

人類の新しい眼 「ジェイムズ・ウェッブ宇宙望遠鏡」 で宇宙を観る

播金 優一
(東京大学宇宙線研究所)

自己紹介



- はりかね 播金 優一 (天文学者)
 - 1991年12月生まれ (31歳)
 - 2019年3月: 東京大学理学系研究科物理学専攻 博士
 - 2019-2020年: 研究員 (国立天文台、University College London)
 - 2020年6月-現在: 東京大学宇宙線研究所・助教
- (富士通の計算機システムに大変お世話になっています)

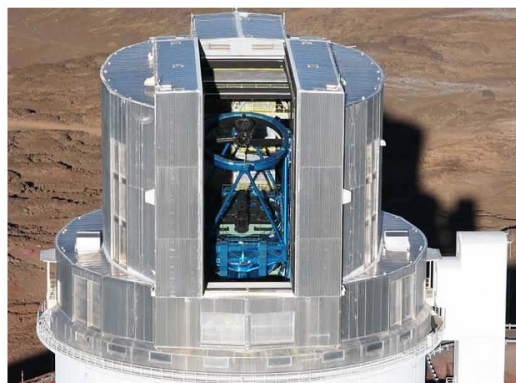
- 大望遠鏡を使って、昔の銀河の研究をしています

すばる

アルマ

ハッブル

ジェームズ・ウェッブ



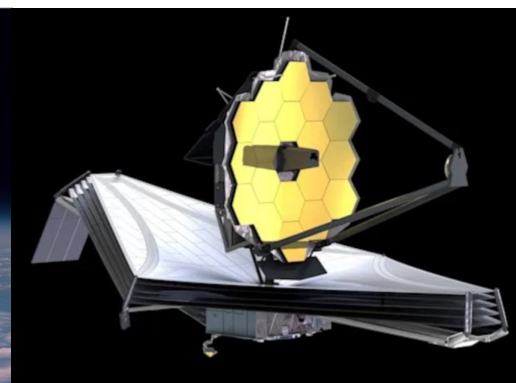
(NAOJ)



(ALMA)



(NASA)



(NASA)

ジェイムズ・ウェッブ宇宙望遠鏡 (JWST)

- 一昨年12/25打ち上げ、去年7/12に最初の画像公開
 - ハubble宇宙望遠鏡の後継機
 - 1兆円規模の巨大望遠鏡プロジェクト



7/12の米ホワイトハウスでの最初の画像公開 (NASA)

JWSTの科学目標



Early Universe

ビッグバン後に誕生した最初の銀河や天体の探査
(初代銀河)



Galaxies Over Time

現在までに銀河がどのように進化してきたのかの調査
(銀河進化)



Star Lifecycle

星の誕生から惑星の形成までの観測
(星・惑星形成)

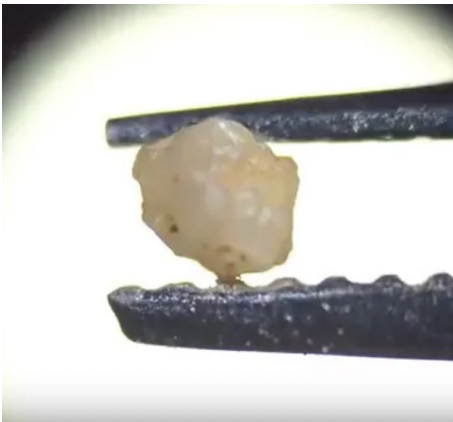


Other Worlds

惑星の性質を調査及び地球外生命の可能性の探査
(系外惑星)

JWSTの最初の公開画像

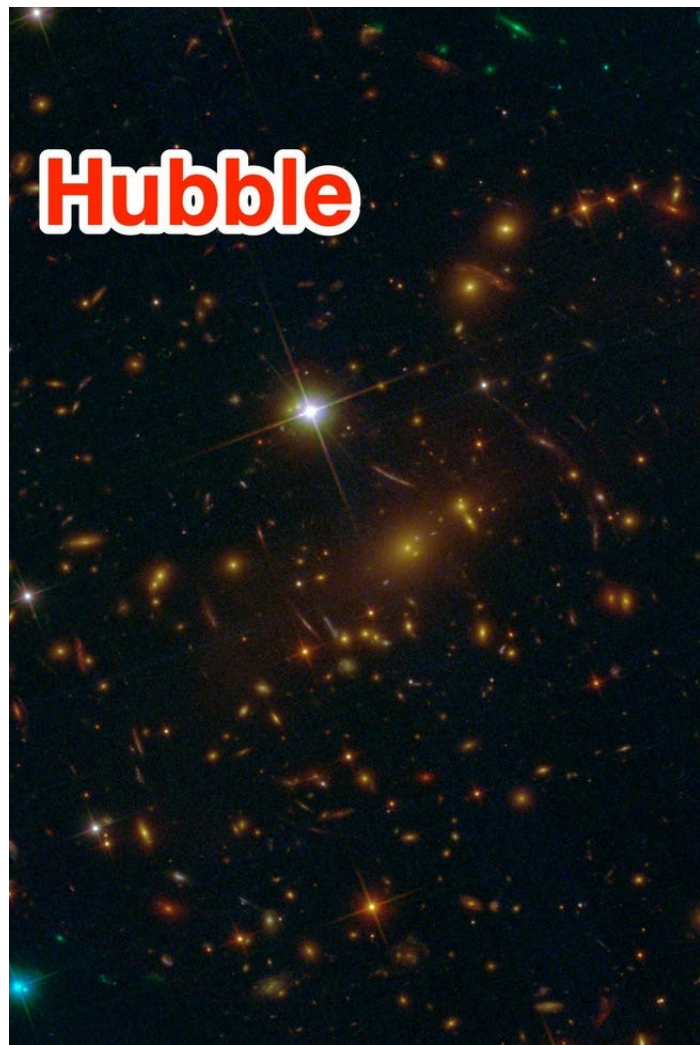
- SMACS0723という46億年前の銀河団
 - 1粒の砂を摘んで空に掲げたくらいの小ささ



NASA

JWSTの最初の画像

ハッブル望遠鏡

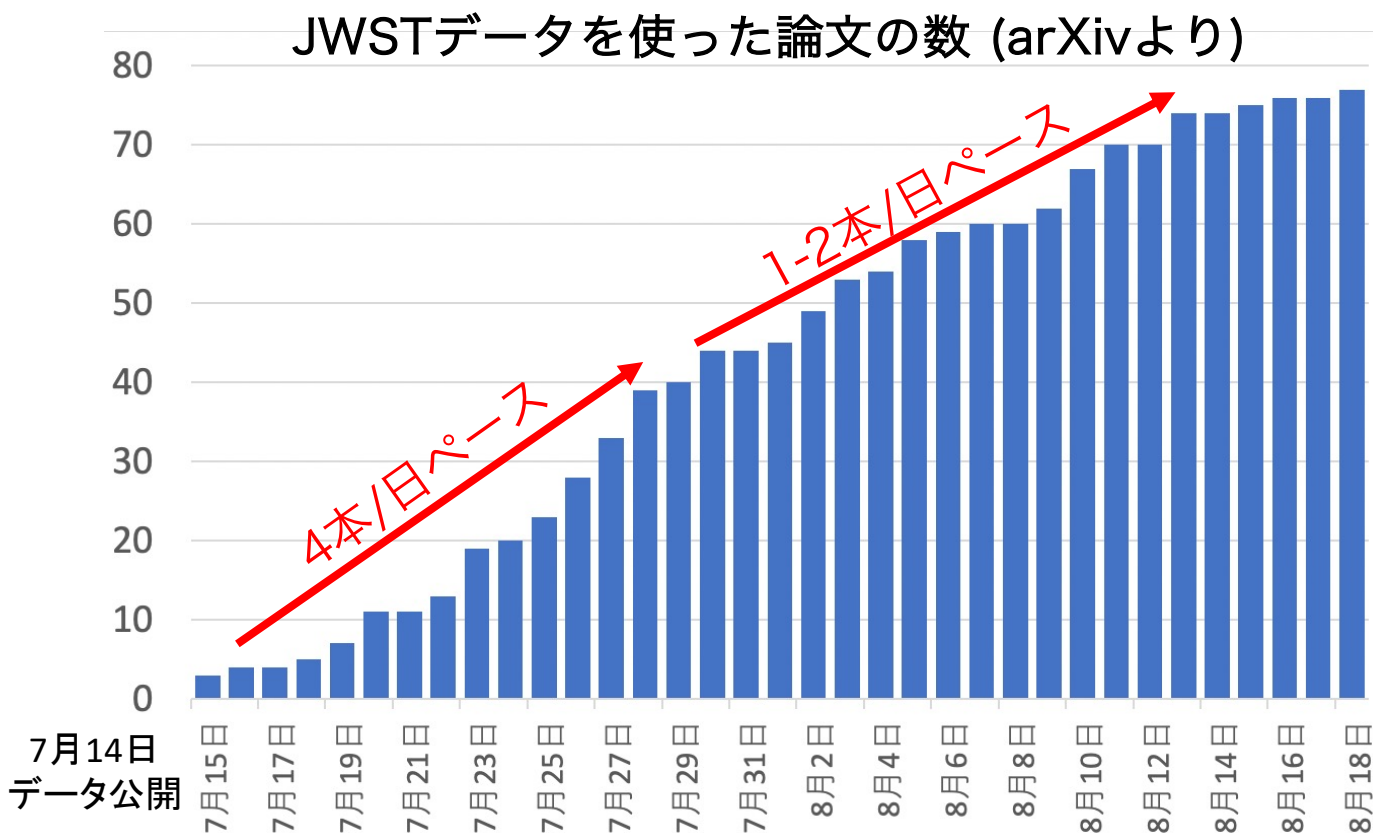


JWST



JWST論文ラッシュ

- >100の論文がプレプリントサーバーに投稿された
 - 世界中の天文学者がJWSTデータに夢中
 - とある日本人天文学者「世界が変わってしまった」



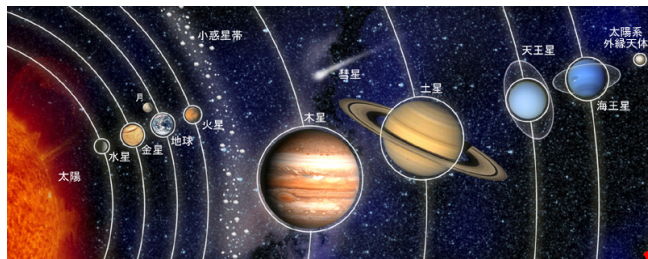
本日の内容

- 昔の銀河の研究の目標
 - なぜ昔の銀河の観測が大事なのか？
 - これまでの遠方銀河研究の進展
- ジェイムズ・ウェッブ宇宙望遠鏡（JWST）
 - 概要、歴史
 - 観測プロセス
 - これまでの様子と今後の展望

1. 昔の銀河の研究の目標

天の川銀河

- 渦巻銀河
- 質量 (星+星間ガス): 太陽質量の1000億倍
 - ダークマターはその10倍くらい
 - 太陽数個分の星が1年に生まれている
- 年齢: 100億-130億歳



