

JWST による遠方銀河研究

播金優一

東京大学宇宙線研究所

※スライドはスクショ・拡散自由です (後日夏学HPにもアップロードされます)。

自己紹介



Business Insider Japan 三ツ村さん撮影

- はりかね 播金 優一 1991年生まれ (30歳)
- 2014年3月: 東大物理学科卒
- 2019年3月: 東大物理学専攻・博士
 - M1の夏学は間違えて宇宙論セッションで発表しました
 - 2015年の銀河・銀河団座長でした (が国際会議のため出られず)
 - 銀河・銀河団セッションできちんと発表するのは初めてです
- 2019-2020年: 学振PD (国立天文台)、Honorary Research Associate (University College London)
- 2020年6月-現在: 東大宇宙線研 (柏)・助教
- 趣味: 旅行(森・山・海・島)・子供(1歳)と遊ぶこと

自己紹介 (研究)

- 遠方銀河 (特に $z>4$) の観測研究をしています。
 - 最初の論文 (M1の6月投稿) は $z=1.2$ 銀河の分光
 - 最近の論文 (この8月に投稿) は $z=9-17$ 銀河候補の発見
- 波長 (可視/赤外/電波) ・ 手法 (撮像/分光) は問いません。
 - 例) すばる望遠鏡, ハッブル宇宙望遠鏡, アルマ望遠鏡、Keck望遠鏡, **ジェイムズ・ウェッブ宇宙望遠鏡 (JWST)**

すばる



(NAOJ)

アルマ



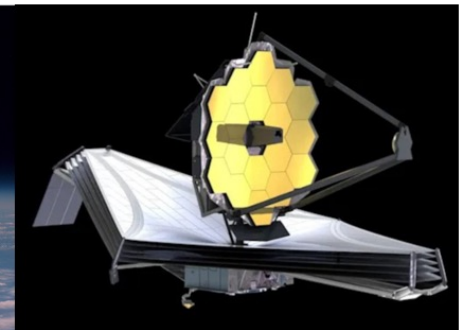
(ALMA)

ハッブル



(NASA)

ジェイムズ・ウェッブ



(NASA)

ジェイムズ・ウェッブ宇宙望遠鏡 (JWST)

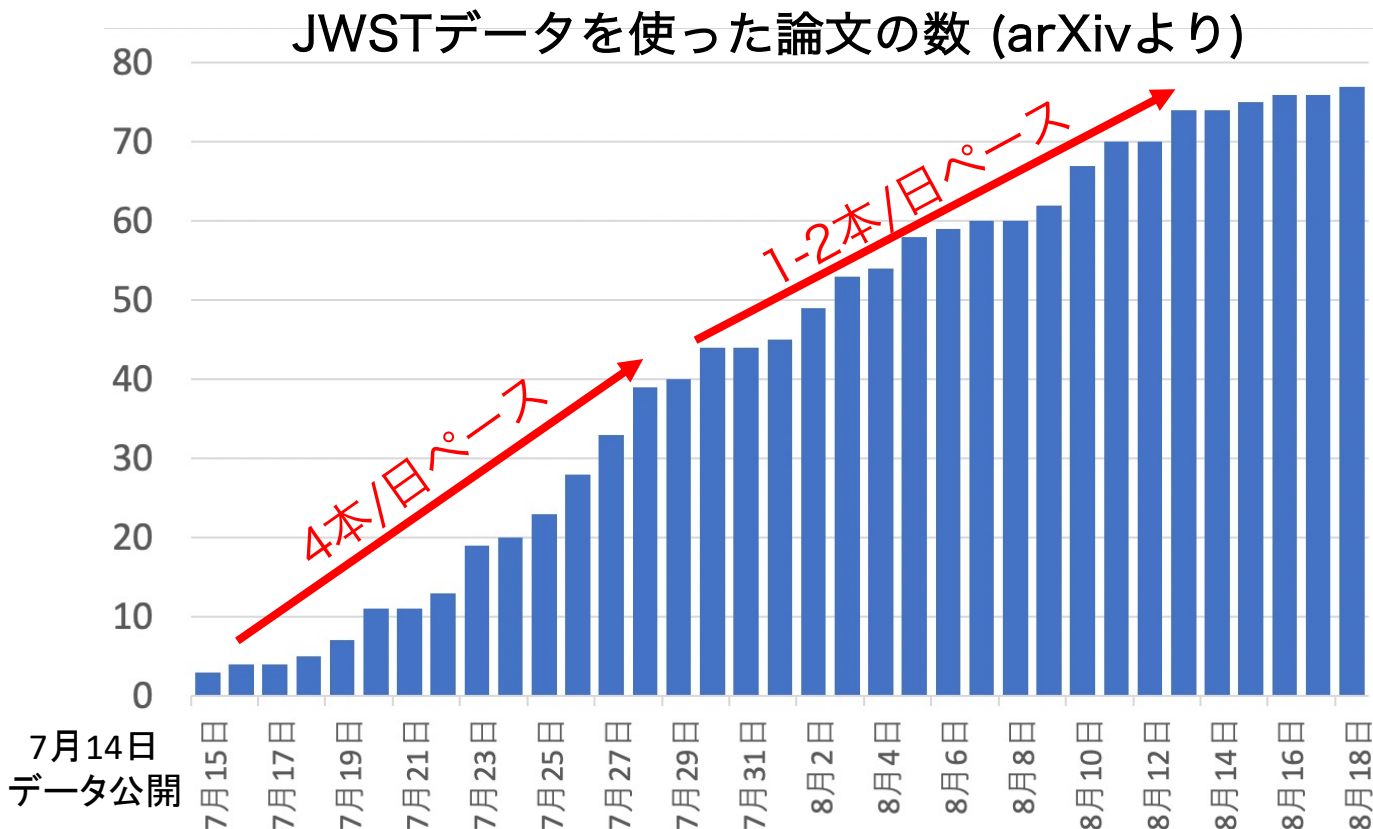
- 1兆円規模の巨大望遠鏡プロジェクト
 - すばる: 400億円、ハッブル: 2000億円
- 去年12/25打ち上げ、今年7/12に最初の画像公開
 - 当初は2007年打ち上げ予定



7/12の米ホワイトハウスでの最初の画像公開 (NASA)

JWST論文ラッシュ

- 80本近い論文がarXivに投稿された
 - 世界中の研究者がJWSTデータに夢中
 - とある研究者「世界が変わってしまった」



本日の内容

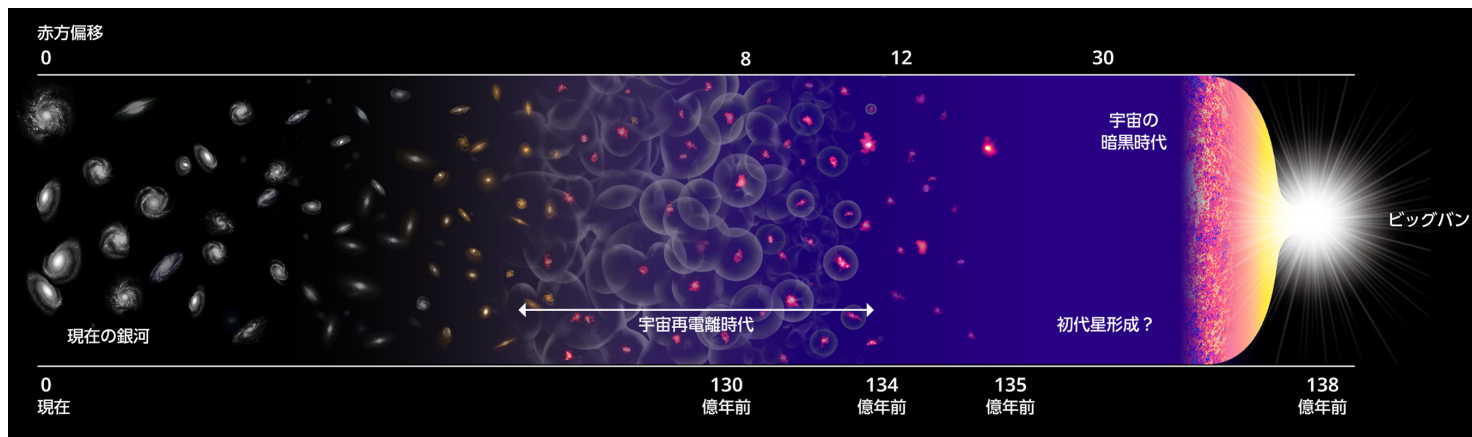
- 遠方銀河研究の目標
 - JWST登場までに分かっていたこと
- JWSTの概要と観測プログラム
- JWSTの最新成果

遠方銀河研究の目標

JWST登場までに分かっていたこと

遠方銀河の研究の目標

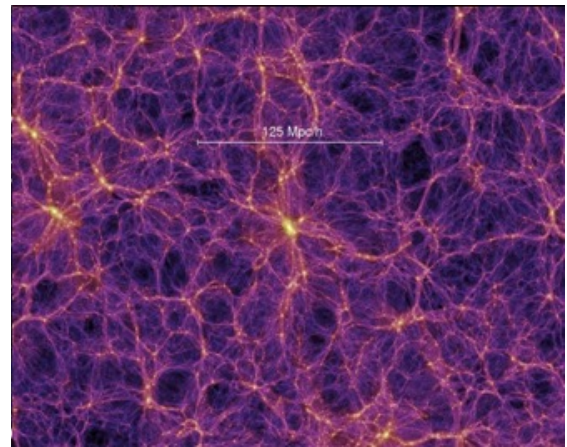
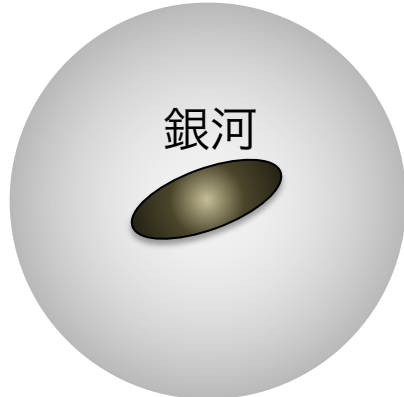
- 銀河がどう形成し、進化したのかを理解したい
- 人によって目標は様々
 - 最初の銀河や星はいつ生まれたのか？
 - どう進化したのか？(e.g., 星質量、金属量、サイズ)
 - 宇宙再電離との関係は？
 - 超巨大ブラックホールと銀河の共進化
 - 環境効果 (e.g., 銀河団、原始銀河団)



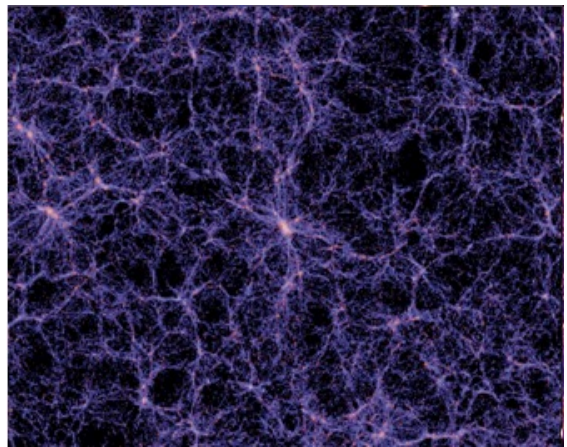
階層的構造形成

$$\boxed{\text{銀河}} = \boxed{\text{構造形成 (ダークマター)}} \times \boxed{\text{銀河形成 (バリオン)}}$$

ダークマターハロー



←→ 200 Mpc Springel+05



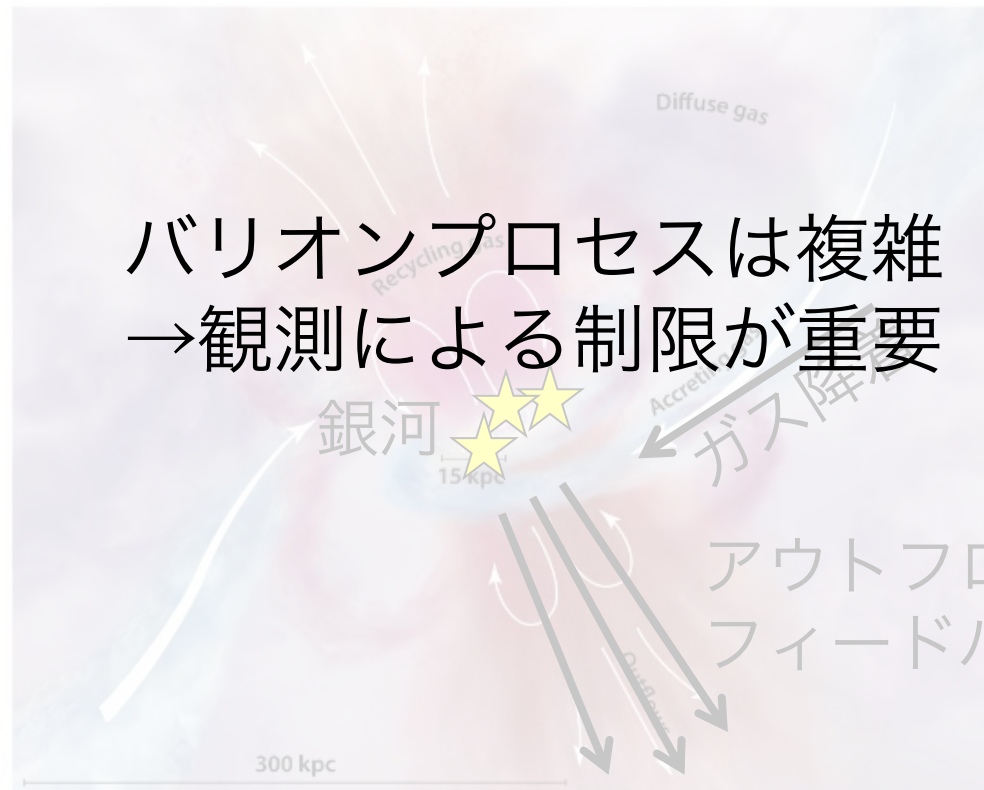
←→ 200 Mpc Springel+05

N体シミュレーション
(e.g., 大滝さん発表)

ダークマターハローの質量が重要

銀河形成 (バリオン) プロセス

質量 (ガス) 降着 → ガス冷却 → 星形成
→ 金属汚染 → フィードバック

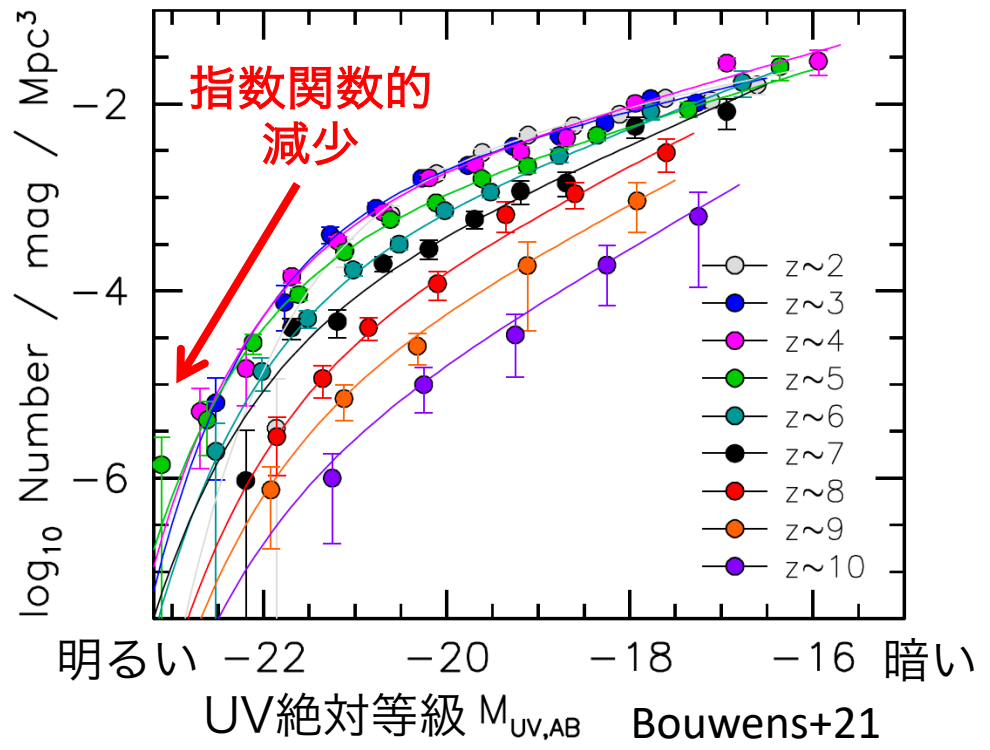
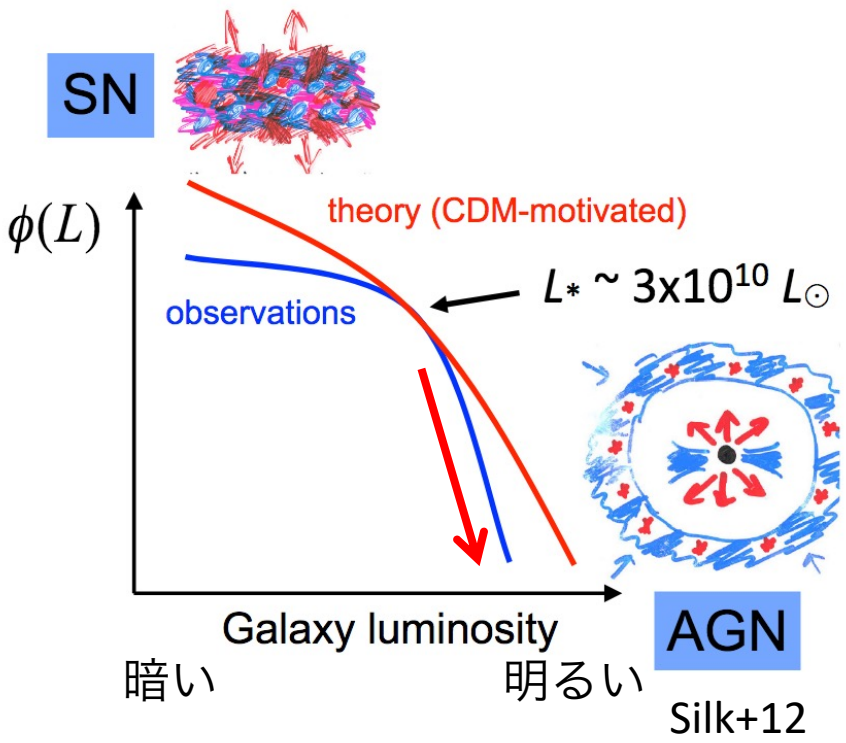


