

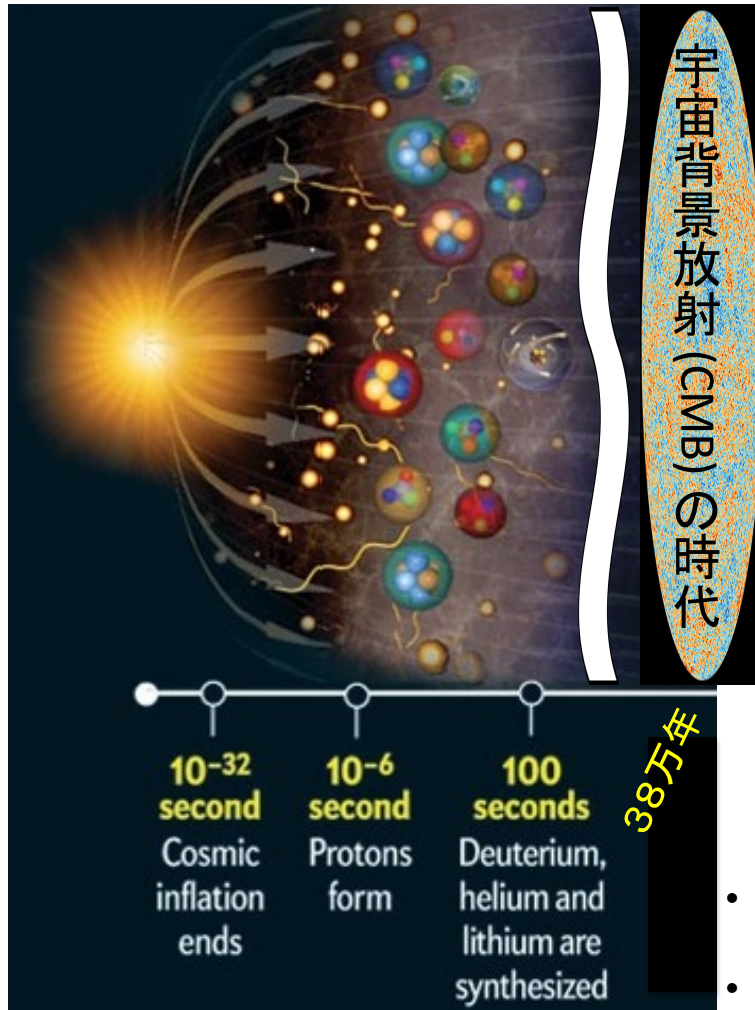
最先端研究I
観測的宇宙論
---観測で探る天体形成と初期宇宙---



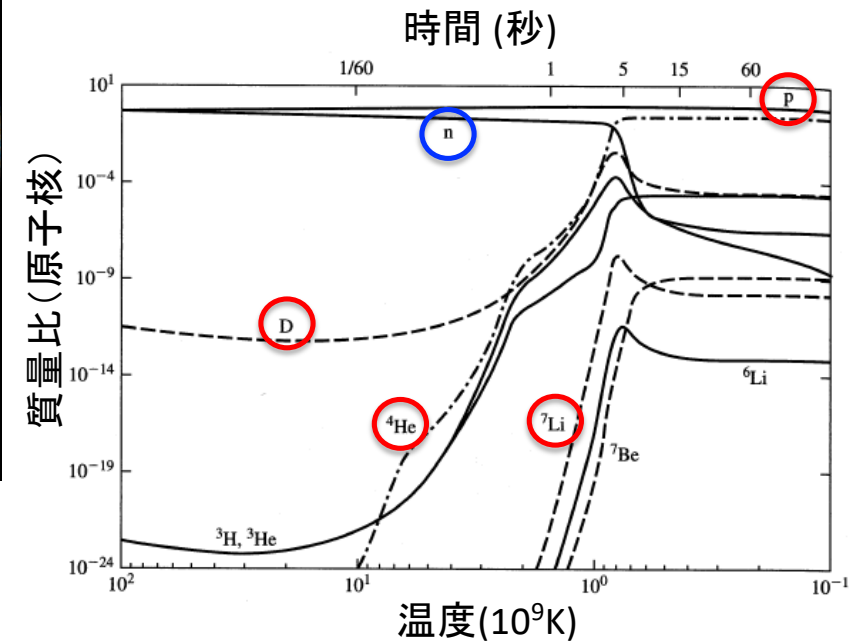
大内 正己
東京大学 宇宙線研究所

Credit: NASA, ESA

ビッグバンで始まった宇宙



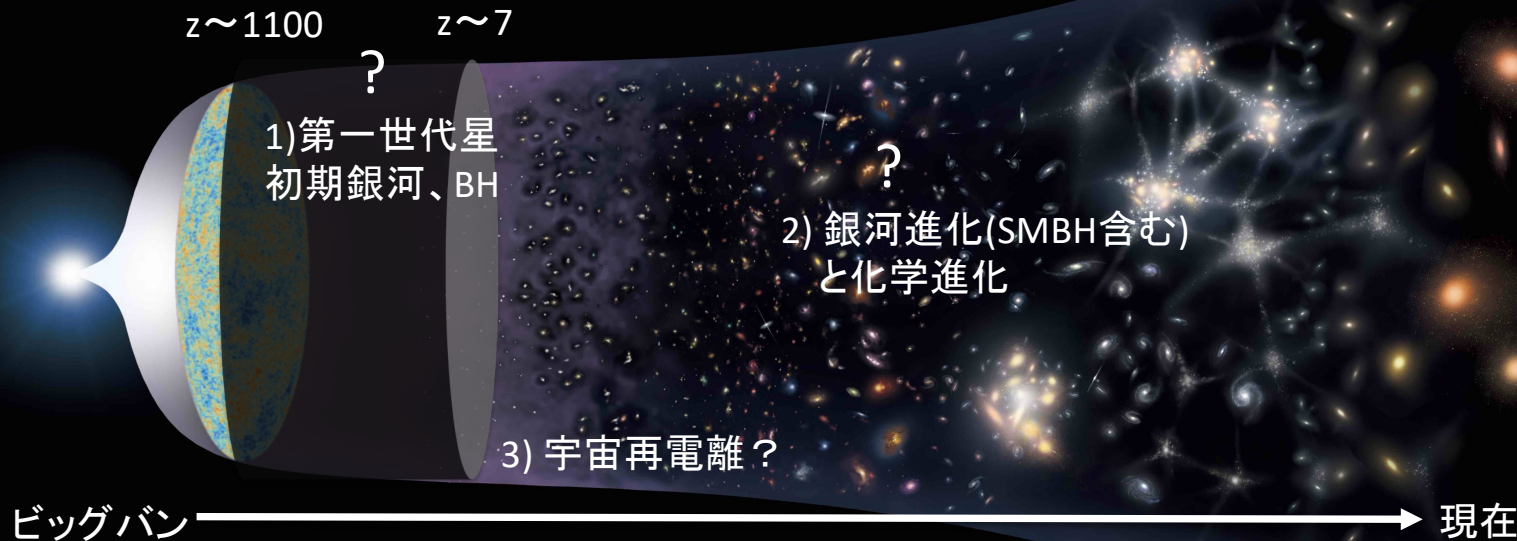
Credit: Scientific American/Malcolm Godwin



- 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,ν)]
- ビッグバン元素合成(BBN): (~1-数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)

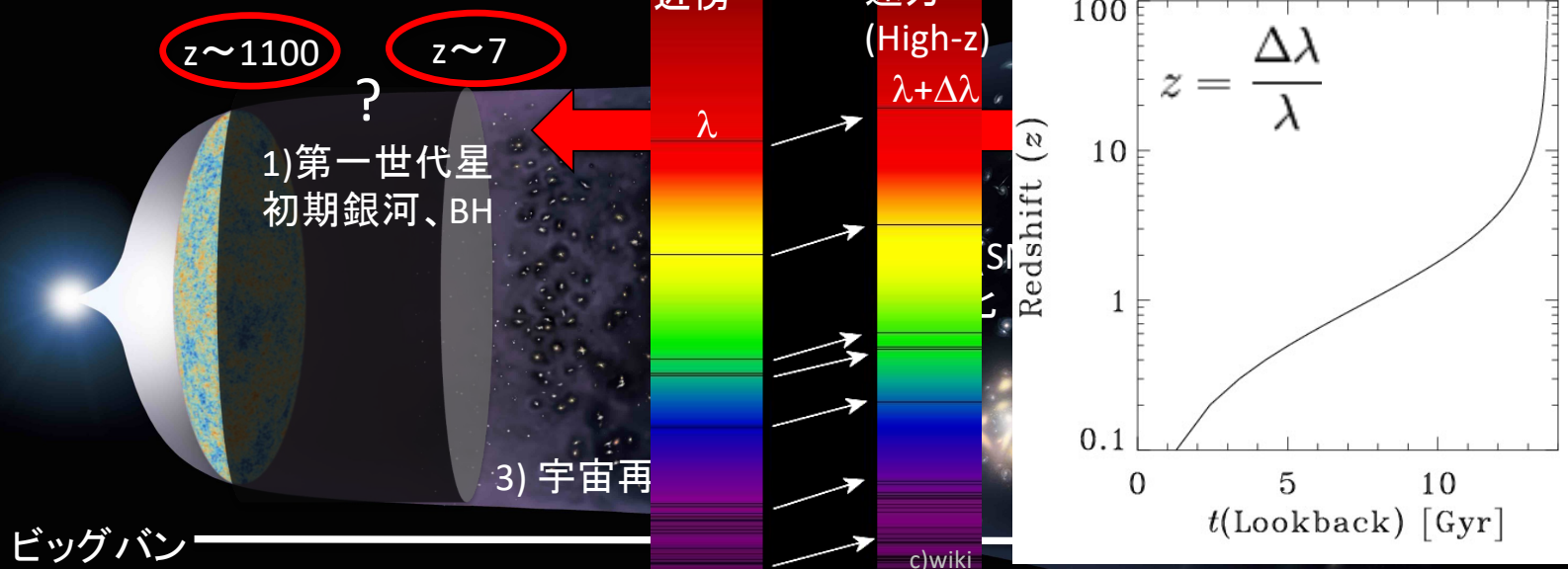


- 銀河が宇宙の基本構造
- 課題

- 1) 第一世代星/初期銀河、種ブラックホール(BH)
- 2) 宇宙大規模構造の中での銀河進化(超巨大ブラックホール含む)と化学進化
- 3) 宇宙再電離史と再電離源

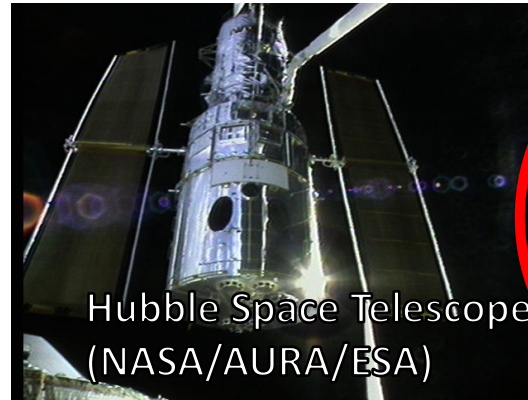
現在の宇宙へ

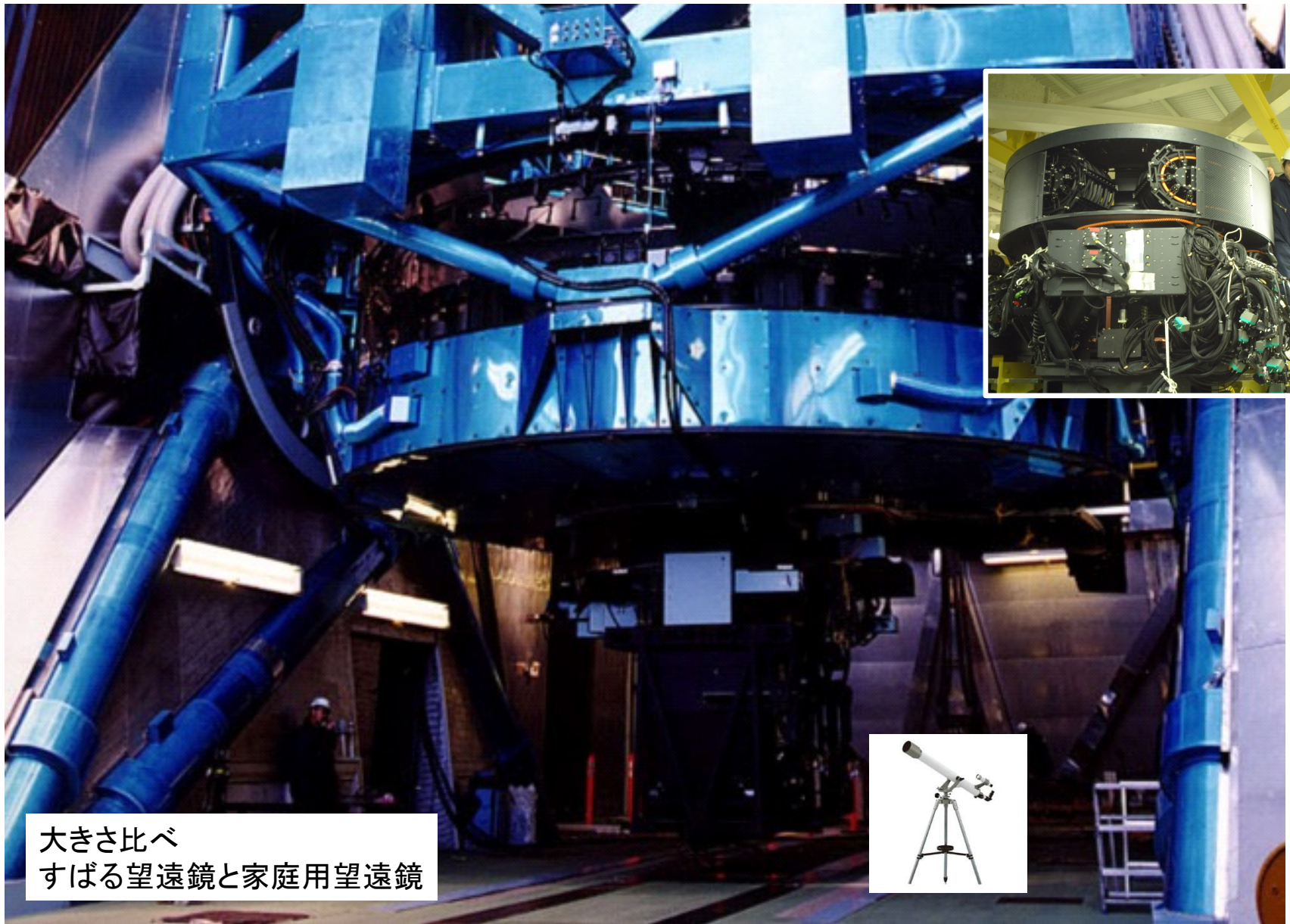
宇宙史(模式図)



- 銀河が宇宙の基本構造
- 課題
 - 1) 第一世代星/初期銀河、種ブラックホール(BH)
 - 2) 宇宙大規模構造の中での銀河進化(超巨大ブラックホール含む)と化学進化
 - 3) 宇宙再電離史と再電離源

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？

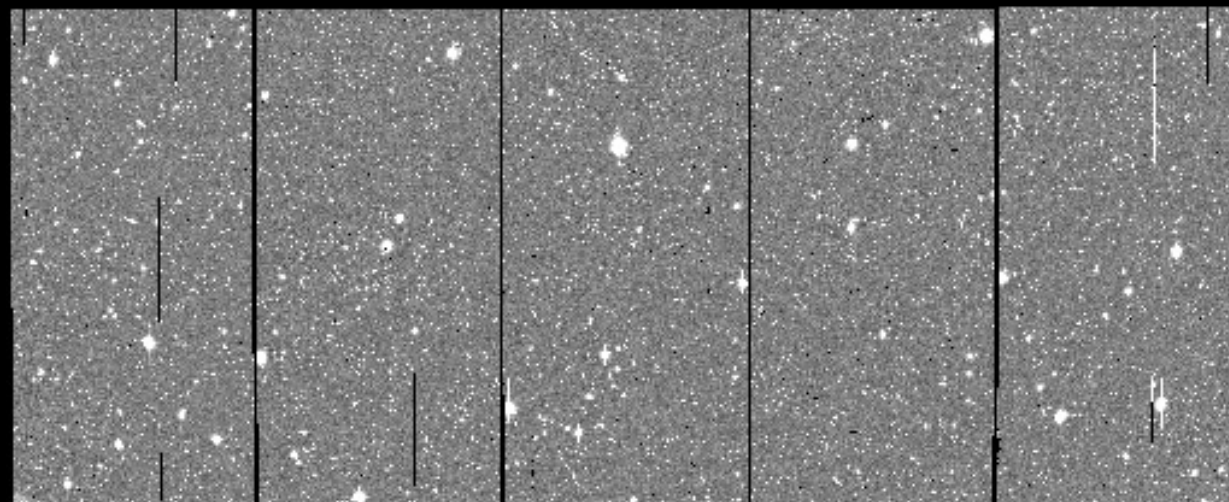
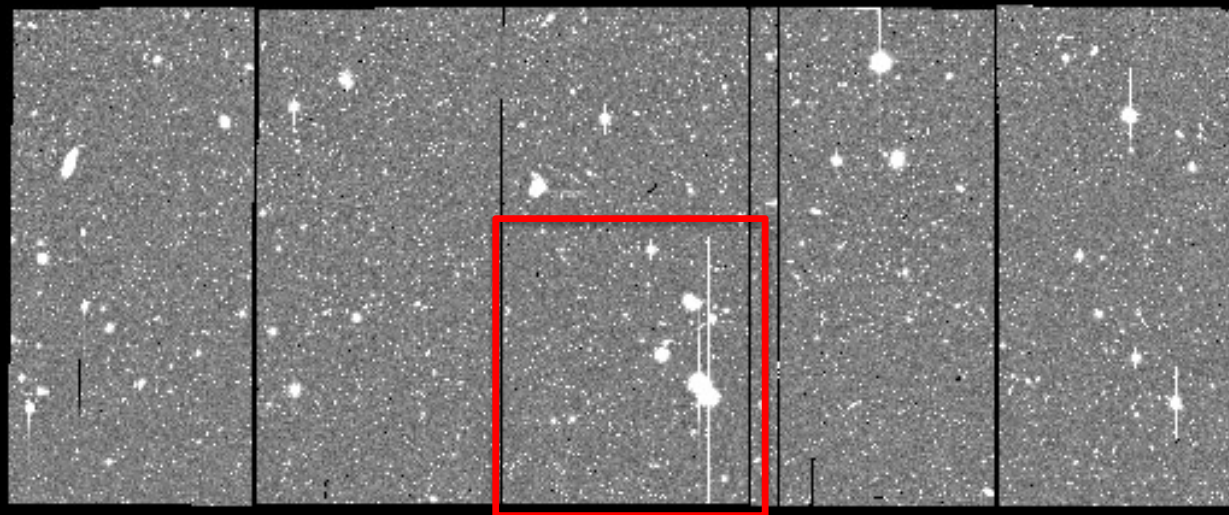
--観測データはどのようなものか？

