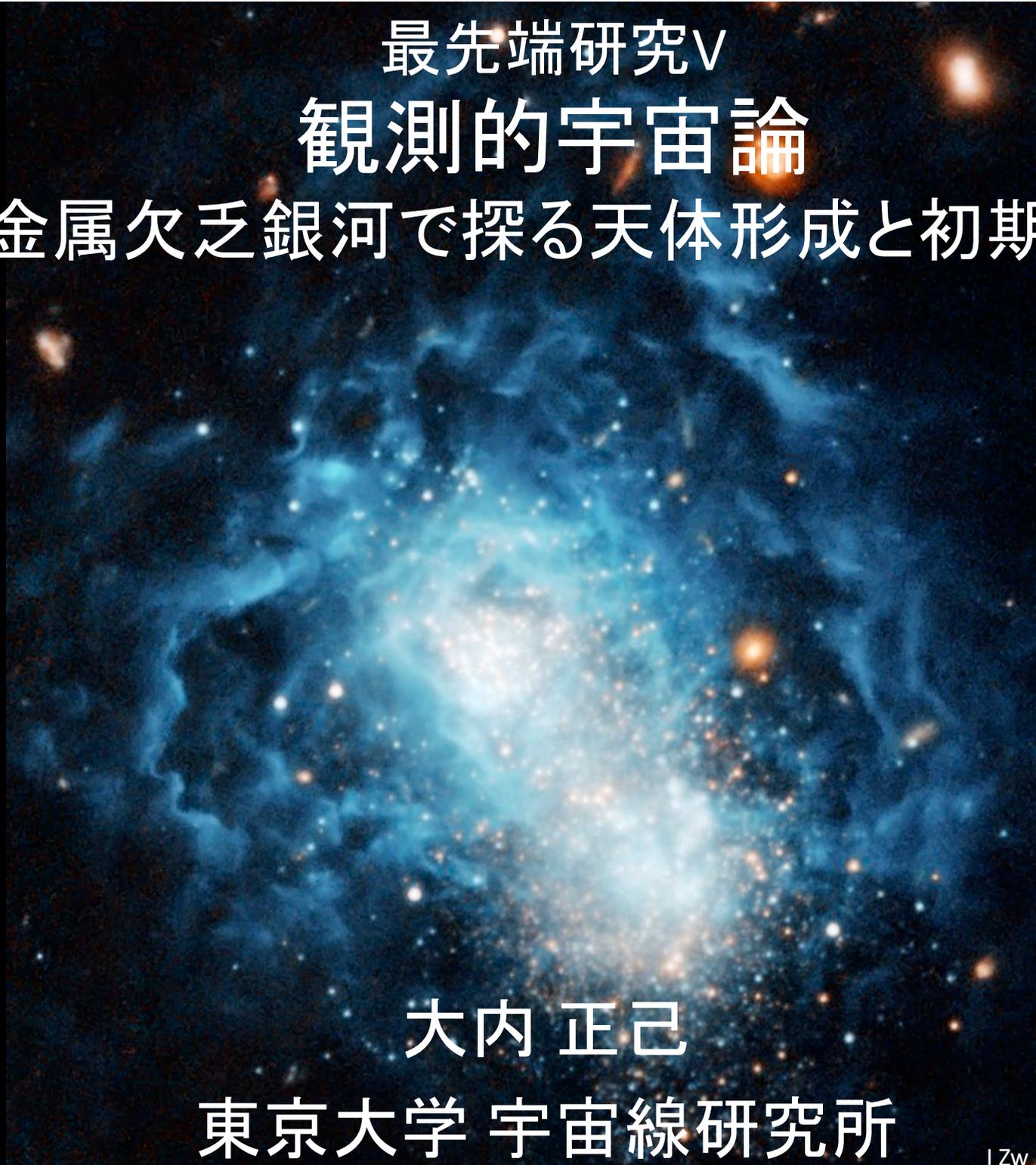


最先端研究V  
観測的宇宙論

---極金属欠乏銀河で探る天体形成と初期宇宙---



大内 正己  
東京大学 宇宙線研究所

# 光学観測で探る宇宙

- 何が見えるか？

- 恒星、高温ガス、超新星爆発、超大質量ブラックホール(AGN)、
- ガンマ線バースト残光、重力波対応天体、、、



M66 (Hubble Space Telescope, NASA/AURA)

# 光学観測で探る宇宙

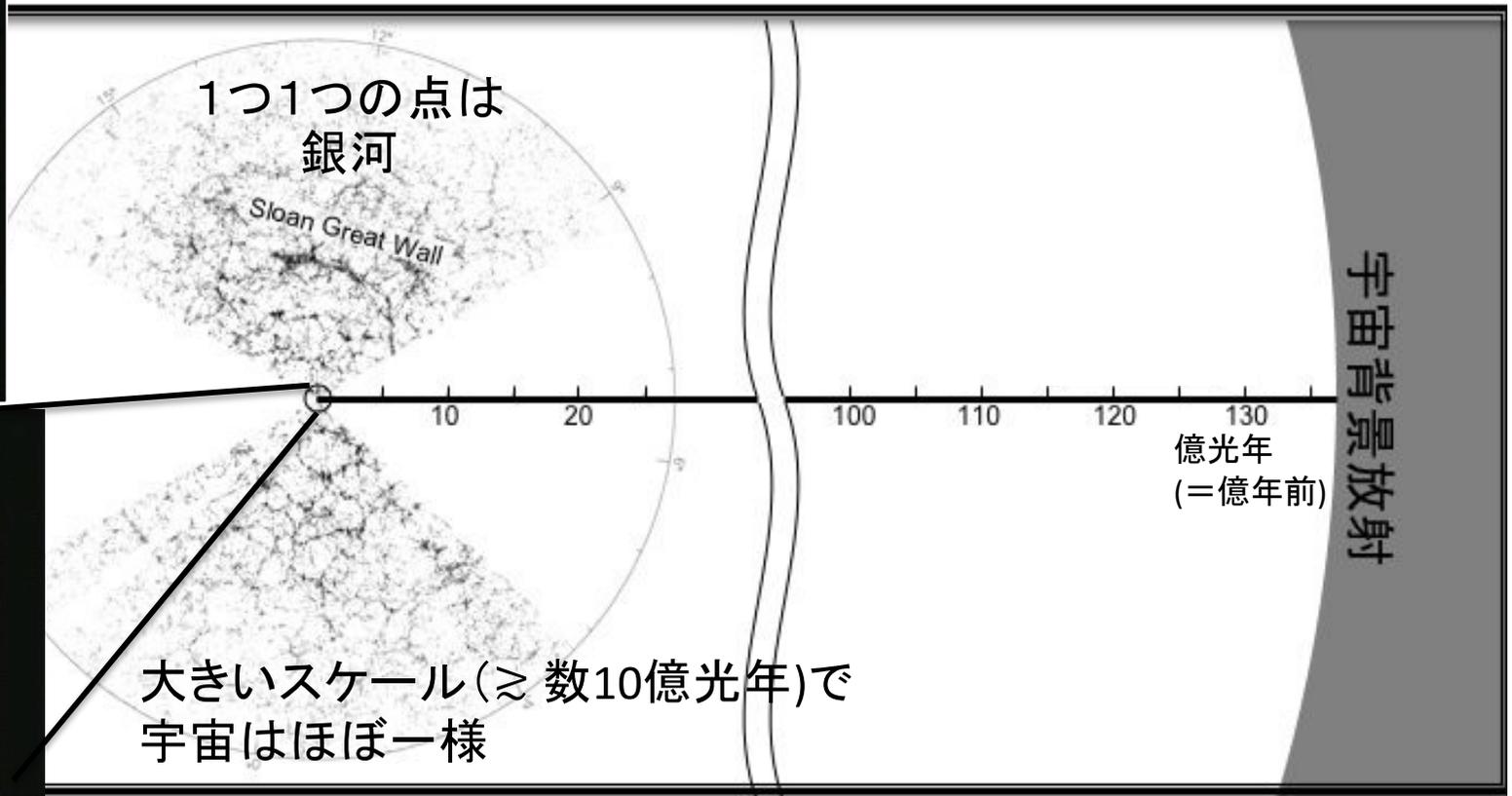
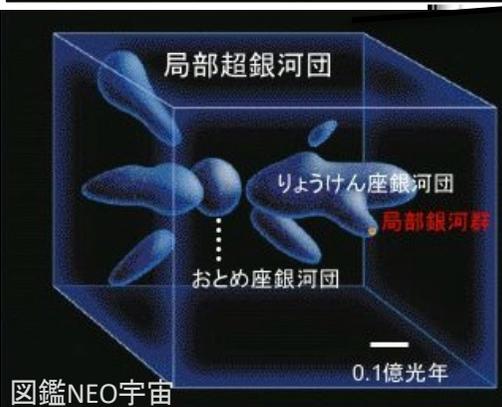
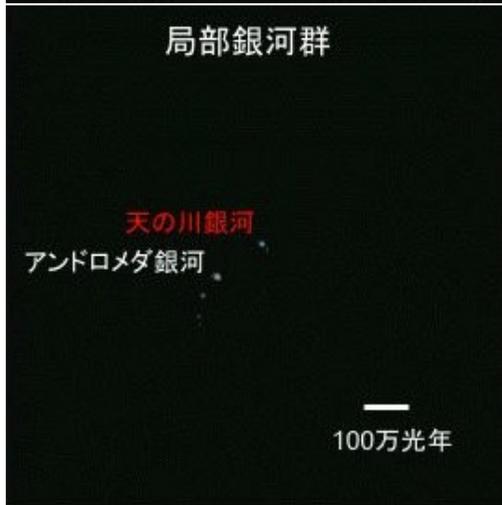
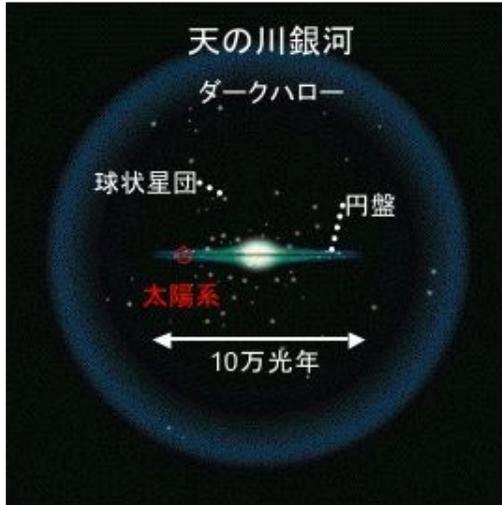
- どこまで理解できたか？

1. 宇宙の成り立ち

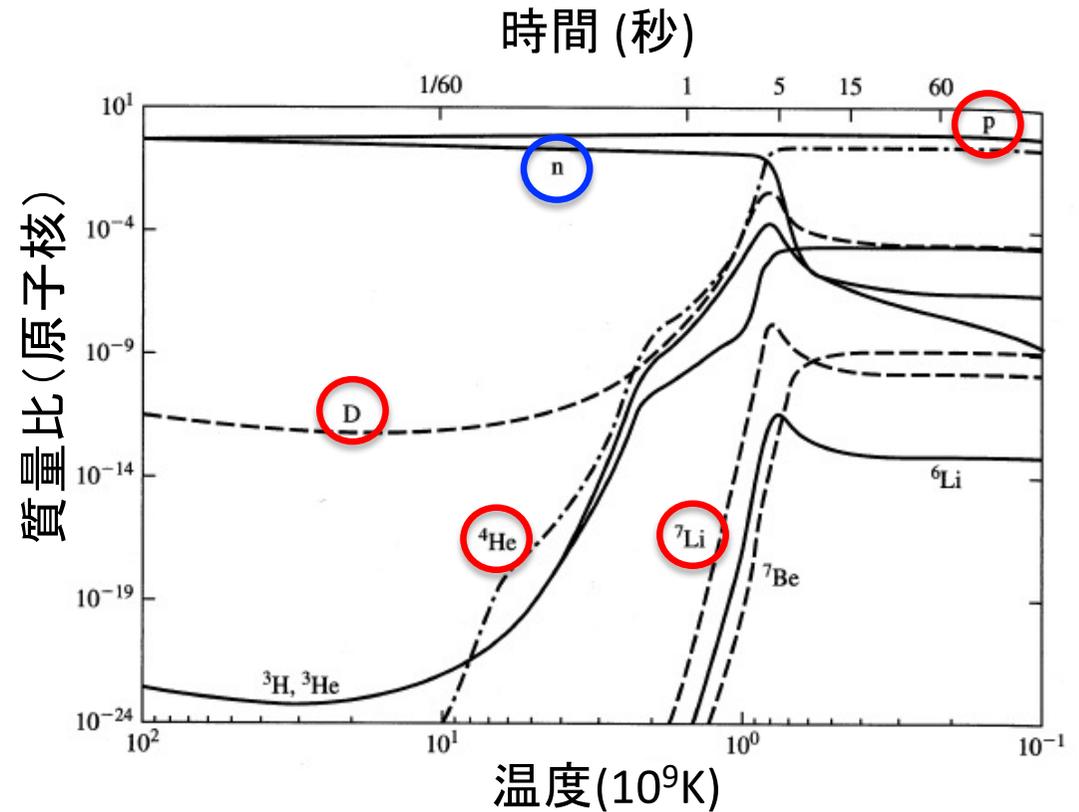
- 銀河宇宙（銀河が基本構成要素）

2. この銀河宇宙がどのように出来たか(宇宙史)？

- 「われわれはどこから来たのか われわれは何者か われわれはどこへ行くのか」(P. Gauguin/ 1897(!))



# ビッグバンで始まった宇宙



- インフレーション、粒子生成 (≒1秒) [≒ 10秒]
  - ハドロン (p,n)、[レプトン(e,v)]
- ビッグバン元素合成(BBN): (~1-100秒) → 始原ガス
  - 水素,ヘリウム,Li [Be] (これ以上の元素=金属)

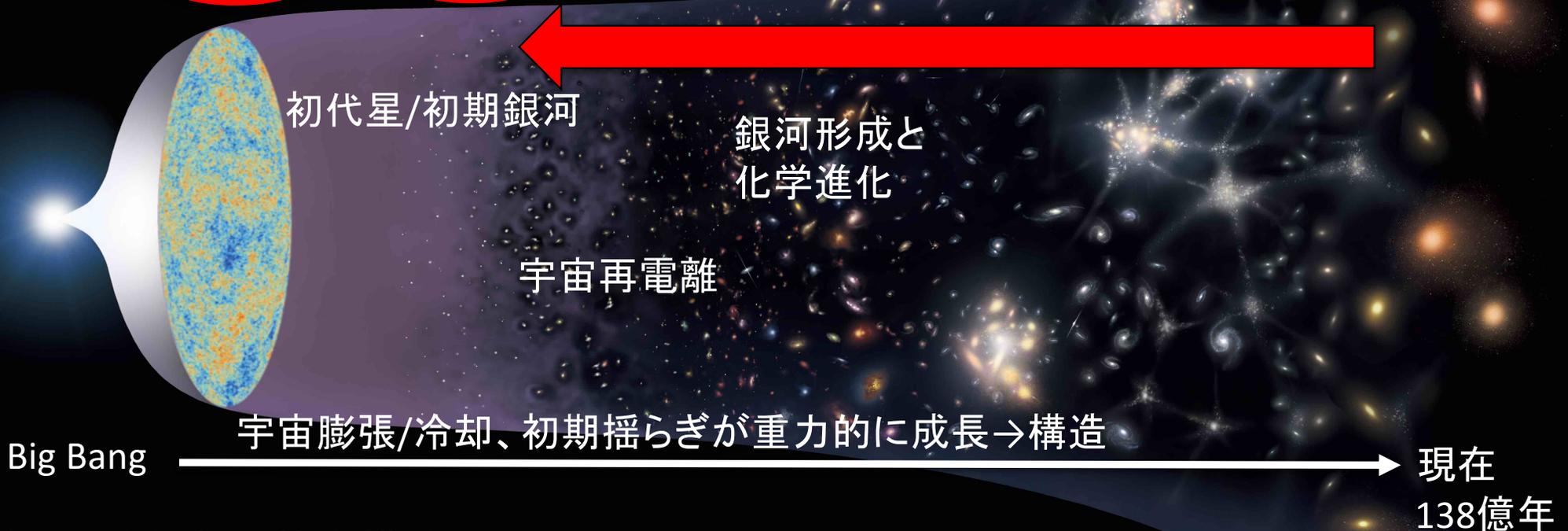
# 熱いビッグバン宇宙から 現在の宇宙へ

宇宙史 (模式図)

$z \sim 1100$

$z \sim 10$

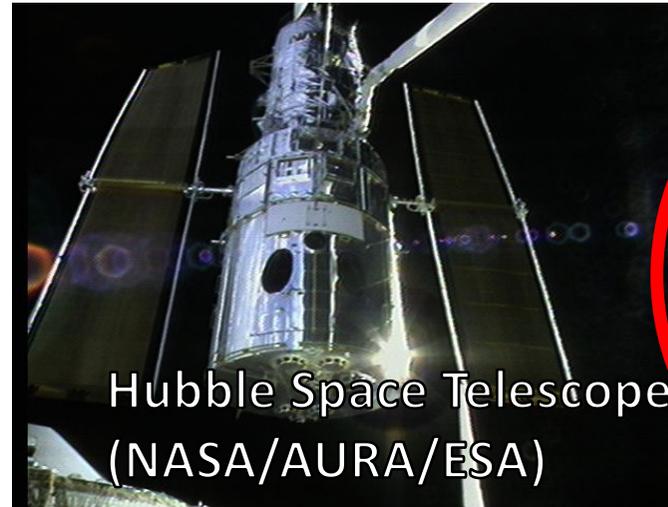
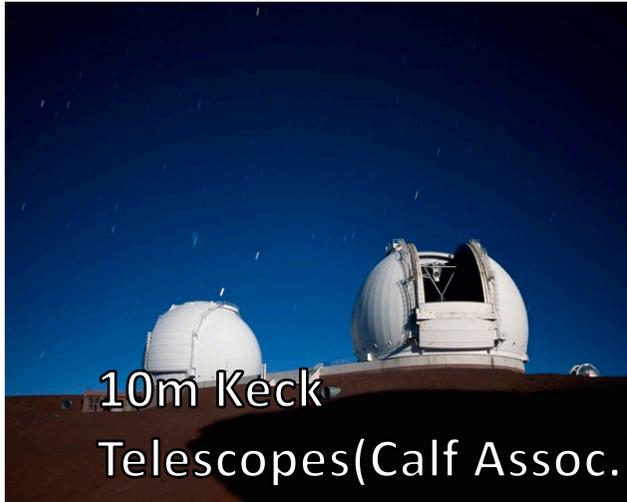
$z=0$



銀河が宇宙の基本構造へ

- 1) 初代星/初期銀河
- 2) 宇宙再電離
- 3) 宇宙大規模構造の中での銀河形成と化学進化

# 大型望遠鏡





大きさ比べ  
すばる望遠鏡と家庭用望遠鏡

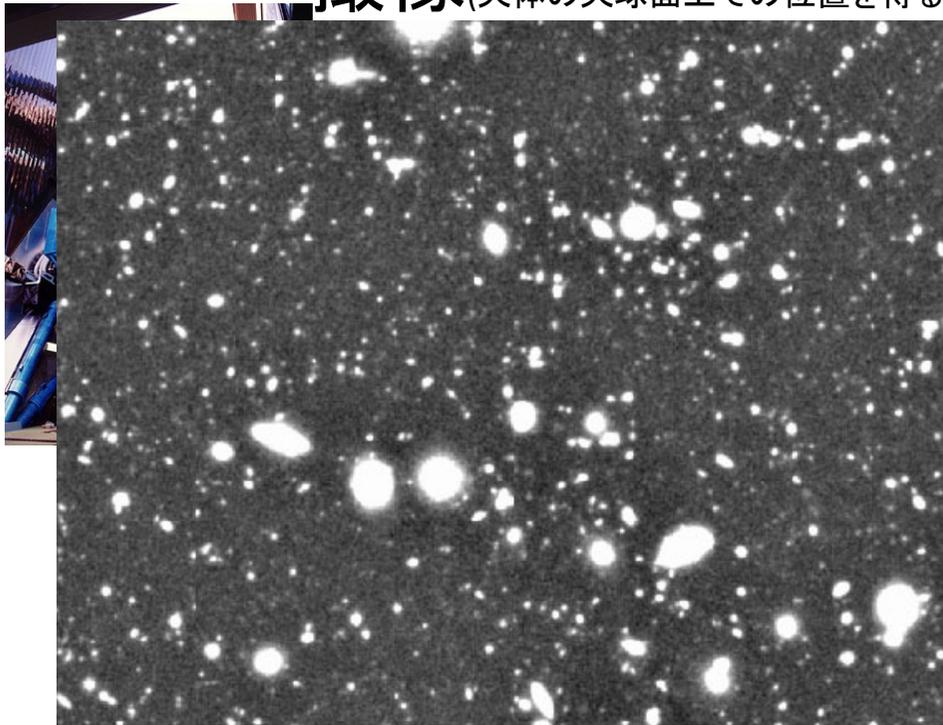


## 光学大型望遠鏡による観測

- 観測はどのように行われるか？
- 観測データはどのようなものか？
- どこまで宇宙が見えたか？

# 観測装置

撮像 (天体の天球面上での位置を得る, XY)

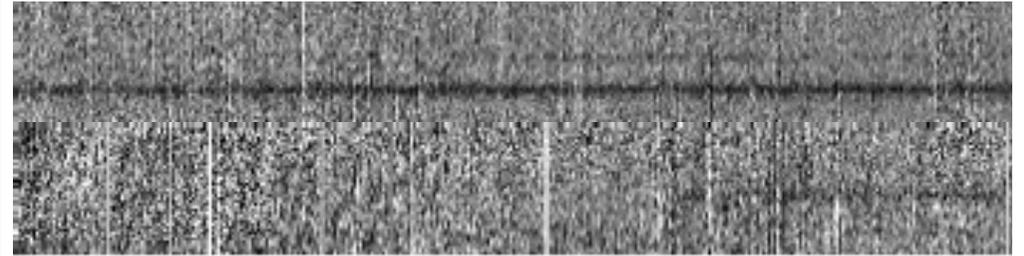


CCDカメラ

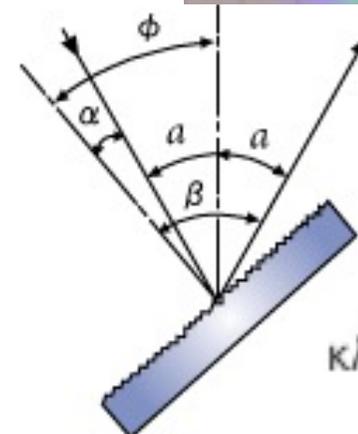
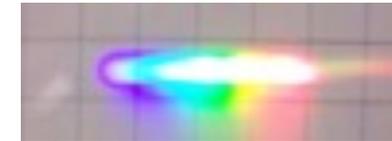
Suprime-Cam 8000万画素

