

NAOJ

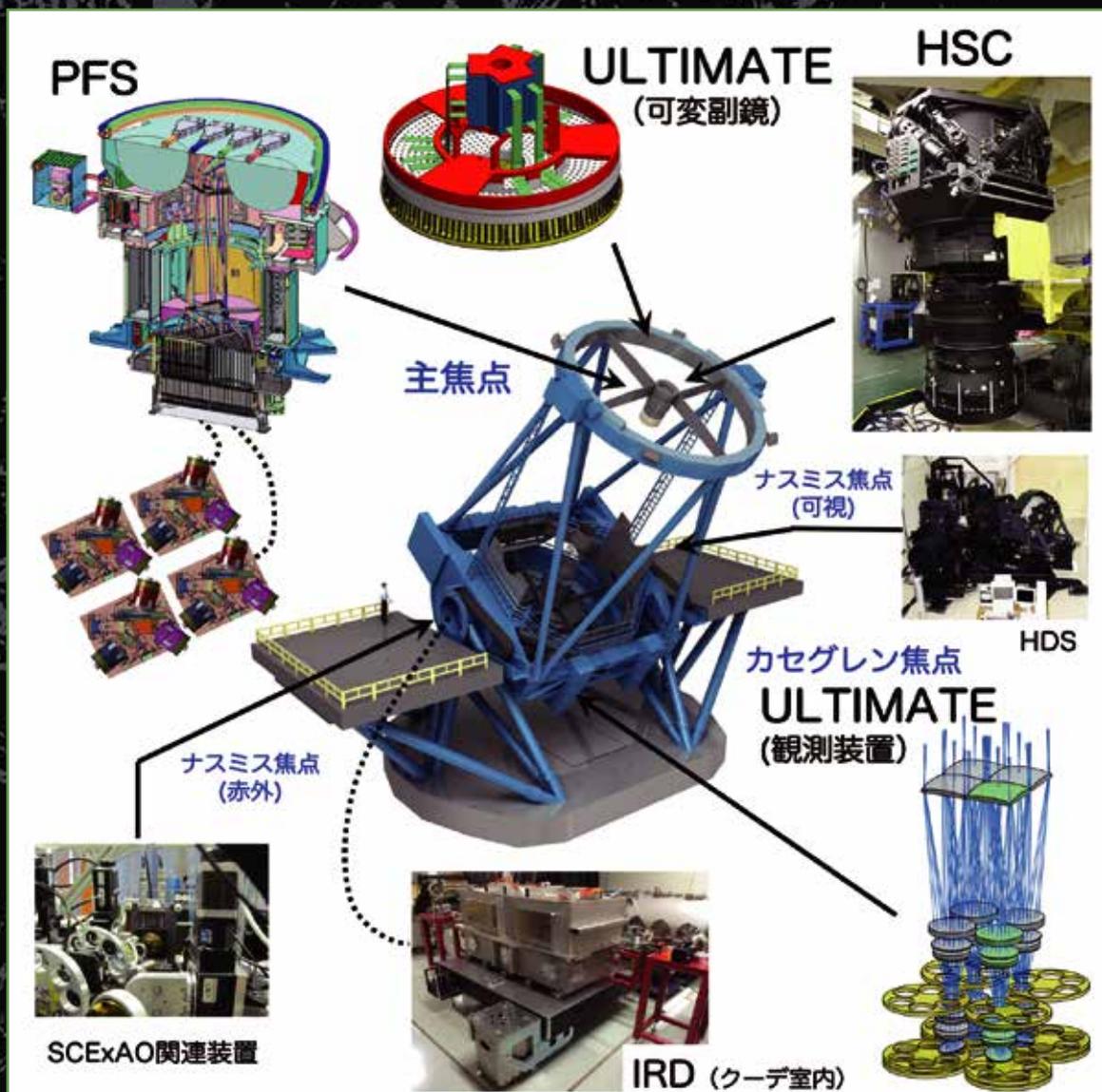
自然科学研究機構

国立天文台ニュース

National Astronomical Observatory of Japan

2020年11月1日 No.328

特集 すばる望遠鏡 2020 後編



- 未来型のすばる望遠鏡へ
- I ダークエネルギー・ダークマターの性質を探求する
- II 銀河の形成と進化の歴史を解明する
- III マルチメッセンジャー天文学を展開する
- IV 地球型系外惑星を探求する

11

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 後編

- 未来型のすばる望遠鏡へ

小山佑世 (ハワイ観測所) / 神戸栄治 (ハワイ観測所)

I ダークエネルギー・ダークマターの性質を探索する

超広視野主焦点多天体分光装置 (PFS)

高田昌広 (東京大学カブリ数物宇宙研究機構 (カブリIPMU)) / 高遠徳尚 (国立天文台ハワイ観測所)

II 銀河の形成と進化の歴史を解明する

地表層補償光学+広視野高解像赤外線観測装置 (ULTIMATE-Subaru)

美濃和陽典 (ハワイ観測所) / 小山佑世 (ハワイ観測所)

III マルチメッセンジャー天文学を展開する

田中雅臣 (東北大学)

IV 地球型系外惑星を探索する

小谷隆行 (アストロバイオロジーセンター、国立天文台) / 佐藤文衛 (東京工業大学)



表紙画像

今後のすばる望遠鏡の機能強化を担うさまざまな観測装置群。

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)

23

おしらせ

- 2021年国立天文台カレンダーができました。

23

編集後記/次号予告

24

連載「すばる望遠鏡 HSC Cosmic Gallery」08

NGC4517

解説: 田中賢幸 (ハワイ観測所)

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10月

- 7日(水) 防災訓練
- 8日(木) 教授会議
- 9日(金) 幹事会議
- 23日(金) 幹事会議
- 24日(土) 特別公開「三鷹・星と宇宙の日2020」(オンライン開催)
- 28日(水) プロジェクト会議

2020年11月

- 6日(金) 幹事会議
- 7日(土) 4D2Uシアター公開(三鷹)
- 9日(月) 運営会議
- 13日(金) 幹事会議/4D2Uシアター公開(三鷹)
- 21日(土) 4D2Uシアター公開(三鷹)
- 25日(水) プロジェクト会議

2020年12月

- 5日(土) 4D2Uシアター公開(三鷹)
- 8日(火) 運営会議
- 11日(金) 4D2Uシアター公開(三鷹)
- 18日(金) 幹事会議
- 19日(土) 4D2Uシアター公開(三鷹)
- 23日(水) プロジェクト会議

特集

すばる望遠鏡2020

後編

協力
ハワイ観測所

本格的な観測開始から20年を経た「すばる望遠鏡」。9月号では、特集・前編として、すばる望遠鏡の近況と、さまざまな観測成果を紹介しました。後編では、今後予定されているすばる望遠鏡の機能強化計画と科学目標（「すばる2」計画）を展望します。現在、活躍中の超広視野主焦点カメラに続いて、順次開発が進む観測装置群の解説も含めて、バージョンアップされたすばる望遠鏡がいかなる課題に挑むのか、その全体像をご紹介します。

未来型のすばる望遠鏡へ

進化を続ける「すばる望遠鏡」。2030年代へ向けたすばる望遠鏡の科学戦略および装置開発計画（「すばる2」計画）を紹介します。



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

すばる望遠鏡も20歳をすぎ、青年期を迎えました。建設開始を知る方から見れば四半世紀、すばる望遠鏡の運用を支えるハワイ観測所のスタッフにも、運用開始当初のことを知る人は少なくなりました。しかしこれは決して寂しいことではありません。すばる望遠鏡の観測データで天文学を学び、巣立った世代が、新時代のすばる望遠鏡の運用と科学戦略を支えています。9月号の前編記事では、近年のすばる望遠鏡を取り巻く状況と最新の科学成果を紹介しました。今回はその続編として、2030年代に向けたすばる望遠鏡の科学戦略および装置開発計画（「すばる2」計画）を紹介します。

「すばる2」計画では、①暗黒物質と暗黒エネルギーの性質の探求及びニュートリノ質量の決定、②宇宙の構造形成、銀河形成・進化の物理過程の理解、③マルチメッセンジャー天文学の展開、④地球型系外惑星候

補天体の同定、の4つの大目標を掲げ、宇宙進化の根源的な謎に迫ります。次項以降で、これらの科学目標と各装置計画の関係、およ

び装置開発の現状を詳しく紹介しますが、ここでは2020年代～2030年代のすばる望遠鏡の未来図を概観してみましょう。

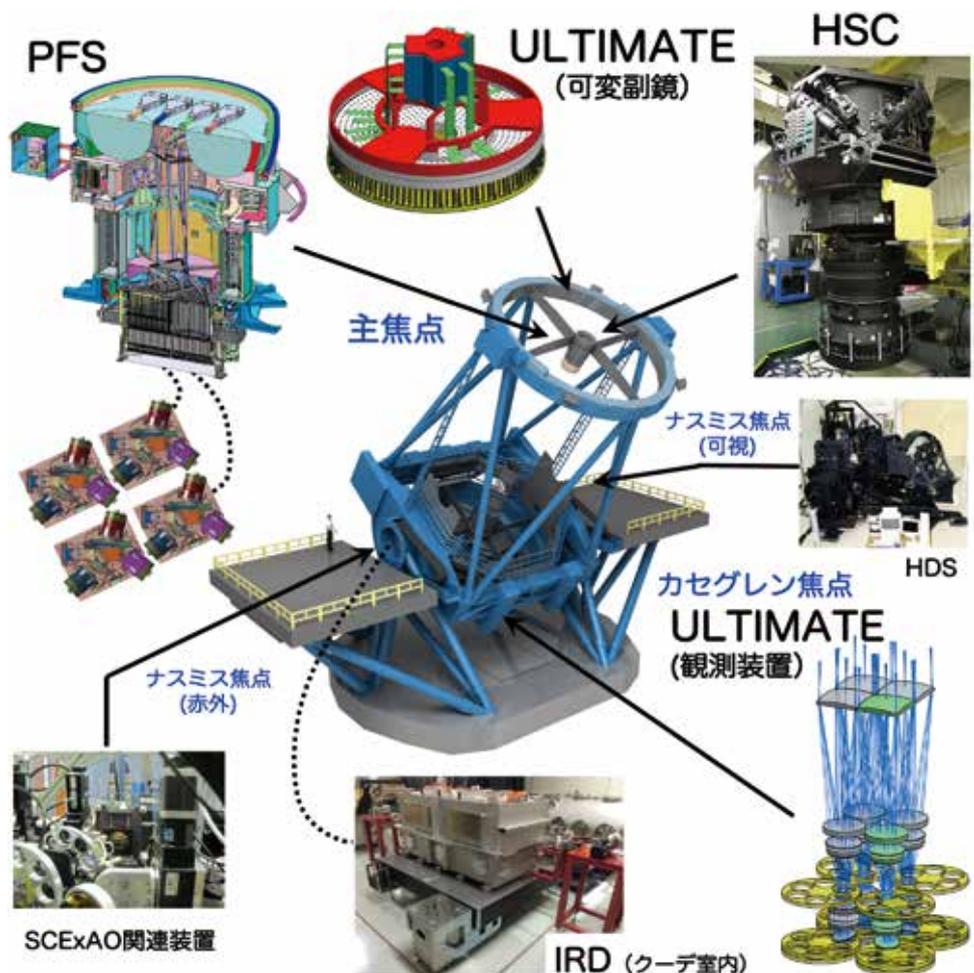


図01 「すばる2」計画を支える観測装置群。HSC・PFSに加えてULTIMATEでGLAOのために導入される可変副鏡の搭載によって主焦点の機能を大幅に強化し、可視・近赤外で広視野サーベイ能力を高める。これに加えてTMT時代を見据え、系外惑星探索を中心に特にユニークな装置は主にPIタイプ装置として運用を最大限サポートする（タイムラインについては図02を参照）。

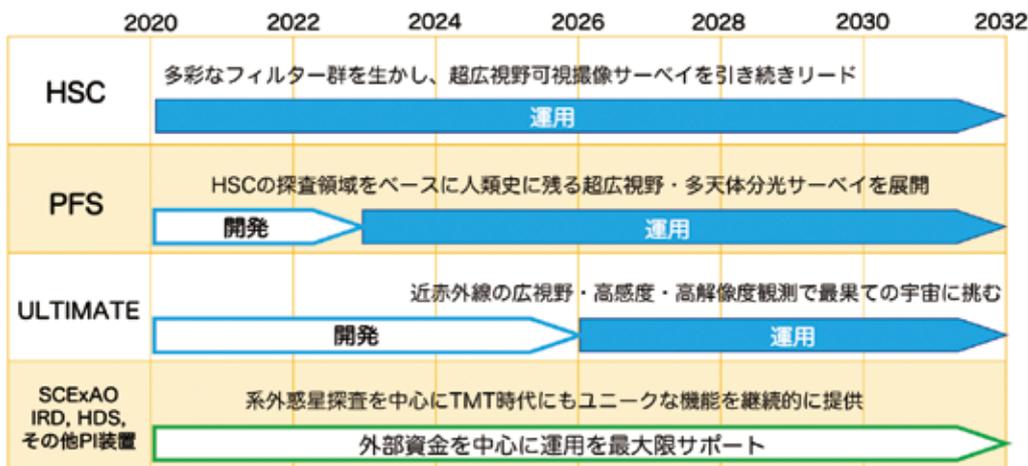


図02 「すばる2」計画のおおまかなスケジュール。

● 「すばる2」計画の概要

図01と図02に「すばる2」計画を支える観測装置とその開発・運用スケジュールをまとめました。すばる望遠鏡の特徴は、何と言っても世界の8メートル級望遠鏡でも群を抜く「広い視野」にあります。現在、すばる望遠鏡の広視野観測を支えているのは、視野1.75平方度を誇る超広視野主焦点カメラ HSC (Hyper Suprime-Cam) です。2014年から延べ330夜の時間を投入して行われたHSCの「戦略枠」プログラムはまもなく終了を迎えますが、9月号の前編記事で紹介したように、すでに数多くの科学成果が生まれており、新時代の広視野・深探査天文学の幕開けに大きく貢献しています★01。

続いて登場するのが、HSCと同程度の視野(1.25平方度)で2400個の天体を可視光から近赤外線(1.26 μ m)まで同時に分光できる超広視野主焦点多天体分光装置PFS (Prime Focus Spectrograph) です。東大IPMUを中心に、2023年からの運用開始を目指して急ピッチで準備が進んでいます。HSCの探査領域をベースに、PFSも「戦略枠」プログラムとして宇宙論・銀河進化・銀河考古学を柱とする

