

すばる

Subaru Telescope

8.2m光学赤外線望遠鏡

お問い合わせ

自然科学研究機構 国立天文台
〒181-8588 東京都三鷹市大沢 2-21-1
<https://www.nao.ac.jp>

ハワイ観測所
Subaru Telescope
650 North A'ohōkū Place, Hilo
Hawai'i 96720, U.S.A.
<https://www.subarutelescope.org>



© 2019 NAOJ
(2019.08)

このプロジェクトは 文部科学省 大規模学術フロンティア促進事業 の支援を受けています。

自然科学研究機構 国立天文台
ハワイ観測所

すばる望遠鏡の挑戦



人は星を見て、ときに限らない郷愁の思いに駆られることがあります。私たち人類は、この宇宙に生きており、この宇宙が私たちを生みました。このことは、まぎれもない事実であり、星をながめるとき私たちは無意識のうちに、このことに思いをはせるのかもしれない。

すばる望遠鏡は1999年にファーストライトを迎え、2000年より共同利用を開始しました。すばる望遠鏡には、高精度に磨かれた主鏡、それを支える261本の能動支持アクチュエーター、気流を制御し陽炎を吹き払う円筒型ドームなど、天体の高解像度観測を実現するためのさまざまな工夫が凝らされています。さらに、その堅牢な架台構造によって、視野を広くとれる主焦点に観測装置を装着することができます。これらの工夫により、すばる望遠鏡はほかの大型望遠鏡と比べ、圧倒的に広視野で高解像度の観測を行うことができるのです。

主力観測装置として現在活躍している超広視野主焦点カメラ（Hyper Suprime-Cam, HSC）は、まさにこうしたすばる望遠鏡の特長を活かした装置です。圧倒的な撮像能力を活かして、宇宙論、銀河の形成および進化から太陽系内天体の探査まで、幅広い研究分野で活躍しています。HSCによる観測の成果をさらに発展させるべく、2400個の天体を同時に分光観測できる主焦点超広視野分光器（Prime Focus Spectrograph, PFS）も開発が進んでいます。この新しい観測装置が近い将来稼働すれば、すばる望遠鏡の観測の効率が大幅に上がり、研究を大きく加速するでしょう。

一方、すばる望遠鏡の高い解像度を極限まで発揮させる、補償光学を用いる観測装置群も活躍しています。太陽系外惑星の観測に威力を発揮し、恒星や惑星が形成される過程の研究に、驚くような発見をもたらしています。

人が星を見るときに感じる憧れ。天文学者たちはそれを突き詰めて、科学の目で宇宙の謎を解明しようと日夜奮闘しています。国立天文台ハワイ観測所はそうした天文学者たちの奮闘に応えるべく、すばる望遠鏡を維持整備し、新たな観測装置の開発を行っています。世界第一線の光学赤外線天文台として、これからもよりいっそうの活躍をめざします。



