すばる望遠鏡 21
HSC Cosmic Gallery

NGC 521
田中賢幸（ハワイ観測所）

70 Mpc ほどの距離にある棒渦巻銀河だ。真正面を向いていて、中心からバルジ、ダストリング、棒構造、そして外に大きく広がる渦巻構造とダストレーンがはっきりと見える。それらの構造が異なる色を示していることもよくわかり、気持ちがいいくらい立派な銀河だ。天の川銀河を外から見たら、このように見えるのだろうか。

HSC

HSCLA

GALAXY CRUISE

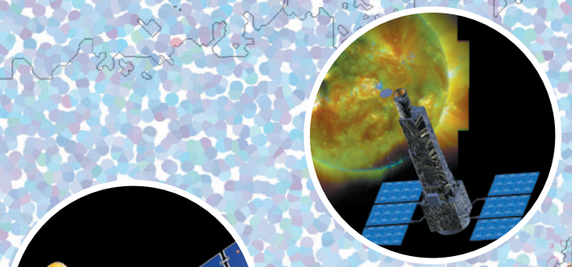
★ HSC：すばる望遠鏡「超広視野主焦点カメラ（Hyper Suprime-Cam/ ハイパー・シュプリーム・カム）」
★ HSCLA：Hyper Suprime-Cam Legacy Archive
★ HSC の観測データを活用した市民天文学プログラム「GALAXY CRUISE（ギャラクシークルーズ）」もお楽しみください。

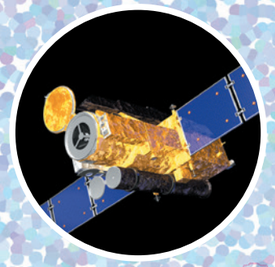
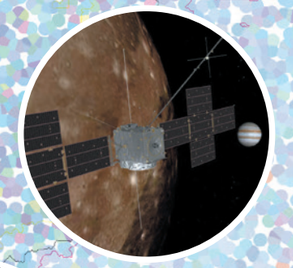
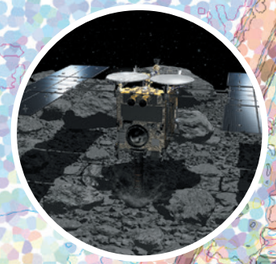
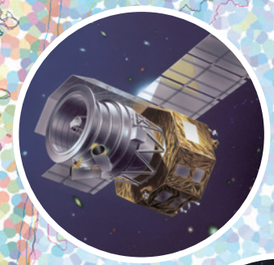
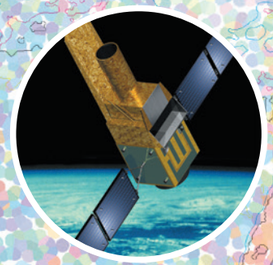
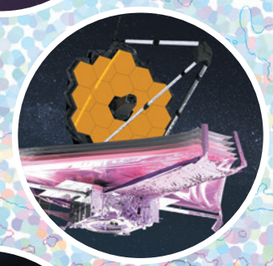
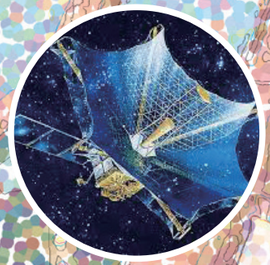
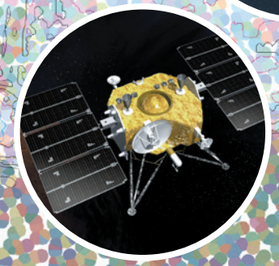
PRINT ISSN 0915-8863
ONLINE ISSN 2436-7230

NAOJ NEWS

国立天文台ニュース

No. 341
National Astronomical Observatory of Japan



スペース天文学

2023 秋

2023
秋

国立天文台のスペース天文学

国立天文台というと、すばるやアルマのように地上の大型望遠鏡で観測をしているイメージを持つ方が多いかもしれません。しかし、宇宙機を使い宇宙から観測する研究も活発に行われています。天文学では遠く離れた天体の状態を調べるために、電磁波、つまり光を使いますが、赤外線、紫外線、X線などは地球大気で吸収されてしまいます。大気を透過する光でも、大気のゆらぎ(シーイング)は精度のよい観測の大敵になります。観測に邪魔な地球大気を突き抜けて、さらに、地球から離れた場所に望遠鏡を持っていったり、地球以外の惑星に探査機を送り込むことができれば、地上の観測では絶対に得られないデータを手にすることができます。

ただし、宇宙に観測装置を持っていくのは簡単ではなく、どういう装置が欲しいのかを決めたらあとは誰かがが作ってくれるわけでもありません。大きくて重たい望遠鏡を宇宙に持っていくことはできず、また通信で衛星からダウンロードできるデータ量も限られていて、その制約の中でどんな装置にしたらやりたい研究ができるのか、どうしたら地上とはまったく異なる宇宙環境でも性能を発揮する装置になるのか、自分たちで知恵を絞って考え設計をします。さらに、打ち上げ前に性能を確認する試験に時間と労力を注ぎます。そのような困難に挑戦して宇宙機を開発するのは、宇宙でしかできないまだ誰も見たことがない観測データを手にしたいという強い思いがあるからです。もちろん、自分たちだけでは絶対に実現できないので、JAXA、メーカー、国内・海外の大学や研究所と協力することも不可欠です。

本特集では、国立天文台が携わっているスペース天文学をご紹介します。

勝川行雄
KATSUKAWA, Yukio
太陽観測科学プロジェクト

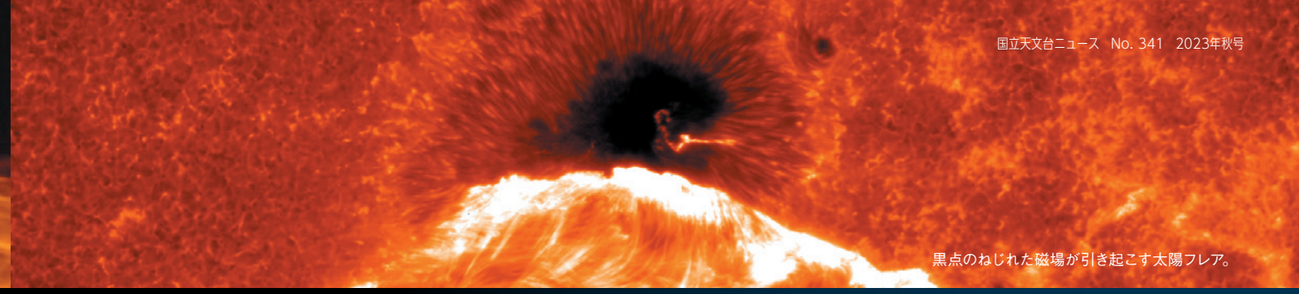
表紙背景
M-Vロケットは、「はるか」「あかり」「ひので」など、多くの科学衛星の打ち上げを行い、スペース天文学に貢献した。(クレジット:JAXA)

CONTENTS

特集「スペース天文学」
04 新たな太陽観測を切り拓いてきた「ひので」
06 ロケット・気球観測からSOLAR-Cへ
08 JASMINE計画
10 かぐや、はやぶさ2がもたらした固体天体探査の成果
12 MMX、JUICEによる惑星探査のこれから
14 地球より大きな電波望遠鏡
15 赤外線天文衛星「あかり」
16 ジェームズ・ウェッブ宇宙望遠鏡の最新観測で迫る宇宙の初期
18 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 後編
30 NEWS
32 すばる望遠鏡HSC Cosmic Gallery 21

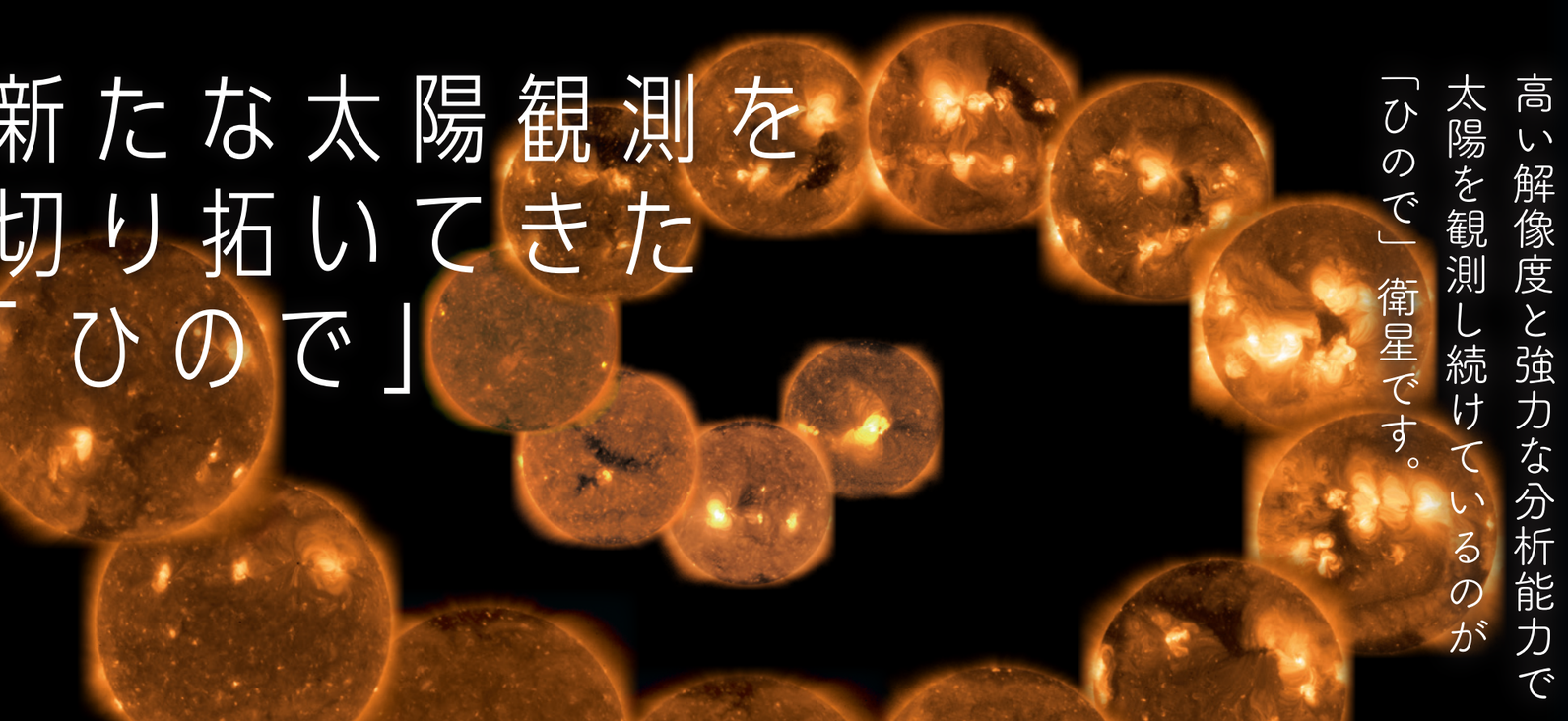
人工衛星から見た日本の都市の明かり。(クレジット:NASA)

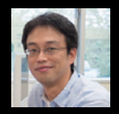
黒点周辺の活発な彩層。


黒点のねじれた磁場が引き起こす太陽フレア。

新たな太陽観測を切り拓いてきた「ひので」

高い解像度と強力な分析能力で太陽を観測し続けているのが「ひので」衛星です。




勝川行雄
KATSUKAWA, Yukio
太陽観測科学プロジェクト

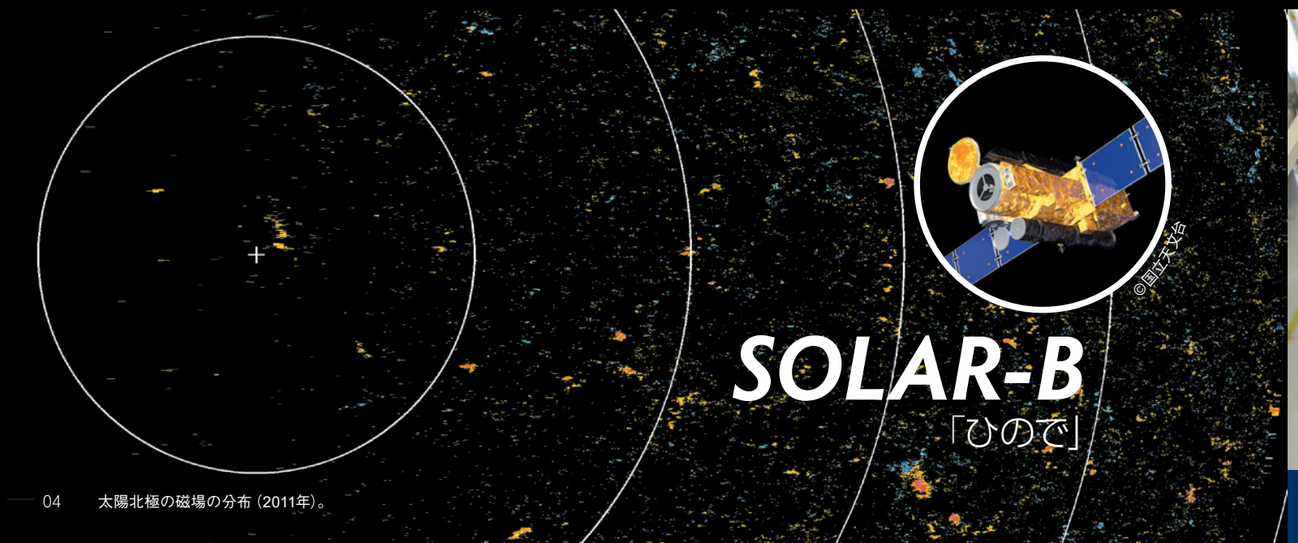
「ひので」衛星は、2006年に打ち上げられた太陽観測衛星です。搭載望遠鏡は日米英の国際協力で開発され、運用には欧州も加わり、17年近くにわたり太陽を観測し続けています。「ひので」衛星は24時間連続して太陽を見ることができる地球周回軌道にあり、地球大気に邪魔されて地上からは観測できない紫外線やX線での観測、地球大気のゆらぎの影響のない高解像度かつ高精度の可視光観測ができることが特徴です。

約6000度の太陽表面は主に可視光を放射します。その外側には約1万度の彩層と数百万度のコロナからなる大気があり紫外線とX線を強く放射します。さまざまな温度の大気が同居しているのが太陽大気の特徴で、それを観測するためにいろいろな波長の望遠鏡が必要になります。「ひので」衛星は太陽のまわりにどのように熱い大気ができるのか、大規模爆発である太陽フレアと質量放出がどのように引き起こされ宇宙天気に影響を及ぼすのかを調べる研究で活躍してきました。これらの太陽活動のエネルギー源は磁場にあります。磁場の持つエネルギーは磁場の強さの2乗に比例します。磁力線がねじれると電流が流れます（アンペールの法則）。近いといっても決して手の届かない太陽で磁場の強さと向きを知るために、偏光を測定してそこから磁場を求めます。地上からは大気のゆらぎのせいで解像度と偏光精度を両立する観測が難しく、打ち上げから17年近く経った現在でも、「ひので」衛星はユニークな可視光偏光データを提供し続けています。