バリオンプロセスは複雑
→観測による制限が重要

アウトフロー
フィードバック

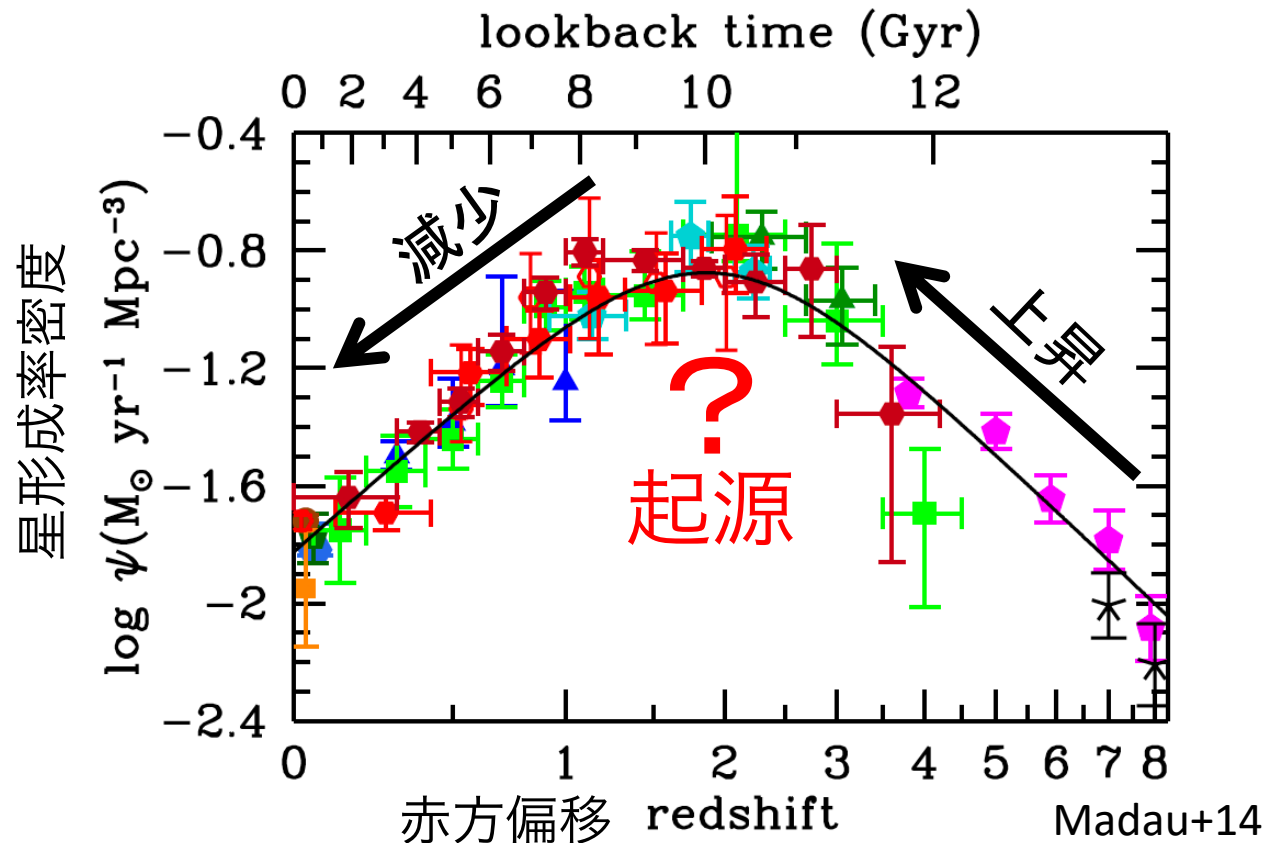
光度関数

- 銀河の明るさごとの個数密度
- シェヒター関数: $\phi(L)dL = \phi^* \left(\frac{L}{L^*}\right)^\alpha \exp\left(-\frac{L}{L^*}\right) d\left(\frac{L}{L^*}\right)$



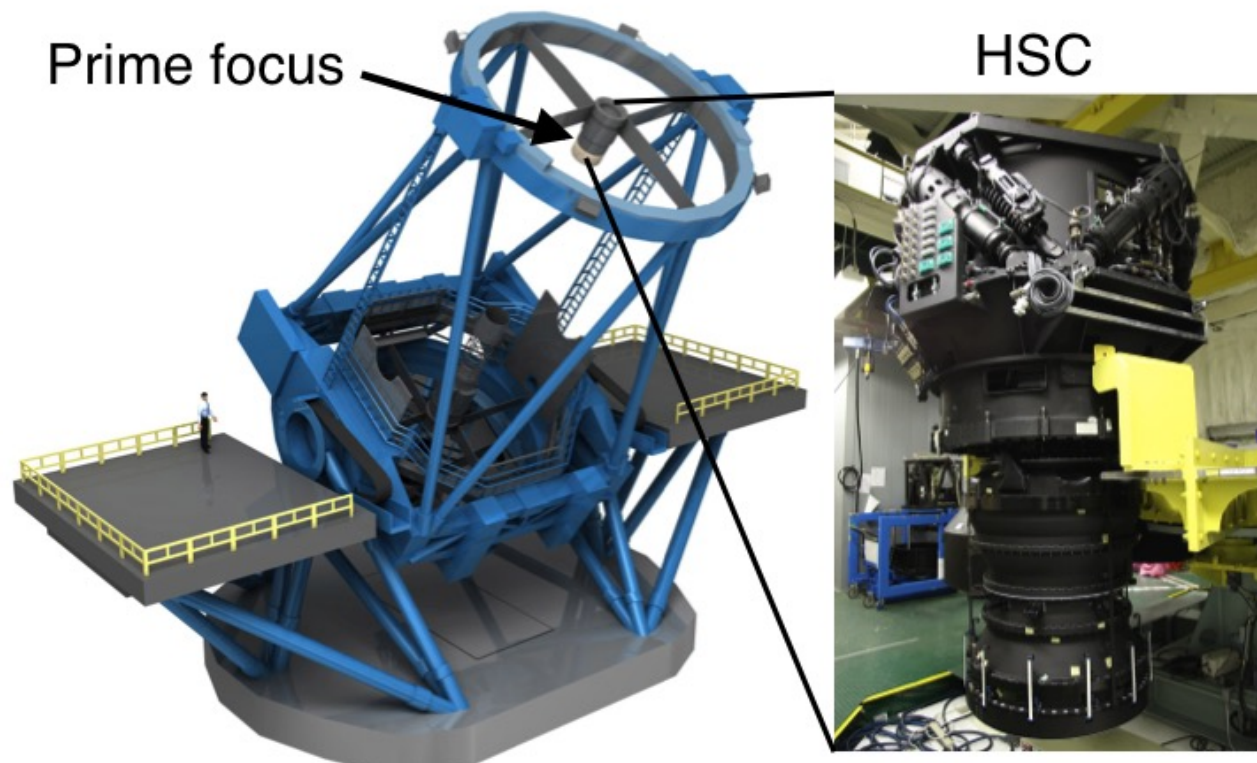
宇宙の星形成史

- UV光度→星形成率 $SFR(M_{\odot} \text{ yr}^{-1}) = \mathcal{K}_{UV} L_{UV}(\text{erg s}^{-1} \text{ Hz}^{-1})$
 $\mathcal{K}_{UV} = 1.15 \times 10^{-28} M_{\odot} \text{ yr}^{-1} / (\text{erg s}^{-1} \text{ Hz}^{-1})$



すばる望遠鏡 HSC

- Hyper-Suprime Cam (HSC)
 - 視野: 1.75平方度、波長範囲: 4000-11000Å
 - 2014-2022: HSC SSP探査 (PI: 宮崎, 300晩, 1000平方度)

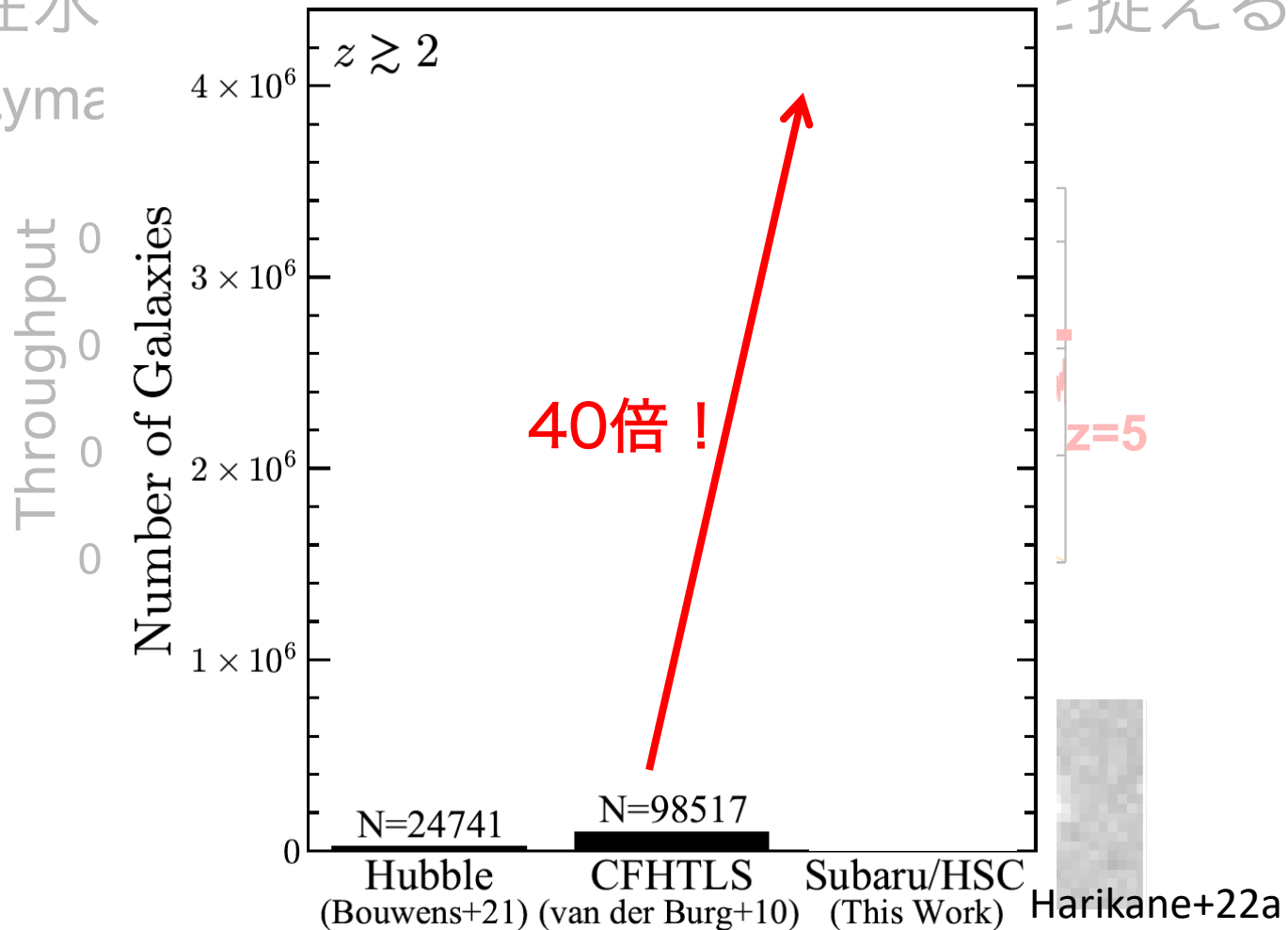


遠方銀河選択 (Lyman Break法)

世界最大の遠方銀河サンプル

- 中性水素 H I

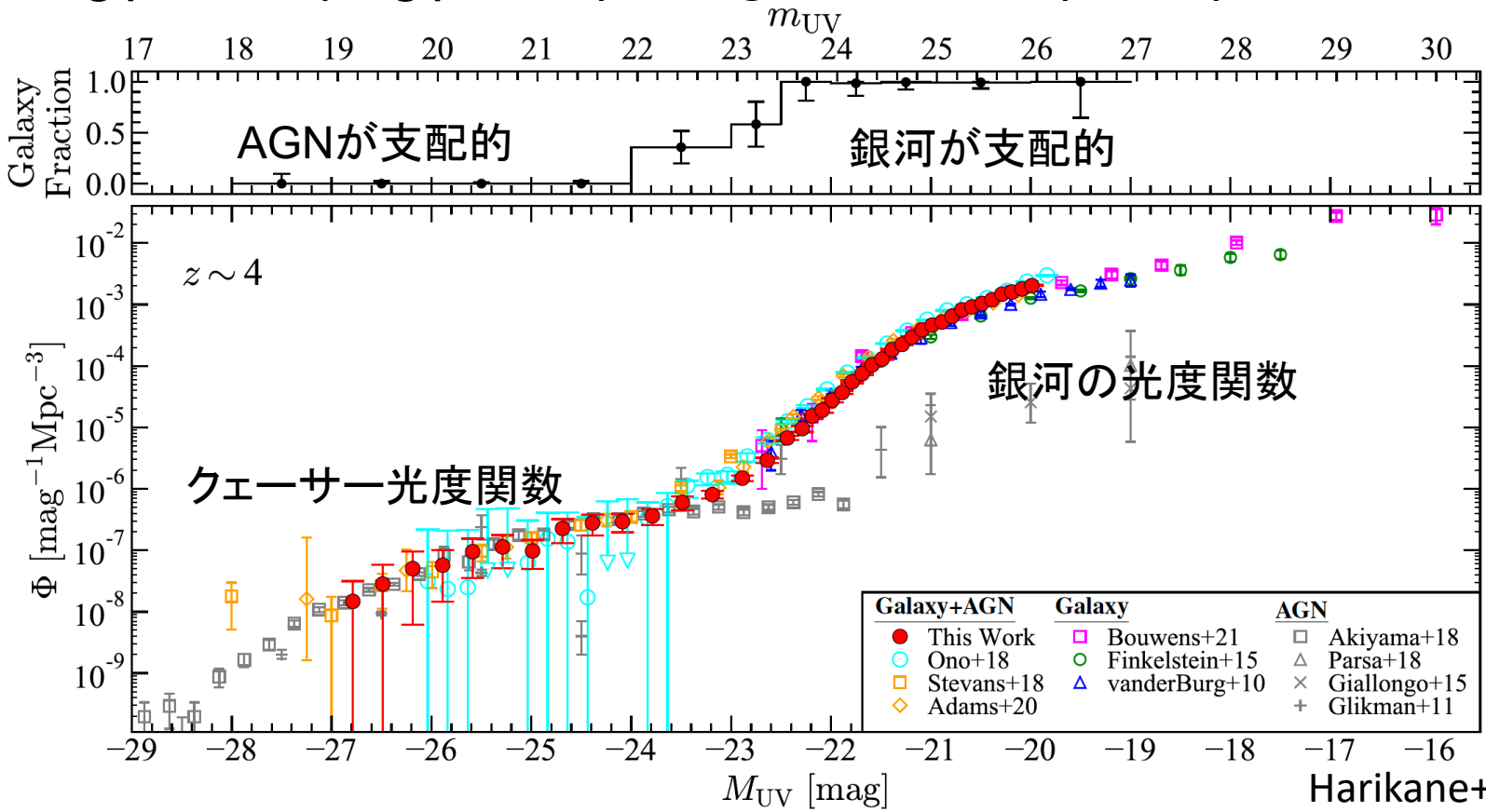
– Lyman



カタログは公開済み: <http://cos.icrr.u-tokyo.ac.jp/rush.html>

UV光度関数

- 広い明るさ範囲をカバー (0.002-2000 L*)
- $M_{UV} < -24$ ($M_{UV} > -22$) mag で AGN (銀河) が支配的



