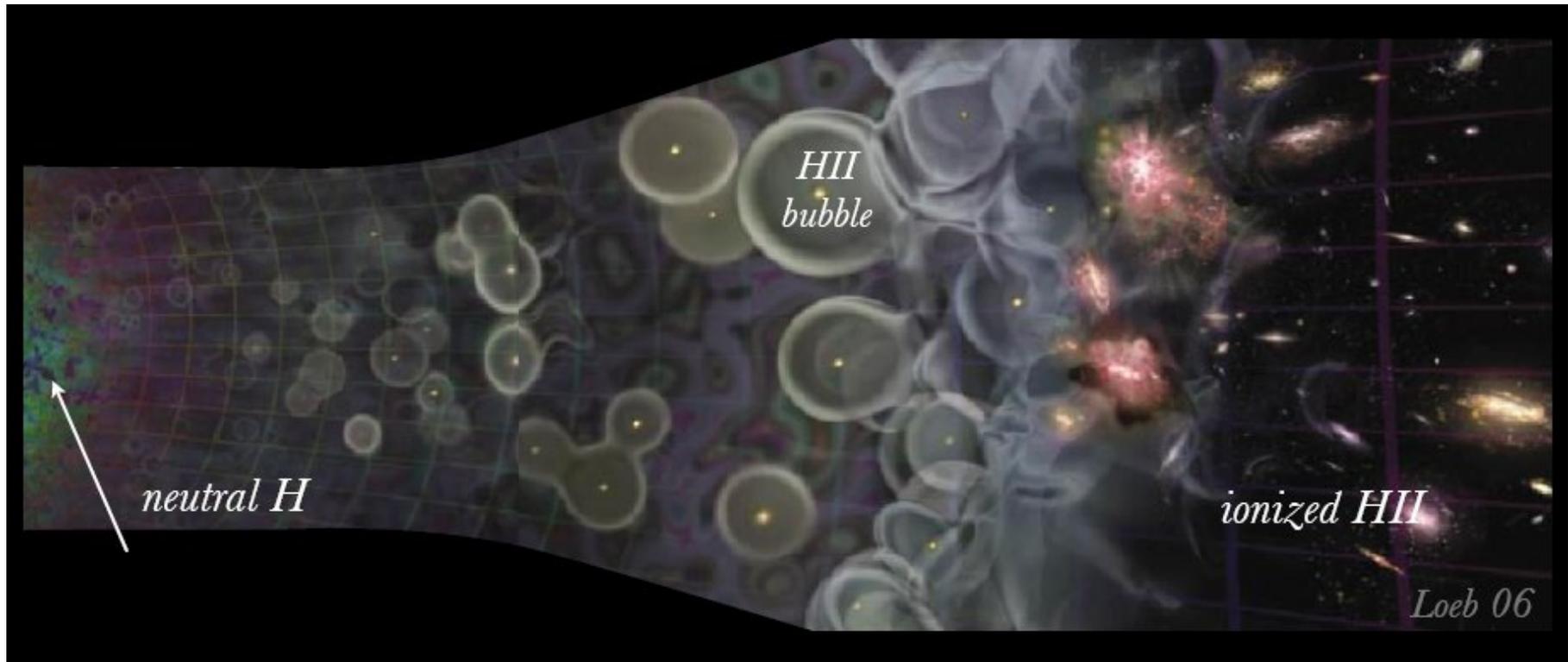


最先端研究II
観測的宇宙論
---宇宙史の中の再電離---



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)で探る宇宙

- 何が見えるか？

- 恒星、高温ガス、超新星爆発、クエーサー、

- ガンマ線バースト残光、重力波対応天体、、、



M66 (Hubble Space Telescope, NASA/AURA)

可視光(近赤外線/近紫外線)で探る宇宙

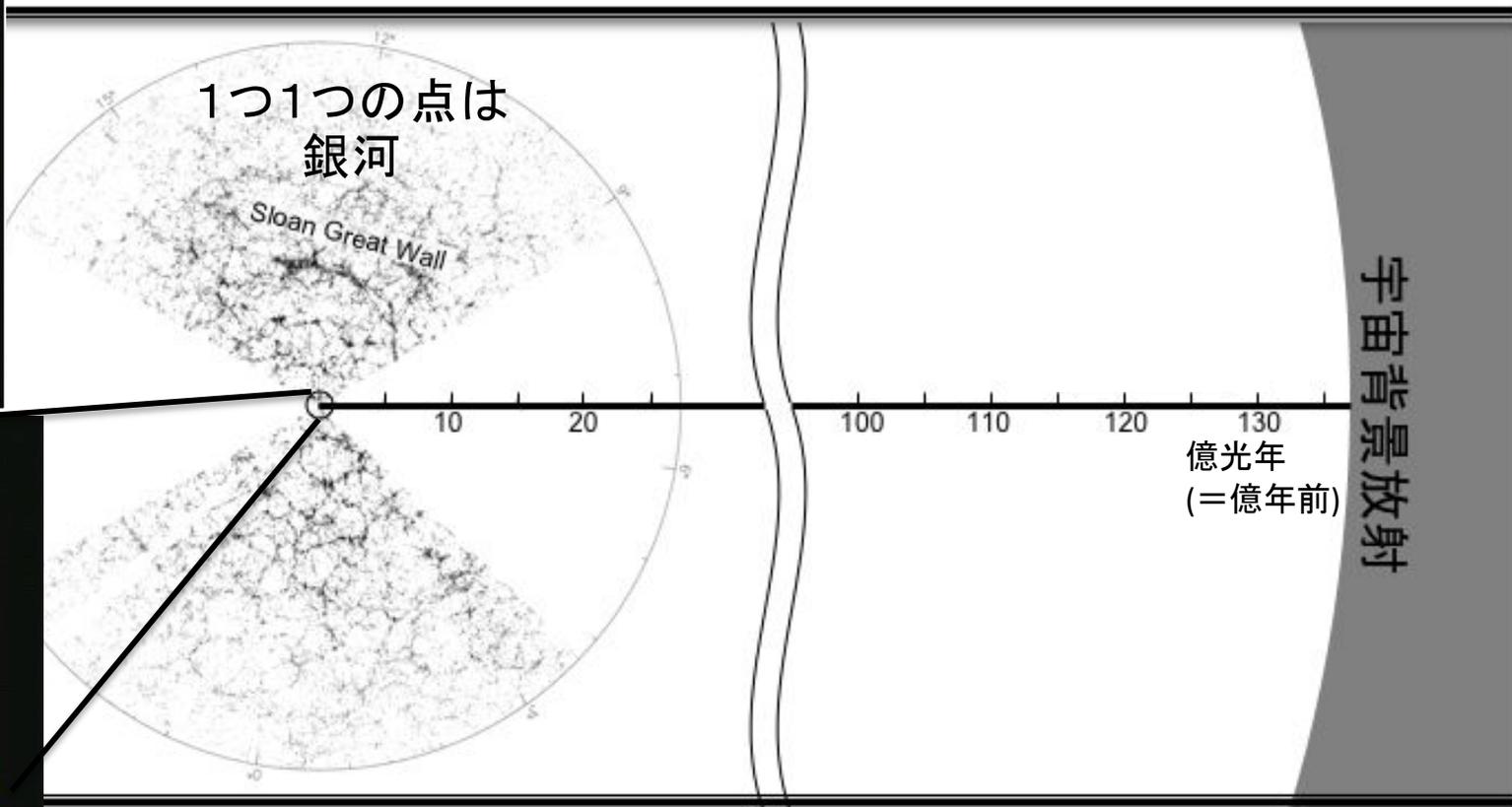
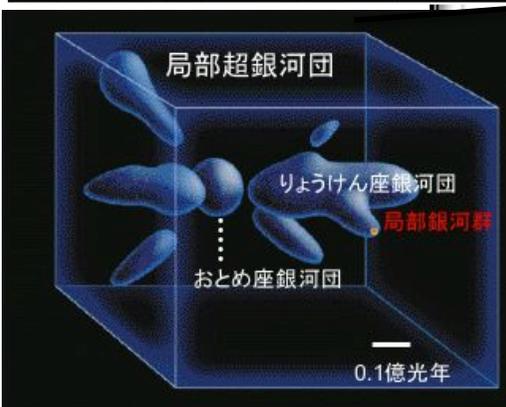
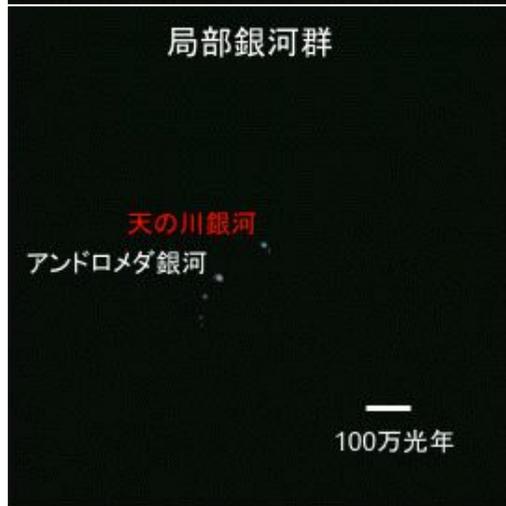
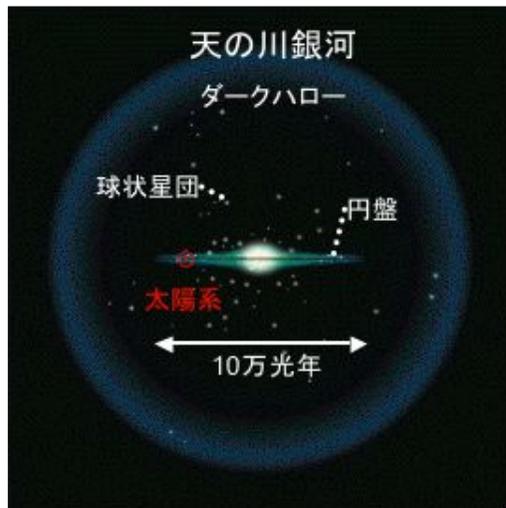
- 何を理解するか？

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)

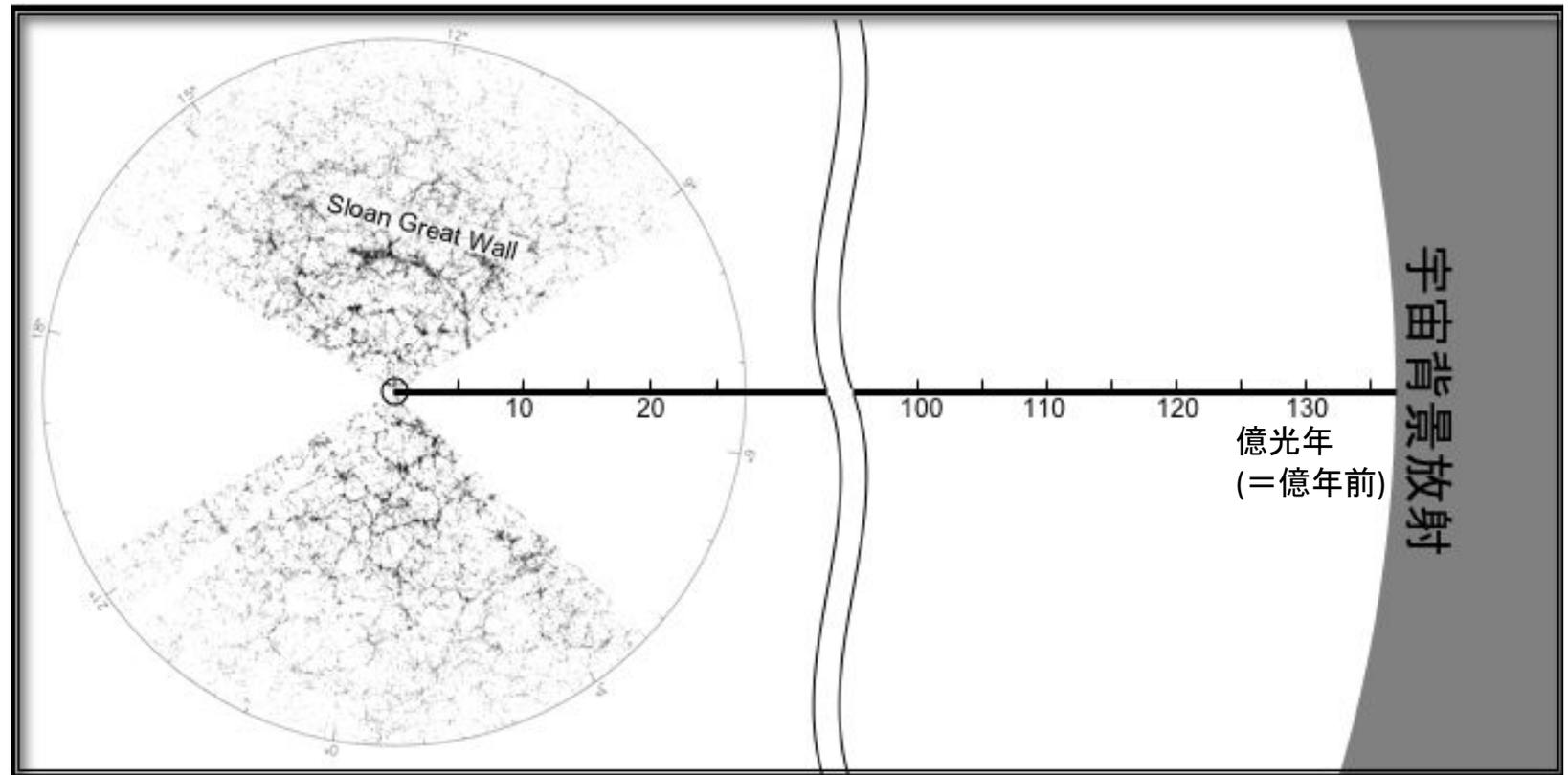
2. この銀河宇宙がどのように出来たか(宇宙史)？

- 「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(!))



