

自然科学研究機構



国立天文台ニュース

National Astronomical Observatory of Japan

2018年11月1日 No.304

特集「アルマ望遠鏡の世界」03 コンピューティング編



- 研究トピックス「活動的な超巨大ブラックホールの周囲に存在する回転高密度分子トーラスの発見」「人類史上最も遠い132.8億光年かなたの銀河で酸素を検出—ビッグバン2.5億年後に星を作り始めていた—」「124億光年かなたのモンスター銀河」
- コンピューティングチームスタッフに聞く! / 小杉城治 / 渡辺 学 / 芦田川京子 / 中村京子 / 臧 亮堅 / 松居隆之 / 中里 剛 / 川崎 渉 / 西江純教 / ルノー ミエル / 加藤禎博 / 池田恵美 / 小林剛志 / 森田英輔 / 清水上 誠 / 中本崇志 / 吉野 彰

★「アルマーの冒険08」

11
2018

- 表紙
- 国立天文台カレンダー

03

特集

「アルマ望遠鏡の世界」03 コンピューティング編

第Ⅰ部 アルマ望遠鏡—最近の科学成果—

- 研究トピックス1
活動的な超巨大ブラックホールの周囲に存在する回転高密度分子トラスの発見
今西昌俊（ハワイ観測所）
- 研究トピックス2
人類史上で最も遠い132.8億光年かなたの銀河で酸素を検出
—ビッグバン2.5億年後に星を作り始めていた—
橋本拓也（チリ観測所／大阪産業大学）
- 研究トピックス3
124億光年かなたのモンスター銀河
但木謙一（国立天文台・日本学術振興会特別研究員）

13

第Ⅱ部 コンピューティングチームスタッフに聞く！

- 小杉城治「アルマを動かす縁の下の力持ち、それがコンピューティングチームです」
 - 渡辺 学「画像とスペクトルを紡ぎだすソフトウェア開発」
 - 芦田川京子「豊かに実ったデータの畑で収穫作業」
 - 中村京子「日進月歩のソフトウェアを見守る試験官」
 - 臧 亮堅「特殊スパコン「相関器」を操るソフト開発」
 - 松居隆之「観測好機をとらえるためのコンピュータメンテナンス」
 - 中里 剛「CASAとPipelineで、データの原石が光り輝く」
 - 川崎 渉「ソフトウェアでデータを魅せる」
 - 西江純教「138億光年の道も一行のソースコードから」
 - ルノー ミエル「空とアンテナをつなぐデータ処理」
 - 加藤禎博「すべてを支えるコンピュータシステムの番人」
 - 池田恵美「複雑なコンピュータシステムを整理整頓」
 - 小林剛志「全員で作上げた最終成果物 観測データをお届け」
 - 森田英輔「新発見の種が詰まった宝箱 データアーカイブ」
 - 清水上 誠「星の数ほどの計算をGPUで高速に処理」
 - 中本崇志「宇宙からのメッセージを読み解くソフト開発とシステム設計」
 - 吉野 彰「価値あるデータの山の中を、効率よく歩き回るために」
- ★インタビューア：川村 晶

29

おしらせ

- 2019年国立天文台カレンダーができました（テーマはアルマ望遠鏡）
- 「2018年度IDL講習会（初級編）」開催報告 亀谷和久（天文データセンター）

31

人事異動／編集後記／次号予告

31

連載「国立天文台・望遠鏡のある風景」08

秋の陽光と太陽フレア望遠鏡

撮影：飯島 裕



表紙画像

アルマ望遠鏡アンテナ群を全球カメラで撮影。今日も「惑星アルマ」は晴天です。

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）



アルマ特集号恒例の電波天文まんが「アルマの冒険」08回を附録で同封します。今回のテーマは「高校生たちが作る電波望遠鏡」です。

国立天文台カレンダー

2018年10月

- 6日（土）4D2Uシアター公開（三鷹）
- 12日（金）教授会議／4D2Uシアター公開&観望会（三鷹）
- 13日（土）4D2Uシアター公開（三鷹）
- 16日（火）幹事会議
- 20日（土）4D2Uシアター公開（三鷹）
- 22日（月）防災訓練（三鷹）
- 24日（水）幹事会議
- 25日（木）プロジェクト会議
- 26日（金）・27日（土）三鷹・星と宇宙の日（特別公開）

2018年11月

- 3日（土）4D2Uシアター公開（三鷹）
- 8日（木）幹事会議
- 9日（金）運営会議／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）
- 21日（水）幹事会議
- 24日（土）観望会（三鷹）
- 28日（水）プロジェクト会議

2018年12月

- 1日（土）4D2Uシアター公開（三鷹）
- 7日（金）幹事会議／4D2Uシアター公開&観望会（三鷹）
- 8日（土）4D2Uシアター公開（三鷹）
- 15日（土）4D2Uシアター公開（三鷹）
- 19日（水）幹事会議
- 21日（金）プロジェクト会議
- 22日（土）観望会（三鷹）

アルマ望遠鏡の世界 03

●インタビュー 文・写真 (第Ⅱ部)

川村 晶 (星の手帖社)

●協力

チリ観測所

最新の研究成果とスタッフ・インタビューをお届けする「アルマ望遠鏡」特集シリーズ。今回は最新の3つの研究成果(第Ⅰ部「研究トピックス」とアルマ望遠鏡のソフトウェアの開発に携わるコンピューティングチーム(第Ⅱ部)をご紹介します。

第Ⅰ部・アルマ望遠鏡―最近の科学成果―

第Ⅱ部・コンピューティングチームスタッフに聞く！



トランスポーターで運ばれる12メートルアンテナ。

活動的な超巨大ブラックホールの周囲に 存在する回転高密度分子トーラスの発見

今西昌俊
(ハワイ観測所)



銀河の中心の活動的な超巨大ブラックホール

宇宙に存在する銀河は一般に広がって見える。空間的に広がって分布する星からの放射を見ているからである。銀河の中には、中心のコンパクトな領域から、非常に明るい放射が観測されるものもある。しばしば大きな時間変動を示し、可視光線での分光スペクトルを取得すると、星で輝く銀河とは明らかに異なる性質を示す。そのような天体は、太陽の約10万倍以上の質量の超巨大ブラックホールに物質が落ち込む際の位置エネルギーを

らわかっており、両者が宇宙の歴史の中で、互いに影響を及ぼし合いながら共進化してきたことが示唆される。超巨大ブラックホールが今まさに大量の物質を飲み込んで活動的になっているAGNは、宇宙の超巨大ブラックホールの質量が成長する重要な過程であると考えられている。また、AGNからの放射によって、銀河の星の生成率が大きく影響されるとする説も提唱されており、従って、AGNの性質を観測的に明らかにすることは、銀河と超巨大ブラックホールの共進化を理解する上で欠かせない。

★ newscope <解説>

★01

多くの人は、トーラスの物理的サイズは、約30光年以下と考えている。ここで、1光年とは光が1年間に進むことのできる距離で、約10兆キロメートルである。3000万年程度の距離に存在する近くの活動銀河中心核でも、トーラスの見かけの大きさは0.2秒角（1秒角は1度の3600分の1）、つまり、1度の18000分の1の広がりしかない。

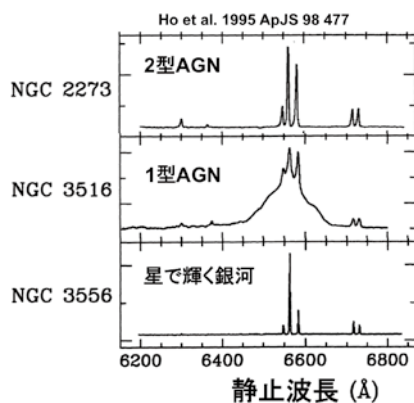


図01 可視光線の分光スペクトル。下から星で輝く銀河、1型AGN、2型AGN（図02参照）。横軸は波長（オングストローム）、縦軸は光量。Ho et al. 1995 ApJS 98 477より改変。

放射に変換して明るく輝いていると考えられており、活動銀河中心核（Active Galactic Nucleus；AGN）と呼ばれる（図01）。

昨今の観測から、ほぼすべての銀河の中心には、超巨大ブラックホールが存在することがわかっている。サイズにして数桁以上異なるにもかかわらず、銀河の星と超巨大ブラックホールの質量には相関があることも観測か

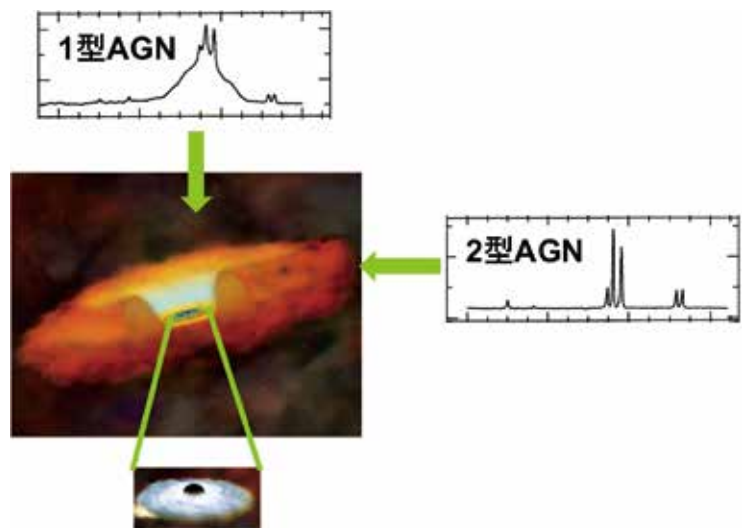


図02 活動銀河中心核（AGN）の想像図。超巨大ブラックホール（下図の黒い球）の強い重力に引き寄せられた物質は、角運動量を持つため、一気にブラックホールに落ち込むわけではなく、降着円盤（下図の白い円盤状の構造）を形成すると考えられている。この降着円盤では、物質が非常に高温になり、紫外線や可視光線を非常に強く放射する。これが、活動銀河中心核として、銀河の中心領域が非常に明るく輝く原理である。超巨大ブラックホールと降着円盤からなる中心エンジン（のさらに外側には、塵と分子ガスからなるドーナツ、いわゆる、トーラスが存在する）と考えられている（真ん中左図のオレンジ色のドーナツ状の構造）。トーラスの内側に存在するガスは、超巨大ブラックホールの強い重力によって激しく運動しており、中心エンジンからの強い放射に照らされて、速度幅の広い輝線を放射する。図で我々が上から見ている場合、中心エンジン、及び、トーラス内側の速度幅の広い輝線が直接見えるため1型、横から見ている場合はトーラスに隠されてその内側の放射を可視光線では直接見ることができないため、2型と分類される。この描像は、AGNの統一モデルと呼ばれる。トーラスは、中心の超巨大ブラックホールの重力に支配されて回転していると考えられている。図のクレジットはNASA、AAS。それを改変。

活動的な超巨大ブラックホールの周囲の、塵と分子ガスからなるトーラス

AGNには、可視光線の分光スペクトルで、速度幅の広い輝線が見られる1型と、そうでない2型が存在する(図01)。現在のAGNの統一モデルによれば、両者は本質的に同じ種族であるが、中心エンジンである質量降着して活動的になっている超巨大ブラックホールの周囲に、ドーナツ状に分布する塵や分子ガス、いわゆる「トーラス」が存在し(図02)、それに邪魔されずに中心エンジンが見えているのが1型、ブロックされて可視光線で直接見えないものが2型であると考えられている。

このようなトーラスがあれば、AGNの観測事実を自然に説明できるため、多くの研究者はその存在を信じて議論を進めている。しかしながら、トーラスはサイズの小さく(★01)、空間的にはっきりと分解し、その性質を観測的に明らかにすることは困難であった。しかし、高空間分解能が実現されるALMAの登場により、そのような研究が可能になりつつある。

A LMAによって鮮明に描き出されたトーラス

約4500万光年の距離にある2型AGN NGC 1068は、約1000万太陽質量の活動的な超巨大ブラックホールを持つと見積もられている、比較的近くにあるよく研究されてきたAGNの一つで、上記のAGNの統一モデルが提唱される基になった天体である。従って、NGC 1068において、想像されているトーラスが実際に存在するのかを観測的に確認することは、AGNの理解において非常に重要である。NGC 1068の過去の観測からは、電波のジェット放射、及び、降着円盤からの放射によって電離した、空間的に広がったガスからの可視光線の輝線が、超巨大ブラックホールに対してほぼ南北方向に伸びて見ついている。これらの放射は、トーラスにブロックされない方向に出て行きやすいと考えられ、従って、トーラスは、南北と直交する方向、すなわち、ほぼ東西方向に分布しているはずだと期待される。

我々は、ALMAを用いてNGC 1068の中心領域を高い空間分解能で観測した。用いたのは、トーラスに存在すると考えられている高密度ガスの性質を調べるのに適した、HCN(シアン化水素)、 HCO^+ (ホルミルイオン)の回転遷移 $J=3-2$ の輝線である。達成された空間分解能は0.04–0.07秒角であった。図03

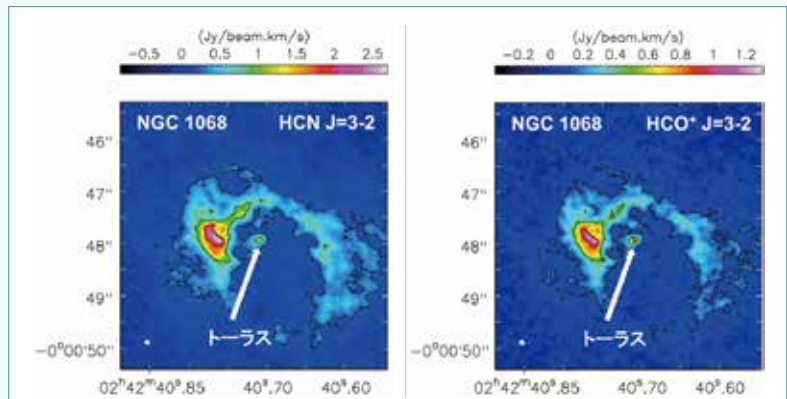


図03 ALMAによるNGC 1068の中心数秒角の分子ガス輝線放射の空間分布。左がHCN $J=3-2$ 輝線で右が $\text{HCO}^+ J=3-2$ 輝線。図の左側が東で、右側が西、上が北で、下が南。等高線はノイズの3、12、24倍。左下の白丸がビームサイズを表す。Imanishi et al. 2018 ApJL 853 L25より改変。

