

アルマ望遠鏡で 132.8 億光年かなたの銀河に酸素を発見！ ～一番星の星くず（酸素）の最遠方検出記録をさらに更新～

名古屋大学大学院理学研究科の 田村 陽一 准教授、大阪産業大学／国立天文台の 橋本 拓也 特任研究員、東京大学の 馬渡 健 ICRR フェロー（当時・大阪産業大学）と大阪産業大学の 井上 昭雄 准教授らの国際研究チームは、アルマ望遠鏡を使って遙か彼方にある銀河 MACS1149-JD1 を観測しました。その結果、この銀河が地球から 132.8 億光年の距離にあることが判明しました。さらに研究チームは、この銀河に酸素が含まれていることを発見しました。この発見により、これまで最も遠方で発見されていた酸素の記録を塗り替え、観測史上、最も遠方で酸素を発見したことになります。ハッブル宇宙望遠鏡などでの観測成果と合わせると、この銀河の中では宇宙誕生から、およそ 2.5 億年が経過した頃から活発に星が作られ始めたと考えられます。アルマ望遠鏡の高い感度により、宇宙最初の星や銀河が生まれたその時代に、また一歩迫ることができました。

今回検出された酸素は、この銀河で最初に生まれた恒星のなごり、いわば「一番星の星くず」です。本研究によって、宇宙初期の恒星がどのように形成されるかが、酸素イオンの光を通してつづさに理解できることが示されました。この研究成果は、さらなる遠方の酸素の発見と、それをを用いた宇宙最初期の星形成の理解につながることを期待されます。

この研究成果は、2018 年 5 月 17 日付（日本時間 2 時）イギリスの科学誌「ネイチャー」に掲載されました。

本研究は、日本学術振興会科学研究費助成事業の支援のもとで行われました。

【ポイント】

- ✓ アルマ望遠鏡を使って、宇宙初期の銀河がもつ酸素イオンガスが放射する電波を検出した。その結果、この銀河が 132.8 億光年の距離に位置することが判明した。
- ✓ 精密かつ高い信頼度で距離が求まった天体としては、観測史上最も遠方に位置することがわかった。同時に、観測史上最も遠方で酸素を発見したことにもなった。
- ✓ この銀河で最初に生まれた恒星のなごり（一番星の星くず）である酸素の観測を通して、きわめて若い宇宙に存在する恒星がどのように形成されたかがわかった。

【研究背景と内容】

宇宙は 138 億年前にビッグバンで生まれ、そのあと数億年が経過した頃に、最初の銀河が誕生したと考えられています。では、それは具体的にはいつ頃で、銀河はどのようにして成長してきたのでしょうか。これは、現代天文学における大きな謎のひとつです。私たちは、タイムマシンを持っていませんので、直接その現場に行くことはできませんが、遠くの天体を観測することで、その様子を垣間見ることができます。遠くの天体から光が届くには時間がかかるため、宇宙のはるか彼方にある天体からの光を観測することは、その天体の昔の姿を見ていることに相当するのです。

こうした宇宙初期の銀河の様子を調べるため、大阪産業大学／国立天文台の 橋本 拓也 特任研究員をはじめとする国際研究チームは、ハッブル宇宙望遠鏡で発見された遠方銀河 MACS1149-JD1^{注1)}をアルマ望遠鏡^{注2)}で観測しました。観測で狙ったのは、この銀河に含まれるであろう酸素イオンが出す波長 88 マイクロメートルの赤外線^{注3)}です。アルマ望遠鏡による観測の結果、宇宙の膨張によって大きく引き伸ばされたこの赤外線が、波長 893 マイクロメートル(0.893 ミリメートル)の電波^{注3)}となって観測されました。この波長の伸びから、この銀河が地球から 132.8 億光年^{注4)}の距離にあることが判明しました。ハッブル宇宙望遠鏡によるカラーフィルタでの距離測定^{注5)}では、おおまかな数値しか導き出すことができませんでしたが^{注6)}、アルマ望遠鏡の高い感度と分光性能を活かして距離を精密に求めることに成功しました。さらに、欧州南天天文台の可視光赤外線望遠鏡 Very Large Telescope (VLT)を用いた観測で、水素原子が出す紫外線の検出にも成功し、そこから求められた距離は、既にアルマ望遠鏡で得られていた距離とほぼ一致しました。これらにより、MACS1149-JD1 は精密に距離が求められた銀河としてはこれまでで最も遠いものとなりました^{注7)}。