「ひので」衛星搭載の観測装置のうち、可視光望遠鏡の望遠鏡部とX線望遠鏡のカメラは国立天文台の天文機器開発実験センター（後に、先端技術センターに改組）で開発されました。口径50 cmの可視光望遠鏡は回折限界0.2秒角を達成するもので、野辺山45 m電波望遠鏡やすばる望遠鏡などの地上望遠鏡の技術を進化させて開発されました。軽量化した望遠鏡構造、宇宙の熱真空環境と無重力下の性能を地上試験で実証する方法、衛星のゆれを補正する技術など、宇宙望遠鏡の技術が凝縮されています。私も大学院生時代から開発に携わり、その観測が実現したときには、衛星からおりてくるデータを興奮して解析したことを今でも鮮明に覚えています。

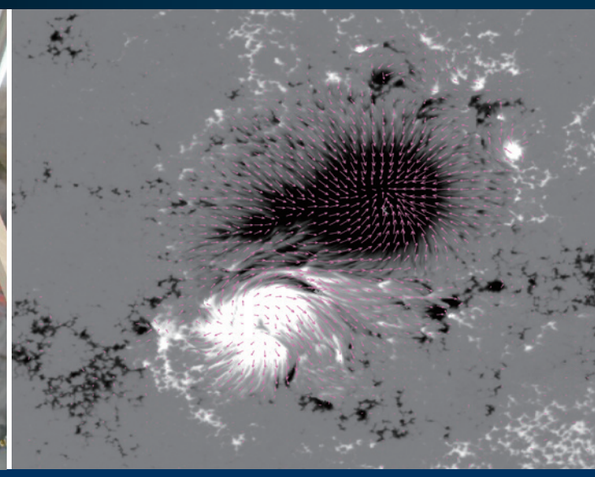
太陽活動はおよそ11年の周期で極大期と極小期を繰り返します。現在は極大期に向けてどんどん活発になっているところで巨大フレアも観測され始めています。極大期には北極南極の磁場の極性が反転します。そこまで観測を継続できれば極性も含めて真に1サイクル観測できたことになります。

「ひので」X線望遠鏡で撮影した2006年～2021年の太陽。（この記事内の画像クレジット：国立天文台/JAXA）



太陽北極の磁場の分布（2011年）。

国立天文台クリーンルームで組み上げられた「ひので」可視光望遠鏡。


太陽フレアを起こした黒点の磁場ベクトル。

太陽研究では、将来必要となる新しい観測技術を獲得するため、ロケット実験・気球実験で特色ある成果を出してきました。自ら開発した装置でまだ誰も見たことがない観測データを手にする醍醐味を経験した人材が、次期太陽観測衛星SOLAR-Cでも中心メンバーとなっています。

CLASP

CLASPロケットの中の観測装置の仕組み。左側に望遠鏡、右側に偏光分光装置。（クレジット：NAOJ, NASA/MSFC, IAS）

国立天文台クリーンルームでのCLASP組立の様子。

CLASPシリーズは、それまで未到であった紫外線の偏光分光観測に挑んだロケット実験です。観測装置の開発は、NASAとフランス宇宙天体物理学研究所の協力のもと、国立天文台にある先端技術センターで行いました。これまで2015年、2019年、2021年の3回、アメリカのホワイトサンズミサイル実験場から打ち上げました。太陽を観測できる時間は6分程度と非常に短いですが、毎回趣向を凝らし、いずれも世界初となる紫外線の偏光スペクトルを観測することに成功しました。彩層上部や遷移層といったコロナ直下の磁場の様子を明らかにするとともに、紫外線の偏光スペクトルから磁場を導出するという新しい観測手法を確立しました。衛星計画などへの今後の発展が期待されています。

石川遼子
ISHIKAWA, Ryohko
太陽観測科学プロジェクト

US Army Photo White Sands Missile Range

FOXSI

FOXSIシリーズは、太陽コロナから放たれるX線を2次元集光撮像分光観測する日米共同の観測ロケット実験シリーズです。これまでに3回の飛翔(FOXSI-1~-3)を成功させ、その都度、世界初の太陽コロナ観測（非フレア時）を実現してきました。そして4回目の飛翔計画FOXSI-4では、いよいよ太陽フレアの観測を実施します。いつ起こるか予測困難な太陽フレアを観測するために、打ち上げ可能な状態で待機しながら、リアルタイムで太陽の活動をモニターし、太陽フレアの発生とともに打ち上げるという世界初の方法で打ち上げを行います。FOXSI-4は2024年春の打ち上げを予定しており、太陽フレアにおけるプラズマ加熱・エネルギー輸送・粒子加速の理解を目指します。

成影典之
NARUKAGE, Noriyuki
太陽観測科学プロジェクト

FOXSI-4の観測装置の概要。X線用望遠鏡と高速度カメラを7組搭載し、太陽フレアから放たれる軟X線～硬X線帯域の光子を1つ1つ計測することで、2次元集光撮像分光観測を実現します。これにより、太陽フレアの様子を空間・時間・エネルギー分解して詳細に調べることが可能になります。（クレジット：FOXSI-4 team）

ロケット・気球観測から SOLAR-Cへ

※個別に表記のない画像のクレジット：国立天文台

SUNRISE-3は口径1ｍの大型光学望遠鏡で太陽を観測する日独西米共同の気球プロジェクトです。大西洋上空の成層圏をスウェーデンからカナダまで飛行しながら太陽の観測を行います。高解像度で高精度な偏光観測を、紫外線-可視光-赤外線の3つの観測装置で行います。光球～彩層の磁場の3次元構造とその時間変化を測定することで磁気エネルギーの輸送と散逸過程に迫ります。国立天文台を中心として近赤外線偏光分光装置SCIPを開発しました。2024年夏の打ち上げを予定しています。

勝川行雄
KATSUKAWA, Yukio
太陽観測科学プロジェクト

国立天文台クリーンルームでのSCIP組立の様子。

SUNRISE-3

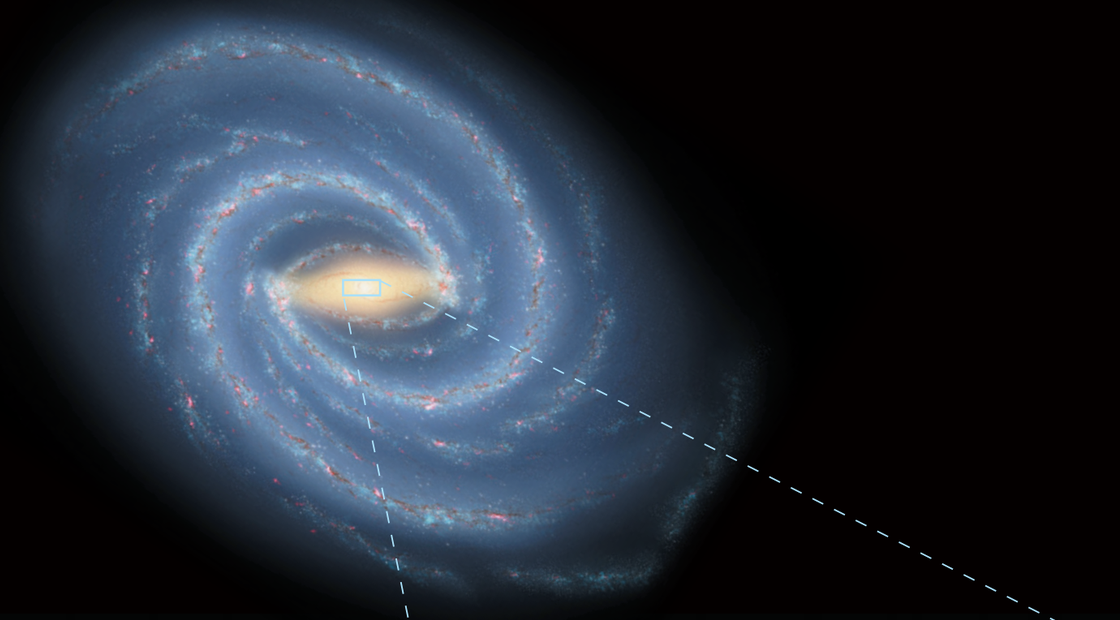
フライトを待つSUNRISE-3気球望遠鏡(2022年)。

SOLAR-Cは、2020年代後半に打ち上げを目指して準備を進めている日本の4番目の太陽観測衛星計画です。この計画では、太陽高温大気や太陽風の形成機構、また地球をはじめ惑星周囲の宇宙天気に影響を及ぼす太陽フレアの機構解明に挑みます。極端紫外線域で分光データを取得する観測装置は、「ひので」衛星の同種のものよりも約1桁向上する解像力と感度をもち、また2万度から2000万度の温度範囲にあるプラズマをつぶさに観測することができるという、これまでにない高い性能をもちます。ロケット、衛星バス、観測装置の全体構造と望遠鏡部を日本が担当し、分光装置部を米国や欧州諸国の研究機関との国際協力で開発します。

国立天文台は、JAXAと協力して望遠鏡部の開発を国内メーカと進めるほか、観測装置全体の取りまとめの役割を担っています。新たな高解像分光観測により、星の表面で生成される高温構造やそれに伴うダイナミクスの起源を明らかにすることが期待されています。

原 弘久
HARA, Hirohisa
SOLAR-Cプロジェクト

SOLAR-C衛星（想像図）と紫外線で観測した太陽。（クレジット：国立天文台/JAXA/NASA）



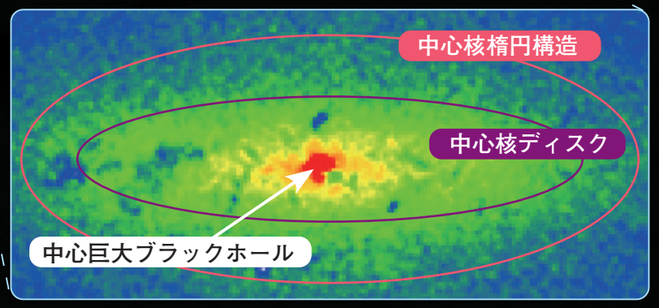
春 秋

天の川銀河の
中心核領域探査

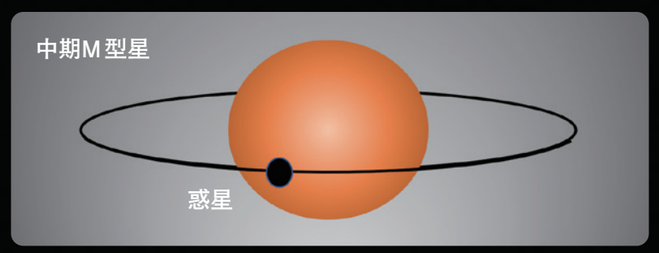
季節によって
観測対象が変化

夏 冬

太陽系外にある
地球型惑星の探査



南アフリカ1.4 m望遠鏡を使って赤外線で撮影された銀河中心（Nishiyama et al. 2013, ApJL, 769, L28のFig.1を引用し改変）。図の色は星の個数密度を表しており、青が低く、緑、黄色、そして赤になるほど高い密度を表す。



JASMINE計画

ジャスミン

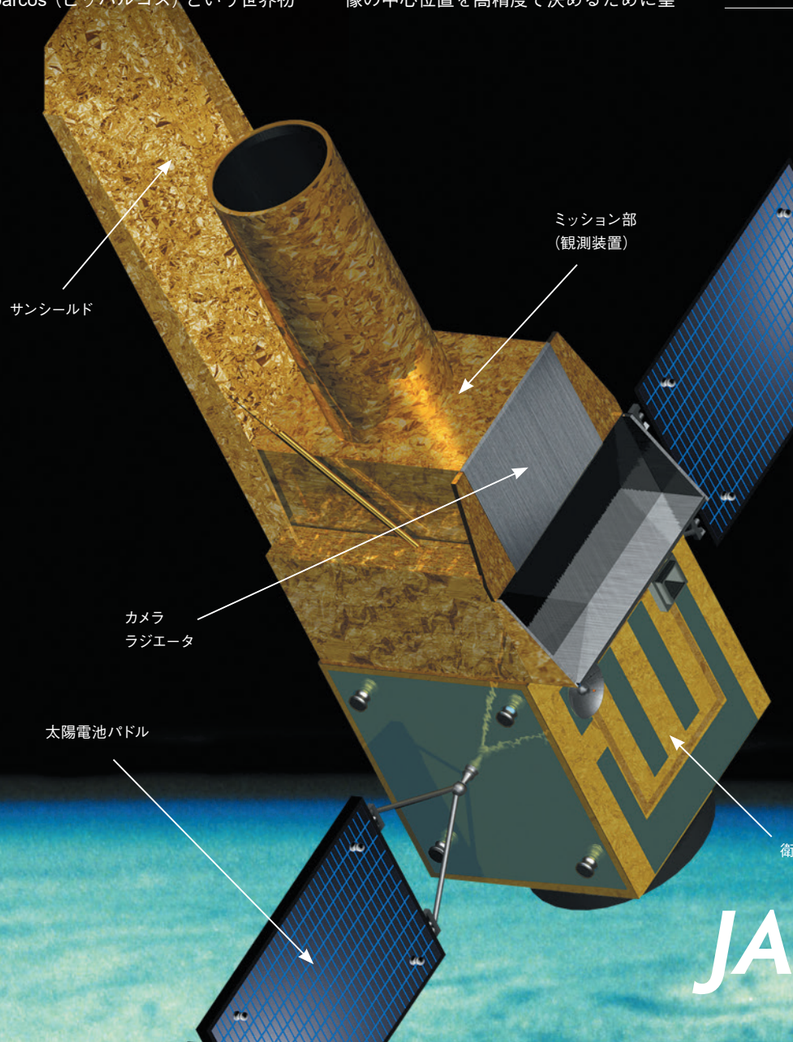
JASMINE（ジャスミン）は、JAXA宇宙科学研究所の公募型小型計画での実現を目指す天文観測衛星です。赤外線観測により、塵に覆われて可視光観測では測定困難な天の川銀河（以降、銀河系）の中心核領域（距離2万6千光年）にある星の距離と運動を測定し、銀河系形成の鍵を握る中心核の構造と形成史を解明することが重要な科学目標の1つです。

