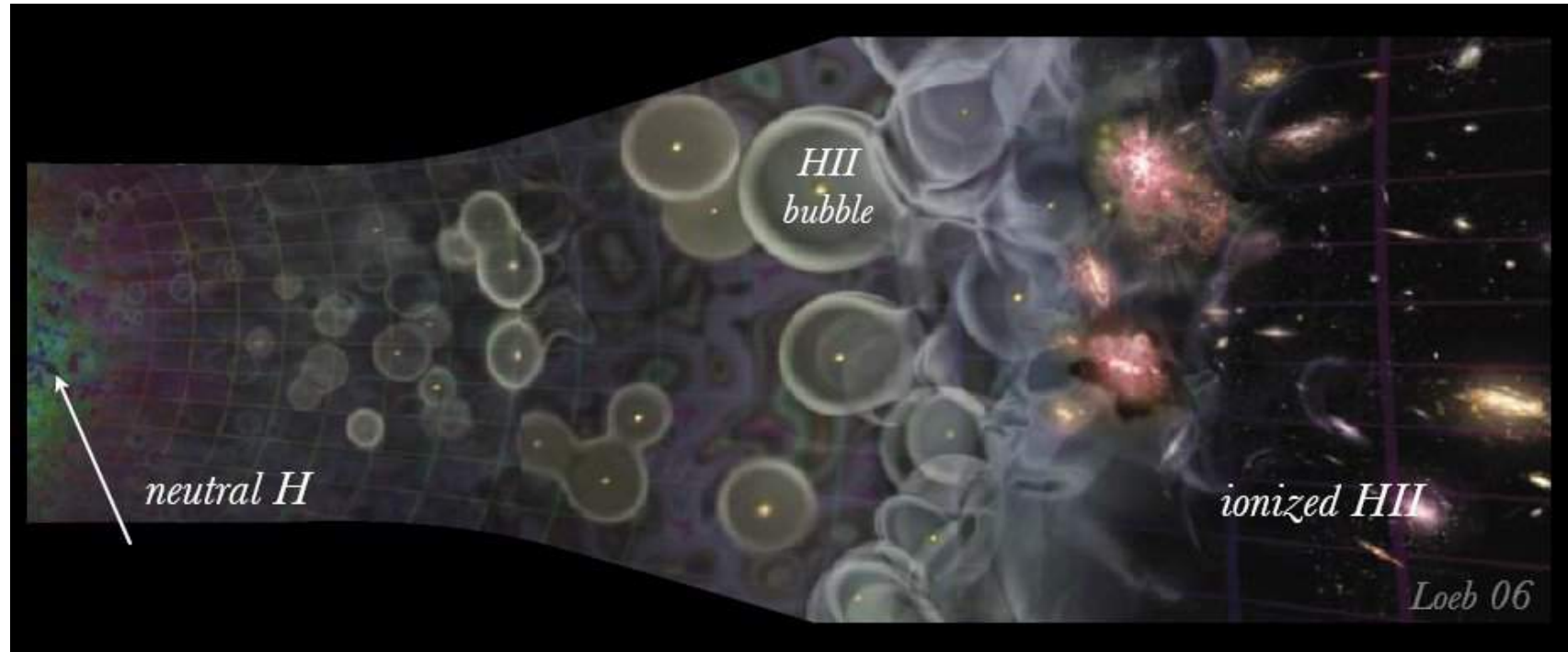


最先端研究III  
観測的宇宙論  
---宇宙史の中の再電離---



大内 正己  
東京大学 宇宙線研究所

# 可視光(近赤外線/近紫外線含む)で探る宇宙

- 何が見えるか？

- 恒星、高温ガス、クエーサー、、、
- 超新星爆発、ガンマ線バースト残光、、、



M66 (Hubble Space Telescope, NASA/AURA)

# 可視光(近赤外線/近紫外線)で探る宇宙

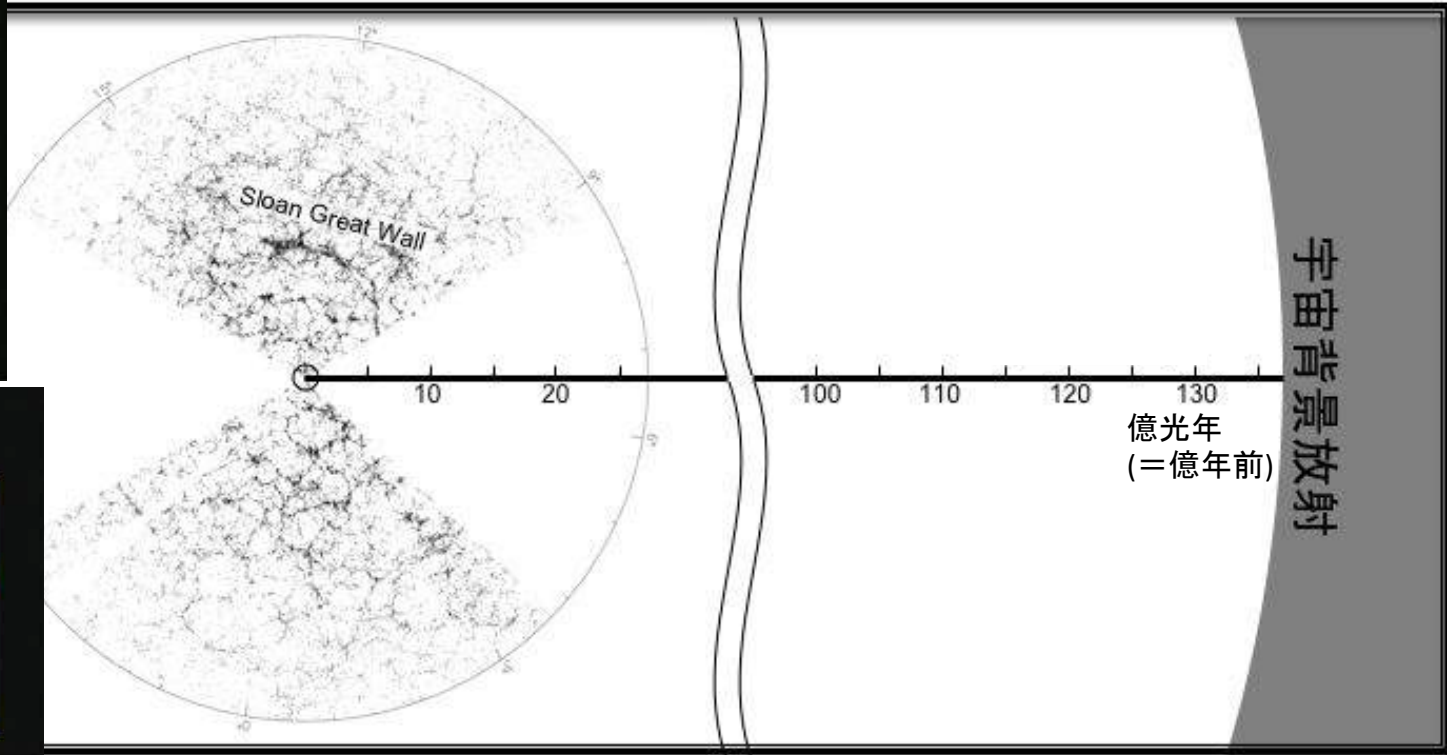
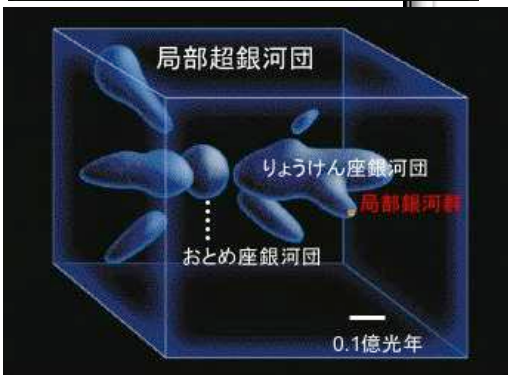
- 何を理解するか？

1. 宇宙の成り立ち(Sloan Digital Sky Survey)

- 銀河宇宙(銀河が基本構成要素)

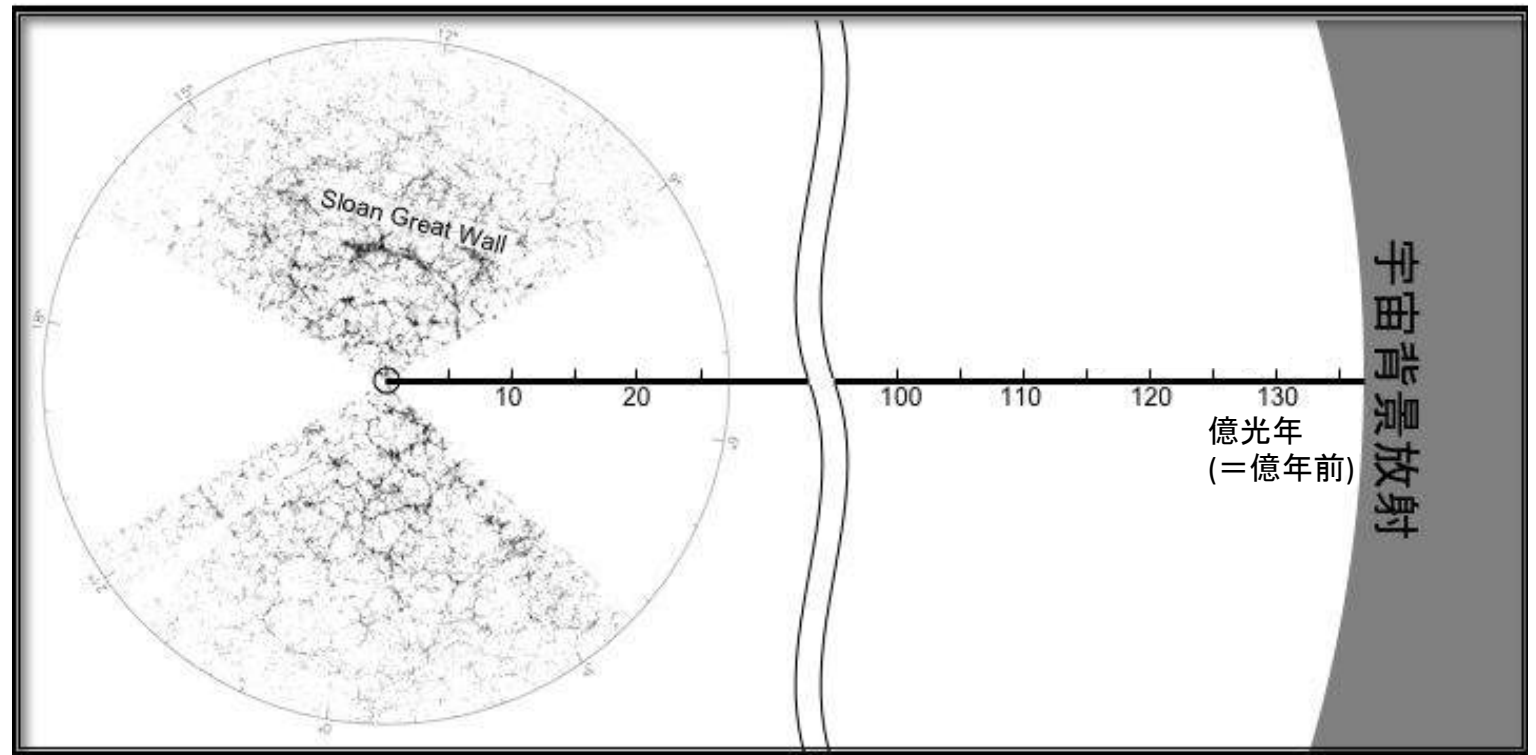
2. この銀河宇宙がどのように出来たか(宇宙史)？

- 「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(!))



# 宇宙史をどうやって調べるか？

- およそ10億光年以上の大きなスケールで見れば宇宙はほぼ一様等方（現在の宇宙、宇宙背景放射）。>10億光年の大きさならどこを観測しても良い。
- 光速は極めて早い。しかし**有限の速度**  $2.998 \times 10^5 \text{ km/s}$
- 遠方の銀河を見る。例えば100億光年彼方の銀河→100億年前に発せられた光。
- 遠方の銀河の光→距離だけでなく時間をこえた光。時空。



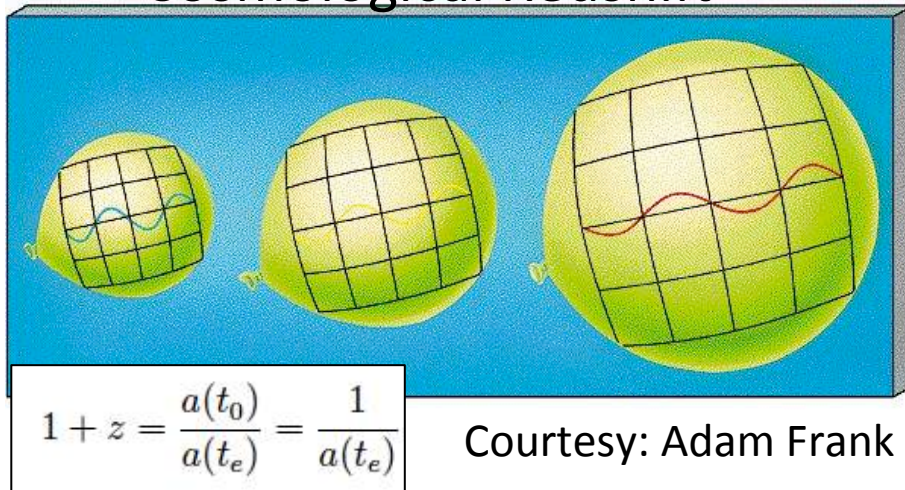


# 赤方偏移とルックバックタイム

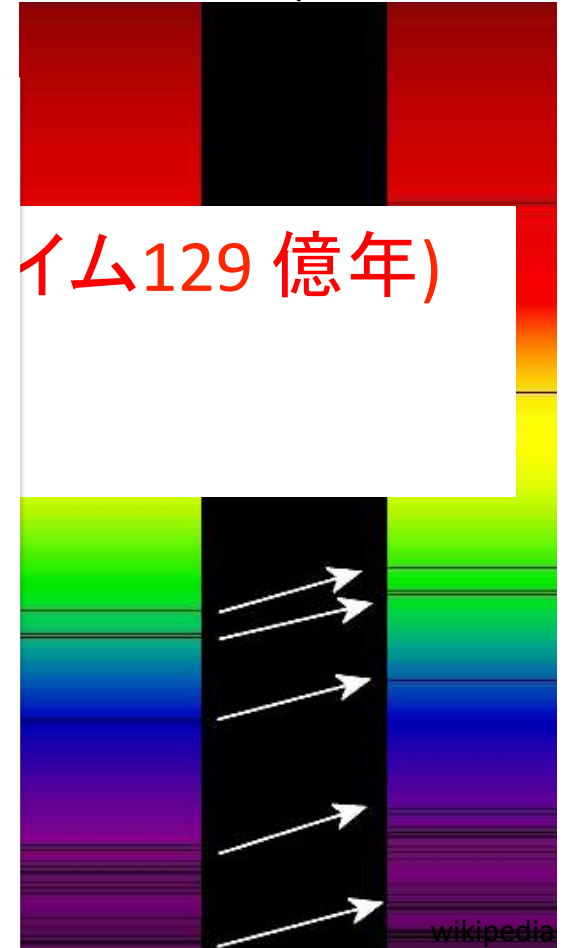
- 遠い天体 (=過去の宇宙の天体)ほど宇宙膨張の効果で赤くなる→「宇宙論的」赤方偏移(redshift;  $z$ )

$$z = \frac{\Delta\lambda}{\lambda}$$

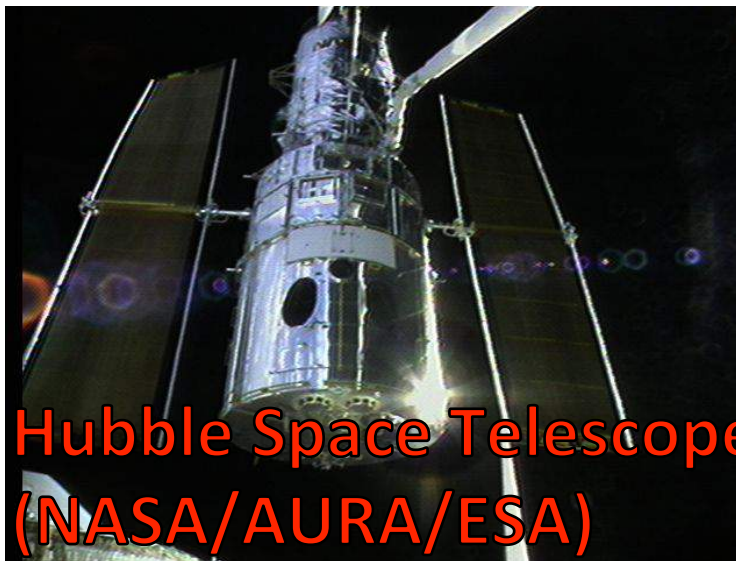
## Cosmological Redshift



Nearest star (The Sun)      Distant galaxies (made of stars)



# 大口径望遠鏡



Hubble Space Telescope  
(NASA/AURA/ESA)

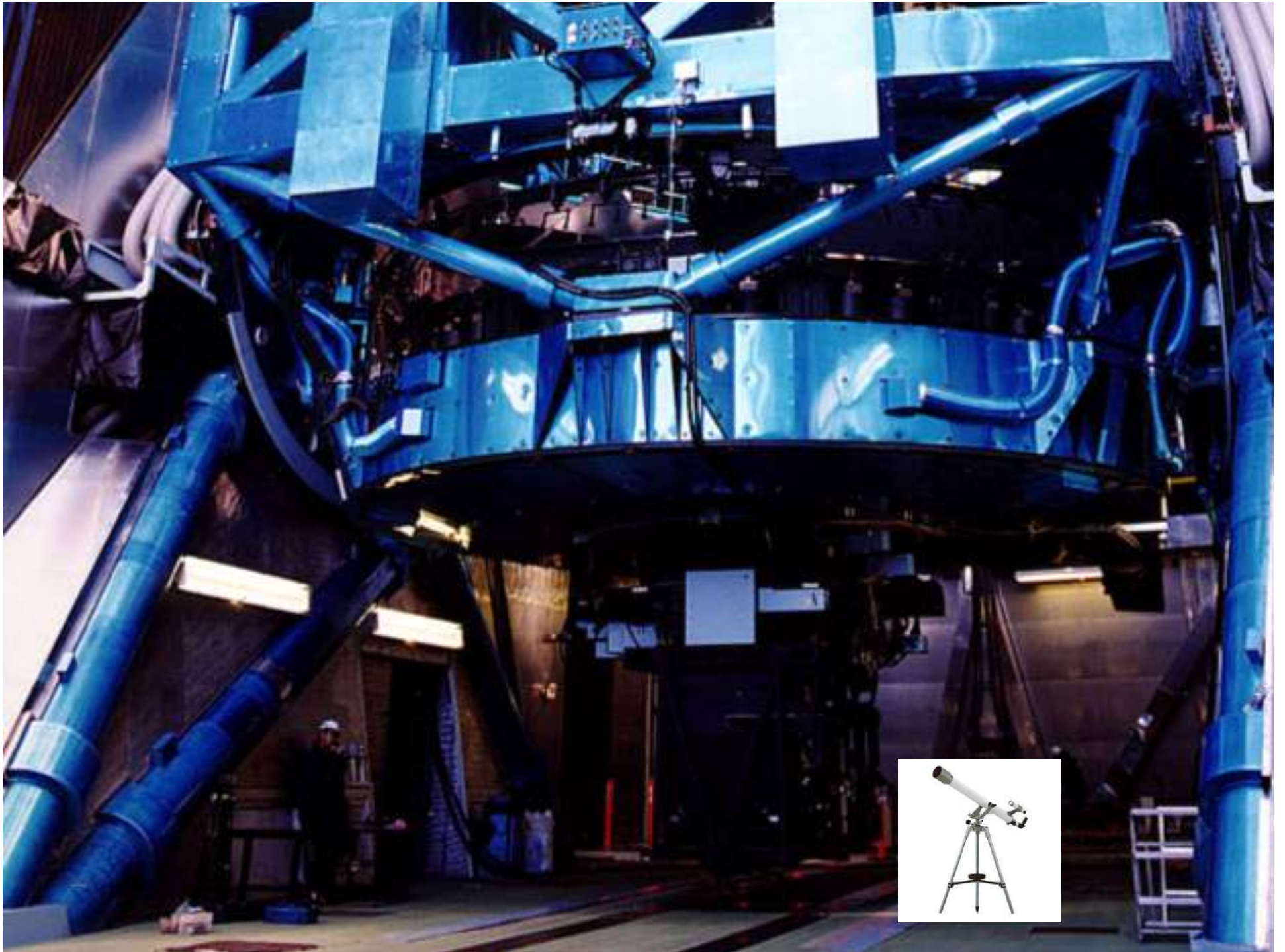


10m Keck Telescopes  
(California Assoc.)