Hyper Suprime-Cam 8億7000万画素

分光 (天体の赤方偏移を測る, z)

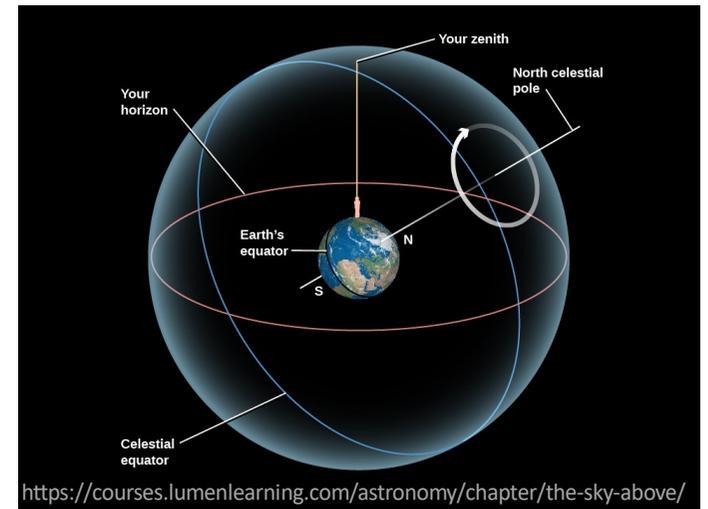


回折格子



$$\kappa\lambda = 2 d \sin\phi \cos\alpha$$

# 観測する天域



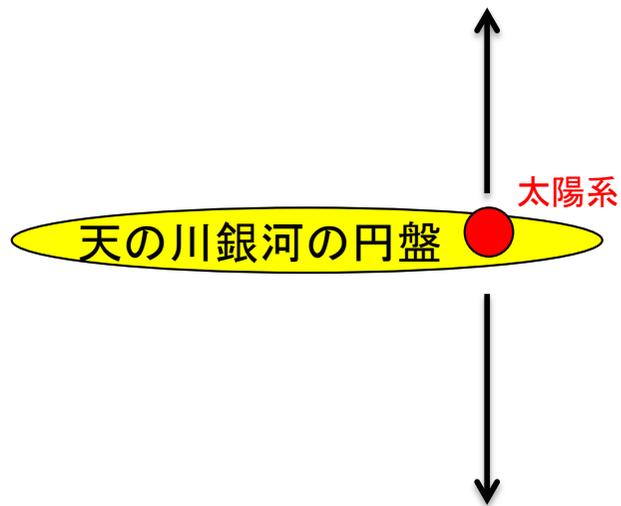
- Quiz:

- 過去(つまり遠方)の宇宙を見るためには、望遠鏡をどこに向けて観測すれば良いか？それは何故か？
  - 「大きいスケール(≧ 数10億光年)で宇宙はほぼ一様」、  
なので、どこを観測しても良いが、実際には観測する方向は大体決まっている。

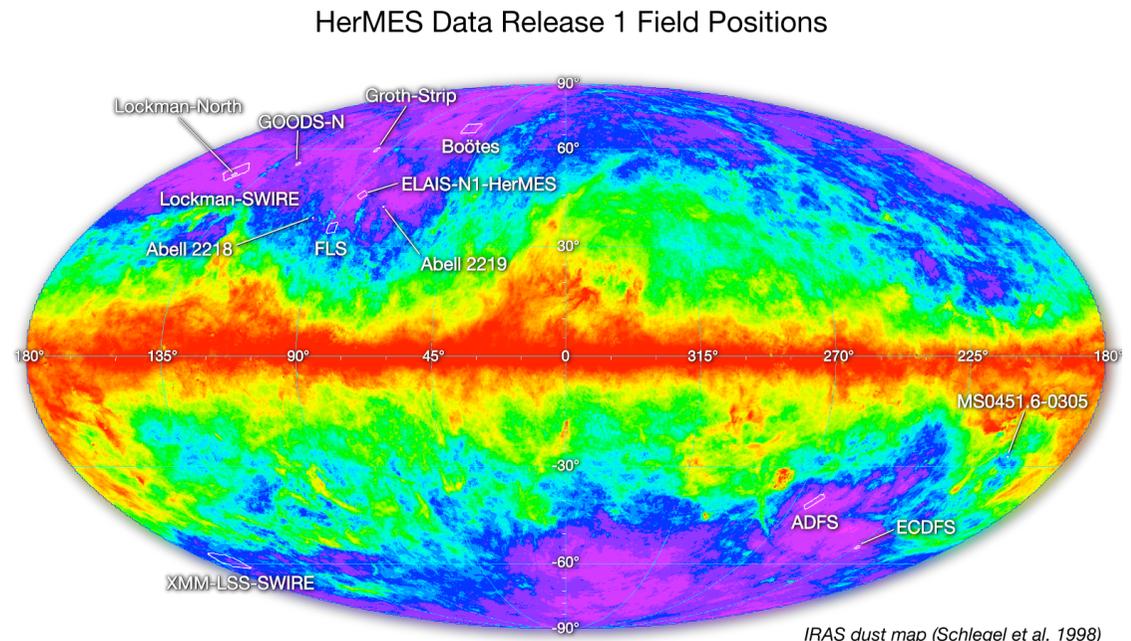
Hint: 遠方宇宙の観測は春と秋に行われる

# 観測する天域

- 銀極方向 (高銀緯方向)



天の川銀河を横から見た図



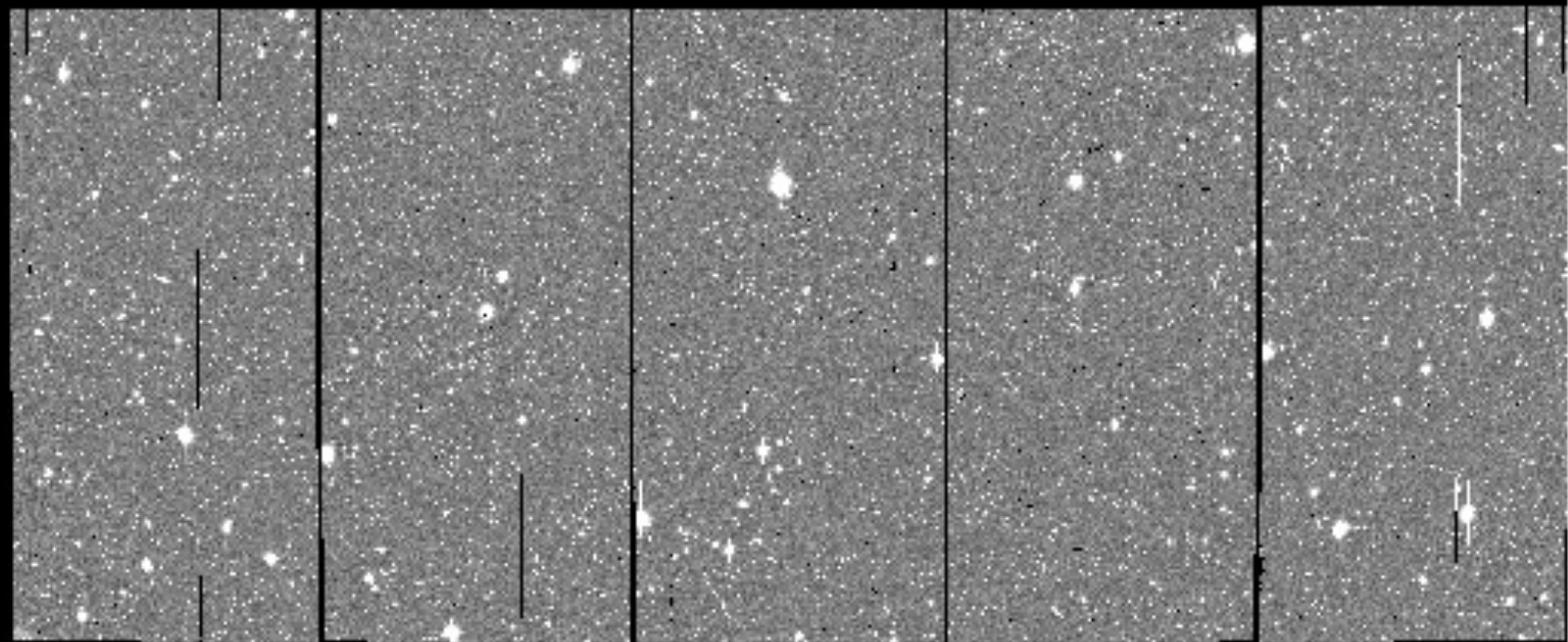
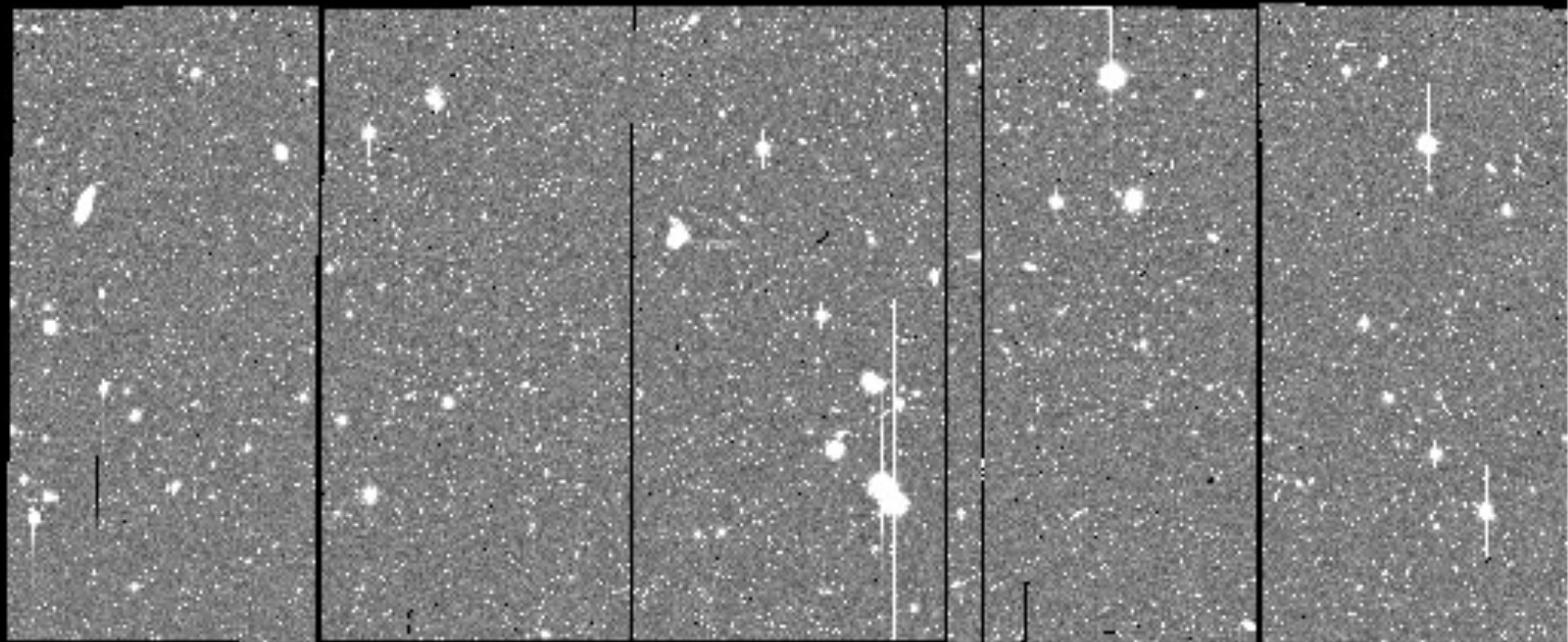
Source: <http://hedam.oamp.fr/HerMES/survey.php>

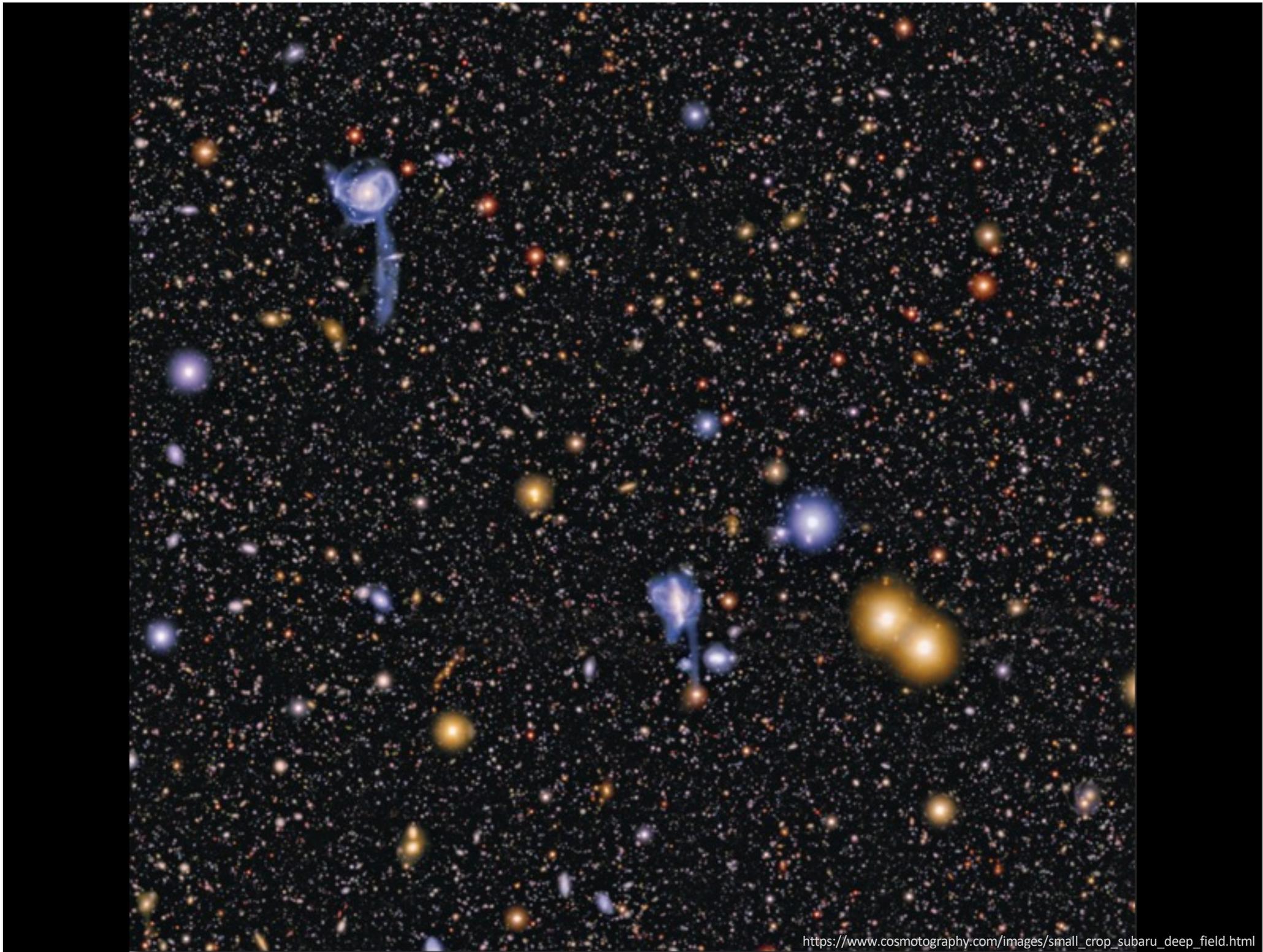
IRAS dust map (Schlegel et al, 1998)  
Galactic coordinates



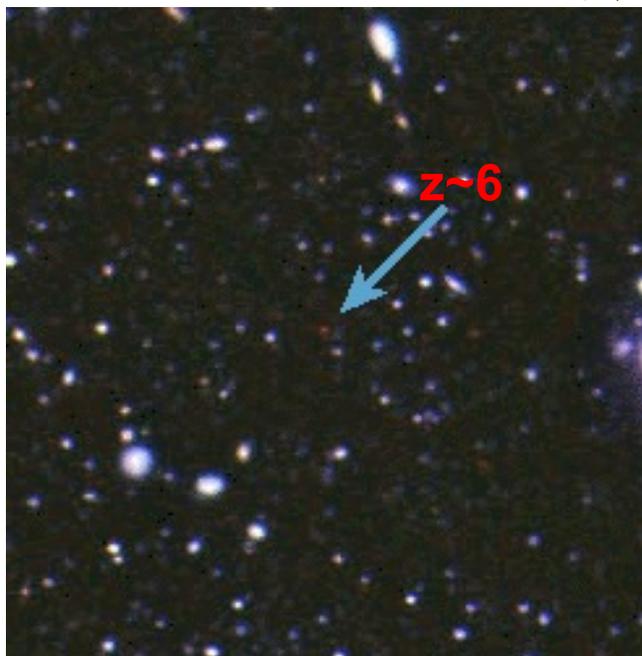


CFHT - Wed Nov 30 17:33:45 HST

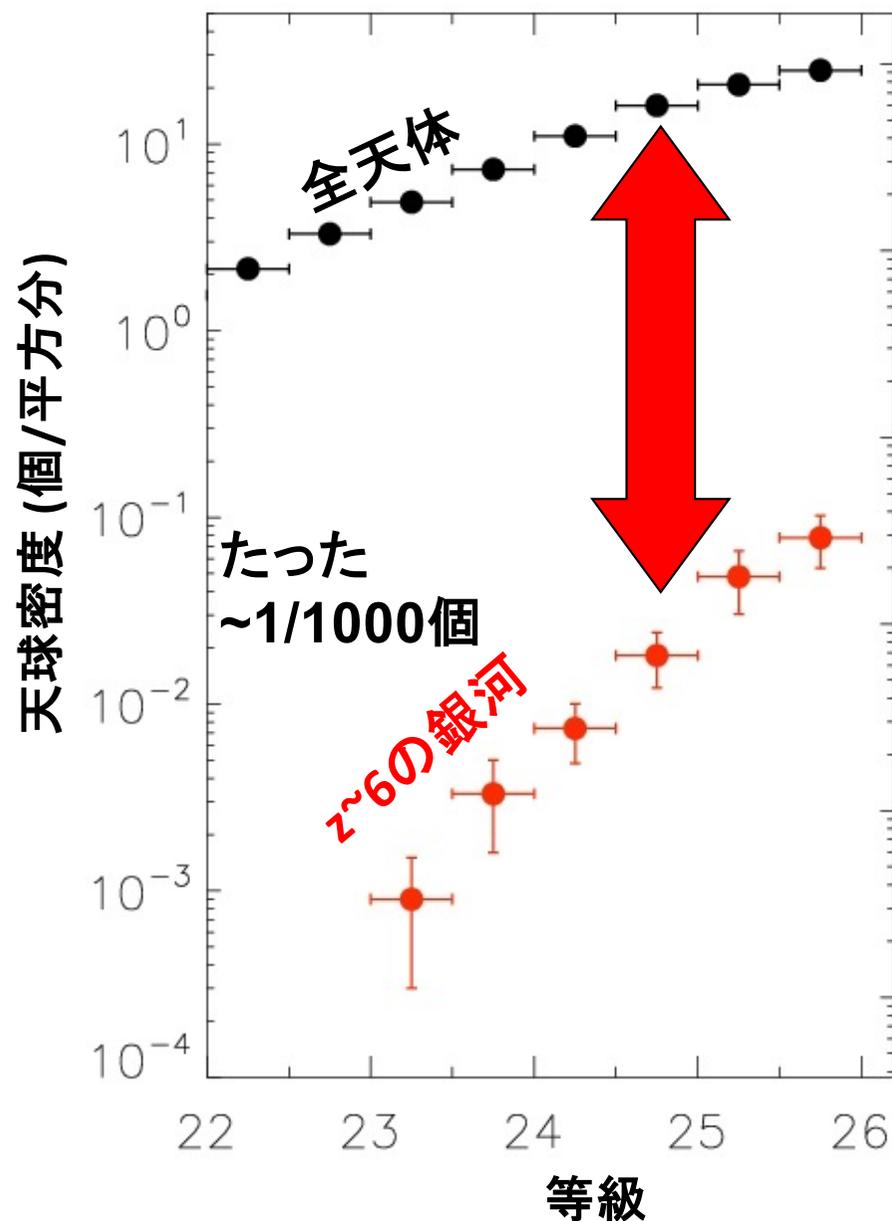




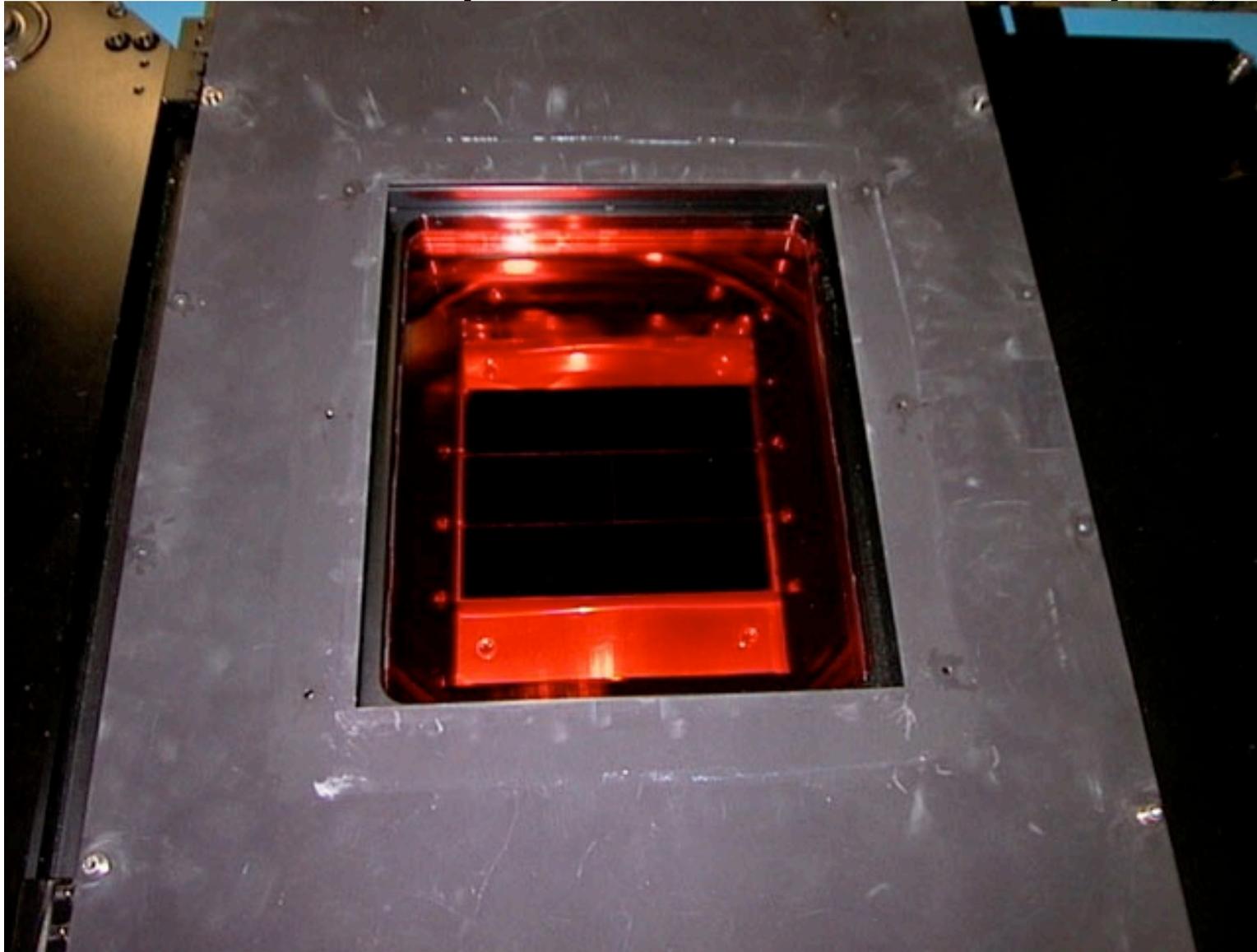
# 前景銀河の海から 遠方の銀河を見つける



- 撮像データ: ほとんどは前景銀河
  - (例) 赤方偏移6の銀河: 1000個に1個
- 全て分光。赤方偏移を測る?
  - 赤方偏移6の銀河1つ~3時間
  - 375日 (=3000時間/8時間)観測で1個  
→ 現実的に不可能



