

最先端研究I  
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

Credit: NASA, ESA

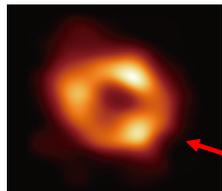
## 光学観測で探る宇宙

- 何が見えるか？
  - 恒星、高温ガス、超新星爆発、超巨大ブラックホール(AGN)、
  - ガンマ線バースト残光、重力波対応天体、、、

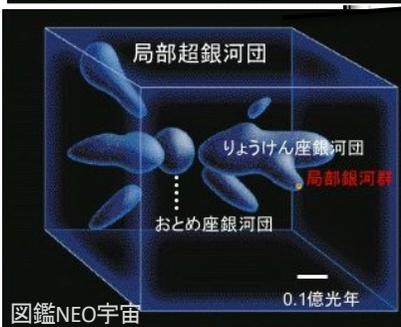
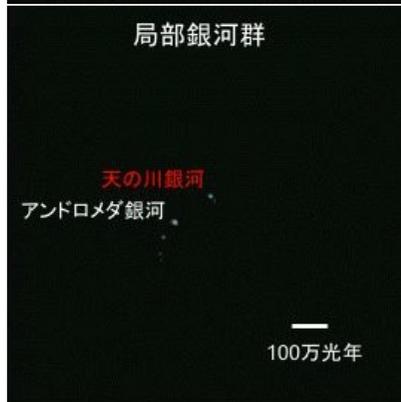
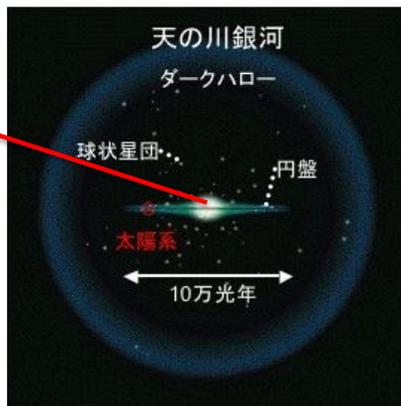


M66 (Hubble Space Telescope, NASA/AURA)

超巨大ブラックホール(400万太陽質量)



c) EHT Collaboration



図鑑NEO宇宙

# 光学観測で探る宇宙

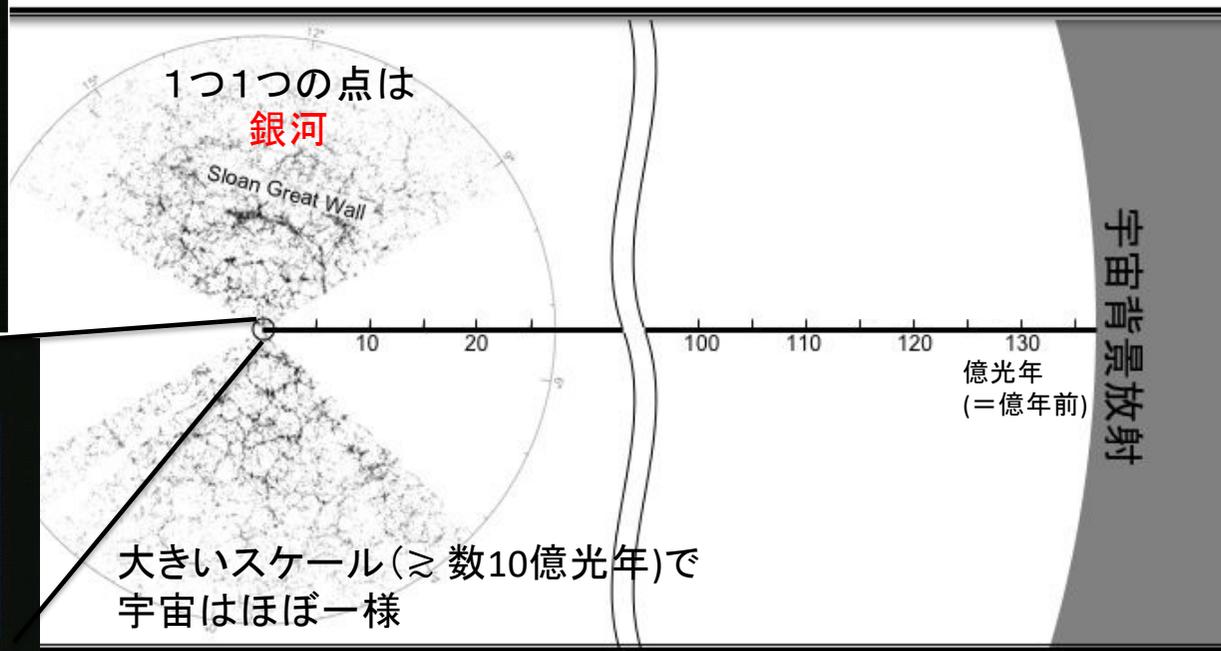
## • どこまで理解できたか？

### 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)？

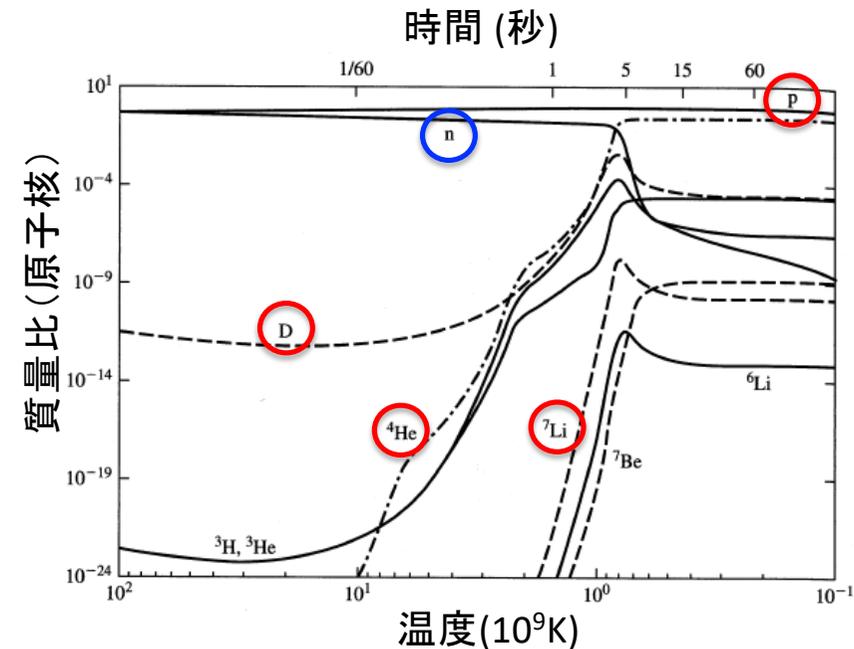
- 「われわれはどこから来たのか われわれは何者か われわれはどこへ行くのか」(P. Gauguin/ 1897(!))



# 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 ( $\leq 1$  秒) [ $\leq 10$  秒]
  - ハドロン (p,n)、[レプトン(e,v)]
- ビッグバン元素合成(BBN): (~1-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

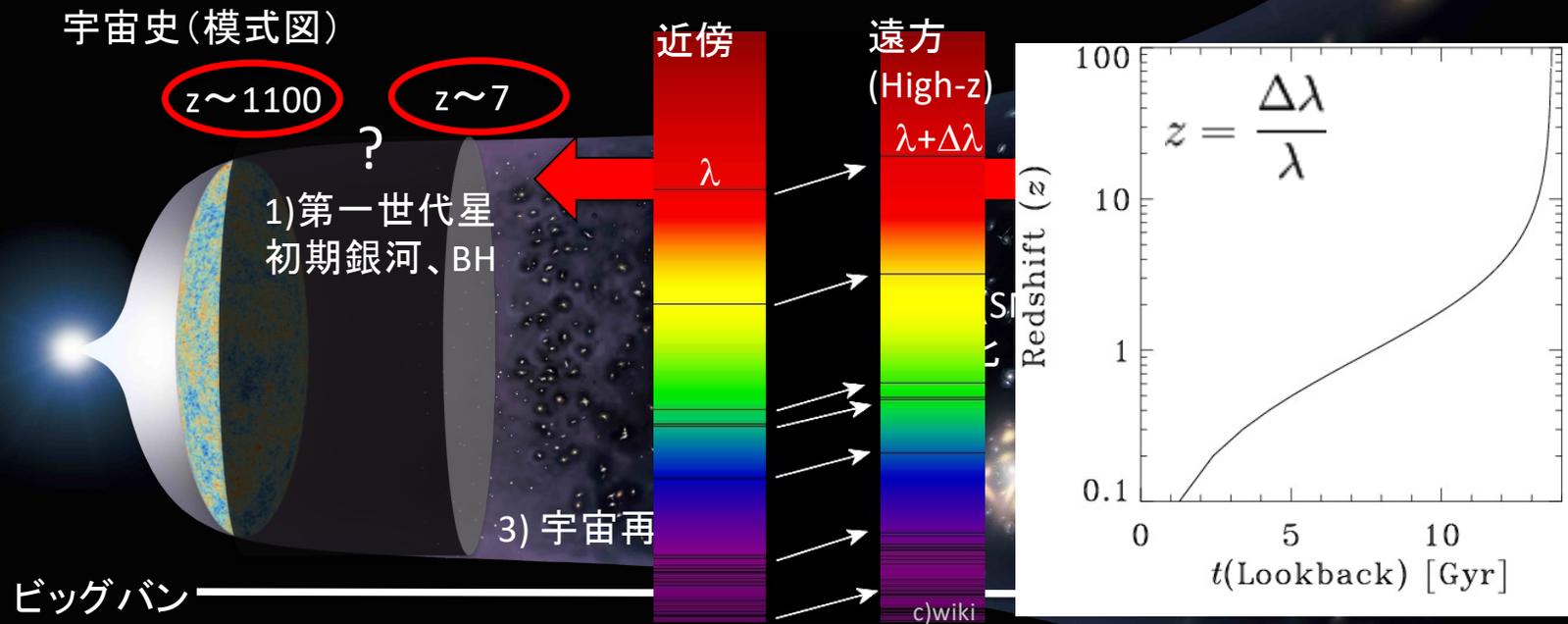
宇宙史(模式図)



- 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

# 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

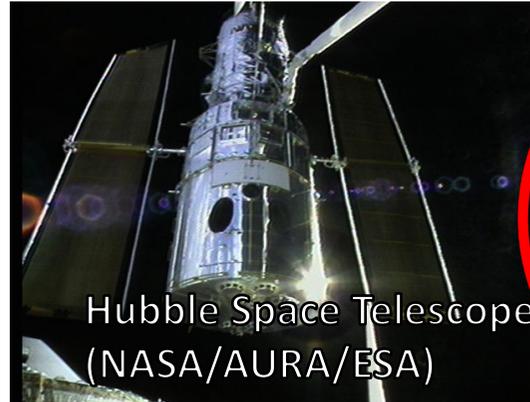
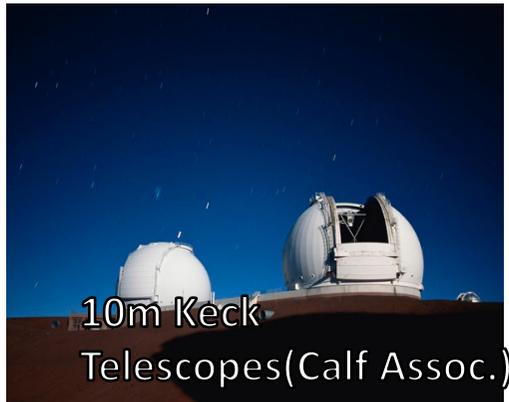
# 熱いビッグバン宇宙から 現在の宇宙へ

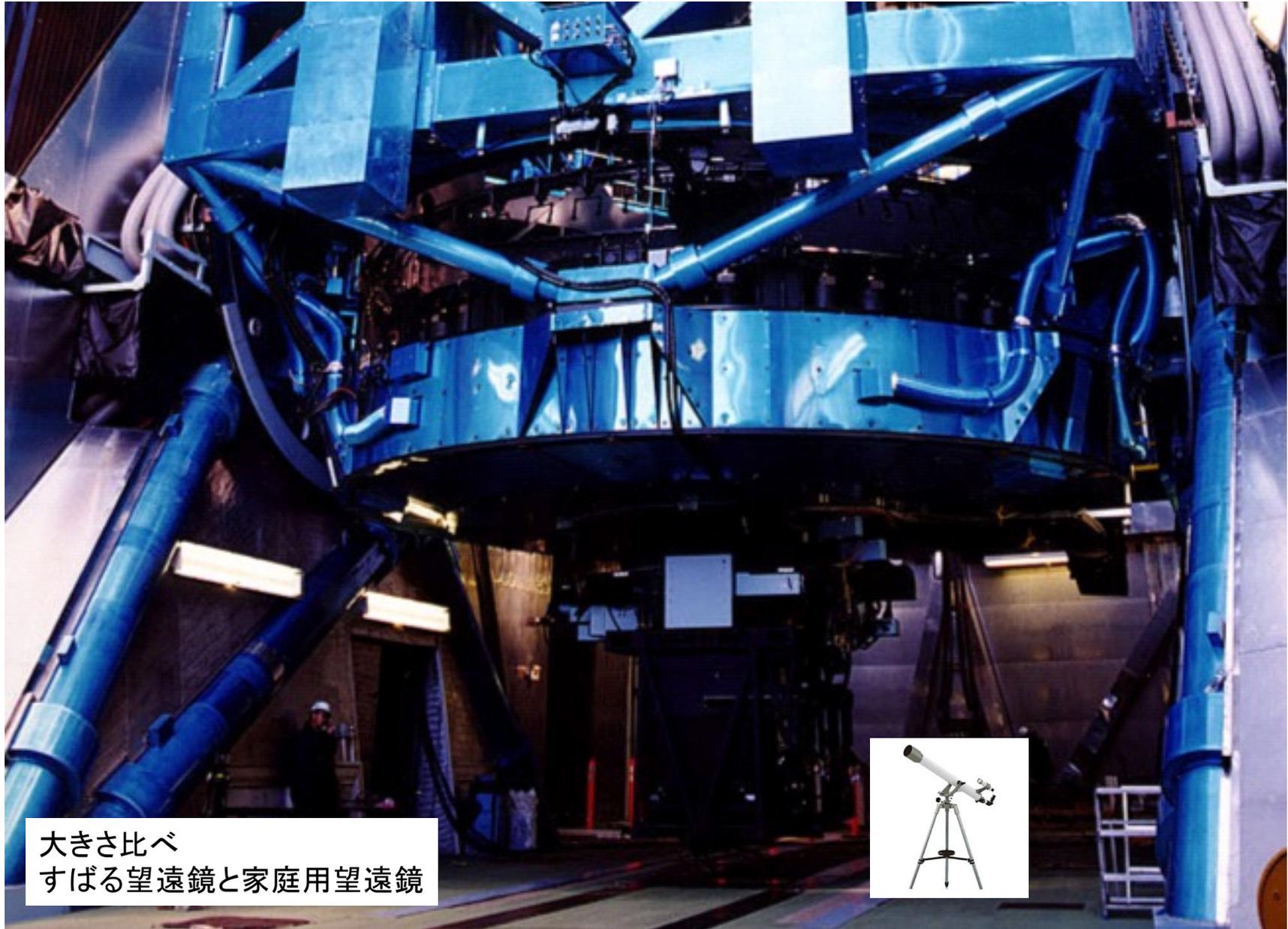
宇宙史(模式図)



- 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





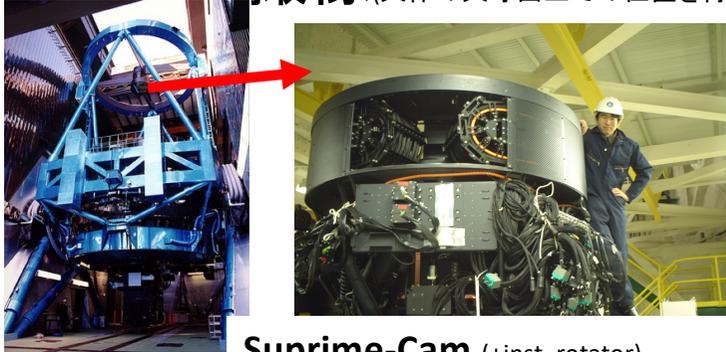
大きさ比べ  
すばる望遠鏡と家庭用望遠鏡

## 光学大型望遠鏡による観測

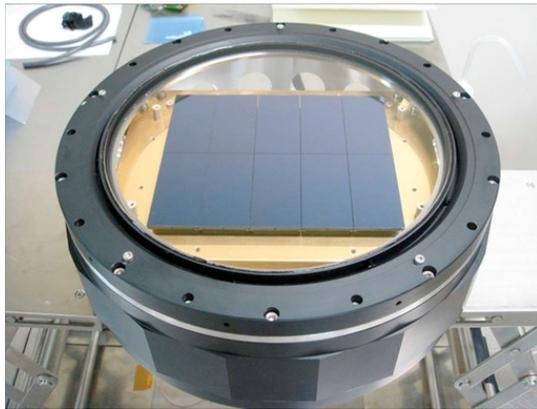
- 観測はどのように行われるか？
- 観測データはどのようなものか？
- どこまで宇宙が見えたか？

