

銀河形態

- 現状の理解と未解決問題 -

(最新版は [こちら](#))



澁谷 隆俊

自己紹介



- ✓ 澁谷 隆俊
- ✓ 道民 (寒冷地仕様)
- ✓ 留萌生まれ, 十勝仕込み
- ✓ キーワード : 銀河形態, 観測, high- z



北見工大 (最北の国立大)



エゾリス (大学周辺にて)

天文台@三鷹, 5年
 $z \sim 7$ LAEs, 再電離など

すばる, *Hubble*, *Keck* など

本講演では

- ✓ 銀河形態に関する現状の理解と未解決問題を解説
- ✓ ただ、観測、可視光、遠方($z>1$)に偏っている (前頁)
- ✓ 本講演と関連の深い 過去の招待講演資料 (閲覧可能なもの, 2013以降)
 - [ハッブル系列の起源](#), 但木謙一さん, 2018
 - [恒星種族に刻印された化石情報から紐解く楕円銀河の形成史](#), 小野寺仁人さん, 2015
 - [円盤銀河の何が問題か? - 天の川銀河から遠方銀河まで -](#), 井上茂樹さん, 2013
 - [渦巻銀河ダイナミクス理論の進展と天の川銀河](#), 馬場淳一さん, 2013

※リンクは2020.8現在
- ✓ 上記講演と内容が極力重複しないように、
銀河形態について広く浅く解説 (することを目指す)

目次

1. 基本事項

2. 現状の理解

3. 未解決問題

1. 基本事項

銀河形態とは

形態の種類

形態の調べ方

注意点

銀河形態とは

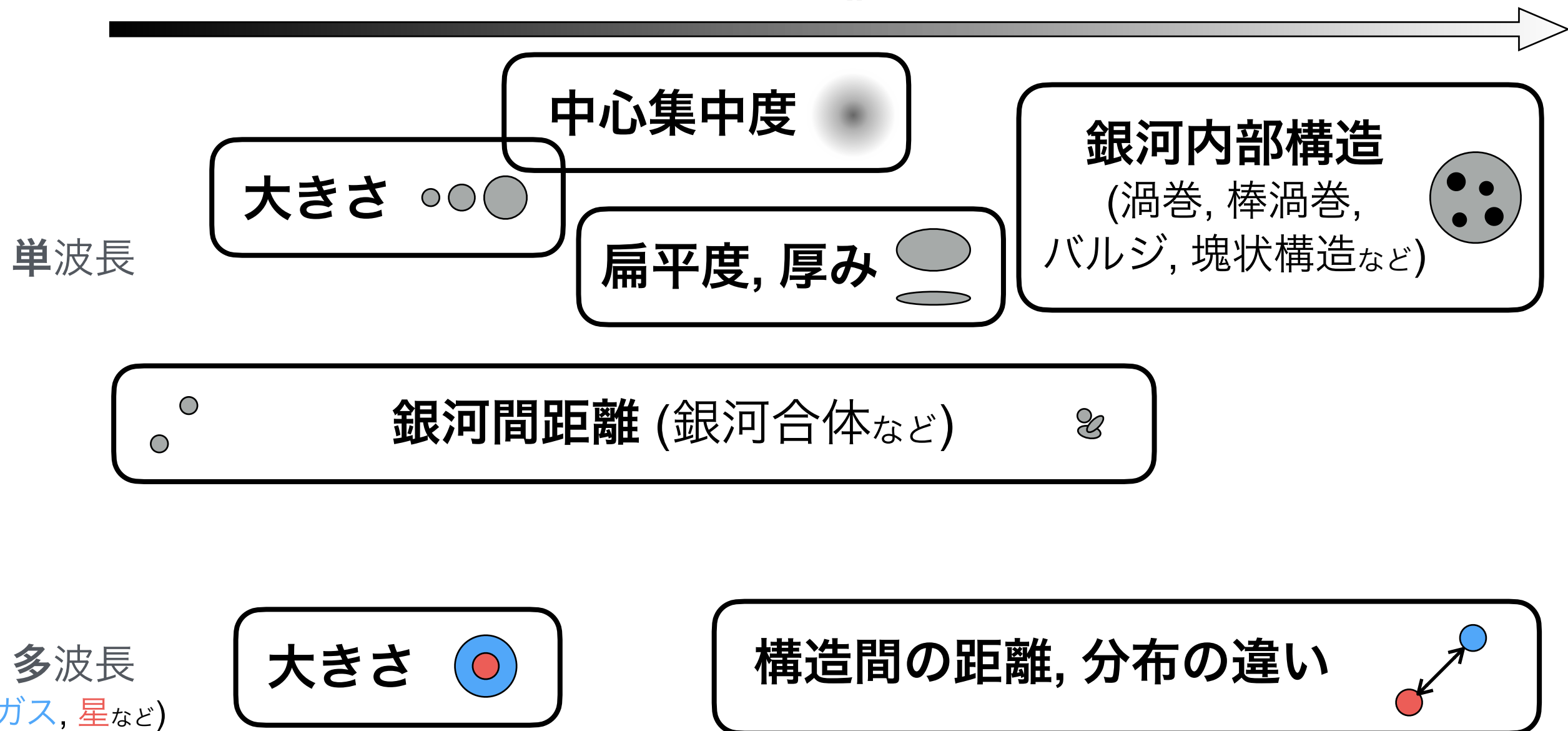
- ✓ **銀河の形**, Galaxy morphology/shape/structure
Spectral line “morphology” などとも言うが, ここでは扱わない
- ✓ **平面2次元/空間3次元** (+それらを1次元化したもの) **で見たときの星, ガスなどの表面/空間密度分布**
- ✓ **銀河発見以来, 最も古くから着目されてきた観測量の一つ**
- ✓ **銀河形成/進化に関する物理過程を反映 + 銀河進化に影響**

銀河形態のスケール

大きい (数 - 数十 kpc)
低次

スケール
銀河構造

小さい (数 - sub-kpc)
高次



銀河形態の調べ方

古い

新しい

(基本的には)
低速, 低精度

(基本的には)
高速, 高精度

Parametric

セルシック則

半径 r_e r_{80}
セルシック指数 n
+
(長軸短)軸比 q

2-components fit.
Bulge/Total 比
 B/T

機械学習
(形態分類,
回帰など)

Non-parametric

目視

成長曲線

curve-of-growth

に基づく
半径 r_e
軸比 q
など

形態指数

非対称度 A
凝集度 S
中心集中度 C
 G, M_{20}, Ψ など

スプースモデリング
画像高解像度化

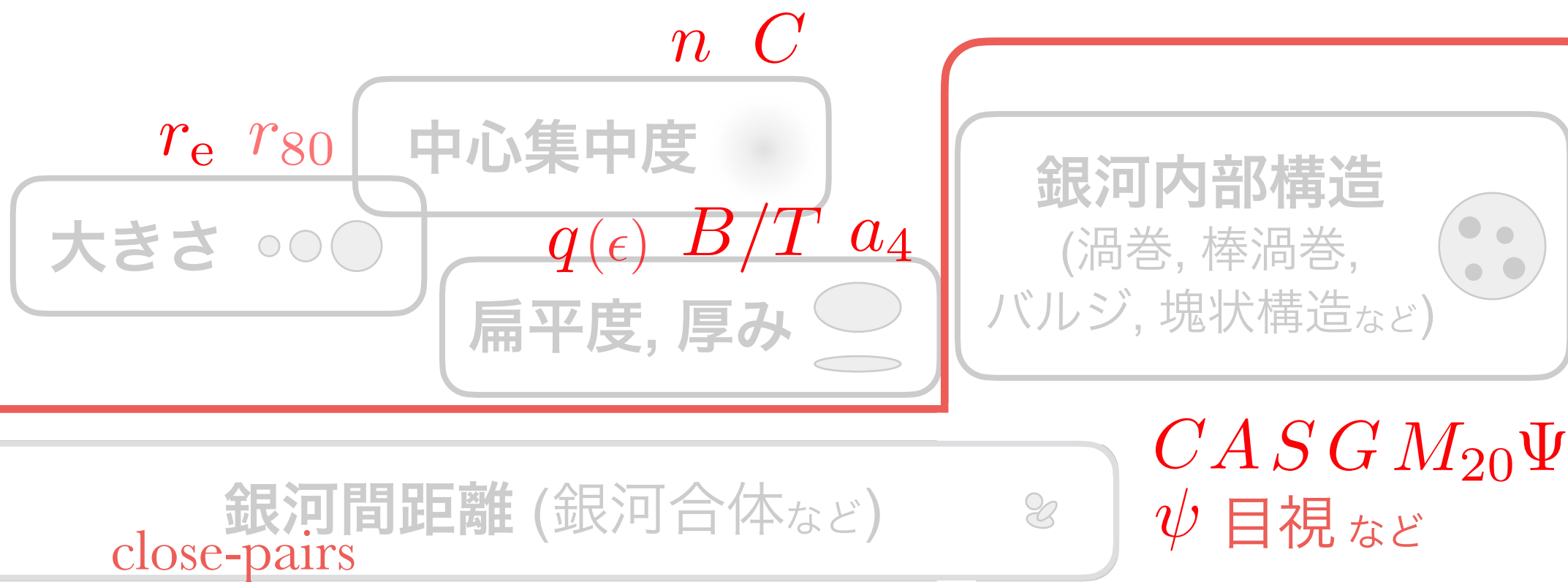
他にも渦巻銀河のピッチ角 ψ , 楕円銀河の円盤型(disky)/箱型(boxy) a_4 など

※新旧は銀河研究に応用され始めた時期を基に. 処理速度, 精度は逆転しているものも.

銀河形態の調べ方

各銀河構造に当てはめると...

機械学習, スパースモデリング



目視 visual inspection

✓ 目で見て形を判断, 最も古典的

✓ ~3-10人の天文学者が多数決

慣れている天文学者同士なら意見が良く一致するとか

✓ 数千個くらいなら現在でも

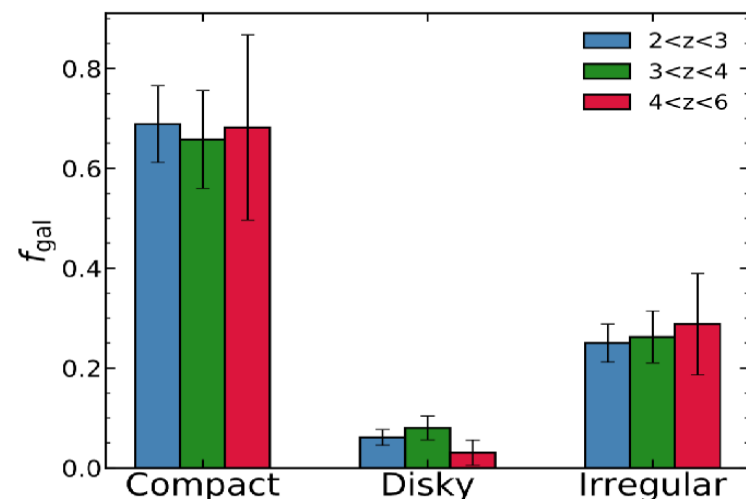
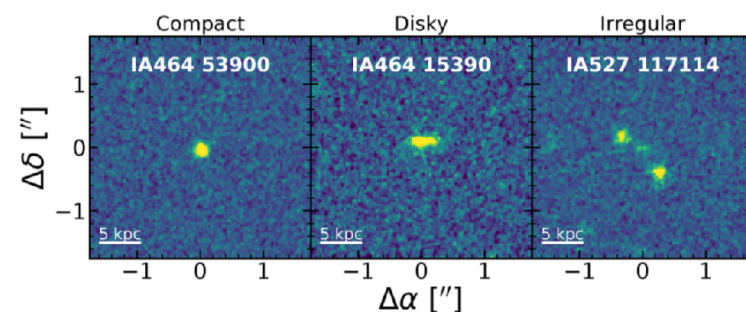
数万 - 十萬個くらいでも頑張れば行ける (e.g., Shibuya+18a)

✓ 数十万-百万人の市民による判定

✓ 一つの銀河に数十人 → 定量化

等級毎の完全性など

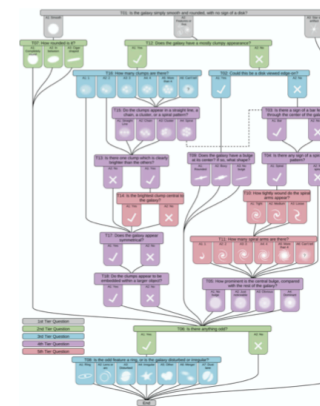
✓ 充実した tutorial, interface



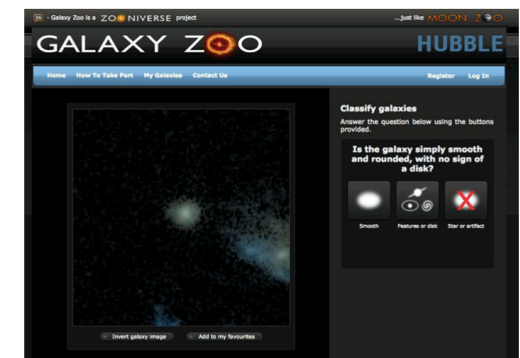
Paulino-Afonso+17



質問を構造化



Willett+13, Simmons+17



すばる/HSC でも



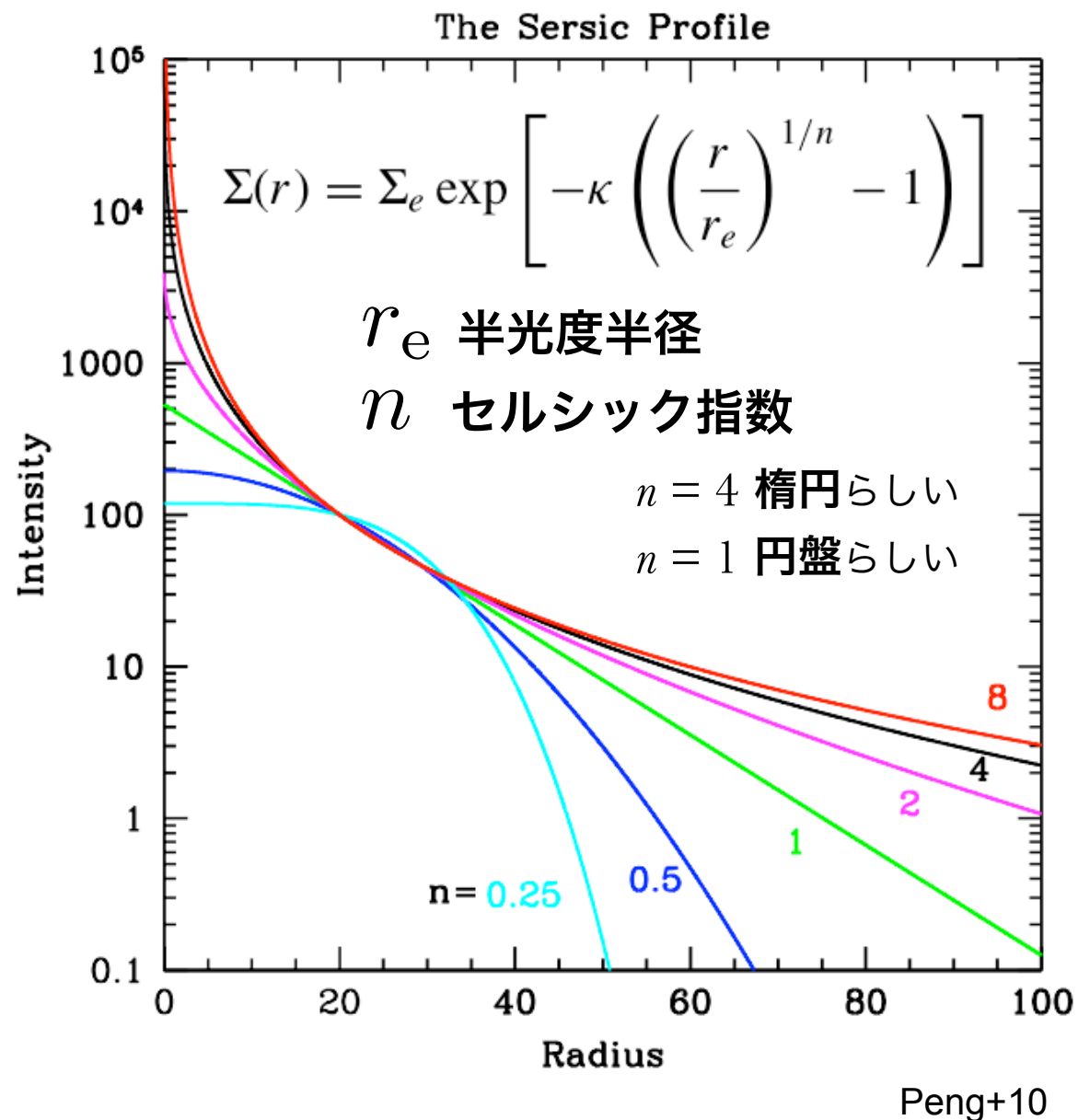
良い 定性判断, 機械学習の教師データ

悪い 労力, 再現性 (but, crowdsourcing)

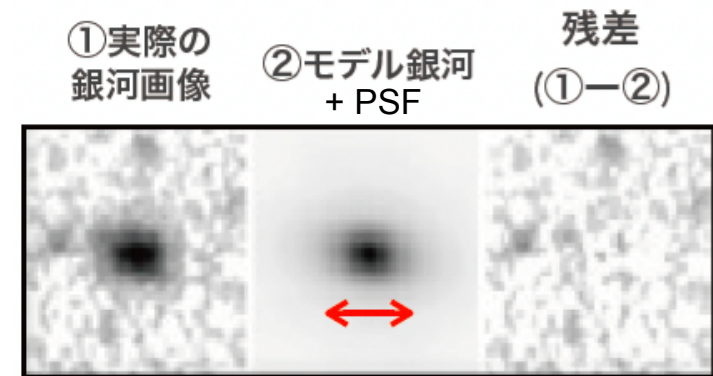
セルシック則

輝度 profile をセルシック則でフィット

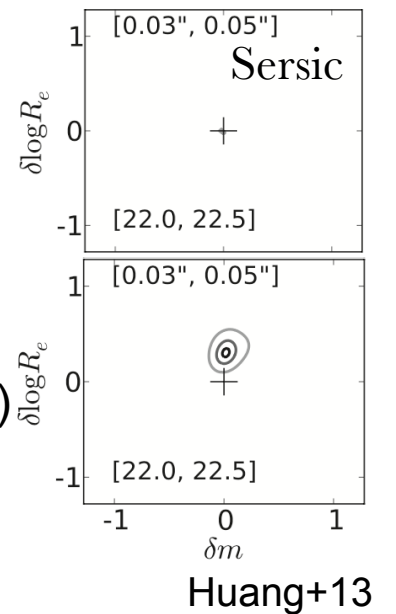
通常, 軸比 q なども加えて 2 次元で



あくまで定量化方法
セルシック則自体に物理的意味があるわけではない



- 成長曲線などよりも r_e が求まり易い
- 成長曲線は複雑な補正が必要な事も
(Curtis-Lake+16),
PSF の影響も事後補正 (van der Wel+14)



良い

分かり易い, PSF broadening の考慮,
(銀河が"素直な"形をしていれば) ノイズに強い

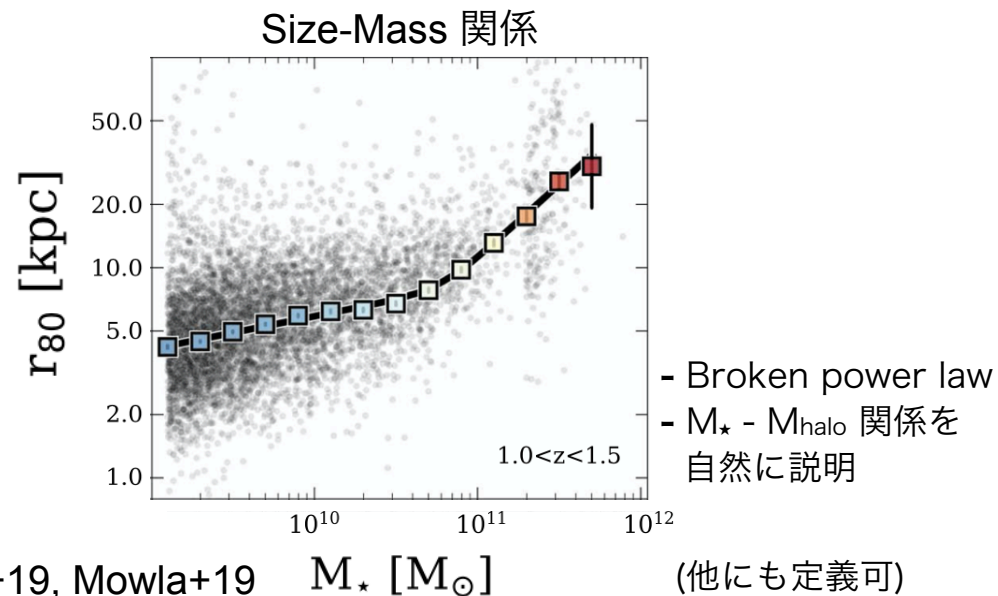
悪い

パラメトリック, 低速

サイズ, 円盤/楕円 - その他の定量化方法

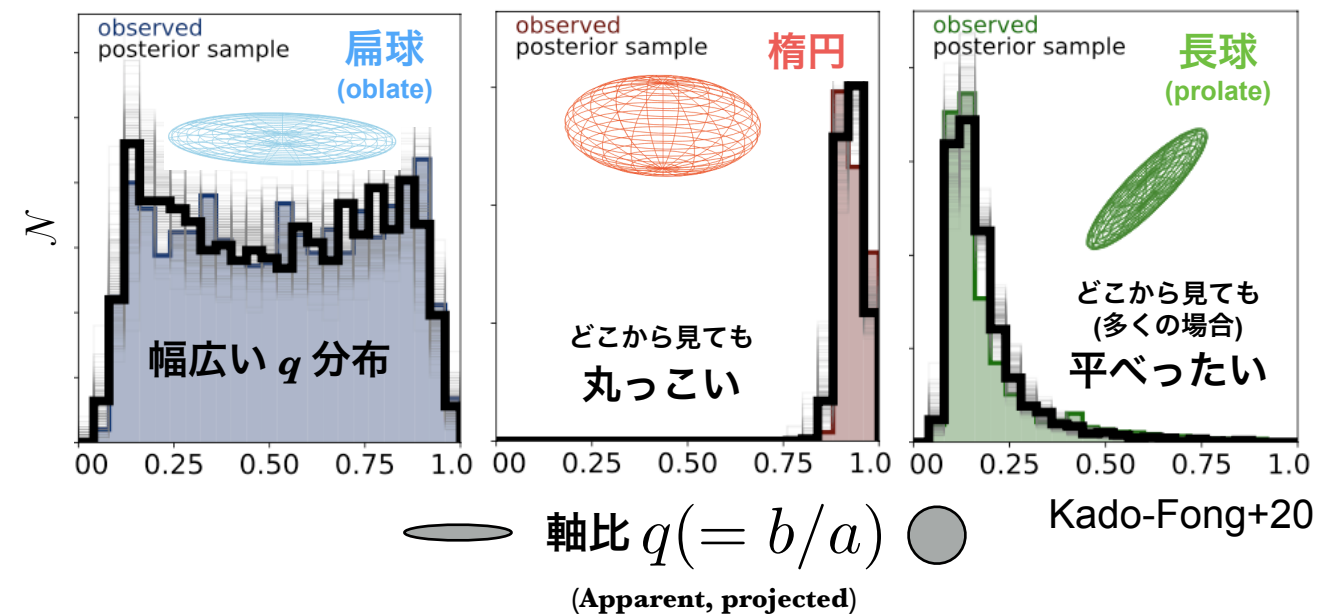
80%光度半径 r_{80}

- ✓ $r_e (= r_{50})$ は n に強く依存
- ✓ $r_{80} \rightarrow$ サイズをより統一的に

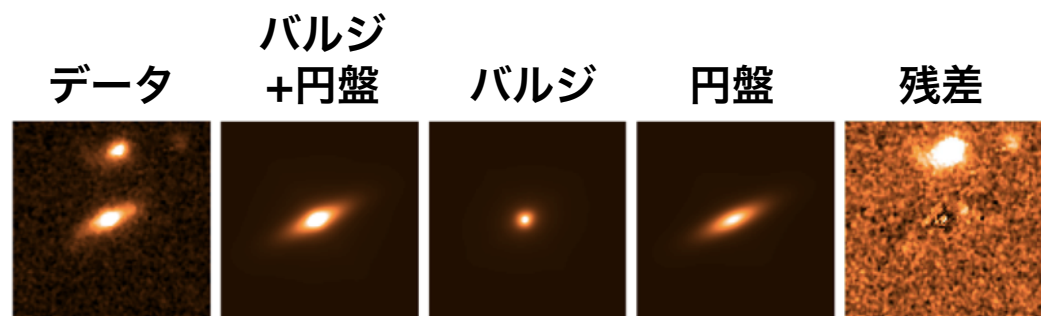


軸比分布

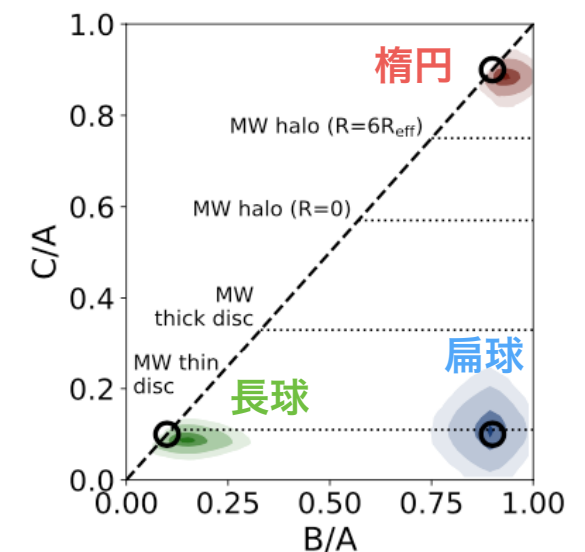
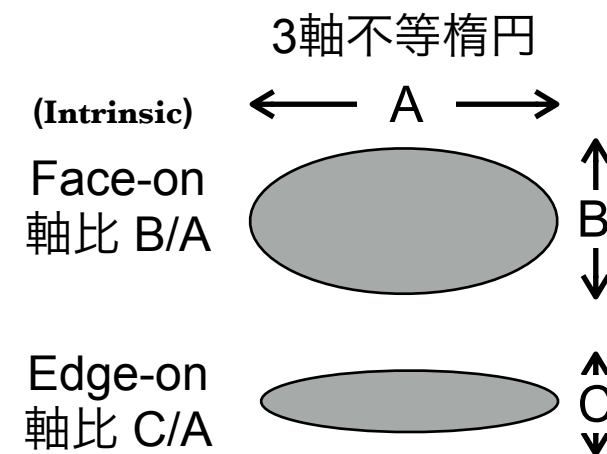
軸比 Q (from e.g., Sersic fit) の頻度分布 $\rightarrow$ 平均的な 3次元形態



2-component Sersic fit



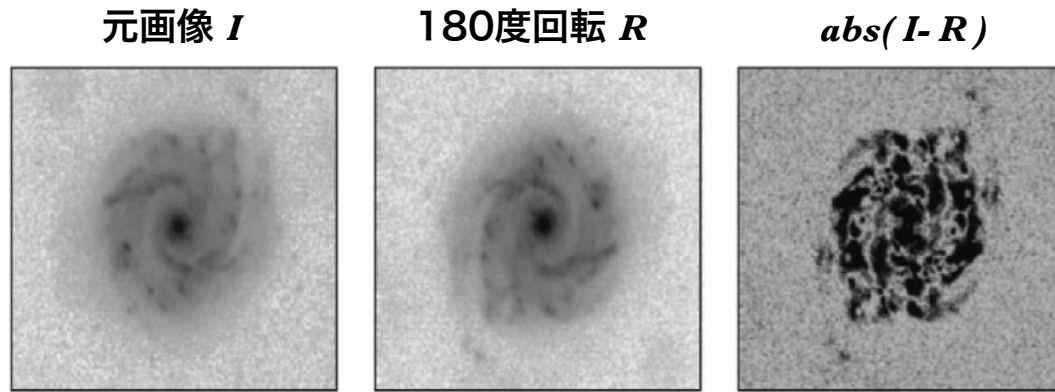
Bruce+14



B/A , C/A の平均, 分散などをパラメータに
ランダムな方向から見て観測と比較

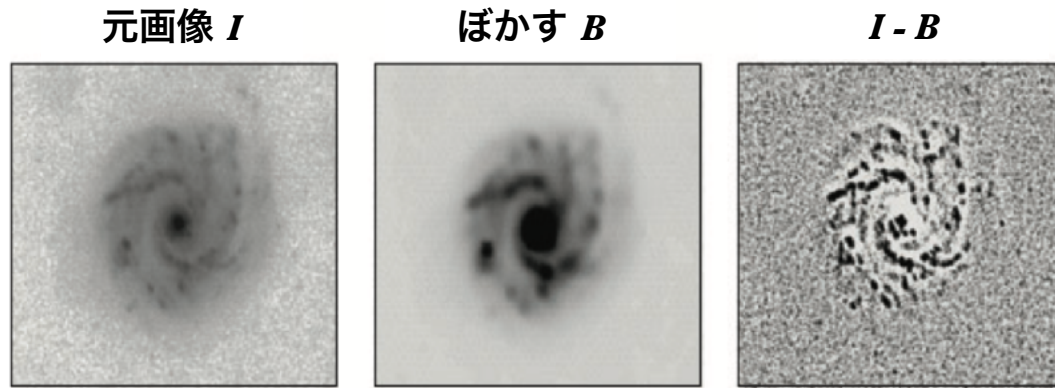
形態指数

非対称度
Asymmetry



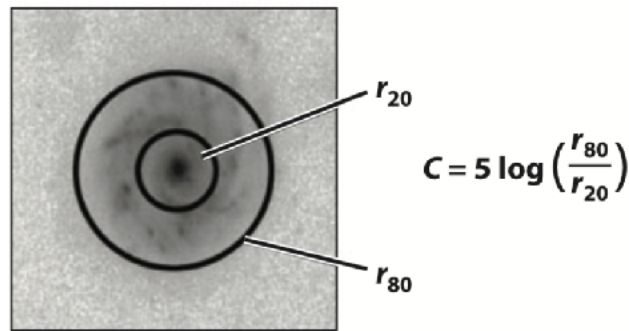
$$A = \frac{\text{abs}(I-R)}{I}$$

凝集度
Clumpiness



$$S = \frac{I-B}{I}$$

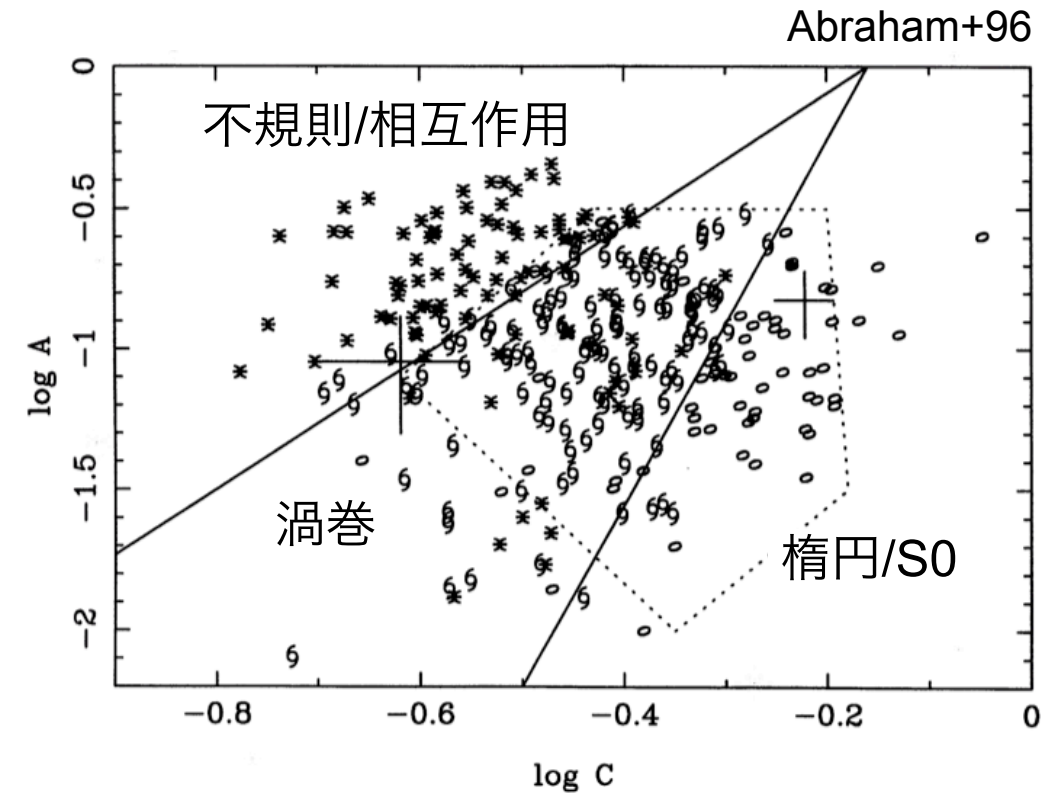
中心集中度
Concentration



Conselice 03

他にも

G ジニ係数 (Abraham+03)
 M_{20} 明るいフラックス20%のモーメント (Lotz+04)
 Ψ Multiplicity (Law+07a) など



- ✓ 形態指数を組み合わせると分類可能
- ✓ しかし、単純な平面では高精度の分類は難しい → 機械学習

良い

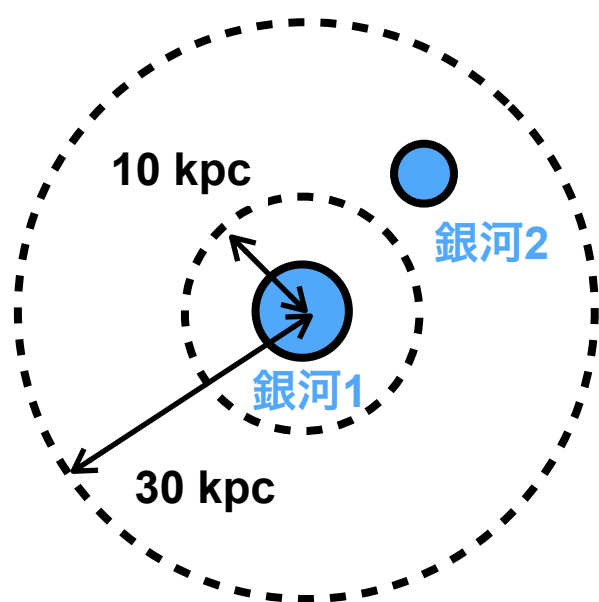
ノンパラメトリック、
単純、実装しやすい

悪い

低精度 (~70-80%)

合体銀河の定義

Close-pairs



- ✓ $R_{\text{proj}} = 10 \sim 30 \text{ kpc}$
- ✓ 光度比 (質量比) $L_1:L_2$ ($M_1:M_2$)
= 1:1 ~ 4:1 → major merger
= 4:1 ~ 10:1 → minor merger

(赤方偏移情報 z_{phot} , z_{spec} があれば)
 Δz が小さいもの (< 0.1 , 0.2 など)

$$\Delta z \equiv |z_1 - z_2| / (1 + z_1)$$

(e.g., Man+16, 数値は研究によって少し変わる)

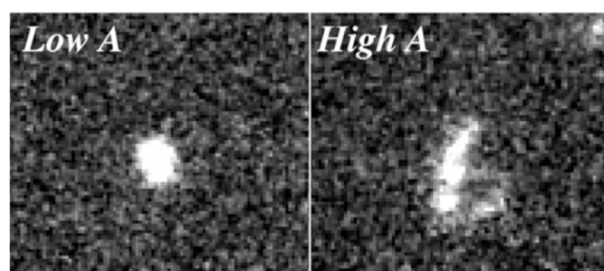
See also, Ventou+19

→ 簡単 + 割と高精度 (major の場合)

