

アルマ望遠鏡による最遠の酸素の発見

井上 昭 雄

〈大阪産業大学 〒574-8530 大阪府大東市中垣内 3-1-1〉
e-mail: akinoue@las.osaka-sandai.ac.jp



アルマ望遠鏡で、赤方偏移7.212（宇宙年齢7億年）の銀河から2階電離酸素イオンの波長88ミクロンの輝線を検出することで、私たちは初期宇宙、特に、宇宙再電離期の銀河形成と進化を調べる新たな「窓」を開くことに成功した。本稿では、研究の過程で行われた共同研究者や周囲の人々との会話、議論、出来事を時系列的に振り返りながら、この発見がどのように成し遂げられたのかを紹介する。また、Science誌に掲載された論文や最遠方天体探査の現状についての解説も行う。

1. 発 端

「あ、松尾さん。この前のプロポーザルは、」
「・・・オースリーが強いっていうモデルが欲しい」
「え？」
「理論屋だったら、オースリーが強いっていうモデルを作って欲しい。絶対強いと思うんだ。実際カーリーとかサーティドロドスとかでオースリーは強いから・・・」
「・・・はあ・・・考えてみます・・・」

お酒のせいもあったかもしれないが、頬を紅潮させ、真剣な眼差しの松尾宏（国立天文台）の表情は今もよく覚えている。慧眼の士。2012年春の天文学会、懇親会にて。

翌2013年1月の北大、私と松尾宏、連名での研究発表。タイトルは「ALMAで観測する赤方偏移8超の[O III]88ミクロン輝線」。その結論は、「赤方偏移新記録に向けて、アルマ望遠鏡による[O III]88ミクロン輝線観測は有望だ。」

2. 予 想

「清水君のシミュレーションやとハイゼットでもメタリシティすぐ上がるやんな？」
「そうですね。結構すぐ上がりますね」

大阪産業大学で科研費研究員をしていた清水一紘（大阪大学）との会話。2013年春頃。

高い競争率を勝ち抜いてアルマの観測時間を獲得するには、もっとリアルな理論予想が必要だと考えた私は、宇宙論的流体シミュレーション銀河形成モデルの使い手である清水一紘の協力を仰いだ。得られた[O III]88ミクロン輝線予想を図1に示す¹⁾。自己重力的ダークマターハローの形成とその重力に引きずられたガスの集積を計算。ガス密度がしきい値を超えると星形成が起き、つづいて寿命の短い大質量星が超新星爆発を起こして酸素をはじめとするさまざまな元素が供給される。大質量星は強い紫外線で電離星雲を生み出し、そこからは紫外線から電波まで多数の輝線が放射される。いくつかの輝線は初期宇宙でも検出可能なほど強い²⁾。今回注目する2階電離酸素イオンからの[O III]88ミクロン輝線もその一つだ。

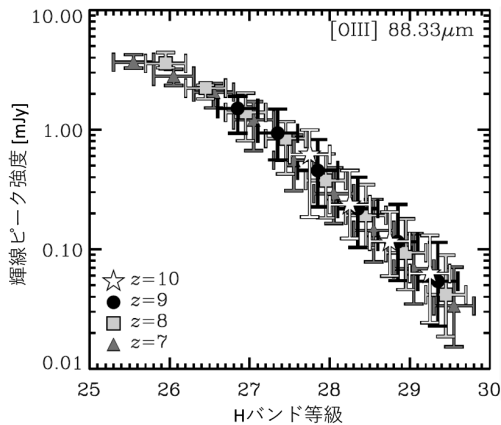


図1 2階電離酸素イオン [O III] の波長88.33マイクロン輝線の予想強度。横軸は近赤外線1.6マイクロン帯 (Hバンド) の等級。誤差棒付きの印は、シミュレーション中の銀河を0.5等級ごとに分けたときのメディアンと68%範囲を示す。印の違ひは赤方偏移の違い。アルマ望遠鏡の1時間の観測で、1 mJy程度まで検出できる。

