

## 129 億光年かなたのクェーサーから強烈に噴き出す分子ガスの発見

～宇宙初期の銀河成長を抑制するメカニズムの解明へ～

### ポイント

- ・129 億光年かなたの銀河から、星の原料となる分子ガスの強烈な噴き出し（アウトフロー）を観測。
- ・遠方銀河の分子ガスのアウトフローで星形成が抑制されている強い証拠を、世界で初めて発見。
- ・今後より多くの銀河を観測することで、さらなる初期宇宙の銀河成長メカニズム解明に期待。

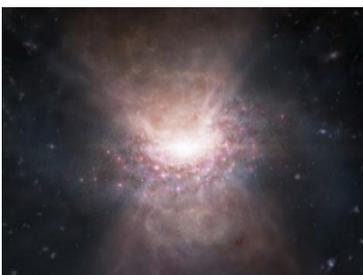
### 概要

北海道大学高等教育推進機構の Dragan SALAK（サラク＝ドラガン）助教、筑波大学数理物質系の橋本拓也助教、早稲田大学理工学術院の井上昭雄教授を中心とする研究チームは、アルマ望遠鏡\*<sup>1</sup>を使った観測により、129 億光年かなたの銀河\*<sup>2</sup> で明るく輝くクェーサー J2054-0005 からの強力な分子ガスのアウトフローを捉えることに成功し、それが初期宇宙の銀河の成長に大きな影響を与えていた強い証拠を世界で初めて発見しました。

現代の宇宙では、星形成が不活発な巨大銀河の存在が知られていますが、その原因として理論的に考えられているものの一つが、銀河からのガスの噴き出し（アウトフロー）です。しかし、これまで宇宙初期のクェーサーにおいて分子ガスのアウトフローが観測された例はわずか 2 天体しかなく、その 2 天体で観測されたアウトフローは星形成の進行を左右し銀河の成長に影響を及ぼすほど強いものではありませんでした。

研究チームは、クェーサー J2054-0005 からの分子ガスのアウトフローを、分子ガス中のヒドロキシラジカル (OH) 分子が作る「影絵」として検出することに成功しました。影絵の様子を詳しく調べたところ、星の材料となる分子ガスが銀河の外へ激しく噴き出していることが分かりました。その速度は毎秒 1,500km にも達し、流出している分子ガスは 1 年間あたり太陽質量の 1,500 倍に相当する莫大な量に上ります。この流出量は銀河の中で新たに作られる星の量と比べて大きいことも明らかになりました。研究チームは、この銀河から 1000 万年ほどで星の材料となる分子ガスが枯渇し、今後新たな星を作りにくくなると考えています。本研究成果は、分子ガスの噴き出し（アウトフロー）が銀河の星形成を抑制するという理論予想を裏付ける重要な成果です。

なお、本研究成果は、2024 年 2 月 1 日（木）公開のアストロフィジカルジャーナル誌に掲載されました。



宇宙初期の銀河中心で明るく輝くクェーサー J2054-0005 から噴き出す分子ガスのアウトフローをアルマ望遠鏡で「影絵」として捉えた（想像図）

Credit: ALMA (ESO/NAOJ/NRAO)

## 【背景】

現在の宇宙では、星を活発に作っている渦巻き銀河や、星形成を終えた楕円銀河の存在が知られています。しかし、銀河がいつどのようにして星を作りにくくなるのかは、現代の天文学の大きな謎となっています。実は、宇宙誕生後わずか 15 億年頃には、すでに星形成が不活発な巨大銀河が存在したことが知られていました。このような不活発な銀河は、過去に星形成が活発な時期を経て、何らかの原因によって星形成が抑制されたと考えられています。

その原因として理論的に考えられているものの一つが、銀河からのガスの噴き出し（アウトフロー）です。例えば現在の宇宙では、ガスが銀河円盤の上下に噴き出すアウトフロー現象が観測されています。分子ガスは星の材料であるため、とくに分子ガスのアウトフローは星形成の進み具合を調節する大切な働きをします。星形成の抑制メカニズムを明らかにするためには、遠方つまり初期の宇宙に遡って、星形成とアウトフローの関係を調べるのが重要です。