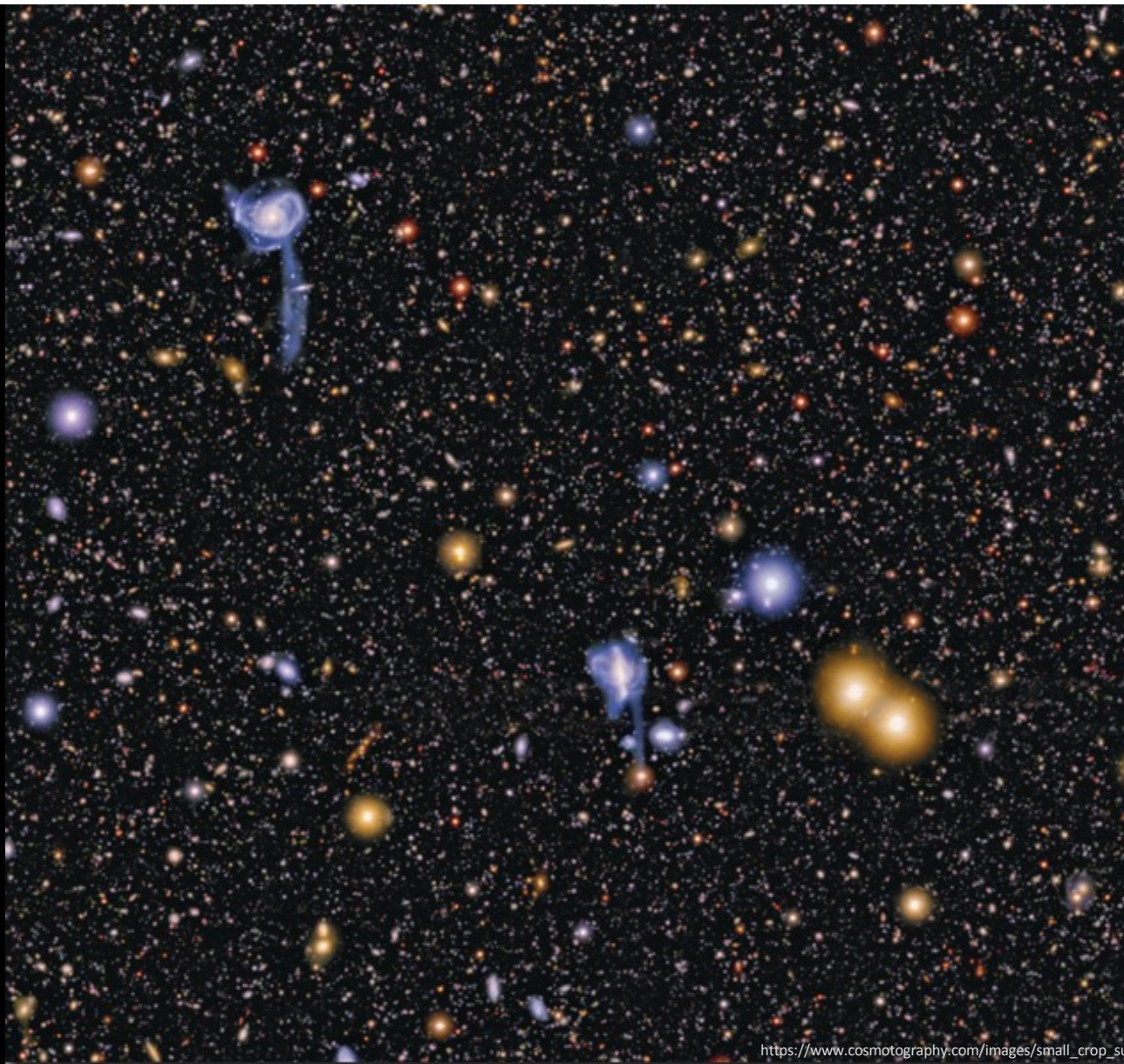
--どこまで宇宙が見えたか？





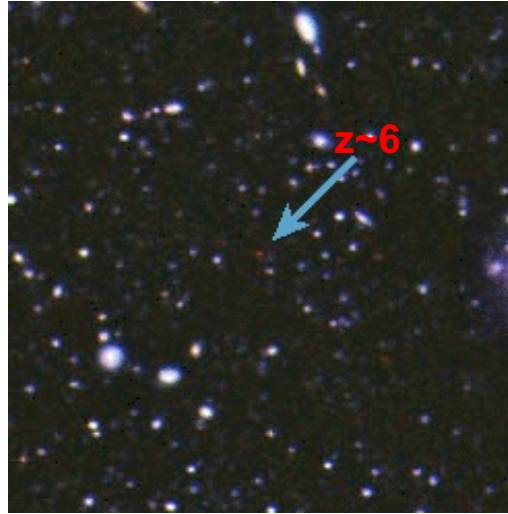
CFHT – Wed Nov 30 17:33:45 HST



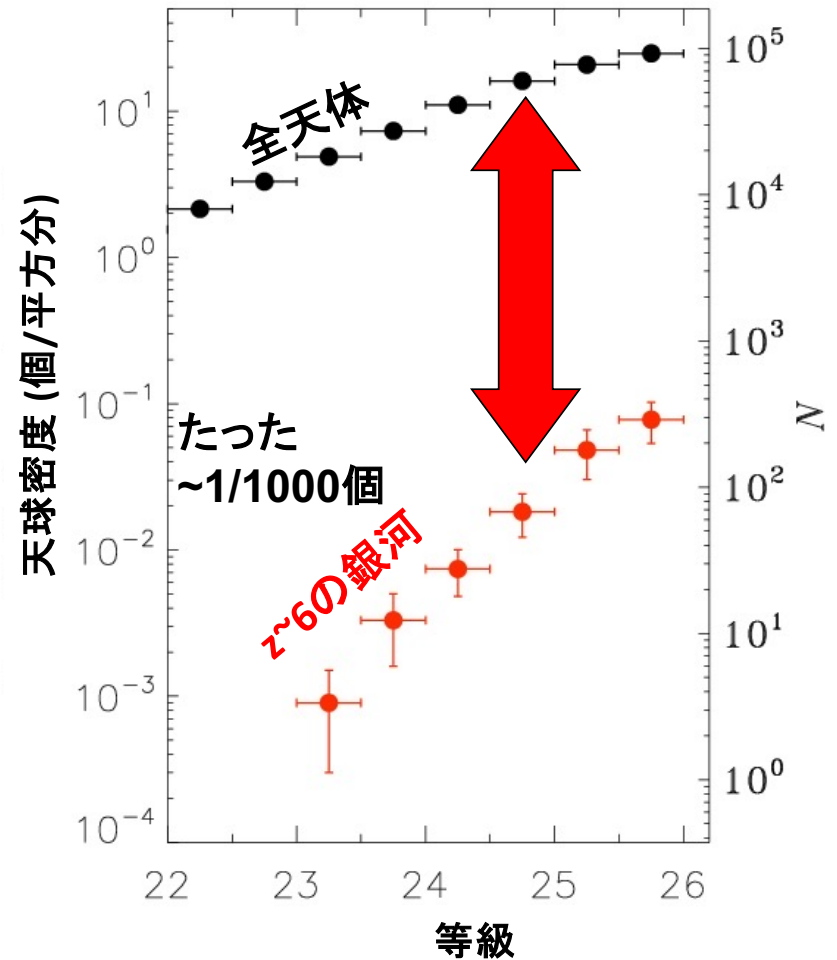


https://www.cosmotography.com/images/small_crop_subaru_deep_field.html

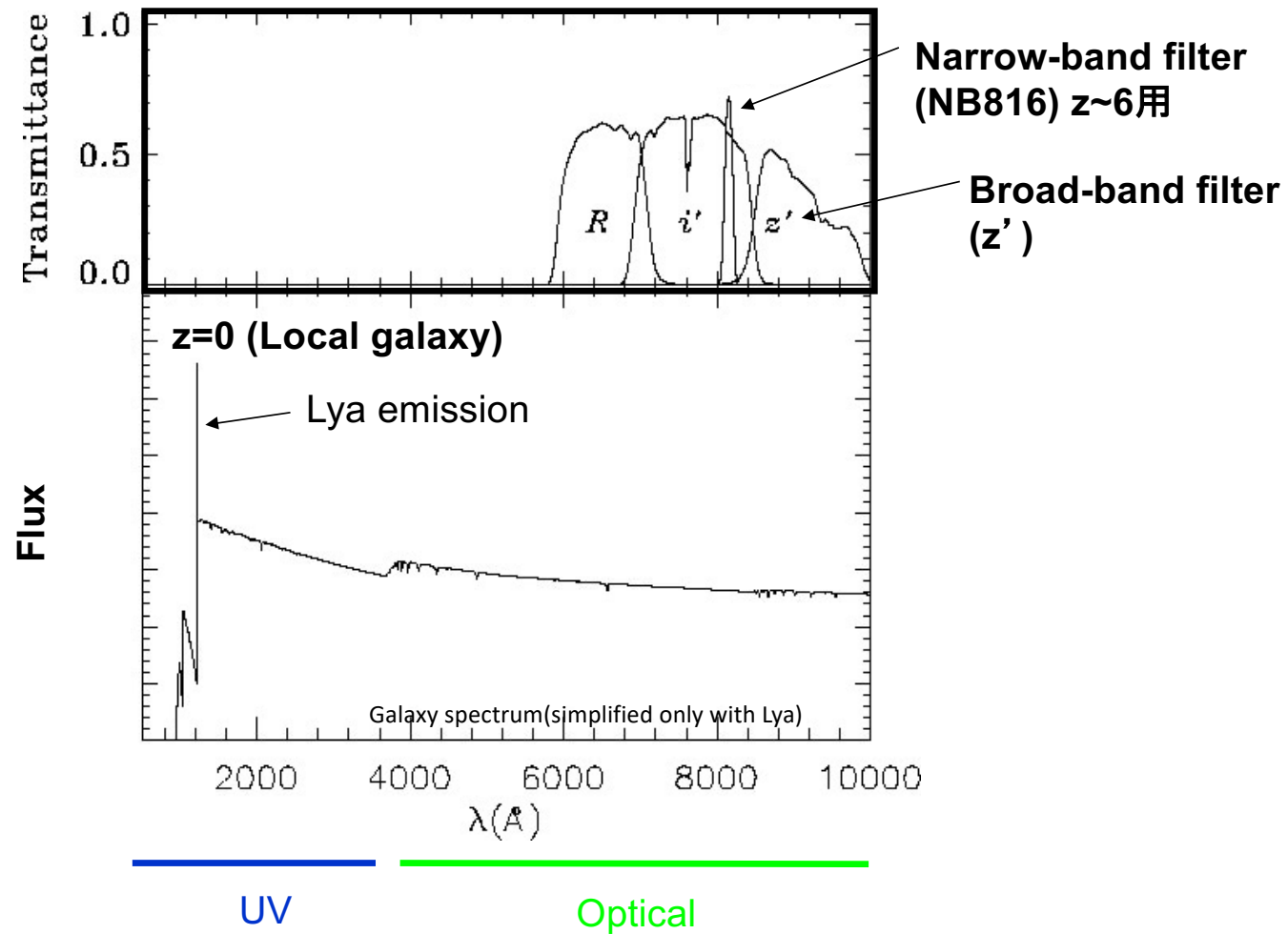
前景銀河の海から 遠方の銀河を見つける



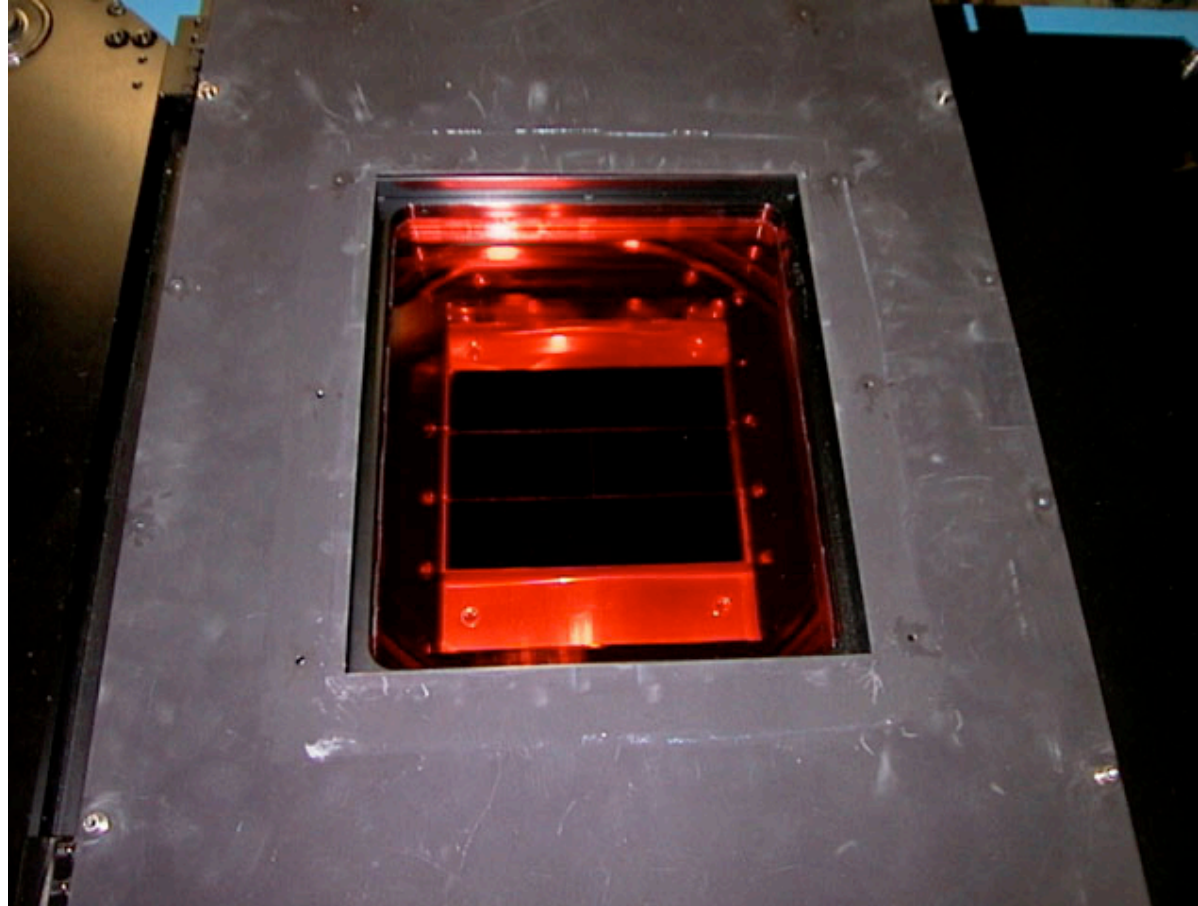
- 撮像データ: ほとんどは前景銀河
 - (例) 赤方偏移6の銀河: 1000個に1個
- 全て分光。赤方偏移を測る?
 - 赤方偏移6の銀河1つ~3時間
 - 375日 (=3000時間/8時間) 観測で1個
→ 現実的に不可能



