

円盤銀河の出現時期 --形態等の観点から--

太田耕司

京都大学 大学院理学研究科 宇宙物理学教室

円盤銀河の形成と進化研究会
2013年9月26－28日 於 三鷹

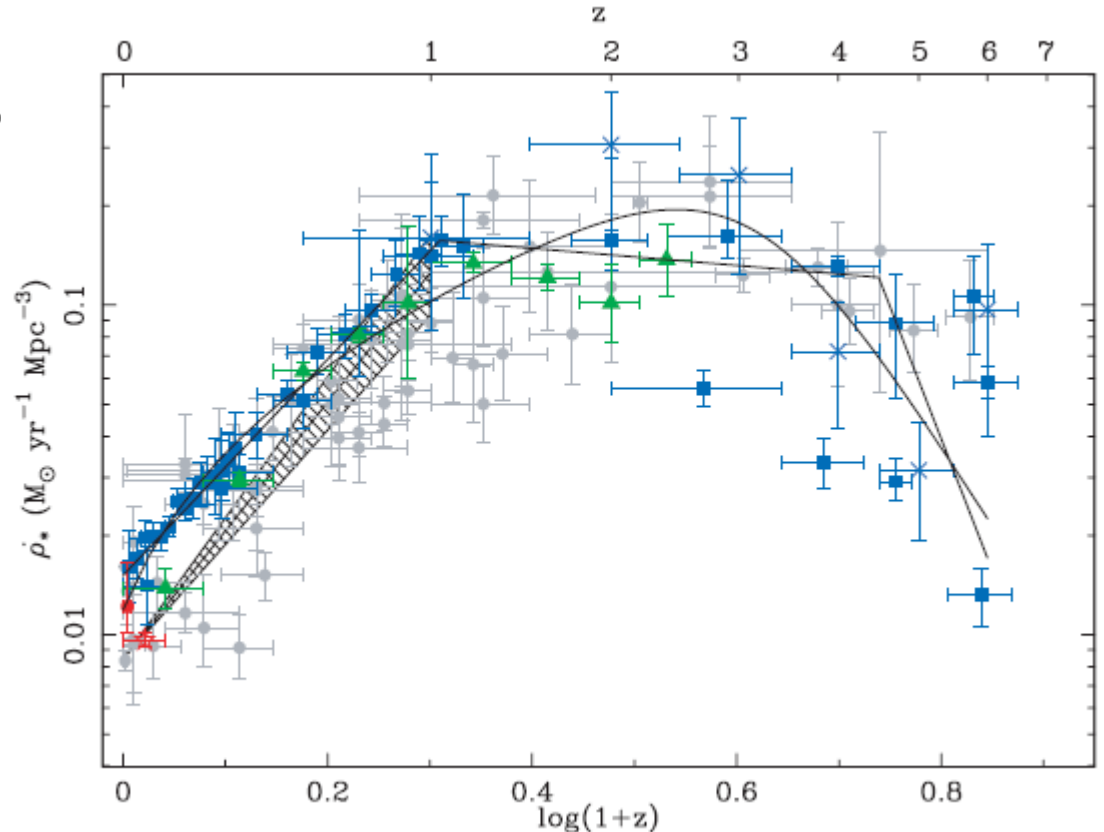
銀河進化の激動期

- $z \sim 2$ 付近 (~ 30 億年)

宇宙論的星形成史

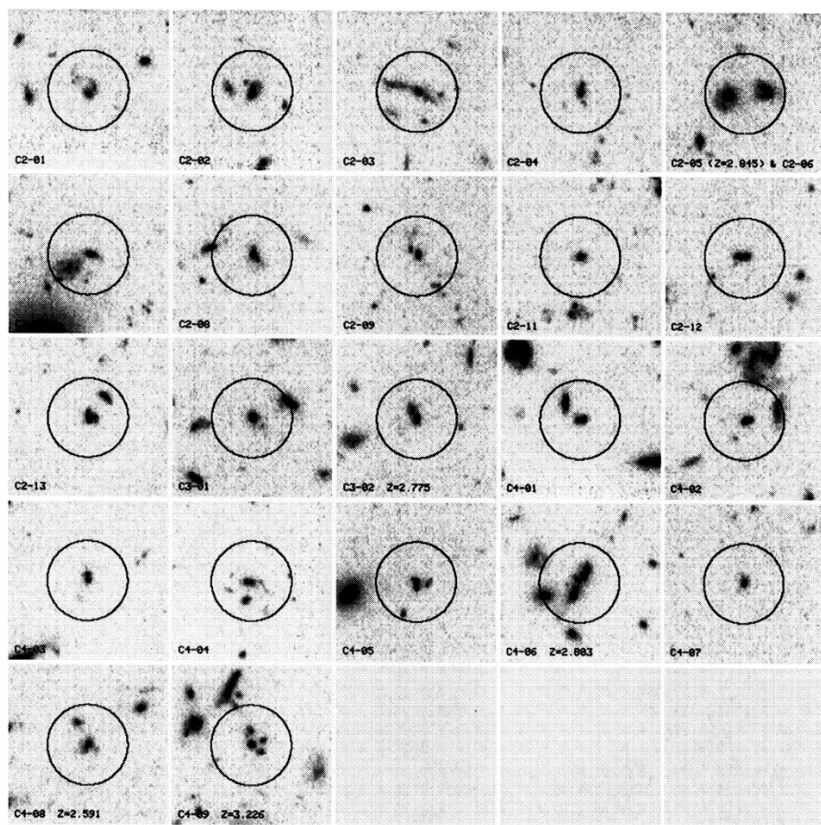
星形成、つまり銀河進化の
最盛期？

銀河合体もこのあたりが
ピーク??
AGNピークも

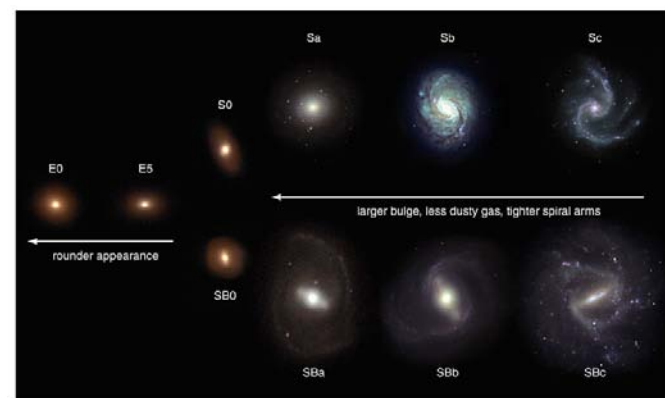


ハッブルシーケンスの発露もこの時代

Z~3の銀河の姿
(レストUVだけど) ~ 80kpc
10 arcsec



Hubble sequence



Copyright © 2004 Pearson Education, publishing as Addison Wesley.

ハッブルシークエンスの発露もこの時代

- $z < 1$ では、ハッブルシークエンス存在
- $z < 1$ では、楕円銀河の進化、円盤銀河の進化、円盤とバルジの進化、といった概念が存在
- $z > 3$ でも、沢山銀河が見つかっているが、何が何銀河か不明
- $z \sim 1-2$ でハッブルシークエンス形成？
 - 円盤やバルジの形成時期もこの時代？
 - 楕円銀河(passive)は既に存在？
とはいえ、まだ数的には少ない？

形態や内部構造の研究:

銀河進化を点(1ゾーン)として
探る時代から

銀河を面(内部構造)として
進化を探る時代へ

WFPCやACS/HST 1990年代後半～

WFPCやACSで一気に内部構造の研究が進展。
しかし、レストUVを見ているので、
 $z > 1$ では、隔靴搔痒の感はまぬがれなかった

- 2000年代になって NICMOS (H-bandまで)
NIC3で 0.043"/px 11" FoV
0.075"/px 19" FoV
0.2"/px 51" FoV (drizzle)
z~2ではレスト可視だが、いまいち盛り上がり欠けた
- WFC3 0.13"/px 136"x123" FoV
2009年頃から論文が出始めた?
- CANDELS時代に入って盛んになってきた
2011年頃からは
CANDELS = Cosmic Assembly Near-ir Deep Extragalactic Legacy Survey
- AOや面分光の登場も重要

10年前の研究例

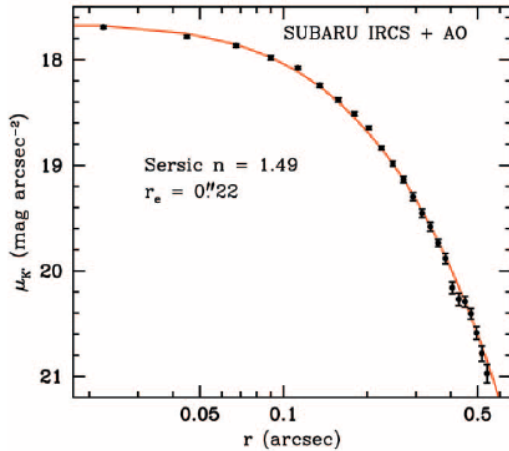
Iye et al. 2003

ERO R1 in the Field of
CI 0939+4713:

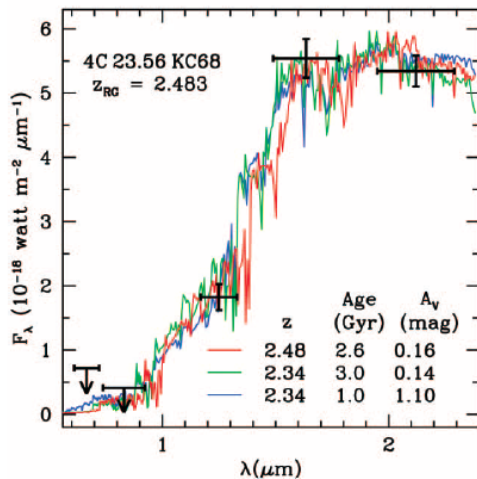
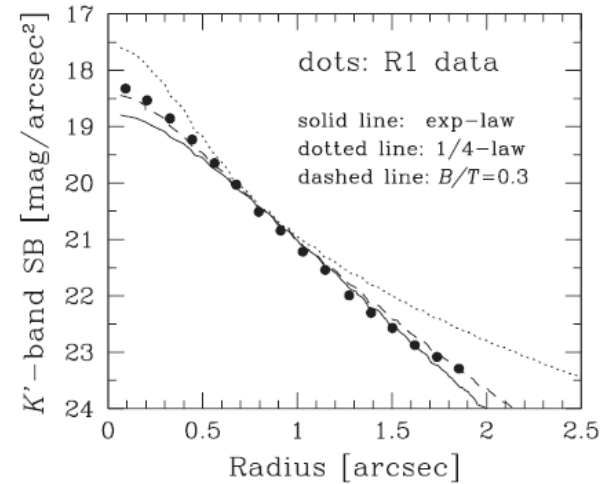
Evidence for 「an」 S0-like Galaxy
at $z \sim 1.5$

Stockton et al. 2004

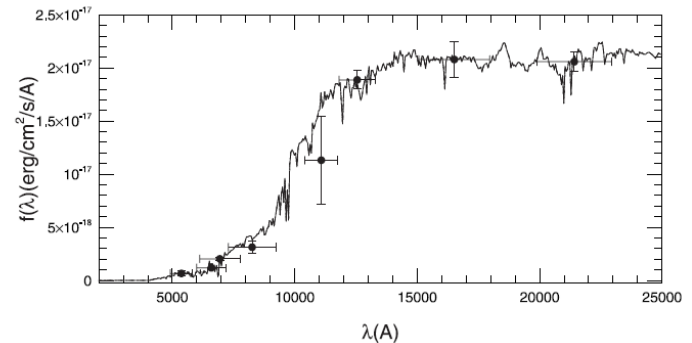
「A」 Disk Galaxy of Old Stars at $z \sim 2.5$



$n \sim 1 \sim 1.5$
 \Rightarrow Disk

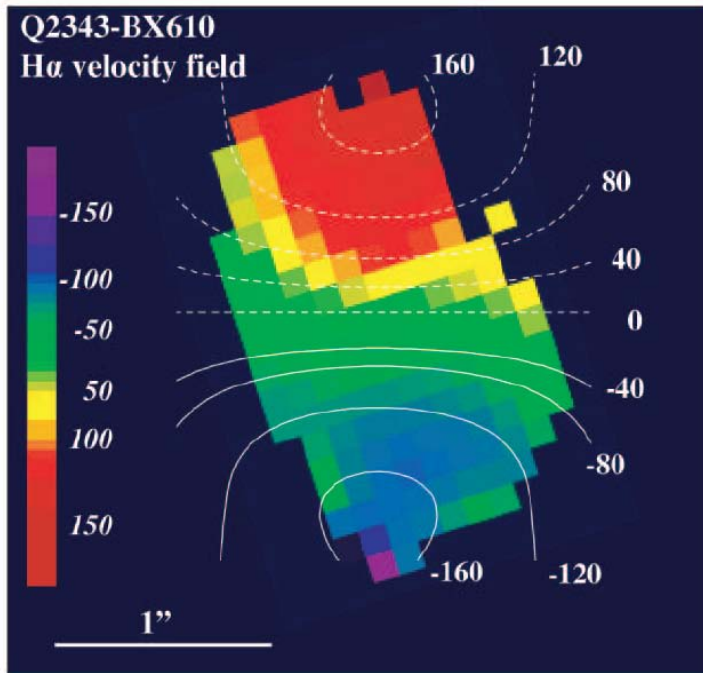


SED
 \Rightarrow old



K-band integral field spectroscopy w/AO

Forster-Schreiber et al. 2006, ApJ 645, 1062



Z~2 SF galaxiesの電離ガスの回転運動
速度分散分布
=>円盤銀河の形成時期？！

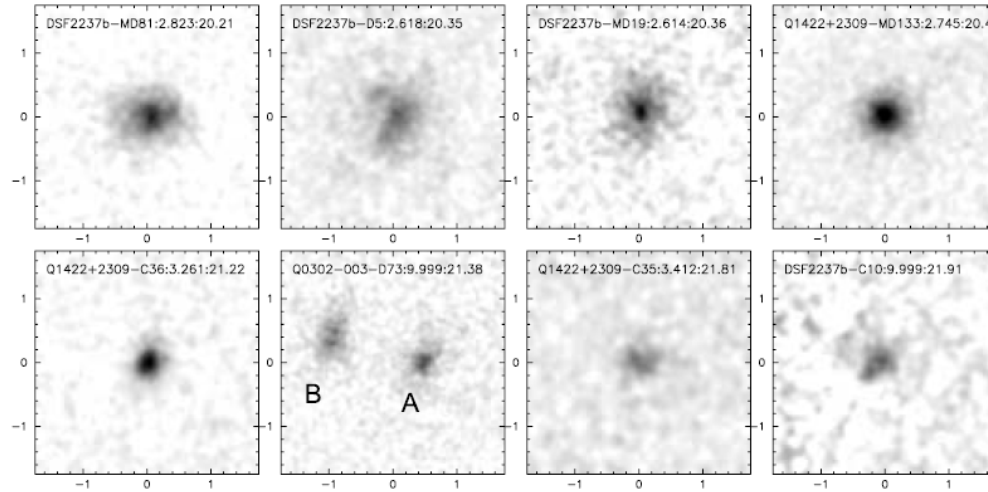
今や 多くの観測結果がでている

FIG. 5.— Two-dimensional $H\alpha$ velocity field of Q2343-BX610. The velocity field derived from the observed $H\alpha$ line emission is shown in colors, with a linear scaling increasing from purple to red. The superposed contours show the iso-velocity map from the best-fit rotating disk model, labeled with values relative to the systemic velocity in units of km s^{-1} (see § 4.3).

K-band imaging of AO

Z \sim 3 LBGs

Akiyama, KO, + 2008, ApJS 175, 1

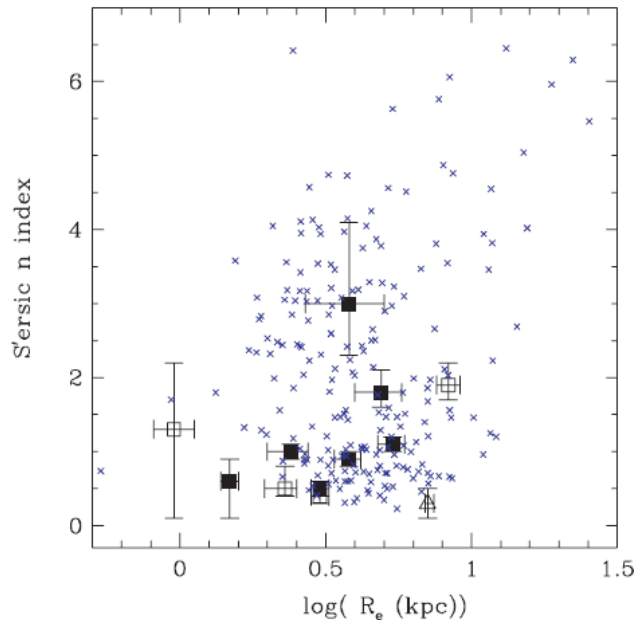


Subaru AO36

0.058"/px 59" FoV

0.023"/px 23" FoV

Typical PSF FWHM \sim 0.15"

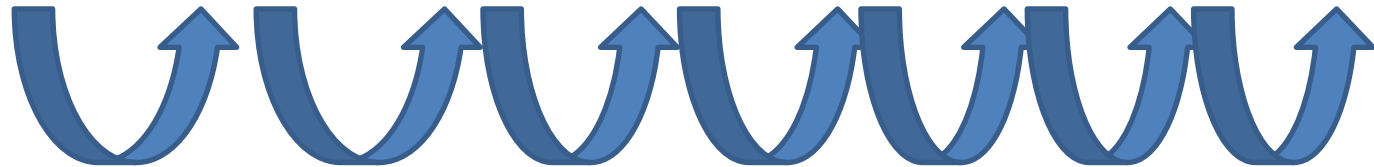


Sersic index $n \sim 1$ が多い!
すわ、円盤銀河の祖先か?
=>
でも円盤銀河の祖先ではない
(星質量面密度が高すぎ)

- 以下では、主に形態の観点から円盤銀河の出現時期を探る
- 紹介する研究例は、
- ほとんど HUDF/GOODS-S, UDS/SXDS等でのCANDELS のデータを用いている
- Phot-z中心
- SED fittingでstellar mass etc
- HSTのWFC3 Hバンドが中心
 - Z=1で レスト ~0.8ミクロン
 - Z=2で レスト ~0.5ミクロン
 - Z=3だと レスト ~0.4ミクロン
- Pixel scale は 0.13"だけど drizzleで ~0.06"
- Z=1~3で ~0.5 kpc