# 遠方の銀河候補を 狭帯域フィルター(narrow-band filter)で選択



d filter  
用

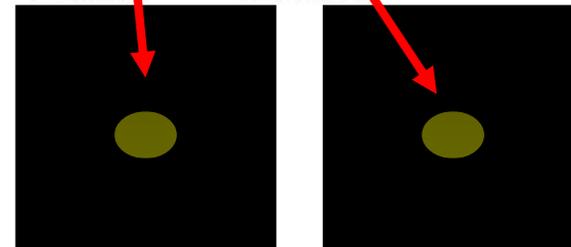
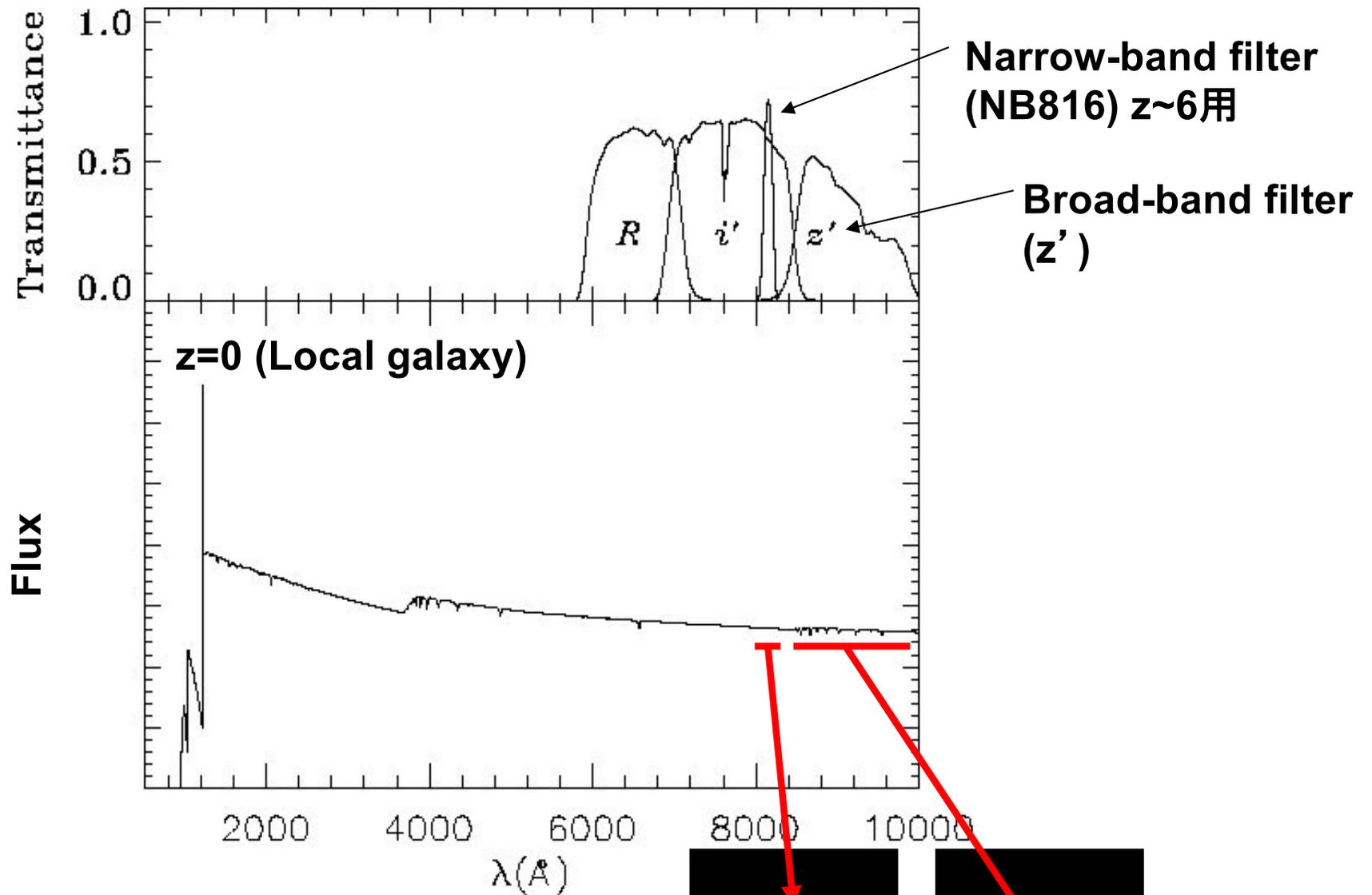
and filter

