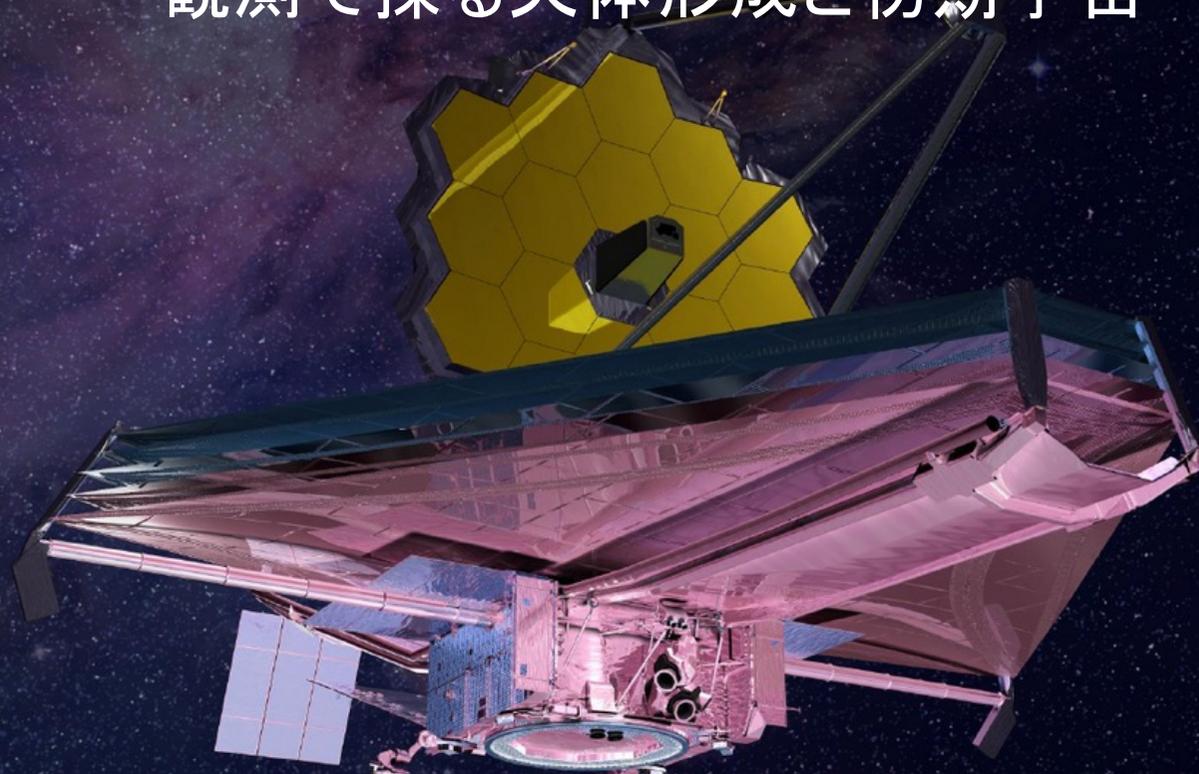


最先端研究I  
観測的宇宙論  
---観測で探る天体形成と初期宇宙---

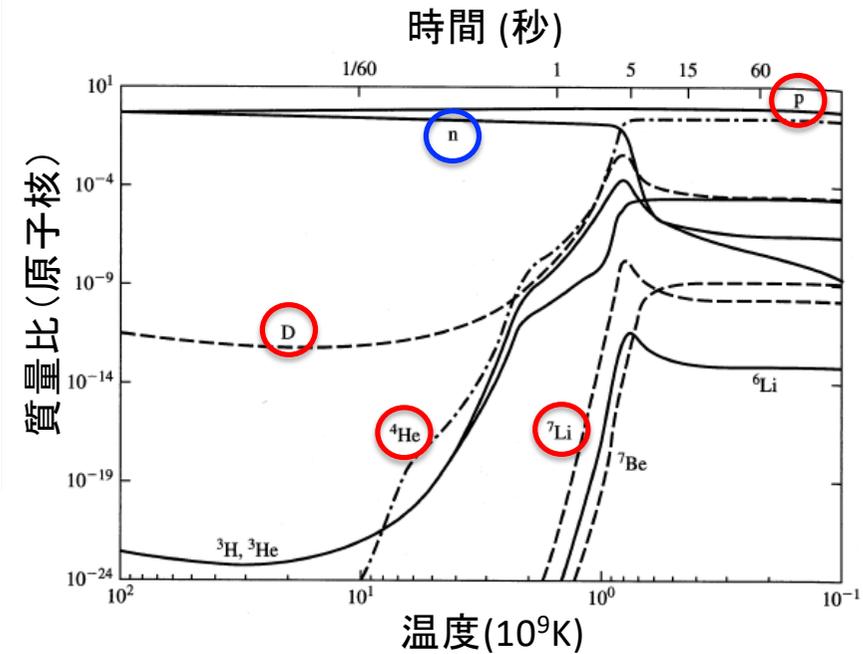


大内 正己  
東京大学 宇宙線研究所

# ビッグバンで始まった宇宙



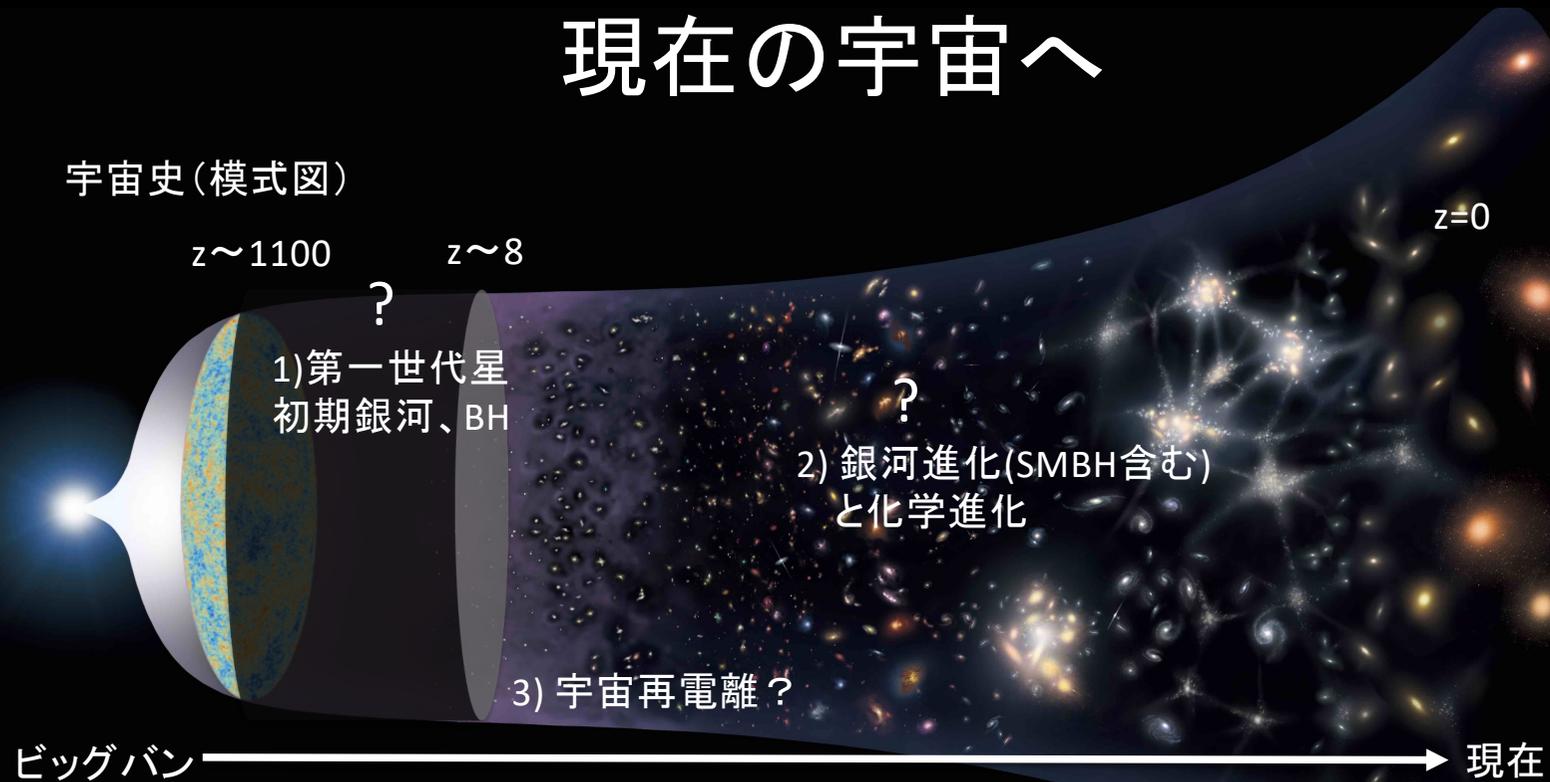
Credit: Scientific American/Malcolm Godwin



- 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=重元素 又は 金属)

# 熱いビッグバン宇宙から 現在の宇宙へ

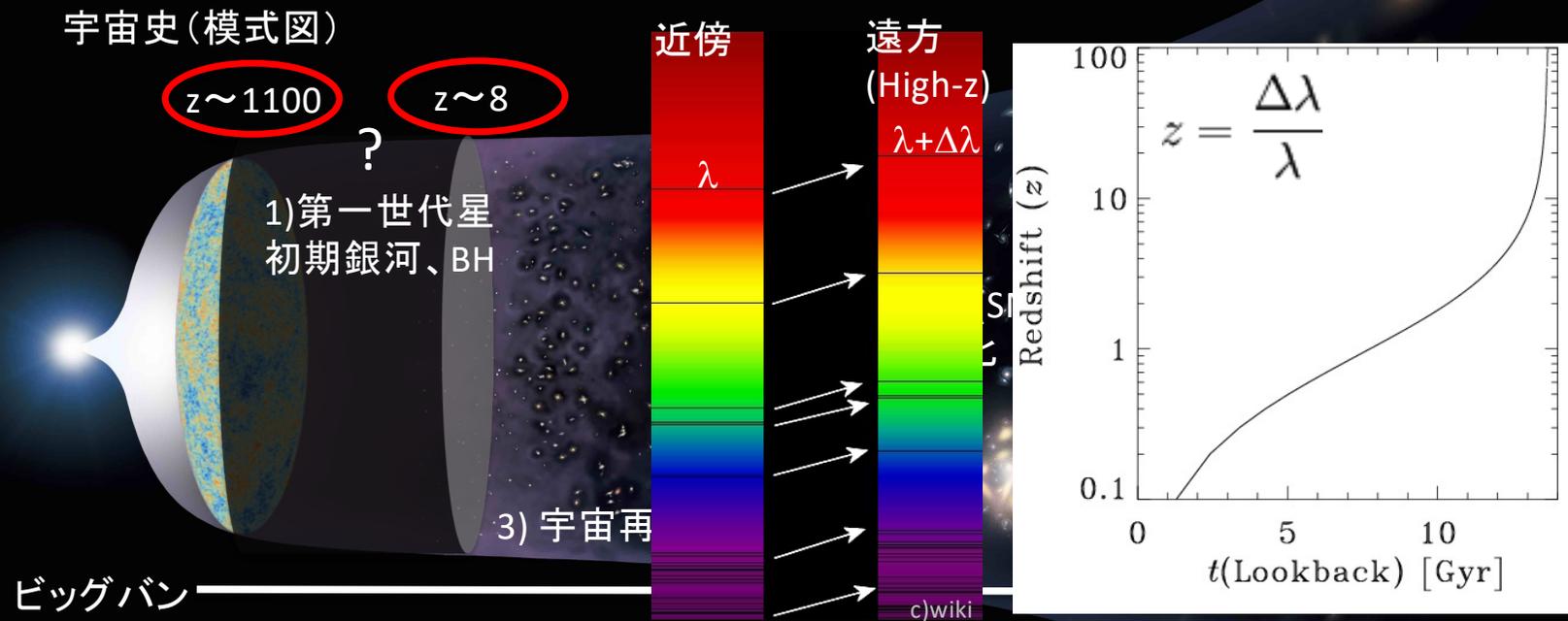
宇宙史 (模式図)



- 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

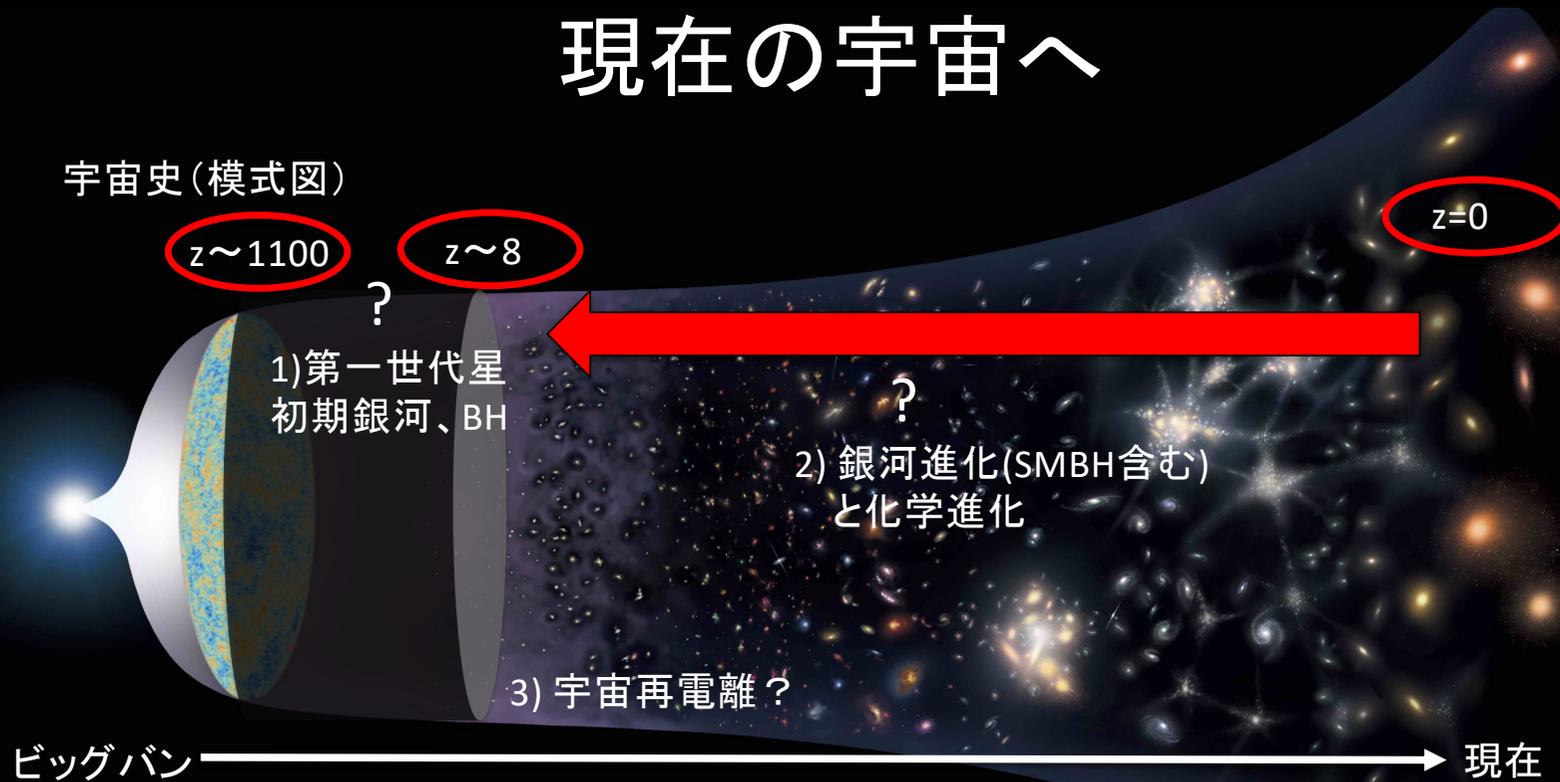
# 熱いビッグバン宇宙から 現在の宇宙へ



- 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

# 熱いビッグバン宇宙から 現在の宇宙へ

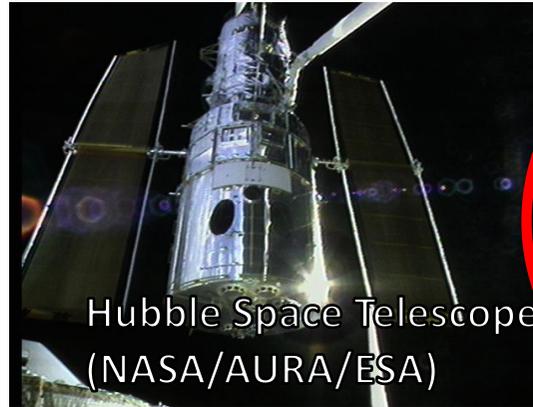
宇宙史 (模式図)