多くの銀河はその中心に巨大質量ブラックホールを宿すことが知られています。とくに、銀河中心にある超巨大ブラックホールへと物質が降り積もることで明るく輝く天体は、クェーサーと呼ばれます。宇宙初期のクェーサーは星形成が活発であり、超巨大ブラックホールの影響も相まって、強烈な分子ガスのアウトフローを生み出している可能性があります。しかし、これまで宇宙初期のクェーサーにおいて分子ガスのアウトフローが観測された例は、わずか 2 天体しかありません。その 2 天体で観測されたアウトフローは、星形成の進行を左右し銀河の成長に影響を及ぼすほど強いものではありませんでした。

## 【研究手法】

研究チームは、129 億光年かなたにあるクェーサー J2054-0005 を、アルマ望遠鏡を用いて観測しました。J2054-0005 は宇宙年齢 10 億年未満の時代において最も明るく輝くクェーサーの一つです。このような明るい天体は観測しやすい利点があります。

分子ガスの動きは、分子の放つ電波信号の波長の変化（ドップラーシフト）として観測できます。一酸化炭素（CO）などが放つ「輝線」が、分子ガスの観測によく用いられます。しかし、銀河から噴き出すアウトフローを観測する場合、銀河本体の回転による放射信号のほうが大きく、アウトフローによる放射信号が弱くて検出できないことなど、複雑な要因が絡み合い、観測は難しくなります。これまでの CO などの輝線の観測では、クェーサー J2054-0005 からのアウトフローは検出されていませんでした。

一方、クェーサーの発する連続波（様々な波長の混ざった光）のうち、観測者から見て手前側にあるガスが固有の波長の電波を吸収することによって生じる「吸収線」をいわば「影絵」のように観測すれば、輝線の観測の場合の複雑な要因がなく、ガスの動きを吸収線のドップラーシフトとして観測できます。ただし、当該の波長の強度が強い連続波光源がガスの背後にある必要があります。ヒドロキシルラジカル（OH）分子の 119 マイクロメートル（=0.119 ミリメートル）の吸収線は、こうした観点から今回の観測に適しており、これを観測することでクェーサー J2054-0005 からのアウトフローを初めて検出し、速度も正確に求めることに成功しました。

本研究はアルマ望遠鏡だからこそ実現した成果です。遠方の天体が放つ光や電波は微弱で、観測するためには高い感度を持つ望遠鏡が必要になります。また、宇宙は膨張しているため、遠方の天体からの光や電波の波長は長く引き延ばされます。今回の研究では、当該の観測波長を高い感度で観測できる唯一の望遠鏡であるアルマ望遠鏡で OH を観測したことが成功への鍵となりました。

## 【研究成果】

研究チームは、キューサーJ2054-0005からの強力な分子ガスのアウトフローを捉えることに成功し、それが初期宇宙の銀河の成長に大きな影響を与えていた強い証拠を世界で初めて発見しました。図1に示すとおり、分子ガス中のOHによって生じる吸収線を検出しています。遠方のキューサーでこれほど高い有意度でOHの吸収線が検出された初めての例です。吸収線の波長から、アウトフローの速度は典型的に毎秒700km、最大で毎秒1,500kmにも達することを明らかにしました。流出した分子ガスの量は、年間あたり太陽質量の1,500倍ほどに上り、この量はJ2054-0005が年間あたりに新しく作る星の質量の2倍に相当する莫大なものです。今後、およそ1000万年という短い期間で星の材料となる分子ガスが枯渇していくと予想されます。本研究成果は、分子ガスのアウトフローが銀河の星形成を抑制するという理論予想を裏付ける重要な成果です。