# 観測装置

撮像 (天体の天球面上での位置を得る, XY)



Suprime-Cam (+inst. rotator)



CCDカメラ

Suprime-Cam 8000万画素

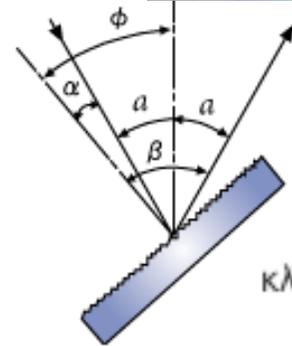
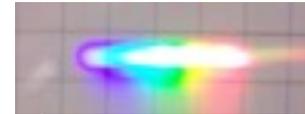
Hyper Suprime-Cam 8億7000万画素

分光 (天体の赤方偏移を測る, z)

Keck/DEIMOS



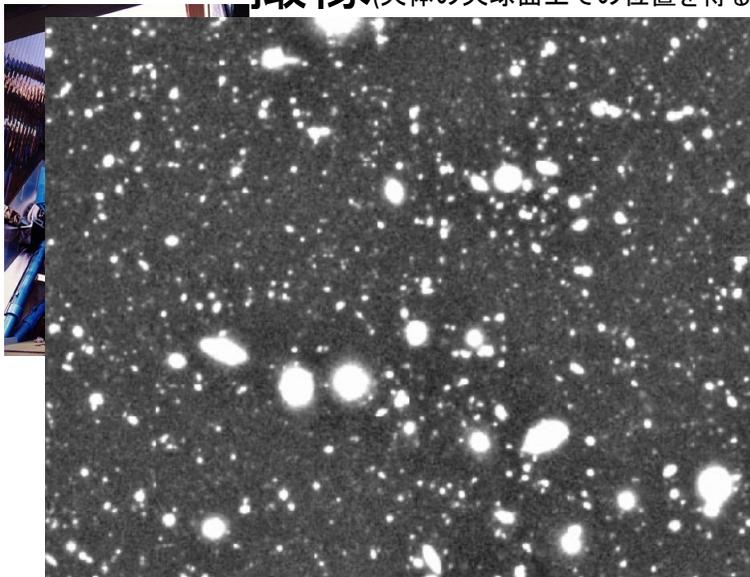
回折格子



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

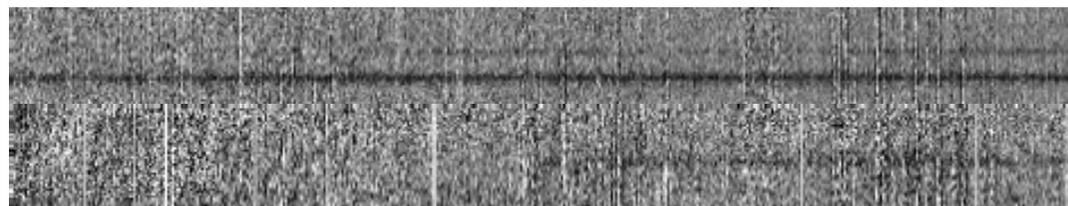
# 観測装置

撮像 (天体の天球面上での位置を得る, XY)

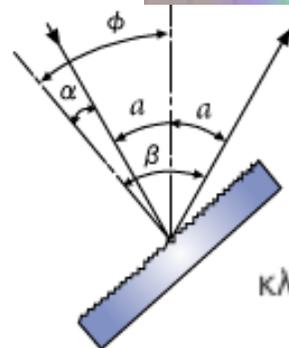


CCDカメラ  
Suprime-Cam 8000万画素  
Hyper Suprime-Cam 8億7000万画素

分光 (天体の赤方偏移を測る, z)

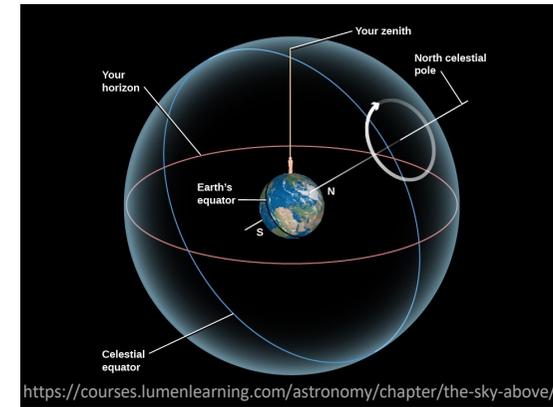


回折格子



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

# 観測する天域

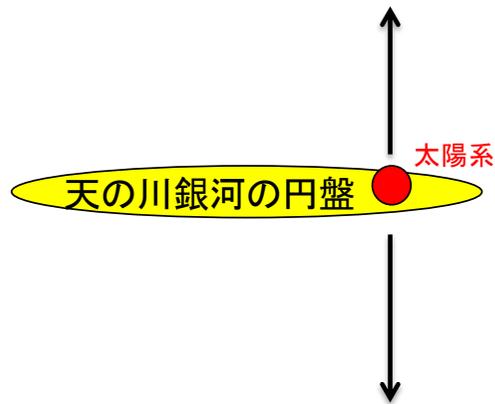


- Quiz:
  - 過去(つまり遠方)の宇宙を見るためには、望遠鏡をどこに向けて観測すれば良いか？それは何故か？
    - 「大きいスケール(≧ 数10億光年)で宇宙はほぼ一様」、  
なので、どこを観測しても良いが、実際には観測する方向は大体決まっている。

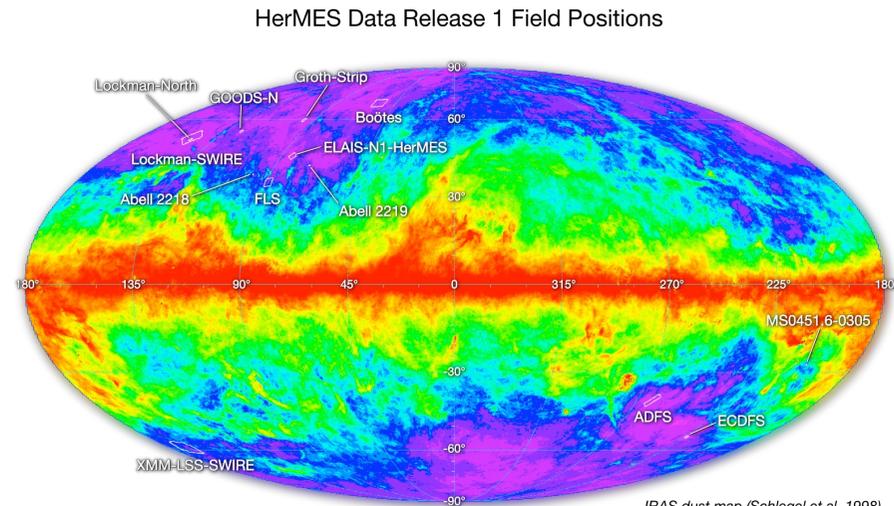
Hint: 遠方宇宙の観測は夏にはあまり行われない

# 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

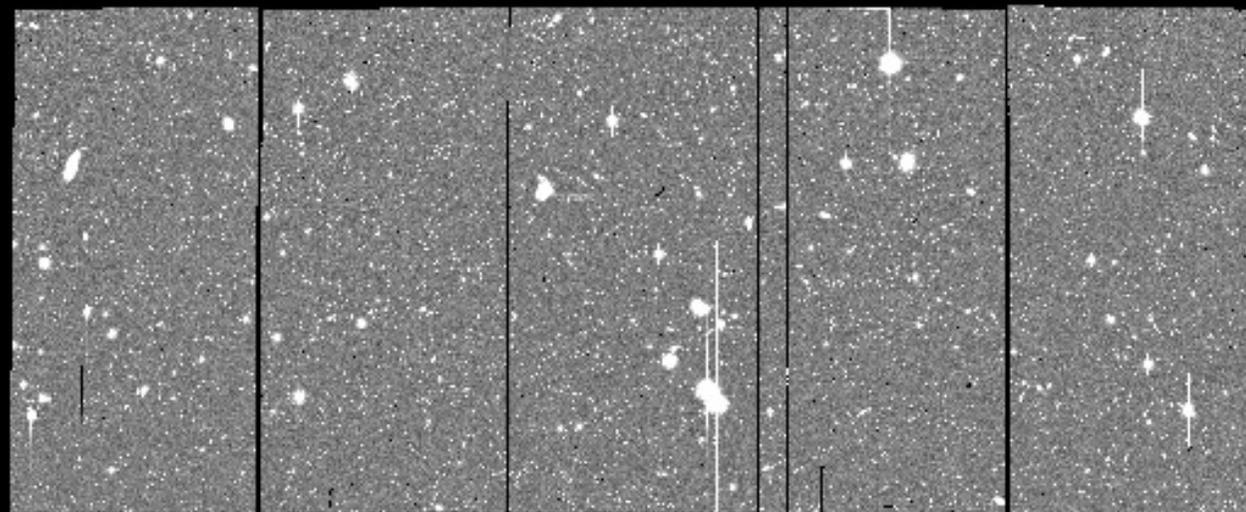


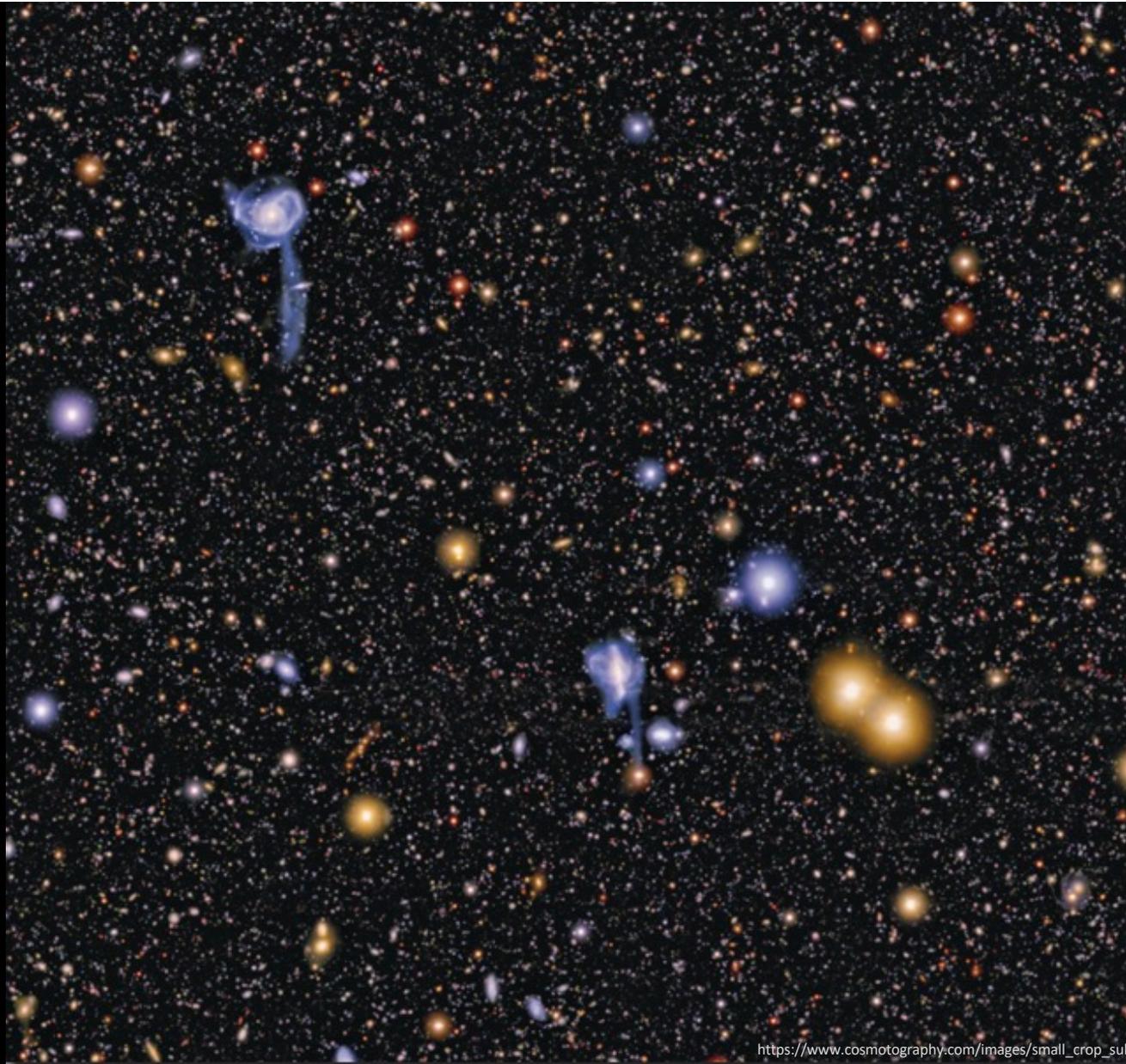
Source: <http://hedam.oamp.fr/HerMES/survey.php>  
IRAS dust map (Schlegel et al, 1998)  
Galactic coordinates



