

## 「大型光学赤外線望遠鏡による国際共同研究の推進」について

1. 概要	1
2. 内容（科学的な意義や整備する装置の概要等を含む）	
2-1. すばる2計画の目標	4
2-2. すばる2の研究テーマ	4
2-3. 国際共同利用で展開する幅広い研究テーマ	11
2-4. すばる2と他の最先端観測施設との連携	12
2-5. すばる2を支える最先端観測装置	14
2-5-1. 超広視野主焦点カメラ HSC	14
2-5-2. 近赤外ドップラー分光装置 IRD	15
2-5-3. 超広視野多天体分光器 PFS	15
2-5-4. 広視野高解像赤外線観測装置 ULTIMATE	16
2-6. すばる望遠鏡のこれまでの共同利用の成果	18
2-7. 社会と国民の支持	18
2-8. 産業・社会への貢献	20
2-9. 事業移行評価における留意事項への対応	20
3. 実施体制	
3-1. 共同利用実施体制	24
3-2. 観測装置の開発と運用の体制	25
4. 国内における検討経緯	27
5. 国際的な動向	29
6. 年次計画（工程表）	31

# 1. 概要

本計画は、米国ハワイ州マウナケア山頂に建設された口径 8.2m の大型光学赤外線望遠鏡「すばる望遠鏡」の超広視野・高解像度観測能力を飛躍的に向上させ、国際共同利用・共同研究を行うものである。すばる望遠鏡は、口径 8m 以上の望遠鏡の中で唯一、可視光において 1 平方度以上の超広視野を星像直径 0.4 秒角という高い解像度で観測できる能力を持つ。すばる 2 は、現行のすばる望遠鏡に対し、可視光分光観測において視野 50 倍・同時分光天体数 20 倍、赤外線観測において視野 10 倍・解像度 2 倍を達成する（図 1）。このため、「超広視野多天体分光器 PFS」「広視野高解像赤外線観測装置 ULTIMATE」を開発し、すばる望遠鏡に搭載する。すばる 2 は、これらの新たに獲得した観測能力を駆使し、大規模サーベイ観測を中心に国際共同利用・共同研究を行う。また、我が国の天文学研究をさらに発展させるため、すばる望遠鏡の特徴を活かして他の最先端観測施設との連携観測を推進する。



## 全体概要

# 大型光学赤外線望遠鏡による国際共同研究

ハワイ島マウナケア山頂に設置した大型光学赤外線望遠鏡「すばる」の機能を強化した「すばる2」により、超広視野撮像分光による大規模サーベイ観測を中心として国際学術コミュニティに供し、宇宙の構造進化と元素の起源に迫る。

**すばる望遠鏡**



**HSC**  
超広視野  
主焦点  
カメラ  
超広視野撮像



**IRD**  
近赤外  
ドップラー  
分光装置  
超精密視線  
速度測定

**国際協力開発**  
PFS:2023年完成、  
ULTIMATE:2027年完成

**PFS**  
超広視野多天体  
分光観測



**ULTIMATE**  
広視野高解像  
赤外線観測



# すばる 2

国際共同運用



**学術的意義：**  
超広視野撮像分光により、

- ダークマター・ダークエネルギー
- 宇宙史にわたる大規模構造の進化と銀河進化、
- マルチメッセンジャー天文学による元素の起源
- 地球型系外惑星天体の同定

の研究に取り組み、人類の宇宙理解を大きく進める。

計画期間：2022年～2031年  
総経費：233億円

現行のすばる望遠鏡に比べて  
**分光視野：50倍**  
**同時分光天体数：20倍**  
**赤外線観測視野：10倍**  
**赤外線解像度：2倍**

**推進体制：**国立天文台が中心となって望遠鏡・観測装置の維持運用を行う。観測装置開発は国内外の大学・研究機関と国立天文台の協力によって実施する。すばる望遠鏡は超広視野観測が可能な世界唯一の大型望遠鏡であり、本計画によって国際的優位性を一層高め、世界の拠点となる。

図 1：本計画の概要。PFS、ULTIMATE といった先進的観測装置を開発・搭載して、すばる望遠鏡の大幅な機能強化を行った「すばる 2」により、最先端の科学研究を推進する。

**【学術的意義】** 現在の宇宙は、銀河、恒星、惑星といった様々な階層からなる豊かな構造を持ち、その中で生命が育まれている。こうした豊かな世界は如何にして生まれ進化してきたのか。これからの宇宙はどうなっていくのか。本計画では、すばる望遠

鏡の機能を飛躍的に向上させた「すばる 2」を用いた国際共同利用・共同研究を行い、1) 暗黒物質（以下、ダークマターと称す）と暗黒エネルギー（以下、ダークエネルギーと称す）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 つの研究テーマを追求し、宇宙の進化に関する根源的な謎に迫ることを目指す。また、共同利用の枠組みを通じて、上記以外の多様な天文学・物理学の研究を推進する。

**【研究者コミュニティの合意】**すばる望遠鏡は、2000 年より国際共同利用を行い最先端の天文学研究成果を挙げてきており、特にその広視野観測能力は世界中からユーザーを引き付けている。これをさらに発展させるすばる 2 計画は、光学赤外線天文連絡会から、学術的価値、緊急性、各分野での連携、実現性の観点から最も高い評価を受け、日本学術会議マスタープラン 2020 に強く推薦された。その結果、マスタープラン 2020 で重点大型研究計画として認定され、さらに文部科学省ロードマップ 2020 に記載されている。

**【計画の実施主体】**すばる 2 は、自然科学研究機構国立天文台が主軸となって、その共同利用運用を実施する。すばる 2 に向けた機能強化のための観測装置開発は、東京大学カブリ IPMU、自然科学研究機構アストロバイオロジーセンターをはじめとする国内大学・研究所、及び米国、中国、台湾、ドイツ、ブラジル、フランス、オーストラリア、カナダなどの研究機関との協力で実現させる。

**【共同利用体制】**すばる 2 では、すばる望遠鏡の 20 年にわたる共同利用体制とその経験を十分に活用するとともに、将来の TMT との一体的運用を見据えた共同利用体制を構築し、年間 80～100 件の共同利用観測を実施し、国内外の多くの研究者の研究に供する。

**【計画の妥当性】**2023 年に PFS の運用、2028 年に ULTIMATE の運用を開始し、大規模サーベイを進めるとともに現存観測装置による国際共同利用を実施する。10 年間で必要な望遠鏡運用経費は総額 136 億円である。これに老朽化対策費総額 40 億円と、望遠鏡機能強化費 27 億円、開発経費 30 億円が必要である。これらの経費は、すばる 2 を安定的に運用し、4 大研究テーマを追求して最先端の研究成果を挙げるために必須である。

**【緊急性】**すばる 2 計画は、可視光・赤外線において他の追随を許さない大規模分光・赤外線サーベイを敢行しようというものであり、現在、世界が最も望んでいる機能を実現し、天文学・物理学に大きな貢献をする好機にある。ベラ・ルービン天文台（旧名 LSST）など後続計画も進展する中、早期に実現することで、圧倒的な国際的競争力を獲得できる。

**【戦略性】**すばる 2 は我が国がこれまですばる望遠鏡で培ってきた広視野観測天文学をさらに伸ばし、物理学や情報統計学といった分野への波及効果も大きい。世界に他にない超広視野観測機能を軸に、世界の天文学に貢献し、その中で頭脳循環も果たす。宇宙の根源に迫るすばる 2 は、国民の基礎科学に対する理解の増進、さらには教育・産業基盤の発展に大きく貢献するものである。すばる 2 は、宇宙望遠鏡など世界の最

先端観測施設との連携観測により多角的に人類の宇宙理解を深めるとともに、天文学研究における我が国の確固たる地位を確立する。また、すばる 2 による膨大な探査データは次世代研究者が取り組む新たな課題を多数発見すると期待され、次世代超大型望遠鏡（TMT、GMT、E-ELT）等による研究に発展する。

**【社会や国民の支持】**すばる望遠鏡がこれまで得てきた国民の理解と支持を踏まえて、すばる 2 はさらにその成果を広く社会や国民に伝え、人類の宇宙理解の上での必要性を訴える。地域社会（ハワイ）の行政及び住民との信頼関係は構築されている。

## 2. 内容(科学的な意義や整備する装置の概要等を含む)

### 2-1. すばる 2 計画の目標

すばる望遠鏡は、他の 8-10m 級地上望遠鏡及び TMT、アルマ望遠鏡、ジェイムズ・ウェッブ宇宙望遠鏡 (JWST) などと比較し、はるかに広い視野をもつ。すばる 2 は、さらにこの特徴を磨き、広視野・高感度・高解像度の広天域探査観測を実施し、宇宙の全体像を捉えることを目指すものである。このため、「超広視野多天体分光器 PFS」、「広視野高解像赤外線観測装置 ULTIMATE」を開発・運用し、現行の「超広視野主焦点カメラ HSC」、「近赤外超精密視線速度観測装置 IRD」とともに、国際共同利用を実施する。PFS、ULTIMATE によって、すばる 2 の観測能力は、現行のすばる望遠鏡と比較して、可視光分光観測において視野 50 倍・同時分光天体数 20 倍、赤外線観測において視野 10 倍・解像度 2 倍に向上し、人類がこれまでに手にしたことの無い観測性能を獲得する。すばる 2 の広天域探査能力は、世界の最先端天文研究施設との国際連携の要であり、広く、深く、多角的に宇宙の謎を解明するのに極めて重要な役割を果たす。ダークエネルギーの解明の重要性から、2020 年代には欧米で広視野の大型地上望遠鏡や宇宙望遠鏡が稼働するが、そのどれも距離精密測定に必要な多天体分光性能を持たない。すばる 2 の多天体分光能力は極めてユニークであり、すばる 2 で大規模探査型観測を戦略的に実施することで世界唯一の研究成果を挙げる。すばる 2 の実現は 2020 年代の天文学の必然的な要請であり、日本は天文学における国際共同研究の場で確固たる地位を得て、他では置き換えることができない重要な役割を果たす事ができる。

### 2-2. すばる 2 の研究テーマ

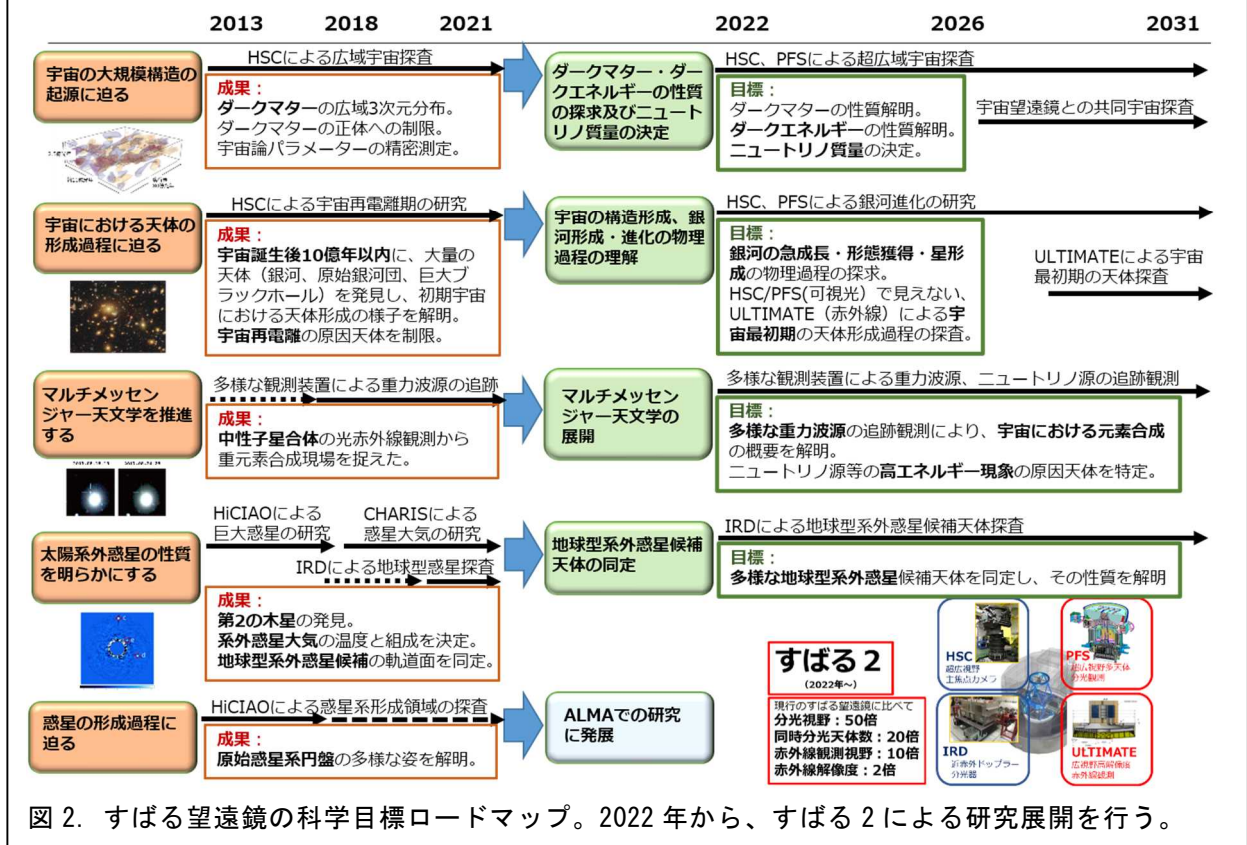
すばる 2 で追及する主要科学目標は以下の 4 つである。今期フロンティア事業期間中の科学目標からのロードマップは図 2 に示す。

#### 【科学目標 1】ダークマターとダークエネルギーの性質の探求及びニュートリノ質量の決定

ダークマター、ダークエネルギーは宇宙構造形成の標準模型の本質的な成分であるが、正体は謎であり、その解明は物理学および天文学の最重要課題である。ダークエネルギーの正体を解明するには、現時点で広天域銀河探査が唯一の手段となっている。ダークマターの重力による宇宙の構造形成とダークエネルギーによる加速膨張は表裏一体の関係にあり、すばる 2 は宇宙の構造形成を徹底的に調べることで、ダークマターとダークエネルギーの性質を明らかにする。さらに、ダークマターの一部を担うニュートリノの質量を、世界に先駆けて信頼性高く測定する (図 3)。

