

観測で明かす銀河の構造の進化

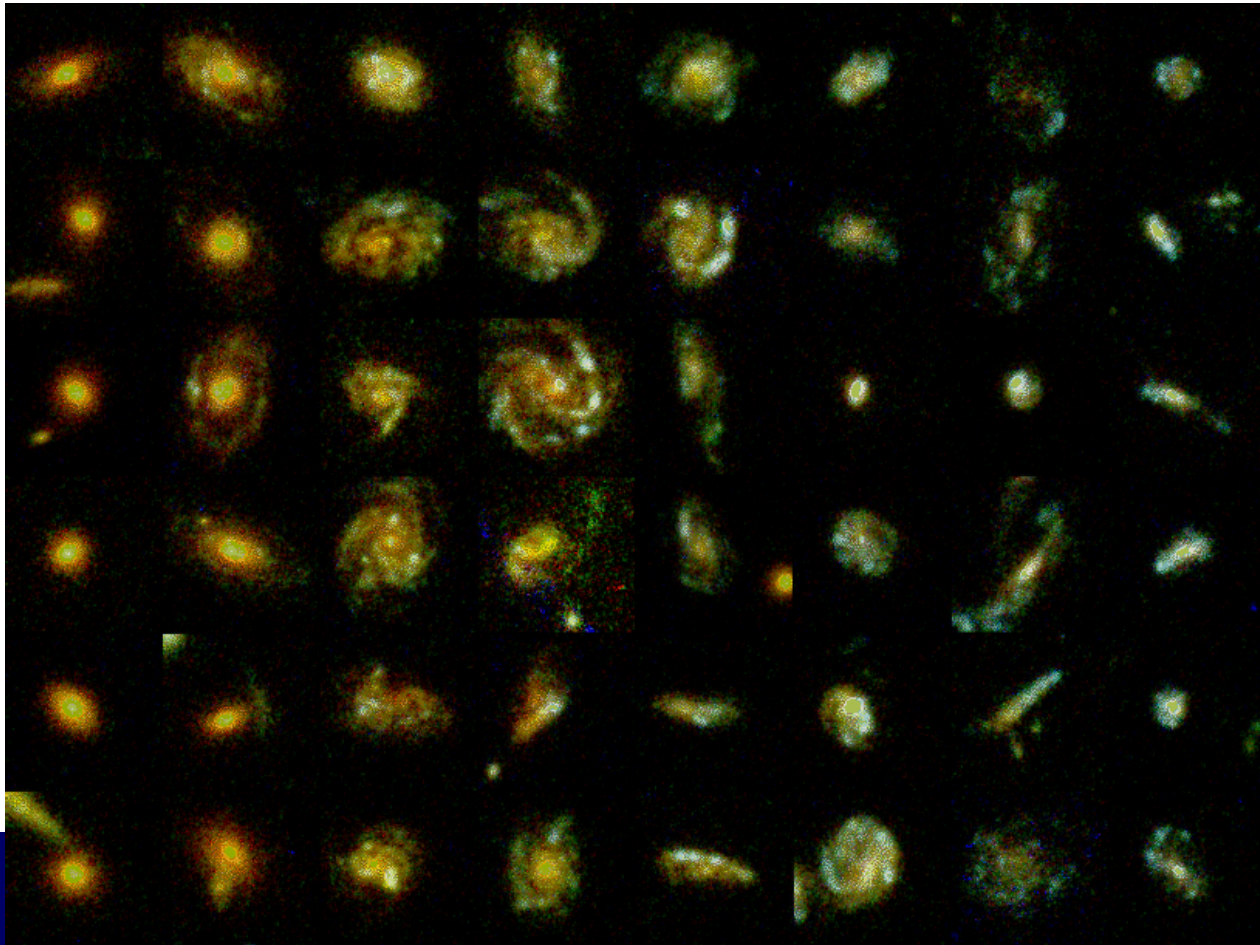
秋山 正幸
(東北大)

イントロダクション

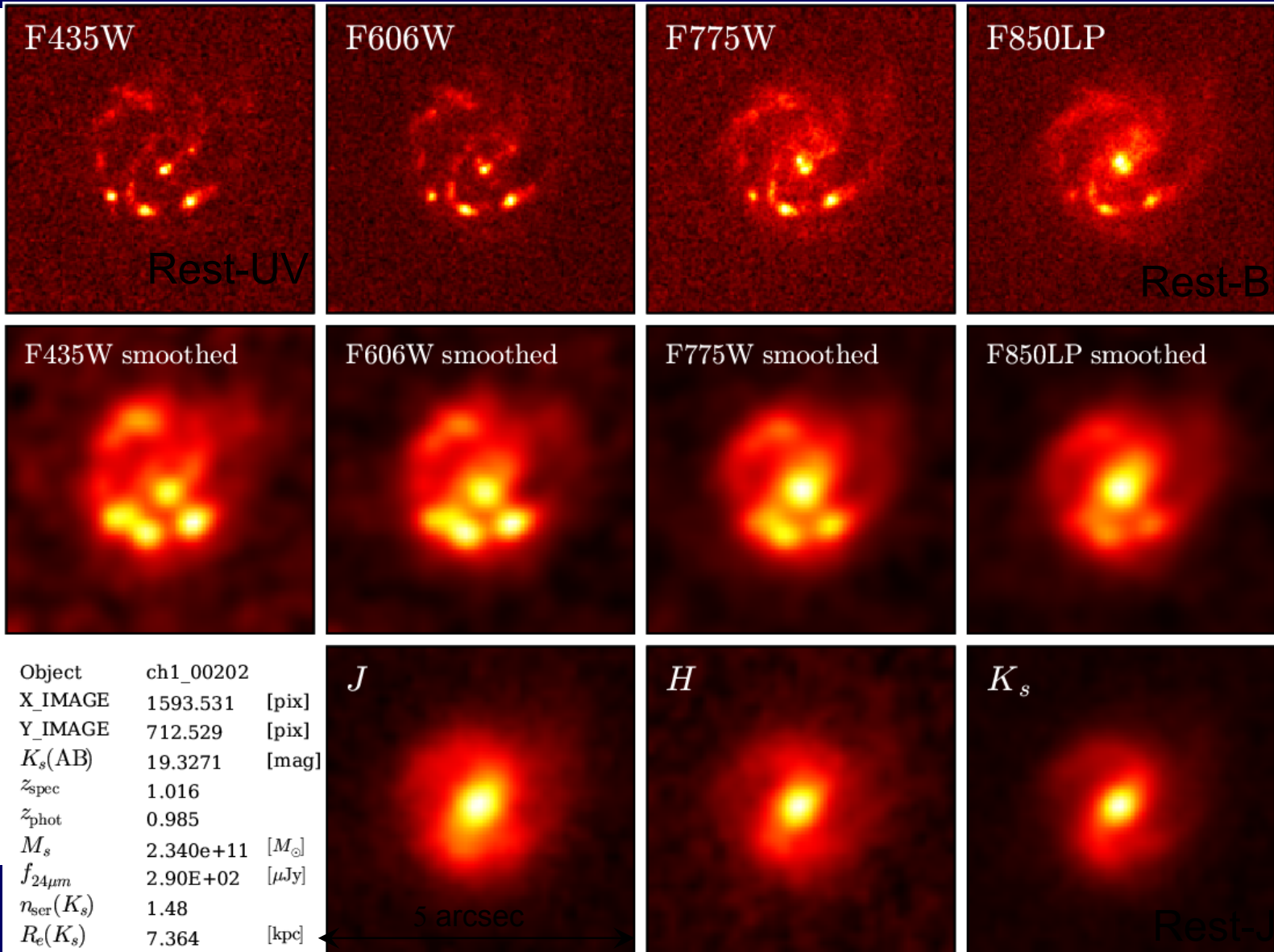
- 最近の観測的研究から見えてきた**銀河の内部構造の進化**について赤方偏移をさかのぼる形で**列挙**していきたい。銀河の統計的性質(光度関数、星形成率密度など)の進化については詳しく触れない。
- どちらかという古典的(?)銀河について (no LAE, no LAB)。

Between $0 < z < 1$

- ハッブル宇宙望遠鏡による赤方偏移1の銀河の画像:
 - HSTの空間分解能 ($\sim 0.1''$ @ $1\mu\text{m}$)があればかなり詳細まで調べられる。
 - 補償光学なしの地上望遠鏡($< 1.0''$)でもぎりぎり内部構造を調べることが可能。



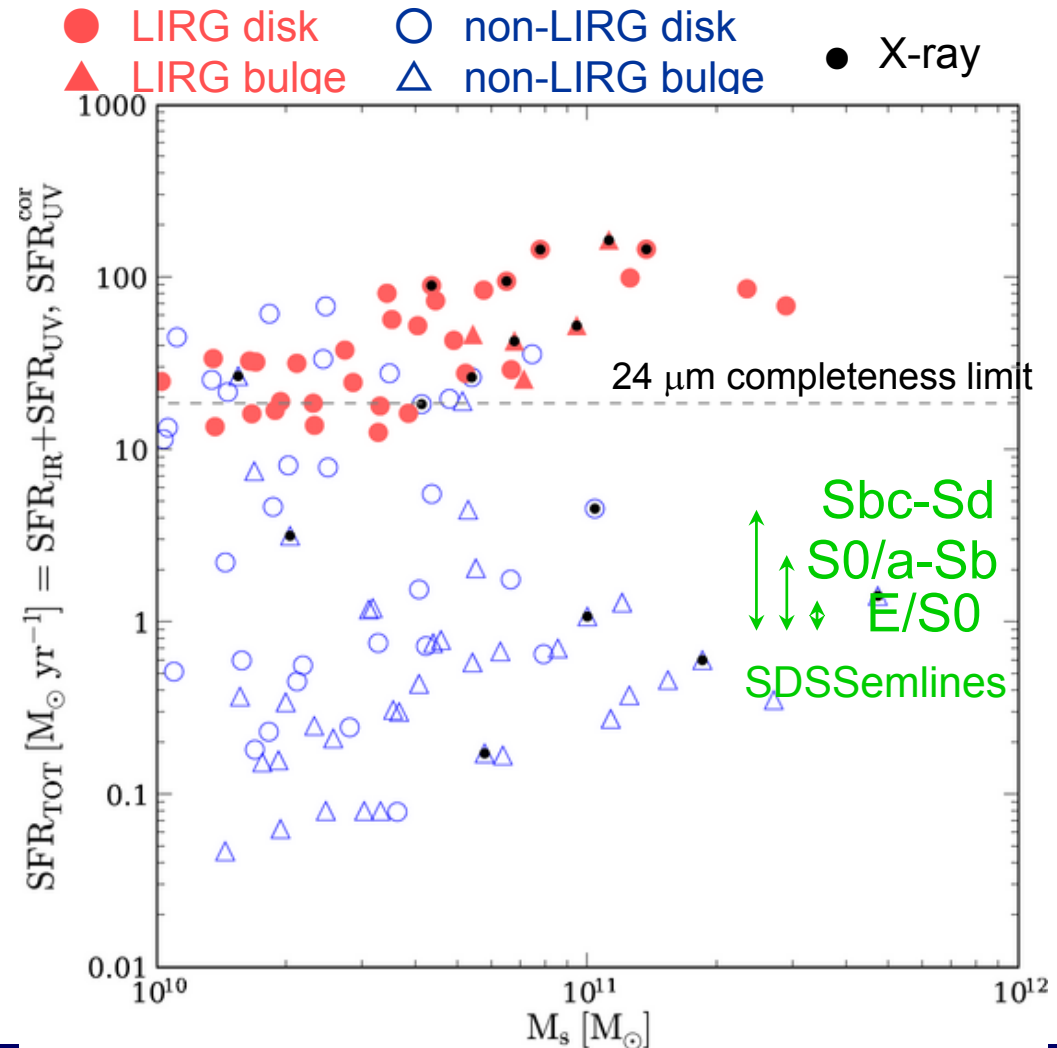
赤方偏移 1 の銀河の形態の解析 (Konishi et al. 2008)



