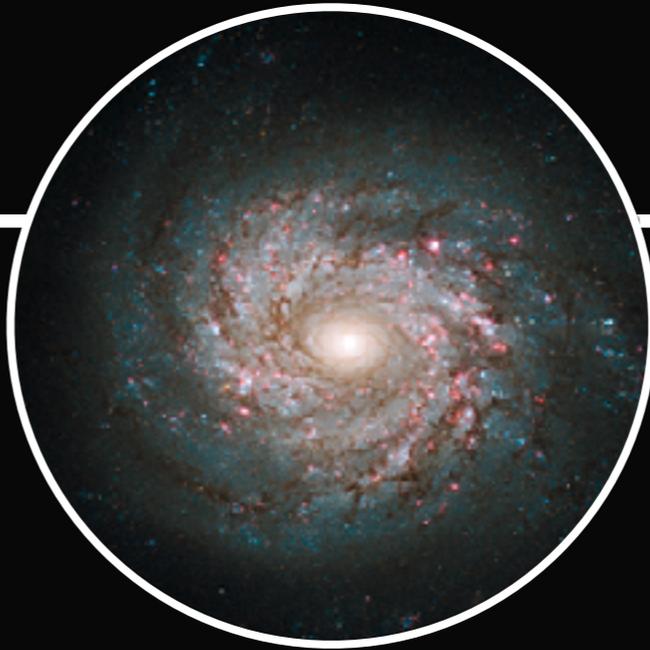


ハッブル系列の起源

但木謙一 (国立天文台)

1. 銀河の研究について
2. 海外での研究生生活について

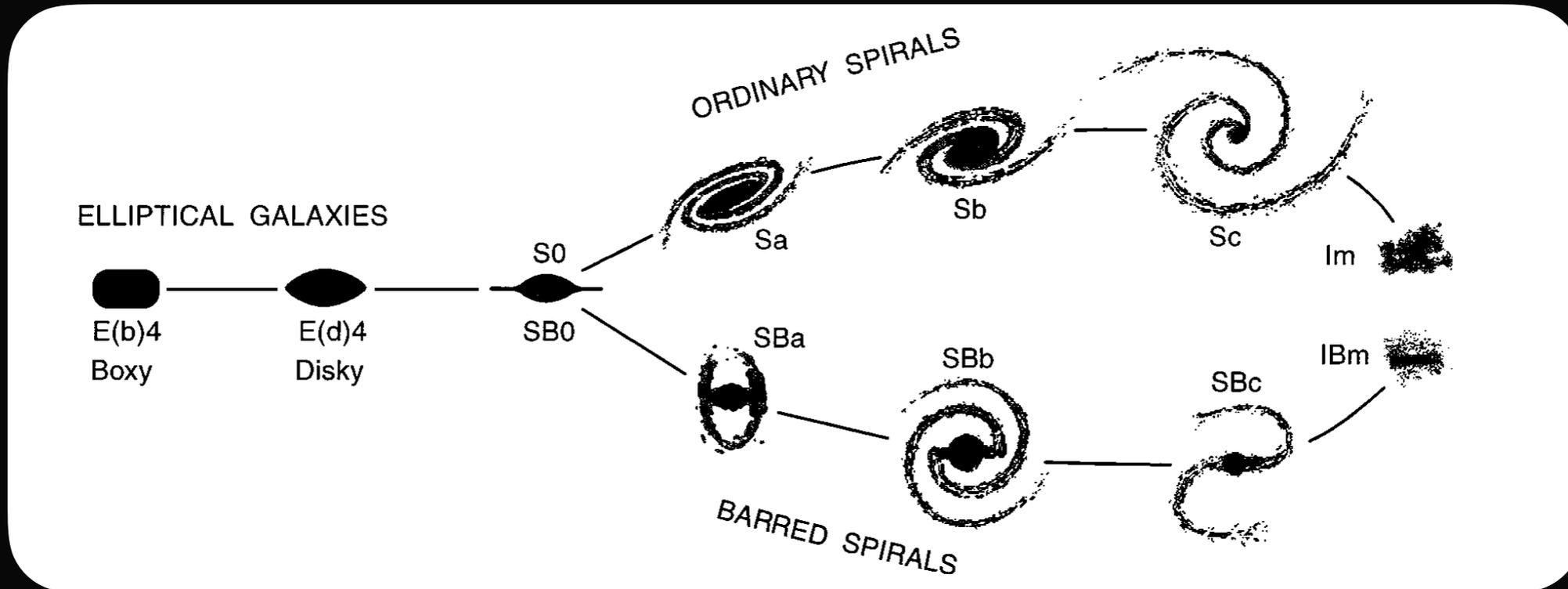
銀河の形態と星形成活動



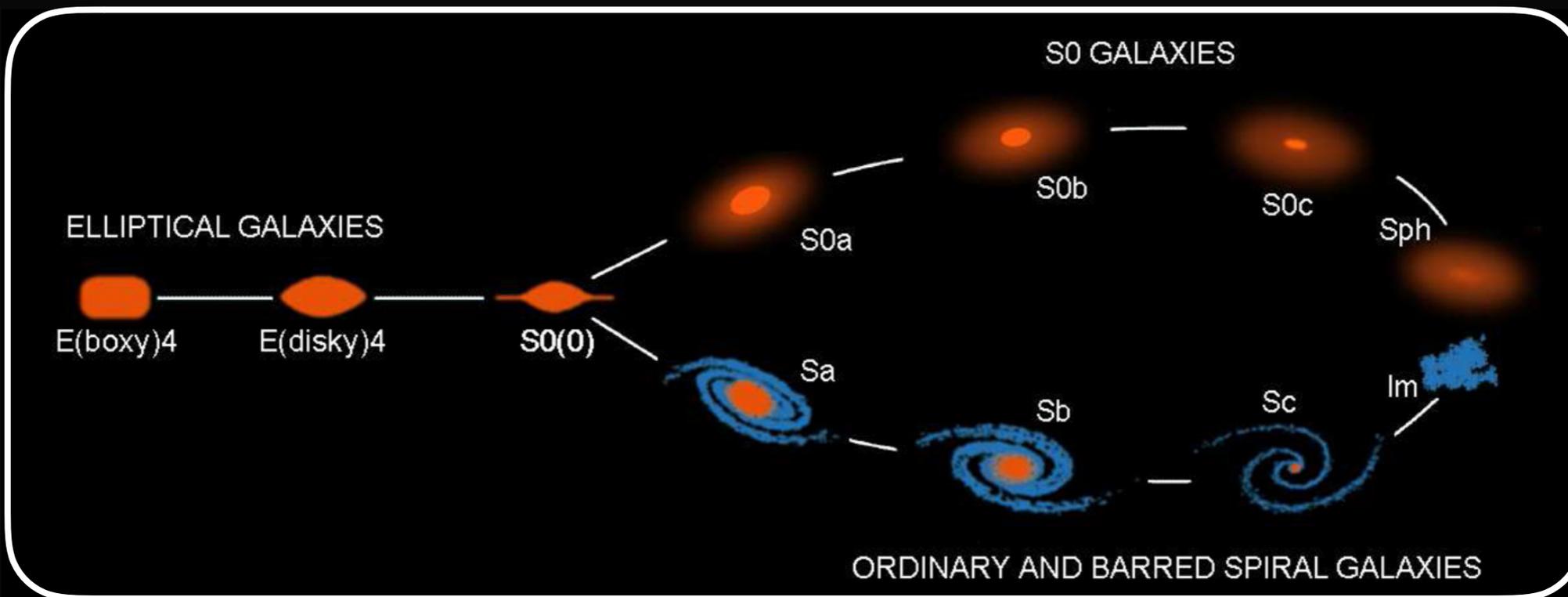
エドウィン・ハッブル

銀河形態の定量化

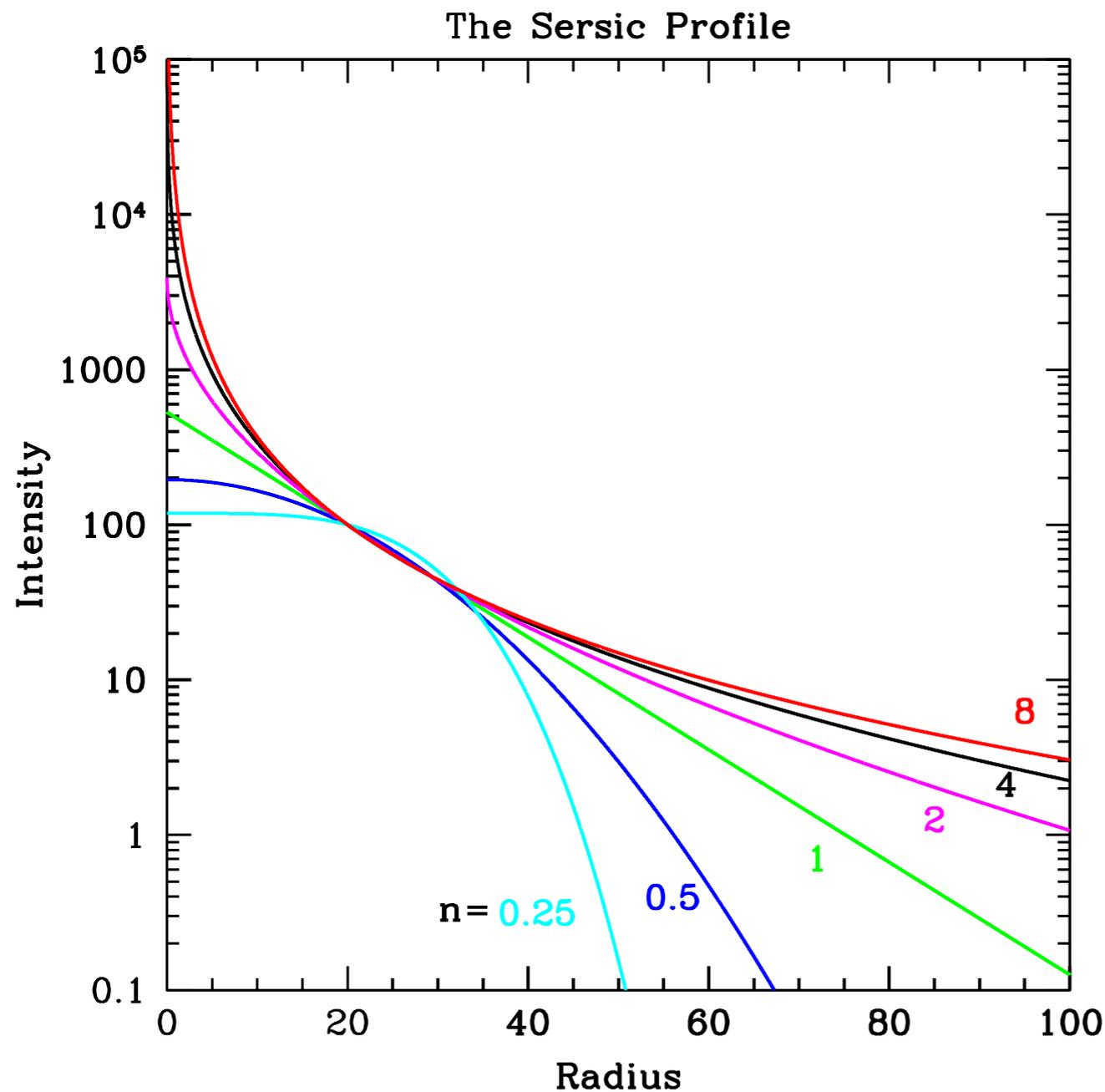
Kormendy & Bender 1996による銀河の形態分類



Kormendy & Bender 2012による銀河の形態分類



銀河形態の定量化



表面輝度プロファイル

$$\Sigma(r) = \Sigma_e \exp \left[-\kappa \left(\left(\frac{r}{r_e} \right)^{1/n} - 1 \right) \right]$$

n: セルシック指数

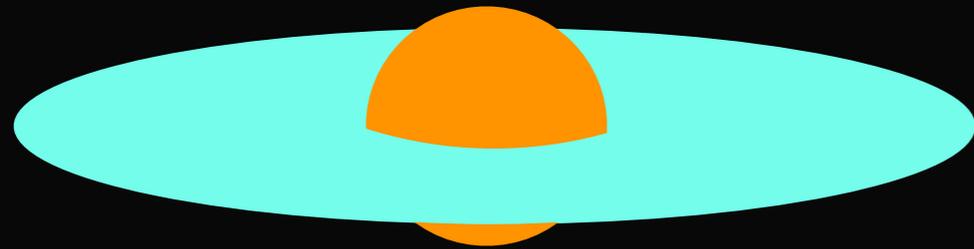
n=0.5 -> Gaussian

n=1 -> exponential

n=4 -> de Vaucouleurs (1/4乗則)

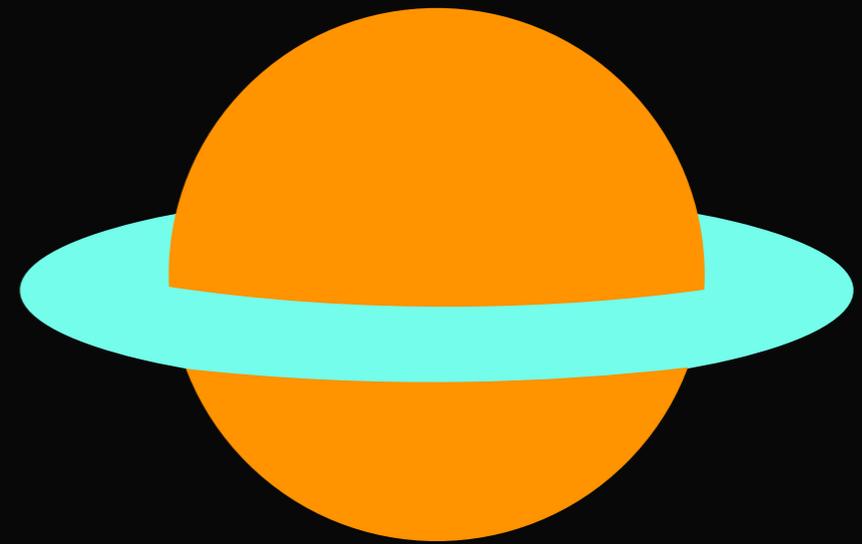
Re: 有効半径 (50%の光が入る半径)

