



アルマ望遠鏡によって明らかにされたビッグバン後10 億年未満の銀河の性質

筑波大学宇宙史研究センター
テニュアトラック助教

橋本 拓也

発表の内容

- 研究歴

- 導入

宇宙再電離時代の銀河の観測
遠方の銀河を観測するためには

- 最近の研究内容・成果のハイライト

- 今後の長期的な展望

- ・ 専門を生かした研究: 南極THz望遠鏡で解き明かす初代銀河
- ・ 学際研究1: ホモキラリティーの起源
- ・ 学際研究2: r-過程元素への知見

発表の内容

- 研究歴

- 導入

宇宙再電離時代の銀河の観測
遠方の銀河を観測するためには

- 最近の研究内容・成果のハイライト

- 今後の長期的な展望

- ・ 専門を生かした研究: 南極THz望遠鏡で解き明かす初代銀河
- ・ 学際研究1: ホモキラリティーの起源
- ・ 学際研究2: r-過程元素への知見

研究歴

- 研究テーマ: 観測的宇宙論

銀河形成・進化
宇宙再電離
星間媒質

- 東京大学 (2010 – 2015)

- Ly α 輝線銀河の可視赤外線の観測

- フランス リヨン天文台 (2015 - 2016)

- 最も深い可視面分光探索の国際プロジェクトへ貢献

- 大阪産業大学 (2017 – 2019)

- 早稲田大学 (2019)

- 電波干渉計アルマを用いた最遠方銀河

- 筑波大学 (2019. 12月-現在)

- 宇宙観測グループ
- 宇宙史研究センター (人社 B102)