## 【今後への期待】

本研究成果は新しい謎にも繋がっています。J2054-0005では星形成を抑制するほどの強いアウトフローが認められた一方で、過去に調べられた2例のキューサーのアウトフローは星形成に大きな影響を及ぼすほど強いものではありませんでした。この違いは何によって引き起こされているのでしょうか。今後、より多くのキューサーに対してOHを観測することで、星形成を抑制するほど強いアウトフローが起きている銀河の割合を統計的に調査することが鍵となります。また、アルマ望遠鏡はアンテナ間を広く離して配置することによって高い空間分解能を実現できます。今後、アウトフローが銀河のどこでどのように発生しているかを解明できれば、銀河の進化と分子ガスのアウトフローの関係をさらに深く理解できると期待しています。

## 【謝辞】

本研究は、ALMA Japan Research Grant of NAOJ ALMA Project, NAOJ-ALMA-294、文部科学省卓越研究員事業 (HJH02007)、日本学術振興会科学研究費補助金 (JP22H01258、JP17H06130、JP20H01951、JP22H04939)、National Science Center (NCN) grant SONATA (UMO2020/39/D/ST9/00720)、国立天文台 ALMA Scientific Research Grant No. 2018-09B、科学技術振興機構次世代研究者挑戦的研究プログラム JPMJSP2119 の支援を受けて行われました。

## 論文情報

論文名 Molecular outflow in the reionization-epoch quasar J2054-0005 revealed by OH 119  $\mu$ m observations

著者名 Dragan Salak<sup>1</sup>、Takuya Hashimoto<sup>2</sup>、Akio K. Inoue<sup>3</sup>、Tom J.L.C. Bakx<sup>4</sup>、Darko Donevski<sup>5,6</sup>、Yoichi Tamura<sup>7</sup>、Yuma Sugahara<sup>3</sup>、Nario Kuno<sup>2</sup>、Yusuke Miyamoto<sup>8</sup>、Seiji Fujimoto<sup>9</sup>、Suphakorn Suphapolthaworn<sup>1</sup> ( <sup>1</sup>Institute for the Advancement of Higher Education, Hokkaido University、<sup>2</sup>Faculty of Pure and Applied Sciences, University of Tsukuba、<sup>3</sup>Faculty of Science and Engineering, Waseda University、<sup>4</sup>Department of Space, Earth & Environment, Chalmers University of Technology (Sweden)、<sup>5</sup>National Centre for Nuclear Research (Poland)、<sup>6</sup>SISSA, ISAS, IFPU (Italy)、<sup>7</sup>Graduate School of Science, Nagoya University、<sup>8</sup>Department of Electrical, Electronic and Computer Engineering, Fukui University of Technology、<sup>9</sup>Department of Astronomy, University of Texas at Austin (USA))

雑誌名 The Astrophysical Journal (天文学の専門誌)

DOI 10.3847/1538-4357/ad0df5

公表日 2024年2月1日(木)(オンライン公開)

## お問い合わせ先

北海道大学高等教育推進機構 助教 Dragan Salak (サラク = ドラガン)

TEL 011-706-3481 メール dragan@oia.hokudai.ac.jp

URL <https://sites.google.com/site/draganspage/>

## 配信元

北海道大学社会共創部広報課 (〒060-0808 札幌市北区北8条西5丁目)

TEL 011-706-2610 FAX 011-706-2092 メール jp-press@general.hokudai.ac.jp

筑波大学広報局 (〒305-8577 茨城県つくば市天王台1-1-1)

TEL 029-853-2040 FAX 029-853-2014 メール kohositu@un.tsukuba.ac.jp

早稲田大学広報室広報課 (〒169-8050 東京都新宿区戸塚町1丁目104)

TEL 03-3202-5454 FAX 03-3202-9435 メール koho@list.waseda.jp

国立天文台アルマプロジェクト (〒181-8588 東京都三鷹市大沢2-21-1)