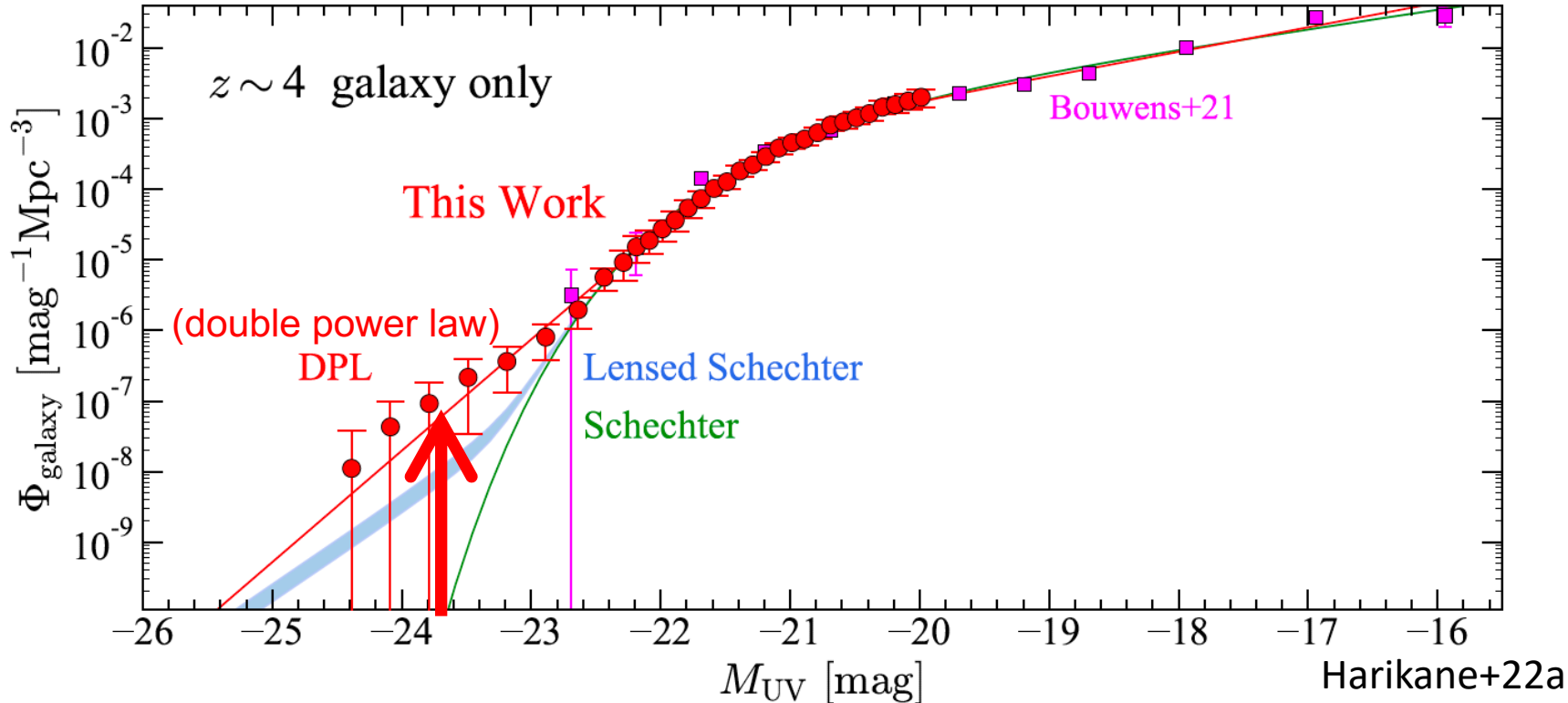
Harikane+22a

see also Ono+18, Stevans+18, Adams+20,+22, Finkelstein+22

銀河の光度関数

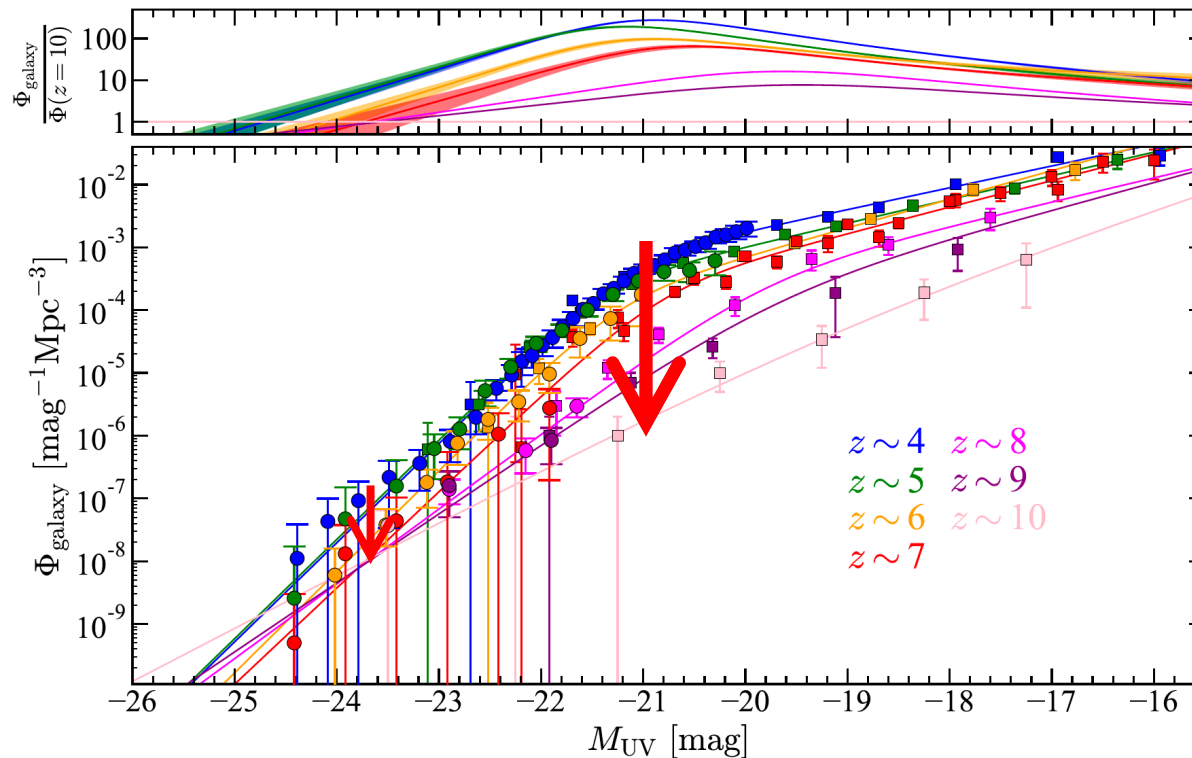
$$\Phi_{\text{galaxy}}(M_{\text{UV}}) = \underbrace{f_{\text{galaxy}}(M_{\text{UV}})}_{\text{分光より計算}} \underbrace{\Phi(M_{\text{UV}})}_{\text{銀河+AGN}}$$

- 明るい側でシェヒター関数から超過 (z~4-7)
 - フィードバックが非効率？ダストが少ない？



赤方偏移進化

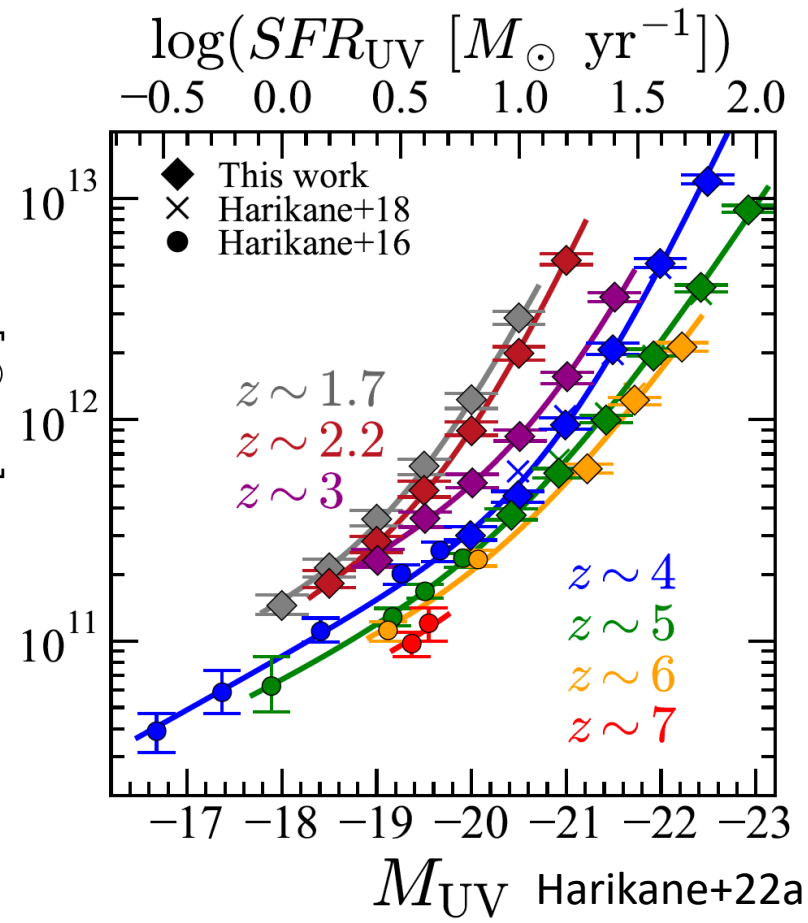
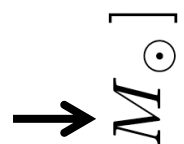
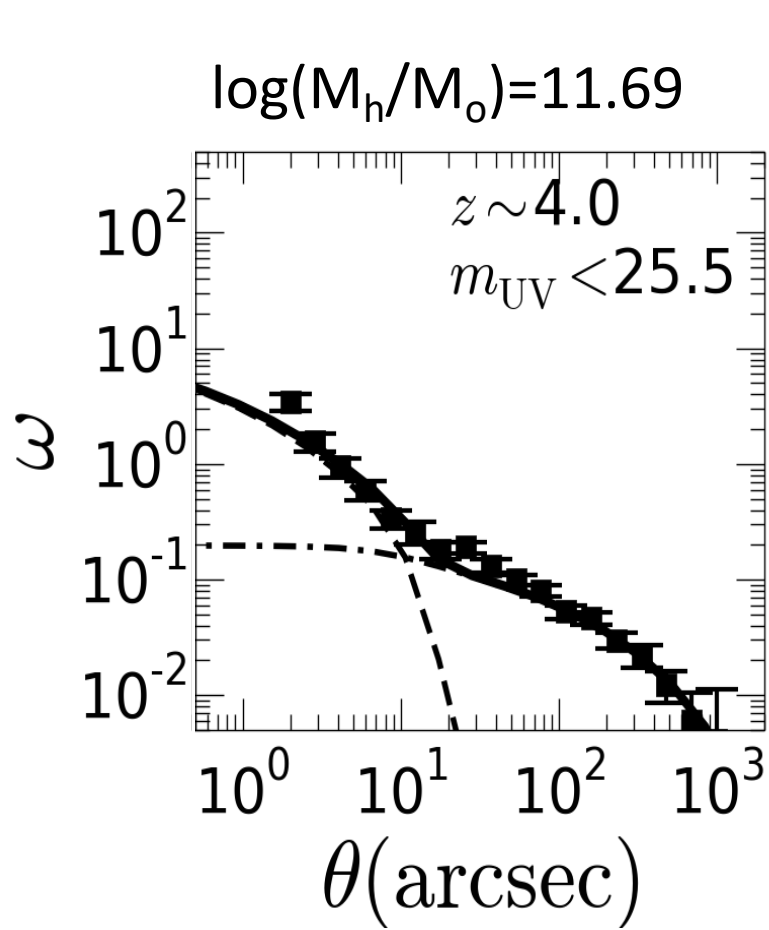
- $M_{UV} \sim -21 \text{ mag} (L^*)$: $z \sim 4 \rightarrow 10$ で100倍以上減少
- Bright end: ほぼ一定
 - 明るい銀河の星形成効率が低い？



Harikane+22a, see also Bowler+20, Finkelstein+22

ダークマターハロー質量

- 角度相関関数を構造形成モデルの予言と比較

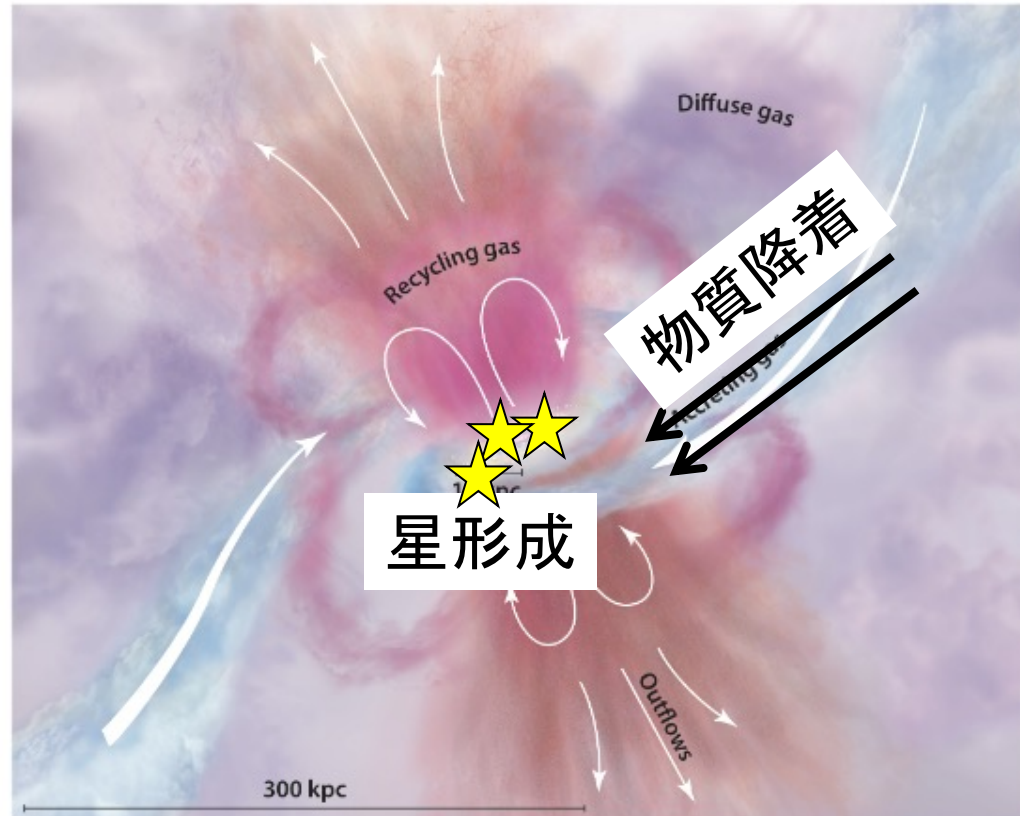


星形成効率 (星形成率/物質降着率)

- SFR: UV光度 w/ ダスト補正
- $\dot{M}_h: \dot{M}_h - M_h$ 関係 (Behroozi+15)

星形成率/物質降着率

SFR / \dot{M}_h



$\text{SFR} / (f_b \dot{M}_h)$

1
01

星形成率密度進化の起源

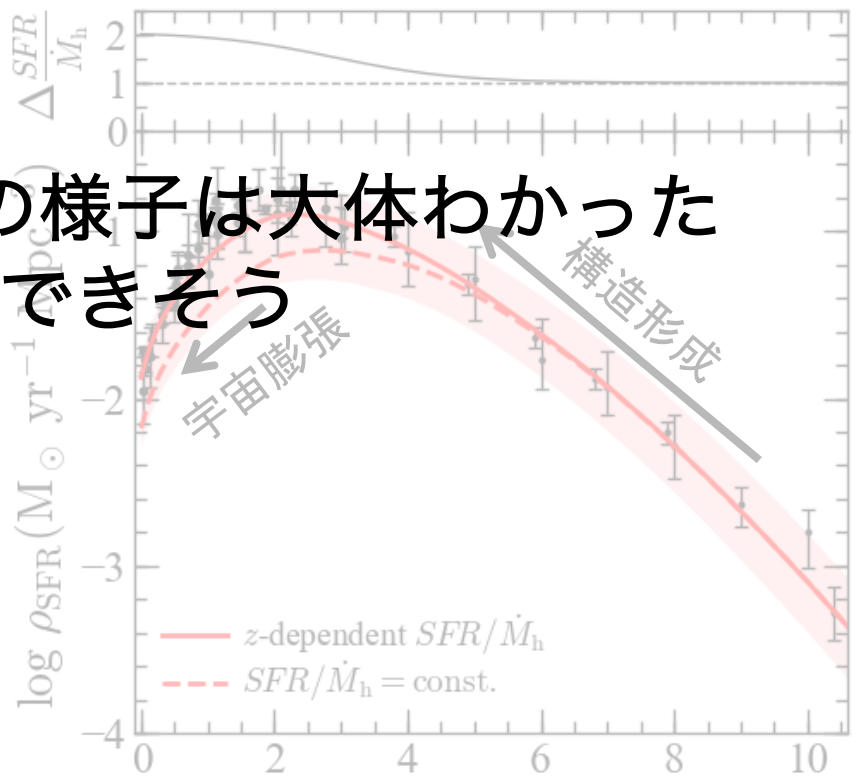
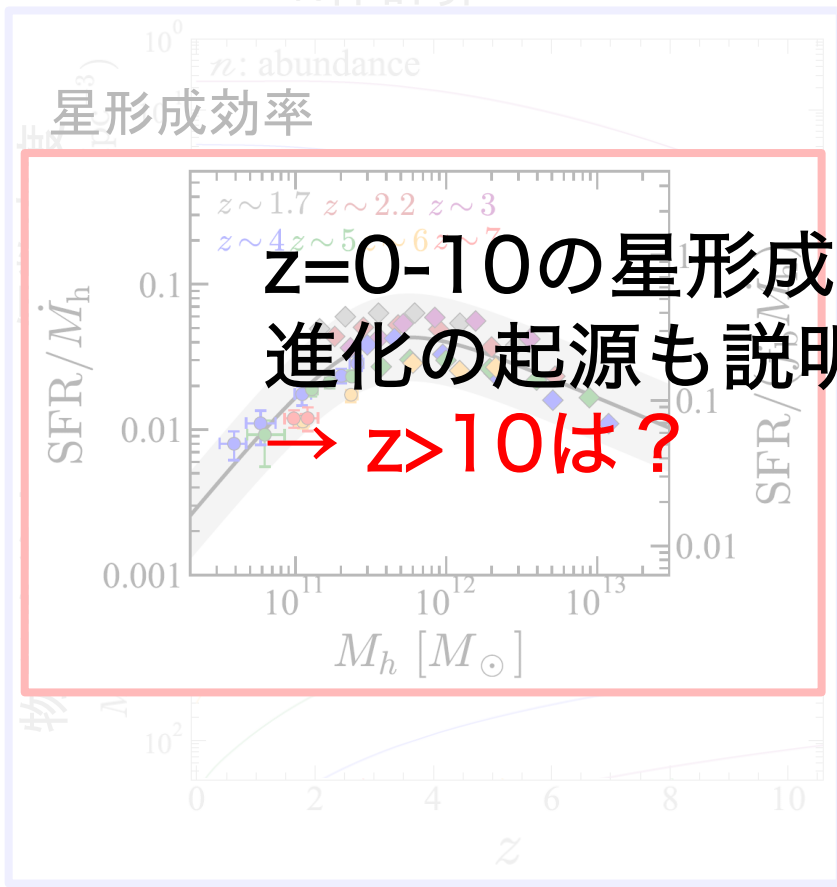
$$\rho_{\text{SFR}} = \int dM_h \frac{dn}{dM_h} \text{SFR} = \int dM_h \frac{dn}{dM_h} \dot{M}_h(M_h, z) \frac{\text{SFR}}{\dot{M}_h}$$