1999 年に宇宙膨張が加速していることが発見されて以来、宇宙の標準モデルにおいては、現在の宇宙の質量組成の約 94% はダークマターとダークエネルギーが占め

# すばる望遠鏡の科学目標ロードマップ



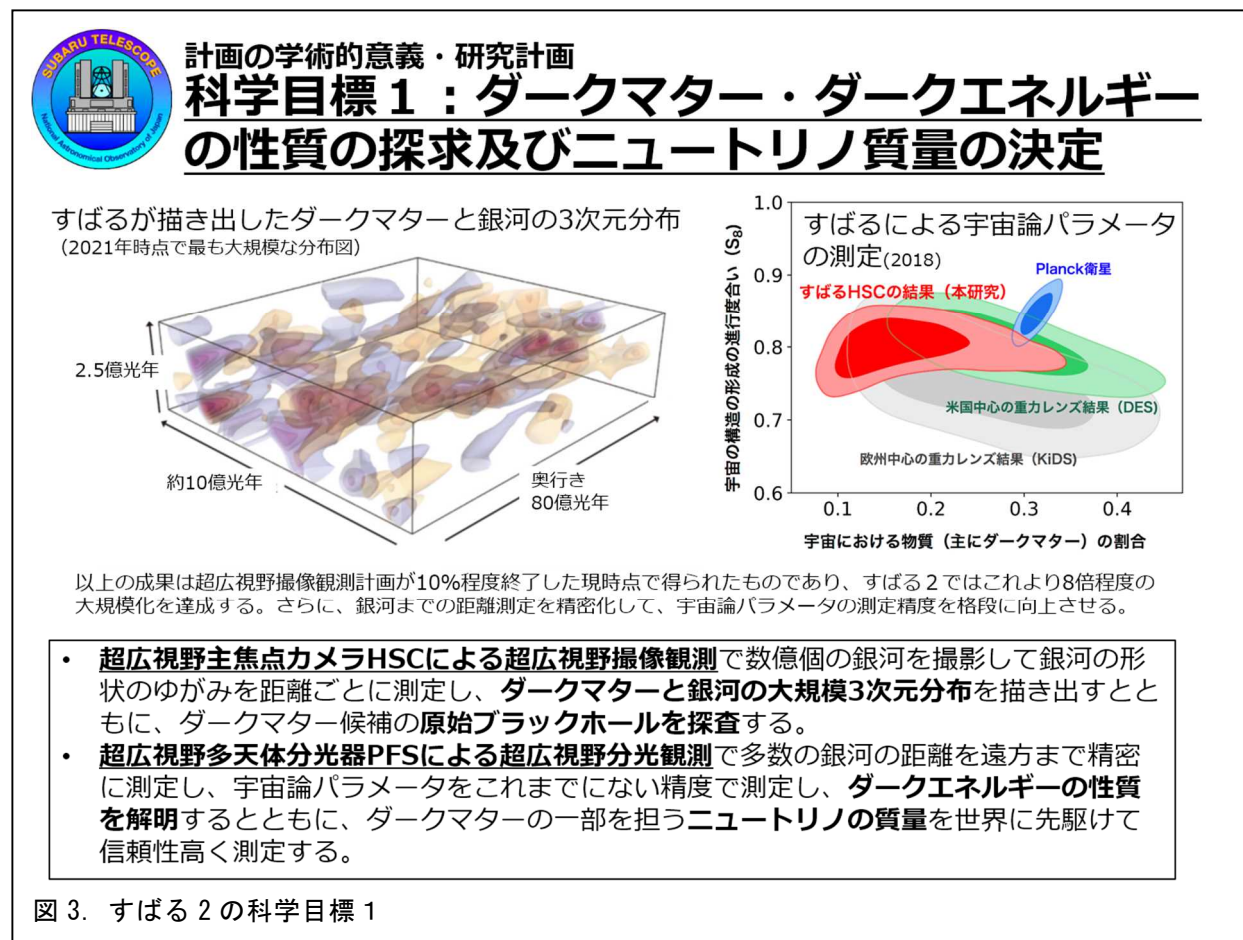
ているとされている。しかしながら、その正体は未知である。ダークマターとダークエネルギーの持つ性質は、宇宙全体の膨張の歴史と、その中の密度揺らぎが成長し、銀河や銀河団といった構造が形成された歴史の中に反映されている。したがって、これらの正体解明には、広域探査によって、宇宙の歴史をひもとくことが必須である。

すばる望遠鏡はこれまでに、HSC を用いて 160 平方度の探査を行い、ダークマターと銀河の 3 次元分布を、ハッブル宇宙望遠鏡での探査で得られた分布の 50 倍以上の広域にわたって明らかにしてきた。また、このデータから宇宙の構造形成を記述する宇宙論パラメーターの値を精度よく求め、(プランク衛星により) 宇宙初期のデータから求められたパラメーターの値と深刻な矛盾を生じている可能性を明らかにした。すばる 2 では、この探査をさらに 8 倍近く (1,200 平方度) 広げ、ダークマターによる構造形成の歴史を明らかにする。そして、この探査データから、現在 2 シグマ (95 パーセント) の信頼性で得られている宇宙論パラメーター値の矛盾について、3 シグマ (99.7 パーセント) 以上の信頼性で、その有無の決着を付ける。

すばる 2 では、上述の HSC の広域探査データを基礎として、PFS の多天体分光によって銀河までの距離を正確に求める。こうして、ダークマターの 3 次元地図の精度を格段に向上させて密度揺らぎの進化を詳しく測定する。こうして、約 100 億年前から現在に至るまでの宇宙の構造成長の速さを、誤差数%で求める。宇宙の構造成長はダークマターとダークエネルギーのせめぎあいので決まるので、この測定によってダークエネルギーの性質を明らかにすることができる。これまで、こうした測定の誤差は

数 10%に及んでおり、複数のダークエネルギーモデルを棄却できない状態が続いているが、HSC+PFSの超広域探査はこの状況を一変させる。

銀河団スケールでの構造形成には、ニュートリノも大きく関与していると考えられている。ニュートリノの質量が大きければ、その重力効果によって構造形成が妨げられ、逆にニュートリノがほとんど質量を持たなければ、銀河団スケールでの構造形成は進みやすい。したがって、PFSを用いてこうした構造形成の様子を詳しく調べることによって、ニュートリノの質量をかつてない精度で求めることができる。ニュートリノ質量は現在の地上実験からは絶対値が求められないので、この測定は、素粒子物理学にも大きなインパクトをもたらす。



### 【科学目標 2】宇宙の構造形成、銀河形成・進化の物理過程の理解

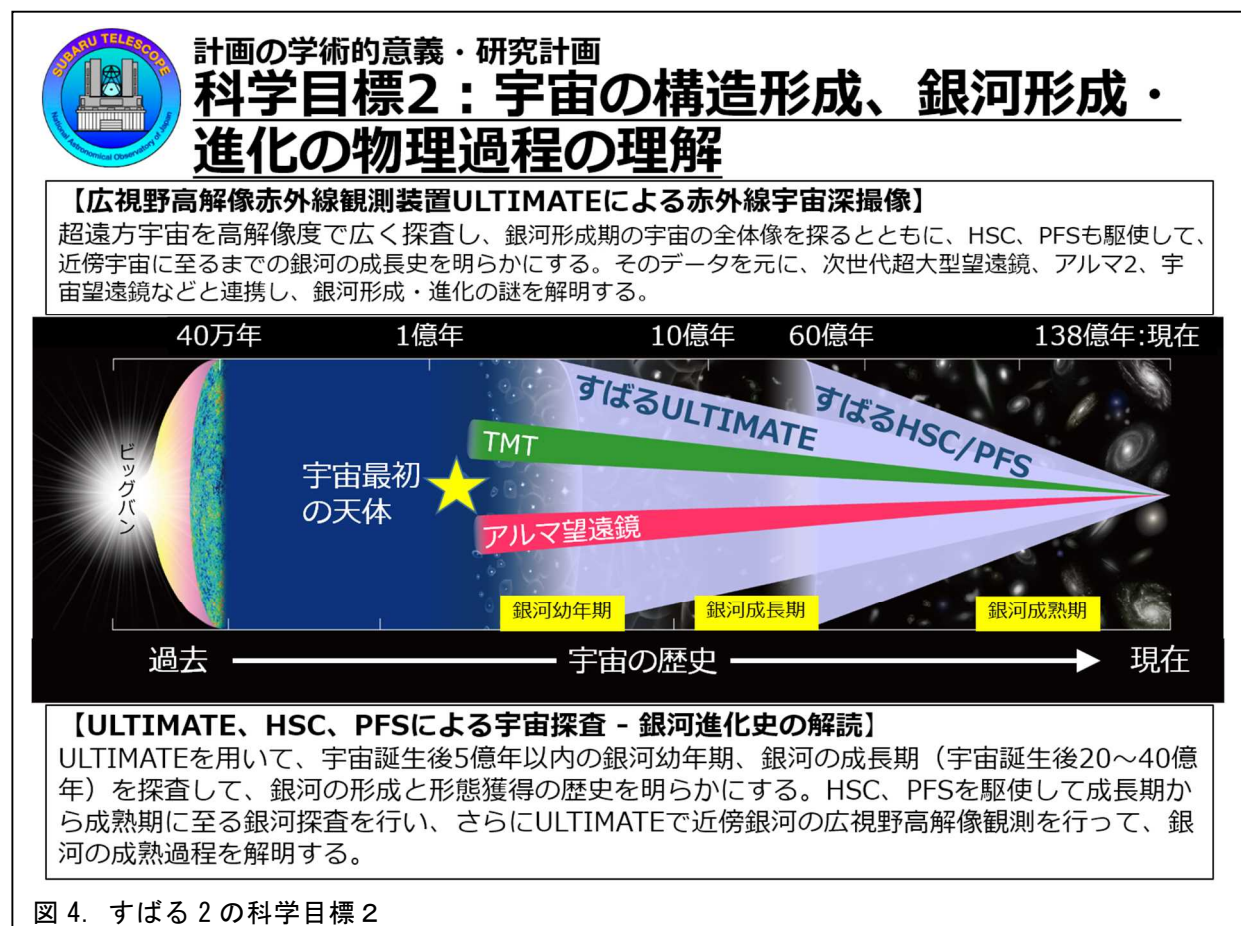
宇宙における物質進化を解明するには、宇宙の構造形成と銀河の形成・進化の関係を明らかにする必要がある。すばる 2 は広天域可視・赤外線観測によって、ダークマター・銀河・銀河間ガスの相互の関係を洗い出し、膨張宇宙における銀河形成・進化を徹底的に調べる。また、宇宙の夜明け時代の始原天体候補を多数検出し、その統計的性質を明らかにするとともに宇宙再電離の原因天体を特定する。検出された始原天体候補は、次世代超大型望遠鏡 GMT、TMT、E-ELT などによる超高感度分光観測でその正体を調べ上げ、初期宇宙の研究を格段に進める（図 4）。

現在の宇宙には性質・スケール共に多種多様な天体・構造が存在する。初代星・初

代銀河はこれら多様な天体形成史の始まりと言える重要な天体である。これら初代天体は宇宙に最初に重元素を供給する源であり、巨大ブラックホールのタネとなる天体である。しかしながら、初代天体の形成・進化過程は謎に包まれている。

すばる望遠鏡は、これまで宇宙誕生から 10 億年以内に存在した幼年期の銀河を 1,000 個以上発見しており、この時代に活発な星形成が進んでいたことを明らかにしたが、さらに遠く、宇宙誕生から 5 億年以内の探査はほとんど進んでおらず、その時代の銀河は現在までに 10 個程度、その候補が見つかったにすぎない。この時代は、宇宙が中性状態から再び電離した「宇宙再電離」が進んだ時代であり、その原因天体や再電離の進行の様子を明らかにすることが、初期宇宙の進化を知る上で欠かせない。宇宙再電離時代の銀河探査には近赤外線での観測が必要である。赤方偏移により、銀河からの光はほとんど近赤外線に偏移しているからである。すばる 2 の ULTIMATE は、広域近赤外線探査によって、この時代に存在したと想定される、初代銀河の候補を数 10 個以上発見し、その多様性を探ると共に光度関数（銀河の明るさごとの個数密度）を求める。宇宙最初期の光度関数は、銀河がどのように誕生したのかの鍵を握る重要な情報であるが、現在は発見天体が少なすぎて、光度関数は得られていない。さらに、より大きな構造のタネである、初代銀河群候補を見つけ、宇宙の大規模構造形成の最初期段階の様子を明らかにする。すばる 2 で発見する初代銀河候補は、TMT を含む次世代超大型望遠鏡やアルマ 2 による詳細観測のターゲットであり、連携観測によって個々の候補を詳しく観測する。

これまでの観測から、宇宙誕生から 20~40 億年の間に、宇宙における星生成が最





も活発となり、銀河が急成長したことが知られている。この時期に、多くの銀河が現在観測されるような様々な形態（渦巻、楕円など）を獲得したと考えられているが、その詳細は明らかではない。すばる 2 では、まず、我々に比較的近い、宇宙誕生後 60～70 億年に存在した多数の銀河を PFS で分光観測し、その時代の銀河の星形成史を明らかにする。また、銀河の吸収スペクトルの解析から、銀河間空間にただようガスの性質と分布を明らかにし、銀河間ガスと銀河進化の関係を探る。さらに、宇宙誕生後 20～40 億年の急成長期の銀河については ULTIMATE で探索し、その高解像度を活かして、銀河の形態獲得の歴史を明らかにする。より近傍の宇宙（宇宙誕生から 100 億年より後）では、ULTIMATE の視野と解像度を活かして、銀河の全体像を、個々の星・ガス雲に分解して捉え、銀河の成熟過程を解明する。さらに、我々の住む銀河系中心領域を広域観測し、重力マイクロレンズ効果を利用してブラックホールを探索し、銀河系におけるブラックホールの個数/質量/空間分布を解明する。

### 【科学目標 3】マルチメッセンジャー天文学の展開

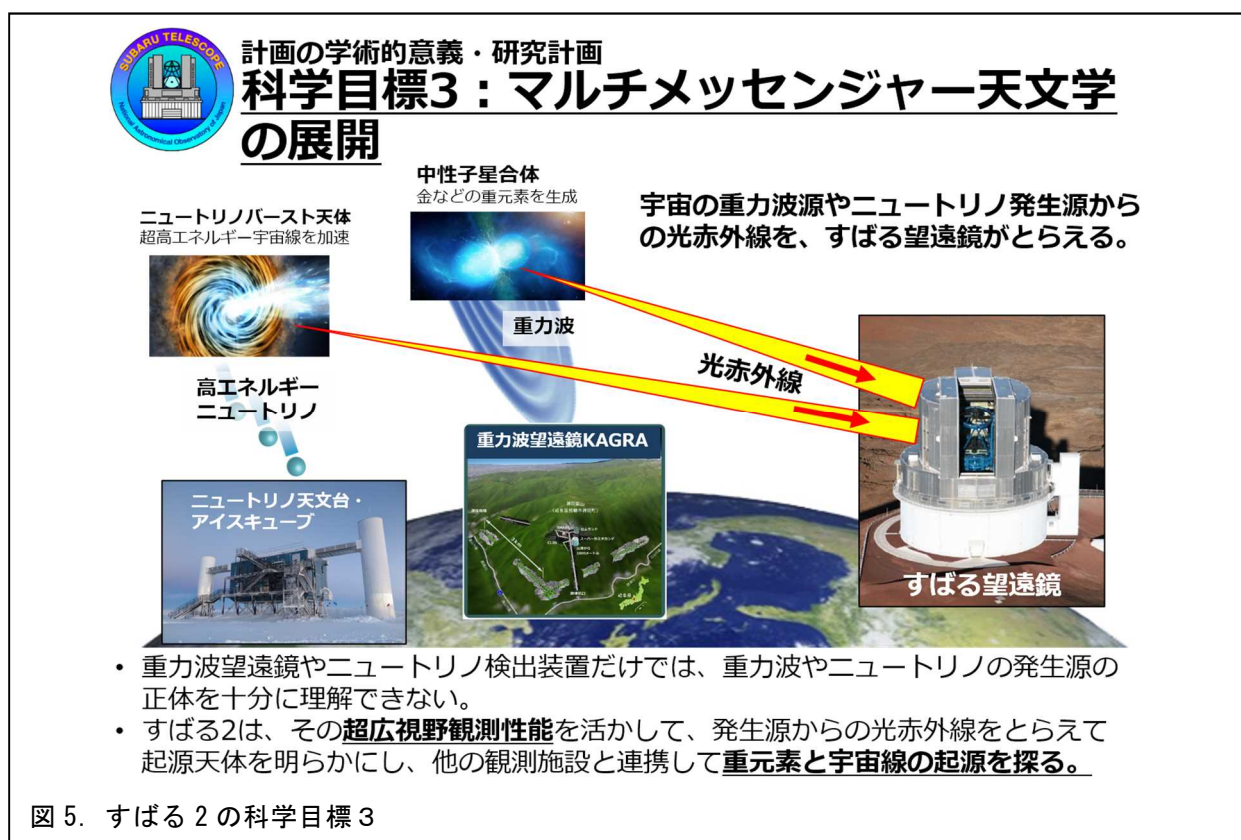
マルチメッセンジャー天文学は、ブラックホールの地平線特性、中性子星など極限状況の核物理、重元素の起源など、従来の電磁波観測だけでは解明できない事象に迫る新たな道を拓いた。すばる 2 は、そのユニークな広視野観測能力を駆使し、KAGRA、ハイパーカミオカンデなど日本の主導する最先端の研究施設と連携してマルチメッセンジャー天文学を大きく発展させる（図 5）。