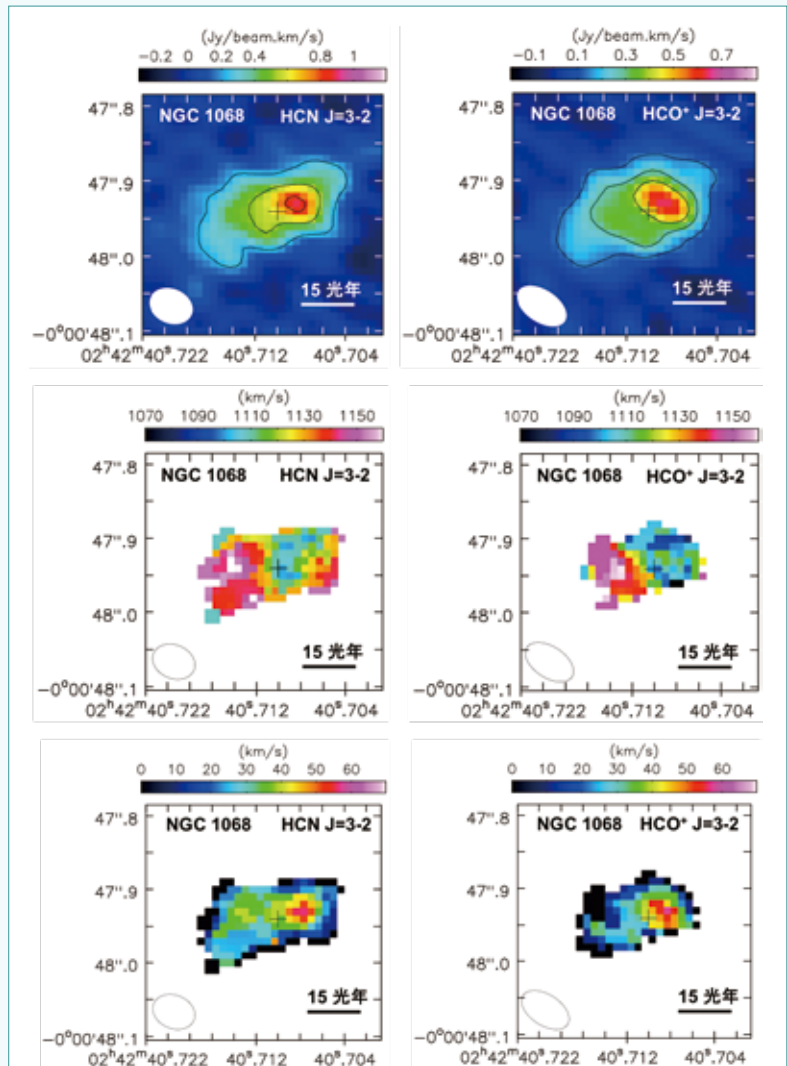


図04 左がHCN $J=3-2$ 輝線で右が $\text{HCO}^+ J=3-2$ 輝線。図の左側が東で、右側が西、上が北で、下が南。一番上：トーラスの分子輝線放射の空間分布の拡大図。西側(右側)が明るい。等高線はノイズの3、6、9倍。上から2段目：トーラスの分子輝線の速度場。東側(左側)が赤い側にシフトしており遠ざかっていく運動、西側(右側)が青い側にシフトしており近づいてくる運動をしていることがわかる。一番下：分子ガスの擾乱の程度を表す速度分散。西側(右側)で擾乱が大きくなっていることがわかる。すべての図で、+印が活動的な超巨大ブラックホールの位置、黒い横棒の長さは15光年、左下の白丸がビームサイズを表す。Imanishi et al. 2018 ApJL 853 L25より改変。

にNGC 1068中心数秒角の領域での、これらの高密度分子ガス輝線の空間分布を示す。銀

河に付随する広がった成分に加え、活動的な超巨大ブラックホールが存在すると考えられている位置に、トーラスの高密度分子ガス起源と考えられるコンパクトな放射が見えている。

図04（上）は、トーラス位置での高密度分子ガス輝線放射の強度の拡大図である。期待通り、ほぼ東西方向に30光年程度に伸びた分子ガス輝線放射を検出することができた。また、図04（中）の分子ガス輝線の運動からは、トーラスの分子ガスはほぼ東西方向に回転し、東側（図の左側）が遠ざかる向き（赤い）、西側（図の右側）が近づいてくる向き（青い）であることも分かった。これらの観測結果は、NGC 1068中心核で期待されていたトーラスの分子ガスの性質とよく一致する（★02）。

しかしながら、その観測的性質を詳しく見てみると、従来から考えられてきた単純なトーラスモデルよりも複雑であることも同時に明らかになった。単純なトーラスモデルでは、トーラスはほぼ軸対称で、中心の超巨大ブラックホールの重力に支配されて回転していると考えられて来た。図04（上）では、トーラスの西側（図の右側）で、東側（図の左側）より放射が明るく観測されており、大

きく非対称な性質を示す。図04（下）のランダム運動の大きさ（速度分散）を見ると、西側の方で大きく、トーラスの西側では、大きな分子ガスの擾乱によって光学的厚さが小さくなり、抜け出して来ることのできる分子ガス輝線が増えることによって明るくなっていると解釈できる。また、図04（中）の回転速度は、太陽の約1000万倍の質量の超巨大ブラックホールの重力のみが支配している場合の回転運動に比べて小さく、何らかの擾乱が生じていることが考えられる。これらの特徴は、観測したHCN $J=3-2$ 、 $\text{HCO}^+ J=3-2$ 輝線両方で同じように見えており、両輝線が同じような高密度分子ガスを見ていること、トーラスの特徴を正しく暴き出していることを示している。本研究は、存在すると言われてきたが観測的に未開拓であったトーラスの形態、動力学をALMAの高空間分解能で初めて鮮明に明らかにした（図05）という点で意義が大きい（Imanishi et al. 2018 ApJL 853 L25）。

単純なトーラスモデルに比べて複雑な性質を示す理由については、いくつかの仮説があり、ALMAを用いた今後のより詳しい観測によって明らかにしていくことを計画している。

★ newscope <解説>

★02

別の研究グループも、ALMAを用いて、一酸化炭素の輝線CO $J=6-5$ でNGC 1068の観測を行い、ほぼ東西の方向に伸びた放射を見つけているが、運動は南北方向に回転しているような結果となっていた。特に運動に関して、NGC 1068のトーラスに期待される性質からは大きく食い違っており、解釈が困難であった。トーラスの擾乱が著しく大きい（Garcia-Burillo et al. 2016 ApJL 823 L12）、あるいは、トーラスと垂直方向に放出されているアウトフローが起源であるため（Gallimore et al. 2016 ApJL 829 L7）などの説が提唱されている。

●論文掲載

“ALMA Reveals an Inhomogeneous Compact Rotating Dense Molecular Torus at the NGC 1068 Nucleus”, M. Imanishi et al. (2018), The Astrophysical Journal Letters, 853, 2

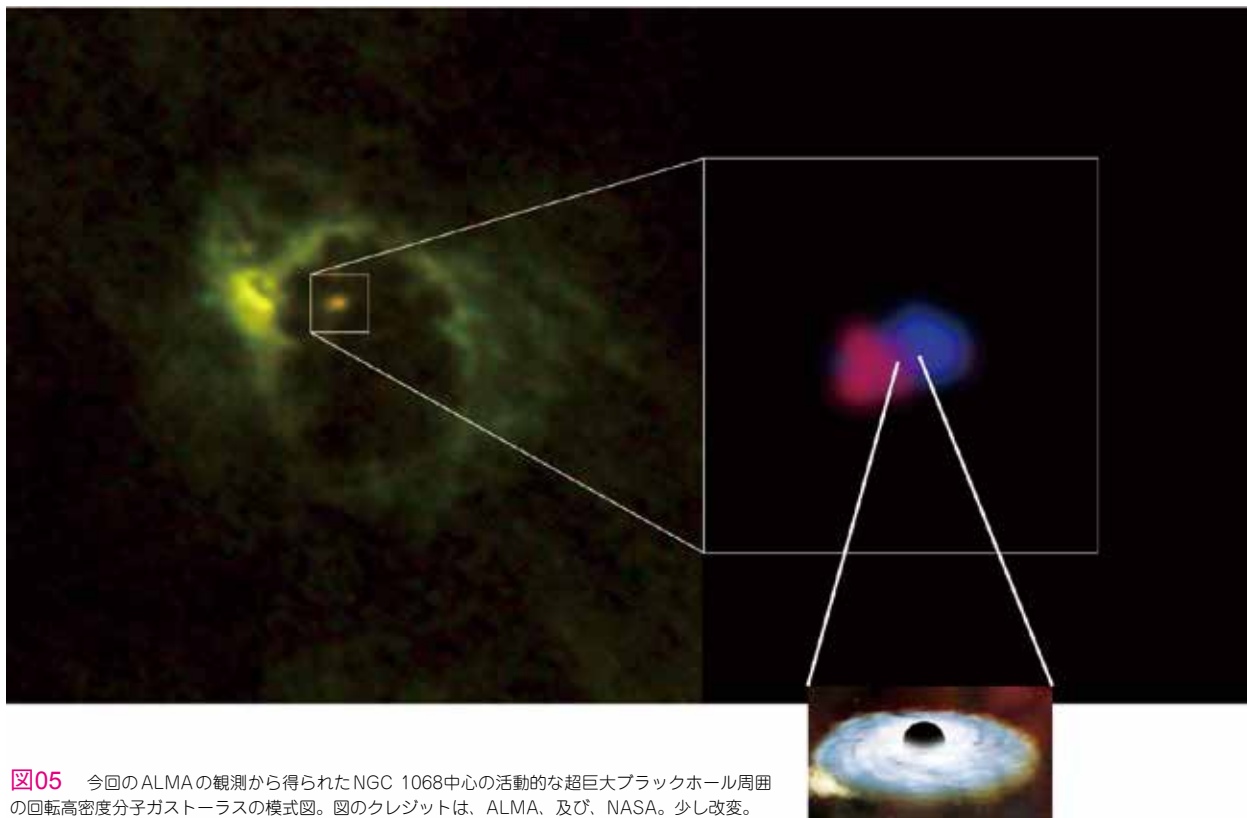
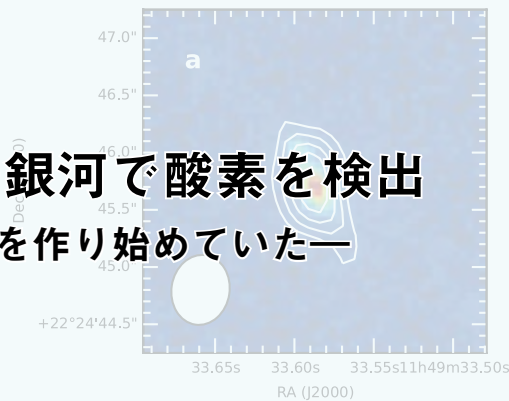


図05 今回のALMAの観測から得られたNGC 1068中心の活動的な超巨大ブラックホール周囲の回転高密度分子ガストーラスの模式図。図のクレジットは、ALMA、及び、NASA。少し改変。

人類史上で最も遠い 132.8億光年かなたの銀河で酸素を検出 —ビッグバン2.5億年後に星を作り始めていた—



橋本拓也
(チリ観測所／
大阪産業大学)



はじめに

わたし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、最も遠い銀河から酸素輝線（以下 [OIII] ★01）の検出に成功しました（図01）。得られた赤方偏移（★02）は $z = 9.11$ で、これは距離に換算すると132.8億光年に相当します（★03）。この成果は、2018年5月17日に出版されたネイチャー誌に掲載されました。この記事では、①132.8億光年かなたの銀河で酸素の検出と②この銀河がビッグバン2.5億年後に星を形成し始めていたことをご紹介します。

酸素輝線を用いた宇宙再電離の研究の歴史

宇宙再電離（図02）が、どのような天体によって引き起こされ、どのようなプロセスを経たのかを解き明かすことは、現代天文学の最重要課題の一つです。この問いに答えるためには、宇宙再電離期の銀河を観測し、その性質を理解することが大切です。遠方銀河の



図01 ハッブル宇宙望遠鏡で得られた銀河団MACS1149+2223と、その一角にあるMACS1149-JD1の酸素輝線。画像全体にわたってMACS1149+2223という名前の銀河団が存在します。MACSとはMASSIVE Cluster Surveyの略語で、その名の通り重い銀河団です。拡大された緑色の画像は、MACS1149-JD1の酸素輝線の様子です。

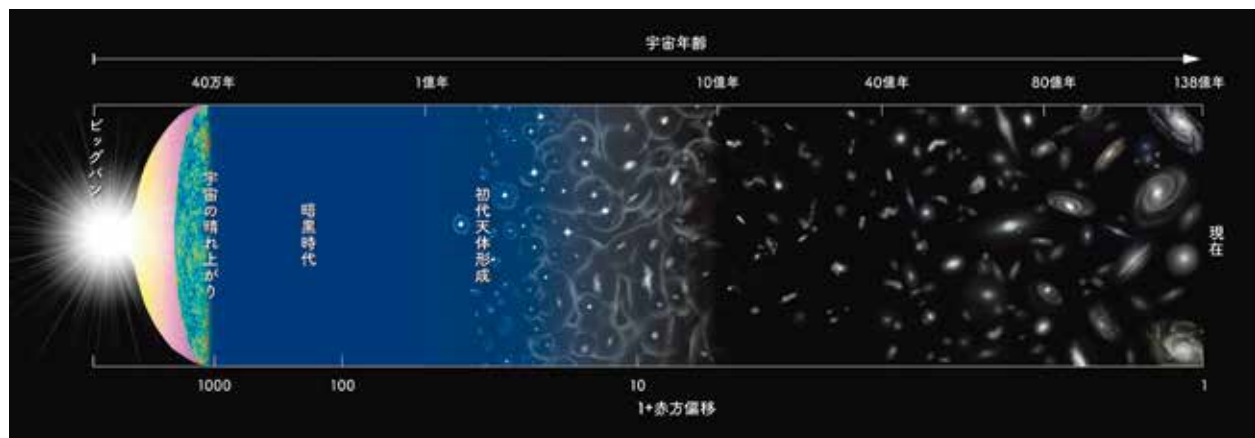


図02 宇宙の時間進化の模式図。膨張宇宙は、およそ138億年前に開始しました（ビッグバン）。その直後には電離していた電子と陽子が、宇宙の膨張・冷却に伴い結合しました（宇宙の晴れ上がり）。その後、初代星や初代銀河からの紫外線により再び電離し（宇宙再電離）、現在の宇宙の姿に至ったと考えられています。宇宙再電離は、赤方偏移 $z \approx 20$ （宇宙年齢 約2億年）から開始し、 $z \approx 6-7$ （宇宙年齢 約8-10億年）に完了したと考えられています。

性質を調べる上での第一歩は、遠方銀河までの距離を測定することです。遠方銀河の距離を測定する方法は大きく分けて二つあります。一つ目はライマンブレイク法（★04）です。この手法は撮像データから多数の遠方銀河の距離を効率良く推定できる一方で、距離に不定性が残ります。もう一つの方法は輝線を分光する方法で、正確な距離を測定できます。