太陽系図鑑



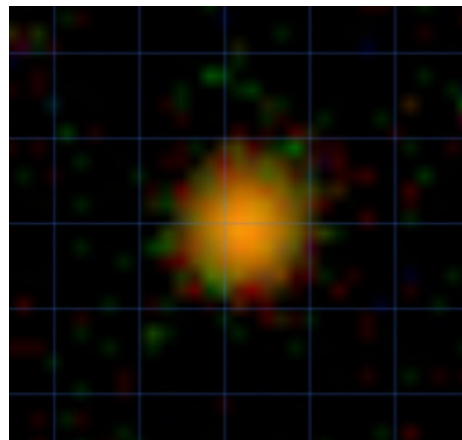
銀河は進化する

- 銀河は進化している
 - 今の宇宙: 渦巻銀河、楕円銀河が多い
 - 昔の宇宙: 不規則銀河が多い
- 昔の銀河＝銀河進化の初期段階

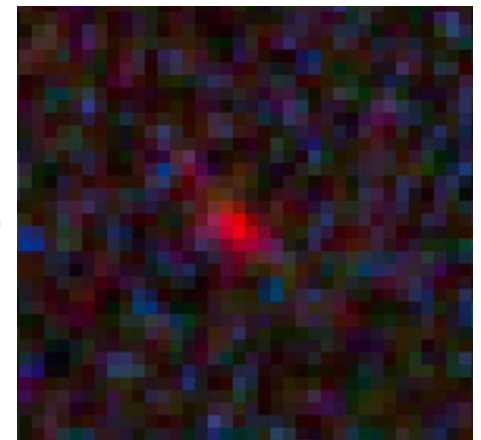
現在



120億年前

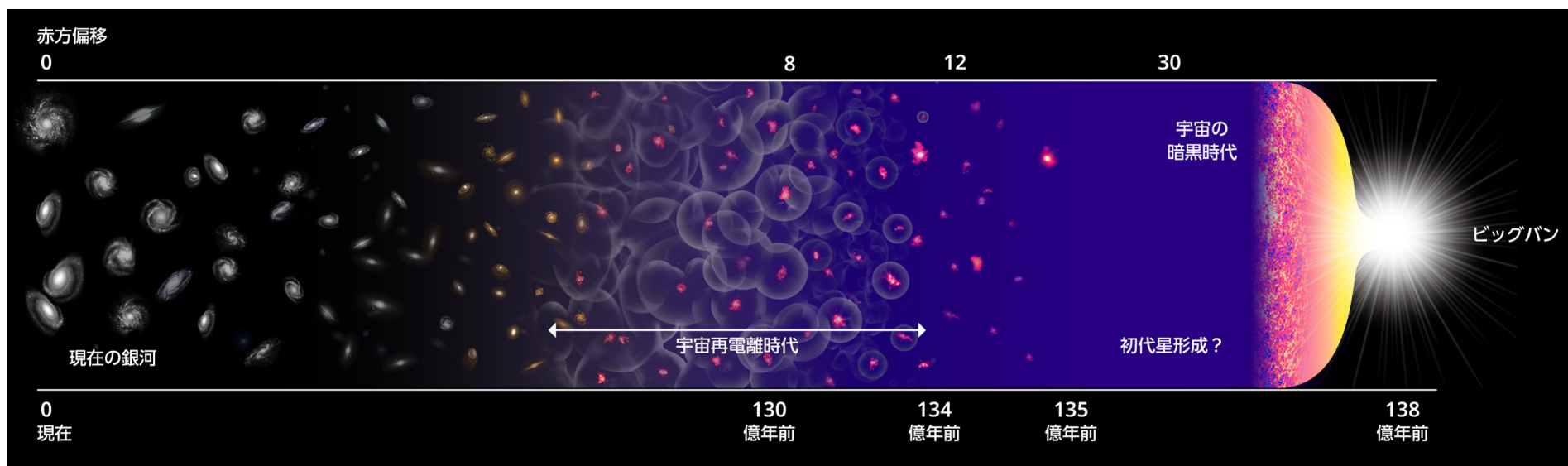


133億年前

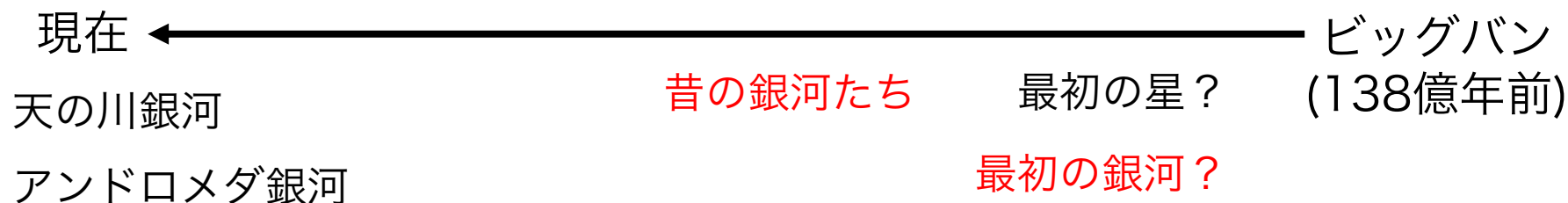


銀河の研究の目標

- 銀河がどう形成し、進化したのかを理解したい
 - 最初の銀河や星はいつ生まれたのか？
 - 観測で最も昔の銀河を探したい

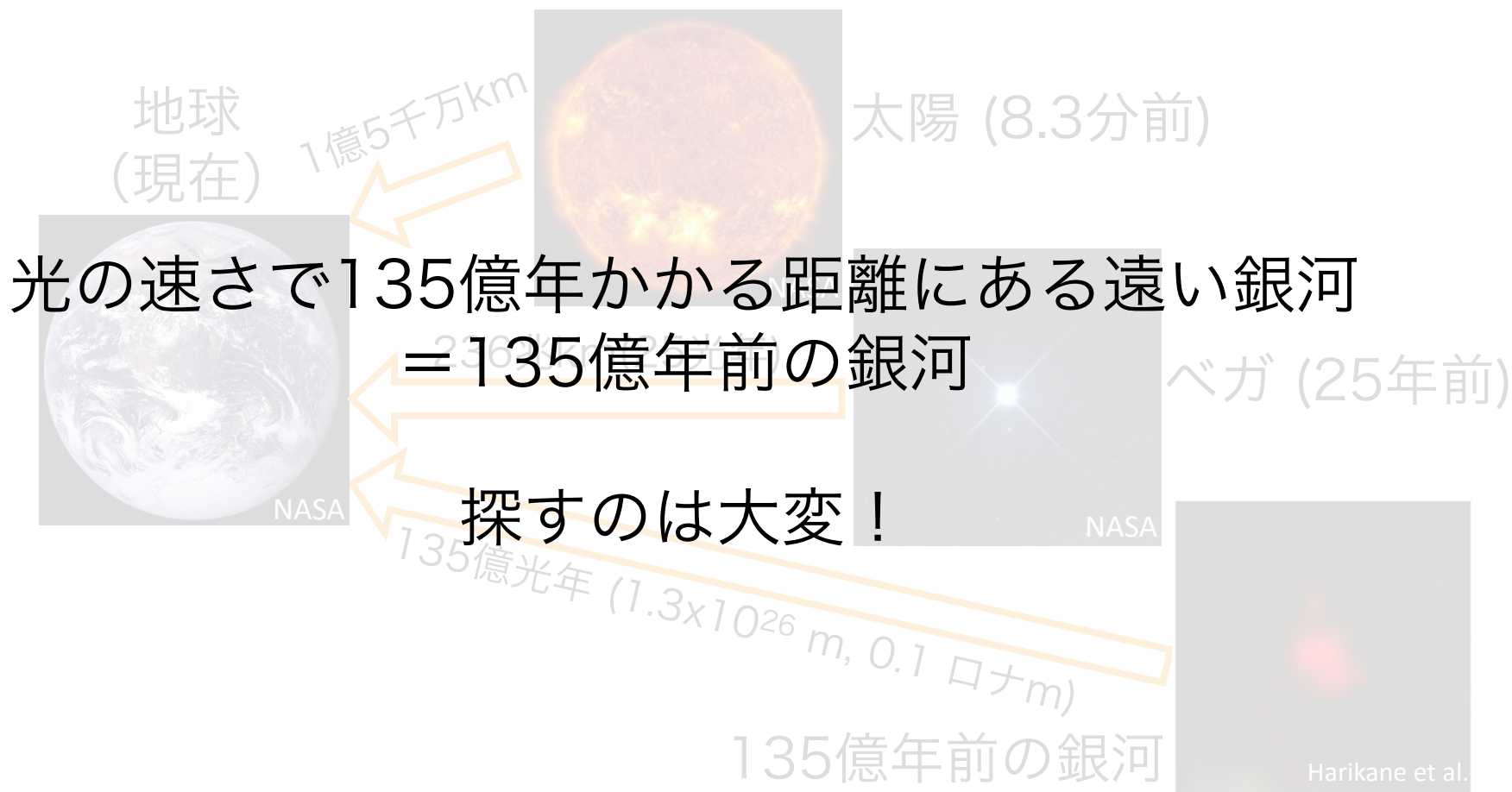


Harikane et al.



昔の銀河は見える

- 光の速さは有限（1秒間で地球を7周半）
 - 遠くの宇宙の銀河 (遠方銀河) = 昔の銀河



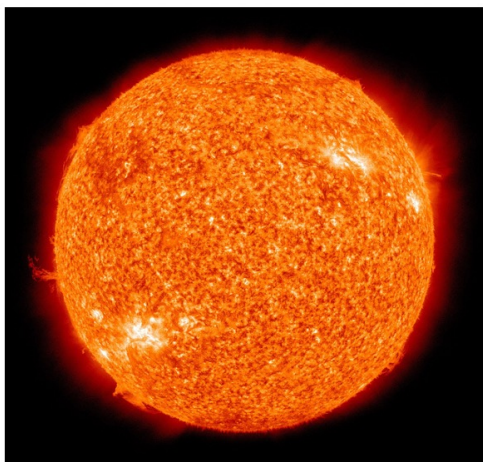
昔の銀河の特徴

1. 遠くて暗い
2. 赤い (波長が長い)
3. 数が少ない

大変ポイント1: 昔の銀河は暗い

- 昔（遠方）にある銀河は暗い
 - 25-30等級、6等星の1億分の1の暗さ
 - 等級 $m_{AB} \approx -2.5 \log_{10} \left(\frac{f_\nu}{3631 \text{ Jy}} \right)$
 f_ν : フラックス密度 ($10^{-26} \text{ W/Hz/m}^2$)
- 大きな望遠鏡を使って光を集める必要がある

太陽 -27等級



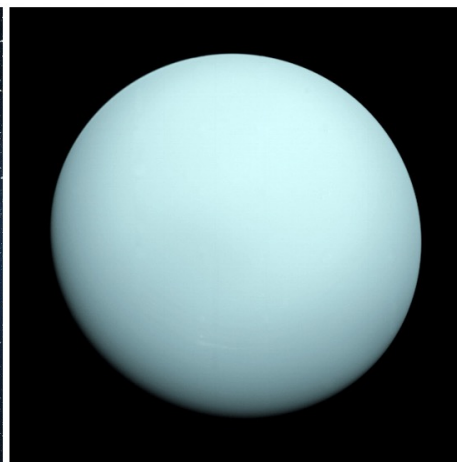
(NASA)

シリウス -1等級



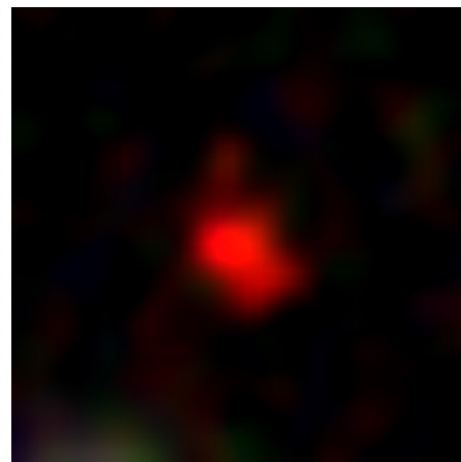
(STScI)

天王星 6等級



(NASA)