8.2m Subaru Telescope  
(国立天文台)



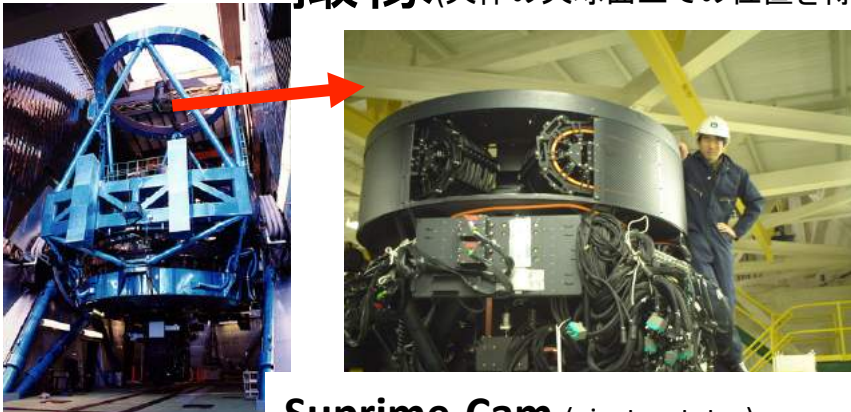


**観測はどのように行われるか？**  
**観測データはどのようなものか？**

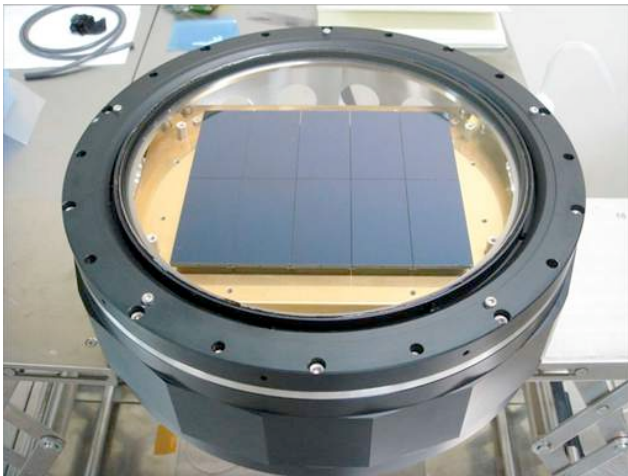


# 観測装置

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

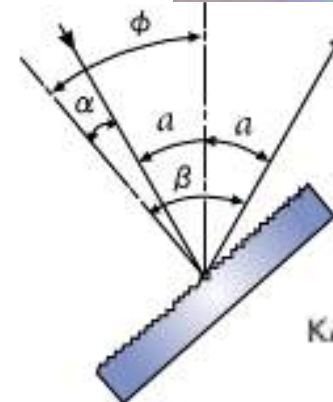
Hyper Suprime-Cam 8億7000万画素  
(cf. Canon IXY 約1000万画素)

分光 (天体の赤方偏移を測る, z)

Keck/DEIMOS



回折格子



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

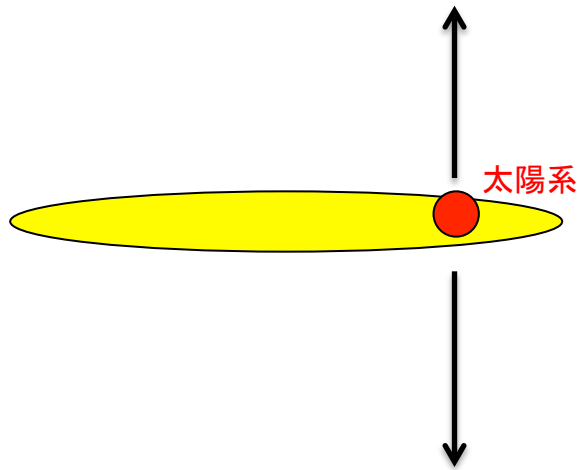
# 観測する天域

- Quiz 1:
  - 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？
    - 「>10億光年の大きさならどこを観測しても良い。」と言ったが、実際には観測される方向は大体決まっている。

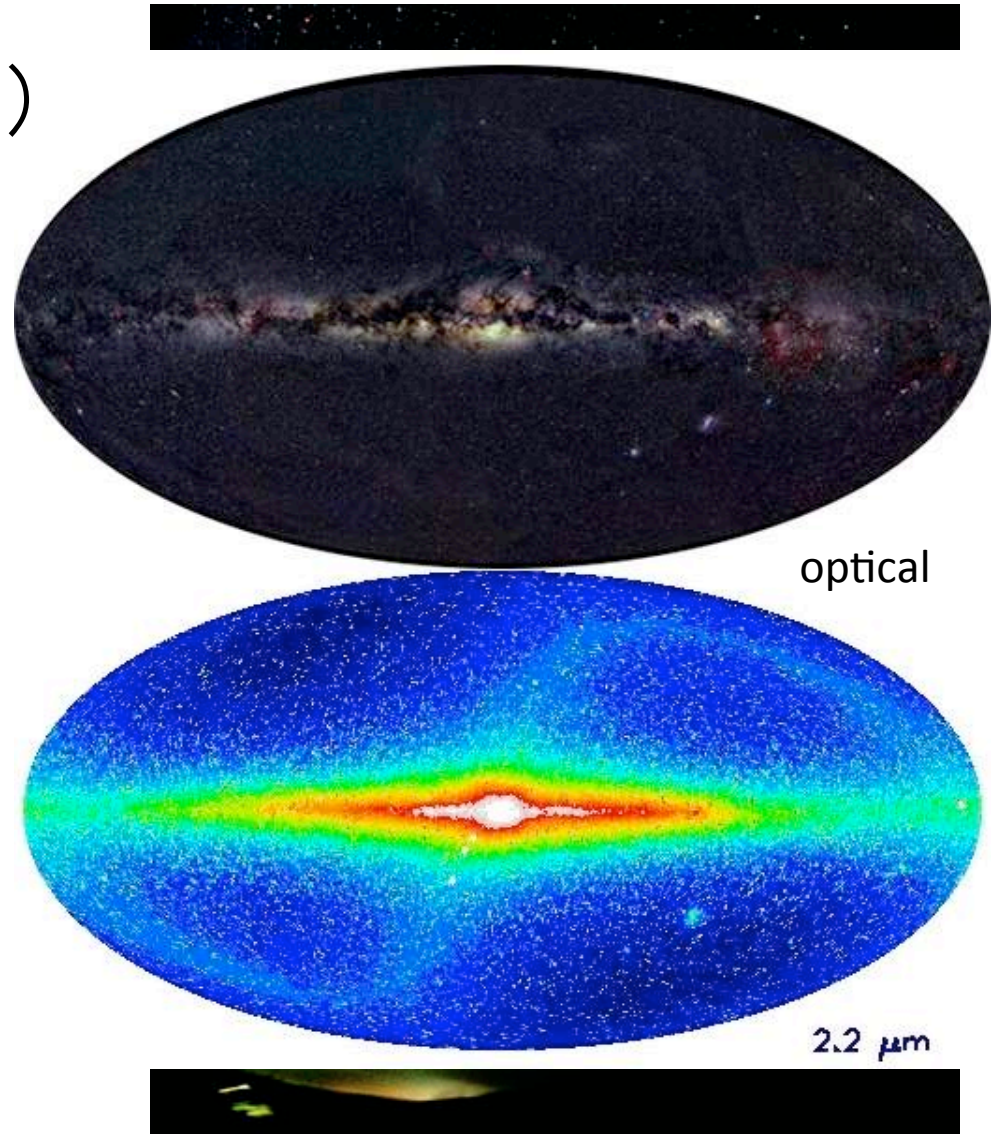
Hint: 遠方宇宙の観測は春と秋に行われる

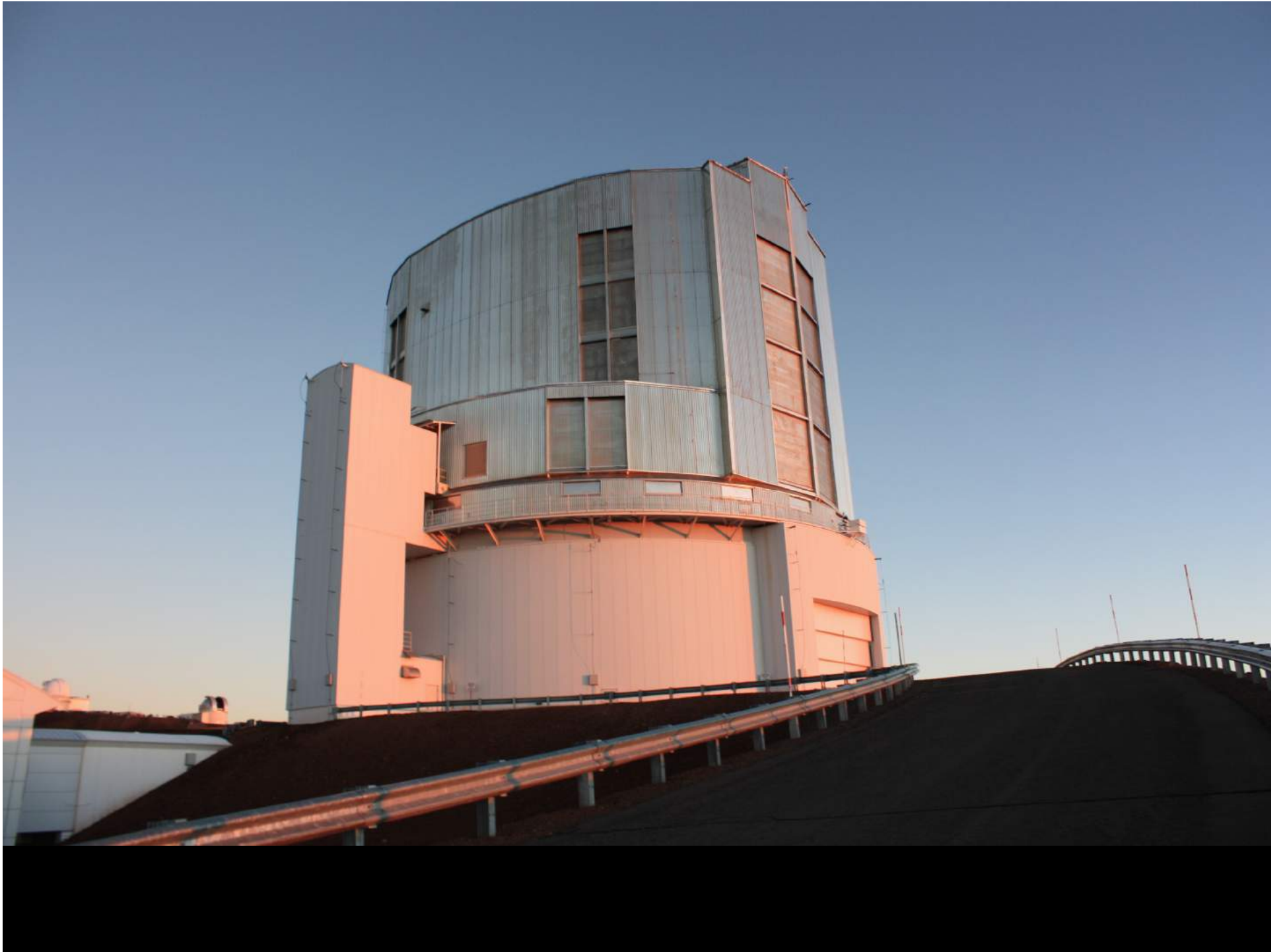
# 観測する天域

- 銀極方向 (高銀緯方向)



天の川銀河を横から見た図

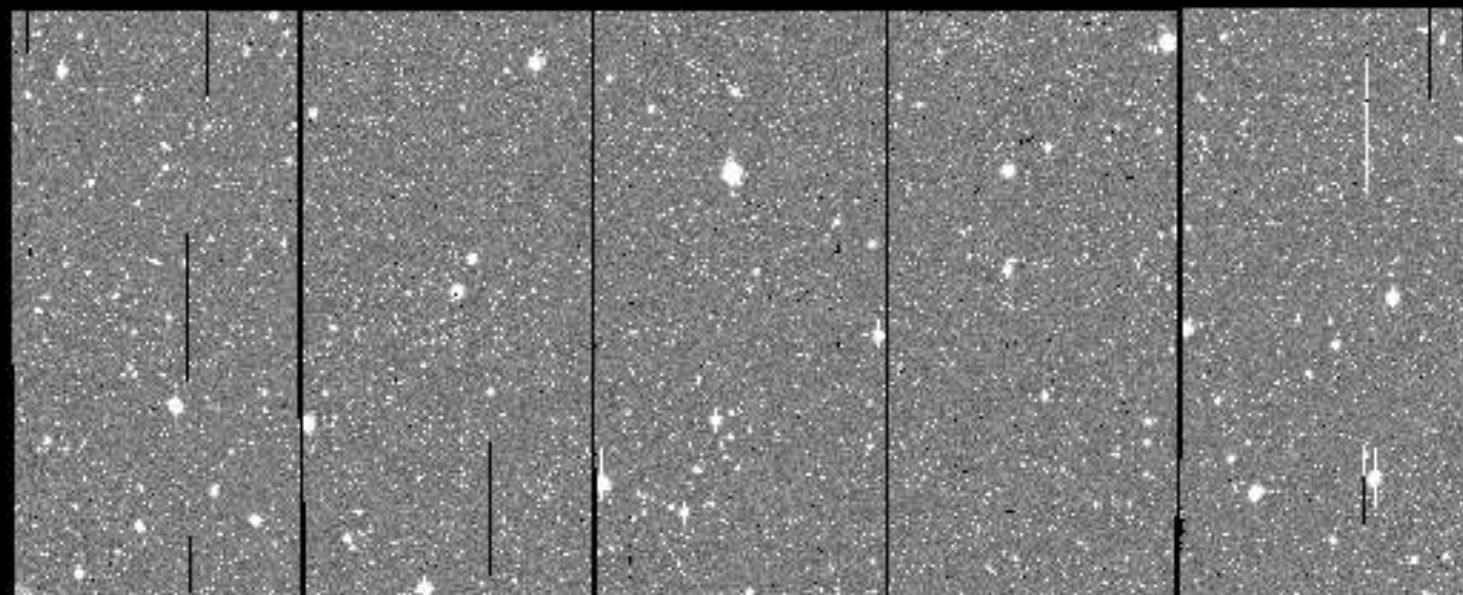
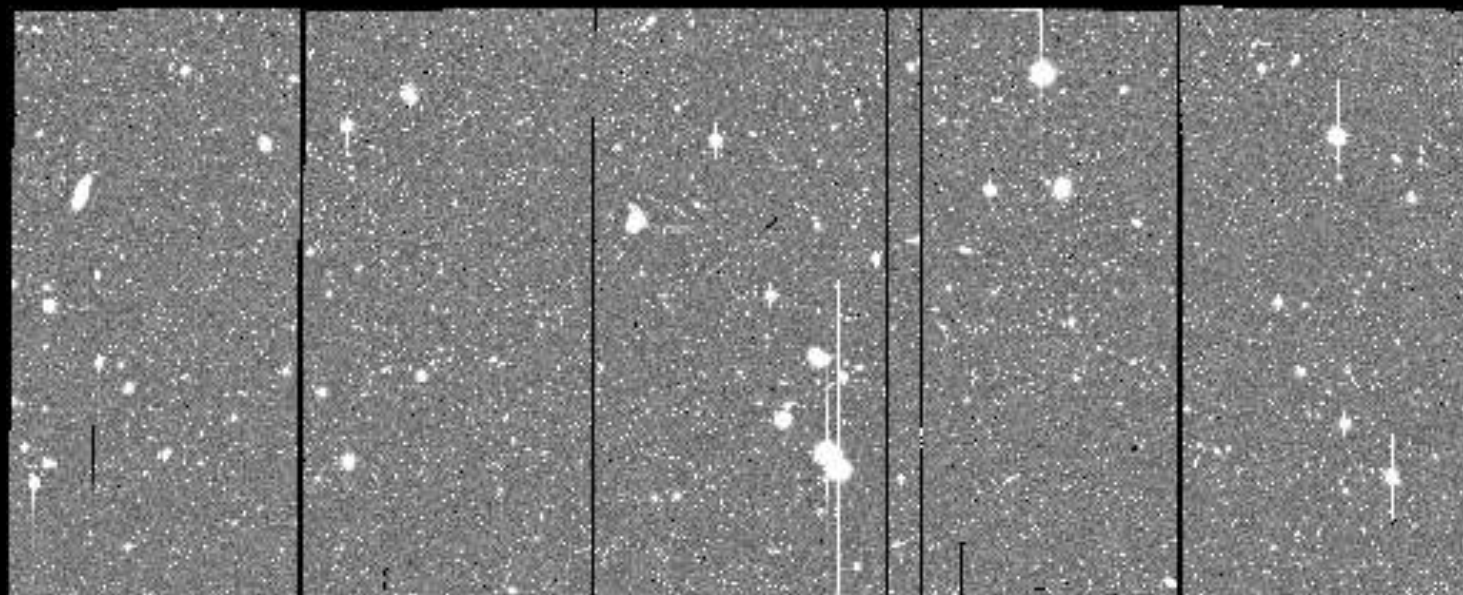








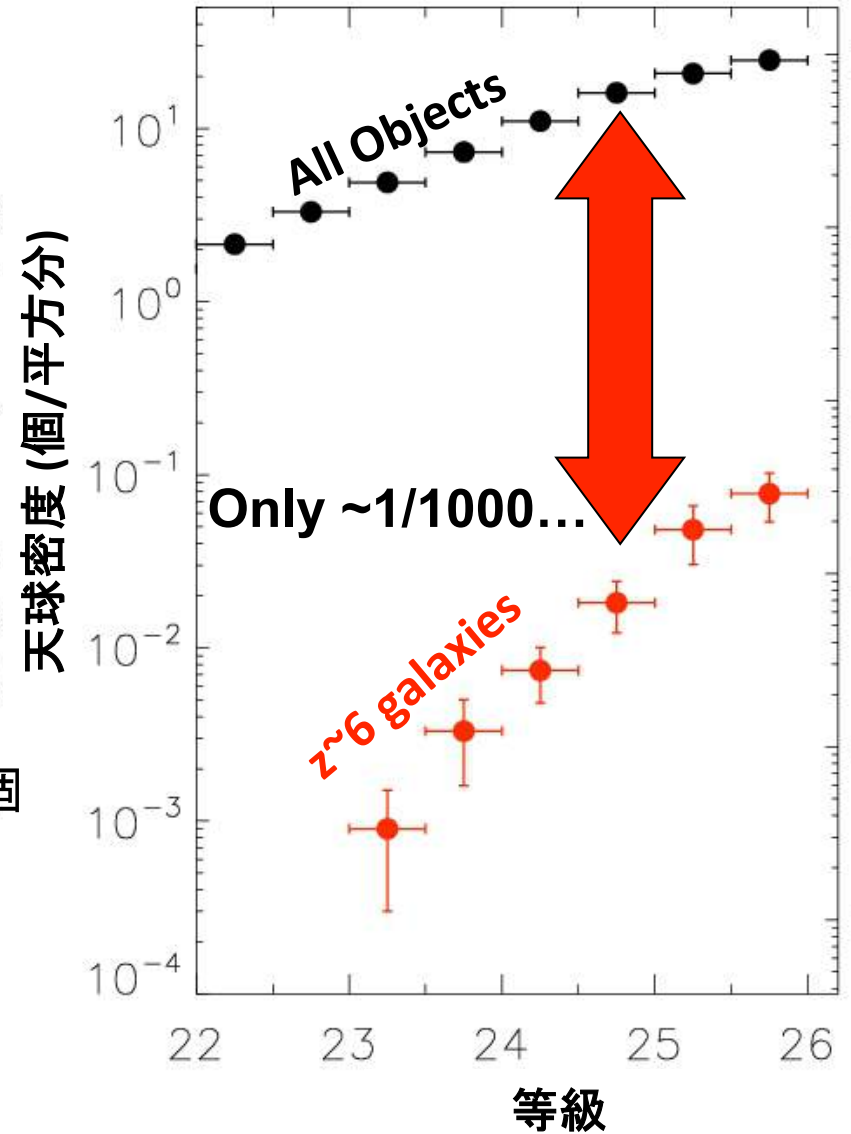
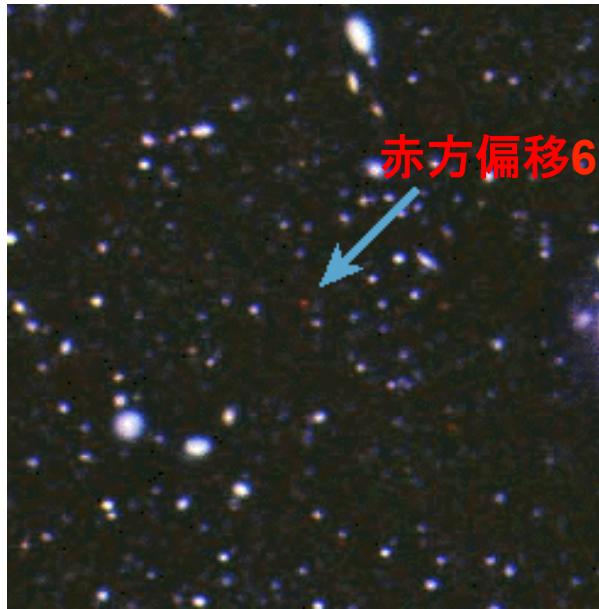
CFHT - Wed Nov 30 17:33:45 HST 2011







