

最先端研究V
観測的宇宙論
---光学観測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

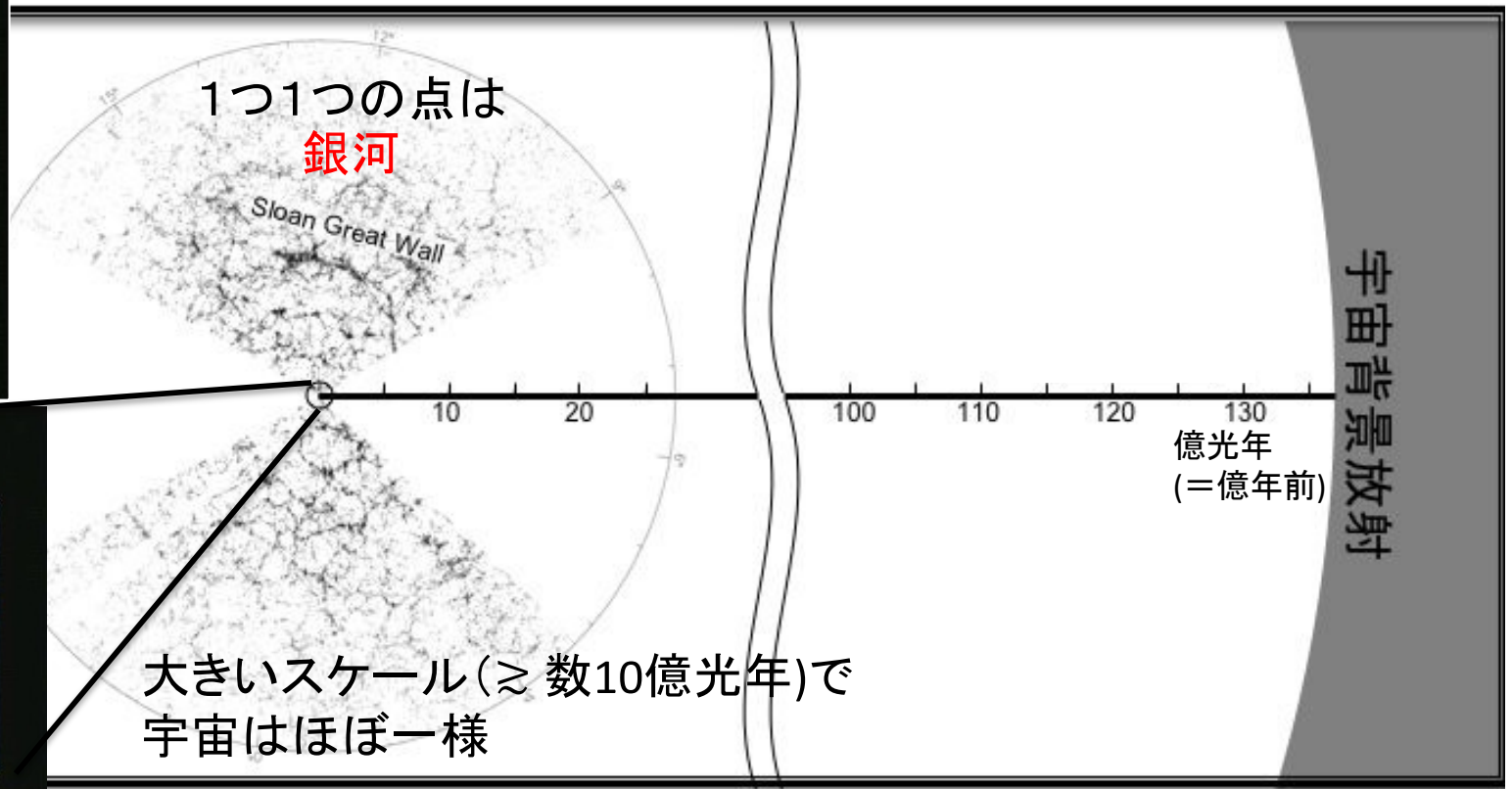
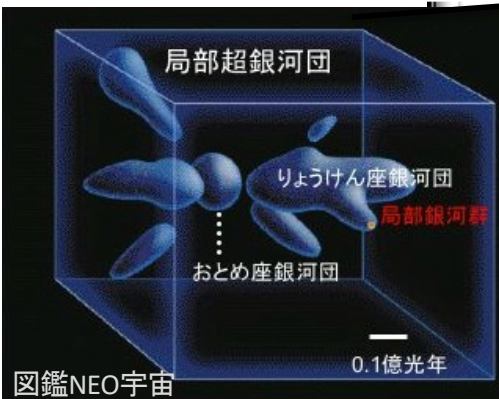
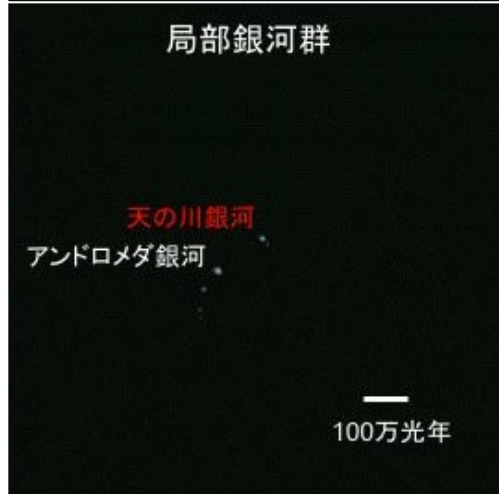
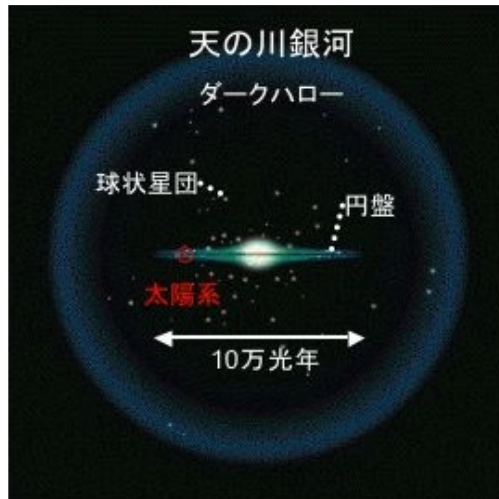
- どこまで理解できたか？

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**)？

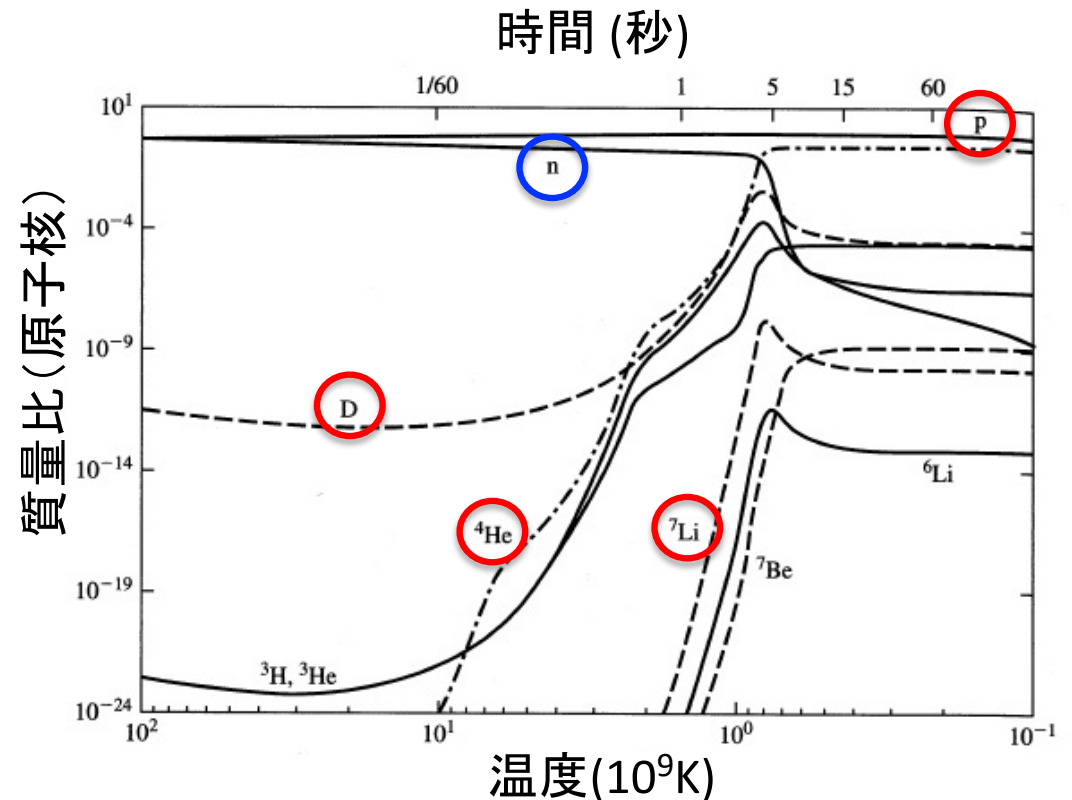
- 「**われわれはどこから来たのか** われわれは何者か われわれはどこへ行くのか」(P. Gauguin/ 1897(!))



ビッグバンで始まった宇宙



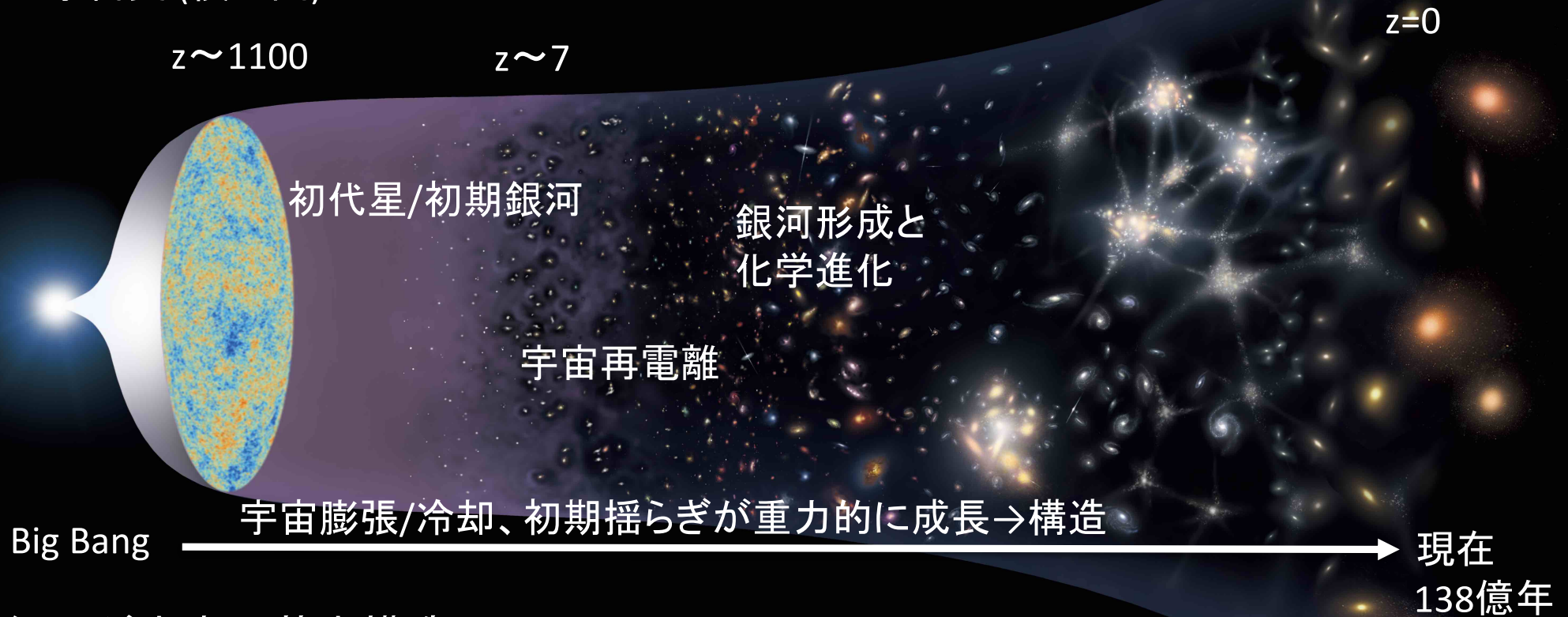
Credit: Scientific American/Malcolm Godwin



- 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)

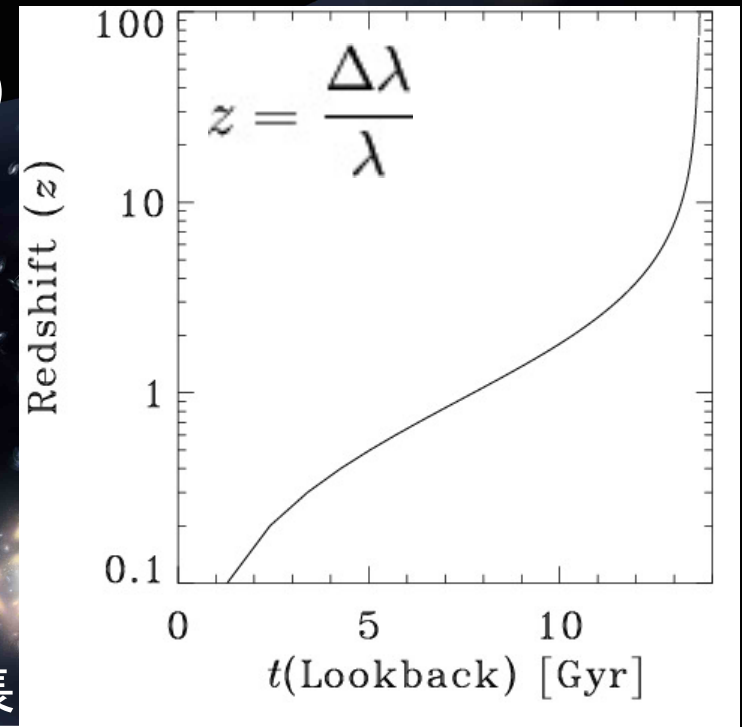
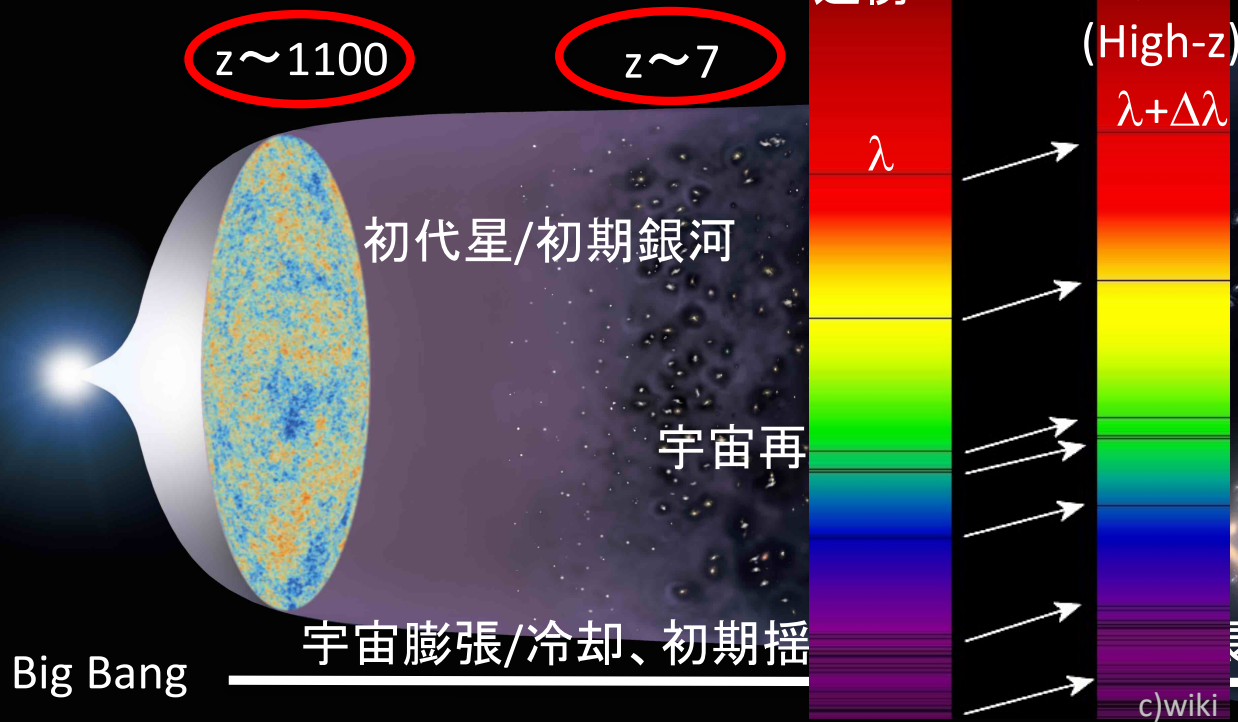


銀河が宇宙の基本構造へ

- 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

熱いビッグバン宇宙から 現在の宇宙へ

宇宙史 (模式図)



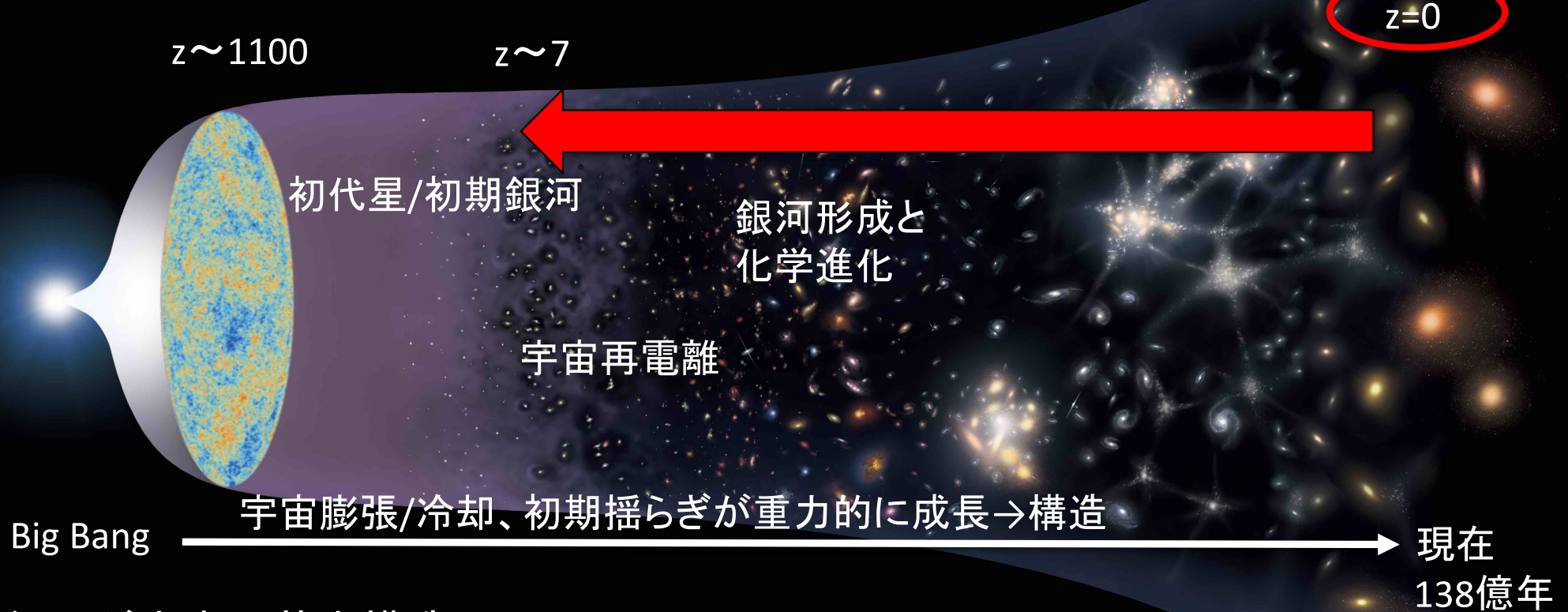
現在
138億年

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

熱いビッグバン宇宙から 現在の宇宙へ

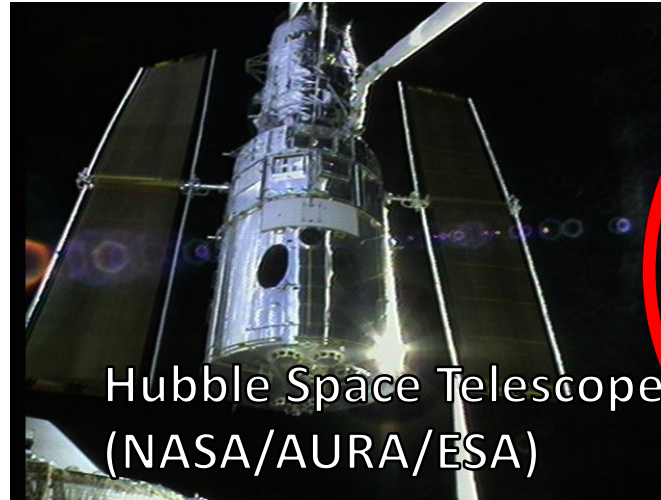
宇宙史 (模式図)

