

TAO近赤外線による 遠方銀河の探査

太田一陽
理化学研究所

Outline

1. 近赤外・遠方銀河探査の現状
2. TAOで目指す遠方銀河探査
3. TAO遠方銀河探査のできるサイエンス

Outline

1. 近赤外・遠方銀河探査の現状
2. TAOで目指す遠方銀河探査
3. TAO遠方銀河探査のできるサイエンス

遠方銀河は主に2種類、近赤外では $z \sim 7-14$

**Lyman Break Galaxy
(LBG; UVで明るい)**

**Ly α emitter
(LAE; UVで暗い)**



Observed Wavelength (\AA)

7500

8000

8500

9000

BD38 $z = 5.515$

f_{ν} (μJy)

0.5

0

-0.5

Ly α $\lambda 1215.67$

SiII $\lambda 1260.42$

OI $\lambda 1302.17$

SiII $\lambda 1304.37$

CII $\lambda 1334.53$

SiIV $\lambda 1402.77$

SiIV $\lambda 1393.76$

Rest Wavelength (\AA)

1200

1250

1300

1350

1400



Flux density ($10^{-18} \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ \AA}^{-1}$)

2.5

2

1.5

1

0.5

0

-0.5

IOK-1

$z = 6.96$ LAE

Sky lines

9,600

9,650

9,700

9,750

9,800

Observed wavelength (\AA)

Ly α 1216Aにより検出

$z \sim 7-14$ 銀河探査の目的

1. First galaxyの発見

2. Ly α 輝線光度関数

宇宙の中性度(再電離度)、銀河進化

3. UV continuum 光度関数

銀河進化、銀河の再電離への貢献度

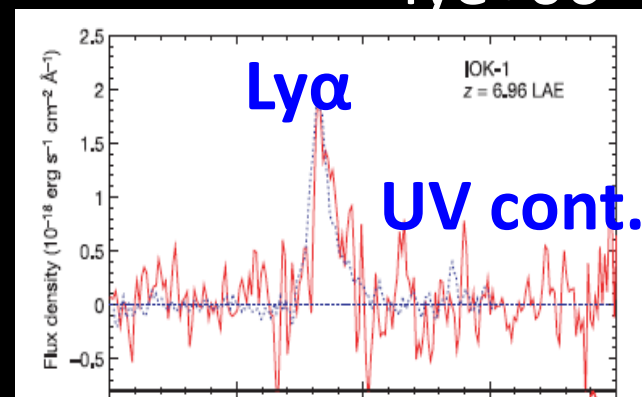
4. 恒星種族 (SED-fitting)

恒星質量、年齢、ダスト赤化、星形成率

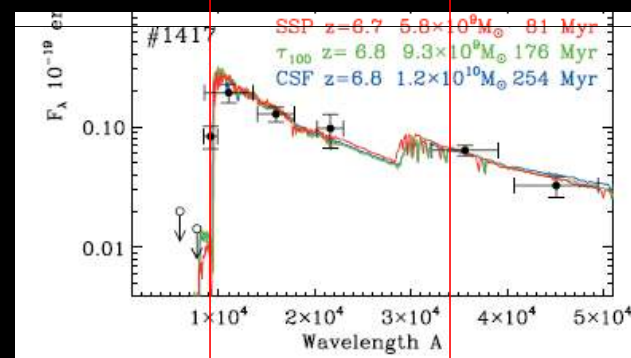
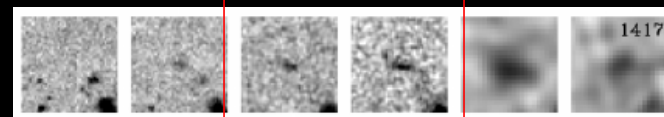
恒星質量密度 \rightarrow 質量集積史、CDMモデルへの制限

星形成率密度 \rightarrow 星形成史、銀河の再電離への貢献度

まずは、 $z \sim 7-14$ 銀河の検出から



可視 近赤外 中間赤



Labbe+06

近赤外・遠方銀河探査の現状

狭く深く vs. 広く程よく深く

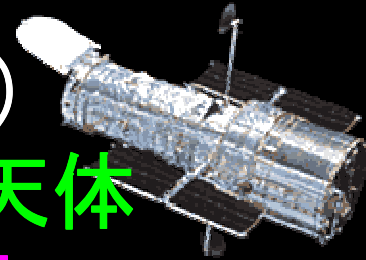
近赤外・遠方銀河探査の現状:狭く深くLBG編

Hubble: ACS i,z NICMOS J, H $\sim 27-28$ (AB5 σ)

Great Observatories Origins Deep Survey (GOODS)

Hubble Ultra Deep Field (UDF)

$z \sim 6-10$ ライマンブレイク銀河 (LBGs)



• $z \sim 5.5-6.7$: i-dropout: $i'-z' > 1.3$ 数百天体

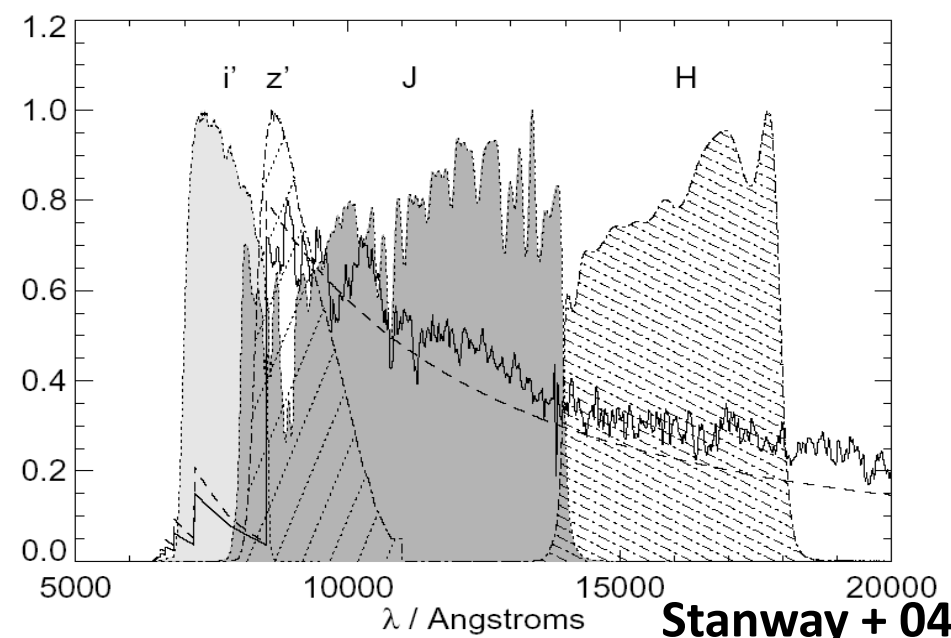
• $z \sim 7-8$: z-dropout: $z'-J > 1.3$ 8天体