赤方偏移 1 の星形成銀河の形態は (Konishi et al. 2008)

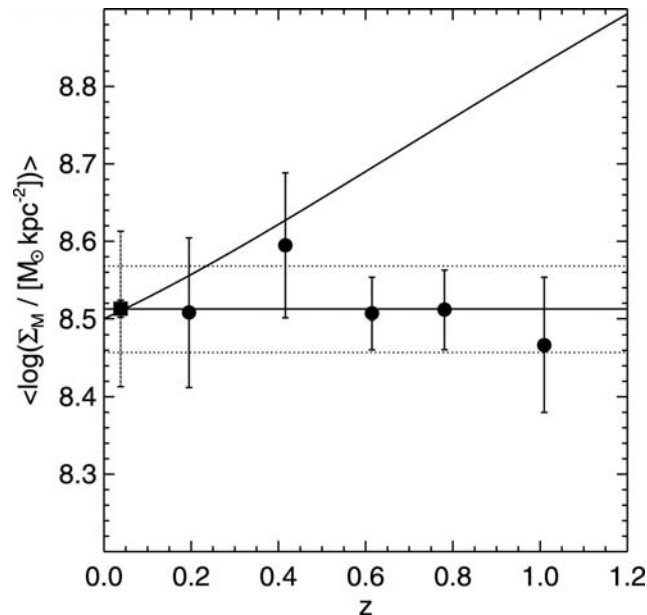
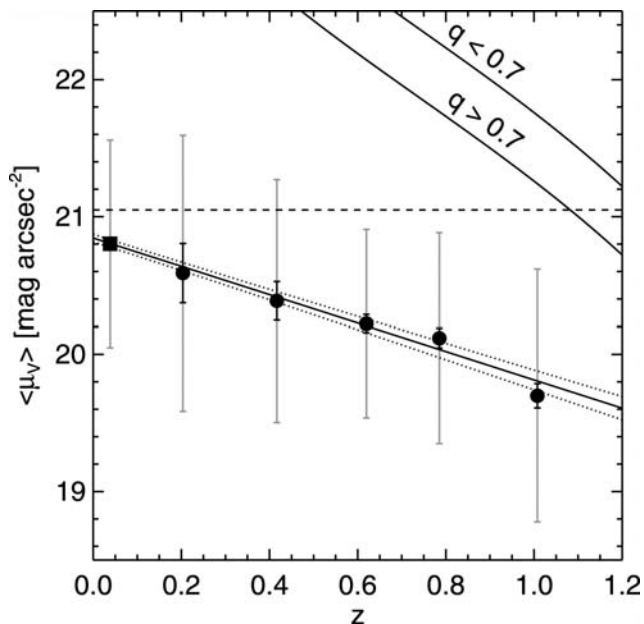
- SFR fraction (●:▲:○:△)
0.64:0.14:0.19:0.03
- $SFR > \sim 19 M_{\text{sun}} \text{ yr}^{-1}$ (24 μm limit)では、約70%が LIRG。
- Non-LIRG bulgeには活発な星形成は見られない。

$z \sim 1$ の ($M_s \geq 10^{10} M_{\text{sun}}$ の) 星形成に大きく貢献しているのは、LIRG (disk)。



Between $0 < z < 1$: Disk galaxies : Disk-size

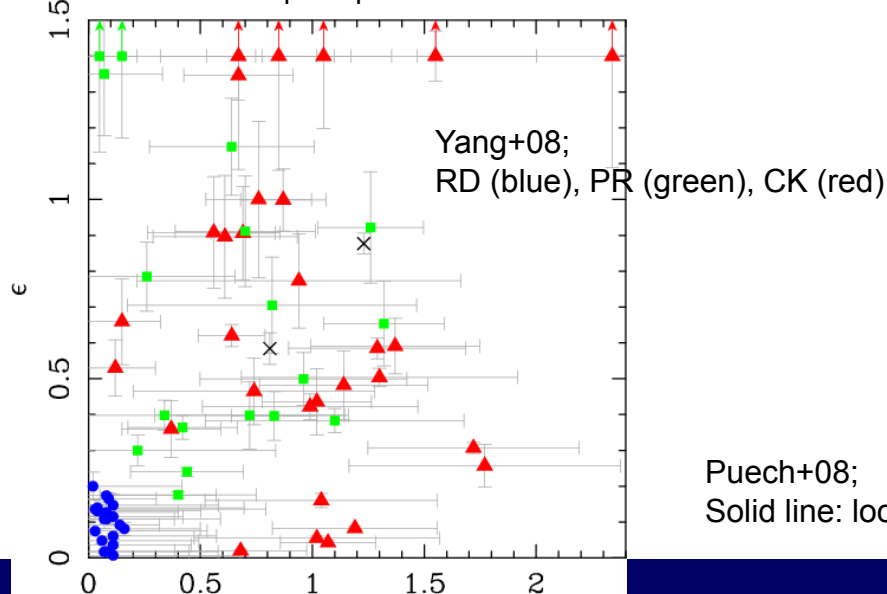
- Disk 銀河の disk サイズの進化; 多数の仕事あり、まとめ Kanwar et al. (2008, ApJ, 682, 907)
- Barden et al. (2005, ApJ, 635, 959) の例;
 - 絶対等級-size 関係(表面輝度)には進化があるが、**星質量-size 関係(表面星密度)には進化がない。**
 - disk 成分の星種族の進化で説明できる。



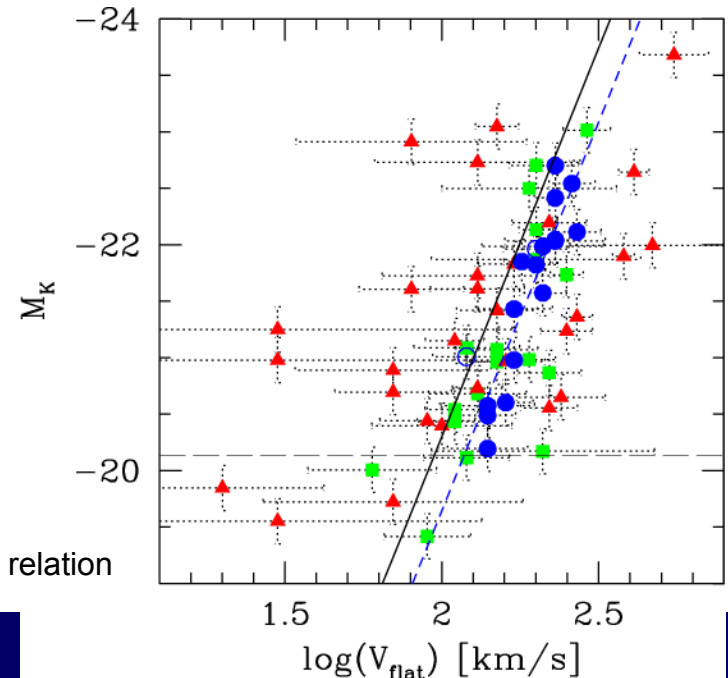
Between $0 < z < 1$: Disk galaxies : Disk dynamics

- Disk galaxy dynamics with VLT/GIRRAFFE multi-IFU w/o AO
- Flores et al. 2006, A&A, 455, 107 ($0.4 < z < 0.75$, disk galaxies), 35% pure-rotating disks following local-TF relation, 65% disturbed rotation, complex kinematics ?
- IMAGES: Yang et al. (2008, A&A, 477, 789), Neichel et al. (2008, A&A, 484, 159), Puech et al. (2008, A&A, 484, 173)
 - Neichel+08 : 12/22 spiral morphology galaxies have PR or CK velocity fields
 - Puech+08 : local K-band TF relation に乗るには星質量で2倍の進化が必要？

Velocity dispersion ratio between model and observation at the model peak position