星までの距離や運動速度の情報を得るために、天球面上での星の位置の時間変化（軌跡）を測定することを位置天文観測といい、天文学の観測分野の1つです。星が非常に遠くにあるために星の天球面上での動きはごくわずかであり、測定は容易ではありません。地上から可視赤外線で広い領域に対する位置天文観測を行うのは、20世紀においては大気のゆらぎによる星像の短時間変動や地球重力による観測装置の変動などにより測定精度に限界がきていました。そこで、ヨーロッパ宇宙機関（ESA）は、これらの影響をうけない宇宙空間での観測を目指して、Hipparcos（ヒッパルコス）という世界初の位置天文観測衛星を1989年に打ち上げ、スペース位置天文観測の幕開けとなりました。宇宙空間だと天候に左右されずに高頻度の観測も可能となり、位置天文観測専用であれば小さな望遠鏡でも高い測定精度が期待できます。JASMINEは、主鏡口径36 cm程度の望遠鏡と宇宙でも使用可能な高性能赤外線カメラシステムを開発して搭載し、最高精度として25マイクロ秒角（7×10^{-9}度）の測定精度を目指しています。この精度の値は、100 km先にいる人の髪の毛1本の太さの1/5を見込む角度におおよそ相当します。

このような高精度で星の動きを測定するには、観測装置に対する技術的な工夫と適切なデータ解析処理の2つをともに行う必要があります。つまり、データ解析では観測した星のデータを活用して誤差を推定し除去するのですが、誤差の推定をしやすくするために、その原因である観測装置の変動（衛星内外で熱の出入りがあることにより起こる変動）を極力小さくする工夫が必要です。さらに、星像の中心位置を高精度で決めるために望遠鏡の向きがぶれずに安定になるような指向の制御方法の工夫や、地球や太陽などから邪魔な光がカメラに入り込まない工夫も行います。

また、JASMINEは、星の明るさを高い精度かつ高い頻度で測定することも可能です。この能力を活かして、銀河系中心の位置天文観測に適さない夏・冬期には、太陽より小さく低温で赤い恒星（中期M型星）に対して、恒星の前を惑星が通過する際の減光現象を捉えることにより、恒星まわりの生命居住可能領域にある地球型惑星を探査します。これがJASMINEのもう1つの重要な科学目標です。惑星が発見できれば、惑星上の生命探査へと進展していきます。

郷田直輝
GOUDA, Naoteru
JASMINEプロジェクト



天の川銀河の形成の鍵を握る
中心核の構造と形成史の解明と、
生命居住可能領域にある
地球型系外惑星の探査に挑みます。

JASMINE

天の川を観測するJASMINE衛星の想像図（クレジット：国立天文台）。上部の銀河系画像（クレジット：NASA）。

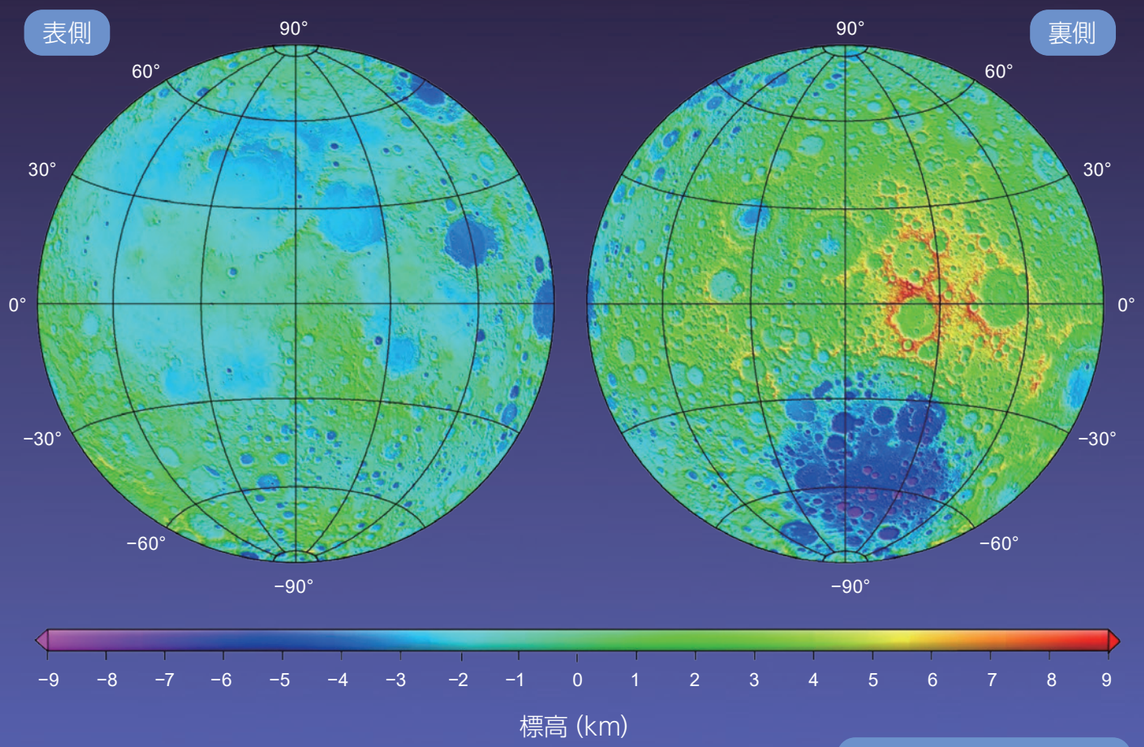
かぐや、はやぶさ2が固体天体探査の成果

来た！観た！分かった！

SELENE 「かぐや」

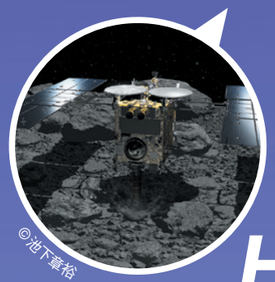
RISEプロジェクトが初めて取り組んだ月惑星探査は「かぐや」です。2007年9月14日にJAXAが打ち上げ、100kmの高さから1年半にわたって月を観測しました。そして「かぐや」は日本が月惑星探査に本格的に乗り出すきっかけとなりました。月は人類にとって最も馴染み深い天体ですが、ずっと半分だけしかわかっていませんでした。月は地球のまわりを1回りしながら、ちょうど1回自転するので、地上からはいつも同じ側（表側と呼びます）しか観測することができなかったからです。そこでRISEは、月の裏側に焦点をあてた観測を計画しました。小型衛星を探査機本体から切り離して、月の裏側を回る本体と地上局の中継を行ったのです。ただし、小型衛星では月と地球をつなぐ通信のための電力が不足します。「かぐや」では日本一大きな長野県臼田の64mアンテナを使ったり、国立天文台が電波天文学のために設置している20m電波望遠鏡を利用したりして小型衛星による月ー地球間の電波通信を成し遂げました。この観測は大成功で、月裏側の重力場を明らかにするとともに、「かぐや」の位置を正確に決めて、レーザーによる地形計測や月自転変化の測定を実現させました。

竝木則行
NAMIKI, Noriyuki
RISE月惑星探査プロジェクト



「かぐや」が作成した月の地形図。
紫と青色が低く、黄色と赤色が高い。

Hayabusa2



「かぐや」の次にRISEが取り組んだのが「はやぶさ2」による小惑星探査です。はやぶさ2は小惑星リュウグウにタッチダウンして表面のサンプルを地球に持ち帰った日本の探査機です。2014年12月に打ち上げられ3年半かけて現地に到着し、1年半の現地滞在中に2度のタッチダウンでサンプルを取得、打ち上げから6年後にサンプル入りのカプセルが地球に帰還しました。

小型の小惑星は生命のもとになる水やアミノ酸を保持していると考えられるため、小惑星を調べることは生命の起源の探求につながります。一方で地上の望遠鏡による観測では小惑星の大きさや形ですら推定が容易ではなく、小惑星を本気で調べるにはさまざまな観測がその場でできる装置を持つ探査機が必須です。RISEが開発と科学運用に参加したレーザー高度計は小惑星の形状を決め、探査機の正確な位置を推定することに貢献しました。

探査機からの現地情報だけを頼りに、限られた時間で多くの判断が必要な点も小天体探査の特長です。そのため、探査機が現地に到着するまでに、着陸地点を選ぶ訓練も行われました。この過程で前述した探査機位置推定の方法も確立させました。

リュウグウ探査は終わりましたが、探査機自体は現在も宇宙を飛行しており、2026年と2031年にそれぞれ別の小惑星を調べる予定です。

野田寛大
NODA, Hirotomo
RISE月惑星探査プロジェクト

LIDAR（レーザー高度計）によるリュウグウの形状測定。（クレジット：国立天文台, JAXA, 千葉工大, 会津大, 日本大, 大阪大）

MMX、JUICEによる 惑星探査のこれから

MMX

2024年に、火星を回る2つの小さな衛星フォボス・デイモスを調べる探査機が打ち上げられる予定です。その名を火星衛星探査計画MMX（Martian Moons eXploration）といいます。2つの衛星のうちフォボスに着陸し、表面からサンプルを採取し地球に持ち帰ります。デイモスには着陸しませんが、フライバイ時に観測します。現地におけるリモートセンシング観測と、地上におけるサンプル分析から、火星衛星の起源がわかると期待されています。フォボスは火星表面から6,000km弱しか離れておらず、火星上にクレータができた際に放出された物質がフォボス表面に到達している可能性があるため、火星環境の進化もわかるかもしれません。地球外天体からのサンプルリターンは、探査機だからこそ実現できるミッションですが、地球から遠く離れた天体への着陸には危険が伴います。MMXの場合、着陸前にフォボスの重力場、表面地形、回転を詳細に調べる（測地学的観測）必要があり、RISEはこの観測データの解析を主導します。測地学的な情報は、着陸に資するだけでなく、フォボスの内部構造を知る手掛かりにもなります。MMX探査機は、火星を周回しながら火星衛星を観測しますが、その運用は「はやぶさ2」と比べて複雑なため、打ち上げ前から鋭意検討を進めています。

松本晃治
MATSUMOTO, Koji
RISE月惑星探査プロジェクト

MMX探査機のCG。（クレジット：JAXA）

JUICE

JUICEはESA（ヨーロッパ宇宙機構）が2023年4月14日に打ち上げた木星衛星系探査衛星です。2031年に木星を回る軌道に、2034年に木星4大衛星の1つガニメデを回る軌道に入り9か月以上詳しい観測を行います。今も多くの謎に包まれているガニメデを含む巨大氷衛星の表面地形、重力、組成、表層環境などの詳しい観測をもとに、ガニメデ内部では氷が融けて海になっているという説を確かめるほか、巨大氷衛星の誕生と進化についても多くの謎が解かれると期待されています。RISEは日本側担当グループの一員としてJUICEが搭載するレーザー高度計（GALA）の開発に協力してきました。

地上の大型望遠鏡や地球周回の宇宙望遠鏡を駆使しても、ガニメデ衛星内部の氷と水の状態を調べることはできません。惑星探査機を送り込んで、木星重力によるガニメデ全体のわずかな形状変化や、重力の微小変化を測る必要があります。

一方課題もあります。それは計画の立案から実施まで長い時間がかかることです。JUICEはその典型的な例で計画の開始が約10年前、実際の観測が約10年後になります。今後は衛星の運用やサイエンスに関心を持つ若い方々が積極的に参入して大いに活躍することが肝要となります。

荒木博志
ARAKI, Hiroshi
RISE月惑星探査プロジェクト

翔べ！探れ！謎を解け！

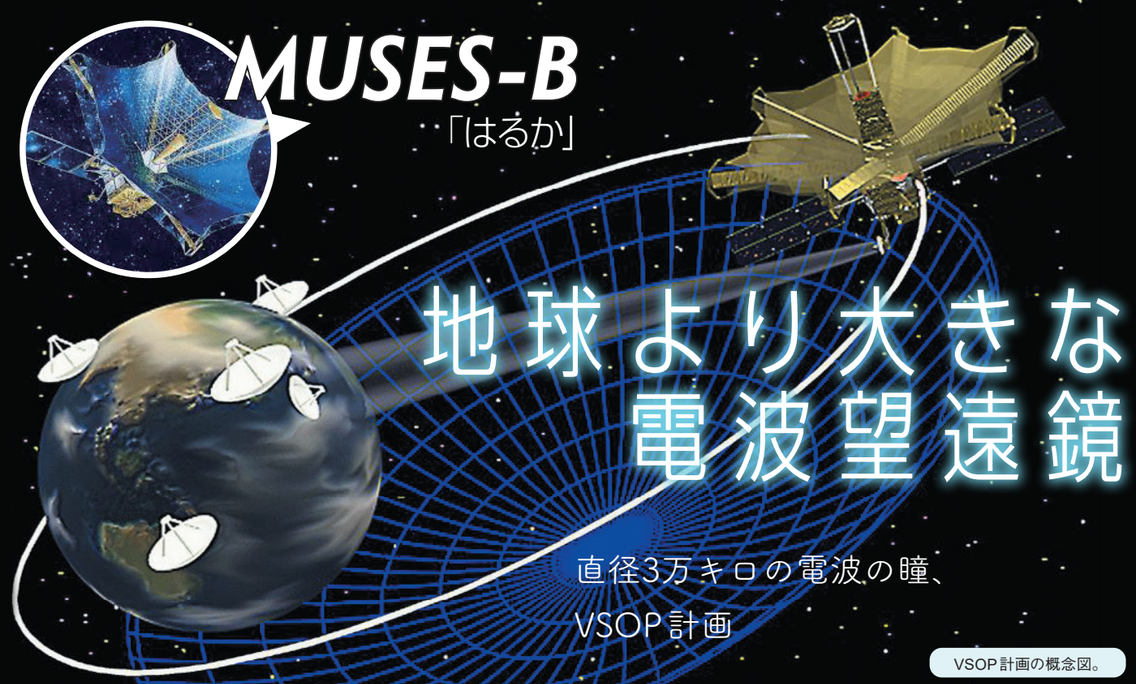
JUICE

ガニメデに接近するJUICE探査機イメージ図（遠景は木星）。（クレジット：ESA / ATG Medialab）

MUSES-B
「はるか」

地球より大きな電波望遠鏡

直径3万キロの電波の瞳、
VSOP計画



VSOP計画の概念図。

高い分解能で宇宙を観測するためには、なるべく離れた場所で同時に受信した電波を集めることが求められますので、人工衛星に電波望遠鏡を載せて地上の電波望遠鏡と組み合わせて、地球の直径より大きな電波望遠鏡を作ることは1980年代から構想されていました。これを踏まえて世界初のスペースVLBI計画であったVSOPは、1997年2月に打ち上げられたHALCA衛星を中心に世界35局の地上VLBI局と共同で進められました。HALCA衛星は、宇宙科学研究所において1989年から開発が開始され、実効開口7mの大型展開アンテナで、波長18cm、5cm、1.3cmの3バンドによってVLBI観測を行いました。