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



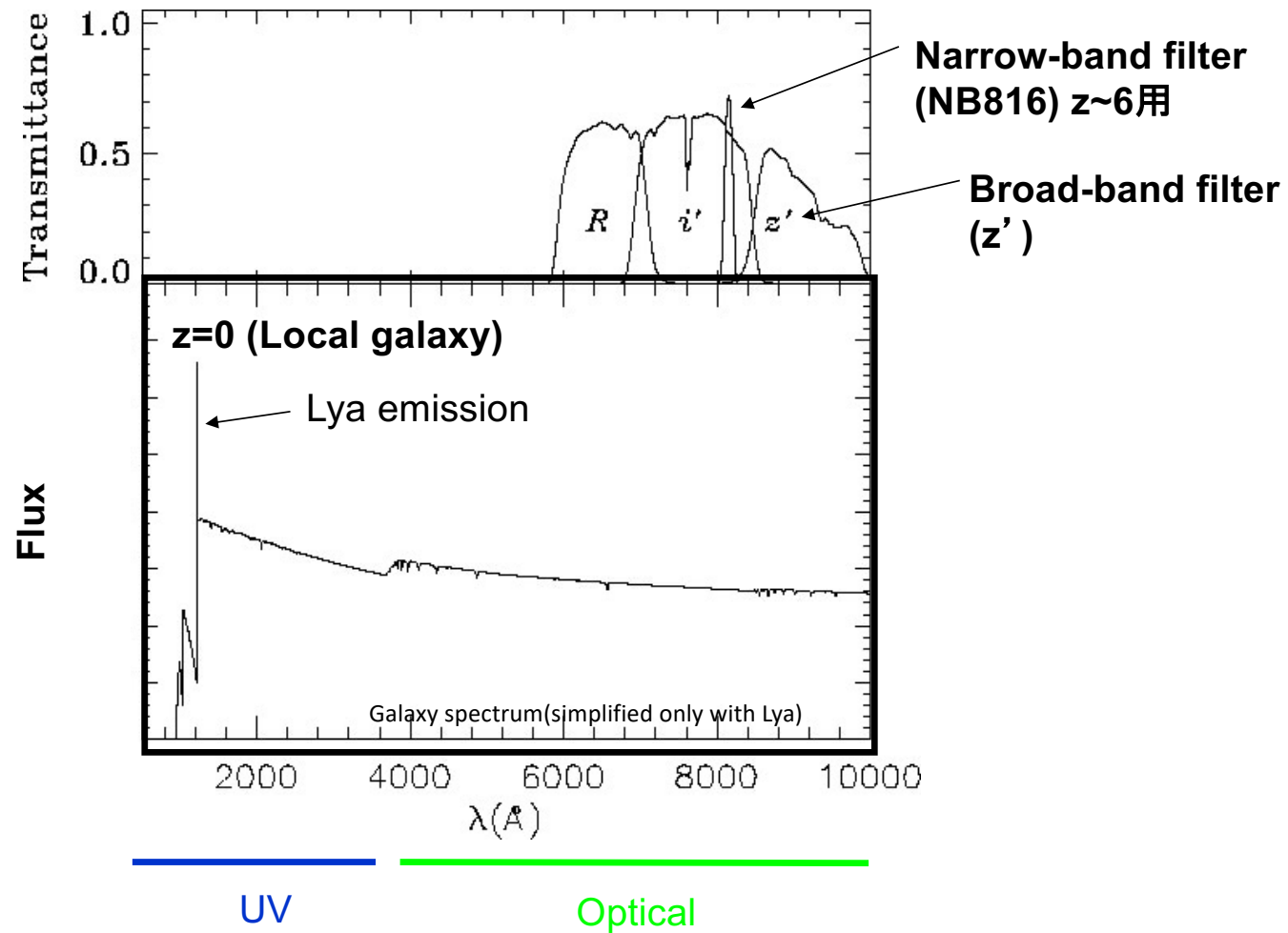
and filter
用

and filter

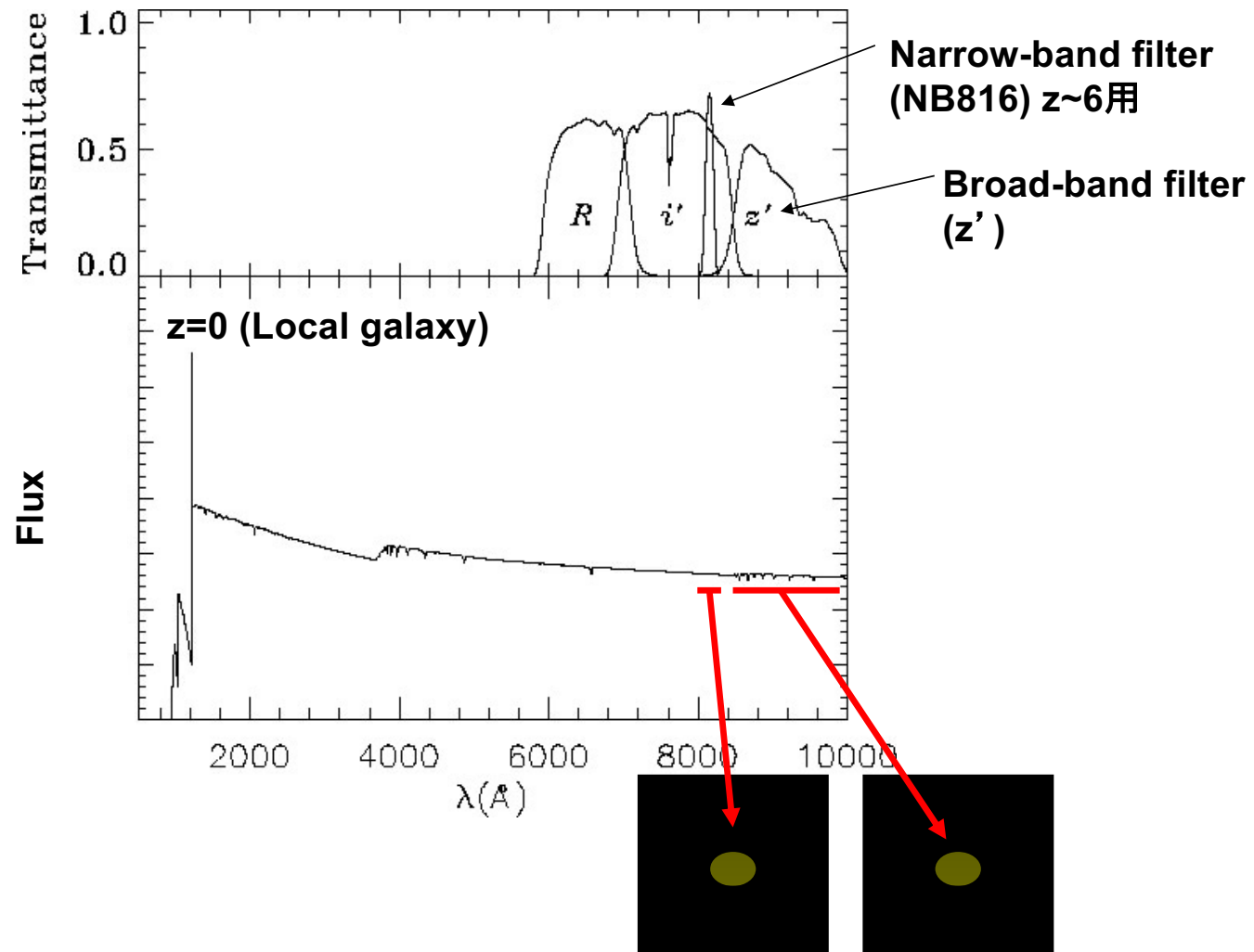
UV

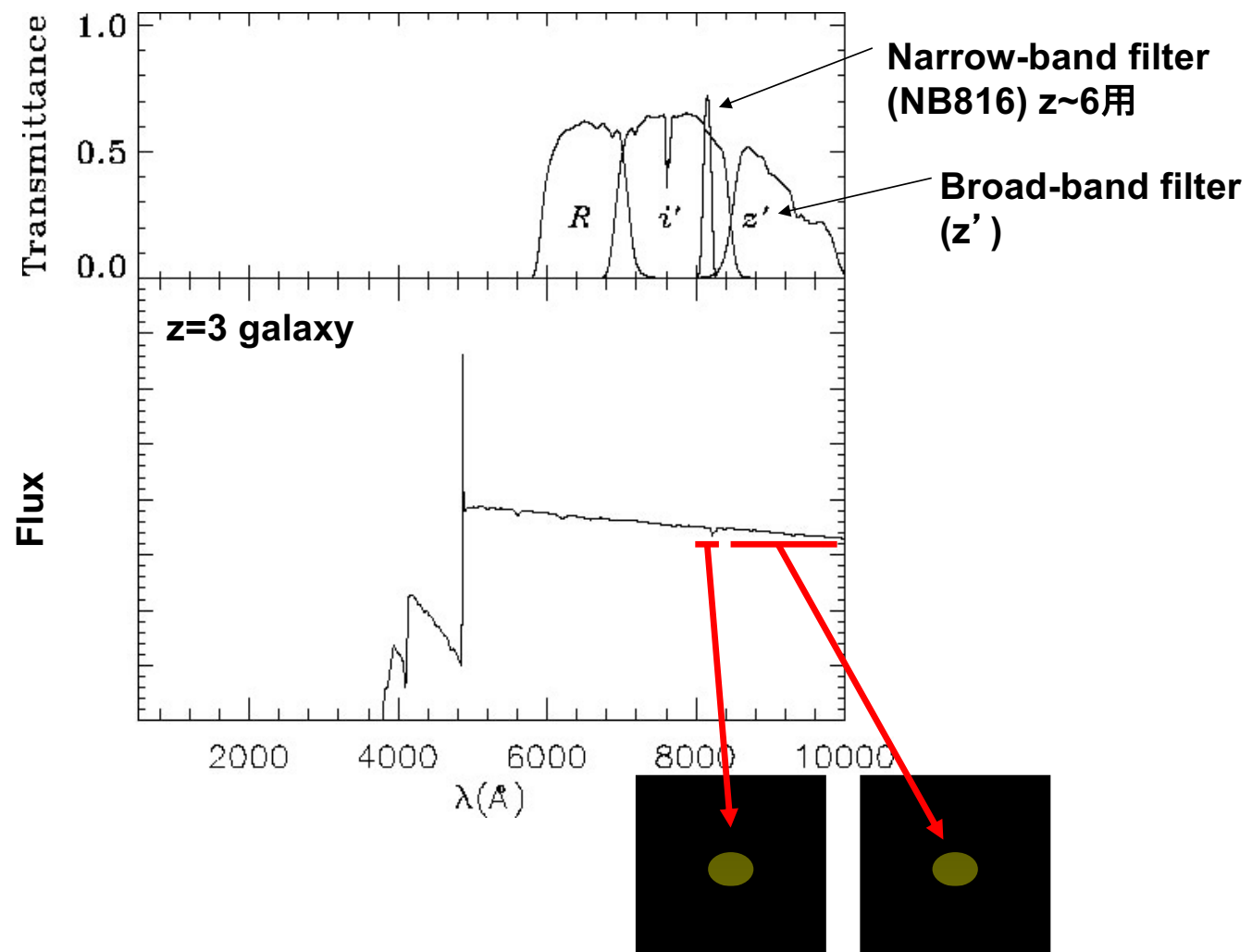
Optical

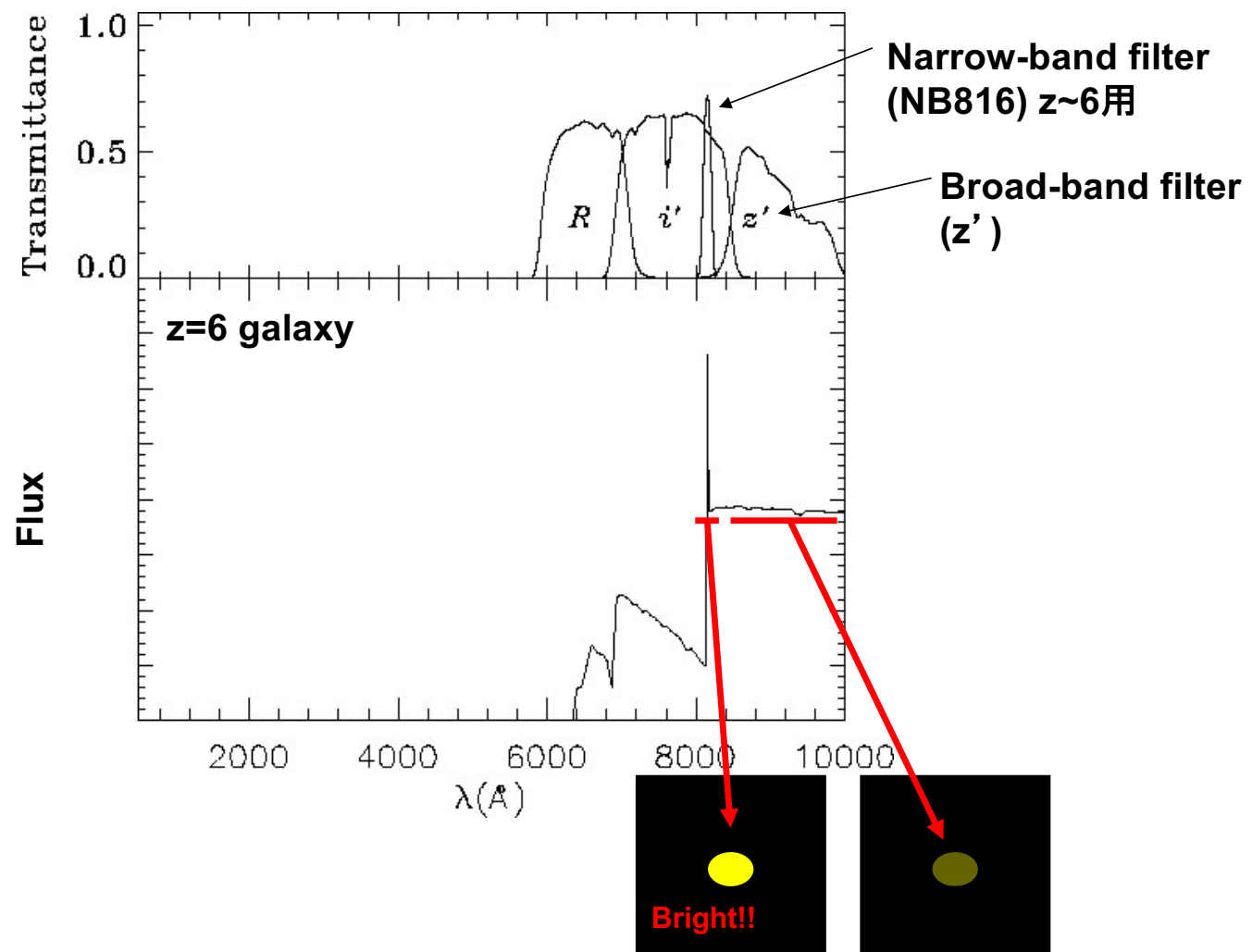
遠方の銀河候補を 狭帯域フィルター(**narrow-band filter**)で選択



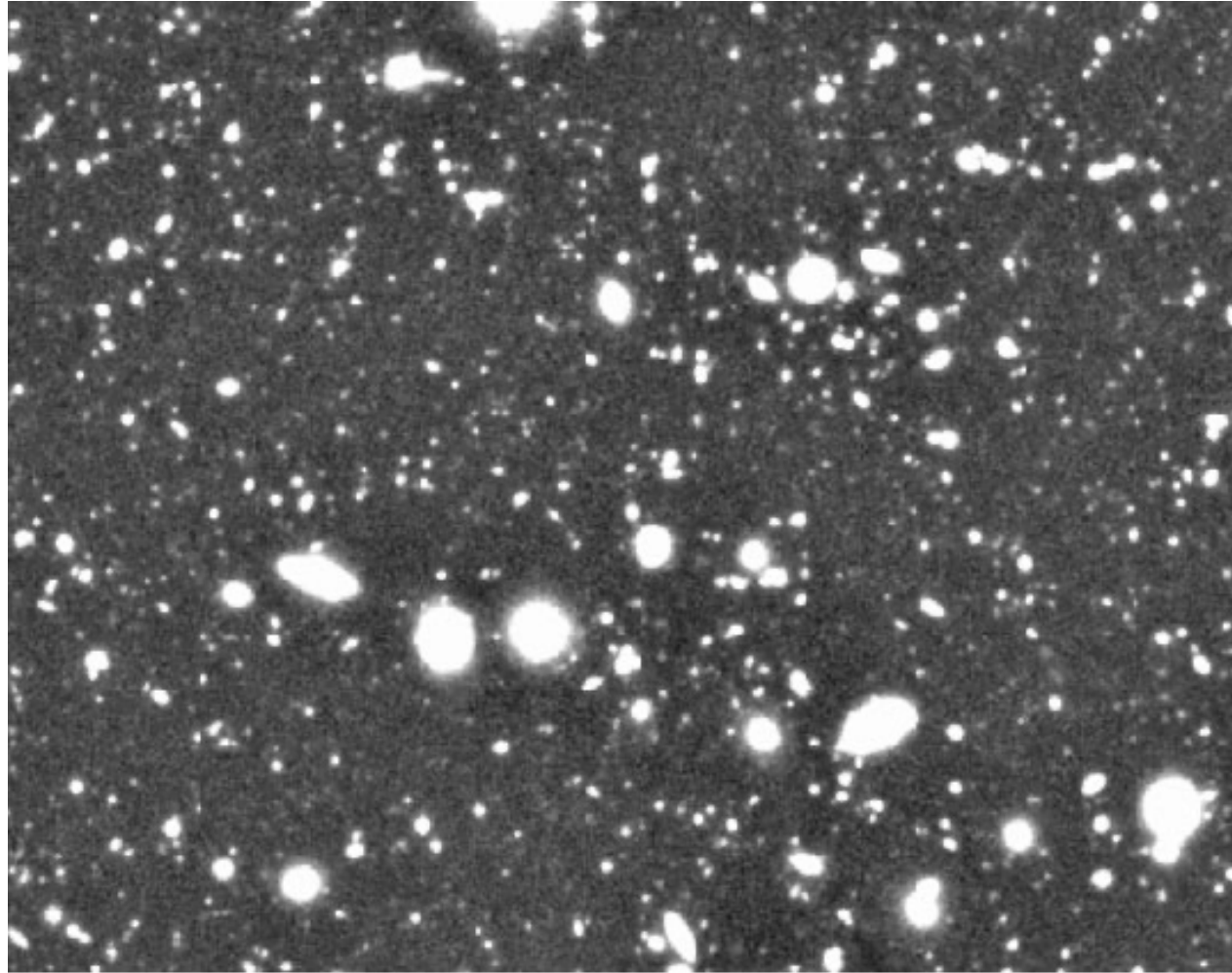
遠方の銀河候補を 狭帯域フィルター(**narrow-band filter**)で選択



