



大型光学赤外線望遠鏡 「すばる」の共同利用研究

学術研究の大型プロジェクトに関する作業部会
事業移行評価資料

自然科学研究機構 国立天文台

2021年5月



目次



1. 計画の概要	・ ・ ・ ・ ・ P.3
2. 実施体制	・ ・ ・ ・ ・ P.8
3. プロジェクト計画	・ ・ ・ ・ ・ P.14
4. プロジェクト計画の達成状況	・ ・ ・ ・ ・ P.17
4-1. 研究の達成状況	・ ・ ・ ・ ・ P.18
4-2. 施設等の整備状況	・ ・ ・ ・ ・ P.41
4-3. 情勢変化に対する対応	・ ・ ・ ・ ・ P.44
4-4. 社会や国民からの支持を得るための 取り組み、情報発信の状況	・ ・ ・ ・ ・ P.47
4-5. 年次計画における「プロジェクト推進 に当たっての留意事項等」への対応状況	・ ・ ・ ・ ・ P.53
4-6. 共同利用・共同研究を行うための 実施体制の状況	・ ・ ・ ・ ・ P.61
4-7. 幅広い研究者が参画できる運用体制の状況	・ ・ ・ ・ ・ P.65
4-8. プロジェクト推進にあたっての課題	・ ・ ・ ・ ・ P.68



1. 計画の概要

(研究計画、施設整備に関する概要)



大型光学赤外線望遠鏡 「すばる」の共同利用研究

銀河誕生時の宇宙の姿を探り、太陽系外の惑星の謎に迫るため、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）を用いて、国内外の研究者による共同利用観測を推進する。

○ 特徴

- 世界最大級の口径8.2m、世界最高精度で研磨された一枚ガラスの主鏡。
- 日本の優れた技術を活かし世界トップクラスの性能を達成。最先端技術を活用した新観測装置の開発で、世界をリードし続けている。
- 超広視野観測が可能な世界唯一の大型望遠鏡として、他の追随を許さない成果。

マウナケア山頂（標高4200m）のすばる望遠鏡



○ 推進体制

日本から赴任職員 24人、現地人材派遣 61人。ハワイ大学との協定に基づいた運用、近隣のアストロノミカル・オブザーバトリー・オブ・ハワイとの連携及び地元社会との協力を進め、国際的に開かれた観測所を実現

○ 喫緊の課題

望遠鏡・ドームは建設から20年以上が経過し、経年変化による不具合や部品の入れ替えなどへの抜本的な対応が必要になっている。



1. 計画の概要

すばる望遠鏡の科学目標

「大規模学術フロンティア促進事業の年次計画（2020年8月改訂）」

5

科学目標 1：ビッグバン後10億年以内の宇宙初期を観測し、宇宙における天体の形成過程を研究する

超広視野主焦点カメラで、宇宙誕生後10億年以内の宇宙再電離期の銀河を観測する。



超遠方の銀河

科学目標 2：遠方宇宙を広い天域にわたって観測することにより、宇宙の大規模構造の起源を研究する

超広視野主焦点カメラと超広視野多天体分光器により遠方宇宙を広い天域にわたって観測し、宇宙の大規模構造のもとになったダークマターの分布を明らかにする。



銀河団が網の目のように連なる宇宙の大規模構造

科学目標 3：太陽系外惑星を直接観測し、その性質を研究する

高分散分光器を用いて地球型の太陽系外惑星を観測し、その性質を明らかにする。

科学目標 4：重力波、ニュートリノ観測と協調した新たな天文学（マルチメッセンジャー天文学）を推進する

ブラックホールや中性子星の合体、ニュートリノバーストを、重力波望遠鏡やニュートリノ観測装置、他波長望遠鏡と協力して観測し、物質の起源を明らかにする。

科学目標 5：惑星系形成領域を観測し、惑星の形成過程を研究する

高コントラストカメラを用いて惑星形成領域や生まれたての惑星を観測し、惑星の形成過程を研究する。



太陽系外惑星の想像図



1. 計画の概要

すばる望遠鏡の立地：ハワイ・マウナケア

【理想的な立地条件】

- 標高が高く（4,200m）、快晴の日が多く乾燥。
 - 上空の貿易風の影響で、気流が安定。
 - 近隣に大都市がなく、人工光の影響がほとんどない。
- 世界11か国が運営する13の望遠鏡が設置されている、最先端観測天文学の一大集積地。



望遠鏡が立ち並ぶマウナケア山頂

マウナケア山頂（4,200m）
すばる望遠鏡





1. 計画の概要

すばる望遠鏡の強み

- 超広視野観測能力
- 優れた結像性能

同じ銀河団の写真だが、感度の高いすばる望遠鏡のほうが多くの銀河を写し出している。



すばる望遠鏡



ハッブル宇宙望遠鏡

超広視野主焦点カメラ
HSCの視野

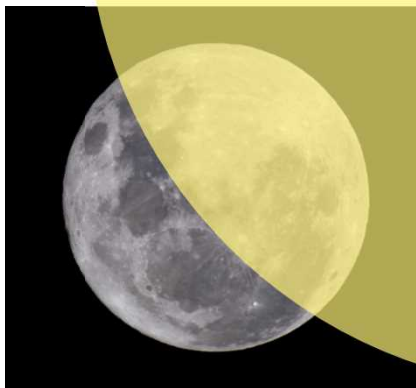
月が9個入る

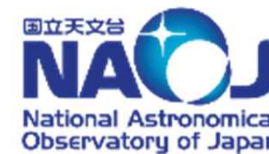
TMTの視野



超広視野多天体分光器
PFSの視野

ケック望遠鏡
広視野分光器
の視野





2. 実施体制

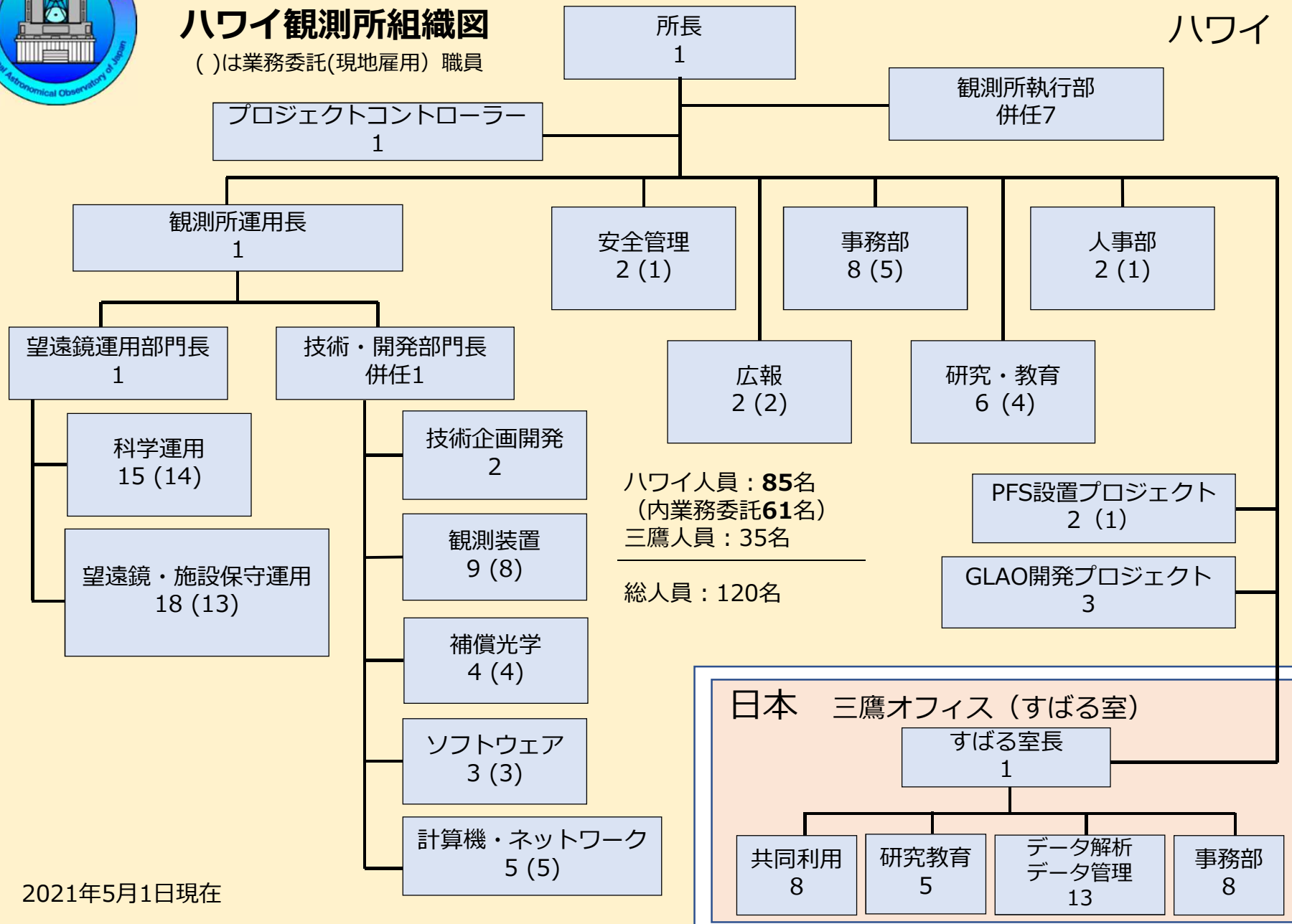
(国内外の連携体制等)



ハワイ観測所組織図

()は業務委託(現地雇用) 職員

ハワイ

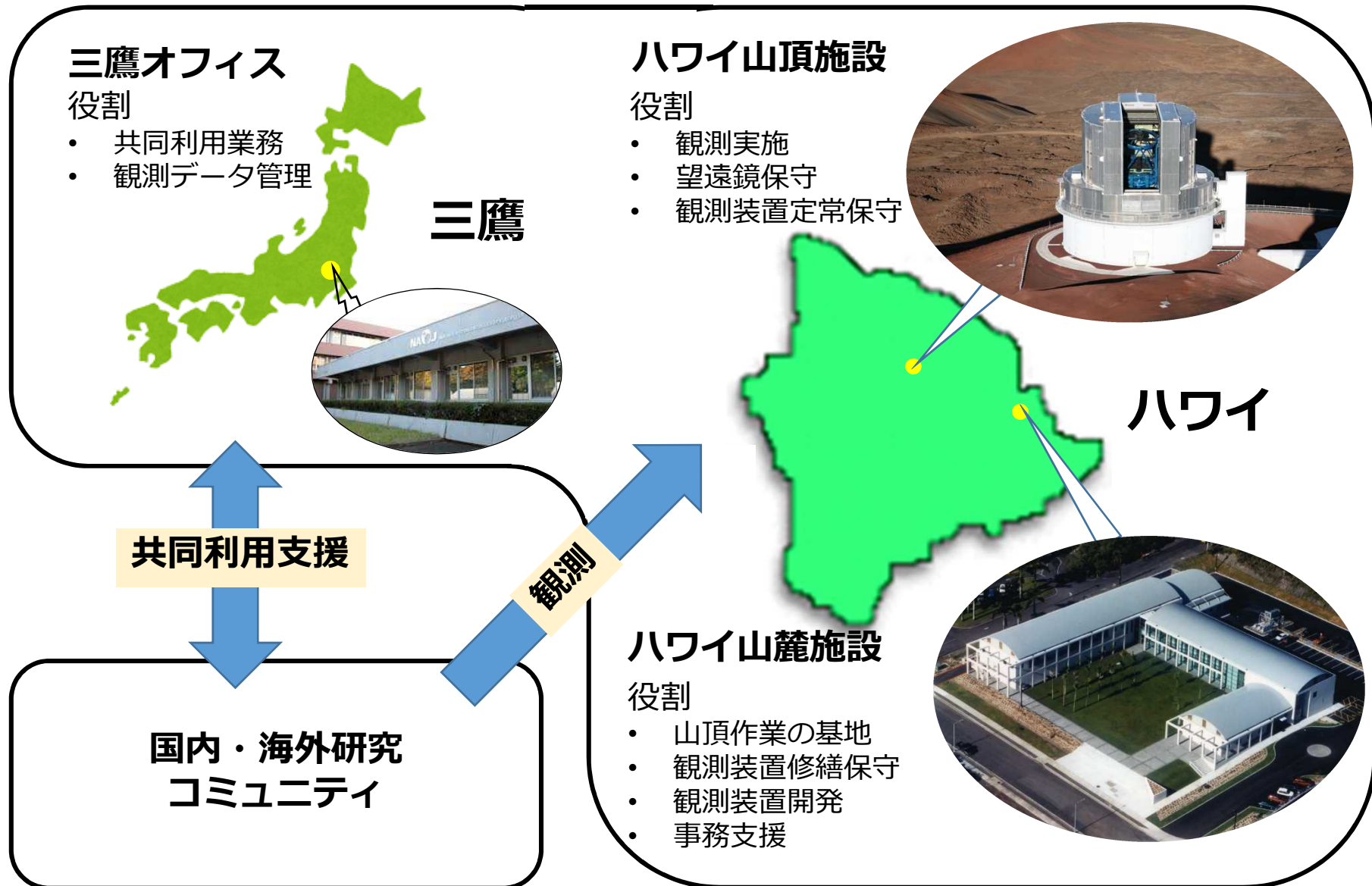




2. 実施体制

10

すばる望遠鏡の共同利用運用

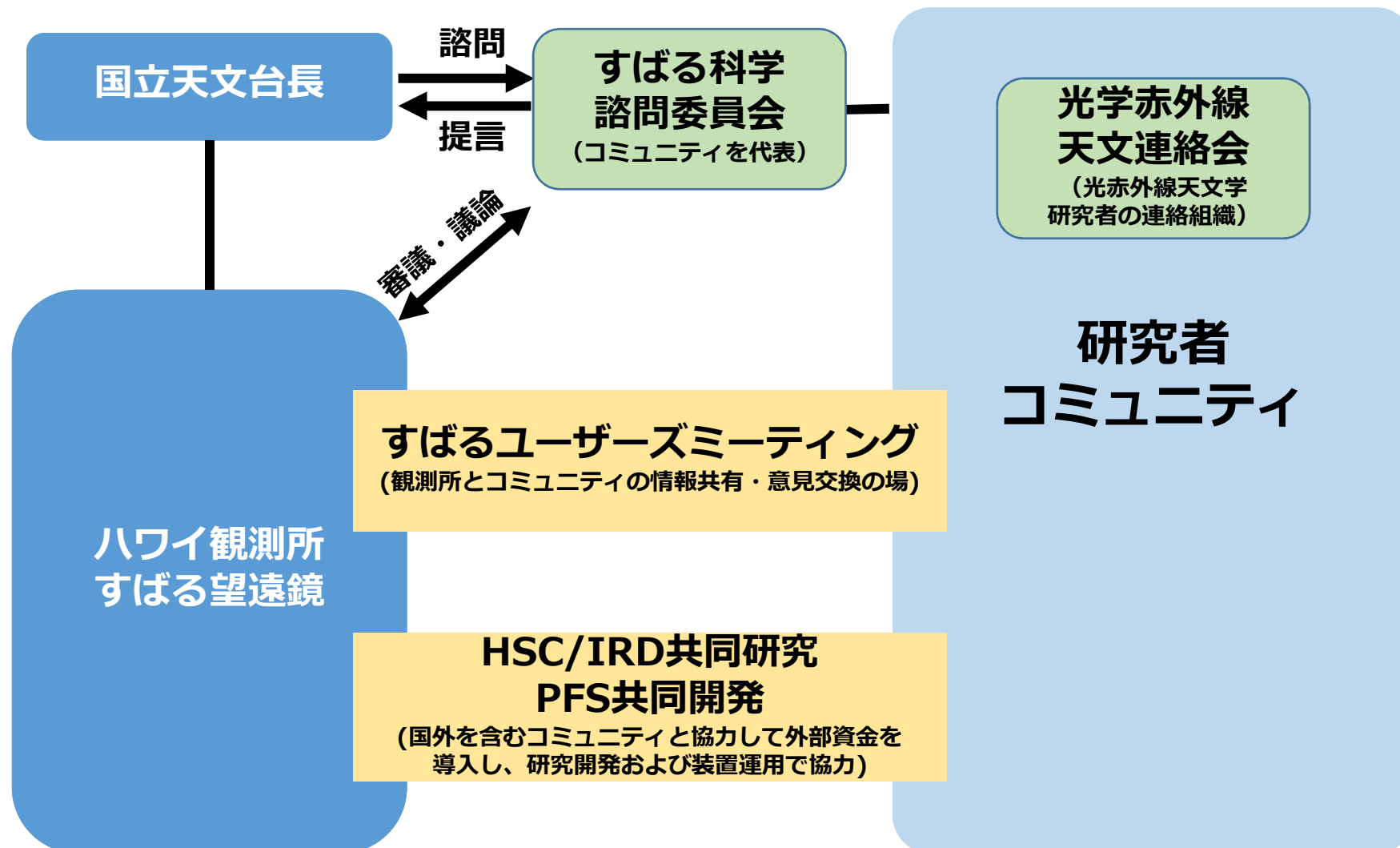




2. 実施体制

研究者コミュニティとの関係

11





2. 実施体制

12

観測装置の共同開発

外部資金を獲得して、国際協力で観測装置を開発

- 多彩な観測装置を開発して、すばる望遠鏡の研究競争力を維持

観測装置開発に関する外部資金獲得実績

観測能力を強化する共同開発

超広視野主焦点カメラ(HSC)開発

東大Kavli IPMU、プリンストン大学、
台湾中央研究院

近赤外線高コントラスト面分光装置 (CHARIS)開発

東京大学、プリンストン大学

近赤外線ドップラー分光装置 (IRD)

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

超広視野多天体分光器(PFS) 開発

東大Kavli IPMU、プリンストン大学
台湾中央研究院、カリフォルニア工科大学、
NASAジェット推進研究所、ジョーンズ・ホプ
キンス大学、マルセイユ天体物理学研究所、
マックスプランク天体物理学研究所
ブラジル大学連合、中国コンソーシアム、
北米東部大学連合

広視野高解像赤外線観測装置 (ULTIMATE)開発

オーストラリア天文学公社
オーストラリア国立大学
台湾中央研究院

種目等	代表者	金額 (円)	国立天文台 受入額(円)	期間	観測装置
寄付金	米国東海岸大学グループ	3.0億	3.0億	2018-2020	PFS
寄付金	中国PFS参加連合	1.3億	1.3億	2018-2020	PFS
基盤研究(S)	秋山正幸 (東北大)	1.6億	約1億	2017-2021	AO188+LGS
寄付金	オーストラリア 天文学公社	1.0億	1.0億	2018	ULTIMATE
寄付金	マックス・プランク地球 外物理研究所	1.4億	1.4億	2016	PFS
新学術領域	村山斉 (東大IPMU)	4.3億	1.6億	2015-2019	PFS
新学術領域	林正彦	5.8億	4.4億	2011-2015	CHARIS
基盤研究(S)	有本信雄	1.7億	1.7億	2011-2014	MOIRCS
特別推進研究	田村元秀 (東大)	5.2億	4.0億	2010-2014	IRD
最先端研究開発支援 プログラム (FIRST)	村山斉 (東大IPMU)	30億	9.4億	2009-2014	HSC、PFS
寄付金	米プリンストン大	10億	10億	2008	HSC
特定領域研究	唐牛宏	12.8億	8.4億	2006-2012	HSC
特定領域研究	田村元秀	2.0億	2.0億	2004-2008	HiCIAO
特別推進研究	家正則	7.2億	7.2億	2002-2006	AO188+LGS