銀河形態の定量化



円盤形 ($n < 2$)

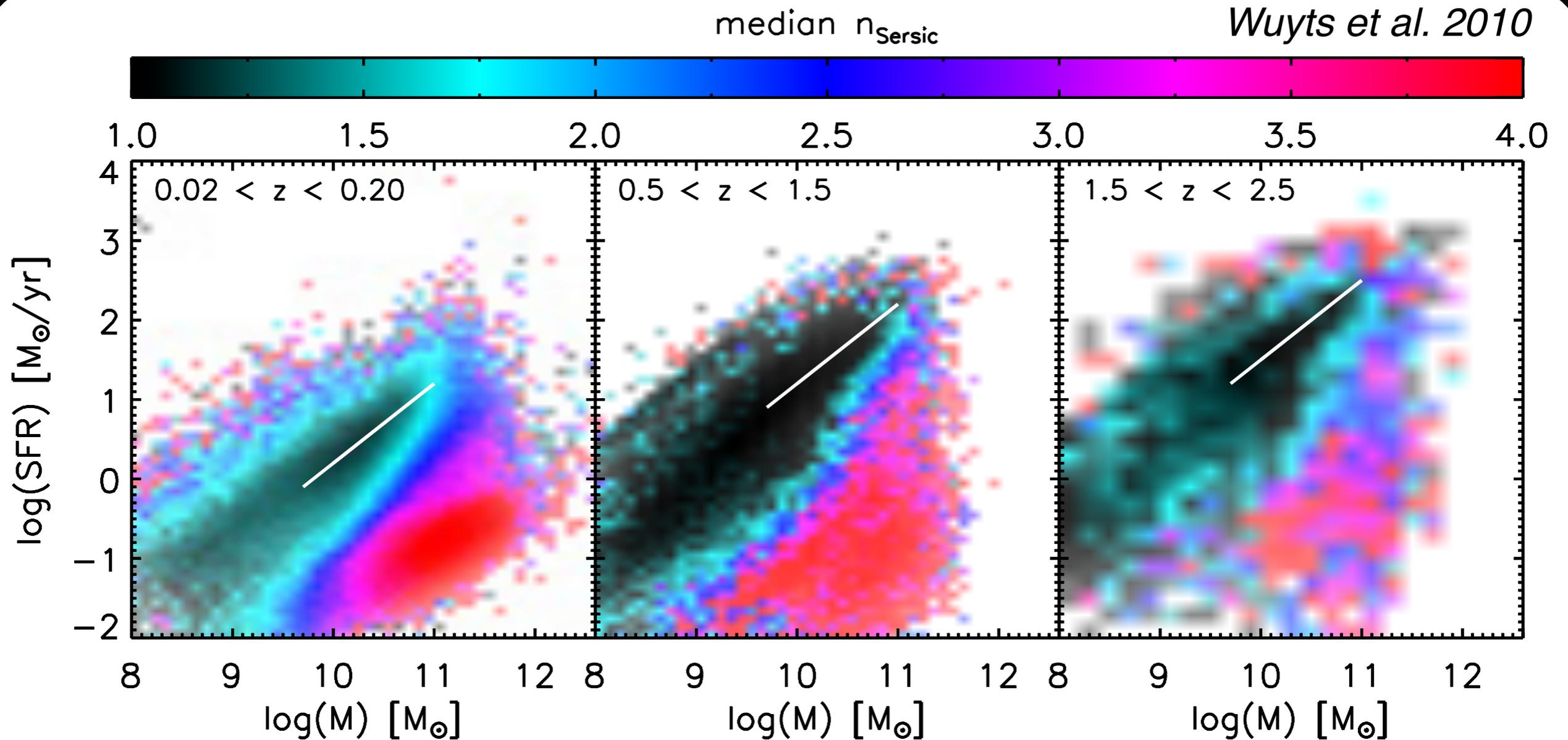
円盤が目立つ



楕円形 ($n > 2$)

中心部の膨らみが目立つ

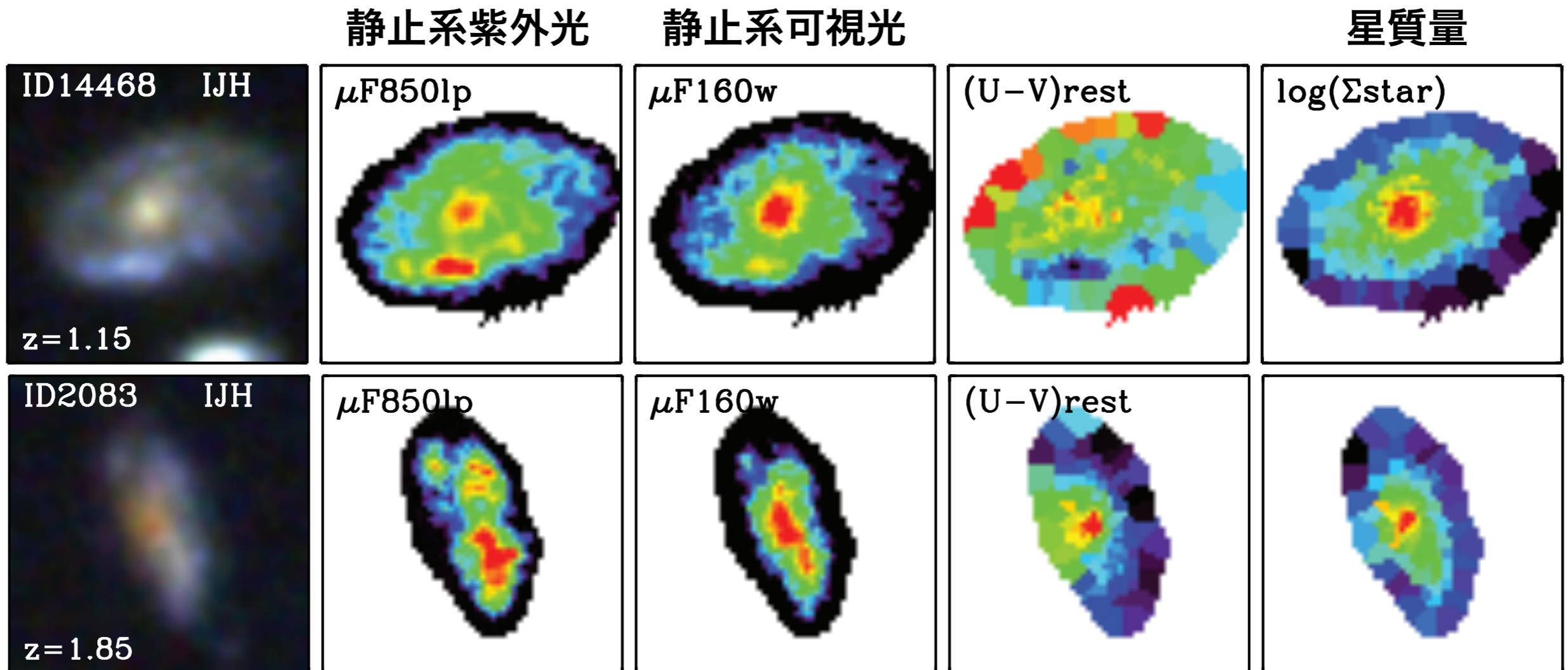
銀河の形態と星形成活動



- ▶ 星形成銀河は円盤形 ($n \sim 1$)
- ▶ 星形成を止めた銀河は楕円形 ($n \sim 4$)
- ▶ 120億年前 ($z=2.5$) にすでにこの関係が成立

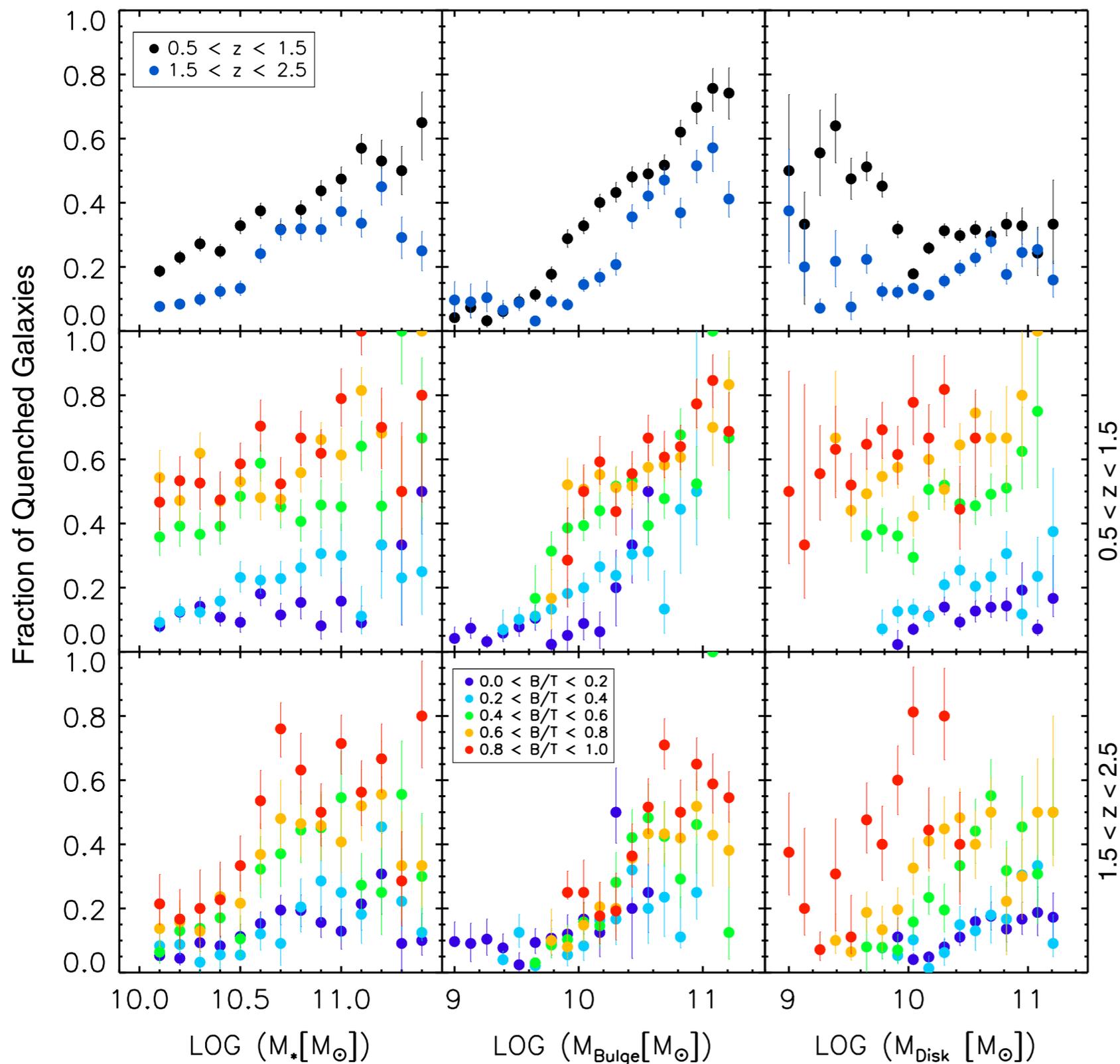
質量-光度比の影響

Wuyts et al. 2010



観測された画像がクランピーな構造でも、
星質量の空間分布はスムーズな円盤である

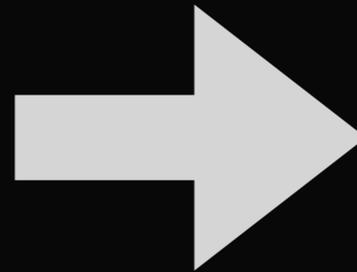
銀河の形態と星形成活動



バルジ質量と
星形成活動に
強い相関がある

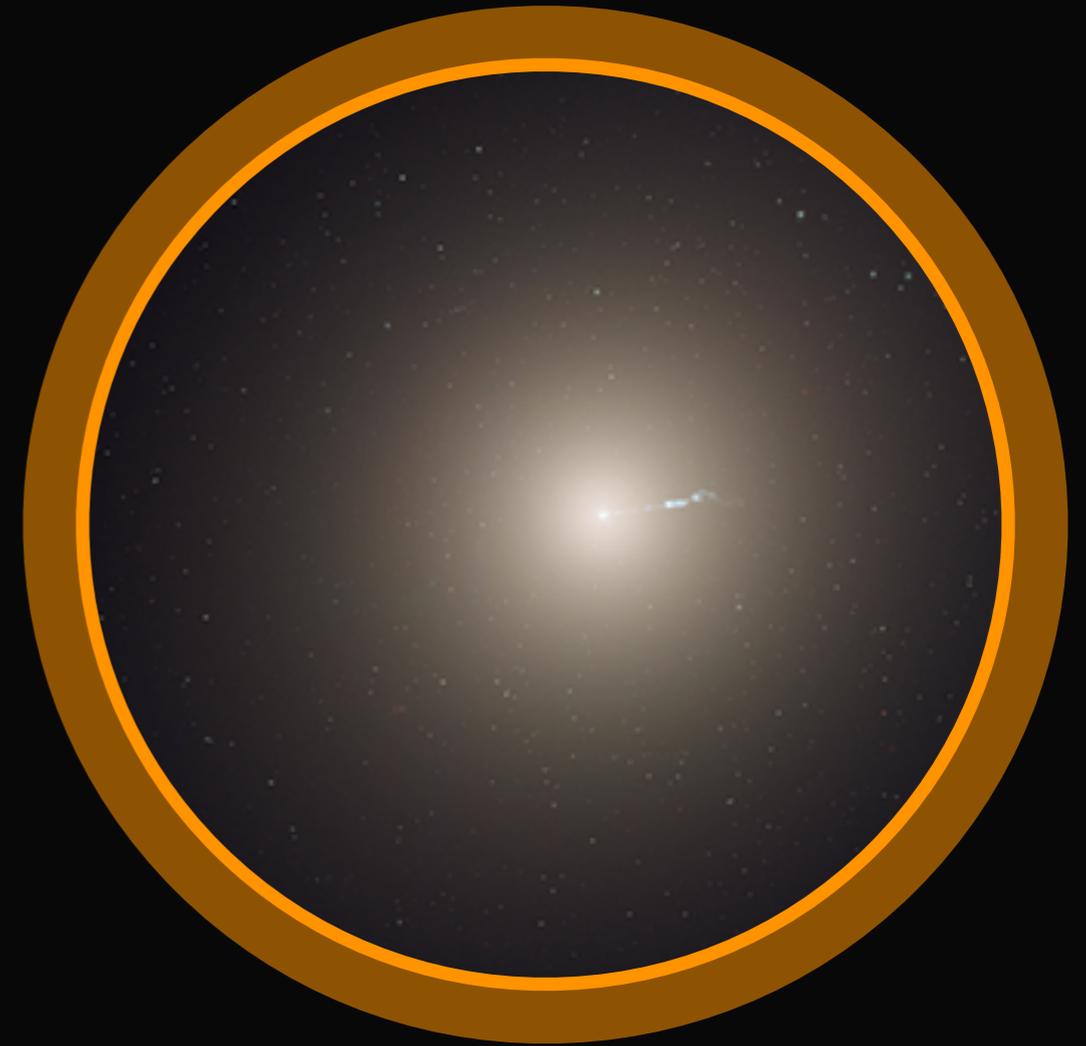
Lang et al. 2014

昔の円盤形銀河
(イメージ図)



