

# 最遠方天体

「平成」から「令和」へ

---

井上昭雄

早稲田大学理工学術院先進理工学部物理学科

早稲田大学理工学術院総合研究所

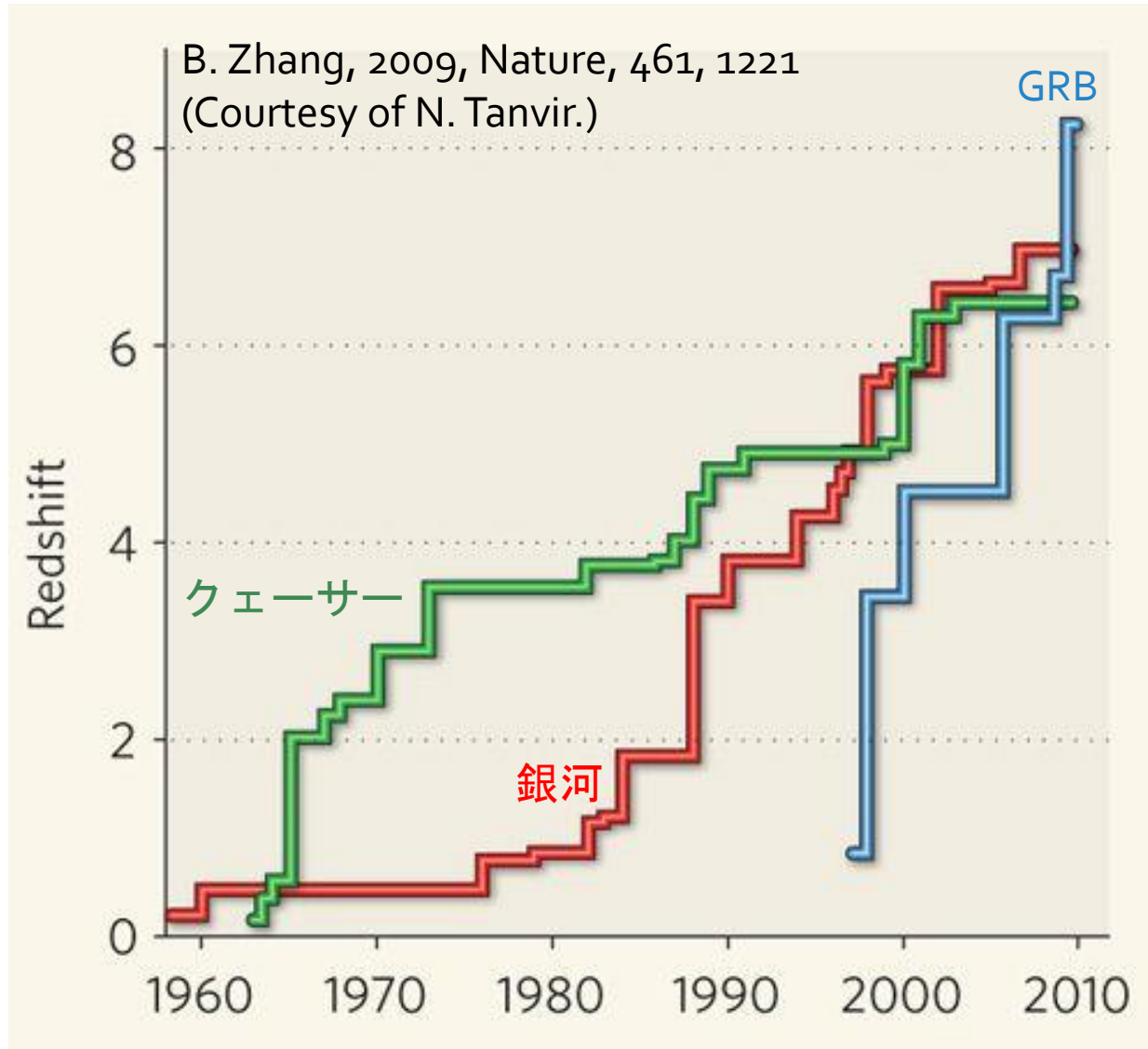
# もくじ

- 「平成」の約30年間で最遠方天体記録がどのように伸びていったか
  - 技術の進歩、新手法の活用、新装置の稼働
- 「令和」の時代にどのような進展が予想されるか
  - 新宇宙望遠鏡案

# 「最遠方天体」の何がおもしろいのか？

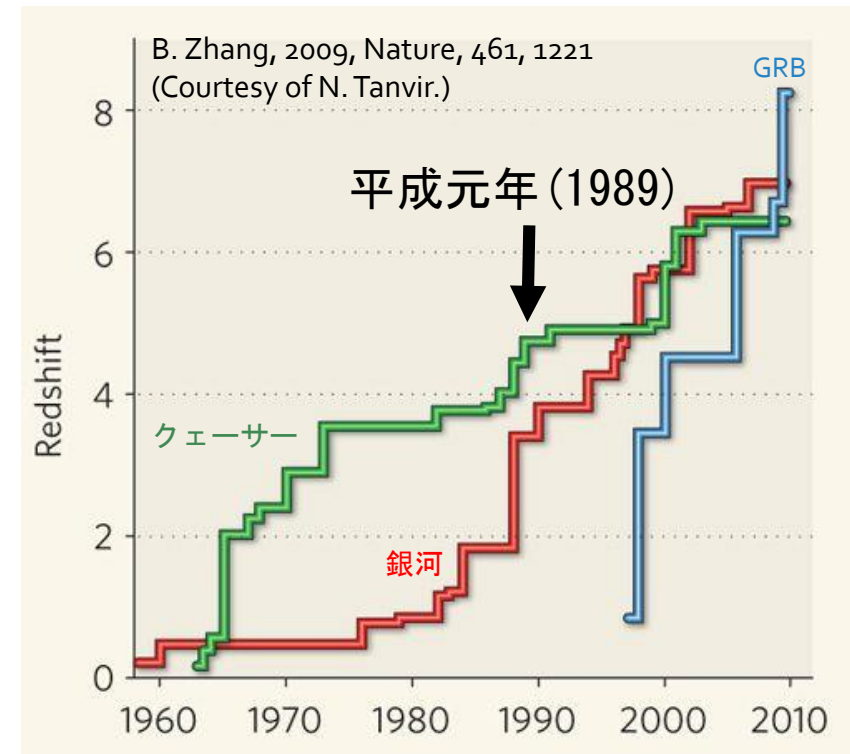
- 発見された時代までの時間が短く、それを作るのが難しい場合がある
  - 最遠方クェーサーと巨大ブラックホール形成問題
  - 最遠方パッシブ銀河と大質量銀河形成
- その時代でもっとも明るい、つまり、もっとも大質量ということは、さらにそれより以前の歴史の手掛かりを提供
  - 「第一世代銀河」
- もっともシンプルでわかりやすい、人類の知のフロンティア
  - 赤方偏移という一つの数値で勝負！
  - アウトリーチしやすい

# 最高赤方偏移記録の変遷（～平成21年）



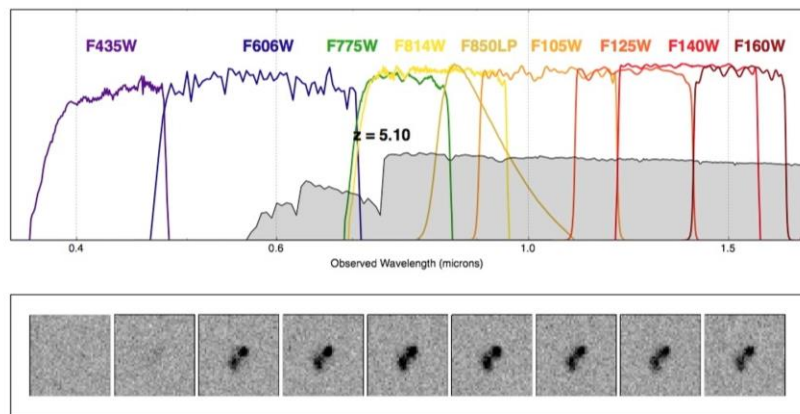
# 昭和から平成へのころ

- クェーサーの赤方偏移が4を超えてくる
  - Warren et al. 1987, Nature, 325, 131 ( $z=4.01$ )
    - UK Schmidt Telescope (1.24m) “color selection” + Anglo-Australian Telescope (3.9m) spectroscopy
  - Schneider et al. 1989, AJ, 98, 1951 ( $z=4.73$ )
  - Schneider et al. 1991, AJ, 102, 837 ( $z=4.897$ )
    - Palomar CCD survey

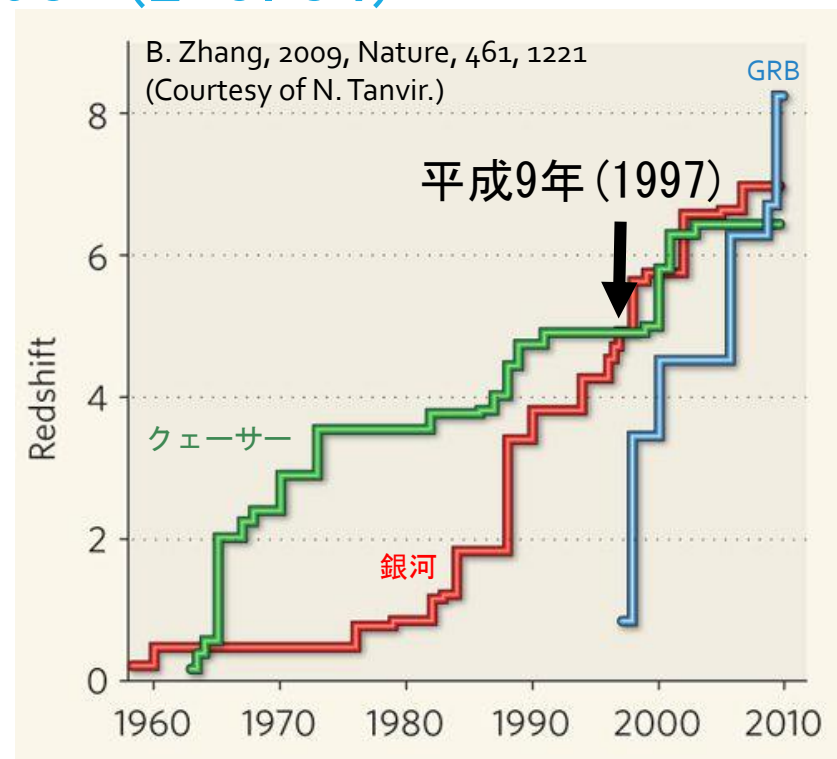


# 平成9～10年

- 銀河の赤方偏移がクエーサーを追い越し、5を超える
- Franx et al. 1997, ApJ, 486, L75 ( $z=4.92$ )
- Dey et al. 1998, ApJ, 498, L93 ( $z=5.34$ )
  - ライマンブレイク法
    - Steidel et al. 1992, AJ, 104, 941
  - Keck望遠鏡による分光



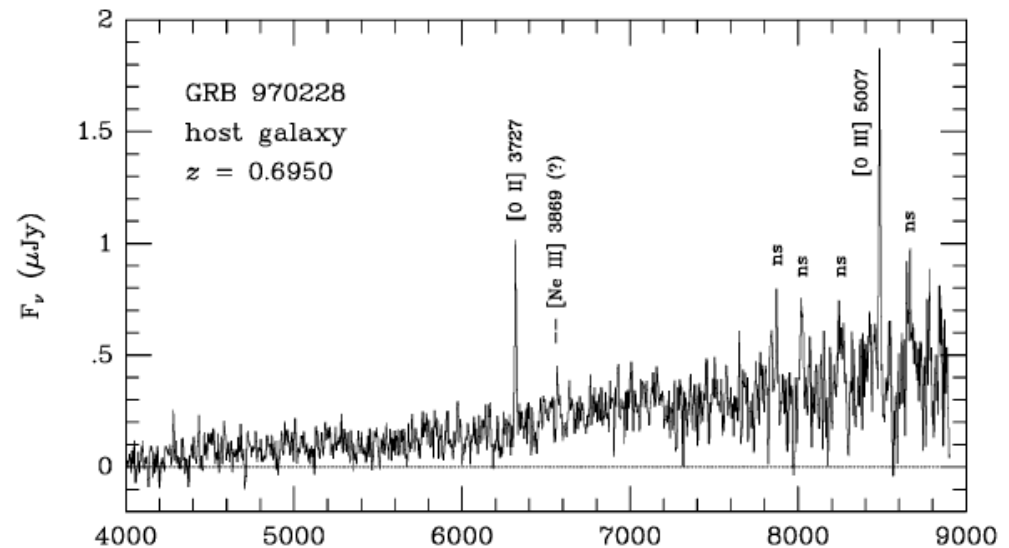
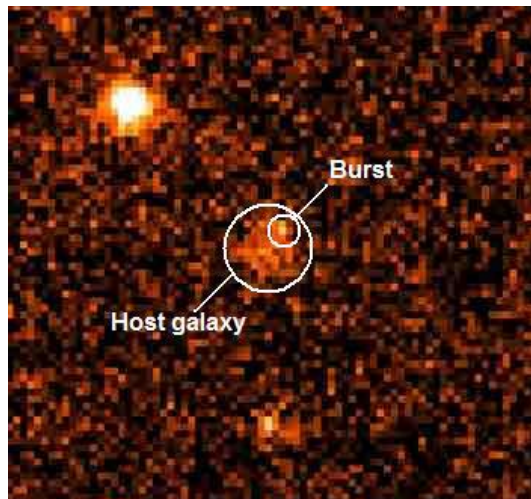
Credit: D. Magee, G. Illingworth, R. Bouwens & P. Oesch



