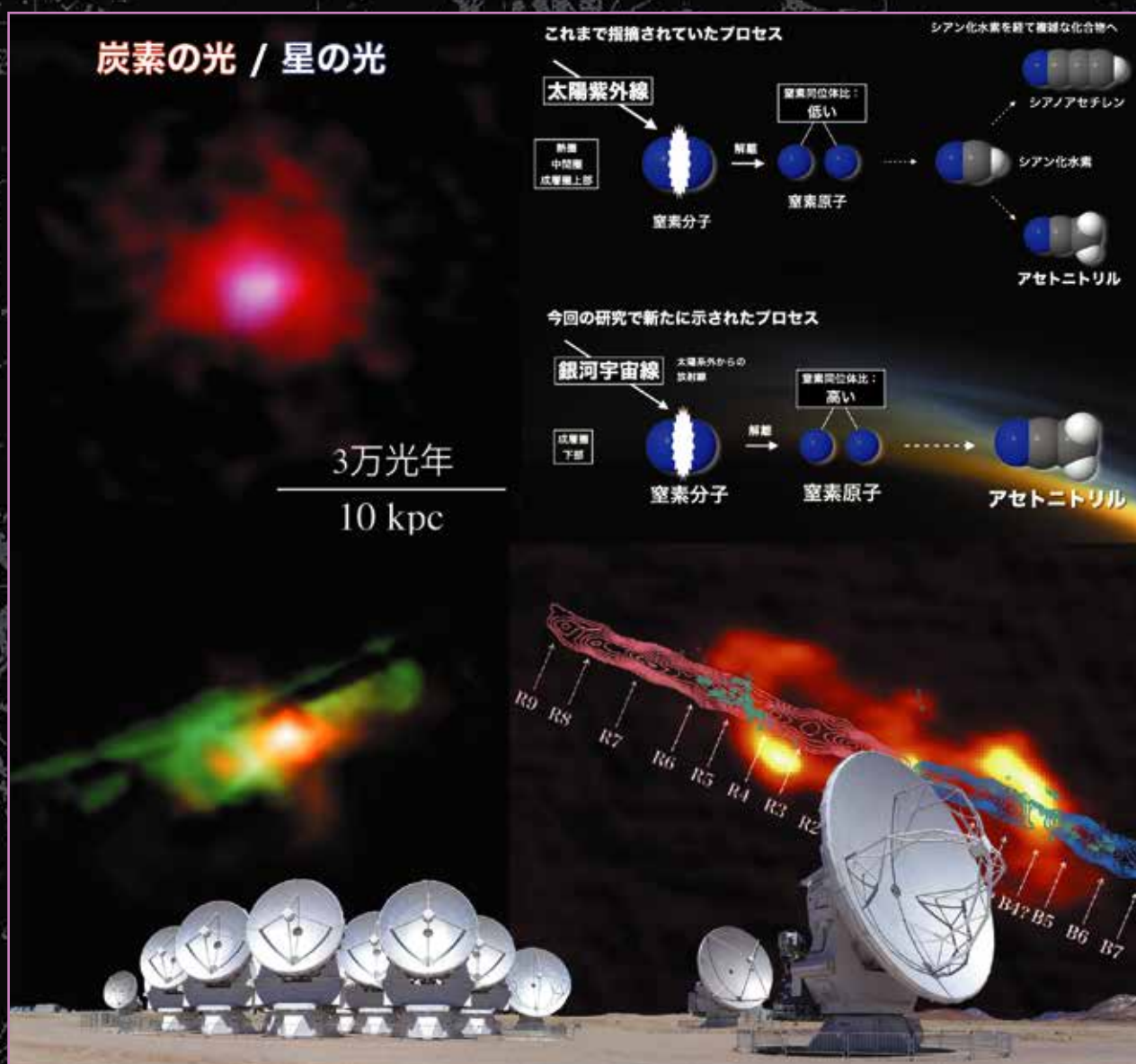


国立天文台ニュース

National Astronomical Observatory of Japan

2020年6月1日 No.323

特集 アルマ望遠鏡 2020



- アルマ望遠鏡の最新レポート
- 宇宙初期の巨大炭素ガス雲の発見
—アルマ望遠鏡がとらえた宇宙最初の環境汚染—
- タイタンの大気化学を解き明かす同位体
- 臨終間近の老星でアルマ望遠鏡が捉えた双極ジェットを吹き出す瞬間
- 太古の宇宙におけるブラックホールジェットと星間ガスの衝突を初観測

6

2020

NAOJ NEWS

国立天文台ニュース

C O N T E N T S

- 表紙
- 国立天文台カレンダー

03

特集

アルマ望遠鏡 2020

- アルマ望遠鏡の最新レポート
平松正顕 (アルマプロジェクト)
- 研究トピックス01
宇宙初期の巨大炭素ガス雲の発見
—アルマ望遠鏡がとらえた宇宙最初の環境汚染—
藤本征史 (コペンハーゲン大学)
- 研究トピックス02
タイタンの大気化学を解き明かす同位体
飯野孝浩 (東京大学情報基盤センター)
- 研究トピックス03
臨終間近の老星でアルマ望遠鏡が捉えた双極ジェットを吹き出す瞬間
今井 裕 (鹿児島大学)
- 研究トピックス04
太古の宇宙におけるブラックホールジェットと星間ガスの衝突を初観測
井上開輝 (近畿大学)

15

おしらせ

- 新型コロナウイルス感染症に関連した対応について●望遠鏡運用状況●
- 新型コロナウイルス感染症に関連した対応について●施設公開等●

15

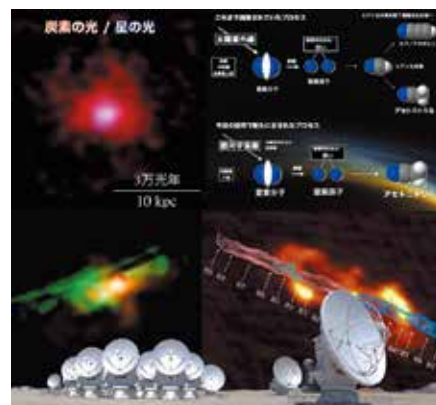
編集後記／次号予告

16

新連載「すばる望遠鏡 HSC Cosmic Gallery」03

SDSS J0232.8-0323

解説：田中賢幸 (ハワイ観測所)



表紙画像

アルマ望遠鏡とさまざまな観測成果画像。

背景星図 (千葉市立郷土博物館)
渦巻銀河 M81画像 (すばる望遠鏡)



三鷹構内のガクアジサイ。

国立天文台カレンダー

2020年5月

2020年6月

2020年7月

●5月、6月、7月のカレンダーは、新型コロナウイルス感染症のため、掲載を見送ります。

特

集

アルマ 望遠鏡 2020

2011年9月にアルマ望遠鏡の初期科学観測が始まってから、もうすぐ9年。アルマ望遠鏡は、惑星系の誕生現場をこれまでにない解像度で描き出し、宇宙初期の銀河をこれまでにない感度で捉えて酸素や炭素の存在を明らかにし、そして星や惑星の形成現場に複雑な有機分子を見つけました。今回のアルマ望遠鏡特集では、改めてアルマ望遠鏡の「今」と「未来」、そして最新の観測成果についてご紹介したいと思います。

協力

アルマプロジェクト・チリ観測所

アルマ望遠鏡の最新レポート

アルマ望遠鏡の現状と最近のおもな研究成果、そして今後の機能強化計画をご紹介します。



平松正顕
(アルマプロジェクト)

●01 アルマ望遠鏡とは？

アルマ望遠鏡は、口径12mのアンテナ54台、口径7mのアンテナ12台の計66台を擁する電波望遠鏡です。多数のアンテナで一斉に一つの天体を観測し、そのデータを専用の高速コンピュータで処理して合成することでひとつの巨大な仮想電波望遠鏡を構成する「電波干渉計」です。アンテナが展開されているのは、南米チリ、アンデス山脈の中にある標高5000mのチャナントール高原。実際にその場所に立ってみると、標高を感じさせないほど広々とした台地が広がっています。66台のアンテナは最大で差し渡し16kmの範囲に展開され、これらがつなぎ合わされることで、東京の山手線大の望遠鏡となります。

このような大規模な望遠鏡は、一国だけでは建設と運用ができません。アルマ望遠鏡は、日本をはじめとする東アジア、北米、欧州の各国が協力して運用を行っています。建設地のチリを含めると、その数は22カ国・地域にのびります。チリ現地には望遠鏡の運用を担う「合同アルマ観測所」が設立され、各国から研究者をはじめさまざまな専門性を持つ職員が集って業務にあたっています。ま