→ 統計的研究が容易

銀河2の検出限界に注意
minor だと難しくなる

歪んだ形態



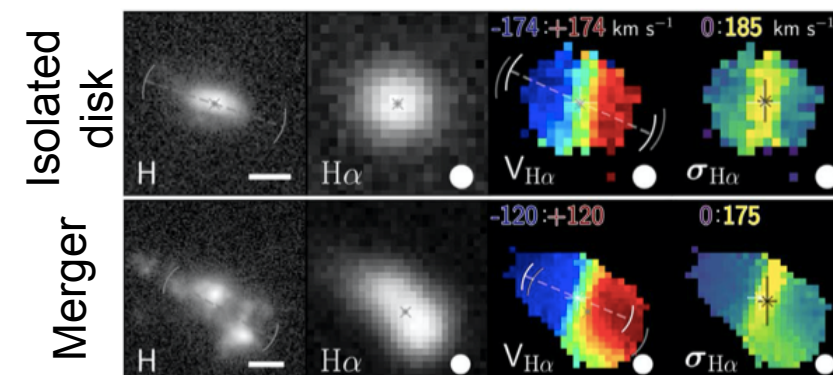
Shibuya+14a

- ✓ 形態指数 A が高いものなど
 - ✓ 他の形態指数との組み合わせも (前頁)
- 合体 後期段階の検出

力学構造

分光データから分類する試み

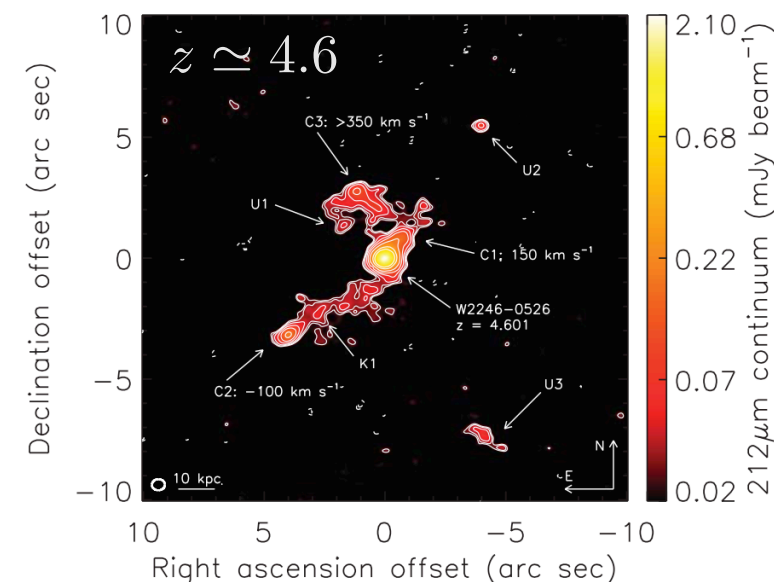
Simons+19



真面目にやると結構難しそう

ガス, ダスト観測

Díaz-Santos+18

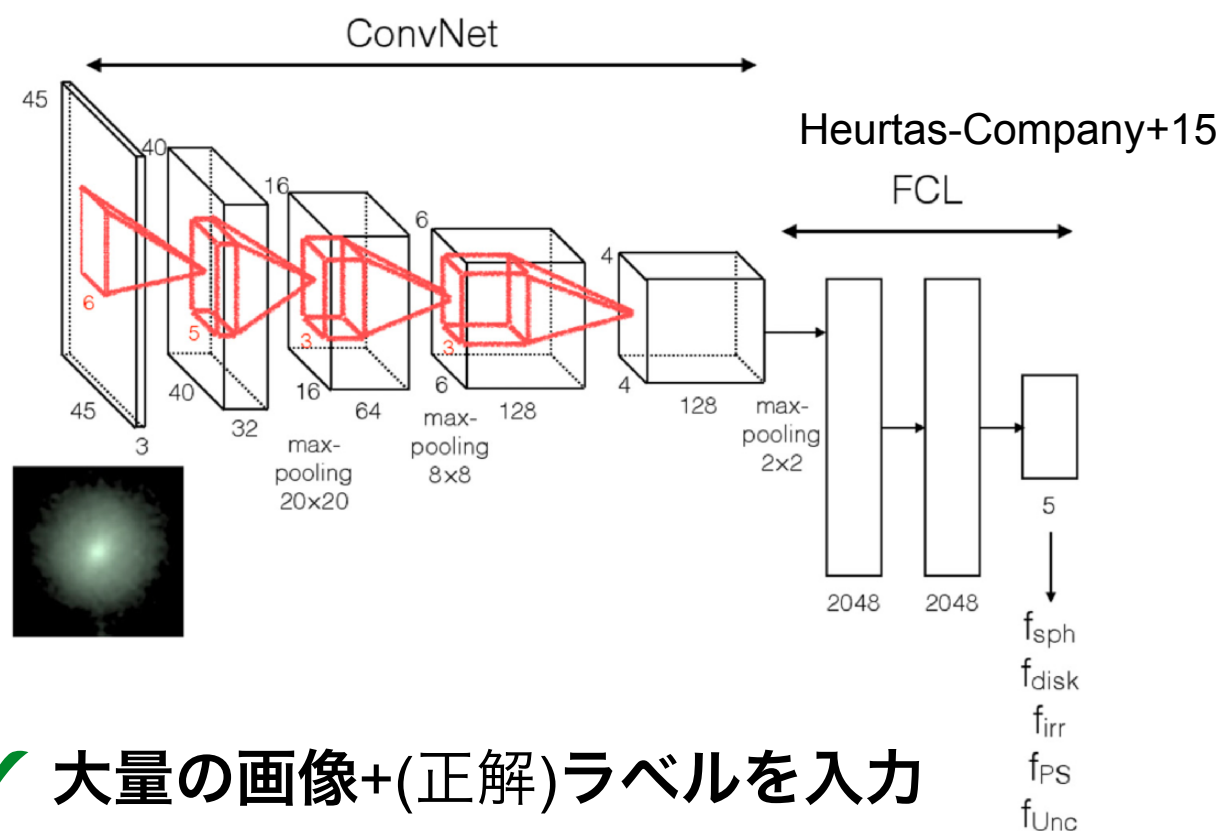


銀河間の gas/dust “bridge” の有無

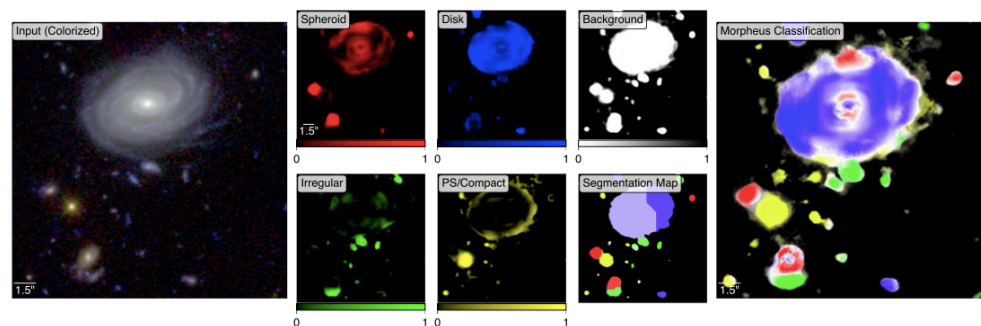
最近は機械学習も (e.g., Pearson+19)

機械学習 (形態分類)

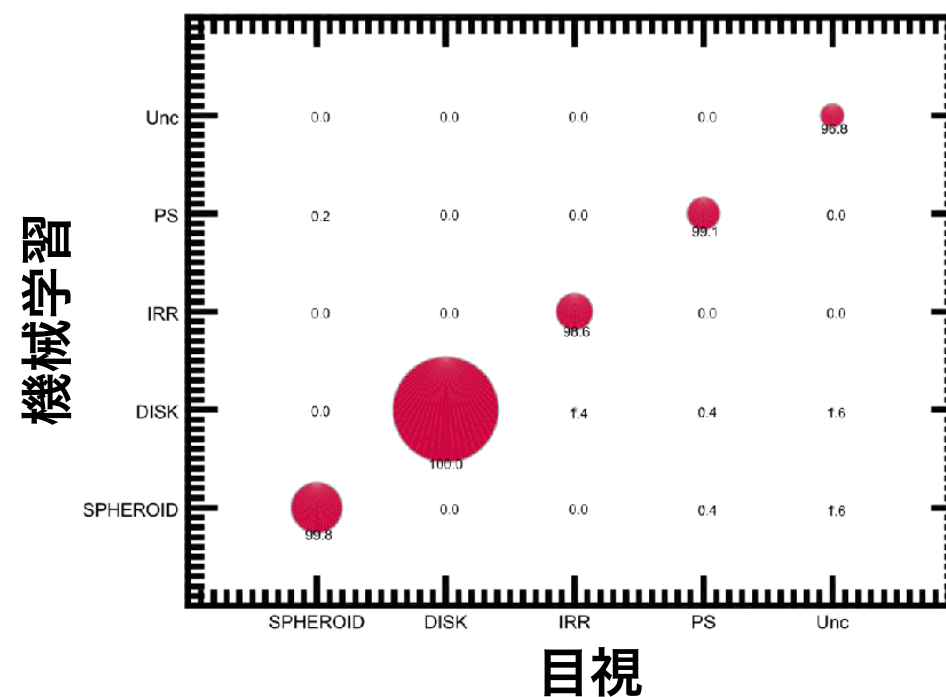
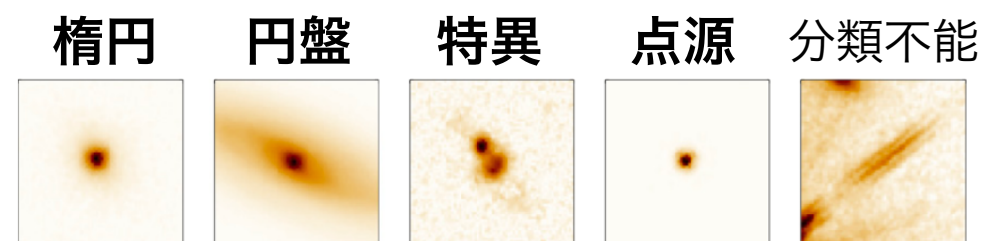
畳み込みニューラルネットワーク (CNN)



- ✓ 大量の画像+(正解)ラベルを入力
- ✓ 形態的特徴を学習
- ✓ 新たなデータに対して分類



Hausen & Robertson 20 ピクセルレベルの分類も



高精度, > 95-99% (明るさなどに依る)

良い

高速, 高精度

悪い

実装し難い (but, Tensorflow など),
大量の教師データ (but, 転移学習など)

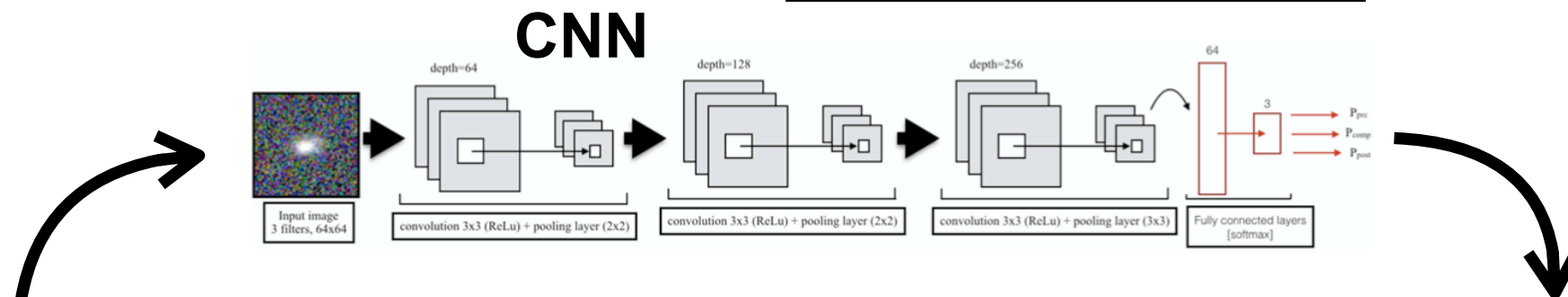
See, e.g., Ackermann+18,
Domínguez Sánchez+19

機械学習 (Simulation 画像 + 形態分類)

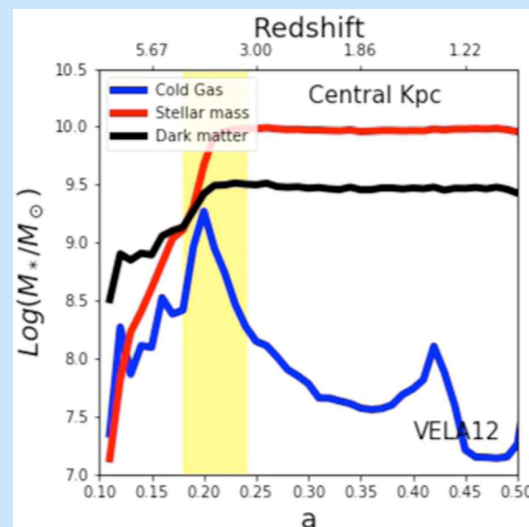
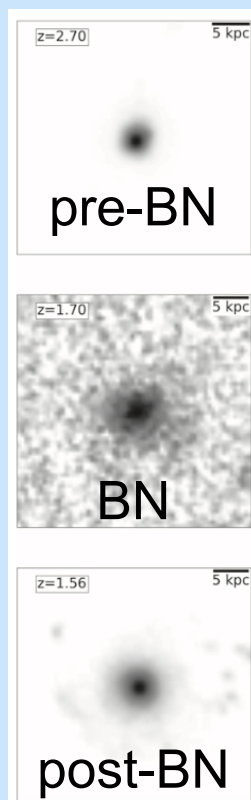
Simulation 画像を入力, 観測画像を分類

例) Blue nuggets (BN) の分類

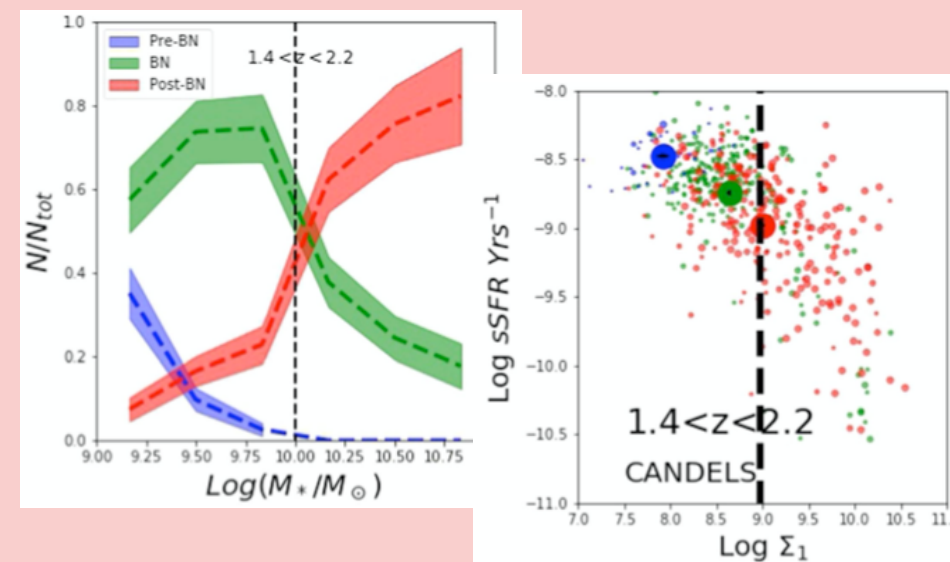
目視判断できないような形態的特徴も学習



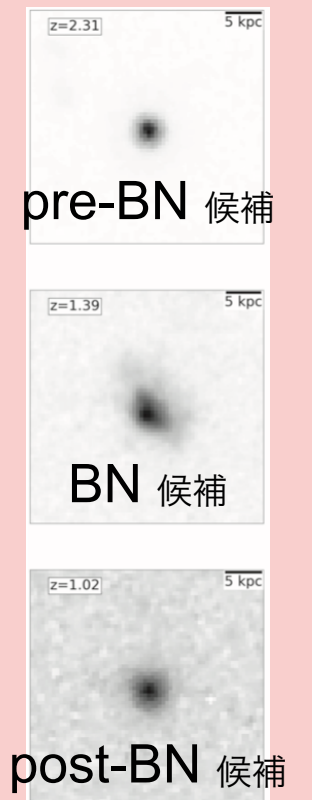
Simulation (VELA)



観測 (Hubble)

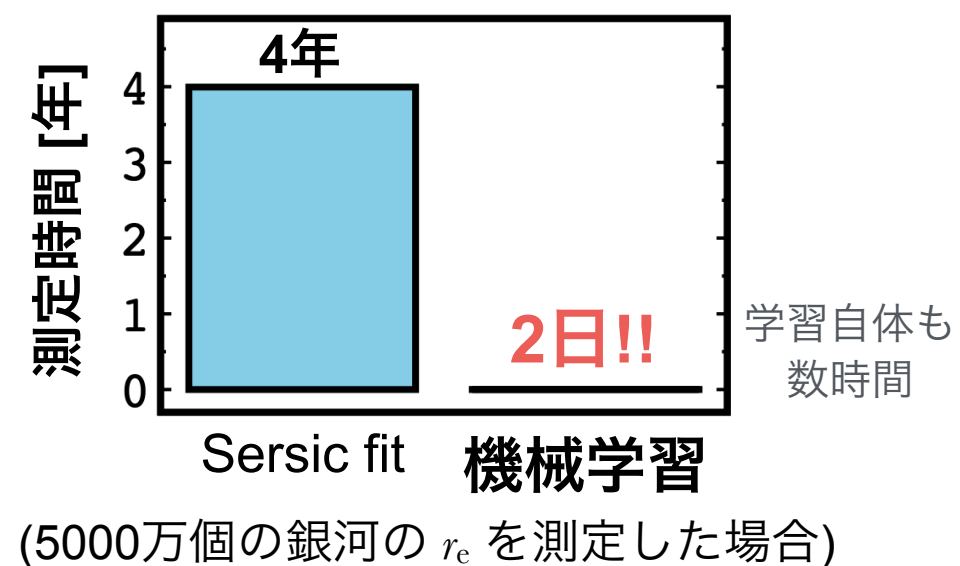
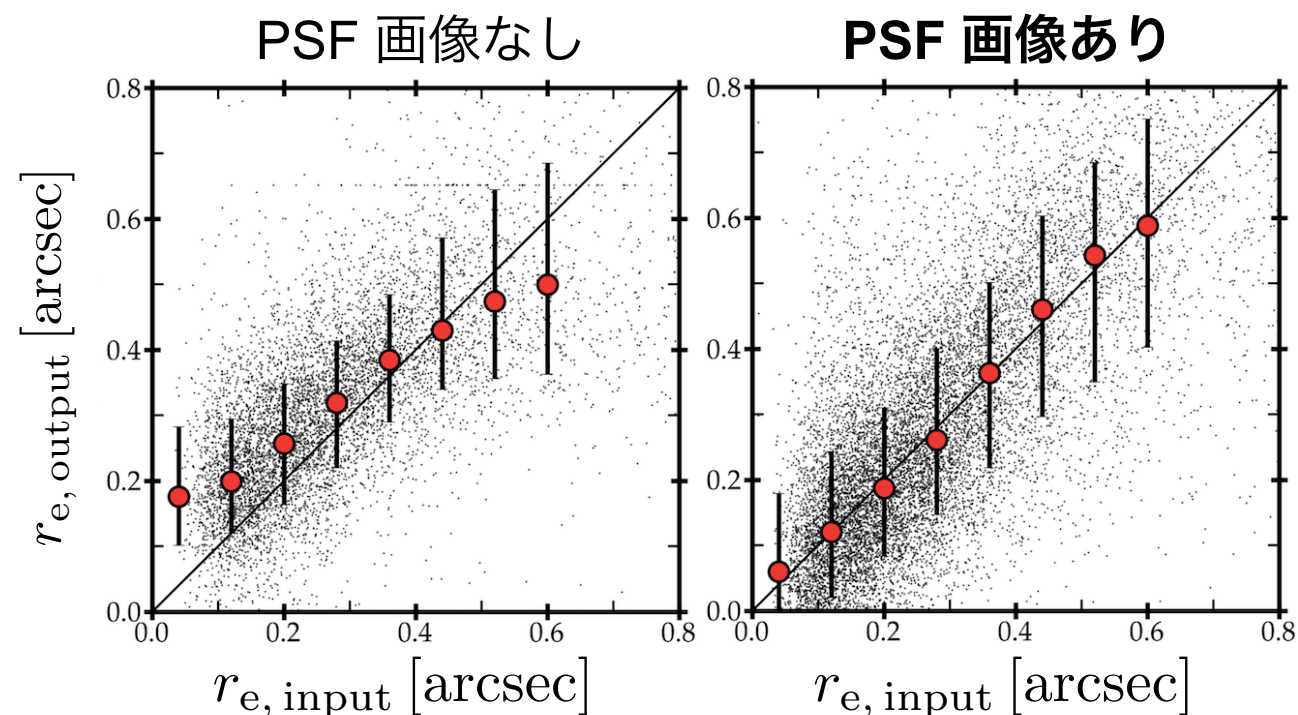
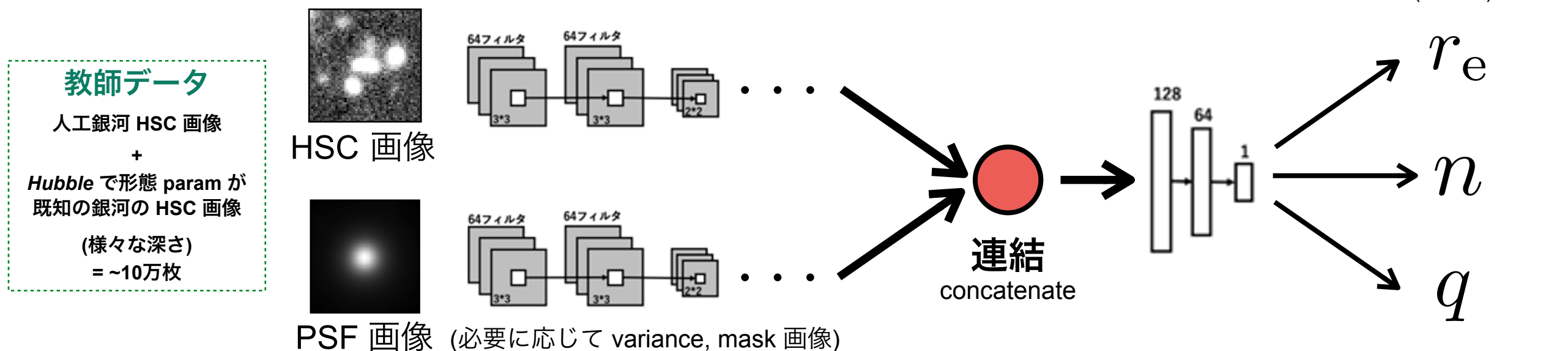


光度, 質量の情報を入力していないのに
BN 星質量 理論予想などを再現



機械学習 (回帰)

画像から 銀河形態に関する数値を予測



Umayahara+in prep.

See also, Tuccillo+18, Ribli+19

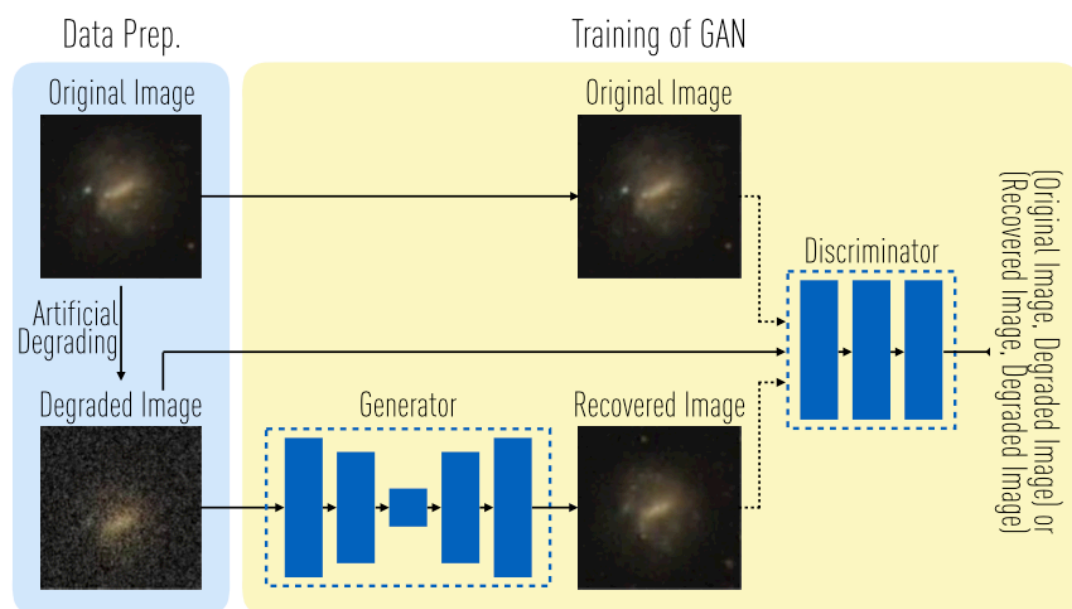
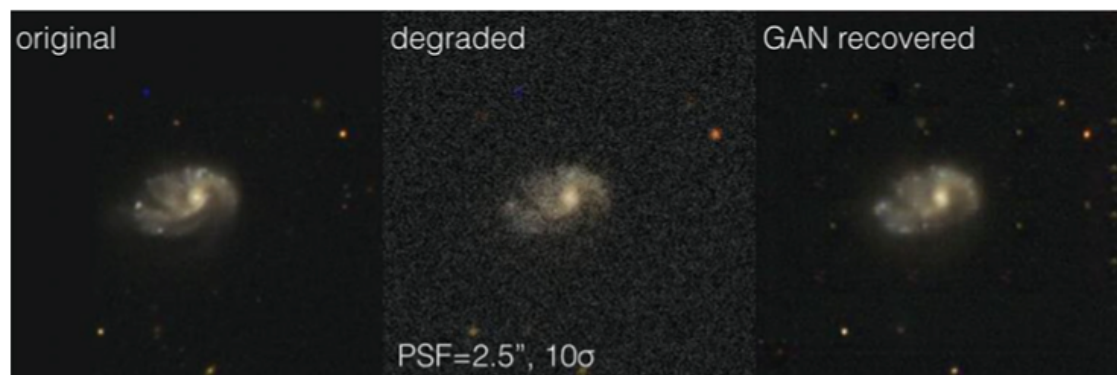
→ **HSC, VRO, RST 時代に必須の技術** (後述)
(LSST), (WFIRST)

画像高解像度化

敵対的生成ネットワーク

Generative Adversarial Network (GAN)

Schawinski+17



元の画像の質を人工的に落とす (S/N, 分解能)

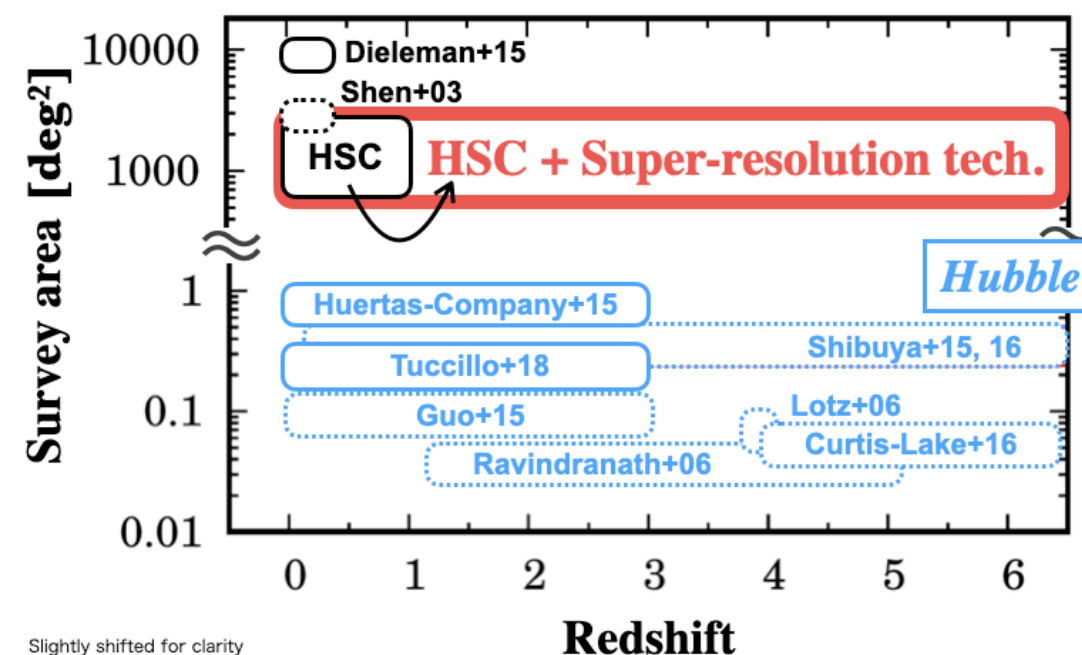
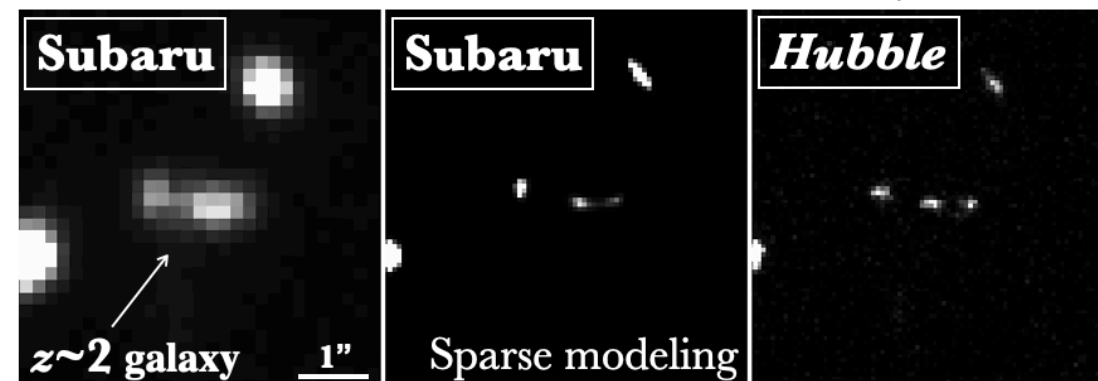
- 画像を復元, 元画像と比較
- どちらが本物か判断, 繰り返し学習
- 高品質 復元画像へ

他にも色々な GAN

e.g., Dominic+18

スパースモデリング

Shibuya+in prep.



- ✓ Merger fraction of bright-end galaxies
- ✓ Morph-density relation of $z > 2$ (proto-)clusters
- ✓ High- z rare populations (e.g., red/blue nuggets)

などが可能に

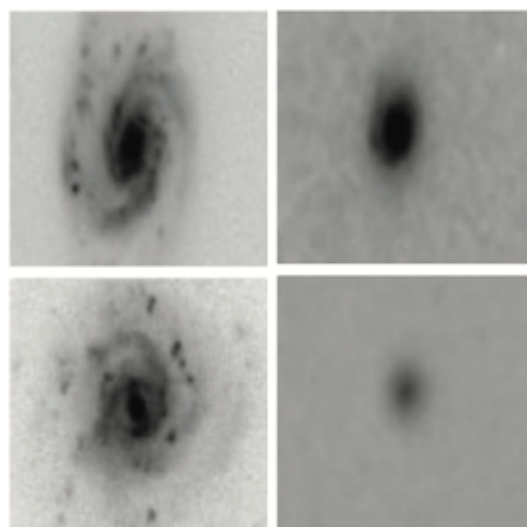
形態進化研究の注意点

宇宙論的 表面輝度減光

Cosmological Surface Brightness Dimming

$(1+z)^{-4}$ の表面輝度減光を受け, high- z の

$z=0$ $z=2.5$ 淡い構造が見えなくなる



Conselice 14

対処法

✓ 人工的に減光画像を作成
→ 比較

✓ 複数画像を足し合わせ
→ 深い画像 (サイズなど)

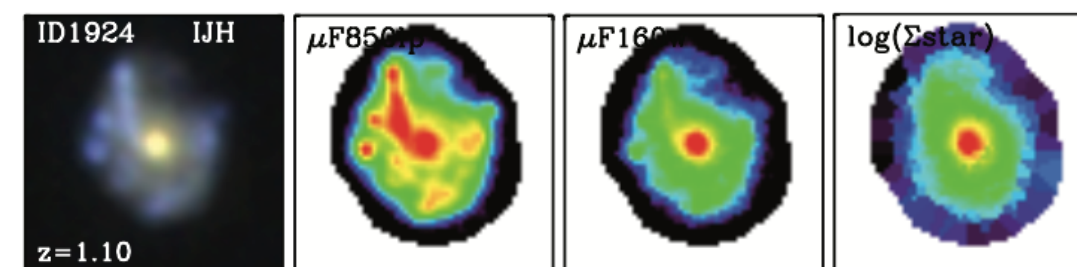
形態指数などの場合 → 補正項

$$A_{\text{final}} = A_{\text{obs}} + \delta A_{\text{SB-dim}} + \delta A_{\text{k-corr}}$$

形態 K 補正

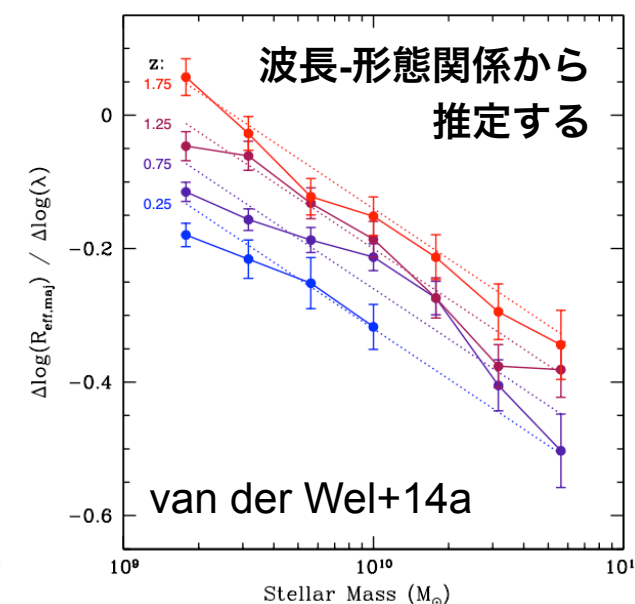
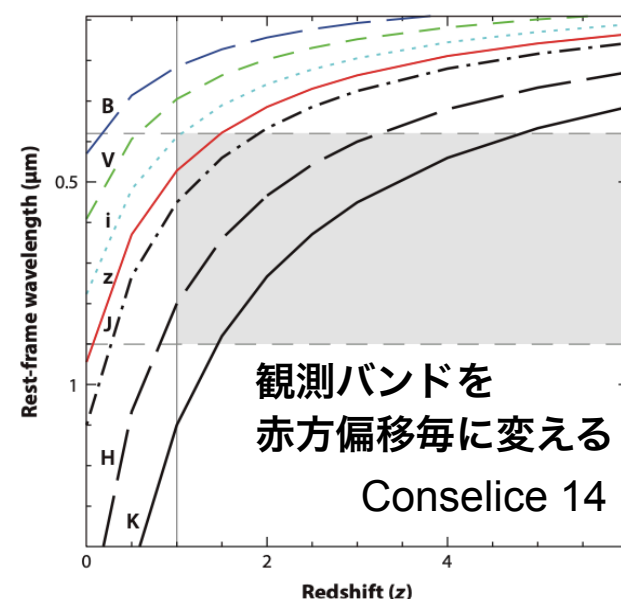
Morphological K-Correction

観測波長によって形態が変わる



Wuyts+12

対処法



(光度, 重さなど)

単純に同一銀河種族の形態進化傾向を見る場合は, low- z /high- z で光度, 重さなどを合わせる

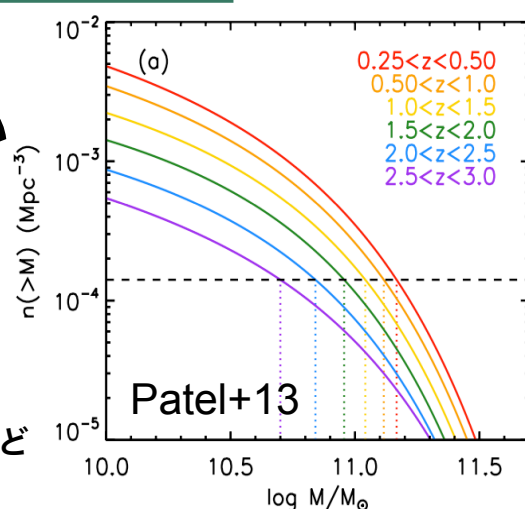
Progenitor Bias

low- z /high- z の間で
銀河は直接の進化関係にない



関係付け

✓ 同一個数密度 ✓ 星形成史 など



2. 現状の理解

形態進化の概要

サイズ進化

大局的形態 (n など)