2015 年 9 月、米国の重力波望遠鏡 LIGO によって、人類は初めて重力波を直接検出することに成功し、ここに、重力波天文学が誕生した。そして、2017 年 8 月、LIGO と欧州の重力波望遠鏡 Virgo は、中性子星同士の合体による重力波イベント GW170817 を検出し、さらにはこの現象からの電磁波放射が世界中の観測施設で検出された。重力波と電磁波の協調観測による、マルチメッセンジャー天文学の大きな一歩である。すばる望遠鏡は、GW170817 からの光赤外線を検出し、さらには追跡観測することに成功し、中性子星合体で重元素が生成されている証拠を掴んだ。

しかしながら、現在までに、重力波と電磁波の協調観測が成功したのは、上記の一例のみであり、マルチメッセンジャー天文学はこれから大いに発展が見込まれる分野となっている。世界各国の重力波望遠鏡（LIGO、Virgo、日本の KAGRA）は、2020 年代中期より、200 メガパーセク（約 6 億光年）彼方で発生した中性子星合体からの重力波を捉えることができるようになる。こうした遠方での中性子星合体は、光赤外線ではピークでも 22 等級より暗く、1～2 日のうちに 24 等級まで暗くなることが予想されている。しかも、こうした現象に対する重力波望遠鏡の位置決定精度は数 10 平方度と広い。すばる 2 は、HSC を駆使して、このような広い領域から光赤外線対応天体を即座に探し出し、長時間にわたって追跡観測を実施する。中性子星合体からは近赤外線が強く放射されることから、ULTIMATE による探索・追跡も行う。こうして、多数の中性子星合体の光赤外線放射とその時間変化を分析し、金やプラチナ、ウランといった、速い中性子捕獲反応で合成される重元素のうち、どういった元素がどのぐらい中性子星合体で合成されるのかを調べ上げる。こうしたデータから宇宙における重

元素の起源を解明する。

また、すばる 2 は、高エネルギーニュートリノ天文台アイスキューブなどで検出される、宇宙から飛来するニュートリノの発生源を特定する。こうしたニュートリノ検出器も位置決定精度が 1 平方度以上あるため、1.7 平方度の視野を持つ HSC による探査が威力を発揮する。地球に到来する超高エネルギー宇宙線の起源はいまだに不明であり、宇宙物理学の大きな謎となっている。高エネルギーニュートリノは超高エネルギー宇宙線と発生源を同じくすると考えられており、すばる 2 によって高エネルギーニュートリノの発生源が同定できれば、この問題に大きな進展をもたらすことが期待される。



#### 【科学目標 4】地球型系外惑星候補天体の同定

太陽系外の生命の探査は、生命の起源を解明し人類が自らの起源を理解するために欠かせない。すばる 2 は、この壮大なテーマに挑む足がかりを得るため、超精密視線速度測定観測によって、地球型系外惑星候補天体を同定する。同定された候補天体は、次世代超大型望遠鏡の超高感度・超高解像度観測によって大気組成や生命の徴候の有無などを詳細に調べる（図 6）。

「我々が住む地球のような惑星は、宇宙には他にもあるのだろうか？そしてそこに生命はあるのだろうか？」この素朴でありながら根源的な問いは、長らく科学の目標というよりは、哲学的な思考対象であった。しかし、1995 年に最初の系外惑星が発見されて以来、これらの問いはまさに天文学が解決すべき具体的な研究対象となっている。そして、すばる望遠鏡、アルマ望遠鏡といった最先端の望遠鏡群は、様々な手法

を用いて、この問いに応えるべく奮闘している。

すばる望遠鏡は、これまでに補償光学装置と高コントラスト観測装置を組み合わせ、主に系外惑星の直接撮像を行い、成果を挙げてきた。すばる2では、これらの研究は継続しつつ、超高精度分光観測によって地球型惑星の間接検出を目指す。ここで用いる手法は「ドップラー法」と呼ばれ、惑星の軌道運動によって母星である恒星が揺り動かされる様子を、スペクトル線の波長移動(ドップラー変位)によって捉える。この手法では、母星が軽いほど地球型惑星のような小さな惑星を検出しやすい。小さな惑星の弱い重力でも母星を比較的大きく揺り動かすことができるからである。したがって、軽い恒星であるM型恒星を観測対象とすることが、地球型惑星を検出するためには有利である。M型恒星は近赤外線で見えるため、近赤外線の観測装置が必要である。この目的のため、自然科学研究機構アストロバイオロジーセンター、ハワイ大学等と協力して近赤外線ドップラー分光装置(IRD)を開発し、2018年より共同利用観測を開始した。近赤外線での超高精度分光ができる装置は、他の8-10m望遠鏡には存在せず、IRDはこの分野の研究においてユニークな位置を占めている。2019年からこの装置を用いて170夜の観測時間を投入する新たなすばる戦略枠プログラム(IRD-SSP)を開始しており、すばる2においてもこれを継続する。IRD-SSPでは100個以上のM型恒星を近赤外線超高精度分光観測し、生命が存在できる範囲(ハビタブルゾーン)にある地球型惑星を検出することに主眼を置いている。ここで検出された惑星は、次世代超大型望遠鏡(TMT、GMT、E-ELT)でより詳しく観測するための重要なターゲットとなる。



計画の学術的意義・研究計画

## 科学目標4：地球型系外惑星候補天体の同定

- 地球は生命を宿す唯一の惑星か、それともありふれた惑星か？
- 近赤外ドップラー分光装置IRDを用いて、**地球型系外惑星の間接探査**を推進する。
  - 銀河系に多数存在する低温星を集中的に観測し、地球型系外惑星を探す。
  - NASAの系外惑星探査衛星TESSと連携し、TESSが発見した系外惑星候補をIRDで詳細観測して、惑星の特徴を明らかにする。
  - 生命を宿す「第二の地球」の有望な候補天体を、TMTに提供する。

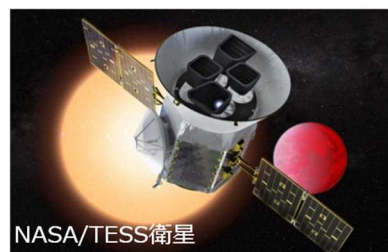
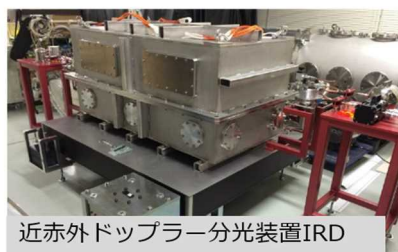
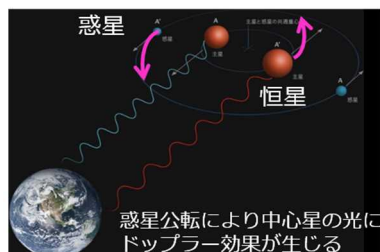
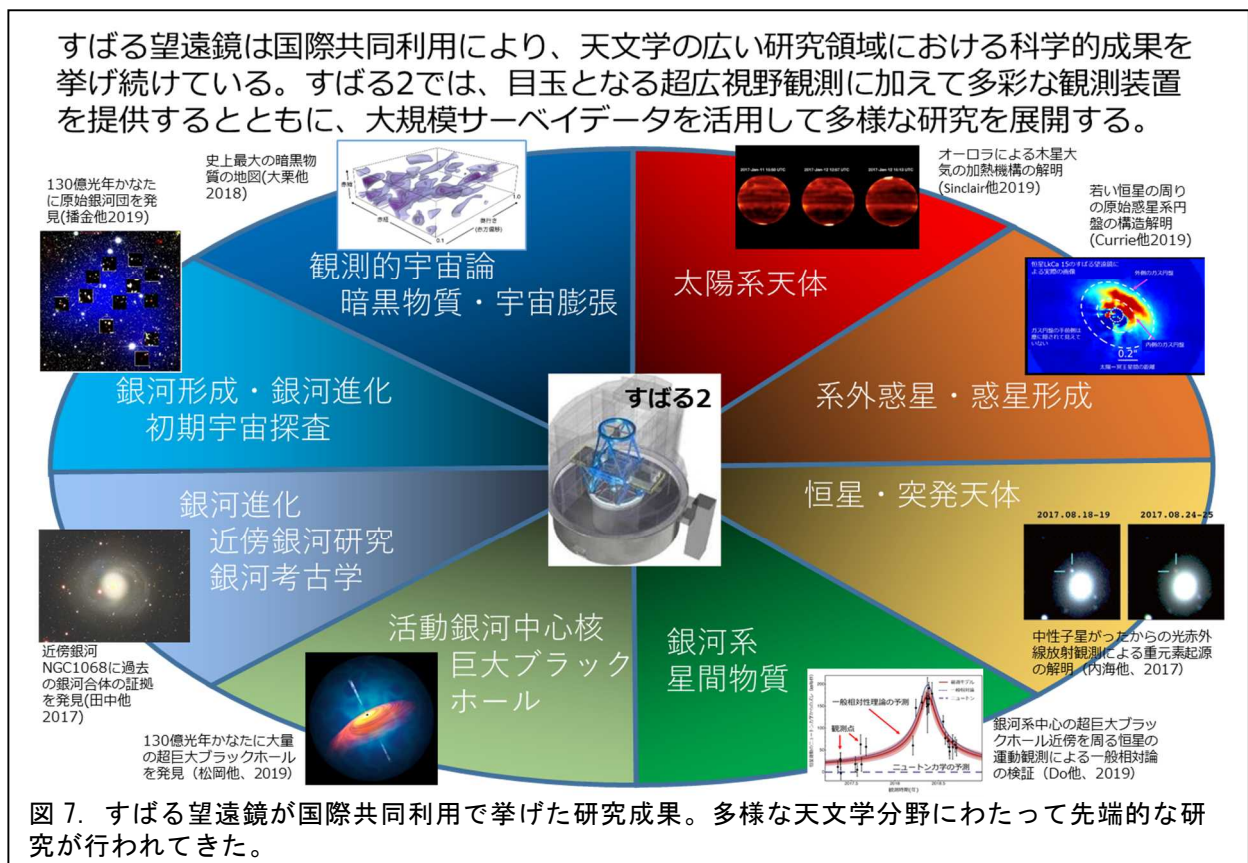


図6. すばる2の科学目標4

## 2-3. 国際共同利用で展開する幅広い研究テーマ

すばる望遠鏡は、年間 240 夜以上にわたる国際共同利用を行ってきており、これまでに太陽系天体から恒星、星間物質、星・惑星形成、系外惑星探査、銀河、ブラックホール、初期宇宙、宇宙論に至るまで、光学赤外線天文学のほぼすべての研究領域で活用されている（図 7）。その成果は、2000 年から 2021 年現在までに 2,300 編を超える査読論文として発表されてきた。

このように幅の広い研究テーマを網羅できるのは、すばる望遠鏡と観測装置の持つ汎用性と広範な研究者を対象とした共同利用による。すばる 2 においては、より広視野観測に重点を置いて望遠鏡の機能強化を行うが、すばる望遠鏡の共同利用は維持する。新しく導入する観測装置である PFS や ULTIMATE は、既存装置である HSC、IRD とともに、それぞれは一つまたは少数の研究テーマのみに特化した機能を持つわけではなく、汎用性を持ち、研究者の創意工夫により多様な研究テーマに用いることができる。また、上記の 4 つの観測装置以外にも、極限補償光学装置や高分散分光装置など、ユニークな性能を持つ観測装置は引き続き運用し、より広いサイエンスニーズに応えていく。



さらに、上に掲げる 4 大研究テーマを追求するために実施する大規模サーベイ観測から生み出されるデータもまた、4 大研究テーマ以外の多様な天文学研究に応用できる。大規模サーベイ観測データは、広い天域、多数の天体、広い波長域にわたる均質な天体データを提供する。こうしたデータが天文学研究における、「レガシーデータ」であり、後年に至るまで様々に活用され、多くの研究成果を生み出す。例として、米

国が2000年より開始したスローン・デジタル・スカイサーベイ (SDSS) がある。SDSSは2.5m 広視野望遠鏡による超広視野サーベイ観測計画であった。メインサーベイは2008年で終了したが、そのアーカイブデータは多様な研究に活用され、現在までに7,700編を超える査読論文が出版されている。すばる望遠鏡の超広視野主焦点カメラHSCによる大規模サーベイ HSC-SSPは、2014年に開始され2021年度に終了予定であるが、すでに2回のパブリックデータリリースを行い、450テラバイトの画像データと4億6千万個の天体カタログを公開している。HSC-SSPのプロジェクト論文は2015年から2021年現在までに180編が発表され、すでに2,600回を超える引用があり、関心の高さが伺える。HSC-SSPのビッグデータは統計数学の天文学への応用としても活用されている。すばる2は、SDSSの10倍以上の集光力と2倍以上の解像度を持ち、大規模サーベイを行い、SDSSとは桁違いに深い詳細な宇宙の姿をとらえ、幅広い天文学分野の豊かな発展に寄与する。

## 2-4. すばる2 と他の最先端観測施設との連携

すばる2は、その超広視野観測能力を活かして、世界の最先端天文観測施設（欧州赤外線衛星ユークリッド (Euclid)、米国近赤外線宇宙望遠鏡ナンシー・ローマン宇宙望遠鏡 (Nancy Roman Space Telescope (以下、Roman))、X線全天サーベイ衛星イーロジータ (eROSITA)、アルマ望遠鏡アルマ2、30m望遠鏡TMT、巨大マゼラン望遠鏡



図8 すばる2 と他の最先端天文観測施設との連携・協力。

GMT、ヨーロッパ超大型望遠鏡 E-ELT など）との連携・協力を行う（図 8）。

すばる望遠鏡は、すでに HSC を用いていくつかの宇宙望遠鏡とは具体的な連携研究を進めている。eROSITA はロシアとドイツが打ち上げた X 線衛星であるが、HSC と eROSITA の研究協定が締結され、幅広い研究力が進行中である。eROSITA の試験観測は HSC のサーベイ領域で行われ、eROSITA の X 線データと HSC の可視光データを組み合わせた研究成果が発表されている。