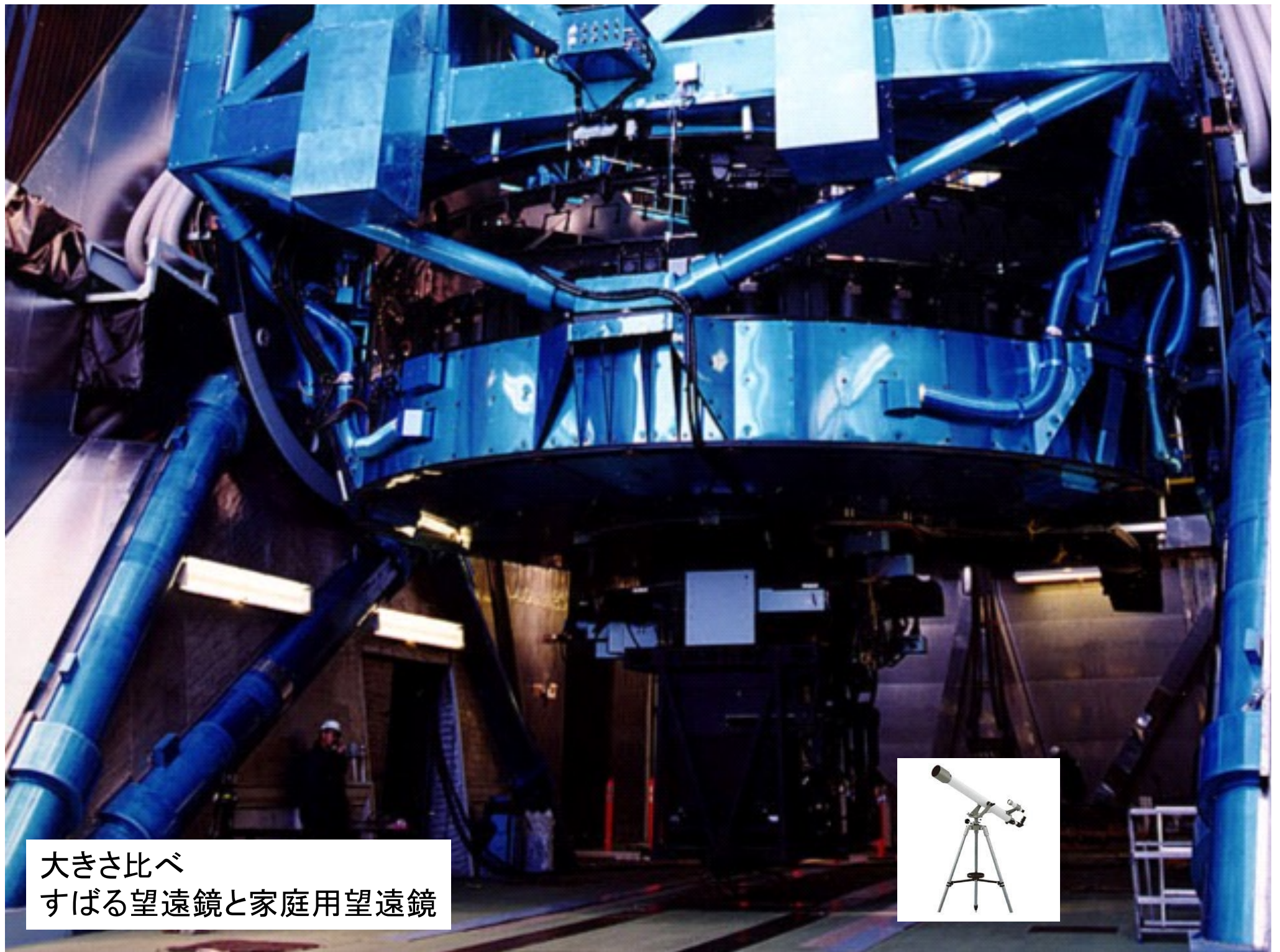


銀河が宇宙の基本構造へ

- 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

大型望遠鏡





大きさ比べ
すばる望遠鏡と家庭用望遠鏡

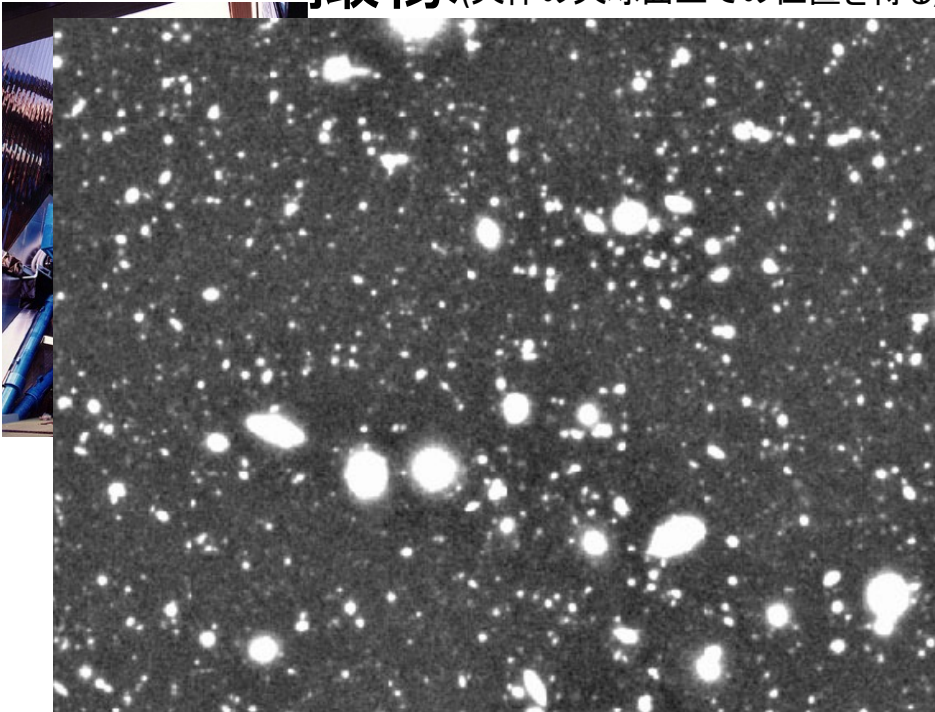


光学大型望遠鏡による観測

- 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)

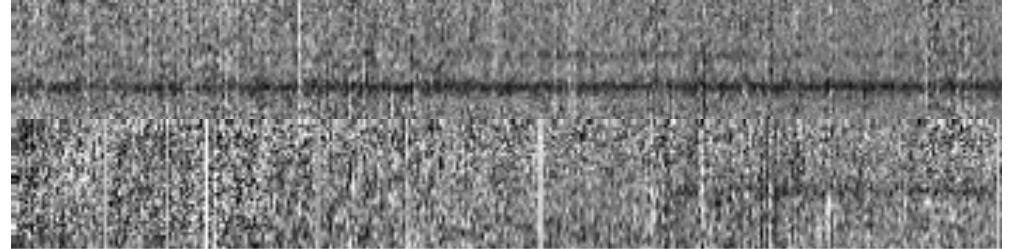


CCDカメラ

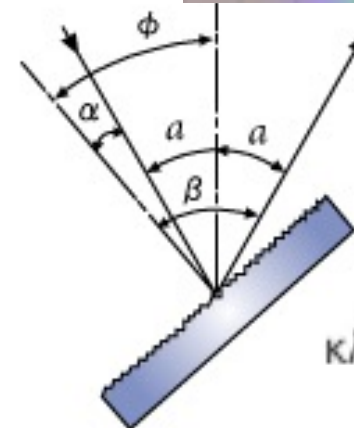
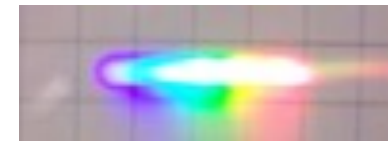
Suprime-Cam 8000万画素

Hyper Suprime-Cam 8億7000万画素

分光 (天体の赤方偏移を測る, z)

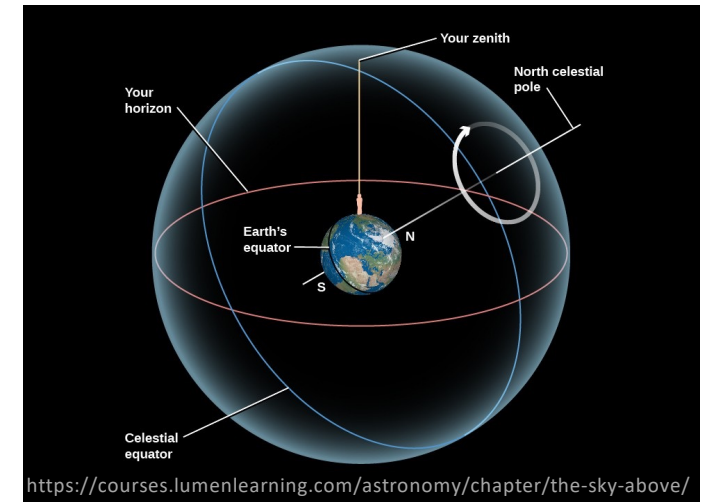


回折格子



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

観測する天域

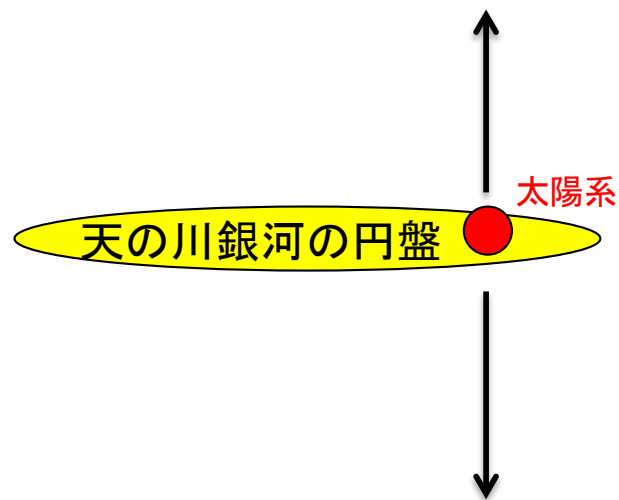


- Quiz:
 - 過去(つまり遠方)の宇宙を見るためには、望遠鏡をどこに向けて観測すれば良いか？それは何故か？
 - 「大きいスケール(≧ 数10億光年)で宇宙はほぼ一様」、
なので、どこを観測しても良いが、実際には観測する方向は大体決まっている。

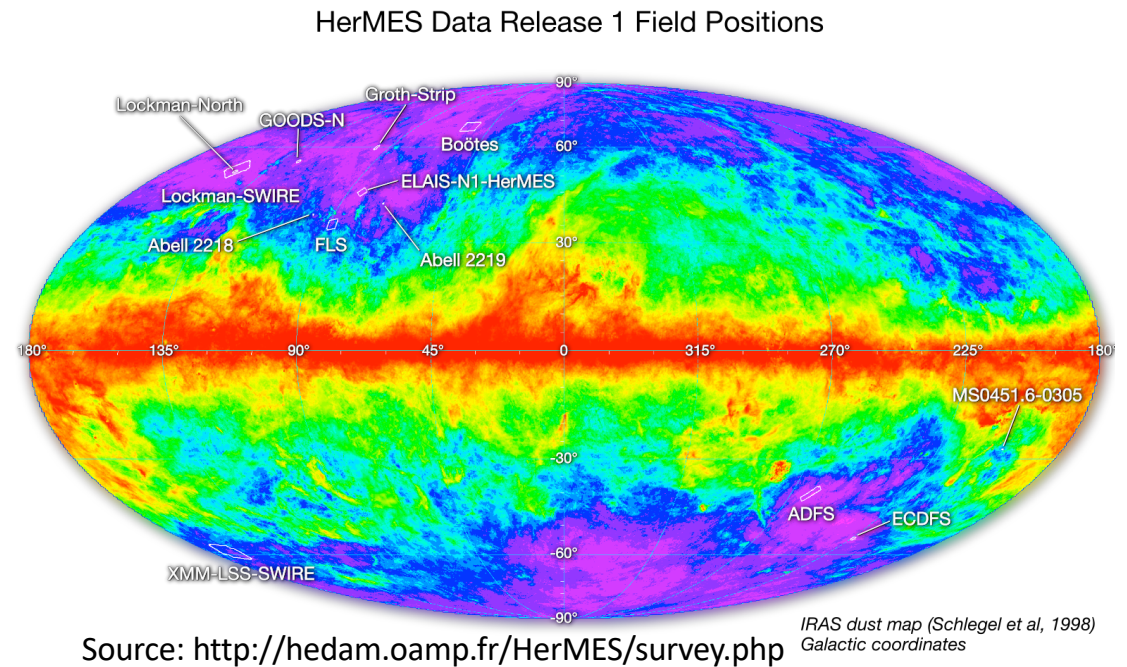
Hint: 遠方宇宙の観測は夏にはあまり行われない

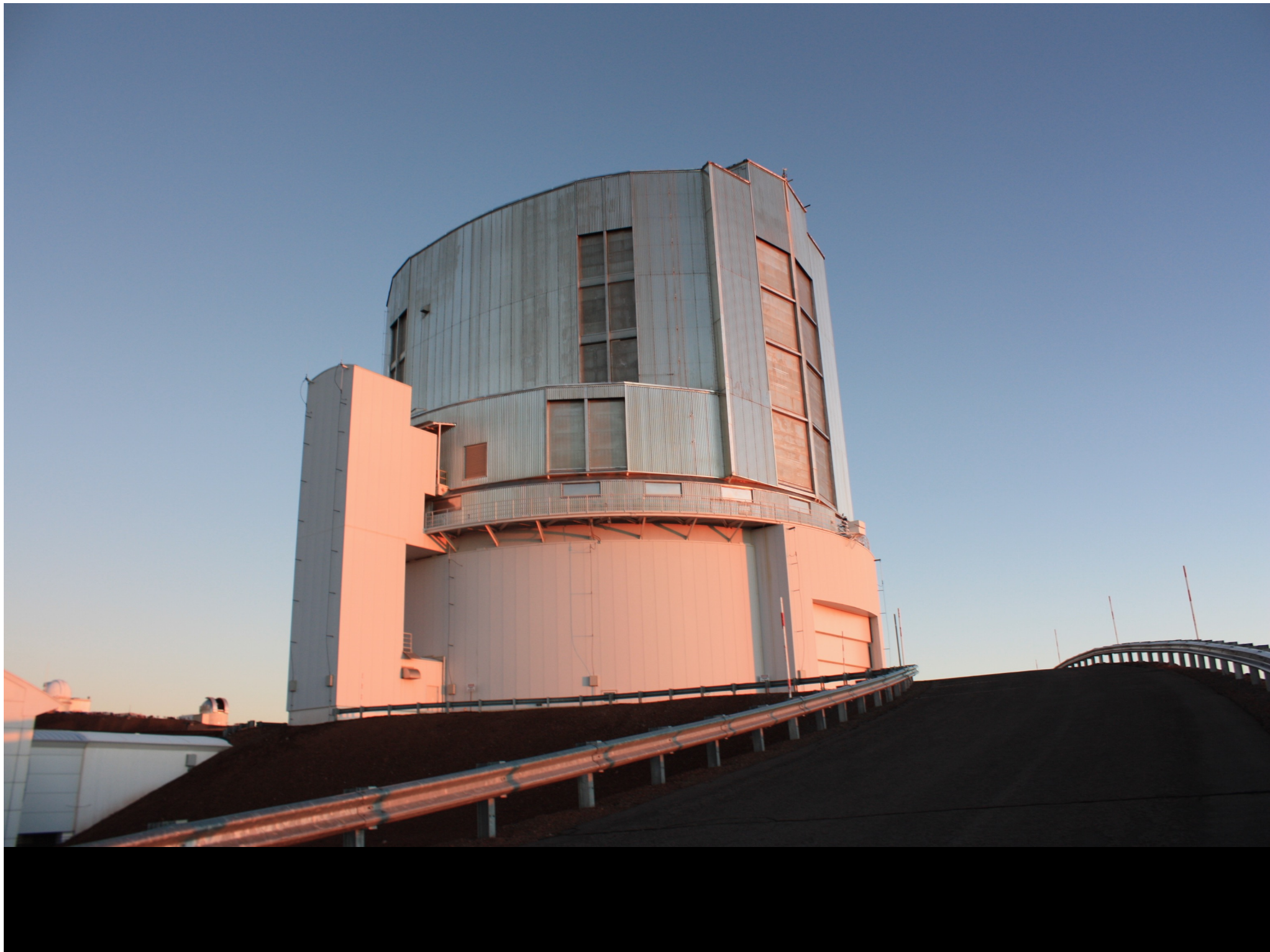
観測する天域

- 銀極方向 (高銀緯方向)



