

自然科学研究機構

NAOJ

国立天文台ニュース

National Astronomical Observatory of Japan

2021年12月1日 No.335

特集 アルマ望遠鏡の10年



- withコロナ時代の国立天文台図書室
- 理科年表2022刊行
- 「PyRAFミニ講習会」開催報告
- 2022年国立天文台カレンダーができました。
- 連載「すばる望遠鏡 HSC Cosmic Gallery」15 NGC 2936

秋冬

2021

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 アルマ望遠鏡の10年

協力／アルマプロジェクト・チリ観測所

●アルマ望遠鏡の10年

平松正顕（天文情報センター）

●最近の研究成果ハイライト

01 原始星まわりの円盤形成初期に存在する惑星形成リング

大橋聡史（理化学研究所）

02 アルマ望遠鏡による原始星周囲の化学組成と天体の進化／物理的環境の関係

谷口琴美（科学研究部）

03 ブラックホールと銀河の始原的な共進化 泉 拓磨（ハワイ観測所）

04 アルマ望遠鏡によって初めて見つけた星形成活動

～塵に隠された初期銀河の発見～

札幌佳伸（アルマプロジェクト／早稲田大学）

●アルマ望遠鏡の同時観測可能周波数帯域の拡大

—超伝導ハイブリッドカプラの開発—

酒井 剛（電気通信大学）

●アルマ望遠鏡運用現場の10年

澤田剛士（チリ観測所）

19 おしらせ

●withコロナ時代の国立天文台図書室

小栗順子（天文情報センター・図書係）

●理科年表2022刊行

片山真人（天文情報センター・暦計算室）

●「PyRAF ミニ講習会」開催報告

磯貝瑞希、巻内慎一郎、小澤武揚（天文データセンター）

●2022年国立天文台カレンダーができました。

23 編集後記／次号予告

24 連載「すばる望遠鏡 HSC Cosmic Gallery」15

NGC 2936

解説：田中賢幸（ハワイ観測所）



表紙画像

アンテナを運ぶトランスポーターとアタカマコンパクトアレイ（ACA）の7mアンテナ群（モリタアレイ）。
[Credit ALMA (ESO／NAOJ／NRAO)]

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）

新型コロナウイルス感染症に
関連した対応について

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しています。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。

国立天文台カレンダー

★予定は変更される場合があります

2021年11月

- 6日（土）4D2Uシアター公開（三鷹）
- 11日（木）防災訓練（安否確認）
- 12日（金）幹事会議／4D2Uシアター公開（三鷹）
- 20日（土）4D2Uシアター公開（三鷹）
- 24日（水）プロジェクト会議
- 27日（土）観望会（三鷹）オンライン開催

2021年12月

- 3日（金）幹事会議
- 4日（土）4D2Uシアター公開（三鷹）
- 10日（金）4D2Uシアター公開（三鷹）／観望会
- 17日（金）幹事会議
- 18日（土）4D2Uシアター公開（三鷹）
- 20日（月）運営会議
- 22日（水）プロジェクト会議
- 25日（土）観望会

2022年1月

- 7日（金）4D2Uシアター公開（三鷹）／観望会
- 15日（土）4D2Uシアター公開（三鷹）
- 20日（木）幹事会議
- 22日（土）観望会
- 25日（火）プロジェクト会議

アルマ望遠鏡の10年

アルマ望遠鏡が16台のアンテナで初期科学運用を開始してから、10年が経過しました。この間、アルマ望遠鏡は惑星の誕生現場を高精細に撮影し、130億年を超える過去の銀河の進化の様子を明らかにし、また様々な天体に複雑な有機分子を見出してきました。ここではごく簡単に、その10年を振り返ってみます。

協力／アルマプロジェクト・チリ観測所

平松正顕
(天文情報センター)



2011年9月30日（チリ時間）、アルマ望遠鏡山麓施設コントロールルーム。

観測スタッフが見つめるモニターに、一つの点が打たれました。アルマ望遠鏡が、世界の科学者からの提案に基づいて初めて天体に向けられ、その天体からの電波がアンテナで集められ、受信機に入り、デジタル信号に変換されて光ファイバーを通り、相関器によって正しく処理されたことを示すものでした。スタッフたちは晴れやかな顔で祝福の拍手を送りました。こうして、天文学の新たな一歩が踏み出されたのです。

アルマ望遠鏡の公式キャッチフレーズは“*In Search of Our Cosmic Origins*”です。日本語にするなら「宇宙に私たちの起源を探る」。アルマ望遠鏡が観測するミリ波・サブミリ波（波長数mmから1mm以下くらいの波長の短い電波）は宇宙の様々な物質から放出されていて、なかでも、星や惑星、そして銀河の材料となる低温のガスや塵（ちり）がアルマ望遠鏡の主要な観測対象です。アルマ望遠鏡は、東アジア・欧州・北米の国際協力によって開発された高性能な観測装置を

組み合わせることで、比類なき高感度・高解像度を実現することができます。この素晴らしい性能を活かし、アルマ望遠鏡はこの10年間で、太陽系内から宇宙の夜明けの時代に至るまでの様々な宇宙の謎を明らかにし、また新しい謎を呼び込んできています。まさに、天文学を大きく前進させているのです。

●惑星の誕生現場を目撃する

4000を超える太陽系外惑星が発見されている今、惑星の誕生、特に惑星の多様性の起源を探ることは天文学の大きなテーマのひとつです。アルマ望遠鏡はその高い解像度を活かして、多数の若い星の周りのガスと塵の円盤（原始惑星系円盤・図01）を高精細に

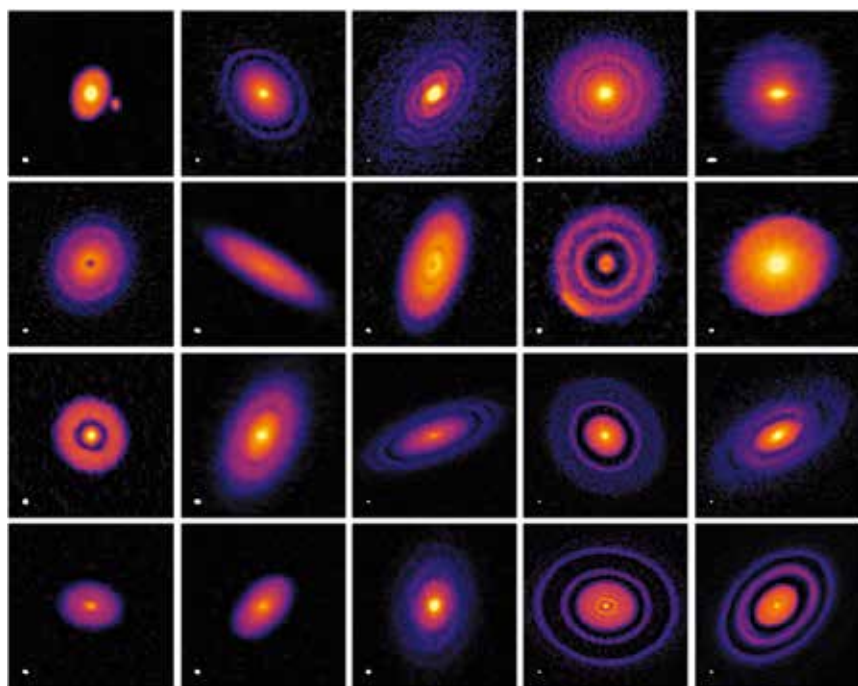


図01 アルマ望遠鏡が観測したたくさんの原始惑星系円盤。細いリング、太いリング、渦巻構造、のっぺりしたリングなど、さまざまな円盤があります。左下の白い点はそれぞれの画像の解像度を表しています。Credit: ALMA (ESO/NAOJ/NRAO)/S. Andrews et al.

撮影することに成功しました。2014年に発表されたおうし座HL星の画像は、研究者に大きな衝撃を与えました。幾重にも入った同心円状の隙間が、惑星形成が予想よりも短い時間で進んでいる可能性、あるいは円盤内での複雑な物理的過程の存在を示していたからです。その後も原始惑星系円盤の高解像度観測が進み、多様な構造が明らかになってきました。さらに若い原始星の周囲での惑星形成の兆候が捉えられたり（本特集中、大橋さんの記事p08-09参照）、原始惑星系円盤の隙間の中で作られた惑星周囲の円盤（衛星が作られる現場？）が写し出されたり（図02）と、原始惑星系円盤の構造と惑星誕生現場の研究はさらに前へと進んでいます。

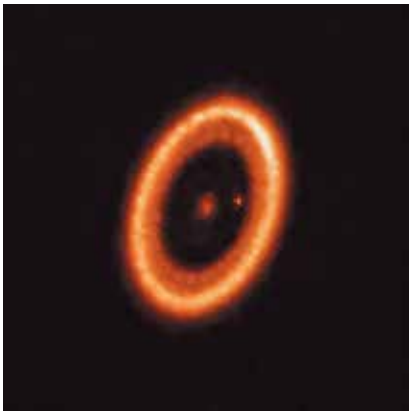


図02 若い星PDS 70のリング状円盤。中央やや右の光点の位置に惑星PDS 70cがあり、惑星周囲の塵円盤が捉えられました。Credit: ALMA (ESO/NAOJ/NRAO)/Benisty et al.

●銀河の誕生と進化を追う

数千億の星を持つ銀河は、138億年の宇宙の歴史のなかでいつ生まれ、どのように成長してきたのでしょうか。遠方の銀河、つまり太古の昔に存在した銀河に含まれる酸素や炭素を含むガスが放つ光は、宇宙の膨張に伴って波長が伸び、アルマ望遠鏡で観測できるミリ波・サブミリ波となって地球に届きます。アルマ望遠鏡は、130

億年を超える過去に存在した銀河を探る手法を確立しました。それは、2階電離した酸素が放つ光を捕まえることでした。日本の研究チームが開拓したこの手法により、酸素の最古検出記録は2016年からの2年間で131億年前、132億年前、132億8000万年前（図03）と着実に更新され、宇宙誕生から約2億5000万年が経過したころにはすでに銀河の中で活発に星が作られていたことが明らかになりました。さらに、ガスが放つ電波のドップラー効果を測定して、銀河内のガスの動きを解き明かすこともできます。一連の研究によれば、120億年以上昔の銀河の中にも、天の川銀河のように整然と回転していたものがあったことがわかってきました。小さな銀河が激しく衝突しあって銀河が成長するという従来のシナリオとは相反する結果であり、理論予測より銀河は早く成熟していたの

です。また、これまで見えていなかった塵に隠れた銀河（可視光/赤外線観測だけでは見逃していた銀河）も多数発見され（本特集中、札本さんの記事p14-15参照）、宇宙初期の全体像を描き出す試みも大きく進んでいます。

●生命につながる分子を求めて

現時点で地球外生命の物質的な組成を仮定するのは困難ですが、地球型の生命を想定するなら、炭素や酸素が結合した有機化合物がその材料となりうるでしょう。多様な有機分子が放つ電波の観測も、アルマ望遠鏡は得意としています。科学観測に入る前の性能確認観測で得られたデータの解析から有機分子グリコールアルデヒド（単純な糖類）が原始星周囲に発見されたことは、アルマ望遠鏡の威力を物語るものと言えます。その後も、アミノ酸にみられる分岐



図03 132億8000万年前の銀河MACS1149-JD1（緑色）を、ハッブル宇宙望遠鏡が観測した銀河団の画像に合成。銀河団の重力レンズ効果により、遠方銀河を詳しく調べることができました。Credit: ALMA (ESO/NAOJ/NRAO), NASA/ESA Hubble Space Telescope, Hashimoto et al.