私たちの理論予想論文¹⁾の結論は、「27等級より明るい銀河なら、アルマ望遠鏡で1時間未満の観測で検出可能である！」

3. 提 案

「そのとき (Cycle 0) はこれほどインプレッシブな観測提案はありませんでした」

谷口義明 (放送大学) から2013年9月22日のメール。

2013年秋、理論予想を手に入れた私と松尾宏は、田村陽一 (東京大学) とともに、アルマ所長裁量時間の獲得を目指した。狙うのは赤方偏移新記録。多波長バンド観測から赤方偏移が9.6と推定されていたMACS1149JD³⁾の [O III] 88マイクロン輝線。史上初めて赤方偏移8を超えるどころか、10に迫ろうという観測提案。谷口義明のお墨付きも得て、優れたアイデアを随時求める所長裁量時間でも十分に競争力があると見込んでいた。しかし落選。時代を先取りし過ぎたのか。当時、

1階電離炭素イオンの [C II] 158マイクロン輝線が有望と見なされており、なおかつ、初期宇宙ではそれが予想外に暗いことが判明してきた状況⁴⁾。遠方銀河での実績が無い [O III] 88マイクロン輝線を狙うなど、あまりにリスクが高過ぎると判断されたのだ。もう一つ厳しい指摘。「赤方偏移記録を更新して、銀河形成理論にどのような制限を与えるのか？」

気を取り直して、2013年12月締め切りで募集がかかったCycle 2に向けた作戦会議。私たちは2本立てで臨むことにした。一つは、MACS1149JDにもう1天体を追加して空振りのリスクを抑えつつ、赤方偏移新記録を目指す提案。「赤方偏移記録は、遅くともその時代までに、観測可能なほど明るい銀河が誕生しているという直接的な証拠を与える。したがって、宇宙の構造形成論に重要な観測的制限を課す」ことを添えて。そして、もう一つの提案は、水素ライマンα輝線が検出されて、すでに赤方偏移が確定している銀河の [O III] 88マイクロン輝線を観測し、理論予想を確かめるもの。いわば、答え合わせ。そのターゲットとして、すばる望遠鏡による深宇宙探査で見つかった二つの銀河を選択した。そのうちの 하나가、2012年に当時の最高赤方偏移記録を更新したSXDF-NB1006-2である⁵⁾。この提案では、[O III] 88マイクロン輝線を検出するだけでなく、[C II] 158マイクロン輝線との強度比較から、星間ガスの電離状態を調べるという、より物理的に明確な目的も書いておいた。とはいえ、正直言って、こちら提案はすべり止めという気持ちが強かった。

結果は、すべり止めだけ合格。アルマ望遠鏡は、より物理的なのがお好き。

4. 検 出

「アルマのデータどうなりました？」

「ええ、この前デリバリーされたんですけど、ま

だ見てないんです」

「すぐ見たほうが良いですよ。何か写ってるかもしれない」

「・・・帰ったら見てみます」

河野孝太郎（東京大学）との会話。ホノルルでの国際天文学連合総会の昼休み，2015年8月3日。

Cycle 2の採択通知が届いてから，すでに1年以上が経過していた2015年6月7, 9, 14日，ようやく，SXDF-NB1006-2の [O III] 88 ミクロン輝線観測が実施された。しかし，アルマ望遠鏡からのメールによる進捗報告を受けても，私はどこか気乗りがしないでした。7月にデータが届いたがそのまま放置していた。他のプロジェクトや日々の大学業務で手一杯だったこともある。前年末に，もう一つのターゲットとした銀河の [C II] 158 ミクロン輝線データが届き，未検出に終わっていたこともあった。

夏休みに入り，ホノルルの国際天文学連合で河野孝太郎から助言を受けたことで，データを見てみる気になった。そして，2015年8月25日の午後，大阪産業大学12号館5階の研究室にて，

「え！？ なんか受かってる・・・！？」

窓外の夏の陽射しに目をやって，深呼吸し，もう一度見る。視野の中心部に何やらモヤモヤしたものがやはり見えるような気がする。アルマ望遠鏡のデータで信号らしきものが見えたのは，私の経験では初めてであり，確信はもてなかった。今まで見たことのないものを見たような感覚。そしてそれは正しかった。人類史上最も遠いところで見つかった酸素イオンの光だったのだから。