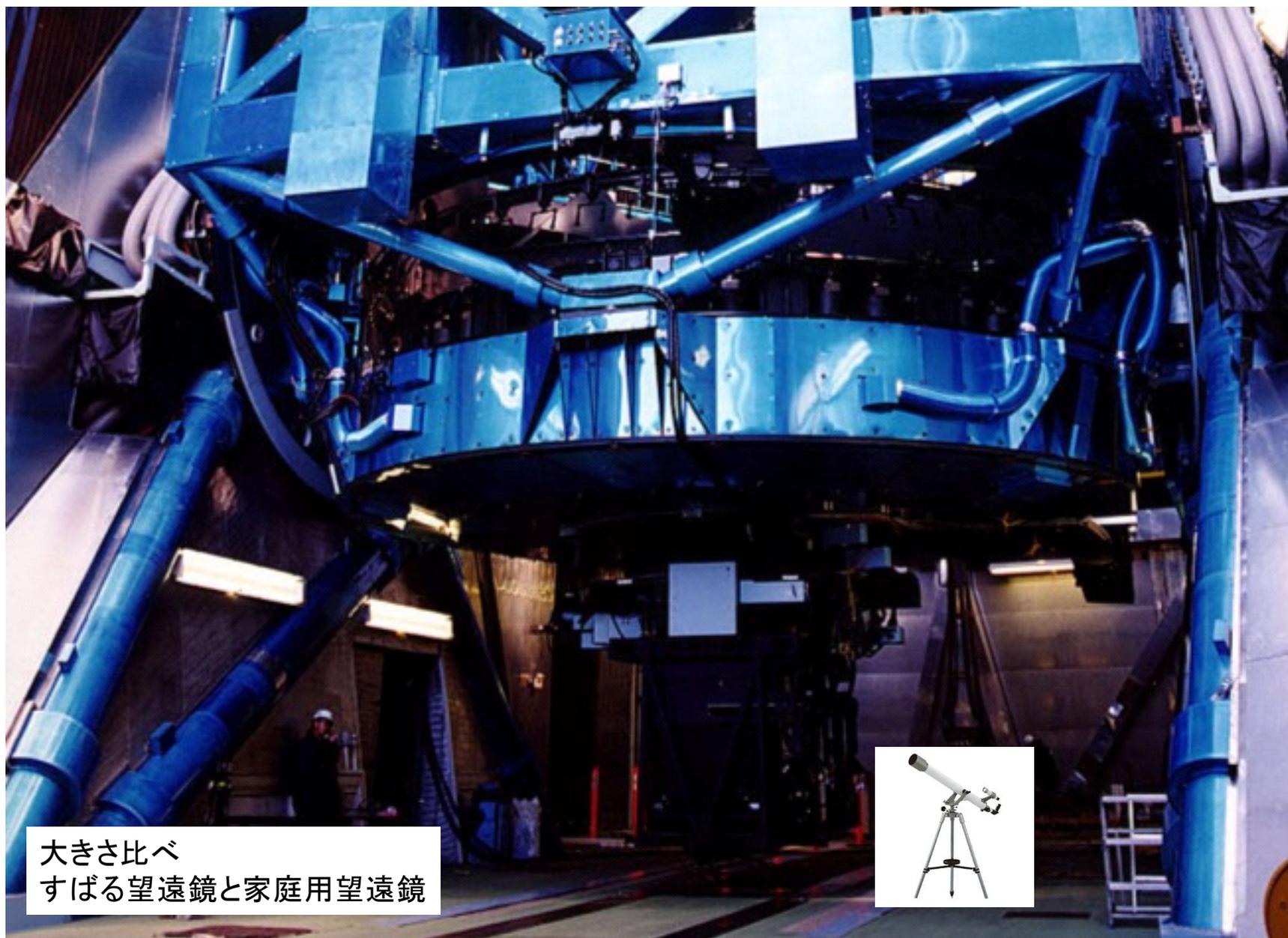


- 銀河が宇宙の基本構造
- 課題

- 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

# 大型望遠鏡





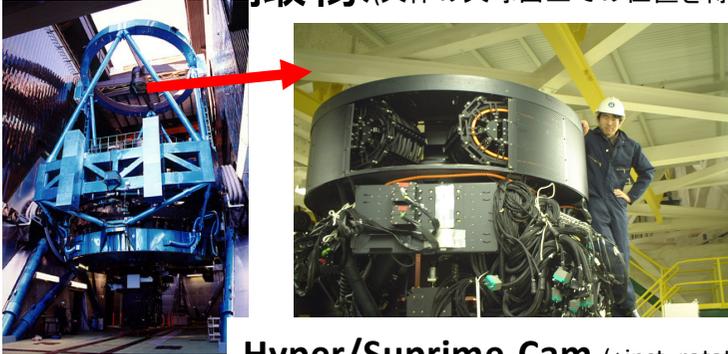
大きさ比べ  
すばる望遠鏡と家庭用望遠鏡

## 光学大型望遠鏡による観測

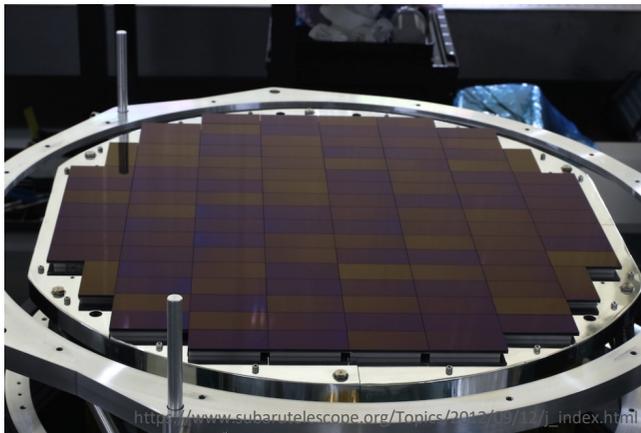
- 観測はどのように行われるか？
- 観測データはどのようなものか？
- どこまで宇宙が見えたか？

# 観測装置

撮像 (天体の天球面上での位置を得る,XY)



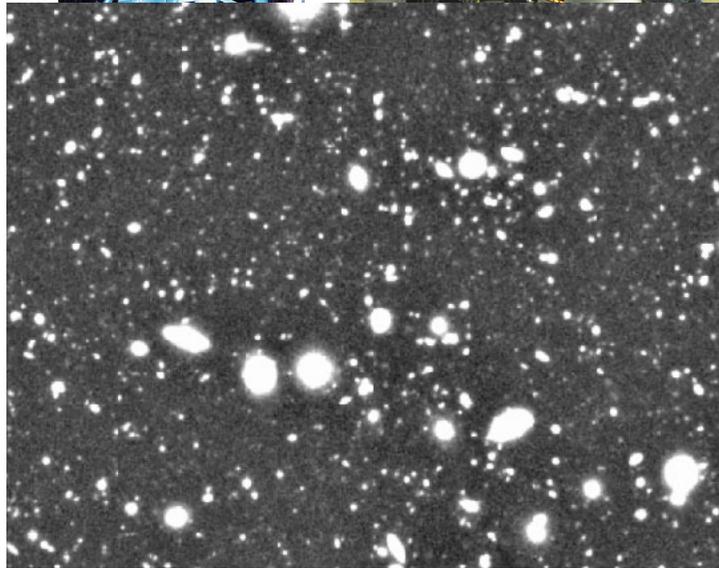
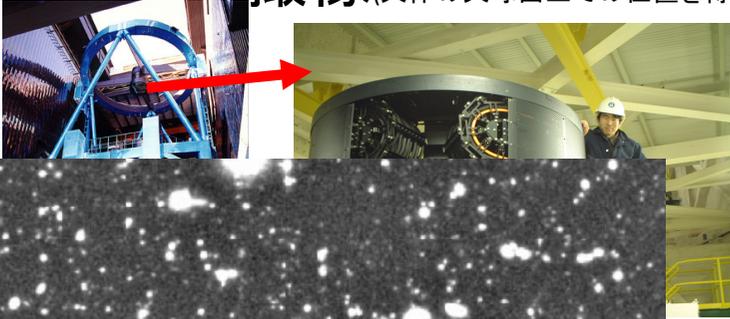
Hyper/Suprime-Cam (+inst. rotator)



CCDカメラ (116個のCCDs)  
Hyper Suprime-Cam 8億7000万画素

# 観測装置

撮像 (天体の天球面上での位置を得る,XY)



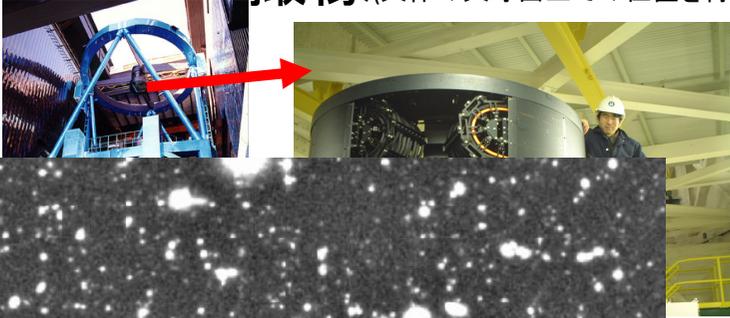
. rotator)



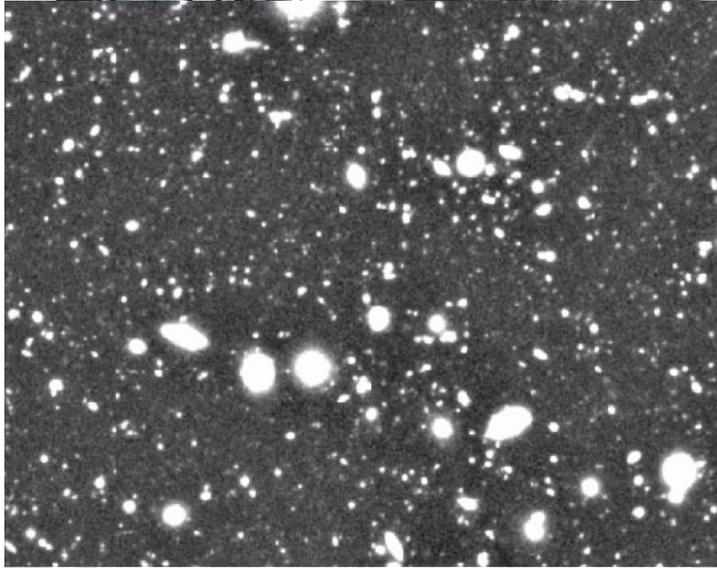
CCDカメラ (116個のCCDs)  
Hyper Suprime-Cam 8億7000万画素

# 観測装置

撮像 (天体の天球面上での位置を得る, XY)



. rotator)



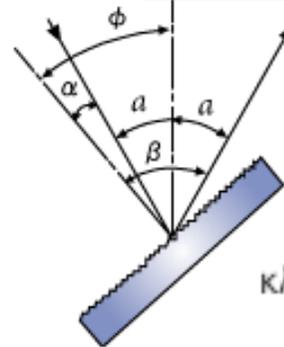
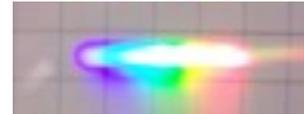
CCDカメラ (116個のCCDs)  
Hyper Suprime-Cam 8億7000万画素

分光 (天体の赤方偏移を測る, z)

Keck/DEIMOS



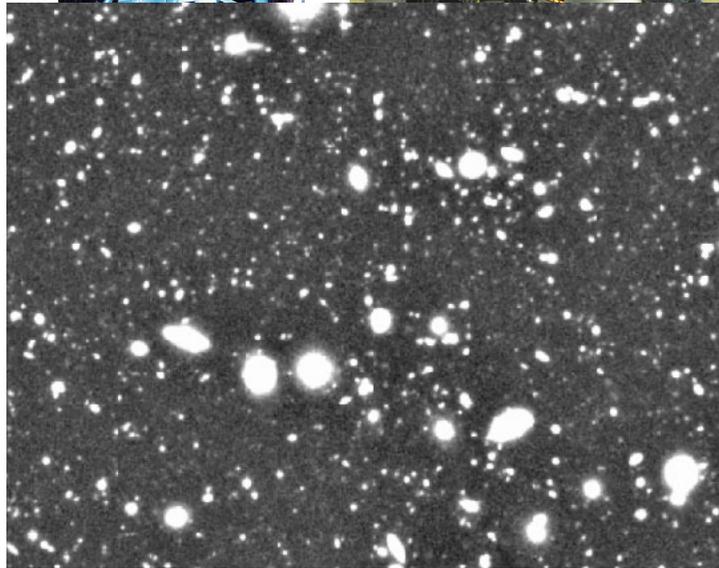
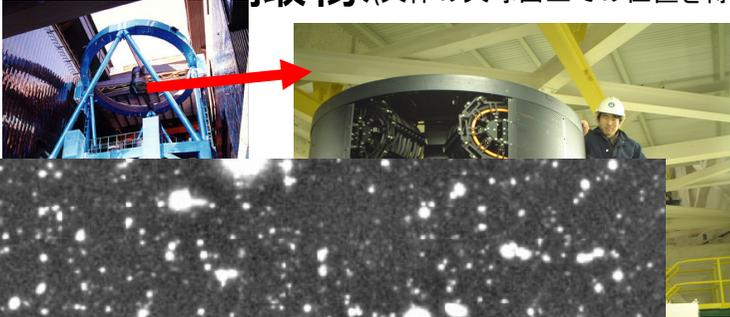
回折格子



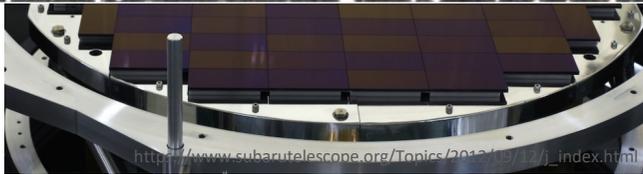
$$\kappa\lambda = 2 d \sin\phi \cos\alpha$$

# 観測装置

撮像 (天体の天球面上での位置を得る, XY)



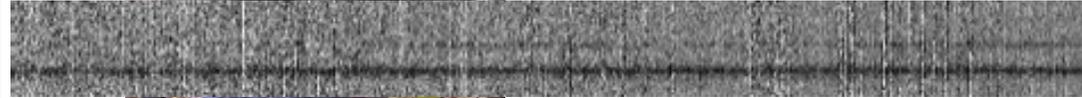
rotator)



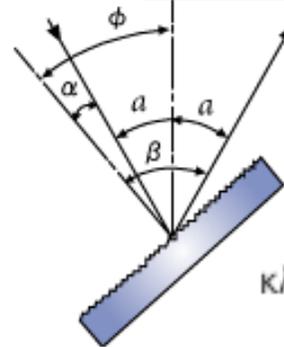
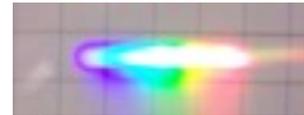
CCDカメラ (116個のCCDs)  
Hyper Suprime-Cam 8億7000万画素

分光 (天体の赤方偏移を測る, z)

Keck/DEIMOS

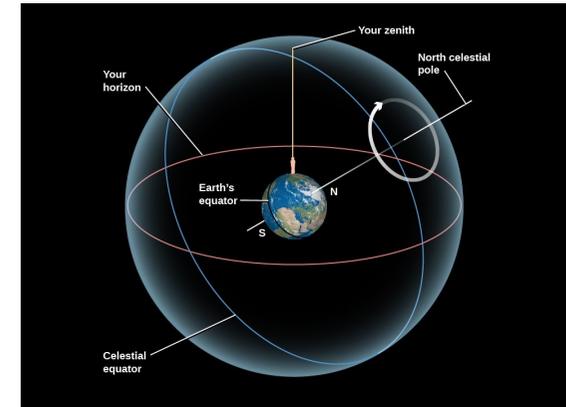


回折格子



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

# 観測する天域



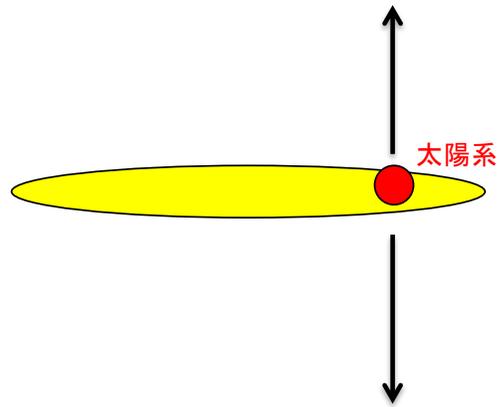
- Quiz:

- 過去(つまり遠方)の宇宙を見るには、望遠鏡をどこに向けるべき？
  - 「>10億光年の大きさなら宇宙はほぼ一様。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。