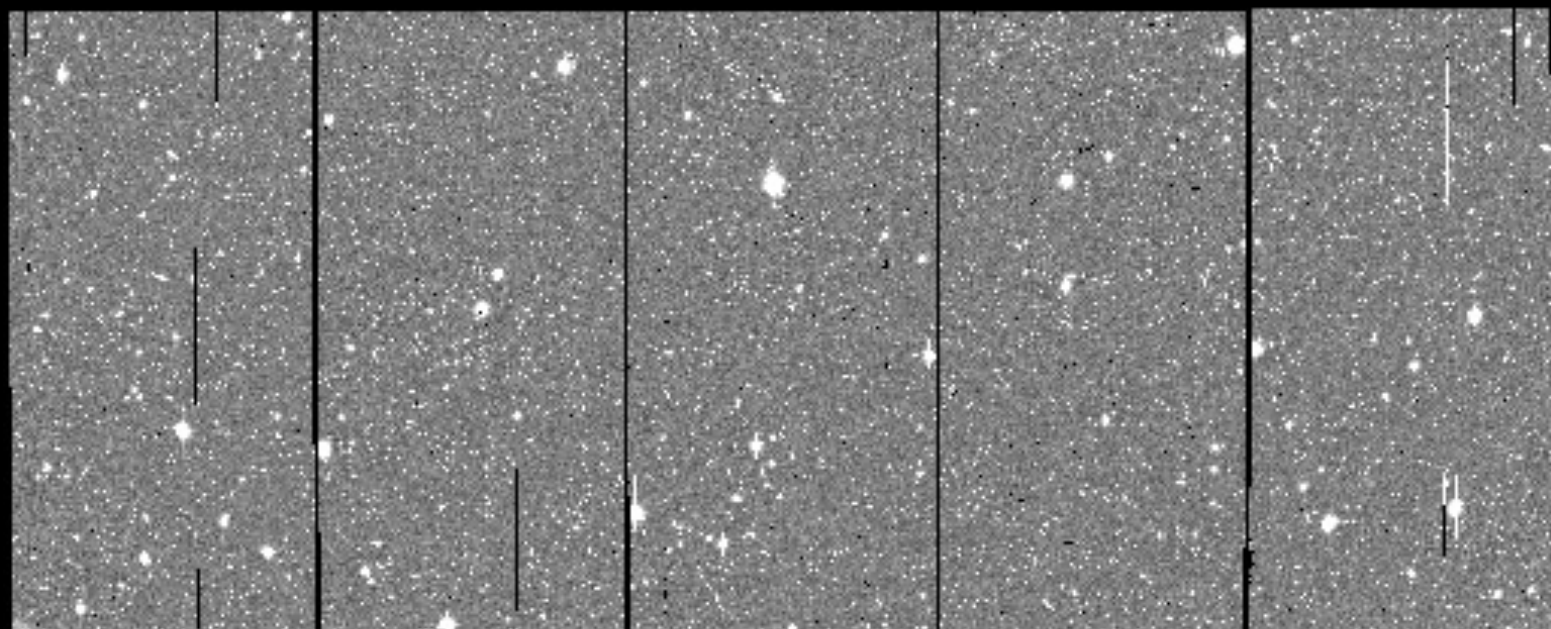
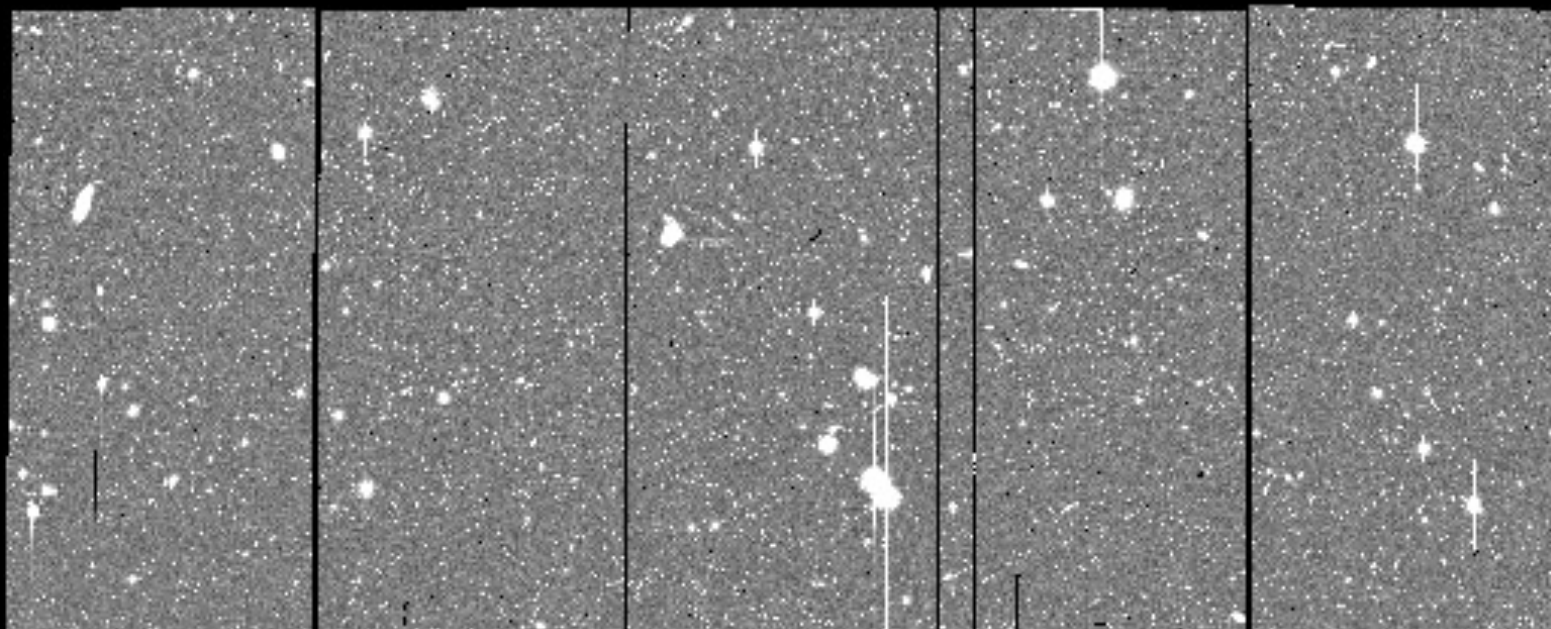
天の川銀河を横から見た図

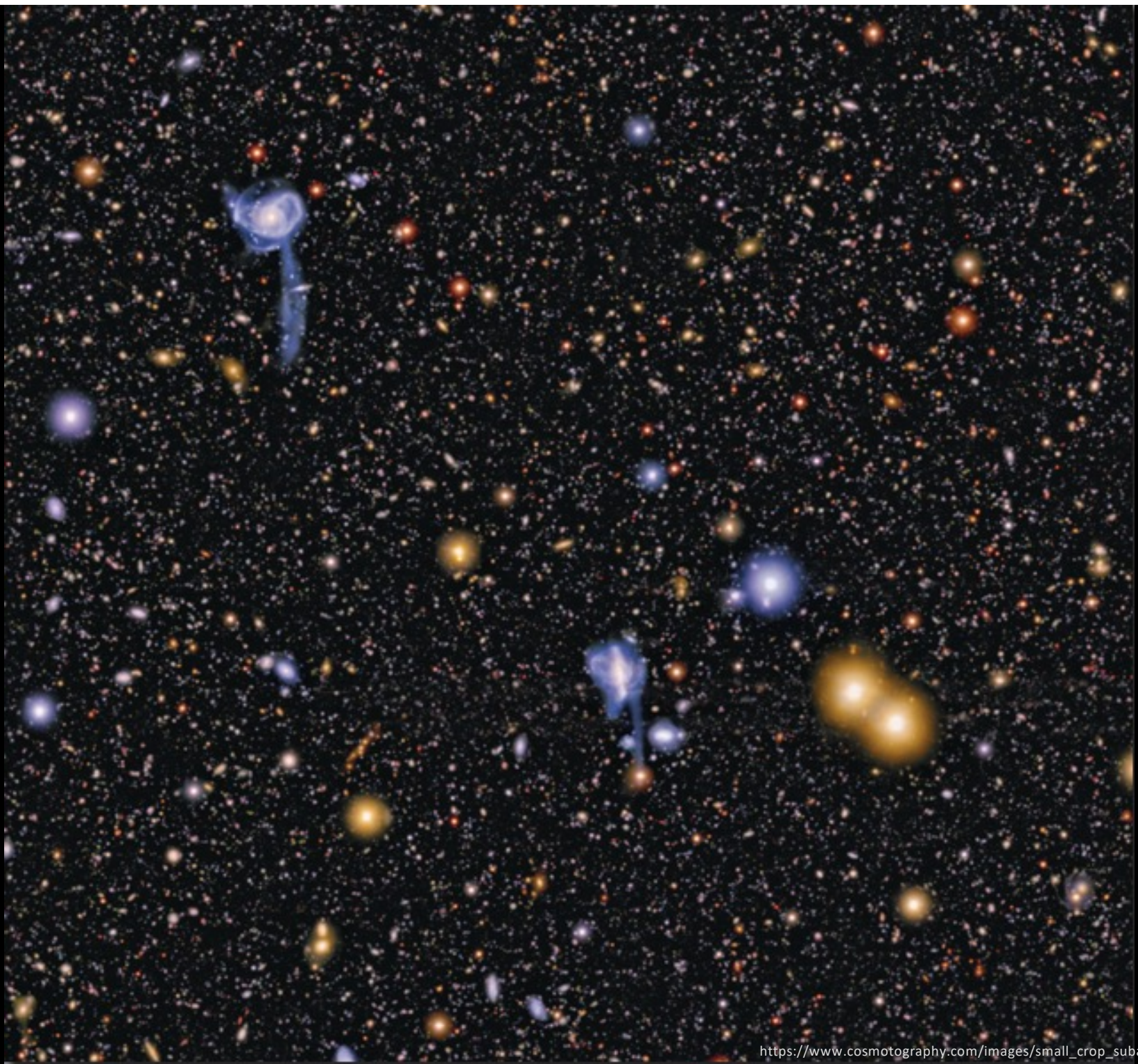




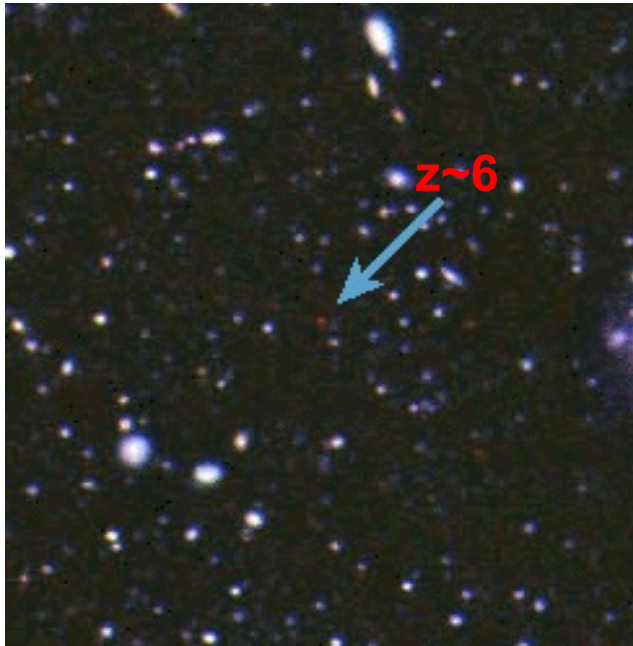


CFHT – Wed Nov 30 17:33:45 HST

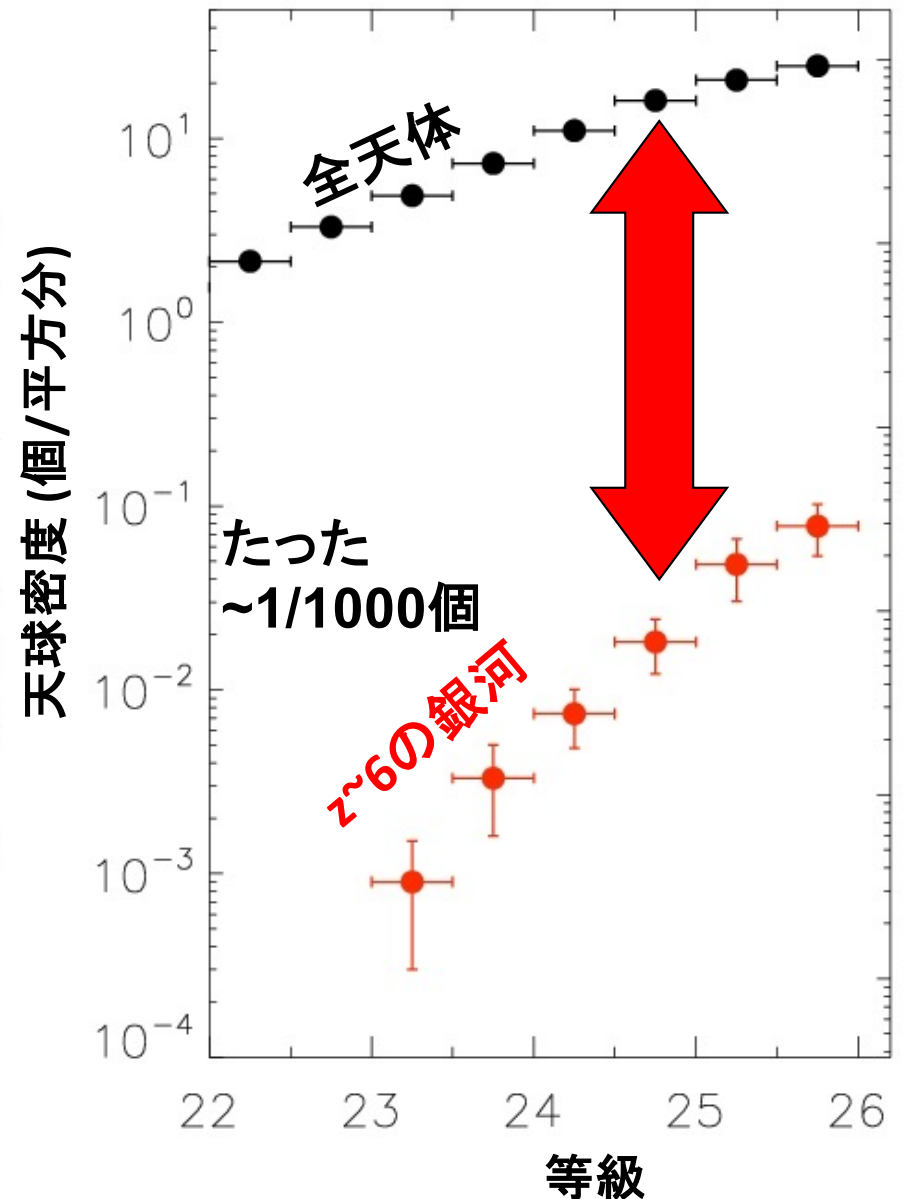




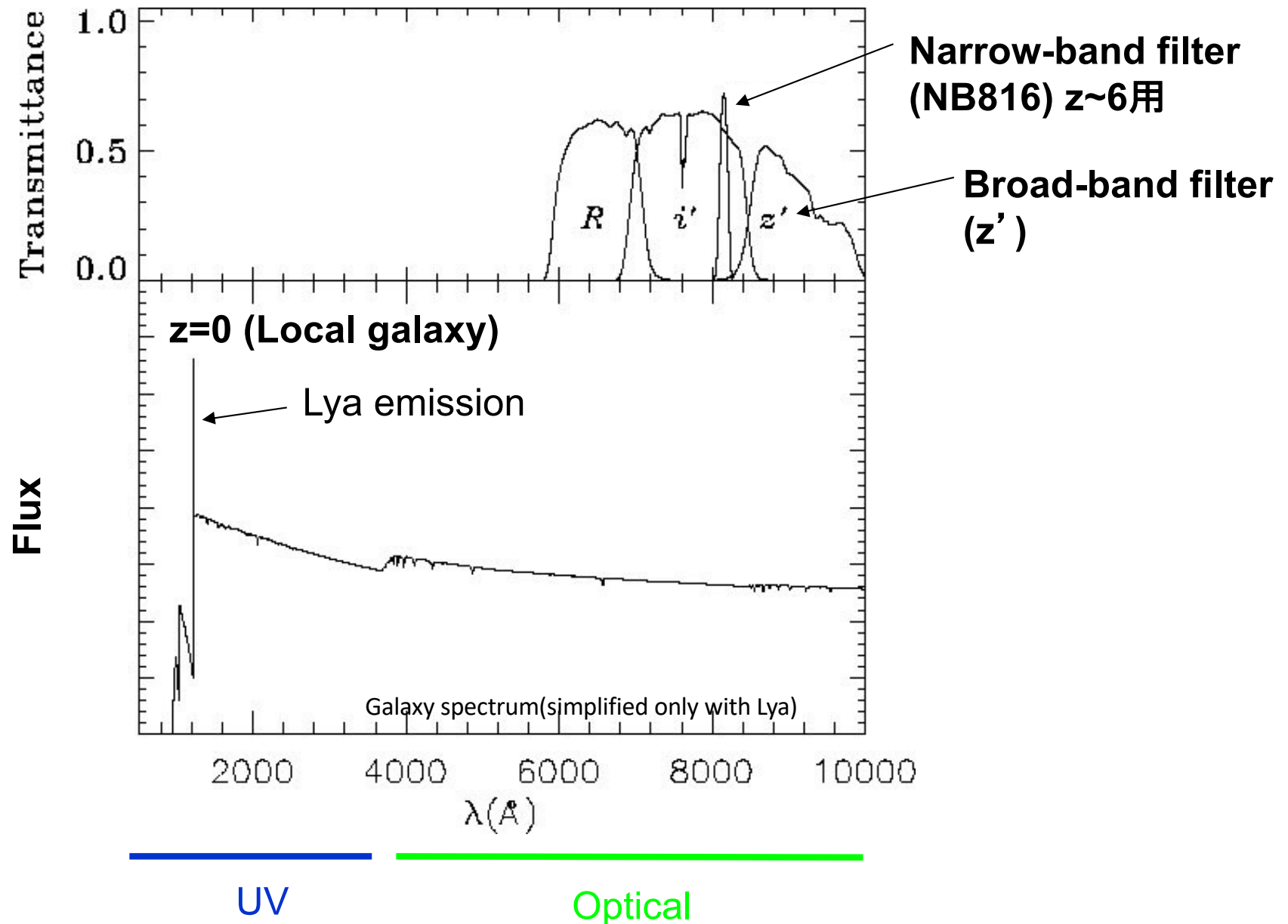
前景銀河の海から 遠方の銀河を見つける



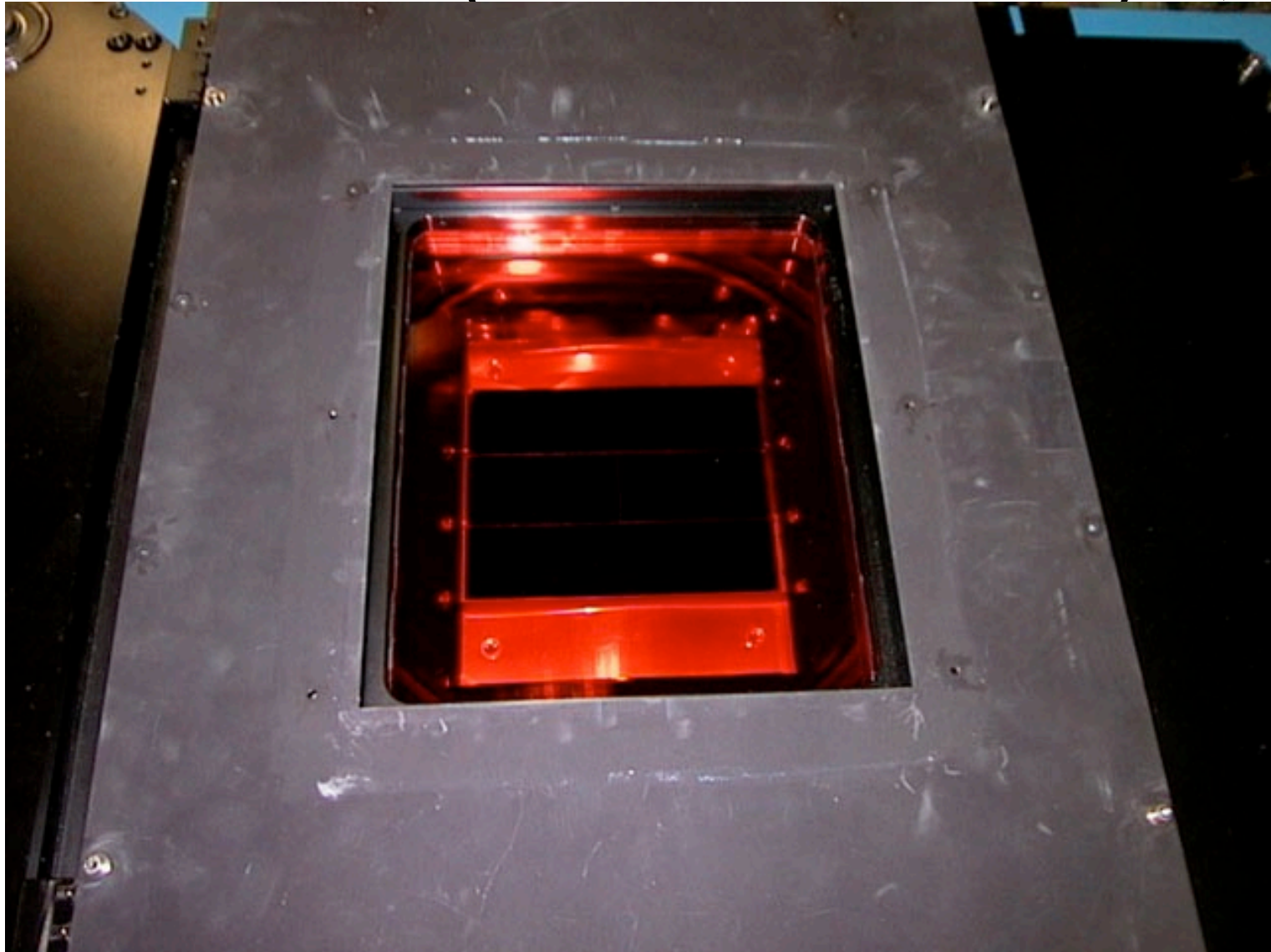
- 撮像データ: ほとんどは前景銀河
 - (例) 赤方偏移6の銀河: 1000個に1個
- 全て分光。赤方偏移を測る?
 - 赤方偏移6の銀河1つ~3時間
 - 375日 (=3000時間/8時間) 観測で1個
→ 現実的に不可能



