

自然科学研究機構


 国立天文台
 NAOJ

国立天文台ニュース

National Astronomical Observatory of Japan

2019年9月1日 No.314

特集 アルマ望遠鏡の世界 4



- Ⅰ アルマ望遠鏡の現状と最新成果 / アルマ望遠鏡が若い恒星うみへび座TW星に見出した惑星形成の種 / アルマ望遠鏡でのぞき込む巨大原始星のガス円盤 / 太陽系の時間0を求めて / アルマ望遠鏡で探る謎の突発天体の正体 / 131億光年かなたで捉えた衝突・合体中の銀河—大三元・酸素、炭素、塵の同時検出—
- Ⅱ NAOJアルマ・プロジェクト長 アルバロ・ゴンサレスさんに聞く
- Ⅲ 電波干渉計の仕組みを知ろう



9

2019

- 表紙
- 国立天文台カレンダー

03

特集 アルマ望遠鏡の世界4

I アルマ望遠鏡の現状と最新成果

平松正顕 (アルマプロジェクト)

●研究トピックス

- ・アルマ望遠鏡が若い恒星うみへび座TW星に見出した惑星形成の種
——塚越 崇 (科学研究部)
- ・アルマ望遠鏡でのぞき込む巨大原始星のガス円盤——元木業人 (山口大学)
- ・太陽系の時間0を求めて——橋 省吾 (東京大学)
- ・アルマ望遠鏡で探る謎の突発天体の正体——諸隈佳菜 (東京大学)
- ・131億光年かなたで捉えた衝突・合体中の銀河—大三元：酸素、炭素、塵の同時検出—
——橋本拓也 (日本学術振興会特別研究員PD/早稲田大学)

○おしらせ

- ・日本地球惑星科学連合2019年大会アルマ望遠鏡ブースに500名来場
- ・アルマ望遠鏡が見た部分日食
- ・国立天文台サンティアゴ事務所での日食観察会

II NAOJアルマ・プロジェクト長 アルバロ・ゴンサレスさんに聞く

工学から天文学へ

From Engineering to Astronomy

インタビュアー：ラムゼイ・ランドック (天文情報センター)

III 電波干渉計の仕組みを知ろう

川村 晶 (星の手帖社) / 監修：平松正顕 (アルマプロジェクト)

31

受賞

アルマ望遠鏡関連2グループが国立天文台長賞を受賞

31

編集後記/次号予告

32

連載「国立天文台・望遠鏡のある風景」18

アルマ望遠鏡の7mアンテナを運ぶトランスポーター

撮影：アルマプロジェクト・チリ観測所



表紙画像

アルマ望遠鏡山麓施設の日本アンテナと天の川。

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)



今年の「三鷹・星と宇宙の日2019」は10月25日、26日開催です。くわしくは

<https://www.nao.ac.jp/open-day/2019/> をご覧ください。

国立天文台カレンダー

2019年8月

- 3日(土) 4D2Uシアター公開(三鷹)
- 5日(月) 研究交流委員会
- 7日(水) 運営会議
- 9日(金) 幹事会議/4D2Uシアター公開&観望会(三鷹)
- 10日(土) 4D2Uシアター公開(三鷹)
- 17日(土) 4D2Uシアター公開(三鷹)
- 23日(金) 幹事会議
- 24日(土) 機構シンポジウム/観望会(三鷹)
- 28日(水) プロジェクト会議

2019年9月

- 6日(金) 幹事会議
- 7日(土) 4D2Uシアター公開&観望会(三鷹)
- 11日(水) 総研大専攻長会議
- 13日(金) 4D2Uシアター公開&観望会(三鷹)
- 14日(土) 4D2Uシアター公開(三鷹)
- 18日(水) 幹事会議
- 21日(土) 4D2Uシアター公開(三鷹)
- 25日(水) プロジェクト会議
- 26日(木) 安全衛生委員会
- 28日(土) 観望会(三鷹)

2019年10月

- 2日(水) 幹事会議
- 5日(土) 4D2Uシアター公開(三鷹)
- 10日(木) 防災訓練/科学戦略委員会
- 11日(金) 4D2Uシアター公開&観望会(三鷹)
- 12日(土) 4D2Uシアター公開(三鷹)
- 16日(水) 総研大専攻長会議
- 18日(金) 幹事会議
- 19日(土) 4D2Uシアター公開(三鷹)
- 23日(水) プロジェクト会議
- 25日(金) 三鷹・星と宇宙の日
- 26日(土) 三鷹・星と宇宙の日

アルマ望遠鏡の世界

4

第Ⅰ部・アルマ望遠鏡の現状と最新成果

第Ⅱ部・NAOJアルマ・プロジェクト長 アルバロ・ゴンサレスさんに聞く

第Ⅲ部・電波干渉計の仕組みを知ろう

2011年9月30日の初期科学観測開始からおよそ8年。アルマ望遠鏡は、天文学の教科書を書き換える発見をいくつも成し遂げてきました。今回の特集では、アルマ望遠鏡の現状と今後、最新の観測成果やニュース、さらに東アジア・アルマ・プロジェクトマネージャを務めるアルバロ・ゴンサレス准教授のインタビューや電波干渉計の仕組み解説など、盛りだくさんでお届けします。

(第Ⅱ部) インタビュアー：ラムゼイ・ランドック (天文情報センター)

(第Ⅲ部) 川村 晶 (星の手帖社)

協力

アルマプロジェクト・チリ観測所

I アルマ望遠鏡の現状と最新成果

アルマ望遠鏡の現状と将来計画の概要、そして多彩な最新の研究成果の数々をご紹介します。



平松正顕
(アルマプロジェクト)

●01 アルマ望遠鏡の現状

アルマ望遠鏡は、南米チリ・アタカマ砂漠のチャントール高原（標高5000m）に建設された電波望遠鏡です。最大で直径16kmの範囲に展開した66台のパラボラアンテナを組み合わせ、山手線に匹敵する巨大な仮想電波望遠鏡を構成します。得られる最高解像度は0.01秒角で、大阪に落ちている1円玉を東京から見るができる「視力6000」に相当します。波長が数mmの電波「ミリ波」や、波長が1mmより短い「サブミリ波」を高感度・高解像度で観測することで、惑星や銀河の誕生、宇宙にある様々な物質の進化を解き明かしつつあります。アルマ望遠鏡は、日本を代表とする東アジアと、

北米、欧州、そして建設地チリの協力で進められる国際プロジェクトであり、2011年の初期科学観測開始以来さまざまな成果を挙げています。

アルマ望遠鏡は、毎年10月から始まる1年間をひとつの「サイクル」として、観測を行っています。現在は、2018年10月に始まった「科学観測サイクル6」が進行中です。2019年10月に開始される「サイクル7」の観

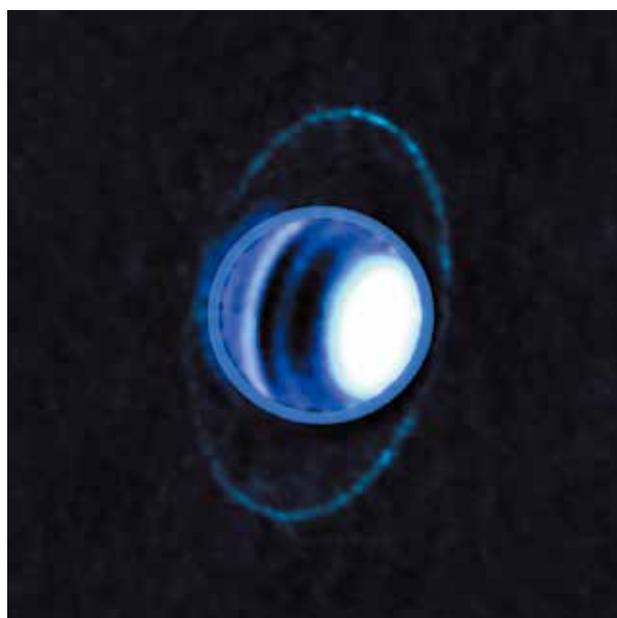


図02 2017年12月にアルマ望遠鏡で撮影された、天王星とその環。天王星の大気に見える黒い部分には、電波を吸収する硫化水素（ H_2S ）が広がっています。

Credit : ALMA (ESO/NAOJ/NRAO) ; Edward M. Molter and Imke de Pater

測提案審査も完了し、2019年7月に提案者に結果が返されました。集まった提案の総数は1773件。「サイクル7」では、直径12mのアンテナ群（12mアレイ）で4300時間が科学観測に供されますが、要求観測時間の合計は19,148時間となり、競争率にして約4.5倍でした。採択されたおよそ400の観測提案の分野別割合を示したのが図01です。銀河の起源と進化を探る「観測的宇宙論・遠方宇宙」が最も多く、次いで「星間物質・

星形成・星間化学」「銀河・銀河中心核」「星周円盤・太陽系外惑星・太陽系」「恒星進化・太陽」と、天文学のさまざまな分野の研究者にアルマ望遠鏡が使われることがわかります。

●02 アルマ望遠鏡の最近の観測成果

直近の約1年間に発表された代表的なアルマ望遠鏡観測成果をご紹介します。今回の特集では5名

サイクル7に採択された観測提案の研究テーマ別割り当て時間比率



図01 2019年10月開始の科学観測サイクル7で採択された観測提案（12mアレイ分）の研究テーマ別割り当て時間比率。

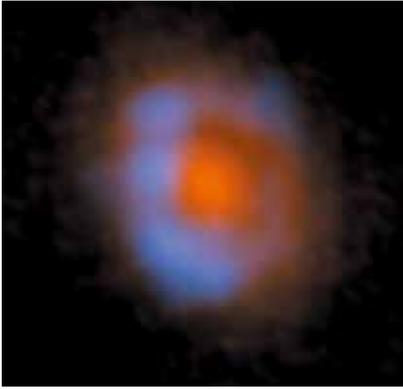


図03 アルマ望遠鏡で観測したオリオン座V883星の疑似カラー画像。塵の分布をオレンジ、メタノール分子の分布を青で示しています。Credit : ALMA (ESO/NAOJ/NRAO) , Lee et al.

の研究者に各自の研究について08ページからご紹介いただきますので、ここではそれ以外の研究テーマについて、地球からの距離の順に挙げていきます。

まずは、太陽系の天体から。米国の研究チームは、アルマ望遠鏡を使って天王星の環を直接観測することに成功しました(図02)。天王星の環はたいへん暗いのですが、アルマ望遠鏡は環の微粒子が放つミリ波を捉えました。反射光ではなく、環の中の微粒子そのものからの熱放射が捉えられたのはこれが初めてのことです。他の望遠鏡による赤外線観測とも合わせ、天王星の数ある環の中でも最も目立つ「イプシロン環」の温度が絶対温度77ケルビン(マイナス196℃)であることがわかりました。また、天王星の環にはマイクロメートルサイズの細かな塵が極めて少ないことがボイジャー2号の探査によって明らかになっていましたが、今回の観測により、このことも再び確認できました。土星や木星の環には細かな塵が多く含まれていますが、天王星の環にはそれがなく、ゴルフボール程度の大きさの粒子からできているというのです。なぜ細かな塵がないのかは未解明ですが、環の成り

立ちを理解するためのヒントになるのではないかと考えられます。

星や惑星の誕生領域でも、多くの成果が得られました。たとえば、韓国のジョンユアン・リー氏と東京大学の相川祐理氏らのチームは、若い星オリオン座V883星を観測し、周囲を取り巻くガス円盤にメタノール(CH₃OH)、ギ酸メチル(CH₃OCHO)、アセトニトリル(CH₃CN)などの複雑な有機分子を多数発見しました。さらに、円盤内でのメタノールの分布も初めて明らかにしました(図03)。この星は、若い星によくみられる急増光の真ただ中にあります。中心の

星が明るくなると周囲の円盤の温度も上がり、円盤内の氷がとけます。氷には多様な有機分子が閉じ込められていて、増光中の星のまわりではこれらが解き放たれ、電波を出すのです。つまり、ふつうの若い星のまわりでは知ることのできない氷の中の有機分子の組成を知ることができたのです。太陽系内の彗星の有機分子組成と似ているということもわかり、私たちの太陽系の起源にもつながる、興味深い成果となりました。

また、同じくオリオン座にある大質量原始星オリオンKL天体では、食塩の成分である塩化ナト

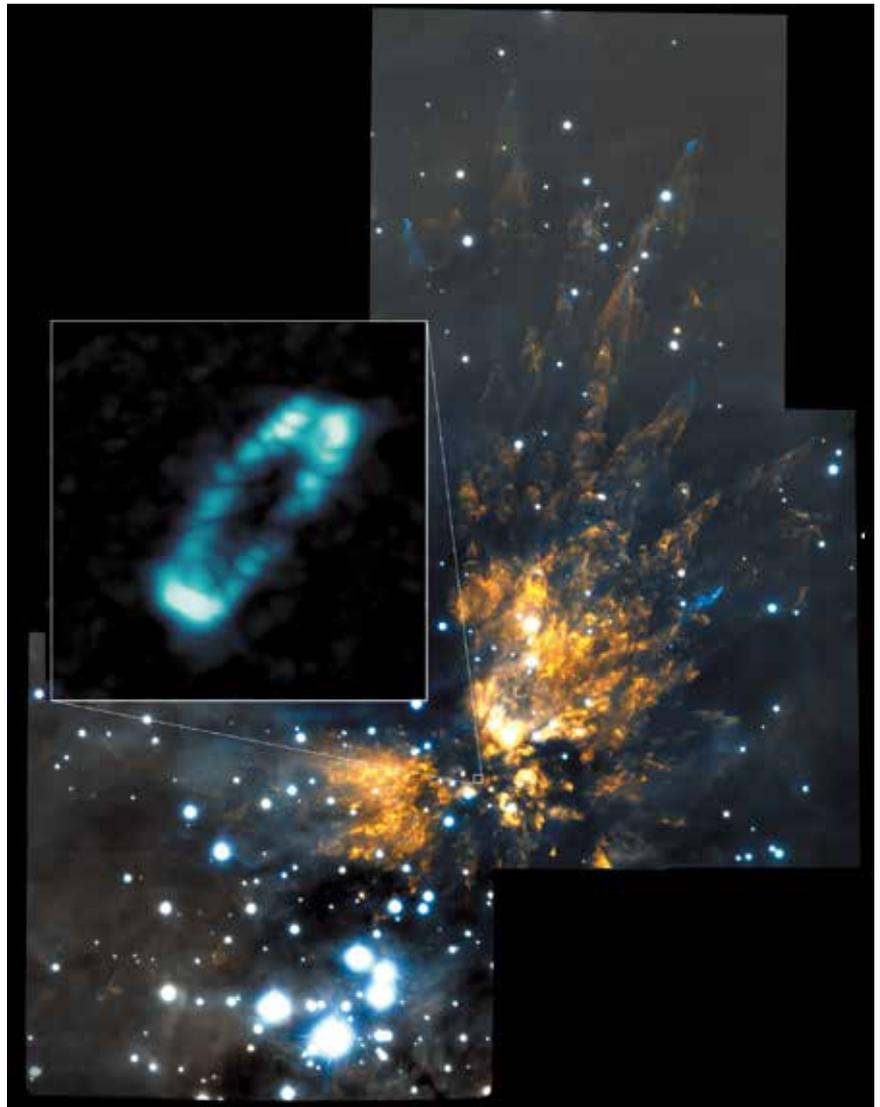


図04 オリオンKL領域の近赤外線画像(ジェミニ望遠鏡で撮影)に、アルマ望遠鏡が観測した塩化ナトリウムからの電波の分布を合成した図。塩化ナトリウムが星を取り巻くリング状に分布していることがわかります。

Credit : ALMA (NRAO/ESO/NAOJ) ; NRAO/AUI/NSF; Gemini Observatory/AURA

リウム (NaCl) が発見されました (図04)。NaClが若い星のまわりで見つかったのはこれが初めてです。研究チームは、星を取り巻く円盤の中で塵の粒子が互いに衝突し壊れることによって、塵に含まれていた塩NaClが飛び出したのだらうと推測しています。つまり、塩は円盤の姿を浮かび上がらせる新たな道具になるかもしれないのです。

銀河の研究でも、アルマ望遠鏡は活躍しています。イベント・ホライズン・テレスコープによる楕円銀河M87のブラックホール・シャドウの観測にも、アルマ望遠鏡は最大感度を誇る望遠鏡として参加し、大きく貢献しました (18ページ参照)。これ以外にも、従来の電波観測のイメージを塗り替えるような観測成果を挙げています。たとえば、PHANGS (Physics at High Angular Resolution in Nearby galaxies) と名付けられたプロジェクトでは、アルマ望遠鏡の観測時間を750時間以上投入して、複数の近傍銀河に含まれるガスの分布を調べました。これまでに、74個の銀河に3万個にのぼるガス雲 (星の工場) が同定されています。個々のガス雲は、天の川銀河で言えばオリオン大星雲とそのまわりのガス雲に相当する巨大な星形成領域で、サイズは数十~数百光年です。数千万光年離れた銀河にあるこれらのガス雲を描き出せるのは、高い感度と解像度を併せ持つアルマ望遠鏡ならではの成果と言えるでしょう。

遠方宇宙の観測でも、アルマ望遠鏡はその威力をいかに発揮しています。132億8000万光年彼方の銀河に最遠の酸素を発見した成果は前回の特集 (2018年11月号) でご紹介しました。その後も遠方銀河の探査は続いており、例えば名古屋大学の田村陽一氏ら

のチームは、アルマ望遠鏡で132億光年離れた銀河に太陽質量の400万倍という大量の塵を発見しました。塵が見つかった銀河としては、観測史上2番目に遠い記録です。宇宙誕生後10億年未満の時代の銀河に理論的予想を大きく超える量の塵が存在するという問題はこれまでも指摘されてきましたが、今回の発見によってより早期の宇宙でも大量の塵が存在することが事実になりました。これは、問題をより大きくする結果と言えます。

また、東京大学/国立天文台のワン・タオ (王涛) 特任研究員と東京大学 河野孝太郎教授らのチームは、110億年以上かなたで星を活発に生み出す巨大銀河を39個発見しました。これらの銀河は、このままのペースで星を作り続ければ、現在の宇宙にある巨大楕円銀河へと進化すると考えられます。今回発見された銀河はいずれもハッブル宇宙望遠鏡では見えておらず、これまでの可視光・近赤外線観測では多くの巨大星形成銀河を見落としていたこととなります。一方、銀河進化に関する多くの理論では、110億年以上遡った過去の宇宙にこれほど多くの巨大星形成銀河があることは想定されていませんでした。この観測成果は、私たちの現在の銀河進化の理解に大きな謎を投げかけるものといえます。