遠方銀河の探査は世界的な競争が続いており、多くの研究者が最遠方銀河の輝線を分光しようと奮闘しています。近年、アルマで宇宙再電離期の [OIII] 輝線を分光する研究が大きく花開きました。この背景を振り返ってみましょう。伝統的に遠方銀河の分光に使われてきたのは、紫外線帯にある水素ライマン α 輝線でした。しかし、宇宙再電離期の銀河では、この輝線が弱くなり、観測が困難だと分かっていました（★05）。そこで着目されたのが [OIII] 輝線です。近傍の矮小銀河では、[OIII] が強いことが分かっており、遠方銀河は近傍の矮小銀河に似た性質を示すと予想されています。このことに注目した大阪産業大学の井上昭雄准教授らは、2014年に理論研究を行い、アルマで宇宙再電離期の銀河から [OIII] が検出可能だと予想しました。そして2016年に、井上氏の率いるグループが、宇宙再電離期（赤方偏移 $z = 7.21$ すなわち131億光年かなた）の銀河から初めて [OIII] の検出に成功しました。この成果はサイエンス誌に掲載されました。さらに2017年には、ロンドン大学のニコラ＝ラポルテ氏率いるグループが、 $z = 8.38$ （132億光年かなた）の銀河で [OIII] 輝線の検出を報告しました。

この記事で紹介する成果は、これらの研究が土台になっています。本研究は、前述した大阪産業大学とロンドン大学のグループをはじめとした国際研究チームで行われました。切磋琢磨の中で得られた成果だったのです。

観測ターゲット：MACS1149-JD1

本研究の観測ターゲットは、MACS1149-JD1という名前の銀河です。MACS1149+2223という重い銀河団の背景にあるため、強い重力レンズ効果（★06）を受けた、見かけ上明るい遠方銀河です（図01および脚注参照）。この天体は、本研究の共同研究者でもあるウェイ＝ジャン（アメリカ ジョンズ・ホプキンス大学）らによって、2012年に発見されました。ハッブル宇宙望遠鏡（以下HST）およびスピッツァー宇宙望遠鏡（以下スピッツァー）の撮像データを利用し、前述のライマンブレイク法で赤方偏移は $z = 9.6 \pm 0.2$ と推定されました。しかし後になって、HSTとスピッツァーのそれぞれで質の高い撮像データが得られると、実は距離の不定性が大きい（ $z = 9.0 - 9.8$ ）ことがわかりました（川俣ら2016年など）。やはり正確な距離を決定するためには、輝線の分光観測が必要です。

アルマで検出された最遠方の酸素（成果1）

アルマ観測は2016年3月から2017年4月の間にかけ、合計で約5時間行われました（PI：井上昭雄）。アルマで一度に観測できる周波数帯、つまり赤方偏移の幅には限りがあります。このため、4つのチューニングを用いて観測を行い、 $z = 9.0 - 9.8$ という誤差範囲をカバーしました。図03は [OIII] の空間分布図（左）と [OIII] 付近のスペクトル（右）です。この空間分布図を見ると、アルマで検出した [OIII] の位置とHSTで見ている紫外光の位置が良く一致しています。輝線検出の優位性は 7.4σ と高く、スペクトルから $z = 9.1096 \pm 0.0006$ が得られました。これは最も遠い酸素の検出であるばかりでなく、輝線から正

new scope <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} ）の輝線を観測しました。記号で [OIII] と書きます。

★02 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。

★03 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。

★04 ライマンブレイクとは、銀河間ガスによって作られる912–1216 Åより短波長側に見られる銀河の連続スペクトルの鋭い落ち込みです。このライマンブレイクの長波長側と短波長側をそれぞれ広帯域フィルターで測光して距離を推定することができます（天文学辞典参照）。

★05 宇宙再電離が完了する前の時代（およそ $z > 7$ ）では、ライマン α 光子が銀河間空間に浮かぶ中性水素ガスによって散乱され、私たちまで届きづらくなります。

★06 背景の天体から出た光が、前景の銀河や銀河団の重力場によって曲げられる現象です。

★07 Spectral Energy Distributionを略してSEDと言います。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、現在星形成が活発に行われているのか、星形成がごく最近停止したのか、または星形成活動が起きていたのはずいぶん昔なのかなど、その銀河の星形成史を推定できます（天文学辞典参照）。本研究では、HSTは静止系紫外域、スピッツァーは静止系可視域、アルマは静止系遠赤外域の光を、それぞれ見えています。

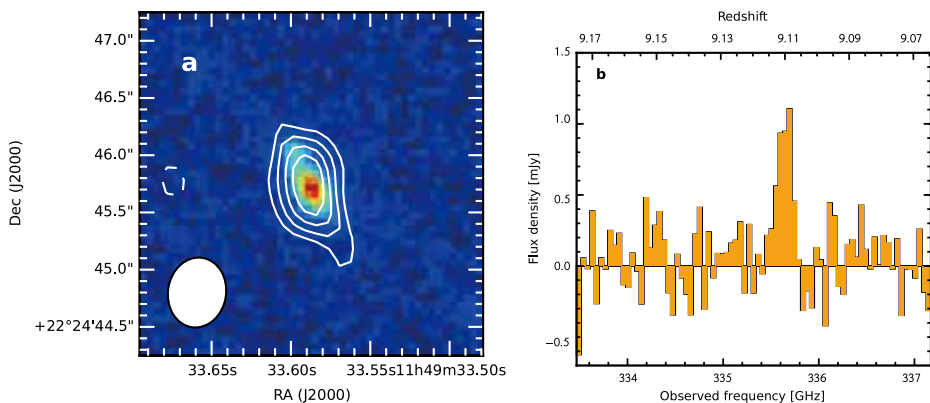


図03 アルマで検出された酸素輝線の様子。（左）白色のコントアはアルマで取得した [OIII] の空間分布を示します。背景のカラー画像は、HSTで取得した紫外光。（右）[OIII] 輝線付近のスペクトル。 $z = 9.11$ に強いピークがあります。

確に距離の求まった天体としても最遠方です。そしてアルマが初めて最遠方銀河の記録を打ち立てた成果でもあります。

ビッグバン2.5億年後に星を作り始めていた (成果2)

さらに私たちは、MACS1149-JD1の多波長スペクトルエネルギー分布 (SED: ★07) を解析し、観測時点より過去の星形成史を解明しました。この結果、MACS1149-JD1は観測時点で既に成熟した天体であることが分かりました。宇宙初期の銀河は平均的には若いことが予想されるので、意外で興味深い成果です。このことを詳しく見てみましょう。

SEDを構築するため、私たちはアルマの酸素輝線データや赤外連続光データに加えてHST、超大型望遠鏡 (以下VLT)、そしてスピッツァーの撮像データを利用しました (図04)。MACS1149-JD1のSEDの興味深い特徴は、スピッツァーの2つの波長 (3.6 μm と 4.5 μm) の測光強度に段差が生じている点です。これまでの研究では、MACS1149-JD1の距離に不定性があったため、この段差の解釈は複数あり決着がついていませんでした。本研究では、詳しい解析の結果、この段差はバルマーブレイク (★08) という古い星から出た光が寄与していることを明らかにしました。一方で、アルマで検出された [OIII] 輝線は、現在も活発な星形成活動が起きていることを示唆しています (★09)。これらの特徴を単一の星種族によって説明することは困難です。代わりに、この銀河を古い成分と若い成分の2種族が存在すると考え、図05のような3段階の星形成史を仮定すると、SEDを整合的に説明できます。①まず1回目の星形成を行い、多くの星を形成します ($z \sim 15 - 12$)。ここで作られた星が古い成分に対応します。②やがて寿命を終えた星が超新星爆発を起こし、一旦星形成を止めバルマーブレイクを徐々に成長させます ($z \sim 12 - 9$)。③そして、爆発によって吹き飛ばされていたガスが銀河本体の重力によって再び集まり、132.8億年前に二度目の星形成が始まり、いまその姿を見ているわけです ($z = 9.11$)。このようにして、MACS1149-JD1はビッグバン後2.5億年

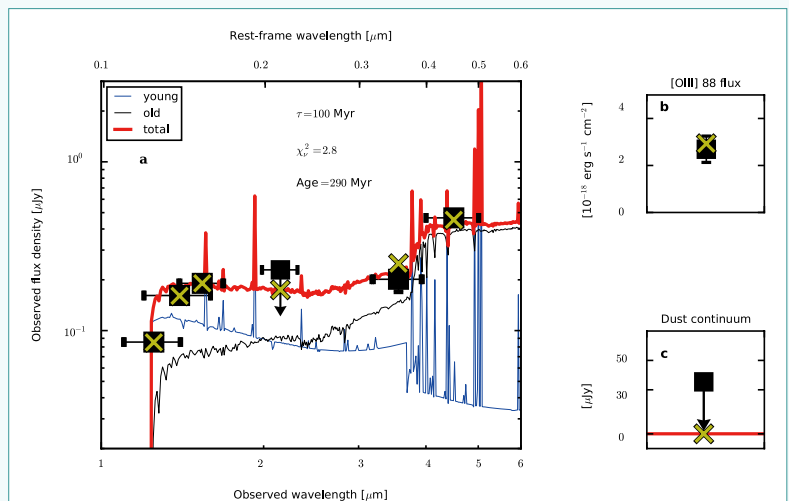


図04 MACS1149-JD1のSED。[OIII] 輝線は現在の星形成活動の情報を与え、SEDは貴重な過去の星形成活動の情報を含んでいます。図のSEDは、古い星成分が $12 < z < 15$ の1億年の間で星形成をしていたと仮定した場合の結果 (図05の赤実線を参照) です。a: 黒色の四角形は、左からHST F125W、F140W、F160Wのデータ、VLT/HAWK-IのKsバンド 2σ 上限値、スピッツァーの3.6 μm 、4.5 μm のデータをそれぞれ示します。横方向の誤差棒は各フィルターの観測波長範囲を表し、縦方向の誤差棒は測定値の 1σ 誤差です。赤色の実線はモデルスペクトルを表し、黄色のクロス印 (x) はこれに対応する等級です。青色および黒色の実線は、それぞれ若い星と古い星による寄与を表します。b: 黒色の四角形はアルマで観測された [OIII] 輝線フラックスで、 1σ は誤差棒で示されている。黄色のクロスはモデルで再現された [OIII] フラックス。c: 黒色の四角形はアルマで観測された赤外連続光の 2σ 上限値で、黄色はモデルで再現された赤外連続光。

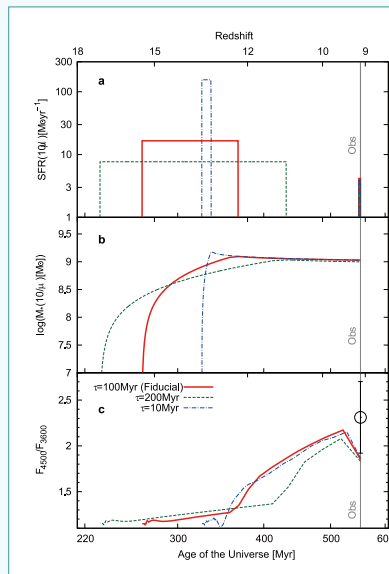


図05 過去の星形成史がMACS1149-JD1のSEDを再現するために必要であることの実証。MACS1149-JD1の (a) 星形成、(b) 星質量の集積、そして (c) バルマーブレイクの成長の歴史を宇宙の時間進化に沿って示したものの。F4500とF3600は静止系4500Åと3600Åにおけるフラックス密度を表す。各パネルで青色一点鎖線、緑色破線、赤色実線はそれぞれ、古い星成分が0.1億年、2億年、1億年の期間に星形成をしたと考えたモデルに対応する。どのモデルも $z = 9.1$ の時点で観測されたバルマーブレイク (パネルcの黒丸) を再現できる。論文では赤色実線の場合を基準モデルとして扱った。

($z \sim 15$) には星形成を始めていたことが明らかになりました。HSTを用いた従来の研究では、 $z \sim 15$ という宇宙最初期の星形成を調べることは不可能です。本研究は、最初期の星形成に初めて知見を与えた点で大きな科学的意義があります。

★ new scope <解説>

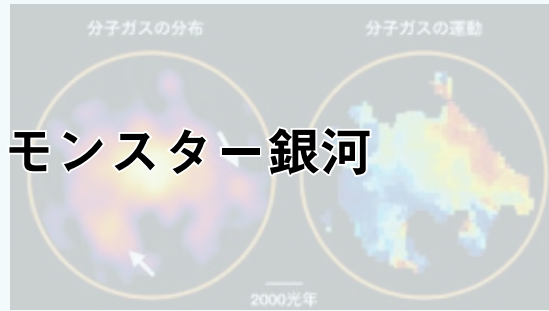
★08 水素原子のバルマー系列の吸収が束縛-束縛遷移による離散的な吸収から束縛-自由遷移による連続吸収へと変化する波長で見られる連続スペクトルの段差。B型星からA型星で顕著に見られる。(天文学辞典)

★09 若い大質量星から放たれた紫外光によって、酸素は二階電離しています。

●論文掲載

“The onset of star formation 250 million years after the Big Bang”, T. Hashimoto et al. (2018), Nature, 557, 392

124億光年かなたのモンスター銀河



但木謙一

(国立天文台、
日本学術振興会
特別研究員)



モンスター銀河の発見

新月の夜に、都会から離れた暗い場所で空を見上げると天の川を見ることができます。天の川は実際には川のような姿をしておらず、1000億個以上もの星々が集まってできた円盤形の銀河です。私たちに身近な太陽もこの天の川銀河にある星の1つです。天の川銀河では年間で太陽1個分に相当する星が新たに生まれていますが、モンスター銀河ではその1000倍ものペースで星が生まれています。

天文学者は可視光線・赤外線・電波など様々な波長で観測を行います。モンスター銀河は赤外線と電波の間にあるサブミリ波（1mm前後の波長）での観測によって見つけることができます。ろくぶんぎ座やしし座の近くにあるCOSMOS（コスモス）と呼ばれる天域で★01、サブミリ波カメラAzTEC（アズテック）★02を使った大規模探査を行い、発見された50個のモンスター銀河候補天体の中で最も明るかったのがCOSMOS-AzTEC-1です。サブミリ波の観測では銀河内にある星に熱された塵からの光を捉えており、サブミリ波で明るければ明るいほど、その銀河の中ではたくさんの星が作られていることになります。

その後の観測によって、COSMOS-AzTEC-1は地球から124億光年離れた距離にあることがわかりました。また他のモンスター銀河の多くも90–120億光年離れた、すなわち90–120億年前の宇宙にあることがわかっています。モンスター銀河は90–120億年前こそ活発に星を作っていますが、現在の宇宙ではすでに星作りを止め、巨大楕円銀河として存在していると考えられています。星が集まってできた天体が銀河ですが、その銀河もまた集まって銀河団を形成しており、その銀河団の中心に存在しているのが巨大楕円銀河です。そのため初期宇宙のモンスター銀河を調べることは、巨大楕円銀河ひいては銀河団の誕生と進化の歴史を紐解くことにつながります。