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



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



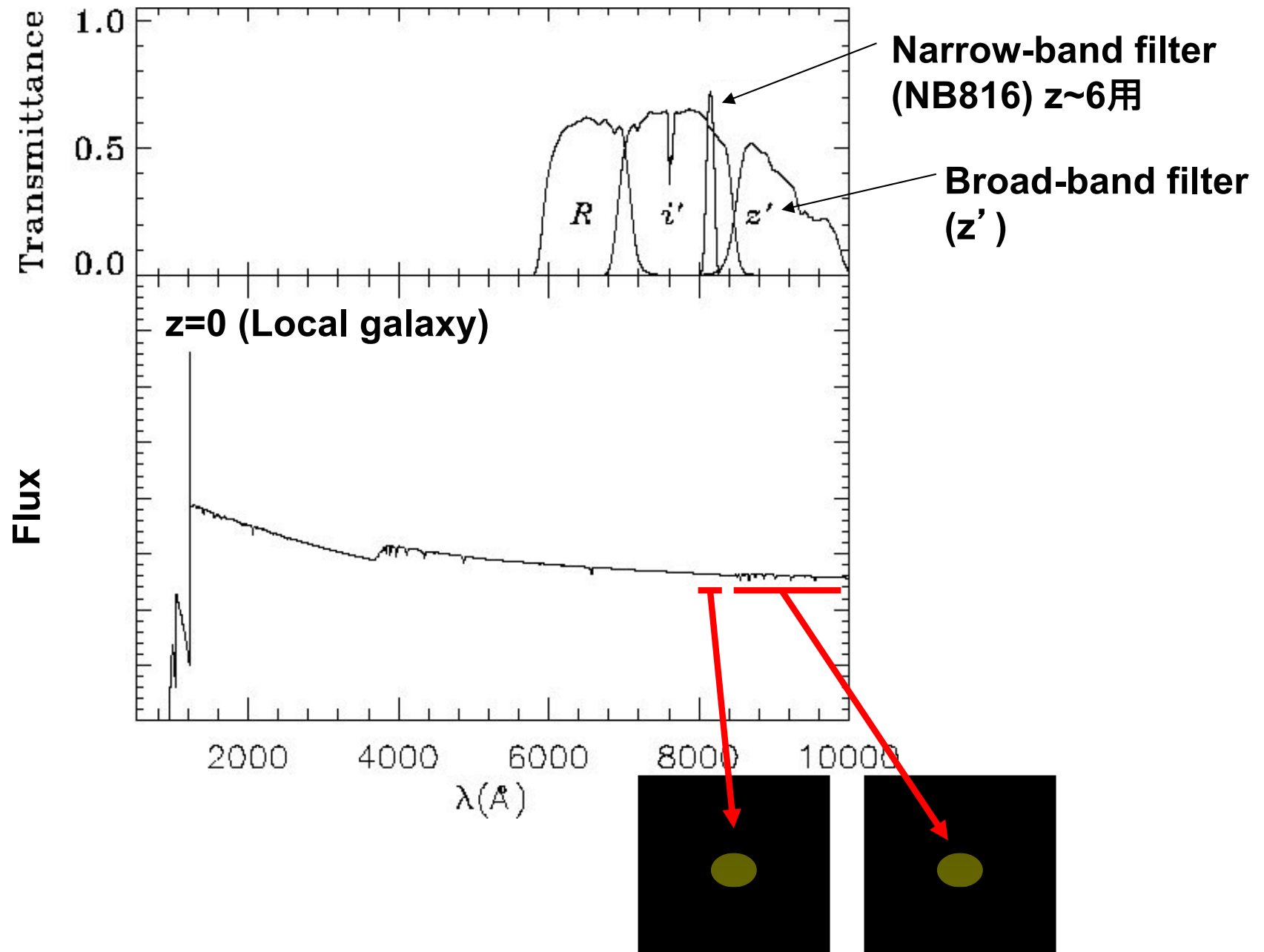
d filter
用

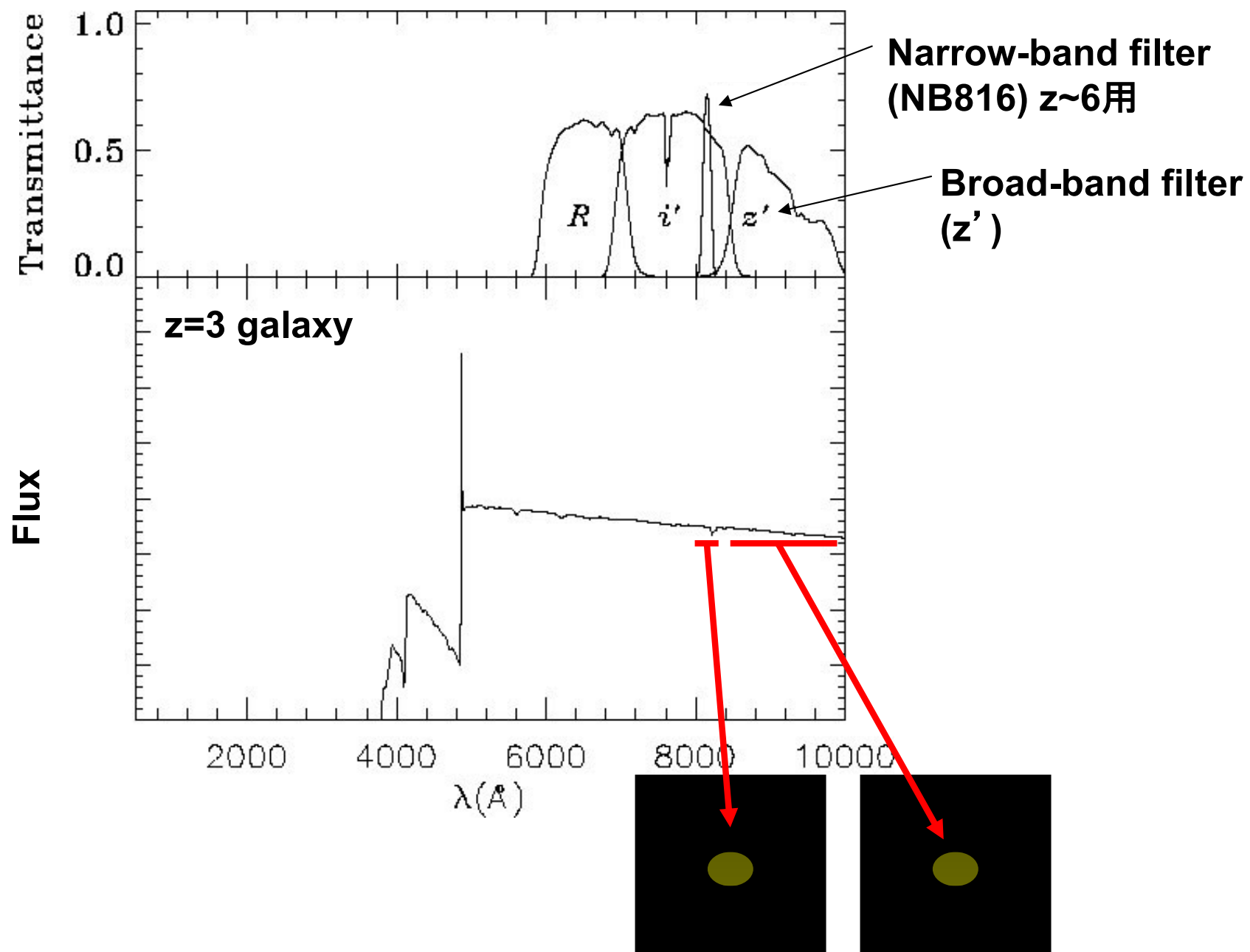
and filter

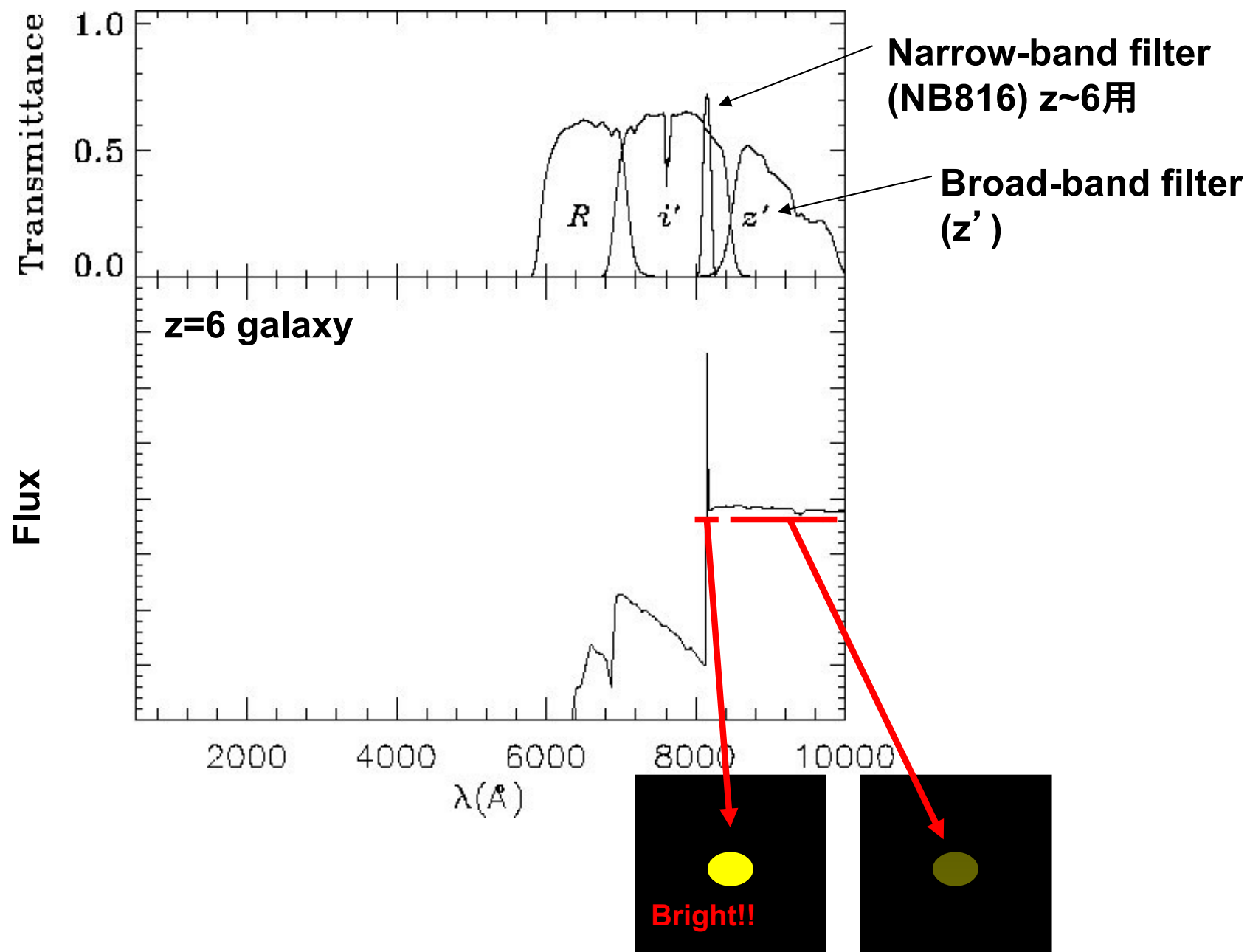
UV

Optical

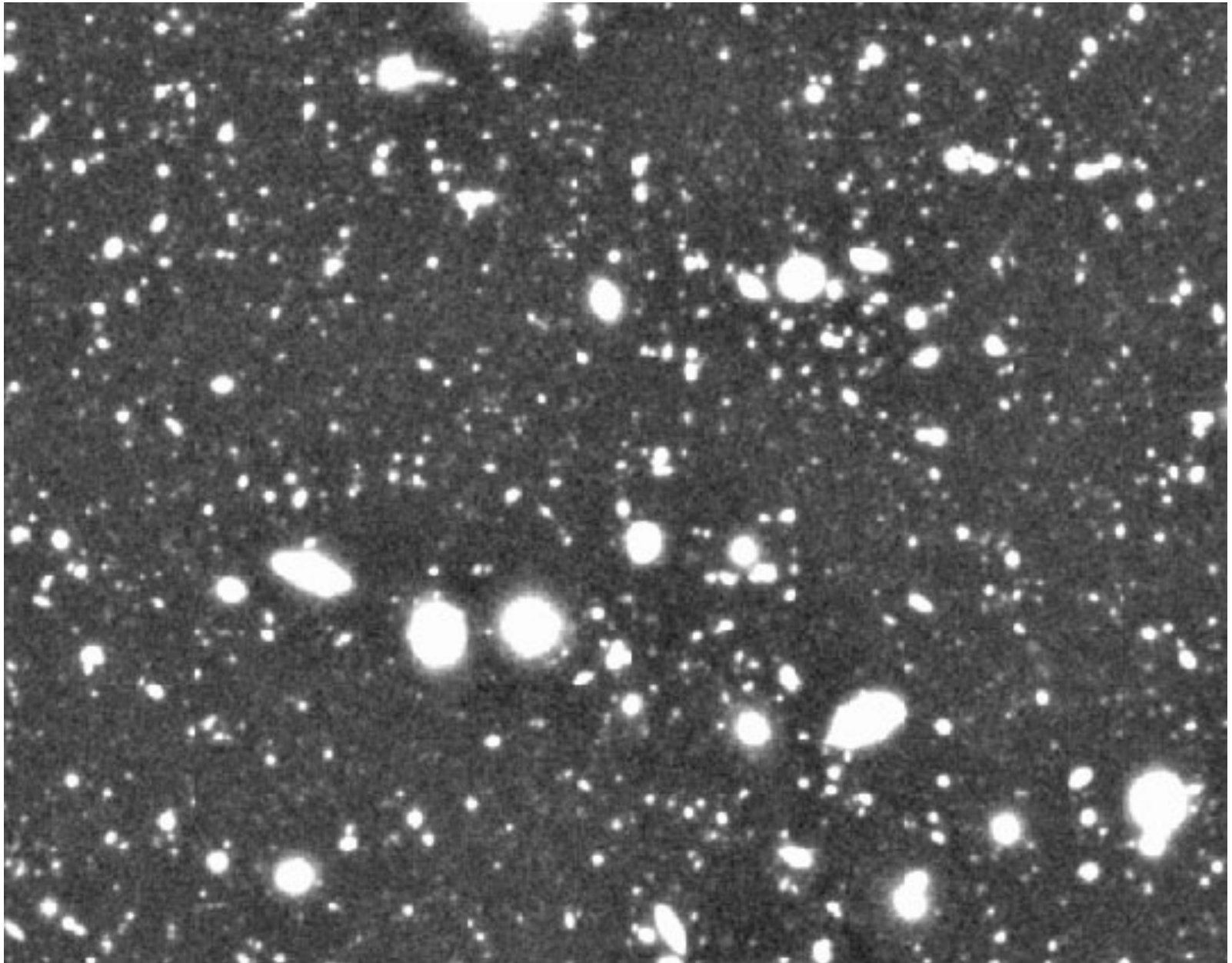
遠方の銀河候補を 狭帯域フィルター(**narrow-band filter**)で選択