した炭素骨格を持つ有機分子やアミノ酸の合成に使われる有機分子など、多様な有機分子がアルマ望遠鏡によって検出されています。さらに、惑星誕生現場である原始惑星系円盤においてもさまざまな有機分子が発見され、円盤内におけるメタノールの分布も描き出されました（図04）。中心星からの距離によって、またリングなど円盤の構造によって、円盤内の化学反応もさまざまに変化します。生命の材料となりうるような分子はどのように合成され、どこに分布するのか。これを解き明かしていくことは、原始太陽系での生命関連分子のようすを解き明かすこと、つまり私たちのルーツを探ることに直結する興味深いテーマと言えます。また、化学組成を手掛かりにして天体の進化そのものを探る研究も、盛んにおこなわれています（本特集中、谷口さんの記事p10-11参照）。

●闇に輝くブラックホール

ここまでにご紹介した3つのテーマがアルマ望遠鏡の科学目標3本柱ですが、それ以外でもアルマ望遠鏡は活躍しています。その代表例は、ブラックホール。2019年4月に大々的に発表された、楕円銀河M87の中心にある超巨大ブラックホールの影の画像の撮影にも、アルマ望遠鏡は大きく貢献しました。世界中の6か所8局の電波望遠鏡が一斉にブラックホールを見つめたイベント・ホライズン・テレスコープ（EHT）の観測に、アルマ望遠鏡は最も高い感度を持つ望遠鏡として参加しました。さらに、超巨大ブラックホール周辺の磁場や銀河ケンタウルスA中心部から放たれる高速のジェットなど、EHTでしか見ることのできない宇宙の姿を描き出

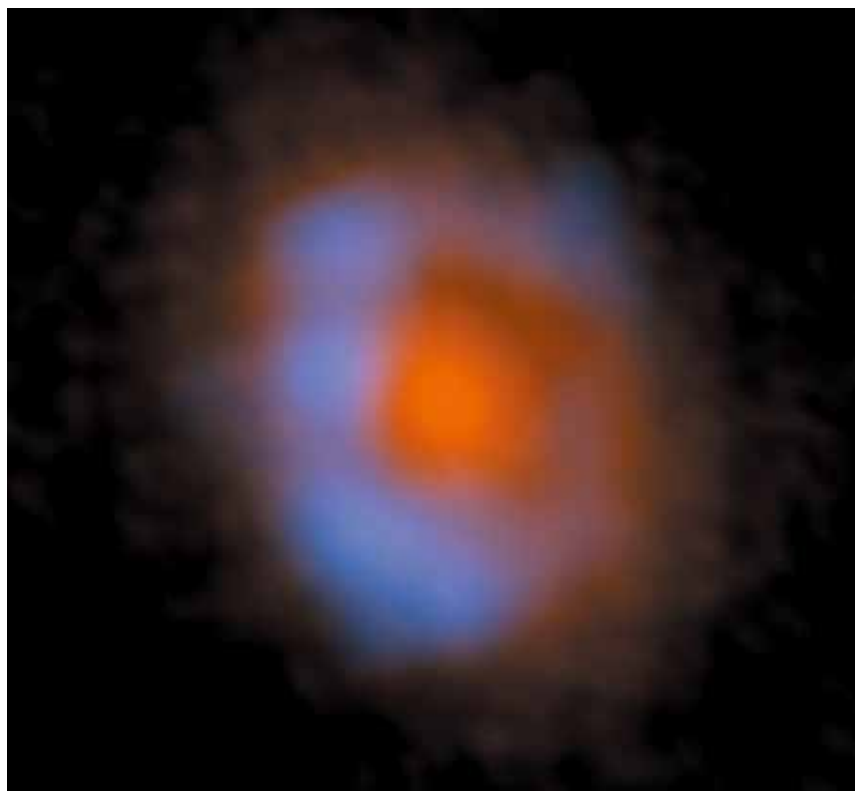


図04 アルマ望遠鏡で観測した「オリオン座V883」の疑似カラー画像。塵の分布をオレンジ、メタノール分子の分布を青で示しています。Credit: ALMA (ESO/NAOJ/NRAO), Lee et al.

しています。また、ブラックホールそのものの観測だけでなく、ブラックホールと周囲の銀河の関係も天文学研究の大きなテーマです。「大きな銀河の中心に大きなブラックホールがある」という単純な関係は銀河とブラックホールの「共進化」と呼ばれ、超巨大ブラックホールと銀河双方の誕生と進化の謎を解く手がかりとして注目されています（本特集中、泉さんの記事p12-13参照）。超巨大ブラックホールが周囲の銀河の星形成環境にどんな影響を与えるのか、吹き出すジェットは銀河の将来をどう左右するのか、アルマ望遠鏡は高感度・高解像度を活かしてその秘密を解き明かそうとしています。

●まだまだ続く、アルマ望遠鏡の快進撃

もちろん、アルマ望遠鏡は今後も観測を続けます。しかも、性能

を格段に向上させながら。2020～30年代にアルマ望遠鏡がどんな天文学を展開すべきか、そのためにどんな開発が必要かが国際的に議論され、「アルマ望遠鏡将来開発ロードマップ」がまとめられました。これに沿って日本が実施する機能強化のための開発と運用は、「アルマ2計画」としてまとめられています。現在の性能に比べて感度を約2倍、解像度を2倍以上、同時観測可能な周波数帯域を2倍以上に拡張することで、地球型惑星形成領域における惑星系形成過程の理解を進め、惑星系誕生過程での生命素材物質の理解の飛躍的前進をもたらす、宇宙における元素合成の開始地点の探究を進める計画です。そのための技術開発も、順調に進んでいます。アルマ望遠鏡がこの後どんな宇宙を見せてくれるのか、どんな謎を解いてくれるのか、そしてどんな新たな謎を見つけ出してくれるのか。引き続き、ご注目ください。

写真で振り返るアルマ望遠鏡運用の10年

2011.09.30

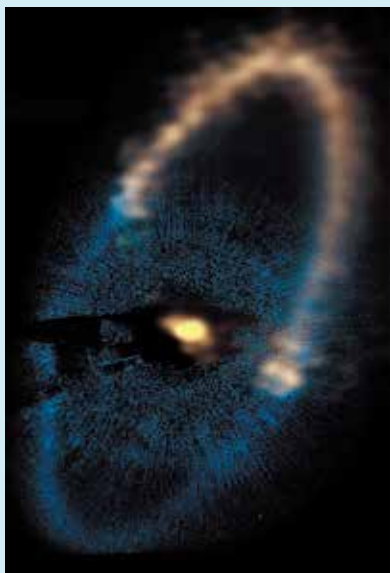
アルマ望遠鏡 16台のアンテナで初期科学観測を開始。試験観測で得られた触角銀河（アンテナ銀河）の画像を、ハッブル宇宙望遠鏡が撮影した画像と合成して発表。



Credit: ALMA (ESO/NAOJ/NRAO). Visible light image: the NASA/ESA Hubble Space Telescope

2012.04.12

最初の科学観測成果論文に基づくプレスリリースを発表：フォーマルハウトの塵のリングを高い解像度で撮影。



Credit: ALMA (ESO/NAOJ/NRAO). Visible light image: the NASA/ESA Hubble Space Telescope
Acknowledgement: A.C. Boley (University of Florida, Sagan Fellow), M.J. Payne, E.B. Ford, M. Shabran (University of Florida), S. Corder (North American ALMA Science Center, National Radio Astronomy Observatory), and W. Dent (ALMA, Chile), P. Kalas, J. Graham, E. Chiang, E. Kite (University of California, Berkeley), M. Clampin (NASA Goddard Space Flight Center), M. Fitzgerald (Lawrence Livermore National Laboratory), and K. Stapelfeldt and J. Krist (NASA Jet Propulsion Laboratory)

2013.03.13

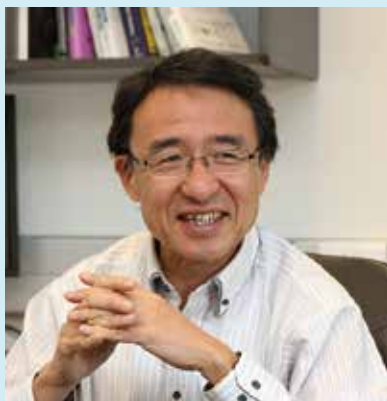
アルマ望遠鏡山麓施設にて開所式を挙行、セバスティアン・ピニェラ チリ共和国大統領他各国の来賓を迎えて、本格運用への移行を祝福。



Credit: ALMA (ESO/NAOJ/NRAO)

2013.03

2012年5月にチリにて死去した森田耕一郎教授の功績をたたえ、日本が開発したアタカマコンパクトアレイ (ACA) の愛称を「モリタアレイ」とすることを決定。



Credit: 国立天文台

2013.04.26

日本が開発した16台のアンテナの山頂施設設置完了。アンテナ設置後に肩を組んで喜ぶ国立天文台および合同アルマ観測所、三菱電機のスタッフたちです。



Credit: ALMA (ESO/NAOJ/NRAO), O. Mendez (NAOJ)

2013.10.26

最高周波数帯「バンド10」で干渉計試験に成功し、観測史上最高周波数での電波干渉計が誕生。新しい観測が成功するたびに、スタッフはコントロールルームで記念写真を撮りました。



Credit: ALMA (ESO/NAOJ/NRAO), T. Sawada (NAOJ/ALMA)

2014.02.18

日本が製造を分担した全219台の受信機の出荷が完了。ひとつひとつを丁寧に組み立て、性能確認し、梱包し、チリに送り出しました。



Credit: ALMA (ESO/NAOJ/NRAO)

2014.06.13

66台目となる最後のアンテナを山頂施設に設置。最後を飾ったのは欧州製の口径12mアンテナでした。



Credit: Ariel Marinkovic / X-Cam

過去の国立天文台ニュースアルマ特集号は、以下のページにまとめてあります。
この10年を詳しく振り返りたい方はぜひご覧ください。 <https://alma-telescope.jp/publish>

2014.11.06

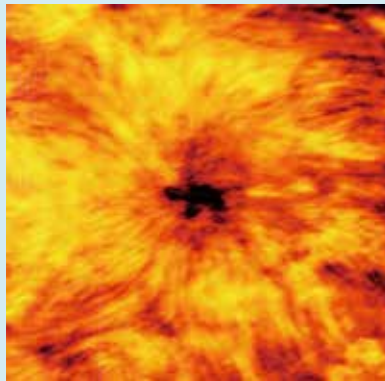
高解像度試験観測で撮影した若い星おうし座HL星のまわりの原始惑星系円盤の画像を公開。



Credit: ALMA (ESO/NAOJ/NRAO)

2017.01

試験観測を経て、太陽の観測を正式に開始。



波長1.25mmの電波でアルマ望遠鏡が撮影した太陽黒点。

Credit: ALMA (ESO/NAOJ/NRAO)

2020.01.30

アルマ望遠鏡の機能強化計画「アルマ2」が、日本学術会議第24期学術の大型研究計画に関するマスタープランにおいて、重点大型研究計画に選定。

2020.03.22

チリにおける新型コロナウイルス感染症拡大防止のため、観測を一時的に停止。

2020.09.24

アルマ望遠鏡の機能強化計画「アルマ2」が、文部科学省「学術研究の大型プロジェクトの推進に関する基本構想 ロードマップの策定」に掲載。

2014.12

アルマ望遠鏡国際研究会『Revolution in Astronomy with ALMA -The 3rd Year-』を東京で開催。



Credit: ALMA (ESO/NAOJ/NRAO)

2017.11

アルマ望遠鏡将来開発ロードマップを策定。2020～2030年代にかけてアルマ望遠鏡の性能をさらに向上させるためのガイドラインとなります。



2021.03.17

観測停止から1年を経て、科学観測を再開。

2021.09

観測開始10周年を記念して、66台のアンテナに名前を付けるキャンペーンを実施。一般からの命名提案と投票をもとに、天体名とクンザ語（アルマ望遠鏡の地元の伝統的な言語）の単語からそれぞれ33の名前がつけられました。

2019.04.10

イベント・ホライズン・テレスコープによるM87中心ブラックホールの画像を公開。アルマ望遠鏡は参加8局の中で最も高感度の望遠鏡として、撮影に大きく貢献しました。



Credit: EHT Collaboration.