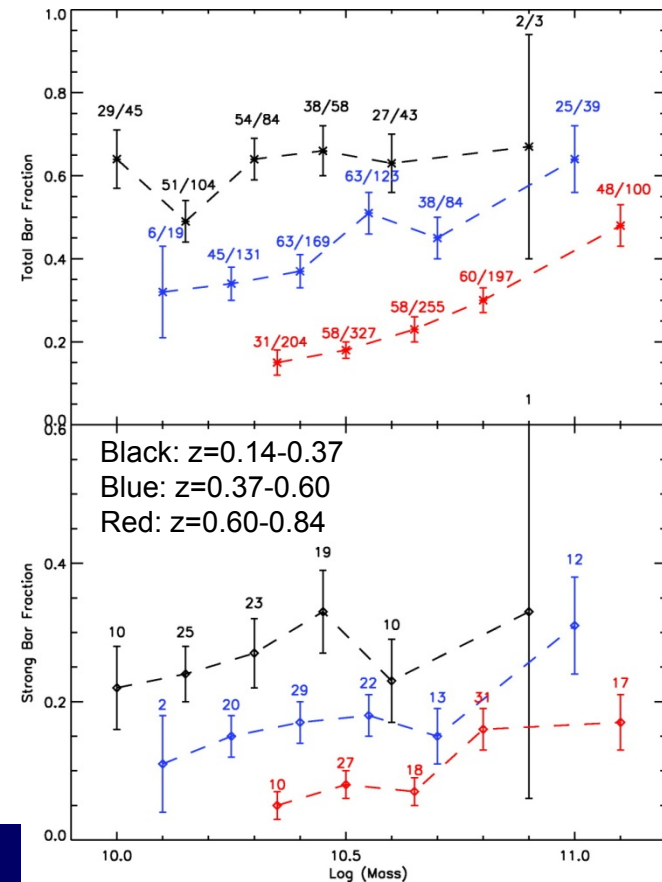
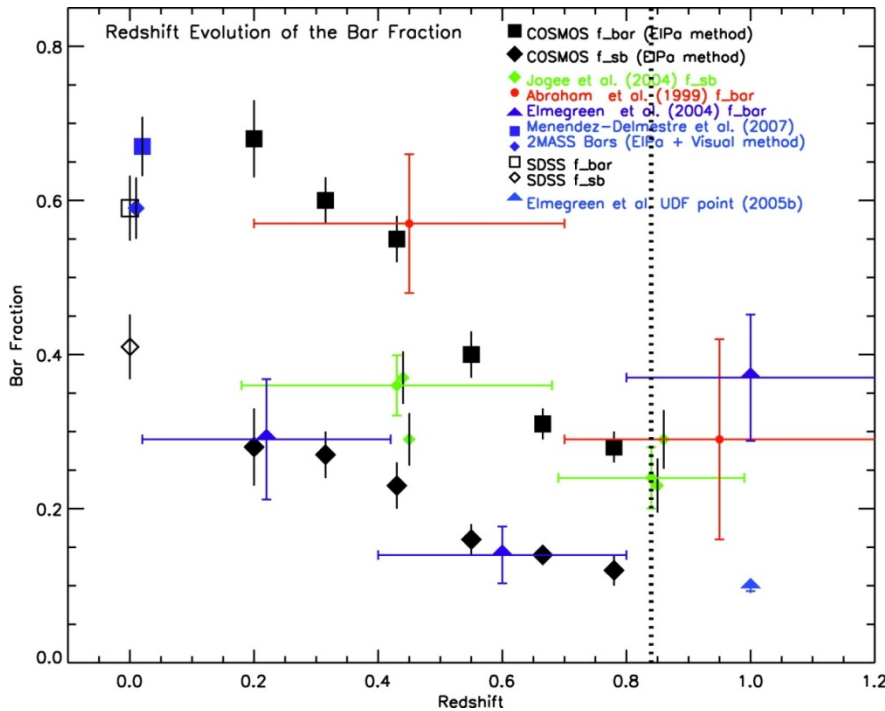


Distance between model and observed peaks of velocity dispersion (pixel=0.52")



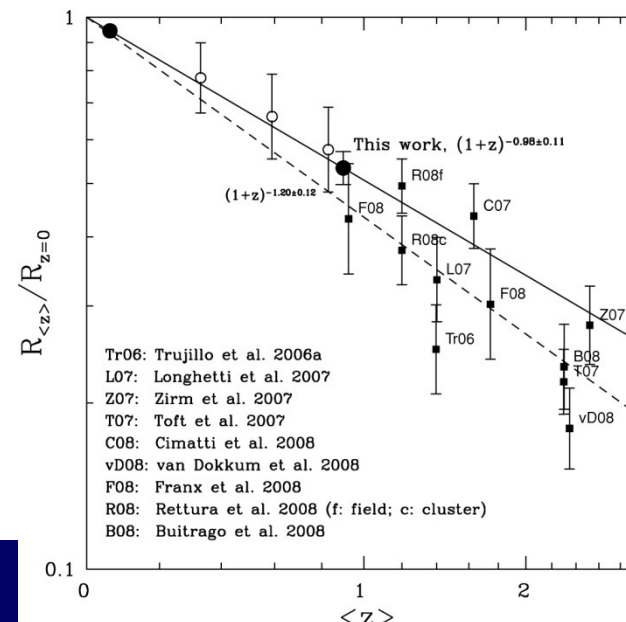
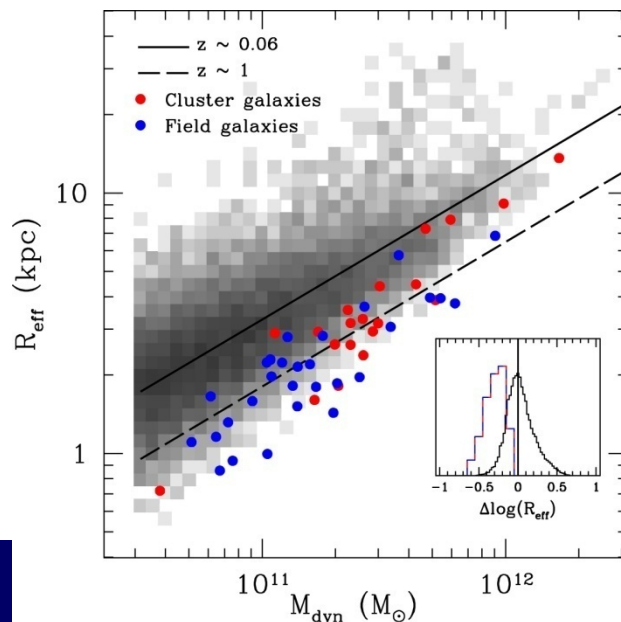
Between $0 < z < 1$: Disk galaxies : Bar-fraction

- Sheth et al. (2008, ApJ, 675, 1141) COSMOS HST images sample
 - Barred spiral の割合 (Bar-fraction) が $z=1 \rightarrow z=0$ の間で急激に増えている。
 - Bar-fraction の進化は銀河の質量の小さいものほど急激である。



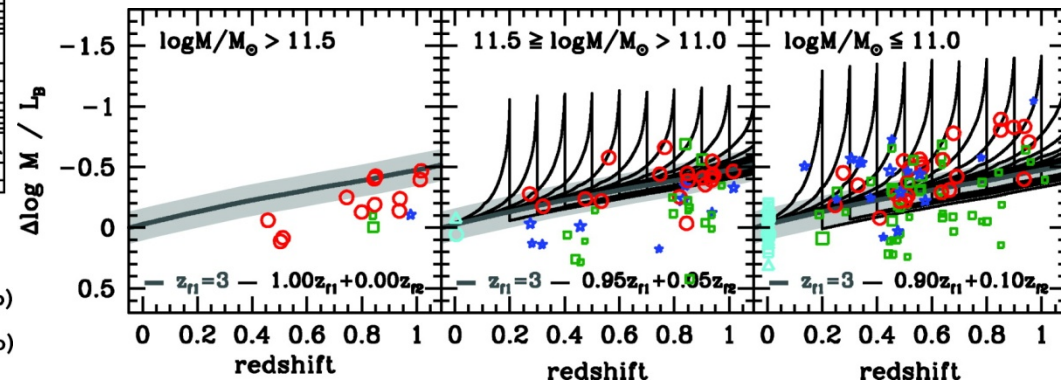
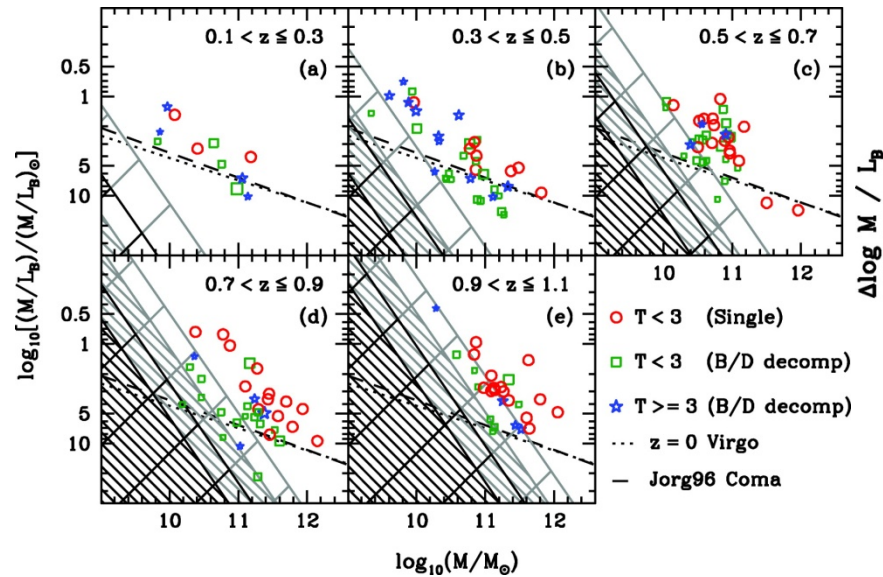
Between $0 < z < 1$: Early-type (E+S0) galaxies

- Treu et al. 2005, ApJ, 633, 175, $0.2 < z < 1.2$ field E+S0 (GOODS-N)
 - FP (σ -SB-Re) からのずれは $\log M^* > 11.5$ のサンプルで $d(\log M/L)/dz = -0.4$ 、 $\log M^* < 11$ で $-0.5 > d(\log M/L)/dz > -1$ に相当する。大質量のサンプルは $z_f = 5$ 、小質量のサンプルは $z_f = 1-2$ からの受動的進化とコンシステント。
 - 銀河団 E+S0 では $d(\log M/L)/dz = -0.46$ で field サンプルの方が進化が大きい。
- van der Wel & van der Marel (2008, ApJ, 684, 260) $0.6 < z < 1.2$ field E+S0
 - $(V/\sigma)^*$ vs. MB の分布図、 $(V/\sigma)^*$ vs. Ellipticity の分布図の上で近傍サンプルから光度進化のみで説明可能。
 - 暗い楕円銀河で $(V/\sigma)^*$ の大きい物の割合が大きくなり、ellipticity が大きい。
- van der Wel et al. (2008, ApJ, 688, 48) $0.8 < z < 1.2$ field+cluster E+S0
 - Re vs. σ_{err} での進化、同じ質量で見ると Re 半分程度。Z=2 では Re が 1/5 になる？



