

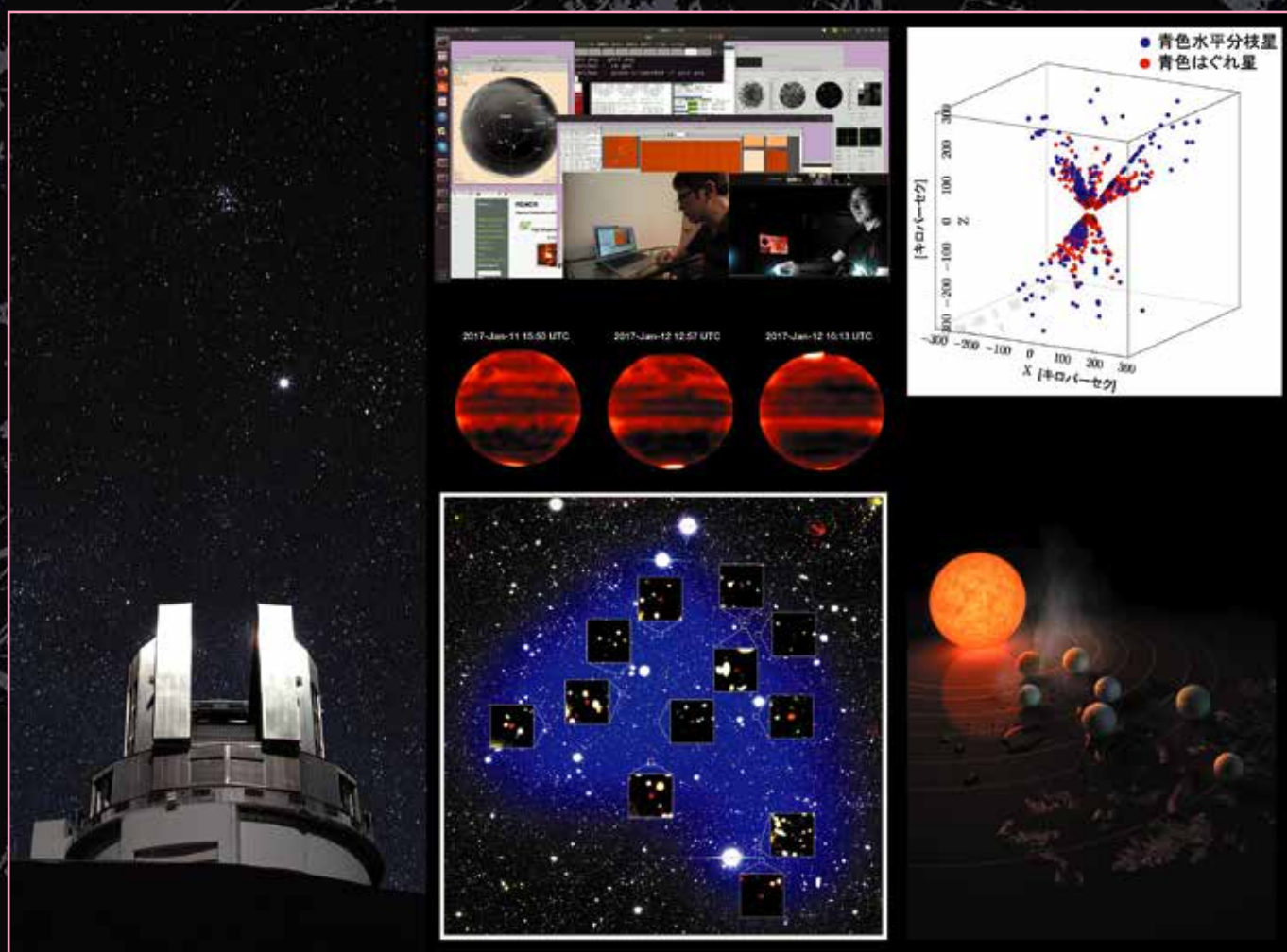
自然科学研究機構

NAOJ

国立天文台ニュース

National Astronomical Observatory of Japan

2020年9月1日 No.326

特集
すばる望遠鏡 2020 前編

- すばる望遠鏡の最新レポート
- 巨大惑星の屋根:宇宙空間へつながる木星の大気を探る
- 銀河系の端が見えてきた!
- すばる望遠鏡、130億光年かなたの宇宙に銀河団を発見
- 第二の地球候補の軌道の傾きを制限:すばる望遠鏡の新分光器IRD
- 松野允郁さん、すばる望遠鏡データを用いた博士論文でSOKENDAI賞を受賞

9

2020

NAOJ NEWS

国立天文台ニュース

C O N T E N T S

- 表紙
- 国立天文台カレンダー

03

特集

すばる望遠鏡2020 前編

- すばる望遠鏡の最新レポート
小山佑世（ハワイ観測所）／神戸栄治（ハワイ観測所）
- 研究トピックス01
巨大惑星の屋根：宇宙空間へつながる木星の大気を探る
笠羽康正（東北大学 理学部 惑星プラズマ・大気研究センター）
- 研究トピックス02
銀河系の端が見えてきた！
千葉柊司（東北大学）
- 研究トピックス03
すばる望遠鏡、130億光年かなたの宇宙に銀河団を発見
播金優一（東京大学 宇宙線研究所）
- 研究トピックス04
第二の地球候補の軌道の傾きを制限：すばる望遠鏡の新分光器IRD
平野照幸（東京工業大学）／田村元秀（東京大学、アストロバイオロジーセンター）

22

受賞

- 松野允郁さん、すばる望遠鏡データを用いた博士論文でSOKENDAI賞を受賞

23

お知らせ

- 「三鷹・星と宇宙の日2020」はオンラインで開催

23

編集後記／次号予告

24

連載「すばる望遠鏡HSC Cosmic Gallery」06 コスモフィールドの深宇宙

解説：田中賢幸（ハワイ観測所）



表紙画像

すばる望遠鏡によるさまざまな観測成果イメージ。

背景星図（千葉市立郷土博物館）
渦巻銀河M81画像（すばる望遠鏡）

新型コロナウイルス感染症に 関連した対応について

新型コロナウイルス感染症の感染拡大を防ぐため、国立天文台の施設公開、定例公開、イベント等の一部を中止いたします。再開につきましては、国立天文台のウェブサイトやSNSにてご案内いたします。みなさまのご理解、ご協力をお願いします。

また、国立天文台にご来訪されるみなさまにおかれましては、下記のことをお願いいたします。

- 新型コロナウイルス感染者との濃厚接触が判明している場合や、その恐れがある場合は、ご来訪をお控えください。
- 咳や発熱などの症状がある場合は、ご来訪をお控えください。
- マスクや手洗いなど、各自で十分な防護策をお取りください。

★くわしくは

<https://www.nao.ac.jp/notice/20200226-coronavirus.html>

をご覧ください。

国立天文台カレンダー

★予定は変更される場合があります

2020年8月

- 1日（土）4D2Uシアター公開（三鷹）
- 7日（金）幹事会議
- 14日（金）4D2Uシアター公開（三鷹）
- 15日（土）4D2Uシアター公開（三鷹）
- 21日（金）幹事会議
- 26日（水）プロジェクト会議

2020年9月

- 4日（金）幹事会議
- 7日（月）運営会議
- 18日（金）幹事会議
- 30日（水）プロジェクト会議

2020年10月

- 3日（土）4D2Uシアター公開（三鷹）
- 7日（水）防災訓練
- 8日（木）教授会議
- 9日（金）幹事会議／4D2Uシアター公開（三鷹）／観望会
- 17日（土）4D2Uシアター公開（三鷹）
- 23日（金）幹事会議
- 24日（土）観望会
- 28日（水）プロジェクト会議



特集

すばる望遠鏡2020

前編

本格的な観測開始から20年を経た「すばる望遠鏡」。日本の光赤外天文学を一気に世界の第一線に引き上げた8・2メートルの巨眼は、観測装置の更新や運用面の改善などによって日々進化し、能力向上を続けています。この特集では、前編としてすばる望遠鏡の近況と観測成果を概観し、号を改めた後編では、今後の今後のすばる望遠鏡の機能強化計画と科学目標を展望します。

すばる望遠鏡の最新レポート

観測開始から20年。ますます進化する「すばる望遠鏡」の近況と最近のおもな研究成果をご紹介します。

小山佑世
(ハワイ観測所)



神戸栄治
(ハワイ観測所)



●01 はじめに

すばる望遠鏡が観測を始めてから、20年が過ぎました。当初は、国内に2m級望遠鏡しかなかった光赤外観測天文学の研究者たちが、すばる望遠鏡稼働以来、世界に伍すべく一心に装置開発や観測天文学に打ち込み、これまで輝かしい科学成果を生み出してきました★01。今日では、そうした環境

で力をつけた研究者が、すばる望遠鏡用の次世代観測装置の開発を牽引したり、いろいろな宇宙望遠鏡との共同研究を推進したりするなど、すばる望遠鏡の能力をさらに引き出しています。そして、2020年代にすばる望遠鏡は、その超広視野天体観測能力を最大限に生かして、よりいっそうの飛躍を遂げようとしています。そこで、9月号の前編では、ここ10

年間、特に前回のすばる特集号（2016年7月号）以降に得られた科学成果を中心に紹介していきます。また、後編（近月号予定）では、我々が2022年度以降に実施しようとしている「すばる2」計画の概要について、紹介します。

★ newscope

★01 この場を借りまして、すばる望遠鏡を実現し、またその成長に尽力してくださった方々に、改めて感謝いたします。



図01 望遠鏡・観測装置操作端末の画面をみながら、自宅などから観測に参加する観測者。S20Bから公開された高分散分光コロナグラフREACHとIRDで系外惑星を初観測中。

●02 最近のすばる

本題の科学成果の紹介に入る前に、最近のすばる望遠鏡の状況について、簡単にご紹介しましょう。前回の特集号でも触れられましたが、すばる望遠鏡の予算は年々厳しくなっており、ハワイ観測所では、あらゆる面で、より集中的かつ効率的な運営をするように努力しています。

観測装置については、2020年代には、超広視野主焦点カメラHSC（運用中／p12-18参照）、超広視野多天体分光器PFS（2023年頃から運用開始）、広視野高解像赤外線観測装置ULTIMATE（2020年代後半に運用開始）の3台が重点装置となります★02が、運用の負担を抑えるために、並行して既存装置の廃止も進めていく予定です。実際に、2020年前期をもって冷却中間赤外線分光撮像装置COMICSの運用を停止したところです（p11参照）。一方で、ハワイ観測所では、外部資金で開発された近赤外超精密視線速度観測装置IRD（p19参照）や持ち込み観測装置である近赤外線2色同時多天体分光撮像装置SWIMSを共同利用に供して、可能な限り観測研究の多様性を維持するようにしています★03。

また、運用面では、リモート観測の強化（図01）、山頂無人観測化計画、サポートアストロノマーの業務の見直し（夜間観測支援を減らし、新規観測装置のための科学運用支援などに力を注ぐ）などを進めています。老朽化が進行する望遠鏡やドームについては、運用・保守・改修等を観測所が主体となって行う内製化を推し進め、より経済的な老朽化対策計画を練り、国立天文台として予算の獲得努力をしているところです。

ハワイ観測所は、国際協力も

積極的に模索しています。装置開発では、まもなく稼働するPFS（後編で紹介予定）の開発に7か国で十数の研究機関や大学連合が参加していますし、NASA/ESAの次世代宇宙望遠鏡ナンシー・グレース・ローマン宇宙望遠鏡（旧WFIRST）やEuclid宇宙望遠鏡との国際共同研究計画が進められ、南天で超広視野撮像サーベイ観測を行う予定のベラ・ルービン天文台との協力も検討されています。一方で、国際共同運用の実現には、連携研究機関との長期的、

総合的な科学目標の共有、パートナーの所属する天文コミュニティや国の理解、なども必要となり、時間がかかります（図02）。今後も、装置開発や研究を共同で進めていきながら、実現可能な国際共同運用の形を見出していくことになります。より多くの方々から、関心、支援、協力を頂くことができればと思います。

すばる望遠鏡を運用する上で欠かせないのが、地元の理解と協力です。すばる望遠鏡も一員であるマウナケア天文台群★04にとっては、2033年に期限がくるマウナケア山頂の土地借用権（マスター・リース）の更新が、ハワイ州の天文学全体に関わる直接的な関心事で、マウナケアの管理体制の改善など、より一層地元の理解が得られるように活動しています。なお、TMTとすばる望遠鏡の関係については、後編の記事で紹介する予定です。



図02 インドを訪問して、国際共同運用について協議中。

●03 すばる望遠鏡の科学目標と成果

このように、すばる望遠鏡を取り巻く情勢は大きく変わりつつありますが、世界第一線の科学成果を創出し続けるというすばる望遠鏡の使命はこれからも変わりません。ハワイ観測所は、柔軟かつメリハリをつけた運用でこれからもすばる望遠鏡の成果創出を支えます。すばる望遠鏡の観測データに基づく科学論文は、運用開始から20年経った今も増え続けてお

☆ newscope <解説>

★02 初期の頃はすばる望遠鏡の予算で観測装置開発が行われましたが、現在では、ほぼ国内外の外部資金で開発が行われています。

★03 SWIMSを運用している間、類似の機能を持つ多天体近赤外撮像分光装置MOIRCSは休眠します。

★04 8 m級望遠鏡であるすばる望遠鏡、KECK-I & II、Gemini North、4 m級であるCFHTとUKIRT、JCMTなどの電波望遠鏡、およびハワイ大学等が運営する天文台などから構成されています。