発表の内容

- 研究歴

- 導入

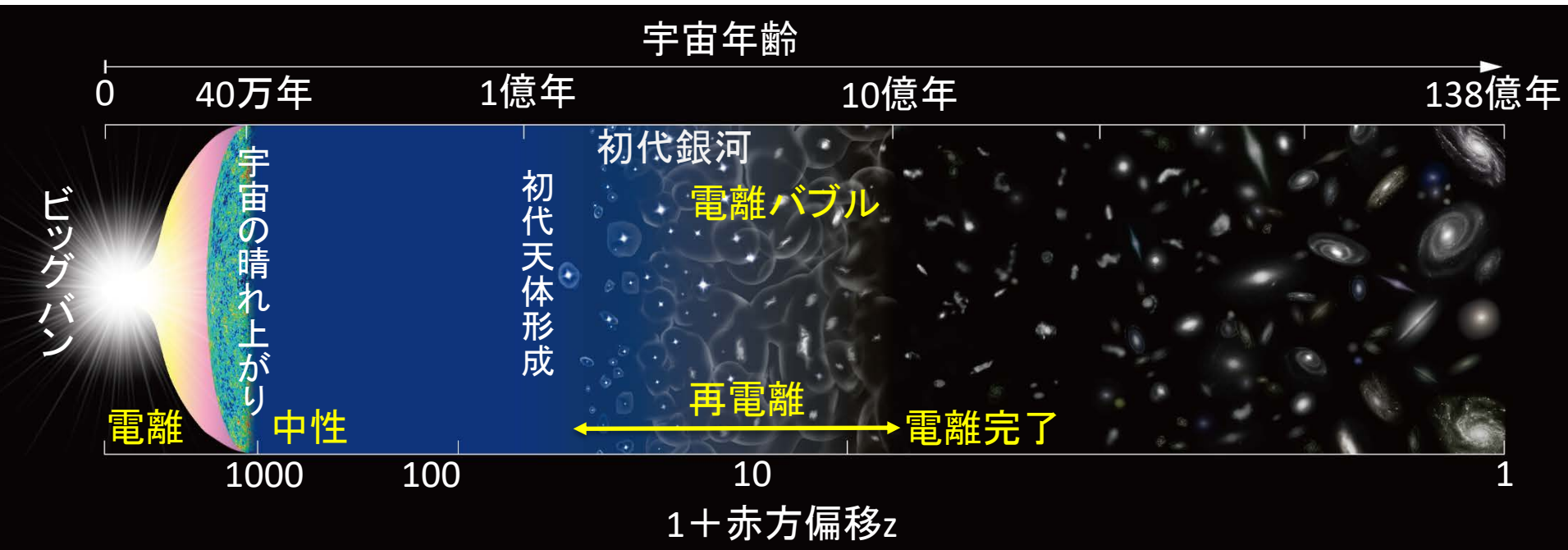
宇宙再電離時代の銀河の観測
遠方の銀河を観測するためには

- 最近の研究内容・成果のハイライト

- 今後の長期的な展望

- ・ 専門を生かした研究: 南極THz望遠鏡で解き明かす初代銀河
- ・ 学際研究1: ホモキラリティーの起源
- ・ 学際研究2: r-過程元素への知見

宇宙再電離とは



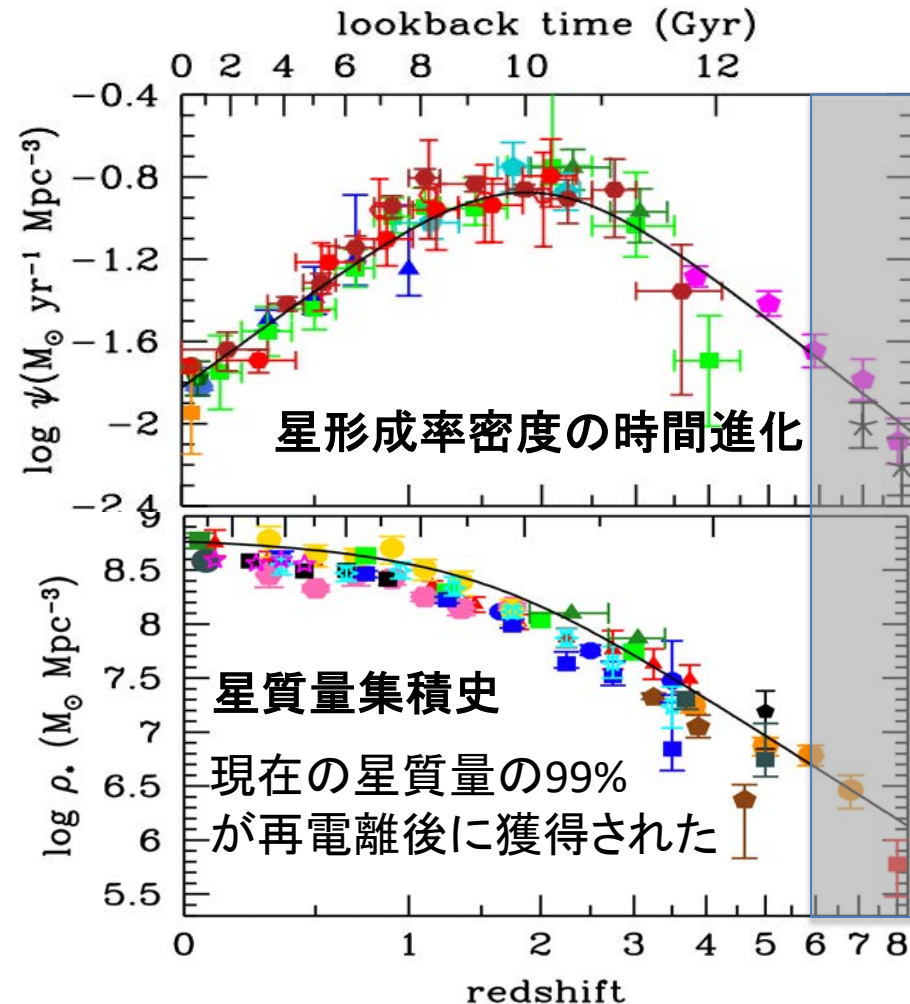
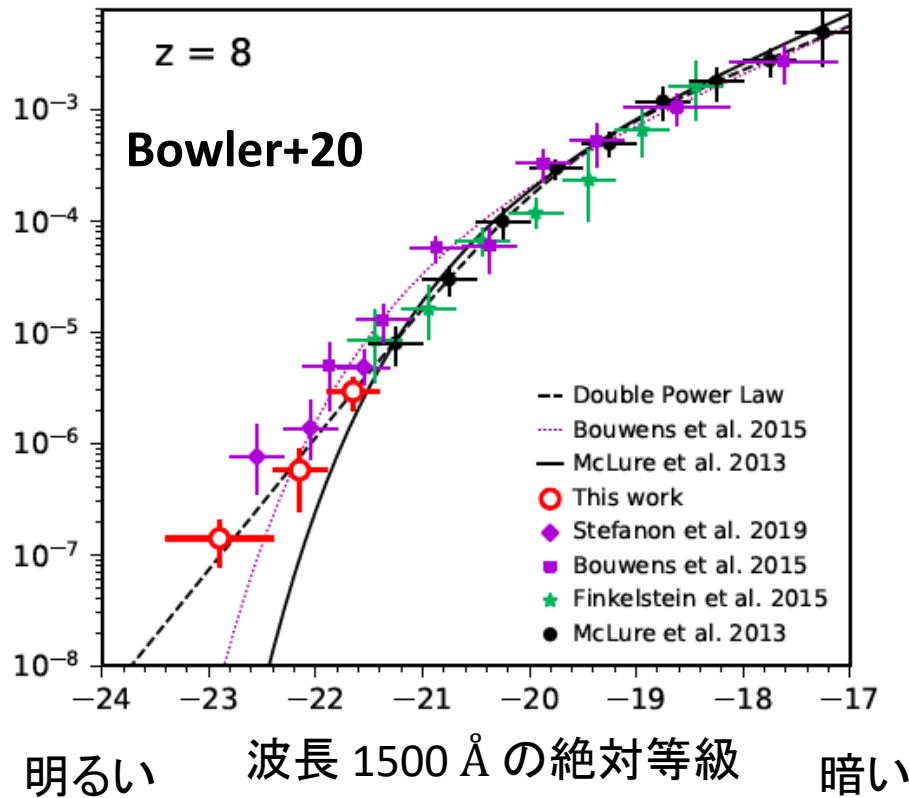
- 宇宙年齢 $\sim 2 - 10$ 億年 (赤方偏移 $z=20 - 6$)に起きた相転移
 - 初代天体 (銀河) の電離光子 ($h\nu > 13.6 \text{ eV}$, $\lambda < 912 \text{ \AA}$)
 - 多様な元素や宇宙塵の起源: 宇宙で最初の酸素、炭素
- 重要な未解決問題
 - いつ、どのように、何が再電離を引き起こしたか？
 - ➔ 遠方すなわち過去の銀河観測が大切 ... ρ_{UV} , ξ_{ion} , $f_{\text{esc}}(\text{LyC})$

宇宙再電離時代の銀河を調べる意義

- 銀河進化: どのように現在の銀河宇宙の姿になったか?

ある時代の紫外光度関数 (c.f., 人口統計)