た東アジア・北米・欧州の各地域には、それぞれの地域の天文学者がアルマ望遠鏡を使った研究を遂行することを支援する「地域支援センター」が設置され、アルマ望遠鏡ユーザーとプロジェクトの橋渡し役を担っています。東アジアのアルマ地域支援センターは国立天文台に設置されていて、データ解析とデータの品質管理、ユーザーズミーティングや観測提案準備ワークショップの開催、問い合わせ対応からソフトウェア・ハードウェアの開発、広報など多彩な支援業務を行っています。

アルマ望遠鏡は、波長が数mmから1mm以下の電波「ミリ波・サブミリ波」を観測します。ミリ波・サブミリ波の観測で研究するのは、主に星の材料になるような低温（絶対温度10ケルビン、摂氏マイナス260℃程度）の星間物質です。アルマ望遠鏡は、「惑星系の誕生」「銀河の形成」「宇宙における物質進化」の解明を3大目標に据え、ミリ波・サブミリ波を極めて高い感度と解像度で捉えることで、天文学を大きく前進させつつあります。

●02 アルマ望遠鏡の「今」

アルマ望遠鏡の観測は、毎年

10月からの1年間をひとつの「サイクル」としています。2019年10月から科学観測「サイクル7」が開始されましたが、新型コロナウイルス感染症の拡大防止のために、2020年3月19日にアルマ望遠鏡の科学運用が一時的に停止されました。このため、サイクル7はその終了期間が1年延長され、2021年9月末までの2年間となりました。現在は、チリでの感染症拡大の状況を注視しながら、運用再開のタイミングを検討しているところです（2020年6月9日現在）。

アルマ望遠鏡の現地運用が止まっても、アルマ望遠鏡を使った研究は止まりません。すでに多くのデータが研究者に配布されており、また観測一時停止前に取得されたデータも順次処理されています。また、アルマ望遠鏡観測データアーカイブにはこれまでに取得されたデータが蓄積されており、多くのデータは誰でもダウンロードして研究に利用できる状態になっています。

さらに、アルマ望遠鏡の能力を高める開発も進んでいます。アルマ望遠鏡は、観測する電波を10の波長帯（バンド）に分け、それぞれに最適化された受信機を作ってアンテナに搭載しています。現在はバンド3からバンド10までの



図01 台湾ASIAAで製造が進むアルマ望遠鏡バンド1受信機。Credit: ASIAA

8種類の受信機が観測に使われていますが、もっとも波長の長い（周波数の低い）バンド1とバンド2は「空席」になっています。この空席を埋め、アルマ望遠鏡の観測周波数帯をさらに拡張するための開発が進んでいるのです。

●バンド1受信機の開発

バンド1（周波数35～50 GHz、波長 6～8.5mm）は、台湾の中央研究院天文及天文物理研究所（ASIAA）を中心に、国立天文台、アメリカ国立電波天文台、チリ大学、カナダ・ヘルツベルグ天体物理学研究所が協力して開発されました（図01）。2019年11月には量産審査会が開催され、必要な性能試験や組み立ての設備と手順、品質管理体制が十分なものであるかどうか審査されました。その結果、全アンテナ66台への搭載分と予備7台の合計73台の量産が認められました。バンド1受信機の製造は進んでおり、既に一部はチリに送られています。2020年3月には、アルマ望遠鏡山麓施設での受信機の組み込み作業が開始されました。アルマ望遠鏡の現地運用が再開されれば、望遠鏡に搭載されて初めて電波を検出する「ファーストライト」に進むことになります。

●バンド2受信機の開発

バンド2（周波数67～90 GHz、波長2.6～4.5mm）受信機の開発

は、欧州南天天文台と国立天文台が共同で提案し、アルマ評議会によって承認されました。受信機の主要部分は欧州南天天文台とオランダのNetherlands Research School for Astronomy（NOVA）、スウェーデンのチャルマース工科大学、イタリアのNational Institute for Astrophysics（INAF）が共同開発します（図02）。国立天文台は、受信機に電波を導く「受信機光学系」の製造と試験を担当します。また、米国立電波天文台とチリ大学は、バンド2受信機の構成部品の一部の開発に携わってきました。バンド2受信機開発に関する契約は2020年4月までに各機関によって締結され、正式に開発がスタートしました。なお、バンド2受信機がカバーする周波数の上限を116 GHzまで拡張し、現在のバンド3受信機（84～116 GHz、波長2.6～3.6mm）が観測できる周波数帯をも1台の受信機で観測可能にする技術的検討も進められています。

バンド1・2受信機が稼働することによって、アルマ望遠鏡の観測周波数が拡大し、さらに力強い天文学研究を推進することができます。期待されている研究のひとつは、遠方銀河に含まれる一酸化炭素分子からの電波をとらえることです。一酸化炭素分子は、星の材料となる分子雲のなかで水素分子に次いで豊富に存在する分子で、電波を強く放射することから

よく観測されています。一酸化炭素分子が放つ電波の周波数は、115 GHz（アルマ望遠鏡バンド3のカバー範囲）とその整数倍の周波数となります。ところが非常に遠方にある銀河の場合、宇宙膨張に伴う赤方偏移によって周波数が下がり（波長が伸び）、バンド3よりも低い周波数帯になって地球に届きます（p06・図03参照）。バンド1やバンド2はこうした周波数帯をカバーすることができるので、遠方銀河に含まれる星の材料のガス量を精度よく測定できるようになるのです。

また、バンド1・2受信機がカバーする周波数帯には、有機分子や重水素を含む分子の電波が含まれます。惑星系誕生の現場ではすでに様々な分子の検出が進んでい



図02 INAFが開発したバンド2試作受信機の15 Kステージ。Credit: INAF/F. Villa

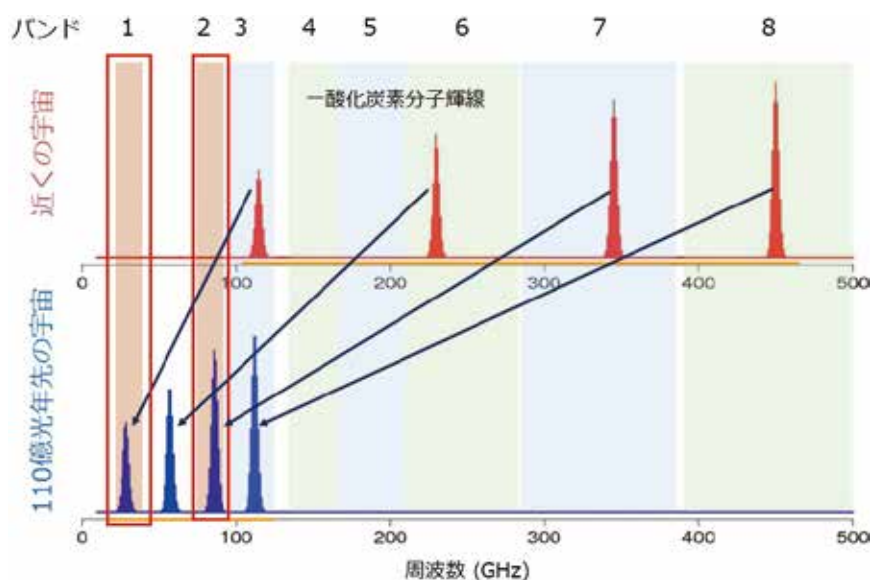


図03 一酸化炭素分子が放つ電波の模式図。一酸化炭素分子は115 GHzとその整数倍の周波数の電波を放つので、宇宙膨張の影響を受けない「近くの宇宙」ではバンド3以上の周波数帯でカバーされます（図上）。一方で遠方宇宙にある天体を観測するときは、宇宙膨張の影響を受けて周波数が下がります。例えば110億光年先の天体に含まれる一酸化炭素分子から発せられる電波は、バンド1・2受信機がカバーする周波数帯に入ってきます（図下）。

ますが、バンド1・2受信機による観測が加わることで、重水素を含む分子の観測から地球型惑星に含まれる水の起源を探る研究や、さらに多様な有機分子の研究が進むことでしょう。