• $z \sim 9-10$: J-dropout: $J-H > 1.8$ 0天体

• $z \sim 12-14$: H-dropout 先例なし

Bouwens + 06

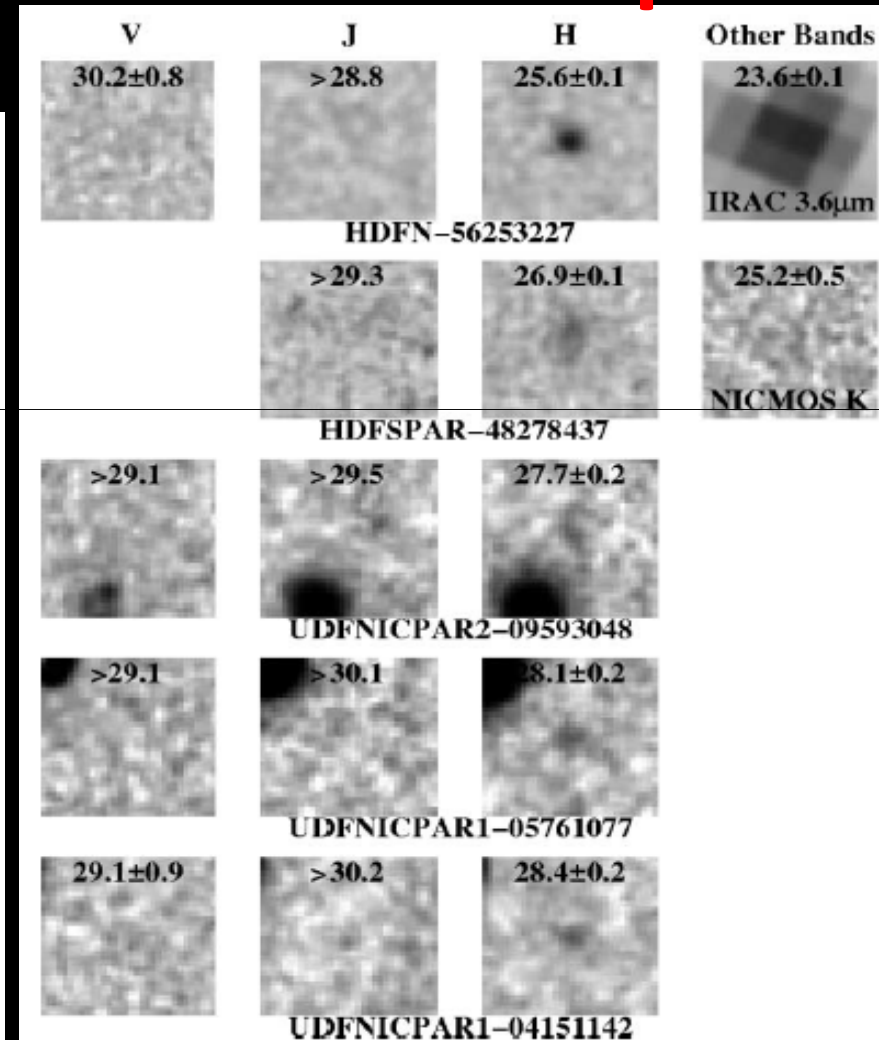
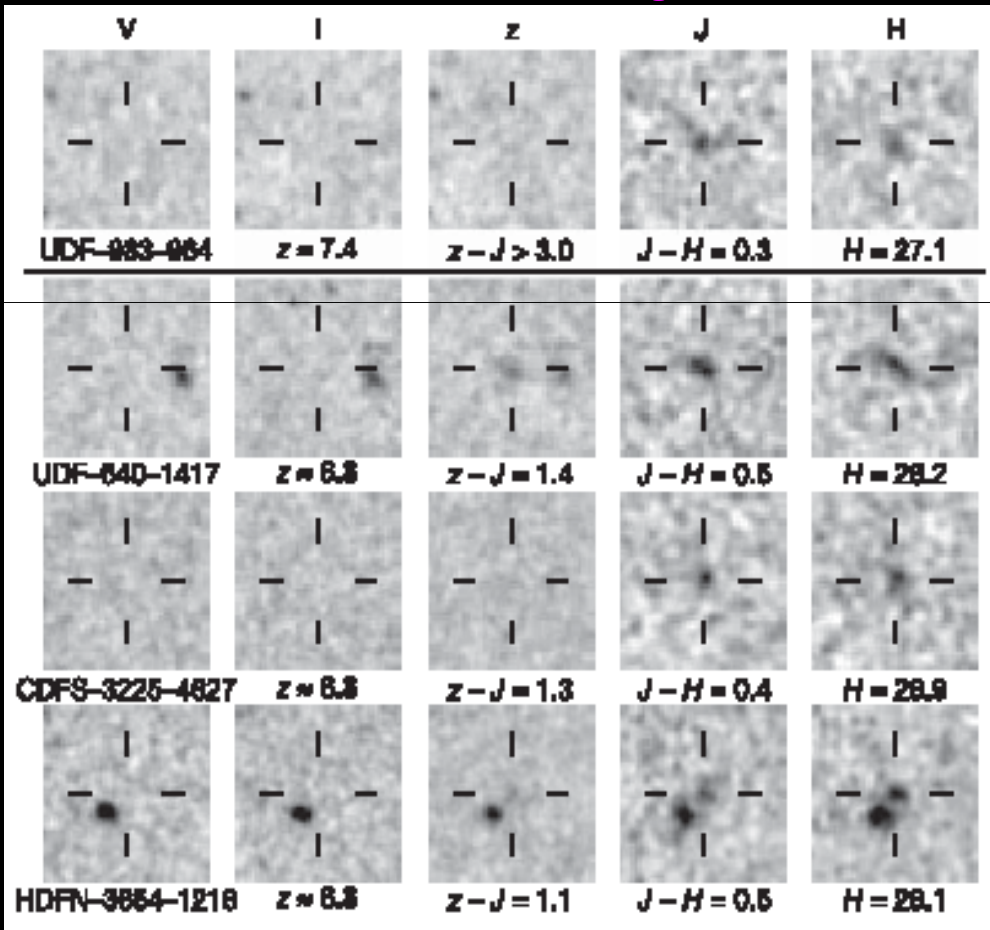
Bouwens + 08



Hubble Ultra Deep Fieldで検出された $z=7-10$ 銀河候補

$z \sim 9-10$ J-dropout

$z \sim 7-8$ z-dropout



Bouwens & Illingworth (2006)

Bouwens et al. (2005)

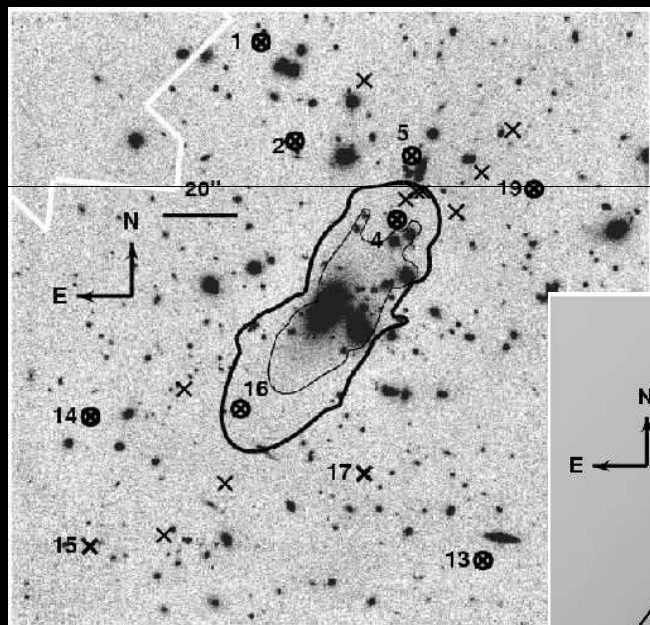
近赤外・遠方銀河探査の現状:狭く深くLBG編

Hubble: ACS z NICMOS J, H $\sim 26-27$ (AB5 σ)

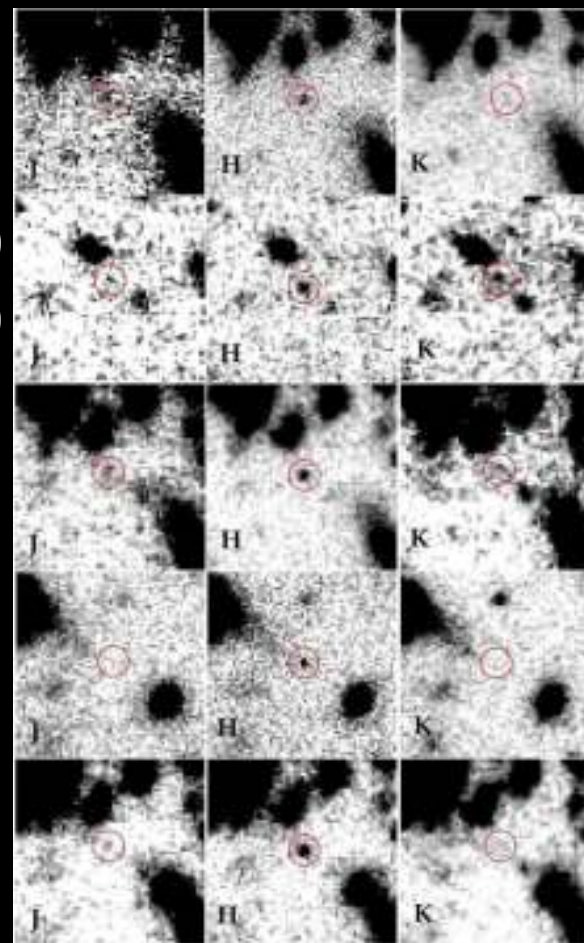
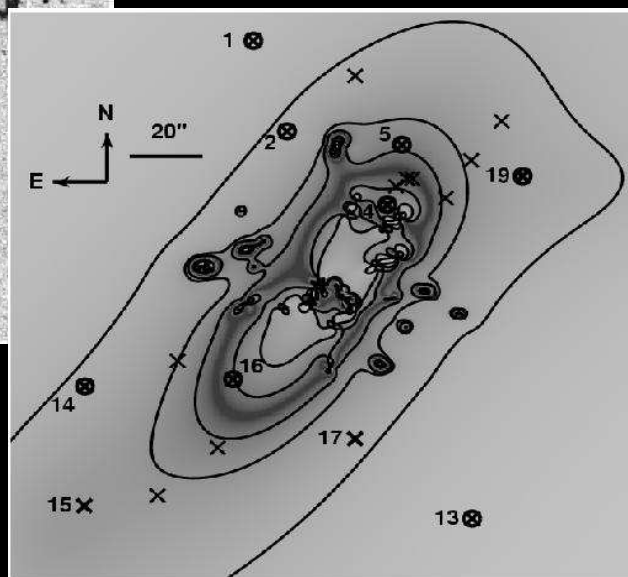
重力レンズ銀河団6個9arcmin² \rightarrow J, H $\sim 27-30$ (AB5 σ)

レンズされた $z \sim 7-8$ LBGs 10個 90%がlow-zなどの可能性あり

レンズされた $z \sim 9-10$ LBGs 2個



Richard et al. (2006)
Richard et al. (2008)