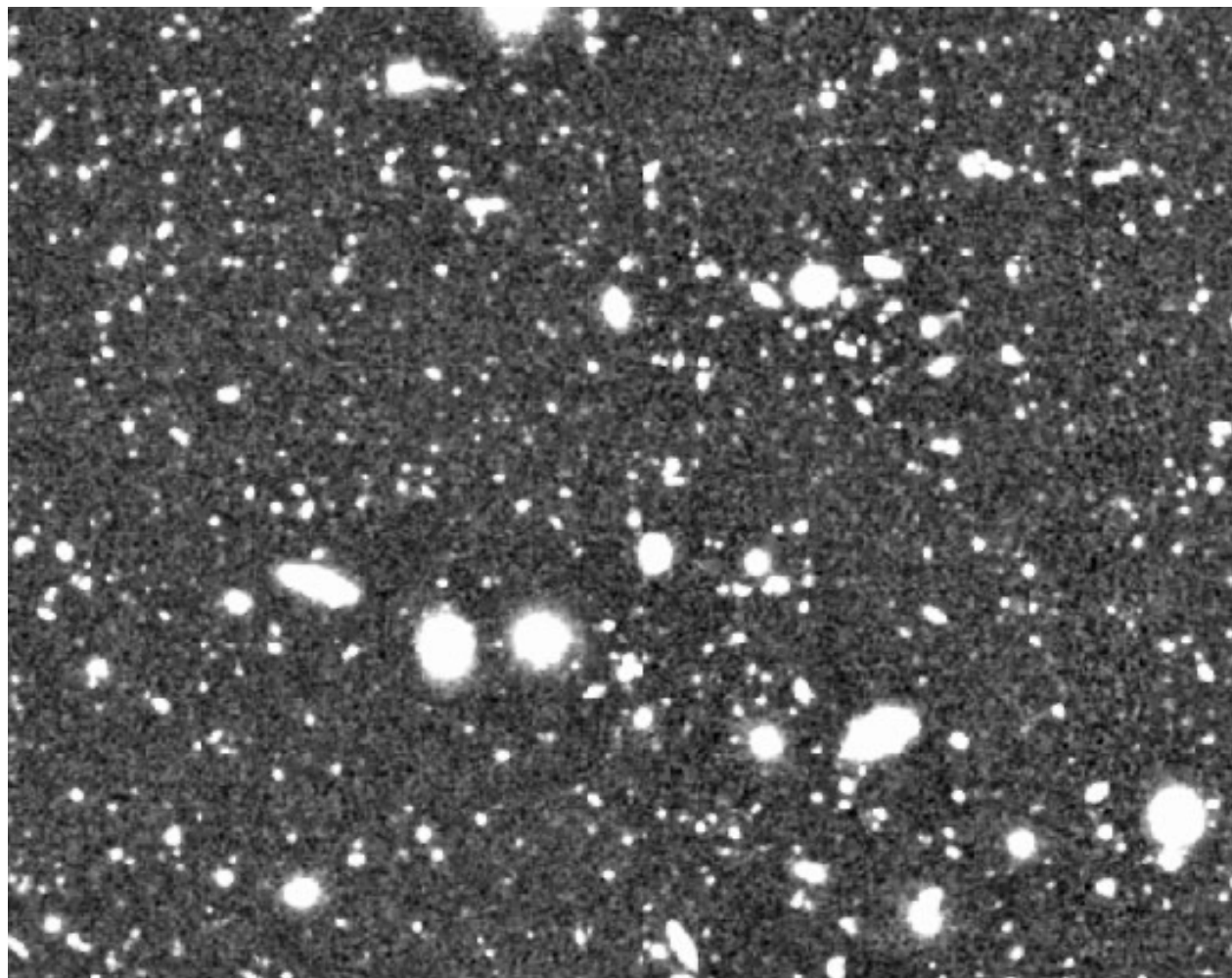




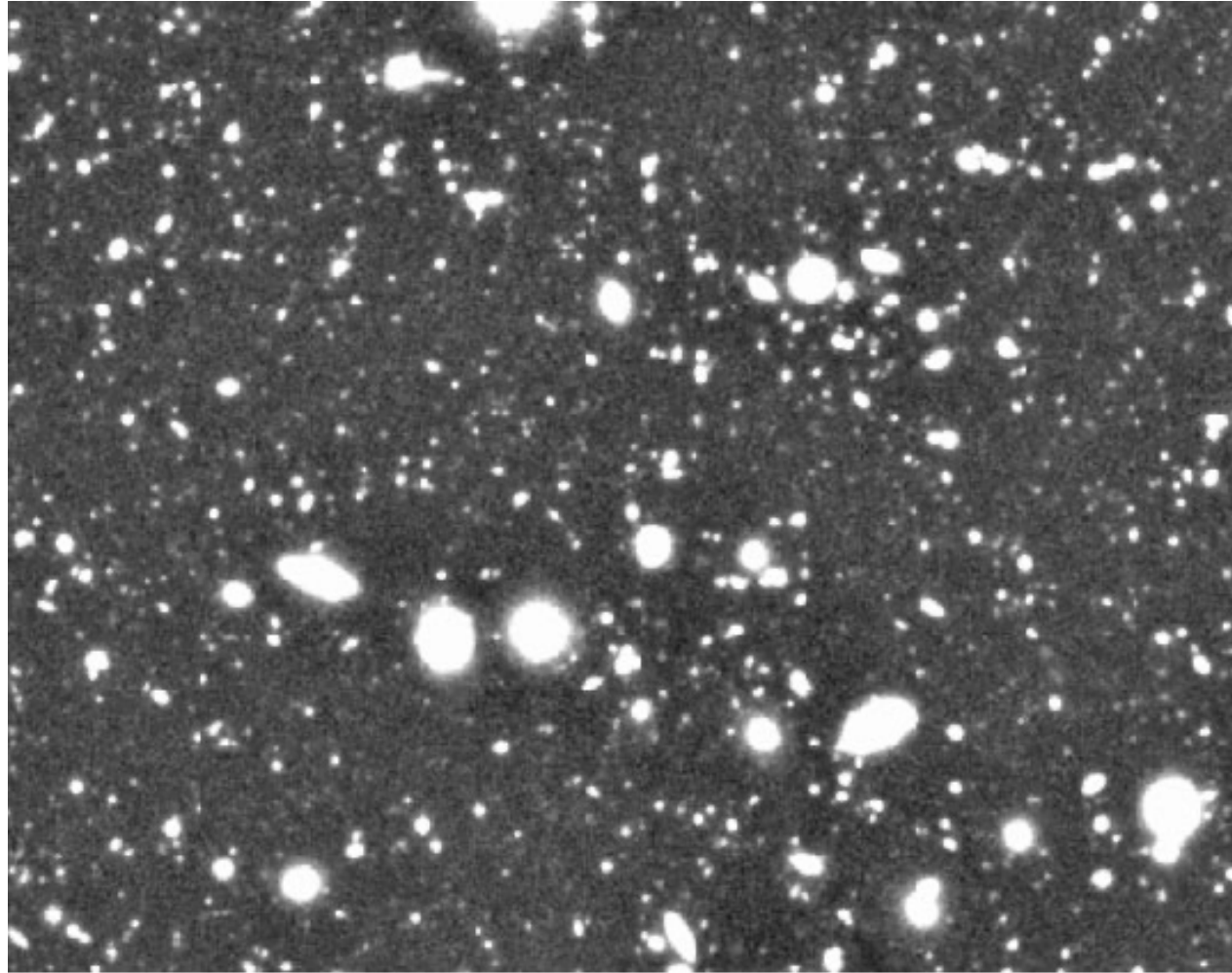
Broad-Band Image



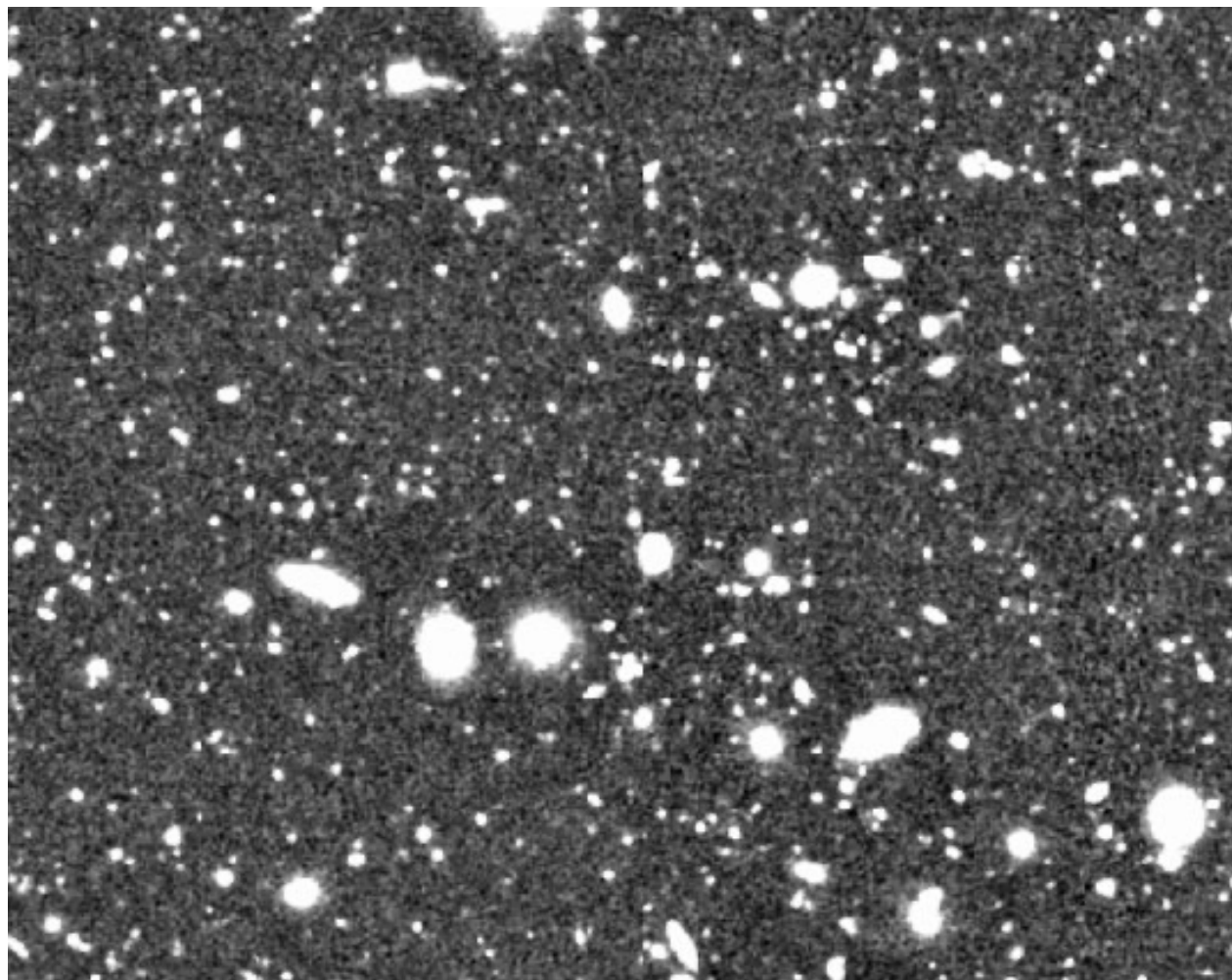
Narrow-Band Image



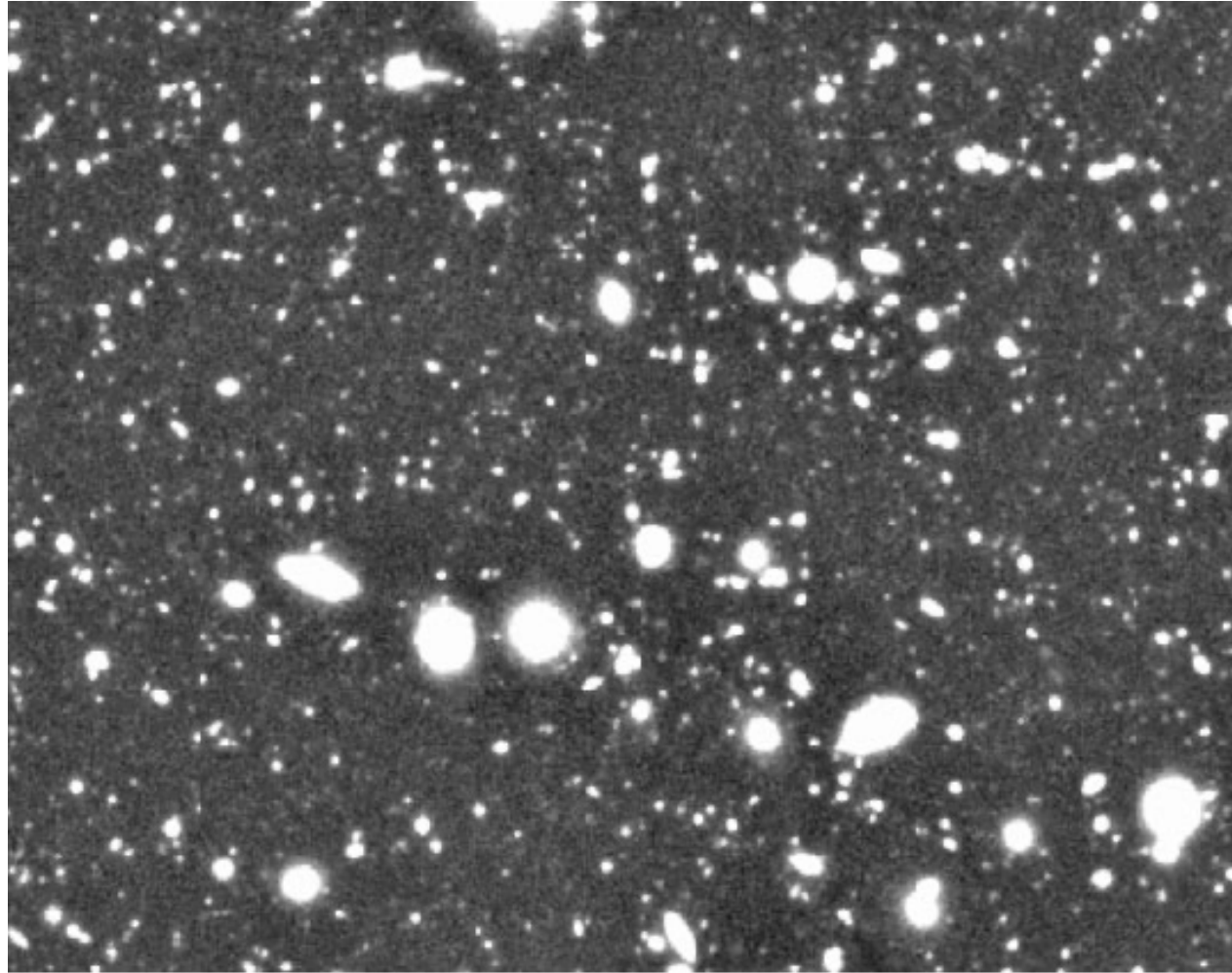
Broad-Band Image



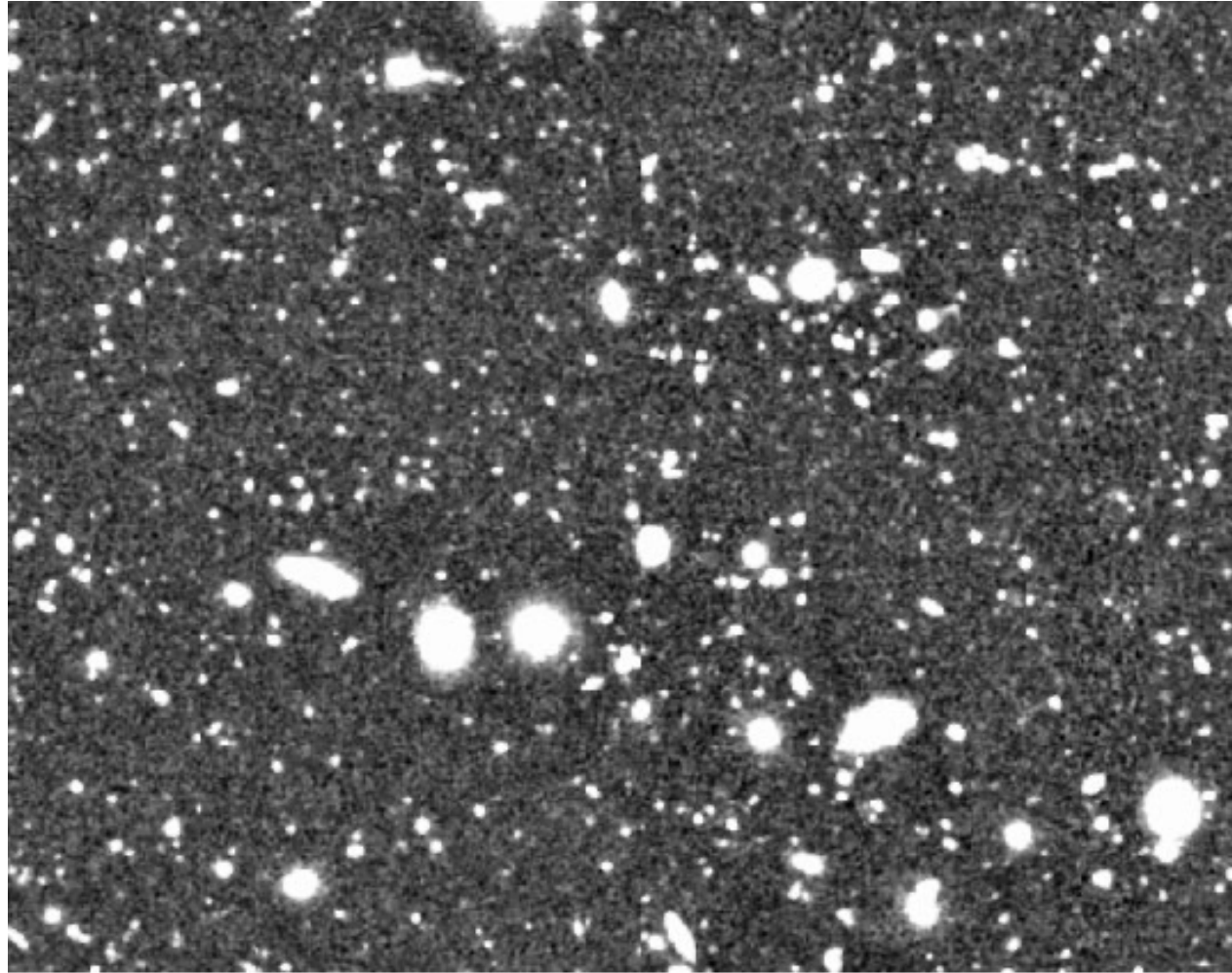
Narrow-Band Image



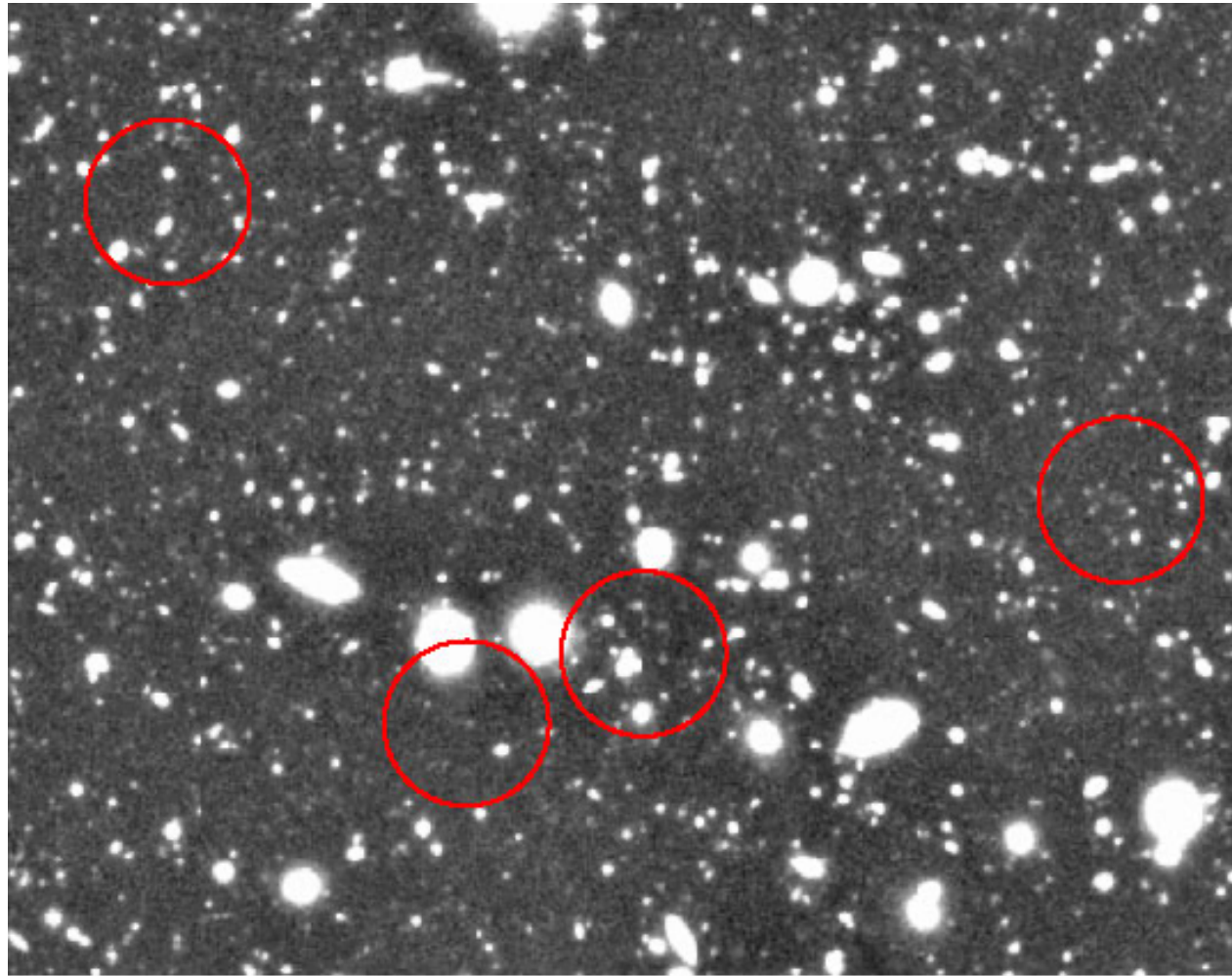
Broad-Band Image



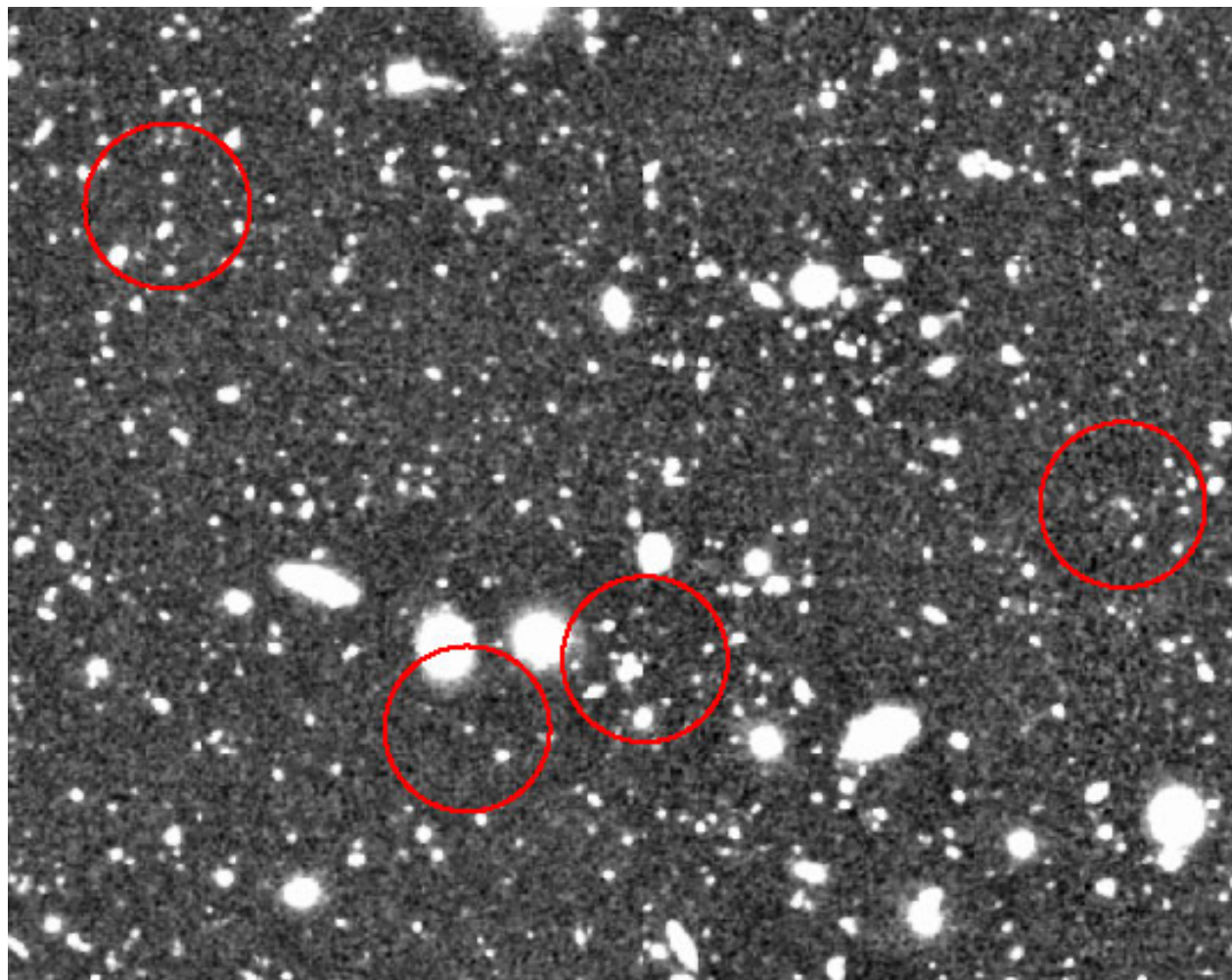
Narrow-Band Image



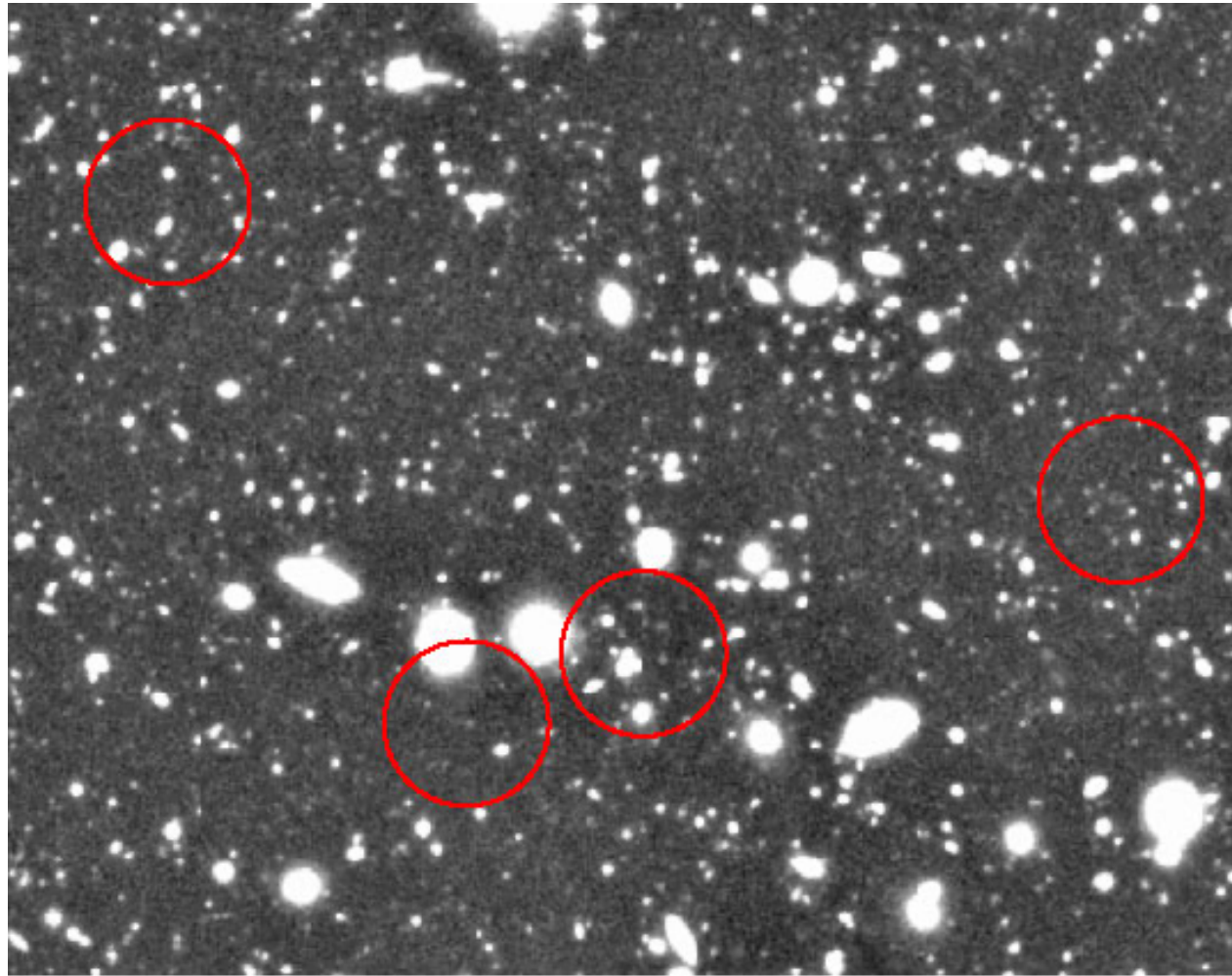