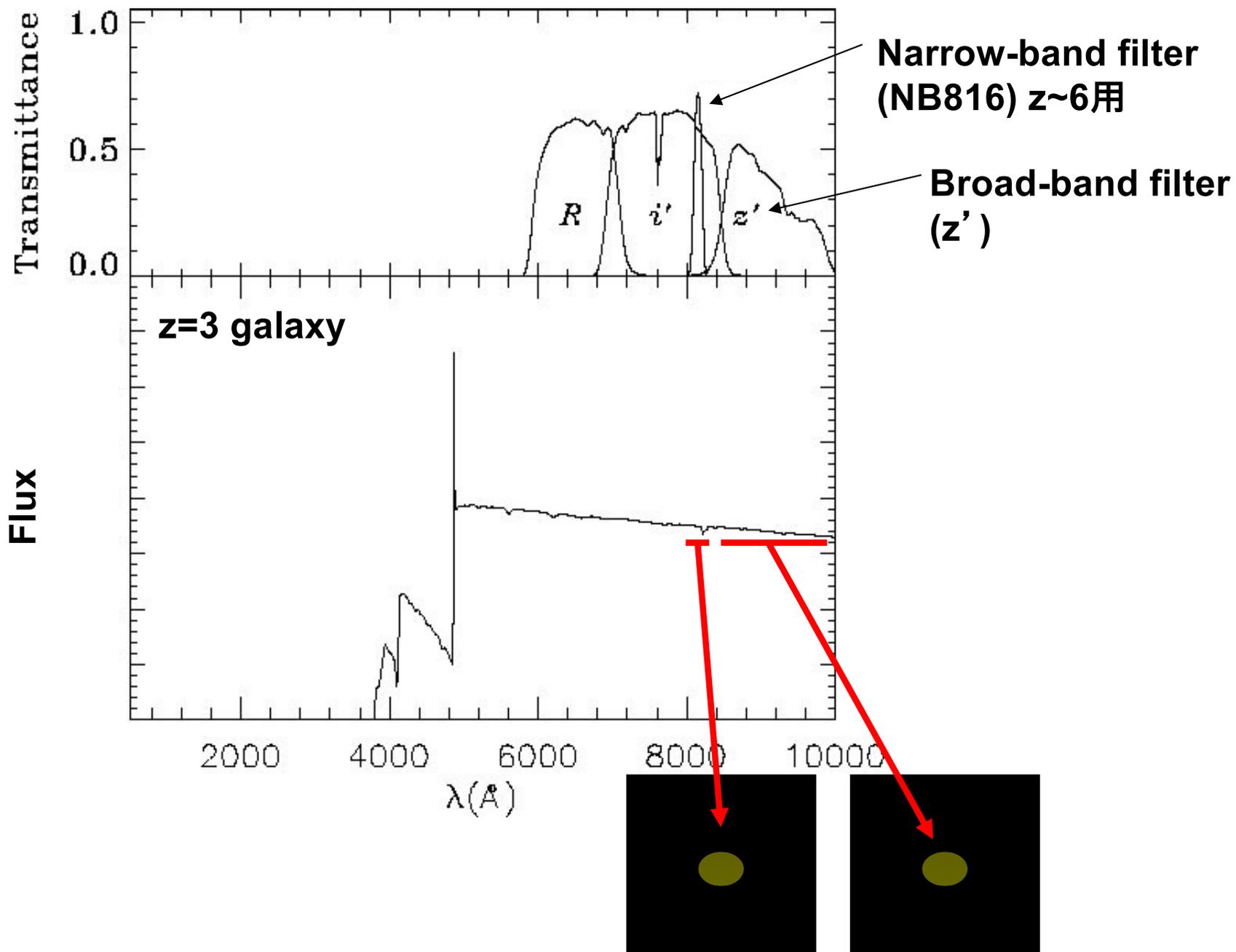
UV

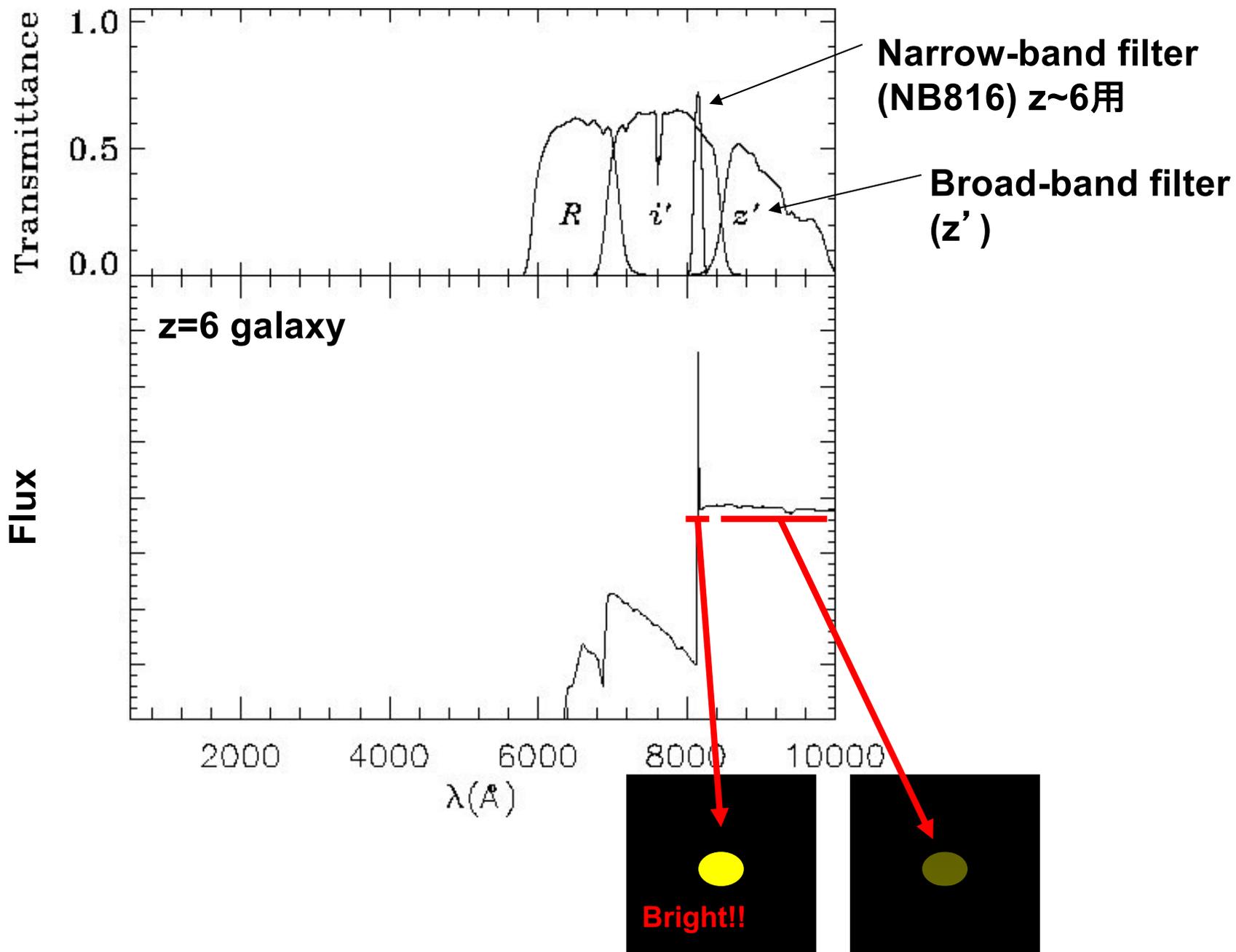
Optical

# 遠方の銀河候補を

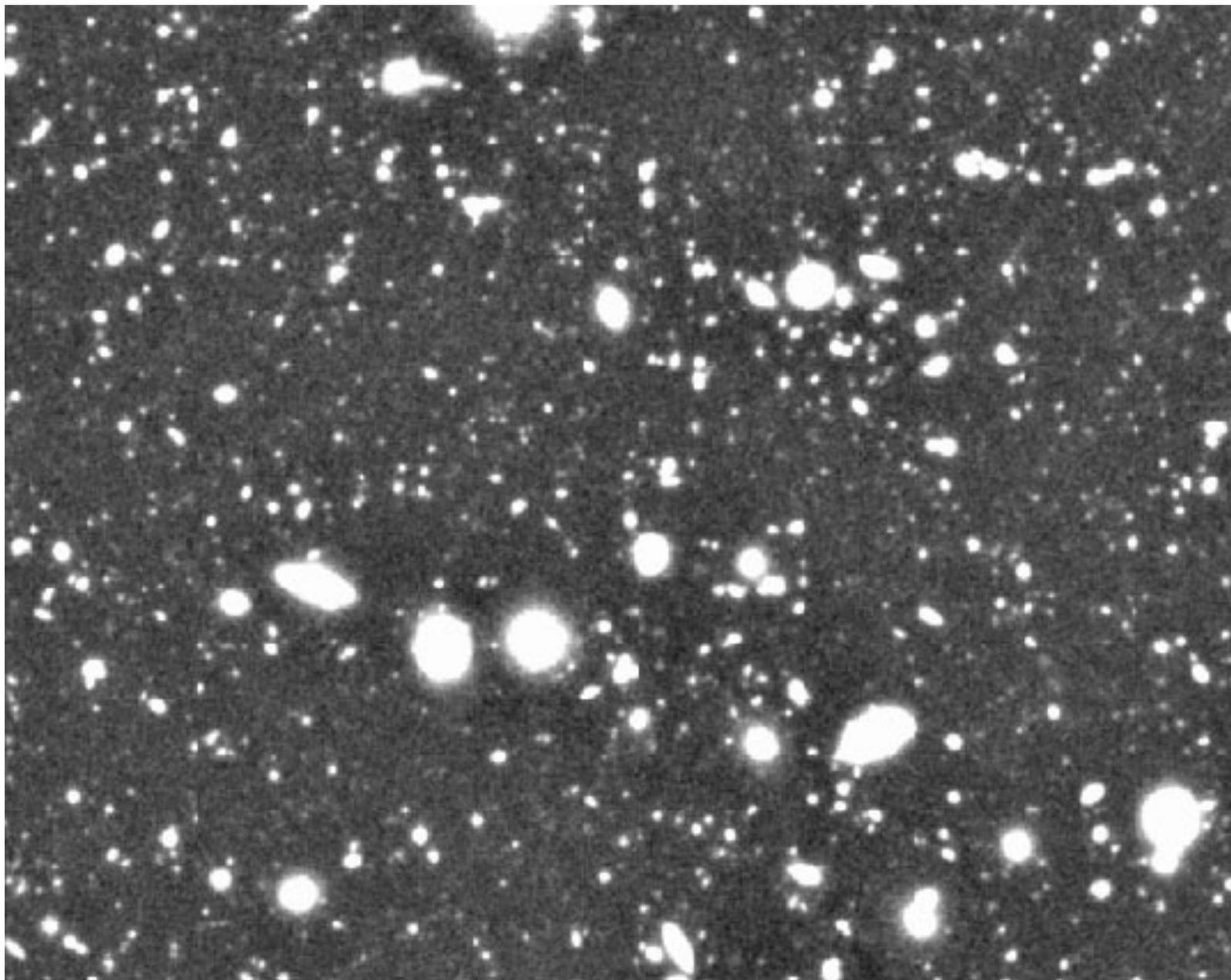
狭帯域フィルター(**narrow-band filter**)で選択



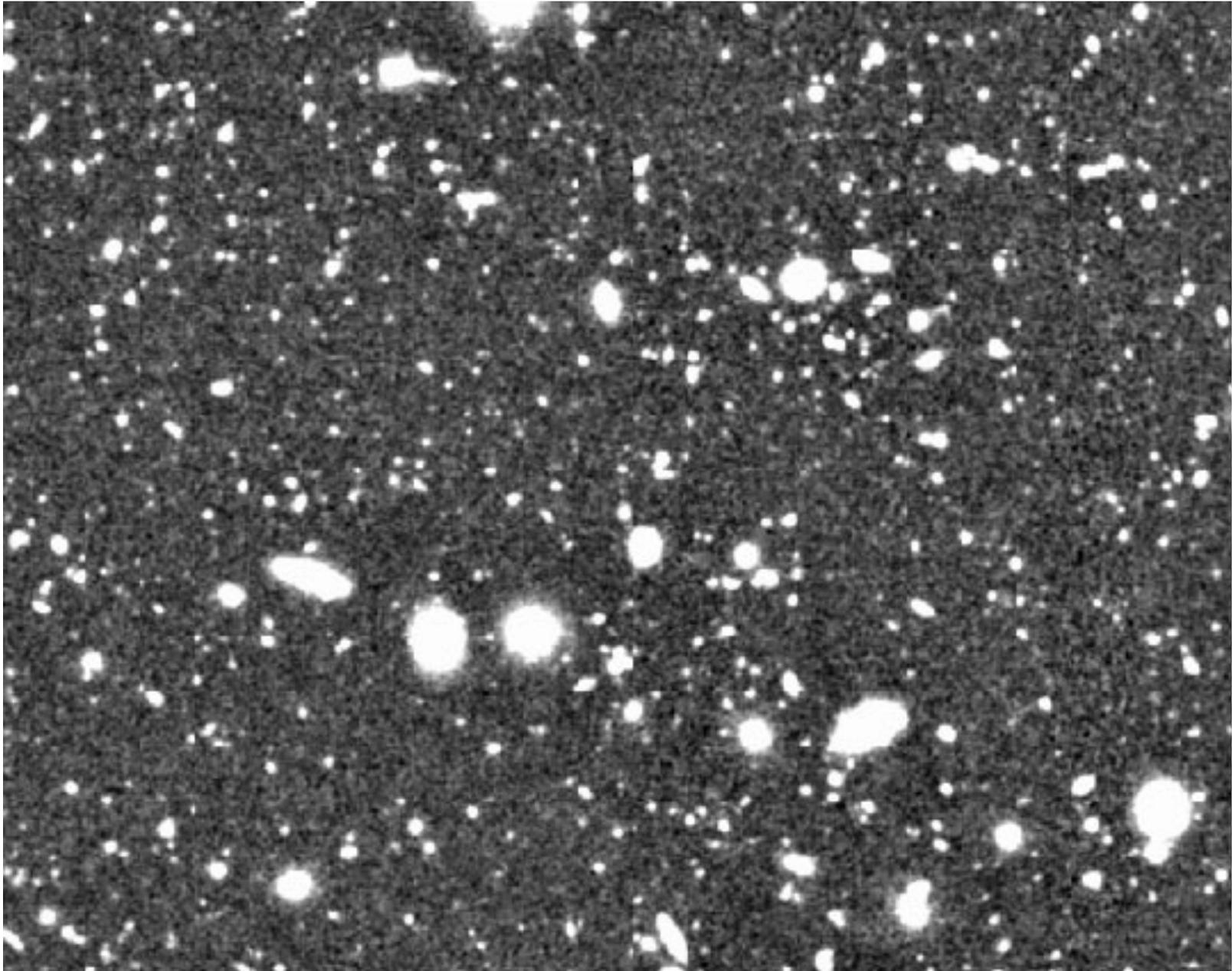




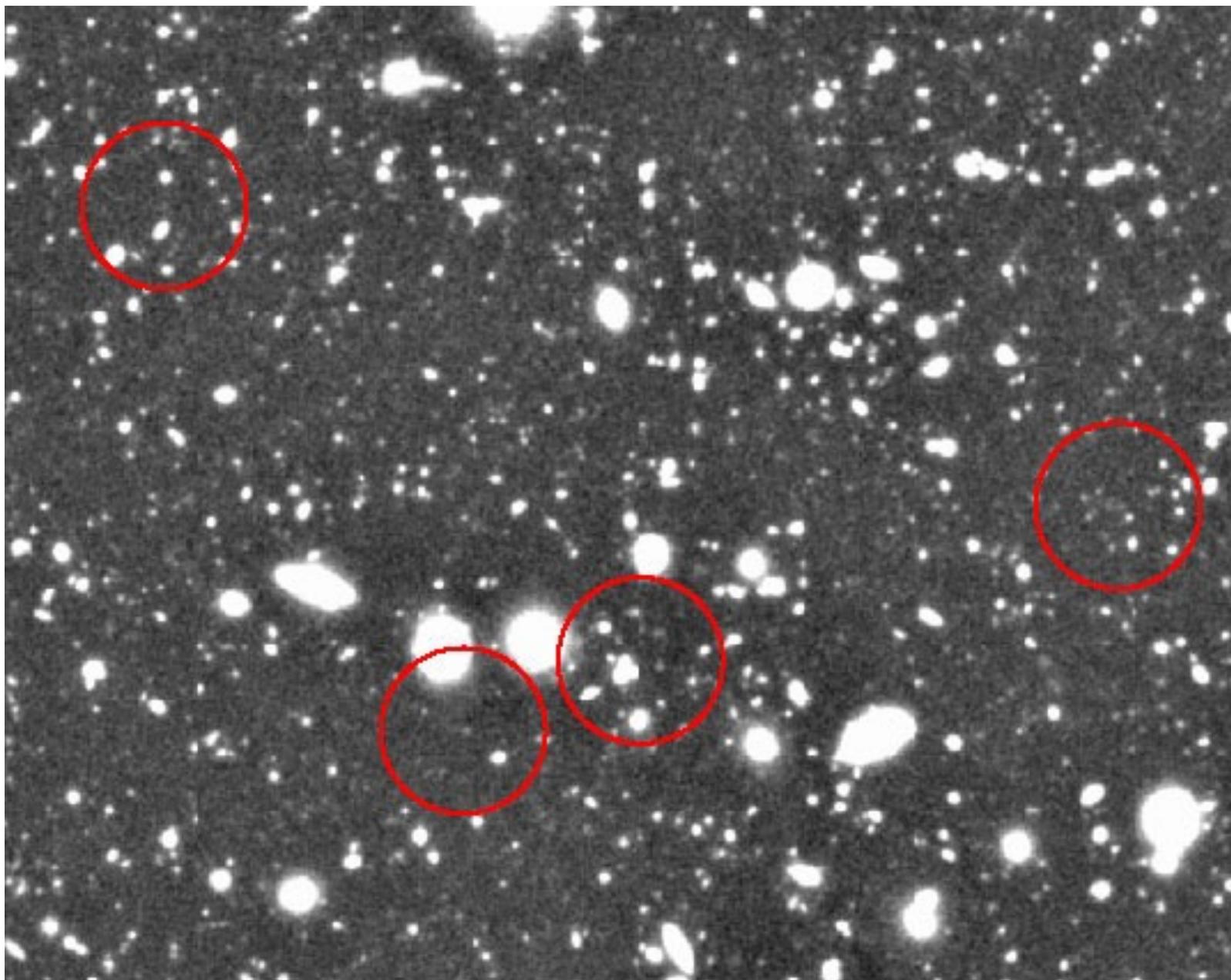
# Broad-Band Image



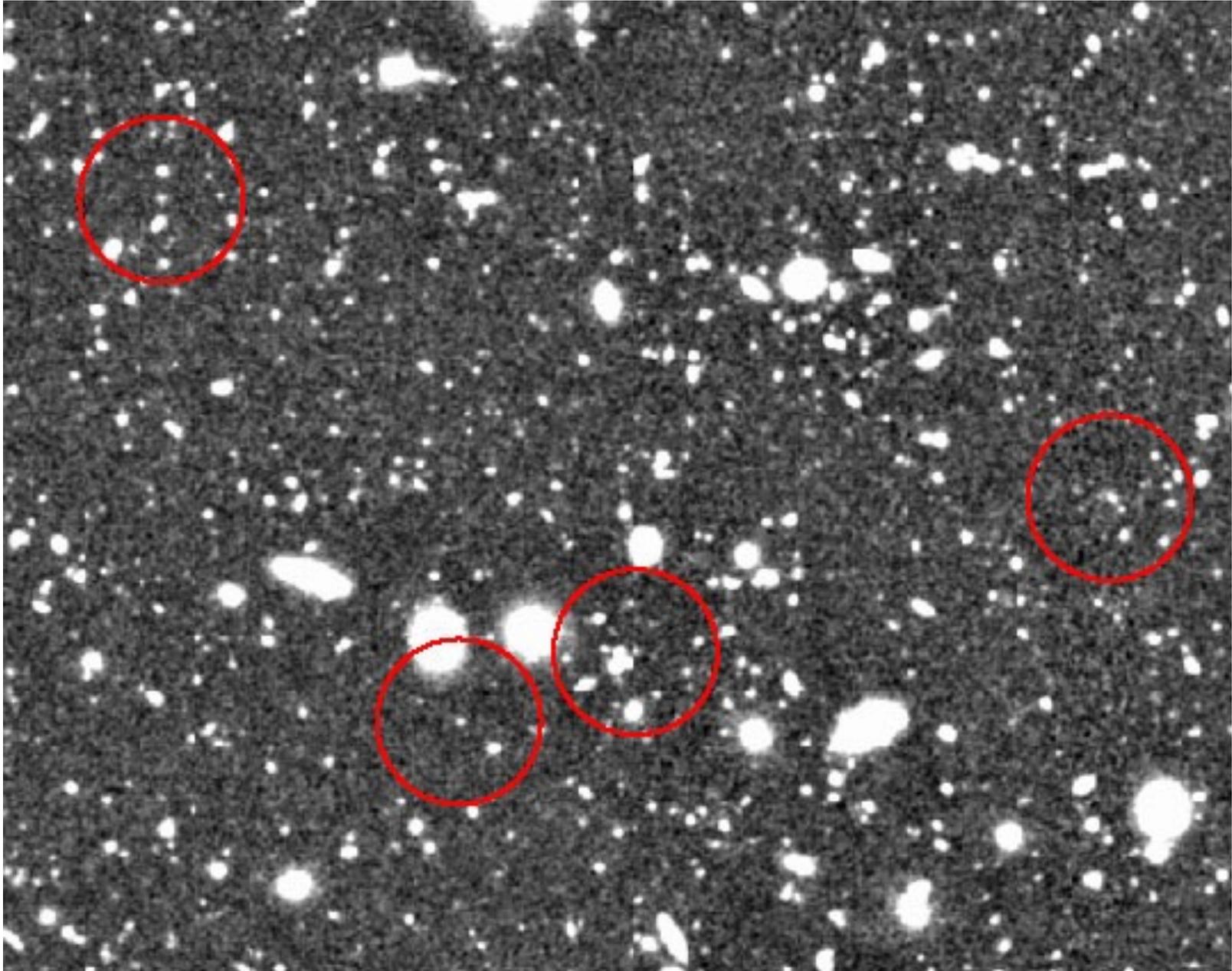
# Narrow-Band Image



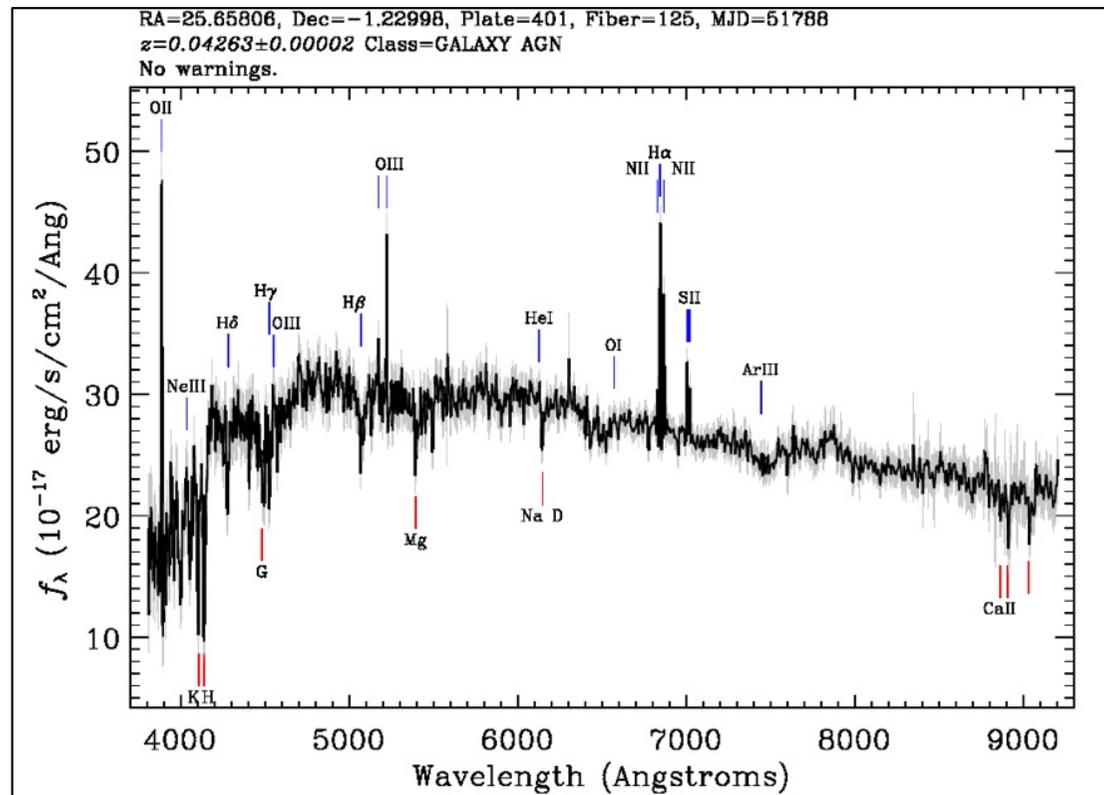
# Broad-Band Image



# Narrow-Band Image

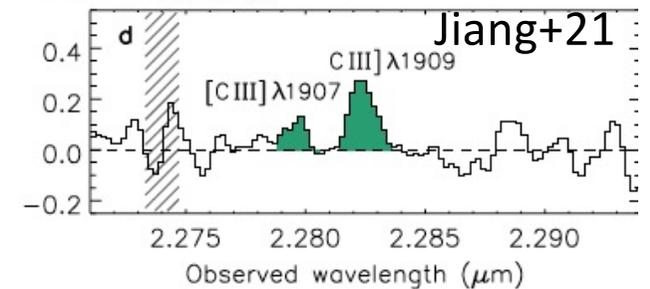
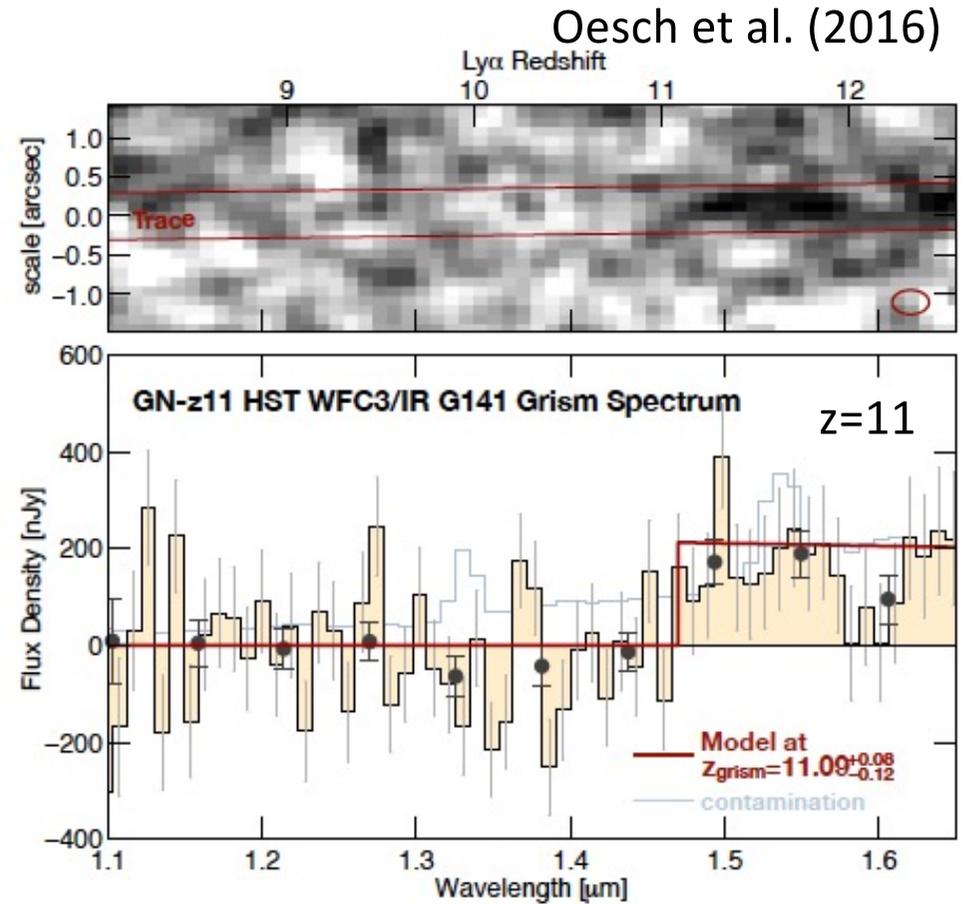
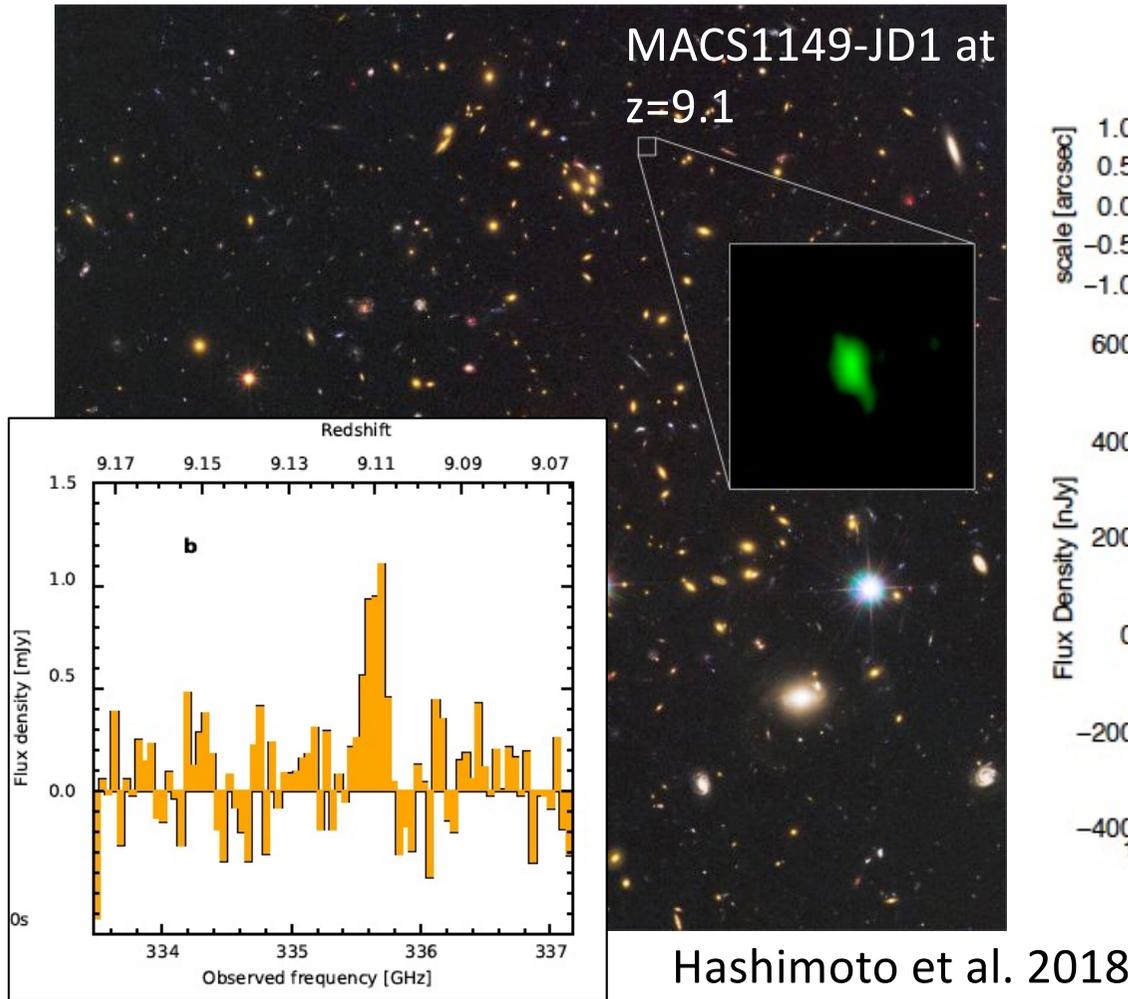


# 前景天体の混入



- 前景天体（輝線を出す）も選ばれてしまう
  - ただし、多くの近傍天体を除くことができる（数 1/100に減少）
  - 現実的な時間内で、分光観測が可能

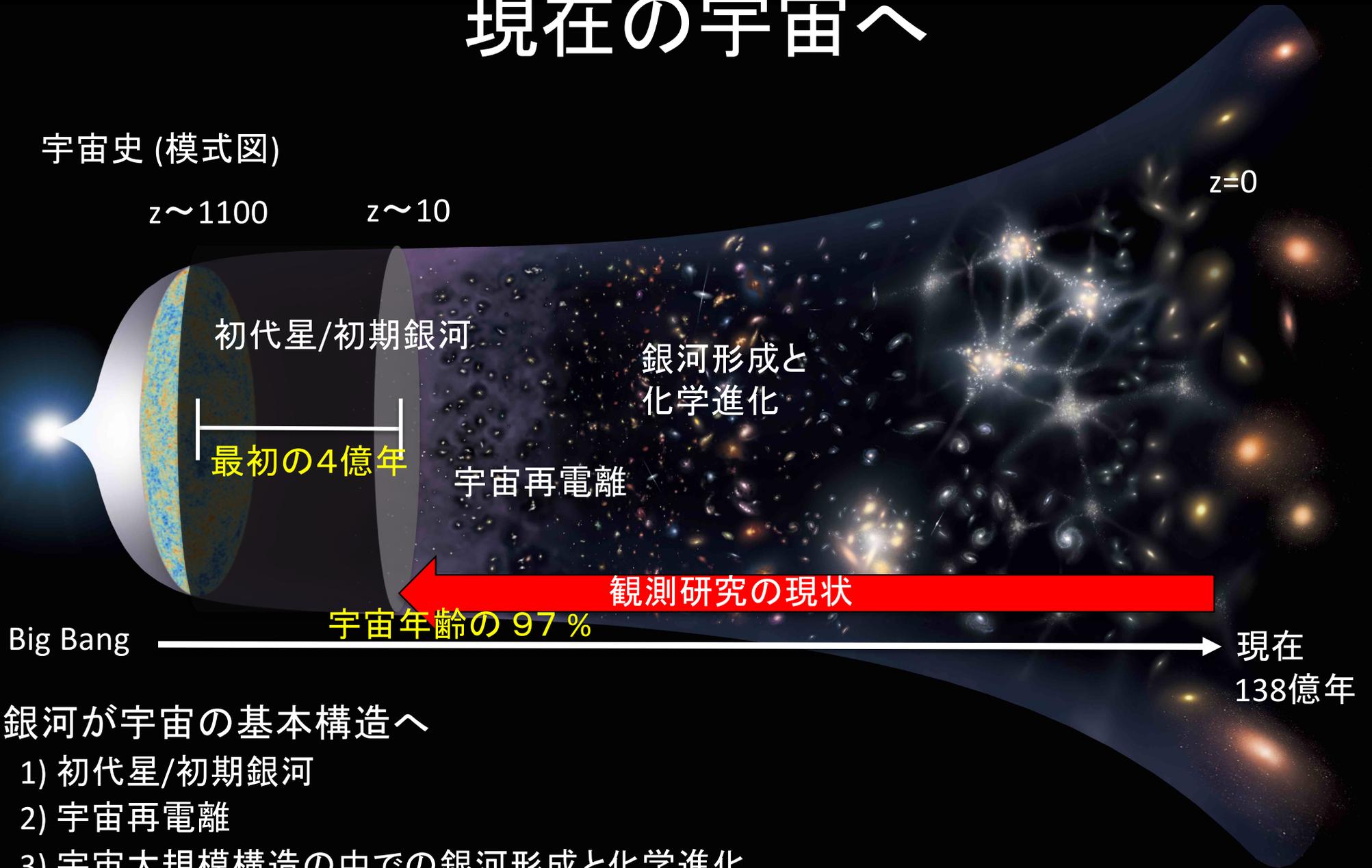
# 宇宙初期における天体の観測(現状)



- ALMA電波観測、ハッブル宇宙望遠鏡近赤外線観測
- 赤方偏移10程度(宇宙最初の4億年): 銀河観測の限界(現状: $z=11$ )