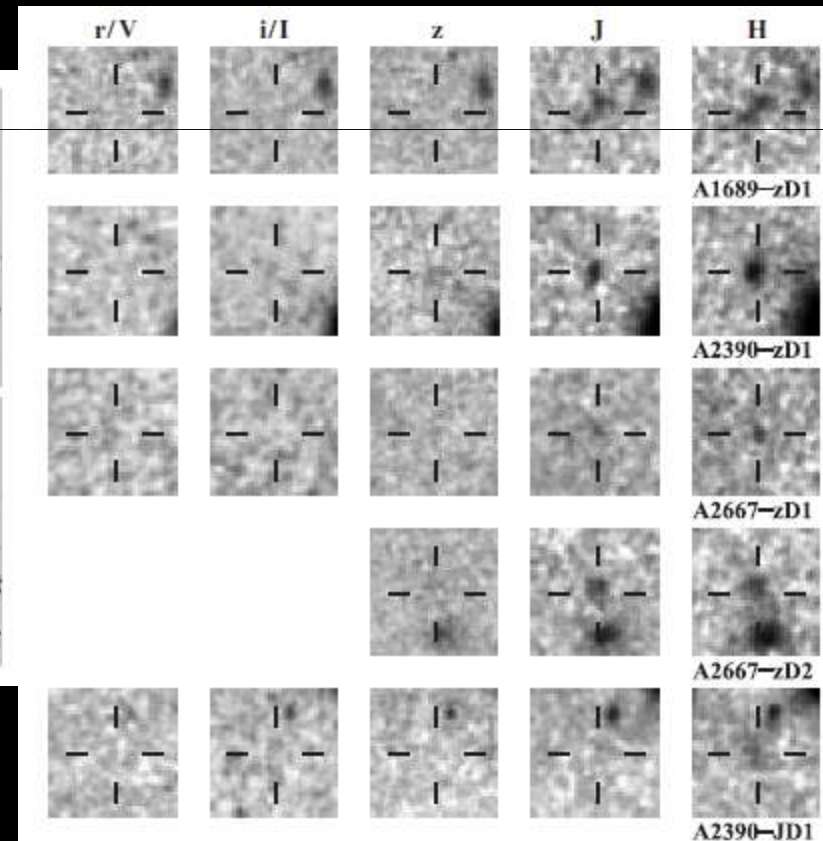
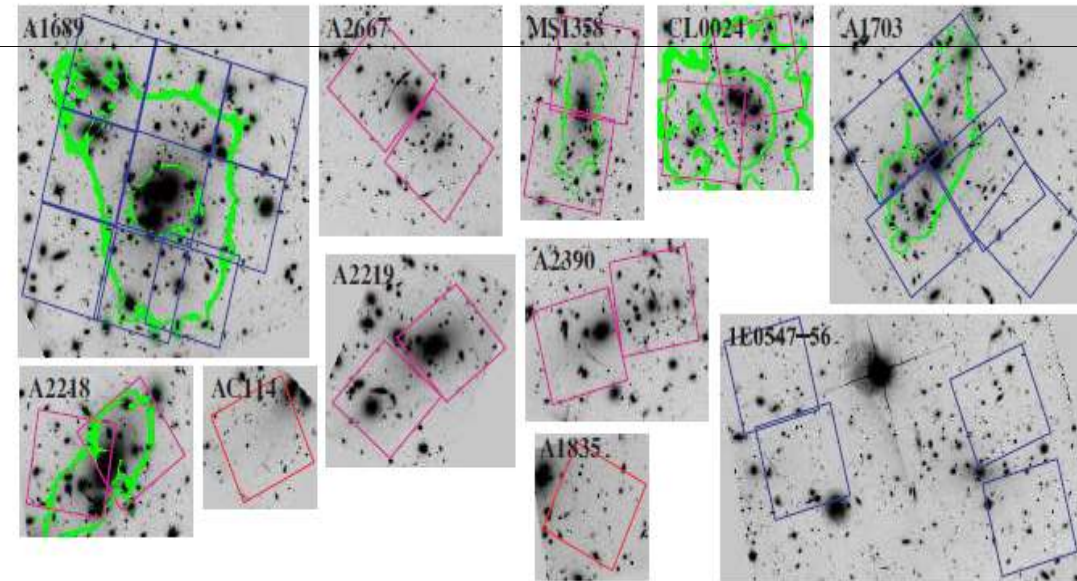


近赤外・遠方銀河探査の現状:狭く深くLBG編

Hubble: ACS z NICMOS J, H $\sim 26-27$ (AB5 σ)

重力レンズ銀河団11個20arcmin² \rightarrow J, H $\sim 27-30$ (AB5 σ)

レンズされた $z \sim 7-8$ LBGs 1個 (less robust 3個)
レンズされた $z \sim 9-10$ LBGs 0個 (less robust 1個)



Bouwens et al. (2009)

近赤外・遠方銀河探査の現状:狭く深くLAE編

VLT: ISSAC narrowband NB119 $\sim 1.19 \mu\text{m}$

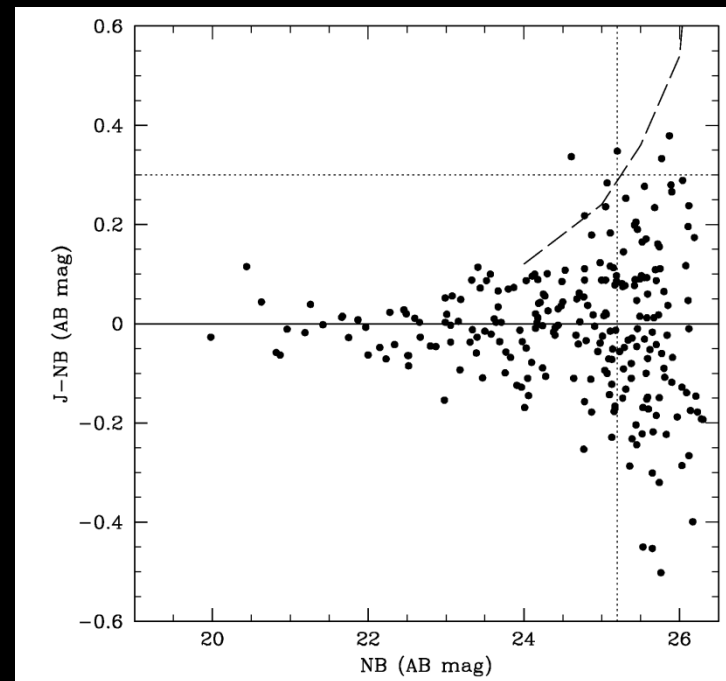
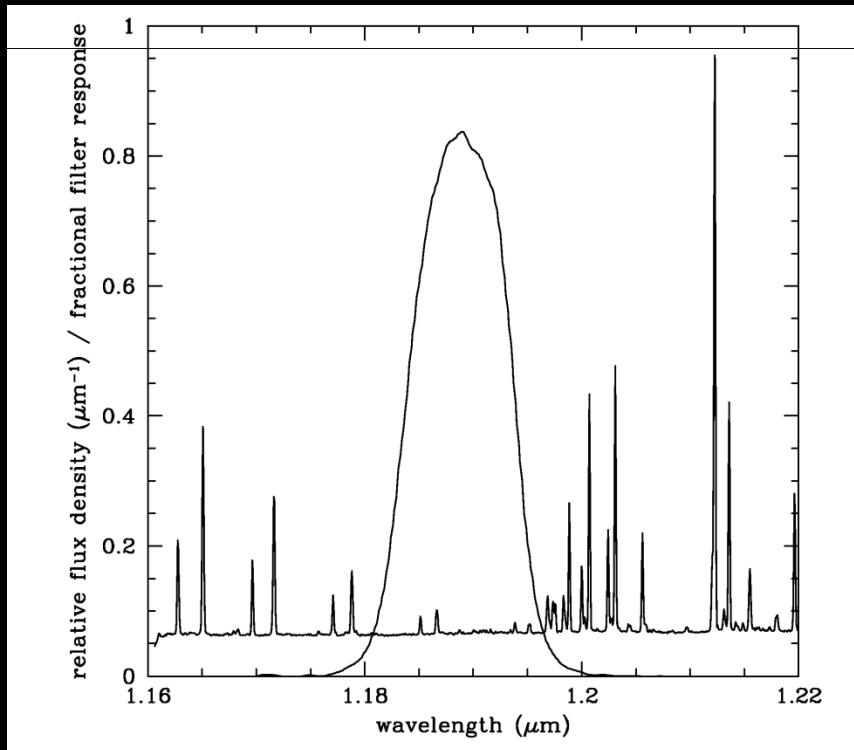
$z=8.8$ ライマン α 輝線銀河(LAE)

GOODS領域 30arcmin^2 0個 $>1.3 \times 10^{-17} \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2}$

HDFS領域 $42\text{h } 4\text{arcmin}^2$ 0個 $>3.3 \times 10^{-18} \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2}$

重カレンズ銀河団3個 12arcmin^2 0個 $>3.7 \times 10^{-18} \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2}$

Willis et al. (2005,2007) Cuby et al.(2007)