夕方，私は田村陽一と松尾宏にメールで連絡した。「何か受かっているように見えます。」田村陽

一から返信が届く，「データ見てみました。4 σ は超えています。解析を最適化すれば5 σ を超える信号になるかもしれません。」

5. 論 文

「馬渡君，オースリー受かったかも」

「え！？ ほんとですか！？ それってすごいんじゃないんですか！？」

「それで相談なんやけど，SXDFなどかのさあ，測光頼んでもいい？もちろん共著者に・・・」

「ぜひやらせてください！」

大阪産業大学博士研究員 馬渡健との会話。2015年秋。

2015年10月29日，私と松尾宏は，国立天文台三鷹キャンパス内の東大天文センターで田村陽一から解析結果の報告を受けた。[O III] 88 ミクロン輝線の統計的有意性は5.3 σ 。偶然得られる確率は1,000万分の1。すばるで観測したライマン α 輝線の位置としっかり合っている（図2）。[O III] 88 ミクロン輝線の赤方偏移は，ライマン α 輝線の赤

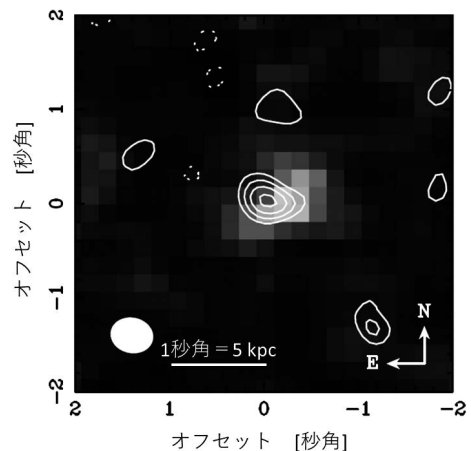


図2 SXDF-NB1006-2の画像。コントアはアルマによる [O III] 88 ミクロン輝線。外側から2, 3, 4, 5 σ レベル。破線は-2 σ レベル。左下の楕円はビームサイズ。背景画像はすばるによるライマン α 輝線。

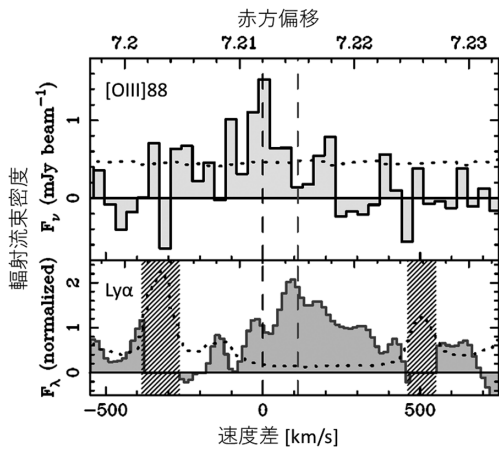


図3 SXDF-NB1006-2輝線スペクトルの比較. 上: アルマで観測した [O III]88 ミクロン輝線. 下: ケック望遠鏡で観測した水素ライマン α 輝線. ライマン α 輝線は [O III] 輝線に比べて+110 km/s 赤方偏移している.

方偏移7.215とほぼ一致した7.212 (図3). 間違いない. 私たちはScience誌に論文を投稿することに決めた.

アルマ望遠鏡のデータアーカイブを確認すると、私たちの他にヨーロッパの二つのチームが高赤方偏移銀河の [O III]88 ミクロン輝線データを手にしている可能性があることがわかった. 急がなければならない. 一番でなければ意味がない. 私は怒涛の勢いで論文を書いた. アルマデータ解析は田村陽一, 可視光・近赤外線測光データ解析は馬渡健, ライマン α 輝線分光データは澁谷隆俊 (東京大学), 理論シミュレーションは清水一紘の協力を得て, 2015年12月14日投稿. その後, 3名の審査員と最大3度にわたるやり取りの末, 2016年5月16日受理⁶⁾.