宇宙史の調べ方は？

- 約10億光年以上の大きなスケール＝宇宙はほぼ一様等方（現在の宇宙、宇宙背景放射）。>10億光年ならどこを観測しても良い。
- 光速は極めて速い($2.998 \times 10^8 \text{ km/s}$)。しかし、宇宙は非常に大きい
- 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、過去の光。

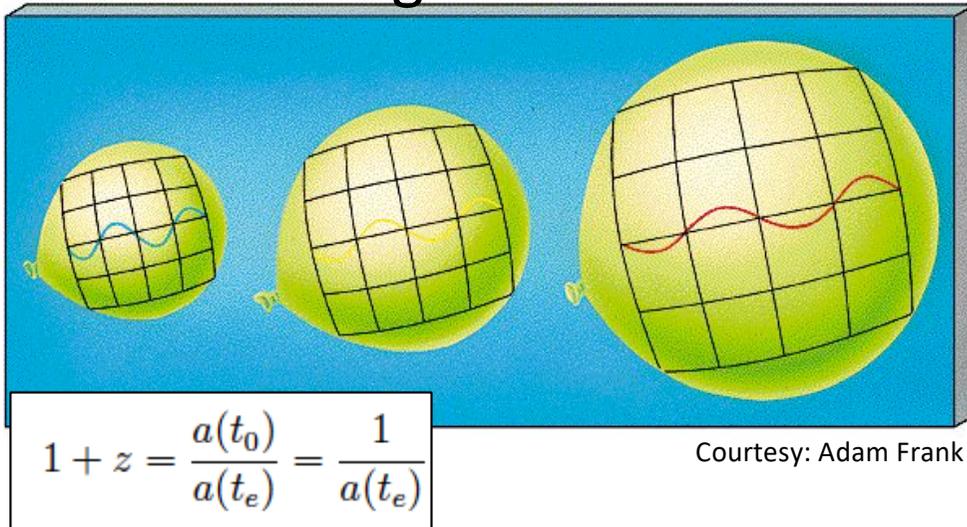


赤方偏移とルックバックタイム

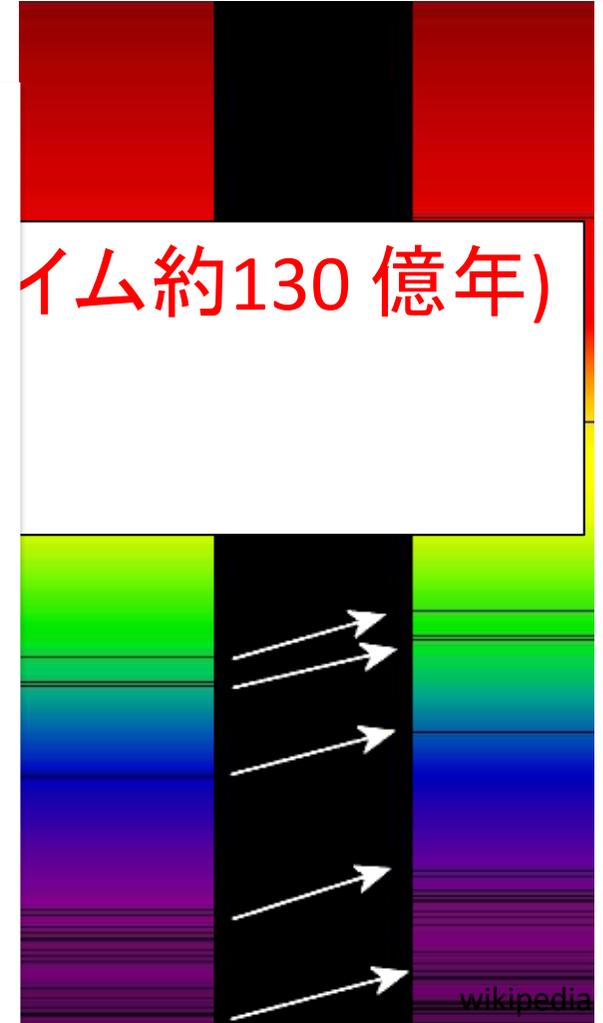
- 遠い天体 (= 過去の宇宙の天体) ほど宇宙膨張の効果で波長が伸びる → 「宇宙論的」赤方偏移 (z)

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

Cosmological Redshift



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



Redshifts of Fraunhofer lines of stars

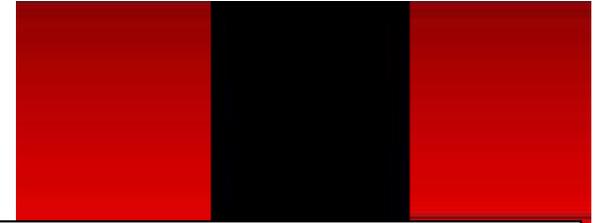
c) wikipedia

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波長が伸びる → 「宇宙論的」赤方偏移 (z)

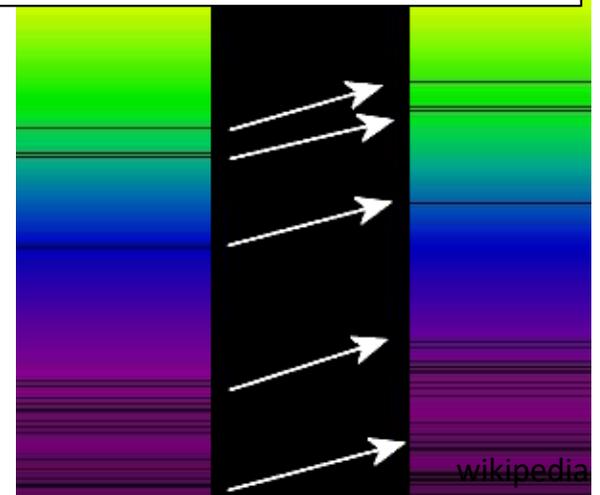
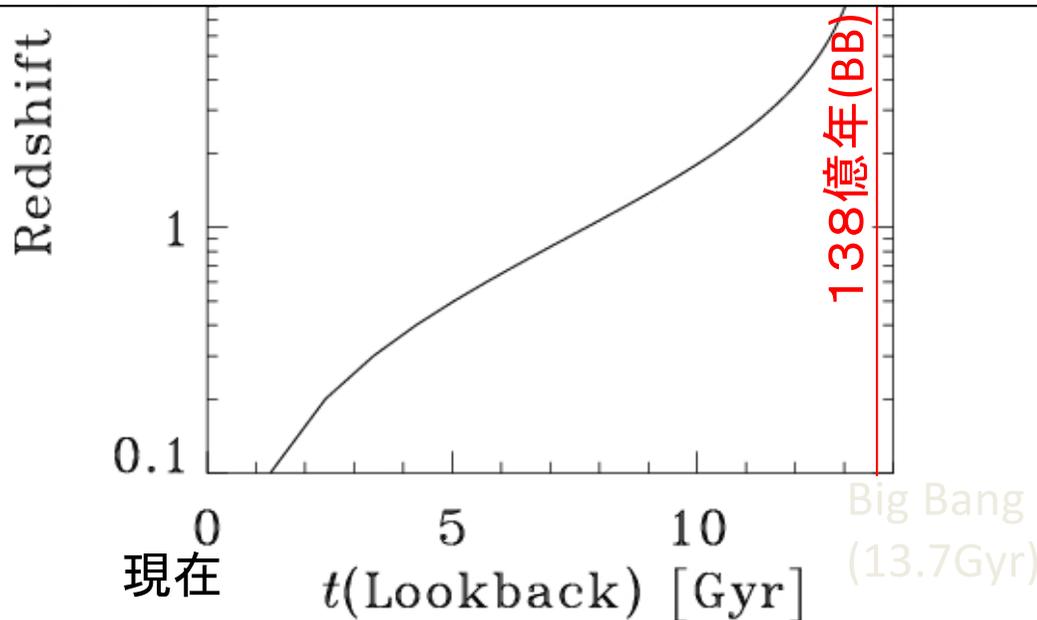
$$z = \frac{\Delta\lambda}{\lambda}$$

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



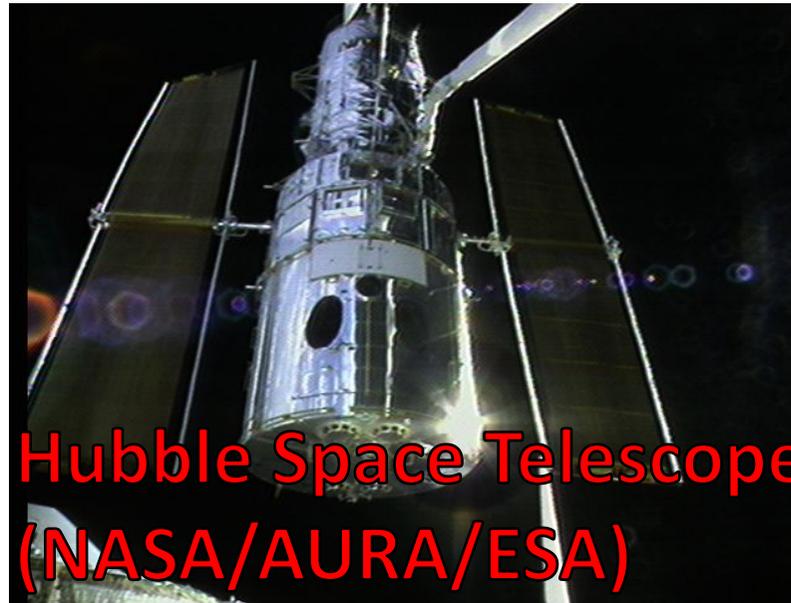
- ルックバックタイム = 過去の宇宙に向け遡った時間

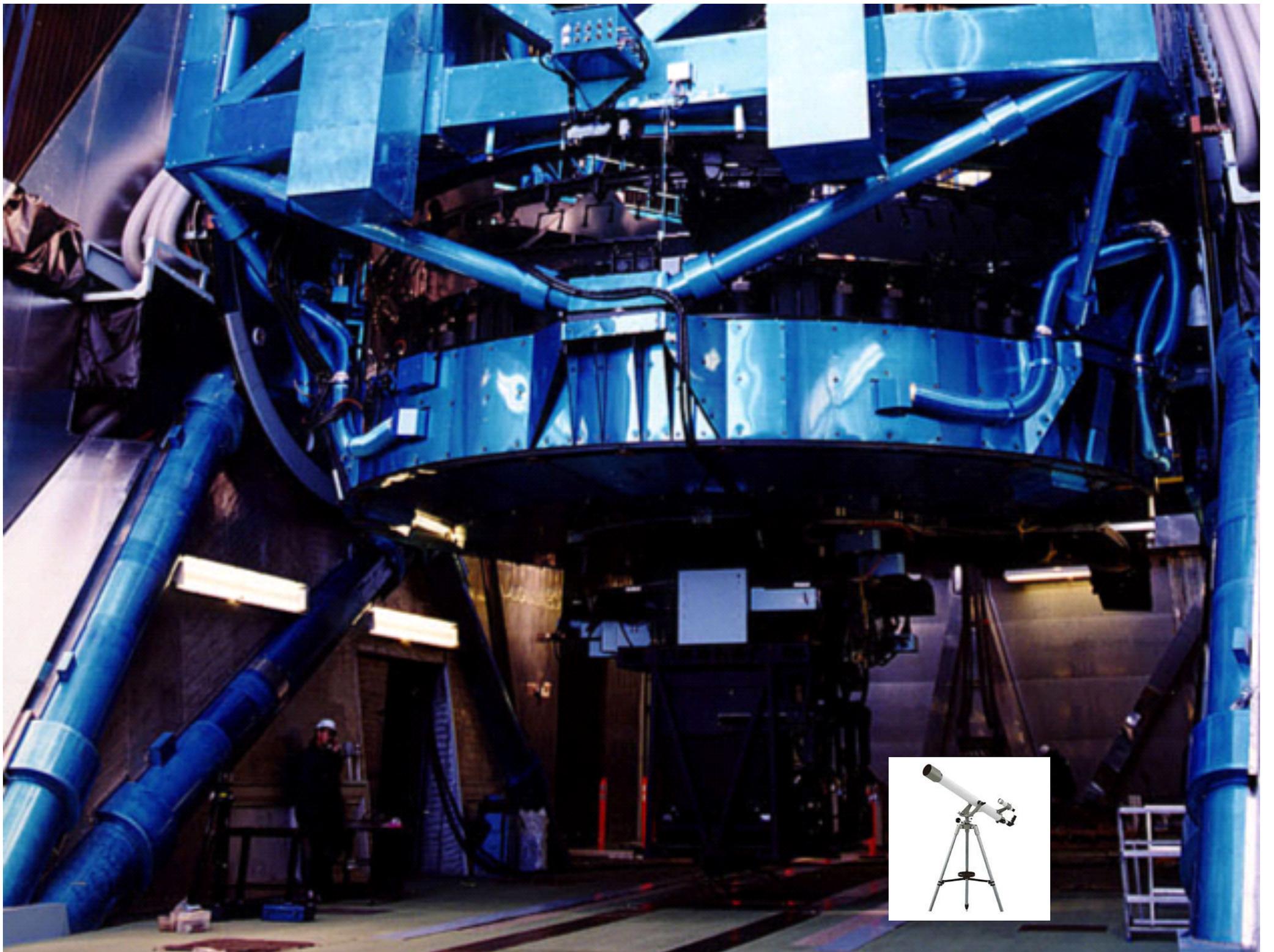
遠くの天体、例えば $z=6$ (ルックバックタイム約130 億年)
 → 非常に暗い: $f_{z=6\text{galaxy}} \sim 1/10^{10} f_{\text{vega}}$
 どうするか？



Redshifts of Fraunhofer lines of stars
 c) wikipedia

大口径望遠鏡

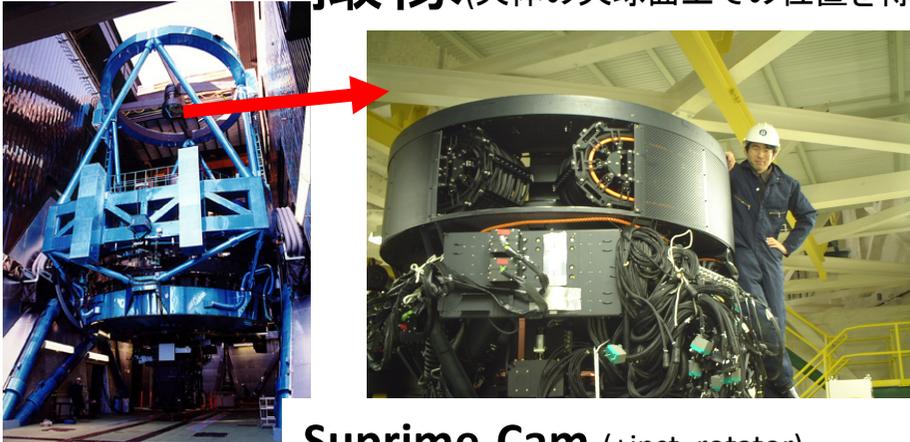




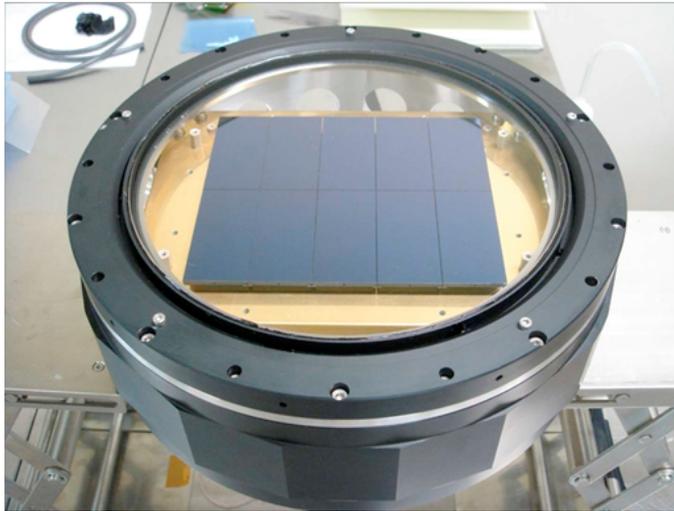
**観測はどのように行われるか？
観測データはどのようなものか？**

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)



カメラ (CCD/CMOS)

Suprime-Cam 8000万画素

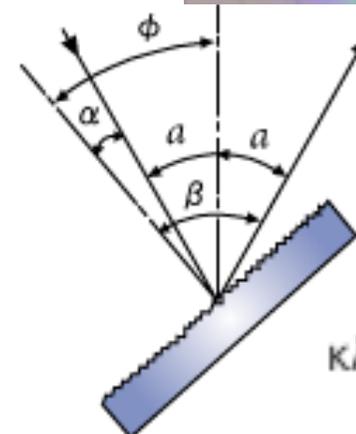
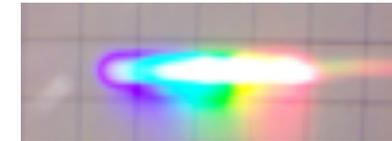
Hyper Suprime-Cam 8億7000万画素

分光 (天体の赤方偏移を測る, z)