M-Vロケットの1号機によって打ち上げられましたが、その当時は宇宙科学研究所には電波天文学の研究グループがなく、野辺山宇宙電波観測所から人員が異動して、野辺山のVLBIグループと共同で、衛星開発・国際調整・衛星運用・科学運用などにあたりました。衛星の開発では、世界で初めての電波望遠鏡の衛星搭載で、10mの高剛性マスト6本を進展させメッシュ構造のアンテナを展開するという、たいへん技術的な難易度の高いものでした。さらに22GHzという高い周波数の観測機器の衛星搭載・30秒角という高い姿勢制御精度・データ伝送レート128Mbpsという高い技術開発を求められるもので、工学試験衛星としての位置づけで製作されました。野辺山の宇宙電波グループは衛星の開発の経験はなく、宇宙研の工学グループとの密接な連携のもとにこの難しい技術課題をクリアしました。

さらに全世界のVLBI網の組織化、新たなVLBIターミナルの開発・大規模なVLBI相関器の開発とそれまでに比べると日本のVLBI研究は、大きなジャンプを達成しました。VSOPによって、AGNジェットの中に微細な構造があることが明らかになるなどの大きな科学成果を得ることができた上に、VLBIにおける日本の国際的な評価はたいへん高まりました。VSOP計画の中心人物であった平林久さん（宇宙研名誉教授）が、本年2023年の国際電波連合（URSI）総会で、デリンジャメダルを受賞されることは、日本の電波天文として、たいへん喜ばしいことです。

小林秀行
KOBAYASHI, Hideyuki
水沢VLBI観測所

VSOP参加のVLBI観測局。

（画像のクレジット：JAXA）

赤外線天文衛星「あかり」

近赤外線から遠赤外線の
多色測光分光サーベイ

ASTRO-F
「あかり」

「あかり」の全天観測データから作成された遠赤外線で見た宇宙。（クレジット：JAXA）

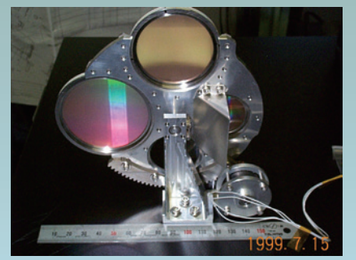
国立天文台でのスペース天文学の取り組みについて、赤外線天文衛星「あかり」を取り上げるとのこと、まずは昔の話から始めることにします。私（松尾）は宇宙科学研究所（ISAS）の観測ロケットを用いてサブミリ波ロケット実験を行いながら、赤外線天文衛星「あかり」にも関わることになりました。ミッションのコンセプトは、宇宙科学研究所、名古屋大学、野辺山宇宙電波観測所からアイデアを持ち寄り、赤外線の多色測光分光サーベイ観測となりました。野辺山ではサブミリ波帯分光器を用いて遠赤外線フィルターの評価を行い、遠赤外線観測装置（FIS）の開発に貢献しました。その後、天文機器開発実験センター（現・先端技術センター）において、遠赤外線観測装置の製作に協力しました。ただ、「あかり」は国立天文台からすると少し遠い存在で、例えば、データ解析を国立天文台で行えないかと相談しましたが、まずは「すばる」とのことで、実現しなかったですね。一方、サブミリ波観測を進めていたASTE＊グループと「あかり」の協力はできたと思います。このあたりがSPICA＊の協力体制にも影響していたと思います。

＊ ASTE（Atacama Submillimeter Telescope Experiment）望遠鏡：南米チリ北部、アタカマ砂漠の標高4860メートルの高地、パンパ・ラ・ボラに設置された直径10メートルのサブミリ波望遠鏡。

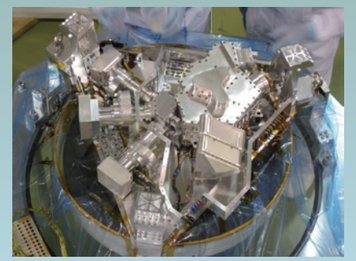
＊ SPICA（Space Infrared Telescope for Cosmology and Astrophysics）：2030年頃の打ち上げを目指して、日本、ヨーロッパ各国、カナダ、アメリカ、台湾などが共同で開発を進めていた次世代の宇宙赤外線冷却望遠鏡。コストの問題で2020年に中止。

「あかり」は米国の宇宙赤外線望遠鏡Spitzerに比べ、視野が広く、多色観測用フィルターの種類が多いという特徴がありました。すばる望遠鏡と相性がよく、「あかり」と「すばる」両方から観測できる北黄極領域において、可視光から遠赤外線までの大規模な多色撮像サーベイ観測が行われ、60–100億年前の銀河進化の様子を探る上で貴重なデータを提供できました。

「あかり」は2006年2月22日の打ち上げからおよそ5年間の観測を行いました。観測終了後、スペースデブリ対策のため軌道高度を下げる運用を行い、2011年11月に停波により運用を終了しました。その後、2023年4月11日に北大西洋上空において、大気圏に再突入しました。「あかり」の成果についてはISASニュース特集号（2009年4月号）、大気圏への再突入についてはISASニュース（2023年5月号）をご覧ください。



遠赤外線観測装置（FIS）のフィルターホイール。



焦点面観測装置。
右側がFIS、左側が赤外線カメラIRC。

松尾 宏
MATSUO, Hiroshi
先端技術センター

和田武彦
WADA, Takehiko
JASMINEプロジェクト

JWST

ジェームズ・ウェッブ宇宙望遠鏡の最新観測で迫る宇宙の初期

人類が目にしたことのない深宇宙の姿が、ジェームズ・ウェッブ宇宙望遠鏡の赤外線観測で明かされつつある

大内正己
OUCHI, Masami
国立天文台
東京大学

遠くの宇宙はどうなっているのでしょうか？　誰しも、より遠くの宇宙のことを知りたくなるものです。遠くの宇宙から届く光は、遥か昔に出された光なので、宇宙の過去の姿を知らせてくれます。すばる望遠鏡であれば131億年くらい前の宇宙の姿まで可視光で見ることができますが、それより昔の姿を捉えるには赤外線で観測する必要があります。遠くからやってくる光は、宇宙膨張の影響を受けて波長が大きく伸び、可視光では観測できなくなってしまうためです。すばる望遠鏡でも赤外線の観測はできますが、地球の大気による吸収を受けたり、強い熱放射によって、遠くからやってくる非常に弱い赤外線を捉えられません。

地球の大気の外で、高い感度の赤外線観測を可能にする、ジェームズ・ウェッブ宇宙望遠鏡、略してJWSTは、2022年7月の科学データの初公開から1年が経ちました。この間、JWSTは予想された以上の性能を発揮し、宇宙誕生からわずか3〜4億年後の宇宙で銀河を発見するなど、怒涛の勢いで驚きの結果を多数出しています。

それらの結果の中から、ここではビッグバンで宇宙が誕生してから、宇宙年齢にして10億年までに起こった宇宙再電離に関する研究のブレークスルーを紹介します。

ビッグバンの後、まだ星も生まれていなかった暗い時代（宇宙の暗黒時代）を経たのち、宇宙を満たす（主に）水素原子のガス（中性ガス）が、この時期に生まれた天体が発する紫外線によって電離されたと考えられています。これを宇宙再電離と呼びます。宇宙を満たす中性ガスの割合が100％だった過去から、現在に向かって0％くらいに変化する様子が理論的に予想されていますが（図1）、宇宙再電離については謎が多く、どのような天体が原因で宇宙再電離が起きたのか、そしていつ宇宙再電離が始まったのか（つまり再電離の歴史）がわかっていません。

特に後者については、大きく分けて2つのシナリオ、早い再電離と遅い再電離のモデルが提唱されています（図1）。宇宙を満たすガスの何％が中性ガスなのかを捉えるには、クエーサーなどの明るい光源を高い精度で観測して、その光源がどれだけ手前の中性ガスで吸収されているかを測定する必要があります。しかし、地上望遠鏡では感度が不十分で、測定精度が低い上、宇宙年齢で7〜8億年までを捉えるのが限界でした（図1）。それがJWSTでは、赤外線での高い感度を生かし、これまで暗すぎて使えなかった銀河も光源として、中性ガスの吸収量が時代ごとに変わる様子を捉えられました（図2）。この吸収量を正確に測定することで、これまで乗り越えられなかった7〜8億年の壁を大幅に超え、宇宙年齢で4〜6億年頃までの再電離の歴史を描き出すことに成功しました（図1）。これはブレークスルーなのですが、逆に7〜8億年の時代の測定値の精度が低いという問題があります。これは、中性ガスがもたらす吸収が弱く、吸収量を正確に測定するのが難しいためです。

そこで登場するのが、すばる望遠鏡です。8億年の時代であれば、測定に必要な光は、赤外線にはなっておらず、すばる望遠鏡の可視光観測で調べられるためです。特に、すばる望遠鏡が得意とする広視野探査のおかげで、JWSTよりも100倍の数の銀河を光源とし、非常に小さい吸収量まで測定して、この時代の中性ガスの割合が高い精度で得られました。JWSTがもたらしたブレークスルーに加え、すばる望遠鏡の観測の最新結果も合わせることで、再電離の歴史を描き出すことができました（図1）。これまで言われていた2つのシナリオと比べると、早い再電離でもなく、遅い再電離でもない、その中間となる第3のシナリオが正しいことがわかりました。

第3のシナリオが正しいとなると、再電離を引き起こした原因の天体は、ビッグバンから間もない時期に登場する質量の小さい天体でも、ビッグバンから10億年頃に現れる質量の大きい天体でもなく、その中間の天体ということになります。今後の研究では、再電離の原因の天体は何なのか、さらにJWSTとすばる望遠鏡という強みが異なる2つの望遠鏡を上手に組み合わせるなどして、明らかにできると期待しています。

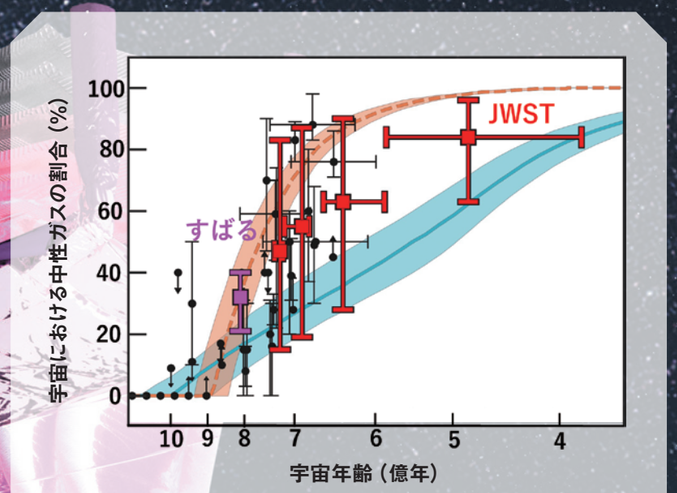


図1　各宇宙年齢での中性ガスの割合を表した図。黒色の丸は従来の観測による結果で、7〜8億年頃か、それ以降の時代でしか測定できていない。水色とオレンジ色の曲線はそれぞれ、早い再電離と遅い再電離のシナリオ。赤色とピンク色の四角印は、それぞれ最新のJWSTとすばる望遠鏡の観測で得られた測定値（出典：Umeda et al. 2023, arXiv:2306.00487）。

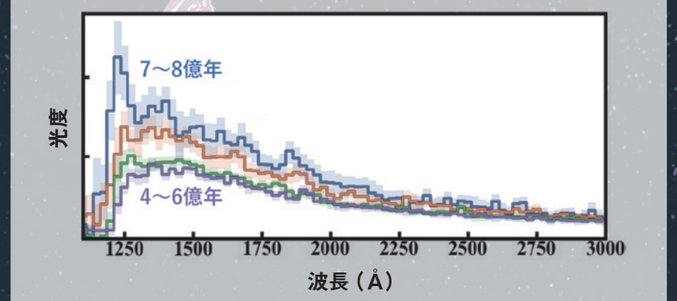


図2　JWSTの観測がとらえた各時代（宇宙年齢）での銀河のスペクトル。中性ガスの吸収によって、時代をさかのぼるにつれて、1220Å辺りの光が弱くなっていく様子が見てとれる（出典：Umeda et al. 2023 arXiv:2306.00487）。

16　ジェームズ・ウェッブ宇宙望遠鏡のアーティストによる概念図。（クレジット：NASA GSFC/CIL/Adriana Manrique Gutierrez）

アルマーの冒険 ALMAr

第11回 ソフトウェアラジオを使って木星の電波観測 後編

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）

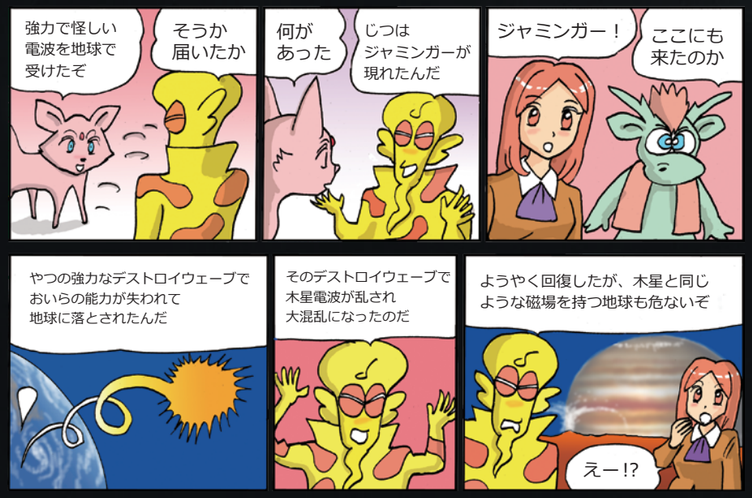
★おもな登場キャラクターのプロフィールはバックナンバーをご覧ください

「アルマーの冒険」制作ユニット
絵／藤井龍二
写真・文・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）
協力／おんたけ銀河村キャンプ場、東京大学木曽観測所、野辺山宇宙電波観測所
編集／高田裕行

★前号・第11回前編

「ソフトウェアラジオを使って木星の電波観測」までのあらすじ

蒼天高校天文部の流星観測中、奈央もアルマーも怪しい電波を感じ取っていた。ふたりとも電波眼が覚醒したのだ。そしてその発信源としてふたりが指さしたのは木星だった。いざよいは奈央とアルマーを連れて、隠し持っていたドーム型宇宙船で木星へとひとっ飛び。衛星イオで、いざよいとは旧知のイオウからジャミンガーによって木星電波が乱され、木星同様に磁場を持つ地球も危険だと知らされる。（※下のまんがは第11回前編の最後のシーンです）