6. 意義

「サイエンスに投稿してるらしいなあ? ところで何が重要なん?」

「・・・何が重要なんでしょう?」

大向一行 (東北大学) のするどい問いかけに窮する私. 2016年4月6日犬塚修一郎教授井上学術賞受賞記念祝賀会にて.

改めて考えてみると, 初期宇宙での [O III]88 ミクロン輝線検出の最大の意義は, 銀河形成過程における星間物理化学状態を調べる新しいツールの提示にある. WMAP衛星やPlanck衛星で解明されてきた宇宙マイクロ波背景放射が生まれた宇宙の晴れ上がり後, 宇宙年齢10億年程度までの時代が現代天文学の一つのフロンティアとなっている. その時代に起こった初代天体と銀河の形成, そしてその帰結とも言える宇宙再電離現象の理解が重要課題だ (図4). その時代の銀河の星間物理化学状態を調べるツールとして, [C II]158 ミクロン輝線が期待されていたのだが, アルマ望遠鏡稼働当初からの観測では予想外に暗かった⁴⁾. そこに新たなツールとして [O III]88 ミクロン輝線が使える可能性を示した. いわば, 初期宇宙を見る新しい「窓」を開いたのだ.

7. 最遠

「酸素の輝線では最遠方とちゃうかなあ」

「最遠方酸素の発見・・・良いですよね!」

「あ, それいいんちゃう! 使わせてもらおう!」

松田有一 (国立天文台) との会話. 国立天文台にて. 2016年4月26日.

最遠=最古だ. 光速が有限であるから, 遠くを見れば過去にさかのぼることができる. 2006年にIOK-1が発見され⁷⁾, 人類の探査能力は宇宙再電離期に突入した. 太古の巨大天体Himikoの発見⁸⁾ (2009年) や, 2012年のSXDF-NB1006-2の発見⁵⁾ の頃までは, 最遠方天体探査はすばる望遠鏡と日本人天文学者の独壇場だった. しかし近年, 2009年のアップグレードで威力を増したハッブル宇宙望遠鏡の後塵を拝すようになってい

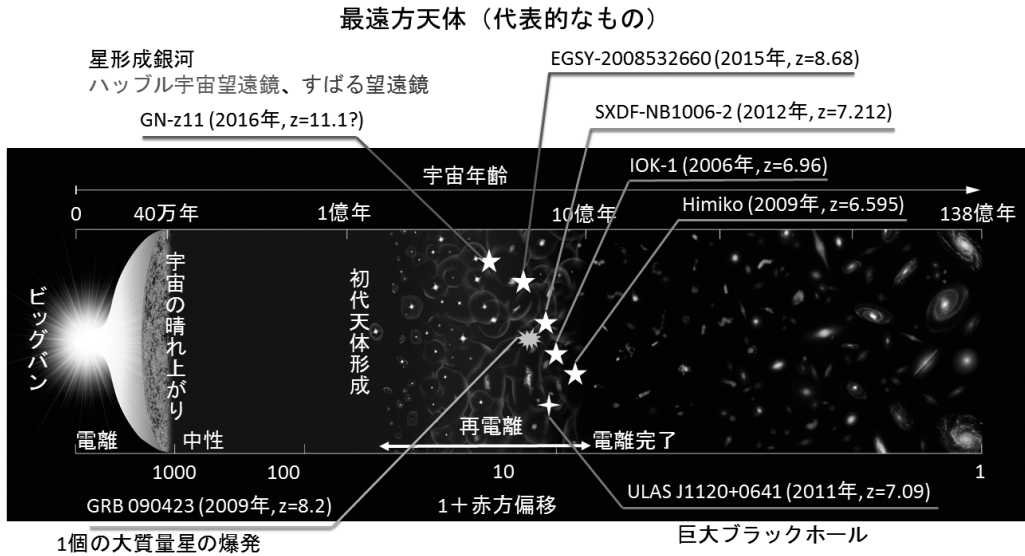


図4 宇宙の歴史と最遠方天体 (2016年12月27日現在の代表的なもの). 背景画像は国立天文台提供.

