



すばる望遠鏡 19
HSC Cosmic Gallery
NGC 3312+NGC 3314
田中賢幸 (ハワイ観測所)

60Mpcほどの距離のうみへび座銀河団に属する、2つの「くらげ銀河」だ。中央やや上にあるNGC 3312と、やや下にあるNGC 3314という渦巻銀河から、淡いフィラメント状のものが右下に向かって出ている。これは2021年2月号でも紹介した、銀河が銀河団ガスの中を高速で運動する際に「風」を受けている様子である。中性水素ガスもフィラメントに沿って検出されており (Hess et al. 2022, A&A, 668, A184)、ただでさえ珍しい「くらげ銀河」が2つ並んだ貴重な一枚である。ちなみに、下のNGC 3314は2つの渦巻銀河がぶつかっているように見えるが、これはたまたま視線上に重なっているだけで、実際に相互作用はしていないとされている。「くらげ銀河」として見えているのは手前にいるface-on渦巻銀河 (NGC 3314a) で、斜めにみえているもう1つの渦巻銀河 (NGC 3314b) は後ろにいる。



HSC



HSCLA



GALAXY CRUISE



★ 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)」
★ HSCLA: Hyper Suprime-Cam Legacy Archive
★ 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。

NAOJ

No. 339 National Astronomical Observatory of Japan

PRINT ISSN 0915-8863
ONLINE ISSN 2436-7230

NEWS

国立天文台ニュース

計算機天文学

2023

冬春

シミュレーションと観測を支えるコンピュータ

- P.04 コンピュータは「理論の実験室」
物理学に基づいた計算で宇宙の謎に挑む。
様々なコンピュータが、シミュレーション天文学のために活躍しています。
- P.06 天文学の世界もデータ爆発の時代に
望遠鏡から日々生み出される膨大なデータは、宝の山。
確実に保管しつつも解析に使える環境を整えることで、新たな発見を支えます。

コンピュータで見いだされた宇宙の新しい姿

- P.08 星1つ1つまで再現した星団形成シミュレーション
- P.10 中性子星合体からの光に刻まれた重元素合成の痕跡
- P.12 高速検索データベースが実現する太陽系小天体の大規模探査

天文学を支える様々な仕組み

- P.14 天文学におけるデータベース利活用、その過去・現在と未来
- P.15 観測データ利用を支援する「サイエンスプラットフォーム」
- P.16 相関器と分光計：アルマ望遠鏡のデジタルな頭脳
- P.16 見えないデータを処理して可視化するデータ解析ソフトウェア
- P.17 GPUと天文学
- P.18 座談会 コンピュータの守り人たち

現代の天文学は、計算機（コンピュータ）なしでは成り立ちません。コンピュータは、膨大な計算を基にしたシミュレーションによって、宇宙で起きる様々な現象のメカニズムや天体の成り立ちを探ります。さらに、望遠鏡やカメラを働かせるにも、得られたデータを解析するにも、コンピュータの力が欠かせません。

国立天文台では、シミュレーションのためのコンピュータを運用する天文シミュレーションプロジェクト、望遠鏡で得られたデータを蓄積して解析に供する天文データセンターを始め、様々なプロジェクトでコンピュータとそのプロたちが活躍しています。今回は、コンピュータという切り口で現代天文学の一端をご紹介します。

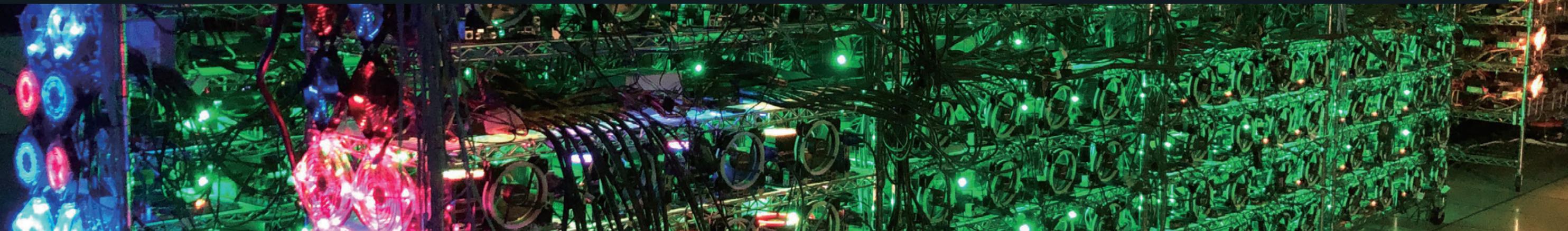
天文学 計算機

- 20 アルマーの冒険 第11回
ソフトウェアラジオを使って
木星の電波観測 前編
- 34 新・キーナンバーで読み解く宇宙
- 36 NEWS
- 40 すばる望遠鏡HSC Cosmic Gallery 19

表紙画像
（右）スーパーコンピュータが数値シミュレーションによって描き出した天の川銀河
クレジット：馬場淳一、中山弘敬、国立天文台4次元デジタル宇宙プロジェクト
（左）スーパーコンピュータ「アテルイII」のブレード 撮影：飯島裕

極限の宇宙を創り、実験する。
そこに宇宙の仕組みを見いだす。

コンピュータは「理論の実験室」



国立天文台は望遠鏡を使って宇宙を観測する研究機関ですから、コンピュータを使った研究もしていると聞くと意外に思われるかもしれませんが、20世紀後半から起こったコンピュータの飛躍的進歩が天文学に変革をもたらしました。天文現象をコンピュータ内で再現し、模擬実験(シミュレーション)して調べることが可能になったのです。これを「シミュレーション天文学」と呼びます。天文現象は極限的な環境で起こるため、地球上で実験することは困難です。そのため、実験が可能な物理学の分

野と比べ、天文学におけるシミュレーションという研究手段は特に重要な位置を占めています。近年の観測技術の進展により、これまで私たちの予想しなかった驚くべき観測結果が立て続けに報告されており、観測結果と直接比較できる高度な天文シミュレーションが強く求められています。また反対に、天文シミュレーションで得た理論仮説で予言を行い、観測で検証することも天文現象を理解する上では不可欠です。

このような背景から国立天文台では、様々な望遠鏡に加えて、シミュレーション

による天文学研究を行うためのコンピュータを運用しています。国立天文台 天文シミュレーションプロジェクトが運用するこれらのコンピュータは、全国の研究者が利用でき、コンピュータを使った計算によって宇宙の様々な謎を解き明かしています。宇宙の大規模構造の進化から銀河形成、超新星爆発、星や惑星の誕生まで、研究対象はここに書ききれないほど多岐にわたります。シミュレーション天文学にとってコンピュータは、天体現象を調べるための言わば「実験室」なのです。

天文学専用スーパーコンピュータ「アテルイⅡ」が、私たちの主力機です。アテルイⅡに搭載されている計算を行う装置CPUは、一般のパソコンの中にあるものと同じものです。しかしそれが4万個も搭載されており、高速ネットワークで繋がって、1つの巨大なコンピュータとして動きます。そのため、1つのパソコンでは非常に長い時間を要する計算でも、アテルイⅡを使うと短時間で計算が終わります。アテルイⅡは、非常に大規模なシミュレーションの実行に適しています。その一方で研究対象

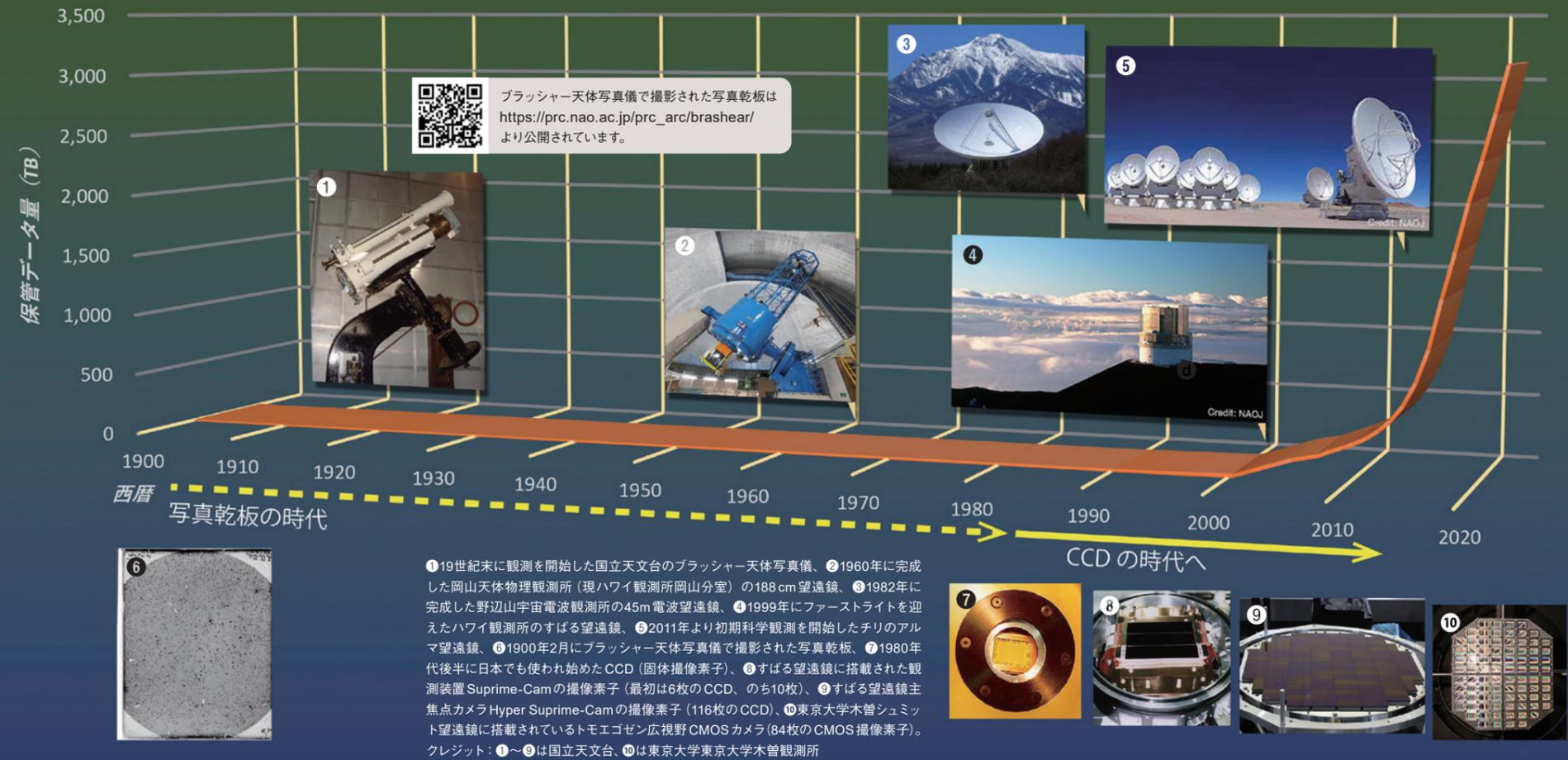
によっては、小規模な計算を長時間行う場合があり、そのためのコンピュータとして「計算サーバ」を運用しています。そのほか「GPUクラスター」など、様々な用途に合わせた計算機を運用しています。天文シミュレーションには、天文学の最新の研究成果を一般の方々に分かりやすく伝えるという役割も持っています。天文シミュレーションは物理法則を基に可能な限り忠実に天文現象を再現します。そのため、まるで傍にいたかのように天文現象を「観る」ことができます。

このように国立天文台では様々なコンピュータが宇宙の謎を解くために休みなく稼働し、最先端の研究成果を生み出して、世界に発信しています。



岩崎一成
IWASAKI Kazunari
天文シミュレーションプロジェクト

国立天文台が保管してきた観測データ量



光の波長の天文観測には日本では1980年代まで写真乾板が使われてきました。写真乾板は現在の固体撮像素子に比べて感度が低かったので、暗い天体まで撮影するために平均して3時間程度の露光をしていました。1980年代の終わり頃になって、ようやく日本でも固体撮像素子であるCCDが観測に使われ始めるようになり、露光時間は数分から30分程度に短縮されます。すばる望遠鏡が稼働を始めると、より大きな領域を一度に撮影するために複数のCCDを並べた観測装置 Suprime-Cam が、2010年代前半からはさらに100枚以上のCCDを積んだ Hyper Suprime-Cam を使った観測が始まります。2020年代には高速撮影が可能なCMOSイメージセンサーを並べた観測装置が登場し、1秒以下の短い露光時間で大量の観測データを取得できるようになりました。新しい望遠鏡の登場や観測技術の進化によって、観測データが近年爆発的に増えています。

データを蓄え、公開する。そこに未来の新発見が隠れている。

データが得られるようになり、観測データの量が飛躍的に増大しました。また最近ではデジタルカメラの普及と計算機のさらなる性能向上により、大フォーマットでしかも高速読み出しができるCMOSカメラが天文観測にも使えるようになり、1秒以下の短い積分時間で観測を続けることさえ可能となってきています。そのため、データ量の爆発的な増大が観測データの恒久的な保管公開を行う上で新たな課題となりつつあります。一方、過去に撮りためた写真乾板は逐次デジタル化が進められており、1世紀以上にわたる長期間の観測データが国立天文台から公開されていることとなります。

写真乾板から発展してきた光の観測データと異なり、アルマ望遠鏡や野辺山45m望遠鏡などの電波望遠鏡の観測データは、受信した目に見えない電波信号をデジタル化して、相関器や分光計と呼ばれる高速専用計算機、さらに解析用の汎用計算機を使って人が理解できるよう可視化します（p.16 渡辺氏、杉本氏の記事参照）。可視化前の観測データと可視化された後の電波画像データはどちらも天文データセンターの計算機に蓄えられています。このように天文データセンターの計算機には、様々な波長の観測データが何十年分も蓄積されているのです。同じ天体でも観測した波長が異なれば見えるものが変わります。天文学者は天体や天文現象を様々な波長で観測することで、或いは、保管されているそのような観測データを分析することで、天体の構造や天体を構成する物質だけでなくその成り立ちまで研究することができるのです。

蓄積された大量の観測データを分析するためには高性能な計算機が必要ですが、研究者が全員そのような計算機を持てるわけではありません。そのため、誰もが大量の観測データを使って研究を進められるよう、天文データセンターでは高性能な計算機環境を整えて研究者に開放しています。さらに昨今のウェブ技術の進歩とネットワークの速度の劇的な向上の恩恵により、天文学の研究環境はインターネット上に広がりつつあります。手元に大きな計算機を用意しなくても、長年にわたって蓄積された大量の観測データを活用した研究が、ウェブブラウザ上で自由に行える仕組みの構築が、天文データセンターでも本格的に進められています（p.15 古澤氏の記事参照）。



天文学の世界もデータ爆発の時代に



アテルイIIのシミュレーションで再現された星団。青白い点は星を、赤～緑色の領域はガスを表している。低温のガスを赤色に、高温のガスを緑色に色付けしている。(クレジット：藤井通子、武田隆顕、国立天文台4次元デジタル宇宙プロジェクト)



実際のオリオン大星雲。水色から紫の色の領域が高温のガス、左上の黒から茶色の部分が低温のガス(分子雲)。(クレジット：ESO/Igor Chekalin)

太陽は、銀河という多数の星が集まった天体の中の星の一つです。銀河も宇宙に普遍的に存在し、私たちの太陽系がある銀河を「天の川銀河」と呼びます。私たちは天の川銀河の中にいるため、その姿を夜空に浮かぶ天の川として常に真横から見えています。この天の川銀河の形成過程を星1つ1つまでシミュレーションで再現することが私たち研究者の大きな目標ですが、天の川銀河の星は数千億個あり、現在の技術ではまだ星1つ1つをすべて再現できるわけではありません。

一方で、天の川銀河の中で活発に星を産み出している星形成領域であれば、星1つ1つまで再現したシミュレーションが可能になってきました。今回、アテルイIIで行ったシミュレーションで再現できたのは、オリオン大星雲とそれに付随する星団です。オリオン大星雲は、明るく広がった高温のガスであることが知られており、その中心に多数の星が集まった星団があります。オリオン大星雲が輝いているのは、その星団の中にある大質量星(太陽の約8倍以上の質量を持つ星)の光によって水素ガスが高温になっているからだと考えられています。

星は、分子雲と呼ばれる密度が高く低温の星間ガスの中で生まれます。巨大分

子雲の中で星が同時にたくさん生まれると、星団となります。今回のシミュレーションでは、分子雲からシミュレーションを始め、星が徐々に生まれ、星団となり、その中で生まれた大質量星によって周囲のガスが高温になり、最後には星団内の星間ガスが吹き飛ばされて完全になくなるまでを再現しました。その中で、まさにオリオン大星雲のような、まだ星団が分子雲に半分埋まっているが周りには高温のガスができていた瞬間も見つかりました。

シミュレーションは、星団ができる過程での星1つ1つの運動を追うことができます。シミュレーションから、オリオン大星雲の星団はいくつもの小さな星の集団が徐々に集まってメンバーを増やす一方、星どうしが近づきすぎて強い重力が働き、一部の大質量星が星団中心から弾き出される姿を捉えることができました。このような弾き出された星は実際の星団でも観測されており、星団は大質量星を始めとする多くの若い星を周囲にまき散らしながら成長していることが分かりました。

私たちは、今回のシミュレーションをさらに発展させ、天の川銀河の形成過程を明らかにしようと挑戦を続けています。

シミュレーションで宇宙の「進化」を直接「見る」

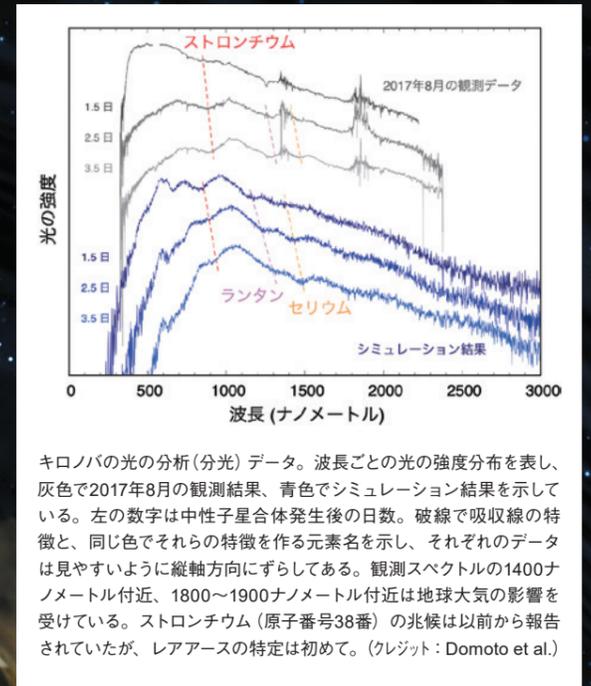
星1つ1つまで再現した
星団形成シミュレーション



藤井通子
FUJII Michiko
東京大学

中性子星合体からの 光重元素の痕跡

元素が誕生した現場から放たれた光を、
シミュレーションで「解読」する



キロノバの光の分析(分光)データ。波長ごとの光の強度分布を表し、灰色で2017年8月の観測結果、青色でシミュレーション結果を示している。左の数字は中性子星合体発生後の日数。破線で吸収線の特徴と、同じ色でそれらの特徴を作る元素名を示し、それぞれのデータは見やすいように縦軸方向にずらしてある。観測スペクトルの1400ナノメートル付近、1800～1900ナノメートル付近は地球大気の影響を受けている。ストロンチウム(原子番号38番)の兆候は以前から報告されていたが、レアアースの特定は初めて。(クレジット: Domoto et al.)