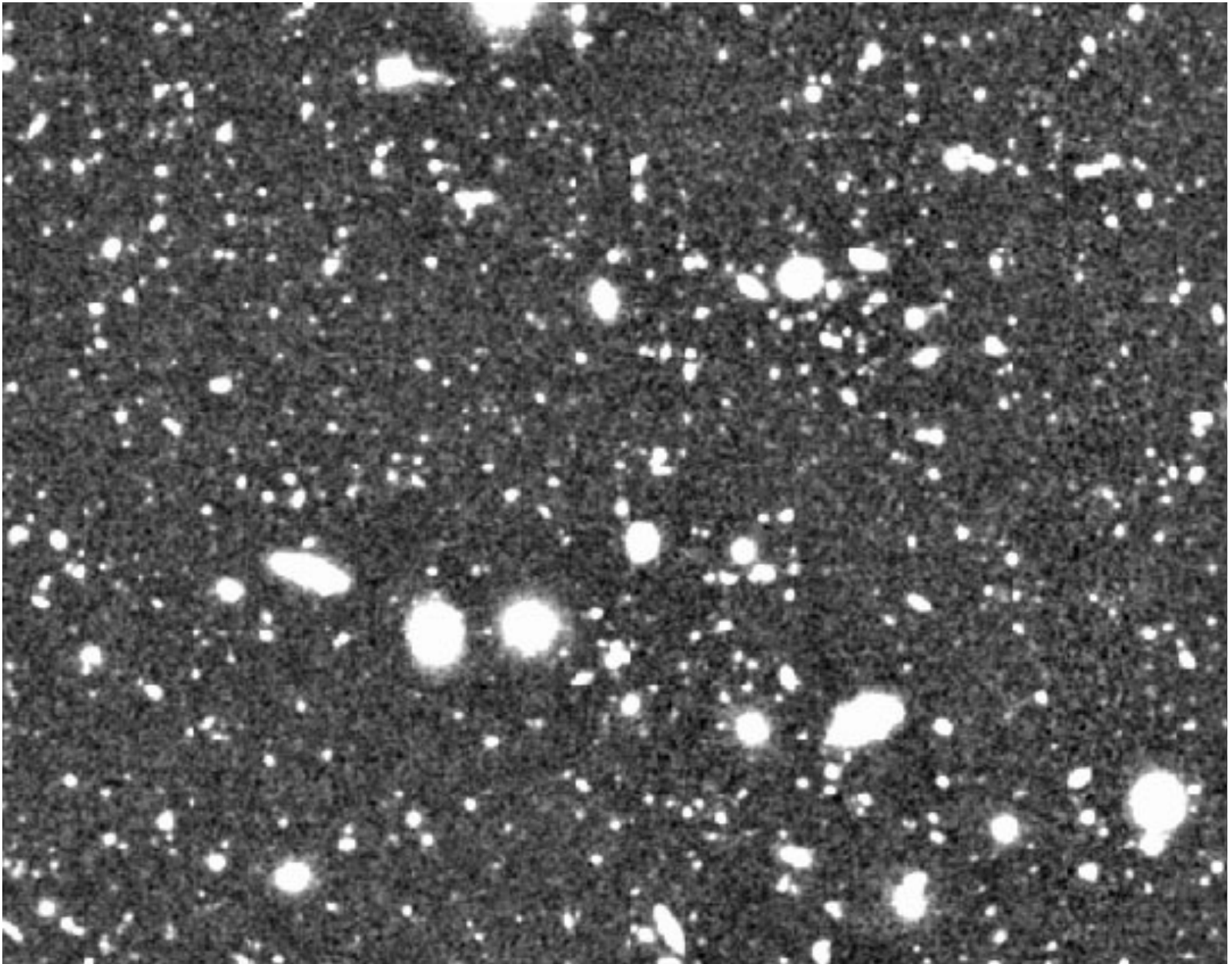




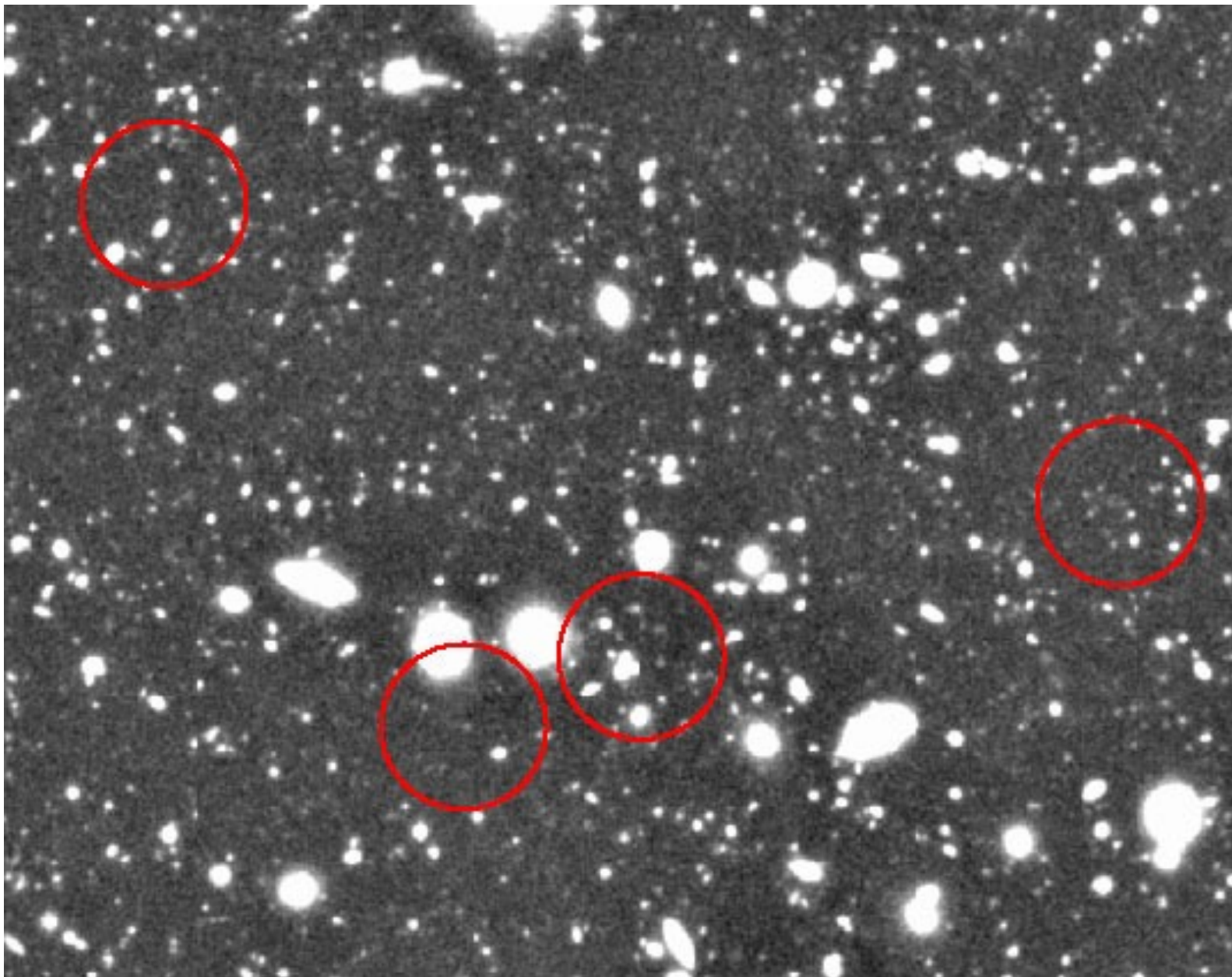
Broad-Band Image



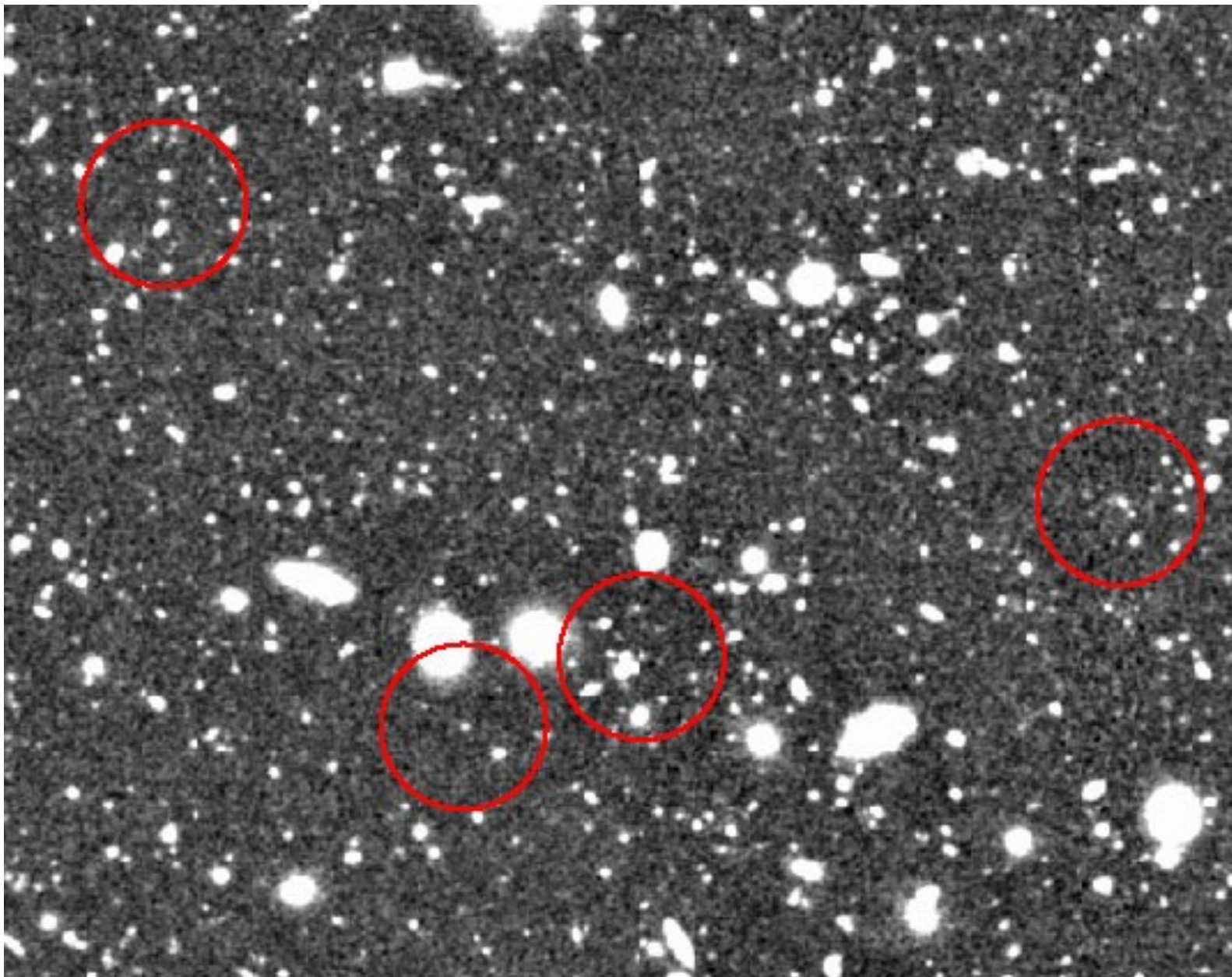
Narrow-Band Image



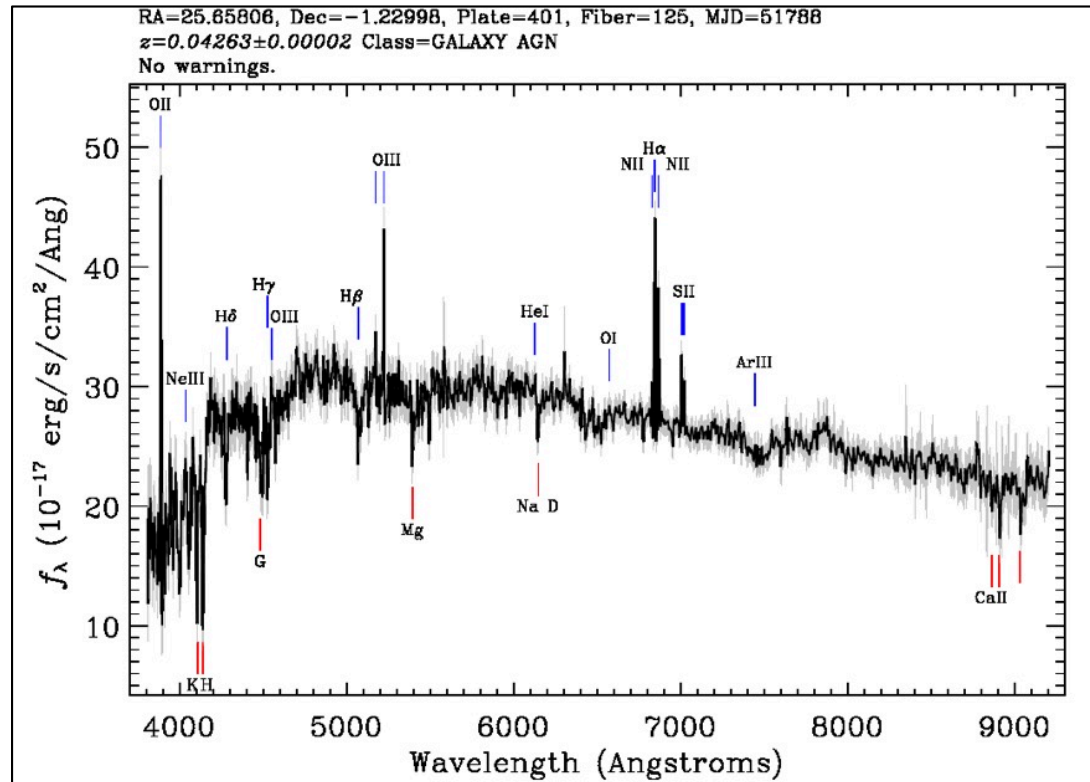
Broad-Band Image



Narrow-Band Image



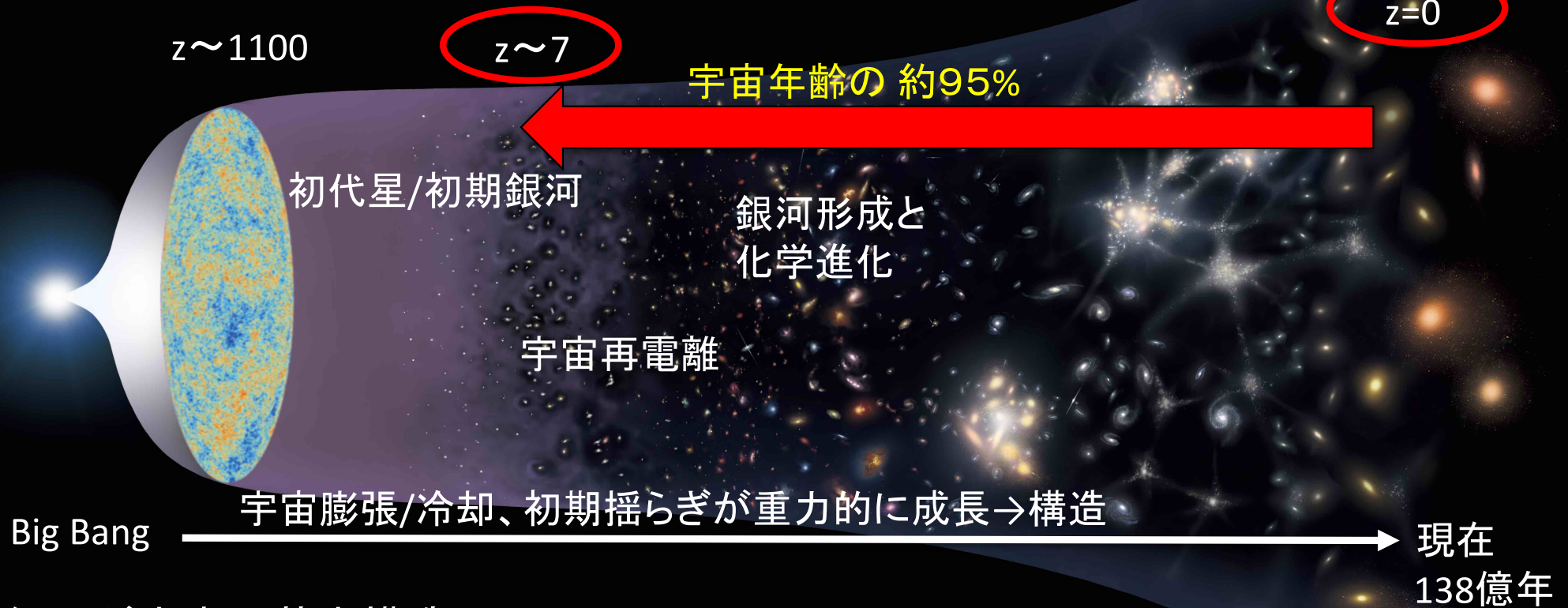
前景天体の混入



- 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

熱いビッグバン宇宙から 現在の宇宙へ

宇宙史 (模式図)



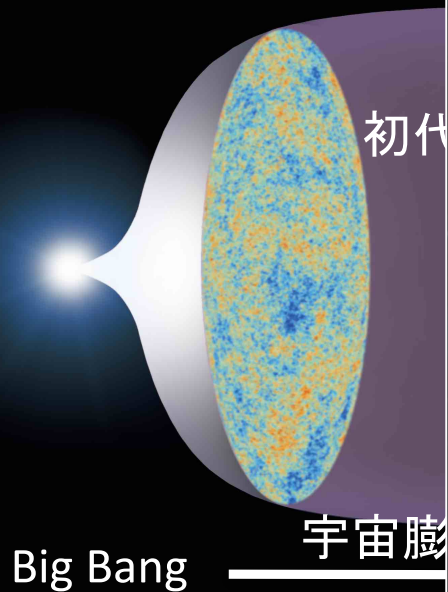
銀河が宇宙の基本構造へ

- 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

熱いビッグバン宇宙から 現在の宇宙へ

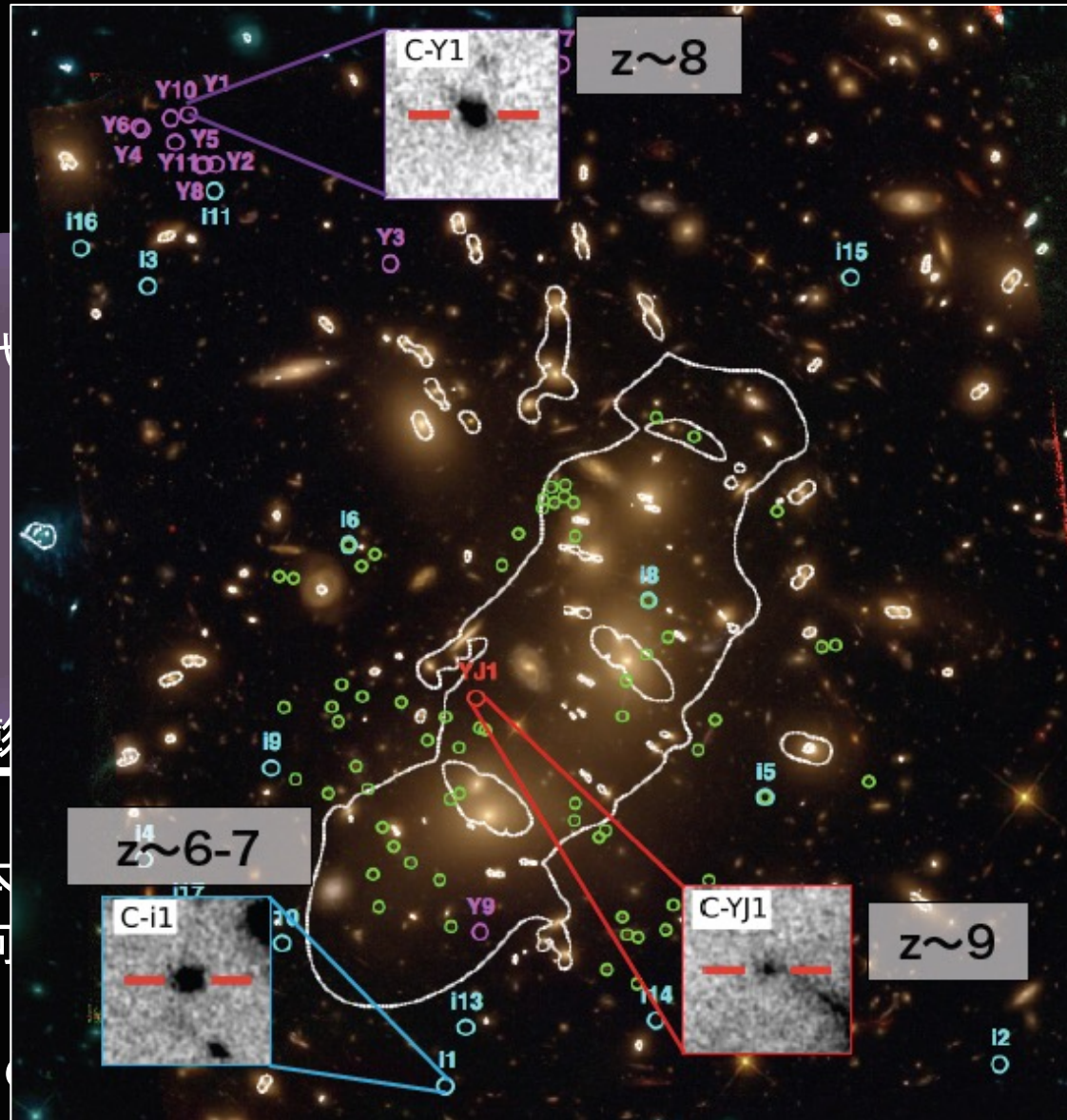
宇宙史 (模式図)