# 前景銀河の海から 遠方の銀河を見つける

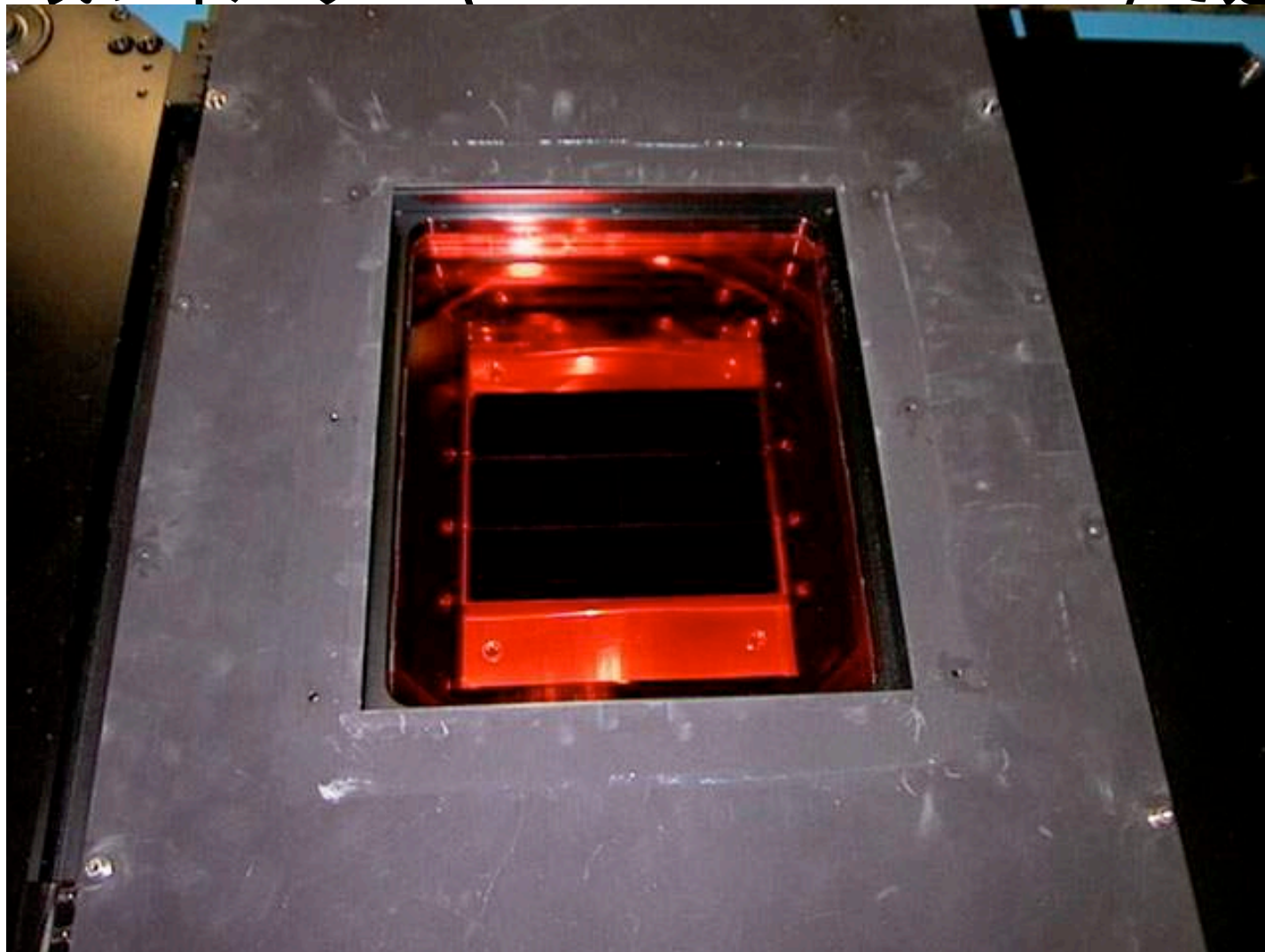


- 撮像データに写った銀河のほとんどは前景銀河
  - (例) 赤方偏移6の銀河は1000個に1個
- 分光して赤方偏移を測れば良い
  - 赤方偏移6では1銀河~3時間が必要
  - 375日 (=3000時間/8時間)観測してやっと1個の銀河、、、現実的に不可能

• enables us to detect higher-redshift galaxies, because spec-z is easily obtained.)