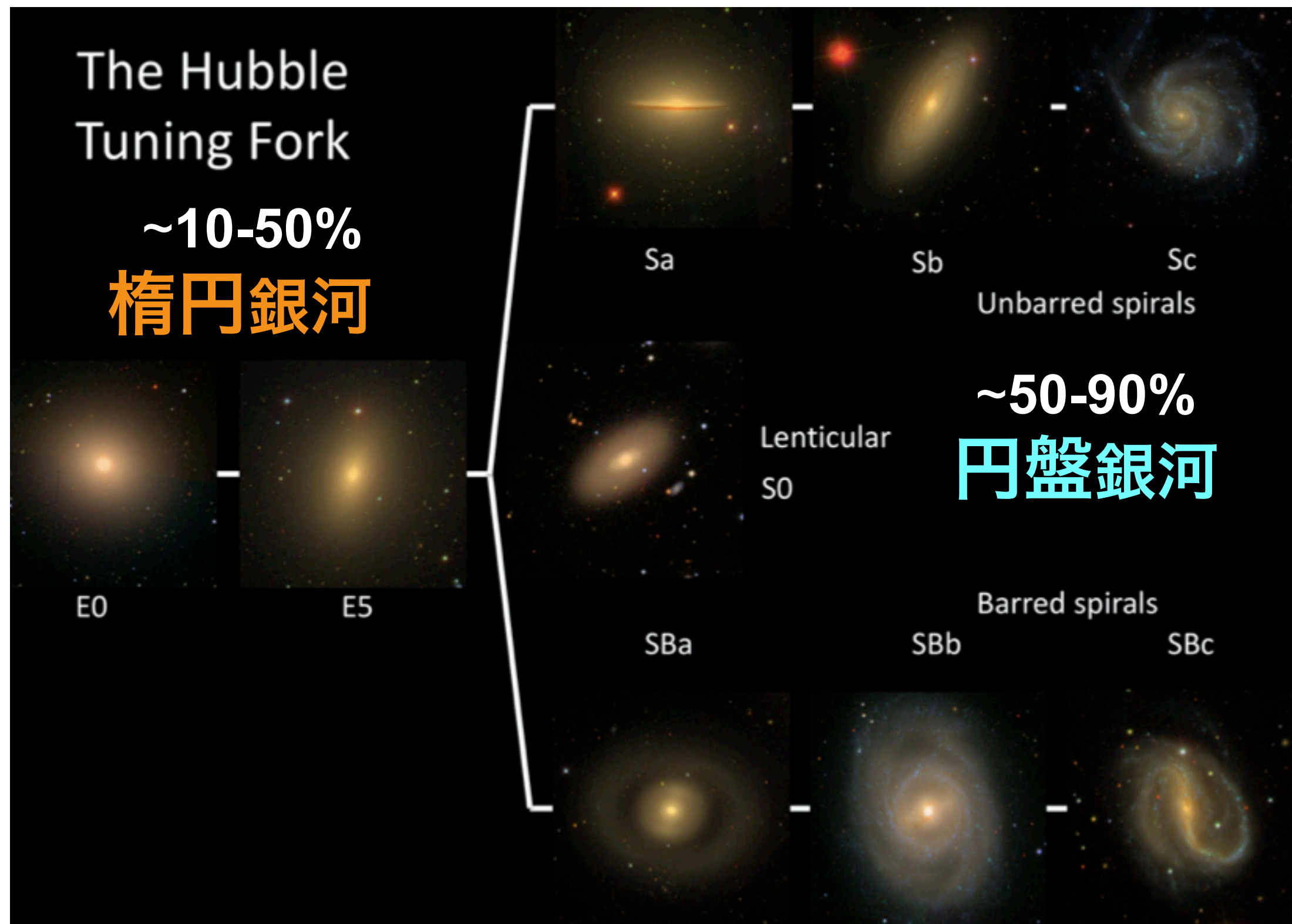
塊状銀河

Red/Blue Nuggets

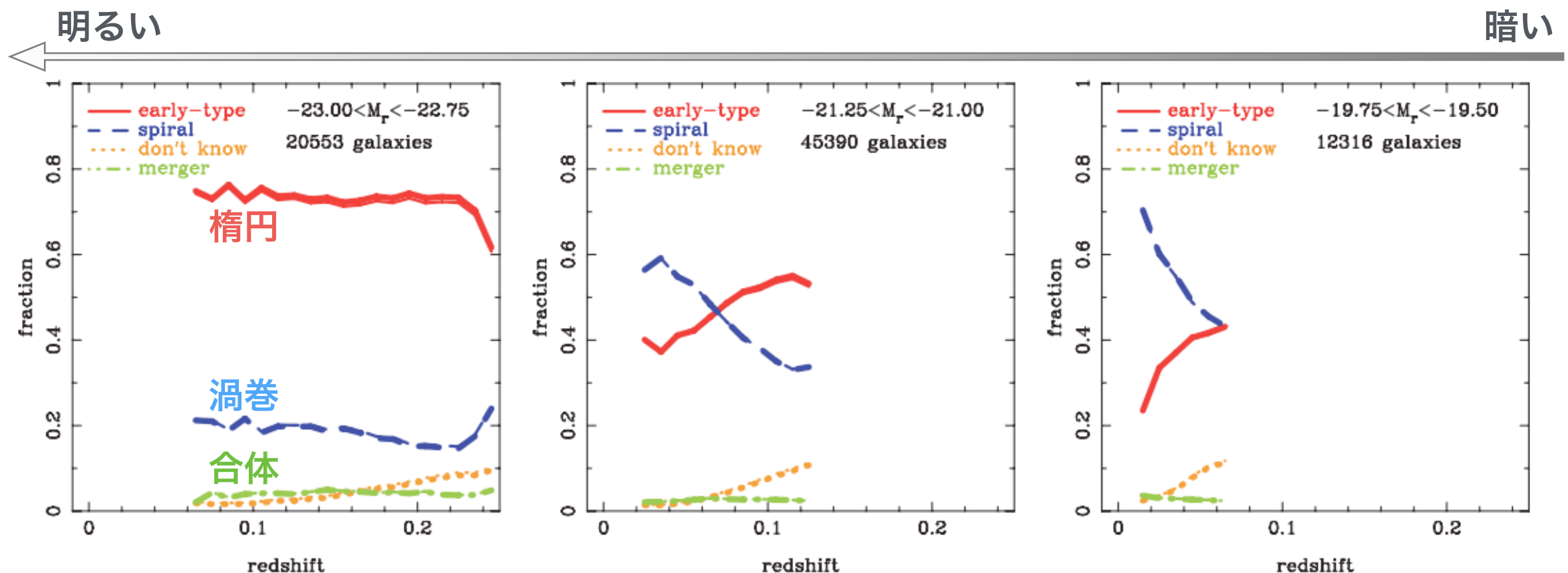
合体銀河

銀河環境と形態

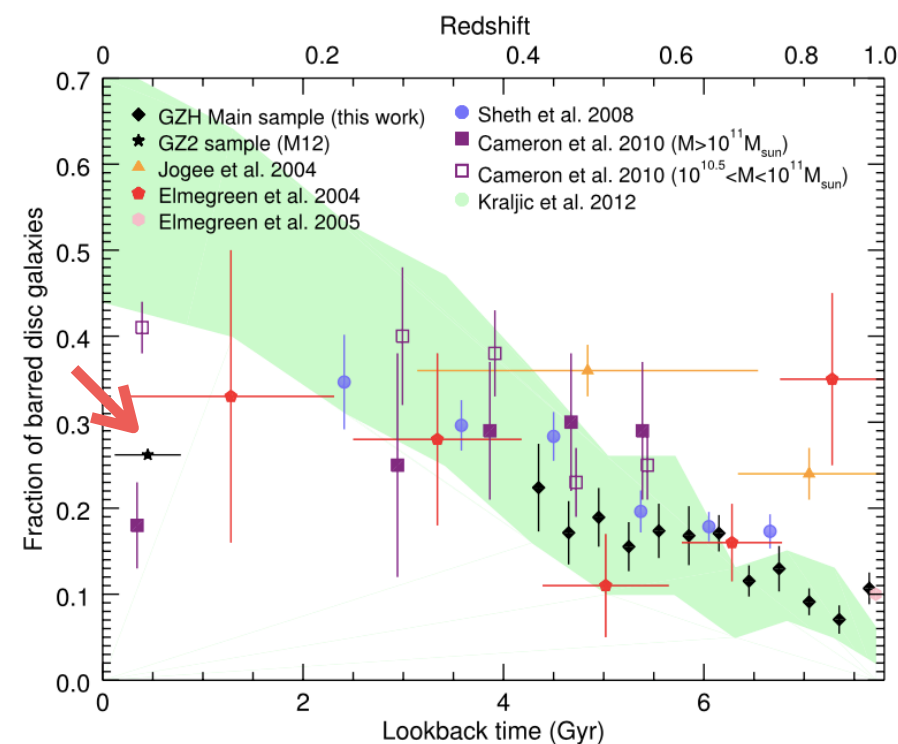
近傍銀河の形態



近傍銀河の形態：Galaxy Zoo では



Bamford+09
(Galaxy Zoo の初期結果)

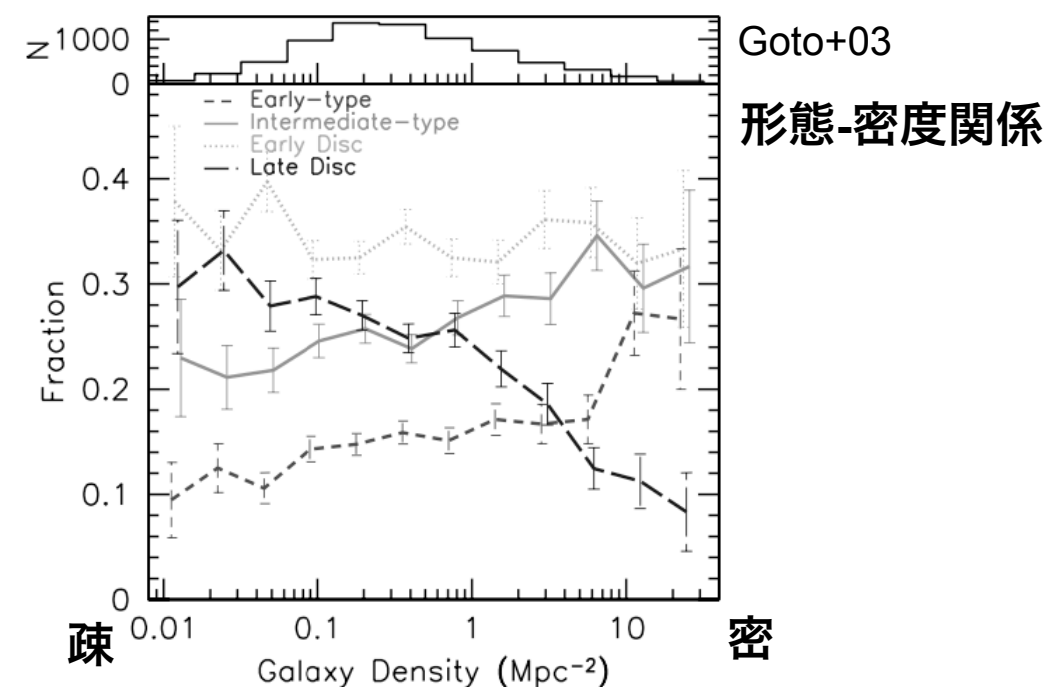
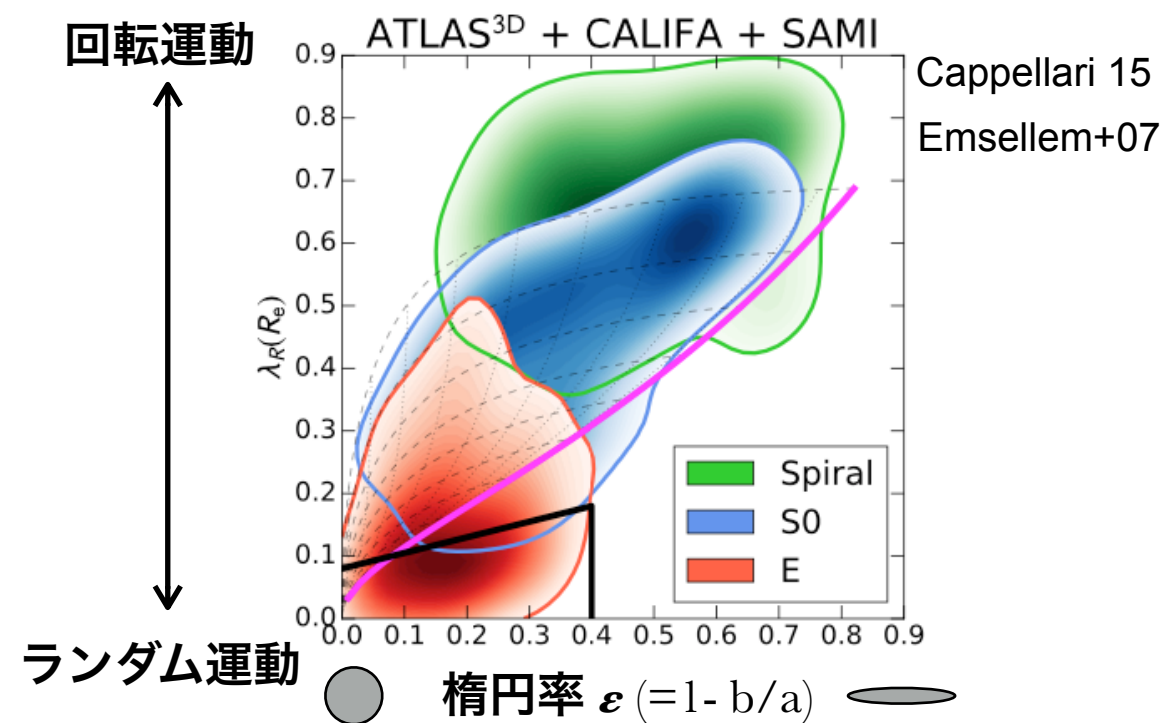
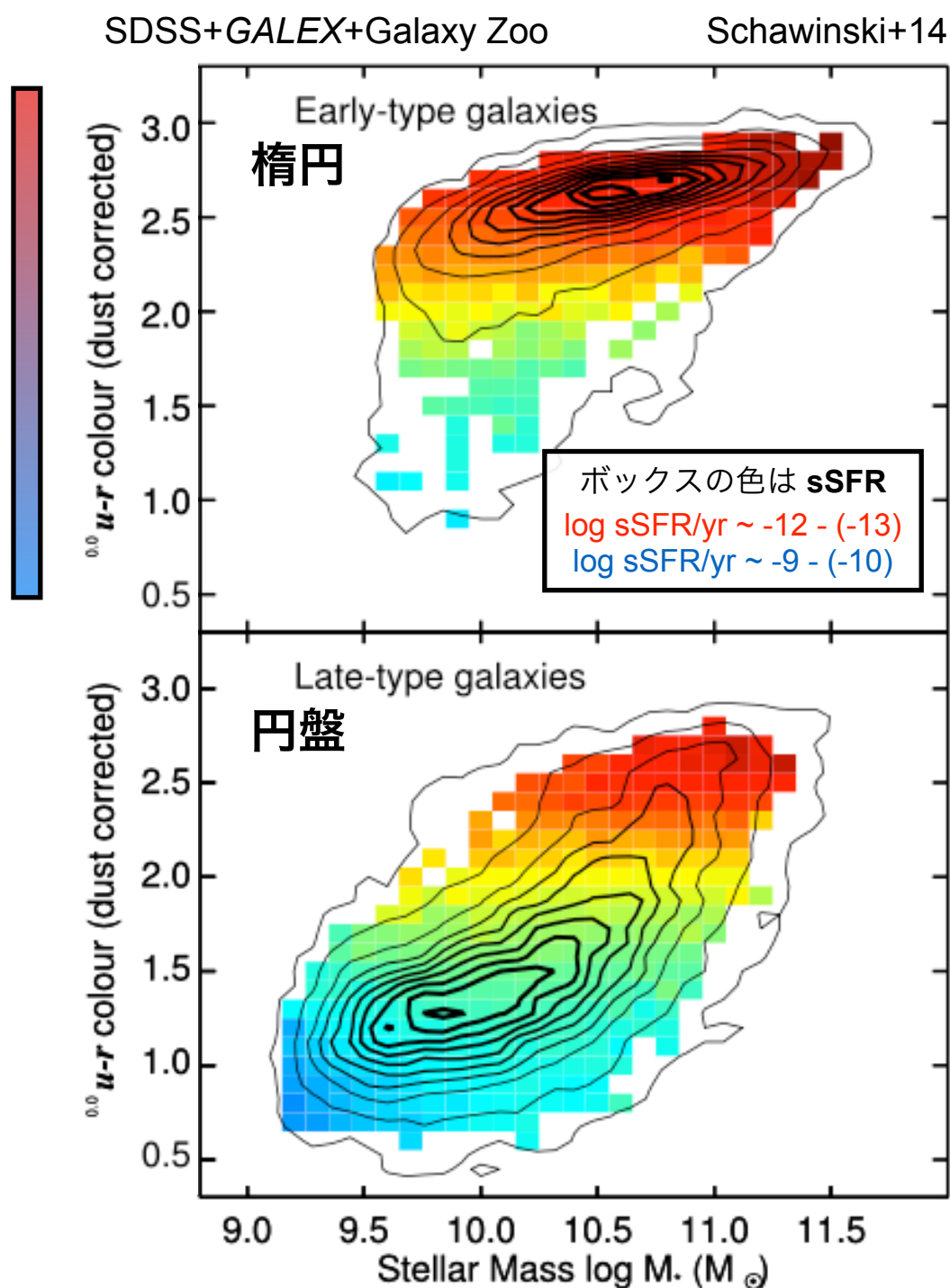


Melvin+14

明るい(~重い)ほど楕円銀河の割合が増える
 $M_r \sim -21$ で楕円/渦巻 半々くらい

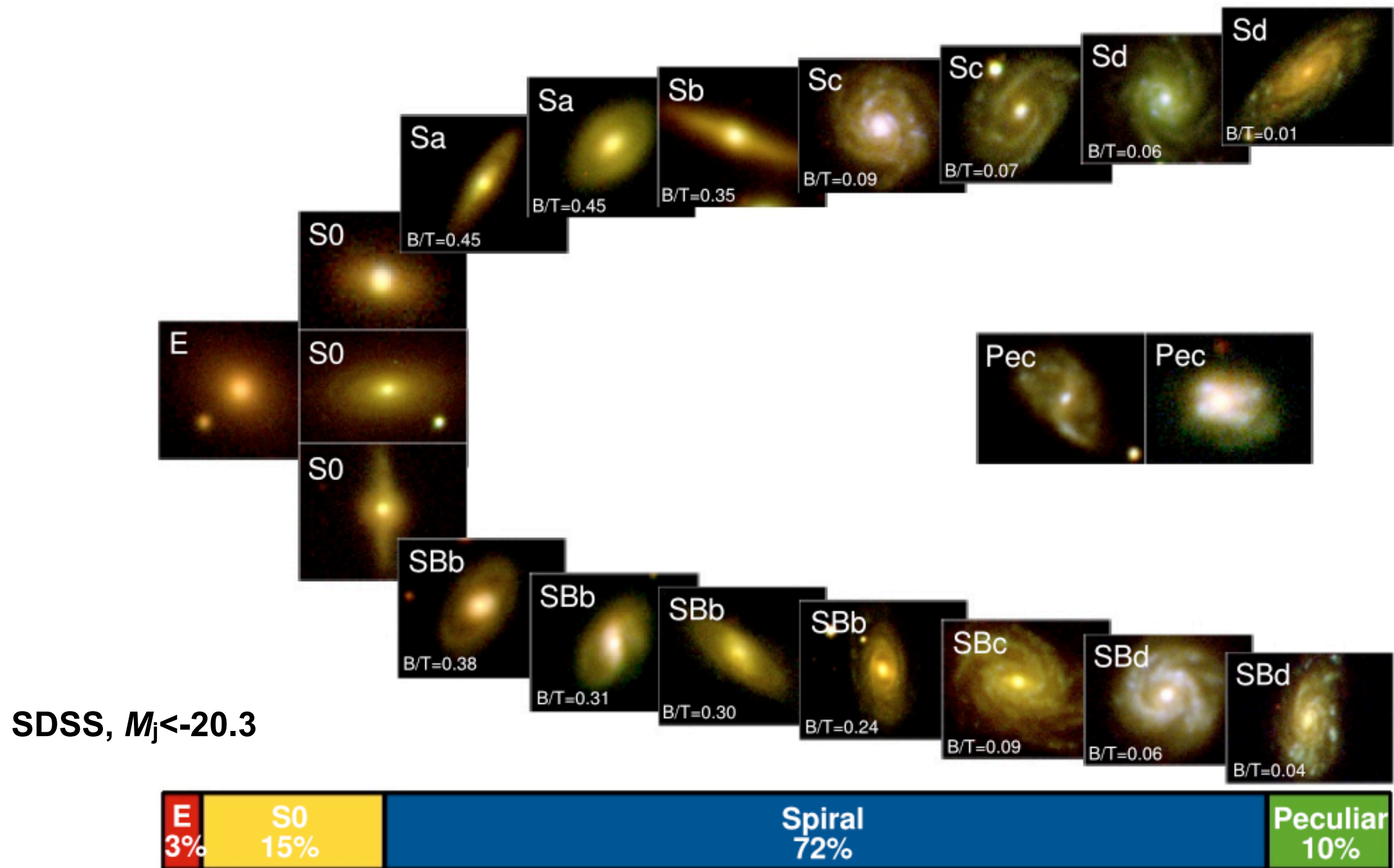
円盤銀河のうち
棒構造を持つ銀河の割合 $N_{\text{bar}}/N_{\text{disk}}$
(Galaxy Zoo では) $\sim 20 - 30\%$ ($\log M_*/M_{\odot} \geq 10$)

形態と物理量の関係 $z \sim 0$



(円盤に対して相対的+典型的に) **楕円は 赤い, 重い, 高 sSFR, ランダム運動, 高密度環境に多い**

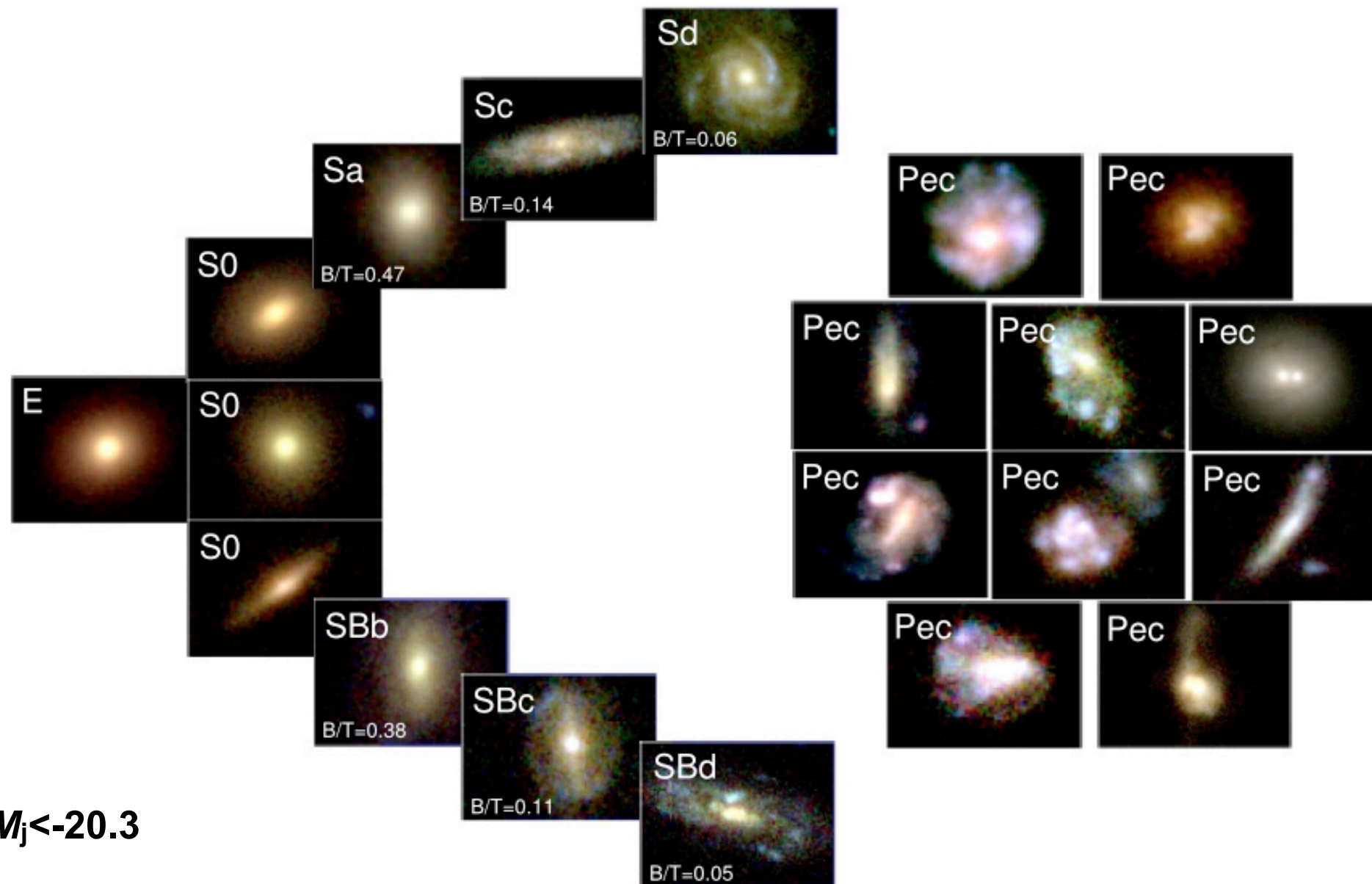
ハッブルの形態分類 $z \sim 0 - 0.15$



B/T , r_e , Sersic parameters, Sersic モデル画像, 残差画像など
→ 決定木 + 目視

Delgado-Serrano+10

ハッブルの形態分類 $z \sim 0.4 - 0.8$



GOODS, $M_j < -20.3$

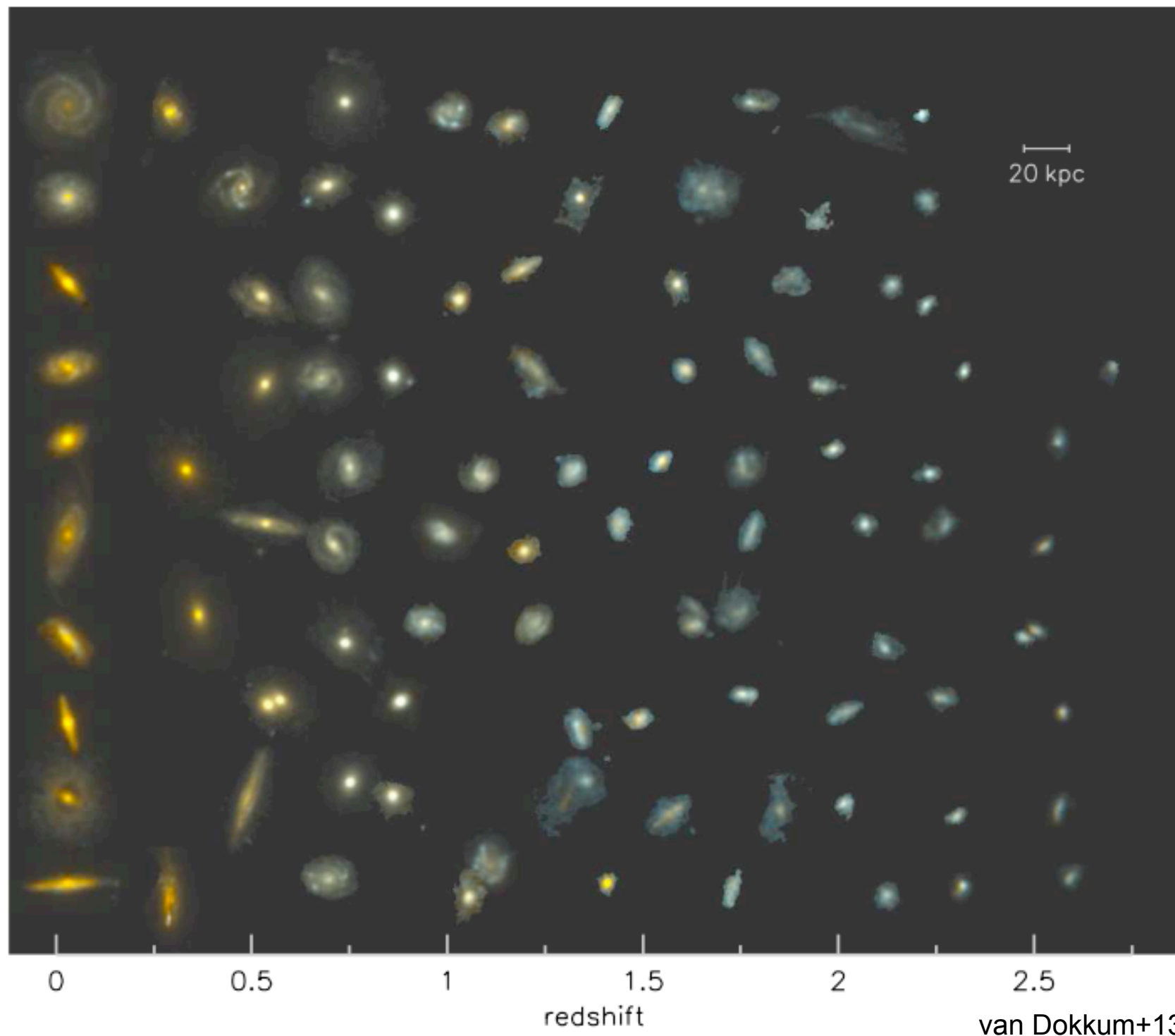


B/T , r_e , Sersic parameters, Sersic モデル画像, 残差画像など
→ 決定木 + 目視

Delgado-Serrano+10

渦巻が減り, 特異(粒々)が増える

形態進化 $z \sim 0 - 3$



遠方ほど

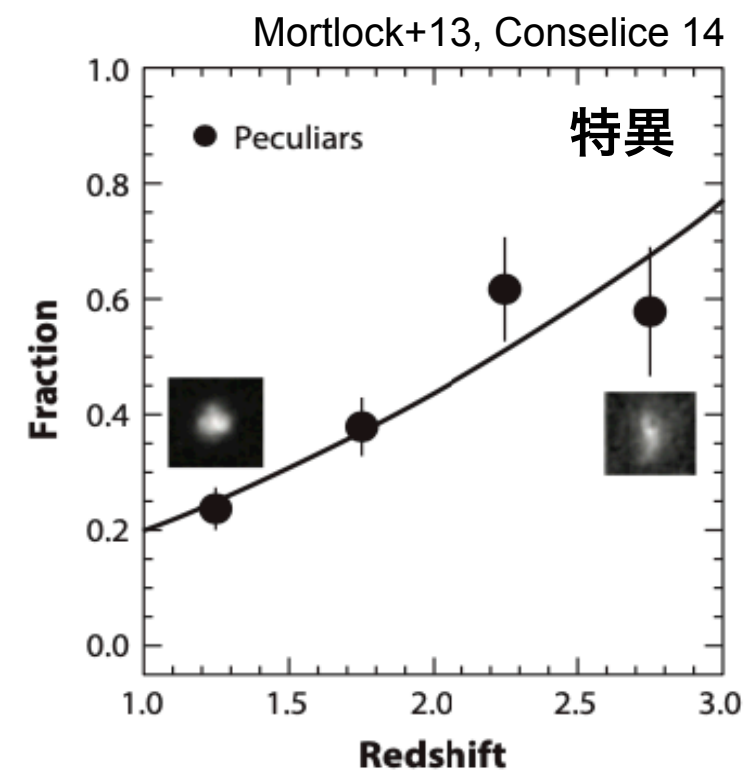
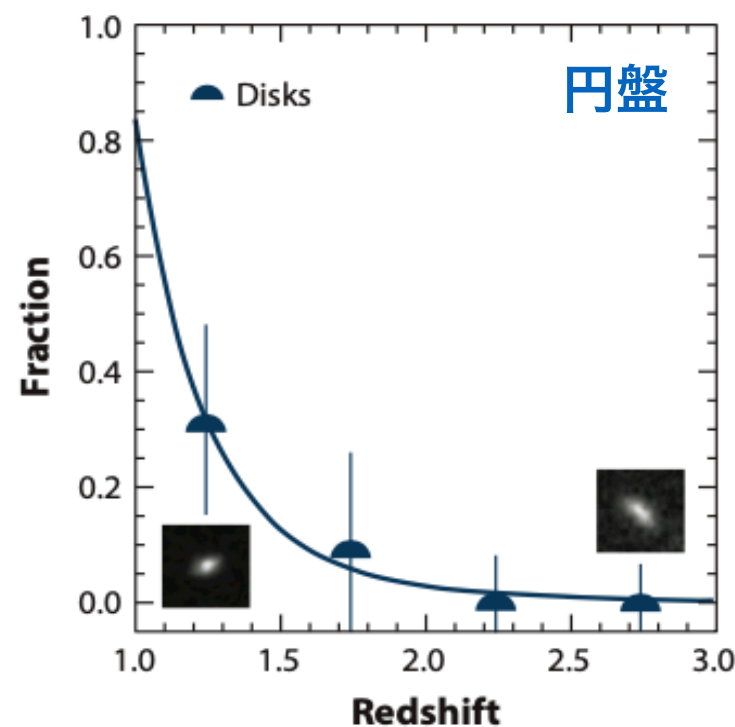
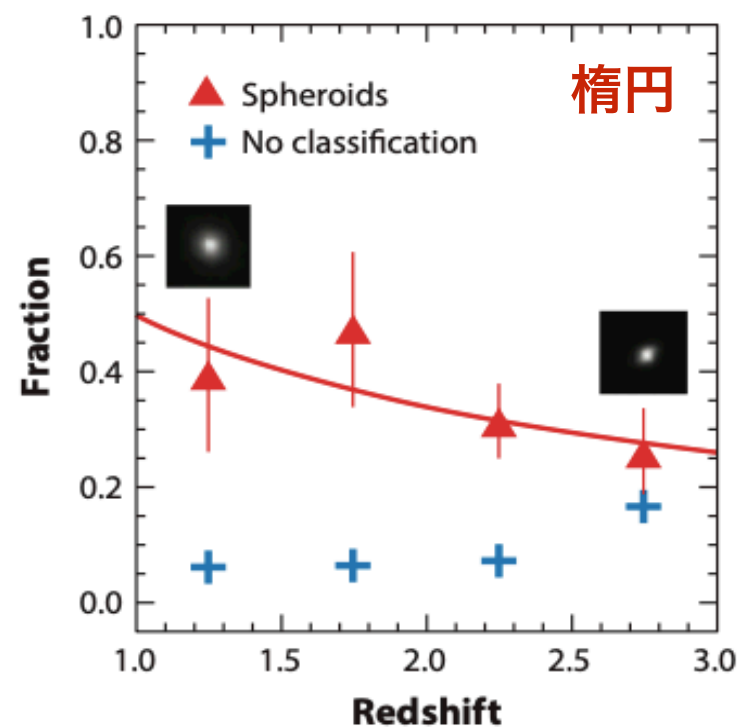
不規則な形

渦巻/楕円銀河が
少ない

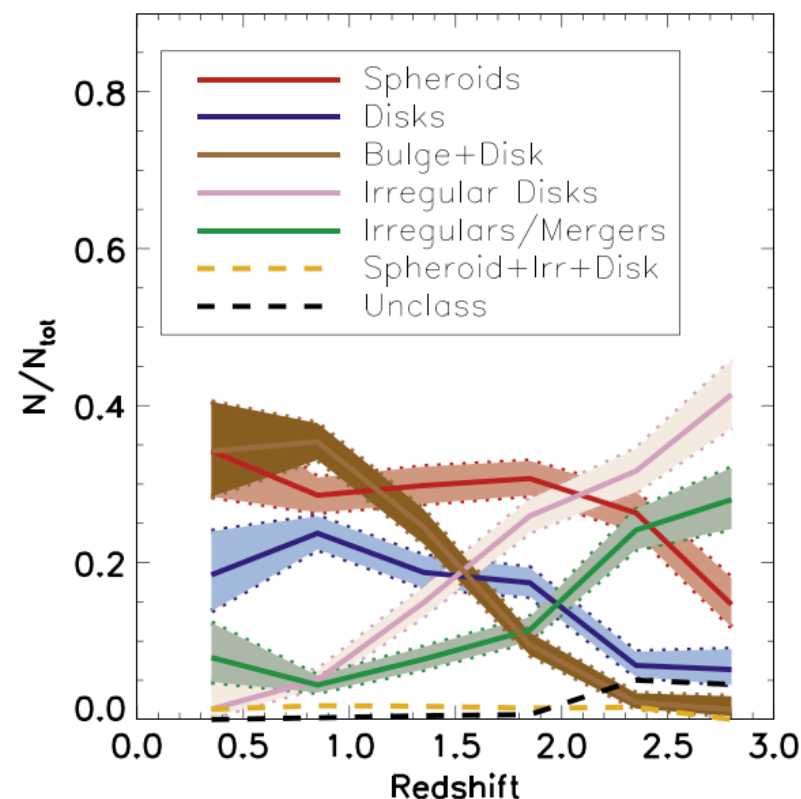
小さい

(青い)

各形態の銀河の割合



目視分類 ($\log M_*/M_\odot \geq 10$)



✓ 遠方ほど楕円/円盤が減り, 特異が増える
特異も大局的には円盤 (後述)

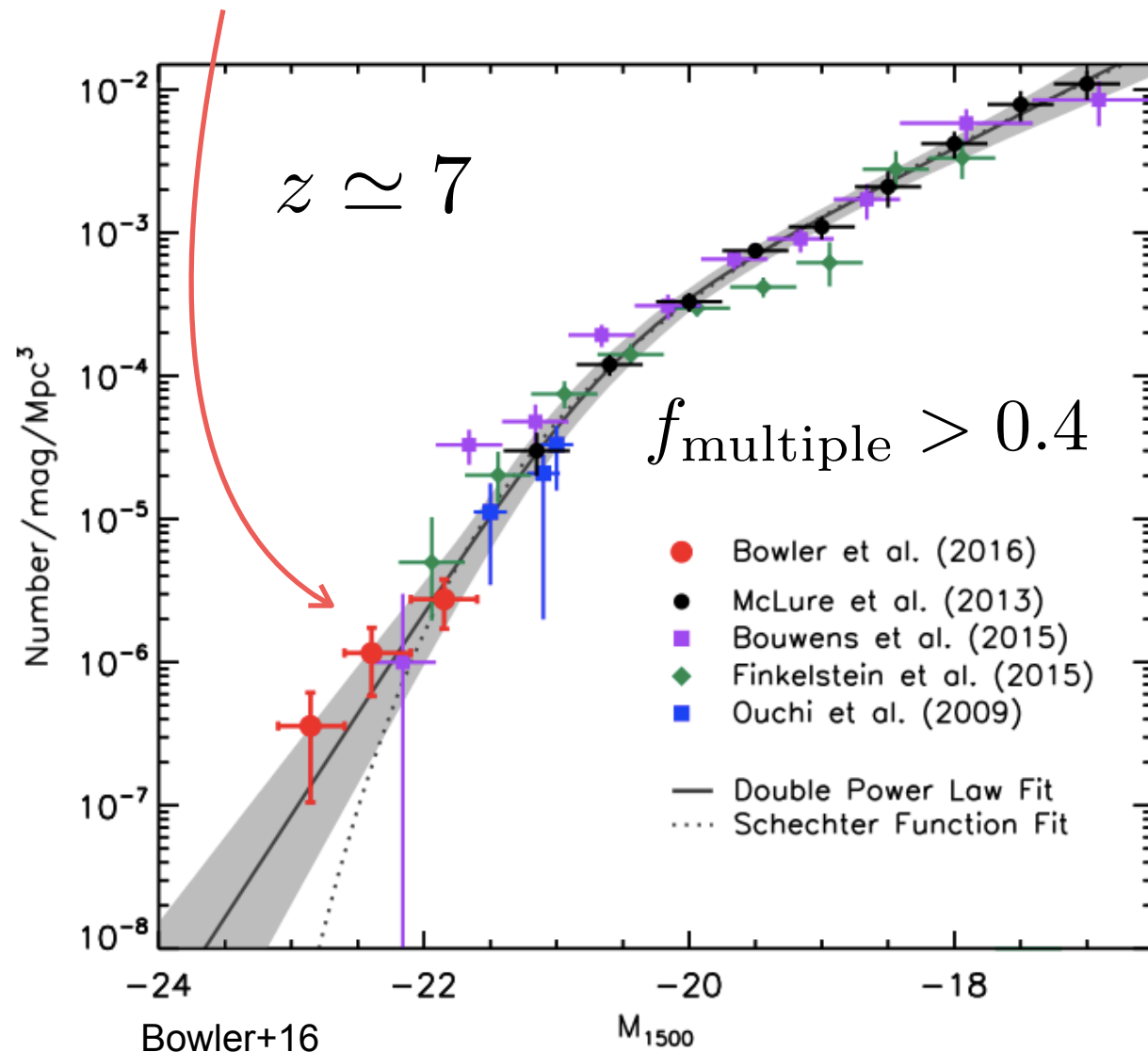
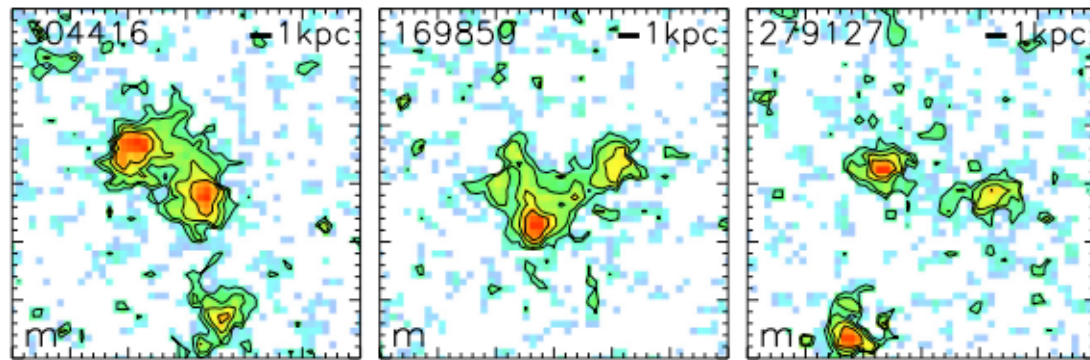
✓ 機械学習でも傾向は概ね同じ