進化

現在の楕円形銀河



円盤形

形態

楕円形

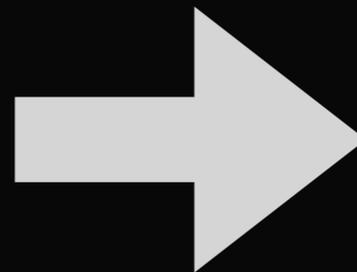
活発

星作り

終わった

昔の円盤形銀河

(イメージ図)



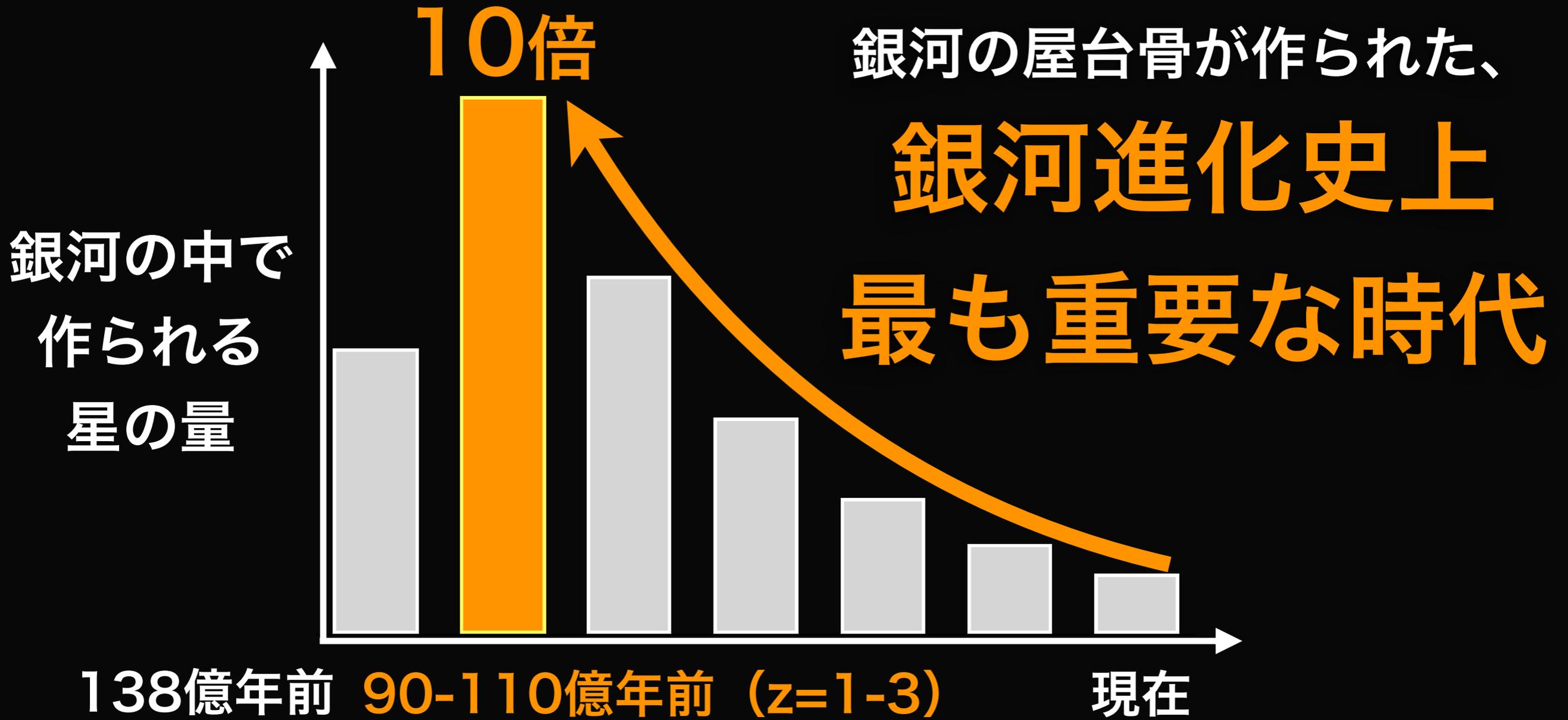
進化

現在の楕円形銀河



形態の変化、星形成活動の停止は
ほぼ同時期に起きたと考えられる
一方で相関関係＝因果関係とは限らない

いつ銀河の形態が形作られたのか？

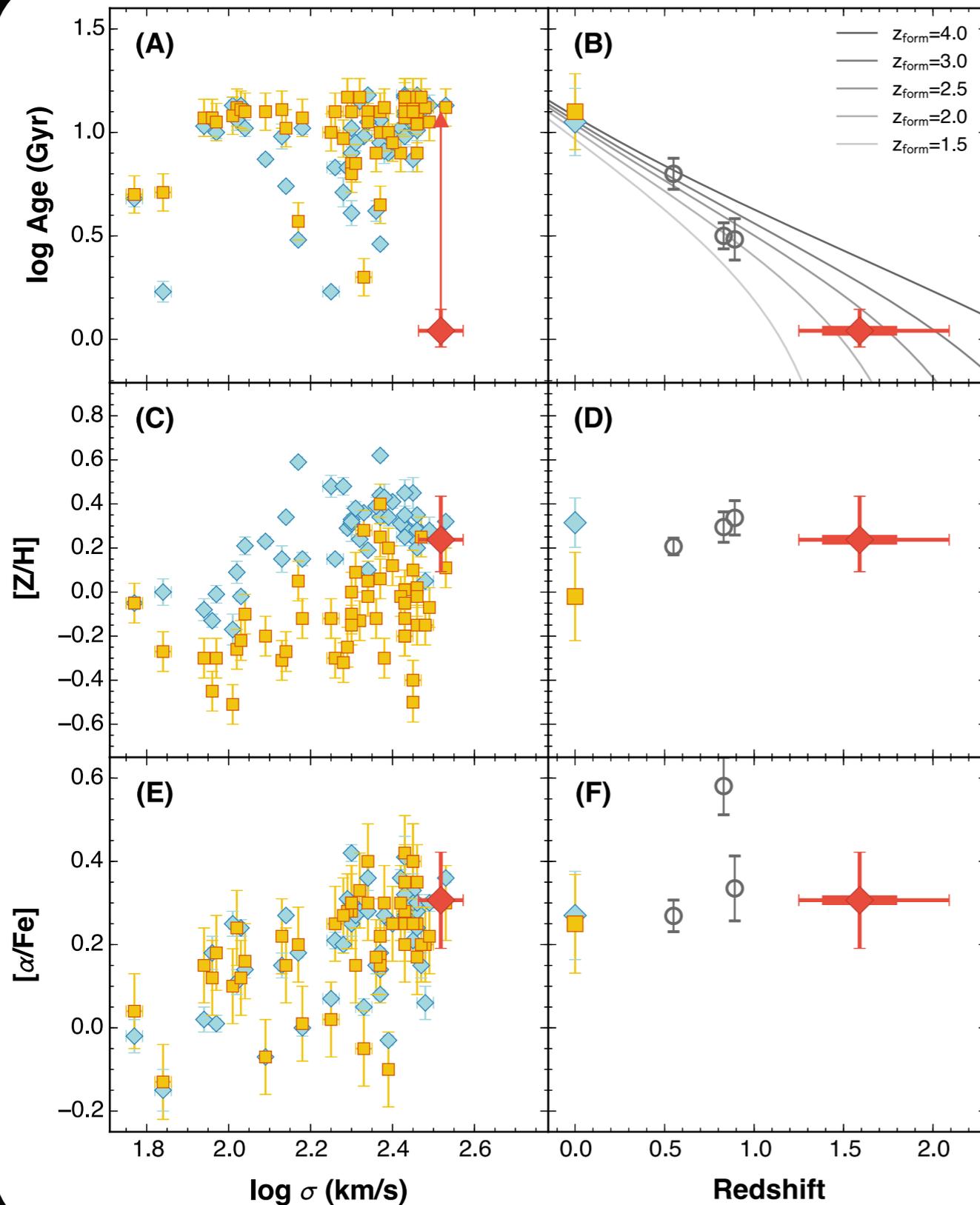


(宇宙誕生)



人間でいう成長期に相当

いつ銀河の形態が形作られたのか？



星形成を止めた銀河の観測

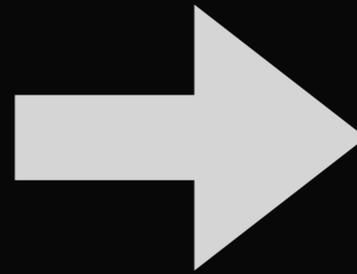
(Onodera+14)

- ▶ 星形成を止めたのは $z=2-2.5$ 頃
- ▶ 星形成のタイムスケールは <1 Gyr
- ▶ あくまで巨大銀河の場合

夏の学校2016 招待講演

(<http://astro-wakate.sakura.ne.jp/ss2015/web/file/torape/shohtai/onodera.pdf>)

昔の円盤形銀河
(イメージ図)