2. 実施体制

すばる望遠鏡の国際協力

13

すばる望遠鏡の広視野観測能力は世界的にも突出しており、その特色を生かして国際天文学コミュニティの中で様々な共同研究/共同開発を展開している。

超広視野観測を軸とした次世代宇宙望遠鏡との共同研究



ローマン宇宙望遠鏡(NASA)



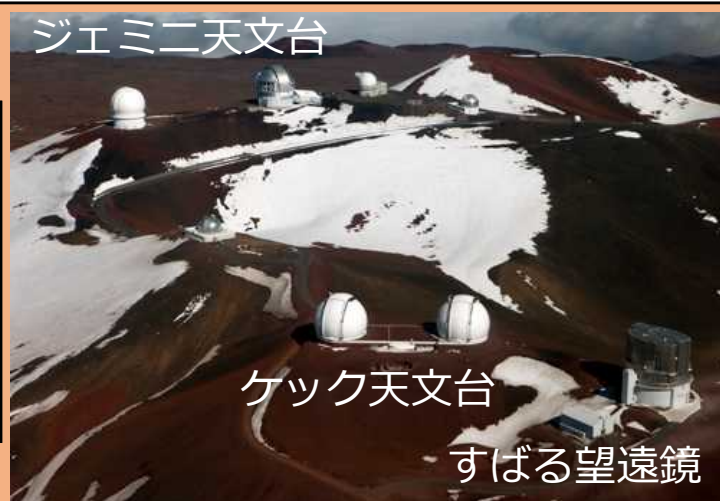
Euclid衛星
(ESA)

観測時間交換

マウナケア天文台群

ケック天文台
ジェミニ天文台

ジェミニ天文台



ケック天文台

すばる望遠鏡

観測能力を強化する共同開発

超広視野主焦点カメラ(HSC)開発

東大Kavli IPMU、プリンストン大学、
台湾中央研究院

近赤外線高コントラスト面分光装置 (CHARIS)開発

東京大学、プリンストン大学

近赤外線ドップラー分光装置 (IRD) 開発

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

超広視野多天体分光器(PFS) 開発

東大Kavli IPMU、プリンストン大学
台湾中央研究院、カリフォルニア工科大学、
NASAジェット推進研究所、ジョンズ・ホプ
キンス大学、マルセイユ天体物理学研究所、
マックスプランク天体物理学研究所
ブラジル大学連合、中国コンソーシアム、
北米東部大学連合

広視野高解像赤外線観測装置 (ULTIMATE)開発

オーストラリア天文学公社
オーストラリア国立大学
台湾中央研究院



3. プロジェクト計画

(研究、施設整備に関する当初計画、資金計画)



3. プロジェクト計画

すばる望遠鏡の所要経費と年次計画

15

大規模学術フロンティア促進事業の年次計画										
計画名称	大型光学赤外線望遠鏡「すばる」の共同利用研究									
実施主体	【中心機関】自然科学研究機構国立天文台【連携機関】北大、東北大、東大、東工大、名大、京大、神戸大、兵庫県立大、甲南大、広島大、愛媛大、鹿児島大、米国（ハワイ大、プリンストン大、ケック天文台）、台湾（天文及天文物理研究所）、カナダ（ビクトリア大）、ドイツ（マックスプランク天文学研究所）、ジェミニ天文台 等									
所要経費	建設費総額 約395億円 年間運用経費 約20億円 ※このうち、老朽化に伴う突発的な不具合など、維持・運用経費の増額等については、実施機関に対し、本事業予算に限らない、多様な財源の確保を求める。	計画期間		建設期間 平成3(1991)～11年度(1999)、9年計画 運転期間 平成12年度(2000)より本格観測 (事前評価 平成2年(1990)、中間評価 平成12年(2000)、進捗評価 平成29年(2017)、令和元年(2019))						
計画概要	銀河誕生時の宇宙の姿を探り、太陽系外の惑星の謎に迫るため、米国ハワイ州ハワイ島マウナケア山頂に建設した口径8.2mの大型光学赤外線望遠鏡(すばる)を用いて、国内外の研究者による共同利用観測を推進する。									
研究目標(研究テーマ)	1. ビッグバン後10億年以内の宇宙初期を観測し、宇宙における天体の形成過程を研究 2. 遠方宇宙を広い天域にわたって観測することにより、宇宙の大規模構造の起源を研究 3. 太陽系外惑星を直接観測し、その性質を研究 4. 重力波、ニュートリノ観測と協調した新たな天文学(マルチメッセンジャー天文学)の推進 5. 惑星系形成領域を観測し、惑星の形成過程を研究									
年次計画	2013 (H25)	2014 (H26)	2015 (H27)	2016 (H28)	2017 (H29)	2018 (H30)	2019 (R元)	2020 (R2)	2021 (R3)	2022 (R4)
1. ビッグバン後10億年以内の宇宙初期を観測し、宇宙における天体の形成過程を研究										
・HSCを用いた広域深宇宙探索による、宇宙再電離期の研究。 ・ULTIMATEを用いた超遠方銀河探索										
2. 遠方宇宙を広い天域にわたって観測することにより、宇宙の大規模構造の起源を研究										
・HSCを用いたダークマターの広域探索 ・PFSを用いた宇宙の加速膨張探索										
3. 太陽系外惑星を直接観測し、その性質を研究										
・HiCIAOを用いた系外惑星の直接観測 ・IRDを用いた地球型惑星探索 ・CHARISを用いた惑星大気の研究										
4. 重力波、ニュートリノ観測と協調した新たな天文学(マルチメッセンジャー天文学)の推進										
・HSCを用いた重力波に伴う重元素合成現場の研究										
5. 惑星系形成領域を観測し、惑星の形成過程を研究										
・HiCIAOを用いた惑星系形成領域の探索										
6. 運用体制の見直し	TMTに役割が引き継がれる研究テーマ、主焦点に特化した望遠鏡とする運用により終了する研究テーマ等を明確にして、すばるの運用の役割にメリハリをつけるとともに、国際協力等により、運営費の大幅な削減に取り組む。									
評価の実施時期	—	—	—	—	進捗評価	—	進捗評価	—	—	



3. プロジェクト計画

16

すばる望遠鏡の所要経費と年次計画

(1) 建設及び運用計画

建設：1991年度から1999年度（9年計画）

運用：（試験観測）1998年度開始

（本格運用）2000年度開始

(2) 資金計画

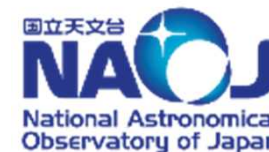
建設費：394.9億円

運転経費・実験経費：578.5億円

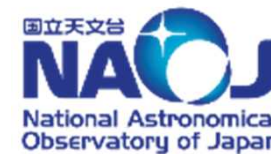
（内訳）建設期（1991年度から1999年度）33.2億円

運用期（2000年度から2012年度）396.1億円

運用期（2013年度から2021年度）149.2 億円



4. プロジェクト計画の 達成状況



4-1. 研究の達成状況



4-1-1. 研究の達成状況・主な研究成果

科学目標に対する成果

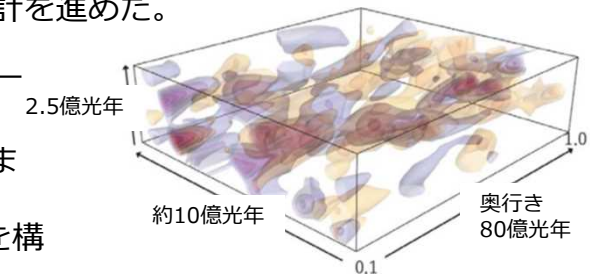
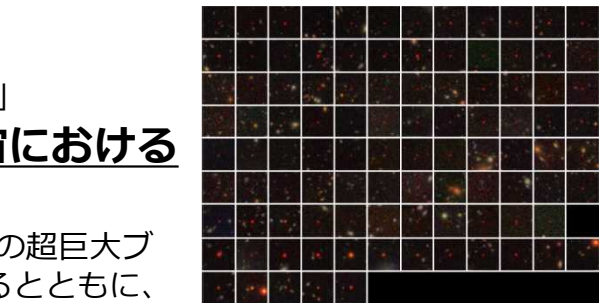
「大規模学術フロンティア促進事業の年次計画（平成30年8月改訂）」

科学目標1：ビッグバン後10億年以内の宇宙初期を観測し、宇宙における天体の形成過程を研究する

- 超広視野主焦点カメラHSCの広視野を活かして、ビッグバン後10億年以内に多数の超巨大ブラックホールおよび原始銀河団を発見し、宇宙再電離の時期に新たな示唆を与えると同時に、銀河の集積が開始された時期を明らかにした。
- さらに初期宇宙を観測するための広視野高解像度赤外線観測装置ULTIMATEの設計を進めた。

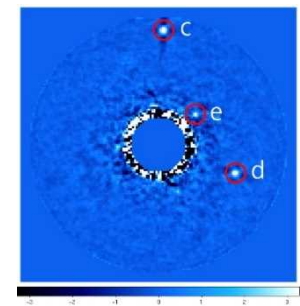
科学目標2：遠方宇宙を広い天域にわたって観測することにより、宇宙の大規模構造の起源を研究する

- 超広視野主焦点カメラHSCを用いてダークマターの大規模広域探査を行い、これまでにない高解像度・広範囲のダークマターと銀河の3次元分布を描き出した。
- 宇宙の加速膨張探査を行うため、超広視野多天体分光器PFSの開発を進め、装置を構成する各コンポーネントを順次すばる望遠鏡に搭載して試験を行った。



科学目標3：太陽系外惑星を直接観測し、その性質を研究する

- 高コントラストコロナグラフ撮像装置HiCIAOを用いて8個の太陽系外惑星の直接観測を行い、第2の木星を発見した。
- 近赤外線ドップラー分光装置IRDによる地球型惑星探査の戦略枠プログラムを開始した。
- 近赤外高コントラスト面分光装置CHARISを用いて系外惑星大気研究を進めた。



科学目標4：重力波、ニュートリノ観測と協調した新たな天文学（マルチメッセンジャー天文学）を推進する

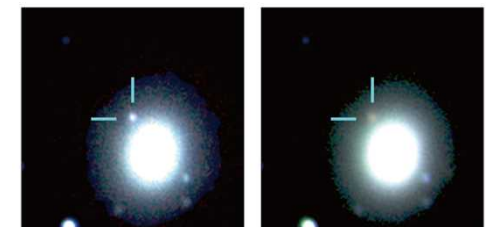
- HSCを用いて重力波の追跡観測を行い、光赤外線対応天体を検出し、連続的な追跡観測に成功。中性子星合体によって金やプラチナ、生命活動の必須元素の一つであるヨウ素などの重元素が合成されている証拠を掴んだ。

科学目標5：惑星系形成領域を観測し、惑星の形成過程を研究する

- HiCIAOを用いて多数の原始惑星系円盤を観測し、その構造を解明。
→ アルマ望遠鏡につながる成果を多数生み出すことができた。

2017.08.18-19

2017.08.24-25



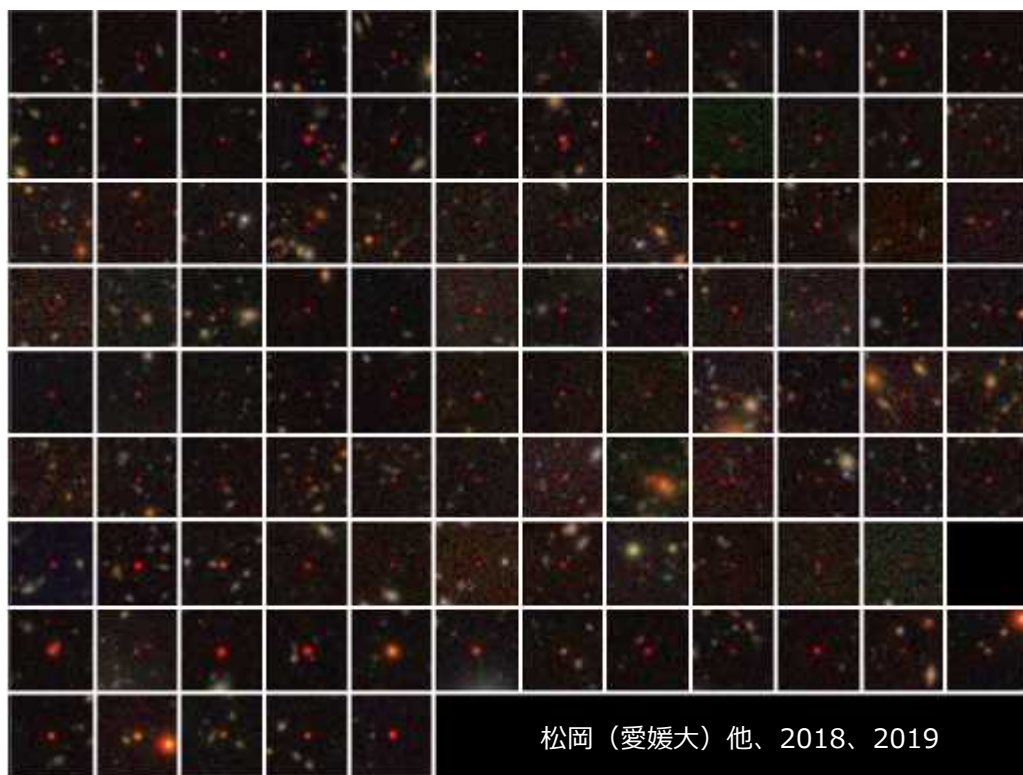


宇宙における天体の形成過程に迫る

宇宙誕生後10億年以内の宇宙再電離期に（太陽の1億倍以上の質量を持つ）超巨大ブラックホールを多数発見

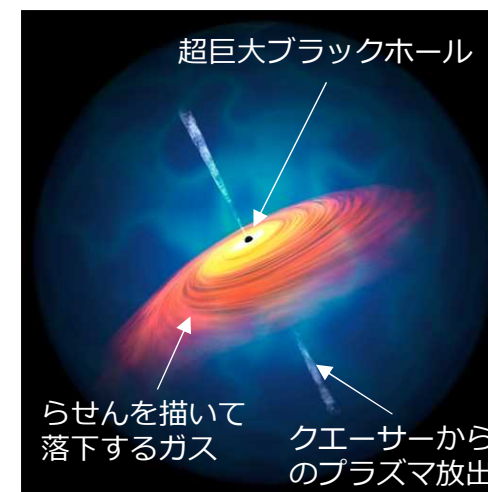
（松岡（愛媛大）他、2018、2019）

- 超広視野主焦点カメラHSCの広視野を活かして、宇宙誕生後10億年以内の宇宙再電離期に超巨大ブラックホールをエンジンとする「クエーサー」を多数発見。
→ 宇宙初期に超巨大ブラックホールが普遍的に存在することを示すとともに宇宙再電離への影響が明らかになった。



すばる望遠鏡により発見された100個のクエーサー（左図の各格子の中心にある赤い点）。これらのクエーサーは超巨大ブラックホールをエンジンとし、宇宙誕生後10億年に存在していた。

松岡（愛媛大）他、2018、2019



クエーサーの想像図。中心に超巨大ブラックホールがあり、そこに落下するガスが超高温に加熱され、明るく光るとともに、プラズマを放出している。



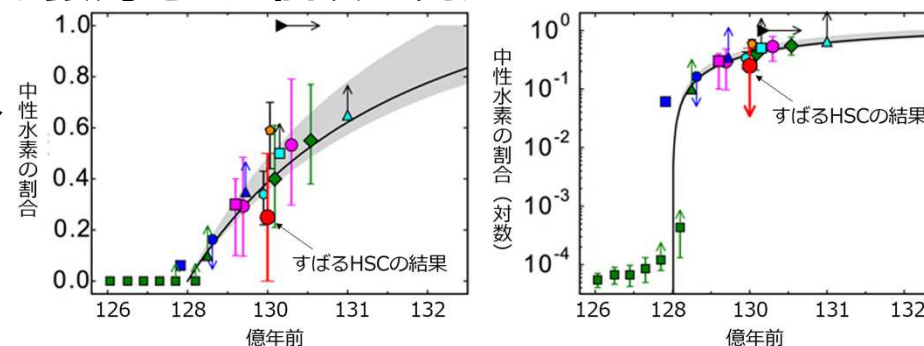
宇宙における天体の形成過程に迫る

広視野を活かして、宇宙の歴史と銀河の形成過程を明らかに

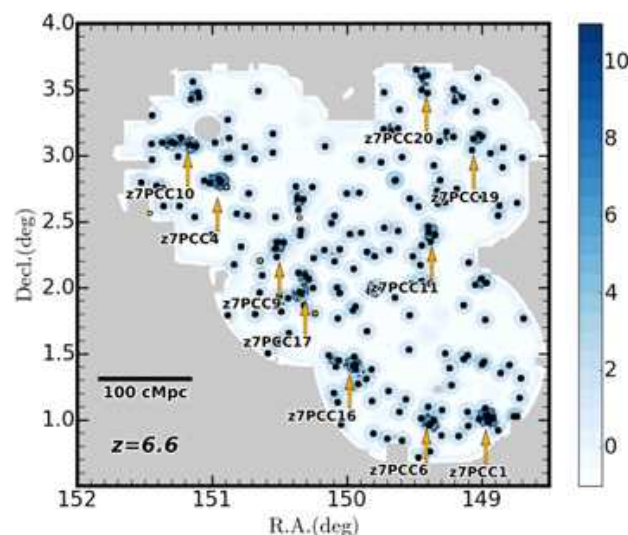
- 宇宙誕生後10億年以内の宇宙再電離期の銀河を4万個以上発見

- このデータを用いた高精度統計解析により初期宇宙における中性水素原子の割合の変化を解明。(今野(東京大)他、2018)

→宇宙再電離が約130億年前にはほぼ完了していた可能性を示した(右図)。



宇宙初期の中性水素原子の割合。すばるHSCの結果(赤丸)は、宇宙の中性水素原子が約130億年前にはほぼゼロとなっていた可能性を示した。



- 宇宙誕生後9億年の時代に多数の原始銀河団を発見(左図)

- こうした宇宙初期にすでに銀河の大規模な集積が始まっていたことを明らかにした。(樋口(東京大)他、2019)