アルマ望遠鏡で捉えるモンスター銀河の姿

COSMOS-AzTEC-1や他のモンスター銀河では、塵がサブミリ波で明るく光っていますが、その光の多くは銀河の中心から5000光年程度の範囲に集中していることがこれまでの研究によってわかっています。天の川銀河の中心から太陽系までの距離が2万6000光年なので、モンスター銀河で作られる星の多くは中心の狭い領域に集中していることになります。どうしてモンスター銀河の中心でこれほど猛烈な星形成活動が起きているのか、その理由はまだ明らかになっていません。その謎を探る鍵となるのは「分子ガス」です。星は分子ガスが高密度に凝縮した分子ガス雲から誕生します。従って星の材料となる分子ガスの分布を示す詳細な地図を得ることができ

★newscope<解説>

★01 COSMOS（コスモス）天域

The Cosmic Evolution Survey（宇宙進化探査）の略称で、ろくぶんぎ座やしし座方向にある2平方度（満月の約10倍の広さ）の天域。100億光年以上かなたにある銀河や巨大ブラックホールなどを研究するために、すばる望遠鏡やハubble宇宙望遠鏡など世界中の望遠鏡を使って集中的に観測を行っている。

★02 サブミリ波カメラAzTEC

1.1 mmまたは2.1 mmの波長帯の電磁波を観測することができる144画素のカメラ。今回のモンスター銀河を発見した当時は、ハワイ島のマウナケア山頂にあるジェームズ・クラーク・マクスウェル望遠鏡に搭載されていた。

ば、モンスター銀河で星がどのように生まれているのか知ることができるかもしれません。

しかしながら120億光年以上も離れた銀河における分子ガス地図を得ることは、簡単ではありません。遠方にある銀河はとても小さく見えるので、それを分解できるほど高い解像度の観測を行う必要があります。また銀河自体もたいへん暗いため、詳細な地図を描くには高い感度が必要となります。そこで、高い感度と解像度を併せ持つアルマ望遠鏡の定番です。アルマ望遠鏡では、複数のアンテナを広い範囲に配置することで、1つの巨大な望遠鏡のように高い解像度の観測を可能にします。今回国立天文台の研究者を中心とする国際研究チームは、アルマ望遠鏡のアンテナ群の配置を最大に広げた状態（アンテナ展開範囲16 km）で観測して高い解像度を実現し、また解析に必要な較正用のデータを含めて合計14時間にわたってCOSMOS-AzTEC-1を観測し続けることで非常に弱い電波まで捉え、超高感度・高精細な分子ガス地図を取得することに成功しました。これは、非常に遠方にあるモンスター銀河の分子ガス地図としては、これまででもっとも高解像度のものとなりました。

図01がアルマ望遠鏡を用いて観測したCOSMOS-AzTEC-1の一酸化炭素分子（CO）の分布を示す地図です。分子ガスの多くは水素分子（H₂）なのですが、残念ながら水素分子は明るく光らないので、その次に多く存在している一酸化炭素分子の観測を通して、分子ガスの量や性質を調べることができます。COSMOS-AzTEC-1では、分子ガスの大部分が銀河の中心から5000光年程度の範囲に集中していることがわかりました。モンスター銀河では、塵の観測から中心部分で活発に星が生まれていることがすでにわかっていますから、星の材料である分子ガスも同様に中心部に集中していることは珍しいことではありません。ところがCOSMOS-AzTEC-1では、中心から離れた位置にも大きなガスの塊が2つあることがわかりました。なぜこんなところにガスの塊があるのでしょうか？ このガスの塊にこそ、モンスター銀河がモンスターたるゆえん、すなわち爆発的に星が生まれている秘密が隠されていたのです。

分子ガスの重力vs分子ガスの圧力

濃く集まった分子ガス雲は自らの重力によってつぶれ、たくさんの星が生まれます。モンスター銀河の中心から離れたところで発

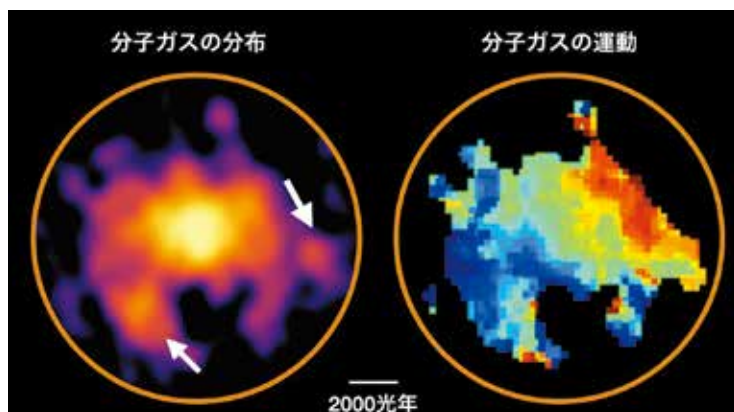


図01 （左）アルマ望遠鏡の観測によって得られたCOSMOS-AzTEC-1の分子ガスの分布を示した地図。白い領域ほど分子ガスが多く集まっており、黒い領域は分子ガスがないことを意味しています。矢印の位置でガスの塊が発見されました。Credit: ALMA (ESO/NAOJ/NRAO)

図02 （右）アルマ望遠鏡の観測によって得られたCOSMOS-AzTEC-1の分子ガスの運動を示した地図。赤い領域は分子ガスが地球から遠ざかっている運動、青い領域は近づいている運動、緑の領域はその中間の運動をそれぞれ意味しています。

見された2つの分子ガスの塊でも星生成活動が活発になっているはずですが。しかしある程度の星ができると、星から噴き出す風や寿命を終えた星が爆発する際（超新星爆発）の衝撃波★03などが重力にあらがう圧力として機能するため、分子ガス雲はつぶれることができず、星が生まれにくくなります。このように、銀河における星形成活動は、ほどよいペースに自動的に落ち着くと考えられます。

今回のアルマ望遠鏡の観測データからこの分子ガスの重力と圧力の大きさをそれぞれ測定することができます。分子ガス雲の重力というのは分子ガスの質量（正確には単位面積当たりの質量）に関係していますので、図01の分子ガスの分布を示す地図から場所ごとの重力の大きさを知ることができます。一方で一酸化炭素分子の観測では、分子ガスの運動についても調べることができます。図02はその一例で、分子ガスの視線方向の速度を示しています。右上から左下にかけて赤→緑→青と色が徐々に変わっているのは、分子ガスが回転運動をしていると考えられます。また回転運動とは別に、分子ガスの動き

newscope<解説>

★03 星から噴き出す風や超新星爆発の衝撃波

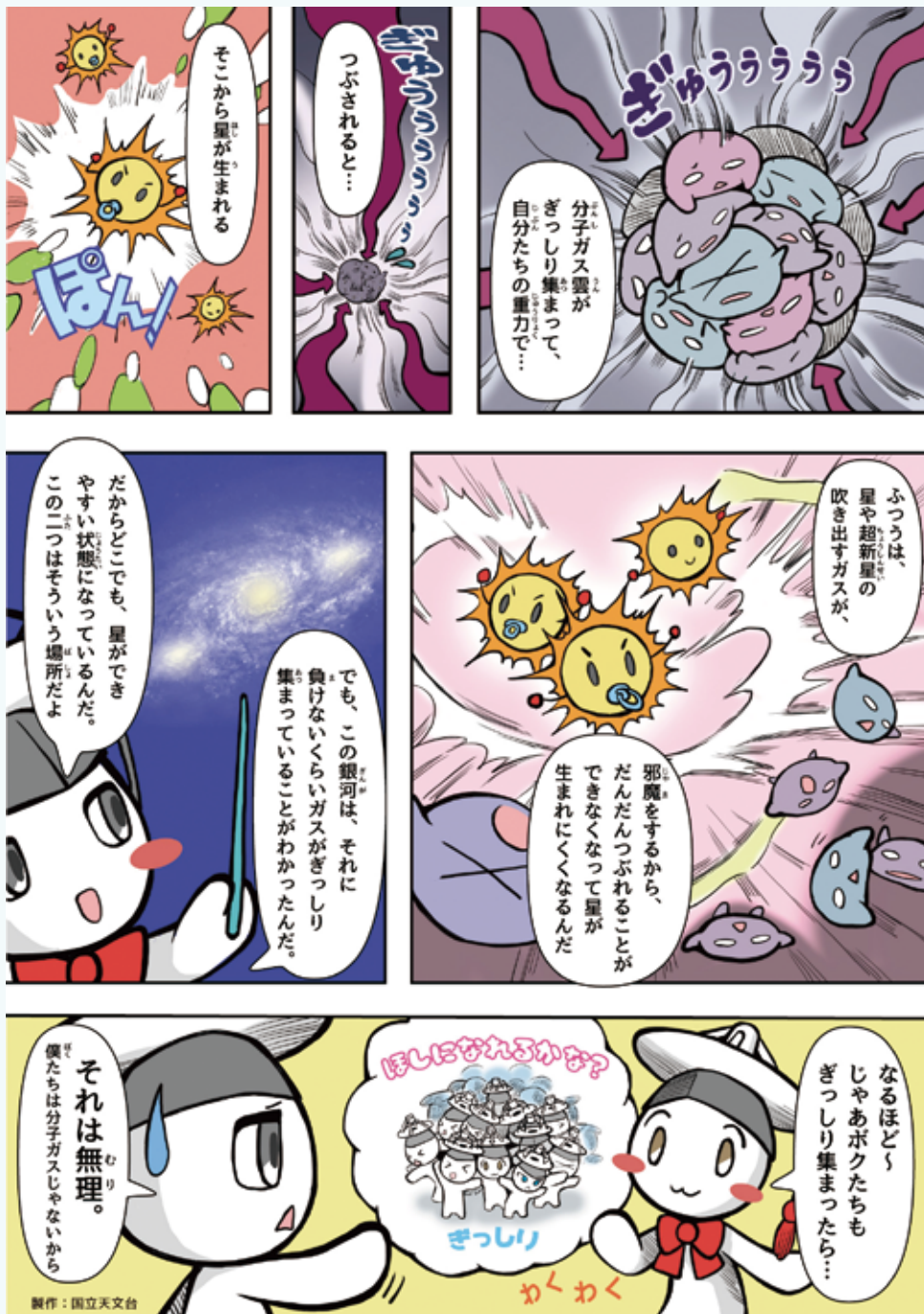
星の表面から物質が星間空間に放出される流れを星風と呼び、大質量星ではその速度は1000km/sに到達する。また大質量星は寿命を終える際にも超新星爆発によって、衝撃波を生じる。これらはともに星間空間にある分子ガスが自らの重力によって潰れようとするのを妨げる働きをする。もし星風や超新星爆発の衝撃波がなければ、分子ガスはすぐに潰れ、次から次へと星になるが、多くの銀河では実際に観測される星形成活動と整合がとれなくなってしまう。しかし今回のモンスター銀河では猛烈な星形成活動が観測されており、分子ガスの重力が勝っていても不思議ではない。

の激しさ（乱れ具合）も測定することができます。この乱雑な運動は星や超新星爆発から吹き出す衝撃波と関係していると考えられるので、重力にあらがう圧力の大きさを知ることができます。

アルマ望遠鏡で124億光年かたにあるモンスター銀河COSMOS-AzTEC-1を観測し、分子ガス雲がつぶれようする重力とそれにあらがう圧力をそれぞれ測定した結果、重力が勝っていることがわかりました。中心から離れたところで発見された2つの分子ガスの塊の存在も分子ガスがつぶれつつあることを

間接的に支持しています。このようにモンスター銀河にある分子ガスは星が生まれやすい状態にあり、結果として星形成活動のペースが天の川銀河の1000倍にもなっているのだと考えられます。

今回観測したモンスター銀河はたった1つですが、宇宙には他にもモンスター銀河が存在しています。今回の観測結果がモンスター銀河全般に言えることなのか、それともCOSMOS-AzTEC-1特有のことなのか、今後のアルマ望遠鏡の観測にご期待ください。



12mくん と 7mくん が大活躍!

アルマ望遠鏡広報の新しいチャレンジとして、今年度からマンガを内製し活用しています。このコーナーで掲載しているマンガは、観測成果をtwitter (@ALMA_Japan) で紹介するために作成したものです。日本製の12 mアンテナと7mアンテナを模したキャラクター（名前は、とりあえず「12mくん」と「7mくん」）のやり取りを通じて、わかりやすく親しみやすいかたちで研究の中身を解説しています。

twitterでは、観測成果の紹介のほかにも電波天文学特有の概念を解説したり「よくある質問」に答えたりするマンガを掲載しています。たとえば、「なぜ電波観測で、宇宙にある物質の種類がわかるのか?」「どうしてガスが回っているとわかるのか?」といった質問が、twitterを通して投げかけられたことがあります。タイムリーに答えられるわけではありませんが、こうした質問をストックしておいて次のマンガのネタにします。

さらに、今年の「三鷹・星と宇宙の日」でもキャラクターたちは大活躍。ヨーロッパ製・アメリカ製アンテナ、さらにはピークニャも総出でハロウィン風のいでたちで皆さんをお迎えしました。



★キャラ紹介：左から7mくん、12mくん、アメリカくん、ヨーロッパくん。かぶっている帽子の形に、実際の各アンテナの特徴を反映させています。



▶ドブラー効果の解説。



◀分子が電波を出すメカニズムの解説。



◀はやぶさ2のリュウグウ到着に合わせて出したマンガ。小惑星もアルマ望遠鏡の観測ターゲットであることを伝えました。ちなみにこれがきっかけで、宇宙科学研究所ウェブサイトの「こちらははやぶさ2管制室（こちはや）漫画版Vol.4」にアルマ望遠鏡と阪本成一 チリ観測所長に似た「サケモト先生」が登場。

●論文掲載

“The gravitationally unstable gas disk of a starburst galaxy 12 billion years ago”, K. Tadaki et al. (2018), Nature, 560, 613

★これまでの作品は、twitterで「マンガでわかるアルマ望遠鏡」と検索するか、<https://alma-telescope.jp/education>へ。

第Ⅱ部

コンピューティングチームスタッフに聞く！

アルマ望遠鏡のコンピューティングチームは、どのような業務を行っているのでしょうか。まず、東アジア・コンピューティングチームマネージャの小杉城治さんに全体像を紹介していただきます。