TEL 0422-34-3630 FAX 0422-34-3764 メール naoko.inoue@nao.ac.jp

## 【参考図】

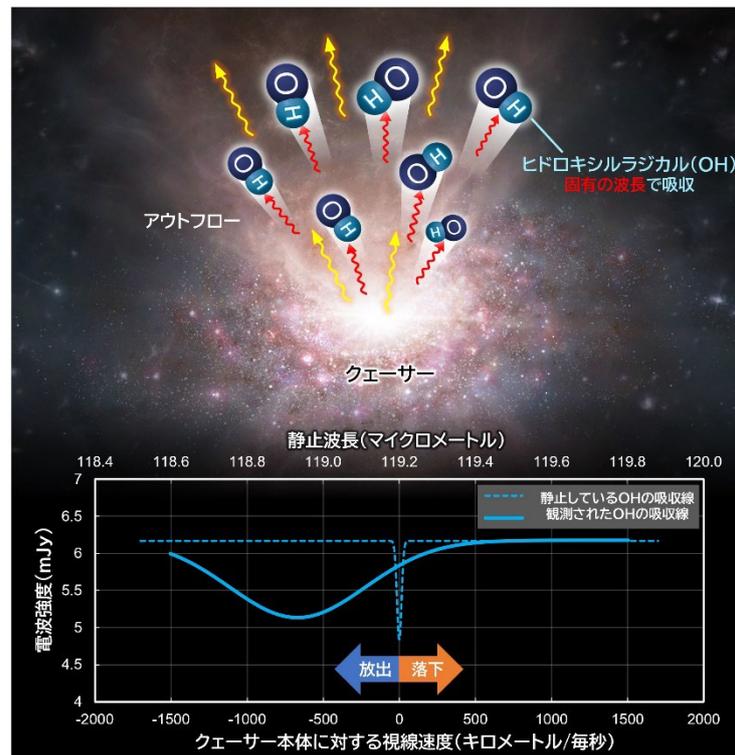


図 1. 分子ガス中のヒドロキシルラジカル (OH) によって生じる吸収線。ガスが放出される場合は観測者に向かって来るため短い波長に吸収線の中心が移動します (ドップラーシフト)。一方、ガスが落下する場合は観測者から遠ざかるため長い波長に移動します。今回は吸収線が短い波長に移動しているため放出、つまり、アウトフローと分かります。また、吸収線の幅が大きく広がっているので、アウトフロー中の OH 分子は速いものから遅いものまで様々な速度を持ってアウトフローしていることが分かります。 Credit: ALMA (ESO/NAOJ/NRAO), D. Salak et al.

## 【用語解説】

- \*1 アルマ望遠鏡 … アルマ望遠鏡 (アタカマ大型ミリ波サブミリ波干渉計、Atacama Large Millimeter/submillimeter Array: ALMA) は、欧州南天天文台 (ESO)、米国国立科学財団 (NSF)、日本の自然科学研究機構 (NINS) がチリ共和国と協力して運用する国際的な天文観測施設です。アルマ望遠鏡の建設・運用費は、ESO と、NSF 及びその協力機関であるカナダ国家研究会議 (NRC) 及び台湾国家科学及技術委員会 (NSTC)、NINS 及びその協力機関である台湾中央研究院 (AS) と韓国天文宇宙科学研究院 (KASI) によって分担されます。アルマ望遠鏡の建設と運用は、ESO がその構成国を代表して、米国北東部大学連合 (AUI) が管理する米国国立電波天文台が北米を代表して、日本の国立天文台が東アジアを代表して実施します。合同アルマ観測所 (JAO) は、アルマ望遠鏡の建設、試験観測、運用の統一的な執行及び管理を行うことを目的とします。
- \*2 129 億光年かなたの銀河 … 今回の天体の赤方偏移は、 $z = 6.04$  でした。これをもとに最新の宇宙論パラメータ ( $H_0 = 67.7 \text{ km/s/Mpc}$ ,  $\Omega_m = 0.3111$ ,  $\Omega_\Lambda = 0.6889$ ) で距離を計算すると、129 億光年になります。