さらに、日本が開発した12mアンテナ向けの新型デジタル分光計も、韓国天文学宇宙科学研究所（KASI）と国立天文台の共同で開発が進められています。高速なデータ処理が可能なGPUを活用した分光計で、天体から届く電波の強度を測定する能力をさらに高めることを目指しています。2019年12月には最終設計・製造審査会がKASIで開催され、国際的な専門家からなる審査委員会によって製造に正式なゴーサインが出されました。

●03アルマ望遠鏡の「未来」

バンド1・2受信機や新型分光計の開発が現在進んでいますが、国立天文台ではそのさらに先を見越した開発の準備も進めています。

アルマ望遠鏡は、日本では文部

科学省の大規模学術フロンティア促進事業によって推進されています。この事業は、すばる望遠鏡やTMT、核融合科学研究所の大型ヘリカル装置、東京大学が主導するスーパーカミオカンデなどの大規模研究装置や研究プロジェクトを推進することで、世界の学術フロンティアを先導することを目指したものです。アルマ望遠鏡の場合、この仕組みによる支援が2022年度で終了します。もちろんアルマ望遠鏡はその後パワーアップしながら共同利用を継続し、天文学の新たなページを切り拓いていくポテンシャルを有しています。これを実現するために国立天文台は、アルマ望遠鏡を機能強化しながら科学観測を実行する「アルマ2計画」を提案しています。

●アルマ2計画

この計画は、まず科学者コミュニティの代表である日本学術会議に提出されました。日本学術会議は「学術の大型研究計画に関するマスタープラン」を6年に一度策定し（3年毎に小改訂）、学術的

意義の高い大型計画を体系化してまとめています。2020年1月に発表された「マスタープラン2020」では、アルマ2計画は速やかに実施すべき計画である「重点大型計画」のひとつに選定されました。次に、文部科学省が策定する「学術研究の大型プロジェクトの推進に関する基本構想ロードマップ」にもアルマ2計画の提案を提出しました。マスタープランが主に学術的意義を踏まえて研究者コミュニティが選定するものであるのに対し、ロードマップは国が「学術研究の大型プロジェクトを推進するうえで一定の優先度を評価するもの」とされています。ロードマップへの提案は、現在審査中です。

アルマ2計画の概要は国立天文台ニュース2019年9月号のアルマ望遠鏡特集で簡単にご紹介しましたが、改めて記しておきましょう。アルマ望遠鏡の機能強化として、「解像度の2倍以上の向上」、「感度の約2倍向上」、「同時観測可能周波数帯域の2倍以上向上」を目指します。このために、アンテナ配置範囲の拡大、受信機や信号処理装置の改良などを検討しています。実際に、国立天文台先端技術センターでは、従来の5倍程度の周波数帯域を同時に観測できる受信素子の開発に成功しています。また、アルマ望遠鏡の大気揺らぎ補正技術を向上させることで解像度を視力6000以上にする試験観測にも成功するなど、準備は着々と進んでいます。すでに比類なき性能を持つアルマ望遠鏡ですが、さらに性能を向上させることで、現在のアルマ望遠鏡や他の望遠鏡では解けない謎を解くことに挑むのです。

●アルマ2計画の3つの科学目標

アルマ2計画で設定する科学目標は3つあります。第一の目標

は、「地球型惑星形成領域における惑星形成過程の理解」。若い星のまわりの原始惑星系円盤をより高い解像度で観測し、地球軌道スケールの構造を明らかにすることで、円盤内のどこでどんな惑星形成が進むのかを明らかにすることを目指します。これは、発見が相次ぐ太陽系外惑星の多様性の起源に迫ることになります。アルマ2計画で解像度を2倍以上向上させることで、地球軌道スケールの構造を見分けられる天体数は現在から約100倍増加するため、より多くの惑星形成現場を見ることが可能になります（図04）。

第二の目標は、「惑星系誕生過程での生命素材物質の理解」を大きく前進させることです。感度と同時観測可能周波数帯を向上させることで、より効率的に、より弱い電波までキャッチすることが可能になります。惑星系誕生現場を細かく分解して調べるだけでなく、その中の場所場所での有機分子の分布を描き出すのです。生命の材料になりうるような有機分子がどこに存在するのかを明らかにし、光学赤外線望遠鏡で行う太陽系外惑星の大気分析や、探査機による太陽系内天体の有機分子探査と結びつけることで、地球と太陽系外惑星における生命の起源についての基本情報を得ることを目指しています。

第三の目標は、「宇宙における元素合成の開始地点の探究」です。アルマ望遠鏡はこれまでに、132億8000万光年先の銀河に酸素を発見するなど、宇宙初期に存在する元素について新たな知見を多く生み出してきました。アルマ2計画で感度向上と周波数帯域を拡大させることで、赤方偏移が確定していない遠方銀河（つまり、重元素からの電波放射の周波数がわからない銀河）の観測効率を大

幅に向上させることを狙っています。これにより、理論的に最初の星が生まれたと考えられる宇宙誕生後3億年の時代を観測し、その星が超新星爆発してまき散らした酸素などの重元素からの電波を探します。これによって、最初の星形成の時期を精度よく求め、宇宙における元素合成の開始地点を特定することを目指します。そしてもちろん、パワーアップしたアルマ望遠鏡はこれら3つの大目標以外にもさまざまな宇宙の謎に挑み、新しい宇宙の姿を見せてくれることでしょう。引き続き、ご支援のほどよろしくお願いします。

●04 最新の観測成果

アルマ望遠鏡からは、引き続き多くの科学成果が創出されています。例えば天の川銀河の隣にある大マゼラン雲で、一方向に大きくガスが広がる「孔雀」形のふたつの分子雲の姿が詳しく描き出されました。その姿は、ガス雲同士が大規模に衝突した場合のシミュレーション研究結果とよく似ていて、大マゼラン雲の激動の歴史を物語っているといえます。また、推定4000万歳のくじら座49番星を取り巻く円盤に、予想をはるかに超える量の炭素原子ガスが発見されました。従来の理論では、この星の周囲では惑星形成が完了し

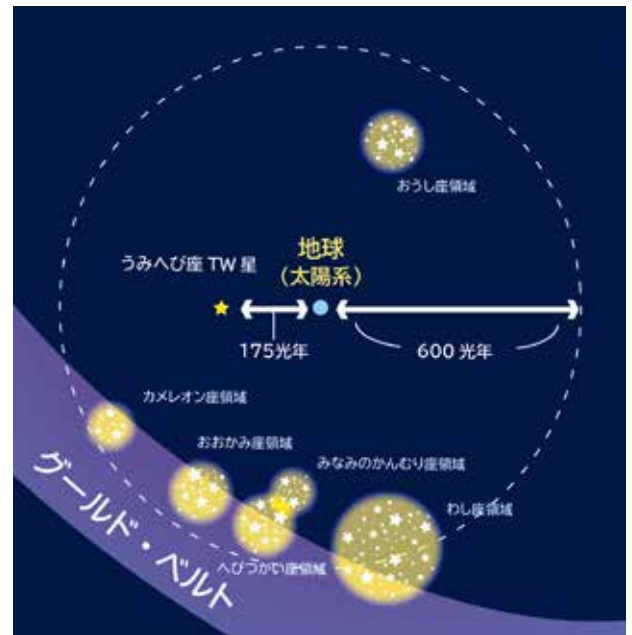


図04 アルマ望遠鏡は、約300光年の距離にある星の周囲で地球軌道スケールの構造を見分けることができます。一方、太陽から300～600光年の位置には数多くの星形成領域があり（帯状に連なる星形成領域を、グールドベルトと呼びます）、数多くの若い星が存在しています。このため、解像度を2倍に向上させると、飛躍的に多くの若い星の周囲で地球軌道スケールの構造を見分けられるようになります。

てガスが散逸してしまっている段階にあたります。この発見は、惑星形成過程全体に再考を迫る重要な成果と言えます。さらに、星形成領域 AFGL 5142 にリンを含む分子が発見されました。リンは DNA にも含まれる生命に欠かせない元素です。探査機による観測で、彗星にもリンが含まれていることが明らかになっています。星のもとになるガス雲にリンが存在し、そこで作られた彗星にリンが取り込まれ、彗星が惑星に衝突することでリンがもたらされる。私たちの体に含まれるリンも、もしかしたらこのような過程を経て地球に運ばれてきたのかもしれない。生命誕生に繋がる物質の由来を紐解くことも、アルマ望遠鏡の重要なミッションです。