2015.12.15

自然科学研究機構、全米科学財団、欧州南天天文台がアルマ望遠鏡運用に関する三者協定に署名。三者によるアルマ望遠鏡の国際協力運用を今後20年にわたって継続する枠組みが確定しました。



Credit: ALMA (ESO/NAOJ/NRAO)

原始星まわりの円盤形成初期に存在する惑星形成リング

大橋聡史
(理化学研究所)



●見えてきた惑星形成の誕生現場

アルマ望遠鏡の高解像度観測によって、原始惑星系円盤の様々な構造が明らかになってきました。中でもおうし座HL星にある原始惑星系円盤★01は多くの人が一度は目にしたのではないのでしょうか。最近の観測ではおうし座HL星の円盤と同様に多くの原始惑星系円盤でリングやギャップ（すきま）構造が見られ、このような円盤構造を作る物理的要因が活発的に議論されています。例えば、リングを形成する有力な候補として惑星の存在が指摘されています。形成途中の惑星（の種）が円盤に誕生すると、その重力によって周囲の物質は惑星に取り込まれ、惑星の軌道上はギャップになると考えられています。そのため、惑星が存在する場所ではギャップが見られ、その内側と外側はリング構造が観測されます。実際に、ある原始惑星系円盤（HD 163296）では惑星によって一酸化炭素（CO）分子ガスがケプラー回転から乱されていることも報告されています。このように原始惑星系円盤ではすでに、惑星が誕生している、あるいは誕生しつつある様子が明らかになってきました。

また、これらの驚くべきアルマ望遠鏡の結果は新たな疑問を生み出しました。それは、「惑星が形成していく様子を観測しようと思ったら、すでに惑星が誕生していた。では、いつ惑星形成が始まっていたのか？」という点です。これまで観測していた天体よりも若い天体ですすでに惑星形成が開始しているのでしょうか？

●従来よりも早い惑星形成を示唆する円盤の描像

私たちは、非常に若い天体おうし座L1527原始星をアルマ望遠鏡とVLAで詳細に観測しました。L1527原始星はアルマ望

遠鏡の初期運用から多くの観測が行われている有名な天体です。その理由として、地球近傍の星形成領域であるおうし座分子雲にあるため高解像度の観測が可能のためです。これまでの観測によって、この天体の周囲の物質が原始星へと落下しながら原始星まわりに円盤を形成している様子が明らかになっています。また、この円盤はエッジオン（edge-on）構造をしており、地球からは円盤を横から見ているため、円盤を形成する様子を詳しく調べることができます。

今回、私たちはVLA望遠鏡★02による波長7mmの連続波観測を行い、円盤の中心付近（半径15天文単位程度）に南北に電波強度の強い箇所（クランプ）を発見しました。天体を横から見ているため、この南北のクランプはリング構造の断面を見ている可能性が考えられます（図01）。実際、この発見後には似たような別の若い天体（IRS 63）でも円盤にリング構造を発見した例が報告されています。このように円盤がまだ成長途中の非常に若い天体で、すでにリング構造が存在するのは、とても驚く

★ newscope <解説>

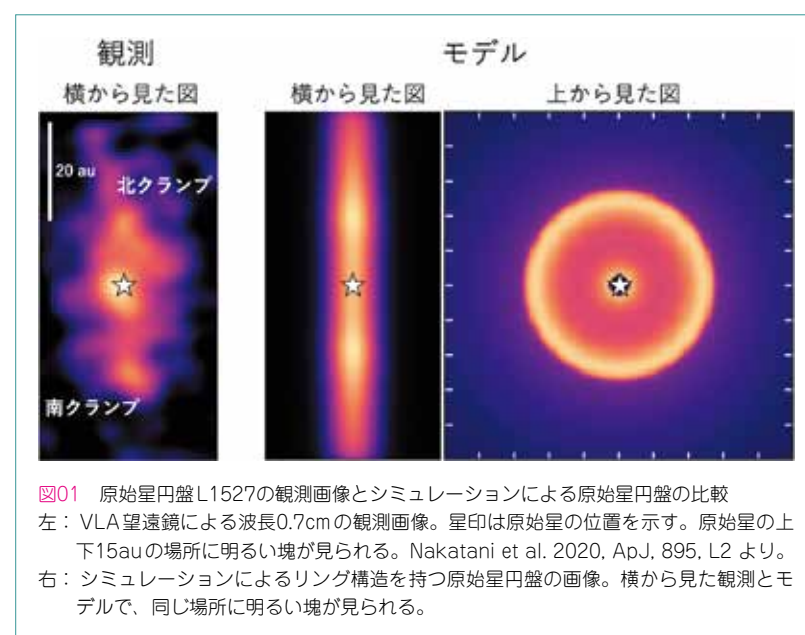
★01



アルマ望遠鏡が捉えたおうし座HL星の原始惑星系円盤。

★02 VLA望遠鏡

カール・ジャンスキー超大型干渉電波望遠鏡群（Karl G. Jansky Very Large Array, 略称VLA）は、アメリカ国立電波天文台が運用する電波望遠鏡である。直径12mのアンテナ27台を米国ニューメキシコ州に設置し、一つの超高性能な電波望遠鏡として運用している。



結果です。これは円盤を形成しながら、同時に惑星形成も行いうという、とてもダイナミックな惑星形成を示唆する結果となりました。

●星間微粒子の成長が惑星形成の第一歩

以上のように近年（特に2020年以降）のアルマ望遠鏡やVLA望遠鏡による高解像度の観測によって、円盤が形成途中で既にリング構造が存在することがわかってきました。そこで私たちは、このようなリング構造が惑星形成によるものではないかと考えました。惑星形成の最初のステップは0.1マイクロメートル程度の星間微粒子（塵）が、円盤の中で互いに付着しながら小石ぐらいの大きさへと成長する過程と捉えることができます。そこで私たちは円盤における星間微粒子の成長シミュレーションを行い、アルマ望遠鏡やVLAでどのように円盤が観測されるのか調べました。その結果、観測結果と同様に円盤にリング構造が現れることを発見しました（図02）。これは、星間微粒子がミリメートルサイズまで成長すると効率よく熱放射を行うことで、アルマ望遠鏡やVLAの観測波長帯で明るく見えるためです。つまり、リング構造は星間微粒子がミリメートルサイズまで成長している証拠でもあります。

さらにシミュレーションではリングの位置が時間と共に外側へと移動する様子も明らかになりました。その結果、リングとして見える位置は中心星の質量と円盤の年齢、そして星間微粒子とガスの質量比にのみ依存することがわかりました。これは、温度構造や乱流場などの様々な円盤固有の物理状態によらず一般的にリング構造が円盤では現れることを意味します。実際に、これまで観測で見つかっているリングの位置と今回シミュレーションで予想するリングの位置を比べると、100万年よりも若い天体ではリングの位置が非

常によく一致していることが確認できました。つまり、近年になって見つかってきている原始星円盤のリング構造は微粒子の成長によるものであることを示唆しています。

●将来の展望

私たちは、原始星円盤のリング構造が星間微粒子の成長、つまり惑星形成の最初のステップによって現れるものであることを示しました。これは従来の惑星形成論よりも大幅に早く惑星形成が始まっている可能性を示しています。今後はさらに詳細に円盤の構造を明らかにし、星間微粒子のサイズを観測から測定することが重要となります。そのためには、幅広い波長帯で星間微粒子を観測し、その波長依存性を調べるのが鍵となります。アルマ望遠鏡も重要な観測となりますが、VLA望遠鏡や次世代望遠鏡（例えばngVLAやSKAなど★03）といったセンチ波帯での観測なども合わせて、様々な望遠鏡を駆使した観測によって惑星形成の最初のステップが明らかになると期待されます。

★ newscope <解説>

★03 ngVLAとSKA

ngVLA (next generation Very Large Array) とSKA (Square Kilometer Array) は主にセンチ波やメートル波の観測波長帯で、これまでよりも一段と多くのアンテナを用いて天体を観測する、次世代の大型干渉計望遠鏡である。SKAは建設中、ngVLAは計画段階であるが、完成すればこれまでよりも格段に高い感度と分解能での観測が可能となる。

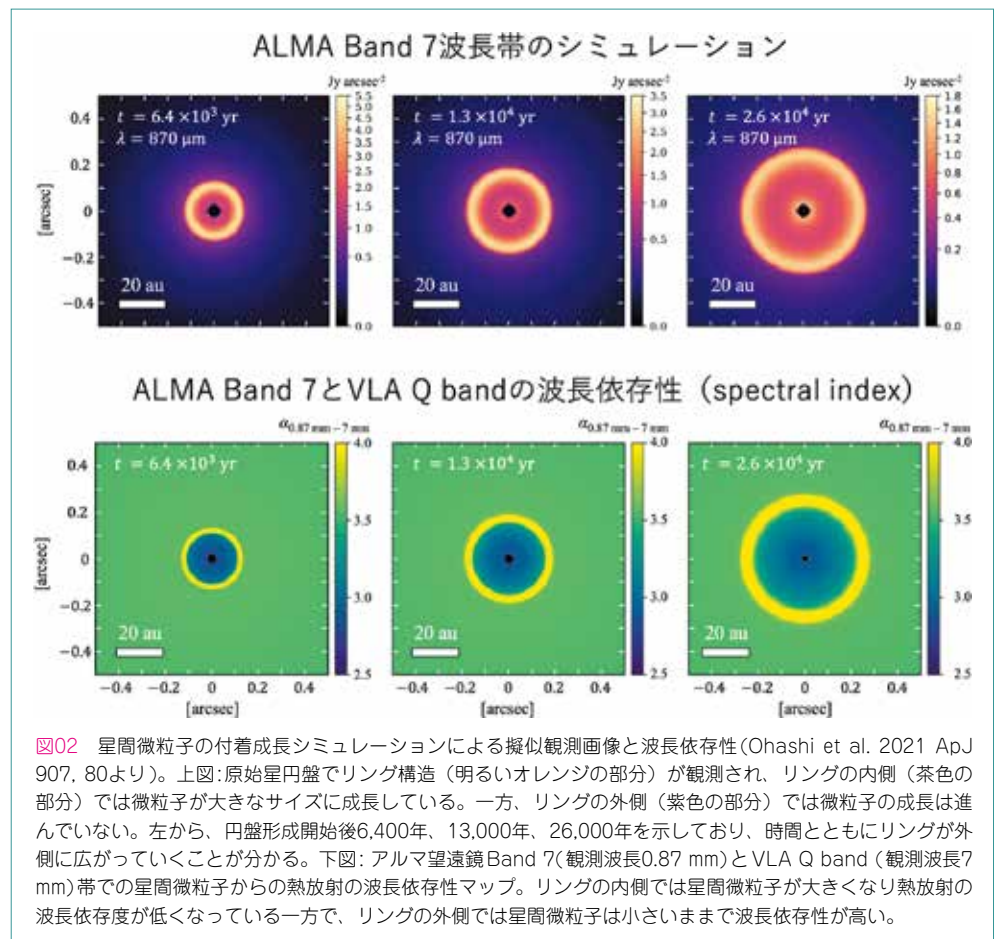


図02 星間微粒子の付着成長シミュレーションによる擬似観測画像と波長依存性(Ohashi et al. 2021 ApJ 907, 80より)。上図:原始星円盤でリング構造(明るいオレンジの部分)が観測され、リングの内側(茶色の部分)では微粒子が大きなサイズに成長している。一方、リングの外側(紫色の部分)では微粒子の成長は進んでいない。左から、円盤形成開始後6,400年、13,000年、26,000年を示しており、時間とともにリングが外側に広がっていくことが分かる。下図:アルマ望遠鏡Band 7(観測波長0.87 mm)とVLA Q band(観測波長7 mm)帯での星間微粒子からの熱放射の波長依存性マップ。リングの内側では星間微粒子が大きくなり熱放射の波長依存度が低くなっている一方で、リングの外側では星間微粒子は小さいままで波長依存性が高い。

アルマ望遠鏡による 原始星周囲の化学組成と天体の進化/ 物理的環境の関係

谷口琴美
(科学研究部)

●大質量星形成領域の環境と星の進化を 化学組成の観点から探る

化学組成は天体の進化段階や物理環境（温度、密度、紫外線など）と関連しています。さらに、化学組成から得られる情報は、観測した時点だけのものだけでなく、過去の情報も含んでいると言えます。このような特徴を活かして、化学組成から星形成領域の物理環境や星形成過程について迫ることができると期待されます。

太陽の8倍以上の質量を持つ大質量星は、星が集団で生まれている領域（クラスター領域）内で誕生しており、低質量星形成領域よりも太陽系から遠いところに位置しています。また、大質量星の進化は低質量星に比べて速いという特徴があります。これらの特徴は観測の困難さをもたらし、大質量星周囲の化学に関する研究は、低質量星の研究に比べて遅れていました。しかしアルマ望遠鏡の稼働により、大質量星周囲の高空間分解能・高感度のデータが得られ、大質量星周囲の化学組成に関する研究も進んできました。

●同じ領域内の大質量星周辺の化学組成 の比較

多くの星は連星系を成しています。IRAS 16562-3959大質量星形成領域内にあるG345.5+1.47大質量原始星の周辺には、複数のコア（高密度ガスのあつまり）が存在しています。私たちは、この領域のアルマ望遠鏡のデータを用いて、この領域内で大質量星が付随する3つのコアの化学組成を比較し、化学組成と天体の進化段階との関係を調べました。

図01の上のパネルは、有機分子のメタノール（ CH_3OH ）と水素の再結合線（ H_3O^+ ）の空間分布を示しています。Core Aにはメタノール輝線が付随しておらず、 H_3O^+ 輝線が付随していますが、Core BとCore Cはそ

の逆の特徴があります。Core Aに電離状態の水素があることを示す H_3O^+ 輝線があることから、この大質量星はすでに電離水素領域を形成するくらいに進化が進んでいる一方、残りの2つはまだ電離水素領域がなくより若い段階にあることわかります。