地球や生物を構成するすべての元素は、宇宙のどこかで作られたものです。例えば、炭素や酸素などの元素は星の中で合成されることが分かっています。しかし、金やプラチナ、レアアース(希土類元素)など、多くの重元素の起源は長年の未解決問題です。

このような重元素の起源天体として有力視されていたのが、中性子星の合体です。大質量星が進化した後に残る、中性子ばかりでできたこの星が2つ組になっていると、

最終的に合体することが知られています。合体の衝撃で中性子星の一部が宇宙空間に吹き飛ばされた中で金やレアアースなどが作られ、その合体は可視光や赤外線で輝く「キロノバ」という天体として観測されると考えられていました。2017年8月にキロノバが初めて観測されたことで、中性子星合体で確かに重元素が合成されていることが確認されました。

しかし、中性子星合体で実際にどの元素がどの程度作られたのか、元素の種類

や量は明らかになっていませんでした。中性子星合体で本当に金が作られたのかはわからないのです。個々の元素は決まった波長の光を吸収するため、天体の光を詳しく分析(分光)することで、天体に含まれる元素の種類を特定することができます。しかし、中性子星合体のあとは物質が高速で飛び散っているため、光のドップラー効果で波長がずれてしまい、元素の特定は非常に困難です。さらに、中性子星合体によって作られる元素は鉄よりも重い元素ば

かりで、そのような元素がどのような特徴の光を出すかも分かっていませんでした。

私たちは、キロノバの光を解読するため、全ての重元素がどの波長にどのような特徴を作るかを網羅的に調べました。そして国立天文台の天文学専用スーパーコンピュータ「アテルイII」を用いて詳細な数値シミュレーションを行い、キロノバの光の特徴を計算しました。その結果、ランタン(原子番号57番)とセリウム(原子番号58番)という一部のレアアースがキロノバの赤外

線の一部を特徴的に吸収すること、そして2017年に観測されたキロノバの光の分析結果が、それらのレアアースによって見事に説明できることが分かりました。これにより、実際に中性子星合体でランタンとセリウムというレアアースが合成されたことが初めて直接特定されました。

今回の結果は、宇宙の重元素合成の証拠をキロノバの光の分析から直接得られることを示しています。シミュレーションによる理論的な理解を通して、1つの観測デー

タから豊富な情報を引き出すことができるのです。今後、より多くのキロノバが観測され、同様の手法を用いていくことで、宇宙における重元素の起源の理解が大きく進むことが期待されます。



土本菜々恵
DOMOTO Nanae
東北大学

高速検索データベースが実現する 太陽系小天体の大規模探査

太陽系の惑星が8個であることはみなさんご存知でしょう。では太陽系小天体と呼ばれる、もっと小さな小惑星や彗星はどのくらいの数が存在しているのでしょうか？2022年末の時点で惑星の衛星が約200個、彗星は3800個以上が確認されています。そして海王星以遠の太陽系外縁天体も含めると、小惑星は既に125万個以上がこれまでに発見されており、2020年以降は毎年約2500もの小惑星が新たに発見されています。

現在の太陽系形成論では、太陽系小天体は惑星に取り込まれなかった「微惑星」の生き残りであると考えられています。太陽系の進化の歴史を知るには、軌道、大きさ、表面の色など、太陽系小天

体の現在の情報が大きな手がかりになります。観測画像1枚1枚から、その時刻での太陽系小天体の位置と明るさを正しく読み取っていき、国勢調査のような地道な作業が大切なのです。しかし、小さい天体や太陽から遠い天体は暗いため、小口径の望遠鏡で捉えることは難しくなります。実際、複数の波長での観測があるものや光度変化から自転の情報が得られているものは、ごくわずかです。小さい天体のこうした情報を得るには、大型望遠鏡での観測が必要です。

その点で、8.2mの口径と超広視野カメラHyper Suprime-Cam (HSC) を併せ持つすばる望遠鏡は、太陽系小天体サーベイには理想的な観測装置です。そこで

私たちは、すばる望遠鏡HSCの観測データで検出された天体の中から、これまでに知られている太陽系小天体をくまなく探し出すプロジェクトを開始しました。銀河や星といった短時間では動かない大量の天体に対し、観測画像ごとに写っている位置が移動していく太陽系小天体を1つずつ見つけていくのです。しかし、暗い天体まで検出できる高性能なHSCの観測も、良いことばかりではありません。HSCの視野内に写る天体は1回の撮影で数十万個に上り、1日の撮影分だけでも延べ数千万個になります。データが大量になるとアクセスするだけで時間がかかってしまい、その中から太陽系天体を探し出すのは大変な手間がかかります。

ここで大きな役割を果たすのが、高速な検索データベースです。私たちは、広く公開されているHSCで検出されたデータの天体カタログを活用することにしました。まずは、2014年3月から2018年1月の174夜の観測で検出された光源の位置・形状・等級などのデータ約28億件をPostgreSQLのデータベースにまとめました。この中から主に座標情報を使って太陽系小天体を探すわけですが、高速な検索データベースを活用することで、数十億件のデータの中から短時間で太陽系小天体の予測座標の範囲内にある天体を抽出できます。こうしてHSCの観測データの中から、現時点で知られている約11万個の太陽系小天体を抽出す

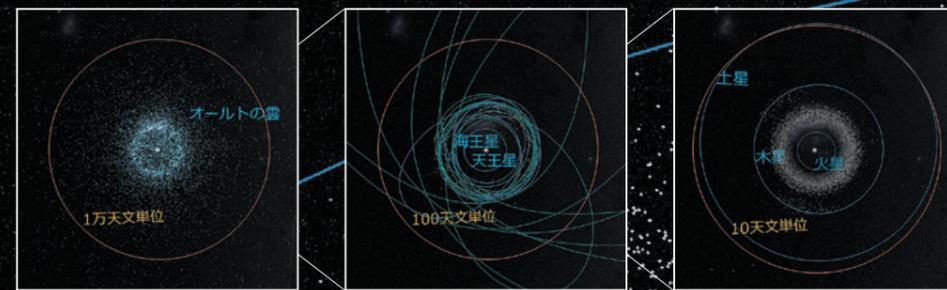
ることができました。解析にかかった時間は、1晩の観測データあたり3時間ほどです。一方で、まだ知られていない太陽系小天体を新たに見つけるためのアプリケーションCOIASを開発するプロジェクトも、日本スペースガード協会などと協力して並行して進められています。いずれはHSCの全観測データの中から太陽系小天体を見つけ出すことを目指しています。

現在世界では様々な望遠鏡が広域観測を進めており、検出された天体データは日々積み上がっています。中でも極めて高い性能を持つルービン天文台をアメリカがチリに建設しており、まもなく観測開始の予定です。将来的にはこうした世

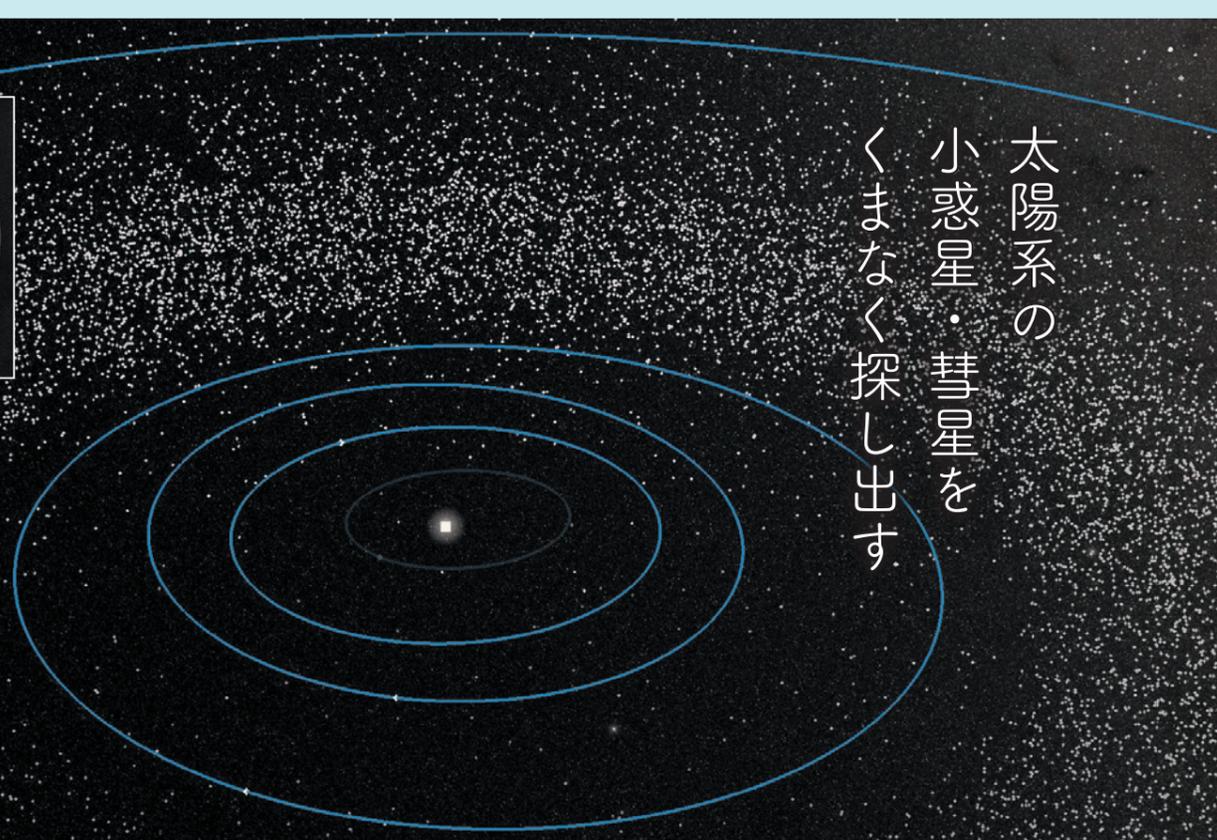
界の望遠鏡が公開している観測データとHSCのデータを連携させ、大規模なデータベースを構築したいとも考えています。現在は、いかに短時間で処理できるか、HSCの数十億件のデータベースと格闘していますが、さらなる高速化が進んだ次世代の検索データベースが実現すれば、近いうちに世界最大の太陽系小天体カタログを作ることも夢ではないと期待しています。



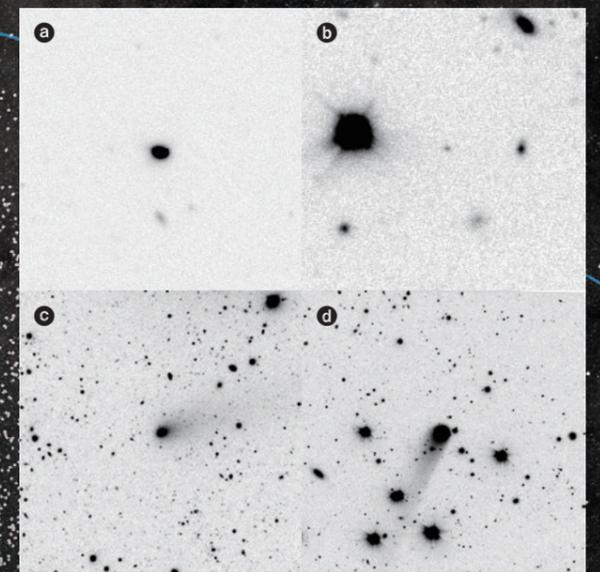
大坪貴文
OOTSUBO Takafumi
天文データセンター



太陽系を北黄極方向から見た概観図。惑星と代表的な小惑星の軌道を表示している。左から、1万天文単位（1天文単位は約1億5千万km）、100天文単位、10天文単位スケールで順に拡大している。それぞれ、オールの雲、太陽系外縁天体、小惑星帯と木星トロヤ群天体の存在領域におおよそ対応している。すばる望遠鏡HSCでは、小惑星帯にある1kmよりも小さい小惑星や、50天文単位を超える距離にある太陽系小天体も検出可能である。(Mitaka: ©2005-2023 加藤恒彦, 国立天文台4次元デジタル宇宙プロジェクト)



太陽系の
小惑星・彗星を
くまなく探し出す



HSCが捉えた小惑星・彗星の検出例。a地球から1.5天文単位にある時の小惑星(7435) Sagamihara。b50天文単位よりも遠くで観測された太陽系外縁天体2014 FL70。c2.7天文単位にある時の短周期彗星118P/Shoemaker-Levy。d長周期彗星C/2016 A1 (PANSTARRS)。木星軌道よりも外に遠ざかった5.6天文単位で観測されている。

天文学におけるデータベース利活用、その過去・現在と未来

高田唯史
TAKATA Tadafumi
天文データセンター

観測データに関する様々な情報を保管・管理し、条件指定によって欲しい情報(だけ)を高速に取り出せる機能を提供することが、天文学におけるデータベースの主な役割です。

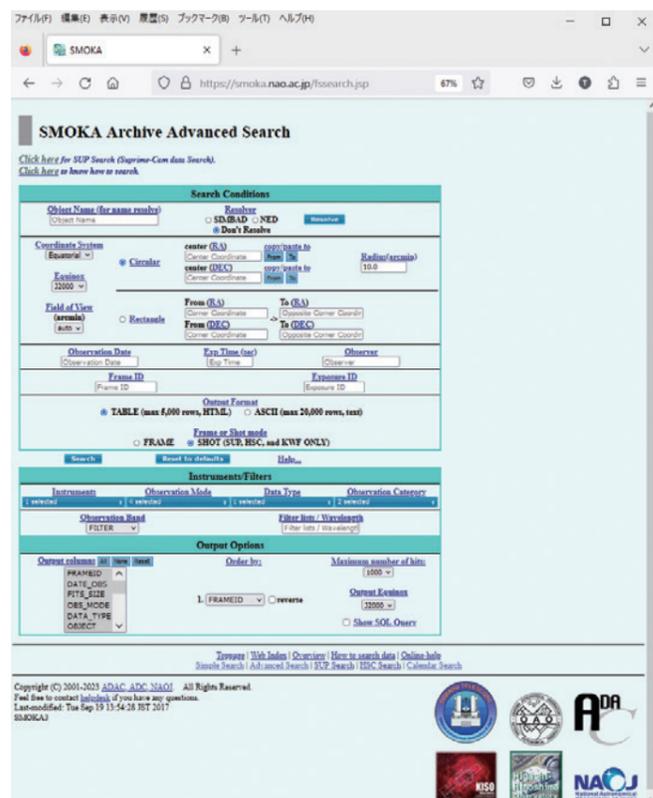
私たちの日々の生活の中で、データベースを使わないことはほとんどありません。Google等の検索エンジン、SNSでのやりとりの履歴や検索機能、銀行などにおけるお金のやりとりの履歴管理、オンライン購システムの利用者情報管理や商品検索など、直接には見えない形ではあるものの、何かしらデータベースにお世話になっているのが現代社会です。そのため、天文学に限らずデータベース、特にその中心的存在のリレーショナルデータベースと呼ばれるものには、分かりやすい統一的な言語による情報検索、データ拡張への対応、データを安全に登録・保管し安定して運用できることが求められてきました。

すばる望遠鏡が建設された1990年代には、このような機能を持つデータベース管理ソフトウェアは有料で高価なものばかりでしたが、時代は進み、現在ではフリーソフトウェアとして配布されるものでも十分な機能・性能を持ちます。天文学の中でデータベースの使われ方は、大きく分けて3種類です。

① 天文データアーカイブシステムにおいて、観測データ(画像やカタログのファイル)の保存先の情報を持ち、観測データに付随しているメタデータ(望遠鏡、装置、観測日時、観測波長などの基本情報)を使って、欲しい画像ファイルだけを選び出す

例えば、国立天文台天文データセンターが運用しているものでは、すばる望遠鏡などのデータを保存管理するデータアーカイブ

システム STARS/MASTARS (ハワイ観測所との共同運用)、日本の地上望遠鏡の可視光近赤外線観測データを世界に向けて公開している SMOKA は、まさにこのような形でデータベースを中心に据えたシステム構築と運用を行っています。



SMOKAシステムのデータ検索用画面。利用者は条件を入力し、欲しいデータを検索、取得することとなる。

② 天文データアーカイブシステムなどにおいて、多数の天体のリスト(カタログ)を保持し、欲しい天体の情報を高速に検索し提供する

例えば、スローン・デジタル・スカイサーベイの SkyServer やすばる望遠鏡 HSC 戦略観測のデータサーバーなどでは、データベースから独自の天体カタログを切り出してくるような利用が多く行われています。

③ 個人の計算機環境にデータベース管理ソフトウェアをインストールし、高速検索や様々なデータ分析(機械学習や深層学習なども含む)を行う

天文データセンターではデータベース講習会を毎年のように実施し、データベースの利活用を促進できる人材の育成を目指した活動を継続しています。①、②のような利用は、世界中の天文学研究所で当たり前になってきています。一方で③は今後より拡大深化(進化?)するのであると思われます。1つの形が、別掲の古澤氏の記事にもあるようなサイエンスプラットフォームといえるでしょう。データベースは、そのような将来の研究を支える基盤技術であると言えます。