N体計算

個数密度

降着率

SF効率

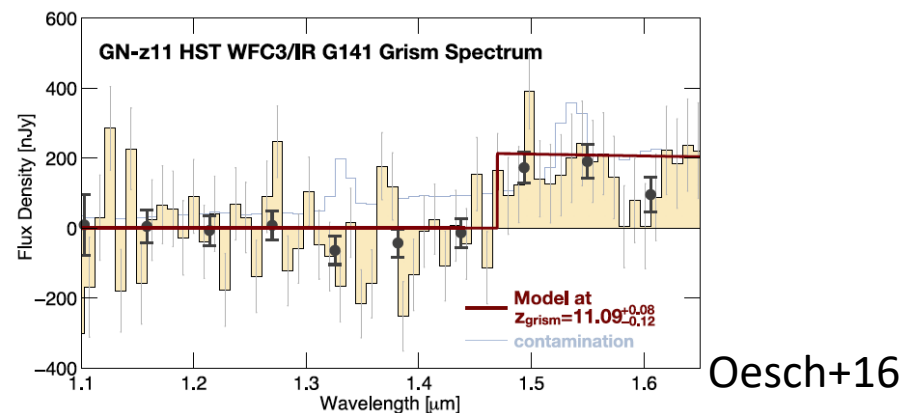
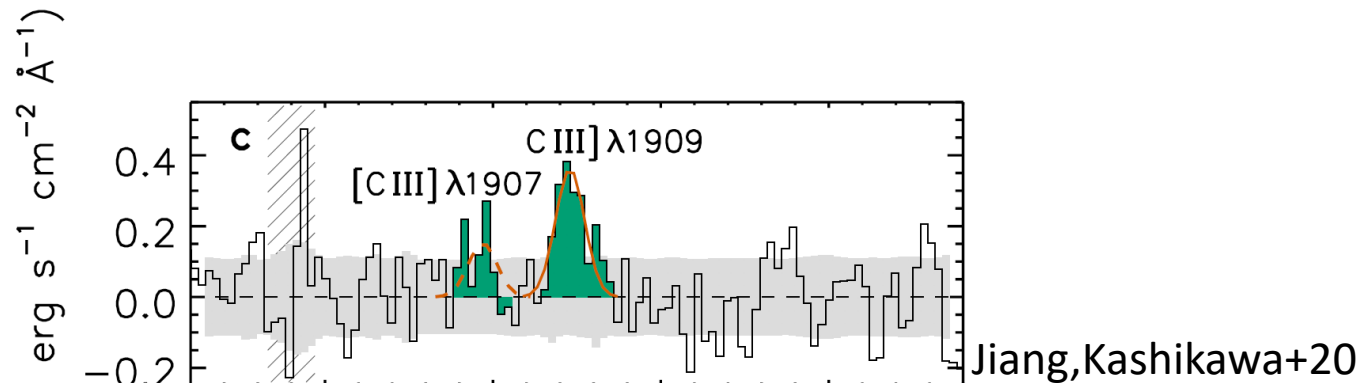


最遠方銀河記録 (分光)



NASA

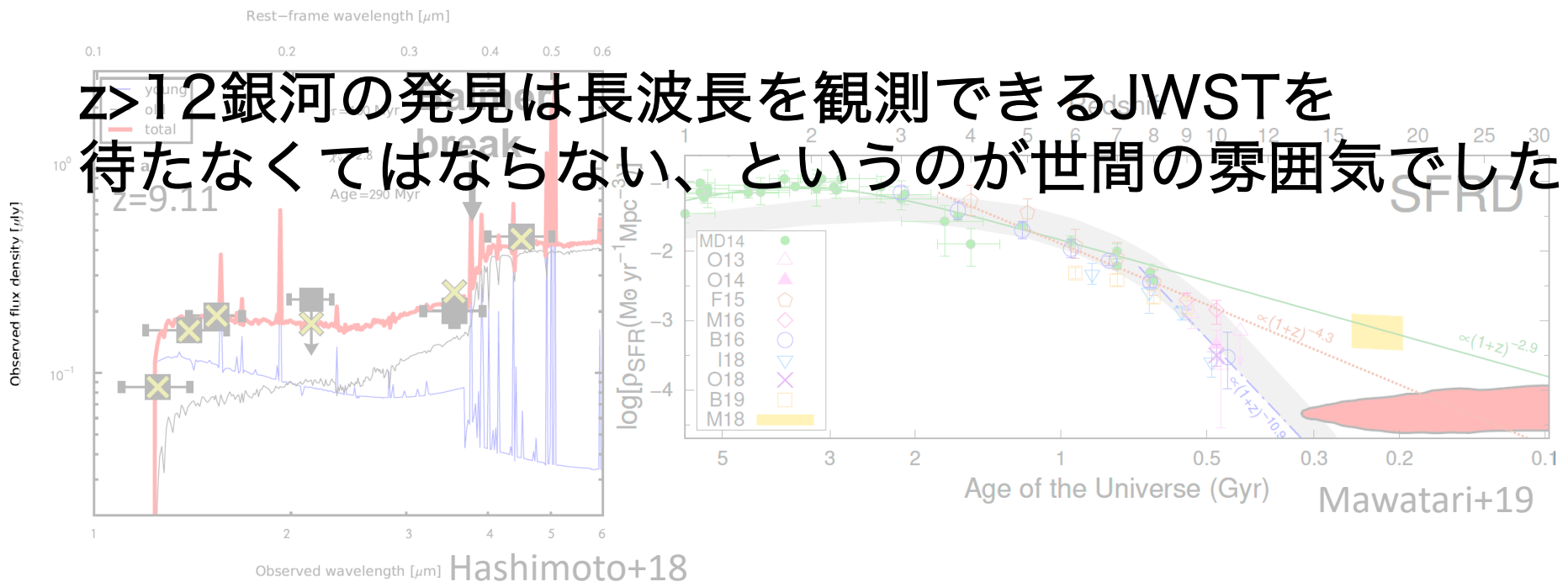
- GN-z11 at $z=10.96$
 - $EW_{\text{C III]}}=40 \text{ \AA} \rightarrow \text{AGN? High C abundance?}$
 - $M_{\text{uv}}=-22 \text{ mag}$ (明るい!) $\rightarrow z>11$ に祖先



z>10の星形成活動の痕跡

- M1149-JD1 at z=9.11
 - Balmer break → z~15の星形成を示唆
- z~6 passive銀河候補

z>12銀河の発見は長波長を観測できるJWSTを待たなくてはならない、というのが世間の雰囲気でした



Hashimoto+18

$z \sim 13$ H-Dropout 探査

- 明るい銀河なら JWST を使わずとも見つかるのでは
 - $z=4-10$ で明るい銀河の個数密度が減らない
- VISTA、UKIRT、Spitzer 望遠鏡



VISTA



UKIRT

z=13 銀河の候補を発見

- HD1 at z=13.27 (今年4月に発表)

NHK ニュースウォッチ9 (2022年4月7日)

“135億年前” 最古の銀河か

3億年後

地球から最も遠い銀河を観測か、135億光年離れた初期宇宙を輝線分光観測するチーム

読売新聞

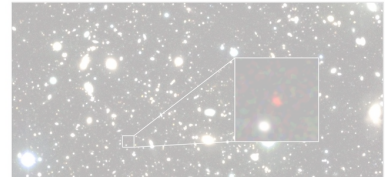
2022/04/07 22:45

この記事をスクラップする

地球から135億光年離れた銀河の候補を観測したと、東京大や早稲田大などの研究チームが7日発表した。これまでの最遠方記録より1億光年遠く、初期宇宙の成り立ちなどの解明につながる可能性があるという。論文が科学誌アストロフィジカル・ジャーナルに掲載される。

宇宙は138億年前に誕生し、数億年後に初期の銀河ができたと言われる。1光年は光が1年間に進む距離で、遠いほど古い銀河を観測していることになる。

チームは70万個以上の天体について、ハワイにあるマウナケア望遠鏡の3000時間以上の観測データ



The New York Times

ニューヨークタイムズ

OUT THERE

Astronomers Find What Might Be the Most Distant Galaxy Yet

日本経済新聞

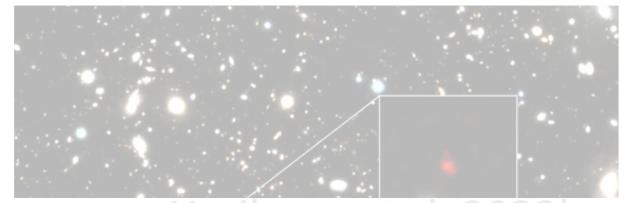
トップ 速報 オピニオン 経済 政治 ビジネス 金融 マーケット マネーのまなび テック 国際 スポーツ

地球から最も遠い銀河を発見か 135億光年先、候補観測

科学&新技術 +フォローする

2022年4月8日 14:00

保存



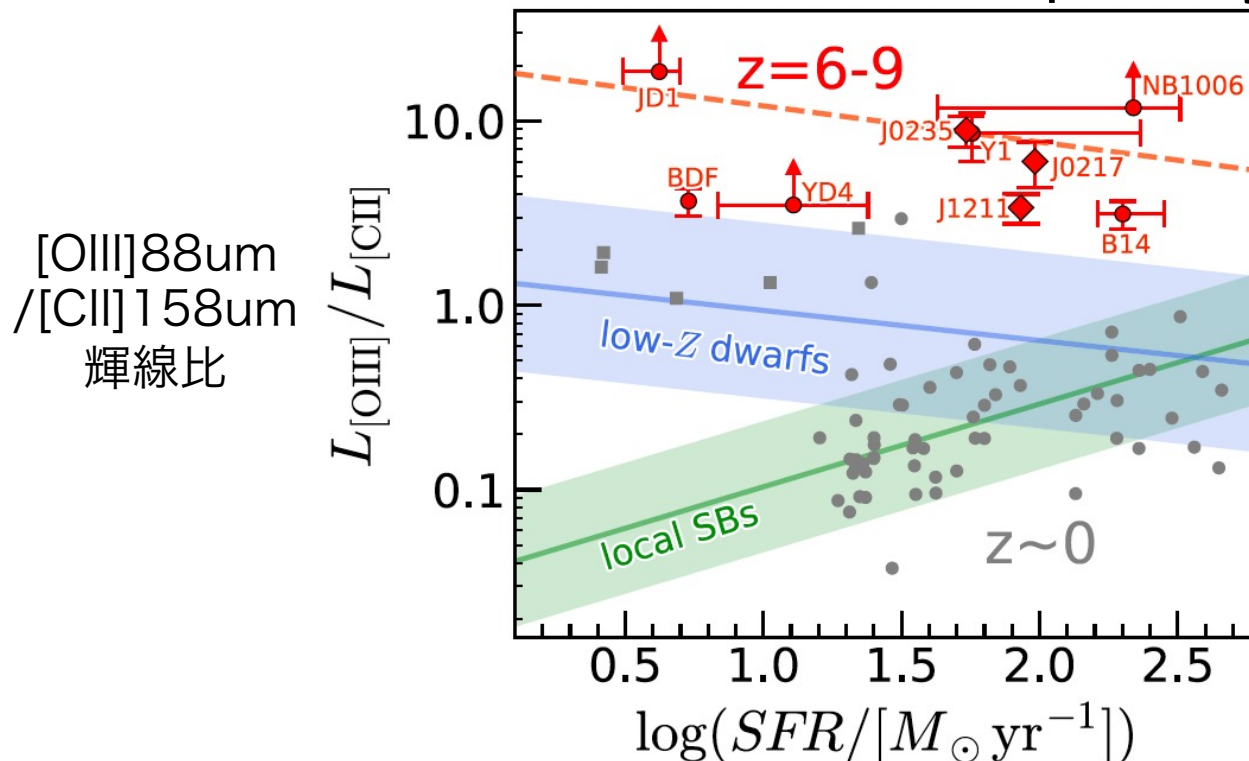
Harikane et al. 2022b

こういう遠方銀河 (z>6) の物理的な性質は？

→輝線分光

ALMAによる $z=6-9$ 銀河観測

- $[\text{OIII}]/[\text{CII}]$ 輝線比が $z=0$ に比べて3-10倍高い
 - 電離パラメータが高い/PDR covering fractionが低い (Harikane+20, Witstok+22)?
 - Carbon abundance が低い& top-heavy IMF (Katz+21)?

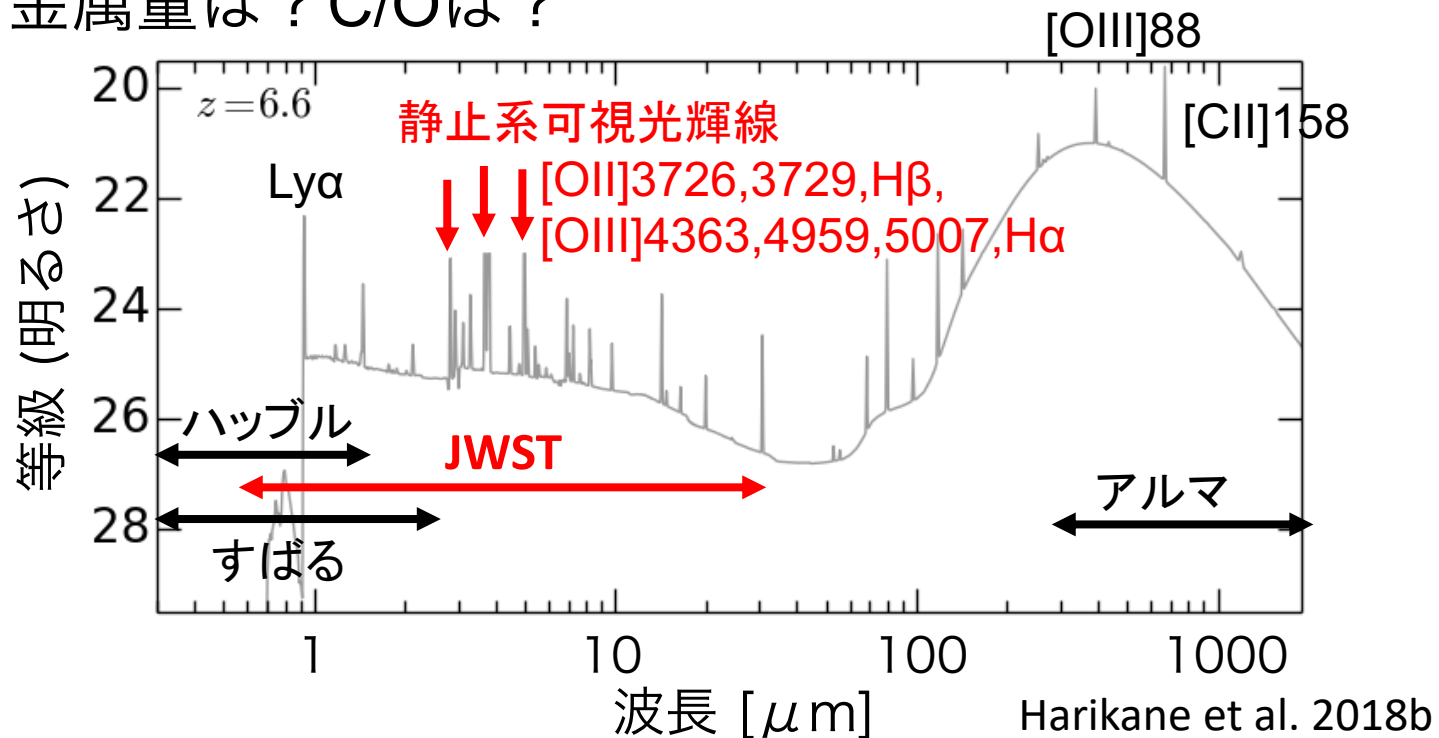


Harikane+20a

See also: e.g., Inoue+18,
Bakx+20, Carniani+20

星間物質の物理状態がわからない

- 星間物質 (ISM) は $z=0$ から $z>6$ で進化していそう
- でもどう進化しているのかわからない
 - 本当に電離パラメータが高いのか？
 - 金属量は？ C/Oは？