る. 分光観測による輝線検出で赤方偏移が確定した天体で現在最遠方なのは, ハッブル宇宙望遠鏡で発見された EGSY-2008532660 で赤方偏移 8.683 だ⁹⁾. さらに, 連続光のライマン α ブレイクで赤方偏移が 11.1 らしき銀河もハッブル宇宙望遠鏡で発見された¹⁰⁾. 銀河以外では, 巨大ブラックホール天体キューサーの最遠方は ULAS J1120+0641 の赤方偏移 7.09¹¹⁾, 一つの大質量星の大爆発で起こるガンマ線バーストの最遠方は赤方偏移 8.2 の GRB090423¹²⁾ となっている (図4).

私たちの SXDF-NB1006-2 に対するアルマ観測は, 酸素の輝線検出としては現時点で最遠方の記録となった. これまでの最遠方酸素輝線は赤方偏移 3.911¹³⁾ であり, 宇宙年齢で言えば 16 億年程度. それが今回は赤方偏移 7.212, 宇宙年齢 7 億年程度に大幅更新だ. 久方ぶりの日本人による「最遠方」. なお, 炭素の輝線としては, 紫外線 [C III] 1909 輝線が赤方偏移 7.730 の銀河で検出された¹⁴⁾. 水素以外の輝線で最遠方の記録は現在これである. また, [C II] 158 ミクロン輝線も, 赤方偏移 7 を超える検出報告が出始めている¹⁵⁾. 最遠方の記録はまさに日進月歩.

8. 解 説

ここで, 論文⁶⁾ の内容をさらに詳しく解説してみよう. やや専門的になるので読み飛ばしても構わない.

SXDF-NB1006-2 のスペクトルエネルギー分布を図5に示す. 近赤外線の観測波長は, この銀河の赤方偏移を補正すると, 紫外線から可視の波長に対応する. SXDF-NB1006-2 の大きな特徴は, 紫外線帯の測光データの傾きが大きいこと. 長波長ほど急に暗くなっているのだ. 天文学的には「青い」と言う. 単位波長当たりの放射流束密度が波長のべき乗関数で表されるとしたときのべきをスペクトルの傾きと呼び, β と表す. 通常の星形成銀河は $\beta = -2$ 程度であるが, SXDF-NB1006-2 は $\beta < -2.6$ と, かなり急. SXDF-NB1006-2 の星団の年齢が非常に若く (100 万年程度, 最大でも 1,000 万年未満), また, 星間ダストが非常に少ないことがうかがえる.

星間ダストは, 典型的なサイズが 0.1 ミクロン程度の固体微粒子で, ケイ酸塩や炭素が主成分と考

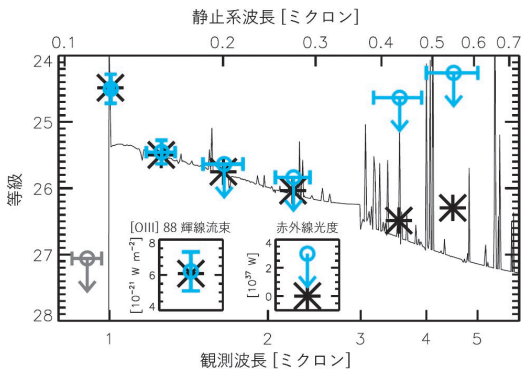


図5 SXDF-NB1006-2のスペクトルエネルギー分布. 横軸の下側は観測波長, 上側は赤方偏移を補正した波長. 内部のパネルは [O III] 88 ミクロン輝線放射流束とダスト赤外線光度. 丸印は観測データ. 米印は実線で表す最適モデルのバンドデータ. 観測波長1ミクロン未満のデータはモデルフィットに用いなかった.

えられている. 星団の紫外線を吸収し, そのエネルギーを赤外線でも再放射する. 短波長の光ほど効率よく吸収および散乱するため, 星間ダストは銀河のスペクトルを「赤く」する. SXDF-NB1006-2の紫外線は極端に青いので, 星間ダストによる赤化を受けていないはずだ. 実際, アルマのデータでは, ダストからの赤外線放射が見つからなかった.