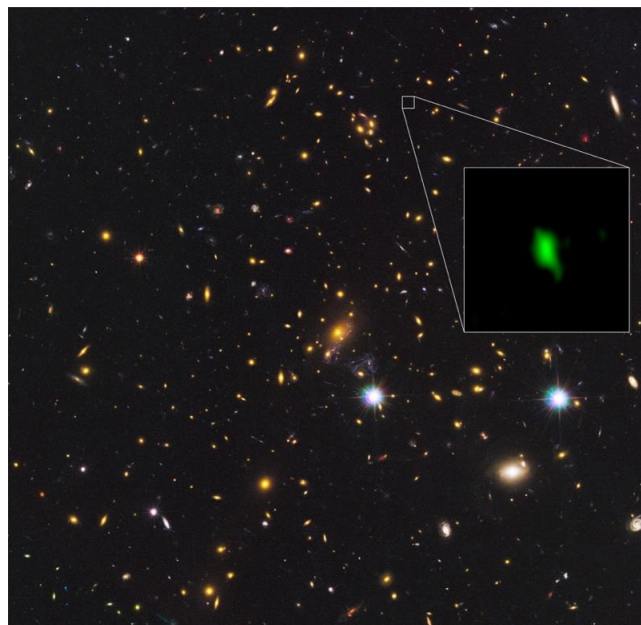
今回の発見は、酸素が検出されたものとしても、史上最も遠い銀河の記録を更新しました^{注8)}。132.8 億光年先の銀河に酸素があるということは、すなわち、132.8 億年前の宇宙に酸素が存在していたことになります。ビッグバンが起きた 138 億年前には宇宙には水素とヘリウム、ごく微量のリチウムしかなく、酸素は宇宙に生まれた星の中で作られ、星の死を経て宇宙空間にばらまかれました。今回の観測成果はつまり、宇宙誕生からおよそ 5 億年の時点で、初期世代の星たちが作り出した酸素がこの銀河の中にまきちらされていたことを示しています。

では、この銀河で最初の星はいつ頃生まれたのでしょうか。アルマ望遠鏡とハッブル宇宙望遠鏡及びスピッツァー宇宙赤外線望遠鏡の観測結果をもとに、観測された 132.8 億年前の時点にくわえ、135.5 億年前(宇宙誕生後およそ 2.5 億年)にも活発な星形成活動が起きていたと研究チームは推測しています。アルマ望遠鏡が酸素イオンの光を観測したことは、観測された時点(132.8 億年前)に活発に星が生まれていて、誕生間もない巨大星が放つ強烈な光によって周囲の酸素原子が電離されている^{注9)}ことを示しています。一方で、ハッブル宇宙望遠鏡とスピッツァー宇宙赤外線望遠鏡で得られた銀河の明るさは、135.5 億年前頃から大量の星が生まれていたと考えれば説明がつく、と研究チー

ムは考えています。MACS1149-JD1 が既に成熟していたということは、現在、私たちが望遠鏡を使って見ることができる時点よりも、さらに昔から星ができていたことを示しています。最初の銀河ができた「宇宙の夜明け」を探るためのエキサイティングな手がかりといえるでしょう。

この銀河で最初に星が活発に作られ始めたのは 135.5 億年前頃と考えられますが、その後、一旦、星の誕生のペースは低くなったということも観測データは示唆しています。これは、活発に作られた星たちの光の影響や、それらが一生を終えて多数の超新星爆発^{注10}が発生し、銀河からガスが一時的に外に吹き飛ばされてしまったのだろう、と研究チームは考えています。そのガスが銀河の重力に引かれて再び銀河に戻り^{注11}、そこでまた、活発に星が作られたと考え、アルマ望遠鏡による観測で見えている 132.8 億年前の時点で酸素イオンが大量に存在することと整合します。