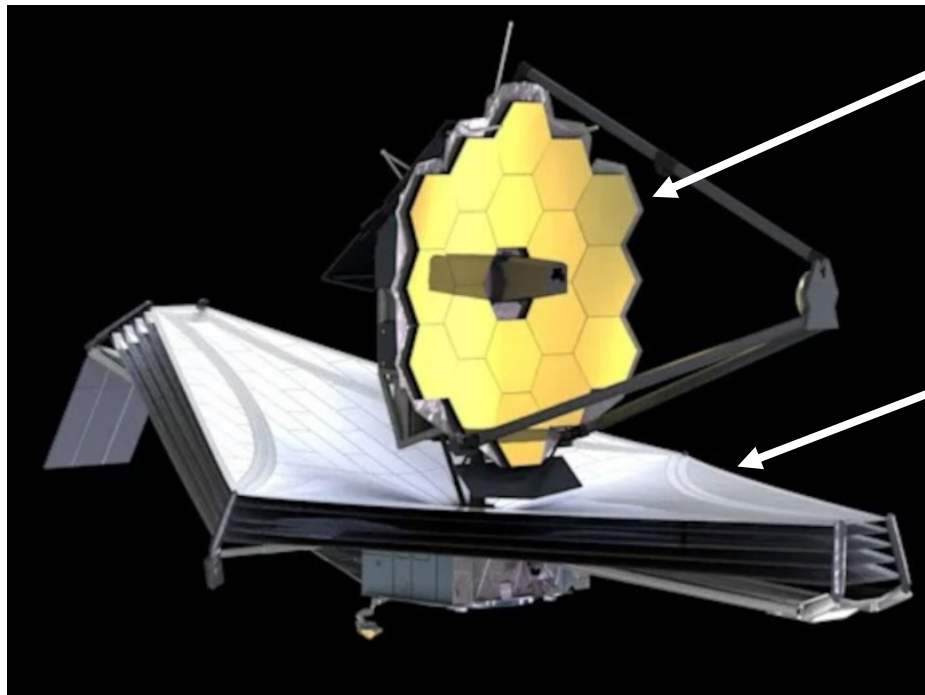
JWST登場までに分かっていたこと

- $z=0-10$ くらいまでのUV光度関数と星形成率密度
 - 進化の様子は大体わかった
 - Constant SF efficiencyモデルで進化が説明できそう
- $z>10$ はよくわからない
 - $z=13$ まで銀河候補は存在 (HD1)。分光は $z=11$ (GN- $z11$)
- $z>6$ は星間物質の状態が $z=0$ とかなり違うようだ
 - でも原因はわからない
 - 金属量進化もわからない
- JWSTなら $z>10$ 銀河も探査できるし、星間物質の物理状態も調べられる

JWSTの概要と観測プログラム

ジェイムズ・ウェッブ宇宙望遠鏡 (JWST)

- 赤外線望遠鏡。6.5mの非常に大きな鏡
 - ハッブル望遠鏡の鏡は2.4m
- 去年12/25打ち上げ、今年7/12に最初の画像公開



主鏡 (直径6.5m)
18枚の小さな鏡の組み合わせ
金メッキコーティング

サンシールド
太陽からの光を遮って、
望遠鏡を-233°Cに保つ

JWSTの科学目標



Early Universe

Search for the first galaxies or luminous objects that formed after the Big Bang. (初代銀河)



Galaxies Over Time

Determine how galaxies evolved from their formation until the present. (銀河進化)



Star Lifecycle

Observe the formation of stars from the first stages to the formation of planetary systems. (星・惑星形成)



Other Worlds

Measure the physical and chemical properties of planetary systems and investigate the potential for life in those systems. (系外惑星・系内天体)

採択された観測プログラムも銀河・AGN関連が一番多い

JWSTの歴史

- **1989年**: ハッブル望遠鏡の後継機を議論する会議
 - ハッブル望遠鏡の打ち上げは1990年
- 1990年代後半: 計画スタート
 - 予算**500億円**を想定、**2007年打ち上げ予定**
- 2003年: NASAから予算獲得 (1000億円)
 - 開発開始、2010年打ち上げ予定
- 2004年: ESA (ヨーロッパ) が参加
- 2005年: 予算超過 (5000億円), 打ち上げを2013年に延期
- 2010年: 大体の装置が決まる。打ち上げを2015-2018年に延期
- 2011年7月: **JWST最大の危機**。アメリカ議会で計画中止が決定される
 - とあるメリーランド州上院議員のおかげで中止を免れる (+予算アップ)
- 2018年3月: 打ち上げを2020年5月に延期
- 2018年7月: 打ち上げを2021年3月に延期 (予算9000億円)
- 2020年7月: 打ち上げをさらに延期 (covid-19のため)
- **2021年12月**: 打ち上げ。総予算**1兆円**

※詳細は[江上さんの天文月報記事](#)
(2022年2月号)

打ち上げ

- 2021年12/25 ESA アリアン5ロケットで打ち上げ
 - 打ち上げが非常にうまく行ったことで寿命が伸びた (5-10年→**20年以上**)

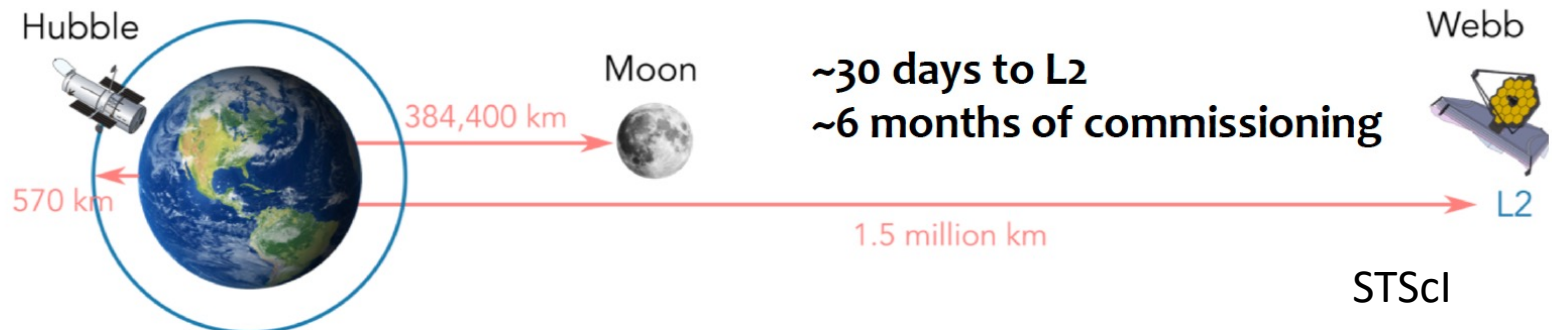


@ギアナ宇宙センター

ESA

ジェイムズ・ウェッブ宇宙望遠鏡 (JWST)

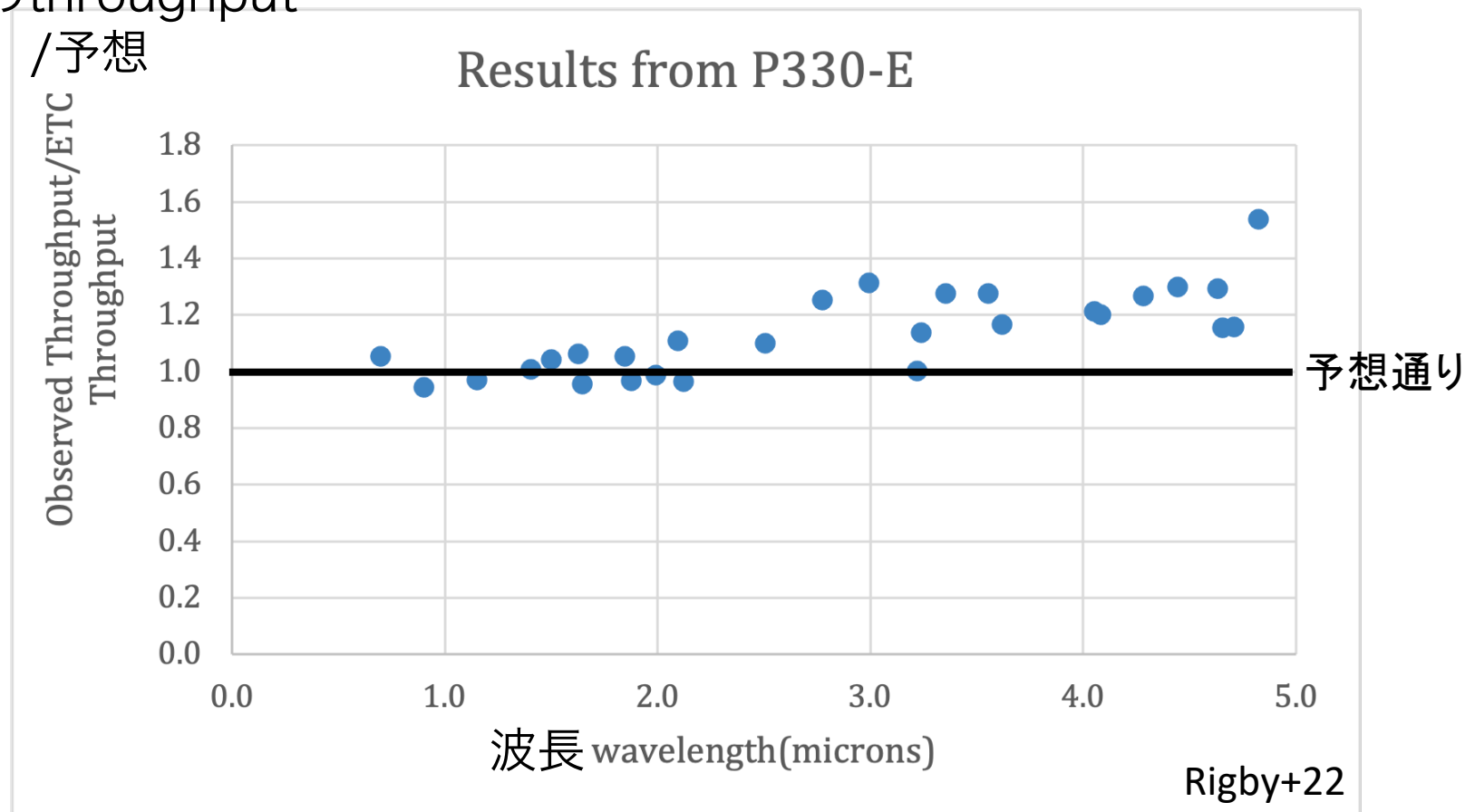
- ラグランジュポイント (L2)で観測
 - なるべく太陽の光が当たらないところ
 - 折り畳まれて打ち上げ -> L2へ(+装置展開) -> 冷却+調整
 - 季節によって観測できないfieldがある



観測は順調

- 予想以上のパフォーマンスが出ている

実際のthroughput

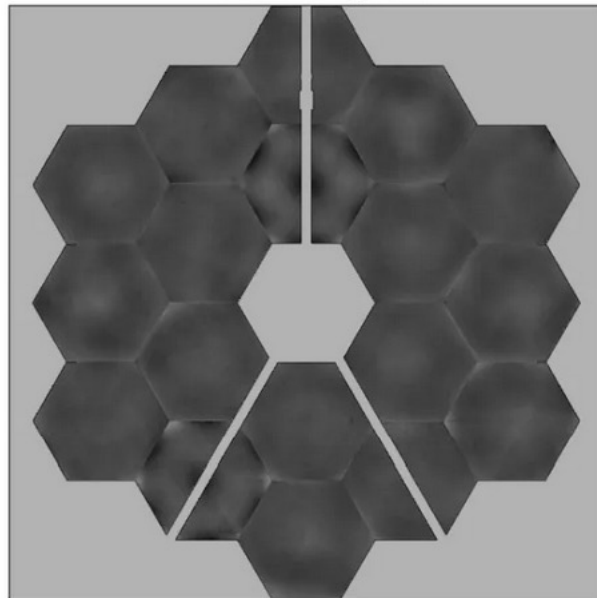


隕石が衝突

- 5/22-24に（想定より大きい）隕石が衝突
 - 1枚の鏡が修復不可能に
 - 残り17枚の鏡で十分性能維持可能

隕石衝突前

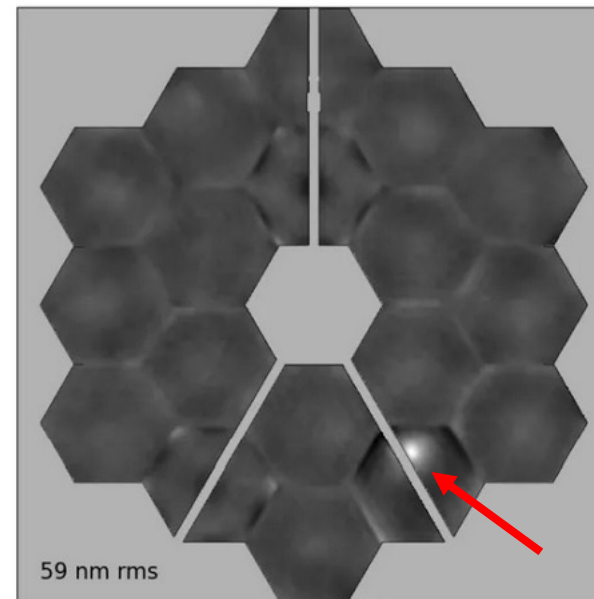
Ground Measurements for
Individual segments



Interferometry measurements from NASA XRCF

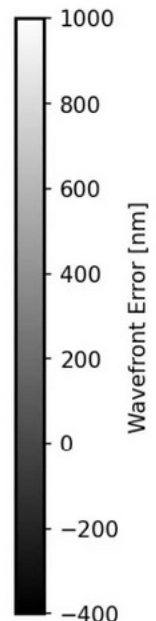
隕石衝突後

Recent Best Mirror Alignment



59 nm rms

NIRCam wavefront sensing on 2022-06-21



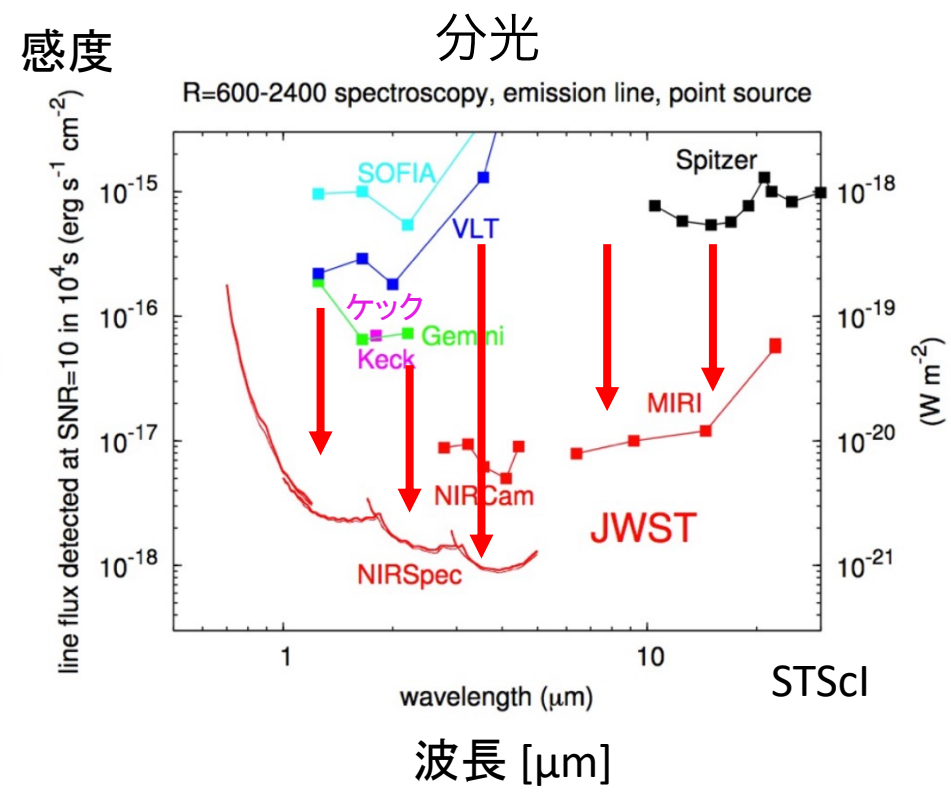
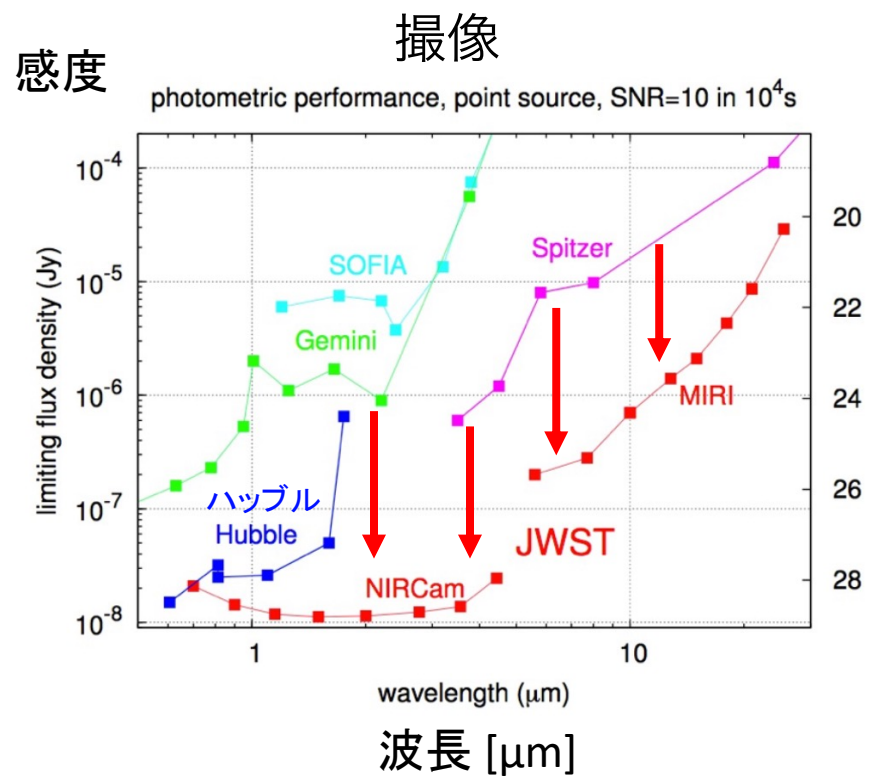
NASA