→宇宙の大規模構造の形成過程の最初期を捉えることに成功した。

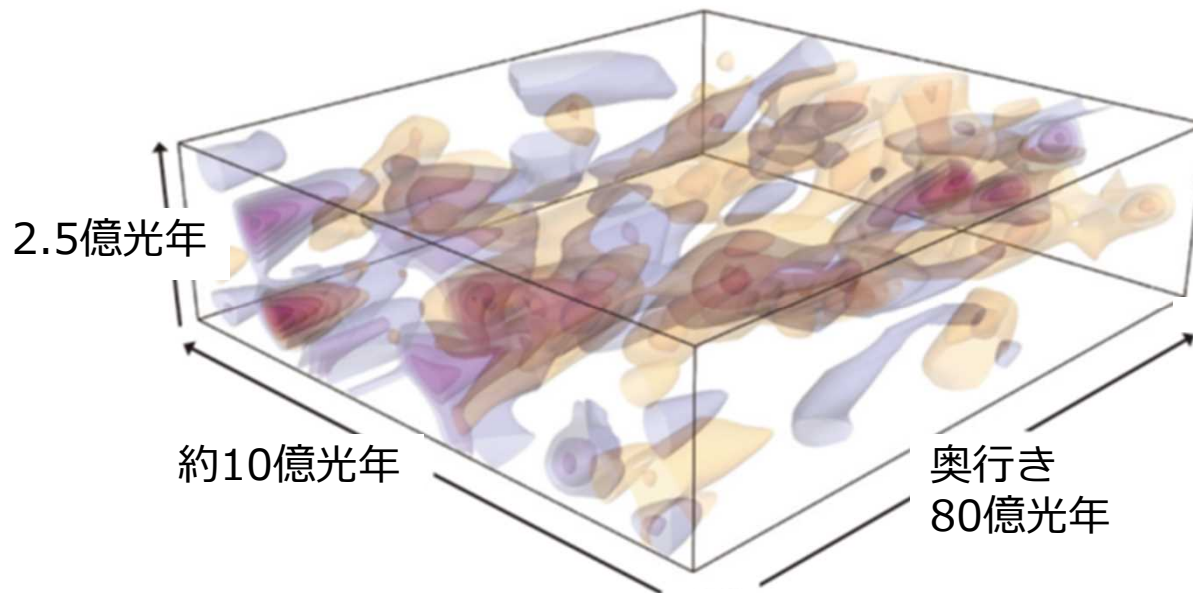
宇宙誕生後9億年のHSCによる探査の結果、発見された銀河の分布(黒丸)。この中で10個の原始銀河団(矢印)を発見した。



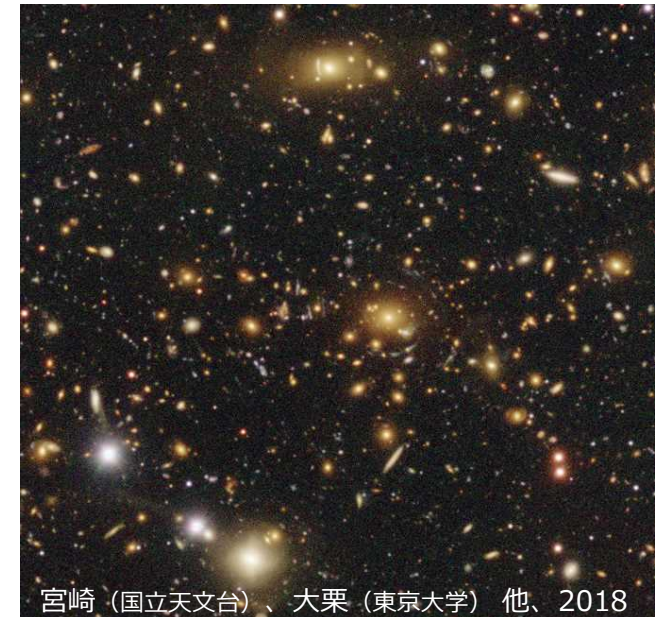
宇宙の大規模構造の起源に迫る

かつてない広さと解像度のダークマターの3次元地図を構築

- 160平方度の範囲で、2,000万個以上の銀河を撮影。（宮崎（国立天文台）、大栗（東京大学）他、2018）
- 銀河の形状を精密に測定し、重力によって光をゆがめるダークマターの分布と銀河の分布を描き出した。その広さ・解像度ともに史上最高。
- ダークマター塊の数や質量と宇宙膨張理論モデルを比較することで、**ダークマター・ダークエネルギーの性質に迫る**ことができる。



すばる望遠鏡が明らかにしたダークマターの分布(紫)と銀河の分布(橙)。ダークマターの集積しているところに銀河も密集している(茶色)が、ダークマター塊の間にも銀河の集団があり、その理由については今後の研究が待たれる。



宮崎（国立天文台）、大栗（東京大学）他、2018

左の結果の元となった画像の一部。この画像に写っている天体はすべて遠方銀河である。

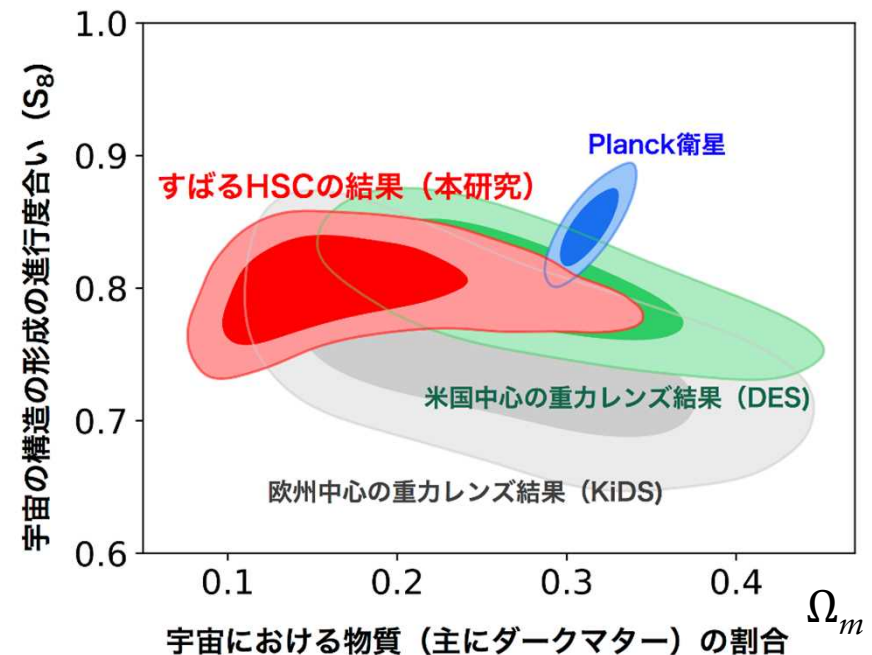
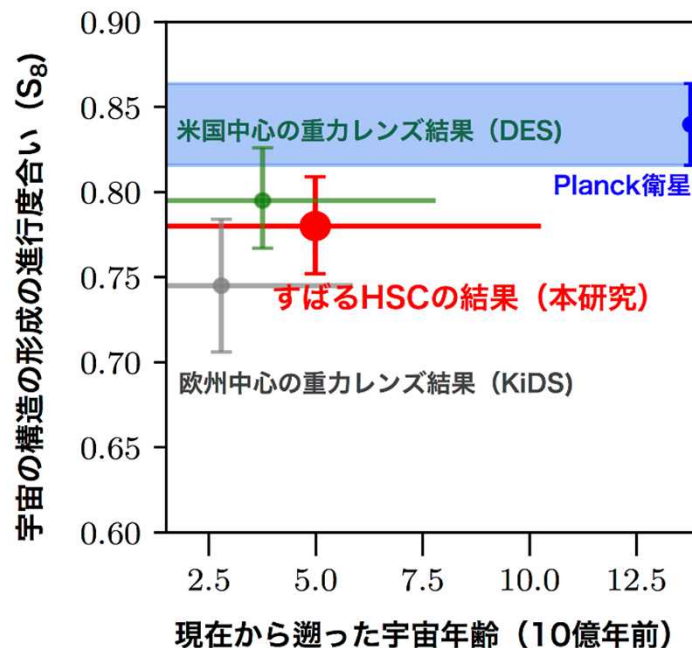


宇宙の大規模構造の起源に迫る

すばる望遠鏡発の精密宇宙論の幕開け

(日影 (東京大学) 他、2019)

- HSCで得られた重力レンズ効果のデータを精密に解析し、宇宙におけるダークマターの質量比 (Ω_m)、宇宙の構造形成の度合い (S_8) といった宇宙論パラメータを求めることに成功した。
- HSCサーベイデータの10%を用いることで、他の同様の研究と同等以上の精度でパラメータを導出することに成功。
- Planck衛星による結果との矛盾を示唆 → 精密宇宙論へ



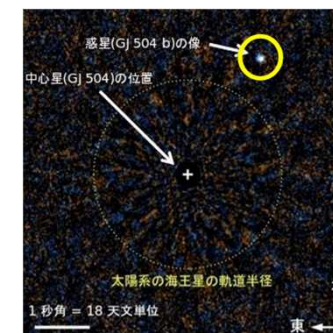


太陽系外惑星の性質を明らかにする

(葛原 (東京工業大) 他、2013；平野 (東京工業大) 他、2020；Currie (NASA) 他、2018)

系外惑星の直接観測を行う

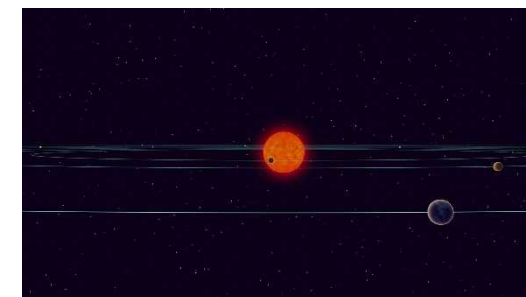
- 高コントラストコロナグラフ撮像装置 (HiCIAO) による高解像度撮像観測で、太陽系外惑星の直接撮像観測に成功。
- 恒星GJ504を周る「第2の木星」を発見 (右図)
- HiCIAOの観測研究は2017年まで継続。その後はIRDとCHARISに継承。



GJ504を周る第2の木星。
右上の丸で囲ってある。

地球型太陽系外惑星の間接的検出に挑む

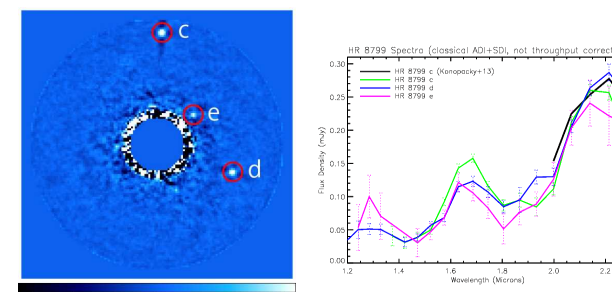
- アストロバイオロジーセンター、ハワイ大学と共同で、近赤外線ドップラー分光装置 (IRD) を開発。2018年より観測を開始。
- 2019年より、地球型惑星の大規模探査プログラムを開始。
- 恒星TRAPPIST-1の地球型惑星の公転軸が主星の回転軸と揃っていることを明らかにするなど初期成果を挙げた。



TRAPPIST-1 の惑星系のイメージ画像。

太陽系外惑星の大気成分分析に挑む

- 米国プリンストン大学、アストロバイオロジーセンターとの共同で、近赤外線高コントラスト面分光装置CHARISを開発。2017年度より観測を開始。
- 恒星HR8799を周る系外惑星の大気成分の分光観測に成功 (右図)。大気温度を決定し、 H_2O や CO の存在を確認。
- 開発された技術は、**TMTの装置開発にも応用する。**



CHARISで撮影された、HR 8799をまわる3つの惑星 (左図赤丸) とそのスペクトル (右図)



重力波源の光学観測で金の生成現場を見た

● 重力波発生現象の追跡観測で、重力波源からの光を初めてとらえた

(内海(Stanford大)他、2017； 田中(東北大)他、2018)

重力波の追跡観測で、光が次第に暗くなっていくようすを連続的に追跡成功。中性子星合体によって金やプラチナ、生命活動の必須元素であるヨウ素などの重元素が合成されるという理論と一致。

→ **中性子星合体による元素合成の証拠を、初めて観測でとらえた。**

日本の重力波望遠鏡KAGRAと、広視野高感度のすばる望遠鏡が協力すれば、**世界の重力波研究を日本がリード**できるチャンス。

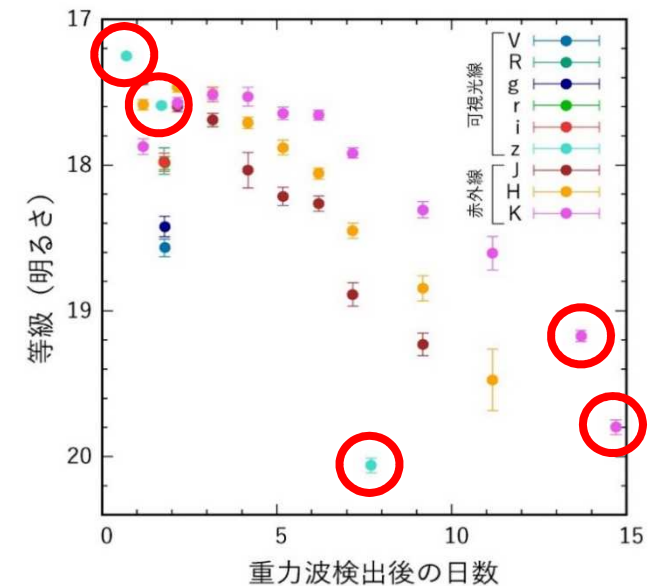
2017.08.18-19



2017.08.24-25



すばる望遠鏡がとらえた、重力波源の明るさの変化。



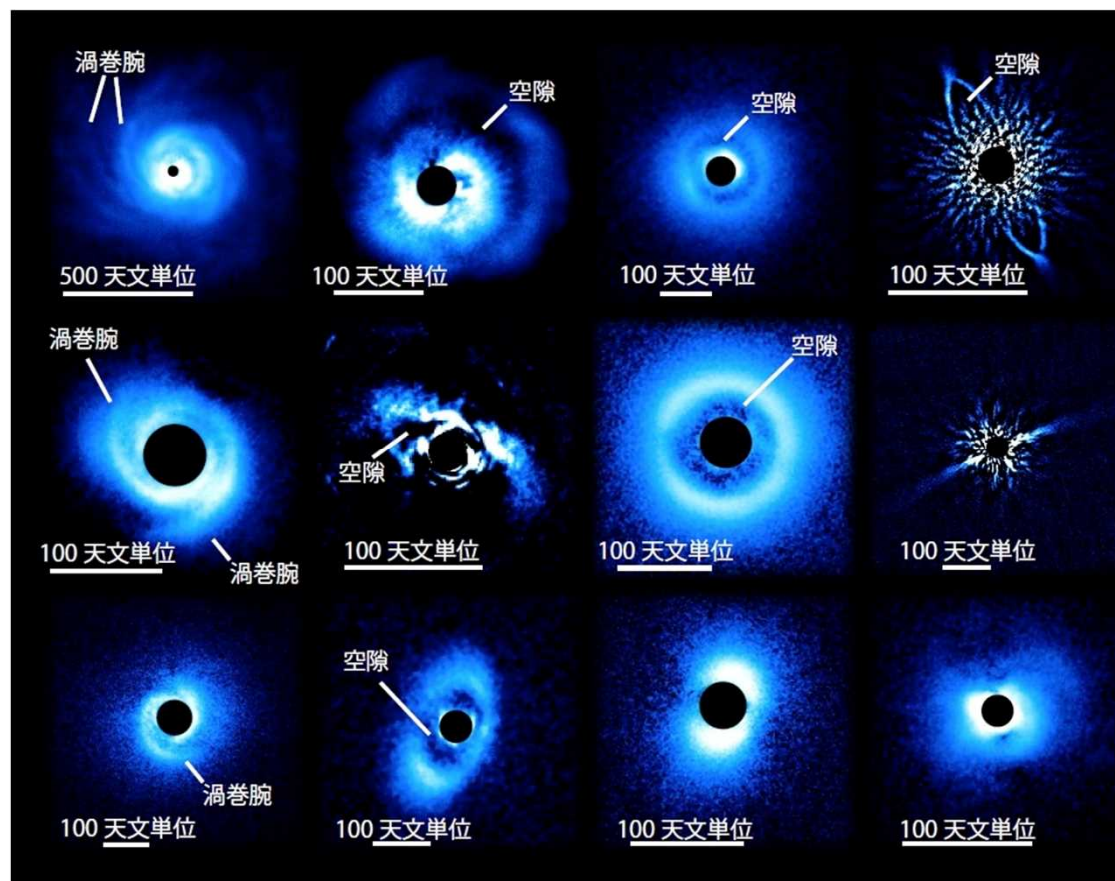
すばるによる観測結果（○印）。広視野を活かして最初期の観測を行い、高感度観測で暗くなった後の光度変化もとらえた。



惑星の形成過程に迫る

高コントラスト撮像観測で、太陽系外惑星と惑星の誕生現場に迫る

- 約500個の原始惑星系円盤を撮影し、その構造を明らかにした。
→ アルマ望遠鏡でのさらなる研究につながる、良質な基礎データを獲得した。



すばる望遠鏡がとらえた、惑星の誕生現場(田村(アストロバイオロジーセンター)他、2016)



太陽系最外縁の天体を発見

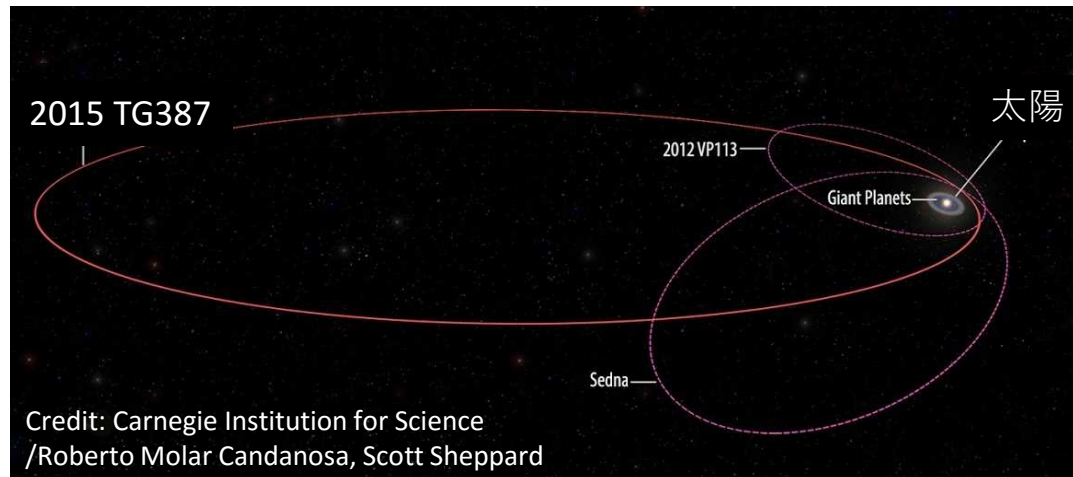
・ 広天域探査で、太陽系最外縁の天体を続々と発見

(Sheppard(カーネギー研究所)他、2019)

超広視野主焦点カメラにより、冥王星の2.5倍の距離にある天体2015 TG₃₈₇、冥王星の3.5倍の距離にあるFarout (2018 VG₁₈) を発見。Faroutは太陽系天体の最遠発見記録を更新。

発見された天体の軌道の偏りから、未知の「第9惑星」が存在する可能性が指摘されており、すばる望遠鏡の広視野撮影能力を活かした観測が期待されている。

→**太陽系の大きさに関する常識を更新し、太陽系最外縁部の謎を明らかにする**



Credit: Carnegie Institution for Science
/Roberto Molar Candanosa, Scott Sheppard

