

宇宙科学I (文科学)

銀河の誕生と進化

土井靖生

2019/7/15

## 今回のポイント

- 銀河には大別して「渦巻き銀河」と「楕円銀河」がある
  - 「渦巻き銀河」は星を作る
  - 「楕円銀河」は星を作らない
- 「渦巻き銀河」が衝突合体して「楕円銀河」となる
  - 衝突合体の際には「スターバースト銀河」となる
- それぞれの銀河の中心に大質量ブラックホールが一つずつある

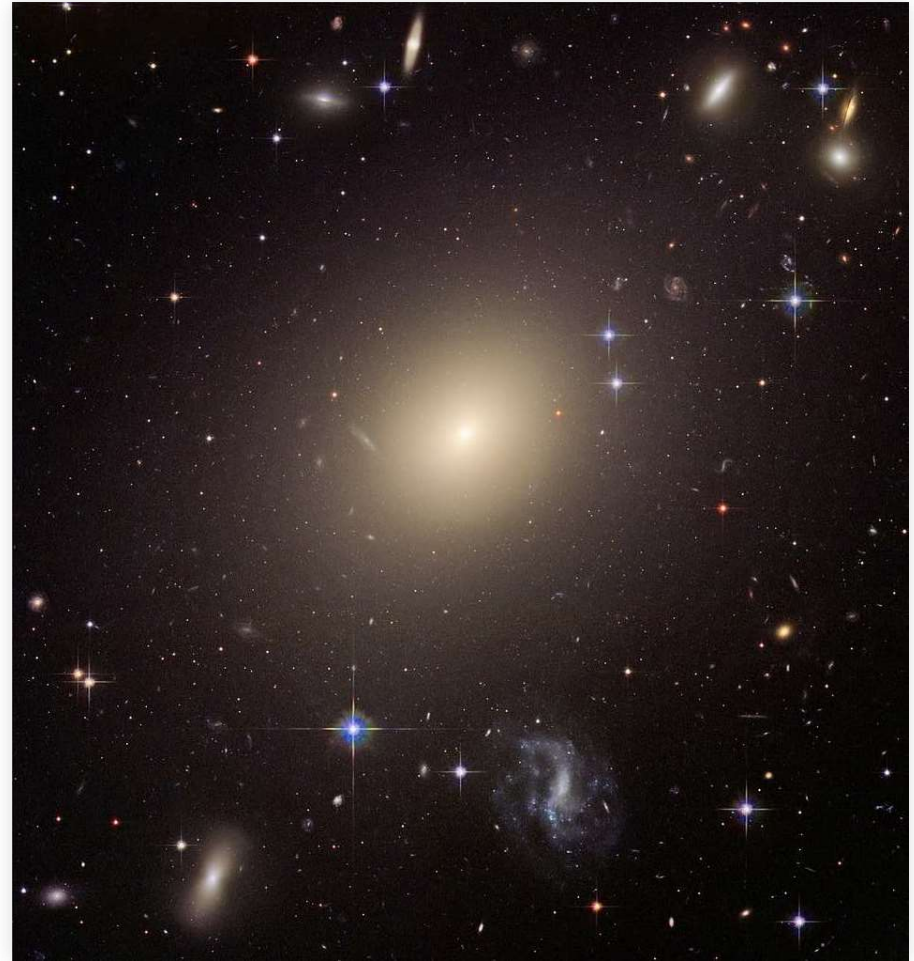
# 系外銀河 (galaxies)

# 星を産む銀河と星を産まなくなった銀河

渦巻き銀河 (spiral galaxies)    楕円銀河 (elliptical galaxies)



Image Credit: FORS, 8.2-meter VLT Antu, ESO

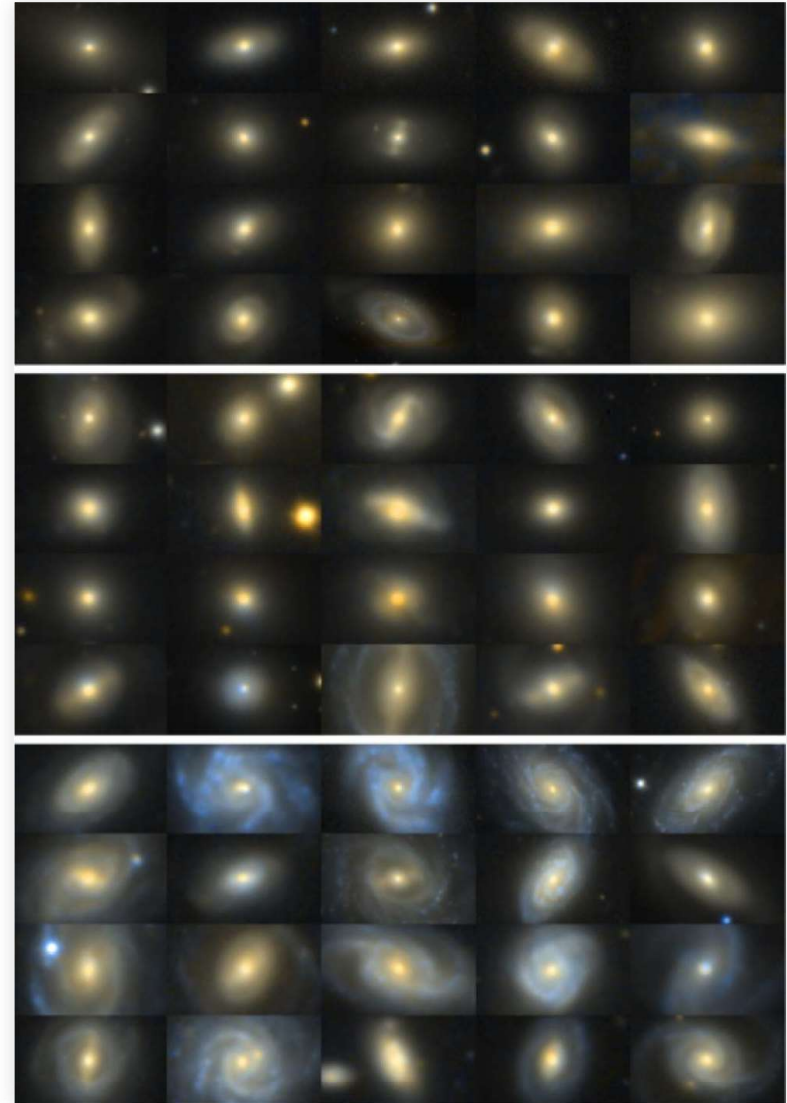


NASA, ESA, and The Hubble Heritage Team (STScI/AURA); J.

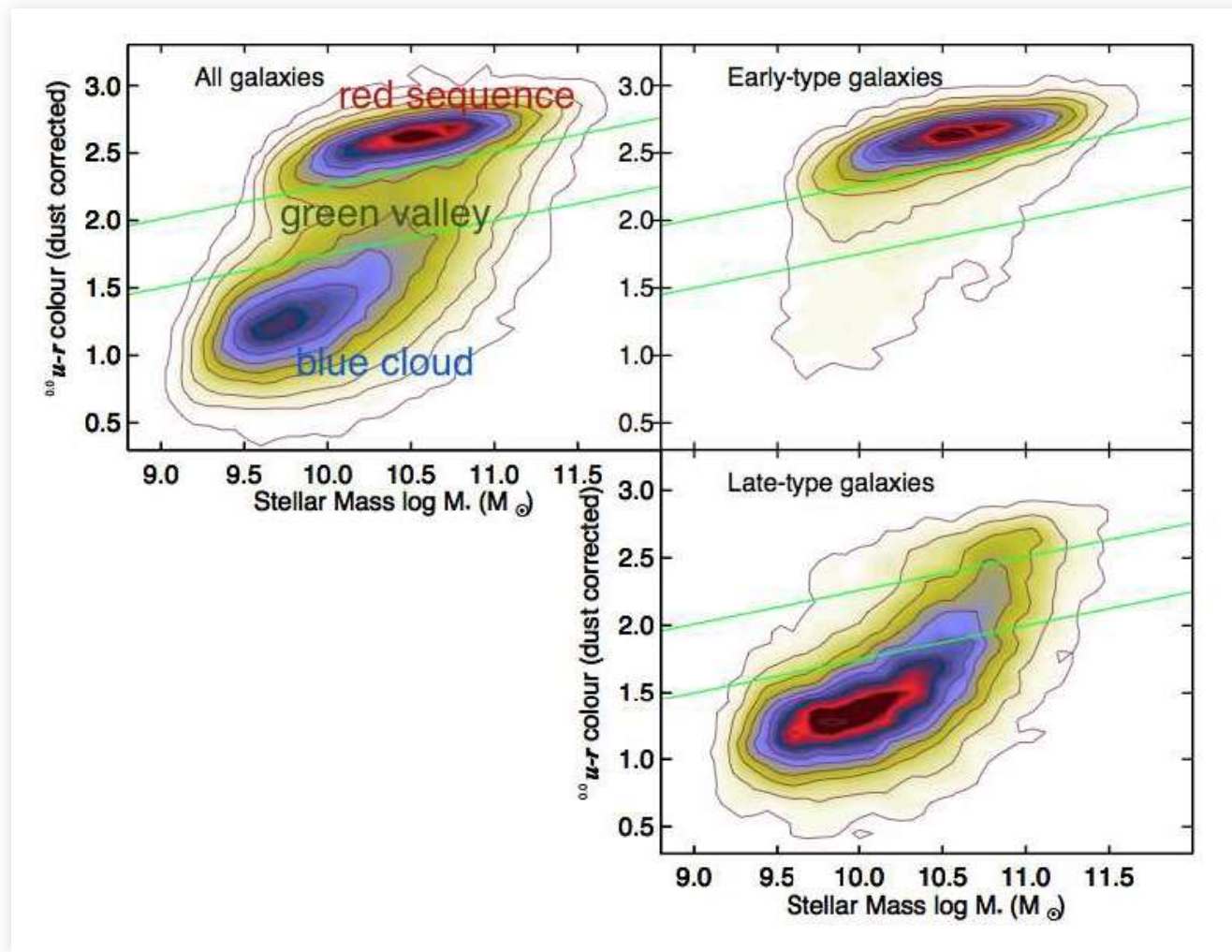
Blakeslee (Washington State University)

# 渦巻き銀河と楕円銀河 の特徴

- 渦巻き銀河
  - ガスが存在
  - 青い
  - 星形成活動あり
  - 楕円銀河よりやや軽い
- 楕円銀河
  - ガスが少ない
  - 赤い
  - 星形成活動なし
  - 渦巻き銀河よりやや重い