●このあとには、アルマ望遠鏡で成果を挙げた日本の研究者たちによる記事が続きます。アルマ望遠鏡が明らかにする新しい宇宙の姿を、ぜひお楽しみください。

宇宙初期の巨大炭素ガス雲の発見

—アルマ望遠鏡がとらえた宇宙最初の環境汚染—

藤本征史
(コペンハーゲン大学)



宇宙にあまねく広がる生命の源、重元素

ビッグバン直後の宇宙には水素とわずかなヘリウム、リチウム、ベリリウムしか存在していませんでした。一方で現在の宇宙には、地球の大気や生命の材料にもなっている、炭素や酸素などの**重元素**^{★01}が広く存在していることが知られています。宇宙で星が生まれると、星の内部で核融合反応がおこり、水素などから重元素が生み出されたと考えられています。しかし、このような重元素がいつどのように宇宙に広がっていったのか、まだ分かっていません。

こうした重元素のガスには電波の波長帯で明るい輝線を放つものが多く存在します。そこで天文学者たちは、電波の波長帯で高い感度を誇る大型電波干渉計アルマ望遠鏡を用いて、宇宙初期に生まれた銀河に対して、重元素ガスの観測をこれまで続けてきました(図01)。その結果、宇宙誕生後数億年後の銀河内部に、すでに炭素や酸素といった重元素が存在していることをつきとめていました。しかし従来の観測では、感度の限界のために、宇宙初期の銀河から外の宇宙空間に重元素が広がっているのかどうかを調べることはできませんでした。

世界最高感度のデータによる巨大炭素ガス雲の発見

そこで我々は、電波の波長帯で最も明るい輝線を放つ炭素ガスの光に注目しました。公開されていたアルマ望遠鏡のデータをくまなく調べ、宇宙誕生後、約7~11億年ごろの初期銀河の炭素ガスをとらえたデータを全て集めてきました。これらの複数のデータを重ね合わせ、よりくっきりとしたシグナルを得る解析処理を行うことで、従来の約20倍の観測時間に匹敵する極めて高感度のデータを得ました。個々の銀河の姿ではなく、この時代の銀河の平均的な姿を描き出すことができたので

す。これは、人類がこれまでに手にした炭素輝線に対するデータの中で、最も感度が高いものです。

世界最高感度のデータによって我々研究チームは、従来の観測ではとてとらえることのできなかった微弱な炭素ガスのシグナルを検出することに成功しました。初期銀河の周りの漆黒の空間に、約3万光年にわたってうっすらと広がった炭素ガス雲が見えてきました(図02)。ハッブル望遠鏡なども駆使して星の分布を撮影し注意深く解析を続けたところ、この炭素ガス雲は、銀河中の星の分布よりも約5倍も広がっている巨大な構造であることがわかってきました。

現在のモデルでは説明できない大きさ

どうして巨大な炭素ガス雲が形成されるのでしょうか。星が死を迎えると、超新星爆発によって星内部で形成された炭素が、周囲にばらまかれていきます。さらに爆発時のエネ

★ newscope <解説>

★01 重元素

天文学では、水素とヘリウムよりも重い元素を、すべてまとめて重元素と呼びます。

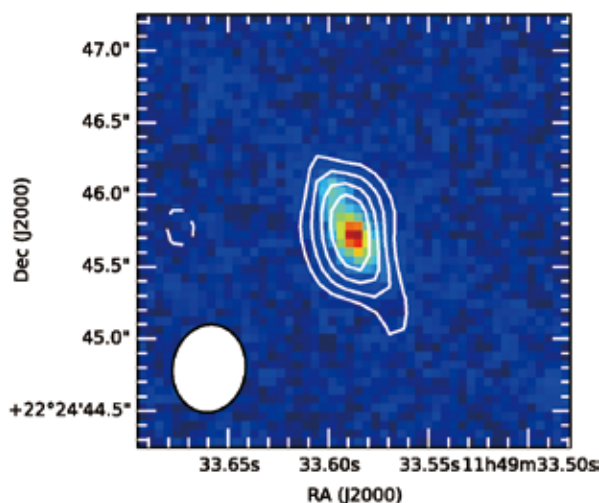


図01 宇宙誕生約5億年後(赤方偏移 $z=9.1096$)の時代の銀河からの酸素の光(白色等高線)。検出を確かめるには十分なデータでしたが、銀河の星の光(背景カラー)に対して、どれほど広がっているかを精査するのは難しい状況でした。Hashimoto et al. 2018, Nature, 557, 392より転載。

ルギー、巨大ブラックホール周囲から放出されるジェットや強力な光によって、星の周囲にとどまらず、銀河の外、やがては宇宙全体に炭素が広がっていったのだと考えられます。原始的な水素やヘリウムガスが充満する宇宙に拡散されていく炭素。天文学では、こうした重元素の拡散によってガス中の重元素比率が上昇することを「汚染」と呼びます。今回の成果は、まさに宇宙最初の環境汚染の現場をとらえた発見とも言えます。

では、こうした巨大な炭素ガス雲構造は、現在の理論モデルで果たして予想されていたのでしょうか。我々はこのような環境汚染について、国内外の最新の理論モデルを用いて検証しました。複数のモデルと比較しましたが、結果はいずれも観測結果が示す、巨大な炭素ガス雲のような十分な広がりには再現されませんでした（図03）。宇宙初期における巨大な炭素ガス雲の発見は、これまで理論モデルで欠けていた新しい物理機構を要請する結果となりました。宇宙初期にできた銀河では、我々が予想していたよりもはるかに多くのガスが、超新星爆発やブラックホールのエネルギーによって、宇宙空間に吹き飛ばされていたのかもしれません。

我々は引き続き、アルマ望遠鏡を含む世界各国の望遠鏡を用いた詳細観測によって、宇宙初期において環境汚染が引き起こされる物理機構の解明を目指しています。

図02 世界最高感度のアルマ望遠鏡データで見えてきた、広がった炭素ガス雲の描像。炭素輝線の広がり（左上パネル、赤色等高線）、銀河中の星によって照らされた塵からの光（右上パネル、緑色等高線）、ハッブル宇宙望遠鏡で捉えた星の光（下パネル、中央部の白く見える部分）に対して約5倍の広がりを持つ炭素雲（下パネル、赤色）をそれぞれ示しています。パネル中のバーは3万光年（10 kpc）の距離に相当します。

図03 観測データと理論モデルの比較。炭素と星の光を赤色、青色、観測データと理論モデルをそれぞれ四角、曲線で示しています。理論モデルにおいて、星の分布はよく再現されている一方、炭素の広がりは再現されませんでした。

●論文掲載情報

Fujimoto et al.: 2019, First Identification of 10 kpc [CII] Halo around Star-Forming Galaxies at $z=5-7$, *ApJ*, **887**, 107.