- $z=5$ 3 2 1.5 1.2 0.9 0.7 0.55

- 1.1 2.1 3.2 4.2 5.0 6.2 7.1 8.1



1Gyr

あとは z が0.1減るにつれて1Gyr増える

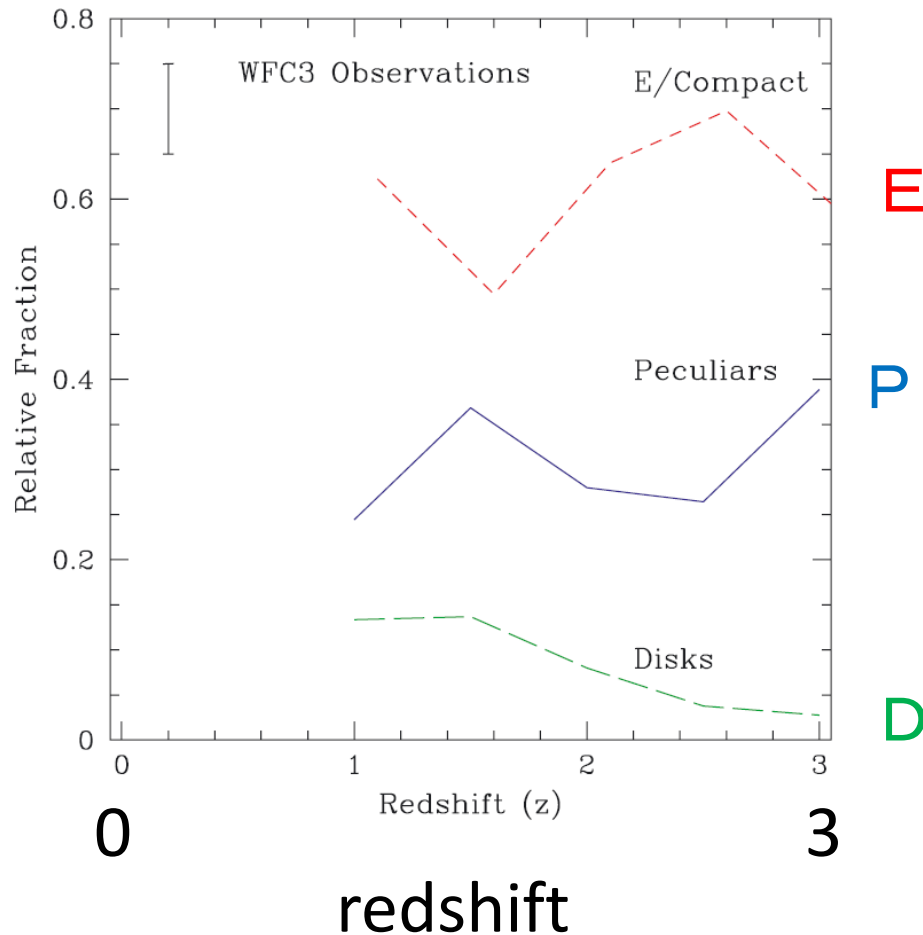
- $R=2$ kpc を 100km/s で回ると0.1 Gyr

ともあれ、まずは、
目でみた形態分類によって
形態進化を見てみよう

形態(の割合)のz進化

Conselice+ 2011, MN 417, 2270

WFC3



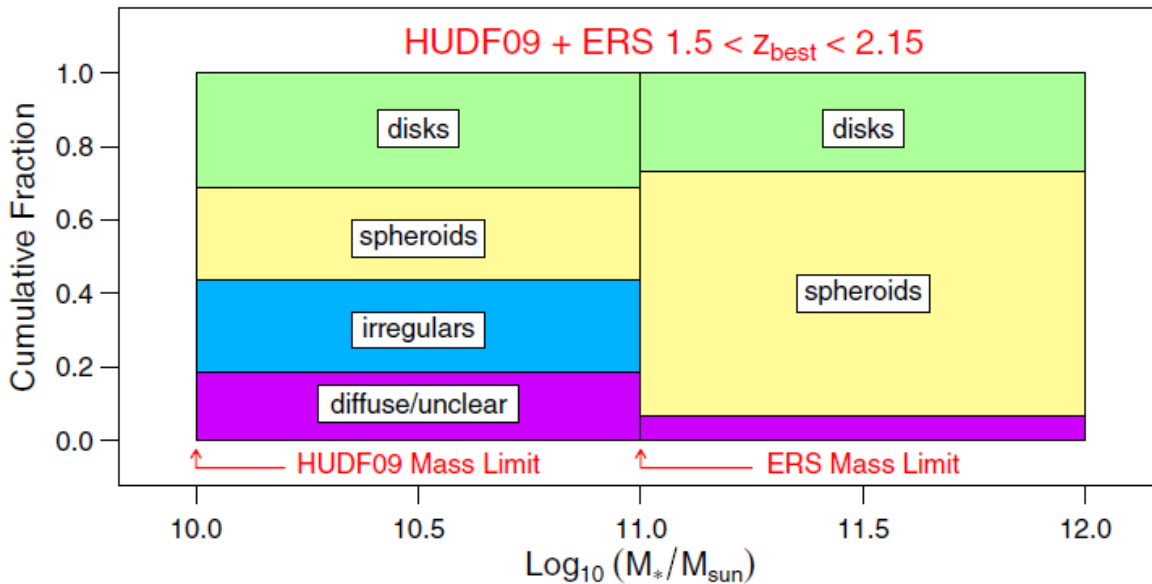
HUDF

Stellar mass cutはよくわからないが、 $10^{11} M_{\text{sun}}$ 以下が多いよう

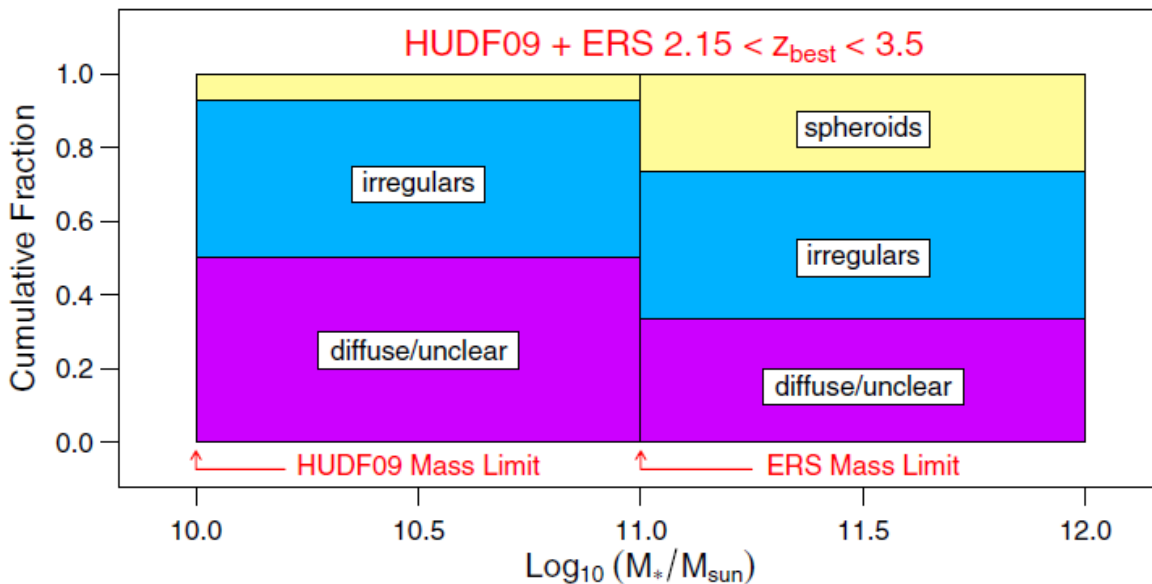
Disk少ない。
特に $z > 2$ では非常に少ない

星質量にも依る

Cameron et al. 2011, ApJ 743, 146



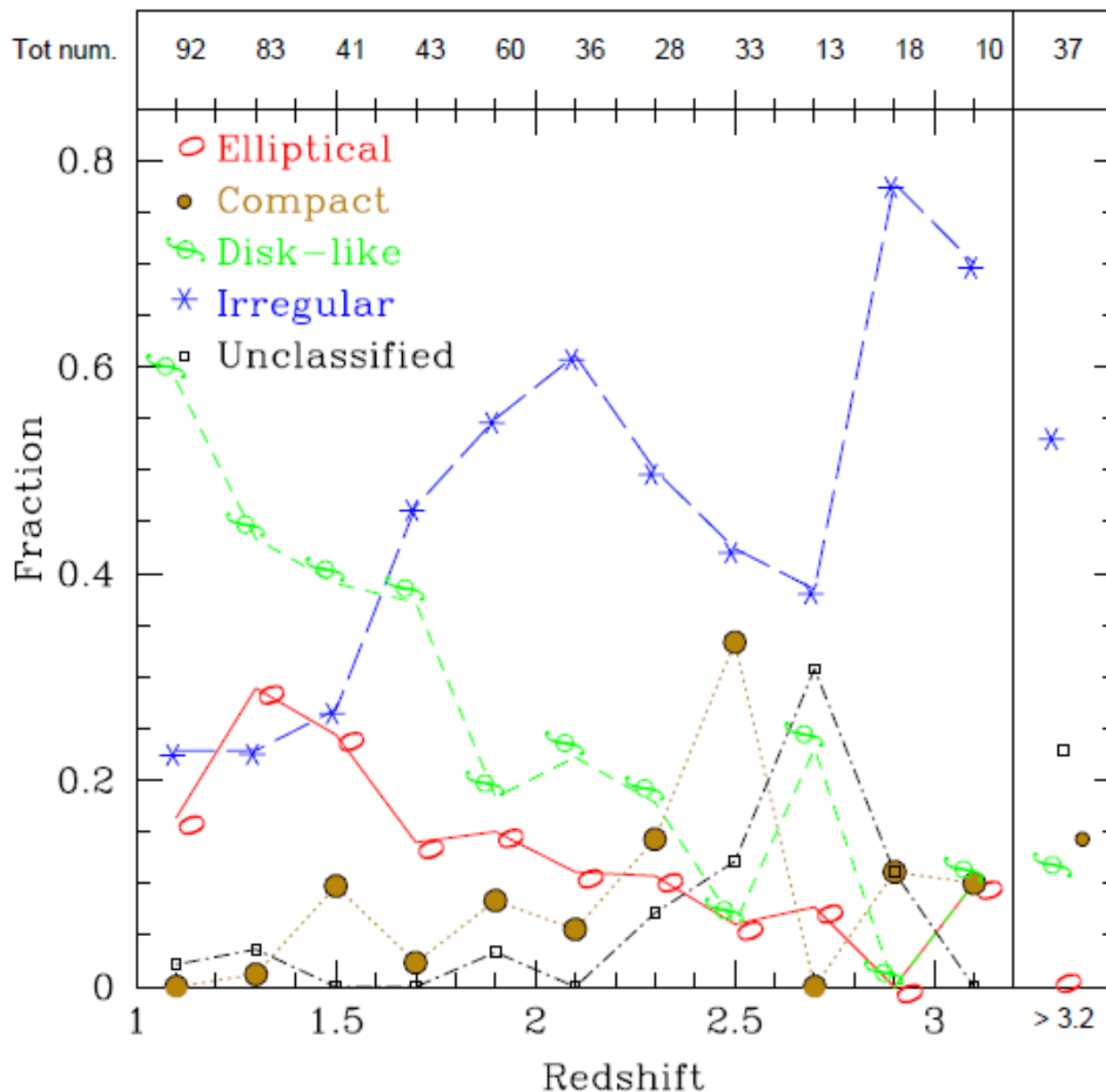
目でみた分類:
High- z ではirregularや
Diffuse/unclearが多く、
Spheroidが少し。
 $z \sim 2$ くらいからdiskが
台頭してきたように
みえる。



$z=1.5$ 4.6Gyr
 $z=2.15$ 3.3Gyr
 $z=3.5$ 1.9Gyr

目で見た分類

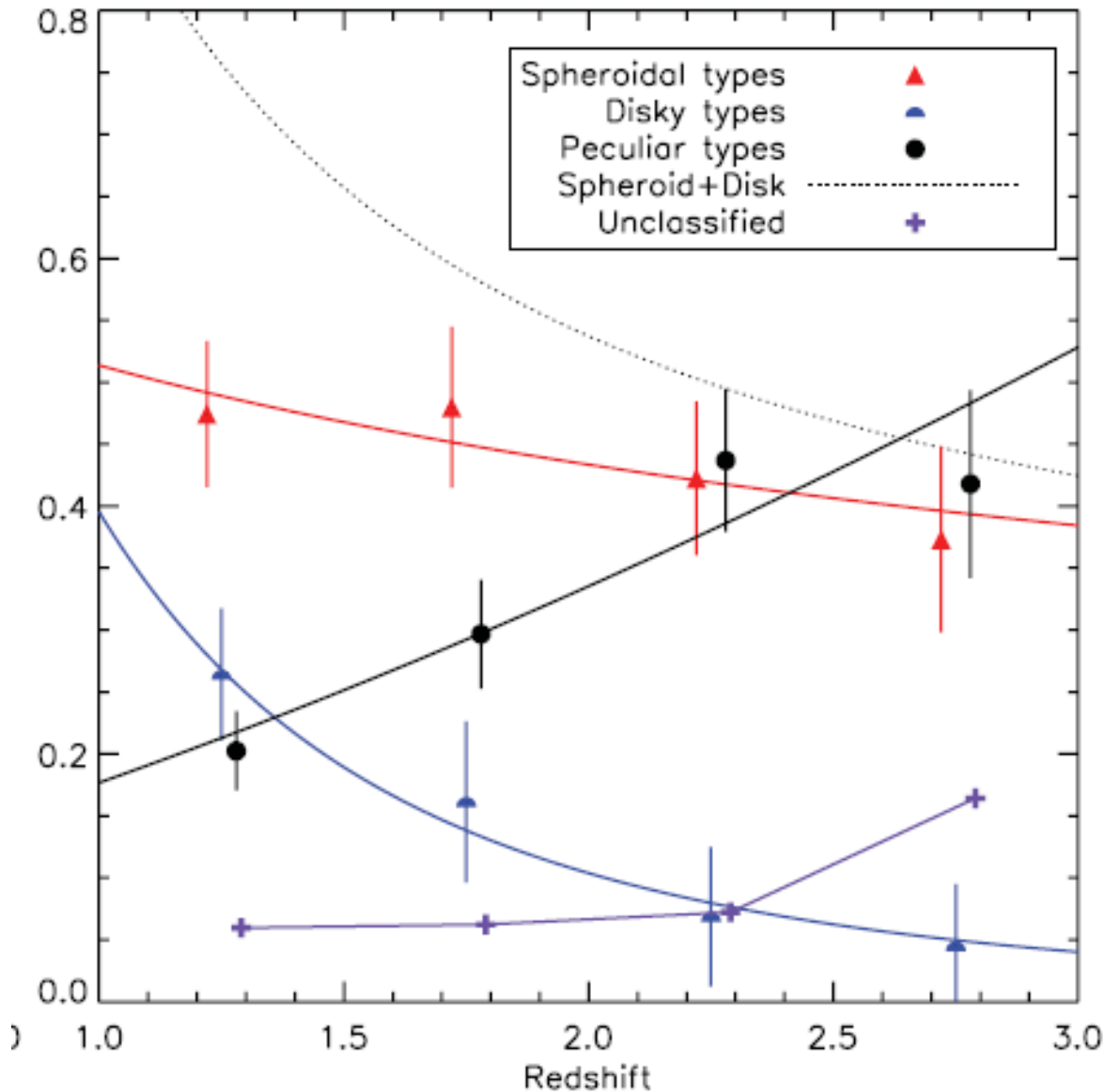
Talia et al. 1307.1366v1



GMASS in GOODS-S

楕円と円盤の割合は
Higher-zで減る。
不規則は増える

**Z > 2で円盤が
少ないのは
一致しているが、
楕円や不規則の
割合は
論文によって違うな**



CANDELS in UDS

やはり $z > 2$ で
円盤は少ない！

Disturbed+interaction

Spheroid+dist sph
+compact

Disk +dist disk

目でみた分類の例

Mortlock et al. 2013, MN 433, 1185

spheroid

disk

interaction

compact

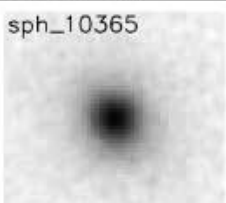



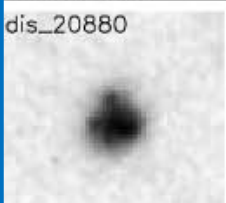



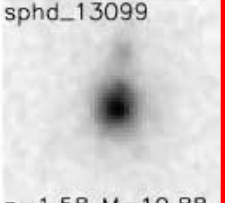





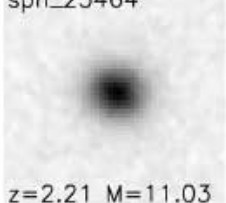
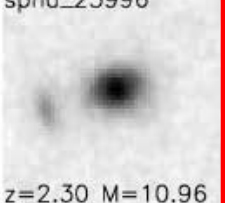
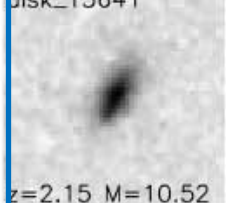

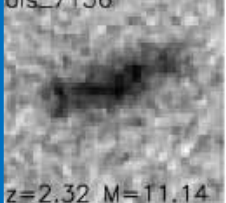

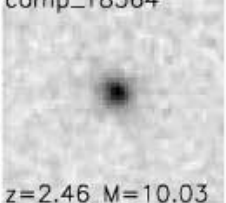
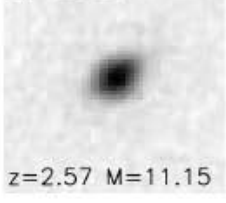
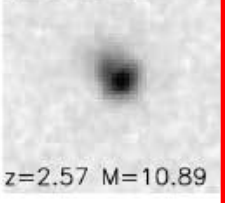
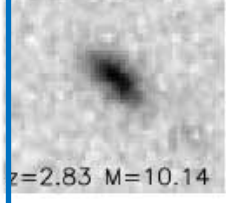
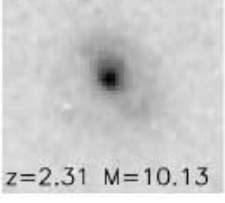
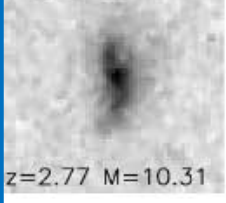
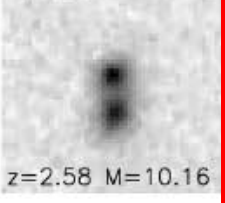
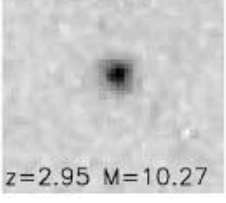
Spheroid	Dist Spheroid	Disk	Dist disk	Disturbed	Interaction	Compact
sph_10365  z=1.40 M=11.01	sphd_15552  z=1.21 M=10.08	disk_21934  z=1.30 M=10.07	diskd_26649  z=1.16 M=10.23	dis_20880  z=1.32 M=10.11	int_4534  z=1.14 M=10.23	comp_19928  z=1.32 M=10.02
sph_7757  z=1.68 M=10.98	sphd_13099  z=1.58 M=10.88	disk_25119  z=1.58 M=10.95	diskd_29560  z=1.50 M=11.16	dis_18773  z=1.70 M=10.28	int_26671  z=1.56 M=11.14	comp_30820  z=1.62 M=10.13
sph_23464  z=2.21 M=11.03	sphd_25996  z=2.30 M=10.96	disk_13641  z=2.15 M=10.52	diskd_10120  z=2.31 M=10.13	dis_7156  z=2.32 M=11.14	int_32311  z=2.49 M=10.14	comp_18364  z=2.46 M=10.03
sph_28681  z=2.57 M=11.15	sphd_15484  z=2.57 M=10.89	disk_16052  z=2.83 M=10.14	diskd_22773  z=2.31 M=10.13	dis_32196  z=2.77 M=10.31	int_4351  z=2.58 M=10.16	comp_26362  z=2.95 M=10.27

Figure 3. Examples of the galaxies that fall into our various classification types. Each row is ordered by type. From left to right the order is spheroid (sph), disturbed spheroid (sphd), disc (disk), disturbed disc (diskd), disturbed (dis), interaction (int) and compact (comp). Each column is ordered by redshift bin. From top to bottom the order is $z = 1-1.5$, $z = 1.5-2$, $z = 2-2.5$, $z = 2.5-3$. The postage stamps are cut out from the CANDELS UDS H_{160} -band image and are approximately 3×3 arcsec in size.

$z \sim 0$ の銀河を $z = 2.5$ に置くとどう見える？ Sa, Sb 編

Conselice et al. 2011, MN 417, 2770

Early diskだとellipticalに見えるものもある

B-band images at $z \sim 0$ Frei +(1996)

WFC3 F160W

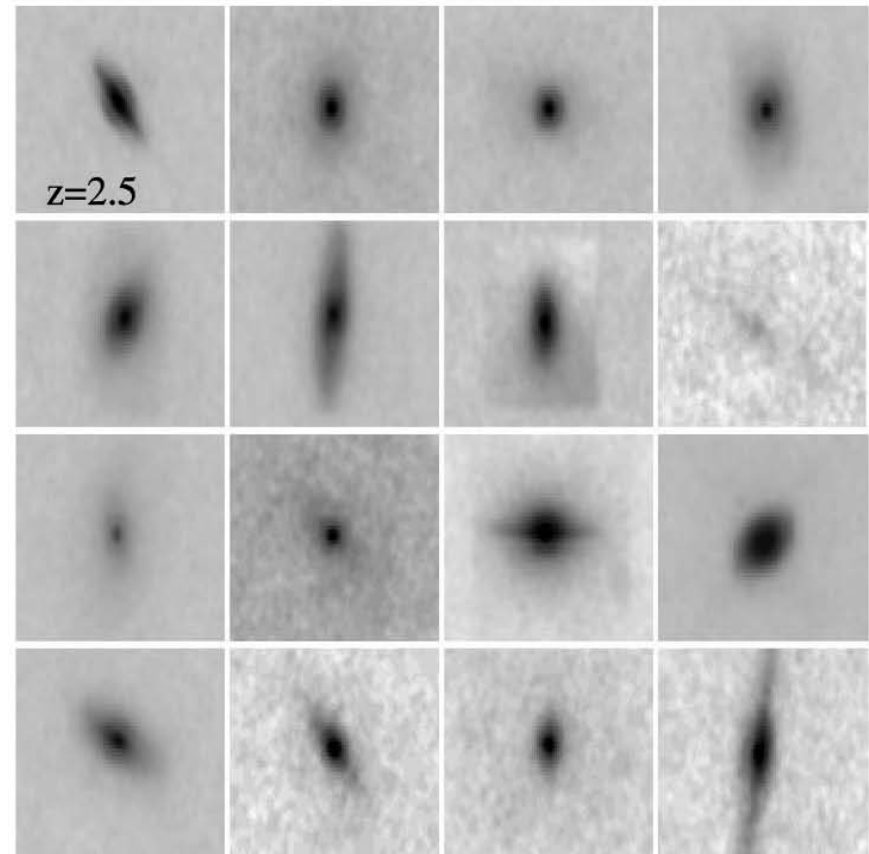
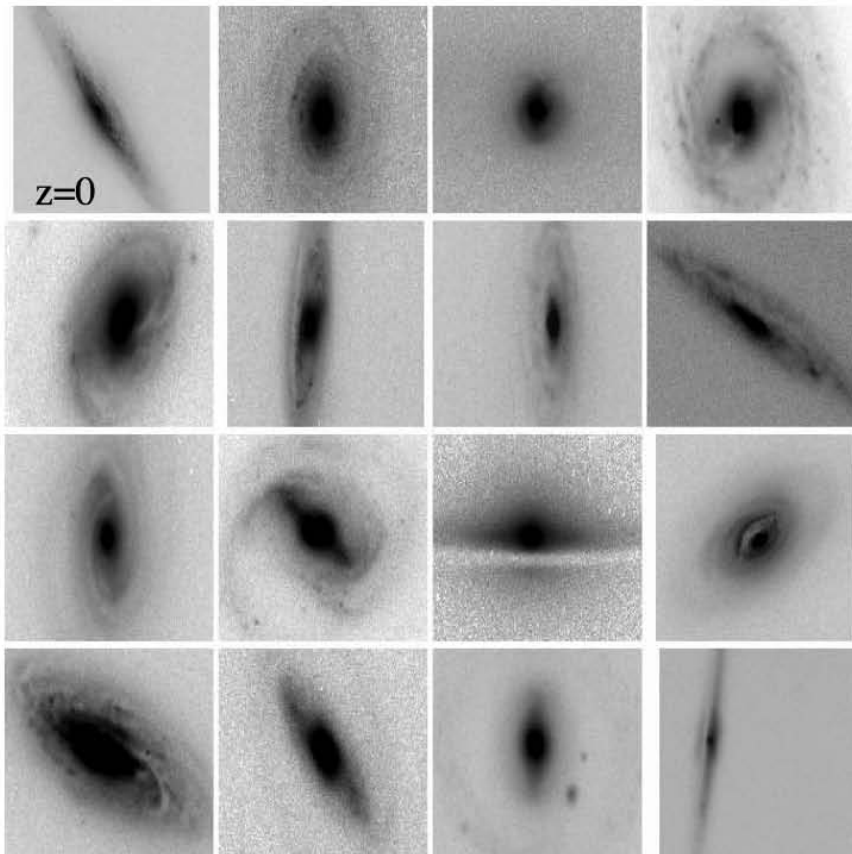


Figure 8. Example simulations of nearby galaxies which are originally observed at $z \sim 0$ imaged to how they would appear at $z = 2.5$ within the UDF $F160W$ band with the WFC3. These nearby galaxies are classified as early-type spirals (Sa and Sb) locally. The typical sizes of these galaxies are several kpc in

$z \sim 0$ の銀河を $z = 2.5$ に置くとどう見える？ Sc, Sd 編

ほとんどbulgeに見える。Spiral armは見えない。
Disk部分はouter haloのようにも見えて、E+envelopeにも見える。

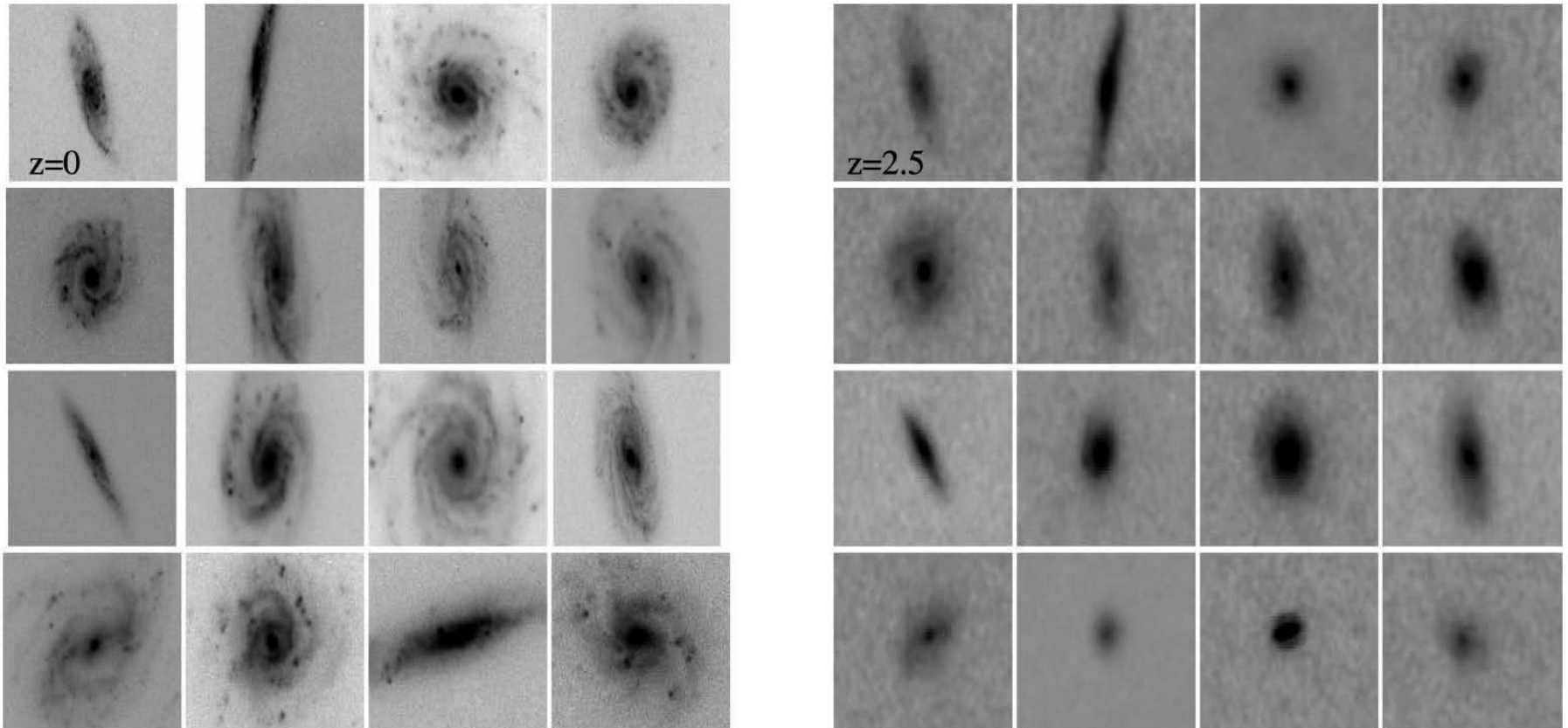


Figure 9. Example simulations of nearby galaxies which are originally observed at $z \sim 0$ imaged to how they would appear at $z = 2.5$ within the UDF $F160W$ band with the WFC3. These nearby galaxies are classified as late-type spirals (Sc and Sd). As can be seen, several systems are edge-on in these simulations.