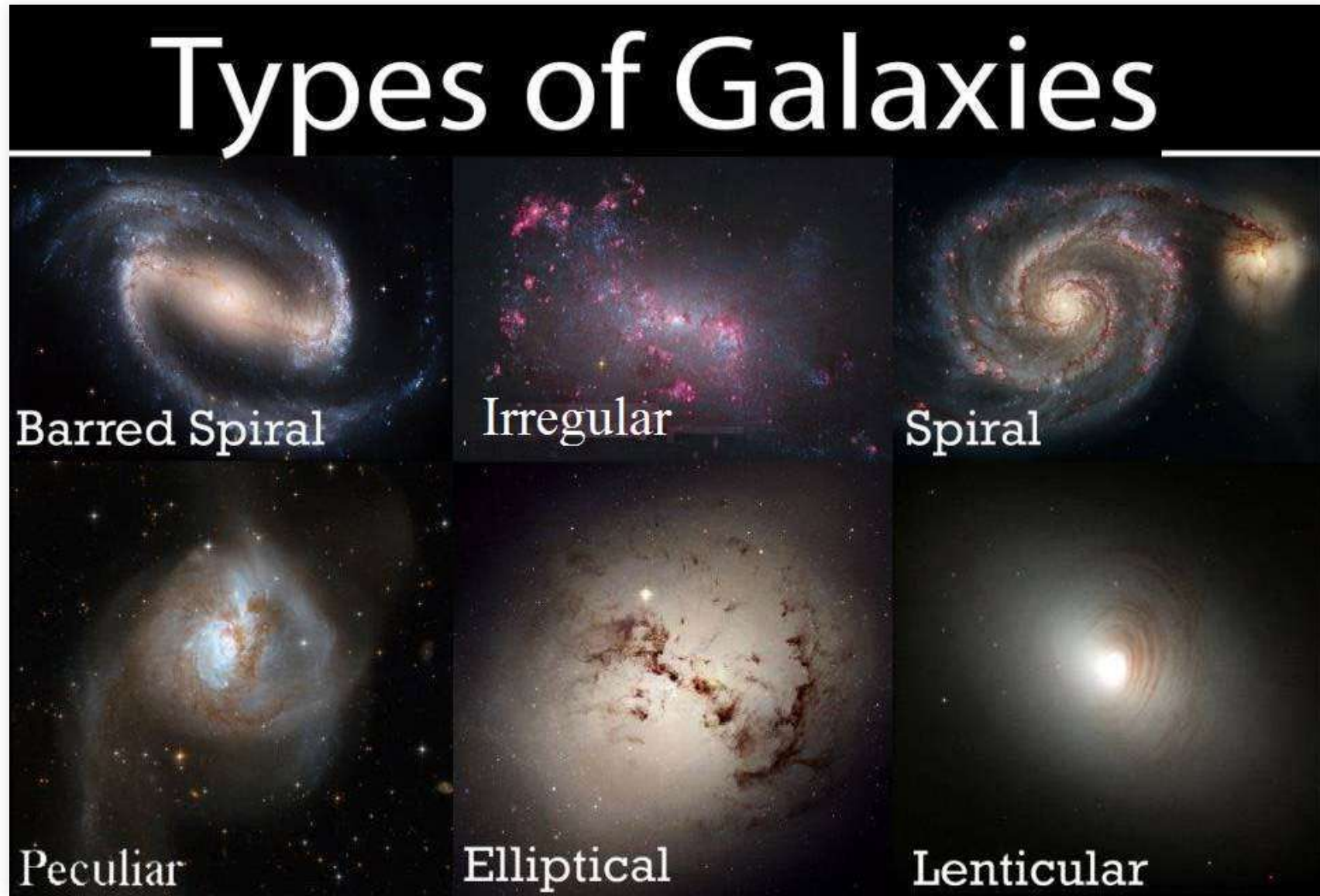


# 赤い銀河と青い銀河



Lintott, Schawinski, Slosar, *et al.* 2008, *MNRAS*, 389, 1179

# 様々な銀河



Source image: futurism.com

3.3

3.4

# 小さな銀河



# 矮小銀河 (dwarf galaxies)



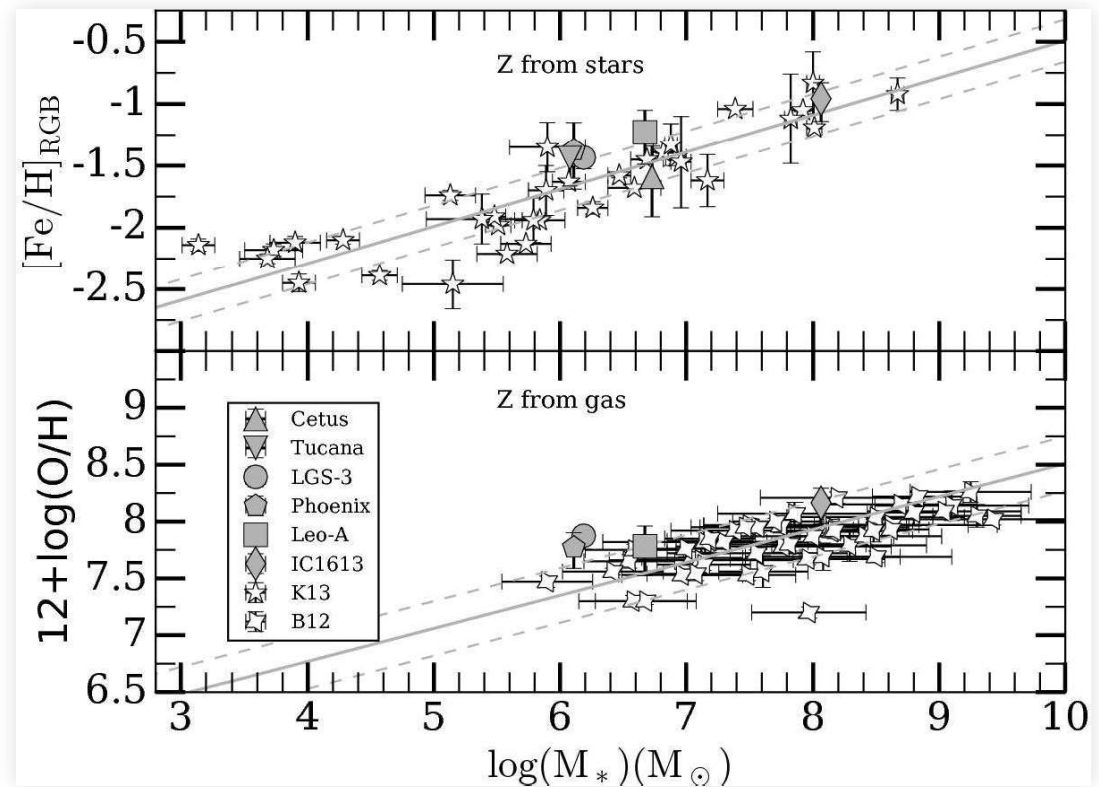
ESA/Hubble and Digitized Sky Survey 2



ESA/NASA/JPL-Caltech/STScI

# 小さな銀河程金属量が少ない

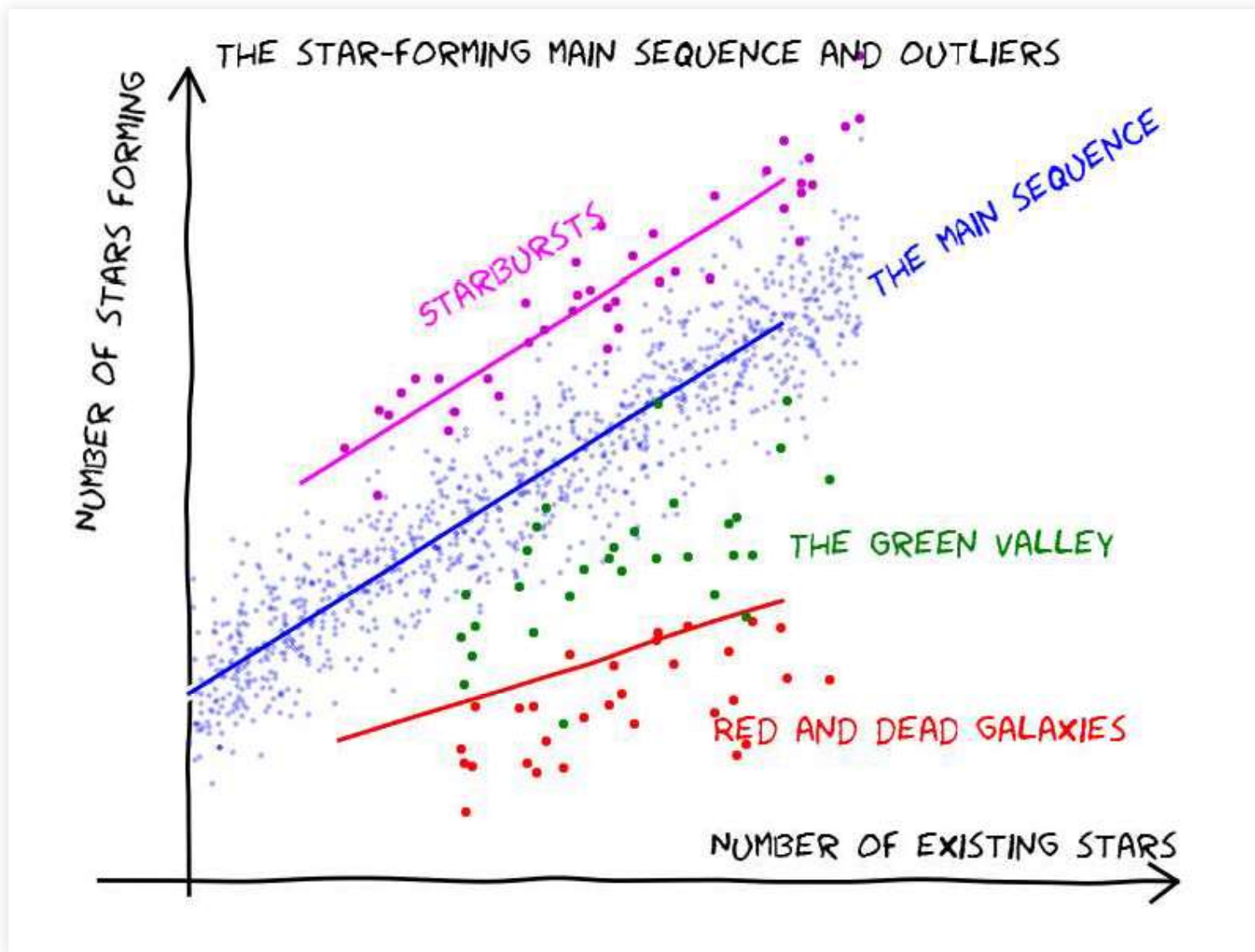
- 矮小銀河
  - ガスが存在(豊富)
  - これまでの星形成活動は少
  - 現在は活発な星形成活動の場合あり