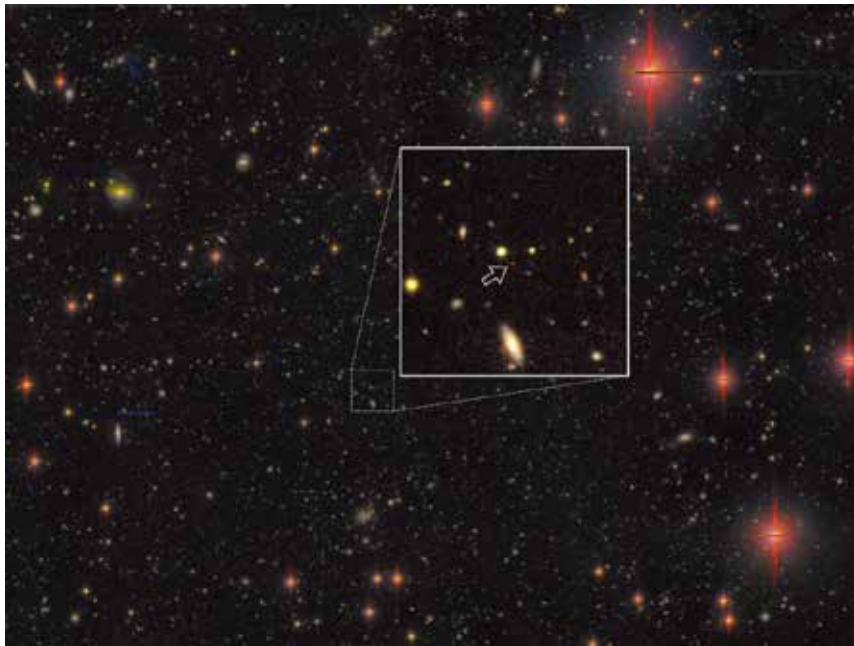


図03 HSCの大規模サーベイで見つかった130億年前の宇宙の巨大ブラックホール。遠方宇宙の暗くて稀な天体を見つけるうえで、HSCは特に威力を発揮する。(クレジット：国立天文台)

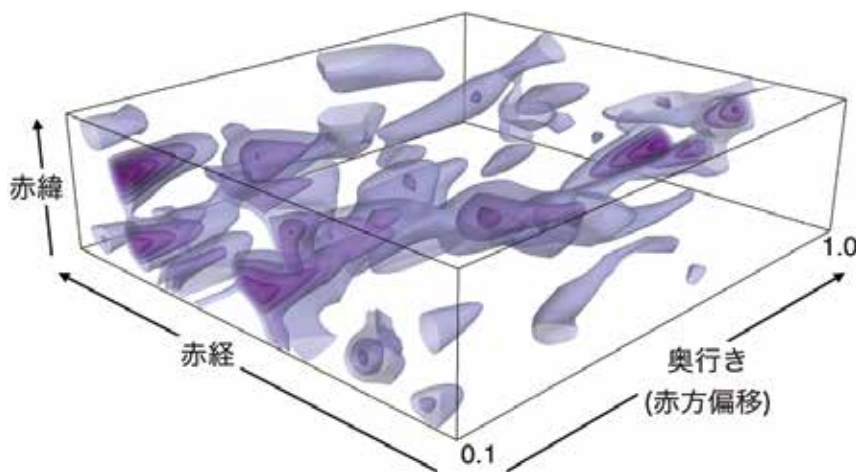


図04 HSCデータによる弱重力レンズ効果を用いて描き出された、10億光年（赤経方向）× 2.5億光年（赤緯方向）× 80億光年（奥行き）の3次元ダークマター分布。すばる望遠鏡の大集光力とHSCの広い観測視野、そしてマウナケアの素晴らしい観測条件が合わさって実現した、史上最大規模のダークマター地図といえる。(クレジット：東京大学／国立天文台)

り、現在は年間で約140本の査読論文が出版されています。平均すると約2.5日に1本のペースですばる望遠鏡からの研究論文が発表されているのです。

すばる望遠鏡が世界の第一線を走り続けるためには、コミュニティのニーズに合致した新規観測装置の開発や新機能の搭載、つまり望遠鏡として進化を続けることが鍵となります。特に新規観測装置の運

用開始に合わせて公募される「戦略枠プログラム」(Subaru Strategic Program;「SSP」)の存在は重要です。このSSPは10年以上前から行われており、2010年代前半には“SEEDS”、“FastSound”といったプログラムが実施されました★05。現在は2014年に開始されたHSCによるSSP、2019年に始まったIRDのSSPが進行中で、その成果が日々発信されているところです。

●HSC-SSP

HSC-SSPは、視野1.75平方度をもつHSCの観測に合計約330夜を投入する、すばる史上最大のサーベイプログラムです。2019年2月と3月の国立天文台ニュースでも「HSCが拓く宇宙」と題して前後編の特集が組まれました。サーベイの完遂にはもう少し時間を要しますが、これまでに中期宇宙の多数の銀河・銀河団・超巨大ブラックホールの発見(図03；文献[1][2][3]など)、重力レンズ効果に基づく史上最大規模のダークマターの3次元地図の構築(図04；文献[4])など、数多くの重要な科学成果を挙げています。2018年にはPASJ誌でHSC-SSPの特集号も生まれ、40本の論文が同時に発表されました。近年はHSC-SSPのデータをもとに学位を取得する大学院生も増えており、我が国の大学院教育においても重要な役割を担っていると言ってよいでしょう。

●太陽系外惑星の観測

太陽系外惑星の研究も進んでいます。近赤外超精密視線速度観測装置IRDの観測によって、TRAPPIST-1（トラピスト-1）とよばれる恒星のまわりの惑星系で、ハビタブルゾーンにある地球型惑星の公転軌道が初めて明らかになりました(p19参照：文献[5])。IRD-SSPは2019年に始まったところですが、まだこれから数多くの驚くような発見を私たちに届けてくれるに違いありません。他にも太陽系外惑星の直接撮像を目指す、すばるの極限補償光学装置SCEAOと近赤外線高コントラスト面分光装置CHARIS

★newscope<解説>

★05 SEEDSおよびFastSoundについては、2013年12月の国立天文台ニュースで特集されています。詳細はそちらをご覧ください。

を用いた原始惑星系円盤の観測(図05; 文献[6]) など、すばる望遠鏡では様々な手法を駆使して惑星形成の謎に挑んでいます。

●マルチメッセンジャー天文学

マルチメッセンジャー天文学とよばれる、多波長横断型の突発天体研究のなかでも歴史に残るイベントは、2015年のブラックホール合体から放たれた重力波の初検出、さらに2017年の中性子星合体による重力波の検出という、当該分野の研究者でなくても心踊った重力波天文学の幕開けといえるでしょう。2017年のイベントではすばる望遠鏡は重力波源の追跡観測に成功し、重力波研究でも重要な役割を担うことができました(図06; 文献[7][8])。

●多様なサイエンスと時間交換

戦略枠としてコミュニティをあげての大規模なプログラムが進行していることで、近年すばる望遠鏡では従来型の小規模グループによる数夜規模の一般共同利用観測はやや減少傾向にあります。しかしすばるの観測時間獲得の競争率は、夜数ベースで約5倍という非常に高い水準が保たれており、大型のプログラムだけでなく、幅広いニーズがあることも分かります。またすばる望遠鏡で10年以上続いているKeck望遠鏡およびGemini望遠鏡との時間交換も、すばるの観測時間同様に高い競争率が維持されています。すばるユーザはすばる望遠鏡だけでなく、マウナケアの他の望遠鏡も利用して幅広いサイエンスを展開しているのです。最近ではすばる望遠鏡とKeck望遠鏡との協調観測による、銀河系中心のブラックホール周りの恒星の運動の観測から一般相対性理論の検証に成功した研究成果(文献[9])なども記憶に新しいところです。

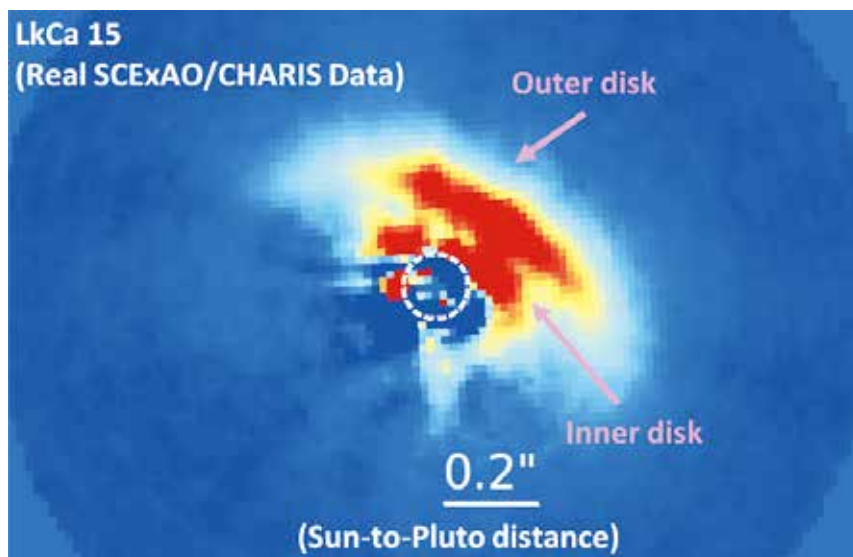


図05 すばる望遠鏡の極限補償光学SCExAOと近赤外線面分光装置CHARISで観測された若い太陽型の恒星LkCa15。二重構造をもつ原始惑星系円盤が見えている。高い空間解像度が実現できる補償光学によって、星形成・惑星形成現場の詳細な理解が進んでいる。

(クレジット: 国立天文台/SCExAO チーム)

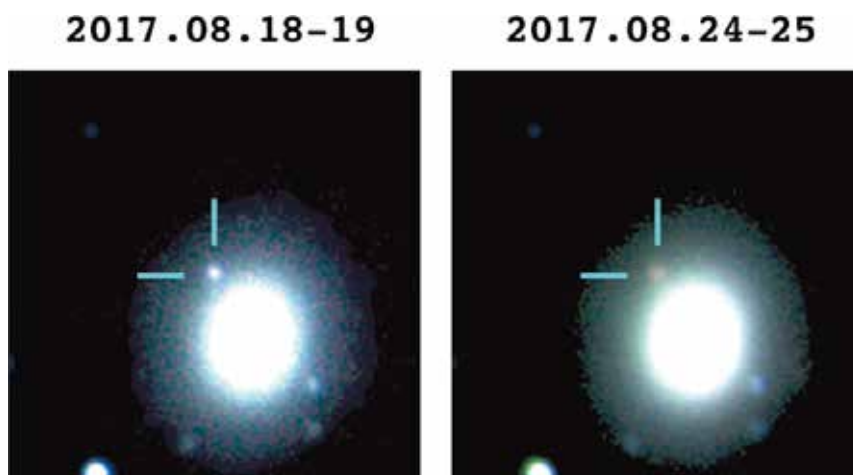


図06 2017年の重力波イベントGW170817の対応天体。すばるHSCによるzバンド画像と南アフリカのIRSF望遠鏡で取得された近赤外(HバンドとKバンド)の画像で3色合成されている。発生から時間が経つにつれてカラーが変化し、近赤外線が明るくなることも分かる。

(クレジット: 国立天文台/名古屋大学)

- 文献[1] Matsuoka et al. 2019, ApJ, Volume 872, Issue 1, article id. L2, 6 pp.
文献[2] Ouchi et al. 2018, PASJ, Volume 70, Issue SP1, id.S13
文献[3] Toshikawa et al. 2018, PASJ, Volume 70, Issue SP1, id.S12
文献[4] Miyazaki et al. 2018, PASJ, Volume 70, Issue SP1, id.S27
文献[5] Hirano et al., 2020, ApJ, Volume 890, Issue 2, id.L27, 7 pp.
文献[6] Currie et al. 2019, ApJ, Volume 877, Issue 1, article id. L3, 8 pp.
文献[7] Utsumi et al. 2017, PASJ, Volume 69, Issue 6, id.101
文献[8] Tanaka et al. 2017, PASJ, Volume 69, Issue 6, id.102
文献[9] Do et al. 2019, Science, 365, 664

次頁以降では、すばる望遠鏡の最新の科学成果をピックアップし、各分野ですばるのサイエンスをリードする方々に解説いただきますが、もちろんここで紹介される成果がす

べてではありません。すばる望遠鏡からは毎年多くの研究成果がリリースされています。ぜひこの機会にすばる望遠鏡のウェブサイトもチェックしてみてください。

巨大惑星の屋根： 宇宙空間へつながる木星の大気を探る

笠羽康正
(東北大学 理学部
惑星プラズマ・
大気研究センター)



北元 (東北工業大)

佐藤隆雄 (北海道情報大)

惑星の大気に「屋根」はない。
それは宇宙空間へ直接つながっている。

地球で暮らす我々には、大気はしっかり地表へ結合して見える。時に大風が吹き大雨が降り、増大するCO₂によって温度が上昇する我が大気では、その変動は下方すなわち地面や海洋から来るように見える。天気予報も雲や旅客機が漂う対流圏（高度約10km程度まで）の物語。しかし晴れた空の向こうには、太陽・月・惑星・星々も見えるはず。大気はこれらが漂う宇宙空間へと地続きでつながる、明確な「屋根」を持たない、不安定な領域である。惑星の形成期には、大量の物質が落下し、大量の大気が流出していった。今も惑星間塵が降っては蒸発し、電子・イオンがぶち当たっては加熱し、水素など軽い原子・分子がゆるゆる流出していく。

こうした惑星と宇宙空間とのやりとりを、我々は東北大ハレアカラ（光赤外）・飯館（電

波）観測施設など地上望遠鏡、JAXAひさき紫外線望遠鏡衛星など宇宙望遠鏡、そして人工衛星や周回探査機で捉え、数値モデルも組み合わせるその過去・現在・未来を見ている。重力でかろうじて繋がれ、組成や太陽距離などで異なる影響を受ける太陽系の惑星大気の追求に道は二つ。1つ目は岩石主体の惑星、すなわち火星・金星やタイタンを地球と共に調べる。似て非なる彼らは「地球の命運を知る」道となる。2つ目は巨大惑星、すなわち木星・土星や天王星・海王星を調べる。宇宙に溢れる惑星系の主役であり、「惑星の命運を知る」道となる。

後者の代表、木星にはNASA Juno 探査機が2016年から周回し、高度4～8千kmまで接近する初の探査機として、電波・磁場・重力場などの観測でこの太陽系最大の惑星の正体に迫っている。本記事は、Juno 探査機を支援する木星の大気の「屋根」の観測、なかでもすばる望遠鏡(図01)による成果をご紹介します。