すばるが捉えた太陽系外縁天体2015 TG₃₈₇の軌道図。太陽から最も遠い地点では、太陽からの距離は地球軌道の2300倍にもなる。



すばるが捉えた太陽系最外縁小惑星Faroutの想像図。遠くに見えているのは太陽。

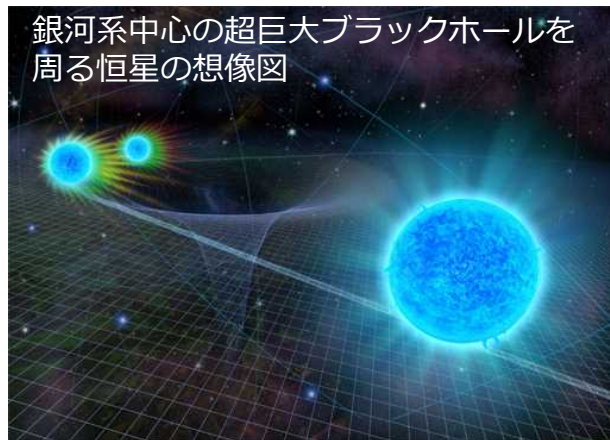


アインシュタインの一般相対論の検証

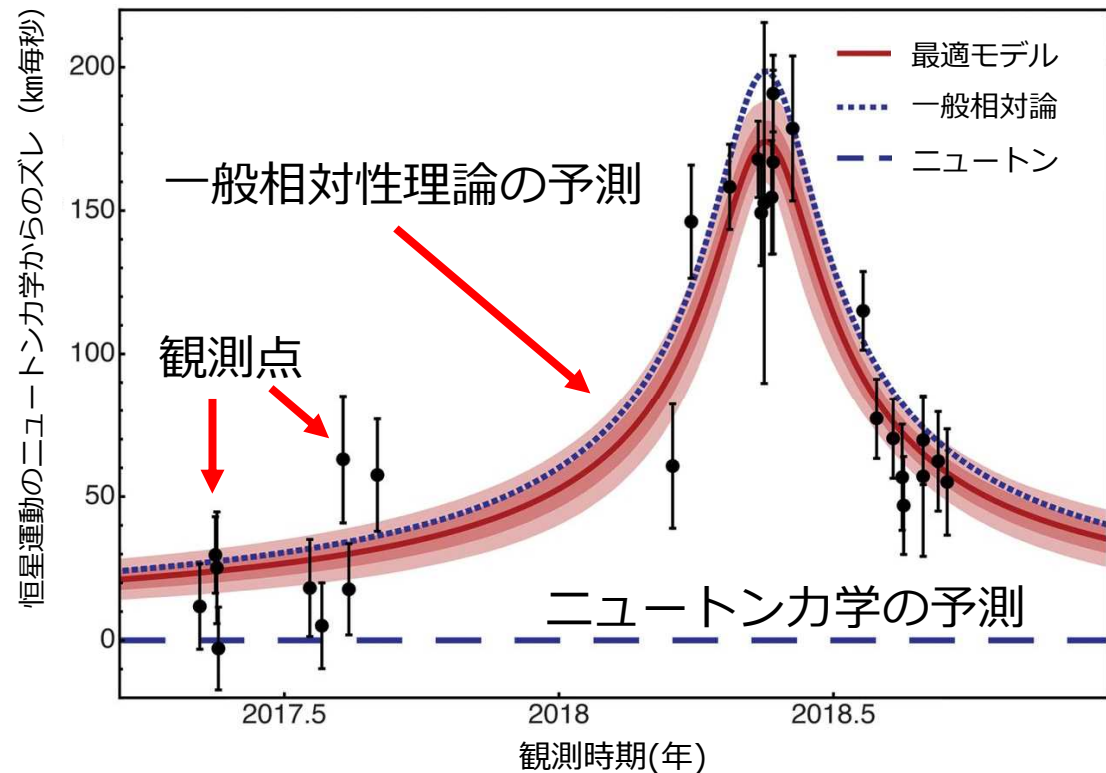
超巨大ブラックホールを周る恒星を観測し、アインシュタインの一般相対性理論の検証をした

(Do (カリフォルニア大)、西山 (宮城教育大)他、2019)

- すばる望遠鏡の補償光学装置を用いて、我々の銀河系中心の超巨大ブラックホールを周る恒星の運動を観測（ケック望遠鏡と共同）
- 観測された運動が、一般相対性理論の予測する運動と見事に一致。**強重力場での一般相対性理論を検証**した。



すばる望遠鏡とケック望遠鏡が観測した恒星の運動（右図・黒丸）。ニュートン力学の予測（水平破線）と大きくずれており、一般相対性理論の予測（点線）と非常によく一致している。

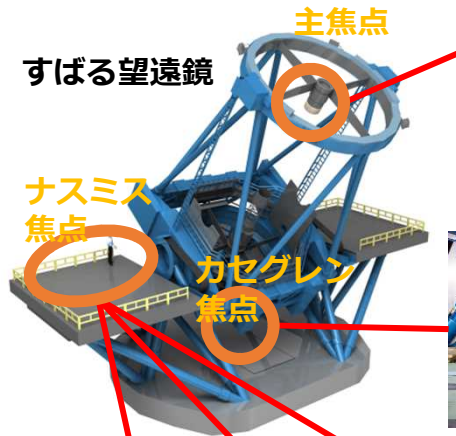




4-1-1. 研究の達成状況・主な研究成果

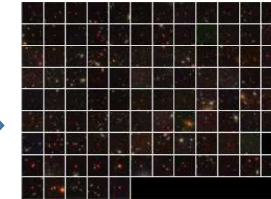
29

多様な観測装置と最新の科学成果

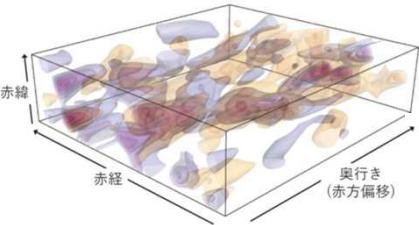


超広視野主焦点カメラHSC

ハッブル宇宙望遠鏡の1,500倍の視野を持つ世界最高性能の可視光カメラ



宇宙初期に大量の巨大ブラックホールを発見 (2018,2018)



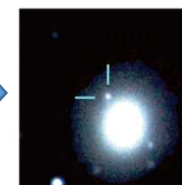
ダークマターの世界最大の3次元地図の作成 (2018)



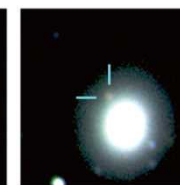
多天体近赤外線撮像分光装置 MOIRCS

400万画素の赤外線検出器を備え、広視野撮像と50天体同時多天体分光ができる赤外線観測装置

2017.08.18-19



2017.08.24-25

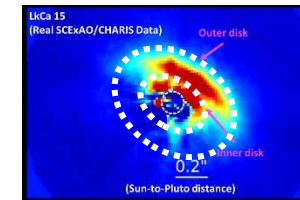


重力波源からの光をはじめて捉え、追跡観測することに成功 (2017)



近赤外線高コントラスト面分光装置CHARIS

極限補償光学を用いて超高解像度で恒星周囲を分光できる観測装置

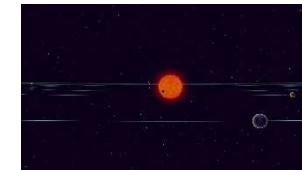


高コントラスト撮像観測で、太陽系外惑星と惑星の形成現場に迫る (2019)



近赤外ドップラー分光装置IRD

恒星の運動を毎秒2mの精度で測り、恒星の周囲を回る惑星を検出できる観測装置

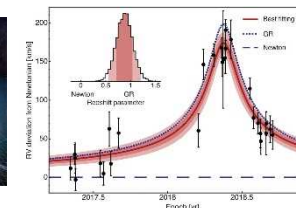
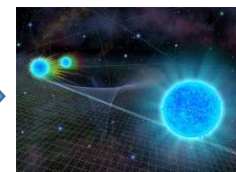


第二の地球候補の軌道面が恒星の自転軸と垂直であることを解明 (2020)



近赤外線分光撮像装置 IRCS

補償光学を用いて高解像度・高波長分解能で撮像・分光ができる赤外線観測装置

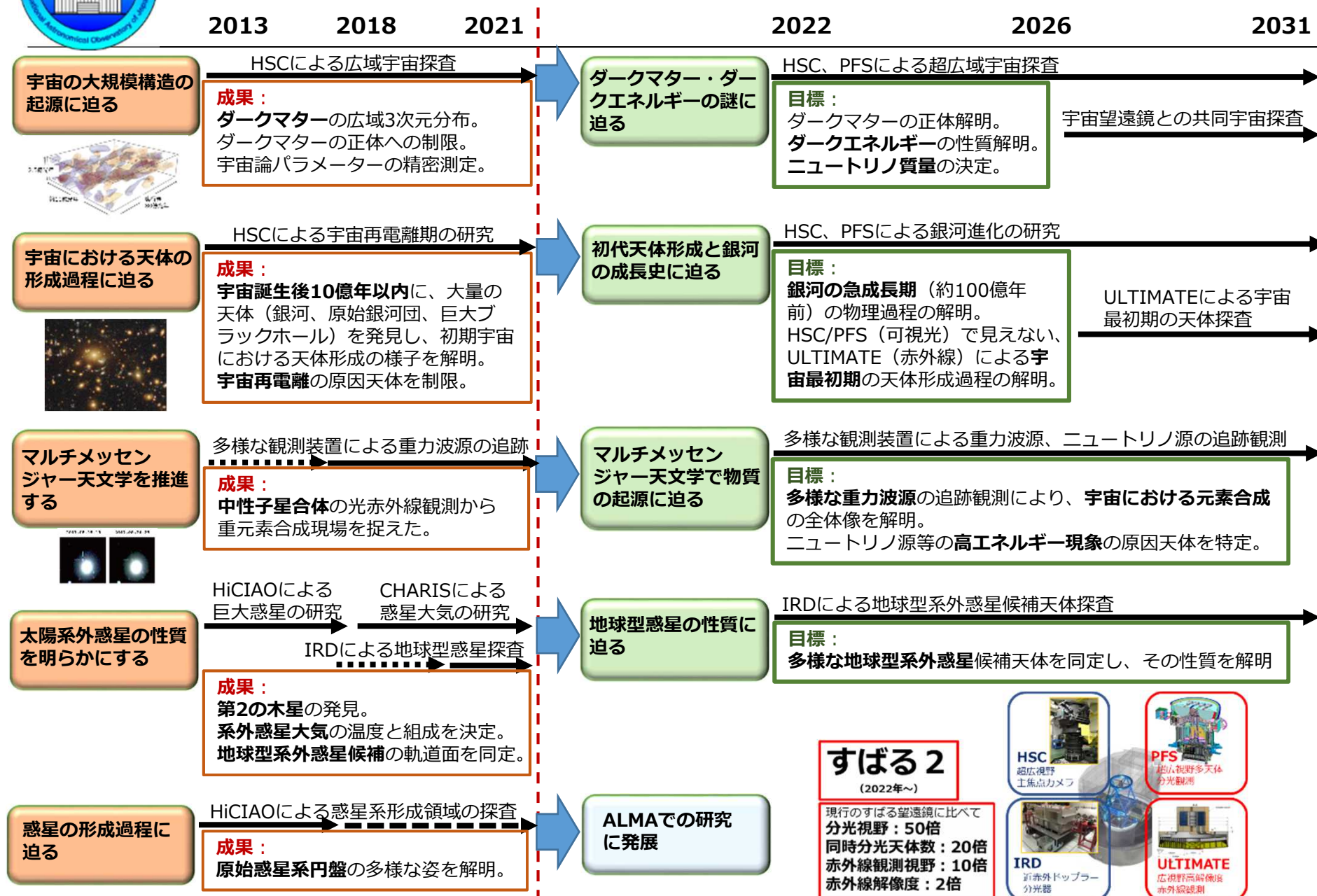


超巨大ブラックホールの周りの恒星の運動から、アインシュタインの一般相対性理論を検証 (2019)



すばる望遠鏡の科学目標ロードマップ

30





日本が主導してきた広視野天体観測の歴史

31

1974

1990

2000

2010

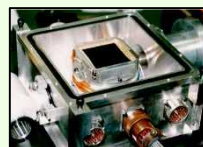
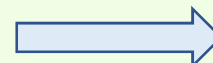
2020



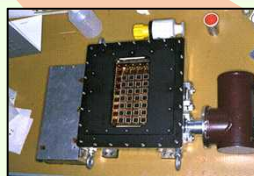
木曽シュミット (1m)

写真乾板
(1974)

モザイク-1 (1991)

2k CCDカメラ
(1997)木曽広視野カメラ
(2012)巴御前カメラ (2019)
新技術(CMOSセンサ)
への挑戦

デュポン (2.5m)



モザイク-2 (1994)

超広視野主焦点カメラHSCは、
この日本の伝統の到達点である。

高性能化の流れ



SDSS (2.5m)



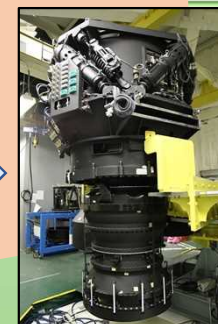
SDSSカメラ (1998)



すばる望遠鏡 (8.2m)



主焦点カメラ (2000)



超広視野主焦点カメラ (2014)

超広視野
多天体
分光器PFS
(2023)



観測装置の機能特化

観測者のニーズや論文生産率などを考慮しつつ観測装置を整理

すばる望遠鏡の観測装置の変遷

	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
観測所共同利用装置																						
S-Cam																						
IRCS																						
FOCAS																						
HDS																						
CISCO																						
OHS																						
CIAO																						
COMICS																						
MOIRCS																						
FMOS																						
HSC																						
持ち込み装置																						
HiCIAO																						
Kyoto 3DII																						
CHARIS																						
VAMPIRES																						
IRD																						
SWIMS																						
補償光学装置																						
AO36																						
AO188																						
SCEXAO																						

青：可視光 橙：近赤外線 赤：中間赤外線 緑：補償光学



4-1-2. 研究の達成状況・計画6「運用体制の見直し」の状況

国際共同運用に向けた取り組み

様々な国と、すばる望遠鏡の国際共同運用について協議

・ オーストラリア

- ・ 2015年から協議開始。
- ・ 2017～2018年に短期協力関係：オーストラリアから5,000万円（現金） + 5,000万円（業務契約）の貢献
- ・ 2017年にオーストラリアがESOに参加することを決定

・ カナダ

- ・ 2016年から協議開始
- ・ 2019年まで研究者間で前向きに検討
- ・ 2020年のカナダ天文学の10年計画で、時期尚早と判断

・ インド

- ・ 2017年から協議開始
- ・ 2019年まで国立天文台とインドの天文学研究機関が協議を重ね、2021年度から、すばる望遠鏡運用へのインドの参画が目標に
- ・ 2020年のコロナ禍によって、協議は停止。2021年度から協議再開。



・ 東アジア諸国（EAO）

- ・ 2014年の東アジア天文台（EAO）の設立から協議開始。
- ・ 2016年に、EAOがすばる望遠鏡の国際共同運用に参加することを表明
- ・ 2017年にEAO枠時間として、すばる望遠鏡の6夜の観測時間をEAOに提供
- ・ 2019年ごろからEAOの財政状況が悪化。すばる望遠鏡への参加は延期

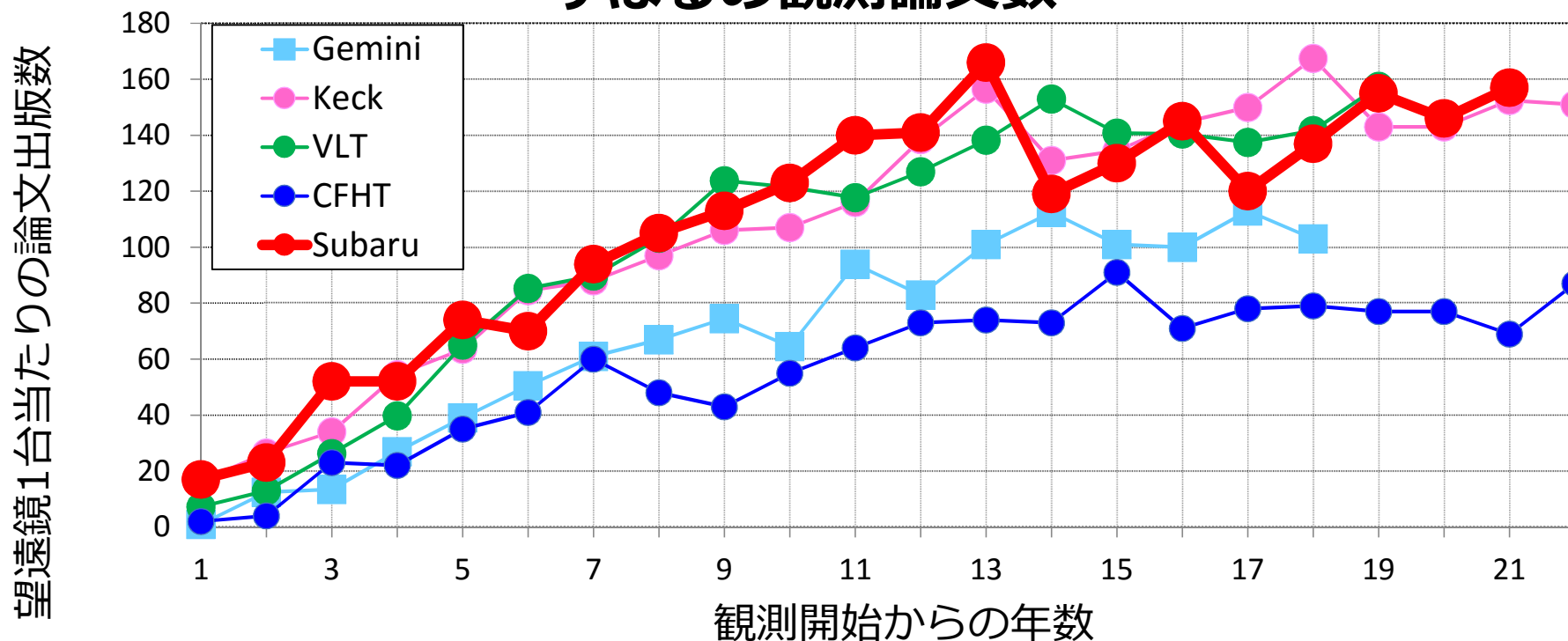


すばる望遠鏡観測に基づく論文①

観測開始直後から、多数の論文を生産し続けている

- 世界の8-10m望遠鏡と比較しても、論文数は常にトップクラス。
超広視野主焦点カメラHSCの膨大なデータで、今後大幅な伸びが期待できる。
- 総論文数**2,282**（2020年末時点）、うち **Nature/Science** に**37**本。
- すばるデータを使った**博士論文（国内）**は**156**本。日本の研究者養成に大きく貢献