大規模な分光サーベイを計画しています。HSCの測光サーベイはそれだけでも十分に価値の高いものですが、銀河までの正確な距離を知り、また個々の銀河の性質を詳細に探るためには分光観測が不可欠です。HSCによる測光データとPFSの分光データが共鳴したとき、その科学的価値は何倍にも高まります。

HSC・PFSが月の暗い夜(暗夜)を担うのに対して、主にすばる望遠鏡の明夜を担う基幹装置として期待されるのが、視野直径20分角にわたってシャープな星像を実現する地表層補償光学(GLAO★02)を搭載した広視野高解像赤外線観測装置です(ULTIMATE★03-Subaru計画)。地表付近の大気ゆらぎを補正するGLAOの技術によって、従来の補償光学に比べて格段に広い視野を実現し、すばる望遠鏡の特に赤外線の観測能力を大幅に強化します(2026年頃完成予定)。欧米の次世代宇宙望遠鏡ともタイアップして、従来の観測波長の壁を打ち破り、私たちの知の地平線を大きく拡大する可能性を秘めた計画です。

今後すばる望遠鏡では、HSC・PFS・ULTIMATEの広視野装置群によるサーベイ観測に重点を置く運用を行っていきます。一方で、外部

からの資金調達が必要にはなりますが、既存装置のアップグレードや新たな持ち込み装置(PIタイプ装置)を最大限サポートします。その代表例が、9月号の前編記事でも紹介した近赤外超精密視線速度観測装置IRD (Infrared Doppler spectrograph) です。高い精度で波長較正を行い、視線

速度法(ドップラー法)によって太陽近傍のM型星まわりのハビタブル惑星の検出を目指します。他にも系外惑星の直接観測のための高コントラスト・高解像度の極限補償光学システムSCEXAO (Subaru Coronagraphic Extreme Adaptive Optics)も、TMT時代の系外惑星研究への技術実証としてすばる望遠鏡で進化を続けます。

「すばる2」計画とはすなわち、すばる望遠鏡の性能を最大限に引き上げるアップグレード計画です。望遠鏡建設当時には誰も想像していなかった、未来型のすばる望遠鏡です。今やHSCは誰もが認めるすばる望遠鏡の主力装置となりました。しかし、多くの研究者がすばるの初期成果に盛り上がっていた2000年代初頭に、すでにその次の時代を見据えた装置開発の取り組みがあったからこそ、運用開始から20年経った今でもすばる望遠鏡が世界から注目され続ける存在でいられることを私たちは忘れてはいけません。装置開発には時間がかかります。新しい装置の完成を知ってから初めて注目するのではなく、研究者コミュニティと観測所・装置開発グループが一体となって、進化するすばる望遠鏡を支えていただきたいと願っています。

★01 HSCの詳細な解説は「国立天文台ニュースNo.307・308」をご覧ください。 ★02 Ground Layer Adaptive Optics
★03 Ultra-wide Laser Tomographic Imager and MOS with AO for Transcendent Exploration

I ダークエネルギー・ダークマターの性質を探求する 超広視野主焦点多天体分光装置 (PFS)

PFSは、HSCの探査領域を元に大規模な分光サーベイを行い、ダークエネルギー・ダークマターの性質の探求やニュートリノ質量の測定など、宇宙論的な課題解決にも挑みます。



高田昌広

(東京大学カブリ数物宇宙研究機構
(カブリIPMU))



高遠徳尚

(国立天文台
ハワイ観測所)

PFSとは？ (高田昌広)

超広視野主焦点多天体分光装置 (PFS) は、カブリIPMUのリードの下、国立天文台、米国 (プリンストン大学、ジョンズ・ホプキンス大学、カリフォルニア工科大学・ジェット推進研究所)、北米の大学のPFS参加グループ、台湾中央研究院天文及天文物理研究所 (ASIAA)、仏マルセイユ天体物理研究所、中国のPFS参加機関、独マックス・プランク宇宙物理学研究所、ブラジルの参加機関からなる国際共同研究で、開発・建設が進められている次期共同利用装置計画です。すばるPFSは、直径で1.3度の広視野をカバーし、一度に約2400個の天体を380~1260 nmの広い波長帯にわたり、波長分解能が2000~5000の精度で分光観測することを可能にする、極めて強力な装置です。10年以上の開発を経て、来年には試験観測を迎え、2023年からのサイエンス運用を目指しています。

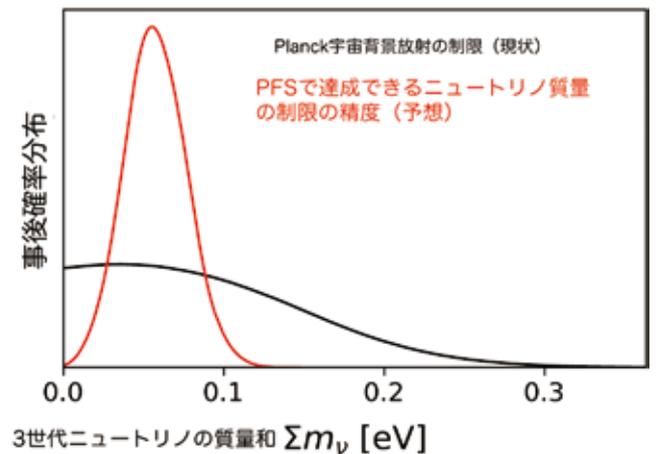
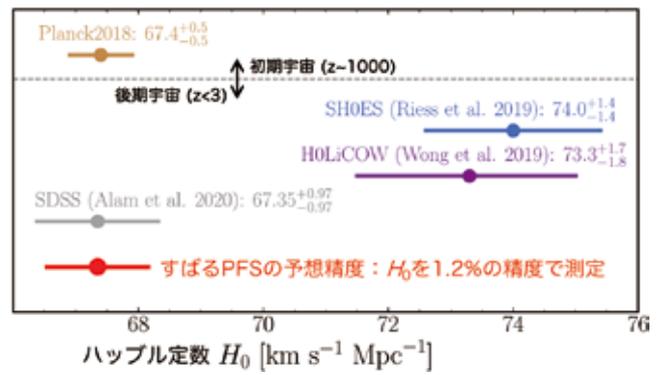


図01 (上図) 平坦 Λ CDM 標準模型を仮定した場合のハッブル定数の測定結果。初期宇宙の宇宙背景放射 (Planck Collaboration 2018) の測定から得られた結果と後期宇宙の観測量を用いた結果のあいだに矛盾が報告されている。セファイド変光星 (Cepheid variables) などの距離はしごを用いた近傍宇宙の測定結果 (ノーベル物理学受賞者 Adam Riess らの結果)、強い重力レンズ効果の測定結果 (Wong et al. 2019)、赤方偏移範囲 $0 < z < 1.2$ の銀河サーベイのスローン・デジタル・スカイ・サーベイのバリオン音響振動 (BAO) の測定結果 (Alam et al. 2020) を示す。これに対し、すばるPFS宇宙論サーベイは、 $0.6 < z < 2.4$ の赤方偏移のBAOを測定し、ハッブル定数の測定問題を解決する。BAO観測によるハッブル定数の測定には、宇宙背景放射の測定結果を用いる必要がない。(下図) PFSで期待されるニュートリノ質量の決定精度を示し、神岡のニュートリノ実験 (Super-Kamiokande) で示唆されている3世代ニュートリノの質量和 0.06 eV を測定できる精度を達成する (図は ASIAA 真喜屋龍氏らの提供データに基づく)。

PFSが目指す主要サイエンス目標

上述したように、PFSはすばる望遠鏡の集光力と併せて、その広視野、多天体分光能力から、2020年代の天文学を席卷すると期待されています。欧州のVLTにもMOONS計画と呼ばれる多天体分光装置の開発が進んでいますが、その視野はPFSの約10分の1、また同時分光天体数も1024個 (半分以下) であることから、PFSの圧倒的な威力が分かって頂けると思います。また、現在すばるHyper Suprime-Cam (HSC) による広天域撮像サーベイのサイエンスが展開されていますが、これらのHSCデータで同定された天体 (星、銀河) を分光観測することにより、様々なサイエンスの相乗効果が期待できます。この記事では、PFS国際共同研究チームおよびすばるコミュニティの研究者からなるPFSチームが検討している主要サイエンス目標を簡単に紹介します。ただし、ここに述べるサイエンスは現時点での天文学、物理学に基づくもので、研究チームが予想しないサイエンスが存在するはずで、PFSで可能になるサイエンス、その地平線の開拓について、皆さんの検討の契機になれば幸いです。

① PFS宇宙論：ダークエネルギーの正体、標準模型を超える物理の探索

宇宙の膨張史、特に加速する宇宙膨張の起源の解明は、現代天文学、物理学における最重要課題です。加速する膨張の「説明」のために導入されたのが、実質的に万有斥力を引き起こすダークエネルギーと呼ばれる謎のエネルギーですが、その性質は全く分かっていません。

宇宙の加速膨張を調べる強力な手段になるのが、分光観測による、広天域にわたる銀河の3次元地図です。PFS宇宙論では、約1400平方度（全天の約3.5%）をカバーするすばるHSCサーベイのデータから選んだ銀河の分光観測を行い、赤方偏移 $z=0.6$ から2.4にわたり、約400万個の輝線銀河に基づく3次元地図を作成する予定です。2019年ノーベル物理学賞を受賞したPeebles教授らの理論から、各赤方偏移の銀河の3次元分布には、バリオン音響振動（BAO）と呼ばれる、その長さ（波長）が分かっている「標準ものさし」の痕跡が残されています。銀河分布からBAO標準ものさしを測定することにより、膨張宇宙における距離を測定することができ、これは宇宙の膨張史を測定することと等価です。また、光の速さは有限であるため、遠方の銀河を観測することは、昔の宇宙にある銀河、ここでは銀河の分布を観測することと等価です。 $z=2.4$ から0.6の範囲にわたる銀河の分布の進化史を測定することで、宇宙の構造の進化史を観測的に紐解くことができます。

図01には、PFS宇宙論が目指す、宇宙の物理量の測定精度の予想例を示します。一つは、現在のハッブル宇宙膨張を特徴付けるハッブル定数の測定精度です。現在、異なる観測の結果のあいだに矛盾が報告されており、宇宙の標準模型 Λ CDMモデルの綻びを示唆している可能性があります。この問題に決定的な決着をつけます。もう一つは、3世代ニュートリノの質量和の測定です。長年の神岡の実験、小柴氏、梶田氏のノーベル物理学賞の世界的研究成果に代表されるように、ニュートリノはいわば日本の国素粒子（national elementary particles）とも言えます。標準模型の3世代ニュートリノに関する物理量で未測定のもの、CP対称性の破れの位相（ δ ）、とニュートリノ質量の絶対値の2つだけです。Kamiokande、Super-Kamiokande またT2Kなどの実験は、ニュートリノの質量自乗差だけを測定しており、3世代ニュートリノの質量和の下限値しか分かっていません。PFSは、そのニュートリノ質量和の真の値が最小値（下限値）であっても測定が可能で、このように、PFS宇宙論は宇宙の物理量の定数を測定できる威力を有しています。ただし、このビッグサイエンスについては熾烈な国際競争にあり、入念な準備が必要になります。

② PFS銀河進化：銀河の特性・進化の俯瞰的研究

現在の標準的な構造形成のシナリオでは、宇宙の始まりのインフレーションの量子ゆらぎから生まれた原始ゆらぎ

が重力の不安定性で成長し、ダークマターが空間的に集積し、その領域でガスが収縮・冷却し、星が形成され、星々が集積し、銀河が形成してきたと考えられています。これらの銀河形成においても様々な未解決問題があります。例えば、重力、星形成、超新星爆発によるフィードバック、また銀河と周辺ガスの循環（輪廻）過程などの物理過程は、各段階の銀河の進化にどの程度の影響を及ぼすのか？ 銀河中心には普遍的に巨大ブラックホールが存在しますが、ブラックホールと銀河形成の関係は何か？ 宇宙の豊かな網の目大規模構造のなかで、楕円銀河、渦巻き銀河、不規則銀河、さらに銀河群、銀河団のなかの中心銀河、サテライト銀河などの異なる銀河の違いはどのように生まれたのか、銀河の形態の起源は何か？ PFSの銀河形成プログラムは、これら銀河形成の問題を圧倒的な統計研究で解明することを目指しています。

PFS銀河進化プログラムは、すばるHSCの深いデータ、また他の多波長データがあるHSC-Deepの約15平方度の領域の約数10万個の銀河を分光観測します。赤方偏移で $z\sim 2$ までの銀河については、近赤外線波長の光度で無バイアスに選んだ、つまり選択効果が最小限の銀河サンプルを調べ、異なる形態、異なる進化ステージにある、様々な銀河について徹底的な統計研究、また銀河を取り巻く環境と銀河の性質を観測的に解明します。赤方偏移 $z\sim 2$ を超える銀河については、星形成銀河、あるいは輝線銀河の候補天体の分光観測を行います。特に新規性の高い研究テーマとしては、星形成銀河を背景光源として用い、連続光スペクトルに現れるライマン α 吸収線を調べることにより、宇宙の大規模構造のなかの中性水素の空間分布を調べる研究があります。さらに $z\sim 7$ に及ぶ高赤方偏移では、ライマン α 輝線銀河を分光観測し、宇宙の再イオン化過程の物理を調べる予定です。

p08・図02はPFS銀河進化研究が計画しているイラストレーションです。赤方偏移で $z\sim 0.5$ から7にわたり、銀河を分光観測し、銀河の性質と大規模構造の関係を調べます。下図に示されるように、星形成銀河を背景光源として用い、銀河間空間における中性水素の空間分布を構築することができます。

③ PFS銀河考古学：ダークマター、天の川銀河の起源

PFSは、天の川銀河の星の観測でも威力を発揮します。天の川銀河のハロー領域に存在する矮小銀河は、質量に対してダークマターが支配的な銀河です。PFS銀河考古学プログラムでは、矮小銀河の重力圏に属するメンバー星を分光観測し、各々の星の視線速度を測定することで、矮小銀河の重力の強度、つまりダークマターの空間分布を復元することを目指します。すばるの大口徑、PFSの広視野、多天体分光性能により、PFSの一晩の観測はKeck望遠鏡の50晩以上の観測に対応します（p08・図03参照）。無バイアスに選んだ矮小銀河の領域の多数の星（メンバー星、また背