# 平成9年～12年

## •GRB970228

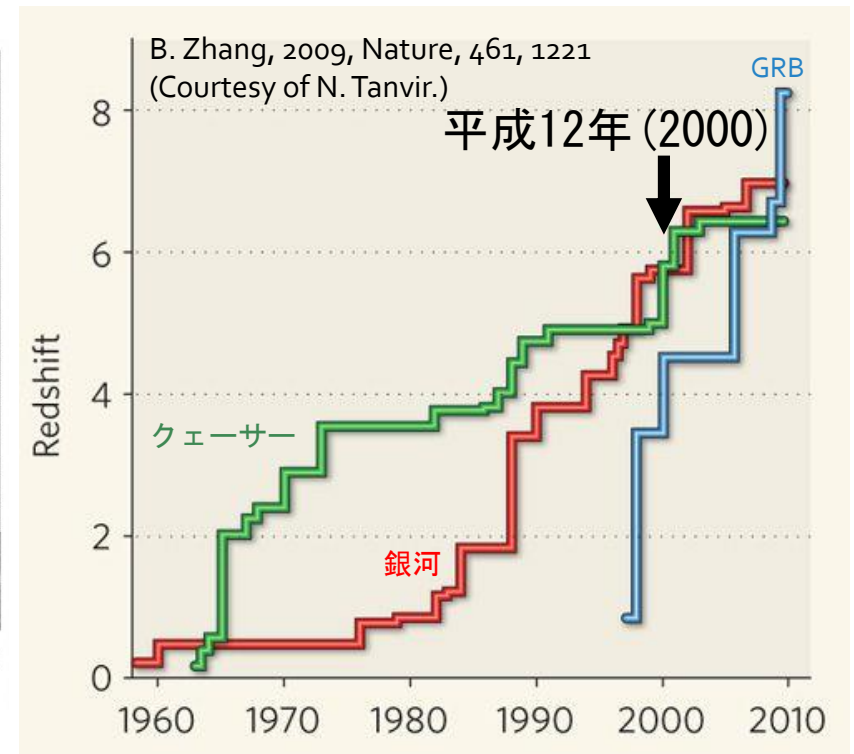
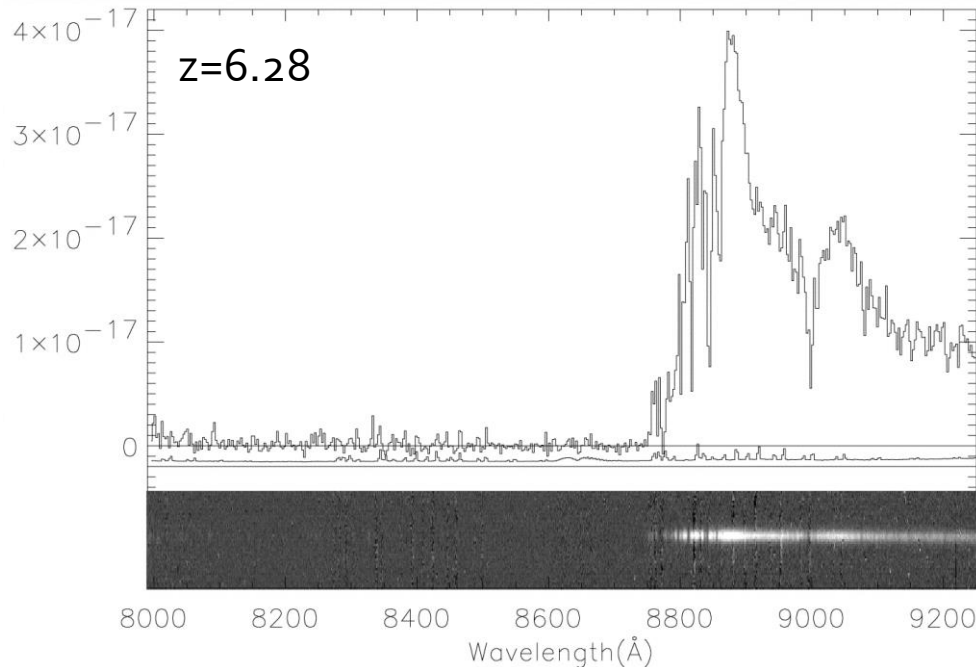
- 初めてアフターグロウを検出→ホスト銀河
- van Paradijs et al. 1997, Nature, 386, 686
- Sahu et al. 1997, Nature, 387, 476
- Costa et al. 1997, Nature, 387, 783
- Bloom et al. 2000, ApJ, 554, 678 ( $z=0.695$ )



# 平成12～14年

- SDSSクエーサーが赤方偏移6を超える
  - Fan et al. 2000, AJ, 120, 1167 ( $z=5.80$ )
  - Pentericci et al. 2002, AJ, 123, 2151 ( $z=6.28$ )

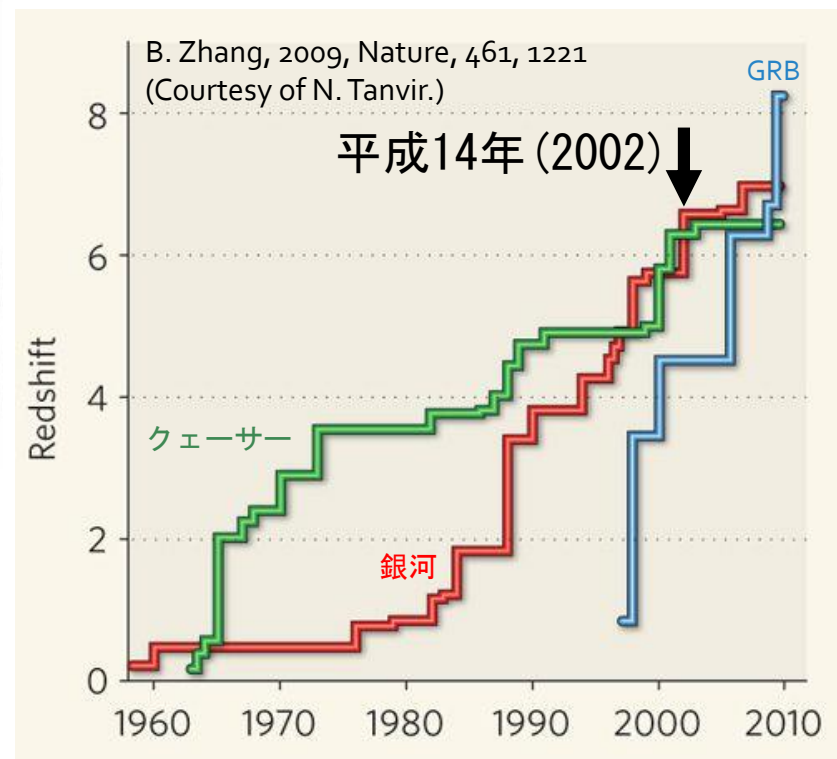
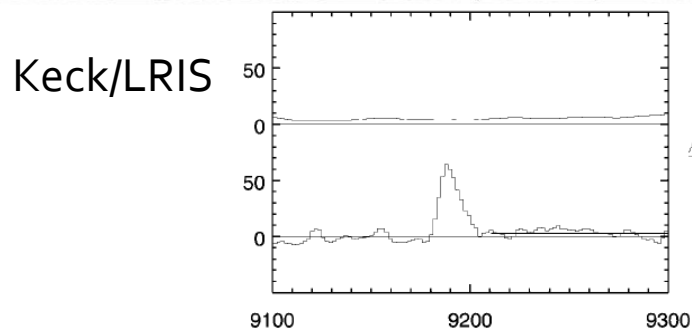
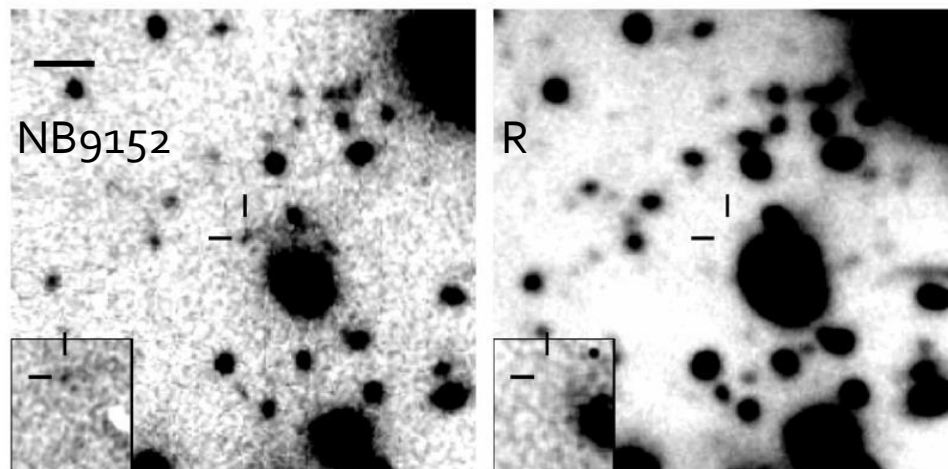
VLT/FORS2 (Pentericci+02)





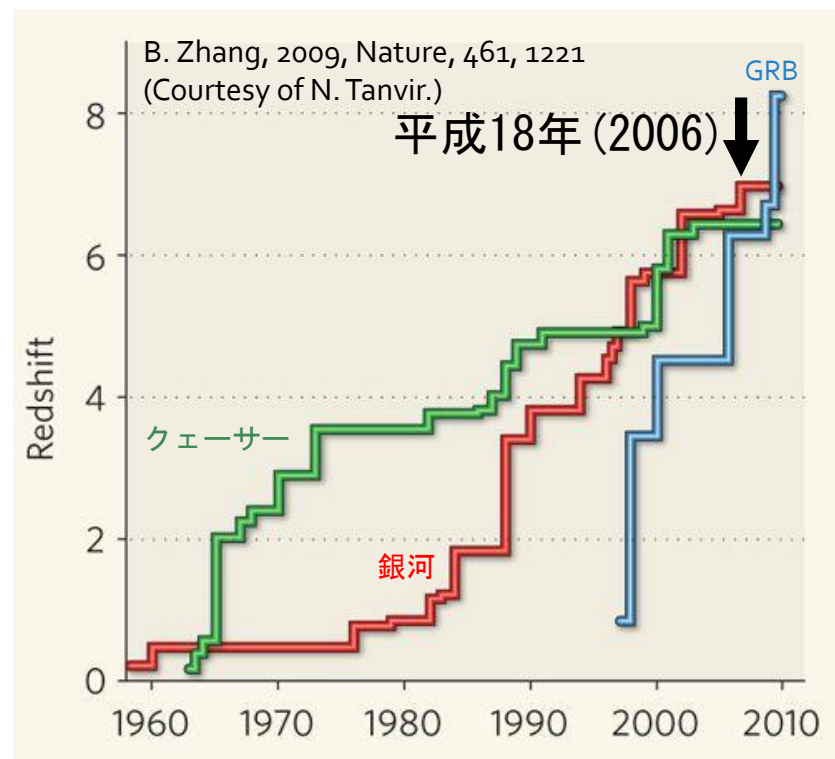
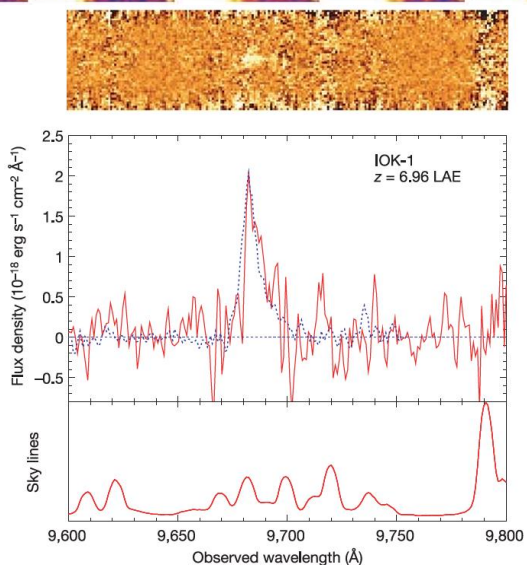
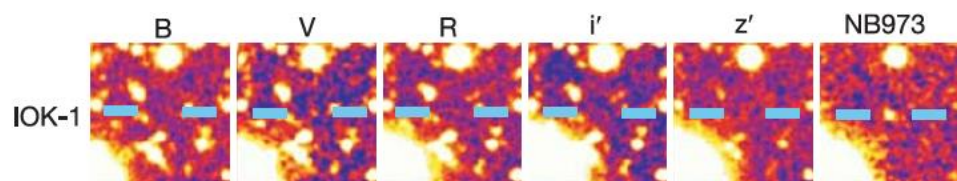
# 平成14年

- 銀河の赤方偏移も6を超える
  - Hu et al. 2002, ApJ, 568, L75 ( $z=6.56$ )
- ライマン $\alpha$ 輝線銀河 (LAE)



# 平成18年：すばる黄金期

- 銀河の赤方偏移がおよそ7に
  - Iye et al. 2006, Nature, 443, 7108 ( $z=6.96$ )
- すばる望遠鏡主焦点カメラ狭帯域探査
  - ライマン $\alpha$ 輝線銀河 (LAE)



# 平成18年：すばる黄金期

表 1: 最も遠い銀河ベストテン (2006年9月14日)

順位	天体名	座標	赤方偏移	距離 #	論文	公表日
1	IOK-1	J132359.8+272456	6.964	128.826	家ほか	2006年9月14日
2	SDF ID1004	J132522.3+273520	6.597	128.250	谷口ほか	2005年2月25日
3	SDF ID1018	J132520.4+273459	6.596	128.248	柏川ほか	2006年4月5日
4	SDF ID1030	J132357.1+272448	6.589	128.238	柏川ほか	2006年4月5日
5	SDF ID1007	J132432.5+271647	6.580	128.222	谷口ほか	2005年2月25日
6	SDF ID1008	J132518.8+273043	6.578	128.219	谷口ほか	2005年2月25日
6	SDF ID1001	J132418.3+271455	6.578	128.219	小平ほか	2003年4月25日
8*	HCM-6A	J023954.7-013332	6.560	128.189	Huほか	2002年4月1日
9	SDF ID1059	J132432.9+273124	6.557	128.184	柏川ほか	2006年4月5日
10	SDF ID1003	J132408.3+271543	6.554	128.178	谷口ほか	2005年2月25日

# 距離は宇宙年齢を136.6億歳とするモデルによる値。単位は億光年

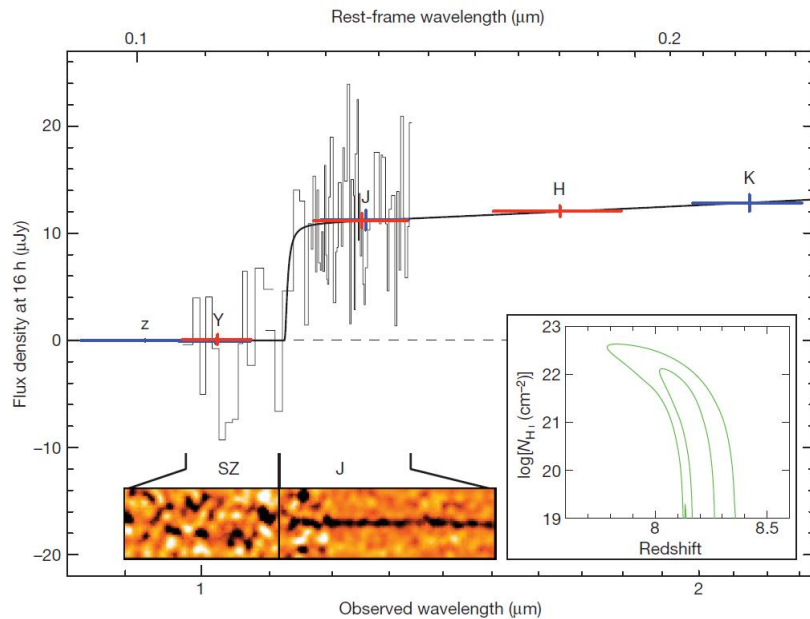
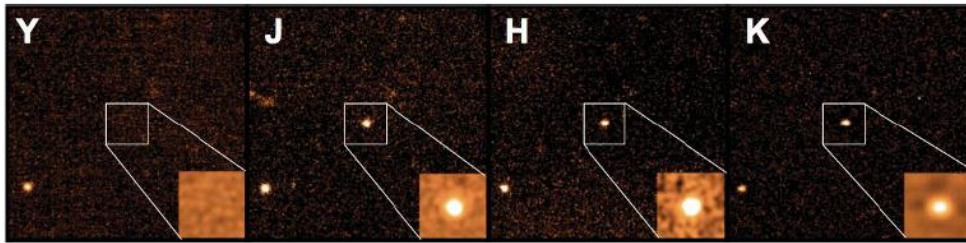
\* この銀河のみケック望遠鏡で発見されたが、他はすべてすばる望遠鏡による発見。