進化

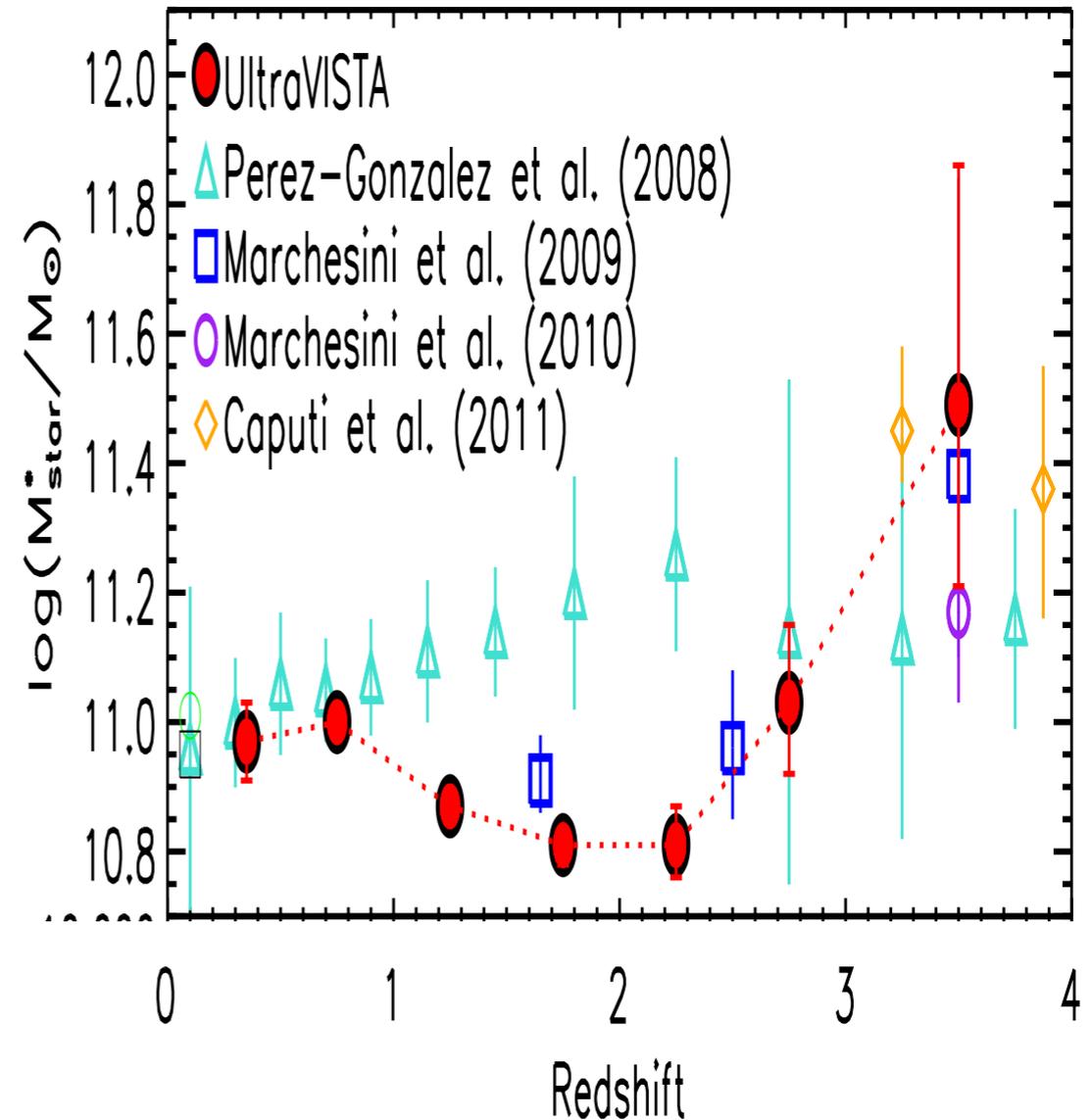
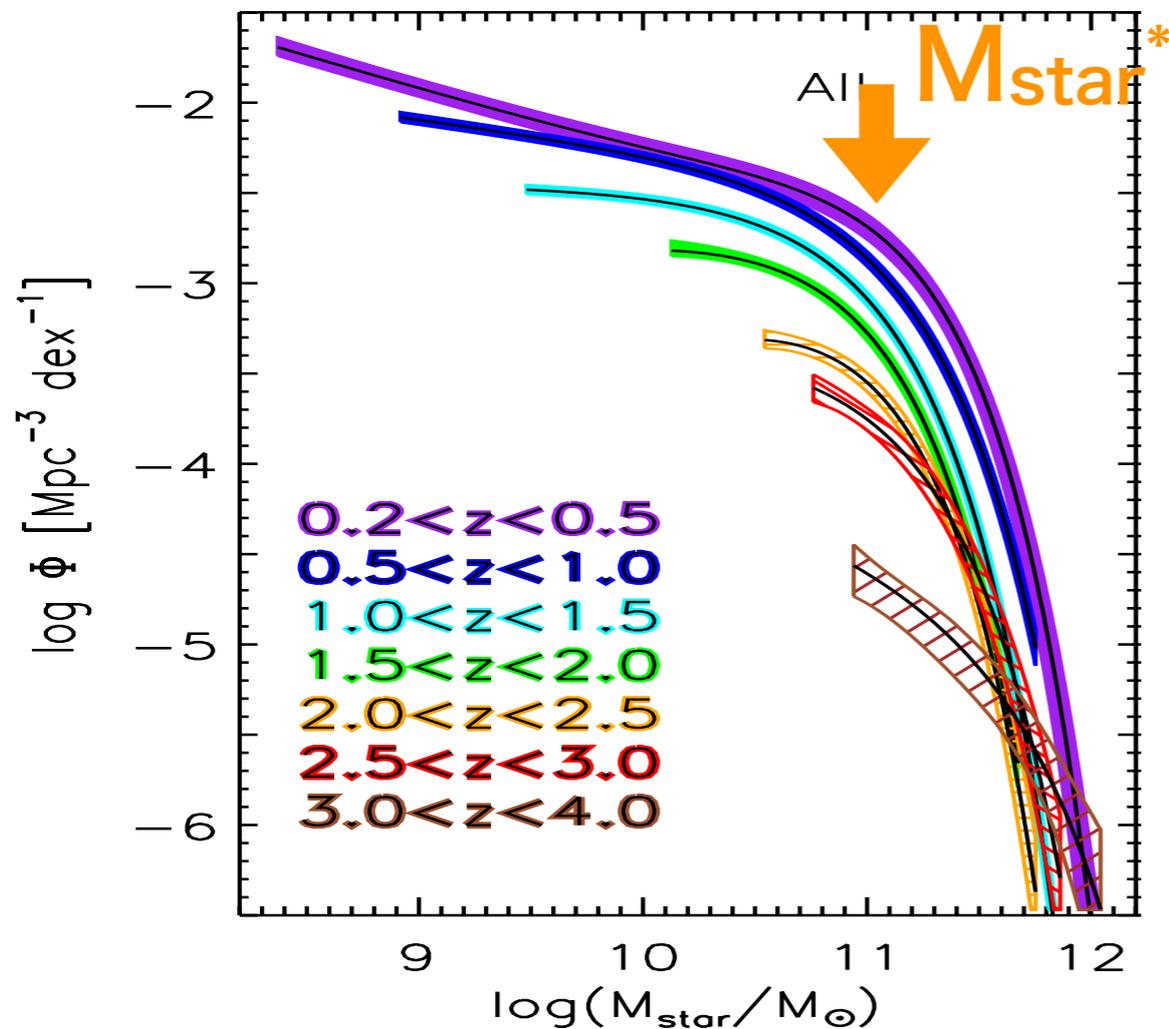
現在の楕円形銀河



形態の変化、星形成活動の停止は
 $z \sim 2$ の時代に
ほぼ同時に起きたと考えられる

いつ銀河の星形成が止まったのか？

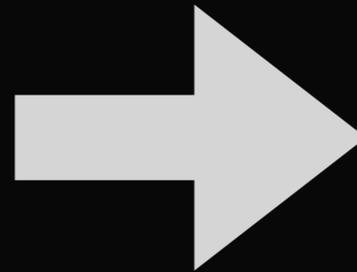
銀河の星質量関数の赤方偏移進化 (Muzzin+13)



- ▶ 銀河は無限大に成長していない
- ▶ $M_{\text{star}} \sim 10^{11} M_{\text{solar}}$ になると、成長が止まる
- ▶ 単純に Λ CDMモデルでは説明できない

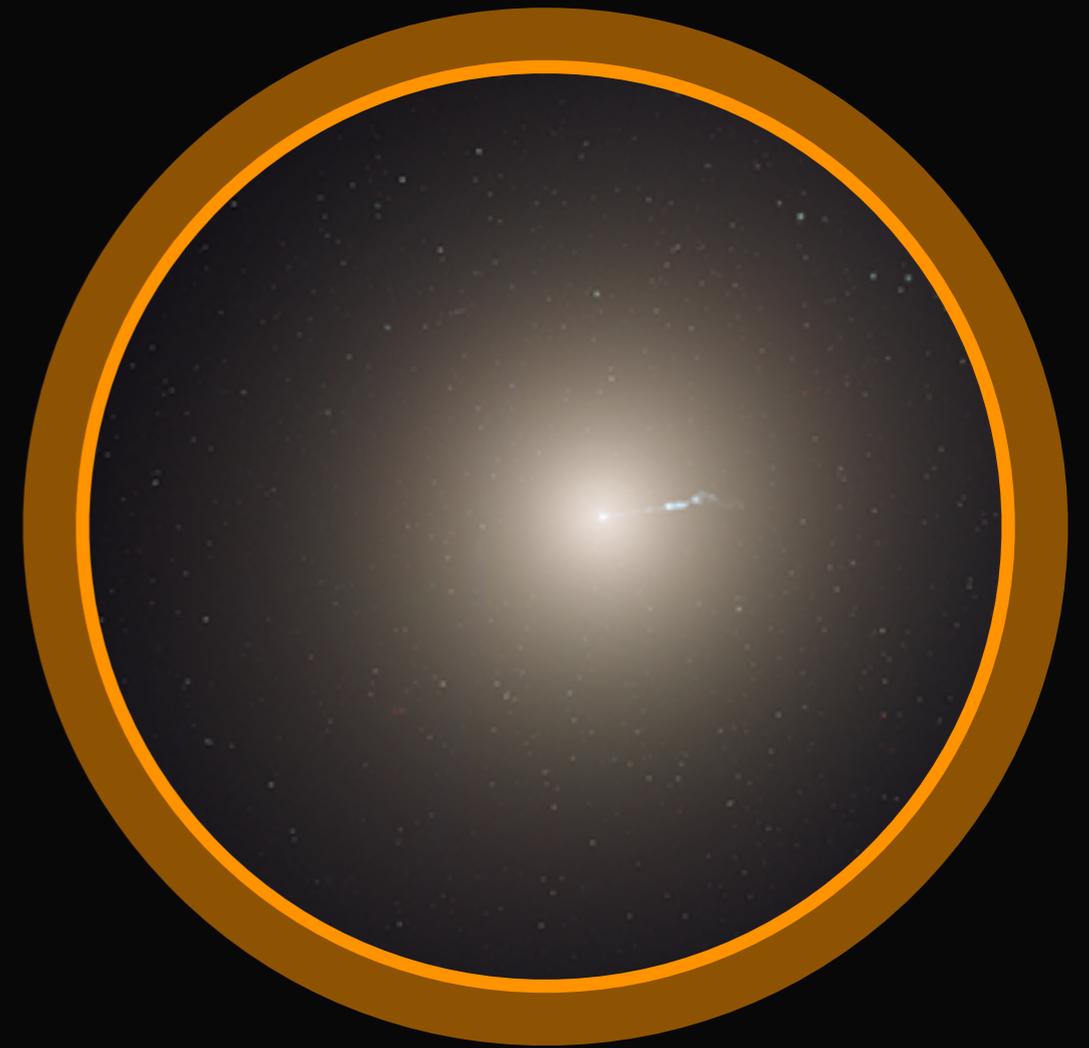
昔の円盤形銀河

(イメージ図)



進化

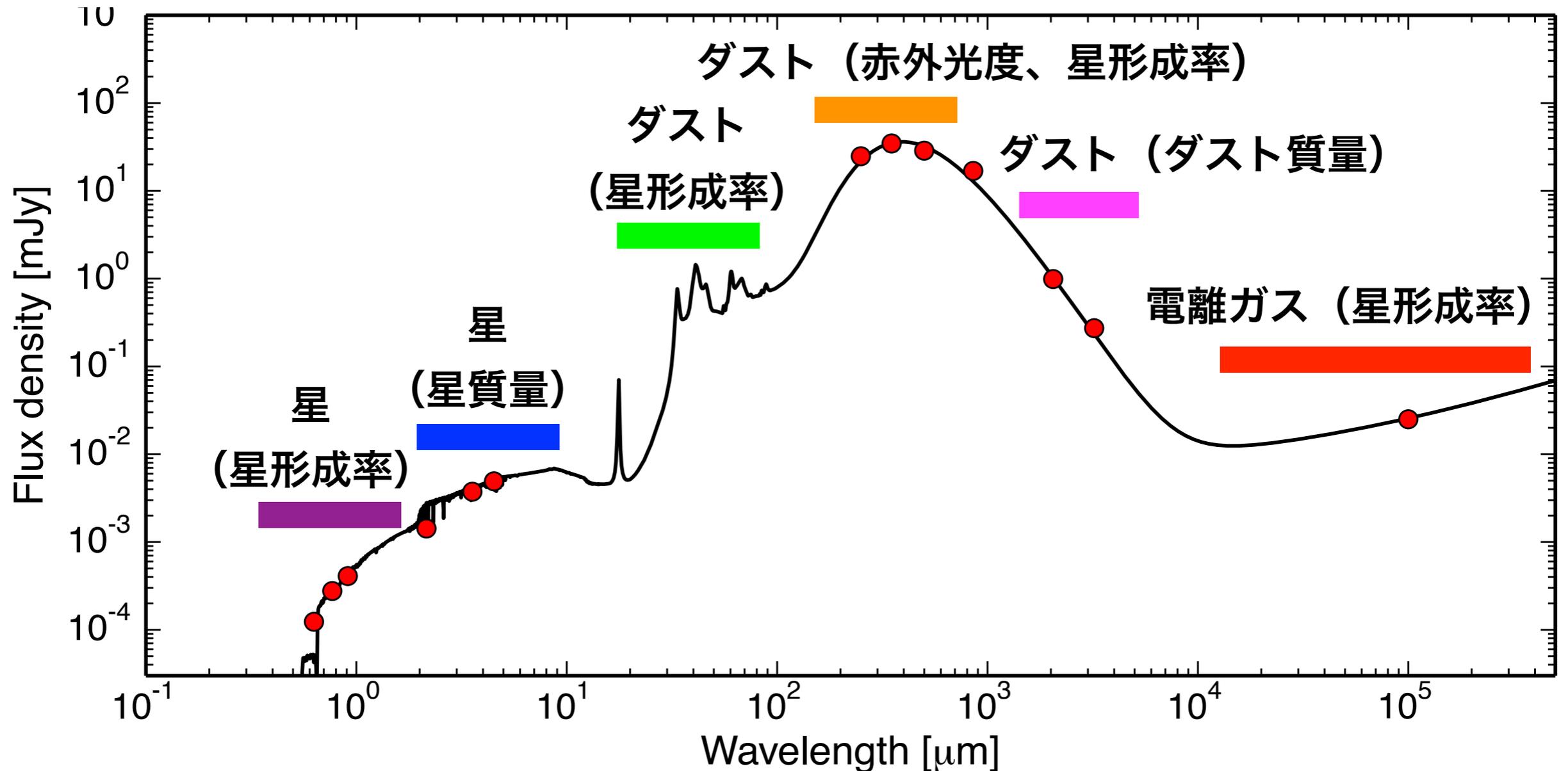
現在の楕円形銀河



$z \sim 2$ で $M_{\text{star}} > 10^{11} M_{\text{solar}}$ の円盤形銀河は
まもなくその形態を変え、
星形成を止めると期待される