Broad-Band Image



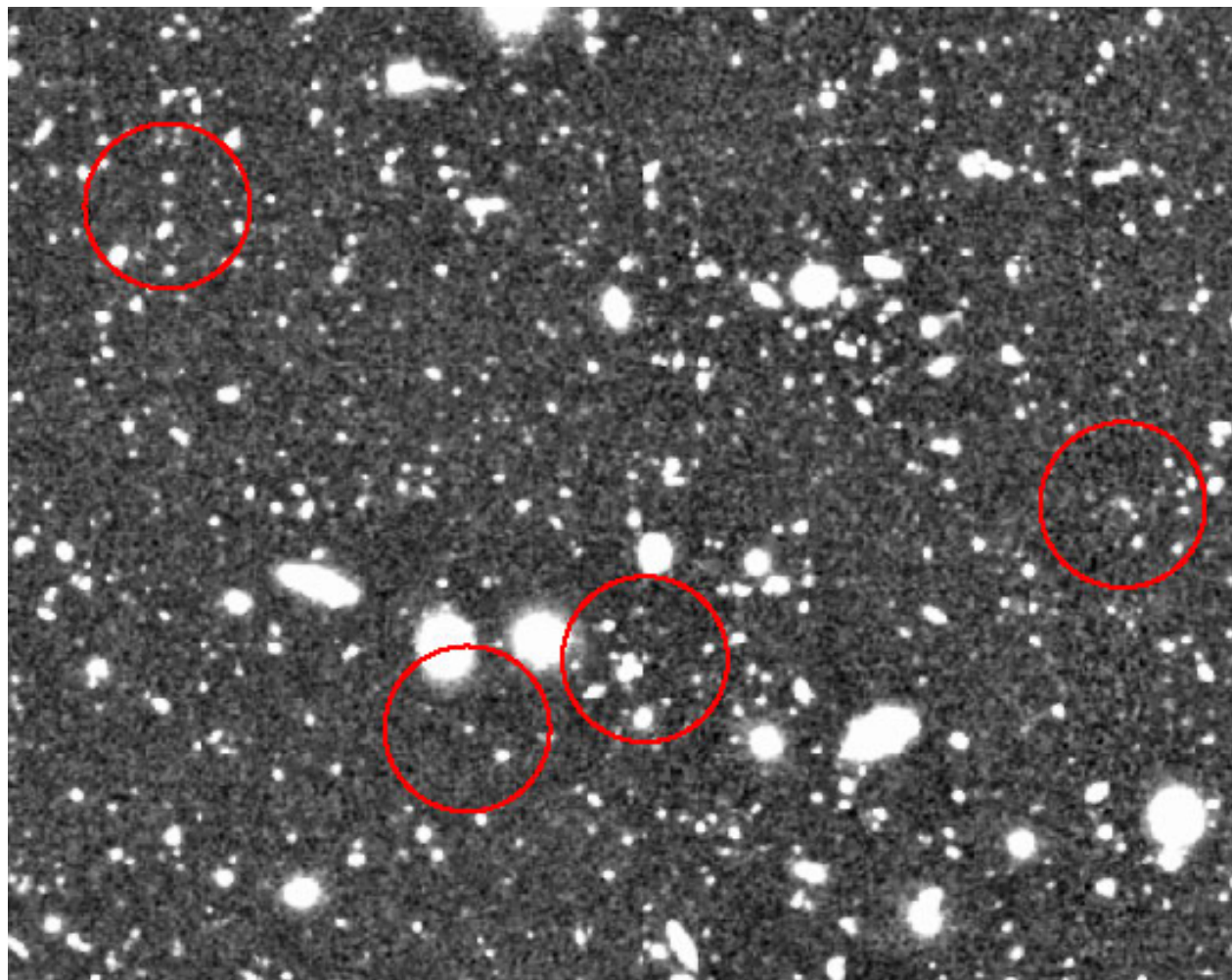
Narrow-Band Image



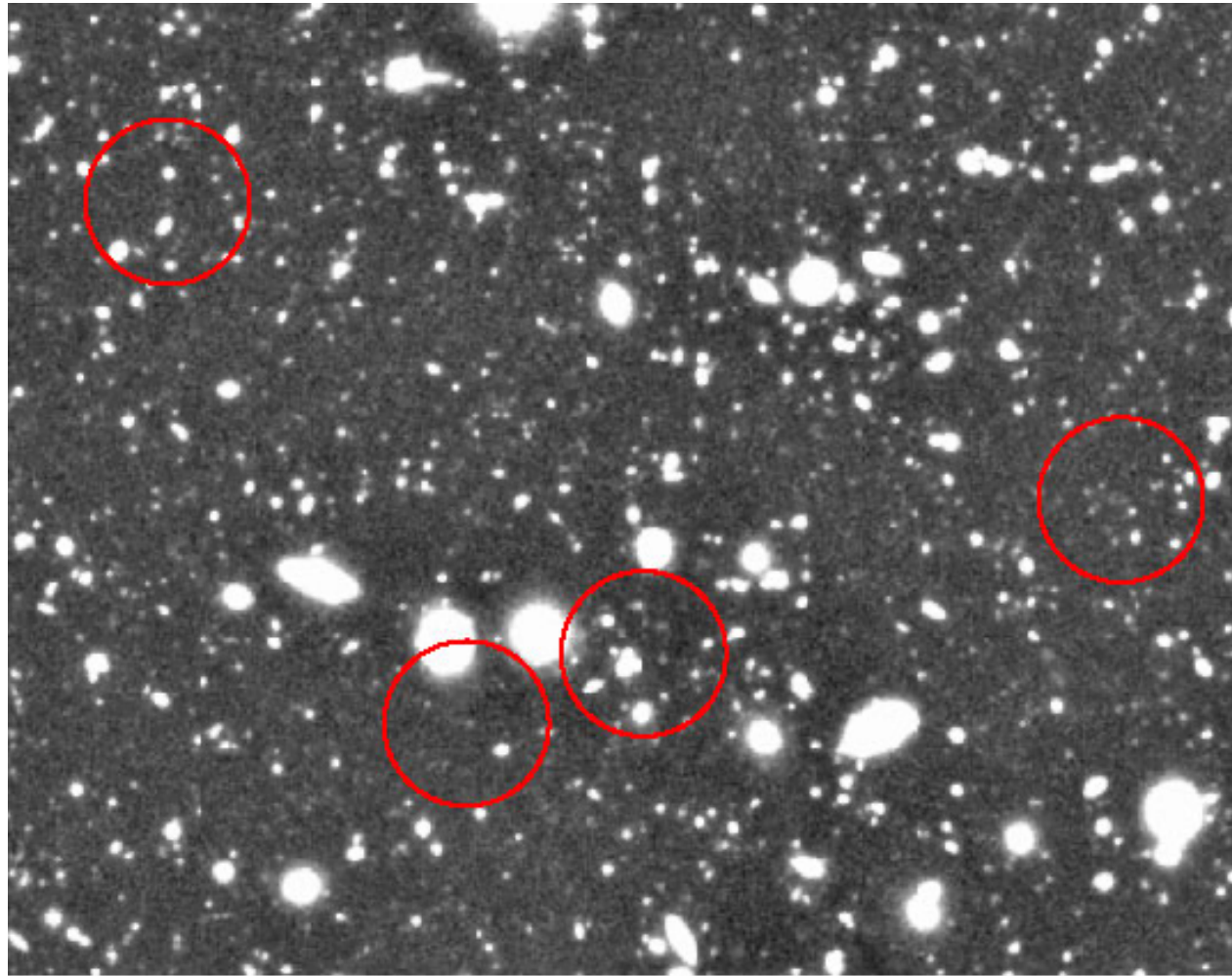
Broad-Band Image



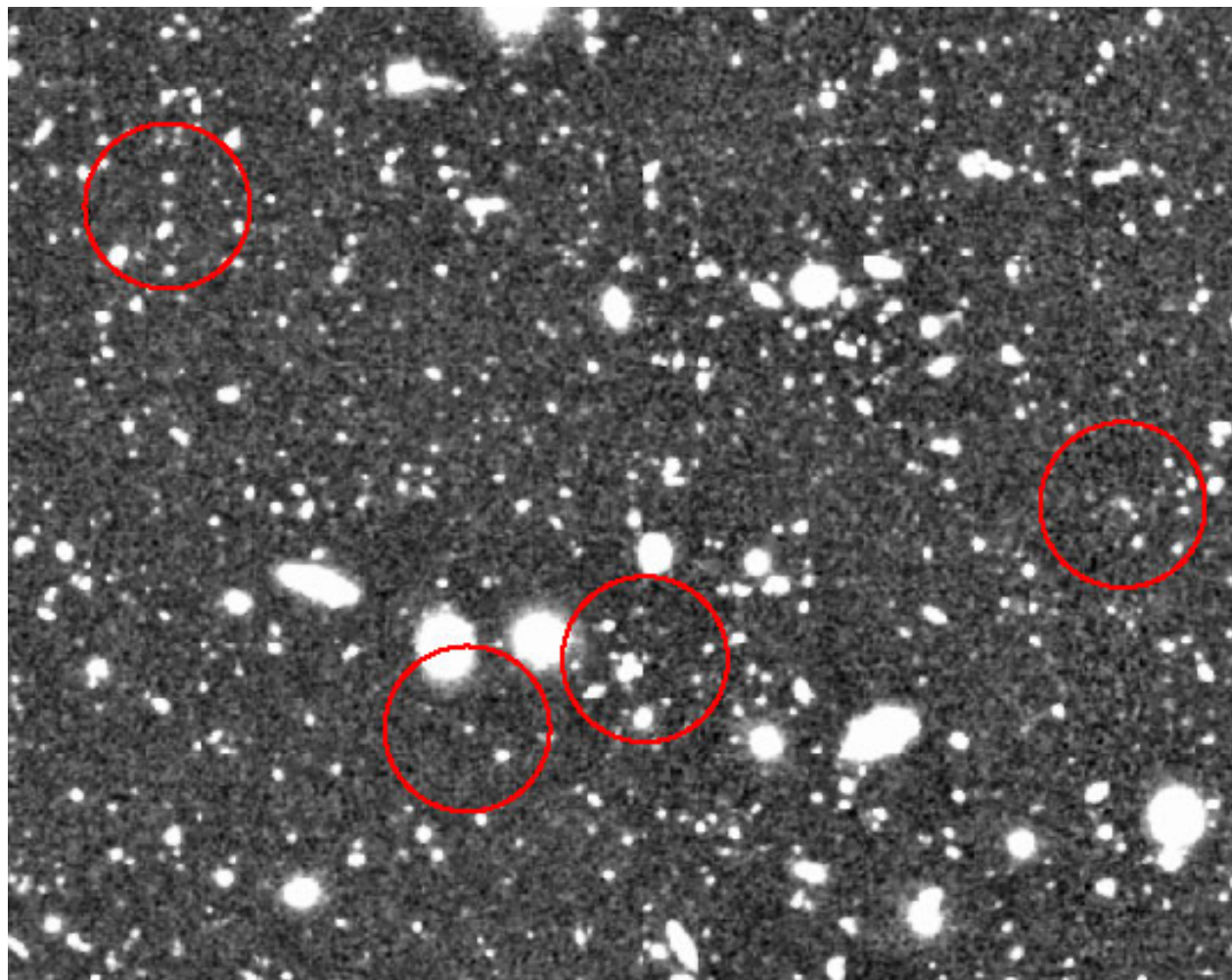
Narrow-Band Image



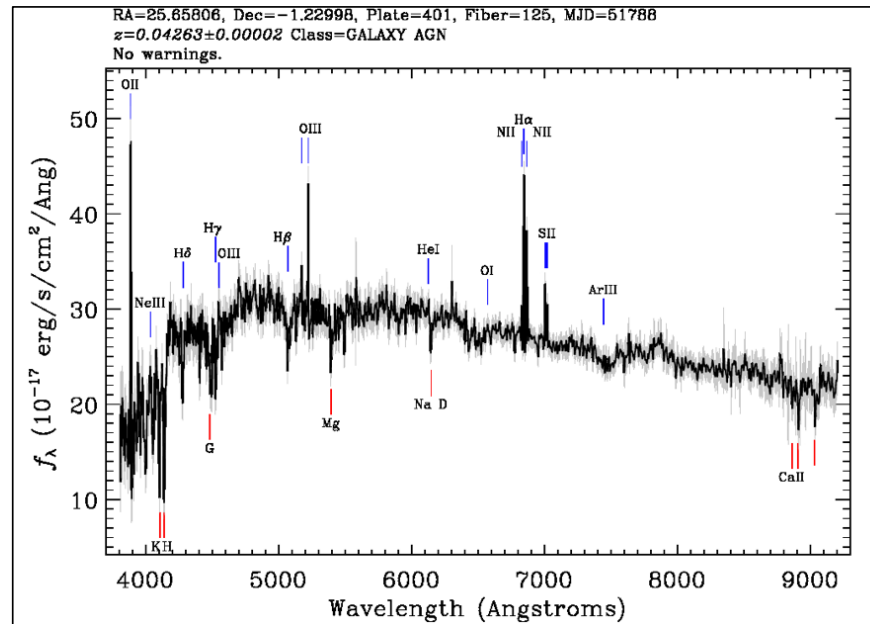
Broad-Band Image



Narrow-Band Image



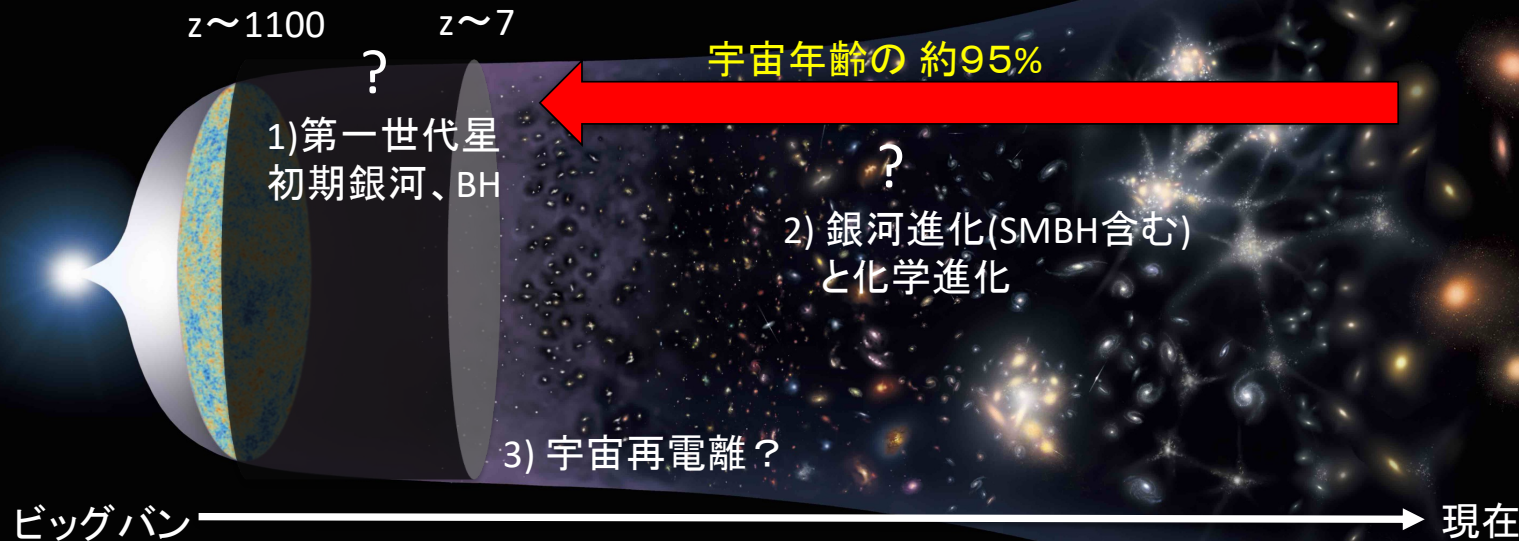
前景天体の混入



- 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
- 課題
 - 1) 第一世代星/初期銀河、種ブラックホール(BH)
 - 2) 宇宙大規模構造の中での銀河進化(超巨大ブラックホール含む)と化学進化