© Subaru Telescope, NAOJ

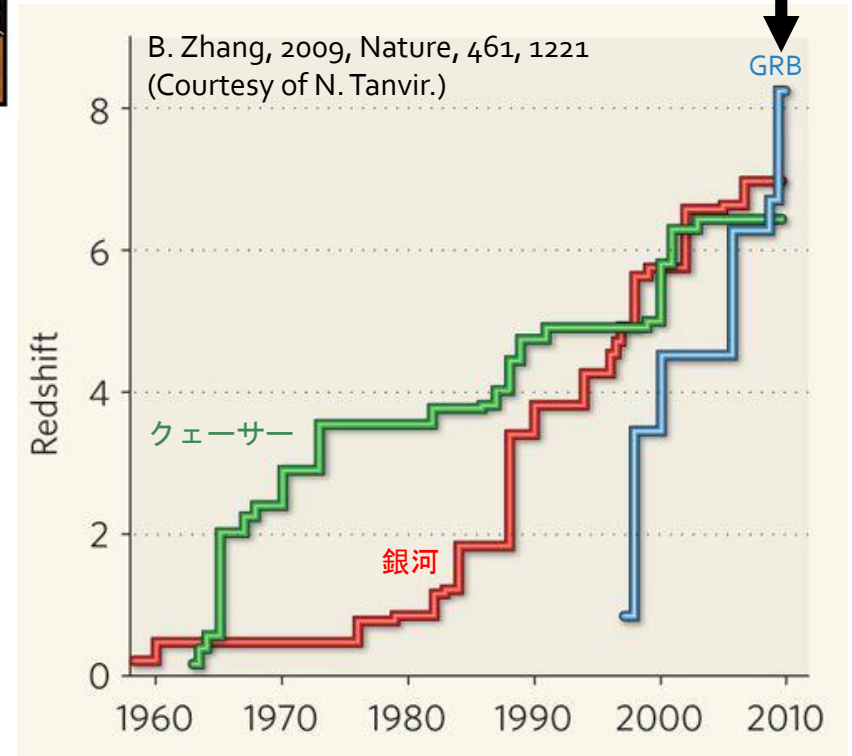
# 平成21年

•GRBの赤方偏移が8を超える

•Tanvir et al. 2009, Nature, 461, 1254 ( $z=8.2$ )



平成21年 (2009)





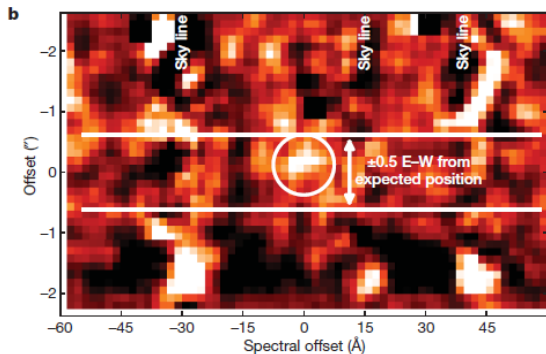
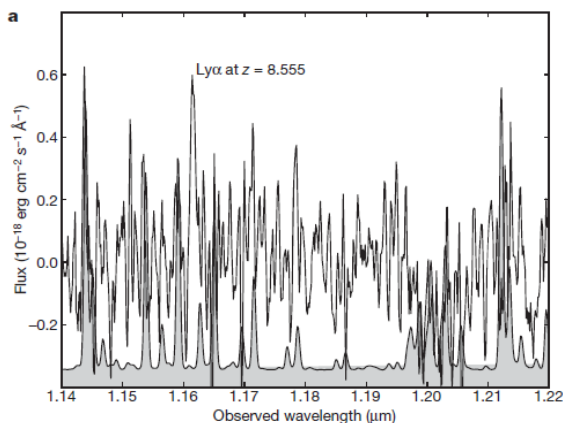
# 平成22～23年：たまには幻も？

## LETTER

doi:10.1038/nature09462

### Spectroscopic confirmation of a galaxy at redshift $z = 8.6$

M. D. Lehnert<sup>1</sup>, N. P. H. Nesvadba<sup>2</sup>, J.-G. Cuby<sup>3</sup>, A. M. Swinbank<sup>4</sup>, S. Morris<sup>5</sup>, B. Clément<sup>3</sup>, C. J. Evans<sup>6</sup>, M. N. Bremer<sup>7</sup> & S. Basa<sup>3</sup>



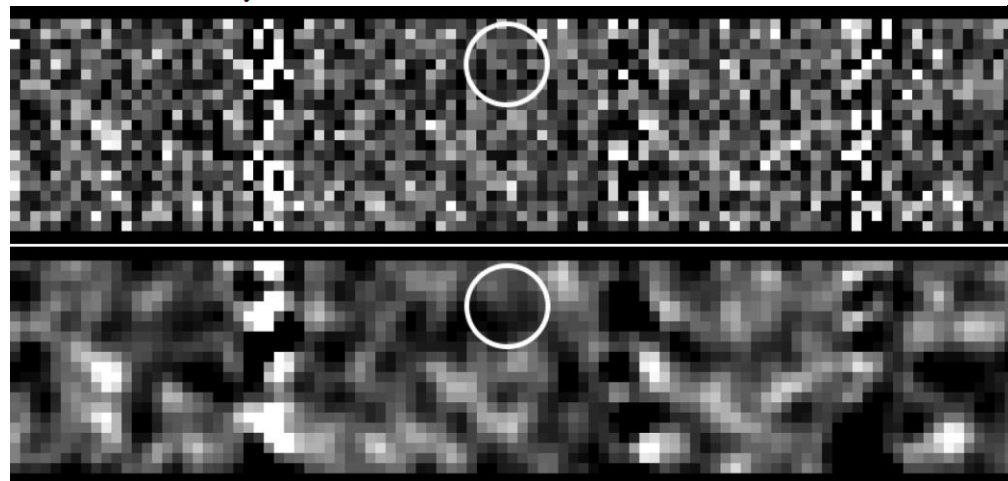
Monthly Notices  
of the  
ROYAL ASTRONOMICAL SOCIETY

MNRAS 430, 3314–3319 (2013)

doi:10.1093/mnras/stt132

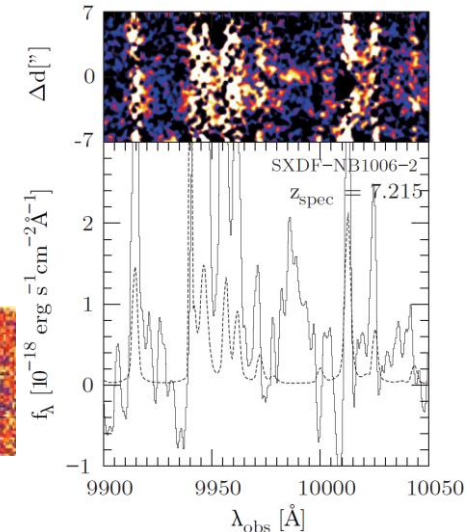
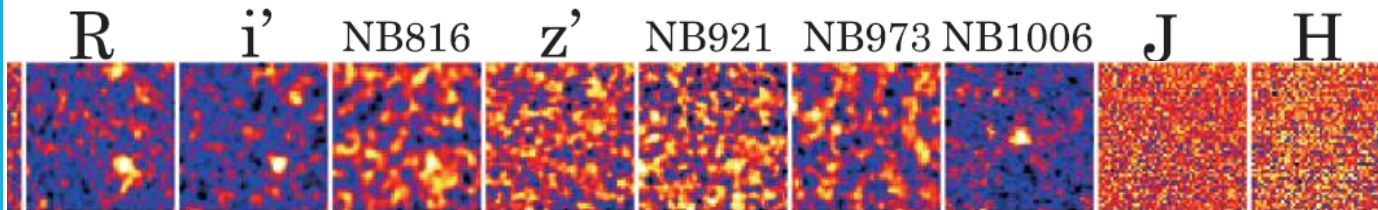
### VLT/XSHOOTER and Subaru/MOIRCS spectroscopy of HUDF.YD3: no evidence for Lyman $\alpha$ emission at $z = 8.55^*$

Andrew J. Bunker,<sup>1†</sup> Joseph Caruana,<sup>1,2</sup> Stephen M. Wilkins,<sup>1</sup>  
Elizabeth R. Stanway,<sup>3,4</sup> Silvio Lorenzoni,<sup>1</sup> Mark Lacy,<sup>5</sup> Matt J. Jarvis<sup>1,6,7</sup>  
and Samantha Hickey<sup>6</sup>



# 平成24年：すばる黄金期(つづき)

- 銀河の赤方偏移記録更新 ( $z=7.215$ )
- Shibuya et al. 2012, ApJ, 752, 114

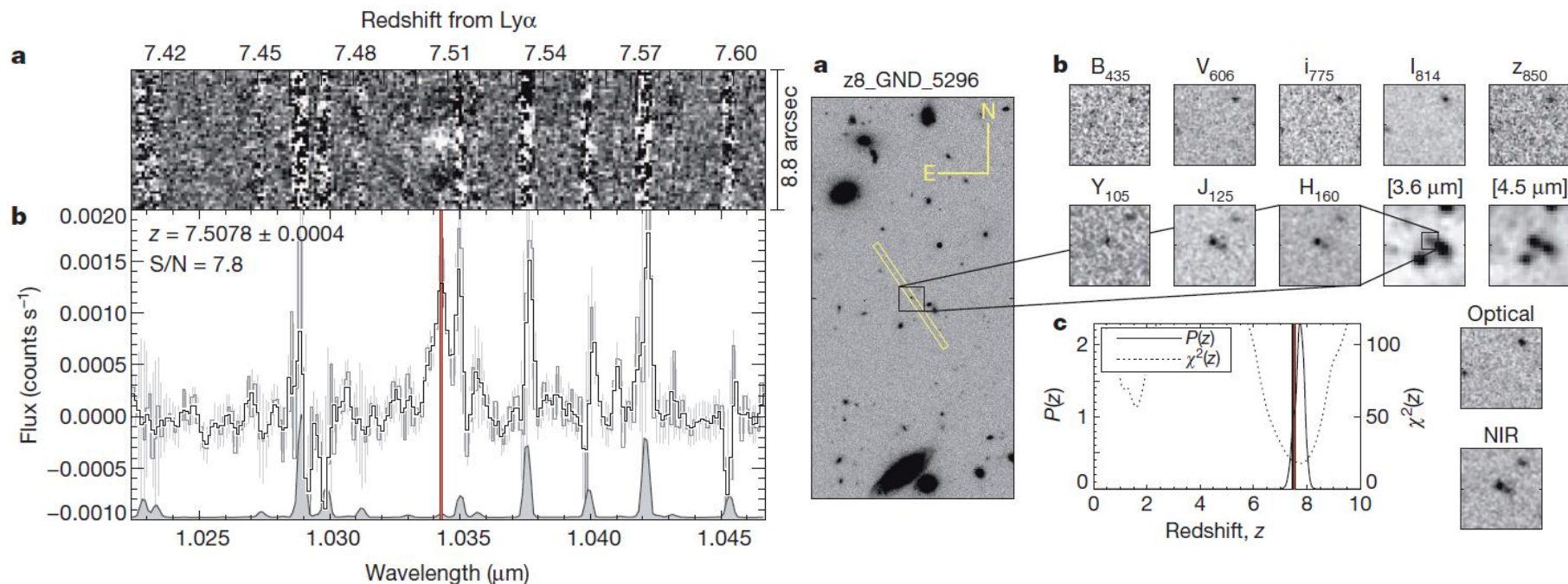


最も遠い銀河ベストテン (2012年6月4日)

順位	名前	座標	赤方偏移	億光年	論文	出版年月
1	SXDF-NB1006-2	J021856.5-051958.9	7.215	129.1	澁谷他	2012.6
2	GN-108036	in GOODS NORTH field	7.213	129.1	小野他	2012.1
3	BDF-3299	J222812.3-0350959.4	7.109	129.0	Vanzella 他	2010.12
4	A1703_zD6	J131501.0+515004	7.045	128.9	Schenker 他	2012.1
5	BDF-521	J222703.1-350707.7	7.008	128.9	Vanzella 他	2010.12
6	G2-1408	J132357.1+272448	6.972	128.8	Fontana 他	2010.12
7	IOK-1	J132359.8+272456	6.964	128.8	家他	2006.9
8	HUDF09_1596	J033303.8-275120	6.905	128.7	Schenker 他	2012.1
9	SDF46975	in Subaru Deep field	6.844	128.6	小野他	2012.1
10	NTTDF-6345	J120536.9-074522.3	6.701	128.4	Pentericci 他	2011.12

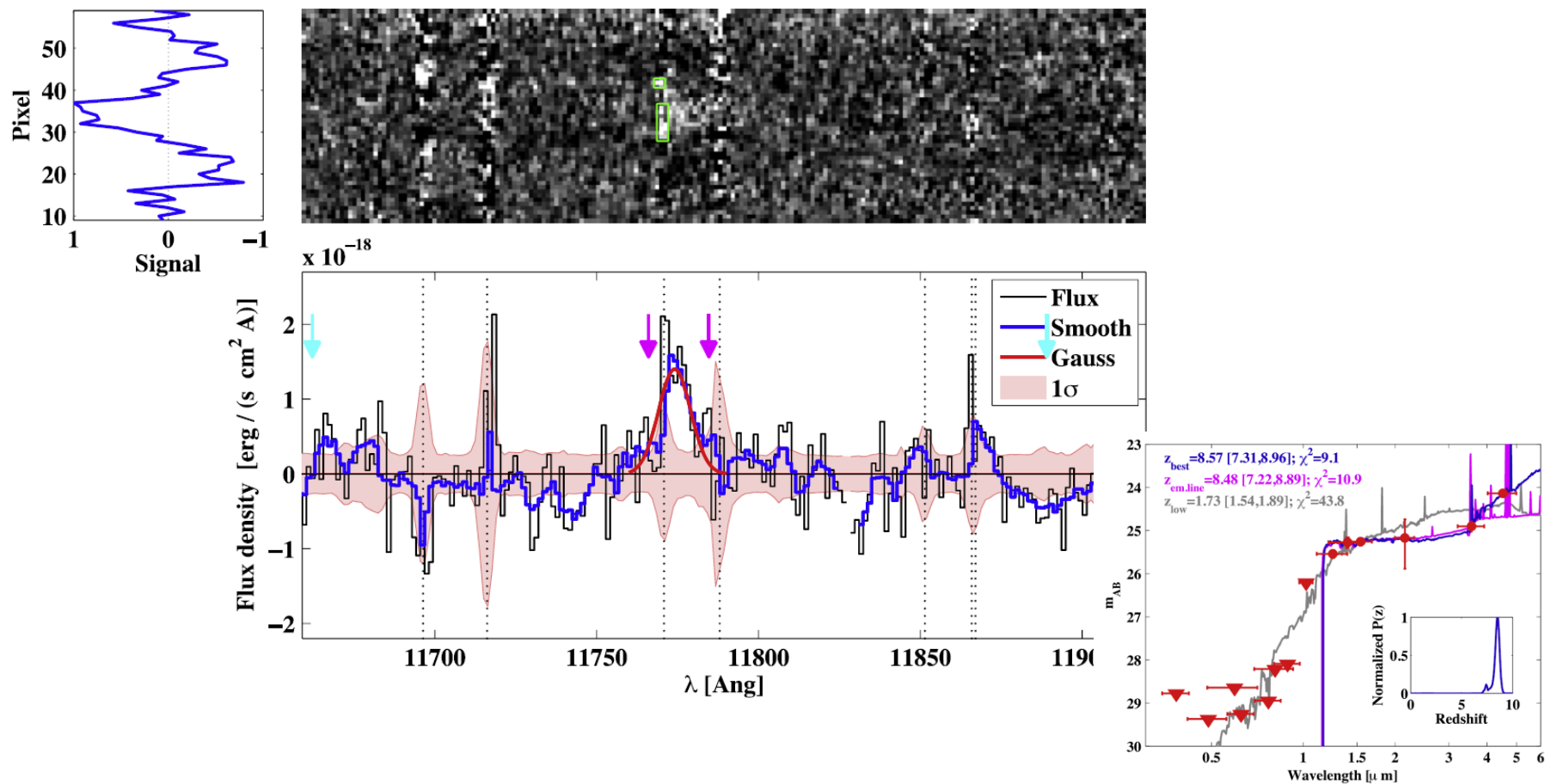
# 平成25年：HST+MOSFIRE/X-Shooter

- ハッブル宇宙望遠鏡のSM-4 (平成21年)
  - 新型カメラWFC3へ交換→近赤外線撮像感度上昇
- ある程度の広さで撮像探査→Keck/VLT分光
  - Finkelstein et al. 2013, Nature, 502, 524 ( $z=7.51$ )