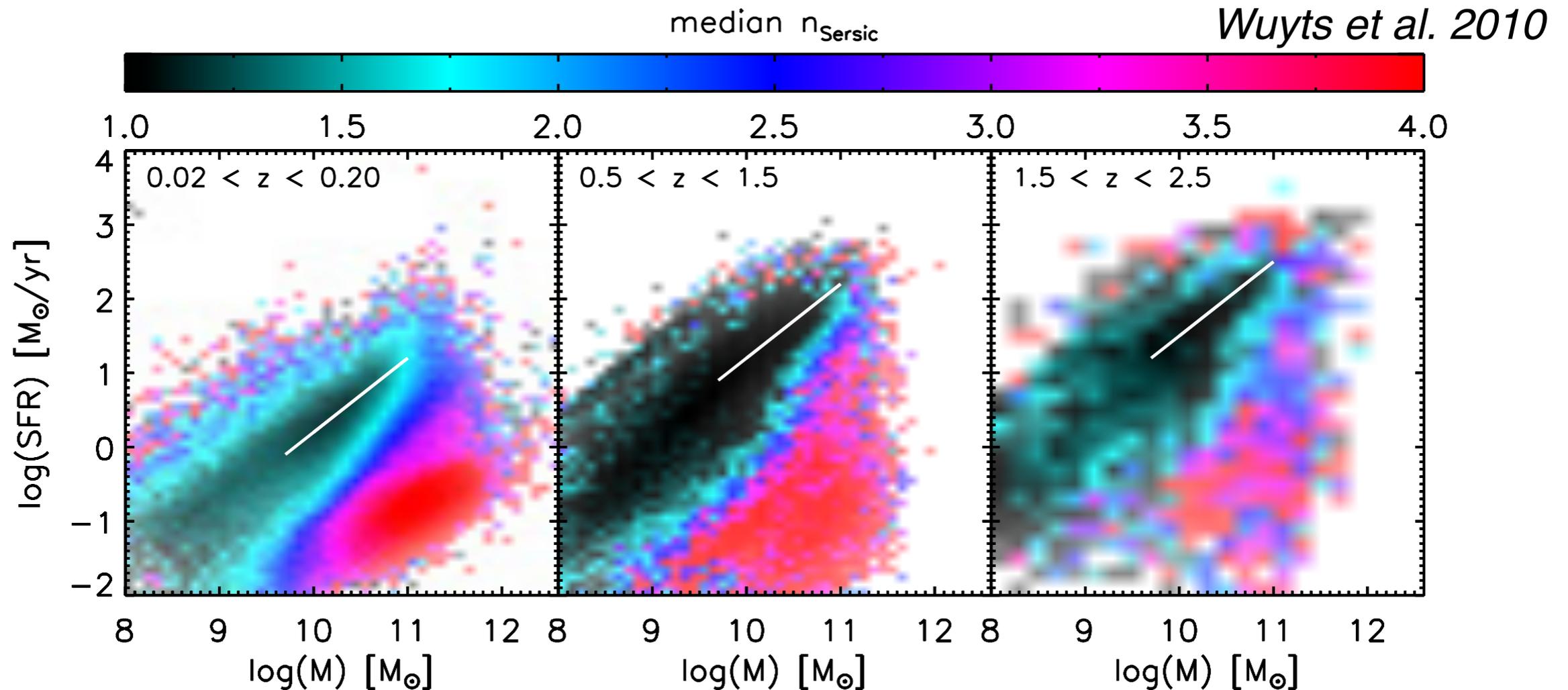
どの波長帯で形態を特徴付けるか？

$z=4.3$ にある星形成銀河のSED



多くの場合は静止系可視 ($\lambda_{\text{rest}} \sim 6000 \text{ \AA}$) での形態
 $z=1$ だと $1.2 \mu\text{m}$ 、 $z=2$ だと $1.8 \mu\text{m}$

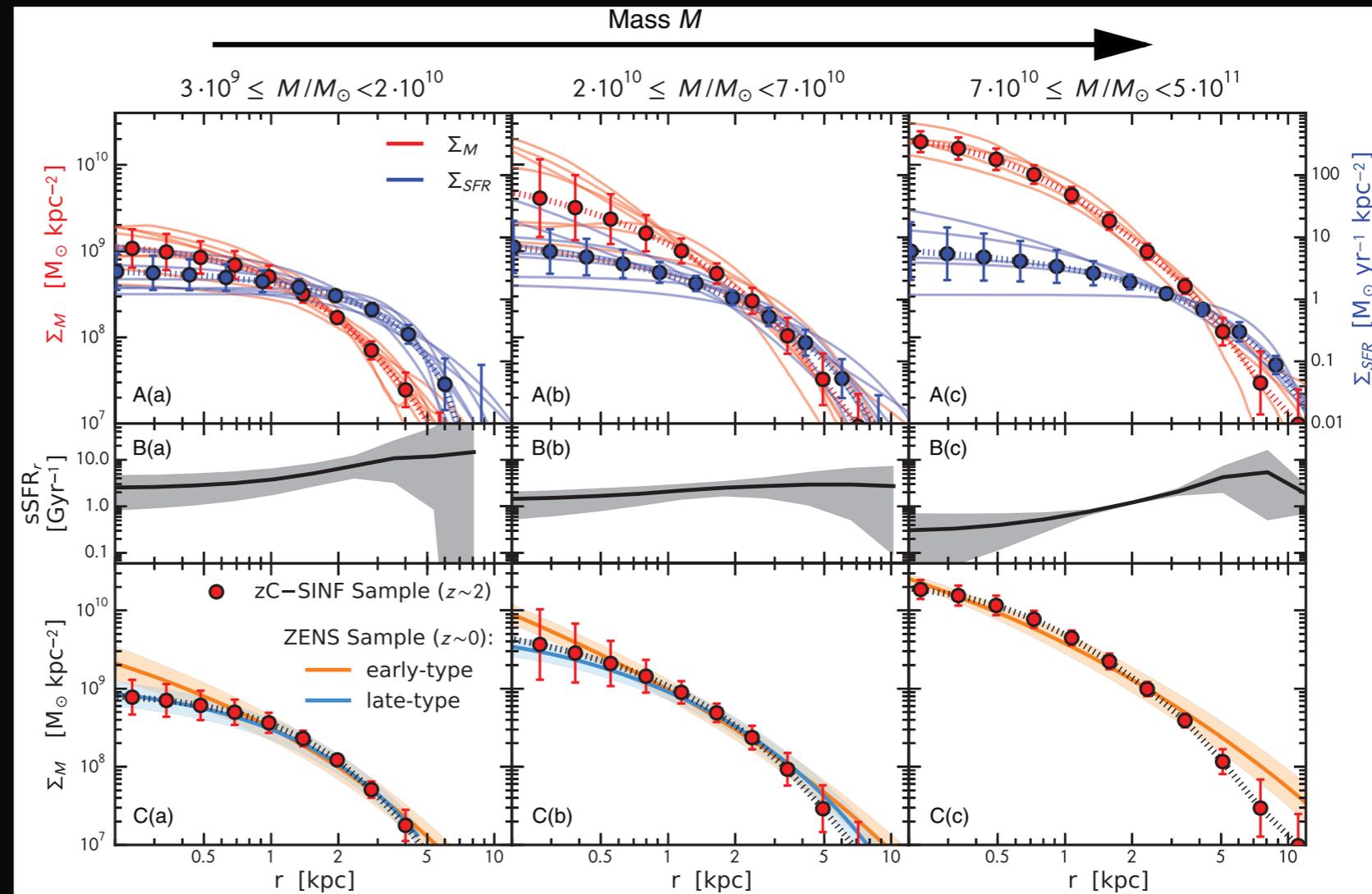
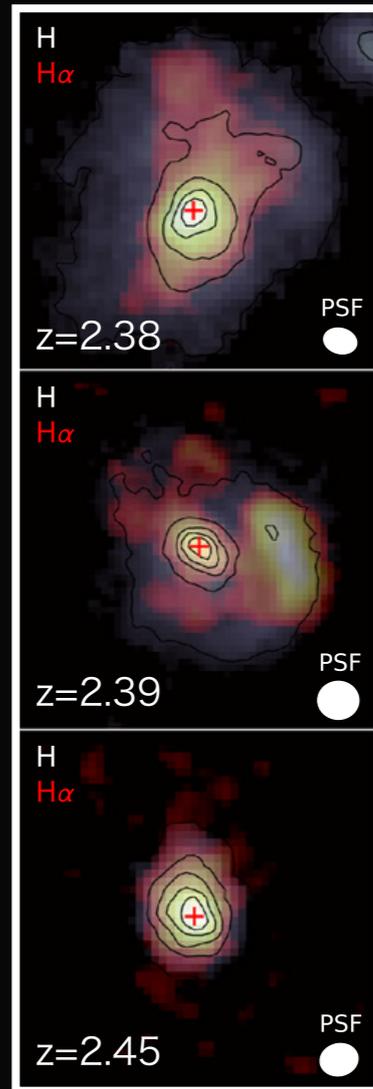
銀河の形態と星形成活動



- ▶ HSTに観測によって、『銀河のどこに星があるか』はかなりよくわかってきた
- ▶ 『銀河のどこで星が作られているか?』がわかれば、銀河の形態進化が予測できる

銀河のどこで星が作られているか？

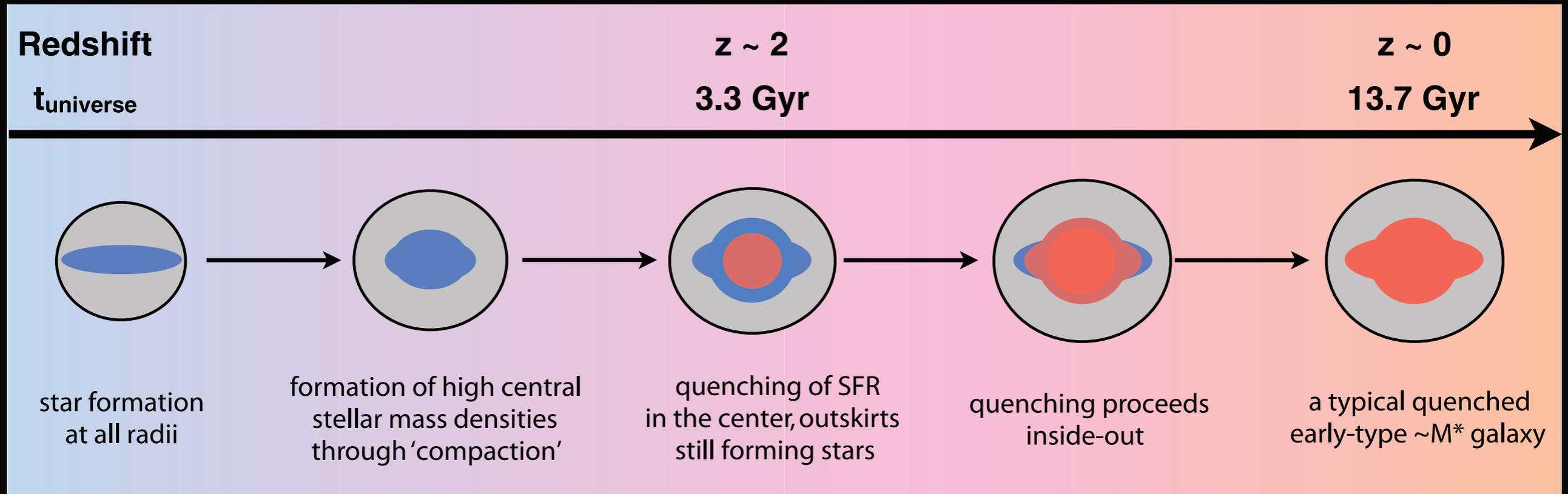
VLT観測によるH α 輝線放射の分布 (Tacchella+15a,b)



- ▶ 星形成領域 (H α 輝線) は星の分布より広がっている
- ▶ 中心部に比べて、外側で星形成 (SFR/M_{star}) が活発
- ▶ inside-out quenching

銀河のどこで星が作られているか？

銀河の形態進化とクエンチング (Tacchella+15a)



形態進化？

クエンチング

- ▶ 星形成領域 ($H\alpha$ 輝線) は星の分布より広がっている
- ▶ 中心部に比べて、外側で星形成 (SFR/ M_{star}) が活発
- ▶ inside-out quenching

ダスト減光問題

遠方銀河



軽い星
(年老いた)

塵



重い星
(生まれたばかり)