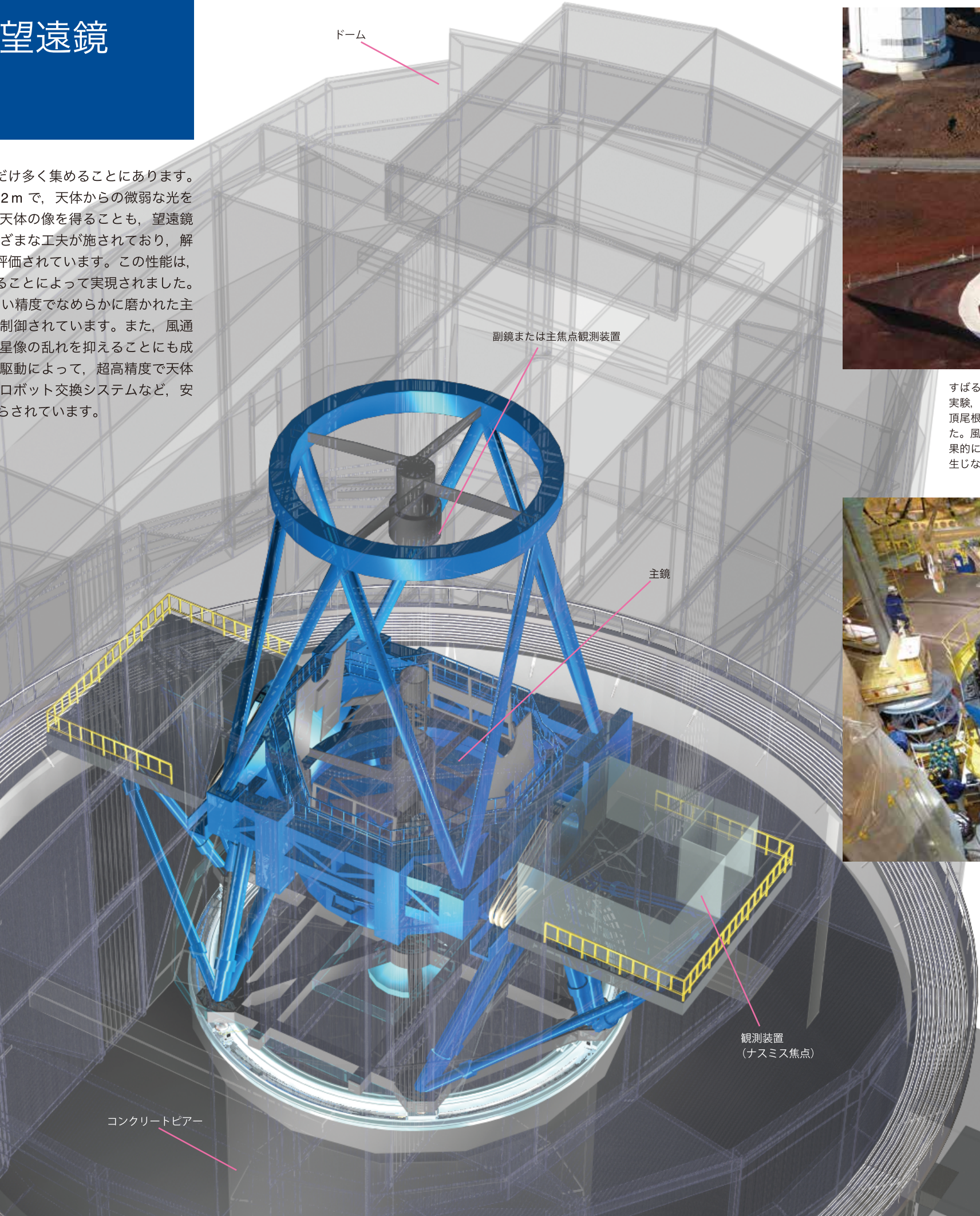
すばる望遠鏡は太平洋のまんなか、ハワイ島マウナケアの山頂に設置されています。ここは、天体観測に最適な場所のひとつとして知られています。上空の貿易風もあいまって気流が比較的安定し、標高約4200 mの山頂まで雲が上ってくることは稀で、快晴の日が多く乾燥しています。近くに大きな都市もなく、天体観測をさまたげる人工的な光はほとんどありません。マウナケアは天体観測に適していると同時に、動植物を含むさまざまな自然の資源があり、文化的・歴史的に貴重な場所です。すばる望遠鏡が設置されている天文学管区は、持続可能な土地利用となるよう注意深く管理されています。

先進技術の粋，すばる望遠鏡

望遠鏡の役割は，遠く of 天体からやってくる光をできるだけ多く集めることにあります。すばる望遠鏡の口径は，単一鏡としては世界最大級の 8.2 m で，天体からの微弱な光を集めることができます。また，集めた光からシャープな天体の像を得ることも，望遠鏡の重要な能力です。このため高い解像度を実現するさまざまな工夫が施されており，解像力の高さは，世界の大型望遠鏡のなかでもとくに高く評価されています。この性能は，望遠鏡を設置する場所を慎重に選び，最新技術を駆使することによって実現されました。8.2 m という大きさにもかかわらず 0.014 μm という高い精度でなめらかに磨かれた主鏡は，重力による変形を受けないようにコンピューター制御されています。また，風通しのよい円筒型ドームによって空気の乱れを少なくし，星像の乱れを抑えることにも成功しています。頑丈な望遠鏡架台構造とリニアモーター駆動によって，超高精度で天体を追尾することができます。そのほかにも，観測装置のロボット交換システムなど，安全にかつ効率よく高山での作業を進める数々の工夫が凝らされています。



すばる望遠鏡の全体像。主鏡の下（カセグレン焦点）に観測装置がとりつけられています。



すばるの円筒型ドームは，マウナケア山頂に立ち並ぶ望遠鏡のなかでも特徴的です。水流実験，風洞実験，数値シミュレーションなどにより最良のドームの形を追求した結果，山頂尾根の端に設置するすばる望遠鏡には，円筒型のドームが適していることがわかりました。風通しのよいこのドームは，外部の乱流を含んだ空気をもち込まずに，内部の熱を効果的に排出することができます。望遠鏡そのものも熱を溜め込まず，まわりにも温度差が生じないようにすることで，鮮明な画像を得るために好都合な環境を維持しているのです。



アルミニウム蒸着を終え，望遠鏡に搭載される直前の主鏡。直径 8 m 級の 1 枚鏡を主反射鏡として用いるためには，能動光学とよばれる技術が必要となります。重さを最小限にするため，すばるの鏡の厚さは 20 cm しかありません。このままでは望遠鏡を傾けると歪んでしまい，形を保持できないのですが，261 本ものアクチュエーターとよばれるロボットの指が主鏡を支え，望遠鏡がどの方向を向いても，つねに鏡を理想的な形に保ちます。