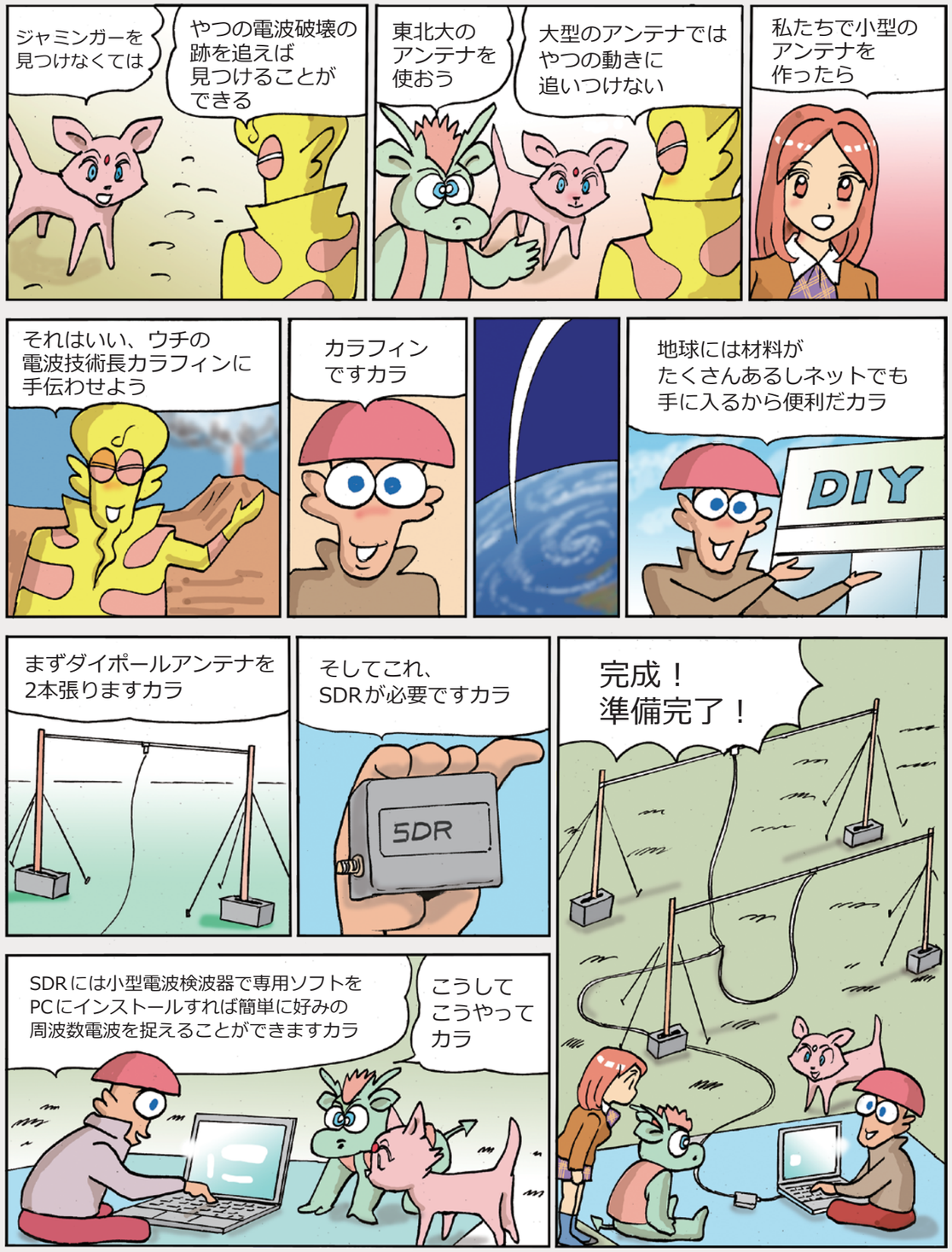
JWSTが撮影した木星の近赤外線画像。両極の輝きは木星の磁場が作り出すオーロラ。
クレジット：NASA, ESA, CSA, Jupiter ERS Team; image processing by Ricardo Hueso (UPV/EHU) and Judy Schmidt.

いよいよ、木星のデカメートル波の観測を実際に行いました。観測には、電波を受けるアンテナ、受信機としてのSDR、それにデータを取得するPCが必要になります。アンテナは市販品の流用も考えられますが、高額であることと、仕組み自体はとても簡単なので自作することにしました。アメリカのRadio JOVEが公開している情報をもとに、国内で調達可能な部品だけで構成できました。SDRはもちろん市販品です。PCは、解析用のソフトウェアがWindows用であることから、Windows10をインストールしたデスクトップPCを用意しました。はたして、木星からの電波を受信することはできたのでしょうか？

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/

アルマの冒険

第11-4章 電波技術長カラフィン登場 自作のアンテナでジャミンガーを探し出せ



1 DIYでアンテナを作る

まずは木星の電波をキャッチするダイポールアンテナを製作。

木星のデカメートル波の観測には、アンテナとSDR、そしてPCが必要です（左ページ右下コマ参照）。SDRとPCは市販品を用いますが、アンテナは自作する必要があります。アンテナは、Radio JOVEが推奨するスタイルを踏襲して製作しました。受信する中心周波数が20.1 MHzのアンテナです。

アンテナそのものの構造は、流星の電波観測で用いたダイポールアンテナと同様ですが、2つで1組のダイポールアンテナを用いるデュアルダイポールアンテナの構成にします。これは、より感度を高めることができ、さらにアンテナに指向性を持たせるための工夫です。

中心周波数が20.1 MHzでは、波長は14.92 mほどになります。ダイポールアンテナは、電波を受信機に導く同軸ケーブルの先（給電点）に2本の直線状のエレメント（導線）を左右対称に張りますが、1本のエレメントの長さは1/4波長としますので、エレメント2本の長さは約7.5 mになります。実際には、Radio JOVEのアンテナマニュアルの通り、導線内での電波の速度が遅くなる短縮率を考慮して3.51 mとしています。

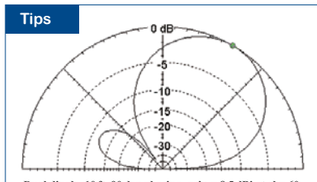
ちなみに、ある程度の間隔を置いて、2つのダイポールアンテナを並べるので、設置場所には少なくとも10 m四方ほどの面積が必要です。

また、ダイポールアンテナのエレメントは、以前に製作した流星用よりも長く、自重も重くなります。そこで、給電点とアンテナマストへの張り綱を固定する両端に力が加わっても、破損することがないような構造にする必要があります。今回は、後述するアンテナマスト製作に使った塩ビパイプの残りを長さ10 cmに切断して加工し、いわゆる碍子（がいし＝電気を絶縁して電線を支える器具）として、補強材とすることにしました。

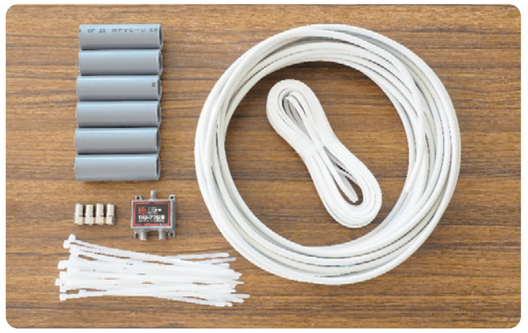
さらに、2つのダイポールアンテナで捉えた電波は、コンバイナーと呼ばれる部品で合成します。ダイポールアンテナを南北に離して設置した場合、木星の南中時に観測を行うと、南側よりも北側のダイポールアンテナの方がわずかに遅く電波が到達します。そこで、コンバイナーで合成する場合には、南側のダイポールアンテナの同軸ケーブルを長くして、北側のダイポールアンテナで受けた電波と位相が合うようにします。観測を行った2022年の夏から秋にかけては、木星の南中高度はおおむね55度ほどでした。Radio JOVEのマニュアルによれば、南側の同軸ケーブルで電波の位相を90度遅らせると、高度60度にアンテナの指向性が与えられるため、より高い感度で南中時の木星からの電波を受信することが可能になります。

同軸ケーブルの長さは、北側が1波長分の11.94 m、南側がさらに90度の位相分を加えた14.92 m、コンバイナーからSDRまでは1波長分の11.94 mとしました。いずれも短縮率（電線カタログより0.8を採用）を考慮して計算で求めています。コンバイナーからSDRまでの長さは任意ですが、ノイズ対策としてPCをアンテナから離したいことと、あまり離すと電波の減衰が問題になるため、1波長分の11.94 mにしました。

Tips



Radio JOVEのアンテナマニュアルより、アンテナ地上高10フィート（約3 m）、南側のアンテナの位相を90度ずらしたときの指向性を示した図。南の空の地平高度約60度で最も感度が高くなる指向性があることがわかる。

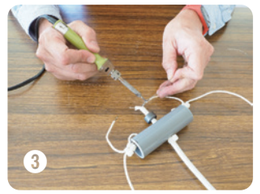


◆アンテナ（エレメント部）材料一覧 （総額約1万6千円）

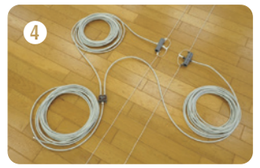
IV線（2 mm²）	20 m
同軸ケーブル（5C-FB）	50 m
F形接栓（5C-FB用）	4個
トロイダルコア（GTR-28-16-20）	2個
塩ビパイプ（VP25・10 cm）	6個
結束バンド（長さ10 cm以上）	22本
コンバイナー（テレビアンテナ用2分配器）	1個
F-SMA 変換アダプタ（SDR接続用）	1個
ハンダ	少々
ビニールテープ	少々

❶銅線や同軸ケーブルは、寸法どおりに切断する。とはいえ、受信する電波の波長はじゅうぶんに長く、ある程度の幅を持った周波数帯を観測するので多少の誤差は気にしなくても問題ない。

❷塩ビパイプは計6本を用意。長さ10 cmに切断し、両端にエレメントを通す穴をドリルで開ける。さらに2本は、塩ビパイプ中央に同軸ケーブルを通す貫通穴を開けておく。



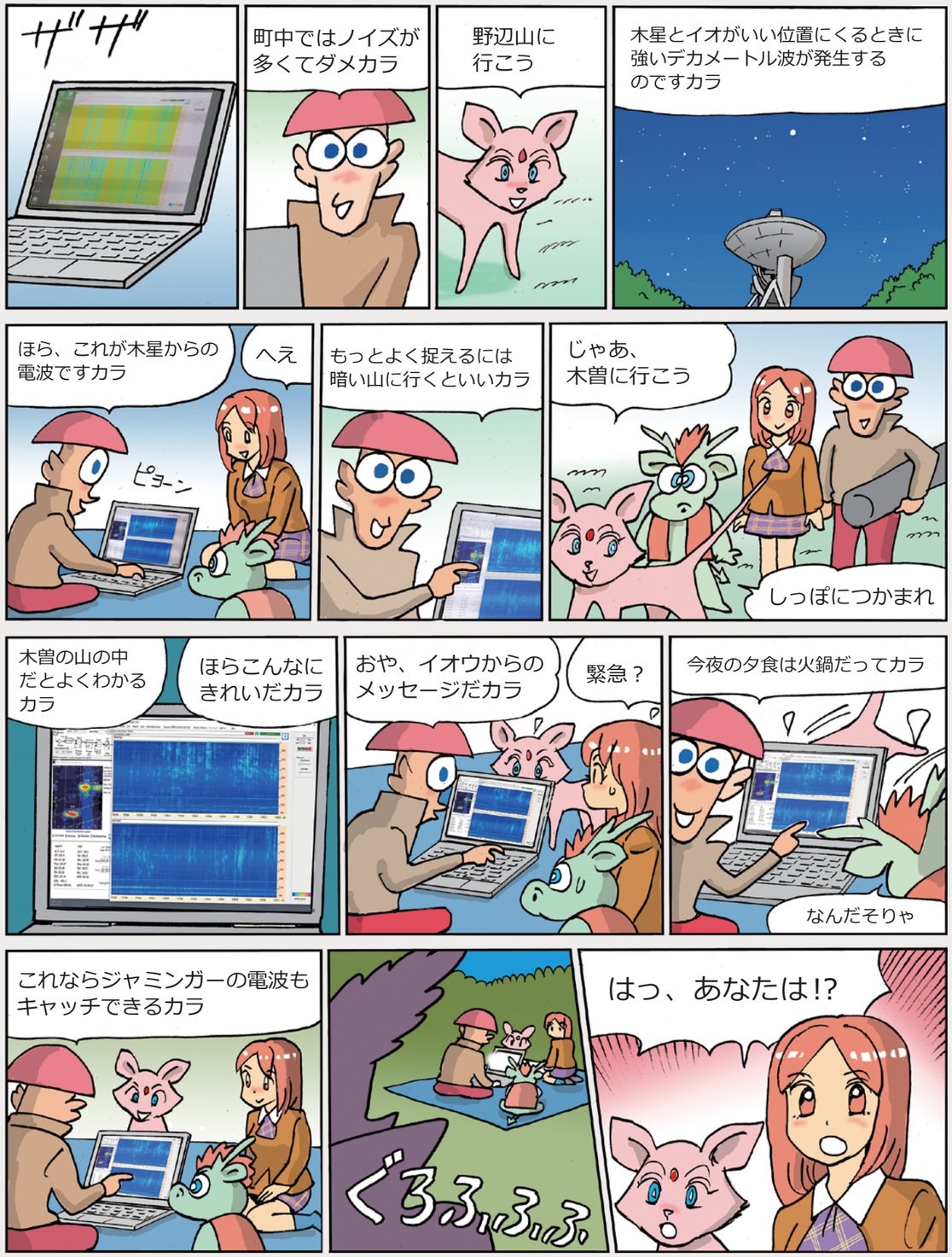
❸アンテナの給電点となる部分のハンダ付け。同軸ケーブルは塩ビパイプの貫通穴から通し、エレメントは同軸ケーブルの穴を通して2本の結束バンドが頑丈に束ねてから同軸ケーブルにハンダ付けした。また、試験観測当初、トロイダルコアは入れていなかったが、本格運用前に改造してトロイダルコアを同軸ケーブルに通している。また塩ビパイプに通した同軸ケーブルの上下には抜け落ち止めとして結束バンドを着けている。同軸ケーブルの給電点と反対の先端には、F形接栓を取り付ける（詳細は第10回P.7参照）。最後に絶縁と防水のため、ビニールテープを巻いて完成。



❹デュアルダイポールアンテナのエレメントと同軸ケーブル部分が完成。右側が同軸ケーブルが長い南側のダイポールアンテナ用。さらにコンバイナーで電波を合成し、1本の同軸ケーブルでSDRまで伝搬させる。

第11-5章 ノイズを避けて山奥へ
電波を捉え続ける奈央たちに迫る謎の人影

アルマの冒険



2　アンテナを立てる

高さ3ｍのアンテナマストを自作して、ダイポールアンテナを設置。

エレメントを張る位置は、ある程度の高さが必要になります。手本としたRadio JOVEのアンテナマニュアルでは、10フィート（約3ｍ）、15フィート（約4.5ｍ）、20フィート（約6ｍ）の高さにエレメントを張った時のアンテナ感度の比較が掲載されていましたが、極端な違いはないようで、今回は地上高約3ｍの高さにエレメントを張ることにしました。