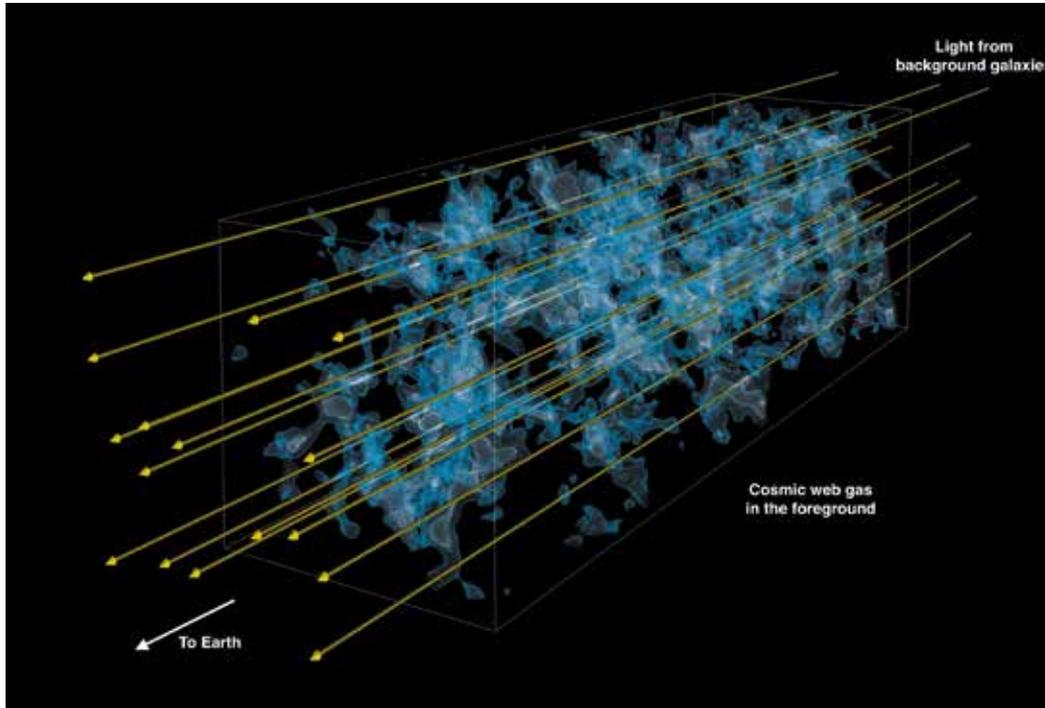
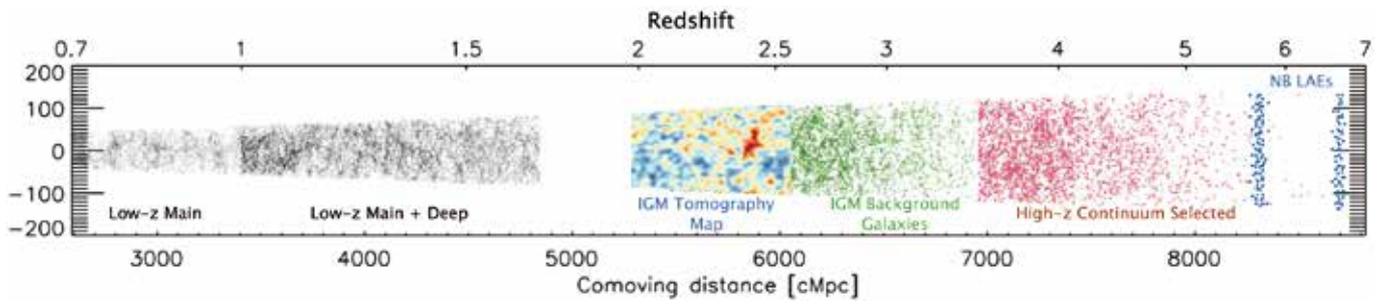


図02 PFS銀河進化サーベイの概念図 (PFS銀河進化チーム、及びカプリIPMU Khee-Gan Lee氏提供)。(上図) HSC-SSP Deep領域から選んだPFSで分光観測するターゲットの銀河を示す。 $1 < z < 1.8$ は、近赤外線の光度(銀河の星質量に対応)で選択した、つまり無バイアス(均一)な銀河のターゲット。 $2 < z < 6$ の範囲は星形成銀河を分光する。このなかで $2 < z < 3.5$ の銀河を背景光源として用い、銀河間空間の中性水素の3次元分布を測定する(左図のイラスト参照)。 $z \approx 5.7, 6.6$ の銀河については、HSCの狭帯域フィルター(NBフィルター)で選択したライマン α 輝線銀河候補を分光観測する。このように、様々な銀河、また銀河間ガスの性質・特性、さらに銀河・ガスの分布で明らかに宇宙の大規模構造を調べる。

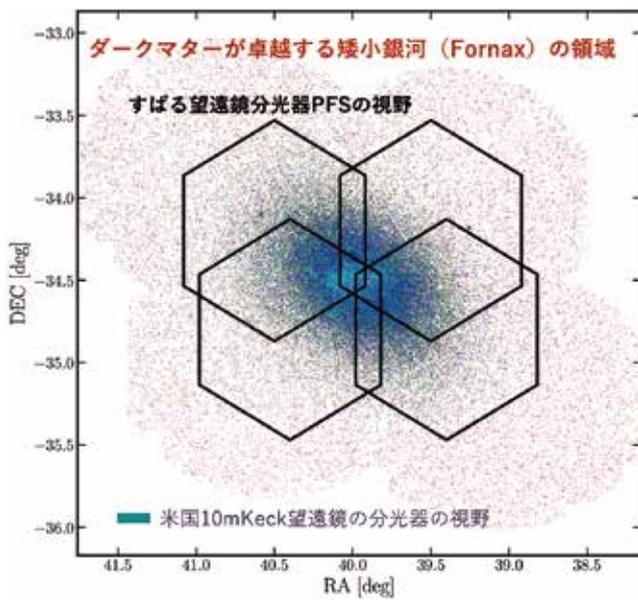
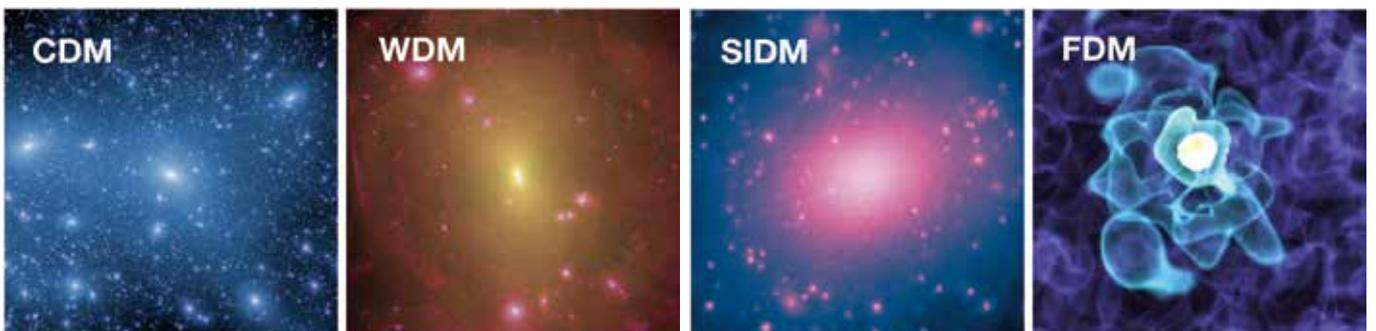


図03 (左図): 矮小銀河FornaxにおけるPFSの視野を示す。青、緑色の点は矮小銀河のメンバー星候補を示し、赤色は天の川銀河ハロー領域の前景、背景星を示す。PFSの1晩の観測で、矮小銀河の自己重力圏にあるメンバー星の視線運動を測定することができ、ダークマターの空間分布を正確に復元できる。左下の四角は、Keck望遠鏡のDEIMOS分光器の視野を示す。PFSの1晩の観測は、Keck望遠鏡の50晩以上の観測に対応する。(下図)異なる性質のダークマターを仮定した場合、自己重力系ハロー領域(矮小銀河などが形成される領域)のダークマターの空間分布の数値シミュレーションの例を示す。標準模型は、冷たいダークマター模型(CDM)に基づく。それ以外は、異なるダークマターを仮定した場合。ダークマター粒子自体の速度分散が無視できない、「暖かい」ダークマター模型(Warm Dark Matter = WDM)。ダークマター粒子同士が相互作用する模型(Self-Interacting Dark Matter = SIDM)。「波」のような性質を持つ、例えばアクシオンなどの超軽量ダークマター模型(Fuzzy Dark Matter = FDM)。矮小銀河のPFS観測から、ダークマターの性質に迫ることができる(東北大 林航平氏ら提供)。



景・前景の星)を分光観測し、矮小銀河の星形成史に依存せずに、矮小銀河の中心部にダークマターの質量密度のコアが存在などの異常が発見されれば、アクシオンダークマター、あるいは比較的強い自己相互作用するダークマターの発見に繋がる可能性があります。このように矮小銀河のPFS観測からダークマターの性質に迫ることができます(図03)。

また、PFS銀河考古学プログラムでは、アンドロメダ銀河のハロー領域の星の分光観測、あるいは天の川銀河のディスクの外縁領域、あるいはストリームにある星の分光観測も行う予定です。位相空間(空間、速度空間)にお

ける星分布の構造、また金属量およびその空間分布などを用いることで、我々の住む天の川銀河の形成・進化過程を観測的に明らかにすることができます。現在、欧州のGaia衛星が天の川銀河の10億個の星(視差距離、固有運動、分光データ)を観測し、銀河考古学分野で様々な革新的な研究成果を出していますが、PFSは天の川ハロー領域、つまりより遠方にある星、また天の川銀河の形成の初期の情報・痕跡を残す星を調べることで、Gaiaと相補的な研究を展開します。これらの研究は、日本が進めるJASMINE衛星計画にも繋がるでしょう。系統的な研究が望まれます。

観測装置PFSの概要(高遠徳尚)

PFSハードウェアの全体構成を図04に示します。すばる主鏡で反射された天体の光は、筒先の主焦点部に集光されます。HSCのために開発された主焦点補正光学系が作る視野は世界トップの広さを誇り、そこに2394本の光ファイバーを配置します(PFI)。光ファイバーは約60mの長さがあり、望遠鏡の高度軸巻取りを通してドーム側に設置した分光器へ天体の光を導きます。分光器(SpS)は全く同一の4台のモジュールからなり、各モジュールには約600本の光ファイバーが接続されます。それぞれのモジュールは青、赤、近赤外域の3アームに分かれており、合わせて0.38 μm から1.26 μm までの広い波長範囲を同時に分光できるようになっています。分光器は近赤外線域での背景光を低く抑えるためと分光器の安定性を確保するために、室温が5 $^{\circ}\text{C}$ の恒温室(SCR)に設置されます。

光ファイバーを使った分光器は、配置の自由度が高い代わりに、星の光を効率よく分光器に届けるのに様々な困難があります。いかに効率良く光を捉えて伝送するかが、腕の見せ所となります。まず光ファイバーを目的天体の場所に正確に配置し、露出時間中もその状態を保たなければなりません。これが最大の関門です。一本一本の光ファイバーは、軸をずらして2段重ねにした小さなモーターに取り付けられていて、直径9.5mmの円の内部を自由に動かすことができます。この位置決め装置はカリフォルニア工科大学とJPLが開発を進めてきたもので、その形と動きが頭をもたげたコブラにどことなく似ているのでCobraと名付けられています。すべての光ファイバーの位置は、カセグレン焦点に設置するカメラ(MCS)により一気に測定されてCobraにフィードバックされます。およそ7回この操作を繰り返すと所定の精度で光ファイバーが配置できます。

しかし「星が焦点面上のどこに来るか」を正しく知らなくては、光ファイバーをそこに配置できません。望遠鏡光学系の像面歪曲、微分大気差、装置や望遠鏡光学系の重力変形等々を、望遠鏡の高度角や装置回転機構の角度の関数として知る必要があります。また装置交換毎の取付け再現性も補正しなければなりません。光ファイバーは視直径約1秒角の光を受けるので、その約1/10(0.1秒角)の精度でこれら変動の影響を予測する必要があります。PFSはHSCと同じ光学系を使用するため、HSCで得られた大量の撮像データおよび製造データを使った光学モデルを使って、上記補正の予行練習を現在行っていますが、望遠鏡に装着してからの較正が非常に重要となります。

首尾よく光ファイバーに星の光を導けた後も、光は長さ60mもの光ファイバーの中を伝播するうちに減衰してしまいます。特に波長の短い青い光で減衰が顕著になるため、PFSでは日本のメーカーに依頼して青域でも減衰の少ない光ファイバーを開発しまし

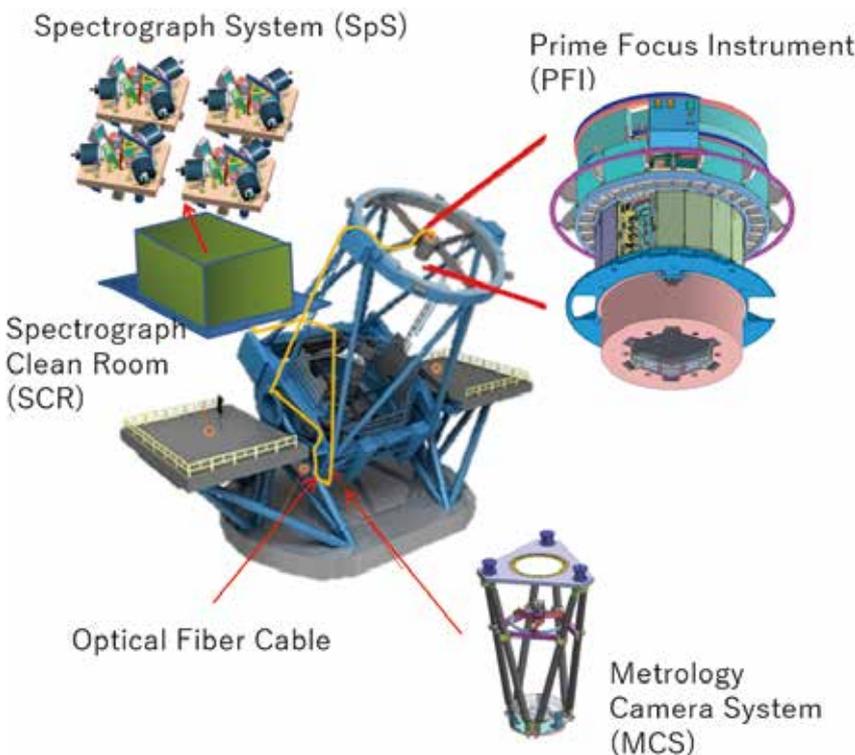


図04 PFSハードウェアの概要。

た。また光ファイバーでは、ファイバーから出てくる光の角度分布が、入射光のそれよりも広がり、光ファイバーの曲がり具合によってそれが変化します。分光器で受けられる光の角度には限りがあるので、それより大きな角度で出射した光は失われてしまいます。それを避けるために、光ファイバーの入射端に小さなレンズを付けてあらかじめ入射角を抑えてあります（このレンズも日本製で、反射防止膜は先端技術センターの特殊蒸着装置で成膜されました）。また光ファイバーは特殊な巻き方で束ねられており、少々曲げが変化しても影響が出ない工夫がしてあります。