誤分類はないか？

Mortlock et al. 2013, MN 433, 1185

近傍銀河を遠方にもっていった時のsimulationをして、分類のテスト

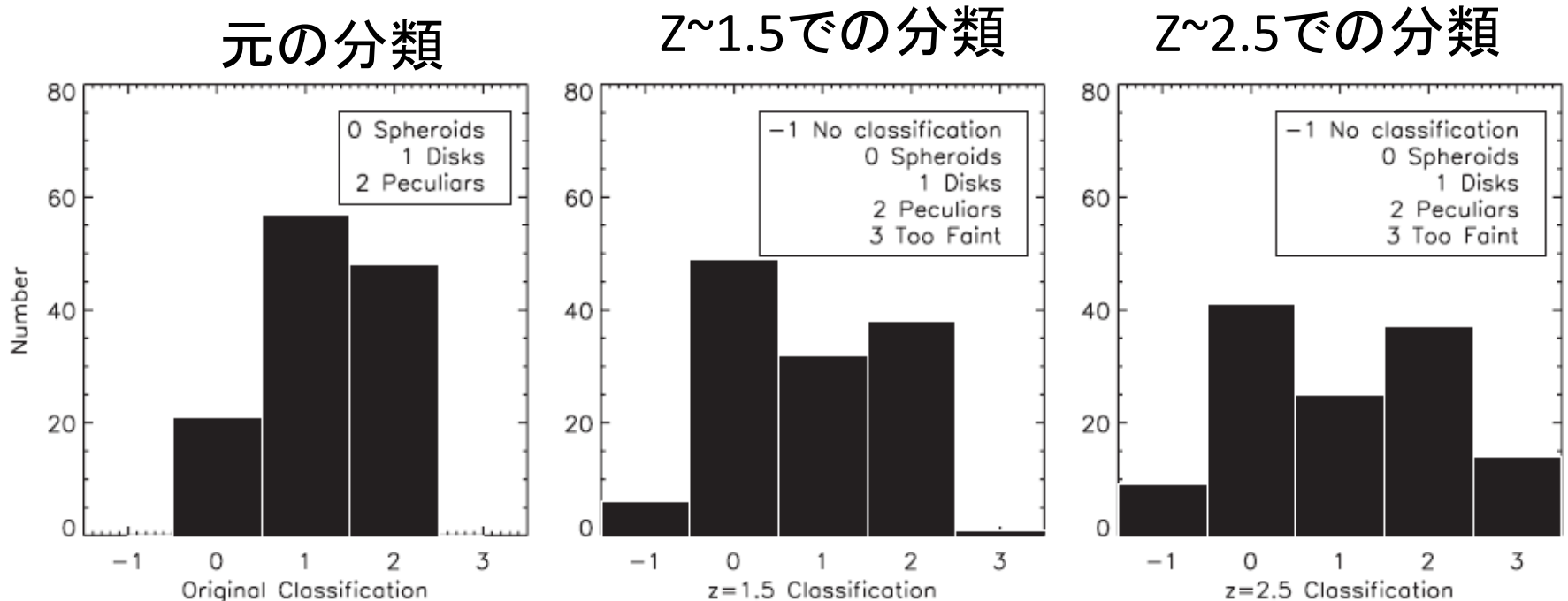
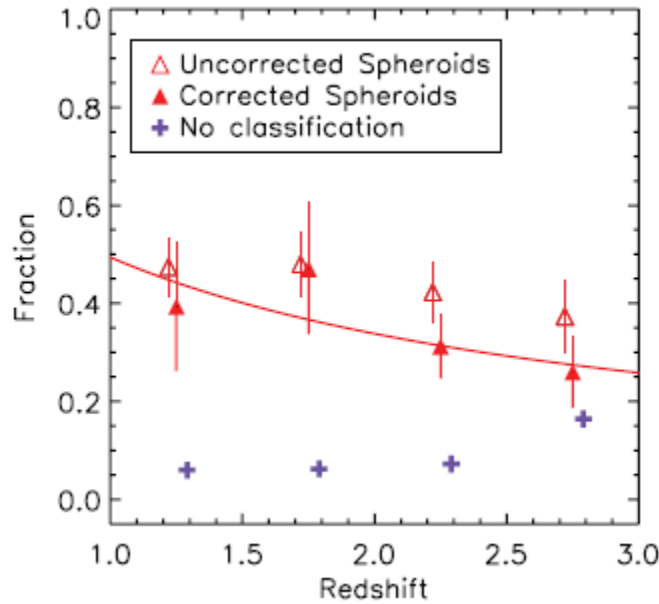


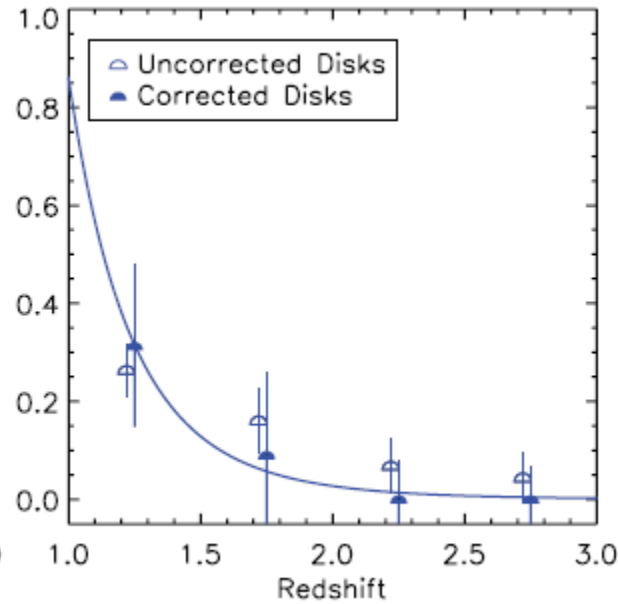
Figure 4. The histograms showing the classification of the 82, mostly Hubble-type galaxies, from Frei et al. (1996) and 44 peculiar galaxies from Conselice (2003) at $z = 0$ (left-hand panel) and the classifications of the sample after being artificially redshifted to $z = 1.5$ (middle panel) and $z = 2.5$ (right-hand panel).

- 明らかに円盤が楕円と認識されている！
- 従って、生の分類による割合を補正しないと
いけない
- で、補正するのだけど、これでいいのかどう
か・・・？ しかし補正の大きさは大したことな
い(次ページ)

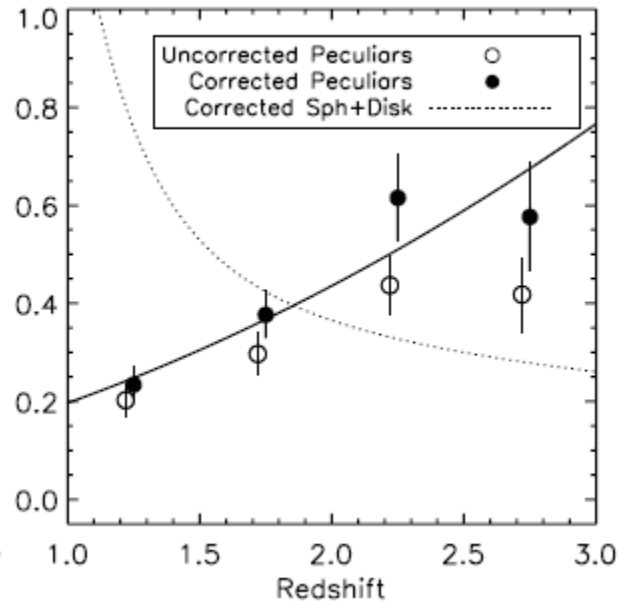
補正後のfractionの進化



spheroid



disk



peculiar

ゆっくり増えていく？

$z > 2$ には円盤いない！

急に減っていく

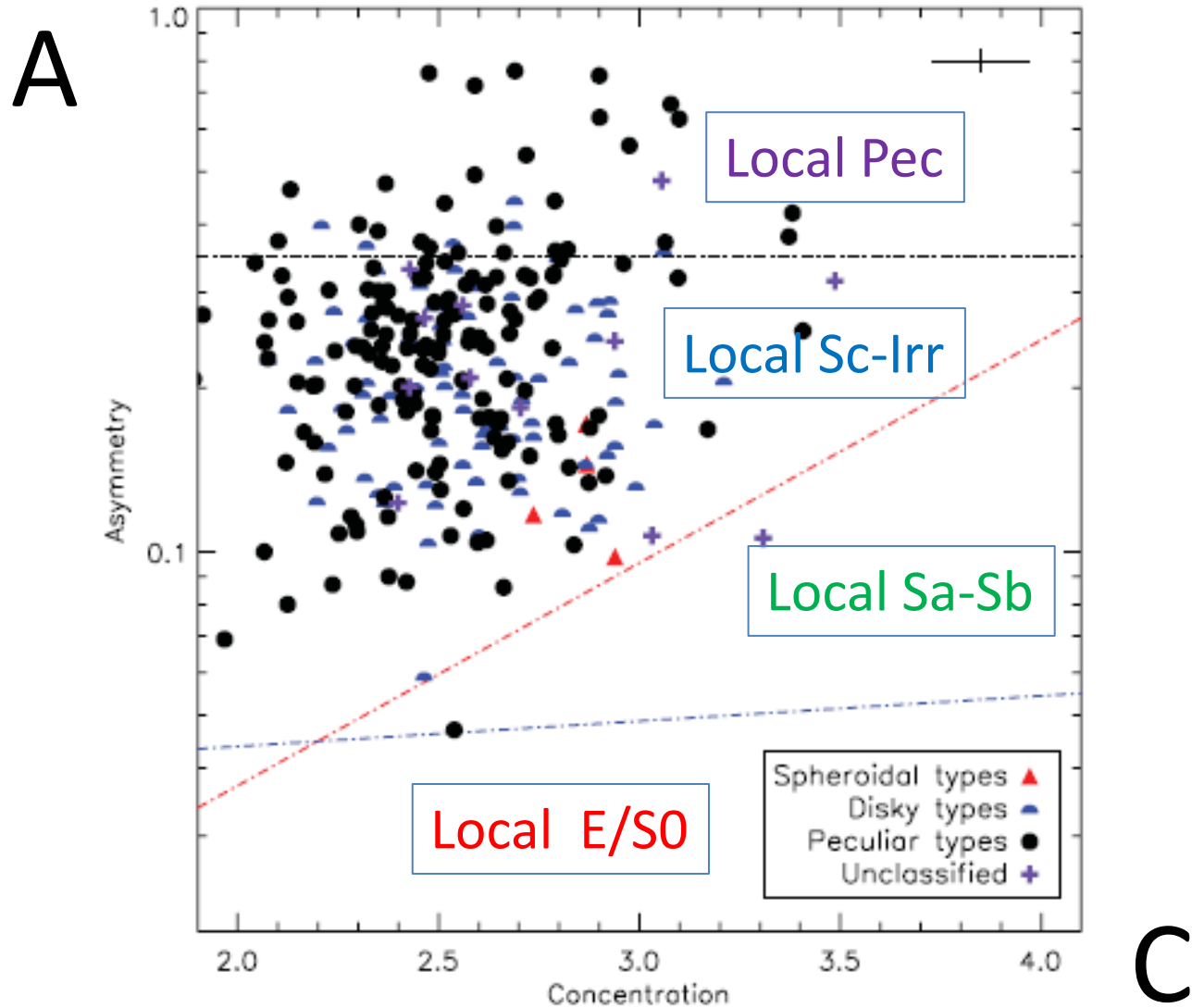
目ではダメだ！

ちゃんとパラメータ使って分類せよ！

CAS分類なんかはどうなのか？

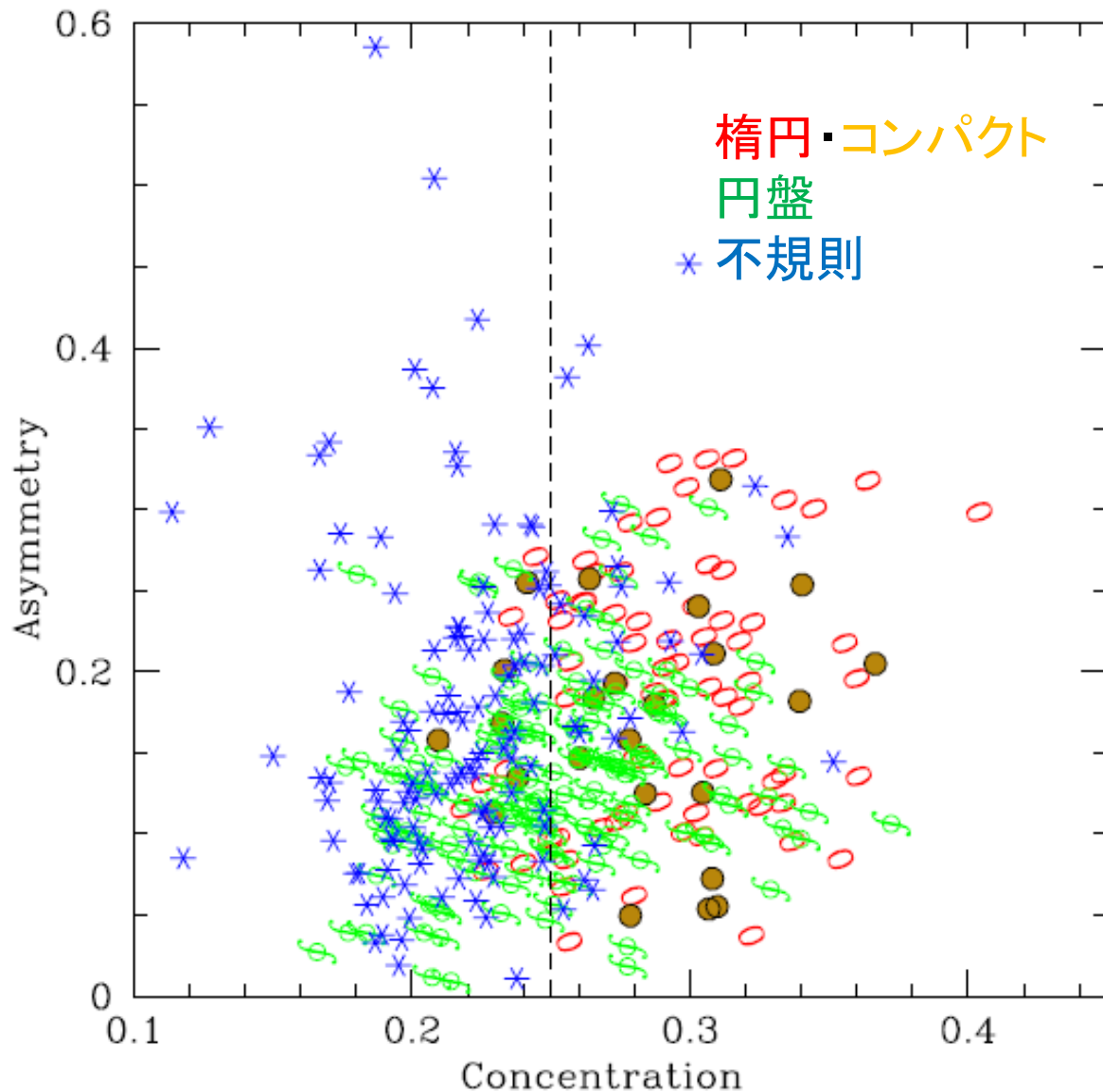
と、言う人もいるかもしれないですね

AC平面での形態分類は無理・不可能



別のグループの結果でも、有効には分離できていない。

Sもあまり有効ではない。



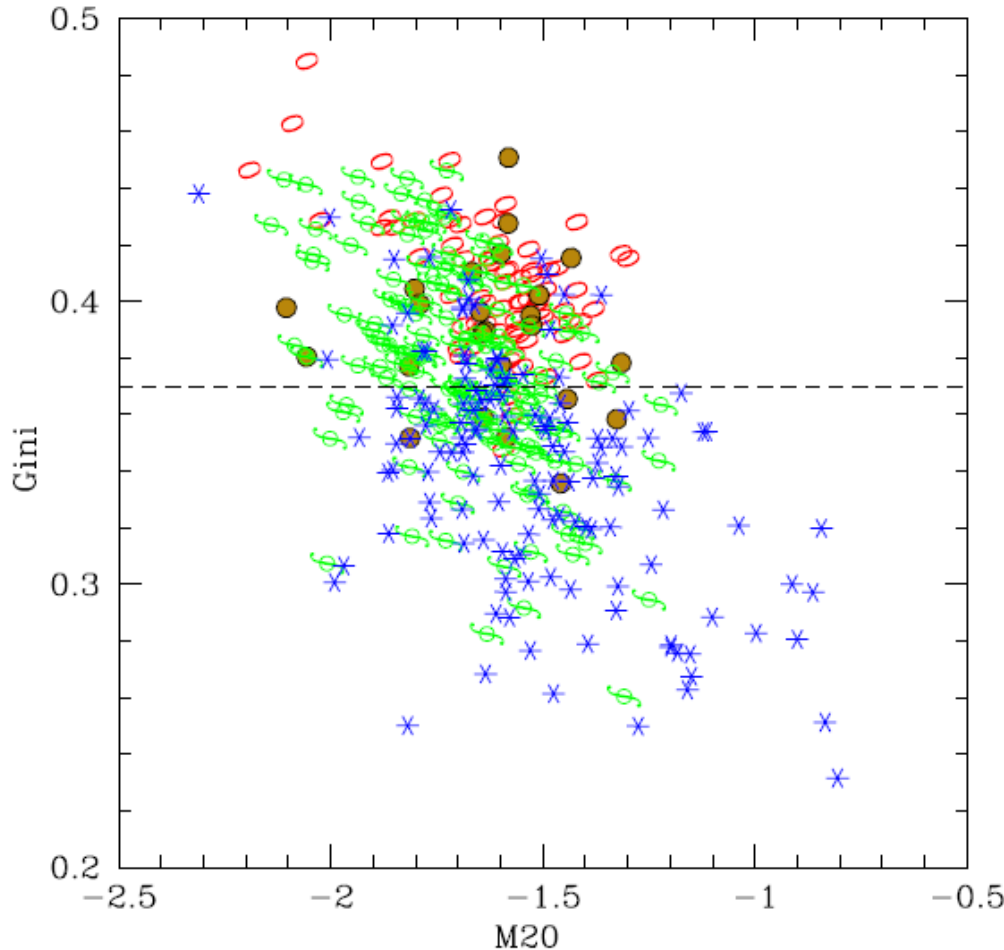
楕円は 中心集中
コンパクトも
不規則は $C < 0.25$

他の similar-z での
過去の研究と大体
合う

Low-z と比べて
全般に A が大きく、
A による分類は
できていない

Gini, M20では？

Gini: 中心集中度みたいたいのもの (F160での値)



楕円とコンパクトは

$G > 0.37$

不規則は $G < 0.37$

円盤はいろいろ

Low-zと比べて

全般に似ているが、
楕円のM20は小さい

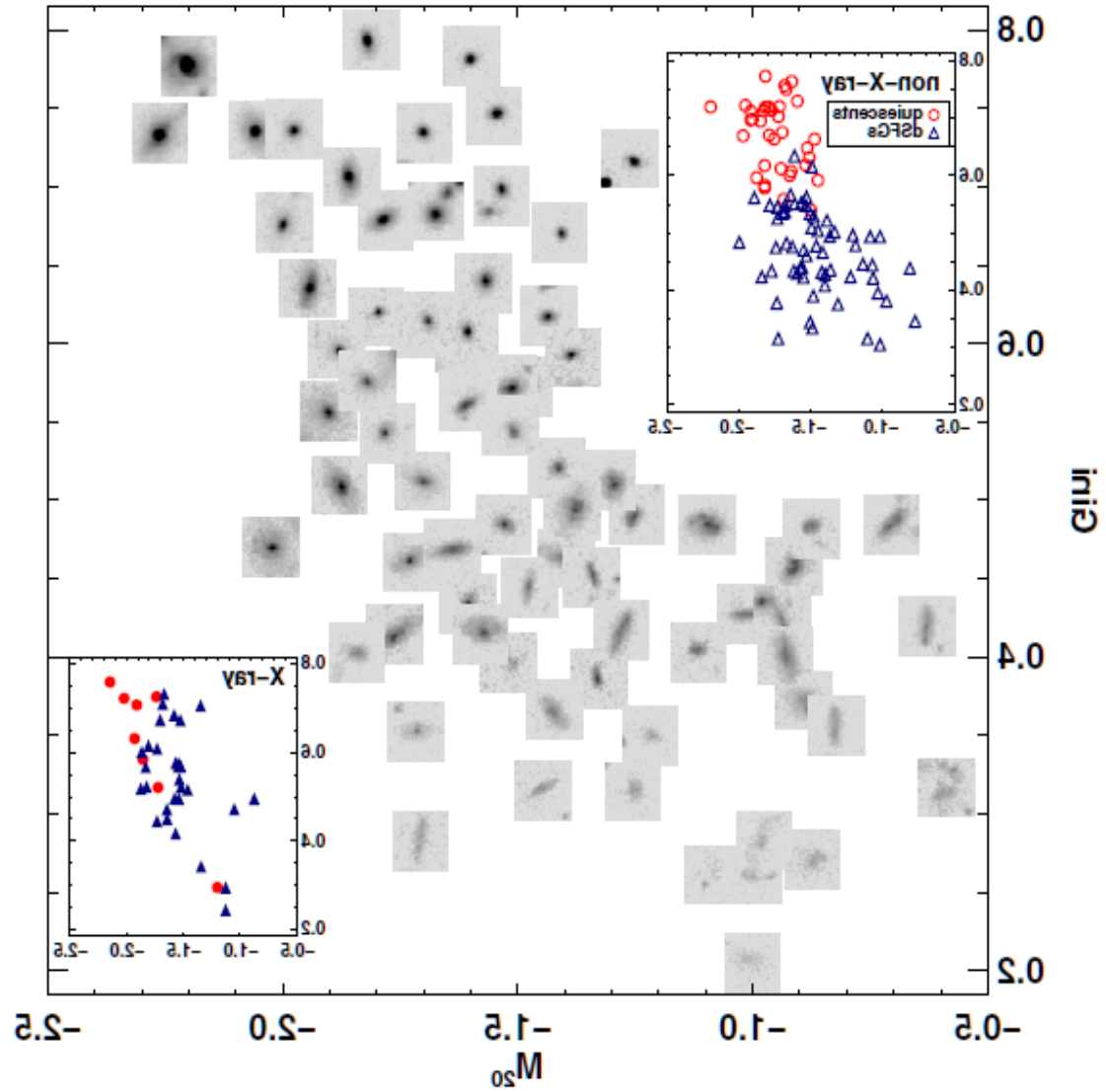
やはりあまり

役に立たない感じ...

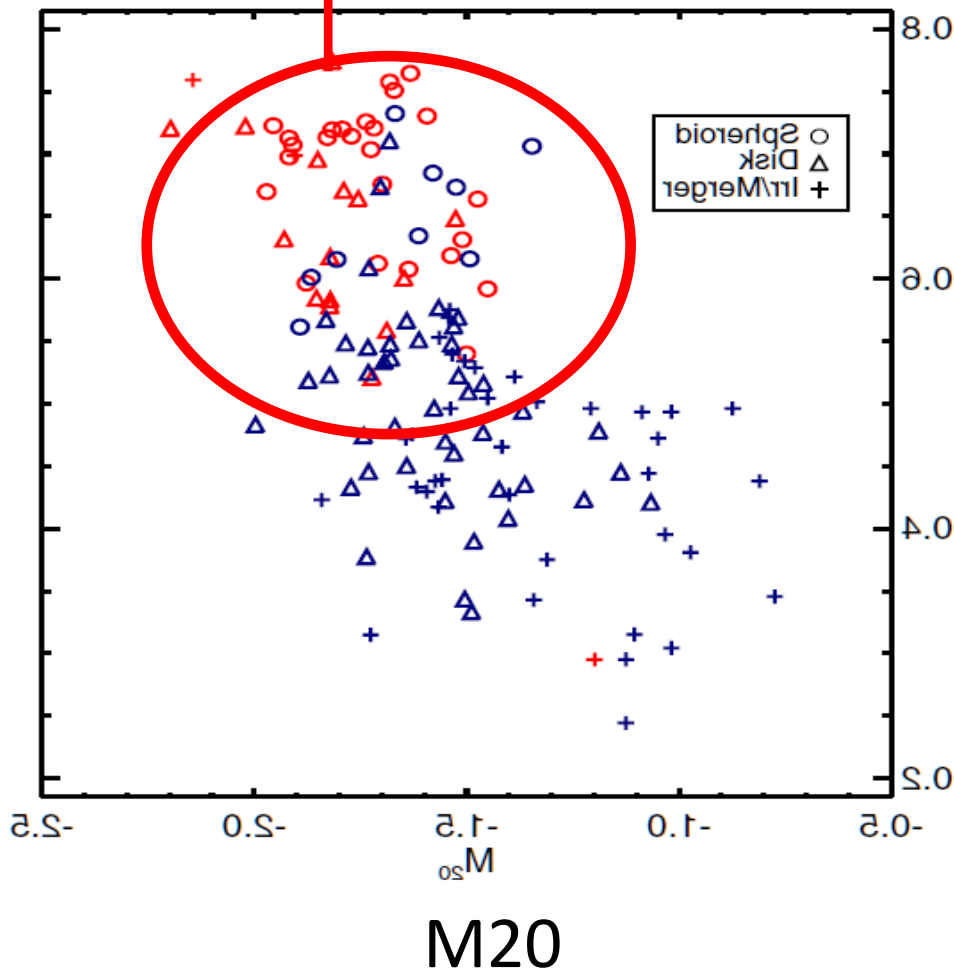
しかも次ページの結果
と少し違う

M20: 2nd order moment of the brightest 20% of galaxy's flux
tidal tail, multi componentに効く

$$G = \frac{\sum_i^N (2i - N - 1) |f_i|}{(N - 1) \sum_i^N |f_i|},$$



さっきの図ではこんなの
いなかった...