# 平成27年

- 銀河がGRBを抜いて最遠方記録に
  - Zitrin et al. 2015, ApJ, 810, L12 ( $z=8.68$ )

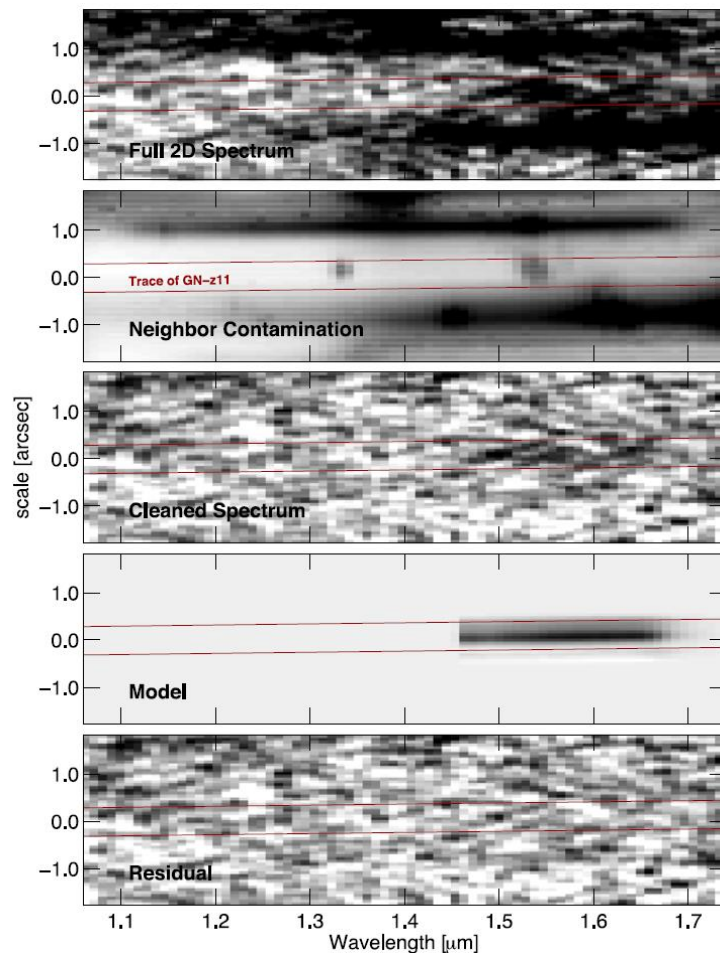
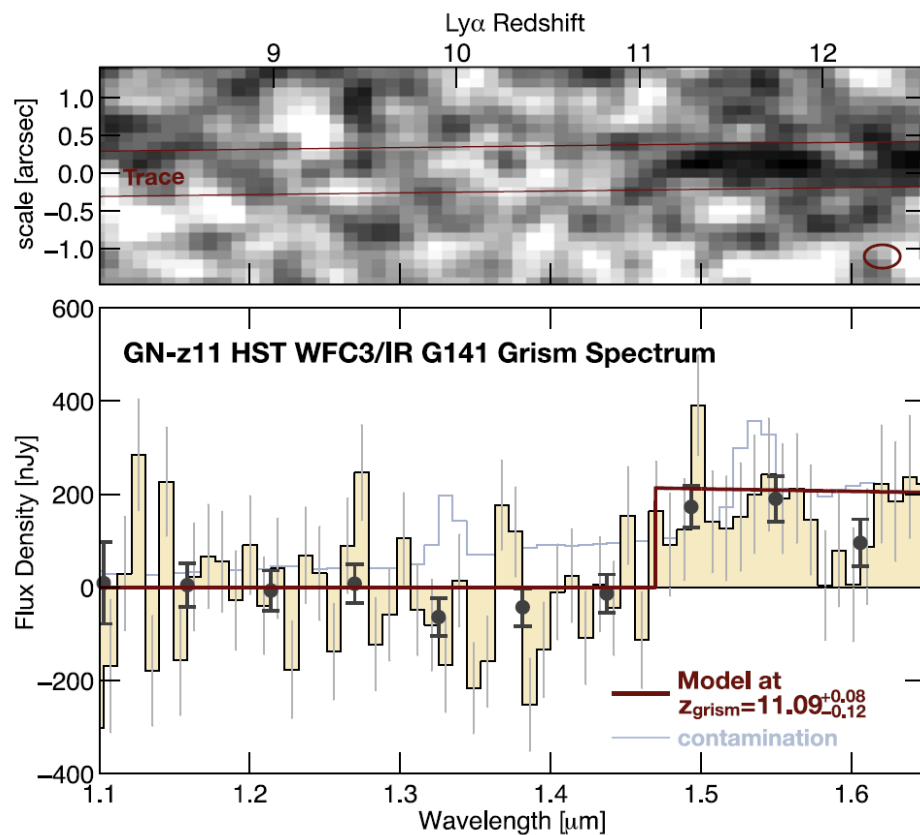




# 平成28年：GN-z11は参考記録？

## •HSTグリズム分光

•Oesch et al. 2016, ApJ, 819, 129 ( $z=11.1$ )



# こんな話もあります : GN-z11

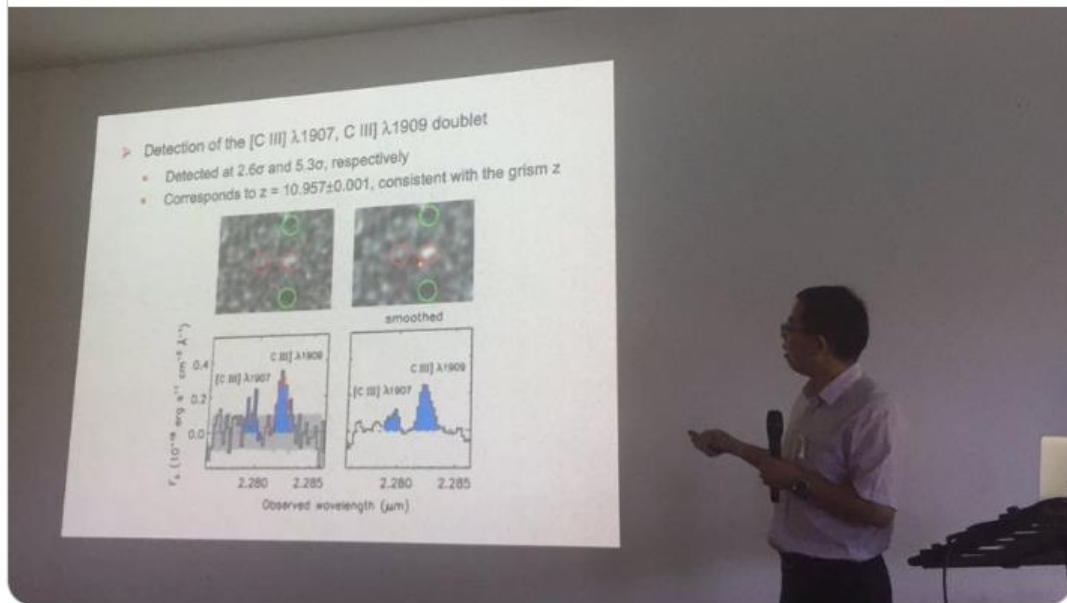


もとはら  
@kmotohara

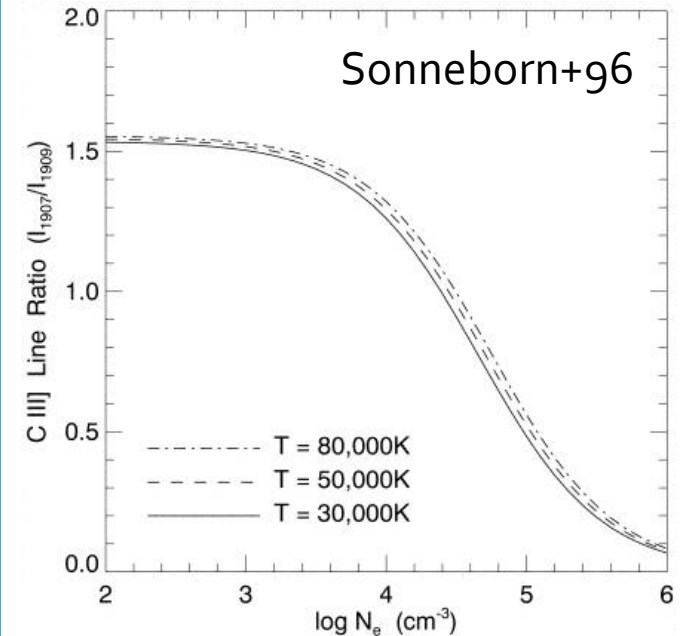
ついに $z > 10$ 輝線が受かった!!

Xiaohui Fan @xfan\_astro · 7月18日

Linhua Jiang: Keck spectroscopy of GN-z11 detects C III lines at  $z=10.957$ .  
#barefootEOR

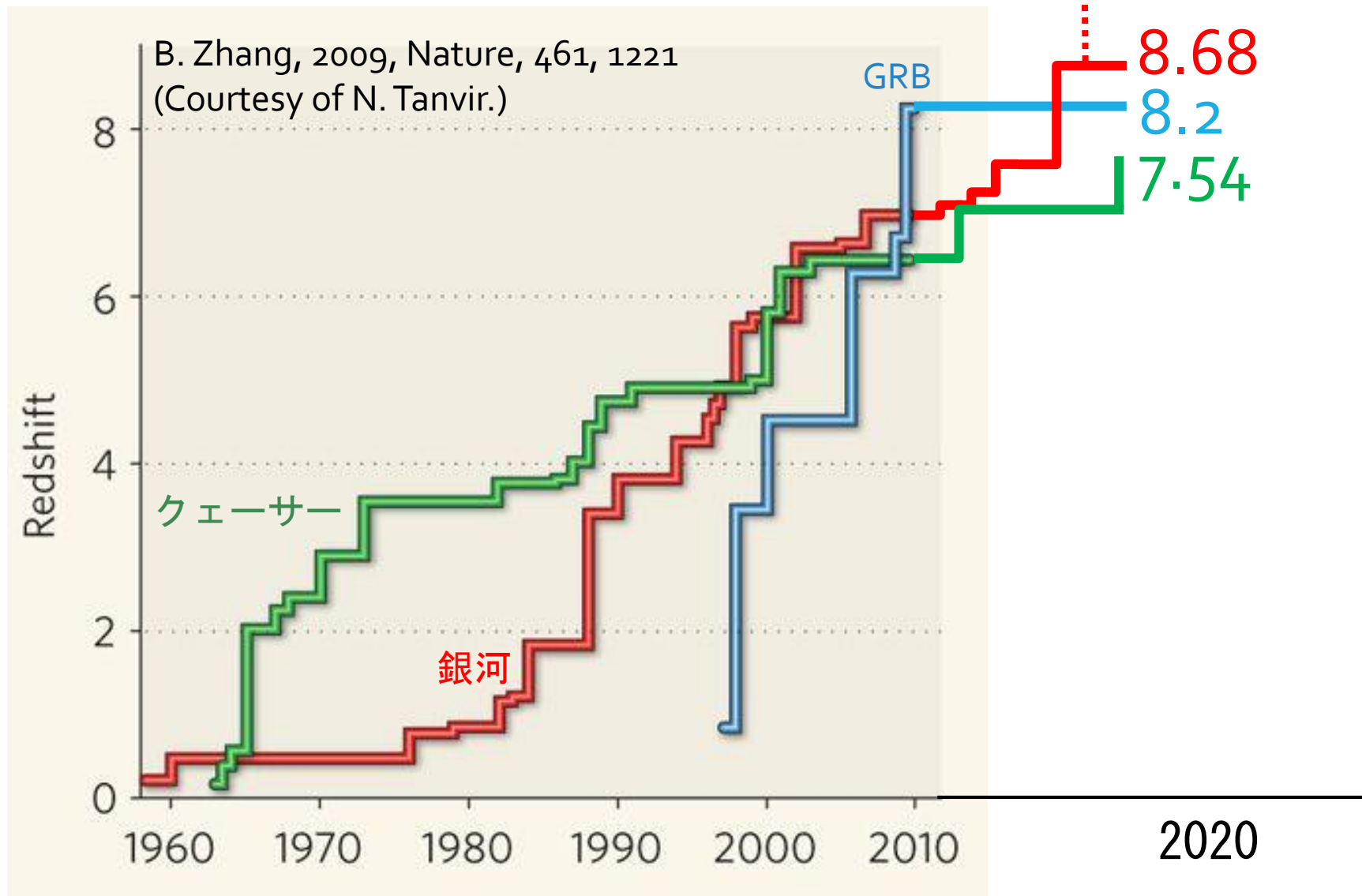


午前11:28 · 2019年7月18日 · Twitter for Android



$F_{1907}/F_{1909} \sim 0.5$   
 $\rightarrow n \sim 1e5 \text{ cm}^{-3} ?$

# 最高赤方偏移記録の変遷 (~平成30年)



# ALMAによる最遠方天体の輝線観測

- [OIII]88ミクロン輝線の検出可能性 (Inoue et al. 2014)
- 最遠方酸素の検出 ([OIII]88 at  $z=7.21$ ; Inoue et al. 2016)
- ALMA Cy3 Grade-A proposal (PI: A. K. Inoue)