●インタビュー（文・写真）
川村 晶（星の手帖社）

小杉城治

KOSUGI George

チリ観測所 准教授
東アジア・コンピューティングチームマネージャ

アルマを動かす縁の下の力持ち、 それがコンピューティングチームです



私は、アルマの運用に必要なあらゆるソフトウェアを作ってきたコンピューティングチームのマネージャです。54台の12mアンテナ、12台の7mアンテナ、アンテナに積まれた受信機群、スパコンに匹敵する2台の相関器など、科学観測や運用に必要なあらゆる「もの」をつないで、システムとして動かしているのがソフトウェアです。また、観測時にオペレータが操作をおこなう観測制御システム、研究者が観測プロポーザルの作成に使う観測準備ツール、研究者が科学データを検索して取り出すサイエンスアーカイブ、取り出したデータを解析処理するデータ解析ソフトウェアなど、ソフトウェアは人とアルマをつないでいます。

国立天文台と共同でアルマを運用しているアメリカ国立電波天文台(NRAO)、ヨーロッパ南天天文台(ESO)、更にチリ合同アルマ観測所(JAO)にもコンピューティングチームがあり、われわれのチームと共に1つの統合コンピューティングチーム(ICT: Integrated Computing Team)として協調しつつ、アルマで使われるソフトウェアの開発や運用・保守をおこなっています。観測所の運用サイクルに沿ってソフト

ウェアの機能を見ていくと、観測プロポーザル作成や申請、採択プロポーザルから観測手順の作成、観測手順に従った観測実行、観測データの収集と保管、観測データの解析と品質保証、研究者へのデータ配信などが挙げられますが、これら全ての機能がわれわれが作ってきたソフトウェアによって実現されているのです。

日本のアルマコンピューティングチームは、大きく4つのサブチームに分かれて活動しています。日本が開発したモリタアレイ(Atacama Compact Array: ACA)の主要な構成要素であるACAアンテナやACA相関器の制御ソフトウェアを扱う制御チーム、データ解析ソフトウェアを扱う解析チーム、計算機インフラやその上で動くサービスを扱うシステムチーム、アルマのサイエンスデータアーカイブを扱うアーカイブチームです。1つのチームだけに所属して専門性を極める人もいれば、幾つものチームにまたがって広く活躍している人もいます。

それに加えて、国立天文台内の他プロジェクトや台外他機関との連携も積極的に進めています。台内プロジェクトでは、TMTのソフトウェア開発をTMT推進室と合同で

進めたり、電波サイエンスアーカイブの構築を野辺山観測所やVERAプロジェクトと進めたり、すばる望遠鏡の診断用ステータスデータベースの構築やHSC(Hyper Suprime Cam)の解析データベースの高速化をハワイ観測所と検討したり、天文データセンターとJVO(Japanese Virtual Observatory)でアルマデータの可視化を進めたりしています。また、台外機関では、統計数理研究所と協力してアルマデータの干渉計イメージングに使える新アルゴリズムの実証や実装をおこなったり、国立情報学研究所とはアルマデータアーカイブのクラウド化の可能性を検証したりしています。

コンピューティングの世界は変化が早く、常に視野を広く持たなければなりません。アルマの外との連携はその一環であり、アルマで培った経験を生かす場でもあり、更に、新しいことにチャレンジする場にもなっています。このような活動を通じて、観測や研究を支える新たなアイデアが芽吹いていきます。

インタビューは、
わたくし川村晶が
担当します!



イラスト: 藤井龍二



仕事の原動力は、みんなに見せたい。 自分でももっと見たい。

日本のアルマ望遠鏡コンピューティングチームでは、現在18名が業務に携わっています。アルマ望遠鏡の観測が始まったからといって、それに関わるコンピューティングの仕事がなくなるわけではなく、新規のソフトウェア開発はもちろん、ハードウェアのメンテナンスからアーカイブの運用など、さまざまアップグレードが続けられているのです。そして、そのコンピューティングチームのメンバーを束ねているのが小杉城治さんです。

横浜育ちの小杉さんですが、小学生の時に高松へと引っ越すことになりました。高松は大きな街とはいえ、横浜よりはるかにはきれいに見える星空をととても身近に感じていたそうです。そして、小学校が主催する天体観察会にも参加するなど、すっかり天文少年へと育っていきました。中学生になった小杉さんは、口径6cmの天体望遠鏡を買ってもらい、自宅のベランダで何気なく明るい星に向けました。その星は、なんと偶然にも土星でした。そのアイピースの中の土星を見て、「小さいけれど輪も見えて、きらきら輝いていて、こんなにきれいなものなのか!」と、ほんとうに感動したそうです。今でも小さな天体望遠鏡を所有していて、時々のご家庭でお子さんにも星を見せているそうです。

さらに小杉さんは大学で宇宙物理を学

び、ハレー彗星の光度観測などの実習を重ねました。また、大学院時代には京都大学大宇陀観測所で、活動銀河の観測研究にいそしんだといいます。そこには、口径60cm望遠鏡、CCDカメラ、分光器などがありましたが、さまざまな機器がまだまだ電子化されていない時代。そこで小杉さんは望遠鏡の駆動系をはじめ、いくつかの観測機器を連携させる観測システムの構築に携わり、「天文学は手作りなんだな」と感じながら電子化を進めていったそうです。もちろん、観測機器を制御するのは、コンピューターとソフトウェアですから、すでに小杉さんはコンピューティングの道を歩み始めていたということでしょう。

その後、岡山天体物理観測所でも同様なシステムを組み上げ、実際に観測も行ってきました。さらには、すばる望遠鏡の立ち上げにも参画し、1997年から8年ほどをハワイ観測所で過ごします。もちろん、それまでの経験を活かして、望遠鏡やその他観測装置の制御、データの管理など、コンピューティングの仕事をごこなしていきました。「すばる望遠鏡のシステムは規模が大きいです。大宇陀や岡山のシステムがその雛形になったと思っています。すばる望遠鏡も実際の観測が始まり、続いてALMA推進室へ着任しました」という小杉さんは、2005年からアルマ望遠鏡のコンピューティ

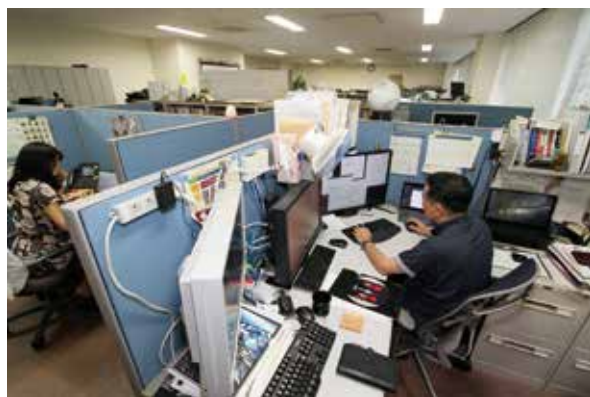


小杉さんも共著者の近刊書籍。すばる望遠鏡のソフトウェア開発の様子が描かれます。

ングに関わる仕事を続けることになったのです。

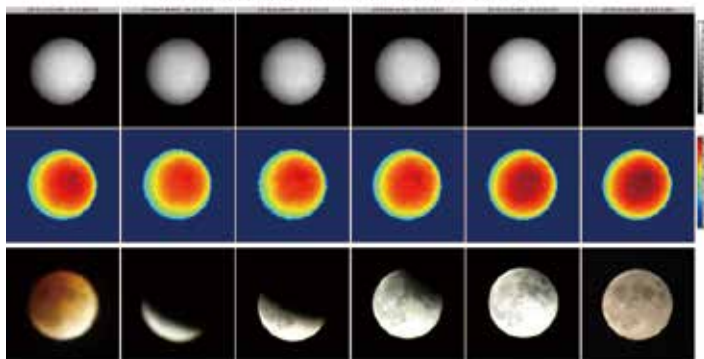
「これまでさまざまな望遠鏡や観測装置の立ち上げに関わってきましたが、仕事でいちばん楽しいと感じるのは、どんなシステムでもファーストライトの時です。すばる望遠鏡でもその現場にいましたし、アルマ望遠鏡でも初期のころから実際に動き出すまでを見てこられたのは、とてもうれしいことです」という小杉さん。アルマ望遠鏡でも、最初に完成した日本製の12mパラボラアンテナではじめて天体からの電波を受信した瞬間を山麓施設で立ち会ったそうです。

少年時代に土星を独立発見(!)した時、「きれいなものをみんなにも見せたい、自分でももっと見たいと思いました」と小杉さんはいいます。その体験が、アルマ望遠鏡の仕事への原動力となっているのでしょう。これからも研究者へ観測データを届けるため、そして多くの人々に宇宙への興味を抱かせるきれいな天体画像が取得できるように、小杉さんはチームと共にコンピューティングでアルマ望遠鏡を支えていくことでしょう。



01 小杉さんのデスクは、スタッフと一緒の大部屋の一角に。自身のソフト開発はもちろんのこと、チームの取りまとめ役としても多忙な毎日。

Lunar Eclipse Feb.21, 2008 at OSF in Chile



02 12 m アンテナ1号機でのファーストライトで皆既月食を観測。下段の可視光の画像は、自前のカメラと望遠レンズを用い、小杉さんによって撮影されたもの。





●小杉城治さん(東アジア・コンピューティングチームマネージャ)の紹介にあったように、人とアルマを繋ぐあらゆるソフトウェアを作ってきたコンピューティングチームの仕事はじつにさまざまですが、大きく分けると

- ・モリタアレイの主要な構成要素であるACAアンテナやACA 関連器の制御ソフトウェアを扱う制御チーム
- ・データ解析ソフトウェアを扱う解析チーム
- ・計算機インフラやその上で動くサービスを扱うシスアドチーム
- ・アルマのサイエンスデータアーカイブを扱うアーカイブチーム

の4チームに分かれます。これにTMTとの連携を加えた5つにチーム分けして、総勢16人のメンバーを紹介していきましょう。

●制御チーム

- 19p 渡辺 学「画像とスペクトルを紡ぎだすソフトウェア開発」
- 20p 芦田川京子「豊かに実ったデータの畑で収穫作業」
中村京子「日進月歩のソフトウェアを見守る試験官」
- 21p 臧 亮堅「特殊スパコン「関連器」を操るソフト開発」
松居隆之「観測好機をとらえるためのコンピュータメンテナンス」

●解析チーム

- 22p 中里 剛「CASAとPipelineで、データの原石が光り輝く」
- 23p 川崎 渉「ソフトウェアでデータを魅せる」
西江純教「138億光年の道も一行のソースコードから」
- 24p ルノー ミエル (Renaud Miel) 「空とアンテナをつなぐデータ処理」

●システムアドミニストレータ

- 25p 加藤禎博「すべてを支えるコンピュータシステムの番人」
- 26p 池田恵美「複雑なコンピュータシステムを整理整頓」

●アーカイブ

- 27p 小林剛志「全員で作り上げた最終成果物 観測データをお届け」
森田英輔「新発見の種が詰まった宝箱 データアーカイブ」

●制御/TMT 連携

- 28p 清水上 誠「星の数ほどの計算をGPUで高速に処理」
中本崇志「宇宙からのメッセージを読み解くソフト開発とシステム設計」
- 29p 吉野 彰「価値あるデータの山の中を、効率よく歩き回るために」

渡辺 学

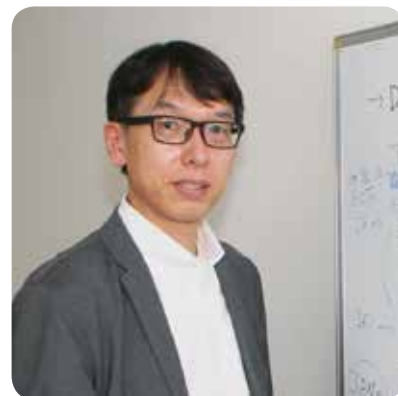
WATANABE Manabu

チリ観測所 主任研究技師
コンピューティングチーム・サブリーダー（制御）

画像とスペクトルを紡ぎだす ソフトウェア開発

アルマ望遠鏡は天体から地球に届く電波をアンテナで受信して観測する電波の望遠鏡ですが、その中でも電波干渉計という種類のものです。電波干渉計は、天体からの電波を多数のアンテナで同時に受信して、別々のアンテナで受信した電波どうしをかけ算します。離れたアンテナで同時に受信した電波どうしをかけ算すると空間的な分解能（＝視力）が上がります。かけ算の結果を「ビジビリティ」といい、ビジビリティを数学的に処理すると元の天体の姿を精細に復元できるのです。

国立天文台はアルマ望遠鏡モリタアレイ（ACA）の16台のアンテナを建設しました。ACAのアンテナで受信した電波からビジビリティを計算するために開発した専用スパコンがACA相関器です。ACA相関器を制御したりACA相関器が計算したビジビリティをアーカイブ装置に送ったりするのは別のコンピュータが行います。私たちのチームはこのコンピュータのソフトを開発しました。ところで、天体からの電波にはさまざまな周波数の電波がまざってい



ます。電波を周波数ごとに分けることを分光といい、分光計とは分光を行う装置のことです。私たちのチームは韓国天文学宇宙科学研究所との国際プロジェクトとしてACA用の分光計（ACA分光計）を開発しており、2020年に完成する予定です。ACA分光計はコンピュータゲームなどでも使われる市販のGPU（グラフィックボード）で計算するのが特徴で、GPUを利用することで高性能な分光計を安く早く作ることを狙っています。

ACA相関器の寿命が尽きるまで ソフト開発は続きます

アルマ望遠鏡コンピューティングチームでACA相関器のソフトウェア開発を行ってきたのが渡辺学さんです。実は、アルマ望遠鏡に関わる人材の中では、一風変わった経歴をお持ちです。大学では原子核物理を学んだ渡辺さんは、人工知能に興味があったことからその研究開発を行うソフトウェア会社に就職したそうです。そこで、ソフトウェア開発の修行をしていましたが、バブル景気に終わりが見えてきたころ、知人の紹介で短大の専任講師へと転身。そこで数年間、学生に向けて実務ソフトウェアの講義を行ってきました。さらにその後は独立、フリーランスのプログラマーを生業としていたそうです。「そのころ、野辺山宇宙電波観測所でソフトウェア開発を行っていた知人から、アルマ望遠鏡の計画がスタートするにあたって、プログラマーが必要だから、と声をかけられました。そこからですね、

アルマ望遠鏡との関わりは。」という渡辺さん。

まだ日本が正式にアルマ望遠鏡の共同建設に加わっていない2002年、試作されたパラボラアンテナをコンピューターで制御のためのプログラムを書くことが最初の仕事だったそうで、翌年には当時上司だった故森田耕一郎先生に同行して、アメリカのソコロでのパラボラアンテナのテストにも出向いています。「最初は、パラボラアンテナの制御ソフトがうまく動かなかったりもしましたが、そのときの仕事が認められたのでしょうか、そこから本格的にアルマ望遠鏡の仕事に関わることになりました」。