Quiescent: bulge/spheroidal
dustySFG: disk or irregular

Gini

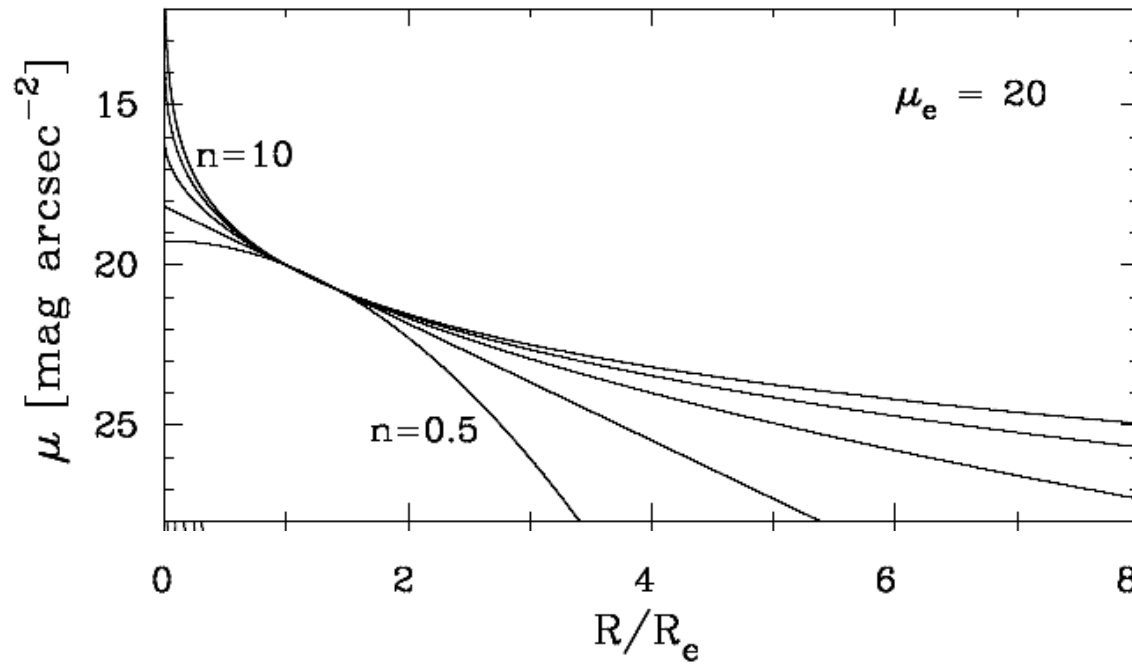
Gini

Sample selectionの違い?
このサンプルは
IEROとして選んでいる。

やはり、Sersic indexがいいのでは？

と、言う人もいるかもしれませんね

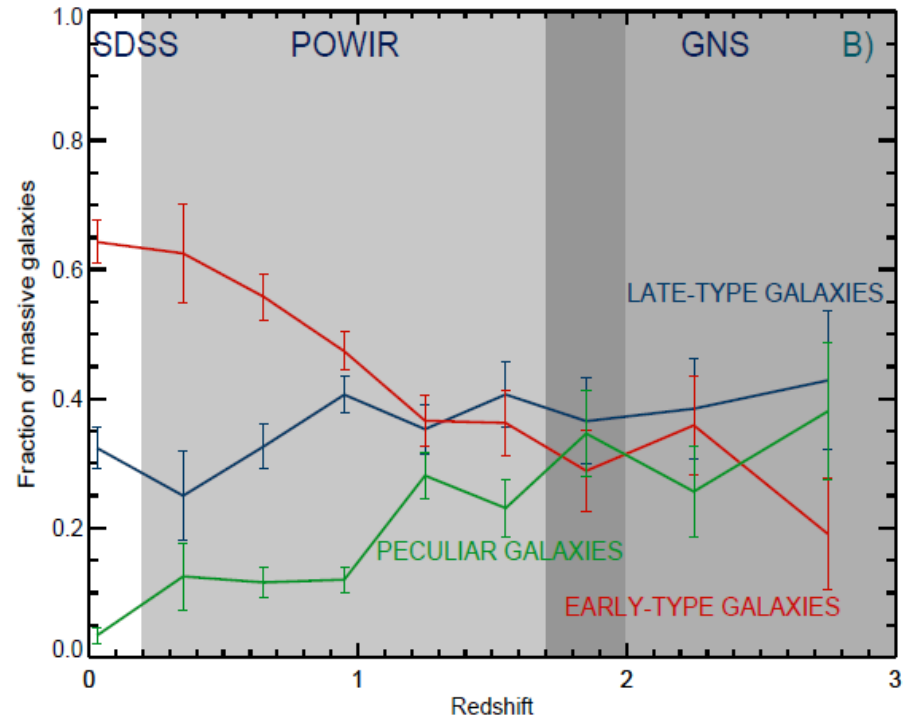
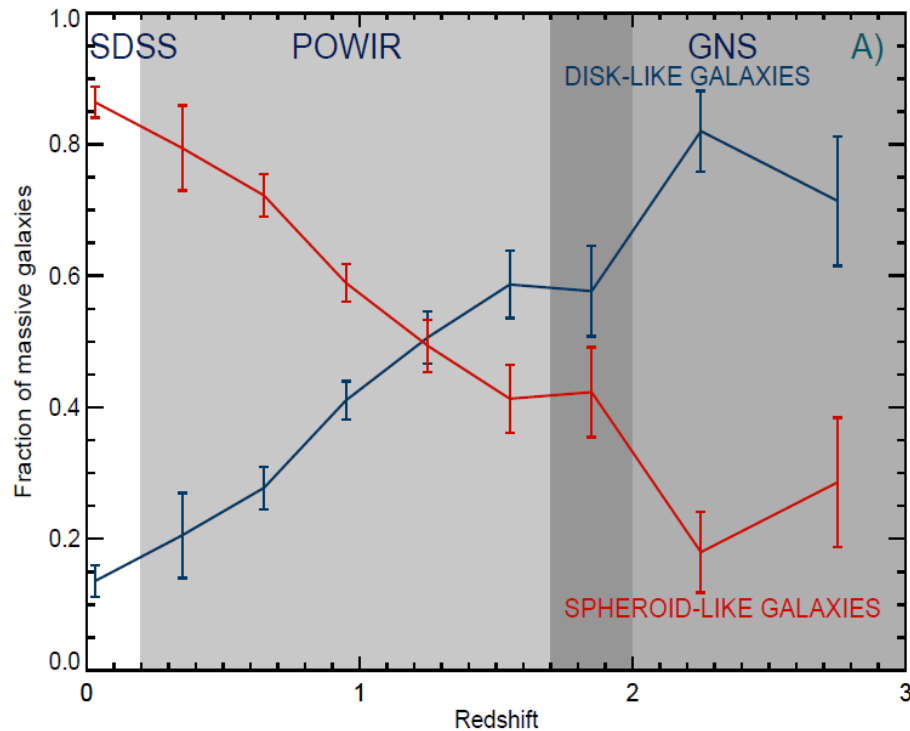
Sérsic profile $I(R) = I_e \exp \left\{ -b_n \left[\left(\frac{R}{R_e} \right)^{1/n} - 1 \right] \right\}$



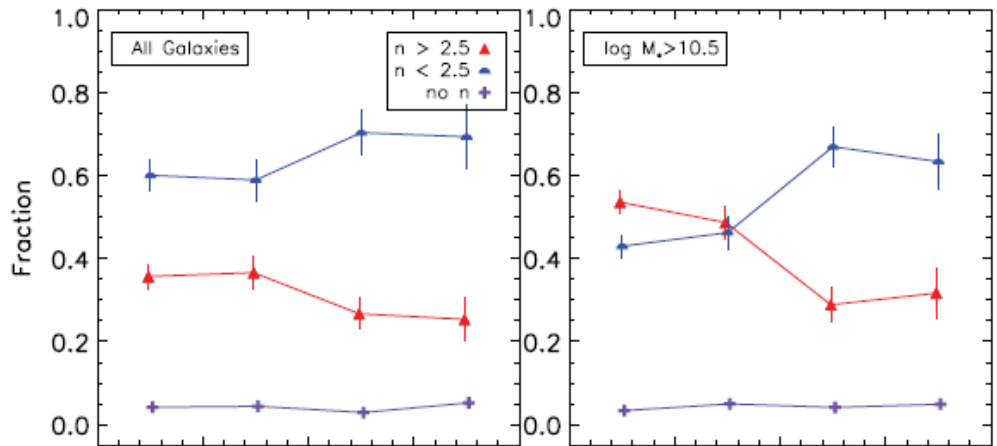
Mstellar > 10¹¹ Msunで n<2.5 vs n>2.5

Fractionで見ると、
Z > 2でdiskが増えている
... !

Irregular/Peculiarを入れると
Disk fractionはさほど変わらない
でもdiskの割合はそこそこ大きい

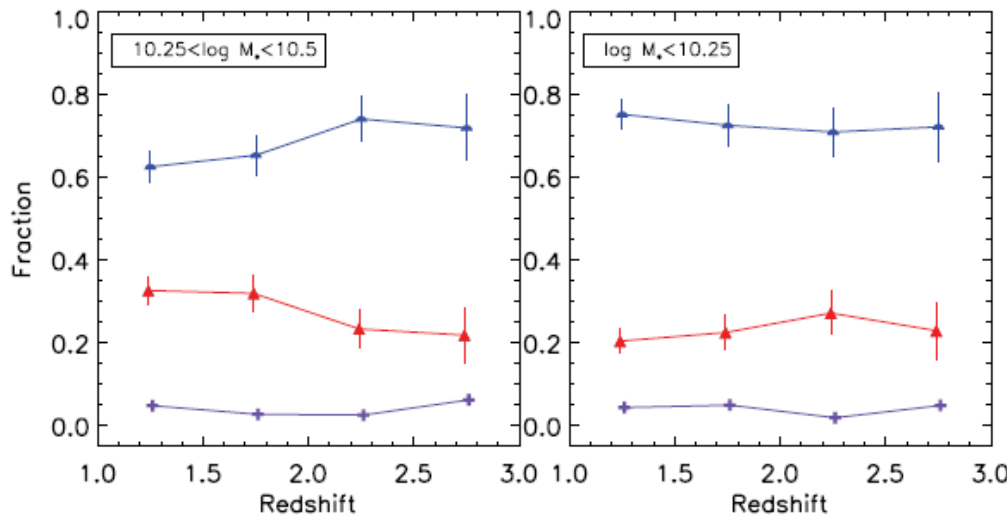


楕円: $n > 2.5$ 円盤: $n < 2.5$ として



disk

spheroid



Massive側では $z \sim 2$ でも
円盤が多い
Less massiveだと、いつも
円盤が卓越

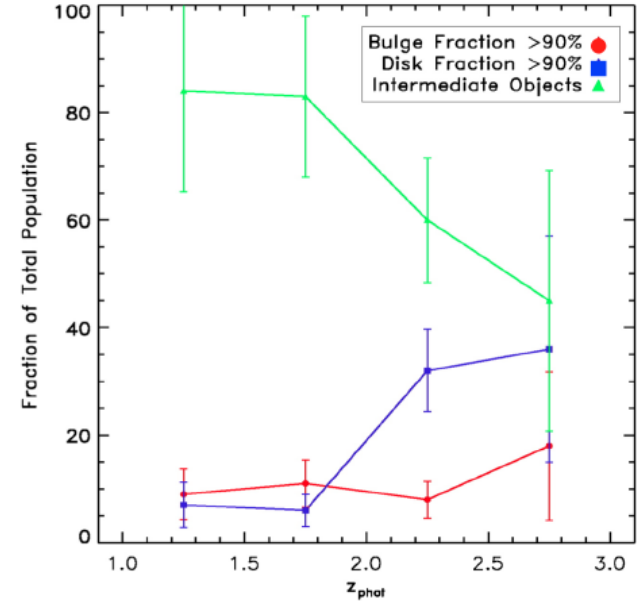
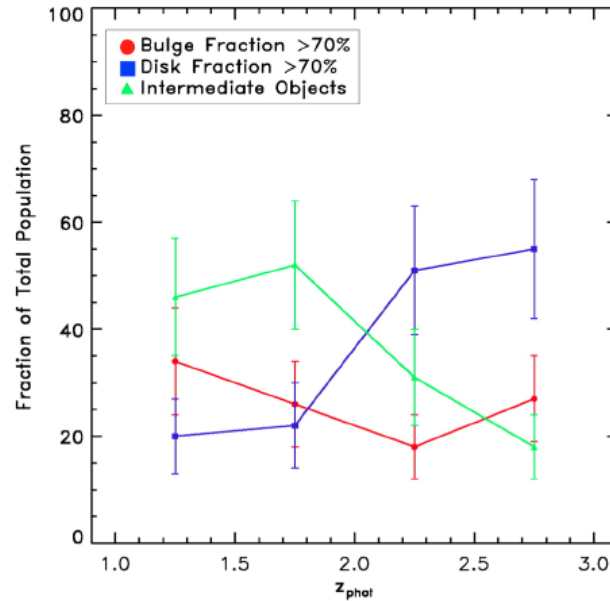
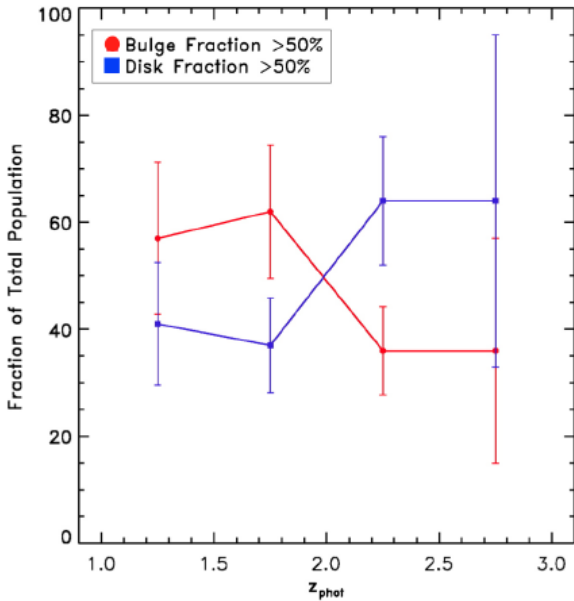
Sersic indexは形態の指標には
ならないのではないかと
(広がり方の指標なだけ?)

+は、sersic indexが得られなかったもの

Mstar > 10¹¹ Msun at 1 < z_ph < 3

GALFIT を使って2成分(or 3成分(点源))のfit

n=1 + n=4 でfitting



B/T=0.5で分けると、z>2で円盤が多い！

D/T>0.7でも z=2-3は era of massive disks?

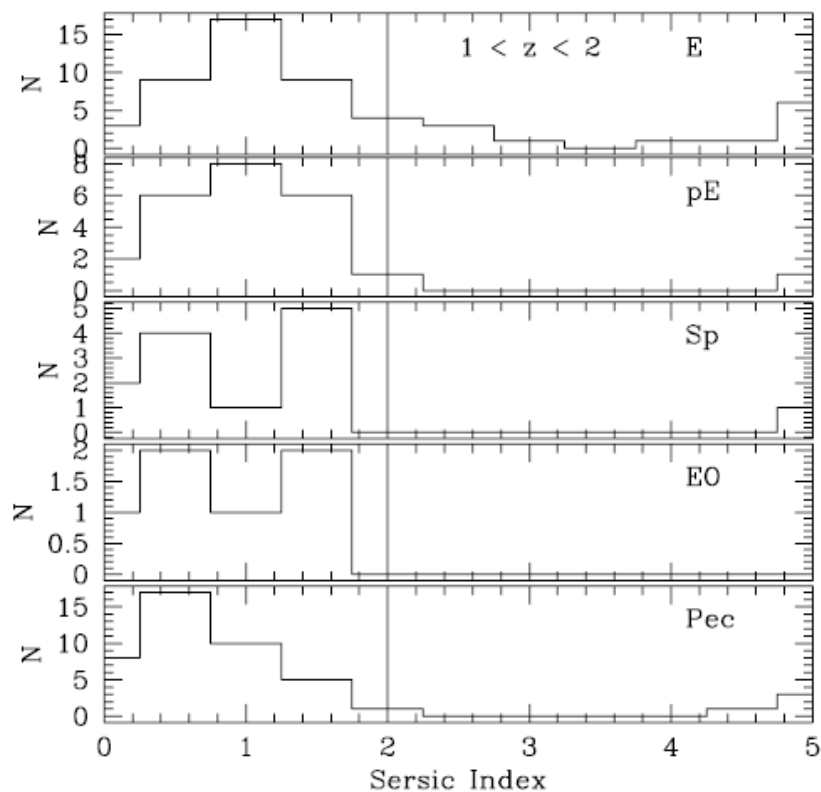
10^{10.5}Msunより重いと z>2 で円盤が多いという、
真逆の結果になっている...

Sersic index n と目でみた形態

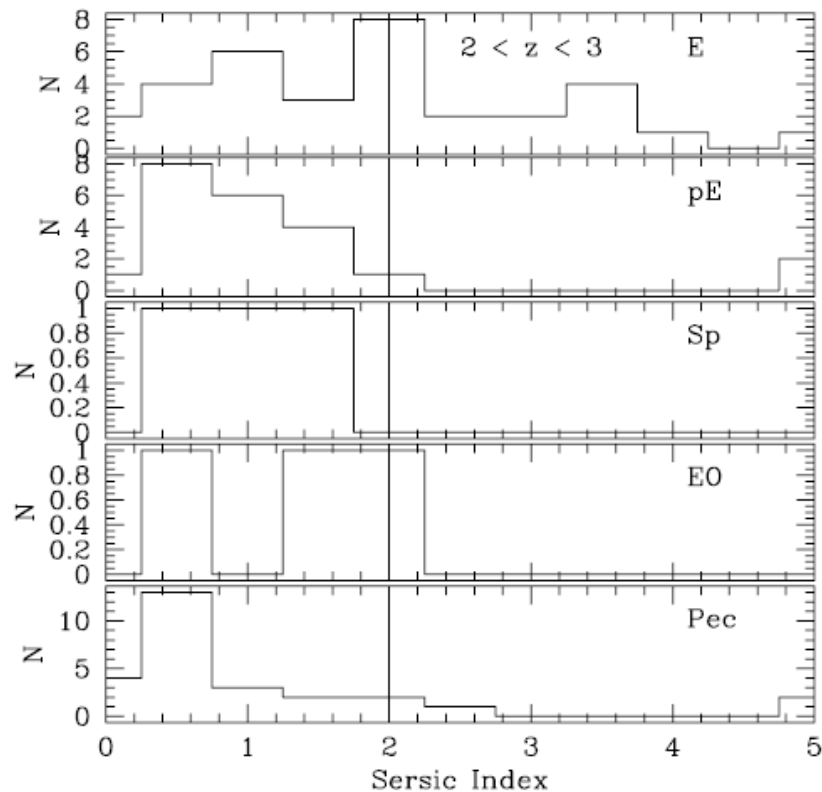
Conselice+ 2011

$n > 4$ は基本楕円銀河　でも楕円銀河にも $n < 4$ 多い
 N が小さいから円盤とは限らない

$1 < z < 2$



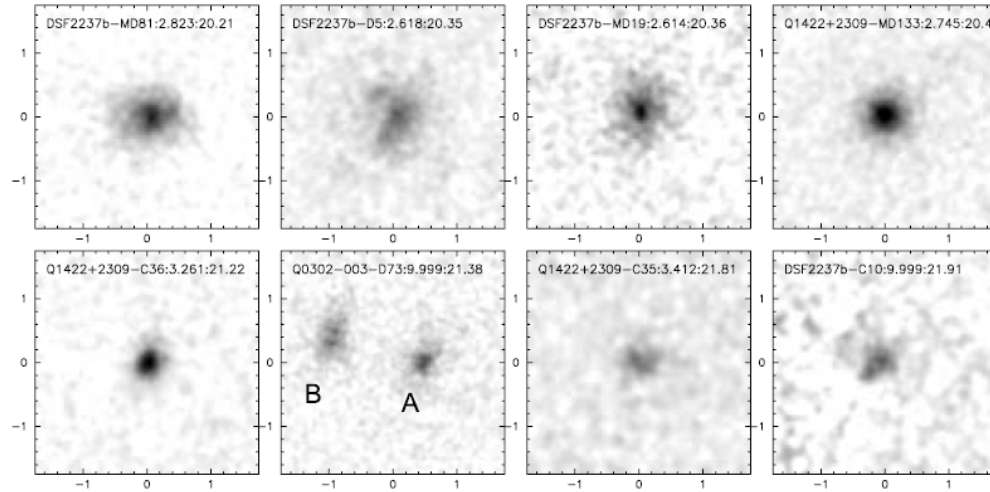
$2 < z < 3$



n~1だと円盤と言えるのですかねえ？

K-band imaging of AO

Z~3 LBGs

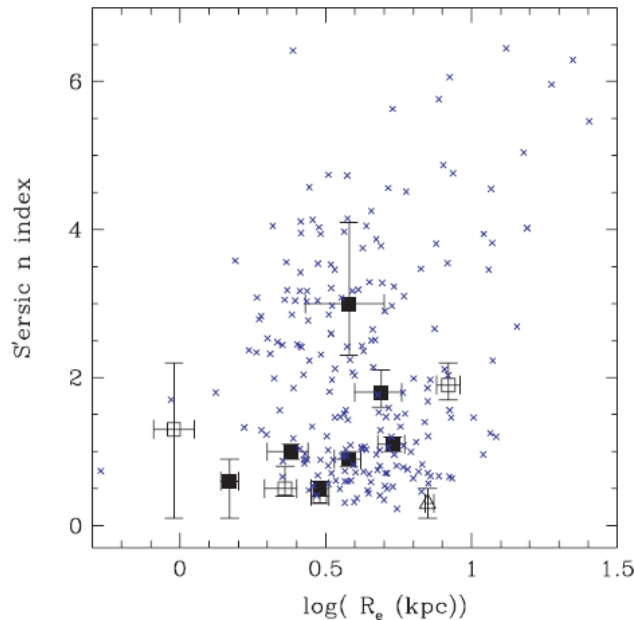


Subaru AO36

0.058"/px 59" FoV

0.023"/px 23" FoV

Typical PSF FWHM~0.15"

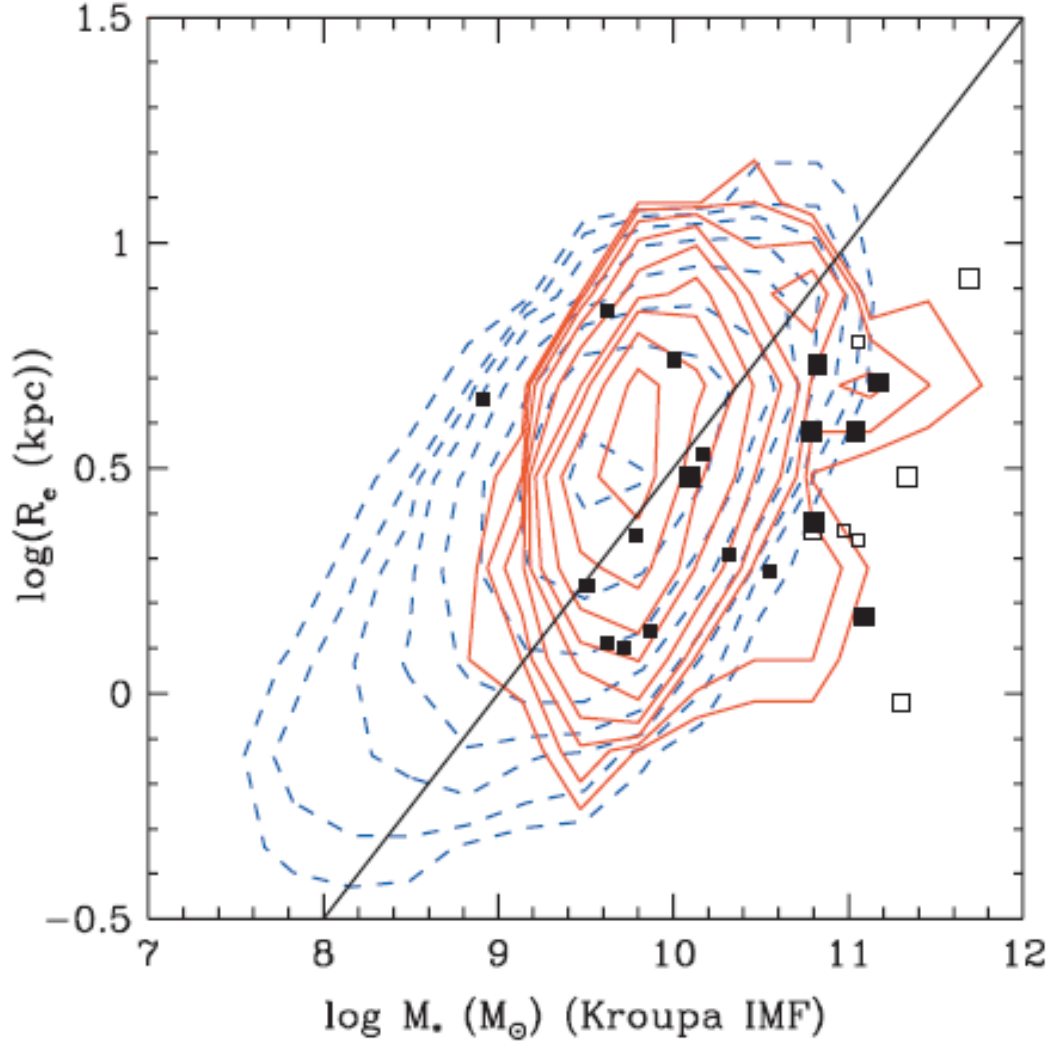


Sersic index $n \sim 1$ が多い!

×はlocal galaxiesを $z \sim 3$ にもって
いった場合のsimulation

**でも円盤銀河の祖先ではない
(星質量面密度が高すぎる)**

Effective radius



赤線: $z \sim 1$ の円盤銀河
青線: $z \sim 0$ の円盤銀河
黒点: LBGs at $z \sim 3$

星の面質量密度が
LBGの方が高い。
=>
多分円盤銀河(の祖先)では
ないのだろう
=>
 $n \sim 1$ だからといって
円盤とは限らない??