 - 3) 宇宙再電離史と再電離源

宇宙史(模式図)

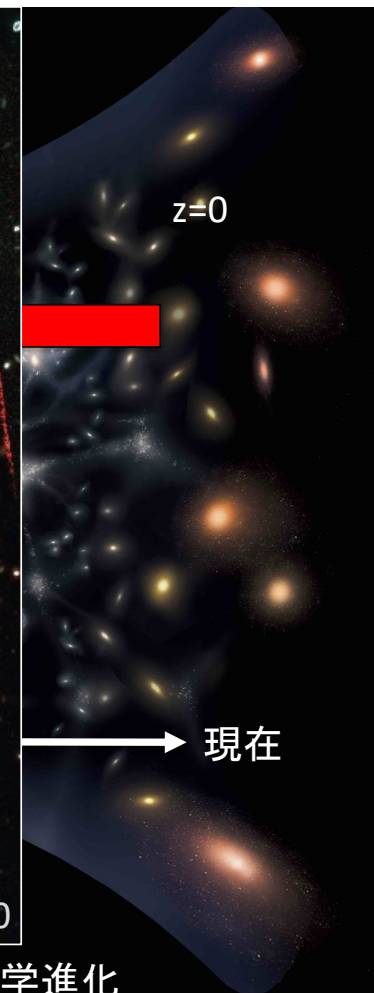
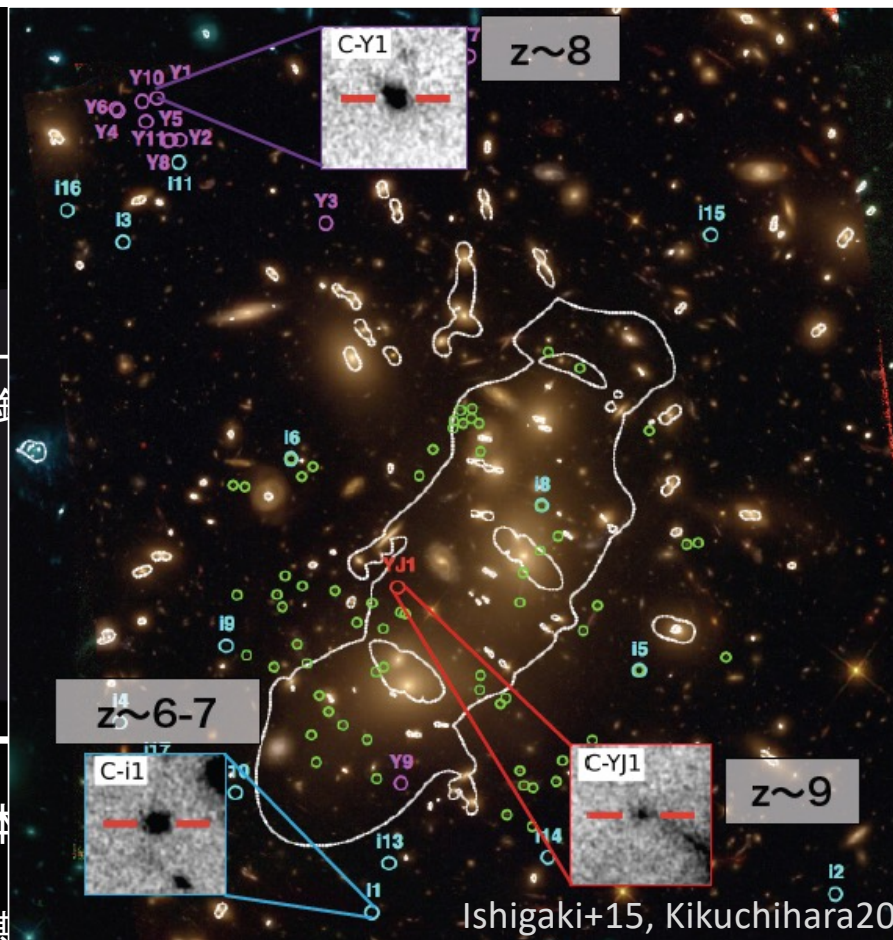
$z \sim 1100$

1) 第一世代星/初期銀河

ビッグバン

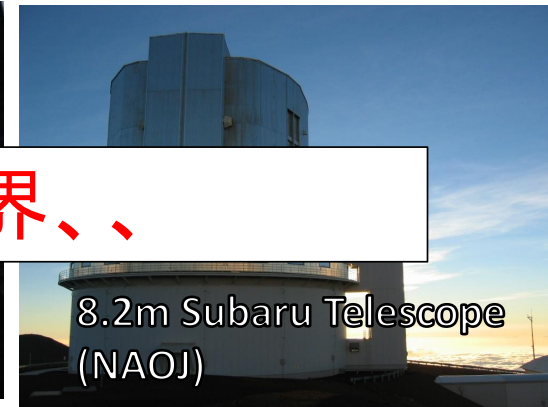
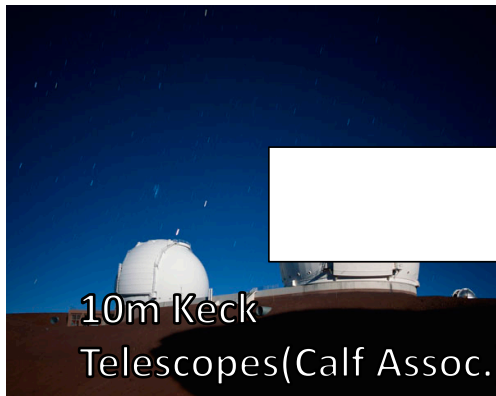
- 銀河が宇宙の基本構造
- 課題

- 1) 第一世代星/初期銀河
- 2) 宇宙大規模構造の中での銀河進化(超巨大ブラックホール含む)と化学進化
- 3) 宇宙再電離史と再電離源

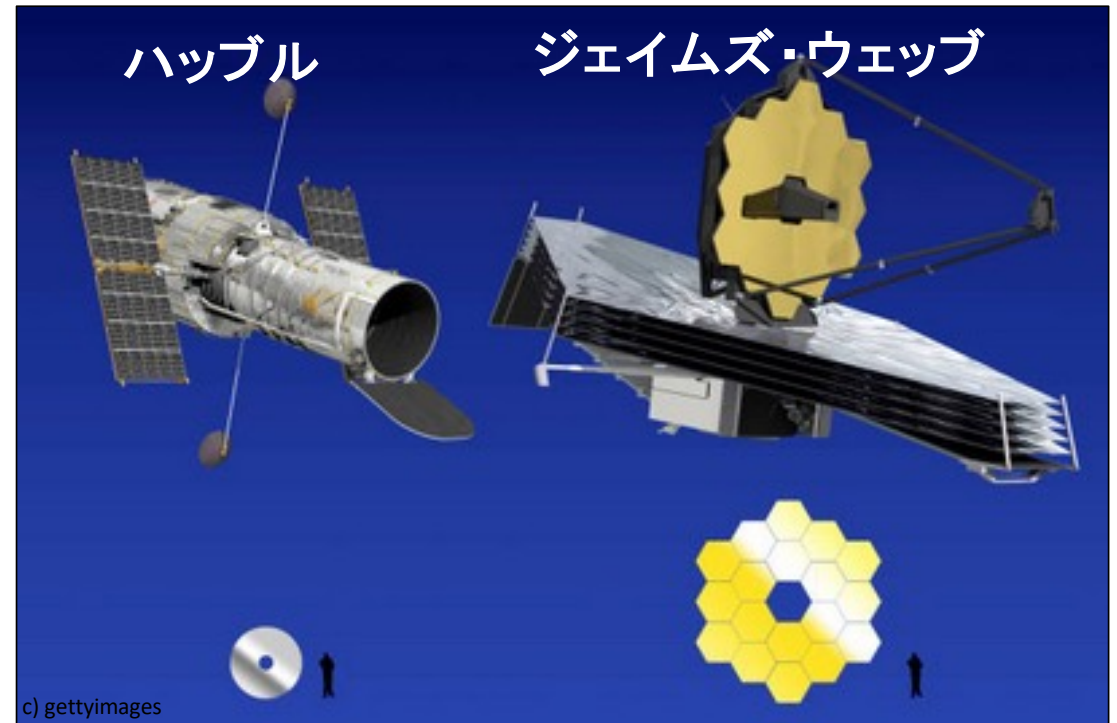
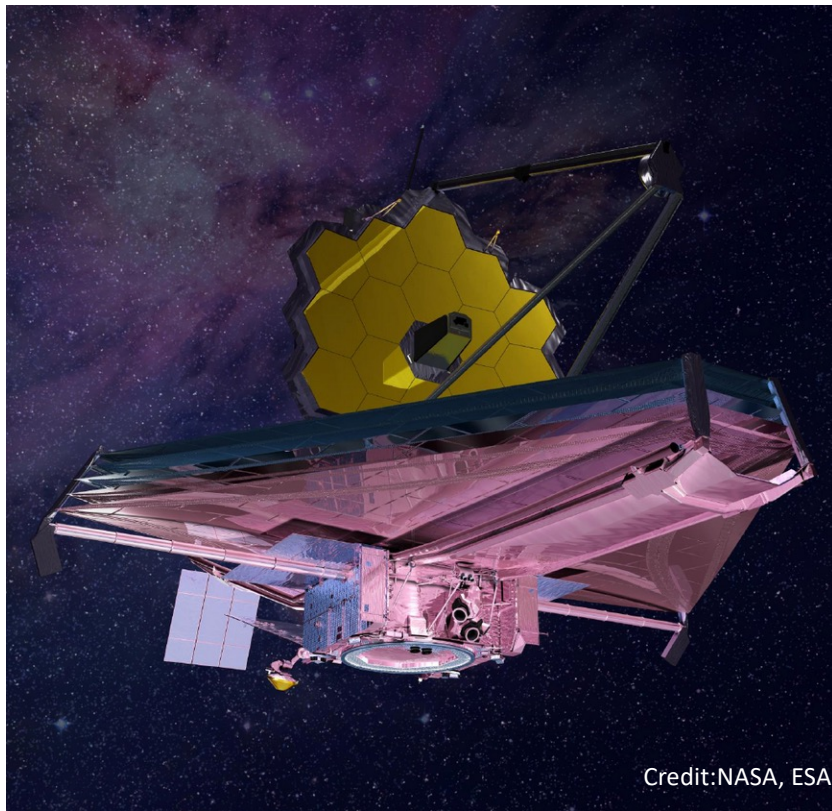


大型望遠鏡

観測能力の限界、、



ジェイムズ・ウェッブ宇宙望遠鏡 (JWST)