Hidalgo 2017, *A&Ap*, 606, A115

# 活動的な銀河

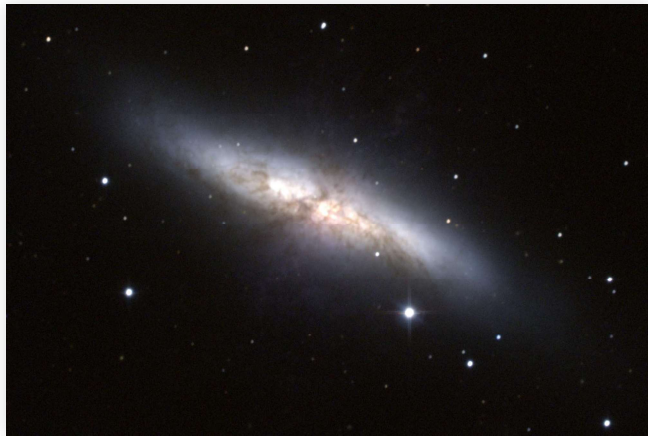
# 星形成率と星質量の関係



# スターバースト銀河 (M82)



Adam Block/NOAO/AURA/NSF

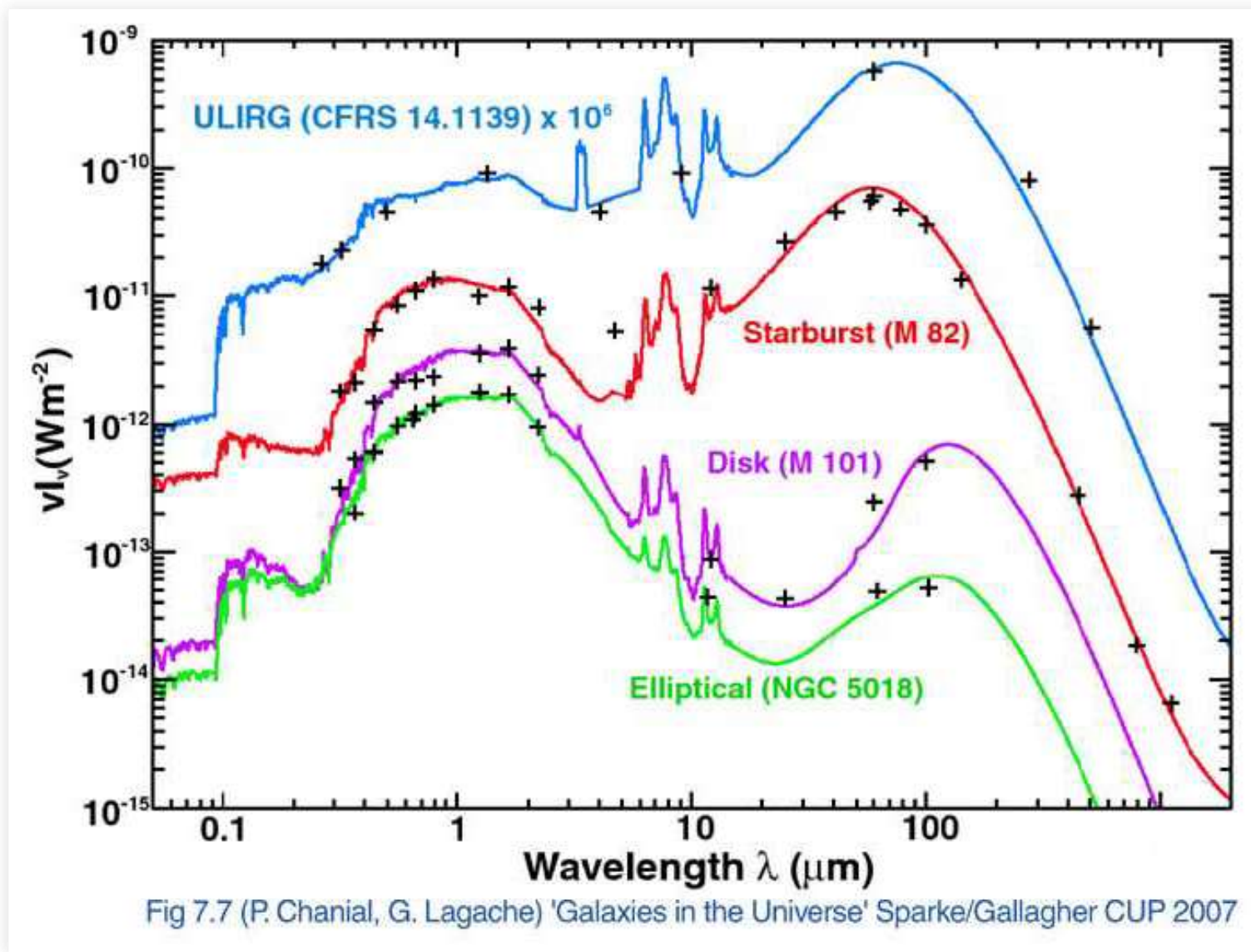


N.A.Sharp/NOAO/AURA/NSF

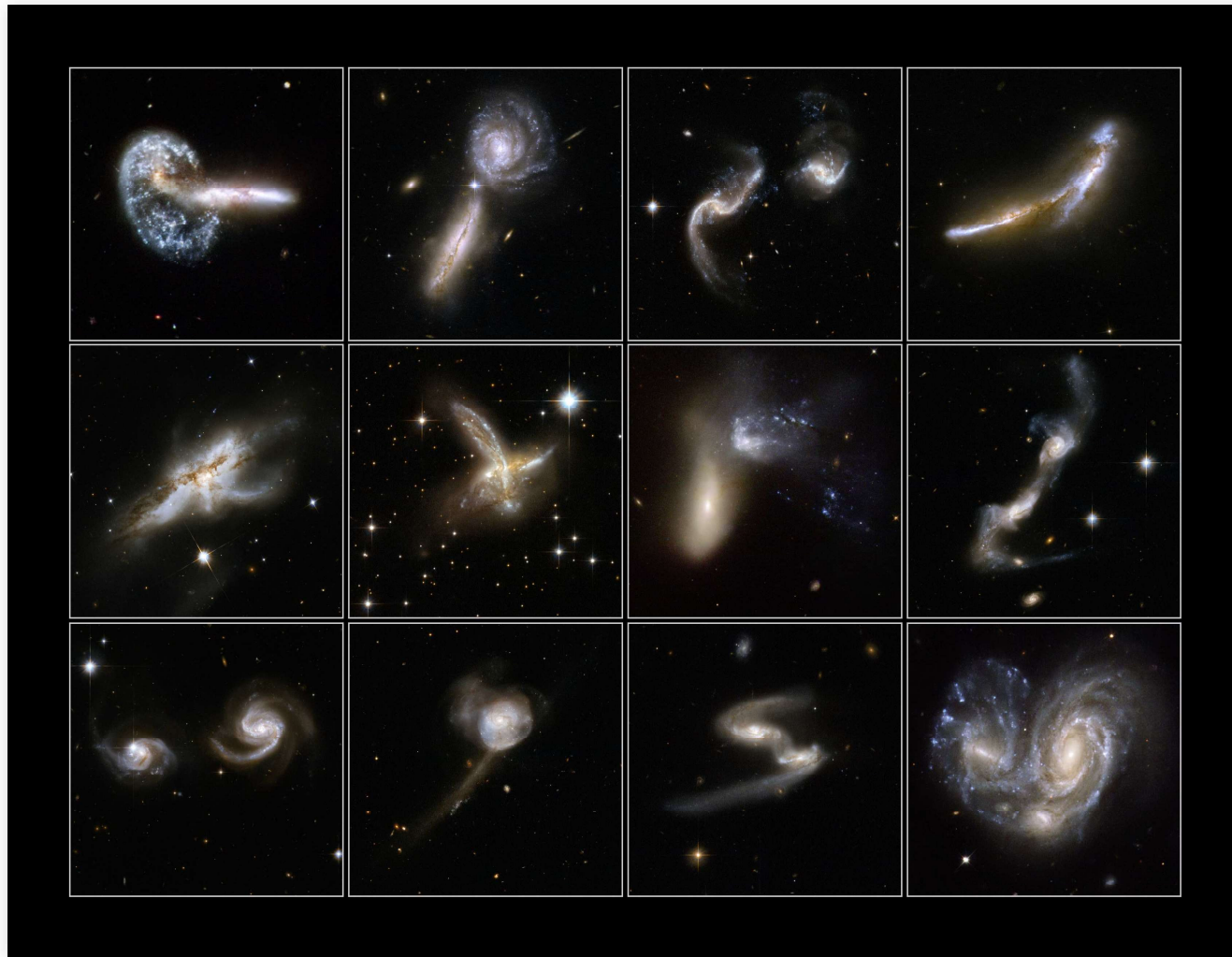


NASA/JPL-Caltech/STScI/CXC/UofA/ESA/AURA/JHU

# 大光度赤外銀河



# 大光度赤外銀河と銀河衝突



NASA/ESA/STScI/AURA (The Hubble Heritage Team) - ESA/Hubble Collaboration/University of Virginia, Charlottesville, NRAO, Stony Brook University (A. Evans)/STScI (K. Noll)/Caltech (J. Westphal)

# 衝突銀河に於ける星形成



Credit: Robert Gendler



NASA/ESA

Simulation of the Antennae Galaxi...

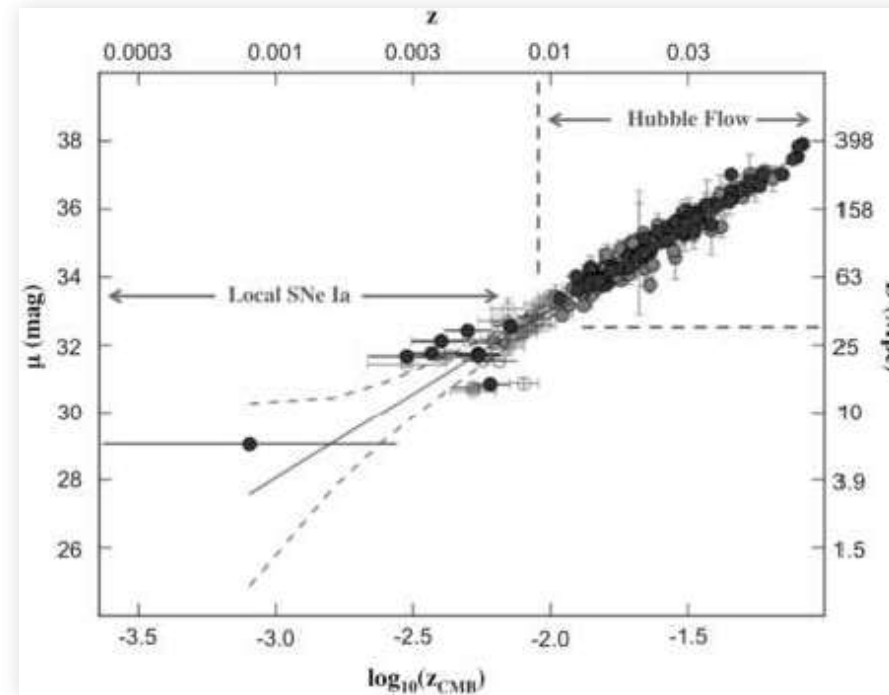


# 銀河の距離指標



# 「距離はしご」 (Distance ladder)

- $\leq$  数kpc : 年周視差(三角測量)
- $\leq$  数Mpc : セファイド型変光星
- $\leq$  数百Mpc : Ia型超新星
- より遠方 : 宇宙膨張による後退速度



Czerny, Beaton, Bejger, et al. 2018, *Space Science Reviews*, 214, #32

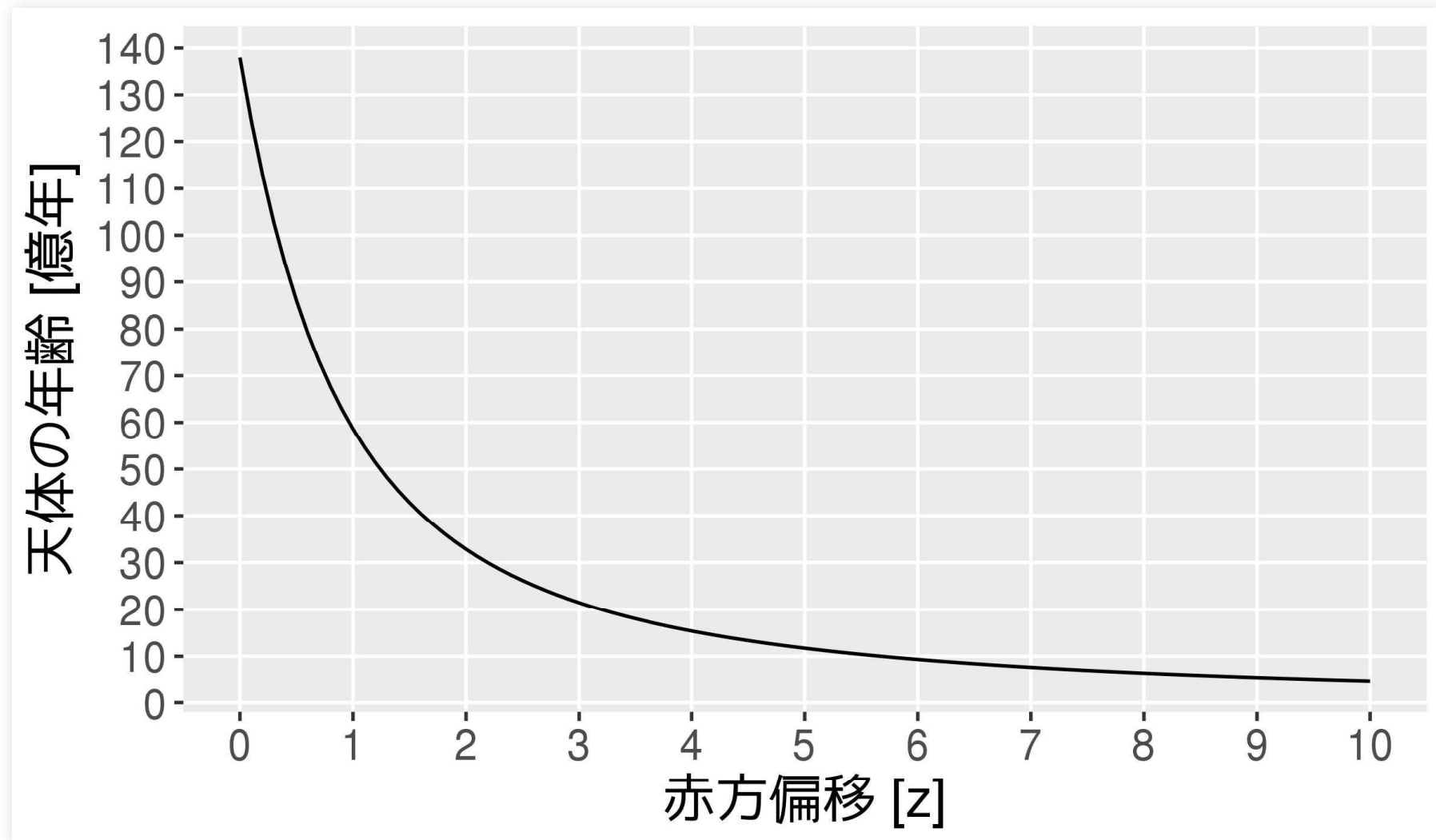
## 銀河の“赤方偏移”

- 遠くの銀河ほど早い速度で遠ざかる
- ドップラー効果により、光の波長が伸びる(“赤くなる”)
  - 赤方偏移 (cosmological redshift)

$$z = \frac{\text{観測される波長} - \text{静止系の波長}}{\text{静止系の波長}}$$

$$1 + z = \frac{\text{観測される波長}}{\text{静止系の波長}} \approx \frac{\text{現在の宇宙の大きさ}}{\text{光が輻射された時の宇宙の大きさ}}$$