すばるの観測論文数





すばる望遠鏡観測に基づく論文②

天文学・天文学物理学分野のTop10%論文の約1%、Top1%論文の約2%がすばる望遠鏡による成果である。

- この分野で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。

InCites : 2021年3月14日現在

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(%)
2014-2018	680	17	3.38	18.68	88.82
2015-2019	691	18	3.62	16.06	89.87
2016-2020	710	21	3.66	17.04	90.14

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(%)
2014-2018	10,805	146	1.65	12.75	67.98
2015-2019	10,968	188	1.92	12.78	70.1
2016-2020	11,315	196	1.96	12.63	71.2

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(%)
2014-2018	129,480	1,045	0.97	9.52	47.99
2015-2019	129,820	1,121	0.97	9.41	48.86
2016-2020	129,082	1,150	0.95	9.36	49.8



4-1-4. 研究の達成状況・共同利用の状況

共同利用の状況

36

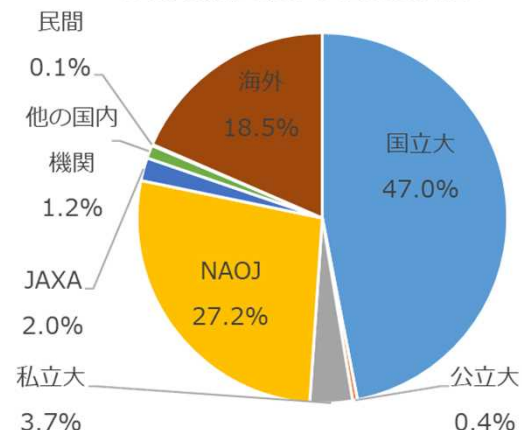
【共同利用状況】

年間約240夜を国際共同利用に提供して、順調に進行中。
観測プロポーザル競争率（2019年-2020年）：平均約4.5倍
国内大学院生が提案したプロポーザルの採択数：208件

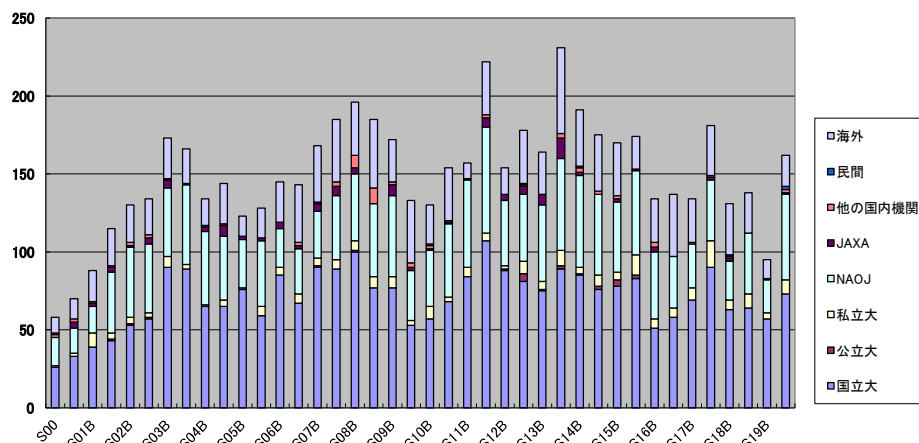
【共同利用実績】

共同利用研究者数（2000年-2020年）延べ17,589名（うち海外研究者4,678名）
共同利用観測者（施設訪問者）数（2000年-2020年）延べ6,231名（海外1,154名）
研究者の所属機関 国公立大学：39、私立大学：32、その他国内研究機関：20、
民間企業：6、海外研究機関：276

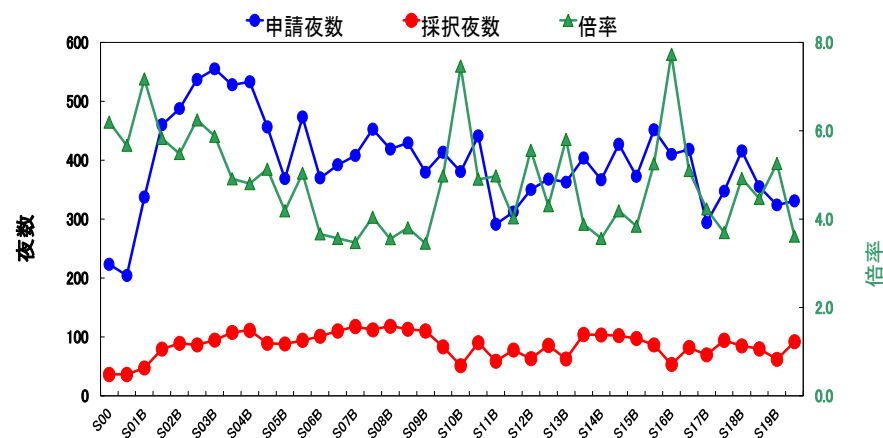
所属機関別の観測者数



所属機関種別 観測者数



共同利用実績（申請・採択夜数）



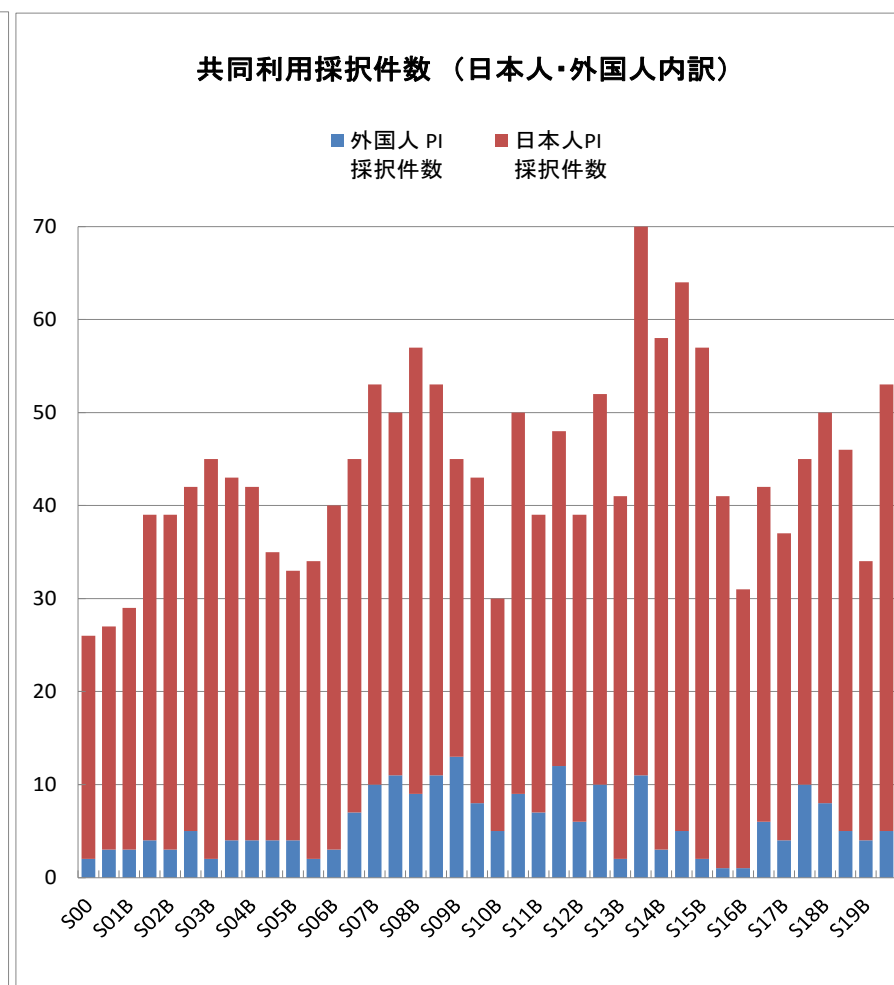
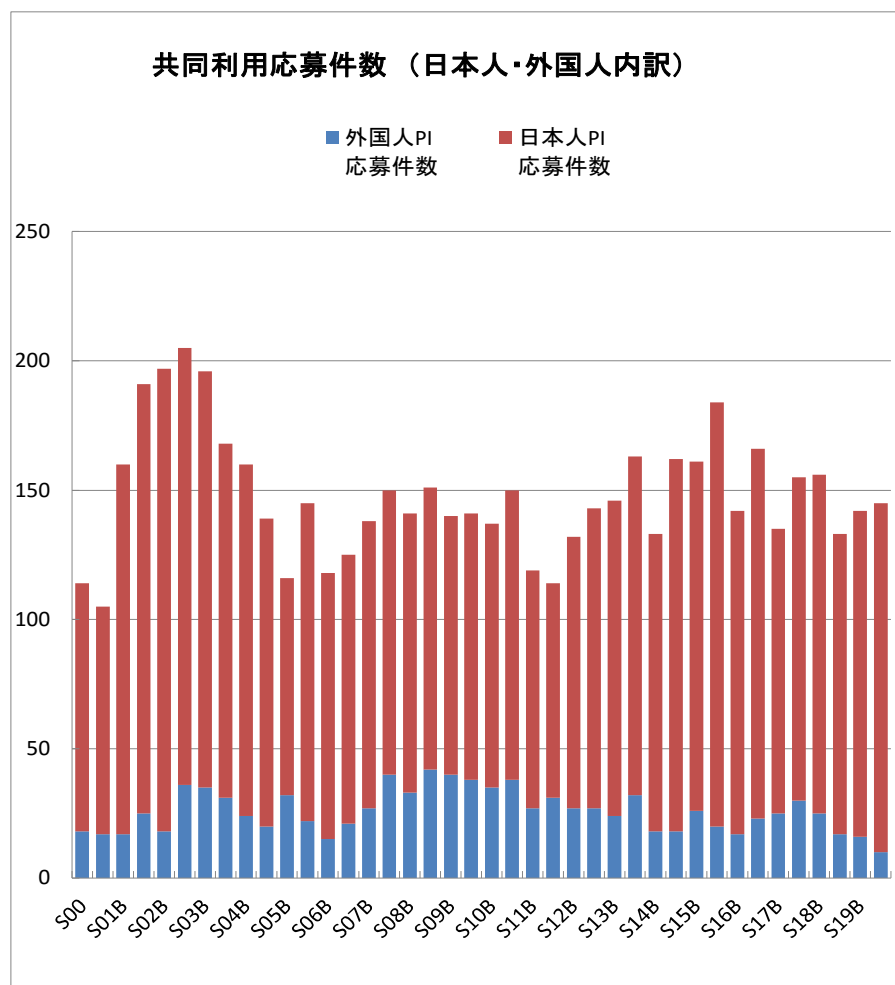


4-1-4. 研究の達成状況・共同利用の状況

37

国際共同利用の実績①

外国人が主研究者（PI）の応募課題数(2000年-2020年)：1,011、採択課題数：219
 共同利用研究者数（2000年-2020年）延べ17,598名（うち海外研究者4,678名）
 共同利用観測者（施設訪問者）数（2000年-2020年）延べ6,231名（海外1,154名）





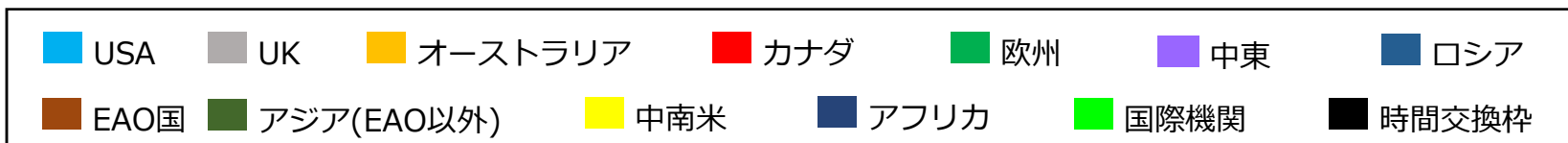
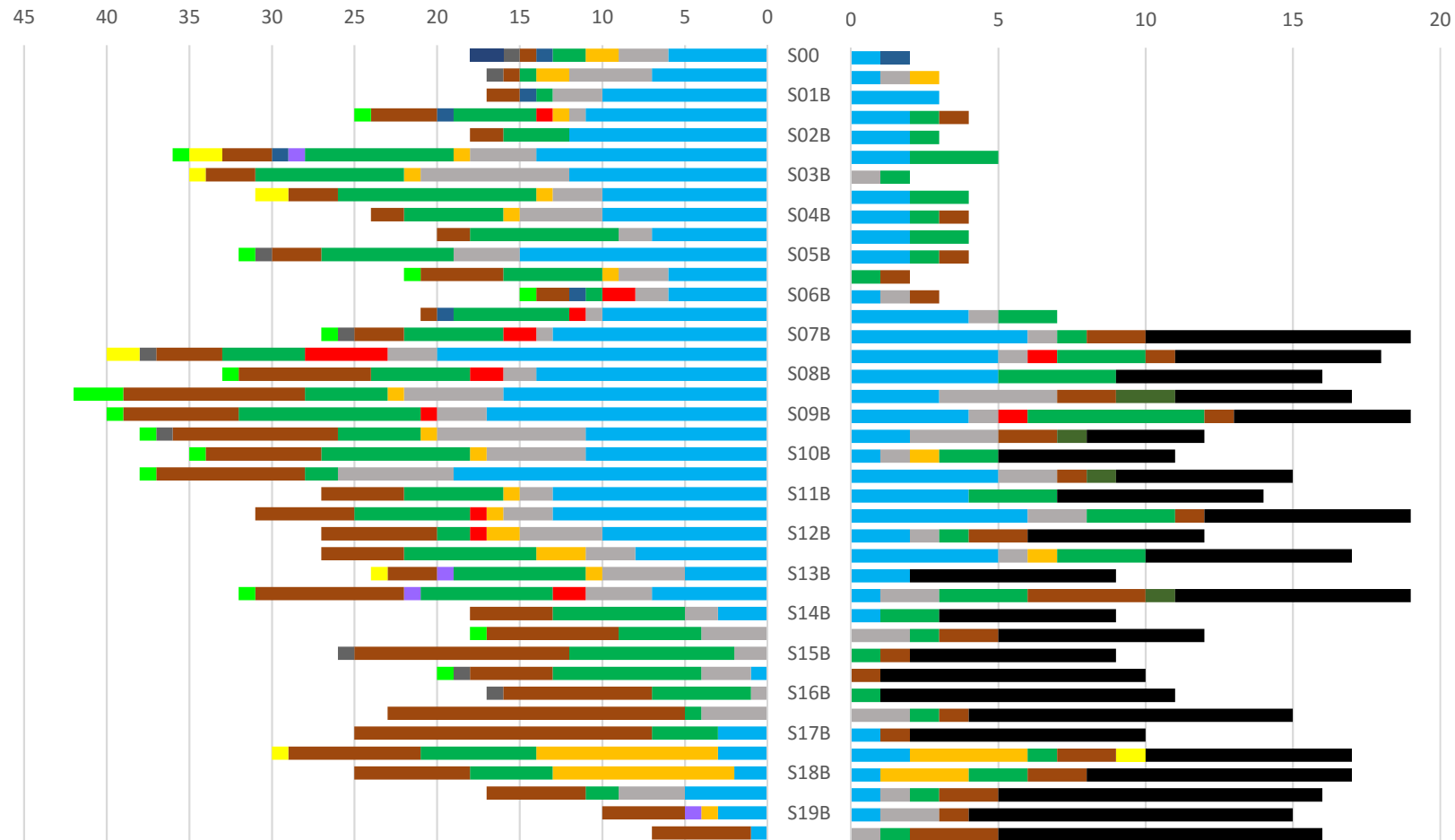
4-1-4. 研究の達成状況・共同利用の状況

国際共同利用の実績②

38

国際提案の地域別提案数

国際提案の地域別採択数



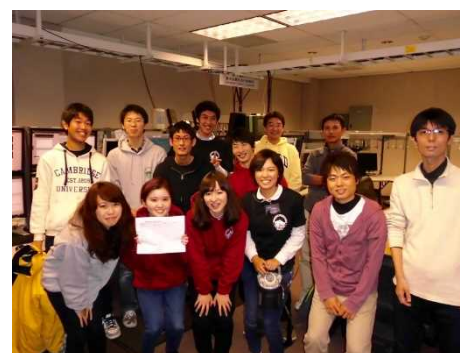
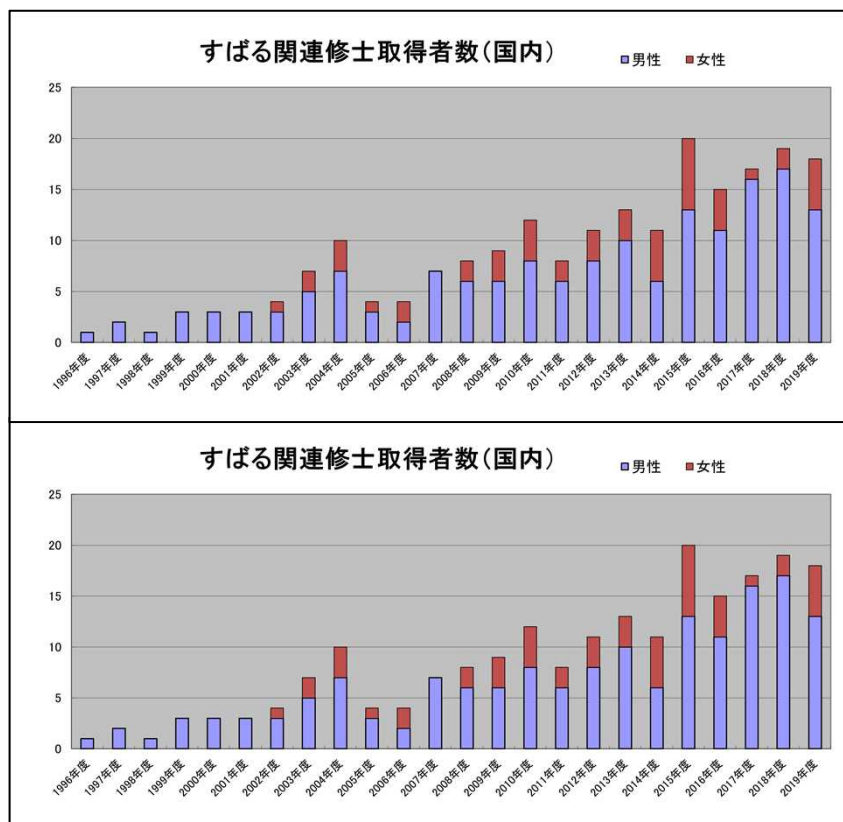


4-1-4. 研究の達成状況・共同利用の状況

すばる望遠鏡の若手人材育成への貢献

【教育・人材育成への貢献】

- 大学院教育 – 博士学位取得者156人、修士学位取得者210人（2000年-2019年）
- 全国の大学学部生・大学院生対象のすばるデータ解析@三鷹&海外（直近6年の参加人数：100人）
- 全国大学学部生対象の観測体験企画@ハワイ（直近12年の参加人数：122人）
- 総研大観測実習@ハワイ（直近12年の参加人数：91人）



観測体験企画の様子
(2017年)



すばる冬の学校@台湾
(2016年)



4-1-4. 研究の達成状況・共同利用の状況

40

他の望遠鏡との観測時間交換

- ジェミニ望遠鏡、ケック望遠鏡と観測時間の交換を行い、各セメスター事に5夜～10夜を交換している。
- 観測時間交換により、それぞれの望遠鏡の特徴ある装置を、各コミュニティの研究者が使用することができる。これにより、一台の望遠鏡およびその観測装置群だけでは成し得ないような観測研究を展開できている。

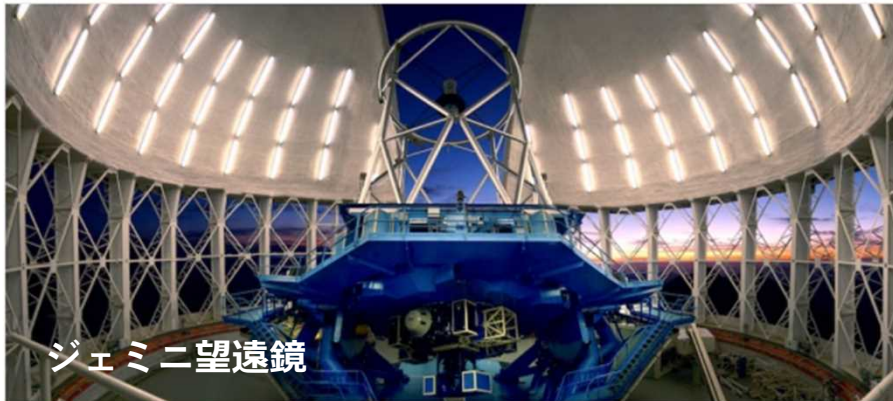
Astronomers set up telescope timeshare

Time swap between observatories points to closer collaboration among large telescopes.