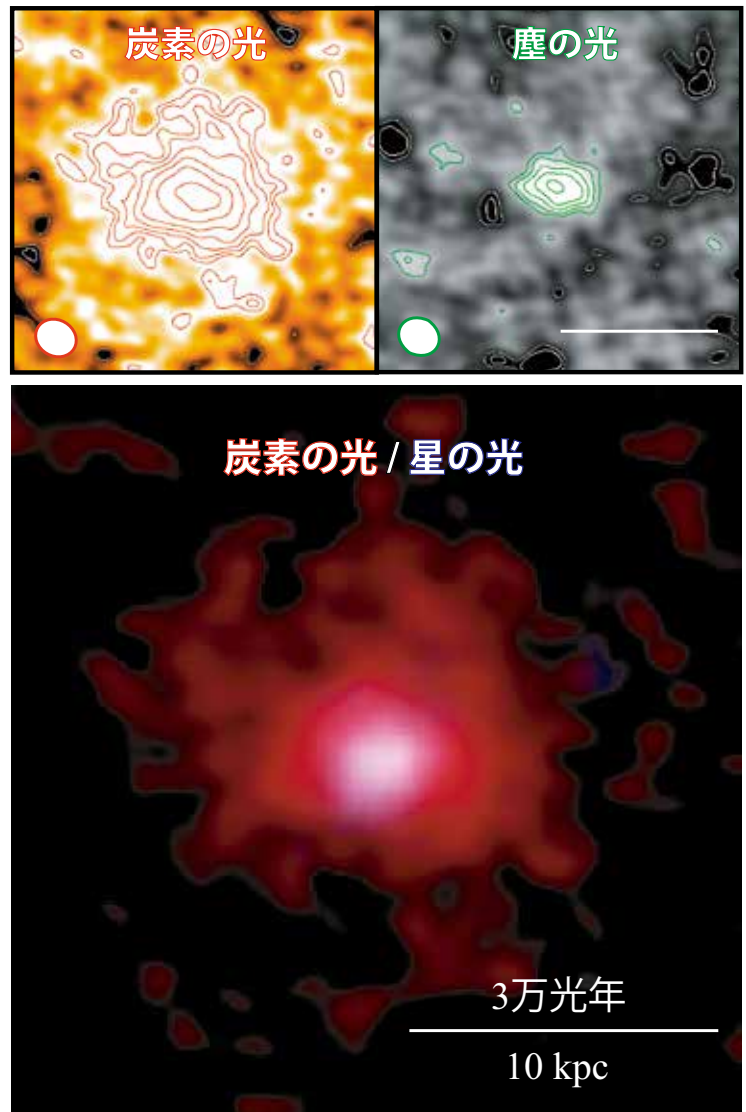


図02

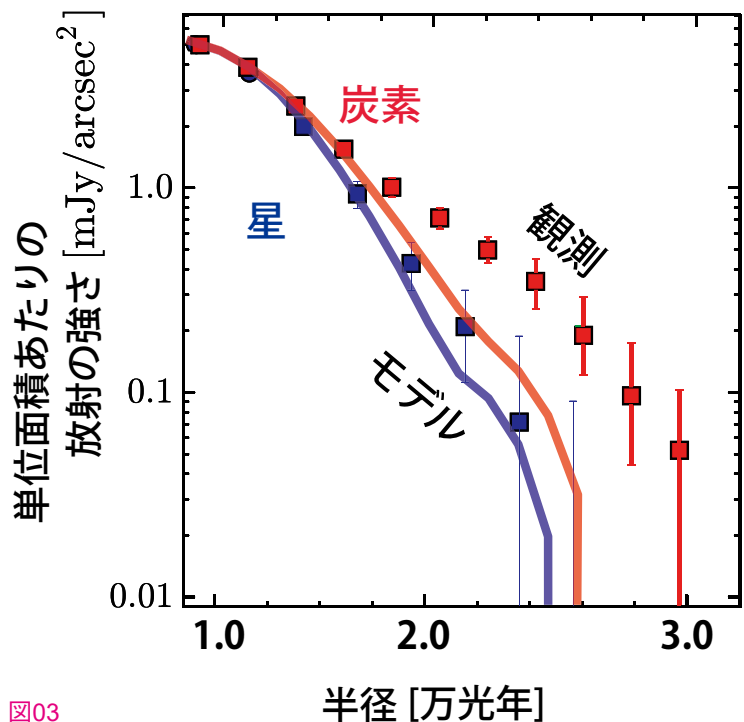


図03

タイタンの大気化学を解き明かす同位体

飯野孝浩

(東京大学
情報基盤センター)



★ タイタン：太陽系で最も複雑な大気成分を持つ天体

土星の衛星「タイタン」は、地球同様に窒素を主成分とし、地表で1.5気圧という分厚い大気を持つ天体です。大気中には地球大気には見られないような複雑な分子ガスが存在し、これらは多様な化学過程を経て生命の構成要素であるアミノ酸を生成する可能性すら指摘されています。そのため、タイタン大気における化学過程の解明は、現代の惑星科学の重要なトピックとなっています。実際にアメリカ航空宇宙局（NASA）が送り込んだ探査機「ボイジャー」や「カッシーニ」はタイタンの詳細な観測を行っており、大気内にシアン化水素やプロパンといった多様な分子ガスが存在すること、その量が季節によって1000倍程度もダイナミックに変化することなどを示してきました。

しかしカッシーニ探査機は2017年にミッションを終了して廃棄されてしまっており、さらなる研究の進展のためには、地上大型望遠鏡を用いた観測・解析技術の構築が必要でした。

★ アセトニトリルの窒素同位体比を世界で初めて詳細に導出

私たちの研究グループは、アルマ望遠鏡を用い、タイタンの成層圏に10 ppb（大気全体の1億分の1ほど）とごくわずかに存在する複雑な分子「アセトニトリル（示性式 CH_3CN ）」と、さらにその1/100ほどしか存在しないその「窒素同位体（ $\text{CH}_3\text{C}^{15}\text{N}$ ）」が放つ、微弱な電波の同時検出に成功しました。そして、検出した電波の特徴の詳細な解析（大気リトリバル★01）からアセトニトリルの窒素同位体の存在量を明らかにしました。すでにアルマ望遠鏡などで求められている他の窒素化合物群（シアン化水素、シアノアセチレン）の窒素同位体比は、窒素分子に比べて低い値を示しており、これは窒素分子同位体の

うち、多く存在するほうは太陽紫外線により解離（窒素分子が窒素原子に分かれること）しにくいことにより生じていると考えられます。いっぽうで、今回求められたアセトニトリルの窒素同位体比は窒素分子に近いものでした。これはすなわち、アセトニトリルを構成する窒素原子は、太陽紫外線ではなく別の要因、すなわち銀河宇宙線★02によって解離されて生成されたものであることを示しているのです。これは近年の大気化学シミュレーション研究との比較によりなされたものです。

★ 銀河宇宙線による微量分子の生成を初めて証明

大気における分子ガスの生成においては、太陽紫外線によって駆動される光化学がよく知

★ newscope <解説>

★01 大気リトリバル

分子のスペクトルの形状は、分子が存在する高度により変化する。そのため、得られたスペクトルの形状から、分子の存在する高度を推定する（リトリバル計算）ことが可能である。研究チームは、アセトニトリルが高度150 km以上の領域に偏在しており、その量は全大気全体の1億分の1程度であることを明らかにした。

★02 銀河宇宙線とその役割

銀河宇宙線は高いエネルギーの陽子（電子のない水素原子）を主成分とし、太陽系の外から飛来してくる。大気と反応しにくいために、紫外線が侵入できない低い高度まで侵入することができる。



図01 カッシーニ探査機が2017年に可視光で撮影したタイタン。厚い雲状のもやは大気中の分子ガス群が結合して形成されており、大気中の複雑な化学プロセスの存在を示している。NASA/JPL-Caltech/Space Science Institute

られています。しかしタイタンは地球に比べると太陽から離れた天体であり、紫外線の強度は数%にまで低下します。さらに、銀河宇宙線は太陽系の外側ほど強力であり、今回私たちは、紫外線よりも低高度まで侵入できる銀河宇宙線が成層圏下部で窒素分子を破壊して窒素原子を生成し、アセトニトリルの生成につながるということを観測的に初めて示しました。これは同時に、窒素同位体比の精密な計測が、遠く離れた天体の大気成分がどのように生成されたのかを解明する有力な手段であることを示した成果としても重要です。

探査機に匹敵する高い感度を地上観測で実現

これまで、太陽系内天体の科学研究では探査機による観測が大きな成果を挙げてきました。探査

機は観測天体の近傍から詳細な観測ができる一方で、研究テーマの立案から観測までは多くの時間や人的コストを必要とします。本研究では、最先端技術を投入して建設された地上大型望遠鏡を用いることで、探査機同様に遠く離れた天体の大気成分の詳細な観測が地上からでも可能になることを示しました。また、今回の観測分子の選定は2018年に出版されたシミュレーション論文に基づくものであり、地上望遠鏡による機動的な研究テーマ設定を実現したものです。

今回の観測データはアルマが較正用に取得したデータであり、同様の目的で取得されたタイタンの観測データは無数に存在します。研究チームは、家庭用の標準的なパソコンが持つハードディスクの100~1000倍に達する500TB（テラバイト）もの巨大なハードディスクを本研究のために整備し、莫大なデータ量の較正観測データ（ビッグデータ）から科学解析に利用可能な有意義なものを抽出しました。さらに電波の特徴（スペクトル形状）の高度に情報科学的な解析から、大気分子の