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



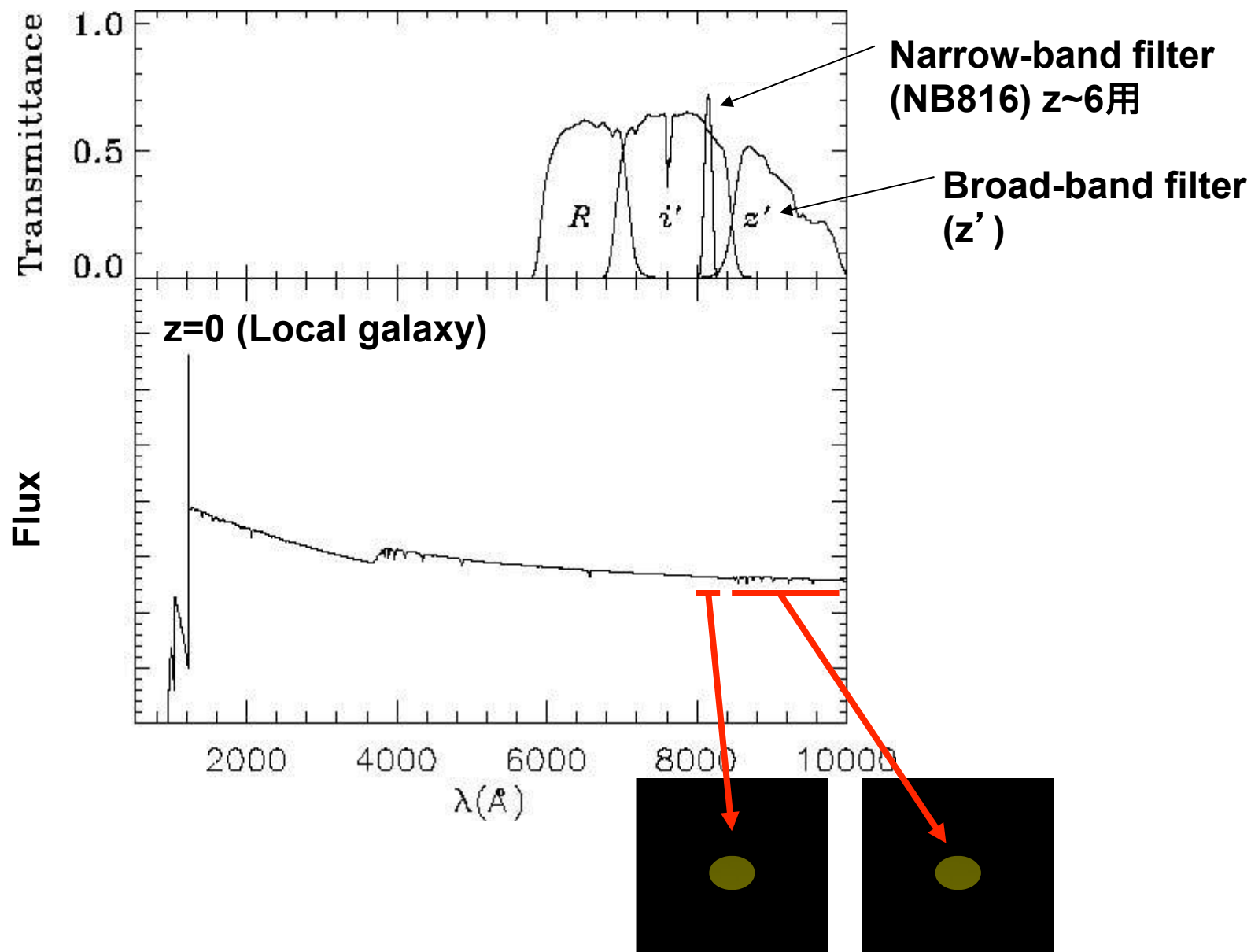
and filter  
用

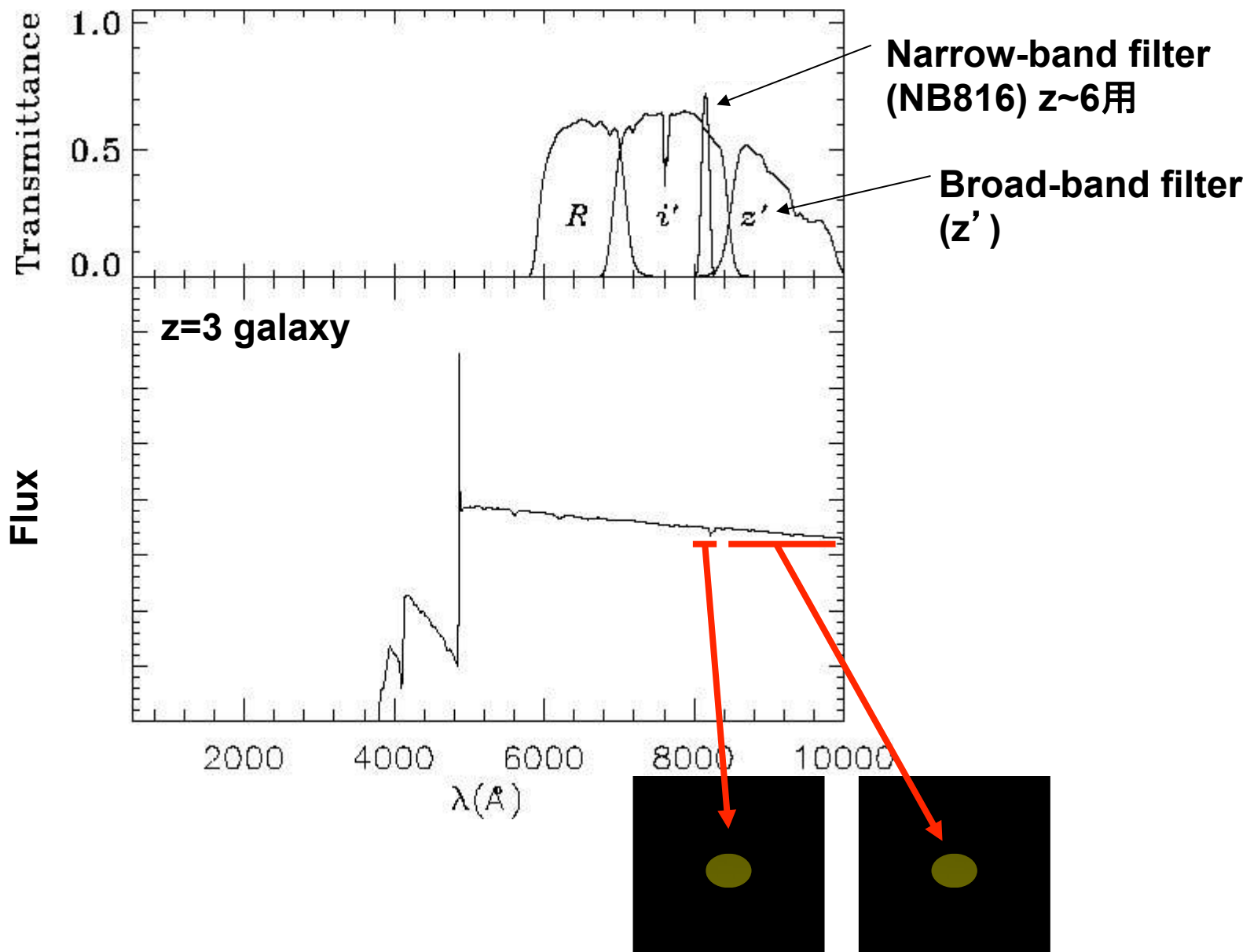
and filter

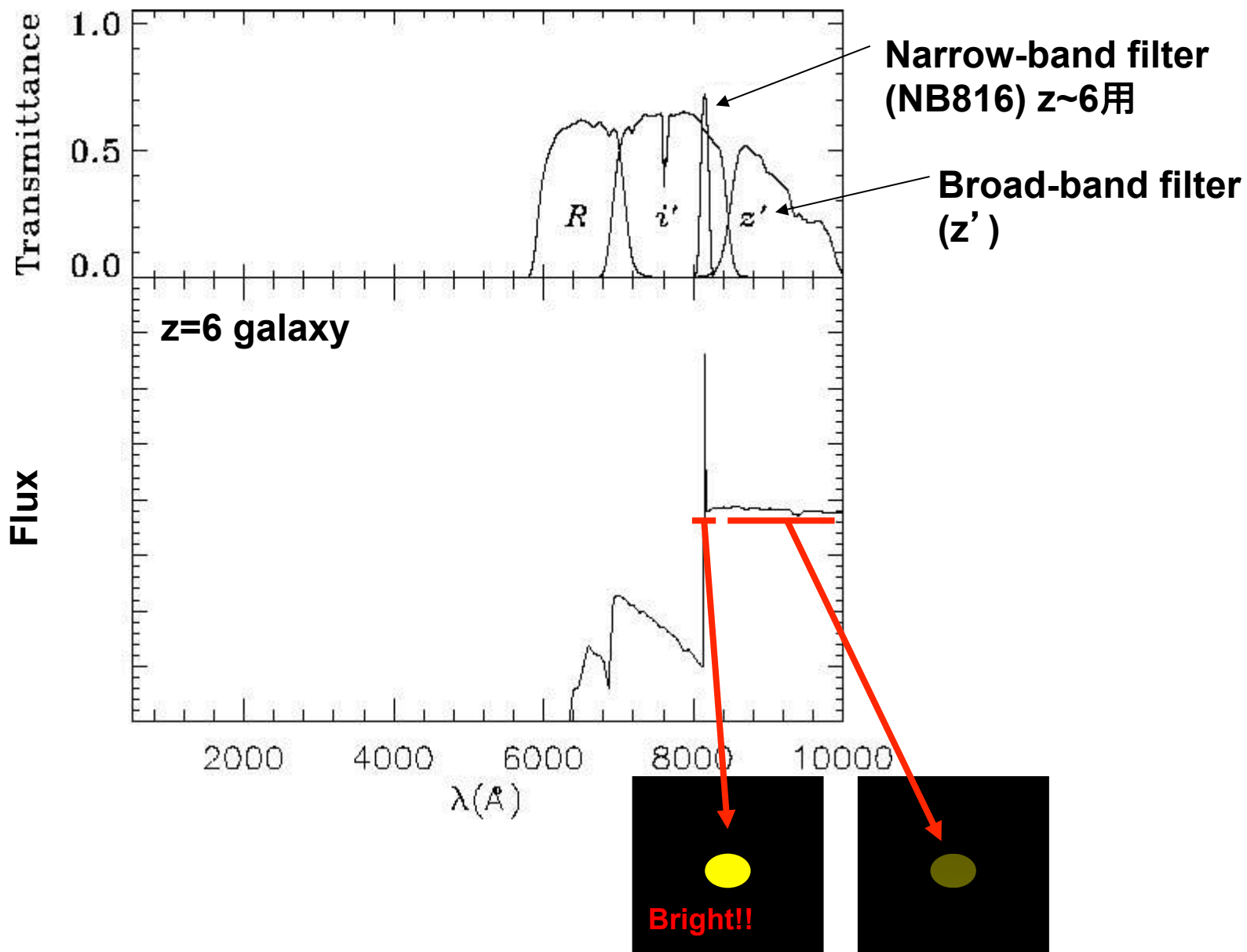
UV

Optical

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

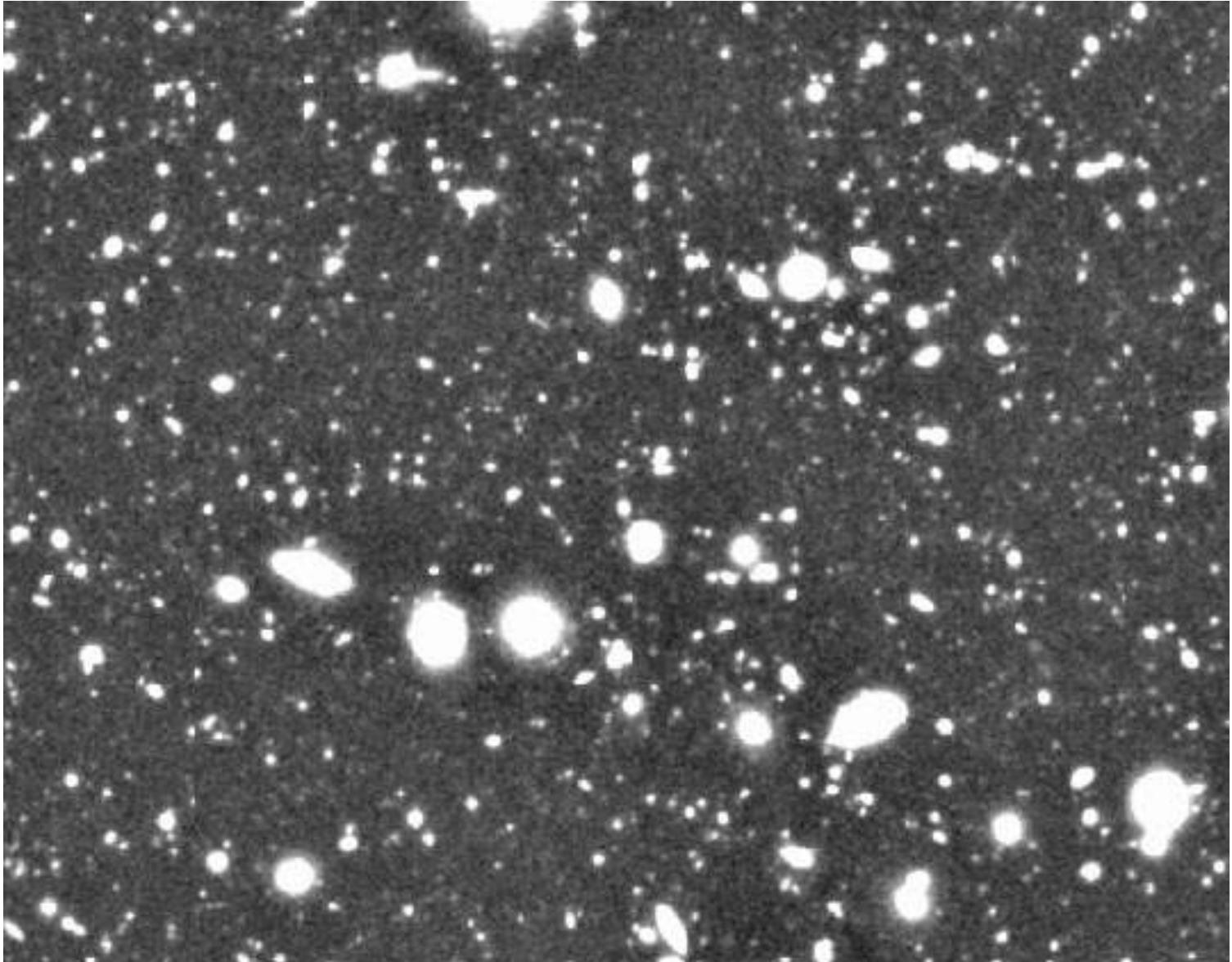




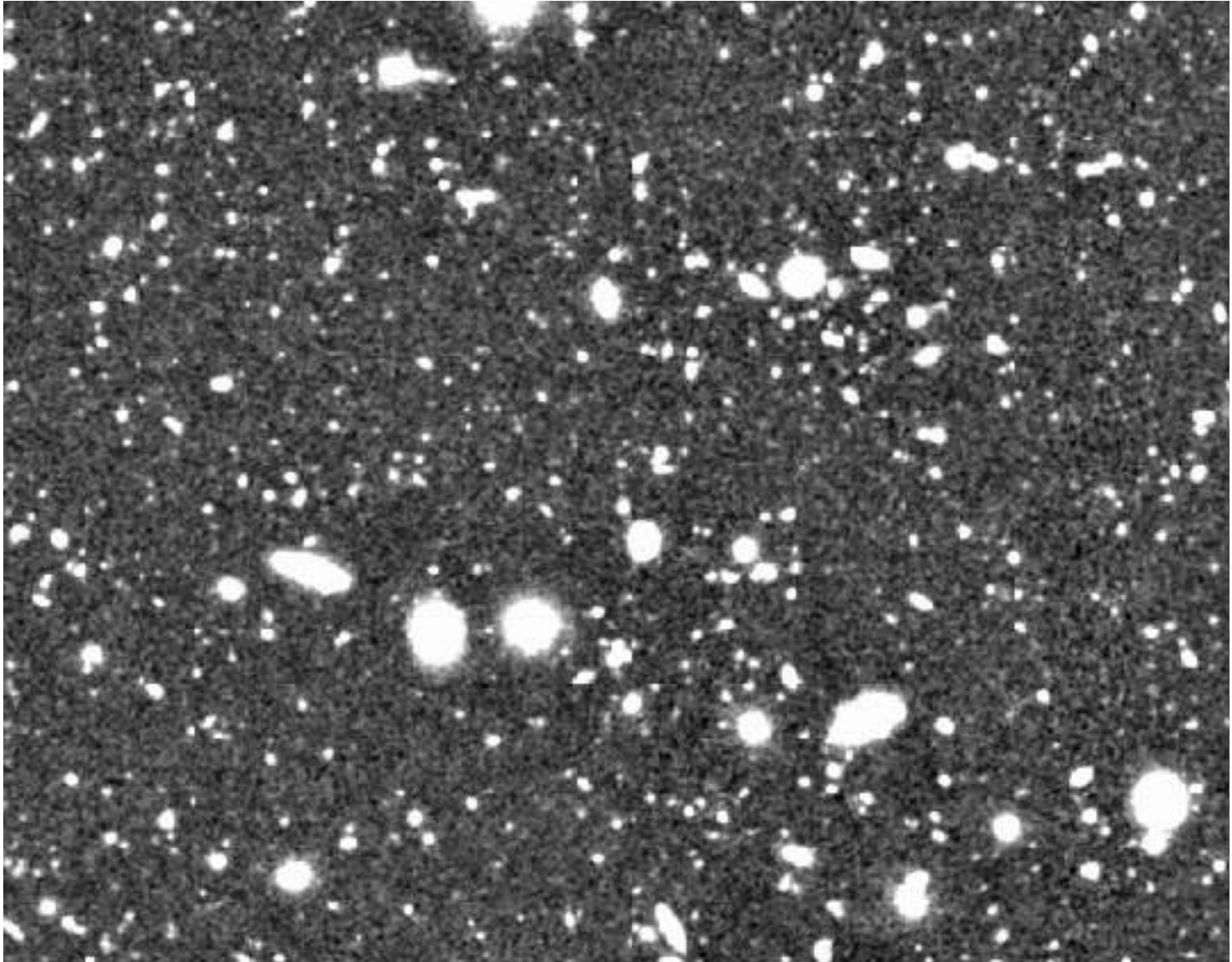




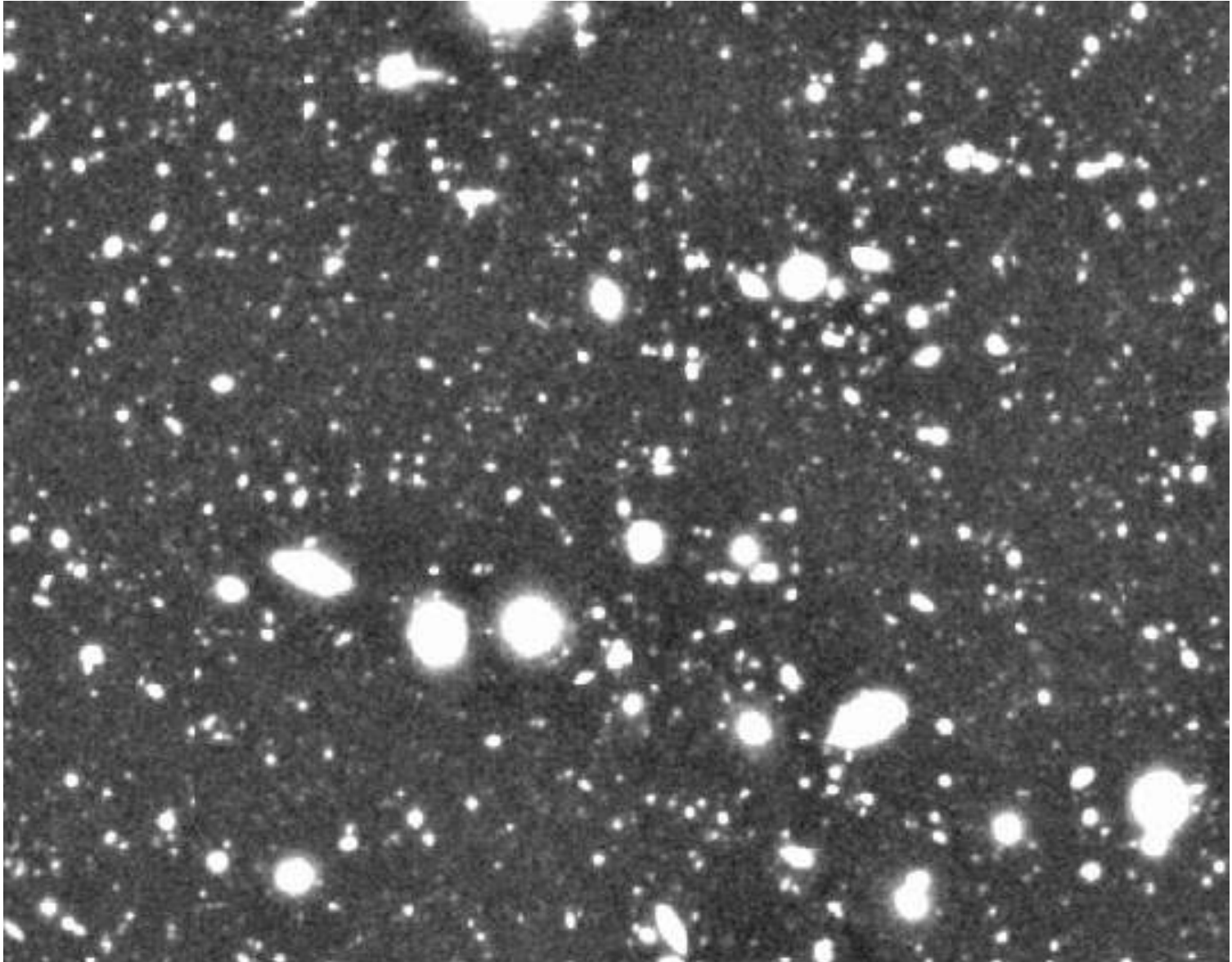
# Broad-Band Image



# Narrow-Band Image

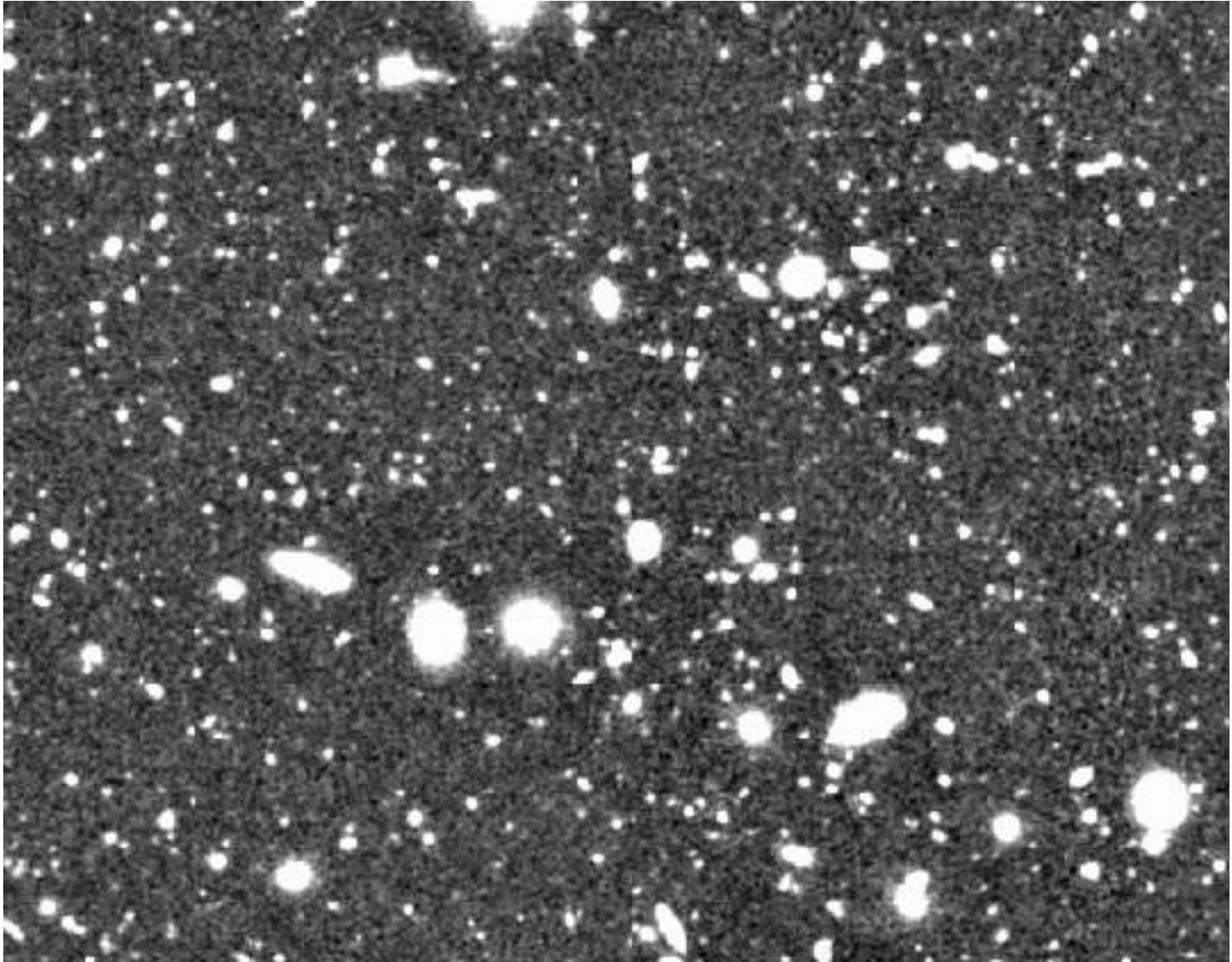


# Broad-Band Image



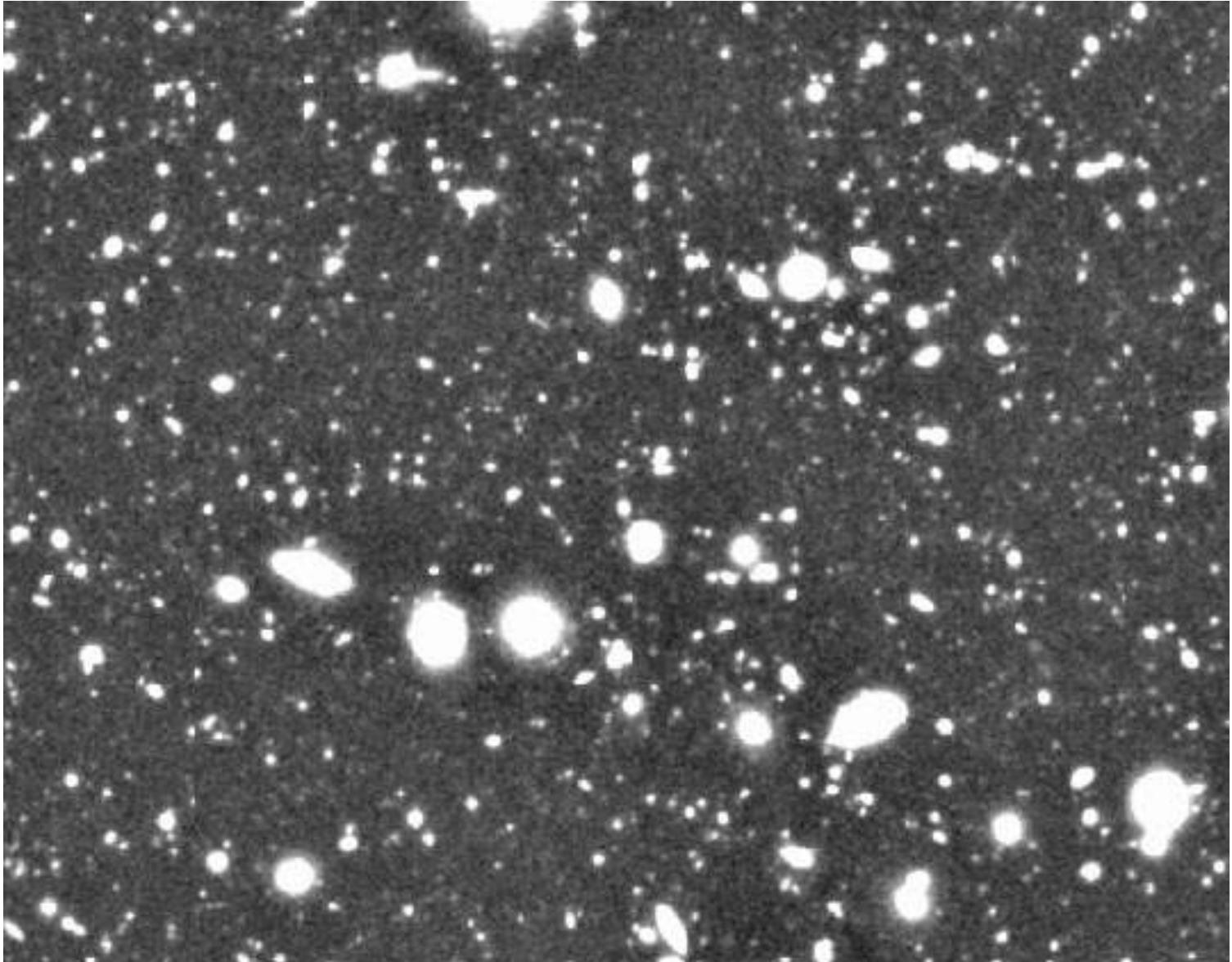


# Narrow-Band Image

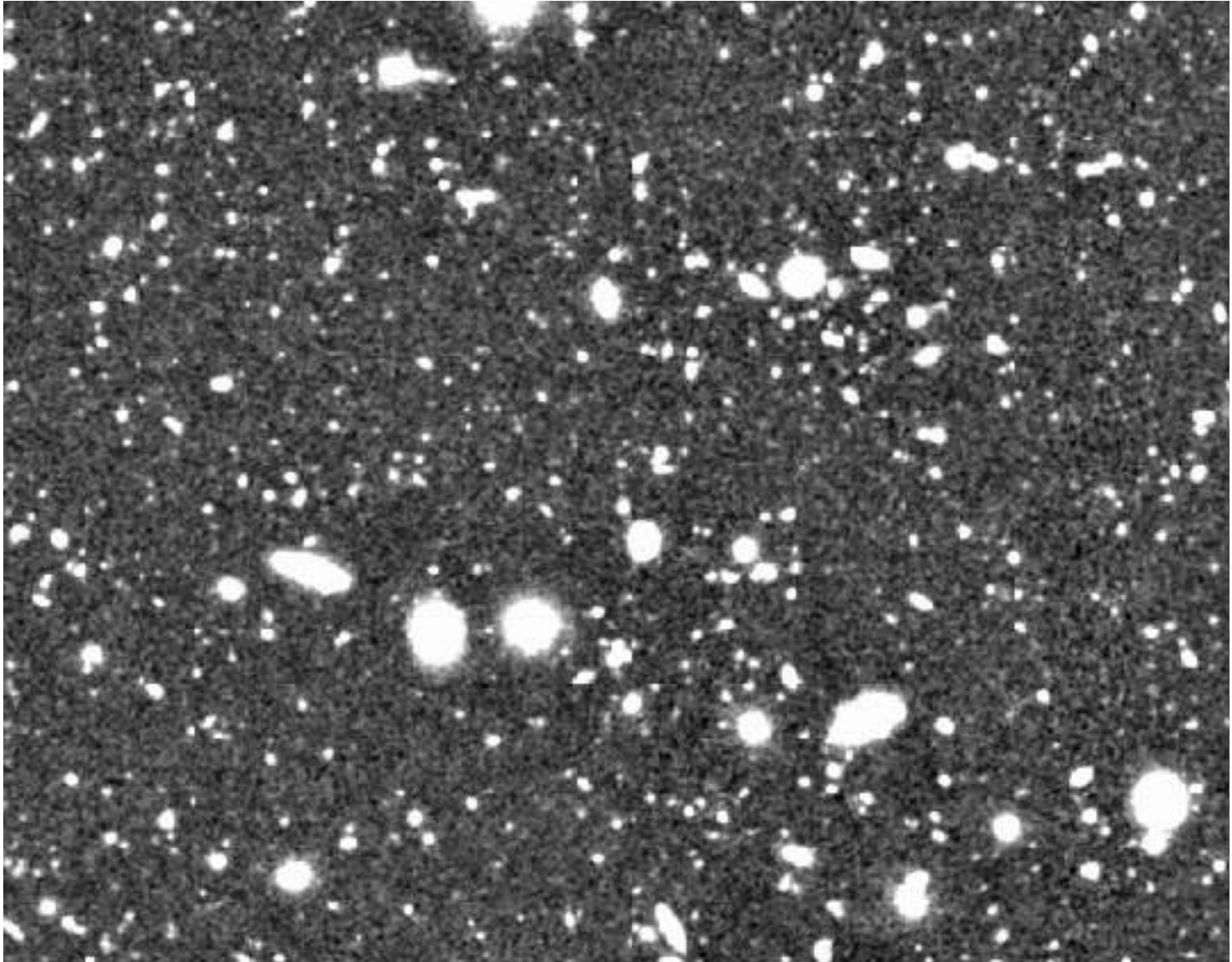