今回検出された酸素は、この銀河で最初に生まれた恒星のなごり、いわば「一番星の星くず」です。本研究によって、宇宙初期の恒星がどのように形成されるかが、酸素イオンの光を通して、つぶさに理解できることが示されました。この研究成果は、さらなる遠方の酸素の発見とそれを用いた宇宙初期の星形成の理解につながることを期待されます。

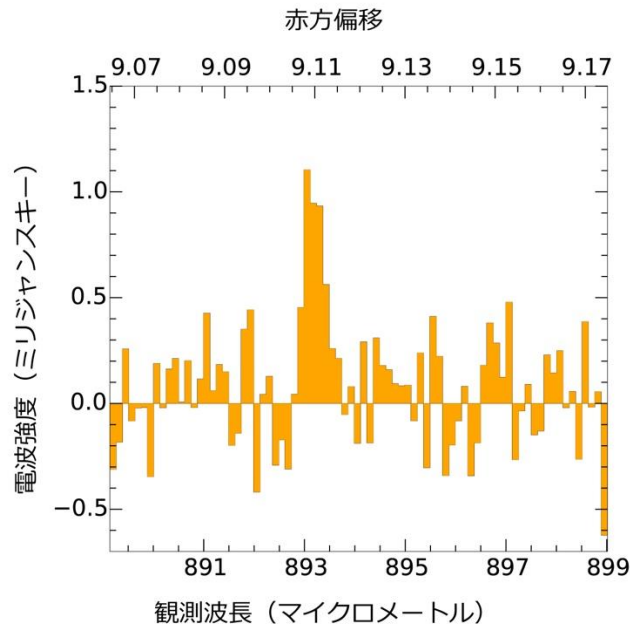


【画像：アルマ望遠鏡 + ハubble宇宙望遠鏡】

https://www.a.phys.nagoya-u.ac.jp/~ytamura/alma/pr180517/ALMA-HST_MACS1149-JD_screen.jpg

ハubble宇宙望遠鏡が赤外線撮影した銀河団 MACS J1149.5+2223 の画像の一角に、アルマ望遠鏡が電波で観測した銀河 MACS1149-JD1 を合成した画像。実際には MACS1149-JD1 は銀河団よりもずっと遠い場所にあるが、地球から見ると偶然重なって見える。画像ではアルマ望遠鏡が観測した酸素の分布を緑色で表現している。

Credit: ALMA (ESO/NAOJ/NRAO), NASA/ESA Hubble Space Telescope, W. Zheng (JHU), M. Postman ([STScI](#)), the CLASH Team, Hashimoto et al.



【酸素イオンの電波スペクトル】

https://www.a.phys.nagoya-u.ac.jp/~ytamura/alma/pr180517/MACS1149-JD1_OIII_1Dspec_J.jpg

アルマ望遠鏡がとらえた銀河 MACS1149-JD1 からの酸素の電波スペクトル。銀河を出た時は波長 88 マイクロメートルの赤外線だが、アルマ望遠鏡による観測では波長 0.893 ミリメートルの電波としてとらえられた。赤方偏移は宇宙膨張による波長の伸びをあらわす数値であり、赤方偏移 z の銀河からの光は波長が $(1+z)$ 倍になって地球に届く。

Credit: ALMA (ESO/NAOJ/NRAO), Hashimoto et al.