# 赤方偏移と天体の年齢との関係



Planck collaboration *et al.* 2016, *A&A*, 594, A13 の結果に拠る

# 銀河の進化と星形成史

# 銀河系とアンドロメダ銀河との衝突合体(再掲)

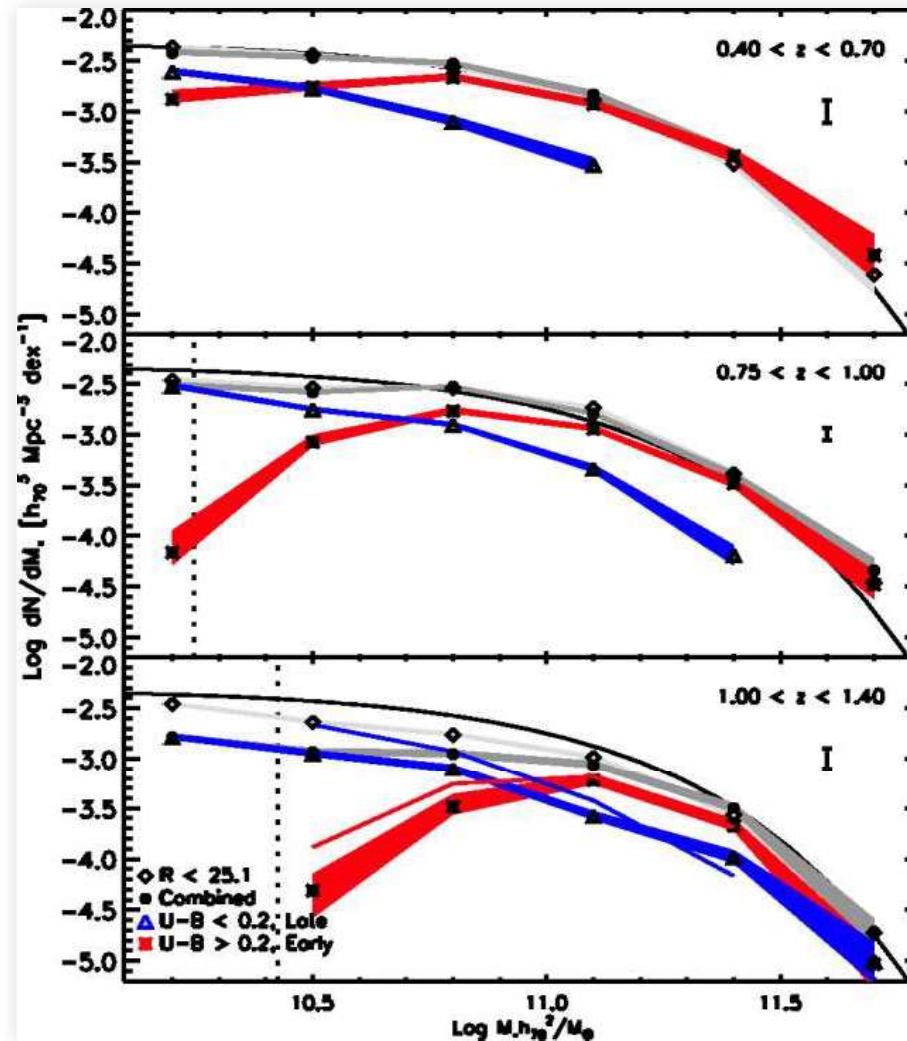


1.225 billion years

Visualization Credit: NASA, ESA, and F. Summers (STScI)

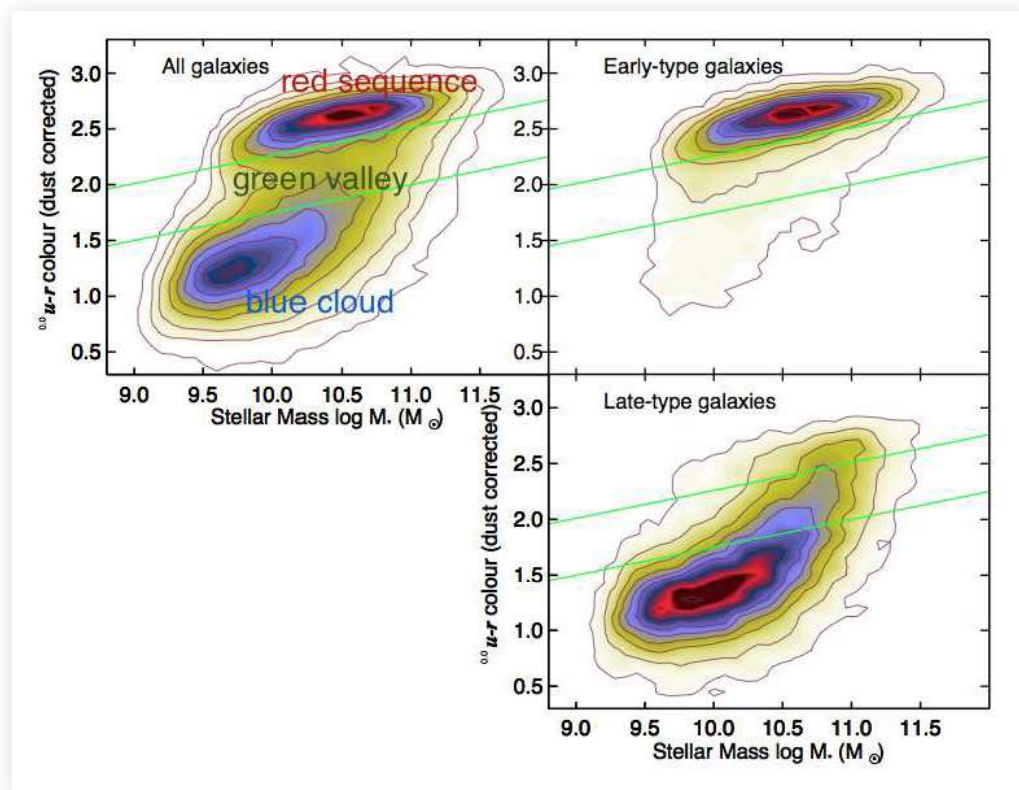
Simulation Credit: NASA, ESA, G. Besla (Columbia University), and R. van der Marel (STScI)

# 銀河の「ダウンサイジング」 (Galaxy “down-sizing”)

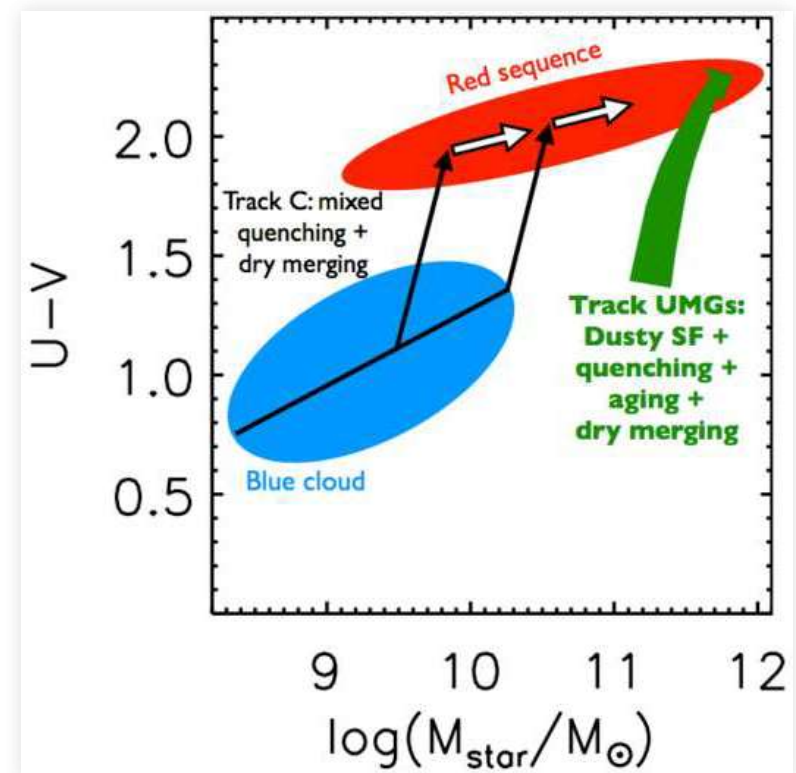


# 渦巻き銀河から楕円銀河への進化

- 大きな銀河と小さな銀河の衝突 → バルジ形成
  - 小さな銀河が大きな銀河に飲み込まれる
- 大きな銀河同士の衝突 → 楕円銀河へ進化



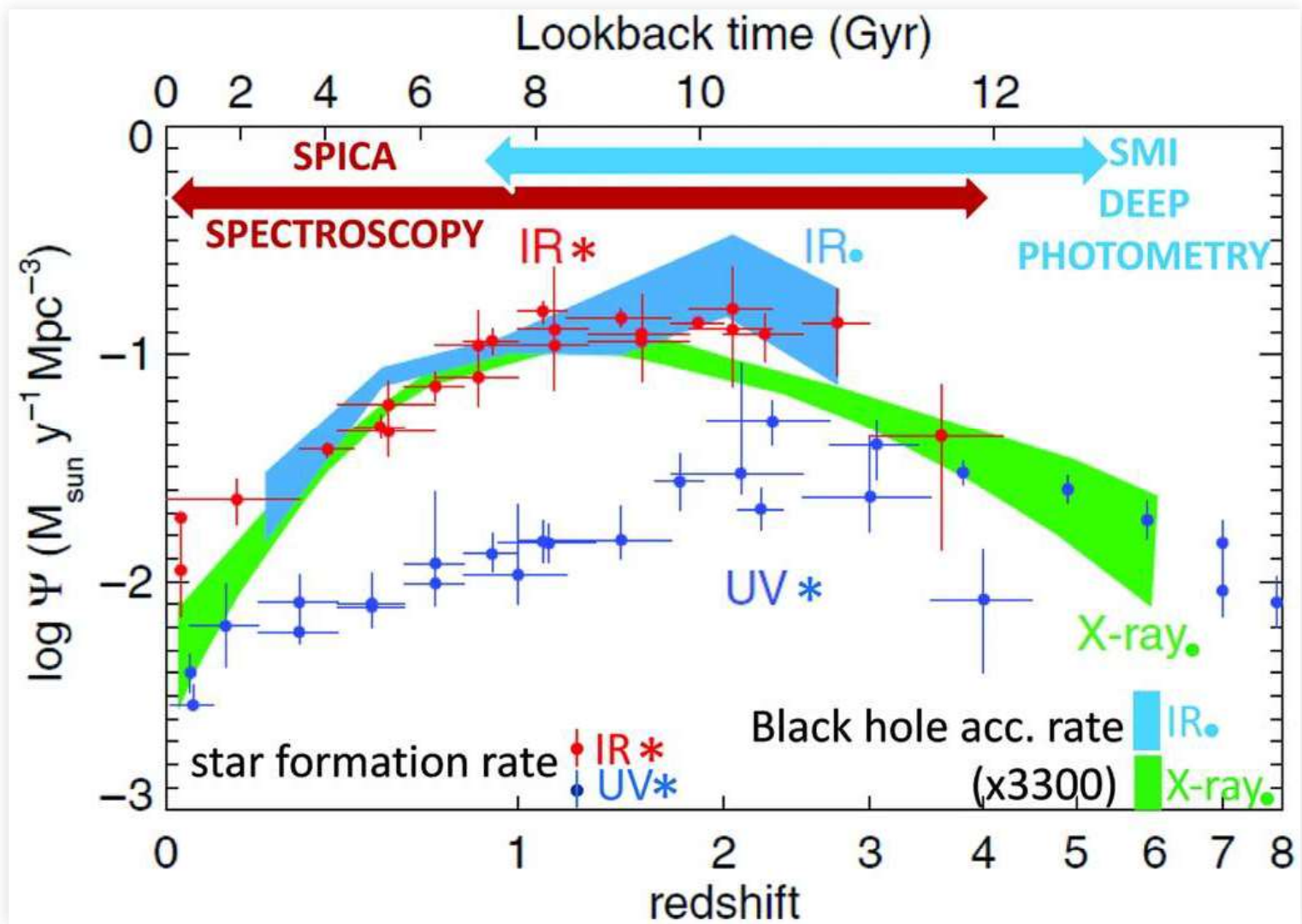
Lintott, Schawinski, Slosar, *et al.* 2008, *MNRAS*, 389, 1179