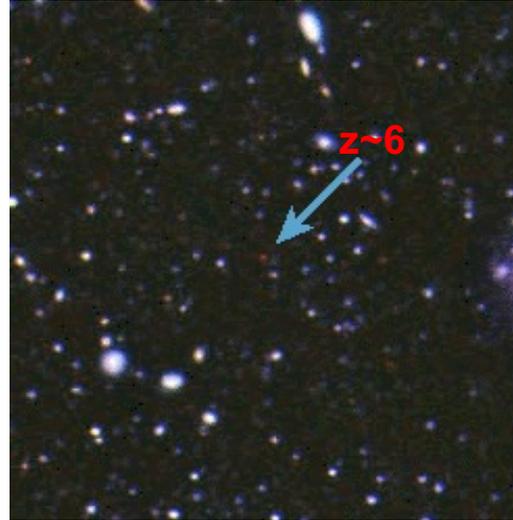


CFHT - Wed Nov 30 17:33:45 HST

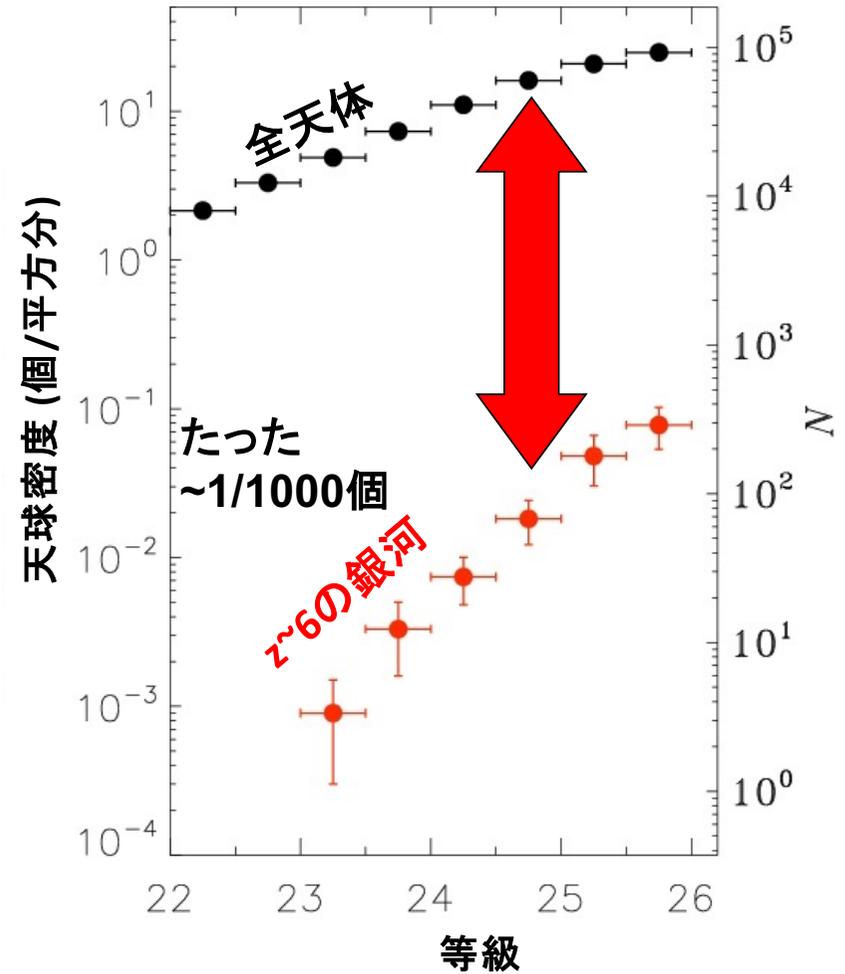




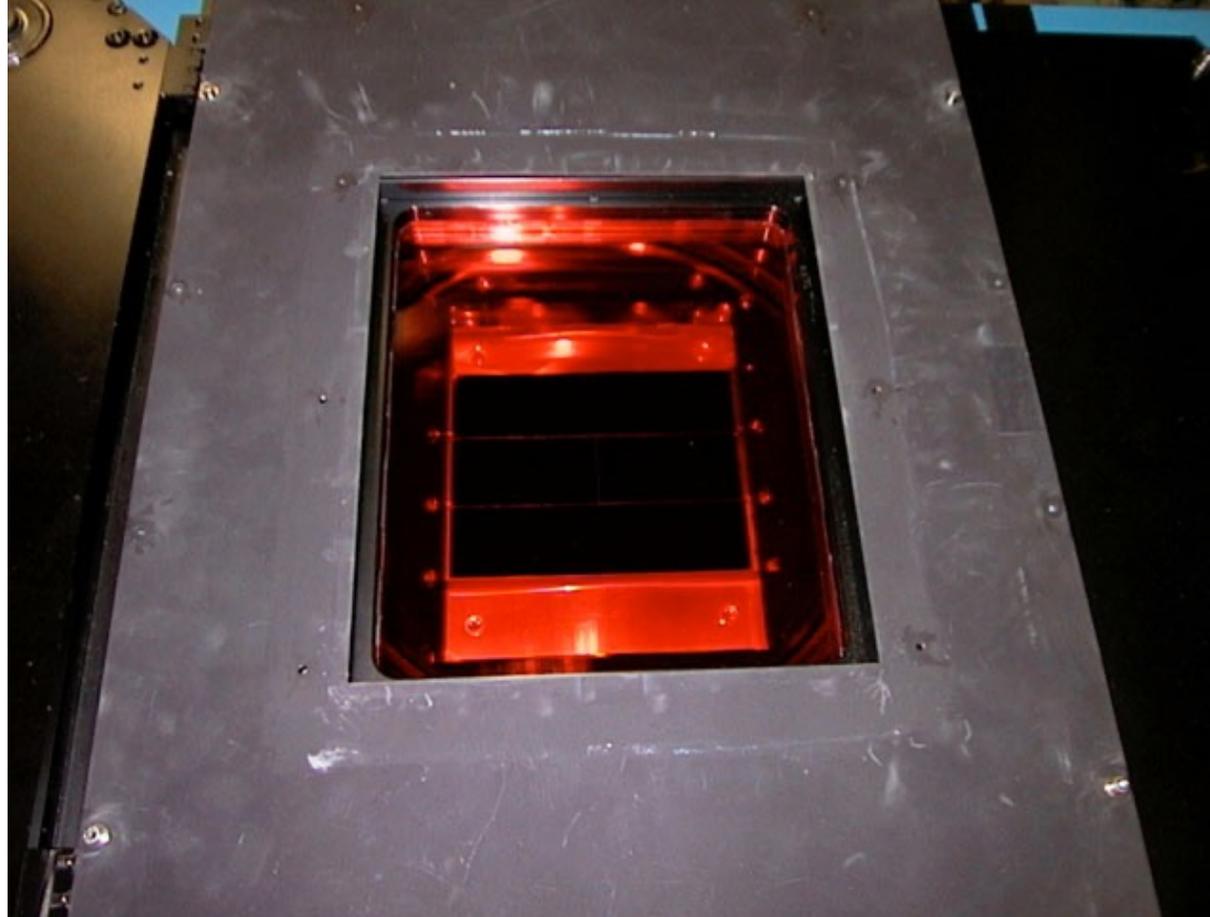
## 前景銀河の海から 遠方の銀河を見つける



- 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



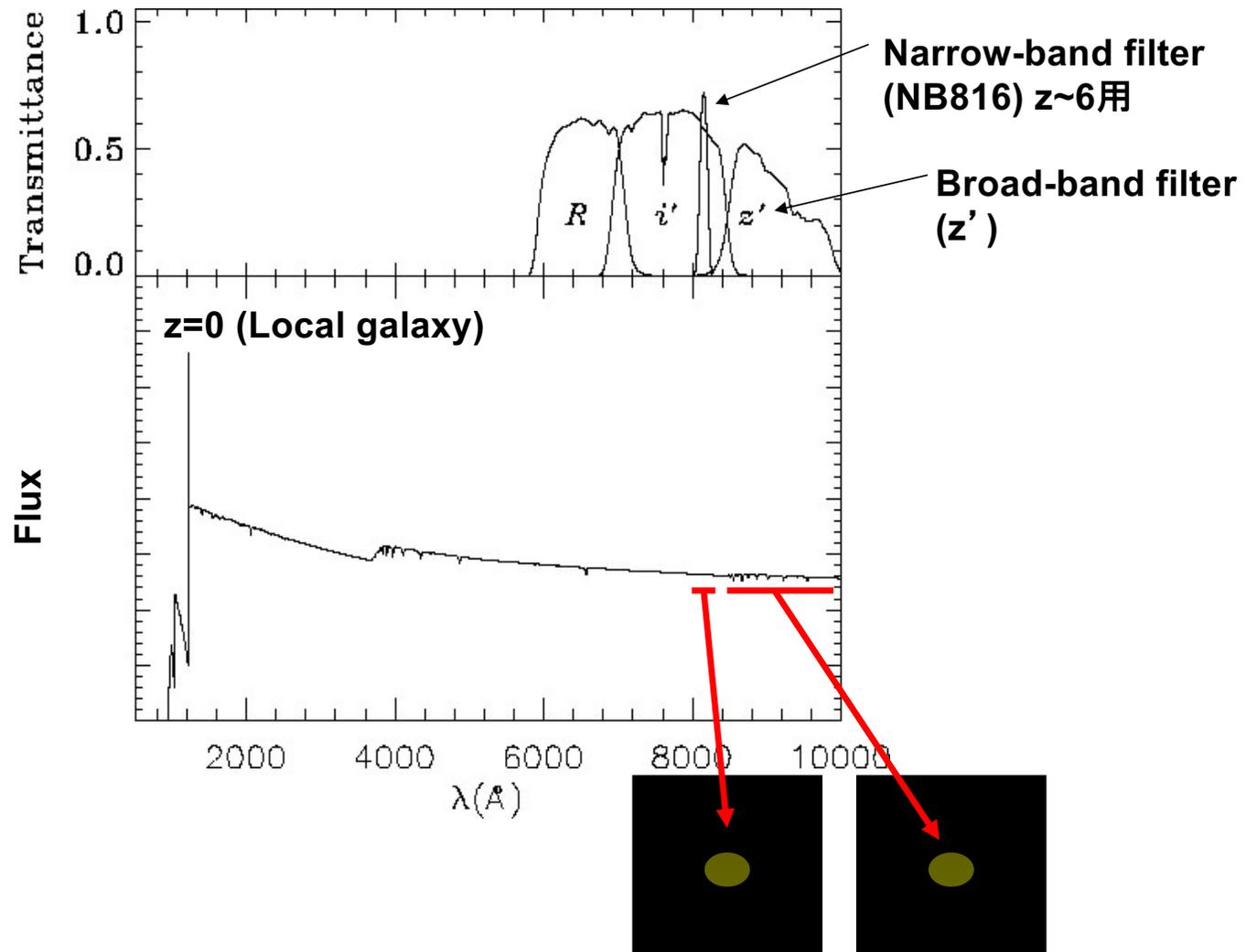
d filter  
用

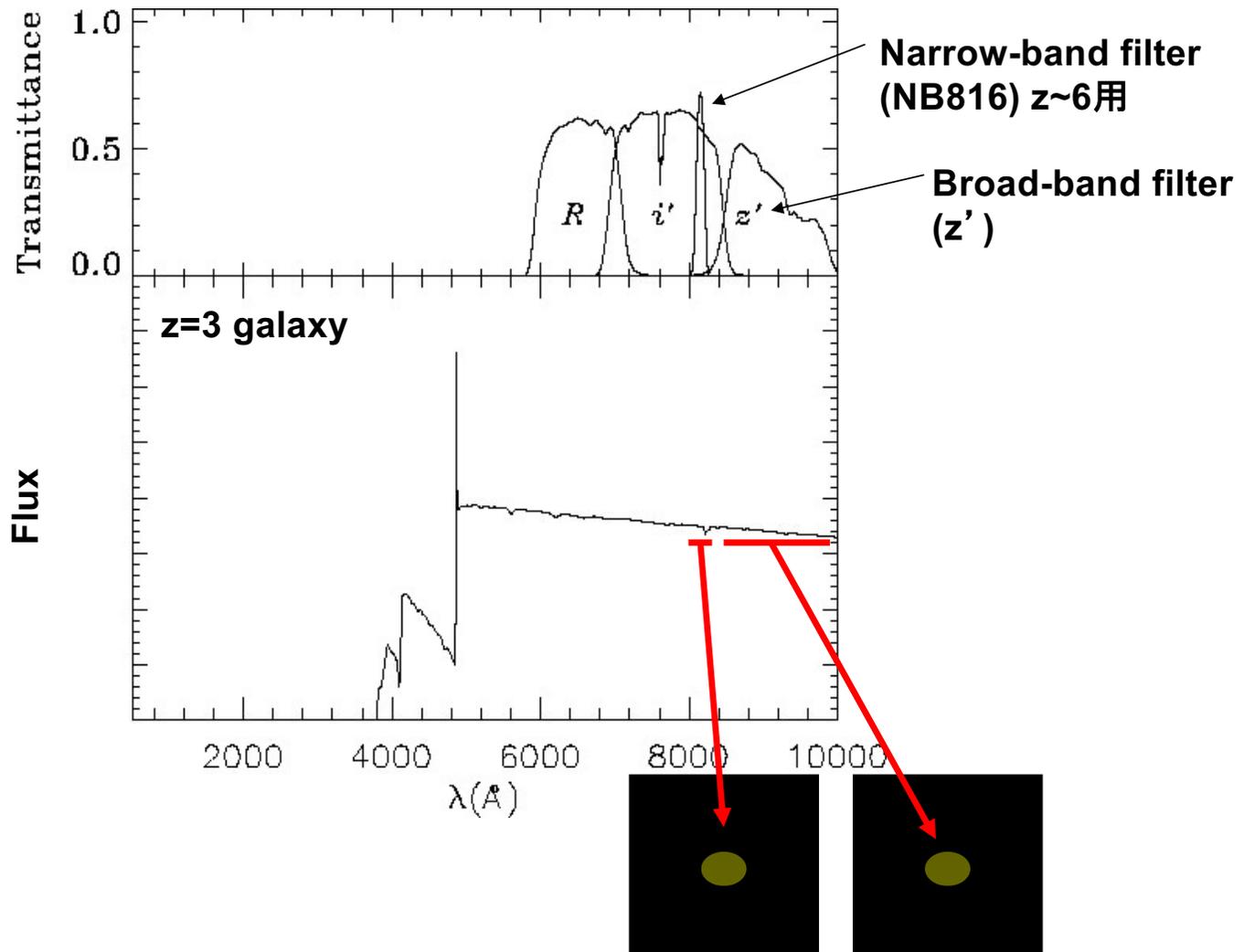
and filter

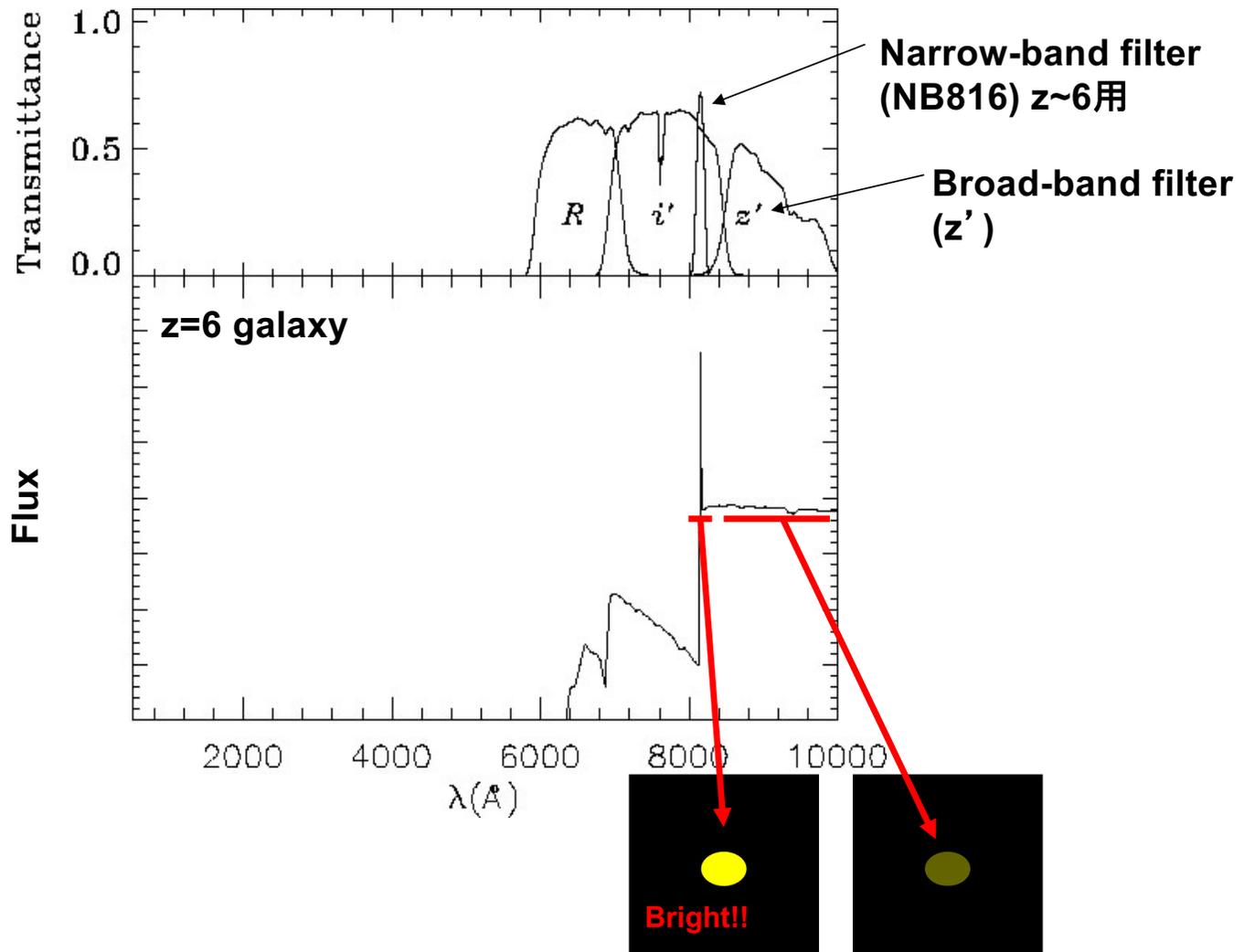
UV

Optical

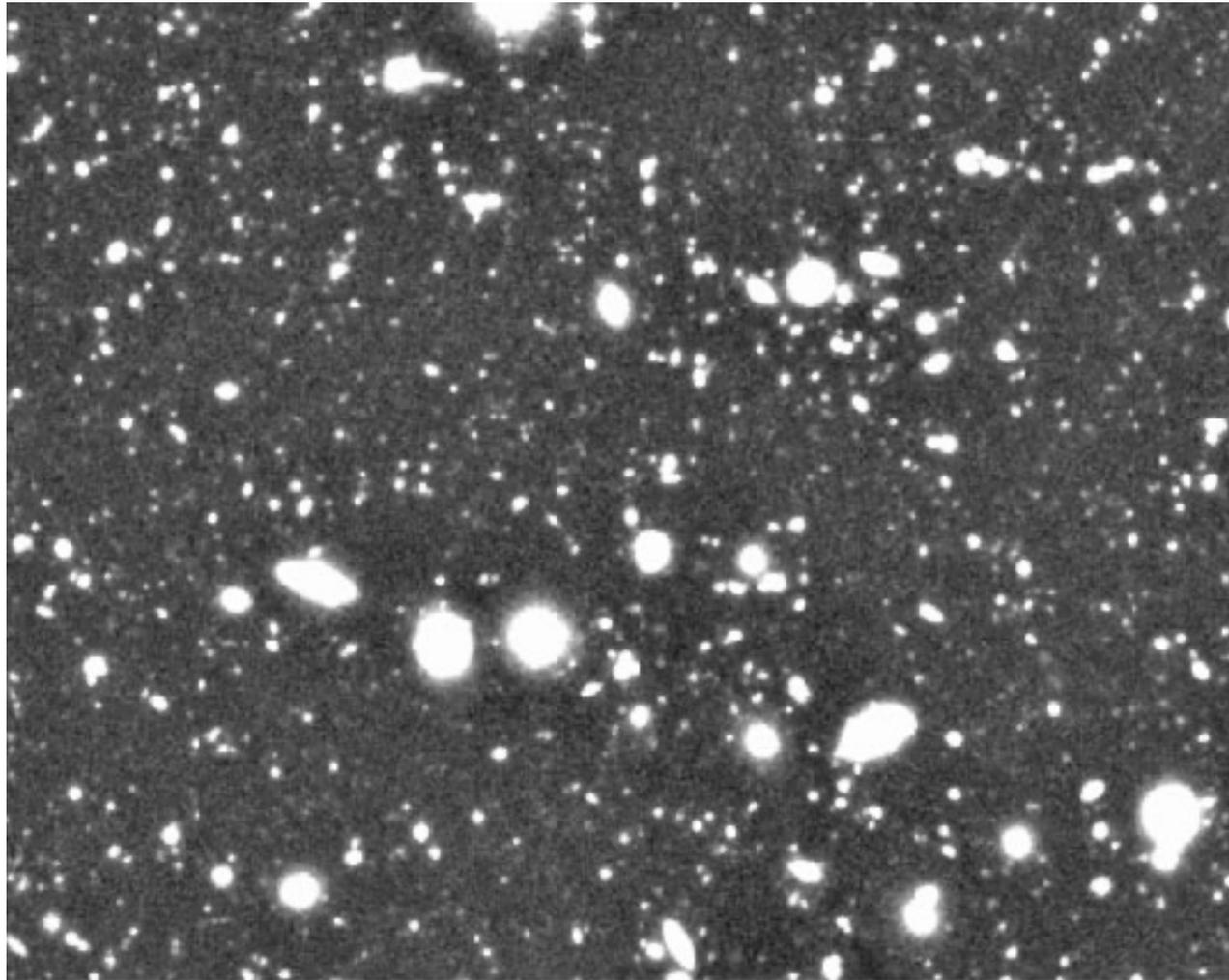