# 熱いビッグバン宇宙から 現在の宇宙へ

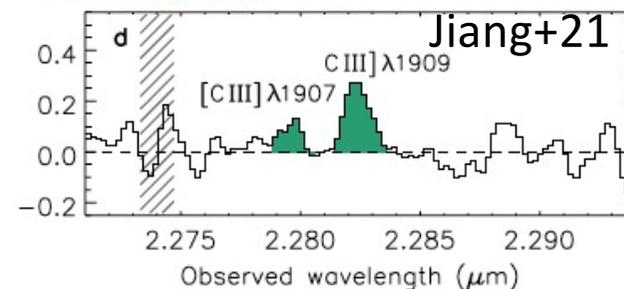
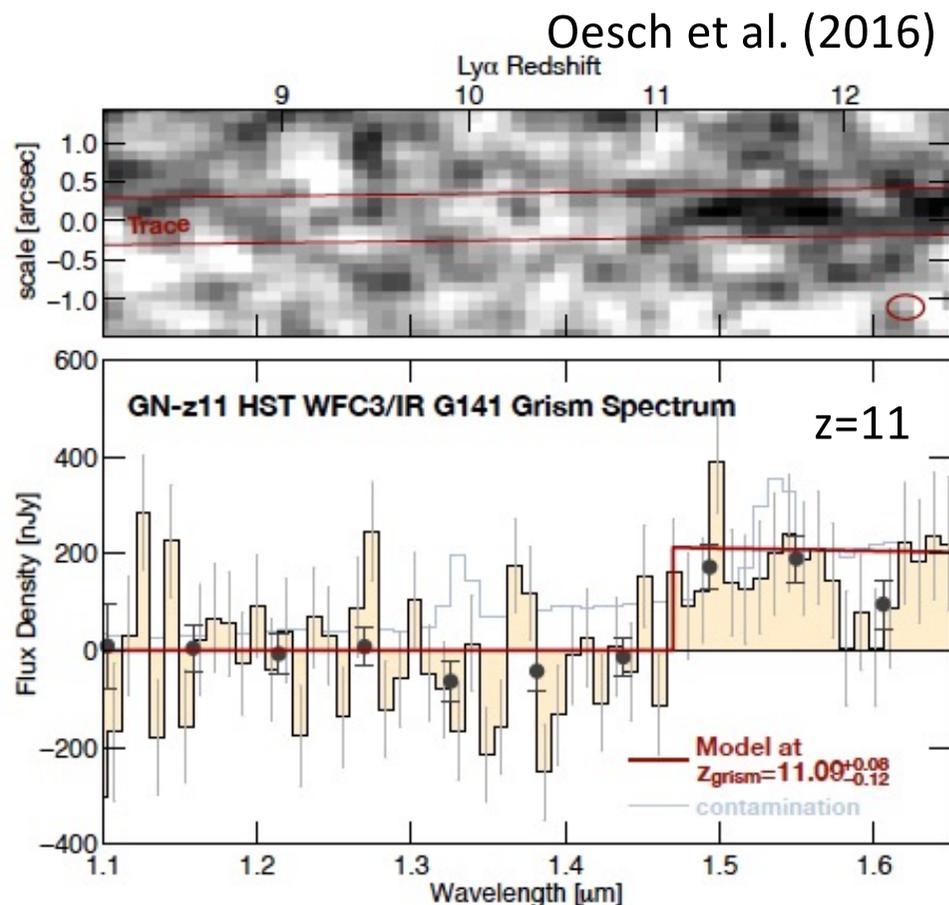
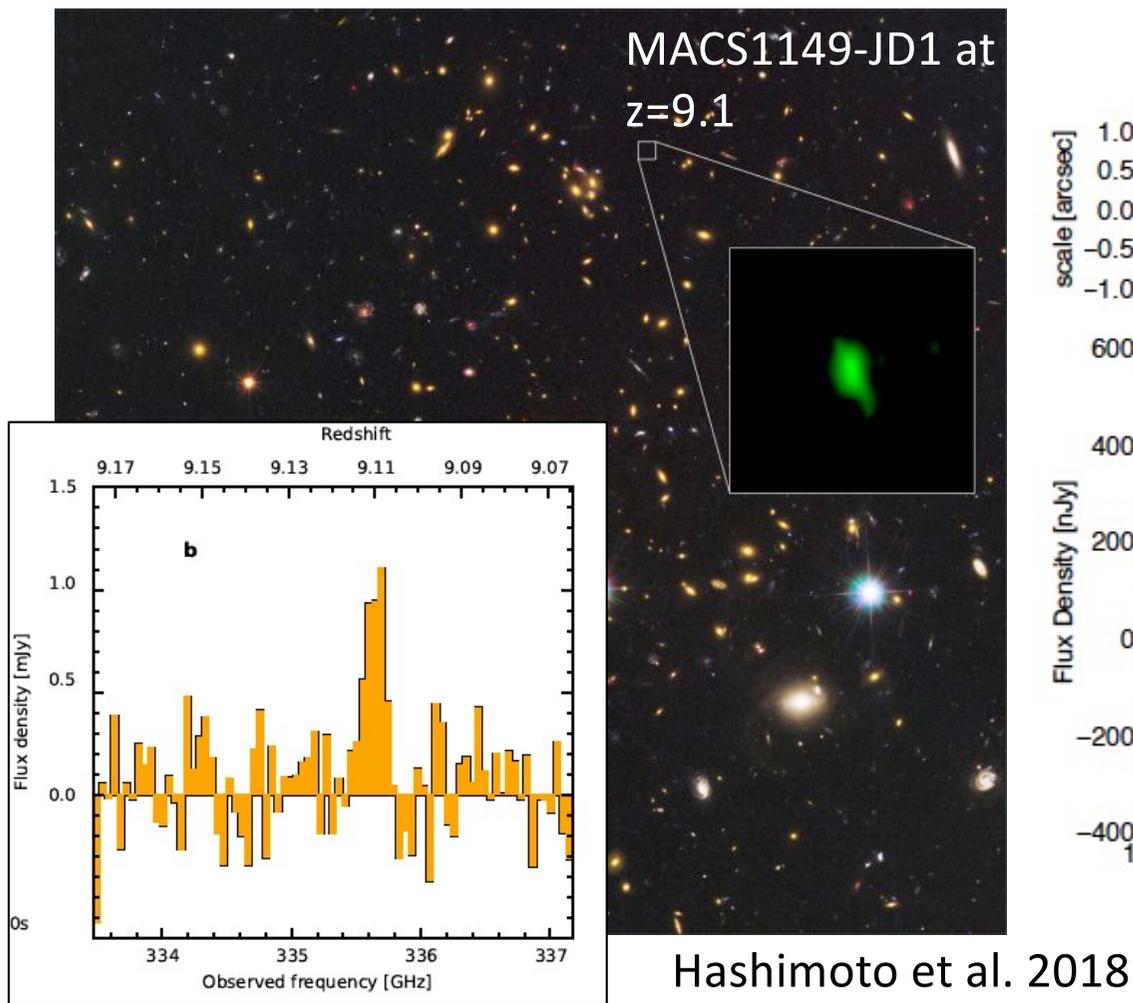
宇宙史 (模式図)



銀河が宇宙の基本構造へ

- 1) 初代星/初期銀河
- 2) 宇宙再電離
- 3) 宇宙大規模構造の中での銀河形成と化学進化

# 宇宙初期における天体の観測(現状)

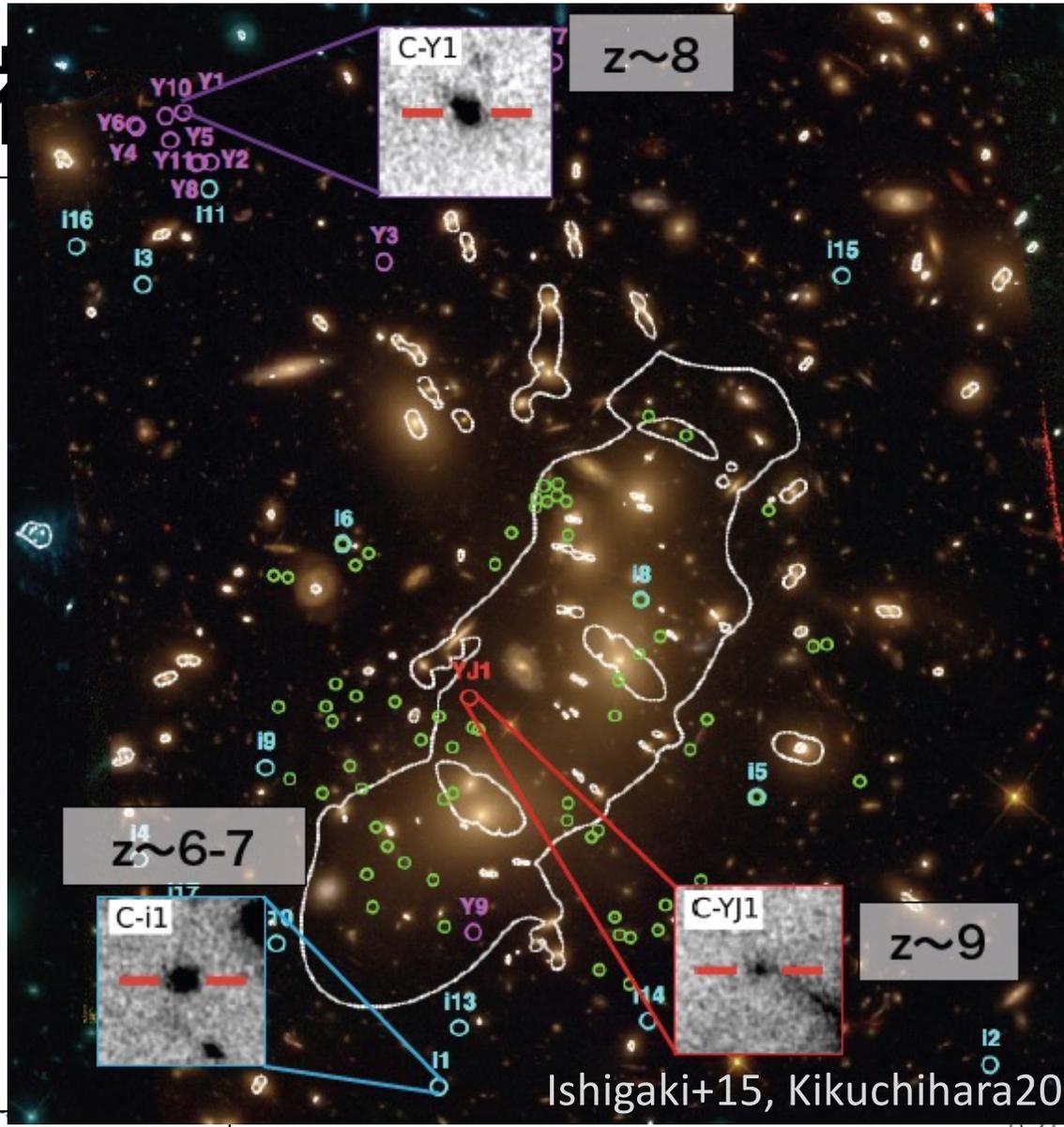
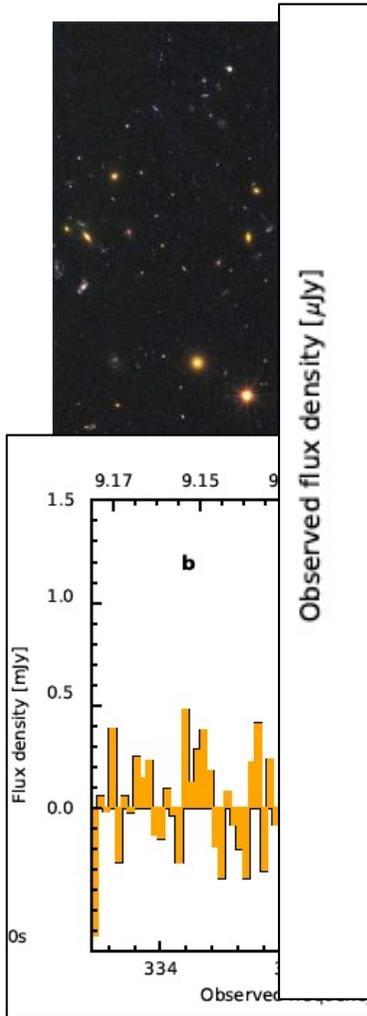


- ALMA電波観測、ハッブル宇宙望遠鏡近赤外観測
- 赤方偏移10程度(宇宙最初の4億年): 銀河
- 星質量:  $M^*=10^{8-9} M_{\odot}$
- 星年齢:  $\sim 300$  Myr (Balmerブレーク=古い星種族) → 明るい
- 重力レンズ探索 (HFF) →  $M^* \gtrsim 10^7 M_{\odot}$  (赤方偏移10)。ただし分光による距離測定なし (Kikuchi+20)

## 赤方偏移 (z)

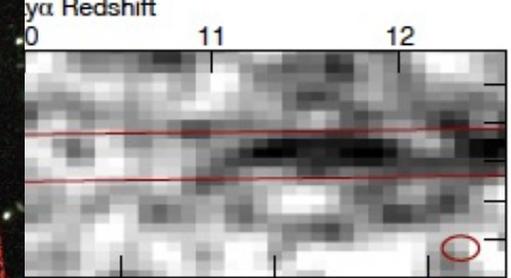
# 宇宙

# 観測(現状)

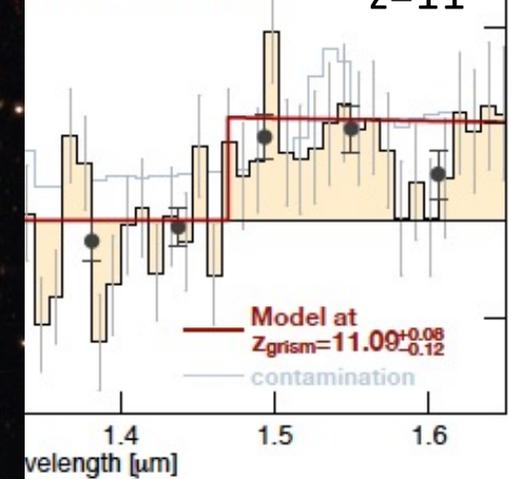


Ishigaki+15, Kikuchi+20

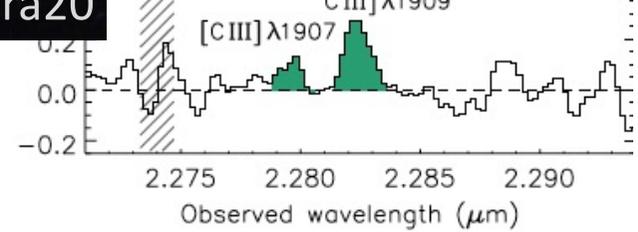
Oesch et al. (2016)



41 Grism Spectrum z=11



Jiang+21



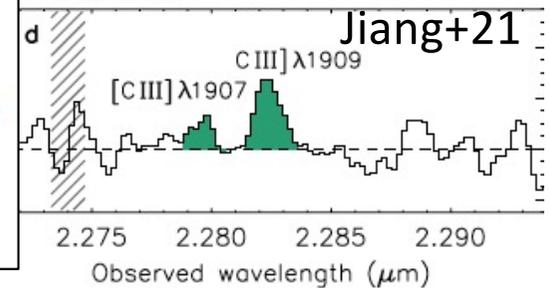
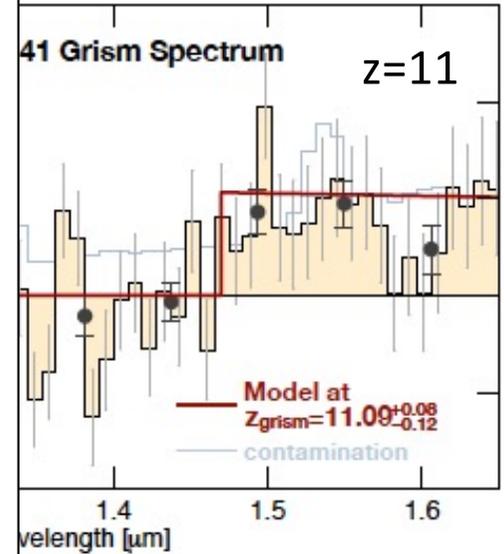
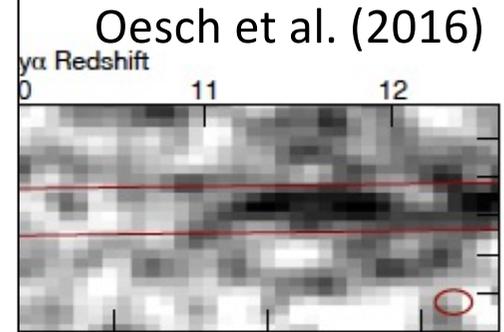
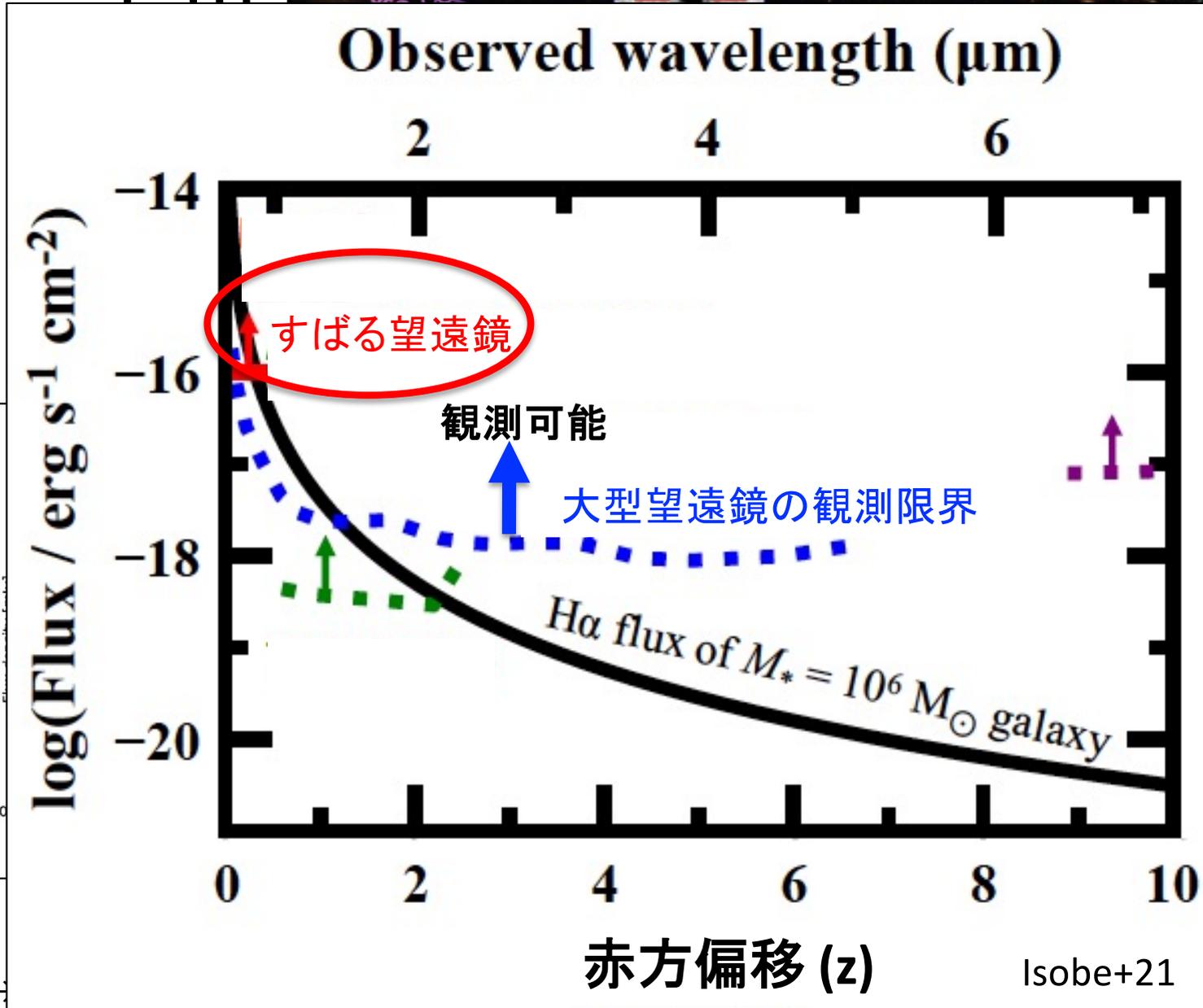
- ALMA電波観測、ハッブル宇宙望遠鏡近接観測 → 赤方偏移10程度(宇宙最初の4億年): 銀河
- 星質量:  $M^* = 10^{8-9} M_{\odot}$
- 星年齢: ~300 Myr (Balmerブレーク=古い星種族) → 明るい
- 重力レンズ探索 (HFF) →  $M^* \geq 10^7 M_{\odot}$  (赤方偏移10)。ただし分光による距離測定なし (Kikuchi+20)

## 赤方偏移 (z)

宇宙



観測(現状)



- 星質量:  $M^* = 10^{8-9} M_{\odot}$
  - 星年齢:  $\sim 300$  Myr (Balmerブレーク=古い星種族)  $\rightarrow$  明るい
- 重力レンズ探索 (HFF)  $\rightarrow M^* \gtrsim 10^7 M_{\odot}$  (赤方偏移10)。ただし分光による距離測定なし (Kikuchi+20)