Eric Hand

02 November 2012

Nature

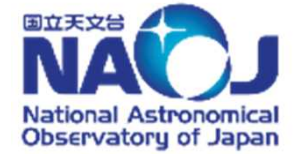


ジェミニ望遠鏡

Astronomers can now freely swap time on the Gemini telescopes (pictured) and Japan's Subaru telescope.



ケック望遠鏡



4-2. 施設等の整備状況



すばる望遠鏡を支える観測装置

• 共同利用観測装置

- 超広視野主焦点カメラ: HSC [主焦点]
- 可視撮像分光器: FOCAS [カセグレン]
- 可視高分散分光器: HDS [ナスミス]
- 近赤外線多天体分光器: MOIRCS [カセグレン]
- 近赤外線撮像分光器: IRCS [ナスミス]

青 : 可視光
橙 : 近赤外線
緑 : 補償光学

• 持ち込み装置

- 高空間分解能コロナグラフ撮像分光器: CHARIS [ナスミス]
- 近赤外線ドップラー分光器: IRD [クーデ]
- 近赤外線2色同時多天体分光撮像装置: SWIMS [カセグレン]

• 補償光学装置

- 188素子補償光学システム: AO188 [ナスミス]
- 極限補償光学: SCExAO [ナスミス]

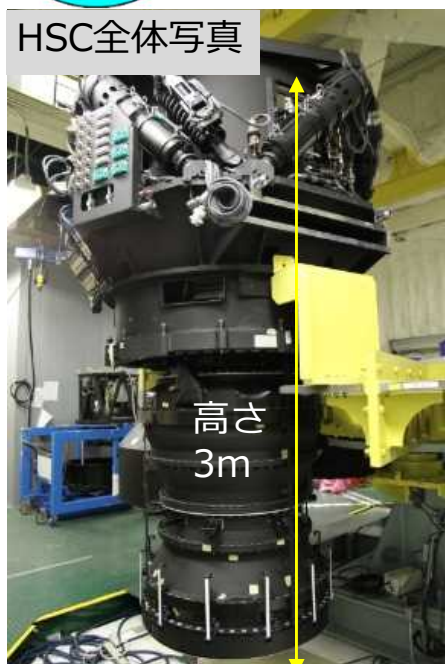


4-2. 施設等の整備状況

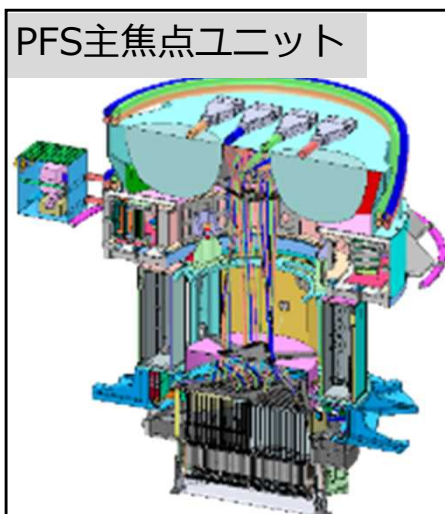
43

すばる望遠鏡の最新鋭観測装置

HSC全体写真



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



4-3. 情勢変化に対する対応



4-3. 情勢変化に対する対応

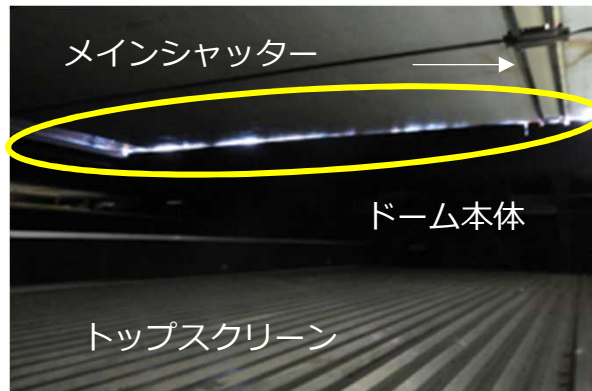
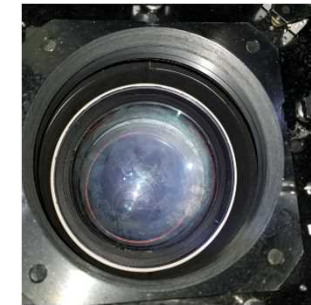
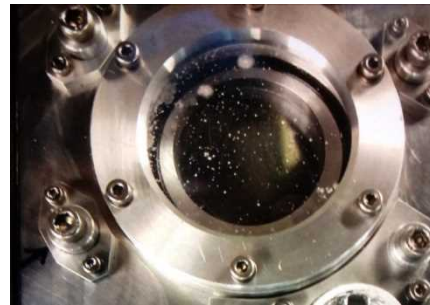
4-3-1. 施設の老朽化

- 2018年度は、キラウエア火山の噴火に伴う地震により、**老朽化しているメインシャッター、トップスクリーンなどにダメージを受ける**と共に、8月のハリケーン・レーンによる大雨では、雨漏り、高湿により観測装置などにも被害が発生した。
- これらの影響により**合計39夜の貴重な観測時間を失った**。これらの復旧は国費による災害復旧費の支援により行なった。



メインシャッター

トップスクリーン



メインシャッター

ドーム本体

トップスクリーン

メインシャッターとドーム本体の間に見られる隙間（被災直後）

望遠鏡に取り付けられた状態で長時間高湿度環境にさらされたために、部分的に潮解（多数の白い点）した、冷却中間赤外線分光撮像装置（COMICS）の入射窓



停電の影響を受けて故障した、開所以来長期間オーバーホールできていない配電盤と劣化したブレーカー内の電極

雨漏りでレンズに水溜りができてレンズが汚損した微光天体分光撮像装置（FOCAS）のレンズユニット



停電の影響を受けて故障したUPSのバッテリーと制御系システム



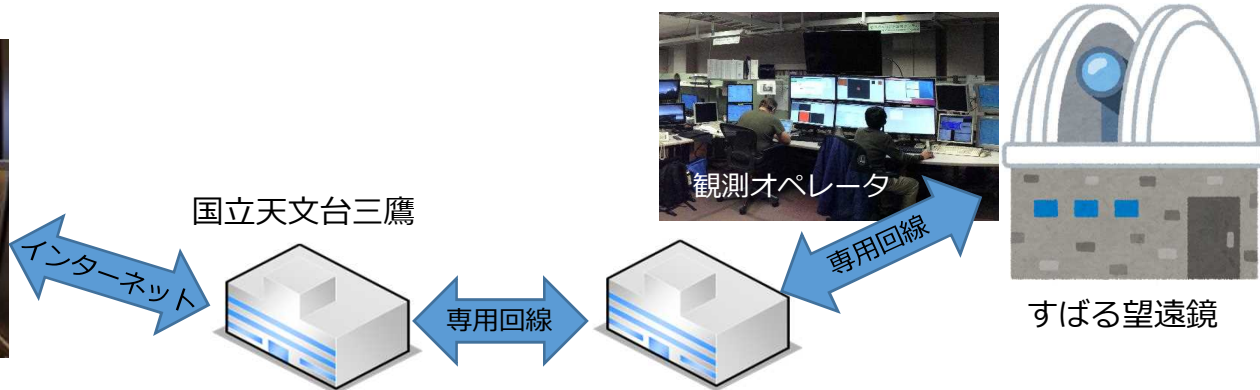
4-3. 情勢変化に対する対応

4-3-2. コロナウイルスの影響

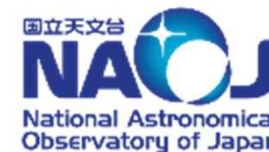
- コロナウイルスの世界的流行により、2020年3月24日にハワイ州全域にロックダウン命令が出された。このため、すばる望遠鏡では、2020年3月24日から同年5月17日まで、55夜にわたって夜間観測を中止した。
- ハワイ観測所では、**コロナウイルス対策本部**を設置して対応を協議、情勢の変化に迅速に対応できる体制を整え、職員向けの「**コロナウイルス対策ガイドライン**」を定めて感染状況に応じた勤務形態を指示した。
- ロックダウン当初は、緊急対応および観測所運用に必要な最小限の業務以外のすべての作業を停止し、職員には在宅勤務を原則とするなど、所内での感染防止に努めた。このように、観測所の停止を最小限に抑えた。
- 並行して、**リモート観測システム**を構築し、観測者がハワイに来なくても観測が実施できる体制を整えた。観測再開後もコロナウイルスの状況は変化し続けており、観測運用に必要な最低限の作業・業務を実施する体制を継続している。



観測者@三鷹・各研究機関



コロナ禍に対応して構築したリモート観測システムの概要



4-4. 社会や国民からの支持を得る ための取り組み、情報発信の状況



4-4. 社会や国民からの支持を得るための取り組み、情報発信の状況

48

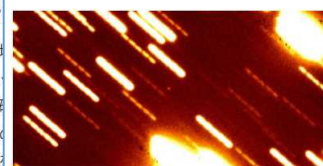
4-4-1. 情報発信

- 科学成果・記者発表
1999年-2020年：280件
- 国内新聞掲載数
2019年度 95件
2020年度 65件



はやぶさ2、地球へ帰還中の姿 すばる望遠鏡が撮影成功

小川詩織 2020年11月26日 17時00分



すばる望遠鏡がとらえた探査機はやぶさ2（中央の光点）=20日、3分間露光の5枚を合成、国立天文台提供

12月6日の地球帰還に向け、地球に近づいている小惑星探査機「はやぶさ2」を、ハワイにある国立天文台のすばる望遠鏡が撮影することに成功した。24・6等級という極めて暗い光の点だが、3分間露光した画像を5枚重ねることで撮影できたという。

国立天文台によると、すばる望遠鏡が20日午前0時すぎ（現地時間）、カシオペア座の方向にいる「はやぶさ2」を超広視野主焦点カメラで撮影した。撮影時、地球からの距離は約580万キロだったという。

はやぶさ2は来月、小惑星「リュウグウ」の砂が入っているとみられるカプセルを豪州の砂漠に投下する。国立天文台の吉田道利・ハワイ観測所長は「姿を捉えることができて光栄。さらなる探査の旅にも、すばる望遠鏡で貢献していきたい」とコメントした。（小川詩織）





4-4. 社会や国民からの支持を得るための取り組み、情報発信の状況

すばる望遠鏡観測成果報道(2018-2019)

49

2018年-2019年の成果報道から、主なものをピックアップ。

【テレビ】

2018/2/27 NHK アインシュタイン理論の修正が必要か 暗黒物質の分布を調査

2019/1/9 NHK すばる望遠鏡の20年 宇宙の過去と未来は？

【新聞】

2018/2/27 共同通信 宇宙の暗黒物質、固まり少なめ 理論修正の可能性も

2018/2/27 日本経済新聞 宇宙の暗黒物質の固まり、少ない可能性 国立天文台など観測

2018/2/27 時事通信 広範囲の「暗黒物質地図」=すばる望遠鏡、新カメラで

2018/2/28 読売新聞 宇宙の膨張、予想より速い?...暗黒物質調べ判明

2018/2/28 毎日新聞 暗黒物質 見える化 東大が分布図 宇宙の進化、解明手がかりに

2018/2/28 産経新聞 世界最大の「暗黒物質」3次元分布図を作製 国立天文台などのチーム

2018/3/22 日本経済新聞 暗黒物質が銀河作った？ 精密な分布図、国立天文台など作製

2018/6/17 地球型惑星「すばる」で探す 国立天文台など 太陽系外を観測

2018/8/2 毎日新聞 木星に新たに12衛星

2018/9/26 朝日新聞 宇宙あと1400億年は「安泰」 東大などすばる望遠鏡で観測

2018/9/26 日本経済新聞 宇宙、膨張し続けても・・・ 「あと1400億年は終わらず」 東大など

2018/9/26 共同通信 宇宙は1400億年続くと発表 東大と国立天文台の研究チーム

2018/9/26 産経新聞 宇宙 あと1400億年は存在 東大などチーム 暗黒物質を分析 数百億年説否定

2018/9/27 読売新聞 宇宙あと1400億年安泰 東大・国立天文台など分析 「暗黒物質」の分布バランス保つ

2018/9/27 毎日新聞 宇宙1400億年先まで大丈夫 東大など分析

2018/10/3 日本経済新聞 太陽系、端に新天体 米研究所など発見 公転周期4万年

2018/10/3 産経新聞 太陽系端に新天体 4万年で1周

2018/10/2 共同通信 太陽系の端に新天体発見 すばる望遠鏡で米チーム

2018/11/17 夕刊フジ 日本の元氣=山根一眞 20年ぶり訪問、進化したすばる望遠鏡

2018/12/18 時事通信 太陽系で最も遠い天体=公転周期1000年超か-米研究所など

2018/12/18 共同通信 米チーム、最も遠くで天体発見 太陽から地球の距離の120倍

2018/12/19 日本経済新聞 太陽系最も遠い天体 米チーム発見、直径500キロ

2018/12/19 毎日新聞 太陽系最果てに天体 米チーム発見

2018/12/19 産経新聞 太陽から180億キロ先に天体 米チーム、すばる望遠鏡で観測

2018/12/30 しんぶん赤旗 すばる望遠鏡初観測20年 8億7千万画素のデジカメ 宇宙の「知」を開拓

2018/12/30 日本経済新聞 宇宙の運命 1400億年は安泰 すばる望遠鏡で暗黒物質を調査 暗黒エネルギー アインシュタインが予言

2019/2/7 毎日新聞 科学の森=すばる望遠鏡 20年の成果

2019/3/14 読売新聞 巨大ブラックホール 83個 130億光年先で発見 愛媛大など

2019/3/14 日本経済新聞 初期宇宙のブラックホール 愛媛大など、83個発見

2019/3/14 毎日新聞 ブラックホール83個 愛媛大など発見 地球から130億光年

2019/3/14 時事通信 宇宙誕生後8億年で多数存在=巨大ブラックホール、すばるで観測

2019/3/14 共同通信 初期宇宙のブラックホール発見 83個、形成過程に新たな謎

2019/3/14 Hawaii Tribune-Herald "83 supermassive black holes discovered by Subaru astronomers"

国内新聞記事掲載数

2017年度 147件

2018年度 115件

2019年度 25件(6月まで)



4-4. 社会や国民からの支持を得るための取り組み、情報発信の状況

4-4-2. ハワイ地元への取組

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

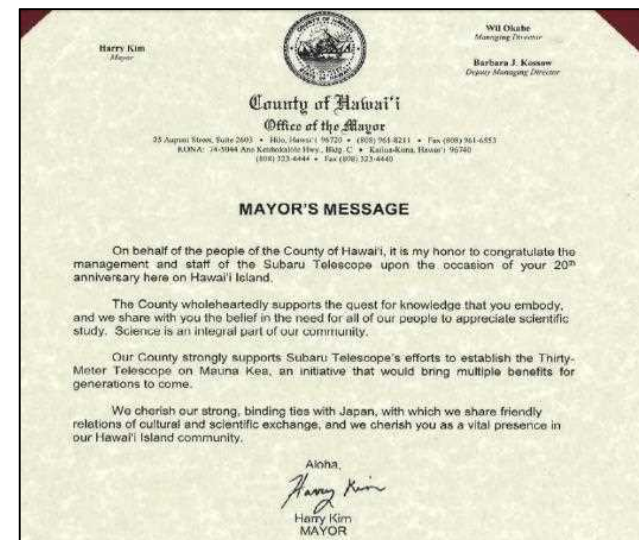
- ・小学校から高校まで、マウナケア天文台職員が出前授業
- ・2019年実績：ハワイ観測所から20人のスタッフが参加。55クラスを訪問。

・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



ハワイ郡長ハリー・キムから届いた、すばる望遠鏡20周年へのお祝い

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



4-4. 社会や国民からの支持を得るための取り組み、情報発信の状況

4-4-3. 産業・社会への波及効果

• JAXA美星スペースガードセンター

すばる望遠鏡で培った「モザイクCCDカメラシステム」、「超ローノイズエレクトロニクス」技術、浜松ホトニクスと共同開発した「赤外線に感度の高いメガピクセルCCD」技術を駆使し、広視野カメラシステム一式を提供。2009年1月の稼働開始以来、10年に渡る長期間、無故障で監視任務に供されている。なお、JAXAの新「宇宙状況把握（SSA）システム」においても、本カメラが継続して使用される。

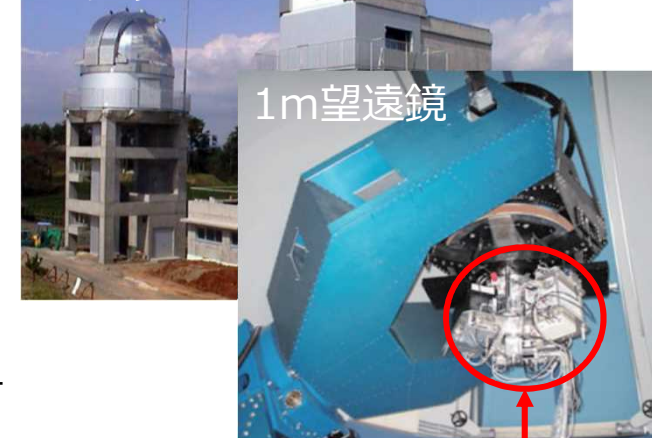
• 赤外線で高感度のメガピクセルCCD

すばる望遠鏡HSCのために、浜松ホトニクスと共同で、空乏層厚200 μm （民間用のセンサーでは数 μm 程度）のCCDを開発し、赤外線感度の劇的な改善に成功した。空乏層が厚いCCDはX線にも高い感度を持ち、JAXAが打ち上げたひとみ衛星及びその後継機にも採用。