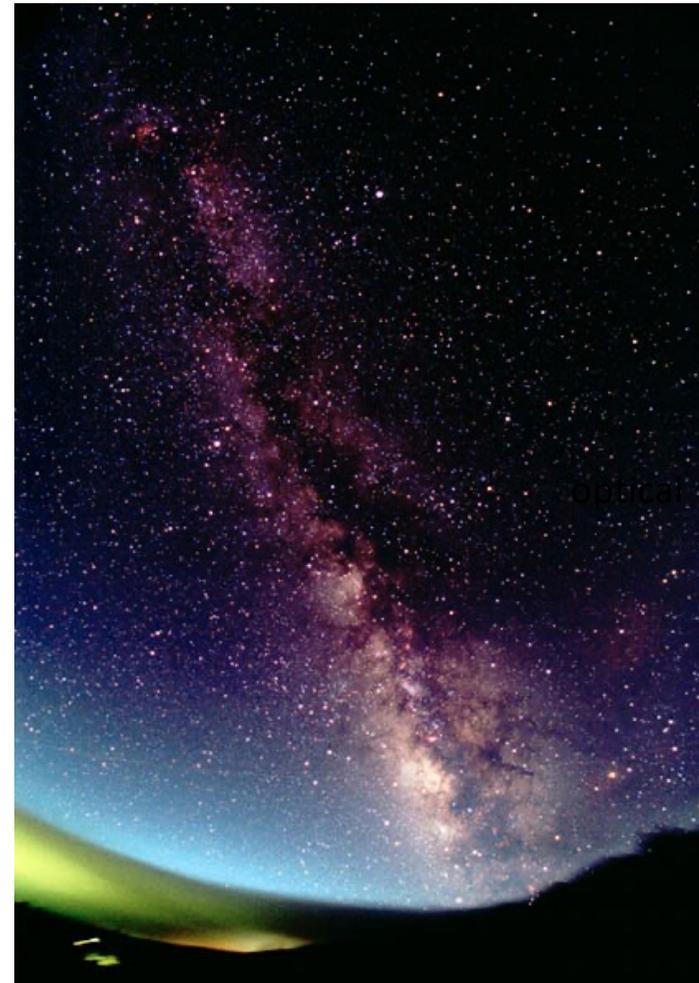
Hint: 遠方宇宙の観測は春と秋に行われる

# 観測する天域

- 銀極方向（高銀緯方向）



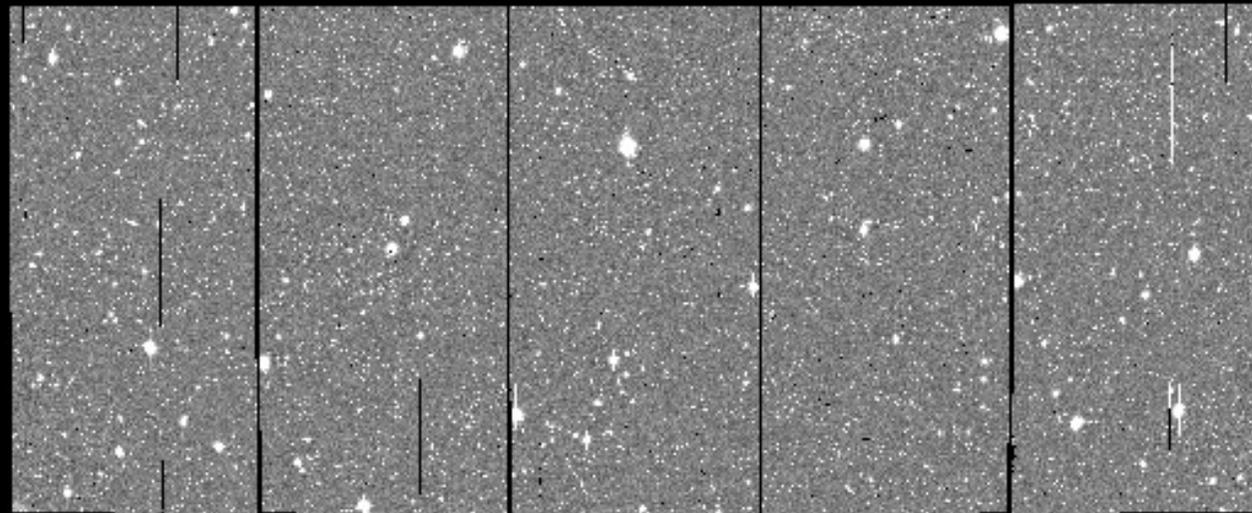
天の川銀河を横から見た図

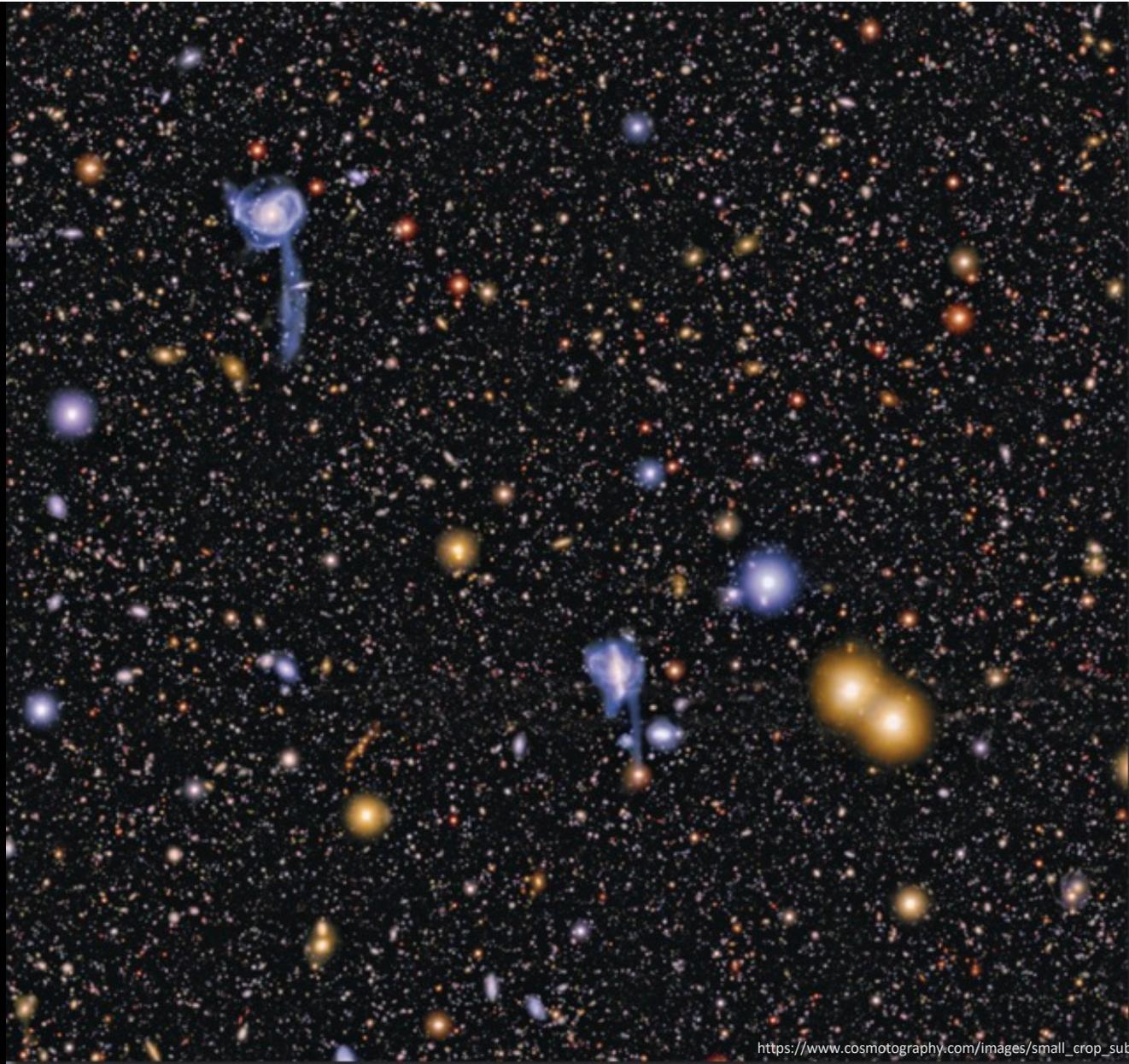




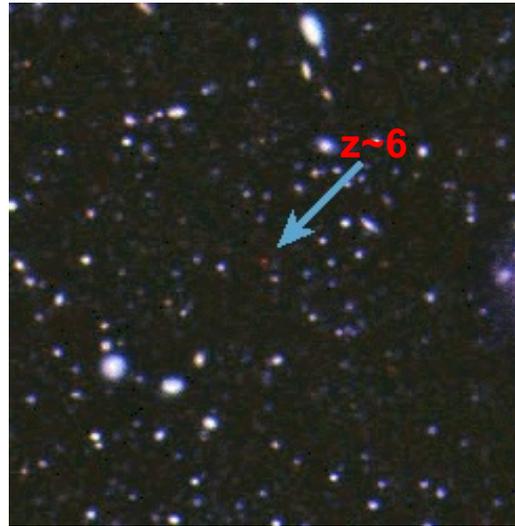


CFHT - Wed Nov 30 17:33:45 HST

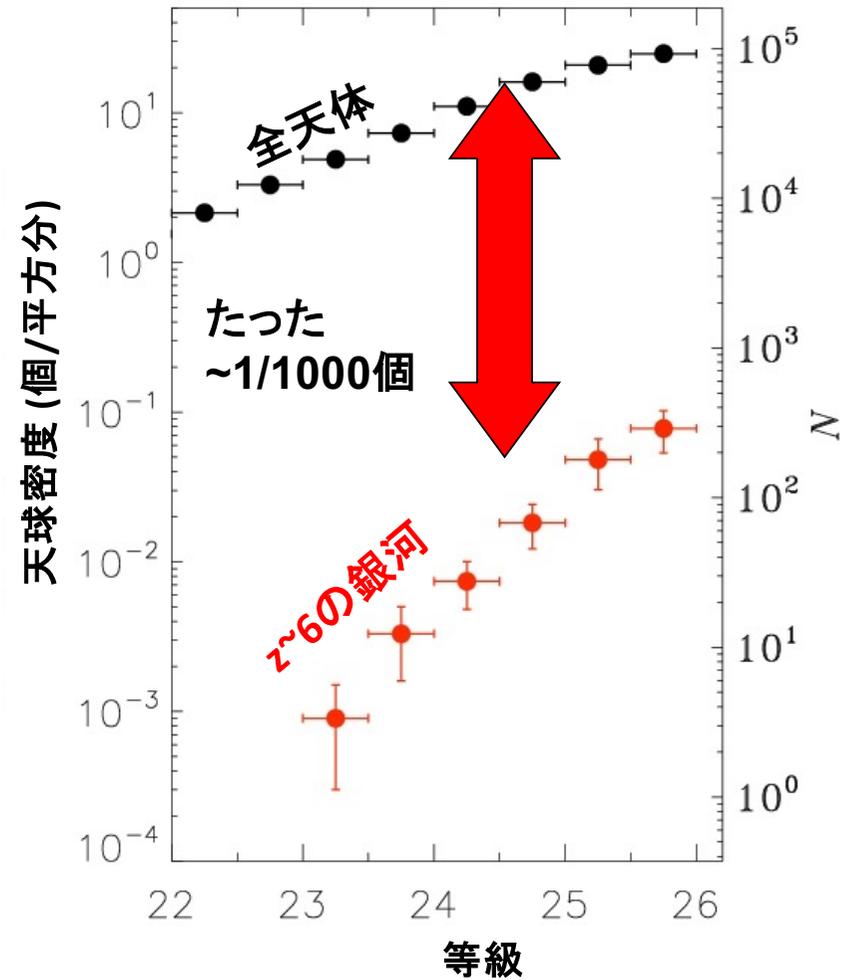




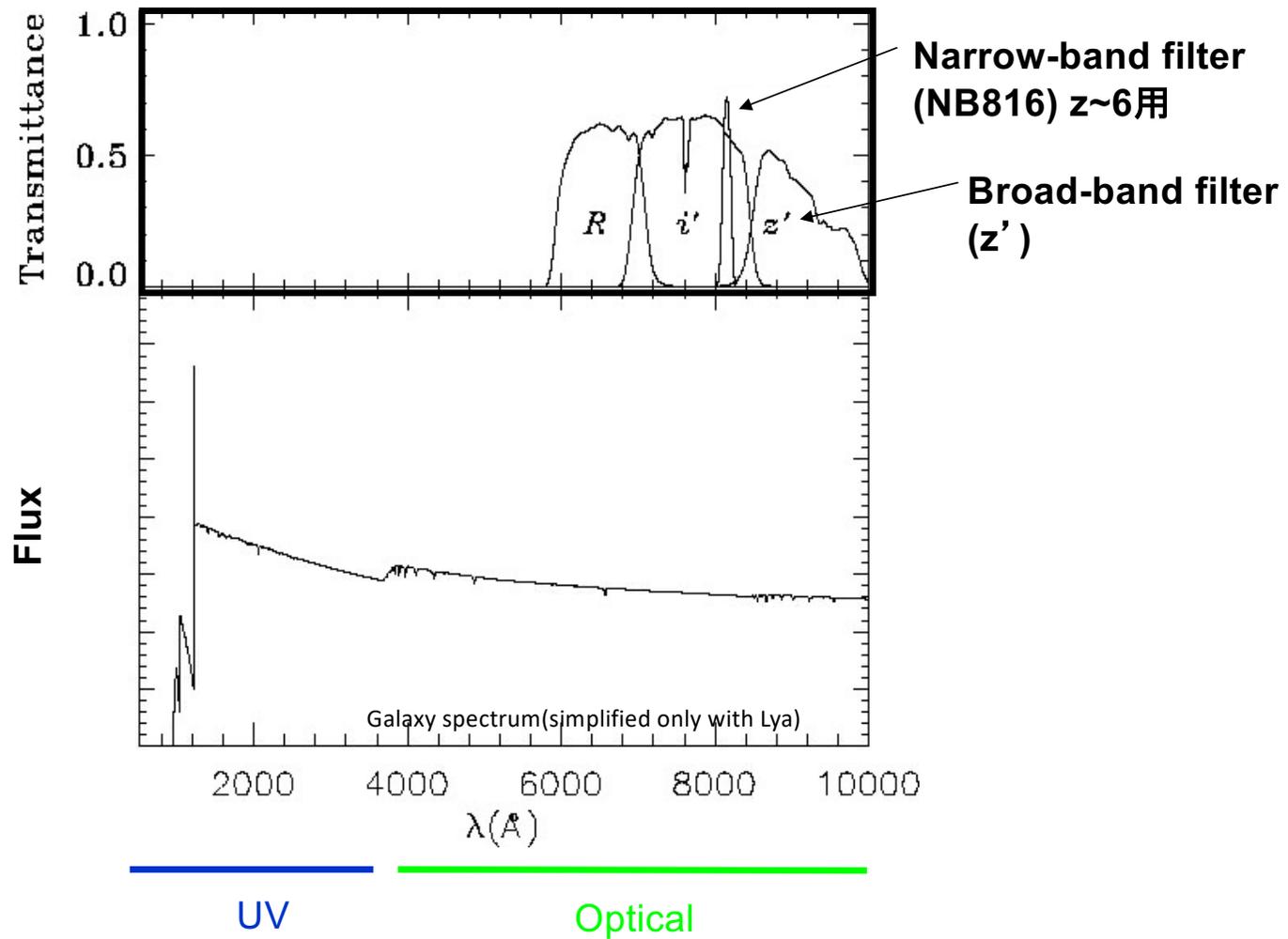
# 前景銀河の海から 遠方の銀河を見つける



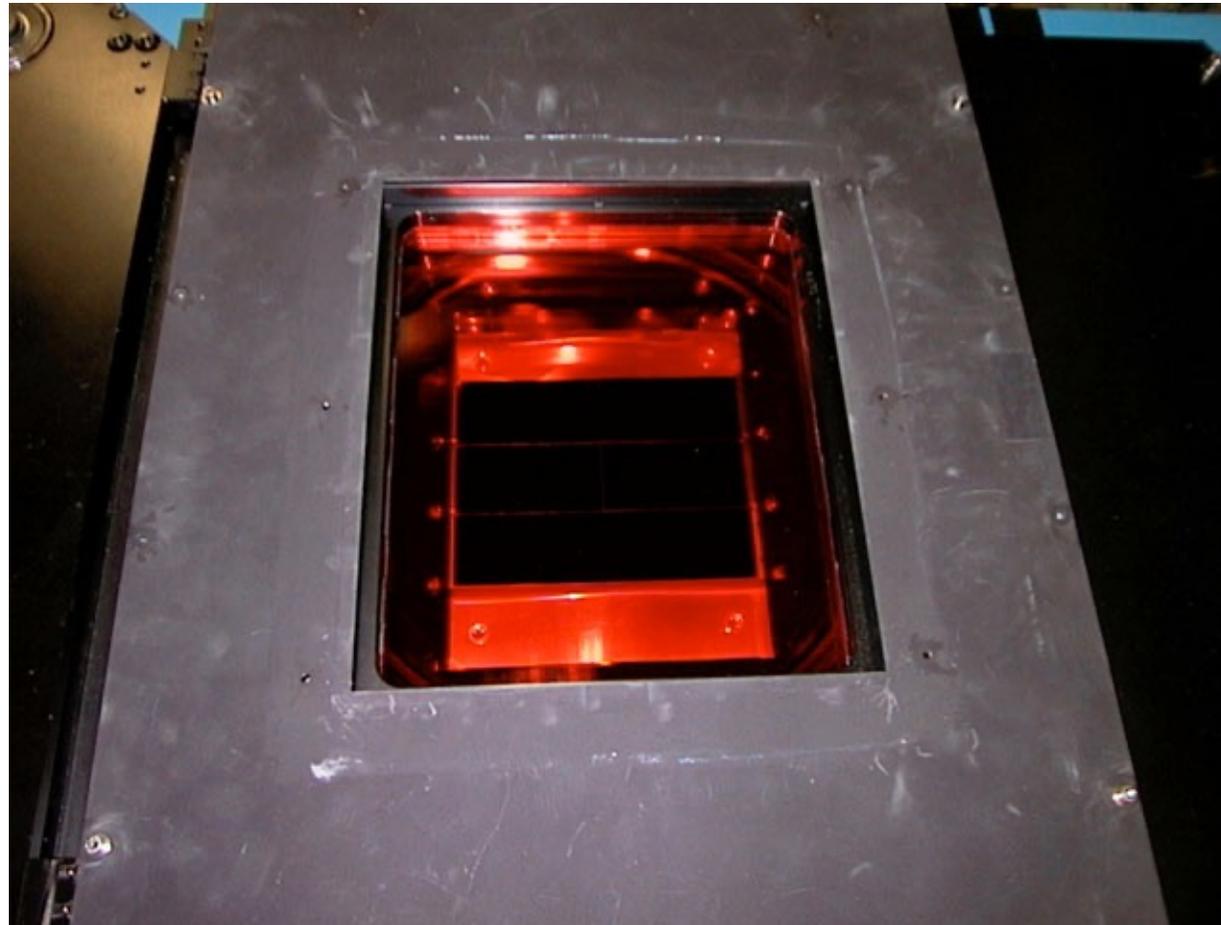
- 撮像データ: ほとんどは前景銀河
  - (例) 赤方偏移6の銀河: 1000個に1個
- 全て分光。赤方偏移を測る?
  - 赤方偏移6の銀河1つ~3時間
  - 375日 (=3000時間/8時間)観測で1個  
→ 現実的に不可能