図01 観測チームの紹介。[左] IRCSによる近赤外観測チーム。左から宇野（現・三菱電機）、私、Pyoさん（国立天文台）。北（現・東北工大）や院生諸氏も参加。[右] COMICSによる中間赤外観測チーム。左から藤吉さん（国立天文台）、Sinclair（NASA/JPL）、佐藤（現・北海道情報大）、Orton（NASA/JPL）、私。北（現・東北工大）や院生諸氏も参加。

木星の「屋根裏」、地球サイズに匹敵する高度へ広がる「熱圏大気」を捉える。

木星は、その強い磁場で地球とは桁違いな量とエネルギーの電子・イオンを捉えている。これらは高度200～数千kmに広がる「熱圏」(図02・上方部)へ降り注ぎ、強力なオーロラ発光を生み出す。地球方向からは木星の昼間側しか見えないため、本来は雲からの明るい太陽反射光に埋もれてしまうが、高度約200km以下の成層圏(図02・中央)に広がるメタンが紫外線・近赤外線の一部を吸収して雲反射光を隠すため、熱圏発光が顔を出す。

紫外線は地球大気を通らず、宇宙望遠鏡からのみ観測できるが、近赤外線は地上観測が可能である。ここではプロトン化水素分子 H_3^+ という見慣れないイオンが光る。岡武史先生(シカゴ大名名誉教授)が見出されたこの発光は、 H_2 に溢れる領域に高エネルギー粒子が降り注ぐ下で生まれ、この宇宙では星間分子雲と惑星の熱圏大気がこの生成条件を満たす。木星では1989年にフランスグループが偶然発見した。

我々はこの熱圏発光をすばる望遠鏡の近赤外線分光器IRCSで観測してきた(図01左)。ガリレオ衛星群を用いたAdaptive Opticsで、探査機に匹敵する空間分解能～250km(～

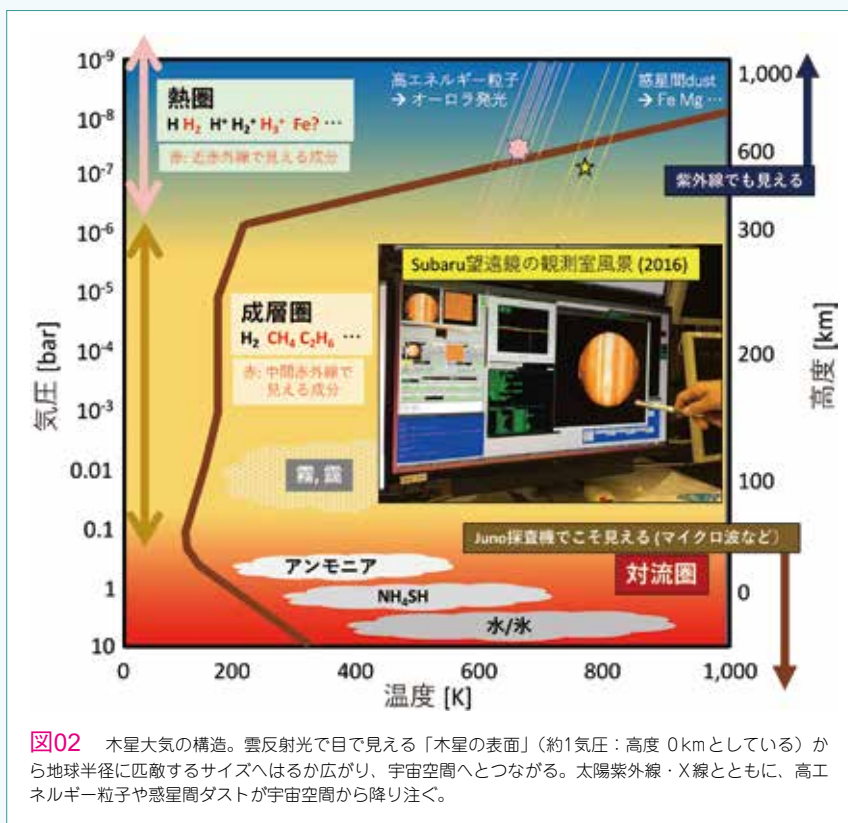


図02 木星大気の構造。雲反射光で目に見える「木星の表面」(約1気圧: 高度0kmとしている)から地球半径に匹敵するサイズへはるか広がり、宇宙空間へとつながる。太陽紫外線・X線とともに、高エネルギー粒子や惑星間ダストが宇宙空間から降り注ぐ。

0.1 arcsec) を達成できる。成果の一例を図03に示すが、①強い発光域が500～1000kmを中心に広がること、②温度は約1000K以上に達すること、③高高度では衝突頻度の低下で熱平衡が崩れていくこと、④ H_3^+ 分子の生

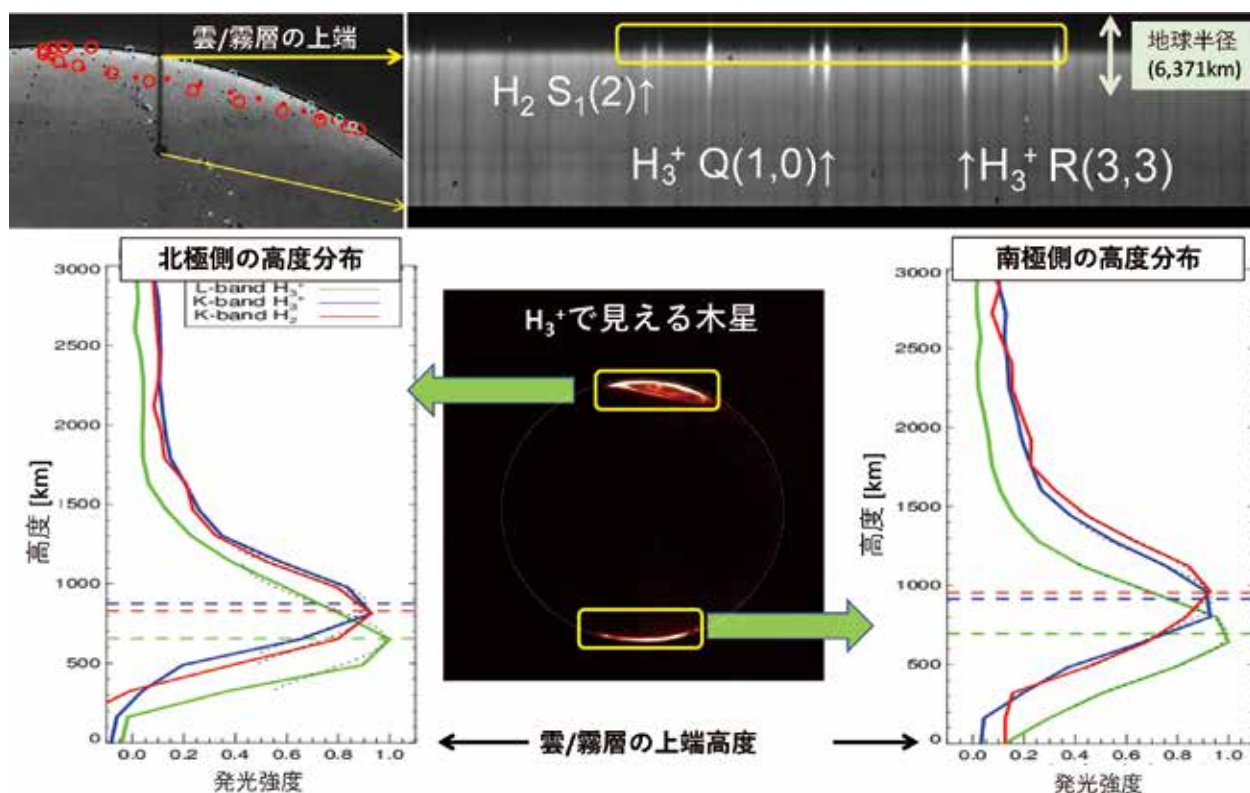


図03 熱圏の水素発光。[上左] hazeが広がる極域にスリット(縦黒線)を当てる。[上右] 分光結果(横軸-波長、縦軸-高度)。連続光の上端は「雲・haze反射で見える“惑星の縁”」。 H_3^+ ・ H_2 発光は更に上、高度数千kmへ広がる。[下中] H_3^+ で見る南北極のリング状発光。数十分周期の脈動現象も発見した。[下左・右] 北極・南極の発光高度分布。500-1000kmで最も激しく発光する。K-band (2 μm) はL-band (3-4 μm) より高温成分を反映。

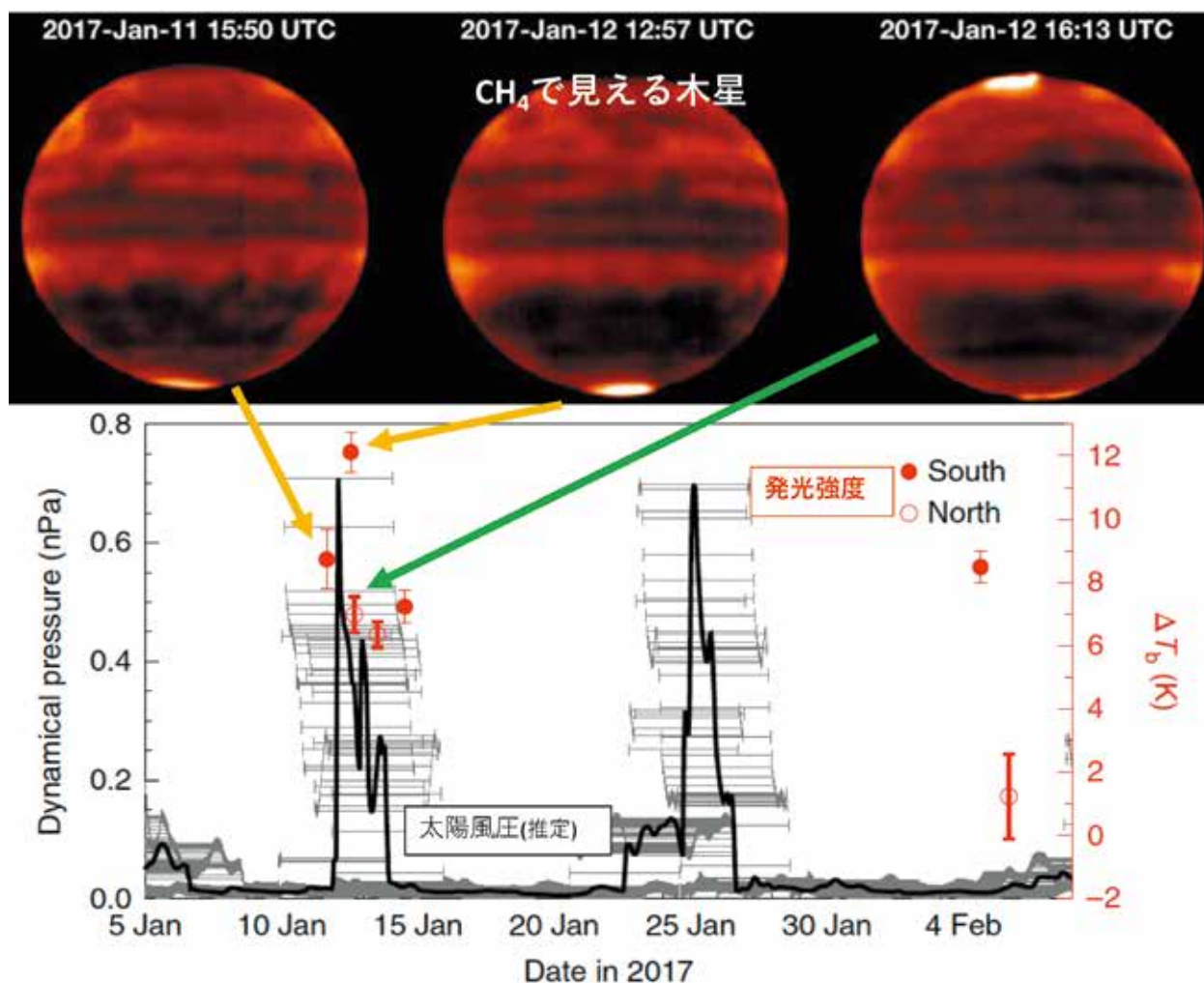


図04 成層圏のメタン (CH_4) 発光。[上] 発光は北極・南極オーロラオーバルの内側を埋め尽くす。同領域ではエタン (C_2H_6) などより複雑な分子も。[下] メタン発光に見える成層圏温度と太陽風圧 (推定) との関係。強い太陽風があり通常期よりも数 K 高温となった。

成・消滅速度に匹敵する数十分周期の脈動があること、などを明らかにしてきた。

一方、水平空間分布には謎を残す。 H_3 発光は、北・南磁極をリング状に囲む紫外線オーロラ発光域 (オーロラオーバル) で最大となった (図03下中)。これは、高エネルギー電子による H_3 分子の生成理論を支持する。一方、近赤外域で同時観測される水素分子 (H_2) 発光は、オーロラオーバルの内側をも埋め尽くした。この領域は紫外線では暗いが、より高エネルギーの粒子が光らせるX線発光で知られる。本領域は太陽風と木星磁気圏の境界域へ磁場でつながっており、境界域に絡む粒子加速・加熱の機構は、Juno探査機でも未解明のトピックである。

最近、この高度で鉄の発光も報告された。我々の観測では H_3 輝線の1つとして認識してきたもので、その真贋は未決着である。鉄であれば、木星に降り注ぐ惑星間ダストに起因するはず。木星近傍のダスト量ははっきりしないが、金属イオンは電離圏の電気伝導度を

介して木星-宇宙空間結合に観測可能な影響を与えることが我々の数値モデルで示されている。今後のテーマとして注目している。

木星の「中二階」、雲の上へはるか広がる「成層圏大気」を捉える。

紫外・近赤外発光をもたらす高エネルギー粒子は、高度200 km以下にある成層圏まで侵入しうる (図02中央)。この領域では下層大気からメタン (CH_4) が拡散上昇してくるため、高エネルギー粒子の衝突でエタン (C_2H_6) などの複雑な炭化水素も作り出される。これらの分子群が中間赤外にも多くの吸収・発光を、我々はすばる望遠鏡の中間赤外線分光器COMICSで観測してきた。波長が長く空間分解能は口径で支配されるこの波長域は、8メートルという大口径が重要である。

2017年1・2・5月の観測 (図01右) では、近赤外線の H_2 発光と同様に極域全体を覆うメタン発光 (図04上) とより複雑な炭化水素を

●論文掲載情報

<近赤外観測>

Watanabe, H.; H. Kita, C. Tao, M. Kagitani, T. Sakanoi, Y. Kasaba (2018). Pulsation characteristics of Jovian infrared northern aurora observed by the Subaru IRCS with adaptive optics. Geophys. Res. Lett. 45, 21, 11,547-11,554, doi:10.1029/2018GL079411.