透過型電子顕微鏡における、電子線直接撮像にも使用。

医療用にも、X線が使われており、診断に用いる装置の高感度化に貢献。このためX線の照射量を少なくでき、生体への影響をそれだけ小さくできる。

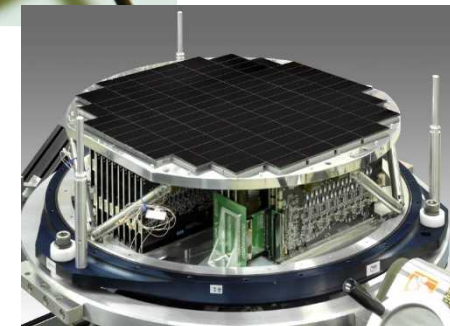
JAXA美星スペースガードセンター



口径1m望遠鏡に装着された
国立天文台製広視野CCDカメラ



左：開発した2K×4K
画素のCCD 下：同
CCDを116個配置し
た、すばる望遠鏡超
広視野主焦点カメラ
HSC





4-4. 社会や国民からの支持を得るための取り組み、情報発信の状況

4-4-3. 産業・社会への波及効果

● 大気揺らぎを打ち消す補償光学

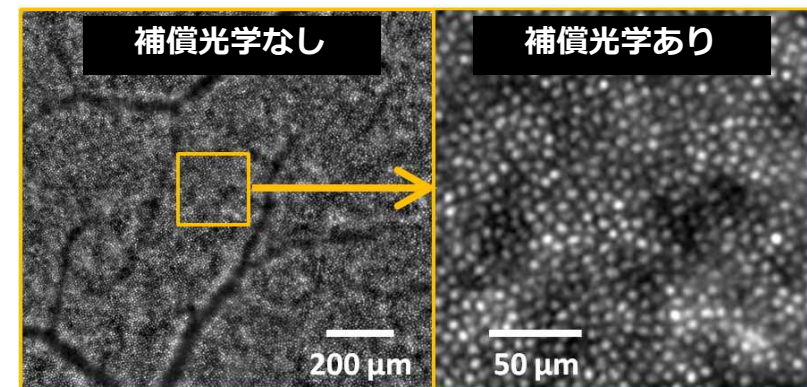
大気の揺らぎを補正してシャープな星像を得るための技術が、補償光学である。像の揺らぎを毎秒1,000回以上測定できるセンサー技術と高速線形演算処理、ミリ秒の応答時間・数ナノメートルの精度で可変形鏡を動かして光の乱れを直すリアルタイム制御技術を組み合わせた装置をすばる望遠鏡に搭載し、従来の10倍以上鮮明な天体画像を得ることを可能にした。

● 医療技術への応用

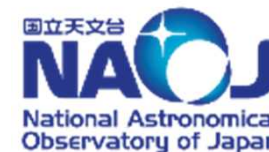
生体組織の奥深くでも鮮明な像を得ることができる補償光学顕微鏡・検眼鏡などに補償光学技術は応用されている。この技術により、医療・生物研究が大きく進展することが期待されている。



(左) すばる望遠鏡向けに開発された極限補償光学装置SCEXAO
(右) 補償光学適用前(上)と適用後(下)での星像の違い。
補償光学により、星像が圧倒的にシャープになる。



補償光学顕微鏡を用いて生体組織の一部を撮影した例。補償光学を用いた高解像度撮影をすると、細胞組織の細部を鮮明に捉えることができる。



4-5. 年次計画における 「プロジェクト推進に当たっての 留意事項等」への対応状況



プロジェクト推進に当たっての留意事項等

「大型研究計画に関する進捗評価について（報告）・大型光学赤外線望遠鏡「すばる」の共同利用研究」
(2019年8月27日：学術審議会・学術研究の大型プロジェクトに関する作業部会)

① マルチメッセンジャー天文学への貢献

近年、可視光・赤外線など電磁波を手段とする天文学と、重力波天文学、ニュートリノ観測が協調した新たな天文学（マルチメッセンジャー天文学）の重要度が増している。すばるは、超広視野主焦点カメラ（HSC）の特徴等を活かして、重力波の追跡観測により重力波源（光源）の様子を捉え、中性子星合体による元素合成の理論を証明することに成功した。引き続き、すばるの観測によって新たな天文学開拓に先導的な貢献をしていくことが重要である。

② 計画的な老朽化対策

すばるは上述したとおり、順調に成果を挙げており、今後も天文分野の最前線で活躍することが期待されている。他方で、建設開始からすでに20年以上が経過しており、老朽化や適切で定常的なメンテナンスの不充分さが顕在化してきている。その結果、地震やハリケーンによる大雨等に起因して、機器の誤動作が生じたり、雨漏り等の対応で観測時間を一部失うなど、研究を進めていく上でも問題が生じている。そのため、望遠鏡の機械系や制御系とドームなどの基幹構造・施設及び耐用年数を著しく超過している機器などで老朽化対策が真に必要なものを予め把握し、計画的な老朽化対策を講じておくことが必要である。

③ TMTとの一体的な運用について

今回のTMT計画の進捗評価では、今後の見通しが明確な状況といえる状況ではなく、建設期間の延長に伴う年次計画の延長等を承認について判断できる状況にないこと、さらに、代替候補地の可能性などすばるとの一体的運用の在り方にも課題が生じていることが確認されている。したがって、今後のTMT計画の状況に合わせて、すばるの将来的な運用の在り方についても検討が求められる。



① マルチメッセンジャー天文学への貢献

留意事項への対応

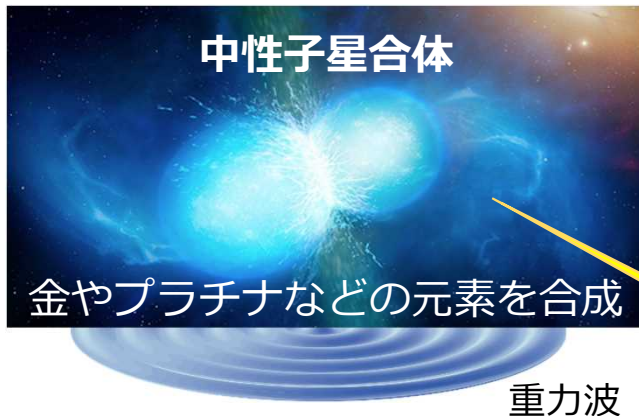
すばる望遠鏡は、中性子星合体現場を人類が初めて捉えた重力波イベントである、GW170817の追跡観測に成功し、宇宙における鉄より重い元素の起源が中性子星合体であるとの証拠を得た。その後、欧米の重力波望遠鏡LIGO、Virgoの第3期定常運用（O3）においても、重力波アラートに対応した追跡観測を試みた。2019年4月から2020年3月まで行われたO3で、すばる望遠鏡はHSCを用いて3つの重力波イベントについて追跡観測を行った。いずれも光学対応天体を発見することができなかったが、2020年2月のイベントS200224caでは重力波の位置誤差範囲のおよそ70%をHSCで探索することに成功し、光学対応天体の明るさに有意な制限を付けた。O3終了後は、日本の重力波望遠鏡KAGRAも参加する第4期定常運用（O4）に向けて、HSCの即時解析機能の強化を行ってきた。

また、重力波に限らずニュートリノバーストに関しても、すばる望遠鏡は貢献している。GW170817の直後に報告されたニュートリノバーストIceCube-170922Aに対してHSCを用いて光学対応天体探査を行い、活動銀河核TXS 0506+056がニュートリノを放出した候補天体として最も確度の高い天体であることを検証した。

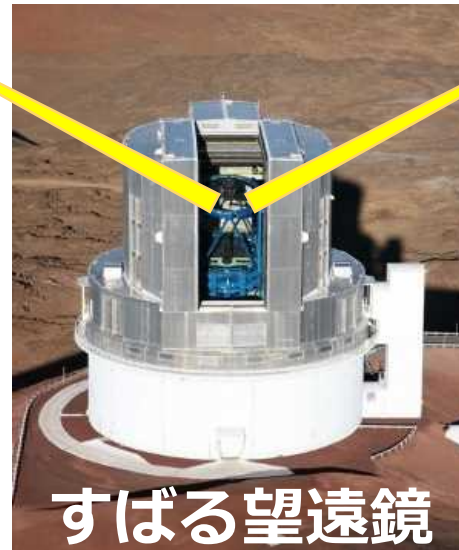
マルチメッセンジャー天文学は、宇宙の突発現象を基にしているため、予測が難しいが、すばる望遠鏡はHSCを中心として、引き続き、重力波観測やニュートリノ観測と連携して、重力波やニュートリノ放出現象の追跡観測を行っていく。



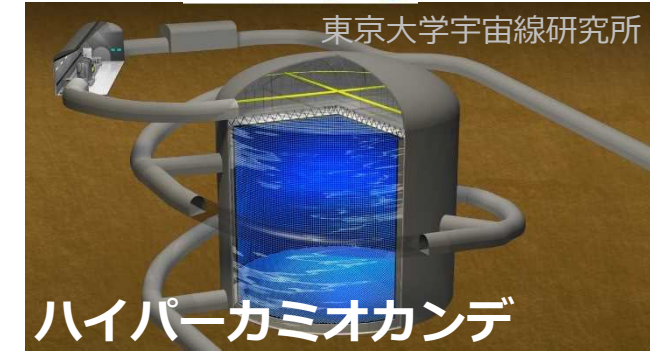
①マルチメッセンジャー天文学への貢献



光



光



- 重力波望遠鏡やニュートリノ検出装置では、天体の正体を十分に理解できない。
- すばる望遠鏡は、**世界随一の広視野観測性能**を活かしていち早く天体の光をとらえ継続的に観測することで、起源天体の正体を明らかにし、そこで作り出される**重元素と宇宙線の起源を解明する。**

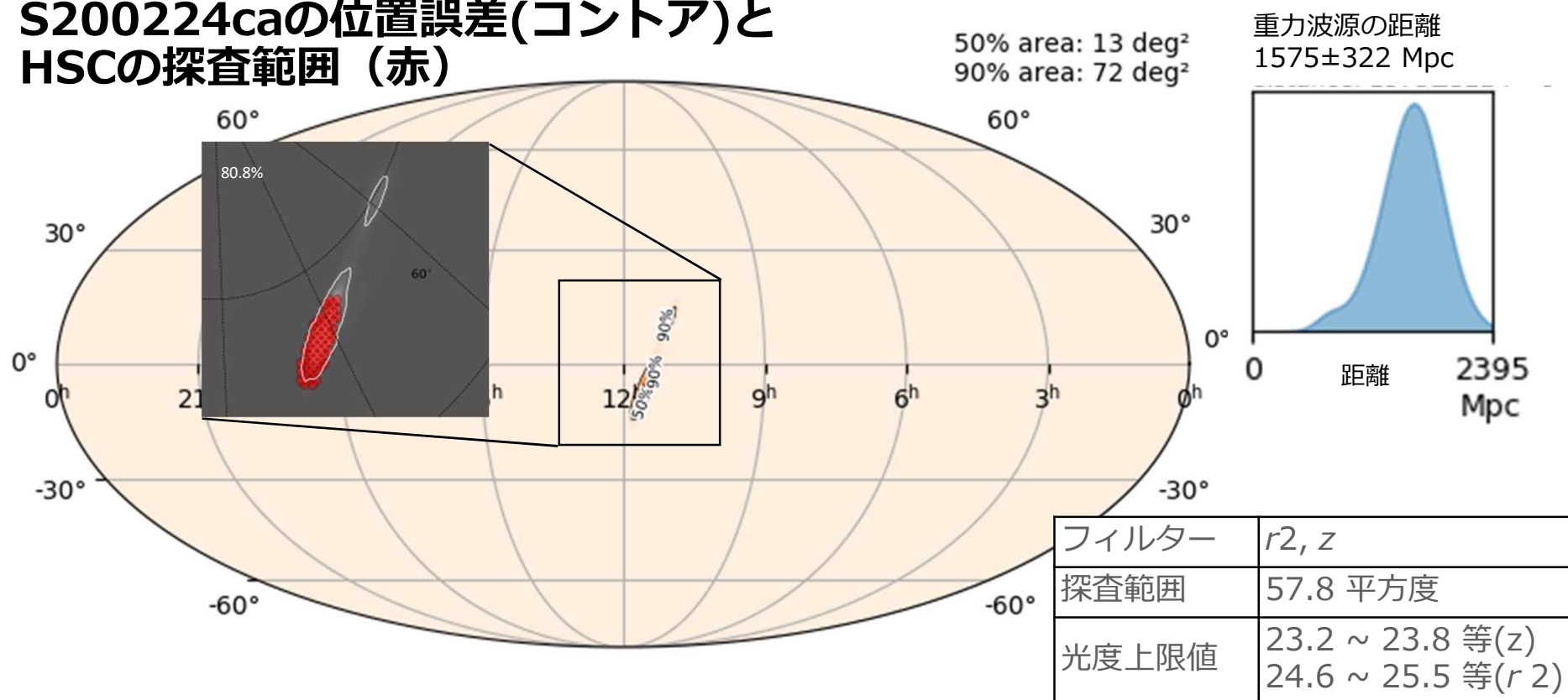


① マルチメッセンジャー天文学への貢献

重力波望遠鏡第3定常運用（O3：2019/4 – 2020/3）で、すばるHSCを用いた光学追跡観測を実施。

- 2020年2月に発生した重力波イベントS200224caで位置誤差範囲の70%を探索。
- 光学対応天体の光度に有意な上限値を得た。

S200224caの位置誤差(コントア)とHSCの探索範囲（赤）





②計画的な老朽化対策

留意事項への対応

すばる望遠鏡では、主要な老朽化対策項目とその優先順位をまとめ、10年計画で予算要求を行いながら、順次対策を進めている。

これまでに、すばる望遠鏡ドームのメインシャッターの改修、赤外線副鏡の再蒸着、望遠鏡駆動回路の一部更新、望遠鏡統括計算機ソフトウェアの更新、などを完了している。これらの一部は、4-3章で述べた災害復旧と重なっている。特に、ドームメインシャッターは、経年劣化によって歪みや動きの悪い個所が発生していたのに加え、メンテナンス性の良くない設計となっていて、近年、動作停止などのトラブルが多発していた。そこに2018年の地震による被害を受け、駆動により大きな支障が出ることとなった。今回、メインシャッターのレールおよびガイドローラー部分を全面的に改修し、メンテナンス性が良く、かつ強度も向上した機構に交換した。これによってメインシャッターの動きは極めてスムーズとなり、同時に地震等で進行していた構造の歪みも補修することができた。

無停電電源装置は2021年3月に本体がドーム内に仮設置され、2021年夏に本格的な設置作業を行う。ドーム空調は現地業者との契約を進め、2021年度中に二つある空調装置の片側の更新を行う。

今後、ドーム駆動機構の更新、望遠鏡駆動機構の更新など、大きな老朽化対策工事を予定しており、2027年度末までに必要な老朽化対策を施す計画である。



4-5. 留意事項への対応

設備の機能改善 <年次計画>

R05年度以降も、ウインドスクリーン改修、望遠鏡の可動部、駆動制御システムの改修・オーバーホール等を進める計画

- ・ 大部分は2027年度までに終了し、経験をTMTの運用に生かす。

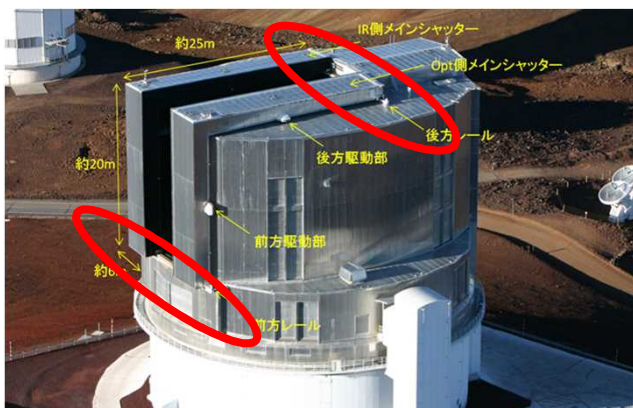
		H30	R01	R02	R03	R04	R05	R06	R07	R08	R09
改修大項目・目的	内訳	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027
蒸着装置オーバーホール	主鏡運搬・洗浄装置改修										
温度環境維持（ドーム）	ドーム空調設備更新										
	ドーム機密性維持										
ドーム駆動改修	ドーム駆動システム改修（旧ドーム制										
	メインシャッター改修										
	トップスクリーンオーバーホール										
	TUE機械系オーバーホール・センサ系										
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										
	筒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										



これまでの老朽化対策の状況

すばるメインシャッターの改修（構造老朽化）

ガイドローラーを改修してスムーズな駆動を実現した。



観測装置の改修（台風によるレンズ劣化）



清掃・再組立

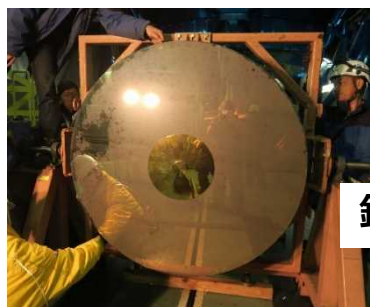


望遠鏡駆動回路更新（素子老朽化：20枚）

更新した駆動回路



すばる赤外副鏡の蒸着（台風により表面劣化）



銀蒸着



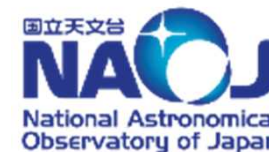
無停電電源更新

新規電源（ハワイ山麓）
コロナのため設置待ち



現在の電源
(20年以上)