Euclid はヨーロッパ宇宙機関 ESA が打ち上げを予定している赤外線サーベイ衛星であるが、可視光の観測能力がなく、HSC に協力が呼びかけられていた。これに応え、すばる望遠鏡の 40 夜の時間を共同利用で獲得し、HSC で可視光観測を行う計画（東京大学カブリ IPMU 大栗ら）が進行中である。HSC 観測と引き換えに、日本の研究者（25 名）が Euclid のデータ優先権を獲得しており、衛星打ち上げ後の共同研究がさらに進行することが期待される。

Roman は、米国航空宇宙機関 NASA が 2026 年に打ち上げを予定している広視野の近赤外線宇宙望遠鏡である。Roman とすばるの協調観測は、2016 年ごろから日米の研究者によって議論されはじめ、2017 年、2018 年には日米合同のワークショップを開いて科学目標を議論した。その後、JAXA と NASA との協定締結作業が進み、その中ですばる望遠鏡の 100 夜を Roman との協調観測に使用することが決定しており、すばる 2 の主力観測装置（HSC、PFS、ULTIMATE）を用いて、宇宙論、銀河進化、系外惑星の研究を推進する計画を策定中である。

すばる 2 とアルマ望遠鏡・アルマ 2 との連携も重要である。実際、すばる望遠鏡で推進していた原始惑星系円盤の研究は、塵とガスからなる円盤をより高解像度で調べると言うアルマ望遠鏡での研究に発展し、この分野を飛躍的に進歩させる大きな成果を得ている。すばる望遠鏡が先鞭をつけた超遠方銀河の探査も、すばる望遠鏡が発見した遠方銀河のアルマ望遠鏡での追跡観測から発展し、今では多くの超遠方銀河がアルマによって発見されるようになり、さらに発展しつつある。すばる 2 とアルマ 2 の協調観測は、光赤外線と電波で深宇宙を探るという点から重要である。アルマ望遠鏡は高感度高解像度の電波望遠鏡であるが、視野は極めて狭い。アルマ望遠鏡で広域探査をすることは不可能である。すばる 2 の超広域探査で興味深い天体を検出し、それをアルマ 2 で追跡観測するという連携が、互いの観測能力を活かして優れた科学成果を挙げる上で欠かせない。

このことは、すばる 2 と次世代の超大型望遠鏡（TMT、GMT、E-ELT）との関係にも当てはまる。アルマ望遠鏡は電波望遠鏡であるので、そこで見えてくるものは、すばる 2 で見えるものとは本質的に異なる。多角的に天体現象を見ると言う意味では、光赤外と電波の多波長観測は重要であるが、すばる 2 で検出した天体を超高感度で分光観測し、その正体を解明するには、同じ光赤外で観測する超大型望遠鏡が必須である。すばる 2 の超広視野探査で検出される様々な新天体を、超大型望遠鏡が次々と分光し、高解像度撮像をする。この連携は、「広域探査機」としてのすばる 2 と、「精密観測機」としての超大型望遠鏡、という役割分担であり、我々の宇宙理解を大きく進める研究成果を生むであろう。とりわけ、TMT は日本が主要メンバーとして参画し、技術面で

も中核を担っている計画であり、すばる望遠鏡との一体的運用によって 2030 年代以降も日本の研究者が最先端の研究をリードするための鍵となる。ハワイでの反対運動により現地工事が遅延しているものの、完成への見通しが明確になり次第製造を再開できるよう、技術リスク低減を図る最小限の活動を維持し、状況変化に対応できる体制を整え、将来のすばると TMT の一体的運用に向けた準備を進めていく。

また、米国が南米チリに建設中のベラ・ルービン天文台（2024 年稼働予定）は、すばる望遠鏡 HSC を超える視野（9.3 平方度）を持つ。ベラ・ルービン天文台とすばる 2 は南天・北天での超広視野観測の役割分担が重要となる。ベラ・ルービン天文台は、可視光の撮像機能に特化しており、すばる 2 の有する分光機能や赤外線観測機能は持たない。したがって、こうした機能を活かして、すばる 2 はベラ・ルービン天文台ではできない観測研究を実施する。

## 2-5. すばる 2 を支える最先端観測装置

すばる 2 は「1. 概要」で述べた通り、以下の 4 つの観測装置（うち 2 装置は現在開発中）を主力装置として運用し、科学目標の達成を目指す（図 11。図 1 も参照）。

### 2-5-1. 超広視野主焦点カメラ HSC

HSC は、直径 1.5 度（面積 1.7 平方度）という、現在の 8-10m 望遠鏡では他に並ぶものがない広い視野を一度に撮像できる可視光（波長  $0.38\mu\text{m}$ ～ $1.1\mu\text{m}$ ）カメラである。すばる望遠鏡の優れた結像性能と、HSC の持つ優秀な光学系によって、この広い視野内の全面にわたって 0.4 秒角という他の望遠鏡と比べて群を抜いて高い解像度で撮影できる。HSC を用いて 1 時間の長時間露光をすると、可視光（波長  $0.55\mu\text{m}$ ）での限界等級は 27.8 等級である。これは 1 等星の 500 億分の 1 の明るさの星を検出できることを意味している。

この圧倒的な性能は国内外の研究者の注目を集め、すばる望遠鏡の共同利用時間の約 50% が HSC を用いた観測となっている。ハワイ観測所では、HSC の能力を最大限に活かすため、2014 年より、「HSC-すばる戦略枠プログラム（HSC-SSP）」を開始し、7 年間で 330 夜の時間を集中的に投資する大規模サーベイ計画を行っている。HSC-SSP には、国内外の 480 名の研究者が参加し、計画的なサーベイを継続している。HSC データを用いて、2013 年度の観測開始から 2021 年現在までに 300 編を超える査読論文が出版されているが、そのうち、HSC-SSP に関連した論文は 180 編に上る。

HSC は現在でも世界最強の天体観測カメラであり、すばる 2 でも主力装置の一つとして稼働させる。2-4 章で述べたように、米国は南米チリに HSC を超える視野を持つベラ・ルービン天文台を建設中であるが、北半球においては、現在のところ HSC に勝る超広視野観測施設の建設予定はない。したがって、HSC は、ベラ・ルービン天文台が完成しても、北天での超広視野観測においては、他の追随を許さない観測性能を持ち続ける。

## 2-5-2. 近赤外ドップラー分光装置 IRD

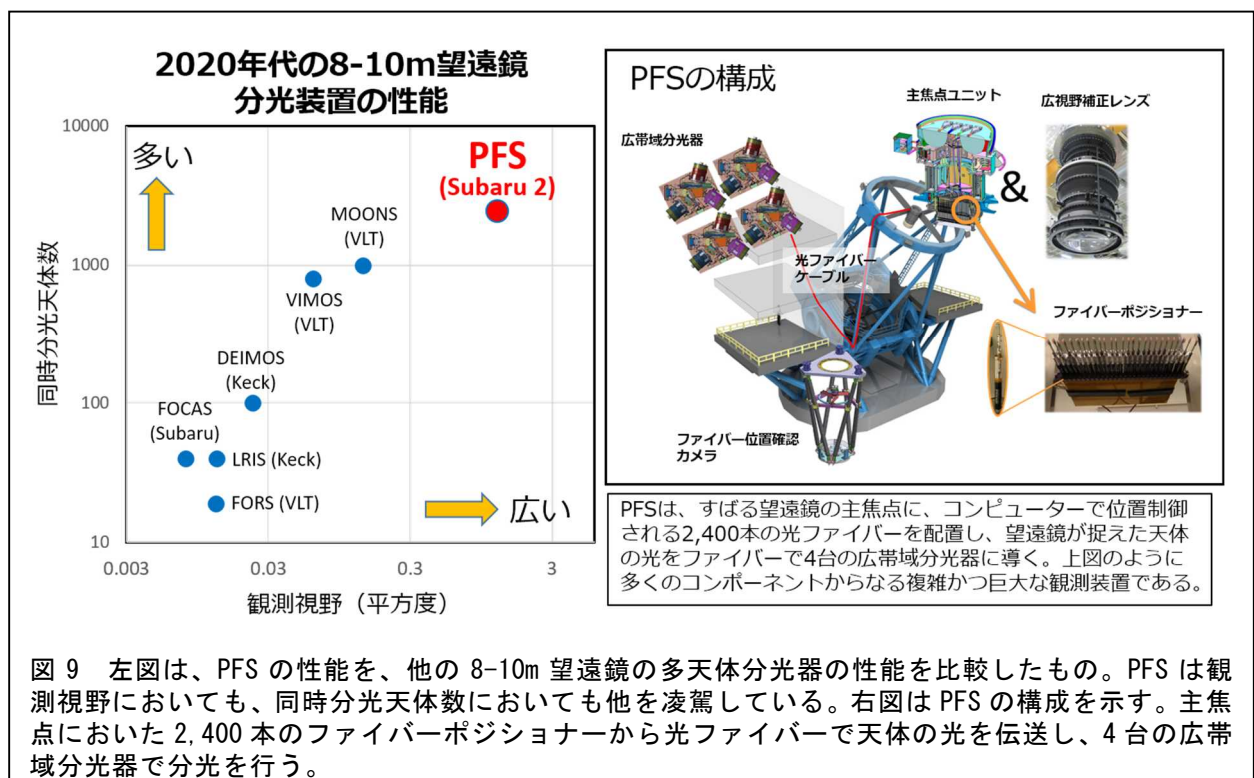
IRD は、近赤外線域において天体からの光を高分散分光し、さらには光周波数コムの技術を用いて、その波長校正を極めて精密に行うことができる観測装置である。IRD は、天体（主に恒星）の視線方向の速度を毎秒 2m という精度で求めることができ、特に、近赤外線で見やすい、太陽より低質量の恒星の観測に適している。

IRD の主たる科学目標は、低質量の恒星を周る地球型惑星の検出と、その性質の解明である。このため、2019 年より、「IRD-すばる戦略枠プログラム (IRD-SSP)」を開始し、5 年間で 170 夜の観測時間を投入する大規模探査を行っている。IRD は、IRD-SSP で掲げた科学目標以外にも多くの科学目的のために使用されており、現在、共同利用時間の 30% 程度が IRD を用いた観測となっている。

IRD の視線速度決定精度は、現在の 8-10m 望遠鏡のなかで最高である。視線速度の精密測定による地球型惑星の検出は、次世代超大型望遠鏡や宇宙望遠鏡での詳細観測のターゲット選定のために必須であり、すばる 2 においても主力装置として運用する。

## 2-5-3. 超広視野多天体分光器 PFS

PFS は、1.25 平方度という超広視野をカバーし、その中に分布する 2,400 個の天体を同時に、広い波長域 (0.38~1.3 $\mu$ m) にわたって分光観測できる観測装置である (図 9)。現在の 8-10m 望遠鏡で、この装置に匹敵する感度と同時観測天体数を持つ観測装置は存在しない。また、2020 年代にこの装置を超える性能を持つ観測装置が実現する可能性はない (2030 年以降をターゲットにいくつかの装置は提案されているが、いず





れも現時点では開発予算の獲得に至っていない)。

現代天文学・物理学の大問題である、ダークエネルギーの正体を解明するには、ダークエネルギーの影響が銀河をはるかに超えた巨大なスケールでしか感知できないため、大規模な宇宙探査が必須であり、またそれが唯一の手段となっている。PFS は遠方まで多数の銀河の距離を正確に測ることができる装置であり、銀河の分布が宇宙の歴史と共にどのように変化してきたのかを、およそ 100 億年前から現在まで非常に高い精度で求めることができる。このデータから、宇宙膨張の様子をこれまでにない精度で明らかにすることができ、これらをコントロールしてきたダークエネルギーの性質を解明できると期待されている。同時に、宇宙における物質集積過程の詳細を調べ、そこから現在でも謎であるニュートリノの質量を高い精度で決定できる。

#### 2-5-4. 広視野高解像赤外線観測装置 ULTIMATE

ULTIMATE は、地表層補償光学 (GLAO) という最新の技術を用いて、8-10m クラスの望遠鏡の近赤外観測ではこれまでにない直径 20 分角 (現在世界で最も広い視野を持つ 8m 望遠鏡赤外線装置の 4 倍) の広視野を解像度 0.2 秒角で観測することができる近赤外線の観測装置である (図 10)。GLAO は、直径 1.3m という巨大な可変形副鏡と多重レーザー参照星システムによって、地表層付近で発生する大気揺らぎを補正し、広い視野にわたって天体像を改善できる最新の補償光学システムである。ULTIMATE では、ライバルのヨーロッパ南天文台 VLT の赤外線観測装置よりはるかに広い視野と高い像改善能力を持つ観測装置である。

銀河の主たる形成時期である、130 億年前より以前の宇宙を探り、生まれたての銀河を観測するには、近赤外線の観測が必須である。宇宙膨張により、130 億年以前に

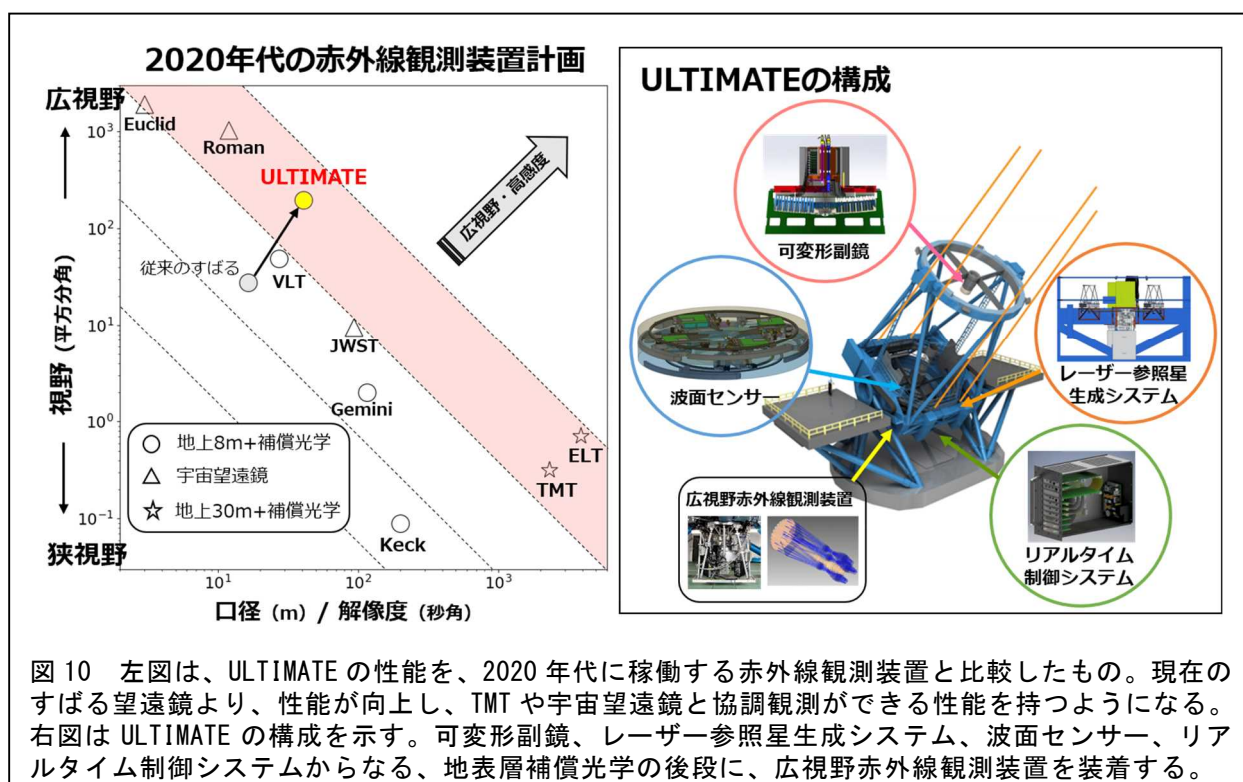


図 10 左図は、ULTIMATE の性能を、2020 年代に稼働する赤外線観測装置と比較したもの。現在のすばる望遠鏡より、性能が向上し、TMT や宇宙望遠鏡と協調観測ができる性能を持つようになる。右図は ULTIMATE の構成を示す。可変形副鏡、レーザー参照星生成システム、波面センサー、リアルタイム制御システムからなる、地表層補償光学の後段に、広視野赤外線観測装置を装着する。