近年はデータの巨大化によって、20年以上前から仕組みが大きく変わっていない旧来のデータベース管理ソフトウェアには苦難の時代になってきています。具体的には、データの登録や検索における速度が遅すぎる場合があるのです。天文学の将来計画の多くは、他の自然科学分野に比べてもデータの巨大化が著しいものが多いと言われています。従って、データベース管理ソフトウェアの進化は喫緊の課題です。近年話題になるビックデータの分析用の仕組みには、旧来のデータベースが備えていた検索機能も含ま

れます。それをさらに発展させながら、現在の主流であるマルチコア・マルチノードの計算機群において、高速にデータ検索・分析を可能にするデータベース管理ソフトウェアの開発が世界中で精力的に行われており、その性能や機能の改良にしのぎを削っている状況です。

今後の新しいデータベースの登場とその発展にも大いに期待したいと思っています。

STARS/MASTARS <https://stars.naoj.org/>
SMOKA <https://smoka.nao.ac.jp/>
SkyServer <https://skyserver.sdss.org/>
すばる望遠鏡 HSC 戦略観測データサーバー <https://hsc-release.mtk.nao.ac.jp/datasearch/>

観測データ利用を支援する「サイエンスプラットフォーム」

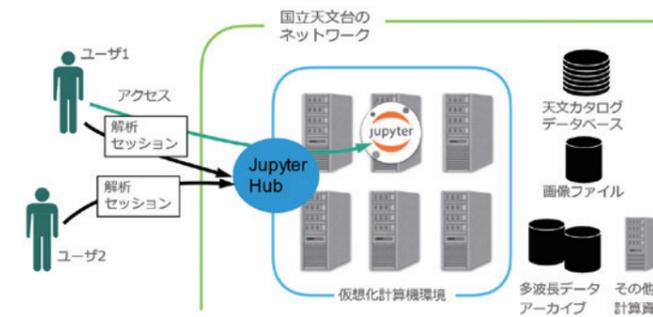
古澤久徳
FURUSAWA Hisanori
天文データセンター

天文学研究に欠かせない観測データ。較正と呼ばれる一連の処理を行い、天体からの信号を明るさや形状などの「物理量」に対応づけることで初めて研究に用いることができます。以前はこうしたデータ処理を個々の研究者自ら手元のコンピュータで行うことが一般的でした。しかし、スローン・デジタル・スカイサーベイ (SDSS) や、すばる望遠鏡 Hyper Suprime-Cam (HSC) など、大型の観測研究が始まり事情が変わりました。一研究者の手には余るほどデータ量が増えたためです。「サーベイ観測」といって、時間をかけ空の広い領域を観測し、データを多様な研究テーマに使う計画も増えてきました。そのため、データの扱いに詳しいチームが較正処理を引き受け、データを早く研究に使える状態に整えて共有することにしたのです。近年、データを広く公開して成果共有と科学促進を図る動きが世界的に広まったこともあり、こうしたデータが全世界に公開され、研究が飛躍的に進みました。

さて、これで万全かというとそうではありません。較正済みデータ自体とても大きく、データの素性をつかむだけでも時間がかかるのです。SDSSやHSCでは、データベース技術を使って必要な天体の情報を高速に探す工夫を行ってきましたが、検索データを詳しく分析するには時間をかけてインターネット越しに手元に持ってこなければなりません。強いコンピュータも必要です。特に、サーベイ観測ではなるべく多くの天体の性質を調べる研究にこそ強みがあるので、ぜひこの問題を解決したいのです。そこで発想転換。データ移動で困るなら、データを移動せずにその場で解析してしまおうという試みが始まりました。

算などの処理を自在に進めることができます。アーカイブの近くにコンピュータ群が備わっているので、画像や天体情報をすぐ分析できます。その結果を操作画面上に分かりやすく表示できるので、大きなデータを手元に運ぶことなく論文執筆に取りかかれるのです。天文学に限らず基礎科学・情報科学分野で似た取り組みが進んでいます。

サイエンスプラットフォーム (SP) は、このような効率的なデータ利用を目指した環境の総称です。大まかにはデータアーカイブから必要なデータを取り出す機能と、そのデータを解析する機能の組み合わせからなります。研究者は、遠隔地からでもウェブブラウザ上の操作画面でプログラミングし、データの検索や統計量の計



サイエンスプラットフォームを使ったデータ解析のイメージ。(提供 小池美知太郎)



サイエンスプラットフォームを使った解析作業の様子。(提供 小池美知太郎)

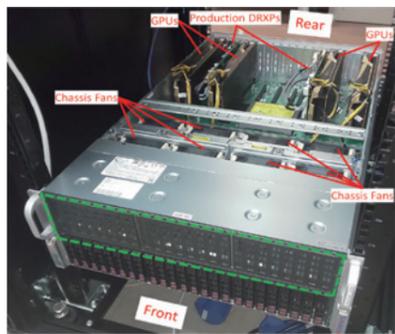
SPには素早いデータ解析以外にもメリットがあります。観測データ量は増え続け、研究者が自前で研究環境を揃えるのはいよいよ難しくなっています。SPはクラウド技術とともに進化してきたので、CPUやGPUなどの計算資源を利用者の目的に応じて切り出すことが得意です。自前の環境がない研究者も、SPの計算資源上で機械学習など最新手法を試すことができます。他のSPとも連携していろいろな観測データや解析ツールを使えるようにすれば、行える研究の幅がさらに広がります。データの専門家が較正データを整備することで、データの科学的な利用価値や品質の向上も期待できます。

世界中の多くの研究者が協力して取り組む今後の大型観測計画(30m望遠鏡 TMT やナンシー・グレース・ローマン宇宙望遠鏡など)では、その貴重なデータを最大限に生かすために SP が重要な役割を担うと考えられています。今、国立天文台では、すばる望遠鏡の次期多天体分光器 PFS の観測データを HSC データと組み合わせるための SP の開発を国際協力で行っています。また、米国中心で開発中のルービン天文台 LSST サーベイ観測のためのデータアーカイブと SP の検討も行っています。私たちは将来的に、国立

天文台が保管している未処理の観測データも加えて、必要なコンピュータ資源を柔軟に組み合わせて作業できるデータ利用環境を実現し、国内外の共同研究を成功させたいと考えています。

ウェブブラウザで
宇宙の深淵を探る

相関器と分光計：アルマ望遠鏡のデジタルな頭脳



国立天文台と韓国天文研究院が共同開発したACA分光計の内部。ハードウェアはGPUを搭載した市販の計算機でありソフトウェアによって分光計としての機能を実現した。

アルマ望遠鏡は、宇宙から届く電波を受信して電波写真を撮影する電波望遠鏡です。また、多数のアンテナで同時に1つの天体を観測し、データを合成して1枚の画像を作る「電波干渉計」という仕組みを使っています。こうすることで、格段に良い視力を実現できます。電波干渉計の原理を知るには、フーリエ級数展開とい

う数学が必要になります。フーリエ級数展開とは、ある関数をいろいろな波長の波の重ね合わせとして表すことです。このフーリエ級数展開を天体の広がり（電波写真）に応用したのが干渉計なのです。

アンテナで受信した電波から電波写真を作るには膨大な計算が必要になります。その計算を行うための専用コンピュータが「相関器」です。相関器は、データを合成する計算手順をあらかじめ電子回路に組み込んだ専用コンピュータとして作ることができます。そうすることで普通のコンピュータよりはるかに高速かつ小電力で計算することができるのです。

ところで、ゲーム用パソコンはGPU (Graphics Processing Unit) というグラフィックス計算専用のボードを搭載していますが、近年のゲームの隆盛に伴いGPUの性能が著しく向上しています。そこで最近ではGPUをグラフィックス以外の計算にも利用するようになりました (p17参照)。GPUでスパコンも作るしAIにも利用されています。電波天文学でも相関器開発にGPUを利用し始めています。

渡辺 学 WATANABE Manabu
アルマプロジェクト

アルマでは国立天文台と韓国天文研究院が共同でGPUを利用して新しい分光計を開発しました。分光計は単一鏡に使うもので相関器そのものではありませんが仕組みを拡張すれば相関器も作れます。新しい分光計は2023年10月からアルマの科学観測で使用する予定です。

GPUソフトウェアの開発は普通のソフトウェア開発と似ています。ただしGPUは多数のコアを搭載しておりそれらを並列動作させることにより計算を高速に行います。そのためGPUで計算する場合は並列性が重要で、逆に並列性を意識せずGPUを普通のCPUのように使うと遅い計算しかできません。ここが腕の見せ所です。

分光計にGPUを利用するメリットの1つは、計算の主役が市販のGPUなので、将来GPUをより高性能なものに買い換えるだけで分光計自体を高機能化できることです。つまりうんと割り切ってしまうと、ゲームやAIのためにGPUの性能がどんどん良くなると電波天文学の研究がどんどん進むわけです。これって楽しくないですか？

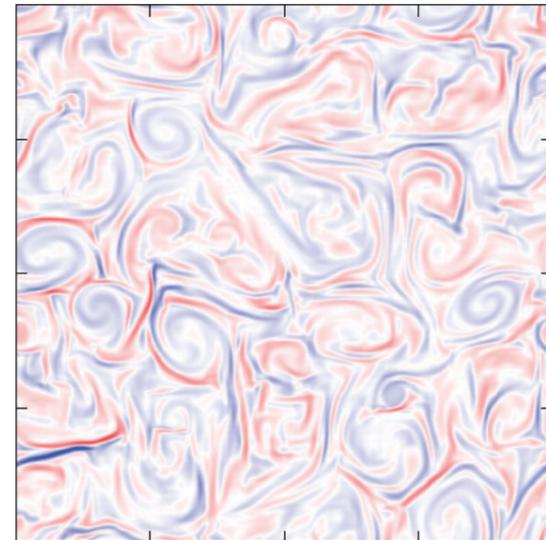
GPUと天文学

波々伯部広隆
HOHOKABE Hiroataka
天文シミュレーションプロジェクト

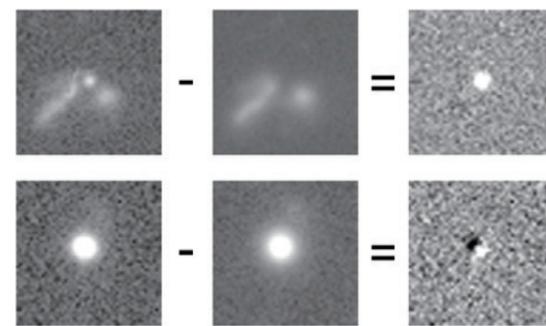
研究に使われる道具が変わると研究の内容は変化します。シミュレーション天文学における道具とは、計算機とそこで動くプログラムです。取り扱う問題に適した計算機を、なるべく長い時間利用できることが良い研究を行うためにとても重要です。天文シミュレーションプロジェクト (CfCA) では用途に応じた様々な計算機を、全国の研究者が使うことのできる共同利用計算機として運用していますが、その中で際立った性質を持っているのがGPUクラスターです。これはGPU (Graphics Processing Unit) を計算加速器として搭載した計算機群です。

GPUは本来、その名前の通り画像を表示するために必要な処理を行う装置です。コンピュータのディスプレイは数百万の画素を毎秒数十回更新していて、その処理に必要な膨大な計算をGPUが行っています。この計算能力を画像処理以外の計算に使って計算を加速することで、普通の計算機、つまりCPUだけで計算をするコンピュータでは実施できない研究を行うことができます。近年では様々な分野で利用が進んでいて、2022年にTop500リスト★に記載されたスーパーコンピュータの約1/3にGPUが搭載されています。GPUは現代の計算機において無視できない要素になっていることが分かります。

しかしGPU本来画像処理のための装置ですから、どのような問題でも速く計算できるようになるわけではありません。たとえば分岐が多く複雑な計算はCPUのほうがうまく処理することができます。GPUを使って高速化できるのは、多数の計算を並列に行うことで処理できる問題に限られます。計算機が計算を行う回路の単位をコアと呼びますが、GPUはコアの数を非常に多くすることで高い処理能力を実現しているからです。現代の



磁気を帯びた流体の2次元数値シミュレーションの例。GPU1基でアテリイIIの7ノード程度（一般的なパソコン50台程度）に相当する計算速度が得られる。図の色の濃さは渦の強さ、赤と青はそれぞれ逆方向の回転を意味している。渦を均等に並べた状態から計算を始めて時間経過による変化を観察している。QRコードのリンク先（英語）に動画があるので興味があれば参照してほしい。（提供 滝脇知也）



超新星候補天体の検出。新しい画像の輝度から過去の画像の輝度を引き算して、輝点が残れば超新星候補であるがしばしば誤検出される。上段が正常に検出された例で、下段は実際には超新星でないのに検出されてしまった例。人間が見ると誤検出であることは明らかだが、数が多いので機械学習で取り除く。（提供 雷永望）

家庭用コンピュータのCPUのコアがなくても16個程度であるのに対して、数値計算用のGPUには数千個から一万個のコアが搭載されています。このような大量のコアをうまく使い切ることができる計算が含まれる研究でのみ、GPUは強力な計算能力を発揮して計算を加速できるのです。

CfCAでGPUの運用が始まったのは2019年ですが、計算加速器の共同利用という意味ではGRAPEという計算加速器が2006年から2021年まで運用されていました。GRAPEは天体どうしの重力の計算を高速に処理することで、重力多体問題という種類の計算を加速する装置です。重力多体問題は天体の数がNの時にN(N-1)/2通りの重力計算が必要で、それぞれを独立に計算することができるためGPUの性質とも相性の良い問題です。そのため、CfCAがGPUの運用を始めた当初は、主にGRAPEユーザの移行先として利用されました。その後、流体力学計算でも使われるようになりまし。流体力学計算は、計算領域を細かく分割して隣り合う微小領域の相互作用を計算するため独立な計算が多く、GPUの能力を上手く使うことができます。

そしてなにより近年利用が広がっているのは機械学習です。機械学習は大量のサンプルを処理する必要があり、GPUの進歩にあわせて急速に発展しました。幅広い分野で使われるためソフトウェアの開発も活発で、ユーザはそれらを天文学に応用して新しい研究を行っています。たとえば1つ1つは人間が簡単に処理できる観測画像処理でも、画像が百万個あればもう人間には困難な仕事です。しかしこれを機械学習で処理できれば、これまでの計算機では生み出せなかった結果を出すことができます。

2022年、CfCAが運用するGPUは最新の機種に更新され、計算能力が大幅に向上しました。新しい道具に刺激されて、どのような研究が行われるようになるでしょう。

★Top500リスト 世界の主要なコンピュータの性能ランキング。毎年2回更新される。

見えないデータを処理して可視化するデータ解析ソフトウェア

杉本香菜子 SUGIMOTO Kanako
アルマプロジェクト

望遠鏡に搭載された観測装置から出力されたデータを処理して画像を作るのがデータ解析ソフトウェアです。私は、アルマ望遠鏡のデータ解析ソフトウェアを開発しています。アルマ望遠鏡はたくさんのアンテナを組み合わせて1つの電波望遠鏡を構成する電波干渉計ですので、データ処理もソフトウェアも特殊です。

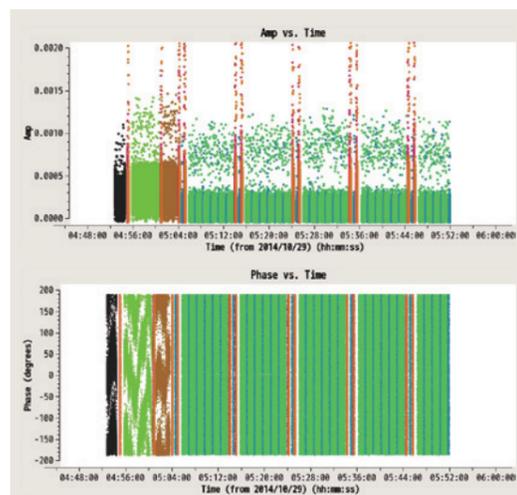
アルマ望遠鏡では、CASAとアルマ科学パイプラインという異なる役割を持った2つのソフトウェアを使って観測データを処理します。CASAは、データを処理・解析するための基本的な機能を網羅していて、アルマ望遠鏡の生データを処理して論文に使う画像を作ったり、様々な分析をしたりすることができます。一方でアルマ望遠鏡のデータは膨大なので、処理が自動化できると研究者が時間を有効に使えます。そのために活躍するのがパイプラインです。パイプラインは、個々の観測の設定やデータの質を確認した上でそのデータに最適な処理の方法を選び、CASAの様々な機能を呼び出し組み合わせでデータを処理します。CASAは主にC++とPythonというプログラム言語で、パイプラインは主にPythonで書かれています。プログラムの行数は合わせて200万行以上にも及びます。2つのソフトウェアは、日本、アメリカ、ヨーロッパからなる国際チームがそれぞれ開発しています。両チーム合わせて約40名のソフトウェア開発者がおり、国立天文台アルマプロジェクトに所属する8名も参加しています。

アルマ望遠鏡には、複数のアンテナを組み合わせる「干渉計モード」と、個々のアンテナを

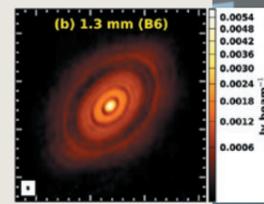
1つの望遠鏡として使う「単一鏡モード」の2通りの観測手法があります。国立天文台は主に単一鏡観測のデータを処理・解析する機能を開発しています。

データ解析ソフトウェアが画像を作るまでの大まかな流れを見てみましょう (図)。相関器が出力する観測データは、天体からの信号だけでなく、地球大気や装置が出す様々なノイズを含んでいます。また観測中には感度のむらが生じます。解析ソフトウェアは、このようなノイズや感度むらを取り除いて、天体由来の電波の強度を正しく測定するための較正処理を行います。装置の影響で時々現れるおかしなデータの除去も必要です。こうしてようやく電波画像を合成する準備ができます。画像合成の方法は、単一鏡と干渉計で大きく異なっています。特に干渉計の画像合成でよく使われる「CLEAN」というアルゴリズムは計算量が多く、データによっては処理にたいへん時間がかかります。

アルマ望遠鏡によって観測された天体は多種多様で、データも多種多様です。そのデータを、正確にかつできるだけ早く処理することで研究成果を生み出すお手伝いをするのが、**データ処理ソフトウェア**なのです。