電離ガス



可視光線

遠赤外線
サブミリ波

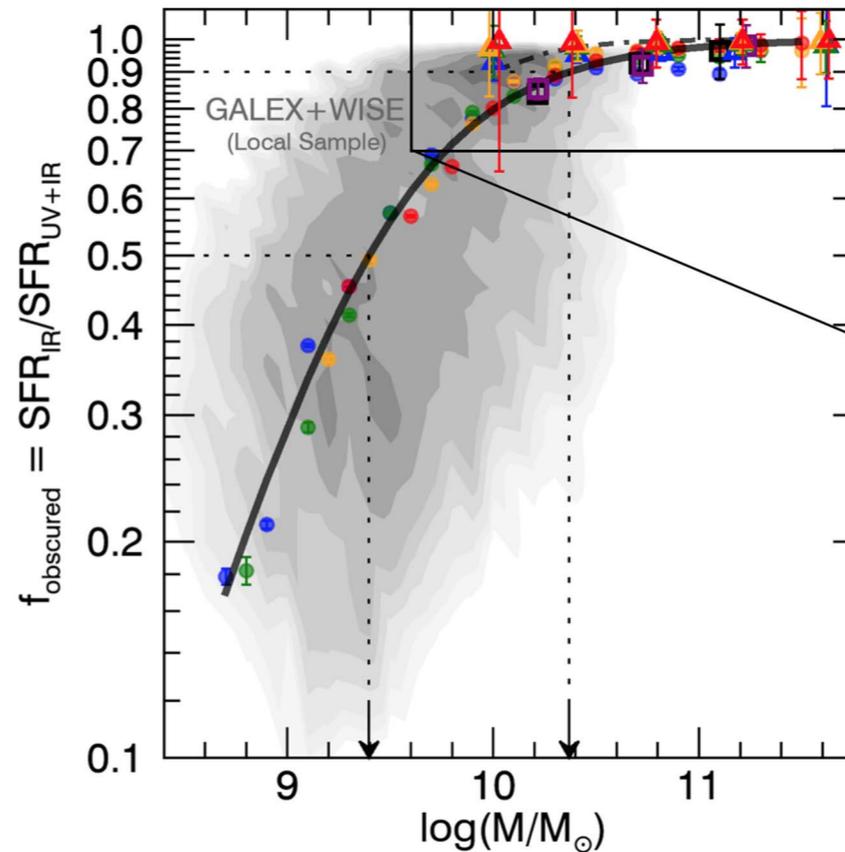
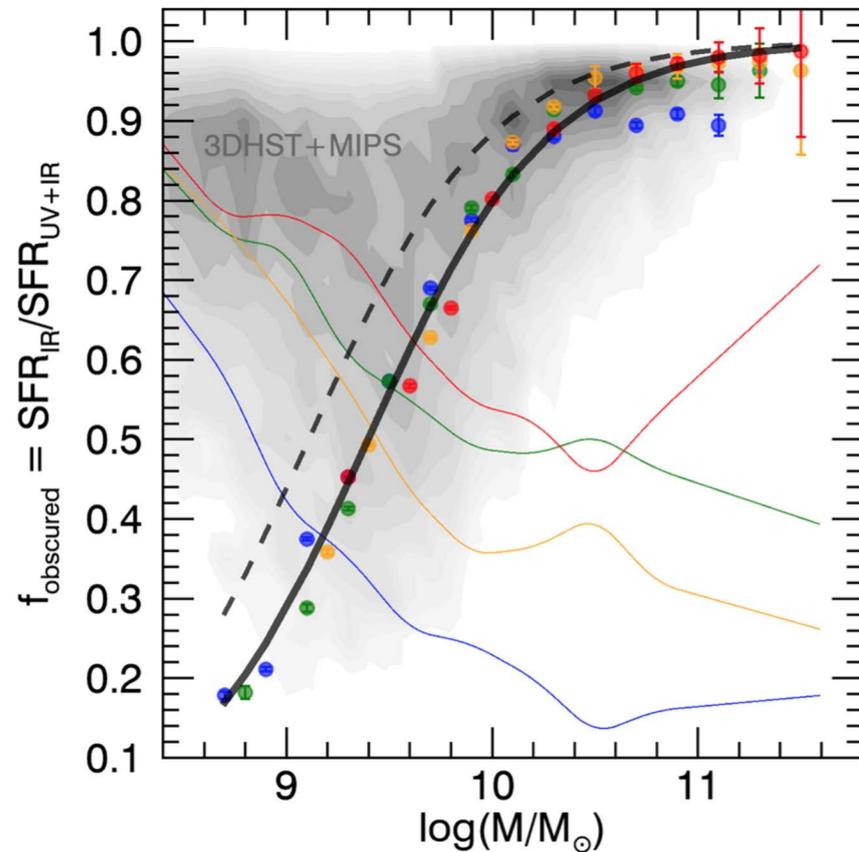
紫外線

H α 輝線

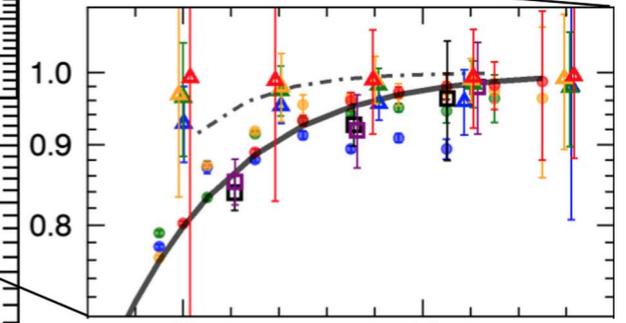


ダスト減光問題

ダスティー



Whitaker et al. 2017



Cybulski et al. (2017; $z=0$)
● Whitaker et al. (2014)
▲ Casey et al. (2014; DSFG)
0.5 < z < 1.0
1.0 < z < 1.5
1.5 < z < 2.0
2.0 < z < 2.5
□ Bourne et al. (2017)
0.5 < z < 1.5
1.5 < z < 2.5

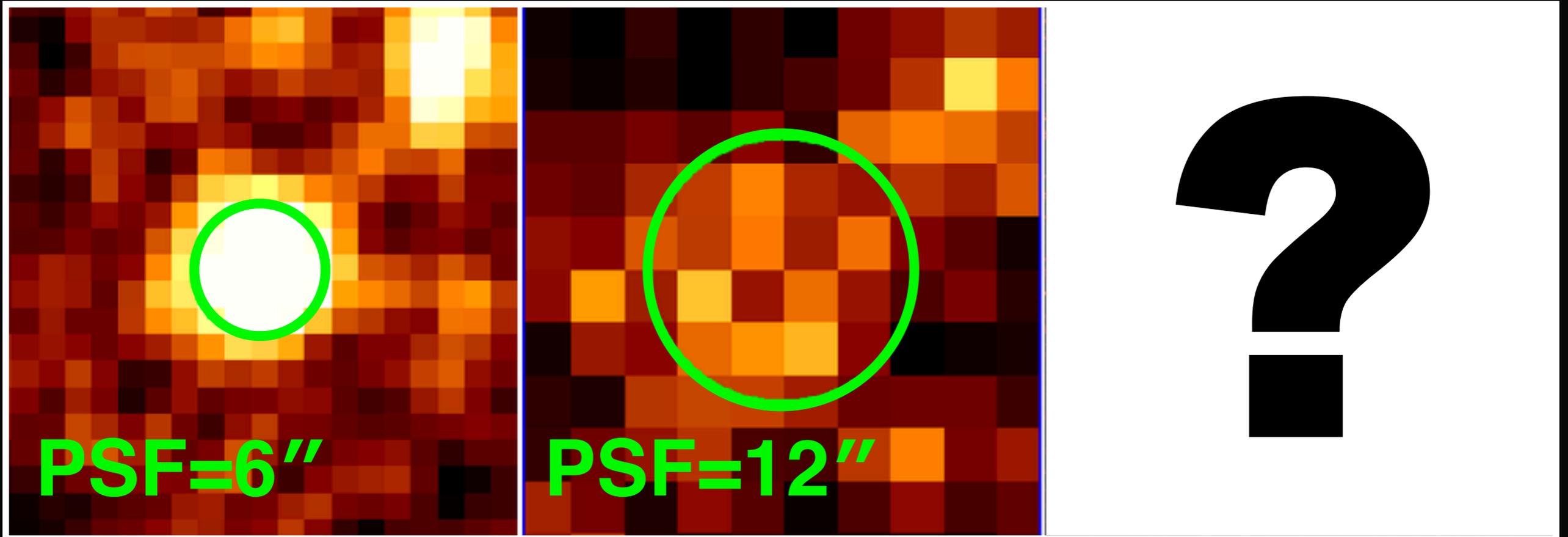
- ▶ 重い銀河ほどUV光は吸収され、IRで再放射されている
- ▶ $M_{\text{star}} > 10^{11} M_{\text{solar}}$ の星形成銀河では、UVやH α 輝線は星形成の指標として不定性が大きい
- ▶ **ダストの連続光を観測すれば良い**

ダスト減光問題

z~2にある星形成銀河 (Tadaki+2017)

MIPS/24um

PACS/160um



- ▶ 中間赤外・遠赤外の観測はスペースからの観測になるため空間分解能が悪い
- ▶ 8 kpc程度 (~1") の遠方銀河を分解するには、これらより遥かに高い空間分解能が必要

Going to ALMA observations



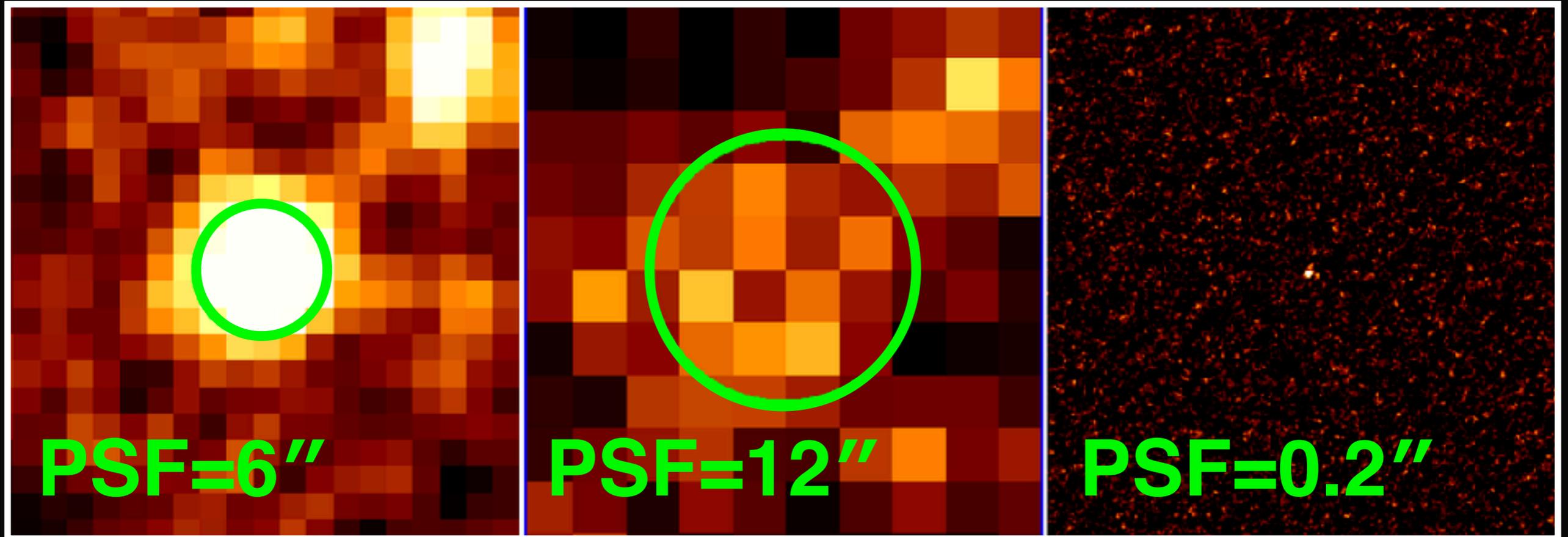
ダスト減光問題

z~2にある星形成銀河 (Tadaki+2017)

MIPS/24um

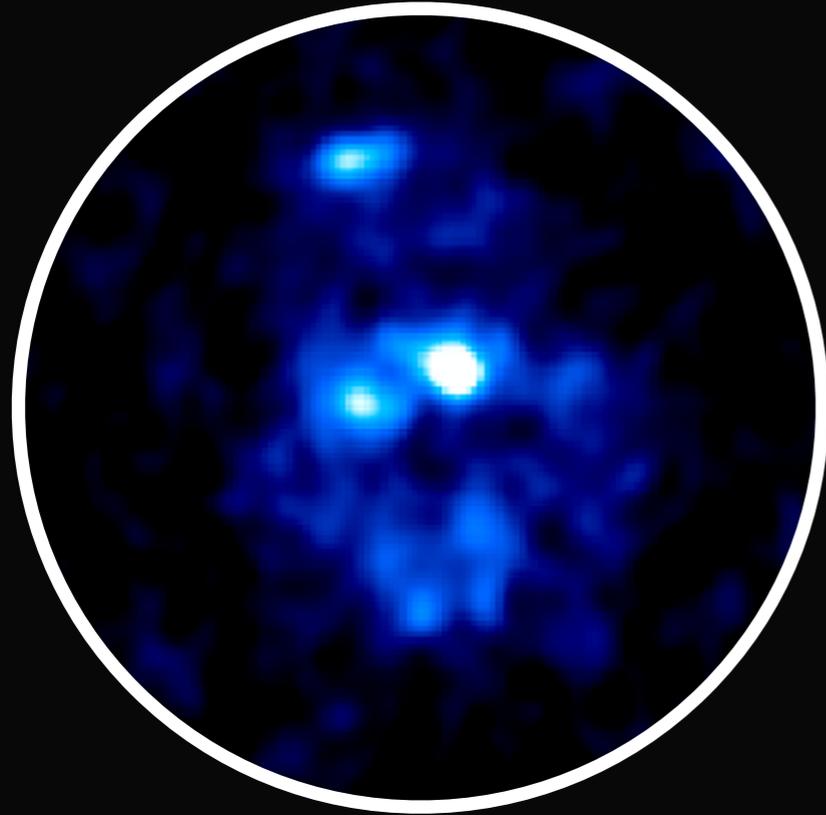
PACS/160um

ALMA/870um



- ▶ 圧倒的に高い空間分解能でダスト連続光を観測
- ▶ 銀河のどこで星が作られているか直接観測することが可能

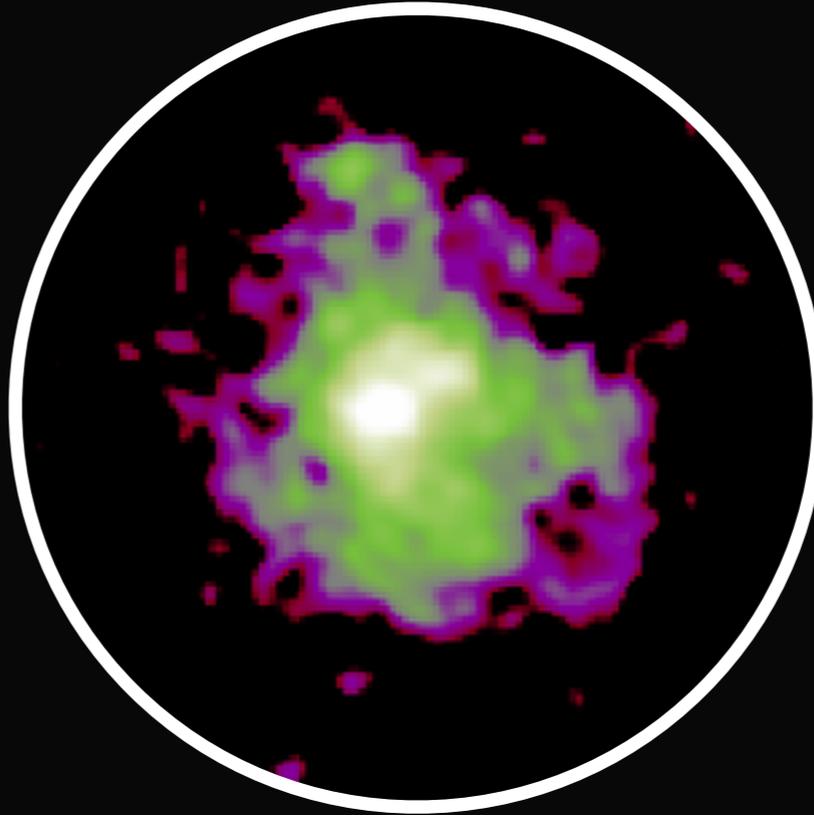
銀河のどこで星が作られているか？



ハッブル
(可視光)