近赤外・遠方銀河探査の現状: 広く程よく深く編

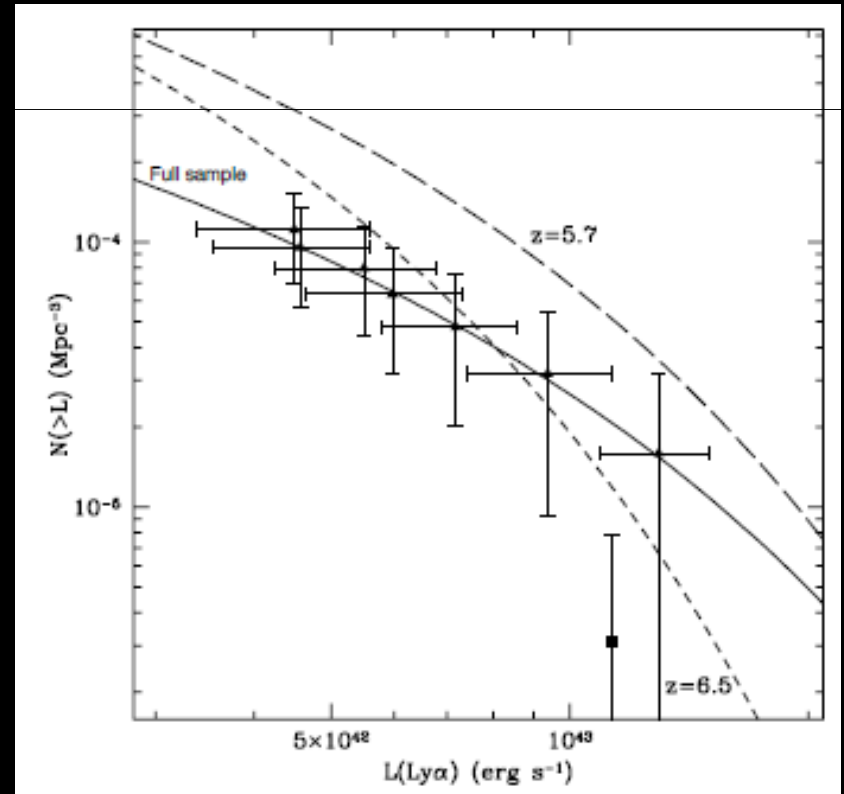
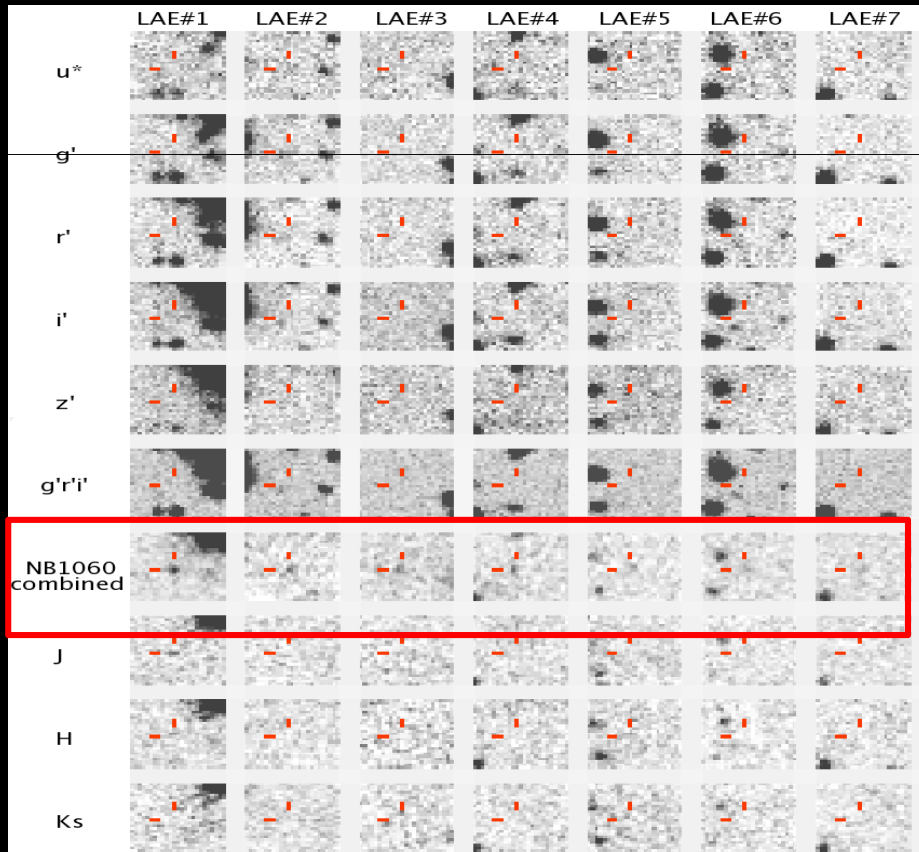
4m望遠鏡近赤外Narrowbandサーベイ NB $\sim 1.06 \mu\text{m}$

$z=7.7$ ライマン α 輝線銀河(LAE)

① CFHT WIRCam CFHT-LS領域 390 arcmin^2 7個 $> 8.3 \times 10^{-18} \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2}$

② KPNO NEWFIRM ?領域 $28' \times 28'$?個 $> 5.5 \times 10^{-18} \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2}$

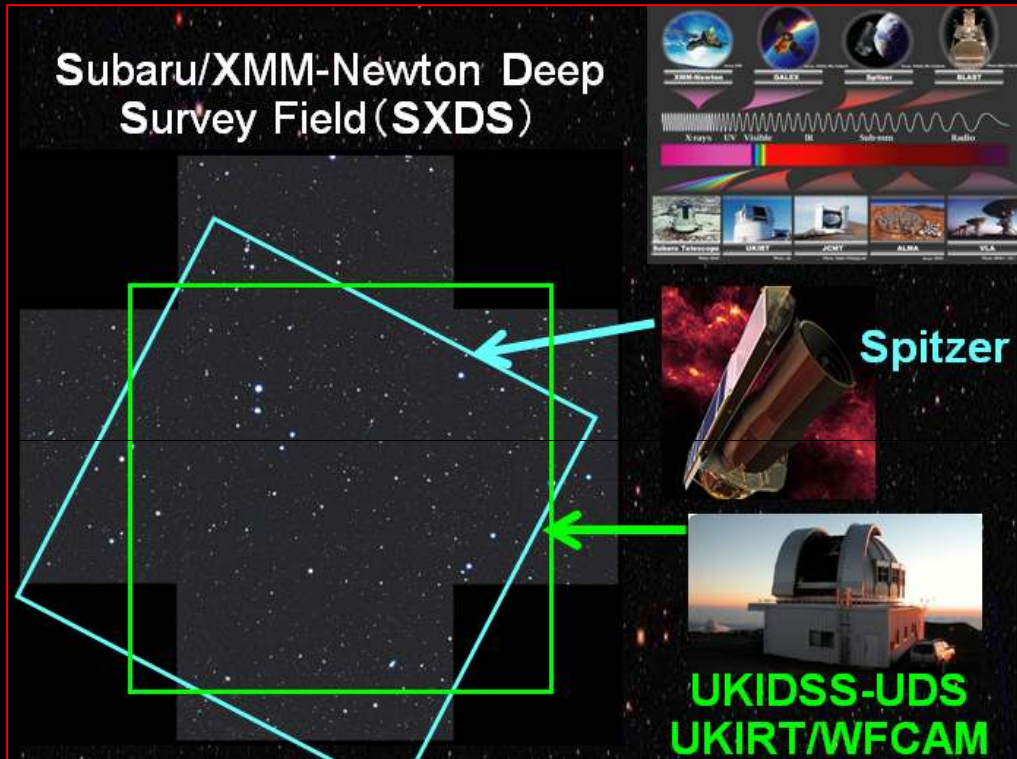
Hibon et al. (2009) Rhoads et al. (2009)



近赤外・遠方銀河探査の現状: 広く程よく深く

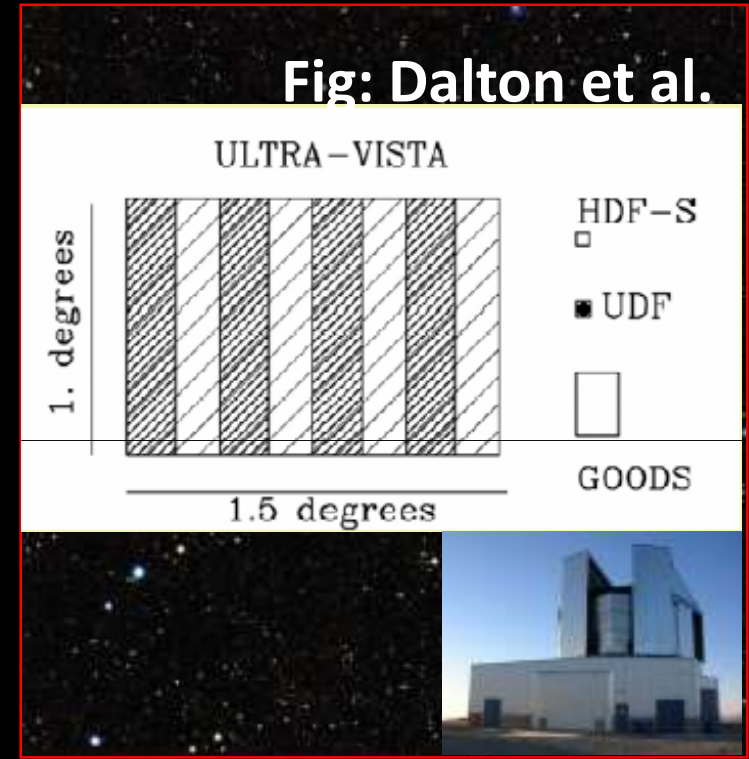
4m望遠鏡近赤外Publicサーベイ

UKIDSS/UDS



0.8 deg² 5 year data
DR5: 210 hrs up to 2007
depths (5σ AB; 2")
J = 24.0 H = 23.7 K = 23.9

COSMOS/Ultra-VISTA



0.75 deg² ultra-deep + 0.75 deg² deep.
5 year from 2009 冬 ~ 1000 hrs.
depth(5σ , AB)
Y=26.7, J=26.6, H=26.1, Ks=25.6,
NB1.18=24.1 (z=8.8 LAE)

Outline

1. 近赤外・遠方銀河探査の現状
2. TAOで目指す遠方銀河探査
3. TAO遠方銀河探査のできるサイエンス

TAOで目指す遠方銀河探査

●これまで分かっている事

■ 狭く深く(Hubble宇宙望遠鏡)

- GOODS/UDF: $z \sim 7-8$ LBG候補が8個
- 重力レンズ銀河団11個: $z \sim 7-8$ LBG候補が1個

問題点①: 視野が狭く、候補数少ない($z \sim 9-10$ LBG候補0個)

問題点②: 暗くて分光できない(30m望遠鏡などを待たないといけない)

■ 広く程よく深く(4m地上望遠鏡)

- ・ CFHT: $z=7.7$ LAE候補が7個 (NB ~ 25.2 AB 5σ)
- ・ KPNO、UKIDSS-UDS、UltraVISTA: 進行中、深さ YJHK $\sim 24-26.5$ AB 5σ
- ・ 予測: 明るい $z \sim 7-10$ LBG、LAE候補が数 \sim 十数個幾見つかる

利点: 明るいので、分光同定できる可能性が高い

問題点: 明るいものは稀なので検出個数が少ない可能性が高い。

限界まで深くできれば... 個数を増やせるかも

→ 4mよりも大きく、気象条件も良いTAO 6.5mなら更に深くできる!