単位体積あたりの銀河の個数密度



- 遠方の超新星爆発、ひいては中性子星や中性子星連星のイベントレートへ知見

どのように遠方銀河を観測するか？

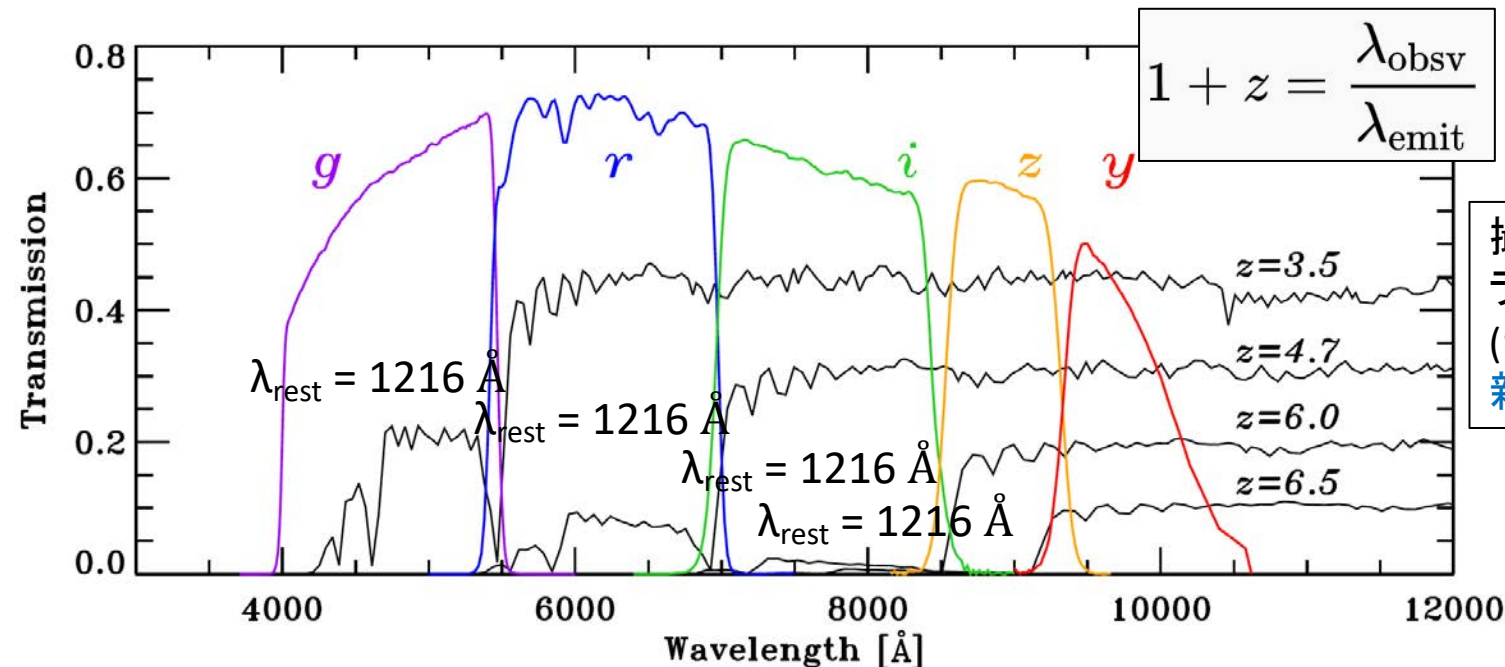
撮像観測

- 視野内にある銀河候補を効率良く探查
- 統計量を得る上で不可欠

分光観測

- 特定の原子/分子が放射する輝線
- 力学的な性質, 複数輝線から化学的な性質へ知見

両者は相補的だが, 遠方銀河の分光は極めて困難



撮像観測の例:
ライマンブレイク法
(赤外放射とは相補的;
新田さん発表)

どのように遠方銀河を観測するか？

● 分光観測の例

• Hydrogen Ly α (1216 Å)

→ 従来使われてきた強輝線. 再電離「完了後」の銀河の観測が得意

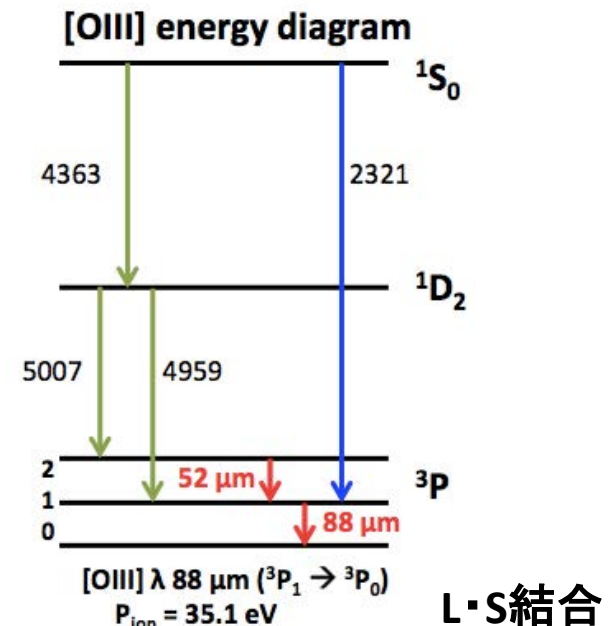
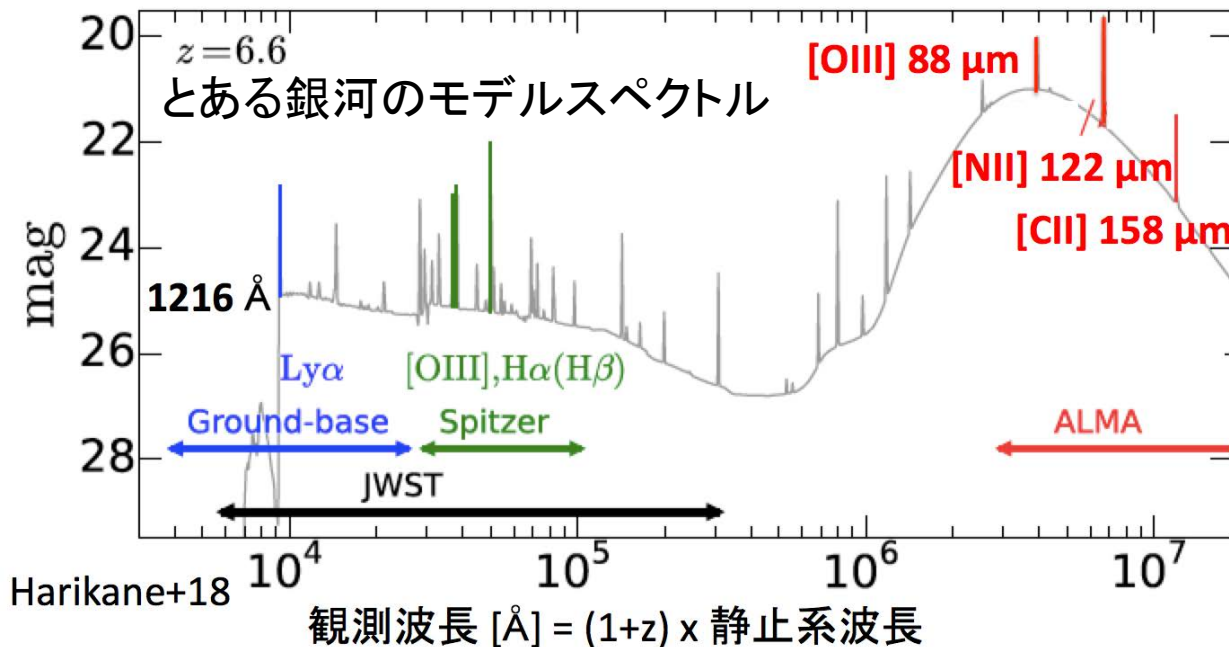
* 再電離期では銀河間空間を漂う中性ガスに散乱され弱い

• C⁺ 158 μ m (微細構造輝線, 励起 E = 11 eV)

→ 星間媒質の中性ガス領域. 再電離期で予想外に弱い

• O²⁺ 88 μ m (微細構造輝線, 励起 E = 35 eV)