機械学習

$\log M_*/M_\odot \simeq 11$ progenitors

Huertas-Company+15

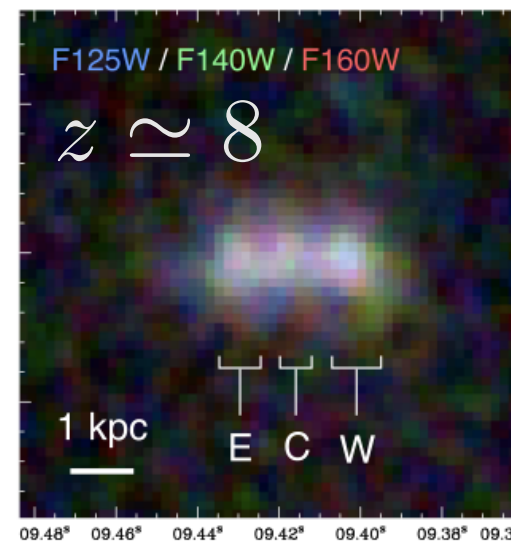
銀河形態 $z > 4$



内部構造がハッキリ分かる銀河は
 $z > 4$ でまだそれほど多くない (感度, 分解能)

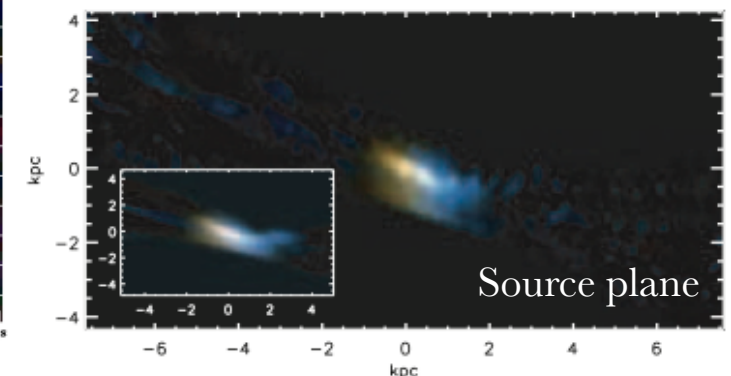
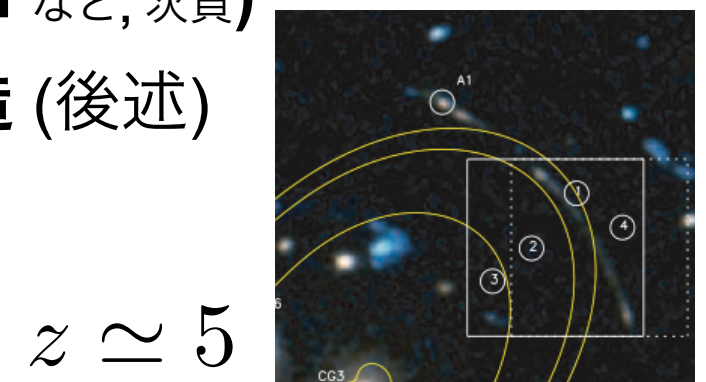


- ✓ 明るい銀河, 重力レンズ銀河
- ✓ ALMA によるガス, ダスト観測
- ✓ 大局的構造 (r_e , n など, 次頁)
- ✓ 合体 or 塊状構造 (後述)



Tamura+19

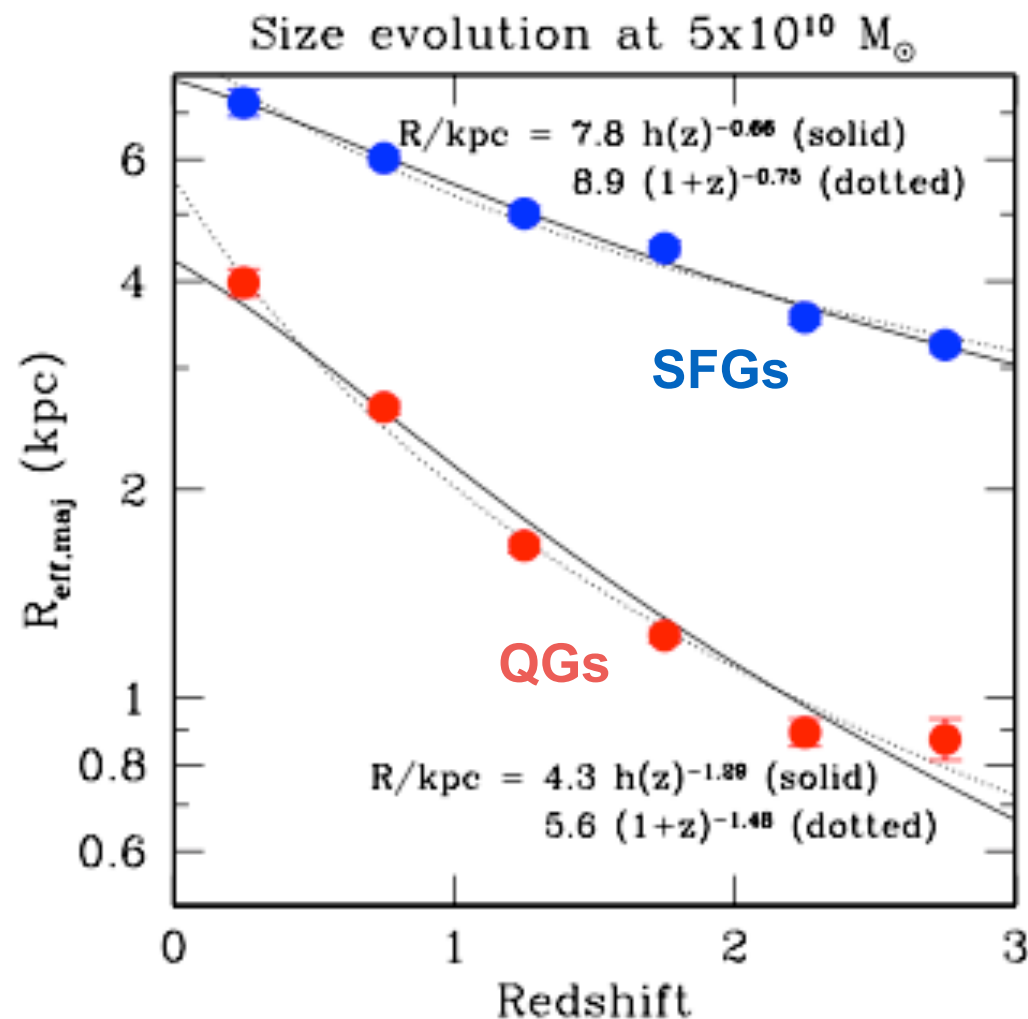
See also, e.g, Hashimoto+18



Swinbank+07

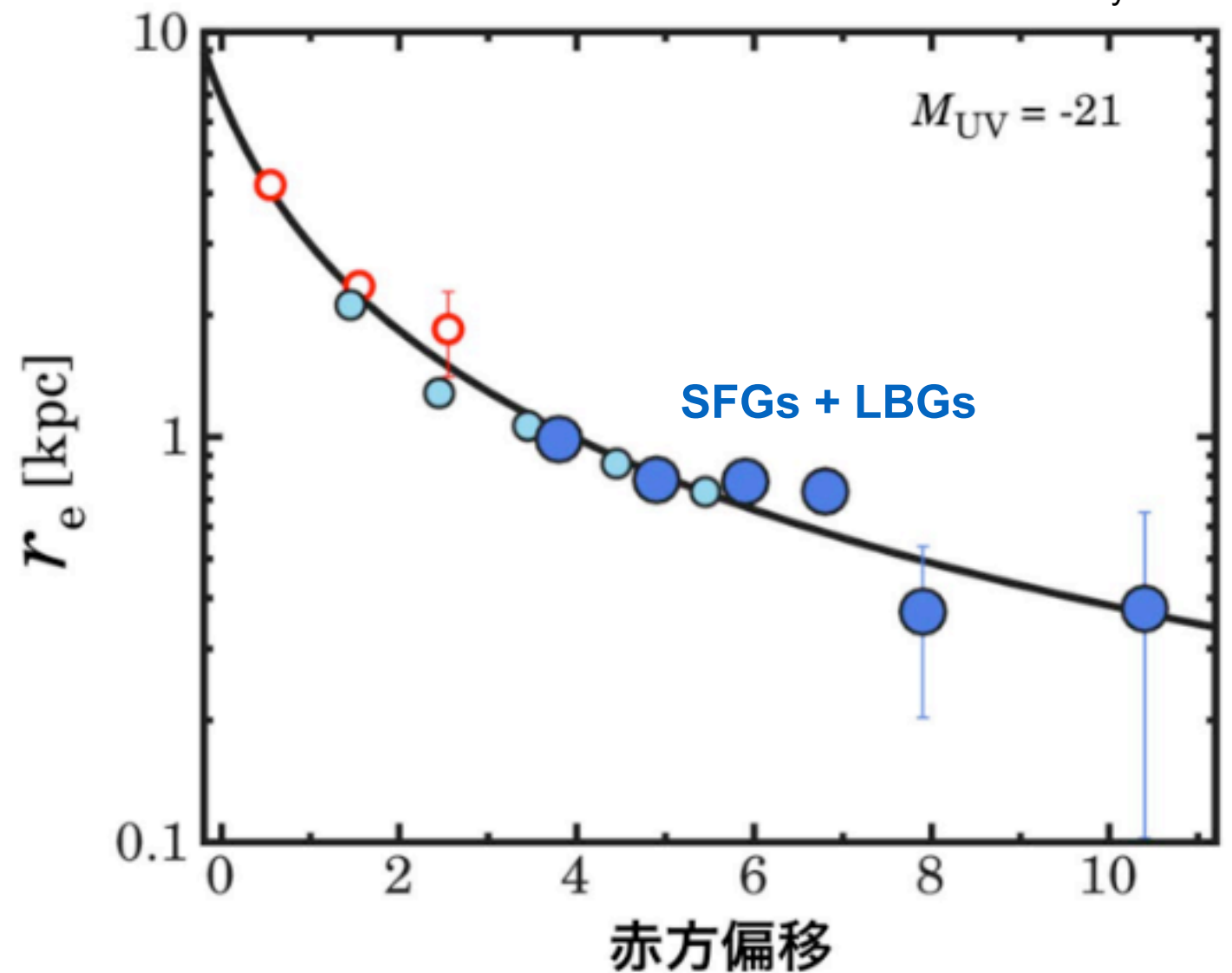
サイズ進化

van der Wel+14



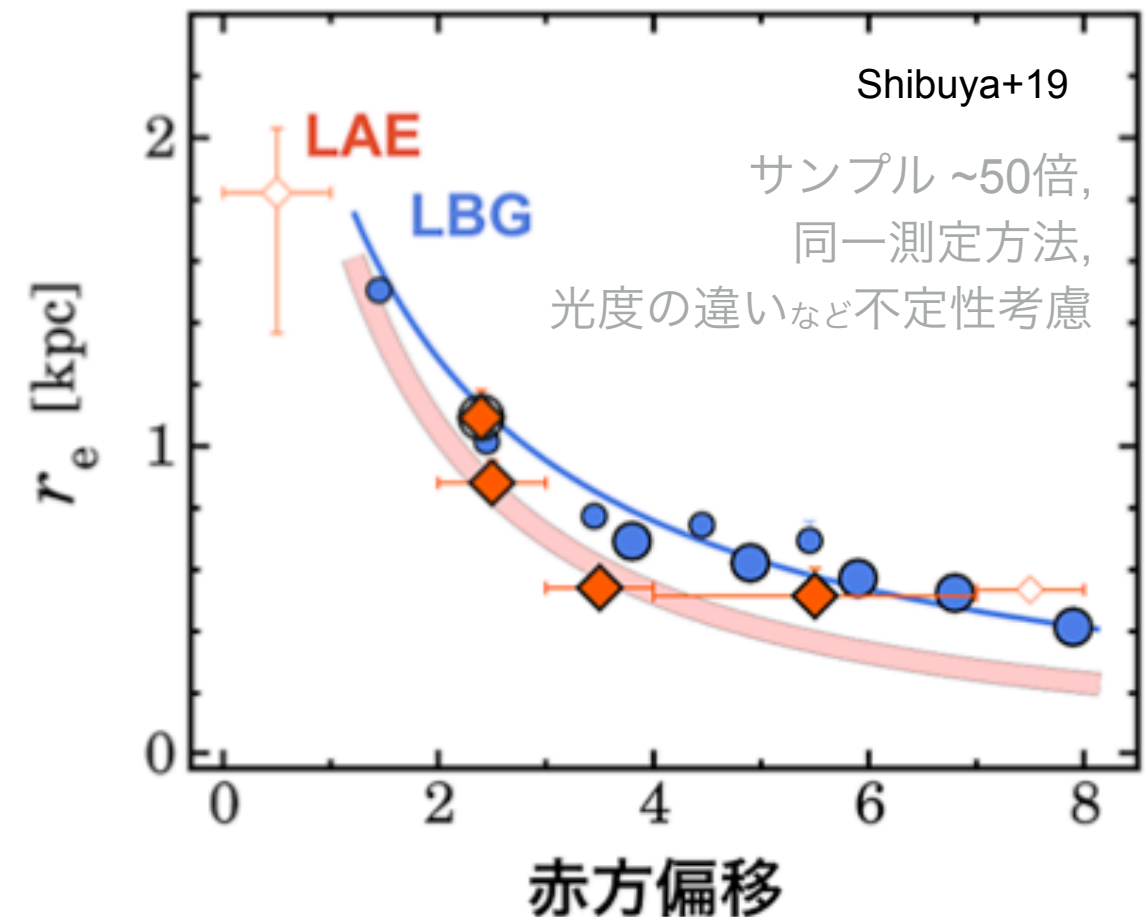
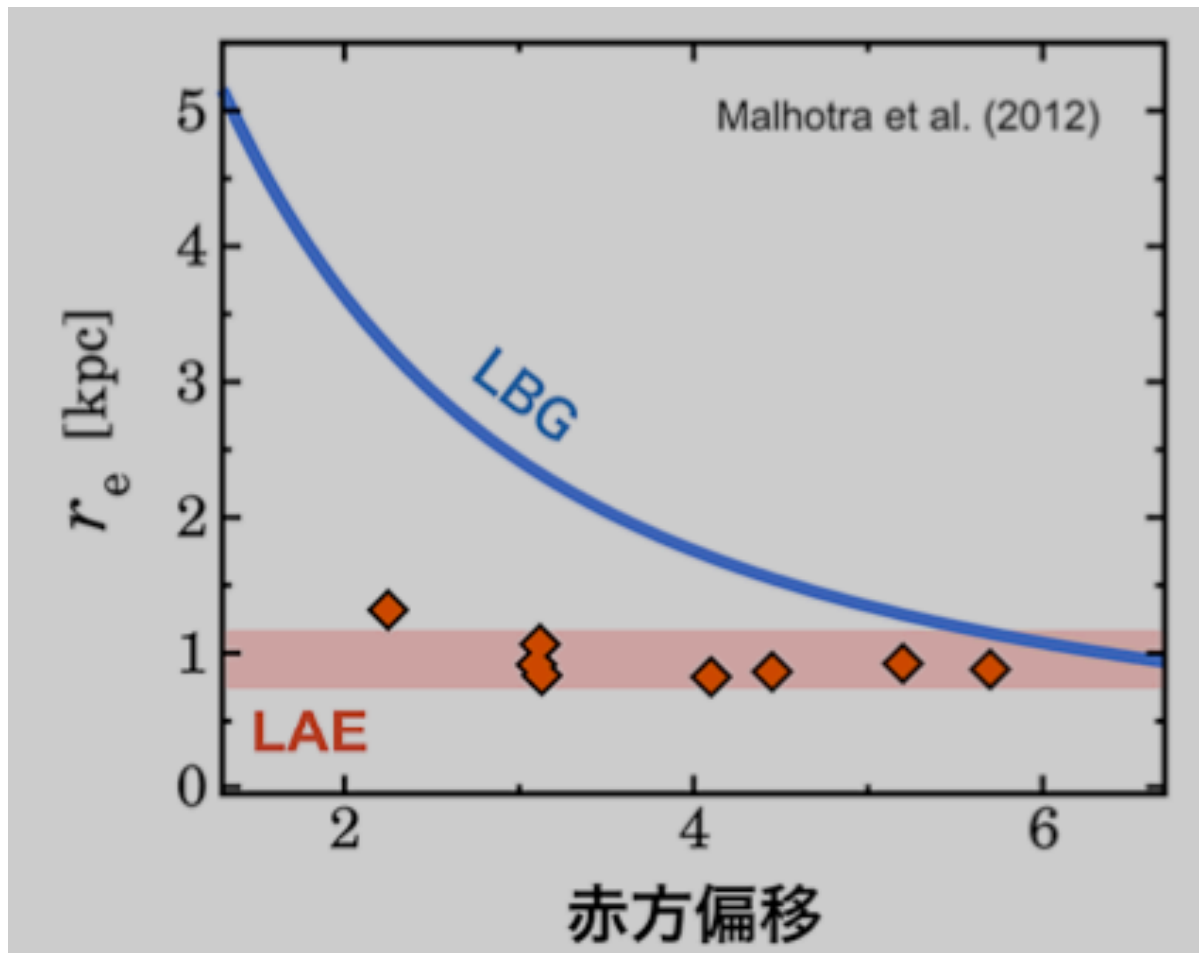
さらに遠方では

Shibuya+15



- ✓ 同一種族(SFGs, QGs など), 同一星質量(光度)のサイズ進化
- ✓ 平均的に, 単調にサイズ進化
- ✓ QGs は $z \sim 3 \rightarrow z \sim 0$ で $\sim 4\text{-}5$ 倍の急激なサイズ進化か

LAEs のサイズ進化



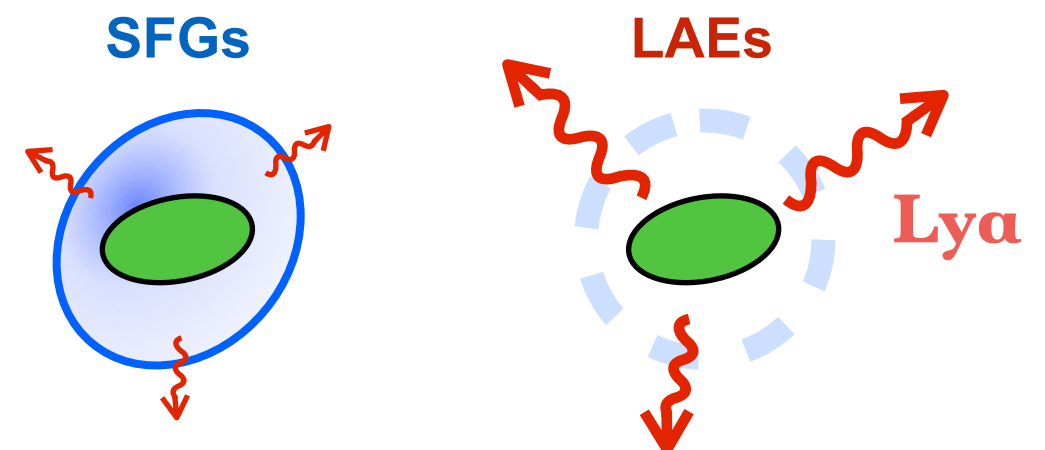
✓ LAEs も LBGs と同様のサイズ進化

✓ LBGs と同じく円盤型 $n \sim 1$ (後述)

→ LAEs の高い Ly α 強度

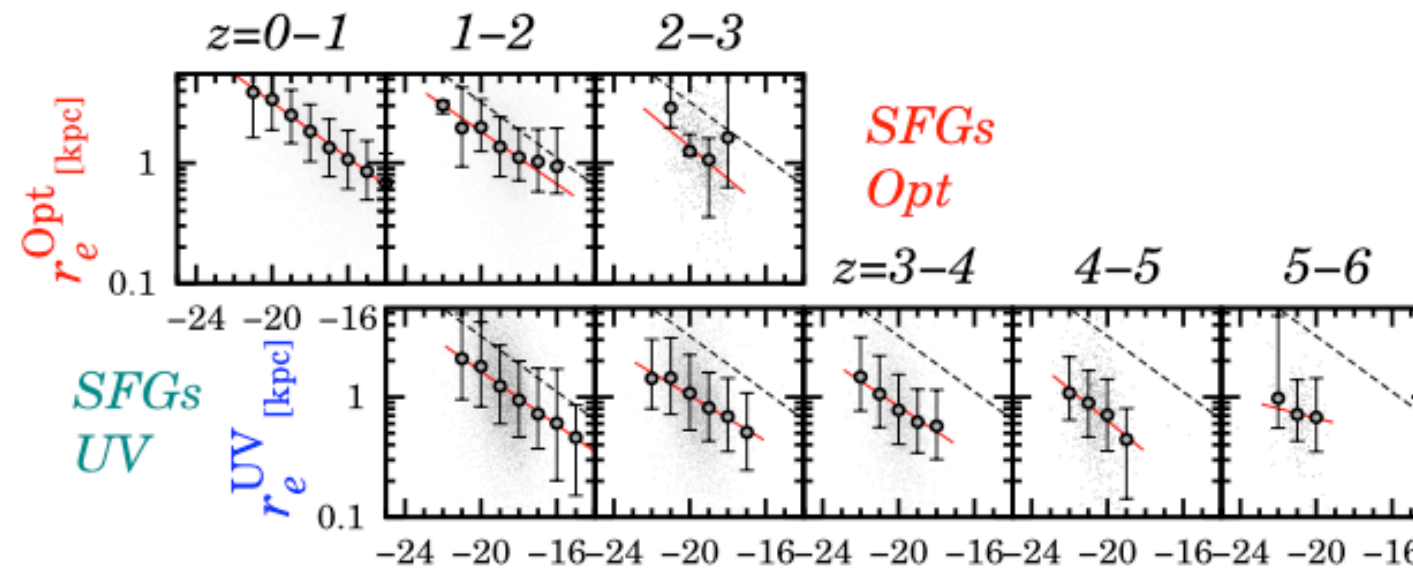
△ 星成分の形態の違い？

○ 星間物質の性質の違い (中性水素 柱密度など) ?

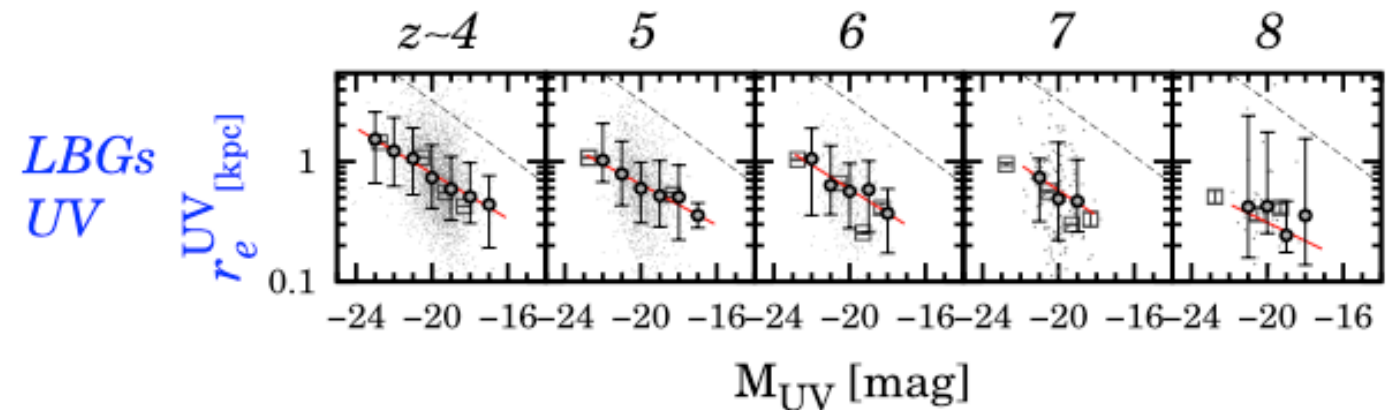


e.g., Hashimoto+15, Nakajima+18, Harikane+18

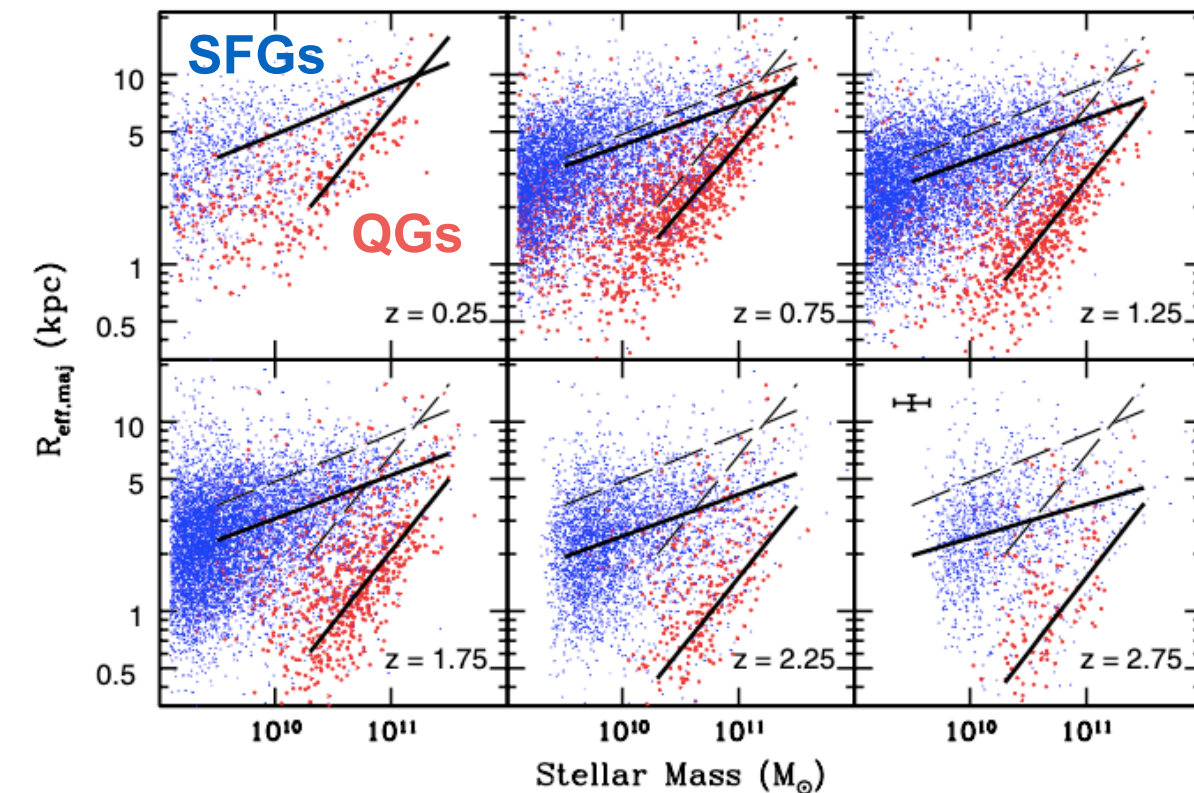
サイズ-質量(光度)関係



Shibuya+15



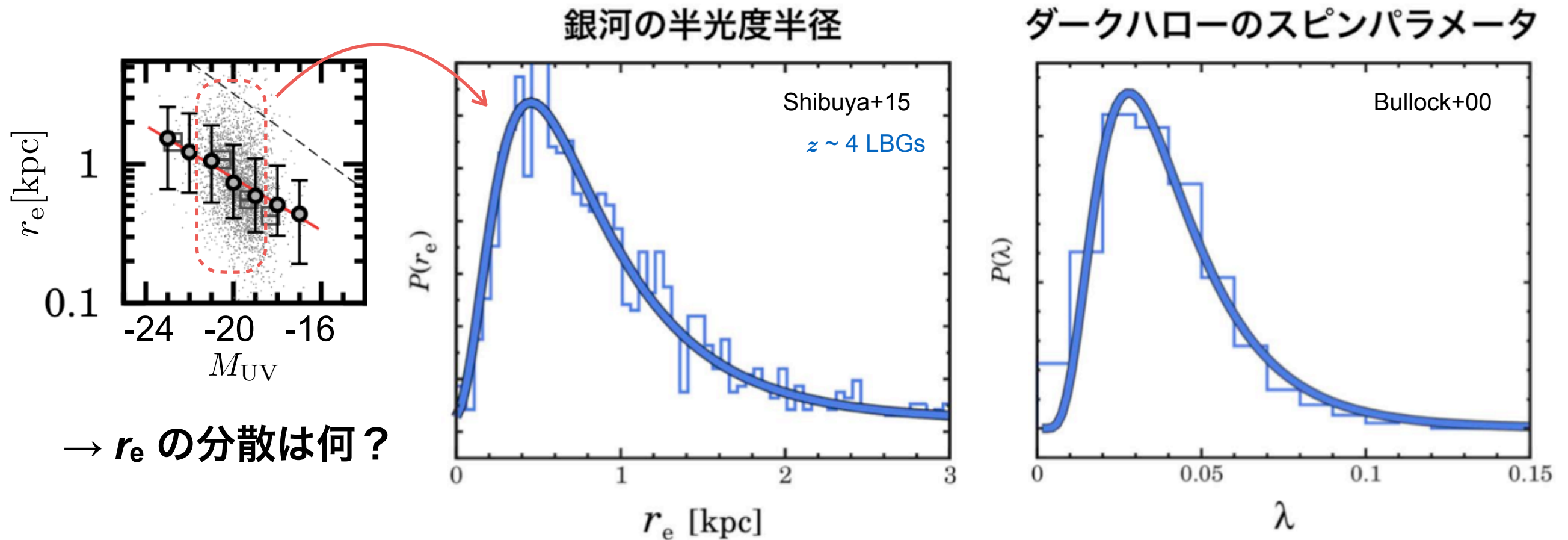
van der Wel+14



- ✓ サイズ-星質量関係も $z \sim 8$ まで同じ形
- ✓ 相似形のまま small r_e へ

※ $M^* - M_{\text{UV}}$ 関係によると, 両者 ($M^* - r_e$, $M_{\text{UV}} - r_e$) は大体同じ関係

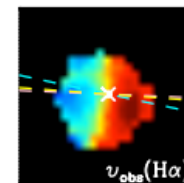
サイズ頻度分布



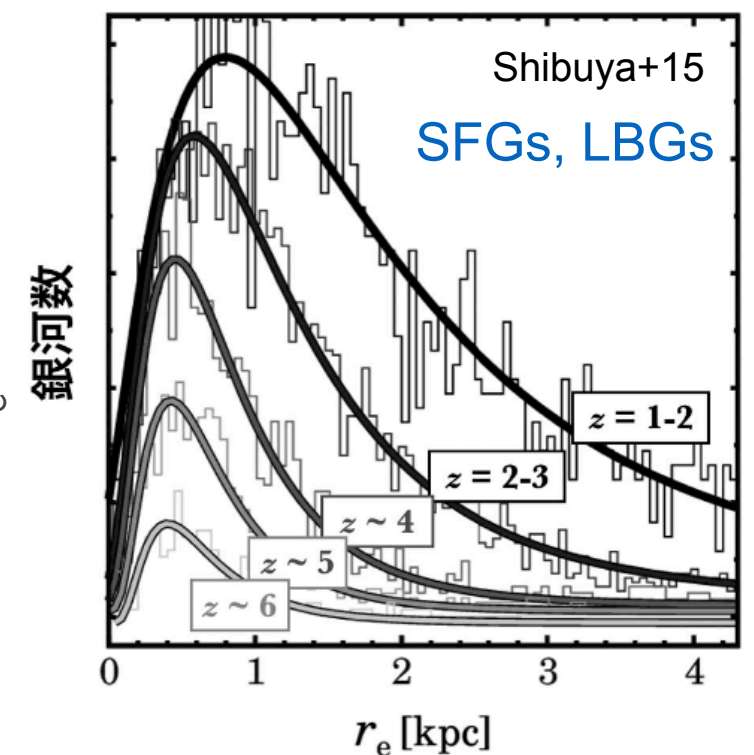
- ✓ 対数正規分布 log-normal distribution
- ✓ DM halo の λ と分布 & 幅 共に概ね同じ $\sigma_{re} \sim \sigma_\lambda$
- ✓ 円盤形成モデル(e.g., Mo+98)によると $r_e \sim \lambda r_{vir}$
→ r_e は λ の頻度分布を反映

→ SFGs は DM halo 内で角運動量を獲得し形成
→ 円盤型に

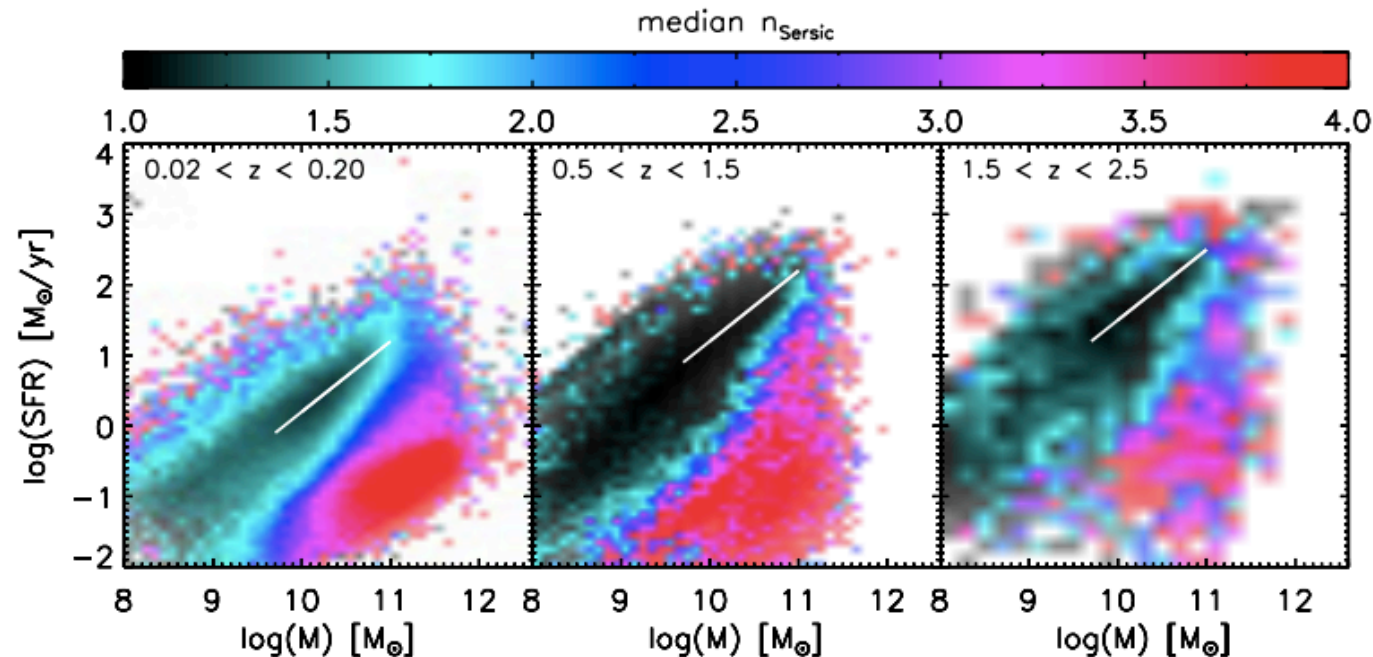
面分光の結果とも
無矛盾



Wisnioski+19



セルシック指数



Wuyts+11

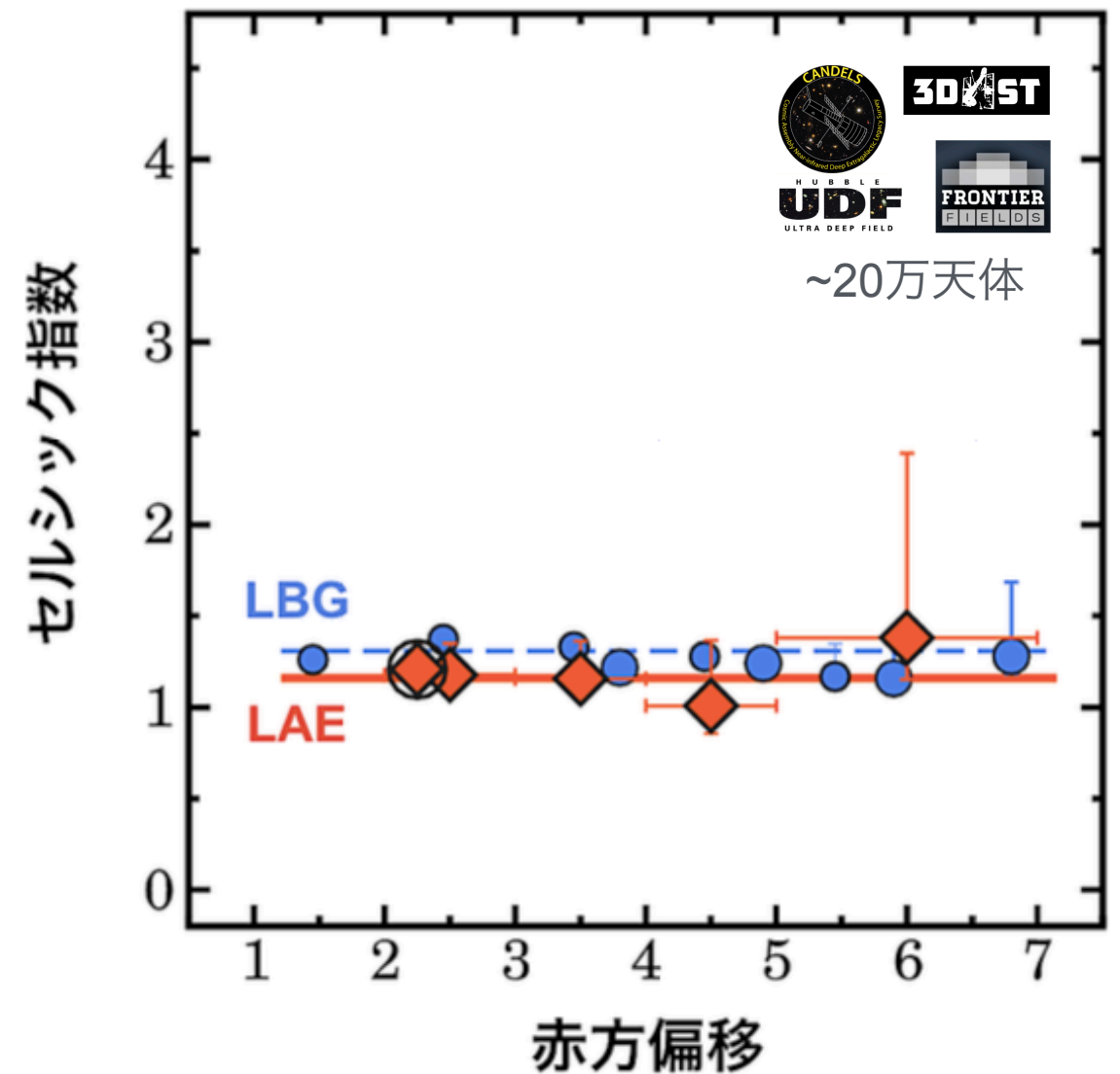
Sersic fit $\rightarrow n$

表面輝度プロファイルの傾き, 大局的な形態

- ✓ 星形成銀河 SFGs は円盤型 ($n \sim 1$)
- ✓ 非星形成銀河 QGs は楕円型 ($n \sim 4$)
- ✓ $\text{Ly}\alpha$ 輝線銀河 LAEs も円盤型
- ✓ $n \sim 1$ は少なくとも $z \sim 7$ まで続く