若い星

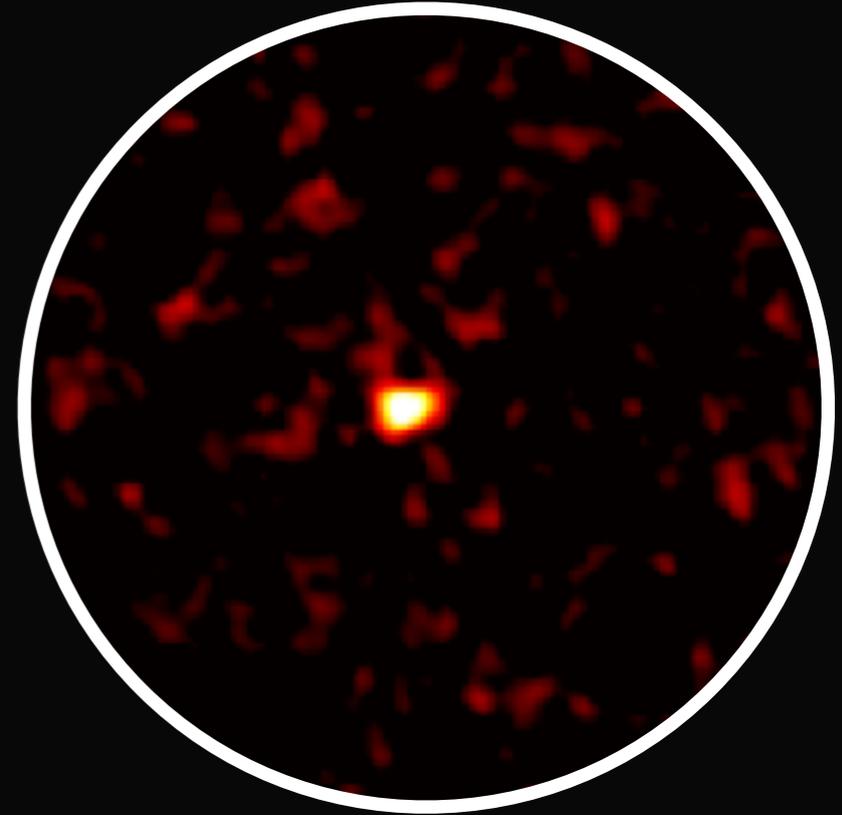
弱い
星形成現場



ハッブル
(近赤外線)

星の総量

銀河の形



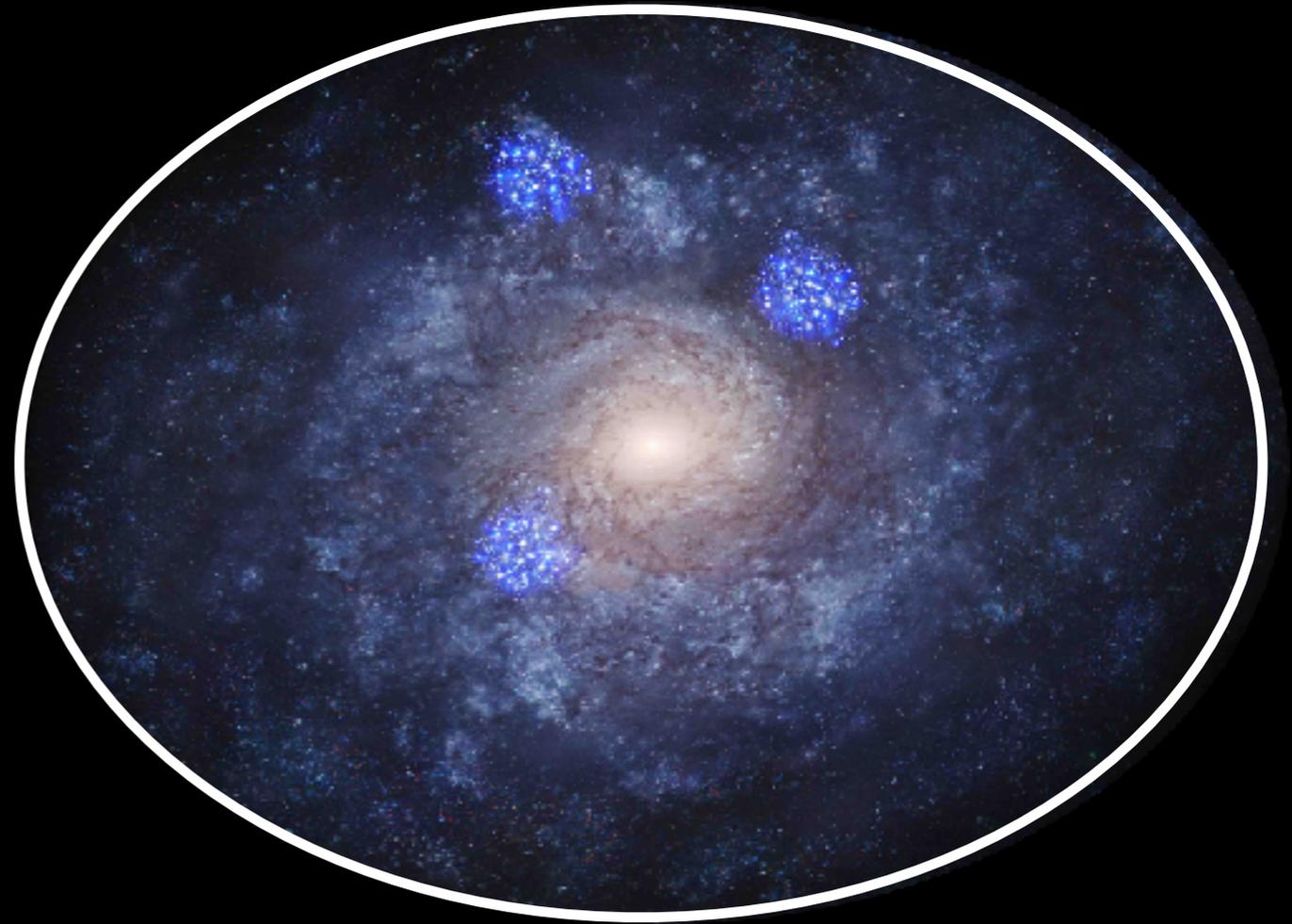
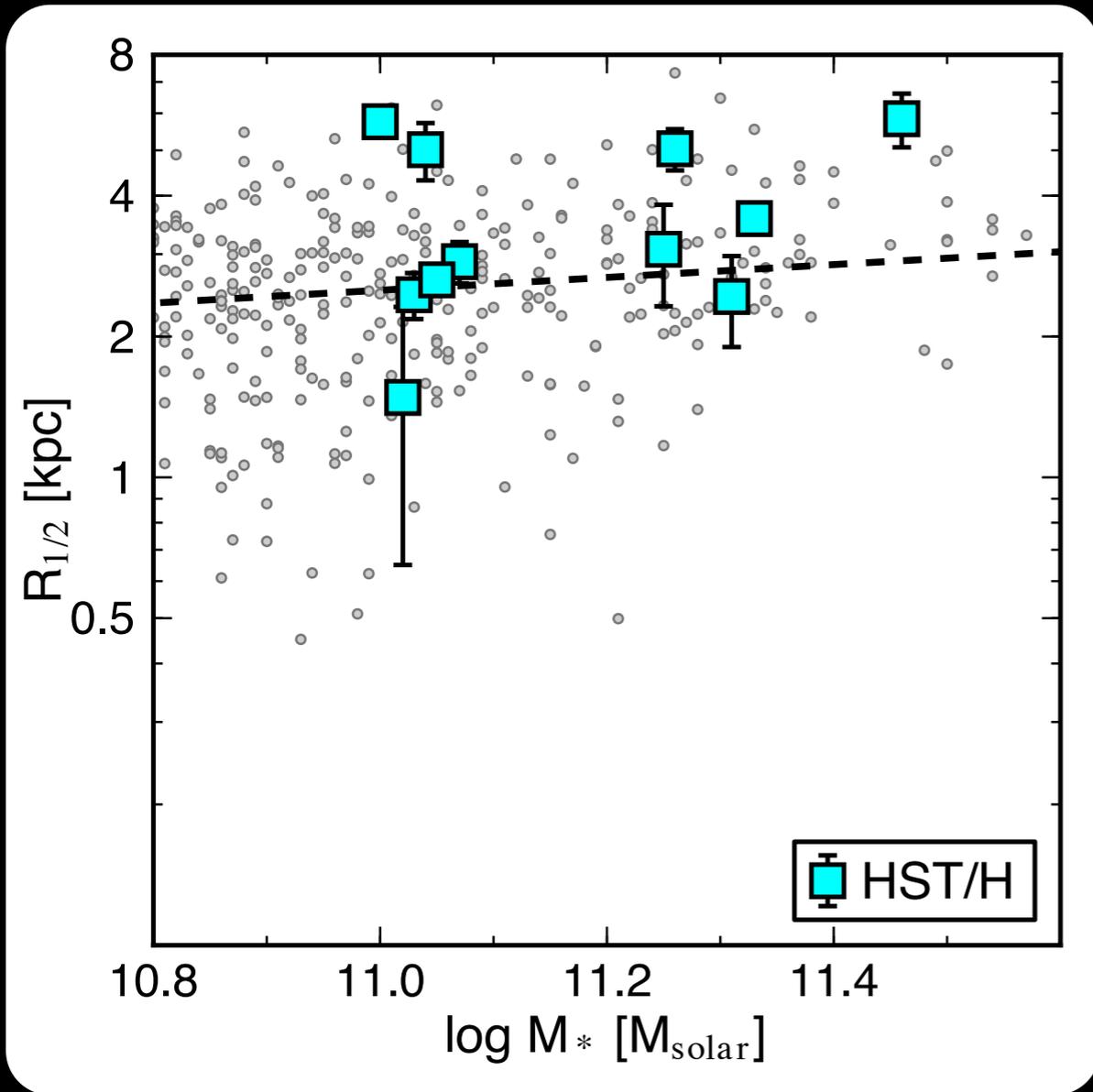
アルマ
(電波)