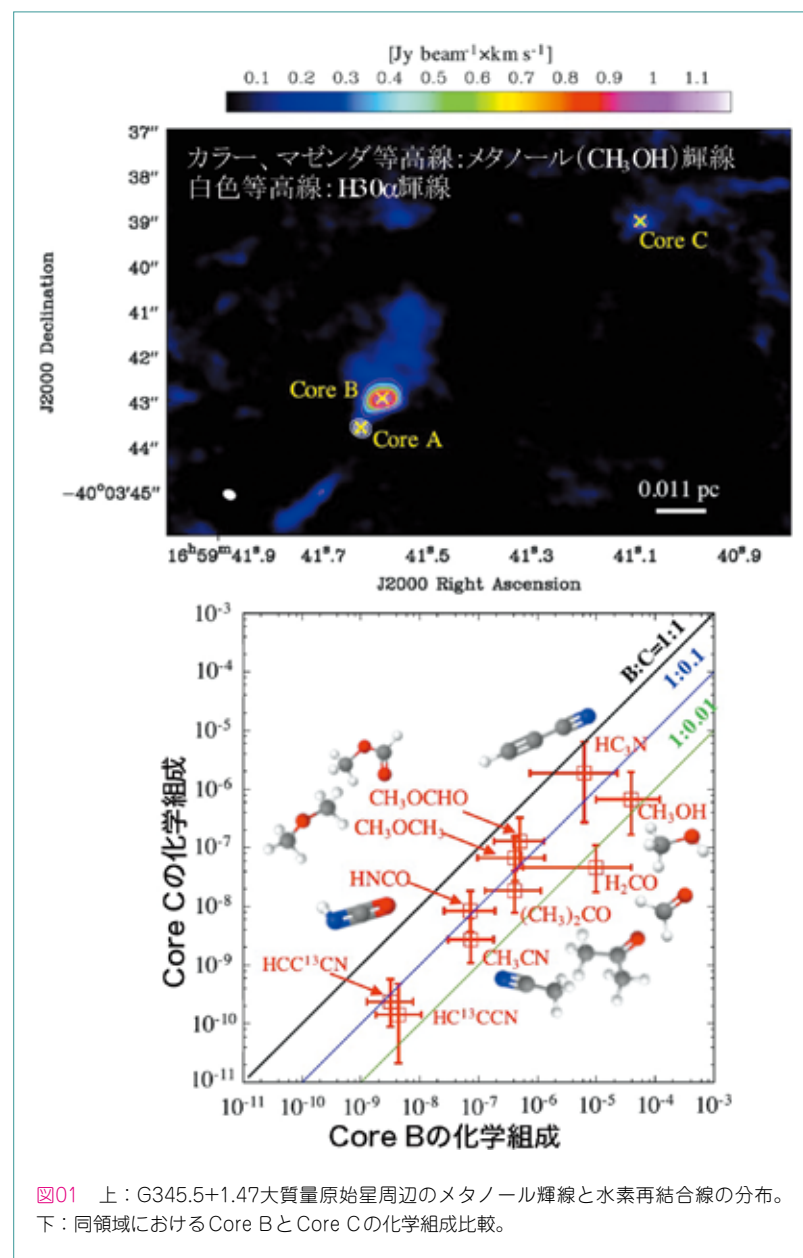


図01 上：G345.5+1.47大質量原始星周辺のメタノール輝線と水素再結合線の分布。
下：同領域におけるCore BとCore Cの化学組成比較。

図01の下のパネルはCore BとCore Cの化学組成を比較したものです。Core BとCore Cの化学組成が同じであれば黒い直線(B:C=1:1)上にデータ点がプロットされます。ほとんどの分子のデータ点は青線(B:C=1:0.1)上にあり、H₂COとCH₃OHは緑線(B:C=1:0.01)上にあります。これらの結果は、Core Bの方に有機分子が10倍ほど、H₂COやCH₃OHに関しては100倍程度多く存在することを示します。H₂COやCH₃OHは、ガス中での化学反応によって生成されると考えられており、有機分子の中でも比較的早い段階から増加してくるという特徴があります。これらの結果は、Core Bの方がCore Cよりも化学的に進化が進んだ天体であることを示します。したがって、化学組成の観点から言うとCore AからCore B、Core Cにかけて進化段階が進んでいます。図01の上のパネルを見ると、これらのコアの空間分布もこの順番に並んでおり、Core Aからの影響を受けて、連続的に星形成が起こっていった可能性が見えてきます。

アルマ望遠鏡の高空間分解能のデータを用いることで、大質量原始星形成領域を十分に分解して、それぞれのコアの化学組成を調べることができます。そして、化学組成を用いることで、クラスター領域での星形成過程を調べる手掛かりになり得ることがわかりました。

●大質量星が周囲の低質量原始星の化学組成に及ぼす影響

大質量星は、熱や紫外線を多く放出し、それらは自身を包むコアのみならず、その外側にある星間物質や周囲にある別の星を生むコアへも影響を与えます。へびつかい座にあるρ Oph A、とρ Oph Bと呼ばれる分子雲にある2つの低質量原始星(Oph-emb9, Oph-emb5)のアルマ望遠鏡のデータを用いて、ρ Oph Aの近くにある大質量星(Herbig Be型星)からの紫外線や加熱が、低質量原始星を取り巻くガス(エンベロープ)の化学組成にどのような影響を与えているかを調査しました。最近の研究では、へびつかい座星形成領域の環境は、太陽系が誕生した環境と類似していると指摘されています。

図02はアルマ望遠鏡の観測視野内における検出された分子の空間分布の概略を示しています。大質量星に照らされているOph-emb9の周囲の化学組成は、大質量星から

の影響を大きく受けています。大質量星に照らされている領域では、DCNやDCO⁺といった重水素化合物や、小さい炭化水素であるcyclic-C₃H₂(c-C₃H₂)が増加しています。一方で、有機分子であるH₂COやCH₃OHは紫外線の影響が小さい領域にあり、Oph-emb9から噴き出す双極分子流によって衝撃波が作られる領域で増加しています。一方でOph-emb5は、比較的孤立した環境にあり、他の星からの影響を受けていません。Oph-emb5周囲では、各分子の空間分布に違いが見られますが、¹³CO、DCO⁺、H₂COは似た分布になっています。これは、DCO⁺やH₂COがCOを原料に生成されていることを示唆します。

一般的に、重水素濃縮は低温・高密度環境で効率的に起こることが知られていますが、Oph-emb9では、暖かい環境でも進む重水素濃縮メカニズムや、紫外線によりイオンの存在量が増加したことにより、大質量星に照らされている領域で重水素化合物が豊富になったと考えられます★01。また、小さい炭化水素は、炭素原子イオン(C⁺)や炭素原子(C)を原料にして生成されるので、紫外線に照らされている領域で増加することが知られています。

この結果から、大質量星はかなりの広範囲に渡って化学組成へ影響を与えていることがわかります。太陽系がクラスター領域内で誕生したならば、太陽系の各惑星が生まれた場所の化学組成を考える場合、太陽からの距離に依存した化学反応の違いだけでなく、太陽系外にあった別の星たちからの影響も考慮する必要があると言えます。

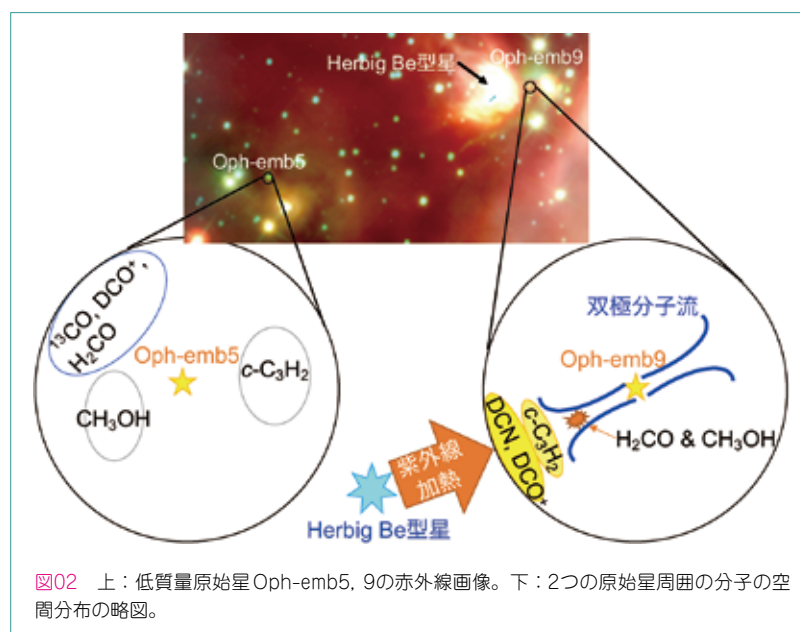
★newscope<解説>

★01

暖かい領域(> 30 K)でのDCO⁺の生成経路として、HCO⁺ + D → DCO⁺ + Hが考えられます。また、DCNの生成経路は、CHD + N → DCN⁺ + Hですが、CHDを生成する鍵となる反応はCH₄D⁺ + e⁻ → CHD + H₂ + H、CH₂D⁺ + e⁻ → CHD + Hというイオンを含んでいます。これらの暖かい領域での重水素化合物生成に必要なイオン(HCO⁺, CH₄D⁺, CH₂D⁺)は、紫外線が照射されている環境で多く生成されると期待されます。

●参考文献

- [1] Taniguchi, K., Guzman, A. E., Majumdar, L., Saito, M. & Tokuda, K.: 2020, *The Astrophysical Journal*, **898**, 54, “Chemical Composition in the IRAS 16562-3959 High-mass Star-forming Region”.
- [2] Taniguchi, K., Majumdar, L., Plunkett, A., et al.: 2021, *The Astrophysical Journal*, **992**, 152, “Chemical compositions in the vicinity of protostars in Ophiuchus”.



ブラックホールと銀河の始原的な共進化



泉 拓磨
(ハワイ観測所)

●ブラックホールと銀河の不思議な関係

現在の宇宙に存在する大質量銀河の中心には、太陽の数百万倍から数十億倍もの質量に達する「超巨大ブラックホール」が普遍的に存在します。実は、このブラックホールの質量と、それを宿す銀河の星質量（特にバルジとよばれる中心領域の質量）はよく相関することが知られています。重い銀河の中心に重いブラックホールがある…一見当たり前のようですが、これは実は非常に不思議です。というのも、銀河とブラックホールは10桁に達するほど大きさが異なるのです。これだけの空間的な隔たりがあるモノ同士が相関することは、両者が何らかの物理的作用を及ぼしつつ成長したことを強く示唆しています。これが銀河とブラックホールの「共進化」と呼ばれる現象で、その起源解明は現代天文学の重要課題のひとつです。

●すばる望遠鏡の大成果—初期宇宙のブラックホールの大量発見！

突然ですが、ここで赤方偏移★01が6以上、つまり今から130億年ほど前の初期宇宙に目を向けてみましょう。近年、国立天文台の「すばる望遠鏡」に搭載されたHyper Suprime-Cam (HSC) という撮像装置を用いた広域かつ高感度な大規模観測★02から、こうした初期宇宙に大量の超巨大ブラックホールが発見されています。これらはクエーサーと呼ばれる、物質を飲み込んで急成長中のブラックホールで、その質量は太陽の1億倍にも達しています。しかしすばる望遠鏡の大集光力を活かして発見された天体ですから、これらのクエーサーは既知のものの10分の1ほどの明るさしかありません（それでも銀河の星成分より明るいのですが）。一般論として、「暗い天体ほど数が多い＝一般的」なので、これらのHSCク

エーサーは当時の宇宙のブラックホール種族の「より一般的な」進化の様子を示すはずです。そこで、その母銀河の様子を観測することで、初期宇宙での共進化の進行具合をも調べることをできると考えました。

●アルマ望遠鏡による母銀河観測

この目的意識のもと、我々のチームはアルマ望遠鏡を用いて電離炭素ガスの光と、星間空間の塵（固体微粒子）が出す光の観測を続けています。電離炭素の光は銀河の星形成活動や運動の様子を調べるのに広く使われています。波長の短い光（例：紫外線）ではクエーサーが明るすぎて母銀河の様子を調べるのが困難なため、アルマ望遠鏡が観測するような長い波長でクエーサー母銀河を研究することが重要で

★ newscope <解説>

★01 赤方偏移

光の波長が伸びて観測される現象を指します。観測者に対する天体の相対運動に起因するもの、強い重力に起因するもの、そして宇宙膨張そのものに起因するもの、の3種類があります。遠方銀河の距離の決定で考えるのは3つ目のタイプで、観測された赤方偏移の量をもとに宇宙論計算をすることで、天体までの距離を導出できます。