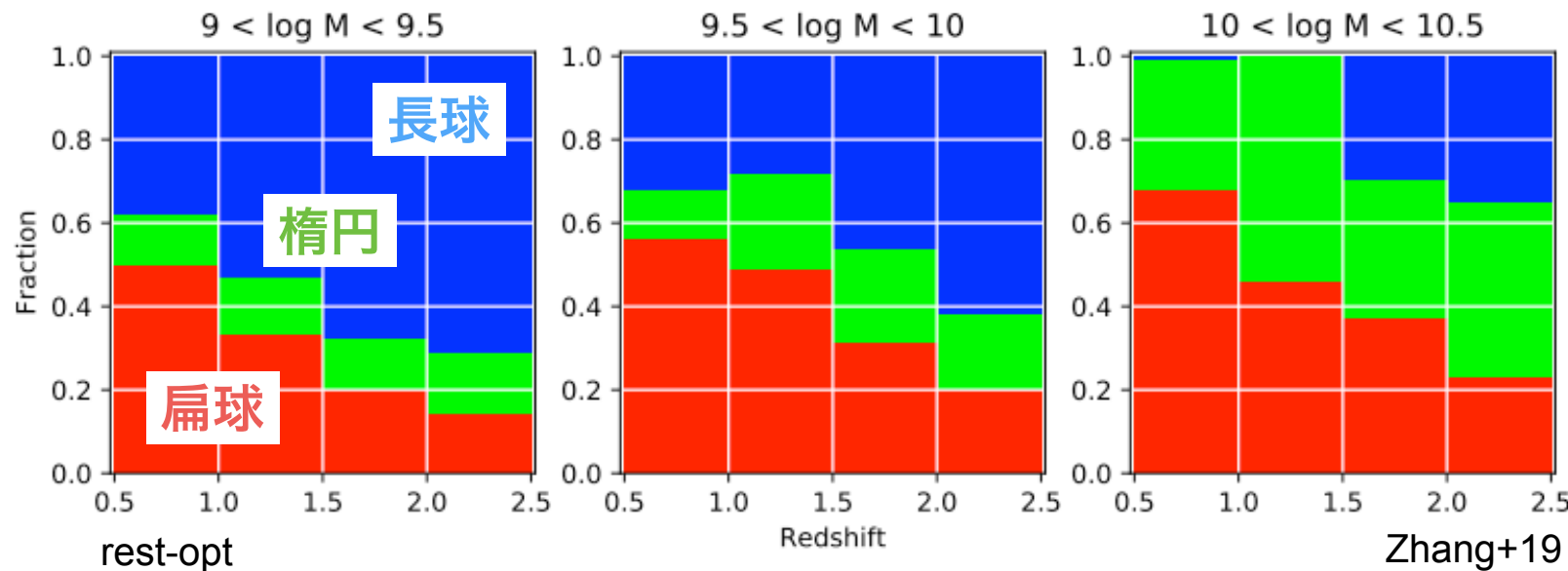
さらに遠方では

Shibuya+15, 19

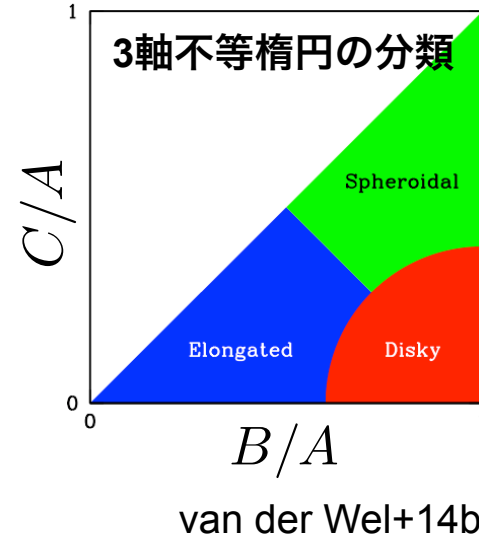
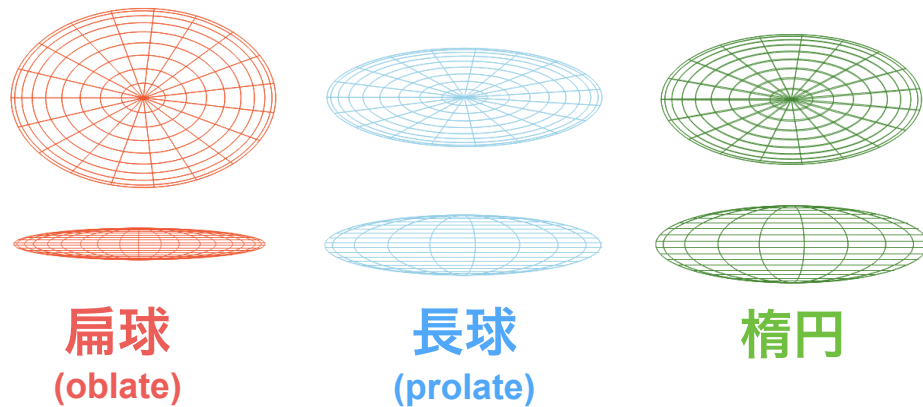


軸比分布

SFMS 銀河



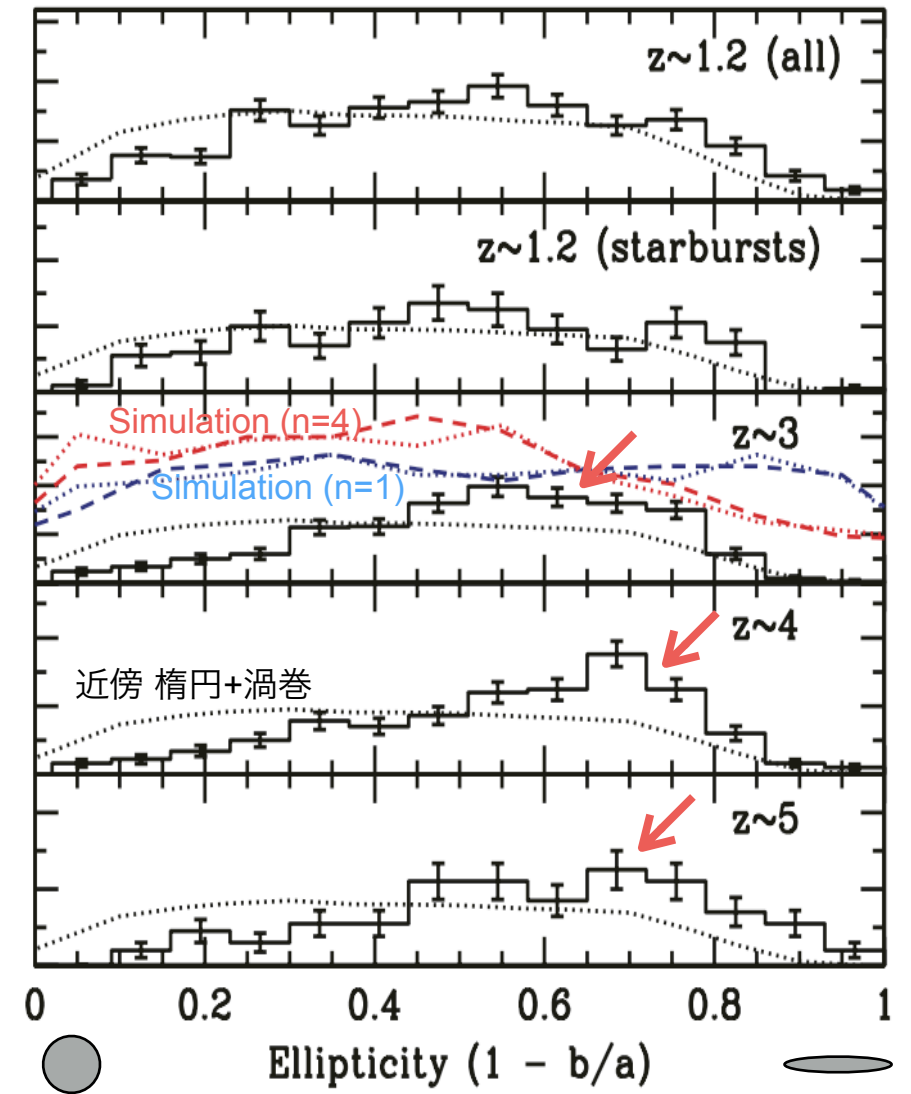
Best-fit (各分類で一番顕著な例)



- ✓ 大まかには円盤っぽい
- ✓ 低質量, high- z に行くにつれて長球が増加
- ✓ 長球→扁球の形態は“compaction”が関係？

LBGs

Ravindranath+06



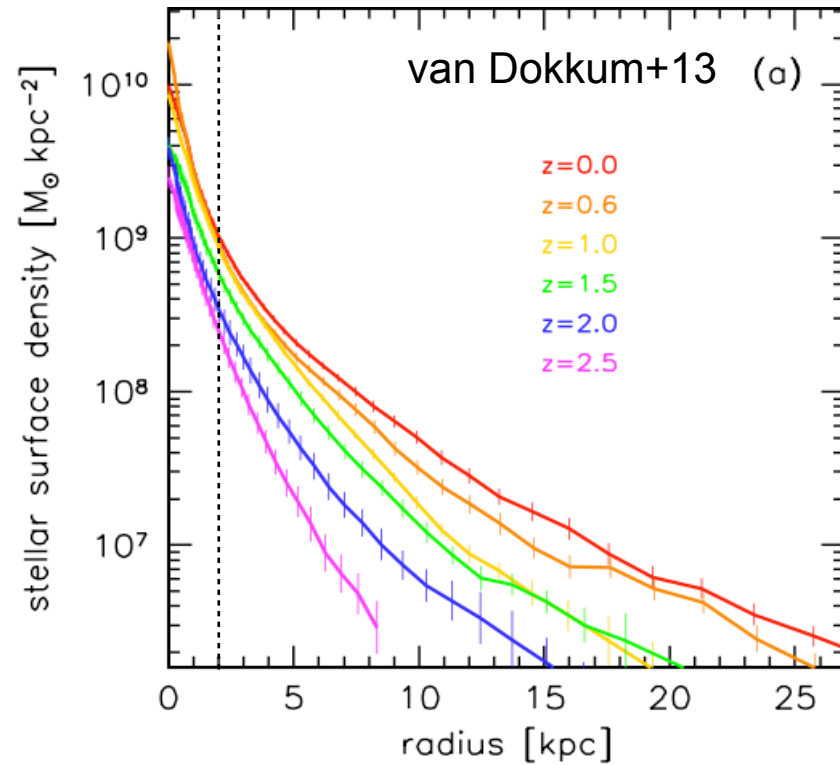
Model fit はしていない

- ✓ $z \sim 3-5$ で elongated が増加
- ✓ 銀河合体？

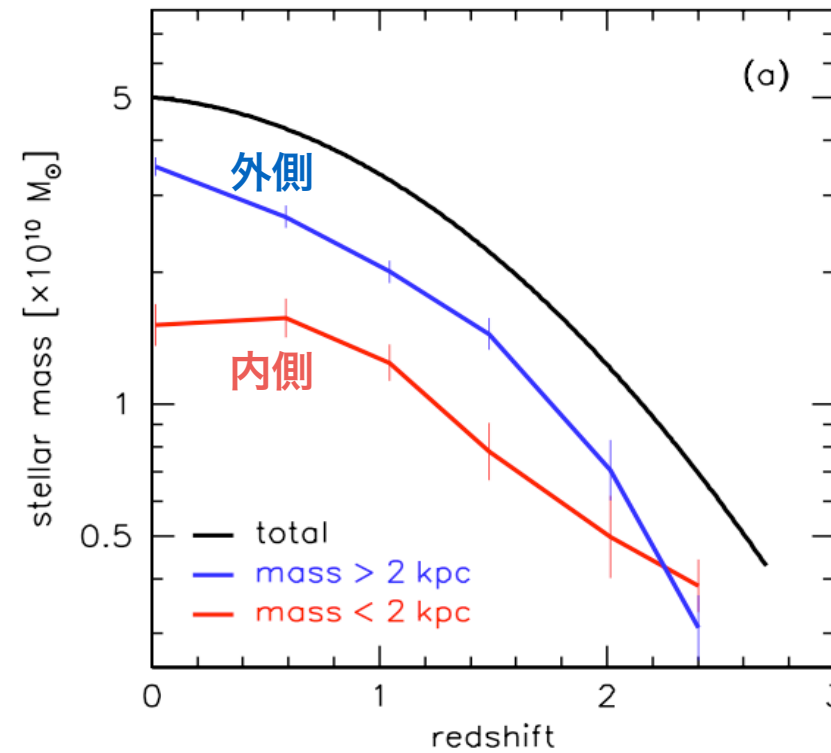
動径プロファイル

$\log M_*$
@ $z=0$

~10.7
銀河系
質量



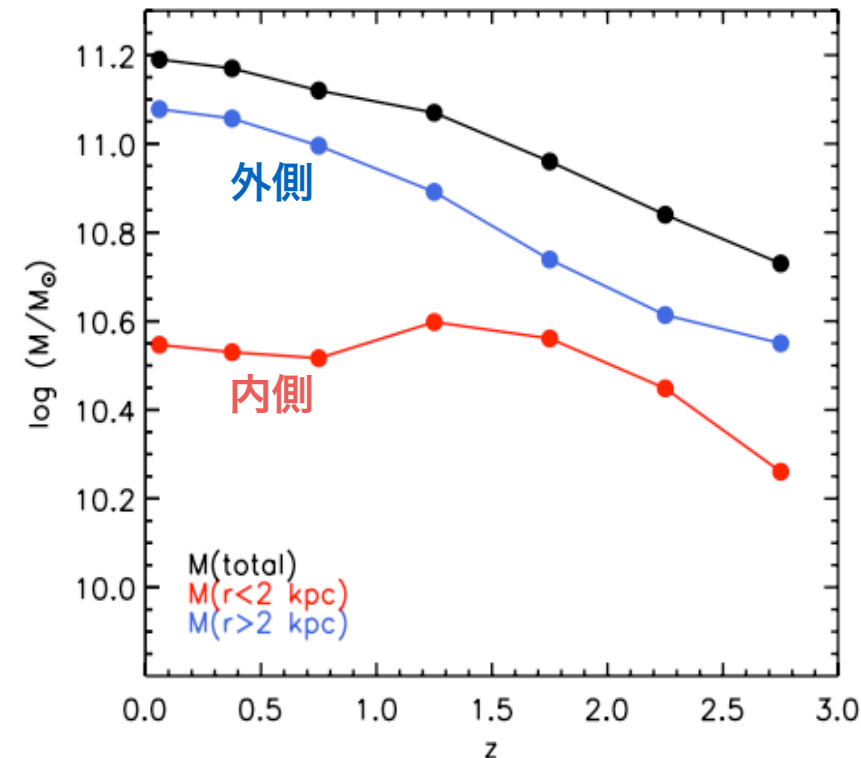
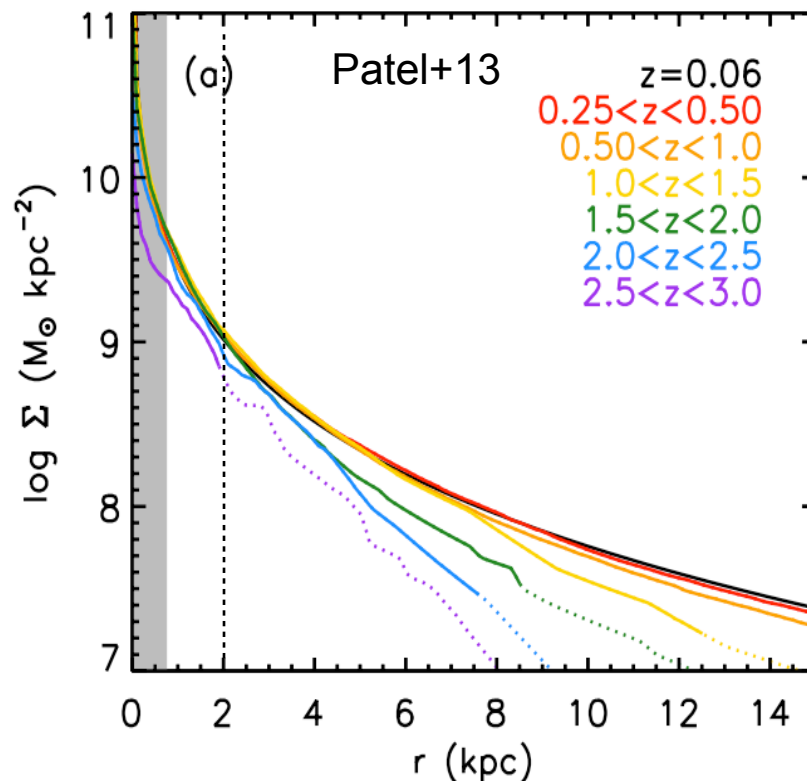
外側 (>2kpc) & 内側 (<2 kpc) の星質量変化



外側と内側
概ね
共に成長

$z < 1$ で内側の
成長が止まる

~11.2

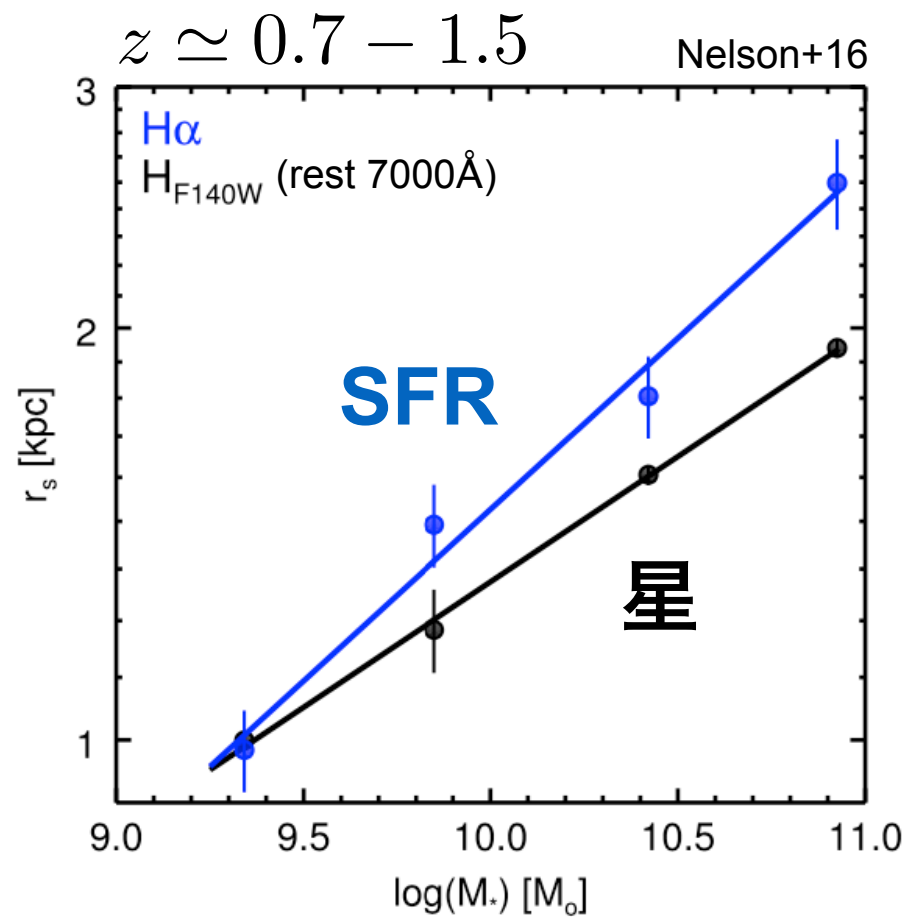


内側は
 $z \sim 2$ の形成以降
ほぼ変化なし

外側は
ずっと成長

→ Inside-out growth

星 & 星形成領域の比較



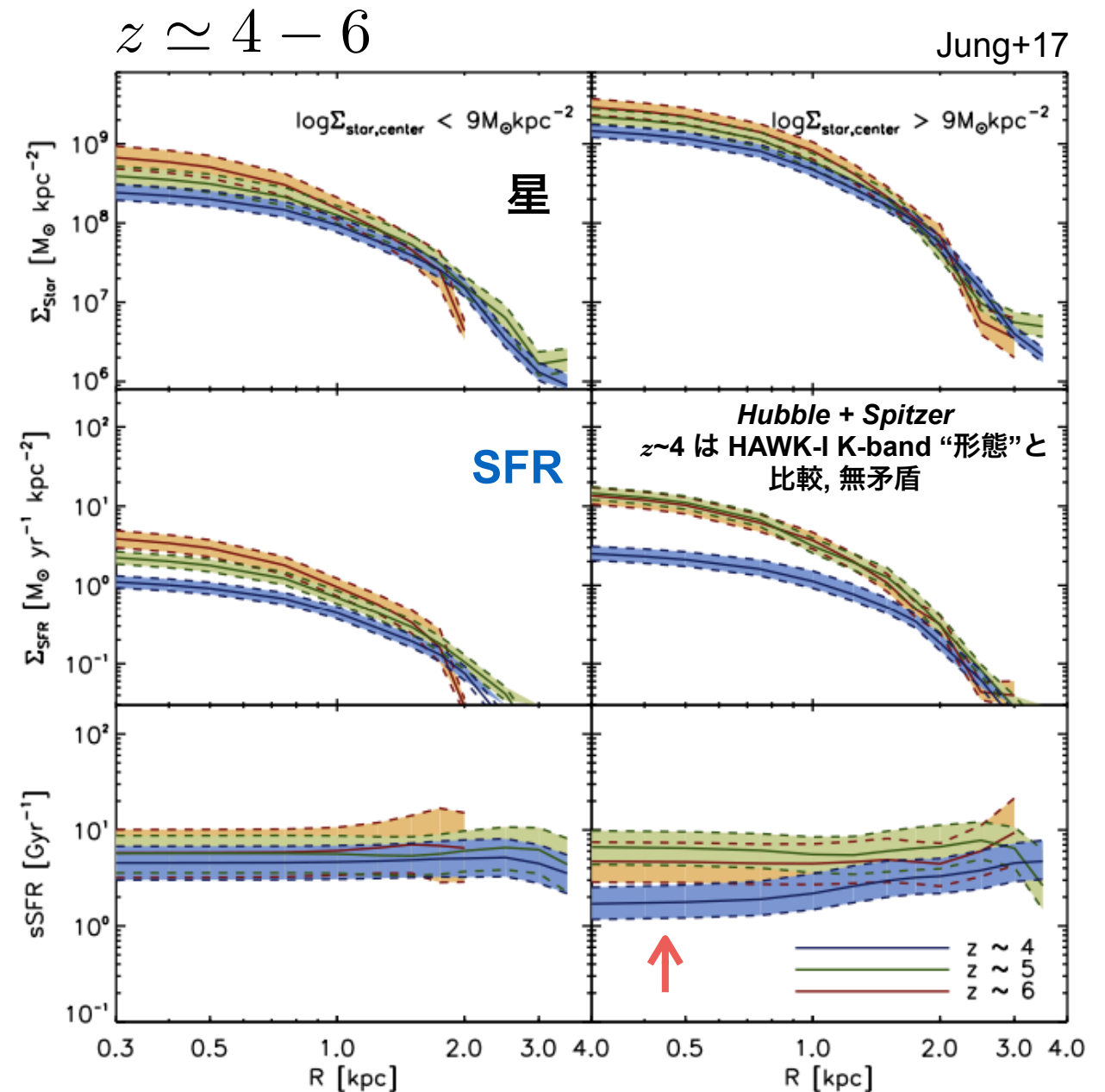
✓ 3D-HST (image+grism)

✓ 星 & SFR 半径を比較

$r_{\text{SFR}} > r_*$ → 外側で星形成 継続

→ Inside-out growth
(重い銀河ほど)

See also, Tacchella+15a for $z \sim 2$ 銀河, AO+IFU



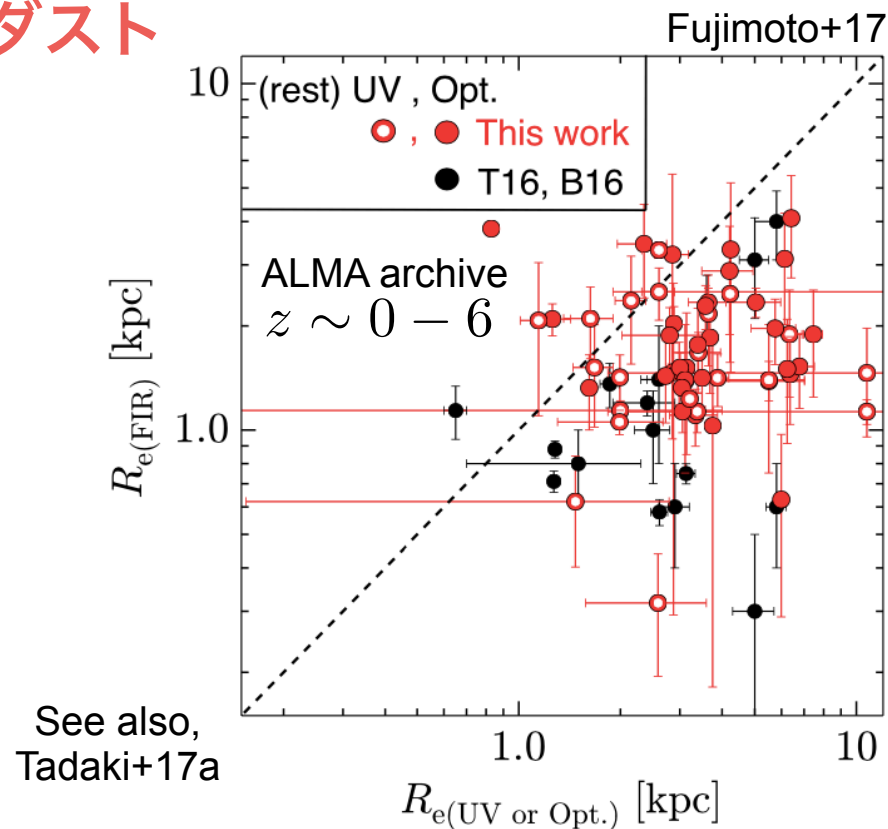
✓ 半径毎の SED → 星/SFR profile を推定

✓ $z \sim 4$ 高 中心密度 銀河 → 中心 sSFR が低い
→ Inside-out growth/quenching

✓ $z \sim 5-6$ などその他 → 全体で星形成

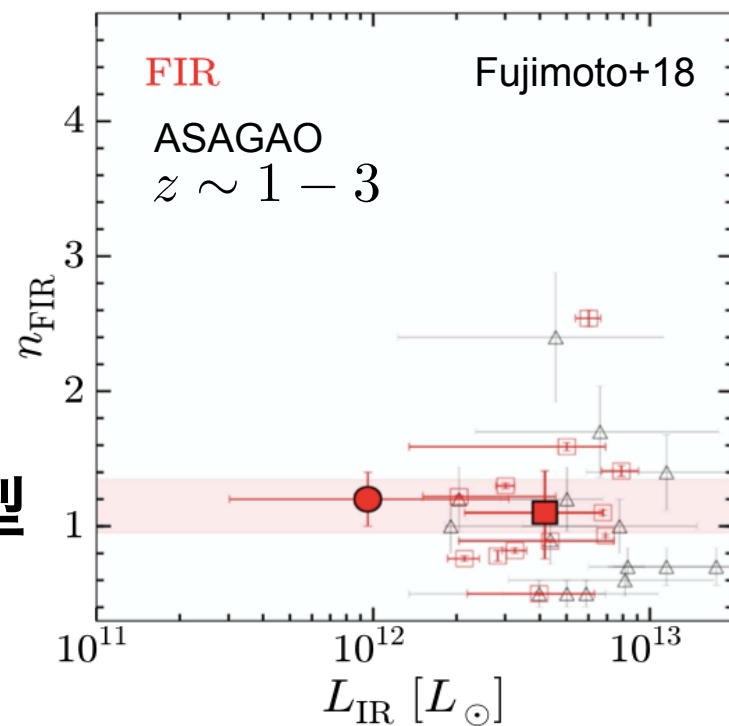
ダスト, 分子ガスの r_e & n

ダスト

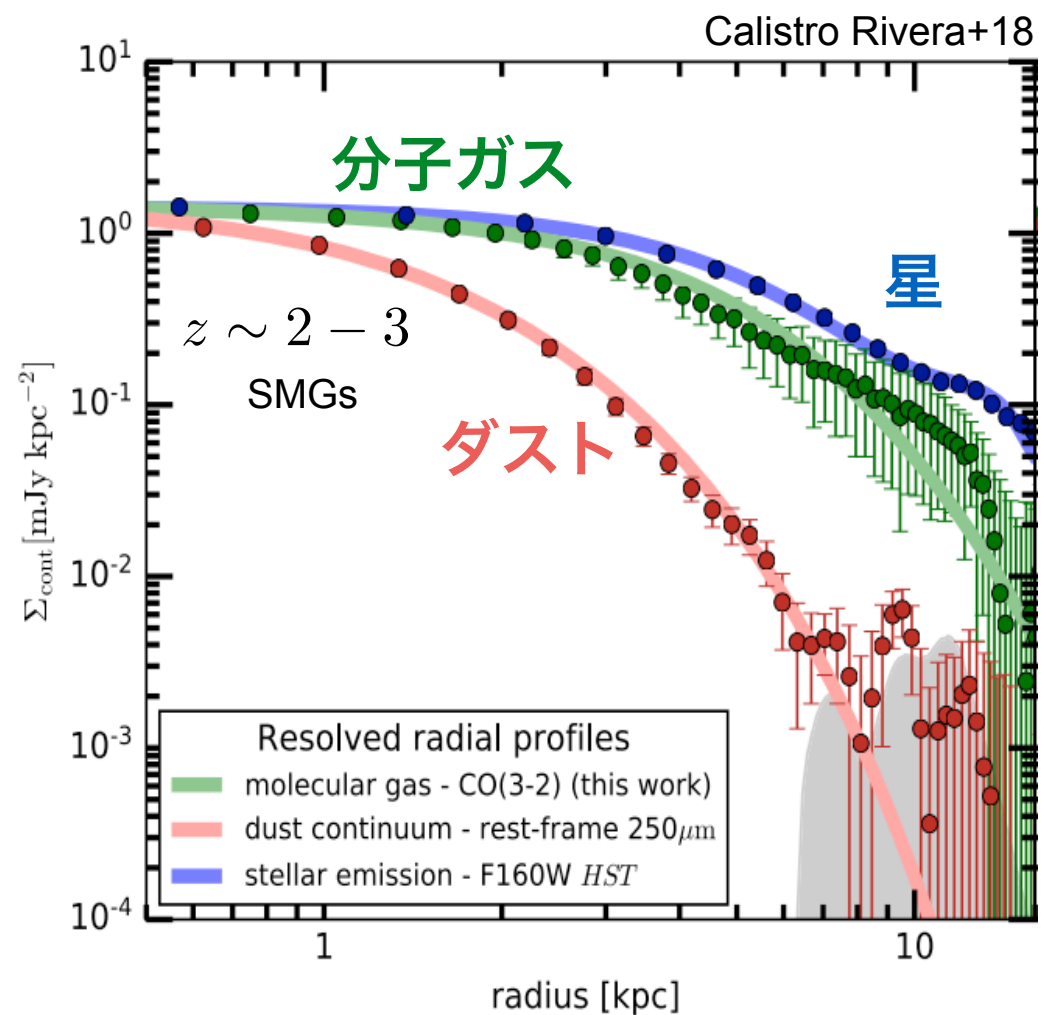


See also,
Tadaki+17a

$r_{\text{FIR}} < r_{\text{UV/Opt}} \rightarrow$ 中心で活発な星形成



円盤型

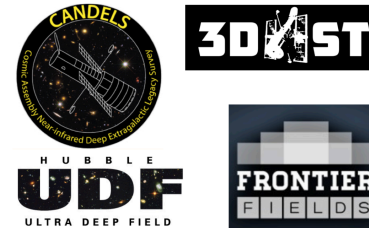
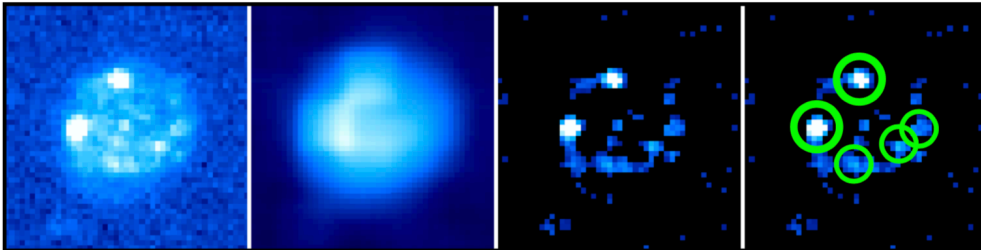