→ 星間媒質の電離ガス領域. 我々が独自に推進する新しい「窓」



発表の内容

- 研究歴

- 導入

宇宙再電離時代の銀河の観測
遠方の銀河を観測するためには

- 最近の研究内容・成果のハイライト

- 今後の長期的な展望

- ・ 専門を生かした研究: 南極THz望遠鏡で解き明かす初代銀河
- ・ 学際研究1: ホモキラリティーの起源
- ・ 学際研究2: r-過程元素への知見

研究ハイライト: アルマによる研究

- O^{2+} 88 μm

→ 我々のチームが独自に推進する新しい「窓」: Inoue+14, Inoue+16 Science

- アルマで最遠方天体記録の樹立

- Hashimoto, Laporte, Mawatari, Ellis, Inoue et al. 2018 *Nature*

- 合体する爆発的星形成銀河として最遠天体を発見

- Hashimoto, Inoue, Mawatari et al. 2019a *PASJ*

- 宇宙誕生後わずか6億年後に豊富な固体微粒子を発見

- Tamura, Mawatari, Hashimoto, Inoue et al. 2019 *ApJ*

- アルマなどで遠方の老けた銀河を発見

- Mawatari, Inoue, Hashimoto et al. 2020 *ApJ*

→ 全てプレスリリースあり

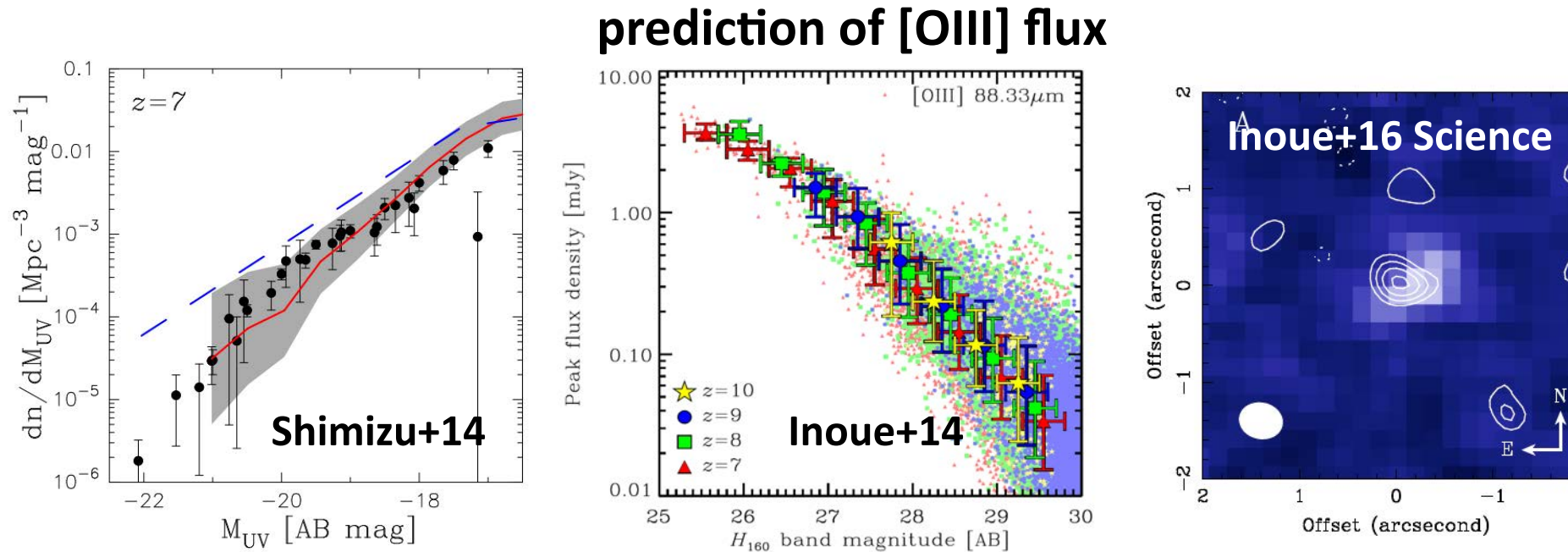
ALMA

Atacama Large Millimeter/submillimeter Array

- アタカマ ミリ波サブミリ波 大型干渉計
- 66 台のアンテナが巨大な 1 基の望遠鏡のように振る舞う
- 南米チリ アタカマ高原 (標高 5,000 m) にあり、当該波長で最高感度



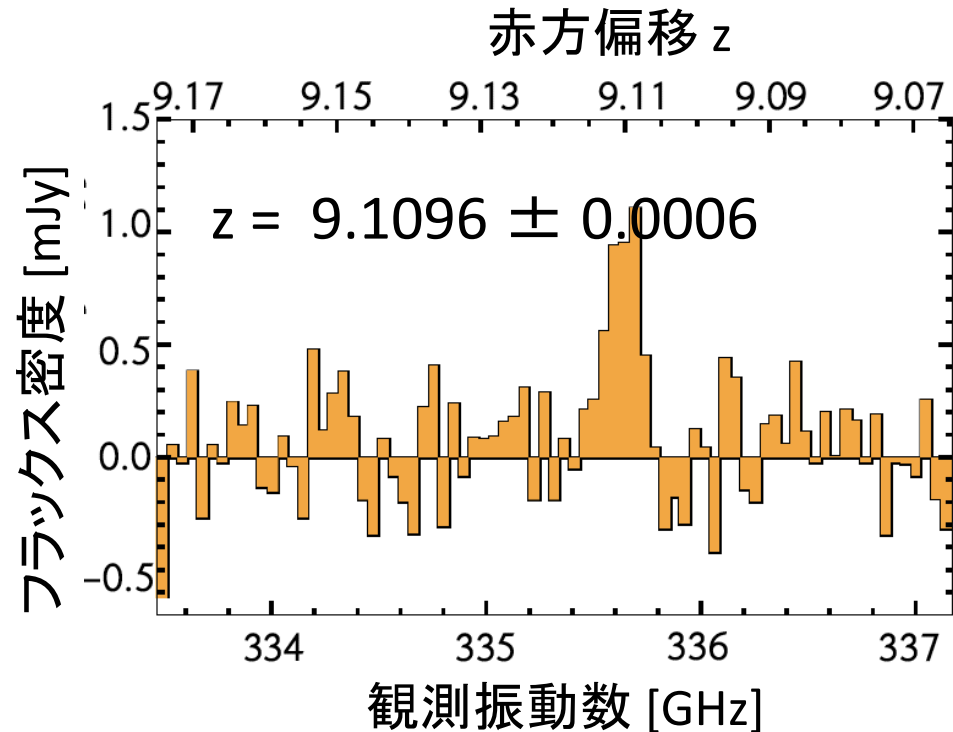
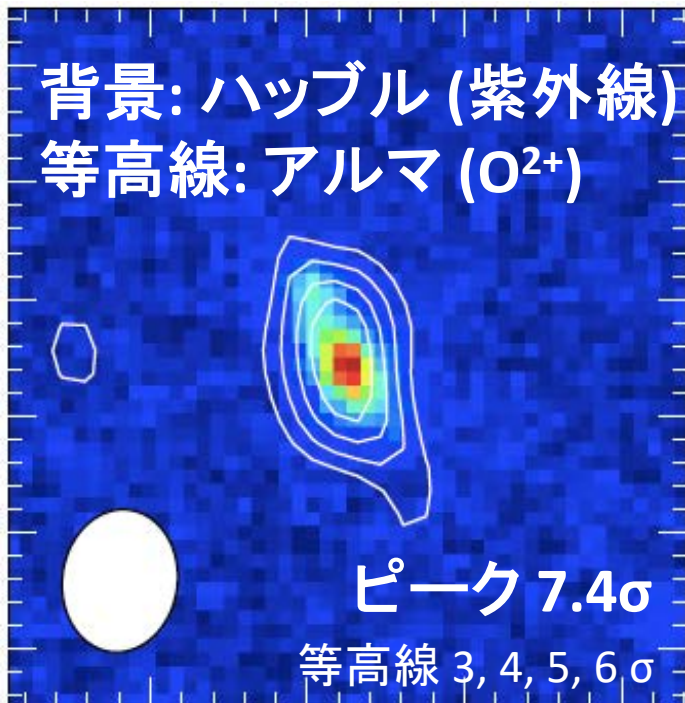
新しい遠方銀河探査ツールとしての[OIII]