# 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



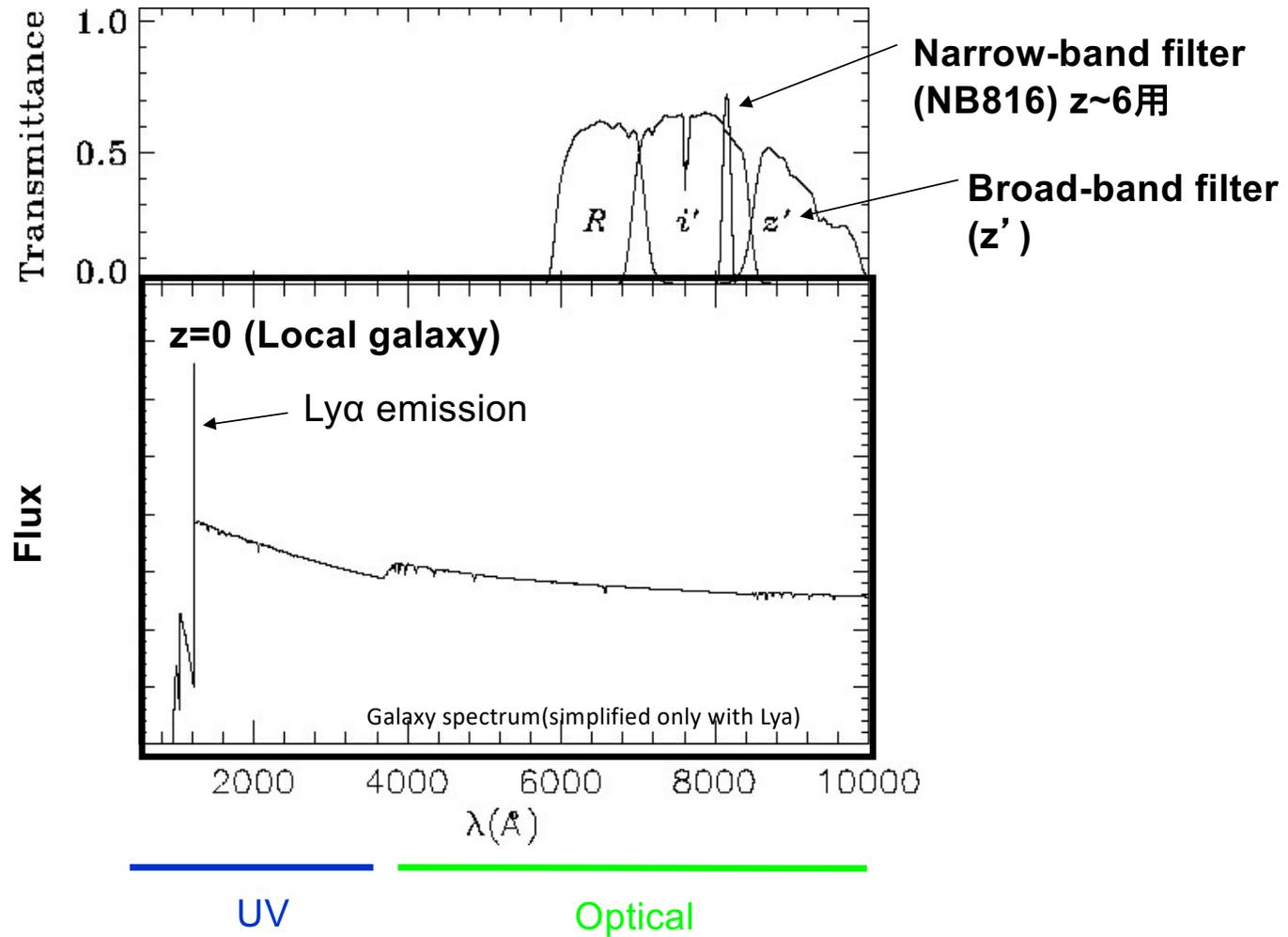
d filter  
用

nd filter

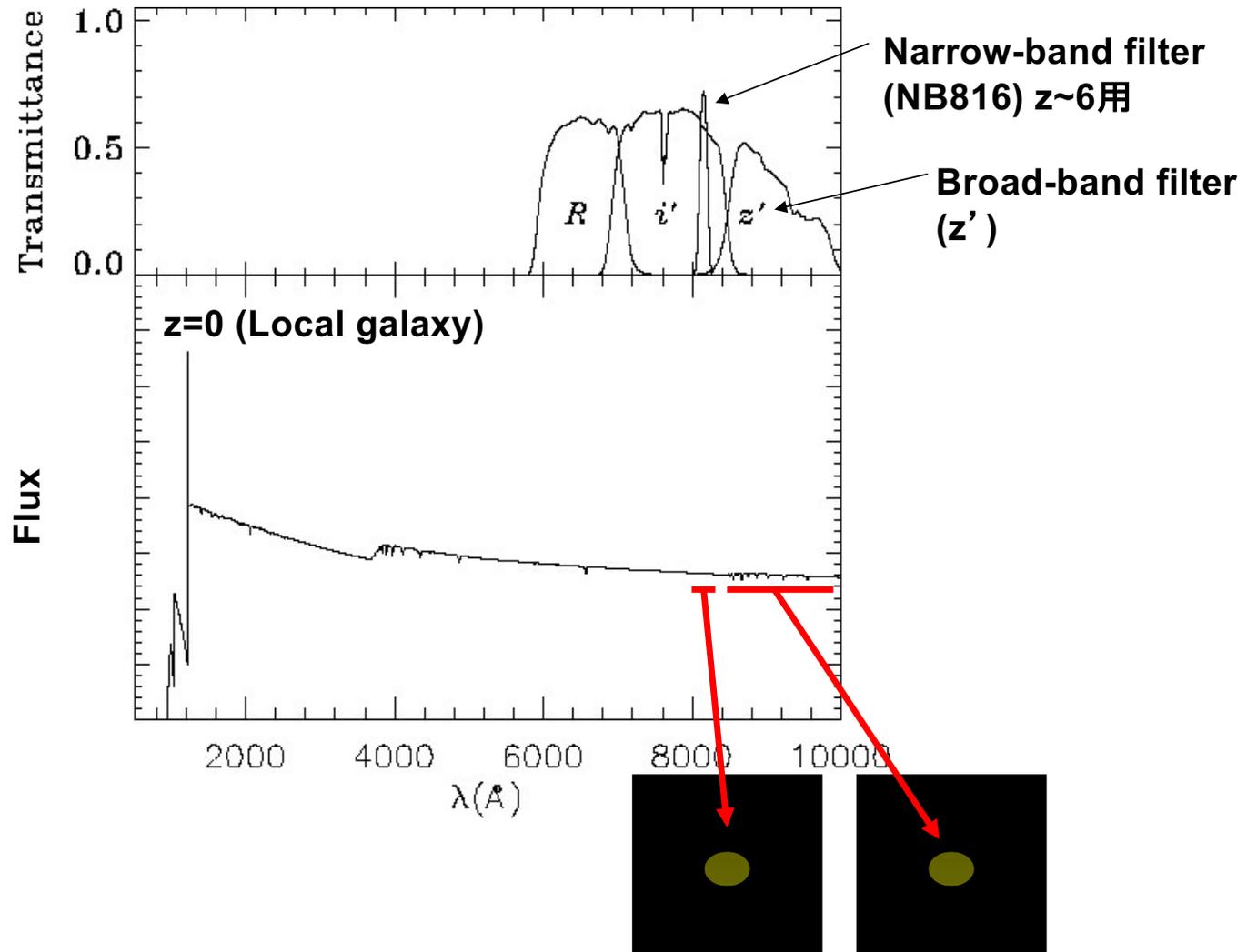
UV

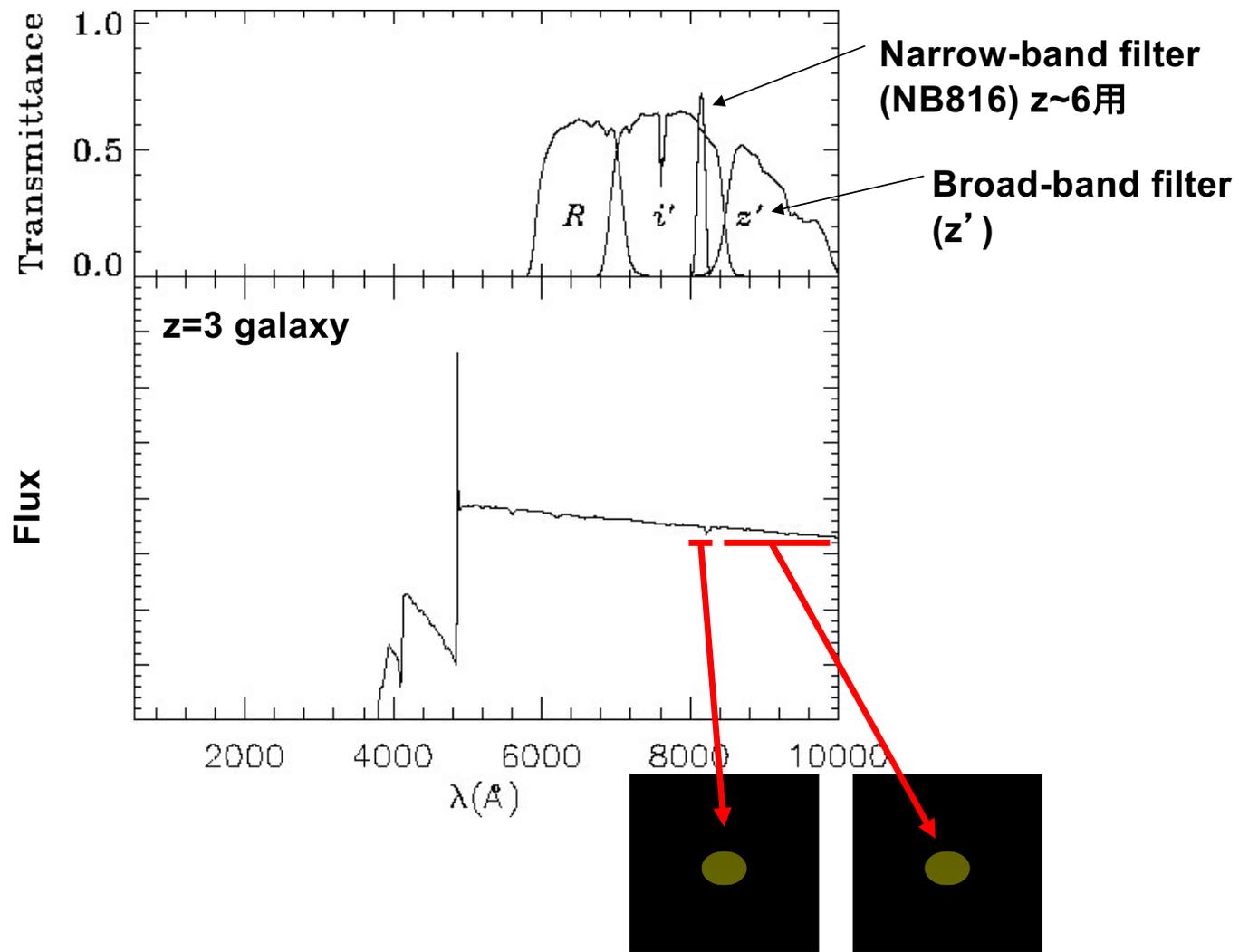
Optical

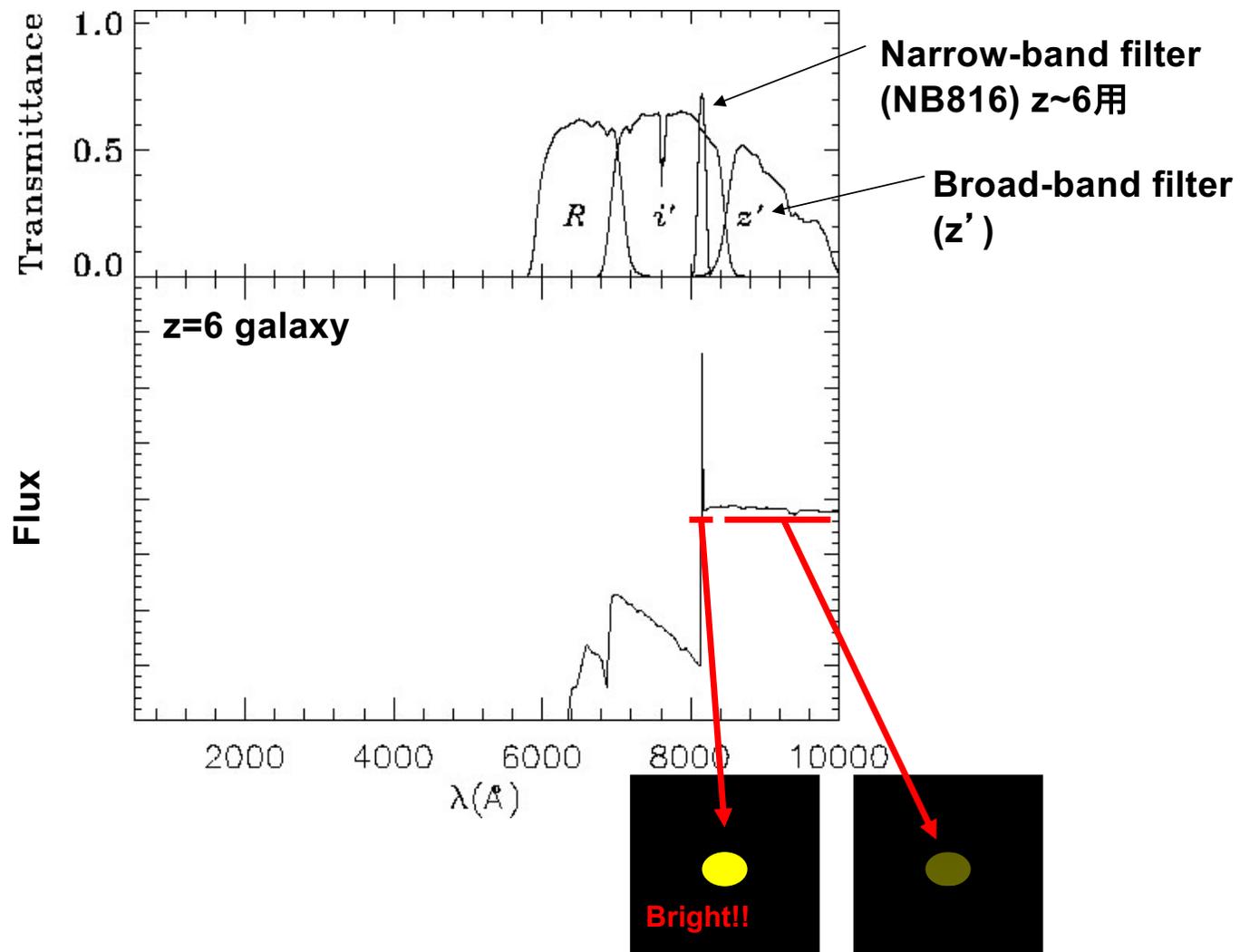
# 遠方の銀河候補を 狭帯域フィルター(**narrow-band filter**)で選択