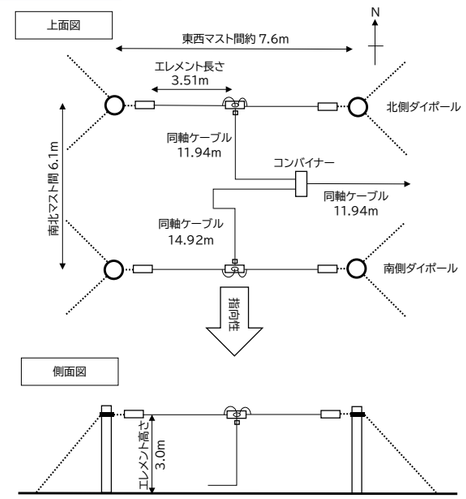
Radio JOVEのアンテナマニュアルには、例としてアンテナマスト（ポール）に塩ビパイプや金属パイプを用いていますが、今回は日本国内での入手性や運用の手軽さを考慮して、水道管用の塩ビパイプを使用することにしました。購入したのは、PV25と呼ばれる外径32ｍｍの塩ビ管です。当初は長さ4ｍのものを3ｍに切断してマストとしていましたが、長すぎて持ち運びに不便（常設する場所がない）なため、さらに半分の1.5ｍに切断し、塩ビ管用の継ぎ手を使って運用時には2本をつなぐようにしています。

アンテナマストは自立させないといけないので、マストの下部はコンクリートブロックに差し込み、キャンプテント用の張りと自在金具、それにペグを使ってエレメントとマストを設置することにしました。マスト上部には、パイプ固定金具とアイボルトを組み合わせた張り綱用のアンカーも取り付けています。

もちろん、今回製作したものは受信実験用であり、本格的に常時観測を目指す場合には耐久性が必要になります。長期の定点観測では、アマチュア無線用の金属製ポールやスタンドなどを用いて、アンテナを設置することを検討するべきでしょう。

アンテナ設置には、できるだけ平らで開けた場所が必要です。当然のことながら、建物で木星が見えない場所では観測はできません。また、観測にはPCが必要です。短時間の運用ならノートPCのバッテリー駆動でも対応できるかと思いますが、商用のAC100V電源が利用できる環境があれば長時間の観測でも電源の心配がありません。

アンテナ設置図



Radio JOVEのマニュアルを参考にアレンジしたアンテナ配置の図。オリジナルでは、長さの単位の表記がインチ・フィートだが、ここではメートルで表した。コンバイナーからの同軸ケーブルの長さは任意だが、1波長分12ｍ弱とした。

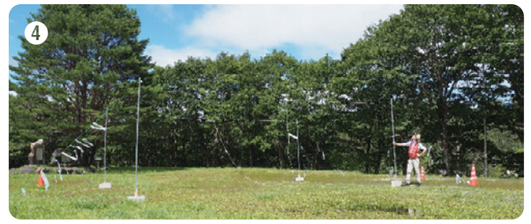
◆アンテナマスト部材料一覧　（総額約1万円）

塩ビパイプ（VP25・4ｍ）	4本
TSソケット（VP25用）	4個
TSキャップ（VP25用）	4個
VP立バンド（VP25用）	4個
アイボルト（M6）	4個
PEカラーロープ（太さ4ｍｍ）	30ｍ
アルミ製自在金具	12個
丸スチールペグ 265ｍｍ	8本
空洞コンクリートブロック（10ｃｍ・基本）	4個
木片（ブロックに塩ビパイプ固定用）	適宜
塩ビパイプ接着剤	適宜

❶デュアルダイポールアンテナは、2つのアンテナを南北に離して平行に並べる。それほど厳密に設置する必要はないが、方位を計るのに方位磁石では真北を指さないので、南中時の太陽でできる垂線の影を基準にしてみた。

❷アンテナマストの基礎は、安価な空洞コンクリートブロックを流用した。アンテナマスト本体となる塩ビパイプを穴に刺して、細い木の棒で隙間を埋めるという単純な構造だ。

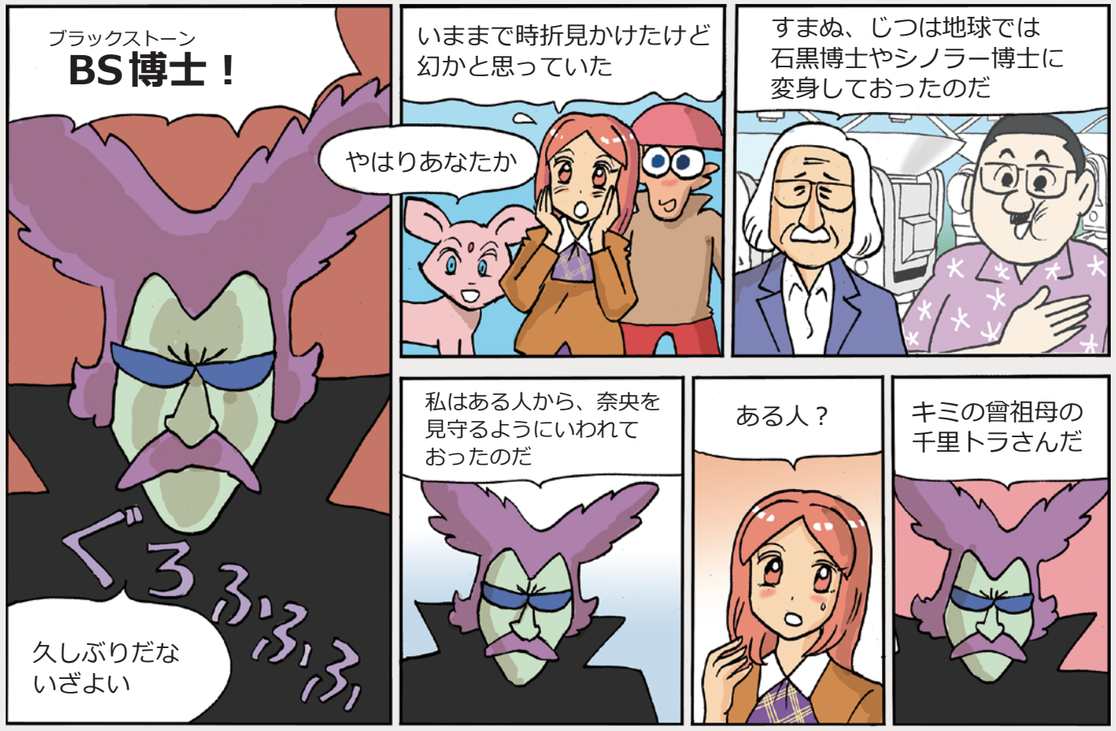
❸アンテナエレメント先端は、穴を開けた短い塩ビパイプに結束バンド2本で固定している。さらに、自在金具を入れた張り綱をアンテナマストの上部に付けた金具に通して、エレメントをできるだけ地面と平行になるように張っている。マストの張り綱は、張り綱そのものを結んで輪を作り、マスト先端に引っかけているだけ。



❹完成したアンテナ。アンテナマストの間隔は、南北6.1ｍ、東西約8ｍ、張り綱を固定するペグの範囲まで含めると、設置には10ｍ四方ほどの平坦な空き地が必要だ。もちろん、木星が見える環境でないと意味がない。

第11-6章 敵か味方か、ついに姿を現したBS博士 そして明かされる奈央の出生の秘密

アルマの冒険



3 SDRの設定と観測ソフトウェア

木星の電波観測に特化した無償のソフトウェアをインストール。

Radio JOVEの観測手法では、SDRにはイギリスのメーカーであるSDRplay社の「RSP1A」の使用を推奨しています。このRSP1Aの機能に特化した観測用ソフトウェアも用意されているので、Radio JOVEの提唱するスタイルで観測を行うなら、ほかに選択の余地はありません。

RSP1Aは、流星の電波観測で用いたもの（第10回）よりも高性能で、とりわけアナログ信号をデジタル化するためのADコンバーターの性能が高くなっています。流星の電波観測に用いたSDRのADコンバーターは8ビットの分解能でしたが、RSP1Aでは14ビットになり、64倍も高い分解能を持つため、よりノイズに対しての信号検出能力が高くなっているといえるでしょう。PCとは、USB2.0で接続します。

実際の観測には、OSとしてWindows7以降をインストールしたPCが必要です。近年に販売された機種で、CPUにインテル社の「Core iシリーズ」やAMD社の「Ryzenシリーズ」を搭載していれば、利用可能と思われます。

Radio JOVEのセットアップオペレーションマニュアルに従えば、まずはRSP1Aをラジオとして動作確認するための「SDRuno」をインストールします。SDRunoは、RSP1Aのメーカーであ るSDRplay社のソフトウェアで、無償でダウンロードでき、RSP1Aのドライバーも含まれています。

SDRunoをインストールしたら、必ずRSP1Aの動作確認をしておきましょう。屋内なら実験的にテレビアンテナを接続して、近隣のFM放送を聞いてみればよいでしょう。

木星のデカメートル波を受信して、その周波数や強度を観測するには、やはりWindows用のソフトウェアである「Radio-Sky Spectrograph（以降RSSと省略）」を利用します。Radio JOVEのサポート企業であるRadio-Sky Publishingから無償で提供されている観測用ソフトウェアで、周波数と電波強度の時間変化スペクトルをリアルタイムで表示、記録することができます。

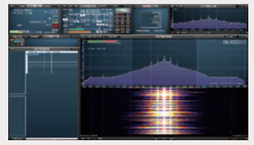
RSSだけではRSP1Aからのデータを読み込むことができませんが、RSSにはRSP1Aとの橋渡しを行う中間ソフトウェアの「SDRPlay2RSS」も含まれているので、RSSをインストールすればわずかな設定だけで運用することが可能です。

RSP1A

「RSP1A」は、イギリスのSDRplay社製のSDR受信機だ。コンパクトなサイズながら、受信レンジは1kHz～2GHzまでと広く、14-bitのADコンバーターを採用している。PCとの接続はUSB2.0で、専用の運用ソフトウェアであるSDRunoが用意されている。国内では、有限会社アイキャスエンタープライズが扱っている。2022年の購入時の価格は17,300円（税込）。
icas.to/sdrplay/lineup-1a.htm

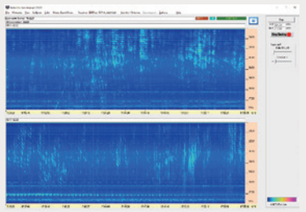
SDRuno

「SDRuno」は、無償のSDRplay社製SDR運用ソフトウェア。木星のデカメートル波観測に使わないが、ラジオ局の放送を受信するなど、RSP1Aの動作テストに使うことができる。また、RSP1AのPC用ドライバーも含まれるので、SDRunoのインストールは必須。ただし、22年の夏現在では、最新バージョンのドライバーでは、後述する観測用のソフトウェアが対応していないため、古いバージョンをダウンロードしてインストールする必要がある。Radio JOVEのマニュアルでは、SDRunoのバージョンは1.41.1が指定されている。以下のURLから、機種とOSを指定して表示されるサイトからダウンロードするが、「Legacy software Click here to show」と表示された文字をクリックしないと古いバージョンは表示されないので注意したい。
www.sdrplay.com/softwarehome/



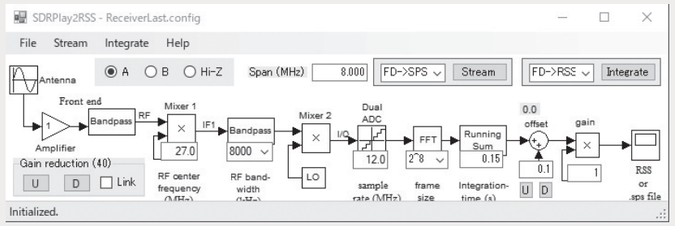
Radio-Sky Spectrograph（RSS）

SDRからのデータを表示する観測ソフトウェアが「Radio-Sky Spectrograph（RSSと略す）」だ。RSP1A用の設定を行うと、18MHzから24MHzまでの幅広い周波数帯のスペクトルを取得し、横軸を時間、縦軸を周波数として電波強度の時間変化を描画してくれる。デフォルトでは、上部がフルスケール2分、下部が10分に設定されている。もちろん、観測データの保存や時刻指定しての再表示なども可能。
www.radiosky.com/specdownload.html



SDRPlay2RSS

「SDRPlay2RSS」は、RSP1Aのデータを RSSへ取り込むための橋渡しを行うソフトウェア。RSSインストーラーに含まれていて、RSSでRSP1Aを使うように設定すると、RSSでの観測開始と同時に起動されるようになっている。



PC

今回の観測で使用したのは、UPUにIntel Core i7 3770Kを搭載したPC。OSはWndows10をインストールしている。何台かの異なるPCでの観測を行っているが、電源ラインから混入したと思われるノイズを拾う機種もあり、できる限り高品質な電源を搭載したPCを用意したほうがよいと思われる。観測継続時間に問題なければ、ノートPCのバッテリー運用も可能だろう。また、原因は不明だが、どうしてもRSSが正常に動作しないPCもあった。必ず事前に動作確認しておきたい。

4 木星電波バーストは予測可能

予測ソフトでデカメートル波が特に強く放射される日時を確認。

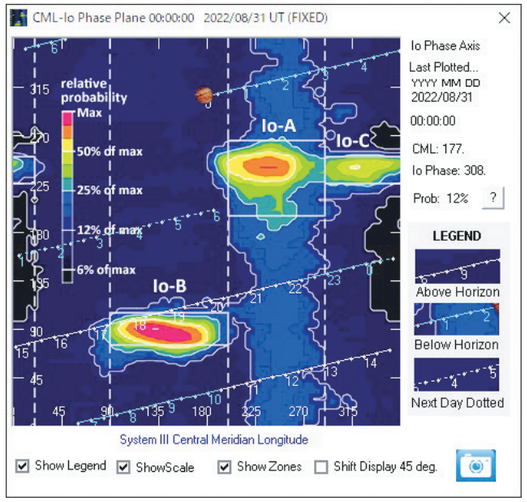
前号でも説明したように、木星のデカメートル波は木星の中央経度とイオの位相によって、平時よりも強力な電波を受信できるタイミングがあります。それは長くても数時間程度で、「木星電波バースト」や「木星電波ストーム」とも呼ばれます。バーストは爆発や破裂、ストームは嵐の意味があり、その名称からも一時的に極端な変化を見せる現象ということが分かります。観測を行うならば、まずは強い電波の木星電波バーストを狙ってみるとよいでしょう。というのも、残念ながら簡単に自作できるダイポールアンテナやSDRでは、バースト以外の電波を継続的にとらえるほどの感度がないからです。