すばる望遠鏡の諸元

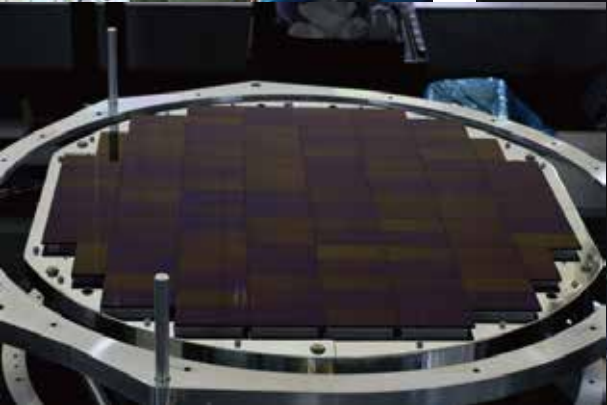
光 学 系	リッチー・クレティエン式
有 効 口 径	8.2 m
焦 点	主焦点 (F値2.0)， カセグレン焦点 (F値12.2)， ナスミス焦点 (F値 可視光12.6，赤外13.6)
最 大 視 野	1.5 度角 (主焦点)
総合星像分解能	0.2 秒角 (補償光学なし，波長 2.15 μm)
天体の追尾誤差	0.1 秒角以下
観 測 波 長	0.3～25 μm

すばるの新しい眼： 超広視野主焦点カメラ HSC

口径 8 メートル級の望遠鏡のなかで、すばる望遠鏡は視野の非常に広い主焦点で観測ができるユニークな望遠鏡です。細かいものを見分ける能力と、広い範囲を一度に観測できる性能を兼ね備えることは容易ではありません。望遠鏡の根本的な設計から、主焦点でも高精度の観測ができるよう、工夫を積み重ねてきました。超広視野主焦点カメラ Hyper Suprime-Cam (HSC) は 4096×2048 画素という大きな CCD 検出器を 116 個並べた画素数約 8 億 7000 万のデジタルカメラで、満月 9 個分、直径 1.5 度角の範囲を視野に収めています。検出器、検出器群の温度を保つしくみ、大きなレンズを組み合わせた補正光学系とそれを収めるセラミックスの筒、そしてカメラ全体の位置を精密に調整するしくみ、巨大なフィルターを操作する機構、それぞれに高度の技術を要するものでした。広い天域を効率よく観測することで、太陽系外縁部や遠方銀河の探査、さらにはこの宇宙の運命を握る暗黒物質や暗黒エネルギーの解明につながるような、画期的な成果が期待されます。