Stellar mass

sBzK 銀河 ($z \sim 2$ の star-forming galaxies) の統計的形狀

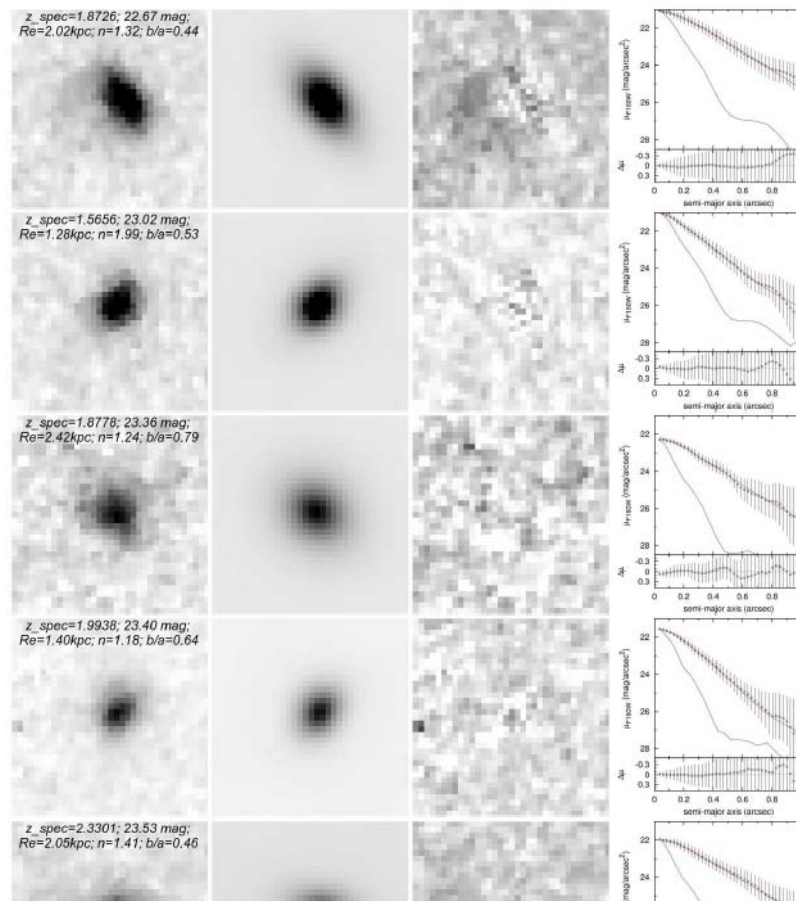
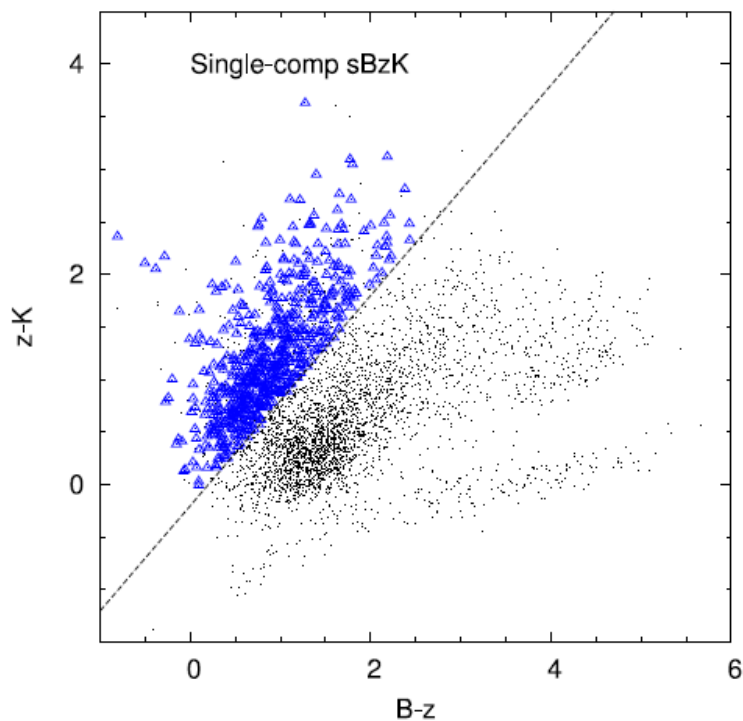
Yuma, KO, + 2011, ApJ 736, 92

Yuma, KO, Yabe 2012, ApJ 761, 19

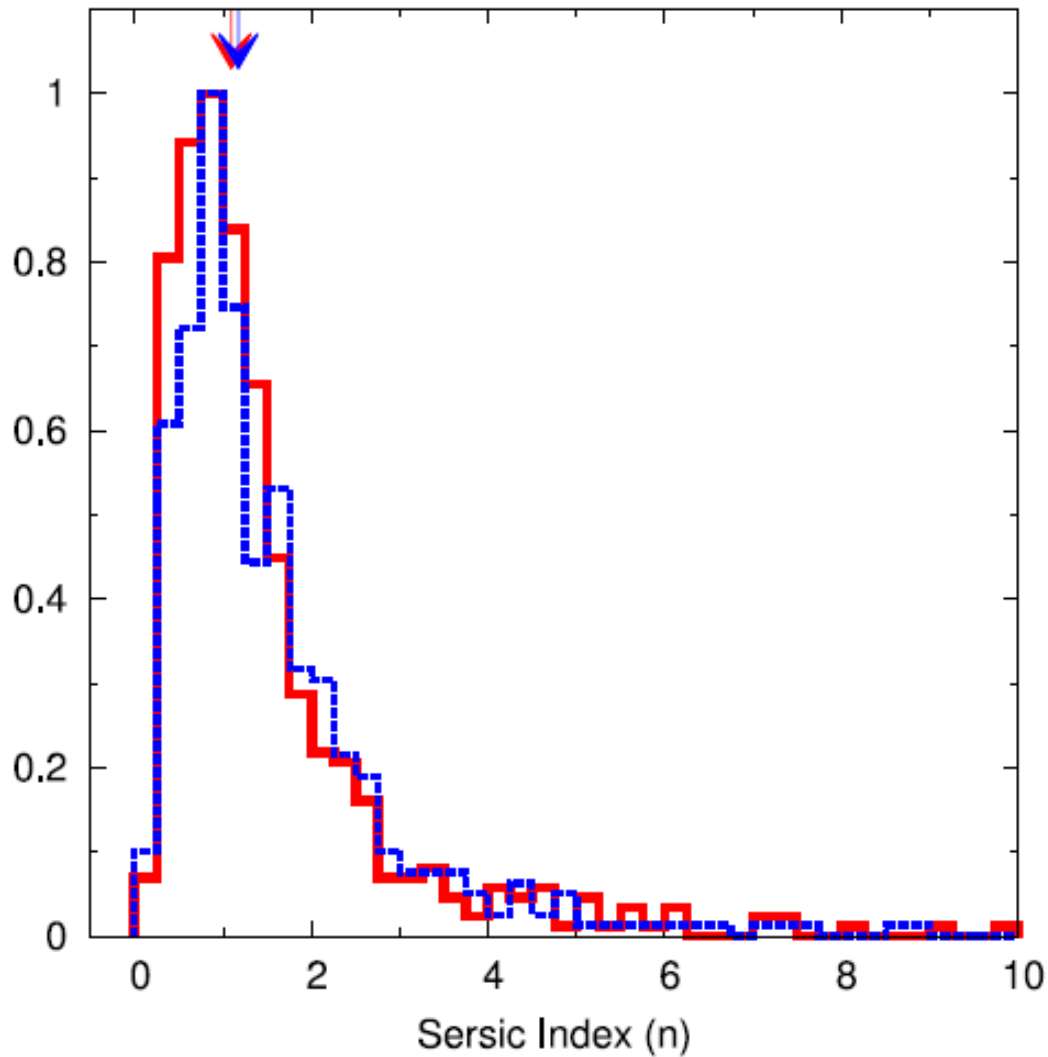
K_AB < 24 mag

GALFIT

sBzK 銀河



Sersic index =1 が非常に多い！

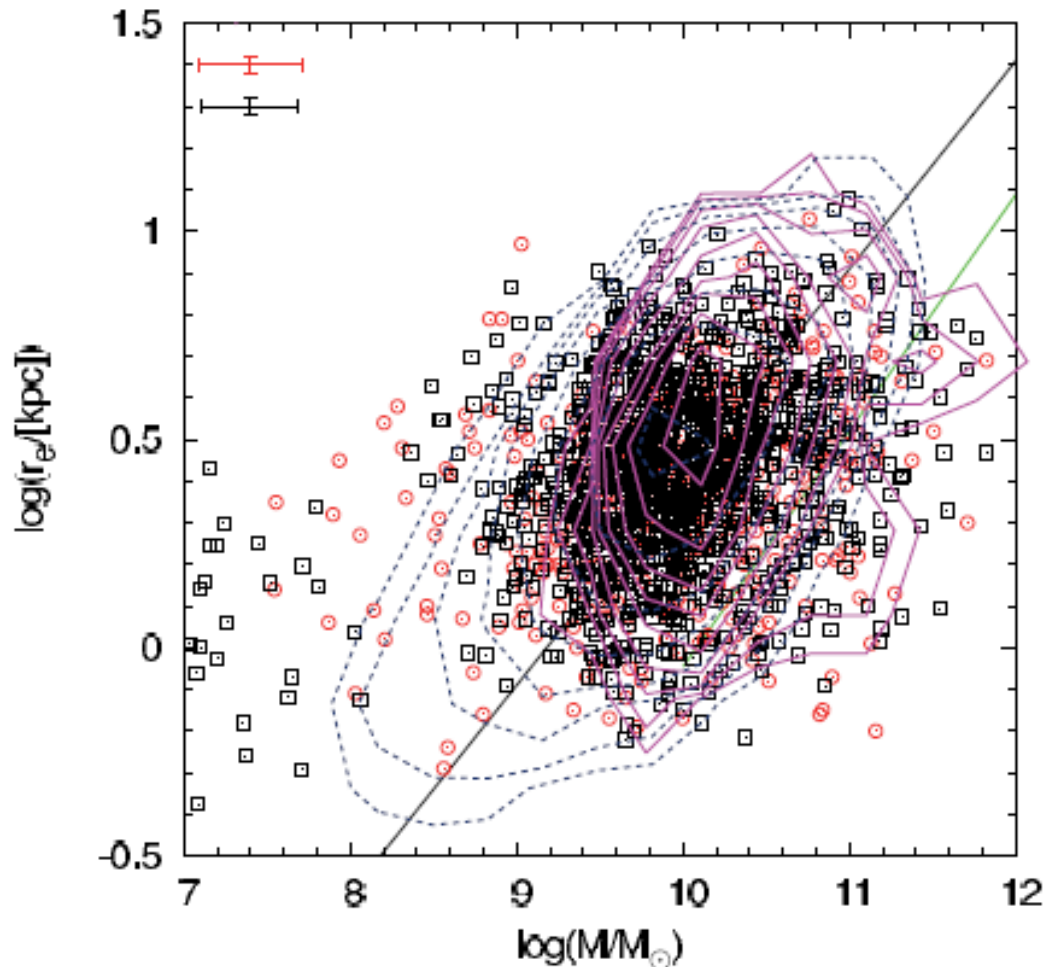


と、いうことは
Disk galaxiesが多い！？

青：ACS(レスト紫外)
赤：WFC3(レスト可視)

しかも

sBzKだと、星質量の面密度も、円盤銀河と同じ位！



ますますもって
円盤銀河でしょう

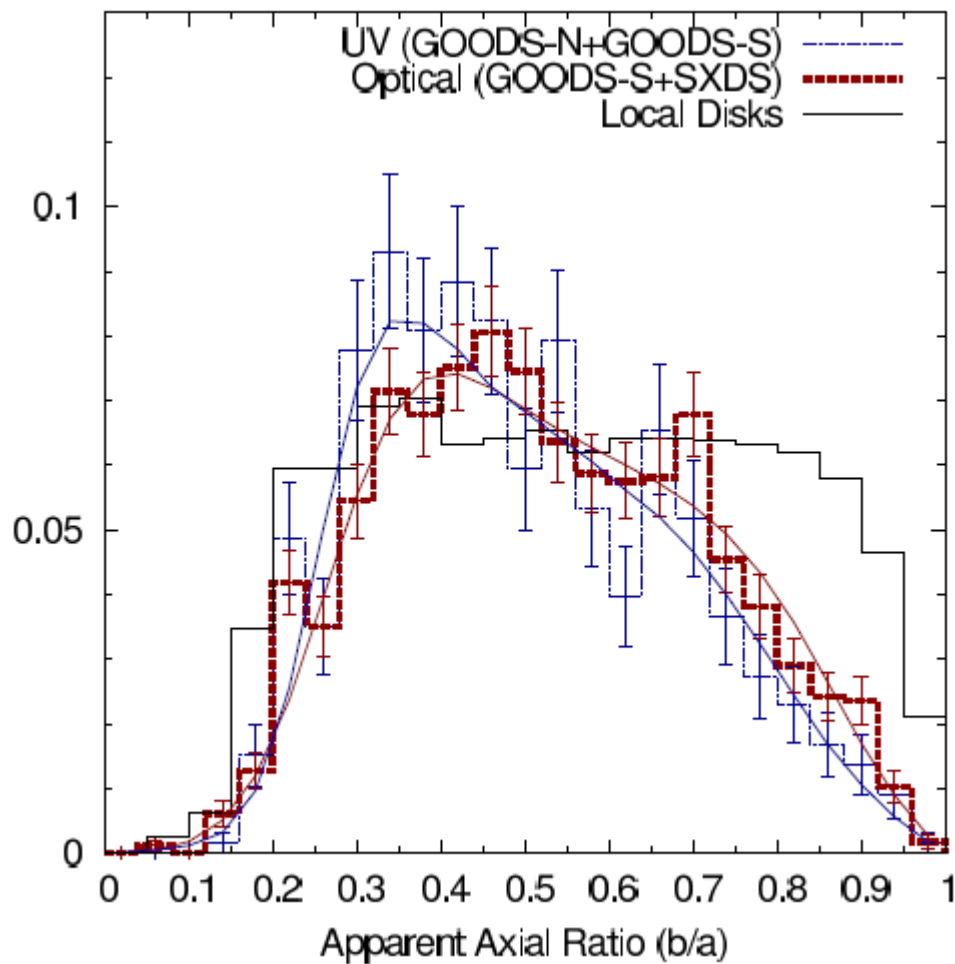
しかも最近sBzKで
銀河回転運動も

見つかっているしねえ

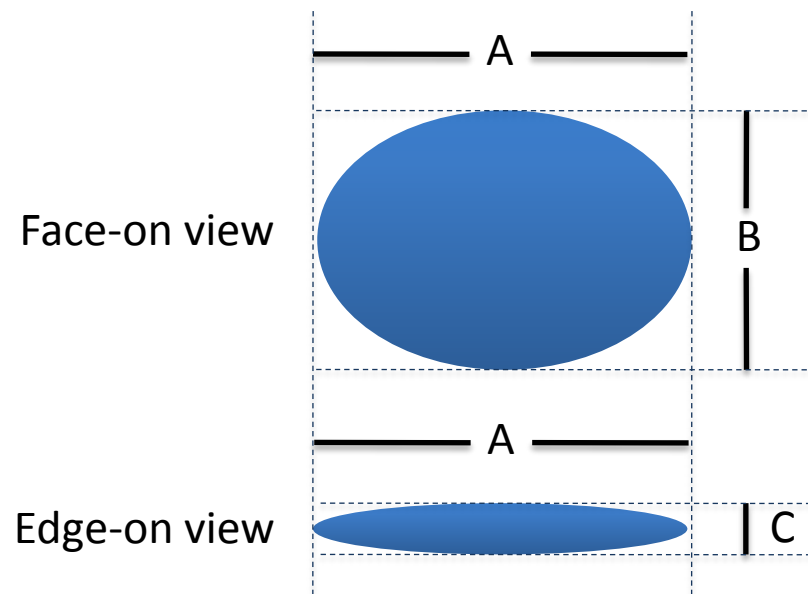


でも、ホンマかいな？
軸比分布をみないと
わからない？

Apparent axial ratio distribution

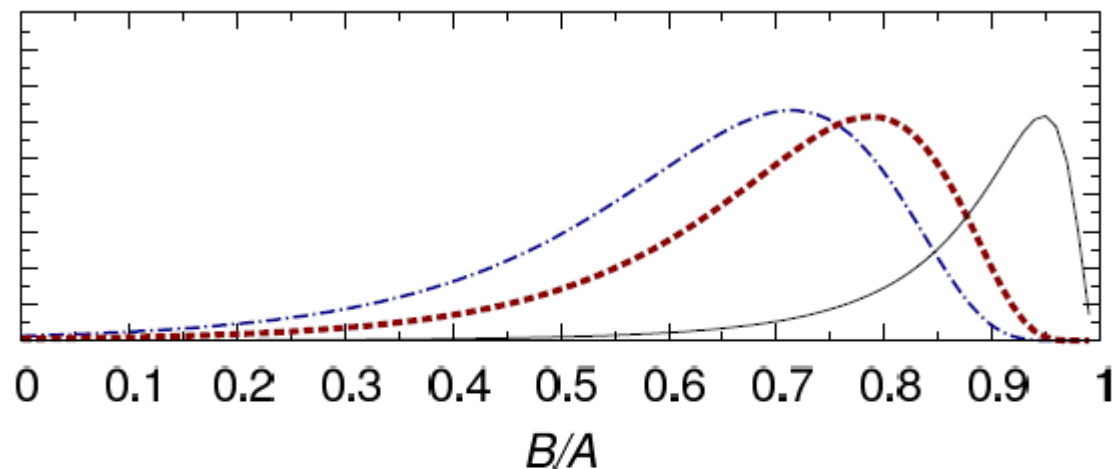


Tri-axial model

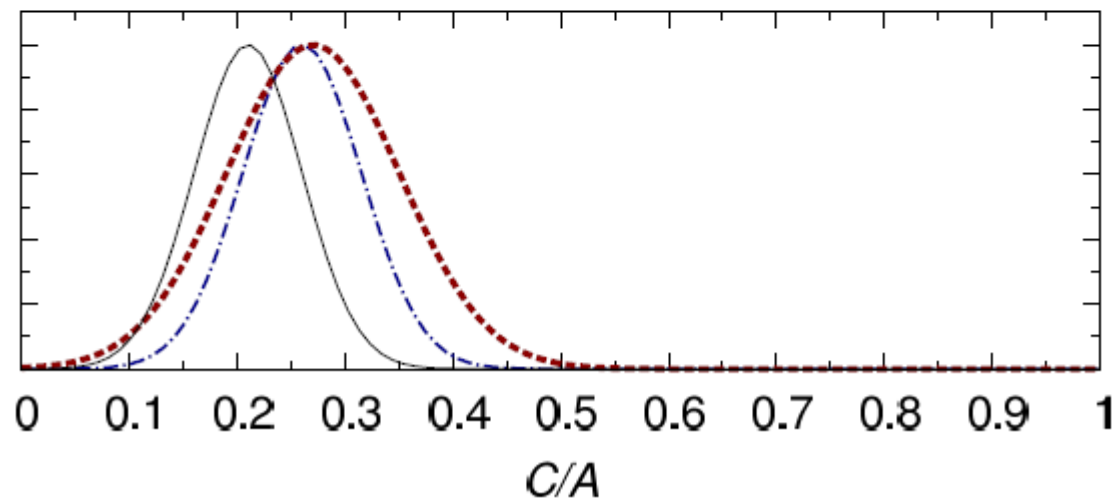


B/Aはlognormalとし、その平均と分散
C/AはGaussianとし、その平均と分散
4つのパラメータを決めて
ランダムな方向から見た時の
見ための軸比分布
と観測される分布を比較

赤線: レスト可視 (WFC3/H160)
青線: レスト紫外 (ACS)
薄い実践: local disk

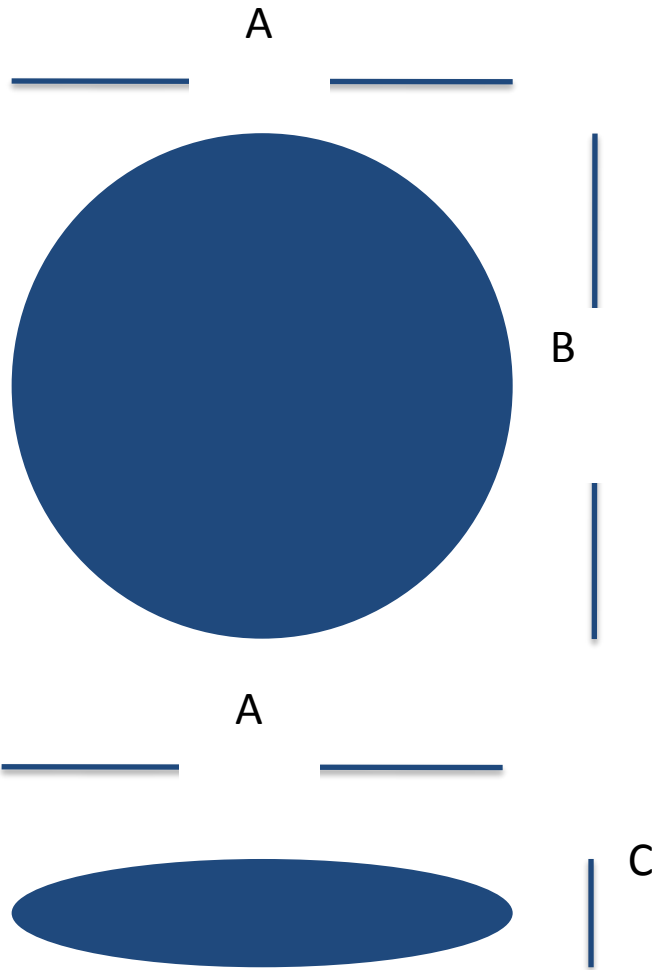


$B/A \sim 0.7$

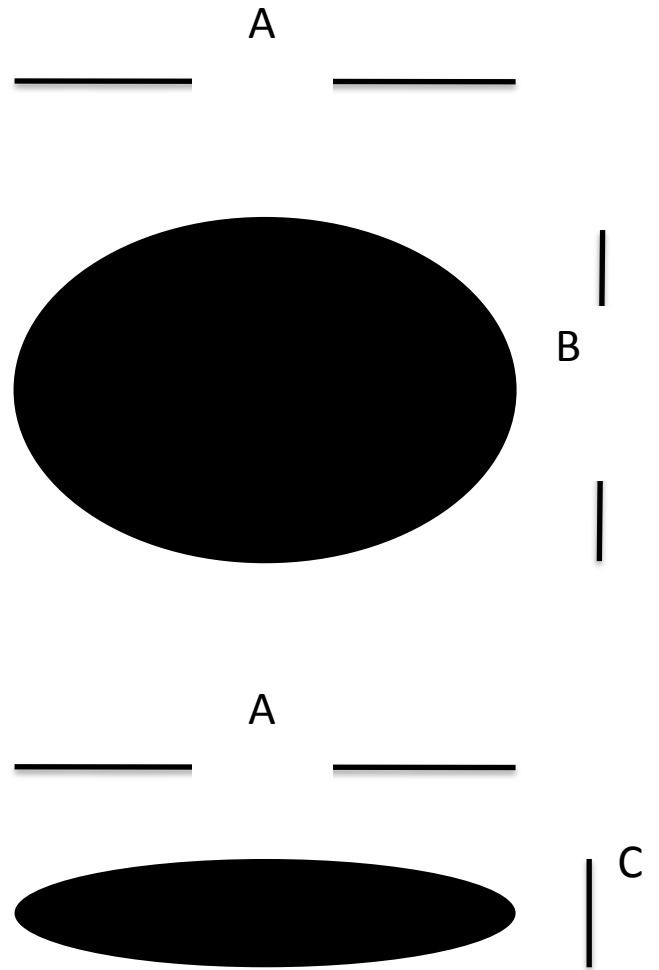


$C/A \sim 0.3$

Local disk
丸い



sBzK
BAR-like



- $C/A \sim 0.3$ なので円盤と言えば円盤か
- しかし、丸くない
- Sersic index n だけで形を言うのはアブナイ

- では、それなら、丸い円盤が卓越してくるのはいつの時代なのか？

シンプルに、軸比分布を調べて、 統計的に形をみよう

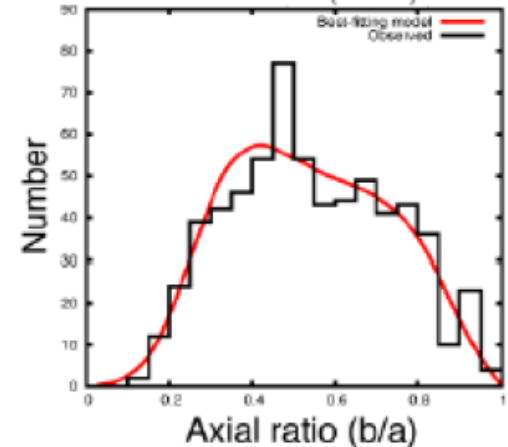
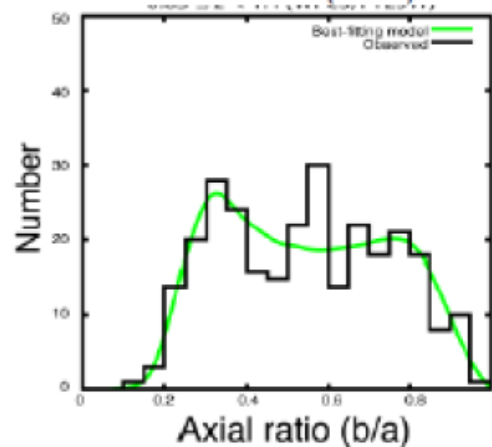
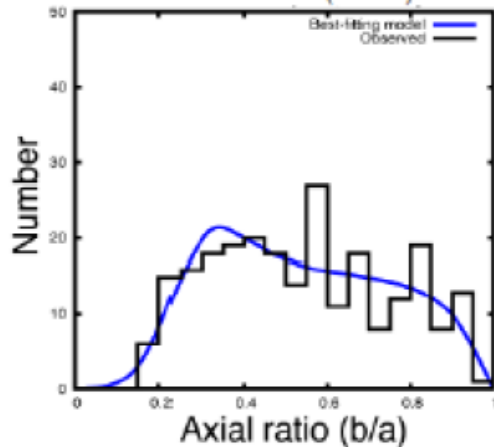
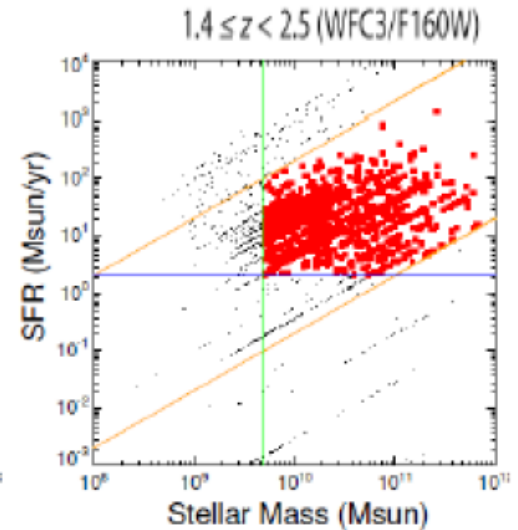
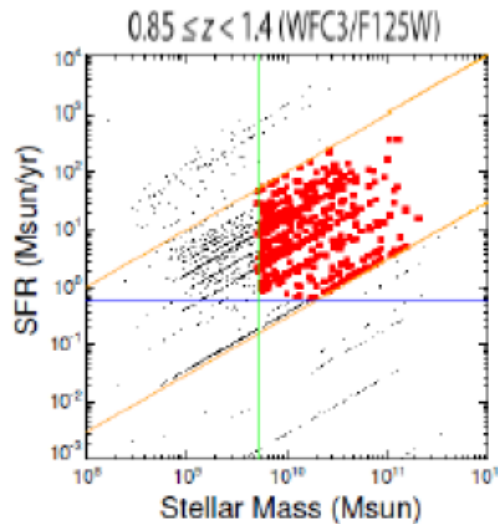
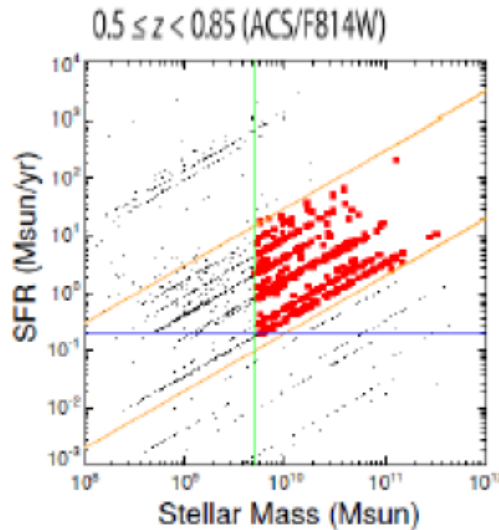
Takeuchi, KO, + in prep