●03 さらなる飛躍に向けて

アルマ望遠鏡は所期の性能を達成し素晴らしい成果を上げ続けていますが、自らの観測で見えてきた新たな謎を解き明し、引き続き天文学の新しい世界を切り開いて

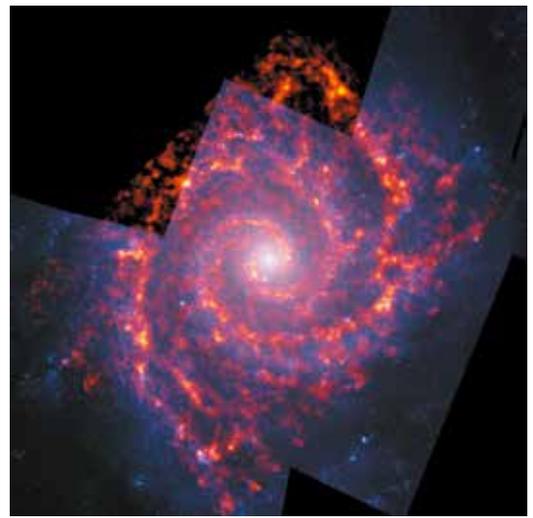


図05 アルマ望遠鏡 (オレンジ) とハッブル宇宙望遠鏡 (青) が撮影した渦巻銀河M74。Credit : NRAO/AUI/NSF, B. Saxton; ALMA (ESO/NAOJ/NRAO) ; NASA/Hubble

いくために、大きく性能を向上させる計画を進めています。国際的な「アルマ将来開発ワーキンググループ」が組織され、2020年代の天文学はどのような謎に立ち向かうべきか、そのためにアルマ望遠鏡はどんな性能を持つべきか、そのための技術開発の実現可能性はどれほどかなど、幅広い議論が行われてきました。また東アジア地域内でも「アルマ将来開発ワークショップ」を2011年からほぼ毎年開催してきました。そしてこれらをまとめる形で、ALMA Development Roadmapが策定されました。このロードマップに整合する計画を日本では「アルマ2計画」と呼称し、共同利用観測と並行してロードマップに従った技術開発を進めることで、アルマ望遠鏡を生まれ変わらせることを目指します。

「アルマ2」で掲げる新しい科学目標は、以下の3つです。

①地球型惑星形成領域における惑星系形成過程の理解

アルマ望遠鏡は多くの原始惑星系円盤を高解像度で撮影し、その構造の普遍性と多様性を明らかに

しました。また最も地球近傍の原始惑星系円盤（うみへび座TW星、08ページの塚越さんの記事の天体）で地球軌道サイズの構造まで描き出すことに成功しています。アルマ2では解像度を向上させてより遠方の天体まで詳細観測し、地球軌道サイズが分解できる天体数を従来の約100倍に増加させます。これによって、多数の原始惑星系円盤に対して、円盤内側から外側までの全域を高解像度観測し、惑星系の形成過程を明らかにすることを目指しています。

②惑星系誕生過程での生命素材物質の理解の飛躍的前進

アルマ望遠鏡によって、いくつかの星形成領域や原始惑星系円盤で複雑な有機分子が検出されました。アルマ2では感度向上によって、複雑な有機分子の「検出」から「分布を描き出す」段階に歩を進め、その進化を明らかにすることを目指します。「はやぶさ2」

などの探査機が行う太陽系内原始天体での水や有機分子の探査、可視赤外線観測による太陽系外惑星大気での生命の兆候探査と組み合わせ、アルマ2は地球外生命探査という人類の究極的な課題に挑む上での基本的知見を与えることを目指します。

③宇宙における元素合成の開始地点の探究

アルマ望遠鏡は、宇宙年齢5億年の時代（132.8億年前）に酸素輝線を検出しました。これは、酸素が宇宙の最遠方を探る重要な手がかりであることを示す重要な成果でした。酸素は星の中で作られ星の死によって宇宙にばらまかれるので、最初の星はさらに昔、宇宙誕生後約3億年ごろには生まれていたことを示しています。アルマ2ではこの時代の銀河の直接検出を目指し、感度向上と観測周波数帯域の拡大などによって遠方銀河の検出効率を1桁以上向上させ

ます。宇宙誕生後約3億年で発生したとされる第一世代星の超新星爆発で放出された酸素を直接捉えることで、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のです。

これらの目標を達成するために、以下のような開発を計画しています。まずは、受信機の広帯域化・高感度化です。アルマ2では、一度に観測できる周波数帯幅を2倍以上に向上させる計画です。このための基礎開発は既に国立天文台先端技術センターにて進行中で、アルマ望遠鏡バンド7とバンド8にまたがる周波数帯（275～500 GHz）で、従来の約5倍の周波数幅を一度に取得できる受信機の実証に成功しています。同時観測可能な周波数帯の拡大は、多様な分子が放つ数多くの電波信号を効率的に捉えることを可能にし、また塵が放つ電波に対しては感度を向上させる効果があります。また、アンテナの展開範囲を現在の16 km から2倍以上に拡大させます。大気による電波の揺らぎを補正する技術をさらに磨くことによって、解像度を2倍以上向上させることができます。さらに、受信機で得られた信号を処理する分光計も広帯域・高性能なものを開発することによって、高い分光能力と感度を実現します。また、現在のアルマ望遠鏡受信機は「1画素」ですが、マルチビーム化（多画素化）して視野を大きく拡大させることも中長期的な目標として重要です。マルチビーム受信機をコンパクトに実現するために、超伝導素子をはじめとする受信機構成部品を平面基板の上に集積する技術の開発も進めています。

「宇宙に私たちのルーツをたどる」アルマ望遠鏡の旅路は、まだまだ続きます。今後の成果にも是非ご期待ください。

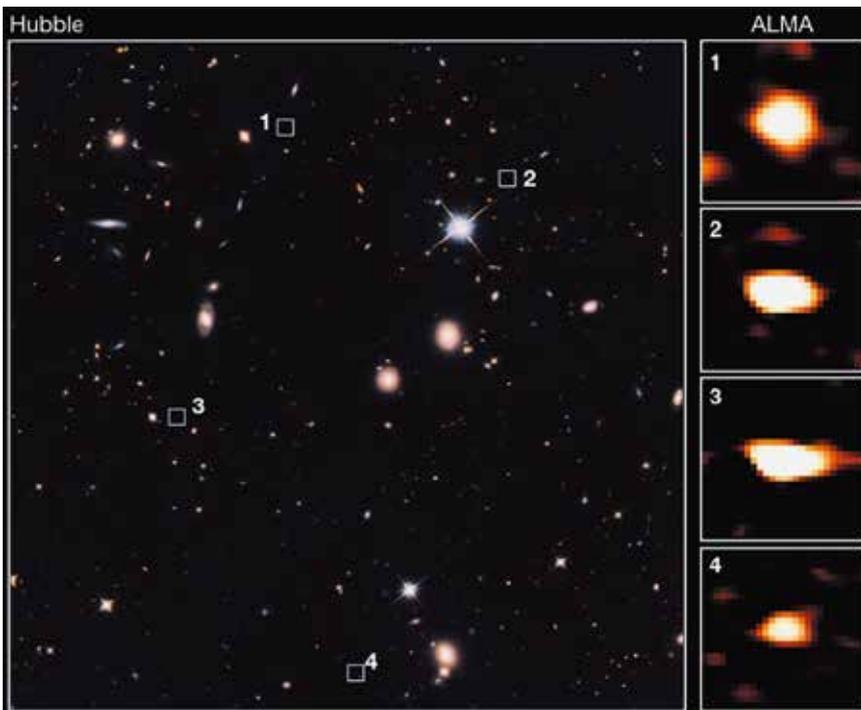


図06 今回の観測をした領域のハッブル宇宙望遠鏡による画像（左）と、アルマ望遠鏡により観測された巨大星形成銀河の画像（右）。サブミリ波では明るく輝いていますが、可視光で最も感度の高いハッブル宇宙望遠鏡による観測では全くなにも写っていないことがわかります。クレジット：東京大学/CEA/国立天文台

アルマ望遠鏡が若い恒星 うみへび座TW星に見出した 惑星形成の種



塚越 崇
(科学研部)

惑星誕生の鍵：円盤の中の円盤

我々が住む太陽系のような惑星系は、若い恒星を取り巻く冷たい塵とガスでできた“原始惑星系円盤”から生まれると考えられています。しかしこれまでに形成中の惑星の様子を観測で捉えた例はなく、惑星がどのように周囲の物質を取り込んで成長していくかなど、その誕生と成長過程には未解明な点が多く残されています。

理論計算によると、原始惑星系円盤の中で形成されつつある惑星は自身の重力によって周りの塵やガスを取り込みながら成長します。その際、取り込まれゆく物質は、惑星の周囲を回転する円盤状構造を作り出します。この円盤を“周惑星円盤”と呼びます。その大きさは、原始惑星系円盤の大きさのおよそ1%程度と、非常に小さいものです。

「原始惑星系円盤内で形成されている周惑星円盤」を見つけることは、惑星系形成過程の研究にとって重要なテーマの一つです。しかしながらこれまでの観測では、周惑星円盤を直接見出すには至っていません。

アルマ望遠鏡を使って原始惑星系円盤を高解像度・高感度で観測

そこで我々の研究グループでは、惑星誕生の現場を描き出すため、電波を捉えることのできるアルマ望遠鏡を使ってうみへび座TW星を観測しました。うみへび座TW星は年齢がおおよそ1000万年程度の若い恒星です。地球からおおよそ194光年の距離にあり、このような若い恒星の中では最も太陽系の近くにあります。また太陽と同じくらいの重さの恒星であることから、私たちの太陽系の起源を知る手がかりになる天体として、これまで多くの観測が行われてきています。

うみへび座TW星の周囲に原始惑星系円盤が存在することは、これまでの観測からよく知られていました。円盤は中心を軸にして対称な構造をしており、複数の隙間を持つ構造を持つことが分かっています。一方、形成中の惑星に付随する周惑星円盤のような小さな構造はこれまで見つかっていませんでした。

原始惑星系円盤内に微小な電波源を検出

今回の観測では、これまで行われてきたアルマ望遠鏡による観測に比べ、およそ3倍という非常に高い感度を達成しており、図01に示すように円盤内のより詳細な電波強度分布を描き出すことに成功しました。その結果、これまで見出されていなかった、原始惑星系円盤に潜む小さな電波源が発見されました。円盤の南西側、原始惑星系円盤の中心から52天文単位^{★01}の位置に、周囲に比べて1.5倍ほど電波が強くなっている場所が見つかりました。その電波源は円盤の回転方向に伸びた構造をしており、長さ4天文単位、幅は1天文単位程度です。原始惑星系円盤内にこのような微小な電波源が見出されたのは、今回が初めてです。

newscope <解説>

★01

1天文単位は地球と太陽の間の平均距離で、およそ1億5000万キロメートルに相当します。52天文単位は、太陽系における海王星軌道半径の約1.7倍に相当します。

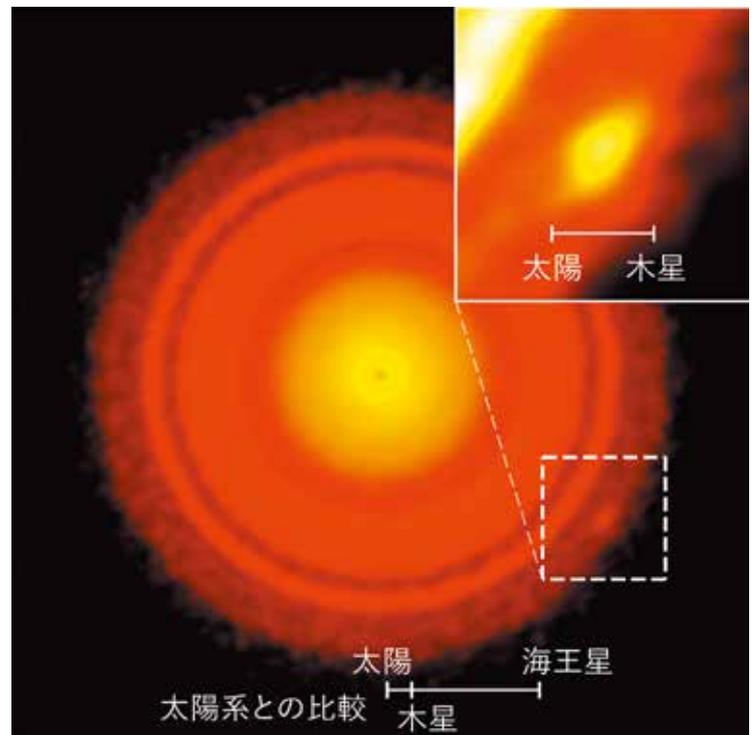


図01 アルマ望遠鏡の観測で取得された、うみへび座TW星を取り巻く原始惑星系円盤の電波画像（波長1.3 mm）。検出した微小電波源の拡大図を右上に示す。距離の参考のため、太陽と木星および海王星間に相当する距離を白線で示している。Credit: ALMA (ESO/NAOJ/NRAO), Tsukagoshi et al.

電波源の正体は何か？

この微小な電波源の正体について、大きく分けて以下の二つの可能性が挙げられます。

まず周惑星円盤の可能性です。周惑星円盤である場合、今回発見された電波源の大きさから、その中心には海王星質量程度の惑星が形成されつつあると予想できます。中心から52天文単位離れた場所にこのような木星よりも軽い惑星が存在することは、過去の赤外線観測などの結果とも整合的です。

しかし一方で、観測された電波強度は、海王星サイズの惑星を取り巻く周惑星円盤と考えるにはやや強すぎる、という問題があります。また電波源は楕円形をしており、周惑星円盤で期待されるような円形ではありませんでした。そこで、電波源の正体のもう一つの可能性として、原始惑星系円盤内に発生した小さいガス渦に溜まった塵、という説が挙げられます。地球上と同じように、原始惑星系円盤内でも局所的な高気圧のガス渦が多数発生します。そのガス渦の中心では塵が掃き集められて溜まりますが、それらは互いに合体・成長し、将来的に惑星の種となるはずで、す。理論的には、ガス渦に捕らえられた塵は

楕円状になると予想されていて、今回の観測によって見出された電波源の構造とよく一致します。一方、そのような小規模な高気圧が原始惑星系円盤内に一つだけ存在することは少し不自然です。

このように「周惑星円盤説」と「ガス渦説」のどちらを取っても、観測と一致する部分と不自然な部分があり、現在のデータではこれらを切り分けることはできません。しかし、どちらの場合でも惑星系形成に繋がる重要な構造であり、惑星形成プロセスの重要な部分を捉えることができた観測結果と言えます。

今後の研究への発展

今回の観測で見出された微小な電波源の正体を明らかにするには、電波源の中心で実際に惑星が形成されつつあるかどうかを直接的に捉えることが重要です。形成中の惑星は周囲の物質を取り込む際に高温となるため、周惑星円盤の内縁が強く温められます。我々の研究グループでは、今後のアルマ望遠鏡を使ったより高い解像度の観測から、実際にそのような高温領域が存在するかを確かめる研究に繋がっています。

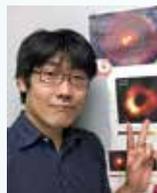
●論文掲載情報

Tsukagoshi, T., et al.: 2019, Discovery of an au-scale excess in millimeter emission from the protoplanetary disk around TW Hya, *ApJ*, **878**, L8.



山麓施設でのアンテナ試験。左は日本製アンテナ、中央右は欧州製アンテナ。Credit : ALMA (ESO/NAOJ/NRAO)

アルマ望遠鏡でのぞき込む 巨大原始星のガス円盤



元木業人
(山口大学大学院
創成科学研究科)

ガス円盤に隠された巨大原始星の成長過程

この20年で、太陽の10倍を超えるような大質量原始星も、太陽程度の星と同様に星を取り巻く降着円盤を通じてガスを取り込み、成長することがわかってきました。しかし、既知の大質量原始星はガス円盤を横から見るような星ばかりです★01。こうした星では円盤自身が邪魔で、内側で何が起きているかを見た人はこれまでにありませんでした。

巨大原始星 G353.273+0.641

G353.273+0.641 (以下、G353) は、地球から見てさそり座の毒針付近、約5500光年の距離に位置しており、質量は太陽のおよそ10倍です。今回我々はG353のガス円盤をアルマ望遠鏡で観測しました。細かい話はさておき、観測データを元に得られた円盤の想像図を図01に示します。幸運にも我々は真上から円盤をのぞき込むことで、円盤内部の詳細な構造を目撃することに成功しました。以下G353発見の経緯も含め、順を追って紹介していきます。

G353との出会い

筆者とG353の出会いは2009年まで遡ります。当時筆者は北海道大学の院生で、苫小牧11m電波望遠鏡を使って何か博士論文のネタになる天体はないかと水メーザ輝線★02の観測に精を出していました。ある日G353からの水メーザが強く見える時と全く見えない時があることに気がつきました(図02)。その後モニター観測を続けると1~2年程度の間隔で間欠的増光を起こすことがわかりました。またVERAを用いたVLBI観測から各増光期のメーザのガス分布が全く異なることも判明しました。これらの事実から筆者はG353が不定期に原始星ジェットを吹き出し、その衝撃波でメーザが光っているという仮説に至ります。

次に我々は野辺山45m電波望遠鏡を用い

て一酸化ケイ素輝線★03の観測を行いました。検出されたスペクトル(図03)は強く青方偏移★04した成分が極めて顕著で、確かに我々に向かって高速で近づくジェットが存在することが確かめられました。当時スペクトルをみた周囲の人から「こんなスペクトル見たことない」「こういう変なもの見るとやる気であるよな」などと言われたのを覚えています。

newscope <解説>

★01 横向き円盤

ガスの回転方向が観測者の視線の方向に平行となる際に光のドップラー効果が最大となるため発見しやすい。

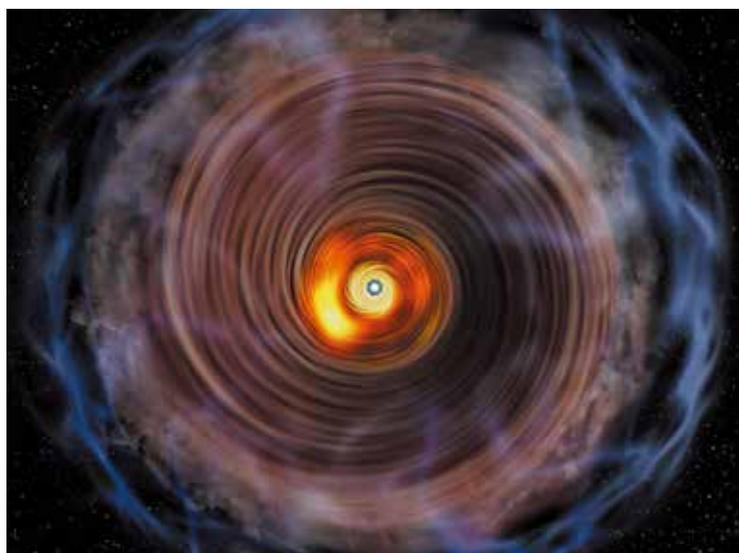


図01 アルマ望遠鏡での観測をもとに描いた巨大原始星 G353.273+0.641の想像図。中央にある原始星を取り巻く円盤を真上から見下ろすような位置関係にあり、円盤の構造をはっきり見分けることができる様子を表現しています。(Credit: 国立天文台)