- JWST: 大型の赤外線宇宙望遠鏡
– ハッブル宇宙望遠鏡の後継→6倍の集光力

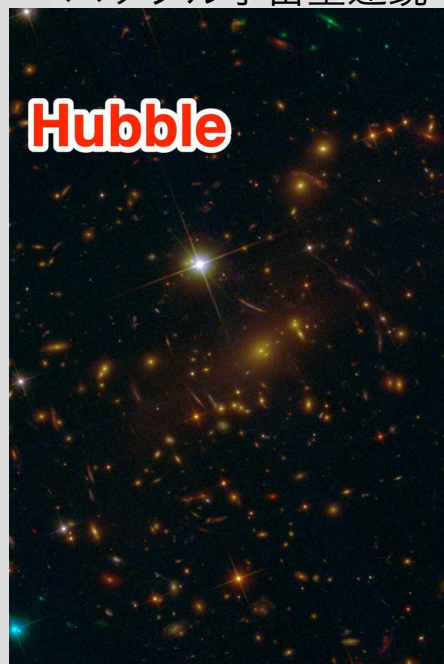


c) NASA Goddard

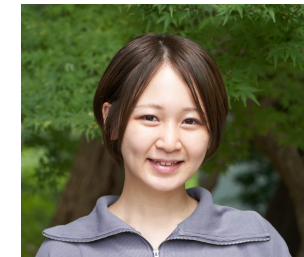
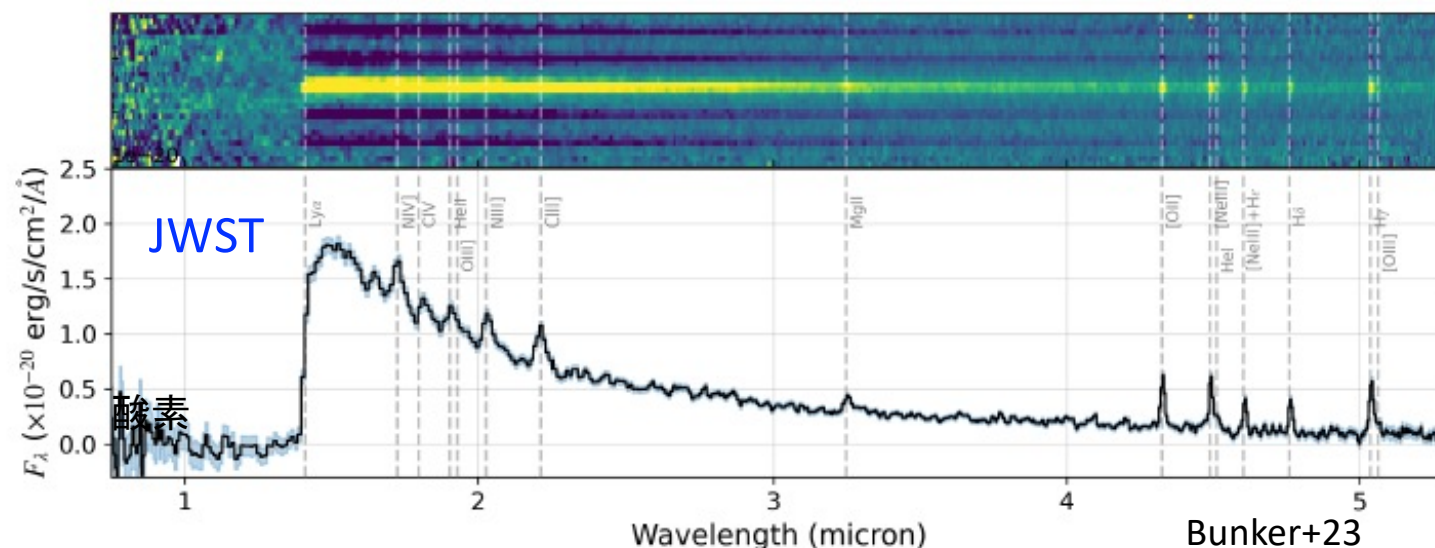


ハッブル宇宙望遠鏡

JWST



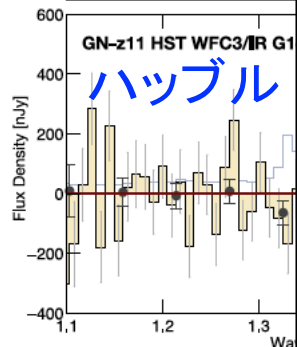
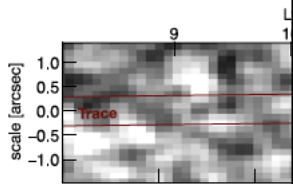
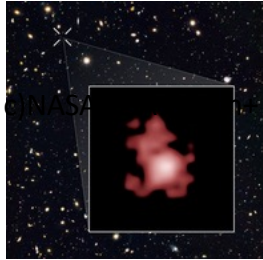
NASA



磯部(→ケンブリッジ) 渡辺(国立天文台/総研大3年)

- ハッブル宇宙望遠鏡のGN-z11 ($z=11$ くらい; 134億年前??) → JWST装置開発チーム連合(JADES)の分光観測 → $z=10.6$ と判明。
- さらに多数の元素から出される輝線、そして星の光(連続光)も
- 驚くほど、窒素ガスが出す輝線が強い → 酸素に対して天の川銀河の~3倍以上の窒素! 何故?

JWSTの高い観測能力 GN-z11

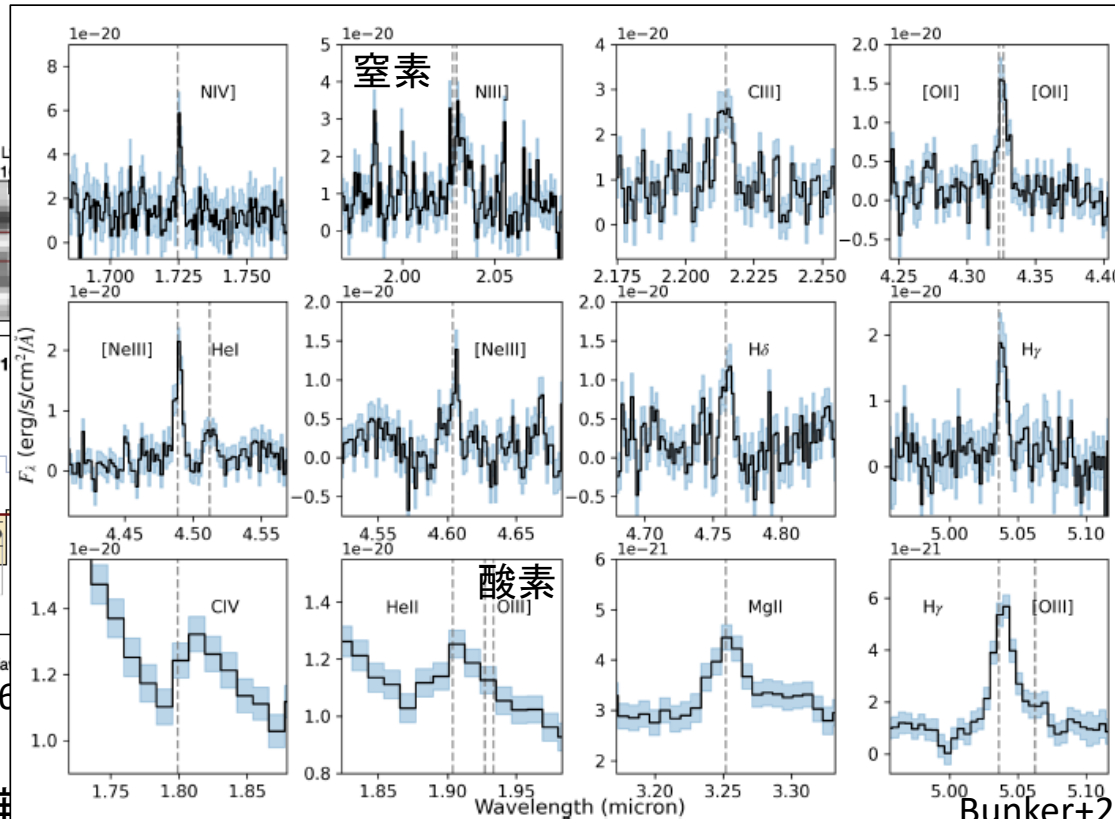


Oesch et al. (2016)

- ハッブル宇宙

→ $z=10.6$ と判明。

- さらに多数の元素から出される輝線、そして星の光(連続光)も
- 驚くほど、窒素ガスが出す輝線が強い→酸素に対して**天の川銀河の～3倍以上の窒素**！何故？



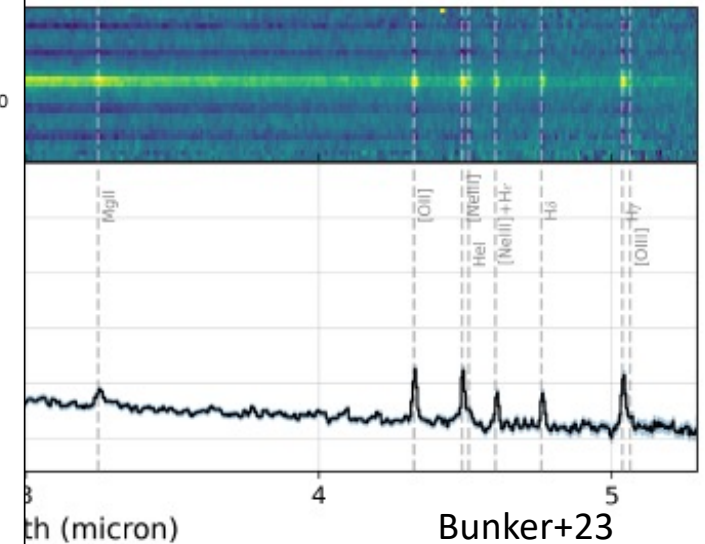
Bunker+23発チーム連合(JADES)の分光観測



磯部(→ケンブリッジ)



渡辺(国立天文台
総研大3年)



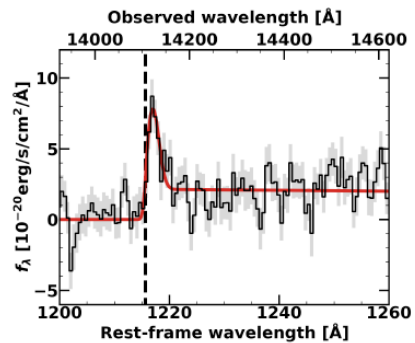
1) 宇宙再電離の解明 --遅すぎる再電離の謎--



中根(M2)



影浦(M1)



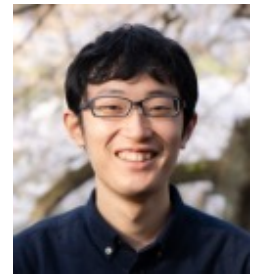
Kageura+25

- Ly α 輝線の吸収量を評価→宇宙の中性度($x_{\text{HI}}=n_{\text{HI}}/n_{\text{H}}$)
- JWSTにより $z>8$ での x_{HI} 進化を初めて明らかに
 - $z>8$ で高い $x_{\text{HI}}\sim 80\text{-}90\%$ →遅い宇宙再電離
 - モデルで説明できないほど遅い。何故？

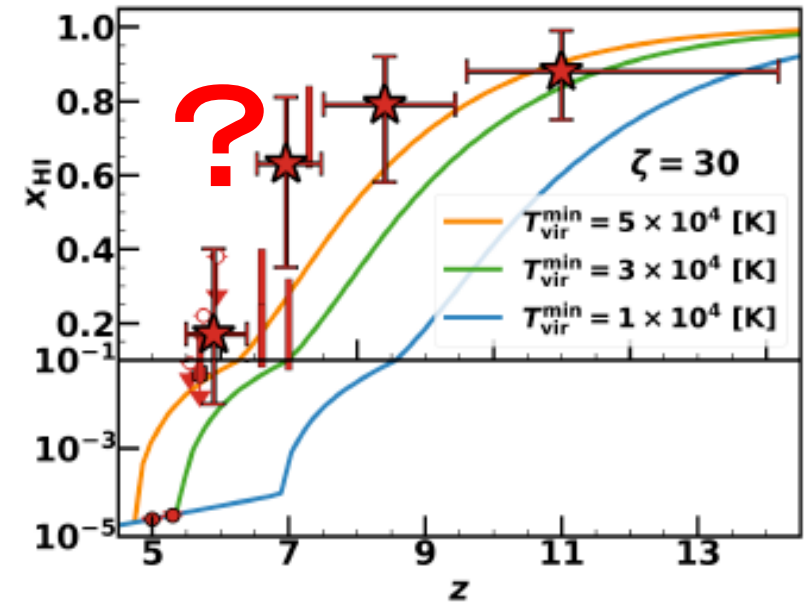
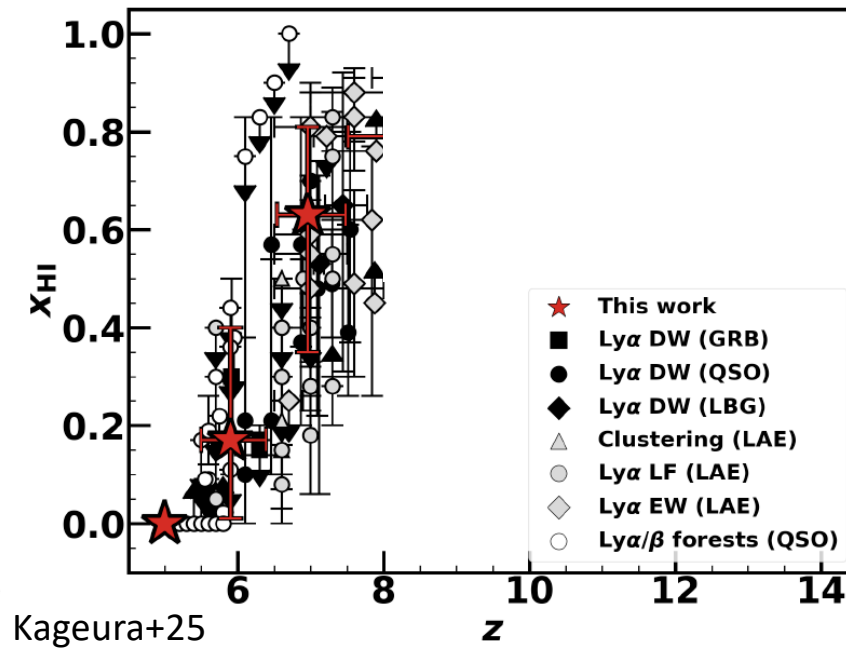
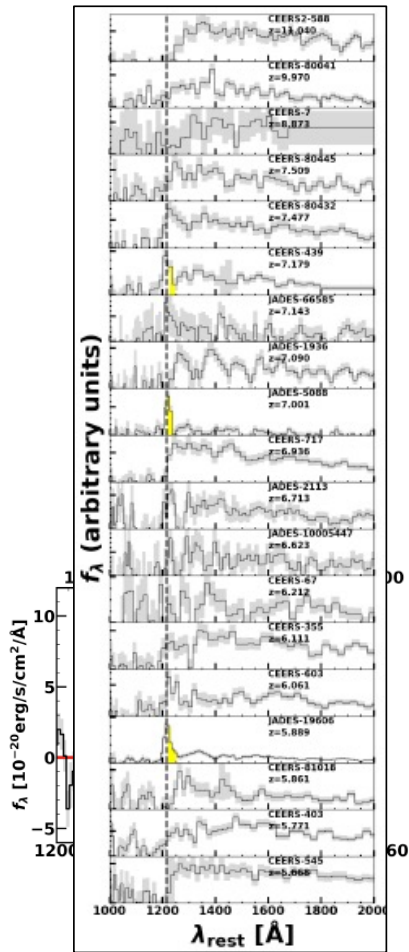
1) 宇宙再電離の解明 --遅すぎる再電離の謎--



中根(M2)



影浦(M1)

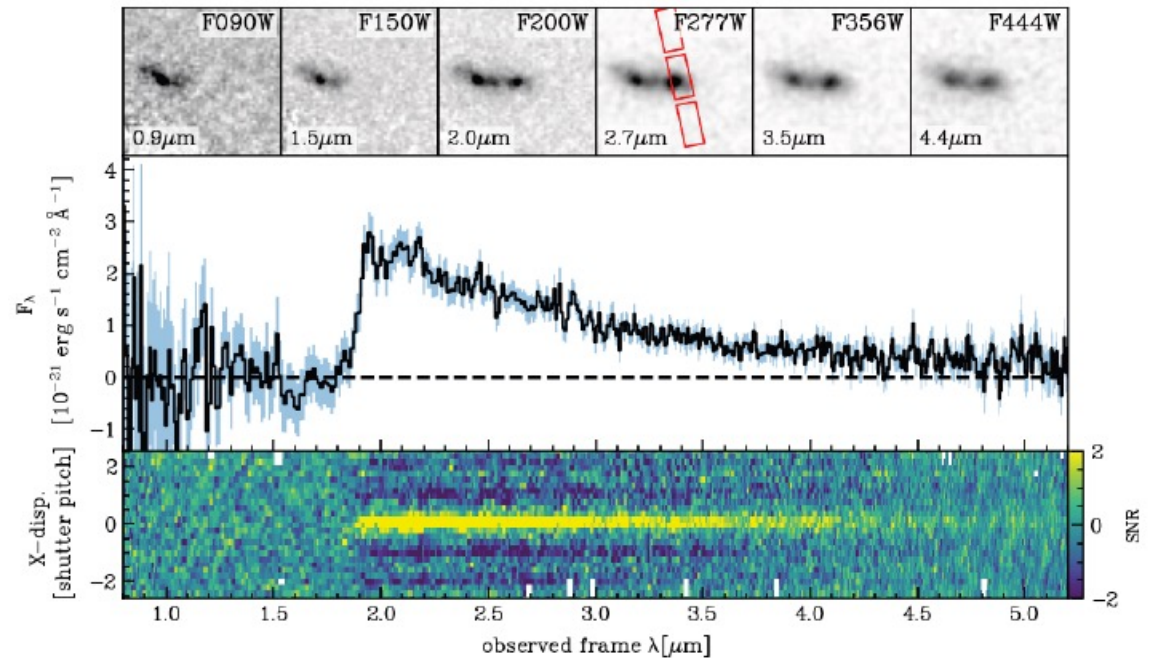


- Ly α 輝線の吸収量を評価→宇宙の中性度($X_{\text{HI}}=n_{\text{HI}}/n_{\text{H}}$)
- JWSTにより $z>8$ での X_{HI} 進化を初めて明らかに
 - $z>8$ で高い $X_{\text{HI}} \sim 80-90\%$ →遅い宇宙再電離
 - モデルで説明できないほど遅い。何故？