星の材料となる^{ちり}塵

激しい
星形成現場

HSTで観る遠方銀河

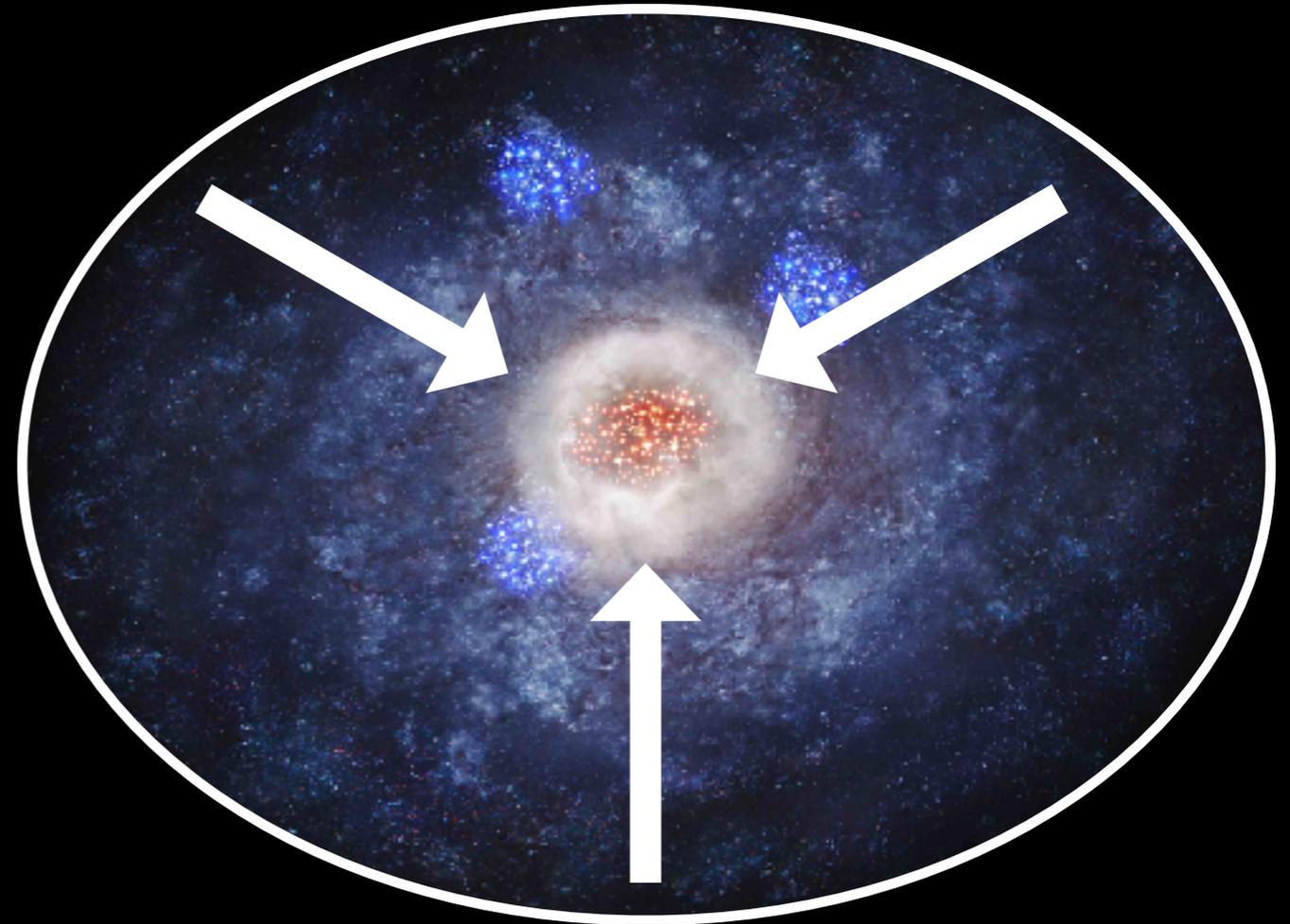
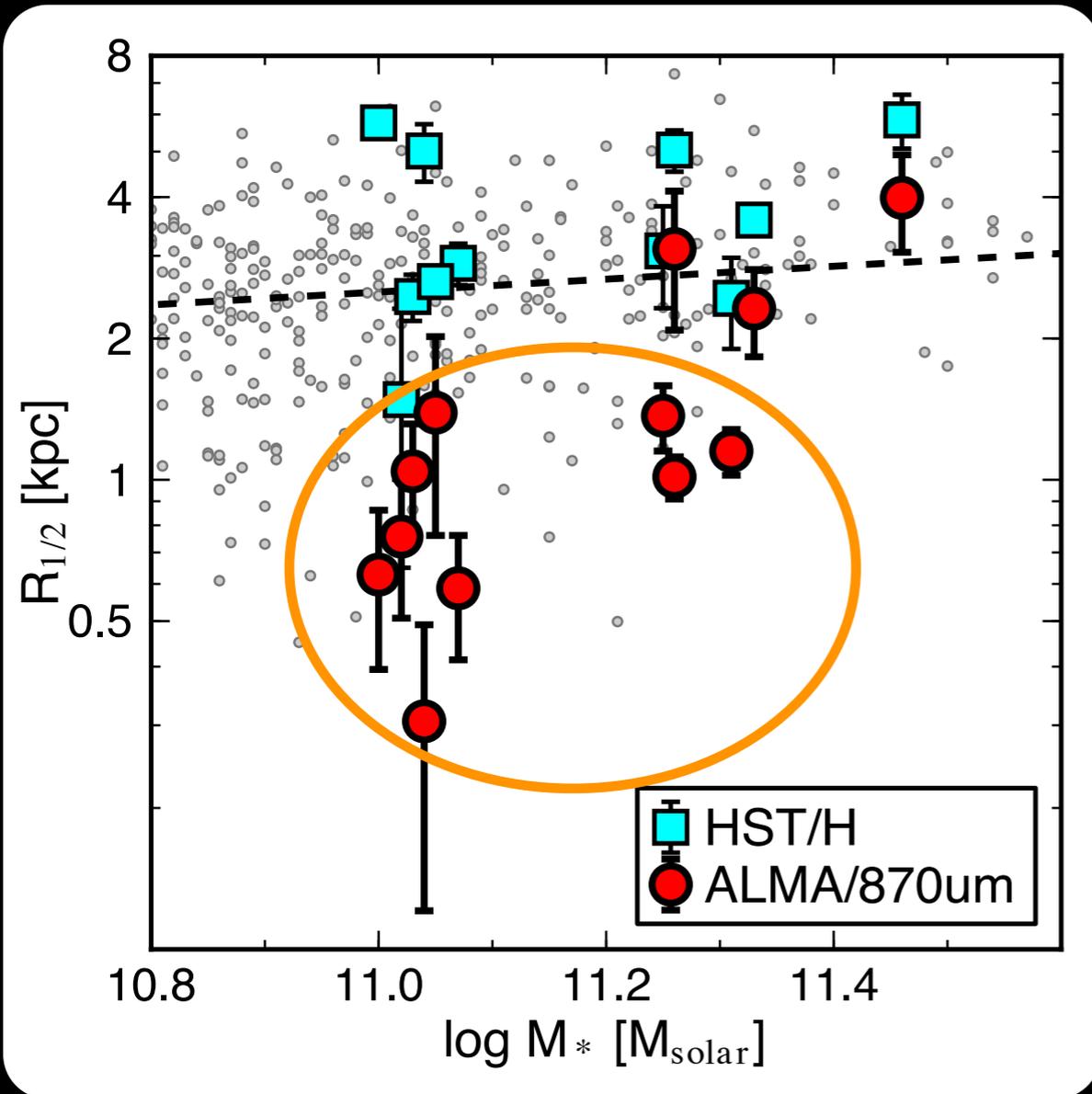
Tadaki+2017



▶ 円盤形 ($n \sim 1$) で広がっている ($R_e = 3-6 \text{ kpc}$)

HST & ALMAで観る遠方銀河

Tadaki+2017

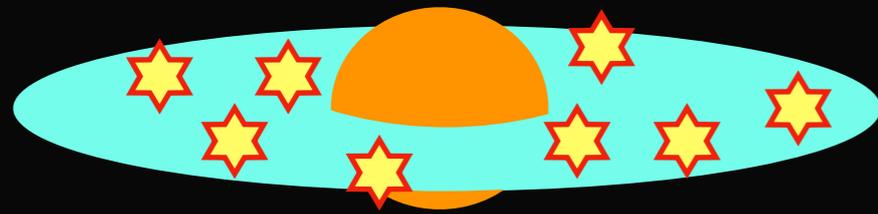


- ▶ 円盤形 ($n \sim 1$) で広がっている ($R_e = 3-6$ kpc)
- ▶ 中心1kpcで激しい星形成

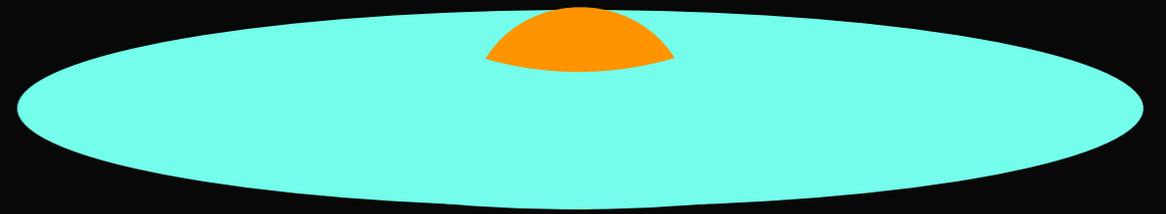
ガスが銀河の中心に運ばれている

銀河の進化を予測する

🔭 円盤で星が生まれている場合

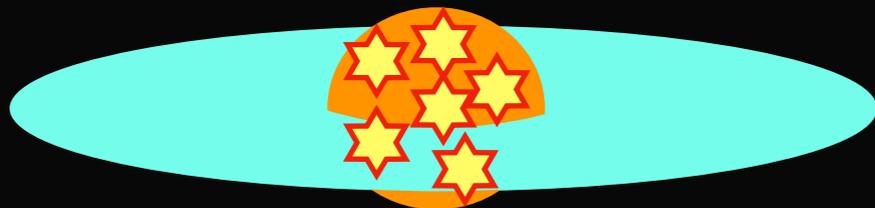


円盤形の銀河

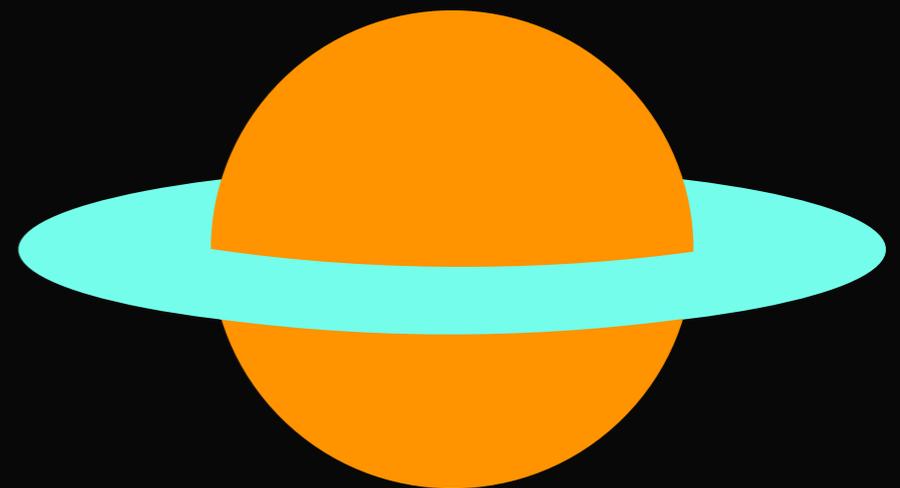


もっと円盤が目立つ銀河に

🔭 中心部で星が生まれている場合

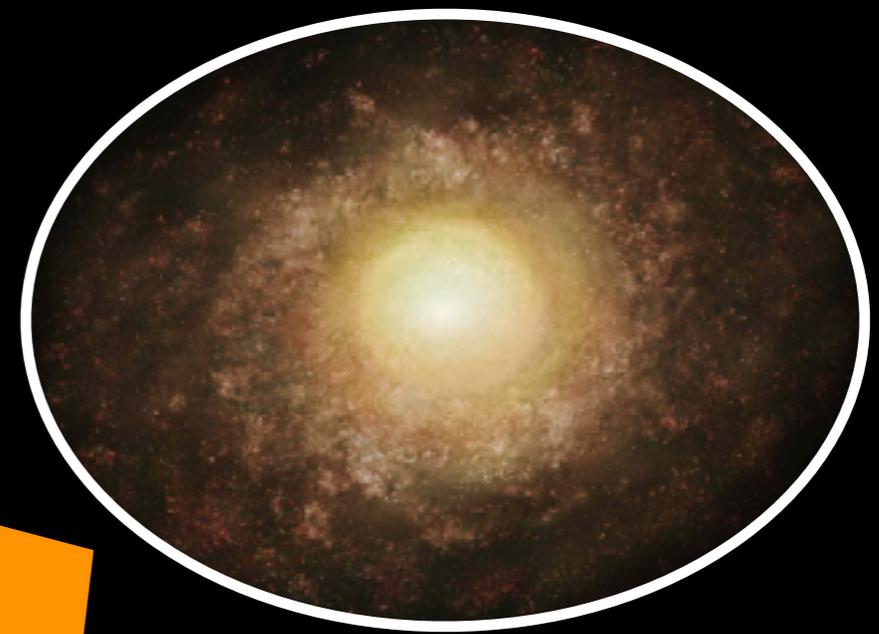


円盤形の銀河

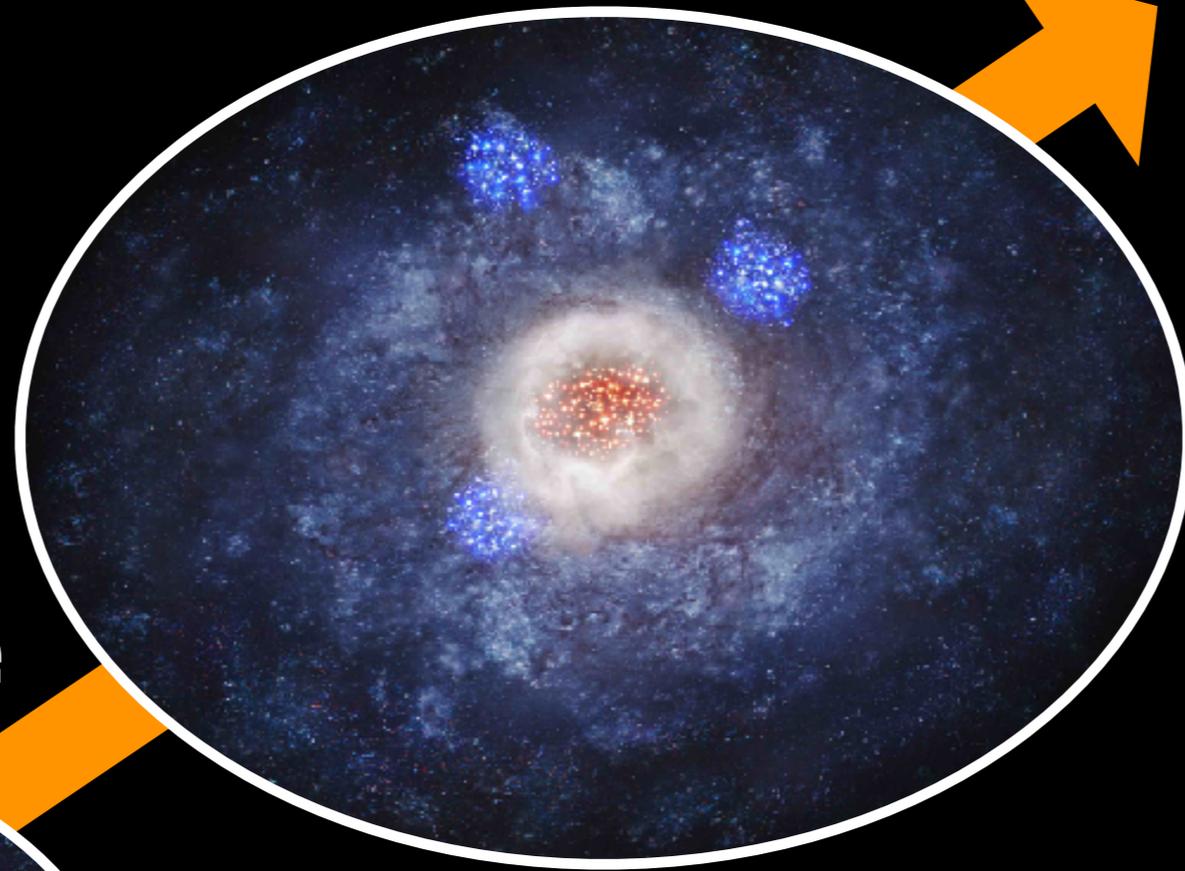


中心の膨らみが目立つ銀河に

bulge formation



**inside-out
quenching**



**inside-out
growth phase**