Keck/DEIMOS



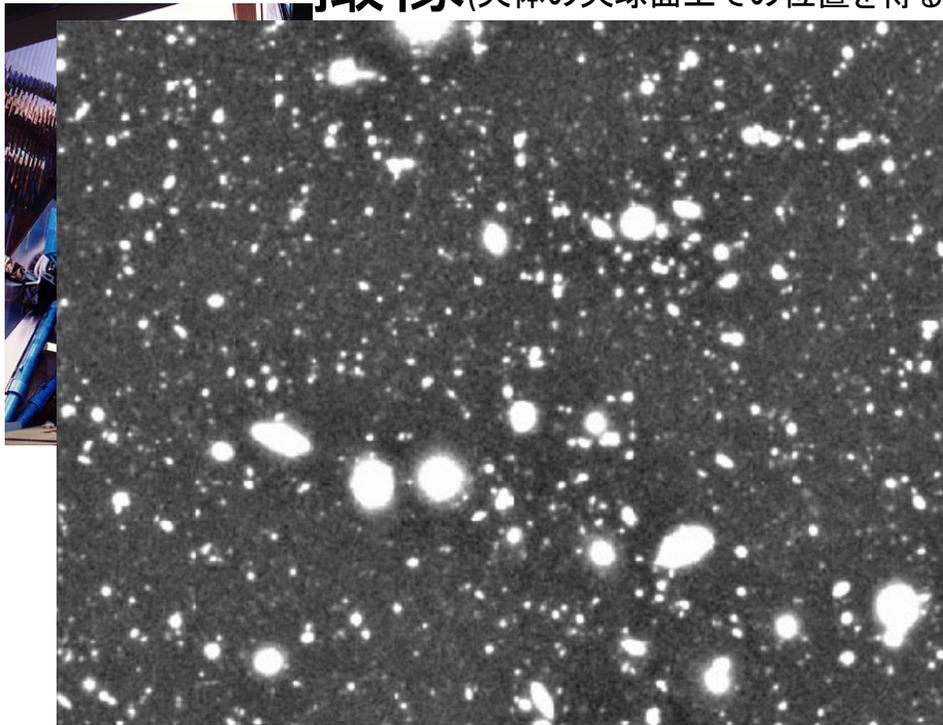
回折格子



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

観測装置

撮像 (天体の天球面上での位置を得る, XY)

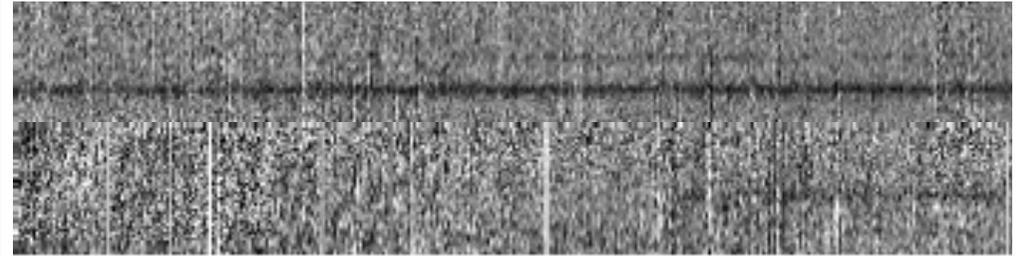


カメラ (CCD/CMOS)

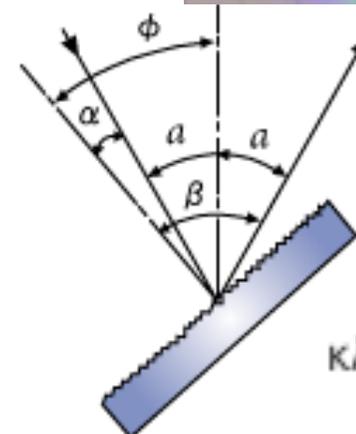
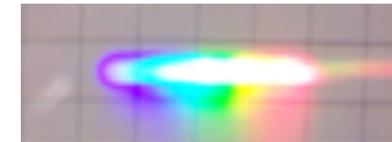
Suprime-Cam 8000万画素

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

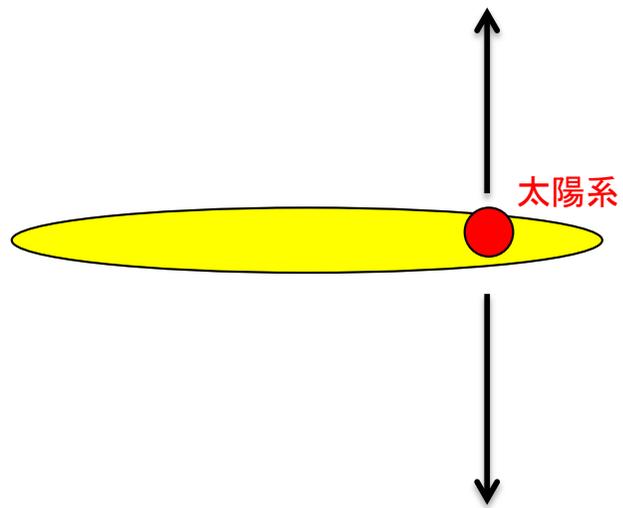
- Quiz 1:

- 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。」
 - ただし、観測する方向は大体おなじ

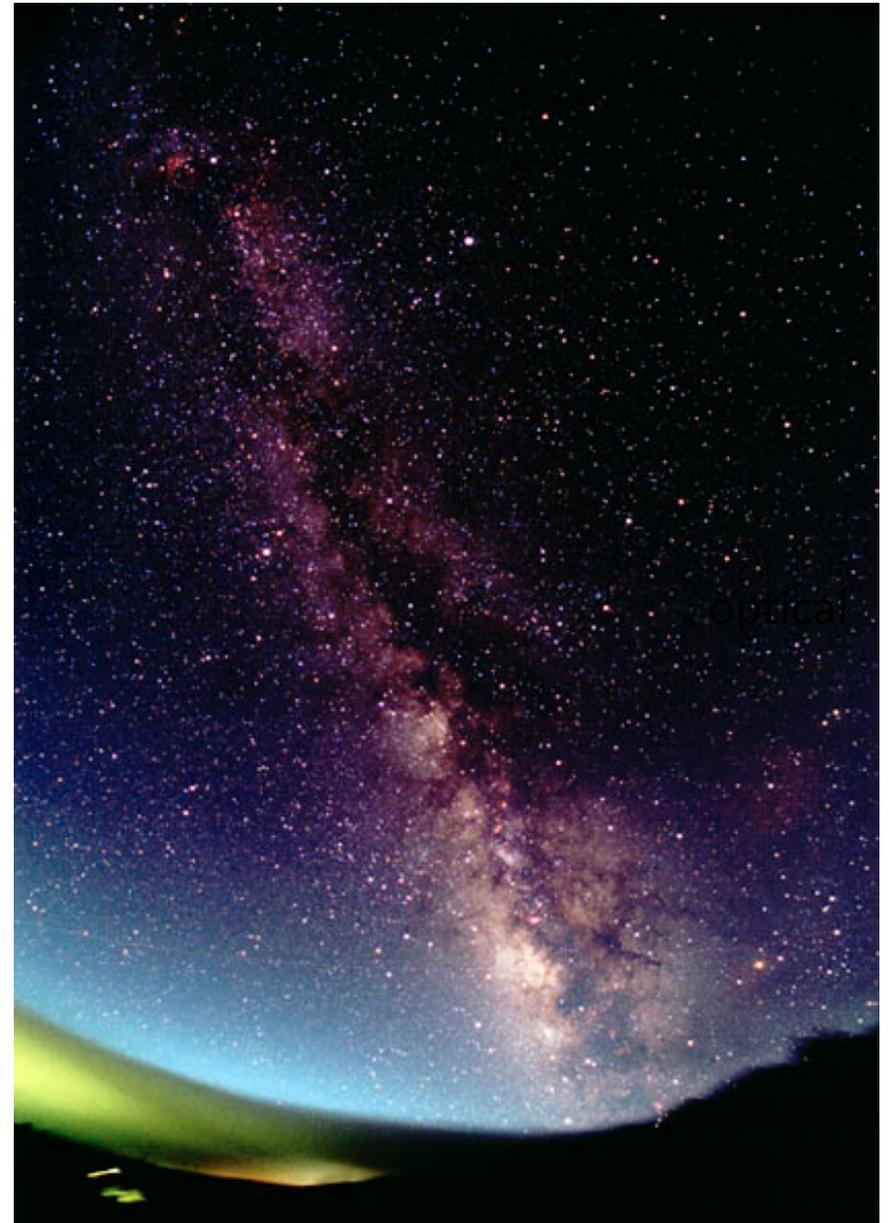
Hint: 遠方宇宙の観測は春と秋に行われる

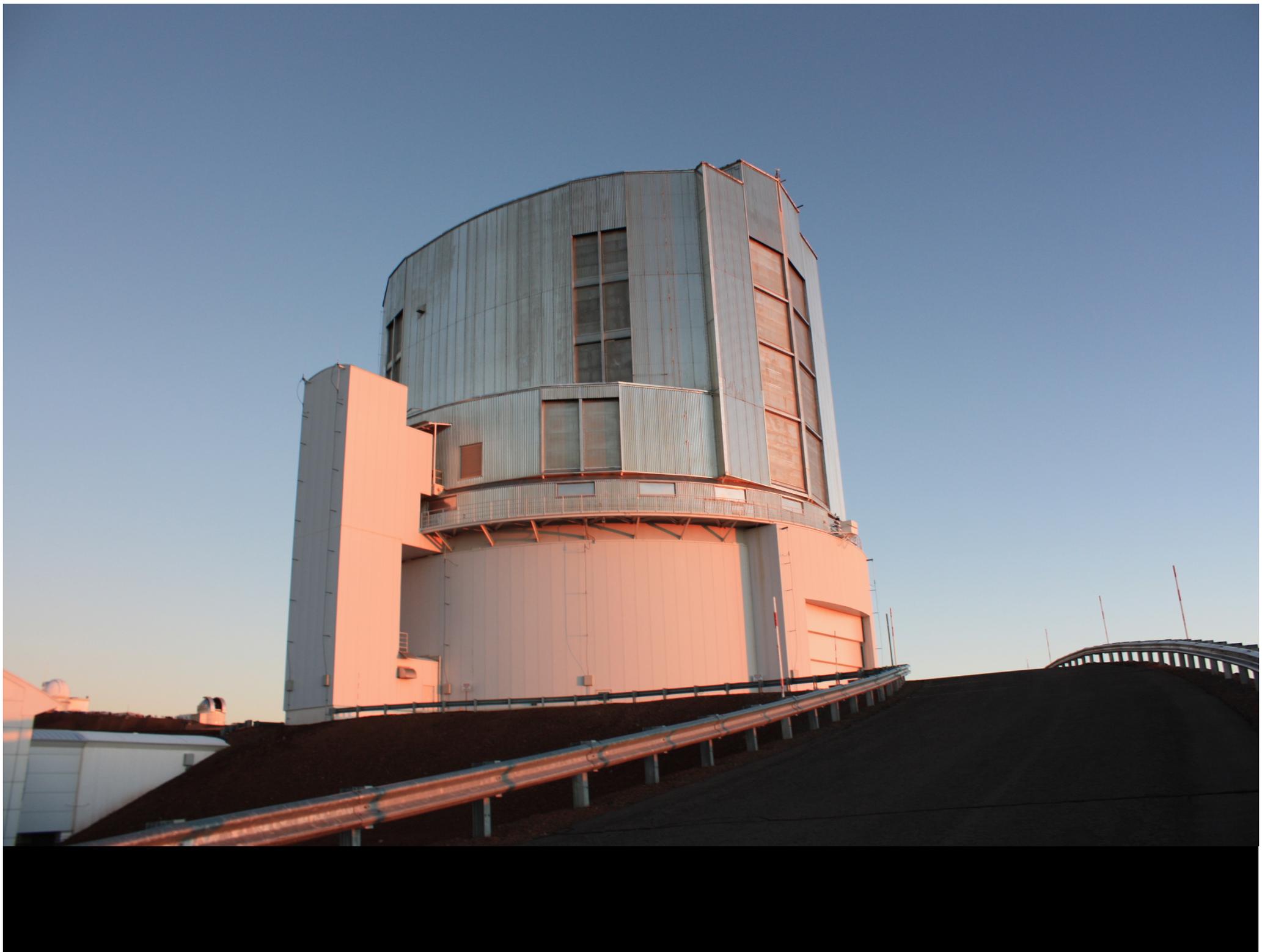
観測する天域

- 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

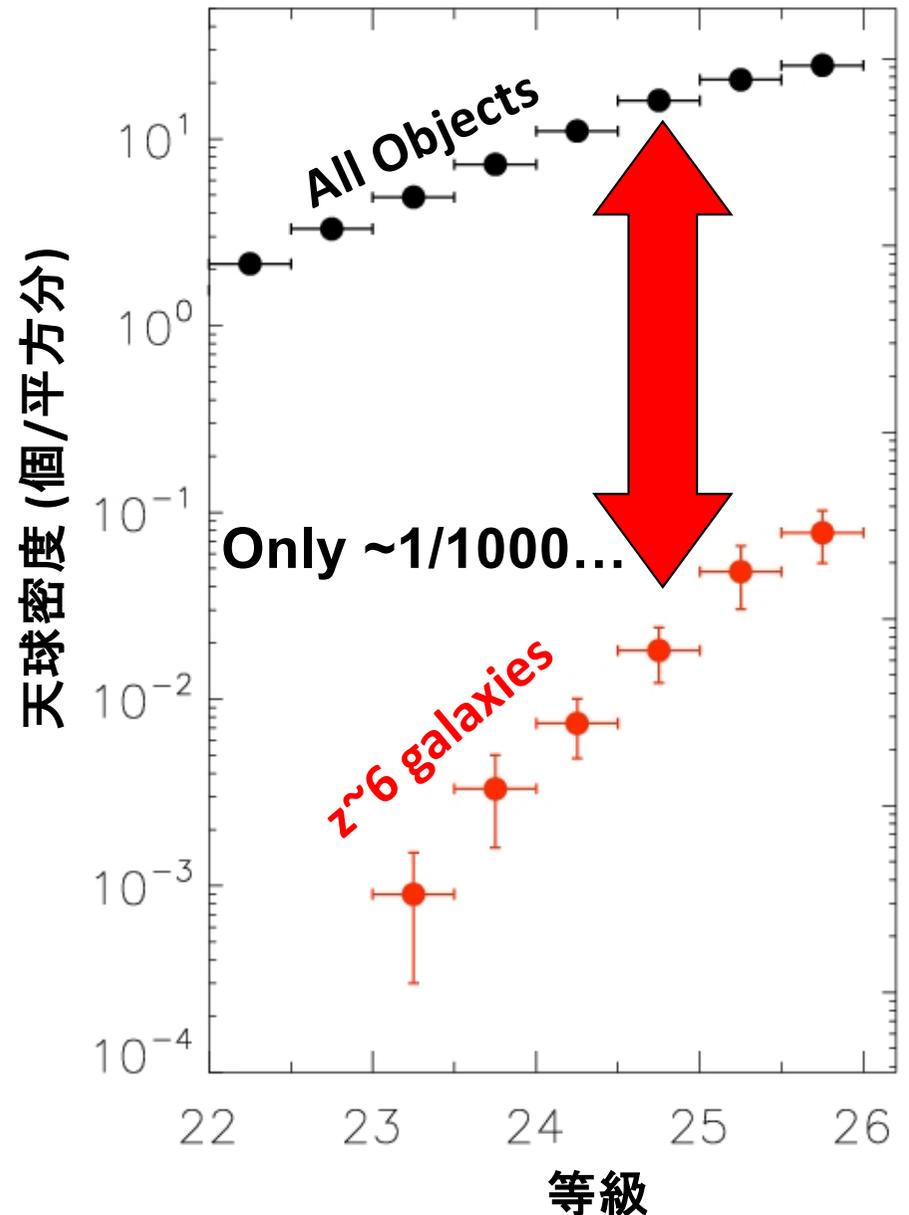




前景天体の海から 遠方の銀河を見つける

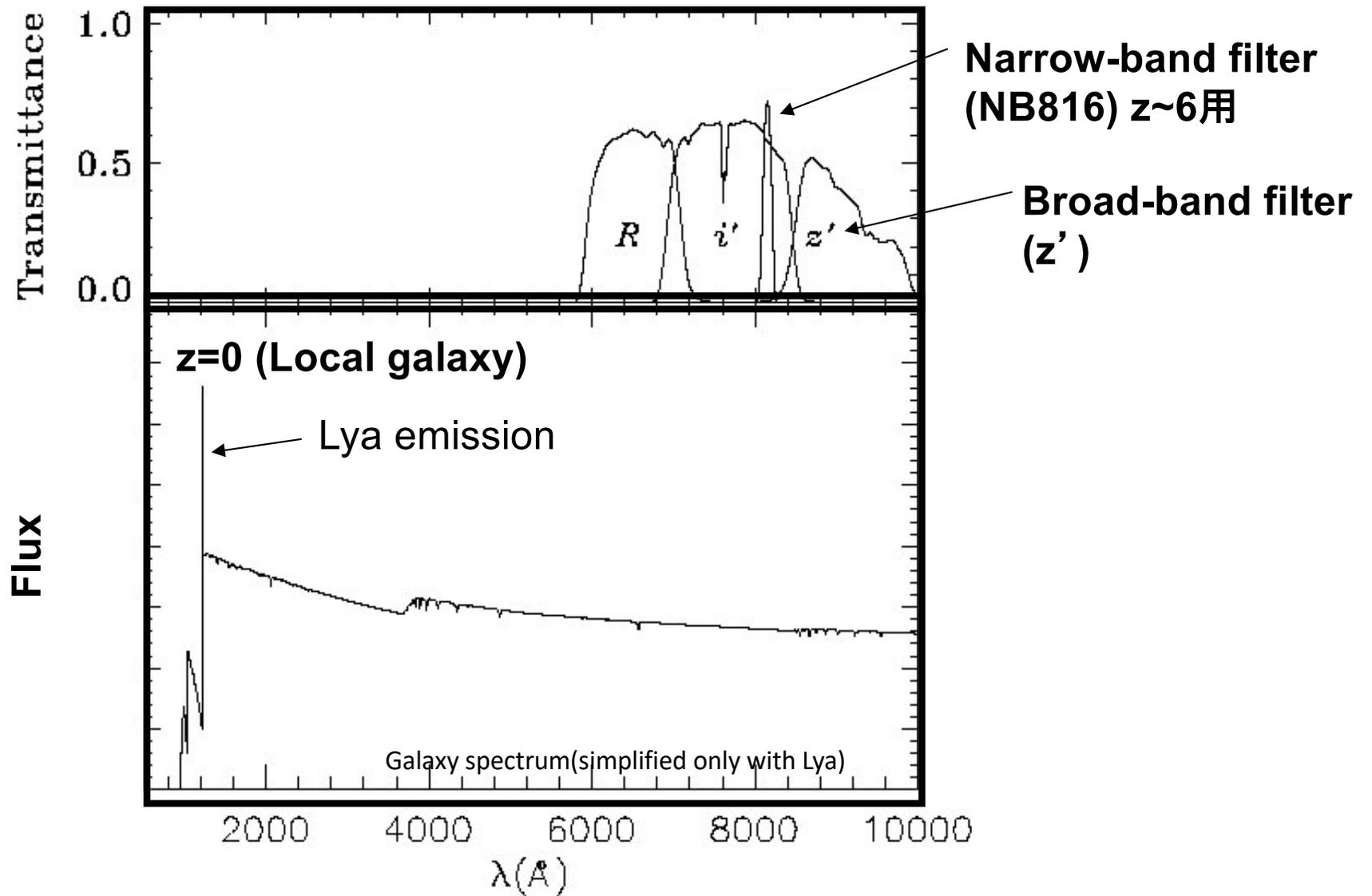


- 撮像データに写った銀河のほとんどは手前の天体 (前景天体)
- (例) 赤方偏移6の銀河は1000個に1個
- 分光して赤方偏移を測れば良い
 - 赤方偏移6では1銀河~3時間が必要
 - 375日 (=3000時間/8時間)観測してやっと1個の銀河、、、現実的に不可能



遠方の銀河候補を

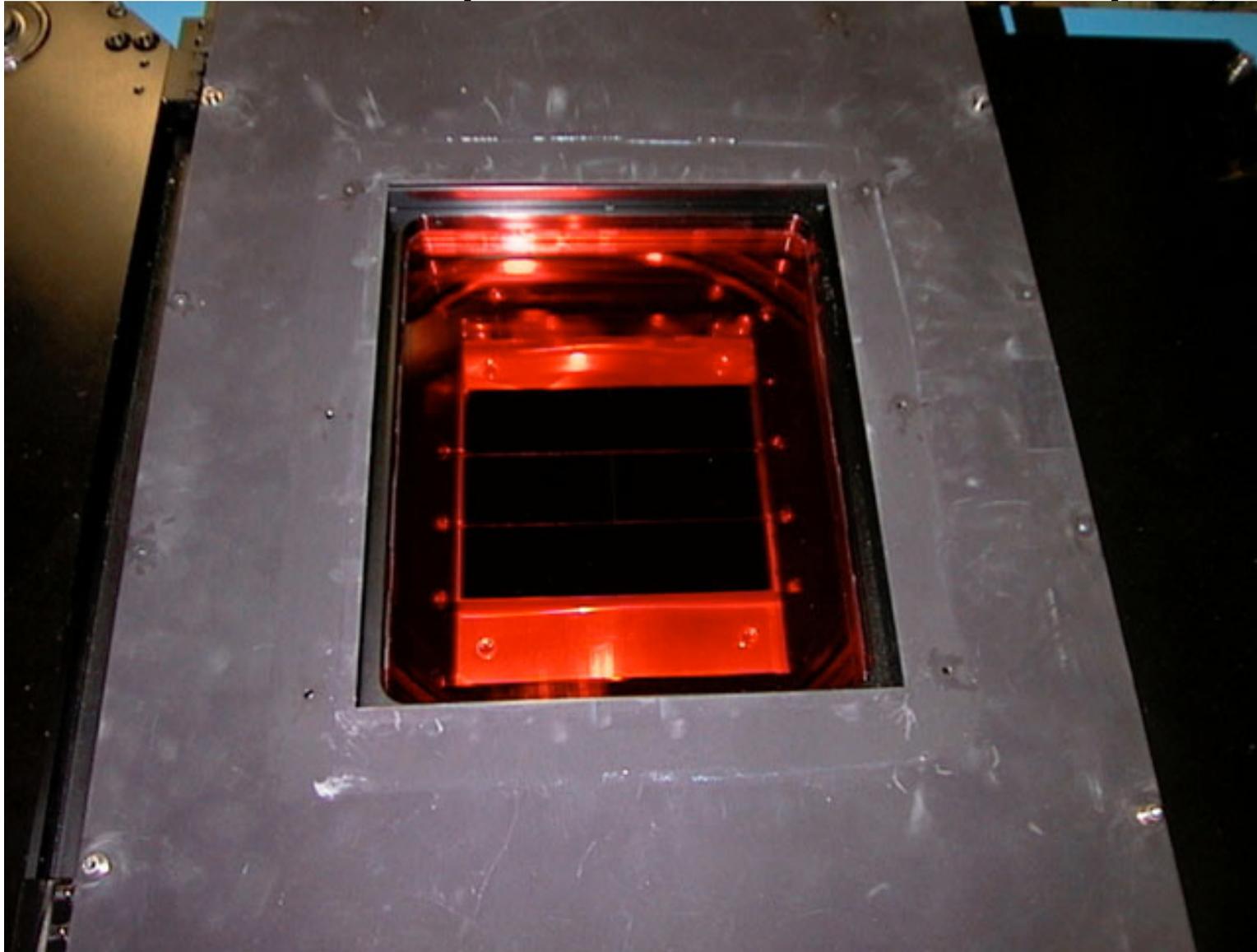
狭帯域フィルター(**narrow-band filter**)で選択



UV

Optical

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

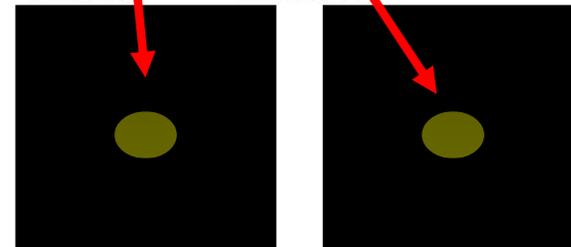
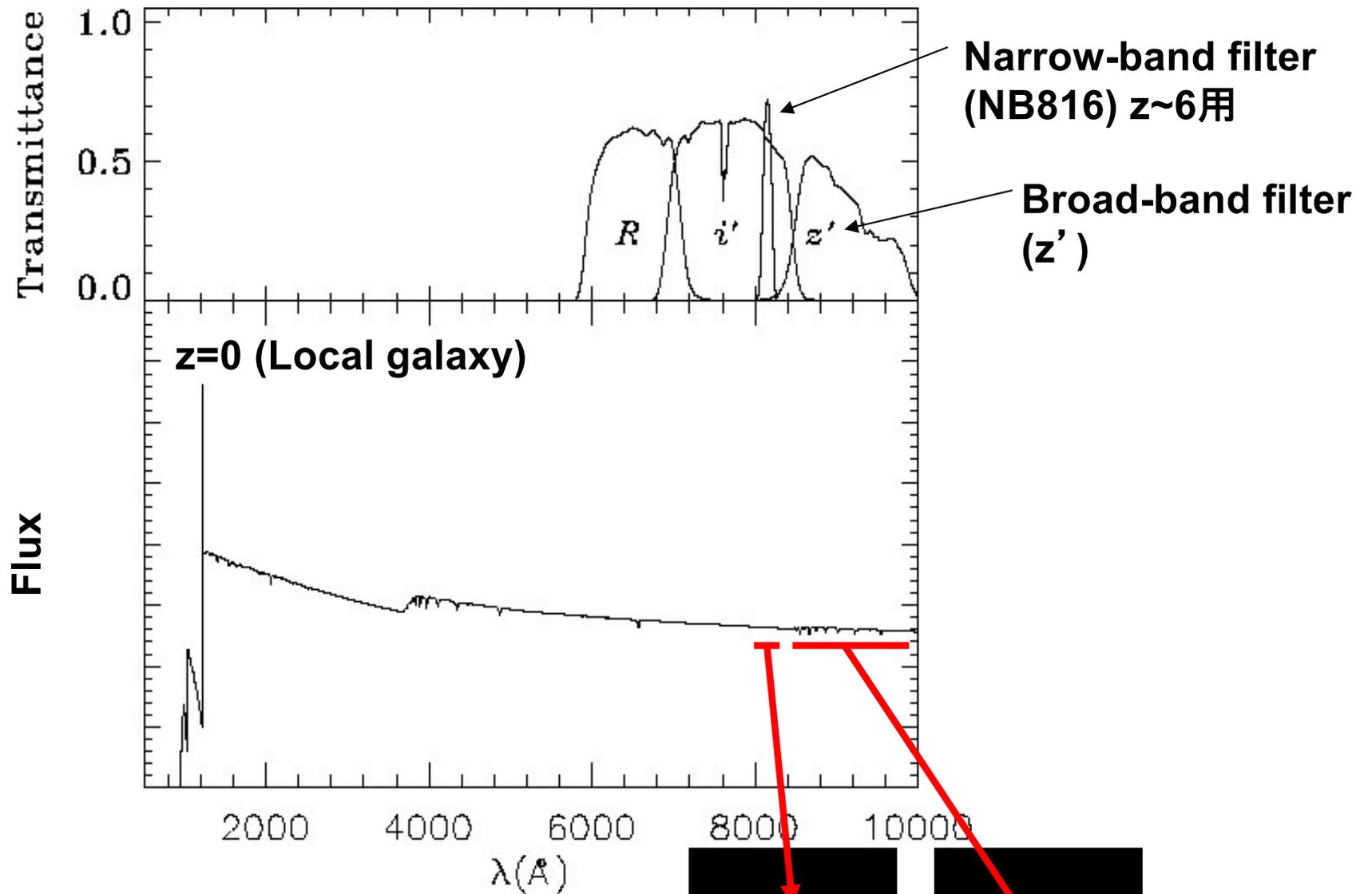
and filter