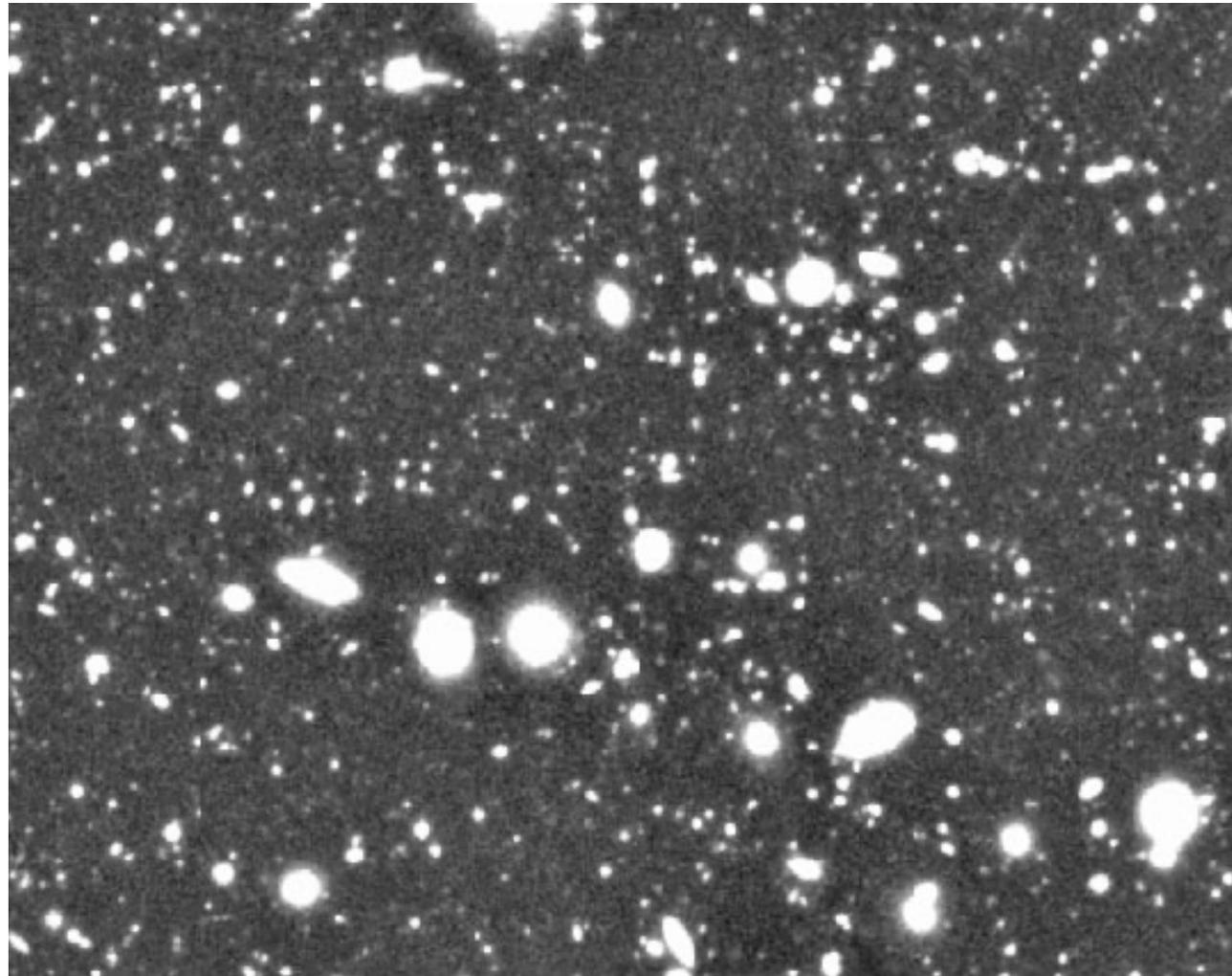
# 遠方の銀河候補を 狭帯域フィルター(**narrow-band filter**)で選択