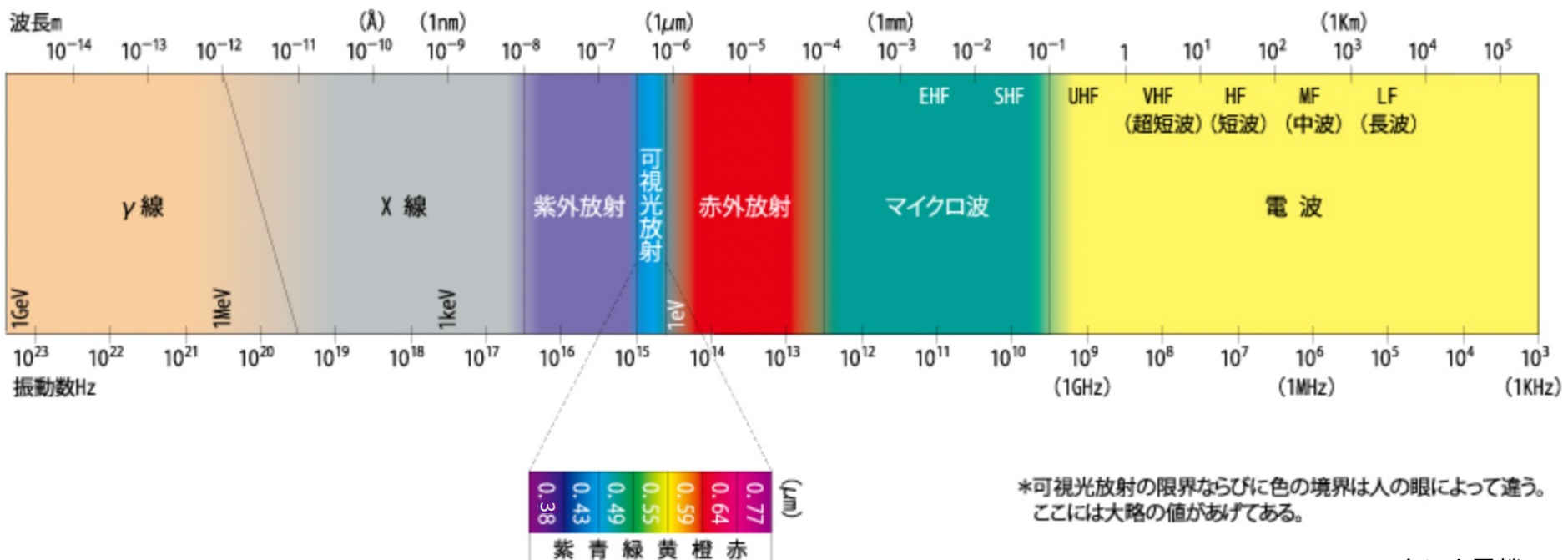
遠方銀河 25等級



(Harikane et al.)

大変ポイント2: 昔の銀河は赤い

- 正確には、波長が長い



大変ポイント2: 昔の銀河は赤い

- 正確には、波長が長い
 - 長い波長（赤外線）まで観測する必要がある

現在 ($z=0$)



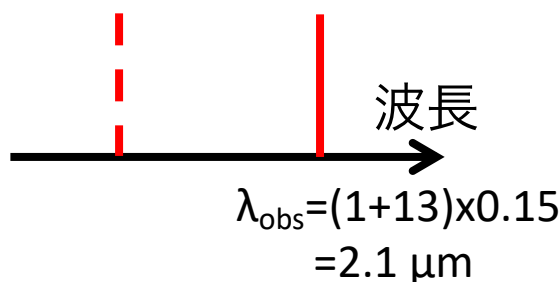
$$\lambda_{\text{obs}} = (1+z) \times \lambda_{\text{int}}$$

λ_{obs} : 観測される波長

λ_{int} : 元々の波長

z : 赤方偏移

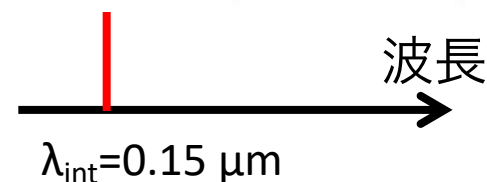
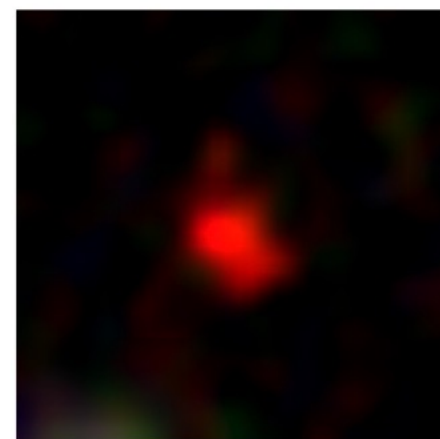
宇宙膨張による
赤方偏移



赤外光

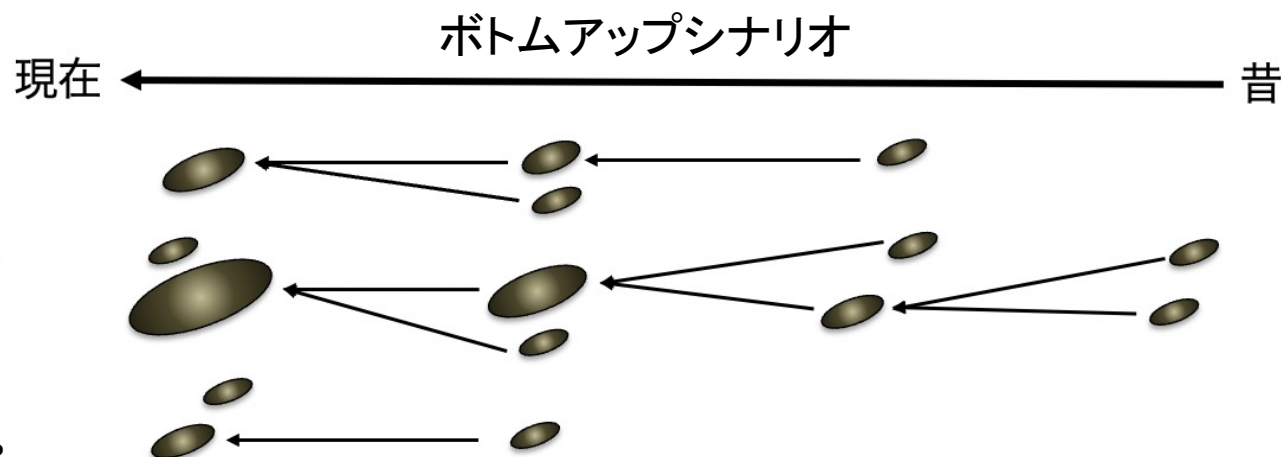
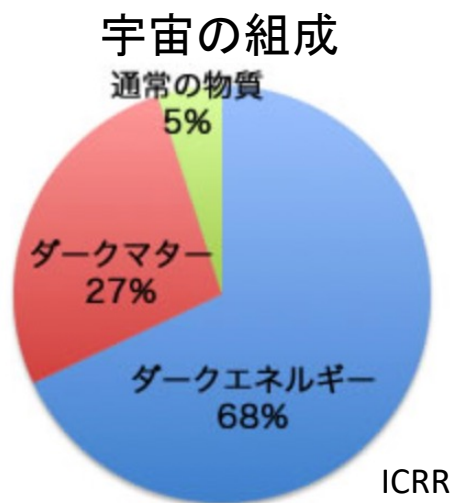
紫外光

135億年前
($z=13$)



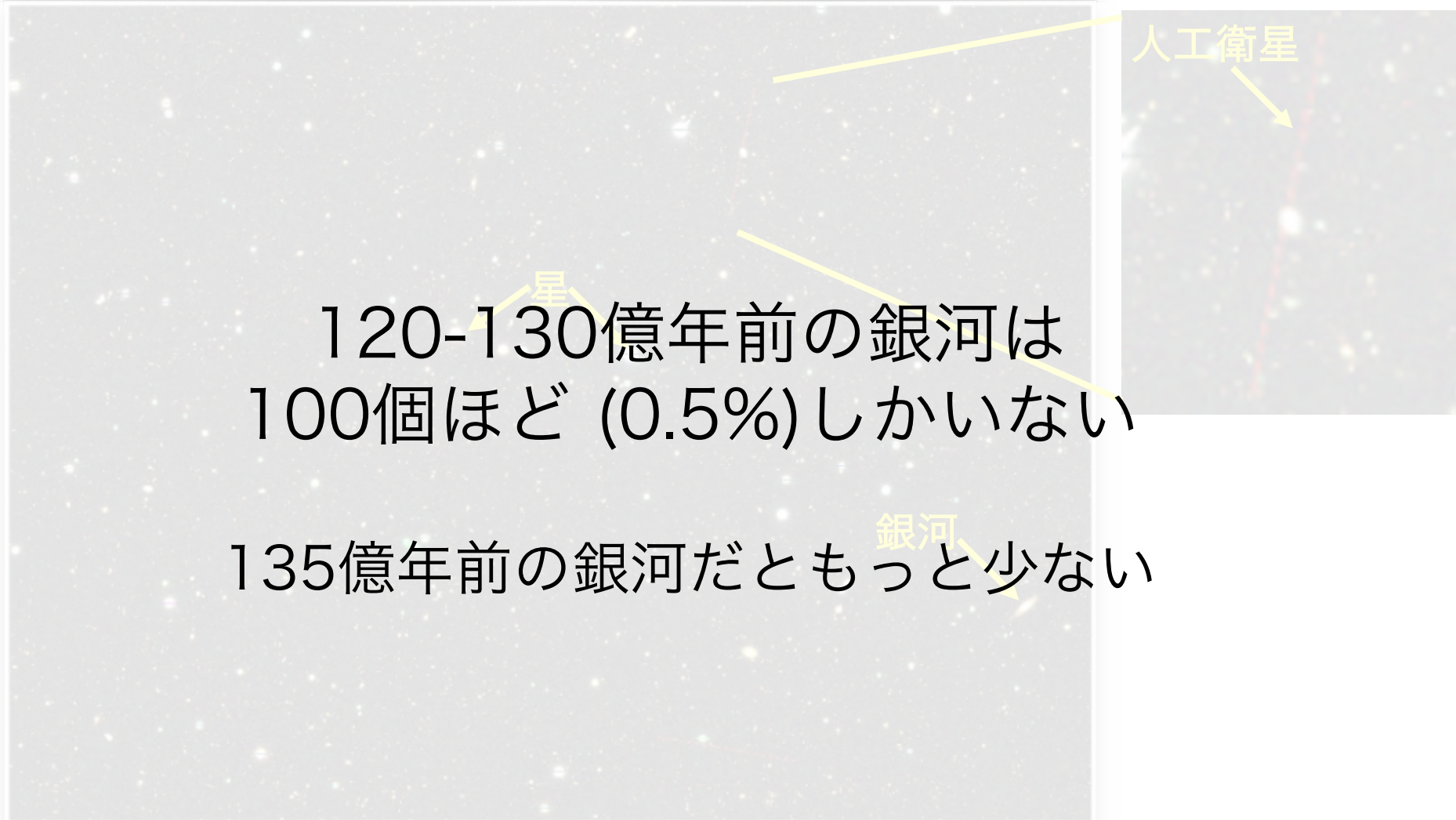
大変ポイント3: 昔の銀河は少ない

- ボトムアップシナリオ (冷たいダークマター)
 - 通常の物質 (5%) よりダークマター (27%) が支配的
 - 小さい銀河からできて、大きい銀河に成長した
- 明るい (大きい、重い) 銀河の方が数が少ない