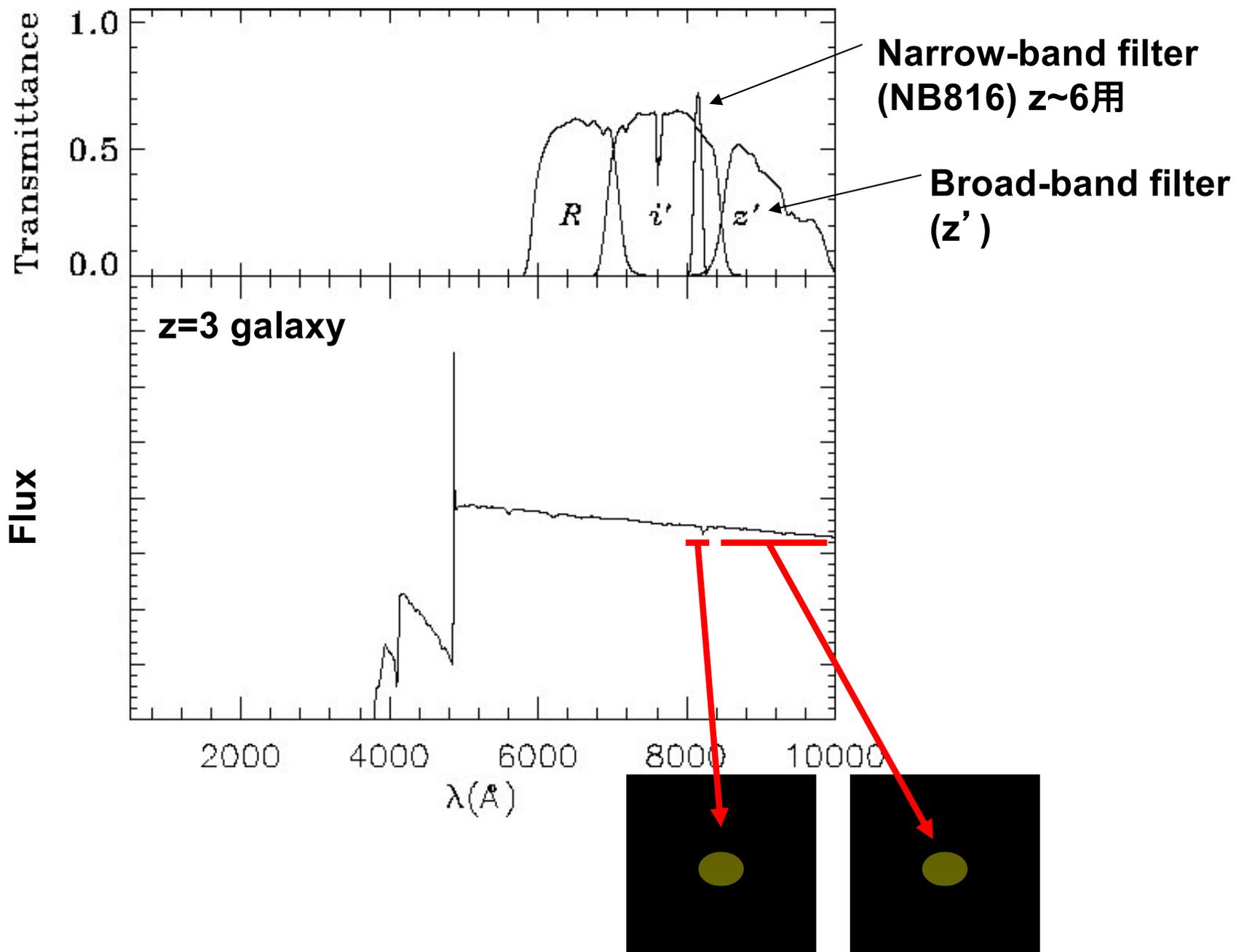
UV

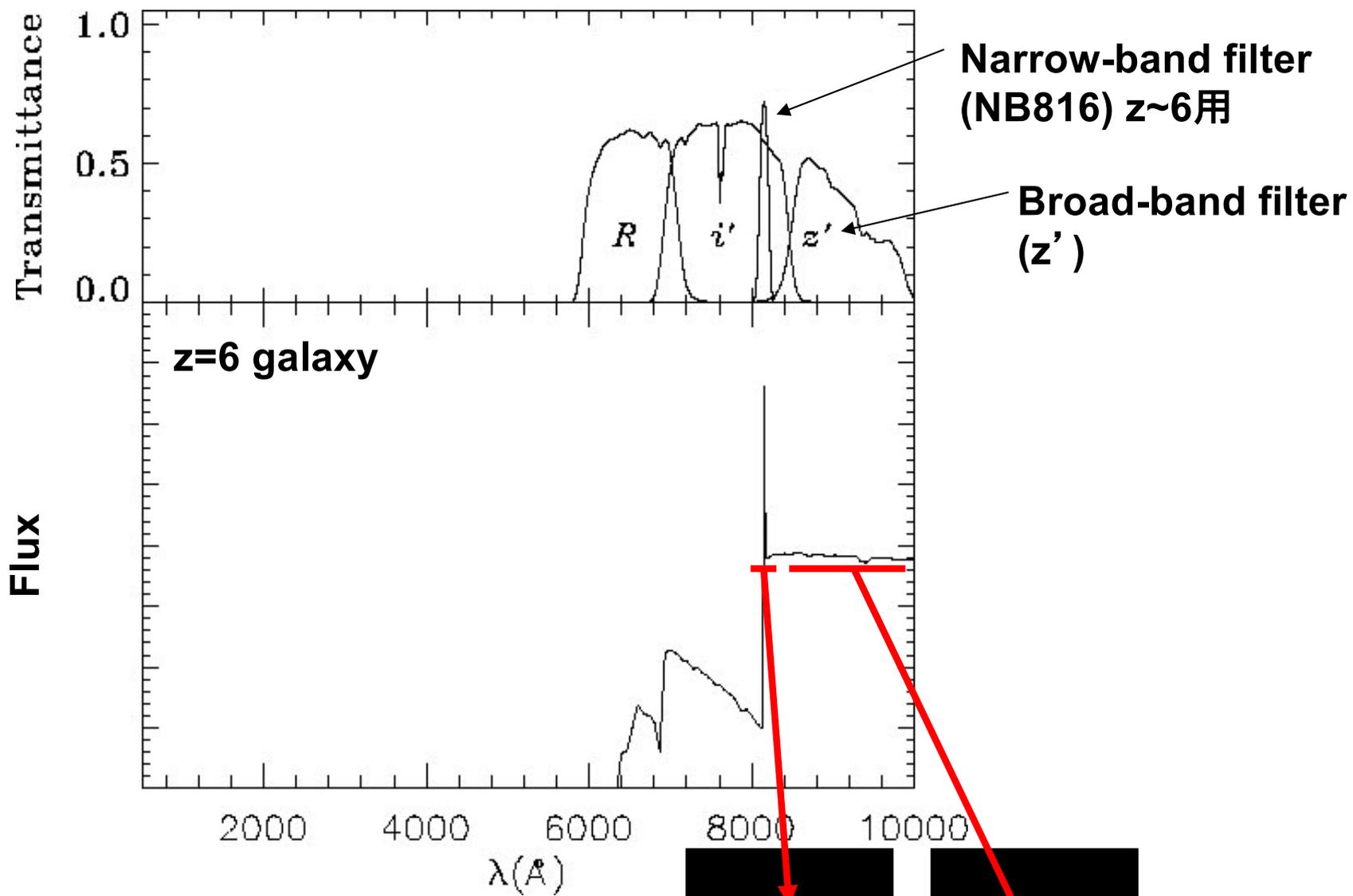
Optical

遠方の銀河候補を

狭帯域フィルター(**narrow-band filter**)で選択

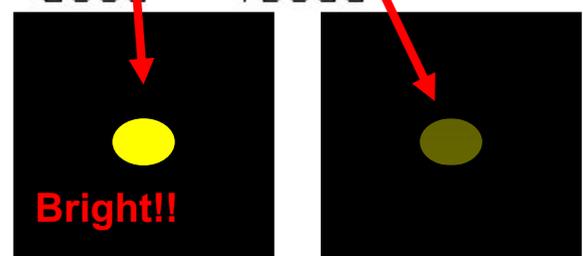




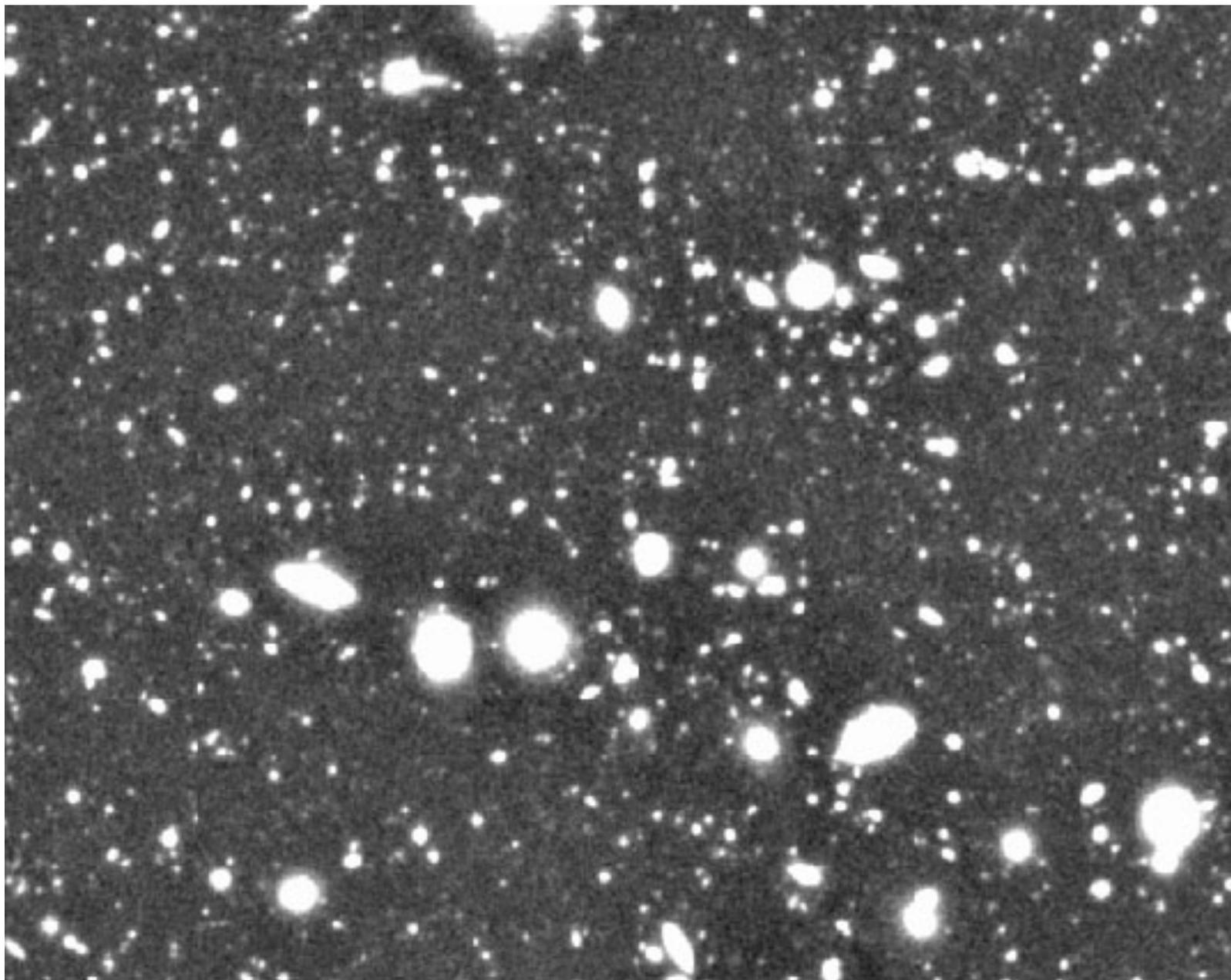


**Narrow-band filter
(NB816) z~6用**

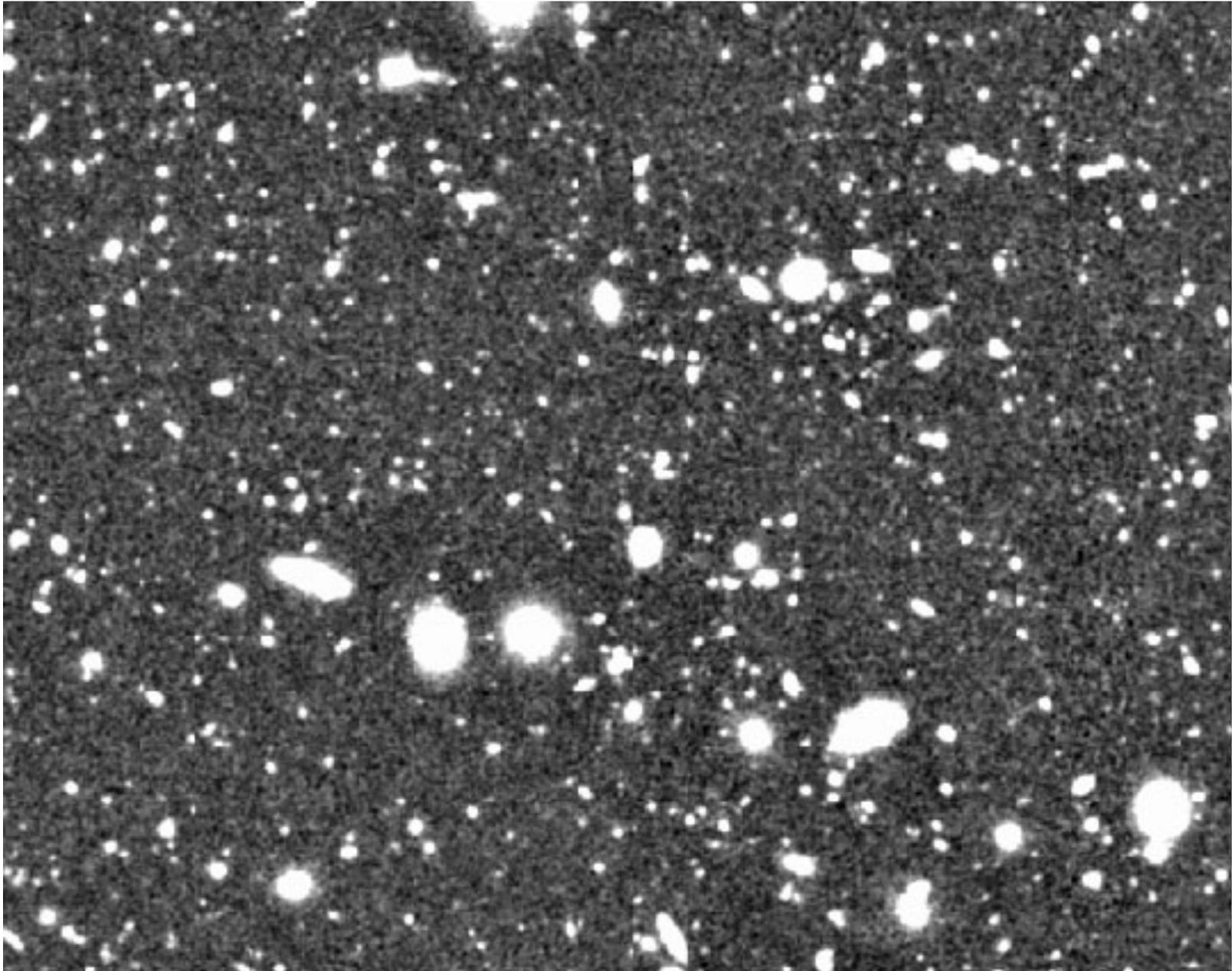
**Broad-band filter
(z')**



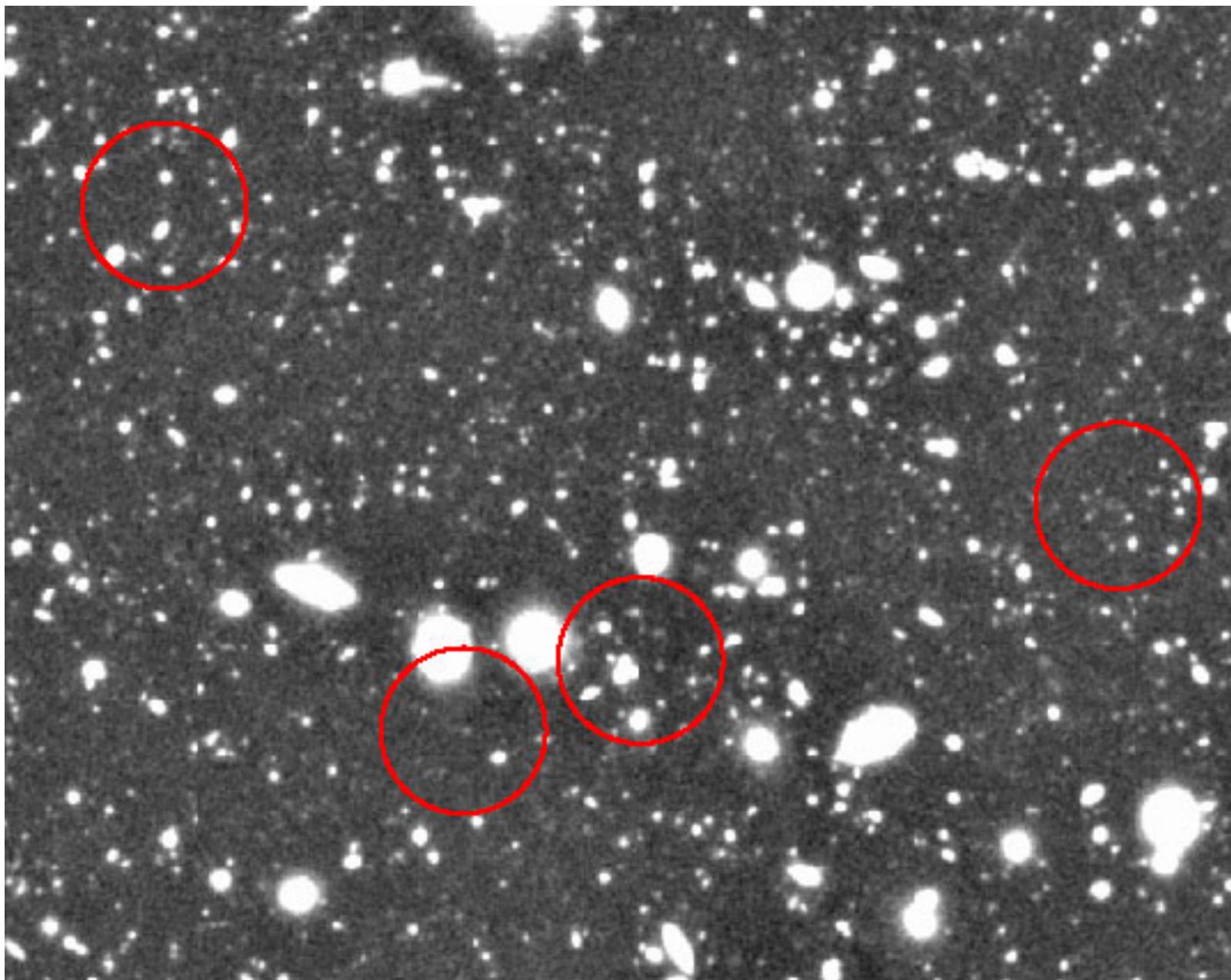
Broad-Band Image



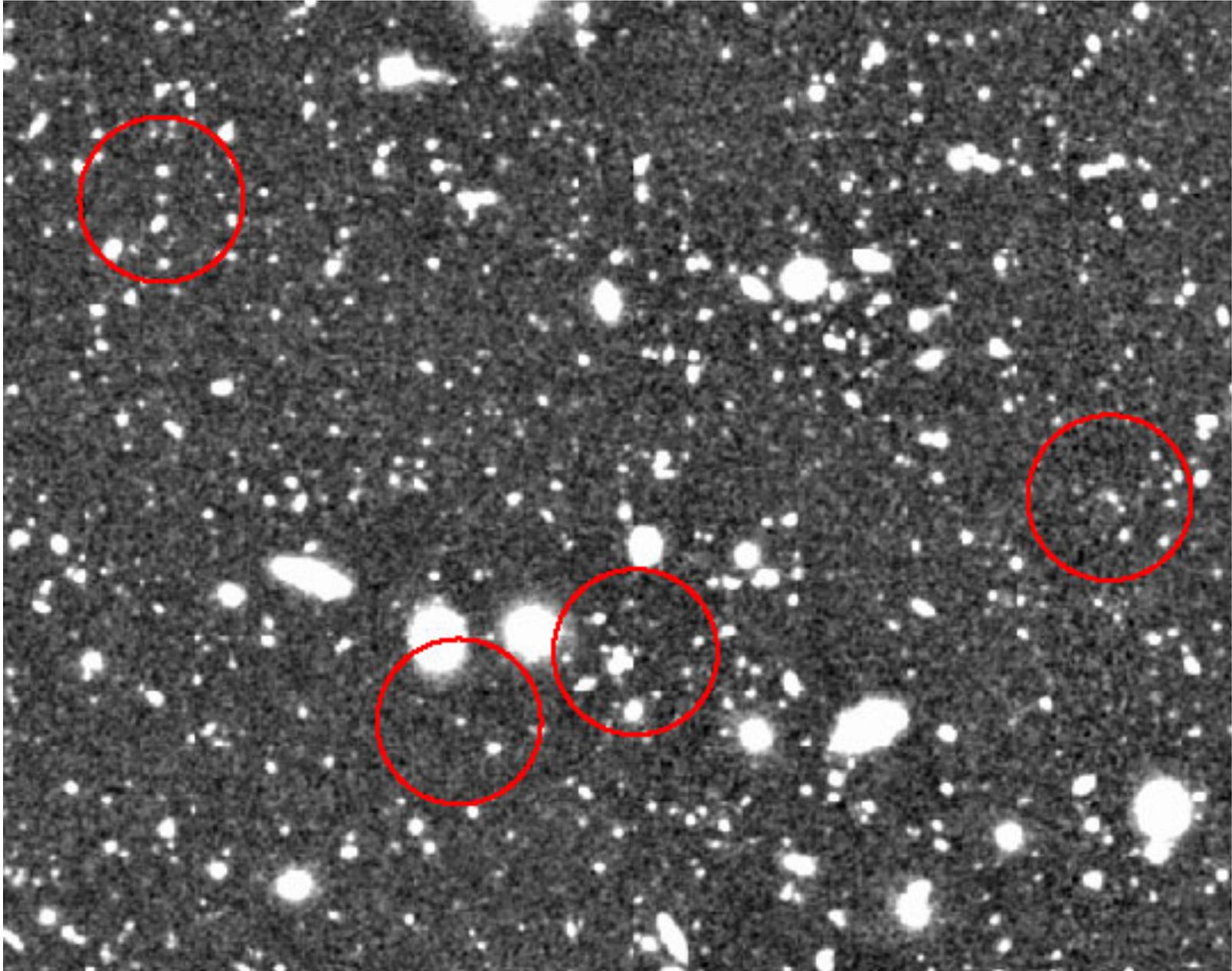
Narrow-Band Image



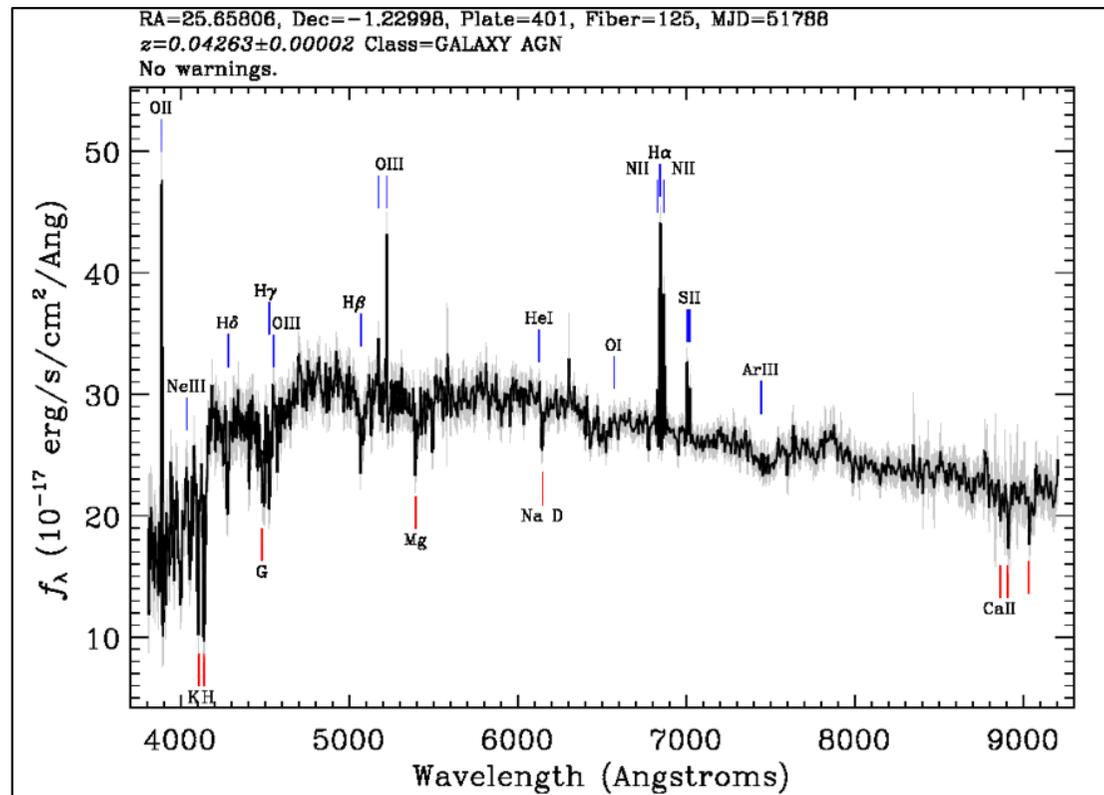