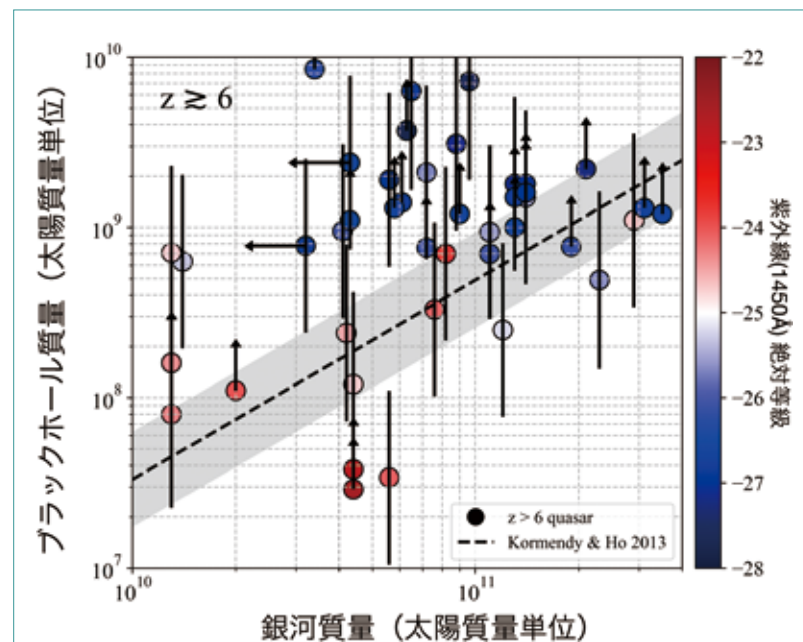


図01 約130億年前のクエーサーにおける銀河質量（アルマ望遠鏡で測定）とブラックホール質量の関係。斜めの破線が近傍宇宙の観測で得られた「共進化関係」。図中で青いほど明るいクエーサーであることを意味する。すばる望遠鏡で発見された低光度種族（赤）は近傍関係と同等、またはよりブラックホールが軽い位置に存在しており、この時代に急激に共進化関係が発現しつつあることを示唆する。

す。さて、アルマ望遠鏡の高解像度観測にもとづく銀河の運動の解析から銀河質量を求めることができます。これは厳密には星や星間物質等々を含めた銀河の「総質量」なのですが、簡単のため「ほぼ星質量に等しい」と考えることにしましょう。こうして描いた、初期宇宙クエーサーにおける星質量とブラックホール質量の関係が図01です。先行研究で発見されていた例外的に明るいクエーサーはやはり例外的に重いブラックホールを持っており、近傍宇宙で見られる「共進化関係」からは大きくブラックホール質量の大きい側に逸脱しています。言い換えれば、先行研究は「重たいブラックホールだけを選び好み」しているのです。その一方で、より低光度（より一般的）なクエーサーの多くは、なんと近傍宇宙の共進化関係とほぼ整合する場所か、よりブラックホール質量が小さい側に位置していることが分かります。これは、「銀河とブラックホールの共進化」が宇宙のごく初期の時点（宇宙年齢10億歳程度）で既に進んでいることを示唆する成果です。いよいよ初期宇宙でも、銀河進化とブラックホール進化の双方を巻き込んだ包括的な議論をする必要が出てきたと言えるでしょう。

●観測史上最遠方の銀河風の発見

アルマ望遠鏡はクエーサーが母銀河に与える「負の影響」をもとらえました。131億光年彼方にあるJ1243+0100と名付けられたクエーサーの電離炭素ガスデータの解析から、非常に高速度で運動するガスが発見されたのです（図02）。それが存在するのは銀河の中心部、つまりクエーサー核の付近でした。運動に要するエネルギー等の見積もりから、この高速成分は、クエーサーがその莫大な放射エネルギーでガスを吹き飛ばす現象、すなわちクエーサー駆動型の「銀河風」だと判明しました。通常の星形成銀河を含めても、観測史上最遠方の銀河風の記録です。

銀河風が吹き飛ばしているガスは星を作る材料。つまりこの銀河風は、クエーサー

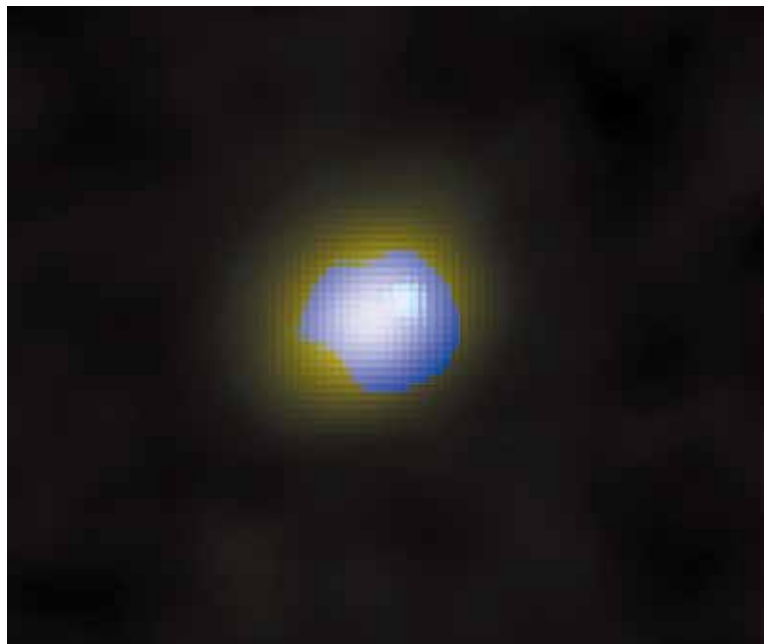


図02 アルマ望遠鏡が観測した、131億年前の宇宙に存在した銀河J1243+0100の画像。この銀河に含まれる静かな動きを持つガスの広がりを黄色、高速で動く銀河風の広がりを青色で表現しています。銀河風は銀河の中心部分に分布しており、ここに潜む超巨大ブラックホールが駆動源であることを示しています。Credit: ALMA (ESO/NAOJ/NRAO) , Izumi et al.

が銀河の星形成活動を阻害する = 銀河の成長を止めてしまう手段だと解釈できます。そう、実はこのクエーサー駆動型の銀河風こそが、多くのモデルが予測する、(圧倒的にサイズの異なる) ブラックホールと銀河をつなぐ「共進化の鍵」なのです。131億年前という極めて初期の宇宙でも、こうしたダイナミックな現象が起きていることに驚きました。

●大規模観測に向けて

上記の成果はいずれもたかだか10数天体の観測から得られたものです。一方で、我々のチームはすばる望遠鏡の観測★02から、すでに100以上の初期宇宙クエーサーを発見しています。今後はこれらをターゲットとした大規模観測をアルマ望遠鏡でも実施することで、宇宙の夜明け時代における銀河とブラックホールの成長史を詳しく理解したいと思っています。

★ newscope <解説>

★02 すばる望遠鏡・HSC観測

すばる望遠鏡の主焦点に取り付けられた Hyper Suprime-Cam (HSC) を用いた「戦略枠プログラム」観測が2014年から開始されています。これはすばるのような8m級望遠鏡では初となる1000平方度級の超広域可視光観測です。すばる望遠鏡の大集光力も活かすことで、遠方低光度クエーサーのように、「珍しく、かつ、暗い」天体を探すのに威力を発揮します。



アルマ望遠鏡によって初めて見つけた 星形成活動 ～塵に隠された初期銀河の発見～

札本佳伸

(アルマプロジェクト／早稲田大学)



●生まれたばかりの宇宙にある銀河と、これまでの観測

約138億年前、ビッグバンによりこの宇宙は誕生しました。時が流れ、我々が住む現在の宇宙に至るまでの間に、数限りない銀河が生まれてきました。それらの銀河がどのように生まれ・成長してきたかという歴史を解き明かすことは、銀河を研究する上での究極の目標のひとつです。そして、その銀河進化の歴史を解き明かすための鍵は、銀河の主要な構成要素の一つである、「星」を銀河がどのように生んできたのかを知ることにあります。

これまで、遠方の宇宙における銀河の観測は、すばる望遠鏡やハubble宇宙望遠鏡などの可視光・近赤外線望遠鏡が中心的な役割を果たしてきました。そして、これらの望遠鏡では、遠方銀河から放たれる静止系紫外光★01を観測することによって、銀河を見つけ、そして見つけた銀河がどのような勢いで星を作っているのかが研究されてきました。これらの観測は過去20年以上の間多大なる成果を上げてきました。

しかし、これらの今まで行われていた観測には一つ大きな問題があります。それは、静止系紫外光は銀河に含まれる星間塵に強く吸収・散乱されるという性質を持っているということです。そのため、仮に星間塵を多く持つ銀河の場合は、塵に大きく阻まれてしまい観測が容易ではなくなります。

実際に、そのような塵に覆われた銀河は、近年の研究で近傍や遠方の宇宙で数多く発見されてきました。しかしながら、これまでの観測では、さらなる遠方の初期宇宙にいったいどれくらいの数の塵に隠された銀河が存在するのかわかっていませんでした。かりに、そういった塵に隠されて見つけられていない銀河がたくさんあるならば、我々はまだ初期銀河の成長の一部しか見ていないということになります。

●たくさんある「普通」の銀河も塵に隠されていた！

今回、私たちはアルマ望遠鏡の大規模探査プロジェクト「REBELS」という国際共同研究で初期銀河の観測に取り組んでいました。その探査プロジェクトの中で、REBELS-12、REBELS-29という、現在から約130億年前の宇宙に存在した2つの銀河をアルマ望遠鏡で観測したとき、予想外の発見をしました。これらの標的とした銀河はかねてより地上からの観測で存在を知られた、初期宇宙にある銀河でした。しかし、アルマから送られてきた観測データを調べていたところ、驚いたことに、これらのデータからはターゲットとした銀河とは異なる空の箇所、これまで静止系紫外光による観測では何も見えていない箇所から、非常にはっきりとした塵からの放射、そして電離炭素からの輝線を検出しました(図01)。紫外光では見えず、塵からの放射だけで輝く銀河、つまりこれは、塵に完全に

★ new scope <解説>

★01 静止系紫外光

宇宙の膨張により、遠方にある銀河が放った紫外光は地球上での観測時には赤外線になります。この観測した赤外線は遠方にある銀河ではもともと紫外光である、ということを確認するため静止系紫外光と呼びます。

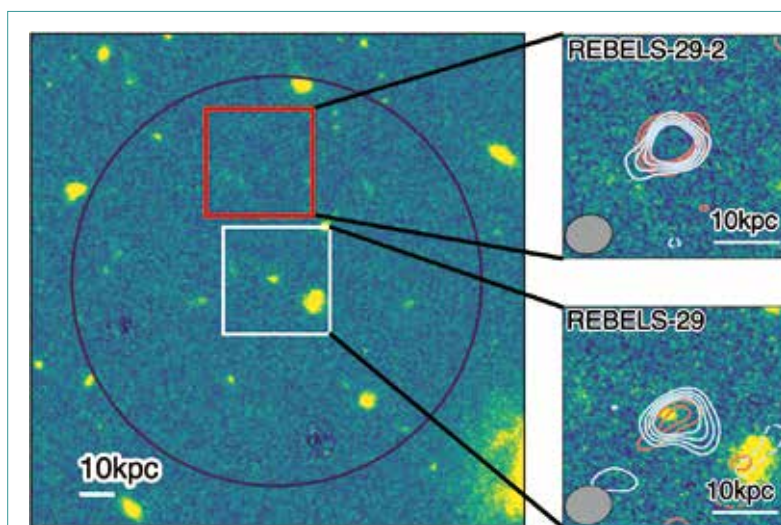


図01 現在から130億年前に存在する銀河（REBELS-29；左、白枠）をアルマで観測したところ、これまで何も見えていなかった場所（REBELS-29-2；左図、赤枠）からもそれぞれ電離炭素の光（白色）、塵からの放射（赤色）を検出しました。これは塵に隠され、これまで見えていなかった新たな銀河の初期宇宙での発見となります。

覆い隠された銀河を約130億年前の宇宙に発見したということになります。

さらに、研究の結果、この新たに見つかった塵に隠された銀河は、「塵に隠されている」ということ以外は、約130億年前の宇宙に存在する典型的な銀河と同じような性質（銀河に含まれる星の質量や星の形成速度）を持っていることがわかりました。つまり今回の発見は、これほど初期宇宙に存在する、非常に若い「普通」の銀河であっても、塵に隠されて見えなくなってしまうことがある、ということを意味しています。このような塵に隠された銀河は、これまでの観測からは見落としていた銀河ということになります。この発見をもとに、約130億年前の宇宙でどの程度の銀河が塵に隠されて見えなくなっているのかを初めて推定することができました（図02）。今回の発見から、我々が今まで静止系紫外光をもとに培ってきた初期宇宙における銀河成長への理解はまだまだ不完全なものである、という可能性が示されてきました。

●さらなる観測、そして将来の広い視野での高感度の観測をめざして

今回の発見によって、さらなる謎が数多く生まれました。例えば、どのようにしてこれほど若い宇宙で塵が銀河を覆い隠すまでになったのか。そして、こういった塵に隠された銀河はどこまで初期の宇宙に存在するのか。また、どれくらいの数存在するのか。これらは、銀河成長の歴史を理解するためにこれからの研究で早急に解き明かすべき課題です。その答えを知るためには、さらなる観測を続ける必要があります。



図03 Credit ALMA (ESO/NAOJ/NRAO)