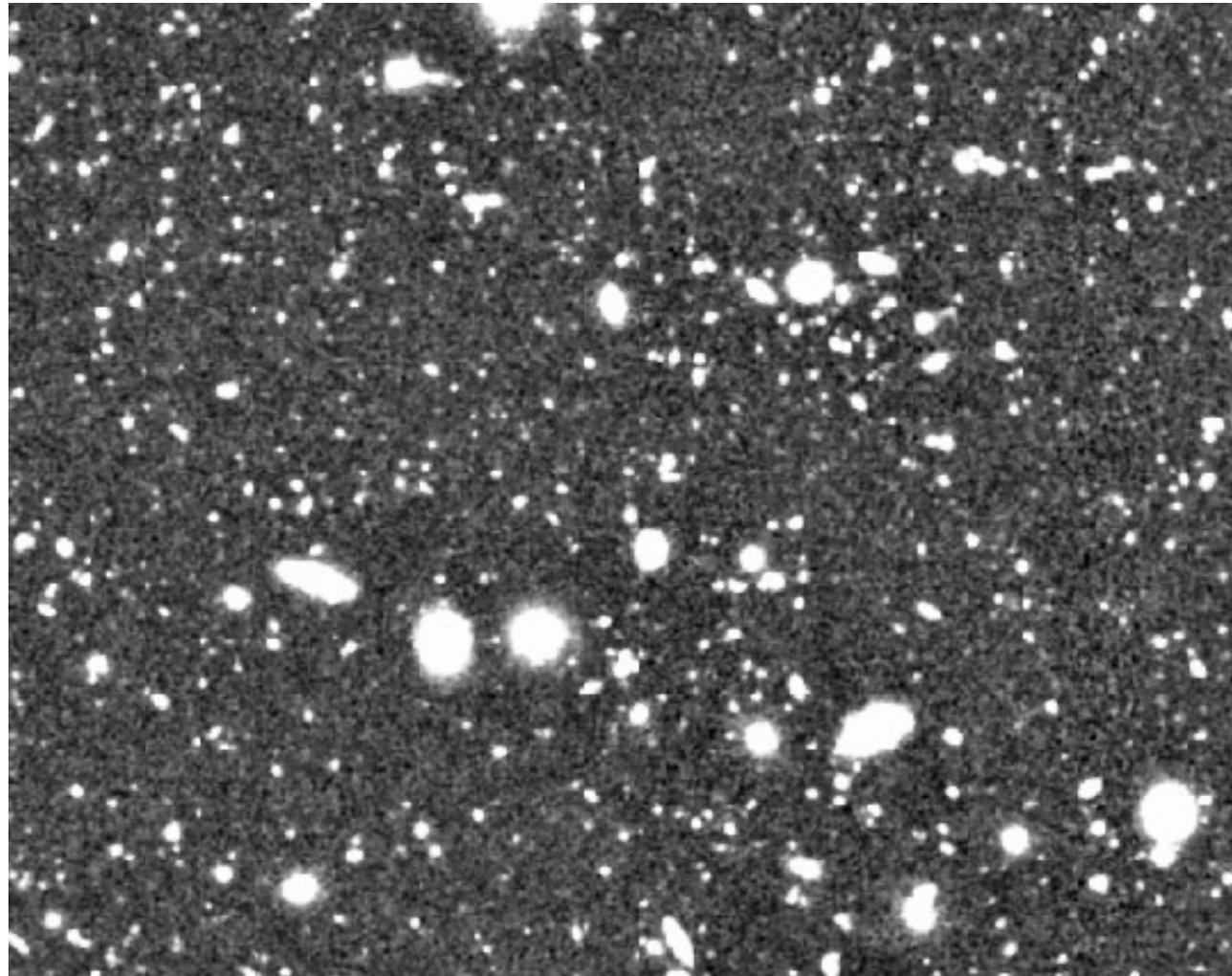




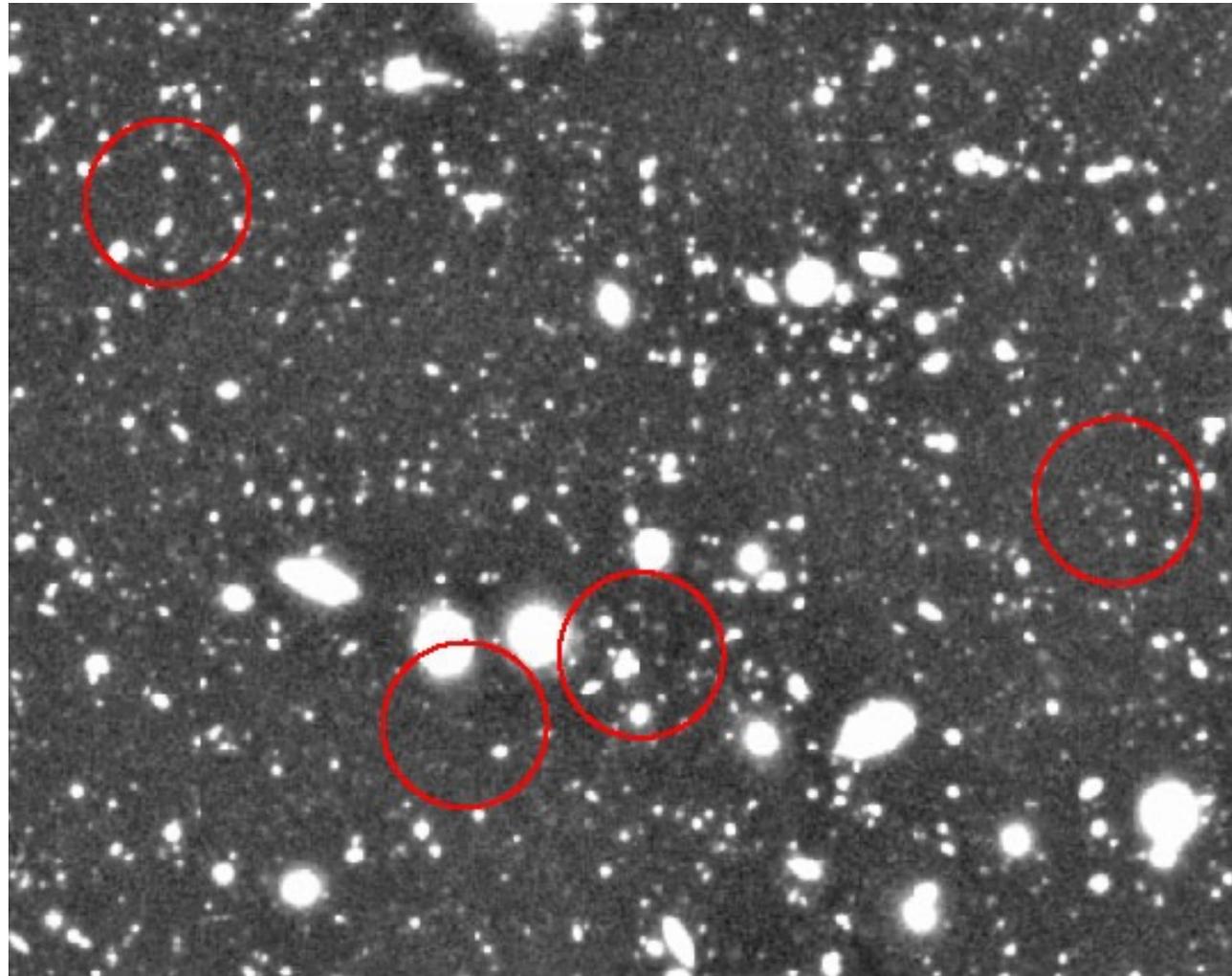
# Broad-Band Image



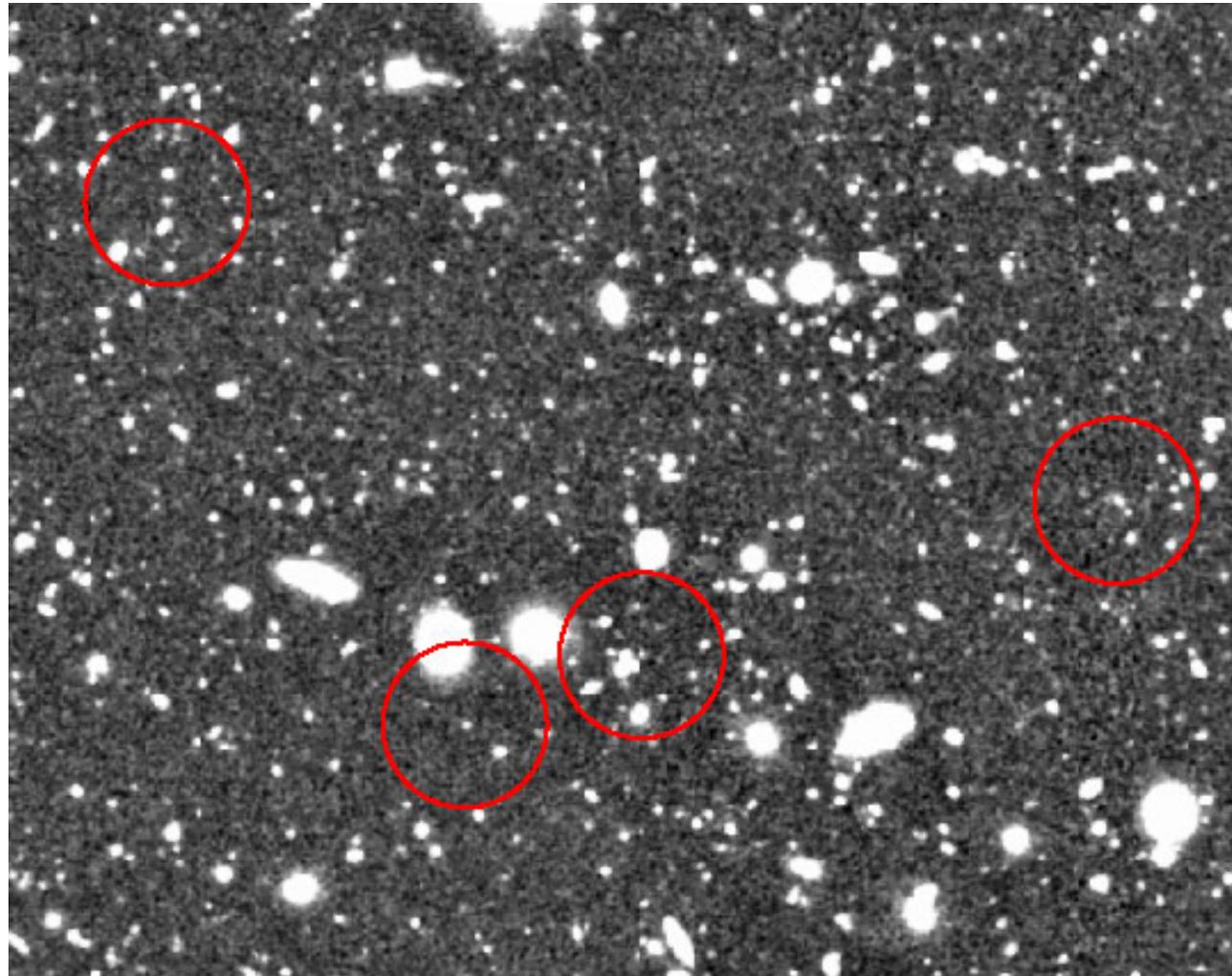
## Narrow-Band Image



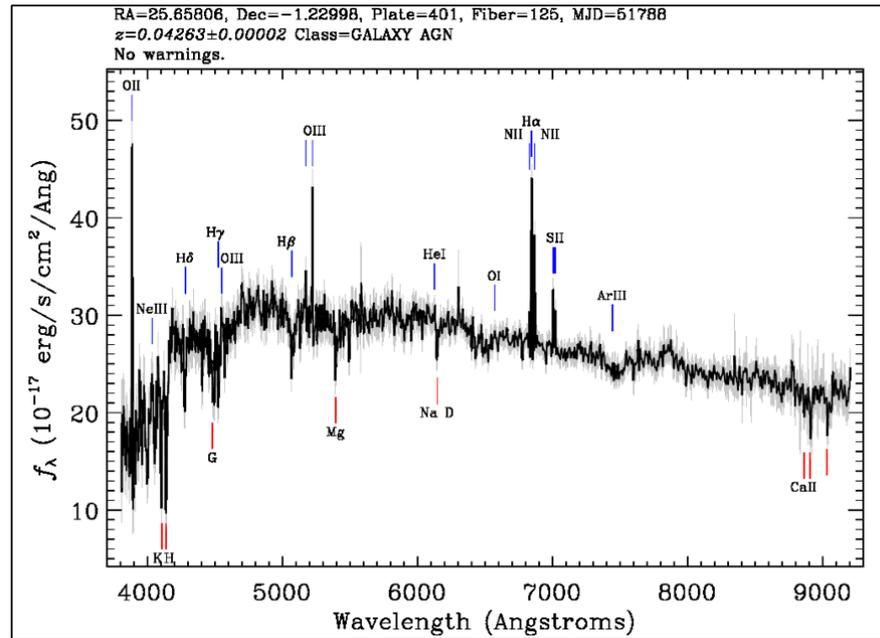
# Broad-Band Image



## Narrow-Band Image



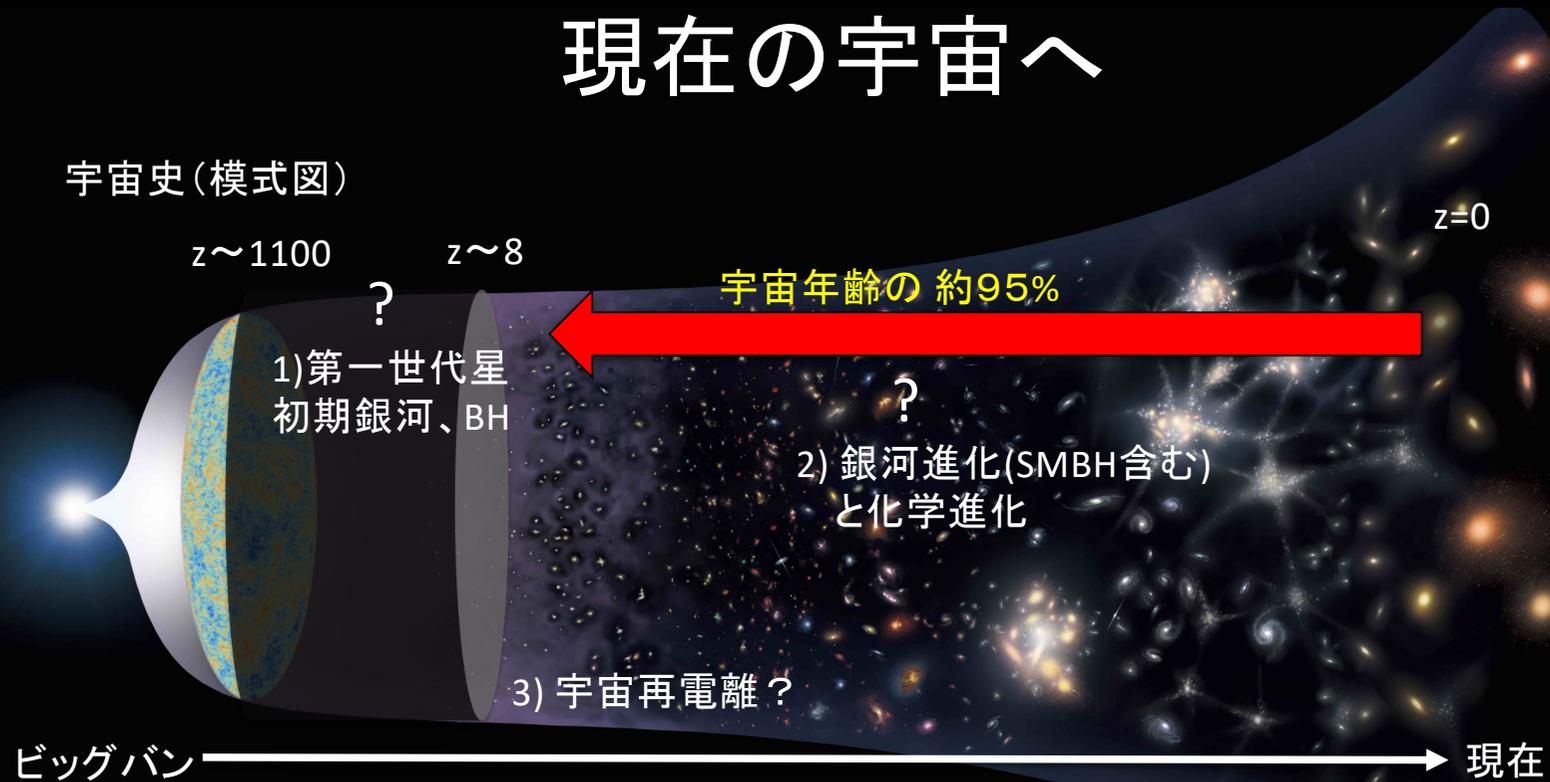
# 前景天体の混入



- 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

# 熱いビッグバン宇宙から 現在の宇宙へ

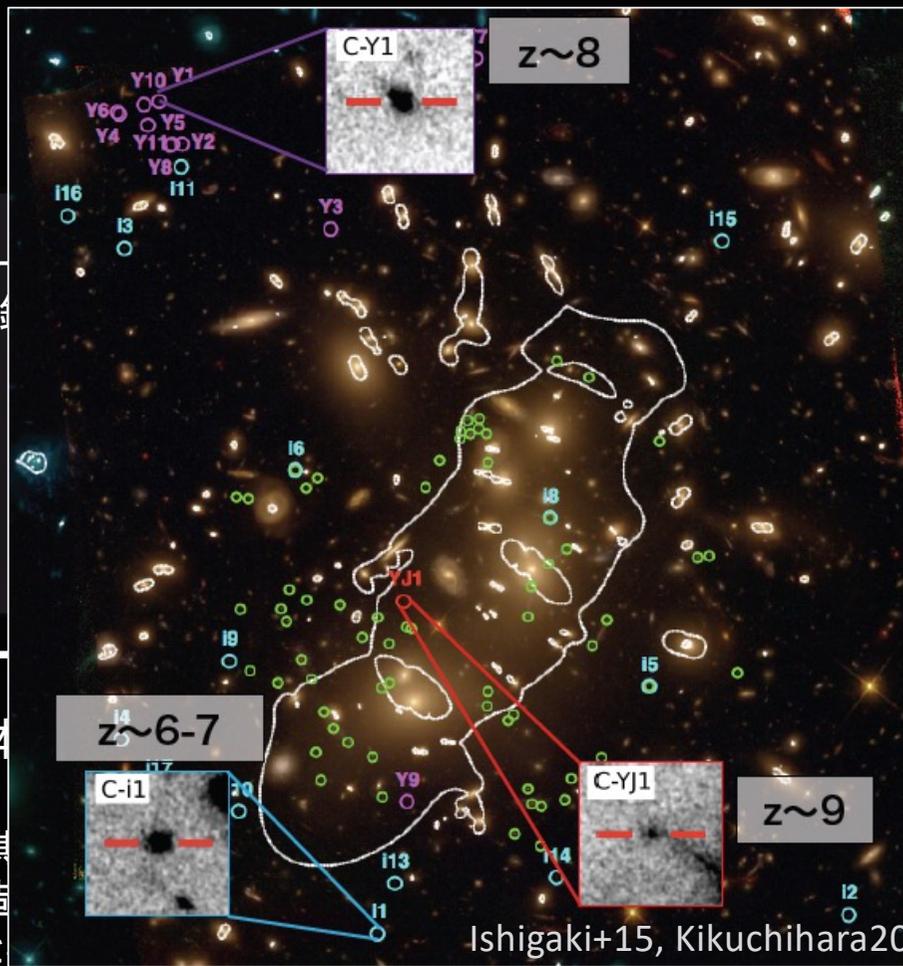
宇宙史 (模式図)

$z \sim 1100$

1) 第一  
初期

ビッグバン

- 銀河が宇宙の基本
- 課題
  - 1) 第一世代星/初期
  - 2) 宇宙大規模構造
  - 3) 宇宙再電離史と



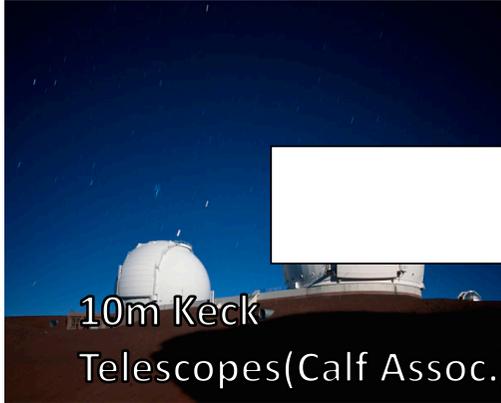
Ishigaki+15, Kikuchi+20

$z=0$

現在

進化

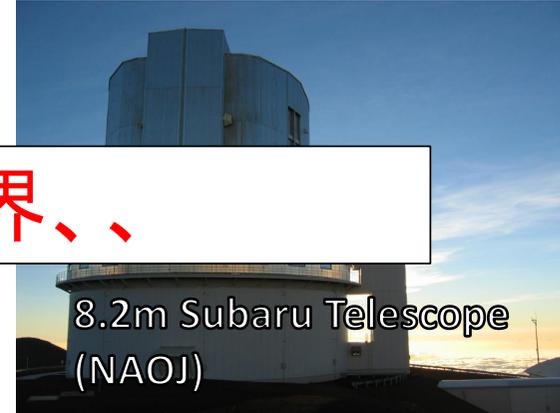
# 大型望遠鏡



10m Keck  
Telescopes(Calf Assoc.)



Hubble Space Telescope  
(NASA/AURA/ESA)



8.2m Subaru Telescope  
(NAOJ)

観測能力の限界、、



Chandra X-ray Observatory  
(NASA/SAO/CXC)

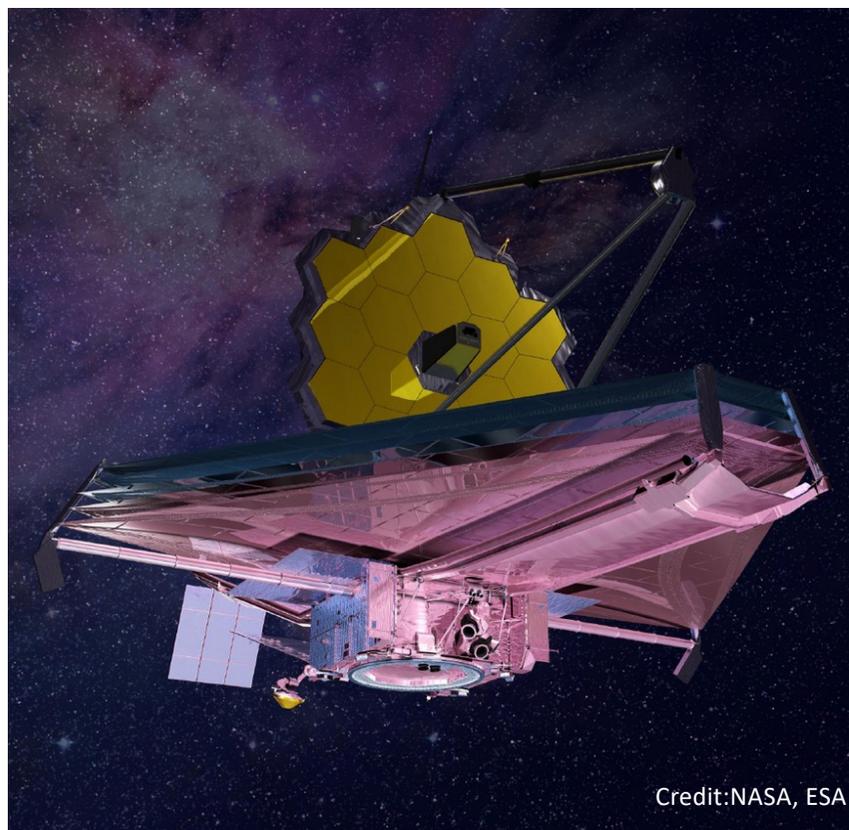


Spitzer Space Telescope  
(NASA/JPL/Caltech)



ALMA(ESO/NRAO/NAOJ..)

# ジェイムズ・ウェッブ宇宙望遠鏡 (JWST)

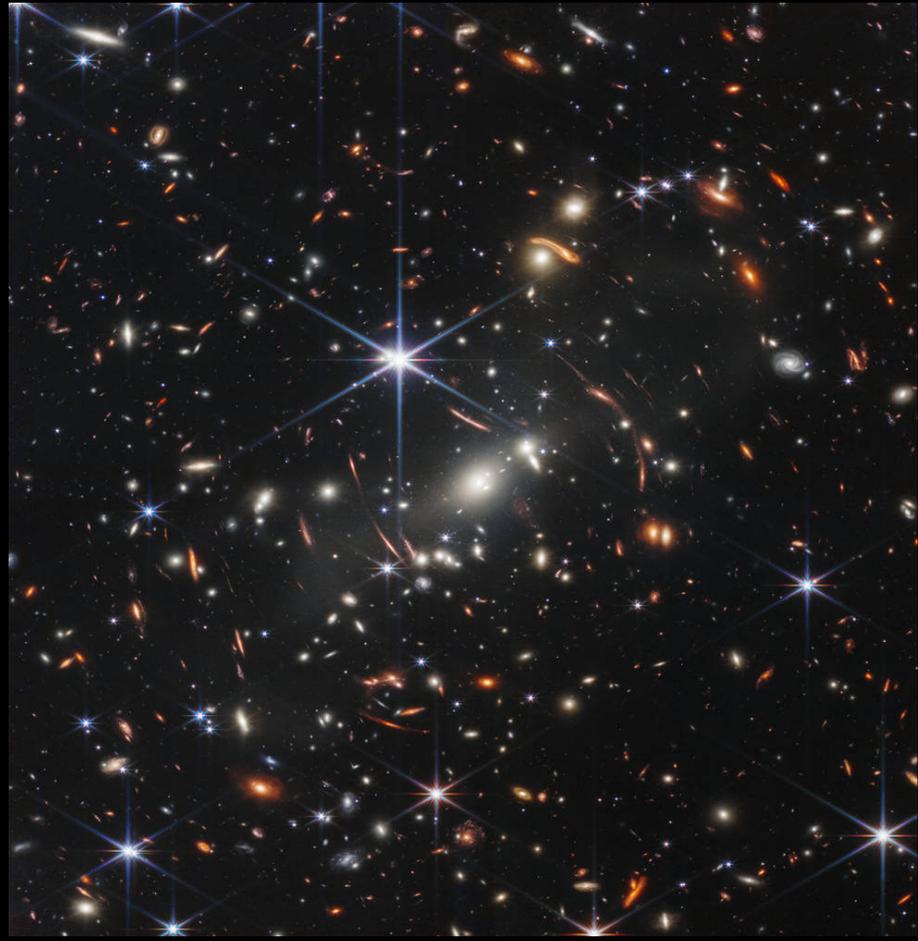


- JWST: 大型の赤外線宇宙望遠鏡
  - ハッブル宇宙望遠鏡の後継→6倍の集光力



gold

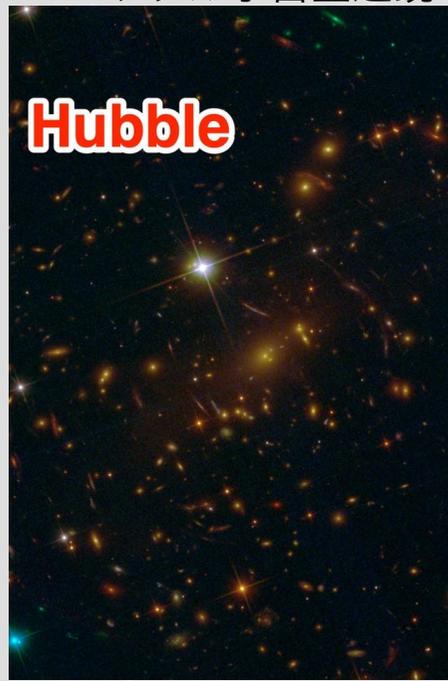
c) NASA Goddard





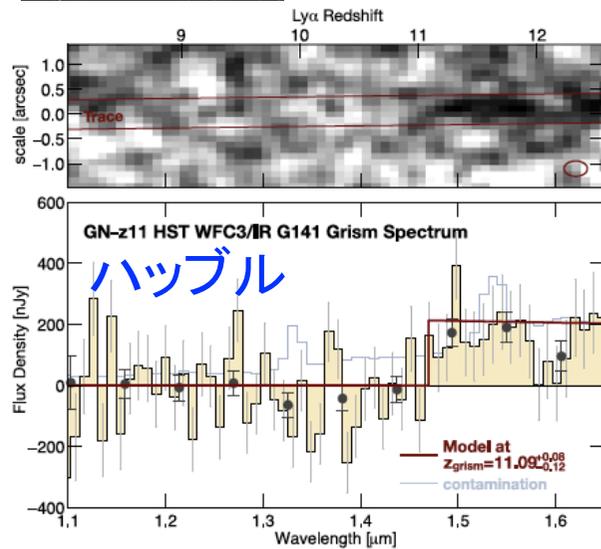
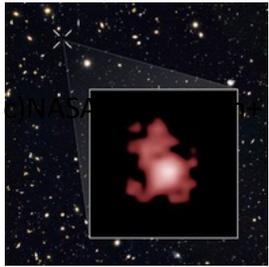
ハッブル宇宙望遠鏡

JWST



NASA

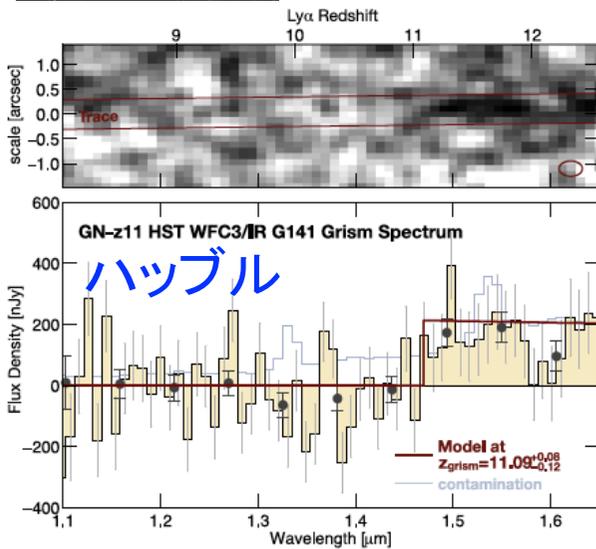
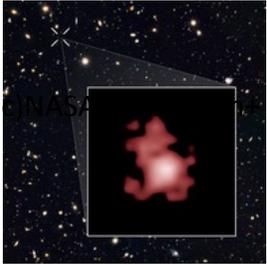
# JWSTの高い分光能力 GN-z11