正式にアルマ望遠鏡を日米欧での共同建設とすることが決まった2004年からは、ACA相関器のソフトウェアの開発を担当したそうです。日本のACA相関器は、すでに先行して開発されていた欧米の相関器とは方式が異なるため、独自に盛り込ま



渡辺さんに Interview

なければならない機能も多く、相関器のハードウェア開発者やアルマ望遠鏡全体のシステム制御のソフトウェア開発者とも連携して作業を進めてきました。もちろん、山麓施設に設置されたあと、現地での作業を何度もされてきたそうです。

科学観測が始まってから早くも数年が過ぎ、アルマ望遠鏡は目を見張る成果を挙げていますが、まだまだACA相関器のソフトウェアの開発は続くのでしょうか？「アルマ望遠鏡は野心的な挑戦でもありますし、相関器に関しては欧米と競合するものなので、日本の相関器の優れているところを見せたいですね。定期的なソフトウェアのアップデートもありますし、世界に一台しかないアルマ望遠鏡ですから、新しい観測手法が考案されれば、仕様の追加もあります。開発は相関器ハードウェアの寿命まで続きます」。

現在は、さらにACAの12mアンテナ用分光器のソフトウェアの開発に携わっているという渡辺さん。アルマ望遠鏡の仕様追加への取り組みが、次の新たな発見につながることに期待しましょう。

芦田川京子

ASHITAGAWA Kyoko

チリ観測所 研究技師
コンピューティングチーム (制御・アーカイブ)

豊かに実ったデータの畑で収穫作業

今までのアルマの観測データが全部入っているのがアーカイブです。元々アルマでは観測提案をした人が自分で観測しないですむようになっていますが、そのデータをアーカイブとして公開することで、誰でもダウンロードして論文のネタにできることになっています。とはいっても、どんなデータがあるのか…。自分が提案した観測でなくても、電波天文が専門でなくても、気になるデータが簡単に見つかるといいですね！ ということで検索インターフェースを工夫するのはもちろんですが、内部で持ってい

るデータベースが整理されていることが重要になってきます。観測で得られた生データは必ずしも検索に適したフォーマットではないので、そこから必要な情報を抜き出したデータベースを作り、素早く検索できるようにする…そのために今、私が開発に参加しているのが「Harvester」と呼ばれるソフトウェアです。畑に実った観測データを、消費者である天文学者の皆様にお届けできるよう収穫しているのです。

アルマで働いて10年が過ぎました。日本製アンテナの制御ソフト



ウェア開発から始まり、アルマソフトウェア全体の統合試験をするようになって、日本製相関器制御ソフトウェアを現地環境へ統合しつつチリのコンピューティングチームの一員として立ち上げ期の観測運用にもかかりました。その頃に初めてリリースされたHarvesterを試験したこともありました。自分が数年後これを担当することになるとは…。数年後もこれをやっているとは思えないのですが、宇宙を観るお手伝いをしていることに変わりはないでしょう。

中村京子

NAKAMURA Kyoko

チリ観測所 技師
コンピューティングチーム (制御)

日進月歩のソフトウェアを見守る試験官

IRM (Integration and Release Management) というグループで、アルマソフトウェアのテストを担当しています。ソフトウェアテストとは、開発者がプログラムしたソフトウェアが、期待した通りに働くことを確認する作業のことです。アンテナを正確に動かし、目的の天体データを取り込み、それらデータを加工し、データベースに保管するという一連の観測動作を行ったり、また観測状況をモニターしたり、観測にかかわる多様な情報を収集・記録したり、さらには観測準備を支援したり

など、様々なソフトウェアが、間違いなく動作することをテストを通して確かめます。

メンバーは、本部のチリ、日本、アメリカ、ヨーロッパに分散しており、手分けをしてテストをしています。アルマでは、ソフトウェアのリリースは開発段階では半年ごとでしたが、運用中の今は月ごとになっています。これに対応して、テストも毎月実施していますが、テスト項目が多い上に、どのリリースでも毎回行わなければならないテストもあるため、テスト自体を自動化する取り



組みも進めています。幸いなことに近年、テストの自動化に関する新たな技術が続々と出てきていますので、それらをいち早く取り入れて活用しています。いろいろな最新技術に触れられるのはありがたいと同時に、それらを次から次へと覚えて使いこなさなければならないのが少々プレッシャーにもなっていますが、このような仕事ができるのも、アルマのような国際プロジェクトに参加しているおかげもあるかな、と思っています。

臧 亮堅

ZANG Scott

チリ観測所 特任専門員
コンピューティングチーム (制御)

特殊スパコン「相関器」を操る ソフト開発

アルマ望遠鏡のアンテナで受信したデータをリアルタイムで処理するスパコンを「相関器」と呼びます。相関器の制御と出力結果をさらにリアルタイムで処理するソフトウェア群の保守が、私の仕事です。

このソフトウェア群は、実際は40台を超える高性能計算機の上で動きます。プログラミング経験がある方は「マルチスレッド」をご存知かもしれませんが、マルチスレッドのように、40台以上の計算機を協同動作させるのはかなり難しい作業です。

分散オブジェクト技術というエンジニアの知恵を使って、計算機群の協同動作が可能になりました。計算機群のアップグレードも大変な作業です。計算機の数が多いこともさることながら、計算機群は標高5000メートルの山頂施設に設置されていますので、低酸素環境で作業するのは肉体的にも大変です。写真は、数年前に山頂で計算機群アップグレード作業を行った時に撮ったものです。お陰様で作業は無事に予定通り終わりましたが、自然の秘密を探るために、



人類が自然と戦っていることをその最前線で実感できて、感動しました。

また、近いうちに最新のGPU技術を使って、相関器アップグレードが予定されています。私はここでも制御ソフトの部分を担当しています。観測の精度と効率の向上にご期待ください。

私たちの仕事は世の中にあまり知られていない仕事ですが、より遠い・より暗い天体を観測したいと願う天文学者を支えながら、天文学の進歩に貢献しています。

松居隆之

MATSUI Takayuki

チリ観測所 特任専門員
コンピューティングチーム (制御)

観測好機をとらえるための コンピュータメンテナンス

アルマ望遠鏡のACAアンテナはほぼ手を離れ、今は主にACA相関器のサポートをしています。華々しい活躍のストーリーの裏側ではハードもソフトも問題山積で、地道なメンテナンス作業がその下支えをしています。

並行して、アルマ望遠鏡に先行してアタカマで観測を行ってきたASTE望遠鏡のお手伝いをしています。20年ほど前から使われてきた古い観測システムの更新はだいぶ進みましたが、今の時点で一部にまだ

Solaris機が残っています。こちらのソフトウェアは、20年分のその場しのぎが積みあがっており、内部に精通した人以外には運用中のトラブルになかなか有効な対処ができません。「正しく動くまで繰り返しリセットしてみる」ということになってしまいます。できれば異常時にももっと良い動きをするように各所を見直したいところですが、歯がゆい思いもしています。

アルマ望遠鏡やASTE望遠鏡のあるアタカマは晴天率の高いところと



聞いていましたが、全体に降水は増えているようで、たまに行くごとに砂漠の緑が濃くなります。年や季節により大雨や大雪がふり、何日も観測できない場合もあります。大気の底から空を見る以上、空の条件の良しあしは運次第、いわゆる一期一会なところもあるのかな、と感じます。自分が手を出せる部分はごく一部ですが、せめてコンピュータ周りのトラブルで良い空を逃すことが無い様に、サポートしてゆければと思います。

中里 剛

NAKAZATO Takeshi

チリ観測所 研究技師
コンピューティングチーム (解析)

CASAとPipelineで、 データの原石が光り輝く

アルマ望遠鏡で取得したデータは、最初から科学者が研究に使える状態になっているわけではありません。科学者に引き渡す前に、地球大気や観測装置由来のノイズを除去したり、受信した電波の強度に正しい目盛りを設定したりといった、データを「磨き上げる」作業が必須です。また科学者が研究を進めるためには、データを効率よく解析するための道具が必要です。これらの機能を使いやすい形で提供するのが、

CASA（カサ）およびPipeline（パイプライン）と呼ばれるアプリケーションです。

CASAとPipelineは日米欧の開発チームが協力して開発しています。日本の開発チームは総勢7名で、モリタアレイの一部である4台の単一鏡が取得するデータを処理するための機能を開発しています。CASAはユーザーからの命令に応じて処理を行う対話型のアプリケーションです。科学者はCASAを使って、ア



ルマで取得されたデータの詳細な解析を行います。一方Pipelineは自動処理を志向してCASAの機能をベースに開発されたアプリケーションです。Pipelineはデータの性質によって最適な処理を選択しながら、電波強度地図の作成までを一括して行います。Pipelineによる対話的な処理も可能ですが、アルマ望遠鏡では、データの品質保証（QA2）を効率化するための自動処理ツールとしてPipelineを活用しています。

サイエンティストの意見を しっかり受け止めて ソフト開発に活かします

アルマ望遠鏡のコンピューティングチームで、ソフトウェア開発に携わっている中里剛さん。現在は、CASA開発関係3名、パイプライン開発関係3名をまとめるチームリーダーとして活躍されています。

中里さんは、学生時代に理論天文学を学んだそうです。生まれたばかりの星の周りがある物質の温度分布をシミュレーションによって再現し、こうして作った仮想天体を疑似観測した結果と実際の観測結果との比較から物理量を探る研究をしていました。大学院卒業後は、野辺山宇宙電波観測所で研究支援員として共同利用のサポートを行っていましたが、2年後にはアルマ推進室へと移ります。「このときは、研究とソフトウェア開発を半分ずつという業務でした。手がけていたのは、アンテナが受信した信号をオンラインで解析してアンテナの制御に

フィードバックするソフトウェアでした。受信機からの信号は、さまざま補正を加えることではじめてデータとして利用できます。そのためのソフトウェアですね」。

ソフトウェアの開発を中心になって行っていたのがフランスの研究施設だったため、中里さんは単身フランスへと渡ります。「プログラム言語が変わったり、ソフトウェアの目的は変わりましたが、結局やっている仕事の内容はプログラミングなので、その意味では学生の時とあまり変わりませんでしたね」。

フランスでの武者修行を3年で終え、2008年からソフトウェア開発専任のポジションとしてCASAとパイプラインの開発に参加することになりました。「10年経った今でも、まだまだ自分で勉強しないといけないところもありますし、新しい技術が出てくれば、評価して取り入れられるものは取り入れる、というこ

とが絶え間なく続いています」。

アルマ望遠鏡は常にアップグレードしています。すると、新しい観測モードが加わるので、新しいことに対応するためのソフトウェアのアップデートが必要になるのだともいいます。中里さんの仕事はいつでも進行形というわけです。

現在は、ACAの12mパラボラアンテナの単一鏡用パイプライン開発に注力しているそうです。「今の仕事はサイエンスから入ったので、プログラムを書くことについては、システムエンジニアのように系統的にトレーニングを受けたわけではありません。ただ、これまでの経験から、サイエンティストとコンピューティングのプログラマーと、両方の意見を理解できるようになりました。なかなか難しいとは思っていますが、サイエンティストの要望をきちんとコンピューティングチームへと伝えられる存在になれたらうれしいですね」という中里さん。アルマの観測によって、サイエンティストの望むデータが確実に得られるように、中里さんは今日もパイプラインの開発ツールに向かっていきます。



中里さんに Interview

川崎 渉

KAWASAKI Wataru

チリ観測所 特任専門員
コンピューティングチーム (解析)

ソフトウェアでデータを魅せる

アルマ望遠鏡のデータ解析ソフト CASA を始めとしたソフトウェア開発に携わっています。国内外約20名の CASA 開発チームの一員として CASA への新機能追加やバグ修正、ドキュメント更新といった作業を日々行っています。CASA は約200万行のプログラムからなる巨大なシステムです。C++ コードのコア部分は前身である AIPS++ 時代からのもので、25年の歴史と相まってかなり複雑で理解は容易ではありませんが、難しいバグの原因をつきとめ正常に動作させられた時や

自分が実装した機能、時には自分の裁量で決めた仕様がユーザーに好評な時、それまでの苦労も報われる気分です。CASA に関しては開発の他にヘルプデスクのお手伝いもしています。技術的な側面から対応が必要な場面で東アジア・アルマ地域センターの担当者を補助します。

CASA 以外では、Vissage という次世代の天文画像ビューワを開発しています。アルマが生み出す巨大かつ多次元のデータを、電波天文が専門でない人間でも簡単に閲覧できる



ものを目指しています。こちらは実質一人で開発しており仕様策定など上流工程的な作業も必要ですが、それもまた楽しくやっています。さらに最近は、自然科学研究機構の分野間連携の一環として生物学のソフトウェア開発にも関わらせて頂いています。これまでの経験を生かしつつ頑張っています。

まだまだ大きな伸びしろがある天文用ソフトウェア、その向上の一助となるべく、これからも精進していきたいと思っています。

西江純教

NISHIE Suminori

チリ観測所 特任専門員
コンピューティングチーム (解析)

138億光年の道も 一行のソースコードから

私は入職1年生。電波望遠鏡で観測した信号の解析ソフトウェア CASA の開発に従事しています。巨大なソフトウェア群を相手に日々奮闘中です。CASA は米国で1980年代から開発された解析ソフトウェア AIPS を母体としています。昔の計算機は近年のものほど計算能力はありません。さらにその昔…諸先輩方は観測データの数字の羅列から、未知の画像をきっと「心で」観ていたのでしょうか。そんな香りをソースコードの断片から感じます。

若い頃の私は大型オンラインシス

テム開発・ソフトウェア工学・組み込みソフトウェアを専門とする技術者でしたが、途中からフリーランスに転じ、物理学・天文学をふくむ多様な分野に首をつっこんでいました。ところがリーマンショックの直撃をうけ失業。これが大転機に。タダでは転びたくなく、手元資金を全部突っ込み、年齢五十路直前にも関わらず博士課程に進学。“ラス牌で大三元”を和了る天運？にも導かれ「精密周波数・位相差測定」に関する研究で学位をいただきました。このテーマは天文台からの招待だっ



たのでしょうか？ 時間-周波数解析が専門の私にとって、干渉鏡・単一鏡はサイエンス魂までも刺激してしまいます。一方…ソフトウェア開発の仕事は1行のソースからの地道な積み重ねです。今の仕事を「一歩」ずつこなし、その積み重ねが「地図」となり、次世代がその道を歩く…そんなことを想像しながら、私は計算機との対話を楽しんでいます。…200年前の伊能忠敬の地図づくりに思いを馳せつつ…。