その他、各サブシステムにはそれぞれ独自の工夫がなされていて解説しだすとキリがないので、興味のある方はSPIE等で発表されているレポートをご覧ください。装置全体の詳しい諸元、予想性能などは<https://pfs.ipmu.jp/intro.html>を参照してください。

現在の開発状況

分光器の1台目は既に山頂に設置され特性の評価を行っています（図05）。光ファイバー位置計測用カメラシステムも既に山頂での調整を終えて（作業の最中にキラウエアの噴火が起こり難儀しましたが）、主焦点部装置の到着を待っている状態です（図06）。主焦点部はコブラ・モジュールの製作が完了し、台湾にてすべてのモジュールの組み込みも完了し（図07）、執筆時現在光ファイバーにコネクタを取り付ける作業と最終の特性評価を行っている段階で、2021年に予定している試験観測開始に向けて作業の大詰めを迎えています。分光器の残り3台も組立調整が進んでいて、順次ハワイへ輸送されフルセットでの試験観測を行う予定です。

ハードウェアの開発と並行して、装置制御ソフトウェアだけでなく、解析パイプライン、科学データベースの開発が進められていて、日本ではHSCで研鑽を積んだチームが中心となって、PFSでもその経験を生かして活躍しています。また2400本の光ファイバーを如何に無駄なく効率

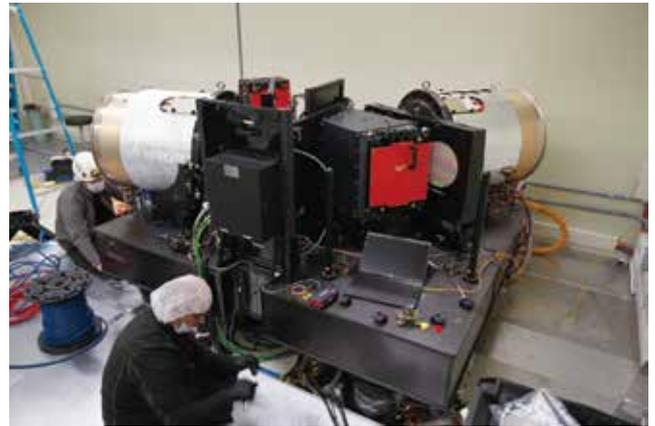


図05 すばる望遠鏡に設置中の1台目の分光器。



図06 すばる望遠鏡に搭載して調整中の光ファイバー位置計測用カメラシステム（MCS）。

良く使用するかは、運用上の重要な課題であり、コミュニティーも含めて検討が進められています。

2020年に入り、新型コロナウイルスの影響で各国でラボへの出入りや出張の制限が続いており、コロナ前に想定していたスケジュールを進めることが困難な状況になっています。しかし各機関と調整、工夫をして、安全・確実に、そしてできるだけ早く科学観測を開始できるよう、進めていく予定です。

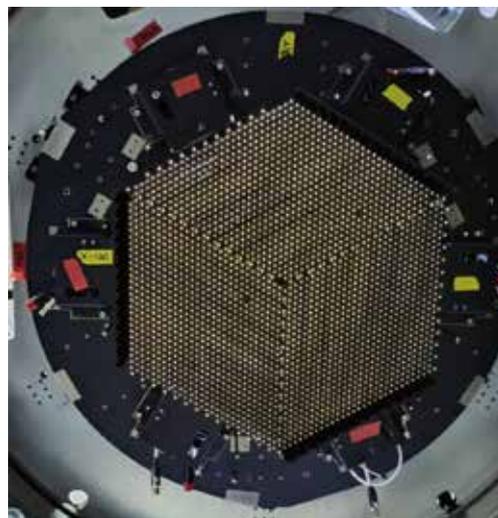


図07（左）コブラ・モジュールの組み込み作業と、（右）モジュールがすべて組込まれた主焦点部装置（PFI）。（クレジット：ASIAA/ASRD）

II 銀河の形成と進化の歴史を解明する

地表層補償光学+広視野高解像赤外線観測装置 (ULTIMATE-Subaru)

ULTIMATE-Subaruは、地表層補償光学を用いた広視野高解像の赤外線観測を実現することで、超遠方の宇宙を探索し初期宇宙の性質とその後の進化を明らかにします。

美濃和陽典
(ハワイ観測所)



小山佑世
(ハワイ観測所)



すばる望遠鏡アップグレード計画「第三の矢」

前節で紹介されたPFSは、すでに運用を開始しているHSCとともに、2020年代のすばる望遠鏡の主力装置として歴史的なサーベイを成し遂げることが期待されます。ただしHSCもPFSも主に「可視光」の観測装置であることには注意が必要です。遠方銀河の観測を例に挙げると、ライマン α 輝線やライマンブレークを狙う方法であれば赤方偏移6~7の宇宙まで、H α 輝線であれば赤方偏移1の宇宙までしか見通すことができません。より遠方宇宙を開拓するには「波長の壁」を打ち破り、可視光よりさらに長い波長帯、すなわち「赤外線」での観測が必要になります。

ULTIMATE-Subaru計画(以下、ULTIMATE)は、視野直径20分角にわたって星像を改善する地表層補償光学(GLAO)を搭載し、すばる望遠鏡の特に近赤外線波長域における観

測能力を大幅に強化する計画です。地表付近の大気ゆらぎを補正して星像を改善するGLAOの技術によって、従来の補償光学に比べて格段に広い視野を実現することができます(図01)。ハワイ島マウナケアは、GLAOに最適な大気条件で、Kバンド(波長 $2\mu\text{m}$ 帯)において標準的な気象条件で0.2秒角の空間解像度を実現できます。これはハッブル宇宙望遠鏡や2020年代中盤に打ち上げが予定される米国NASAのNancy Grace Roman Space Telescopeとも同等の解像度です(p12・図02)。GLAOによる星像改善によって点源検出感度も向上し、視野拡大と合わせてサーベイ効率が桁で向上します(p12・図03)。ULTIMATEはその近赤外線波長域での広域探索能力を武器に、TMTへすばる独自のターゲットを供給する意味でも重要な役割を果たすことが期待されています。本稿ではULTIMATEが目指す科学目標と開発の現状を紹介します。

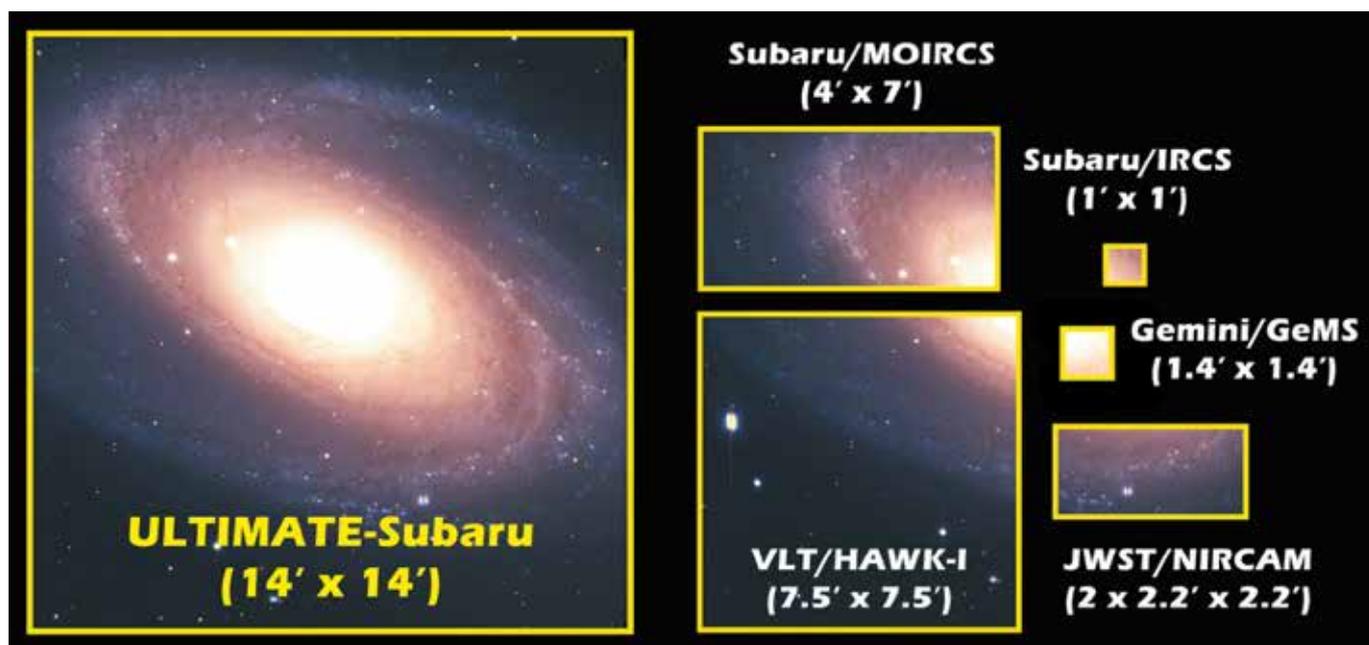


図01 ULTIMATEの視野と地上大型望遠鏡/スペース望遠鏡の赤外線カメラの視野比較。特にKバンド(波長 $2\mu\text{m}$ よりも長波長側)の観測において、ULTIMATEは世界最大の視野とサーベイ効率を実現する。(ULTIMATE-Subaruチームより提供)

前人未到の超遠方宇宙への挑戦

まだ誰も見たことのない宇宙をこの目で見たい。もっと遠い天体を見つけたい。そして宇宙で最初に生まれた天体にたどり着きたい。これは天文学者の夢であるだけでなく、現代を生きる私たち人類のロマンでもあります。ULTIMATEは、最果ての宇宙に挑む計画です。すばる望遠鏡はこれまでも宇宙の広域探査で世界をリードしてきました。赤方偏移6~7（約130億年前の宇宙）に多数の天体を見つけ、これまでに何度も最遠方天体の記録を塗り替えてきました。ULTIMATEでは、近赤外線（特に2 μ m帯）での高い感度を生かし、2020年代に打上げが予定される欧米の近赤外線宇宙望遠鏡計画（EuclidやNancy Grace Roman Space Telescope）とタイアップする事で、赤方偏移10を超える宇宙に銀河を多数見つけ出し、宇宙初期の天体形成を観測的に解き明かします。

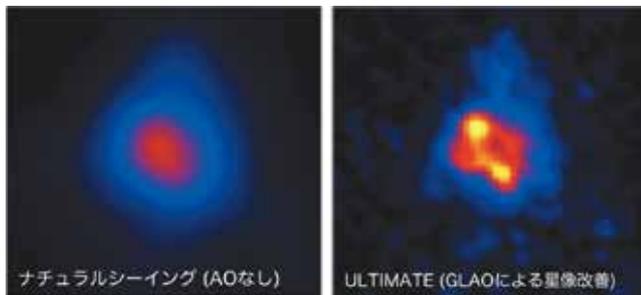


図02 ULTIMATEによる赤方偏移2（100億年前の宇宙）の星形成銀河の観測シミュレーション。補償光学を使わないナチュラルシーイング条件ではほぼ点源にしが見えないが、GLAOによって0.2秒角の分解能が達成されると銀河の内部構造が見えてくる。ULTIMATEはこの解像度を14分角x14分角（直径20分角）の広い領域にわたって実現する計画である。

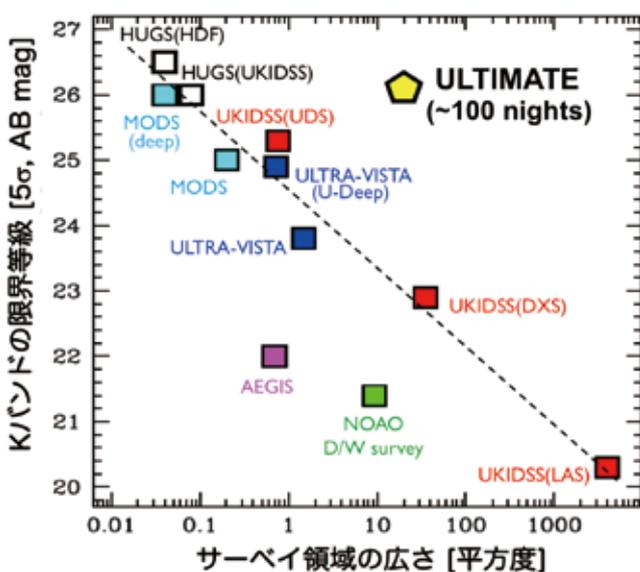


図03 ULTIMATEで仮に100夜を投入してKバンドのディープサーベイを行なった場合に実現できるサーベイ面積（横軸）と限界等級（縦軸）の目安。過去に行われた同波長域のサーベイと比較して、圧倒的な広さと深さが期待できる。より具体的なサーベイデザインは現在サイエンスチームで議論されている。

銀河進化の歴史を解剖する

銀河の画像を見て「美しい」と思う人は多いでしょう。でも、銀河がどのようにその美しい姿を獲得したのか、考えてみたことはありますか？ ULTIMATEは宇宙の歴史を遡り、銀河の形成と進化の歴史をシャープに描き出します。最近の研究によれば、100億年以上前の宇宙にすでに現在の宇宙に見られる大質量銀河に匹敵する巨大な銀河が存在することが分かってきました。ULTIMATEでは広視野カメラに多彩なフィルターを搭載して遠方銀河を静止系可視光で探査します。また遠方銀河を見つげ出すだけでなく、ULTIMATEならその高い空間解像度を生かして、個々の銀河の内部構造まで明らかにすることができます。近傍銀河の観測では巨大分子雲（GMC）のスケールへ、さらに近傍の銀河であれば個々の星にまで分解して、銀河内部で起きている物理現象が手に取るように分かります。ULTIMATEはさまざまな時代の銀河を徹底解剖し、銀河という天体の素性を明らかにします。