<中間赤外観測>

Sinclair, J.A., G.S. Orton, J. Fernandes, Y. Kasaba, T.M. Sato, T. Fujiyoshi, C. Tao, M.F. Vogt, D. Grodent, B. Bon-fond, J.I. Moses, T.K. Greathouse, W. Dunn, R.S. Giles, F. Tabataba-Vakili, L.N. Fletcher, P.G.J. Irwin (2019). A brightening of Jupiter's auroral 7.8-micron CH_4 emission during a solar-wind compression. Nature Astronomy 3, 607-613, doi:10.1038/s41550-019-0743-x.

捉えた。宇宙から降下する高エネルギー粒子が成層圏上層部の温度を変動させ、また複雑な炭化水素生成へと進行させている。1日程度の短時間で変動が起きうること、この変動に太陽風圧との相関が見うけられることも発見した。これは、熱圏よりも深い高度まで宇宙空間からの影響が直接及ぶことを示唆する。中間赤外観測は、その能力を持たないJuno探査機を支える上で重要であり、アルマ望遠鏡と共同した対流圏大擾乱の垂直構造のNH₃雲・ガス変動による追跡、雲層の非一様に起因する自転変動を用いた系外惑星の大気変動解釈法の示唆といった成果にもつながってきた。

この高度域はそこを漂う霧・もやでも知られ、これらは炭化水素分子の凝結によるとされる。固体表面のない木星ではこれらは内部へ沈降してしまい、より複雑な有機化合物の生成へとつながることはない。しかし「表面」を有する惑星であればどうか？ 宇宙空間から降り注ぐ高エネルギー粒子が引き起こす大気中の化学反応は地球や火星・金星でも見られ、我々の研究テーマの1つである。これらの惑星でも、形成直後で水素を豊富に含む大気を有した時代には、宇宙からの刺激で有機高分子が生成・蓄積されたことはありえる。現在もメタンを含む大気と固体表面を持つ天体がある。土星の衛星タイタンは、メタンを含む表面で約2気圧に達する大気を持ち、木星極域と同様に炭化水素の霧が浮遊していることが知られる。メタンの雨とともに表面へと落下し地表に集められた物質の行方は？ この衛星をドローンで探査する米国のDragonfly計画が昨年採択されており、若かりし頃の太陽系惑星たちや他の恒星を巡る系外惑星たちの変動と進化にも手がかりを与えてくれるかもしれない。

なお、冷却など費用がかかることもあり、COMICSは我々がコロナ渦中で行った2020年7月末の観測をもってOpen-Useが停止された(図05)。これで中間赤外観測能力を持つ8メートル級望遠鏡はESOのVLT(VISIR)のみとなる。日本における中間赤外線観測は、観測開始に向け整備が進む東大アタカマ天文台TAO 6.5メートルと、開発途上のESA-JAXA 赤外線宇宙望遠鏡SPICA計画へ引き継がれる。

探査機と望遠鏡：宇宙空間と惑星大気のつながりを求めて

太陽系の研究は、世界各国が競争・共同して進める探査機群が到着するたびに飛躍的に進

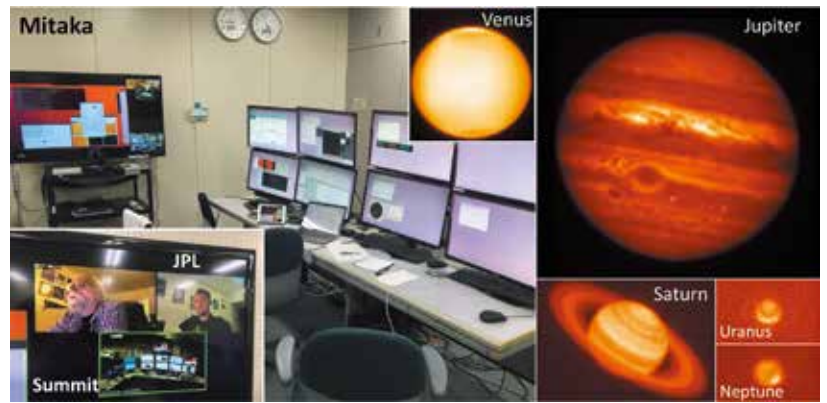


図05 Subaru COMICS Open-Use 最終観測風景(2020/7/28, 30)。コロナ禍の折ながら7月頭から利用可能となった三鷹リモート観測室、今回観測の主役・木星、そして名残を惜しみ巡礼した金星・土星・天王星・海王星のQL像。雲層・CNH系分子・温度場など多様な情報を含むこの波長帯とはしばしのお別れです。COMICSに関わられた皆様、お疲れさまでした。

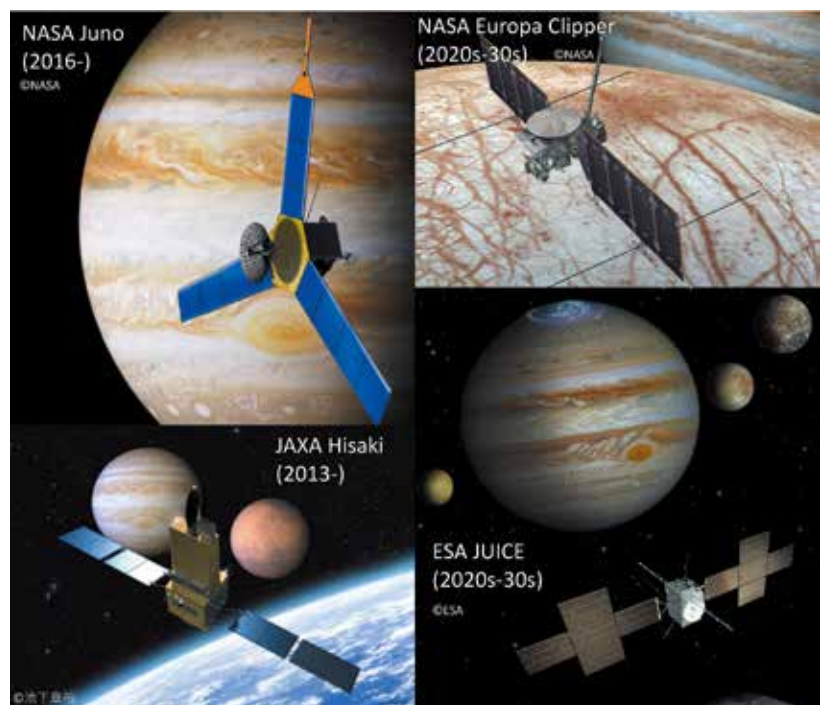
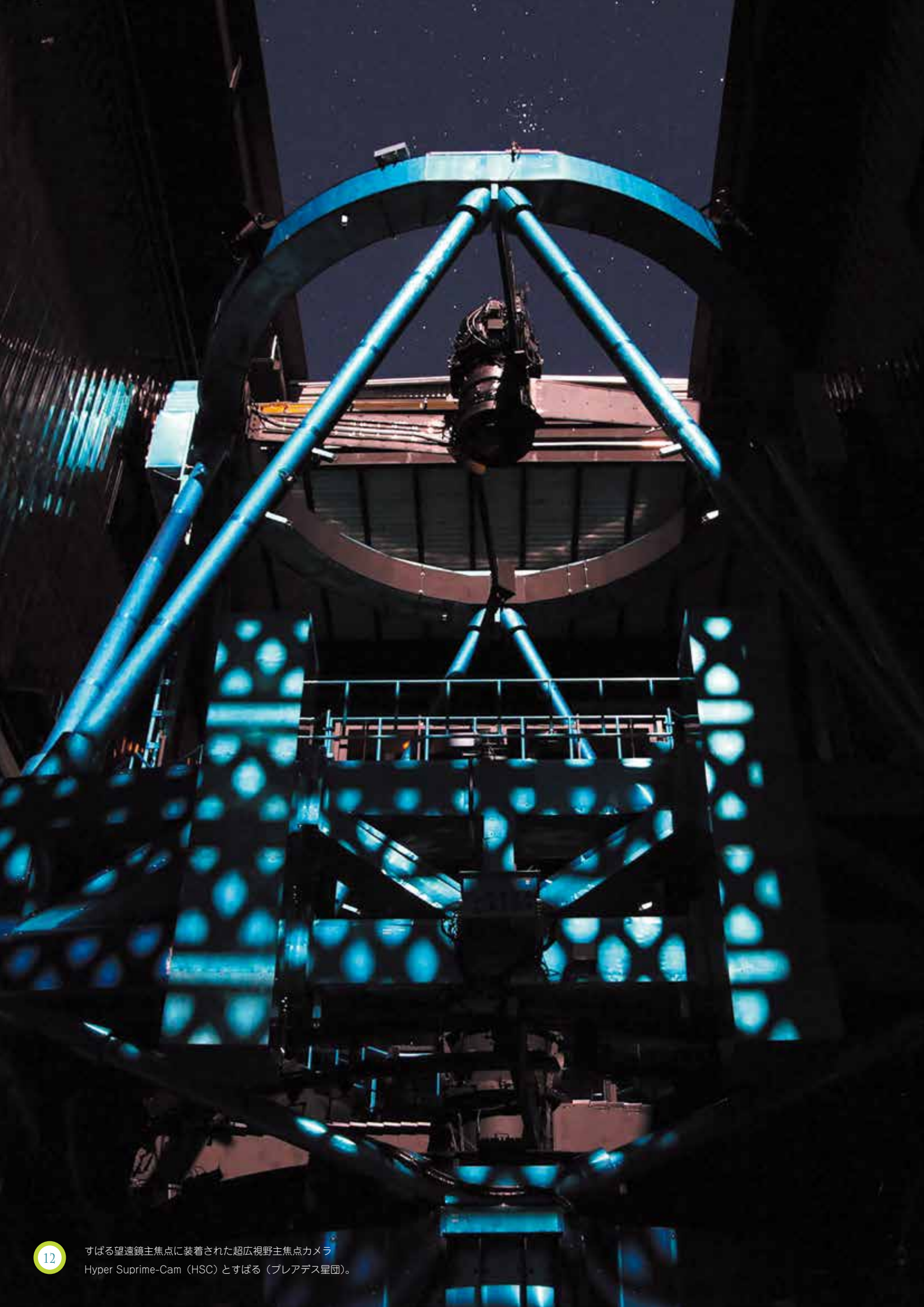


図06 活動中のNASA木星探査機Juno(左上)とJAXA紫外線・極端望遠鏡衛星ひさき(左下)。そして2020-30年代の周回を目指して開発中のNASA Europa Clipper探査機(右上)およびESA JUICE探査機(右下)。

む。木星系では、Juno探査機・ひさき望遠鏡衛星の次に2020~30年代を目指してNASAのEuropa ClipperとESAのJUICEが開発中である(図06)。ひさき望遠鏡を開発した私たちは、JUICEでも搭載観測装置の開発に参加し、コロナ渦の中で懸命に作業中である。とはいえ、探査機は重量制約も厳しく決して万能ではなく、より継続的な地上・宇宙望遠鏡によって支えられている。東北大では口径1.8メートルの新望遠鏡PLANETSをハワイ大・名大・京大の協力で開発途上でもある。ご支援頂けると幸いです。



銀河系の端が見えてきた！

千葉 柊司
(東北大学)



はじめに

私たちの研究チームは、すばる望遠鏡の超広視野主焦点カメラHyper Suprime-Cam (HSC) が撮像したデータを用いて、銀河系の最遠端、すなわち銀河系を形作る星ばしの世界の境界をはじめて見極めることができました。その大きさは半径52万光年もあり、銀河系中心から太陽系までの距離の20倍にもなることがわかりました (図01)。このような銀河系の端まで広がる星ばしは、年齢が120億年前後の最長老の星々で、銀河系の初期に生まれたものであることから、銀河系がどのように形成されたかを知る上で大変重要な手がかりを与えてくれます。

銀河系の全体構造とハロー

私たちが住む銀河系は、大きく分けて天の川にあたる銀河系円盤部とそれを取り囲むハローと呼ばれる広大な領域から構成されています。天の川には太陽を含めた約1000億個の星が円盤状に分布していて、年齢が数10億年の若い星でできています。一方、ハローには年齢が120億年前後の古い星が約10億個、球状星団★01が約150個ほど分布していて、天の川の部分を囲む広大な領域に渡っています (図01)。つまり、ハローには銀河系の初期に生まれた星があり、銀河系が形成された当初はその大きさは現在の天の川の部分に比べてたいへん大きな状態であったことになります。これは銀河系が初期に多くの小銀河の合体を経て形成され、その痕跡が広範囲に分布する年齢の古い星として残っているからです。

では一体、このハローはどこまで広がっているのでしょうか。それを知るためには、ハロー全体に広がっていて、かつハローの端にあっても同定できるような明るい目印となる星を使うと便利です。そのようなものとして、青色水平分枝星 (Blue Horizontal Branch stars: BHB星・p14かこみ参照) やこと座RR