ルノー ミエル

Renaud Miel

チリ観測所 特任専門員
コンピューティングチーム（解析）

空とアンテナをつなぐデータ処理

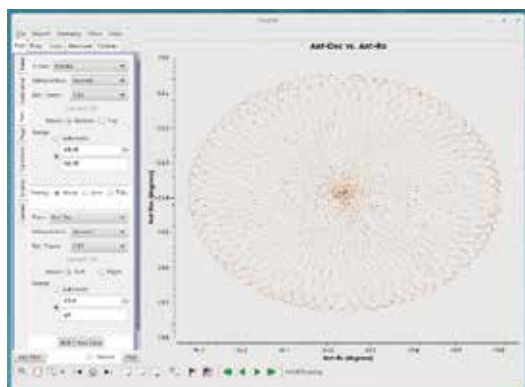
私はフランス出身で、2015年からチリ観測所のコンピューティングチームの一員として働いています。仕事のひとつは、アルマ望遠鏡の観測データを解析するソフトウェアの開発です。現在は観測時のアンテナ

方向を可視化する機能を開発しています。例えば太陽をアルマで観測するとき、アンテナが太陽の中心の周りに数百の円を描きながら電波強度を測定します。11分間の観測の間

に太陽が空の上で動くため、アンテナは太陽の中心を追う必要があります。このため、記録されたアンテナの方向データは、あくまでアンテナが空のどの個所を見ていたかを示しています。

アンテナが果たして太陽面のどこを見ていたかを調べるためには、地球の自転をなくすような天文学的計算をする必要が

あります。左図はこの処理を施した結果です。パソコンの画面からいったん離れてアルマ望遠鏡の観測現場に戻りましょう。太陽の見た目の大きさは腕を伸ばして、手に持った5円玉の穴と同じぐらいです。100トンのアンテナが自ら支えている巨大な反射鏡（直径12m、一軒家の高さの2倍程の大きさ）を微細に動かしながら、空の上で動く5円玉の穴サイズの中でこのような複雑な模様をこれほど正確に描けるのは、アルマのあまり知られていないもう一つの超すご技だと私は思います。このことを実感して頂ければ幸いです。仕事のもう一面は…、次回ご紹介します :=)。



加藤 禎博

KATO Yoshihiro

チリ観測所 技師
コンピューティングチーム (シスアド)

すべてを支える コンピュータシステムの番人

我々チリ観測所のシステムアドミニストレータチーム（略称：シスアドチーム）は、チリ観測所の運用に必要な計算機を管理しています。解析用には多くの負荷がかかるため実計算機を使用しています。アルマ望遠鏡データ解析ソフトウェアCASA開発用の計算機5台、自動的にデータ解析を行うアルマパイプライン用に14台、他に計算機12台があります。

運用のための計算機は主に仮想環境に置かれています。仮想環境用を実計算機3台とストレージを2台（FUJITSU ETERNUS DX80 S2、

Dell EMC SCv3000）を所有しています。国立天文台には、データセンターが提供する仮想環境もあるため、用途によってはその仮想環境を使用したり、冗長化のために両方の環境に計算機を置くこともあります。

シスアドチームが管理している主な計算機は、計算機利用者の情報を管理するActive Directoryとチリ観測所のアドレスを管理する計算機（kdc.alma, bdc.alma）、共有ファイルサーバ用の計算機（fs.alma, fs2.alma）、wiki用計算機、課題管理用のJIRAやRedmine用の計算機、メーリ



ングリスト用計算機、グループウェア用の計算機、天文台からデータをダウンロードするための計算機（alma-dl）、文書管理用の計算機、情報公開用の計算機、そしてそれらの計算機を監視するための計算機（almacons）等があります。どれかの計算機に何か問題が発生するとalmaconsからメールが送られるようになっています。

我々はこれらの計算機の維持、管理、ソフトウェアのバージョンアップやセキュリティ対策を行って、安定して計算機が使えるように努力しています。



加藤さんに Interview

チリ観測所のみなさんが安全で 安心してコンピューターを使えるように

2018年夏、三鷹市付近に自然の猛威が襲いかかりました。落雷です。その影響で、国立天文台三鷹キャンパスは停電してしまいました。業務の多くをコンピューターに頼っている現代では、電源喪失は最大級のトラブルといえるでしょう。「チリ観測所でもメーリングリスト用のコンピューターが異常終了してしまっ、再起動できず、復旧に3日かかってしまいました」というのは、システムアドミニストレータチームの加藤禎博さんです。3名のシスアドとともに、チリ観測所のネットワークインフラを支えるという大切な仕事に携わっています。

通常、停電が起こると補助電源が作動して、停電が継続する場合は各コンピューターを管理するコンピューターからネットワークを通じて正しく電源を落とすように命令が出されるのですが、DNS（IPアドレスを管理するサーバー）

もダウンしていて、命令が届かなかったのです。「これは想定外でした。今後は、冗長性を持たせるためにも、使用用途によっては2か所に計算機を置くことも考えています」という加藤さん。乗鞍コロナ観測所から先端技術センター、そしてアルマ望遠鏡アンテナチームへと配置換えはありましたが、これまでいくつかの業務に加えてスタッフのコンピューターアカウントを管理するシスアドを務めてきました。コンピューティングチームへ異動した現在では、それがメインの仕事となっています。

一口にアカウントの管理といっても、仕事の内容は多岐にわたり膨大だといいます。アカウントの数はおよそ150。スタッフのスケジュール管理やドキュメントの共用、さまざまな議案の承認や決済などワークフローを行うグループウェアの設定も、人員の出入りがあるたびに変

更を行うそうですが、「設定の間違いがあった時だけ苦情が来ます。ワークフローは組織が複雑になってきて、どうしても設定の取りこぼしが出ます。設定はできても自分で運用できないので、間違いを指摘されてはじめて発覚するわけです」とのこと、苦情がないことだけが仕事がうまくいっている証しなのだそうです。

また、インターネット時代の昨今、さまざまなコンピューターシステムが外部からの攻撃の恐れがありますが、国立天文台も例外ではありません。「チリ観測所には、WEBサイトを公開している職員が50名ほどいて、セキュリティーホールが見つかった場合、対応を要請したり、対応ができない場合は公開を控えてもらえるようお願いをしています」と、最近の加藤さんはセキュリティ対策強化に力を入れているそうです。まさに縁の下の力持ちのような地道な仕事ですが、システムアドミニストレータのみなさんの存在は、なくてはならないものなのです。

池田恵美

IKEDA Emi

チリ観測所 特任専門員
コンピューティングチーム（シスアド）

複雑なコンピュータシステムを 整理整頓

私は、2016年1月より、チリ観測所のシステム運用管理やデータアーカイブシステムの開発に携わっています。アルマの望遠鏡を動かすためには、様々なシステムがあり、日々、運用、開発が進められています。私はシステムアドミニストレーターとして、プロジェクトに関係する多くの方がネットワーク上でこれらの作業を進めるためのシステムやサーバのインフラを運用しています。中でも、アルマ望遠鏡で得られた観測データの解析作業や解析ソフトウェア

の開発、プロジェクト関係者の業務等の環境構築、サーバや業務アプリケーションの運用、アカウント管理を行っています。アルマ望遠鏡の観測性能が向上し続け、たくさんの観測データが産出されていくのに伴い、新たなデータストレージ環境の構築も進めています。

また、電波望遠鏡の観測データのアーカイブ化とWeb公開、配信を目的としたデータアーカイブサービスの開発にも携わっています。昨年、野辺山45m電波望遠鏡の観測

データをアーカイブ化してサービスを公開しました。現在は、ASTE望遠鏡の観測データのアーカイブサービスの準備を進めています。自分の仕事が目に見える物になるのは嬉しいことです。

セキュリティ対策の必要性が高まる中、ネットワークを通じて連携しあうシステム群を安定して運用するのは難しく緊張しますが、システムの構造をひも解き、考えて整理していく作業は、生来、整頓好きの私にはワクワクする作業でもあります。



小林剛志

KOBAYASHI Tsuyoshi

チリ観測所 特任専門員
コンピューティングチーム (アーカイブ)

全員で作り上げた最終成果物 観測データをお届け

アルマ望遠鏡は日本から遠く離れた南米チリにあります。観測者が現地に行くことはありません。観測者と観測所は観測に必要な情報をインターネットを通じてやりとりします。そのためのウェブサイトが「サイエンスポータル」<https://almascience.org/>です。サイエンスポータルでは、観測スケジュール/アンテナ配置の確認はもちろん、望遠鏡性能/技術文書の公開、ユーザ登録から観測提案作成/提出、観測指示書作成/確認、観測状況やデータ処理状況の確認、処

理済データの検索/ダウンロードからヘルプデスク機能まで、アルマ望遠鏡を使う際のあらゆる段階で必要になる機能を提供しています。

ウェブサーバは国立天文台だけではなく欧米にも設置され、世界中どこからでもアルマ望遠鏡データが利用できます。例えばここ国立天文台のサーバは、日本・韓国・台湾をはじめとして中国・インド・オーストラリア・ベトナム・インドネシアなど各国のユーザーに利用されています。登録ユーザー数は世界で約



8000にもなります。

アルマ望遠鏡は、宇宙からの電波受信から電波画像生成までの各業務においてIT技術およびその進歩に大きく依存しています。NAOJ ALMA コンピューティングチームでは、天文学研究者かつ/あるいはデータベース/信号処理/通信/機械制御など幅広い知識と経験を持つ専門家メンバーが、よりよいサービス、ユーザーの研究を推進するサービスを提供すべく業務をとりおこなっています。

森田英輔

MORITA Eisuke

チリ観測所 特任専門員
コンピューティングチーム (アーカイブ)

新発見の種が詰まった宝箱 データアーカイブ

主にデータアーカイブシステムを担当しています。チリのアルマ望遠鏡から送られてくる観測データは、合同アルマ観測所サンティアゴ中央事務所のデータアーカイブに保存された後、世界中の研究者に迅速にデータを提供できるように、高速ネットワーク回線を通じて日米欧の各地域センターのデータアーカイブにコピーされます。最大66台ものアンテナから構成されるアルマ望遠鏡の観測データは膨大で、1日あたり約500 GB、1年間で約200 TBにも

なります。

日本では、全てのデータが国立天文台三鷹の計算機室で運用・管理されているデータベース・サーバおよびストレージで管理されています。データアーカイブに保存されているデータは、PI（主観測提案者）の1年間の占有期間の後、一般に公開され世界中の研究者がダウンロードできるようになります。まさに、将来の研究成果の種がたくさん詰まった宝箱です！ 逐次チリから送られてくる膨大なデータを滞りな



く迅速に研究者に提供できるよう、日々のメンテナンスやチューニングは欠かせません。簡単ではありませんが、とてもやりがいがあり、また腕の見せ所でもあります。

国際プロジェクトのメンバーとして、さまざまな国の優秀なエンジニアや天文学者と交流することも魅力のひとつです。天文学について学ぶ機会を得られるだけでなく、国によって異なる文化や仕事への取り組み方は、とても刺激的でありとても勉強になります。

清水上 誠

SHIZUGAMI Makoto

チリ観測所 技術員（水沢 VLBI 観測所併任）
コンピューティングチーム（制御 / TMT）

星の数ほどの計算を GPU で高速に処理

私は ALMA/TMT 合同ソフトウェアチームで GPU 分光計を作っています。分光計は天体がどんな周波数でどのくらいの強さの電波を出しているか観測する装置です。分光計の内部では電圧の時間変化を周波数ごとの強度に変換するために大量の計算を必要とします。GPU はコンピュータの画面を描くための装置でパソコンやスマホにも搭載されています。GPU は複数の計算を並行して行うことで高速に大量の計算を処理することが得意です。この GPU を分光計に応用したのが、GPU 分光計です。

GPU は 3DCG の描画をカスタマイズし高速化するために進化してきました。3DCG では、座標変換、照明などの計算に行列計算を多用します。行列計算は掛け算と足し算の繰り返しです。分光計の周波数ごとの強度を得る処理の核になる高速フーリエ変換アルゴリズムも掛け算と足し算の繰り返しで、GPU の特性を有効に活用出来るわけです。開発している GPU 分光計では、1秒間に約 14兆回の計算ができる GPU を4基用いて、24 Gbps の4つのアンテナの信号を処理する計画です。計算のさせ方が下手だと、14兆回/秒とい



う能力を十分に生かしきれません。計画通りの性能を出すためには、4台の GPU への計算の分担のさせ方、GPU への信号の渡し方、GPU の中での並列化のさせ方、などを突き詰めていくことが必要で、これは開発する私の腕の見せ場でもあります。

最後に、GPU 分光計の先には、GPU を用いた関連器の開発という構想もあります。これまで作った VERA プロジェクト GPU 分光計と、今作っているアルマ望遠鏡プロジェクト GPU 分光計で培った GPU による信号処理技術を、GPU 関連器の開発につなげていきたいと考えています。

中本崇志

NAKAMOTO Takashi

チリ観測所 特任専門員
コンピューティングチーム（制御 / TMT）

宇宙からのメッセージを読み解く ソフト開発とシステム設計

2016年からコンピューティングチームに加わり、韓国天文宇宙科学研究院と共同で、ACA（モリタアレイ）12m アンテナ向けの新型分光計の開発をしています。この新型分光計では、パソコンで 3DCG 作成やゲームをするのに広く用いられている GPU（Graphics Processing Unit）という演算装置を使い、天体からの電波信号を周波数ごとの成分に分ける高速フーリエ変換という処理をします。私はソフトウェア開発、アンテナからのデータを受信する装置の

開発のとりまとめ、各種試験などを担当しています。

これまでの仕事で一番印象に残っているのは、新分光計のプロトタイプを 5000m の山頂で試験したことです。普段は三鷹のオフィスで仕事をしているので、現場に出向くのはとても新鮮であったとともに、アルマ望遠鏡のアンテナを目の前にして気分が高揚したのを覚えています。

アルマ望遠鏡以外にも、TMT の望遠鏡制御システムや、TMT 第一期観測装置 IRIS のソフトウェア開発・シ



ステム設計にも携わっています。国立天文台に来るまでは天文とは無縁の世界にいましたが、エンジニアとしての自分の専門性を活かして世界最先端の天文観測装置の開発に携われるのを誇りに思います。新型分光計の開発も TMT の建設も道半ばですが、私たちが開発した装置で天体観測ができるようになる日を楽しみにしながら、装置の完成に向けてこれからも頑張っていきます。

吉野 彰

YOSHINO Akira

チリ観測所 特任専門員
コンピューティングチーム (制御 /TMT)

価値あるデータの山の中を、 効率よく歩き回るために

私の仕事は2つあります。1つは観測データを整理して保管し世界の研究者向けに公開するシステム、すなわちアーカイブを作ることです。もう1つは観測生データを自動的に処理して読みやすいデータにまで加工するソフト、すなわちパイプラインを作ることです。

昨年、野辺山宇宙電波観測所のスタッフを含む我々のチームは野辺山45m電波望遠鏡のデータアーカイブを作って公開しました (<https://nobeyama-archive.nao.ac.jp/>)。今は