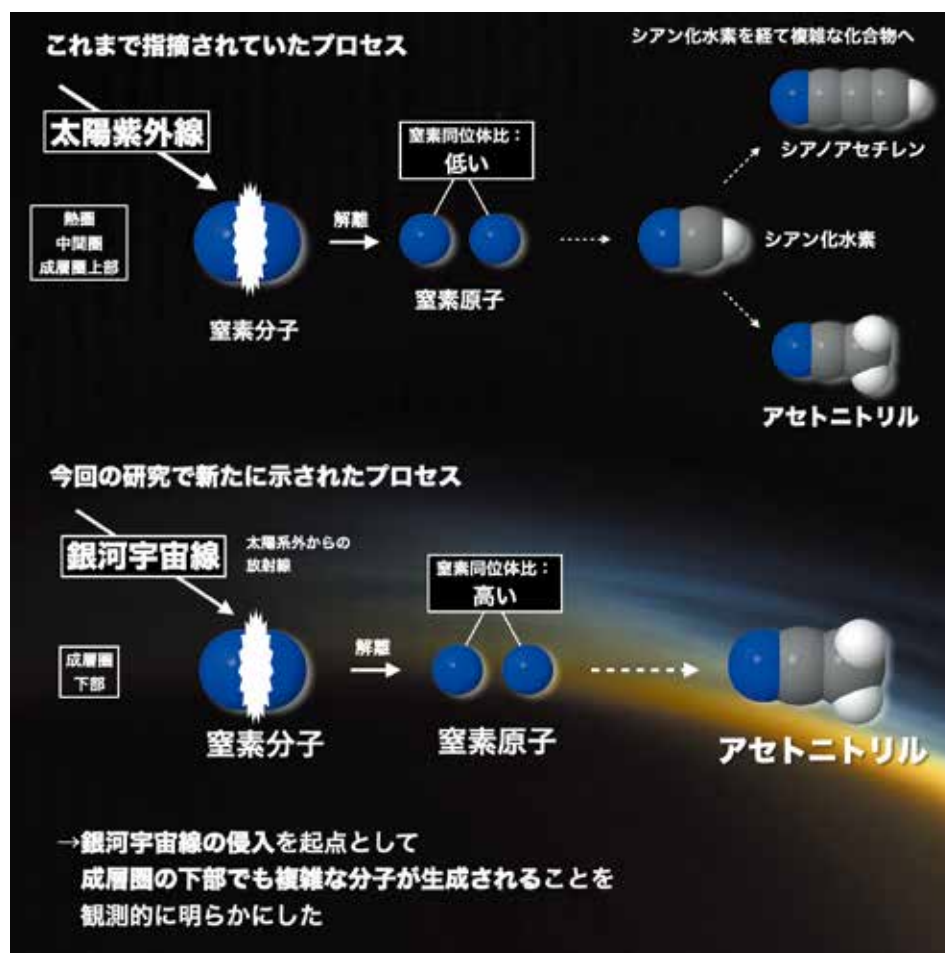


図02 本研究で窒素同位体比を測定したアセトニトリル分子の生成プロセス。今回観測された成層圏ではアセトニトリルの高い窒素同位体比が観測され、これは銀河宇宙線により窒素原子が解離（破壊）してアセトニトリル分子を生成するという先行研究のモデルが示唆した値と一致した。背景画像クレジット：NASA/JPL-Caltech/Space Science Institute

存在量や分布高度を割り出すという、アルマ惑星大気データの一連の解析プロセスも確立されました。

将来の展望

アセトニトリルのように成層圏下部で生成される分子は他にも存在する可能性があり、今後の大気化学シミュレーション研究や、それをもとにしたアルマ望遠鏡など多くの望遠鏡群を用いたさらなる観測研究につながることを期待されます。さらに、今回のように同位体比を用いた大気化学プロセスへのアプローチは、生成プロセスの不明な窒素化合物を持つ他の惑星（特に木星・海王星）の大気化学の理解につながる一歩になると考えられます。

●論文掲載情報

Iino, T., Sagawa, H., & Tsukagoshi, T.: 2020, $^{14}\text{N}/^{15}\text{N}$ Isotopic Ratio in CH_3CN of Titan's Atmosphere Measured with ALMA, *ApJ*, **890**, 95.

臨終間近の老星でアルマ望遠鏡が捉えた 双極ジェットを吹き出す瞬間

今井 裕
(鹿児島大学)



「宇宙の噴水」と呼ばれる稀有な天体

太陽程度の質量を持つ星は、その終末に大きく膨らんで赤色巨星となり、ガスを噴き出して**惑星状星雲★01**として短期間輝いた後、芯（白色わい星）を残して一生を終えます。元の星は真ん丸いガス球なのに、多くの惑星状星雲は多様な形状を持っています。その形は、どうやって生み出されるのでしょうか。私たちは、惑星状星雲を作る直前の終末星に注目しています。これらのごく一部に、高速度で吹き出されるガス流（ジェット）の存在を示す**水メーザー★02**が見つかっています。これらは、水メーザーにちなんで「宇宙の噴水」と呼ばれています。このような天体では、高速ジェットが**星周縁★03**のガスを撃ち抜いて変形させていくはずですが、この星周縁はやがて、星からの照射を受けて惑星状星雲として光るガスの分布の原型になることでしょう。しかし、その原型は実際どんな形になっているのか、そもそもこのような高速ジェットがどうやって作られるのかについて、多くの謎があります。ただし、発達した分厚い星周縁に覆われたこの中にあるジェットを作る星を、直接見ることはできません。

アルマ望遠鏡が捉えた「極細」・「低温」高速ジェット

私たちはアルマ望遠鏡を使って、「宇宙の噴水」天体の1つであるW43Aを観測しました。結果、水メーザーの観測だけでは分らなかった、ジェットの“真の姿”を捉えました。**図01**に示す通り、双方向に細く飛び出した、低温度（約100 K）の高速（約100 km/s）ジェットが鮮明に写っています。ジェットの噴出が始まってわずか60年しか経過していません。終末星が星周縁をまとう期間は数万年ですが、その最後の瞬間ジェットによって撃ち抜かれていく、まさにその状況を捉えています。高速ジェットが分厚い星周縁によっ

て減速される代わりに、ジェットに引きずられた星周縁の内側が、より広角度で外側へと加速されます。そして、物質を掃き寄せて繭状の形を作っていくのです。

終末星からのジェットは連星系から作られる？

このような細く絞られたジェットの根元には、連星系があると提唱されてきました。まず、先に進化が進んだ星（伴星）から吐き出される物質が、もう1つの星（主星）の周りに取り込まれます。次に、主星が赤色巨星へと進化すると、極小の伴星に向かって主星から物質が逆流します。こうして最近、伴星からジェット噴出が始まったのではないかと、考えられます。このような連星系中にある2つの星を、まだ見分けられません。ただし、ジェットのガス塊が連星軌道周期と同じと思われる5—7年に一度の頻度で「間欠泉」の如く吹き出すことが、アルマの観測で確認できました（**図02**）。この連星系の真の姿、そして、ジェットが星周縁を貫いて星からの光が

★ newscope <解説>

★01 惑星状星雲

赤色巨星が自身のガスを激しく撒き散らした後に、高温の星の芯がむき出しになる。この星（白色わい星）からは強力な紫外線が放出され、照射を受けたガスは激しく加熱されて電離してしまう。電離したガスは発光星雲つまり惑星状星雲となる。このような星雲が緑かかった惑星に見えるところから、ウィリアム・ハーシェルによってその名称が与えられた。

★02 水メーザー

高密度ガス中の水分子が作り出す、増幅されかつ指向性を高められた強力な電波放射。レーザーの電波版。あるガスの塊が別のガス塊に激しく衝突する場所で発光する。この水メーザーの周波数は22GHz。

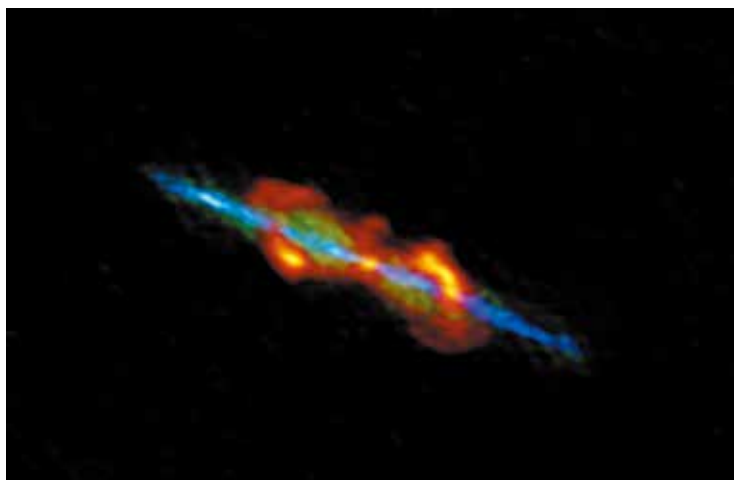


図01 アルマで撮像されたW43Aの合成像。青色・緑色：ジェット中で光る一酸化炭素(CO)分子輝線(周波数230 GHz)のうち、それぞれ最高速度(毎秒100 km)で飛び出す成分とそれ以外の低速度成分。オレンジ色：元々W43Aを丸く取り囲んでいた星周物質縁のうち、もっとも分厚く加熱された部分にある塵からの放射。(Credit: ALMA (ESO/NAOJ/NRAO), Tafuva et al.)