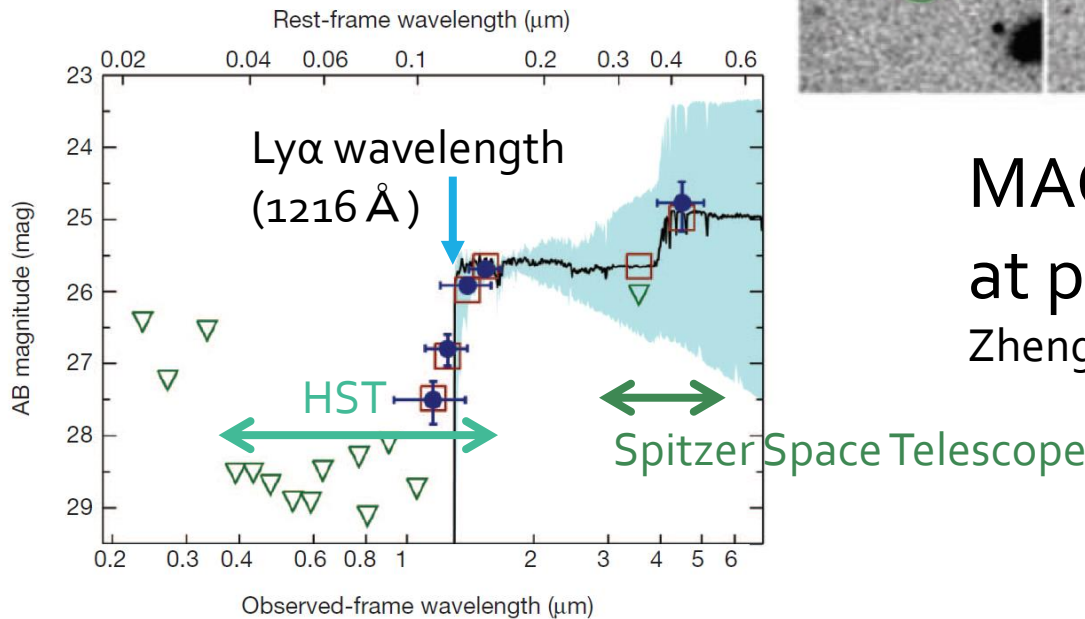
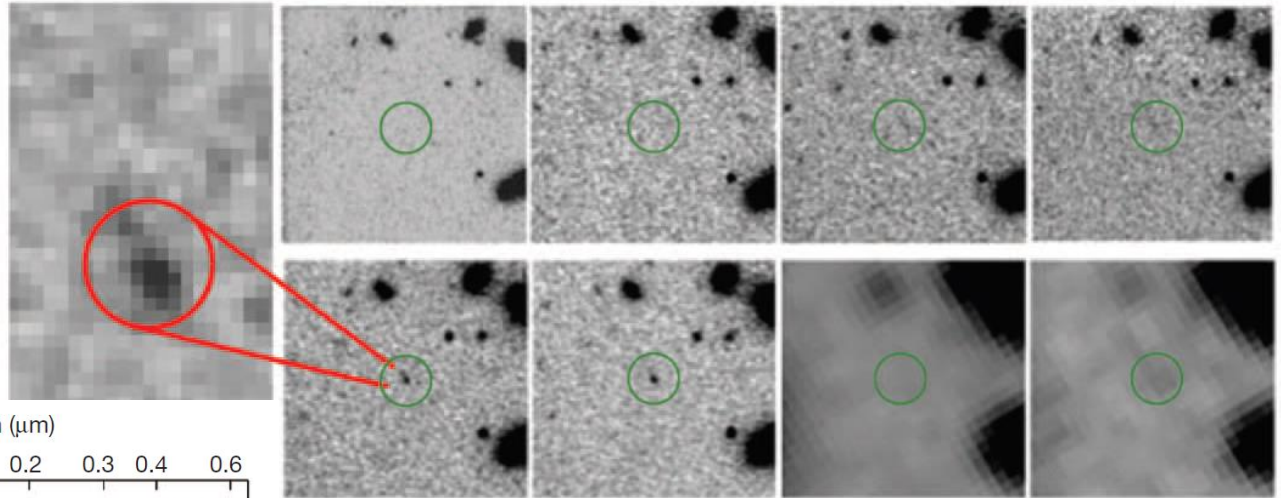
NAOJ/ALMA





# MACS1149-JD1

## • 最遠方ライマンブレイク銀河「候補」

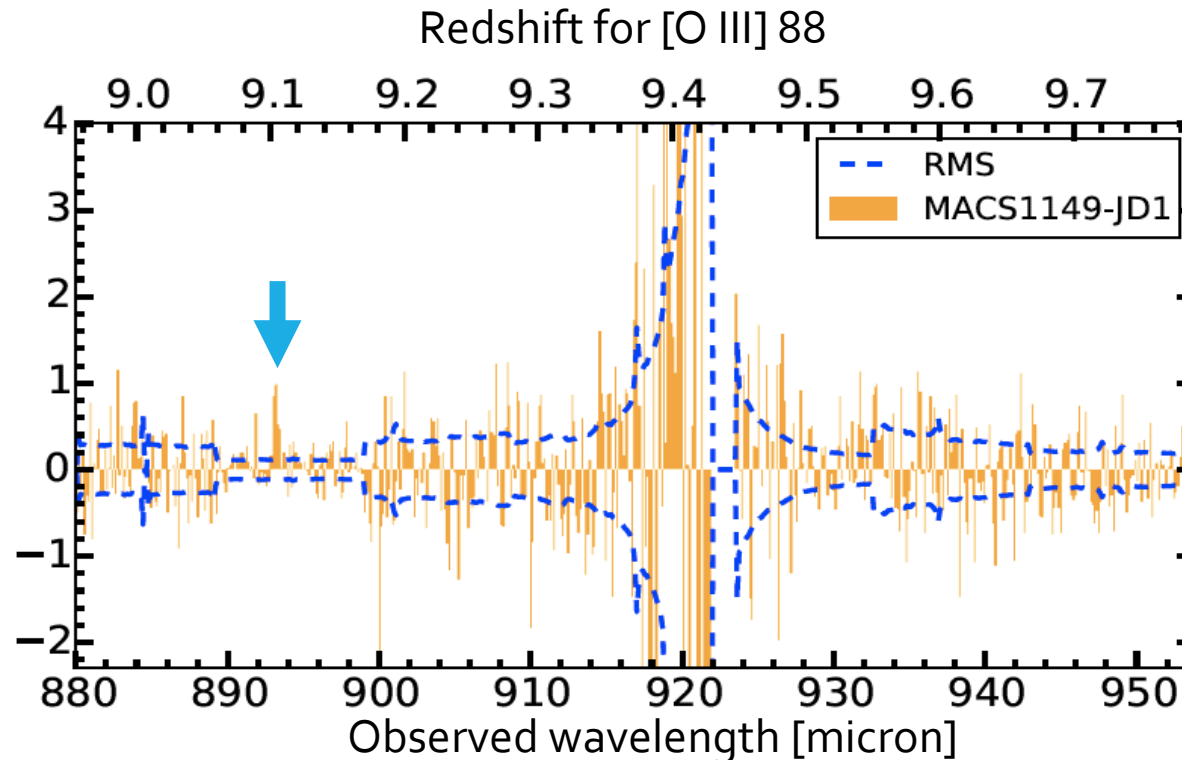


MACS1149-JD1  
at photo- $z=9.6 \pm 0.2$   
Zheng et al. 2012, Nature, 489, 406

# MACS1149-JD1

Hashimoto+AKI+18, Nature

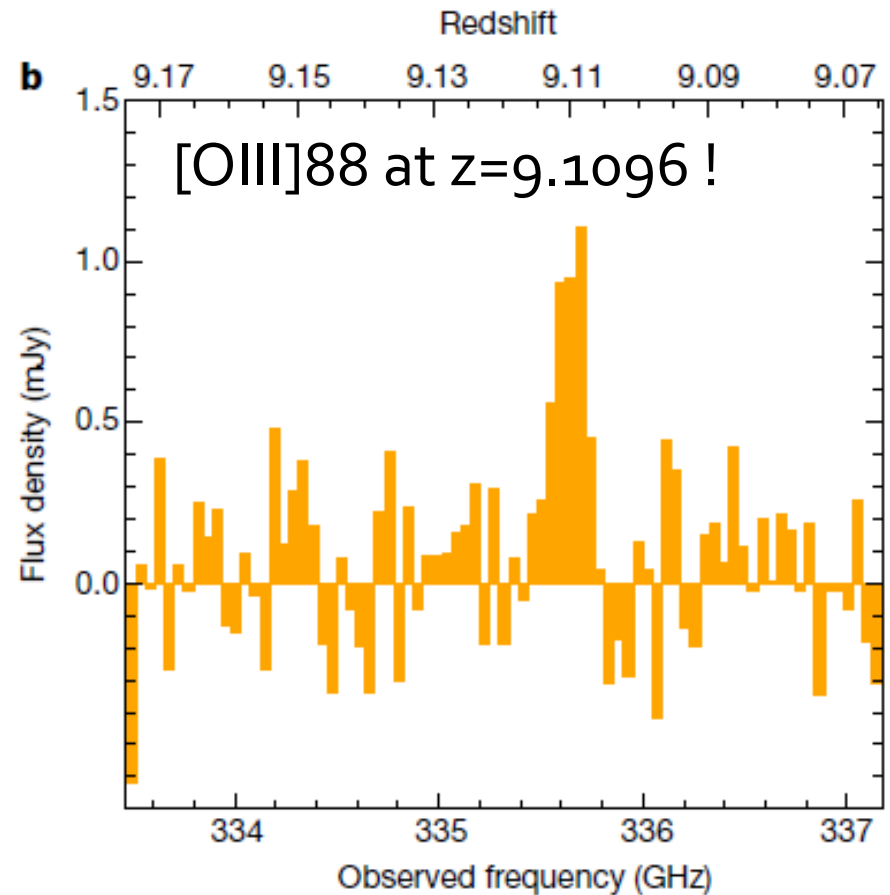
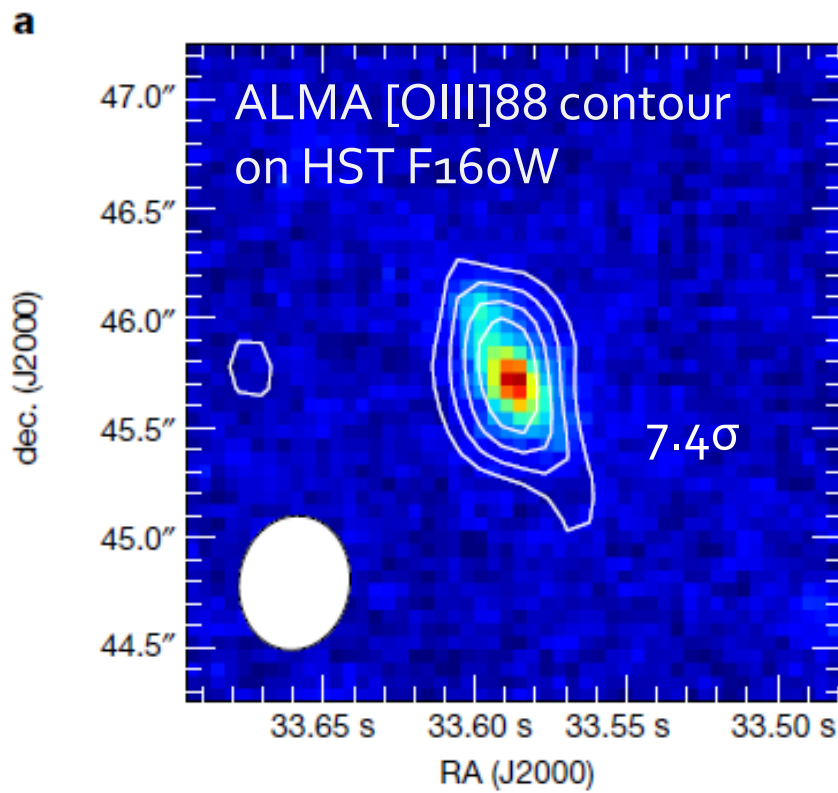
- 観測：2016年3月～2017年4月
- 積分時間：約5時間 (on-source)
- 4つの振動数セットアップ



# MACS1149-JD1

Hashimoto+AKI+18, Nature

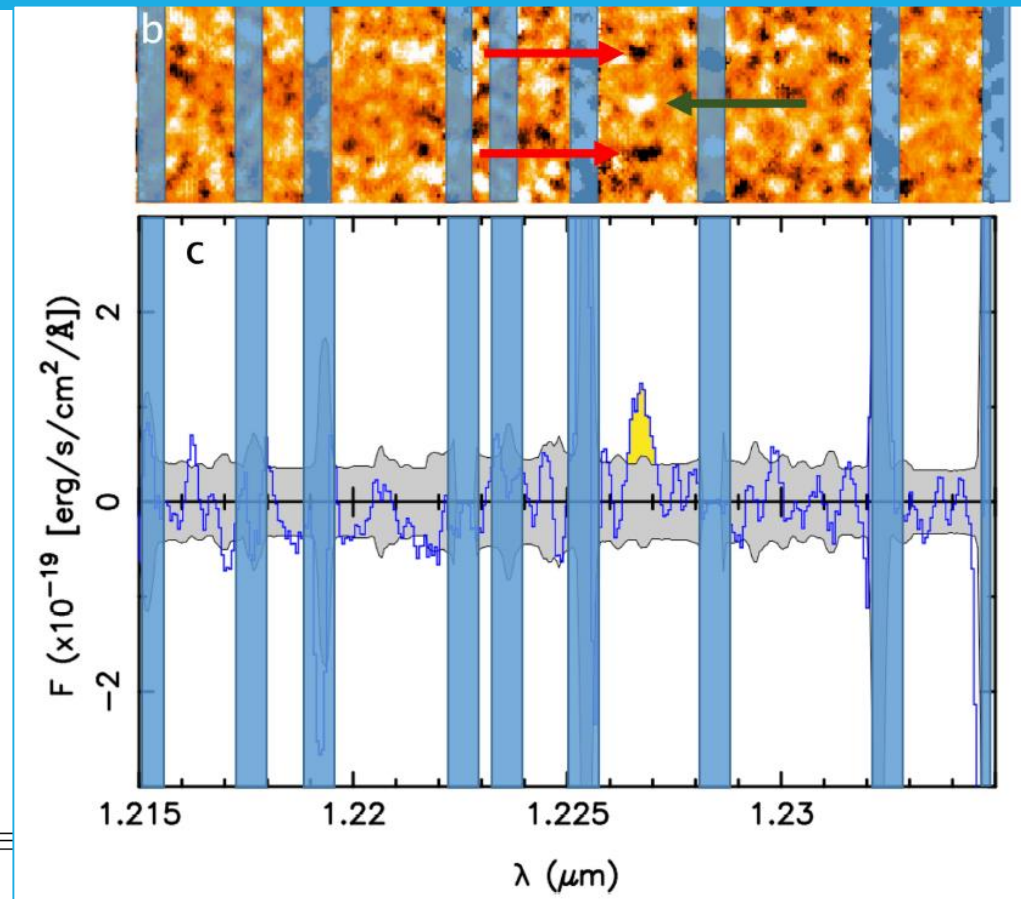
- [OIII] 88輝線の検出： $7.4\sigma$
- 輝線赤方偏移記録の更新！



# MACS1149-JD1

- VLT/X-Shooter
- Ly  $\alpha$  輝線の兆候
- 450 km/s blueshift
- UKとのコラボ

## LETTER



## The onset of star formation 250 million years after the Big Bang

Takuya Hashimoto<sup>1,2\*</sup>, Nicolas Laporte<sup>3,4</sup>, Ken Mawatari<sup>1</sup>, Richard S. Ellis<sup>3</sup>, Akio K. Inoue<sup>1</sup>, Erik Zackrisson<sup>5</sup>, Guido Roberts-Borsani<sup>3</sup>, Wei Zheng<sup>6</sup>, Yoichi Tamura<sup>7</sup>, Franz E. Bauer<sup>8,9,10</sup>, Thomas Fletcher<sup>3</sup>, Yuichi Harikane<sup>11,12</sup>, Bunyo Hatsukade<sup>13</sup>, Natsuki H. Hayatsu<sup>12,14</sup>, Yuichi Matsuda<sup>2,15</sup>, Hiroshi Matsuo<sup>2,15</sup>, Takashi Okamoto<sup>16</sup>, Masami Ouchi<sup>11,17</sup>, Roser Pelló<sup>4</sup>, Claes-Erik Rydberg<sup>18</sup>, Ikkoh Shimizu<sup>19</sup>, Yoshiaki Taniguchi<sup>20</sup>, Hideki Umehata<sup>13,20,21</sup> & Naoki Yoshida<sup>12,17</sup>