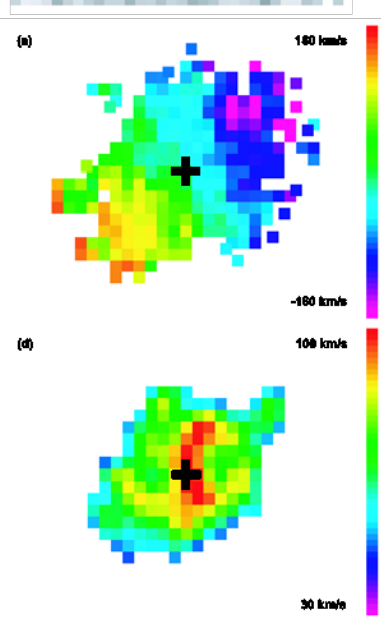
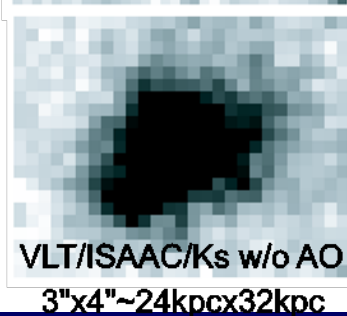
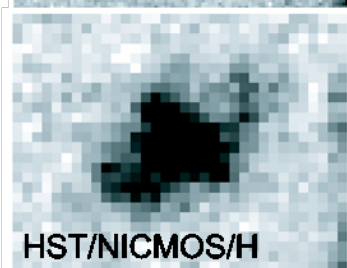
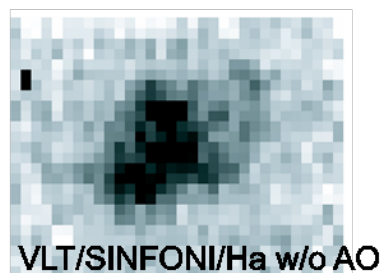
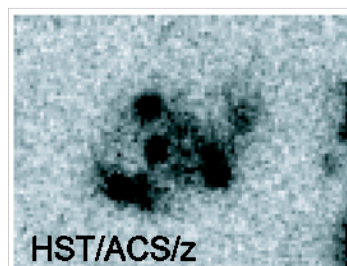
Between $0 < z < 1$: Disk galaxies : Bulge

- MacArthur et al. (2008, ApJ, 680, 70), $0.1 < z < 1.2$ 137 spiral galaxy in GOODSs.
 - FP からのずれから求めた $d \log(M/L)/dz$ は
 - $\log(M^*) > 11$ bulge = $d \log(M/L)/dz = 0.4$: $z_f \sim 3$ とコンシステント、楕円銀河に近い。
 - $\log(M^*) < 11$ bulge 散らばりが大。



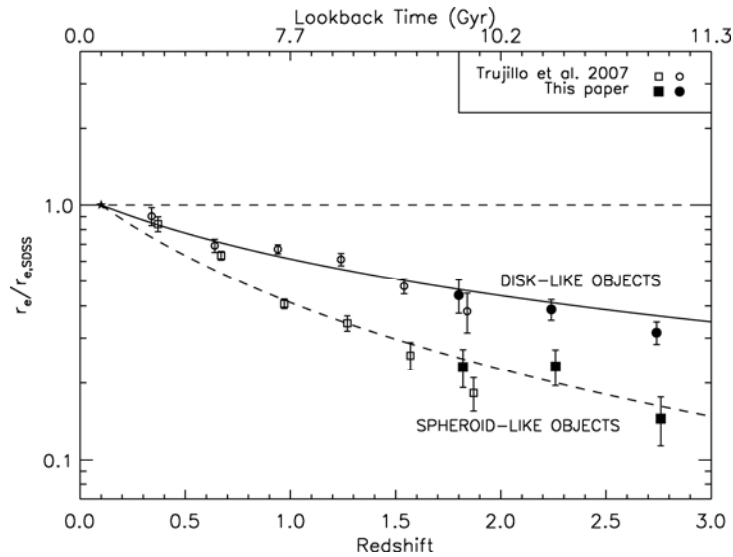
Between $1 < z < 3$

- 赤方偏移2の銀河の詳細観測 (Starkenbourg et al. 2008, arXiv:0806.3369)
 - HSTの空間分解能 ($\sim 0.15''$ @ $1.6\mu\text{m}$) で内部構造を調べることが可能。
 - 補償光学なしの地上望遠鏡 ($\sim 0.5''$) でも大きい銀河ではぎりぎり内部構造を調べることが可能。

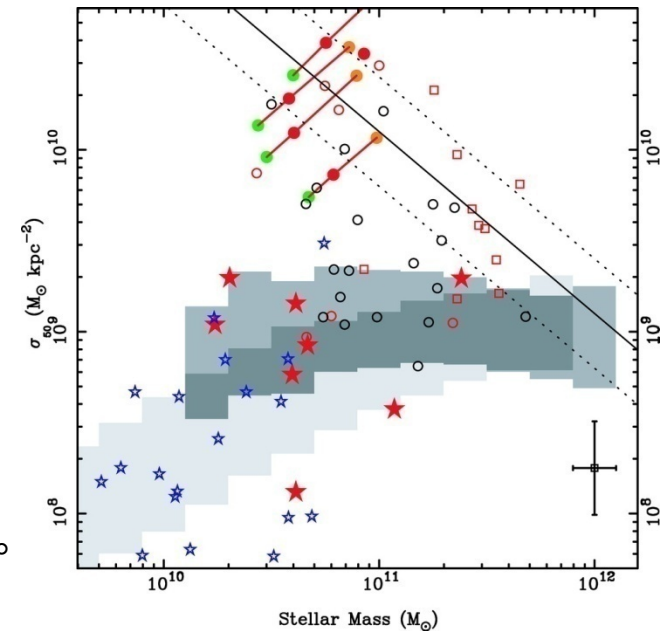


Between $1 < z < 3$: Galaxy size

- Trujillo et al. (2007, MNRAS, 382, 109); 他、彼らの一連の仕事あり。ただし、ACS-I band。
- Buitrago et al. (2008, ApJ, 687, L61); 銀河サイズの進化、Sersic-index で分けてみた場合。
 - Sersic-index が似ているから同じ種族を見ているとしてよいかは自明ではない。



- Zirm et al. (2007, ApJ, 656, 66)
 - quiescent SED galaxies は非常にコンパクト。

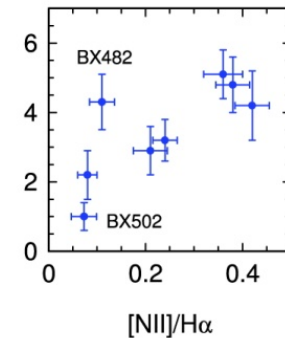
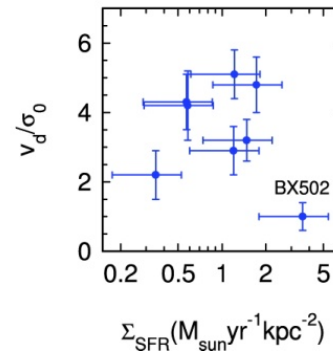
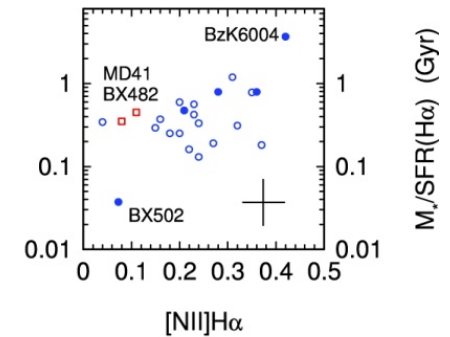
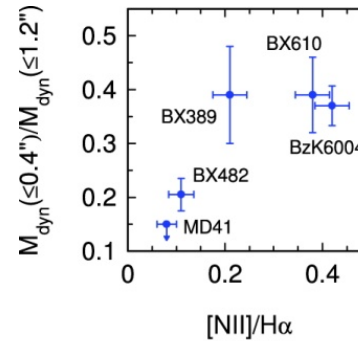
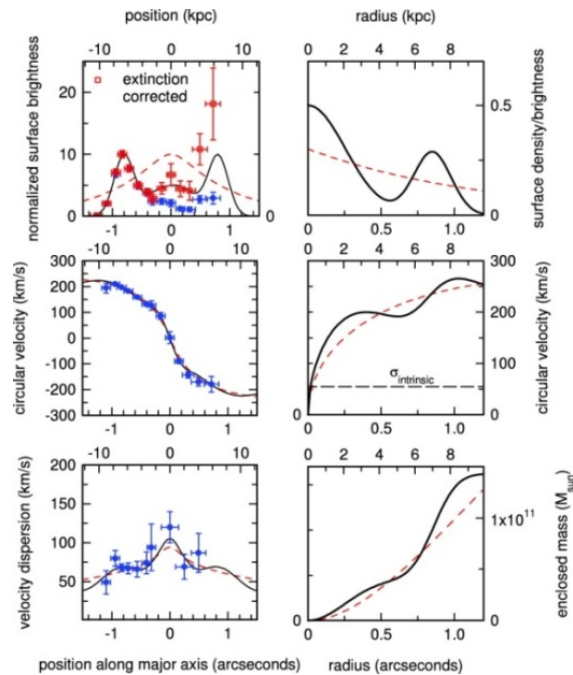


Between $1 < z < 3$: Dynamics

Rotating disks with large velocity dispersion (local disk $V_c/\sigma=10-20$) ? Or something else ?

- Genzel et al. (2006, Nature, 442, 786); $V_c/\sigma=2-4$
- Forster Schreiber et al. (2006, ApJ, 645, 1062); 14 $z \sim 2$ UV selected galaxies; VLT/SINFONI w/o AO; $V_c/\sigma \sim 2-4$
- Starkenburg et al. 2008 (arXiv:0806.3369); large disk galaxy at $z=2.03$; VLT/SINFONI w/o AO; consistent with local K-band TF, but $V_c/\sigma \sim 4$
- Genzel et al. (2008, ApJ, 687, 59) ;

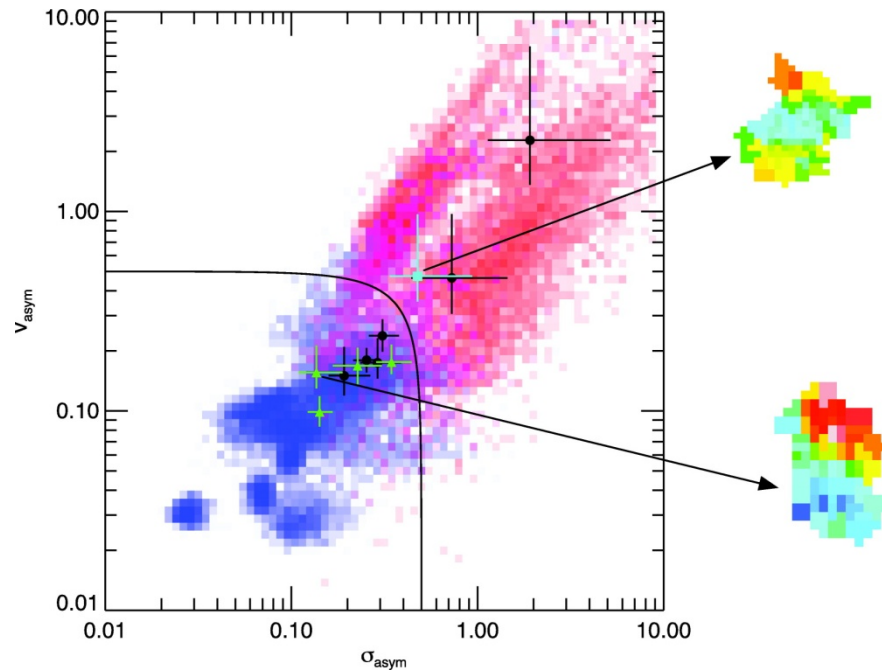
• 2 LGS-AO+VLT/SINFONI observations;



Between $1 < z < 3$: Dynamics

- Rotating disks with large velocity dispersion ? Or something else ?