すばる望遠鏡で撮った宇宙の写真

合計約2万個の天体

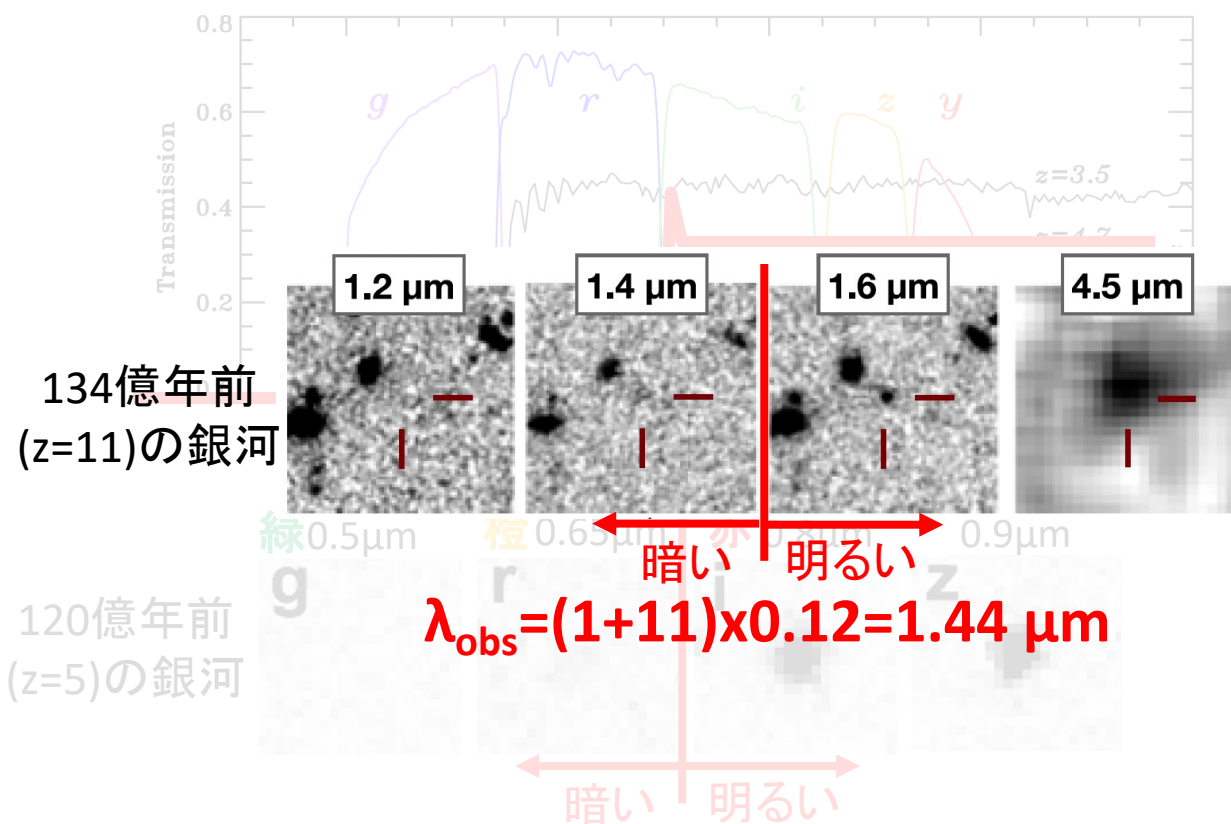


120-130億年前の銀河は
100個ほど (0.5%) しかいない

135億年前の銀河だともっと少ない

遠方銀河の探し方

- 昔の銀河は赤い（波長が長い）
- 長い波長だけで見える銀河 = 昔の銀河の候補
 - 水素の吸収（ライマンブレイク, $0.12\mu\text{m}$ ）を使う



$\lambda_{\text{obs}} = (1+z) \times \lambda_{\text{int}}$
 λ_{obs} : 観測される波長
 λ_{int} : 元々の波長
 z : 赤方偏移
 ブレイク

観測の種類

撮像観測（写真）

- 多くの銀河を一度に観測
- 詳細に調べるには分光が必要

分光観測（スペクトル）

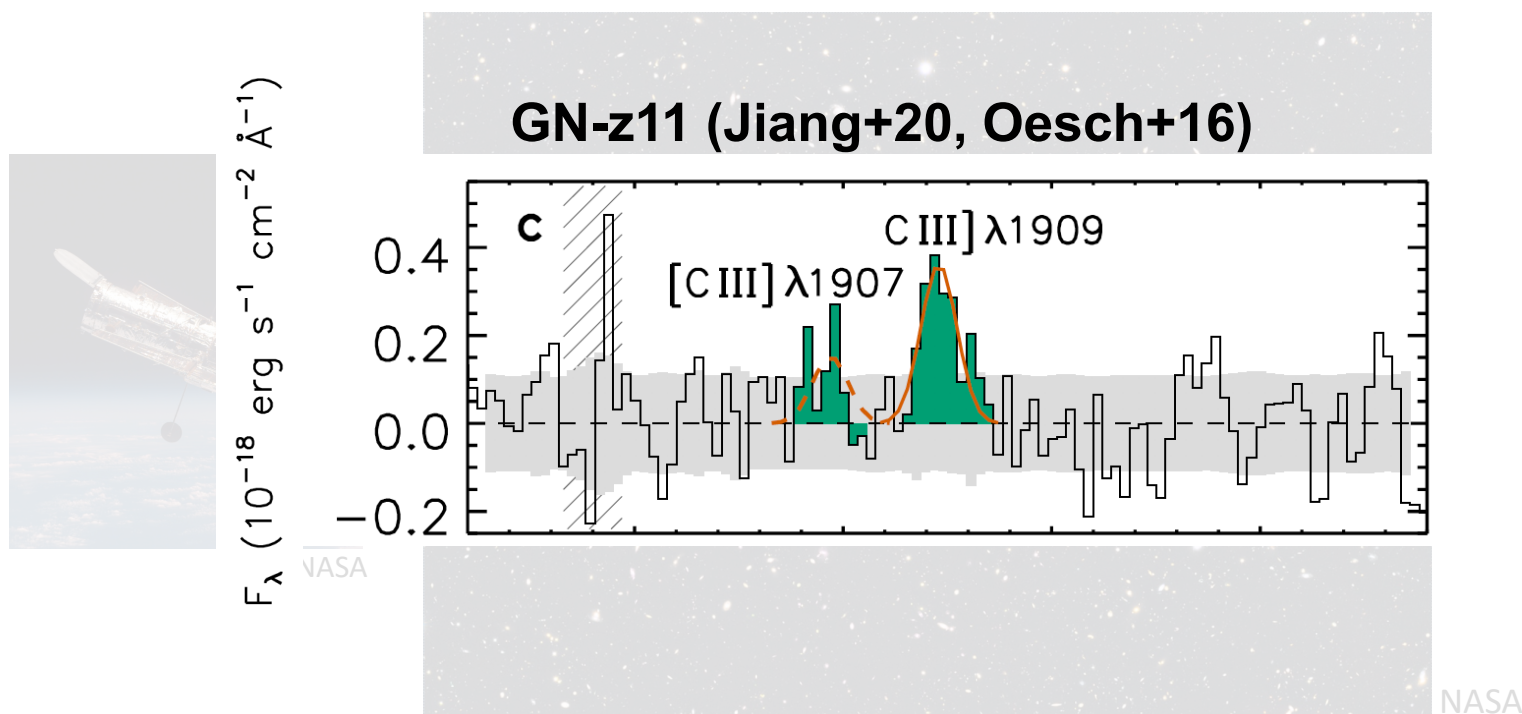
- 個別に分光し輝線を検出
- 正確な距離がわかるが、時間がかかる

撮像観測で撮った写真の中から
昔の銀河の候補を探して、
分光観測で調べる



JWST登場前の昔の銀河の記録

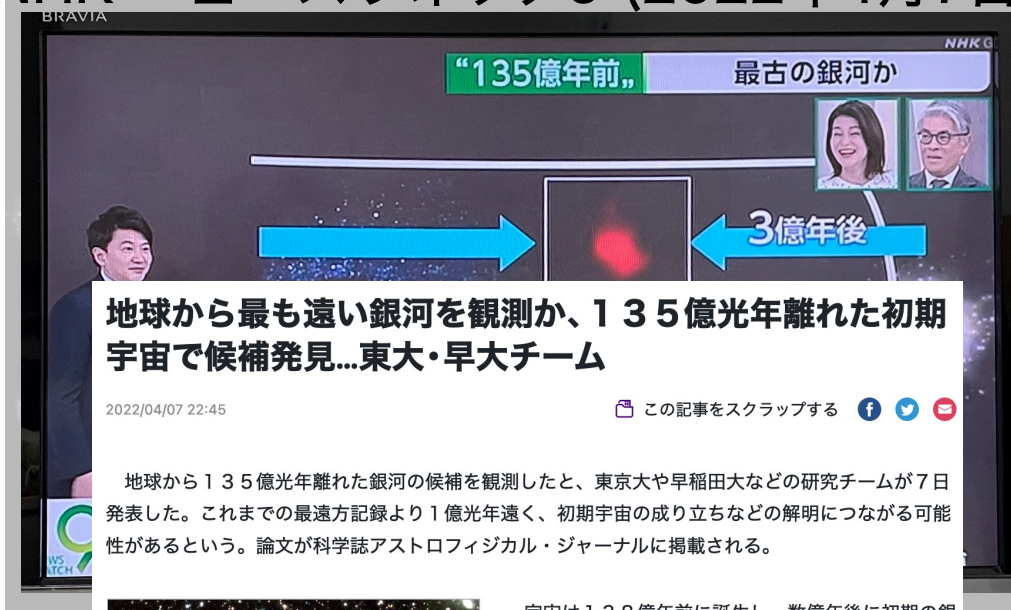
- ハッブル宇宙望遠鏡で見つかった134億年前 ($z=11$) の銀河 GN-z11
- 炭素の輝線スペクトルで距離を確認 (2020年)



最遠方銀河の候補を発見

- 134.8億年前の銀河の候補、HD1 (今年4月に発表)
 - 地上望遠鏡データ、70万個以上の天体の中から発見

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

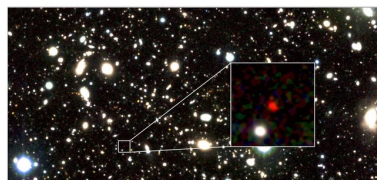
3億年後

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で候補発見...東大・早大チーム

2022/04/07 22:45

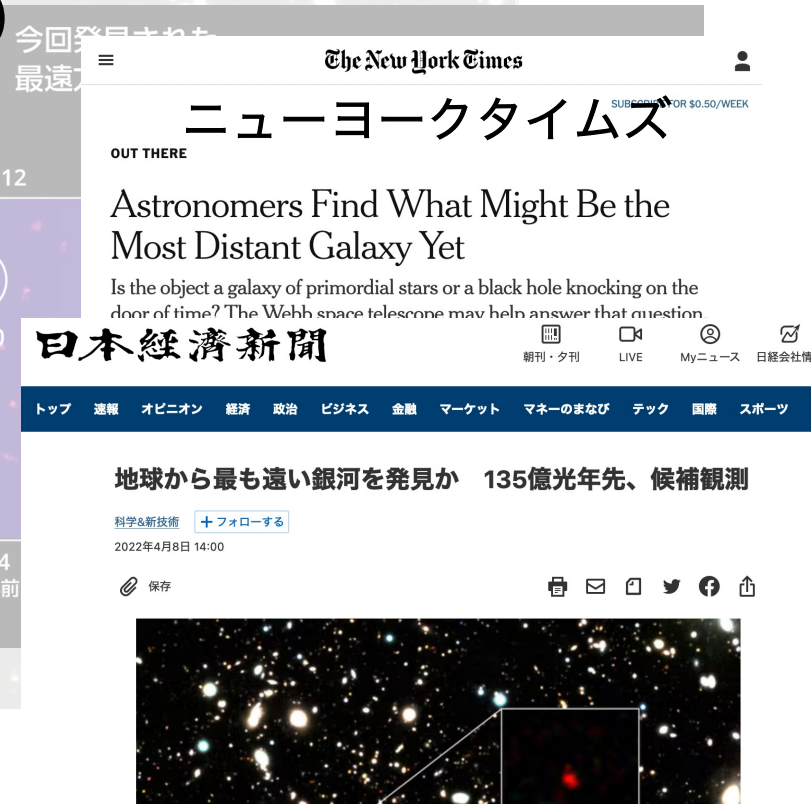
この記事をスクラップする

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



今回発見された最遠方銀河

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

Is the object a galaxy of primordial stars or a black hole knocking on the door of time? The Webb space telescope may help answer that question.