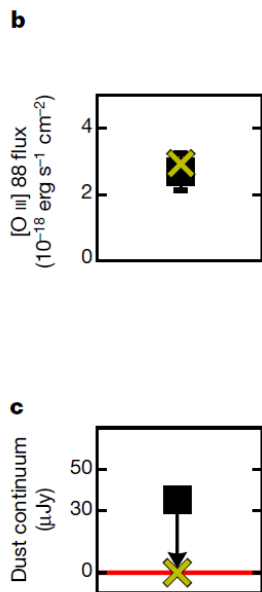
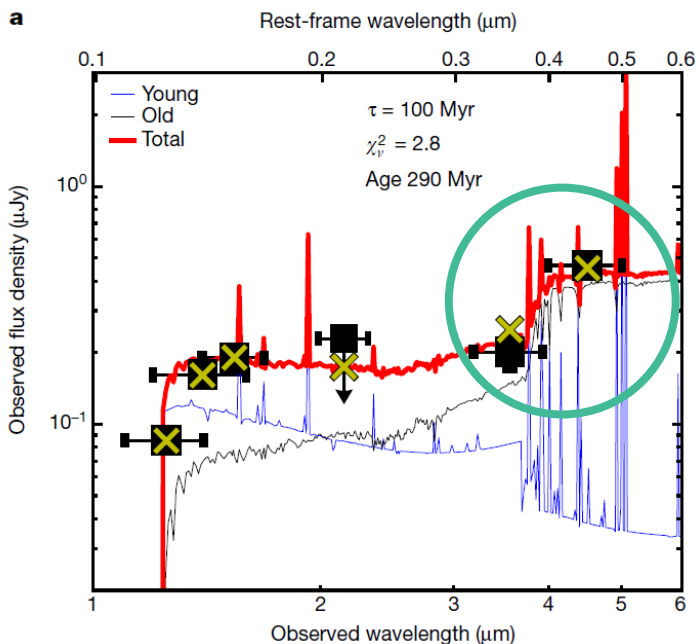
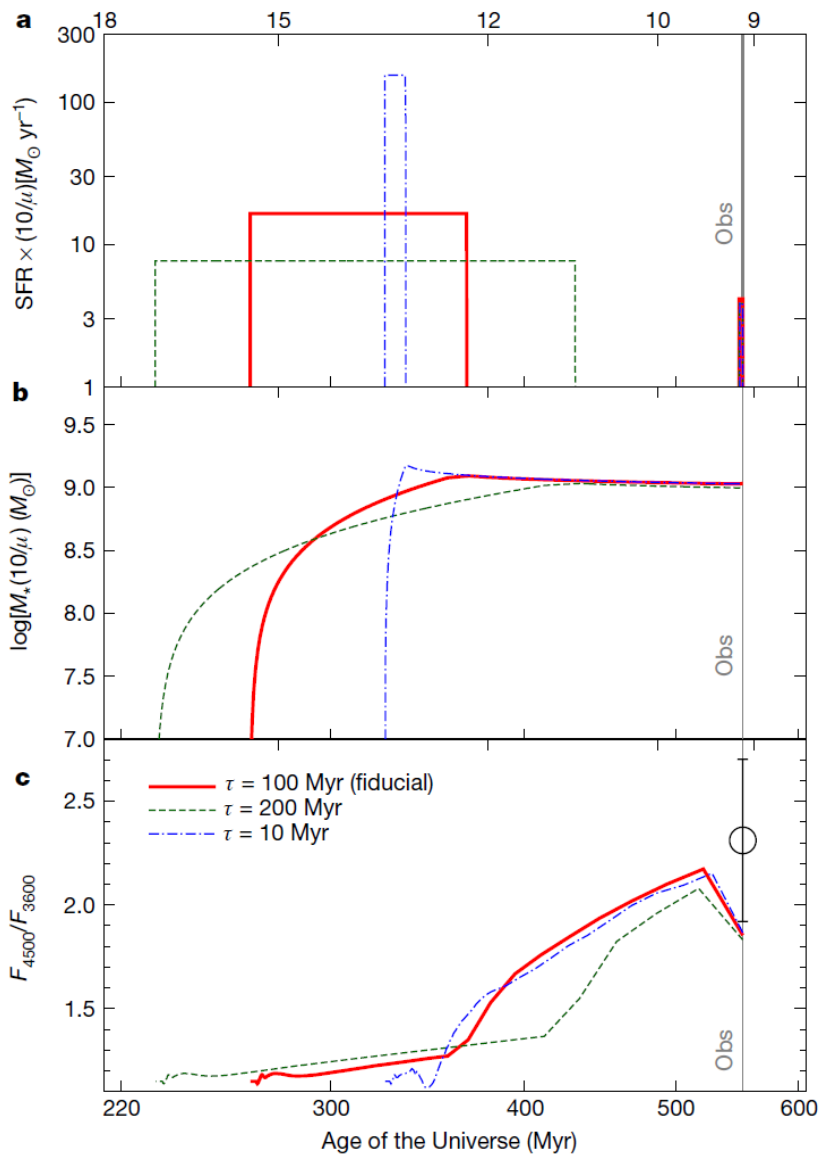


# MACS1149-JD1

- バルマーブレイク！
- 恒星の年齢は約3億年
  - 2段階の星形成か？
  - 最初の星形成は $z=15$ ！

Hashimoto+AKI+18, Nature

Redshift

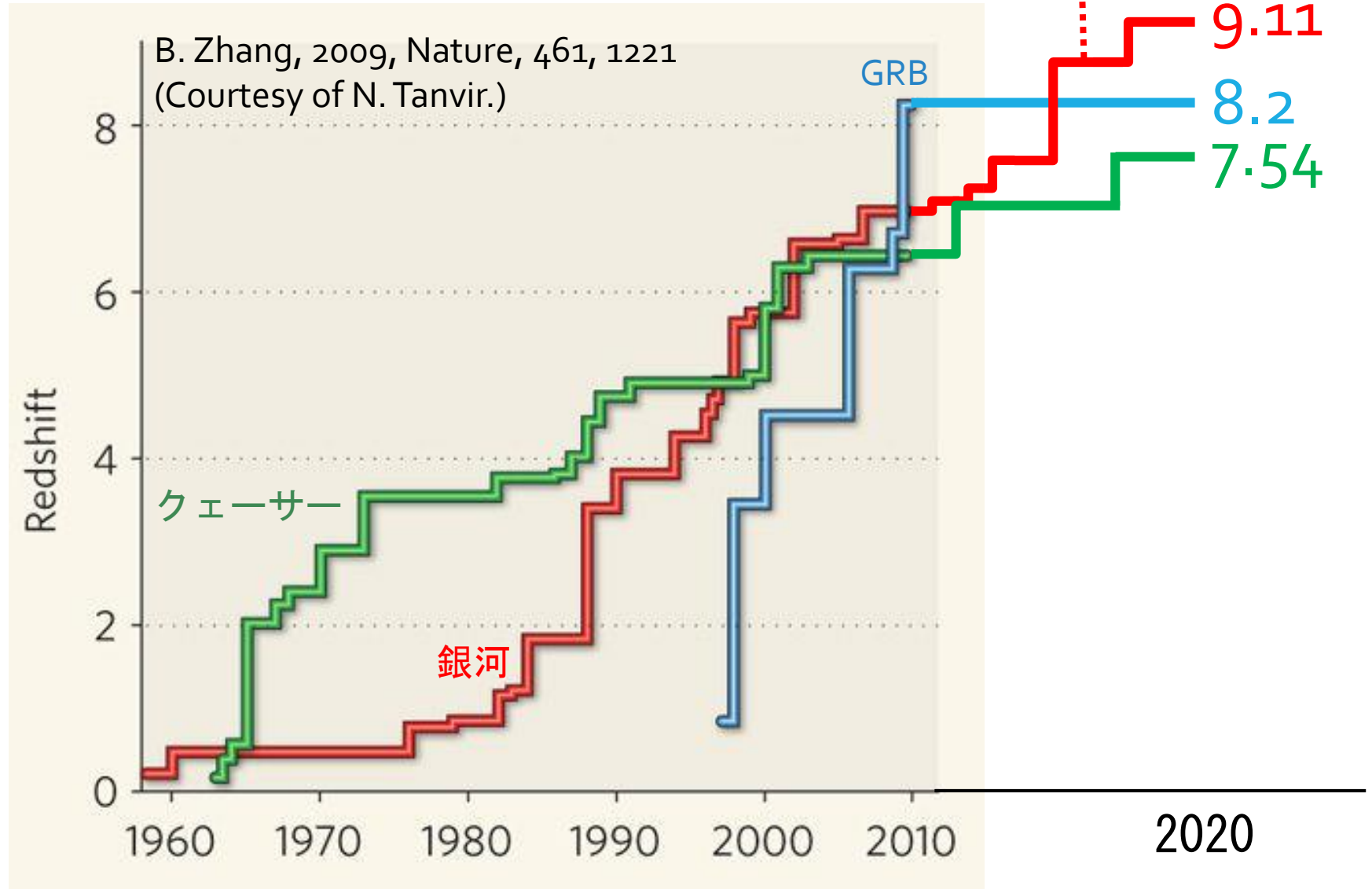


宇宙誕生から**0.0** 億年

# Emission line redshift ranking as of December 2019

	Object name	Line redshifts	Lines	References
1	MACS1149-JD1	9.110, 9.094	[OIII]88, LyA	Hashimoto+AKI+18
2	EGS8p7	8.683	LyA, NV1243	Zitrin+15, Mainali+18
3	A2744_YD4	8.382	LyA, [OIII]88	Laporte+17
4	MACS0416_Y1	8.312	[OIII]88	Tamura+AKI+19
5	EGS-zs8-1	7.730	LyA, CIII]1909	Stark+17
6	Z7_GSD_3811	7.664	LyA	Song+16
7	MACS1423-z7p64	7.640	LyA	Hoag+17
8	Z7_GND_16863	7.599	LyA	Jung+19
9	QSO J1342+0928	7.541	[CII]158, LyA+	Banados+18
10	Z8_GND_5296	7.503	LyA, CIII]1909	Finkelstein+13, Hutchison+19

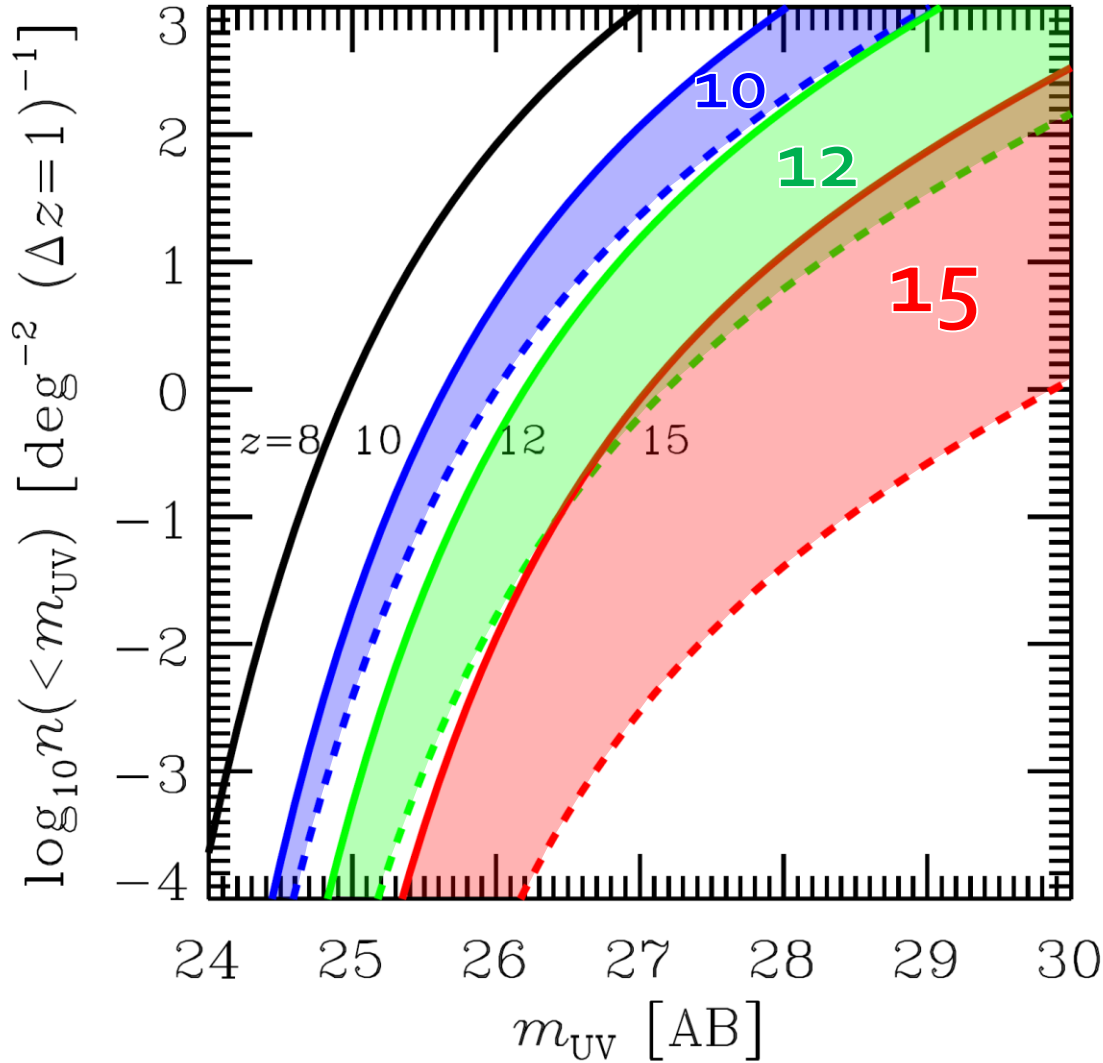
# 最高赤方偏移記録の変遷 (~令和元年)



# 「令和」の時代に

---

# 超遠方銀河の数密度予想

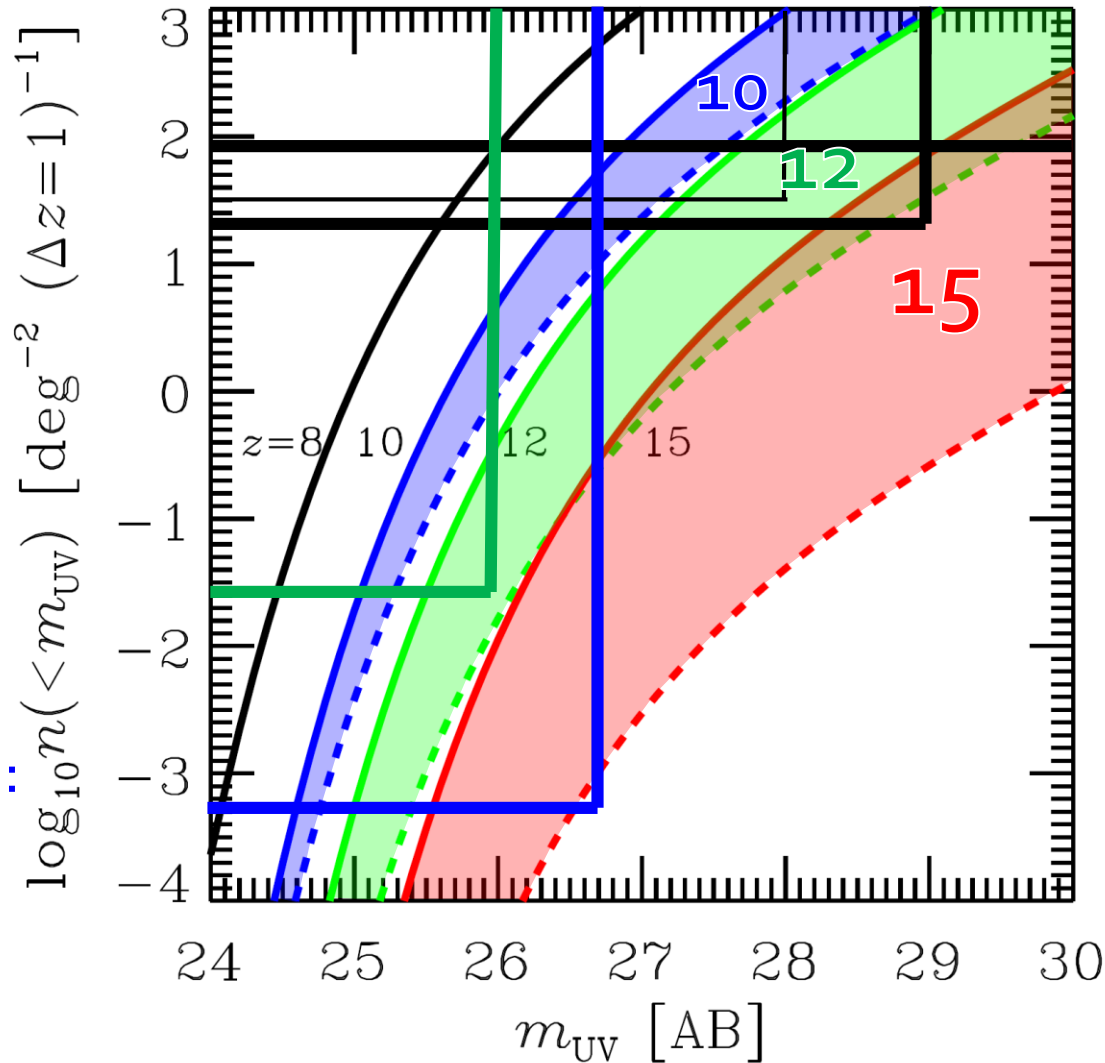


これまでのUV  
光度関数の外  
挿による経験  
的予想  
(井上2019)