INSPIRE High Energy Physics information system



# 星形成史



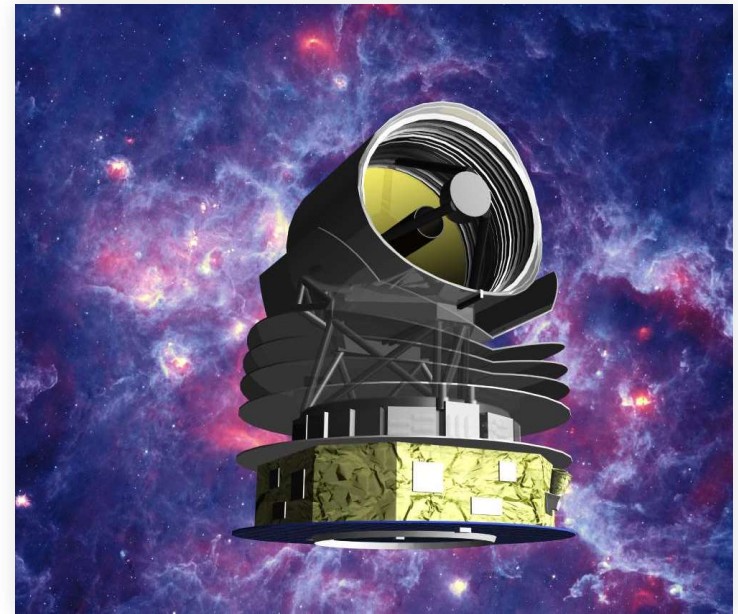
Spinoglio *et al.* 2017, *PASA* 35, e057

## 銀河の星形成をストップさせる要因

- 銀河の星生成率
  - 様々な年代の比較には単位体積辺りの星生成率を使う  
「星生成率密度」  $M_{\odot} \text{ yr}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$
- 銀河の星生成率は宇宙が **20億 ~ 30 億歳**のころがピーク
  - 銀河合体が主因と考えられているが、まだ確定ではない
- その後星生成率は減少
  - この頃の銀河質量の半分はガス。従って星を作る材料は十分ある筈。
  - 「星生成抑制問題」

# SPICAによる観測

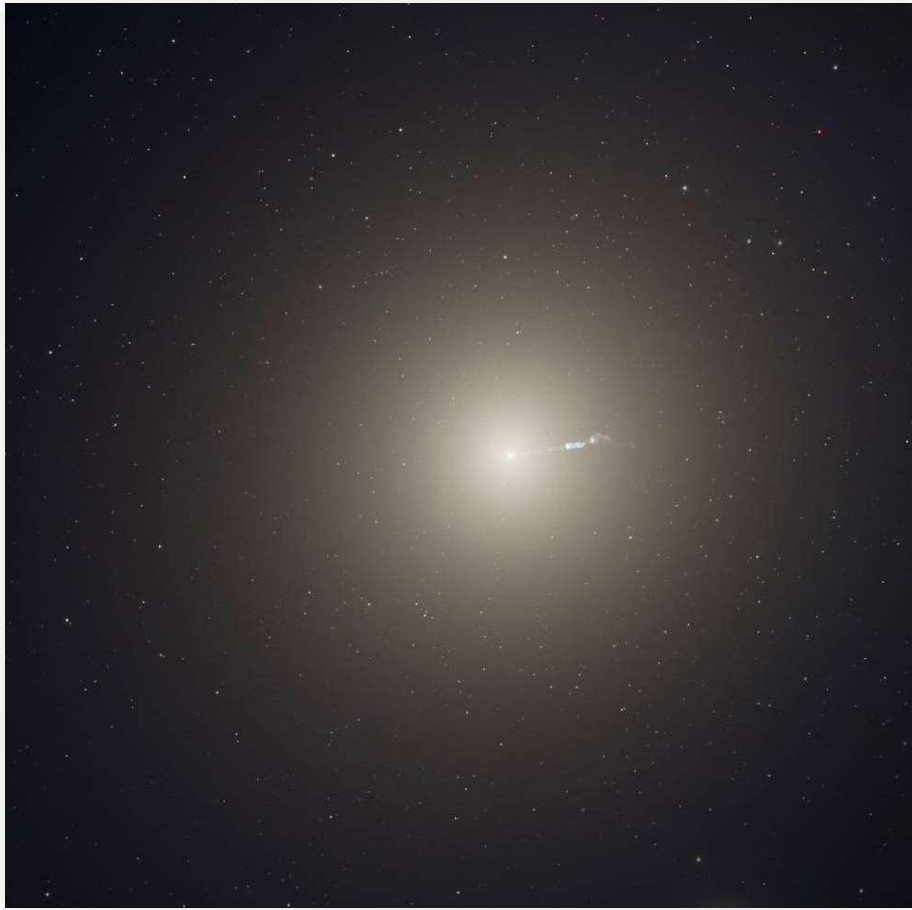
- 星形成の盛んだったころの銀河を観測、星形成をトリガーする要因・ストップさせる要因を解明
- 星間塵により隠された星形成銀河の観測 → 赤外線
- 日欧共同の赤外線天文衛星計画
- 2030年ころの打ち上げを目指す
  - 欧州宇宙機構(ESA)の3つの候補のうちの1つ
  - 2021年に最終選抜予定



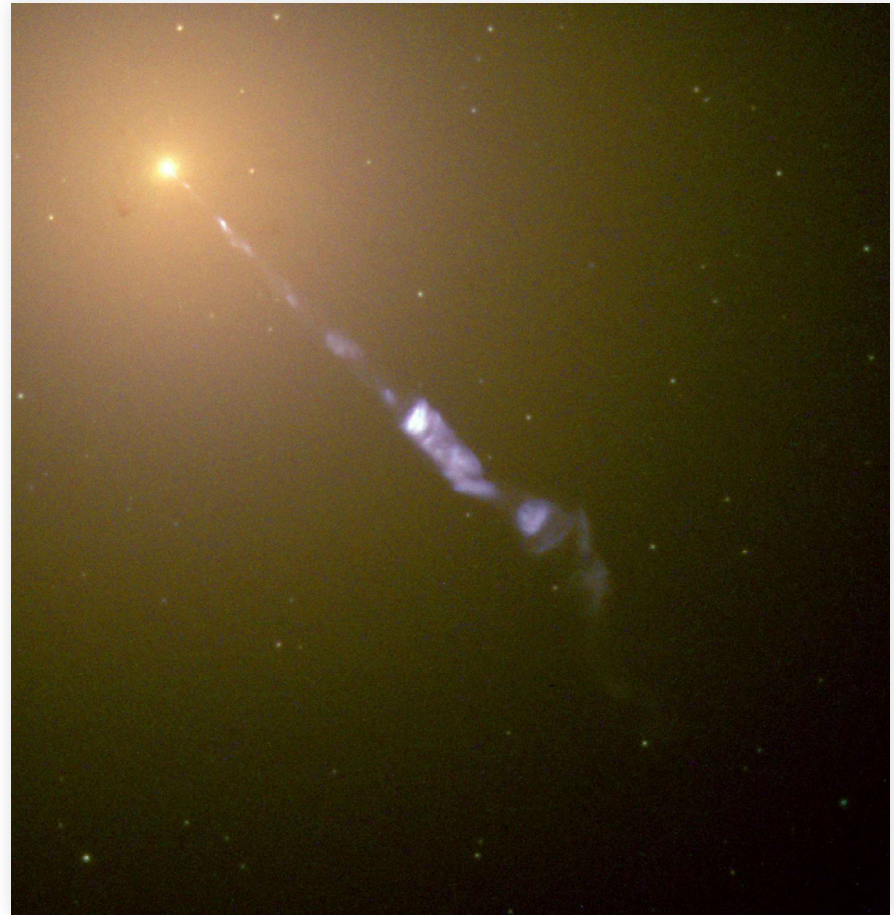
SPICA team

# 銀河のもう一つの活動性

# M87中心核からのジェット



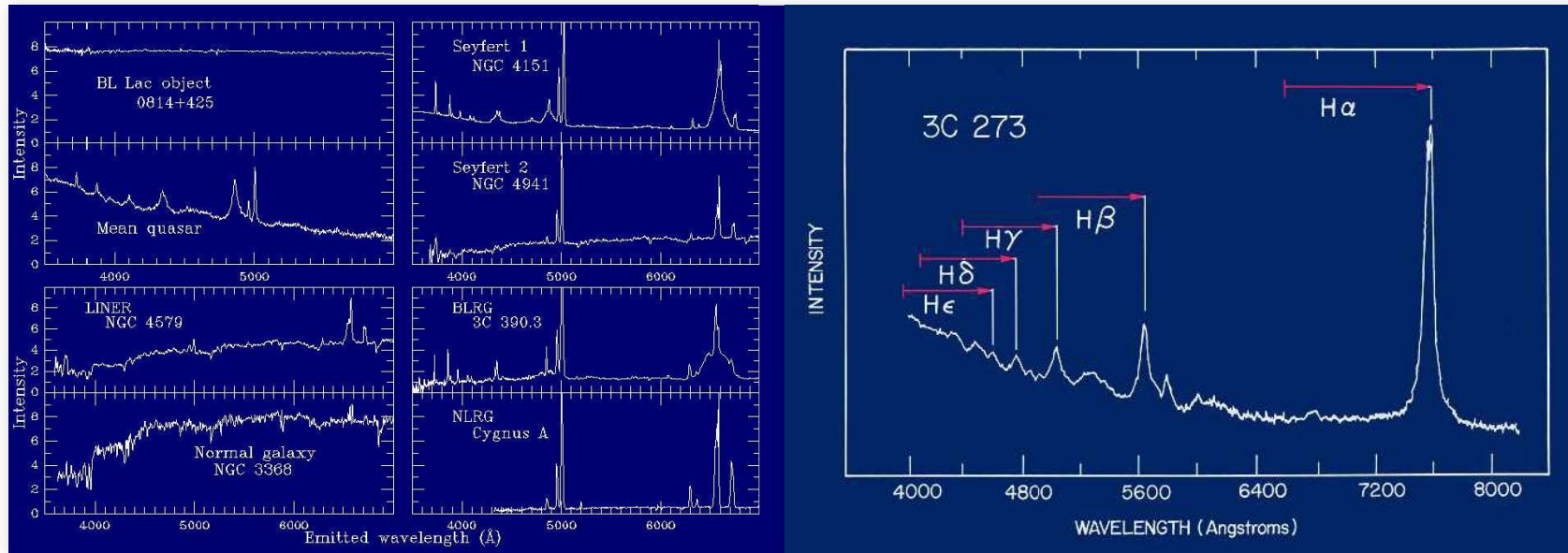
Credits: NASA, ESA and the Hubble Heritage Team (STScI/AURA);  
Acknowledgment: P. Cote (Herzberg Institute of Astrophysics) and  
E. Baltz (Stanford University)



Credits: NASA and the Hubble Heritage Team (STScI/AURA)

# 活動銀河中心核 (Active Galactic Nuclei: AGN)

- 中心部に明るい「核」が存在
- 高温で電離された原子の出す輝線の検出
- 輝線の“幅”が広い → ガスが激しく運動している
- 3C273の輝線の“赤方偏移”  $z = 0.185$  (約20億光年)
  - 銀河中心核の輝度  $L = 2 \times 10^{12} L_{\odot}$