アルマ望遠鏡で観測した若い星おうし座HL星の処理中のデータ (上図) と処理後の電波画像 (右図)。上図は較正処理前の「ビジビリティ」と呼ばれるデータの一部を時系列で示したものです。右図はCASAが提供するCLEANによって作られた電波画像 (Brogan et al. 2015, ApJ 808, L3より転載)。なお、この観測データはアルマ望遠鏡の科学評価データとして公開されている。
<https://almascience.nrao.edu/alma-data/science-verification>



★アルマでは、観測所がデータ解析ソフトウェアで電波画像を作成し、その品質を科学者が目で見て確認しています。品質確認ができた電波画像だけがアルマ科学アーカイブに登録されて、まずは観測提案者に届けられます。そして1年の占有期間の後、そのデータは全世界の人々に公開されます。

司会：今日はよろしくお願いします。まずはそれぞれのお仕事内容や経歴を教えてください。

田中：天文データセンター（ADC）の田中です。今のメインの仕事はサーバ室の空調や電源などの管理ですが、つい最近まではデータ解析システムの管理を担当していました。学生時代はX線天文学の研究をやっていました。

白崎：同じくADCの白崎です。私はJVO★というデータベースのシステム開発をしています。すばる望遠鏡やアルマ望遠鏡を始めとして、世界中の望遠鏡が取得したデータを手軽に探したりダウンロードしたりできる仕組みです。大学院在学中は宇宙線、学位を取った後はガンマ線

バーストの研究をしていました。

加納：天文シミュレーションプロジェクト（CfCA）の加納です。コンピュータの利用者管理が私の仕事です。利用者の登録手続きやそのためのサーバ管理などですね。国立天文台に勤める前は民間の会社でウェブサービスの運用を担当していました。

瀧：CfCAの瀧です。三鷹キャンパスにある中小規模のコンピュータの開発と管理、利用者からの質問対応を主にやっています。研究は惑星系の形成がテーマです。以前からコンピュータを使ったシミュレーション研究をしていて、昔は利用者だったのが今は管理のほうにも手を伸ばしたという感じです。

平松：CfCAはシミュレーションでデータを生み出す仕事、ADCは望遠鏡の観測データを蓄積して公開する仕事、と少し性質が違いますが、それぞれ年間どれくらいのペースでデータが増えていくのですか？

瀧：CfCAのコンピュータはいくつかあるんですが、計算データでは水沢キャンパスのスパコン「アテルイII」が多くを占めていて、計算結果として年に4ペタバイト★くらい出てきます。水沢のデータ容量が6.5ペタバイトなので、いらぬものを徐々に消しつつということですね。

平松：ADCはどれくらいですか？

田中：いろんなシステムがあって複雑なんですけど、レンタルしている機材と国立天文台で購入した機材とがあります。大きいの

でした。でも、サムネイル画像も作り直しが必要で1か月くらいかかりましたかね。

田中：ADCのレンタル機材の障害対応は業者がやってくれるんですが、大きいのが5年間で1回か2回くらいありますか。僕はハードウェアにはさわりませんが、業者や利用者である研究者との橋渡しはほんとに大変。

加納：原因がわからないけど利用者からいっぱい苦情が来る、というのはありますね。でも、料金取ってないからか利用者さんも比較的優しいですね。

田中：僕もそれは感じてます。民間とはそこが違いますね。

平松：加納さんは民間からということでしたが、他に違いはありますか？

加納：昔働いていた民間企業ではスケジュールがすべてで、市場調査も含めてロードマップを作っていました。でもここはそう簡単にはいかない(笑)。それが面白いところでもあるんですが、自分たちだけでロードマップを決めるのではなくて、外部の研究者が入った諮問委員会が話し合って今後の方針を台長に伝えて、それを聞きながら私たちが実際のコンピュータを運用することになっています。

瀧：研究の内容は利用者である個々の研究者が決めるので、こういうコンピュータを準備したらこういう成果が達成できる、というのは定義しづらいんです。

田中：一緒ですね。環境を準備してあとはお好きに、っていう。それが逆にいい

点で、使ってもらえてるんだろうなという気はしますね。

平松：最近の利用者の傾向などありますか？

加納：CfCAの利用者は、学生の割合がちょっとずつ増えています。教育用という使われ方もあるのかなと。

瀧：ここ10年くらいはプログラムを公開するという文化がいきなりつつあって、学生の新規参入障壁が下がっていると思います。スパコンを使うには申請と審査が必要なんですけど、CfCAでは学生向けの枠も確保しています。スパコンはみんなと一緒に使うので、例えば同じ消費電力で性能をうまく出し切れたほうが良い

座のコンピュータ守り人たちの会



司会
平松正顕
HIRAMATSU Masaaki
天文情報センター



加納香織
KANO Kaori
天文シミュレーションプロジェクト



白崎裕治
SHIRASAKI Yuji
天文データセンター



田中伸広
TANAKA Nobuhito
天文データセンター



瀧 哲朗
TAKI Tetsuo
天文シミュレーションプロジェクト

冷却ファンの音を響かせながらじっと動かず天文学を支えるコンピュータたち。そのコンピュータをさらに支える人たちが、国立天文台で働いています。その中の4名に、仕事内容ややりがいなどを聞きました。

はレンタルのほうで、2022年度の初めて、テープも含めて総容量が14ペタバイト、そのうち使っているのが9ペタバイトくらいです。望遠鏡から出てくるデータは消さないで、アーカイブシステムとしては純粋に増えていくだけです。年間400~500テラバイトくらいですかね。

平松：データはどんどん増えていく方向だと思いますが、解決策はあるんですか？

田中：どうしようもない……(笑)。観測データは消せないですもんね。安いハードディスクを買うとか。つい最近クラウドの利用も始めました。

白崎：クラウドも、「コールドストレージ」というテープに入れてためておく形で、頻

繁にアクセスするものではないんです。そのほうが安いから。データの出力がたくさんあると、その分お金がかかる形になってしまいます。

田中：保険ですね。バックアップです。

瀧：観測データはすべてバックアップしてるんですか？

田中：すべてやっています。二重よりもたくさんバックアップが。だから大変なんです(笑)

平松：それぞれ、たいへんだったお仕事などありますか？

田中：大変なことばかりですよ(笑)。私は電源とか空調とか担当なので、体力仕事もあります。

平松：電気代も上がってますね。

田中：そのプレッシャーもあります。

瀧：計算サーバが特定のOSの時だけ停止することがあって、その時は僕が担当だったんで、つらかったですね。

加納：CfCAはハードウェア障害の対応が多いですね。ADCではそれはあまりないですか？

白崎：RAIDの設定を間違えて400テラバイトくらい消してしまったことがありました。

皆：お〜、それはけっこうデカイですね(笑)。

白崎：アルマ望遠鏡のデータで、台内のアルマサイエンスアーカイブからコピーしてくれば復旧できたので致命的ではありません

のですが、学生枠の審査ではその基準を少し緩めるなどの工夫をしています。

田中：ADCは、最初は可視光や赤外線観測データのためのシステムとして動いていた面が大きいのですが、10年くらい前から電波や太陽のデータ解析環境をしっかり整備してきたので、そちらの利用者が増えてきたのが特徴的かなと思います。

平松：昔、野辺山のデータをテープに入れて三鷹に運んで解析していたのを思い出しました。

田中：ある程度昔のソフトの面倒を見続けているのもADCの特徴かもしれないですね。利用者も多種多様で、分野によっては古いものを使い続ける人がいるので。

平松：最後に、やりがいや心がけていることなどあれば教えてください。

田中：研究する側から支援する側に移ったんですが、天文学の研究のベースを支えていることにやりがいを感じています。気をつけているのは、私の場合は安全・無事故ですね。それをやっていけば、システムとしても問題なく利用者に提供できるので。

白崎：論文の謝辞に「ADCを使った」と書かれているのを見るとモチベーションが上がるので、使った人は書いてください(笑)。気をつけているということは、JVOはとにかく使いやすく。マニュアル読まなくてもクリックしていけばデータにたどり

着けるインターフェースで、プログラム側からもアクセスしやすい仕組みを作りたいです。

加納：嬉しいのは成果が上がること、論文がたくさん出ることですね。利用者から感想を聞くと、携わっていられて良かったなと思います。

瀧：コンピュータの管理って、研究のインフラ整備です。100か所に分散して存在しているより国立天文台の1か所でまとめて管理したほうが、業界全体の幸福度が上がると思うので、業界全体の効率を上げているというところにやりがいを感じています。

平松：ありがとうございました。

★JVO Japanese Virtual Observatoryの略。世界中の望遠鏡で得られた観測データをひとつの「宇宙」と捉え、その宇宙を仮想的に「観測」することで観測成果を得る「バーチャル天文台」を開発している。

★ペタバイト 1ペタバイト=100万ギガバイト=1000テラバイト

アルマの冒険 ALMAr

第11回
ソフトウェアラジオを使って
木星の電波観測

前編

おもな登場人物



千里奈央
(せんり・なお)



アルマー
(ALMAr)



いざよい
(十六夜)

★おもな登場キャラクターのプロフィールはバックナンバーをご覧ください

前回（「アルマーの冒険」第10回）は、電波による流星の観測を実際に行いました。ただしそれは、地上から流星観測用に発信された電波を利用するという手法で、天体が発する電波を直接捉えたわけではありません。また、以前には太陽からの電波の観測を2回行っていますが（「アルマーの冒険」第04回と第09回）、いずれもほぼ既存の観測機器を用いていました。

そこで、これからは前回の流星の電波観測のように、アンテナを自作したり、安価な受信機を活用することで、様々な天体から届く電波の直接受信にチャレンジしていきます。まずは手始めに、木星からの電波の観測を試みます。流星の電波観測で用いたものと同様なSDR（Software-Defined Radio）を受信機として観測装置を製作し、実際に木星電波の検出を目指します。

「アルマーの冒険」制作ユニット

絵／藤井龍二
写真・文・星図作成・構成／川村 晶
監修・制作協力／熊本篤志、土屋史紀、笠羽康正、加藤雄人（東北大学）、
石黒正人（国立天文台）、唐崎健嗣（合同会社プラネタリウムワークス）
編集／高田裕行

★前号・第10回

「ソフトウェアラジオを使って流星の電波観測」までのあらすじ

太陽からの電波を捕らえることに成功した蒼天高校天文部のメンバーたちは、次の観測目標を流星と定めた。観測用に送信されているアマチュア無線の電波を流星が反射するのを受信するという観測だ。奈央の親戚であるクニタチ天文台のワレナベ先生らの手ほどきでダイポールアンテナを設置し、観測は大成功。しかしその夜、いざよいが流星にまぎれて宇宙からやってくる「ヤツ」の存在に気づいたのだった。（※下のまんがは第10回の最後のシーンです）



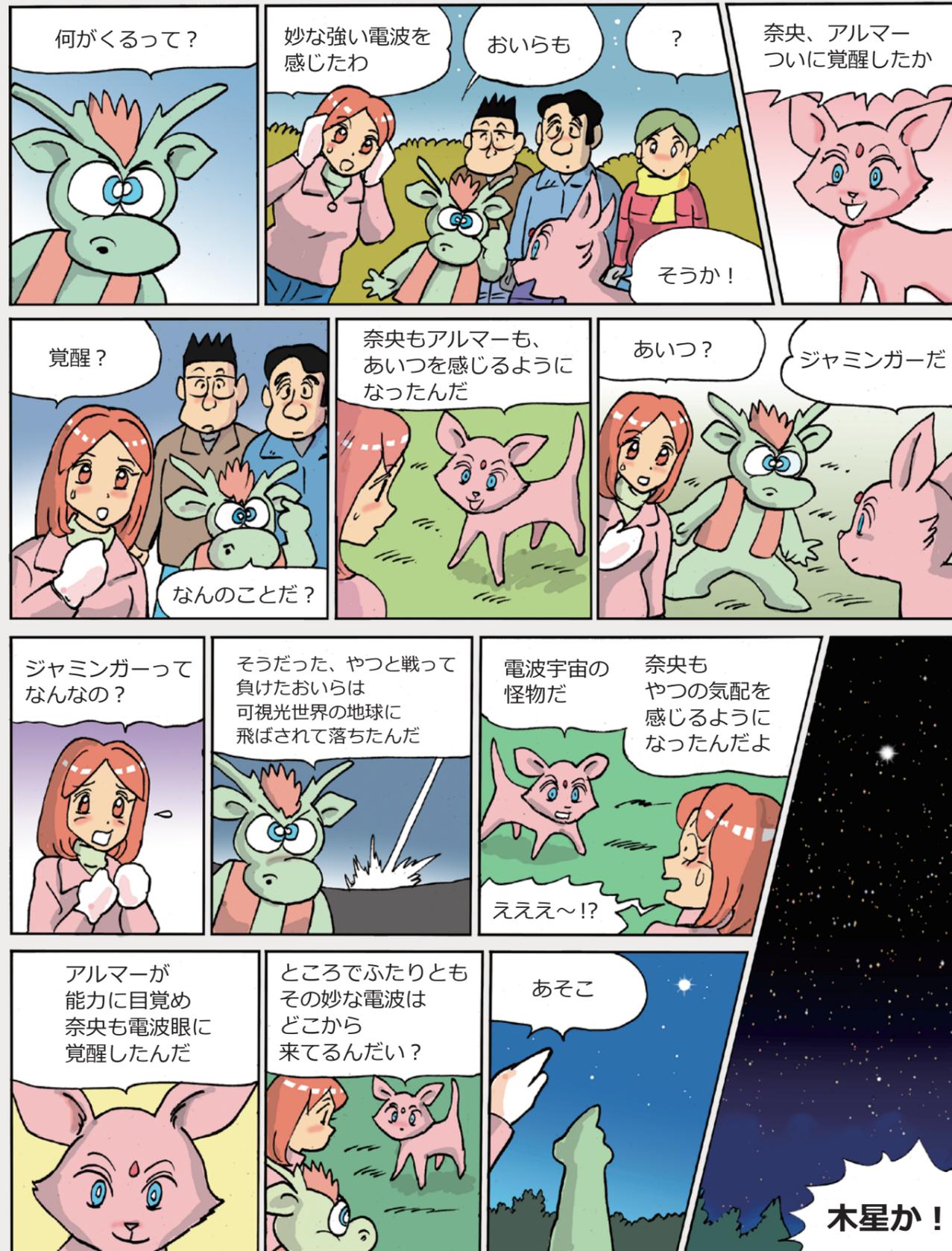
電波天文まんが「アルマーの冒険」バックナンバー

<https://www.nao.ac.jp/about-naoj/reports/naoj-news/almar/>



アルマーの冒険

第11-1章 覚醒した奈央が感じた電波は木星からやってきた



1 偶然に発見された木星からの電波

かに星雲の観測中に捉えたノイズの発生源は木星だった

現在では、光と同様に様々な天体から電波が放射されていることが知られています。きっかけは、電波天文学の歴史（「アルマーの冒険」第05回参照）でも記したように、アメリカ・ベル研究所の技術者だったカール・ジャンスキーが、1931年に銀河中心方向からやってくる電波を偶然に捉えたことです。その後、電波を放射する天体が数多く見つかりました。実は、木星からの電波の発見も偶然によるものでした。

1954年のことです。アメリカ・ワシントンDCのカーネギー研究所に所属するバーナード・バーク (B. F. Burke) とケネス・フランクリン (K. L. Franklin) は、メリーランド州セネカにある約40ヘクタール（東京ドーム8つ分）の土地に建設された電波望遠鏡で、おうし座にある「かに星雲」からの電波を観測していました。

電波望遠鏡は「ミルズクロスアレイ」と呼ばれ、624mにわたって66基のダイポールアンテナ★を2列、X字型に並べたアンテナアレイで、その観測周波数は22.2 MHzでした。



図01 オーストラリアの電波天文学者であるミルズ (B. Y. Mills) と後に干渉計の開口合成でノーベル賞を受賞したイギリスのライル (Martin Ryle) が設計したアンテナで、66対の木製のマスト上端に電線を張ったものだ。使われた電線は総延長8kmにもなったという。受信機器は、もともと現場に置かれていた陸軍の余剰トラックに載せられていた。残念ながら現在は撤去され、観測所もアンテナも残っていない。
Credit: Carnegie Institution for Science Archives

謎のノイズの時間的な変化と木星の天球上での動きが一致していることに気がつき、ノイズは木星からの電波であることを突き止めたのです。この観測は、惑星が放射する電波を初めて確認したことになりました。

1955年に論文が発表されると、多くの電波天文学者が過去の観測データの見直しを行いました。なかでも、オーストラリア出身の電波天文学者であるシャイン (C. A. Shain) が、その5年も前からこれまで認識されていなかった木星からの電波と思われる記録を見つけ出しました。天文学者たちは、さっそく木星からやってくる電波の存在を確認したのです。

しかし、これだけでは、なぜ木星が電波を放射しているのかは分かりませんでした。後に様々な仮説が立てられ、詳細な観測が行われるようになって、その原因が少しずつ解明されていったのです。

ちなみにこの木星からの電波は、後におよそ10~40 MHzの周波数であることが明らかになります。波長にすると、およそ30m~7mで、おおむね10m (=デカメートル) 台の範囲であることから、「木星のデカメートル波 (Jovian DecAMetric Radiation = Jovian DAM)」と呼ばれるようになりました。

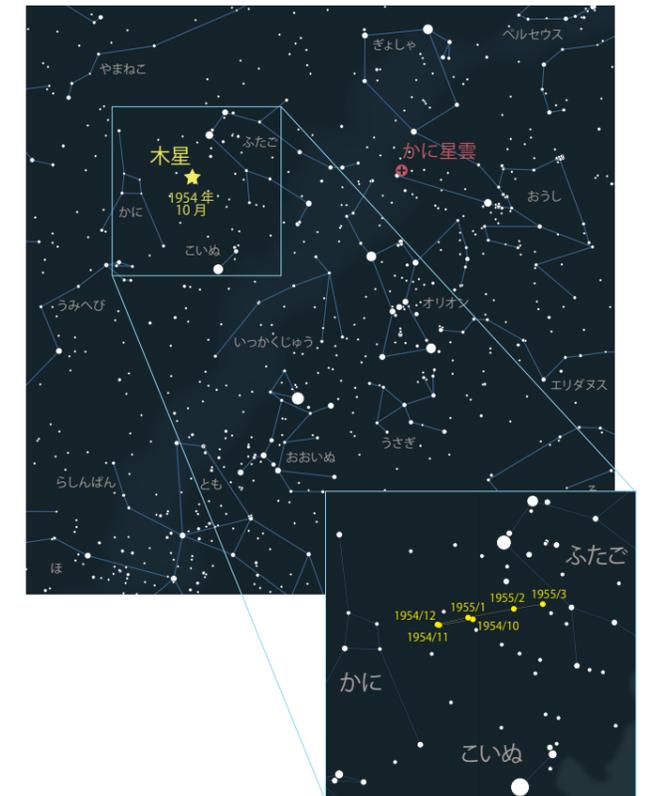


図02 1954年から1955年にかけて、バークとフランクリンが謎のノイズについて観測を行っていた頃の星図。かに星雲のある「おうし座」に近い「かに座」付近に木星があるのが分かる。拡大星図には、各月1日の木星の位置を記した。木星は1954年12月から1955年3月にかけて、天球上を西へ向かって10度ほど移動していた。