# 遠方の銀河候補を 狭帯域フィルター(**narrow-band filter**)で選択



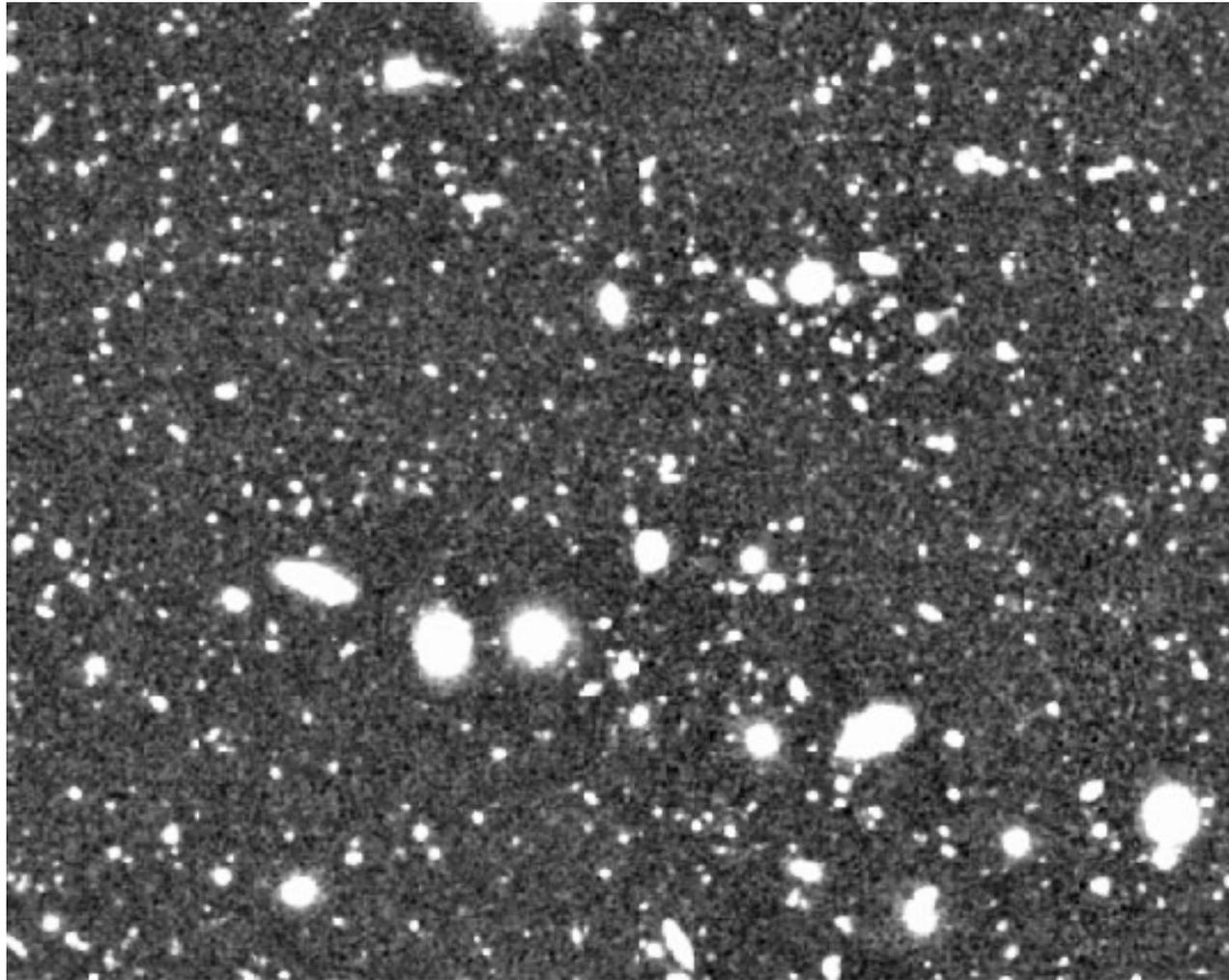




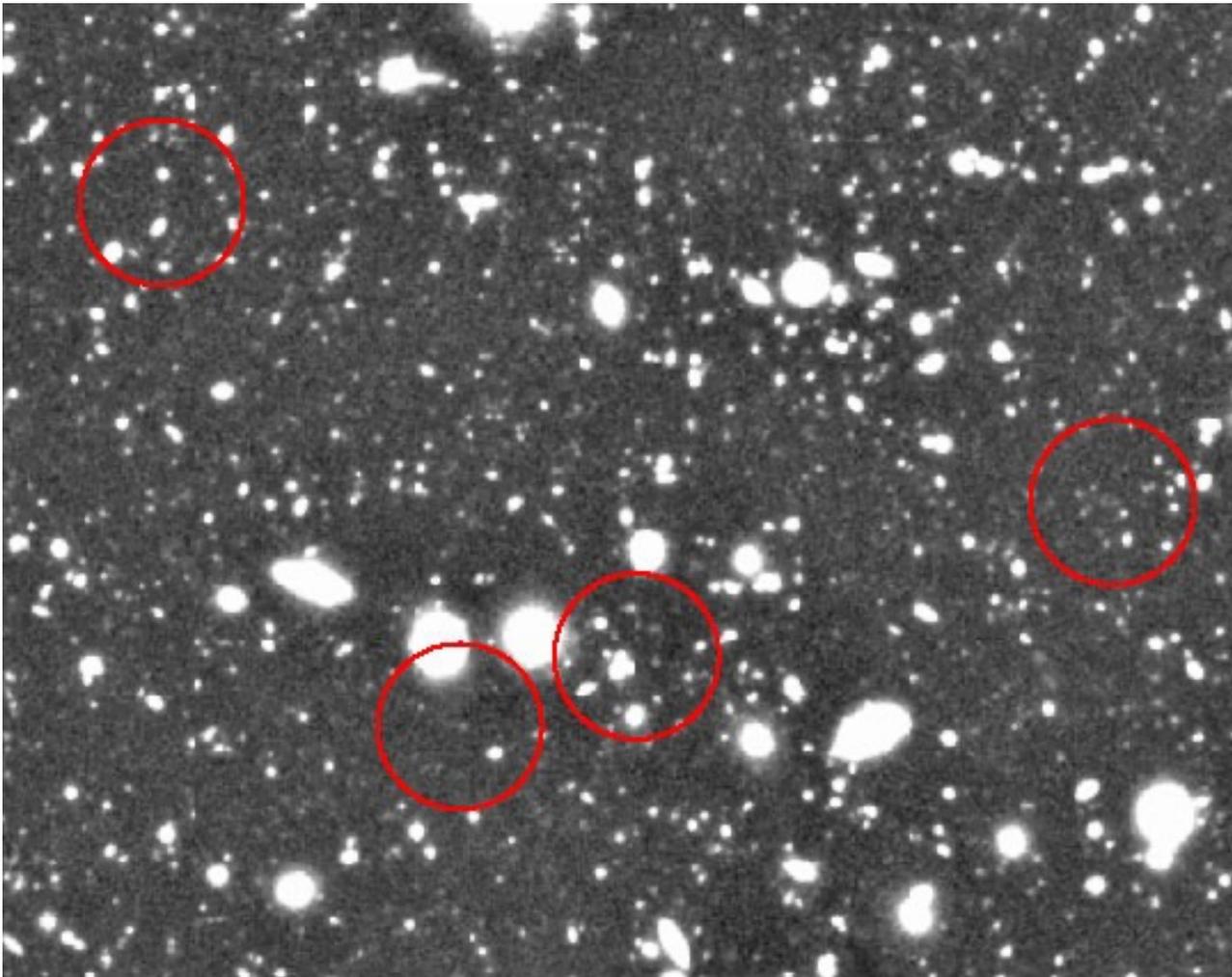
# Broad-Band Image



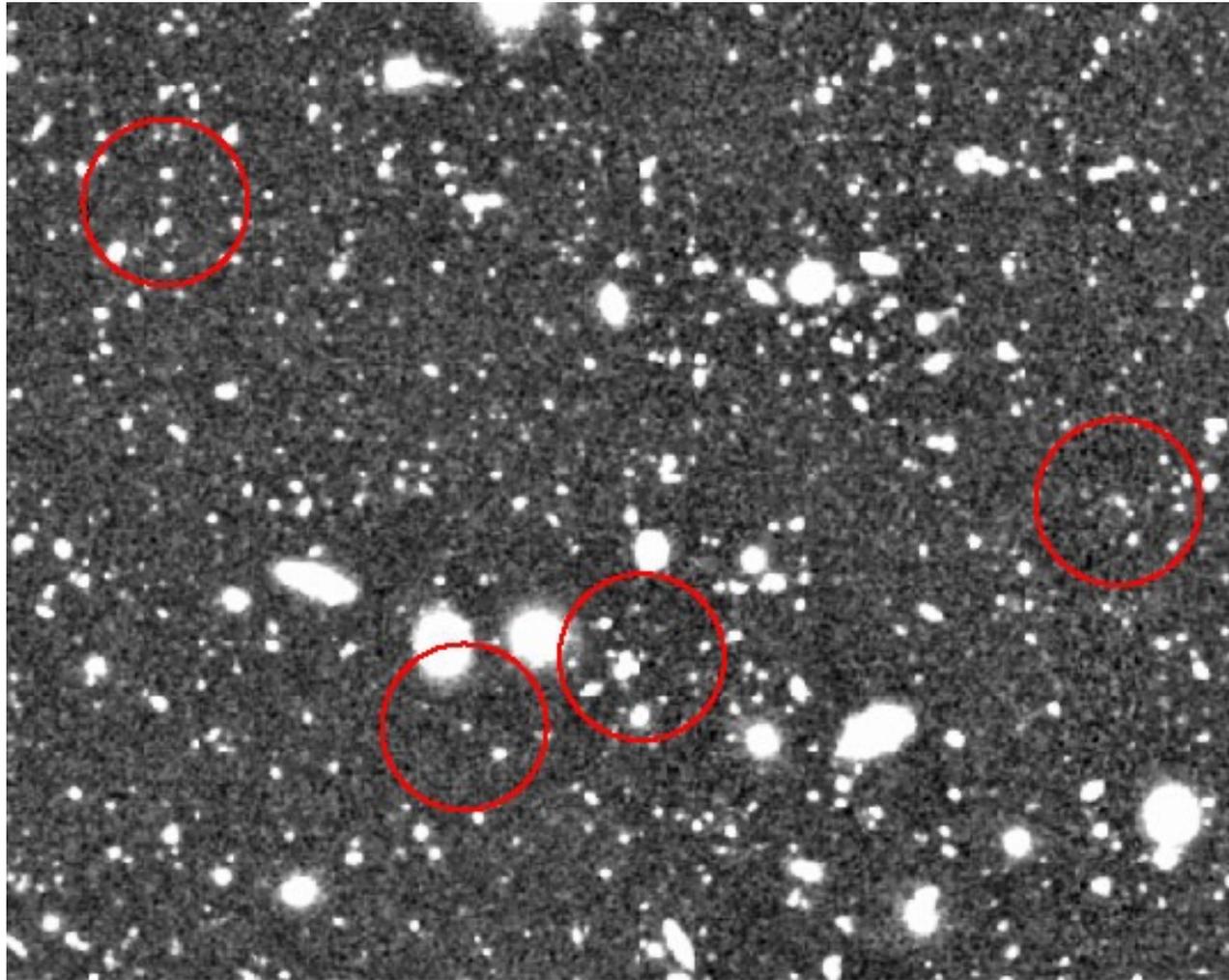
## Narrow-Band Image



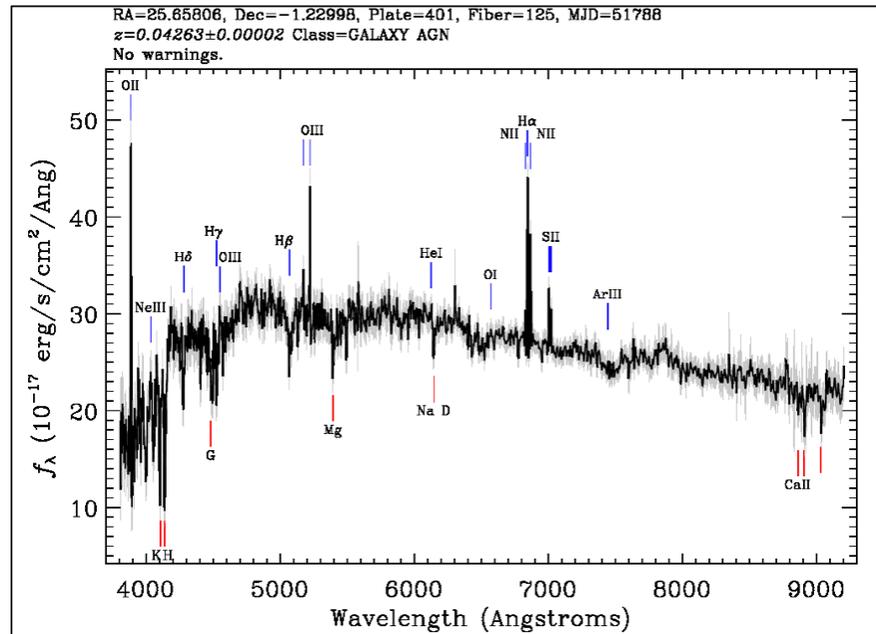
# Broad-Band Image



## Narrow-Band Image



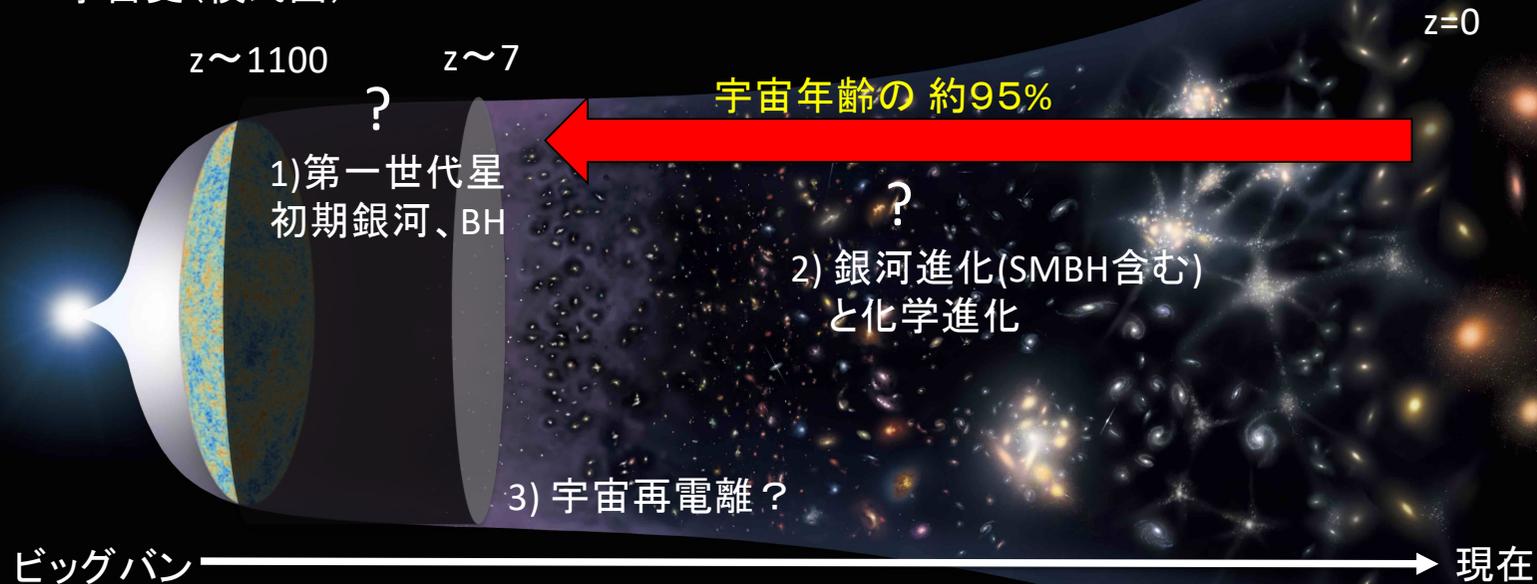
# 前景天体の混入



- 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

# 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

宇宙史(模式図)