2) 予想を超える明るい銀河

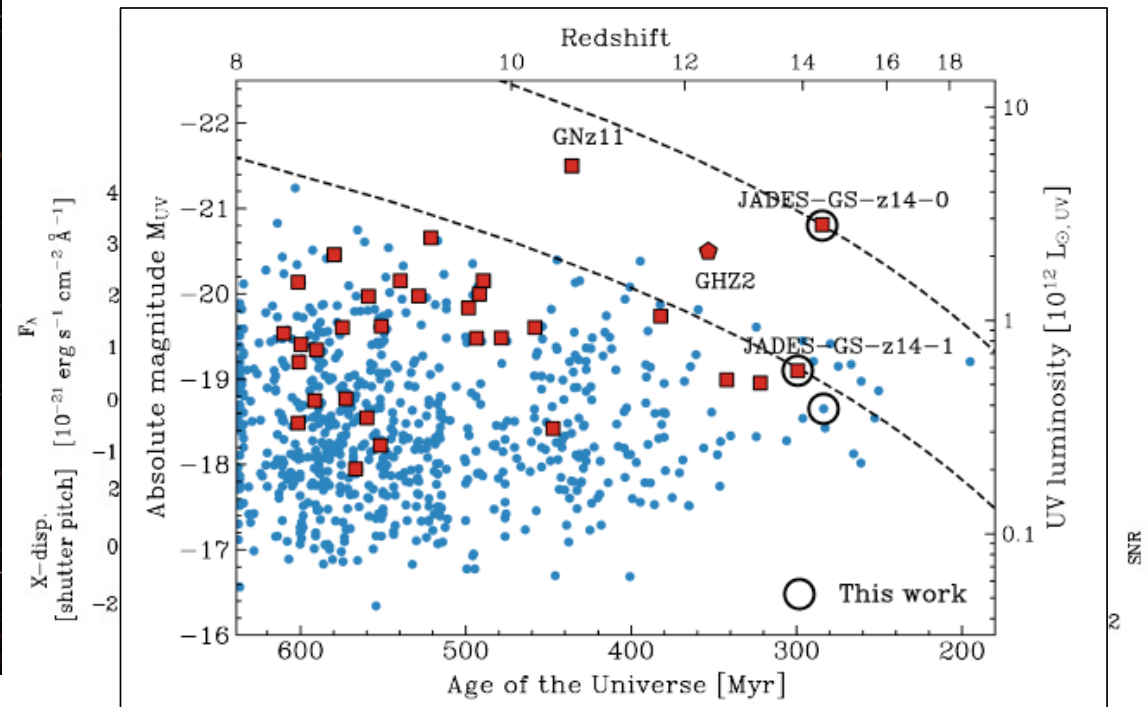
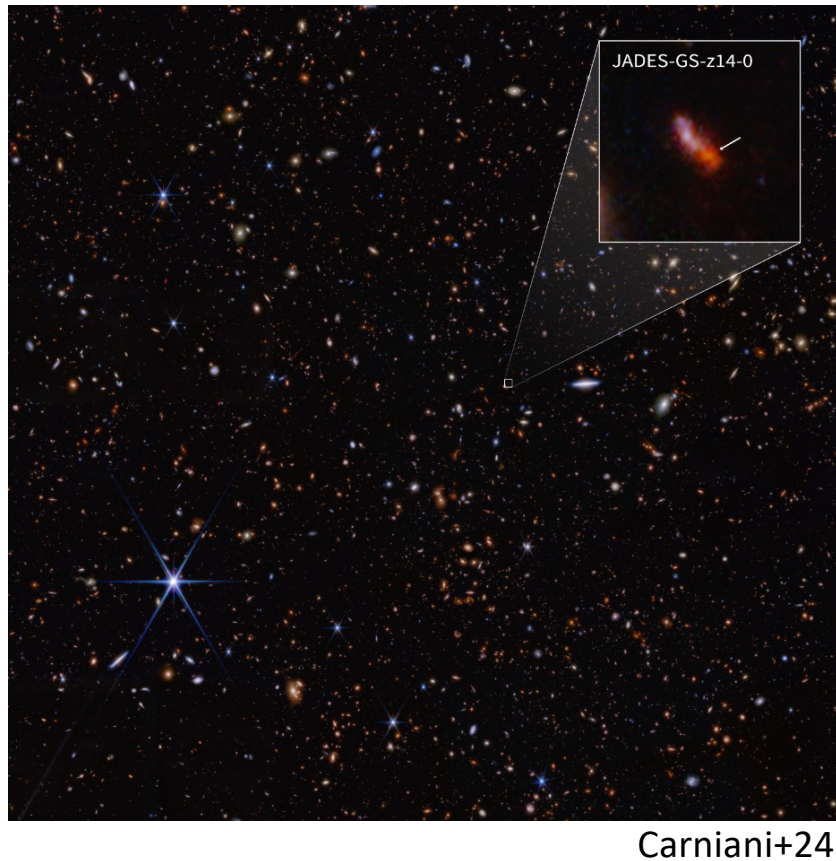


Carniani+24



- JADES: $z=14.2$ (135億年前) の銀河 **GS-z14-0** まで報告 (Carniani+24ab, Helton+24, Schouws+24)
- 距離は **分光で確定**。炭素、酸素輝線 → 元素組成
- 宇宙初期 ($z>10$) で、約20天体以上が分光同定。宇宙初期で、予想以上に星が作られている (早く銀河が成長)

2) 予想を超える明るい銀河

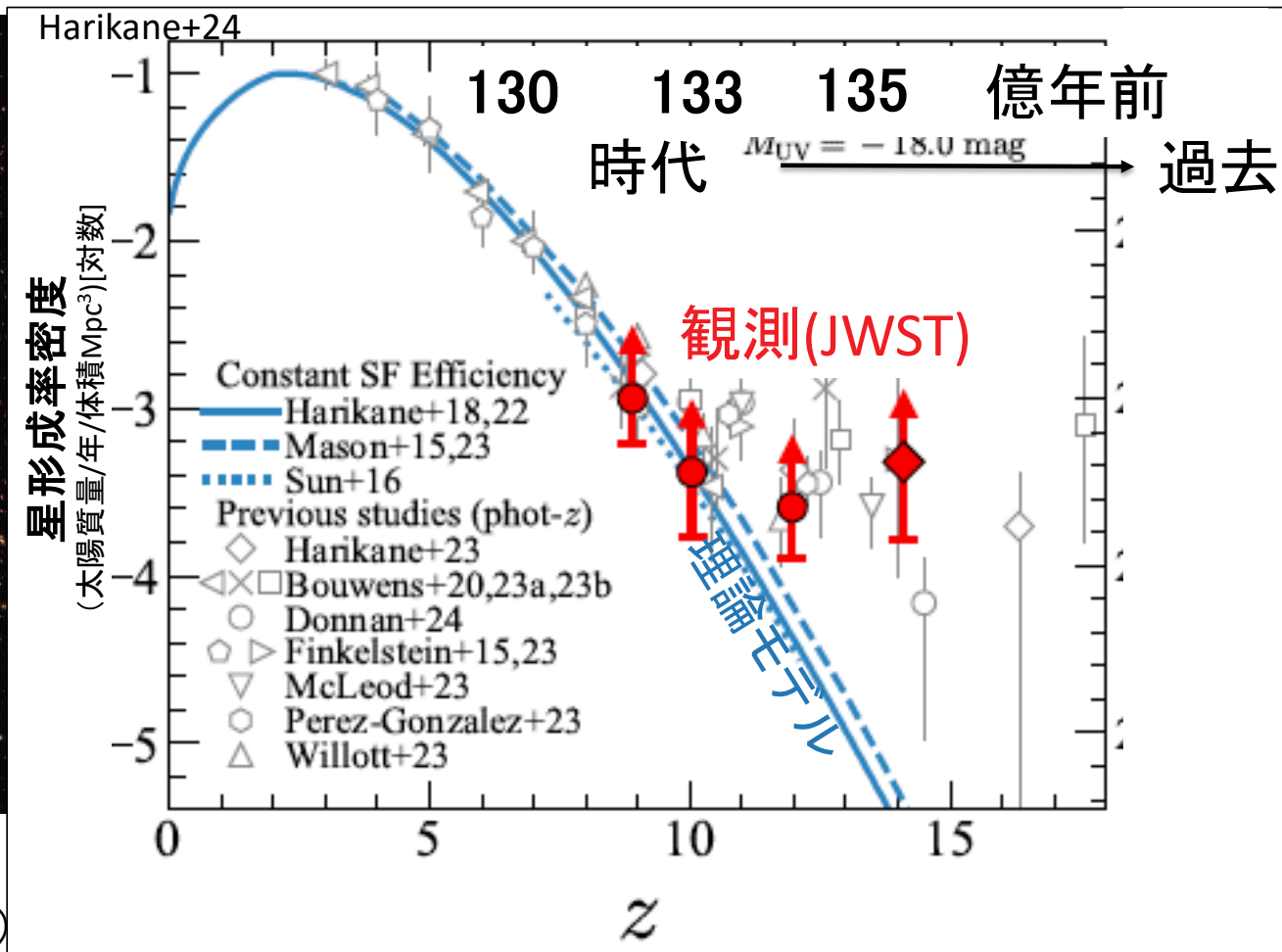


- JADES: $z=14.2$ (135億年前) の銀河 **GS-z14-0** まで報告 (Carniani+24ab, Helton+24, Schouws+24)
- 距離は **分光で確定**。炭素、酸素輝線 → 元素組成
- 宇宙初期 ($z > 10$) で、約20天体以上が分光同定。宇宙初期で、予想以上に星が作られている (早く銀河が成長)

2) 予想を超える明るい銀河



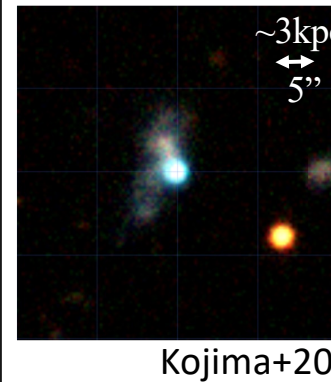
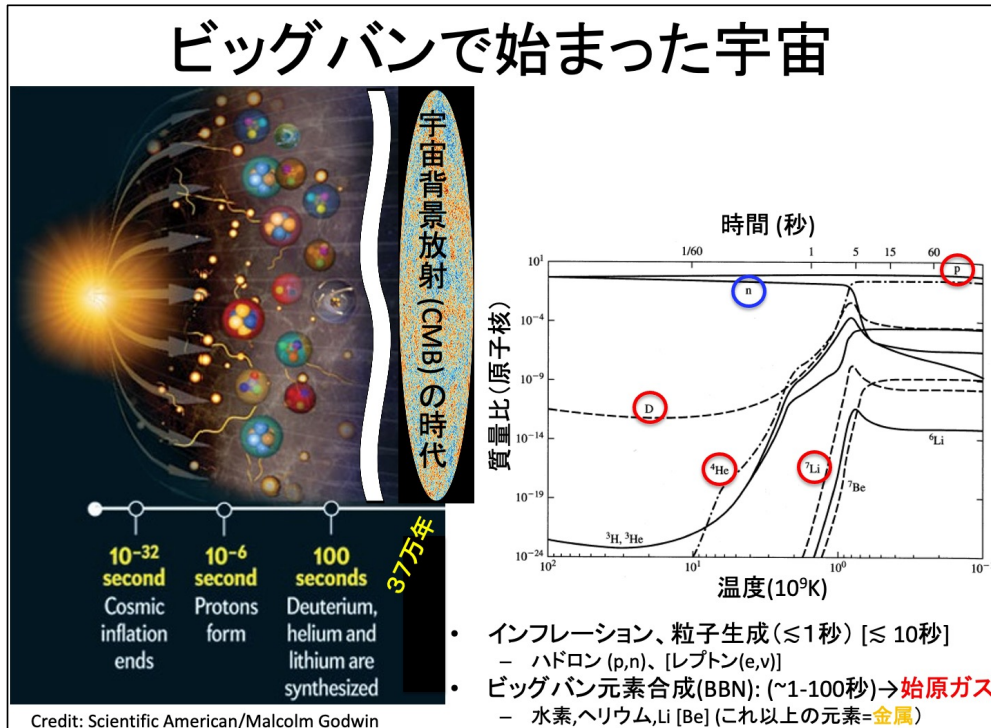
播金(助教)



- JADES: $z=14.2$ (135億年前)
- 距離は**分光で確定**。炭素、酸素輝線→元素組成
- 宇宙初期($z>10$)で、約20天体以上が分光同定。宇宙初期で、予想以上に星が作られている(早く銀河が成長)

より初期の宇宙へ
ービッグバン直後の宇宙ー

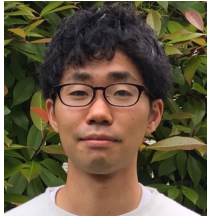
ビッグバン元素合成



すばる望遠鏡



- 軽元素: 始原ガス
- 極金属欠乏銀河 (近傍)
- すばる望遠鏡 → 原始Heの組成比: He/H (初期宇宙での宇宙膨張率など)

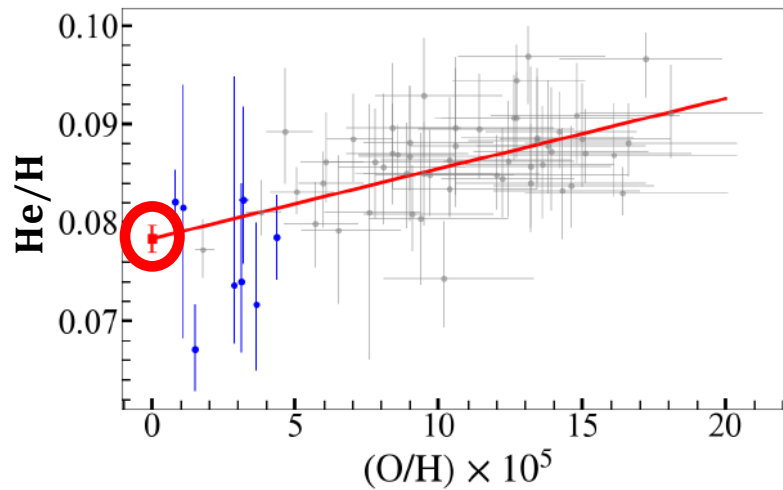


松本(D2)

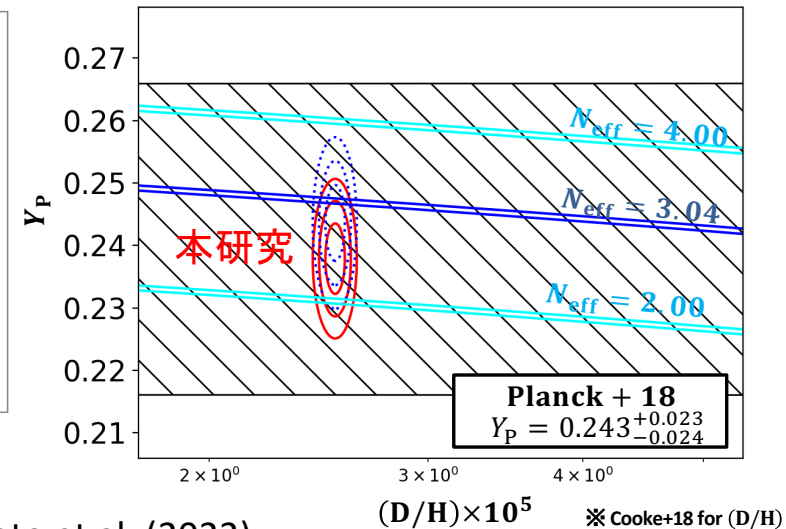
原始ヘリウム組成比 Y_p



柳澤(M2)

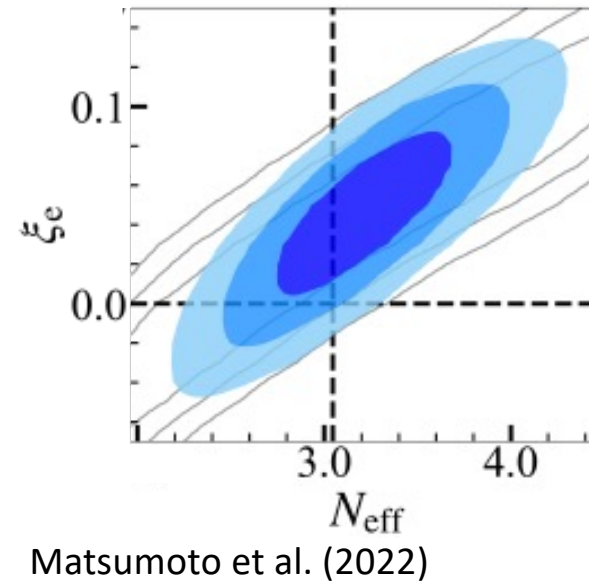
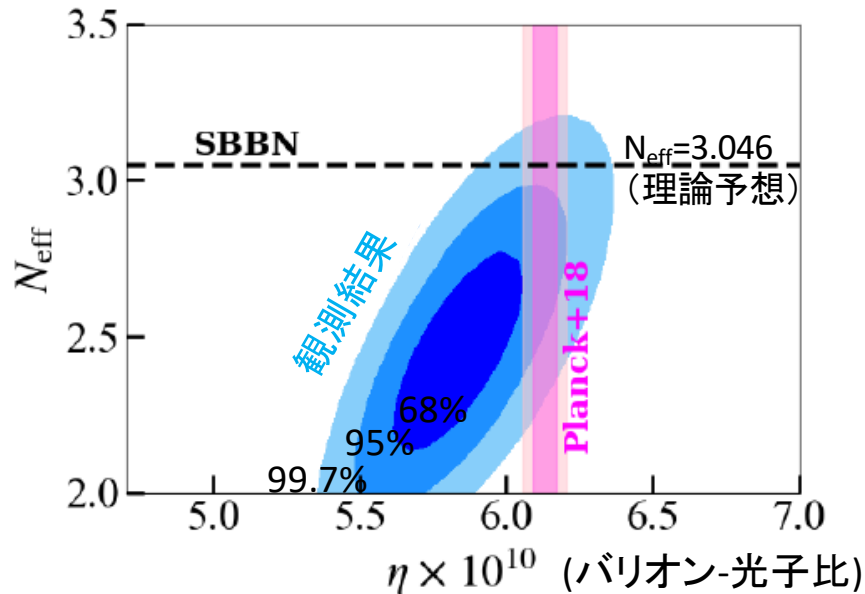


Matsumoto et al. (2022)



- ゼロ金属量におけるHe組成「個数」比 $\text{He}/\text{H} = 0.0777 \pm 0.0015$ ($\equiv y$)
- 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 $N_{\text{eff}} = 2.49 (+0.17/-0.26)$: 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？ $\rightarrow \xi_e = 0.05^{(+0.03)/(-0.02)}$
 - 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

- 観測で探る宇宙
 - 宇宙がどのように出来たか？宇宙史の理解の取り組み
- 観測データと解析
- ジェイムズ・ウェッブ(JWST)宇宙望遠鏡の観測
 - 優れた分光観測能力(～130億年より前の時代)
 - 1) 宇宙再電離史の解明 (理論で説明できないほど遅い？)
 - 2) 理論予想を超える、多数の明るい銀河
- すばるの観測(ビッグバン直後の初期宇宙)
 - ビッグバン元素合成がもたらした少ないHe
 - 大きいレプトン非対称性？
 - さらなる観測で検証へ