望遠鏡上部にとりつけられた、超広視野主焦点カメラ HSC

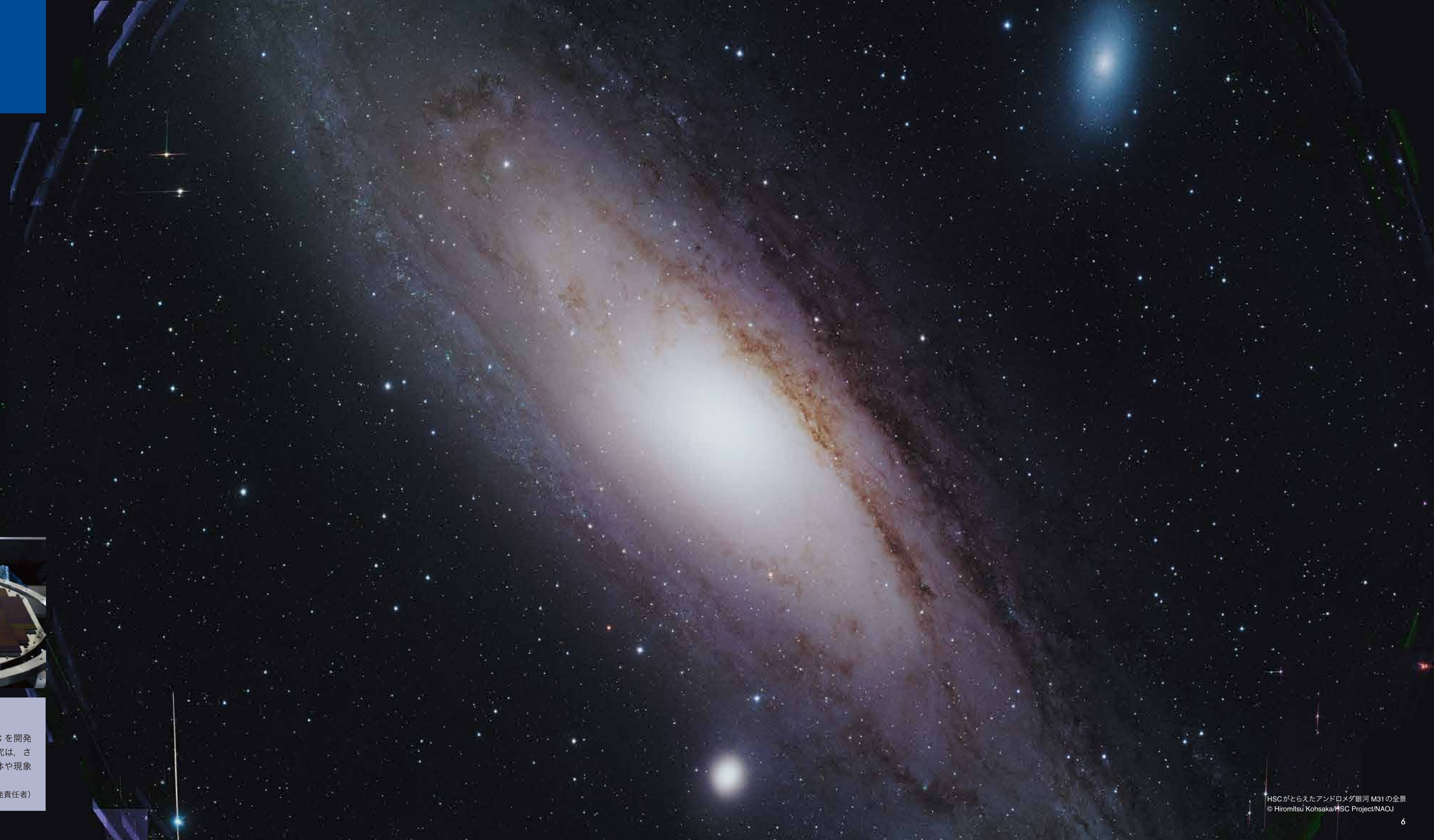


HSCの検出器
8000 万画素の CCD 素子が 116 個、直径約 50 cm にわたって敷き詰められています。



私たちは暗黒エネルギーの謎を解明するために、HSC を開発しました。このような超広視野の観測装置による研究は、さらに最初の目標を超えて、いろいろなおもしろい天体や現象の発見につながると思います。

宮崎 聡（国立天文台 / HSC 開発責任者）



HSC がとらえたアンドロメダ銀河 M31 の全景
© Hiromitsu Kohsaka/HSC Project/NAOJ

すばるが探求する宇宙の謎

地上から可視光と赤外線で見える宇宙

すばる望遠鏡が観測しているのは、天体から届く光（電磁波）のうちの可視光と一部の赤外線です。可視光ではおもに、恒星やその集団である銀河が、赤外線では星形成領域の低温天体や、塵に隠された天体が観測できます。また、遠方の銀河などからもともと紫外線や可視光として放たれた光が、赤方偏移の効果によって赤外線として観測されることもあります。赤外線の波長域では、すばる望遠鏡は補償光学の技術で大気のゆらぎを克服し、宇宙望遠鏡さえもしのぐ解像度で観測を行うことができます。

すばる望遠鏡の観測装置 FOCAS がとらえた、不規則銀河 M82 の可視光画像。星からの光に加えて、中心部から噴き出す水素ガスからの放射（赤色）が見えます。右は上から、中心付近の X 線（NASA チャンドラ衛星による）、近赤外線（すばる望遠鏡 CISC0）、電波（国立天文台野辺山宇宙電波観測所）による画像。

© NASA/NAOJ

太陽系外惑星の世界をかいまみる

この宇宙に、生命を育む第二の地球は存在するのでしょうか？ 1995 年に初めて確実に発見されて以来、太陽系の惑星はその候補を含めるとすでに数千個も見つかっています。しかし、惑星による恒星のふらつきを見いだす分光観測などの間接的な方法と比べ、惑星の姿を直接とらえるのは非常に困難でした。それは、明るい主星（恒星）と比べると、そのまわりを回る惑星は非常に暗いからです。

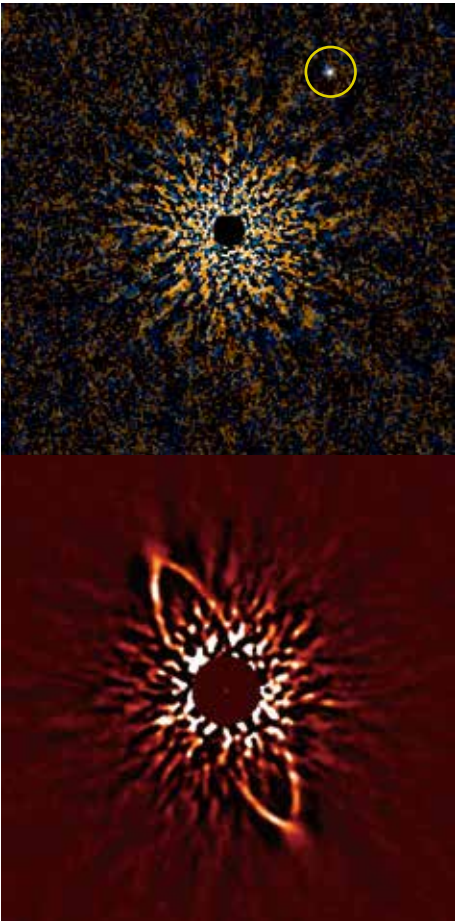
すばる望遠鏡は近赤外高コントラスト撮像カメラと、大気のゆらぎを補正する補償光学装置 AO188 を駆使して、明るい星のすぐそばを回っている暗い系外惑星や、星のまわりにある原始惑星系円盤の直接観測を行っています。また、太陽よりも小さな星のまわりを回る地球型惑星を探すために、赤外線で星のふらつきを測定する新しい高分散分光器 IRD も稼働しました。あらゆる手段で系外惑星系の巨大惑星や地球型惑星、そして惑星の誕生現場である原始惑星系円盤を探り、この宇宙で私たち人類は特別な存在なのか、第二の地球は存在するのかといった問いに対する答えを見いだそうとしています。