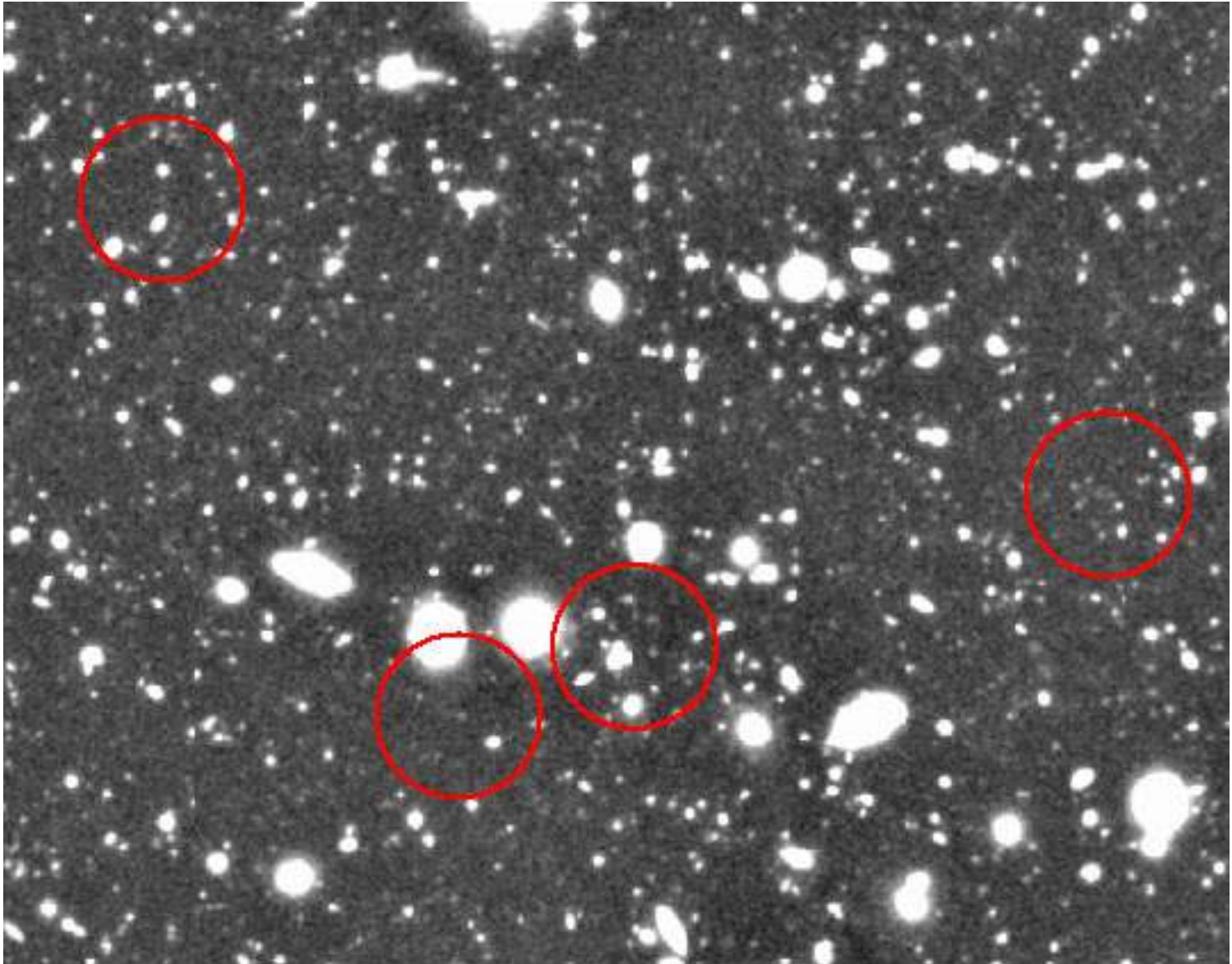
# Broad-Band Image



# Narrow-Band Image

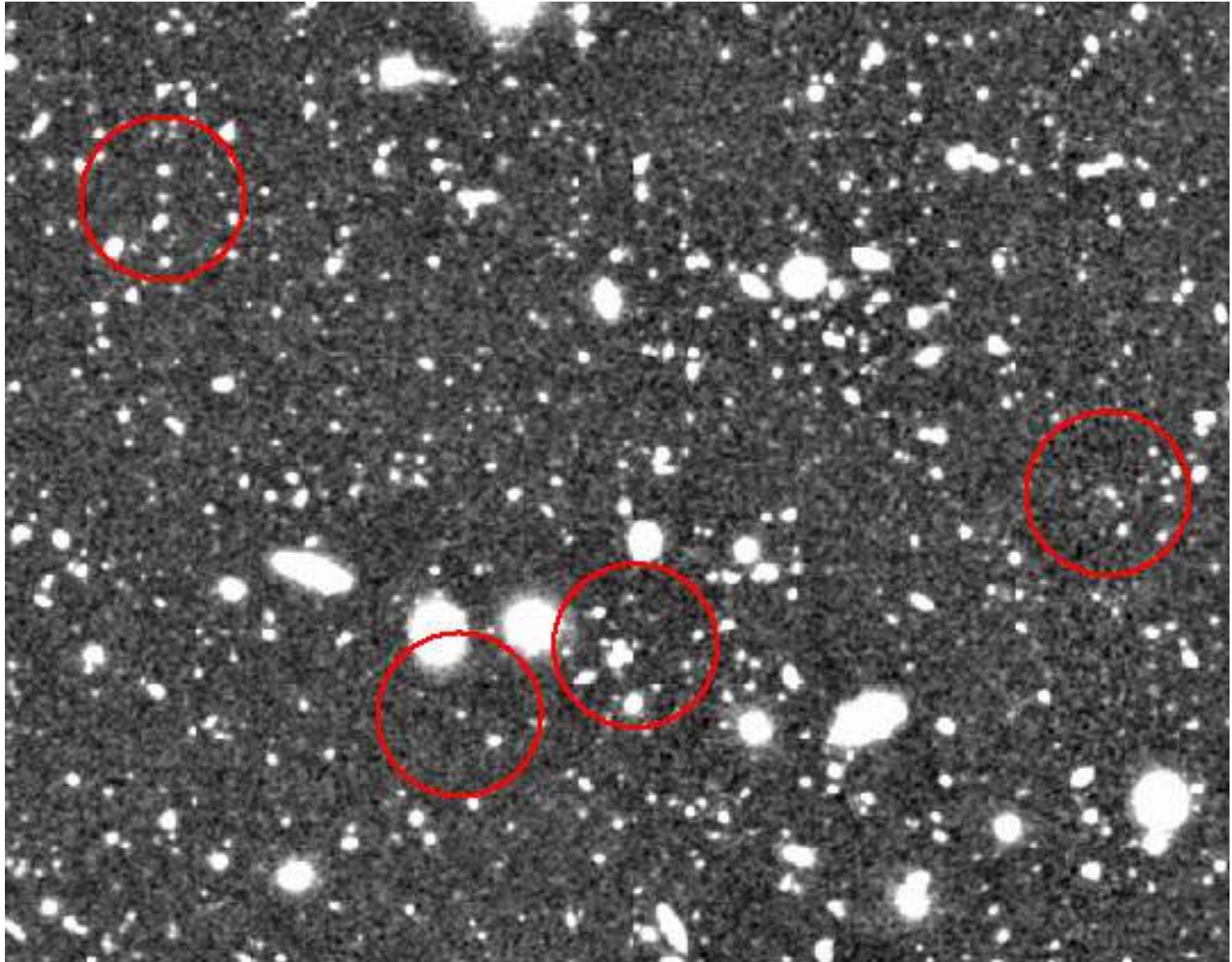


# Broad-Band Image



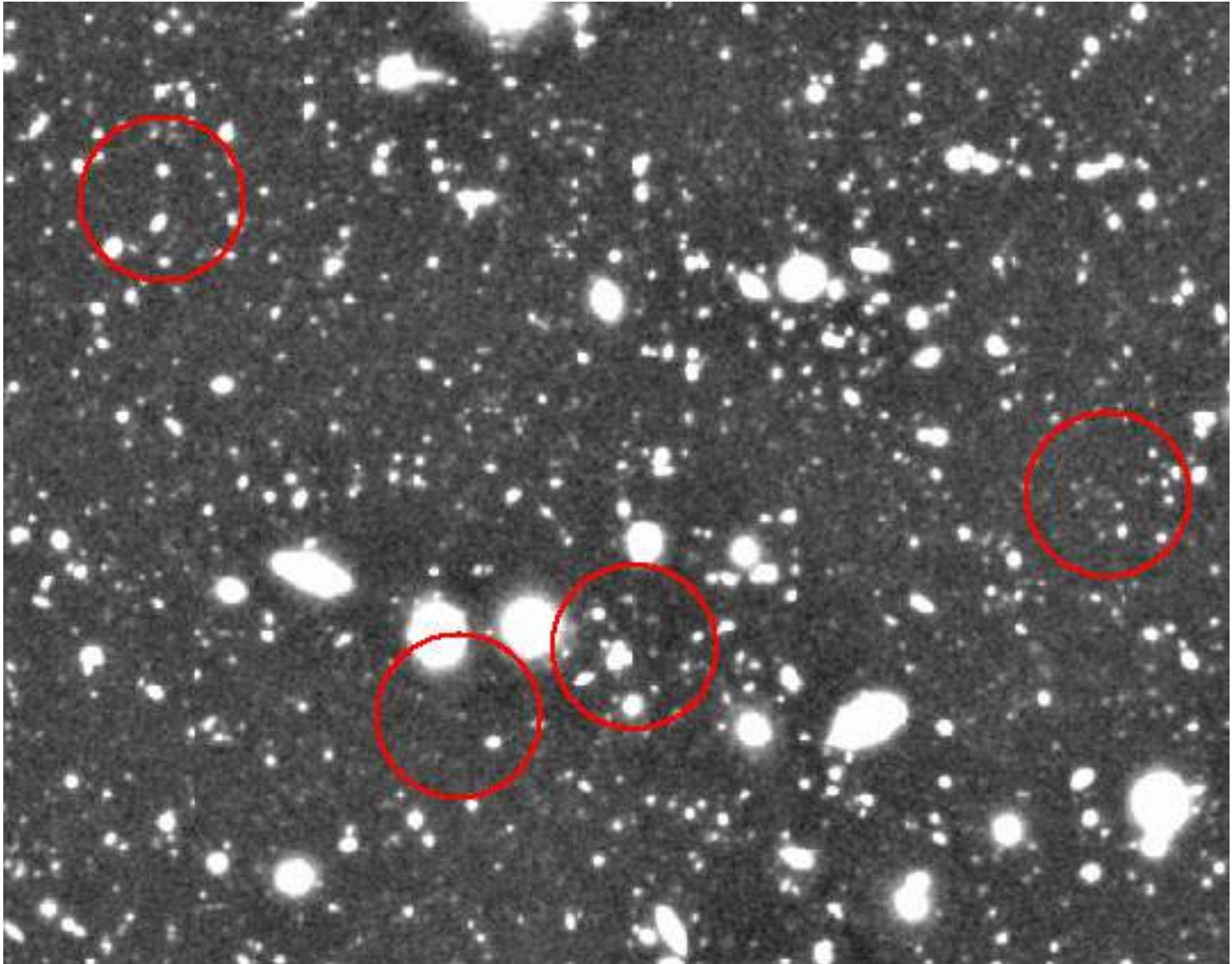


# Narrow-Band Image

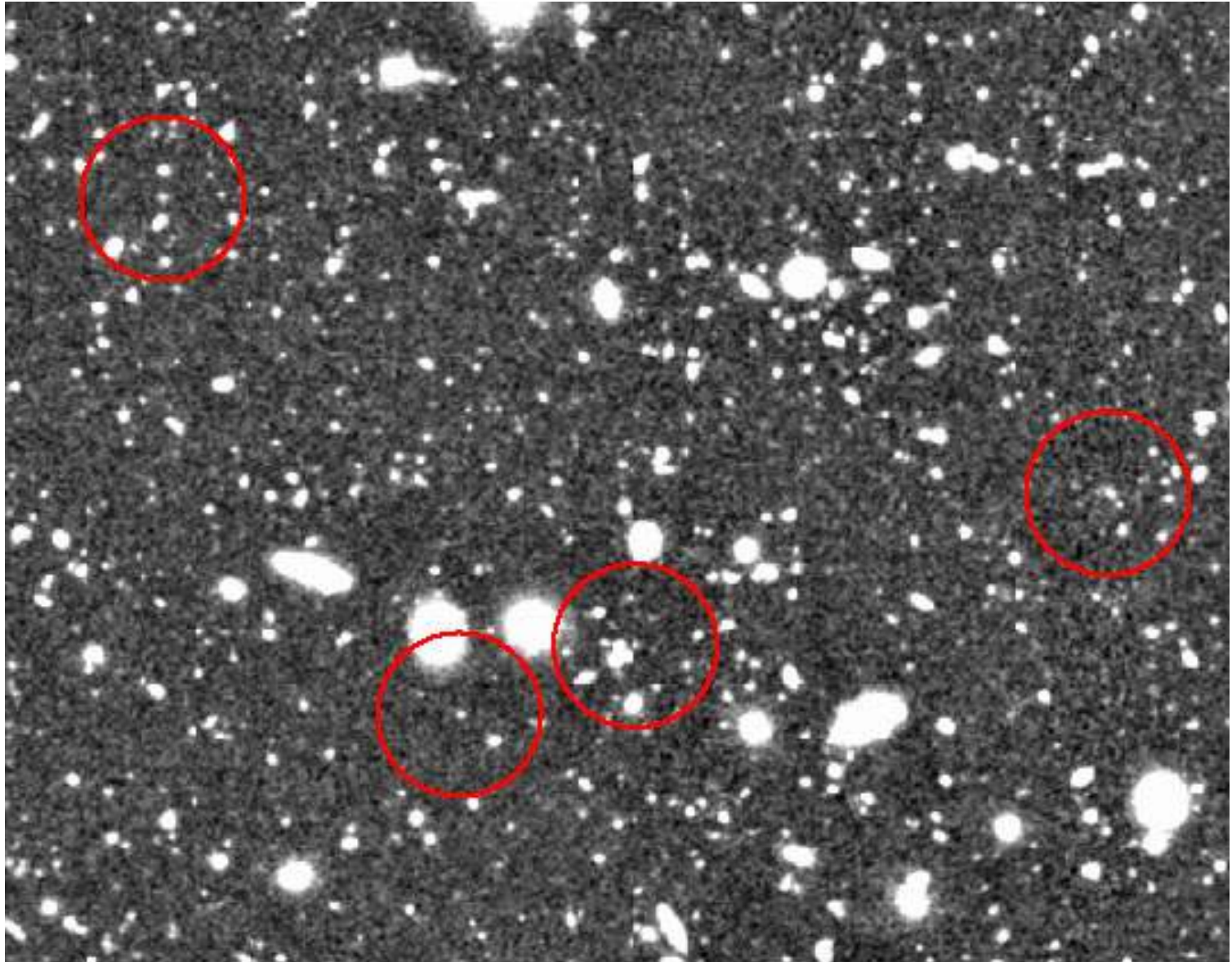




# Broad-Band Image

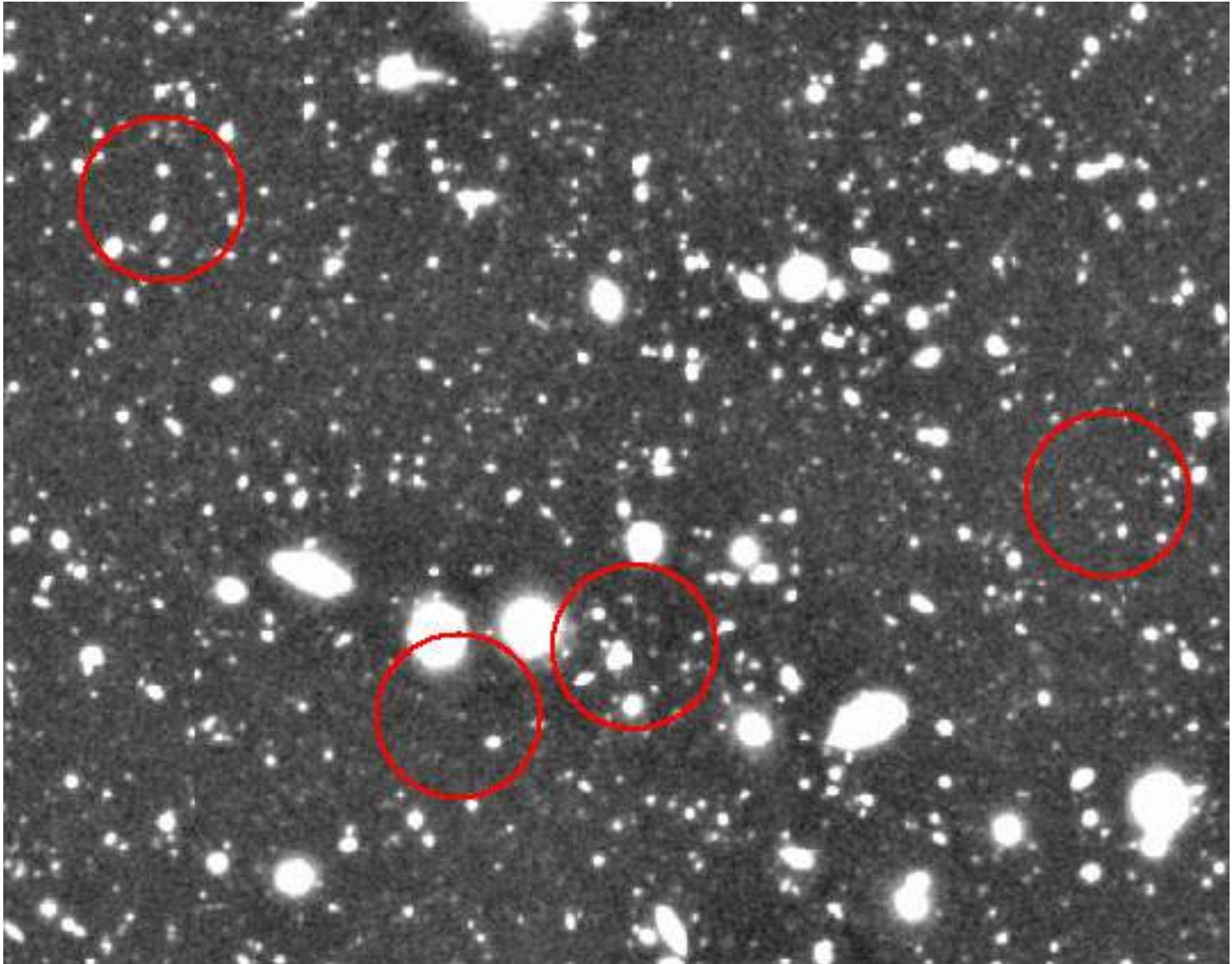


# Narrow-Band Image

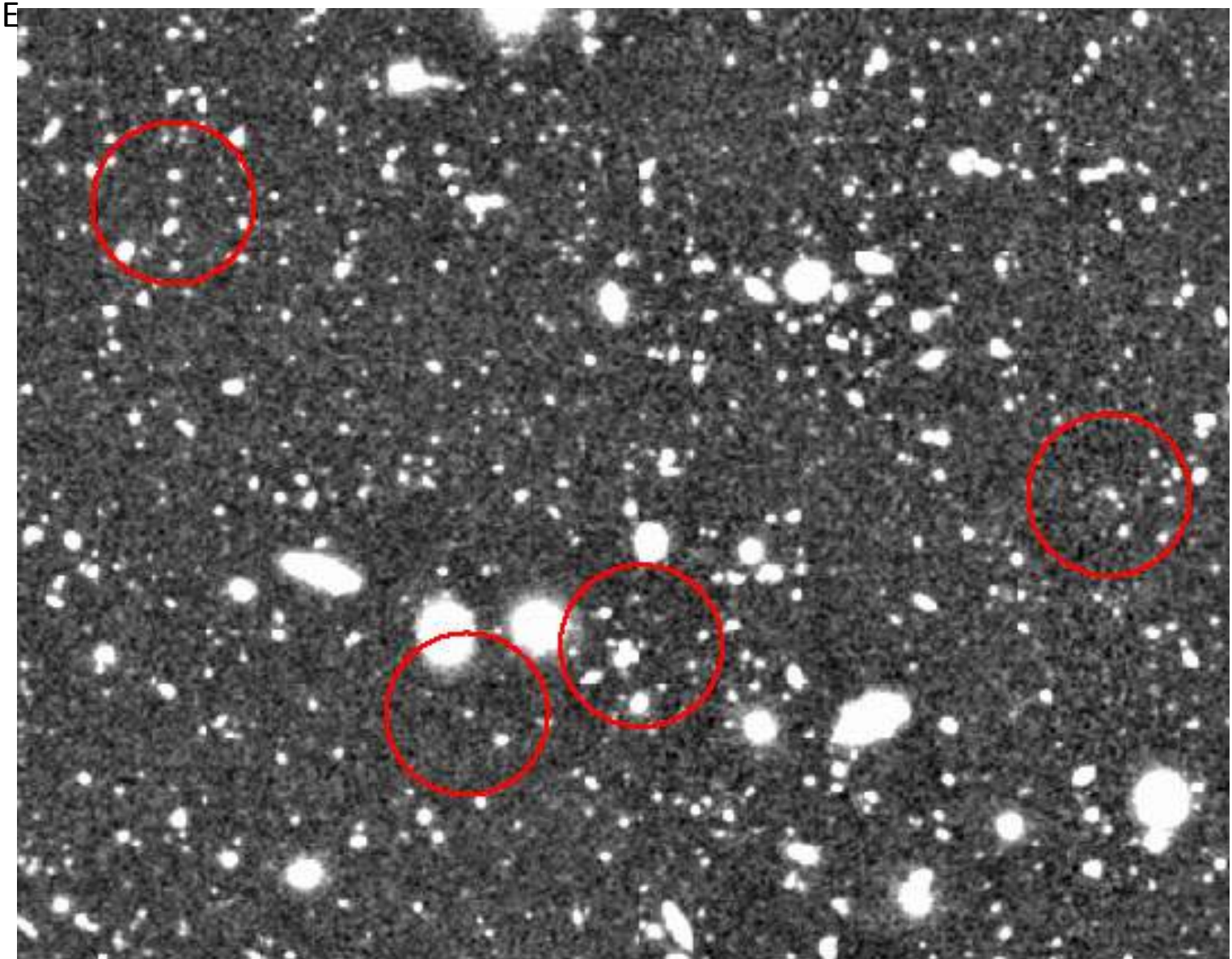




# Broad-Band Image

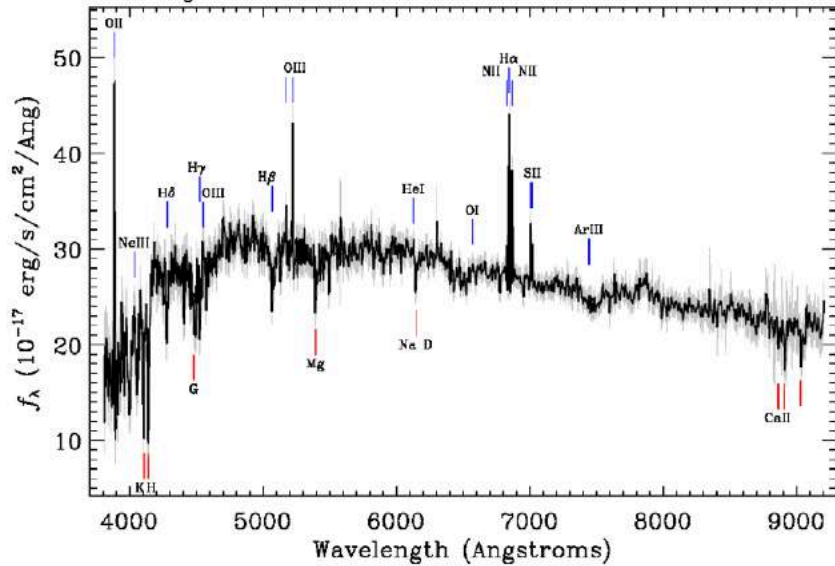


# Narrow-Band Image

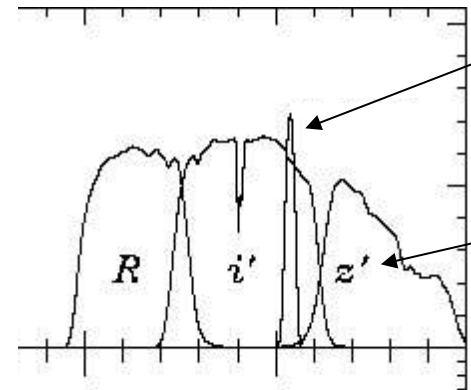




RA=25.65808, Dec=-1.22998, Plate=401, Fiber=125, MJD=51788  
z=0.04263±0.00002 Class=GALAXY AGN  
No warnings.