- Shimizu+14 のシミュレーション (観測データを再現)
- 星雲輝線モデル “CLOUDY” に基付いた z -依存する [OIII] 放射率
- 2014 年に理論予想: $z > 8$ の明るい銀河は早く重元素汚染 ($0.2 Z_{\odot}$) するため、ALMA で [OIII] 88 μm を検出できるはず
- Inoue et al. 2016, *Science*

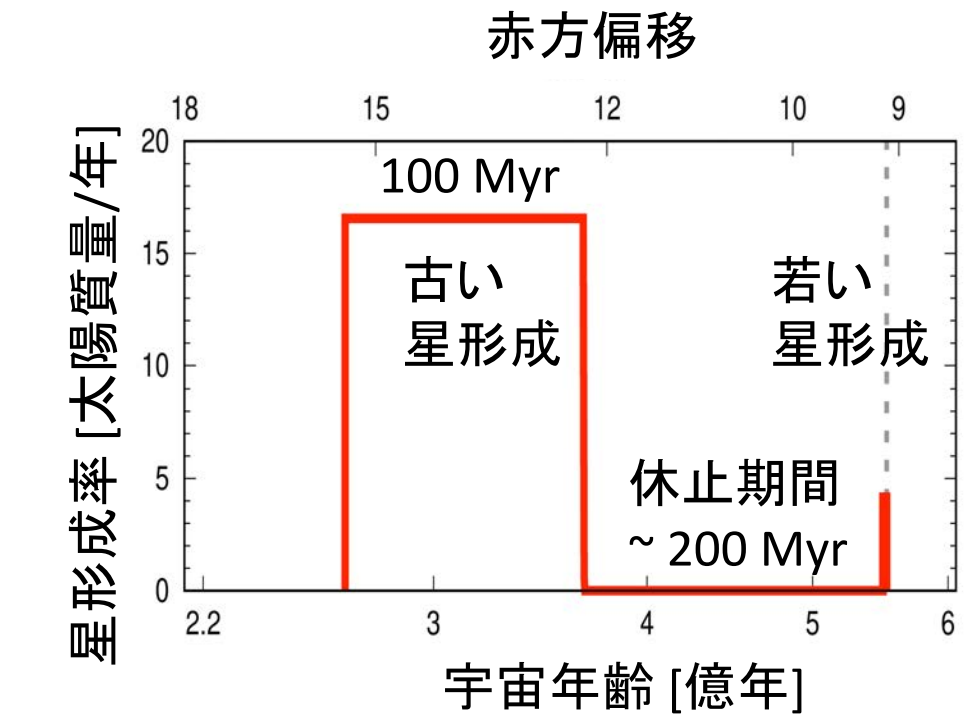
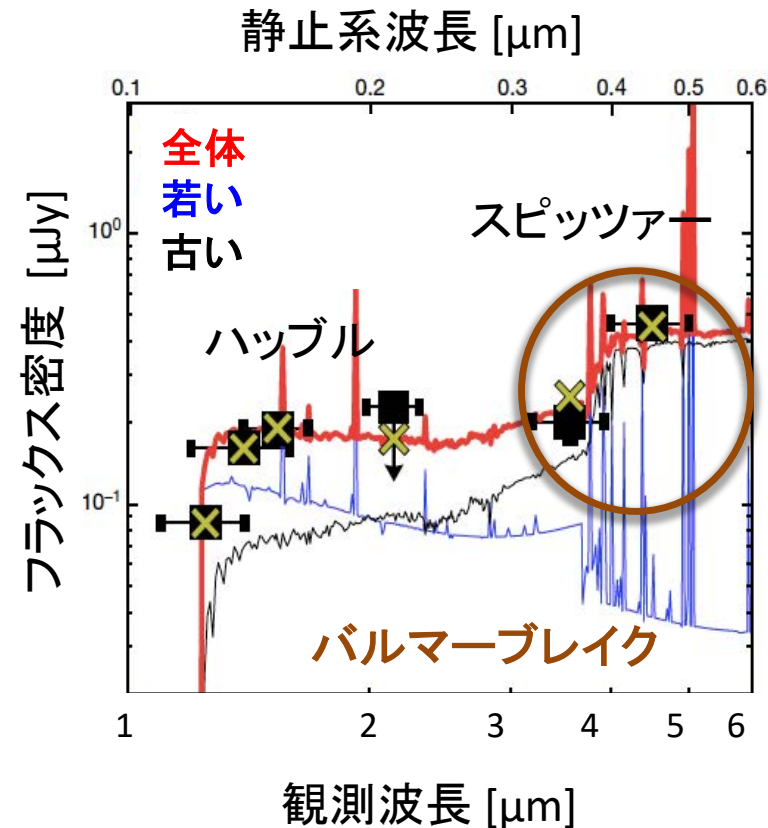
アルマで最遠方銀河記録の樹立

- Hashimoto, Laporte, Mawatari et al. 2018 *Nature*
- ハッブル宇宙望遠鏡で発見された赤方偏移の未定天体
- ライマンブレイクによる測光赤方偏移 $z = 9.0 - 9.8$



宇宙最初期の星形成へ知見

- Hashimoto, Laporte, Mawatari et al. 2018 Nature
- 正確な距離 (赤方偏移) → 波長 $4.5 \mu\text{m}$ 帯に**バルマーブレイク**
年齢 1 億年以上の恒星種族が主な成分
- 星形成の開始時期は赤方偏移 15 (宇宙年齢 2.5 億年)