（上）すばる望遠鏡の近赤外高コントラスト撮像カメラでとらえた、太陽型恒星 GJ504 の低質量惑星 GJ504b。直接撮像された惑星ではもっとも軽い（木星の数倍）ものの1つです。
（下）恒星 HR4796A のまわりの残骸リング。惑星形成の名残りである微惑星が衝突し、塵がばらまかれることで形成されると考えられています。



21 世紀は太陽系外惑星に生命を探る時代です。すばる望遠鏡はその先駆けとして、生命が存在することのできる地球型惑星をとらえ、さらに TMT 望遠鏡ではそこに生命の兆候を探るという、野心的な観測を現実のものとしてくれます。

田村元秀（東京大学 / アストロバイオロジーセンター / 国立天文台）



宇宙における爆発現象

新星や超新星、ガンマ線バーストなど、宇宙ではあちこちで爆発現象が起こっています。最近では重力波を発生させた中性子どうしの合体でも、キロノバとよばれる爆発現象の証拠が見つかっています。これらの爆発現象は、宇宙における元素合成できわめて大きな役割を担っていると考えられており、宇宙の物質進化を理解するうえで重要な研究テーマです。すばる望遠鏡では、広視野観測によって新たな爆発現象を見つけたり、個別天体で元素合成が起こっている現場を直接詳細に観測したりというように、その特長を活かした先端的な研究を行っています。



重力波天体が放つ光の観測

すばる望遠鏡は米欧の重力波望遠鏡が 2017 年 8 月 17 日に観測した、GW170817 という重力波源を可視光と赤外線で見つけ、対応する天体をとらえました。これは重力波源を電磁波で観測した初めての例です。さらに、その明るさの時間変化を追跡することにも成功しました。

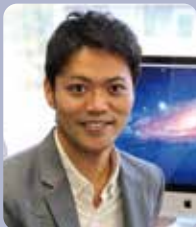
重力波信号の特徴から、GW170817 は中性子星どうしの合体と考えられています。このとき中性子星の一部が高速で宇宙空間に放り出されると、特別な核反応が起こり、プラチナなどの重い元素が合成されます。これらが崩壊し、そのエネルギーが電磁波となって放射されるのが「キロノバ」と呼ばれる現象です。すばる望遠鏡などの観測結果は、この現象の理論予測とよく一致していたのです。



超広視野主焦点カメラ HSC が観測した、重力波源 GW170817 が放つ光（左：2017 年 8 月 18 日、右：8 月 25 日）。1 週間で明るさが大きく変化する様子をとらえています。

新星爆発はリチウムの工場

2013 年に現れた新星爆発 V339 Del でリチウムが大量に生成されていることが、すばる望遠鏡の詳細な分光観測によって突き止められました。3 番目に軽い元素のリチウムは、ビッグバンのときに生成されるだけでなく、恒星の内部や新星、超新星、星間空間など、さまざまな場所でつくられると考えられています。宇宙における元素の起源や物質進化を探るうえで、試金石となる元素なのです。今回の観測は、リチウムを生成し放出している天体を直接とらえた初めての例です。リチウムをつくり出している現場の観測により、宇宙の物質進化の理解が大きく進むと期待されます。