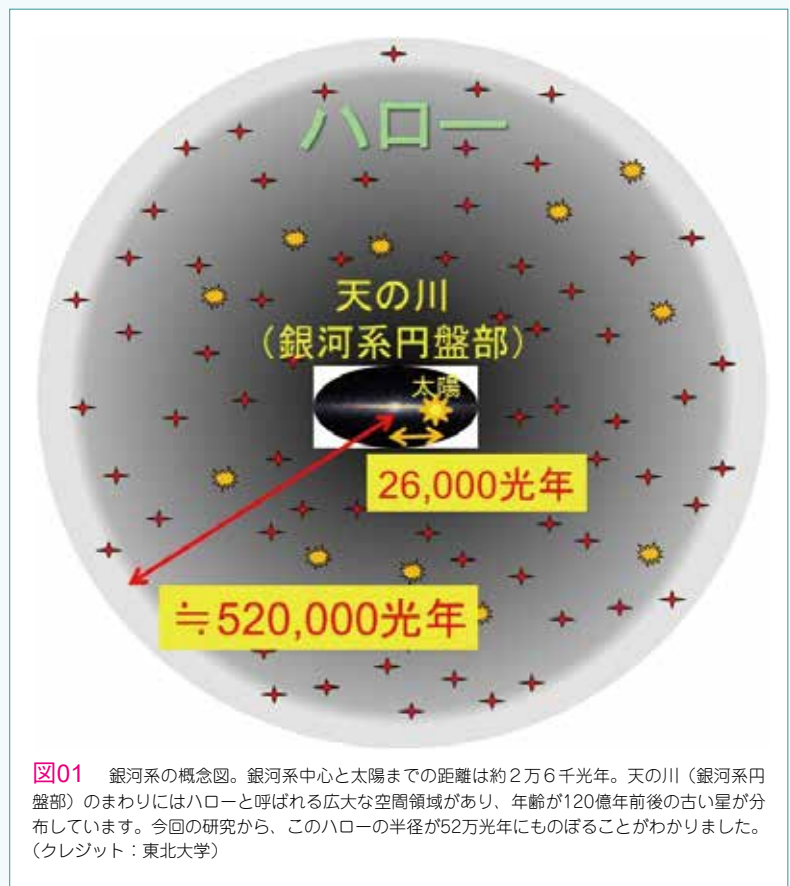


図01 銀河系の概念図。銀河系中心と太陽までの距離は約2万6千光年。天の川（銀河系円盤部）のまわりにはハローと呼ばれる広大な空間領域があり、年齢が120億年前後の古い星が分布しています。今回の研究から、このハローの半径が52万光年にものぼることがわかりました。（クレジット：東北大学）

型変光星と呼ばれる明るい星があり、絶対等級がほぼ一定なので銀河系の中の標準光源として使用することができます。これまでもこれらの星を用いて銀河系ハローの地図作りが行われてきましたが、その観測には中口径望遠鏡が使われてきたため、銀河系ハローの端にあるような暗い星を捉えることはできませんでした。

Hyper Suprime Camによるハローマッピング

このような暗い星の探査には、8.2メートルという大口径を持つすばる望遠鏡と超広視野焦点カメラHSCの組み合わせがたいへん威力を発揮します。なぜなら、遠方にあるハロー星を検出するためには広い視野を暗い等級まで探査する必要があり、すばる望遠鏡

★ newscope <解説>

★01 球状星団

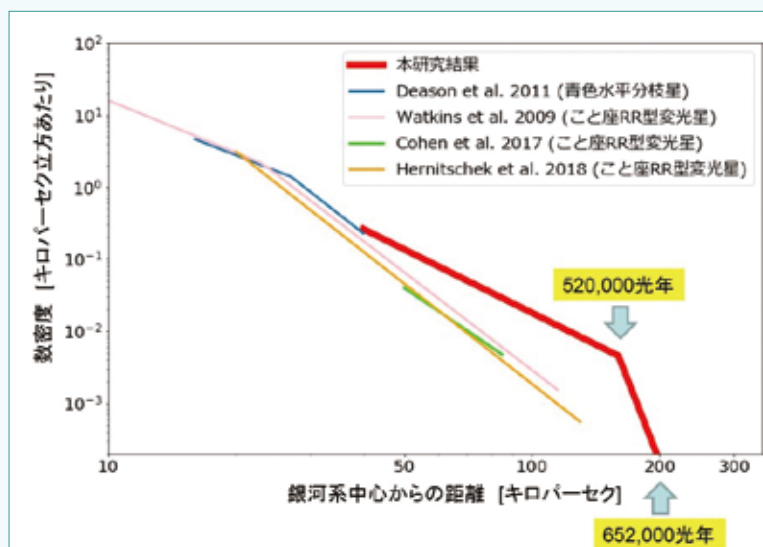
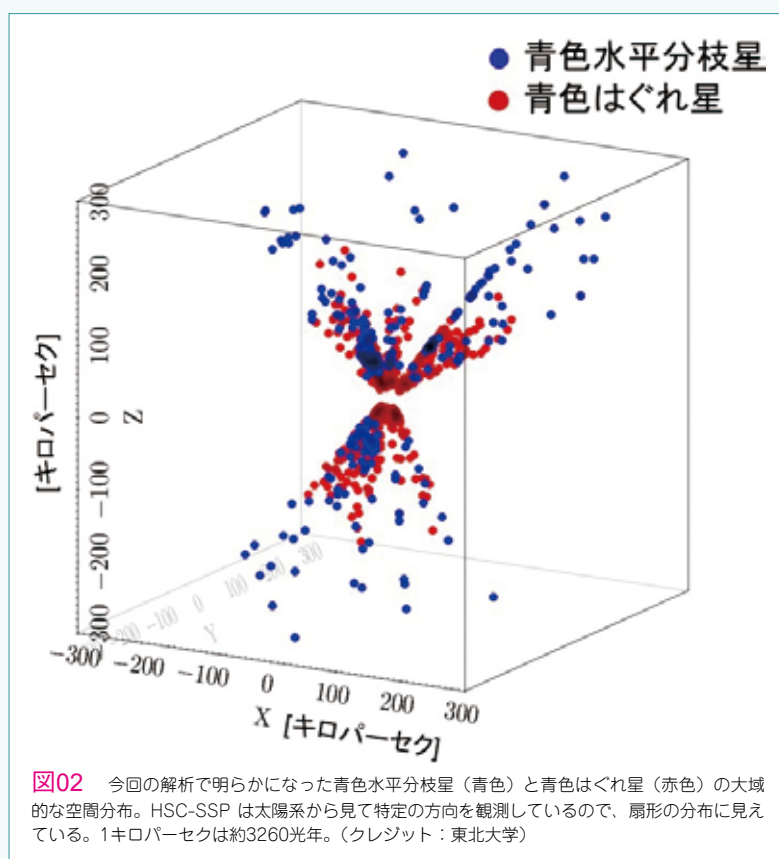
約10万個の星が半径30光年程度の小さな球状の領域に密集する星団。種族IIに分類される星からなり、銀河系の初期に形成されたと考えられている。

とHSCは世界で最も良い組み合わせだからです。私たちは、HSCの戦略枠プログラム（Subaru Strategic Program：SSP）で行われている広域測光サーベイのデータを用い、さらに銀河系ハローの地図を作るための星としてBHB星に着目しました。このタイプの星を同定するには、まずHSC-SSPの観測データの中から点源である銀河系内の恒星を選び、さらにこの中から複数の測光バンドを組み合わせさせてBHB星の候補天体を抽出します。この方法では、他の点源天体（A型スペクトルの主系列星で通称青色はぐれ星、白色矮星、クエーサー、ならびに遠方銀河）を天体の色の情報からうまく取り除く必要があります。注意深い統計解析が必要になります。

この解析を行い銀河系ハローにおけるBHB星の大域的な分布を導出したのは、当時東北大学大学院修士学生の福島徹也さんです。福島さんは、HSC-SSPの測光観測で用いられる g, r, i, z バンドのデータを組み合わせた天体の色の情報から、BHB星の候補天体を確率論的に導出するプログラムを開発しました（図02）。この方法では太陽系からおおよそ120万光年の距離まで星の性質を詳しく調べることができるので、考えられる銀河系ハローの端を十分にとらえることができます。ちなみに、これまで行われてきた銀河系ハローの地図作りでは、距離にしてせいぜい32万光年くらいまでしかカバーできなかったのが、銀河系の端までは届きませんでした。BHB星の空間分布は、図03に示すように銀河系中心からの距離とともに減少する傾向を示します。さらに、半径が約52万光年のところで急激に数が落ちていきますので、このあたりが銀河系ハローの境界になっている可能性がとても高い結果となりました。このように銀河系の最遠端を捉えることができたのは世界ではじめてで、まさにすばる望遠鏡とHSCのおかげです。

銀河系形成への示唆

このような銀河系ハローの特徴的な分布は、銀河系形成過程に重要な示唆を与えます。特に、動径分布がハローの内側で急な一方、今回のBHB星の結果から外側で緩やかになる傾向（図03）は、最近の数値シミュレーションの結果と合致しています。これは、内側のハローは先に生まれ外側は最近の矮小銀河合体から形成されたことを示します。また、このような恒星系ハローの空間的な大きさはダークハロー★02のそれに匹敵しており、ハ



ローの合体過程を理解する上で重要な制限になります。ちなみに、アンドロメダ銀河のハローに関する観測研究も進んでおり、今のところ中心から約53万8千光年の距離までハロー領域が広がっていることが確認されています。アンドロメダ銀河ハローは銀河系ハローと他の面で違っていることが多く、これは銀河系と異なる合体史を経て形成されたことを反映していると考えられています。

newscope＜解説＞

★02 ダークハロー

暗黒物質であるダークマターがその互いの重力で集まったハロー領域のことをいう。銀河系ではその総質量は太陽の1兆個分になり、光って見える星の10倍程度に相当する。

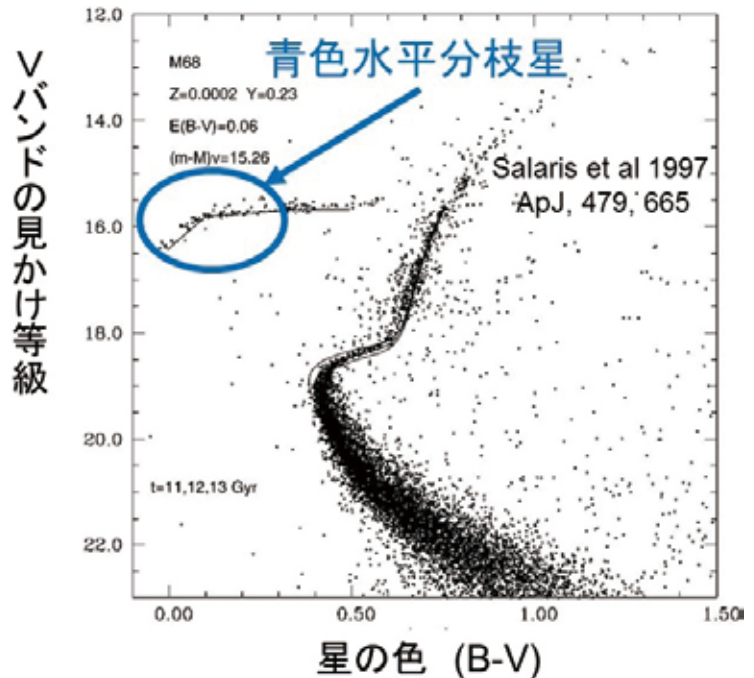
終わりに

この成果を共同研究者の小宮山裕さん（国立天文台）に勤められて表題と同じタイトルでプレスリリースをしました。専門家である私たちにとっては今回の成果はそれほど驚くこともなく普通に受け止めていましたが、（わかりすぎるタイトルからか）たくさんのメディアから質問が来てまた取り上げてくださりました。ある新聞社から来た電話では、「ネット検索すると銀河系の大きさは（円盤部に相当する）半径5万光年と書いてあり、今回は大発見なのか？」といった質問がありました。そこで、丁寧に回答したところ、初めて聞いてよく理解できたという感想をいただきました。銀河系の構造や大きさは実際どういったものなのか、一般の人にも多少ながら伝わったと思い、プレスリリースをして良かったなと痛感した次第です。

●論文掲載情報

Fukushima, T. et al. 2019, “The stellar halo of the Milky Way traced by blue horizontal-branch stars in the Subaru Hyper Suprime-Cam Survey”, PASJ, 71, 72.