初期宇宙の超新星爆発を捉える

静寂に見える宇宙も決して止まっていません。宇宙のいたるところで様々な爆発現象が起きています。ULTIMATEのKバンドでの広視野・高感度のモニタリング観測によって、超遠方宇宙で起きる超新星爆発を捉えることができるかもしれません。超新星には超高輝度超新星（superluminous supernovae）や対不安定型超新星（pair-instability supernovae）とよばれる特に明るく輝くタイプがあり、ULTIMATEなら赤方偏移6を超える宇宙でこれらを発見できると期待されています。発見される超新星のなかにはいわゆる「種族Ⅲ星（Population III）」の星の爆発も含まれていると期待されます。ULTIMATEが見つめる超新星はさらに将来、TMTによる格好のフォローアップ対象となります。ULTIMATE+TMTで初代星の性質を明らかにする日がやってくるのです。

天の川銀河の形成と進化、そして星の一生を究める

ULTIMATEの特長である近赤外線での広視野・高解像度の観測能力は、銀河系中心や銀河面、さらに銀河系内の星形成領域のように星が混み入った領域や塵に深く埋もれた領域の観測で威力を発揮します。銀河系中心（バルジ）領域の広視野モニタリング観測からは、「マイクロレンズ」と呼ばれる手法で恒星質量ブラックホールを見つけ出し、また恒星の位置情報（アストロメトリ）から中間質量ブラックホールを同定できると期待されます。また銀河面に沿ってULTIMATEで広域に探査することで、これまで星密度が高くて分解できていなかった様々な種族の星を個別に検出し、主系列星、激変星、超新星残骸やOH/IR星などの研究も飛躍的に進むことが期待されます。さらに銀河系内

に分布する星形成領域の系統的な観測から、さまざまな環境下での初期質量関数 (IMF) を調べ上げ、その普遍性や環境依存性を明らかにすることができます。このように ULTIMATE は赤外線域での広視野・高解像度観測が鍵を握るすべての研究分野で新しい時代を切り拓きます。

究極のすばるに向けて (装置開発の現状)

ULTIMATE では、近赤外線波長域において、これまでにない広視野かつ高感度のサーベイ観測を、ハッブル宇宙望遠鏡に匹敵する高解像度で行う事を目指しています。このユニークな機能を実現するために必須の装置が、地表層補償光学 (GLAO) です (図04)。GLAO は、地上望遠鏡において、地球大気による光波面の乱れをリアルタイムに補正し、望遠鏡で観測する星像の中心集中度を大幅に向上させる補償光学の1つの手法です。従来の補償光学では、1つの波面参照星を使って望遠鏡の回折限界に迫る高い空間解像度を得ることができました。しかし、大気揺らぎの強さが、望遠鏡の見る方向によって異なるため、参照星の周辺の狭い視野 (< 1 分角) においてしか高解像度の観測ができないという制限がありました。GLAO では、複数の波面参照星の情報を使って、地球大気地表に近い層 (地表層、高度 < 100 m) の揺らぎだけを測定し補正します。地表層の揺らぎは、望遠鏡が見る方向によって大きく変化しないた

め、広い視野にわたって補償光学による補正を効かせることができます。高層の大気揺らぎは補正できないため、回折限界に迫る空間分解能は達成できませんが、すばる望遠鏡のあるマウナケア 山頂では、地表層の揺らぎが支配的であるため、地表層の揺らぎを補正するだけで、視野直径 20 分角にわたりハッブル宇宙望遠鏡に迫る 0.2 秒角の空間分解能が得られると期待されています。

ULTIMATE では、最大 14×14 平方分角 (対角 ~20 分角) の視野をカバーする世界最大の GLAO をすばる望遠鏡に搭載するための検討を進めています。GLAO を構成する主要な構成要素としては、主に光波面を測定する波面センサー、波面を測るための参照光源を人工的に生成するレーザーガイド星生成システム、波面を測定するための波面センサーユニットがあります (p14・図05)。すばる GLAO では、広い視野にわたって揺らぎを補正するために、望遠鏡の入射瞳に相当する副鏡部分を可変形鏡化する可変形副鏡を搭載します。可変形副鏡は、直径 1.26 m で厚さ 2 mm の薄い鏡の裏に 924 本のアクチュエーターを搭載し、鏡の形状を 1 kHz 以上の高速で変形させる事ができます。レーザーガイド星生成システムでは、波長 589 nm の高出力のレーザーを望遠鏡から上空に向かって照射し、高度 ~90 km の高層大気にあるナトリウム原子を励起させ、人工の波面参照星 (レーザーガイド星) を作ります。すばる GLAO では、望遠鏡の側面から 4 本のレーザーを照射し、4 つのレーザーガイド星を作ります。4 つのレーザーガイド星からの光は、望遠鏡の焦点面付近に搭載した 4 つのシャックハルトマン波面センサーに導かれます。

波面センサーユニットでは、4 つのレーザーガイド星からの光以外に、レーザーガイド星では測れない低次の波面誤差を測定するための 4 つの自然の星の光を使い、合計 8 個の波面センサーにより波面測定を行います。測定された波面測定データは、リアルタイム計算機に送られ、地表層の揺らぎだけを取り出し、それに合わせて可変副鏡の形状を変形させます。このような測定、補正のループを 0.5~1.0 kHz のサイクルで行います。波面センサーユニットは、すばる望遠鏡のカセグレン焦点、ナスミス焦点にそれぞれ搭載され、それぞれの焦点に搭載された観測装置に GLAO によって大気揺らぎが補正された光を提供します。

すばる GLAO は 2018 年度に概念設計を完了し、現在基本設計の段階にあります。2019 年度には国立天文台の新規 A プロジェクトとして採択され、「すばる広視野補償光学 (GLAO) プロジェクト」として活動を開始しました。このプロジェクトでは、最初の 3 年で基本設計及

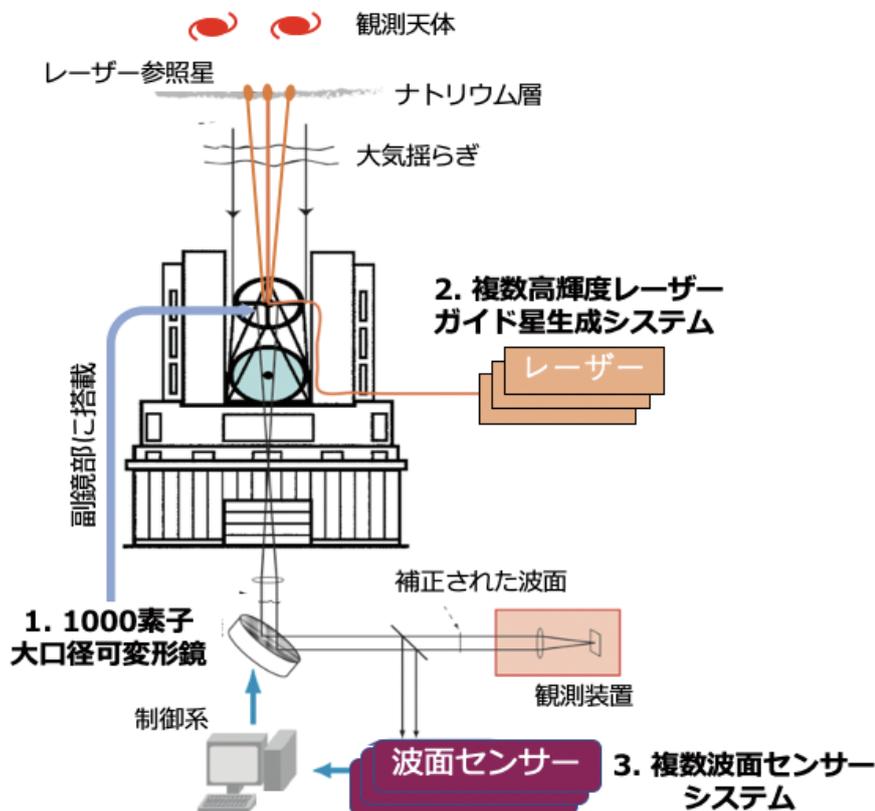
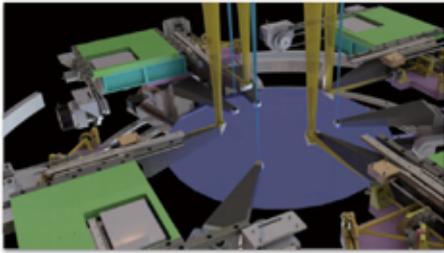


図04 地表層補償光学 (GLAO) の概念図。複数の波面センサーを用いて、地球大気のうち地表に近い層の揺らぎのみを取り出し、望遠鏡の副鏡部に搭載した可変形副鏡を高速で変形させ、広視野に渡った揺らぎ補正を実現する。揺らぎを測定するための参照星としては、高出力のレーザーを用いて複数の人工星を望遠鏡の視野周辺に作る。

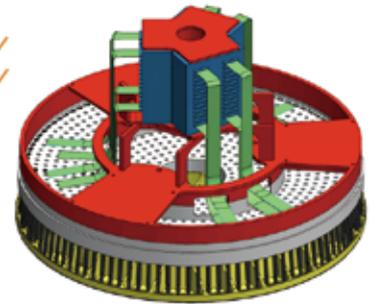
3. GLAO:波面センサー

カセグレン焦点 赤外ナスマス焦点
(視野<20分角) (視野<14分角)



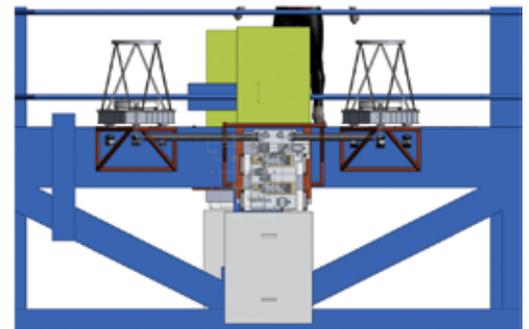
1. GLAO: 可変副鏡

直径1260mm, 924本のアクチュエーターを搭載した可変形鏡



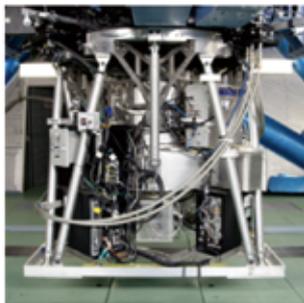
2. GLAO:レーザーガイド星生成装置

TOPTICALレーザー(589nm)を2台搭載し、4本のレーザーを照射

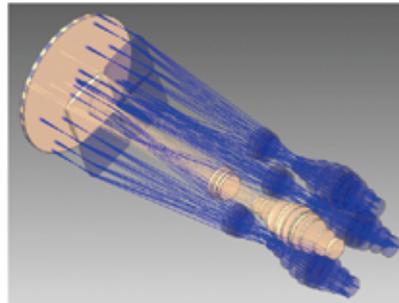


4. 広視野近赤外線観測装置

- ・ MOIRCSを赤外ナスマス焦点で再利用
- ・ カセグレンに広視野撮像装置(WFI)を設置



a. MOIRCS



b. Wide-Field Imager (WFI)

図05 ULTIMATEで開発するGLAOシステム及びサイエンス観測装置の概要。

びレーザーガイド星生成システム、波面センサーなどの基盤となる技術の実証を行います。その後、最終設計、製作、組立試験を行い、2025年度までにすばる望遠鏡にGLAOを搭載し、科学試験観測を実施することを目指しています。

ULTIMATEでは、すばる望遠鏡においてGLAOと共に用いる観測装置の検討も進めております(図05)。ナスマス焦点には、既存の広視野近赤外線撮像分光装置であるMOIRCSをカセグレン焦点からGLAOのコミッショニング時期に合わせて移設し搭載する予定です。MOIRCSは、GLAOのコミッショニングのための装置として使う他、撮像モードによる初期サイエンス、多天体分光モードによる世界最高感度の近赤外線分光サーベイを行います。また、カセグレン焦点には、最大視野14×14平方分角を持つGLAO専用の広視野近赤外線撮像装置(Wide-Field Imager, WFI)を搭載し、ULTIMATEの旗艦装置として、大規模な広視野サーベイ観測を展開します。現在、MOIRCSの移設、WFIの開発については概念設計を行っており、それぞれGLAOのナスマス焦点(2026年度)、カセグレン焦点(2027年度)におけるコミッショニング時期に合わせて装置を開発するべく検討を進めております。

新時代のすばる補償光学で広がるサイエンス

最後に、ULTIMATEが提供するののは広視野の観測能力だけではありません。GLAOで開発する補償光学システムでは、レーザーガイド星を空の狭い領域に集中させ、その領域の大気揺らぎを完全に補正することで可視光から近赤外線までの広い波長域で望遠鏡の回折限界に迫る高い空間分解能が得られる狭視野モード(LTAOモード)も実装する予定です。このモードを利用して点源への感度を極限まで高め、狙った天体について可視光から近赤外線まで同時に分光できる新しい高感度・広帯域分光装置のアイデアなども提案されています。すばるは決して「広視野サーベイ」一本槍の望遠鏡ではなく、多彩な機能を備えた世界一の望遠鏡であり続けたい。そのためにもULTIMATEの実現が期待されているのです。

ULTIMATEの科学目標、観測装置計画、開発、サイエンス計画を進めるチームメンバー、プロジェクトの進捗状況についてはウェブサイト(<https://ultimate.naoj.org/>)で紹介しておりますので是非ご覧ください。

III マルチメッセンジャー天文学を展開する

電磁波のデータに重力波やニュートリノの観測シグナルも加わるマルチメッセンジャー天文学では、広視野・高感度の「すばる望遠鏡」が天体の同定に大きな力を発揮します。



田中雅臣
(東北大学)

宇宙を探る新しい手段

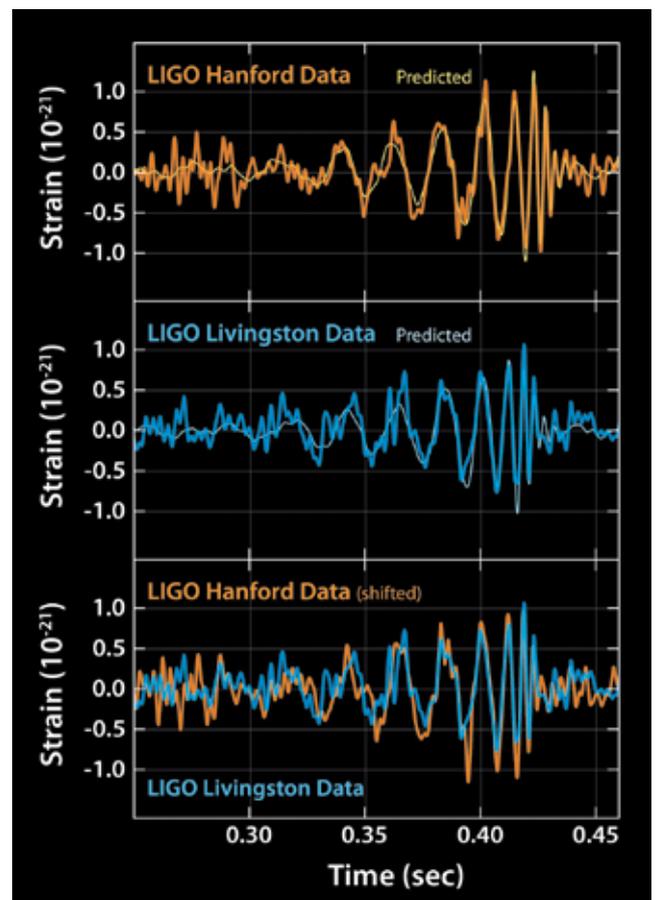
人類はこれまで主に電磁波を使って宇宙を研究してきました。目に見える光（可視光）を使った天文学の時代が長く続いた後、20世紀には赤外線、電波、X線といったあらゆる波長の電磁波を駆使した天文学が可能となりました。しかし、宇宙からやってくるシグナルは電磁波だけではありません。太陽など宇宙に存在する恒星はニュートリノを放っていますし、重力の強い天体の動的な現象は重力波を放つことが知られています。このように、宇宙からやってくる全てのシグナルを使って宇宙の姿を研究する天文学は、「マルチメッセンジャー天文学」と呼ばれています。