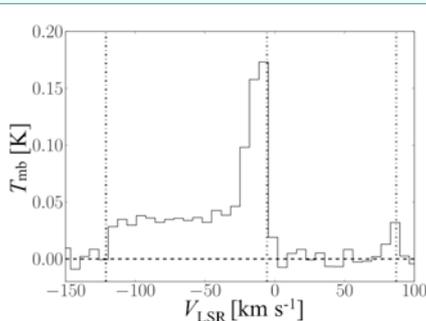


図02 苫小牧11m望遠鏡で得られた水メーザスペクトル。横軸は観測者の視線方向に沿ったガスの速度で、我々に近づく向きを負にとっています。縦軸はメーザの強度です。図中の数字は2008年1月1日を基準とした観測日で、426日のスペクトルには縦方向に0.5のオフセットを与えて見やすくしています。縦の点線は中心星の速度で、メーザを放射するガス全体が我々に近づく運動をしていることがわかります。Credit: Motogi et al. 2011, MNRAS, 417, 349

newscope <解説>

★02 水メーザ

水分子が起こす電波の誘導放射。光におけるレーザーと同じ現象。強い衝撃波で励起されるため、原始星ジェット内でよく見られる。

★03 一酸化ケイ素

水メーザ同様に強い衝撃波で励起されるため原始星ジェットの指標となる。ここで観測されたのは回転量子数が2から1へ変化する86.84696 GHzの輝線。

★04 青方偏移

光のドップラー効果で我々に向かってくる天体が放つ電波の波長が短くなること。逆に遠ざかる場合は波長が長くなる(赤方偏移)。

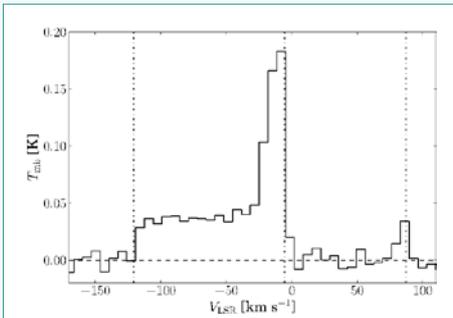


図03 野辺山45m望遠鏡で得られた一酸化ケイ素のスペクトル。横軸は視線方向に沿ったガス速度、縦軸は放射の明るさを温度換算した輝度温度を表しています。縦の点線は赤と青が過去に水メーザで観測された最大の速度を、緑は原始星の速度を示しています。(Credit: Motogi et al. 2013, 428, 349)

へ ストアングルな降着円盤の予感

さてジェットが我々に向かって飛んでいるということですから、その根本には地球へ真正面を向けた円盤（フェイス・オン円盤）が存在することになります。ここでやっと話が最初とつながるわけです。

2010年代前半はまだ円盤を探す時代でしたから、星周ガスの回転運動を発見しやすい横向きの円盤ばかりに注目が集まっており、フェイス・オン円盤を探して観測するような例も発想ありません。そこで無名だったG353のユニークさが認められ、2016年にアルマ望遠鏡の観測が実施されました。

アルマ望遠鏡による俯瞰撮像

アルマ望遠鏡で得られた合成画像を図04に示します。ここでは原始星近くの高温ガスを赤、円盤を黄、円盤全体を包むガス（エンベロープ）を青で示しています。円盤の半径は250天文単位★05であり、これは海王星軌道の8倍以上の大きさに相当しますが、他の大質量原始星の周囲で見つかった円盤に比べる



図04 アルマ望遠鏡で得られたG353周囲のガス構造。中心星付近の高温ガス（赤）、円盤（黄）、エンベロープ（青）の3つの構造を疑似カラー合成しています。(Credit: ALMA (ESO/NAOJ/NRAO), Motogi et al., 2019, ApJL, 877, L25)

と小さなものです。

このうちエンベロープはメタノール分子の輝線で観測され、ガスが回転しつつ中心に落下していることが明らかになりました。ガスが落下するペースから中心星の年齢を推定するとわずか3000歳ほどとなり、これまでに知られている大質量原始星の中では最も若く、ほぼ生まれたての瞬間を見ていることとなります。

円盤から内側は星間ダストによる熱放射で観測されました。直接ガスの速度場を観測することはできませんが、エンベロープ内のガスの回転から、円盤の半径がちょうどガスの遠心力半径★06と一致していることがわかりました。また中心星の東側が明らかに明るく、円盤が非対称な構造を持つことがわかります。

さらに円盤の質量は2~7太陽質量と見積もられました。星の質量が10太陽質量ですから、円盤の質量が中心星の20~70%もある、極めて重い円盤です。そこで円盤の安定性を解析してみると、この円盤は安定に存在することができず、今後分裂して中心星に落下しやすい状態であるとわかりました(図05)★07。

観測された非対称な構造もそうした分裂過程で自然に説明することができます。

このように大質量原始星の周囲で不安定な円盤が捉えられたのも今回が初めてのことです。このことはG353が成長の最初期段階にあるという予想とも一致しています。

今後に向けて

G353の円盤の特徴は小質量原始星の若い円盤とよく似ており、星の初期成長過程が体重に寄らず似ていることを示しています。今回は150 GHz帯のみの観測であり、まだ物理量の不定性が大きい

ですが、現在230/350 GHzでの追加観測が行われており、より高い解像度のデータでより詳細な物理状態を明らかにする予定です。また2例目以降のフェイス・オン円盤の発見も進めていきたいと考えています。

G353の発見から10年、アルマ望遠鏡長基線の威力を得て大質量原始星の円盤を“探す”時代から“調べる”時代へ移りつつあると言えるでしょう。

●論文掲載情報

Motogi, K., et al.: 2019, *ApJL*, 877, L25.

★ newscope <解説>

★05 1天文単位

地球-太陽間の平均距離。約1億5000万キロメートル。

★06 遠心力半径

ガスの回転による遠心力とガスを引き込む重力がちょうど釣り合う半径。ガス円盤の外縁の指標。

★07 円盤の不安定性

円盤の質量が大きい場合、円盤内のガス同士が重力でお互いを引っ張りあうため、円盤全体の運動が乱される。その際回転にブレーキをかけられたガスは遠心力が弱まって星へ落下しやすくなる。

★08 ToomreのQ値

円盤の重力的安定度を示す指標となる量。一般にQが2下回ると円盤が不安定となり始め、1を下回ると分裂を起こす。

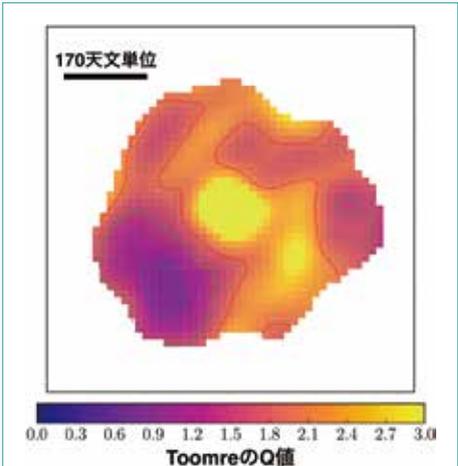


図05 円盤の安定度を示すToomreのQ値★08の分布。色が紫に近いほど不安定なことを示しています。赤、緑、青の等高線はそれぞれQ=2.0, 1.5, 1.0となる境界線を示しており、赤線から内側が不安定な領域です。電波が明るい東側で特に円盤が不安定になっていることがわかります。(Credit: Motogi et al., 2019, ApJL, 877, L25)

太陽系の時間0を求めて



橋 省吾
(東京大学大学院
理学系研究科
宇宙惑星科学機構)

恒星がどのように誕生し、その周囲に惑星がどのようにつくられるのかという問いに対し、天文学では、星・惑星形成の“現場”観測で、そのプロセスを理解しようとし、地球惑星科学では、隕石や「はやぶさ」、「はやぶさ2」などの探査機が持ち帰る地球外試料を分析することで、太陽系最初期の惑星形成プロセスを理解しようとしてきました。

太陽系形成年代

太陽系誕生直後につくられ、大規模な融解などを経験しておらず、太陽系初期の記憶を残す隕石をコンドライトとよびます。コンドライトは化学組成や酸素同位体組成の特徴から異なる化学グループに分類されます(これらの化学グループの違いは太陽系最初期に惑星の材料に多様性をつくる物理化学過程があったことを示唆します)。あるグループのコンドライトにはカルシウム、アルミニウムといった揮発性の低い元素に富んだ鉱物からなる数mm程度の白色の物体を含みます(図01)。この白い物体は、カルシウム(Ca)、アルミニウム(Al)に富んだ包有物(Inclusion)ということでCAIとよばれています。CAIは揮発性の低い元素を多く含み、揮発性の高い元素に乏しいことから、1300Kを越える温度でつくられたと考えられています。これらのCAIの年齢は45億6700万年程度で、隕石中の他の様々な構成物質の年齢を測定しても、CAIよりも古いものは存在しません。このため、太陽系でつくられた最古の物質CAIの形



図01 アエンデ隕石。写真中央下部に白く見えるのがCAI。

成年代が太陽系の誕生年代(太陽系の時間0)と見なされ、それ以降の惑星形成までのプロセスが議論されています。しかし、太陽系最古の物質CAIがどのような環境でどうやってつくられたのかは十分に理解されておらず、太陽系の時間0という重要な基準点が星・惑星形成過程のどの段階に対応しているのかがはっきりしていません。

他の原始星を探る

誕生直後の太陽系を、時間を遡って直接観測することはできませんが、生まれたての他の恒星を観測することはできます。私たちは、原始星周囲にCAIを形成するような高温のガスの存在を求めて、大質量星形成領域であるオリオン大星雲(図02)の中の巨大原始星候補天体「オリオンKL電波源I」(太陽の数倍以上の質量があると見積もられている)周囲の原始星円盤★01のアルマ望遠鏡による観測データを解析しました(Tachibana et al., 2019)。

解析で注目した分子は一酸化アルミニウム(AIO)分子です。AIO分子は進化末期の年若い恒星から吹き出すガス中に存在が報告され、最近、アルマ望遠鏡でその空間分布も初めて観測され(Takigawa et al., 2017)、酸化

newscope <解説>

★01 原始星円盤

誕生直後の原始星の周囲にできる回転するガス円盤。惑星を誕生させる母胎となる。



図02 ハッブル宇宙望遠鏡が撮影したオリオン大星雲。Credit: NASA, ESA, M. Robberto (Space Telescope Science Institute/ESA) and the Hubble Space Telescope Orion Treasury Project Team

アルミニウムからなる固体微粒子（ダスト）の材料となっていることが明らかとなった分子です（酸化アルミニウムからなるダストが銀河を漂い、太陽系の材料となったことも隕石の分析からも知られています）。AIO分子が誕生直後の原始星の周囲にも存在するのか、また、存在した場合にどのように分布しているのかは未解明でしたが、アルミニウムに富む鉱物を多く含むCAIの材料となる分子の有力候補として、今回、探索をおこないました。

AIO分子が見えた

オリオンKL電波源Iのアルマ望遠鏡のデータを解析してみると、その中にAIO分子から放射される497GHzと650GHzの電波が存在することがわかりました（図03）。また、高空間分解能をもつアルマ望遠鏡の特性を活かし、AIO分子が、円盤からのアウトフロー（回転しながら吹き出すガスの流れ）の根元付近に限定的に存在することも明らかになりました（図04）。同じくアウトフローに見つかる一酸化ケイ素（SiO）分子などの分布（Hirota et al., 2017）に比べると、AIO分子は局所的な分布を示します。これは、高温のガスがアウトフローとして広がる過程で冷却され、揮発性の低いAIO分子がダストとして凝縮し、ガスから取り去られたためであると考えられます。SiO分子が原始星から離れて遠くまで広がることを考えると、このダストの正体はケイ素に乏しく、アルミニウムに富む酸化物であると考えられます。すなわち、原始星候補天体オリオンKL電波源I周囲に、CAIを形成するような鉱物ダストがつけられる場が存在するのです。

時間0へ

原始星周囲でAIO分子がダストを形成する可能性を示した本研究の成果は、原始星周囲での惑星材料の進化に対する一般的理解を進めることはもちろんですが、太陽系で惑星の材料がどのようにつくられ、惑星へと進化したのかについて、他の天体の観測から理解を進める第一歩としたいと考えています。オリオンKL電波源Iは太陽より大質量の原始星候補天体であり（実は晩期型星ではないかという議論もあります）、原始星円盤からのアウトフロー中でCAIを構成するようなダストができることはわかりましたが、他の大質量星や太陽程度の質量の恒星周囲の原始星円盤ではどうなのかなどは今後の課題です。様々な質量の原始星周囲でのガスの観測から惑星材

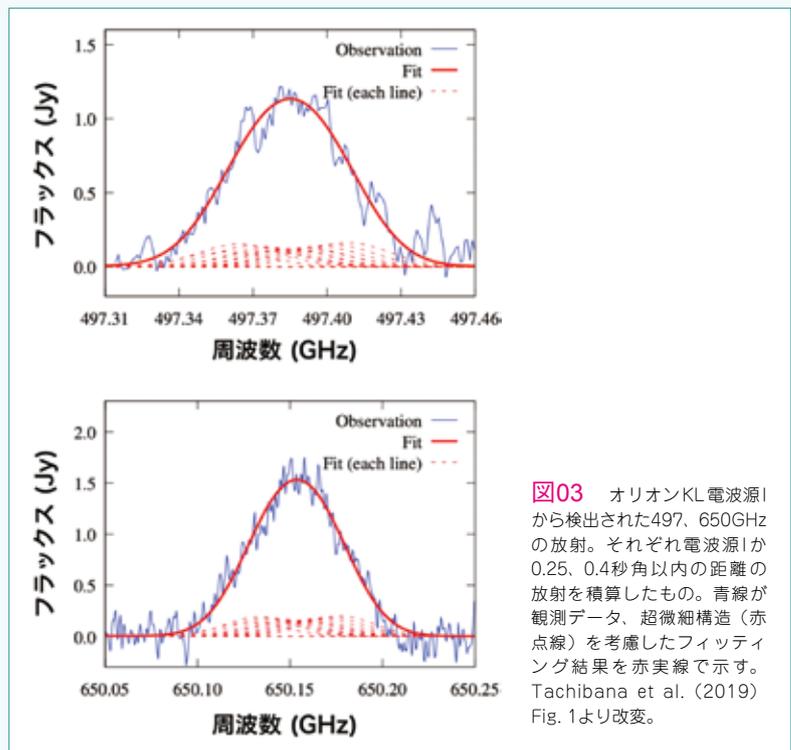


図03 オリオンKL電波源Iから検出された497、650GHzの放射。それぞれ電波源Iが0.25、0.4秒角以内の距離の放射を積算したもの。青線が観測データ、超微細構造（赤点線）を考慮したフィッティング結果を赤実線で示す。Tachibana et al. (2019) Fig. 1より改変。

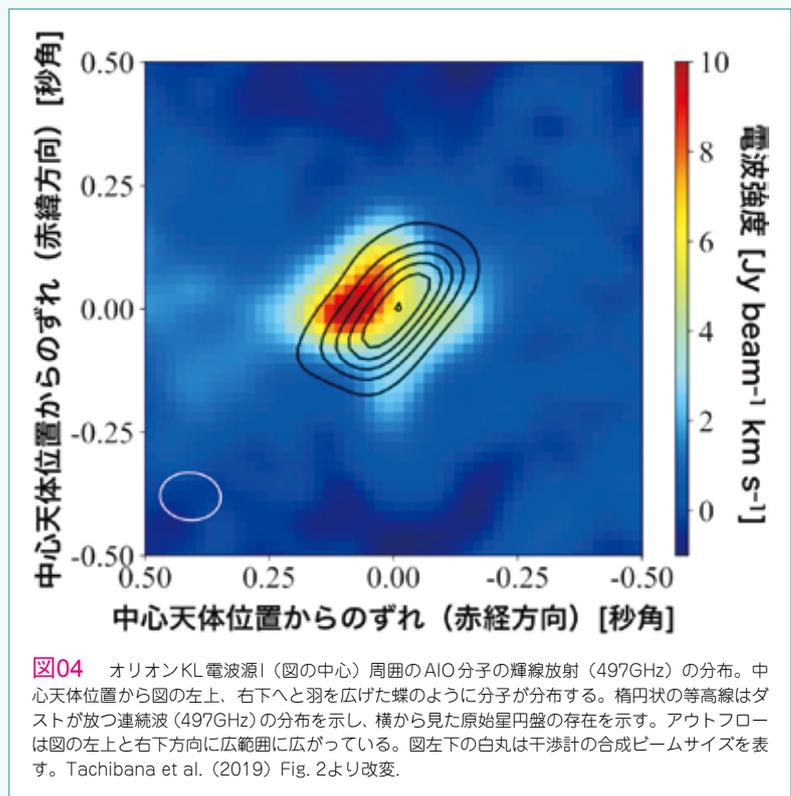


図04 オリオンKL電波源I（図の中心）周囲のAIO分子の輝線放射（497GHz）の分布。中心天体位置から図の左上、右下へと羽を広げた蝶のように分子が分布する。楕円状の等高線はダストが放つ連続波（497GHz）の分布を示し、横から見た原始星円盤の存在を示す。アウトフローは図の左上と右下方向に広範囲に広がっている。図左下の白丸は干渉計の合成ビームサイズを表す。Tachibana et al. (2019) Fig. 2より改変。

料の形成や進化に関する知見が今後得られることを期待しています（私たち自身もそのような観測研究をおこなっていきたくと思っています）。観測結果と、隕石や探査機によるリターンサンプルの分析やそれらの再現実験からわかる初期太陽系に関する知見とを比較することで、太陽系の時間0を星・惑星系形成過程に位置づけることができればと思っています。

論文掲載情報

Tachibana, S., Kamizuka, T., Hirota, T., Sakai, N., Oya, Y., Takigawa, A., Yamamoto S.: 2019, Spatial distribution of AIO in a high mass protostar candidate Orion Source I, *ApJL*, **875**, L29.
doi:10.3847/2041-8213/ab1653

アルマ望遠鏡で探る 謎の突発天体の正体

諸隈佳菜
(東京大学大学院
理学系研究科附属
天文学教育センター)



最近タイムドメイン天文学業界をざわつかせている突発天体がいるんです

一口に天文学と言ってもその内容は実に多岐にわたっています。そこで、私たちは専門外の最新トピックを勉強するため、定期的に少人数で“異分野勉強会”を開催しています。前回の発言は、2019年3月に開催した勉強会で出たものでした。タイムドメイン天文学は、明るさが時間変動する天体（超新星爆発★01など）の光度曲線（明るさの時間変化）、その波長依存性（スペクトルの時間変化）などから、突発天体の性質を明らかにする分野です。天の川銀河以外の銀河の個々の恒星を観測することは、現在最高の視力をもつハッブル宇宙望遠鏡やアルマ望遠鏡をもってしても難しいのですが、タイムドメイン天文学は、大口径の望遠鏡を使わなくても遠くの銀河の個別の恒星の性質を調べることができる、極めてユニークな分野です。