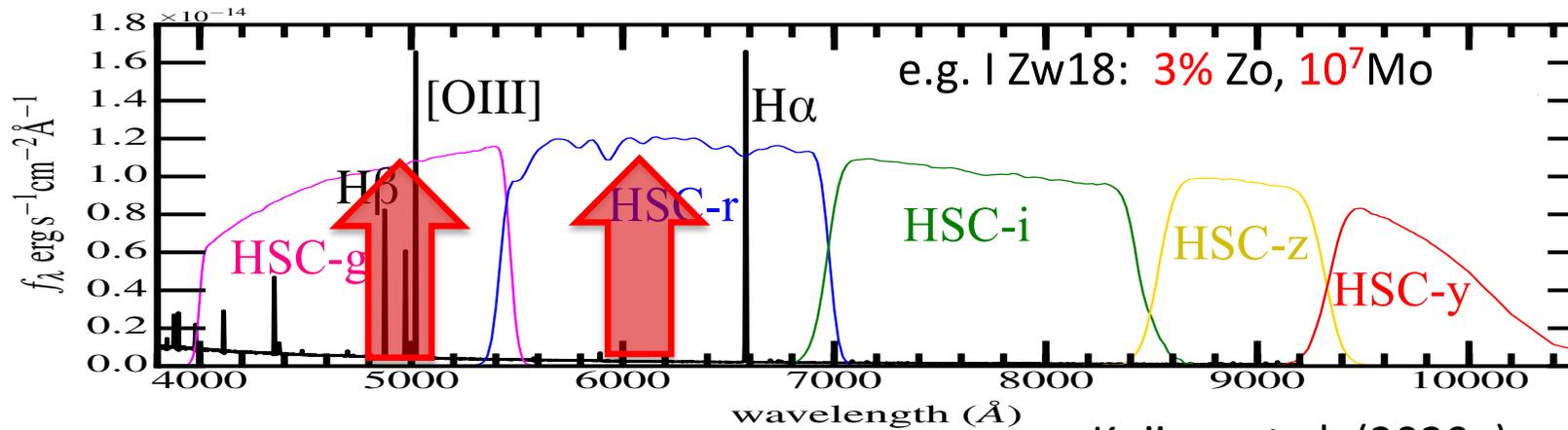
**新たなアプローチ**  
**--近傍宇宙で探る、天体形成初期**

# --- 天体形成の最初は? --- 極金属欠乏銀河 (EMPGs)

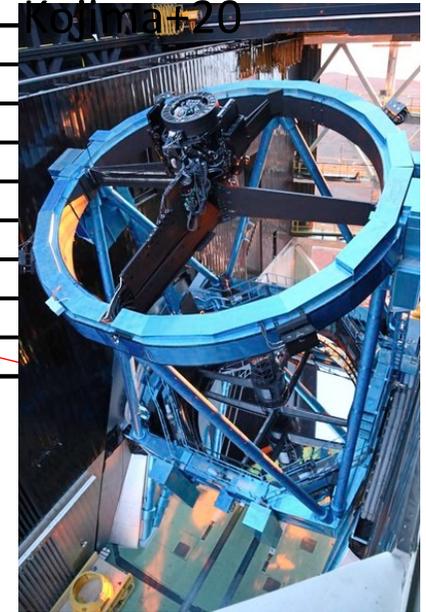


小島さん博士論文

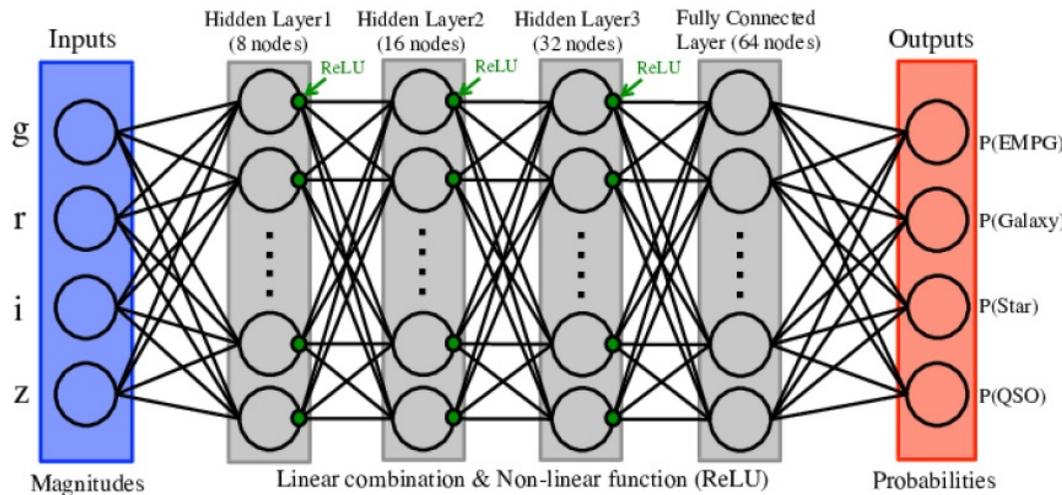
- 形成初期にある近傍の銀河



Kojima et al. (2020a)



+ Machine learning technique



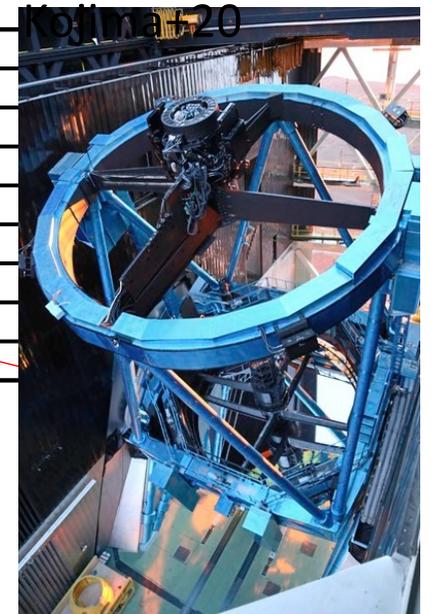
SED models (30,000 × 4)

- |                      |                           |
|----------------------|---------------------------|
| <i>Beagle</i>        | Chevallard & Charlot 2016 |
| <i>Stellar model</i> | Castelli & Kurucz 2004    |
| <i>QSO composite</i> | Selsing et al. 2016       |

# --- 天体形成の最初は? --- 極金属欠乏銀河 (EMPGs)

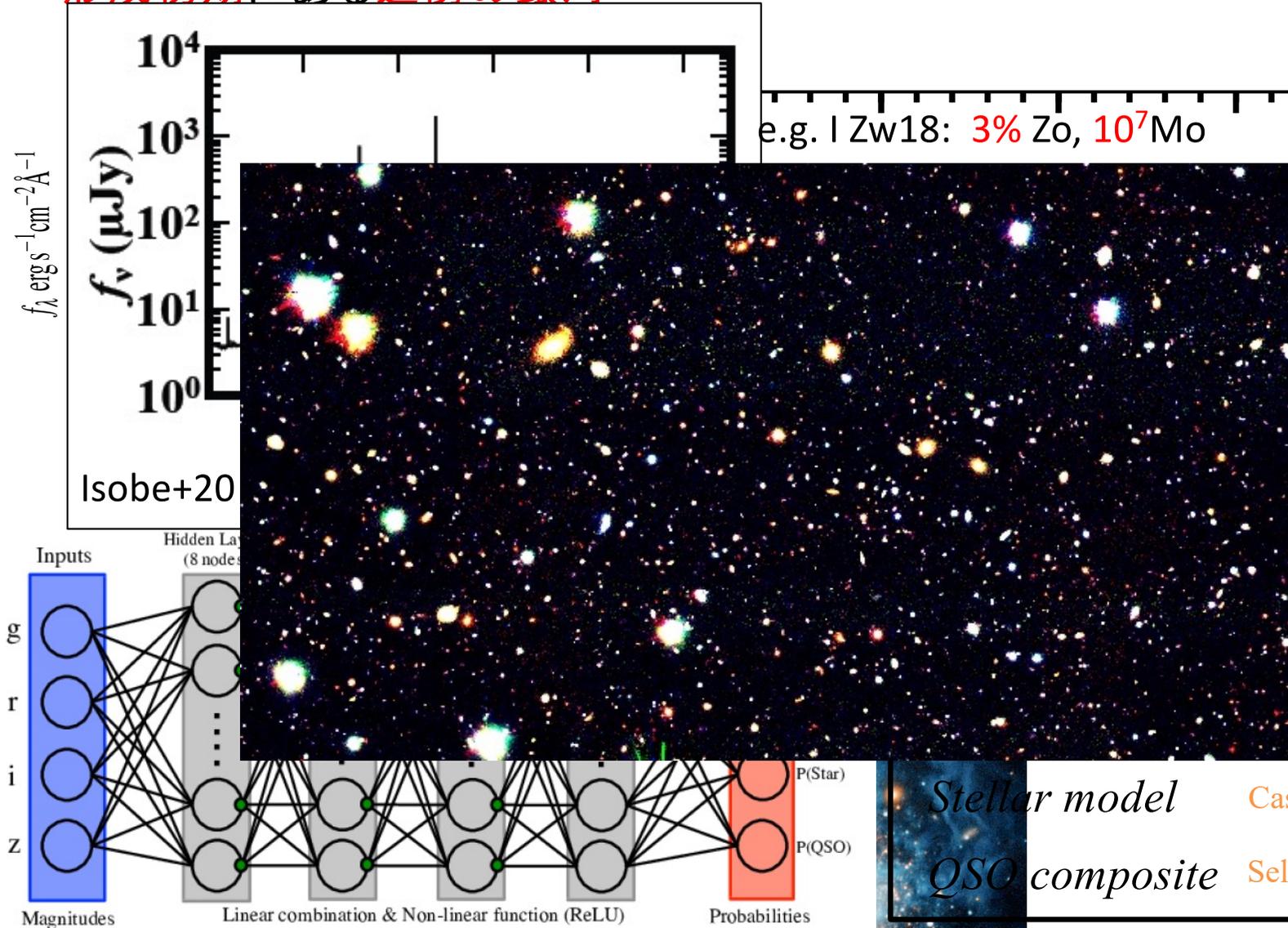


小島さん博士論文



Kojima+20

- 形成初期にある近傍の銀河



(30,000 × 4)

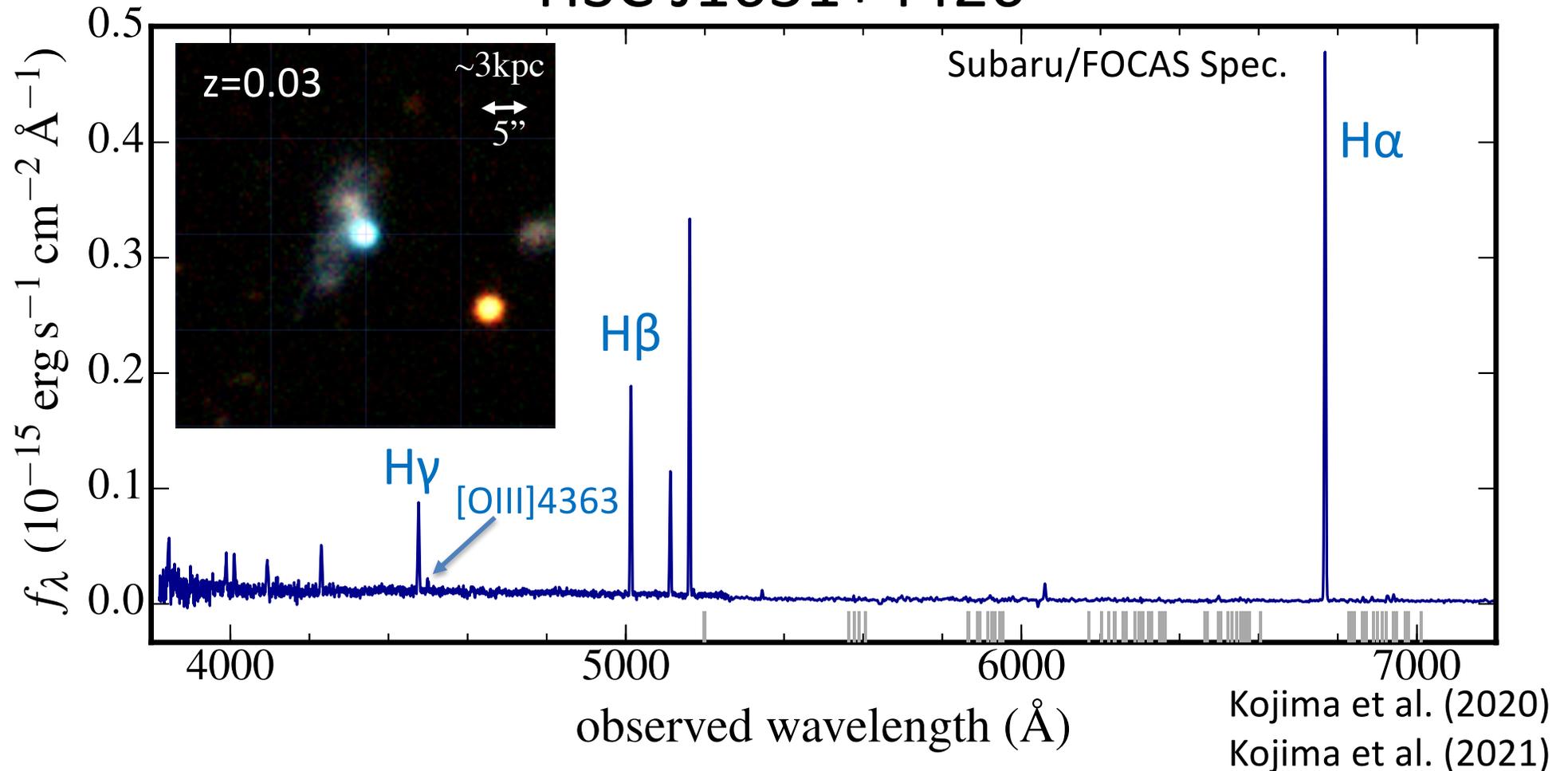
vallard & Charlot 2016

Castelli & Kurucz 2004

Selsing et al. 2016

# 分光結果の一例

HSC J1631+4426

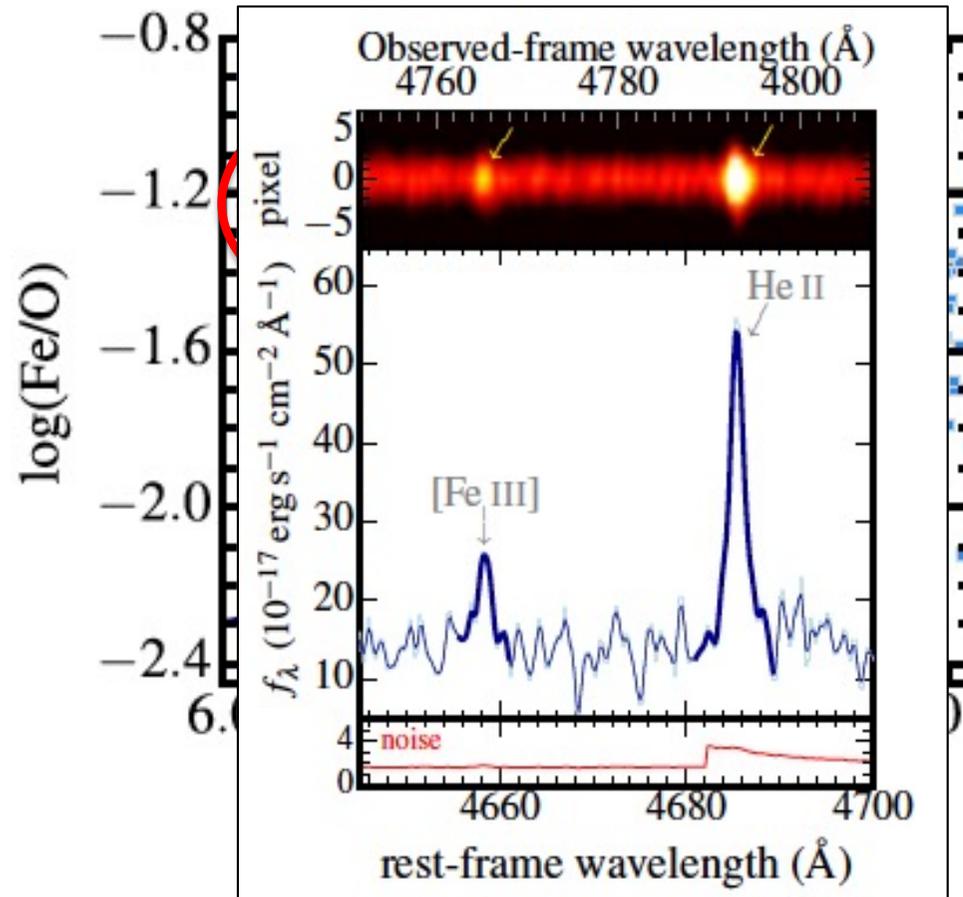


- $0.016 Z_{\odot}$  ( $M^* = 8 \times 10^5 M_{\odot}$ )  $\sim 10$  Myr
- 観測史上最低の金属量 (cf. I Zw18)

# 極金属欠乏銀河の詳細観測で分かったこと

## 1) 銀河形成

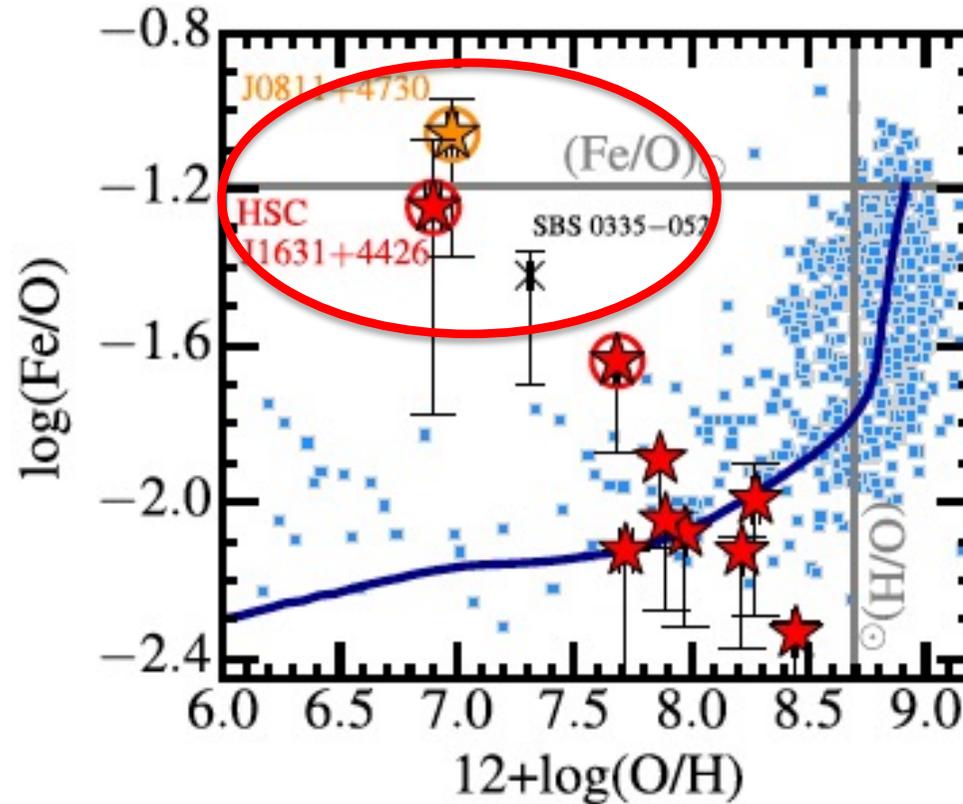
# 金属欠乏銀河の鉄元素



Kojima et al. (2021)

- 鉄の元素量が卓越 ( $\text{Fe}/\text{O}) \sim 1.0$  ( $\text{Fe}/\text{O})$ 。◉
  - 金属欠乏銀河 (= 形成初期の銀河) でなぜ？

# 金属欠乏銀河の鉄元素



Kojima et al. (2021)

- 鉄の元素量が卓越  $(\text{Fe}/\text{O}) \sim 1.0 (\text{Fe}/\text{O})_{\odot}$ 
  - 金属欠乏銀河 (= 形成初期の銀河) でなぜ？

# Ia型超新星



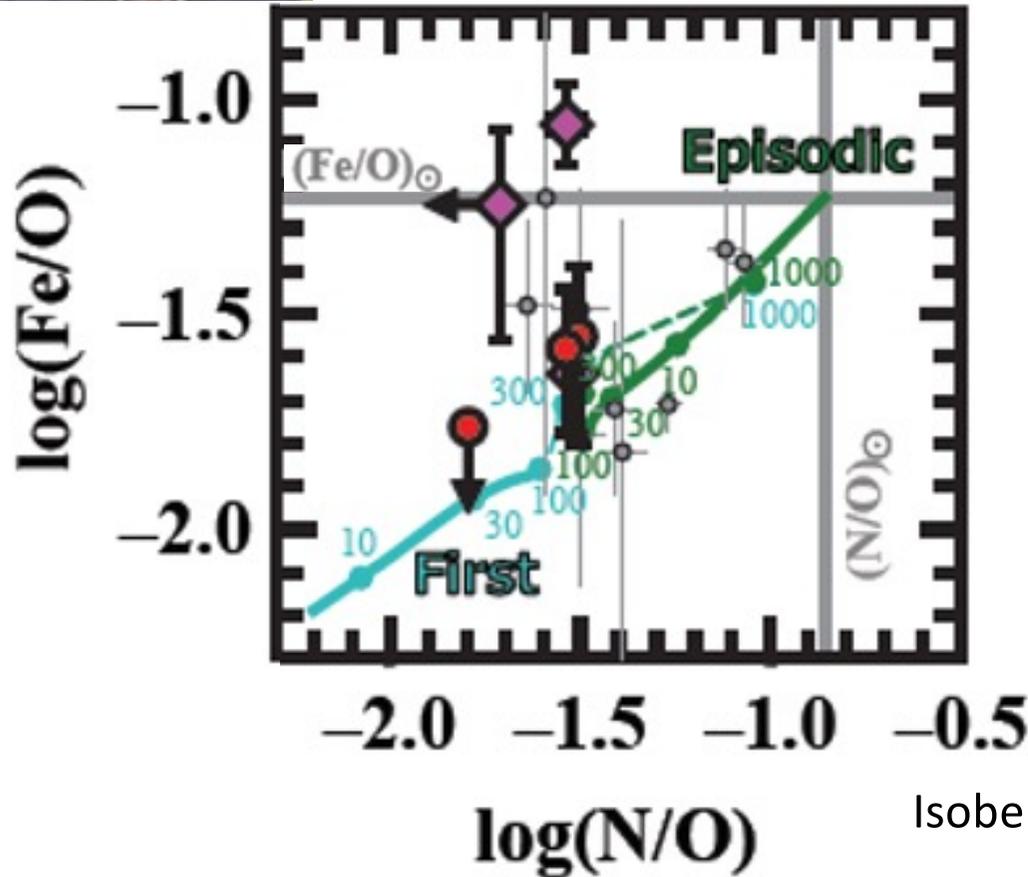
(ESA and Justyn Maund, QUB and Kyoto U.)