# 「令和」時代の近赤外線撮像探査

Euclid Deep:  
40 deg<sup>2</sup>,  
H < 26 AB

WFIRST HLS:  
2,000 deg<sup>2</sup>,  
H < 26.7 AB



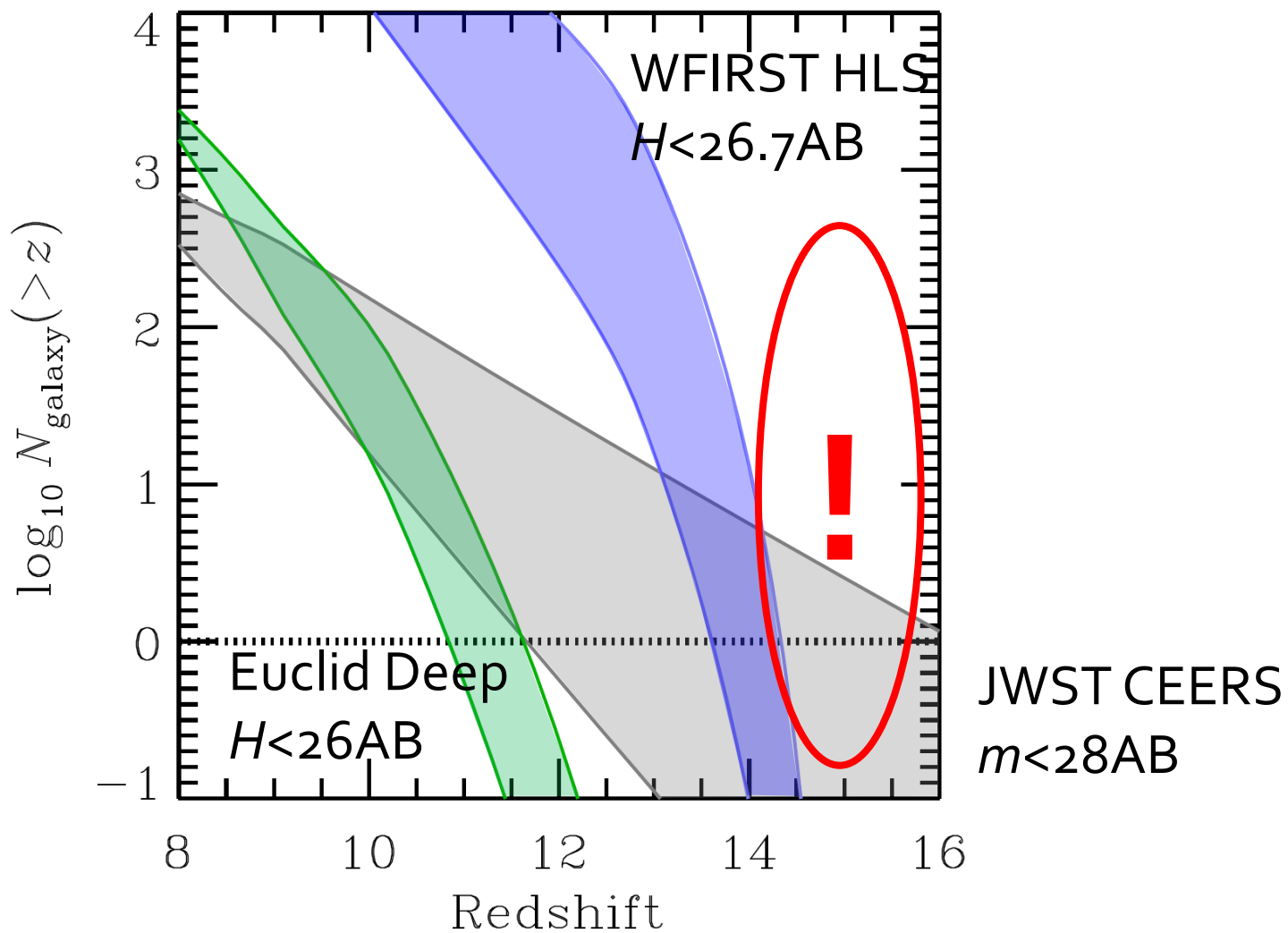
JWST

JADES-D:  
46 arcmin<sup>2</sup>,  
29.7 AB

JADES-M:  
190 arcmin<sup>2</sup>,  
28.7 AB

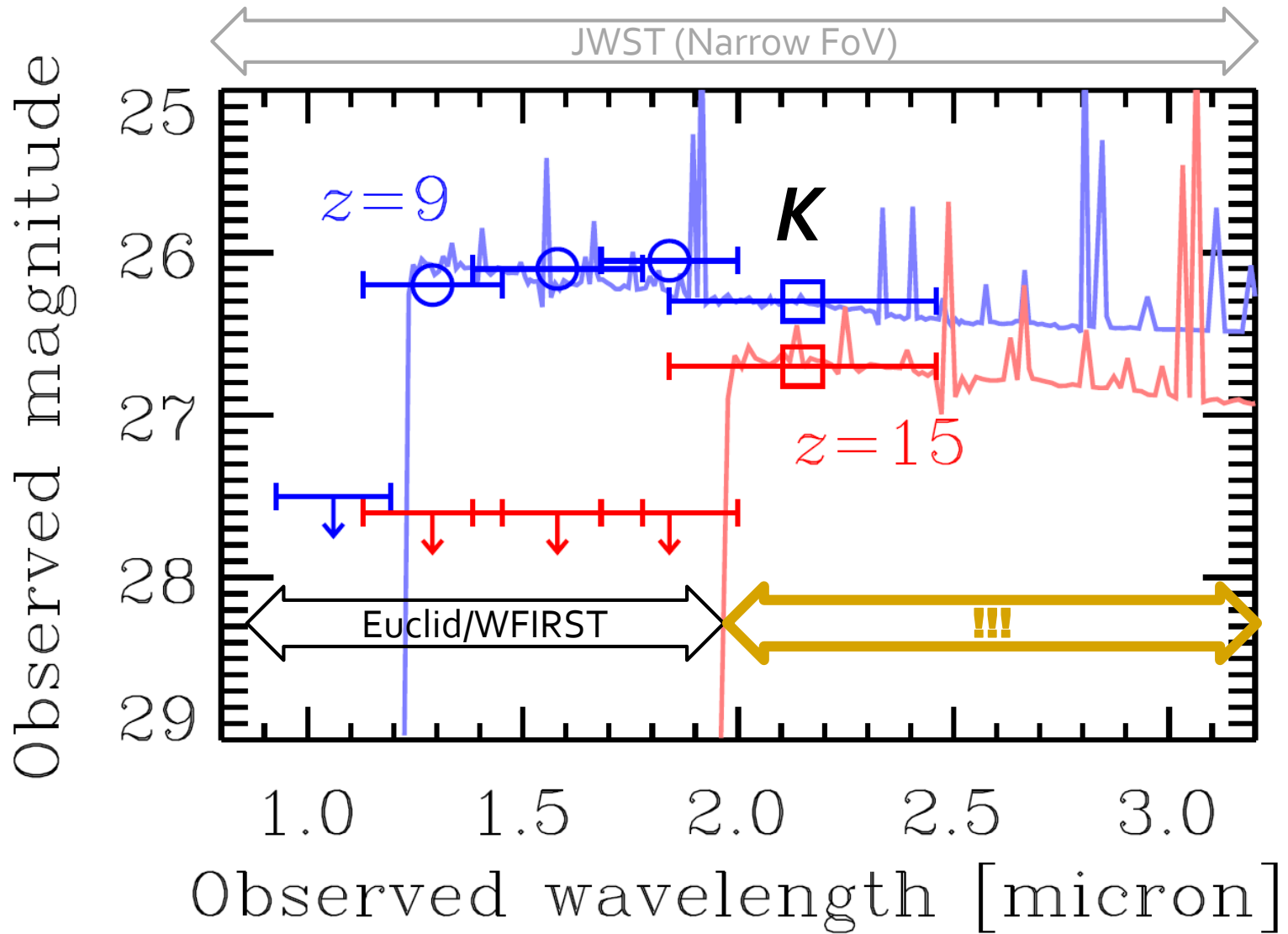
CEERS:  
100 arcmin<sup>2</sup>,  
28 AB

# 検出期待個数





# Hバンドドロップ問題



# Hバンドドロップ問題の解決法

## Wide-field Imaging Surveyor for High redshift

T. Yamada (2009)

### WISH Specifications Quick Summary

Primary Mirror Diameter 1.5m

Wavelength Coverage 1-5 $\mu$ m 波長 2 ミクロン以上

Image Quality achieving diffraction limit to the FoV edge  
at 1-5  $\mu$ m

Spatial Sampling 0.15"/18 $\mu$ m (optimized at 1.5 $\mu$ m)

Limiting Magnitude  $\sim 28$  AB/10-20h  $\sim 20$ nJy (3sigma)

Camera Field of View  $\sim 1000$ acmin<sup>2</sup>

Orbit SE-L2

Launcher Japanese HIIA (fit to the Dual Launch)