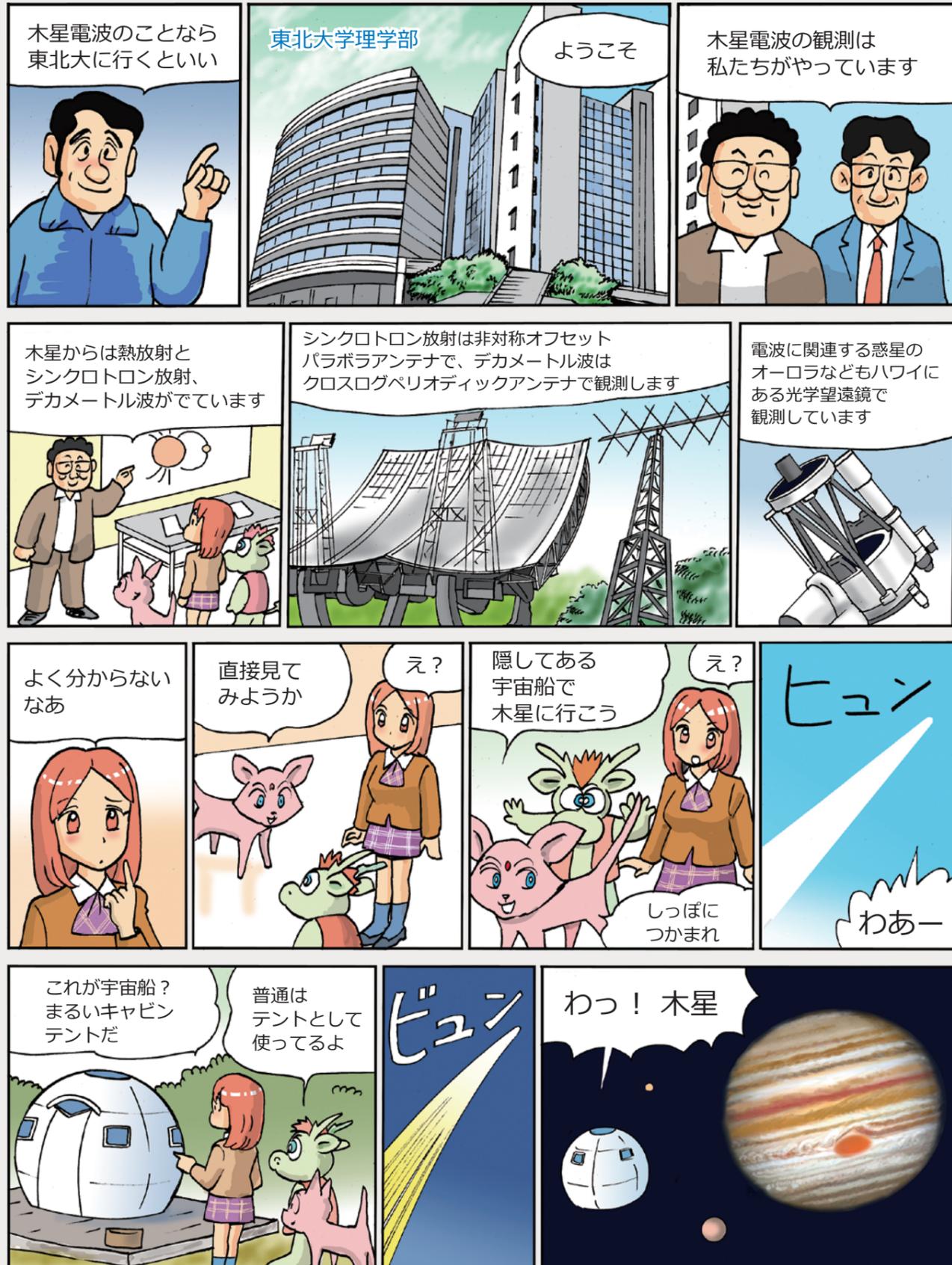
観測を進めていたバークとフランクリンは、かに星雲からの電波ではないと思われるノイズが、時折現れることに気がつきました。原因を探るうちに毎日ではないが、ほぼ同じ恒星時（地球の自転1回転の周期）に1~2時間ほどのノイズが現れることも見いだしました。そこで、このノイズは人工的な電波ではなく、天体由来のものとの仮説を立てます。

さらに観測を続けると、実際には恒星時よりも少しだけ早い周期間隔でノイズが現れることが分かりました。もしも宇宙からやってきているのであれば、そのノイズの発生源は天球上を東から西へと動いていることになります。ちょうどその頃、かに星雲の近くには木星がありました。木星は、1954年11月中旬にかに座で留を迎えて逆行に転じ、そこから翌年3月まで天球上を西へと移動していたのです。バークとフランクリンは、

★ダイポールアンテナ：受信波長の1/4の長さを持つ直線状のエレメント（導線）を2本、電波を導くためのケーブル（同軸ケーブル）の先端（給電点）に取り付け、エレメントを左右対称に展開したアンテナ。シンプルな構造のため、自作するのが容易である。

アルマの冒険

第11-2章 木星での異変を調査するため、木星までひとっ飛び



2 木星のデカメートル波の正体とは?

謎の電波の正体を探るため、光と電波で詳細に木星を観測

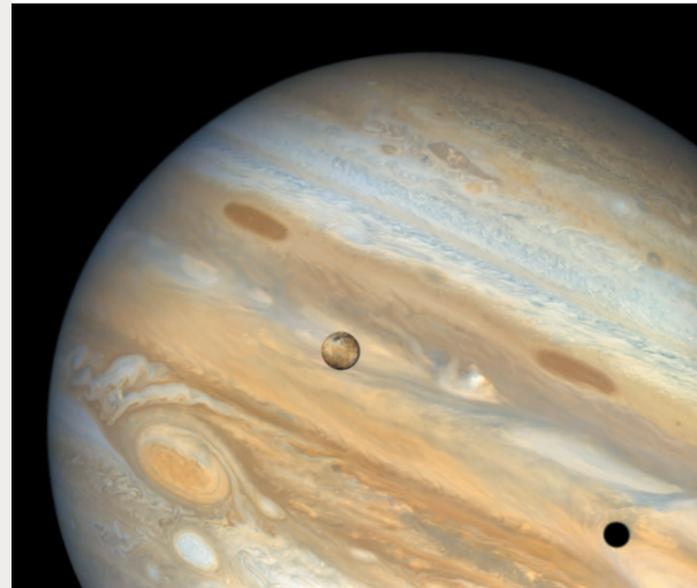


図03 木星は太陽系の第5惑星で、太陽系の惑星の中では最も大きく、その直径は地球のおよそ11倍もある。主に水素やヘリウムなどが集まった巨大ガス惑星で、地球からは小さな天体望遠鏡でも、その表面に縞状の模様や大赤斑と呼ばれる模様を見ることができる。これらは主にアンモニアの結晶などでできた雲による模様である。図は1979年に惑星探査機ボイジャー1号によって、約100万kmの距離から撮影された木星と衛星のイオ。木星の表面にはイオの影が落ちている。
Credit: NASA/Jet Propulsion Laboratory/Ian Regan

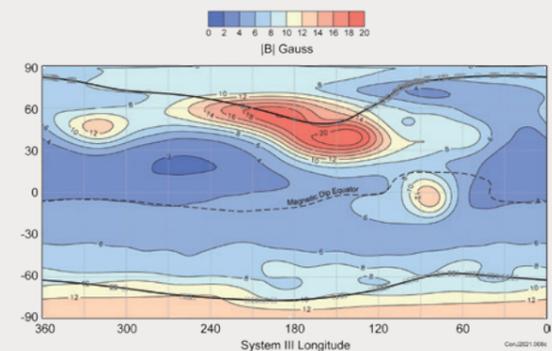


図04 木星の表面上の磁場の強さ(ガウス)の等高線を緯度経度の直角図法で示した図。木星探査機ジュノーの観測データより作成された。青い部分は磁場が弱く、赤い部分は磁場の強いところ。かなりの偏りがあることが分かる。
Connerney et al. (2022) Fig. 5より引用。

また、木星のデカメートル波は右回りの円偏波でした。偏波とは、電磁波の振動の様子です。電波は、電場と磁場の振動(時間的な変化)が波として伝わる現象ですが、円偏波は進行方向に向かって電場が回転している状態です。

偏波の観測からは、電波の発生原因や木星から地球までの空間の状態についての情報を引き出せます。また、偏波の原因の1つとして、木星のデカメートル波の発生に磁場が関わっていることが予測されました。そこから、木星には磁場が存在する可能性が示唆されたのです。

現在では、探査機などによる直接探査で、木星に磁場の存在が確認されています。惑星の磁場の成因は、基本的に惑星内部にあると考えられます。地球にも磁場がありますが、場所によって磁場の強いところや弱いところがあります。原因についてはいくつかの説がありますが、詳細は不明です。木星も同様に磁場に部分的な強弱があって、自転による周期的なデカメートル波の強度変化に関連していると考えられるのが自然でしょう。

ところが、木星のデカメートル波を長期にわたって観測を続けていくと、電波強度と中央経度にずれが生じることも分かってきました。木星表面の雲の模様は、それ自体が時間とともに変化しますし、赤道付近と極付近でも自転周期にわずかに違いが見られます。木星内部と表面上の自転速度に違いのあることも電波の観測で明らかになりました。

さらに、観測データから興味深いことが見つかりました。同じ中央経度の時でも木星のデカメートル波には強度に大きな変動があって、しかもそれに周期性があるのです。その原因は、木星の衛星のイオでした。特定の木星の中央経度とイオの位相(軌道上の位置)との組み合わせによって、周期的に木星のデカメートル波が特に強く放射されるのです。木星にはたくさんの衛星がありますが、イオの軌道は木星の磁場の強い磁力線の中にあつたのです。

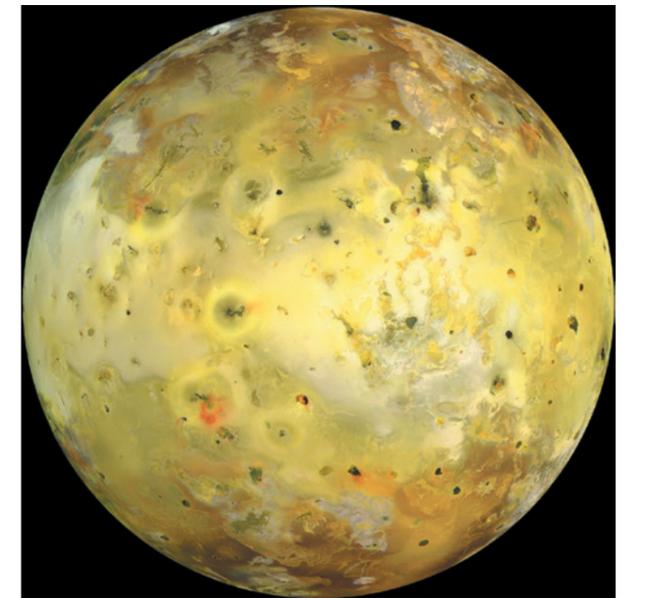


図05 1999年にNASAの探査機であるガリレオが撮影した木星の第一衛星イオの画像。複数の波長で撮影された画像を肉眼で見える色に近い色調に調整して、さらに色を強調したもの。黒っぽく見えるのが火山の噴火口で、表面の多くが主に硫黄やその化合物で覆われていて、黄色みを帯びている。Credit: NASA/JPL/University of Arizona

天文学者たちは、観測から木星のデカメートル波の存在を確信し、さらにその電波放射の仕組みを突き止めるため、電波の波長と強度、観測時刻の記録を続けました。また、同時に光学観測も行いました。地上からは、光学望遠鏡を用いて木星表面の雲の模様を観測することができます。この模様の位置と電波の強度の観測結果を比較すると、相関関係があることが分かってきました。地球上の位置を示すのに緯度と経度を用いますが、木星も同様に表面の模様を基準にして緯度と経度を定めることができます。地球から見える木星正面の経度を中央経度と呼びますが、電波はその中央経度に対応して強度が変化していたのです。

アルマの冒険

第11-3章 ジャミンガー出現で木星電波大混乱、地球も危ない!?

3 木星のデカメートル波の発生原理

衛星イオと木星電離圏の間（の磁力線）に電流が流れて、強力な電波が周期的に発生？

木星の衛星のイオは、地球の月よりもやや大きな天体です。イオは太陽系内では珍しく、火山を持つ衛星です。木星に比較的近い公転軌道を巡っているイオは、木星の強大な潮汐力によって内部に熱が生まれ、内部の物質が噴出しているのです。ただし、火山といっても地球のそれとは様子が異なります。その噴出物の成分は、主に硫黄や二酸化硫黄の気体で、他にナトリウムやカリウム、塩素なども含まれます。噴出物の多くは宇宙空間へと飛び出すと、主に太陽からの紫外線でイオンと電子に分かれたプラズマの状態になります。そして、それらのプラズマは、イオの軌道にまわって木星を取り巻く浮き輪の形のように分布しているのです。これを「イオトラス」と呼んでいます。

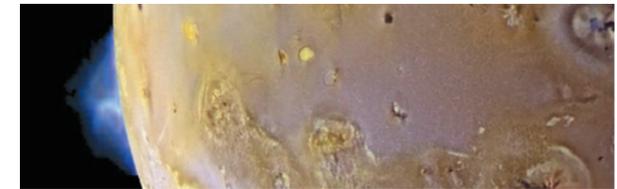


図06 木星探査機ガリレオが捉えたイオの噴火の様子。噴火による噴出はブルームと呼ばれるが、イオのブルームははるか上空の宇宙空間へまで物質を吹き上げている。
Credit: NASA/JPL/University of Arizona

イオはそのトラスの中で、自身の火山の噴出物で構成される薄い大気をまとって木星の周りを回っています。この大気は物質がプラズマの状態なので導電性を持っています。そこで、磁場を持つ木星を磁石と見立てると、イオが木星の磁場の中を移動する（実際には木星の自転周期のほうがイオの公転周期よりも短いために磁力線がイオを追い越す）と電流が発生するのです。磁石と電線を巻いたコイルを用いる発電機は、コイルの内側で磁石を回すことで、コイルの電線に電流が流れますが、イオの大気（プラズマ）と木星の磁場はまさに巨大な発電機と言えます。

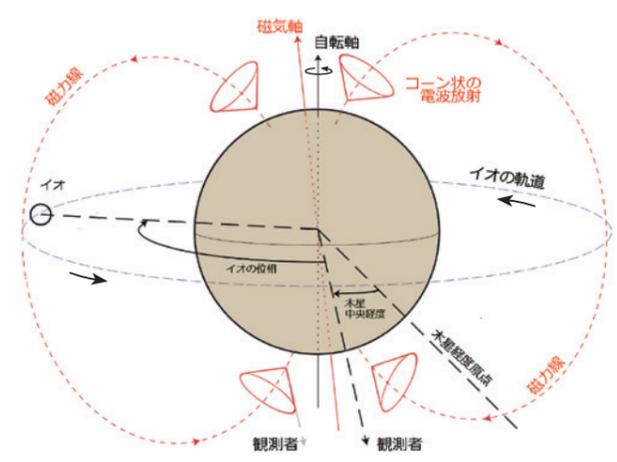


図07 木星のデカメートル波発生原理の模式図。イオの公転周期よりも木星の自転周期が短いので、プラズマを伴ったイオを磁力線が追い越すことで起電力が発生し、磁力線を経由して電離層との間に電流回路が生じる。さらに磁力線に沿って加速されたイオンが電離層でオーロラを、電子がコーン状に電波を発生させると考えられている。イオよりも高緯度の磁力線上でも、より遠方の磁気圏（図11参照）との間に電流が流れて電子が加速されるために電波が放射されるが、イオに関連したものよりは微弱である。
Louis, C. K., et al., ExPRES: an Exoplanetary and Planetary Radio Emissions Simulator, A&A, 627 (2019) A30, Fig. 2より引用し一部改変。

こうして、イオと木星の電離層を繋ぐ木星の磁力線上に電流が流れる条件が出来上がります。そして磁力線に沿って加速された電子がらせん状に運動しながら磁力線に沿って進んで行く時に、電波を放射すると考えられています。こうした電波の発生の仕組みは「サイクロトロン放射★」と呼ばれています。

残念ながら、木星のデカメートル波の発生原理は完全には解明されていませんが、デカメートル波は木星の極に比較的近い位置で、磁力線と交わる電離層付近から放射されていることも分かってきました。電波は開いた傘を逆さまにしたようなコーン状に放射され、コーンの頂点とコーンの縁を結ぶ直線上に地球が位置する時のみ、木星のデカメートル波を受信できるというわけです。

ちなみに地上から観測可能な木星のデカメートル波の周波数は、およそ18 MHzから40 MHzです。サイクロトロン放射による電波発生仕組みでは、その電波の周波数が磁場の強さに依存することから、木星のデカメートル波の周波数は、木星の磁場の強さを知るための指標にもなり得るのです。

木星のオーロラとイオフットプリント

木星でも地球と同様に、極域にオーロラが見られます。地球のオーロラの発生原理は完全には解明されていませんが、おもに太陽風のプラズマ（荷電粒子）が、複雑な過程を経て、地球の磁場の磁力線に沿って加速され、地球大気と衝突することで励起された大気分子が基底状態に戻る時にオーロラとして発光すると考えられています。木星のオーロラも基本的な発生原理は地球のものと同様と考えられています。波長は幅広く、X線から紫外線、可視光線、赤外線領域まで広がっています。