観測装置

	波長	観測モード	視野 (平方分角)
NIRCam	0.6-5.0 μm	撮像	2x2.2'x2.2'
		Slitless分光	2x2.2'x2.2'
NIRSpec	0.6-5.3 μm	MSA分光	3.4'x3.6'
		fixed-slit分光	-
		IFU分光	3.0"x3.0"
MIRI	5-30 μm	撮像	1.2'x1.9'
		fixed-slit分光	-
		IFU分光	~5"x5" (波長依存)
NIRISS	1.0-2.5 μm	Slitless分光 (+撮像)	2.2'x2.2'

他の望遠鏡との比較

- 撮像・分光ともに感度が10-1000倍向上



<https://www.stsci.edu/jwst/about-jwst/history/historical-sensitivity-estimates>

観測プログラム

	提案者	占有期間	観測時間 (cycle 1)	
Guaranteed Time Observations (GTO)	装置開発グループ	1年	3500時間	3年で4200時間
Early Release Science (ERS)	誰でも	0年 (即時公開)	500時間	最初の5ヶ月 で取得
General Observers (GO)	誰でも	0/0.5/1年 (PIが設定可能)	6000時間	75時間以上の プログラムは 占有期間0年
Early Release Observation (ERO)	STScI EROチーム	0年 (即時公開)	100時間	全データ公開済

※GTOで観測されるターゲットはGOで提案できない

各観測プログラムの詳細は以下のページ:

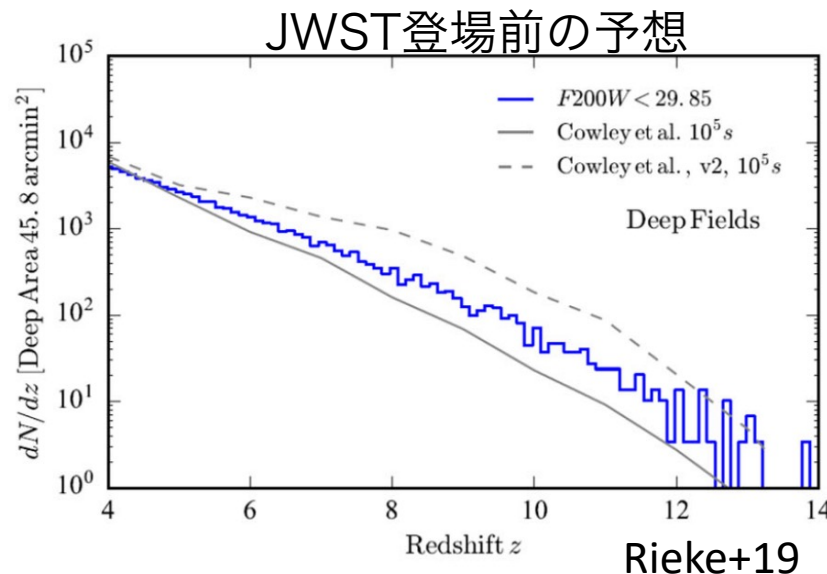
<https://www.stsci.edu/jwst/science-execution/approved-programs/cycle-1-gto>

<https://www.stsci.edu/jwst/science-execution/approved-ers-programs>

<https://www.stsci.edu/jwst/science-execution/approved-programs/cycle-1-go>

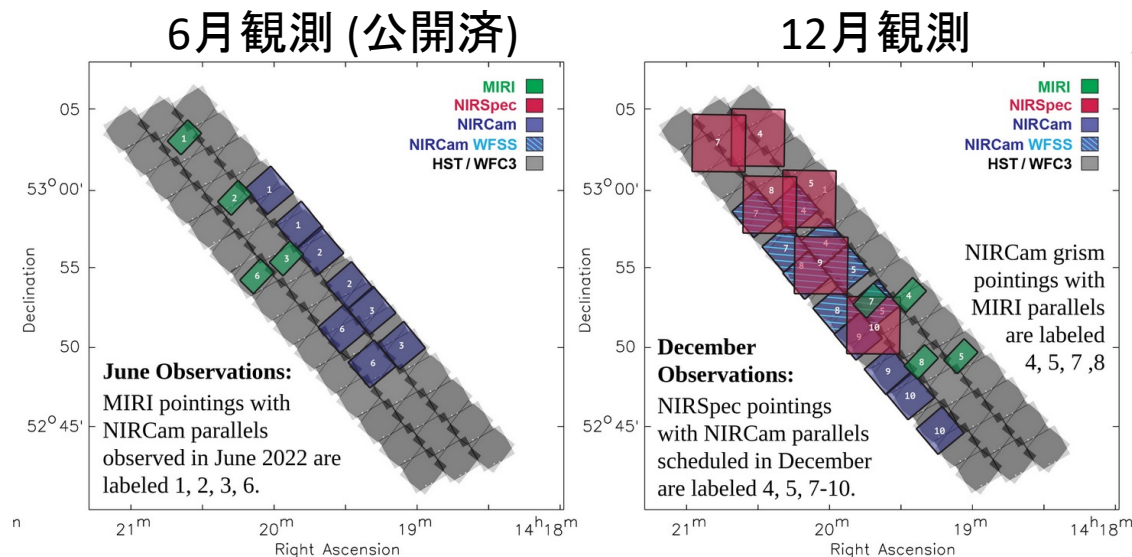
GTO: JADES

- JWST Advanced Deep Extragalactic Survey: JADES
- 撮像(NIRCam, MIRI)+ 分光 (NIRSpec) 824時間
- GOODS-North and GOODS-South (HST有名領域)
 - Deep: 46平方分, ~30 ABmag
 - Medium: 190平方分, ~29 ABmag

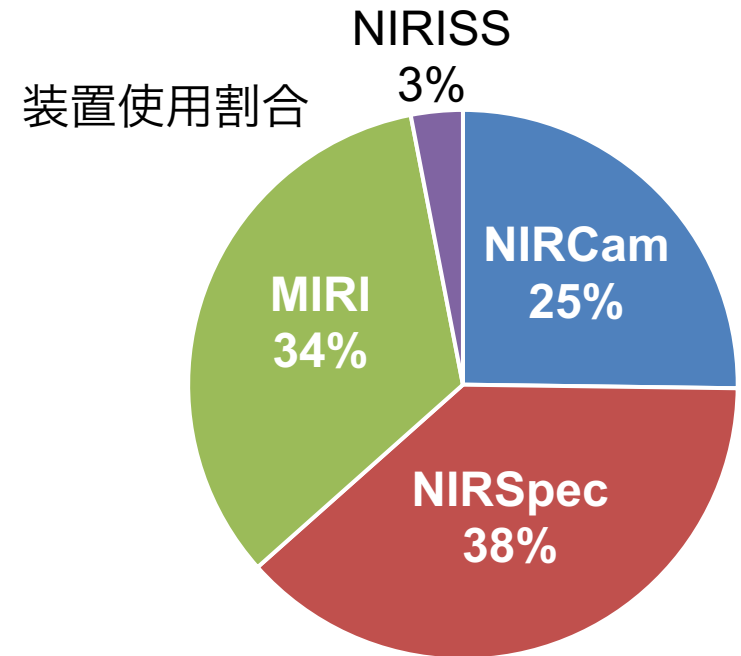


ERS (即時公開)

- CEERS (PI: Finkelstein)
 - EGS領域をNIRCam+MIRI撮像+NIRCam/NIRSpec分光
- GLASS (PI: Treu)
 - Abell2744銀河団のNIRSpec/NIRISS分光, +NIRCam撮像
- TEMPLATES (PI: Rigby), Q-3D (PI: Wylezalek), ...



GO



• 3カテゴリ

- Small (<25 h)
- Medium (>25, <75 h)
- Large (>75 h) 占有期間0年

• 2022/5-2023/8に観測

- PRIMER (COSMOS+UDS広く撮像, PI: Dunlop)
- $z=9-10$ 銀河候補の分光 (e.g., PI: Bagley)
- $z=6$ 単独の星の観測 (PI: Coe, arXiv:2208.09007)
- 12個の $z=6$ クエーサー観測 (PI: Onoue)
- $z\sim 13$ 銀河候補分光 (PI: Harikane)
- $z>6$ ALMA[OIII]88um銀河のdirect- T_e 金属量 (PI: Harikane)
- etc...

プロポーザル準備

- GO Cycle1 締切: 2020/11/24
- 2020/3から準備。GTO, ERS観測を精査
 - 日本 (朝-夜), ヨーロッパ (夕方-深夜), アメリカ (深夜-朝) の共同研究者と議論
- 倍率4.2倍。僕は5本出して2本通りました。

ID	ProposalID	NIRSpec_IFU	NIRSpec_MSA
MACS1149-JD	1199 1208 1262	G395H/F290LP(5.0h) PRISM/CLEAR(1.1h) G235M/F170LP(4.7h) G395M/F290LP(4.7h) PRISM/CLEAR(0.8h)	
EGSY-2008532660	1213 1262 1345	G395H/F290LP(5.0h) PRISM/CLEAR(1.1h) G140M/F100LP(0.8h) G235H/F170LP(0.5h) G235M/F170LP(0.5h)	
A2744_YD4	1324		G140H/F100LP(1.2h) G235H/F170LP(1.2h) G395H/F290LP(1.2h)
MACS0416_Y1	1208	G395H/F290LP(5.0h) PRISM/CLEAR(1.1h) PRISM/CLEAR(0.8h)	
EGS-zs8-1	1213 1345		G140M/F100LP(0.8h) G235H/F170LP(0.5h) G235M/F170LP(0.5h)
z7_GSD_3811	1180 1207 1210 1283 1286		G140M/F070LP(2.3h) G140M/F100LP(2.0h) G235M/F170LP(0.5h)
MACS1423-z7p64	1208		PRISM/CLEAR(0.8h)
z7_GND_16863	1211		G235H/F170LP(0.5h) G395H/F290LP(0.5h) PRISM/CLEAR(0.8h)
z8_GND_5296(z7_GND_42912)	1181 1211		G140M/F070LP(0.8h) G235H/F170LP(0.5h) G235M/F170LP(0.5h)
EGS-zs8-2	1213 1345		G140M/F100LP(0.8h) G235H/F170LP(0.5h) G235M/F170LP(0.5h)
GS2_1406			
SDF-NB1006-2			
SXDF-NB1006-2			
GN-108036	1211		G235H/F170LP(0.5h) G395H/F290LP(0.5h) PRISM/CLEAR(0.8h)
B14-65666	1217 1284	G395M/F290LP(3.0h)	
RXJ1347-018			
COS-zs7-1	1214 1217 1284	G395M/F290LP(3.0h)	G235H/F170LP(0.5h) G395H/F290LP(0.5h) PRISM/CLEAR(0.8h)
MACS0744-064			
A1889-z11			

詳細は天文月報2022年2月号の[播金の記事](#)

プロポーザルの書き方は[有本さんの記事](#)が参考になります

Portion of JWST Survey Programs

Title	Type	PI	Field	Area (amin ²)	Image Depth	Note
JADES	GTO	-	GOODS-N,-S	200-50	29-30	NIRCam+NIRSpec+MIRI
JWST Medium-Deep Fields	GTO	Windhorst	Lensing clusters, NEP, etc	220	28-29	NIRCam
CANUCS	GTO	Willott	Lensing clusters	5 fields	? (220 h)	NIRCam+NIRSpec+NIRISS
CEERS	ERS	Finkelstein	CANDELS-EGS	100	29	NIRCam+NIRSpec+MIRI
GLASS	ERS	Treu	Abel 2744	20?	29	NIRISS+NIRCam+NIRSpec
PRIMER	GO	Dunlop	COSMOS+UDS	380-30	28-30	NIRCam+MIRI
NGDEEP	GO	Finkelstein	GOODS-S	8	31	NIRCam (HUDF09-2) +NIRISS (HUDF12)
COSMOS-Web	GO	Kartaltepe	COSMOS	2160	28	NIRCam+MIRI
UNCOVER	GO	Labbe	Abel 2744	25	30	NIRCam+NIRSpec
FRESCO	GO	Oesch	GOODS-N,-S	120	- (53 h)	NIRCam/WFSS
UDF Medium-band	GO	Williams	UDF	~5?	(5bands, 20 h)	NIRCam Medium-band

STScI Dan Coeの[まとめシート](#)も参考になります

Portion of Targeted Galaxies (w/ Spec-z)

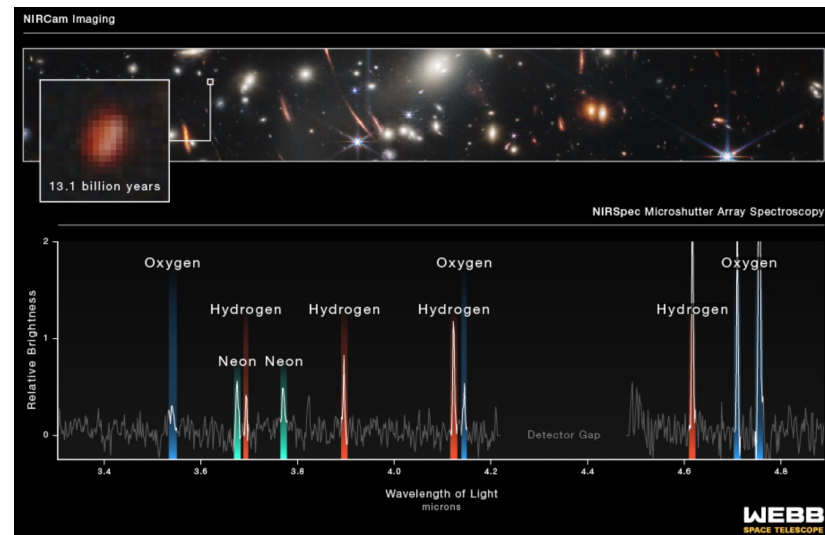
Targets	z	Program	NIRCam Img	NIRCam WFSS	NIRSpec IFU	NIRSpec MOS,FS	NIRISS	MIRI IFU+Img
GN-z11 (CIII], OIII])	10.96	GTO, several GO	○			○		
UDS_z910 (-22 mag)	10.57?	GO-1758				○		
MACS0647-JD	9.28?	GO-1433	○			○		
MACS1149-JD1 ([OIII]88um)	9.11	GTO-1199, 1208, 1262	○		○	○	○	○
EGSY-2008532660 (Lya, NV)	8.683	GTO-1213, 1262,1345, GO-2279	○	○	○	○		○
A2744_YD4 ([OIII]88um, dust)	8.38	GTO-1324 GO-1840	○		○	○	○	
MACS0416_Y1	8.312	GTO-1208	○		○	○	○	
A1689-zD1	7.133	GO-1840			○			
A1703-z7 (CIV)	7.045	GO-2478				○		
SPT0311-58 (SMG)	6.900	GO-1264			○			○
12 objs in REBELs	>6.5	GO-1626			○			
COLA-1	6.593	GO-1933		○				

JWSTの最新成果

※全て査読中です (2022/8/23現在)

7/14に最初のデータ公開

- 合計90 arcmin²の撮像+分光データ
 - ERO SMACS0723: NIRCам+NIRSpec+MIRI+NIRISS
 - ERO Stephan's quintet: NIRCам+MIRI
 - ERS CEERS: NIRCам+MIRI
 - ERS GLASS: NIRISS+NIRCам