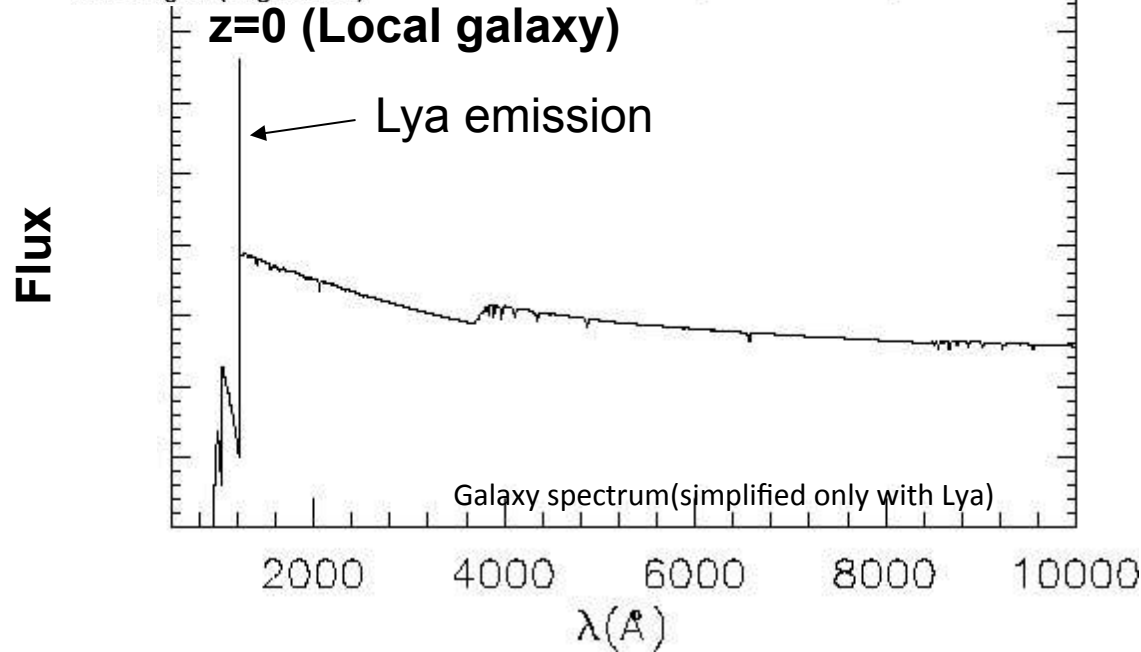


# 銀河候補を (row-band filter)で選択



Narrow-band filter  
(NB816)

Broad-band filter  
(z')



z=0 (Local galaxy)

Ly-alpha emission

Galaxy spectrum(simplified only with Ly-alpha)

UV

Optical

# 宇宙史と宇宙再電離

# 宇宙史と宇宙再電離

再結合→晴れ上がり(宇宙背景放射)

$z=1100$

(宇宙年齢0.004億歳)

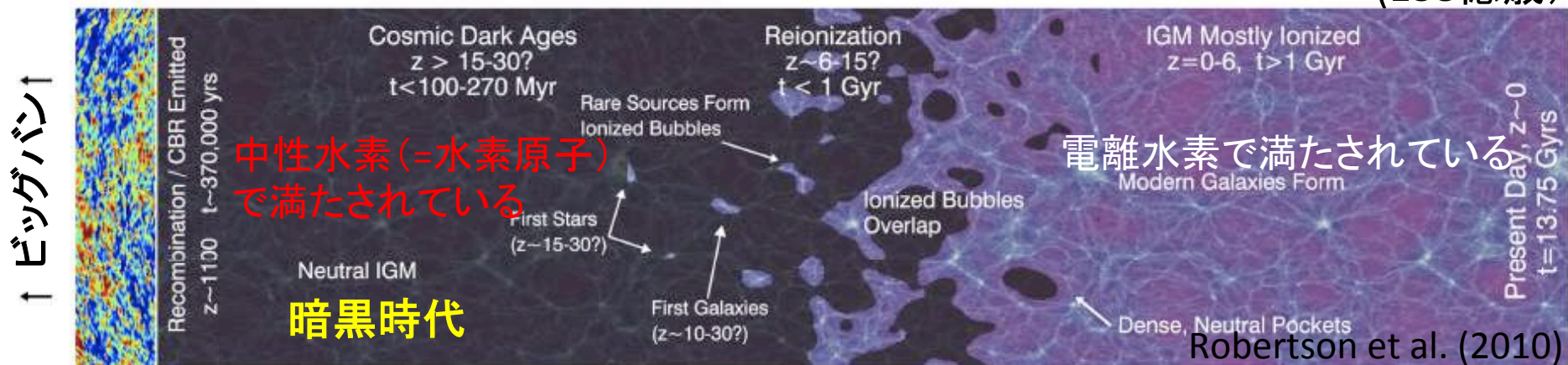
$z=6$

(9億歳)

現在

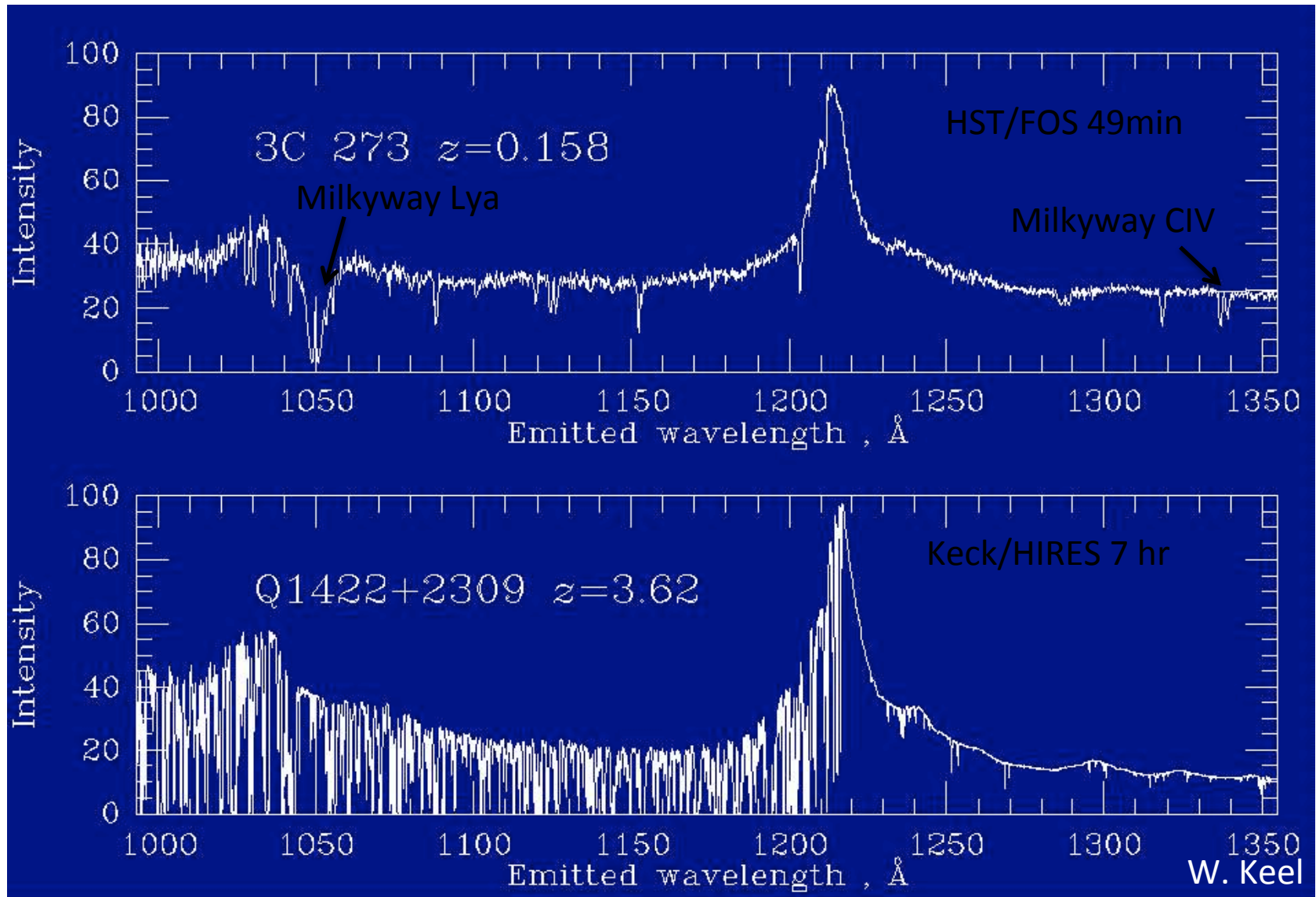
$z=0$

(138億歳)



- 初期の宇宙: 高温の電離ガス
  - 1. 再結合して中性宇宙へ→暗黒時代
  - 2. 電離して電離宇宙へ(再電離)→現在の宇宙へ
- 宇宙再電離: 宇宙史最後のイベント

# クエーサーのスペクトル



- 現在 ( $z \sim 0$ ) は中性水素(のLy $\alpha$ )吸収がほとんどない → 電離水素で満たされている



# 宇宙史と宇宙再電離

再結合→晴れ上がり(宇宙背景放射)

$z=1100$

(宇宙年齢0.004億歳)

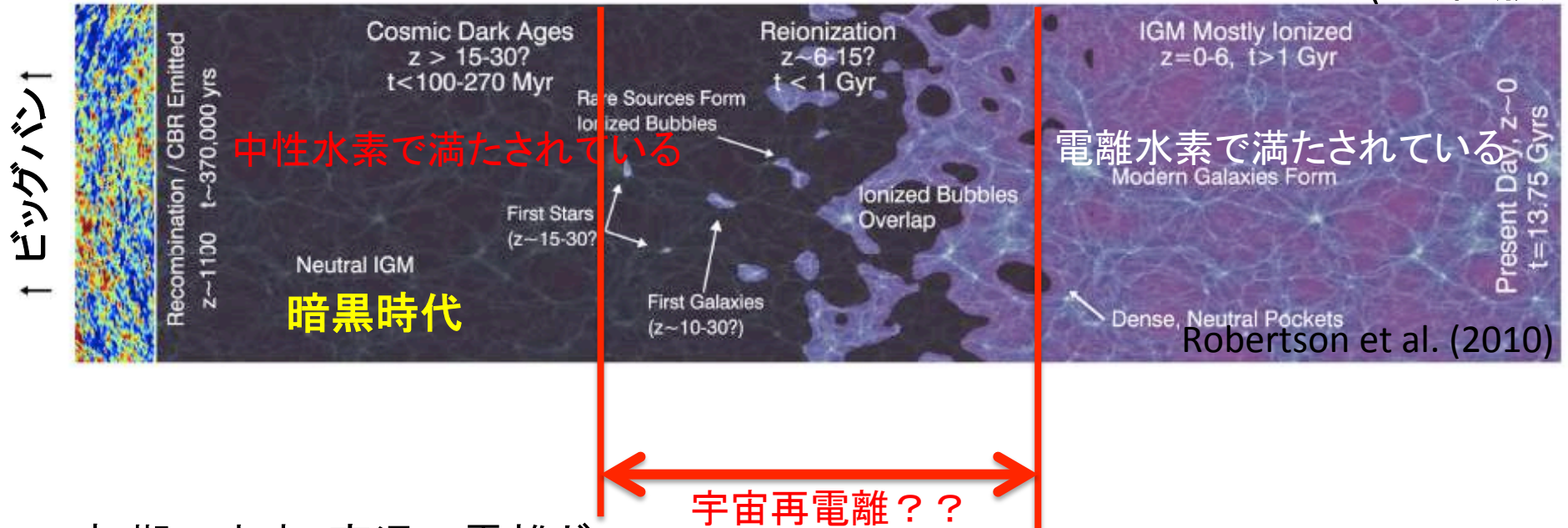
$z=6$

(9億歳)

現在

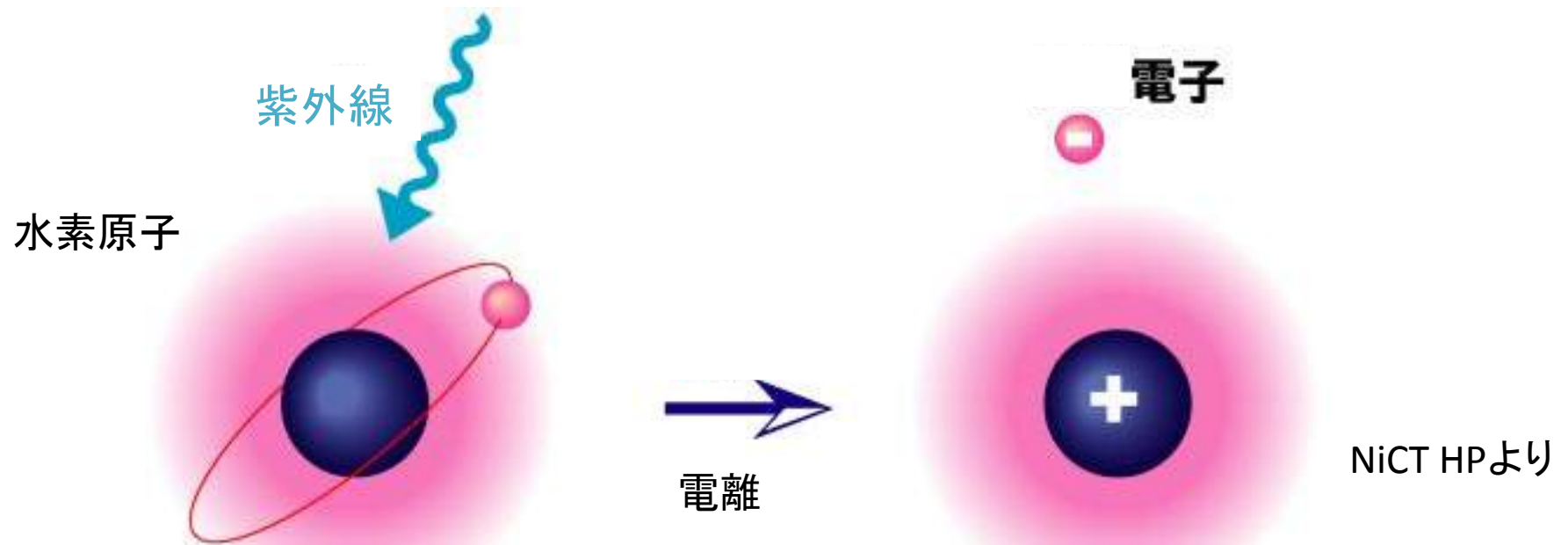
$z=0$

(138億歳)



- 初期の宇宙: 高温の電離ガス
  - 1. 再結合して中性宇宙へ→暗黒時代
  - 2. 電離して電離宇宙へ(再電離)→現在の宇宙へ
- 宇宙再電離: 宇宙史最後の大イベント

# 電離



- 宇宙の再電離: 主に水素原子が陽子(+)と電子(-)に分かれる(紫外線、温度)。



- 水素原子に紫外線が当たる→陽子と電子(電離)
- 陽子に電子が結合→紫外線が出て水素原子ができる(再結合)

# 宇宙史と宇宙再電離

再結合→晴れ上がり(宇宙背景放射)

$z=1100$

(宇宙年齢0.004億歳)

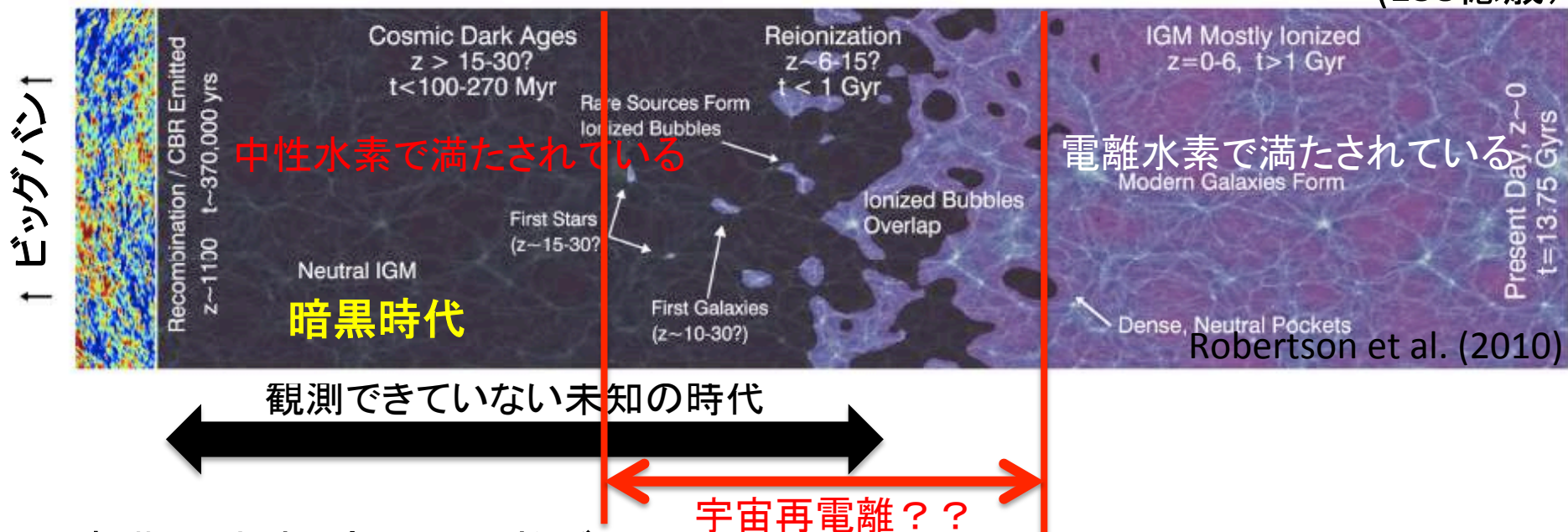
$z=6$

(9億歳)

現在

$z=0$

(138億歳)



• 初期の宇宙: 高温の電離ガス

1. 再結合して中性宇宙へ→暗黒時代

2. 電離して電離宇宙へ(再電離)→現在の宇宙へ

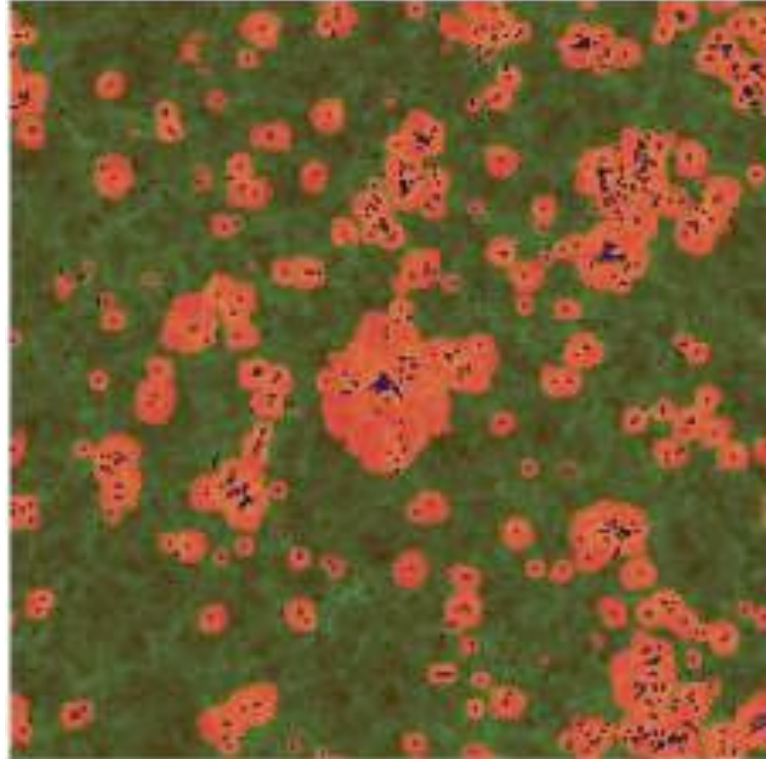
宇宙再電離: 宇宙史最後の大イベント

2つの課題:

1) どのように再電離が進んだか? (宇宙再電離史)

2) 再電離を引き起こした原因は何か?