●青色水平分枝星とは、太陽よりも軽い小質量の星で年齢が古く進化が進んだ星で、その中心部でヘリウムが核融合反応を起こして輝いています。星の色・等級図の中で絶対等級が星の色によらずある一定の明るさになっていて、図の中で水平に分布する様子を示すので水平分枝星と呼ばれます。水平分枝星の中で、色が青いもの（同じ水平分枝にあること座RR型変光星よりも青いもの）を青色水平分枝星といいます。



グラフは銀河系の球状星団M68の色・等級図。青色で囲んだ領域にある星が青色水平分枝星（Salaris et al. 1997, ApJ, 479, 665より）



すばる望遠鏡（左）に取り付けられるHSC（右）。

すばる望遠鏡、 130億光年かなたの宇宙に銀河団を発見



播金優一
(東京大学
宇宙線研究所)



宇宙の構造の屋台骨、銀河団

現在の宇宙には、1000個程度の銀河が集まった「銀河団」★01が存在しています(例: 図01)。例えば、我々の地球から最も近い銀河団であるおとめ座銀河団には3000個以上の銀河があります。銀河団は宇宙で最も質量の大きな天体であり、さらに銀河団同士はお互いに結びつき合っておりより大きな構造(宇宙の大規模構造)を作っています。そのため銀河団は宇宙の構造の要であり、138億年の長い宇宙の歴史の中でどのように銀河団が形作られてきたのかを調べることは天文学における重要な課題のひとつです。

銀河団の形成起源に迫るために、天文学者たちは銀河団の祖先だと考えられている「原始銀河団」★02を探してきました。原始銀河団は昔の宇宙で確認できる形成途中の銀河団で、10個程度の銀河が密集している天体のことです。これまでの観測により20個ほどの原始銀河団が見つっていますが、その中で最も昔のものは、2012年にすばる望遠鏡がかみのけ座の方向の「すばる深宇宙探査領域(Subaru deep field; SDF)」で発見した、128.7億光年かなた★03(128.7億年前の宇宙)の原始銀河団でした。



図01 地球から54億光年かなたの宇宙にあるMACS1149銀河団。中心には巨大銀河が存在する。(credit: STScI)。

すばる望遠鏡を用いた原始銀河団探査

このような原始銀河団はいつの時代から存在していたのでしょうか? もっと昔の宇宙にも原始銀河団はあったのでしょうか? それを知るためには、なるべく昔、つまり遠くの宇宙を調べる必要があります。しかし、原始銀河団は周辺に比べて格段に密度が高い特別な領域なので、稀な天体であり、簡単には見つかりません。そこで私たちは広い視野を持つすばる望遠鏡の最新撮像装置「ハイパー・シュプリーム・カム(Hyper Suprime-Cam; HSC)」を使い広範囲を探査することで、数少ない原始銀河団を含む広大な領域の宇宙の地図を作りました(図02)。

★ newscope <解説>

★01 銀河団

数千個の銀河によって形成される銀河の集団。ダークマターを含めた総質量は 10^{14} - 10^{15} 太陽質量で、宇宙に存在する最も重い自己重力系(自らの重力で形状を保っている系)である。

★02 原始銀河団

現在の銀河団に進化すると予想される過去の銀河の集団。主に宇宙年齢が約30億年よりも若い昔の宇宙で見つかる。

★03 距離

「128.7億光年かなたの宇宙」とよく表現されるが、実際には宇宙は膨張しているため現在は128.7億光年よりもさらに遠い場所に存在している。例えば、128.7億年前の銀河から発せられた光は128.7億光年の距離を旅して地球に届くが、光を発した銀河は現在の宇宙では300億光年ほど離れてしまっている。

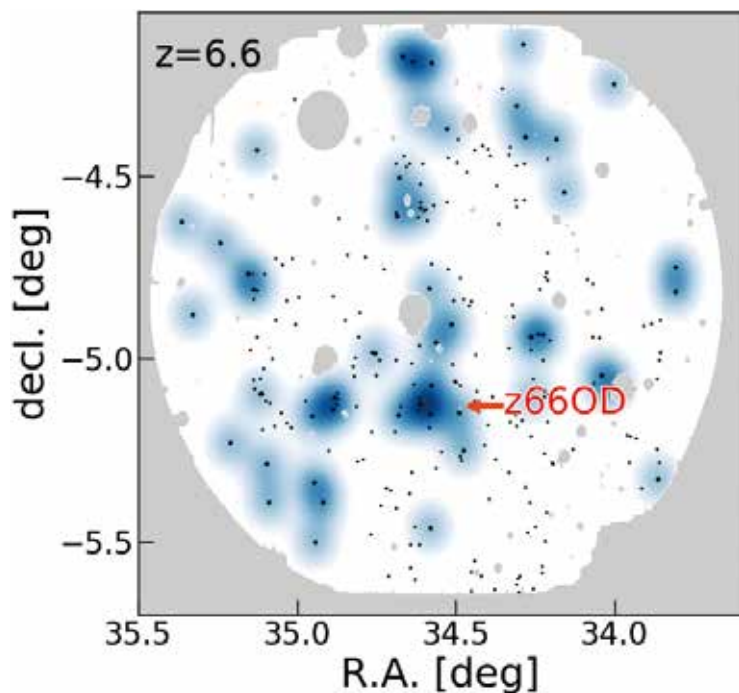


図02 129.7億年前(赤方偏移 $z=6.6$)の銀河の分布図。横軸が赤経、縦軸が赤緯。黒い点が銀河の位置を示し、青色が濃いほど銀河の密度が高いことを表している。赤矢印の領域に銀河が通常の15倍密集している最遠方原始銀河団z660Dがある。(Harikane et al. 2019より改変)

最遠方原始銀河団の発見

すばる望遠鏡のHSCによる探査の結果、私たちは宇宙地図のくじら座の方向に、銀河が予想に比べて15倍密集している原始銀河団の候補「z66OD」を発見しました。さらにケック望遠鏡およびジェミニ望遠鏡による追加分光観測により、12個の銀河から赤方偏移した水素輝線を検出し（図03）、これらの銀河が地球から129.7億光年の先に存在していることを突き止めました。図04のように12個の銀河は3次元図の中でも密集しており、この観測結果からz66ODは、129.7億光年かなたの宇宙に存在する原始銀河団であることがわかりました（p18・図05）。これは、2012年にすばる深宇宙探査領域で発見された原始銀河団の最遠記録を約1億光年も塗りかえる、現在知られている中で最も遠い原始銀河団の発見です。

不思議な巨大銀河「ヒミコ」の位置と活発な星形成活動

興味深いことに、z66ODの12個の銀河の中には、2009年にすばる望遠鏡によって発見された、巨大ガス雲天体「ヒミコ」がありました（p18・図06）。ヒミコのような巨大天体は質量が大きいので、同じように質量が大きいと考えられる原始銀河団の中に存在すること自体は不思議ではありません。実際に現在の宇宙に存在する銀河団の中心にも、brightest cluster galaxy (BCG) と呼ばれる巨大銀河が存在することが知られています。しかしヒミコは原始銀河団の中心ではなく、中心から5000万光年も離れた位置にいました。どうしてヒミコが中心に位置していないのかはまだわかりませんが、これは銀河団と巨大銀河の関係を理解する上で重要な手がかりになるのかもしれません。

さらに私たちはすばる望遠鏡、イギリス赤外望遠鏡、スピッツァー宇宙望遠鏡の観測結果をもとに、z66ODを構成する銀河の星形成の様子を調べました。その結果、z66ODに属する銀河では、同じ時代、同じ重さの他の銀河に比べて5倍もの星が生まれていることがわかりました（p18・図07）。なぜz66ODの中の銀河で星が効率よく生まれているのか、その原因はわかりません。一つの可能性として、z66ODは質量が大きいために、周りの大規模構造から星の材料であるガスが大量に供給され、星の生まれる効率が高いことが考えられます。

今回の発見により、活発に星を作りながら

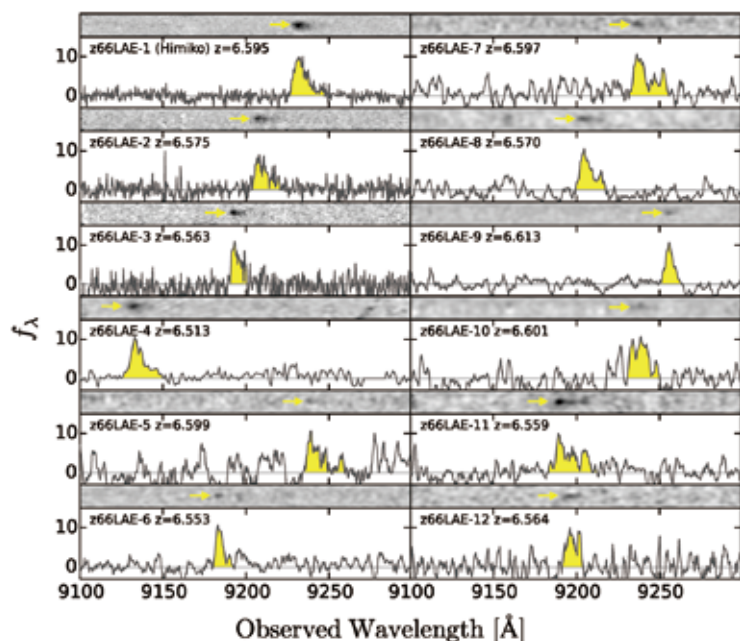


図03 ケック望遠鏡やジェミニ望遠鏡等を使った追加分光観測によって得られた、z66OD原始銀河団を構成する12個の銀河から検出された水素輝線のスペクトル。横軸が波長、縦軸が波長ごとの光の強さ。黄色で示された信号が赤方偏移した水素輝線（ライマンアルファ輝線）で、これらの銀河が129.7億光年先の宇宙にあることを示している。（Harikane et al. 2019より）

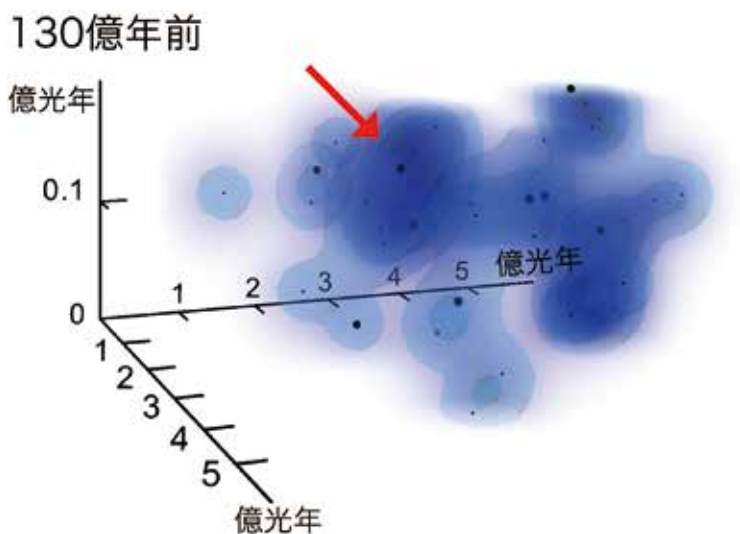


図04 今回の研究によって得られた銀河の分布の3次元図。黒い点が銀河の位置を示し、青色が濃いほど銀河の密度が高いことを表している。赤色の矢印の先が今回発見された観測史上最も遠方にある原始銀河団z66OD。図の上方向に伸びる軸が奥行きを、手前と右方向に伸びる軸がそれぞれ赤経・赤緯を表している。（credit：国立天文台/Harikane et al.）

銀河団へと成長する原始銀河団が、宇宙年齢が8億年の時代（現在の宇宙年齢の6パーセント以下の時代）の初期宇宙に既に存在していたことがわかりました。一方で、近年の観測により原始銀河団には、塵に覆われた巨大な銀河★04も存在していることがわかってきています。今回見つかったz66ODにはまだそのような銀河は見つかりませんが、今後アルマ望遠鏡などの観測が進むと、そのような塵に覆われた巨大銀河も見つかり、z66ODの全貌が明らかになるかもしれません。

★ newscope <解説>

★04 塵に覆われた巨大な銀河
今回の研究で筆者らが同時に調べた128億光年かなたの原始銀河団には、塵に覆われた巨大な銀河が複数存在していることが示唆されています。

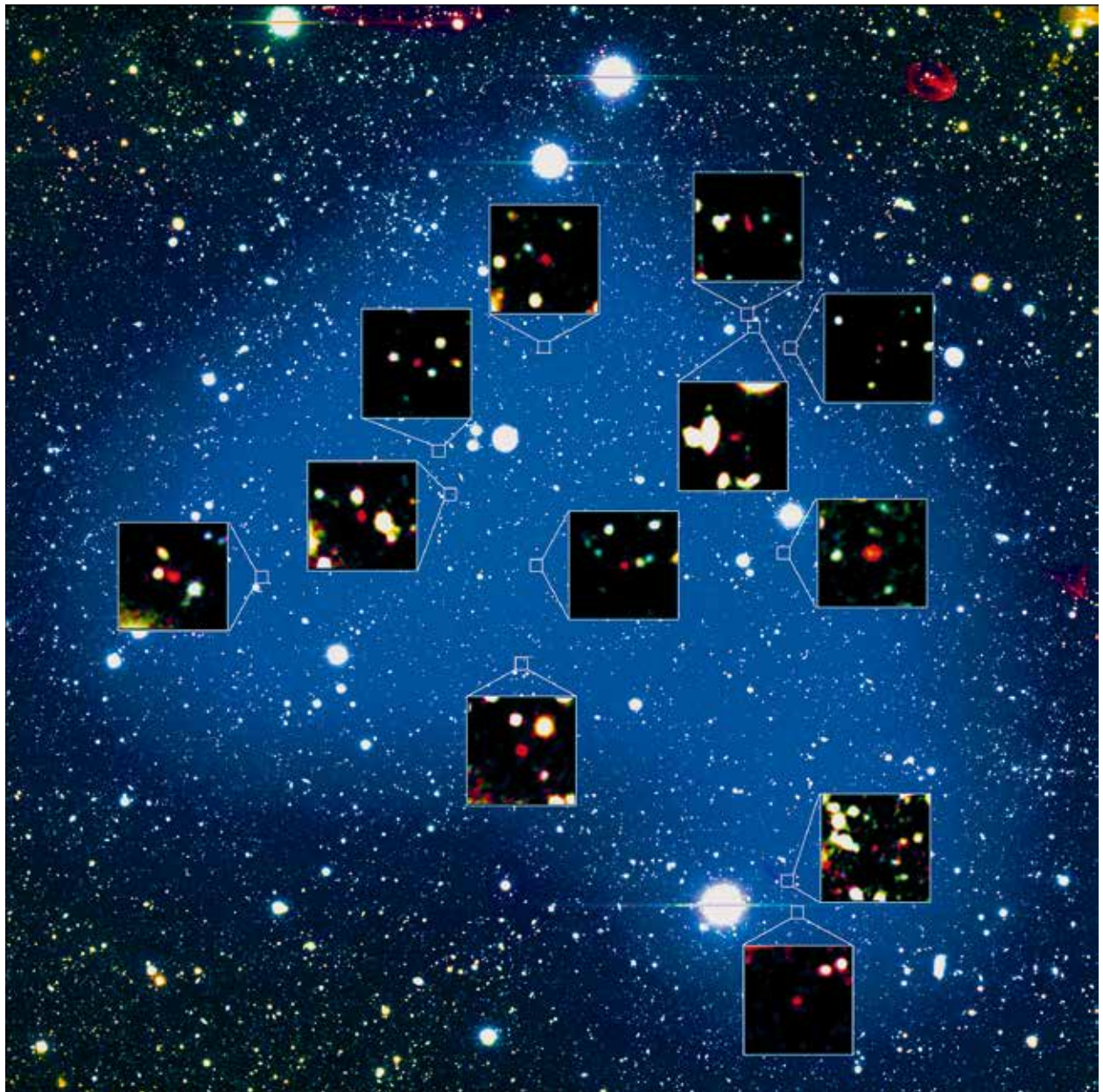


図05 今回発見された観測史上最も遠方にある原始銀河団（z660D原始銀河団）の擬似カラー画像。すばる望遠鏡による3色の観測データを合成することで、画像に色をつけている。青色の部分でz660D原始銀河団で、青色の濃さは原始銀河団を構成する銀河の天球面密度を表す。12個の拡大図の中心にある赤い天体が、原始銀河団に存在する12個の銀河。（credit：国立天文台/Harikane et al.）