日本経済新聞

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

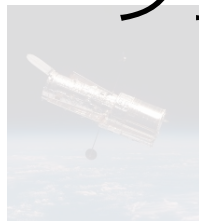


これまでの望遠鏡の限界

- ハッブル望遠鏡: $1.7\ \mu\text{m}$ までしか観測できない
 - 134億年前が限界 (昔の銀河は赤い)
- 地上望遠鏡: $2.5\ \mu\text{m}$ まで観測できるが、感度が足りない

長い波長 (赤外線, $30\ \mu\text{m}$) まで
高感度観測が可能な

ジェイムズ・ウェッブ宇宙望遠鏡



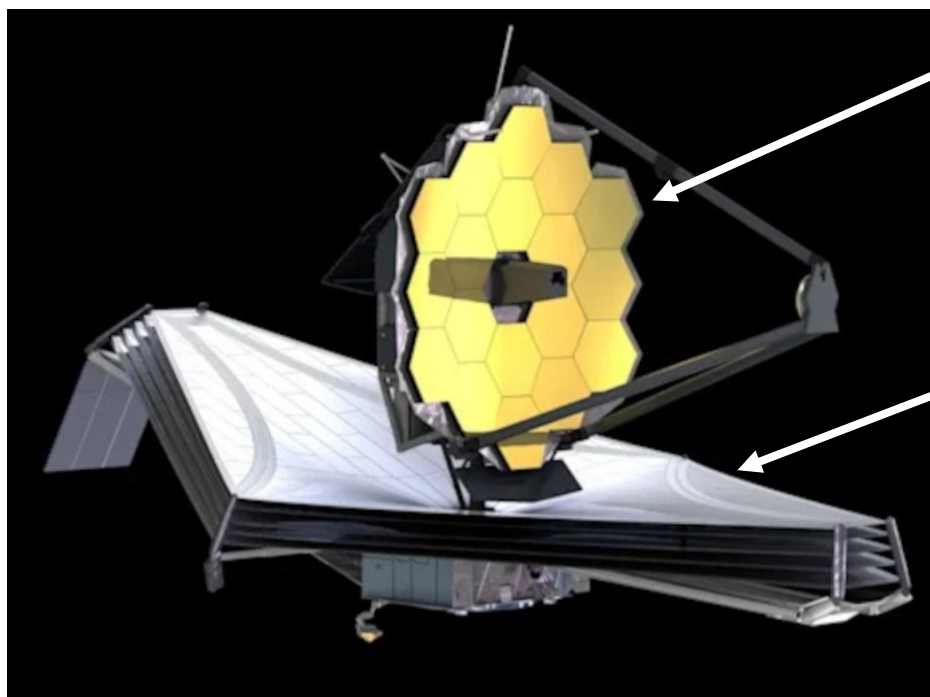
135億年前
($z=13$)の銀河



2. ジェイムズ・ウェッブ宇宙望遠鏡

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
- 一兆円規模の巨大望遠鏡プロジェクト
- 一昨年12/25打ち上げ、去年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℃に保つ

NASA

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**

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**)

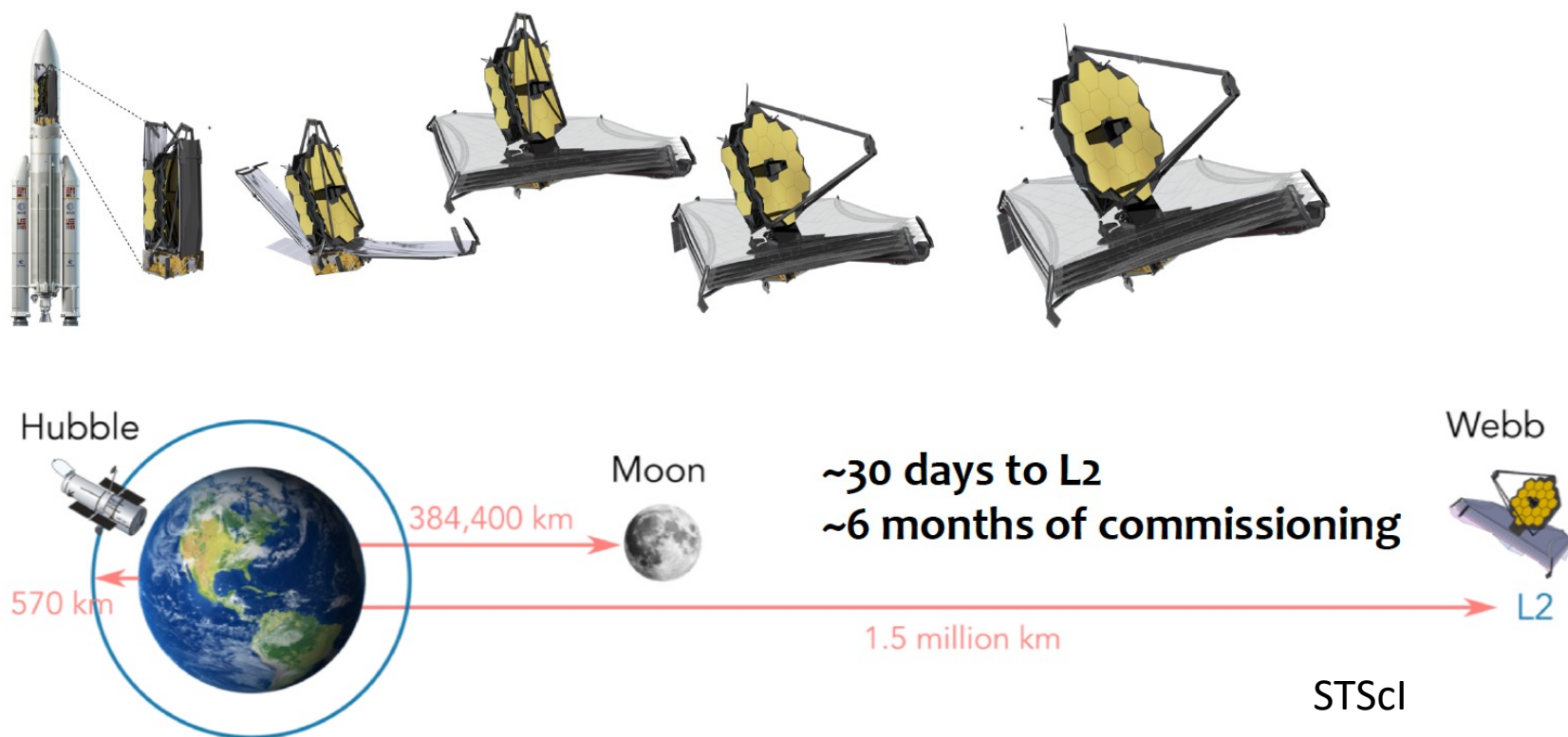


@ギアナ宇宙センター

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



観測は順調

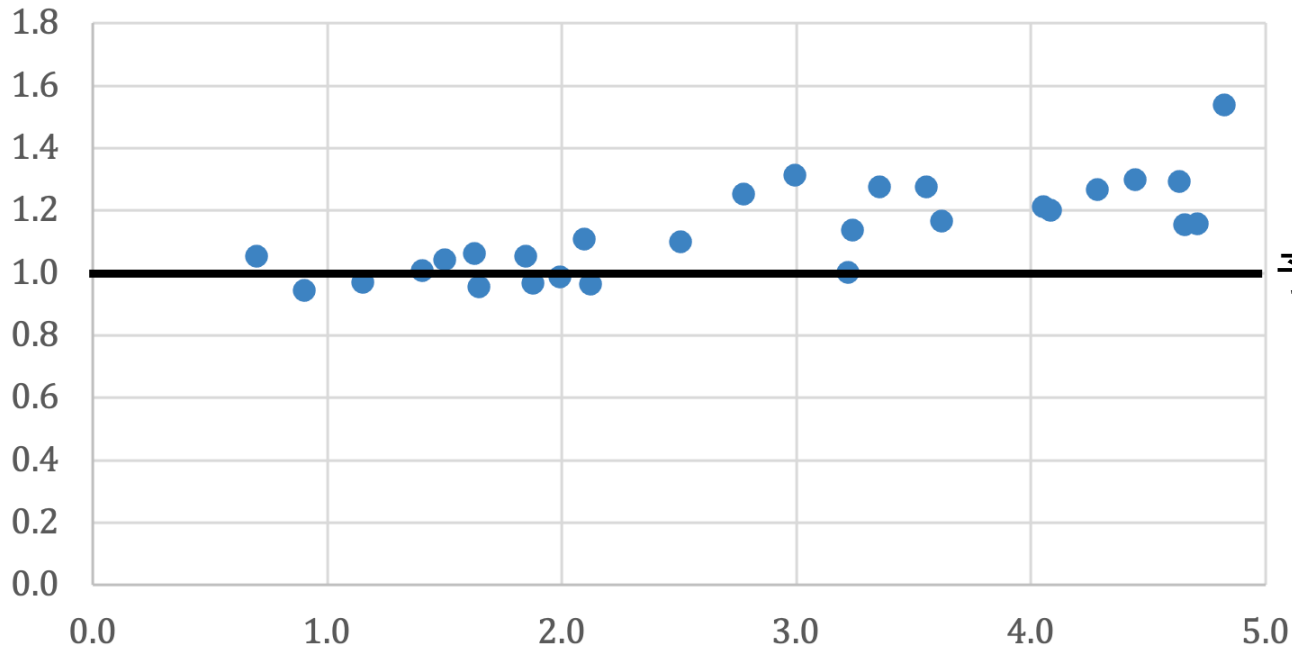
- 予想以上のパフォーマンスが出ている

実際の性能

/予想

Results from P330-E

Observed Throughput/
Throughput



予想通り

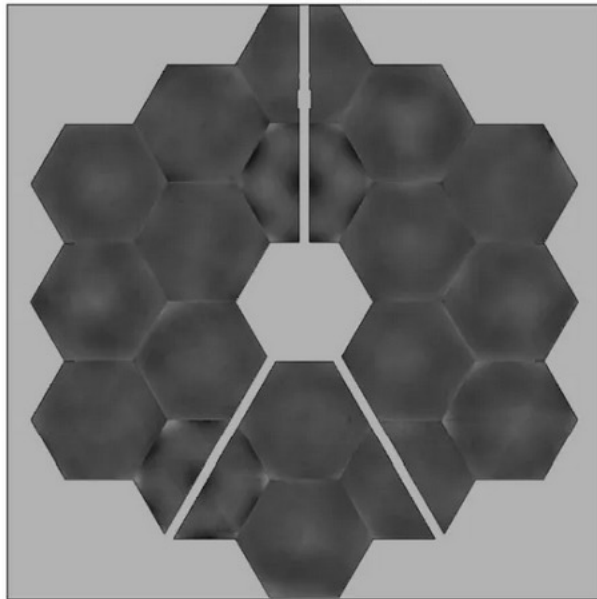
Rigby+22

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

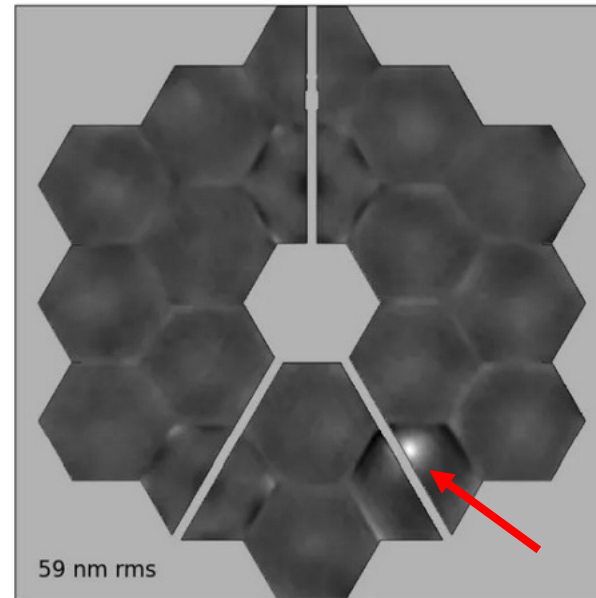
Ground Measurements for
Individual segments



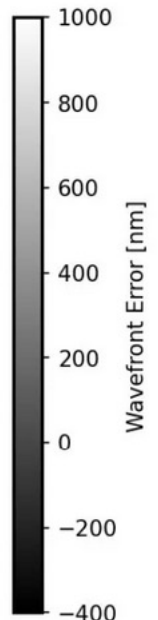
Interferometry measurements from NASA XRCF