広く深く = TAO 6.5m + 視野・感度最大設計 + 大量時間投入

TAO近赤外カメラへの要求・観測に必要なパラメータ

- 観測視野：少なくともUKIDSS、Ultra-VISTAと同じか広く $\geq 0.8 \text{deg}^2$
 - 8 arcmin² ϕ 視野： ≥ 57 pointing
 - 9.6 arcmin² ϕ 視野： ≥ 40 pointing
 - 12 arcmin² ϕ 視野： ≥ 25 pointing
- 観測深さ： UKIDSS、VISTAより深く
 - ZYJ ≥ 27.0 、H ≥ 26.5 、K ≥ 26.0
 - NB ≥ 25.5 –26.0
- 多バンド同時観測：3バンド同時が良い
- 観測投入時間： ZYJHK～数十時間/バンド
NB～数十時間/バンド

TAO Deep Field 構想

●観測① (同時撮像): 1 deg^2 ,

$z=7.0、7.7、8.8、\dots 18$ Ly α ナローバンド(NB) $\sim 26\text{mag AB } 5\sigma$
ブロードバンドZ, J, H, K $\sim 26\text{-}27\text{mag AB } 5\sigma$

●検出天体①: $z=7\text{-}18$ ライマン α 輝線銀河

- $z=7.0、7.7、8.8、\dots 18$ LAE、
低赤方偏移のH α 、OIII、H β 、OII輝線銀河も検出可能

●検出天体②: $z\sim 7\text{-}14$ ライマンブレイク銀河

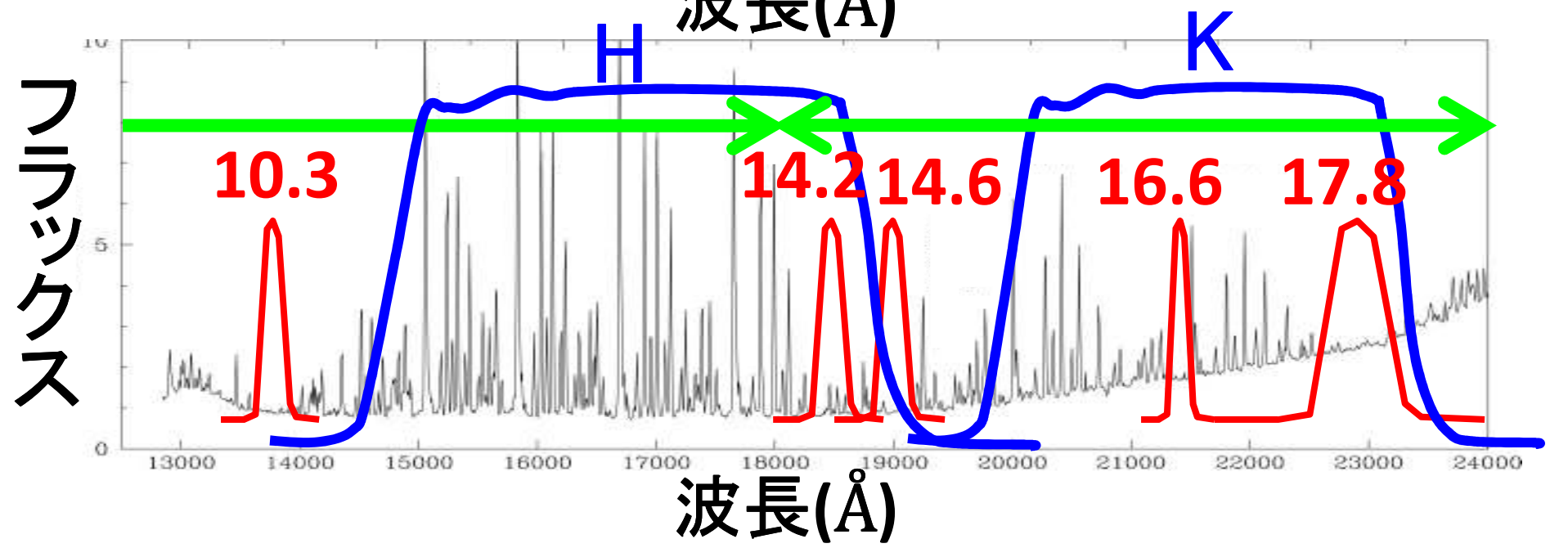
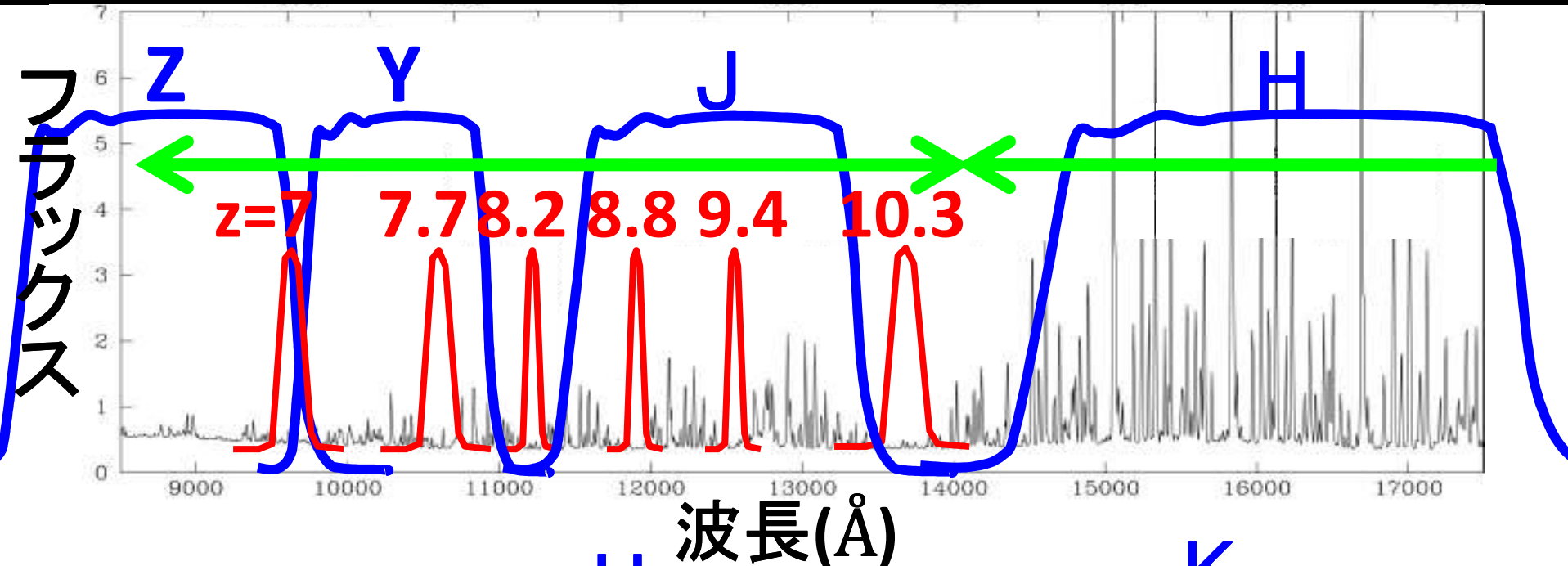
- $z\sim 7\text{-}8$ Z-drop (z-bandはSubaru Suprime-CamでもOK)
- $z\sim 8\text{-}9$ Y-drop LBG
- $z\sim 9\text{-}10$ J-drop LBG
- $z\sim 12\text{-}14$ H-drop LBG (SPICAなどの中間赤外線と連携もあり)

●観測②フォローアップ多天体分光 (将来30m望遠鏡で分光も可)

●目的: $z=7\text{-}14$ 宇宙で以下を探查

- ・銀河進化(光度関数、質量集積史、星形成史)
- ・宇宙再電離(中性水素の変化、ionizing photon budget)