存在していた天体から来る光は大きく赤方偏移し、主たる放射は近赤外域に来るからである。しかも、こうした遠方宇宙では銀河の数密度が小さく、広い天域に稀にしか存在しない希少天体である上に、個々の銀河は非常に暗い。そうした銀河を検出するには広い視野と高感度による探査が必要となる。ULTIMATE は広い視野を持ち、かつ、GLAO による高解像度により天体からの光を集中させてこれまでにない高感度を達成する。



HSC全体写真  
高さ  
3m



PFS主焦点ユニット

**国際協力**により最新鋭の観測装置を開発し、**宇宙の起源と進化、系外惑星の謎に迫る。**

- **超広視野主焦点カメラ (HSC) 運用中**
  - ・ 8億7,000万画素、ハッブル宇宙望遠鏡の1,500倍の視野の世界最高性能カメラ。
  - ・ 開発期間：7年。
  - ・ 2013年度観測開始。6年間の大規模サーベイ観測を実施中（～2021年度）。
  - ・ 開発機関：国立天文台、東大Kavli IPMU、台湾中央研究院、プリンストン大学
- **近赤外ドップラー分光装置 (IRD) 運用中**
  - ・ 開発期間：4年。
  - ・ 2018年度観測開始。6年間の大規模サーベイ観測を実施中（～2024年度）。
  - ・ 開発機関：国立天文台、アストロバイオロジーセンター、ハワイ大学
- **超広視野多天体分光器 (PFS) 開発中 (2023年度観測開始予定)**
  - ・ 2,400個の銀河を一度に分光できる多天体分光装置。
  - ・ 開発期間：10年。
  - ・ 現在、コンポーネントを順次望遠鏡に装着して試験中。
  - ・ 開発機関：国立天文台、東京大学Kavli IPMU、台湾中央研究院、プリンストン大学、他。7か国共同開発
- **広視野高解像赤外線観測装置 (ULTIMATE) 開発中 (2028年度観測開始予定)**
  - ・ 20分角という広視野を0.2秒角の高解像度で観測できる赤外線観測装置。
  - ・ 開発期間：8年。
  - ・ 現在、地表層補償光学装置 (GLAO) 設計が進行中。
  - ・ 開発機関：国立天文台、東北大学、台湾中央研究院、オーストラリア国立大学

図 11 すばる 2 を支える最先端観測装置のまとめ

## 2-6. すばる望遠鏡のこれまでの共同利用の成果

すばる望遠鏡の共同利用成果については、世界で高く評価されている。その根拠として、近年の Top10%、Top1%論文シェアの実績があげられる（図 12）。また、9 割近くの論文が国際共著論文であるなど、国際的な共同研究が基盤となっていることを示している。

### **すばる望遠鏡の被引用数Top1%論文の割合は3%を超え、天文学・天体物理学分野の世界平均(1%)、国内平均(2%)を上回る。**

- この分野の日本の研究レベルを向上させるのに大きな貢献をしている。
- 約90%の論文が国際共著であり、我が国の研究の国際化にも貢献している。

すばる論文	論文数	高被引用論文数	Top 1%割合(%)	Top 10%割合(%)	国際共著率(%)
2011-2015	695	7	1.87	18.85	84.46
<b>2016-2020</b>	717	26	<b>3.35</b>	<b>16.46</b>	<b>90.24</b>

天文学分野 日本全体	論文数	高被引用論文数	Top 1%割合(%)	Top 10%割合(%)	国際共著率(%)
2011-2015	8,458	130	1.53	13.01	65.87
2016-2020	10,242	210	<b>2.03</b>	<b>12.92</b>	<b>72.86</b>

天文学分野 世界全体	論文数	高被引用論文数	Top 1%割合(%)	Top 10%割合(%)	国際共著率(%)
2011-2015	101,348	972	1.0	9.92	48.74
2016-2020	113,162	1,150	<b>0.97</b>	<b>9.51</b>	<b>52.56</b>

出典：InCites (article, review)：2021年7月6日現在

図 12. すばる望遠鏡の Top10%論文、Top1%論文統計。

## 2-7. 社会と国民の支持

すばる望遠鏡は、世界第一線級の学術研究施設として国民に広く知られており、関心・理解も極めて高い。すばる望遠鏡の科学成果は新聞・テレビなどを通じて広く報道されて大きな注目を集め、すばるの名前は国内外で一層浸透してきている。科学的成果・記者発表は 1999 年から 2020 年までに 280 件以上を実施しており、多くの人々へ科学の成果を届けると共に、科学的興味の上への一助となっている。ホームページへのアクセス数は 1 日あたり平均 19,000 件と、多くの方々から閲覧されている。合わせて、近年大幅に普及しているソーシャルメディアによる発信にも力を入れている。ツイッターのフォロワー（購読者）数は 59,000 人を超えた。さらに、知的共有財産としての観測データを手軽に閲覧できるビューアーを一般に公開するなど、すばる望遠鏡は教育現場やシチズン・サイエンス活動を刺激・活性化する存在ともなっている。このような、すばる望遠鏡の 20 年間の広報普及活動を基盤とし、すばる 2 にお

いても社会や国民に対して科学的成果を還元し、その意義・必要性を説明していく。

地元ハワイの理解やサポートを得るために、ハワイにおける活動にも力を入れている。イミロア天文学センターと提携し、観測所員による科学成果の発表の他、地元出身の技術者による、望遠鏡での業務に関する講演を行うなど、地元の理解に貢献している。観測所員による地元小中学校への出前授業、ジャーニー・スルー・ザ・ユニバース等の地元の天文関係のイベントでも、ハワイ観測所は大きな貢献をしている。ハワイの各種民間団体（ハワイ商工会議所、ハワイ島日系人商工会議所、ハワイ日本センター等）、ハワイ大学、マウナケア天文台群と協力して、図に示すような各種イベントも主催、共催し、観測所員が参加して地元市民との交流に努めている（図 13）。

ハワイ観測所は、ハワイ地元との信頼関係を築くため、地元小中高校への教育支援や各種アウトリーチイベントによる科学普及などを通じて、地域社会に貢献した。

	2013年度	2014年度	2015年度	2016年度	2017年度	2018年度	2019年度	2020年度
山麓施設での講演・講義 (人数)	50件 (526)	23件 (389)	22件 (269)	23件 (392)	18件 (579)	16件 (472)	12件 (249)	コロナ禍 で中止
出前授業＋一般講演会@ハワイ (人数)	30件	37件 (1,133)	72件 (1,947)	59件 (1,613)	64件 (1,478)	49件 (1,446)	53件 (2,000)	コロナ禍 で中止
出前授業＋一般講演会@日本 (人数)	7件	16件 (1,453)	-	15件 (2,028)	32件 (2,098)	22件 (1,481)	2件 (120)	コロナ禍 で中止
リモート授業・講演会 (人数)	14件	13件 (1,944)	16件 (975)	11件 (949)	10件 (546)	10件 (917)	休止	5件 (3,000)
広報普及イベント@ハワイ (人数)	8件	8件 (5,940)	8件 (6,715)	13件 (6,675)	13件 (6,064)	12件 (3,570)	6件 (9,000)	1件 (1,000)
インターンシップ@ハワイ	0	0	6	4	6	7	5	5

・オニヅカ・サイエンス・デイ@ハワイ大学

- ・小学生・中学生対象
- ・ワークショップ、展示、ハンズオン
- ・2018年イベント：114人の生徒が参加



・ジャーニー・スルー・ザ・ユニバース

- ・小学校から高校まで、マウナケア天文台職員が出前授業
- ・2019年実績：ハワイ観測所から20人のスタッフが参加。55クラスを訪問。



・アストロデイ@ショッピングセンター

- ・一般市民対象 全マウナケア天文台が参加
- ・展示、ハンズオン
- ・およそ600人の市民と直接触れ合う機会

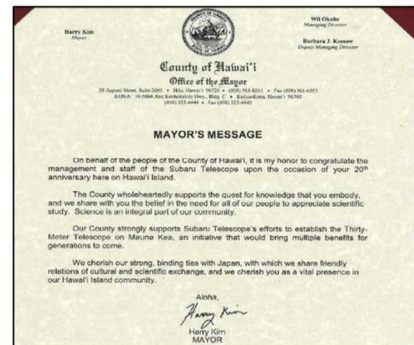


・セタまつり@ハワイ観測所

- ・ハワイ島日系人商工会議所と共催。
- ・そうめん流し、観測所員による出し物、等
- ・2018年：約100名参加



ハワイ地域社会と共同で行っている各種アウトリーチイベント



ハワイ郡長ハリー・キムから届いた29すばる望遠鏡20周年へのお祝い

図 13. ハワイ観測所の地元へのアウトリーチ活動の実績。

## 2-8. 産業・社会への貢献

日本が主導する国際共同研究によって宇宙進化の根源的な謎に迫るすばる 2 計画は、日本の科学の「フラッグシップ」であり、国民の基礎科学に対する理解の増進、さらには教育・産業基盤の発展に大きく貢献するものである。すばる望遠鏡の建設では、世界に未だ存在しない先鋭的な大型望遠鏡を追求することで、製作等に関わった企業による高度な技術開発が進んだ。これにより、国内産業における高度技術の育成に寄与するとともに、日本の技術の誇りを高めた（特許取得件数 75 件）。

すばる望遠鏡で培った技術や浜松ホトニクスと共同開発した技術を駆使した広視野カメラシステムは、JAXA 美星スペースガードセンターに採用され、10 年に渡る長期間、無故障で監視任務に供されている。この時に開発した CCD カメラは X 線にも感度が高く、JAXA のひとみ衛星およびその後継機にも採用された。また、電子顕微鏡や医療用 X 線カメラなどに応用されている。高速高精度アクチュエータ、高速演算装置、高速読み出し高感度光検出器、高精度光学設計などを総合して、極限補償光学装置（SCExAO）をすばる望遠鏡用に開発した。この技術は、生体細部を高精細に捉える補償光学顕微鏡に応用され、医療や生物学研究が大きく進展することが期待されている。この他、図 14 に示す様々な観点から、すばる 2 計画は社会に貢献していく。



社会や国民の支持

# 社会に貢献する「すばる2計画」

【SDGsへの貢献】

**4** 質の高い教育をみんなに



本計画が挑む宇宙の謎の解明は人類普遍の興味であり、日本の科学の「フラッグシップ」として国民の科学に対する理解増進と教育基盤の発展に大きく貢献する。


すばる望遠鏡広報活動実績	
科学成果発表件数	280件以上(1999年以降)
新聞掲載数	115件(2018年度)
ウェブサイトアクセス数	平均19,000件/日
Twitterフォロワー数	59,000人以上

**8** 働きがいも経済成長も



すばる望遠鏡運用によって、ハワイ現地の雇用を促進し、地域経済に貢献する。

**3** すべての人に健康と福祉を



HSC向け高感度可視光センサはX線にも感度を持ち、医療用レントゲン撮影装置にも応用され、医療被曝の低減に貢献している。また、JAXAスペースガードセンターの宇宙デブリ探索カメラに搭載されている。

**16** 平和と公正をすべての人に



**17** パートナリシップで目標を達成しよう



国際共同による科学研究推進・観測装置開発によって、国の垣根を超えた協力関係を構築し、国際平和の礎を築く。

**9** 産業と技術革新の基盤をつくろう



超広視野撮像分光観測実現のための「革新的センシング」「ビッグデータ処理」「先進的光学」技術はSociety 5.0の技術課題であり、技術革新基盤の構築に貢献する。

すばる用に開発された高感度可視光センサ（左）とそれを搭載したデブリ探索望遠鏡（右）



図 14. すばる 2 の果たす社会への貢献。

## 2-9. 事業移行評価における留意事項への対応

「大規模学術フロンティア促進事業の「事業移行評価」(報告)」「大型光学赤外線望遠鏡「すばる」共同利用研究」(令和3年6月15日)において、以下の3点が、後継計画推進に当たっての留意事項としてあげられた。

### ① 計画的な老朽化対策

建設開始からすでに20年以上が経過する中、自然災害等により顕在化する老朽化や定常的なメンテナンス不足に対し、計画を作成し順次対策を進めている。引き続き、観測に極めて重要な影響を及ぼす施設等のうち老朽化対策が真に必要なものを予め把握し、将来に向けた計画的な老朽化対策を講じていくことが必要である。

後継計画の推進に当たっては、新たな観測装置の搭載による高度化に支障を来たさないよう、基本となる施設の計画的な老朽化対策が重要と考えられるが、どの時点までの運用を前提とした老朽化対策なのか、運用を続けるフェーズからクローズまでの道筋を見据えた将来計画に基づいた対策を行う事が必要である。

### ② 研究者の研究環境整備

本プロジェクトによる卓越した成果は、科学成果まで見通せる優秀な人材の高いモチベーションにより支えられている部分も大きい。特に、若手を含む研究者が、プロジェクトの運用業務にエフォートの多くを割かれ、自身の研究に専念できなくなる事のないよう、業務の適切な分担への配慮など研究環境の整備に取り組む必要がある。また、メンター制度など若手研究者への支援体制を整備する取組や海外の同様の研究機関との流動性に関する状況を示すなど研究者が将来のキャリアプランを見通せるような取組を行う事も必要である。

### ③ 他の望遠鏡との連携・一体的な運用

後継計画の運用にあたっては、ローマン宇宙望遠鏡(NASA)やEuclid衛星(ESA)など次世代宇宙望遠鏡との共同研究や、マウナケア天文台群におけるケック天文台やジェミニ天文台との観測時間交換の実施など、現在の協力関係をさらに発展させることが必要である。また、チリのLSSTやE-ELTなど他の望遠鏡計画との連携についても検討を進めていくことが期待される。

一方、国立天文台は、30m光学赤外線望遠鏡(TMT)完成後には、TMTとすばる望遠鏡を一体的に運用する方針を掲げているが、TMTは、2015年度より現地建設が中断しており、今後の見通しが明確といえる状況になく、一体的運用の在り方にも課題が生じている。