$z \sim 1100$



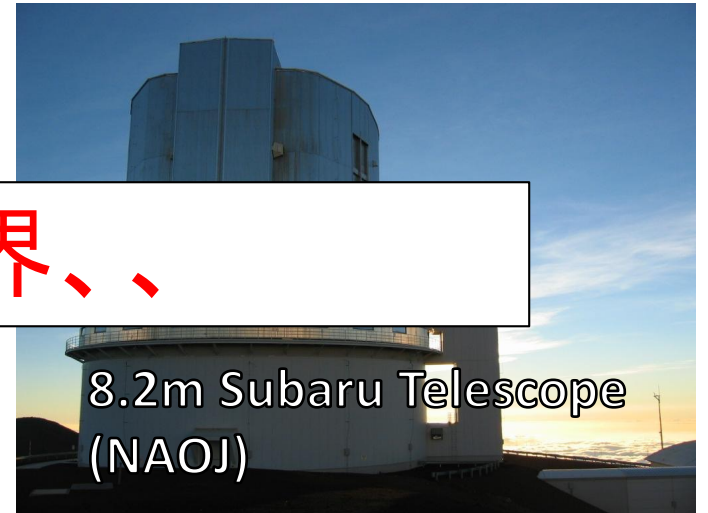
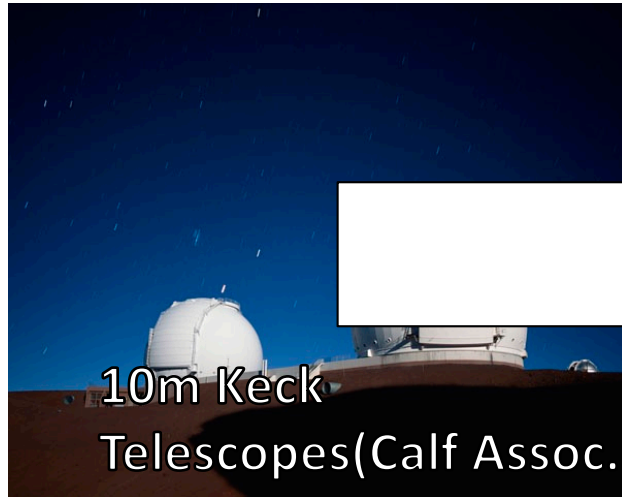
銀河が宇宙の基本

- 1) 初代星/初期銀河
- 2) 宇宙再電離
- 3) 宇宙大規模構造



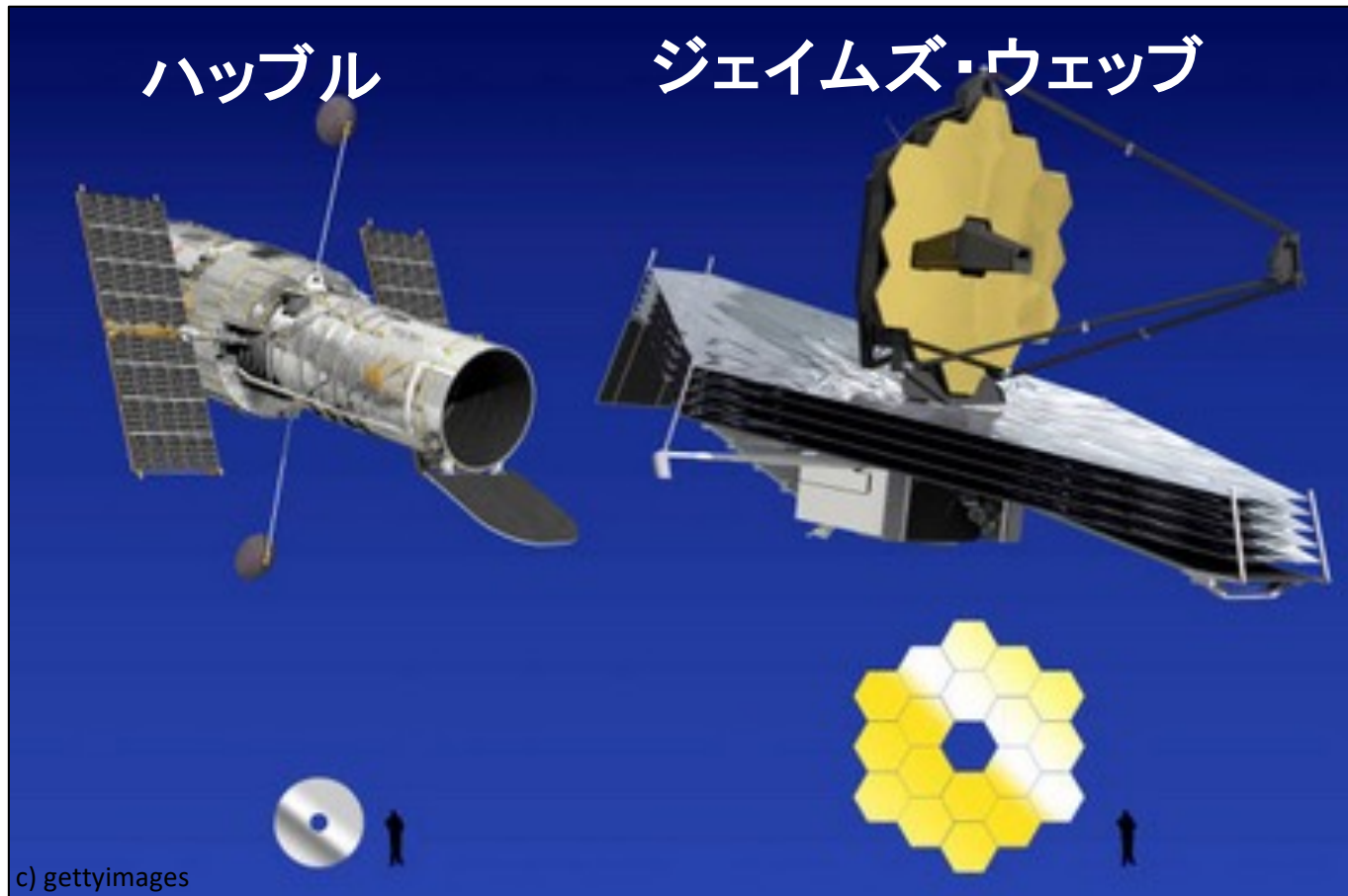
大型望遠鏡

観測能力の限界、、



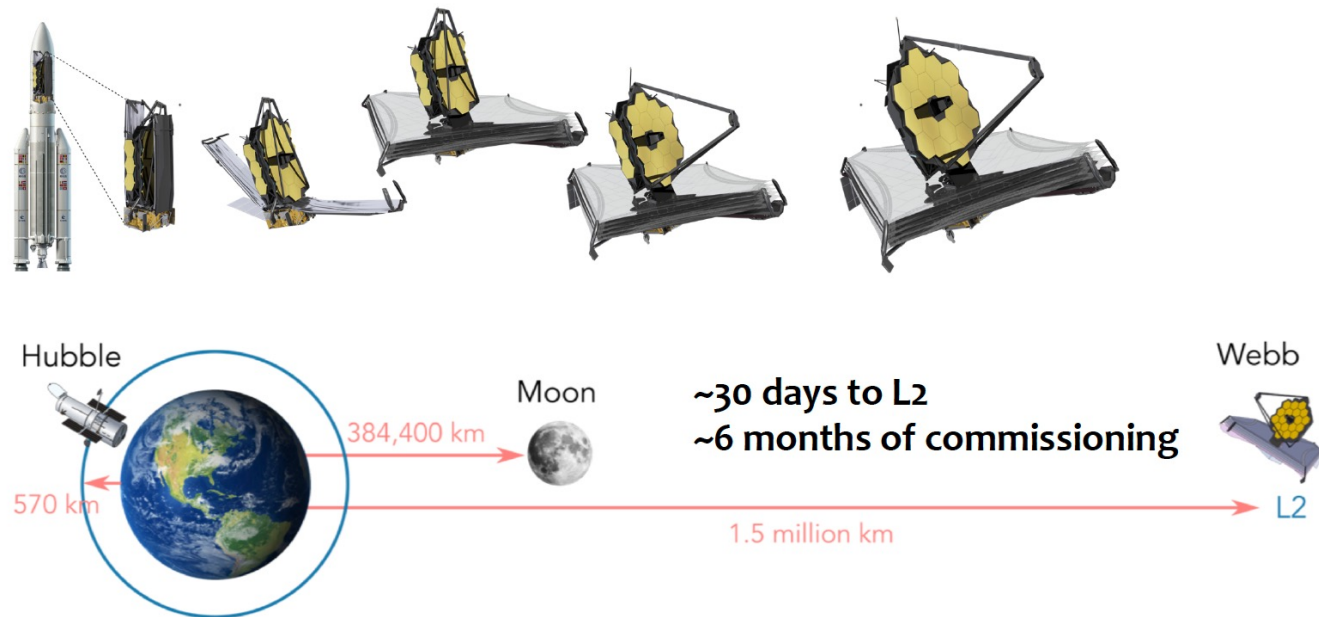
ジェイムズ・ウェッブ宇宙望遠鏡 (JWST)

- JWST
 - NASA(米)、ESA(欧)、CSA(加)
 - 大型の宇宙望遠鏡(赤外線+可視光の一部)
 - ハッブル宇宙望遠鏡の後継→6倍の集光力





打ち上げ後 望遠鏡の展開、L2ポイントへ



c) STScI

- L2ポイントへ(1ヶ月間)
 - 太陽や地球が発する赤外線の影響を避ける(比較:地球低軌道のハッブル)
 - 150万km彼方のL2ポイント(月までの距離の約4倍)
- 同時に望遠鏡を展開

JWSTデータ 世界に公開



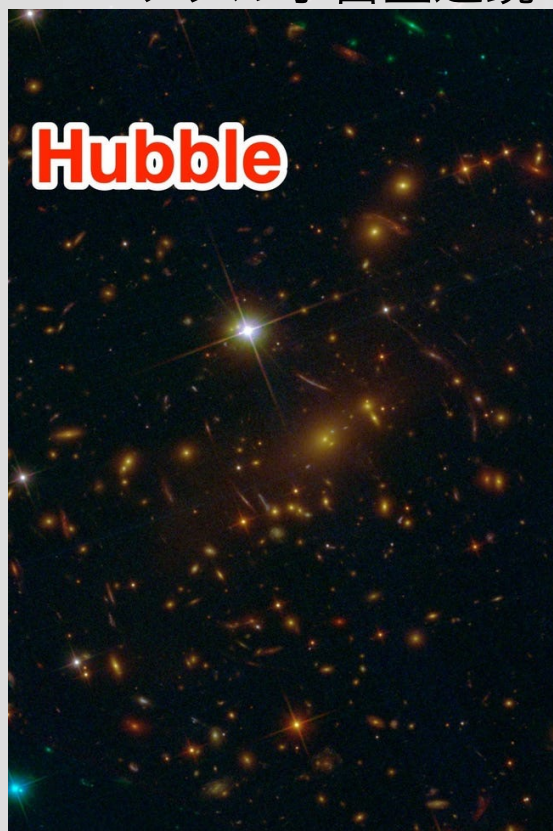
- バイデン米大統領による記者発表(於:ホワイトハウス2022年7/12)
- 初期のデータを公開。その後も順次データ公開