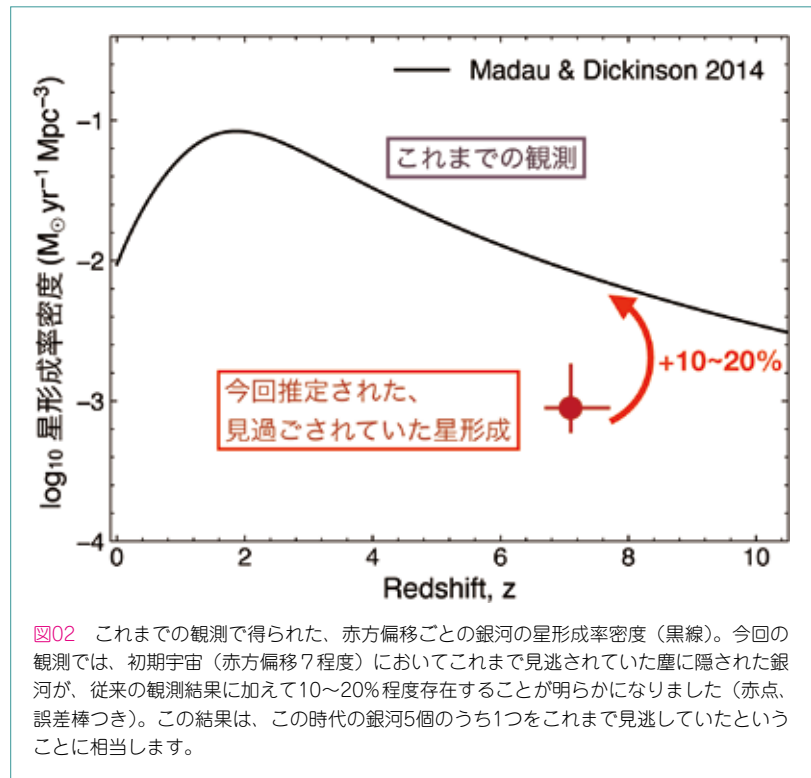


図02 これまでの観測で得られた、赤方偏移ごとの銀河の星形成率密度（黒線）。今回の観測では、初期宇宙（赤方偏移7程度）においてこれまで見逃されていた塵に隠された銀河が、従来の観測結果に加えて10~20%程度存在することが明らかになりました（赤点、誤差棒つき）。この結果は、この時代の銀河5個のうち1つをこれまで見逃していたということに相当します。

特に重要になるのが、アルマ望遠鏡（図03）、そして最新の宇宙望遠鏡であるジェイムズ・ウェッブ宇宙望遠鏡（図04）による赤外線や電波による観測です。これらの観測により、これまで静止系紫外光では全く見えていなかった銀河の発見やそれらの性質を詳細に研究することが可能になります。アルマ望遠鏡、ジェイムズ・ウェッブ宇宙望遠鏡による赤外線や電波での高感度・高視野観測をさらに進めることで宇宙の初期に銀河がどのようにして星を作っていたのかをさらに理解し、究極的には銀河の成長と進化の歴史をすべて解き明かしていきたいと考えています。

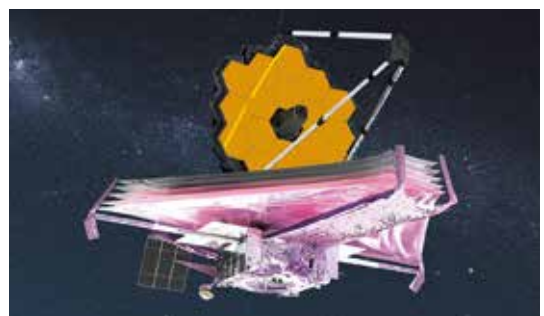
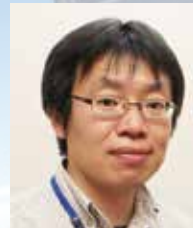


図04 ジェイムズ・ウェッブ宇宙望遠鏡を描いた想像図：2021年打ち上げの、直径6.5mの主鏡をもった赤外線の波長で観測を行う宇宙望遠鏡。かつてない高感度や高解像度の観測により、宇宙最初の世代の星や銀河、また太陽系外の惑星の観測を通して様々な宇宙の未解決問題を解くことが期待されています。（Credit：NASA GSFC／CIL／Adriana Manrique Gutierrez）

アルマ望遠鏡の 同時観測可能周波数帯域の拡大 —超伝導ハイブリッドカプラの開発—



酒井 剛
(電気通信大学)

アルマ望遠鏡の機能を強化するアルマ2計画において最も重要な開発要素の一つに「同時観測可能周波数帯域の2倍以上向上」があります。この目標を実現するためには、受信機の広帯域化★01が必要不可欠です。私の所属する電気通信大学では、国立天文台先端技術センターと共同で、アルマ2に向けた受信機の広帯域化に関する開発を行っています。本稿では、受信機の広帯域化で必須となる「90度ハイブリッドカプラ」の開発についてご紹介します。

●受信機の広帯域化

アルマ望遠鏡では35–950 GHzの電波を観測することが可能です。しかし、受信した高い周波数の信号をその周波数のまま処理することは困難です。そのため、天体からの信号と人工的に作り出した信号（ローカル信号）をミキサ素子で混ぜ合わせ、2つの信号の差の低い周波数（中間周波数と呼びます）に変換して処理しています。「同時観測可能周波数帯域の2倍以上向上」を実現するためには、中間周波数の帯域を2倍以上に広げることが必要です。具体的には、中間周波数帯域を、現在の4–8 GHzの4 GHz幅から少なくとも4–20 GHzの16 GHz

幅まで拡張することを目標としています。

●サイドバンド分離型受信機

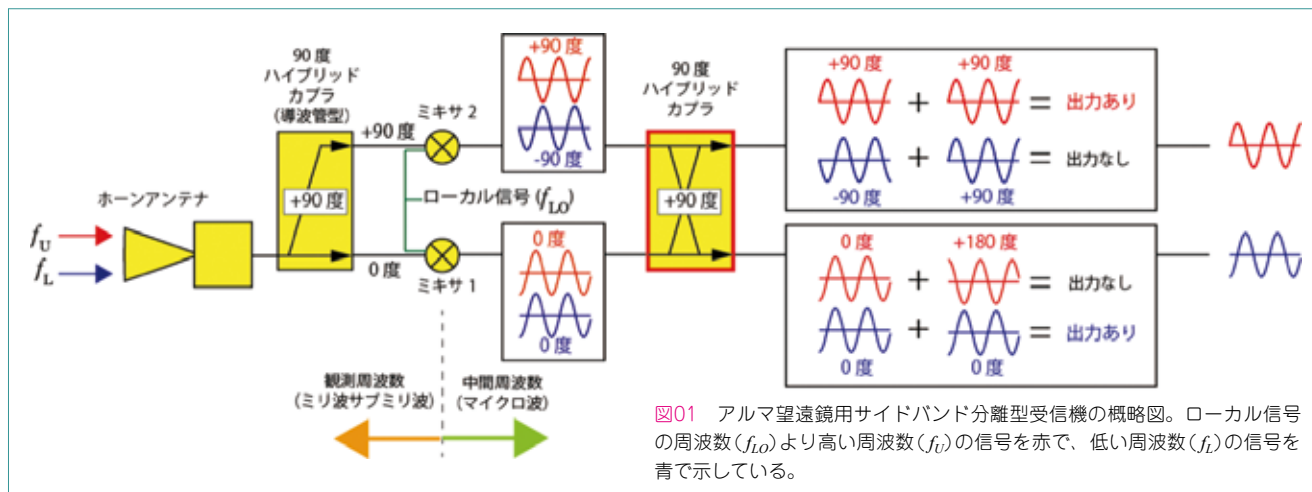
ミキサ素子から出力される中間周波数帯の信号（周波数： f_{IF} ）は、ローカル信号の周波数（ f_{LO} ）と観測周波数の差の周波数ですが、中間周波数が f_{IF} となる観測周波数は、ローカル信号に対して低い周波数（ f_L ）と高い周波数（ f_U ）の2つがあります（ $f_{IF} = f_{LO} - f_L = f_U - f_{LO}$ ）。単純に天体からの信号とローカル信号をミキサ素子で混ぜただけでは、周波数 f_L と f_U の信号が重なって出力されることになり、観測している信号がどちらの周波数のものかわからなくなってしまいます。アルマ望遠鏡では、それら2つの信号（ f_L と f_U ）を分離するサイドバンド分離型受信機を採用しています。

図01にアルマ望遠鏡のサイドバンド分離型受信機の概略図を示します。アンテナで集光された電波は、ホーンアンテナに導かれ、導波管と呼ばれる金属の伝送線路を通して2つのミキサ素子に入力されます。ホーンアンテナとミキサ素子の間には、「90度ハイブリッドカプラ」と呼ばれる導波管の回路が設置されています。この回路は、天体からの信号を2つに等分配し、さ

★newscope＜解説＞

★01 広帯域化

アルマ望遠鏡では分子のスペクトル線を観測可能です。受信機の観測周波数帯域が広がると、同時に観測できるスペクトル線の数が増え、天体について多くの情報を一度に得ることが出来ます。受信機で使用される回路には、大きさが周波数（波長）で決まる部分があり、広い周波数範囲で回路を動作させるには様々な工夫が必要になります。



らに、2つのミキサ素子に到達する信号の位相を90度ずらす役割があります。

90度異なる位相で分けられた信号は、ミキサ素子でローカル信号と混ざり、中間周波数として出力されます。このとき、位相差+90度でミキサ素子（ミキサ2）に入力された信号は、ローカル信号に対して高い周波数の信号と低い周波数の信号で、それぞれ+90度と-90度と異なる位相を持つ中間周波数として出力されます。さらに、2つのミキサからの信号をもう一度「90度ハイブリッドカプラ」に入力し合成すると、2つある出力ポートのうち片方の出力ポートでは、2つの入力ポートから来る信号の位相が180度ずれることになります（図01参照）。位相が180度ずれた信号は打ち消しあい出力されません。結果として、ローカル信号に対して高い周波数と低い周波数が異なる出力ポートから出力され、信号を分離することが可能です。同時に観測する周波数帯域を広げるためには、広い中間周波数帯域で動作可能な「90度ハイブリッドカプラ」の開発が必要不可欠です。

●超伝導体を使用した90度ハイブリッドカプラ

中間周波数帯域で使用する90度ハイブリッドカプラを広帯域化するためには、シンプルな回路ではなく、少し複雑な多段回路にする必要があります。しかし、複雑な回路では、伝送線路での損失が大きくなります。この問題を解決するには、伝送線路に損失が少ない超伝導体★02を用いることが有効です。しかし、我々は、これまで超伝導体を用いたハイブリッドカプラを作成した経験がありませんでした。そこでまずは、4-8 GHzと比較的狭い帯域で動作する超伝導体を用いた回路の製作、評価からスタートしました。超伝導体（ニオブ）を用いて作成した実際の回路が図02です。基板はシリコンを用い、回路は3段構成になっています。国立天文台にて性能を評価した結果、4-8 GHzにおいてハイブリッドカプラとして動作していることが確認できました。しかし、まだ細かいところでシミュレーション結果とのずれがみられており、現在、その原因を追求しているところです。この開発では電気通信大学大学院生の有馬海里さんが活躍しています。また現在、4-20 GHzで使用可能なハイブリッド

カプラの設計、および試作も行っています。設計段階では、4-20 GHzで動作することが確認できていますが、4-8 GHzで実際に製作、評価した結果をもとに、製作手法などの検討を行っているところです。まだ開発は始まったばかりですので、今後の成果にご期待ください。

●研究を進める上で

本研究は、ミリ波サブミリ波帯超伝導素子の専門家である国立天文台先端技術センターの小嶋崇文准教授と、通信機器などで使用されるフィルタの設計を専門に研究されている電気通信大学の小野哲准教授との共同研究です。国立天文台の持つ超伝導素子の製作及び評価技術と、電気通信大学の持つ通信技術の融合によって、開発を大きく進展させることができています。本共同研究などを通じて、受信機の間周波数広帯域化に向けた技術開発は、日本が世界をリードしており、天文学の発展には、様々な分野の研究者との連携が非常に重要であると実感しています。今後も、様々な分野の方々と連携しつつ開発を進めていきたいと考えています。

★ newscope <解説>

★02 超伝導体

超伝導物質をその物質特有の温度（転移温度と呼びます）より低い温度にすると物質の持つ電気抵抗が0に近づきます。回路に抵抗があると電力がそこで消費され損失が発生します。抵抗値が低い超伝導物質を導体に用いることで回路の損失を低減できます。本研究で使用しているニオブの超伝導転移温度は約-264℃です。そのため、回路は冷却して使用します。