2015年にはアメリカの重力波観測所LIGOによって、初めて重力波が直接検出されました（GW150914、01）。そのシグナルの特徴から、この重力波は2つのブラックホールが合体した時に放たれたものであることが分かっています。この検出によって宇宙に太陽よりも30倍ほど重いブラックホールが存在することが分かり、宇宙物理学に大きな衝撃を与えました。

一方で、ニュートリノは重力波よりも以前から観測が行われています。太陽における核融合で放出されるニュートリノは、1970年代に初めて観測されています。また、1987年には大マゼラン雲でおきた超新星爆発（SN 1987A）からのニュートリノが日本のカミオカンデで検出されました。太陽や超新星では以前からマルチメッセンジャー天文学が行われていたのです。

さらに、2011年からは南極の氷を使った IceCube ニュートリノ観測所で、1兆電子ボルト（1電子ボルト=1ボルトの電圧で加速された電子がもつエネルギー）を超えるエネルギーをもつニュートリノが継続的に観測されています。太陽や超新星からのニュートリノは1つあたり10~1000万電子ボルト程度のエネルギーですので、まさに桁違いの高エネルギーニュートリノです。このような高エネ

ルギーニュートリノは、宇宙で陽子などが高いエネルギーに加速され、周りの物質や光と衝突したときに放出されることが知られています。宇宙では宇宙線と呼ばれる高エネルギー粒子が飛び交っていることが分かっていますが、非常にエネルギーの高い宇宙線がどこで作られているかはまだ明らかになっていません。宇宙線は宇宙空間の磁場で曲げられてしまいましたが、ニュートリノは私たちのところに



01 史上初めて観測された重力波シグナル（GW150914）。横軸が時間で縦軸が重力波の振幅を表している。縦軸の単位は、重力波が到来したことによる長さの相対的な変化で、 10^{-21} という極端に微小なシグナルであることがわかる。（クレジット：LIGO）

まっすぐ飛んでくるため、高エネルギーニュートリノを放出している天体を見つかることができれば、宇宙の高エネルギー粒子の加速源を突き止めることができるはずです。

なぜマルチメッセンジャー観測？

重力波やニュートリノは宇宙を探るための魅力的な新しい手段です。しかし、重力波やニュートリノそれぞれの観測だけでは、その恩恵を最大限に享受することができません。なぜなら、重力波やニュートリノの検出器だけでは、その到来方向を正確に決めることができないからです。

重力波検出器の場合は、重力波を放った天体の位置の決定精度は100平方度程度になってしまいます(図02)。そのような広大な領域を望遠鏡で観測すると、無数の星や銀河が存在するため、どの天体が重力波を放ったかが分からないのです。ニュートリノの場合も状況は似ており、スーパーカミオカンデの場合は位置決定精度がおおよそ30平方度(超新星爆発の場合)、IceCubeの場合は1平方度程度です。

そこで、重力波やニュートリノが検出されたら、その情報を受けてすぐに電磁波の望遠鏡を向け、対応する天体を探し出すことが重要となります。ここで、8m級の望遠鏡では唯一広い視野を観測できるすばる望遠鏡の出番です。すばる望遠鏡の超広視野カメラHyper Suprime-Cam(HSC)は1.8平方度の視野をもっており、これは他の8m級の望遠鏡の視野の実に30倍にもなります。つまり、すばる望遠鏡はどこにあるかが正確には分からない天体を探し出すのに世界で最も適しており、マルチメッセンジャー天文学には「最強」の望遠鏡なのです。

重力波天体

重力波天体のマルチメッセンジャー観測は、2017年に初めて成功しました。2017年8月17日に中性子星合体からの重力波がLIGOとVirgo(イタリアの重力波観測所)によって観測され(GW170817)、この速報を受けた世界中の望遠鏡がその方向を探査した結果、重力波を放った天体が同定されました(図03)。中性子星の合体现象は、金やプラチナなどの重元素を合成して放出することで可視光や赤外線で輝くことが期待されていました。GW170817からの電磁波放射の特徴はその予想と一致しており、中性子星合体が重元素を合成する現場が初めて捉えられたといえます。

この重力波シグナルはすばる望遠鏡のあるハワイが昼の時間に検出されたため、すばる望遠鏡が最初の発見をした訳ではありません。しかし、すばる望遠鏡ではHSCの広視野を生かして、重力波の到来方向をくまなく観測し、図03右の天体以外に候補の天体がないことを証明しています(図03左)。この貢献は科学的には非常に重要なものでした。

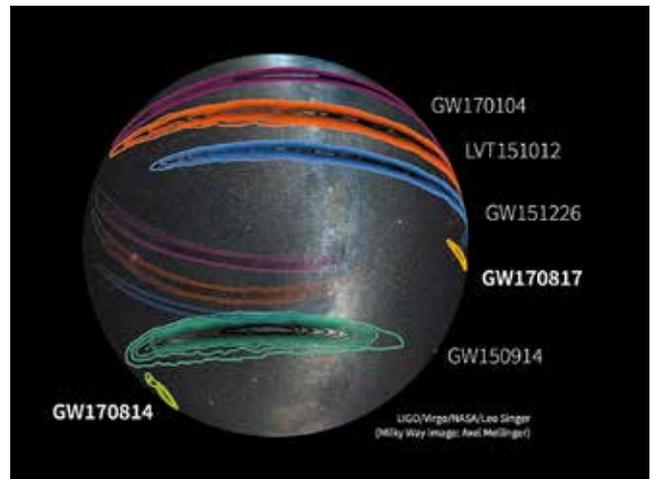


図02 重力波の到来方向。天球面における見かけ大きさは角度で測り、1度×1度の大きさが1平方度(満月の直径は0.5度で、大きさは0.2平方度)。GW150914の到来方向の決定精度は約600平方度で、満月3000個分に相当する。GW170814とGW170817の位置決定精度が良いのは、Virgoも観測に加わっているため。[クレジット: LIGO/Virgo/NASA/Leo Singer (Milky Way image: Axel Mellinger)]

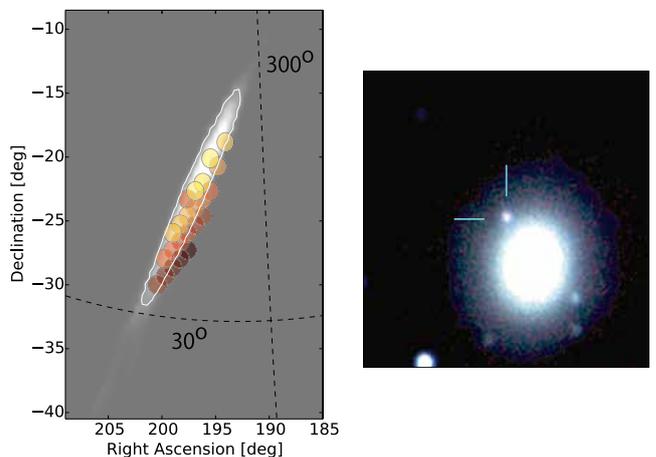


図03 (左) GW170817の到来方向と、すばる望遠鏡HSCで観測された領域(Tominaga et al. 2018, PASJ, 70, 28)。[クレジット: 富永 望氏(甲南大学)] (右) GW170817の可視光・赤外線対応天体(Ustumi et al. 2017, PASJ, 69, 101)。すばる望遠鏡とIRSFで観測された可視光と赤外線の画像を合成したもの。線で示されたのが中性子星合体からの光。中心の明るい部分は、中性子星合体が起きた銀河(NGC4993)。[クレジット: 国立天文台・名古屋大学]

中性子星合体が本当に宇宙における重元素の起源かどうかはまだ分かりません。この問題に答えるには、宇宙でどれくらいの頻度で中性子星合体が起きているのか、そして1回の合体でどのような元素がどれだけ放出されているのかを明らかにしなければなりません。しかし、これまでマルチメッセンジャー観測が成功したのはたった1例のみです。今後、重力波観測の感度が向上し、さらに日本のKAGRAが観測に加わることで、位置決定精度が良い重力波の検出例が増えると考えられ、より多くの天体のマルチメッセンジャー観測が実現することが期待されています。

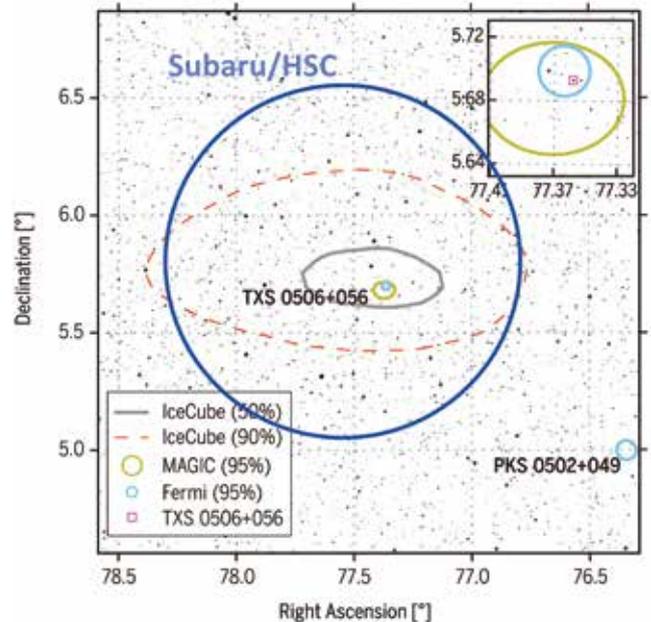
ニュートリノ天体

高エネルギーニュートリノ天体のマルチメッセンジャー観測も、2017年に初めて実現されました。2017年9月22日にIceCube観測所で高エネルギーニュートリノが観測され (IceCube-170922A、[図04](#))、その情報が世界中に速報されました。広島大学のかなた望遠鏡でその到来方向を観測したところ、ブレーザーと呼ばれる天体 (TXS 0506+056) の明るさが以前と変化していることが発覚しました ([図05](#))。ブレーザーとは、超巨大ブラックホールから光の速さに近いガスの流れ (ジェット) が発生しており、そのジェットが地球の方向を向いている天体です。その後、この天体の明るさがガンマ線でも変動していることが分かり、IceCube-170922A ニュートリノを放った天体として同定されました。ブレーザーのジェットで高エネルギーの粒子が加速され、そこからニュートリノが放出されたと考えられるのです。

しかし、これまでのニュートリノとガンマ線の観測から、ブレーザーが全ての高エネルギー宇宙線を加速しているとは考えにくいことも知られており、高エネルギー宇宙線の起源はまだ謎に包まれています。超新星爆発や、ブラックホールに星が吸い込まれる現象など、宇宙には高エネルギー現象が多く存在しています。高エネルギー宇宙線がどこで作られているのかという問いに答えるには、今後より多くの高エネルギーニュートリノに対してマルチメッセンジャー観測を実現することが必要です。

今後への期待

重力波と高エネルギーニュートリノの観測が可能となっ

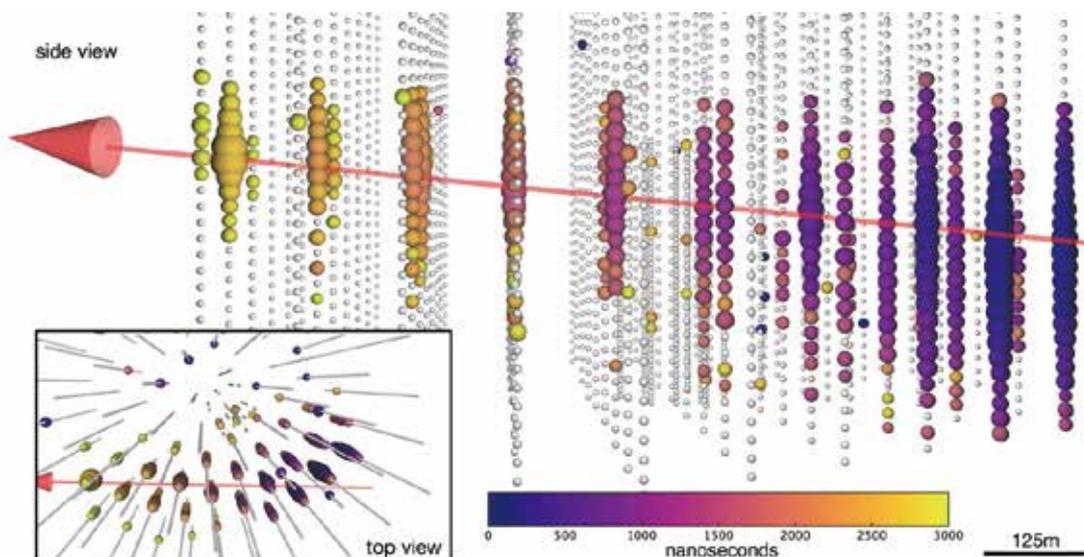


[図05](#) IceCube-170922Aの対応天体。右上が中心部の拡大図で、ピンク色の四角が対応天体として同定されたブレーザーTXS 0506+056。青い丸がすばる望遠鏡HSCの視野を表す。その他の線は、IceCube (ニュートリノ)、MAGIC (高エネルギーガンマ線)、Fermi (ガンマ線) で推定された天体の位置。[The IceCube Collaboration et al., 2018, Science, 361, 146の図を改変。クレジット：諸隈智貴氏 (東京大学)]