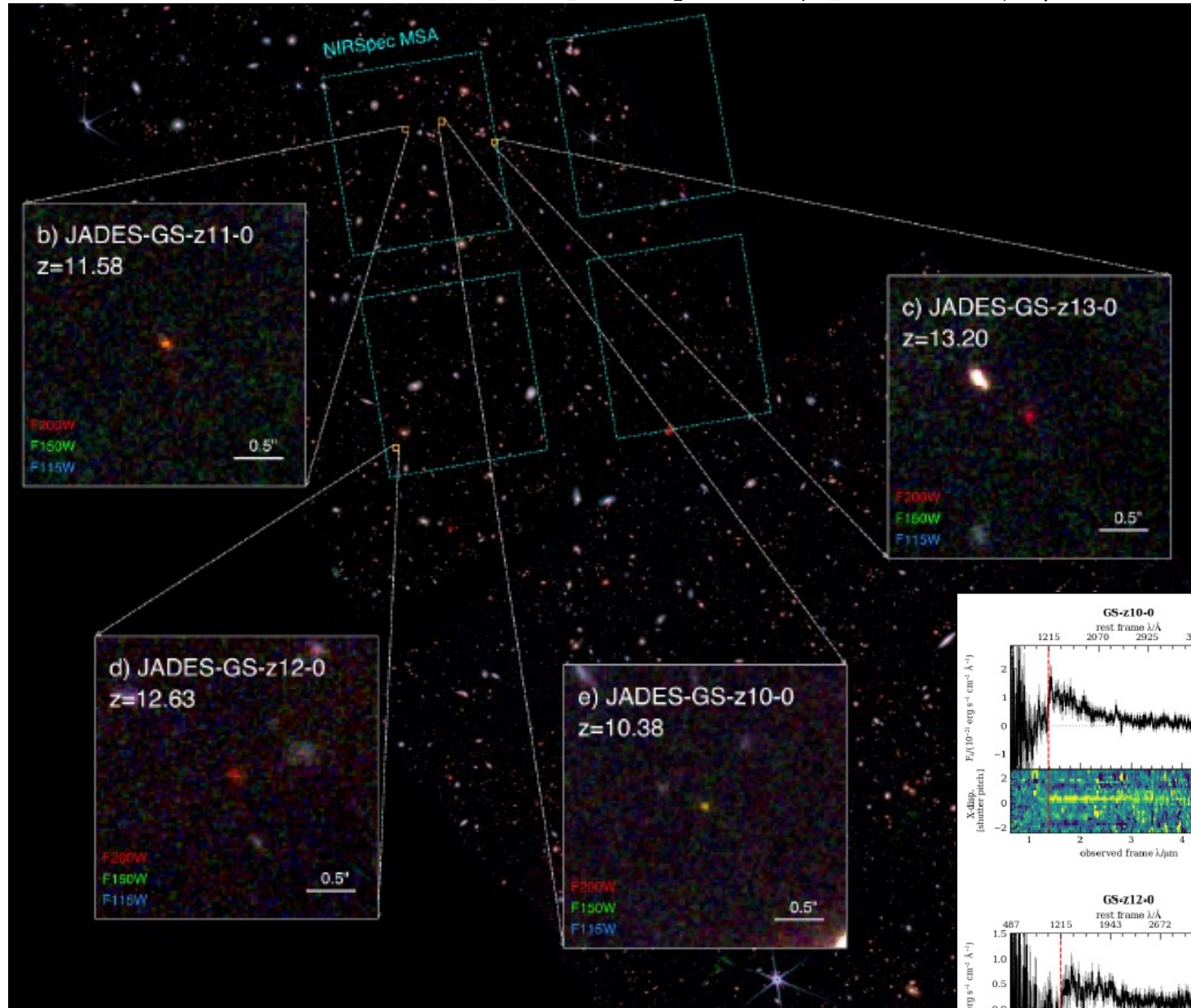
ハッブル宇宙望遠鏡

JWST

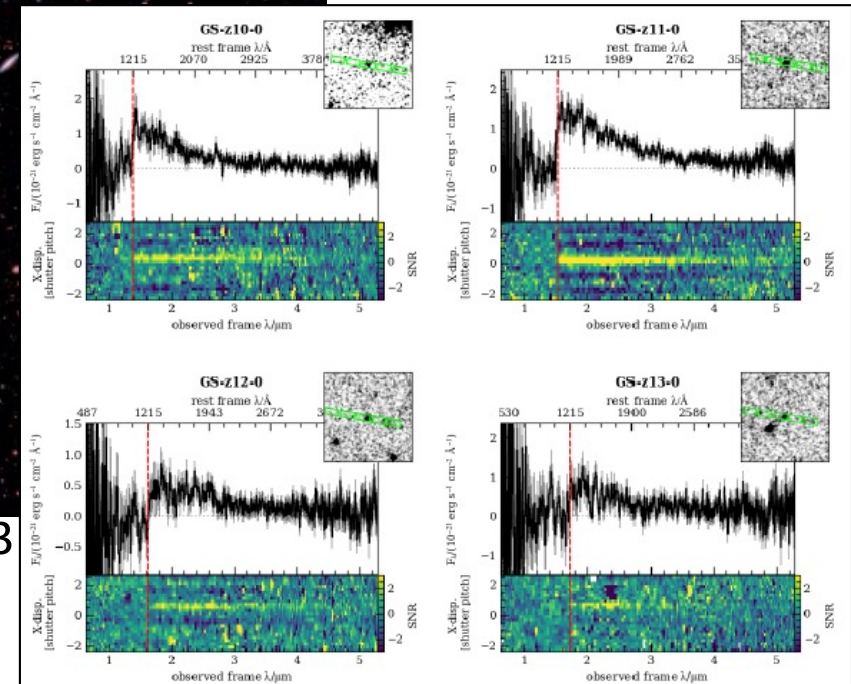


NASA

宇宙初期の銀河



Curtis-Lake+23



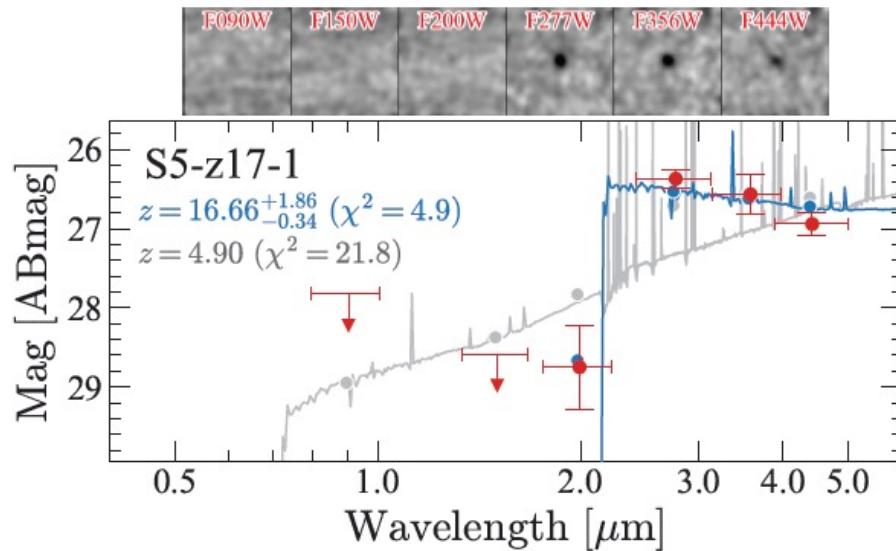
Robertson+23

- 赤方偏移10くらいの銀河まで分光同定
- 赤方偏移10-17の銀河候補も

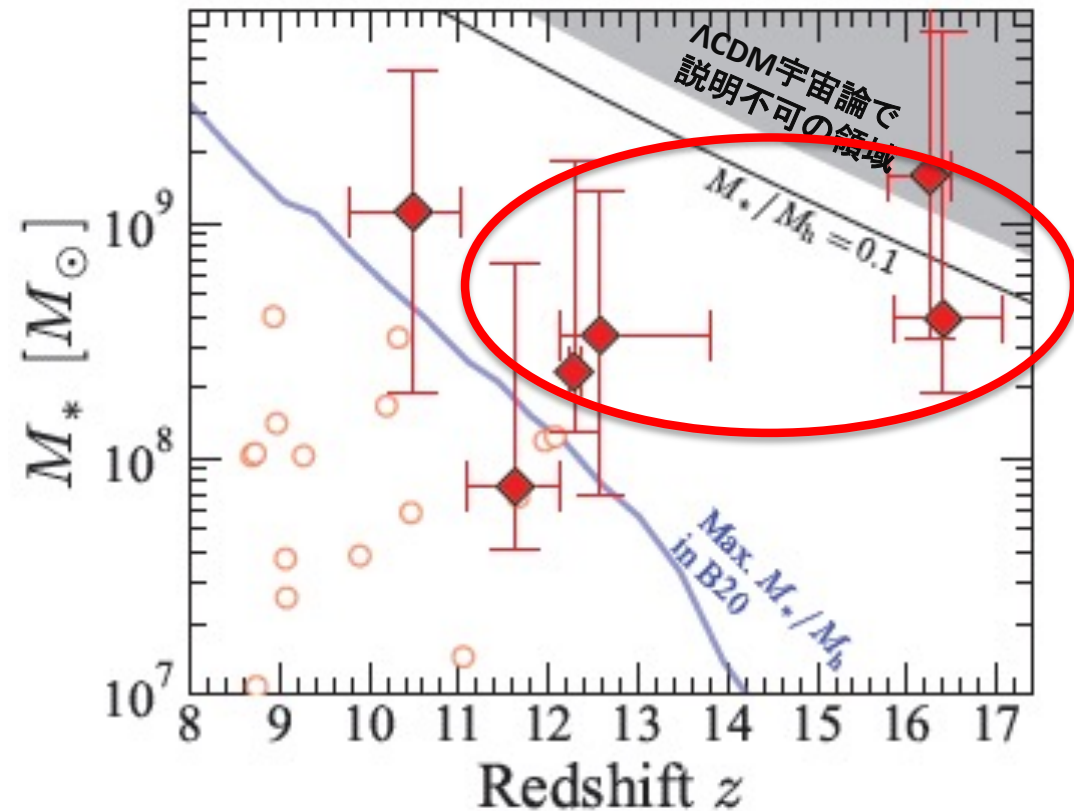
初期観測の結果(1)



播金さん研究

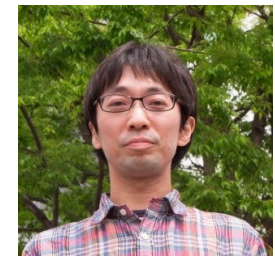


Harikane et al. (2022)

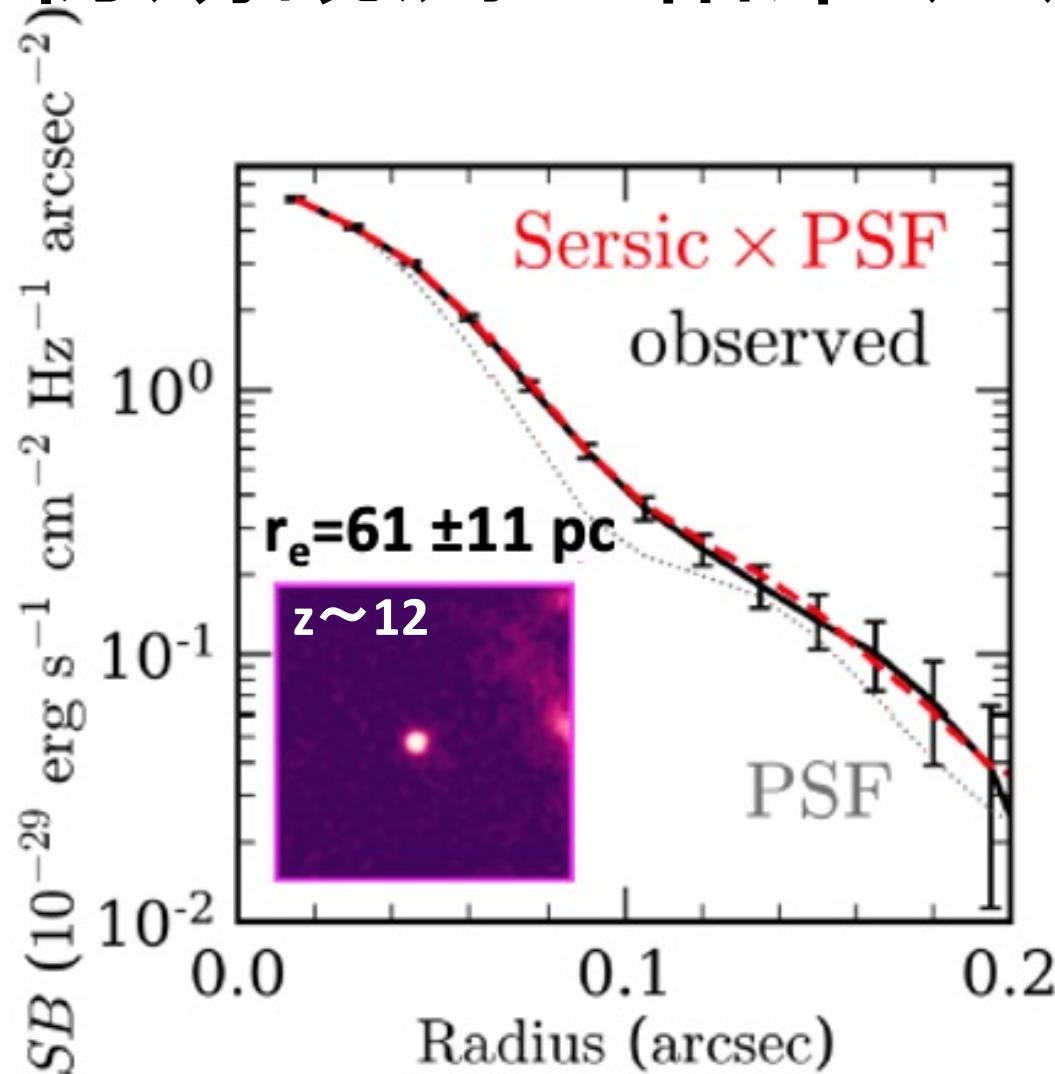
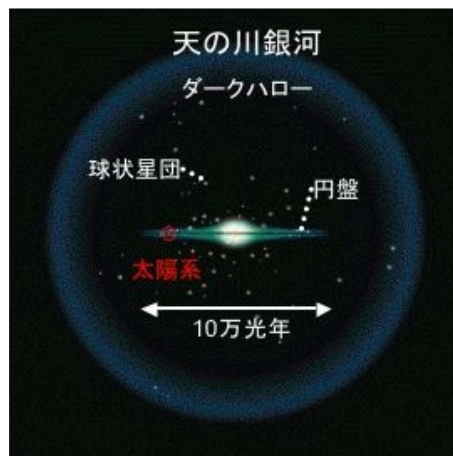


- 多くの大質量銀河(10^8 - $10^9 M_{\odot}$)候補が初期宇宙に存在
- 暗黒物質ハローの質量の割に、星が多い。
- 一部は Λ CDM宇宙論では説明できない??

初期観測の結果(2)



小野さん研究



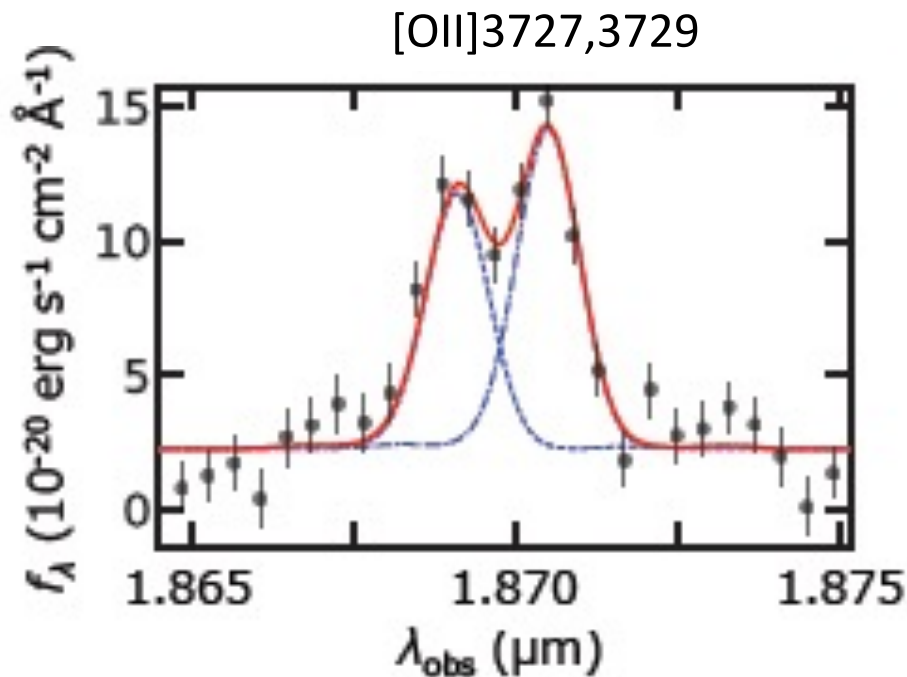
Ono et al. (2022)

- 非常に小さい銀河($\sim 10^8 M_\odot$)候補。星団クラスの大きさ。
- どうやってこれほどの星を星団くらいの範囲で作れたのか？

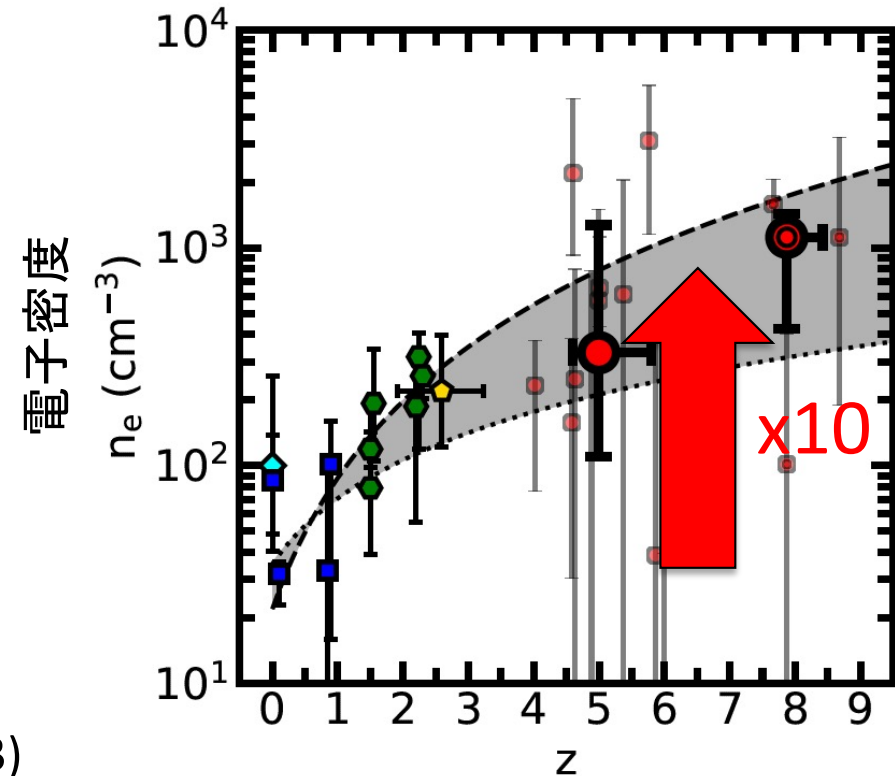
初期観測の結果(3)



磯部さん研究



Isobe et al. (2023)

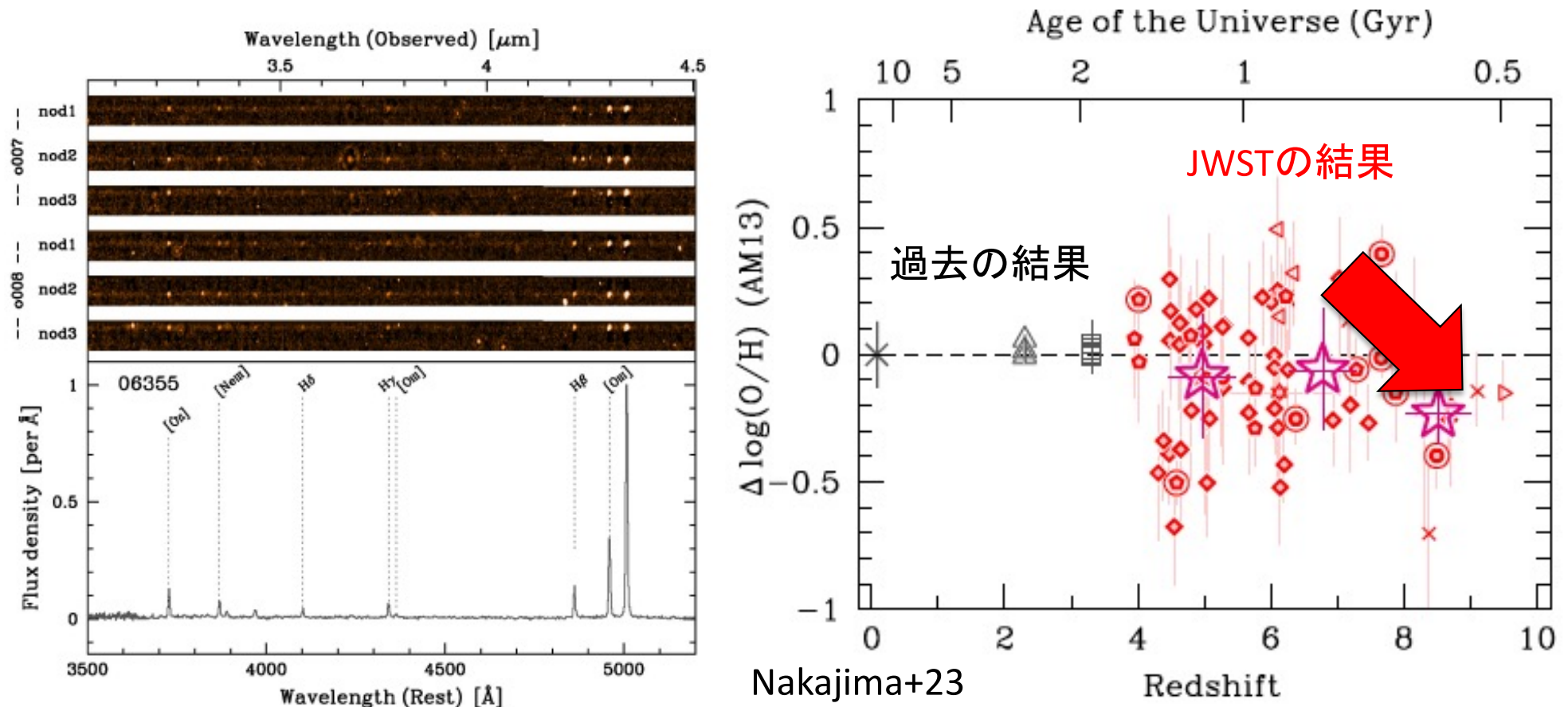


- 電子密度の測定→過去の銀河ほど高い電子密度(現在の10倍以上)
- 初期の宇宙では、宇宙が小さく密度が高い
- 初期銀河が小さいことと整合的？

初期観測の結果(4)



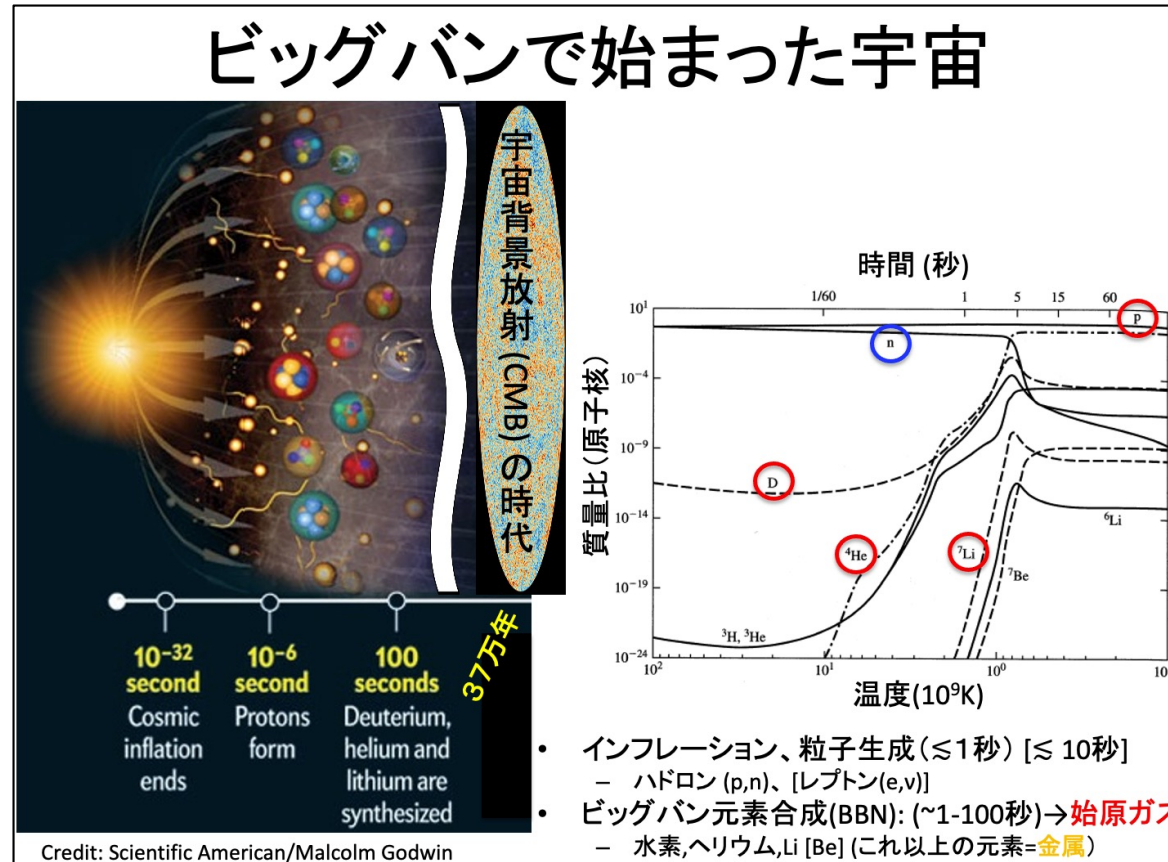
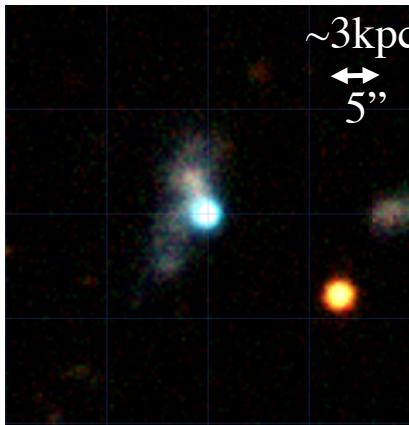
中島さん研究