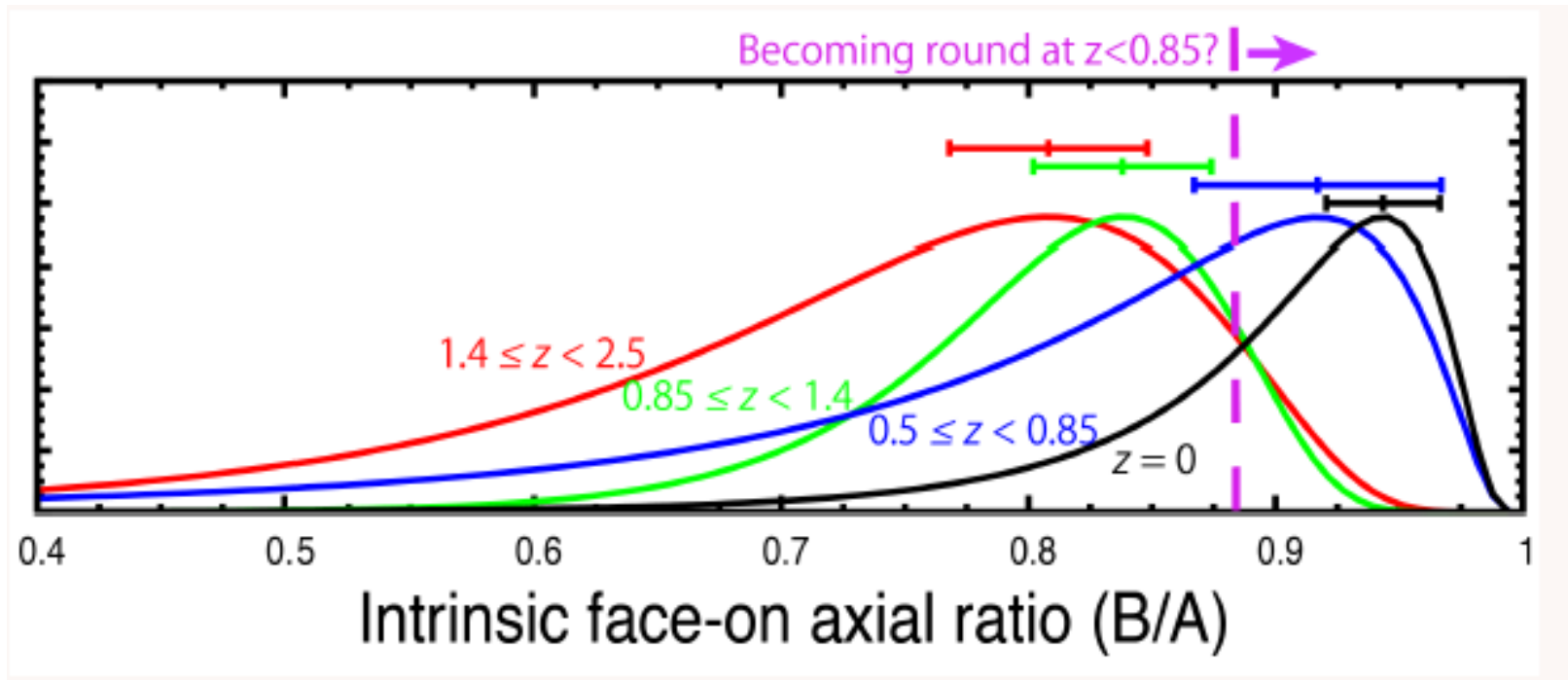
$K_{AB} < 24.0$ mag

$0.5 < z < 0.85$

$0.85 < z < 1.4$

$1.4 < z < 2.5$



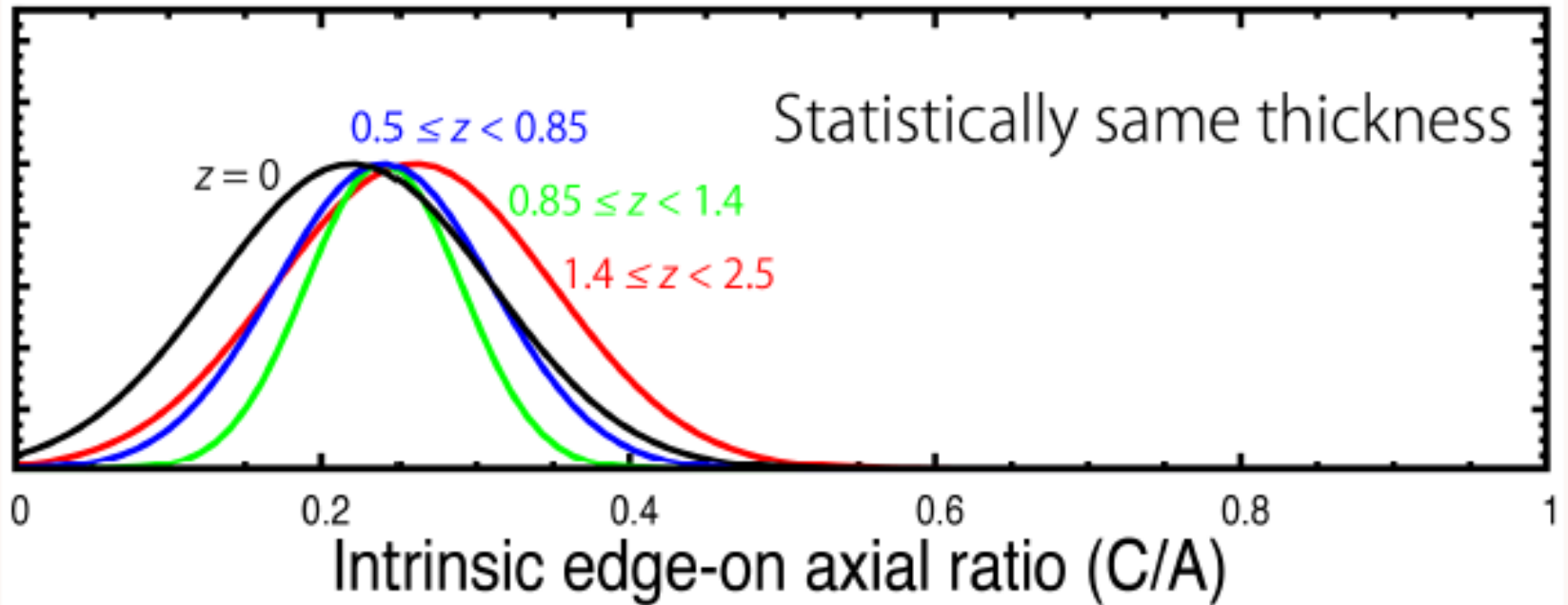


B/A的にはだんだん丸くなる。

$z \sim 0.9$ 位になれば

現在の円盤と同じ位丸い円盤になっている

厚みはどない？

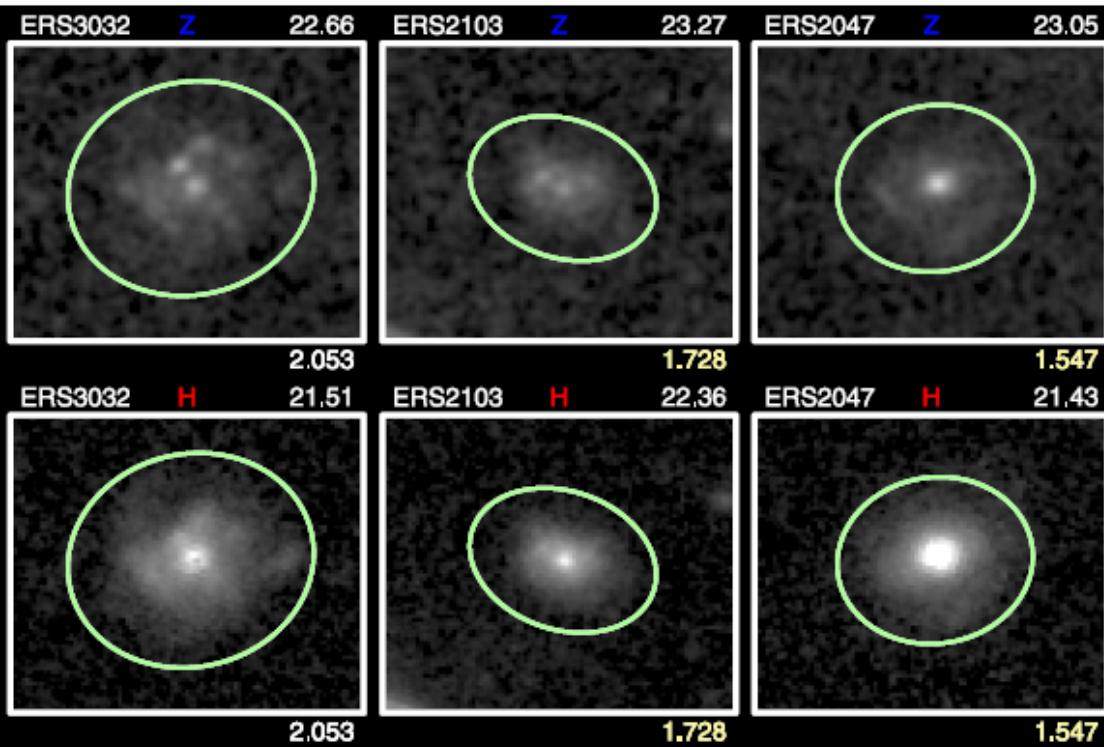
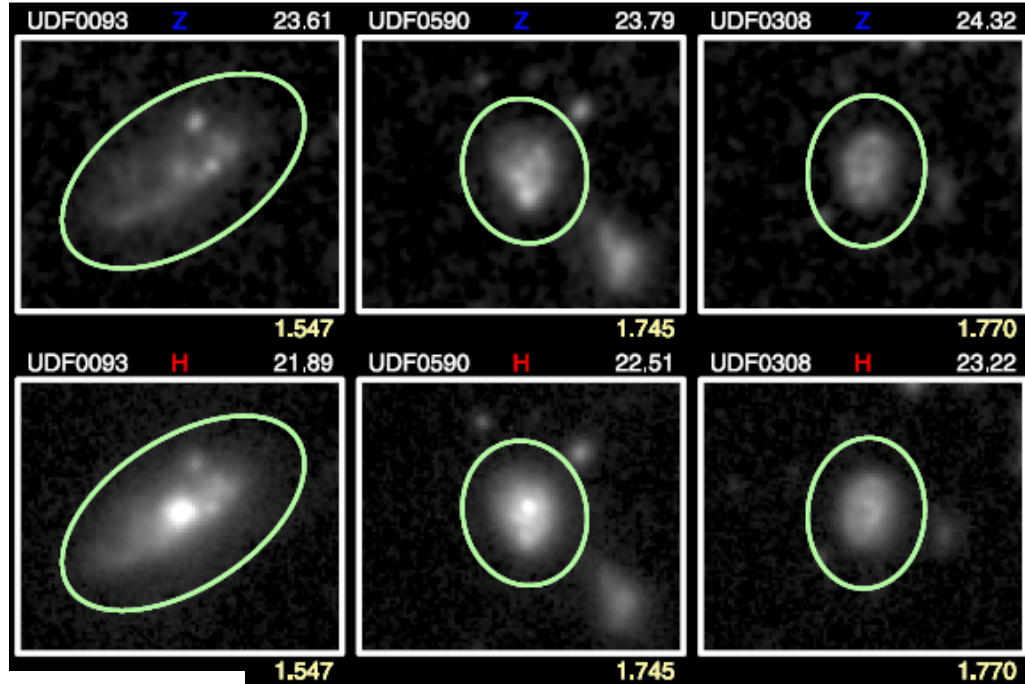


厚みは今とあまり変わらない
Thick disk??

Bulgeはいつから見えている？

- $z > 2$ のCompactとか、spheroidの暗いものはバルジかも？
- $z \sim 2$ にはバルジはできている？（か、できかかっている？）

Disk ? (Class 1)
 上がレストUVで
 下がレスト可視
 UVと可視で随分形態が違う
 タイプ

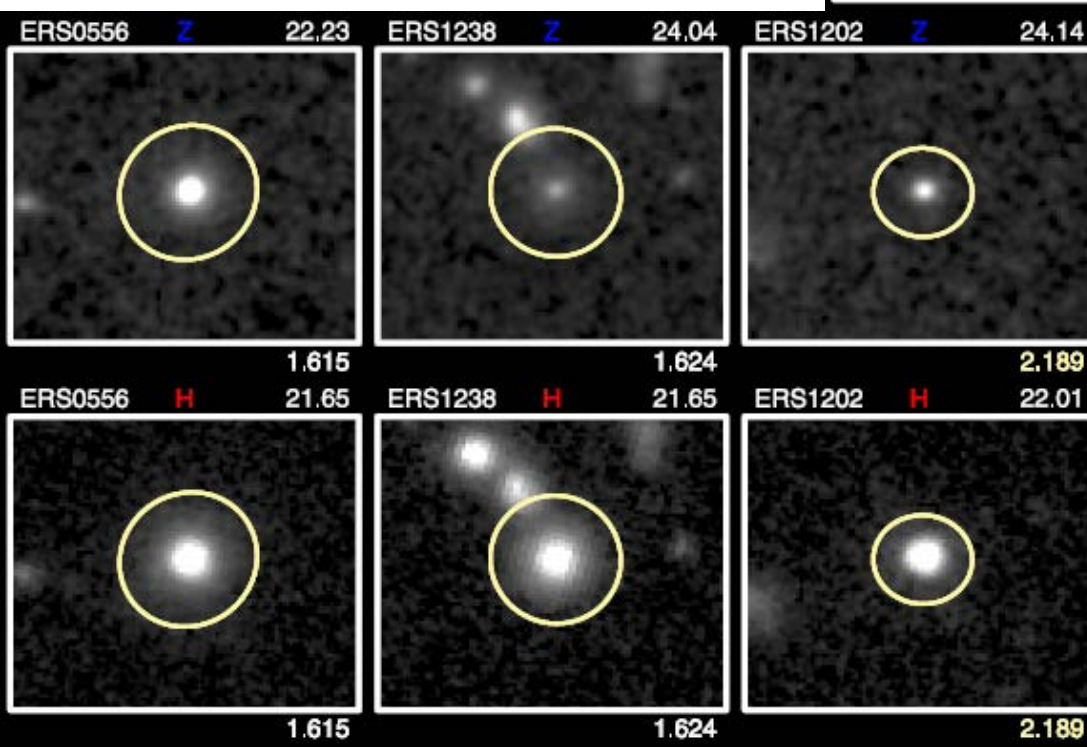
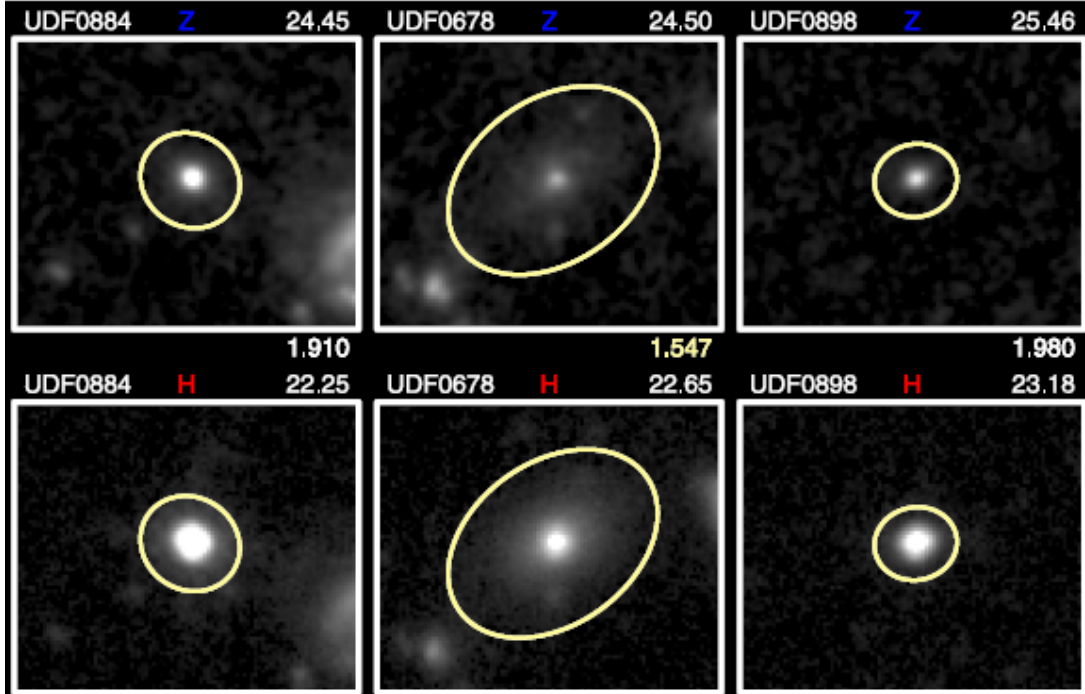


$1.5 < z < 2.0$

レスト可視だとbulge+diskの
 構造が見えている？

Bulgeは赤い？

spheroid ? (Class 2)
 上がレストUVで
 下がレスト可視
 UVと可視で共に
 Spheroidっぽいタイプ

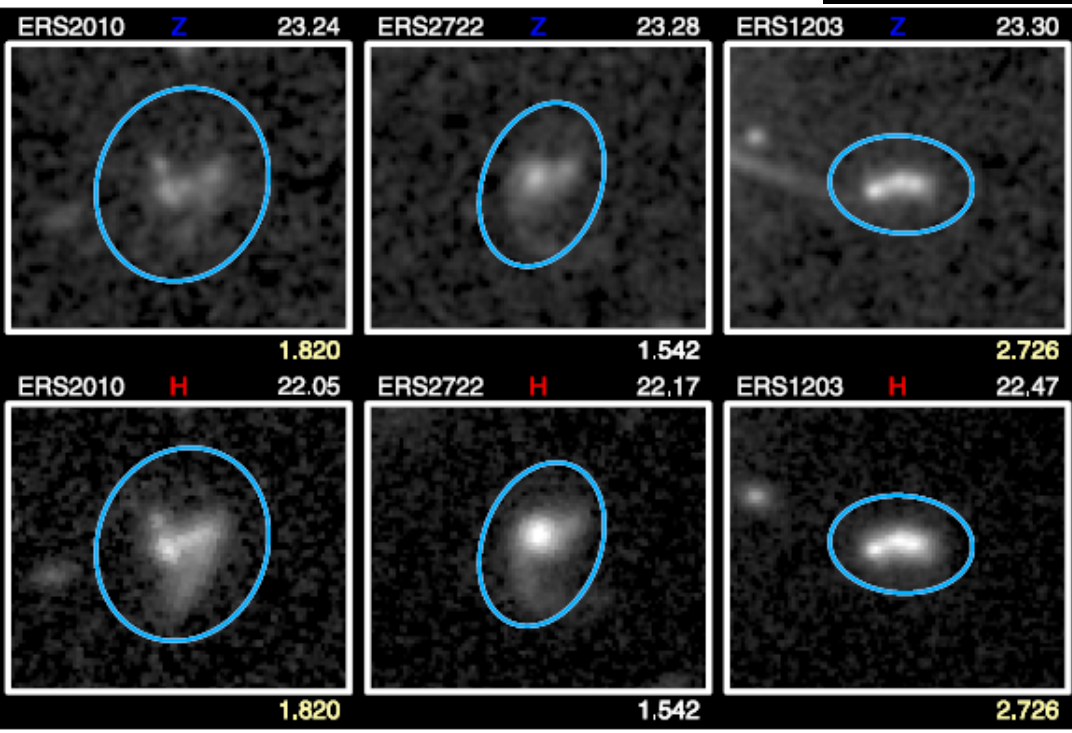
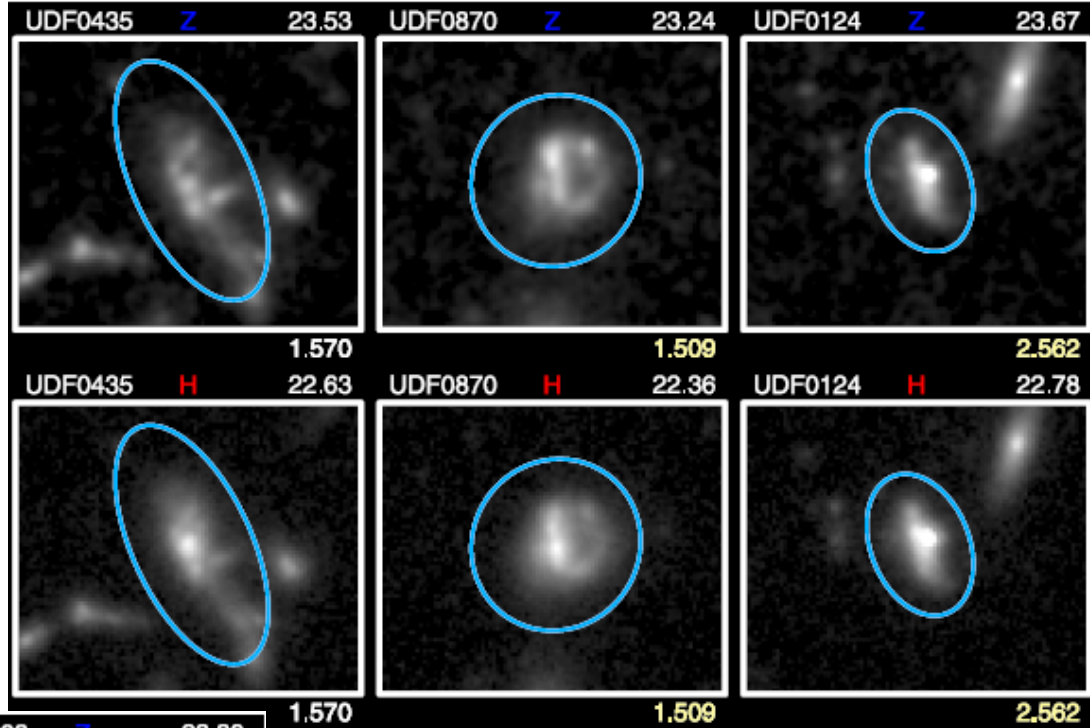


$1.5 < z < 2.2$

Bulge+diskにはみえない
 同じ色の構造

Cameron et al. 2011, ApJ 743, 146

Irregular ? (Class 3)
 上がレストUVで
 下がレスト可視
 UVと可視で共に
 irregularタイプ



$1.5 < z < 2.7$

Bulge+disk??