後継計画の推進に当たっては、今後のTMT計画の状況に合わせ、将来的な一体運用の在り方を検討することが不可欠である。また、TMTの見通しが不透明な状況にあるため、すばるとTMTの効果的な連携の観点から、柔軟かつ臨機応変に対応できる体制を検討することが必要である。

それぞれに留意事項に対する対応について、以下に説明する。

## ① 計画的な老朽化対策

老朽化対策については、すばる 2 計画の開始から 20 年間、すばる望遠鏡を運用することを念頭に、図 15 に示すような老朽化対策を順次実施していく。2027 年度までにここに示した対策を施すことで、すばる 2 計画の実施期間および、それを超えて、すばる望遠鏡の安定的な運用を行う事ができる。

改修大項目・目的		内訳	H30	R01	R02	R03	R04	R05	R06	R07	R08	R09
			2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027
蒸着装置オーバーホール	主鏡運搬・洗浄装置改修											
温度環境維持（ドーム）	ドーム空調設備更新											
	ドーム機密性維持											
ドーム駆動改修	ドーム駆動システム改修（旧ドーム制）											
	メインシャッター改修											
	トップスクリーンオーバーホール											
	TUE機械系オーバーホール・センサ系											
温度環境維持（望遠鏡・観測装置）	チラー・廃熱機構更新											
電気系改修	電源系統改修	配電盤更新										
		UPS更新										
		スリップリング改修										
	簡頂スパイダーコネクタ等改修											
ウインドスクリーン改修	ウインドスクリーン改修											
望遠鏡可動部改修	電動ジャッキボルト更新											
	天体微動追尾機構等望遠鏡可動部改修											
望遠鏡駆動制御システム改修（旧指向性能維持の一部など）	方位・高度駆動部改修											
	望遠鏡静圧システムオーバーホール											
	望遠鏡駆動制御ボード等改修											
	望遠鏡類操作計算機更新											

図 15. すばる望遠鏡の老朽化対策計画。すばる 2 計画の開始からは、図の黄色および赤色部分を順次改修・更新し、2027 年度までに主要な老朽化対策を完了する。ここに示した計画は、すばる 2 計画開始より 20 年間の望遠鏡運用を想定したものである。

## ② 研究者の研究環境整備

若手研究者の研究時間の確保は、プロジェクトの大きな課題である。現在のハワイ観測所では、若手研究者の業務エフォートは 50%~70%に抑え、研究時間の確保に努めている。各若手研究者にはスーパーバイザが付いている。観測所での業務分担と研究時間の確保、および、研究の達成度については、毎年、年度初めに国立天文台の「目標設定共有プロセス」に則って、スーパーバイザと個々の研究者が面談を通じて年度目標と業務分担・エフォートを確認し、さらに年度末に年度ごとの目標達成率を、研究者本人、スーパーバイザ、さらにその上司の間でチェックして過度な業務負担となっていないか、研究成果が十分挙がっているかどうかを確認しており、行き過ぎた業務負担がある場合は次年度の業務割合を調整するなどしている。また、ハワイ観測所では、すべての研究者が申請できる「研究専任期間制度」を設けており、3 年間の間に 3 か月間を限度として、業務負担をゼロとして研究に専念できるようにしている。

この期間には長期渡航も可能で、渡航費用および一定の研究費も支給する。こうした仕組みは、すばる 2 においても継続する。

若手研究者の研究活動を活性化するために、所内セミナーを毎週開催（これには近隣の天文台からも自由に参加できる）したり、観測に来所した研究者による特別セミナー等を行うといった活動も行っていった。残念ながら、コロナ禍のため、昨年度からこのような取り組みは大きな制限を受け、オンラインを主としたものとなって、対面で直接議論する機会が失われているが、状況が好転し次第、復活させる。

すばる 2 計画推進において、よりきめ細かいサポート体制について、継続的に検討をしていく。

### ③ 他の望遠鏡との連携・一体的な運用

すばる 2 で展開される科学研究は、それ自体で多くの成果が得られることに加え、広視野探査機能を活かした観測で発見される天体の追跡観測を要する課題を多数提起すると見込まれ、他の最先端望遠鏡・観測施設との連携によって、より豊かな科学的成果に結実すると思われる（2-4 章）。特に、2-2 章で述べたそれぞれの研究課題は、すばる望遠鏡と同じ光学赤外線観測を行う、将来の超大型望遠鏡（TMT、GMT、E-ELT）の観測によって大きく発展することが期待される。なかでも TMT は、地球型系外惑星や宇宙最初の天体等、すばる 2 の主要科学テーマに必要な赤外線観測で、他の超大型望遠鏡より優れた性能を持ち、すばる望遠鏡の最適な連携相手である。すばる望遠鏡と、北半球に建設され日本が運用の一端を担う TMT とは、一体的運用によって、他の超大型望遠鏡では実現が難しい、効率的かつ有機的な連携を行うことができ、日本のコミュニティに大きな優位性をもたらす。

すばる望遠鏡とその観測装置を実現した技術力は、すばる 2 と TMT の技術開発へと発展的につながっている。大型構造物の精密駆動や機械設計・制御、大型光学系、補償光学といった主要技術は、すばる 2 と TMT で共通しており、それぞれの開発におけるノウハウの蓄積は、他方の開発に活かされる。例えば、すばる 2 で活躍する ULTIMATE の可変形副鏡を搭載するための望遠鏡改造と、TMT の望遠鏡本体構造は同じ日本のメーカーのチームが推進している。また、すばる 2 の観測装置（HSC、PFS）の大型光学系の技術は、TMT の主鏡や大型観測装置にも直結している。

すばる望遠鏡と TMT は、以上のように、科学研究・技術開発両面で高いシナジーがある。すばる 2 の計画期間においては、TMT 完成後の科学的連携を見据え、技術面での相乗的な効果を発揮しつつ、将来ハワイ観測所の元で一体的に運用し効率化を実現できるよう、検討・準備を進めていく。具体的な取組みとしては、広報と三鷹オフィスの事務に関して、TMT とハワイ観測所はすでに一体化を完了している。すばる 2 は、運用・開発によって人材育成や基礎技術の開発を行い、TMT の建設の諸段階に合わせて適切な人材供給や技術提供を行っていく。TMT 完成の見通しが明確になり、TMT の運用の具体化が進めば、それに合わせて、これまで検討してきた一体的運用体制計画を継続的に実施していく。



### 3. 実施体制

#### 3-1. 共同利用実施体制

すばる 2 の共同利用運用は、自然科学研究機構国立天文台を事業実施主体とした国際共同で行う。すばる 2 の運用をリードする国立天文台ハワイ観測所は、すばる望遠鏡の 20 年間に及ぶ共同利用運用の体制を引き継ぎ、その経験と実績を活かして、すばる望遠鏡の運用の責任を負う（図 16）。

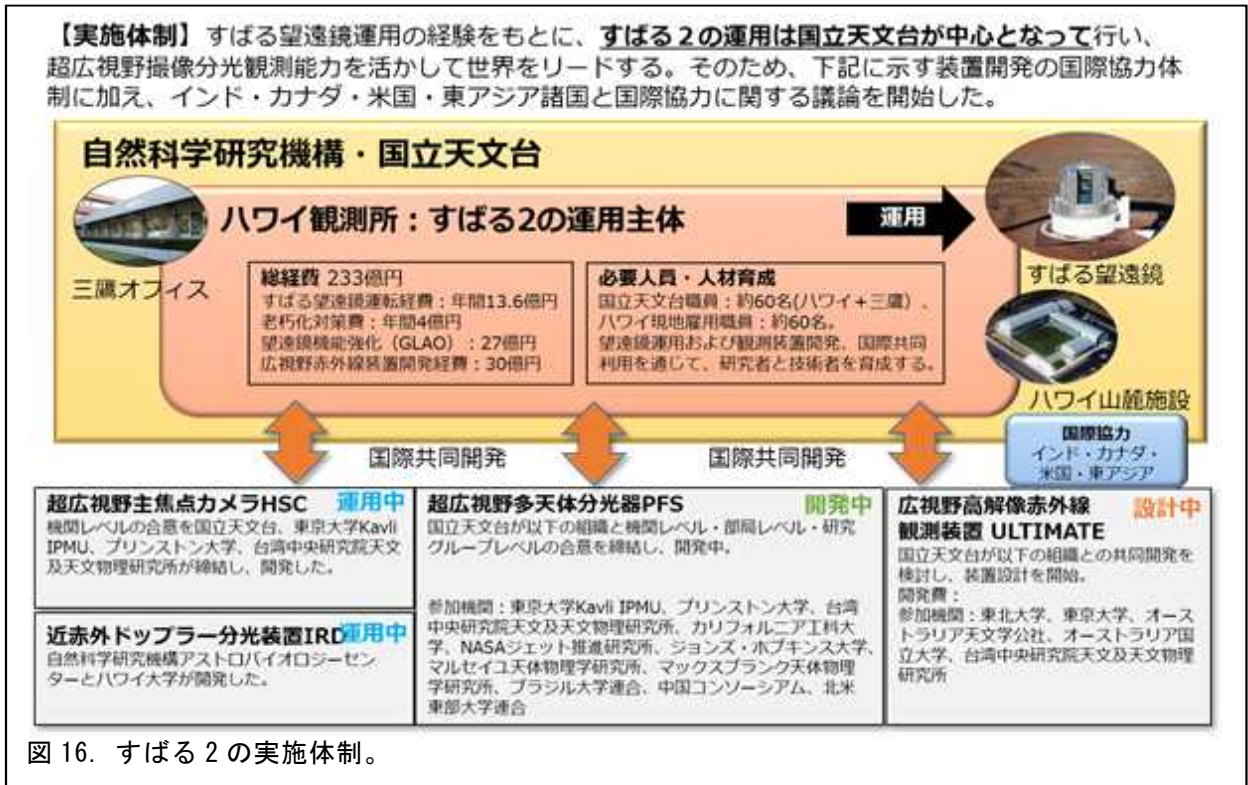
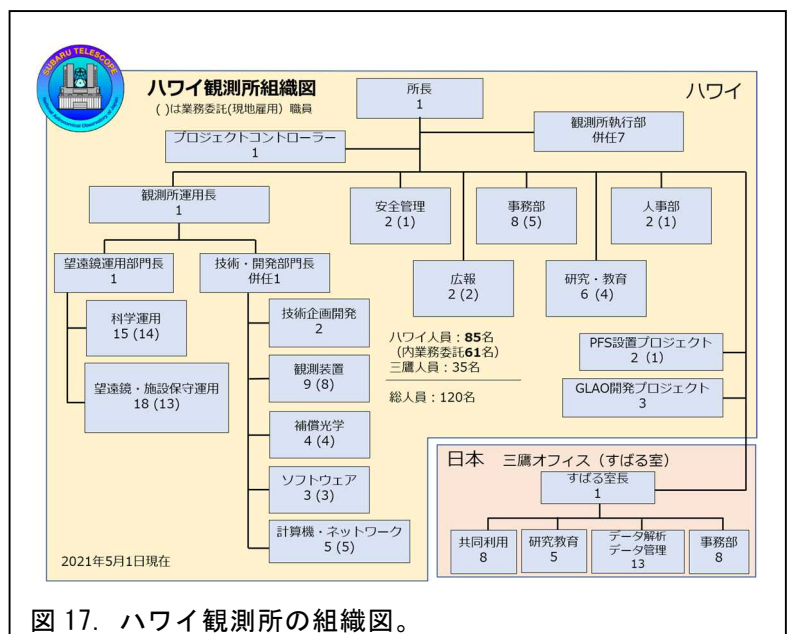


図 17 に現在のすばる望遠鏡の組織図を示す。事業の実行組織である自然科学研究機構国立天文台の職員 24 名がハワイに赴任しており、現地人材派遣職員 61 名と協力して、また三鷹オフィスの 35 名とも連携を取りながら共同利用観測の運用を実施している。すばる 2 でもこれを継承する。さらに、国際共同運用の可能性を、インド、カナダ、米国などと協議している。



研究者コミュニティを代表するすばる科学諮問委員会とは、観測所の方針から運用に至るまでの協議を行っており、委員会からの提言を観測所運営に活かしている。コミュニティ全体との情報共有や意見交換の場を確保するため、毎年すばるユーザーミーティングを開催している。また、光学赤外線天文連絡会を通じて、コミュニティの意見を運用に反映させている。すばる望遠鏡の観測装置やデータ解析に関する学生・研究者への教育活動（すばるの学校）も毎年開催している。

現在すばるでは、ハワイ観測所と国立天文台三鷹キャンパスが協力して、観測提案の募集、日程調整、ユーザーによる観測の支援、データの品質評価・配布、データ解析支援、データ・アーカイブなどの観測支援を行っている。すばる2ではユーザーが大量かつ複雑なデータを速やかに利用できる環境がより重要となるため、観測のリモート化・自動化、データ品質評価の自動化およびユーザーのデータ利用体制の強化などを行う。

### 3-2. 観測装置の開発と運用の体制

すばる2における観測装置運用・開発は、以下に示す国際協力で役割分担をする。国立天文台は、すばる望遠鏡の維持運用、超広視野主焦点カメラ HSC、近赤外超精密視線速度観測装置 IRD の運用、超広視野多天体分光器 PFS の設置・運用、および広視野高解像度赤外線観測装置 ULTIMATE 開発・運用の中心となる。HSC は、機関レベルの合意を国立天文台、プリンストン大学、台湾中央研究院と結んで開発し、運用は国立天文台が行っている。また、アストロバイオロジーセンターおよびハワイ大学は協力して IRD の開発を行い、運用を国立天文台と協力して行っている。HSC と IRD による大規模観測プログラム（すばる戦略枠プログラム）は、各装置の開発チームを中心に実施しており、適宜研究グループレベルの合意を取りながら研究チームを拡張している。

PFS の開発は、以下の機関との国際協力で行っている。

- ・ 東京大学カブリ IPMU： 中心機関、開発プロジェクト統括
- ・ 国立天文台： 望遠鏡への装置設置、データ解析・アーカイブシステム開発
- ・ 台湾中央研究院天文及天文物理研究所： 位置補正カメラ開発、主焦点ユニット組み上げ
- ・ ジョーンズ・ホプキンス大学： CCD カメラ開発、データアーカイブシステム開発
- ・ マルセイユ天体物理研究所： 分光器開発
- ・ カリフォルニア工科大学／ジェット推進研究所： ファイバーポジショナー開発
- ・ プリンストン大学： データ解析ソフト開発
- ・ ブラジル PFS コンソーシアム： 光ファイバー製作
- ・ 米国北東大学連合： データ解析ソフト開発
- ・ マックス・プランク天体物理研究所： サーベイ研究計画立案
- ・ 中国 PFS コンソーシアム： サーベイ研究計画立案

上記それぞれで機関レベル・部局レベル・研究グループレベルの合意を取って協力体制を構築して行っている。すばる望遠鏡への設置後は、開発チームを中心として PFS を用いたすばる戦略枠プログラムで大規模サーベイ観測を行う。

ULTIMATE の開発体制は以下のようになっている。

- ・ 国立天文台： 中心機関、開発プロジェクト総括、地表層補償光学開発
- ・ 東北大学： レーザーガイド星開発
- ・ 東京大学： 広視野赤外観測装置開発
- ・ オーストラリア国立大学： レーザー開発
- ・ 台湾中央研究院天文及天文物理研究所： 波面センサー開発
- ・ カナダ国立研究所： 面分光システム開発