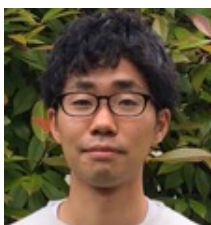
- 111個の銀河の化学進化の統計
- 赤方偏移0-8の宇宙史の大半(95%以上)は化学進化は平衡状態
- 赤方偏移8以上で平衡が破れたのか？

より初期の宇宙へ
ービッグバン直後の宇宙ー

ビッグバン元素合成 原始ヘリウム



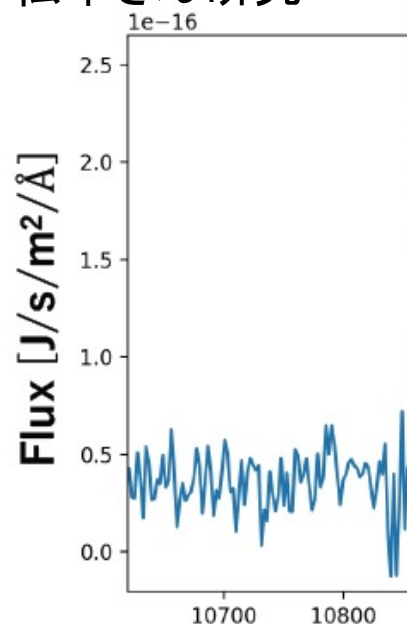
- 極金属欠乏銀河(近傍):ビッグバン元素合成によるガス
→原始ヘリウムの組成比



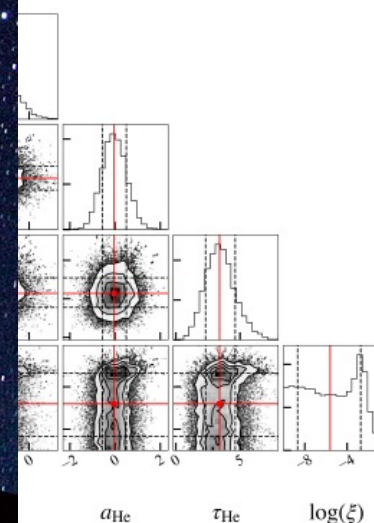
ヘリウム組成比 He/H の測定

$\text{HeI}\lambda 10830\text{\AA}$

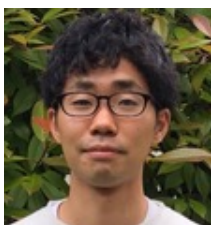
松本さん研究



すばる望遠鏡

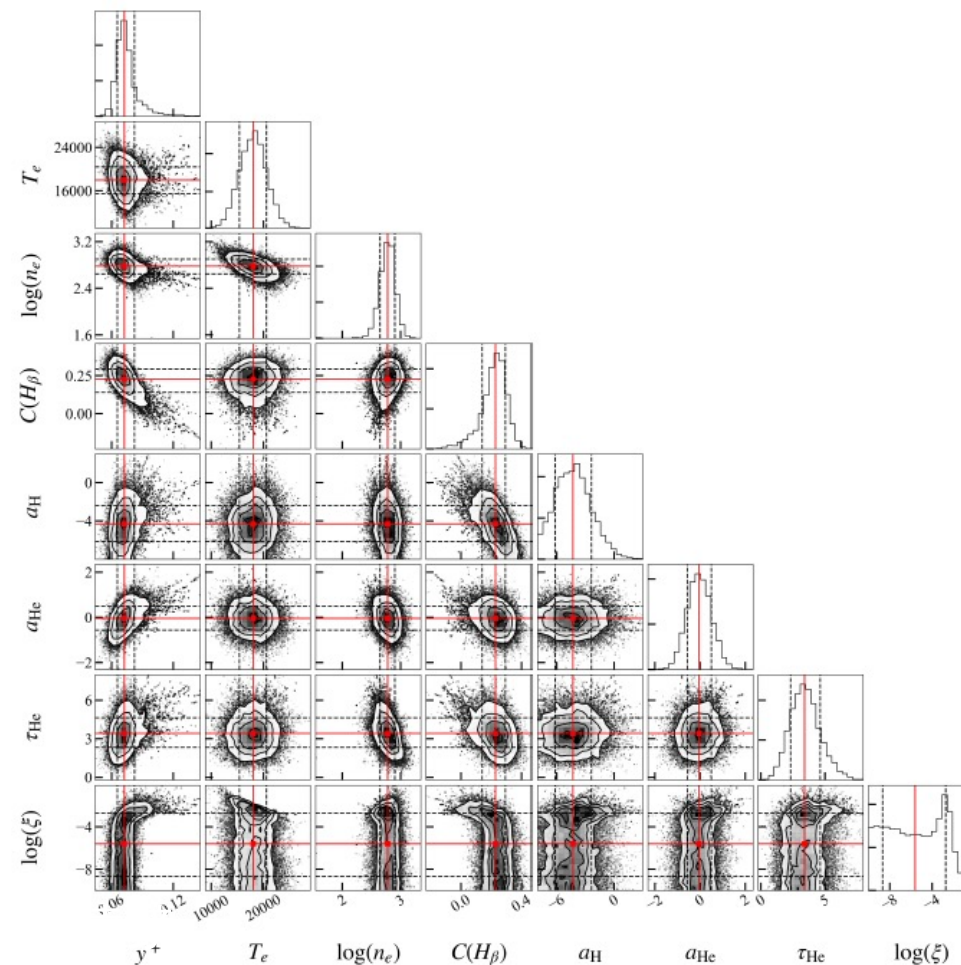
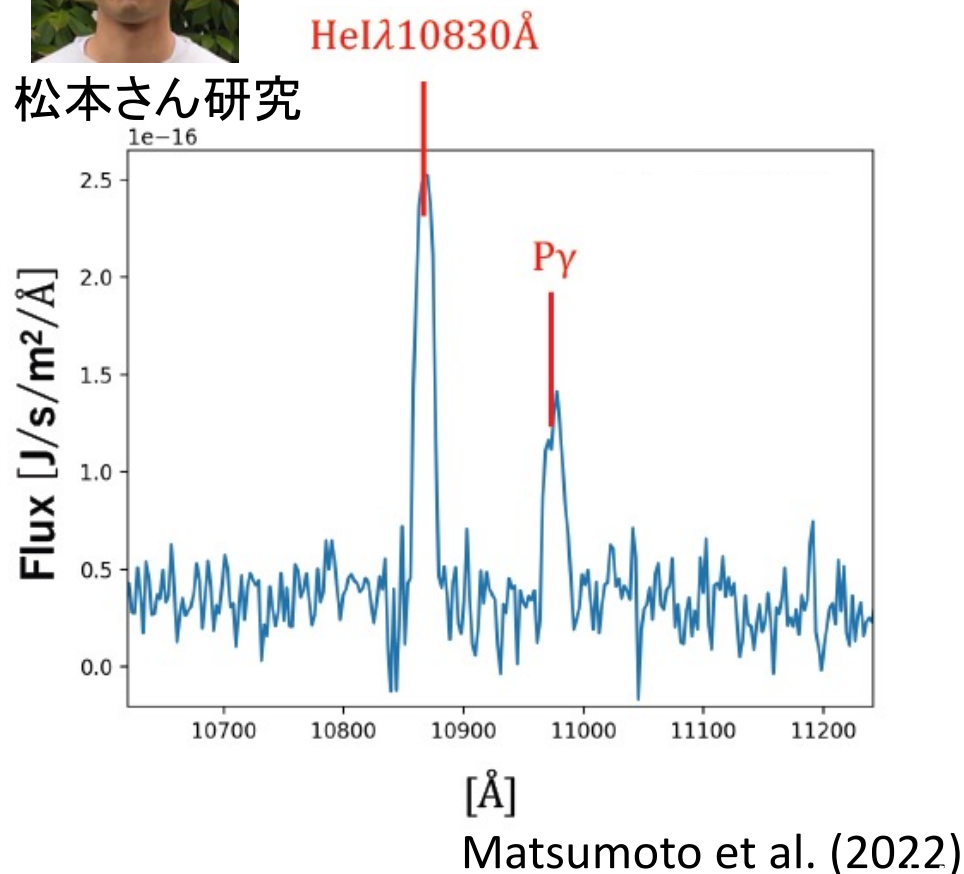


- 水素-ヘリウム14本の輝線(可視光-近赤外):すばる観測
- Markov chain Monte Carlo (MCMC)法でモデルフィット
 - 8つのガス雲パラメータ: (He/H) , T_e , n_e , ξ etc.



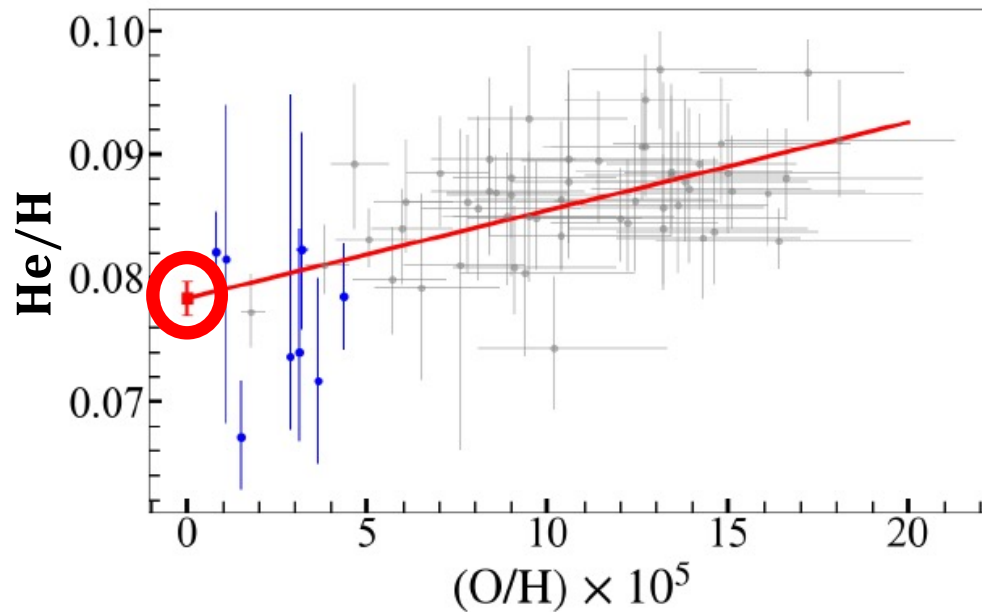
ヘリウム組成比 He/H の測定

松本さん研究

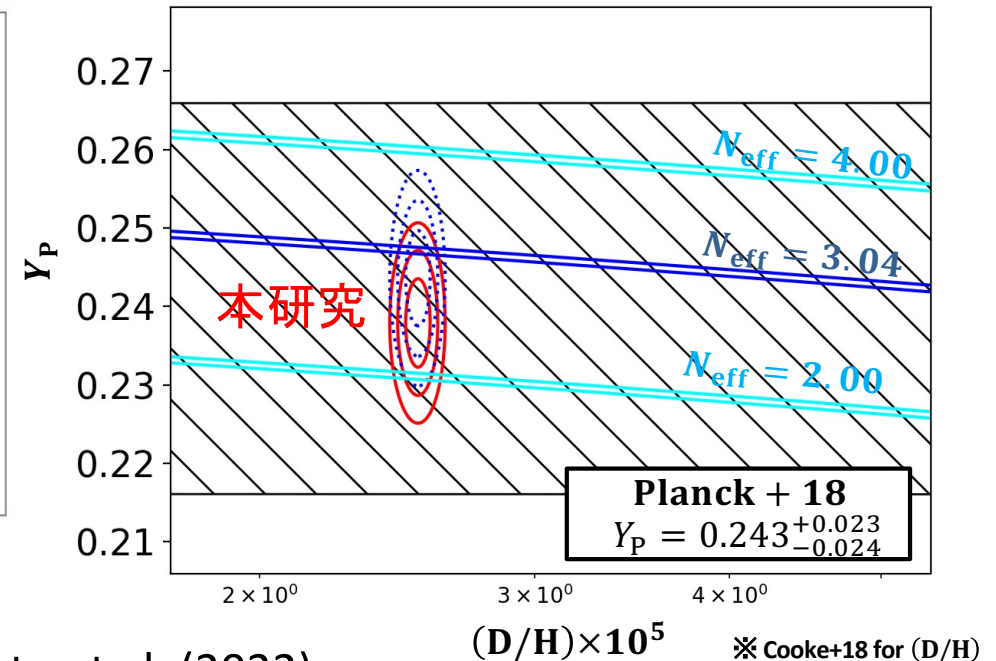


- 水素-ヘリウム14本の輝線(可視光-近赤外):すばる観測
- Markov chain Monte Carlo (MCMC)法でモデルフィット
 - 8つのガス雲パラメータ: (He/H) , T_e , n_e , ξ etc.

原始ヘリウム組成比 Y_p



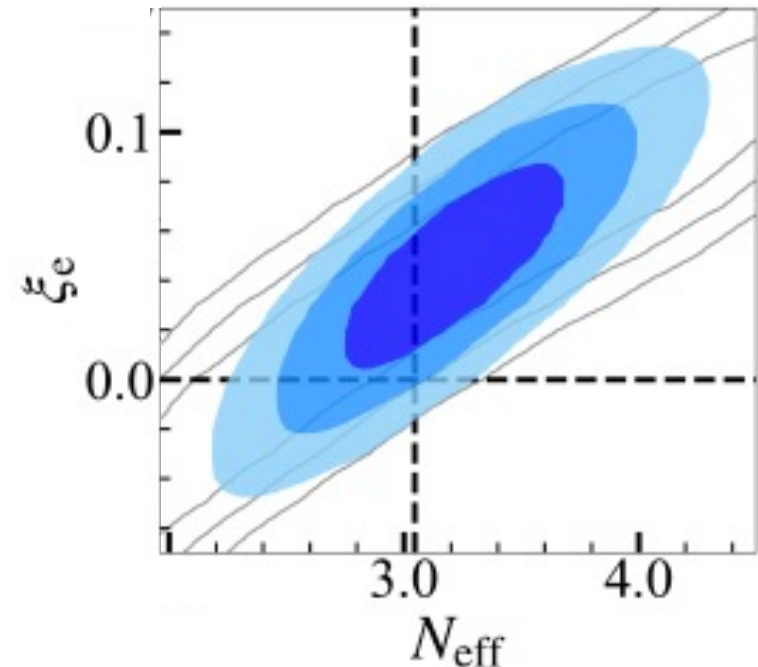
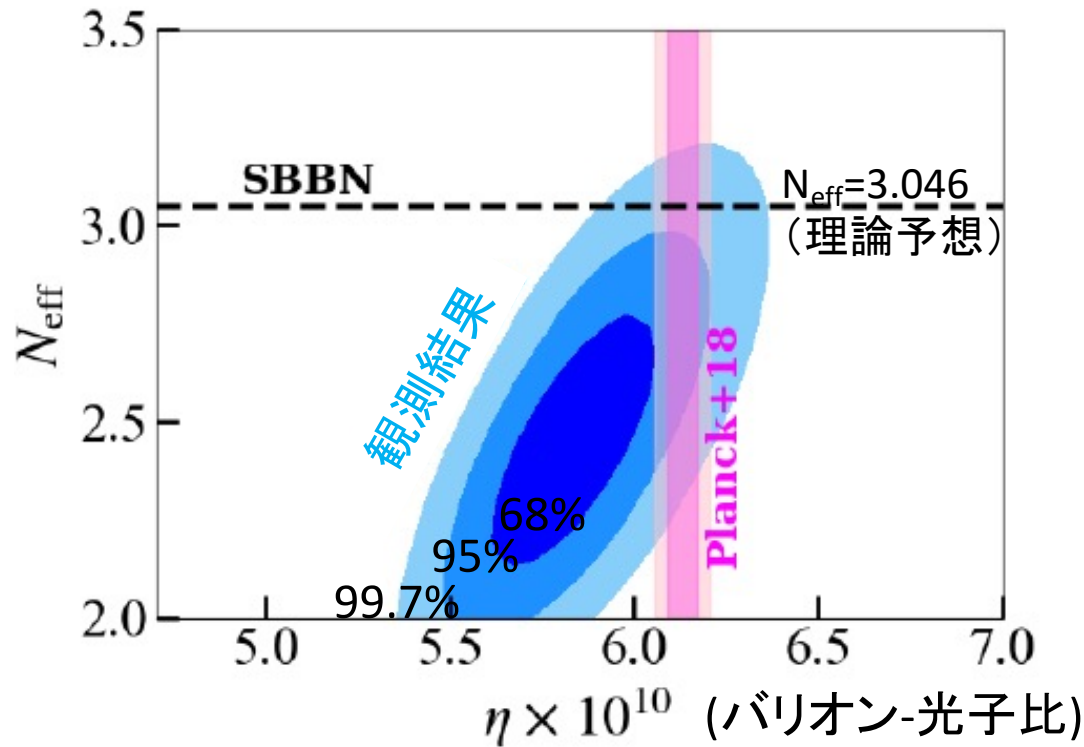
Matsumoto et al. (2022)



- 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: $Y_p = 4y/[1+4y] = 0.2370 \pm 0.0033$
- 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。
- $Y_p \rightarrow$ ニュートリノ世代数 N_{eff}

標準理論からのズレ？

レプトン非対称性？



Matsumoto et al. (2022)

- ニュートリノ世代数 $N_{\text{eff}} = 2.37 (+0.19/-0.24)$: 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？ $\rightarrow \xi_e = 0.05^{(+0.03)/(-0.02)}$
 - 10^{-2} オーダーのレプトン非対称性 (一方でバリオン非対称性 10^{-10}) $\rightarrow$ 何故??
- ξ_e の決定精度は不十分 $\rightarrow$ 観測継続へ

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
- 初期銀河形成(JWSTの観測)
 - 化学進化の平衡状態の破れ。過去ほど高い電子密度。
 - 多すぎる初期銀河？星団級の大きさの初期銀河？
- ビッグバン直後の初期宇宙(すばるの観測)
 - ビッグバン元素合成がもたらした少ないヘリウム
→大きいレプトン非対称性？
 - さらなる観測で検証へ