仮にそうでも、色は青い
 Class 1とは様子が違う
 むしろClumpy galaxies的?

Cameron et al. 2011, ApJ 743, 146

B/T比を出せないか？

The Morphologies of Massive Galaxies at $1 < z < 3$
in the CANDELS-UDS Field:

Compact Bulges, and the Rise and Fall of Massive Disks
Bruce, Dunlop, et al. 2012, MN 427, 1666

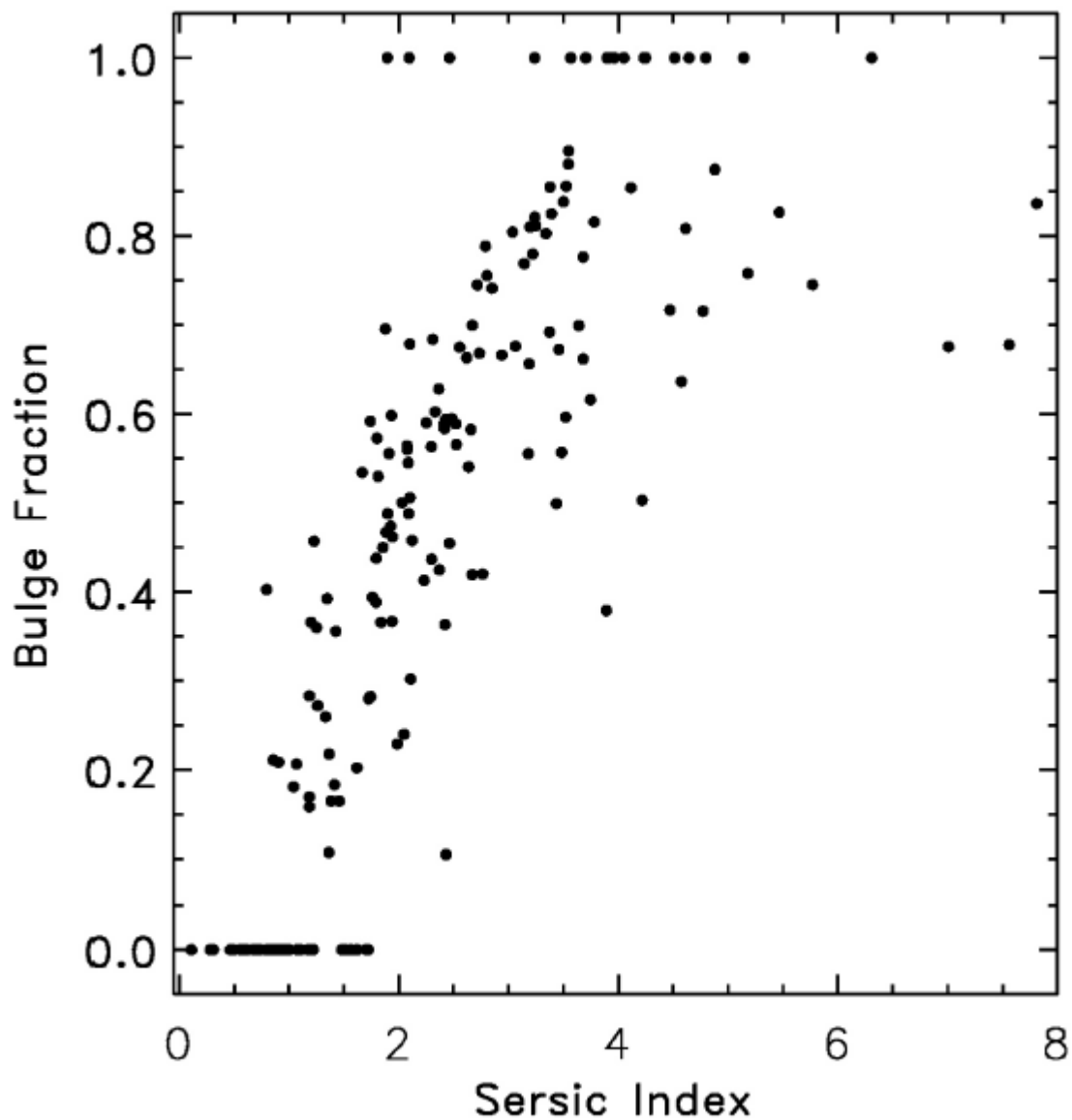
UDSのCANDELS

$M_{\text{star}} > 10^{11} M_{\text{sun}}$ at $1 < z_{\text{ph}} < 3$

GALFIT を使って2成分(or 3成分(点源))のfit

PSF, background subtractionの影響テスト

multi-componentのテスト? Formally acceptance level



Multi-component model
(n=1) + (n=4) (+ psf)

Sersic index と
Bulge fractionの 良い相関

Single component GALFIT

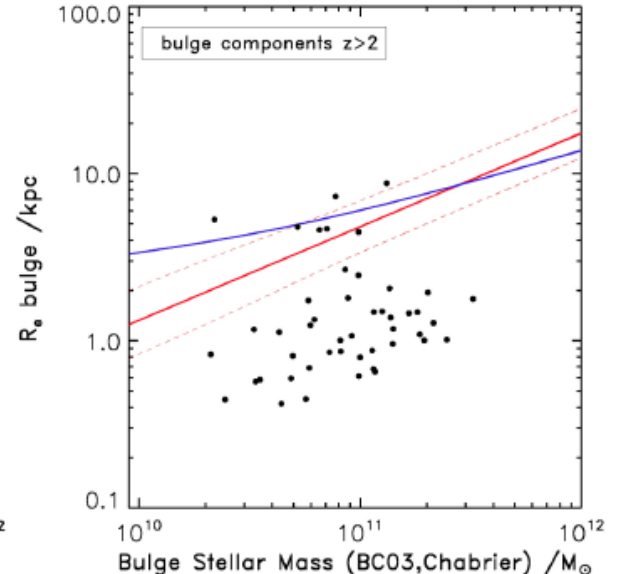
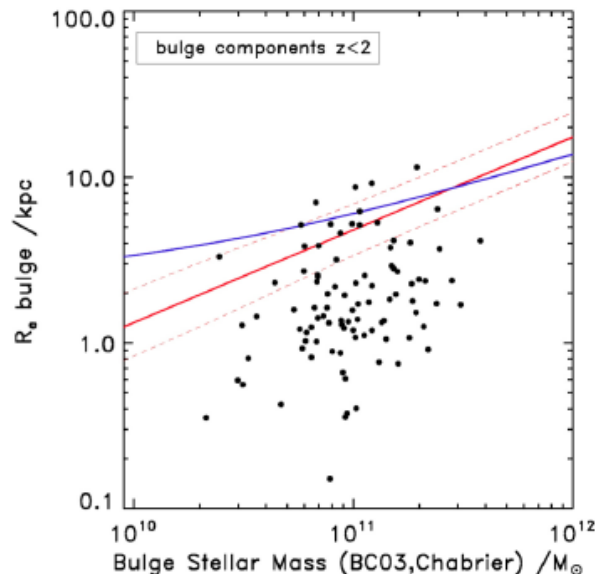
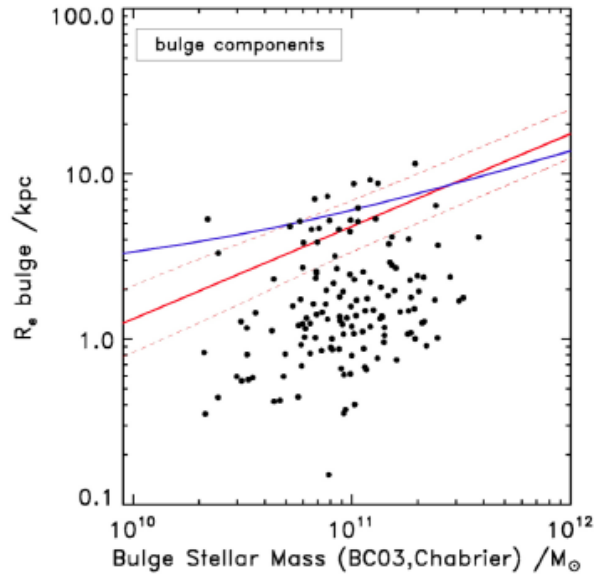
Bulge 成分だけで見ると...

ただし、total stellar mass にH160でのbulge fractionをかけただけ。
成分別でSED fitしたのではない。また、 $2 \times 10^{10} M_{\odot}$ 以下の成分は表示していない

log Re

$z < 2$

$z > 2$



Log 星質量

赤線 : local early-type
青線 : local late-type

$z \sim 0$ と比べてサイズ進化が激しい(diskに比べて)

$z=3-2$: ~85% がlocal relationより有意に下

$z=1-2$: ~80% がlocal relationより有意に下

$z=3-2$: factor 4.4 smaller (median)

$z=1-2$: factor 3.5 smaller (median)

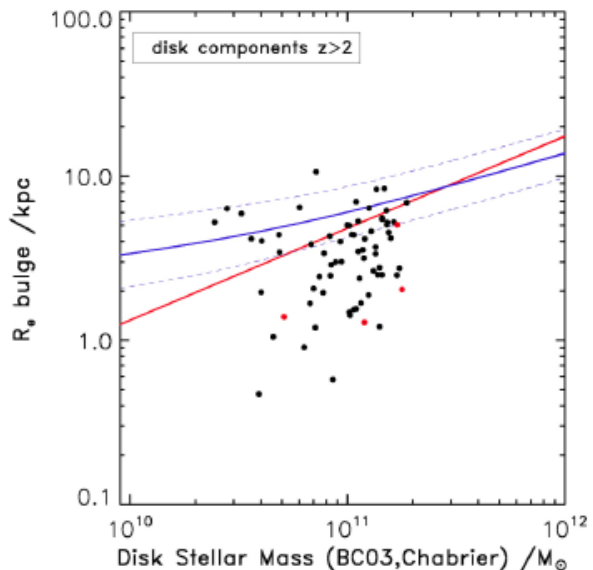
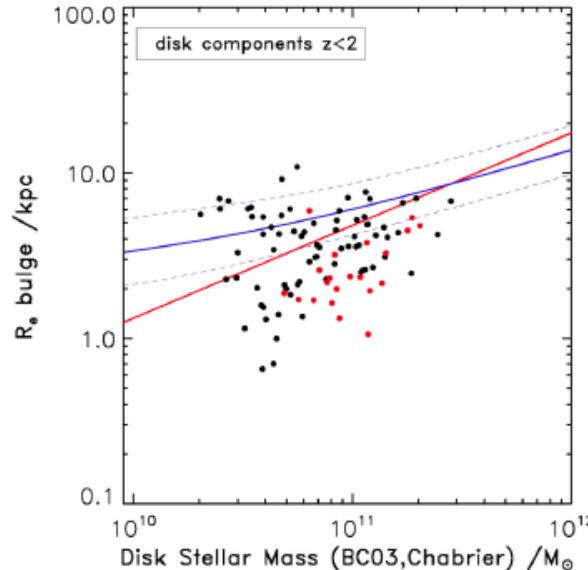
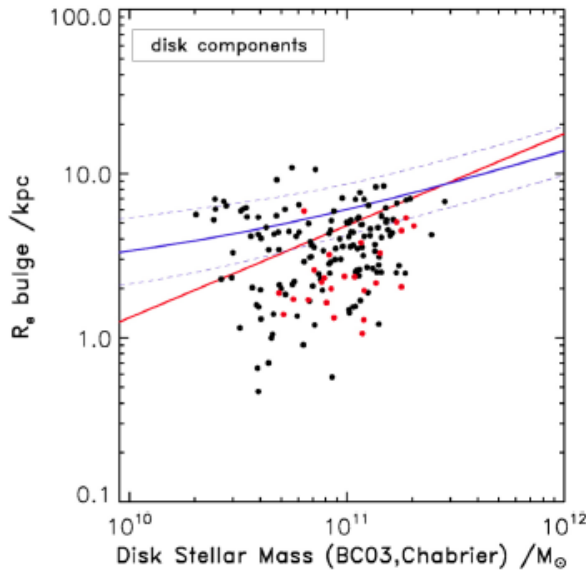
Disk 成分だけでみると・・・

ただし、total stellar mass にH160でのbulge fractionをかけただけ。
 成分別でSED fitしたのではない。また、 $2 \times 10^{10} M_{\odot}$ 以下の成分は表示していない

log Re

$z < 2$

$z > 2$



Log 星質量

赤線: local early-type
 青線: local late-type

赤点はpassive disk
 皆小さい(compact)

$z \sim 0$ にかけて進化はあるものの
 bulgeほどではない

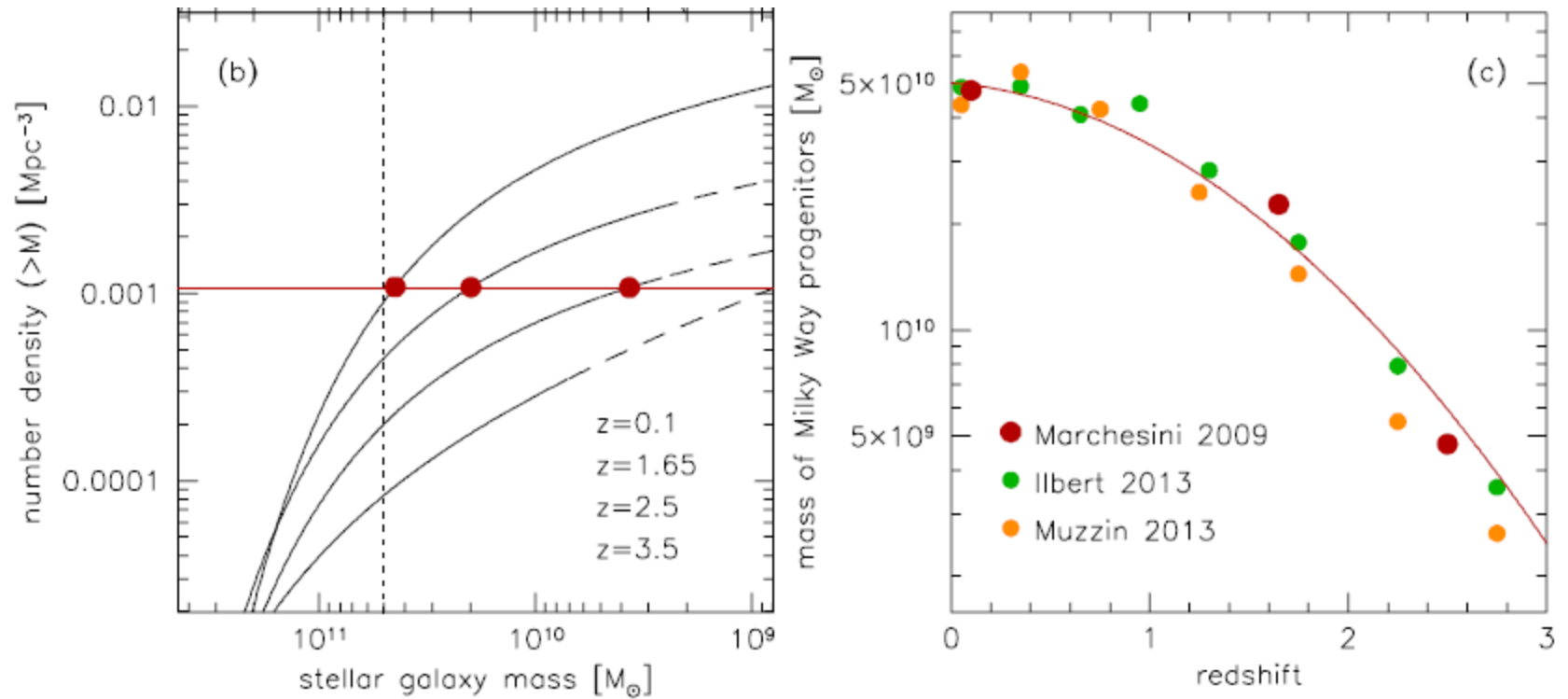
$z=3-2 \Rightarrow 1-2$ でもさほど差はなし

$z=3-2$: factor 2.55 smaller

$z=2-1$: factor 2.43 smaller

THE ASSEMBLY OF MILKY-WAY-LIKE GALAXIES SINCE $z \sim 2.5$

Van Dokkum et al. 2013, ApJ 771, L35



Number densityが同じになる星質量の銀河が、
我々の銀河の先祖と考えよう

361銀河 @ $0.25 < z < 2.75$ $\text{MMW}(z) \pm 0.11$ dex

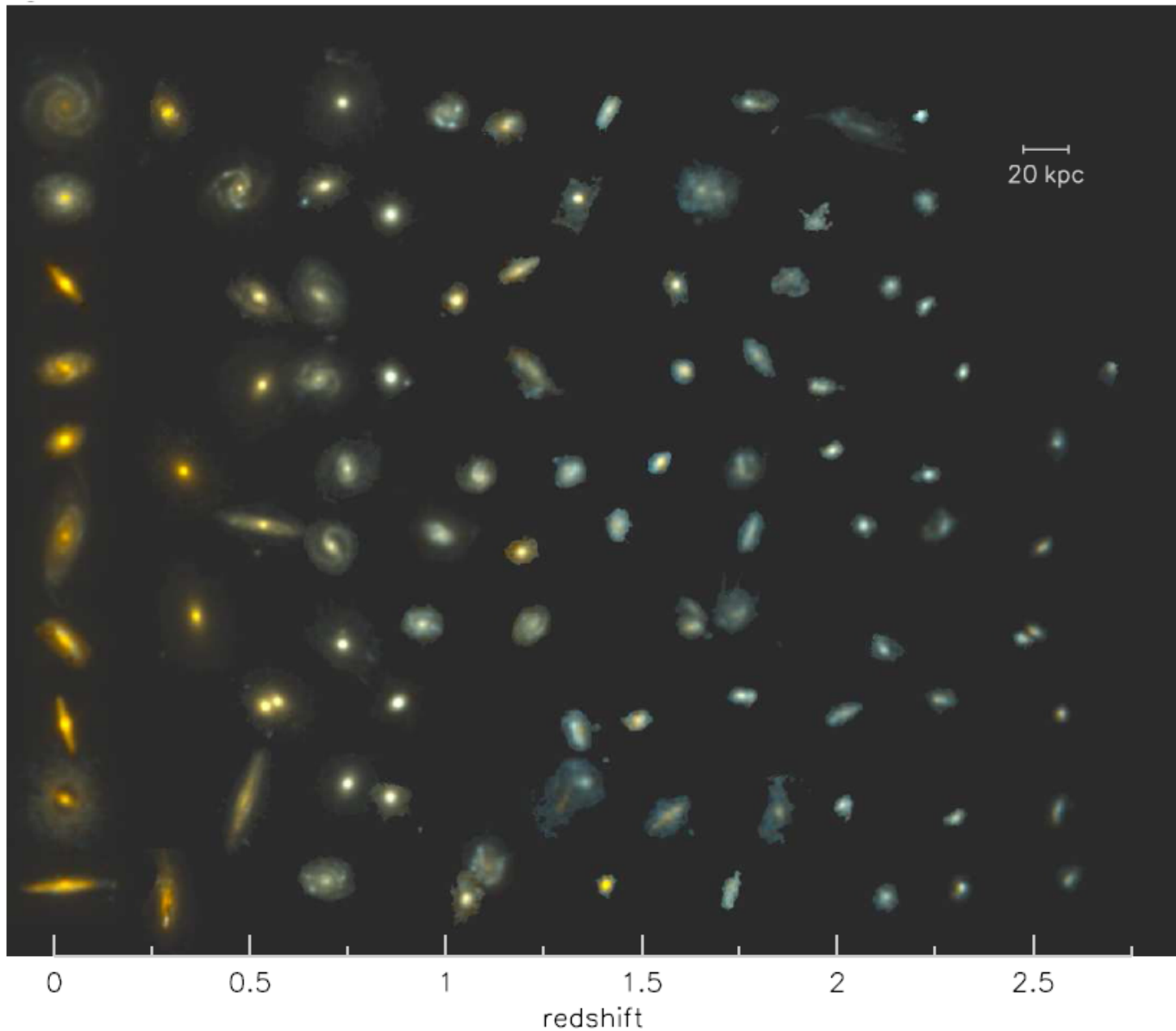
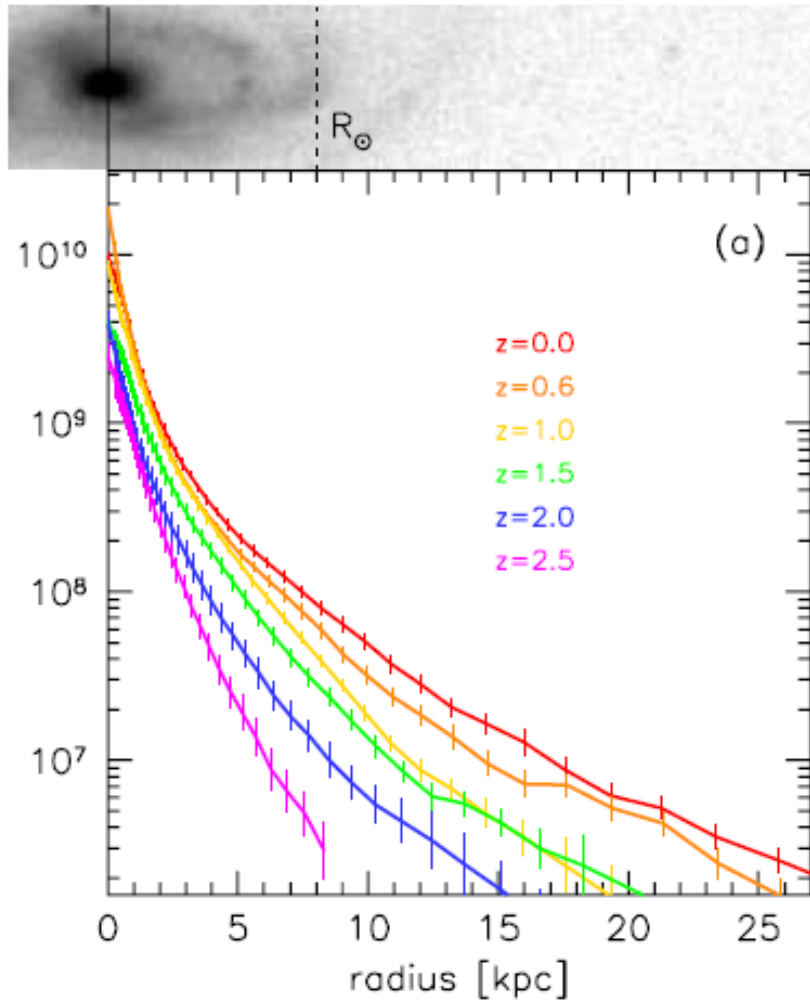


Figure 2. Examples of galaxies with the number density of the Milky Way at $0 < z < 2.75$. Galaxies at $z \approx 0.015$ are from the SDSS; galaxies at higher redshift are from the 3D-HST and CANDELS surveys. The color images were created from data in the same rest-frame bands (u and g) at all redshifts and have a common physical scale. Their intensities are scaled so they are proportional to mass, indicated in the top panel. Galaxies at high redshift have relatively low surface densities; their centers and outer parts seem to build up at the same time, at least until $z \sim 1$.