幸いなことに、太陽系内の惑星や衛星の運行については、正確に予測可能です。したがって、特定の時刻における地球、木星、イオの位置関係や木星の中央経度を計算で求められます。その予測を行う専用のシミュレーションソフトウェアも用意されています。前出のRSSをリリースしているRadio-Sky Publishingが無償で提供している「Radio-Jupiter pro3」は、木星のデカメートル波の観測の支援を行うソフトウェアです。

やや古めかしいスタイルのインターフェースですが、観測場所の緯度経度、タイムゾーン（時差）などの情報をあらかじめ登録しておけば、その観測地の星空での木星の位置を示す星座早見盤的な表示や、木星電波バーストの発生確率を色分け表示したグラフなどを表示できます。さらに、アンテナの感度の指向性の表示などが可能で、観測計画を立てるのにもとても役立ちます。もちろん、観測中の状況変化をリアルタイムに表示することも可能です。

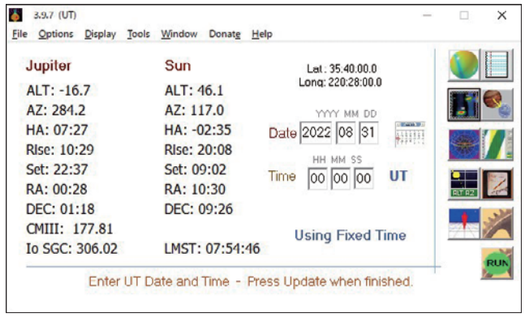
木星から地球には、常にデカメートル波が届いていますが、木星の中央経度とイオの位相の組み合わせによって、Io-A、Io-B、Io-Cと命名された3つの特に強い電波の受信ができるバーストがあります。それ以外の木星の中央経度だけによるデカメートル波は、non-Io-A（やや強い）、non-Io-B（弱い・観測は困難）などと呼ばれています。

また、木星電波バーストの特徴は、数十分から数時間にわたって比較的長い時間での周波数変動を起こすLバースト（Lはロングの意味）とわずか数秒以内に大きな周波数変動を起こすSバースト（Sはショートの意味）の2種類がありますが、今回の観測では、あまり時間分解能を必要としないLバーストを狙いました。な

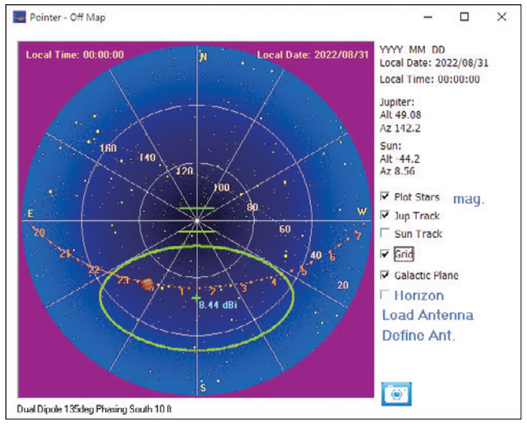


過去の観測データから作られた木星電波ストーム発生確率図で、縦軸がイオの位相、横軸が木星の中央経度。可能性として、赤色の部分がきわめて強力な木星のデカメートル波が観測できるエリアだ。アンテナを立ててシステムが構築できたら、まずはできる限りこの赤色の部分を木星が通過するタイミングを狙うとよい。

木星電波ストームの観測計画を立てるのに便利な一覧表もある。ストームの種類とその時刻、さらに色分けされたグラフも表示される。



Radio-Jupiter pro3の起動画面。木星と太陽の位置情報と、さまざまな機能を持つウィンドウを開くためのアイコンが表示されている。観測地を設定（緯度経度、なぜか東経で入力しても西経表示される）すれば、時刻系は世界時（UT）とローカル（観測地が日本なら日本標準時）の切り替えが可能だ。また、現象をシミュレーションして時刻を設定することも、PCの内蔵時計でのリアルタイム運転もできる。



星座早見盤的な全天が表示されるウィンドウもある。木星の見える位置やアンテナの感度の範囲表示なども可能だ。（この例は南アンテナの位相を135度ずらしたところ）。

5 ついに捉えた木星のデカメートル波

狙い通り、予測された日時に木星電波バーストの観測成功！

20MHz前後の木星のデカメートル波のような低周波の電波は、地上では人工的なノイズが多く、Radio JOVEでは、観測場所は人里離れた運動場のような広場が好適だとしています。また、「実際に日本国内の都市部では、人工的なノイズが多いため、木星のデカメートル波の観測はかなり困難でしょう。比較的都市部から離れた山間地でも、人の活動が落ち着く深夜にならないとノイズが減らない傾向があります」という助言を東北大学理学研究科准教授で地球物理学専攻の熊本篤志先生からいただいていました。さらに、熊本先生からは独自に計算した木星電波バーストの予報もご提供いただき、Radio-Jupiter pro 3のシミュレーションと合わせて、木星電波バーストの観測計画を立てることにしました。

観測準備中のアルマーの冒険制作チーム。

運良く、2022年の夏から秋にかけては、木星は秋の星座であるうお座付近にあって、深夜から未明にかけて南中するという申し分のない条件でした。そこで、人工的なノイズが少なくなると予想される時間帯で、観測できそうなタイミングを探しました。そして、まずは2022年7月21日夜から22日未明にかけて試験的な観測を行いました。深夜に木星が南中し、Io-Aの電波バーストの発生が予測されたからです。

観測場所は、大都市から離れた人里離れた場所ということで、長野県の木曽御岳山の中腹に位置するキャンプ場のスタッフ用宿舎をお借りして、宿舎前の広場にアンテナを設置しました。

近くに大都市のない環境とはいえ、夕刻はまだ人工的なノイズが多い状況でしたが、夜が深まるにつれてノイズは劇的に収まっていきました。そして、PCの画面を注視していると、不意にモヤモヤとしたシミのようなスペクトルが現れはじめたのです。まさにIo-Aの木星電波バーストが予測された時間どおりです。こうして、自作のアンテナとSDRを使って木星からの電波を捉えることに成功したのです。

さらにアンテナを一部改良しつつ、さらに広くて見晴らしのよいキャンプ場の駐車場をお借りして再配置しました。ここでは、人工的なノイズもさらに少なく、8月30日から3夜連続で、Io-A、Io-B、Non-Io-Aという木星電波バーストを捉えることもできました。

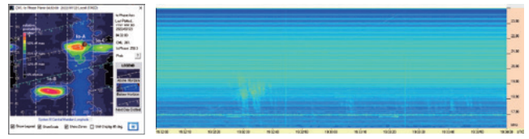
アルマーの冒険制作チームの観測した木星のデカメートル波

これまで解説してきた自作のデュアルダイポールアンテナとSDRのRSP1A、そしてRSSをインストールしたWindows PCを使って、実際に木星のデカメートル波の観測を行った結果を掲載する。いずれもRadio-Jupiter pro3で予測される木星電波バーストを狙っての観測である。掲載しているのは、取得したRSSのデータを再表示し、特に電波が強く現れている2分間分のスペクトルである。同一周波数で継続的に受信される筋状の人工的なノイズとは異なり、モヤモヤとした塊状に見えるのが特徴的だ。バーストの出現が予測される前後数時間にわたり観測を続けたが、予測される時間帯以外には、こうした塊状のスペクトルはほぼ現れないことから、木星からの電波であると思われる。

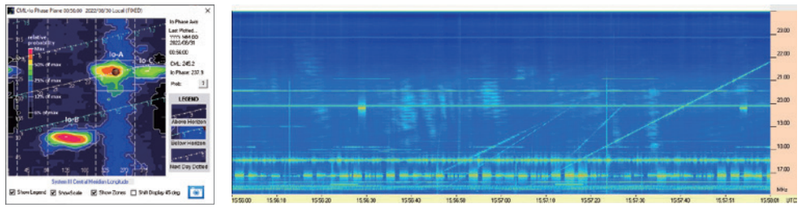
弱 ← 電波強度 → 強

RSSでは、電波強度を色で表示している。観測したデータでは、背景が青で比較的ノイズが少ない環境。木星電波のスペクトルは、それよりもやや強い程度だということがわかる。今回の観測では、定量的な電波強度を知るための「キャリブレーション」を行っていないので、実際の電波強度は不明。

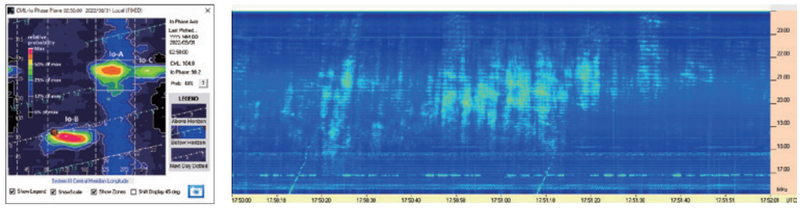
◆ 2022年7月23日 4時32分～34分 Io-A
長野県木曽郡王滝村（おんたけ銀河村キャンプ場/スタッフ宿舎前）



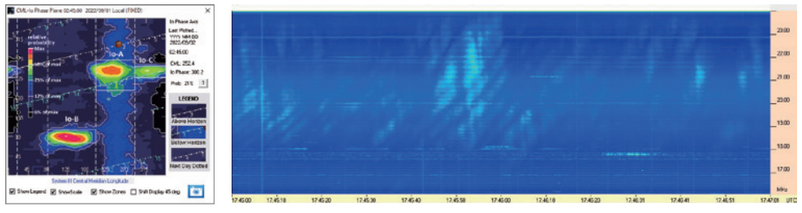
◆ 2022年8月31日 0時56分～58分 Io-A
長野県木曽郡王滝村（おんたけ銀河村キャンプ場/駐車場）



◆ 2022年9月1日 2時50分～52分 Io-B
長野県木曽郡王滝村（おんたけ銀河村キャンプ場/駐車場）



◆ 2022年9月2日 2時45分～47分 Non-Io-A
長野県木曽郡王滝村（おんたけ銀河村キャンプ場/駐車場）



6　観測地ごとの人工的なノイズ比較

木星のデカメートル波観測の最大の障害は人の活動に伴うノイズ。

光での天体観測ではできる限り大都市から離れた土地での観測がのぞましいと考えられます。大都市では、本来は市民生活のための照明が星空を照らしてしまい、天体の観測においては「光害」として悪影響を及ぼします。

電波も同様で、市民生活のために利用される電波が、それ以外の場所にもあふれてしまっています。とはいえ、街明かりのように目には見えないため、実際にアンテナを建ててみないことには、その場所が木星のデカメートル波の観測に適しているかどうかがわからないのが光とは異なるところでしょう。そこで、当初から観測地として予定していた長野県王滝村のおんたけ銀河村キャンプ場、東京都三鷹市にある国立天文台三鷹キャンパス、長野県野辺山にある国立天文台野辺山宇宙電波観測所、長野県上松町にある東京大学木曽観測所の計4か所でデカメートル波のノイズレベルを調べてみました。

野辺山でも観測。石黒先生も参加。RSSのスペクトル表示に興味津々。

国立天文台三鷹キャンパスでは、建物の屋上にアンテナを設置しましたが、真夜中でもノイズレベルが下がらず、木星のデカメートル波の検出どころではない状況でした。野辺山宇宙電波観測所は現在でも大型の45ｍ電波望遠鏡でミリ波を用いた観測を進めています。しかし、デカメートル波では人工的なノイズが深夜になってもそれなりに残る環境だとわかりました。それでも、木星電波バーストを捉えることはできました。

意外だったのは、東京大学木曽観測所です。夜天光観測室（標高1100ｍ）と呼ばれる平屋の建物の屋上にアンテナを設置しましたが、確実に木星電波バーストを捉えることのできたおんたけ銀河村キャンプ場（標高1410ｍ）とは、直線距離でわずかに10キロメートルほどの位置にもかかわらず、深夜までノイズレベルが下がりませんでした。当初は施設そのもののノイズを疑いましたが、銀河村キャンプ場とは地形の差も大きいことに気がつきました。南を除く三方を山や小高い丘に囲まれたおんたけ銀河村キャンプ場に対して、木曽観測所は山の尾根近くにあり、遠方からやってくるノイズの状況がかなり異なるようです。

後に、簡易的にシングルのダイポールアンテナを使ってノイズレベルの確認を行ったところ、台地状に開けている場所よりも、谷間の見晴らしの悪い土地の方が、明らかに人工的なノイズを拾いにくいことがわかってきました。また、アンテナの地上高度を上げすぎると、見晴らしがよくなるためか、ノイズレベルが上がることも確認しました。

木星のデカメートル波の観測を行うには、人工的な電波によるノイズとの戦いとなります。もしもアンテナを設置するとしたら、木星が間違いなく見える谷間の地形の場所を探すとよいかもしれません。

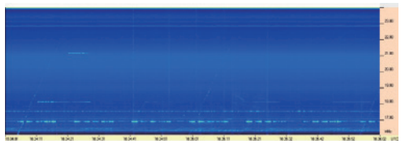
木星電波を観測する意義

はるかかなたの木星を取り巻く環境のなかでも、磁場の様子を直接観測することはとてもむずかしく、デカメートル波のような電波や木星大気圏のオーロラなど、間接的な観測方法しかありません。デカメートル波の発生の原理は、前編にて簡単に紹介していますが、木星と衛星（特にイオ）の位置関係はもちろんのこと、太陽活動や木星磁場強度そのものの変化によっても電波強度が大きく変動します。したがって、継続的に観測を行い、データを蓄積することで、木星や太陽の物理的な状態を知るための手がかりとなります。

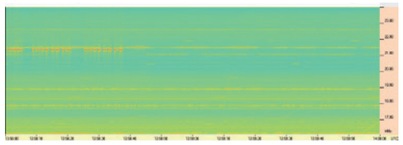
もちろん、直接探査することも大切です。現在、木星へはESA（ヨーロッパ宇宙機構）が2023年4月14日に打ち上げた探査機のJUICE（ジュース・JUpiter ICy moons Explorer/木星氷衛星探査計画）が向かっています（P.12–13参照）。JUICEは、主にガニメデやカリストなど、氷に覆われた木星の衛星の探査を目的とした探査機ですが、イオのプラズマや、ガニメデと木星のそれぞれの磁場の相互作用を観測する装置も搭載されています。

JUCIEに搭載される観測装置のRPWI（Radio and Plasma Wave Investigation）のチームロゴに、セガ社のゲームキャラクターである「ソニック・ザ・ヘッジホッグ」が描かれている。RPWIは各国との共同開発で、東北大学理学研究科の笠羽康正教授（惑星大気プラズマ研究センター長）が日本側の代表者を務められている。チームからの提案にセガ社が全面協力、無償でロゴが提供された。