# 宇宙再電離の歴史を調べる



銀河 (青点)、中性水素 (緑)、電離水素 (オレンジ)

ある時代( $z$ )でどのくらいの割合の水素が中性か？  $x_{\text{HI}} = n_{\text{HI}}/n_{\text{H}}$

– 電離水素ガスからの放射

- ただし電離ガスは、銀河内のガスの約20万分の1の密度→非常に暗い(単位面積当たり)

– 中性水素からの21cm輝線

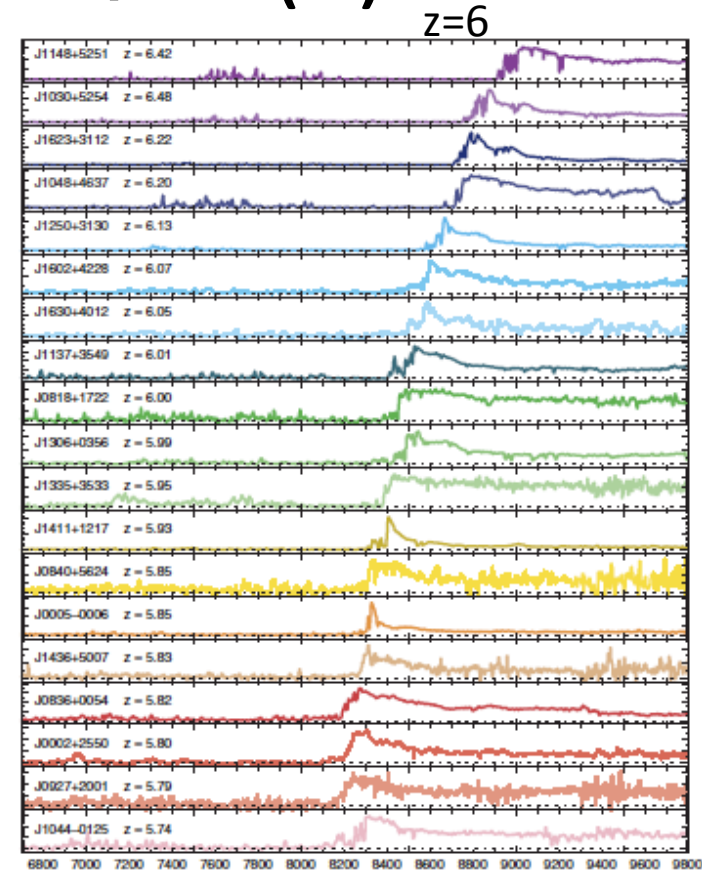
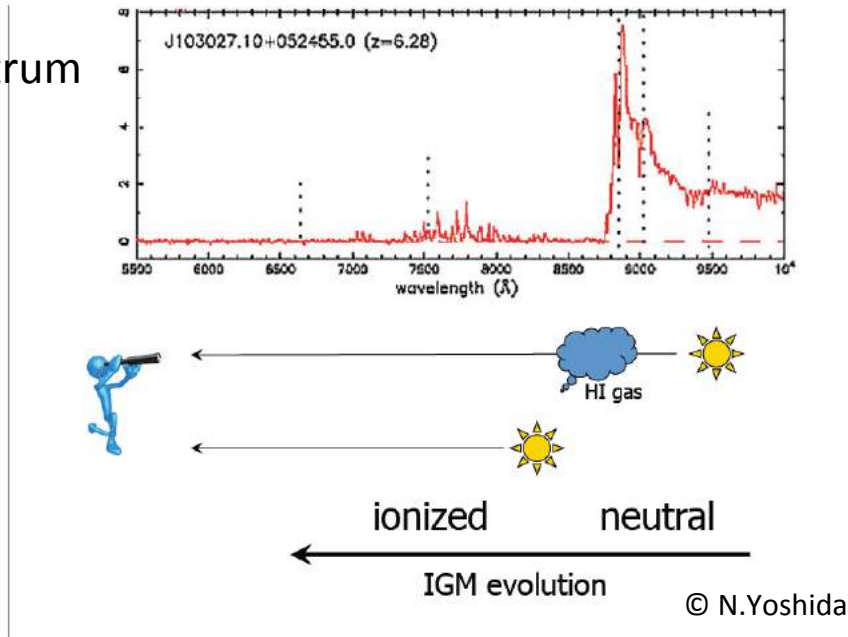
- 微弱で現在の技術ではまだ捉えることができていない(cf. LOFAR, SKAプロジェクト)

**Quiz2:** どういう手法で宇宙を満たす希薄な水素ガスの電離状態を知るか？



# 宇宙再電離史を探る (1)

QSO Spectrum



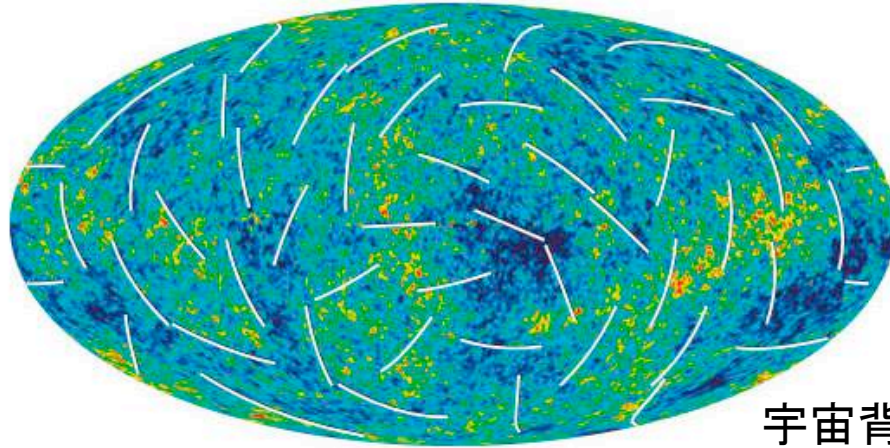
明るい背景光(クエーサーなど)に現れる吸収線(ライマン $\alpha$ )から前景の中性水素量を見積もる(Gunn Petersonテスト)。光学的厚さ( $\tau$ )は、

$$I/I_0 = e^{-\tau}.$$

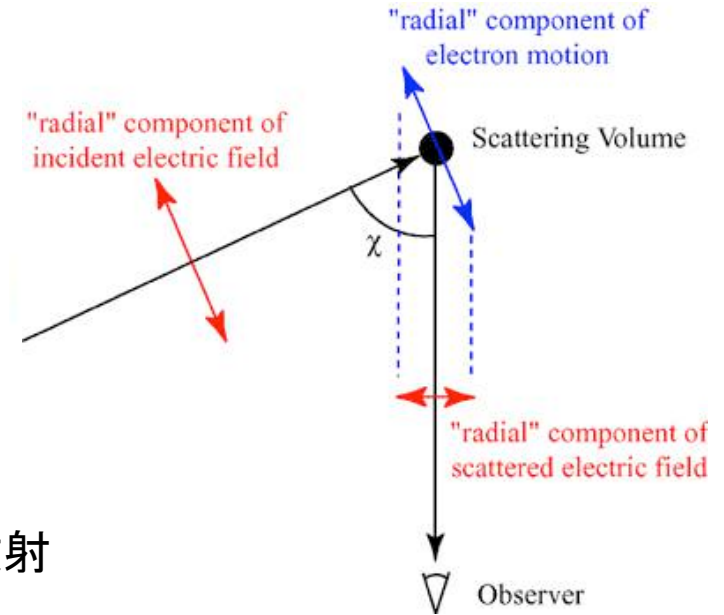
$$\tau_{\text{GP}}(z) = 4.9 \times 10^5 \left( \frac{\Omega_m h^2}{0.13} \right)^{-1/2} \left( \frac{\Omega_b h^2}{0.02} \right) \left( \frac{1+z}{7} \right)^{3/2} \left( \frac{n_{\text{HI}}}{n_{\text{H}}} \right)$$

→z>6で中性水素割合が増大: z=6で宇宙再電離が終了(Fan et al. 2006)

# 宇宙再電離史を探る(2)



宇宙背景放射  
(WMAP7)



- 宇宙背景放射(CMB)に照らされる前景の電離水素 (自由電子)
- CMB光子が散乱(トムソン散乱)を受け、偏光される
- 散乱の量→**光学的厚さ( $\tau_e$ )**



# 宇宙史と宇宙再電離

再結合→晴れ上がり(宇宙背景放射)

$z=1100$

(宇宙年齢0.004億歳)

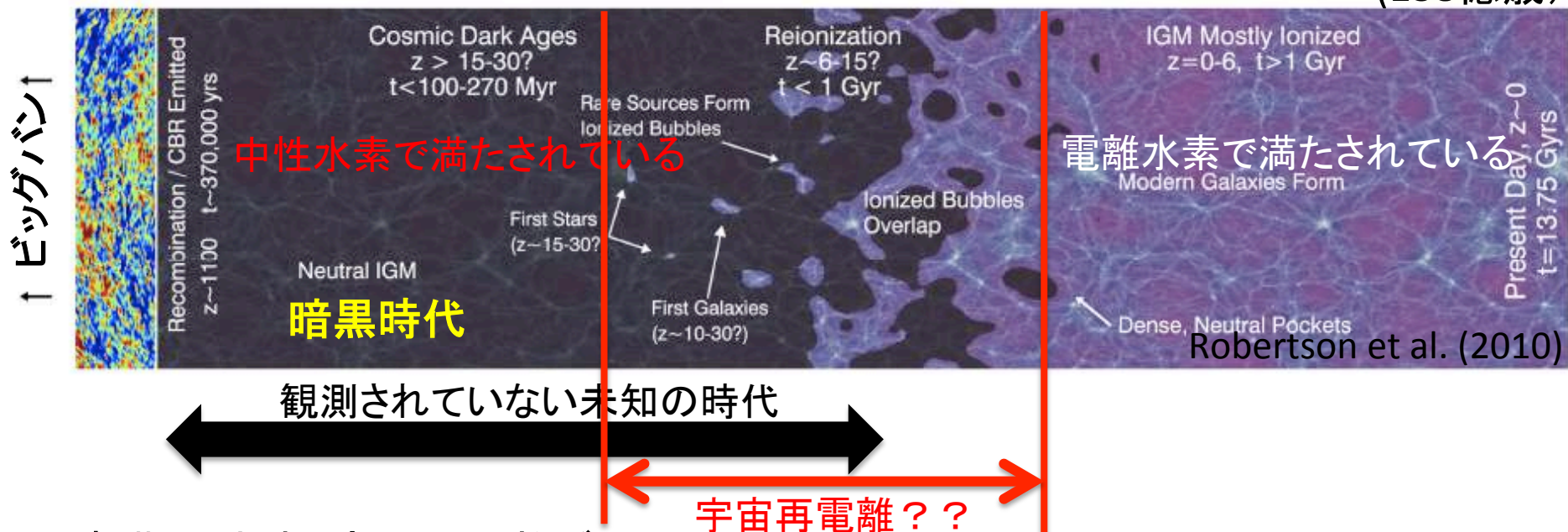
$z=6$

(9億歳)

現在

$z=0$

(138億歳)



• 初期の宇宙: 高温の電離ガス

1. 再結合して中性宇宙へ→暗黒時代

2. 電離して電離宇宙へ(再電離)→現在の宇宙へ

宇宙再電離: 宇宙史最後のイベント

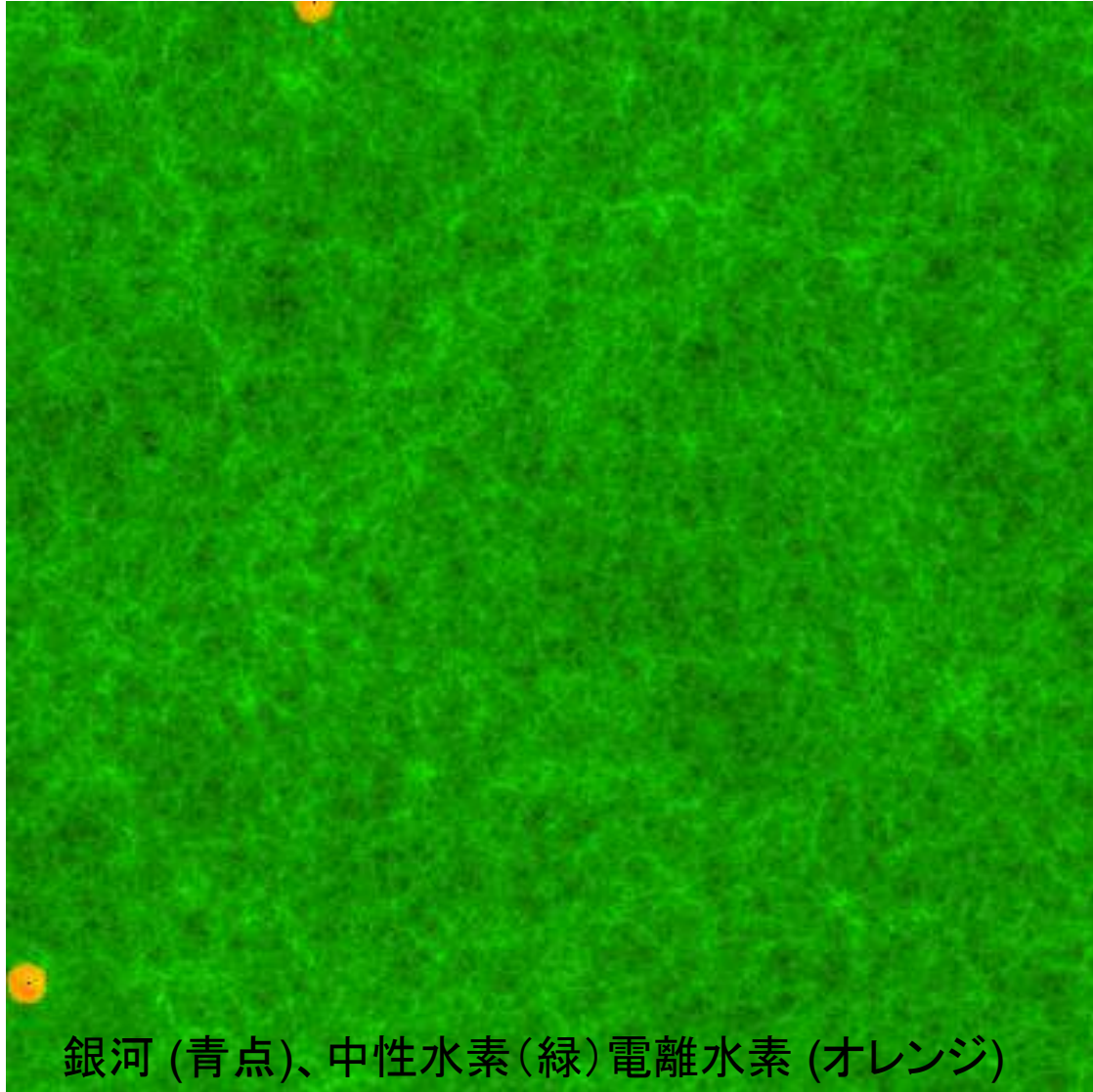
課題:

1) どのように再電離が進んだか? (宇宙再電離史)

2) 再電離を引き起こした原因は何か?



# 理論予想

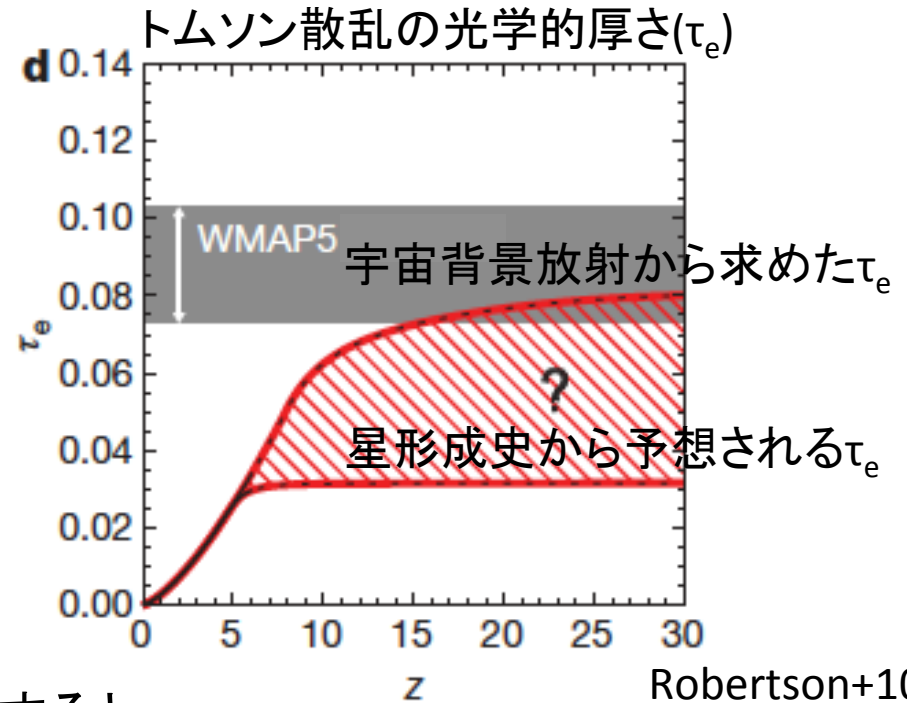
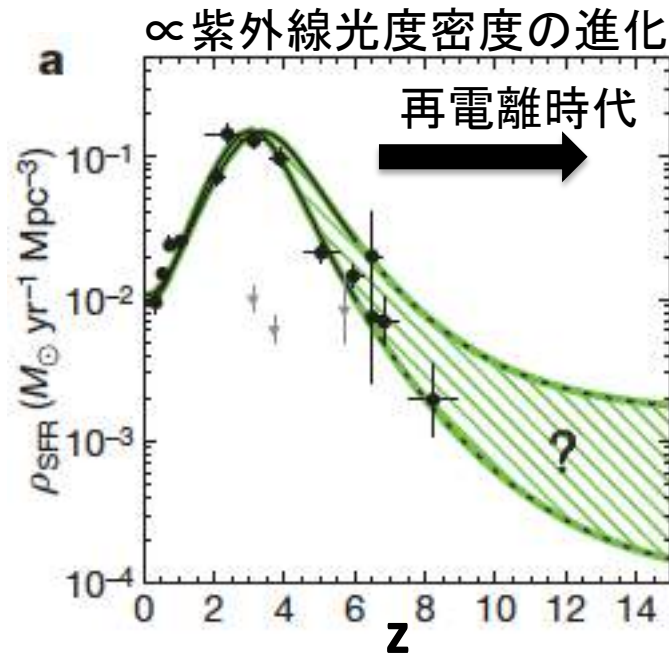


銀河 (青点)、中性水素 (緑) 電離水素 (オレンジ)

数値シミュレーション  
(Iliev et al. 2006)

銀河 (の中の星形成)が宇宙再電離を引き起こす？  
→宇宙再電離は銀河が原因？

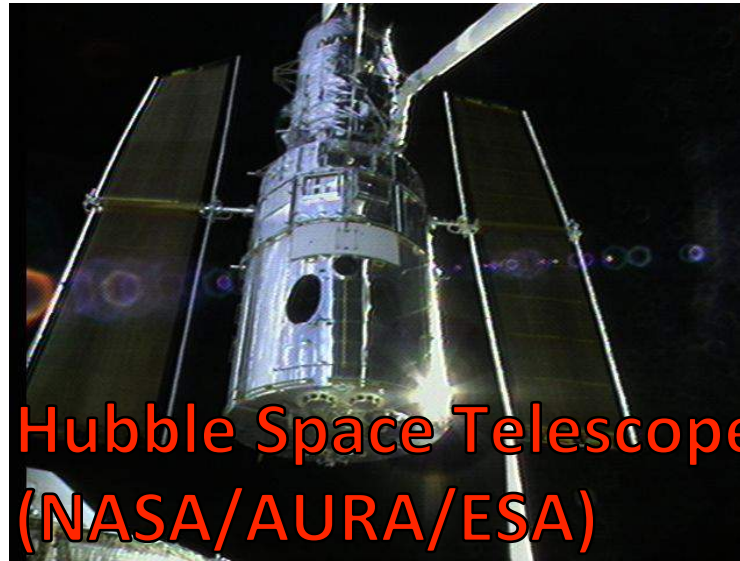
# 「電離光子不足」問題？



- 仮に銀河(星)が宇宙再電離を起こしたとすると
    - 紫外線光度密度  $\rightarrow$  電離光子の放射量(単位時間・体積当たり)
    - 各赤方偏移での自由電子の量  $\rightarrow$  トムソン散乱の光学的厚さ( $\tau_e$ )
    - これを現在( $z=0$ )から過去の宇宙へ足し上げる
    - $\rightarrow$  宇宙背景放射の観測値より $\tau$ が小さい?(矛盾?)  $\rightarrow$  課題
  - 銀河以外から電離光子が出た??
    - 暗黒物質の対消滅? 原始ブラックホール??
    - X線連星、暗いAGN?
- 赤方偏移  $> 8$  の観測精度を高めて、課題を解決すべき。  $>$  現状では難しい

**問題の解決に向けて  
(将来の研究プロジェクト)**

# 大口径望遠鏡の限界



Hubble Space Telescope  
(NASA/AURA/ESA)



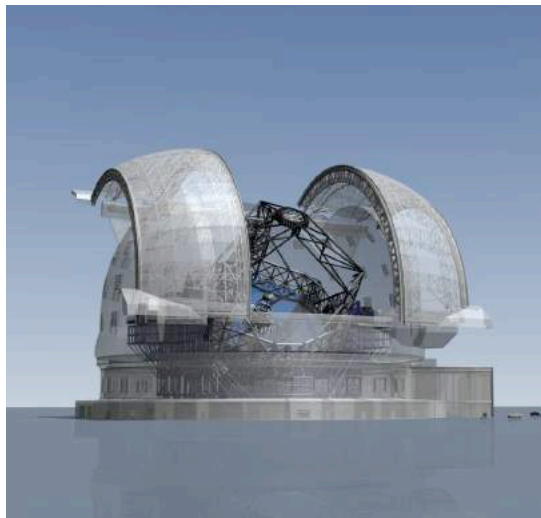
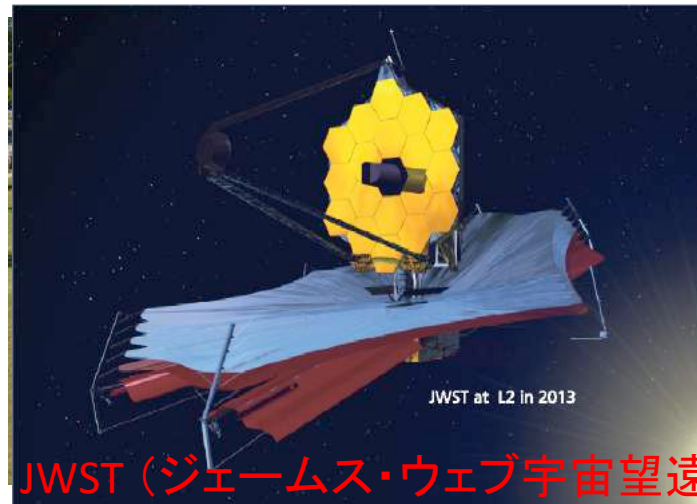
10m Keck Telescopes  
(California Assoc.)