- ✓ 分子ガスは星の分布と概ね同じ
- ✓ 分子ガス $n \sim 1$
- ✓ ダストのみコンパクト

塊状銀河

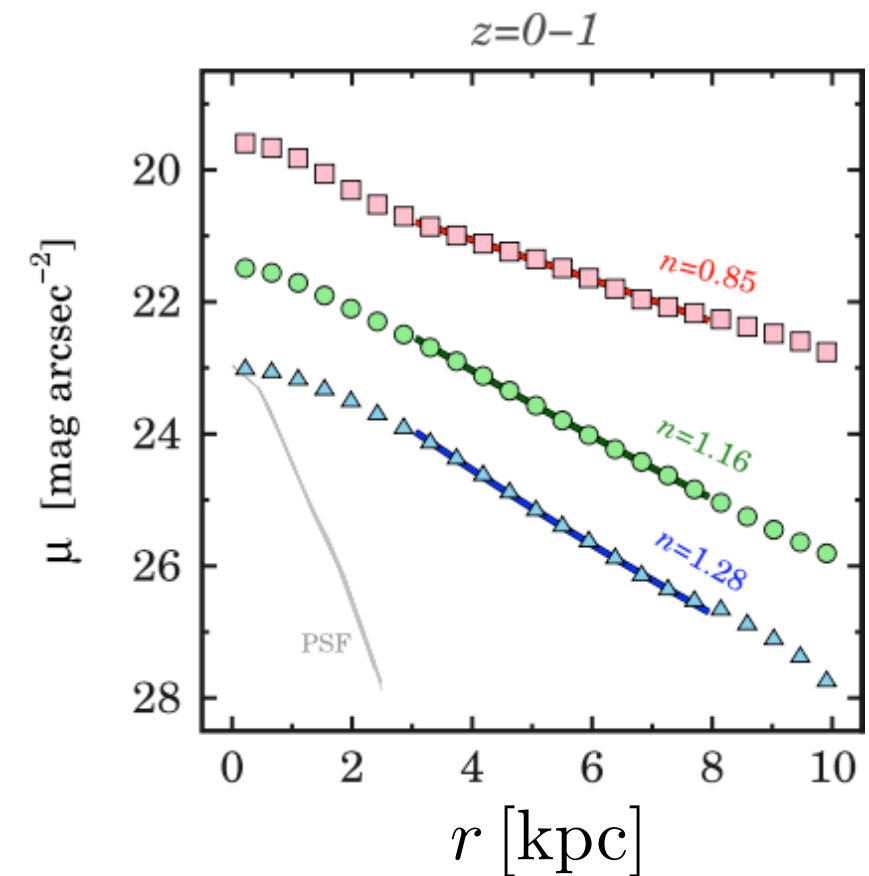
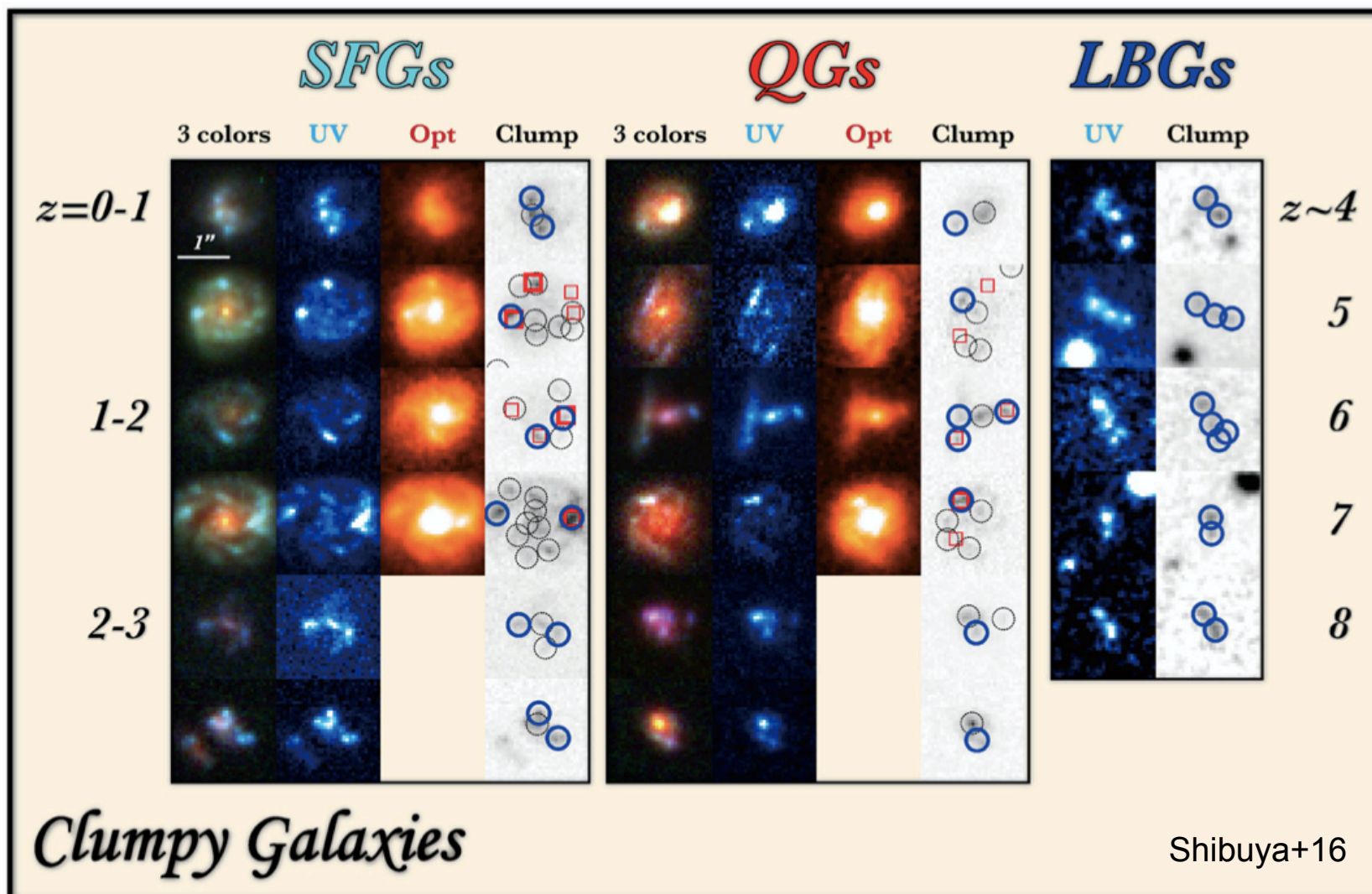
SFGs は大局的には円盤 では、より細かい構造は？

①実際の
銀河画像 ②ボカす 差し引く
(①－②) 検出



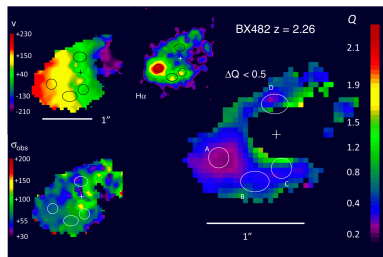
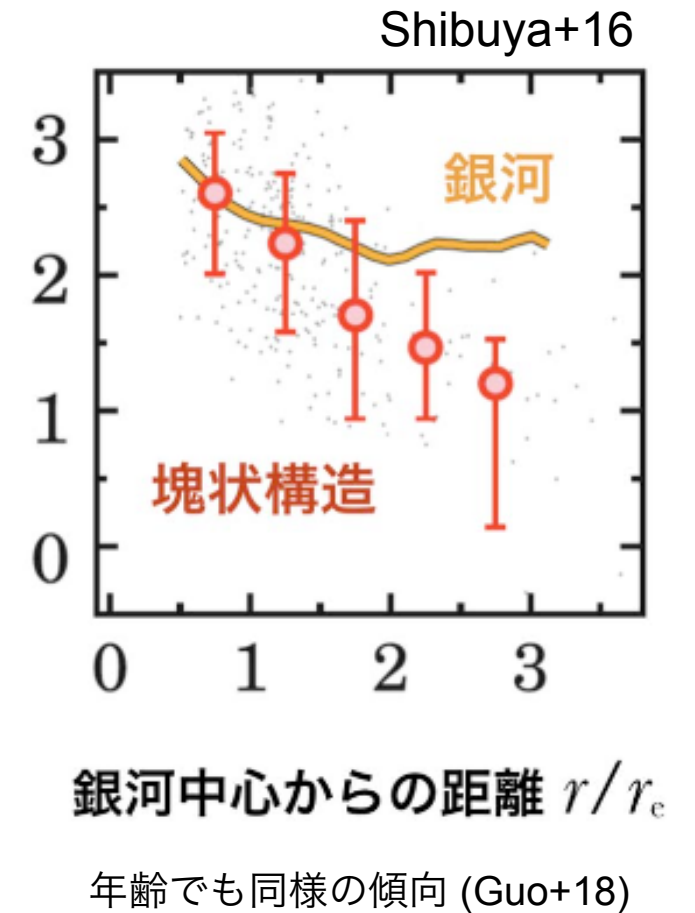
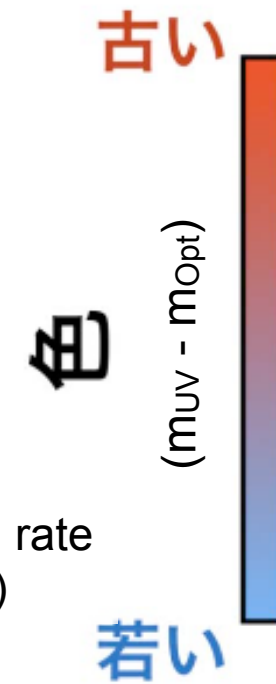
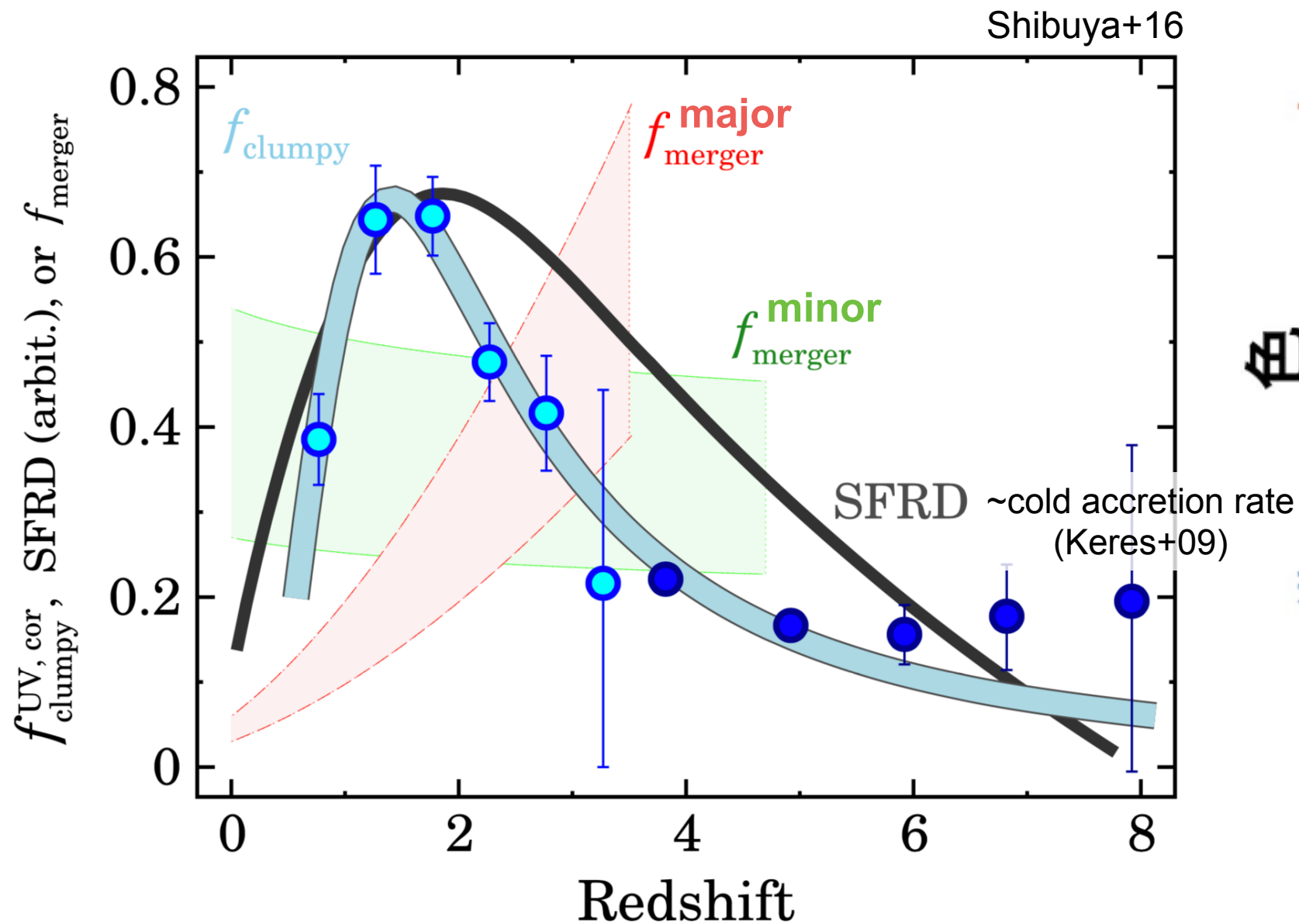
塊状銀河の足し合わせ

→ “母銀河”の輝度 profile
→ 円盤 ($n \sim 1$)



Shibuya+16

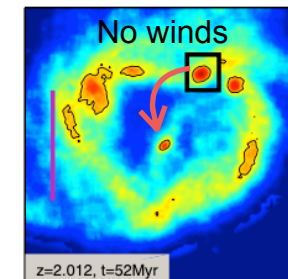
塊状銀河



Genzel+11

塊状構造の多くは
内的要因 (e.g., 円盤不安定) で形成？

Cold accretion $\rightarrow$ High f_{gas}
 $\rightarrow$ Low Toomre Q , Violent disk instability？



Genel+12

塊状構造が中心へ移動？
Clump migration

(擬似)バルジ形成？
(実際に移動するかは要議論)

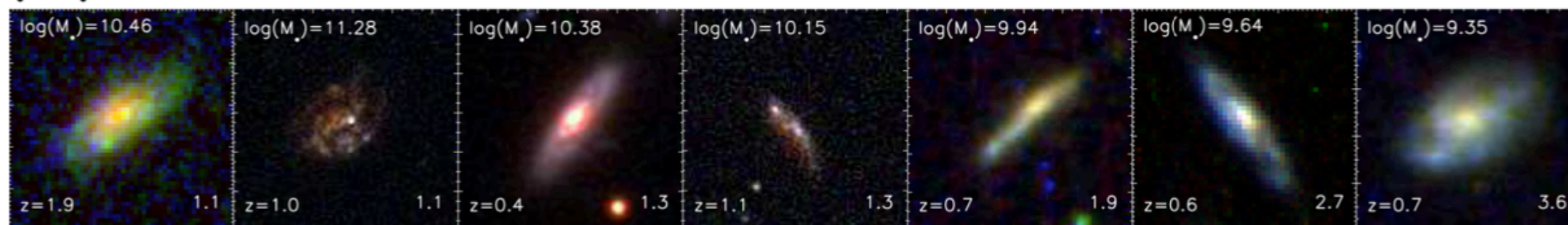
力学構造と形態の関係

面分光観測 + *Hubble* で力学構造と形態の研究も

Swinbank+17

KMOS+MUSE, ~ 400 SFGs @ $z \sim 0.3-1.7$

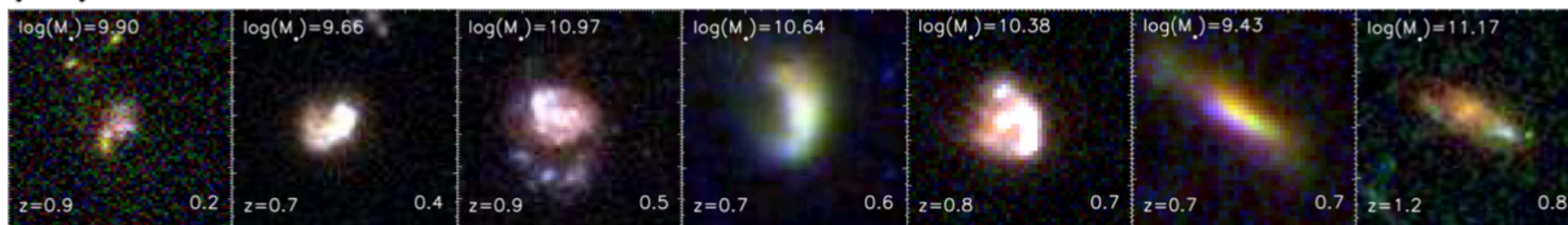
$j_{\perp}/j(M_{\perp}) = 1.1 - 3.6$



High specific Angular momentum (sAM)

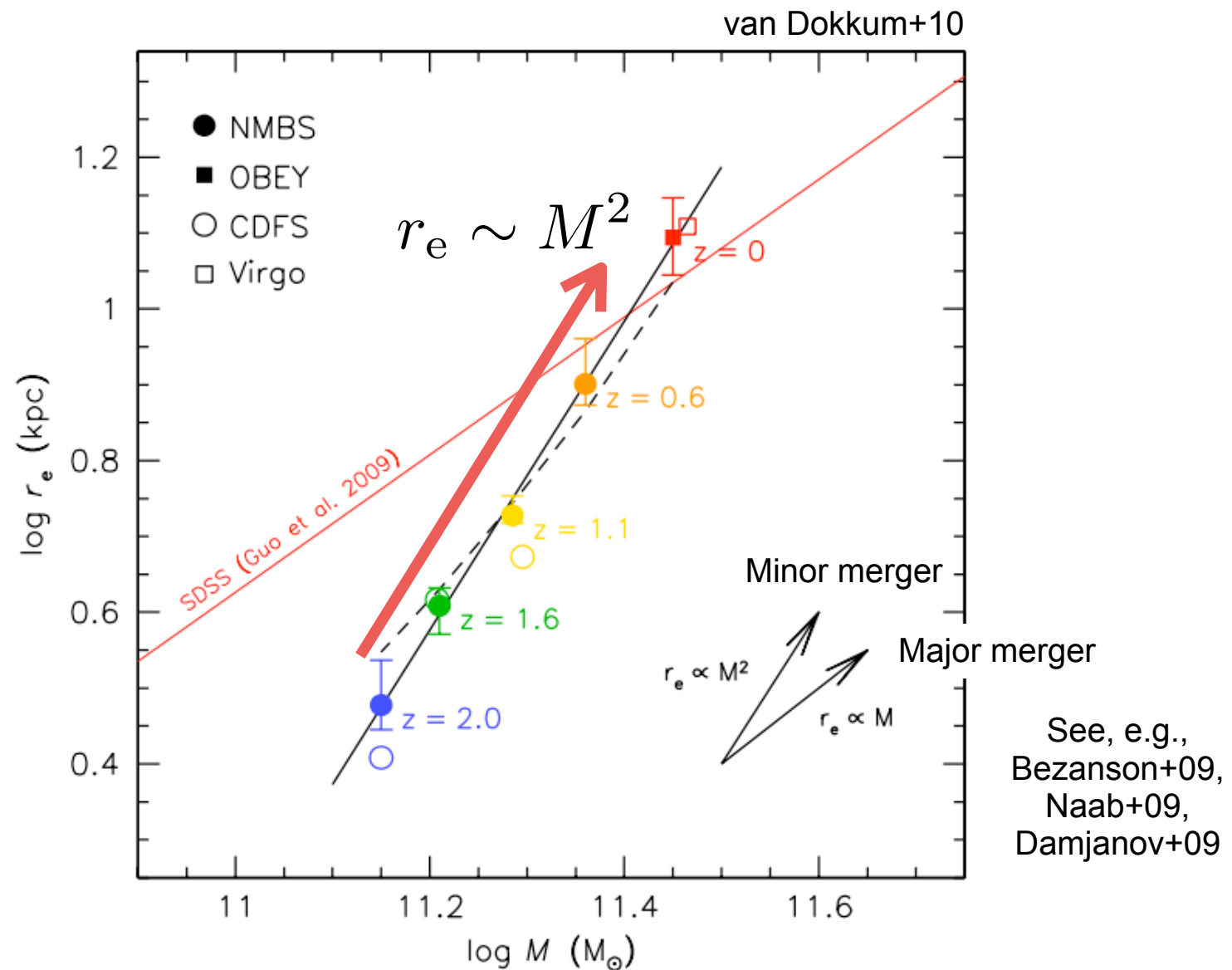
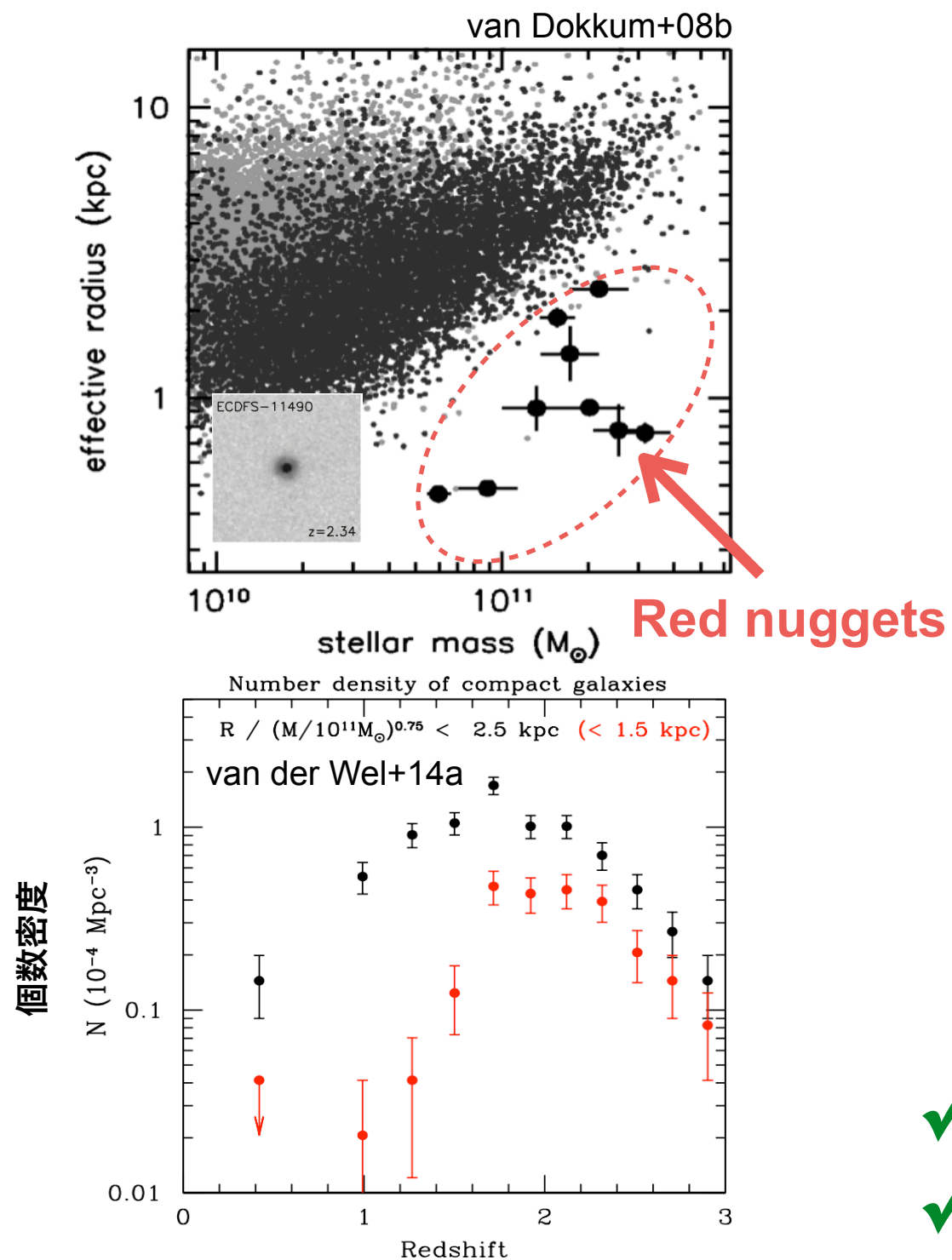
→ 安定 Toomre $Q \sim 1.1$, 渦巻き銀河に似た形態

$j_{\perp}/j(M_{\perp}) = 0.2 - 0.8$



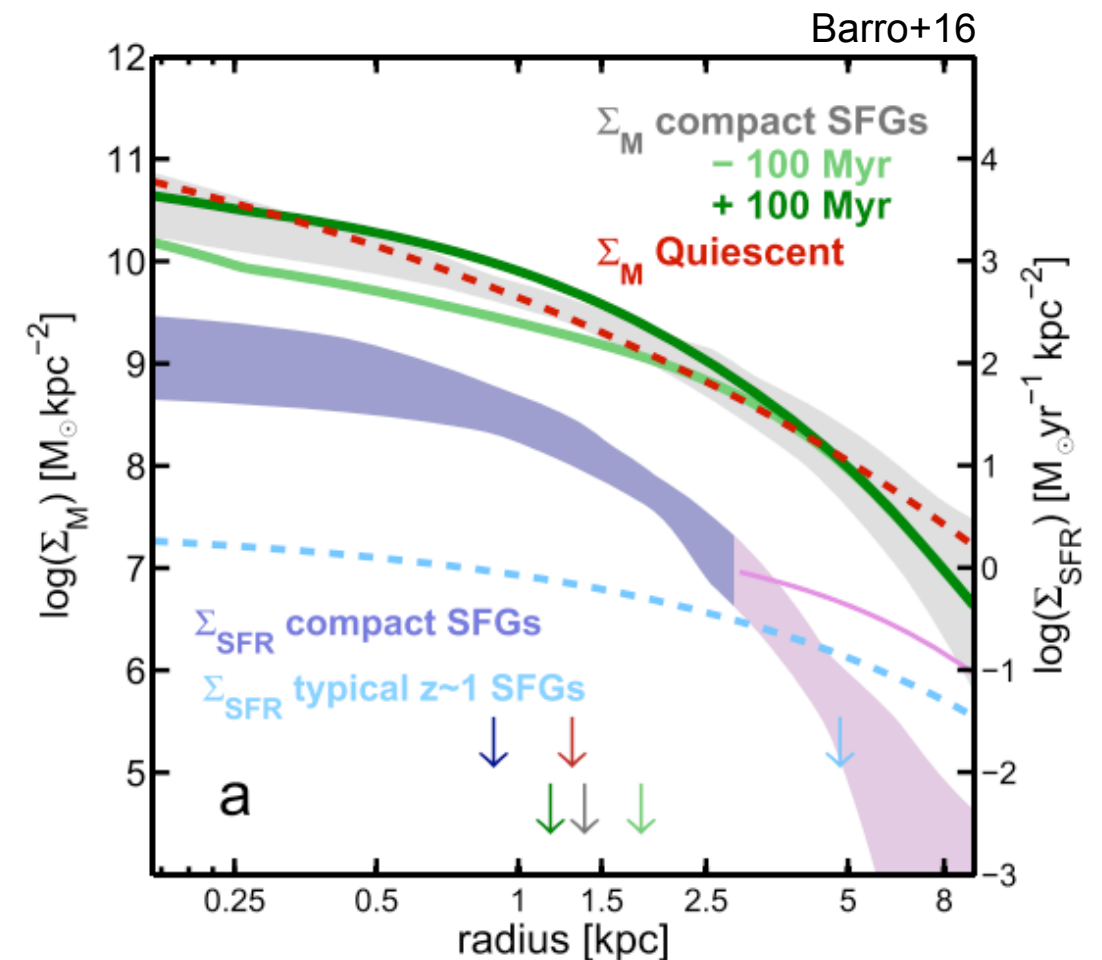
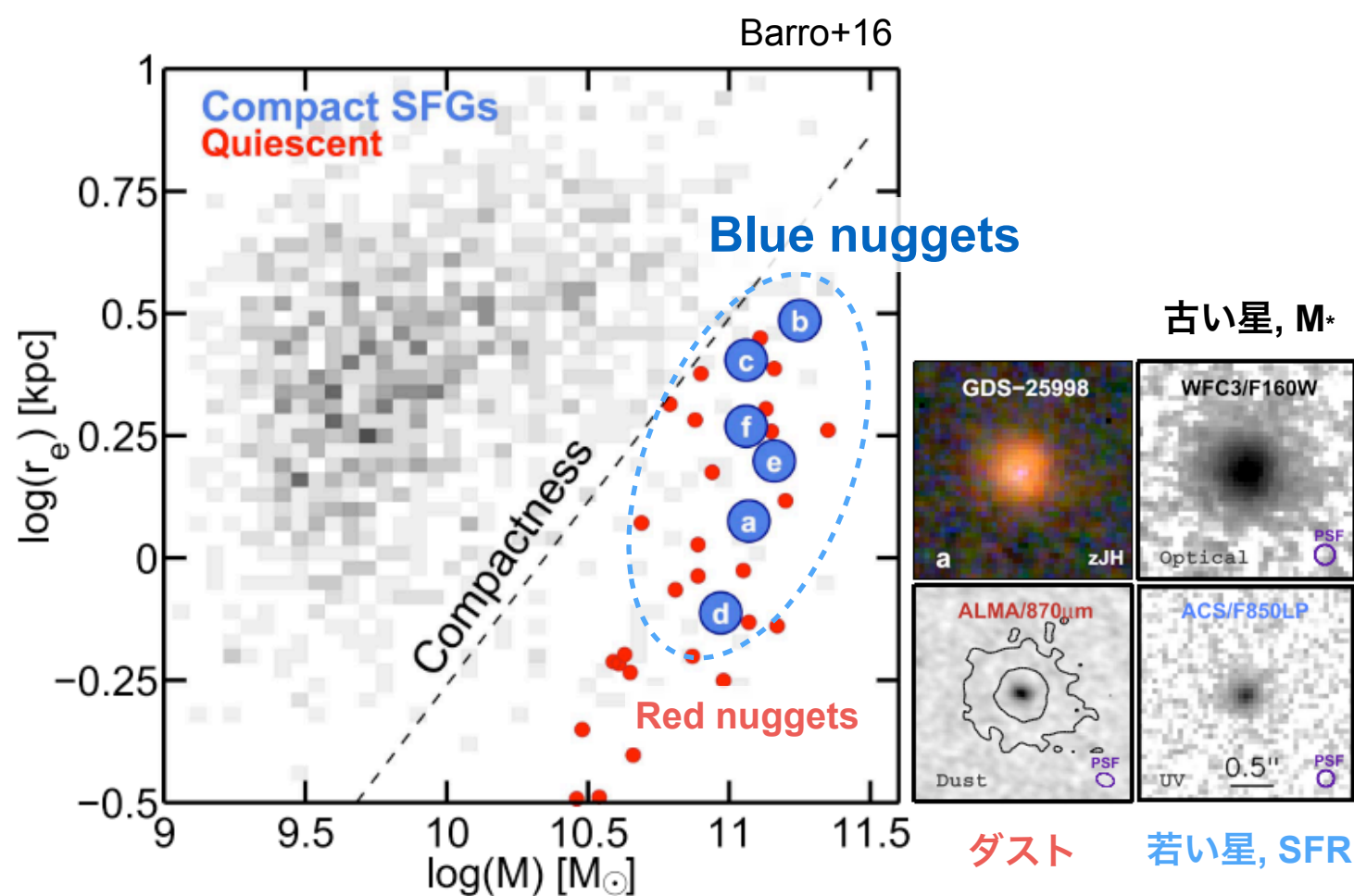
Low sAM → 不安定 Toomre $Q \sim 0.5$, 複雑な形態, いくつかの星形成領域

Red Nuggets



- ✓ 主に **minor merger** でサイズ & 質量成長か
- ✓ Merger だけでは不十分という指摘も (e.g., Man+16)
- ✓ Progenitor bias の見積もりも重要 (e.g., Belli+13c)
- ✓ 重く, 小さい QGs, $z \sim 1-3$ に多い
- ✓ $z \sim 0$ にかけて減少 → サイズ進化?

Blue Nuggets, compact SFGs/SMGs

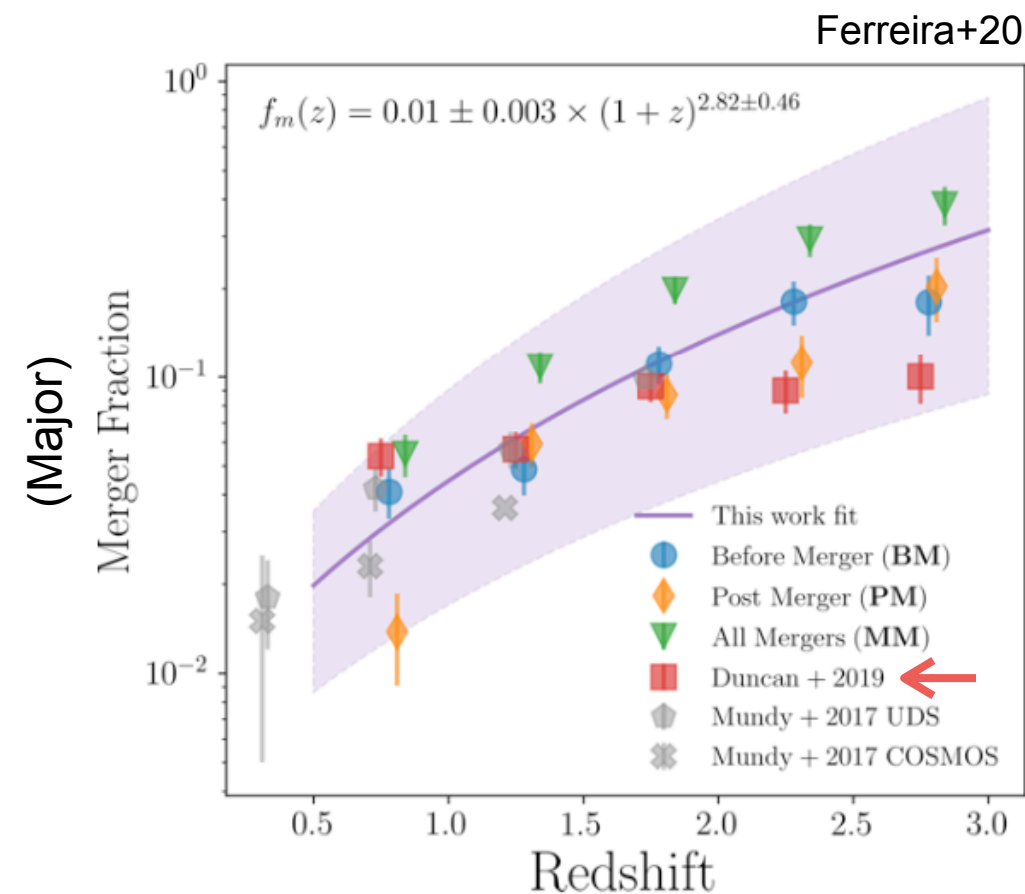
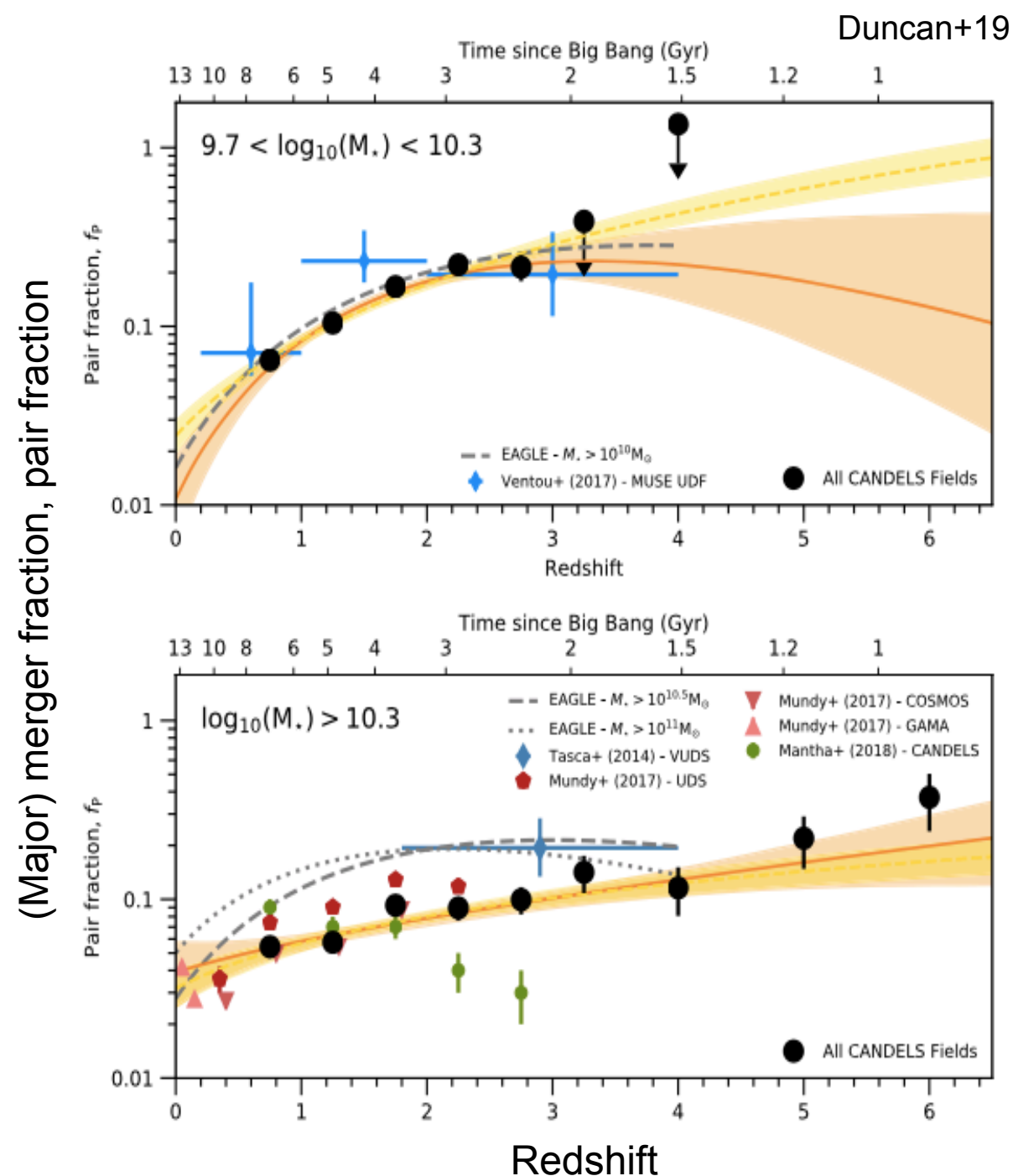


- ✓ Red nuggets と同じくらい重く小さい SFGs
→ **Blue nuggets** (compact SFGs/SMGs)
- ✓ Red nuggets の progenitors か
- ✓ 中心 1kpc 以内の星質量密度 $\Sigma_{1\text{kpc}}$ が
形成/進化過程と密接に関係か (e.g., Barro+17)

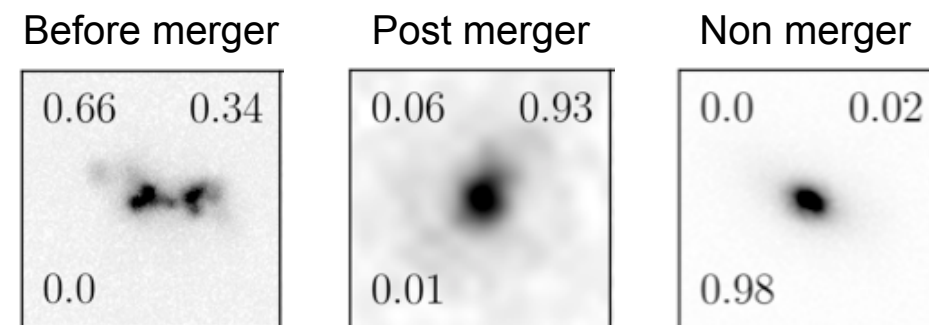
中心の激しい星形成により
Blue → red nuggets の
サイズ & 質量進化が可能か