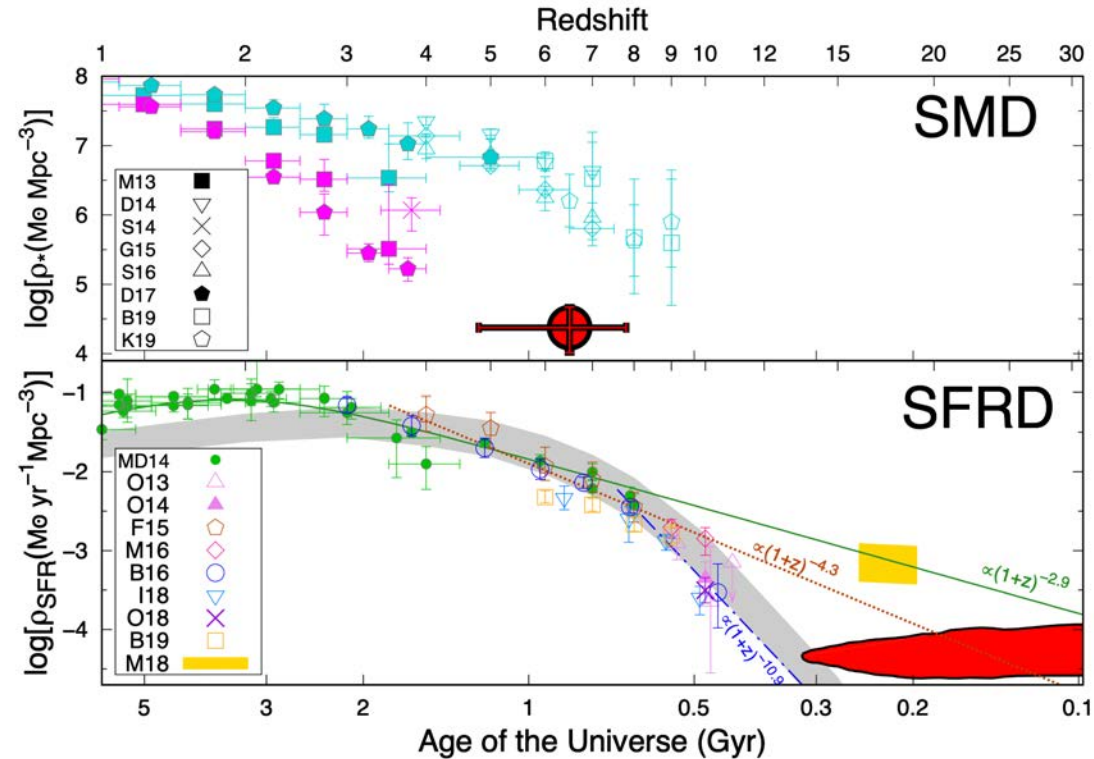
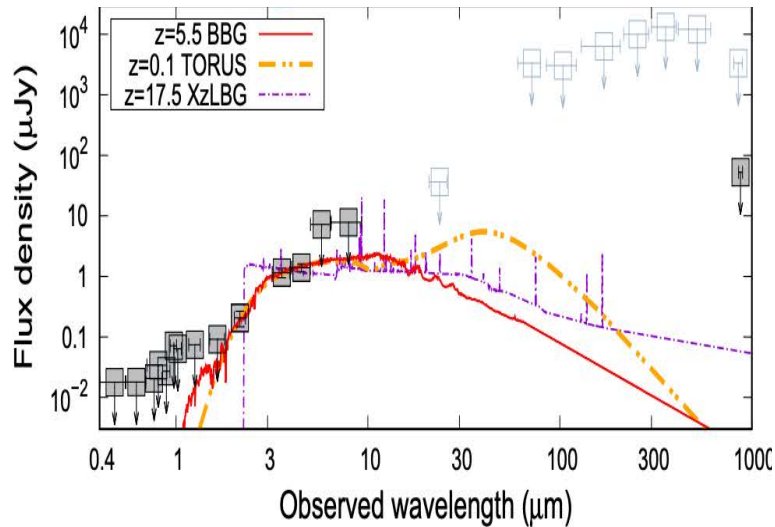


300 Myr 遡る



宇宙最初期の星形成へ知見

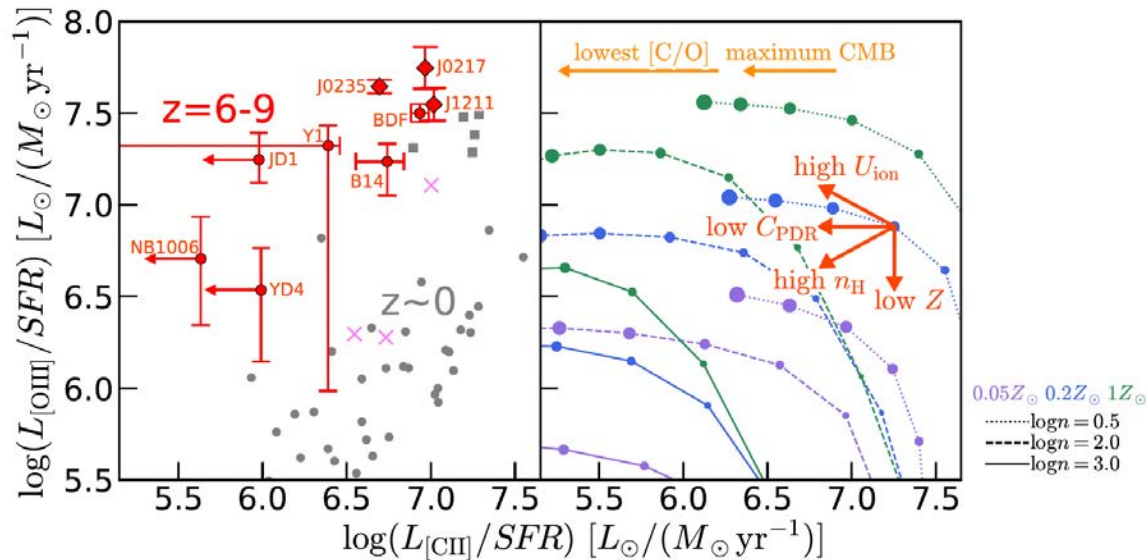
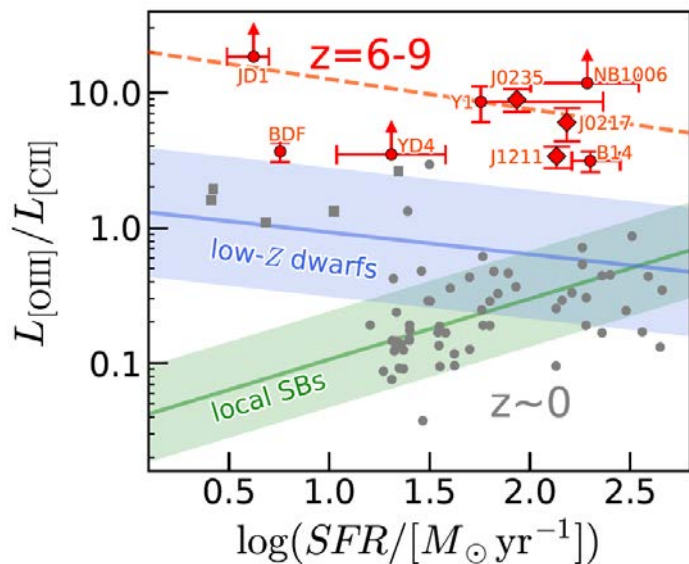
遠方バルマーブレイク銀河のSED