隕石衝突後

Recent Best Mirror Alignment

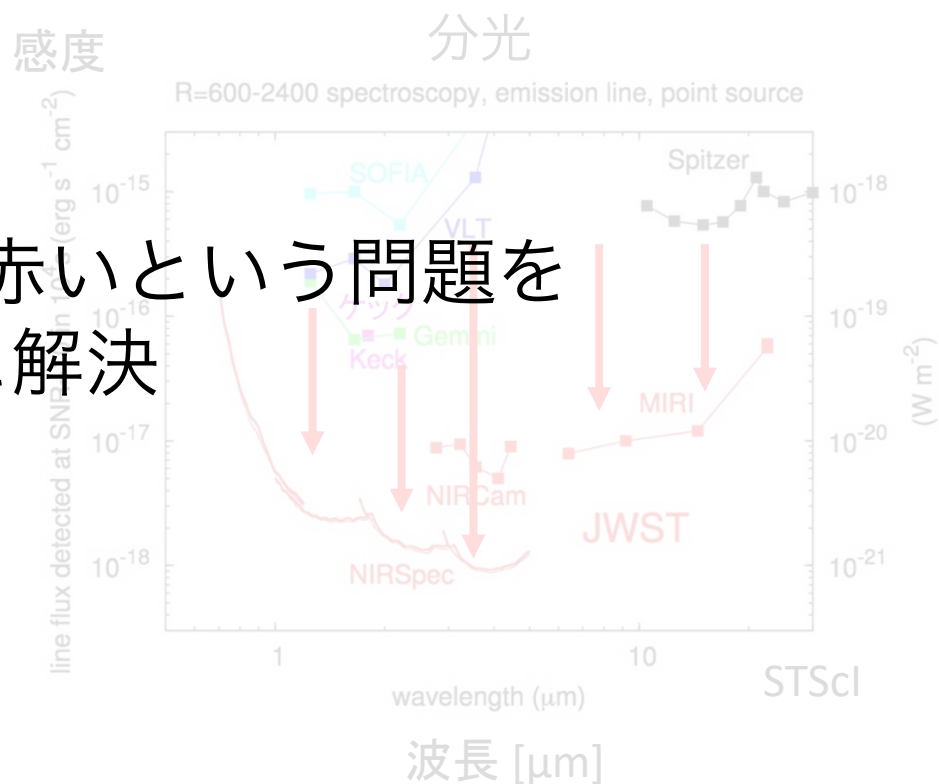
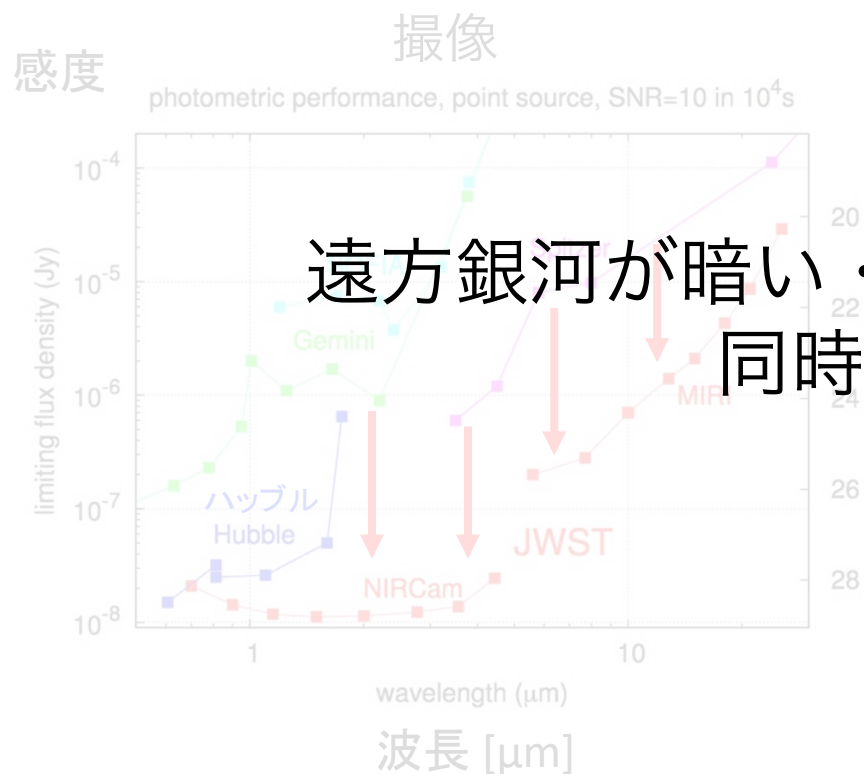


NIRCam wavefront sensing on 2022-06-21



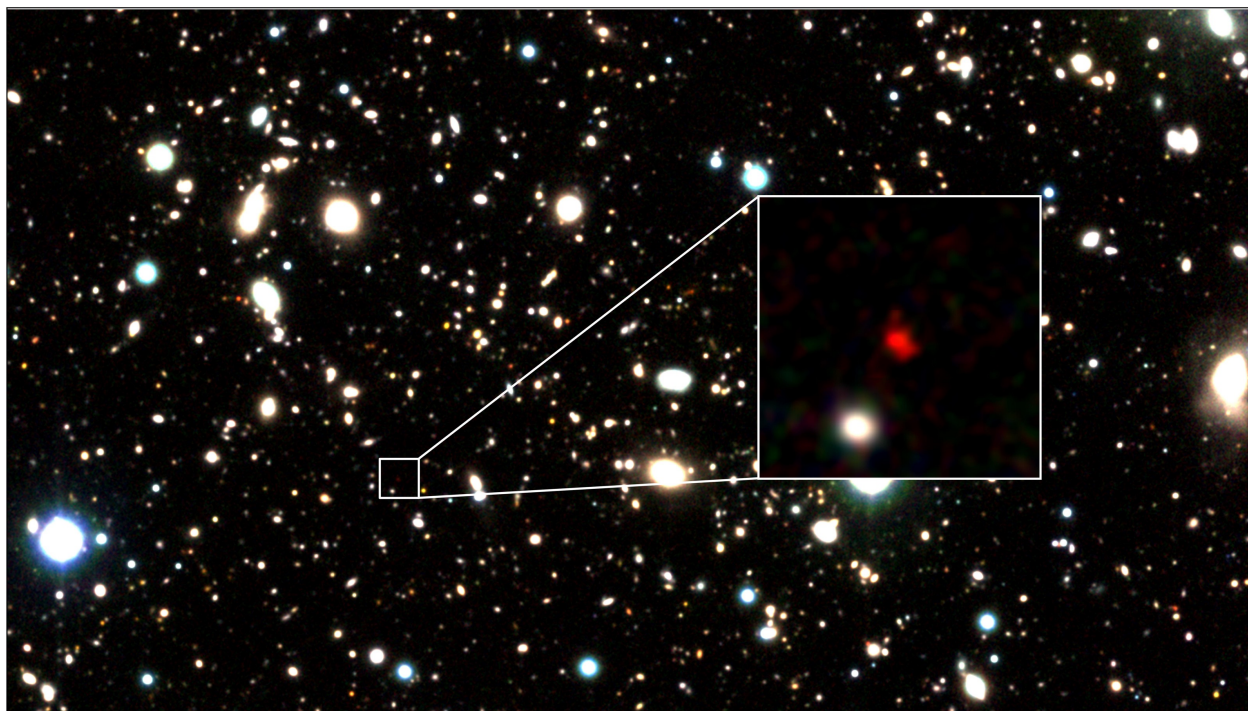
他の望遠鏡と比べた新規性

- 撮像・分光ともに感度が10-100倍以上向上



最遠方銀河候補を観測

- HD1が第1期観測のターゲットとして採択
 - プログラム代表: 播金
 - 135億年前の銀河かどうか分光観測で調査



観測提案書

- 世界中の研究者が観測提案をする
 - 倍率4倍 (ハッブルは10倍くらい)
 - 英語で8ページ + α

播金が代表として書いた提案書

James Webb Space Telescope

Cycle 1 GO Proposal

1740

H-drop galaxies: ``Rosetta Stones'' at $z \sim 13$ for galaxy formation studies

Scientific Category: Galaxies

Scientific Keywords: Galaxy Evolution, Galaxy Formation, High-Redshift Galaxies

Instruments: NIRSPEC

Proposal Size: SMALL

Exclusive Access Period: 12 months

Allocation Information (in hours):

Science Time: 2.7

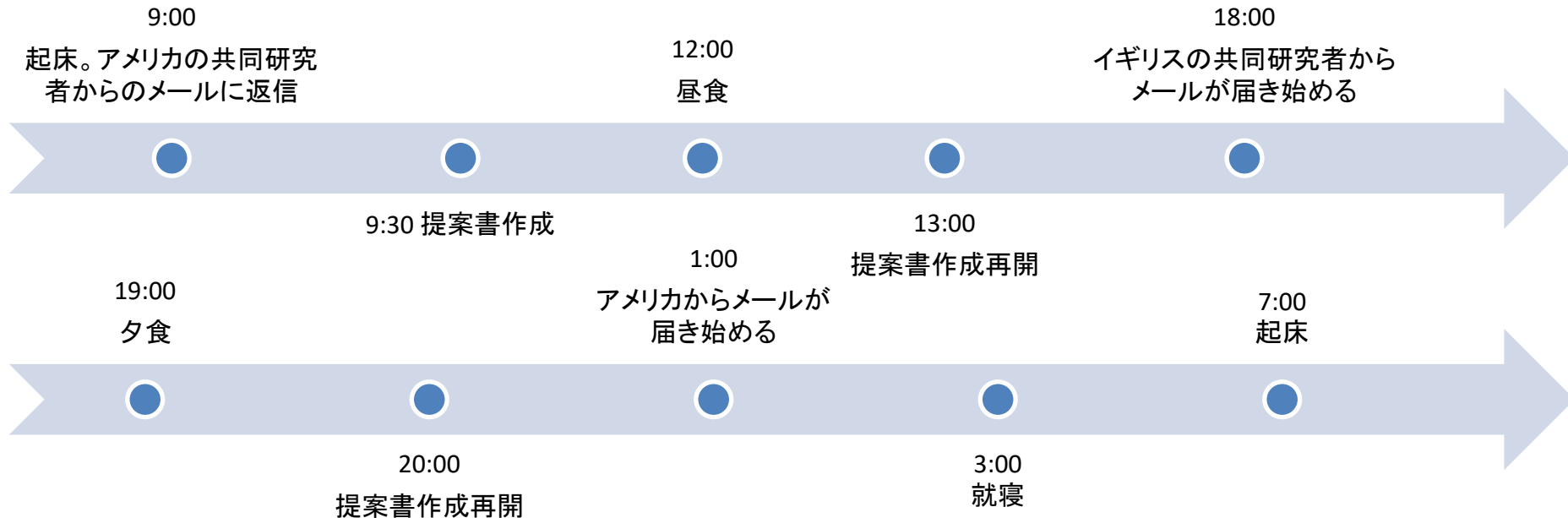
Charged Time: 6.6

Abstract

We propose NIRSpec/PRISM spectroscopy to confirm the Lyman break in secure candidates of luminous Lyman break galaxies at $z \sim 13$. These galaxies were found in an H-band dropout selection to search for unprecedentedly high- z objects at $z > 12$ in the 2.3 deg² near-infrared deep imaging data in the COSMOS and UDS fields. After careful examination of non-detections in the deep optical to H-band images as well as the flat spectrum from K-band to Spitzer IRAC [3.6] and [4.5]-bands, only three candidates remain. The absolute magnitudes of these objects are typically -23.4 and the photometric redshifts are estimated to be $z > 12$. An ALMA program targeting one of the candidates shows a tentative [OIII]88 μ m emission line at $z = 13.3$. The line flux is at the lower edge of the expectation, implying that this galaxy is a very low-metal system before chemical enrichment begins. A successful detection of the Lyman break from at least one object among them will yield the new redshift record far from the current ones at $z = 9.1$ and $z = 11.1$, and demonstrate the JWST capability for confirming galaxies at $z > 12$. These $z \sim 13$ galaxies are luminous enough to be followed-up with higher spectral resolution modes and will be ``Rosetta Stones" for galaxy formation studies, once their redshifts are determined.