See also, e.g., Toft+14, Gómez-Guijarro+18

銀河合体率の進化



From IllustrisTNG

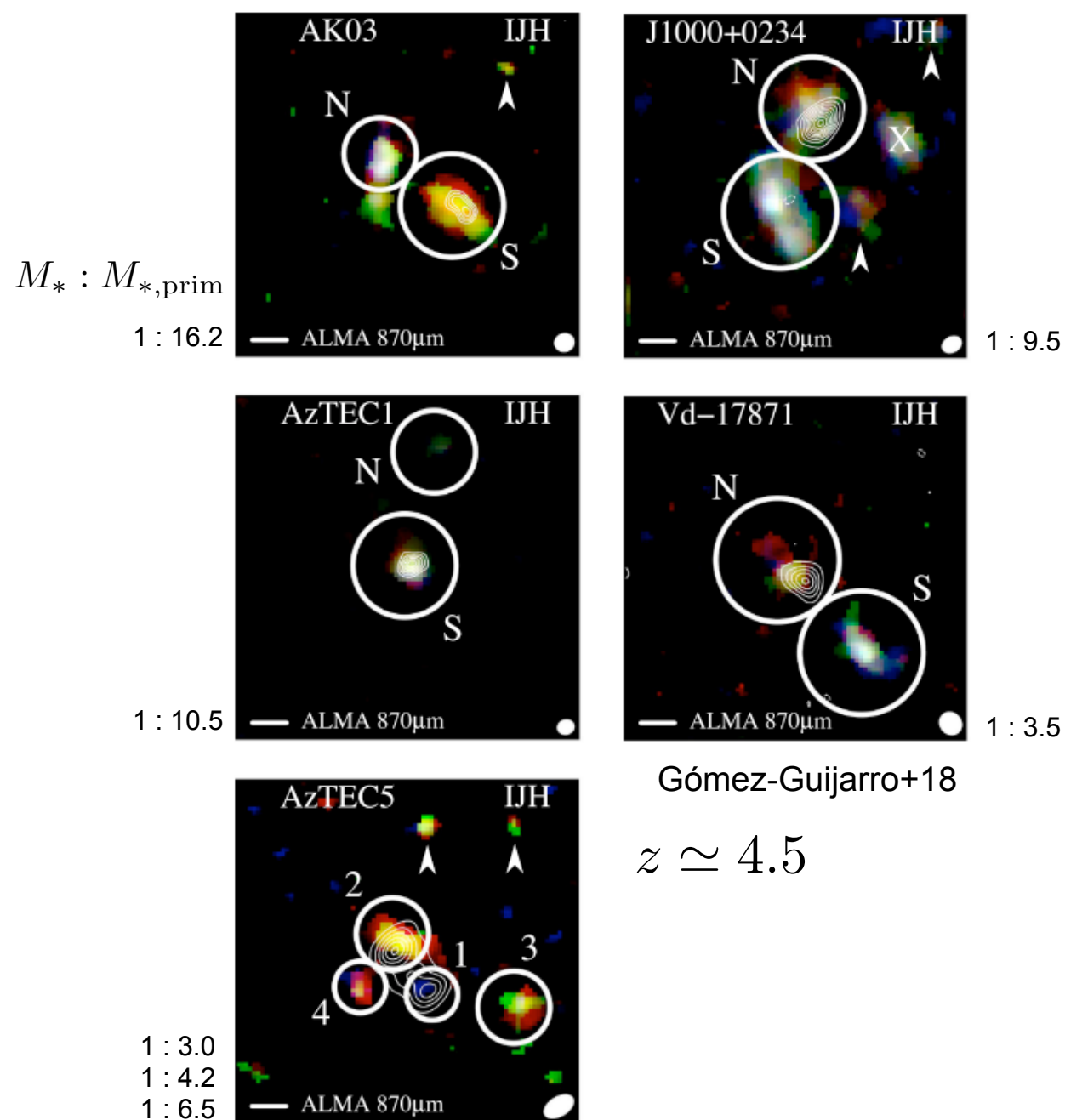


(Major) 合体率は $z \sim 4-6$ まで増加傾向
→ 過去に頻繁な合体

✓ 機械学習でも $z = 0-3$ は同傾向
✓ Simulation 画像を入力

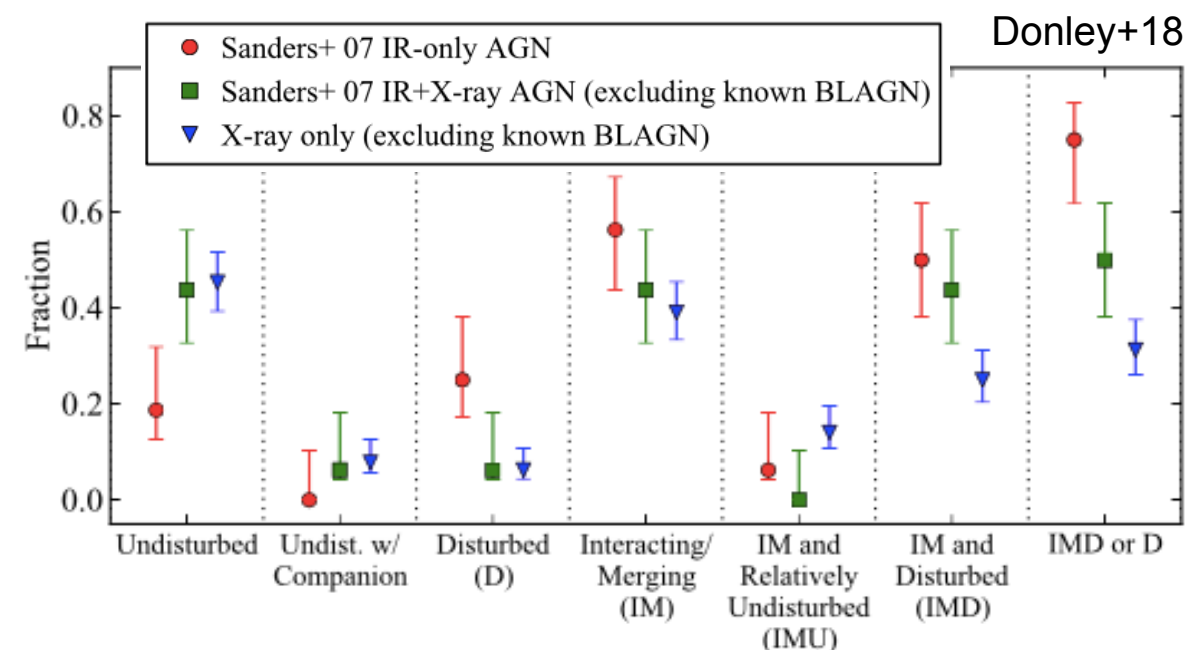
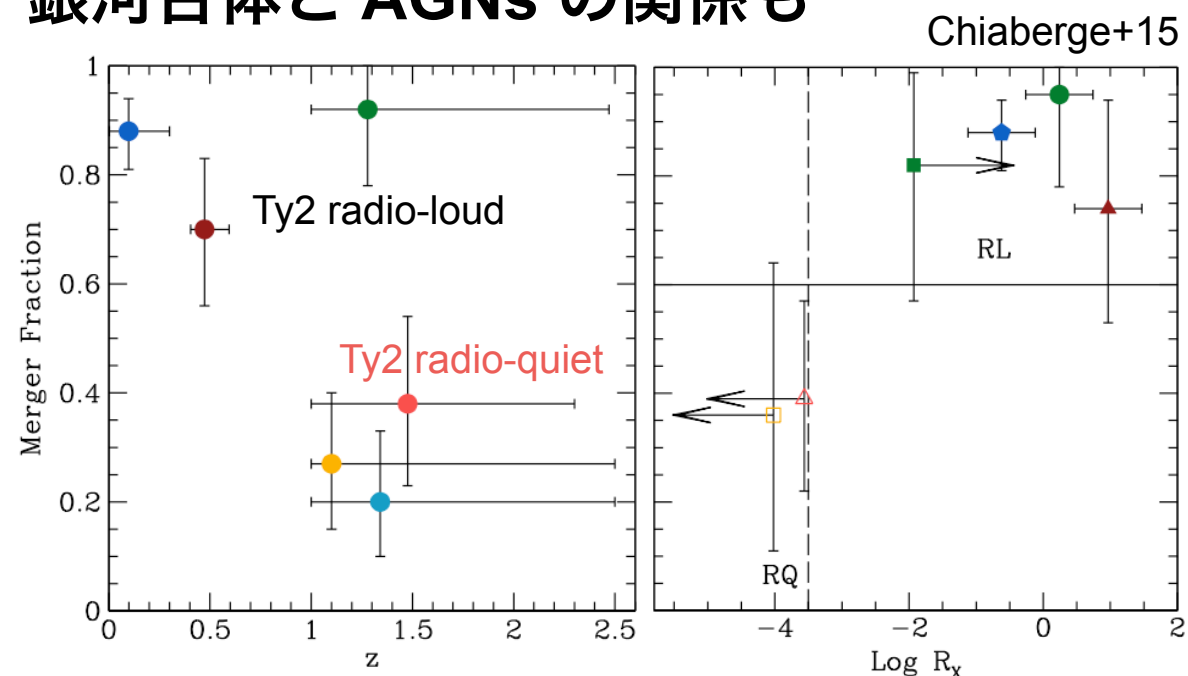
銀河合体と SMGs, AGNs の関係

合体を引き起こしている SMGs も



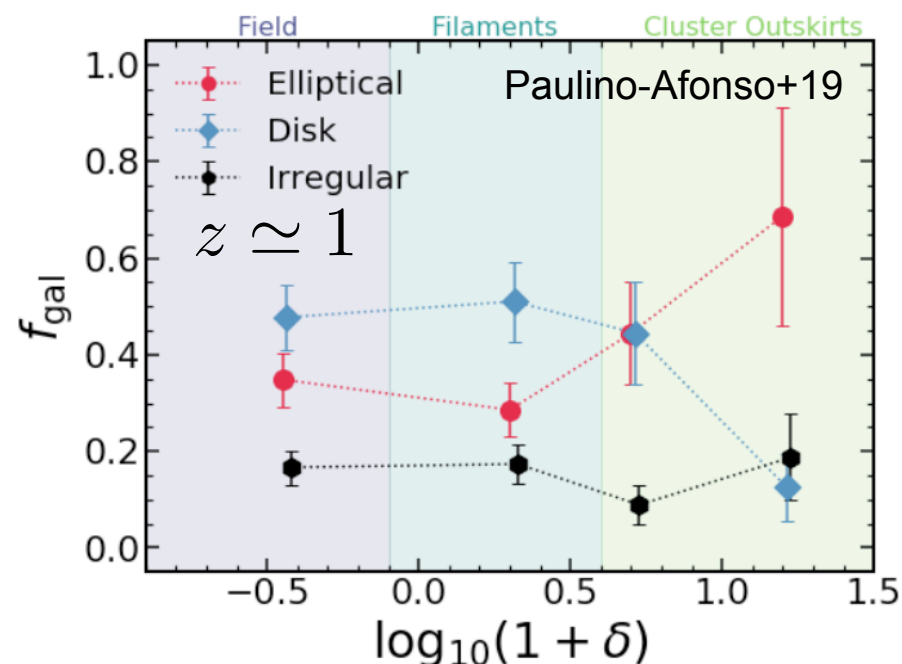
(Minor merger が多い?)

銀河合体と AGNs の関係も

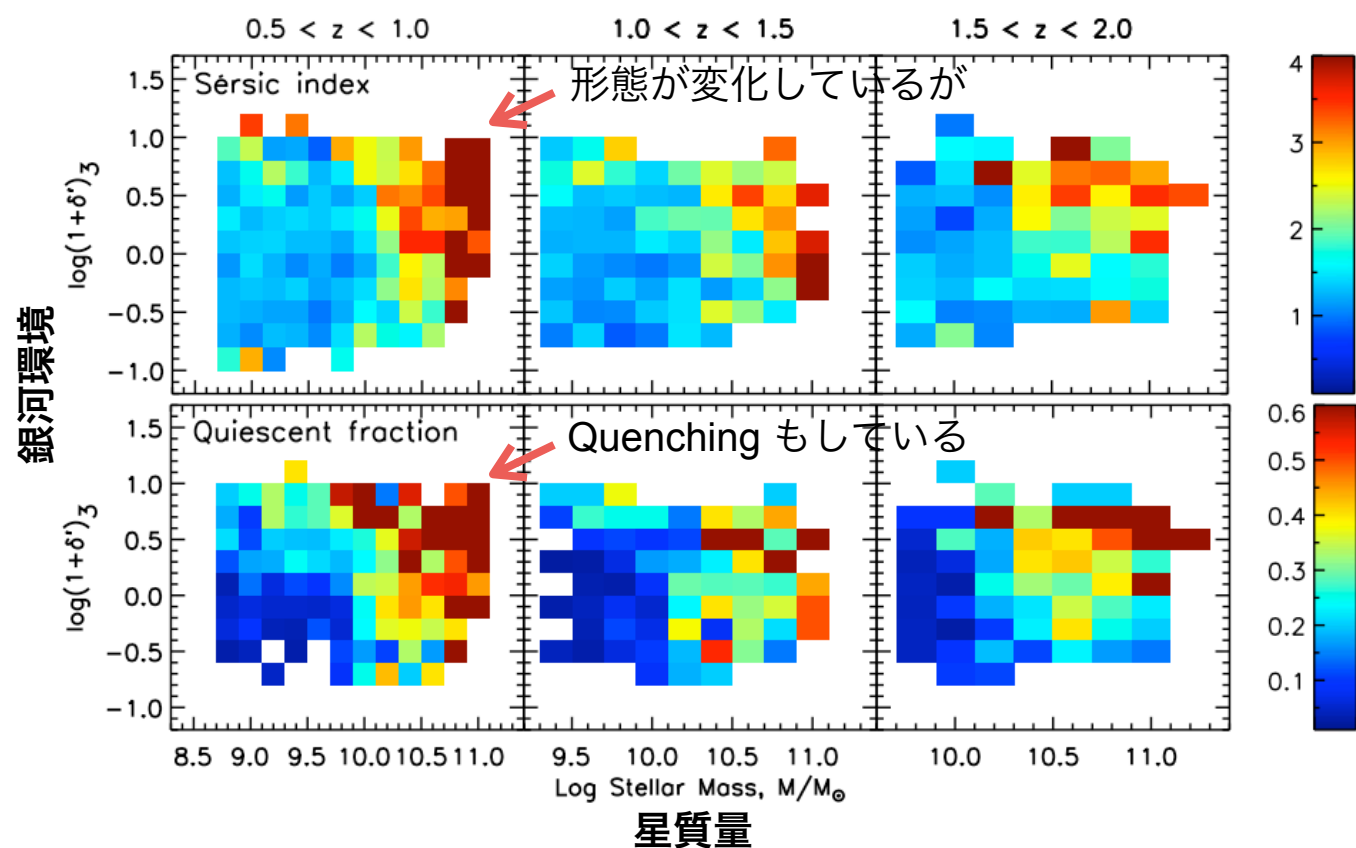


- ✓ 関係が有ったり無かったり
- ✓ AGN の種類や合体の段階にも関係？

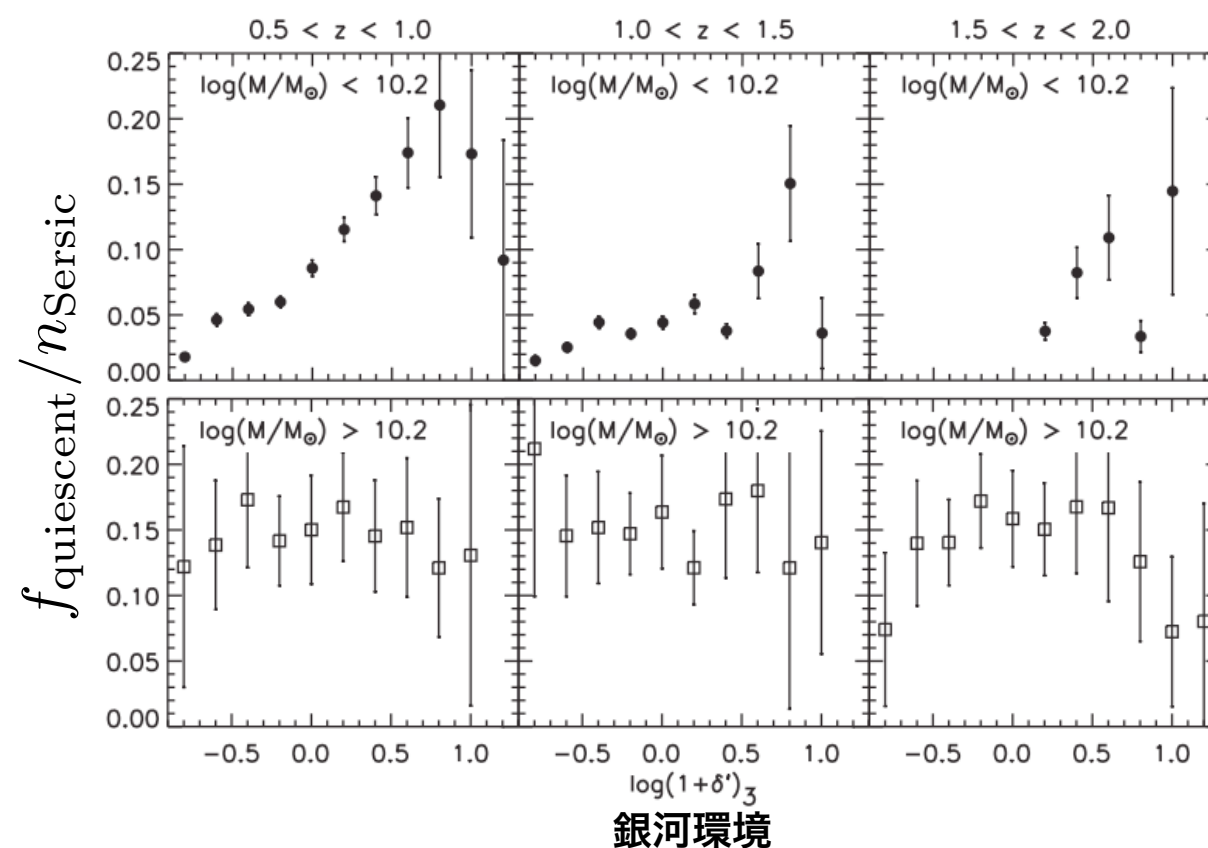
銀河形態の環境依存性



- ✓ 形態-密度関係が $z \sim 1-2$ で既に存在する系も
- ✓ 「高密度領域には、重く星形成を止めた銀河が多い」という質量効果も
- ✓ Quenching と形態変化の関係は？
→ 様々な(原始)銀河団を系統的に研究する必要性



形態に対する Quenching



Kawinwanichakij+17

See also, Peng+10 for local galaxies

Low-M では δ に対して, n はほぼ一定だが, $f_{\text{quiescent}}$ は大きく変化
→ Quenching 後, すぐに形態変化? (see, Kawinwanichakij+17)

これまでの形態研究で分かったこと



※ 質量に依存, 大まかな流れ

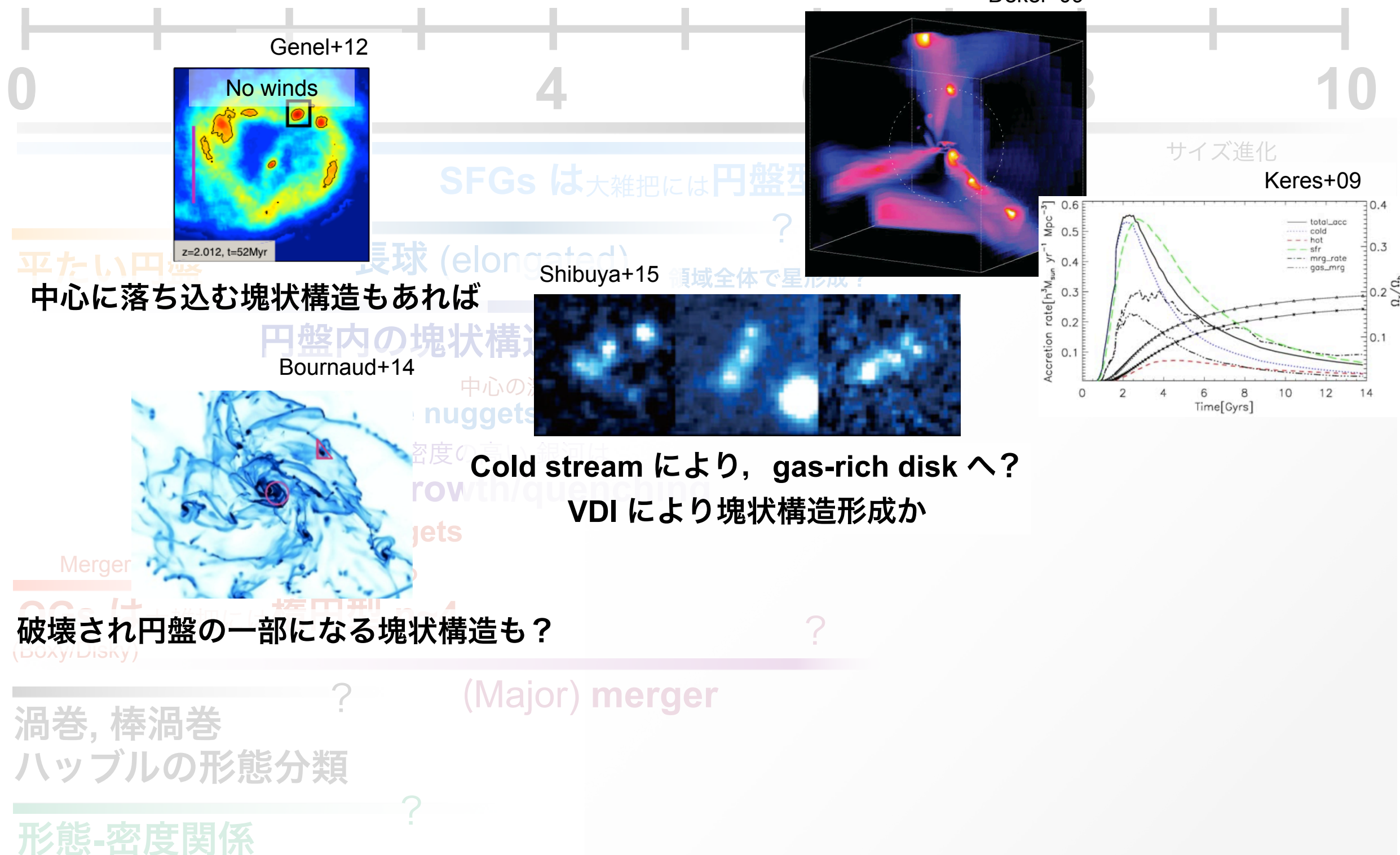
銀河形態進化の大枠



※ 質量に依存, 大まかな流れ

銀河形態進化の大枠

赤方偏移 z

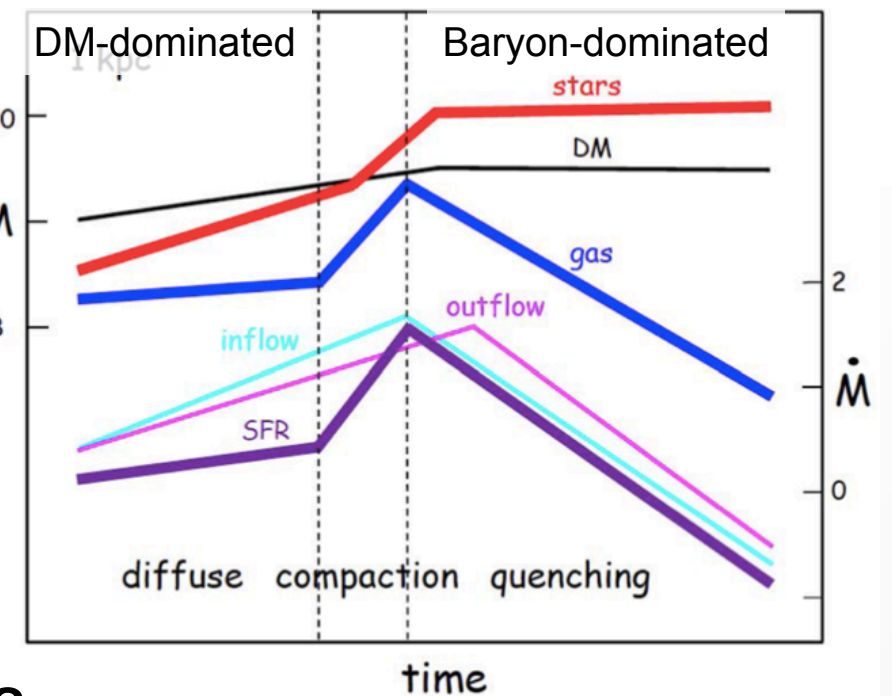
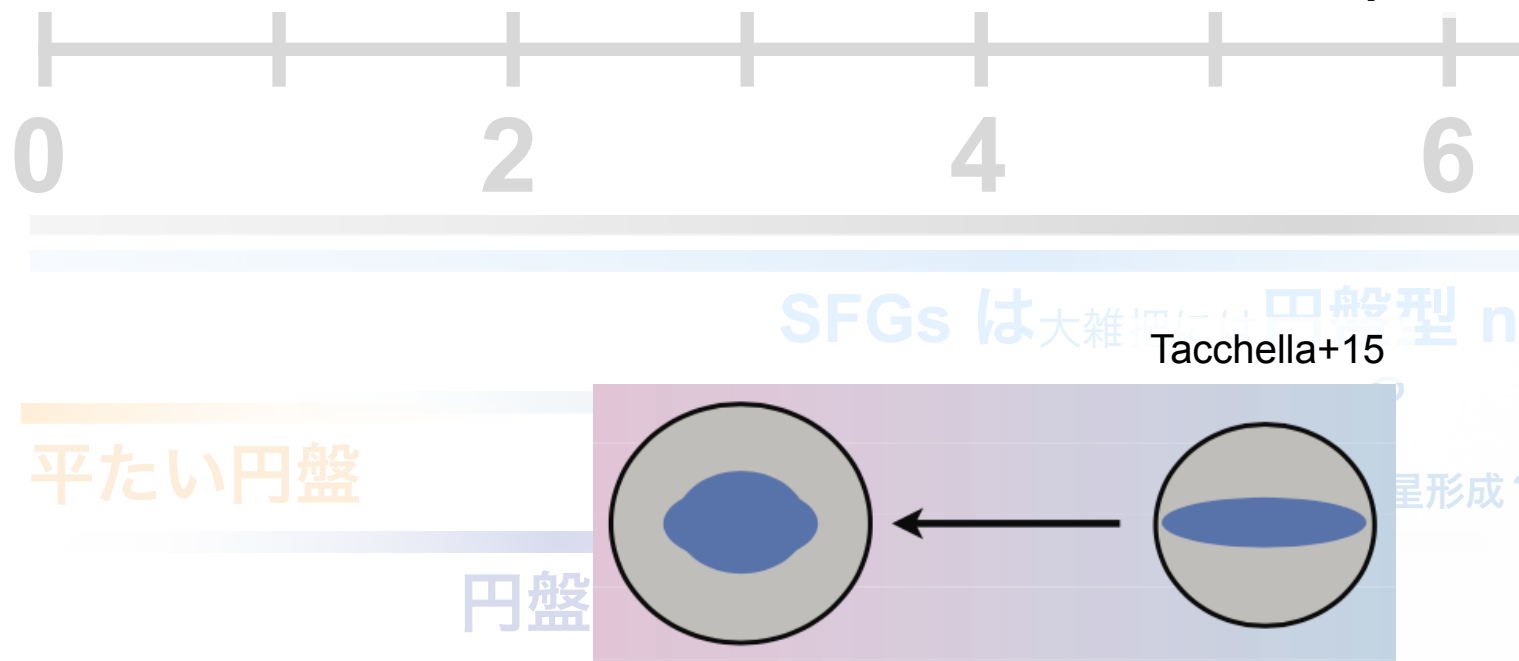


※ 質量に依存, 大まかな流れ

銀河形態進化の大枠

中心 1kpc の変化

赤方偏移 z
Zolotov+15



“(Wet) compaction” により中心密度が高くなる？

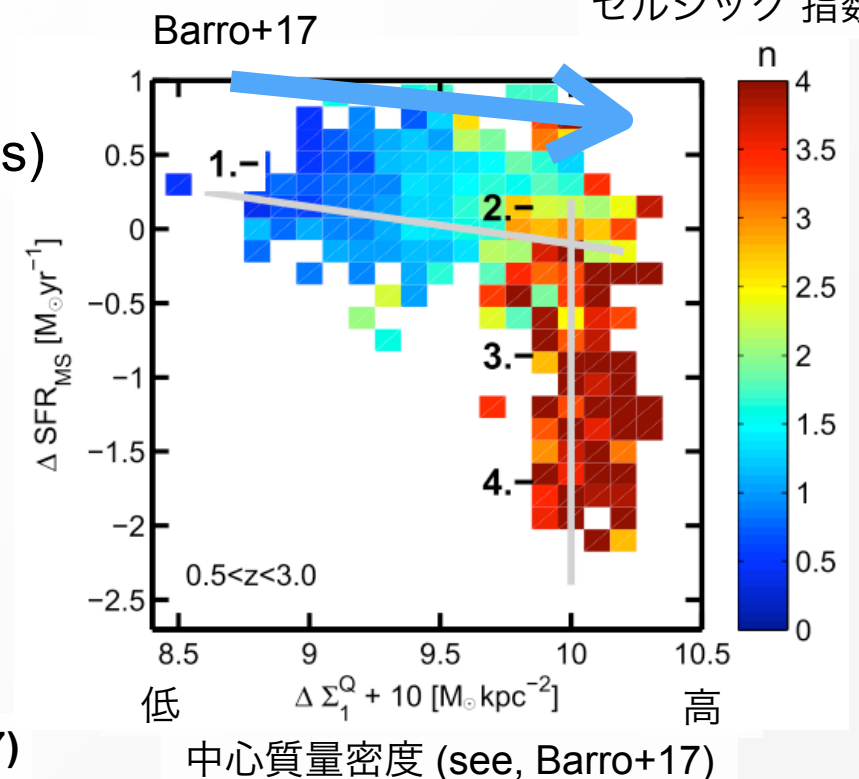
= 銀河中心への質量輸送

→ Blue nuggets

(compact SFGs/SMGs)

- ✓ 円盤不安定によるガス流入
- ✓ Counter-rotating streams
- ✓ Clump migration
- ✓ 銀河合体 など

セルシック 指数



“(Dry) compaction” も (see, e.g., Barro+17)

※ 質量に依存, 大まかな流れ

平たい円盤

円盤

中心の激しい星形成

星形成？

Merger による

QGs は

(Boxy/Disky)

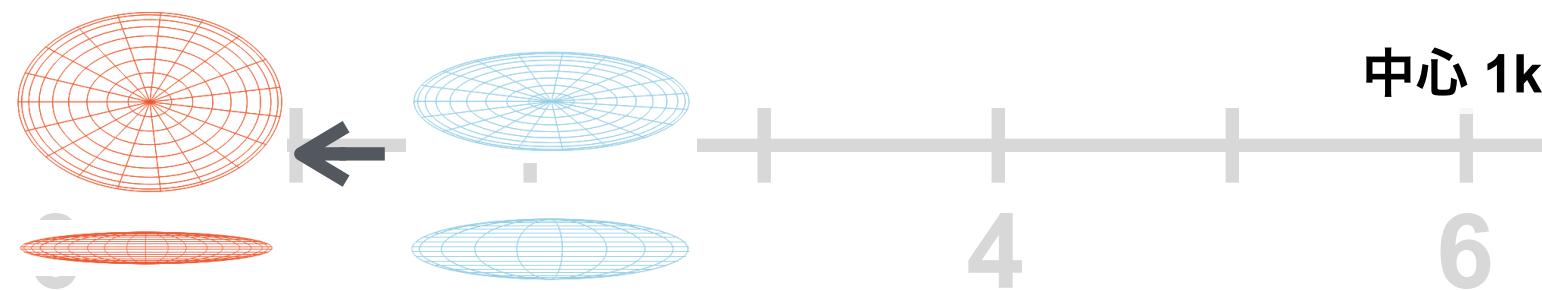
渦巻, 棒渦巻

ハッブルの形態分類

形態-密度関係

(Major) merger

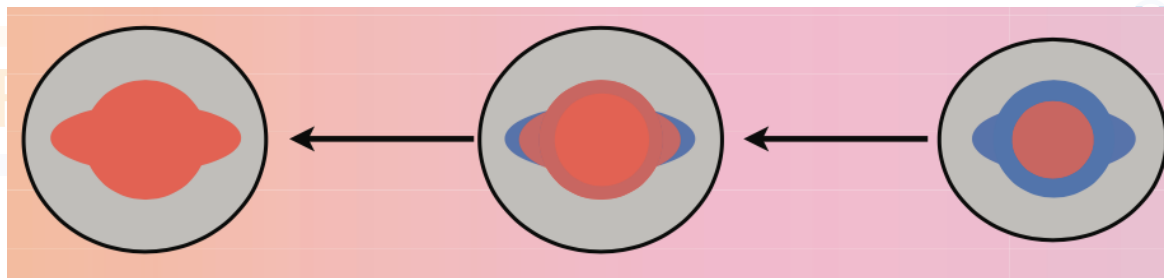
銀河形態進化の大枠



Compaction 後, 平べったい円盤へ?

SFGs は大雑把には円盤型 $n \sim 4$

Tacchella+15



中心の激しい星形成による ガスの枯渇,

AGN/SF feedback など

→ Quenching

→ Red nuggets proto-bulge?

Merger によるサイズ/質量進化?