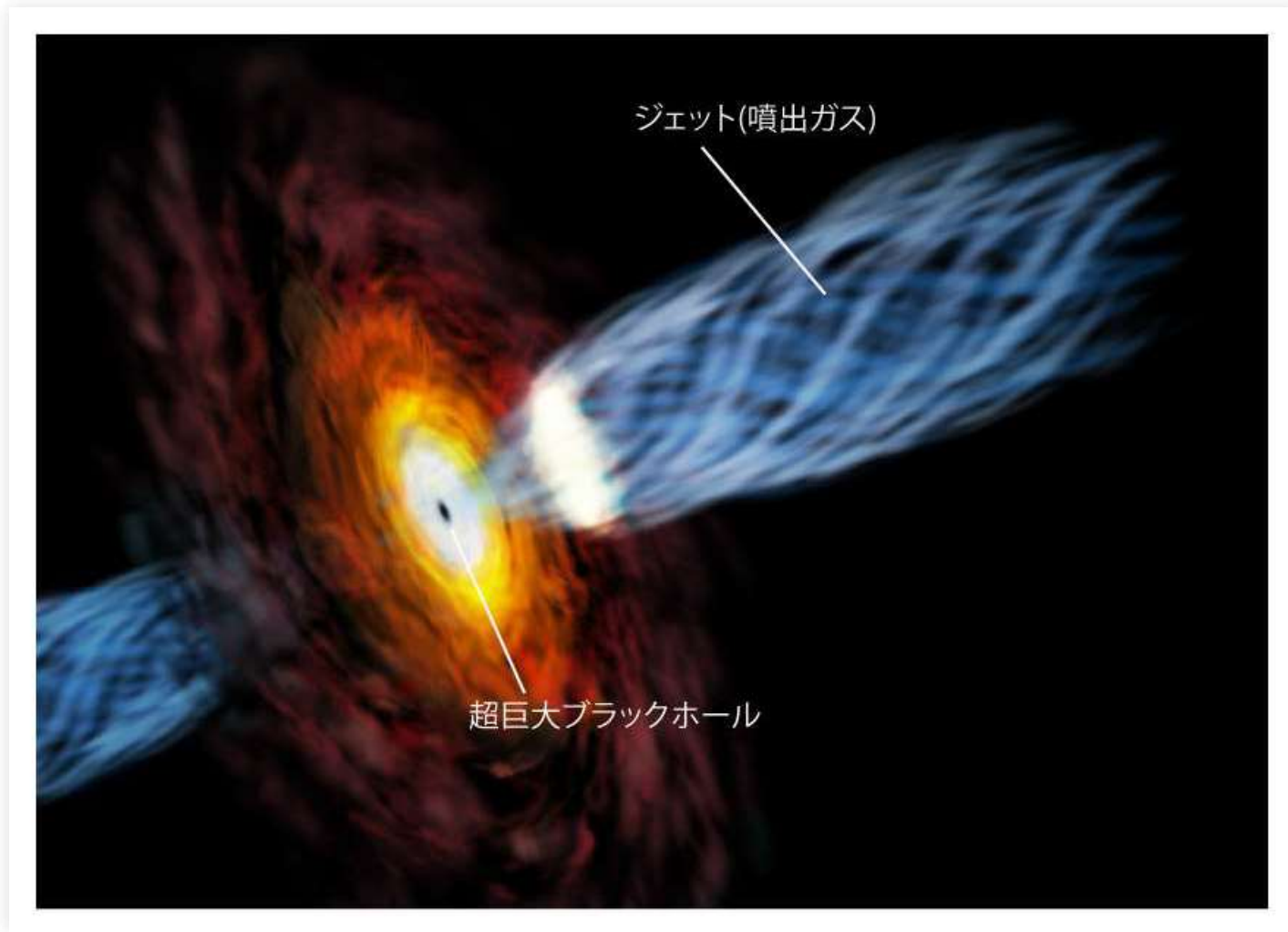


# AGNのエネルギー源

- 活動領域の大きさ：1光年以下
  - 3C48の例：数ヶ月程度の短い時間で明るさが変動  
→領域の大きさは「数光月」以下
- 狭い領域から  $\geq 10^{12} L_{\odot}$  のエネルギーを放射  
→ ブラックホール (エネルギー変換効率10 ~ 40%)
- 質量降着率  $\sim 1 M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$
- 輻射圧とブラックホールの引力との釣り合いで明るさの上限が決まる **エディントン光度 (Eddington luminosity)**
- エディントン限界 (Eddington limit)
  - $1 M_{\odot} \leftrightarrow 3 \times 10^4 L_{\odot}$
  - $3 \times 10^7 M_{\odot} \leftrightarrow 1 \times 10^{12} L_{\odot}$

# M87中心核の想像図

- $7 \times 10^9 M_{\odot}$ のブラックホールが存在するとされる

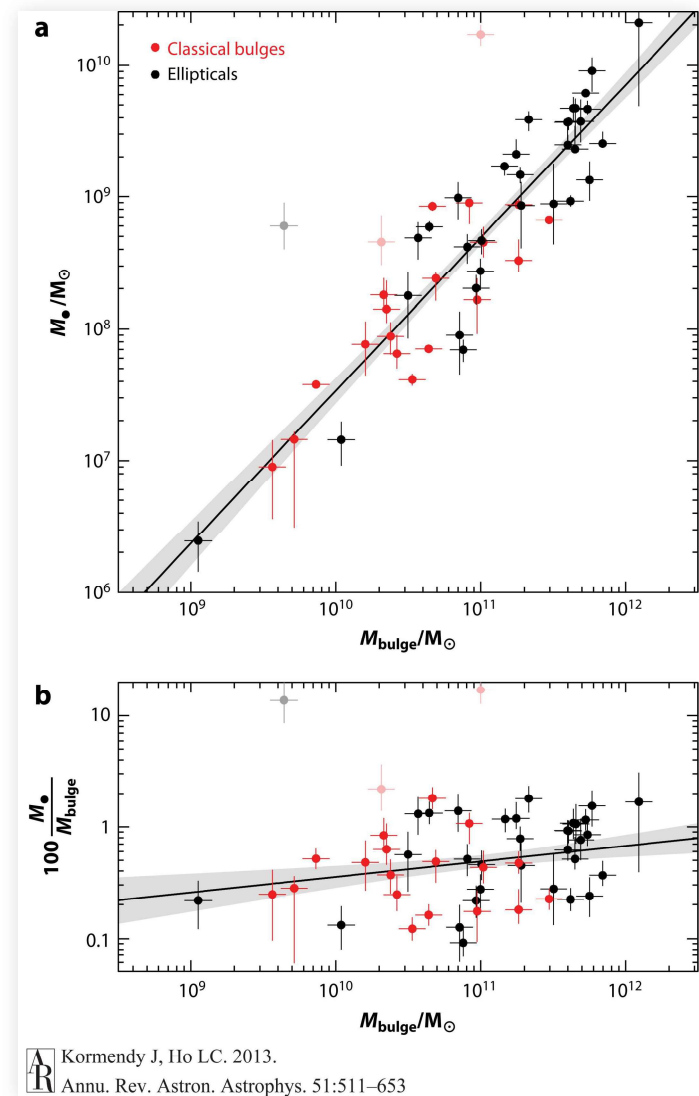


画像クレジット:国立天文台/AND You Inc.



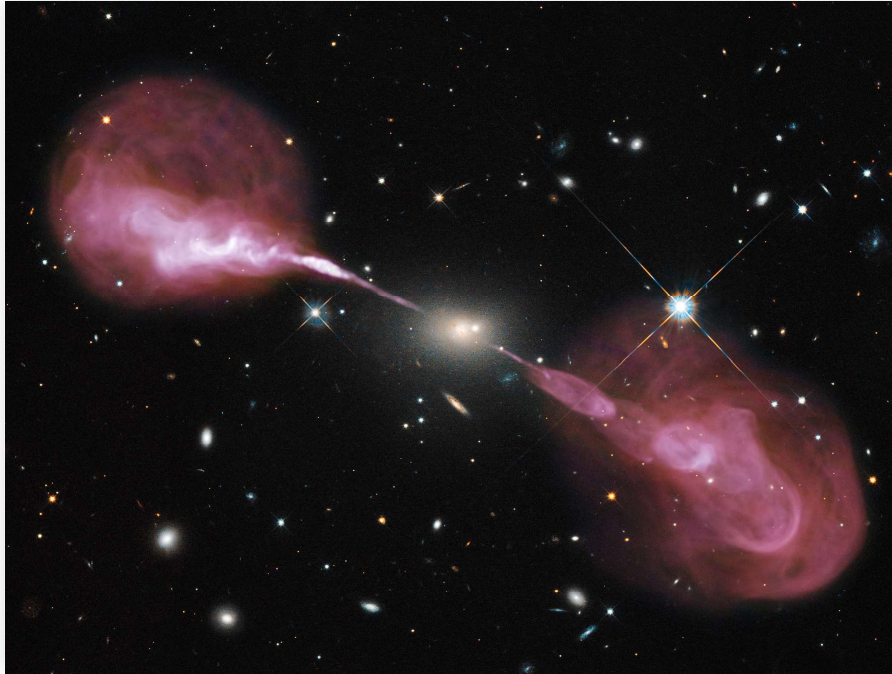
# ブラックホール質量の「共進化」(co-evolution)

- 銀河中心核のブラックホール質量と渦巻き銀河のバルジや楕円銀河の質量が相関
  - “Magorian relation” と呼ばれる
- 銀河合体による中心核ブラックホールの合体成長？

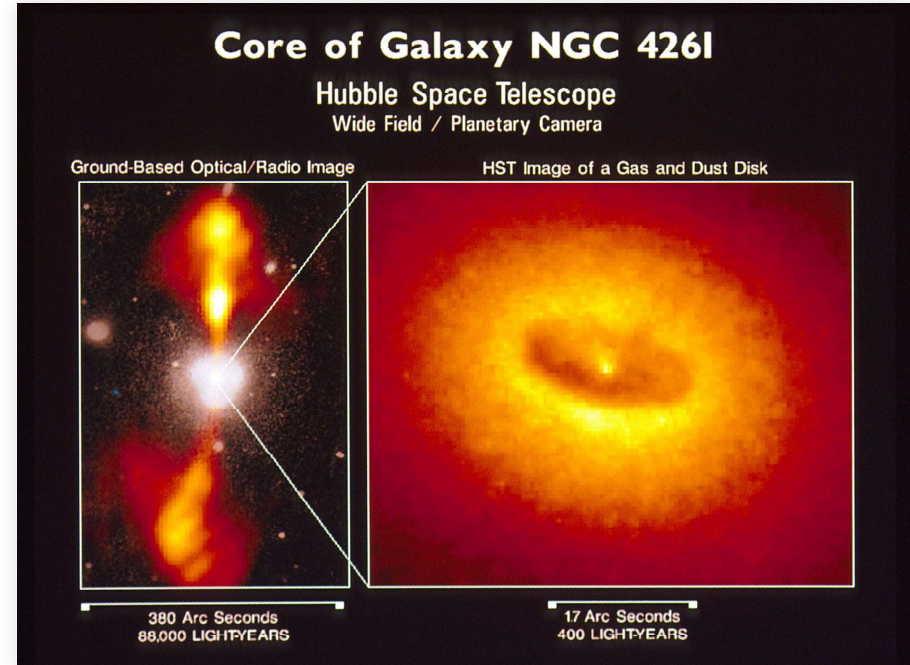


Kormendy & Ho 2013, ARA&A, 51, 511

# 活動銀河核からのジェット



Credit: NASA, ESA, S. Baum and C. O'Dea (RIT),  
R. Perley and W. Cotton (NRAO/AUI/NSF),  
and the Hubble Heritage Team (STScI/AURA)