8.2m Subaru Telescope  
(国立天文台)



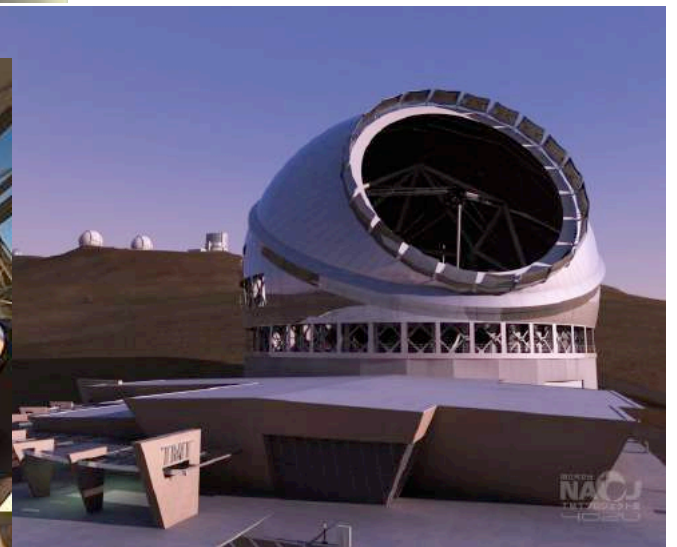
# 宇宙再電離史へのアプローチ ( $z > \sim 10$ の天体の観測)



E-ELT (欧州超大型望遠鏡)  
[欧]

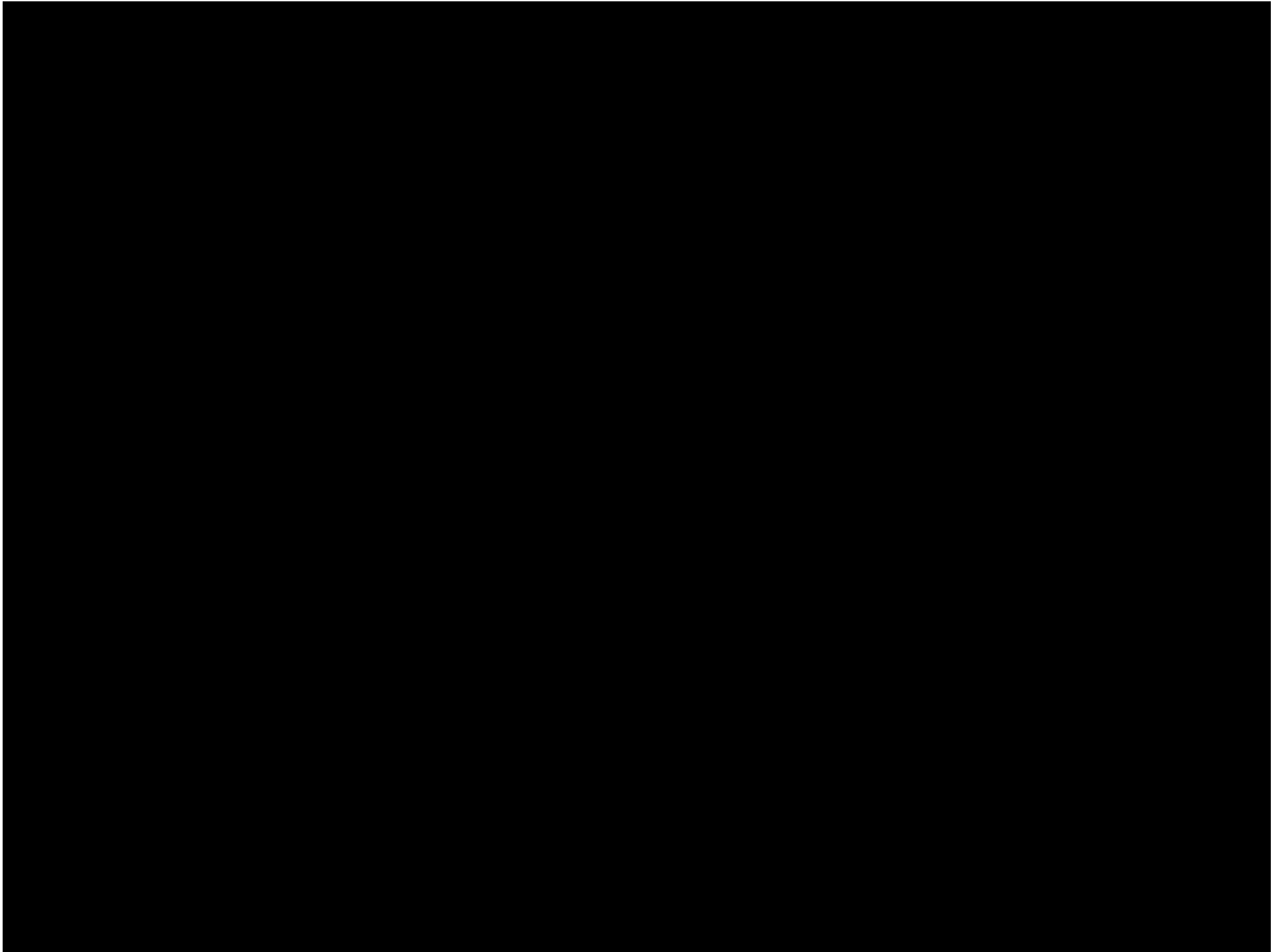


GMT (巨大マゼラン望遠鏡)  
[米豪韓]



TMT (30m望遠鏡)  
[日米加中印]





# まとめ

- 主に可視光(近赤外線/近紫外線含む)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
- 何が問題か？(宇宙再電離について)
  - 宇宙の再電離史
  - 宇宙再電離の原因(何が宇宙を再電離させたのか？)
- 問題の解決に向けて: 将来の研究プロジェクト
  - 次世代超大型望遠鏡計画



# 3月1日の報道



【3月1日 AFP】米アリゾナ州立大学（Arizona State University）などの天文学者チームは2月28日、宇宙がビッグバン（Big Bang）で誕生した直後に生まれた宇宙最古の星々「ファーストスター」に由来する電波を、史上初めて検出したと発表した。この観測結果に科学界は騒然となっている。

ファーストスターの痕跡検出に向けた取り組みは10年前から続けられてきたが、実際に観測できるのはまだ何年も先になると予想されていた。観測結果は今後、別の実験によって裏づけられる必要があるが、一部からは既に、ノーベル賞を受賞した2015年の重力波検出以降で最大級の天文学的発見だとの声も上がっている。

今回の発見は、宇宙の大部分を構成すると考えられている謎の透明物質「暗黒物質（ダークマター）」の謎を解明する手がかりとなることも期待されている。

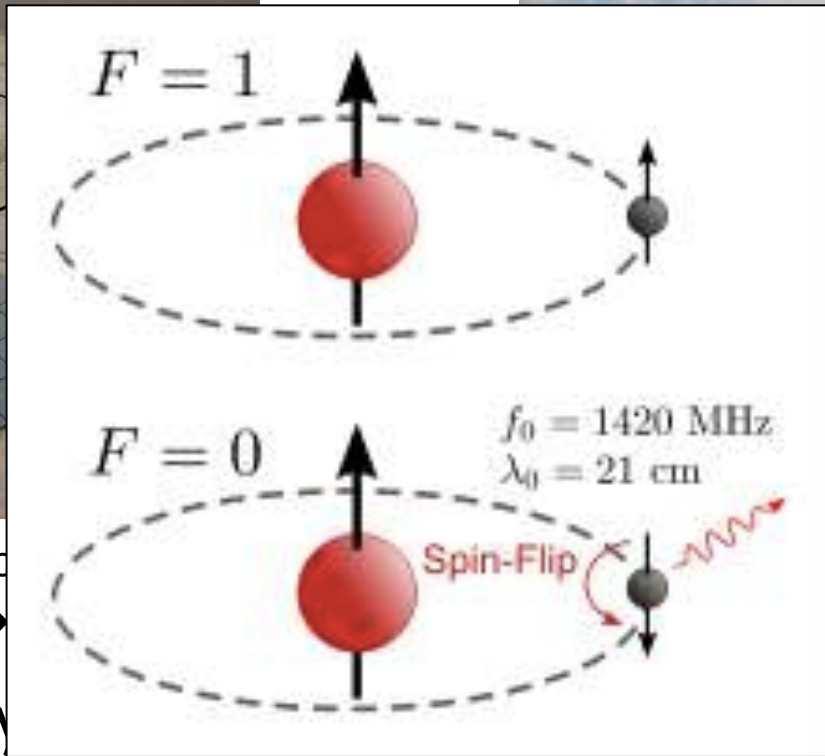
検出されたのは、今から136億年前、ビッグバンによる宇宙誕生からわずか1億8000万年後にすでに活動を始めていたファーストスターの痕跡で、オーストラリアの砂漠に設置されたダイニングテーブルほどの大きさの電波分光計により観測された。

# In and Beyond First-Star Epoch

## ---Hydrogen 21cm Radio Observations---



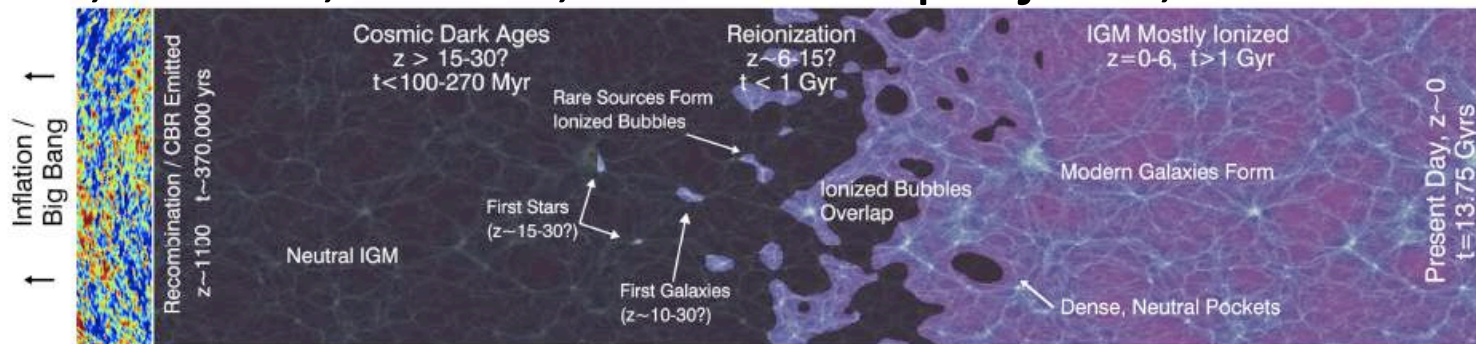
LOFAR © TO



MWA ©MWA web site

21cm emission

- HI (spin flip) →
- Low frequency
- GMRT, PAPER, LOFAR, and MWA projects, so far.



# 21 cm Signal from Reionization

- Spin temperature

$$\frac{n_{\uparrow\uparrow}}{n_{\uparrow\downarrow}} = 3 \exp\left[-\frac{h\nu_{21\text{cm}}}{kT_{\text{spin}}}\right]$$

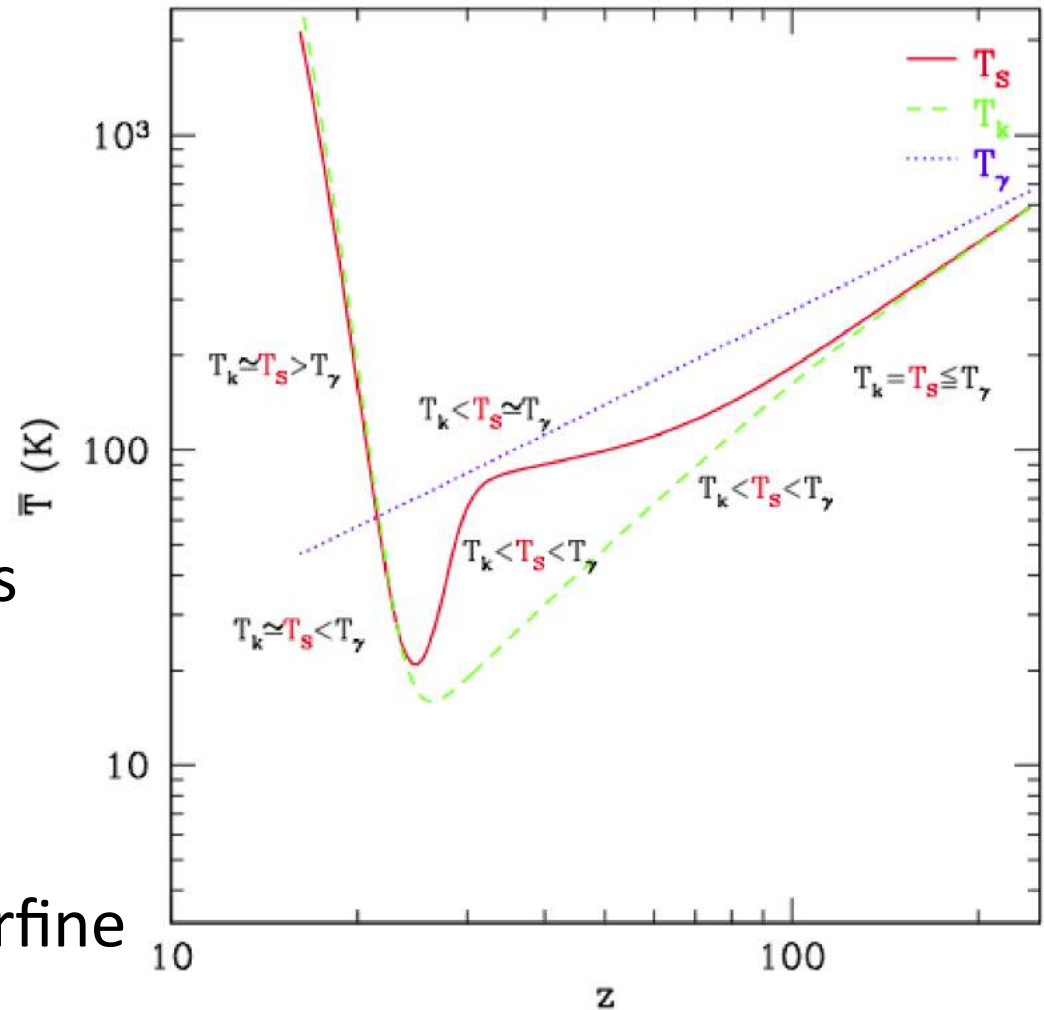
$T_s$ : Spin temperature

$T_\gamma$  ( $T_{\text{CMB}}$ ): CMB temperature

$T_k$ : Kinetic temperature

- $z \sim 150$ : Collisions of atoms
- $z \sim 70$ : Too low density for atom collisions
- $z \sim 20$ : Ly $\alpha$  emission from objects redistribute hyperfine states (WF effect)
- $z < 15$ : Heating by objects (X)

## Prediction



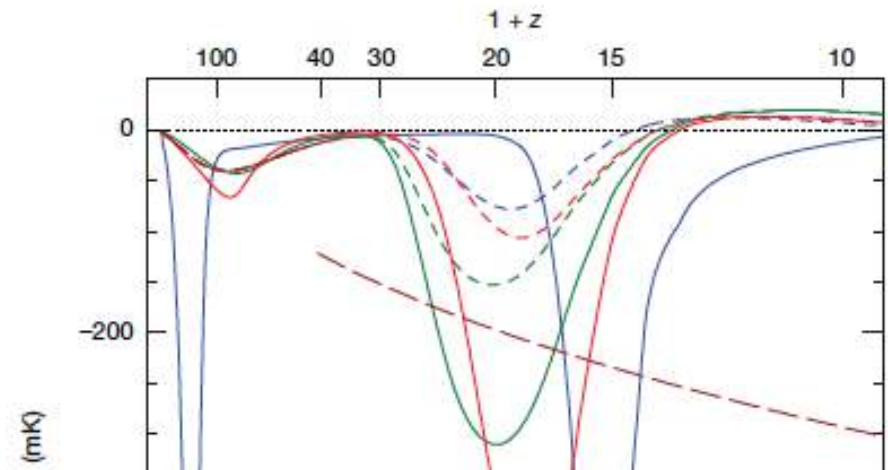
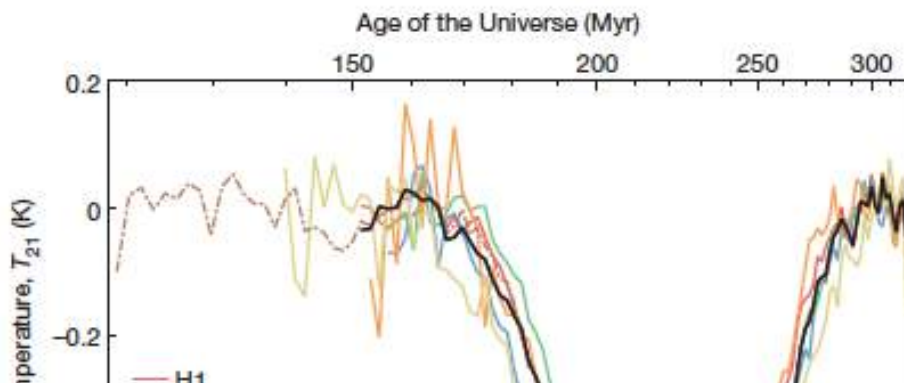
K. Takahashi



# 2編のNATURE PAPER

観測結果を説明する理論

観測結果



読売新聞記者への大内のコメント

今回の発見の報告は、2つの意味で天文学に大きなインパクトを与える可能性があります。1つ目は、電波で最初の星の痕跡を見つけた点、2つ目はその痕跡が理論予想を超えた強さだった点です。

一方で、観測データの解釈は容易ではなく、この研究だけで結論づけることは難しいと思われます。

今後の研究によって、この発見がしっかりと検証されることを期待しています。