AT2018cowという天体で、どんな突発天体の光度曲線とも違うんです

名前に「cow」が入っていますが、新種の牛が見つかった訳ではありません。突発天体の名前は、一般的に、“AT”（Astronomical Transient）＋「報告された年」＋「複数アルファベットの組み合わせ」となります。末尾のアルファベットは報告順で決まり、その年の最初に報告された天体から順にaaa、aab、aac…と名付けられます。つまりAT2018cowは、2018年の1739番目に報告された突発天体ということになります。そのキャッチーな名前から、タイムドメイン天文学者の中では「The cow」と呼ばれたりしています。

たった2～3日の間に青く明るくなって、すぐに暗くなってしまったんです

近年の高頻度でのサーベイ観測により、これまで知られている突発天体よりも早い変動（10日以内）を示す天体が多数見つかりました（FELT、Fast Evolving Luminous

Transient）。FELTの光度曲線やスペクトルの良質なデータは多くなく、その正体は依然として謎に包まれています。AT2018cowは比較的近所の銀河で発生したFELTであったため、どのFELTよりも詳細に観測され、様々な理論モデルが提唱されています（図01）。例えば、①大質量星（太陽の8倍以上の質量をもつ恒星）の何らかの爆発現象、②中間質量ブラックホール（太陽の10万倍程度の質量）がその強い重力場によって近くを通った恒星を引きちぎる潮汐破壊現象、などです。

アルマでも観測されていますね

勉強会に参加している他の研究者が、AT2018cowはアルマ望遠鏡のToO観測（Target of Opportunity）でデータが2018年6月頃に取得されていること、ToO観測なのでそのデータがすでに公開されている事に気がつきました（アルマ望遠鏡の普通の観測データは、取得後1年間の観測提案者の占有期間があります）。そこで私たちは、そのデータを使ってAT2018cowが付随する母銀河の分子ガスの性質を調べることにしました。分子ガスは星形成の材料であり、恒星が今現在多く生まれている（寿命の短い大質量星がまだ生きている）銀河ほど豊富な分子ガスがあることが知られています。分子ガスの情報から、AT2018cowの正体が大質量星の何らかの爆発現象によるものなのか、そうでないのか、を切り分けられると考えたのです。

★ newscope <解説>

★01 超新星爆発のタイプ

恒星の中には、その生涯を全うするときに超新星爆発と呼ばれる大爆発を起こすものがある。超新星爆発は可視光でのスペクトルの特徴に応じて分類されており、水素のスペクトル線がないものをI型、水素のスペクトル線がみられるものをII型と呼ぶ。さらにI型の中では、スペクトルにシリコンがみられるものをIa型、シリコンはなくヘリウムがみられるものをIb型、ヘリウムもシリコンもないものをIc型と分類する。またII型の中でも、爆発後時間が経ってからヘリウムが検出されるものをIIb型と分類している。Ia型は連星系にある白色矮星の爆発で、それ以外は大質量星の最期である重力崩壊型超新星であると考えられている。



図01 左から爆発15年前、爆発4日後、爆発28日後のAT2018cowの可視光画像。母銀河は棒渦巻銀河で、AT2018cowは左端の図の緑のマルで示された場所で発生した。AT2018cow発生直後は母銀河よりも明るくなっているのが確認できる。（Perley+, 2019, MNRAS, 484, 1031より）

一酸化炭素輝線 ギリギリ受かってる！

三つの幸運が重なり、私たちはAT2018cowの母銀河の分子ガスの分布を明らかにすることができました(図02)。一つ目は、観測周波数の設定です。AT2018cowの3つのToO観測のうち一つだけ、分子ガスの調査によく使われる静止周波数115GHzの一酸化炭素(CO)輝線が観測周波数帯のギリギリ端に含まれていました。二つ目の幸運は、空間分解能です。アルマ望遠鏡は最大で66台のアンテナからなる干渉計で、個々のアンテナ間の距離が長いほど、高い空間分解能で観測できますが、観測する天体がのっぺりした構造だと、その分長い観測時間が必要になります。使用したデータは、比較的コンパクトなアンテナ配列で観測されており、短い観測時間でも、空間分解能が低かったおかげで、なんとかCO輝線を検出することができていました。三つ目の幸運は、AT2018cowの発生位置がそれほど銀河の外側ではなかったことです。電波干渉計の観測視野は、個々のアンテナの口径と観測周波数で決まります。同じ口径の望遠鏡で観測した場合、高い周波数ほど、観測視野は狭くなります。使用したデータの視野中心はAT2018cow自身でしたが、CO輝線の周波数では母銀河全体がギリギリ視野内におさまっていました。

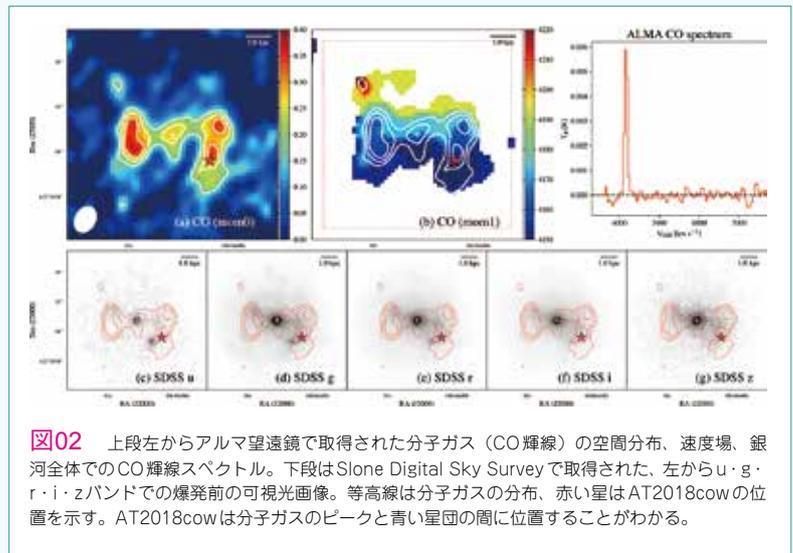


図02 上段左からアルマ望遠鏡で取得された分子ガス(CO輝線)の空間分布、速度場、銀河全体でのCO輝線スペクトル。下段はSlone Digital Sky Surveyで取得された、左からu・g・r・i・zバンドでの爆発前の可視光画像。等高線は分子ガスの分布、赤い星はAT2018cowの位置を示す。AT2018cowは分子ガスのピークと若い星団の間に位置することがわかる。

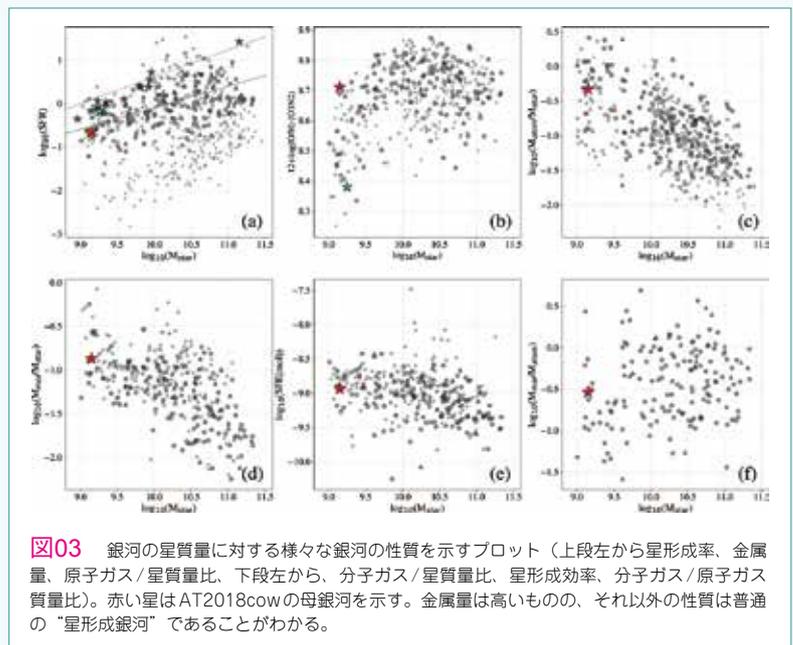


図03 銀河の星質量に対する様々な銀河の性質を示すプロット(上段左から星形成率、金属量、原子ガス/星質量比、下段左から、分子ガス/星質量比、星形成効率、分子ガス/原子ガス質量比)。赤い星はAT2018cowの母銀河を示す。金属量は高いものの、それ以外の性質は普通の“星形成銀河”であることがわかる。

AT2018cowが発生した環境は、特殊な 超新星爆発が起こる環境に似ている

アルマ望遠鏡で得られた分子ガスの情報と、

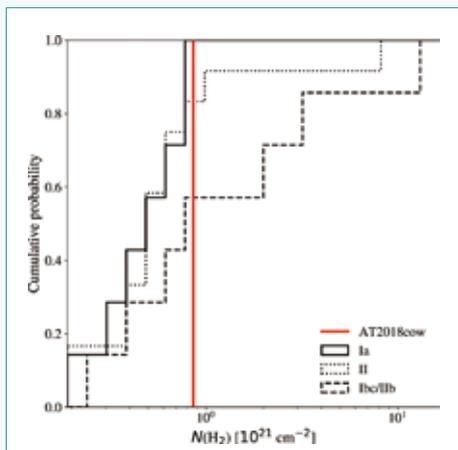


図04 超新星爆発の発生場所の分子ガスの柱密度と、発生した超新星爆発のタイプ(Ia、II、IbcとIIb)の比較。赤い線はAT2018cowの場所での分子ガスの柱密度を示す。AT2018cowの場所での分子ガスの柱密度は、タイプIaやIIよりはタイプIbc/IIbの発生場所に似ていることがわかる。なお、Ibc/IIbは比較的大きな質量の大質量星が起こす超新星爆発であると考えられている。

その他の観測データから、AT2018cow母銀河は質量は小さいものの、“並”のペースで分子ガスから恒星を作っている”星形成銀河”であることがわかりました(図03)。これは、AT2018cowの正体が大質量星の何らかの爆発現象であることを示唆しています。さらに、より具体的にどのような爆発現象であるかを推測するため、私たちは超新星爆発が発生した母銀河の性質と比較しました。その結果、大質量星の中でもより質量の大きな恒星が起こす超新星爆発の発生環境と、AT2018cow発生環境が似ていることがわかりました(図04)。ただし、その超新星爆発の理論モデルでも、AT2018cow自身の光度曲線やスペクトルが説明できていない、ということには注意が必要です。今後は、近傍FELTの観測数を増やし、母銀河の性質も含め、統計的にその正体に迫っていきたいと思っています。

●論文掲載情報

Morokuma-Matsui, K., et al.: 2019, ALMA Observations of Molecular Gas in the Host Galaxy of AT2018cow, *ApJL*, 879L, 13M.

131億光年かなたで捉えた 衝突・合体中の銀河

—大三元：酸素、炭素、塵の同時検出—

橋本拓也
(日本学術振興会
特別研究員 PD /
早稲田大学理工学術院)



はじめに

私たち国際研究チームは、アルマ望遠鏡(以下アルマ)を用いて、非常に遠方にある銀河から酸素の輝線(以下 [O III] ★01)、炭素の輝線(以下 [C II] ★01)、宇宙塵の放射する連続光(以下 ダスト★02)の三種を検出しました(図01)。赤方偏移★03は $z=7.15$ で、これは距離に換算すると131億光年に相当します★04。これほど遠方の銀河でこの三種を全て検出したのは、本研究が初めてで、私たちは大三元★05と呼んでいます。また、観測から導かれる考察として、この銀河が最遠方の衝突・合体銀河の現場を捉えたものである可能性が高いことをご紹介します(図01参照)。本成果は2019年に日本天文学会欧文研究報告に掲載されました。

アルマを用いた遠方銀河の研究

光速は有限であるため、遠くの天体を観測することは過去の宇宙の姿を調べることに直結します。一般的に遠方銀河は極めて暗いため、大型望遠鏡を用いて観測します。巨大電波干渉計アルマの登場は天文学の幅広い分野にブレイクスルーをもたらしましたが、遠方銀河の観測においても例外ではありません。私たちの研究グループは [O III] や [C II]、そしてダストの連続光を利用して遠方銀河の性質を明らかにしようとしています★06。

アルマの強みの一つは、銀河の空間情報と速度情報を同時に調べることができる点です。これは銀河の衝突・合体の様子を調べる上で不可欠です。遠方すなわち過去の銀河は衝突・合体を繰り返し、次第に大きくなり現在に至ると考えられています。また、時には激しい星形成活動(スターバースト)が誘発されクェーサー★07と呼ばれる天体の形成に繋がると考えられています。このように銀河の衝突・合体は銀河の進化史を明らかにする上で重要です。しかし、超遠方にある銀河で衝突・合体の様子を詳しく調べることは困難でした。

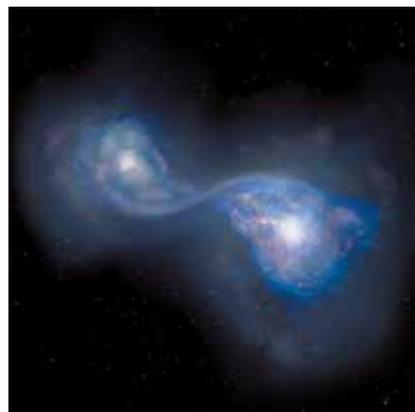


図01 B14-65666の想像図。2つの遠方銀河が近づいており、合体・衝突をしている最中の様子。

観測ターゲット：B14-65666

本研究の対象はB14-65666という名前の銀河です。この銀河は赤方偏移7を超える天体としては極めて明るく、遠方銀河の性質を知る上で格好の対象です。実際に、これまで様々なグループがこの銀河の研究を推進してきました。その歴史を簡単に振り返ってみましょう。B14-65666は2014年にチリにあるVISTA望遠鏡の撮像データを使って、同時代にある銀河としては紫外光で最も明るい部類の天体として発見されました。2017年にハッブル宇宙望遠鏡(HST)により詳細な構造が分かると、B14-65666は2つの塊状の天体が隣接して存在しており、合体銀河の可能性も指摘されました。同じく2017年には、すばる望遠鏡に搭載されたFOCASという分光装置を用いて水素のライマン α 輝線が分光検出されました。翌年の2018年にはアルマによって、ダストの連続光が検出されました。このように、この数年でB14-65666の理解は着実に進んできました★08。

成果1：大三元—酸素、炭素、ダストの同時検出に成功

アルマ観測は2016年11月から2018年5月の間にかけ、合計で約13時間行われました(PI：井上昭雄)。バンド8と6を用いて、それ

newscope <解説>

★01

輝線は、物質に特有の波長で強く光るスペクトルです。本研究では二階電離した酸素が出す静止系波長88マイクロメートル(μm ：マイクロは 10^{-6})の輝線(記号で [O III])と、一階電離した炭素が出す静止系波長 $158\mu\text{m}$ の輝線(記号で [C II])を検出しました。

★02

宇宙塵(ダスト)は典型的には $0.01\sim 10\mu\text{m}$ 程度の大きさを持った固体微粒子で、主に炭素(グラファイト)やケイ酸塩などで構成されています。紫外-可視光を散乱及び吸収し、赤外線連続的な波長で再放射します。

★03

宇宙膨張による光の波長の伸びを表す指標です。遠方から放たれた光の波長は、 $1+z$ 倍に伸ばされて私たちに届きます。

★04

距離は宇宙論パラメータに依存します。ここでは $H_0=67.3\text{km/s/Mpc}$ 、 $\Omega_m=0.315$ 、 $\Lambda=0.685$ ：Planck 2013 Resultsを採用しました。

★05

大三元とは麻雀における役の一つです。本研究では、これほど遠方の銀河では初めて三種の特徴を検出したことから、私たちは宇宙における大三元(英名：Big Three Dragons)と呼んでいます。

★06

特に [O III] を用いた遠方銀河の研究は日本発と言っても過言ではなく、これまで日本グループが大きな成果を上げてきました。2016年に初めて $z > 7$ の [O III] 検出に成功し(Inoue et al. 2016, Science, 352, 1559)、2018年には $z=9.11$ という史上最遠方銀河の記録も打ち立てました(Hashimoto et al. 2018, Nature, 557, 392)。

★07

超巨大ブラックホールによる最も明るい部類の活動銀河核。

★08

各項目の詳細は、4編の論文をご覧ください。Bowler et al. (2014), MNRAS, 440, 2810; Bowler et al. (2017), MNRAS, 466, 3612; Furusawa et al. (2017), ApJ, 822, 46; Bowler et al. (2018), MNRAS, 481, 1631.