【CG 映像】※ 以下の URL から動画 (85MB) をご覧になれます。

https://www.a.phys.nagoya-u.ac.jp/~ytamura/alma/pr180517/@Ans_Alma_HD_180315.mov

今回の観測をもとに作成した銀河 MACS1149-JD1 の成長の様子。宇宙誕生直後から物質が集まり始め、およそ 2 億年を経過したころから活発に星の形成が始まる。宇宙誕生からおよそ 4 億年後にガスが銀河からいったん大きく吹き飛ばされるが、そのガスが戻ってきて再び活発に星が作られている様子を表現。 *Credit: ALMA (ESO/NAOJ/NRAO)*

この研究は、日本学術振興会/文部科学省科学研究費補助金(No. 26287034, 17H01114, 17H06130, 17H04831, 16H01085, 16H02166, 15K17616, 17K14252, JP17H01111, 16J03329, 15H02064)、国立天文台 ALMA 共同科学研究事業 2016-01A、European Research Council Advanced Grant FP7/669253 and 339177、CONICYT-Chile Basal-CATA PFB-06/2007、FONDECYT Regular 1141218、国立天文台滞在型研究員プログラムによる支援を受けています。

【用語説明・注釈】

- 注1. MACS1149-JD1 : 2012年にジョン・ホプキンス大学の Wei Zheng 氏らがハッブル宇宙望遠鏡を使って発見した遠方の銀河。質量は、天の川銀河の100分の1程度と推定されています。
- 注2. アルマ望遠鏡 (<https://alma-telescope.jp/about>) : 南米チリの標高5,000メートルの高地に建設され2011年に運用を開始した「アタカマ大型ミリ波サブミリ波干渉計」とよばれる巨大電波望遠鏡の呼称。銀河や星、惑星の材料となるガスや塵が放つつかすかな電波(とくに波長0.3~7ミリメートルの電波)を観測します。日本を含む22の国と地域が協力して運用しています。
- 注3. 88マイクロメートルの赤外線、893マイクロメートル(0.893ミリメートル)の電波:電磁波(光)は、その波長によって紫外線(波長がおおよそ0.01~0.4マイクロメートル)、可視光線(おおよそ0.4~0.8マイクロメートル)、赤外線(おおよそ0.8~300マイクロメートル)、電波(300マイクロメートル以上)などと呼び名を変えます。今回検出した酸素原子が放射する電磁波は、波長が88マイクロメートルですので、赤外線にあたります。遠い過去132.8億年前に88マイクロメートルの赤外線として銀河を後にした酸素の光は、宇宙が膨張するにしたがってその波長が伸び(この現象を赤方偏移と呼びます)、地球に届くときには波長が893マイクロメートルになっていました。この波長はもはや赤外線ではなく、電波として観測されることになります。
- 注4. 132.8億光年: 今回の天体の赤方偏移は、 $z = 9.11$ でした。これをもとに最新の宇宙論パラメータ($H_0 = 67.3$ km/s/Mpc, $\Omega_m = 0.315$, $\Omega_\Lambda = 0.685$; Planck 2013 Results)で距離を計算すると、132.8億光年となります。距離の計算について、詳しくは「遠い天体の距離について」(<https://www.nao.ac.jp/astro/glossary/expressing-distance.html>)もご覧ください。
- 注5. カラーフィルタでの距離測定: 私たちの目は自然に色を知覚することができます。一方で、天体観測では特定の色(波長)だけを透過させるフィルタを複数使うことによって始めて、天体の色を計測することができます。このフィルタをカラーフィルタと呼びます。注2の説明にもある通り、遠い過去に銀河を出た電磁波は、宇宙が膨張するのに伴い、地球に届くまでにその波長が伸びます。波長が伸びるという現象は、色の変化に言い換えると、色が赤く変化(赤方偏移)することに対応します。赤方偏移量を計測することができれば、どれくらい過去の(またはどれくらい遠方の)銀河を観測しているかがわかります。したがって、カラーフィルタを使って銀河の色がどれくらい赤くなったか、すなわち赤方偏移したかを計測すれば、銀河までの距離を推定することができます。
- 注6. ハッブル宇宙望遠鏡は、近赤外線領域の5つのカラーフィルタを使ってこの銀河を観測しました。宇宙膨張で光の波長が伸び、遠くにある天体ほどより赤い色で見えるようになるため、その赤み(赤方偏移量)を複数のカラーフィルタによって大まかに測定することで天体までの距離の概算値を求めることができます。
- 注7. GN-z11という銀河は、ハッブル宇宙望遠鏡による観測に基づいて地球からおおよそ134億光年の距離に存在すると考えられていますが、今回のアルマ望遠鏡による観測のように原子が放つ単一波長の輝線観測ではないため、距離決定精度がやや劣ります。