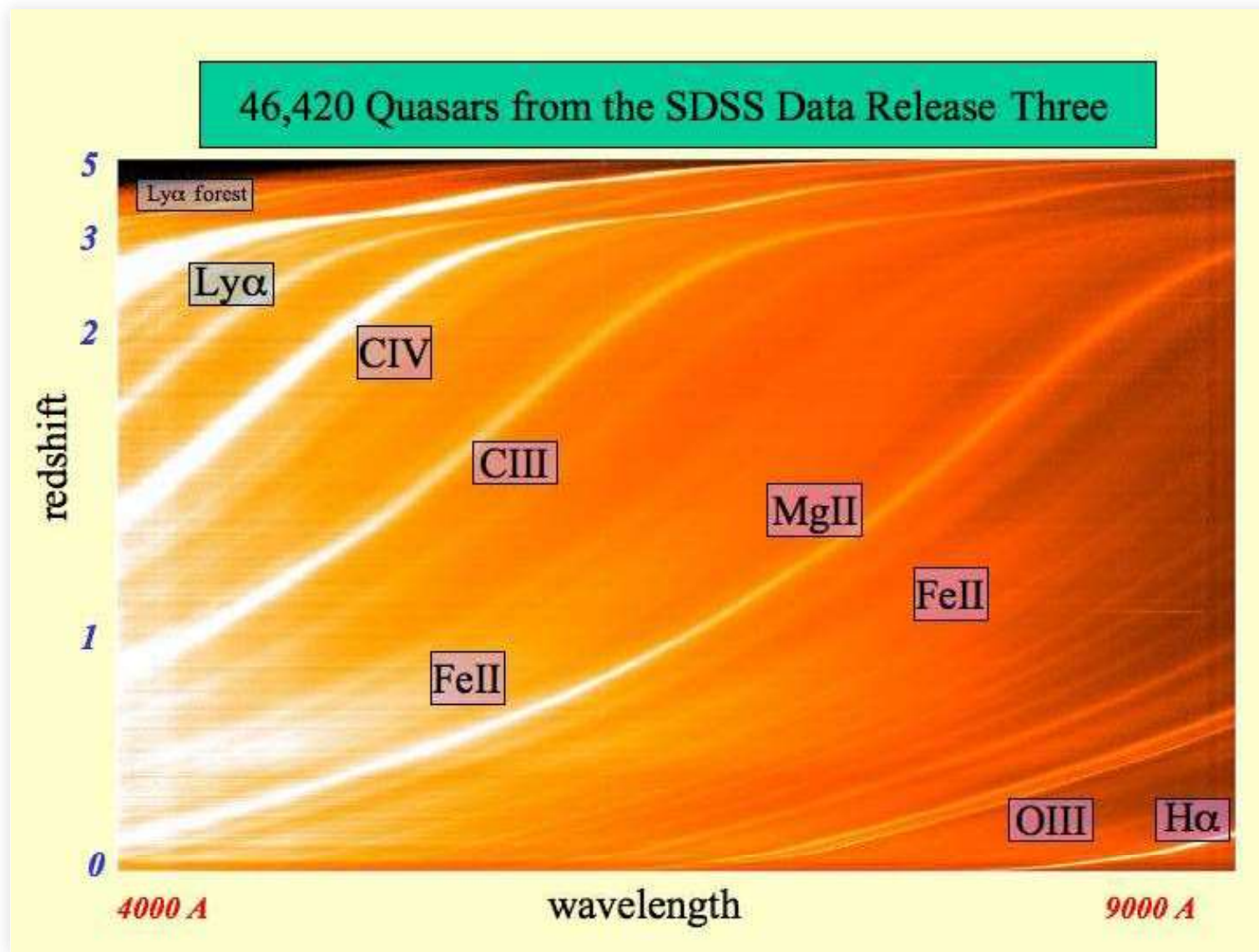


Credit: Walter Jaffe/Leiden Observatory,  
Holland Ford/JHU/STScI, and NASA

- 星形成をストップさせるもう一つの要因となり得る

# より遠くの銀河

# SDSSによる遠方銀河の観測



Credit: X. Fan and the Sloan Digital Sky Survey.

# 2007時点の最遠天体トップ10

10天体中9天体が日本人による論文(「すばる」の活躍)

天体名	赤方偏移	距離(10億光年)
IOK1	6.96	13.0295
SDF132522.3+273520	6.597	12.9738
SDF132520.4+273459	6.596	12.9737
SDF132357.1+272446	6.589	12.9725
SDF132432.5+271647	6.58	12.9710
SDF132528.8+273043	6.578	12.9707
SDF132418.3+271455	6.578	12.9707
HCM-6A	6.56	12.9678
SDF132432.9+273124	6.557	12.9673
SDF132408.3+271543	6.554	12.9668

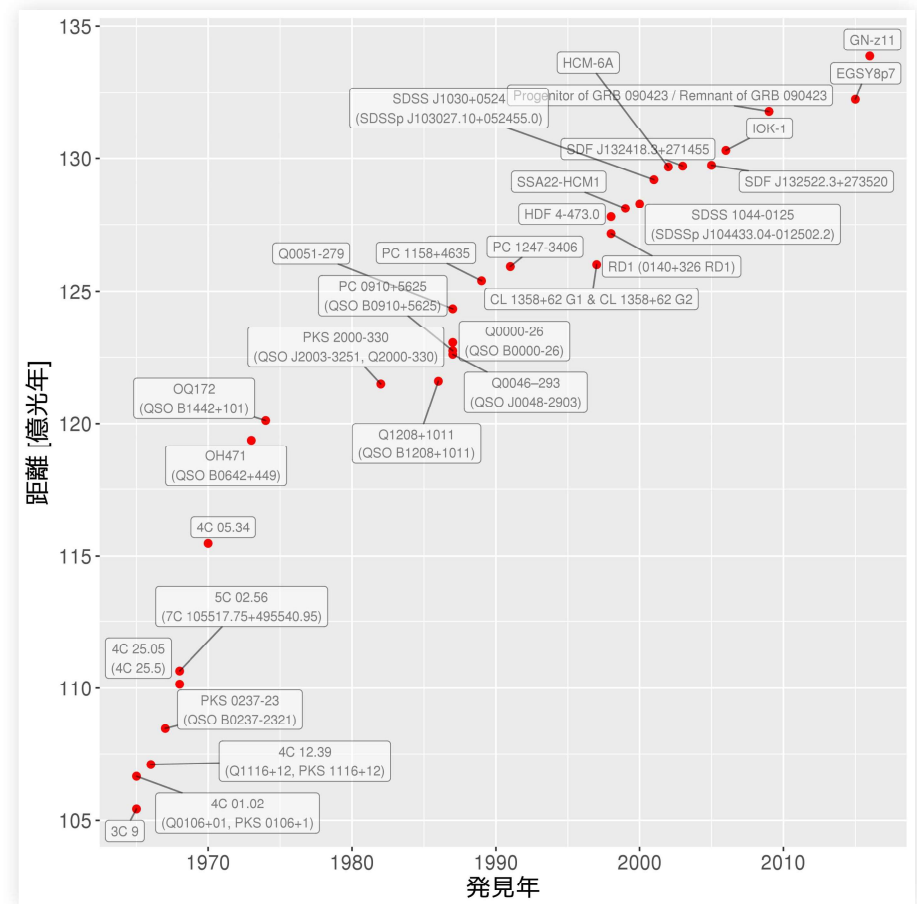
Taniguchi 2007, *Proceedings of the International Astronomical Union*, 3(S250), 429-436

# 現在の遠方天体の記録

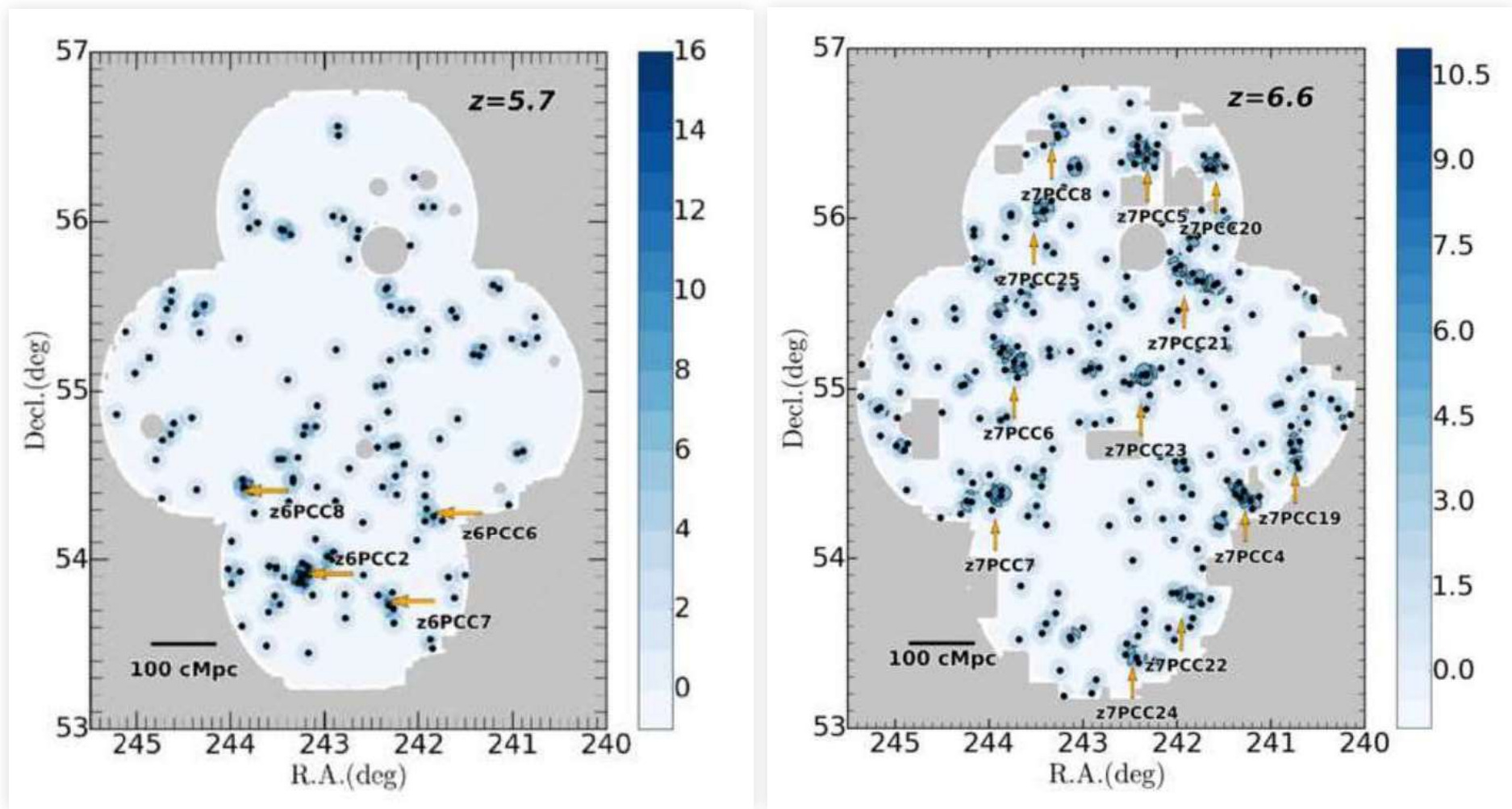
名前	赤方偏 移	距離(10億光 年)
GN-z11	11.09	13.39
MACS1149- JD1	9.11	13.26
EGSY8p7	8.68	13.23
A2744 YD4	8.38	13.2
GRB 090423	8.2	13.18
EGS-zs8-1	7.73	13.13
z7 GSD 3811	7.66	13.11
ULAS J1342+0928	7.54	13.1
z8 GND 5296	7.51	13.1
A1689-zD1	7.5	13.1