しかし, SXDF-NB1006-2には酸素はある. 酸素はケイ酸塩の主要な構成元素, つまり星間ダストの材料だ. [O III] 88 ミクロン輝線を含む銀河のモデルスペクトルとの詳しい比較から, 酸素の存在量は太陽組成の10%が最適解として得られた. これは, 清水一紘の銀河シミュレーションの予想ともよく一致する. SXDF-NB1006-2は, 太陽や銀河系に比べると酸素の量は少ないが, ゼロではない. 銀河系では, 酸素の約半分はダスト(固体)に含まれているのだが, SXDF-NB1006-2でもそうだとすると, ダスト赤外線放射が余裕で検出できるほど, アルマは高感度なはずだ. にもかかわらずダストが見つからないということは, 酸

素のうちダスト(固体)になっている割合が小さいはず. 初期宇宙の銀河では, 銀河系よりもダストの生成が非効率なのだ.

SXDF-NB1006-2は, [C II] 158 ミクロン輝線もアルマで観測されている. そのデータを調べてみたが, 有意な信号は見つからなかった. 結果, [O III] 88 ミクロン輝線は [C II] 158 ミクロン輝線に比べて12倍以上強い. この [O III]/[C II] 強度比は, 系外銀河の観測でこれまでに得られた中で最大. これは何を意味するのか. [O III] 88 ミクロン輝線強度はほぼ理論予想どおりなので, [C II] 158 ミクロン輝線が弱いせいで, 大きな強度比となったのだ. 炭素原子の電離ポテンシャルは水素原子のそれより低く, [C II] 輝線を出す1階電離炭素イオンは中性水素ガスと共存する. したがって, 弱い [C II] 輝線は, 中性水素ガスが少ないことを意味する.

この解釈は, 図3で測定された水素ライマン α 輝線の速度差+110 km/sと整合的だ. 赤方偏移2から3あたり(宇宙年齢20から30億年)の星形成銀河ではライマン α 輝線と可視の [O III] 輝線や H β 輝線との速度差が測定されている. SXDF-NB1006-2の紫外線光度では典型的には300 km/s程度の速度差となる. それに比べると, SXDF-NB1006-2の速度差110 km/sはずいぶん小さい. ライマン α 光子伝播の理論計算によると, 小さい速度差は星間中性水素が少ないことを意味するのだ¹⁶⁾.

総合すると, SXDF-NB1006-2の星間水素の大半が電離している可能性が高い. また, 星間ダストもほとんどない. すると, 銀河内の大質量星が放つ電離紫外線が, 星間中性水素やダストに阻害されることなく, 銀河外まで抜け出す. そして, 銀河間空間の水素を電離する. SXDF-NB1006-2は, 宇宙再電離を引き起こした光源の典型例と言えるのかもしれない⁶⁾.

9. 会 見

「いま、Yahoo! Japan のトップにテキストで載っています」

平松正顕（国立天文台）から6月17日10:51のメール。

Science誌に受理される見込みが大きくなってきた2016年4月26日、国立天文台に出張した私は松尾宏とともに、アルマ望遠鏡広報担当の平松正顕にプレスリリースの相談をした。初めての経験で不安もあったが、平松正顕の献身的な協力のおかげで準備は着々と進み、6月16日14時から一橋講堂にて記者会見を行った。その前日には、NHKからも取材を受けた。そして、6月17日朝、史上最遠方の酸素の発見として、NHKと朝日放送のテレビニュースで報道され、新聞各紙に大きく取り上げられた。Yahoo! Japanのトップにも登場し、国立天文台が確認できただけでも、世界中で413件のオンライン記事が出た。