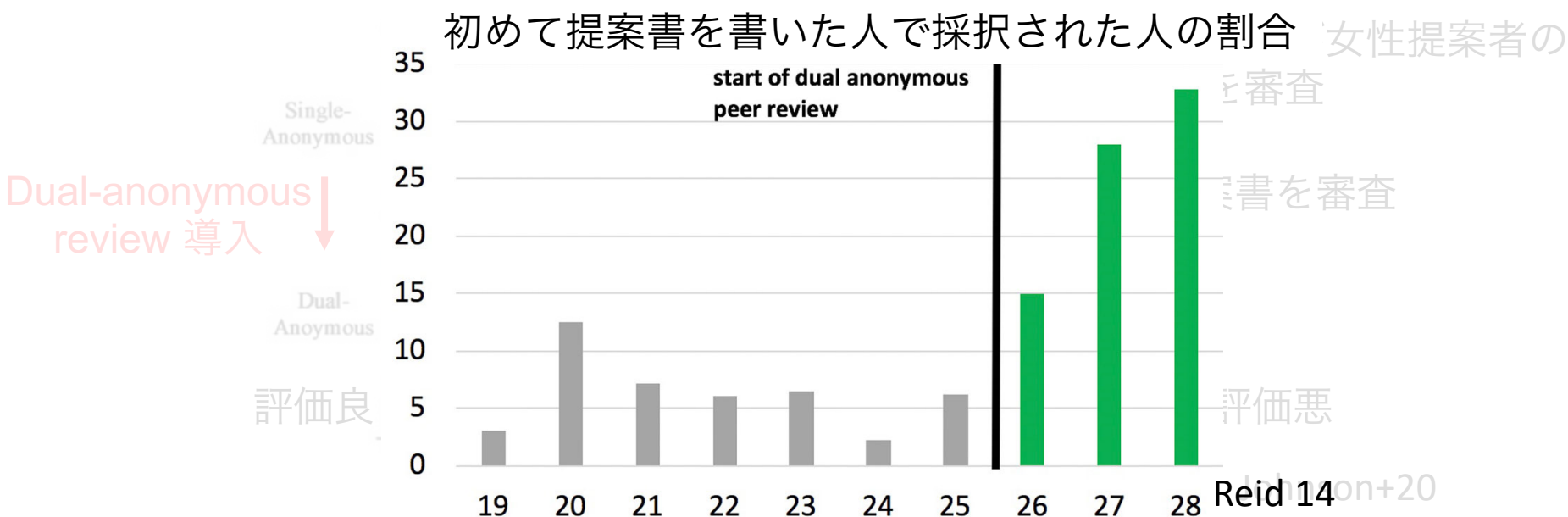
締め切り4日前のスケジュール

- 2020年11月20日-21日 (締め切り11/24)
- とにかく大変でした
 - どの時間でも日本+アメリカ+ヨーロッパからメール
 - すぐに対応しないと間に合わない
 - でも寝ないと頭が働かない



観測提案書の審査

- 初期観測 (cycle 1, 1084件の提案 → 286件を採択)
 - 科学的な重要性、実現可能性、観測スケジュール
- Dual-anonymous review
 - 提案者は審査員が誰なのか分からない
 - 審査員も誰が提案書を書いたのか分からない



観測のプロセス

- 観測スケジュールの策定 (286プログラム)
 - 常に太陽に背を向けるので、観測時期は限られる
 - 1週間毎に最終的なスケジュールを策定、コマンド送信
- データ取得。転送 (0.87 MB/s, 半日毎4時間)
- データはSTScIのサーバーで保存 (メール通知)
(宇宙望遠鏡科学研究所, アメリカ)



Space Telescope Science Institute <noreply@stsci.edu>

To Yuichi ▾

7:05 (5 時間前)



🌐 英語 ▾ > 日本語 ▾ [メッセージを翻訳](#)

[次の言語で無効にする: 英語](#) ×

New observations for proposal(s) 1657 are available in the JWST archive.

You must be authorized and logged in to retrieve data that are exclusive access. The PI of this program can grant access (if needed) to collaborators by visiting [MyST](#). If you have questions about access, please see the [MAST Accounts page](#), or contact the Archive HelpDesk at archive@stsci.edu.

You can retrieve the data from the Portal by navigating your browser to the link(s) below:

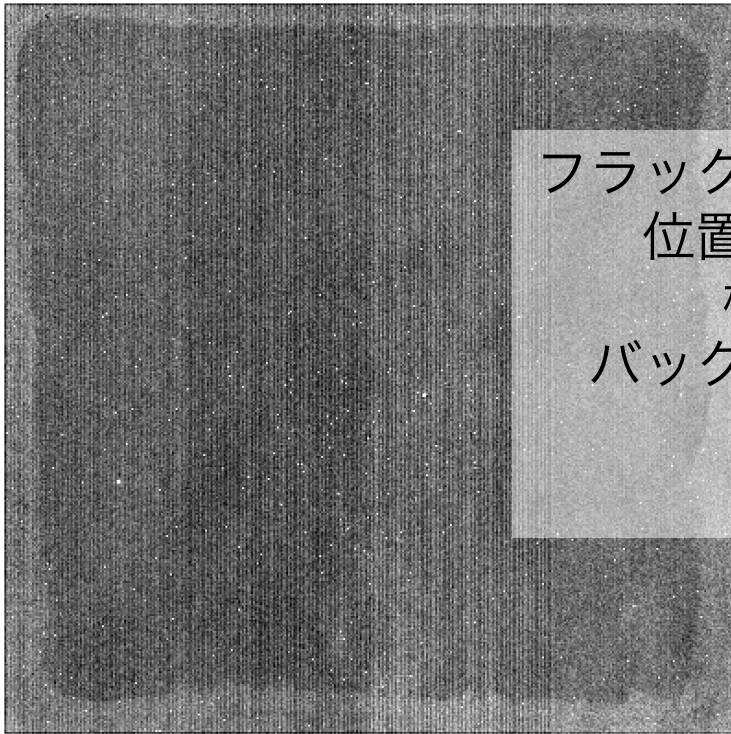
[Proposal 1657](#)



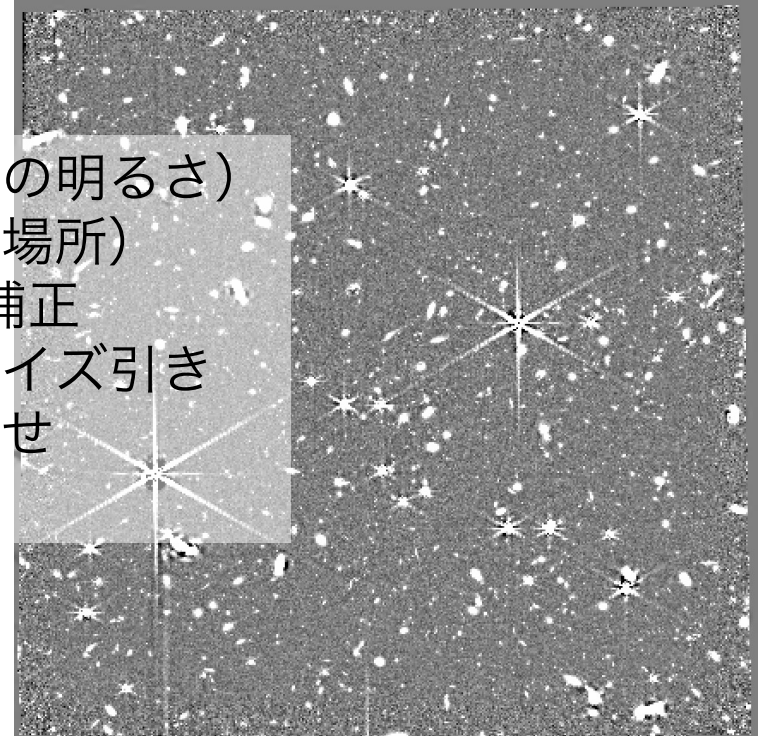
Analog.com
NASA

データ校正

生データ



校正済みデータ



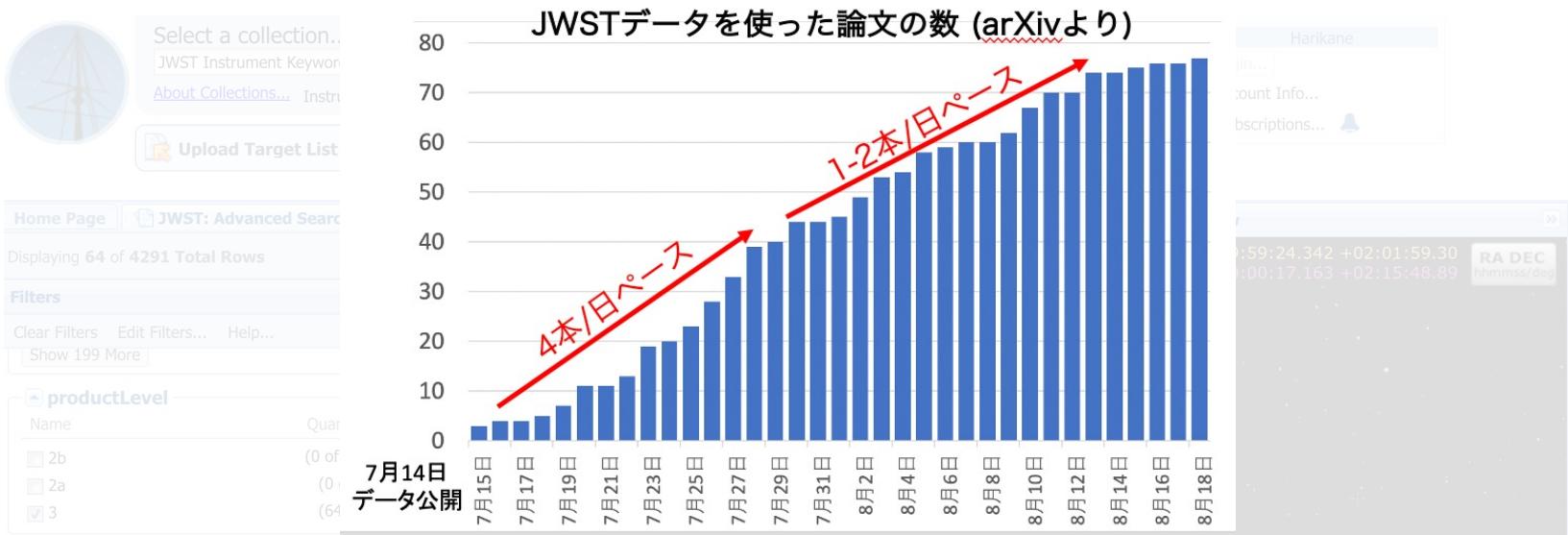
フラックス校正（天体の明るさ）
位置校正（天体の場所）
検出素子感度補正
バックグラウンドノイズ引き
画像足し合わせ
...

STScIが校正済みデータを公開してくれるが、問題が多い
→ 研究者個人で大学の計算機等を使って校正（1日~1週間）

データ公開

Mikulski Archive for Space Telescopes

- STScIのデータサーバー (MAST)
 - 初期データ (7/14公開) はAmazon web service (AWS)
- 即時公開 vs 占有期間あり
 - 即時公開のメリット: 世界中の研究者がデータを使うことで、いち早く多様な成果を出せる。
 - 観測提案者のメリットは？



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} YOSHIKI ONO,¹ KIMIHIKO NAKAJIMA,² YUKI ISOBE,^{1,6}
HIROYA UMEDA,^{1,6} KEN MAWATARI,² AND YECHEI ZHANG^{1,7}

¹*Institute for Cosmic Ray Research, The University of Tokyo, 5-1-5 Kashiwanoha, Kashiwa, Chiba 277-8582, Japan*

²*National Astronomical Observatory of Japan, 2-21-1 Osawa, Mitaka, Tokyo 181-8588, Japan*

³*Kavli Institute for the Physics and Mathematics of the Universe (WPI), University of Tokyo, Kashiwa, Chiba 277-8583, Japan*

⁴*Center for Frontier Science, Chiba University, 1-33 Yayoi-cho, Inage-ku, Chiba 263-8522, Japan*

⁵*Department of Physics, Graduate School of Science, Chiba University, 1-33 Yayoi-Cho, Inage-Ku, Chiba 263-8522, Japan*

⁶*Department of Physics, Graduate School of Science, The University of Tokyo, 7-3-1 Hongo, Bunkyo, Tokyo 113-0033, Japan*

⁷*Department of Astronomy, Graduate School of Science, The University of Tokyo, 7-3-1 Hongo, Bunkyo, Tokyo 113-0033, Japan*

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.