- 注8. 2016年、大阪産業大学の井上昭雄氏、東京大学(現・名古屋大学)の田村陽一氏らの研究チームがアルマ望遠鏡を使った観測で、131億光年先の銀河に酸素を発見しました(参考:2016年6月17日付プレスリリース『アルマ望遠鏡、観測史上最遠方の酸素を捉える』, https://alma-telescope.jp/news/press/mt-post_661)。翌2017年3月には、ユニバーシティ・カレッジ・ロンドンのラポルテ氏らのグループが同じくアルマ望遠鏡を用いて132億光年先の銀河に酸素を発見しました(参考:2017年3月8日付プレスリリース『アルマ望遠鏡、132億光年先の銀河に酸素と塵を発見—最遠方記録を更新し、銀河誕生時代に迫る』, <https://alma-telescope.jp/news/mt-132>)。今回、井上氏らとラポルテ氏は協力して一つのチームを作り、今回の132.8億光年かなたにある銀河に酸素を発見しました。
- 注9. 酸素原子が電離されている:酸素原子は、電気力(クーロン力)によって8つの電子を閉じ込めています。酸素原子に高いエネルギーをもつ電磁波(ここでは紫外線)が当たると、紫外線からエネルギーを受け取った電子がクーロン力を振り切って原子の外に飛び出します。これを電離(あるいはとくに光電離)と呼びます。
- 注10. 超新星爆発:太陽よりも8倍以上重い星は、寿命が数千万年と「短命」であり、かつその一生の最後に超新星爆発と呼ばれる大爆発を起こします。このとき、爆風で周囲のガスを吹き飛ばします。また、その星の内部で核融合された酸素などの元素が宇宙空間にばらまかれ、次の世代の星や惑星の材料になります。
- 注11. 銀河は、重力によって高密度のガスを閉じ込めることによって、星を生み出します。しかし、宇宙初期に存在するMACS1149-JD1のような若い銀河は、まだ質量が小さいために重力が弱く、銀河内部の超新星爆発によって銀河の外縁部にガスを逃がしてしまうと考えられます。銀河内部のガスが枯渇すると、重い星が形成されなくなり、それに伴って超新星爆発もやんできます。すると、こうしたガスは、やがて再び銀河の重力に引きずられて銀河内部に降り積もり、次の世代の星を生み出す材料になったと考えられます。

【論文情報】

雑誌名: Nature, 2018年5月16日号

論文題目: “The onset of star formation 250 million years after the Big Bang”

著者: 橋本拓也(大阪産業大学/国立天文台), Nicolas Laporte (University College London/Université de Toulouse), 馬渡健(論文受理時は大阪産業大学、現在の所属は東京大学), Richard S. Ellis (University College London), 井上昭雄(大阪産業大学), Erik Zackrisson (Uppsala University), Guido Roberts-Borsani (University College London), Wei Zheng (Johns Hopkins University), 田村陽一(名古屋大学), Franz E. Bauer (Pontificia Universidad Católica de Chile/Millennium Institute of Astrophysics/Space Science Institute), Thomas Fletcher (University College London), 播金優一(東京大学), 廿日出文洋(東京大学), 早津夏己(東京大学/欧州南天天文台), 松田有一(国立天文台/総合研究大学院大学), 松尾宏(国立天文台/総合研究大学院大学), 岡本崇(北海道大学), 大内正己(東京大学), Roser Pelló (Université de Toulouse), Claes-Erik Rydberg (Universität Heidelberg), 清水一紘(大阪大学), 谷口義明(放送大学), 梅畑豪紀(放送大学/東京大学/理化学研究所), 吉田直紀(東京大学)

DOI: [10.1038/s41586-018-0117-z](https://doi.org/10.1038/s41586-018-0117-z)