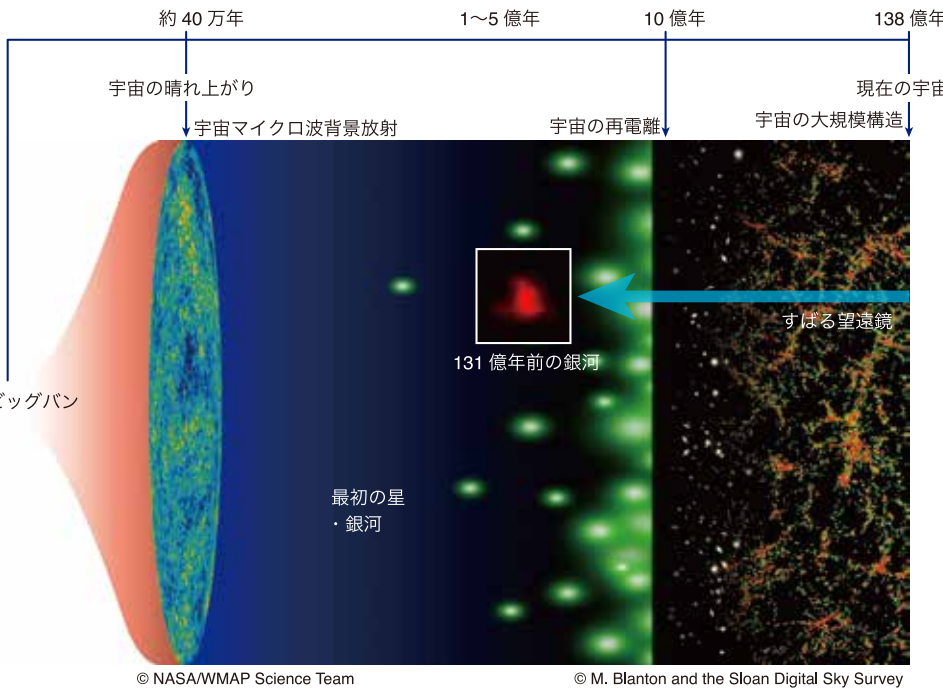
田中雅臣（東北大学）

すばる望遠鏡は口径 8 m 級の望遠鏡では最大の視野を誇り、宇宙の爆発現象を探すのに多大な威力を発揮します。遠い宇宙で起こる超新星を多数観測することで、宇宙の膨張や星形成の歴史をたどる研究が進むでしょう。未知の爆発現象も見えてくるかもしれません。今後の観測に期待が高まります。

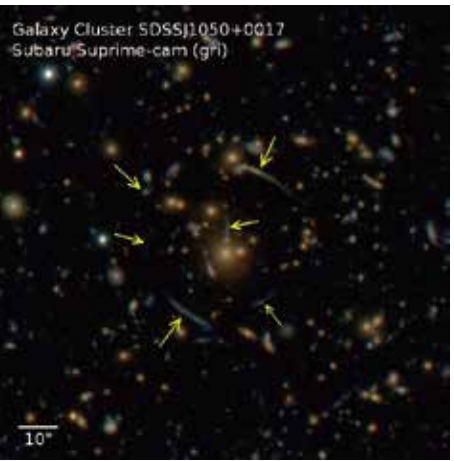
宇宙の歴史をさかのぼる

現在の宇宙では、銀河は群れをなし、「宇宙の大規模構造」とよばれる分布を示すことがわかっています。銀河やそれがある大規模構造は、宇宙が誕生したときの物質密度の濃淡が種となって形づくられたと考えられるようになりました。天文学者たちはいま、ビッグバンに始まる宇宙史のシナリオを描き、観測で検証しようとしています。

その鍵となるのが、宇宙で最初の星と銀河がいつ、どのように誕生したのかを明らかにすることです。すばる望遠鏡は 131 億年かなたの銀河の発見に成功しました（右の画像の黄色い丸で示した赤い点）。これは、宇宙誕生から約 7 億年たったころに存在していた銀河が放った光をとらえたことになります。また、重力レンズ効果とよばれる現象を利用して、銀河団の分布にみられる宇宙の大規模構造と、それを生み出したとされる暗黒物質や暗黒エネルギーの謎を解き明かす試みも進められています。



宇宙誕生から約 40 万年後、宇宙空間の水素が電離した状態から中性の状態になり、光がまっすぐに進むことができるようになります。これを「宇宙の晴れ上がり」といい、当時の宇宙の姿はマイクロ波での観測でくわしく調べられています。その後、物質密度の高いところに水素のガス雲が集まり、やがて宇宙で最初の星や銀河が誕生してきます。すばる望遠鏡は、新しく建設される TMT とともに、この時代にどのような天体が生まれたのか、解き明かそうとしています。



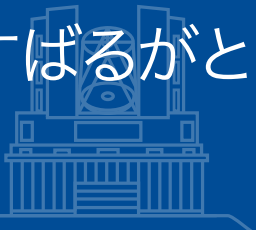
銀河団 SDSS J1050+0017 矢印で示しているのは、この銀河団の重力によって大きく引き伸ばされ、複数の分裂したように見えている（重力レンズ効果）もっと遠方にある銀河です。



多くの星の集まりである銀河を研究することは、銀河の成長を知るとともに、星々の歴史を知ることでもあります。すばる望遠鏡により、さまざまな時代の銀河の姿を描き出すことができるようになってきました。観測所内外の交流を通じて、サイエンスをいっそう掘り下げていきたいものです。

有本信雄（国立天文台）

すばるがとらえた宇宙の姿



太陽系, そして天の川銀河の森羅万象

人類が思い描く宇宙の姿は、太陽系の惑星を観測し続けるなかから生まれてきました。すばる望遠鏡はこれらの大きくて明るい惑星ばかりでなく、その外側に広がる空間に潜む数知れない小天体を探り、太陽系の誕生と進化の謎を解き明かそうとしています。