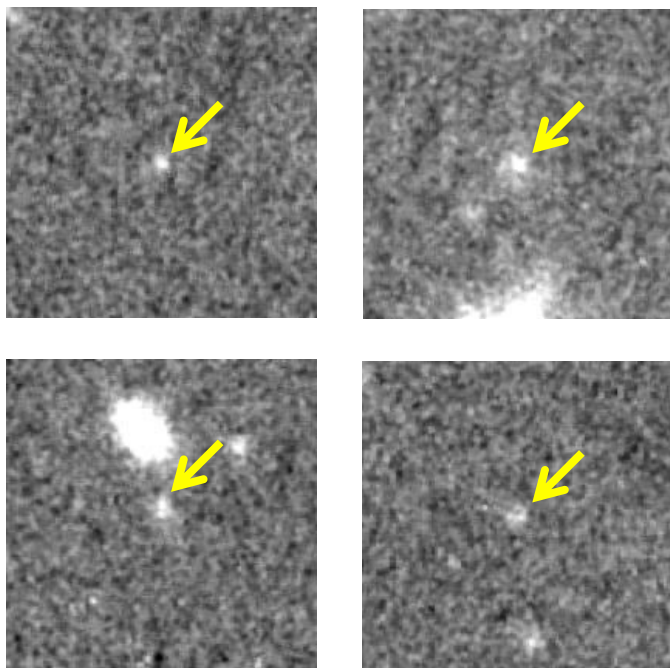
Keywords: galaxies: formation — galaxies: evolution — galaxies: high-redshift

Xiv:2208.01612v1 [astro-ph.GA] 2 Aug 2022

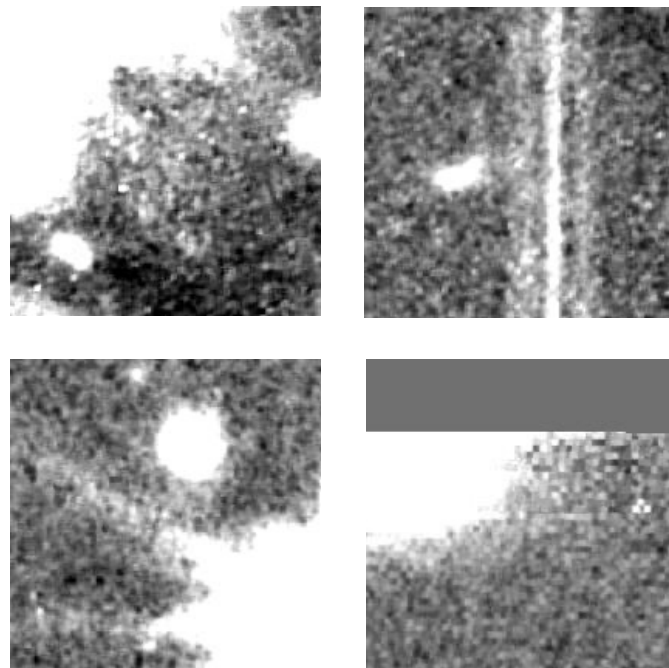
目で天体をチェック

- プログラムを使って天体を選ぶと、本物 (銀河) ではない信号が紛れ込む
- 機械学習で分類も可能 (Ono,...,YH+21)

本物の天体



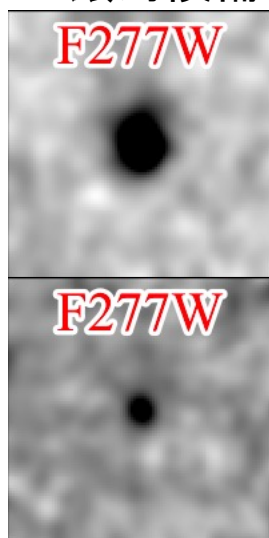
偽物の信号



昔の銀河の候補が大量に見つかった

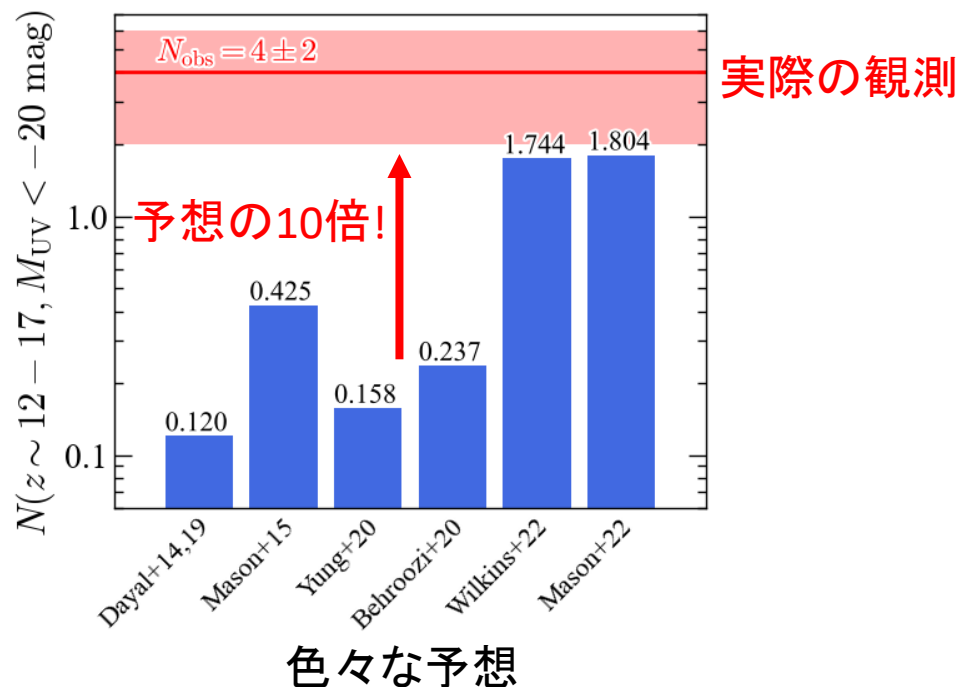
- ジェイムズ・ウェッブ宇宙望遠鏡の画像から20個以上の新たな131-136億年前の銀河候補を発見
 - 即時公開データ → 複数の研究者が独立に発見
 - 今後の分光観測が必要

136億年前
の銀河候補



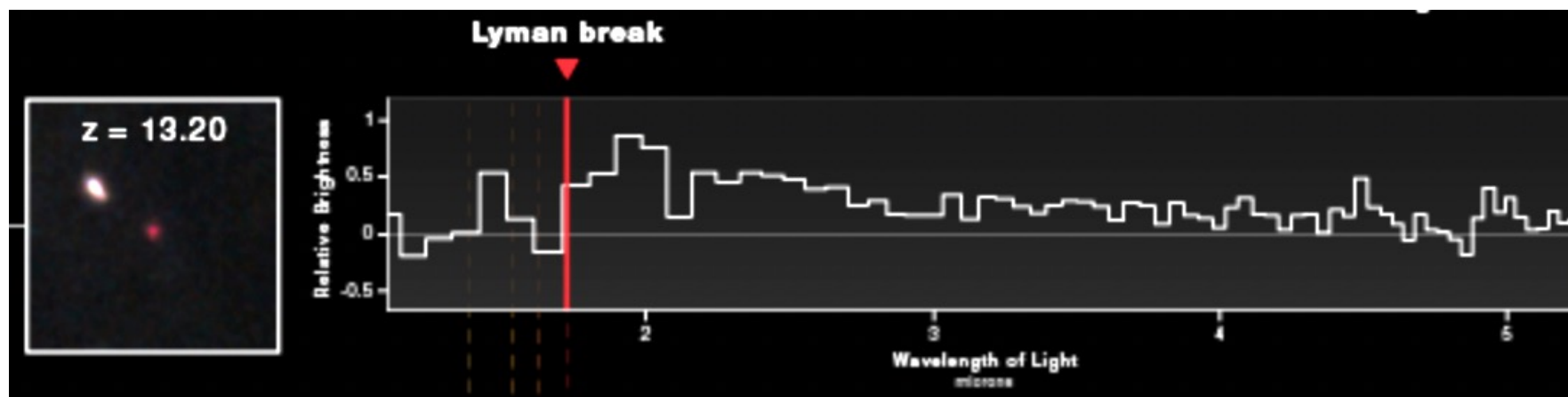
Harikane+22c

銀河の数



現在の最遠方記録

- 135億年前の銀河を分光確認
 - 見かけの明るさ29等級 (非常に暗い)
 - ジェイムズ・ウェッブ宇宙望遠鏡以外では無理
 - 人類が到達した最果ての銀河

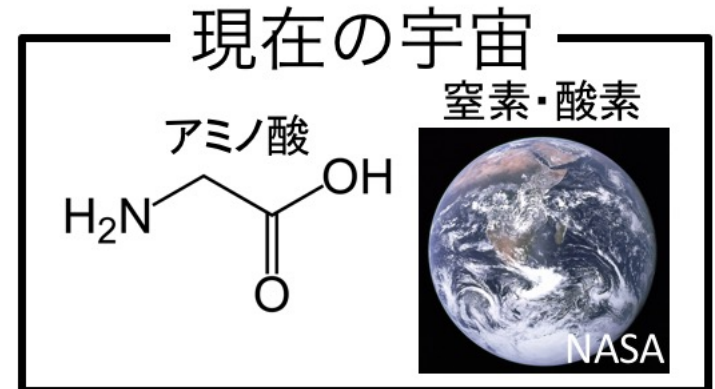
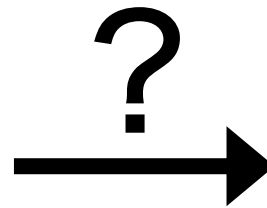
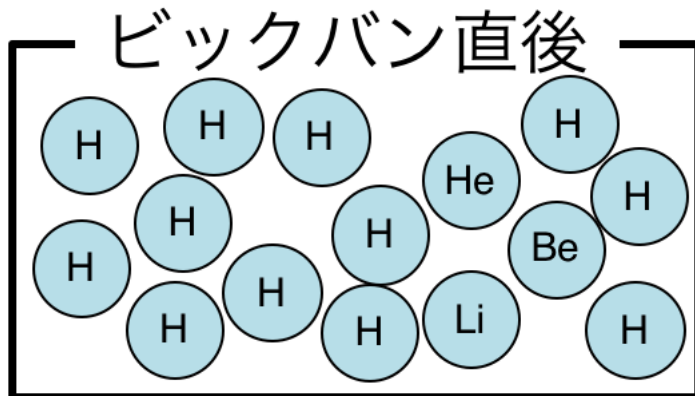


NASA, Curtis-Lake+22

今後の期待

- 宇宙初期の天体の理解が飛躍的に進む
 - 初代銀河、初代星の発見
- 宇宙の化学進化
 - 銀河の重元素 (酸素や窒素) の量を調べられる
 - 私たちの体や地球の起源の理解へ

重元素: 水素・ヘリウム以外の元素 (例: 酸素)



まとめ

- ジェイムズ・ウェッブ宇宙望遠鏡（JWST）は天文学に革命を起こしつつある
 - 赤外波長の感度が10-100倍向上
 - 最遠方銀河記録の更新 (135億年前)
 - 大量の131-136億年前の銀河候補
 - 論文ラッシュ、観測提案書審査、データ占有期間, ...
- 今後も、驚くような宇宙の姿を我々に見せてくれるだろうと期待しています
- 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