当日、2限に物理の講義をもっていた私は教室で、

「今朝、NHKのニュース見てきた人？」

「・・・」

「誰も見てないの？」

「・・・」

「オレ、出たのに」

「えーーーーー！！！」

夕方には卒業生から電話がかかってきたりし、改めてテレビの影響を実感した。そして、

「おめでとうございます」

「え？」

「何か大発見されたそうで、すごいですね」

後日、マンションのエレベータでも、

10. 今 後

「今回の研究成果は、第一歩にすぎません」

2016年6月17日付、国立天文台ウェブリリースでの田村陽一のコメント。

アルマ望遠鏡で宇宙再電離期の銀河の [O III]88 ミクロン輝線を検出できることはわかった。では次に何を？ いくつかの展開が考えられる。一つは、他の銀河でも高い [O III]/[C II] 比が観測されるのかどうか調べることだ。星間中性水素やダストが少なく、電離紫外線が銀河外に抜け出しやすい状況が一般的かどうか調べ、宇宙再電離に対する銀河の寄与を明らかにすることができる。私たちは、四つの銀河に対する [O III]88 ミクロン輝線と [C II]158 ミクロン輝線のアルマ観測を2016/17シーズン（Cycle 4）で実施している。また、[O III]88 ミクロン輝線を空間分解して観測し、ガスの運動を調べることも興味深い。初期宇宙で銀河がどのように形作られていくのかわかるだろう。私たちは、SXDF-NB1006-2の [O III]88 ミクロン輝線の追観測をアルマ所長裁量時間で実施し、現在、データ解析中である。もっと初期の宇宙で [O III]88 ミクロン輝線を探し、宇宙で最初の酸素供給、すなわち、宇宙で最初の星の誕生と死に迫ることも面白い。私たちのMACS-1149JDの観測提案はCycle 3でついに採択され、観測も半分程度完了した。残りのデータ取得が待たれる。

アルマ望遠鏡と [O III]88 ミクロン輝線による初期宇宙の探査は今まさに始まったばかりだ。しかしさらにもっと先を見据える谷口義明の2016年12月19日の言葉で本稿を締めくくろう。

「井上君、次はゼット30だよ」

謝 辞

本稿で紹介した成果は、本文中に登場した方々に加え、太田一陽さん、吉田直紀さん、Erik Zackrissonさん、柏川伸成さん、梅畑豪紀さん、廿日出文洋さん、家正則さん、岡本崇さん、山口裕貴さんや、ほかにも多くの方々の多大なるご協力とご助言があって初めて得られた成果です。改めてこの場で深く感謝いたします。なお、本文中では敬称を略させていただきます。

参考文献

- 1) Inoue A. K., Shimizu I., et al., 2014, ApJ 780, L18
- 2) Shimizu I., Inoue A. K., et al., 2016, MNRAS 461, 3563
- 3) Zheng W., et al., 2012, Nature 489, 406
- 4) 谷口義明, 2017, 「ALMAによる銀河の観測」, 天文月報 110, 185
- 5) Shibuya T., et al., 2012, ApJ 752, 114
- 6) Inoue A. K., Tamura Y., Matsuo H., et al., 2016, Science 352, 1559
- 7) Iye M., et al., 2006, Nature 443, 186
- 8) Ouchi M., et al., 2009, ApJ 696, 1164
- 9) Zitrin A., et al., 2015, ApJ 810, L12
- 10) Oesch P., et al., 2016, ApJ 819, 129
- 11) Mortlock D. J., et al., 2011, Nature 474, 616
- 12) Tanvir N. R., et al., 2009, Nature 461, 1254
- 13) Ferkinhoff C., et al., 2010, ApJ 714, L147
- 14) Stark D., et al., 2017, MNRAS 464, 469
- 15) Pentericci L., et al., 2016, ApJ 829, L11
- 16) Hashimoto T., et al., 2013, ApJ 765, 70

Discovery of the Most Distant Oxygen with ALMA

Akio K. INOUE

Osaka Sangyo University

Abstract: Detecting the doubly ionized oxygen emission line at wavelength 88 micrometers from a galaxy at redshift 7.212 (cosmic age of 700 Myr) with ALMA, we have opened a new “window” to probe the galaxy formation and evolution in the early Universe, especially, the epoch of cosmic reionization. In this article, I describe how this discovery was carried out, chronologically looking back conversations, discussions, events, etc. with collaborators and people around me during the research. I also present reviews of our paper published in Science Journal and the status of the search for the most distant object in the Universe.