- Shapiro et al. (2008, ApJ, 682, 231); Kinemetry; 速度構造、速度分散構造がどれだけ回転対称か？ 回転が支配的？

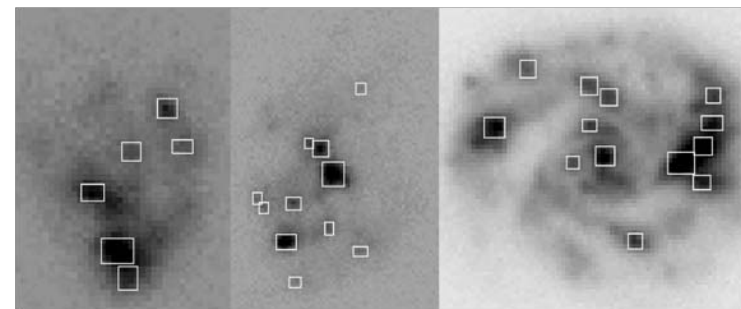
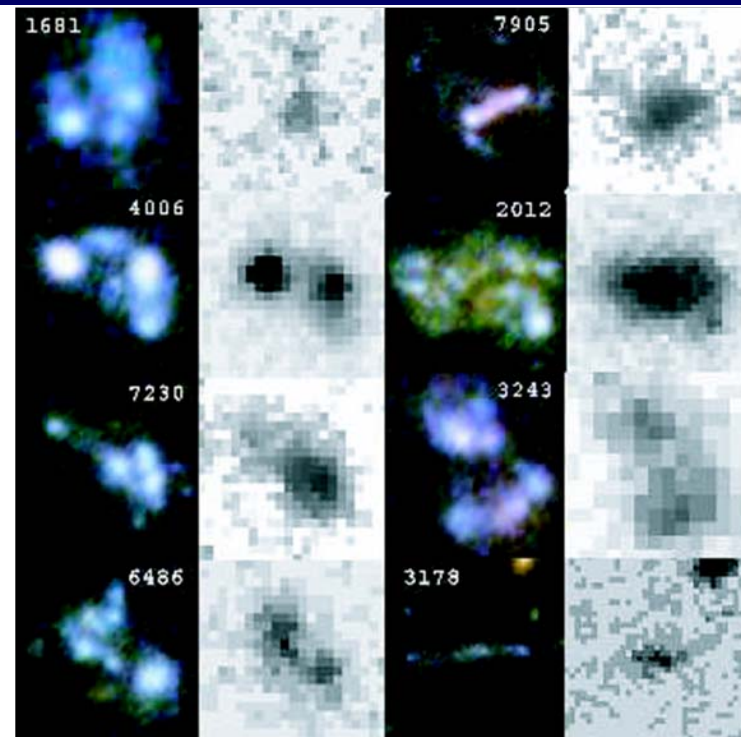


- Wright et al. 2008 (arXiv:0810.5599); part of the large velocity dispersions due to **uncorrected halo of AO PSF** ?

Between $1 < z < 3$: Structures

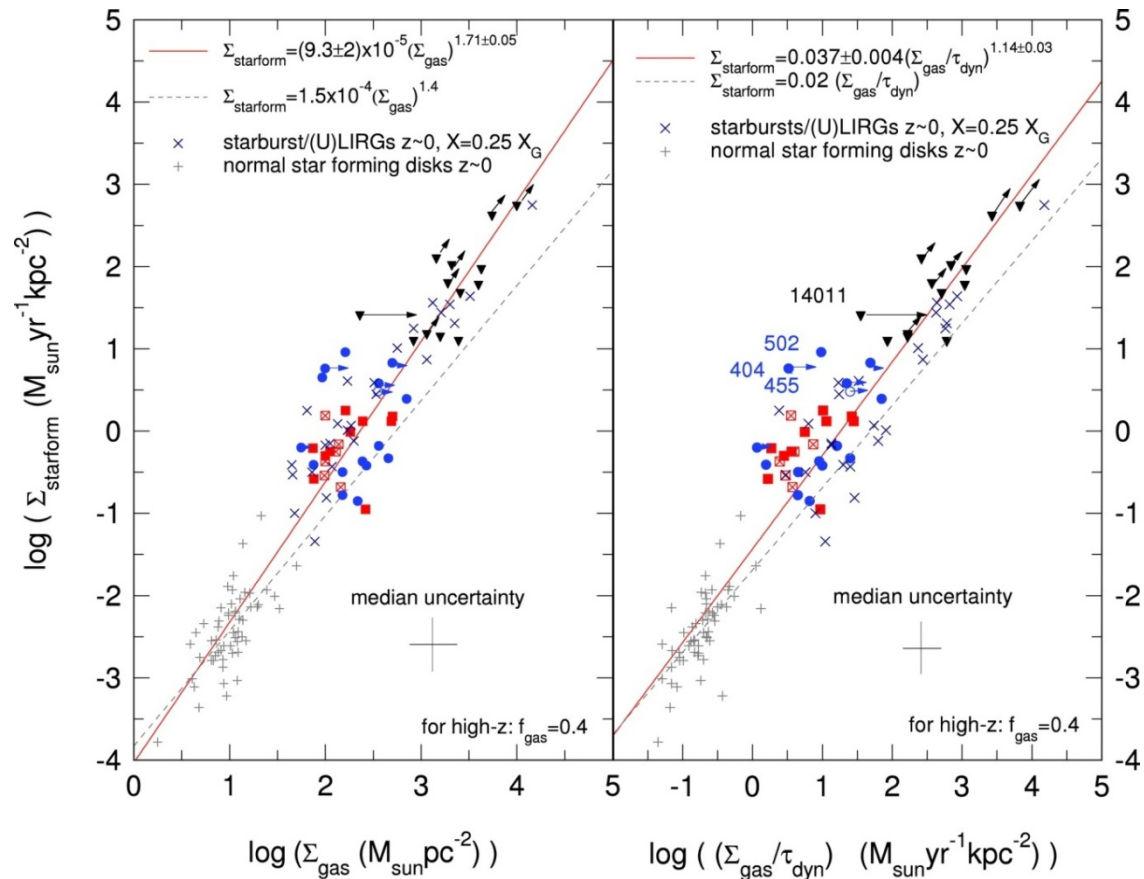
- Elmegreen et al. 2008, arXiv:0810.5404;
ACS+NICMOS H; Clump clusters ($0 < z < 4$), chain galaxies ($0 < z < 4$), spirals ($0 < z < 2$)

- Bulge-like clump (red clump) $\sim \log M^* = 8-9$, Other clump (blue clump) $\sim \log M^* = 6-9$, other clumps are ~ 10 times smaller than bulge-like clumps. Total clump mass corresponds to $5 \times 2\% = 10\%$ of the galaxies total mass.
- other clumps are younger than bulge-like clumps by 10 times.
- 0.3 Msolar / yr / clump
- それぞれのクランプの星質量は近傍銀河に見られる星形成領域の星質量の100倍ある。ディスクのガスの速度分散が大きく、ジーンズ質量が大きくなっている？



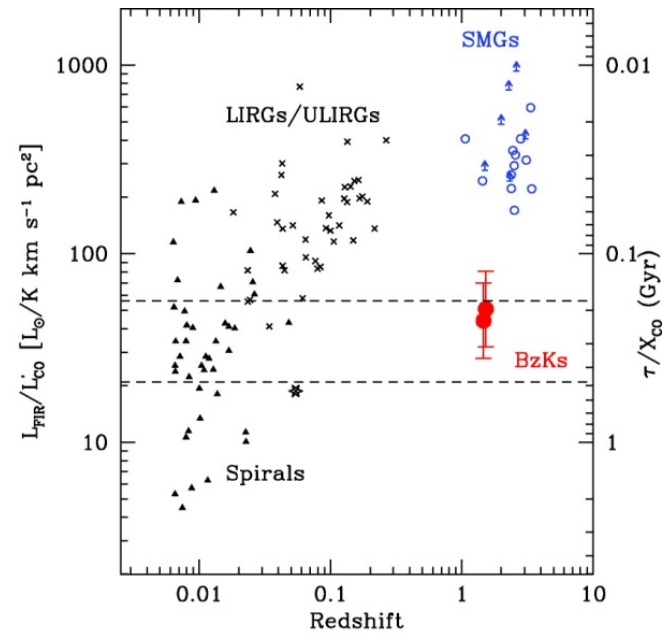
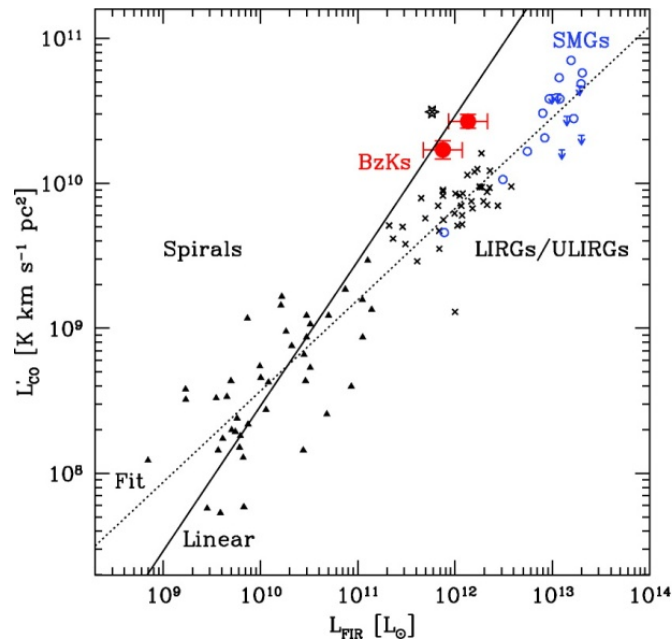
Between $1 < z < 3$: Schmidt-Kennicutt law ?