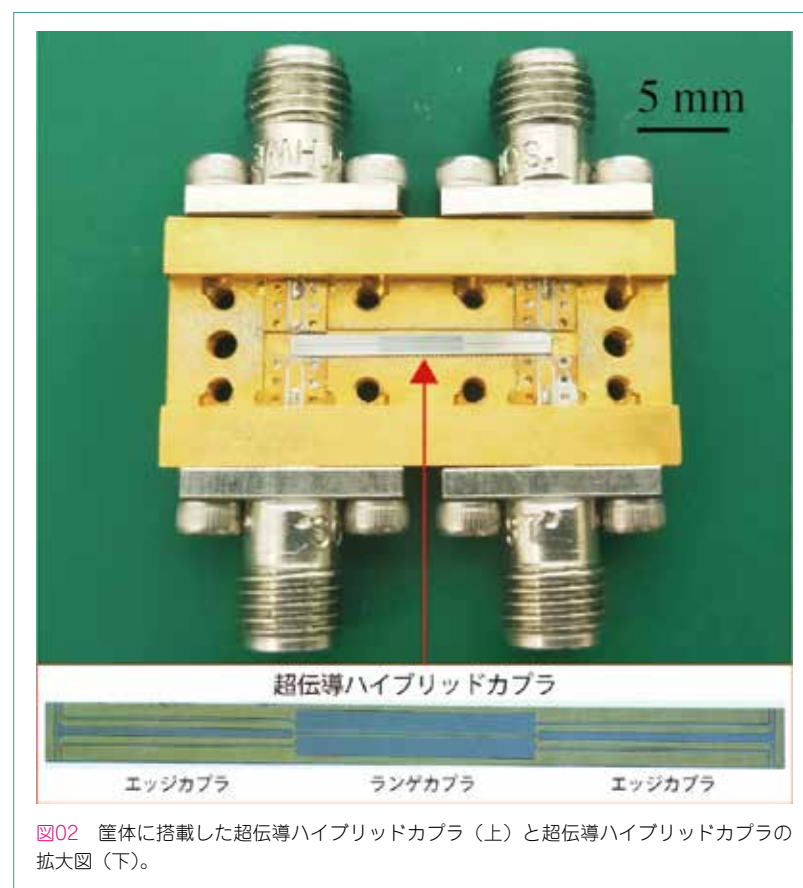


図02 筐体に搭載した超伝導ハイブリッドカプラ（上）と超伝導ハイブリッドカプラの拡大図（下）。

アルマ望遠鏡運用現場の10年

澤田剛士
(アルマプロジェクト)

2011年9月30日★01にアルマ望遠鏡の初期科学運用サイクル0が開始されてから10年が経ちました。この10年間の、チリ現地でのおもな出来事を振り返ってみたいと思います。

●性能向上への努力

初期科学運用の開始当初、観測に使われたのは16台前後の口径12mアンテナでした。これは12mアンテナ54台と7mアンテナ12台の計66台からなるアルマ望遠鏡のごく一部で、性能は発展途上でした★02。初期科学運用開始後も、日米欧各チームによる残りのアンテナの組み立てがアルマ望遠鏡山麓施設にて急ピッチで進められました。完成したアンテナはアルマ観測所に引き渡され、技術者チームとアンテナ評価科学者チームによる調整と性能確認ののちに山頂施設に運ばれ、望遠鏡に組み込まれました。こうして、2014年6月に66台目のアンテナが山頂施設に到着するまでアンテナの数は増えつづけ、アルマ望遠鏡の性能は格段に向上しました。

アンテナの数を増やすだけが性能向上ではありません。新しい機能(観測モード)の追加も進められました。新機能をユーザーに提供する前には、入念な準備が必要です。具体的には、必要な機器やソフトウェアの開発、試験すべき項目の洗い出し、試験観測の実行とデータ解析、試験を通じて見つかった問題への対処、機能・性能の最終確認などです。この作業はチリ現地のスタッフだけではなく、世界各地の研究機関等に所属する研究者・技術者などと共同で、電子メールや電話会議などで連絡を取りながら行われました。試験観測はおもにチリ勤務の研究者により、科学観測の合間を縫って実行されました。しかし国外の専門家をまじえて試験を行う場合、時差やデータ転送にかかる時間などの点から、試験結果をすばやく吟味して限ら

れた試験時間を有効に使うには限界があります。そこで、国外の専門家が現地に出張して集中的に試験を進めることもしばしば行われました(写真01)。このようにして、初期科学運用の開始から現在(科学運用サイクル8)までの間に、アタカマコンパクトアレイ、観測可能な周波数域(受信機バンド)の追加、偏波観測、太陽観測、長基線観測、超長基線電波干渉計(VLBI)への参加、など多くの観測モードが追加されました。そのほか、運用中に明らかになった技術的問題や不具合を解決し、望遠鏡システムの信頼性・安定性を向上することも地味ながら重要な性能向上の手段で、現在まで連綿と行われています。

●新型コロナウイルス感染症流行による運用停止と復帰

もちろんすべてが順調に進んだわけではなく、多くの困難がありました。なかでも望遠鏡の運用にもっとも大きな影響を与えたのが、

★ newscope <解説>

★01 チリ現地時間(以下同じ)。

★02 ただしこの時点ですでに、アルマ望遠鏡の性能は他のミリ波・サブミリ波干渉計を大きく上回っていました。



写真01 太陽観測試験中のようす。得られた画像を囲んで記念写真。

新型コロナウイルス感染症（COVID-19）の世界的流行です。チリでも2020年3月初旬に最初の陽性者が確認されて以来感染の拡大が続き、これを受けて一時的にアルマ望遠鏡の運用を停止することが決定されました。本格運用開始以来はじめて発電機★03のスイッチが切られ、3月22日、山頂施設と山麓施設の運用が停止されました。サンティアゴオフィス勤務の職員も在宅業務を行うことになり、まもなくチリ政府によって首都サンティアゴをはじめとする全国各地にロックダウン措置が敷かれました。

こうしてアルマ望遠鏡はいつ終わるとも知れぬ運用停止期間に入りました。この間、安全管理を行うためのチームが交替で山麓施設近くの街に滞在し、毎日施設を訪問して安全確認や水素メーザー発振器★04の管理を行いました。運用停止期間はその後約半年にわたって続きましたが、チリ国内のCOVID-19流行状況が多少改善したことを受けて、2020年10月に山麓施設、ついで12月には山頂施設の運用が再開され、科学観測再開にむけた準備が進められました★05（写真02）。長期にわたる停止状態からの復帰は観測所にとっては初めての経験であり、予期せぬトラブルもありましたが、技術者チームをはじめとする観測所スタッフの奮闘で乗り越えられました。その後、望遠鏡の調整や機能確認を経て、2021年3月17日、ほぼ1年ぶりにアルマ望遠鏡は科学観測を再開しました。COVID-19流行状況はいまだ予断を許しませんが、2021年10月に開始された科学観測サイクル8では（本稿を執筆している11月下旬の時点では）、COVID-19以前に近い観測運用が行われています。

●次の10年、その先へ

最初の10年は、これからも続くアルマ望遠鏡の歴史の中では始まりにすぎません。今後も重要な科学的成果を生みつづけるため、望遠鏡の性能を維持し向上させていくための努力が続けられています。チリ現地では、山頂施設で10年間の風雪に耐えたアンテナを1台ずつ山麓施設に運び、点検整備をして山頂施設に戻す作業が技術者チームによって行われています（写真03）。また、さらなる観測モードの追加にむけた開発・試験が行われているほか、「アルマ2」計画と呼ばれる大規模な性能向上の検討と



写真02 防護服とマスクを着用しての健康チェック。標高2900 mや5000 mという高地での感染対策は、通常よりもさらに負担の大きいものになります。

準備が進められています。次の10年、アルマ望遠鏡はどのような宇宙の姿を見せてくれるのでしょうか。

★ new scope <解説>

★03 僻地にあるアルマ望遠鏡山麓・山頂施設では、すべての電力を自家発電でまかなっています。

★04 観測機器の時刻・周波数の基準となる信号を発振する、重要な装置。デリケートな機器であるため、運用停止期間中も太陽電池等を使って稼働が続けられました。

★05 運用再開にあたっては、山麓施設に滞在するスタッフの人数制限やサンティアゴオフィスからのリモート観測の導入など、COVID-19感染リスクを極力下げることの方策が取られました。



写真03 メンテナンス作業中の欧州製12mアンテナ（手前）と日本製7mアンテナ（奥）。Credit: Pablo Carrillo and Mark Gallilee, ALMA (ESO/NAOJ/NRAO)

with コロナ時代の国立天文台図書館

小栗順子（天文情報センター・図書係）

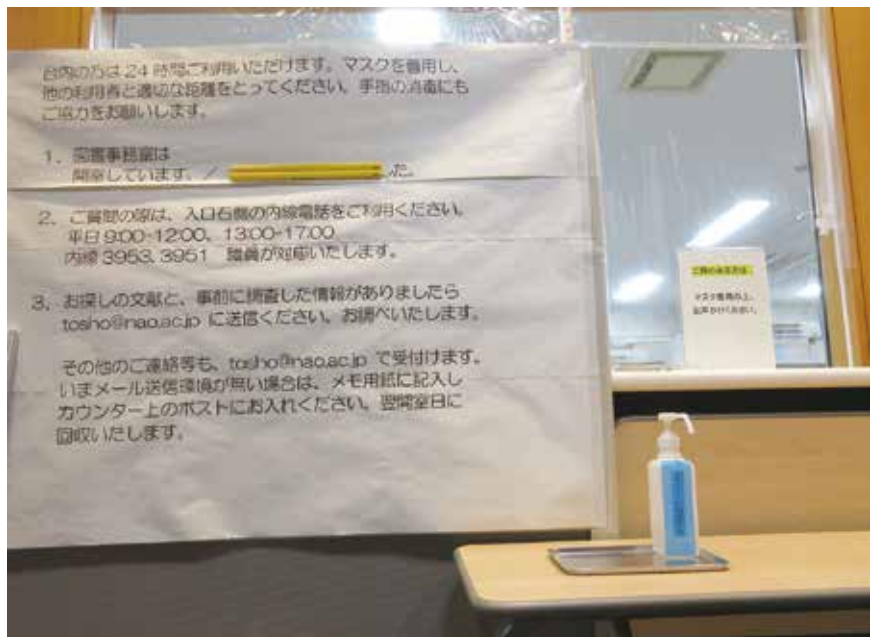
新型コロナ感染拡大から2年目となる今年。何度も感染拡大と縮小の波を繰り返しながら、まだまだ、収束も予測できないなか、各地の大学等機関の図書館は閉館やサービスを制限して開館するなど、さまざまな対応策をとっています。ここでは、コロナ危機に直面した当初の国立天文台図書室の様子や、その後の感染症拡大の予防対策の実施など、with コロナ時代の国立天文台図書館の取り組みをご紹介します。

国立天文台図書室は、新型コロナウイルス感染症拡大防止のため、2020年3月1日から台外者による一般利用を休止し、緊急事態宣言の発出から2020年6月末まで台内カウンターでの対面業務を休止しました。一般利用は2021年12月現在も休止中ですが、調査研究のための問い合わせは引き続きメール対応可です。

2020年4月の緊急事態宣言発出と延長により、職員の出勤は制限され、図書室の台内者カウンターの窓口業務も休止を余儀なくされました。在宅勤務とは言え、研究・教育活動に携わる方々を支援する動きを止めることがないよう、問い合わせをメールベースで行ったり、オンライン環境（電子媒体へのアクセス支援など）の整備を進めたり。

基本的な感染症対策は、国立天文台の「新型コロナウイルス感染拡大防止策」に則りながら必要な設備や物品をそろえるほか、接触の多い場所であるカウンターは透明ビニールカーテンを設置、閲覧室内の定期的なふき取り消毒をするなど、可能な限り接触・飛沫感染に対する予防策を講じる状態と、再開後の運用面の確認ができたのをうけて、2020年7月に台内カウンター業務を再開しました。対面の対応を必要最小限にするために、業務の流れに工夫してアレンジしたり、サービスの提供と質を維持できるよう、模索しながら取り組んでいます。なにしろ前例のないことなので、試行錯誤と手探りですが、日々改良を重ねています。

閲覧室の利用に際しては、マスク着用や手指衛生の励行、閲覧ブース利用の注意（ソーシャルディスタンスや長時間利用）などにご理解とご協力をいただいています。資料利用や入室制限などサー



01 台内カウンター前にホワイトボードを設置しました。閲覧室利用時の留意点や連絡手段、図書事務室の開室情報を掲示しています。



02 自動貸出返却装置を使えない時は、「手書き借覧票」の出番。分かりやすく、状況に合わせた掲示物を心掛けています。

ビス内容には、特に変更はありません。台内者であれば24時間いつでも職員証などで入退室ができます。設置している自動貸出返却装置ほか情報端末の利用も自由にセルフで操作することができます。もしものシステム障害の時に困らないように、各所に代替手段を用意してあります。台内環境であれば、電子媒体へのアクセスも可能で、図書室ホームページには、電子ジャーナルと電子ブックのペー