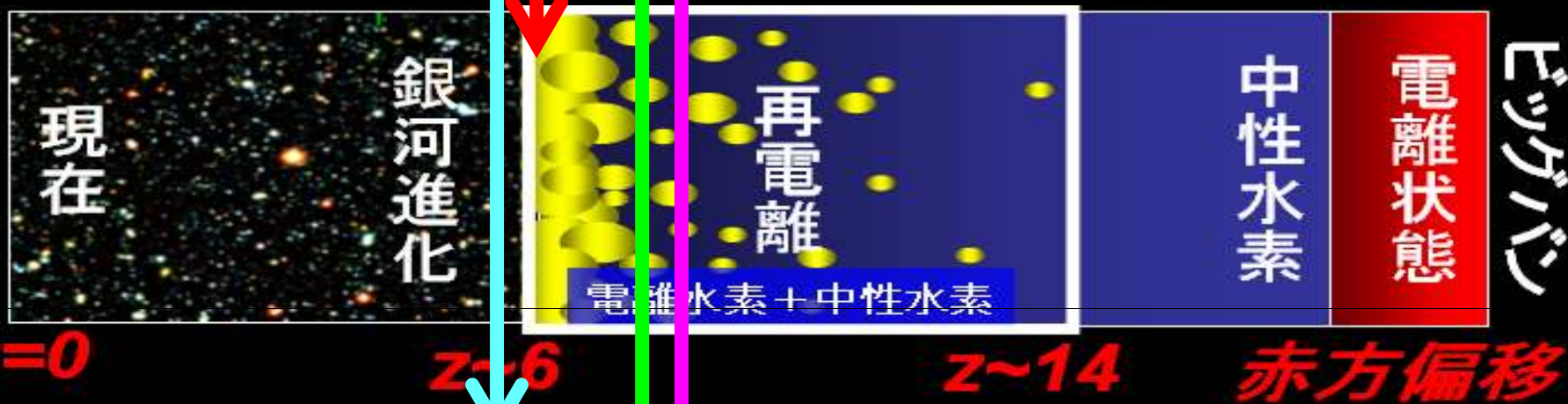
ZYJHKと $z > 7$ Ly α NBの3バンド同時撮像組み合わせ



Outline

1. 近赤外・遠方銀河探査の現状
2. TAOで目指す遠方銀河探査
3. TAO遠方銀河探査のできるサイエンス

クエーサーのGPTラフ吸収
 $z \sim 6$ 宇宙の中性度 X_{HI} は1~4%



$z=0$

$z \sim 6$

$z \sim 14$

赤方偏移

$z=5.7$

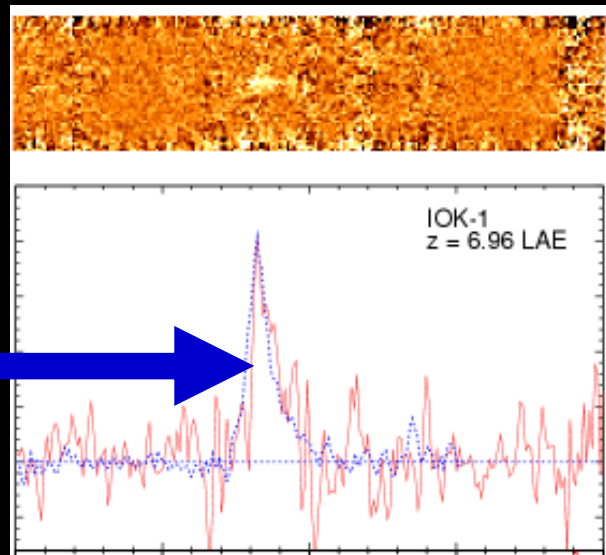
$z=6.6$ $X_{\text{HI}} \sim 24-36\%$

$z=7$ $X_{\text{HI}} \sim 32-64\%$

3つのサンプル

$\text{Ly}\alpha$ 輝線銀河 (LAE)

もし $z > 6$ で中性水素が急増すれば、
 $\text{Ly}\alpha$ 光子が吸収・散乱される。
→ LAEの観測個数 ($\text{Ly}\alpha$ 光子) 密度が減少



宇宙年齡 (Gyr)

$z > 7$ 再電離探查

0.97

0.81

0.75

log(個數密度)

Mpc^{-3}

-4
-5
-6

Semi-analytic model
(kobayashi et al.2007)

銀河進化

再電離

?

log(星形成率密度)

$\text{M}_{\odot} \text{ yr}^{-1} \text{ Mpc}^{-3}$

-3
-4
-5

銀河進化

再電離

?

log($\text{Ly}\alpha$ 光度密度)