たことで、宇宙の重元素の起源や、高エネルギー宇宙線の起源など、宇宙の物質の根源に迫る新たな手段が切り拓かれました。これらの天体現象を捉えるには、高感度で広い領域を観測する必要があり、マルチメッセンジャー天文学では「最強」のすばる望遠鏡に期待が集まっています。

そして、重力波や高エネルギーニュートリノを放つ天体を発見するだけではまだ足りません。発見された天体の素性を詳しく知るためには、光を波長方向に分ける分光観測が必要不可欠です。分光観測を行うことで、中性子星合体が放出する元素に関する情報が得られますし、ニュートリノ

を放った天体の種類や距離を特定することができます。すばる望遠鏡でやっと見つけれられる天体の分光観測には、Thirty Meter Telescope (TMT) など30m級の望遠鏡が必要となります。重力波天体・ニュートリノ天体をすばる望遠鏡で見つけて、TMTにその情報を送って即座に分光する、そんなマルチメッセンジャー観測を実現できる日を楽しみにしています。



[図04](#) IceCube-170922Aのシグナル (The IceCube Collaboration et al. 2018, Science, 361, eaat1378)。各点が検出器のシグナルを表しており、検出された時刻の違いによって色分けされている。紫色が最初の方に観測されたもの、黄色が最後の方に観測されたもので、端から端までの時刻の差は3マイクロ秒程度。各点の大きさは記録された光の量に対応している。

IV 地球型系外惑星を探索する

9月号の前編記事でも紹介した赤外線分光装置IRDによって、現在、大規模なサーベイ観測が行われています。IRDが目指す今後の地球型系外惑星の探索プランを紹介します。



小谷隆行

(アストロバイオロジーセンター、
国立天文台)



佐藤文衛

(東京工業大学)

太陽以外の恒星をまわる惑星は太陽系外惑星あるいは系外惑星と呼ばれ、現代の天文学の中で最もホットな話題の一つになりました★01。すばる望遠鏡でも、これまで可視分光器を用いた間接的惑星探査による巨大なコアを持つ木星型惑星の発見や、高コントラスト赤外線カメラを用いた直接撮像観測による「第二の木星」の発見などで大きな成果を挙げてきました。一方、系外惑星分野は世界との競争の激しい分野でもあり、常に新しい観測装置を開発して、これまでにない種類の観測を行うことが求められます。そこで、すばる望遠鏡では、自然科学研究機構アストロバイオロジーセンターと協力して、赤外線によるドップラー法により地球型惑星に迫ることと、将来の超巨大望遠鏡用の系外惑星直接観測の技術開発にすばる望遠鏡をテストベッドとして用いることを「すばる2」の大きな柱としています。本稿では、このうちの前者について詳しく紹介したいと思います。

観測装置の概要

IRD (InfraRed Doppler) は、すばる望遠鏡用に開発された、恒星の視線速度（ドップラー速度とも呼ぶ）を2メートル毎秒という非常に高い精度で赤外線を用いて測定し、地球型の系外惑星を発見することを目的とした観測装置です。様々な赤外線技術を集結した最先端赤外線観測装置ですが、2018年にすばる望遠鏡における試験観測に成功し、現在は晩期M型矮星★02まわりに地球型惑星を発見するべく大規模サーベイ観測（IRD-SSP、後述）を行っているほか、すばる望遠鏡の共同利用観測に提供され、宇宙望遠鏡によって発見された系外惑星のフォローアップ観測や9月号の前編記事で紹介された惑星の特徴を調べる観測など、多彩なサイエンスに用いられています。

それでは、IRDではどのようにして惑星を検出するのでしょうか？ 恒星のまわりに惑星が存在している場合、恒

星と惑星はお互いの共通重心のまわりを公転するため、恒星の光はドップラーシフトと呼ばれる現象により波長がわずかに変化します。波長を非常に細かく見分けることのできる高分散分光器を使えば、この変化を精密に測定し、直接は見えない惑星の存在を確認することができます。ただし惑星は恒星よりも非常に軽いため、恒星の動きはとても小さく、視線速度の変化はわずかに数メートル毎秒程度（だいたい人が歩く速度）です。この手法は可視光では多く利用されていて、最初の系外惑星の発見も、視線速度を測定する方法によるものでした。

それでは、なぜ今頃に新装置が必要なのでしょうか？ これまで系外惑星の多くは太陽に似た恒星（太陽型星）のまわりで探査が行われていました。実は近年、M型矮星という太陽の1/2以下の軽い恒星のまわりの惑星が注目されています。恒星が軽いため地球程度の小さな質量の惑星まで発見することが可能になること、M型矮星は太陽系近傍に最も多く存在する恒星であることが理由です。また、太陽系の近傍の惑星は将来の地上望遠鏡による惑星の直接撮像や分光観測により、生命の存在を示すバイオマーカーの存在を確認できる可能性があります。ただしM型矮星は低温度で可視光では暗いため、赤外線での観測が不可欠です。IRDはこのM型矮星や若い恒星など低温度天体の視線速度測定に特化した能力を持つ赤外線分光器です。

IRDは近赤外線と呼ばれる波長0.97~1.75マイクロメートル(μm)の天体の光を非常に細かく(約7万色に)分解してスペクトルを測定するための装置です。図01に装置の概略を示します。すばる望遠鏡のナスミス焦点にて、補償

★01 太陽型恒星まわりの系外惑星の発見（マイヨールとケロー 1995年）は、2019年度ノーベル物理学賞を受賞した。

★02 M型矮星は0.5太陽質量未満の軽い恒星のこと。赤色矮星とも呼ぶ。そのうち、特に温度の低いものが晩期M型矮星。IRDが狙うのは特に3000 K以下、0.1太陽質量以下のものである。

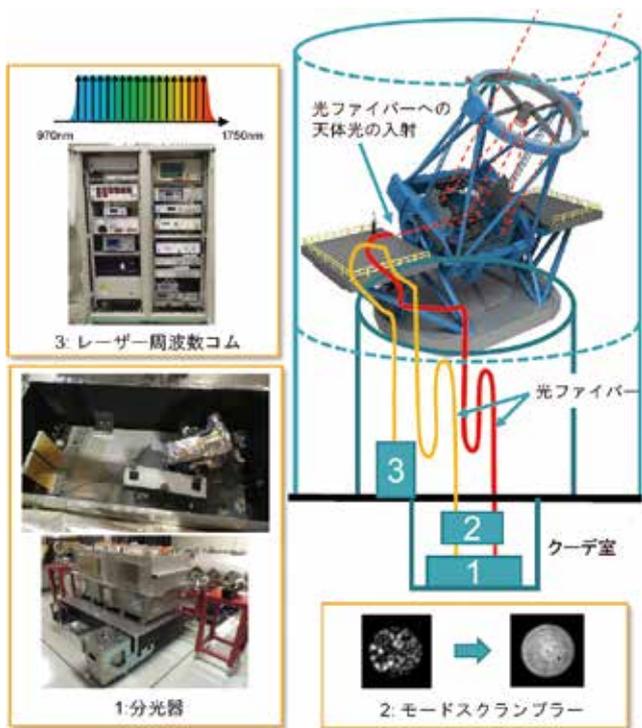


図01 IRD装置の概要。望遠鏡からの光は、ナスミス焦点にて光ファイバーに入射され、望遠鏡の真下に設置された分光器に接続されます。分光器の近くにはモードスクランブラーとレーザー周波数コムが設置されています。

光学で大気乱れを取り除いたあと、星の光を光ファイバーに入射します。光ファイバーは望遠鏡の真下にあるクーデ室と呼ばれる地下室に設置された分光器に接続されます。この場所は、すばる望遠鏡の中でも振動や温度変化が少なく、分光器を安定化させるには最適の場所です。分光器は真空チャンバーに納められており、微弱な赤外線を検出するために全体を -100°C に、最終的にスペクトルが記録される赤外線検出器は -200°C に冷却されています。赤外線検出器は世界で最も高感度な検出器を2基使用しています。分光器ではエシェル型回折格子を用いて天体の光を非常に細かく分解し、スペクトルを測定します。天体の光と同時に、レーザー周波数コムと呼ばれる波長の基準となる光源のスペクトルも同時に測定し、恒星の視線速度を高精度に測定します。

偽の視線速度変動との闘い

ただし、地球のような質量の小さな惑星を発見するのは簡単ではありません。なぜなら、観測装置自体が様々な原因により惑星とは関係のない「偽の視線速度変動」を生じさせてしまうため、これを極力小さくすることが、惑星を発見するためには極めて重要です。IRDはそのために以下のような3つの技術的ブレークスルーを必要としました。

① 究極の安定性を実現する光学系と温度安定化システム

数メートル毎秒という小さな視線速度の変化を検出する

には、装置が極めて安定である必要があります。例えば分光器の温度が 1°C 変化しただけで、見かけ上恒星が何百メートル毎秒も動いたかのように見える場合があります。そのような偽の視線速度変動を起こさないためには、分光器全体の温度を 0.1°C 以下で安定させる必要があります。IRDは様々な場所に温度センサーとヒーターを設置して精密な温度制御を行っています。さらに、温度が変化しても光学素子の形状や位置が変化しないような、「超低熱膨張セラミックス（京セラ製コージライト）」と呼ばれる特殊なセラミックを用いて光学定盤、ミラー、回折格子ホルダーなどを製作しました。このように光学定盤も含めた観測装置の大部分に超低膨張セラミックを用いたのは、IRDが初めてです。

② モードスクランブラーの開発

分光器が完璧に安定であっても、まだ偽の視線速度を生じさせるものがあります。それは、大気の乱れによって星像が変化したり、望遠鏡の指向が安定しない場合です。そのような「外乱」があると、天体の波長が変化したかのように見えてしまいます。この影響を限りなく小さく抑えるために、逆にわざと大きな「外乱」を与え続けることで、平均すれば常に同じスペクトルを観測できるようにする装置が「スクランブラー（擾乱発生器）」です。IRDでは、様々なタイプのスクランブラーを試験した結果、束になった光ファイバーを一定の周期で曲げ方を変化させる「シーソースクランブラー」、光を500メートル以上の非常に長い光ファイバーを通す「静的スクランブラー」、また光をディフューザーという回転するすりガラス状の光学素子を通すスクランブラー、などを組み合わせて使用しています。これによって、どのような観測条件でも常に安定した視線速度の観測が行えるようになっています。

③ 極めて安定な波長基準光源となるレーザー周波数コムの開発

これまで述べた観測装置を安定化させる手法を用いたとしても、まだ数メートル毎秒の視線速度測定には十分では

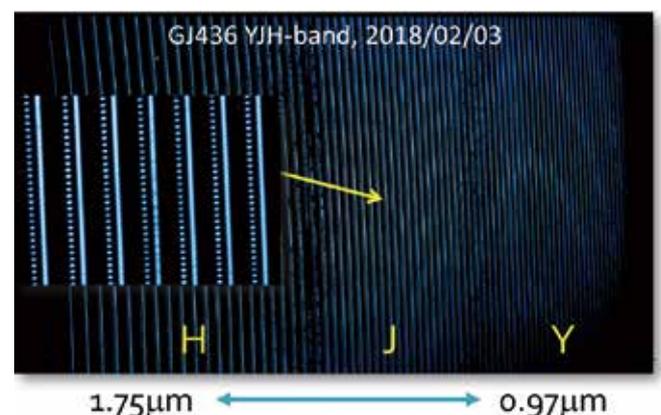


図02 IRDで観測したM型矮星とレーザー周波数コムのスペクトル。点状に連なって見えるのがレーザー周波数コム。

ありません。最終的には、絶対的に安定な波長の基準となる光源を天体と同時に分光観測し、偽の視線速度変動を取り除く必要があります。IRDでは新たに、光通信技術を応用して約0.1メートル毎秒の安定性を持つ「レーザー周波数コム」を開発しました。このレーザー周波数コムは、IRDの波長域の大部分において、一定の周波数間隔でレーザーのような鋭い輝線を発生させるもので、世界でもこのように広い帯域を持つ天文用のレーザー周波数コムは例がありません。p19の図02はIRDで実際に観測された天体とレーザー周波数コムのスペクトルです。

以上のような技術的な困難を解決し、IRDは約2年の長期間にわたり、2メートル毎秒の安定性でM型矮星の視線速度を測定可能であることを示しました。これは現時点では、近赤外線の高分散分光器としては世界で最も安定なものになりました。

IRDを用いたすばる望遠鏡戦略的観測

すばる望遠鏡では、2019年2月から上記の新分光器IRDを用いた晩期M型矮星まわりの地球型惑星探索を目的とした戦略的観測（IRD-SSP）が行われています。晩期M型星とは、M型矮星のうちの特に温度が低く低質量のものです。このような天体はほとんどが可視光では暗すぎて赤外線ではしか観測できません。また、主星が軽いので、2メートル毎秒程度の速度精度があれば地球のような軽い惑星でさえも検出できるようになります。IRD-SSPは当初に2年間の計70夜が暫定的に認められ、その後、装置性能とサイエンスの意義が改めて評価され、2020年7月に残りの3年間の計105夜が正式に認められました。

IRD-SSPには、以下の3つのサイエンスの柱があります。

- I. ハビタブルゾーン（HZ、生存可能領域）にある地球質量惑星の探索
- II. スノーライン★03以遠の地球型惑星から巨大惑星までの分布の解明
- III. 小型惑星の移動メカニズム、惑星進化への示唆

そしてこれらのサイエンスのため、以下のゴールを設定し惑星探索を進めています。

- ① 将来の超大型望遠鏡を用いた詳細観測に向けて、太陽近傍のM型矮星周りにハビタブルゾーン地球質量（ここでは～1.3地球質量を指す）惑星を発見する

★03 スノーライン：雪線とも呼ぶ。惑星系を形成するガスと塵の円盤では中心星から離れるほど低温になるが、水・アンモニア・メタンなどの水素化合物が凝集し、気体から固体となる温度となる距離のこと。太陽系の場合、水の雪線は約3au（1auは地球・太陽の距離）。雪線の内側では岩石惑星が、その外側には氷惑星やガス惑星ができやすくなる。