Broad-Band Image



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

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)

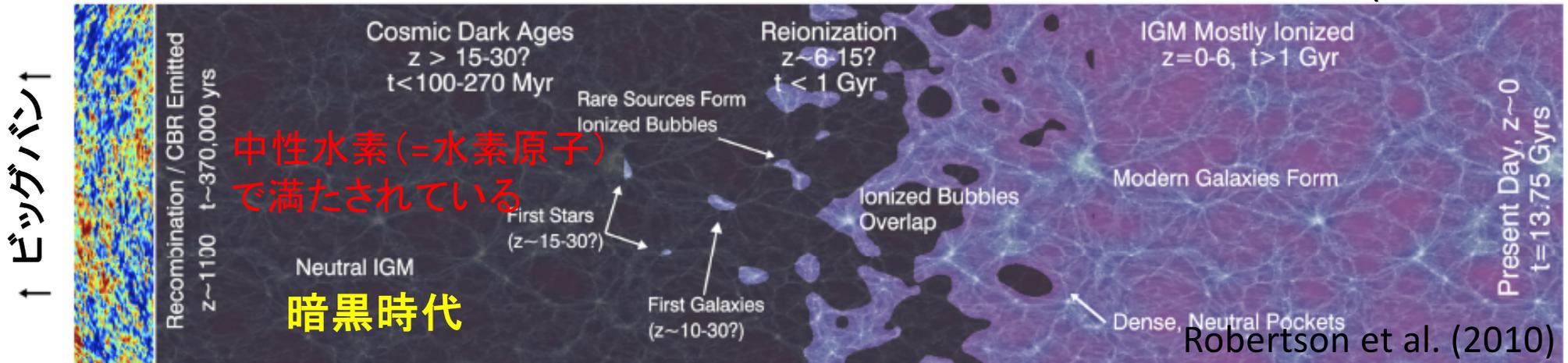
$z=6$

(9億歳)

現在

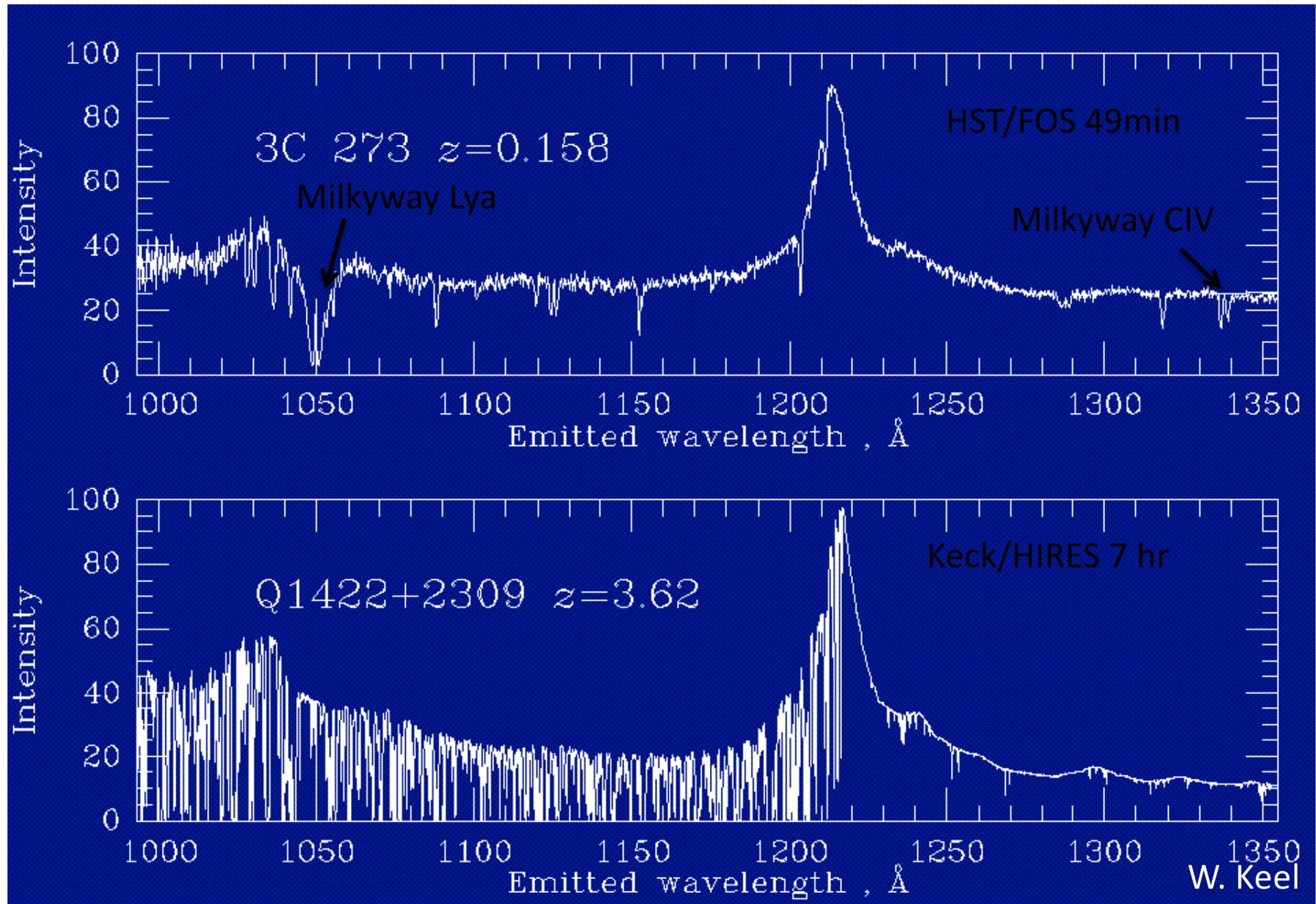
$z=0$

(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

クエーサーのスペクトル



- 現在 ($z \sim 0$) は中性水素 (の Ly α) 吸収がほとんどない \rightarrow 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)

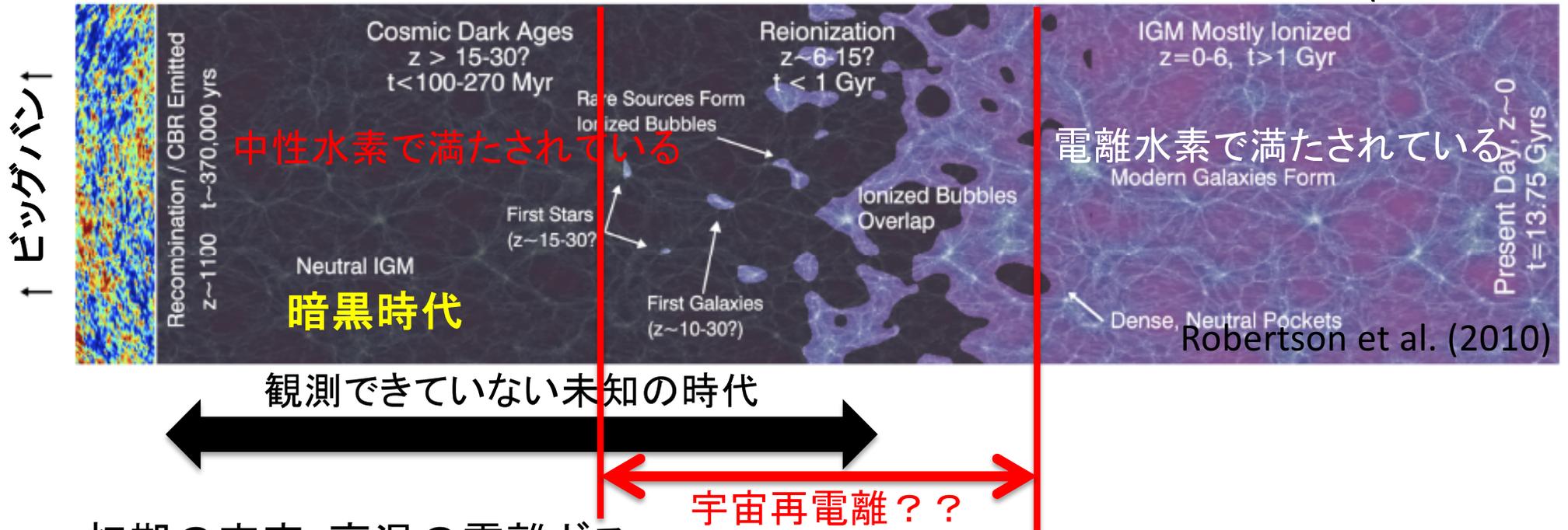
$z=6$

(9億歳)