- Bouche et al. (2007, ApJ, 671, 303); order-of-magnitude Schmidt-Kennicutt law of $z=1-3$ galaxies; BX (filled blue), BM (open circles), SMGs (filled black triangle, $z \sim 2$ BzK/GDDS (filled red squares), $z \sim 1.5$ BzK/GDDS (open cross square); 注意: SMG 以外は力学質量と星形成率の比を見ているだけ。



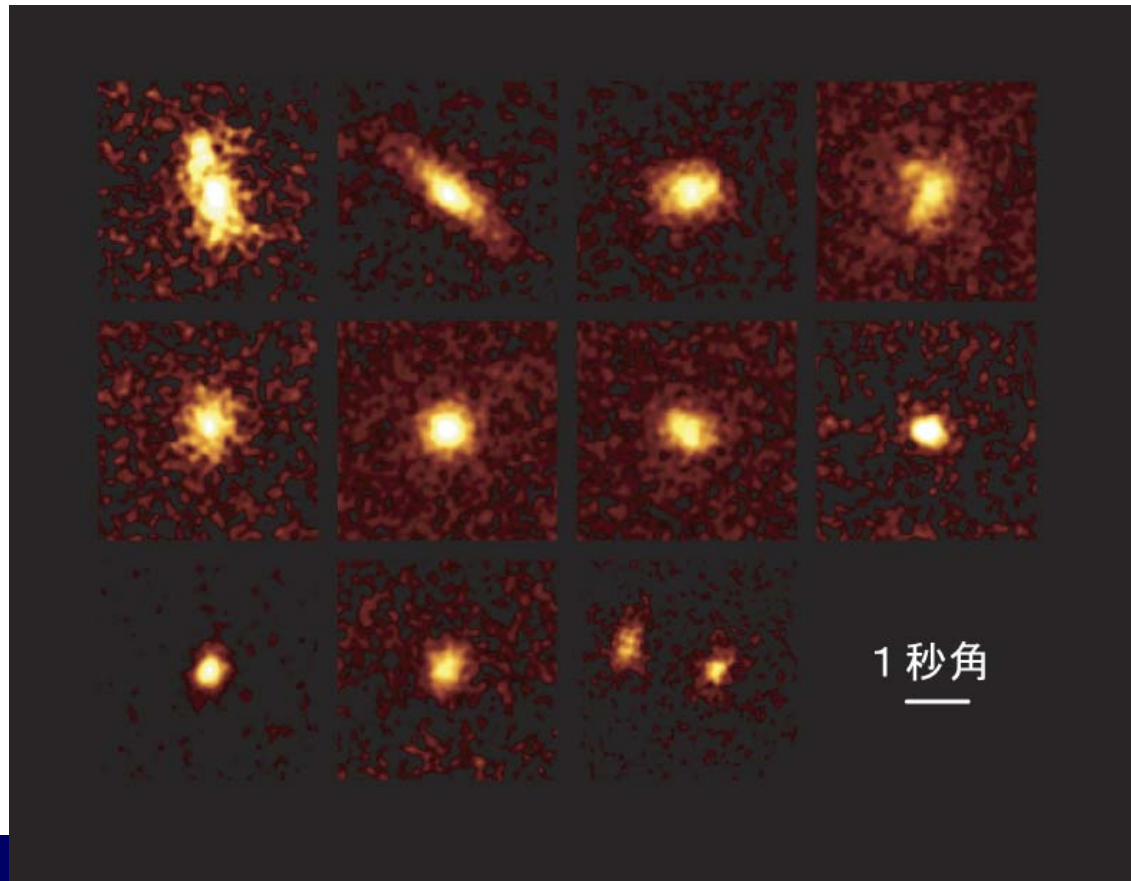
Between $1 < z < 3$: SF-efficiency

- ただし、大きな分子ガス質量をもつが、星形成率が低い銀河も見つかっている。
- Daddi et al. (2007, ApJ, 673, L21);



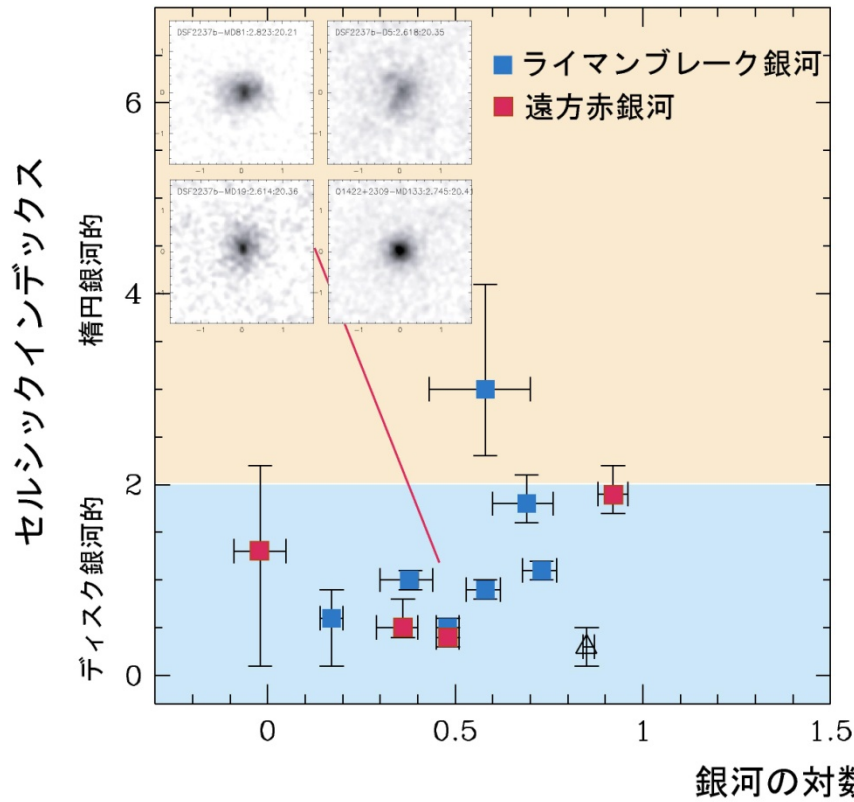
Above $z>3$

- すばる望遠鏡＋補償光学による赤方偏移3の銀河の画像 (Akiyama+08):
 - HSTの空間分解能 ($>0.2''$ @ $2\mu\text{m}$)では不足気味。
 - 地上望遠鏡＋補償光学($<0.1''$ @ $2\mu\text{m}$)でぎりぎり内部構造を調べることが可能。