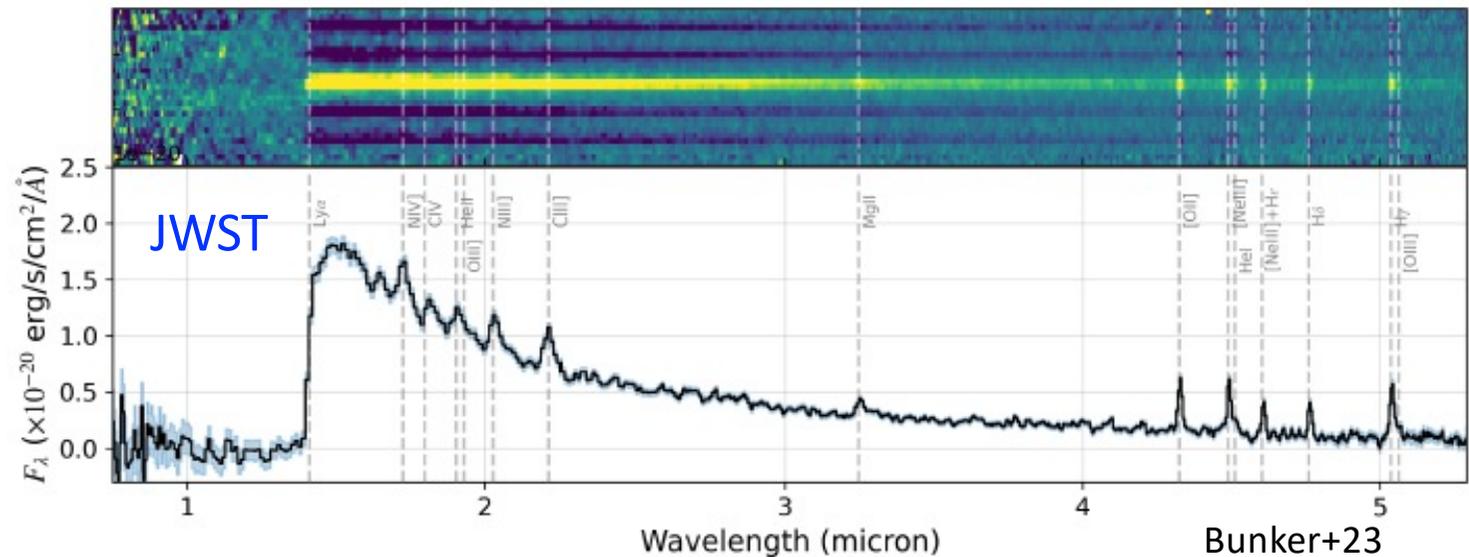
Oesch et al. (2016)

- ハッブル宇宙望遠鏡のGN-z11 ( $z \sim 11$ ) → JWST装置開発チーム連合(JADES)の分光観測
- 星の光(連続光)
- 多数の元素からなるガスの光(輝線)
- 驚くほど、窒素ガスが出す輝線が強い(酸素に対して) → 窒素が多い。何故？

# JWSTの高い分光能力 GN-z11

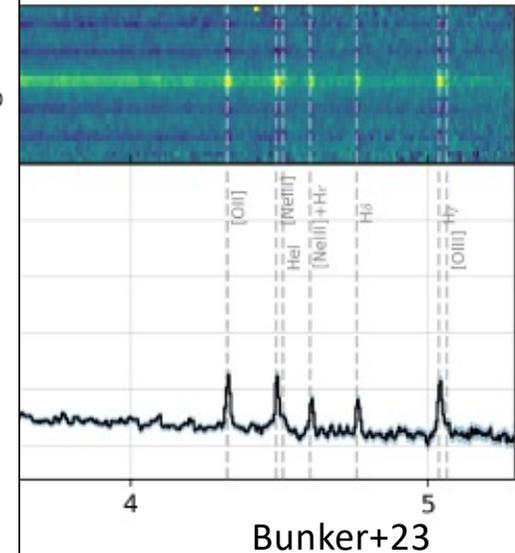
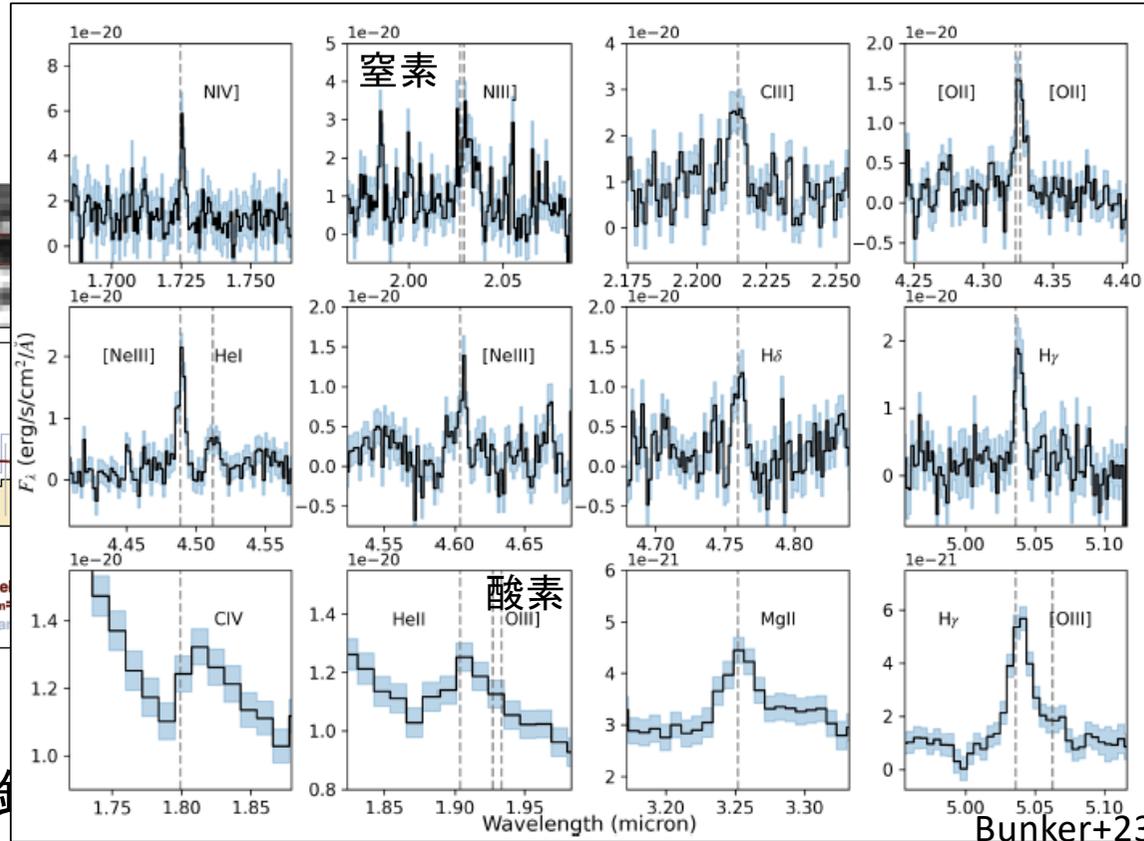
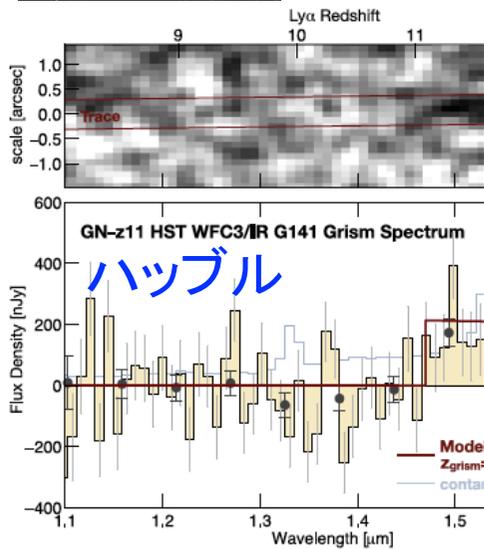
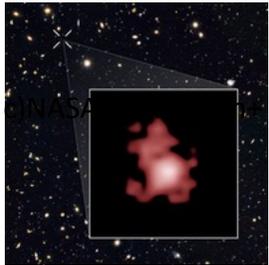


Oesch et al. (2016)



- ハッブル宇宙望遠鏡のGN-z11 ( $z \sim 11$ ) → JWST装置開発チーム連合(JADES)の分光観測
- 星の光(連続光)
- 多数の元素からなるガスの光(輝線)
- 驚くほど、窒素ガスが出す輝線が強い(酸素に対して) → 窒素が多い。何故？

# JWSTの高い分光能力 GN-z11

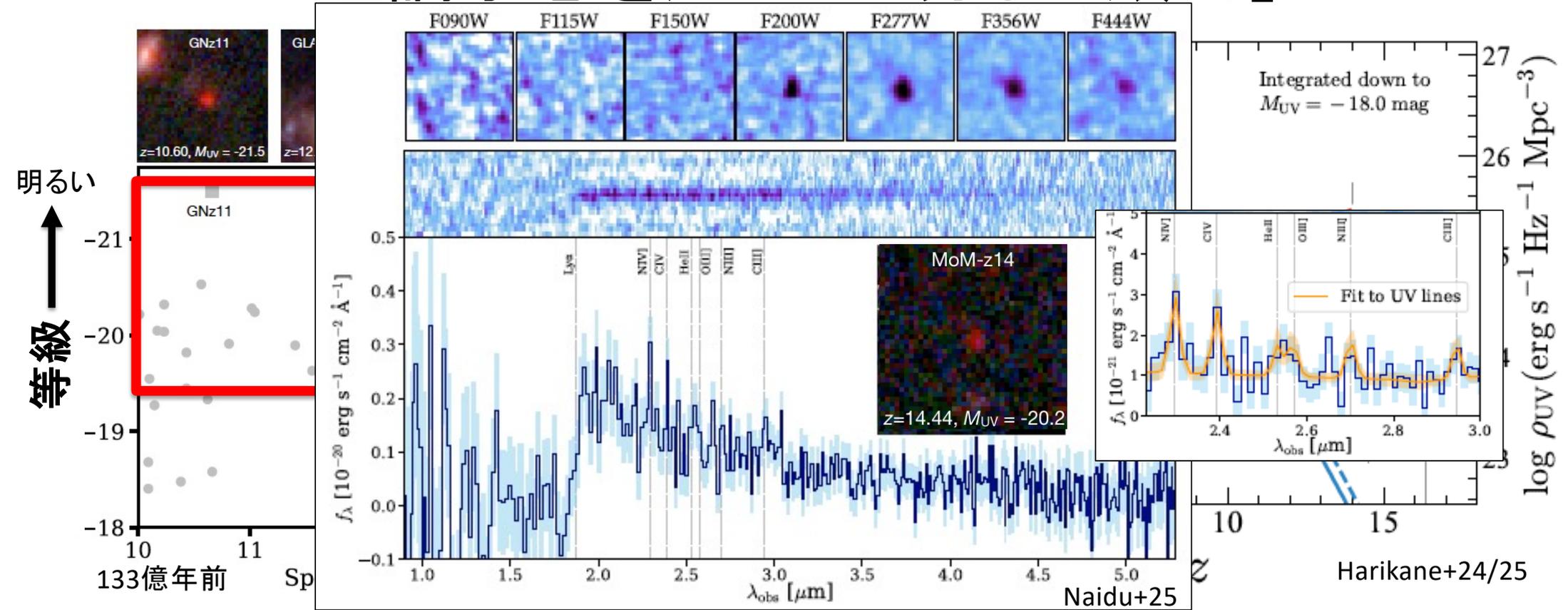


の分光観測

Oesch et al. (2016)

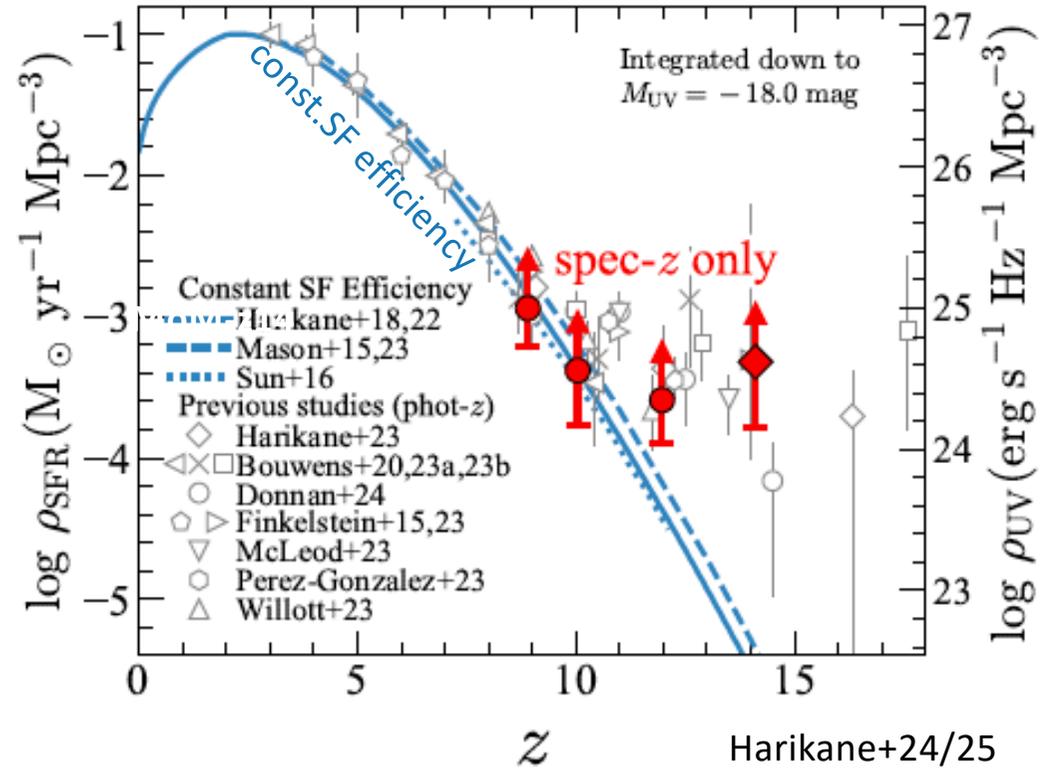
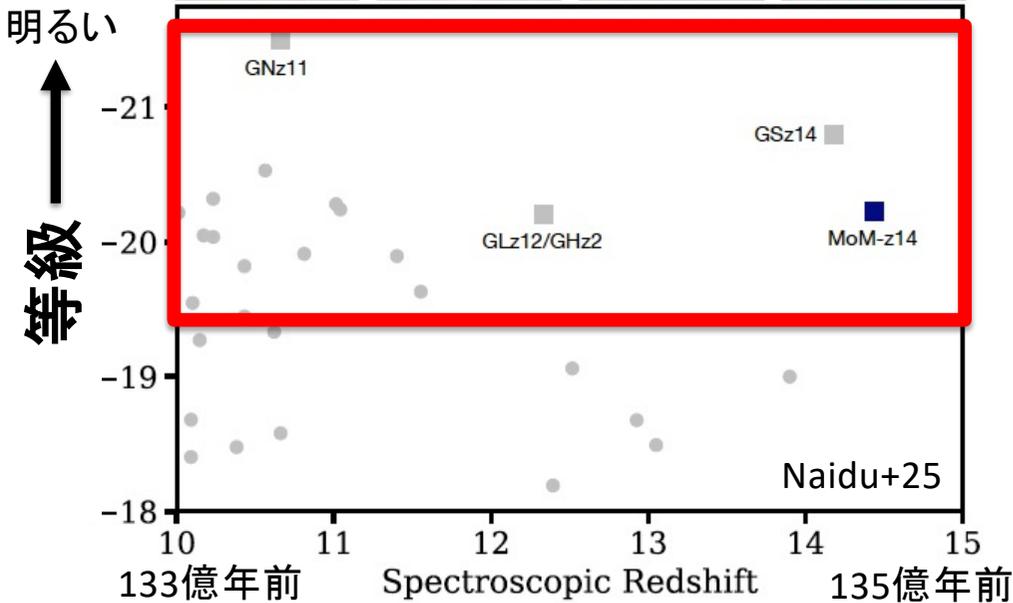
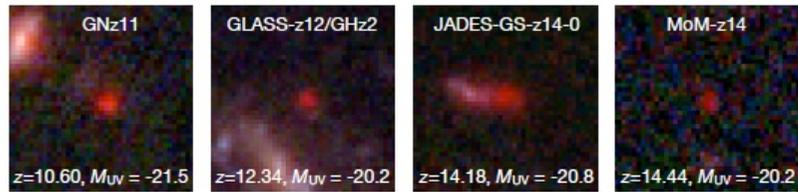
- ハッブル宇宙望遠鏡
- 星の光(連続光)
- 多数の元素からなるガスの光(輝線)
- 驚くほど、窒素ガスが出す輝線が強い(酸素に対して) → 窒素が多い。何故？

# 理論予想を超えた「明るい銀河」



- COSMOS領域(Sextans): MoM-z14→ $z=14.4$ の銀河(ビッグバン後2.8億年後→現在の宇宙年齢の2%)
- 連続光(紫外線)で非常に明るい
- $z > 10$ の銀河が~50個。非常に明るい銀河が多く。理論で説明できず。何故?
  - 初代星が生まれる現場? 隠された超巨大ブラックホール? ビッグバン宇宙論の間違え??、、、

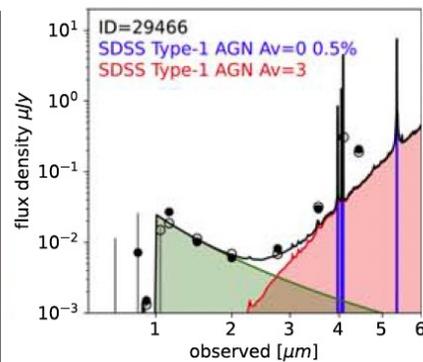
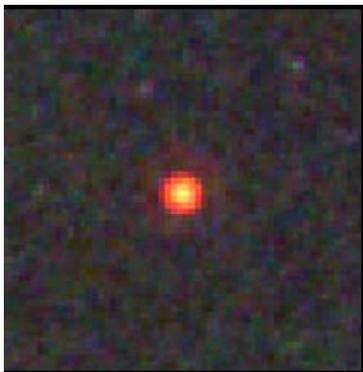
# 理論予想を超えた「明るい銀河」



- COSMOS領域(Sextans): MoM-z14→z=14.4の銀河(ビッグバン後2.8億年後→現在の宇宙年齢の2%)
- 連続光(紫外線)で非常に明るい
- z>10の銀河が~50個。非常に明るい銀河が多く。理論で説明できず。何故？
  - 初代星が生まれる現場？隠された超巨大ブラックホール？ビッグバン宇宙論の間違い??...