直接見られる頃のW43Aの姿に近い将来拝むことができるのではと、期待する所です。

●論文掲載情報

Tafoya, D., et al.: 2020, Shaping the envelope of the asymptotic giant branch star W43A with a collimated fast jet, *ApJL*, **890**, L14.

★newscope<解説>

★03 星周縁

赤色巨星自身がガスを激しく撒き散らして形成する、星周圏（1000天文単位程度以内）を取り巻く分厚い物質の取り巻き。赤色巨星は太陽の明るさの数1000倍で光る。しかし、あまりの星周縁の光学的分厚さの為に、星自身が可視光線では隠されて見なくなってしまうこともある。「宇宙の噴水」天体はこの様な発達した星周縁を伴った星の進化段階を経る天体で作られると考えられている。

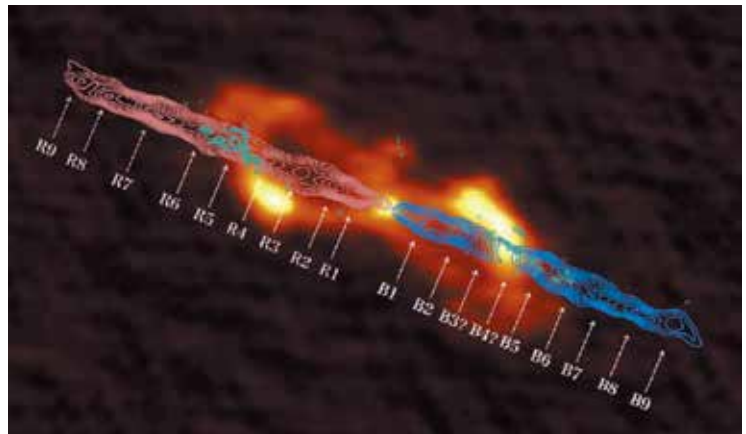


図02 細く伸びた双極ジェット内部のCO輝線分布（青及び赤色）と水メーザースポット群（水色）の分布を重ねたもの。オレンジ色の濃淡は図01と同じもの。ジェットの中のガスの塊それぞれにラベルが記されている。(Credit: Tafoya et al., 2020, ApJL, 890, L14)

太古の宇宙におけるブラックホール ジェットと星間ガスの衝突を初観測



井上開輝
(近畿大学)

アウトフローの謎

ほとんどの銀河の中心には、巨大ブラックホールが存在しています。ブラックホール周辺から噴き出すジェットはその周囲に存在する銀河内の星間ガス雲と衝突し、星の材料となる大量のガスを押し出す流れ（アウトフロー）を作り、巨大ブラックホールを包み込む銀河全体の進化に大きな影響を与えていると考えられています。しかし、そのような大量のガス流出を引き起こす原因は、ブラックホールを取り巻く円盤から放たれる強い光であるかもしれず、ジェット、光のどちらが主要な駆動メカニズムなのか未だ説明されていません。

重力レンズクエーサー MG J0414+0534

私たちは、100億年以上昔の銀河でどのようにジェットが星間ガス雲に影響を与えているのかを探るため、地球から110億光年の距離にあるクエーサーMG J0414+0534★01に注目しました。MG J0414+0534は、「重力レンズ効果」を受けている天体としても知られ

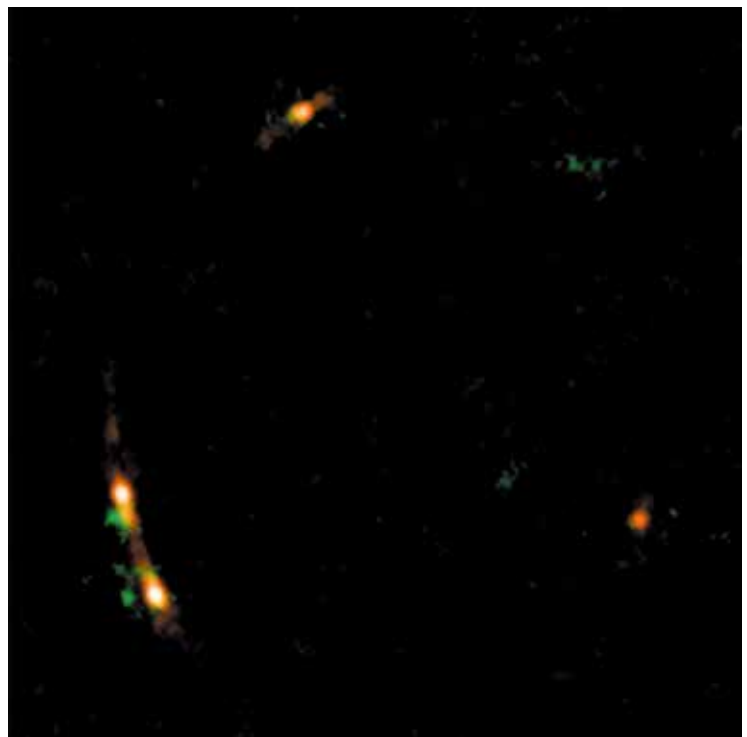


図01 アルマ望遠鏡で観測したクエーサーMG J0414+0534の疑似カラー画像。オレンジ色が塵と高温電離ガスの分布、緑色が一酸化炭素分子ガスの分布を表しています。重力レンズ効果によって弧状に引き延ばされています。

Credit: ALMA (ESO/NAOJ/NRAO), K. T. Inoue et al.

ています。MG J0414+0534と地球との間に存在する別の銀河と、それを包み込むダークマターの塊による重力がレンズの役割を果たし、MG J0414+0534が放つ光の経路が大きく曲げられ、4重に分裂し、個々の像も本来の像に比べ拡大しているのです (p13・図01)。

若いジェットと星間ガス雲の衝突

今回のアルマ望遠鏡による観測で、私たちはMG J0414+0534の高解像度撮影に成功しました。さらに、重力レンズ効果を精密に調べ、拡大される前の4重像を合成し、本来の銀河の姿を再現しました。解析の結果得られた110億光年先の銀河の姿は、クエーサーの中心部に、チリやプラズマガスが放つ明るい部分があり、その左右に星間ガス雲の成分である一酸化炭素分子ガスが分布している、というものでした (図02)。また一酸化炭素分子が放つ輝線スペクトルを詳しく調べると、ジェットに沿って星間ガス雲が秒速600kmにも達する速さで激しく運動していることが明らかになりました。これは、超巨大ブラックホールが放つジェットが周囲にある星間ガス雲と衝突し、比較的高温のガス雲が激しく揺さぶられていることを示している、と私たちは考えています。

さらに注目すべきは、ジェットの長さ、そしてジェットと星間ガス雲が衝突している領域の大きさです。これらは、ジェットが吹き出し初めてから数万年程度しか経っていないことを示しています。ジェットが吹き続ける期間は数千万年程度であると考えられていることから、このジェットは相対的に「若い」といえます。さらにMG J0414+0534の観測的な特徴は、理論シミュレーションによって予言されていた若いジェットと相互作用する星間ガス雲の性質と良く一致していました。

