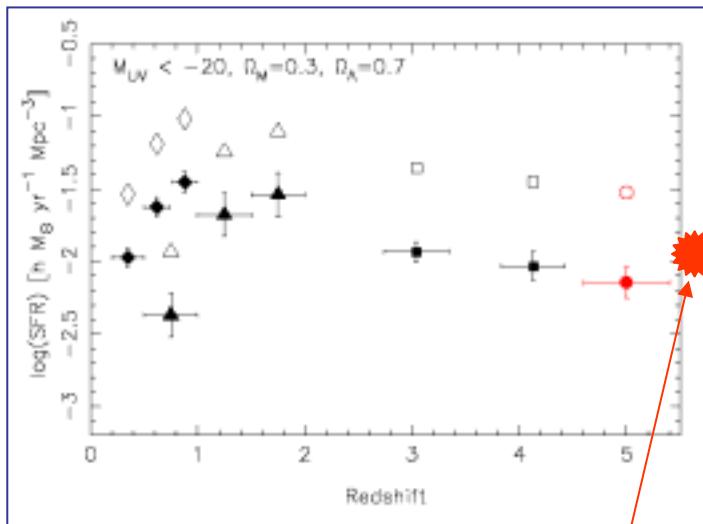
$$S \sim 0.014 \text{ nJy} @ z=13.2$$



Z=6.6 – 20までの星形成銀河の探査

中性ガスの中の Ly α 輝線天体の検出可能性

Iwata et al. 2003



Z=6で宇宙を(再々)電離するのに
必要な星形成密度

宇宙は2回(以上)再電離された? Cen 2003

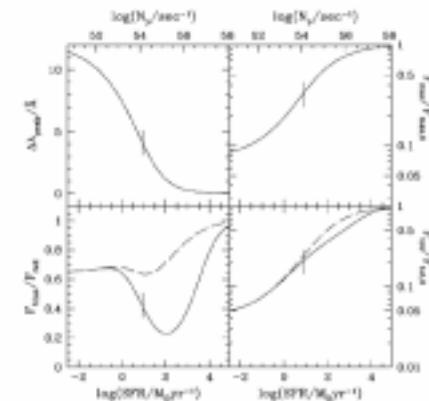
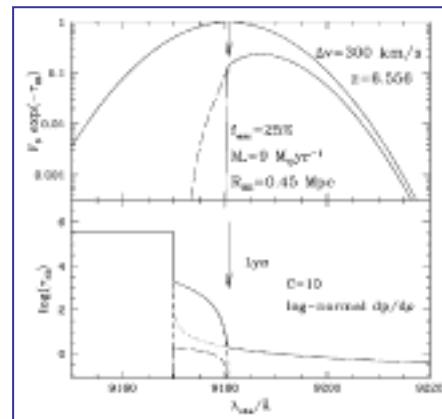
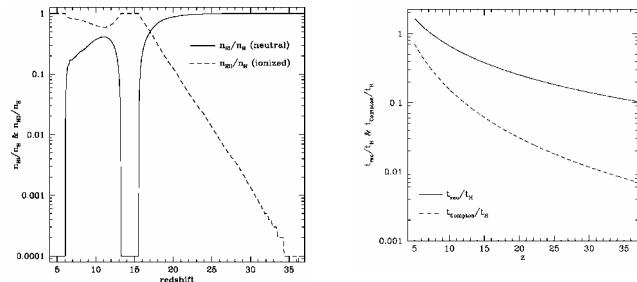


FIG. 2.—Parameters of the observed Ly α line as a function of the SFR of the galaxy at $z = 6.56$. The intrinsic line is assumed to have a width of 300 km s $^{-1}$. The four panels show, clockwise from top left to bottom right, the apparent redshift displacement of the line center, the suppression of the apparent peak flux relative to the rest-emitted line, the apparent asymmetry of the line rate of fluxes on the apparent blue and red sides, and the suppression of the total line flux relative to the rest-emitted line. The solid and dashed curves correspond to different treatments of the residual H β opacity within the H II region (see text for discussion).

Haiman et al. 2002

1M_{sun}/yr 10%に減光
100 M_{sun}/yr 35%に減光

z>6で中性(度が大きな)宇宙に
埋もれた輝線天体の探査は現実的か?

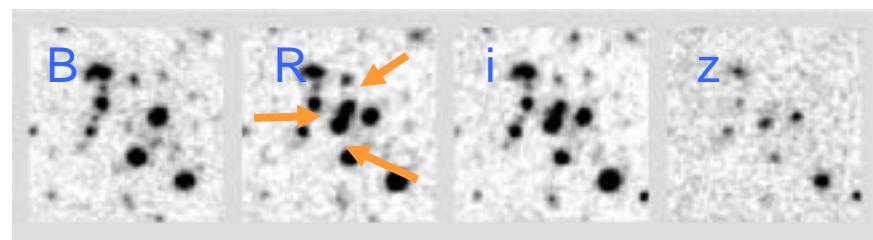
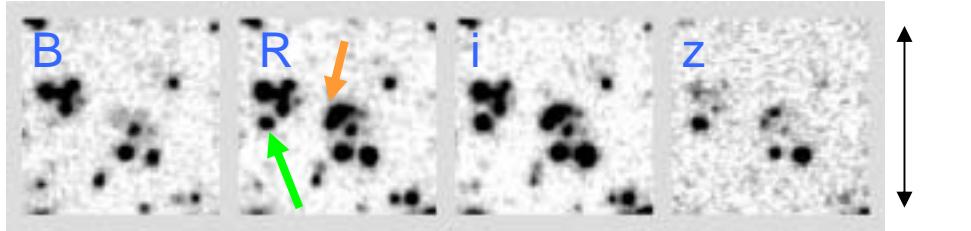
YES