ぞれ [O III] と [C II] を狙った観測を行いました。図02は [O III]、[C II]、ダストの空間分布を表しています。また図03は [O III] と [C II] の輝線スペクトルを表しており、 $z = 7.15$ だと分かりました。これほど遠方の銀河で三種の特徴を同時に検出した初めての例であることから、私たちは麻雀の役になぞらえて、この天体を「大三元」と呼ぶことにしました。

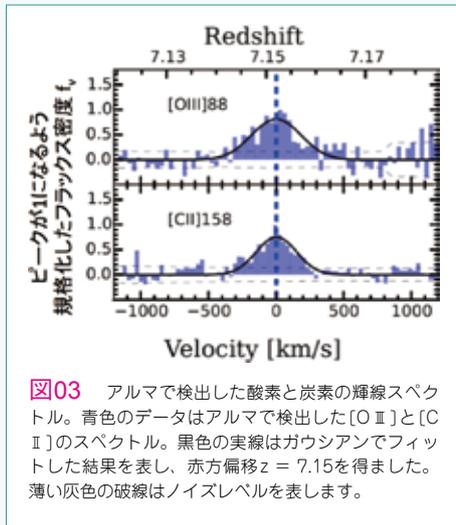


図03 アルマで検出した酸素と炭素の輝線スペクトル。青色のデータはアルマで検出した [O III] と [C II] のスペクトル。黒色の実線はガウシアンでフィットした結果を表し、赤方偏移 $z = 7.15$ を得ました。薄い灰色の破線はノイズレベルを表します。

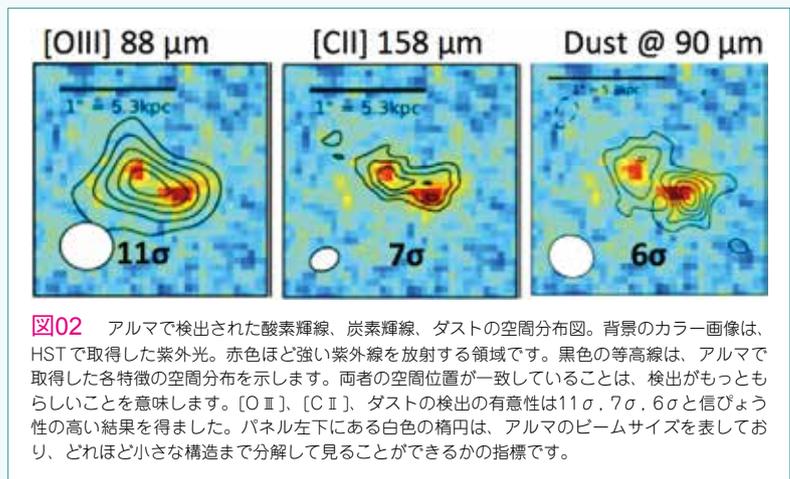


図02 アルマで検出された酸素輝線、炭素輝線、ダストの空間分布図。背景のカラー画像は、HSTで取得した紫外光。赤色ほど強い紫外線を放射する領域です。黒色の等高線は、アルマで取得した各特徴の空間分布を示します。両者の空間位置が一致していることは、検出がもっともらしいことを意味します。[O III]、[C II]、ダストの検出の有意性は 11σ 、 7σ 、 6σ と信ぴょう性の高い結果を得ました。パネル左下にある白色の楕円は、アルマのビームサイズを表しており、どれほど小さな構造まで分解して見ることができるかの指標です。

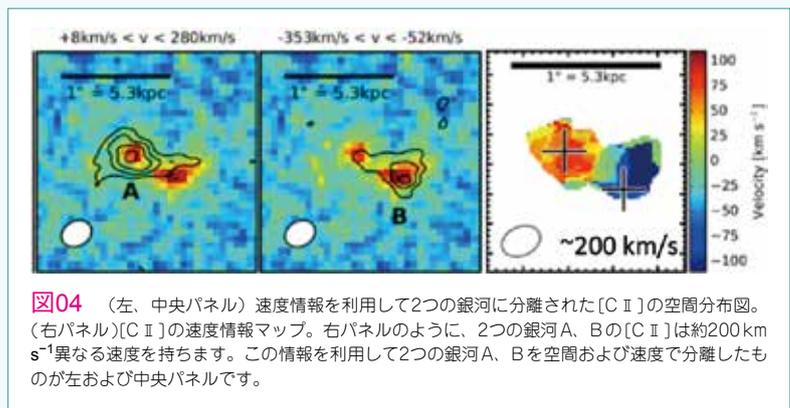


図04 (左、中央パネル) 速度情報を利用して2つの銀河に分離された [C II] の空間分布図。(右パネル) [C II] の速度情報マップ。右パネルのように、2つの銀河 A、B の [C II] は約 200 km s^{-1} 異なる速度を持ちます。この情報を利用して2つの銀河 A、B を空間および速度で分離したものが左および中央パネルです。

成果2: 大三元の正体は？ 最遠方の合体・衝突中の銀河の現場を捉えたか

B14-65666の詳しい性質を探るため、輝線スペクトルの速度情報を利用した解析を行いました(図04)。この結果、紫外光だけでなく [O III] と [C II] も2つの銀河に分離でき、2つの銀河は互いに約 200 km s^{-1} 異なる速度で運動していることが分かりました。同様にダストも2つの銀河に分離できます。これらの情報は、2つの銀河が偶然視線上で重なって見えているのではなく、実際に近接する2つの銀河として存在することを初めて明らかにするものです。

多波長データ解析★09の結果、B14-65666が同時代の平均的な銀河に比べて激しく星を生み出すスターバースト銀河であることが明らかになり、合体説を支持します★10。それでは2つの銀河はどのような衝突・合体をしているのでしょうか？ 2つの銀河は紫外線、[O III]、[C II]、ダストのどの特徴で見ても同程度の光度を持つことから、同程度の大きさの銀河が衝突・合体するメジャーマージャーであることが推測されます。これらの情報を総合的に判断し、私たちはB14-65666が最遠方の衝突・合体銀河の現場を捉えたものだと解釈しています★11。

今後は高空間分解能なデータから詳細な速度-空間モデリングを行うことで多角的に衝

突・合体の解釈を考察することが重要です。そしてB14-65666では、窒素 ([N II] $122 \mu\text{m}$) や分子ガスの輝線 (一酸化炭素 CO) のアルマ観測が予定されており、検出に成功すればいずれも星形成銀河で最遠方の検出記録となります。B14-65666は引き続き遠方銀河の詳細な性質を調べる上で一つの指針となることが期待されます。

★ newscope <解説>

★09

ある天体が、どの波長でどれだけのエネルギーを出しているかを表すのが、SED (Spectral Energy Distribution) です。多数の多様な星からなる銀河のSEDからは、その銀河を構成する星の種類を知ることができます。星の種類がわかれば、その銀河の星の総質量や、どれだけ活発に星を生み出しているか (星形成率) を推定することができます。本研究では、VISTAは紫外域、スピッツァーは可視域、アルマは遠赤外域の光 (いずれも、赤方偏移を受ける前の波長域) を、それぞれ見えています。

★10

この銀河の単位質量あたりの星形成率 (比星形成率) は $260 (+119/-57)/10^9$ 年と推定され、同時代の典型的な銀河で得られている数値 (約 $10/10^9$ 年: Stark et al. 2013, ApJ, 763, 129; Santini et al. 2017, 847, 76) に比べ大きいことが分かります。この数値が大きいことは激しい星形成活動をしていることを意味します。

★11

これまで最遠方の衝突・合体の銀河は $z = 6.90$ でした (Marrone et al. 2018 Nature, 553, 51)。

● 論文掲載情報

Hashimoto, T., et al.: 2019, “Big Three Dragons”: a $z = 7.15$ Lyman-Break Galaxy Detected in [O III] $88 \mu\text{m}$, [C II] $158 \mu\text{m}$, and Dust Continuum with ALMA, *PASJ*, 71, 71.

チリ議会上院、初のブラックホール撮影成功に対しアルマ観測所チームを表彰

チリ共和国の議会上院は、イベント・ホライズン・テレスコープによって発表されたブラックホール初撮影の功績をたたえ、2019年4月17日の議会にアルマ観測所の代表者らを招きました。アルマ観測所への祝辞に加え、ブラックホール観測に深く関わったアルマチームの科学者アレハンドロ・セーズ氏、ヴィオレッテ・インベリツェリ氏、ヒューゴ・メシアス氏、ルーベン・ヘレロ・イラナ氏、廣田晶彦氏、さらにコンセプション大学のニール・ナガー氏、ヴェンカテッシュ・ラマクリシュナン氏らの功績が高く評価されました。

世界中に大きなインパクトを与えた今回のブラックホール初撮影を受け、チリ議会上院は、アルマ観測所とチリから参加した7名の科学者に対し、メダルの授与を決定。式典は上院会議場にて開催されました。

アルマ望遠鏡ディレクターのショーン・ドウアティ氏は「ブラックホール直接撮影という歴史的な挑戦において、アルマ望遠鏡は重要な役割を果たした。アルマチーム全員の並々ならぬ努力に感謝しています」と述べました。



01 式典の後、上院議長のハイメ・キンタナ氏は「優れた科学者の皆さんにメダルを贈ることができ、大変誇りに思います。研究チームは素晴らしい観測結果によって科学分野への大きな貢献を果たしました。科学と政治とのつながりを強化することは、我々が10年に渡って上院で掲げてきた方針であり、Congreso del Futuro（未来会議）の重要な課題でもあります」と述べました。この会合では、ショーン・ドウアティ氏に加え、今回の論文共著者の中で唯一チリ国籍を持つアレハンドロ・セーズ氏による講演などが行われ、今回の観測の重要性を議員らとともに共有しました。

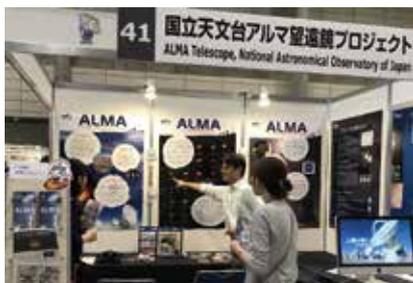
合同アルマ観測所の一員として今回のプロジェクトに携わった廣田晶彦国立天文台チリ観測所助教は「アルマアンテナの出力を合成して、アルマを仮想的な一つの巨大アンテナとしてVLBI観測に参加させるALMA Phasing Projectにおいて、主に観測ソフトウェア開発を担当するという形で参加しました。数多くの研究者と技術者が一つの目標のもと、それぞれの専門性を持ち寄って得られた今回の結果に微力ながら貢献できたことを嬉しく思うとともに感謝

します」と語っています。



02 左から、パウリーナ・ボガス氏（チリのNRAO/AUI法定代理人）、ヒューゴ・メシアス氏、アレハンドロ・セーズ氏、廣田晶彦氏。Credit: N. Lira-ALMA (ESO/NAOJ/NRAO)

日本地球惑星科学連合2019年大会アルマ望遠鏡ブースに500名来場



01 日本地球惑星科学連合2019年大会でのアルマ望遠鏡展示ブースの様子。

2019年5月26日(日)～30日(木)の5日間、千葉県千葉市の幕張メッセで「日本地球惑星科学連合2019年大会」が開催されました。この大会は、宇宙惑星科学、大気水圏科学、地球人間圏科学、固体地球科学、地球生命科学を幅広くカバーする国際学会です。

アルマ望遠鏡の展示ブースでは、「史上初のブラックホール観測」「惑星誕生」「ア

ストロバイオロジー」などの成果を中心にご紹介しました。高校・大学・大学院生、企業や研究機関の研究者など、たくさんの方が足を運んでくださいました。

今年はブラックホール観測のニュース（国立天文台ニュース6月号参照）を受けて「世界の望遠鏡をつなぐとは、どういうこと？」などの質問が寄せられました。「望遠鏡をつなぐ」とは、各地にある望遠鏡で同じ対象を同時に観測し、そのデータを統合させて仮想的な巨大望遠鏡を作り出すことです。

一般に、望遠鏡は口径が大きいほど解像度が上がります。しかし、直径何万kmもある巨大望遠鏡（＝パラボラアンテナ）を作るのは不可能です。そこで、世界各地の電波望遠鏡をつなぎ、地球サイズの望遠鏡と同じ精度でブラックホールを観測したのです。

ブラックホール観測のニュースを受けて「複数のアンテナを組み合わせで観測する」という手法が多くの方に知られるようになりました。ブースでは、アルマ望遠鏡自体もこの仕組みを使って観測していること、ブラックホール以外にもさまざまな観測成果をあげていることなどを来場者にご紹介しました。



02 今年は、展示の一つとしてVR体験をご用意しました。アルマ望遠鏡が設置されているチリの標高5000mを旅するバーチャルツアーです。「標高5000m」なんて普段なかなか行くことのできない場所ですが、VRを使って、あっという間に地球の反対側へ。チリのアタカマ砂漠ではたらく66台のアルマ望遠鏡を間近で体験していただきました。

アルマ望遠鏡が見た部分日食

2019年7月2日、南米の一部で皆既日食が見られました。アルマ望遠鏡のあるアタカマ高地では、太陽の76%が月に隠される部分日食となりました。この部分日食を、アルマ望遠鏡の日本製12mアンテナ1台で電波観測することができました。

観測を担当した合同アルマ観測所の天文学者アントニオ・ヘレス氏は「アルマ望遠鏡のアンテナで日食を観測するには、多くのスタッフの手を借りる必要がありました。悪天候で観測はやや苦戦しましたが、最終的には良い画像を得ることができてうれしく思います」とコメントしています。

日食が起きていたころ、標高5000mのアルマ望遠鏡山頂施設は雲に覆われ、秒速10mを超える風が吹いていました。さらに週末には雪が降ったため、合同アルマ観測所の技術部門のスタッフが雪の影響を取り除く作業を続けていました。この作業は日食直前に完了し、アルマ望遠鏡アンテナを使った日食観測を始めることができました。しかし秒速15mを超える風が再び吹き始めたため、日食の終了を待たずに観測は終了となりました。観測データの較正を担当した国立天



01 2019年7月2日に起きた部分日食を、アルマ望遠鏡の1台のアンテナで観測した連続画像。太陽の前を月が横切る様子が、電波による観測でもよくわかります。27枚の観測画像をつないだ短い動画も以下でご覧いただけます。 <https://alma-telescope.jp/news/eclipse-201907>

[Credit : Masumi Shimojo (NAOJ), Antonio Hales (NRAO/ALMA), Akihiko Hirota (NAOJ/ALMA); ALMA (ESO/NAOJ/NRAO)]

文台の下条圭美 助教は、「観測準備は約1か月前から始めていましたが、悪天候が伝えられていたので、観測を諦めていました。悪天候の中、アンテナを整備してくれた現地スタッフに感謝しています。

アルマ望遠鏡にとって太陽は明るすぎて大きすぎる天体なので、日食観測には色々な工夫がなされています。太陽に月の影が映った画像を見たときは、感動と共に安堵しました」と語っています。

国立天文台サンティアゴ事務所での日食観察会

2019年7月2日、チリの一部では皆既日食が見られました。首都サンティアゴでは太陽の93%が月に隠される大きな部分日食となりました。

この日食を観察するため、サンチャゴ日本人学校の児童生徒の皆さん45名と教員の方々が国立天文台サンティアゴ事務所を訪問されました。日食観察の前に、浅山信一郎 国立天文台チリ観測所長が、日食の起きる仕組みや日食の安全な観察方法を模型なども使いながら解説しました。その後、事務所内から日食グラスを使って欠けた太陽を観察しました。また「日本人学校」「NAOJ」という文字に沿って小さな穴をあけた紙を用意し、ピン



01 地球と月の模型を使って日食の仕組みを解説する浅山信一郎 国立天文台チリ観測所長。(Credit : 国立天文台※以下同)

ホールの原理を利用して壁などに太陽の像を写して、三日月形の太陽で形作られた文字を楽しみました。現地時間午後4



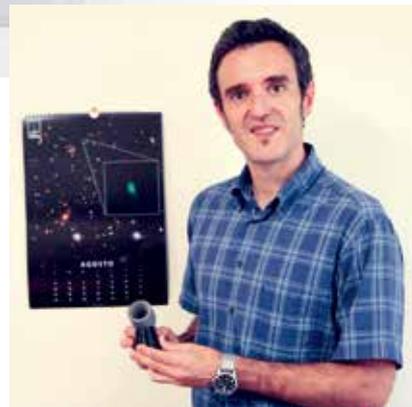
02 日食メガネを使って日食を観察するサンチャゴ日本人学校の児童生徒と先生方および保護者の皆さん。

時半ごろが部分日食のピークとなったため太陽は西の空に大きく傾いており、室内からも観察しやすい日食となりました。

Ⅱ NAOJアルマ・プロジェクト長 アルバロ・ゴンサレスさんに聞く



国立天文台アルマ・プロジェクト長のアルバロ・ゴンサレスさんにアルマ望遠鏡との関わりや研究、趣味などのお話を伺いました。



工学から天文学へ From Engineering to Astronomy

NAOJアルマ・プロジェクト長アルバロ・ゴンサレス
NAOJ ALMA Project Manager Alvaro Gonzalez Ph.D.



インタビュアー：ラムゼイ・ランドック（天文情報センター）

Q: How did you first become involved in ALMA?

A: Well, I came to Japan to work in ALMA back in February 2010. Originally, my background is in engineering but with a very strong interest in science. When I was in high school, I used to have a telescope and look at the night sky, for planets, star clusters, and galaxies and those kind of objects.

I got my 5-year Engineering degree in Valencia in Spain in Telecommunication Engineering in 2005. And then, the following year I got a Master in Space Studies by the International Space University. After that, I went to work to the European Space Agency (ESA) for 2 years working on the design of antenna feeds and mixers for satellite communications and spacecraft science missions, such as remote sensing of the Earth. These are actually the building blocks of radiometers, which are similar to receivers for radio astronomy, as those in ALMA. In telecom, the emphasis was in low loss designs, which are similar to low noise designs for radio astronomy.

At that time, while working at ESA, I found that I would like to develop my career more towards research. So then I went to Caltech, and I started a Master/Doctoral course in 2008. I got my Master in Electrical Engineering there in June 2009 and started my PhD. However, at that time, in late 2009, I found the possibility to come to Japan to work on the development of the ALMA Band 10 receiver, and that is how my involvement with ALMA started! It was radio astronomy, very high frequency, and exactly my expertise. Then, I came to Japan and started working on the receiver development and later on I got my Ph.D. in Physics in University of Tokyo.

Q: アルマ望遠鏡プロジェクトに関わるまでの経緯を教えてください。

A: 2010年2月に、アルマ望遠鏡プロジェクトで働くために来日しました。もともと私の専門は工学でしたが、科学にも強い興味を持っていました。高校生の時には、自分の望遠鏡で惑星や星団、銀河を見たりもしていました。

2005年までの5年間、スペイン・バレンシアで電気通信工学を学びました。そして次の年、国際宇宙大学でスペース・スタディーズの修士を取りました。その後、欧州宇宙機関(ESA)に就職して、衛星通信や地球のリモートセンシングに使われるアンテナフィードやミクサーの設計の仕事に2年間携わりました。これらは電波の強度を測る装置(ラジオメーター)の構成要素で、アルマ望遠鏡のような電波望遠鏡の受信機とよく似ています。電気通信では低損失な設計が求められますが、これは電波天文学で低雑音な設計をするのと同じことです。

ESAで働いているうちに、もっと研究寄りの仕事がしたいと思うようになりました。それで2008年、カリフォルニア工科大学の修士・博士プログラムに入学しました。2009年6月に修士をもらって、博士の勉強を始めましたが、2009年後半に日本でアルマ望遠鏡バンド10受信機開発に関わる仕事を見つけました。これが、アルマ望遠鏡プロジェクトに参加したきっかけです。電波天文学と超高周波数はちょうど私の専門だったので、まさにぴったりの仕事でした。それで、来日して受信機開発を始めました。博士号は後に、東京大学で物理学で取りました。

Q: From that start, how did you get to here, to being Project Manager?

A: Well, I came to NAOJ for a position in pure engineering. And after the completion of Band 10, we started with the development of new instrumentation, considering future upgrades for ALMA. At that time, I continued doing a very specialized technical work, but also little-by-little I took more responsibility from a management point of view, and joining ALMA reviews, international meetings and collaborations, and so on. Then, back in 2016, I became the team leader for the receiver development team at ATC and later in 2017, I became the Development Manager, in charge of all the development program for ALMA in East-Asia. Finally, in 2018, I was selected to serve as the Project Manager, right after Iguchi-san, which I have been doing officially from October 1st.

Q: What are your impressions of the job itself?

A: I think it's a very interesting job and I'm liking it very much. I have been always very interested in astronomy; from the "science" point of view. But my background was more on the technical side of things. So now, as a project manager I can overlook all the aspects of the project, from science, to engineering, computing, or all the managerial things like administration or safety, among others. It is very interesting to get the full perspective of how everything relates.

Q: Do you have any personal research themes?

A: Project management is a very big responsibility and basically it takes all of your time. Well, it's difficult to find the time to do your own research. It becomes more of your own hobby. You have to decide to spend time for your hobbies or for your research. But I continue working on the development of instrumentation for ALMA through some small activities, and also through the training of one young engineer and the mentoring of one student. And providing some guidance or support to some of my former colleagues in the ALMA development team at ATC. And I have several papers I have to publish soon. That requires time, and it's complicated. For example, this 3D-printed horn.