ASTE 10m望遠鏡のデータも取り込もうと開発を進めています。

野辺山アーカイブに今入っているのは生データ(野辺山独自のNOSTAR・NEWSTAR形式。アルマ望遠鏡で使われるCASA measurement set形式のデータは近日公開)だけです。しかし生データのままでは研究に使うには扱いづらいでしょう。そこで処理済みデータ(fits形式)と処理過程の記録もアーカイブに入れたいと考えています。そのためのソフトがパイプラインで、観測者の経験に頼ら



ずとも自動的に生データから処理済みデータを出力します。元々アルマ望遠鏡用に作られたものですが、それを野辺山とASTEにも適用し、できた処理済みデータをアーカイブに入れて公開することが現在の目標です。実現すれば一般研究者がアーカイブから得たデータでもっと効率良く研究を進めることができると思います。自分の作ったシステムが研究推進の役に立てば幸いです。

2019年国立天文台カレンダーができました。

おしらせ
NO.01

2019年国立天文台カレンダーができました。

今回のテーマは、アルマ望遠鏡が見た宇宙です(※台外発送分に同封)。

- ・01月 太陽黒点
- ・02月 うみへび座TW星の塵円盤
- ・03月 アルマ望遠鏡が見た若い星たち
- ・04月 宇宙の暗闇に挑む
- ・05月 宇宙花火オリオンKL
- ・06月 極低温のブーメラン星雲
- ・07月 渦巻銀河M77の超巨大ブラックホールを取り巻くガス雲
- ・08月 青空のもとで、準備万端
- ・09月 すれちがう銀河IC 2163とNGC 2207
- ・10月 銀河団RX J1347.5-1145のスニヤエフ・ゼルドビッチ効果
- ・11月 132.8億光年彼方の銀河MACS1149-JD1
- ・12月 アルマ望遠鏡と、巡る南天の星たち



「2018年度IDL講習会（初級編）」開催報告

亀谷和久（天文データセンター）

天文データセンターでは、「IDL 講習会（初級編）」を2018年7月26日（木）から27日（金）の2日間の日程で三鷹キャンパス南棟の共同利用室にて開催しました。講師は当センターの巻内慎一郎・特任専門員が務めました。

IDL（“Interactive Data Language”の略称）は、データの解析と可視化に特化したプログラミング言語です（★01）。データの処理、科学的解析から視覚化までを対話的に手軽に扱えるという特徴から、科学技術の様々な分野のデータ解析に利用されています。また、配列計算が得意で直感的に書くことができるため、習得が容易という利点もあります。天文学関係のデータ処理に有用なライブラリ群が豊富に存在していることなどから、多くの天文学研究者にも標準的なデータ解析ツールとして長年愛用され、観測データの一次処理から論文用の図の作成まで様々な場面で利用されています。

巻内特任専門員は、赤外線天文衛星「あかり」のデータ解析環境の開発・整備等をIDLを用いて実施してきた実績があり、IDLに精通しています。「初級編」講習会を担当するのは2017年2月以来2回目となります。今回は6名の受講者の方々にご参加いただきました。そのうち3名は学部4年生、2名は修士課程の大学院生、1名は技術職員という内訳でした。昨今の講習会では、学部生の受講が増加傾向にあり、今回も若い年齢層が中心となりました。受講生の皆さんのモチベーションは非常に高く、アンケートによると、「太陽観測衛星の画像解析に使用したい」「計算ソフトから出力される結果を描画するのに使いたい」など、一人一人が具体的な目的意識を持って熱心に講習に臨んでいたようです。

講習会は、講義（座学）と計算機を使用した実習から構成され、講師による270ページを超える充実したテキスト（★02）に沿って進みます。最初にIDLとはどのような言語か、使用の準備と環境設定、起動と終了の仕方、ヘルプシステムの使用など、IDLの基本的な情報の講義から始まります。次に基礎的な文法やコマンドの使い方、簡単なグラフの作成、データ型と型変換についての内容

に進みます。さらに、IDLの最大の特徴である配列の扱い方、IDLによるプログラミングの基礎を学んでいきます。これらはテキストにある豊富な例を用いて説明され、実際に各自の端末で打ち込んで実行することで、だんだんと受講者の皆さんも慣れてきたようでした。最終的には、天文学用のライブラリも駆使して、赤外線天文衛星「あかり」などによる本物の観測データのFITSファイルを読み込み、様々なグラフの作成や画像処理をする演習に取り組みました。講習の内容は多岐にわたりますが、IDLを用いた天文データ解析とその可視化に焦点を当

てた内容で構成されているため、受講者にとってはIDLを活用した研究論文資料の作成方法や、IDLの天文学への幅広い応用を系統的に学ぶ機会になったと感じています。また、特に演習では、講師と数名のチューターが受講者の質問に丁寧に対応することにより、疑問はその場で解決しながら効率良く学習を進めることができるという講習会ならではの環境を作ることができていたように思います。

講習会終了後にアンケートを実施したところ、受講者の皆さんの満足度は非常に高かったようで、世話人一同安心しました。受講者の感想としては、「説明がすごく分かりやすく、大変有意義なものになりました」「ちょうど学びたい内容でしたので良かったです」などの声がありました。一方で、「少し難しかったです」「学部生にも交通費や宿泊費の補助をしてほしい」等のご意見もありました。これらの貴重なご意見は、今後の講習会



01 講義を行う巻内講師。



02 講義の様子。

に向けて参考にしていきたいと考えています。

●最後となりましたが、参加していただいた受講者の皆様、および本講習会にご協力いただいたすべての方々に、この場をお借りして感謝申し上げます。

★01 IDLのライセンスは有料ですが、天文データセンターではIDL環境を含むデータ解析用計算機システム（多波長データ解析システム）を提供しています。天文学やその関連分野における大学院生以上の研究者であれば基本的に利用できますので、是非ご活用ください。

https://www.adc.nao.ac.jp/JJ/kaiseki_top.htm

★02 今回の講習会のテキストは、以下のURLから入手できます。

https://www.adc.nao.ac.jp/JJ/cc/public/koshu_shiryō.html

また、過去に天文データセンターが主催した各種講習会の資料も掲載していますので、ご興味のある方は是非ご参照ください。

● 研究教育職員

発令年月日	氏名	異動種目	異動後の所属・職名等	異動前の所属・職名等
2018/9/1	ゴンサレス ガルシア アルバロ	併任 (部局長)	チリ観測所副所長(期間:平成30年12月31日まで)	
2018/9/30	林 正彦	退職		光赤外研究部教授 勤務地:三鷹
2018/10/1	深川 美里	採用	電波研究部(チリ観測所)教授 勤務地:三鷹	(名古屋大学大学院理学研究科准教授)

● 技術職員

発令年月日	氏名	異動種目	異動後の所属・職名等	異動前の所属・職名等
2018/9/1	高橋 敏一	配置換	電波研究部野辺山宇宙電波観測所技師 勤務地:野辺山	先端技術センター技師 勤務地:三鷹

● 年俸制職員

発令年月日	氏名	異動種目	異動後の所属・職名等	異動前の所属・職名等
2018/8/31	河田 大介	退職		JASMINE 検討室特任准教授(外国人客員准教授) 勤務地:三鷹
2018/8/31	高橋 博之	退職		天文シミュレーションプロジェクト特任助教 勤務地:三鷹
2018/8/31	サリナス ポブレテ パチャイル ニコラス	退職		チリ観測所特任研究員 勤務地:鹿児島大学
2018/8/31	押野 翔一	退職		天文シミュレーションプロジェクト特任専門員 勤務地:三鷹
2018/8/31	竹林 康雄	退職		電波研究部特任専門員 勤務地:三鷹
2018/9/1	グエン ドック デュー	採用	チリ観測所特任研究員(プロジェクト研究員) 勤務地:三鷹	
2018/9/5	クザニヤン キリル	採用	太陽観測科学プロジェクト(外国人客員教授) 勤務地:三鷹	
2018/9/18	野村 麗子	採用	RISE 月惑星探査検討室特任研究員(プロジェクト研究員) 勤務地:三鷹	
2018/9/29	カボカーサ エレオノ ラ	退職		重力波プロジェクト推進室特任研究員(プロジェクト研究員) 勤務地:三鷹
2018/9/30	福井 暁彦	退職		ハワイ観測所岡山分室特任専門員 勤務地:岡山
2018/10/1	トンプソン マイケル ジョン	採用	太陽観測科学プロジェクト特任教授(外国人客員教授) 勤務地:三鷹	
2018/10/1	瀧 哲朗	採用	天文シミュレーションプロジェクト特任研究員(プロジェクト 研究員) 勤務地:三鷹	
2018/10/1	村上 祥子	採用	事務部総務課特任専門員(台長秘書) 勤務地:三鷹	(事務部総務課総務係(秘書室) 特定事務職員 勤務地:三鷹)

年に2回の庭園公開があるというので、国分寺へ行って野川の源流を見てきました。天文台のすぐそばを流れている川の始まりがここなのかと感心しました。紅葉にはまだ少し早かったです。(G)

人生初の車検に行ってきた。少し壊れやすい車なので治せるところは全部見てもらったらびっくり価格に。。。でも愛車なので良しとする。(は)

韓国で開発される電波望遠鏡に関する会議で初めてソウルへ。会議が開かれるホテルは快適ですが、明日のソウルは雪の予報らしい。東京よりずっと寒いですね。(I)

アルマ望遠鏡日本製アンテナの台数にちなんで月齢16の夜にメールマガジンを発行していますが、ふと夜空を見上げて月が太てくると「ああメルマガがかなきゃ」と気持ちが追いついてくれる結果に。風流というかなんとか。(h)

念願叶って初めての熊野詣。熊野三山に参拝し、古道を少し歩きました。山深きの丹倉神社は素朴な磐座だけで、清々しい空気が流れていました。(e)

ドイツでお世話になっている方の60歳記念研究会に参加させてもらった。幅広い分野から講演がありとても感銘をうけた。あわせて、今やっているプロジェクトの相談など色々させてもらった。国際協力は難しいことも多いが、その分得られるものが大きいことをあらためて思い知らされる。(K)

飛騨天文台50周年記念に出席してきました。50年、節目ですね。京都大学の天文学に於ける役割を再認識する機会でした。(W)

国立天文台ニュース

NAOJ NEWS

No.304 2018.11

ISSN 0915-8863

© 2018 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: 渡部潤一(委員長・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(チリ観測所) / 小久保英一郎(理論研究部/天文シミュレーションプロジェクト) / 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、<http://www.nao.ac.jp/naoj-news/>でもご覧いただけます。

発行日 / 2018年11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)

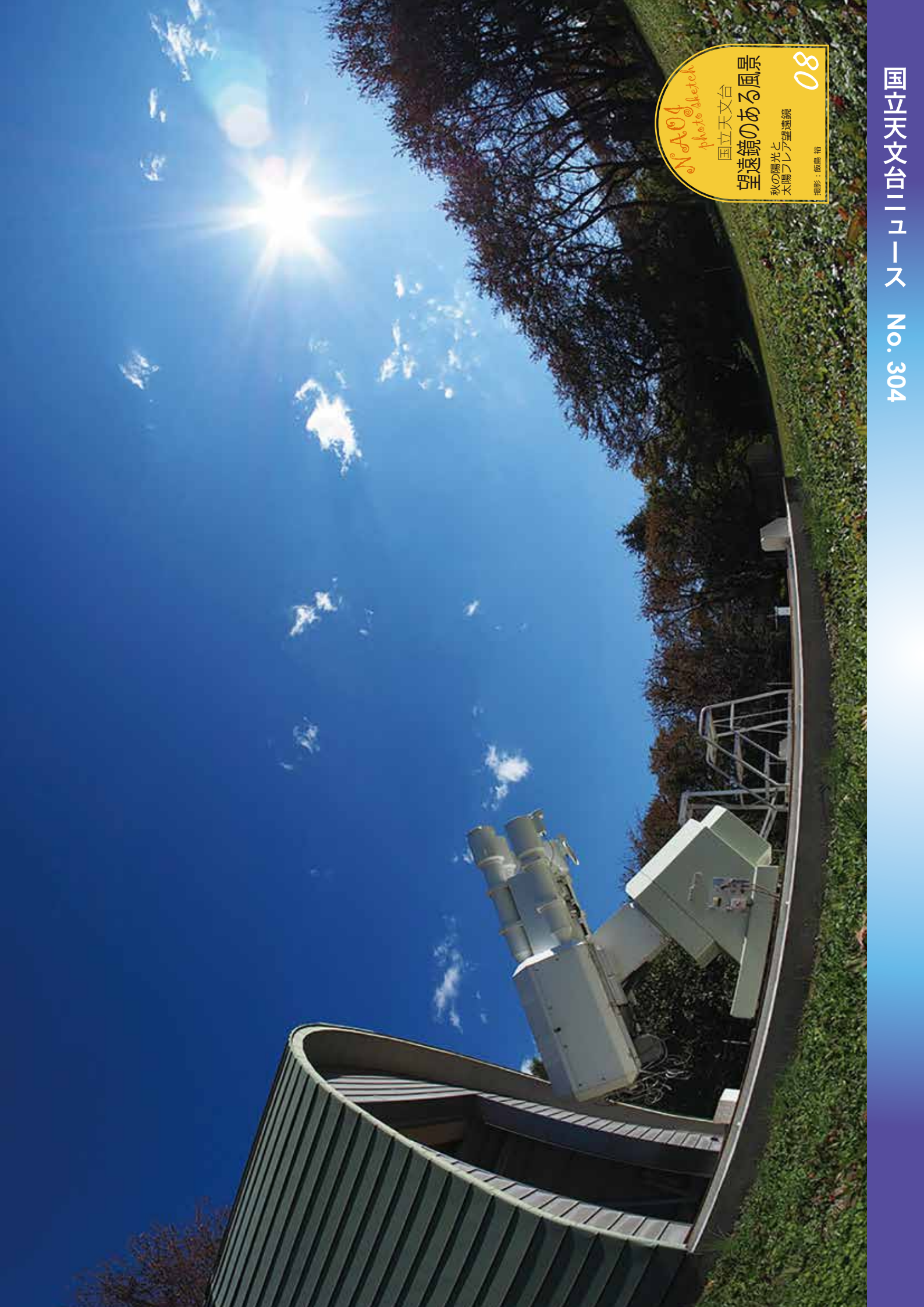
FAX 0422-34-3952 (出版室)

国立天文台代表 TEL 0422-34-3600

質問電話 TEL 0422-34-3688

12月号は、半世紀ぶりに三鷹にも戻ってきた6メートルミリ波望遠鏡の話題をお届けします。
お楽しみに!

12月号



NAOJ
photo sketch
国立天文台
望遠鏡のある風景
秋の陽光と
太陽フレア望遠鏡
撮影：飯島 裕
08