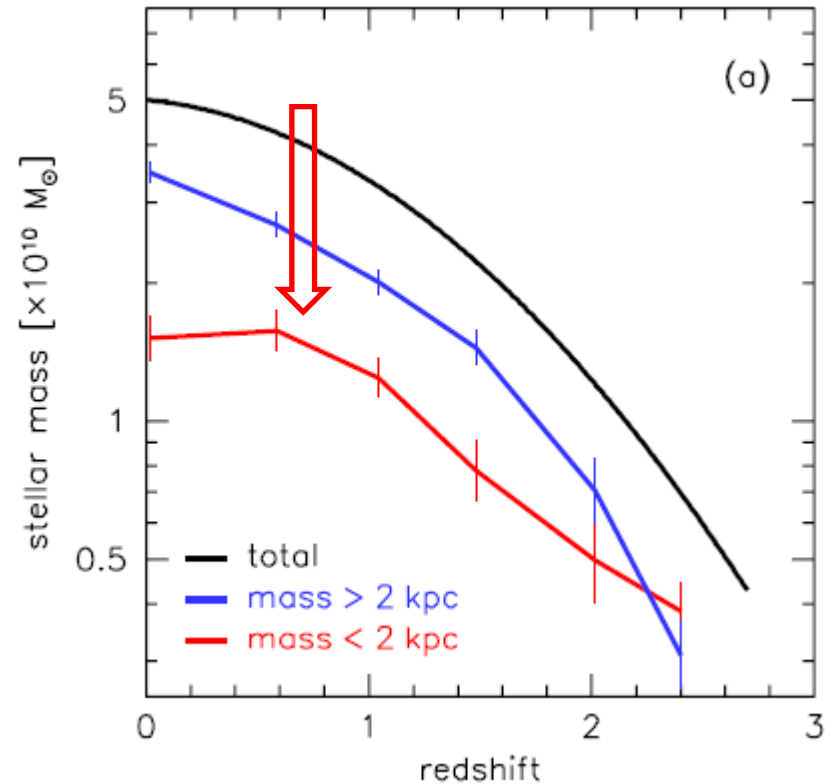
平均質量面密度分布

Psf corrected, rest g-band
Total mass でscaleしてある



半径2kpc以内では、 $z \sim 1$ までは増加するが、後は増加しない
半径2kpc以遠では、ずっと増加
 \Rightarrow

$z \sim 1$ 弱まではバルジも円盤も成長
 $z < 1$ ではバルジの成長はほとんどない

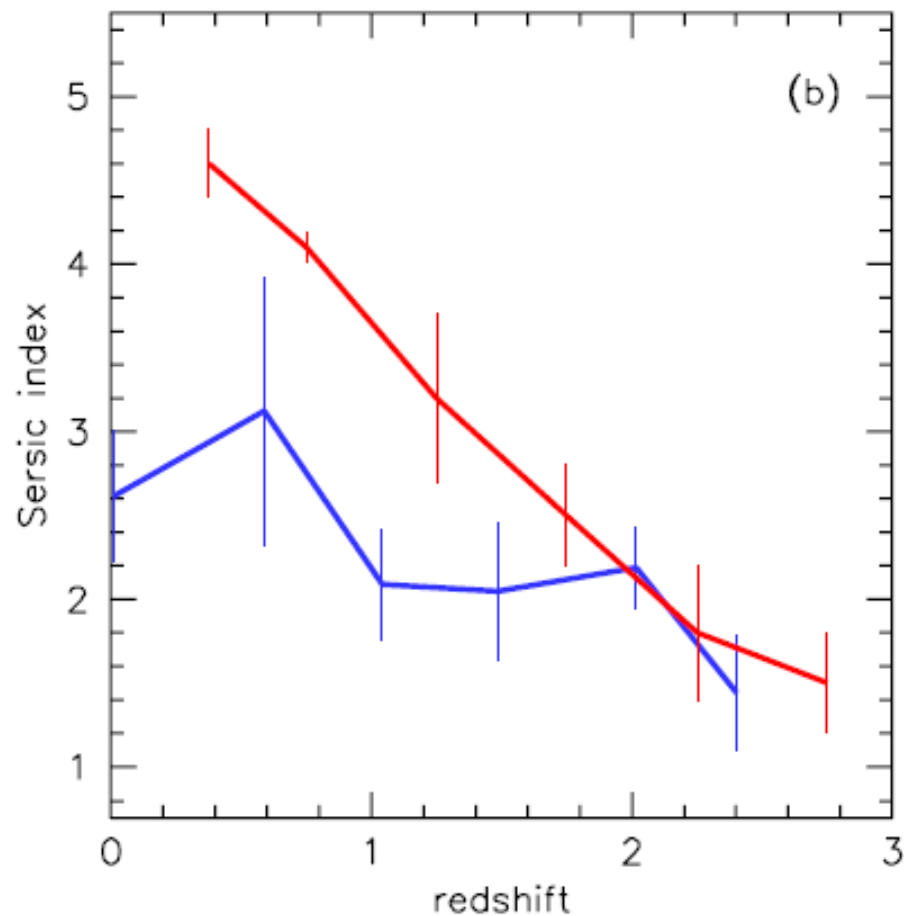
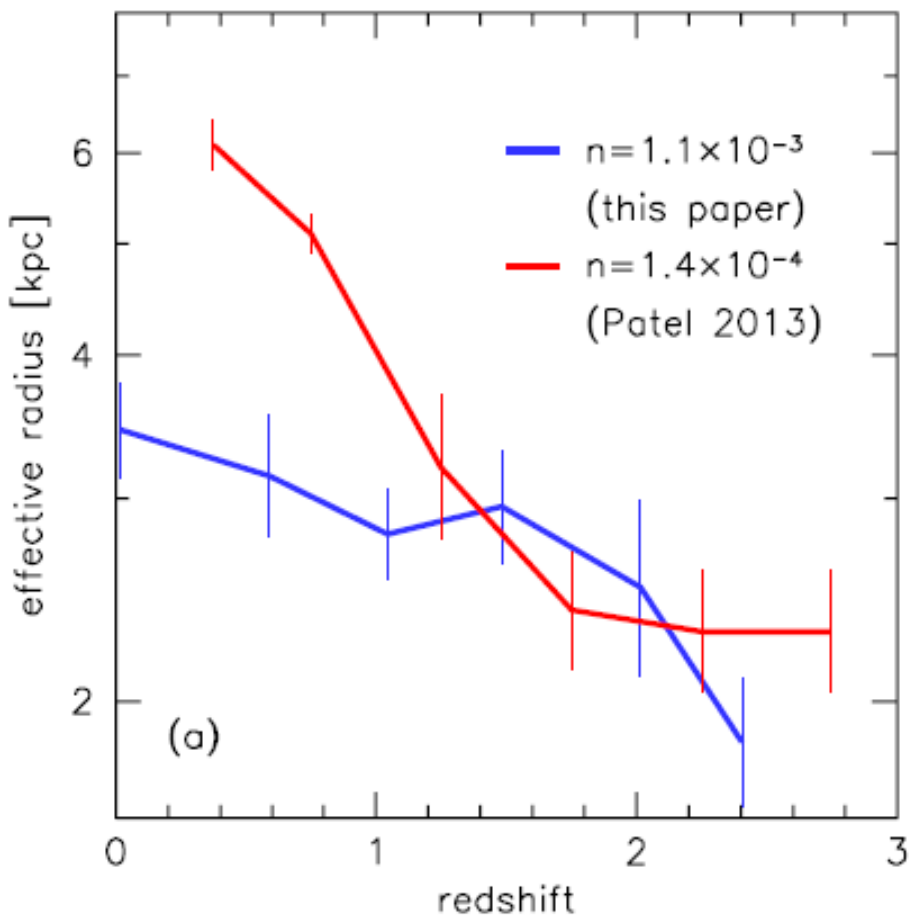


Effective radius と Sersic indexの進化

青: MWマス といふか MWマスの数密度に対応するマス

赤: 楕円銀河のマスに対応する数密度のマス

円盤銀河での進化はあまり大きくない

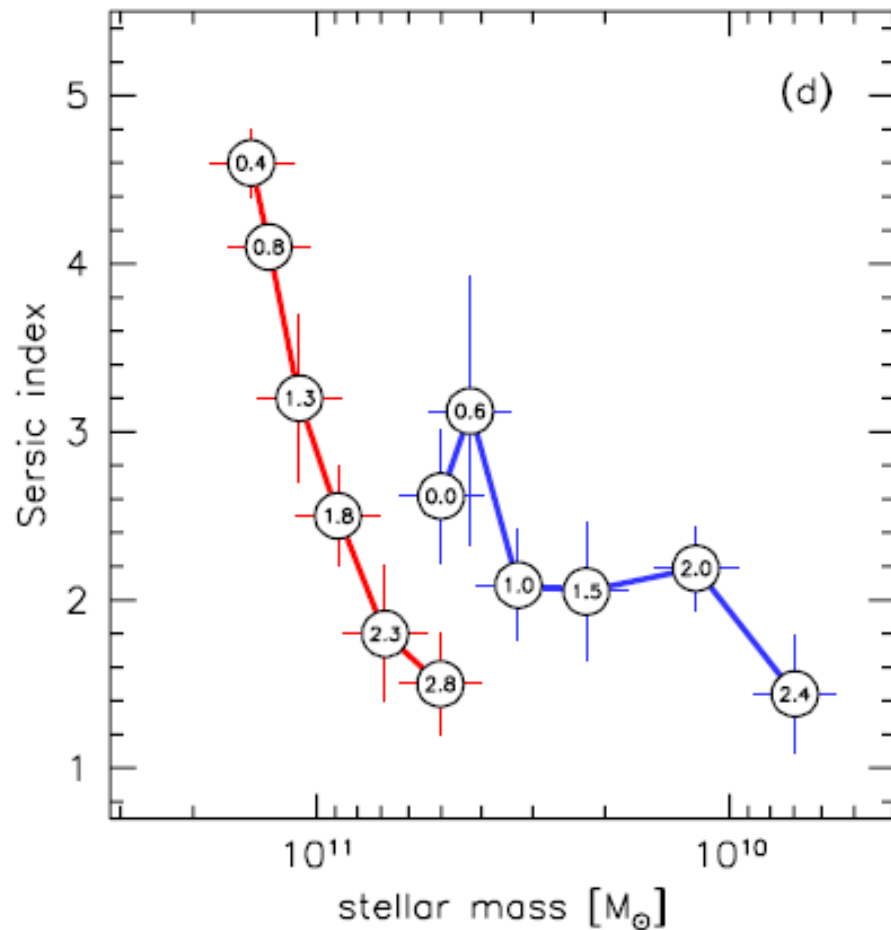
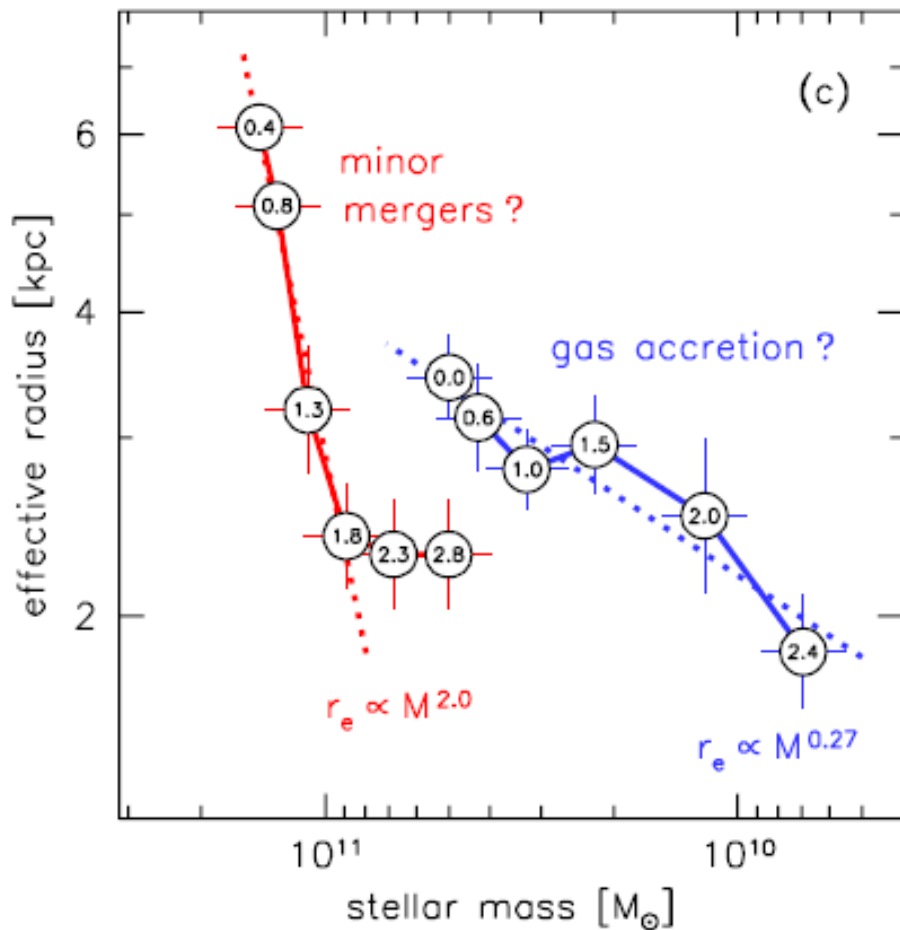


星質量の関数として見ると...

青: MWマス といふか MWマスの数密度に対応するマス

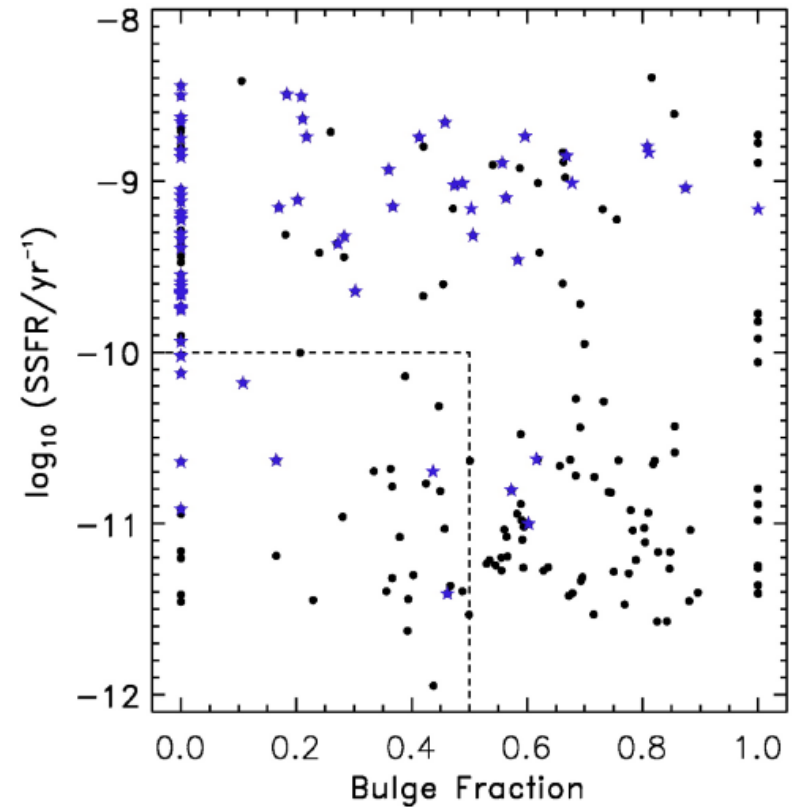
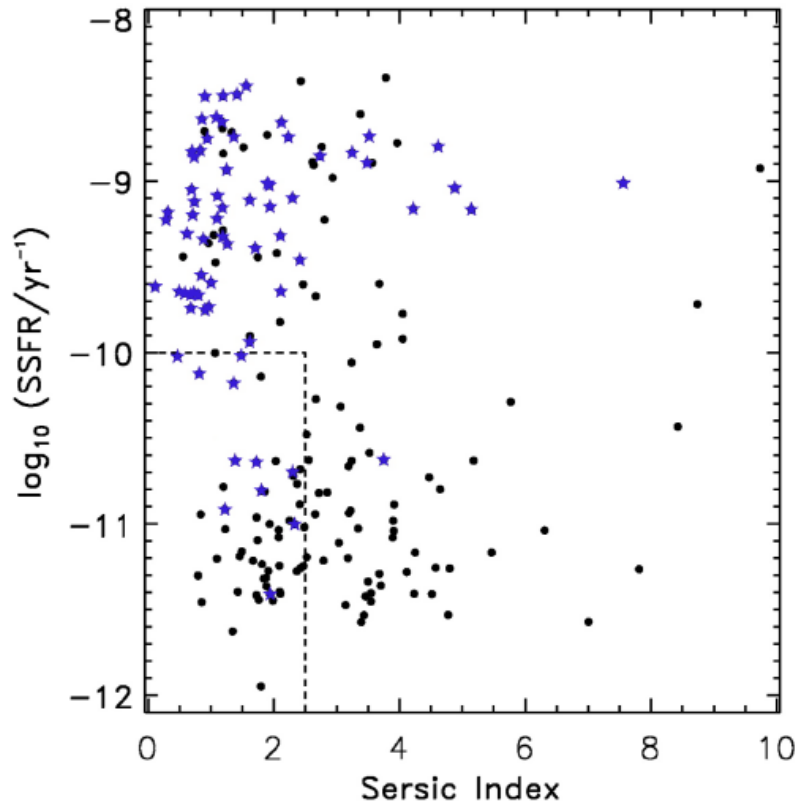
赤: 楕円銀河のマスに対応する数密度のマス

○内は赤方偏移



その他関連するかもしれない話題

Presence(?) of passive disks at $z=1-3$



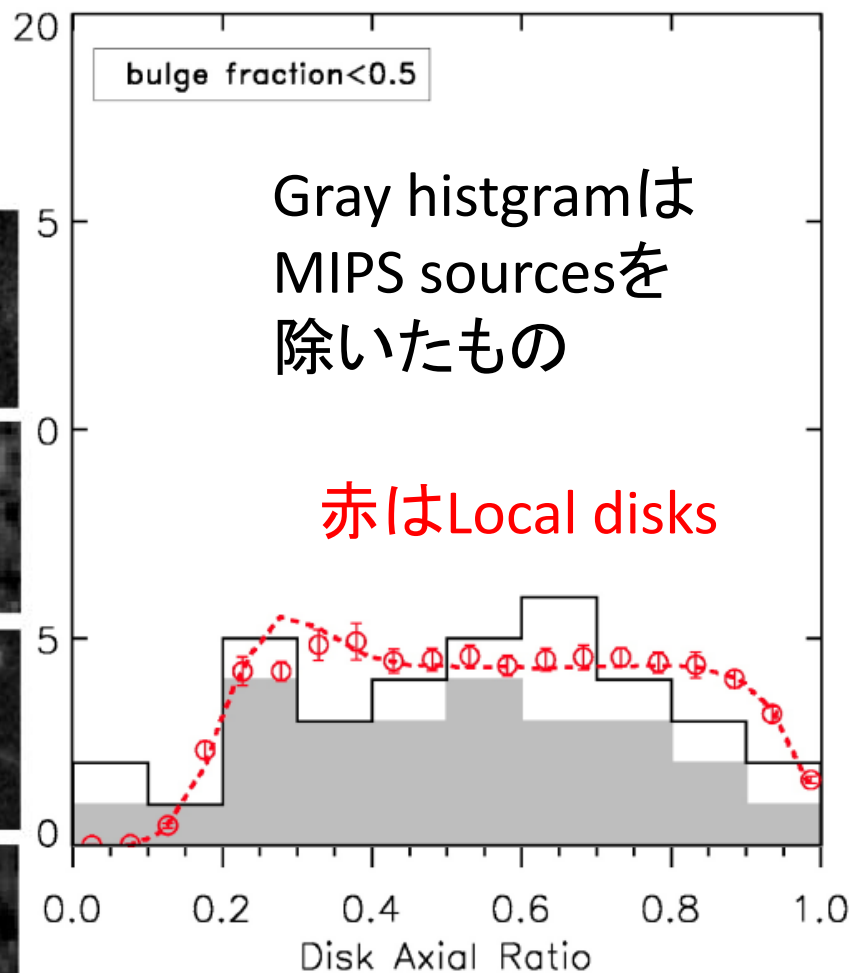
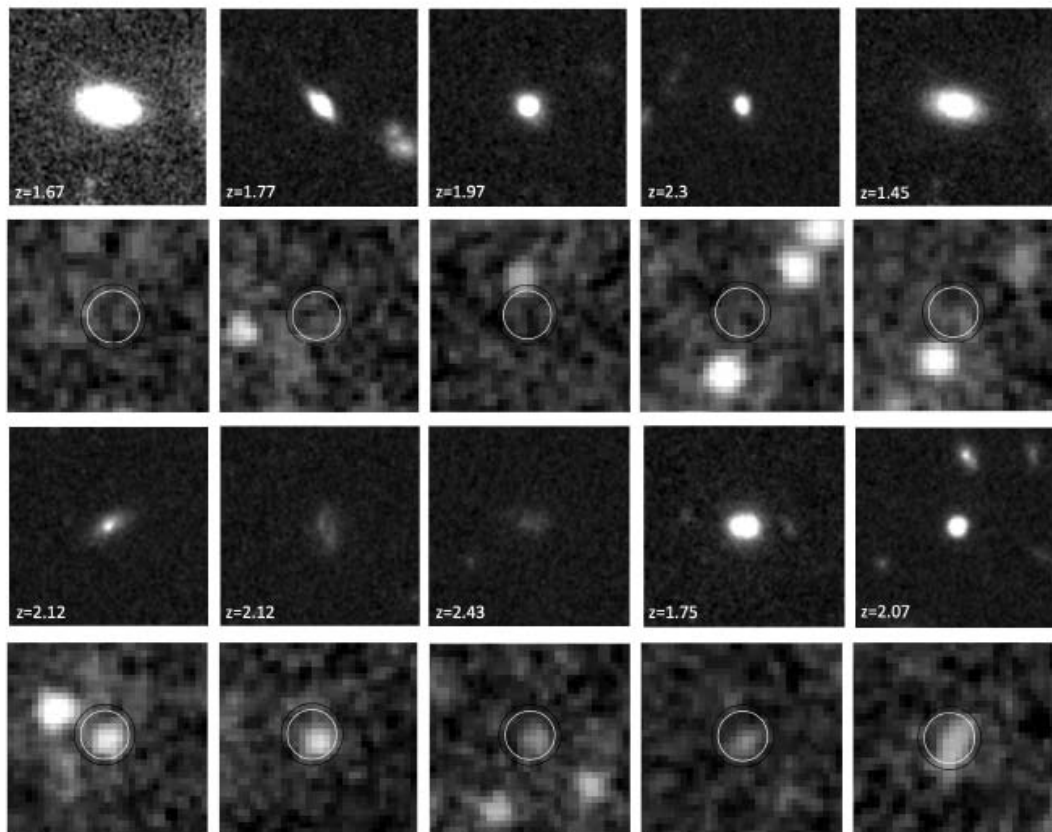
青はMIPSソース

Disk dominatedなのにpassive ($\text{sSFR} < -10$)が存在(boxの中)

Passive pure-disksの姿

Passive diskはflat分布

6"x6" stamps
10個分
上H160、下MIPSの
組が10



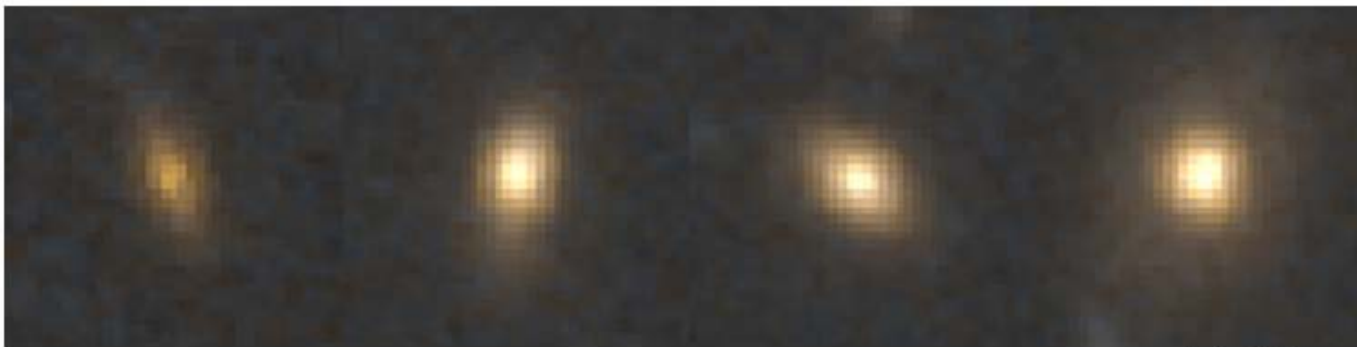
Quiescent disk in compact massive galaxies?

Quiescent Compact massive galaxies at $z \sim 2$ の大部分は

Disk dominated だー (犬井ヒロシ風に)

Van del Wel et al. 2011
ApJ 730, 38

但し、disk scale は小さい (1.5 kpcとか)
なので、これがそのまま円盤銀河になるわけではないだろう。
むしろ早期型銀河へ？



B/T=0.25



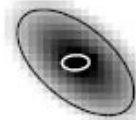
Rd = 1.7 kpc
Rb, eff = 0.33 kpc

B/T=0.43



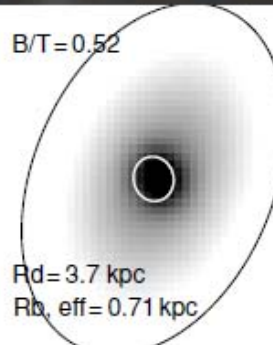
Rd = 1.9 kpc
Rb, eff = 0.58 kpc

B/T=0.26



Rd = 1.4 kpc
Rb, eff = 0.34 kpc

B/T=0.52



Rd = 3.7 kpc
Rb, eff = 0.71 kpc

2成分FITの結果
Disk は $n=1$ に固定

簡単なまとめ

- 目でみると、 $z > 2$ で円盤はいない
- ACS等のパラメータでは分類は難しい
- Sersic indexで $n \sim 1$ を円盤とみなすと、 $z > 2$ は円盤が多い(質量の大きい銀河では特に)
- $N \sim 1$ だからといって円盤形状とは限らない
- 丸い円盤が確立されるのは $z \sim 0.9$ 位？
- Bulgeは $z = 2$ 付近から1付近にかけて急激成長？
(じゃあ、SMBHも？)
- 円盤は $z = 2$ 付近ではゆっくり・同じ位成長？
- Passiveな円盤やcompact massiveな銀河にも円盤構造が...

今後

- Clumpy galaxiesとの関係？
- cold accretion scenarioとの関係？
- マージやその割合との関係？
- 形態の定量評価？
 - そもそも無理？
- そもそも円盤銀河の形成時期とは？
- これらの進化をどうつなぐか
 - number densityも一つの案だけど・・・
 - clusteringの強さ？
 - internal dynamicsも合わせてシミュレーションとの比較？