興味深いのは、イオ付近を通る磁力線が木星の大気と交わる付近（電離層）には、特に明るい発光部分が現れます。この部分を「イオフットプリント（＝イオの足跡）」と呼んでいます。木星のデカメートル波は、イオフットプリント付近から放射されていると考えられています。



図08 木星の極域に発生したオーロラと「イオフットプリント（＝イオの足跡）」（矢印）
Credit: NASA, ESA, and J. Nichols (University of Leicester); Acknowledgment: A. Simon (NASA/GSFC) and the OPAL team

★宇宙を飛び交う電波の多くは、熱的放射、シンクロトロン放射、輝線の3種です。木星からは、それ以外のサイクロトロン放射による電波が最も強く放射されています。シンクロトロン放射もサイクロトロン放射も、磁力線に沿ってらせん運動する電子によるものですが、シンクロトロン放射のほうがエネルギーのはるかに大きな（光速に近い速度を持つ）電子によるものです。

4 木星が放射する3種の電波と他の惑星からの電波

デカメートル波以外の木星からの電波と惑星電波観測の現在

後年の観測で、木星はデカメートル波とは異なる種類の電波も放射していることが分かってきました。1つは、表面の雲の熱放射です。物体からは、その温度に依存する電磁波が放射されています。木星の雲の温度はおよそ130K（マイナス140°Cほど）です。この熱放射による木星からの電波は20 GHz前後で、理論的に求められる130Kの黒体放射の数値とほぼ一致しています。

もう1つ、木星の周囲には、磁場によって閉じ込められた非常にエネルギーの高い粒子が存在する放射線帯と呼ばれる場所があります。ここからシンクロトロン放射と呼ばれるメカニズムで電子が電波を放射していることも分かっています。

シンクロトロン放射は、おもに光に近い速度の高いエネルギーの電子が磁場に捉えられて放射する電波です。その周波数は、サイクロトロン放射による電波よりも高く、数百MHzから数GHzほどです。

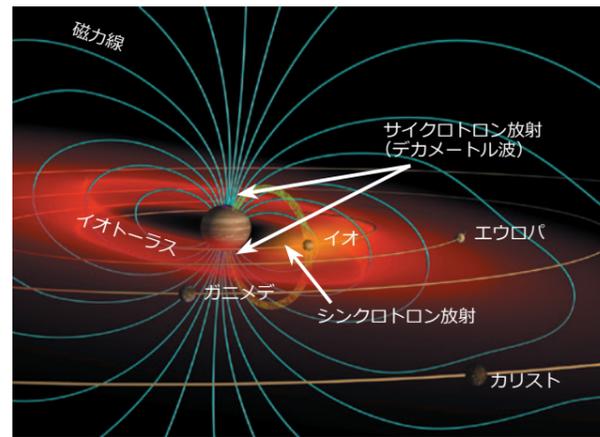


図09 木星の磁場と4大衛星の軌道、さらにイオトーラスとそこから磁力線に沿って流れる電子などを模式的に示した図。デカメートル波は木星の両極に近い電離層から、シンクロトロン放射による電波はイオの軌道よりもさらに内側にある放射線帯から放射されている。Wikimedia Commons (https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Jupiter_magnetosphere_schematic.jpg)より引用し、日本語解説を追加。

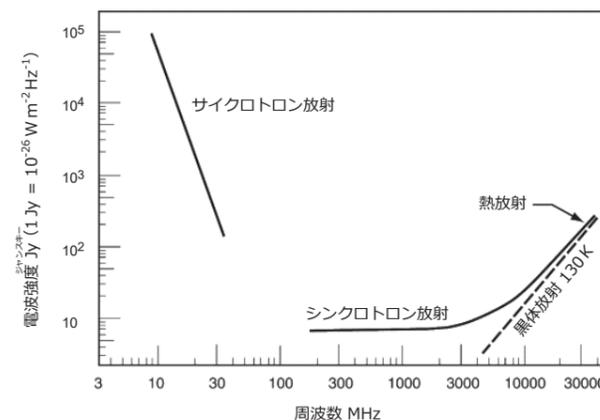


図10 木星から放射される電波は、その放射のプロセスによって異なる周波数帯に広がっている。木星からは、表面からの熱放射、放射線帯からのシンクロトロン放射、イオトーラスと磁場によるサイクロトロン放射の3種類の電波が存在している。単純な電波強度の比較では、サイクロトロン放射がより強く観測される。

Mark S. Marley, Jonathan J. Fortney, in Encyclopedia of the Solar System (Second Edition), 2007 (<https://www.sciencedirect.com/topics/physics-and-astronomy/jupiter>) Fig. 11より引用し日本語化。

実は、地球にも発見者の名にちなんでバンアレン帯と呼ばれる放射線帯が存在しています。木星の磁場は地球よりもはるかに強力なため、強いシンクロトロン放射による電波が放射されているのです。もちろん、地球でも磁気圏で電波が発生しています。しかし、電離層による反射で、その電波を捉えることがむずかしく、熱放射以外の惑星からの電波の存在が認められたのは、木星のデカメートル波が最初だったのです。

また、電波による惑星の観測の手法としては、大気吸収線などもあります。大気の熱放射による電波は、大気中に含まれる分子に応じて特定の周波数の電波のみが吸収されるので、それを観測します。電波によって、間接的に大気中に存在する物質を知ることが可能になるのです。

惑星の磁場

地球上では、方位磁針（磁気コンパス）を用いて南北の方角を知ることができます。これは、地球がまるで棒磁石のような磁場を持っているからです。地球の磁場の発生原理は、完全には解明されていませんが、地球内部の外核を構成する溶けた状態の金属（主に鉄やニッケル・導電性を持つ）が熱や物質の移動によって対流を起こしたり、さらに地球の自転も加わることで外核内部に電流が流れ、磁場が生まれるとされています。このような磁場発生の仕組みは、「ダイナモ理論」と呼ばれています。複雑な仕組みですが、大局的には地球の自転による影響が最も大きく、比較的地球の両極に近い位置に磁場の両極が位置しています。

木星も内部は主に導電性のある液体の金属水素で満たされていると考えられていて、地球と同様なプロセスで磁場が発生しているようです。ただし、磁場の強さは地球の2万倍もあります。強力な磁場により、高エネルギーの放射線帯が形成されるので、探査機で近づくには、搭載した機器が影響を受けないような対策が必要になります。

惑星で磁場を持つのは、地球と木星の他には水星、土星、天王星、海王星です。火星と金星には磁場がありませんが、探査機による観測では、火星にかつて磁場があったことが分かっています。

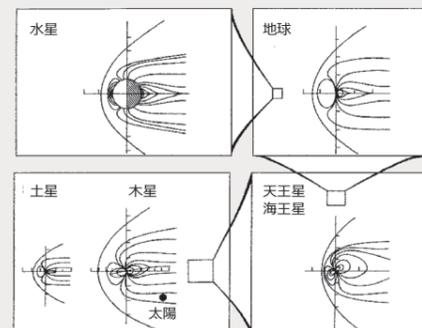


図11 惑星の磁場が及ぶ範囲を磁気圏と呼んでいます。この図は、惑星ごとの磁気圏の大きさを示しています。木星の磁場がどれほど強いかがよく分かります。天王星と海王星は、なぜか磁極が自転軸から大きく傾いています。Andrew J. Coates, The Solar System in the next millennium (https://www.researchgate.net/publication/243688353_The_Solar_System_in_the_next_millennium#pf12) Fig. 4より引用し一部改変。

日本の惑星大気観測 [SPART]

日本の惑星大気による電波の吸収線観測としては、大阪府立大学電波天文学研究室のSPART (Solar Planetary Atmosphere Research Telescope) がありました。このプロジェクトは国立天文台の野辺山宇宙電波観測所に設置されていた野辺山ミリ波干渉計の運用終了後に、干渉計を構成していた6基の口径10 mパラボラアンテナのうち1基を改装し、世界初の惑星大気観測専用の地上ミリ波電波望遠鏡として観測を行いました。現在は、すでにプロジェクトを終了していますが、大気の特定の成分が電波を吸収することを利用して、金星や火星の大気成分の季節変化や太陽活動に起因する変化などの長期のモニタリングで成果を上げています。



図12 大阪府立大学電波天文学研究室が使用していた野辺山宇宙電波観測所のミリ波干渉計F号機。ミリ波干渉計は口径10 mパラボラアンテナを6基で観測を行っていましたが、運用終了後にF号機だけを単独で使用できるように改修して活用されてきました。後ろに見えるのは野辺山45 m電波望遠鏡です。

アルマ望遠鏡によるイオ大気観測

イオは、火山から噴出される一酸化硫黄や二酸化硫黄の大気を持っていることが知られています。地球の10億分の1ほどというごくわずかな大気ですが、それが直接火山から噴き出したものか、地表に降り積もった物質が太陽光に温められて昇華し、大気に混じるのかは分かっていませんでした。そこで研究チームは、木星の影の中では大気がイオの表面に固体となって堆積すると考え、アルマ望遠鏡を用いてイオが木星の影に入る前と影から出た後で大気観測を行うことにしました。そして、高い解像度と感度を持つアルマ望遠鏡により、イオの火山から噴きあがる二酸化硫黄と一酸化硫黄のガスを捉えることに初めて成功。観測結果から、イオの大気の30~50%は火山から直接供給されていると見積もられました。また、アルマ望遠鏡は、二酸化硫黄や一酸化硫黄が検出されない場所で、火山から噴出する新たな種類のガスとして、塩化カリウムも検出しています。研究チームでは、イオの内部でマグマの組成が異なっている証拠と考えています。

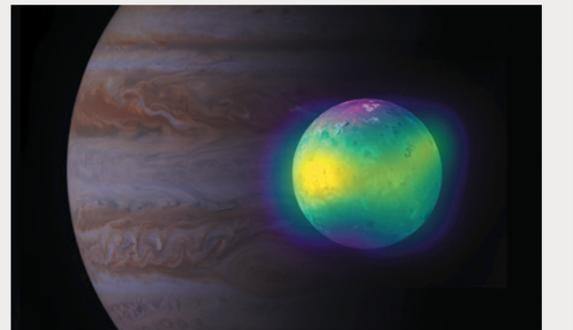


図13 にじんだような黄色の部分アルマ望遠鏡が電波で観測したイオの二酸化硫黄。さらに探査機カッシーニが撮影した木星とボイジャー1号とガリレオ探査機によって得られたイオの表面画像も合成しています。Credit: ALMA (ESO/NAOJ/NRAO), I. de Pater et al.; NRAO/AUI NSF, S. Dagnello; NASA/JPL/Space Science Institute

右上のイオ大気を観測したアルマ望遠鏡はチリのアタカマ砂漠に建設された電波干渉計です。山頂施設に並ぶアルマ望遠鏡モリタアレイ（アタカマコンパクトアレイ）のアンテナ群。密に並んでいるのが日本製7mアンテナ、右手前が日本製12mアンテナです。Credit: ALMA (ESO/NAOJ/NRAO)



5 アメリカの市民科学アウトリーチ「Radio JOVE」

木星電波観測を利用したNASA主導の体験型教育プロジェクト

アメリカには1999年から市民科学へのアウトリーチとして、Radio JOVE（ラジオジョーブ／JOVEはローマ神話のユピテル＝Jupiterのこと）と呼ばれるプロジェクトがあります。これは、学生や教師、一般市民が電波望遠鏡を作ったり、インターネットを通じて遠隔地の電波望遠鏡を利用することで、電波天文学について学ぶことができる体験型の教育プロジェクトです。すでに2500を超える学生団体や個人が参加しているそうです。

Radio JOVEの参加者は、ネットワーク上で交流したり、データの共有を通じて協力しあうこともできます。また、プロジェクトのパートナーとして、NASAゴダード宇宙飛行センターを始め、フロリダ大学天文学部やミドルテネシー州立大学などの研究機関や教育機関、いくつかの企業がサポートをしています。

2016年からは、Radio JOVEプロジェクトの範囲は、太陽物理学の市民科学研究を取り込むために拡張され、現在では「Radio JOVEプロジェクト2.0」として、木星や太陽、天の川銀河、および地球上の電波放射からデータを収集し、科学的分析とアーカイブまでを行うことができるようになっています。

最大の特徴は、参加者へ安価な電波望遠鏡のキットを非営利で提供していることでしょう。電波望遠鏡とはいえ、簡単なデュアルダイポールアンテナとSDRを受信機として、PCを活用した簡単な構成ですが、木星のデカメートル電波の観測を行うには十分な性能を有しています。また、観測に必要なソフトウェアも提供されていて、誰もが電波天文学分野の観測を体験することが可能です。受信機は当初、オリジナルで設計されたもので、電子部品をはんだ付けして組み上げるシステムを採用していました。しかし、安価で観測波長範囲が広く、波長も時間も高分解能で、なによりスペクトルが取得できるSDRの登場で、より本格的で有意義な観測を行えるようになっています。

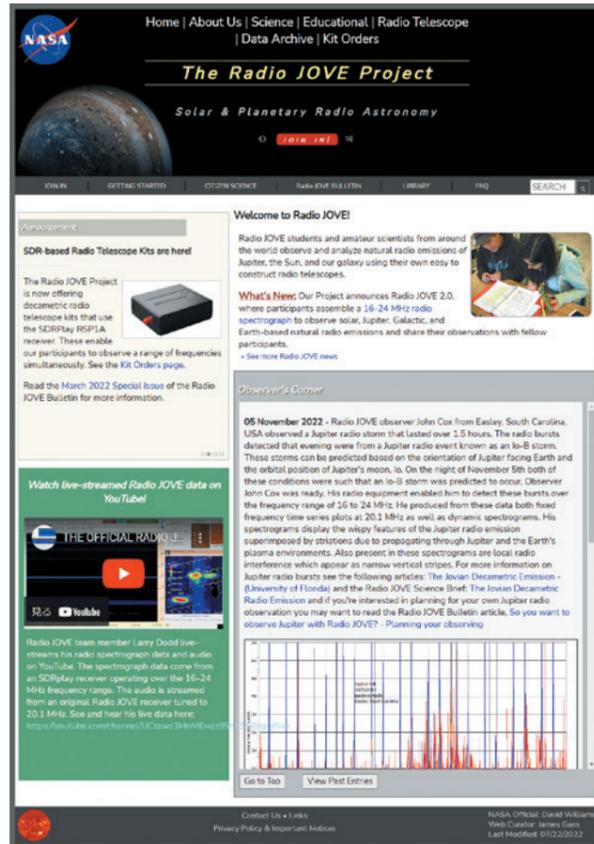


図14 Radio JOVEのウェブサイト。もちろん英語のみだが、最近ではウェブブラウザの翻訳機能も充実してきたので、内容を理解するのはさほどむずかしくないだろう。木星のデカメートル波の発見から現代の観測手法まで、たくさんの情報が詰まっている。
<https://radiojove.gsfc.nasa.gov/>

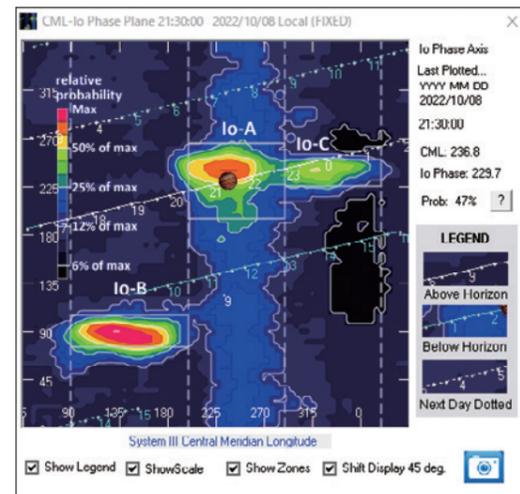


図15 木星のデカメートル波の観測計画の立案に欠かせないのが、Radio-Sky Publishing社より提供されている「Radio-Jupiter Pro 3」だ。木星の中央経度とイオの位相から、デカメートル波が強く放射されるタイミングを予測することができる。
<https://radiosky.com/rjpro3ishere.html>

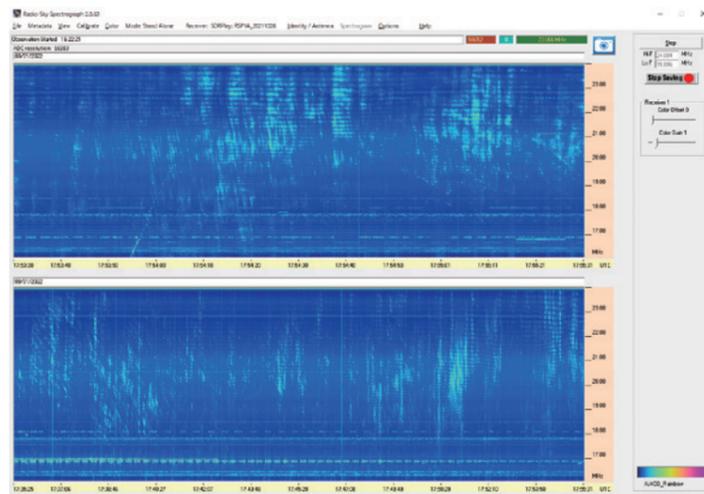


図16 「Radio-Sky Spectrograph」は、アナログデジタルコンバーターを使用してPCでデータを収集できるインターネット対応のストリップチャートレコーダー。「Radio-Jupiter Pro 3」と同様にRadio-Sky Publishing社より提供されている。SDRとの接続用アプリと併用することで、木星のデカメートル波の比較的広範囲なスペクトルの観測が可能となる。
<https://www.radiosky.com/specdownload.html>

実際に観測を行うソフトウェアに加え、木星の中央経度とイオの位相から、木星のデカメートル波のストームを予測するソフトウェアなども無償で用意されていて、まさに至れり尽くせりです。

Radio JOVEが提供する電波望遠鏡キットをアメリカから日本へ輸入することは不可能ではありませんが、残念ながら送料なども考えるとあまり現実的ではないようです。そこでアル

マーの冒険制作チームは、Radio JOVEの電波望遠鏡キットの構成を踏襲したシステムを作り上げ、実際に木星のデカメートル波の観測を行ってみました。Radio JOVEが指定するSDRはイギリス製ですが、国内の代理店が扱っていて通販で購入できます。また、アンテナは日本国内で比較的簡単に入手可能な材料を用いて組み上げました。観測システムの構築から実際の観測結果までは、後編にて紹介の予定です。