A feed horn is basically the component, that collects the radiation coming from the antenna through the receiver optics and brings it to the waveguide housing where you have the mixer. The mixer is where the signal will be brought to low frequencies which can be detected. A corrugated horn has all these corrugations to improve the performance with respect to a smooth wall horn. This 3D-printed horn is the first horn fabricated for frequencies up to 50 GHz that can be used for an astronomical receiver. So this would be for ALMA Band 1 and has been tested at cryogenic temperatures already. It is 3D printed directly in aluminum and it is working as well as a traditionally fabricated component. The very good thing is we can fabricate many of these at once and very quickly, in just a few hours. This can be very useful for the production of the Band 1 receiver and other future projects which require the fabrication of a large number of components. The Band 1 receiver is an East Asia deliverable to ALMA in collaboration with

Q: そこからどのようにしてプロジェクト・マネージャになったのですか？

A: 最初は純粋な技術者として国立天文台に来ましたが、バンド10の受信機が完成したあとは、アルマ望遠鏡のアップグレードのための新しい装置についての研究を始めました。専門的な技術開発をやりながら、少しずつ、マネジメント的な仕事もするようになりました。例えば、さまざまな技術審査や国際会議、国際協力のための議論などです。そして2016年に、先端技術センターで受信機開発チームのリーダーになり、続いて2017年には、東アジアでのアルマ望遠鏡将来開発活動のすべてを統括する開発マネージャになりました。そして2018年、井口さん（現副台長）の後継者としてプロジェクト・マネージャに選ばれ、10月1日からその仕事をしています。

Q: 今の仕事の感想は？

A: とっても面白い仕事ですね。私は以前から、科学や天文学に興味がありました。しかし、私の専門は技術開発のほうです。でも、今プロジェクト・マネージャとしてプロジェクト全般を見渡すことができる立場にいます。科学、工学、コンピューター技術に事務や安全管理のようなマネジメントのこともすべてです。すべてのものが複雑に関係しあってアルマ望遠鏡が成り立っているようすを見るのは、とても面白いです。

Q: 個人的な研究もやっていますか？

A: プロジェクト・マネージャは責任が大きくて、基本的にすべての時間をこれに費やさなくてははいけません。研究する時間は、なかなかないです。趣味で時間を使うか、研究で時間を使うかの選択になりますね。実はまだ少しだけ、アルマ望遠鏡の装置開発研究の仕事が続いています。若い技術者や大学院生の面倒も見ていて、これを通じても研究には携わっています。もともと一緒に仕事をしていた先端技術センターのアルマ望遠鏡開発チームの同僚たちにもアドバイスやサポートをしています。そして、そろそろ発表しなくてははいけない論文もあります。論文は時間がかかりますし、簡単ではありません。例えば、この3Dプリンタで作ったホーンが論文のテーマのひとつです。



3Dプリンタで作成したバンド1受信機用コルゲートホーン。内部に凹凸が見えます。



ゴンサレスさんはVLAから古い犬釘のお土産を大事にしています。

our partners in Taiwan, in ASIAA (Academia Sinica Institute of Astronomy and Astrophysics), who are leading the activity.

Q: What are your hobbies other than research?

A: I love traveling. And always I have the chance, I go somewhere with my family, or even alone! Some years ago, when I first traveled to the VLA (Very Large Array) site, in New Mexico I picked this small souvenir there. As you know, the project has been ongoing for more than 40 years. So it's like a museum. It's quite unique to see the old technologies and how the telescope still works nicely after timely upgrades. As you walk around the site, looking at the antennas, and all the technology there, there are these pieces of metal all around the place. This particular one is one of the rail track spikes, which are holding the wood planks of the VLA tracks to the ground below. A friend of mine working at NRAO (National Radio Astronomy Observatory) in the site at that time picked this one from the ground and said, "Yea, you can take it."

Q: What research contributed to the NINS Young Researcher award you received recently?

A: I got this award for my research on ALMA instrumentation, let's say. The first point would be the improvement of the ALMA Band 10 receiver optics design towards the production of the receiver

フィードホーンは、アンテナからの電波を集めて、導波管そしてミクサーに運ぶ役割を担う部品です。ミクサーでは、信号が検出しやすい低い周波数に変換されます。コルゲートホーンの内側には凹凸があるのですが、そのおかげで滑らかなホーンより性能がいいのです。このホーンは、3Dプリンタで作られたものとしては世界で初めて天文学用の受信機で使える性能を持ったもので、50ギガヘルツまでの周波数に使用できます。つまり、アルマ望遠鏡のバンド1受信機に使えるのです。低温試験にももう合格できました。このホーンはアルミニウムで3Dプリントされたものですが、これまでの方法で作られたホーンと同じぐらいの性能を達成しています。3Dプリンタのよいところは、一度にたくさん作れること、しかも数時間でできてしまうことです。多くの部品が必要なバンド1受信機や今後のプロジェクトによって大きく役立つことでしょう。バンド1受信機はアルマ東アジアが開発を分担していて、台湾のASIAA（中央研究院 天文及天文物理研究所）が中心となって開発が進んでいます。

Q: 研究以外の趣味はありますか？

A: 旅行が大好きです。機会があれば家族と一緒に旅行するか、あるいは一人でも旅行へ行きます。数年前に、初めてニューメキシコ州にある電波干渉計VLAを訪ねた時に、この小さなお土産をもらいました。VLAは40年以上前から観測をしているので、観測所は博物館みたいです。基本的な技術は古くても、時機を得たアップデートのおかげで望遠鏡はまだ現役で、不思議な環境ですね。望遠鏡のまわりを歩いてみると、いたるところに金属片が落ちています。そのうちの1個がこれです。これはVLAのレールの枕木を地面に固定していた犬釘です。観測所で働いていたNRAO（米国国立電波天文台）の知り合いがこれを拾って、「お土産にどうぞ」といって、私にくれたのです。

Q: 最近受賞した自然科学研究機構若手研究者賞は、どんな研究に対してのものですか？

A: 簡単に言うと、アルマ望遠鏡の装置に関する研究です。まずは、アルマ望遠鏡の最高周波数帯であるバンド10受信機について、この周波数帯で最も良い性能を達成するための光学系設計を行いました。そして受信機製造が終わったあと、アルマ望遠鏡をさらに進化させるための研究とマネジメントへの私の貢献も受賞の対象になりました。さらに、国立天文台と世界中のいろいろな研究機関との国際協力を立ち上げたことも評価してもらいました。

授賞式は独特で面白かったです。なぜなら、受賞者は高校生を対象とした講演を頼まれるのです。私は、この賞では初めての外国人の受賞者でした。これまでの受賞者は日本語で講演していたのですが、私は英語で講演すると決めました。高校生が英語の科学講演



自然科学研究機構若手研究者賞の授賞式と講演後の高校生との質疑応答の様子。

that yielded the best performance at this high frequency range, which is the highest frequency band in ALMA. And then, after we completed the production of ALMA, all my contribution to the new development of ALMA, both from a research point of view and also management. So it was kind of a recognition of all this work, and the establishment of many different international collaborations, between NAOJ and many different institutes around the world.

And receiving the award was quite interesting, because the recipients are requested to give a public lecture targeted to high school students, which is usually in Japanese. But, it was the first time a non-Japanese was awarded the NINS Young Researcher Award. So, I decided to make the talk in English, as this would be a great chance to expose them to a science talk in English, and I asked a Japanese ALMA member to support me with the translation of my slides in Japanese, so at least everybody could follow the talk. The question and answer session was also a mix of Japanese and English. I think finally we managed the situation with an appropriate combination of English and Japanese. It was a pleasant surprise to see that some of the high school students were very fluent in English!

Q: And what are the future plans for ALMA?

A: A very important, very exciting task which is going to gain importance in the coming 3~4 years, or even from now on, is the upgrade of ALMA, toward the second phase of the project, what we call ALMA2 in Japan. Of course, ALMA is already being operated and producing groundbreaking results, but we need to upgrade the telescope so we can continue being able to say this in 10 years from now. So we have to keep up with the upgrades of the science goals and also with the technology to be able to achieve those science goals.

ALMA has already prepared the so-called ALMA Development Roadmap, which includes the new updated science goals and identifies what are the high priorities for ALMA to be improved in the coming decade. In the NAOJ ALMA Project, we have also prepared an ALMA 2 book to explain the new phase of the project in Japanese and summarized some of the amazing scientific results achieved so far.

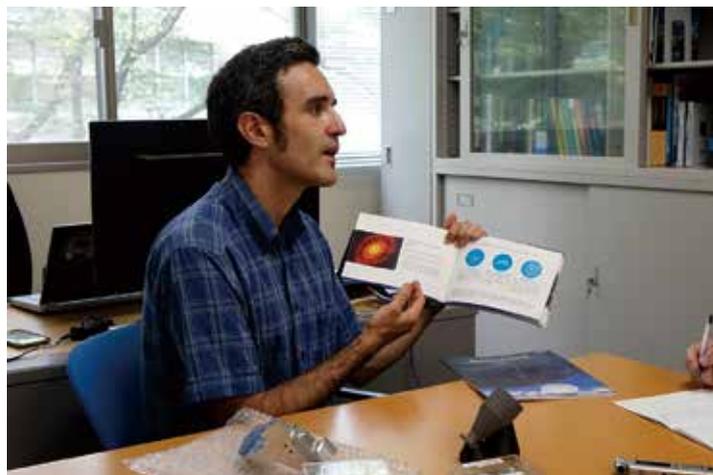
In addition, we are also looking for possibilities of collaboration to increase the scientific impact of ALMA and future projects that can help in this regard. For that, we have started a new Study Group for ngVLA (next generation Very Large Array) to analyze the opportunities for collaboration with NRAO in this new exciting project, and how those are complementary to ALMA.

に触れることが大切だと思っているからです。英語がわからなくても講演の中身はわかってもらえるように、アルマプロジェクトの日本人職員に発表資料の翻訳を頼みました。発表の後の質疑応答も、英語と日本語を混ぜて行いました。結果的に、日本語と英語の適切なバランスで講演できたと思います。英語がペラペラの高校生もいるのは、うれしい驚きでした!

Q: アルマ望遠鏡は、これから何を目指しますか?

A: とっても面白くて大切な仕事は、アルマ望遠鏡を次の段階に進めるためのバージョンアップです。これは、これからの3~4年、いや今この瞬間からでもとても重要なプロジェクトで、日本ではこれを『アルマ2』と呼んでいます。もちろん、アルマ望遠鏡はもう動いていて世界最先端の成果を産出していますが、10年後にも同じことを言うためには、望遠鏡を進化させ続けなければなりません。だから私たちは、新しい科学目標を定め、その目標を達成するための技術開発を進める必要があります。

国際的な議論の中で、私たちは高い優先順位を持ってこれからの10年間で開発を行う項目を定めた『アルマ・ディベロップメント・ロードマップ』を作成しました。国立天文台アルマプロジェクトでも、これまでの注目すべき成果とプロジェクトの次のステップを紹介する日本語冊子を作りました。



アルマ・ディベロップメント・ロードマップを説明するゴンサレスさん。

さらに、アルマ望遠鏡の科学的意義を高めるための協力を模索したり、これに資する新しいプロジェクトの検討を行ったりしています。このために、「ngVLA (Next Generation Very Large Array) 検討グループ」を設立し、エキサイティングなngVLAプロジェクトでNRAOと協力することやアルマ望遠鏡とどのような相補関係にあるかの分析を進めています。

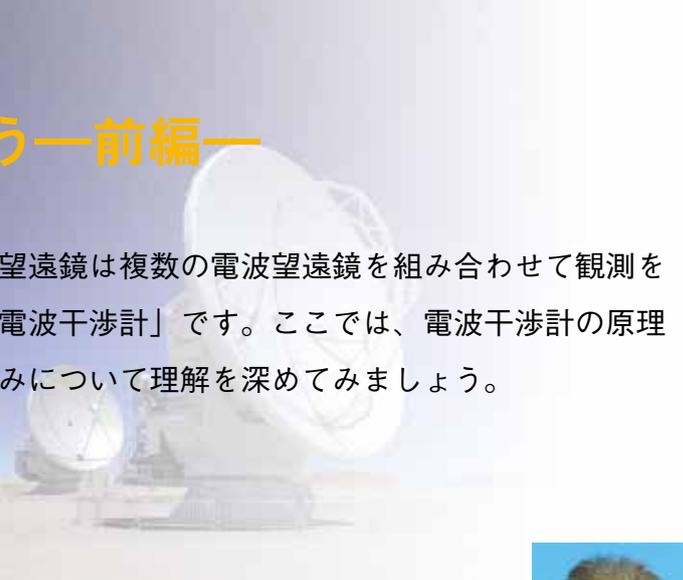


インタビューの様子。ゴンサレスさん、ありがとうございました。

Ⅲ 電波干渉計の仕組みを知ろう—前編—



アルマ望遠鏡は複数の電波望遠鏡を組み合わせる観測を行う「電波干渉計」です。ここでは、電波干渉計の原理と仕組みについて理解を深めてみましょう。



川村 晶

(星の手帖社)

監修：平松正顕

(アルマプロジェクト)



●01 電波干渉計の精確な理解をめざして

アルマ望遠鏡はめざましい成果を上げ続けています。驚異的な解像度の天体画像は、学術的な研究対象であることはもちろん、天文宇宙に興味を持つ多くの人の目を楽しませてくれています。

しかし、なぜアルマ望遠鏡で天体の電波画像が得られるのか？ その原理や仕組みを理解している人は多くはないでしょう。電波望遠鏡ですから、電波をキャッチするためのアンテナがあるのは感覚的にわかります。でも、どうしても皆さんのアンテナを組み合わせると、つまり「電波干渉計」を用いると、1つの電波望遠鏡より高解像度の天体の電波画像が得られるのか、なかなか本質的な理解にたどりつけません。そこで今回は、電波干渉計の原理に深く根ざした数学的手法でありながら、その難解さゆえに、一般的な説明では触れられることがほとんどない「フーリエ変換」の概念を紹介しながら、電波干渉計のより精確な理解をめざしてみたいと思います。

いかにもむずかしそうな数式がいくつも出てきます。数学や物理学が苦手な方には、それぞれの式を理解するのはたいへんなことかもしれませんし、残念ながら、誌面の都合で式の変形など、すべてを網羅して掲載できません。しかし、式の中に長さや時間、周波数、エネルギーなど、どのような物理量が使われているのかを眺めるだけでも、多少は理解が進むことでしょう。

●02 光と電波の違い

現在、人類は天文学だけでなく、数学や物理学、さらには工学などさまざまな分野における知見を広め、光だけではなく、ガンマ線から電波、ついには重力波でも天体を観察する技術を確立しています。もちろん、天体を拡大して観察する手法は当初、可視光線を用いた光学望遠鏡が担ってきましたので、まずはなじみの深い光と電波を比べてその特長を捉えてみましょう。

電波も光も電磁波です。なかでも可視光線は目に見えるの

で、その振る舞いを理解するのは、それほど難しいことではありません。目に見えないとはいえ、可視光線に隣接する波長域の紫外線や赤外線は、日焼けや熱の伝搬など、その存在を認識できる現象もあり、可視光線の考え方を拡張すれば比較的理解は容易です。しかし、電波（とりわけ自然界にある微弱なもの）は人の五感ではまったく検知することができません。存在を確認するためには、それに適した「装置」が必要になります。これだけでも、光と比べて理解のためのハードルが高いといえるでしょう。

さらに、検知する手法もそれぞれ大きく異なります。そもそも、電波も光も電磁波ですから「波」として振る舞いますが、これとは別に、ともに「光子」という粒子としての性質も持ち合わせています。

可視光線を検知する場合、一般的には光子の特徴を利用する手法がほとんどです。たとえば、写真です。デジタルカメラは、レンズで作られた景色の像を撮像素子上に結ばせて、光のエネルギーの大きさを記録して画像にしています。ここでいう光のエネルギーの大きさは、単位時間内に捉えられる光子の数です。つまり、デジタルカメラの写真（画像）の明るさの濃淡は、捉えた光子の数の違いを表現したものとれます。フィルムでも同じ理屈で、光を検知する場合のほとんどでは、波の特性を利用してはいません。ところが、電波の場合は、波としての性質を大いに利用します。その原理は、電波を受信機で捉え、電磁誘導によってそこに発生した電流や電圧を検知するわけですが、このとき波の大きさとその時間変化、すなわち「振幅」と「位相」の両方を計測して記録することができるのです。

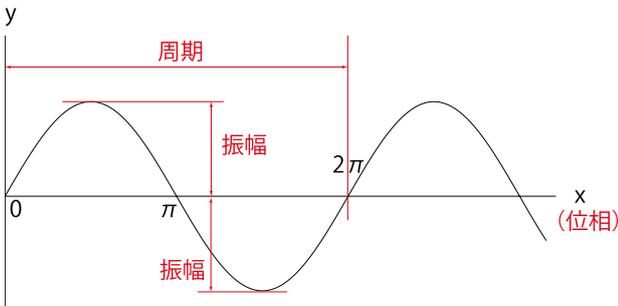
もちろん、光も波ですが、波長500 nm（周波数ではおよそ600 THz）の可視光と波長5 mm（周波数ではおよそ60 GHz）の電波では、波として観測する時間的スケールが1万倍も違います。つまり電波よりも時間的変化が数万倍も速い光は、現代の技術では波として記録することが困難なのです。

ちなみに、これまで光や電波を単純に「波」と表記してきましたが、物理学や数学の世界では、「波動」のことです。何らかの物理量が変化しながら伝搬する現象を示しますが、電波も空間を伝搬する波動の一種です。

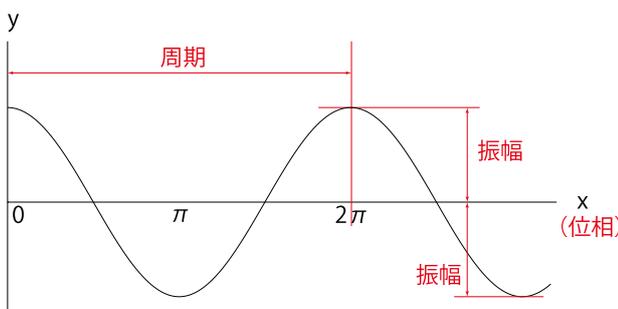
●03 波の基本と干渉

電波の特長や振る舞いを理解するために、波を知ることからはじめましょう。もっとも単純で理解しやすい波の姿は、正弦波 (sin カーブ) でしょう。数学的には、 $y = \sin(x)$ で示される三角関数のグラフです。また、 $y = \cos(x)$ で示される余弦波 (cos カーブ) も単純な波の姿といえるでしょう (図01)。

$y = \sin(x)$ のグラフ・正弦波 (sin カーブ)



$y = \cos(x)$ のグラフ・余弦波 (cos カーブ)