QGs は (Boxy/Disk) $n \sim 4$

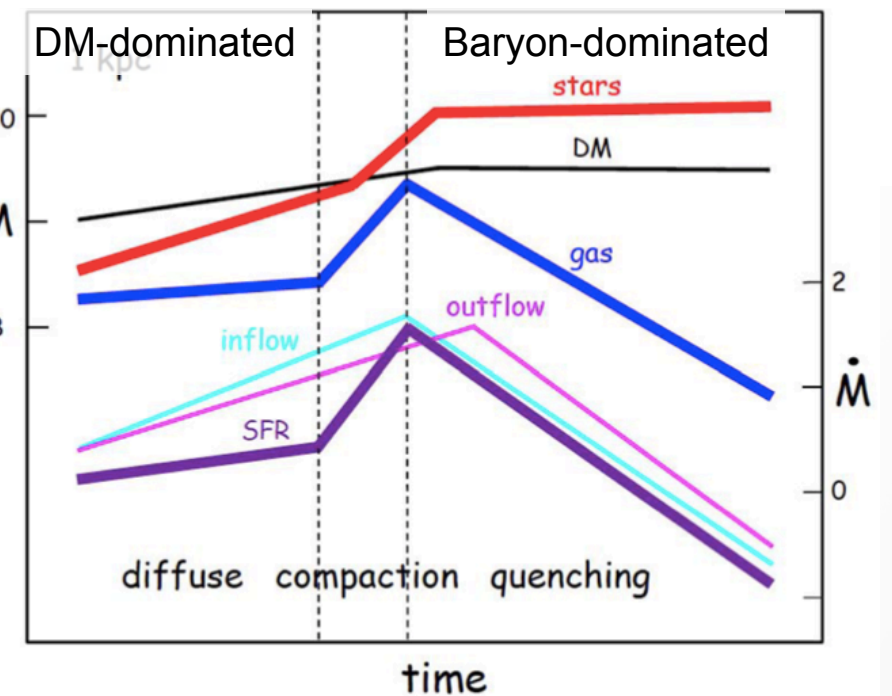
中心から徐々に Quenching

(Major) merger

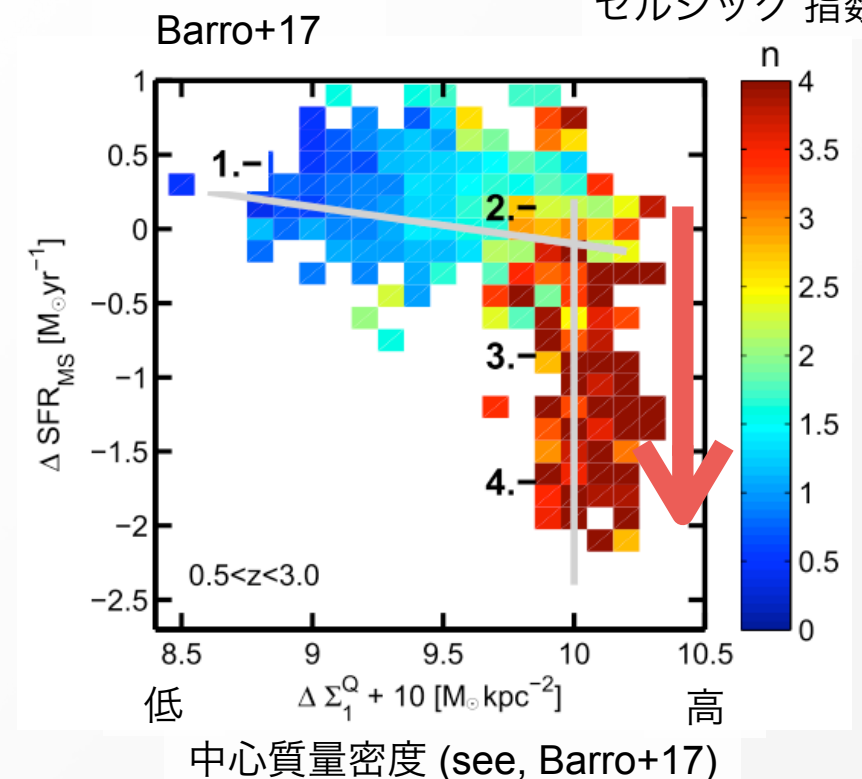
渦巻, 棒渦巻
ハッブルの形態分類

形態-密度関係

赤方偏移 z
Zolotov+15

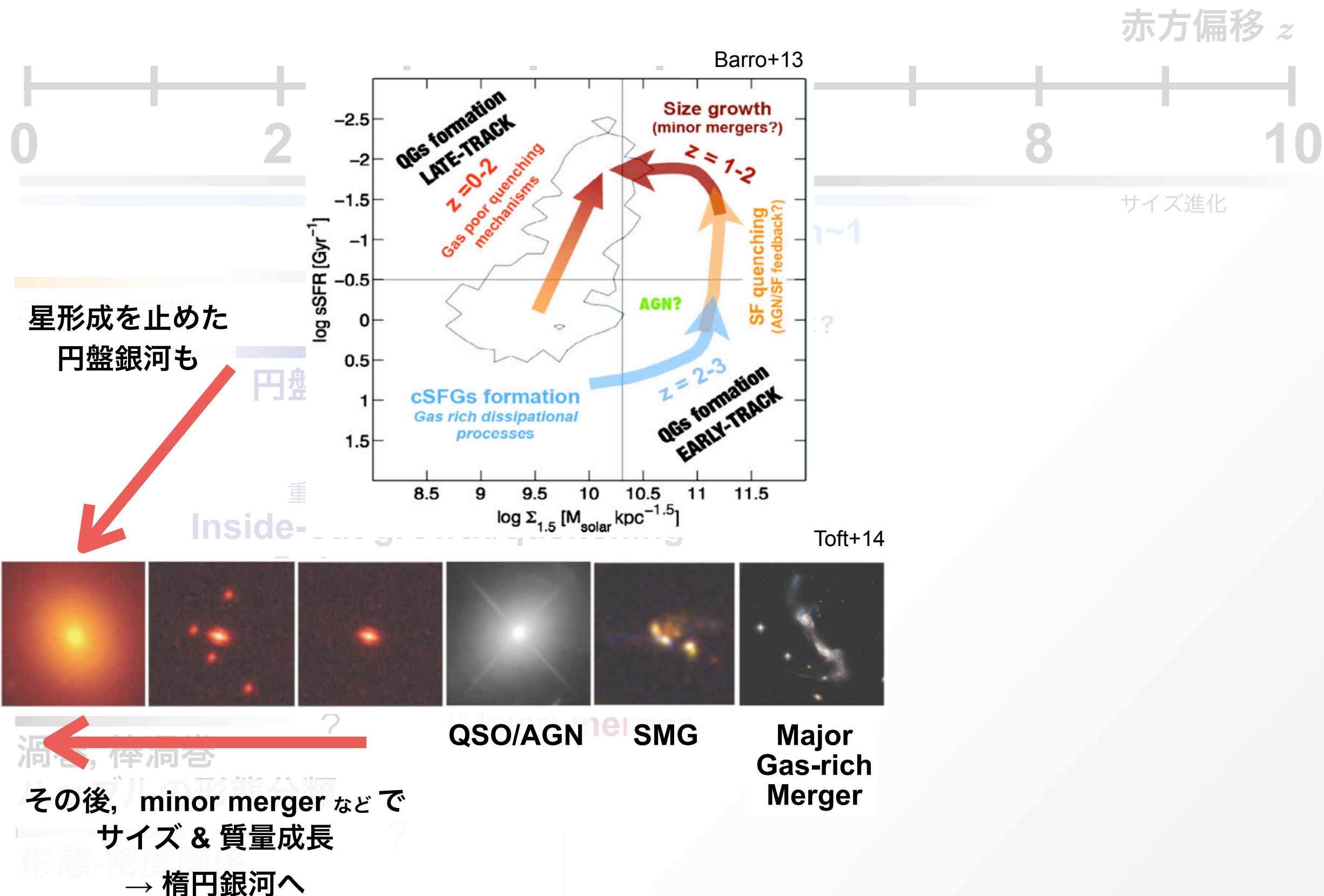


セルシック 指数



※ 質量に依存, 大まかな流れ

銀河形態進化の大枠



※ 質量に依存, 大まかな流れ

3. 未解決問題

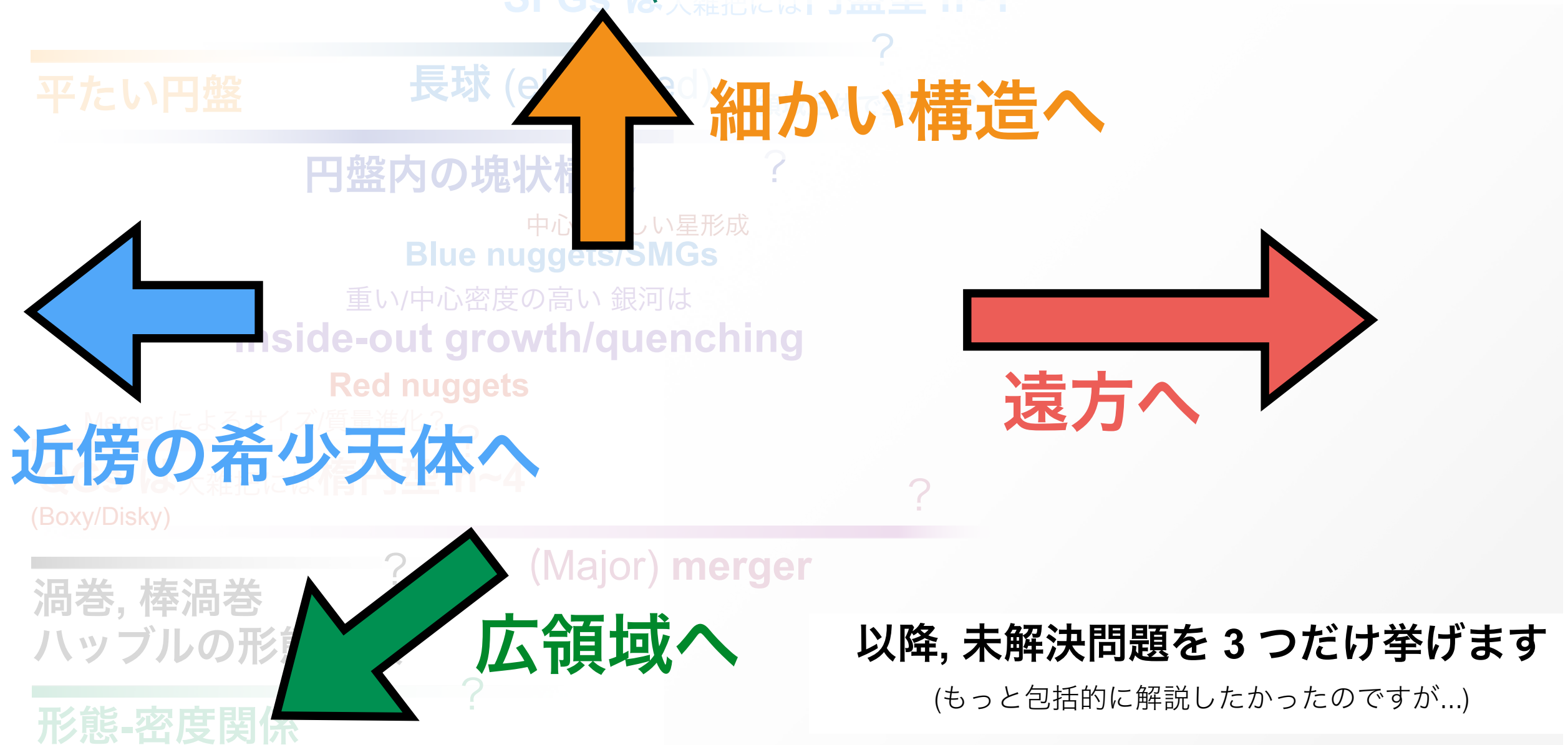
形態研究の方向性 (例)



※ 質量に依存, 大まかな流れ

形態研究の方向性 (例)

- ✓ 希少/遠方天体, 環境の研究は *Hubble* の視野で制限
- ✓ $z > 3-4$ の静止系可視光(星成分)の研究は殆ど無い
- ✓ $z > 7-8$, 暗く小さい → *Hubble* でも形態が不明
e.g., Sersic fit による測定 → n を固定



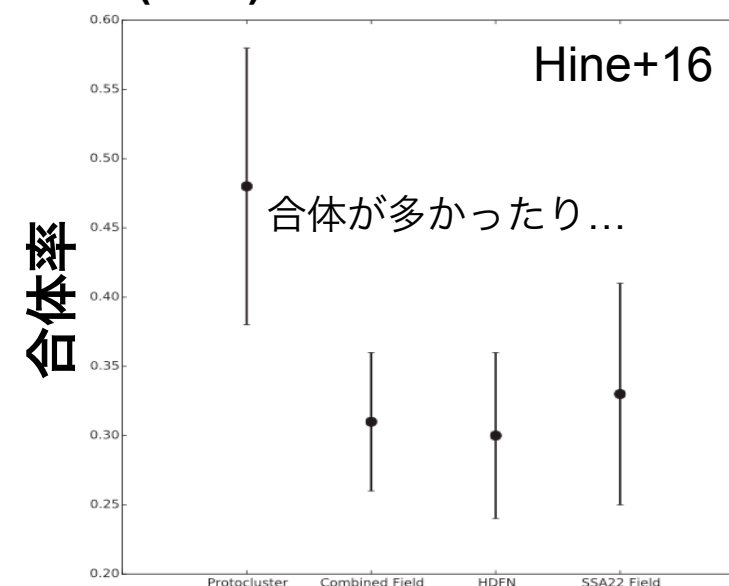
※複数の方向へ進むことも

例1) 銀河形態の環境依存性

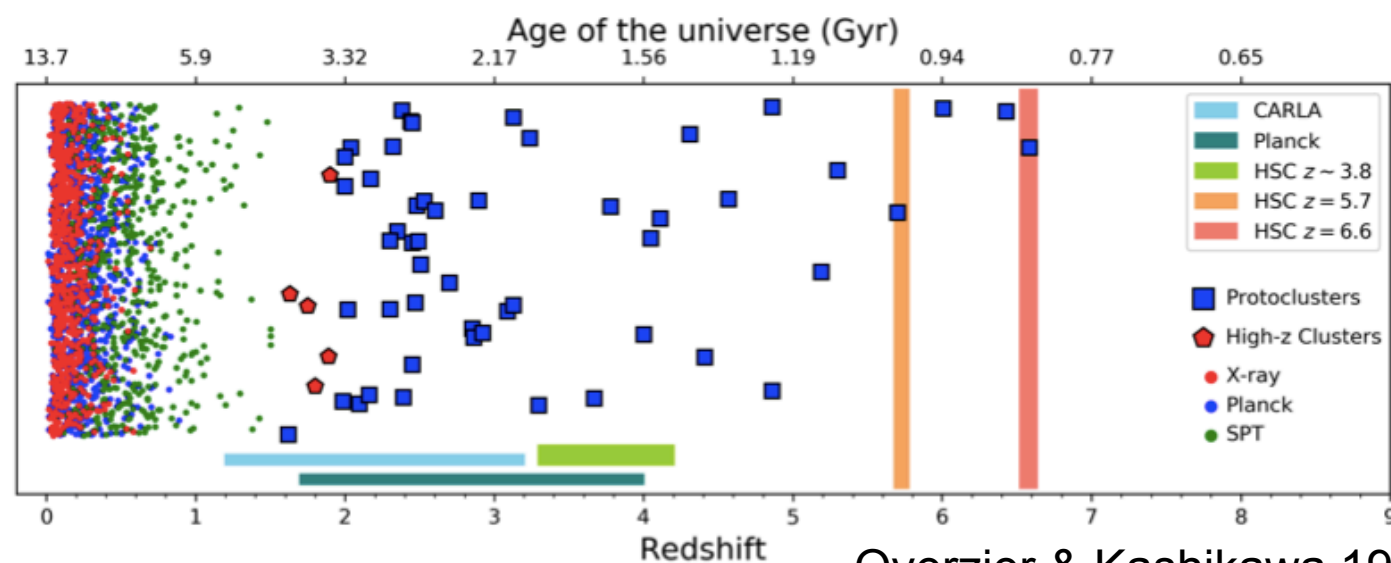
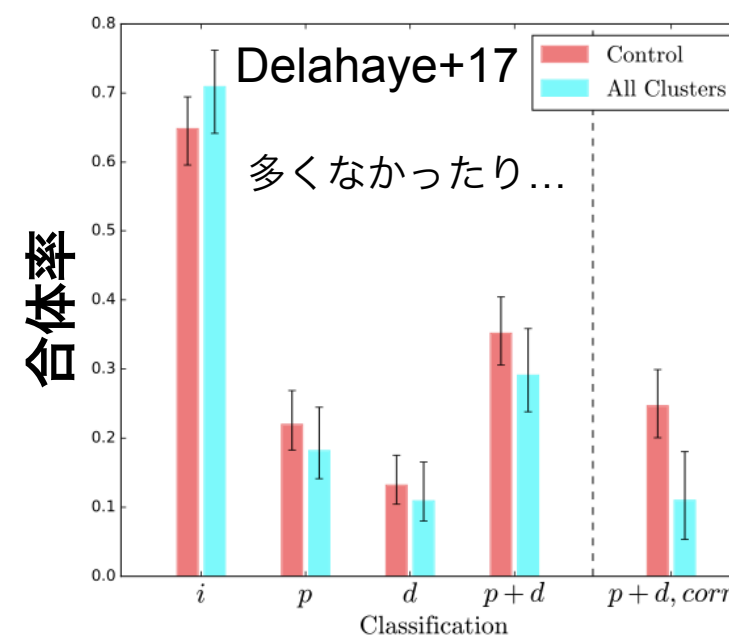
環境が銀河形態に与える影響は いつ, どのように？

「銀河 高密度環境下では銀河合体が形態に影響を及ぼす」と言うが...

(原始)銀河団の銀河合体率

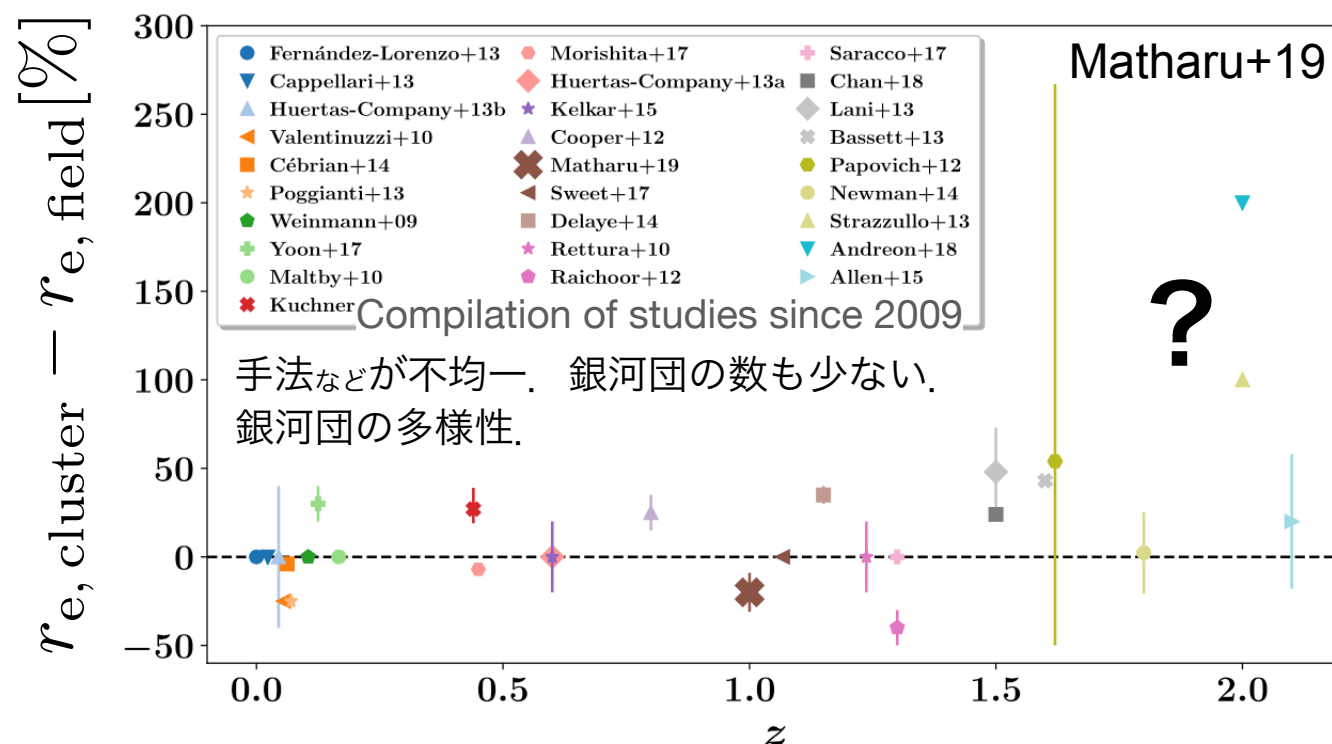


原始銀河団 一般領域



Overzier & Kashikawa 19

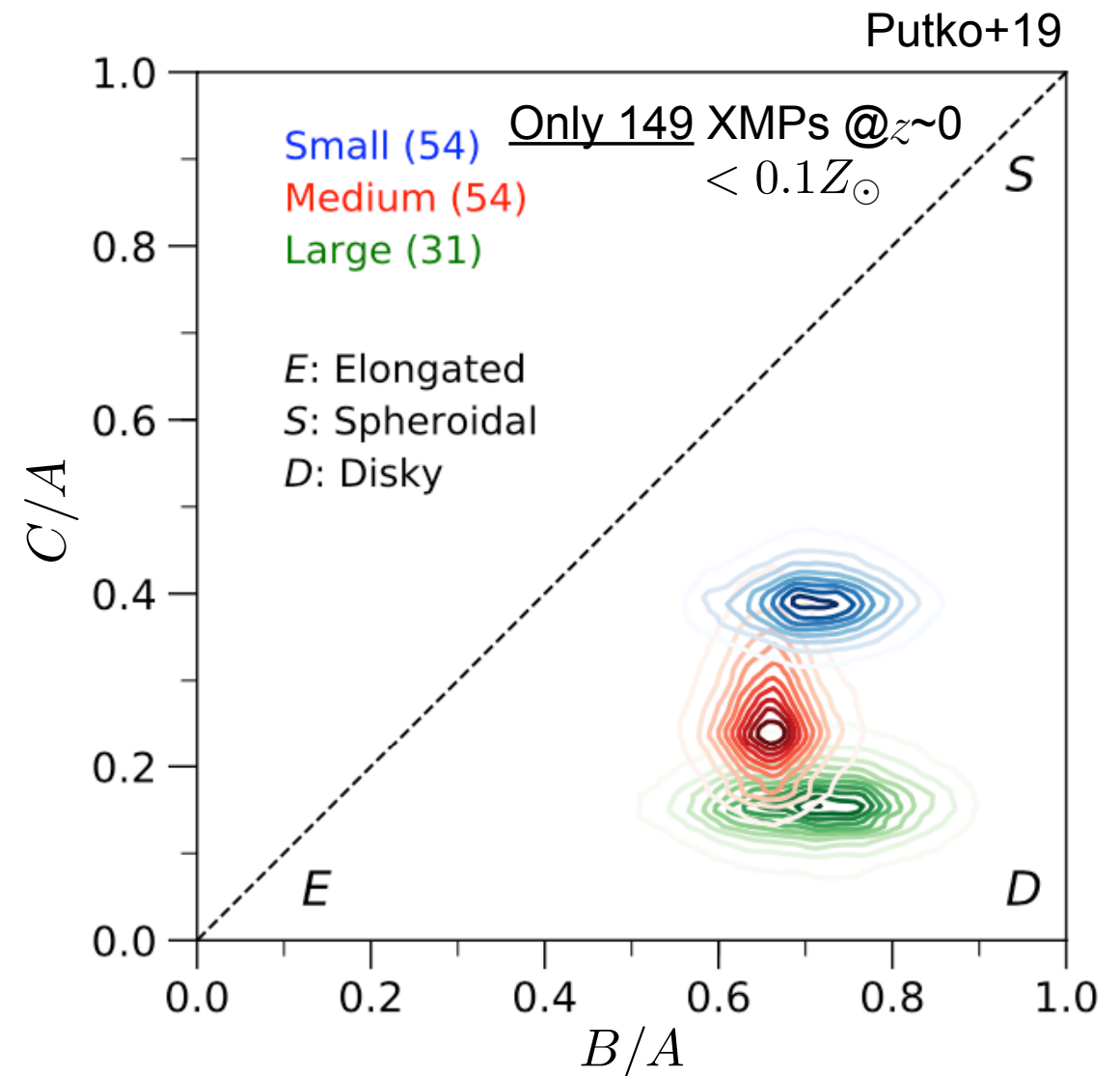
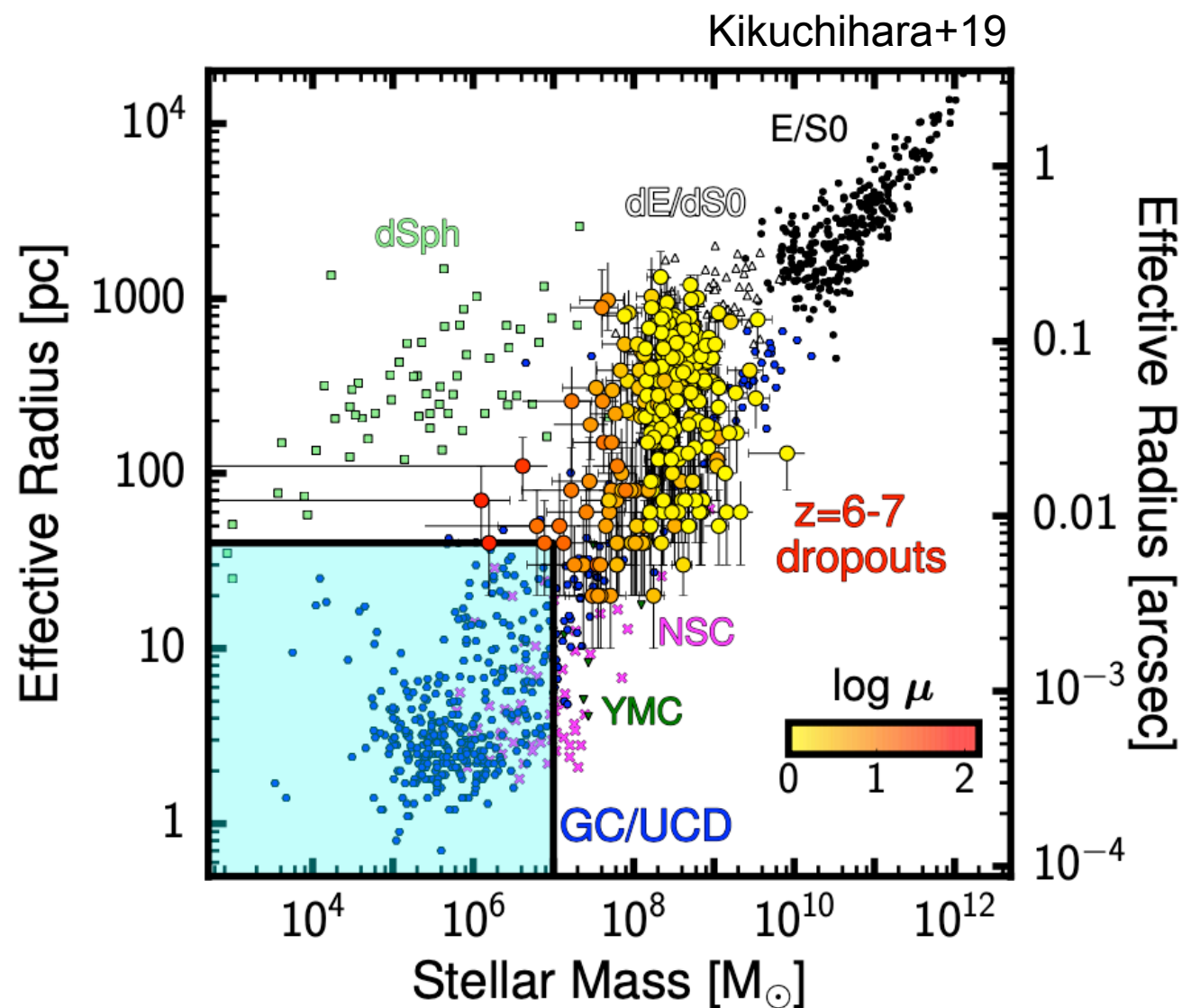
See also, Harikane+19



→ HSC, VRO, RST による統計的研究, 高速測定が鍵

銀河合体, ガス相互作用などによる
サイズ変化と関係

例2) 低質量/若い銀河の形態



✓ $z \sim 6-9$ で球状星団の質量/半径に近い“銀河”

→ 形態は？ 円盤型？ 楕円型？
より大きな銀河の一部？

→ 形成過程は？

✓ 低金属量の若い銀河の3次元形態

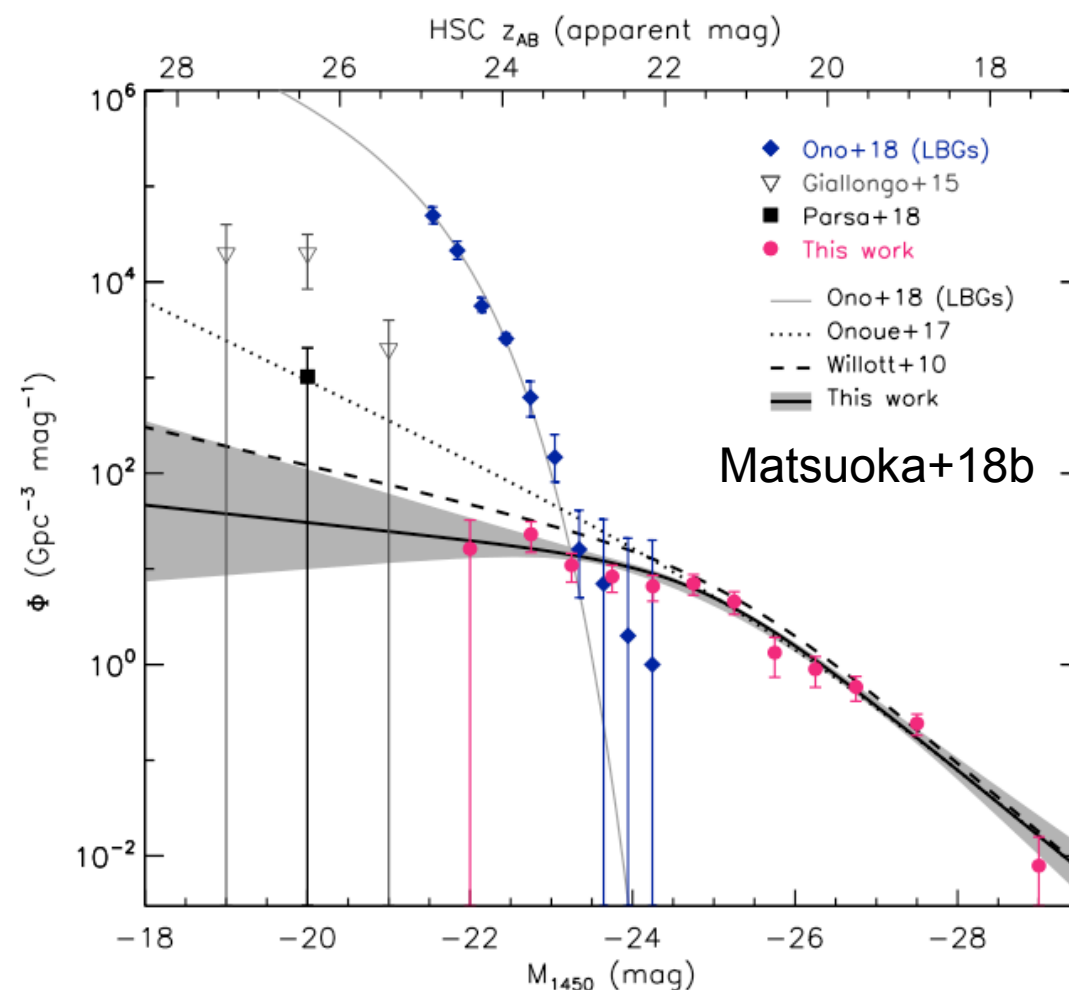
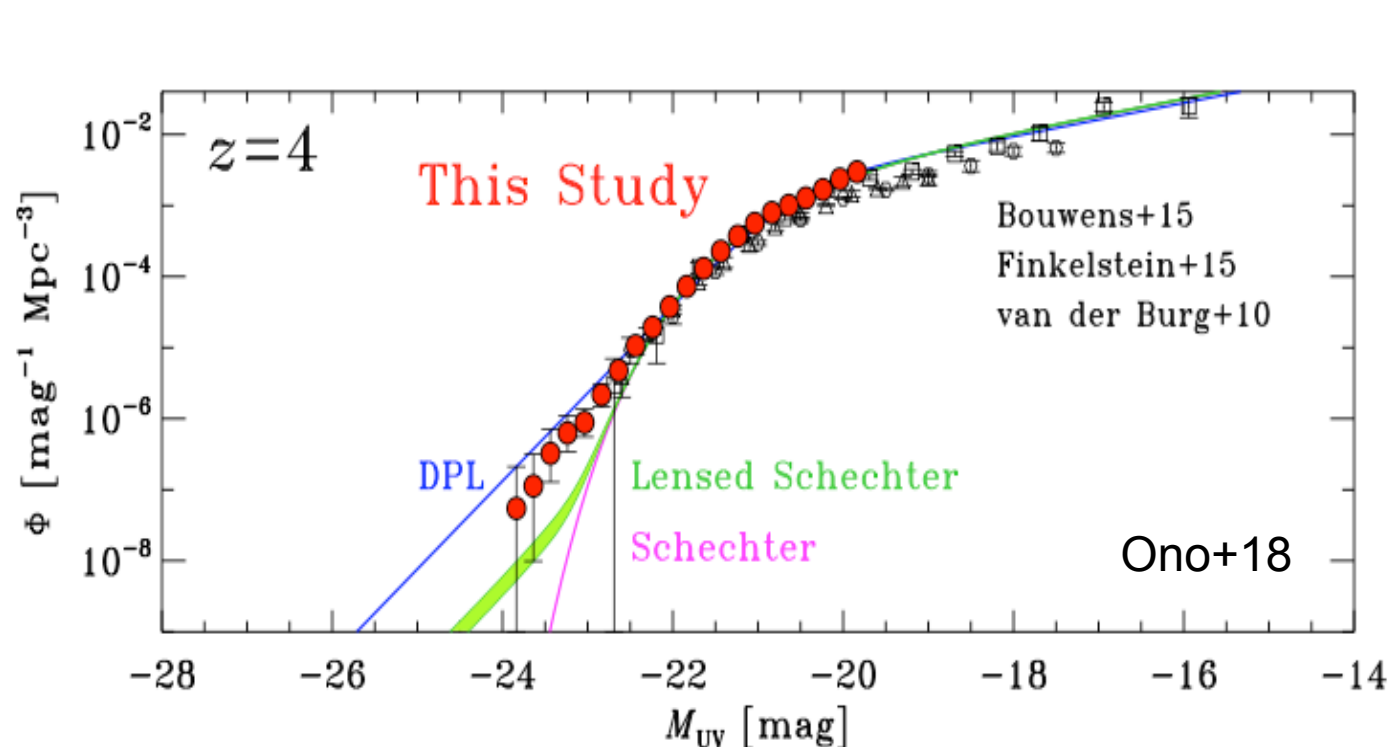
✓ ガス流入, feedback 過程などを反映か

✓ 形成初期の銀河の物理状態は？

See also, Isobe+20

→ JWST, ELTs, 画像高解像度化, 広領域探索との親和性

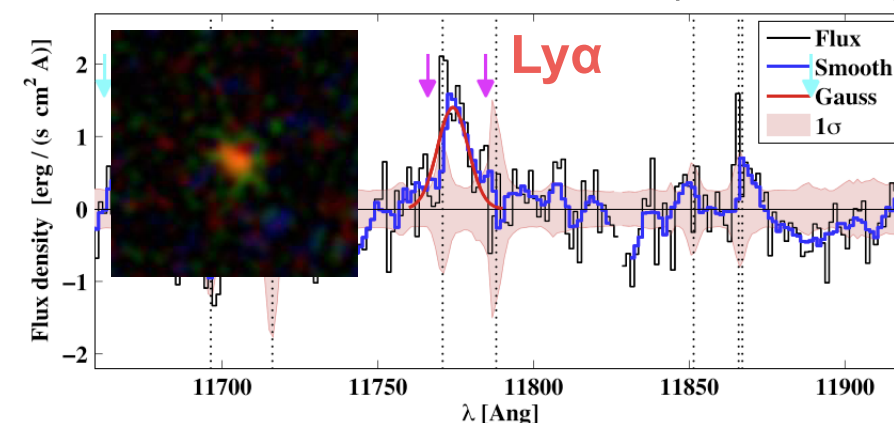
例3) High- z の明るい銀河の形態



UV, Ly α などで明るい銀河の形態は？
銀河合体による星形成の影響は？

- ✓ Power-law UV LFs は AGN feedback の低下？
- ✓ 低光度 QSOs の発現機構は？
- ✓ 再電離期の Ly α 輝線 (Large HII bubble or ...)
- ✓ Bright-Ly α /high- $EW_{Ly\alpha}$ LAEs, LABs (e.g., Ouchi+18) の形成過程は？

再電離期の銀河 $z = 8.68$ (Zitrin+15)



→ ALMA, RST, JWST, 画像高解像度化

その他

その他の未解決問題

(形態に関するもの)

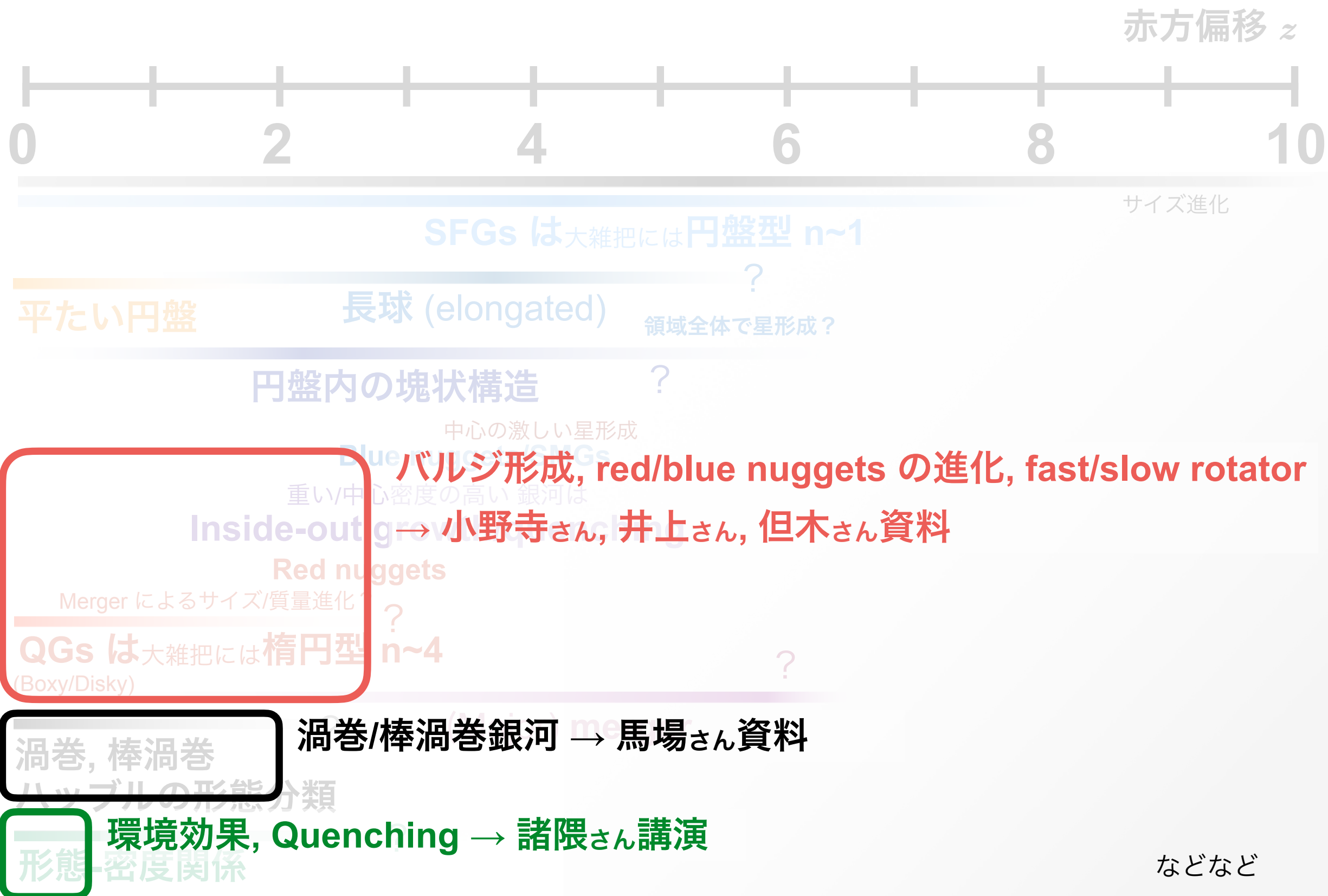
- ✓ バルジ・red/blue nuggets 形成/進化問題
- ✓ 塊状構造が中心に落ち込むか問題
- ✓ $z > 2$ 渦巻/棒渦巻銀河 (Law+12, Yuan+17)
- ✓ 極低輝度銀河の形成 (van Dokkum+15)
- ✓ 形態変化と post SB の関係
- ✓ $z > 4$ の静止可視光 形態
- ✓ $z > 6$ の disk thickness, radial growth
- ✓ Minor merger rate
- ✓ 中性水素ガス分布, 形態, LABs, LAHs
- ✓ その他, 理論研究との定量的比較

などなど

機械学習について

- ✓ 既に始まっている, 今後 必須の技術
- ✓ $z < 3$ の見た目の結果は 大きく変わっていなさそう
(これまでも目視, Galaxy Zoo で研究を行っていたため. 解釈は今後 変わるかも)
- ✓ Simulation + 観測 + 機械学習の研究は強力 → 現在 活発化

(詳しく)触れなかった話



まとめ

- ✓ 銀河形態は重要な観測量, 銀河形成/進化の物理過程を反映
- ✓ 数々の手法により $z \sim 0-10$ の形態進化の大枠が見えてきた
- ✓ 機械学習などの情報科学技術 + 広視野/高分解能装置
 - 省人化, 高速化, データ高品質化など
 - 今後, さらに形態研究が進展