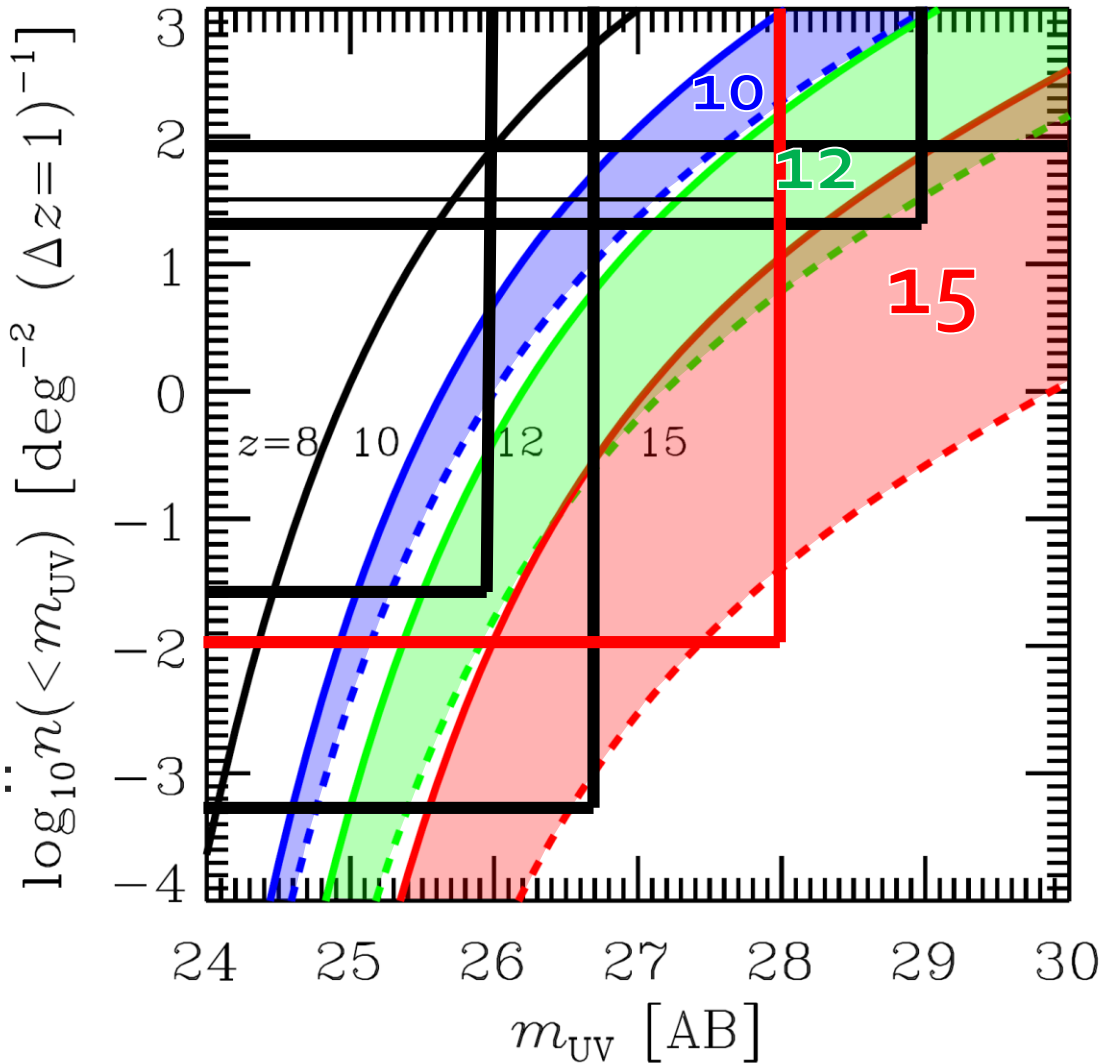
十分な広視野

# 「令和」時代の近赤外線撮像探査

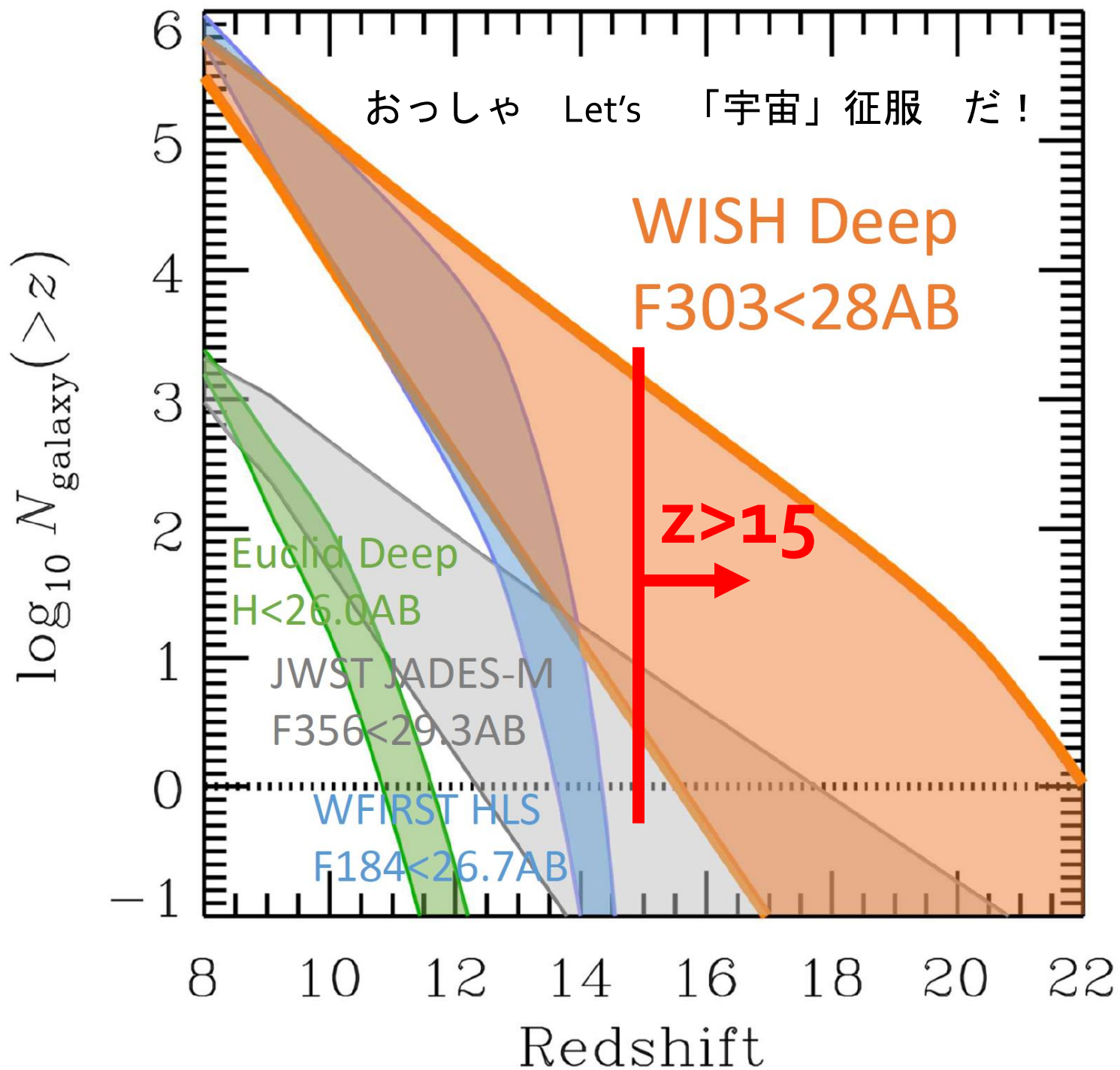
**WISH-like:**  
100 deg<sup>2</sup>,  
28AB

Euclid Deep:  
40 deg<sup>2</sup>,  
H<26AB

WFIRST HLS:  
2,000 deg<sup>2</sup>,  
H<26.7AB

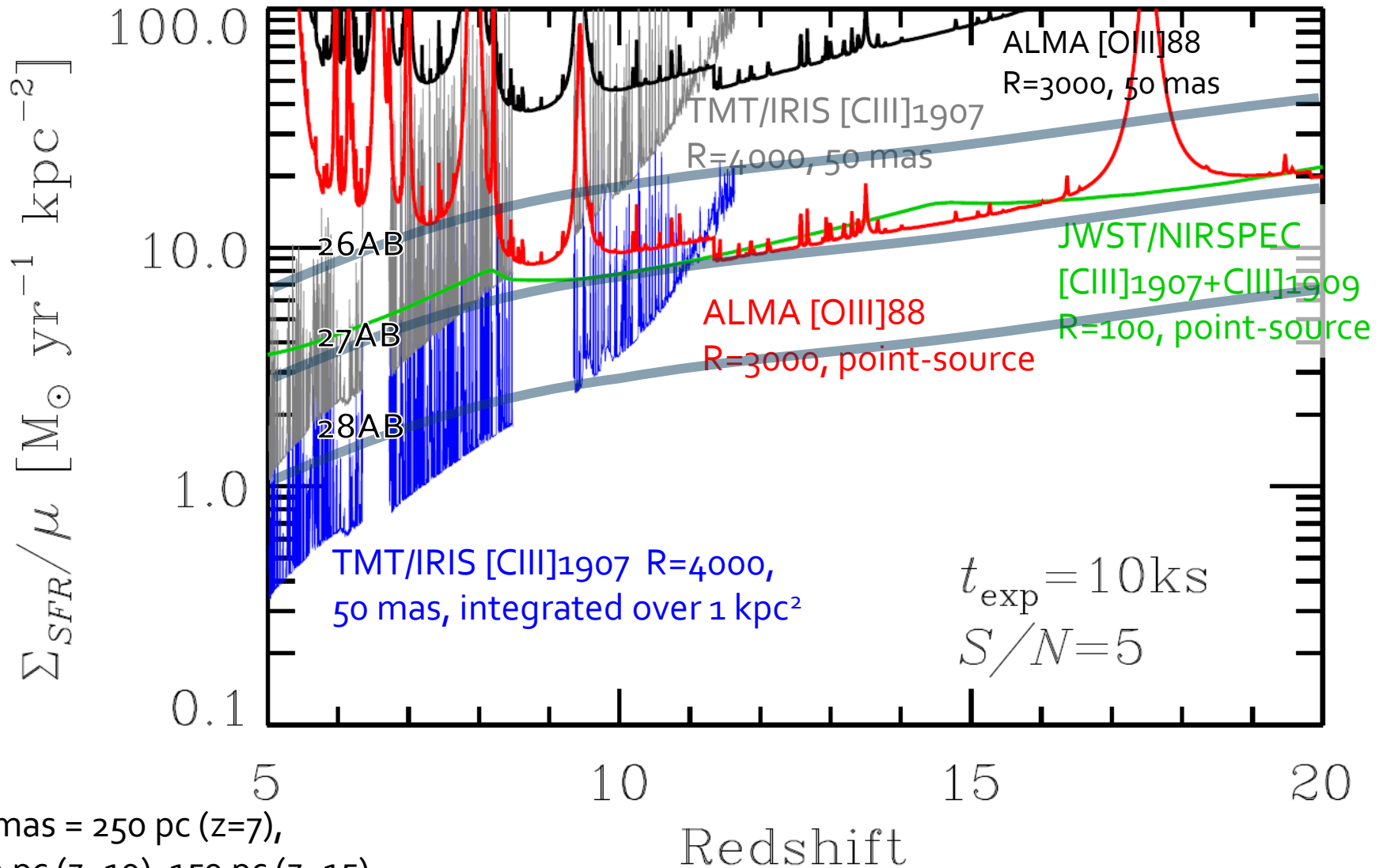


- JWST
- JADES-D:  
46  
arcmin<sup>2</sup>,  
29.7AB
- JADES-M:  
190  
arcmin<sup>2</sup>,  
28.7AB
- CEERS:  
100  
arcmin<sup>2</sup>,  
28AB



# ALMA, JWST, TMTの輝線感度

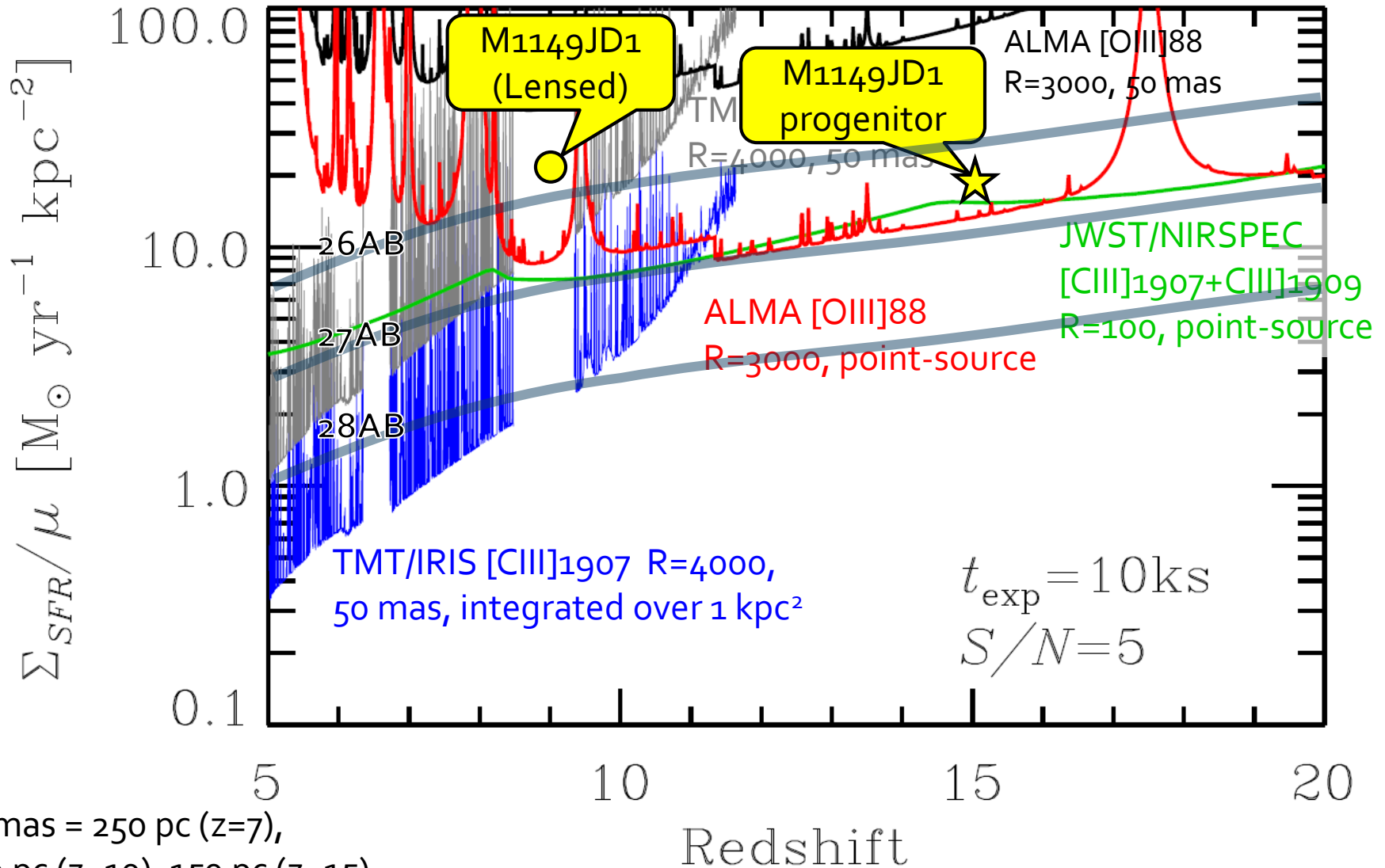
Line FWHM = 100 km/s



50 mas = 250 pc (z=7),  
 200 pc (z=10), 150 pc (z=15)

# ALMA, JWST, TMTの輝線感度

Line FWHM = 100 km/s

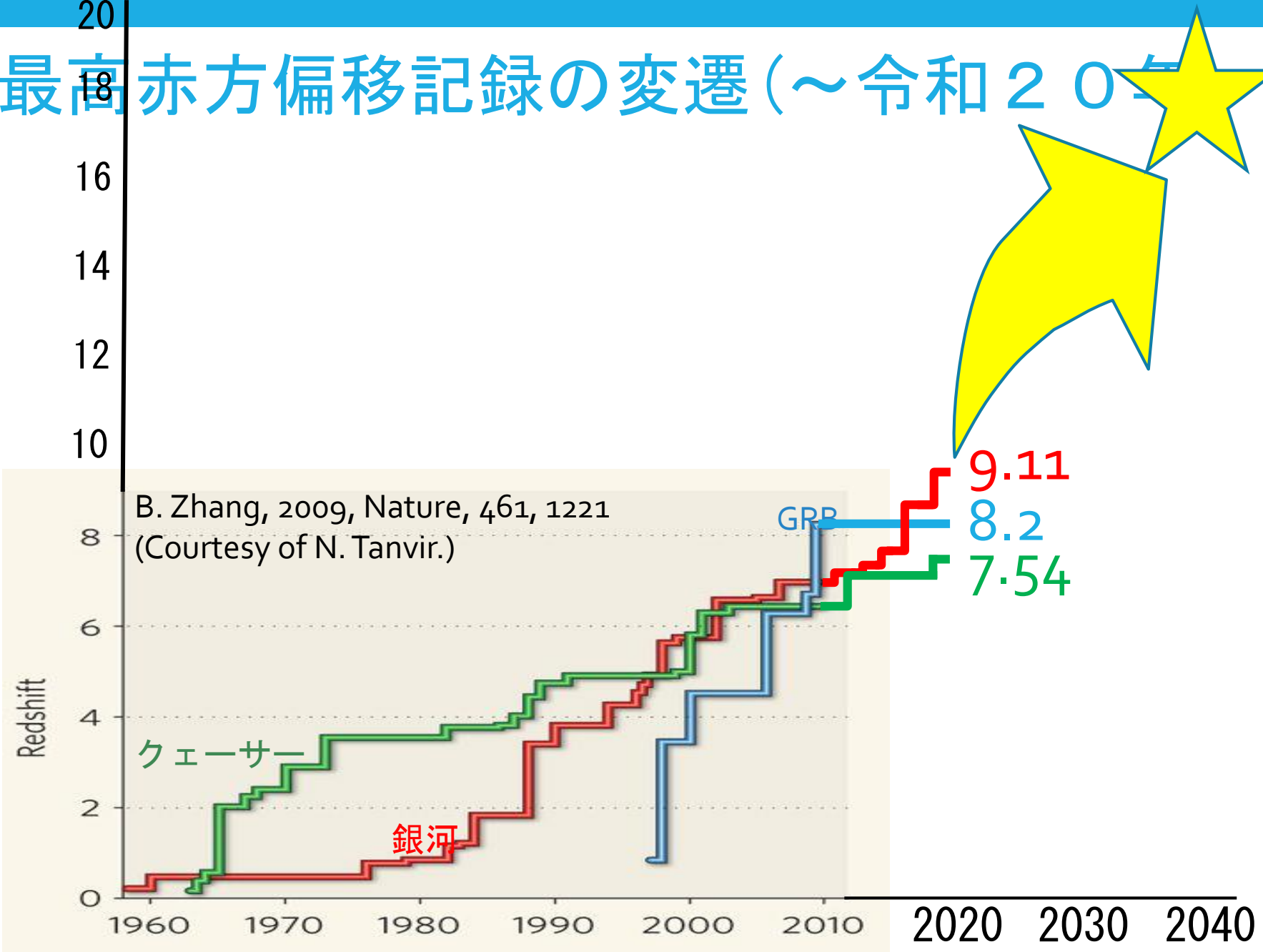


50 mas = 250 pc (z=7),  
200 pc (z=10), 150 pc (z=15)

2019/12/25



# 最高赤方偏移記録の変遷 (~令和20年)



# まとめに代えて

WISHのような宇宙望遠鏡ミッション実現のため、「初代銀河探査機Research Group」を宇宙研に申請しました。

2030年代の打ち上げを目指しますので、理論懇からもご支援どうぞよろしくお願いいたします。

それでは良い年末年始をお過ごしください。