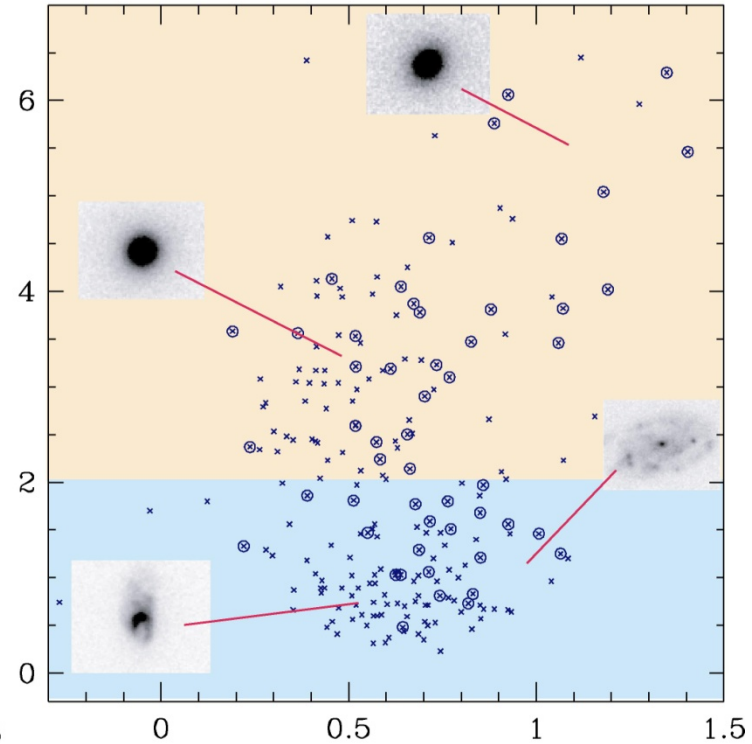


Above $z>3$; structure

赤方偏移 3 の銀河の観測結果

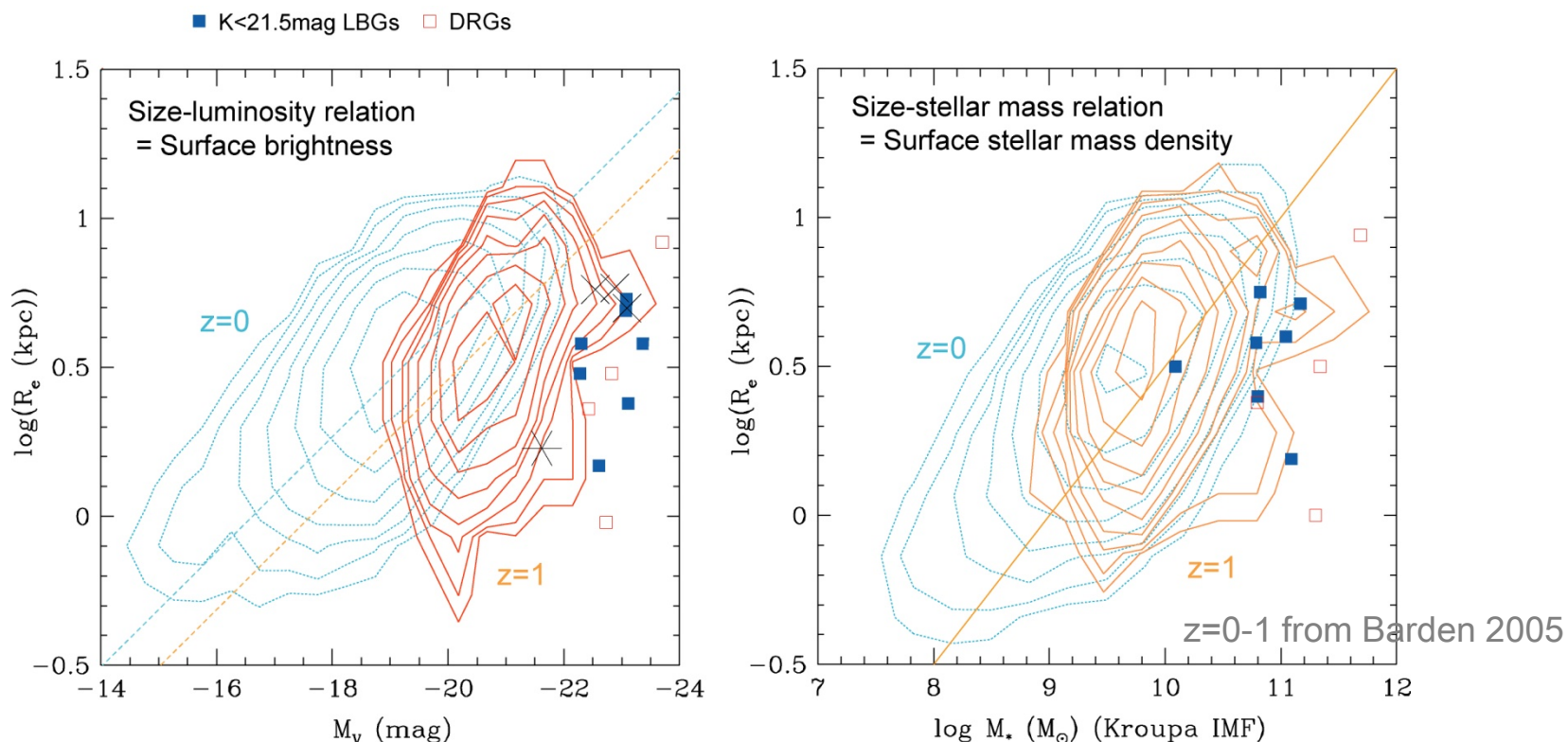


赤方偏移0.4-0.7の銀河の画像を用いたシミュレーション結果



- n 形態的には、ディスク銀河に似たフラットなプロファイルの銀河が多い、楕円銀河的な中心集中度の高い銀河が少ない。(Akiyama et al. 2008, ApJS, 175, 1)

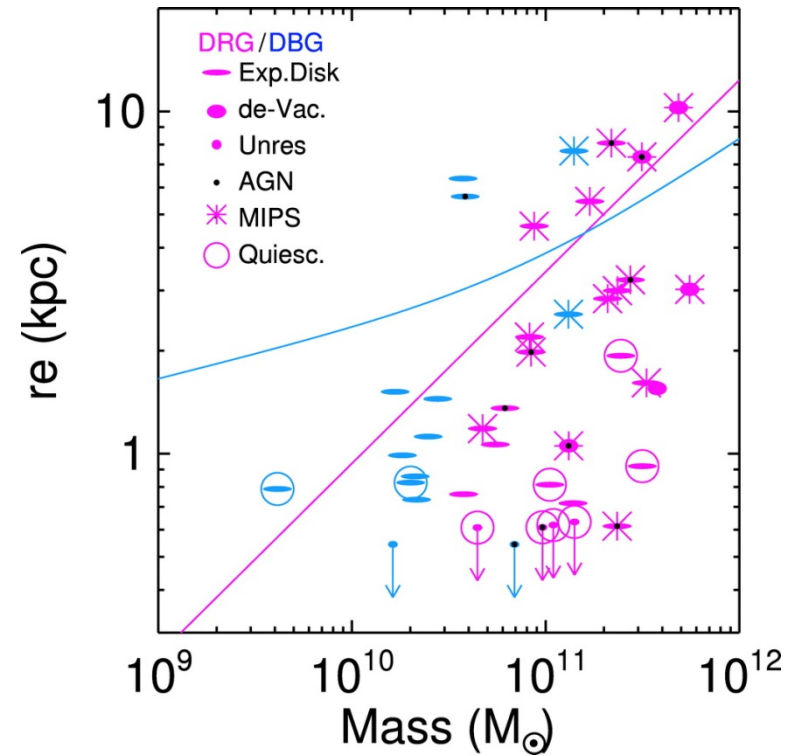
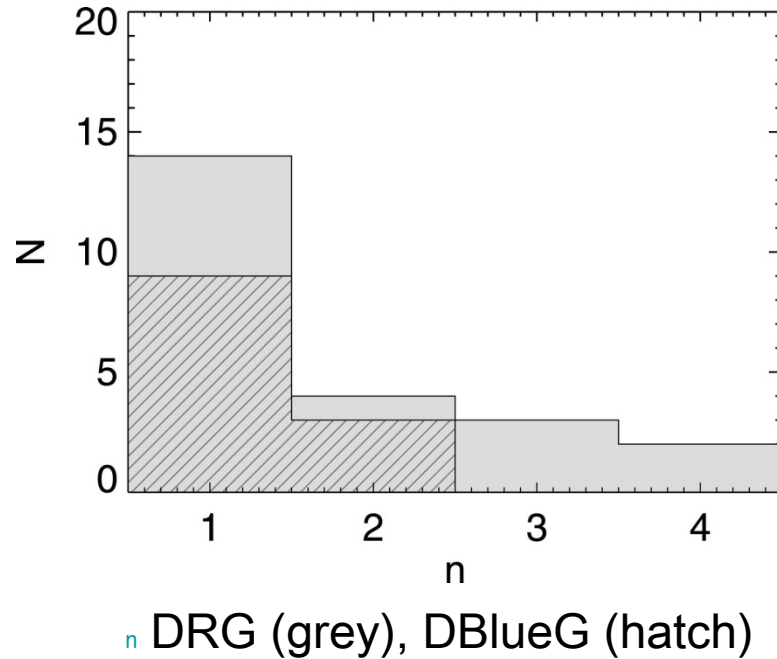
Above $z>3$; size



- n If we assume that the LBGs/DRGs have disk-like morphology, V-band surface brightnesses inferred from the size-luminosity relation is 2.9mag, and 1.7mag brighter than $z=0$ and $z=1$ disk galaxies, respectively.
- n Surface stellar mass densities inferred from the size-stellar mass relation is 3-6 times larger than $z=0-1$ disk galaxies shown with thick solid line. (Akiyama+08)

Above $z > 3$: structure, size

Toft et al. (2007, ApJ, 671, 285); HST NICMOS H-band imaging



Above $z>3$: dynamics ?

- 観測的にはようやくいくつかの銀河について調べられ始めたばかり。
- 回転か？ 複数のコンポーネントが見えているだけか？
 - Law et al. (2007, ApJ, 669, 929L) rotation with large V/σ ?
 - Nesvadba et al. (2008, A&A, 479, 67) marging ?

Above $z>3$: dynamics

• Stark et al. 2008 Nature, 455, 755; $z=3.07$ lensed galaxy

• 重力レンズによって空間分解能が有効的に高く (20-40mas = 150-300pc resolution) 観測できた。回転が支持される。

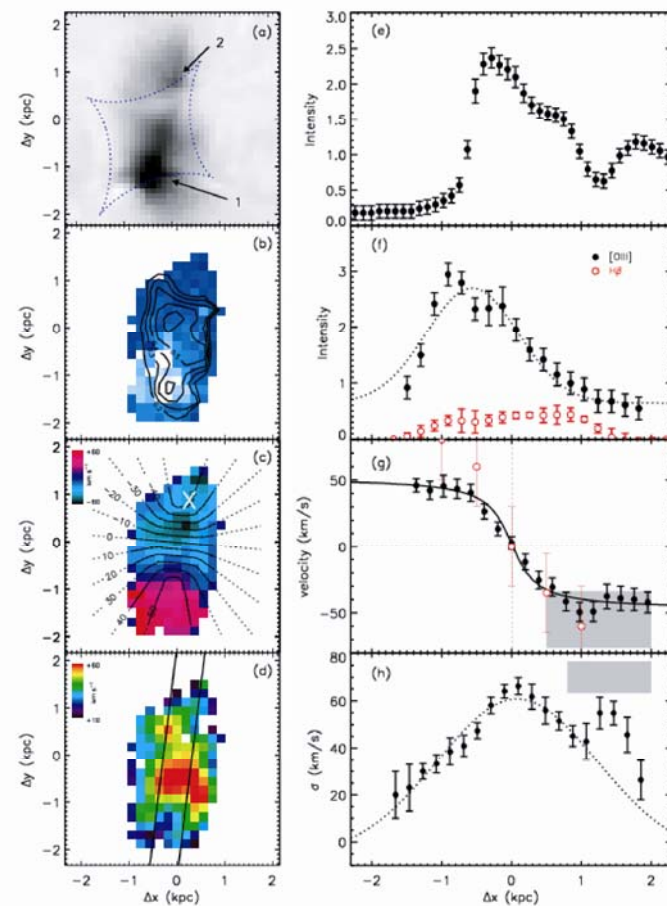
• ± 50 km/s rotation (inner 0.5kpc) + flat rotation curve, $\log M_{\text{dyn}}=9.3$ vs. $\log M_{\text{str}}=9.8$

• $\sigma=54$ km/s, $v/\sigma=1.2$ (星形成による加熱?),

• 4.4 Msolar/yr/kpc² (近傍銀河の Nuclear Star burst 程度)

• $12+\log(\text{O}/\text{H})=8.6 = 0.9Z_{\text{solar}}$,

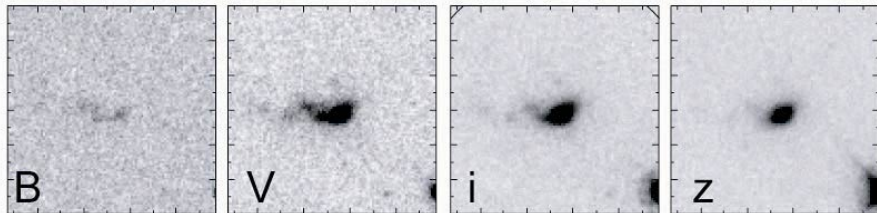
• CO luminosity-gas mass conversion factor <0.8 ;
~local LIRG (1) \ll local spiral (5)