現在

$z=0$

(138億歳)

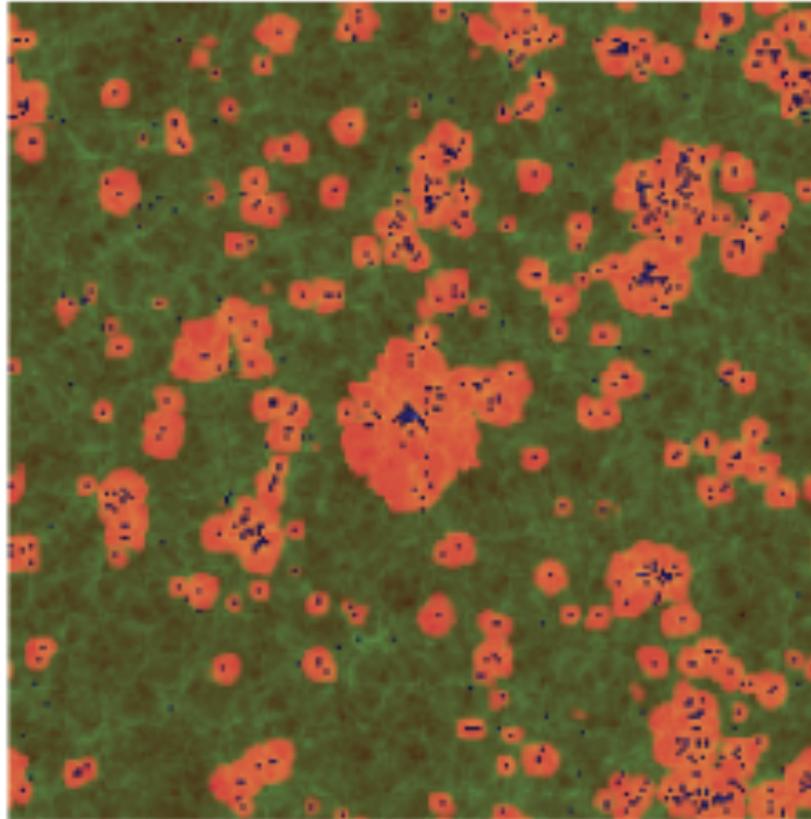


- 初期の宇宙: 高温の電離ガス
 - 1. 再結合して中性宇宙へ→暗黒時代
 - 2. 電離して電離宇宙へ(再電離)→現在の宇宙へ
- 宇宙再電離: 宇宙史最後のイベント

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)でどのくらいの水素が中性か？ 中性水素割合 $x_{\text{HI}} = n_{\text{(中性水素)}} / n_{\text{(電離+中性水素)}}$

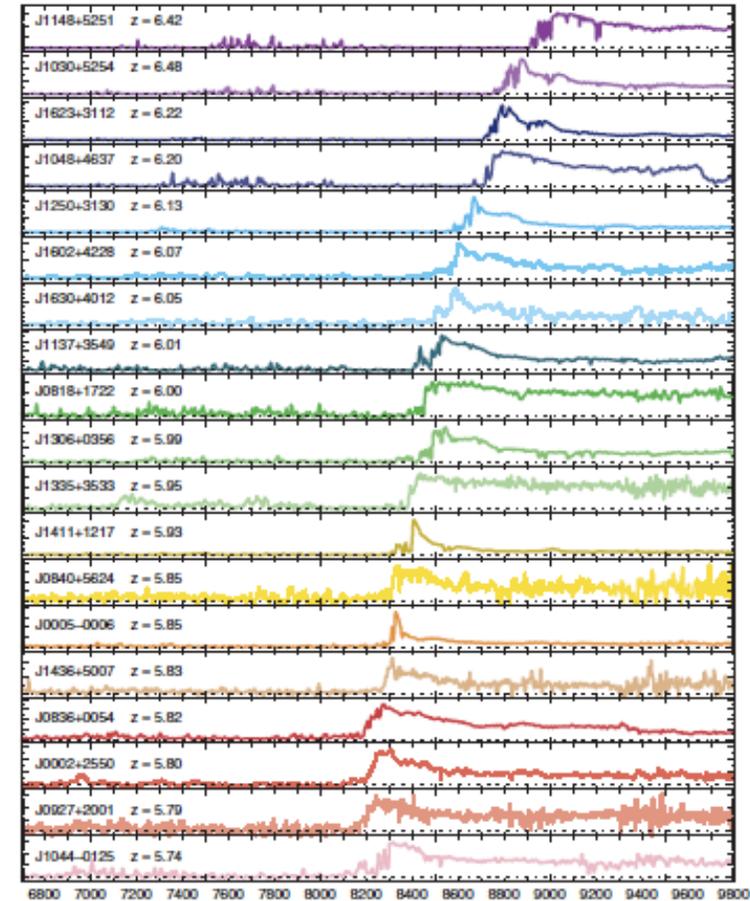
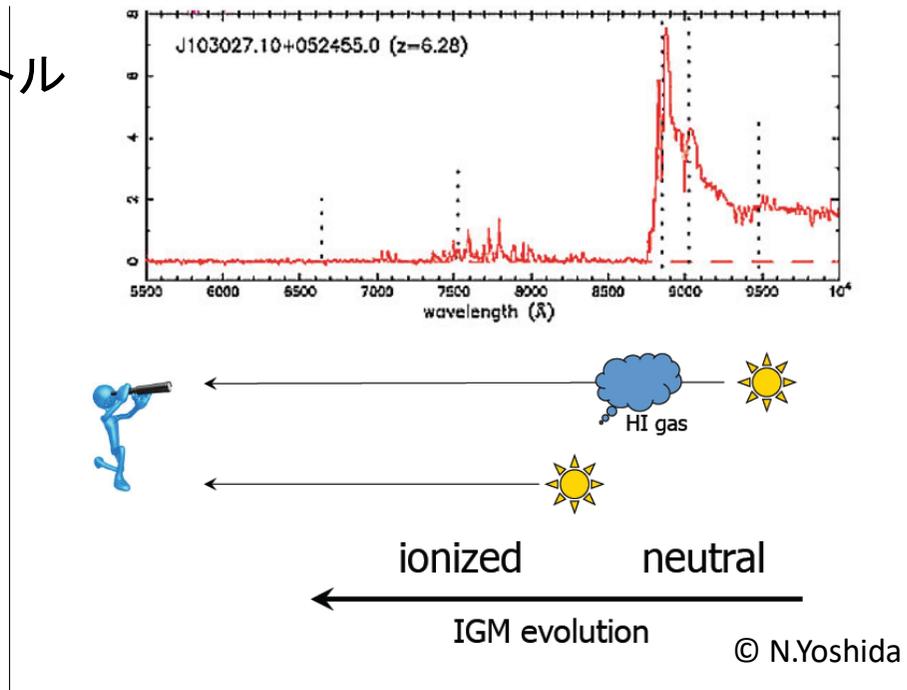
- 中性水素からの21cm輝線
 - 微弱で現在の技術ではまだ捉えることができていない(cf. LOFAR, SKAプロジェクト)
- 電離水素ガスからの放射
 - 銀河内のガスの約20万分の1の密度→非常に暗い(単位面積当たり)

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)

z=6

スペクトル



明るい背景光(クエーサーや銀河など)に現れる吸収線(ライマン α)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(τ)は、

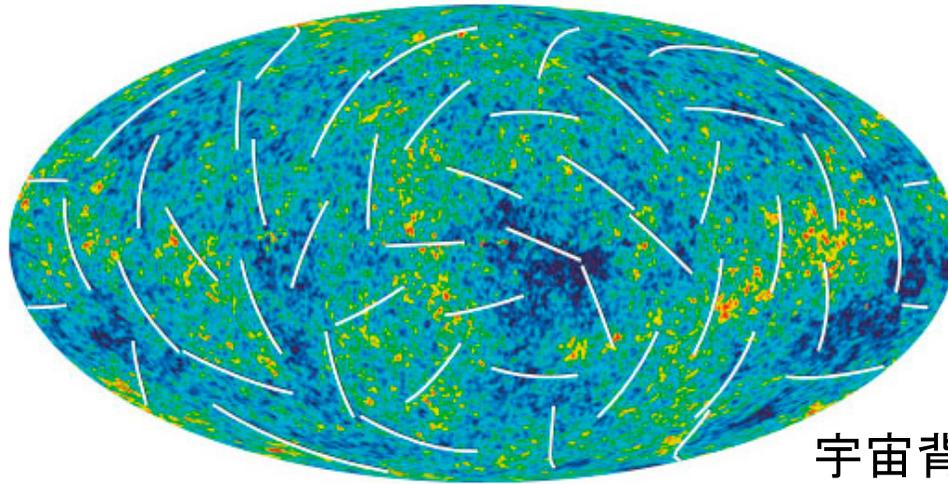
$$I/I_0 = e^{-\tau}.$$

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

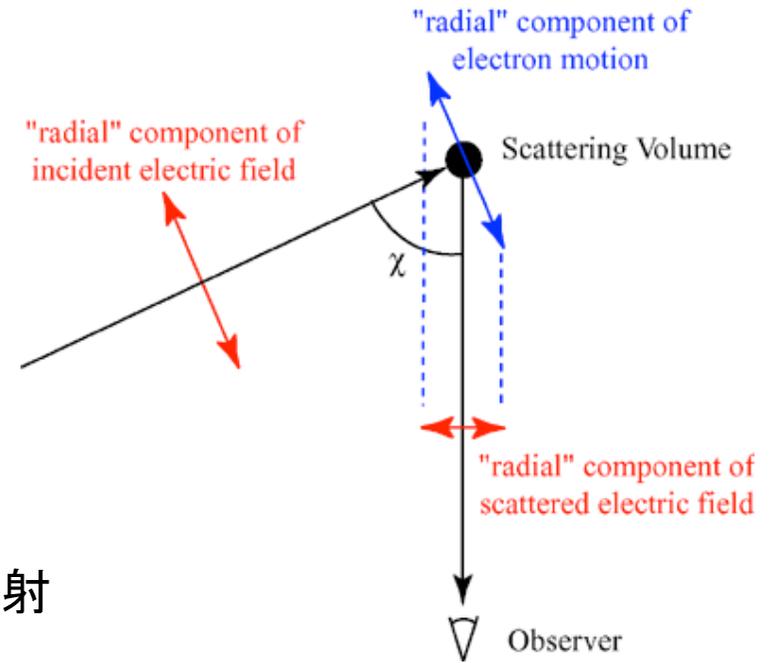
→z>6で中性水素割合が増大: z=6で宇宙再電離が終了?(Fan et al. 2006)

z=5では?? (Kulkarni et al. 2019)

宇宙再電離史を探る(2)

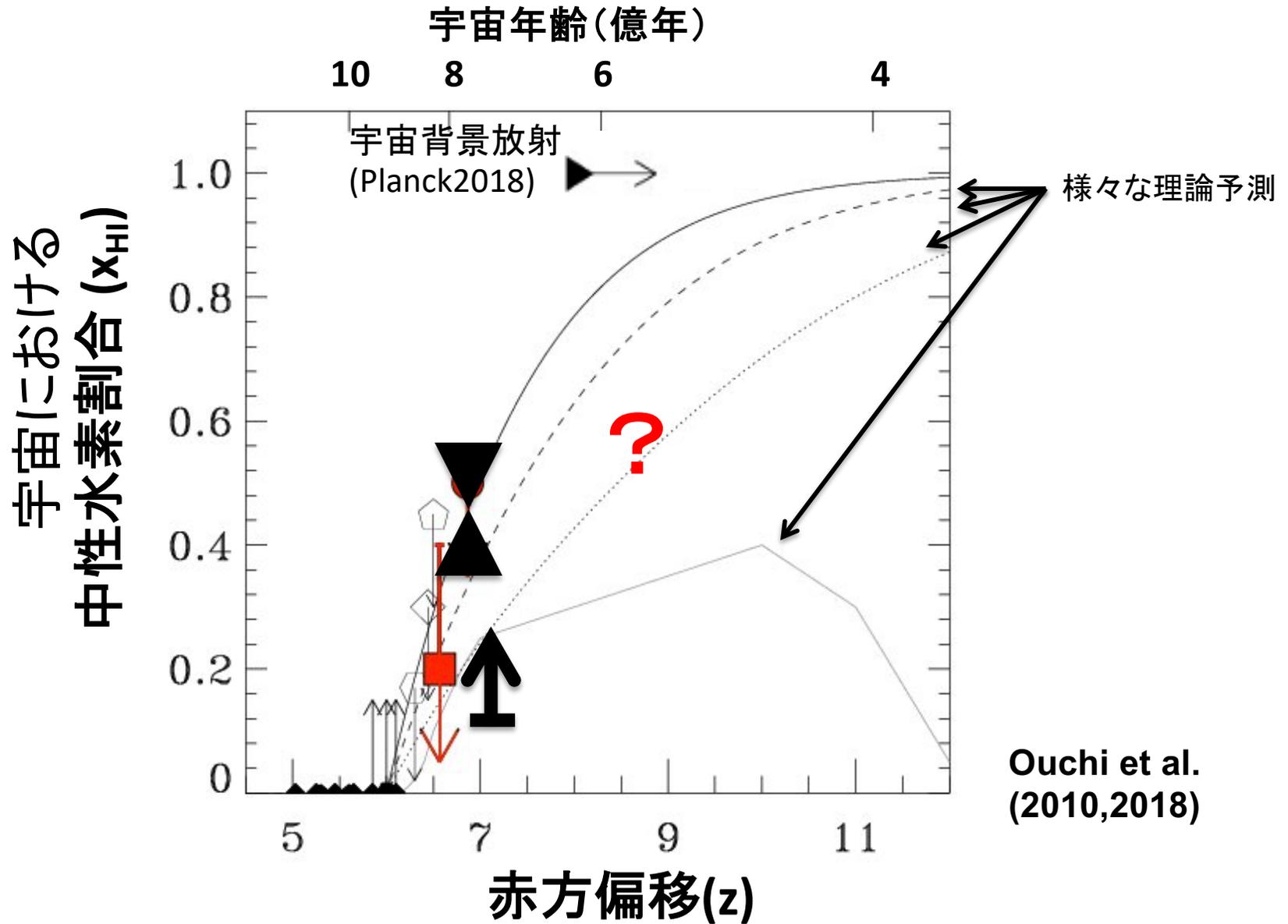


宇宙背景放射



- 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(τ_e)**

宇宙再電離の歴史(データ)