- 中小質量星の進化最終段階→白色矮星( $1M_{\odot}$ 程度)
- 伴星が巨星に進化するとガスが降着
- 白色矮星: 縮退圧で支える限界( $1.4M_{\odot}$ )を超えると爆発(核を含む)
  - ただし、白色矮星が必要。白色矮星ができるまでに数百Myrから1Gyr (delay time)必要

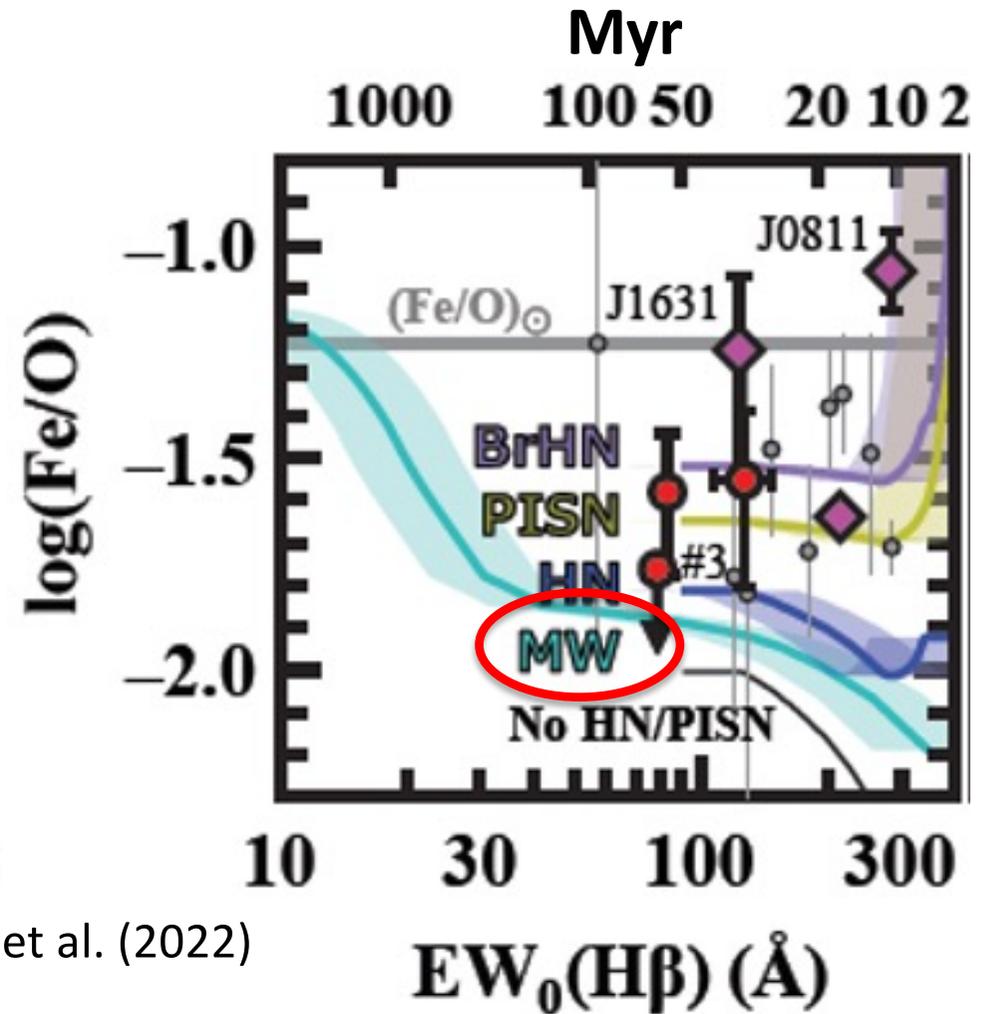
# 多すぎる鉄の起源は？



磯部さん研究



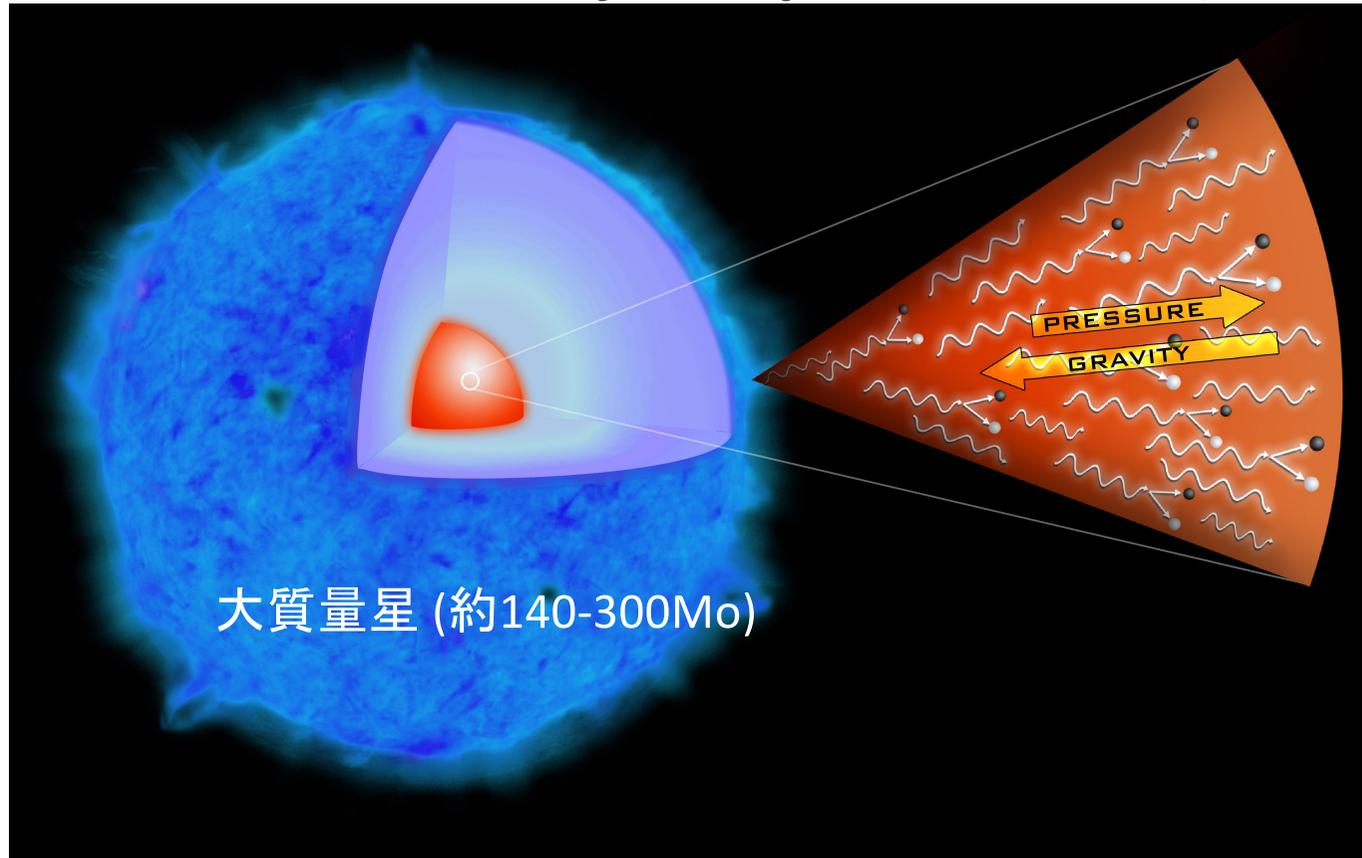
Isobe et al. (2022)



- 高い  $(\text{Fe}/\text{O}) \sim (\text{Fe}/\text{O})_{\odot}$  → 理論モデルによる説明
    - Ia型超新星爆発 (SNeIa) による鉄生成? → No (delay timeより小さい星年齢)
    - 間欠的な星形成 (古い星種族の存在)? → No ( $\text{N}/\text{O}$ が大きすぎるため)
    - ダストへの降着 → No (IGMの $\text{Fe}/\text{O}$ が小さいため)
- 何か？

# 対不安定型超新星

## Pair Instability Supernova (PISN)

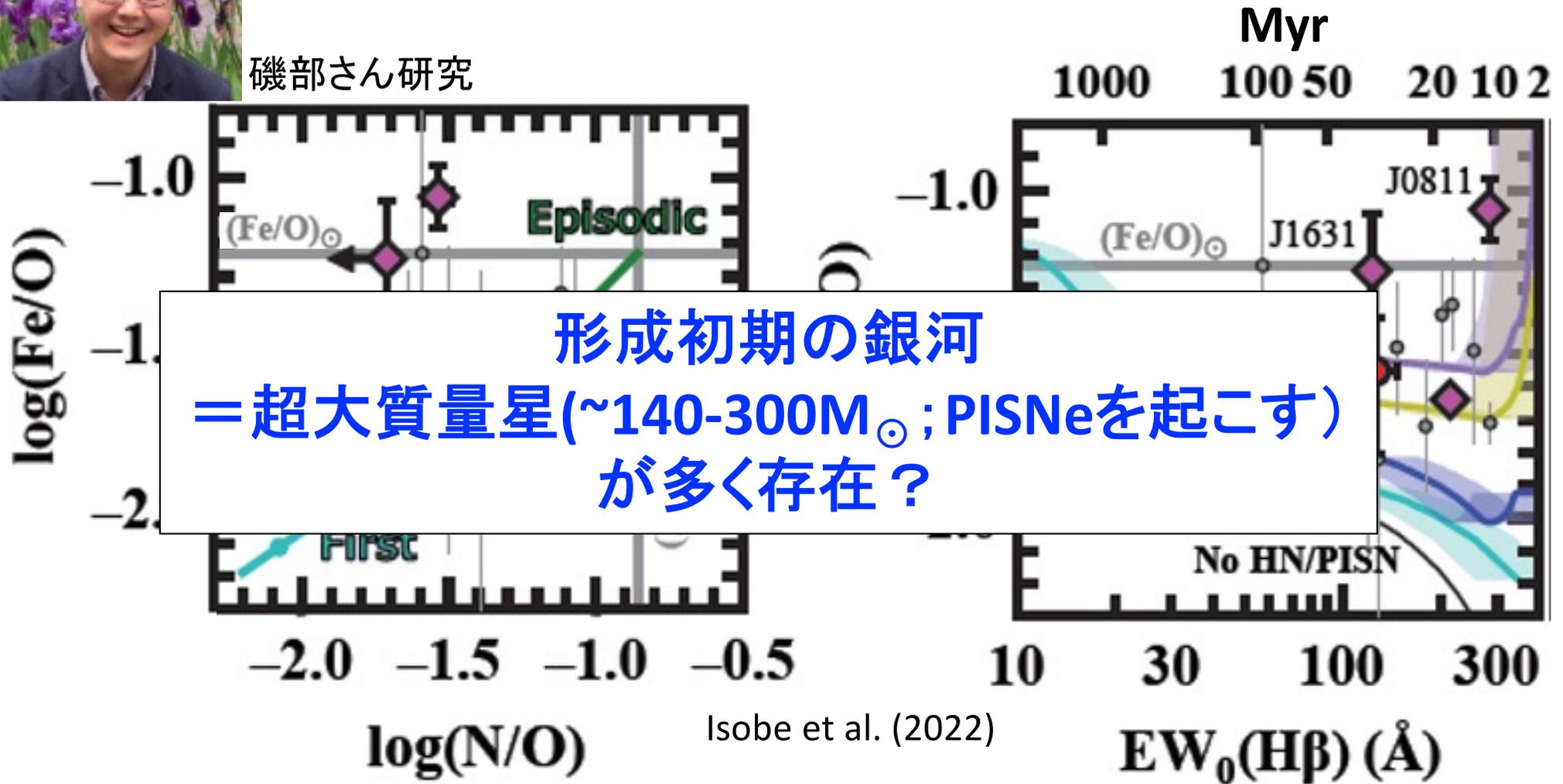


- 恒星内部の核融合反応で作られた放射(光子)の圧力で自身の重力を支える
- 鉄の中心核の成長で核融合を起こせず→恒星が自重で縮む→温度上昇
- 恒星内部の光子のエネルギーが1.02MeVを超え多くが対生成→電子陽電子
- 光子の移動距離が減り、放射の圧力が減少→急激に潰れて核融合が暴走



磯部さん研究

# 多すぎる鉄の起源は？

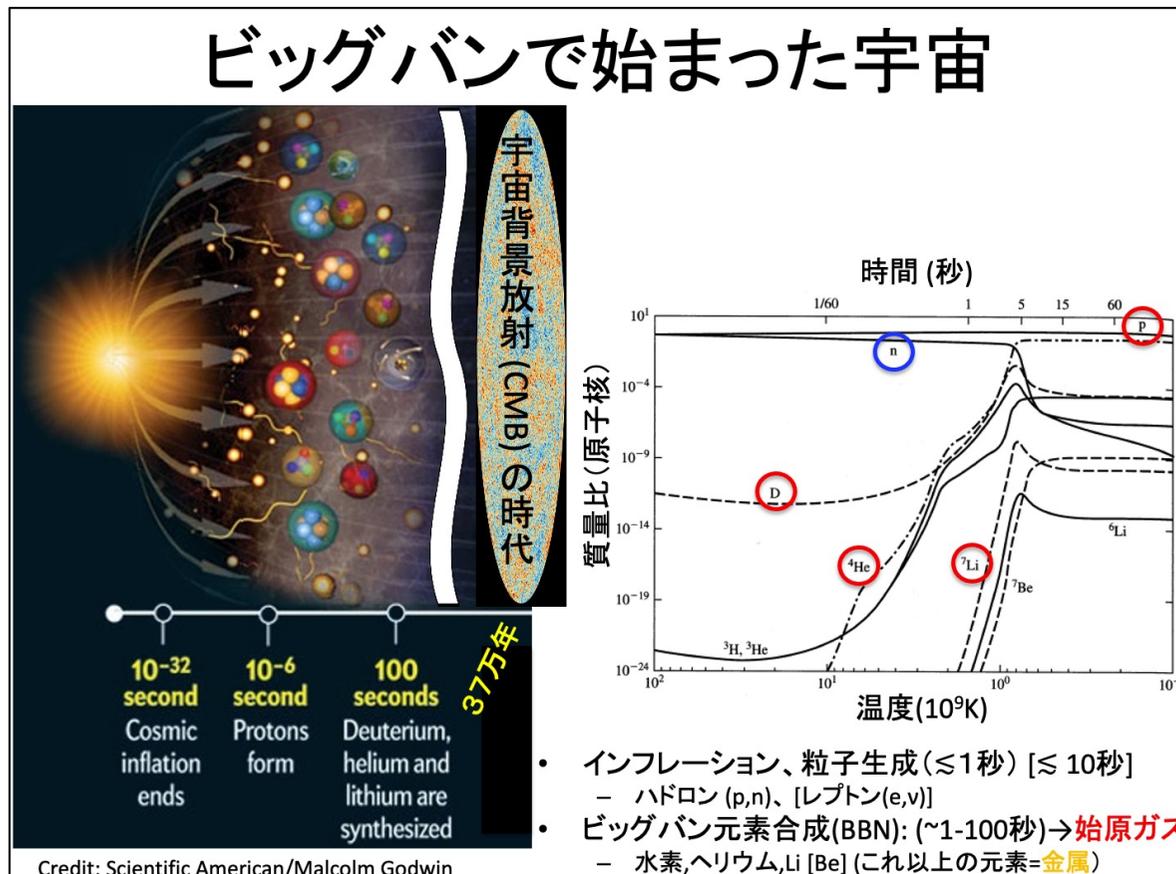
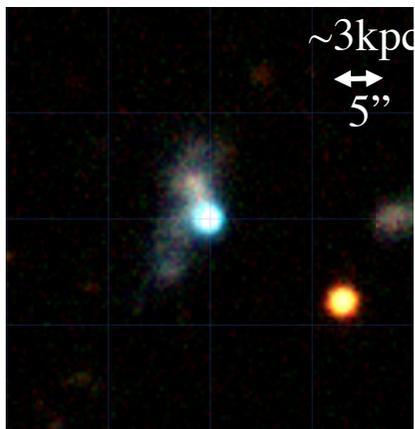


- 高い  $(\text{Fe}/\text{O}) \sim (\text{Fe}/\text{O})_{\odot}$  → 理論モデルによる説明
    - Ia型超新星爆発 (SNeIa) による鉄生成？ → No (delay timeより小さい星年齢)
    - 間欠的な星形成 (古い星種族の存在)？ → No ( $\text{N}/\text{O}$ が大きすぎるため)
    - ダストへの降着 → No (IGMの $\text{Fe}/\text{O}$ が小さいため)
- 何か？

# 極金属欠乏銀河の詳細観測で分かったこと

## 2) 初期宇宙

# ビッグバン元素合成 原始ヘリウム

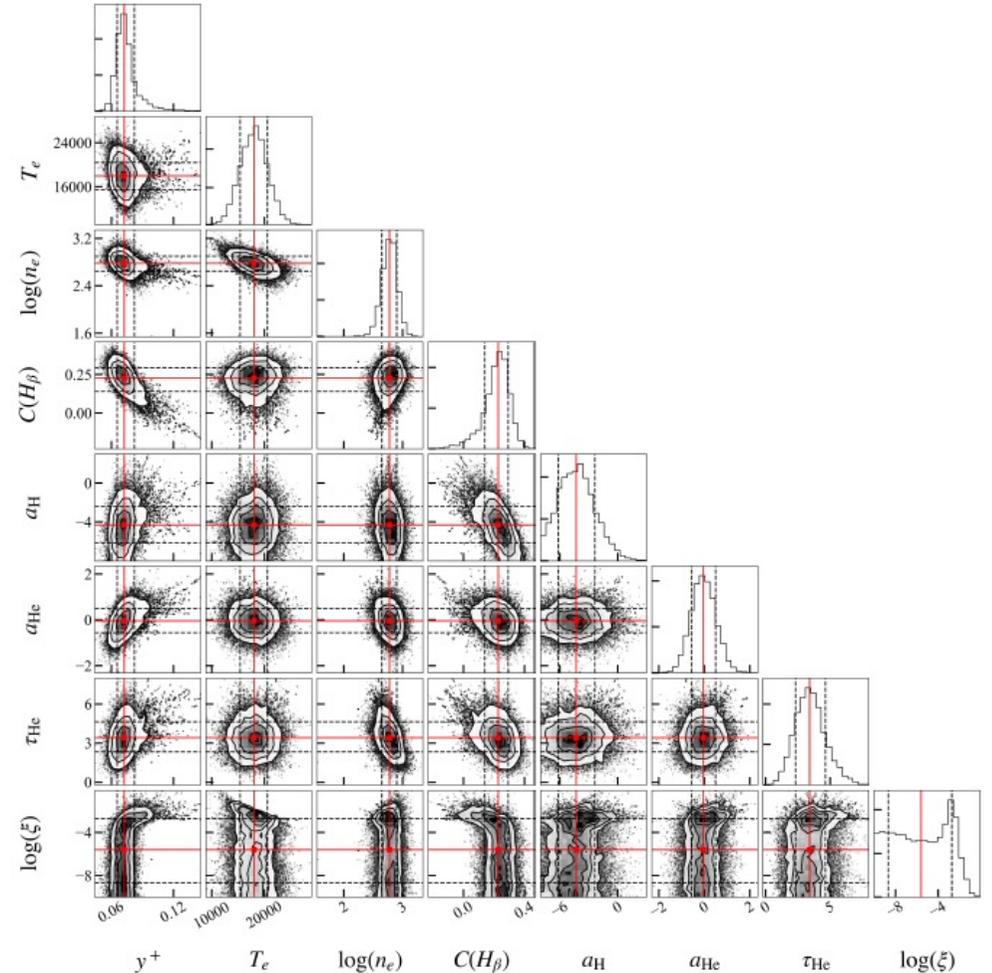
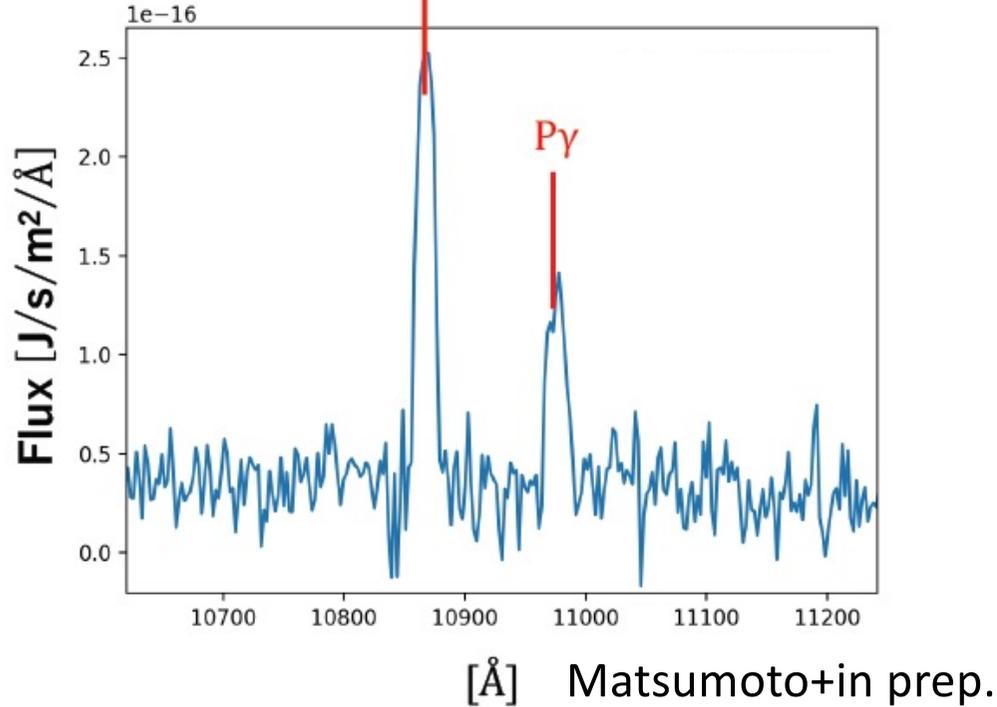


- 極金属欠乏銀河: ビッグバン元素合成によるガス  $\rightarrow$  原始ヘリウムの組成比



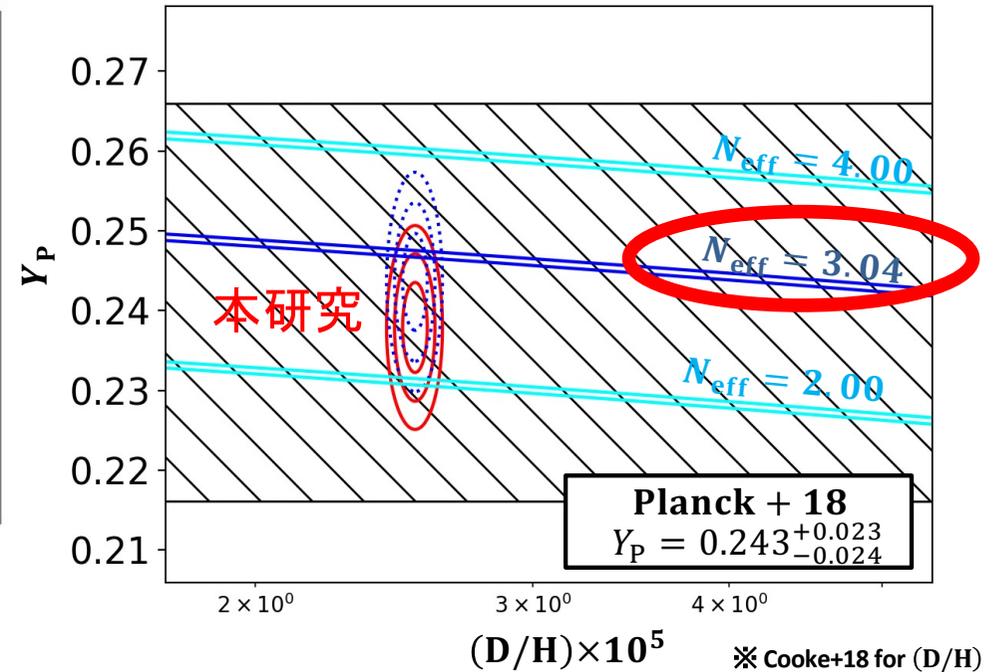
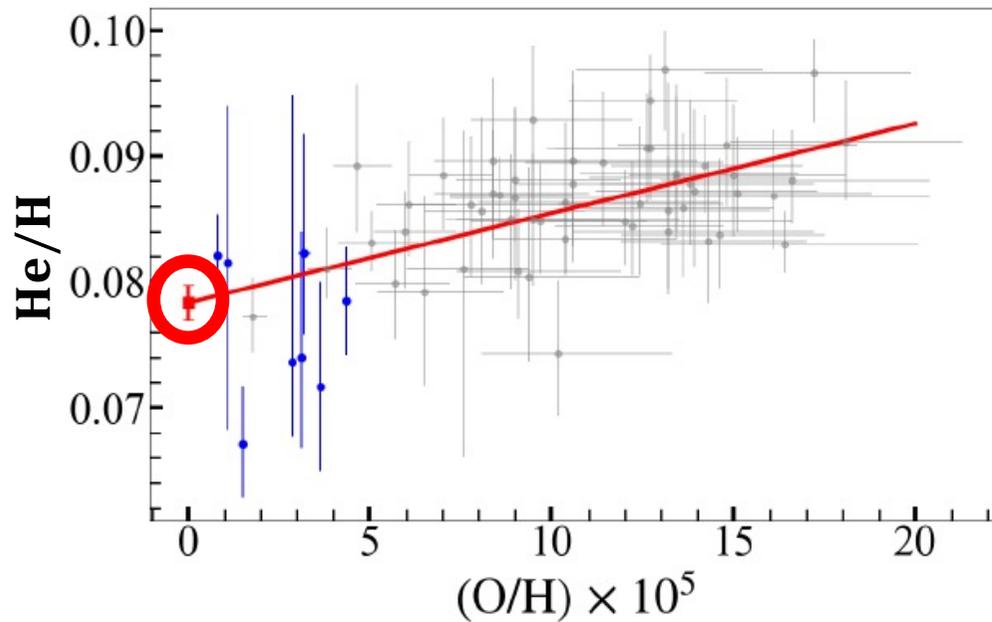
# ヘリウム組成比 $\text{He}/\text{H}$ の測定

松本さん研究



- 水素-ヘリウム14本の輝線(可視光-近赤外)
- Markov chain Monte Carlo (MCMC)法でモデルフィット  
– 8つのガス雲パラメータ:  $(\text{He}/\text{H})$ ,  $T_e$ ,  $n_e$ ,  $\xi$  etc.