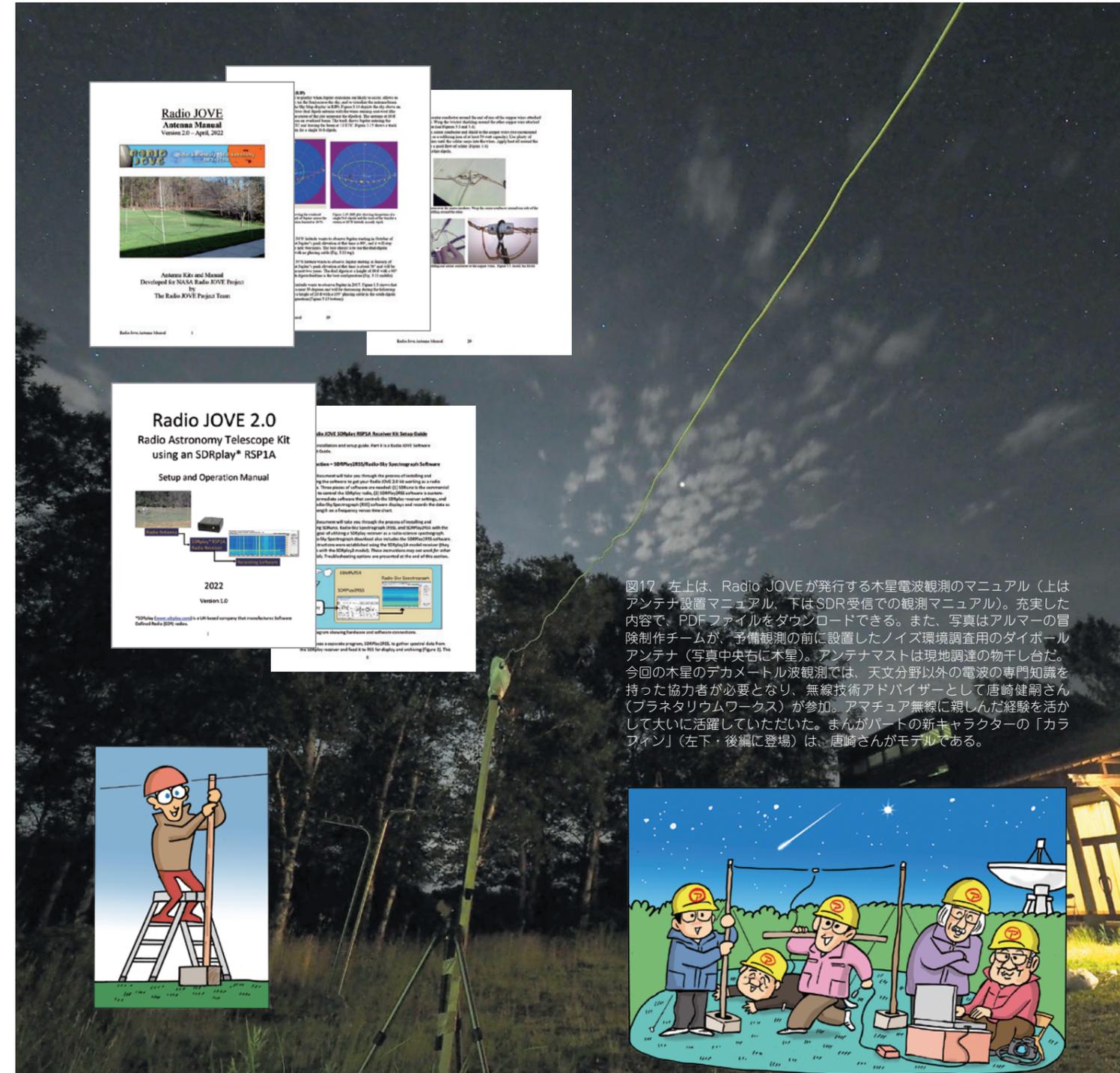


図17 左上は、Radio JOVEが発行する木星電波観測のマニュアル（上はアンテナ設置マニュアル、下はSDR受信での観測マニュアル）。充実した内容で、PDFファイルをダウンロードできる。また、写真はアルマーの冒険制作チームが、予備観測の前に設置したノイズ環境調査用のダイポールアンテナ（写真中央右に木星）。アンテナマストは現地調達した物干し台だ。今回の木星のデカメートル波観測では、天文分野以外の電波の専門知識を持った協力者が必要となり、無線技術アドバイザーとして唐崎健嗣さん（プラネタリウムワークス）が参加。アマチュア無線に親しんだ経験を活かして大いに活躍していただいた。まんがパートの新キャラクターの「カラフィン」（左下・後編に登場）は、唐崎さんがモデルである。

6 歴史ある日本の木星電波観測のエキスパート

東北大学大学院理学研究科の「惑星圏飯館観測所」を訪問

日本の木星電波研究は、東北大学や前田耕一郎氏（元兵庫医大）、今井一雅氏（高知高専）によって進められてきました。特に1970年代から継続的に木星電波の観測を行ってきた東北大学では、現在も大学院理学研究科の地球物理学専攻／惑星プラズマ・大気研究センターが最前線で研究をしています。そこで、アルマーの冒険制作チームで木星のデカメートル波観測を行うにあたり、地球物理学専攻／惑星プラズマ・大気研究センターのみなさんに、ご協力とアドバイスをいただきました。

また、惑星プラズマ・大気研究センターには多数の天体観測施設がありますが、なかでも特に惑星電波観測の中心となっている「惑星圏飯館観測所」を見学させていただきました。ここでは、観測所の様子や研究成果などをご紹介します。

惑星圏飯館観測所は、福島県相馬郡飯館村の山中に建設された施設で、東北大学大学院理学研究科のある仙台市からは、車で2時間ほどです。ここには、「木星・銀河デカメートル電波

観測施設」と「惑星電波・分光観測施設」の2つの施設が隣接しています。

木星・銀河デカメートル電波観測施設では、木星はもちろん、銀河からのデカメートル波の観測を行っています。電波をより高感度に受信するために、森の中に9基のクロスログペリオディックアンテナが設置され、アレイ干渉計システムが構築されています。これによりイオに関連した木星のデカメートル波の詳細な振る舞いを記録したり、イオとは関係のない微弱な電波源の全貌を明らかにするべく、観測を続けています。

さらに、東北大学には木星のデカメートル波の観測を行う施設として、宮城県内に米山観測所（登米市）、川渡観測所（大崎市）、蔵王観測所（刈田郡蔵王町）があり、飯館の施設と合わせた4局での長距離干渉計網を構築しています。干渉計として使うことで、より高い分解能で、木星のどちらの極が放射源かを調べることが可能になっています。



図18 木星・銀河デカメートル電波観測施設には、9基の短波帯（HF）アンテナが設置されているが、そのうちの6基のクロスログペリオディックアンテナで、木星からの電波の強度と偏波をモニタリングしている。観測波長は15~40 MHz。

図19+20 それぞれのアンテナからケーブルが引き込まれた建屋の中には、受信機とPCが置かれて電波のスペクトルが記録されている。観測データは、インターネット上でも公開されている。
<http://ariel.gp.tohoku.ac.jp/~jupiter/>

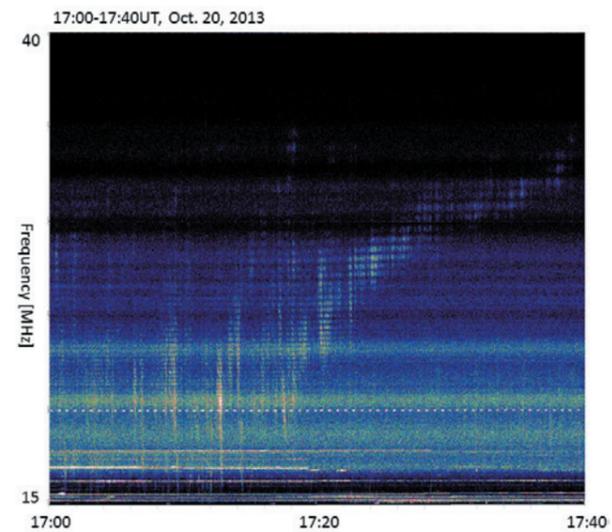


図21 観測データの一例。木星のデカメートル波のうち、Io-Bと呼ばれるラジオストーム（電波嵐）を捉えたもの。アーチ状に周波数に変化していくのが大きな特徴だという。

惑星電波・分光観測施設には、大きさが31m×16.5mを2面で並べ、開口面積が1000平方メートルを超える大型の非対称オフセットパラボラ式の惑星シンクロトロン電波望遠鏡があります。こちらは現在、木星放射線帯内の高エネルギー電子から放射される電波（シンクロトロン放射）を観測しています。さらに、太陽のコロナ大気中のプラズマが加速する際に放射する電波バーストも観測しています。観測から得られた電波強度やスペクトルの変化を解析し、木星と太陽周辺のプラズマ粒子の加速過程、輸送過程の解明が進められています。

また、東北大学では、アメリカのRadio JOVEを手本として、木星電波観測を市民科学へのアウトリーチとするべく、大学院生を中心として活動を開始しています。さらに、他大学と協働しての活動も進められていて、今後は多くの人に木星のデカメートル波の観測の体験を通し、地球を含むそれぞれの惑星の「惑星圏」への興味と理解を深めてもらえるように働きかけていくとのことです。



図22 惑星電波・分光観測施設の主力観測装置は、変わった形の非対称オフセットパラボラアンテナを持つ惑星シンクロトロン電波望遠鏡だ（アンテナサイズ 31 m×16.5 m 2面）。木星放射線帯内の高エネルギー電子から放射される電波（シンクロトロン放射）を観測し、電波強度やスペクトルの変化から、放射線帯粒子の加速過程や輸送過程の解明に使用されている。

図23+24 県道315号線から、林道を進んだ先に惑星圏飯館観測所がある。残念ながら、一般公開はされておらず、道沿いから施設のアンテナ群を眺めることはできない。林道に沿って送電用の電柱が並んでいるが、これらは観測所への電力供給のために設置されたもの（林道の先には民家や施設はない）で、なんと「木星線」と記されたプレートが付けられている。

図25 仙台市にある東北大学青葉山キャンパスにて、木星電波についてのレクチャーをいただいた。写真は、後列左から土屋史紀准教授（惑星プラズマ・大気研究センター）、笠羽康正教授（惑星プラズマ・大気研究センター）、加藤雄人教授（地球物理学専攻）、熊本篤志准教授（地球物理学専攻）、前列はアルマーの冒険制作チームの3名。

図26 土屋史紀准教授（写真右）と熊本篤志准教授（写真左）には、惑星圏飯館観測所をご案内いただいた。（写真提供：東北大学）

図27 惑星圏飯館観測所の訪問には石黒正人国立天文台名誉教授（左から二人目）も参加。

次回予告

木星のデカメートル波の受信を目指して、いよいよアンテナを製作し、SDRとPCを用いての観測を試みます。はたして、木星からの電波を検知することはできるのでしょうか、次回をお楽しみに！

新・キーナンバーで読み解く宇宙

国立天文台の所蔵貴重資料が重要文化財に

86通



文 腰原伊織
KOSHIHARA Iori
天文情報センター
図書係長

国立天文台では、江戸幕府天文方が所蔵していたものを中心に、天文・暦・和算関係の古書を多数所蔵しています。その中の1つ『星学手簡』が国の重要文化財に指定されることになりました。

『星学手簡』は、高橋至時(1764-1804)と間重富(1756-1816)の間で交わされた書状を中心に集成された、上中下の3巻から成る写本です。編者は至時の次男である渋川景佑(1787-1856)と推定されています。

算学に優れた至時と、裕福な商家を営む重富は、ともに江戸時代後期の天文学者・麻田剛立(1734-1799)に師事した研究仲間でした。天文方となった至時は、幕府から改暦の任を命じられます。至時は重富の協力を得ながら、江戸、大坂、京都、長崎など全国各地で天測、測地と

いった準備を行い、やがて最新の理論と精度の高い観測に基づいた「寛政暦」を完成させました。

寛政の改暦後もその精度に満足しなかった至時は、西洋天文学書を手し、天体運動理論の精密化に努めました。重富は垂揺球儀(振り子時計)・子午線儀・象限儀などの観測機器や、方位盤・量程車などの測量装置の作成・改良に才を発揮しました。暦の計算上の要請から地球の大きさを測定する必要性を痛感した2人は、至時に弟子入りしていた伊能忠敬(1745-1818)の全国測量・地図作成の事業を支援していきます。



国文学研究資料館の国書データベース
<https://kokusho.nijl.ac.jp/biblio/100265804>

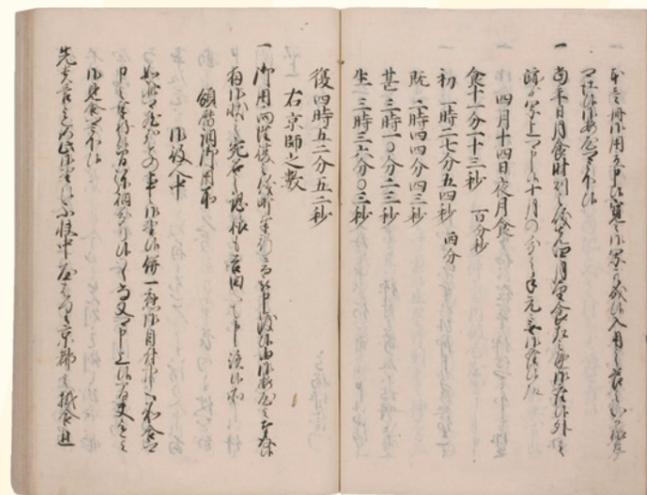
※『星学手簡』のすべてのページをこのデータベースでご覧いただけます。

(1745-1818)の全国測量・地図作成の事業を支援していきます。

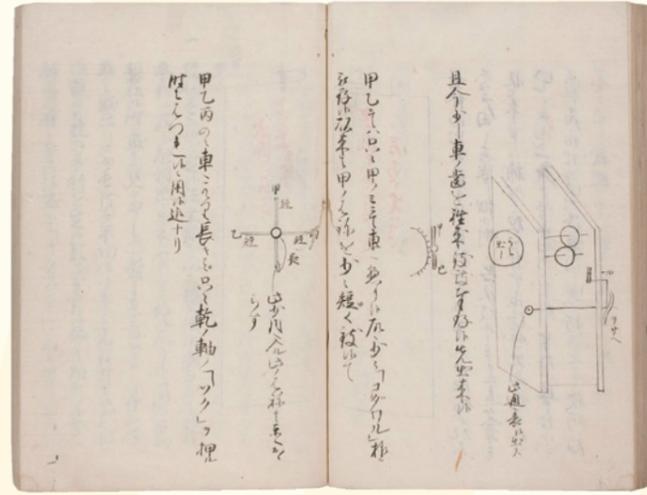
至時と重富の間の頻繁なやり取り、および関係する人物に宛てられた書状約86通をまとめた『星学手簡』からは、天体観測や天文暦学研究の実態について、刊行された書物や天文方の公的な文書には残されない内情までも伺い知ることができます。

幕末まで渋川家に所蔵されていた本書は、明治前期に科学思想史研究家の狩野亨吉の手に渡り、その後東京天文台に譲渡されました。

※数字はデータベースの画像番号



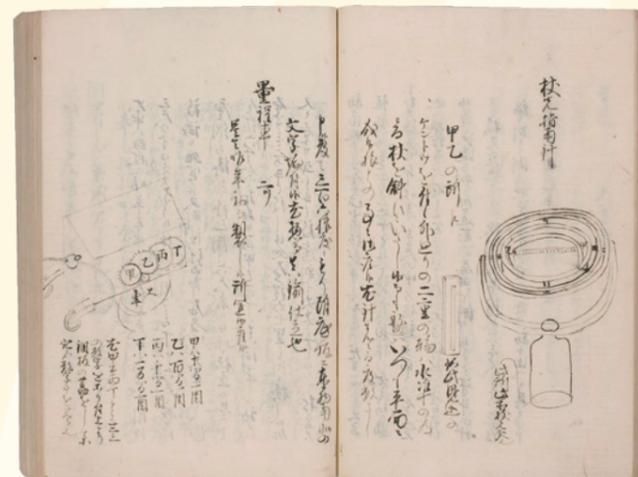
No.40 月食観測の記録。



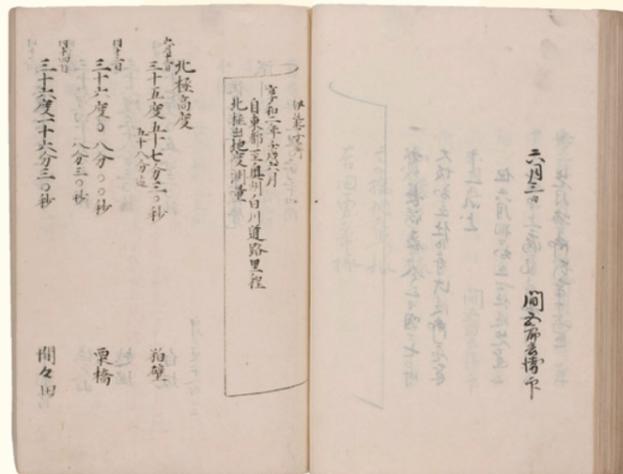
No.76 垂揺球儀の改良について。振子の揺れる回数を自動で数える仕組み。



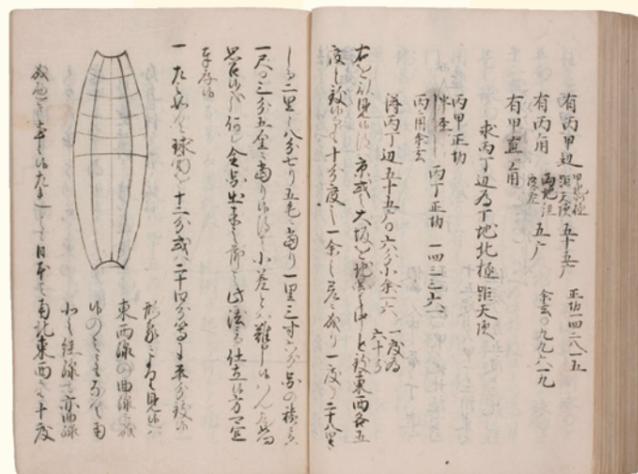
No.79 観星鏡と測量技法。



No.154 測量用の機器。「杖先指南針」「量程車」。



No.237 伊能忠敬の測量記録より。奥州街道の各地で北極星の高度を測った。



No.253 地図描画における経緯線の作図について。

NEWS

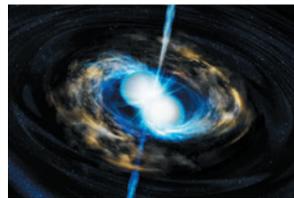
研究連携主幹が目にした 2022年の国立天文台の研究成果

本原顕太郎（国立天文台 先端技術センター／研究連携主幹）

2022年も国立天文台は、様々な天文学の研究成果を発信し続けました。その中で、本原が個人的に「これは面白かった、印象に残った」というトピックを振り返っていききたいと思います。