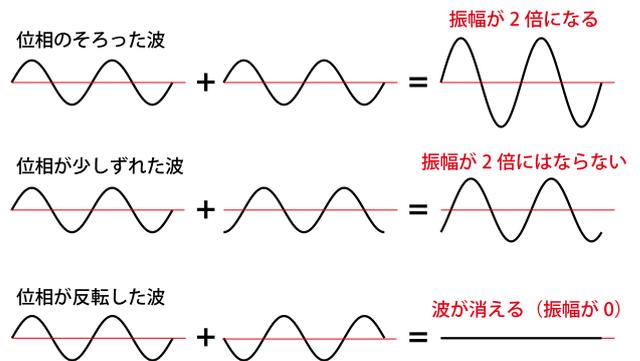
01a もっとも単純な波としての三角関数 $y = \sin(x)$ と $y = \cos(x)$ のグラフ。

します。角周波数 ω に時間 t を乗じることによって、角度が決まります。そもそも位相とは、周期的な波において、ひとつの周期中の位置を示す量です。また、 α は時間 t が 0 の時の「初期位相」を示します。そして、振幅、角周波数、位相が決まれば、波の形が確定することになります。こうした正弦波を表す三角関数のように、一定の周期で同じ形の波が繰り返されるような関数を「周期関数」と呼んでいます。

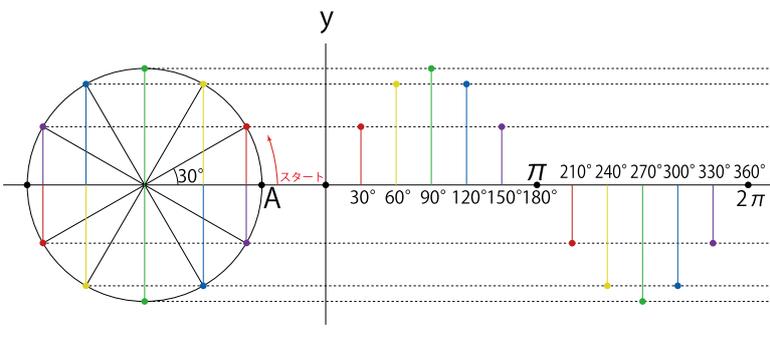
また、波の特長のひとつとして、干渉があります。干渉とはふたつ以上の波が重なり合うことで、波が強め合ったり (振幅が大きくなる)、弱め合ったり (振幅が小さくなる) することです (図02)。

ふたつの同じ形の波を位相をそろえて干渉させれば、振幅が2倍の波になります。また、ふたつの同じ形の波の位相を周期の半分 (180度 = π ラジアン) だけずらして干渉させれば、振幅が0になって波は消失してしまいます。

波が干渉することは、電波干渉計を理解する上できわめて重要な知識といえます。



02 波の干渉。



01b 正弦波は、図のように描くことができます。たとえば、半径1の円の周囲を点Aが反時計回りに回って行くと、x軸からの高さが変わります。x軸に角度、y軸にx=0からの高さをプロットしていくと、「波模様」が描けます。これが、 $y = \sin(x)$ の正弦波で、振幅=1、周期 2π ラジアン (360度) (右かこみ参照) で、点Aが円周をぐるぐると何周もすれば、 2π ラジアンごとに同じ波の形が繰り返され、いわゆる「周期関数」となります。ちなみに、 $y = \cos(x)$ の余弦波のグラフは、点Aのx軸からの高さではなく、y軸からの距離と角度の関係を表したものになります。

ここで、正弦波において、波が時間 t で変換する関数として考えれば、

$$y(t) = A \sin(\omega t + \alpha)$$

と表現できます。

このとき、 A は振幅、 ω は角周波数、そして $(\omega t + \alpha)$ が位相です。振幅は波の大きさ (高さ) を表します。角周波数は単位時間内に位相が何度 (もしくはラジアン) 進むかを表

●角度の表し方と円周率 π

角度の単位としては、一般的に「度数法」の「度 (°)」が用いられています。これは、円の「円周を360等分した弧の中心に対する角度」と定義されています。もうひとつ、数学や波のような物理現象を扱うときなどによく用いられる角度の単位として、「ラジアン (rad)」

があります。「弧度法」とも呼ばれ、「円の半径に等しい長さの弧の中心に対する角度」と定義されます。

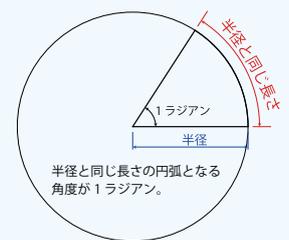
度とラジアンとの関係は以下のように表されます。

$$360(^{\circ}) = 2\pi(\text{rad})$$

$$1(\text{rad}) = 360/2\pi \doteq 57.29578(^{\circ})$$

「 π 」は、円周率 (3.141592...) を表す記号で、円の円周の長ささと直径の比のことです。つまり、半径の長さ (直径の半分) を π 倍するとちょうど半円の円周部分の長さと同じになるので、度数法の180°に相当します。したがって、 2π が360°に相当するわけです。

ちなみにラジアンは、一般的に単位としての「rad」を省略されることが多いので注意しましょう。角度は位相を表すなど、波を扱うときに大切な役割を果たします。



●04 電波望遠鏡の仕組み

前述したように、光と電波は、波として観測しようとする
と、波長が1万倍ほども違います。

そして、この極端に異なる電波と光の波長の差は、観測で
きる「分解能」にも大きな影響を及ぼします。「分解能」とは、
どこまで細かく見分けられるかを示す数値ですが、パラボラ
アンテナの電波望遠鏡を使った場合、おおむね以下のような
式で表せます。

$$\theta \approx \lambda/D$$

θ : 分解能 (ラジアン) λ : 波長 D : アンテナの直径

ちなみに光学望遠鏡の眼視観測での分解能は、経験則から

$$\theta \text{ (秒角)} = 116/D \text{ (mm)} \quad \text{※ドーズの限界式}$$

で表されることが一般的ですが、上記計算式で計算しても結果
にそれほど大きな差はありません。

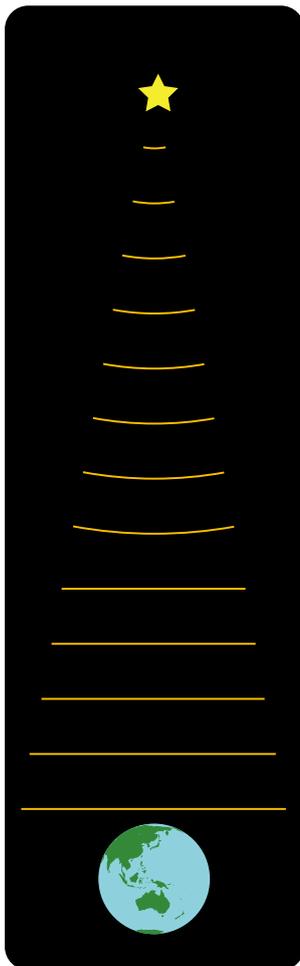
分解能の計算式から、レンズを使った光学望遠鏡やパラボラ
アンテナの電波望遠鏡で光や電波を集めた場合、その直径(口
径)が大きいほど高い分解能が得られることがわかります。ところ
が、電波は光に対して、波長が1万倍も大きいので、たと
えば光の口径10cm (0.1m) の望遠鏡と同じ分解能を電波で
得ようとする、1万倍も大きな口径1000mものパラボラ
アンテナが必要となります。

そんな大きなパラボラアンテナを造ることは現実的ではあ
りませんから、1つの電波望遠鏡で「高い分解能を得ること
=高解像の画像を得ること」が原理的にとても難しいことが
わかります。

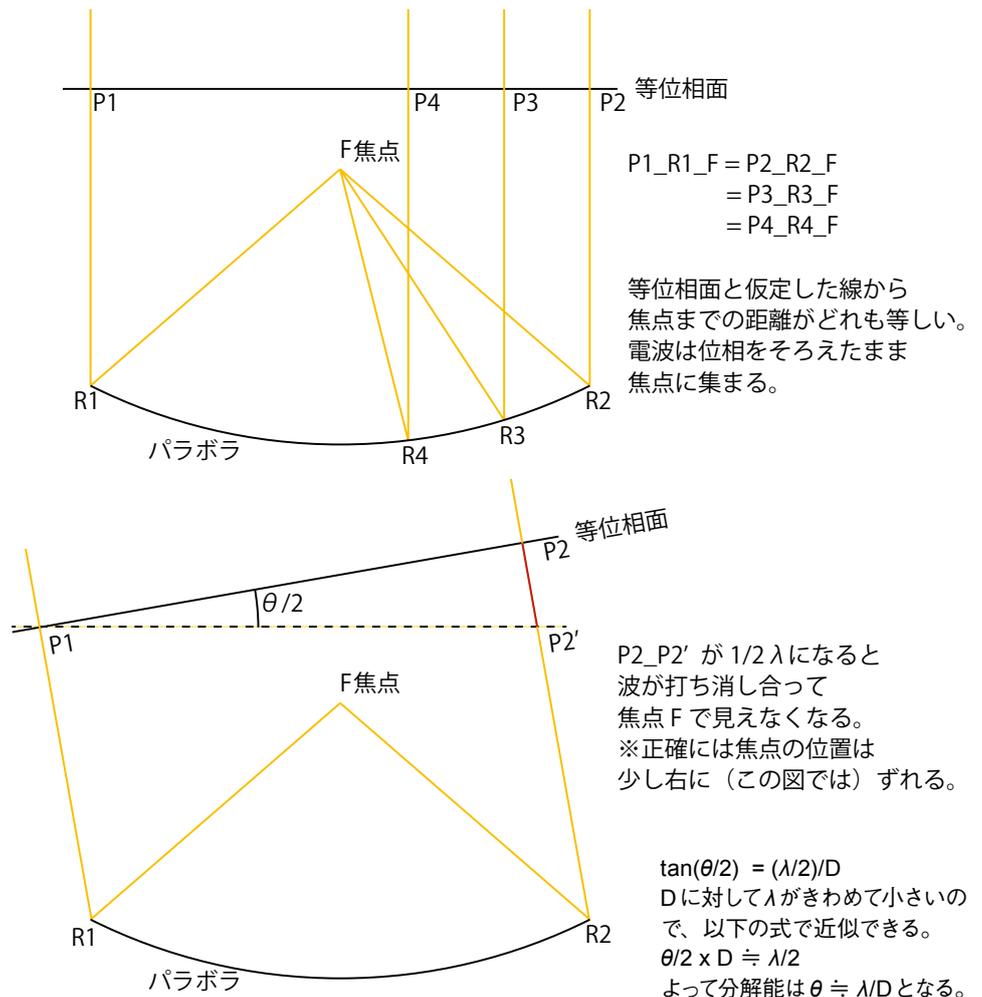
では、電波望遠鏡での実際の分解能はどのくらいかとい
えば、たとえば直径10mのパラボラアンテナの場合、波長
3mm (周波数で約100 GHz) のケースを計算すると、分解能
は約62秒角です。つまり、62秒角より小さな構造を持つもの
は、見分けられないことになります。

ちなみに最も木星が大きく見える頃の視直径が約50秒角
です。光と電波では、性能評価の方法はまったく異なります
が、光学望遠鏡なら木星を口径10cm、100倍程度で眼視観
察すれば、表面の大きな模様は十分に識別できます。しかし、
直径10mのパラボラアンテナ1基だけでは、木星の形をなん
とか確認することができる程度なのです。

ところで、それほど解像度が低いなら、光学望遠鏡を製作
する精度を考えると、アンテナは適当に電波を集める反射面
を持っていればよいような気がします。しかし、電波望遠鏡
の場合は、電波を波として観測する必要があるため、電波の
位相が大切なのです。位相がそろっていないと、どれだけ電
波を集めても、位相の異なる電波どうしが干渉して、波が弱
く(振幅が小さく)なってしまいます。



遠方の天体からの電波は
等位相面が平行に連なってやってくる



03 パラボラアンテナの分解能と視野。

具体的に遠方にある天体から発せられた電波を考えてみましょう。電波の波面は広がりながら地球に届きますが、あまりに遠いので、どんな波長でも同じ位相を持った「等位相面」が平行に連なって進んでくると考えられます。この電波がパラボラの真正面から入射すると、位相がそろったまま焦点に集まります。パラボラの開口面から焦点までは、距離（光路長）が一定だからです。距離が同じなら、位相がずれることはありません。

ところが、電波のやって来る方向がパラボラの真正面からわずかに傾いた場合は、受信機には位相の異なる電波が集められてしまいます。さらに、パラボラ開口径の両端で位相が $1/2$ 周期（ 180 度 $=\pi$ ラジアン）ずれると干渉で波が消えて、電波を捕らえることができなくなります。もちろん、電波のやって来る方向がパラボラの真正面から大きく傾くと、電波は受信機から大きく離れた位置に集まってしまうので、当然のごとく電波を受信することはできません。

つまり、天体からの電波の位相が $1/2$ 周期ずれるだけの角度の2倍（反対側の傾きも加える）がパラボラアンテナで電波を受信できるようになります。すなわちその角度は、パラボラアンテナが一度に見渡せる視野の広さであり、その視野の中の電波をすべて受信できることを考えると、その角度はパラボラアンテナが持つ分解能でもあるのです（図03）。

●位相をそろえたまま電波を集めるパラボラアンテナ

パラボラ（回転放物面）は、光学望遠鏡であるニュートン反射望遠鏡の主鏡にも使われる凹面鏡です。光学望遠鏡の場合、無限遠の一点（例えば、恒星）からやってくる光を反射させて像面の一点に集めるためには、平行光線としてやって来た光の経路長を一定にする必要があります。それを実現できるのがパラボラです。電波の場合も位相を変えずに電波を集めるためには、経路長が一定であるパラボラアンテナが利用されるのです。

ちなみにアルマ望遠鏡を構成する66基のアンテナは、一般的にはパラボラアンテナと呼称されています。しかし、電波を集める大きな面（主鏡）はパラボラですが、そのパラボラの焦点面には電波の受信機はありません。パラボラで反射した電波はさらに回転双曲面の副鏡で反射して受信機に導かれる仕組みなのです。したがって、光学望遠鏡のように分類するならばセグレ式望遠鏡といえるでしょう。

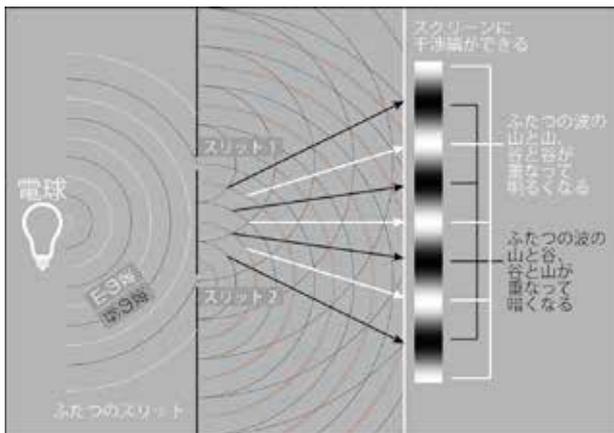


●05 ヤングの干渉実験

もうひとつ、押さえておきたい知識があります。それは、ヤングの干渉実験です。かつて、光は波なのか、粒子なのか、大論争になりました。いまでは、粒子であり、波でもあるとその双方の特長を併せ持つ存在と認識されていますが、その過程でさまざまな科学者がそれぞれの論を主張するための検証を行ってきました。

ヤングの干渉実験とは、トーマス・ヤングが光は波であることを証明した歴史的な物理実験で、1点から発せられる位相のそろった光を、ふたつのスリットに通すと、離れた場所に設置されたスクリーンに明暗の縞模様ができるというものです。

これは、光の波の干渉による結果で、縞模様の明るい部分は、ふたつのスリットを通った光の位相がそろって波の山と谷が重なり合っているところ、逆に暗いところは波の位相が1/2周期（180度＝ π ラジアン）ずれて山と谷が重なっているため、波が消えているところです。この明暗の縞模様を干渉縞と呼んでいます。この結果からヤングは、光は波であると結論付けました（図04）。



04 ヤングの干渉実験の模式図。図はわかりやすく描いたもので、実際にはスリットの幅や、スリット間の間隔はきわめて小さく、スリットからスクリーンまではじゅうぶんに長い距離があるものとします。

干渉縞の明るい縞から隣の明るい縞までの間隔 Δ は、

$$\Delta = L\lambda/d$$

L：スクリーンまでの距離 λ ：波長 d：スリット間隔

という関係式で求められます（ただし、Lがdに対してきわめて大きい場合）。

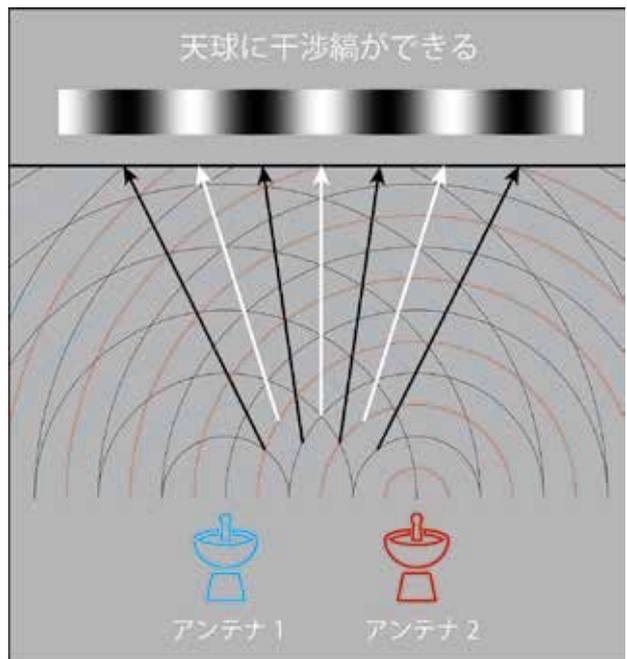
つまり、スリット間のdが大きくなると細かい縞模様の干渉縞となり、波長 λ が大きくなると幅の広い縞模様の干渉縞になります。

縞模様の中央の明るい部分は、二つのスリットまでの距離が同じで、二つのスリットから同時に同じ位相で発せられた光が干渉したものと考えられます。しかし、その両隣の明るい部分は、二つのスリットまでの距離が異なり（光路差がある）、それぞれ位相が1周期分だけずれた波が重なったものとなります。さらにその外側の明るい部分は位相が2周期分ずれているのです。

それでは、この実験で光の進む向きを逆にしてみたらどう

なるでしょう。つまり、位相のそろった光をスクリーンから放射して、ふたつのスリットに光を通すという実験です。このとき、ふたつのスリットを通してきた光のうち、位相がそろっているのは、先の実験において位相のそろった光でできた干渉縞の中央の最も明るい部分から発せられた光だけということになります。

光も電波も電磁波であり、共に波の性質を持っていますから、電波でもこのヤングの干渉実験が同じ結果になるのは明らかです。そこで、スリットをアンテナに置き換え、位相のそろった電波を夜空に発したとします。すると、ヤングの干渉実験の通り、夜空には電波による干渉縞が描けることになります（図05）。