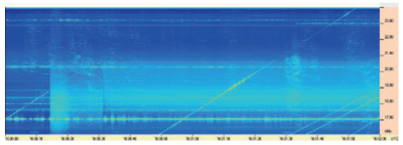
◆2022年9月1日
未明
長野県木曽郡王滝村（おんたけ銀河村キャンプ場）
かなり理想的な環境



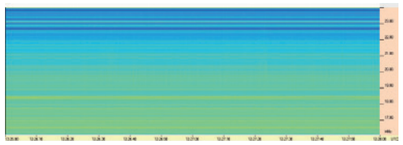
◆2022年10月8日
深夜
東京都三鷹市（国立天文台三鷹キャンパス）
観測不能



◆2022年10月17日
未明
長野県南佐久郡南牧村（国立天文台野辺山宇宙電波観測所）
Io-B 観測中



◆2022年11月17日
夜半前
長野県木曽郡木曽町（東京大学木曽観測所・夜天光観測室）
観測不能



7　電波天文観測と周波数資源保護

便利で安全な社会との共存を目指して。

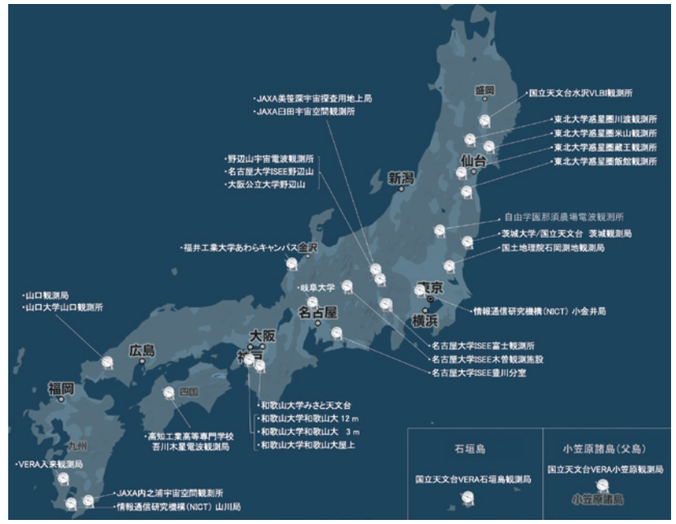
アルマーの冒険制作チームが遭遇した、人工電波によるノイズ。観測した周波数は20.1 MHzで、「短波」と呼ばれる周波数帯にあたります。短波は非常に遠くまで届くため、船舶無線や航空機無線、放送用途などに盛んに利用されています。夜が深まっていくとノイズが下がっていくことは、人間活動と密接に関連があることの証拠です。

宇宙の天体から届く電波は、たいへん微弱です。例えば皆さんがお持ちの携帯電話を月に持って行って電源を入れ、それを地上から観測すると、全天でトップクラスの強さの電波源として検出されるはずです。38万キロメートル彼方の携帯電話1台でこれですから、地上にあふれる携帯電話からの電波は相当な強さになります。身のまわりにはWi-Fiやテレビ、レーダーなどさまざまな電波が飛び交っていますので、その中できわめて微弱な天体からの電波を捉えるのはたいへんです。

さまざまな用途の機械が好き勝手に電波を出していては、うまく通信できなかったり他の用途を邪魔してしまったりします。このため、電波を交通整理するための仕組みがあります。電波の周波数を区切って、それぞれ使う用途を決めておく「周波数割当」です。日本国内では、総務省が「周波数割当計画」の中で周波数ごとに割り当てられる用途を公表しています。もちろん電波は国境を越えて飛びますので、国際的には国連の専門機関である国際電気通信連合が「無線通信規則」を制定し、その中で国際的な周波数の割当を決めています。各国での周波数割当は、基本的にはこの国際的な枠内で行われることになります。

電波天文学も電波を扱う業務の1つですので、特に天文学にとって重要な周波数帯を中心に割当を受けています。例えば、宇宙に豊富に存在する水素原子が出す電波（波長21 cm、周波数1.4 GHz）やアンモニア分子が出す電波（波長1.3 cm、周波数23 GHz）、一酸化炭素分子が出す電波（波長2.6 mm、周波数115 GHz）などです。割当を受けている周波数帯では電波天文学に優先権がありますので、他の用途からの電波の混信（有害干渉）があった場合には、混信をなくすよう要請することができます。

ところが、電波全体の広い周波数帯に比べると電波天文への割当のある周波数帯はごくわずかです。今回木星電波の観測を行った20 MHz帯も、電波天文への割当はありません。つまり、「20 MHzで木星電波が見えないから、通信に使う電波はもっと弱くして！」と主張する権利はないのです。電波の周波数は有限で、みんなで分け合って使わなくてはいけませんから、優先順位がつけられるのはやむを得ません。割当のない周波数帯で観測したい場合には、制作チームのように市街地から離れたノイズの低い場所で実施するしかありません。



日本国内の電波天文観測施設。低い周波数から高い周波数のものまで、約30か所の観測施設があります。（Map data ©2022 Google）

周波数割当は、未来永劫変わらないものではありません。「5G」「Wi-Fi 7」など新しいサービスが始まるときには、新しい周波数を割り当てる必要があります。まったく何にも使われていない周波数帯はほとんどありませんから、その周波数帯をすでに使っている業務と新しく割当を受ける業務との間で、お互いに邪魔しないかどうかを確認し、電波の強度や出し方を調整する必要が生じます。電波天文への割当がある周波数帯でこうした調整を最近行っている例としては、無線LANの6 GHz帯への拡張、5G携帯電話への40 GHz帯の割当、76 GHz帯車載レーダーの規制緩和などがあります。電波放射装置の技術仕様をもとに国内の電波観測所への有害干渉の有無を計算し、もし干渉が懸念される場合には電波天文への割当周波数帯を避けてもらう、電波放射可能エリアを制限してもらうなどの交渉が必要になります。こうした業務を行っているのが、2019年に設立された国立天文台天文情報センター周波数資源保護室です。

とはいえ、周波数資源保護室も「電波天文がいちばん大事」と考えているわけではありません。電波を使ったいろいろなサービスにより、私たちは現代社会で便利さや楽しさや安全を享受することができます。こうした現代社会と電波天文観測に適した環境を両立させることが、周波数資源保護室の大きなミッションなのです。（周波数資源保護室長：平松正顕）

背景：国際電気通信連合の会議。2023年3月にジュネーブで開催されたもので、オンライン含め約1900人が参加しました。たくさんの議題が設定されており、議題ごとに細かく分科会を作って議論しますが、各国の利害が衝突する場面もあり、なかなかたいへんな会議です。

次回予告

アルマーの冒険制作スタッフは、いよいよ太陽系を飛び出します。次なるテーマは銀河電波。天の川銀河から地球へと降り注ぐ電波をキャッチし、さらに渦巻腕ごとに異なるドップラーシフトを検出して、天の川銀河の構造解析に迫ります。次回もお楽しみに！

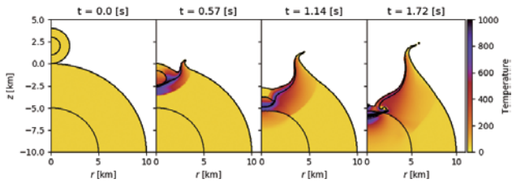
2023年度 iSALE講習会

松本侑士（天文シミュレーションプロジェクト）

2023年6月2日から7月7日までの1か月ほどにわたり、天文シミュレーションプロジェクト（CfCA）では毎週金曜日に衝突シミュレーションコードiSALEの講習会をオンラインで開催いたしました。本年度は大学生から研究員までの14名の受講者が集まりました。黒澤耕介氏（千葉工業大学）と黒崎健二氏（神戸大学）、またCfCA松本侑士特任研究員が講師を担当し、衝突が引き起こす物理現象およびiSALEを用いた衝突シミュレーション方法とその解析方法について学びました。iSALEを用いた数値シミュレーションの一例が下の図です。受講者はこうした数値計算を自前で行えることを目標としました。今後、講習会受講者がCfCAの計算資源を活かした衝突シミュレーションにより、天体の衝突現象が惑星や衛星の進化に及ぼす影響についての研究を進めることが期待されます。

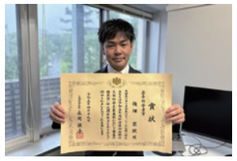
iSALE 日本語サイト

https://www.wakusei.jp/~impact/wiki/iSALE/



iSALEによる小天体同士の衝突シミュレーションの一例。衝突により、高温を経験した物質が表層へと巻き上げられている。

すばる望遠鏡・アルマ望遠鏡を活用する研究者2名が文部科学大臣表彰の若手科学者賞を受賞



梅畑豪紀特任助教。
（クレジット：名古屋大学）

播金優一助教。
（クレジット：東京大学宇宙線研究所）

令和5年度科学技術分野の文部科学大臣表彰において、名古屋大学の梅畑豪紀特任助教と東京大学の播金優一助教が若手科学者賞を受賞しました。

梅畑さんは「原始銀河団の活動銀河をつなぐ宇宙網の研究」、播金さんは「すばる望遠鏡等の大規模観測データを使った遠方銀河の研究」が受賞の理由となりました。

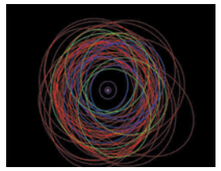
すばる望遠鏡 トピックス

https://subarutelescope.org/jp/news/topics/2023/05/25/3268.html

すばる望遠鏡、土星の100番目の衛星を発見

土星の既知の衛星数が、太陽系内の惑星として初めて100個を超えました。100番目に報告された土星の衛星「S/2004 S43」（仮符号）は、すばる望遠鏡によって初めて観測されました。

2023年2月に15個の新衛星が発表された木星は、95個の既知の衛星を保持して一時「最も衛星が多い惑星」の王座に輝きましたが、同年5月に国際天文学連合から新たに62天体が土星の衛星として発表されると土星の衛星数は145個になりました。土星はたったの3か月で王座を奪還したことになります。



土星の極方向から見た衛星軌道の概念図。（クレジット：スコット・シェパード/カーネギー研究所）

すばる望遠鏡 トピックス

https://subarutelescope.org/jp/news/topics/2023/05/22/3264.html

デービッド・ユタカ・イゲ 前ハワイ州知事へ感謝状を贈呈

感謝状を手にするイゲ前ハワイ州知事（中央 左）と常田国立天文台長（中央 右）。（クレジット：NINS/NAOJ）

2023年5月8日、自然科学研究機構および国立天文台はデービッド・ユタカ・イゲ前ハワイ州知事に感謝状を贈呈しました。

イゲ前ハワイ州知事は、2014年の米国ハワイ州知事就任以降、2期8年を通じ一貫してマウナケアの天文学を支持し、地元との関係や文化との融合に尽力されました。沖縄県にルーツを持つ同氏は、幅広い分野で日本とハワイの交流と相互理解の促進に積極的に取り組みました。その功績が認められ、令和5年春の外国人叙勲で旭日重光章を受章されました。旭日重光章受賞をお祝いする会で、自然科学研究機構および国立天文台より同氏に感謝状を贈呈しました。

国立天文台 トピックス

https://www.nao.ac.jp/news/topics/2023/20230524-certificate.html

IRAMのシュスター所長、ノーベル物理学賞受賞のゲンツェル博士らが、国立天文台を訪問

右からIRAMのカール・シュスター所長、フランス国立科学研究センター（CNRS）のマルタン・ジアール博士、スペイン国立地理学研究所（IGN）のラファエル・バチジェール博士、先端技術センターの小嶋崇文准教授。（クレジット：国立天文台）

フランスに本部を置くミリ波電波天文学研究所（IRAM）のカール・シュスター所長と、同研究所運営委員で2020年ノーベル物理学賞受賞者のラインハルト・ゲンツェル博士らの一行が、2023年7月18日から20日にかけて、国立天文台三鷹キャンパスを来訪されました。

国立天文台 トピックス

https://www.nao.ac.jp/news/topics/2023/20230727-iram.html

令和4年度 国立天文台長賞

●技術・開発部門

「マウナケア山頂施設の継続的な点検保守及び大型観測装置交換による、すばる望遠鏡の長期安定運用への貢献」

ハワイ観測所デイクルー（敬称略）

James Ferreira, Christopher Boggess, Raymond Adams, Jordan Akiona, Benjamin Bergin, Teiji Chiba, Jonah Conol, Terry Henninger, Michael Kerns, Loreto Villegas-Villeza Jr.

●運営部門

「長年にわたる周波数資源保護活動への貢献」

大石雅壽氏（元・天文情報センター特任教授）

●広報普及部門

「テレビ番組・ラジオ番組を通じての天文学および国立天文台の知名度向上への貢献」

北野和宏氏（元・NHKテレビプロデューサー、現・NHKエンタープライズ）

坂田正已氏（元・NHKラジオセンターアナウンサー及びプロデューサー）

（左）技術・開発部門の受賞者、（右）運営部門／広報普及部門の受賞者と常田台長。

アンケートに答えて

ご好評につき第2弾！

「国立天文台 望遠鏡キット」をゲット！

Please fill in the questionnaire.

ご回答いただいた方の中から、国立天文台がプロデュースした「国立天文台 望遠鏡キット」を抽選で1名様にプレゼント！

（希望者のみ）

★今号のNAOJ News（国立天文台ニュース）はいかがでしたか？NAOJ Newsは、読者の皆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ください。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します。

https://forms.office.com/r/ncn1EauggW

回答期限：2023年11月15日

©Vixen

編集後記

スペースは究極の観測サイトなので、新しい観測を目指してこれからも挑戦を続けます。大きな望遠鏡を持っていくのはなかなか難しいですが、熱意とアイデアでさまざまな将来計画が検討されています。それはまた別の機会に紹介させてください。（勝川行雄・太陽観測科学プロジェクト）

次号予告

次号（2023/24年冬号）は特集「時と天文学」と題して、暦や時間と天文学の関わり、近年の観測の発展で脚光を浴びる「タイムドメイン天文学」などを紹介します。好評連載「銀河鉄道の夜空へ -Al Nokta čielo de la Galaksia Fervojo」第8回もお楽しみに。

NAOJ NEWS / 国立天文台ニュース

No.341 2023年秋号

©2023 NAOJ（本誌記事の無断転載・放送を禁じます）

発行日／2023年10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

国立天文台望遠鏡キットは、望遠鏡の原理や仕組みがわかる組立式の天体望遠鏡です。高性能、軽量・コンパクト、安価な天体望遠鏡レンズ、焦点距離、サイズ、鏡筒材質を徹底的に検討し、詳細な惑星観測ができる性能とコストを最適化。コストパフォーマンスに優れ、学習教材として、入門者向けとして最適な天体望遠鏡を実現しました。くわしくは、

https://www.nao.ac.jp/study/naoj-tel-kit/

国立天文台望遠鏡キット

※キットは鏡筒のみです（三脚は含まれません）。