銀河の内部構造の進化

高赤方偏移銀河の内部構造；

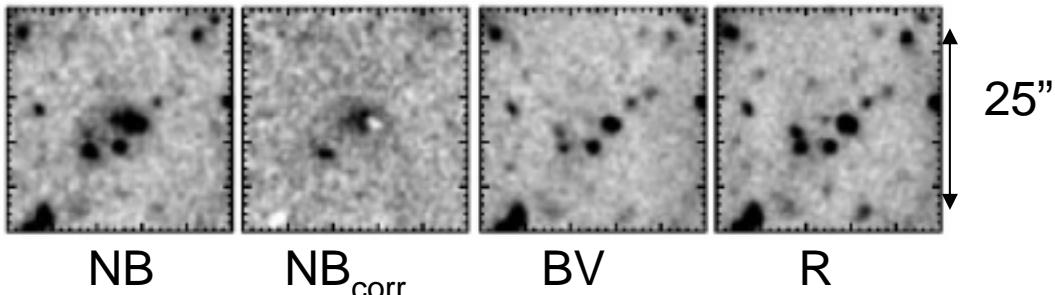
力学質量？場所毎の星形成、化学進化の違いは？

SXDS 中の $z=4$ LBG の例 (SXDS Team)

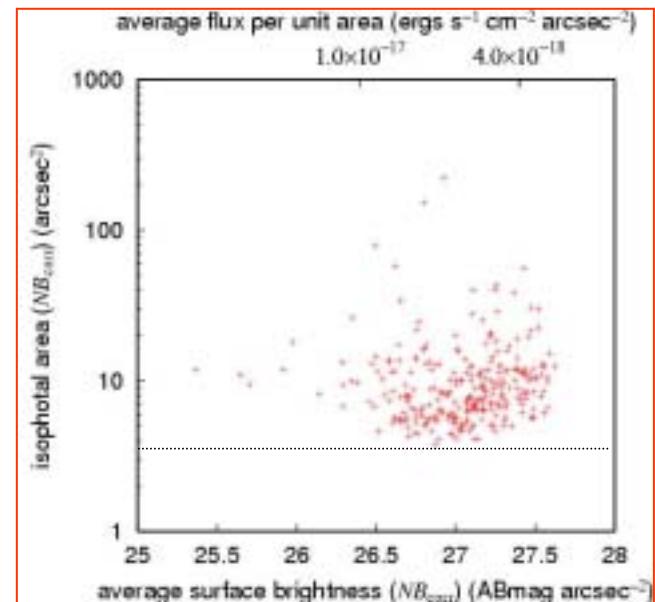


紫外線連続光で大きく広がった構造を持つ
場所毎のスペクトルの違いや吸収線による Kinematics
を調べたい。

$Z=3$ の広がった輝線天体の例 (Matsuda et al.)



すばる 7 時間積分で見つかった
 $z=3$ の Ly 輝線天体の平均表面輝度



すばるでは、1秒程度以下の
構造に分解して分光するのは苦しい。

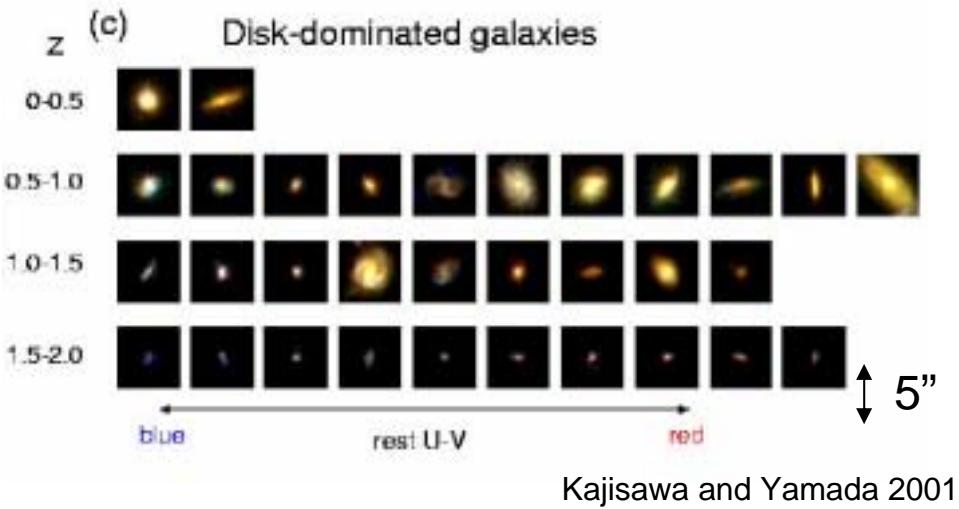
高解像度、静止系可視 スペース
集光力、淡い構造を解像して分光
地上大口径

銀河の構造は、いつ、どのようにして現在のような姿になったのか？

e.g., 円盤銀河の円盤の成長はどのようにおこったのか？

形態の測定、系統的な運動の測定(rotation curve)の測定が不可欠

円盤銀河のT-F 関係や、橍円銀河の Fundamental Plane はどこまで観測できるか？



Z=1-2 の円盤銀河 (HDF-N, $M_v < -20$) は
系統的に小さく、青い。
回転速度を測定するには高解像度、大集光力が必要。

c.f., Voigt et al. Z~1 における回転曲線
Erb et al. Z~2における回転曲線(?)