Mawatari, Inoue, Hashimoto et al. 2020, *ApJ*

- 宇宙年齢 10 億年程度にある**バルマーブレイク**銀河候補の探査
 - ・ 広視野かつ、複数の望遠鏡で取得した多波長データを利用
 - ・ SED 解析により, **過去の星形成活動**を推定
- 初代銀河で極めて効率良くダークマターから星へ変換?
- AGN によるネガティブフィードバック効果が効いていない? (菊田さん)

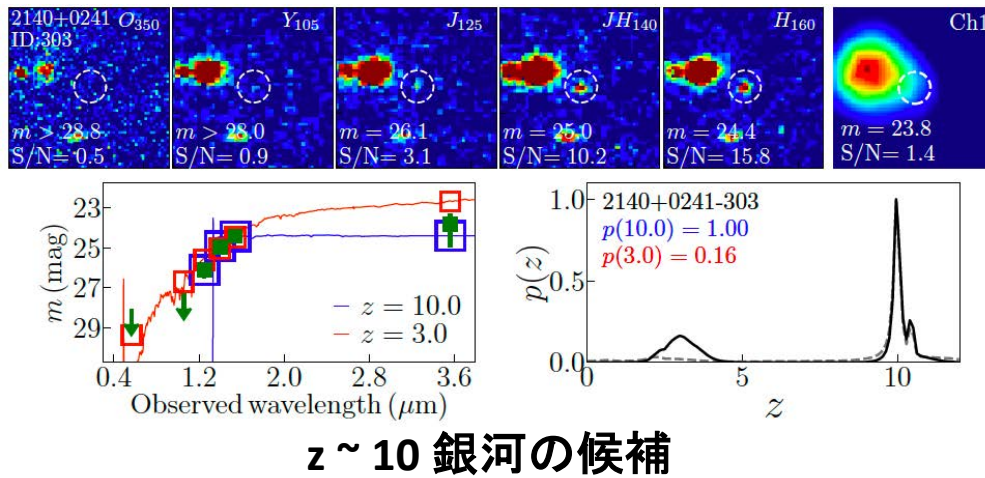
$T_{\text{univ.}} < 1 \text{ Gyr}$ の銀河の星間媒質



Harikane incl. TH+20

- 遠方銀河は [OIII] 88/[CII] 158 光度比が異常
- 詳細な輝線モデリング
 - 近傍銀河に対して電離パラメータが 10-100 倍 / 中性ガス被覆率が低い C_{PDR} (0 ~ 0.1)
 - 高い O/C 組成比, 高いガス密度, CMB による [CII] の減衰も可能
- 仮説の切り分けに、将来さらなる多輝線観測が必要
 - 前者の仮説 → 宇宙初期の銀河が再電離を引き起こしやすい状況

現在進行中のプロジェクト



成層圏赤外線天文台

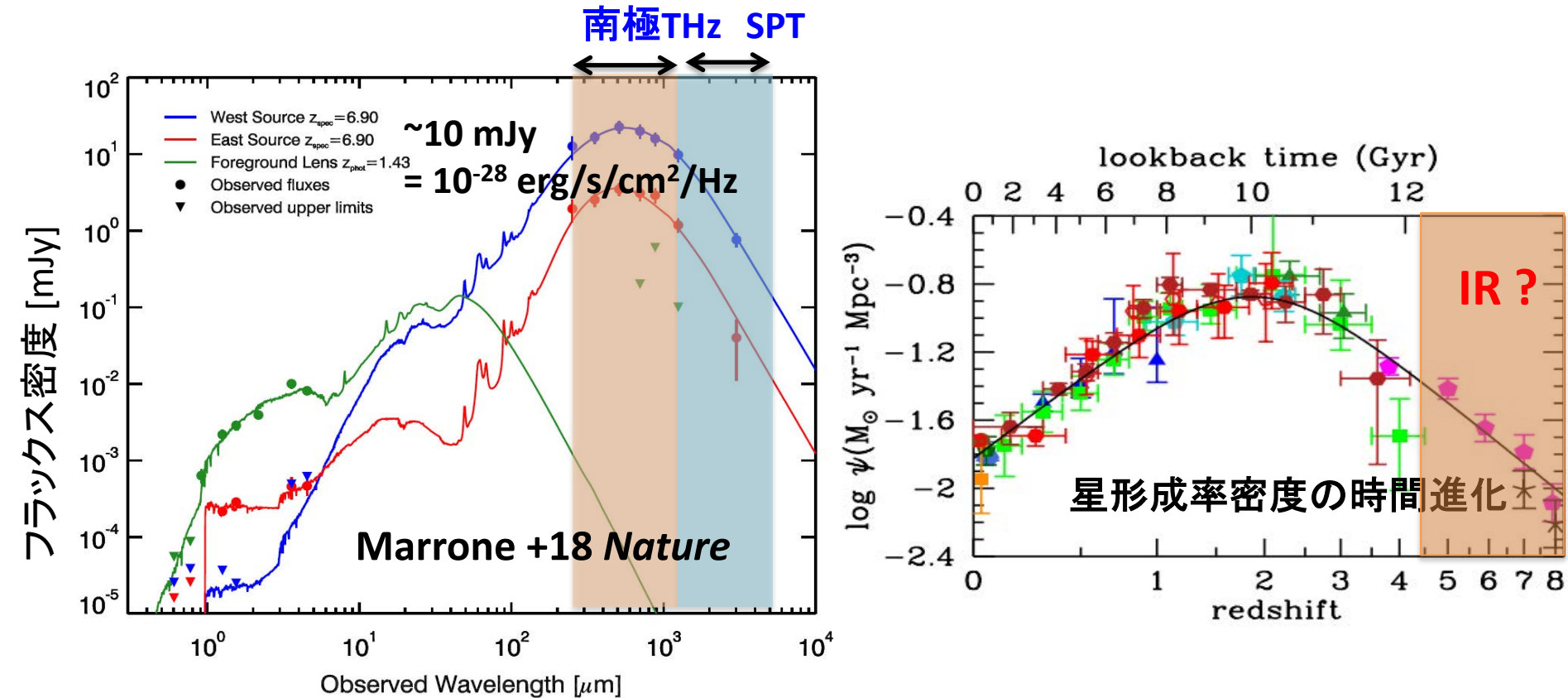
- ① 遠方銀河のフロンティアを押し進める ($z > 10$)
- ② 現在のフロンティアである $z \sim 7-9$ 天体の多輝線観測
少数の天体で星間媒質の包括的な理解
- ③ 詳細に調べられる, 近傍宇宙にある遠方アナログ天体の性質