図06 130億光年かなたの宇宙に存在する巨大ガス雲天体ヒミコの想像図。（credit：国立天文台）。

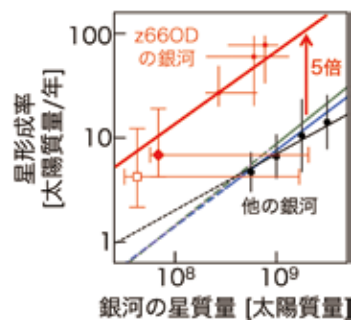


図07 最遠方原始銀河団z660Dの中の銀河の星形成の様子。横軸が銀河の星質量、縦軸は星形成率で、一年あたりに生まれる星の量を示している。赤色で示されたz660Dの銀河は同じ時代の他の銀河に比べて、星形成率が5倍ほど高い。（Harikane et al. 2019より改変）

●論文掲載情報

Harikane et al. 2019, “SILVERRUSH. VIII. Spectroscopic Identifications of Early Large Scale Structures with Protoclusters Over 200 Mpc at $z \sim 6-7$: Strong Associations of Dusty Star-Forming Galaxies”, *ApJ*, 883, 142

第二の地球候補の軌道の傾きを制限： すばる望遠鏡の新分光器IRD

平野照幸
(東京工業大学)



田村元秀
(東京大学、
アストロバイオロ
ジーセンター)



はじめに

1995年の太陽型星まわりの系外惑星の発見は2019年度ノーベル物理学賞を受賞しました。それ以降、数千個もの多種多様な惑星が発見・確認されていて、系外惑星分野は天文学・惑星科学で最もホットな話題であるだけでなく、生物学・化学など広い分野を巻き込みつつアストロバイオロジー（宇宙における生命の起源・進化・伝播の研究）への新しい視点を与えています。それに伴って、系外惑星の研究でも地球に似た小さな惑星への興味が増しています。

系外惑星の軌道の傾き

最初に発見されたペガサス座51番星b★01を含め、これまで見つかった系外惑星の多くは太陽系の惑星とは全く異なった特徴を持っています。太陽系のように、一番内側の惑星が公転周期約88日の地球よりもずっと軽い岩石惑星というのはむしろ稀で、過半数の太陽型星が周期100日以内に地球以上の質量（最も一般的なのは数倍から30倍）の惑星を持つことが分かっています。ではこのような短い周期の大きめの惑星はどのようにして形成されたのでしょうか。

系外惑星の発見まで、惑星の形成理論は主に太陽系の惑星を説明するために作られていました。伝統的な形成モデルでは、惑星は原始惑星系円盤と呼ばれるガスと塵でできた恒星を取り囲む円盤状の天体の中で形成され、恒星に近いところでは固体粒子が少ないことから小さな惑星が、恒星から遠いところでは水が核となってガスを集めることから巨大な惑星が形成されると考えられていました。その際、全ての惑星は同じ円盤内で形成されるため惑星の軌道面はお互いによく揃ったものになり、その面は恒星の自転軸と直交するこ

とが予想されました。実際、太陽系では全ての惑星の軌道面の軸は太陽の自転軸と約7度以内でよく揃っています。

ところが系外惑星に目を向けてみると、これが必ずしも事実ではないことが明らかになりました。恒星の前を系外惑星が周期的に通過するような系を「トランジット惑星系」と呼びますが、惑星による恒星面通過（トランジット）が起こっている系に対して恒星の分光観測を実施すると、「ロシター効果」と呼ばれる現象（図01）によって恒星の自転軸と惑星の公転軸のなす角度（図02）を制限することができます。こうした「系外惑星の軌道の傾き」を調べる研究は2000年代から実施されてきましたが、驚くべきことに巨大惑星に対するロシター効果の観測によって多くの系外

★ new scope <解説>

★01 ペガサス座51番星b

ペガサス座51番星は、その周りに系外惑星が発見された最初の太陽型恒星です。系外惑星の名前は、見つかった順（あるいは公転周期が短いものから順）に、その中心にある恒星名の後にb, c, d...と小文字のアルファベットを付与する習慣になっています。ペガサス座51番星bは、公転周期が4.23日、質量が0.47木星質量の木星型の系外惑星を表します。

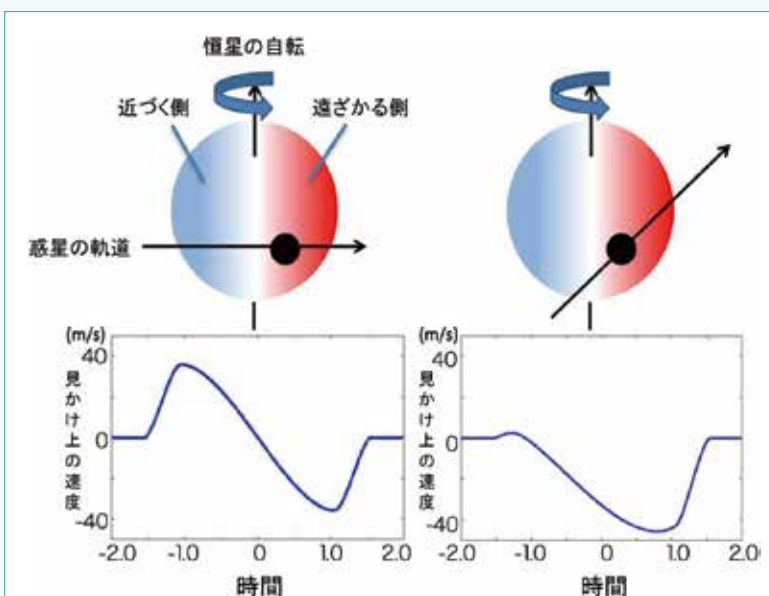


図01 ロシター効果の概念図。恒星は一般に自転しているため観測者から見て近づいてくる側と遠ざかる側の半分ずつに分かれます。この恒星面の一部を惑星が隠すことを「トランジット」と呼びますが、近づいている側を惑星がトランジットするとき恒星は見かけ上遠ざかって観測されます。逆に遠ざかる半球を惑星が隠すと恒星は見かけ上近づいて見えます。このトランジット中の恒星の視線方向の速度を調べることで、惑星が恒星面上をどの様に通過したかを知ることができます。図の左半分は惑星の公転軸と恒星の自転軸が揃っている場合で、右半分は2つの軸がずれている場合に相当します。

惑星系（全体の3分の1程度）では恒星の自転軸と惑星の公転軸が揃ってないことが判明しました。このような軌道の傾いた惑星がどのようにして形成されたのかは未だに議論が続けられていますが、現在までに「複数の惑星が形成された後お互いの重力によって軌道面がかき乱された」とするものや「最初から円盤自体が傾いていた」とするものまで様々な理論モデルが提唱されています。

ト ラピスト-1系

最近発見された系外惑星系の中でもトラピスト-1系は最も注目を集めている惑星系です。トラピスト-1は、有効温度約2500Kと恒星の中では極めて低温のM型矮星で、そのまわりに7つの小型系外惑星（0.77~1.15地球半径）がトランジット法によって発見されています（図03、04）。これらトランジット惑星の公転周期は約1.5日から19日といずれも短いですが、恒星が低温かつ小さい（半径は太陽の10%程度）ことから、7つの惑星のうちトラピスト-1e、f、gについては液体の水が存在可能な軌道領域（ハビタブルゾーン）に存在すると考えられています。

これらの惑星は異環境における第二の地球と言えるでしょう。太陽系では公転周期88日の水星が最も内側の惑星であることを考えれば、トラピスト-1系がいかに太陽系とは異なる姿をしているか分かります。トラピスト-1系がどのようにして誕生して発展してきたのかは現在でも理論的な研究が進

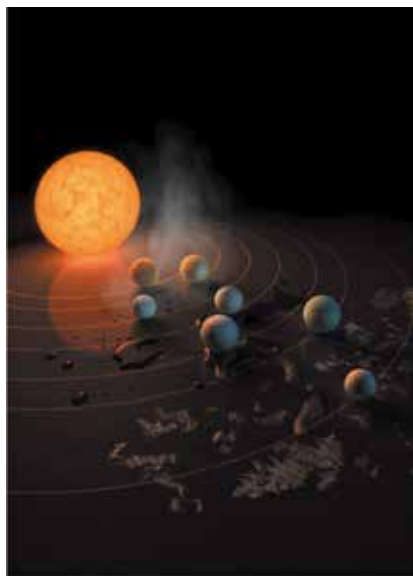


図04 トラピスト-1系の想像図。惑星の軌道長半径等は実際のものとは異なります。（クレジット：NASA and JPL/Caltech）

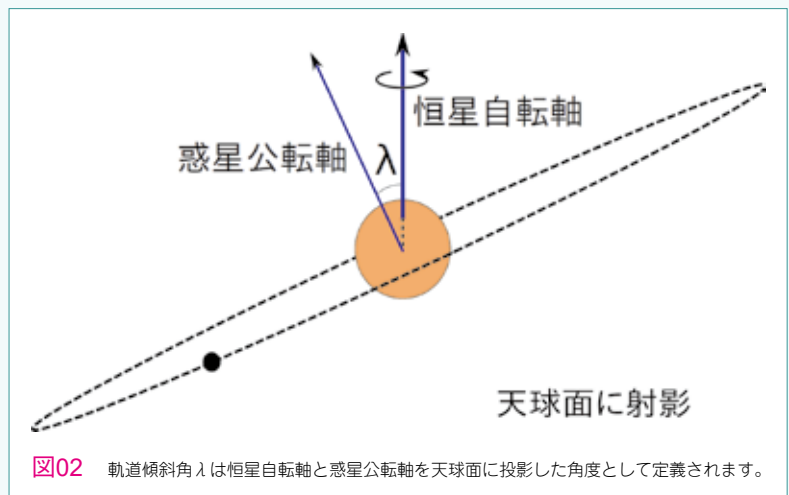


図02 軌道傾斜角λは恒星自転軸と惑星公転軸を天球面に投影した角度として定義されます。

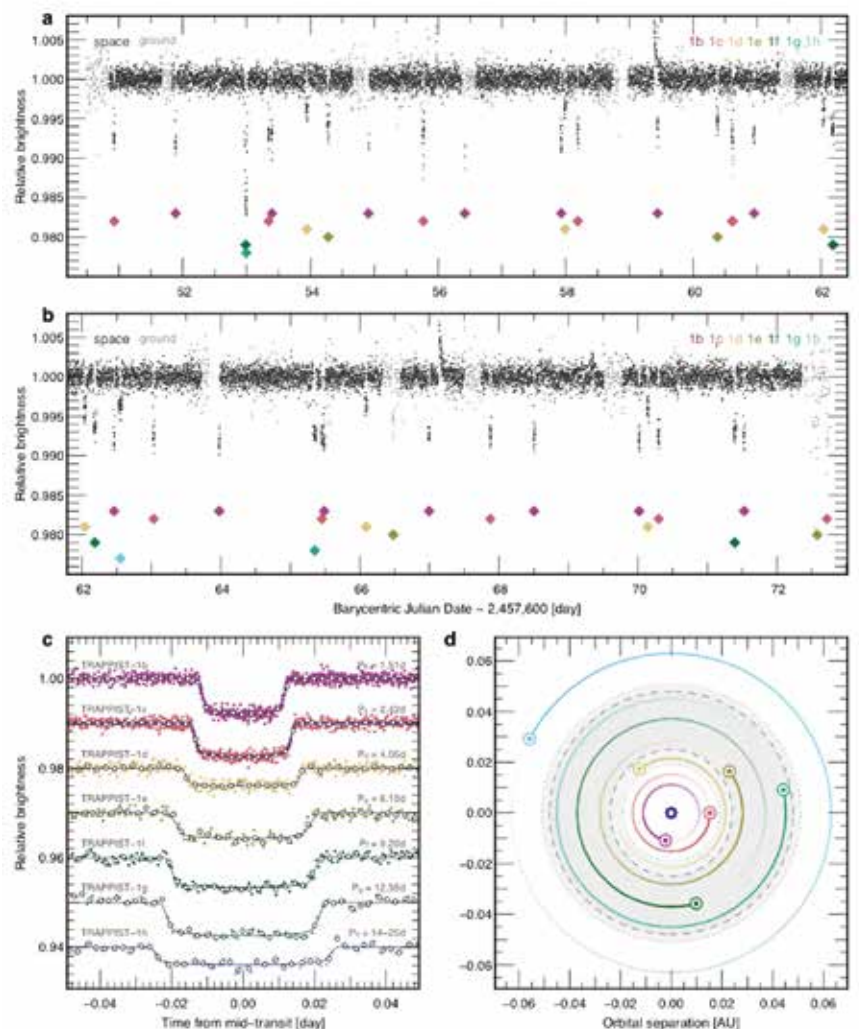


図03 トラピスト-1まわりのトランジット惑星の発見。パネルaとbはトラピスト-1の光度曲線（恒星の見かけ上の明るさの変化）、パネルcは各惑星の周期で光度曲線を折りたたんだ場合に得られる惑星のトランジット付近の光度変化を表しています。パネルdは7つの惑星の軌道（面）を上から見た模式図。（クレジット：Gillon et al. 2017, Nature）

められていますが、観測的には惑星の軌道の傾きや大気の組成を調べることでその手がかりを得ることが可能です。特に、ハビタブルゾーンに存在する地球型惑星がどこからやってきたのか（過去に軌道や円盤面が大きくかき乱されることがあったのか）、地球と同様

に中心星の自転と同じ向きに公転しているのか、というのは非常に興味深い疑問です。

すばる望遠鏡IRD分光器による観測

私たちはトラピスト-1系の惑星のこうした性質を調べるため、2017年に新たにすばる望遠鏡に搭載した分光器IRDを使ってトラピスト-1系の惑星のトランジットを観測しました。IRDは、これまで可視光で成功してきた高精度ドップラー法による系外惑星観測を赤外線で実現するための装置です。この装置には、レーザ光技術（光周波数コム）、高感度赤外線検出器、セラミック光学系、ファイバーなどの赤外線新技术が総合的に活用されています（装置の詳細は次号の記事で紹介の予定です）。