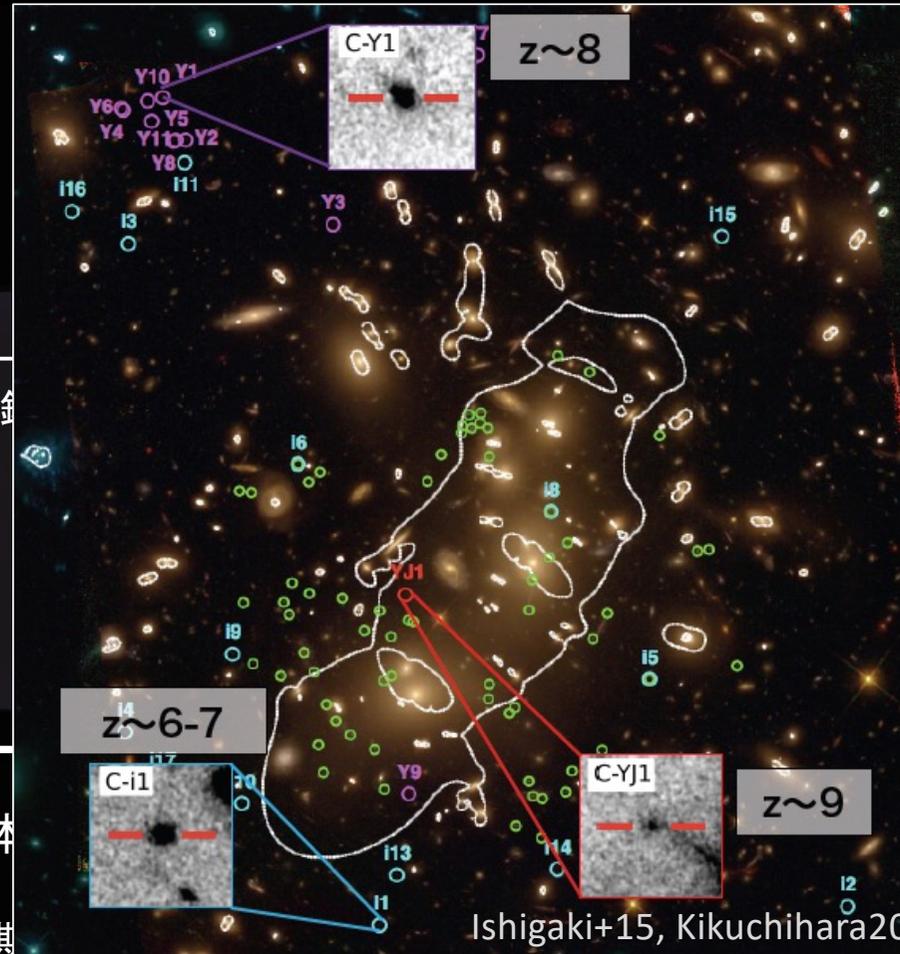
$z \sim 1100$

1) 第一  
初期銀河

ビッグバン

- 銀河が宇宙の基本
- 課題

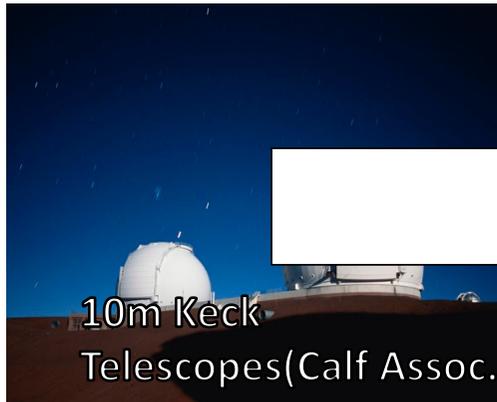
- 1) 第一世代星/初期
- 2) 宇宙大規模構造の中での銀河進化(超巨大ブラックホール含む)と化学進化
- 3) 宇宙再電離史と再電離源



$z=0$

現在

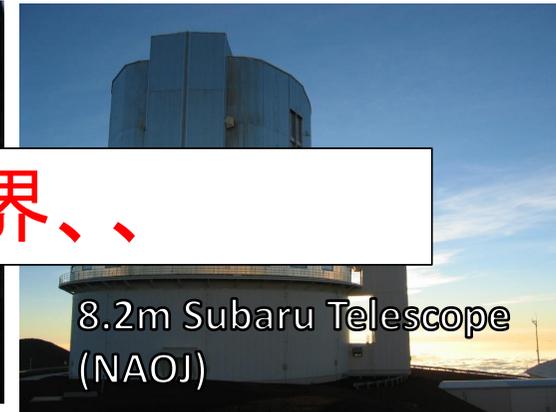
# 大型望遠鏡



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)

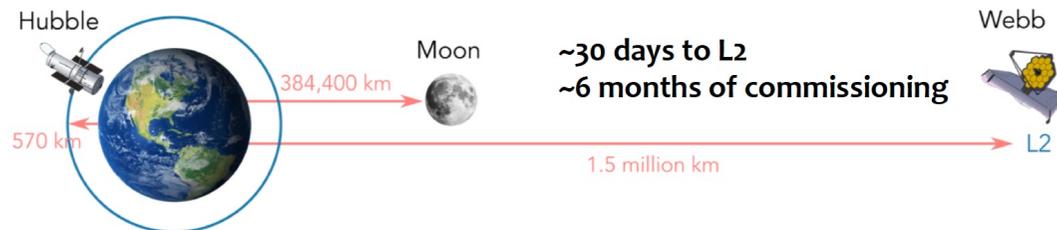
- JWST
  - NASA(米)、ESA(欧)、CSA(加)
  - 大型の宇宙望遠鏡(赤外線+可視光の一部)
  - ハッブル宇宙望遠鏡の後継→6倍の集光力





c) NASA Goddard

# 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

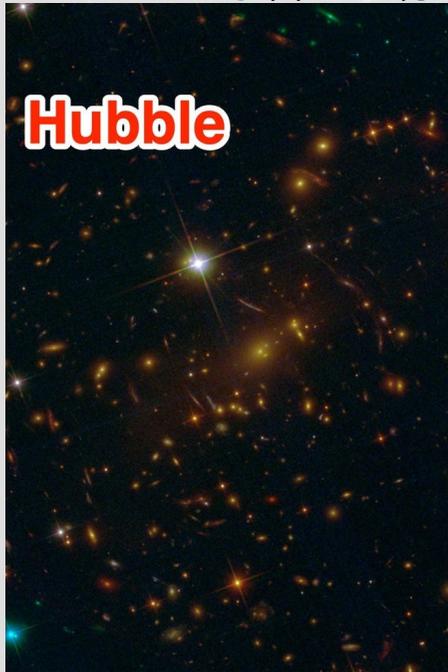


- バイデン米大統領による記者発表(於:ホワイトハウス2022年7月)
- 初期のデータを公開。その後も順次データ公開



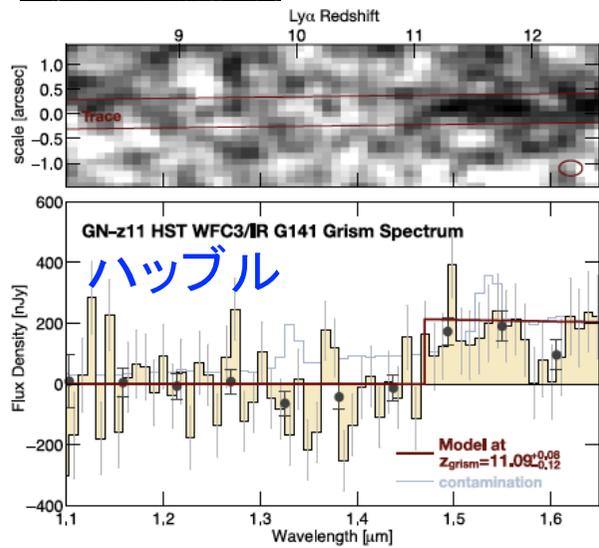
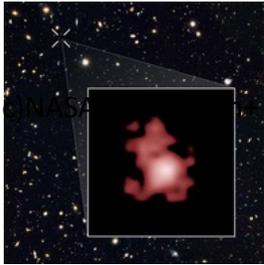
ハッブル宇宙望遠鏡

JWST

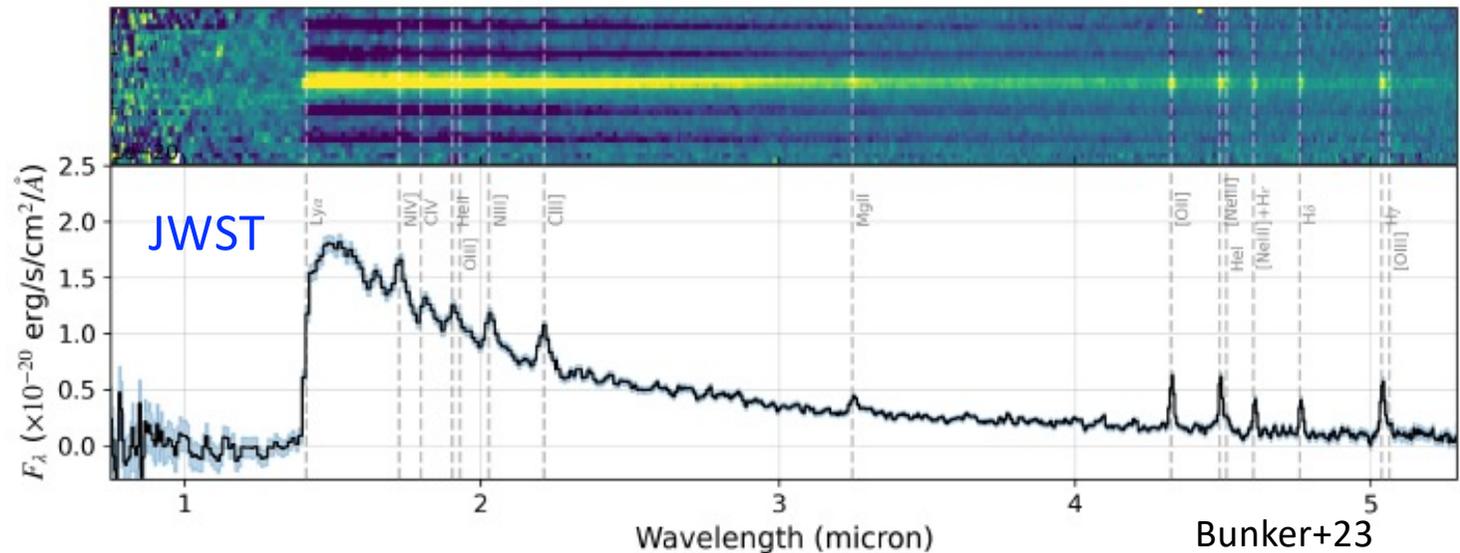


NASA

# JWSTの高い観測能力 GN-z11

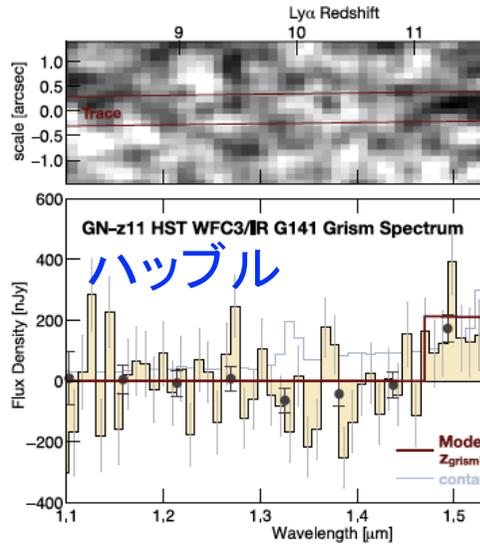
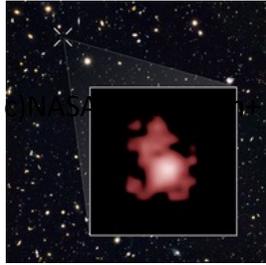


Oesch et al. (2016)

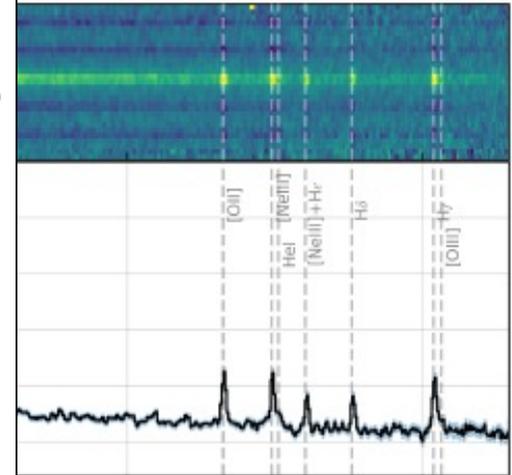
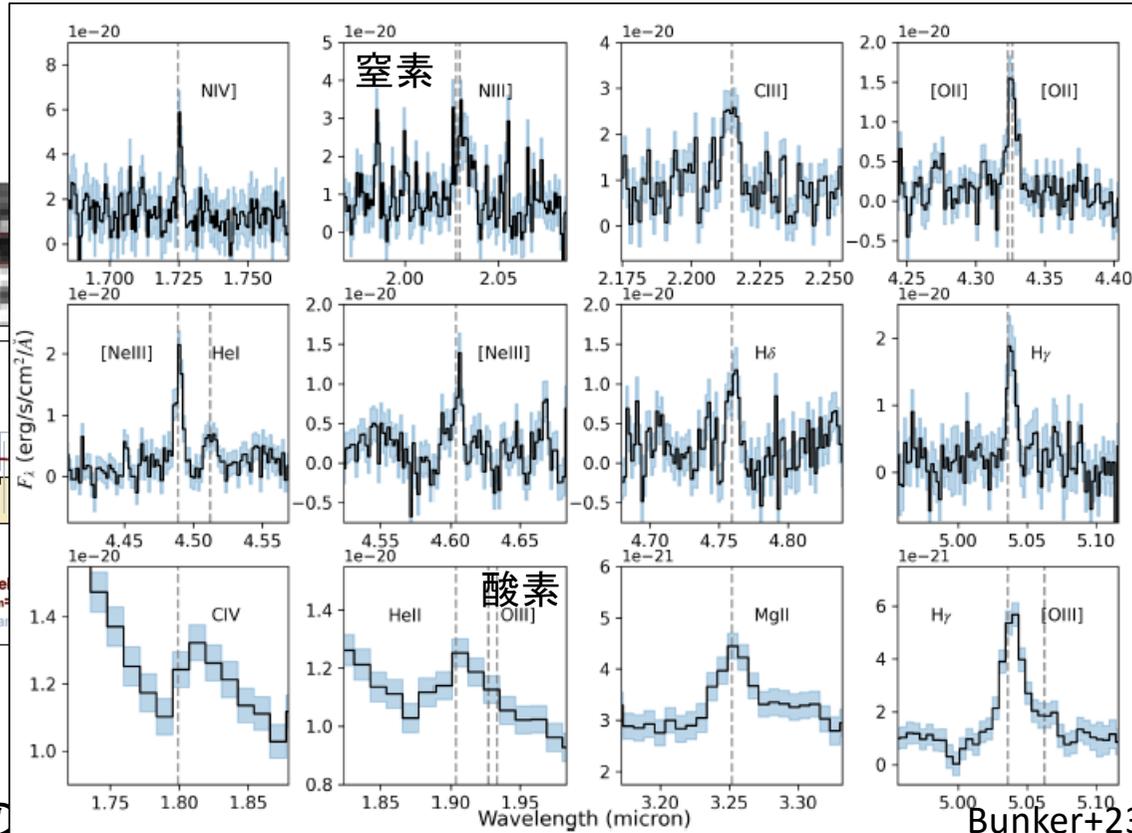


- ハッブル宇宙望遠鏡のGN-z11 ( $z=11$ くらい; 134億年前??) → JWST装置開発チーム連合(JADES)の分光観測 →  $z=10.6$ と判明。さらに1つの輝線だけではない
- 多数の元素から出される輝線、そして星の光(連続光)も
- 驚くほど、窒素ガスが出す輝線が強い(酸素に対して) → 窒素が天の川銀河の~3倍以上の窒素! 何故?