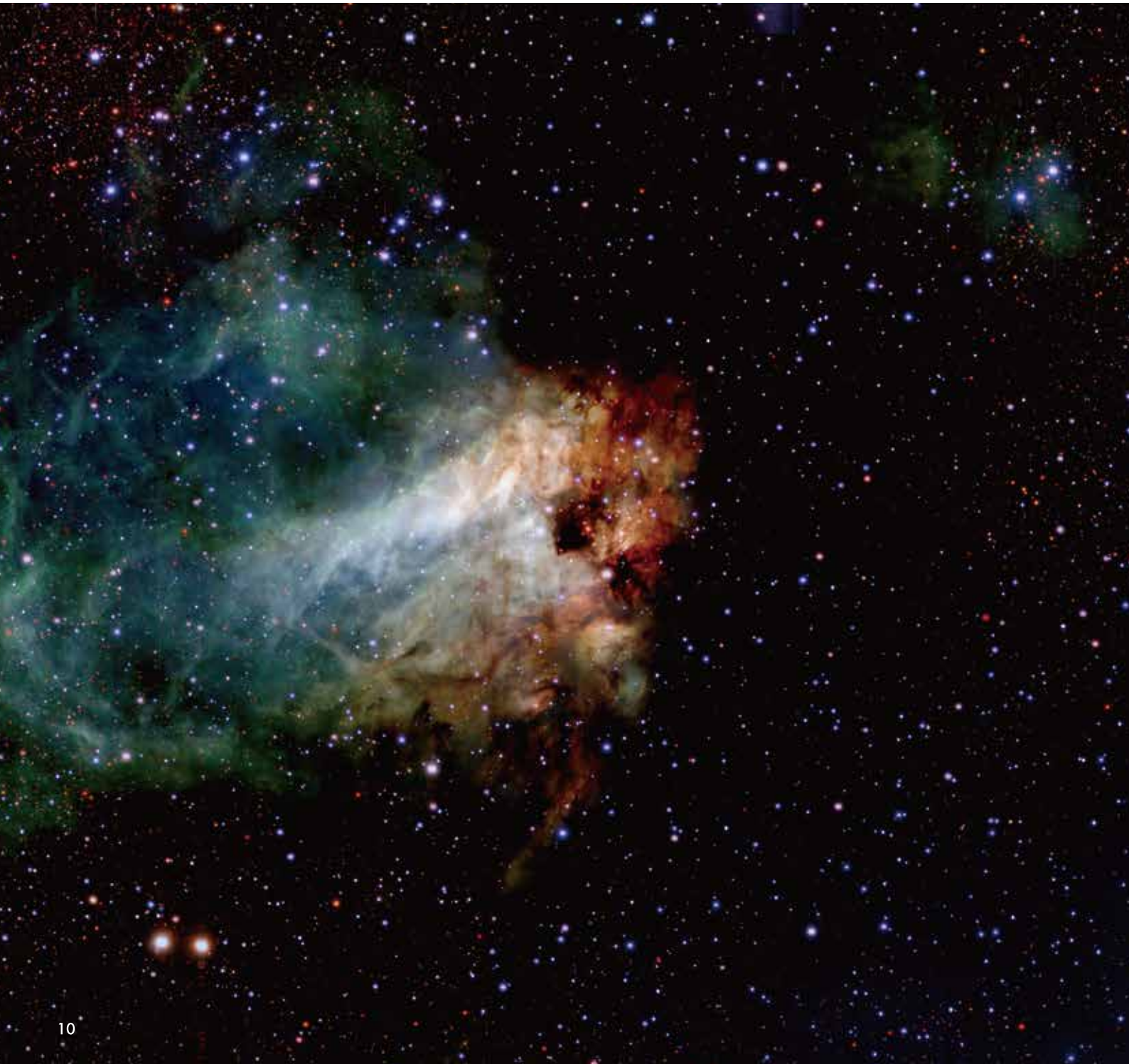
さらに目を太陽系の外に向けると、そこはめくるめく破壊と再生、輪廻転生の世界です。冷たいガスと塵の雲から星が誕生し、核融合反応で輝く安定期をへて、老年期を迎えると自分自身の物質をさまざまな形で放出するのですが、それらはまた次の世代の星々のもとになるのです。その過程で引き起こされる多種多様な天体現象を、すばる望遠鏡はつづさにとらえています。

主焦点カメラSuprime-Camがとらえた散光星雲 M17
ここでは新しい星がいくつも生まれています。左のほうに青くフィラメント状に見えるのは、生まれたての星が出す強い紫外線により電離されたガスです。

近赤外線分光撮像装置 IRCS と補償光学装置を使って観測した、木星の擬似カラー画像
右上に写っているのは衛星のガニメデですが、木星に対して動いているので、時間をおいて撮った3色の画像を合成するとずれてしまいます。



超広視野主焦点カメラHSCで撮影したアイソン彗星
ハワイ現地時間 2013 年 11 月 5 日の明け方（日本時間 11月5日 23時～24時ごろ）撮影。尾が1 度角以上（満月の見かけの直径の2 倍以上）も伸びている様子を、鮮明にとらえています。
© HSC Project/NAOJ





渦巻銀河 NGC 6946
主焦点カメラ Suprime-Cam による可視光画像。渦巻をほぼ真正面から見られるので、銀河内の星形成活動を俯瞰することができます。