先に述べたように、系外惑星系の中でも特筆すべき特徴を持つトラピスト-1系ですが、恒星が可視光波長で極めて暗い天体であることから従来の方法・観測装置（可視光分光器など）では詳細な特徴付けが困難でした。一方、トラピスト-1は低温の恒星であるため、可視光線ではなく近赤外線の波長帯で最も明るくなります。近赤外分光器IRDは、まさにトラピスト-1のような低温の恒星の観測にはうってつけで、すばる望遠鏡の8.2mという大口径と合わせて世界でも例のない非常にユニークな観測を実現することが可能です。

2018年8月30日（ハワイ時間）、トラピスト-1系の7つの惑星のうち偶然にも3つが一晩のうちにトランジットを起こす（惑星e、f、bが順番にトランジットを起こす）機会がありました。私たちはその機会をとらえ、すばる／IRDによる分光観測によって3つの惑星に対してロシター効果の検出を試みました。結果は図05に示したように、いずれの惑星に対してもその公転軸と中心星の自転軸はよく揃っていることが明らかになりました（図06）。この結果は、トラピスト-1系では過去に円盤や惑星軌道の大きな攪乱は起こっておらず、惑星は現在の場所で形成されたか形成後に円盤内をゆっくりと移動して来たことを示唆しています。ハビタブルゾーン内にある惑星に対して（惑星eとfが該当）ロシター効果によって軌道面の傾きが調べられたのはこれが初めてのことで、トラピスト-1系の惑星は軌道面の傾きという点でも太陽系の惑星と似た特徴を持つことが明らかになりました。

今後の展望

トラピスト-1のように非常に低温の恒星

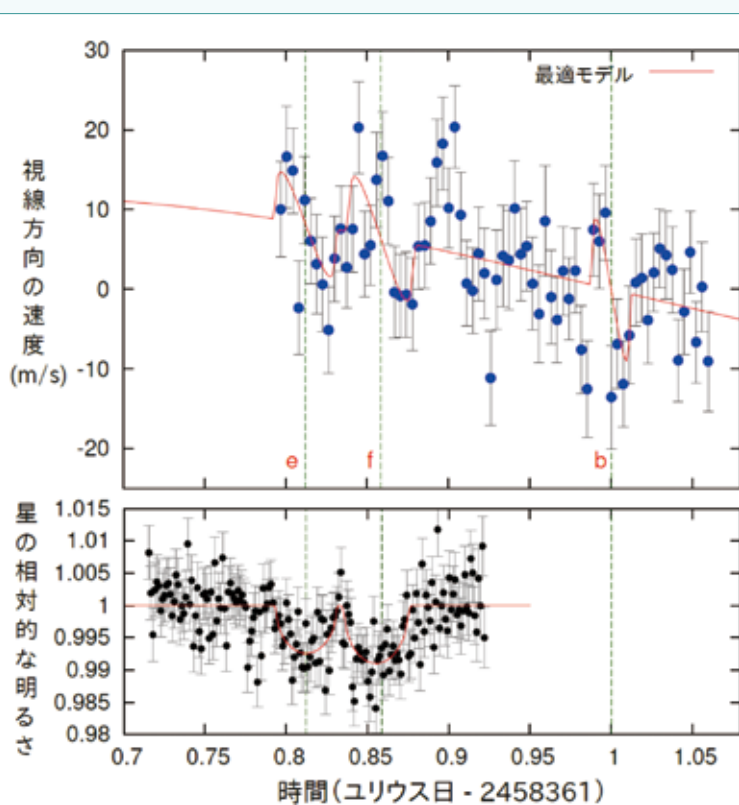


図05 （上のパネル）すばる／IRDの分光観測による、トラピスト-1の視線方向の速度の変化。トランジットの最中の視線方向の速度の変化は、惑星の軌道傾斜角 λ が小さい場合のものと同じです。（下のパネル）すばる／IRDとほぼ同時に取られた、米国マクドナルド天文台1 m望遠鏡によるトラピスト-1の惑星トランジット付近の明るさの変化。

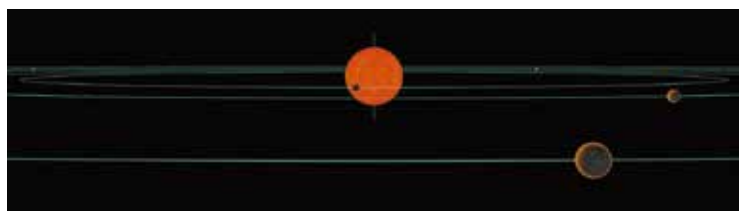


図06 すばる／IRDの観測によって明らかになった、トラピスト-1系の惑星軌道面と恒星自転軸の模式図。（クレジット：国立天文台）

を公転する惑星の発見・特徴付けは、IRDのような近赤外観測に特化した新しい観測装置の登場によって最近になってようやく可能になってきました。特に、M型矮星（太陽質量の1/2から1/10程度の軽い恒星、赤色矮星と同義）をまわる惑星の軌道面の傾きを調べる研究は、これまでトラピスト-1を含めて4例（GJ 436、AU Mic、K2-25）しか報告がありません。この内、トラピスト-1以外の惑星は地球型ではなく海王星型以上の中サイズの惑星系ですが、GJ 436系は惑星軌道面が傾いているという報告があり、M型矮星まわりの惑星の起源を探る動きは始まったばかりです。今後サイズや周期の異なる様々な惑星に対してロシター効果のような観測を実施することで、M型矮星まわりの惑星の形成進化史、さらには太陽系との類似点・相違点が明らかになるでしょう。

●論文掲載情報

Hirano et al. 2020, "Evidence for Spin-Orbit Alignment in the TRAPPIST-1 System", *ApJL*, 890, L27.

松野允郁さん、すばる望遠鏡データを用いた博士論文でSOKENDAI賞を受賞

国立天文台のすばる望遠鏡を用いた研究により2020年3月に総合研究大学院大学で博士号の学位を取得した松野^{まつの}允郁^{ただふみ}さんが、その優れた成果を評価され、第4回SOKENDAI賞を受賞しました。受賞対象となった博士論文のタイトルは「High-Precision Abundance Study for the Milky Way Halo Stars with Kinematics and Asteroseismology（日本語タイトル：高精度化学組成と恒星力学、星震学の組み合わせによる天の川銀河ハロー研究）」で、授賞式は3月25日に東京都内で行われました。

天の川銀河には、よく知られている渦巻構造に加えて、それを大きく取り囲むように星がまばらに存在する領域があり、その構造は「銀河ハロー」とよばれています。松野さんが取り組んだのは、このハロー構造がいつ、どのように形成されたのかを明らかにすることです。そのためには、銀河ハローを構成する星の年齢や天の川銀河内での軌道運動、星を構成する物質（元素組成）を明らかにすることが重要です。研究では、米国航空宇宙局（NASA）の「ケプラー宇宙望遠鏡」によって恒星振動が観測され、それによって年齢が推定できたハローの赤色巨星を対象とし、すばる望遠鏡の高分散分光器HDSを用いた観測で元素組成を測定しました。これらの星までの距離や銀河系内での運動は、欧州宇宙機関（ESA）の位置天文衛星「ガイア」のデータによって測定しました。こう



すばる望遠鏡データを用いた博士論文で第4回SOKENDAI賞を受賞した松野允郁さん（左）。中央は長谷川眞理子総研大学長。（クレジット：総合研究大学院大学）

いった研究は、従来は太陽系のごく近くの星に対してのみ可能でしたが、この研究は赤色巨星について初めてこれらの基本情報を取りそろえ、対象を天の川銀河内に大きく広げることを可能にしたのが大きな特色です。

これまでの研究から、銀河系ハローの星には、天の川銀河本体で作られた種族と天の川銀河の外で作られた後に天の川銀河に取り込まれた種族の2つがあると考えられています。星の振動の観測結果と、高分散スペクトルから得られた情報を組み合わせることで、天の川銀河の外に起源をもつものと銀河本体で形成されたものの形成年代の

違いは15億年以内であるという結果を得ました。銀河系外起源の種族の方が後に作られたという予想がありましたが、この研究の結果は天の川銀河本体で作られた種族と形成時期に大きな差がないことを示しています。またこの研究では、すばる望遠鏡で取得した星の高分散分光スペクトルから、詳しく元素組成を調べることで、天の川銀河の外に起源をもつ星の種族の形成に要する時間を1億年から3億年程度であると見積もりました。これらの結果については、今後さらに観測を進めることでより詳しい調査が可能になると期待されます。

「三鷹・星と宇宙の日2020」はオンラインで開催

国立天文台、アストロバイオロジーセンター、東京大学天文学教育研究センター、総合研究大学院大学、は、2020年10月24日に「三鷹・星と宇宙の日（特別公開）」を開催します。今年は、新型コロナウイルスの影響に伴い、オンラインのみでの開催となります（三鷹キャンパスでのイベント開催はありません）。

概要

名称：三鷹・星と宇宙の日2020オンライン

日時：2020年10月24日（土曜日）

主催：自然科学研究機構 国立天文台／自然科学研究機構 アストロバイオロジーセンター／東京大学大学院 理学系研究科附属 天文学教育研究センター／総合研究大学院大学 物理科学研究科 天文科学専攻

後援：公益社団法人 日本天文学会／公益財団法人 天文学振興財団

協力：東京大学消費生活協同組合天文台支所／三鷹市星と森と絵本の家 他

おもな内容（詳細は10月中旬に発表予定）

★メインライブ配信（仮称）

午前10時から午後6時30分（予定）

太陽系から宇宙の果てまで、ストーリー性のある楽しいライブ配信を企画中です。



★講演（講演テーマ「ブラックでダークな宇宙」）

研究紹介、施設や装置の紹介など、宇宙の不思議とそれに挑む研究者、そして、研究者を支える人たちの情熱を、丸一日かけてお届けします。

★宇宙に関する質問にもお答えします

質問は、ウェブサイトにて10月8日締切で募集。

★特設ウェブコンテンツの公開

詳細は <https://www.nao.ac.jp/open-day/2020/> をご参照ください（内容は随時更新されます）。

○お問い合わせ先

自然科学研究機構 国立天文台 事務部総務課

電話 0422-34-3600（代表）

編集後記

夏休みの3日間は、日の出頃から野川公園にでかけて、息子が虫探しや川遊びをするのにつきあいました。何時間も飽きずに遊ぶ息子につきそうのは体力を使いますが、こんなこともあと数年と頑張ってがんばります。(G)

例年岩手は9月に入ると肌寒いくらいになってくるのに今年はずっと暑い。早く快適な季節が来てほしいです。(は)

コロナでオンラインになった天文学会年会に参加。自分の机に居ながらにして、いろいろな分科会を簡単に聞いて回れるのは画期的。でも、顔が見えないためか質問はしにくい気がします。(I)

VRゴーグルをかぶってVR空間でのコミュニケーションを初めて経験。肩は凝ったけれど、新しい可能性を感じました。(h)

オンラインで集中講義をやらせていただいた。学生さんの顔が見えず、パソコンに向かって朝から夕方まで話し続けるのはなかなかつらい。聴講する学生さんも忍耐が必要そうです。(K)

8月のなかば、久しぶりに天の川を見に行ったら。流れ星が天の川を横切っていくのを眺められた。夏、だ、と思った瞬間だ。(W)

毎年楽しみにしていたお祭りが中止になりました。残念です。来年はできるといいなあ。(e)

国立天文台ニュース NAOJ NEWS

No.326 2020.09

ISSN 0915-8863

© 2020 NAOJ

（本誌記事の無断転載・放送を禁じます）

国立天文台ニュース編集委員会

●編集委員：小久保英一郎（委員長・天文シミュレーションプロジェクト）／渡部潤一（副委員長）／石井未来（TMT推進室）／秦和弘（水沢VLBI観測所）／勝川行雄（SOLAR-C準備室）／平松正顕（アルマプロジェクト）／伊藤哲也（先端技術センター）
●編集：天文情報センター出版室（高田裕行／ランドック・ラムゼイ）●デザイン：久保麻紀（天文情報センター）

★国立天文台ニュースに関するお問い合わせは、上記の電話あるいはFAXでお願いいたします。
なお、国立天文台ニュースは、<https://www.nao.ac.jp/naoj-news/>でもご覧いただけます。

発行日／2020年9月1日

発行／大学共同利用機関法人 自然科学研究機構
国立天文台ニュース編集委員会

〒181-8588 東京都三鷹市大沢 2-21-1

TEL 0422-34-3958（出版室）

FAX 0422-34-3952（出版室）

国立天文台代表 TEL 0422-34-3600

質問電話 TEL 0422-34-3688

10月号は、ともにオンライン開催となった野辺山宇宙電波観測所の「今年はおうちで特別公開」や石垣島天文台の「南の島の星まつり2020」の報告等をお届けします。

次月号



すばる望遠鏡

HSC Cosmic Gallery

06 コスモスフィールドの深宇宙

田中賢幸（ハワイ観測所）

現在、すばる望遠鏡330夜を用いたHSCすばる戦略枠プログラムが進行中である。その一環で、2つのフィールドを各フィルターで5-10時間に渡って露出するという非常に深い観測をしている。すばるのような大口径望遠鏡でこれだけ長い露出をすると、極めて暗い天体の姿が浮かび上がる。この画像はコスモスフィールドと呼ばれる深い観測をした領域の一つで、淡く見える光の点一つ一つが遠方の銀河である。隙間がないほどに銀河が写っており、夜空は文字通り銀河で埋め尽くされていることが実感できるだろう。

★HSC：すばる望遠鏡「超広視野主焦点カメラ（Hyper Suprime-Cam/ハイパー・シュプリーム・カム）」

★HSCの観測データを活用した市民天文学プログラム「ギャラクシークルーズ」もお楽しみください。

<https://galaxycruise.mtk.nao.ac.jp/>