$\text{erg s}^{-1} \text{ Mpc}^{-3}$

-4
-5
-6

39
38
37

5

5.7

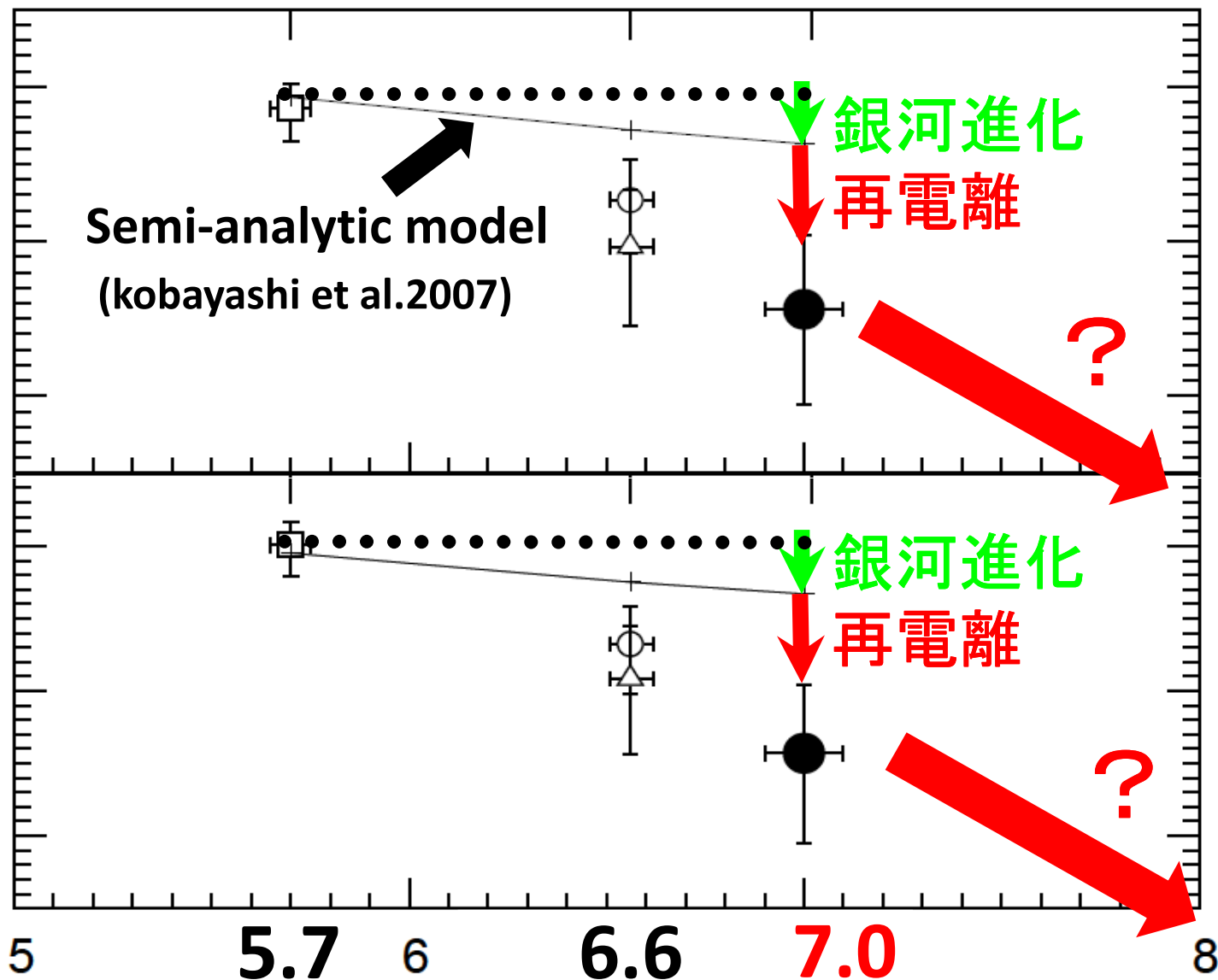
6

6.6

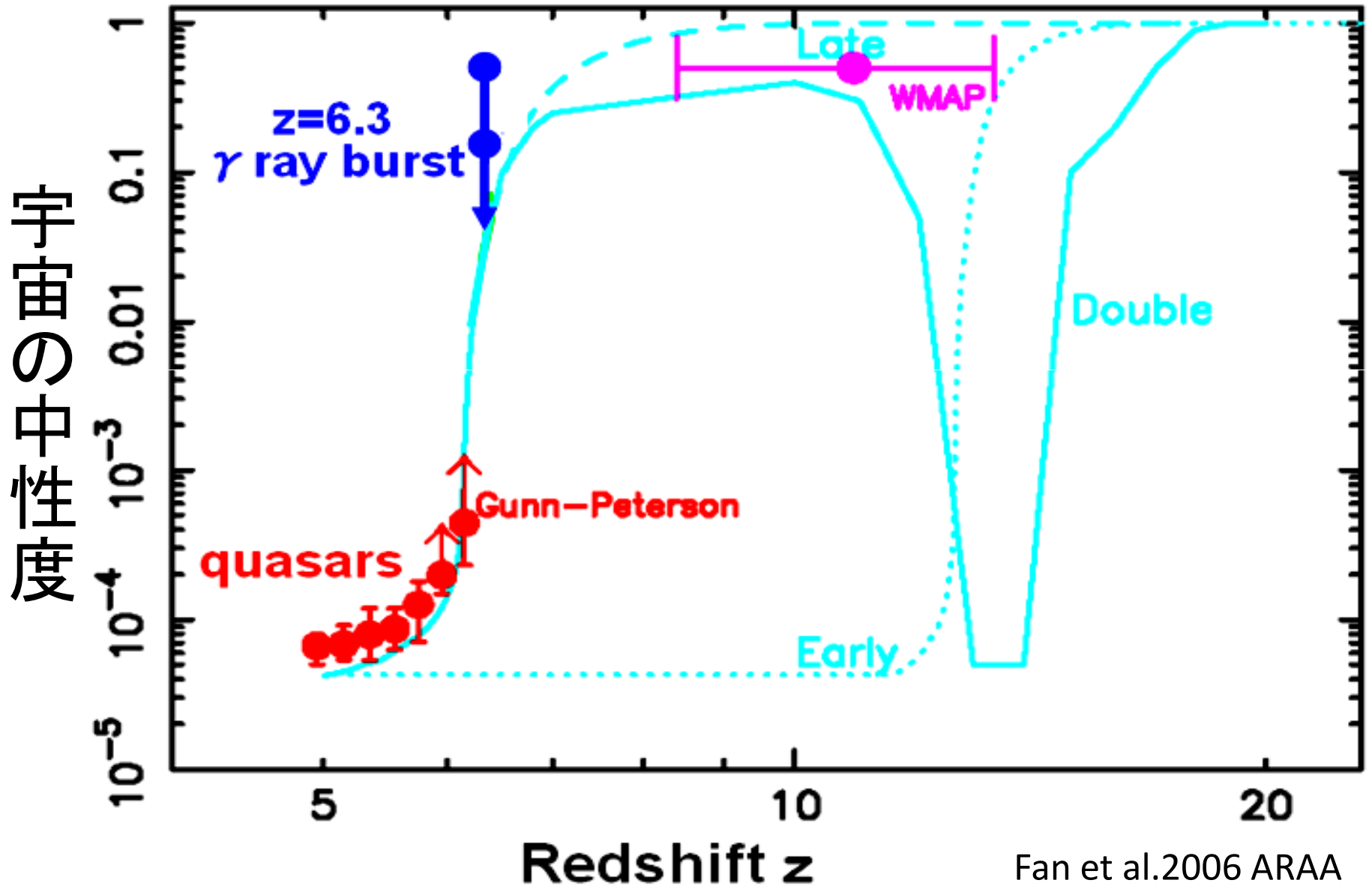
7.0

8

赤方偏移 z

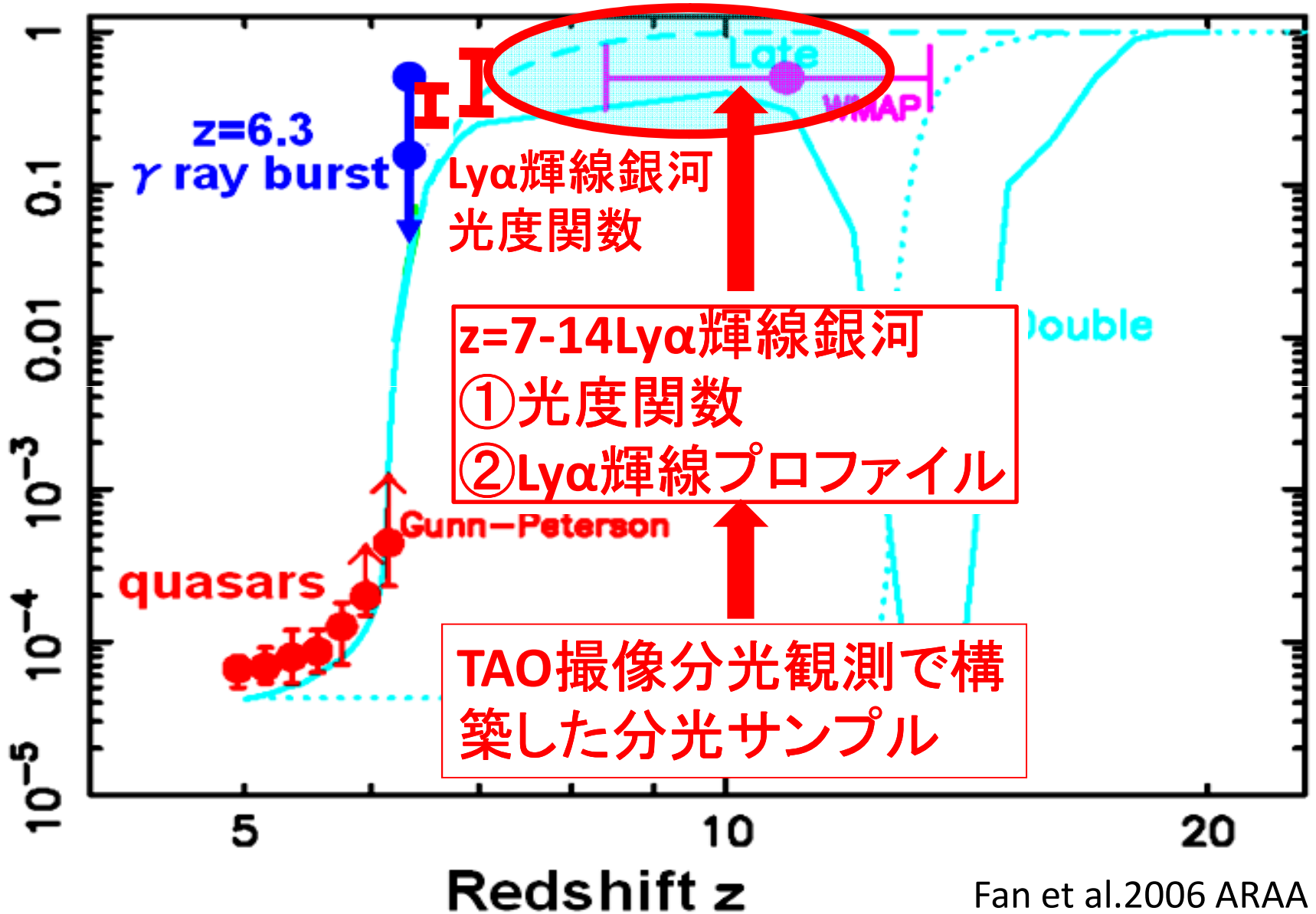


宇宙の再電離状況：観測vs.モデル



宇宙の再電離状況：観測vs.モデル

宇宙の中性度



ライマンブレイク銀河のUV光度関数 at $z > 6$

銀河は宇宙を完全に再電離できるか？

(でなければ、銀河以外に再電離に貢献した天体は何？)

？

銀河が供給する電離光子数 \geq 宇宙を完全電離するのに要する光子数

● 銀河のUV連続光が供給する再電離光子の生成率

$$\dot{N}_i = B \int_{-\infty}^{M_{\max}} 10^{-0.4(M+25+5 \log D_L)} \Phi(M) dM \quad (\text{s}^{-1} \text{ Mpc}^{-3})$$

● 宇宙を完全電離するのに必要な再電離光子の生成率

$$\dot{N}_{\text{cri}}(z) = 10^{51.2} \frac{C}{30} \left(\frac{1+z}{6} \right)^3 \left(\frac{\Omega_b h_{100}^2}{0.02} \right)^2 \text{ s}^{-1} \text{ Mpc}^{-3}$$

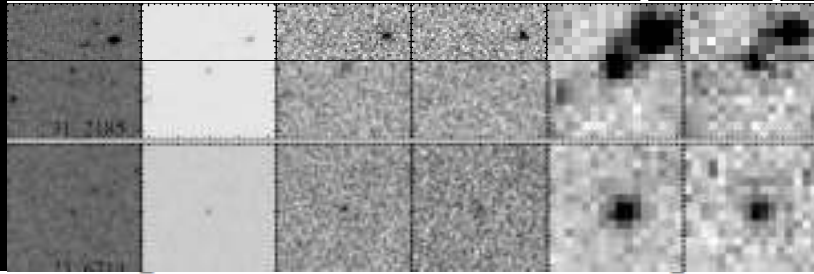
$$\dot{N}_i \geq \dot{N}_{\text{cri}}(z) \text{ なら宇宙を完全に再電離できる}$$