- ② M型矮星周りのスノーライン以内、以遠の領域における地球型惑星～巨大惑星の分布を明らかにし、惑星形成と進化を包括的に理解する

上記ゴールに到達するため、IRD-SSPは5年間で数十個の地球型惑星（このうち少なくとも数個はHZに存在）を含む60個以上の惑星発見を目指しています。

ゴール①：ハビタブルゾーン地球質量惑星の発見

これまでに4000個を超える系外惑星が発見されていますが、低温（表面温度3300K以下）の晩期M型矮星の周りでは、まだ約30個の惑星しか発見されていません（図03）。しかも、このうちHZに存在する惑星は8個しかなく、HZにある地球質量惑星は6個（恒星としては4個）しか見つかりません。HZ内外にある地球質量惑星の発見数を増やし、将来の大気調査などによってそれらの多様性を明らかにしていくことは、地球外生命探査を進める上で重要なステップです。特に、真に生命居住可能な惑星系を発見するためにはできるだけ多くの惑星を発見しておく必要があります。IRD-SSPの開始時点で既にHZ地球質量惑星は発見されていましたが、可視波長域で特に明るい太陽最近傍星を対象とした観測が中心の現状ではサンプルの増加は期待できません。一方、IRD-SSPのような近赤外波長域での観測では少し暗めの星にまで探索範囲を広げることができるため、将来のフォローアップに適した地球質量までの重要な惑星サンプルを増やすことができます。

ゴール②：惑星形成と進化の解明

図03についてスノーラインに注目してみると、スノーライン以内で見つかっている惑星は小型惑星が中心です。スノーライン以内の惑星分布は惑星の移動スピードによって違いが生じると考えられ、相対的に巨大惑星が少ないという傾向は定性的には速い移動（大きく成長する前に内側に

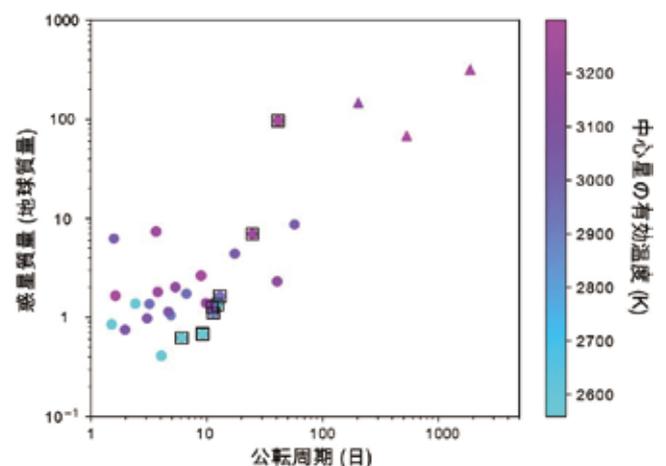


図03 これまでに発見されている低温（表面温度3300K以下）の晩期M型矮星まわりの惑星の質量・周期の分布（質量が測定されているもののみ）。横軸は惑星公転周期（単位日）、縦軸は地球質量を単位とする惑星質量、色の違いは中心星の表面温度の違いを表す。□はHZに位置する惑星。▲はスノーライン以遠の惑星。データはNASAのExoplanet archiveに基づく。

移動する)を示唆しますが、これは巨大惑星形成領域であるスノーライン以遠の惑星分布と併せて議論する必要があります。惑星形成論や太陽型星を対象とした視線速度観測の結果からはM型星ではそもそも惑星の材料物質が少なく巨大惑星の存在頻度は低いと予想されていますが、一方、別の手法による惑星探索ではこれが豊富に存在することを示唆するものもあり、大きな乖離が生じています。IRD-SSPはスノーライン以遠の地球型惑星から巨大惑星まで検出感度があるため、スノーラインをまたいだ広範囲の軌道領域の惑星分布を直接解明し、これらの問題に決着をつけることができると期待されます。

今後の予定

IRD-SSPで惑星探索が行われる天体は入念に選ばれています。まず、SSPが始まる前に中小口径望遠鏡を用いて

数百個のM型矮星に対して低分散分光観測を行い、H α 輝線の強度から自転速度と活動性を評価しました。自転速度が大きい星は地球質量惑星の検出に必要な視線速度の測定精度が出せず、また、活動性が高い星は恒星自身の視線速度変動が大きいため惑星検出には向いていません。自転速度が十分に小さく活動性の低い、惑星探索に適した星だけを約150個選定し、最終的にはこれらをIRDでのスクリーニングを通して約60個に絞り込みます。こうして選ばれた天体に対してそれぞれ80回の観測を目標に重点的な視線速度モニター観測を実施し、ハビタブルゾーンにある地球質量惑星の検出が可能なレベルにまで検出限界を下げます。これまで2年間の観測で一部の天域を除いて順調にスクリーニングが進み、2020年6月からはいよいよ集中的なモニター観測が始まりました。

赤外線ではしか観測できない晩期M型星はIRDのような赤外線分光器の独壇場です。今後、IRDが発見する「第2、第3の地球」の報告にご期待ください。

すばる望遠鏡の今とこれから一まとめに代えて



吉田道利
(ハワイ観測所長)

すばる望遠鏡の今

すばる望遠鏡の最近の数々の科学成果やそれらの将来に向かった発展の大きな可能性について、この特集で縦横に語られてきた。HSC、SCEXAO、IRDなどの最新の観測装置群が、人類がまだ見たことのない宇宙の姿を暴き出し続けている様子が、読者の皆さんに少しでも伝われば幸いである(9月号・特集「前編」参照)。すばるは一刻たりとも立ち止まることなく、前進し続けている。宇宙論、銀河進化、系外惑星、そして、基礎物理学へのインパクト。アルマ望遠鏡や天文観測衛星と連携した多波長観測の推進、さらにニュートリノ観測や重力波観測と協調したマルチメッセンジャー天文学の推進。すばるが生まれて20年。すばる望遠鏡はこれまで築き上げた成果の上に立ち、また新たな世界へ乗り出していこうとしている。そして、PFS、ULTIMATEといった新しい観測装置群を加えた「すばる2」計画は、そうした新たなすばる望遠鏡の挑戦を象徴するものである(今月号・特集「後編」参照)。すばる望遠鏡自体が大きく変わるわけではない。しかし、その機能は大幅に強化され、2020年代も世界最先端を走り続けるであろう。

TMTとの連携

すばる望遠鏡の将来はTMTとの関係を無視しては語れない。すばるとTMTの研究連携はすでに様々なところで語られている。例えば、2020年3月に国立天文台から発行された「すばる望遠鏡とTMTが結ぶ新たな宇宙像」★01(p22・図01)には、その具体的な内容が示されている。ぜひ一読いただきたい。これは80名以上の研究者が、「惑星系の理解と生命探査」「銀河進化のゆりかごから墓場まで」「宇宙のダーク成分と物質の起源」という三大テーマにつき、すばるとTMTの果たす役割と、その連携観測から期待される科学的成果をまとめた文書である。すばるとTMTの連携という時、すばる望遠鏡の超広視野観測能力と、TMTの高感度高解像度観測能力ということがしばしば取り上げられ、その相補性についての説明がなされることが多い。それは真実であり、この点における両望遠鏡のタッグは世界最強と言っても良い。しかし、この相補性の本質は、「視野」と「感度」の違いではない。「すばるで見つけてTMTで調べる」というところに本当の連携があると見るべきであり、系外惑星研究では、すばるの超精密視線速



図01 すばる望遠鏡とTMTが結ぶ新たな宇宙像(サイエンスブック2020)表紙。

度測定による地球型惑星候補の検出が、TMTによる詳細観測を可能とする。また、観測装置開発における連携も重要である。高解像度高コントラスト観測装置の開発では、すばるでの入念な実験・試験によって新しい技術の開発を行うことが、TMTの観測装置に繋がる道となっている。

すばる望遠鏡とTMTはその運用においても互いに密接に連携をはかっていく。現在、すばるとTMTの将来の一体的

な運用に向けて、両プロジェクトの協力体制の推進と、一部機能の融合が進められている。TMTは建設地に関する大きな問題を抱えており、残念ながらその建設開始は数年先延ばしとされた。この状況は、将来一体的な運用を目指すすばる望遠鏡にとっても苦しいものであるが、すばるとTMTの科学的な相補性と、両者の連携によって豊かなサイエンスが創出されることは明らかであり、すばる-TMT連携の実現を目指して、今後も協力関係の緊密化をはかっていく。

すばる望遠鏡の暗黒面

この特集で多くの方が語っているように、すばる望遠鏡は、科学的観点から見れば、今まさに旬を迎え、さらなる大きな発展を遂げようとしている。しかし一方、その将来に暗雲が垂れ込めているのもまた、否定はできない。標高4200mの過酷な環境下で、年間365日ほぼ無休で運用している施設にとって、20年という月日は重くのしかかってきている。施設設備のあらゆるところに老朽化の影が忍び寄る。国民の税金で運用されているすばる望遠鏡は、国の財政事情が芳しくない中、運用経費の削減が求められ、その圧力は年々厳しさを増している。すでに数年前から始まっていた大幅な予算削減は、観測所から運用に対する体力を徐々に奪い、その根幹を揺るがしつつある。すばるの科学成果を最大化しようとするれば、その運用は長期的に安定でなければならない。そして、それには施設設

備の老朽化に適切に対応しつつ、新しい観測装置のための施設整備を進めるという基盤を強固なものにすることが必須であり、その上で初めて実現できるものである。ハワイ観測所では、今、老朽化対策を最重要項目として取り組みつつ、観測装置の新規導入を行おうとしている。これらを並行して実施するために、すばる望遠鏡の運用の効率化によるリソースの有効活用や、観測装置開発・望遠鏡運用に関する国際パートナーシップの導入に取り組んでいる。今後とも一層のご支援をお願いしたい。

すばるはどこへ向かうのか

様々な困難を抱えているとはいえ、現在のすばる望遠鏡の価値はかつてないほど高まりつつあり、「すばる2」ではさらに超広視野多天体分光、広視野高解像度赤外線観測という機能強化によって、さらなる飛躍が期待されている。しかしながら、すばる望遠鏡が単独で成しえることには限りがある。すばる望遠鏡の観測を他の最先端観測施設での観測と連携させることが、これからのすばるの発展のためには不可欠である。図02に、すばる望遠鏡と他の最先端観測施設との協力・連携関係の概念を示した。こうした国際的な研究連携網の中で、他では代え難い独自の地位を築き、世界の天文学研究に貢献していく。これこそが、すばるの向かうべき道であろう。

2020年代のすばるはますます面白い。乞うご期待。

★01 <https://tmt.nao.ac.jp/researchers/science/>



図02 すばる望遠鏡の近未来：すばる望遠鏡と世界の最先端観測施設との連携。(クレジット：国立天文台、W. M. Keck Observatory, Gemini Observatory, Vera Rubin Observatory, Giant Magellan Telescope Project, NASA, ESA, 東京大学、京都大学)

2021年国立天文台カレンダーができました。

2021年国立天文台カレンダーができました。今回のテーマは、「国立天文台・望遠鏡のある風景」。国立天文台ニュースNo.297～No.320の裏表紙に掲載した連載シリーズ「NAOJ photo sketch 望遠鏡のある風景」から画像14点を選んで再録したものです（※台外発送分に同封）。

- ・01月 VERA水沢観測局の20mと10m電波望遠鏡、そして冬の星座たち
- ・02月 野辺山観測所45m電波望遠鏡の表面の雪落とし
- ・03月 小望月の雲海に浮かぶすばる望遠鏡ドームのシルエット
- ・04月 満開の桜と子午儀資料館（旧レプソルド子午儀室・三鷹）
- ・05月 天文学専用スーパーコンピュータ「アテルイⅡ」（Cray XC50）
- ・06月 獅子が守るVERA石垣島観測局の20m電波望遠鏡
- ・07月 すばる望遠鏡主鏡の再蒸着前のクリーニング作業
- ・08月 立ち昇る夏の銀河と石垣島天文台「むりかぶし望遠鏡」
- ・09月 大型低温重力波望遠KAGRAの真空ダクト
- ・10月 VERA入来観測局20m電波望遠鏡のシルエットと雲海に沈む入来の町
- ・11月 秋の夕日とゴーチェ子午環室〔登録有形文化財（建造物）〕
- ・12月 アルマ望遠鏡モリタアレイと逆さオリオン



編集後記

「カマキリのタマゴ」が欲しいと公園に探しに行った息子（小1）が、コクワガタの成虫を発見。家で飼い始めましたが、寒い季節なのでじっとしています。無事に冬越しできるといいね。(G)

三鷹公開日のため半年以上ぶりの東京出張へ。新幹線や地下鉄の想像以上の密着ぶりに驚くばかりだったが、東京の人はもうこれが当たり前ののだろうか。(は)

昨年、テレビ信州が制作した野辺山観測所のドキュメンタリー番組、NHK BSで昼の時間帯に再放送するというので、いくつかのMLで宣伝したら結構反響が。夜にもまた再放送してほしい。(I)

オンライン特別公開が終了。初めてのことで要改善・要反省点は多々あれど、ひとつのストーリーに載せて国立天文台の全体像を見ていただくという野望はある程度果たせたか。未見の方はぜひYouTubeかニコニコ生放送の国立天文台チャンネルで！(h)

オンライン特別公開に少しだけ出演させていただきました。色々な方と顔をあわせて話をするのは好きなほうなので、それができないのは残念ですが、1万人以上の方に視聴して頂いたと思うとすごいです。準備されたスタッフの皆さんに感謝です。(K)

土星と木星がそろって沈んでいくのを見ました。季節と共に夜空も巡っているのを実感。(W)

三十三番土偶札所巡りを始めました。好きな土偶に再会したり、初めての土偶に出会ったり、楽しい旅です。(e)

国立天文台ニュース NAOJ NEWS

No.328 2020.11
ISSN 0915-8863
© 2020 NAOJ
(本誌記事の無断転載・放送を禁じます)

発行日 / 2020年11月1日
発行 / 大学共同利用機関法人 自然科学研究機構
国立天文台ニュース編集委員会
〒181-8588 東京都三鷹市大沢 2-21-1
TEL 0422-34-3958 (出版室)
FAX 0422-34-3952 (出版室)
国立天文台代表 TEL 0422-34-3600
質問電話 TEL 0422-34-3688

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（副会長）／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。

12月号の研究トピックスは、AI（人工知能）を活用して銀河の形を効率的に調べ、銀河進化のメカニズムを探る最新研究を紹介します。

深き宇宙



すばる望遠鏡
HSC Cosmic Gallery

08 NGC4517

田中賢幸 (ハワイ観測所)

9 Mpcほどの距離にある、エッジオン銀河である。ダストによる減光がはっきり見え、おそらく渦巻銀河を横から見ているのであろう。右上にあるもう一つの銀河も、ほぼ同じ距離にある渦巻銀河である。このような渦巻銀河は、宇宙の中で比較的低密度な銀河環境を好む傾向がある。対照的に高密度環境である銀河団のような環境では渦巻銀河は少なく、楕円銀河・レンズ状銀河が支配的となる（8月号の銀河団の画像を参照されたい）。これは銀河進化が宇宙の大規模構造の進化と密接に関係してきたことを示しているが、その物理的起源はまだはっきりとはわからないままである。

★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/>