渦巻銀河 M81
主焦点カメラ Suprime-Cam による可視光画像。大型の渦巻銀河である M81 は、となりの銀河 M82 に強い影響を及ぼしています。

銀河のおりなす宇宙の記憶

私たちの天の川銀河に含まれる星の数は 2000 億ともいわれますが、宇宙にはこのような銀河がまた 1000 億もあると考えられています。渦巻や楕円など形は多様で大きさもさまざまですが、それは銀河がたどった歴史を反映しているのです。内部での星の誕生と死ばかりではなく、銀河どうしの相互作用、さらには衝突さえも珍しいことではありません。ビッグバンに始まる宇宙史のなかで、多様な銀河がどのように生まれ、成長してきたのかを解明することは、今日の天文学の大きなテーマのひとつです。



矮小銀河 NGC 4449 (左下) と、のみ込まれつつあるさらに小さな銀河 (右上)
主焦点カメラ Suprime-Cam がとらえた可視光画像。NGC 4449 中心部の青い輝きは活発な星生成活動を、外縁部や右上の小さな銀河の赤い光は年老いた赤色巨星の存在を示しています。
(Composite image produced by R. Jay GaBany.)

アンブレラ銀河 NGC 4651
すばる望遠鏡の主焦点カメラ Suprime-Cam と、ブラックボード天文台の 0.5m 望遠鏡の画像の合成。その名の由来となっている左側の傘のような謎めいた形は、重力によって引き裂かれた微小な銀河 (左下挿入図中央の小さな点) の名残だということがわかりました。
(Composite image produced by R. Jay GaBany.)



すばるの歩みと天文学の未来

共同利用と教育

すばる望遠鏡では 2000 年から、共同利用観測を開始しました。国内外の研究機関や大学に在籍する研究者や研究チームは、年 2 回の観測提案申込時期に英文の提案書を作成し、国際的な審査を経て観測時間を獲得します。観測には大学院生が同行し、自分の研究につながる観測を行ったり、ハワイ観測所に長期滞在して観測装置に関する開発に携わることもあります。国立天文台を基盤とする総合研究大学院大学天文科学専攻の大学院生をはじめ、日本各地の大学の大学院と連携して大学院生を受け入れ、教育に協力しています。



山頂観測室で行われた、総合研究大学院大学の大学院生の観測実習

国内外の研究機関との協力

すばる望遠鏡では、国際的なメンバー構成によるチームでの共同利用観測が多数を占めています。また、各国の 8～10m 級望遠鏡との観測時間交換プログラムにより、それぞれの望遠鏡が備えているユニークな観測装置を利用できるようにしています。

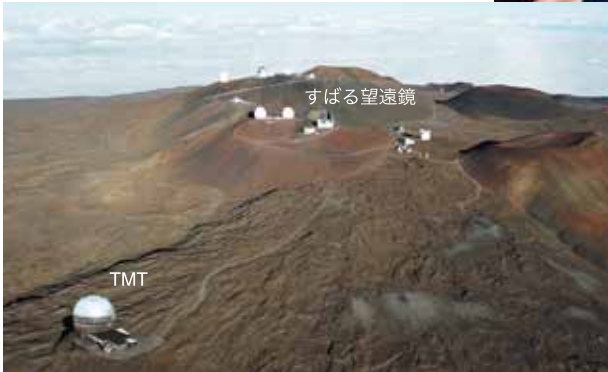
さらに、日本国内外の研究機関や大学のグループと共同で、新しい観測装置などの開発も行っています。これまで米国のハワイ大学、台湾国立天文研究所、東北大学、東京大学カブリ IPMU (WPI)、米国のプリンストン大学などと協力を進めてきました。日本の技術で国際貢献するとともに、将来の協力関係の素地も築かれています。



国際協力で製作された HSC フィルター交換機構の受け入れ審査

TMTとすばる望遠鏡の連携

国立天文台ではいま、口径 30 m の巨大望遠鏡 TMT の建設を、国際協力により推進しています。TMT は宇宙で最初に誕生した星や銀河を調べたり、生命が存在する可能性のある太陽系外惑星を探索したりすることなどを大きな目標としています。TMT が完成すれば、すばる望遠鏡の広い視野を活かした探査で最遠方銀河の候補をみつけ、TMT でその性質をくわしく調べるといった研究も可能になります。すばる望遠鏡は TMT と連携し、世界の天文学をリードしていきます。



ハワイ島マウナケア山頂のすばる望遠鏡と、次世代超大型望遠鏡 TMT (完成予想図)

1980s

大型光学赤外線望遠鏡計画 (JNLТ) として建設準備が始まる

1988

国立天文台発足、JNLТ 準備室開設

1991

国会で建設予算承認、望遠鏡建設開始

1992

公募により愛称が「すばる」に決定
山頂での起工式

1997

ドーム完成
ハワイ観測所設置 (山麓施設)

1998

ドーム内での望遠鏡組み立て完了
主鏡の研磨完了

1999

初観測成功 (ファーストライト)

2000

共同利用観測開始

2004

山頂施設の一般見学開始

2006

もっとも遠い銀河を発見

2009

太陽型星をめぐる惑星の直接撮像成功

2013

超広視野主焦点カメラ Hyper Suprime Cam (HSC) が観測開始