銀河の星/質量形成史

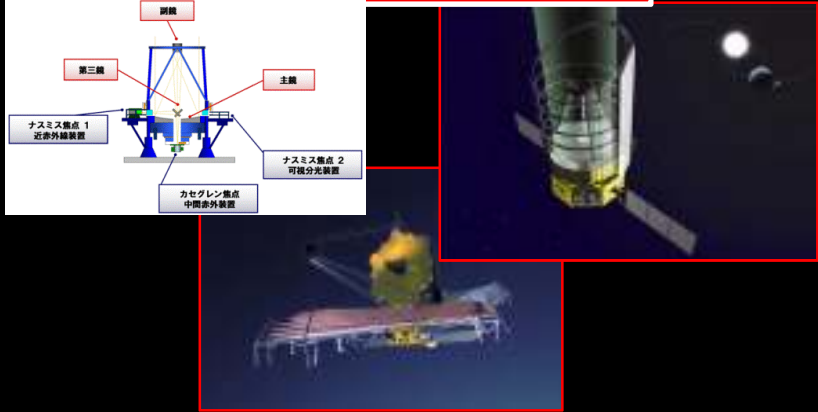
z=3-7 銀河



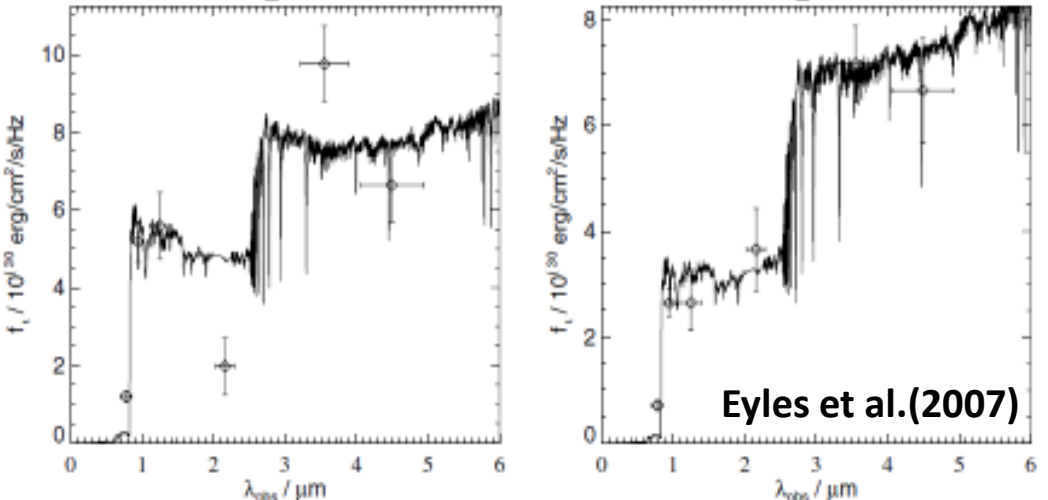
i' z' J K 3.6μ 4.5μ



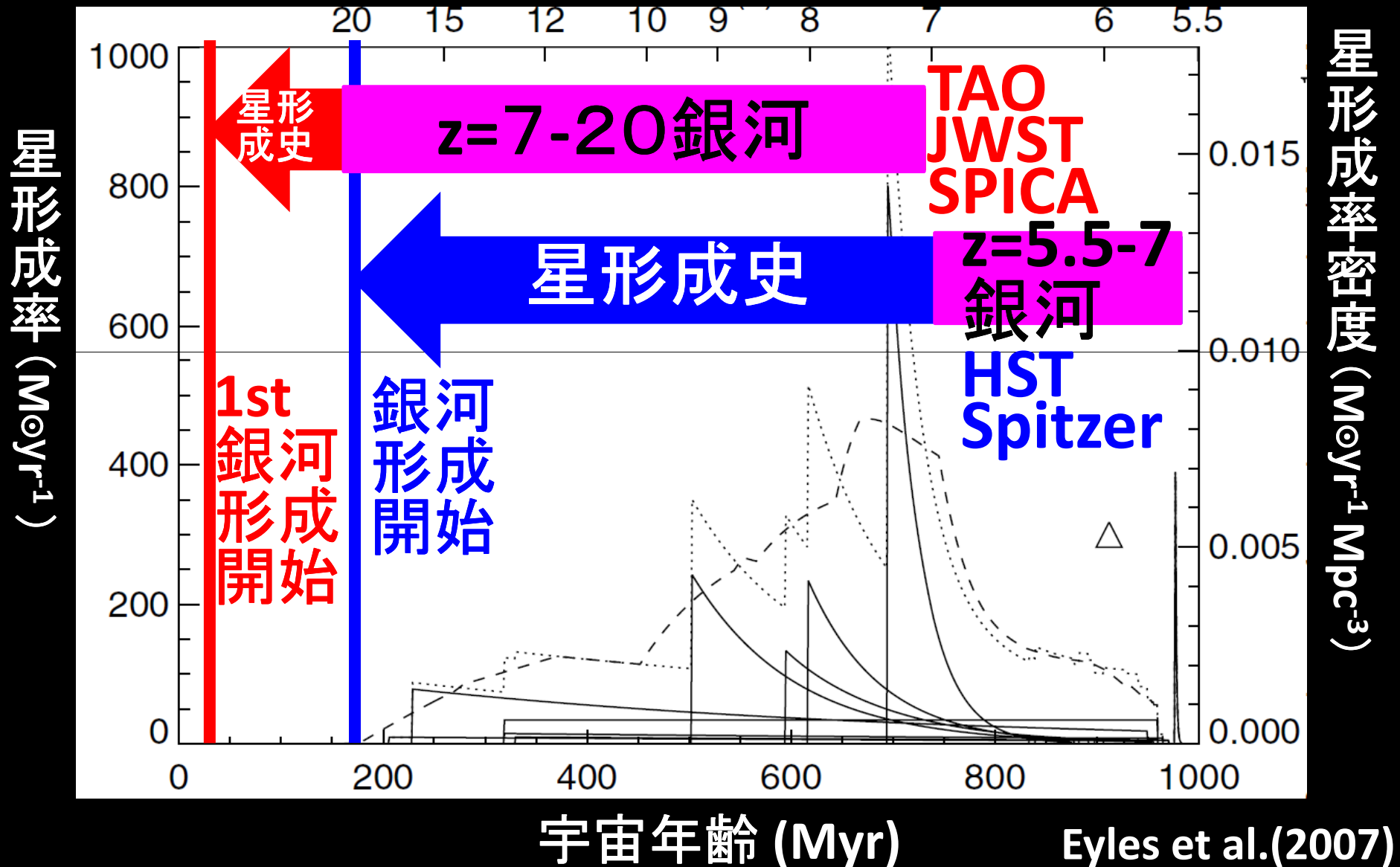
z=7-20 銀河



- ① **TAO** で **z=7-14 LAE**, **z=7-14 LBG** 候補を検出。
- ② **JWST**、**SPICA** で **中間赤** **外** フォローアップ撮像。
- ③ 静止系可視-近赤外をSED fit、**恒星質量**、**星形成史**を求める。

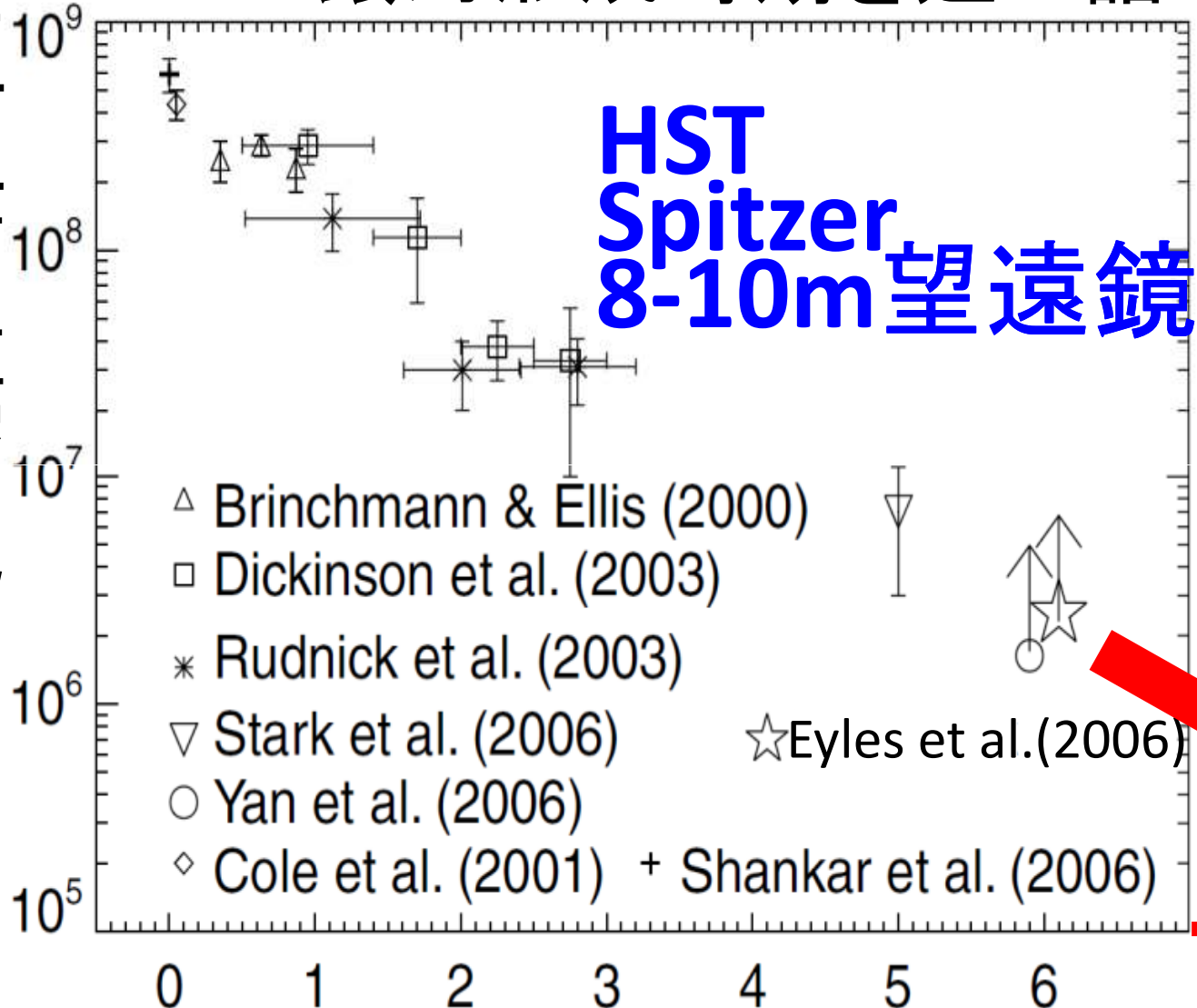


星形成史を遡り、 最初の銀河形成時期を突き止める 赤方偏移 z



質量形成史から 1st銀河形成時期を追い詰める

恒星質量密度 ($M_{\odot} \text{Mpc}^{-3}$)



**TAO
JWST
SPICA**

z=7-14

赤方偏移 z

結論

1. 視野は広い方が良い(12'φ)
2. 同時撮像バンド数が多いほどよい(3バンド)
3. 時間をたくさん投入して
UKIDSS/UDS、Ultra-VISTAと以上の深さと広さ
　　広くて深いサーベイを目指す