# リトル・レッド・ドット(LRD)と ブラックホール星(BH\*)の発見

## LRD

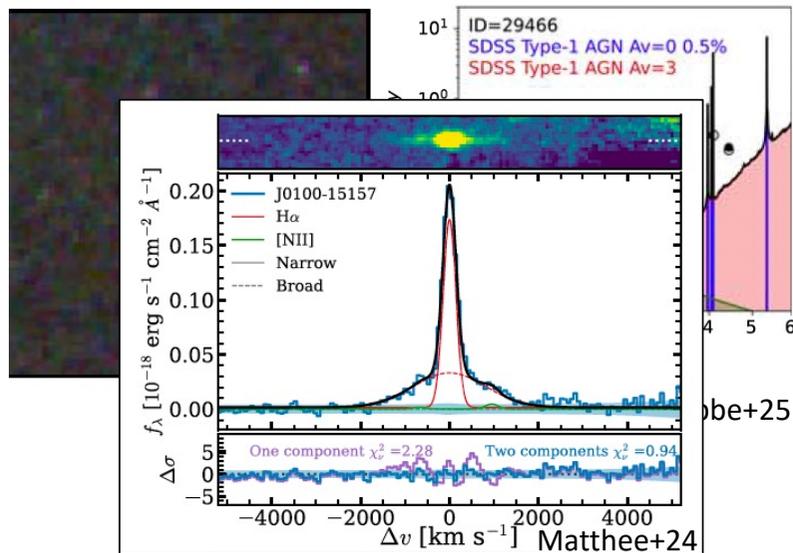


Labbe+25

- 主に $z \sim 4-7$ の宇宙: 赤くて小さい天体を多数発見 → Little Red Dot (LRD)
- LRDは $10^7-10^8$  Moのダスト減光を強く受けた超巨大ブラックホール(SMBH)??
- MoM-BH\*-1: LRDの1種( $z=7.8$ )。星や減光を受けたSMBHでは説明できない黒体放射のような形。強い $H\alpha$ 吸収
- 40AUほどの分厚いガス(大気)に囲まれた $10^6$  Moのブラックホール? → ブラックホール星(BH\*; BH envelope/cocoon)の発見
  - BH\*は生まれたばかりの超巨大ブラックホール?

# リトル・レッド・ドット(LRD)と ブラックホール星(BH\*)の発見

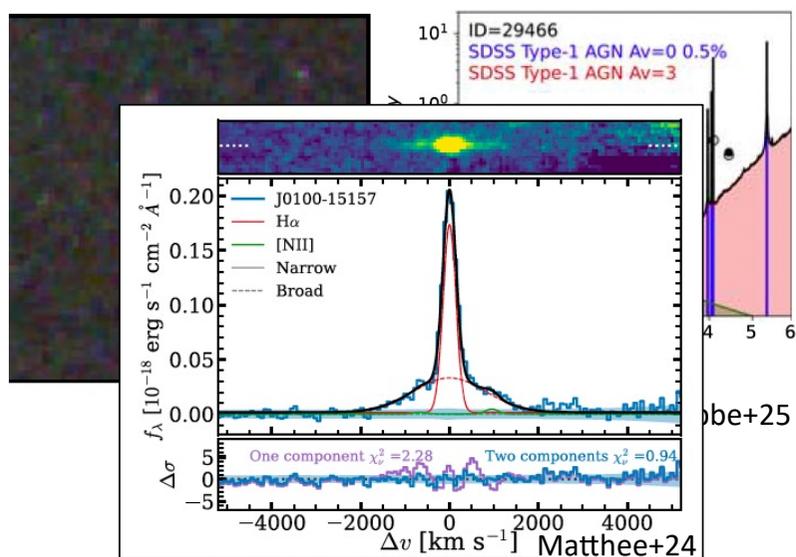
## LRD



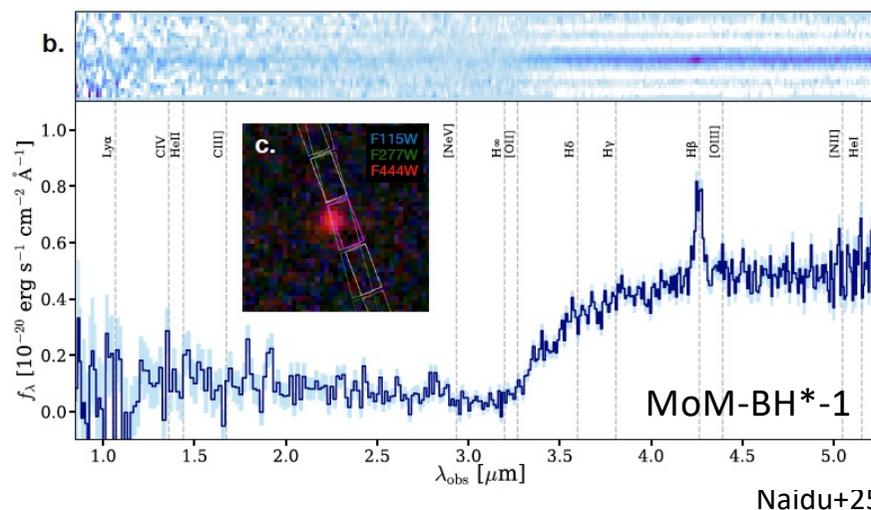
- 主に $z \sim 4-7$ の宇宙: 赤くて小さい天体を多数発見  $\rightarrow$  Little Red Dot (LRD)
- LRDは $10^7-10^8$  Moのダスト減光を強く受けた超巨大ブラックホール(SMBH)??
- MoM-BH\*-1: LRDの1種( $z=7.8$ )。星や減光を受けたSMBHでは説明できない黒体放射のような形。強いH $\alpha$ 吸収
- 40AUほどの分厚いガス(大気)に囲まれた $10^6$  Moのブラックホール?  $\rightarrow$  ブラックホール星(BH\*; BH envelope/cocoon)の発見
  - BH\*は生まれたばかりの超巨大ブラックホール?

# リトル・レッド・ドット(LRD)と ブラックホール星(BH\*)の発見

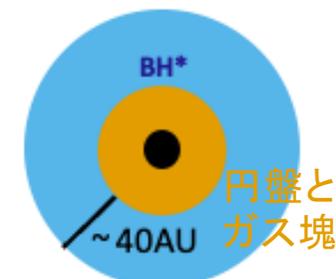
## LRD



## BH星



ブラックホール  
( $10^6$  Mo)

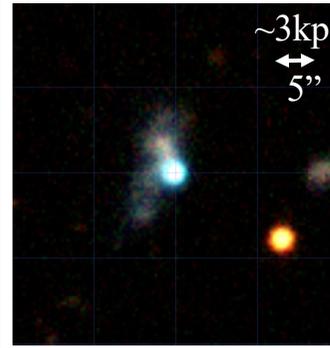
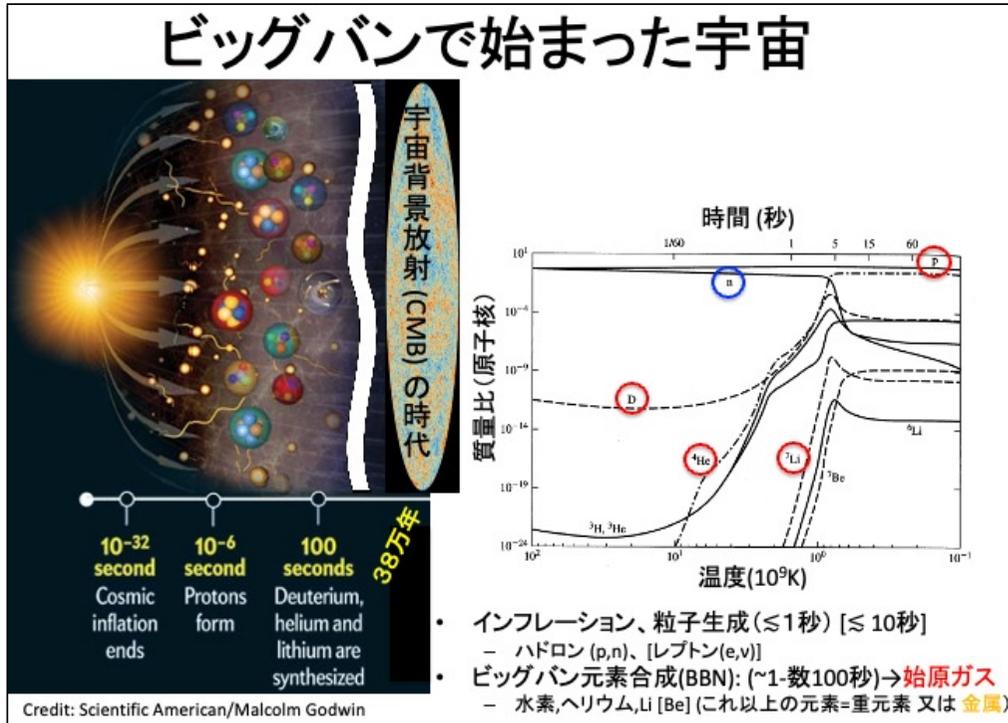


円盤と  
ガス塊  
高密度ガス  
「大気」

- 主に $z \sim 4-7$ の宇宙: 赤くて小さい天体を多数発見  $\rightarrow$  Little Red Dot (LRD)
- LRDは $10^7-10^8$  Moのダスト減光を強く受けた超巨大ブラックホール(SMBH)??
- MoM-BH\*-1: LRDの1種( $z=7.8$ )。星や減光を受けたSMBHでは説明できない黒体放射のような形。強い $H\alpha$ 吸収
- 40AUほどの分厚いガス(大気)に囲まれた $10^6$  Moのブラックホール?  $\rightarrow$  ブラックホール星(BH\*; BH envelope/cocoon)の発見
  - BH\*は生まれたばかりの超巨大ブラックホール?

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



Kojima+20

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)

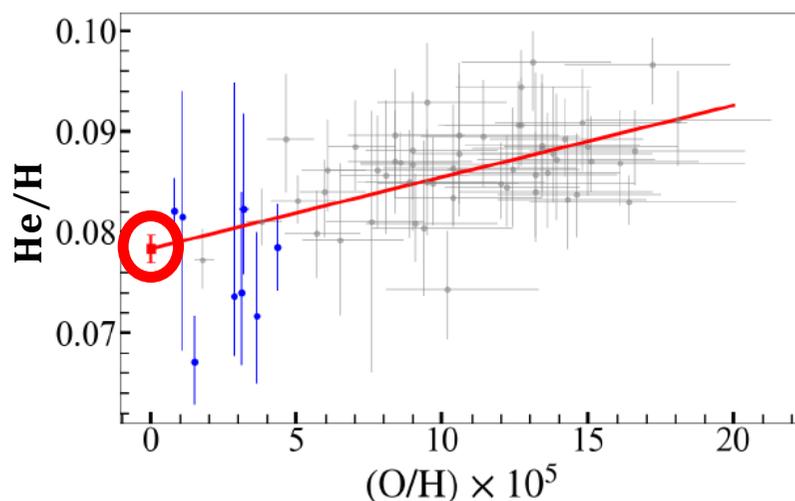


松本(D3)

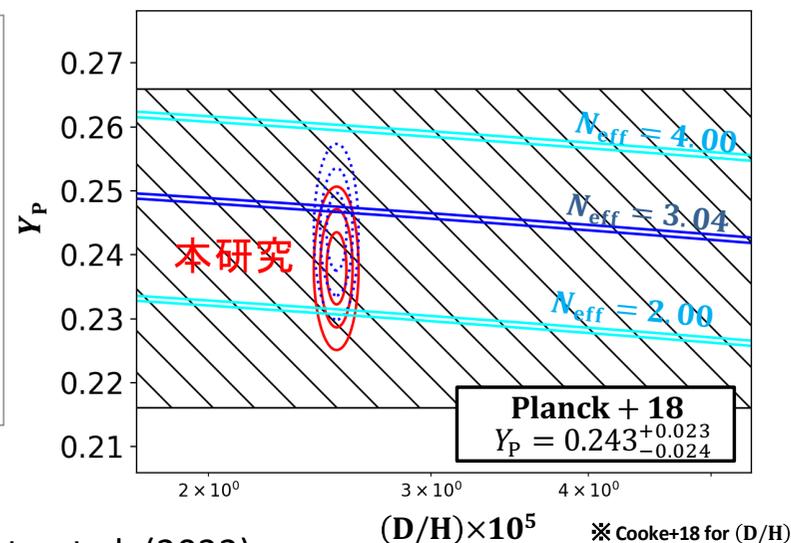
# 原始ヘリウム組成比 $Y_p$



柳澤(D1)



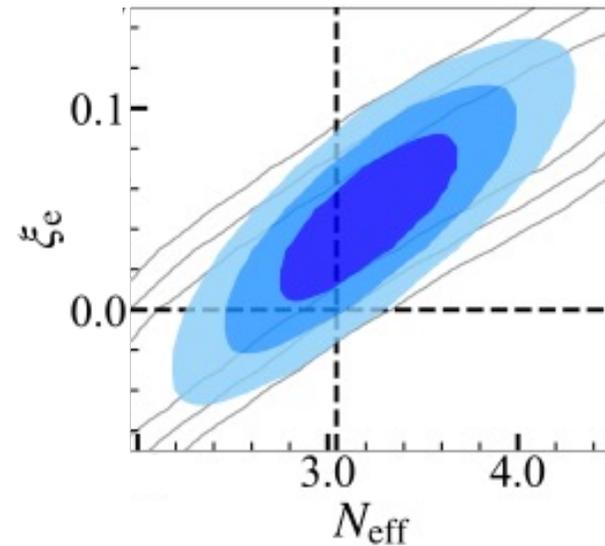
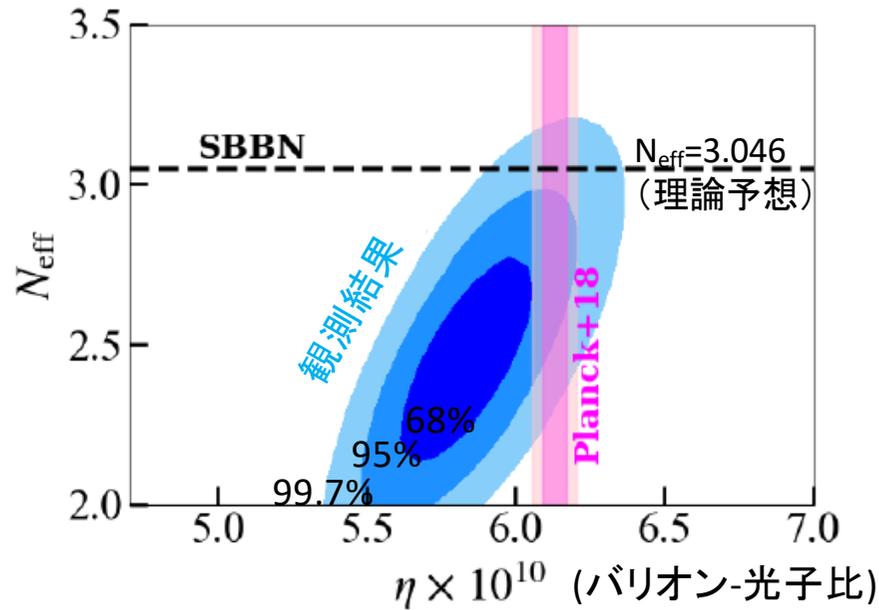
Matsumoto et al. (2022)



※ Cooke+18 for (D/H)

- 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  $N_{\text{eff}}$

# 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??
- $\xi_e$  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) 理論予想を超える、多数の明るい銀河
    - 2) リトル・レッド・ドット(LRD)とブラックホール星(エンベロープ)の発見
- 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