NASA, ESA, CSA, and STScI

JWST論文執筆スケジュール

DRAFT VERSION AUGUST 3, 2022
Typeset using L^AT_EX twocolumn style in AASTeX63

A Comprehensive Study on Galaxies at $z \sim 9 - 17$ Found in the Early JWST Data:
UV Luminosity Functions and Cosmic Star-Formation History at the Pre-Reionization Epoch

YUICHI HARIKANE,¹ MASAMI OUCHI,^{2,1,3} MASAMUNE OGURI,^{4,5} YOSHIAKI ONO,¹ KIMIHICO NAKAJIMA,² YUKI ISOBE,^{1,6}
HIROYA UMEDA,^{1,6} KEN MAWATARI,² AND YECHI ZHANG^{1,7}

わかったこと:
36ページの論文も、頑張れば (+素晴らしい共同研究者の方々の助けを借りれば) **1ヶ月弱で書ける**

Submitted to ApJ Supplement

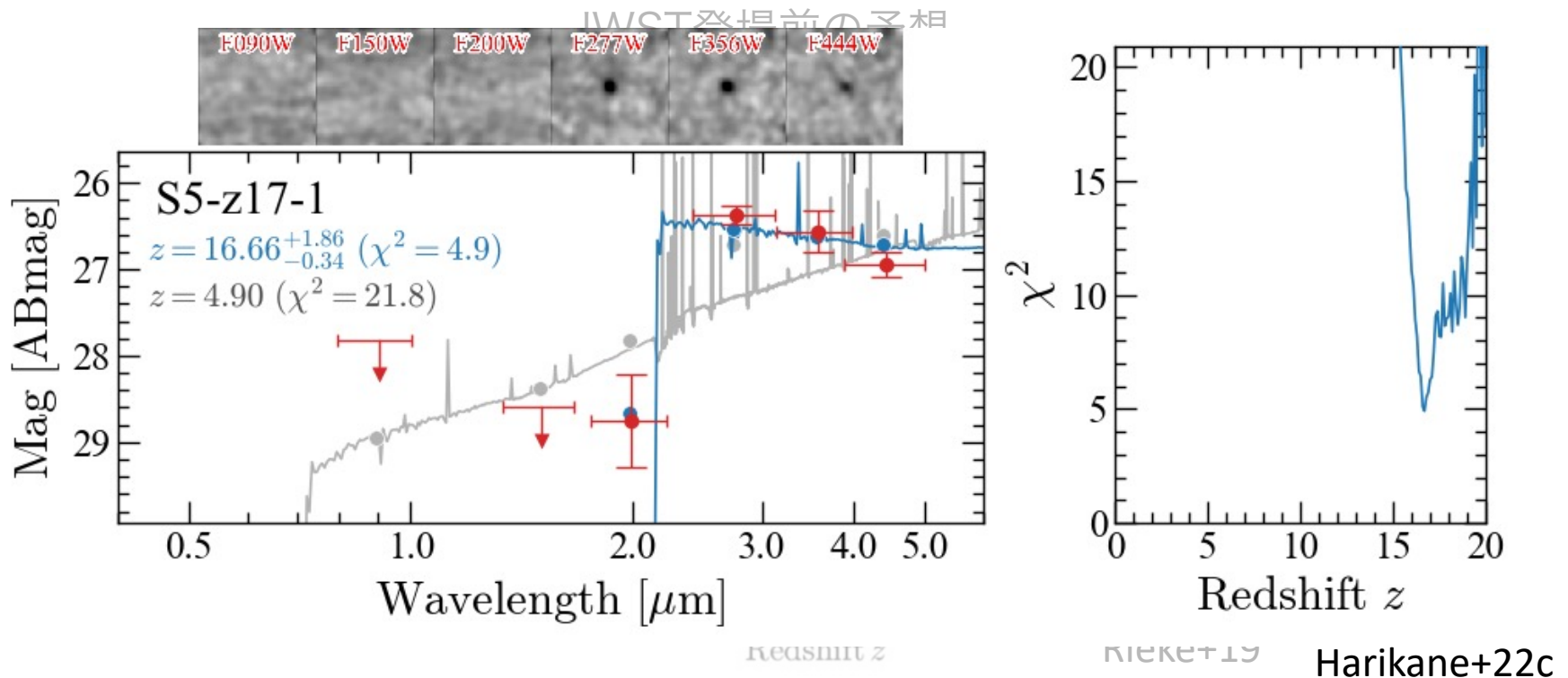
ABSTRACT

We conduct a comprehensive study on dropout galaxy candidates at $z \sim 9 - 17$ using the first 90 arcmin² JWST/NIRCam images taken by the early release observations (ERO) and early release science (ERS) programs. With the JWST simulation images, we find that a number of foreground interlopers are selected with a weak photo- z determination ($\Delta\chi^2 > 4$). We thus carefully apply a secure photo- z selection criterion ($\Delta\chi^2 > 9$) and conventional color criteria with confirmations of the ERO NIRSpec spectroscopic redshifts, and obtain a total of 25 dropout galaxies at $z \sim 9 - 17$, including two candidates at $z_{\text{phot}} = 16.45^{+0.09}_{-0.32}$ and $16.66^{+1.86}_{-0.34}$. We perform thorough comparisons of dropout galaxies found in our work with recent JWST studies, and conclude that our galaxy sample is reliable enough for statistical analyses. We derive the UV luminosity functions at $z \sim 9 - 17$, and confirm that our UV luminosity functions at $z \sim 9$ and 12 agree with those determined by previous HST and JWST studies. The cosmic star-formation rate density decreases from $z \sim 9$ to 12, and perhaps to 17, but the densities at $z \sim 12 - 17$ are higher than the constant star formation efficiency model. Interestingly, there are six bright galaxy candidates at $z \sim 11 - 17$ with $M_{\text{UV}} < -19.5$ whose stellar masses are very high, $10^8 - 9 M_{\odot}$. Because a majority ($\sim 70\%$) of these galaxies shows no signatures of AGNs in their morphologies, the high cosmic star-formation rate densities and the existence of these stellar massive galaxies are explained by no suppression of star-formation by the UV background radiation at the pre-reionization epoch or an efficient UV radiation production by Population III-like star formation.

Keywords: galaxies: formation — galaxies: evolution — galaxies: high-redshift

JWST z=9-17 銀河候補

- JWST前の予想: Cycle 1全体で $z \sim 15$ 数個以下
- 現実: 初期データ (全体の10%) で $z \sim 17$ 候補まで見つかった



JWST z=9-17銀河候補

JWST登場前

ID	赤方偏移	Reference
1 HD1	13.3	Harikane+22b
2 HD2	12.3 +0.4-0.3	Harikane+22b
3 UDFj-39546284	11.9 +0.3-0.5	Ellis+13, Bouwens+11等
4 GN-z11	10.96 (spec)	Oesch+16, Jiang+20
5 MACS0647-JD	10.7 +0.7-0.6	Coe+13

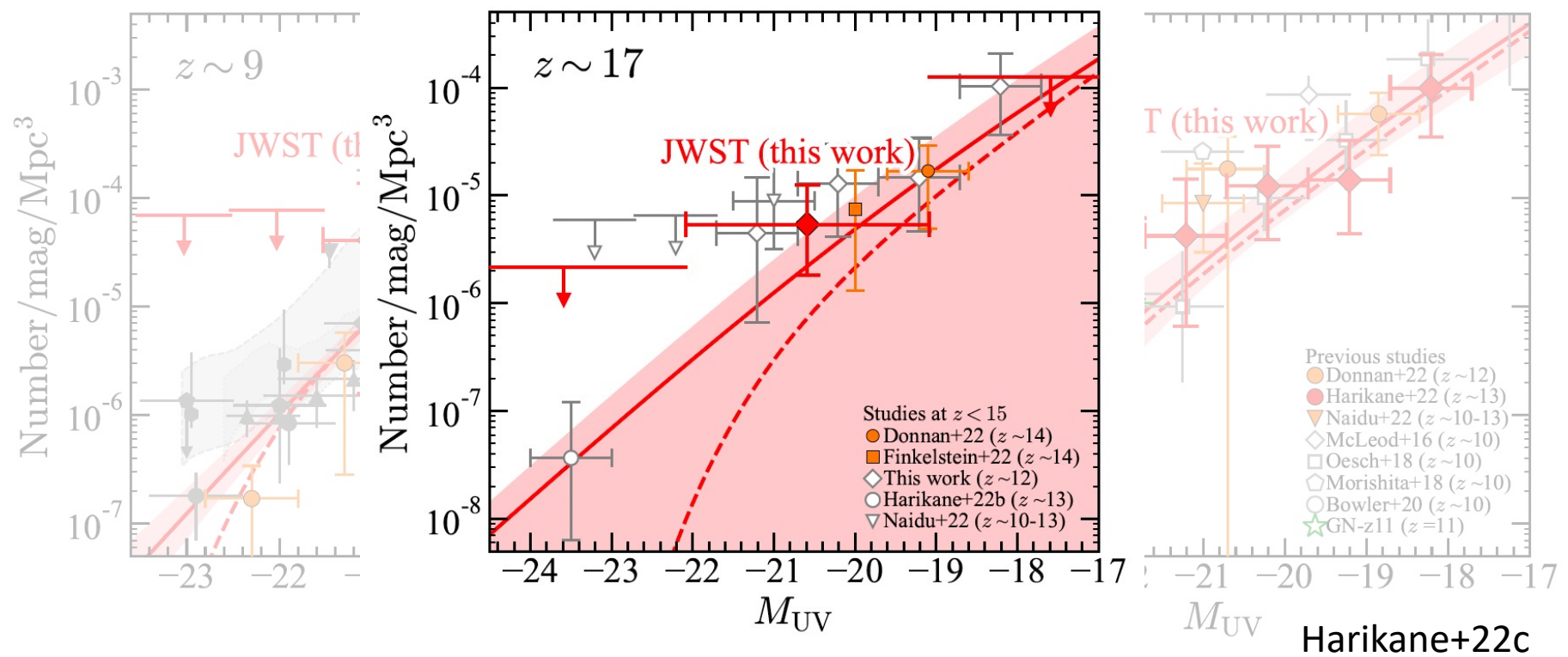
JWST登場後

ID	赤方偏移	Reference
1 S5-z17-1	16.7 +1.9-0.3	Harikane+22c
2 93316	16.6 +0.1-0.1	Donnan+22, Harikane+22c, Naidu+22b
3 CEERSJ141946.35+525632.8	14.3 +0.4-1.1	Finkelstein+22b, Harikane+22c
4 S5-z12-1	13.7 +0.9-1.2	Harikane+22c
5 HD1	13.3	Harikane+22b

※候補が多すぎるので、Harikane+22cの解析で選ばれなかったものは省略しています。

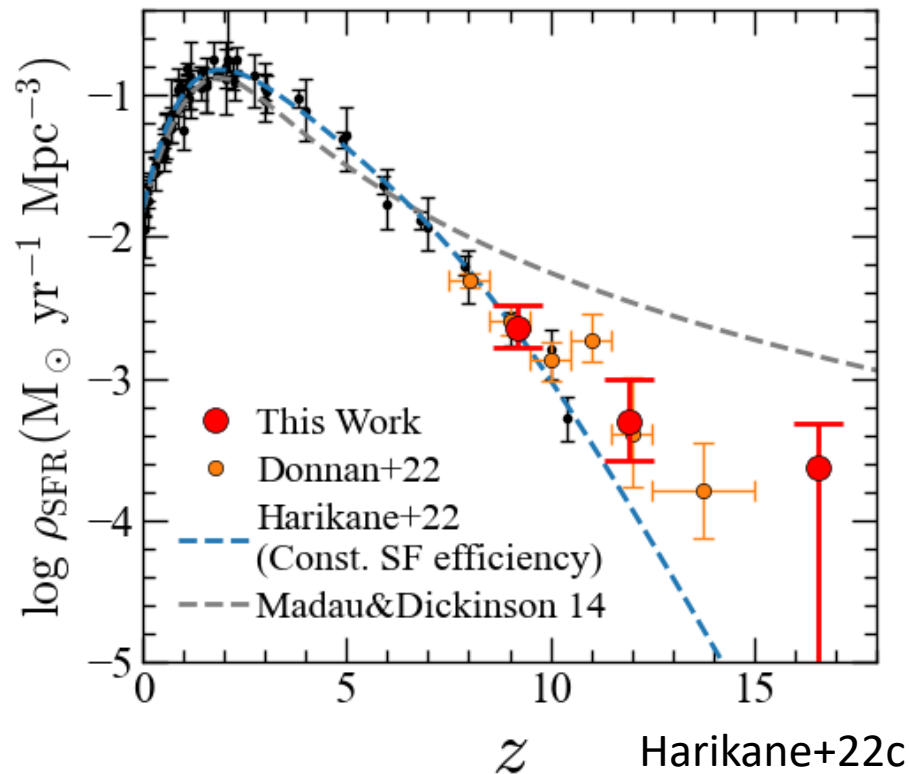
z=9-17 UV光度関数

- z~9,12はこれまでのHST&JWSTの結果と一致
- z~17に初めて制限



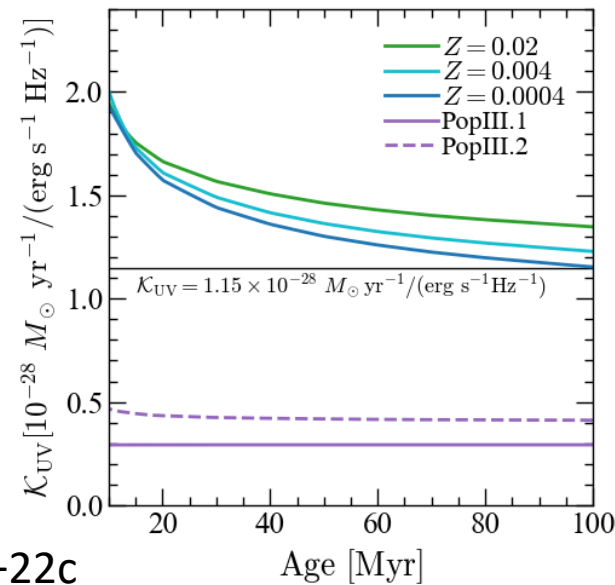
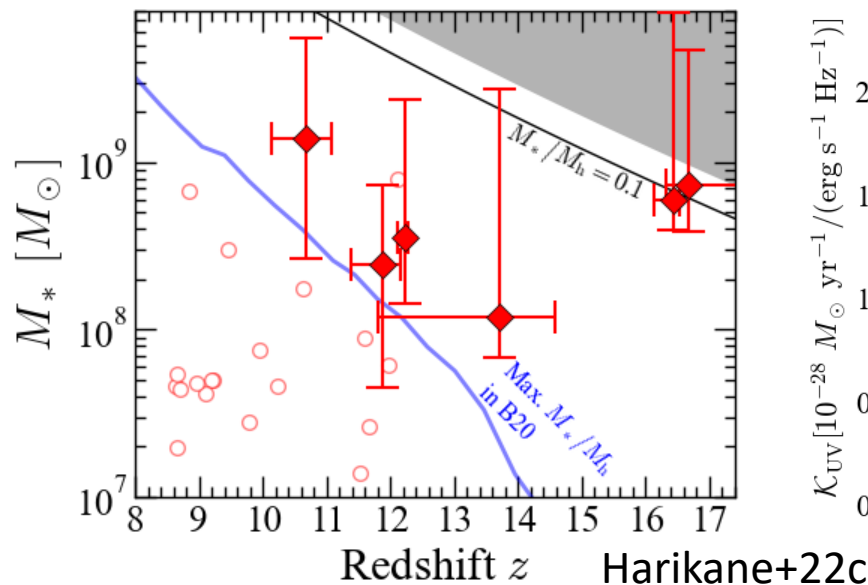
z=9-17 星形成率密度

- UV→SFR: $SFR(M_{\odot} \text{ yr}^{-1}) = \mathcal{K}_{\text{UV}} L_{\text{UV}}(\text{erg s}^{-1} \text{ Hz}^{-1})$
 $\mathcal{K}_{\text{UV}} = 1.15 \times 10^{-28} M_{\odot} \text{ yr}^{-1} / (\text{erg s}^{-1} \text{ Hz}^{-1})$
- 星形成効率一定のモデルより z>10 で高そう