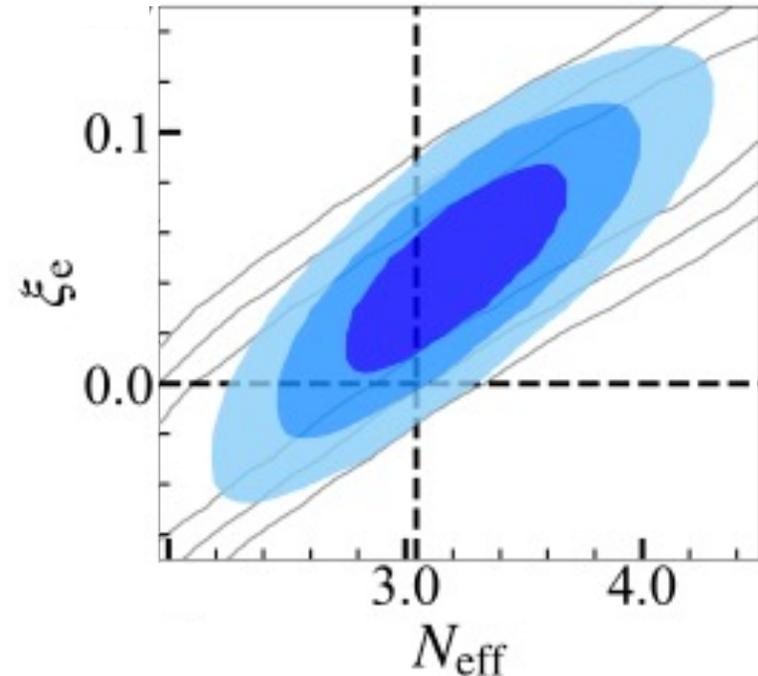
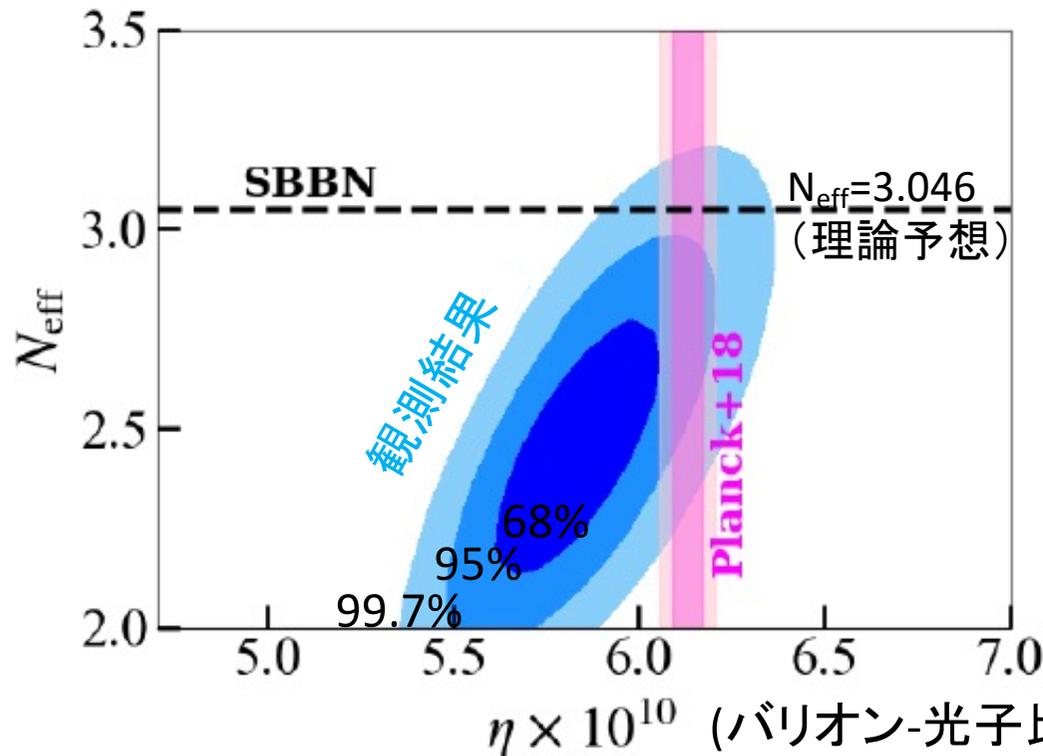
# 原始ヘリウム組成比 $Y_p$



Matsumoto+in prep.

- ゼロ金属量におけるHe組成「個数」比  $\text{He}/\text{H} = 0.0783 \pm 0.0014$  ( $\equiv y$ )
- 原始Heの「質量」組成比:  $Y_p = 4y/[1+4y] = 0.2386 \pm 0.0033$
- 宇宙背景放射(CMB)観測による制限(Planck)と無矛盾。より強い制限。
- 比較的小さな  $Y_p \rightarrow$  標準理論(ニュートリノ世代数  $N_{\text{eff}} = 3.046$ )より小さい

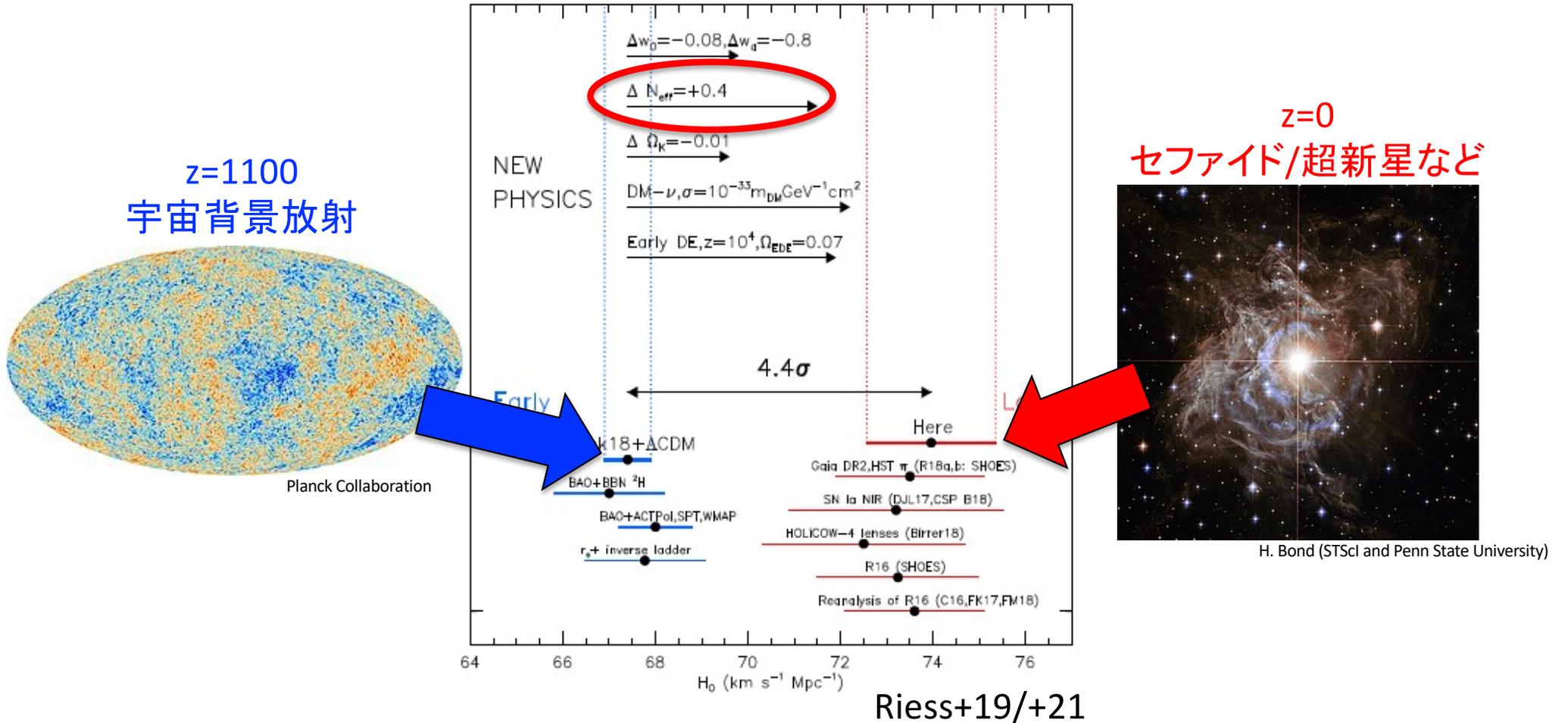
# 標準理論からのズレ？ レプトン非対称性？



- ニュートリノ世代数  $N_{\text{eff}} = 2.49 (+0.17/-0.26)$  : 標準的な宇宙理論 ( $N_{\text{eff}}=3.046$ ) から95%以上の確率でズレる？ → レプトン非対称性  $\xi_e \neq 0$  を示唆？
- 標準理論はそのまま、宇宙初期にレプトン非対称性を許した場合  
 $\xi_e > 0$  で  $N_{\text{eff}} = 3.19 (+0.33/-0.29)$  →  $N_{\text{eff}}$  大きく  $\sim 3.5$  程度までとりうる ( $\Delta N_{\text{eff}} = 0.4$  程度)。

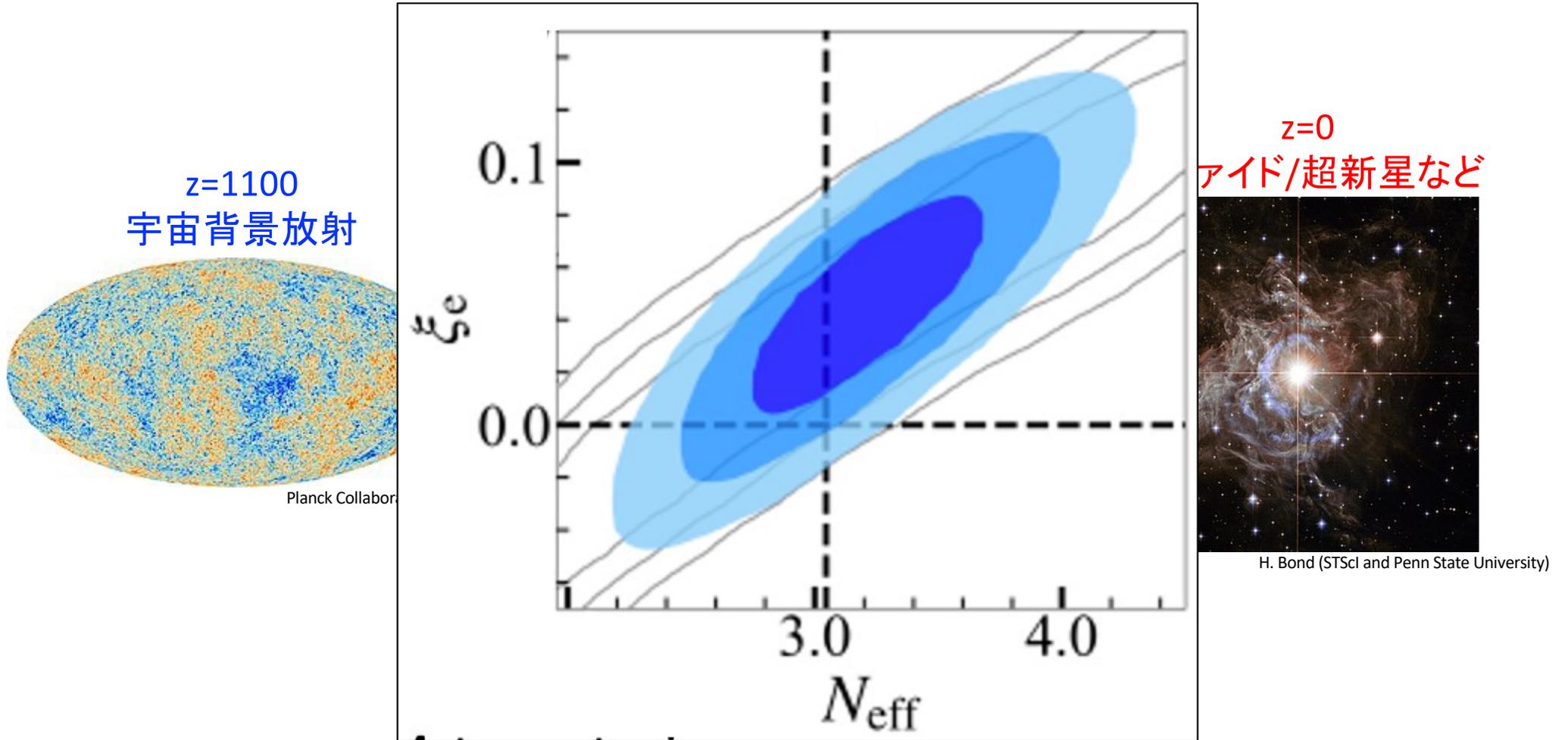
# 宇宙論最大の問題 (Hubble Tension)

## 解決の手がかり?



- Hubble Tension : 宇宙の膨張率  $H_0$  の食い違い (初期宇宙 vs. 現在の宇宙)
  - $H_0 = 67.4 \pm 0.5$  (初期; 宇宙背景放射; Planck+18) vs.  $73.0 \pm 1.0$  (現在; セファイド、超新星) in km/s/Mpc
  - $N_{\text{eff}}$  が 3.046 より  $\Delta N_{\text{eff}} \sim 0.4$  程度大きい? ( $N_{\text{eff}} \sim 3.5$ )  $\rightarrow$  食い違いを説明できるかも?
  - $N_{\text{eff}}$  の決定精度はまだ高くない  $N_{\text{eff}} = 3.19 (+0.33/-0.29)$   $\rightarrow$  **すばるで観測継続へ**

# 宇宙論最大の問題 (Hubble Tension) 解決の手がかり?



- Hubble Tension : 宇宙の膨張率  $H_0$  の食い違い (初期宇宙 vs. 現在の宇宙)
  - $H_0 = 67.4 \pm 0.5$  (初期; 宇宙背景放射; Planck+18) vs.  $73.0 \pm 1.0$  (現在; セファイド、超新星) in km/s/Mpc
  - $N_{\text{eff}}$  が 3.046 より  $\Delta N_{\text{eff}} \sim 0.4$  程度大きい? ( $N_{\text{eff}} \sim 3.5$ ) → 食い違いを説明できるかも?
  - $N_{\text{eff}}$  の決定精度はまだ高くない  $N_{\text{eff}} = 3.19 (+0.33/-0.29)$  → **すばるで観測継続へ**

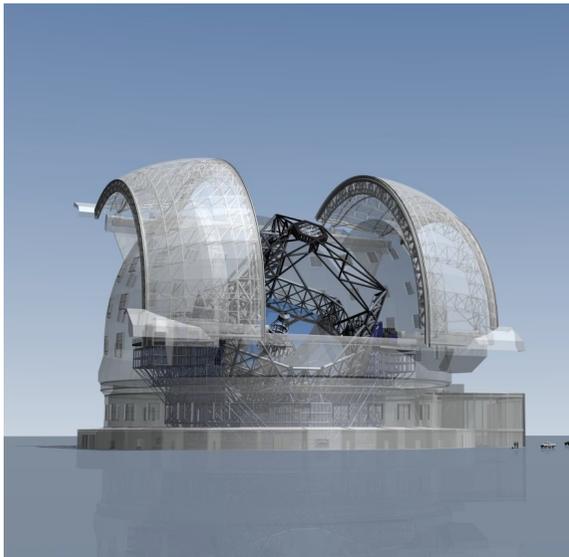
**さらに進んだ研究へ  
(将来の研究プロジェクト)**

# 宇宙初期の観測 を目指して ( $z > \sim 10$ )

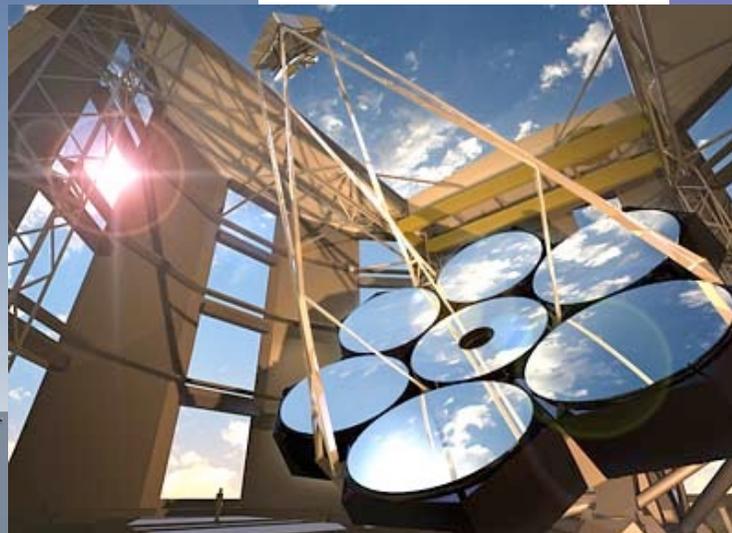
- 大型宇宙望遠鏡 JWST (6.5m)
- 超大型地上望遠鏡 TMTなど( $\sim 30$ m)



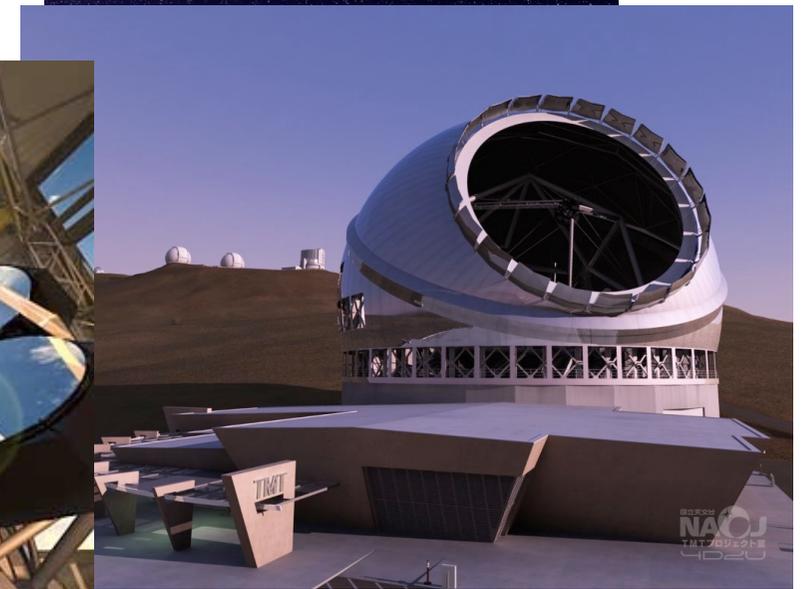
James Webb Space Telescope (JWST; 2022)



European Extremely Large  
Telescope (E-ELT;  $\sim 2025-2030$ )



Giant Magellan Telescope  
(GMT;  $\sim 2025-2030$ )



Thirty Meter Telescope  
(TMT;  $\sim 2029$ ) incl. Japan



# まとめ

- 光学観測で探る宇宙
  - 今日の宇宙の姿→  
宇宙がどのように出来たか？宇宙史の理解の取り組み
- 観測の方法
- 新たな観測アプローチ(極金属欠乏銀河)と最新結果
  - 形成初期銀河の多すぎる鉄
    - 超大質量星の存在？
  - ビッグバン元素合成がもたらした少ないヘリウム
    - Hubble Tensionの謎を解く鍵？
- さらなる初期宇宙の観測に向けて: 将来プロジェクト
  - 次世代超大型望遠鏡計画 JWST (観測開始: 2022年5-6月頃)