- 赤方偏移5-6以下で宇宙はほぼ完全に電離(赤方偏移7で多少中性水素が出てきているかも?)
- 課題: 宇宙再電離が始まったのは早い時期か遅い時期か? 急激に再電離が進んだか、ゆっくり進んだか? 何故か? → 赤方偏移 > 8を知りたいが、、難しい

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)

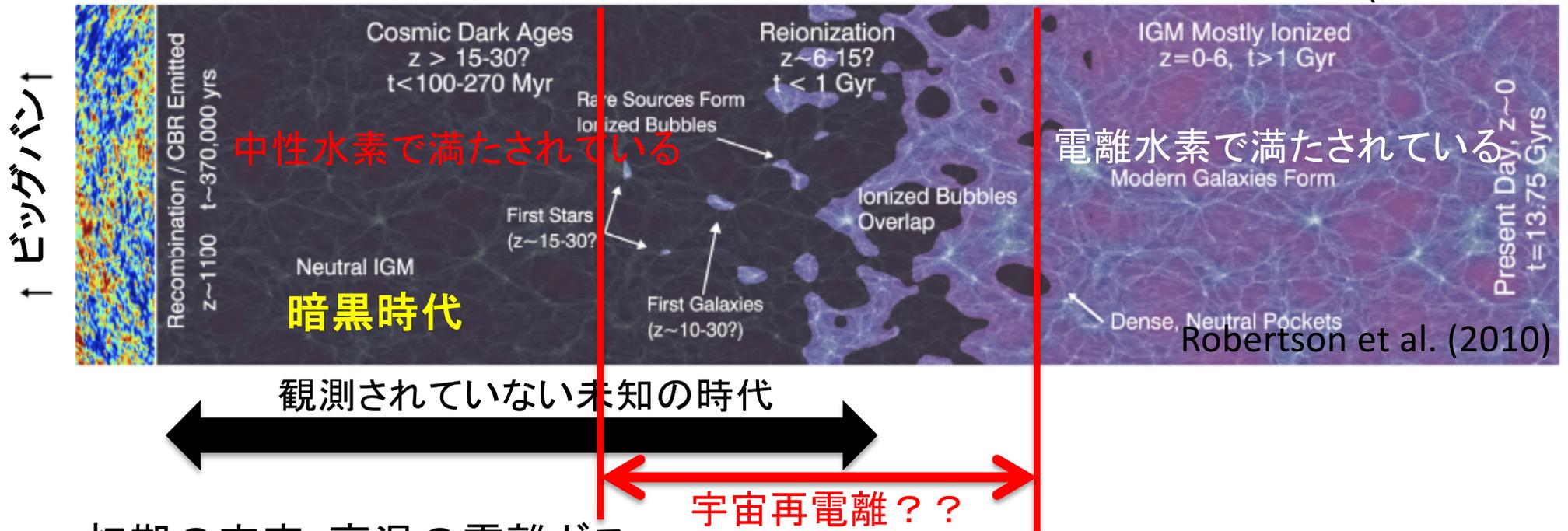
$z=6$

(9億歳)

現在

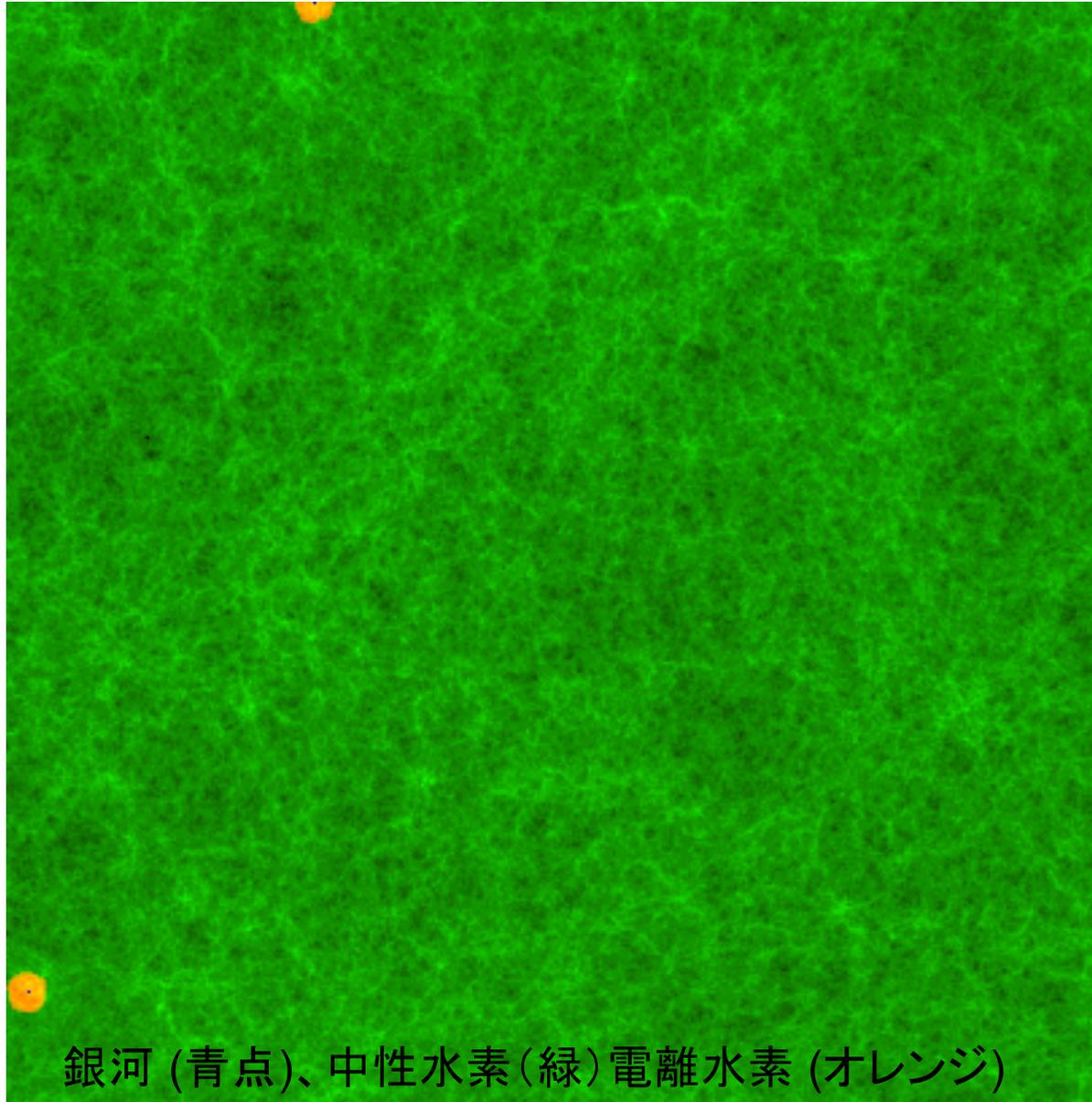
$z=0$

(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?

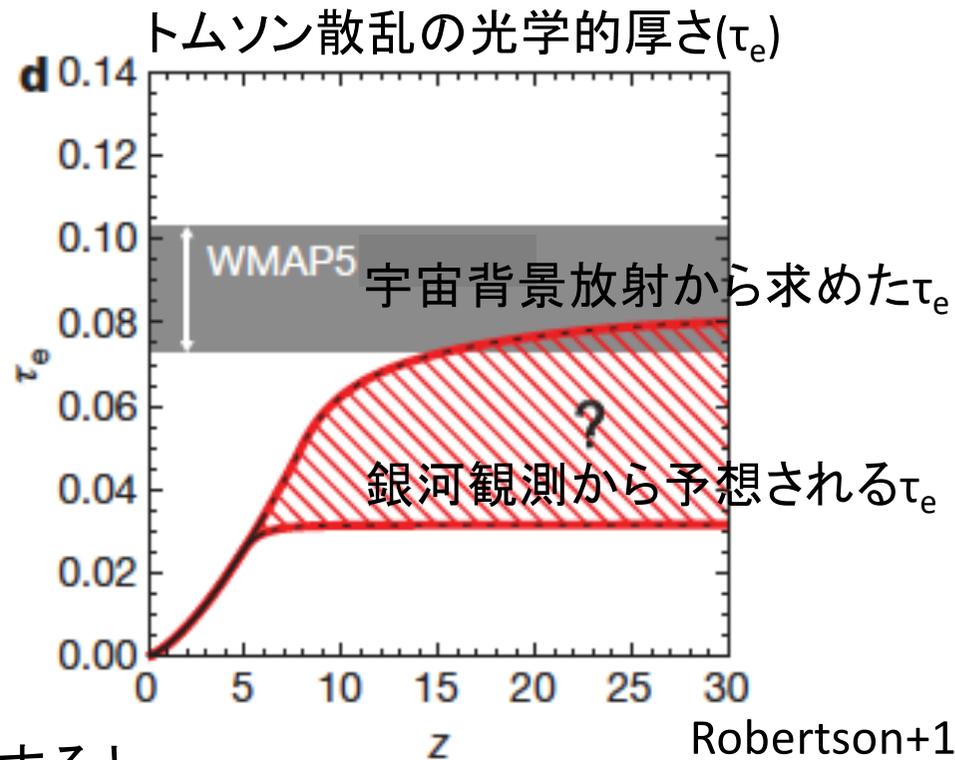
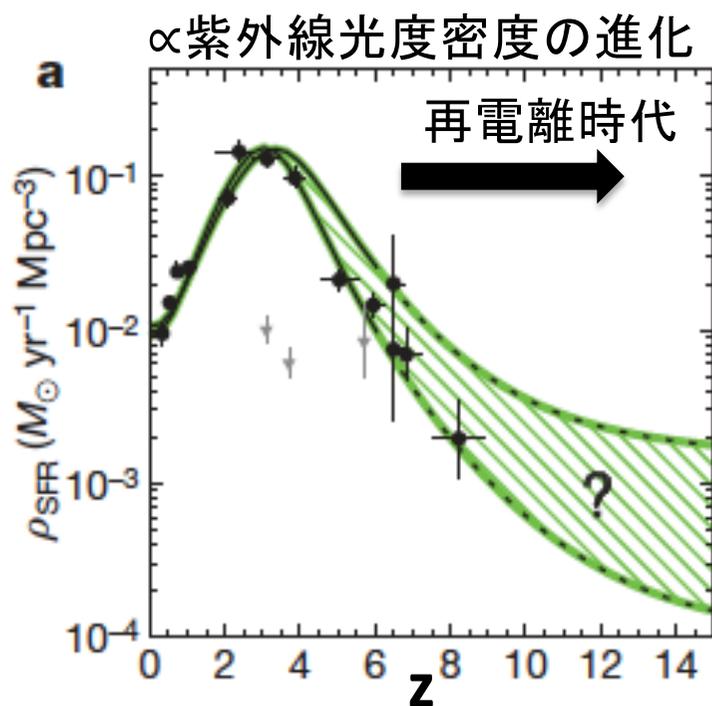
理論予想



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？

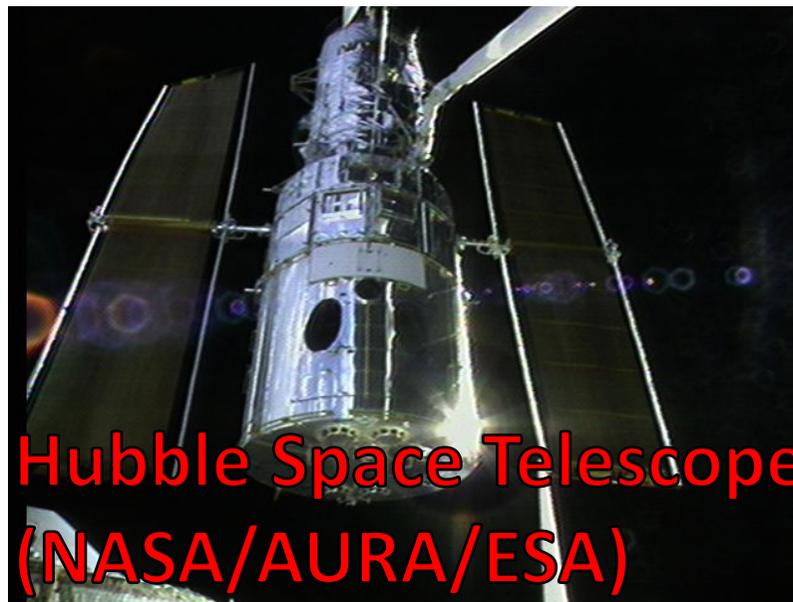


Robertson+10
(see also +15)

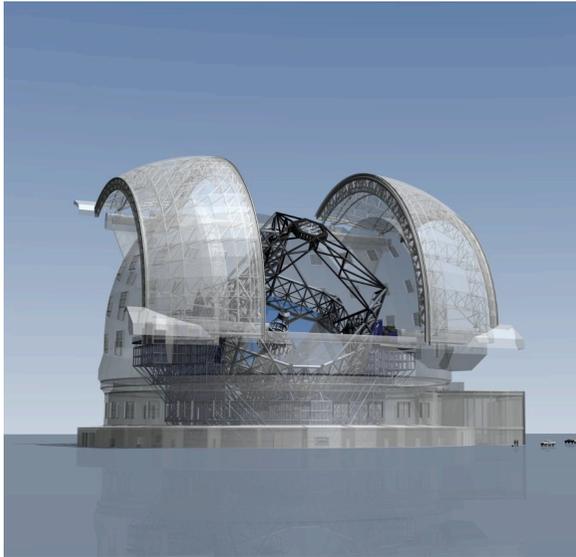
- 仮に銀河(星)が宇宙再電離を起こしたとすると
 - 紫外線光度密度 → 電離光子の放射量(単位時間・体積当たり)
 - 各 z の自由電子の量 → トムソン散乱の光学的厚さ(τ_e)
 - 現在($z=0$)から過去へ足し上げ
宇宙背景放射の観測値より τ が小さい?(矛盾?) → 課題
 - 銀河以外から電離光子が出た??
 - 暗黒物質の対消滅? 原始ブラックホール??
 - X線連星、暗いAGN?
- 赤方偏移 >8 の観測精度を高めて、課題を解決すべき。 → 現状では難しい

**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



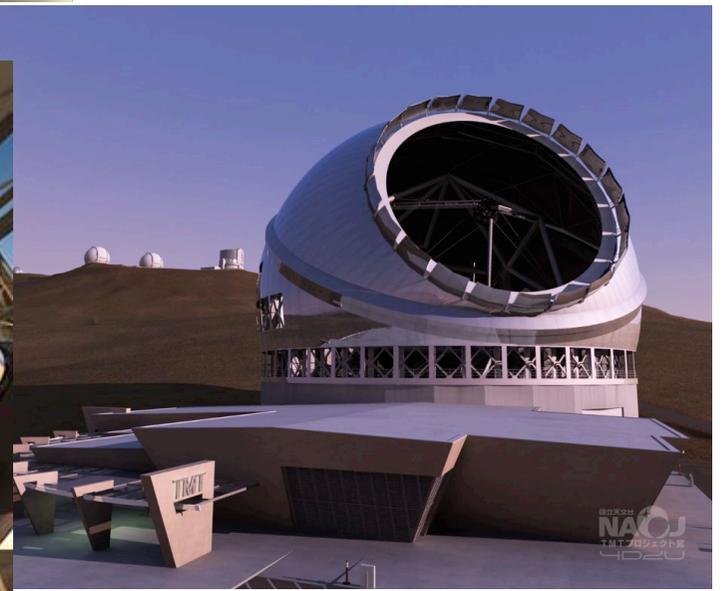
宇宙再電離史へのアプローチ ($z > \sim 10$ の天体の観測)



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)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