それでブラックホールはバルジ的構造に付随しない？

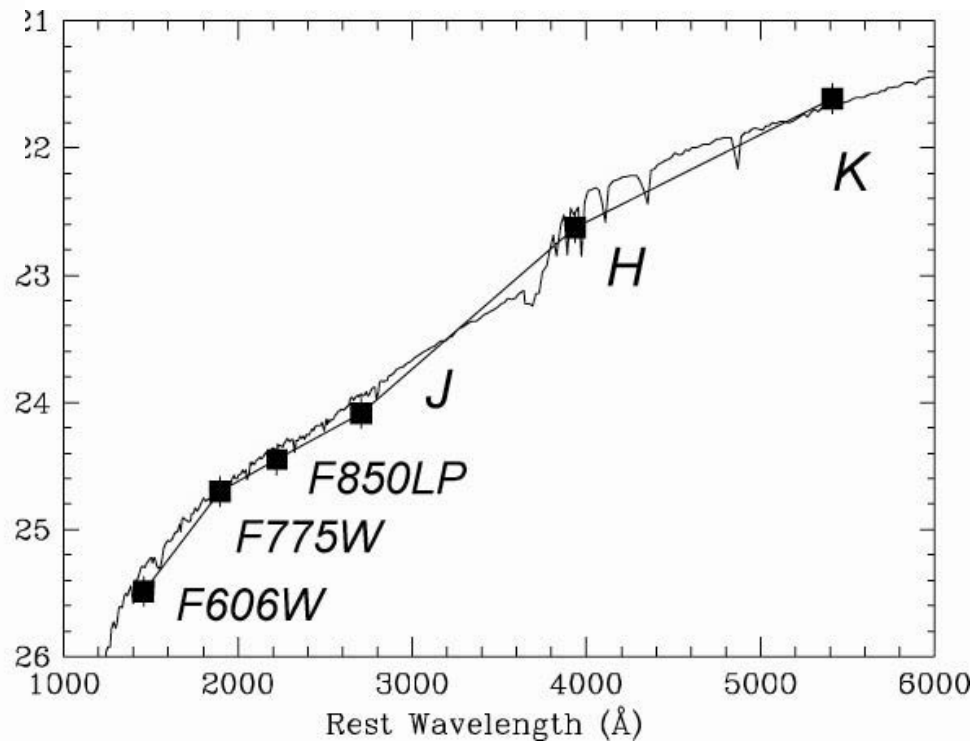
- ディスク的なものばかりだとすると、高赤方偏移ではブラックホールはバルジ的構造に付随していないのだろうか？
- とあるX線天体は楕円銀河に付随しているように見える。(Akiyama et al. 2005, ApJ, 629, 72); まだまだ観測が必要。

GOODSS027 $z=3.064$



AB magnit

- n NICMOS image fitted with r1/4-law
- n SED fit= Constant SF model, 1.8Gyr,
- n $E(B-V)=0.5\text{mag}$,
- n with $M_{\text{star}}=5.3 \times 10^{11} M_{\text{sol}}$



近い将来



From
<http://www.nro.nao.ac.jp/alma/J/photoneews/index.html>

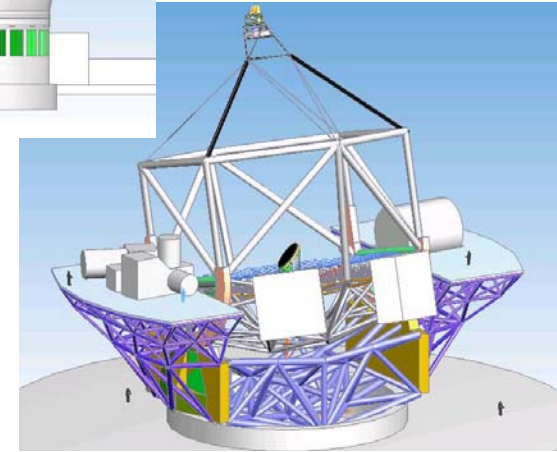
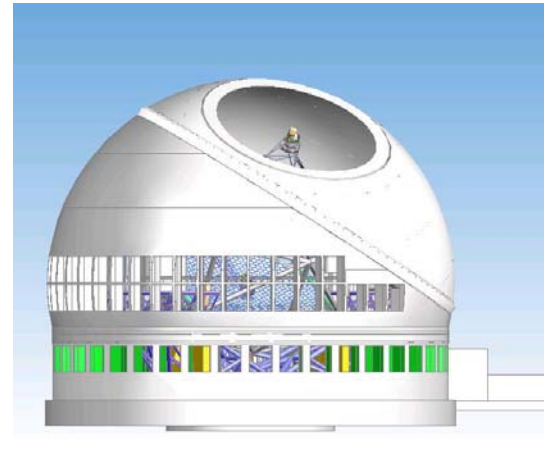
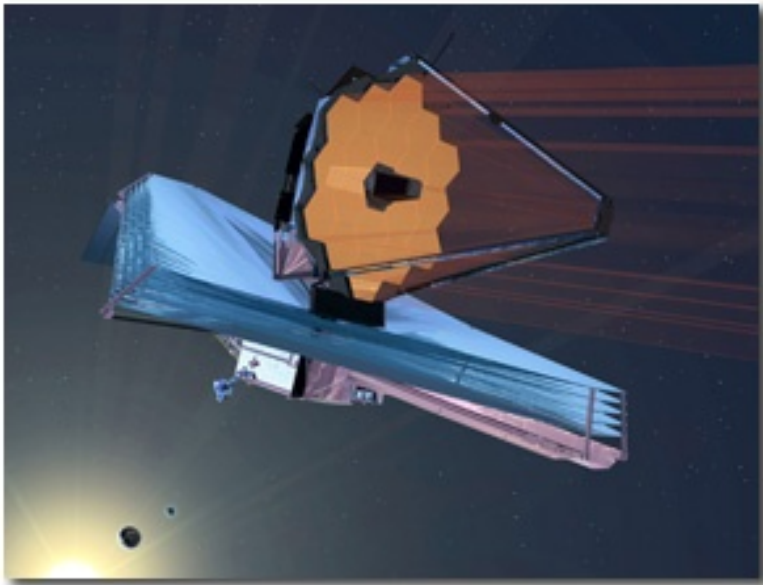


From
<http://www.aoc.nrao.edu/evla/>

遠方銀河の中での星形成がどのようなモードで起こっているかを知るためにはガス成分の観測も重要。ALMA (2012?) や EVLA (2012?) による遠方銀河の分子ガスの統計的観測により、力学質量＋星質量＋分子ガス質量の進化を知ることが可能になる。

(ガス質量の割合は銀河形態を決めるカギかもしれない。)

次のステップ

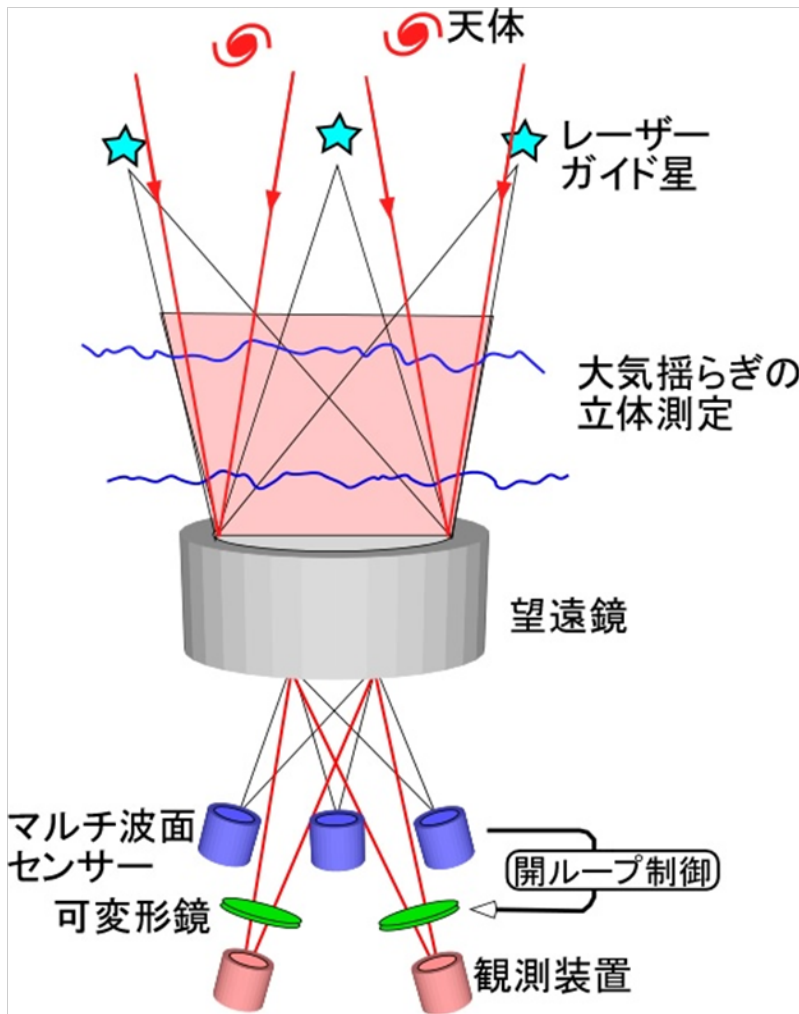


JWST 6.5m (2013?) + 30m 地上望遠鏡 (2016?) の時代:

低背景放射 JWSTによる**深撮像分光**観測と

大口径 30m望遠鏡補償光学による**高空間分解能**観測 ($\sim 0.015''$)

次のステップ; 我々の提案



新しい補償光学システムの概念図

我々のグループ(東北大学、国立天文台AOグループ、京都大学ほか)では
30m 望遠鏡の視野の中の、
多数の天体を
多天体補償光学を用いて
回折限界に近い空間分解能で
面分光観測する装置を検討/提案中。

どういう観測が有効か、
ぜひ理論側面からもインプットを！

Summary

- $0 < z < 1$ では
 - ディスク銀河では単純な回転ではない運動を示すものが増える。
 - 楕円銀河の進化は顕著ではないがサイズは小さくなっている。
- $1 < z < 3$ では
 - 回転を示す銀河が多いが速度分散も大きく、回転速度と速度分散の比が小さい。分厚いディスク？
 - 近傍宇宙の銀河との対応関係が自明ではない。
- $3 < z$ では
 - ディスク的構造をもつ回転する銀河が見られる。限られた種族しか見ていない？

Summary

- $0 < z < 1$ では
 - ディスク銀河では単純な回転でよい運動を示すものが増える。
 - 楕円銀河の進化は顕著ではないがサイズは小さくなっている。
 - $1 < z < 3$ では
 - 回転を示す銀河が多いが速度分散も大きく、回転速度と速度分散の比が小さい。分厚いディスク？
 - 近傍宇宙の銀河との対応関係が不明ではない。
 - $3 < z$ では
 - ディスク的構造をもつ回転する銀河が見られる。限られた種族しか見ていない？
- その次の観測として何が銀河の形成、進化を理解する鍵になるのか？
- $z > 2$ と $z = 1$ の銀河の対応関係をつけたい。
- 