アテルイIIで読み解く宇宙の重元素合成

まず1つ目、宇宙の重元素合成のお話です。我々の体を形作っている炭素や酸素のような水素、ヘリウムを除く元素は、宇宙誕生時には存在してなくて、その後生まれた星の中や、超新星爆発時などの核反応で作られ出したことが分かっています。とくに、

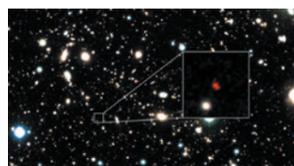


中性子星合体とキロノバの想像図。(クレジット：東北大学)

金やプラチナ、レアアースなどの重元素は、中性子星の衝突合体で大量に作られることが理論的に予想されてはいましたが、そもそもこの合体は非常にまれな現象で、2017年8月17日に重力波望遠鏡によって初めて同定されました。その後世界中の望遠鏡が追観測を行って、詳細なスペクトルも得られています。これらのスペクトルは、この元素の種類や量の情報が含まれているロゼッタストーンのようなものなのですが、その解釈は難しく、進んでいませんでした。東北大学を中心とする研究チームが国立天文台のスーパーコンピュータ「アテルイII」を使って、このスペクトルを読み解くことに成功し、ランタンとセリウムが作られたことが初めて明らかになりました。

アルマ望遠鏡で捉えた最遠方天体の候補

2つ目は、宇宙誕生からわずか数億年という時代の初期宇宙の様子を明らかにした研究です。光の速度は毎秒30万キロメートルと有限なため、遠くを見れば見るほど過去の宇宙の姿をのぞき見ることができます。このことから天文学者は、可能な限り遠くにある天体を探して、初期の宇宙の姿を明らかにしようとしています。



観測史上、最遠方の銀河の候補「HD1」の画像。拡大した図の中心にある赤い天体が、今回発見された「HD1」です。3色の観測データを合成し擬似カラーで表しています。(クレジット：Harikane et al.)



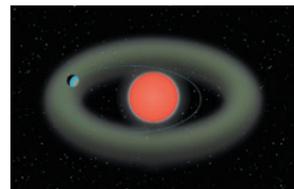
MACS 1149-JD1の想像図。(クレジット：ALMA (ESO/NAOJ/NRAO))

東京大学と早稲田大学を中心とする国際研究チームが、これまでで最も遠い銀河の兆候を示す天体を、アルマ望遠鏡を用いて発見した、と報告しています。「最も遠い天体を発見した」と言い切っていないのは、天体の距離を示す信号（酸素原子の光）が非常に微弱で確定的ではないためです。しかし、そのほかの情報も総合すると、最も遠い天体である可能性は非常に高いと考えられます。この天体は、宇宙誕生からわずか3億年の時代に存在していると考えられていますが、現在の銀河形成の理論が予想するよりもかなり明るく、この研究分野に大きなインパクトを与えそうです。今後の宇宙望遠鏡などによ

る追観測で真に遠方の天体かどうか分かるかが鍵になるでしょう。また、宇宙誕生から5億年の時代の銀河をアルマ望遠鏡で詳細に調べた研究では、この銀河がすでに今の渦巻銀河のように回転していることを捉えています。一方で、我々の天の川銀河に比べて直径は30分の1、重さは100分の1と非常に小さな銀河です。初期宇宙の銀河の姿を明らかにするとともに、我々の住んでいる天の川銀河がどのように形作られてきたかの手がかりになるとも考えられます。2022年はNASAのジェイムズ・ウェッブ宇宙望遠鏡も観測を開始し、夏頃から怒濤のようにデータが公開されて、この初期宇宙における銀河の知見も一気に広がっています。2023年以降もどのような新しい成果が得られるのか、目が離せません。

すばる望遠鏡で進む第2の地球探し

3つ目は、第2の地球探しの最新の成果です。現在、高精度の赤外線分光器IRDを用いて、恒星の視線速度の変動（見かけ上どれくらい近づき遠ざかっているかの変動）を観測して、その周りの地球型惑星を探す大規模観測を、すばる望遠鏡で行っています。2019年に観測を開始して2年



発見された太陽系外惑星系の模式図。(クレジット：アストロバイオロジーセンター)

あまり、ついにその第1号が発見されました。この惑星は、太陽の5分の1の重さの「ロス508」と呼ばれる恒星の周りを11日（！）という非常に速い公転周期で周回していることが分かりました。しかも、ロス508からの距離は、ちょうど水が液体で存在できるくらいのところにある模様で、もしかしたら生命が存在しているかもしれません。今後、生命探査が行われることを期待したいところです。

すばる望遠鏡次世代装置PFSの完成に向けて

最後に、現在、すばる望遠鏡の次世代の大型観測装置で主焦点に搭載するファイバー分光器、超広視野多天体分光器PFSを、東京大学Kavli IPMUなどとともに開発しています。新型コロナウイルスの影響でスケジュールが遅れるなどしていましたが、2022年9月についに望遠鏡に取り付けての観測に成功し、完成に向けて大きな峠を越えました。



すばる望遠鏡に搭載されたPFSの「主焦点装置」。(クレジット：Kavli IPMU)

本格的な観測の開始は2023年後半までお預けの予定ですが、宇宙論から星・惑星まで、様々な成果が出てくると期待しています。

他にも、様々な研究成果を発信しました。いずれも最先端の天文学を切り開くエキサイティングなものばかりです。ウェブ記事「ニュース：研究成果：2022年」にまとめられているので、ぜひ一度ご覧ください。

国立天文台は、宇宙の謎を明らかにするための様々な観測施設を運用するだけでなく、世界最先端の研究開発を日々行っています。2023年も新たな天文学の発見にご期待ください。



2023年を迎えて、常田佐久 国立天文台長の 年頭のご挨拶が公開されました



常田台長
年頭挨拶

2022年度永年勤続者表彰が行われました

2022年11月24日（木）10時から三鷹・中央棟（北）講義室およびZoomにて開催されました。表彰者は以下の方々です。
野田寛大（RISE月惑星探査プロジェクト 助教）
大淵喜之（先端技術センター 前任研究技師）
田中愛子（事務部総務課 課長）
山浦真理（事務部総務課 係長）
山本真一（事務部財務課 係長）



該当者表彰式終了後に、記念撮影が行われました。表彰状を手に左から山本真一さん、田中愛子さん、山浦真理さん。

ふれあい天文学から始まった繋がり (高槻高校生の三鷹キャンパス訪問)

都築俊宏（先端技術センター）

国立天文台では、子どもたちが宇宙への興味と探究心を持つきっかけとしてもらうために「ふれあい天文学」を実施しています。この「ふれあい天文学」は国立天文台の天文学者が国内・海外の小中高校に出張し授業を行う取り組みで、2010年度から2021年度までの期間で、のべ872校に対して実施してきました。

さて、私（都築）の母校でもある高槻中学・高槻高等学校は、中高一貫教育で医学・理学教育に力を入れている、大阪府の私立で唯一のSSH*指定校です。2019年、高槻中学校から中学2年生に進路を考



えさせる機会にしたいと、「ふれあい天文学」の申し込みがありました。それに応じる形で、その年の12月に、TMTプロジェクトの家正則名誉教授が高槻中学校を訪問し、「宇宙の時代がやってくる」と題した授業を行いました。

当時の中学2年生が高校2年生となった2022年、今度は高槻高校から、東京への研修旅行の機会に、希望する生徒を引率して国立天文台を訪問し、家さんの話を再度聞きたいという要望がありました。今年このふれあい天文学の募集は終了していましたが、家さんから高槻高校OBの私と天文情報センターに相談があり、対応することになりました。

11月16日、高槻高校の生徒12名と引率先生2名が三鷹キャンパスを訪れました。都築からは高槻高校卒業後、国立天文台で観測装置の開発に携わることになった経緯と仕事内容の紹介、小池明夫広報普及員からは三鷹キャンパス施設の見学案内、家さんからは「宇宙の中の人類」と題した講演を実施しました。事前に生徒から多くの質問が寄せられており、それらにも答えることができました。後日、生徒の一人から頂いたお礼状には「天文学以外にも様々なことを学べた、非常に実りのあるものだった」と書かれていました。このような取り組みが生徒の将来に少しでも役立つ機会となれば、とても嬉しく思います。

*SSH：スーパーサイエンスハイスクール。文部科学省から指定を受け、高等学校等において、先進的な理数教育を実施するとともに、高大接続の在り方について大学との共同研究や、国際性を育むための取り組みを推進する高校。

すばる望遠鏡3Dバーチャルツアー： 世界最大級の光赤外望遠鏡を大公開！

国立天文台ハワイ観測所は、電気通信大学とマーターボート社と連携して、すばる望遠鏡ドームの3Dショーケースを公開しました。酸素が地上の6割しかない、標高約4200メートルのハワイ島マウナケア山頂域に位置する、すばる望遠鏡ドーム内を、3Dバーチャル空間を通じて散策することが可能です。お手元のスマートフォンやタブレット、PC、またはVRゴーグルで特設ページにアクセスすることで、現在非公開となっている望遠鏡ドーム内をいつでもどこでも気軽にお楽しみいただけます。

さらに、国立天文台三鷹キャンパスの天文台歴史館と太陽塔望遠鏡の3Dショーケースも国立天文台およびマーターボート社ウェブサイトにて公開しています。是非こちらも合わせてお楽しみください。



*このプロジェクトはJST次世代研究者挑戦的研究プログラムJPMJSP2131より支援を受けています。



ドームの観測階から眺めたすばる望遠鏡の本体。(クレジット：国立天文台)

NEWS

家 正則 国立天文台名誉教授が瑞宝重光章を受章



瑞宝重光章を受章した家正則 国立天文台名誉教授（内閣府の瑞宝章の画像を加工して作成）。（クレジット：国立天文台）

家正則 国立天文台名誉教授および総合研究大学院大学名誉教授が、令和4年秋の叙勲にて「瑞宝重光章」を受章しました。

家氏は、望遠鏡の主鏡をコンピュータ制御で理想的な形に保つ「能動光学」を提唱し、

口径8.2メートルのすばる望遠鏡をハワイ島に建設する計画に貢献しました。すばる望遠鏡の完成後は、初期宇宙の観測に力を注ぎ、2006年に当時としては最遠となる130億光年離れた銀河を検出しました。また、大気のゆらぎによる星像の乱れを克服する「補償光学」の機能を持つ装置を開発し、すばる望遠鏡の視力を10倍に向上させることに貢献しました。この装置を搭載したすばる望遠鏡は、近距離の恒星を公転する惑星の直接撮像に成功する等の顕著な観測成果を挙げています。国際協力の下で進めている次世代超大型望遠鏡TMT計画の推進にも力を注ぎ、TMT国際天文台の評議員会の副議長と日本代表を務めました。現在も、宇宙史の解明に向けた精力的な研究を続けています。

家氏は、天文学研究の功績により、平成23年秋の叙勲において紫綬褒章を受章しています。また、2020（令和2）年には、日本学士院会員に選定されています。

黒点計数のための汎用黒点自動検出手法の開発

国立天文台 太陽観測科学プロジェクト

黒点や黒点群の数は、太陽活動の指標の中で、太陽の直接観測で得られるものとしては最も長い蓄積があり、長期にわたる太陽活動変動を知る手がかりとなっています。ただ、その基になる黒点検出は、今でも人の手によるスケッチが基準となっています。このような主観が入るデータは現在の科学では扱いつらく、また先端的な観

測装置により光球からコロナまで多面的にその姿が捉えられる現代の太陽観測を運用する中で、スケッチに労力を投入するのは現実的ではありません。今後は、白色光画像を基に黒点を自動検出することで黒点計数を継続していくことになると考えられます。

国立天文台では、旧来のスケッチに代わり、1998年以降CCDカメラで撮影した白色光画像を基に自動黒点検出を行ってきました。しかし、誤検出や検出漏れも少なくありませんでした。そこで今回、スケッチ観測の置き換えが可能となるような、より高精度に黒点を検出でき、かつ装置や画質が異なるデータにも対応できる黒点検出手法の開発を行いました。また、画像1枚だけから黒点を検出すると、シーイングの影響で生じた偽黒点を捉えることがあるため、連続して撮影された複数画像から黒点を検出して信頼性を上げることも可能としていて、眼視によるスケッチ観測での利点である、シーイングによる見え方の変化を捉えて黒点を判別するという方法を、自動検出で再現しています。図は、実際に太陽フレア望遠鏡で得られた太陽画像上の黒点を検出した例で、赤が半暗部、緑が暗部を示しています。

この手法により、2021年の太陽フレア望遠鏡・川口市立科学館・アマチュアの森田作弘さん（いずれも複数画像を連続して撮影）という三様のデータを実際に処理して得られた黒点数と、スケッチ観測であるロカルノ Specola Solare Ticinese（黒点相対数算出の基準観測所）および京都大学花山天文台の黒点数を比較し、画像からの黒点検出で眼視観測に匹敵する結果が得られていることが分かりました。また、誤って黒点を検出していないか確認したところ、自動検出での誤検出は0ではないが眼視観測と同等の少なさであることが確認されました。フレア望遠鏡のデータからの黒点検出は当プロジェクトのウェブページで公開中であり、また本手法は汎用的に使えるので、科学館・アマチュアなどでもスケッチの代替としての黒点検出を行うことができ、長期にわたって観測を持続すれば黒点相対数算出に貢献することができます。



*この研究成果は、Hanaoka, Y. "Automated Sunspot Detection as an Alternative to Visual Observations" として、Solar Physics 誌 (2022, 297, 158; doi:10.1007/s11207-022-02089-z) に掲載されました。

令和6（2024）年暦要項の発表

片山真人（天文情報センター）

令和5年2月1日、官報で令和6（2024）年暦要項を発表しました。
 ・春分の日、秋分の日は、それぞれ3月20日、9月22日になります。国民の祝日に関する法律3条2項にもとづく休日数（5）、月曜日が休日となる日数（11）は、ともに過去最多です。
 ・日食が2回、月食が1回あります。4月9日には皆既日食がありますが、日本では見る事ができません。9月18日には部分月食がありますが、日本では見る事ができません。10月3日には金環日食がありますが、日本では見る事ができません。日食も月食も国内でまったく見られないのは意外に珍しく、平成15（2003）年以来的ことです。

各地の詳しい予報については暦要項のほか、暦計算室ウェブページでも調べいただけます。



暦計算室
ウェブページ

『理科年表2023』刊行

『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部門から成る科学全般を網羅したデータブックです。その2023年版が刊行されました。



暦部トピックスでは、ユリウス日について解説しています。

天文部では、膨大な観測データで天文学に新たな革命をもたらしつつあるGaia（ガイア）衛星の成果を「近距離の恒星」に反映し、トピックスにて解説しています。さらに、「超新星」には電子捕獲型とされる「超新星2018zd」を追加し、同じくトピックスで解説しています。

気象部や物理／化学部でも、最新の観測や知見に基づきデータを追加・更新しています。地学部では、「地質年代表」に2020年認定の「チバニアン期」を、「日本付近のおもな被害地震年代表」に1454年の「享徳の津波」を追加するなど、様々なデータを更新しました。生物部では、「体が分岐する環形動物キングギドラシリスの発見」で新たな環形動物の発見を、環境部では、「未知なる感染症とワクチン開発」でCOVID-19の事例を中心にワクチン開発について、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96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。



理科年表
オフィシャル
サイト

*理科年表オフィシャルサイトを、このたび全面リニューアルしました。「徹底解説」や「理科年表Q&A」、これまでのトピックスやその後日談を紹介する「リカトビ」のほか、理科年表紙面を補う「プラスα」も新たに追加しています。こちらもぜひご利用ください。

編集後記

計算機は現代科学にとって必要不可欠な道具になっています。天文学でもまさにそうで、これは理論、観測を問いません。大きな計算能力によって初めて見えてくる世界があるのです。天文学の最先端での計算機の活躍を少しでも感じていただければうれしく思います。（小久保英一郎・天文シミュレーションプロジェクト）

望遠鏡や観測装置には寿命がありますが、計算機で保管できるデジタル化された観測データには寿命がありません。今蓄積し続けているデータから後世の人が未来の計算機を使って何を見つけるのか、楽しみにしています。（小杉城治・天文データセンター）

次号予告

次号（2023年春夏号）は「太陽系外惑星」を特集します。天文台メモワールでは退職者による味わい深いエッセイの数々をお届けします。

NAOJ NEWS/ 国立天文台ニュース

No.339 2023冬春号

©2023 NAOJ（本誌記事の無断転載・放送を禁じます）

発行日／2023年3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
 shuppan@ml.nao.ac.jp
 https://www.nao.ac.jp/naoj-news/



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（天文情報センター）／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（アルマプロジェクト）

●編集：天文情報センター出版室

アンケートにご回答ください

Please fill in the questionnaire.

ご回答いただいた方に、国立天文台貴重書ブックカバーのデータDLプレゼント！

★リニューアルしたNAOJ News（国立天文台ニュース）は、いかがでしたか？ NAOJ Newsは、読者のみなさんと一緒に作る広報誌を目指します。ぜひアンケートにお答えいただいて、これからの誌面作りの参考とさせていただきます。下記のリンクや2次元バーコードからアンケートフォームに進み、ご回答をよろしくお願い致します。

https://forms.office.com/r/XSYWKFnLDd

回答期限：2023年5月20日

*前号の「国立天文台 台長賞」に関する記事で、令和3年度とすべきところが平成3年度となっております。ここに訂正し、お詫び申し上げます。