明るい銀河が多すぎる？

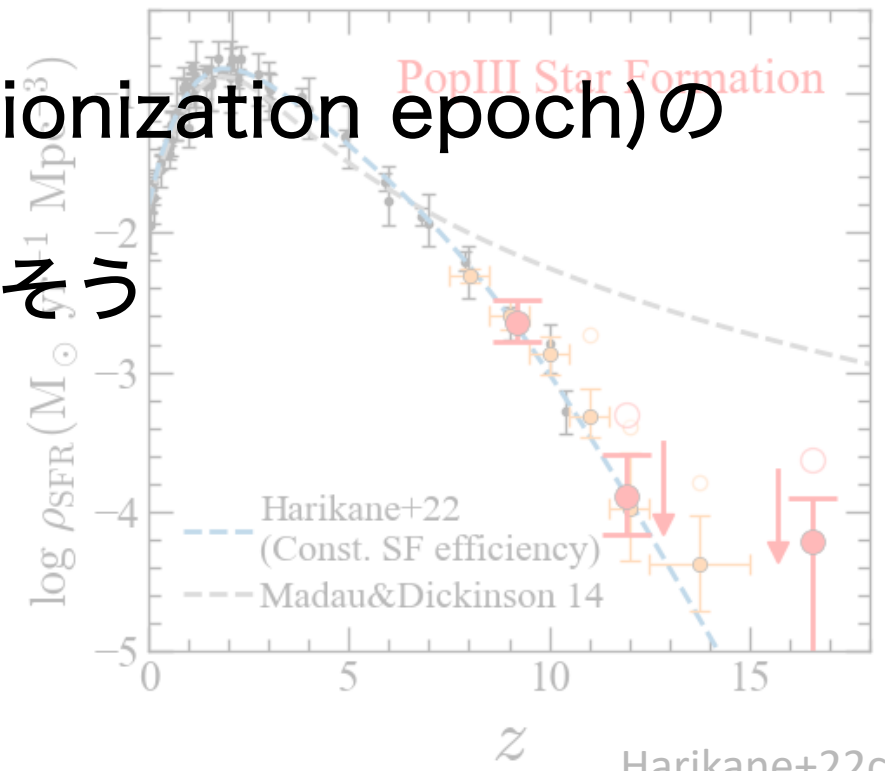
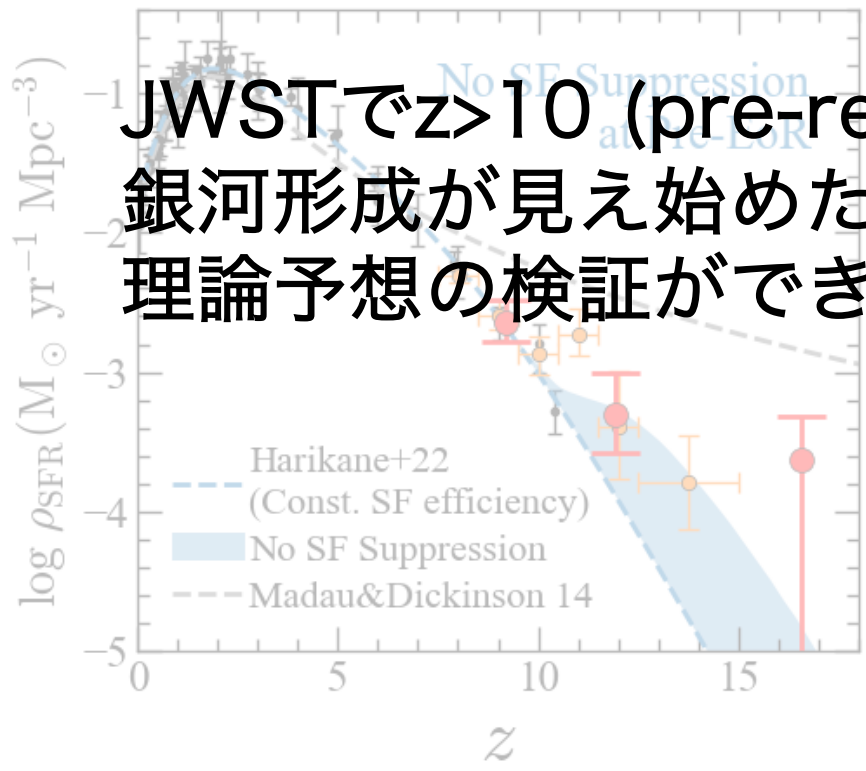
- $M_* > 10^8 M_{\text{sun}}$ (w/ high sSFR $\sim 10^{-8} \text{ yr}^{-1}$)
 - $M_*/M_h \sim 0.1$ at $z \sim 16-17 \rightarrow$ 星形成効率60%??
 - 1. 再電離前でUV backgroundによる星形成の抑制が効かない (e.g., Susa&Umemura 04)
 - 2. AGN (e.g., Inayoshi, YH+22), だけど一部はextended
 - 3. Top-heavy IMF (e.g., Omukai+05) w/ Pop-III



z>10の高い星形成率密度

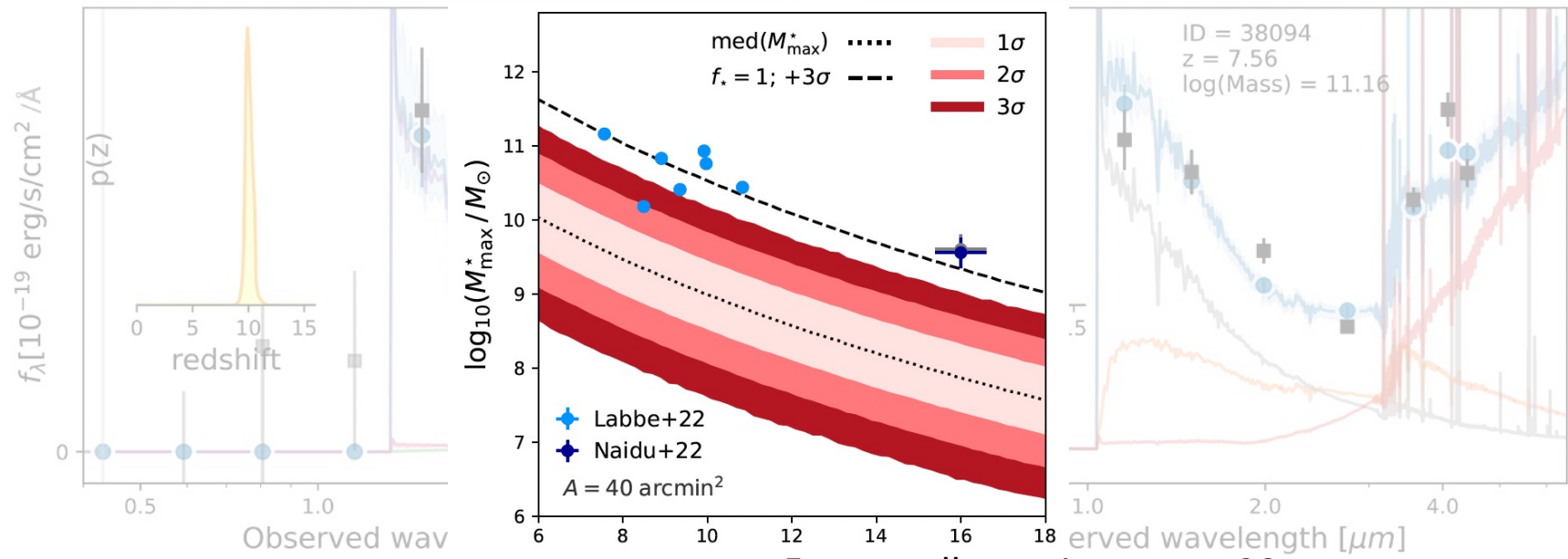
- 1) UV backgroundによる星形成の抑制が効かない
 - 3) Top-heavy IMF w/ Pop-III
- で説明できそう？

JWSTでz>10 (pre-reionization epoch)の銀河形成が見え始めた理論予想の検証ができそう



Λ CDM宇宙論とのTension?

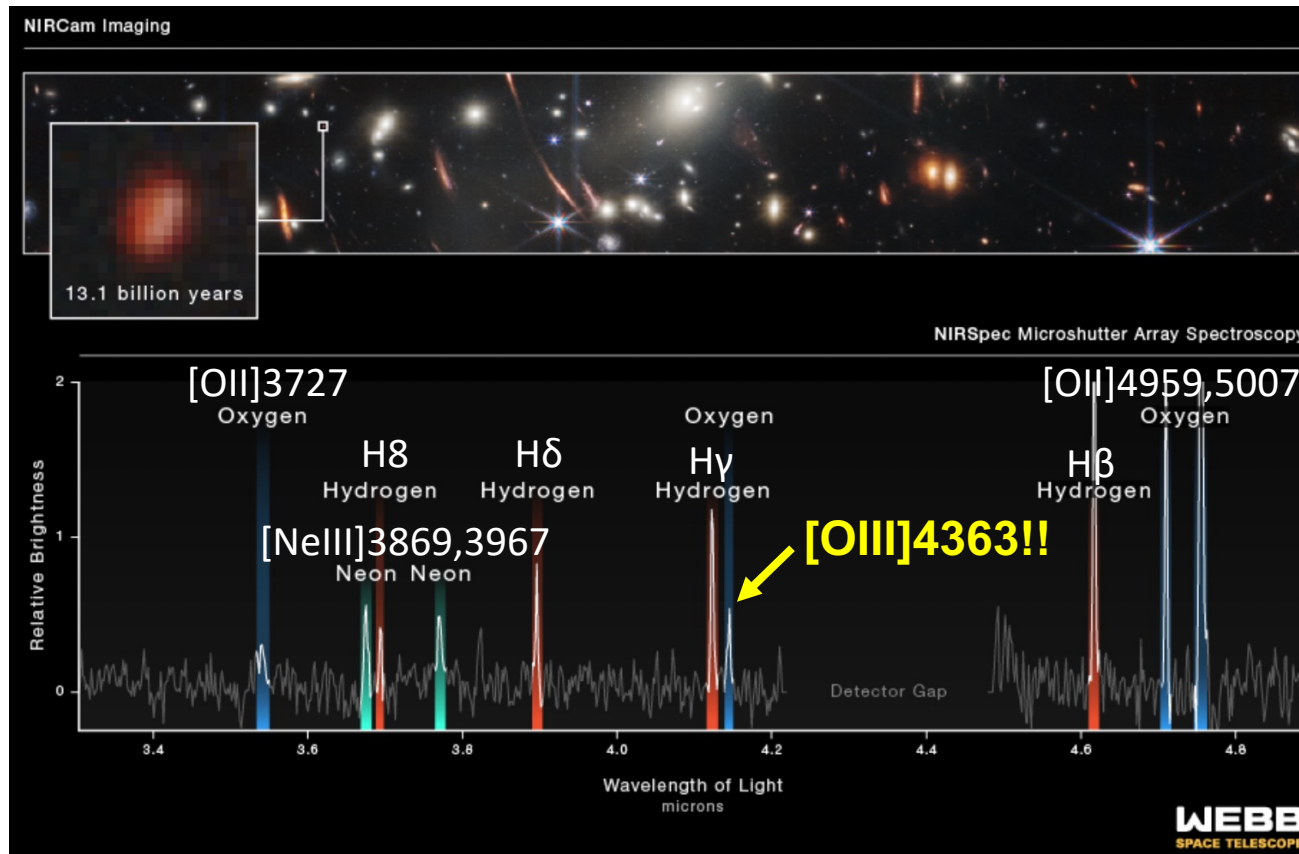
- Labbe+22: JWST画像から $z=7-11$ のmassive銀河候補 ($M_* \sim 10^{11} M_{\text{sun}}$) を発見
- 本当に $M_* \sim 10^{11} M_{\text{sun}}$ だったら Λ CDMが破綻
 - 本当はもっとlow-massかも (Steinhaladt+22)



Lovell, Harrison, YH +22
 See also Boylan-Kolchin 22
 Labbe+22

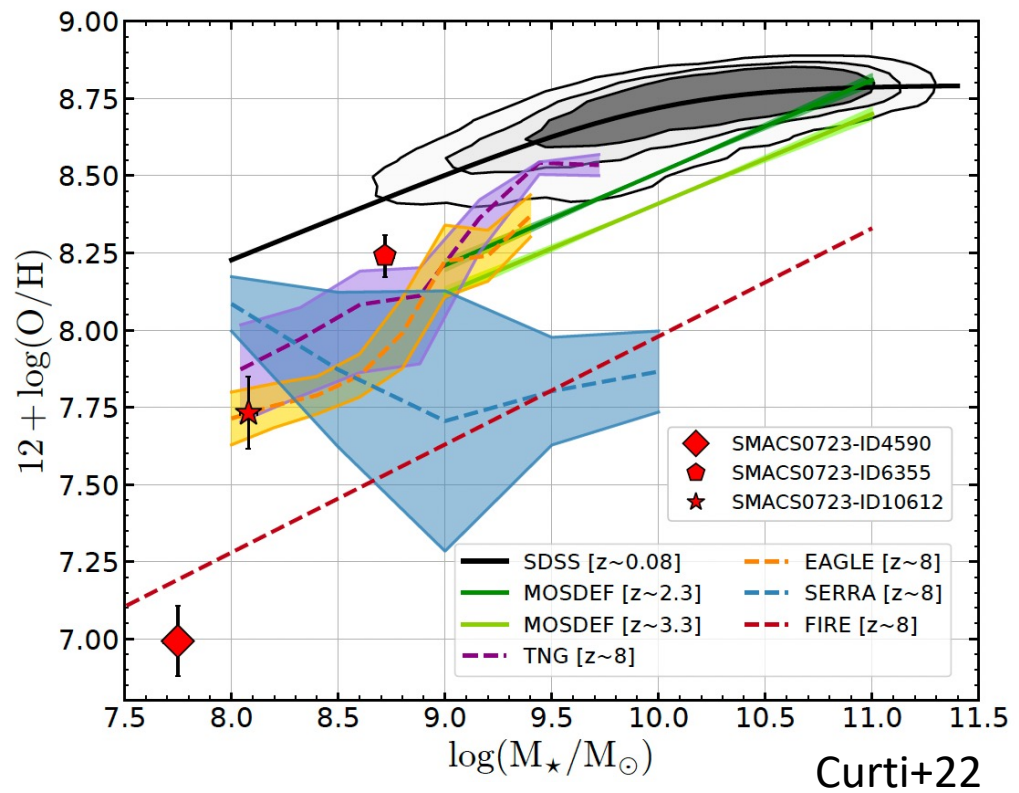
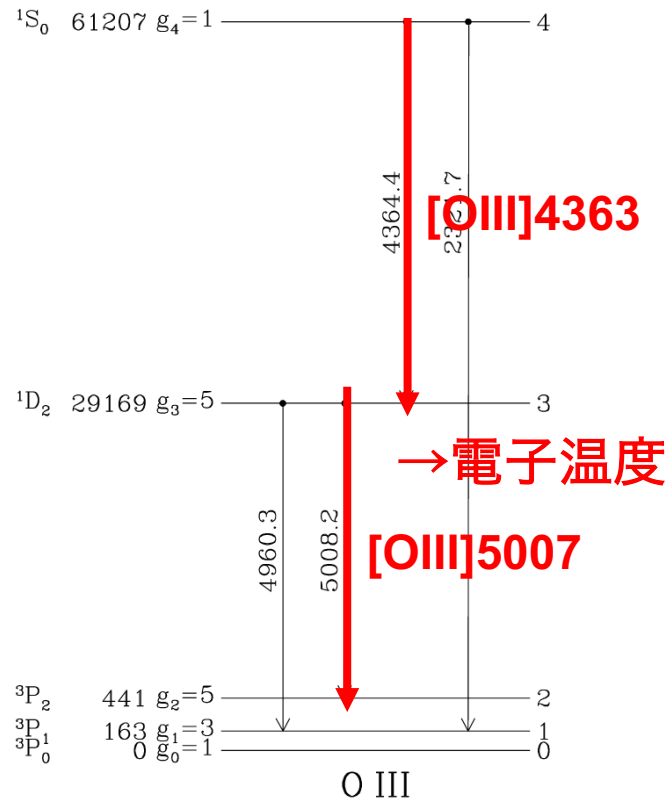
NIRSpec分光データの衝撃

- $z=8.5$ で[OIII]4363輝線を検出！
 - これまでの検出例は $z=3.1$ が最遠方 (Sanders+16)



z=7-9銀河の金属量

- [OIII]4363輝線を使って直接温度法により推定可能
- Metal-poor: $12+\log(\text{O}/\text{H})=7.0-8.3$ ($0.02-0.4 Z_{\text{sun}}$)
 - Calibrationの難しさ



今後のJWSTの動き

- 今後もデータがどんどん出てきます
 - 10月-11月: UNCOVER, Abell2744 NIRCам撮像
 - 10月-11月: GLASS: Abell2744 NIRSpec分光
 - 11月-1月: PRIMER, COSMOS領域: NIRCам撮像
 - 12月: CEERS: EGS領域 NIRSpec分光
- 次のプロポーザル締切は2023/1/27です
 - 理論研究者も是非 (理論→観測で成功例多数)

JWST 今後の個人的な期待

- 現在見つかっている $z > 12$ 銀河候補の分光
 - 1年以内には結果がでて様子がわかってくるだろう
 - $z > 20$ 候補？
- $z > 6$ 銀河のISM (e.g., 金属量) の系統的調査
 - この秋くらいからさらに本格化
- 予想していなかった新発見
 - 大きな発見は望遠鏡稼働の数年後くらいに起きる
 - すばる (1999年稼働): $z = 6.9$ 銀河の発見 (Iye+06)
 - アルマ (2013年稼働): $z = 7-9$ [OIII]88um分光 (Inoue+16, Hashimoto+18)
 - 意外と、遠方銀河ではない分野かも

まとめ

- JWSTは遠方銀河研究に革命を起こしつつある
 - $z=9-17$ 銀河候補の大量発見
 - $z>6$ 銀河のISMの物理状態 (例: 金属量, 電離パラメータ)
 - 遠方銀河のサイズ, 力学構造, AGN, 再電離, 星質量関数...
- 新規参入して大発見ができるかも
 - 多くのデータが公開されている
- 天文学者という仕事、めちゃくちゃ楽しいです
 - 驚きで鳥肌が立つ瞬間が何度かあります。
 - JWSTデータを使って $z=12$ 光度関数を描いた瞬間は、天文学者になってよかった、と思いました。