03 カウンター、1階2階の閲覧ブース等は定期的な消毒をしています。職員同士、図書事務室内でも感染予防対策をとっています。



04 「三鷹・星と宇宙の日2021」オンラインで紹介した「オンラインでも来て！見て！図書室2021」企画本棚を、閲覧室内にオープンしました。

ジがあります。ただ、そのような便利な時代になっても、やはり冊子しか存在しない論文や書籍があり、利用したいものが天文台で所蔵していない資料もあります。入手したい論文や書籍が見つからない・アクセスできないなど、お困りごとがありましたら、今まで通り、ぜひお気軽にメールでご連絡ください。

図書室は無線LAN完備で、閲覧ブースも多くあり、空間の利用としてもおすすめです。研究室や事務室での密回避や人との接触を減らすための活用ができます。また、大きく変わった日常で、思うように人にも会うこともなかなかできませんが、図書室で本との「出会い」はいつでも可能です。

感染症拡大予防や、図書室利用の面においても、皆さんに安心して、安全にご利用いただけ



05 展示中の書籍は借り出せます。特設ページでは、紹介している本リストをご覧になれます。
<https://library.nao.ac.jp/open-day2021.html>

る環境につとめています。時にはオアシス的なご利用も含めて、図書室を幅広くご活用くださいませ。

★教職員の皆さまからのご寄贈を
 随時受け付けています★

理科年表2022刊行

片山真人 (天文情報センター・暦計算室)

『理科年表』(国立天文台 編)は、暦、天文、気象、物理／化学、地学、生物、環境の7部門からなる科学全般を網羅したデータブックです。その2022年版が刊行されました。

暦部では、惑星の等級算出方法を改訂、トピックスで詳細を解説しています。

天文部では、国際的な共同観測体制が整い、続々と成果を上げている重力波について項目を新設しました。トピックスでは、「小惑星探査機「はやぶさ2」による小惑星リュウグウ探査」で採取されたサンプルの初期分析成果について解説しています。

気象部では平年値を10年ぶりに大改訂、物理／化学部や地学部でも最新の知見や観測に基づいてデータを更新しています。生物部では「ゲノム科学が解明するホモ・サピエンスの進化」で古代人のDNA解析から浮かび上がった人類の進化について解説、環境部では「東日本大震災から10年—ゲノム・コホート研究

の現状—」で東北メディカル・メガバンク計画で行われてきた未来型医療研究について解説しています。

理科年表は多数の研究機関の協力の下に国立天文台が編さんする、日本で最も信頼されている「自然界の辞典」です。大正14(1925)年に創刊されましたが、第2次世界大戦中に休刊していた時期があり、今号が第95冊となります。創刊号から最新号までのデータを集録した『理科年表プレミアム 個人版』もぜひご利用ください。

また、環境データに特化した『環境年表 2021-2022』も刊行されました。「巨大衛星網(メガコンステレーション)による天文学研究や生態系への影響」では、深刻となっている巨大衛星網の影響について解説しています。

理科年表オフィシャルサイトでは、これまでのトピックスやその後日談を順次掲載しています。『環境年表 2021-2022』の関連データや、授業に活用する



●理科年表オフィシャルサイト
<https://www.rikanenpyo.jp/>

ためのワークシートなども公開していますので、ぜひご活用ください。

2021 11 30

おしらせ
 NO.02

「PyRAF ミニ講習会」開催報告

磯貝瑞希、巻内慎一郎、小澤武揚（天文データセンター）

2021年7月14～15日に天文データセンター主催のPyRAF ミニ講習会をオンラインで開催しました。PyRAFは光赤外天文学分野での標準的なデータ整約・解析ソフトウェアであるIRAFをプログラミング言語のPythonで使用するためのソフトウェアで、講師と世話人を磯貝瑞希が、チューターを巻内慎一郎と小澤武揚が担当しました。

本講習会は昨年度にもオンラインで2回開催しており、今回も学生や大学院生9名を含む総勢11名の参加申し込みがありました（うち1名は申し込み締め切り後に都合が悪くなり辞退）。講習会の内容★01は、昨年度に開催した同講習会とほぼ同じで、講習には多波長データ解析システム★02の対話型解析サーバを使用し、1日目にminicondaで一般ユーザ権限でのPyRAF実行環境の構築を行いました。2日目はPyRAFの対話的利用法やPython言語の基礎、PythonスクリプトからPyRAFを使用する方法を一通り学んだ後、一次処理スクリプトを作成する実習を行いました。

オンライン開催はテレビ会議ソフトウェアのZoomを使用し（写真01）、質問は音声による発話やチャット、ブレイ

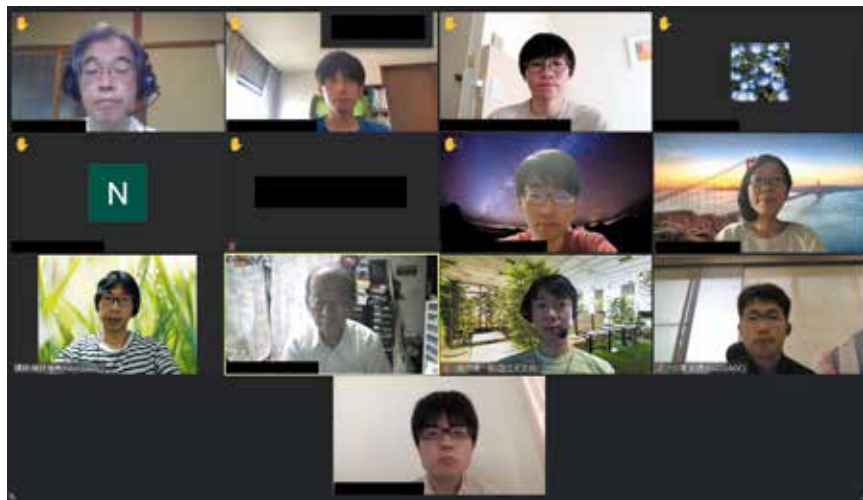


写真01 参加者・講師・世話人の集合写真。

クアートルームによる個別対応も行いました。また1日目に参加できないユーザ向けに講習会の様子を録画した動画を配信し、2日目までに自習しておいてもらうといった対応も行いました。

アンケート結果は昨年度開催の前回とほぼ同じ結果で好評でしたが、進行・時間配分に関してはもっと時間を増やしてほしいという声が挙がっていました（図01）。オンライン受講についての満足度は今回も高く、アンケートに回答した9名全員が最も評価の高い「とても良かった」を選択しており、7名が今後もオンラインを含む開催方式を希望しました（図02）。今後もオンラインの利点を活かしつつ、需要を捉えた講習会を企画していければと考えていま

す。講習会についてご意見・ご要望がありましたら、ぜひ天文データセンターの講習会担当★03までお知らせください。

★01 今回の講習会のテキストは、以下のウェブサイトに掲載しています。

https://www.adc.nao.ac.jp/J/cc/public/koshu_shiryo.html#iraf_prog

上記サイトには天文データセンターがこれまでに主催した各種講習会の資料も掲載していますので、ご興味のある方はご参照ください。

19. 講習会当日の時間について

詳細

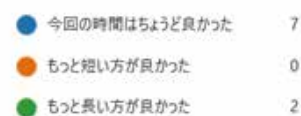


図01 「講習会当日の時間について」のアンケート結果。

20. 今後の講習会の開催方式について

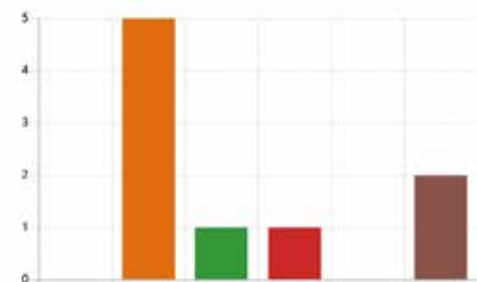
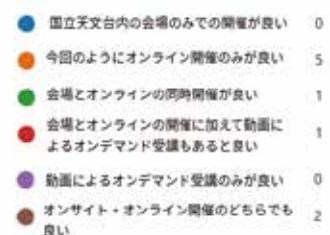


図02 「今後の講習会の開催方式について」のアンケート結果。



★02 多波長データ解析システムは、天文データセンターが運用する共同利用計算機システムで、天文学およびその関連分野における大学院生以上の研究者であれば利用できます。遠隔環境からも利用可能ですので、是非ご活用ください。
<https://www.adc.nao.ac.jp/MDAS/>

★03 天文データセンターの講習会担当の連絡先です。
lecture@ana.nao.ac.jp

2022年国立天文台カレンダーができました。

おしらせ
NO. 04

2022年国立天文台カレンダーができました。今回のテーマは、「すばる望遠鏡 超広視野主焦点カメラ HSC (Hyper Suprime-Cam) が観た宇宙」。国立天文台ニュース(裏表紙)で現在連載中の「すばる望遠鏡 HSC Cosmic Gallery」[構成・解説: 田中賢幸(ハワイ観測所)]の中から既刊の画像12点を選んで再録したものです(※台外発送分に同封)。国立天文台ニュースの誌面には詳しい解説が掲載されていますので、ぜひ<https://www.nao.ac.jp/about-naoj/reports/naoj-news/>のそれぞれの該当ページをご覧ください。

- ・01月 くらげ銀河(衝突銀河)
- ・02月 KKR 25(矮小銀河)
- ・03月 NGC 5713 + NGC 5719(銀河ペア)
- ・04月 近傍銀河団と天の川銀河のシラス
- ・05月 SDSS J0232.8-0323 [重力レンズ(アインシュタインリング)]
- ・06月 NGC 4517(左・エッジオン銀河)とNGC 4517A(右・渦巻銀河)
- ・07月 NGC 4123(中央・棒渦巻銀河)とその衛星銀河
- ・08月 三重リング銀河(衝突銀河)
- ・09月 狭帯域フィルターで捉えた輝線銀河
- ・10月 くらげ銀河・その2(衝突銀河)
- ・11月 ホルスの目(重力レンズ)
- ・12月 赤方偏移0.7の遠方巨大銀河団

★2022年カレンダーは暦のカラーリングにユニバーサルデザインの視点を導入しました。



編集後記

今年の夏はカイコを3世代も育てました。夏の虫の次は秋の虫(コオロギ)がきて、今は、カブトムシの幼虫とコオロギとカイコの卵が越冬中です。(G)

最近是人里離れた農家レストラン巡りをしています。地元の季節の食材で美味しい料理を食べられるのはとても贅沢だなとしみじみしています。(は)

ASTE運用で久しぶりにチリに出張中。その間にオミクロン株が広がり、帰国しても正月は家から出られない。政府公認正月です。(I)

アルマ望遠鏡科学観測開始から10年3か月、私がアルマ望遠鏡広報担当になって10年9か月。大変充実した時間を過ごすことができました。関係者の皆様ありがとうございます。次は周波数資源保護の仕事で全力を尽くします。(h)

幼稚園で宇宙の話をさせていただきました。ブラックホールとか人工衛星とか宇宙飛行士とか、子供たちは現実的なもので宇宙に関心があるんだなと感じた。私が子供のころはアニメの世界だった気がする。(K)

変異株がオミクロンまでできてしまったが、WHOはギリシア文字が尽きた後に星座名や星の名前を使うというアイデアを持っているようだ。IAUはこれには絶対反対なのだが。(W)

懐かしい映画のシネマコンサートに行きました。今、万感の思いを込めて汽笛が鳴る。今、万感の思いを込めて汽車が行く。今見ても、熱くなります。(e)

国立天文台ニュース NAOJ NEWS

No.335 2021. 秋冬号
ISSN 0915-8863
© 2021 NAOJ
(本誌記事の無断転載・放送を禁じます)

発行日/2021年12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

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プロジェクト) / 秦和弘(水沢VLBI観測所) / 勝川行雄(太陽観測科学プロジェクト) / 平松正顕(天文情報センター) / 伊藤哲也(チリ観測所)
●編集: 天文情報センター出版室(山岡均/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、shuppan@ml.nao.ac.jpへ。または上記の電話・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。

2022年春号
(3月発行予定)は、
NAOJスタッフ・インタビュー、銀河鉄道の
夜空へ、アルマーの
冒険など特別記事満
載! お楽しみに!

次号予告



すばる望遠鏡

HSC Cosmic Gallery

15 NGC 2936

田中賢幸 (ハワイ観測所)

100 Mpcほどの距離にある、ペンギンが卵をかかえたような姿をした銀河だ。銀河同士の重力相互作用の影響でこのような形になったと考えられ、それによって引き起こされた活発な星形成の様子が青く見えている。このような銀河同士の衝突・合体をテーマとした市民天文学プロジェクト、GALAXY CRUISEが2019年11月に立ち上がり、HSCで撮られた銀河の分類に多くの市民天文学者が参加している。そのGALAXY CRUISEが令和3年度 科学技術分野の文部科学大臣表彰・科学技術賞を受賞した。ひとえに、ご理解・ご協力を頂いた皆様、そして多くの市民天文学者の皆様のおかげだと思っている。このスペースを借りて御礼申し上げるとともに、今後の発展にご期待いただきたい。

★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「GALAXY CRUISE（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/>