# JWSTの高い観測能力 GN-z11



Oesch et al. (2016)



Bunker+23

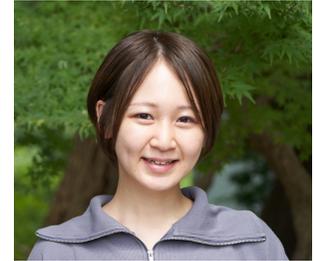
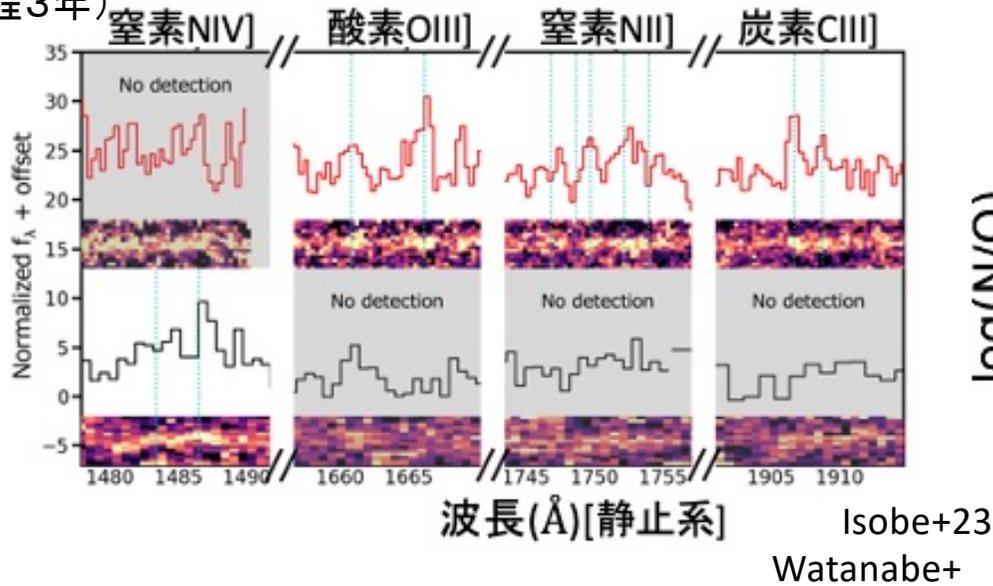
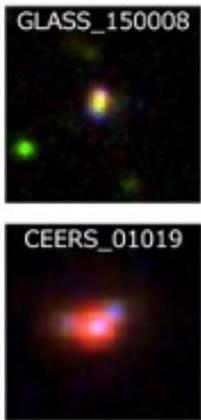
Bunker+23連合(JADES)の分光観測

- ハッブル宇宙望遠鏡の  
→ z=10.6と判明。さらに1つの輝線だけではない
- 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) → 窒素が天の川銀河の~3倍以上の窒素！何故？

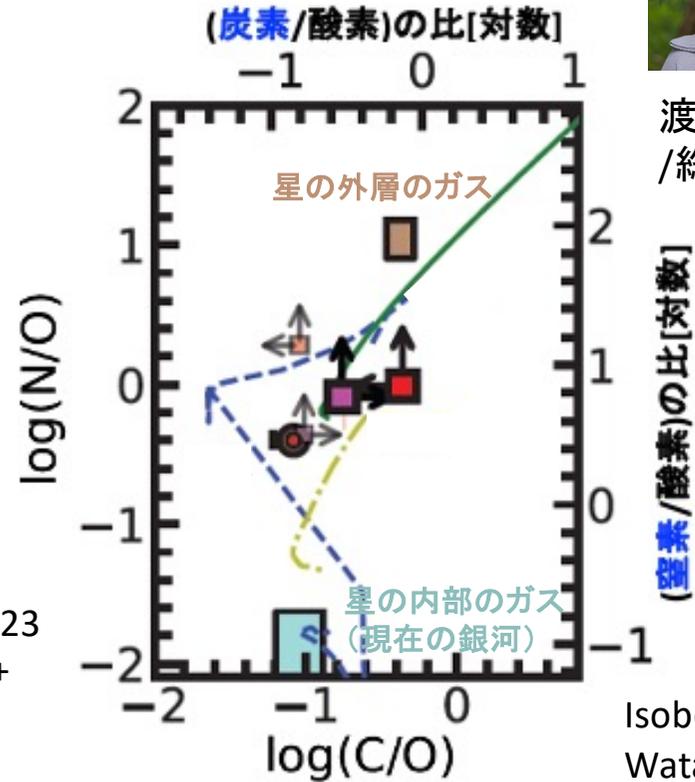
# 1) 多い窒素の謎



磯部(博士課程3年)



渡辺(国立天文台/総研大2年)

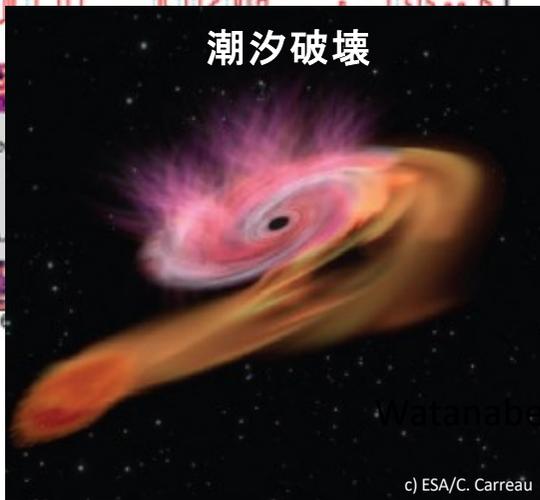
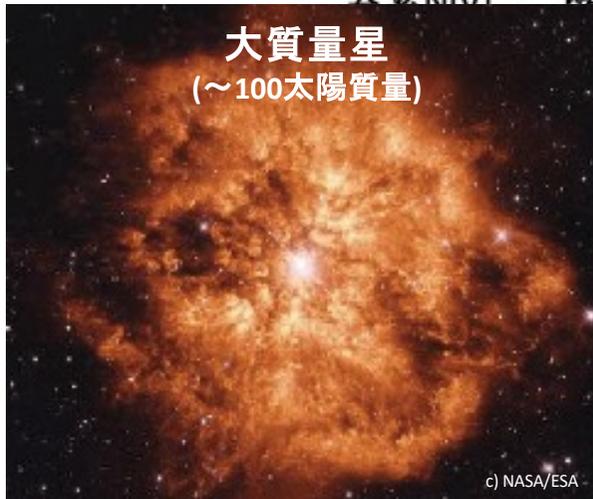
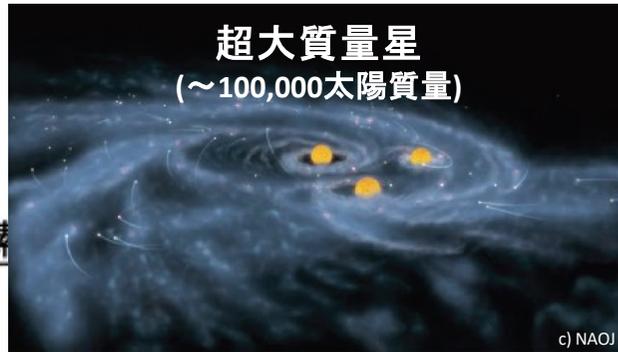


- 同じく窒素が多い銀河が2つ→普遍的に存在
- 星の外層のガス(CNO cycle核融合反応)に近い窒素、炭素、酸素比
  - 何故、星の外層のガスばかりが宇宙空間に出てきた?
  - 超新星爆発が起きずに星中心部は全てブラックホールに? →早い時代のブラックホールへ?

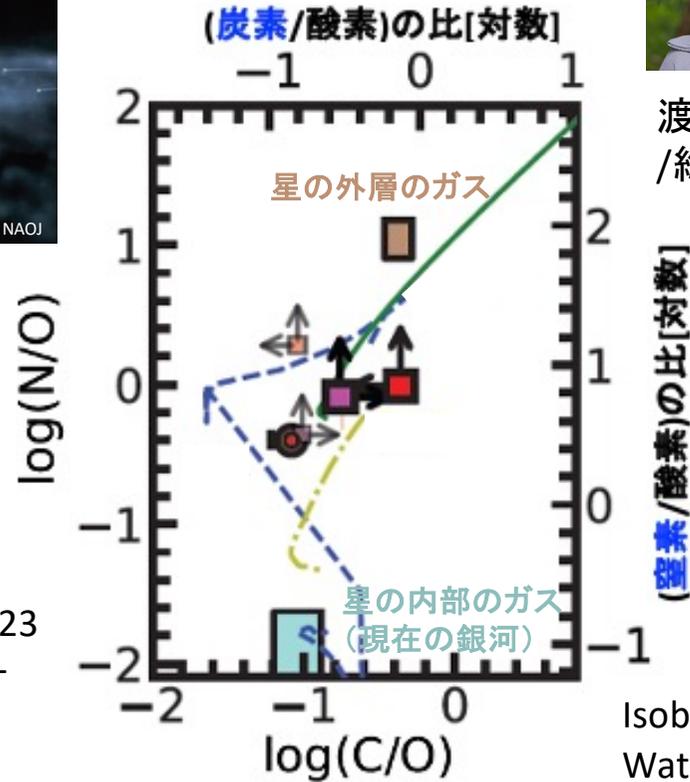
# 1) 多い窒素の謎



磯部(博士課程3年)



渡辺(国立天文台/総研大2年)



- 同じく窒素が多い銀河が2つ→普遍的に存在
- 星の外層のガス(CNO cycle核融合反応)に近い窒素、炭素、酸素比
  - 何故、星の外層のガスばかりが宇宙空間に出てきた?
  - 超新星爆発が起きずに星中心部は全てブラックホールに? →早い時代のブラックホールへ?

# 1) 多い窒素の謎

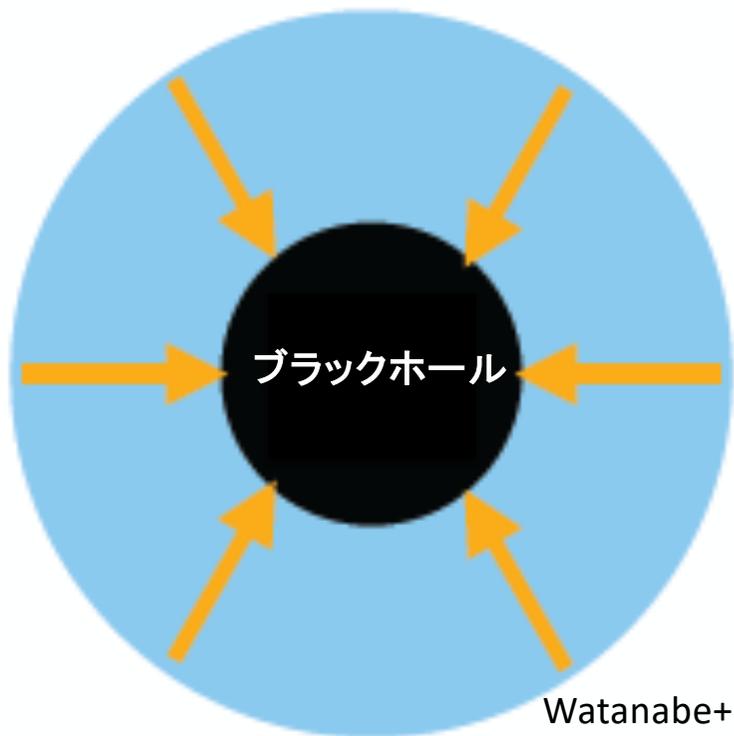
超大質量星



磯部(博士課程3年)



大質量星  
(~100太陽質量)



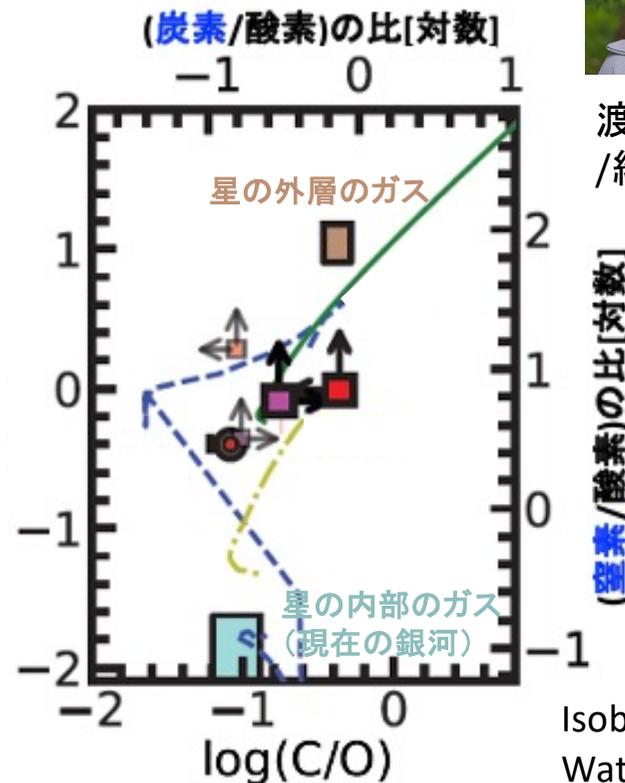
ブラックホール

Watanabe+

c) ESA/C. Carreau



渡辺(国立天文台/総研大2年)

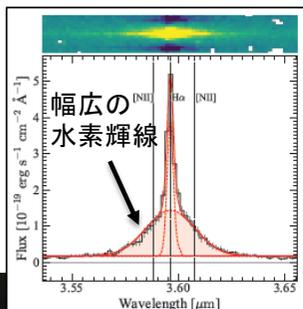


- 同じく窒素が多い銀河が2つ→普遍的に存在
- 星の外層のガス(CNO cycle核融合反応)に近い窒素、炭素、酸素比
  - 何故、星の外層のガスばかりが宇宙空間に出てきた?
  - 超新星爆発が起きずに星中心部は全てブラックホールに? →早い時代のブラックホールへ?