→ 関連した PI 観測提案が2017-2020年で10件採択
→ 一部は学生テーマへ

発表の内容

- 研究歴
- 導入
宇宙再電離時代の銀河の観測
遠方の銀河を観測するためには
- 最近の研究内容・成果のハイライト
- 今後の長期的な展望
 - ・ 専門を生かした研究: 南極THz望遠鏡で解き明かす初代銀河
 - ・ 学際研究1: ホモキラリティーの起源
 - ・ 学際研究2: r-過程元素への知見

ALMA と南極THz 望遠鏡で 明らかにする (隠された) 初代銀河



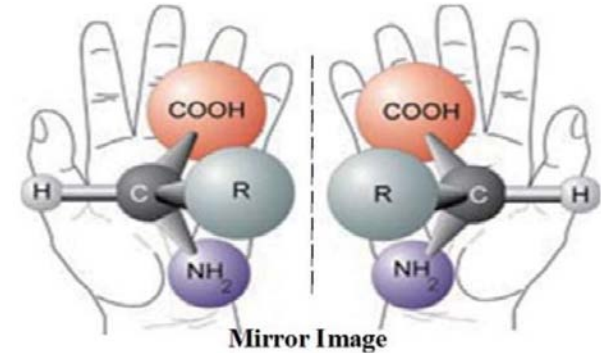
- 南極 THz → 遠方にあるダストに覆われた銀河 の観測に有効 (新田さん発表)
 - ・ 例 は SPT で 2,400 平方度探索で見つかった $z = 6.9$ の銀河 → ALMA でフォローアップ
 - 宇宙初期のレアな高密度領域 (構造形成への知見, 化学進化への知見)
 - より完全 (UV+IR) な星形成率密度進化
- TODO; 遠方天体の観測 feasibility

学際研究案1: $\text{Ly}\alpha$ 偏光観測で明かす ホモキラリティーとLABの起源

- 計算科学研究センターとの 異分野融合研究

- 生命の起源の重要問題: ホモキラリティー

- ・ 地球上の生体は基本的にL-アミノ酸
- ・ **何らかの理由**でL体が過剰 → ブースト



©富永ら

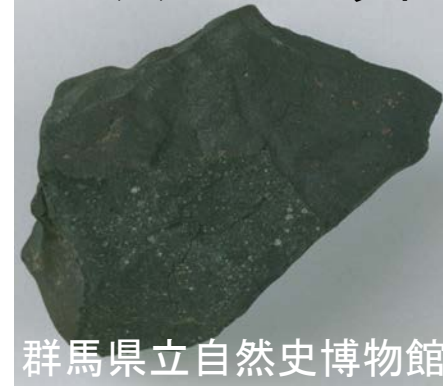
- 地球外説

- ・ 隕石 (炭素質コンドライト) にアミノ酸 → 一部でL体過剰 (Cronin 1997 Science)
- ・ 活発な星形成領域 (NGC 6334) で強い赤外線円偏光
- ・ **主要アミノ酸の $\text{Ly}\alpha$ 円偏光の吸収断面積が
L, D 体で異なる (梅村教授ら)**

- 仮説: かつて「天の川銀河 (MW)」が強い $\text{Ly}\alpha$
円偏光場を形成し、「原始太陽系」付近で
L体過剰を引き起こした隕石が地球に降り注いだ?

- ・ **MW はかつて強い $\text{Ly}\alpha$ を生成
(理論: 矢島ら2015年ApJ, 観測: 日下部, 橋本ら2017年など)**

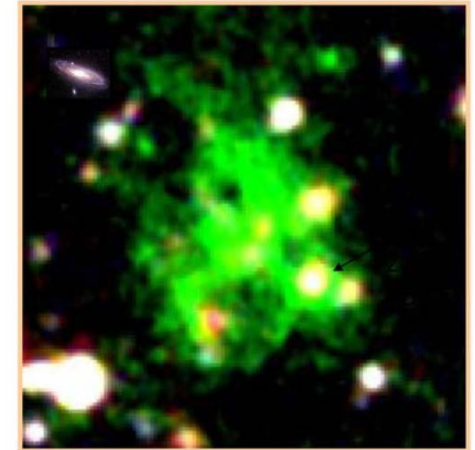
マーチソンコンドライト



群馬県立自然史博物館

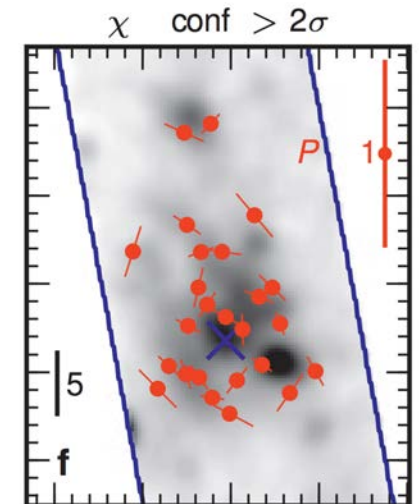
学際研究案1: Ly α 偏光観測で明かす ホモキラリティーとLABの起源

- Ly α blob (LAB) ... Ly α で輝く巨大な天体 (サイズ > 100 kpc)
 - なぜ巨大な範囲で Ly α で輝くのかは未解明
 - Ly α の偏光観測がキー
 - 数天体で Ly α 線偏光 (Hayesら2011年 Nature)



- 統計的なサンプルの LAB で円偏光観測
 - 偏光を取り入れた輻射輸送モデル (矢島准教授)
 - 広視野サーベイによる LAB サンプルの供給 (日本)
 - Ly α プロフィールも利用 (橋本ら2013, 2015年)

➔ 既存/将来の望遠鏡で銀河の Ly α 偏光観測の
Feasibility 計算等は今後の課題



まとめ

● 最近の研究成果

- ALMA による宇宙初期の銀河観測
 - ・ 最遠方の銀河観測に [OIII] 88 μm は有効
 - ・ 宇宙年齢 ~ 2.5 億年程度の星形成史へ知見
 - ・ 遠方銀河の星間媒質は近傍天体に比べて異常
 - ・ 電離光子を脱出させやすい状況の可能性

● 長期的な将来展望

- アルマと南極テラヘルツで解き明かす初代銀河
- 計算科学研究センター: ホモキラリティーと巨大 $\text{Ly}\alpha$ 天体の起源