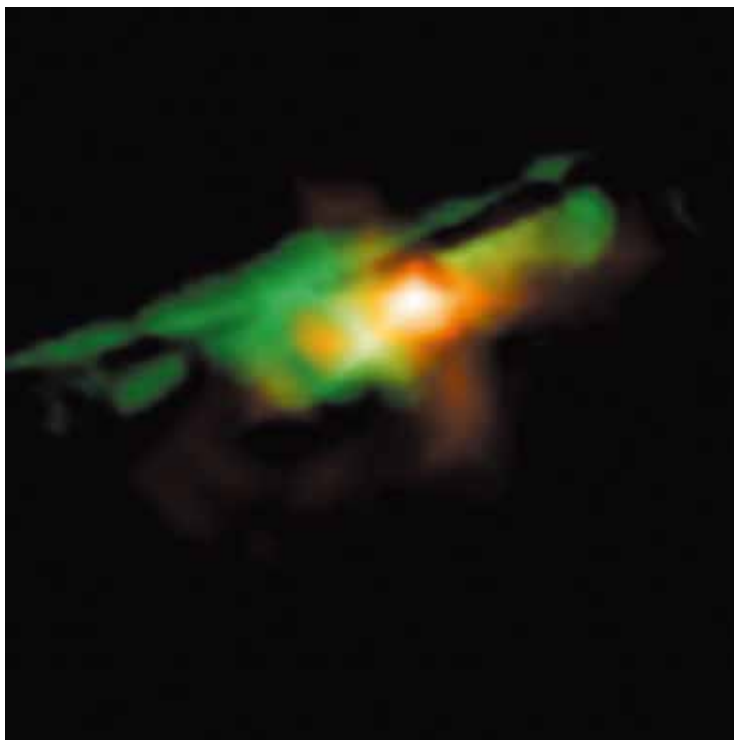


図02 アルマ望遠鏡で観測したデータをもとに、クエーサーMG J0414+0534が重力レンズ効果を受ける前の本来の姿を再構成した疑似カラー画像。オレンジ色が塵と高温電離ガスの分布、緑色が一酸化炭素分子ガスの分布を表しています。一酸化炭素分子が、明るい銀河中心核から吹くジェットに沿って分布していることがわかります。

Credit: ALMA (ESO/NAOJ/NRAO), K. T. Inoue et al.

これらの成果は、銀河の進化初期において超巨大ブラックホールが放つジェットがどのように星間ガス雲に影響を及ぼし、どのように銀河の巨大ガス流出が引き起こされるのかを明らかにする手掛かりになるでしょう。

●論文掲載情報

Inoue, K. T., et al.: 2020, ALMA 50-parsec-resolution Imaging of Jet-ISM Interaction in the Lensed Quasar MG J0414+0534, *ApJL*, **892**, L18.

★ newscope <解説>

★01 MGJ0414+0534は、地球から見るとおうし座の方向に位置しています。この天体の赤方偏移(光の波長の伸び率)は $z=2.639$ です。これをもとにプランク衛星の観測から得られたパラメータを用いてMGJ0414+0534が光を発したときの宇宙年齢を計算し、パラメータの不定性も考慮して距離を110億光年としています。

新型コロナウイルス感染症に関連した対応について●望遠鏡運用状況● (6月上旬現在)

●水沢VLBI観測所 (岩手県)
・VERA4局 → 通常運用中

●野辺山電波観測所 (長野県)
・45m電波望遠鏡共同利用
→ 2019-2020シーズン (Semester2019) の共同利用観測の
早期終了

●ハワイ観測所 岡山分室 (岡山県)
・京都大学3.8mせいめい望遠鏡 → 通常運用中

●重力波プロジェクト推進室 神岡分室 (岐阜県)
・KAGRA観測 → 4月下旬からサスペンド状態最低限の維持
以外は基本的に禁止。

●アルマプロジェクト・チリ観測所 (チリ)
チリ政府方針のもと

・アルマ山頂施設・山麓施設 → 閉鎖 (滞在人員を削減し観
測所維持)
・ASTE望遠鏡2020年度共同利用の中止 (7月、8月に予定
されていたもの)

●ハワイ観測所 (ハワイ)
ハワイ州方針のもと
・山頂施設、ヒロ山麓施設
・すばる望遠鏡
→ 共同利用観測をハワイ時間 (HST) 5月18日から再開

【研究者支援】

海外のポジションを得て渡航予定であった天文分野の研
究者で、新型コロナウイルス感染症流行の影響により海
外に渡航ができなくなったため、ポジションが途切れて
しまう者、研究場所が確保できていない者を特別客員研
究員として受け入れ。

新型コロナウイルス感染症に関連した対応について●施設公開等● (6月上旬現在)

新型コロナウイルス感染症の感染拡大を防ぐため、国立天文台の施設公開、定例公開、イベント等の一部を中止いたします。
再開につきましては、国立天文台のウェブサイトやSNSにてご案内いたします。みなさまのご理解、ご協力をお願いします。

また、国立天文台に業務でご来訪されるみなさまにおかれましては、下記のことをお願いいたします。

- 新型コロナウイルス感染者との濃厚接触が判明している場合や、その恐れがある場合は、ご来訪をお控えください。
- 咳や発熱などの症状がある場合は、ご来訪をお控えください。
- マスクや手洗いなど、各自で十分な防護策をお取りください。

★くわしくは <https://www.nao.ac.jp/notice/20200226-coronavirus.html> をご覧ください。

編集後記

息子 (小1) の学校も徐々に登校日が増えてきました。「新しい生活様式」での学校で、新しいお友達ができるかなと気になりますが、気長に見守ります。(G)

先日仕事から帰宅するとポストにマスク2枚が！ 岩手は年内くらいかと思っていたので想像以上に早く届いてびっくりしました。大切に使います。(は)

子どもの学校も学童クラブも始まって、久しぶりの職場。大きな画面って素晴らしい。でも、熱中症注意。(I)

Zoomを通じたオンライン講演にトライ。ふつうの部屋の明かりでは少し顔が暗いので、お手頃価格のライトを購入した。出番はあと何回あるかな。(h)

在宅勤務から復帰して最初の1週間は、体力と精神力が明らかに落ちていてどっと疲れがでた。この先まだどうなるか見えていないことも精神をすり減らしている原因かもしれない。(K)

規制が緩み、行きつけの店もお客さんが戻り始めた。金曜には満席に。店にとっては良いのだろうが、客が少ない中でゆったり出来る時間が無くなっていくのもやや寂しい。(W)

中止になったドイツでの滞在型国際研究会がオンラインでの部分開催になりました。講演開始は日本時間で午後11時半。移動できないと時差が効いてきます。(e)

国立天文台ニュース NAOJ NEWS

No.323 2020.06

ISSN 0915-8863

© 2020 NAOJ

(本誌記事の無断転載・放送を禁じます)

国立天文台ニュース編集委員会

●編集委員：小久保英一郎 (委員長・天文シミュレーションプロジェクト) / 渡部潤一 (副委員長) / 石井未来 (TMT推進室)
/ 秦和弘 (水沢VLBI観測所) / 勝川行雄 (SOLAR-C準備室) / 平松正顕 (アルマプロジェクト) / 伊藤哲也 (先端技術センター)
●編集：天文情報センター出版室 (高田裕行 / ランドック・ラムゼイ) ●デザイン：久保麻紀 (天文情報センター)

★国立天文台ニュースに関するお問い合わせは、上記の電話あるいはFAXでお願いいたします。
なお、国立天文台ニュースは、<https://www.nao.ac.jp/naoj-news/>でもご覧いただけます。

発行日 / 2020年6月1日

発行 / 大学共同利用機関法人 自然科学研究機構
国立天文台ニュース編集委員会

〒181-8588 東京都三鷹市大沢 2-21-1

TEL 0422-34-3958 (出版室)

FAX 0422-34-3952 (出版室)

国立天文台代表 TEL 0422-34-3600

質問電話 TEL 0422-34-3688

7月号の研究ト
ピックスは、スーパー
コンピュータ「アテル
イII」の数値シミュレ
ーションで描き出す巨大ブ
ラックホールの種とな
る星たちの形成メカニ
ズムに迫ります！

アテルイII



すばる望遠鏡
HSC Cosmic Gallery

03 SDSS J0232.8-0323

田中賢幸 (ハワイ観測所)



遠方の天体からの光は前景の天体の重力の影響を受けている。その作用がとりわけ強い場合を、強い重力レンズ効果と呼び、背景天体はしばしば大きく引き伸ばされ、ゆがんだ形をしている。背景天体が前景天体のほぼ真後ろに来ると、円を描くように歪められ、アインシュタインリングと呼ばれる。この天体はSDSSの画像で発見され、アインシュタインリングに近い形をしている。Stark et al. 2013 (MNRAS, 436, 1040) による分光観測で、中心のオレンジ色をしたレンズ天体が赤方偏移0.45、ほぼ円状に歪められた背景天体は赤方偏移2.52とわかっている。HSCの威力は比較に示したSDSS画像と比べることでお分かりいただけるだろう。

★HSC：すばる望遠鏡「超広視野主焦点カメラ（Hyper Suprime-Cam/ハイパー・シュプリーム・カム）」

★HSCの観測データを活用した市民天文学プログラム「ギャラクシークルーズ」もお楽しみください。

<https://galaxycruise.mtk.nao.ac.jp/>