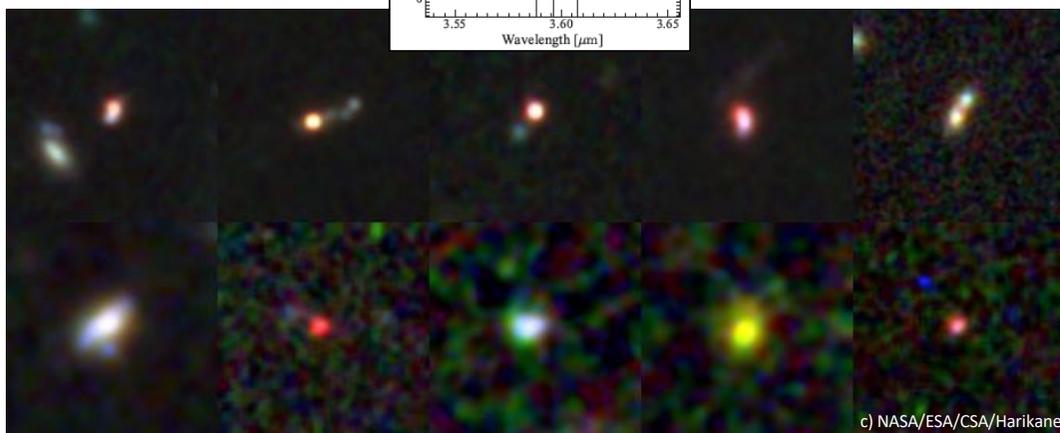
## 2) 予想以上に多かった 超巨大ブラックホール



播金 (東大)



$z=4-7$   
(123-130億年前)

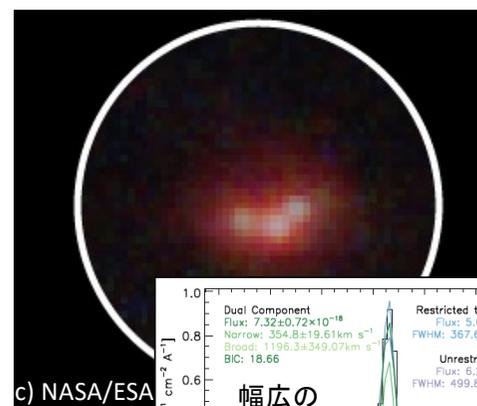


c) NASA/ESA/CSA/Harikane

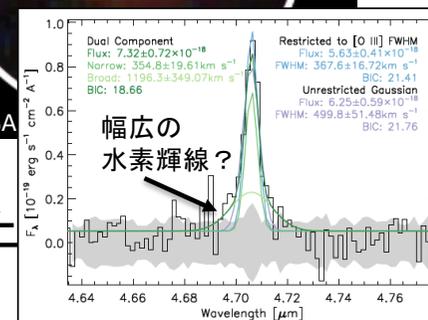
CEERS 1019  $z=8.68$   
(132億年前)



Larson  
(テキサス大)

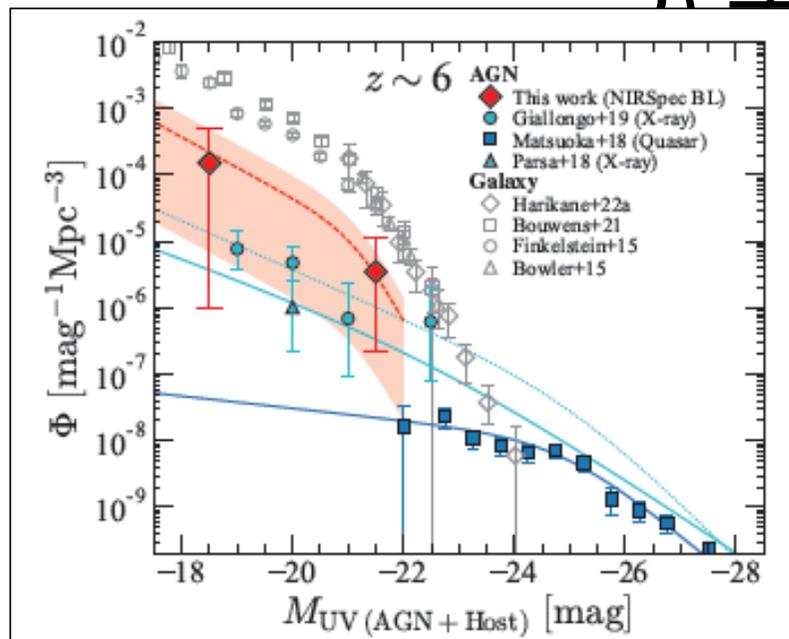


c) NASA/ESA

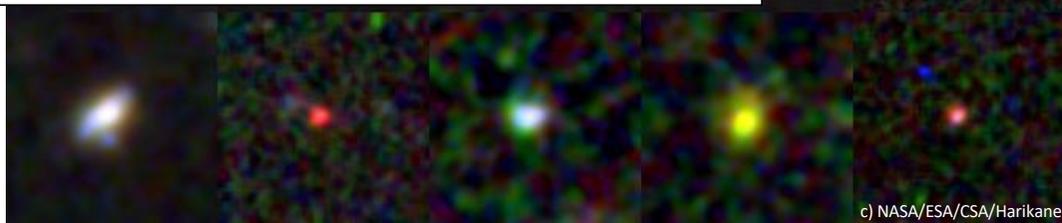


- 「普通の銀河」にあった、活動するブラックホール→推測の10倍以上
  - 宇宙初期は考えられていたより活動的だったのでは？
- 最も遠い/昔のブラックホール
  - CEERS 1019 ( $z=8.7$ ) 132億年前
  - より質の高いデータ: CEERS 1019のブラックホールは確認できず?寧ろGN-z11 ( $z=10.6$ ) 134億年前)に存在(Maiolino+23)?

# 予想以上に多かった 巨大ブラックホール



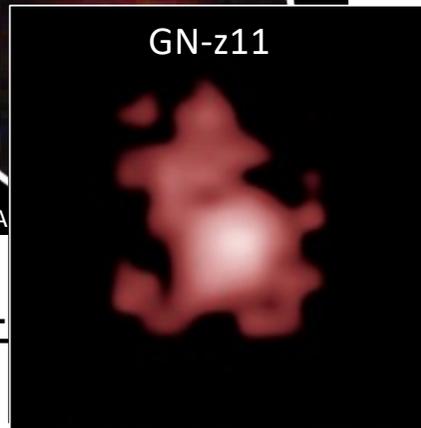
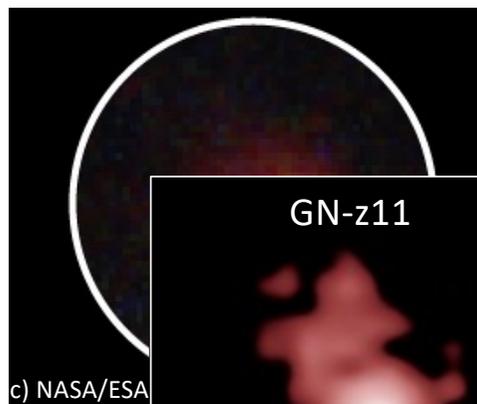
=4-7  
123-130億年前



CEERS 1019  $z=8.68$   
(132億年前)



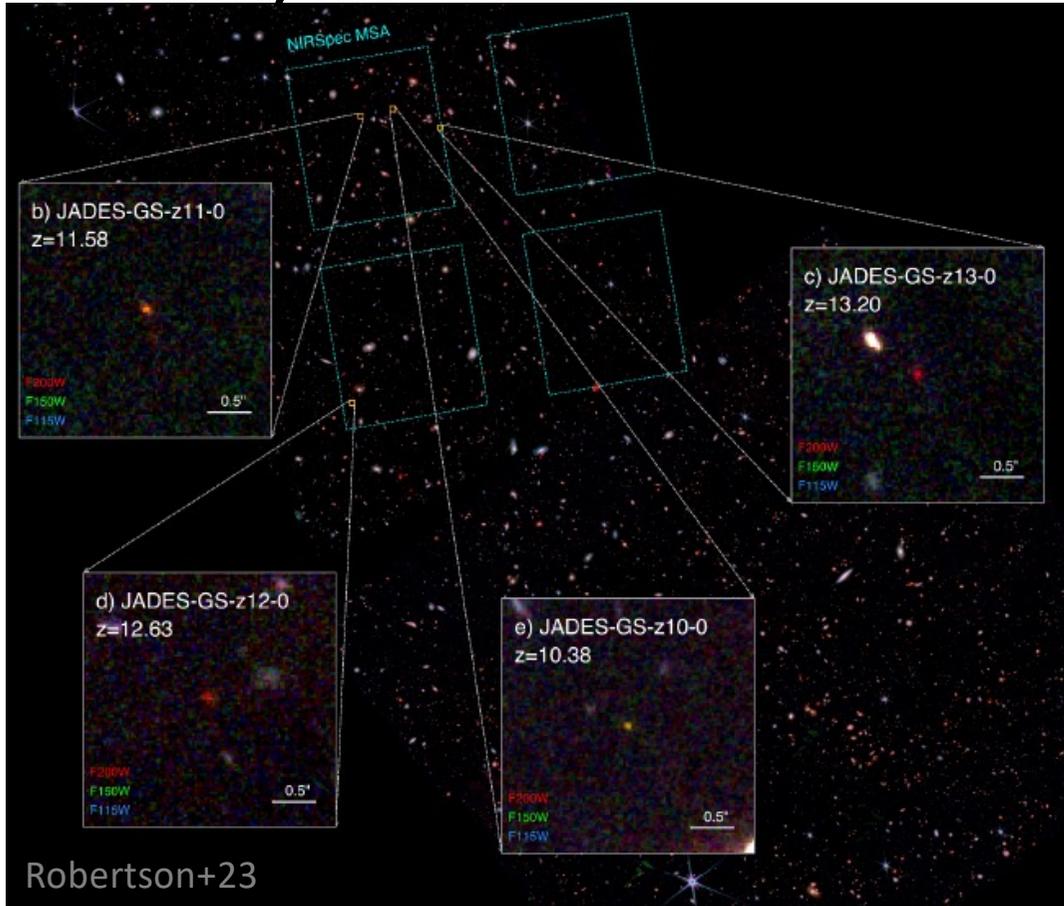
Larson  
(テキサス大)



Maiolino  
(ケンブリッジ大)

- 「普通の銀河」にあった、活動するブラックホール→推測の10倍以上
  - 宇宙初期は考えられていたより活動的だったのでは？
- 最も遠い/昔のブラックホール
  - CEERS 1019 ( $z=8.7$ ) 132億年前
  - より質の高いデータ:CEERS 1019のブラックホールは確認できず?寧ろGN-z11 ( $z=10.6$ )134億年前)に存在(Maiolino+23)?

# 3) 予想を超える明るい銀河

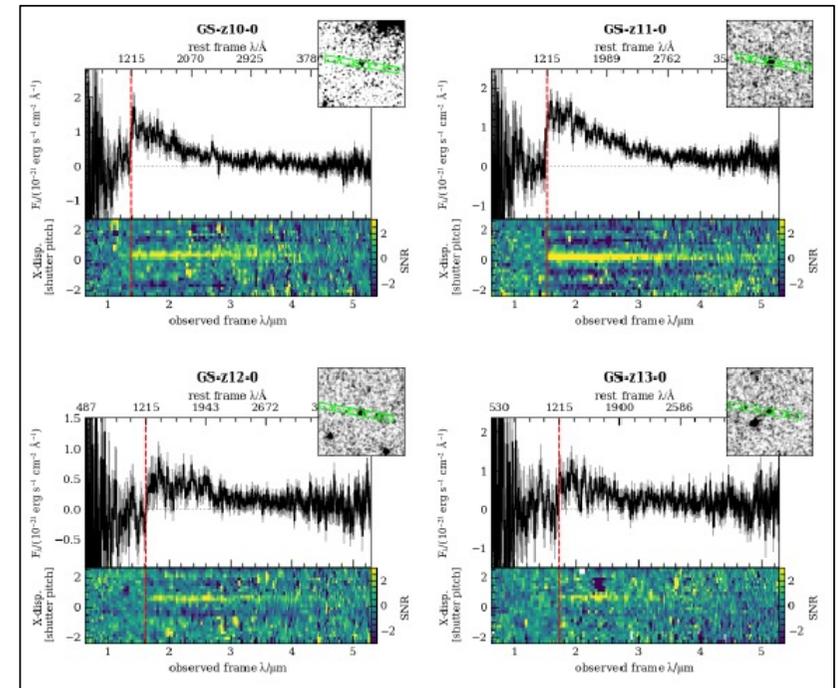


Robertson  
(カリフォルニア大)



Curtis-Lake  
(ハートフォードシャー大)

Curtis-Lake+23



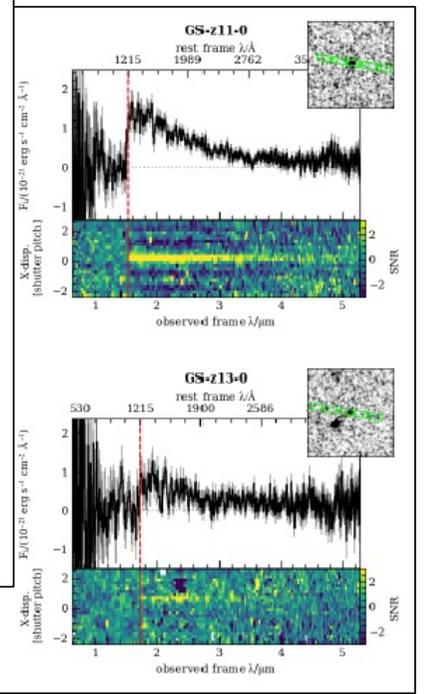
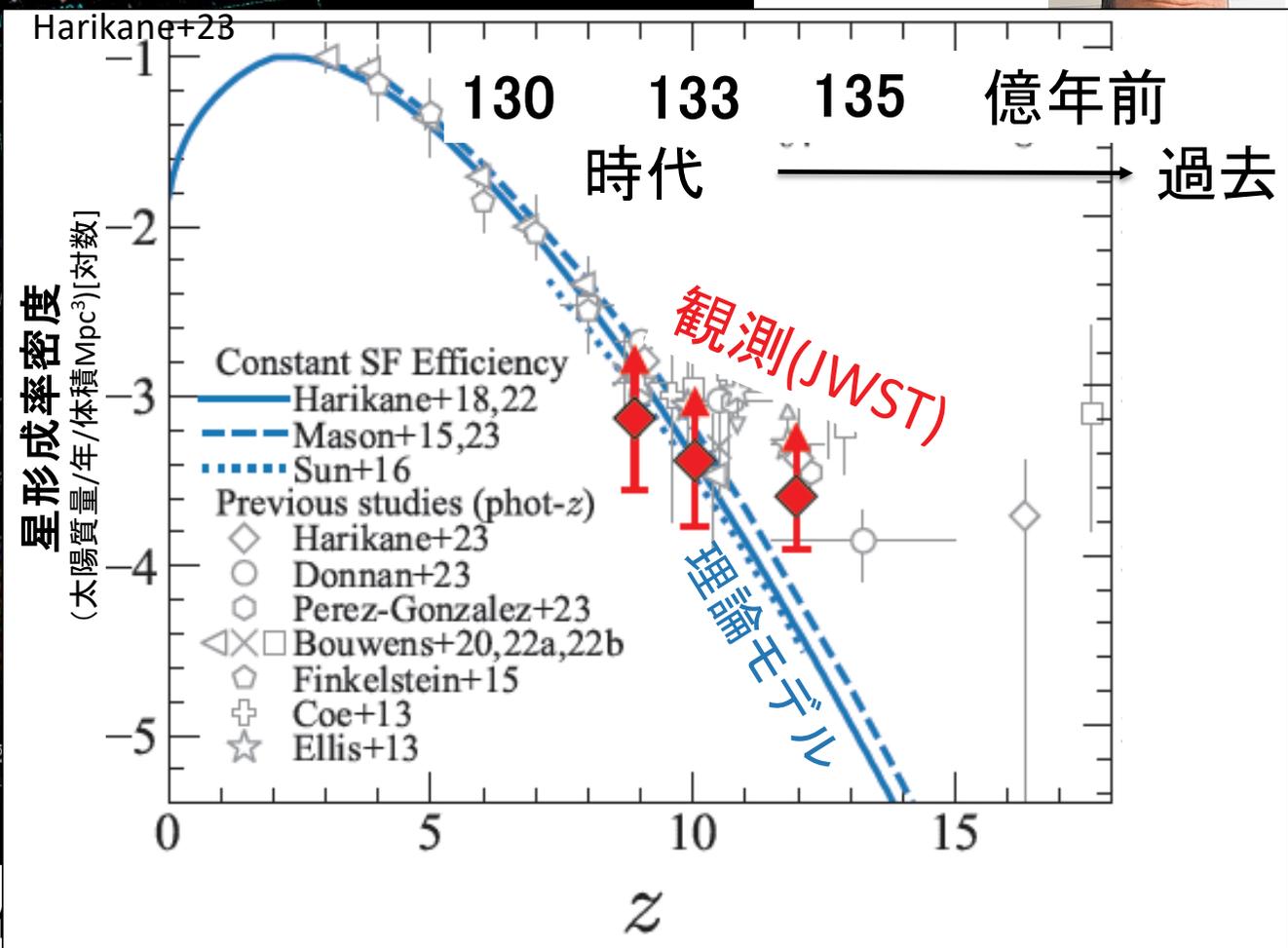
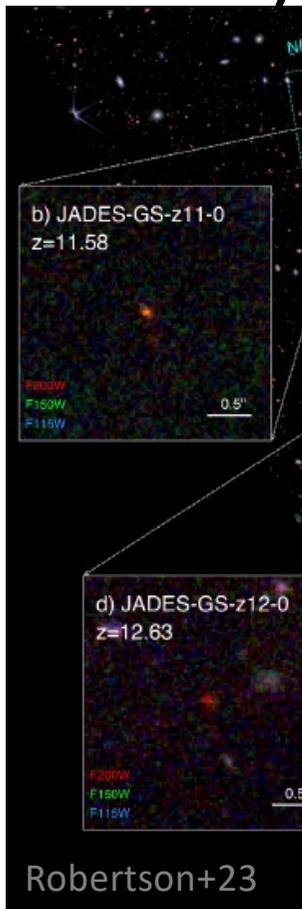
- JADES:  $z=13.2$  (135億年前)の銀河GS-z13-0まで報告( $z=14$ も)
- 距離は**分光で確定** (「銀河候補」ではない)
- 宇宙初期で、予想以上に星が作られている(早く銀河が成長)何故？