Wikipedia

HST, Keck, VLT, Subaruなど  
複数の望遠鏡を組合せて観測

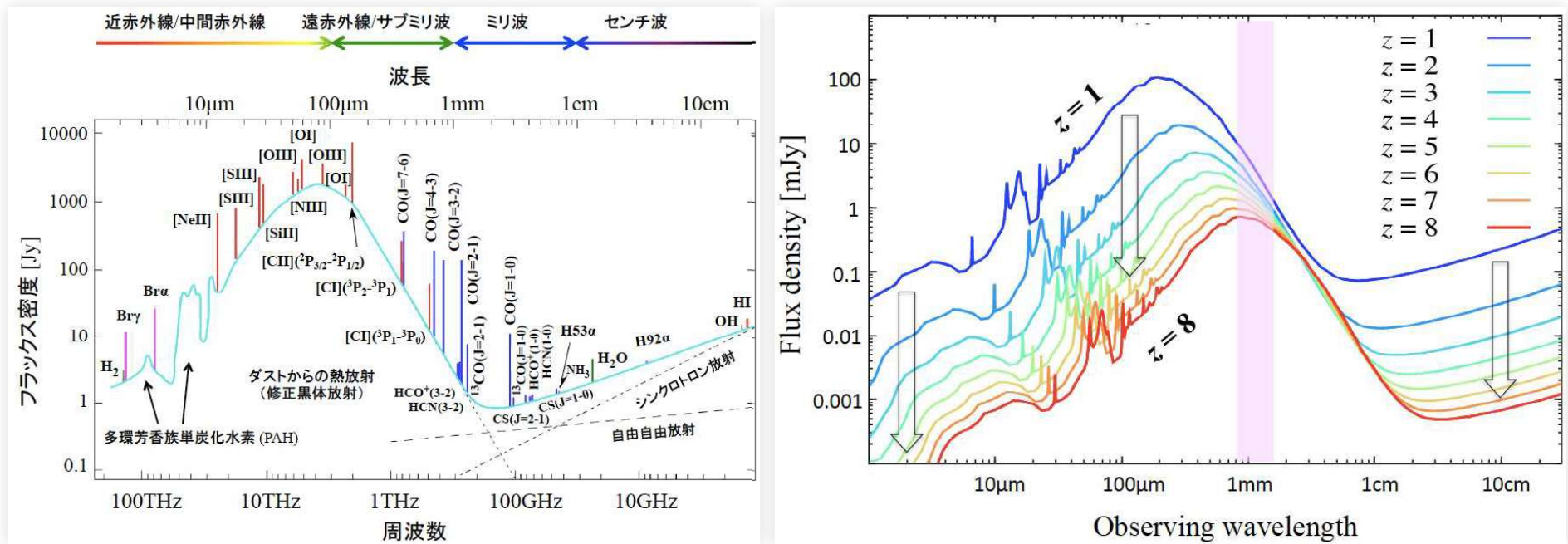


# SUBARU/HSCによる遠方銀河団の観測



Higuchi *et al.* 2018, arXiv1801.00531

# ALMAによる遠方天体観測の可能性

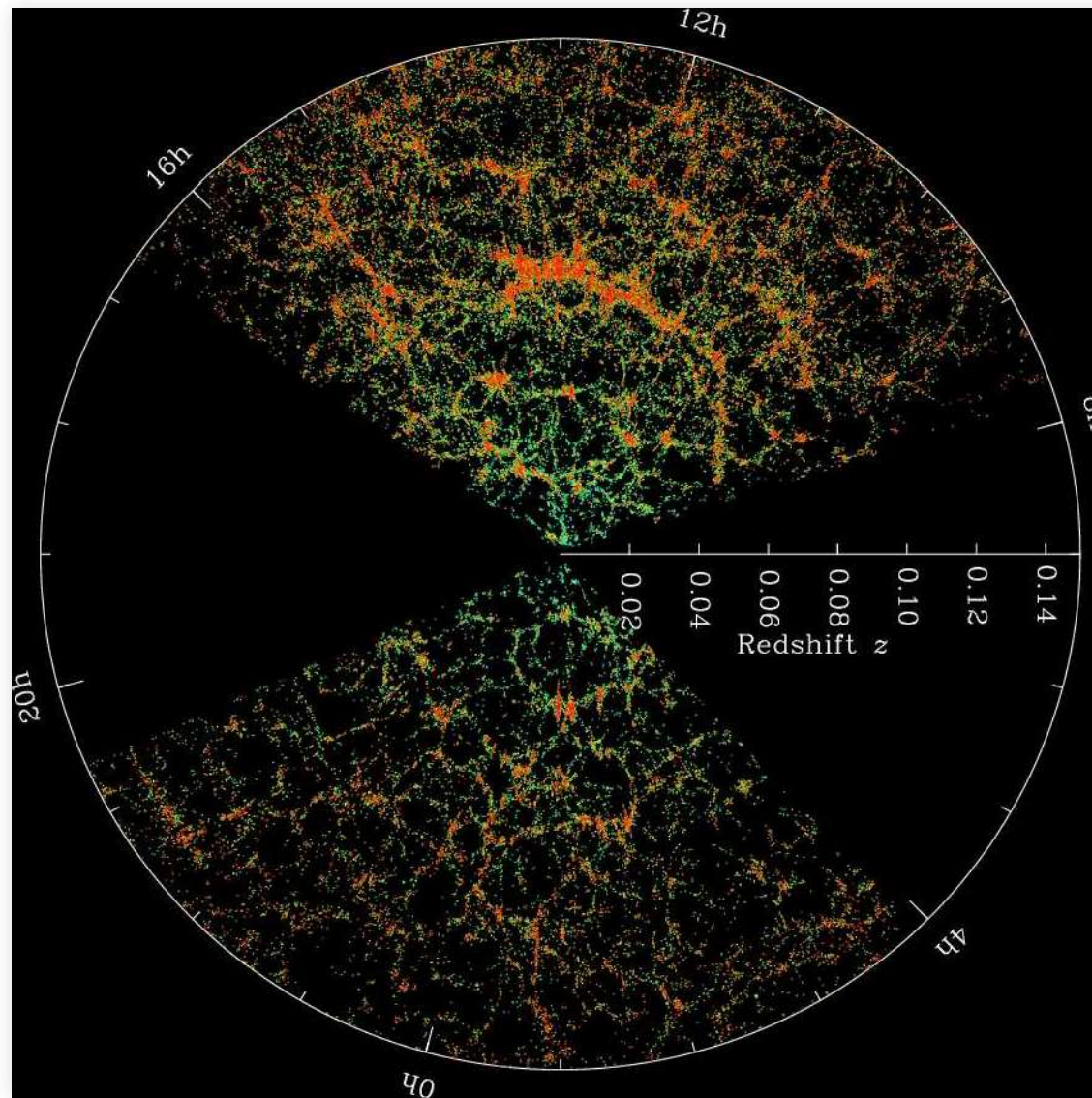


河野孝太郎教授(東大天文センター)ホームページより



# 宇宙の大規模構造

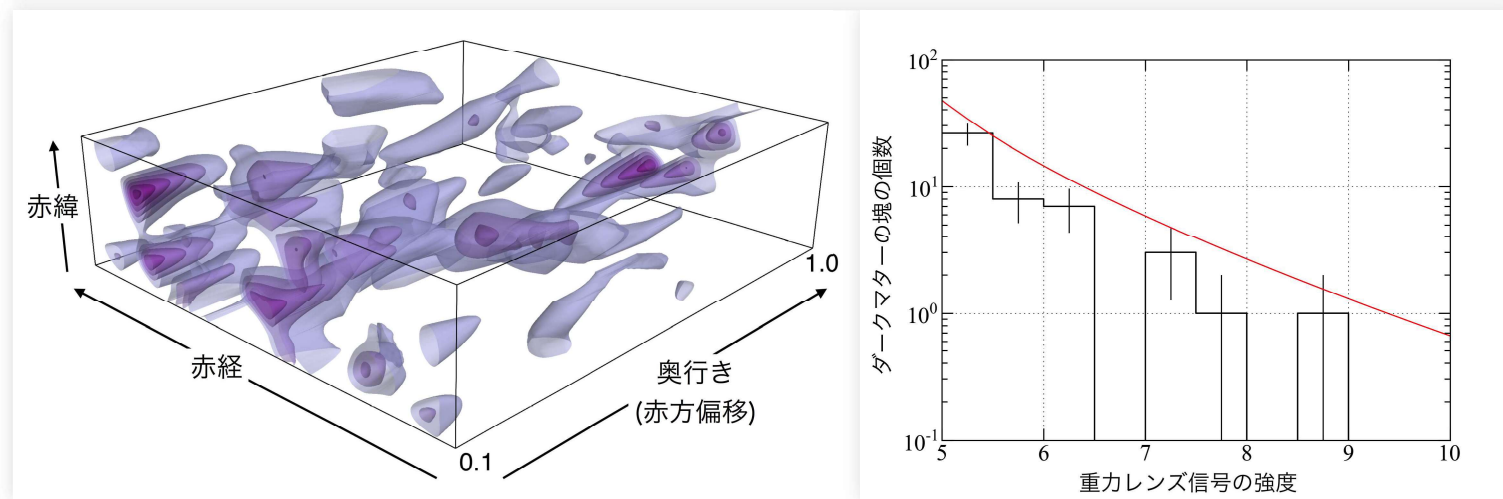
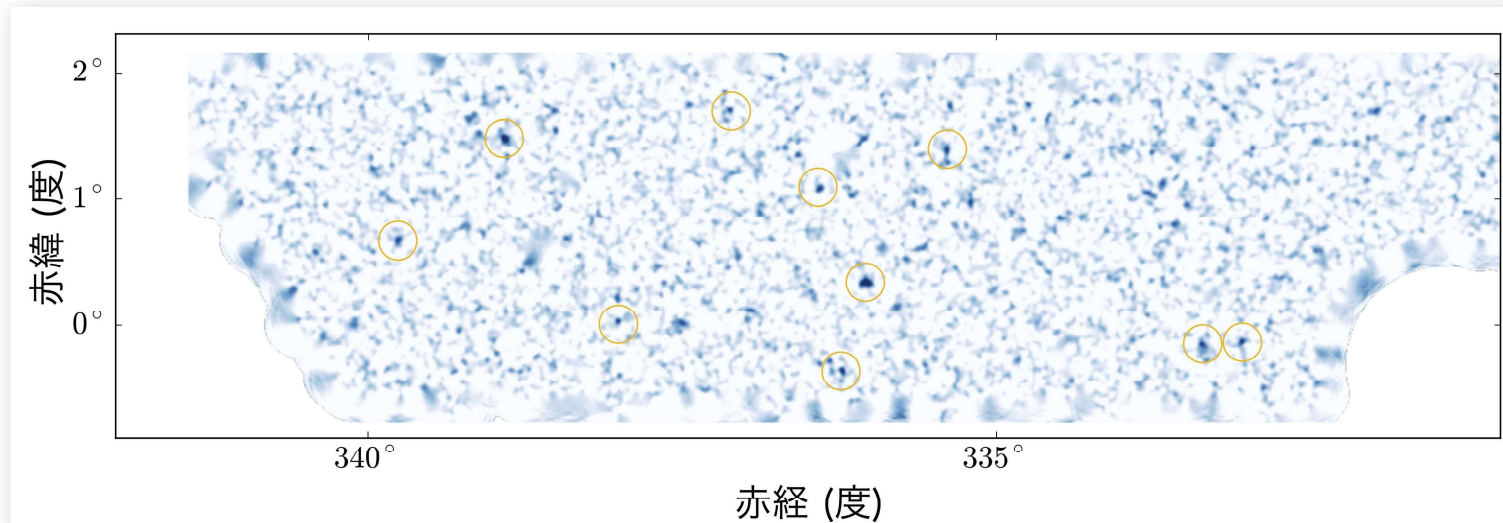
# SDSS



the Sloan Digital Sky Survey

# SUBARU/HSC

- 重力レンズ効果を利用したダークマターの分布図



クレジット：国立天文台/東京大学

# SUBARU/HSC darkmatter map

かつてない広さと解像度のダークマター地図



クレジット：国立天文台/東京大学

# 銀河形成モデル

# 渦巻き銀河の形成

小さな星の集まりから、大きな銀河へ

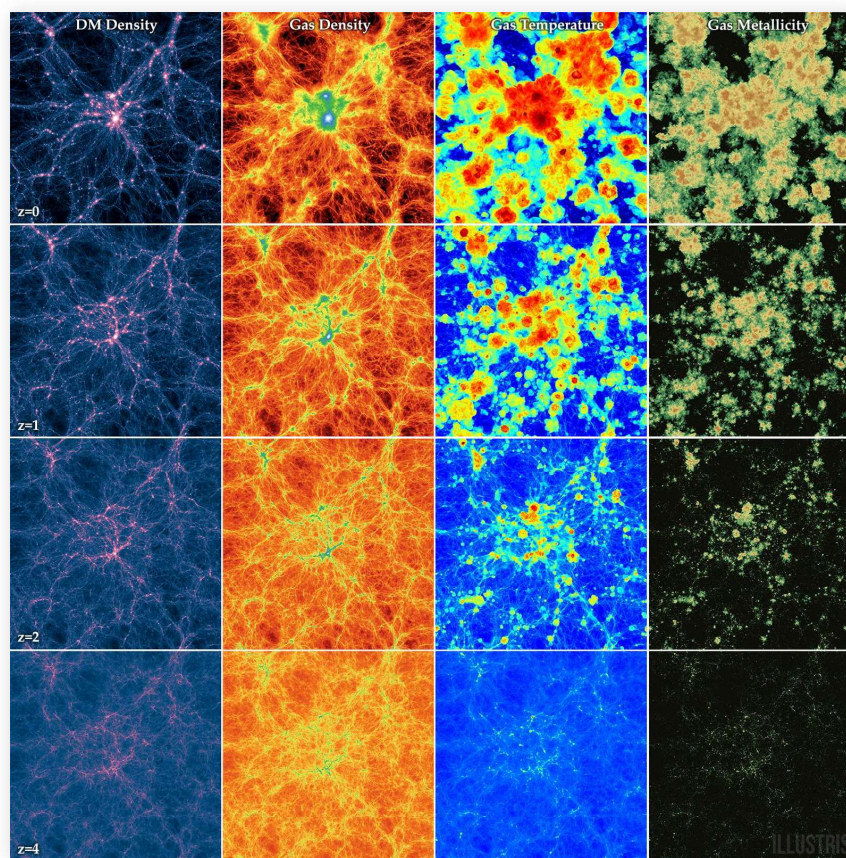
渦巻銀河の形成 (ver.3)



国立天文台 4次元デジタル宇宙プロジェクト提供

# 暗黒物質の必要性

- 見えている物質だけでは構造形成に不足
- 量に勝る暗黒物質がまず集まり、その中で通常の物質が冷却により構造を形成



Illustris

# 計算機シミュレーション

Illustris Simulation: Most detailed simulation of our Universe



IllustrisVogelsberger *et al.* (2014)