上記機関において、研究グループレベルの合意の下、各コンポーネントの設計・開発が進められている。PFS と同様、すばる望遠鏡への設置後は、開発チームを中心としたすばる戦略枠プログラムで大規模サーベイ観測を行う。

PFS や ULTIMATE の開発には、大型光学系製作技術、大型機械設計・構造解析技術、超精密加工、大型機械制御技術、超精密制御技術、実時間制御技術、熱制御技術、光検出器技術などが必要であり、これらの技術を組み合わせて観測装置開発が進んでいる。PFS も ULTIMATE も類似の既存装置が存在しない最先端の特殊な装置であるため、それぞれの要素技術は既存の技術の単なる応用ではなく、新たな開発要素を解決しつつ実装が行われている。また、すばる望遠鏡で開発が継続中の極限補償光学装置、レーザートモグラフィ補償光学装置、さらには ULTIMATE のために開発する地表層補償光学装置は、空気揺らぎによる像の乱れをリアルタイムに補正するため、超精密加工による可変形鏡を高速演算による実時間制御システムで超高速精密駆動する装置である。そして、いずれもレーザー光による空気乱流計測を行っている。レーザー光は、レーザー発振を利用した光周波数コムとして、IRD の超精密波長校正のためにも使われている。

すばる望遠鏡や、すばる 2 の観測装置のために開発され、用いられている上記のような要素技術は、いずれも、TMT の望遠鏡や観測装置開発のために必須のものであり、すばる 2 での開発が TMT に応用されていく。また、開発された技術は、2-8 章で述べた通り、産業や医療などへの応用も行われている。

すばる 2 で培われる国内外の協力関係や装置開発グループは、TMT をはじめとする次世代の超大型望遠鏡計画における開発や研究協力の基盤となる。特にすばる 2 で経験を積んだ若手研究者が 2030 年代の開発と研究をリードできるよう、研究環境や支援体制を整備する。

## 4. 国内における検討経緯

すばる望遠鏡の構想は、今から40年ほど遡る1980年頃に始まった。世界各国が3-4m級の望遠鏡を運用する一方、日本の天文学界では、光学赤外線天文連絡会（光赤天連）が組織されて次世代光学赤外線望遠鏡の議論が始められた。光赤天連は日本の光学赤外線天文学者コミュニティであり、2020年現在、302名の会員を擁する。光赤天連における議論の結果、1984年には海外の天体観測好適地に大型望遠鏡を建設することがコミュニティの目標となった。同年夏、日本学術会議・天文学研究連絡委員会において、海外設置を前提とする大型光学赤外線望遠鏡計画の推進決議が採択された。その後、設置場所についての具体的調査などが行われ、1989年には「大型光学赤外線望遠鏡計画説明書」が提出された。1990年度には国において「大型光学赤外線望遠鏡計画調査研究費」が認められ、1991年度には建設計画の初年度予算が認められ、本格的な建設計画がスタートした。同年、市民からの投票に基づいて望遠鏡の愛称を「すばる」とした。約9年間の建設期間を経て、1999年にファーストライトを迎え、2000年から国際共同利用を開始した。

共同利用開始から20年が経過し、より先端的な天文学研究を推進するため、すばる望遠鏡の機能強化を行う「すばる2」計画を次期地上大型望遠鏡計画として光赤天連の支持を得て策定するに至った。すばる2計画の策定にあたって、ユーザーズミーティングや光赤天連による将来計画ワークショップなどの中で、挑むべき科学的課題の検討や議論を重ねてきており（下記参照）、コミュニティの合意はできている。2019年11月17日に開催されたユーザーズミーティング、2019年11月18日～21日に開催された国際シンポジウムにおいても計画の推進についてコミュニティへの説明や意見交換を行った。

（参考：過去に行ったすばる望遠鏡の将来計画に関連する光赤天連シンポジウム）

- ・ 2002年光赤天連将来計画シンポ 2002/9/26～27
- ・ 2004年「次世代天文学 - 大型観測装置とサイエンス -」シンポジウム 2004/12/25～27
- ・ 2008年度光赤天連シンポ「地上大型望遠鏡計画：2020年のための決心」 2008/8/21～22
- ・ 2012年度光赤天連シンポ「2020年に向けてのロードマップ」 2012/8/9～10
- ・ 2013年度光赤天連シンポ「2020年代の光赤外天文学 - 将来計画の再構成」 2013/8/6～7
- ・ 2014年度光赤天連シンポ「光赤外分野の展望?将来計画検討書中間報告会」 2014/9/8～10
- ・ 2015年度光赤天連シンポ2「光赤外将来計画：将来計画のとりまとめ」 2016/2/9～10
- ・ 2016年度光赤天連シンポ「共同利用と大規模観測の調和」 2016/9/26～28
- ・ 2017年度光赤天連シンポ「国際協力で実現させる2020年代の光学赤外線天文学」 2017/7/24～26
- ・ 2018年度シンポ「2030年代の光学赤外線天文学を考える - 2018年秋 -」 2018/9/10～12

すばる 2 計画は、光赤天連から、学術的価値、緊急性、各分野での連携、実現性の観点から総合評価 S（最も高い評価）と評価を受け、マスタープラン 2020 に強く推薦された。そして、日本学術会議において、マスタープラン 2020 の重点大型研究計画の一つとして認められ、さらに文部科学省ロードマップ 2020 に記載された。

すばる望遠鏡のユーザーコミュニティは、光学赤外線天文学以外に、電波天文学や高エネルギー天文学など他波長の観測天文学分野および理論天文学分野、さらには宇宙論、原子核物理、素粒子物理、重力波、分子化学、宇宙生物学などの研究分野にも広がりを持っている。すばる望遠鏡は、2020 年末までにこれらの研究分野にまたがる延べ 17,589 名（国内 97 機関 12,911 名、国外 276 機関 4,678 名）の研究者に観測時間を提供してきており、国際的なユーザーコミュニティを構築してきている。

すばる 2 の主力観測装置である超広視野多天体分光器 PFS や広視野高解像度赤外線観測装置 ULTIMATE については、国際協力メンバーとのコラボレーションミーティングやサイエンスミーティングを重ね、装置開発や科学目標などについての議論を深め、プロジェクトのスムーズな進行をはかるとともに、ユーザーコミュニティの一層の拡大に努めてきている（図 18、19、20）。



図 18. 超広視野多天体分光器 PFS 第 11 回コラボレーションミーティング（2019 年 12 月於カリフォルニア工科大学）



図 19. PFS 第 10 回コラボレーションミーティング（2018 年 12 月 於上海交通大学）

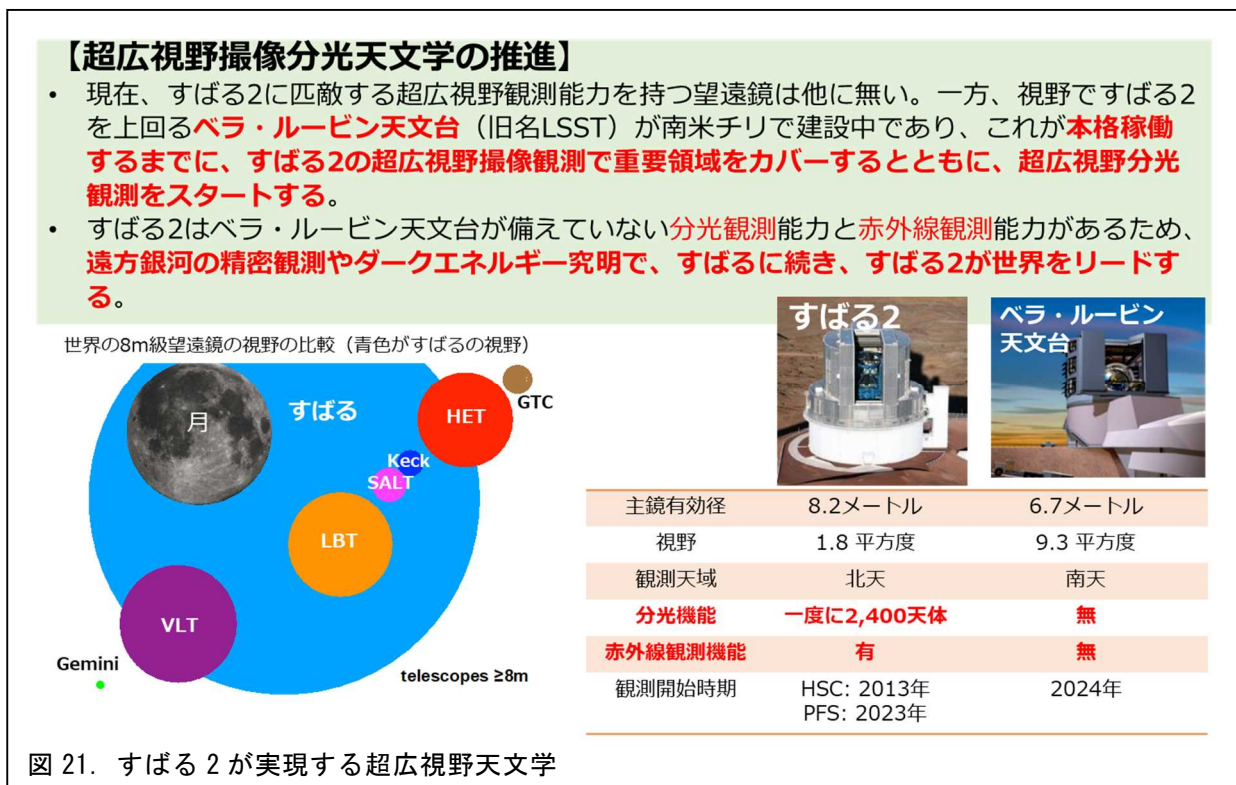


図 20. 広視野高感度赤外線観測装置 ULTIMATE の第 2 回サイエンスミーティング（2016 年 6 月 於国立天文台）

## 5. 国際的な動向

すばる 2 計画は、現行のすばる望遠鏡にさらに超広視野分光能力、広視野高解像度赤外線観測能力を追加し、可視光・赤外線において他の追随を許さない広視野大規模分光・赤外線サーベイを敢行しようというものであり、現在、世界が最も望んでいる機能を実現できる好機にある。

世界の天文学は、TMT に代表される超大型望遠鏡、新鋭宇宙望遠鏡群、重力波望遠鏡、ハイパーカミオカンデなどのニュートリノ観測装置等、2020 年代～2030 年代に実現が見込まれる大型観測施設の時代を見据えて、これらの最新鋭装置では実施することが困難で、かつ、こうした装置の成果を最大限に引き出す、「大規模サーベイ観測」に重点が置かれつつある。光学赤外線望遠鏡においては、すでに各国の 4m 級望遠鏡は軒並み広視野観測装置を備えた大規模サーベイを実施しつつある。一方、現在の最先端の望遠鏡である 8-10m 級望遠鏡の多くは、広い視野を持たない。こうした中であって、唯一、すばるのみが 1 平方度を超える視野を一度に観測できる能力を持ち、超広視野主焦点カメラ HSC によって質・量ともに世界最高のサーベイデータを生み出している。しかしながら、米国では、HSC を凌ぐ性能を持つベラ・ルービン天文台（旧名：LSST）計画が順調に進行しており、2023 年ごろには稼働しはじめる。ベラ・ルービン天文台は南半球に設置されており、北半球に設置されたすばる望遠鏡とは相補的な役割を負うと考えられるが、サーベイスピードはベラ・ルービン天文台のほうが勝っている。すばる 2 計画では、ベラ・ルービン天文台にない「分光」「赤外線観測」の能力を備えて、さらに HSC による研究成果の蓄積を踏まえて世界最強のサーベイ望遠鏡として大きなジャンプを目指す（図 21）。



すでに、すばる 2 の根幹観測装置である PFS や ULTIMATE には海外から多数の研究者がその開発に参画しており、国際的な注目度も非常に高い。このような事情から、早急に計画をスタートさせることが極めて重要であり、そのことによって、我が国は光学赤外線大規模サーベイ観測において世界を牽引する立場を得るだけでなく、2020 年代～2030 年代の世界の天文学研究において欠くことのできない重要な位置を占めることとなる。

上に述べた通り、現在は広視野「分光」「赤外線観測」を追求することが世界での圧倒的な優位性を保つ鍵となっているが、世界では他にも、すばる 2 よりスペックが劣るものの広視野分光装置計画、広視野赤外線装置計画が複数進められつつある。さらに、カナダ・フランス・ハワイ連合では、すばる 2 を上回る広視野多天体分光ができる観測装置（マウナケア分光探査望遠鏡）が計画段階に入っている。すばる 2 計画が順調に進展すれば、これらの計画を凌駕する成果をいち早く生み出せるが、時期を逸すれば、我が国は光学赤外線大規模サーベイ観測において現在の優位な位置を失い、他国の後塵を拝するだけでなく、我が国の天文学全体が世界から大きな後れを取ることが危惧される。





## 用語解説

### ○アクチュエータ

アクチュエータとは、入力されたエネルギーもしくはコンピュータが出力した電気信号を、物理的運動に変換する、機械・電気回路を構成する機械要素である。すばる望遠鏡の主鏡は、261本の力センサーを組み込んだアクチュエータで支えられており、主鏡にかかる力を計測してそれに応じた適切な支持力を発生し、常に主鏡の形が補正されている。これを能動支持機構と呼ぶ。この機構により、すばる望遠鏡の主鏡は望遠鏡の姿勢が変わっても常に形状を理想形に保つことが可能となっている。

### ○イーロジータ (eROSITA)

ドイツのマックスプランク地球外物理学研究所によって開発された X 線天文観測装置であり、ロシアとドイツが共同で 2019 年に打ちあげた Spectrum-Roentgen-Gamma 宇宙天文台に搭載されている。X 線で広く宇宙を探索する能力を持ち、銀河団や宇宙論の研究に威力を発揮すると期待されている。

### ○宇宙再電離

宇宙で最初の天体が誕生した後、天体が発する紫外線によって宇宙全体にある中性水素ガスが光電離されること。宇宙の夜明けともいう。宇宙にあるガスは宇宙の晴れ上がり(宇宙年齢 37 万年、赤方偏移約 1,090)よりも前には高温による電離状態にあったが、次第に冷えて、その後の宇宙の暗黒時代には中性ガス状態であった。初代星(始原星ともいう)の誕生に始まる星と銀河の形成により再び電離された。【天文学辞典】

### ○宇宙の大規模構造

宇宙空間における銀河の分布には特徴的な疎密が見られる。大部分の銀河は、銀河団及び銀河団をつなぐフィラメント状構造に属しており、このフィラメントに囲まれるようにしてボイドと呼ばれる低密度の領域が存在する。銀河団とそれらをつなぐフィラメント状構造およびボイドが織りなす構造のことを宇宙の大規模構造という。宇宙の大規模構造は、せっけんの泡がくっつきあっている様子に似ていることから泡構造とも呼ばれる。一つの泡(ボイド)の大きさは数 10 メガパーセク(数 10 Mpc=1 億光年)にも及ぶ。フィラメントでつながれた銀河群、銀河団などは更に大きな超銀河団を構成する。