# 3) 予想を超える明るい銀河

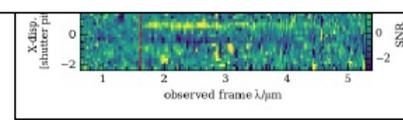


Curtis-Lake  
(ハートフォードシャー大)

Curtis-Lake+23

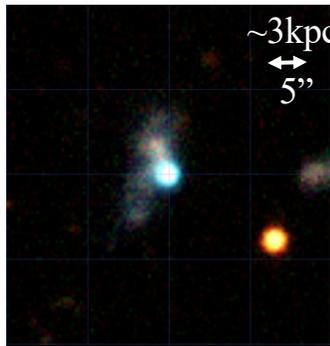


- JADES:  $z=13.2$  (135億年前)
- 距離は**分光で確定** (「銀河候補」ではない)
- 宇宙初期で、予想以上に星が作られている (早く銀河が成長) 何故？

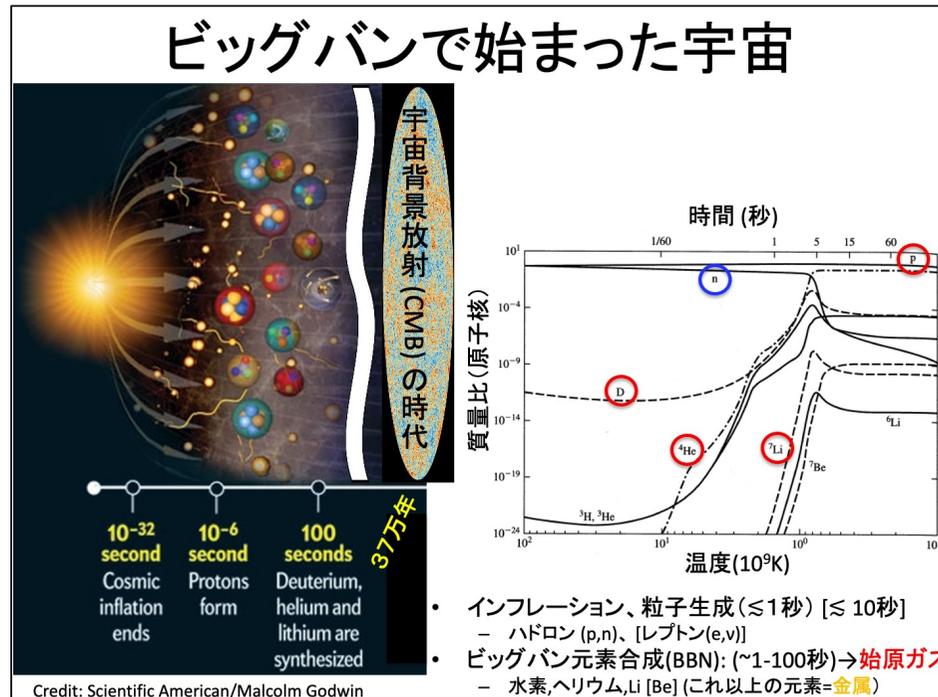


より初期の宇宙へ  
—ビッグバン直後の宇宙—

# ビッグバン元素合成 原始ヘリウム



Kojima+20

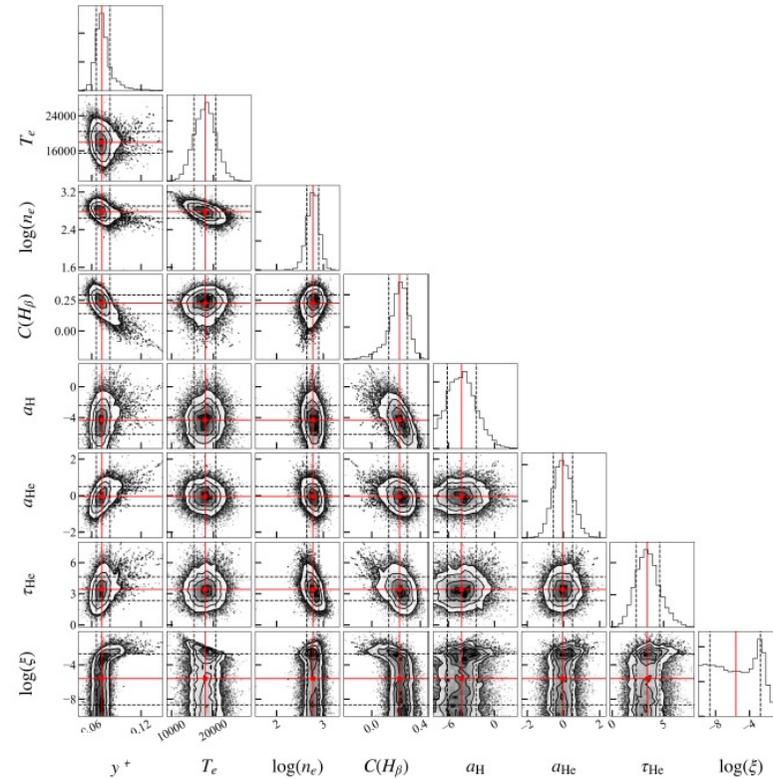
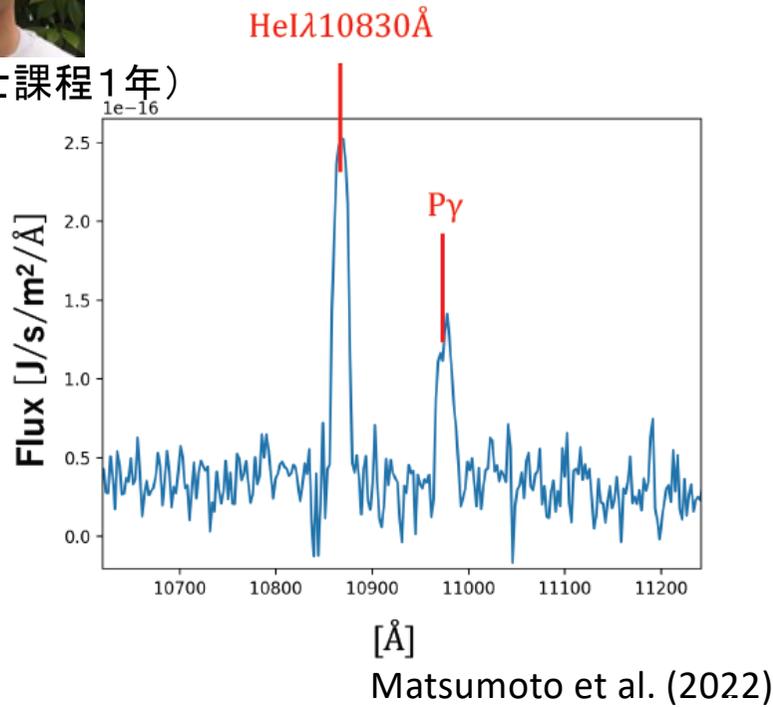


- 極金属欠乏銀河 (近傍): ビッグバン元素合成によるガス  $\rightarrow$  原始ヘリウムの組成比

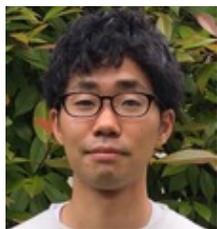


松本 (博士課程1年)

# ヘリウム組成比 $\text{He}/\text{H}$ の測定



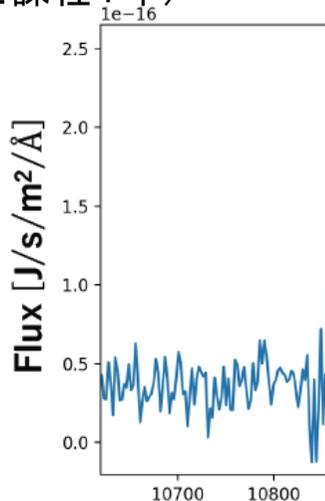
- 水素-ヘリウム14本の輝線(可視光-近赤外): すばる観測
- Markov chain Monte Carlo (MCMC)法でモデルフィット
  - 8つのガス雲パラメータ:  $(\text{He}/\text{H})$ ,  $T_e$ ,  $n_e$ ,  $\xi$  etc.



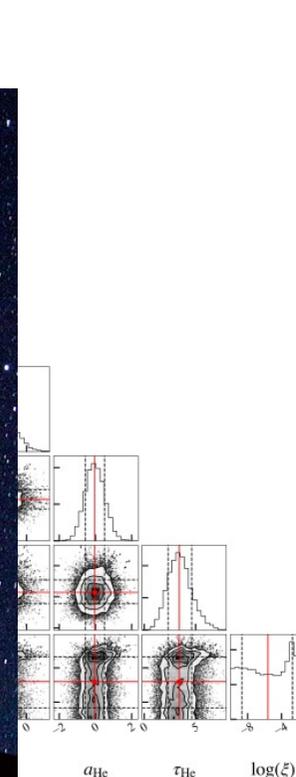
松本(博士課程1年)

# ヘリウム組成比 $\text{He}/\text{H}$ の測定

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

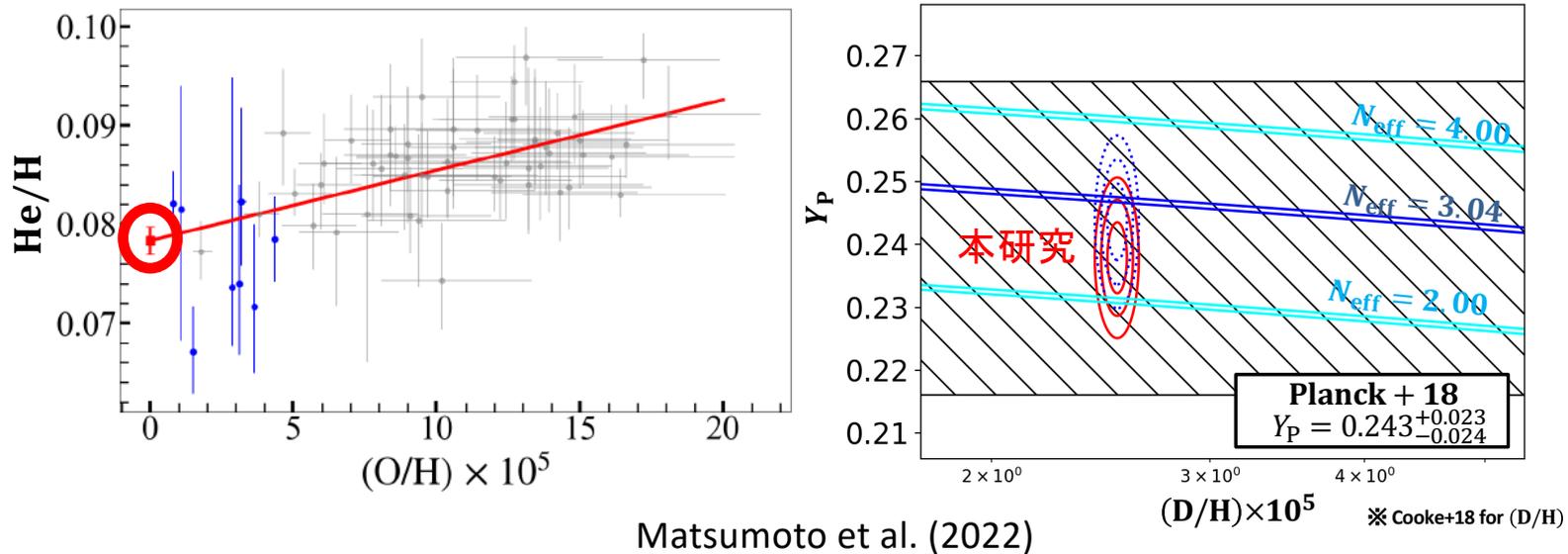


すばる望遠鏡



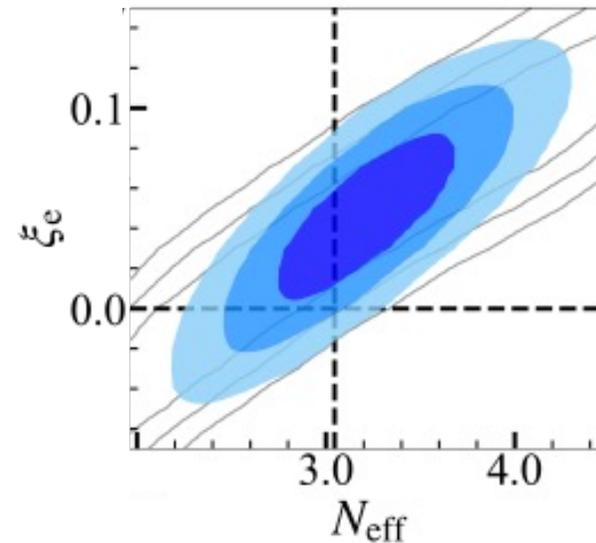
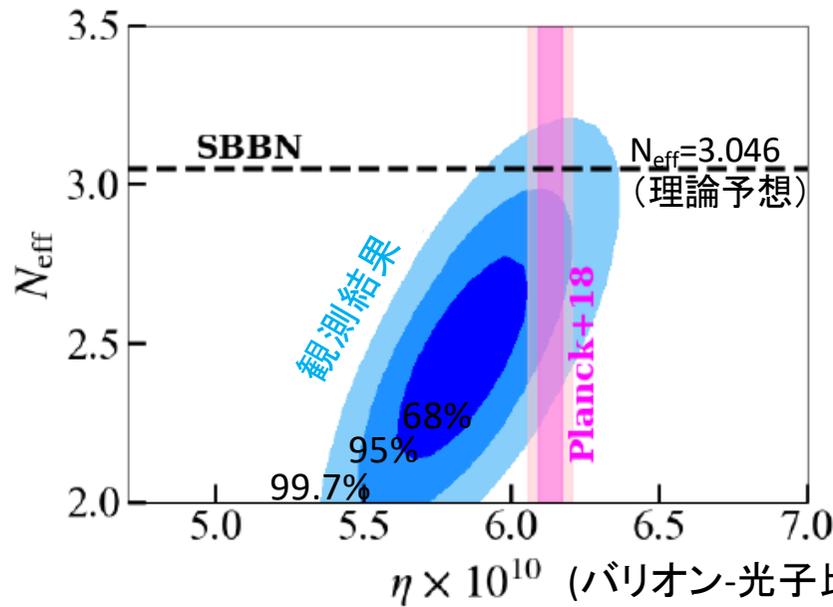
- 水素-ヘリウム14本の輝線(可視光-近赤外):すばる観測
- Markov chain Monte Carlo (MCMC)法でモデルフィット
  - 8つのガス雲パラメータ:  $(\text{He}/\text{H}), T_e, n_e, \xi$  etc.

# 原始ヘリウム組成比 $Y_p$



- 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。
- $Y_p \rightarrow$  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

- 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
- ジェイムズ・ウェッブ宇宙望遠鏡(JWST)
  - 打ち上げから観測、データ公開へ
  - 優れた分光観測能力(～130億年より前の時代)
    - 1) 多い窒素の謎
    - 2) 推測された以上に多かった超巨大ブラックホール
    - 2) 予想を超える明るい銀河
- 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