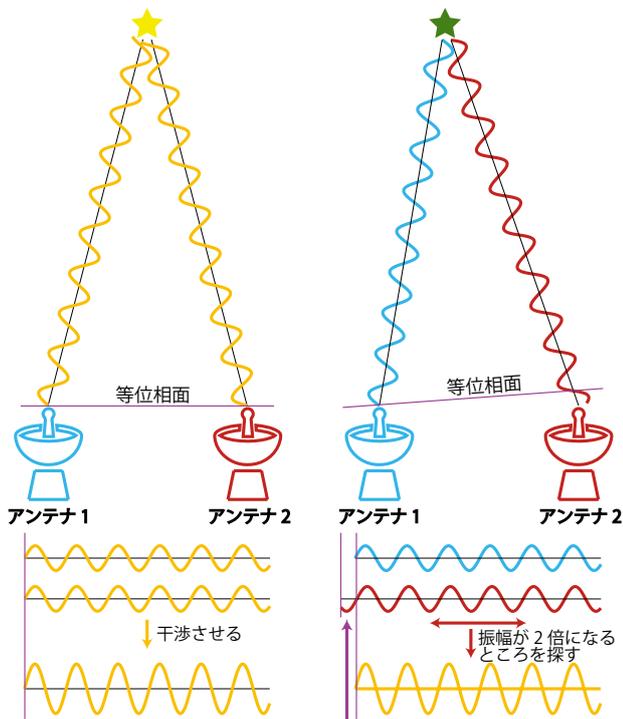


05 ふたつのアンテナを夜空に向けて、位相のそろった電波を放射したとします。位相がそろっているので、天球に電波の干渉縞ができるはずですが。

さらに、光のときと同じく、電波の向きを逆に考えてみましょう。ふたつのアンテナの正面、つまりそれぞれのアンテナから同じ距離の1点を電波源として、電波がやって来たとします。ここで、ふたつのアンテナで同時に電波を受信して、その波形を重ねて干渉させたとき、ふたつの波は同じ位相を持った同じ形の波のはずですから、それぞれの波の高さに比べ、2倍の高さの波になります。

ところが、アンテナの正面から、アンテナ間の基線方向に少しだけ電波源が動いたとします。すると、ふたつのアンテナで受信した電波は、電波源からの距離の違いの分だけ位相がずれた波形になります。そこで、一方のアンテナで受信した電波の波形を基準に、もう一方のアンテナで受信した電波の波形の位相をずらしながら干渉させると、波の山の高さが変わります。そして、最も波の山が高くなった位相の差がわかれば、電波源がアンテナの正面からどのくらいずれた位置に存在しているのかがわかるはずですが（図06）。

このように、ふたつのアンテナで受信した電波のそれぞれの位相のずれを調べていくということが、電波干渉計という観測機器を実現するための最も基本的な考え方なのです。



電波源（天体）からの電波は、ふたつのアンテナに同時に届く。そのまま干渉させる（足し合わせる）と振幅は2倍になる。

干渉させて（足し合わせて）振幅が2倍になるように位相をずらすと、アンテナ2にどれくらい電波が遅れて届いたか、つまり電波源の位置がわかる。

06 離れた位置にあり、ぴったり同じ方向を向いたふたつのアンテナで、電波源（天体）からの電波を受信した場合、アンテナの視野（27ページ参照）の中心に電波源（黄色の星マーク）があれば、同じ位相でふたつのアンテナに同時に電波が届きます。ところが、電波源が視野中心から離れた場所（緑色の星マーク）にあると、それぞれのアンテナまでの距離がごくごくわずかに変わります。距離の違いは、電波の到達時間の違い、すなわち同時に電波を受信しても位相がずれた状態になるのです。電波干渉計では、この位相のずれを利用しているのです。



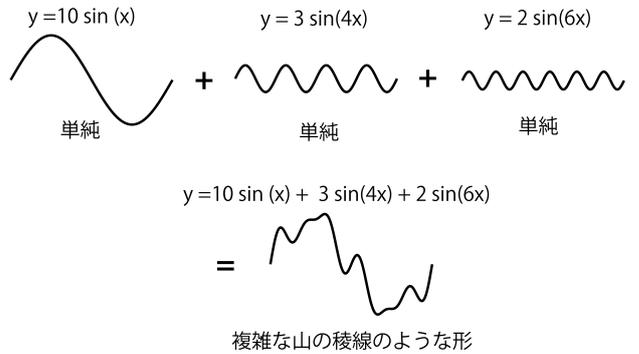
アンテナの動きを写し込んだアルマ望遠鏡と天の川銀河。

●06 フーリエ級数解析やフーリエ変換にあえて足を踏み入れる

電波干渉計の仕組みを理解するうえで、もっとも重要かつ難解な概念が数学的手法の「フーリエ変換」でしょう。波という現象はさまざまな特徴を持っていますが、電波干渉計は波の特徴とフーリエ変換の応用で成り立っているといっても過言ではありません。ここからは、フーリエ変換とは何かを順を追って簡単に説明していきましょう。

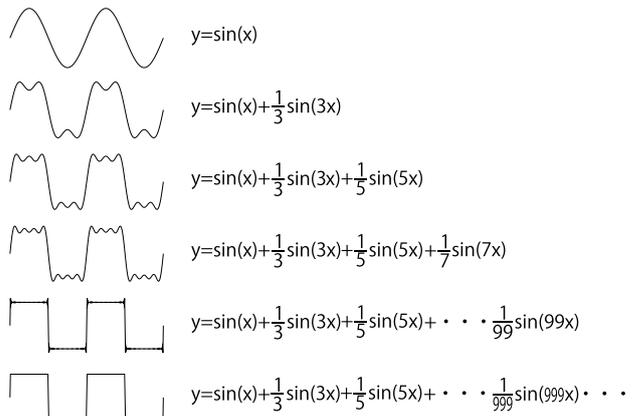
フランスの数学者で物理学者でもあったジョゼフ・フーリエは、物体の熱の伝わり方を式で表そうとしている時に、「フーリエ級数展開」と呼ばれる数学的手法を考え出しました。それは、「任意の関数は、三角関数の級数で近似的に表すことができる」ということです。もう少しわかりやすい言葉に直してみると、「複雑な波の形は、単純な波の形を無限に足し合わせることでほぼ同じものを作ることができる」ということです。

理解するために、まずは単純な三角関数の波を足し合わせてみます（図07）。



07 複雑な波の形は単純な波の足し合わせで作ることができます。

それぞれは単純な波の形ですが、これを足し合わせると、山の稜線のような形になります。言い換えれば、山の稜線のような形は、いくつかの単純な波の形に分解して置き換えることができる、ということなのです。また、波の足し合わせによっては、直線的な形も表現可能です。「矩形（くけい）波」と呼ばれる部分的に直線で示される波形も、単純な三角関数の波の重ね合わせで描くことができます（図08）。



08 「矩形（くけい）波」と呼ばれる直線で構成される形も、単純な三角関数の波の重ね合わせで描くことができます。

ところで、フーリエ級数展開では、周期 2π の周期関数について以下のような式で近似することができます。

$$f(x) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} (a_k \cos(kx) + b_k \sin(kx))$$

$$a_k = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) \cos(kx) dx, \quad k = 0, 1, 2, \dots$$

$$b_k = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) \sin(kx) dx, \quad k = 1, 2, \dots$$

式で示される a_k 、 b_k を「フーリエ係数」と呼んでいます。フーリエ係数は、複雑な波を単純な三角関数の波に分解したとき、その三角関数の周波数ごとの振幅を示したものとえます。つまり、任意の関数に、どのような単純な三角関数がどのくらい含まれているのか、波の成分を選び分けて表組みにしたり、グラフ化するための手法と思えばわかりやすいでしょう。

また、先に矩形波を作った波の足し合わせは、フーリエ級数展開によって、以下のような関数で表すことができます。

$$f(x) = \sum_{k=1}^{\infty} b_k \sin(kx) \\ = \frac{4}{\pi} \left\{ \sin(x) + \frac{1}{3} \sin(3x) + \frac{1}{5} \sin(5x) + \frac{1}{7} \sin(7x) + \dots \right\}$$

展開された式の中に、単純な三角関数の足し合わせがあることがわかります

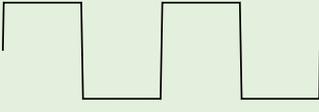
※式の左の $4/\pi$ は、振幅（グラフで表現される波の形の高さ）に関わるだけで、矩形波そのものには影響を与えない係数です。

ここで、矩形波を構成する三角関数の振幅と周波数を表にして、グラフ化してみると、その任意の関数がどのような波の集まりでできているのかが一目瞭然となります。それは任意の関数の波の成分表でもあり、これを「スペクトル」と呼んでいます。

スペクトルは、料理に例えるなら材料一覧といったところでしょうか。「複雑な波の形は、単純な波の形の足し合わせで作ることができる」ということも、「料理の複雑な味は、単純な味の素材を組み合わせて作ることができる」というように考えると、少しは理解しやすいかもしれません (図09)。

★前編はここまでです。

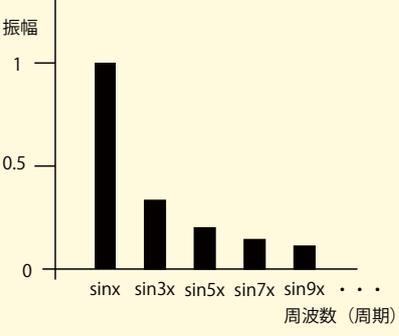
後編は 11 月号に掲載の予定です。いよいよ山場のフーリエ変換を制覇し、電波干渉計がフーリエ変換によって天体の姿を見いだすまでを解説します。いくつかの例を参考にしながら、さらにより深く電波干渉計の仕組みに迫っていく予定です。



$$y = \sin(x) + \frac{1}{3} \sin(3x) + \frac{1}{5} \sin(5x) + \dots + \frac{1}{99} \sin(99x) + \dots$$

カレーライス





カレーの材料



成分ごとに表組みにしてみた

周期	振幅
sinx	1
sin3x	1/3
sin5x	1/5
sin7x	1/7
sin9x	1/9
⋮	⋮
⋮	⋮
⋮	⋮

似ている・・・

カレーのレシピ (4人分)

材料	分量
カレールー	115g
豚肉	350g
玉ねぎ	中 2 個
ジャガイモ	中 1 個
にんじん	小 1 個
サラダ油	大さじ 1
水	750ml

これもスペクトルのようなもの！

※もちろん、カレーは作ったら材料には戻せません。ライスはとりあえず考えないことにします。

09 矩形波とその構成成分であるスペクトルの周波数と振幅をグラフ化と一覧表にまとめてみました。じつは、波とスペクトルは、料理とその材料のような関係に似

ています。カレーライスを作るための材料の一覧表は、「カレーのスペクトルである」と考えることもできるのではないのでしょうか。

アルマ望遠鏡関連2グループが国立天文台長賞を受賞

国立天文台に対して特に顕著な功績があると認められる者を表彰する平成30年度国立天文台長賞が、アルマ望遠鏡に貢献した2グループに送られ、7月30日に表彰式が行われました。

●技術・開発部門

受賞者：小川英夫（大阪府立大学客員教授）

受賞業績：ミリ波・サブミリ波受信機の開発による国立天文台への貢献

★受賞理由となったのは、電波望遠鏡のアンテナで集められた電波を検出して電気信号に変換する受信機の開発です。宇宙からやってくる電波は大変微弱なため、超伝導技術を活用した受信機が多くの電波望遠鏡に搭載されています。一方でこうした受信機は市販されていないため、企業とも連携しながら研究機関や大学が自ら開発してきました。小川氏は、アルマ望遠鏡をはじめとする国立天文台の多くの電波望遠鏡に搭載された受信機の開発に、主導的な貢献をされました。また、現在国立天文台の電波天文分野の中核となる多くの研究者及び技術者を指導されました。これらの小川氏の貢献が、国立天文台および日本の天文学の発展に大きく寄与したことが高く評価され、今回の受賞となりました。

●運営部門

受賞者：澤田剛士 助教、高橋智子 助教、廣田晶彦 助教、奥田武志 准教授、水野範和 教授

受賞業績：合同アルマ観測所国際職員としてのアルマ運用への貢献

★国際協力で進められるアルマ望遠鏡の現地運用を担うため、「合同アルマ観測所（Joint ALMA Observatory：JAO）」がチリに設立されています。JAOには各国から集った天文学者のほか、技術者や事務職員など多様な職員が働いています。今回台長賞を受賞し



台長賞を受賞した小川英夫 大阪府立大学客員教授（右）と、合同アルマ観測所国際職員を代表して表彰状を受け取った澤田剛士 国立天文台助教（左）。中央は常田佐久 国立天文台長。Credit: 国立天文台

た澤田助教、高橋助教、廣田助教はJAOに勤務する国立天文台の天文学者であり、アルマ望遠鏡の科学評価・システム評価活動（試験観測などを通じてアルマ望遠鏡の性能を高め、所期の目標が達成されていることを検証・評価する活動）を牽引しました。また、水野教授はJAOの技術部長として、奥田准教授はJAO技術部門の国際職員として、アルマ望遠鏡の日々の運用を実現するための重要な役割を担ってきました。受賞者5名はいずれもアルマ望遠鏡の安定運用の確立において顕著な貢献を果たし、最前線の活動を通じて国立天文台および日本の研究者の国際的なプレゼンスの向上に寄与したことが高く評価され、今回の受賞となりました。

編集後記

そろそろ「三鷹・星と宇宙の日」の準備が忙しくなってきました。すばる望遠鏡20周年を記念する企画を準備していますので、お楽しみに。(G)

8月恒例の一般公開日。今年はブラックホール関連で日本各地からお越しいただき、ブラックホールスイーツも登場し大盛況でした。(は)

チリから出張帰りの米国ダラス・フォートワース空港。いつも子供への土産の絵本を買っていた空港内の本屋が、今回来てみたら閉店していた。時代の流れとは言い、さびしいなあ。(I)

怒涛のアルマ望遠鏡観測成果プレスリリースからさらにピックアップしてアルマ特集をお届けしました。面白いものがどんどん見えてくるアルマ望遠鏡、今後ぜひご期待ください。(h)

今年の夏は旅行に出かけたりあまりできませんでしたが、スペインから来日したゲスト家族のおかげでよい思い出ができました。言語の垣根を越えたこどものコミュニケーション能力に感服です。(K)

先日、ある先生と話をしていたら、神田で宮沢賢治関連本を数十万円分購入したという。それにしても北回り路線には「やられた」と言っていた。励みにするか、プレッシャーになるか。(W)

夏休みに数年ぶりで馴染みの離島に潜りに行きました。去年の台風でサンゴがずいぶんやられていましたが、もう小さな株があちこちに出てきていました。強いです。(e)

国立天文台ニュース

NAOJ NEWS

No.314 2019.9

ISSN 0915-8863

© 2019 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（副台長）／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／2019年9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）

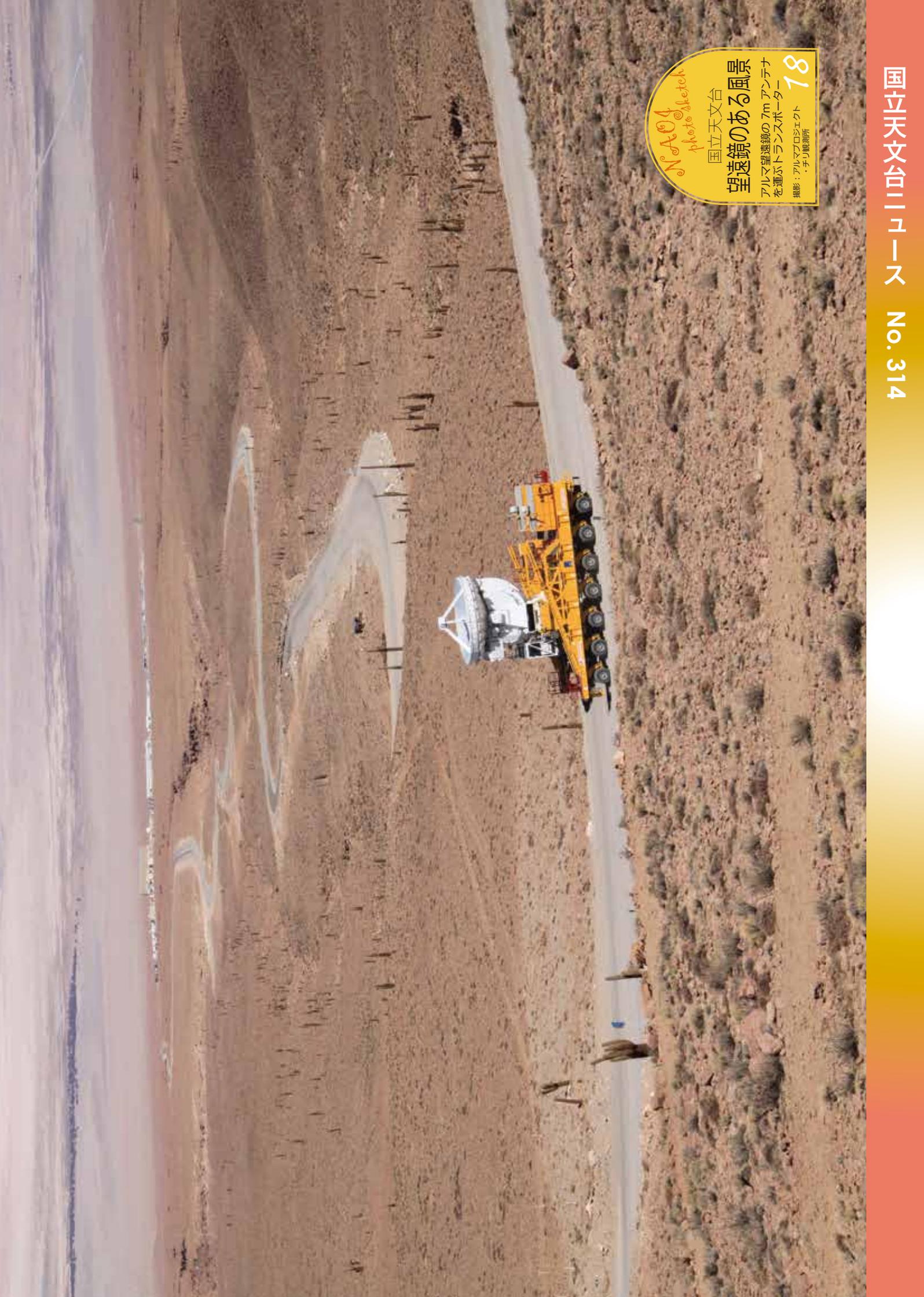
FAX 0422-34-3952（出版室）

国立天文台代表 TEL 0422-34-3600

質問電話 TEL 0422-34-3688

10月号の研究トピックスは、日本とオランダで共同開発された新型超伝導受信機「DESHIMA」をご紹介します。今年の夏も各観測所で開催された夏の特別公開の報告記事も満載です。お楽しみに！

トピックス



NAOJ photo sketch
国立天文台
望遠鏡のある風景
アルマ望遠鏡の7mアンテナ
を運ぶトランスポート
撮影：アルマプロジェクト
・チリ観測所