### ○M 型恒星

スペクトルによる恒星分類で用いられるグループ分類のうち、星の表面温度によって分類される O 型、B 型、A 型、F 型、G 型、K 型、M 型のうち、表面温度が最も低く、質量が小さい恒星。

### ○近赤外線高コントラスト面分光装置 (CHARIS)

近赤外線で太陽系外惑星の像を捉え、その分光観測を行う装置のこと。極限補償光学装置 (SCExAO) と組み合わせて、恒星からの光を取り除き、恒星の周りを回る惑星の像を高いコントラストで撮影できる。

また、恒星周辺の領域を一度に分光する機能を持ち、惑星からの微かな光も逃さず分光することができる。

#### ○近赤外線ドップラー分光装置 (IRD: Infrared Doppler instrument)

太陽より軽い星の周りを回る地球型惑星を探すための高分散分光器のこと。星からの光を近赤外線波長ごとに細かく分解した強度(スペクトル)を測定することによって、星のふらつきを測定する。このふらつきを測定することによって、惑星の重さや公転周期を決めることが可能となる。

#### ○キュー観測

従来の望遠鏡の観測スケジュールでは、観測するプログラムを予め割りつけておくが、このような方式では、悪天候や観測条件が悪い時などに、別の適切なプログラムに切り替えるのが難しく、観測時間が無駄になることもある。これに対して、キュー観測と呼ばれる観測方式では、天候状況などに応じて柔軟に観測プログラムを切り替え、観測時間の無駄をできるだけ少なくすることができる。

#### ○極限補償光学装置 (SCExAO)

補償光学装置(AO)の中で、極限の解像度を実現する装置のこと。観測できる視野は大変狭い(1秒角程度)が、その代わりに、その視野内の大気揺らぎを高精度に補正して、望遠鏡の限界解像度に迫る像を得ることができる。

#### ○銀河団

明るい銀河を100個程度以上含む銀河の集団。銀河以上の階層構造のうち自己重力系としては最大の構造。矮小銀河まで含めると、1つの銀河団には典型的に千個以上の銀河が存在する。

#### ○ケック望遠鏡

ウィリアム・マイロン・ケックが設立したケック財団からの寄付を受けてハワイ島マウナケア山頂に建設された、2台の光学赤外線望遠鏡。主鏡の大きさ(口径)は10m。カリフォルニア天文学研究協会(California Association for Research in Astronomy)およびNASAが共同参加するケック天文台で運用されている。

#### ○原始銀河団

現在の銀河団になると予想される過去の銀河の集団。主に赤方偏移が2程度以上に見つかる銀河集団に対して用いられるが、これはこの時代に銀河団の形成が始まったと考えられているからである。

#### ○高コントラストコロナグラフ撮像装置 (HiCIAO; High Contrast Instrument for the Subaru next generation Adaptive Optics)

HiCIAOは、明るい天体のすぐ近くにある暗い天体の画像を撮影する装置で、太陽系外の惑星や原始惑星系円盤の発見に威力を発揮する。現在すばる望遠鏡に取り付けられている同様の装置よりも10倍以上暗い天体を撮影することができる。

#### ○広視野近赤外線撮像装置(WFI; Wide Field Imager)

広視野高解像赤外線観測装置 ULTIMATE の一部をなす観測装置で、地表層補償光学 GLAO の性能を活かし、かつ、ハッブル宇宙望遠鏡の 40 倍以上の視野を一度に観測できる性能を持つ。

#### ○広視野高解像赤外線観測装置(ULTIMATE; Ultra-wide Laser Tomographic Imager and MOS with AO for Transcendent Exploration)

すばる望遠鏡の地表層補償光学(GLAO)と、広視野近赤外線撮像装置(WFI)を組み合わせることで広視野かつ高解像度の赤外線観測を実現する装置。ハッブル宇宙望遠鏡の 40 倍以上の視野を、同等の解像度で観測できる。ULTIMATE は、超広視野主焦点カメラ HSC、超広視野多天体分光器 PFS とともに、すばる望遠鏡の広視野観測戦略の一翼を担う主力観測装置であり、2020 年代においてもすばる望遠鏡が国際的な競争力を維持し、TMT と相補的な役割を果たす上で極めて重要な観測装置である。

#### ○サーベイ観測

広い天域や多数の天体を対象にした観測のことで、個別の天体ではなく、統計的に天体の性質を理解する研究を可能にする。広い視野をもつすばる望遠鏡はこのような観測を得意とする。

#### ○30m 光学赤外線望遠鏡(TMT:Thirty Meter Telescope)

日本(国立天文台)、米国(国立科学財団、カリフォルニア大学、カリフォルニア工科大学)、中国(国家天文台)、インド(TMT 連携機構)、カナダ(天文学大学連合)の 5 カ国の国際協力プロジェクトとして、ハワイ州マウナケア山頂域(標高 4,012m)に、現在の世界最大の望遠鏡をはるかに上回る口径 30m の超大型望遠鏡 TMT を建設する。これによって地球型系外惑星における生命の兆候探査、銀河誕生期の宇宙史の解明、ダークエネルギーの性質の解明など、広範な研究を画期的に推し進めることを目的としている。

#### ○ジェミニ望遠鏡(Gemini Telescope)

アメリカ、イギリス、チリ、オーストラリア、アルゼンチン、ブラジルの国際共同プロジェクトとして、ハワイ島マウナケア山頂とチリ中部のパチョン山に建設された、2 台の光学赤外線望遠鏡。主鏡の大きさ(口径)は 8.1m。ジェミニ望遠鏡は、アメリカ、カナダ、チリ、アルゼンチン、ブラジル、韓国が共同参加しているジェミニ天文台で運用されている。

#### ○地表層補償光学(GLAO)と広視野高解像赤外線観測装置(ULTIMATE)

補償光学は、地球大気のゆらぎをリアルタイムで測定し、鏡の形状を変化させて、天体像をより鮮明にする技術である。現在の補償光学装置では同時に天体像を補正できる空の面積は限られているのに対し、複数のレーザー光源による人口の星を使い、かつ望遠鏡の副鏡を可変形鏡とすることで、地表層で発生する大気揺らぎの影響を取り除き、従来の 200 倍以上の広い視野でシャープな天体像を得ることができる。

### ○重力波

一般相対性理論などの相対論的な重力理論一般に予言される重力場の波動的振動。一般相対性理論では、重力波は物質の四重極モーメント以上の高次モーメントの時間変化から放射される横波で、その伝播速度は光速度に等しい。【天文学辞典】

### ○重力レンズ

遠くの天体から出た光が、途中にある銀河や銀河団の重力場によって曲げられる現象。重力場が凸レンズのように働くことから名づけられた。一般相対性理論の帰結の一つであり、重力レンズ方程式で記述される。重力場となる天体をレンズ天体、重力レンズ効果を受ける天体を光源という。【天文学辞典】

### ○主焦点カメラ(Suprime-Cam)

主焦点に取り付ける観測装置で、満月とほぼ同じ大きさの広い視野を一度に撮像することが可能である。銀河の誕生・進化や宇宙構造の研究、太陽系外縁部の小天体の探査等で優れた成果をあげた。約7倍の広視野化を果たした超広視野主焦点カメラ(HSC)の定常運転に伴い、2017年度に運用を終了した。

### ○赤方偏移

一般に天体の発する光の波長が伸びて観測されることを、赤い側にずれるという意味で赤方偏移という。赤方偏移が起きる原因は三種類あり、それぞれ異なる名前で呼ばれている。第1は、相手の天体が相対的に観測者から遠ざかっている場合である。このときの赤方偏移はドップラー効果で説明され、これを運動学的赤方偏移と呼ぶ。第2は、重力に起因するものである。重力がより強い場所から発せられた光は、観測者に到達するまでに波長が伸びる。これは一般相対性理論の効果で重力赤方偏移と呼ぶ。第3は、宇宙膨張の効果によるものである。十分遠方の天体はすべて赤方偏移を示すが、これを宇宙論的赤方偏移と呼ぶ。これは天体を発した光がわれわれ観測者に届く間に、宇宙空間が膨張したために光の波長が伸びたのである。

### ○ダークエネルギー（暗黒エネルギー）

現在の宇宙の平均エネルギー密度の約4分の3を占めていると考えられる正体不明の成分。その存在が認められるようになったのは、遠方のIa型超新星の観測データによる宇宙の加速膨張の発見(1998)による(2011年ノーベル物理学賞)。加速膨張は実効的に負の重力(斥力)を及ぼすような何らかの成分が宇宙を満たしていることを示唆する。【天文学辞典】

### ○ダークマター（暗黒物質）

現在の宇宙の平均エネルギー密度の約4分の3はダークエネルギーによって占められているが、元素からなる通常の物質(宇宙論ではこれをバリオンと呼ぶことが多い)は、全体のわずか5%以下でしかないことがわかっている。ダークエネルギー以外の宇宙の成分の8割以上(すなわち宇宙の5分の1以上)を占める成分をダークマターと呼ぶ。ダークマターは通常の物質と同じく重力相互作用を及ぼすものの、それ以外の相互作用はほとんど及ぼさない。【天文学辞典】

### ○太陽系外惑星(系外惑星)

太陽以外の恒星を周回する惑星。1995年に発見が報告されて以来、急速に研究が進み、これまでに2,000を超える惑星系候補がみついている。惑星は木星のような巨大ガス惑星と、地球のような岩石惑星に大別される。地球型の系外惑星は生命の存在可能性を探るうえで重要なターゲットであり、すばる望遠鏡などの地上望遠鏡や宇宙望遠鏡で探査が行われている。一方、生命探査のためには地球型系外惑星の直接撮像が必要であり、TMTなど次世代望遠鏡の課題となっている。

### ○多天体近赤外撮像分光装置(MOIRCS; Multi-Object Infrared Camera and Spectrograph)

近赤外線用としては巨大な400万画素の検出器を2個搭載し、広い視野を撮像する能力を持った赤外線用デジタルカメラであり、同規模の大型望遠鏡では世界で初めて近赤外線の波長域で一度に多数の天体の分光観測を可能にした装置である。この機能により観測効率が劇的に向上し、遠方銀河の研究に威力を発揮している。

### ○超広視野主焦点カメラ(HSC; Hyper Suprime-Cam)

HSCは、すばる望遠鏡主焦点に設置される1.5度の超広視野角をもつ可視光カメラであり、これまでに大きな成果を挙げた30分角の視野角をもつSuprime-Camの約10倍の視野を持つ。この装置を用いれば、宇宙の広い範囲の極めて多数の天体を同時に観測することができ、宇宙におけるダークマターの分布、宇宙初期の銀河、太陽系の外側の天体などの研究に画期的な進展をもたらすことができる。

### ○超広視野多天体分光器(PFS; Prime Focus Spectrograph)

PFSは、すばる望遠鏡主焦点に2,400本の光ファイバーを並べ、同時に多数の天体を観測できる分光装置であり、ダークエネルギー、銀河考古学、銀河進化などの研究に威力を発揮することが期待される。東京大学カブリ数物連携宇宙研究機構(IPMU)が全体計画をとりまとめ、国立天文台が望遠鏡インターフェースを担当し、他にアメリカ、台湾、フランス、ブラジル、ドイツ及び中国が参画し、開発計画を推進している。

### ○ドップラー法

太陽系外惑星の検出方法の一つで、最も古い伝統的な方法。視線速度法とも言う。惑星をもつ恒星は、惑星の重力を受け惑星との共通重心の周りを公転する。惑星の軌道面が視線方向に対して垂直(軌道傾斜角が0度)でない限り、恒星の微小な公転運動が視線方向の運動としてドップラー効果でとらえられる。恒星からの光のドップラー偏移を通してこの視線方向の運動を検出する方法をドップラー法(またはドップラーシフト法)という。【天文学辞典】

### ○ナンシー・ローマン宇宙望遠鏡(Roman: Nancy Roman Space Telescope)

NASAが2026年ごろに打ち上げを予定している、口径2.4mの赤外線宇宙望遠鏡。差し渡し約25分角の領域を近赤外線(波長 $1\mu\text{m}$ ~ $2\mu\text{m}$ )で観測できる能力を持つ。すばる望遠鏡の広視野高解像赤外線観測装置(ULTIMATE)とは、観測できる視野がほぼ同じである。Romanは地上望遠鏡よりも赤外線で感度が高いが、ULTIMATEの狭帯域撮像機能や分光機能は、Romanにはない機能であり、互いに相補的な役割を果たすと期待されている。

### ○ニュートリノ

電荷を持たないレプトンに分類される素粒子で、電子ニュートリノ、ミューニュートリノ、およびタウニュートリノの 3 種類(それぞれの反粒子を含めると 6 種類)ある。これらは電荷を持つレプトンである電子、ミューオン(ミュー粒子)、およびタウ粒子と対をなしている。他の素粒子と弱い相互作用しか起こさないため、検出には巨大な検出器が必要となる。素粒子の標準理論では質量ゼロとされているが、近年ニュートリノ振動の観測によりわずかな質量を持つことが示唆されている。【天文学辞典】

### ○ハビタブルゾーン

地球と似た生命が存在できる惑星系の空間。生命居住可能領域、生存可能圏とも呼ばれる。液体の水が天体表面に安定に存在できる条件から求められる。【天文学辞典】

### ○秒角

角度の単位で、1 度の 3,600 分の 1 に対応する角度。どれだけ細かいものを見分けられるかという、望遠鏡の解像度(視力)を表す指標としても使われる。

### ○補償光学装置(AO)

大気の影響による星像の乱れを実時間で補正し、望遠鏡の解像力を向上させる装置の総称である。大気揺らぎを参照星やレーザーガイド星(LGS)を用いて計測し、可変形鏡などを用いて星像の乱れを実時間で補正する。その実現方法によって、極限補償光学、広視野補償光学など数種類に分かれる。

### ○188 素子補償光学装置(AO188)

すばる望遠鏡用に開発された、188 素子の可変形鏡を用いた補償光学装置(AO)。レーザーガイド星(LGS)との組み合わせで用いられることも多い。2007 年度から運用を開始した。

### ○マルチメッセンジャー天文学

天体現象によって発生する電磁波、宇宙線やニュートリノなどの粒子および重力波、を情報運ぶ運び手(メッセンジャー)と見立てて、複数のメッセンジャーを用いて天体現象を総合的に解明する天文学のこと。

### ○ユークリッド(Euclid)

欧州宇宙機関(ESA)が中心となって開発している、近赤外線天文観測衛星。口径 1.2m の赤外線望遠鏡を搭載し、一度に 0.5 平方度の視野を観測できる能力を持つ。主体は撮像観測であるが、低分散の分光観測もできる。主たる科学目標は全天探査によるダークマターとダークエネルギーの研究であり、すばる望遠鏡をはじめとする地上望遠鏡との連携が極めて重要であるとされている。

### ○レーザーガイド星機能つき補償光学装置(LGS/AO188)

補償光学装置が働くためには、大気揺らぎを測るための参照星が必要である。しかし、星の少ない領域を観測するときには適切な参照星を観測できないことがある。そこで、地上からレーザーを打って、大気中に疑似星を作る技術が開発された。これをレーザーガイド星(LGS)という。主としてナトリウムレー

ザーが用いられ、上空 10km 程度にある大気のリウム層を光らせて疑似星を作る。LGS は 188 素子補償光学装置(AO188)と組み合わせて、2007 年からシステムの運用を開始した。