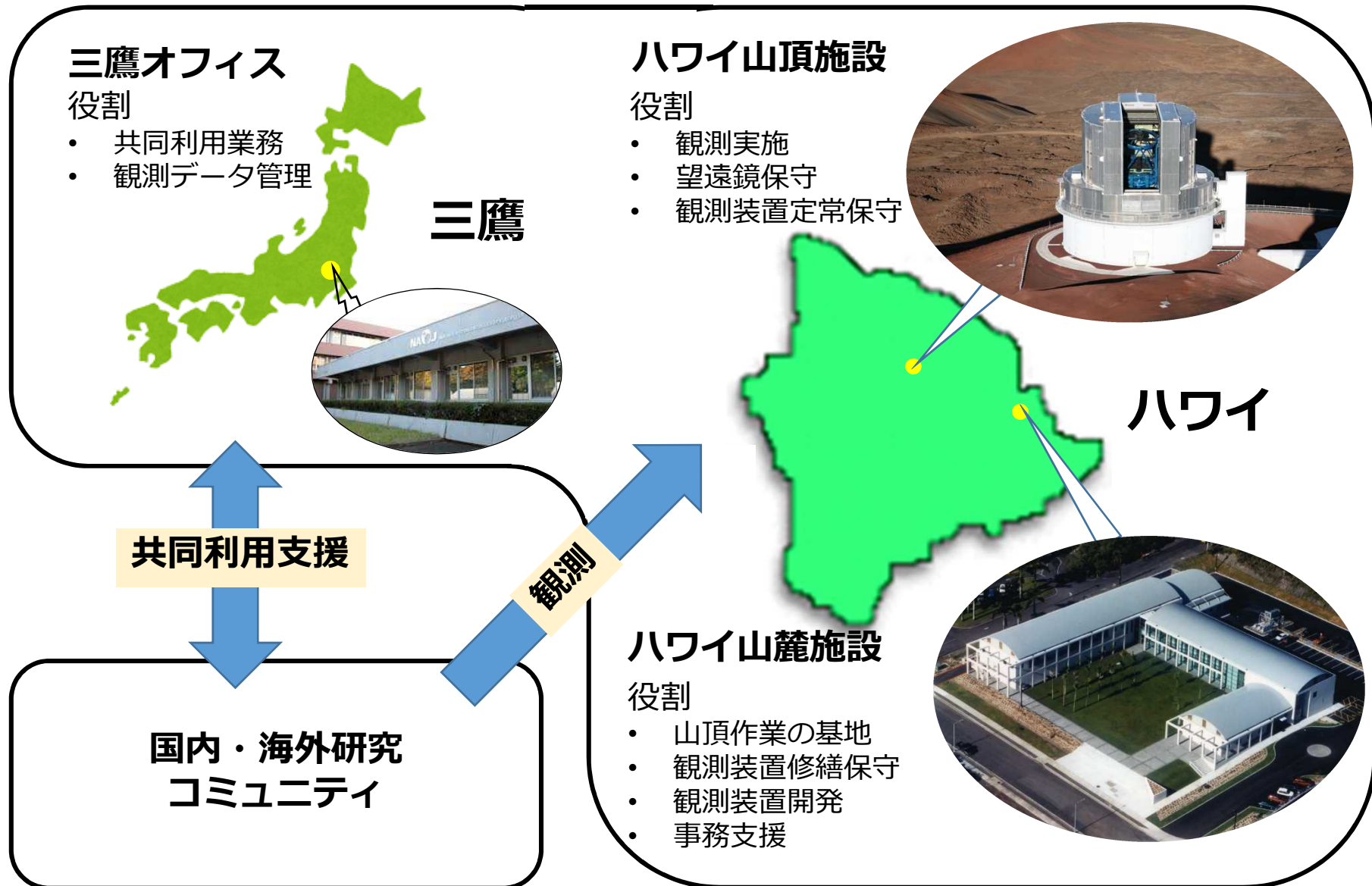
4-6. 共同利用・共同研究を行う ための実施体制の状況



4-6. 共同利用・共同研究を行うための実施体制の状況

62

すばる望遠鏡の共同利用運用 (再掲)

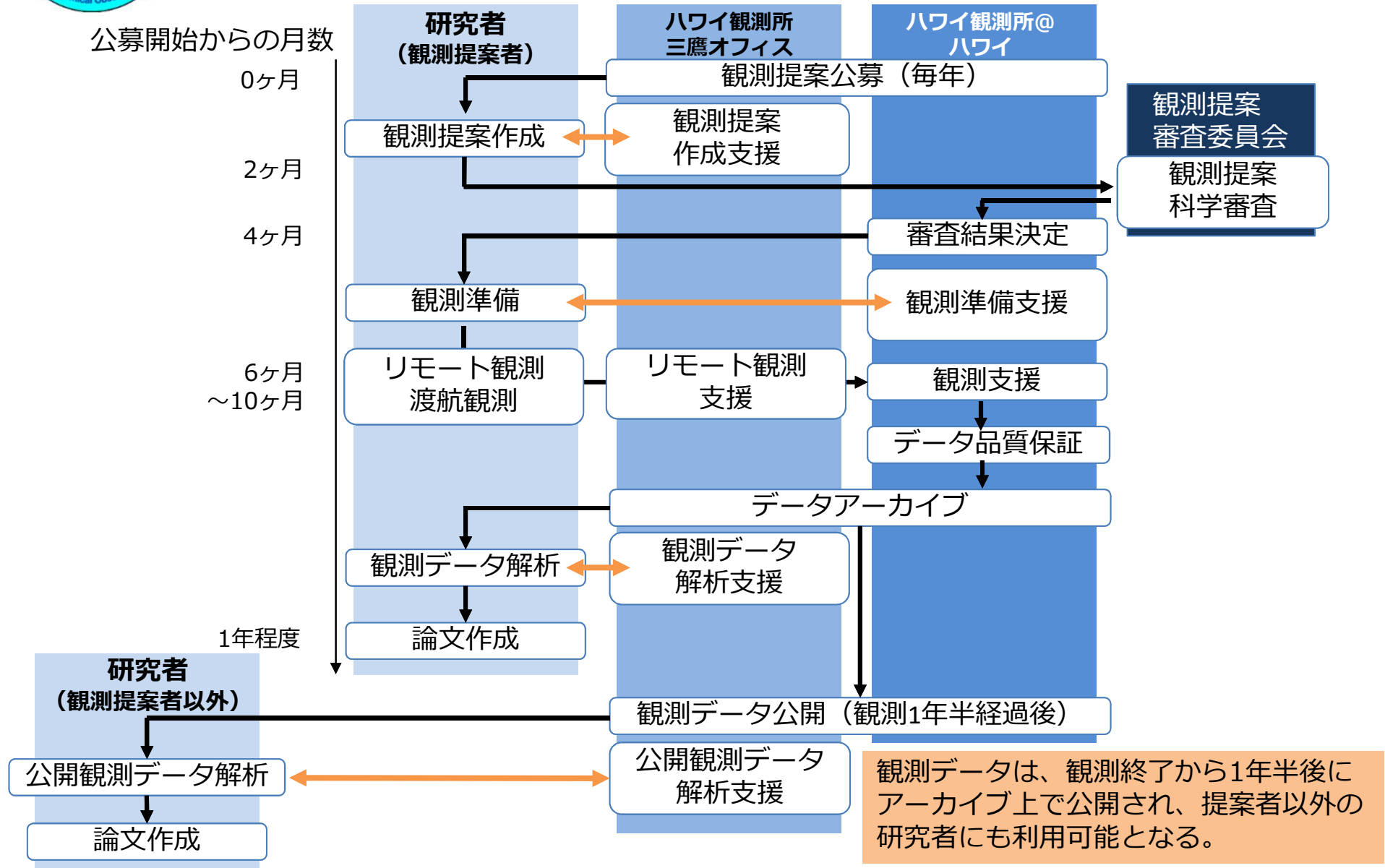




4-6. 共同利用・共同研究を行うための実施体制の状況

63

すばる望遠鏡の共同利用観測の流れ





China.gov.cn

4-6. 共同利用・共同研究を行うための実施体制の状況

64

頭脳循環と我が国の発展への寄与



すばる2の観測装置開発および大規模サーベイ観測の国際共同研究を、関係各国の研究者・ポスドク・学生が互いに行き来しながら推進し、我が国の学術研究および技術開発の発展に寄与する。

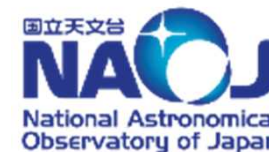
計画を実現しない場合、我が国の天文学研究の発展が大きく阻害されるだけでなく、関連研究分野における世界的発展に日本が主導的役割を果たす機会を失うことになる。

超広視野主焦点カメラHSC

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

近赤外超精密視線速度観測装置IRD



4-7. 幅広い研究者が参画できる 運用体制の状況



4-7. 幅広い研究者が参画できる運用体制の状況

4-7-1. 天文学および隣接した分野での活動

すばる科学諮問委員会：国立天文台長の諮問機関。委員はコミュニティの代表者から構成され、諮問事項に答申する他、毎月一回会合を開いて、ハワイ観測所の報告を受けたり、共同利用の短期的な課題から、装置開発、望遠鏡時間の配分方針、国際連携に向けた戦略などの中長期的な課題に至るまで、幅広く議論を行う。

すばるユーズーズミーティング：年1回開催。日本国内の研究者のみならず、マウナケア天文台群の近隣望遠鏡およびハワイ大学の代表者も参加して、広くコミュニティに開かれた場で重要な課題について議論を行う。

観測装置のコラボレーションミーティング：超広視野主焦点カメラ（HSC）や超広視野多天体分光器（PFS）については、定期的のコラボレーション・ミーティングやサイエンスワークショップを開催して、共同研究の推進を図っている。

その他：すばる望遠鏡とTMTの連携に関しては、主要科学目標の設定や具体的な観測戦略の検討がコミュニティ主導で進められ、「サイエンスブック」としてまとめられる予定、など。

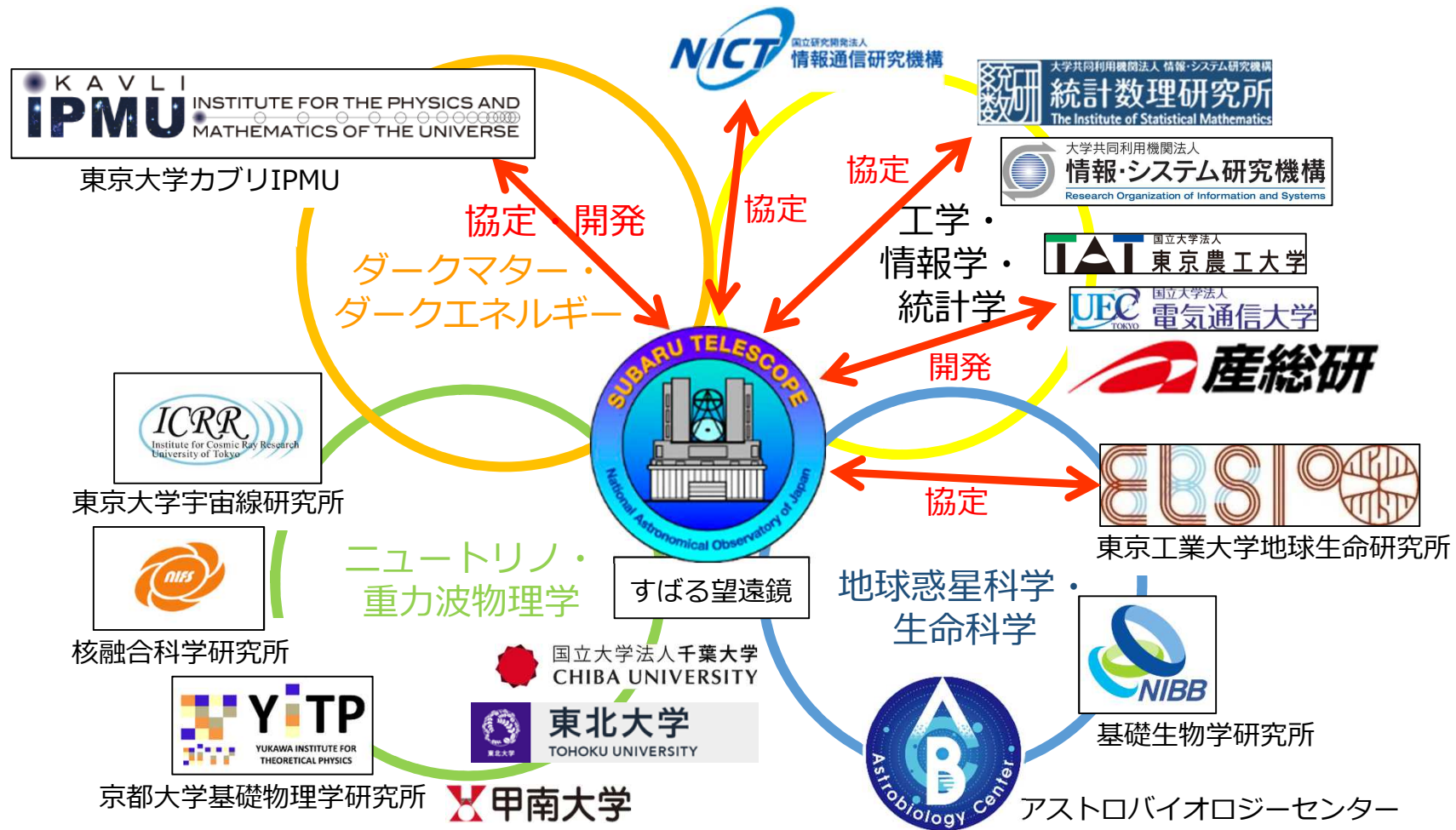


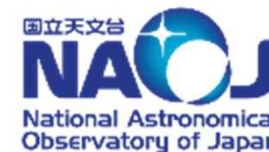
すばるユーズーズミーティング(2019)



4-7. 幅広い研究者が参画できる運用体制の状況

4-7-2. 広い分野の研究者との共同研究





4-8. プロジェクト推進（後継計画）にあたっての課題



4-8. プロジェクト推進にあたっての課題

すばる望遠鏡の次期計画・すばる2

「学術研究の大型プロジェクトの推進に関する基本構想ロードマップ（ロードマップ2020）」に掲載





4-8. プロジェクト推進にあたっての課題

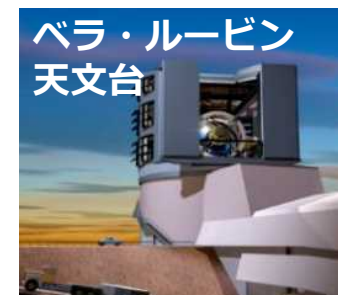
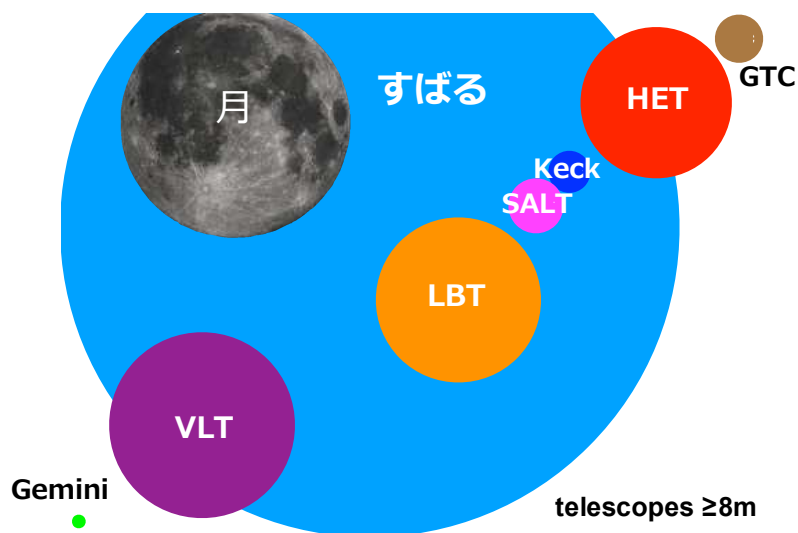
超広視野観測能力で世界を牽引

すばるのこれまでの科学的成果をさらに発展させ、**超広視野撮像分光観測能力を活かして世界をリード**。

【超広視野撮像分光天文学の推進】

- 現在、**すばる2に匹敵する超広視野観測能力を持つ望遠鏡は他に無い**。一方、視野ですばる2を上回るベラ・ルービン天文台（旧名LSST）が南米チリで建設中であり、これが2020年代中ごろに本格稼働する。しかし、**すばる2にはベラ・ルービン天文台が備えていない分光観測能力と赤外線観測能力があり**、他の大型光赤外線望遠鏡では不可能な超広視野分光観測・広視野赤外線観測を行い、**遠方銀河の精密観測やダークエネルギーの究明において世界をリード**する。

世界の8m級望遠鏡の視野の比較（青色がすばるの視野）



	すばる2	ベラ・ルービン天文台
主鏡有効径	8.2メートル	6.7メートル
視野	1.8 平方度	9.3 平方度
観測天域	北天	南天
分光観測	2,400天体同時分光	無
赤外線観測	有	無
観測開始時期	HSC: 2013年 PFS: 2023年	2024年



4-8. プロジェクト推進にあたっての課題

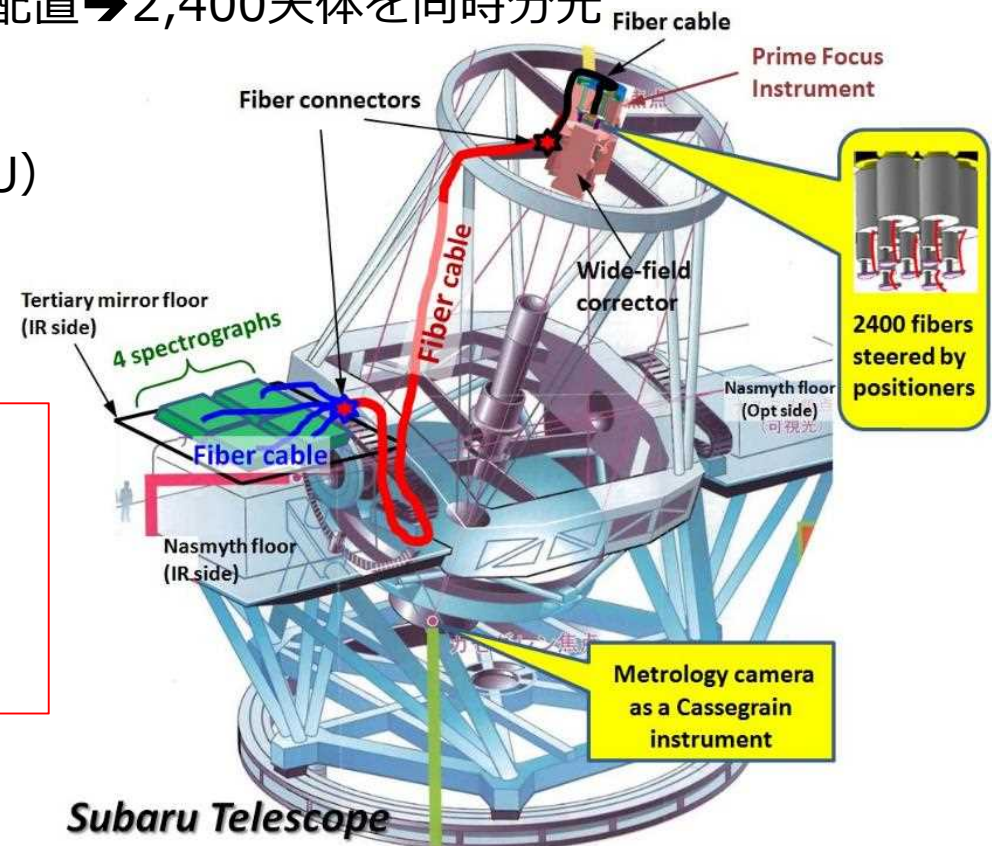
4-8-2. 新たな観測機能の維持運用

- 宇宙の構造形成の歴史を明らかにし、ダークエネルギーの謎に迫るため、**超広視野多天体分光器PFS**を開発、すばる望遠鏡に搭載して共同利用観測および大規模サーベイ観測を実施する。

PFSの概要

- 主焦点に2,400本の光ファイバーを配置→2,400天体を同時分光
- 波長範囲：0.38 μm ～1.3 μm
- 視野：1.25平方度
- PI：村山齊氏（東京大学カブリIPMU）
- 2018年～2022年にすばるへ装着
- 2023年から本格稼働

- PFSは、これまですばる望遠鏡に導入された中で最も複雑かつ繊細な装置であり、その性能を100%発揮させて共同利用を進めるためには、新たな運用リソースが必要。



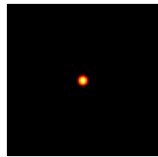


4-8. プロジェクト推進にあたっての課題

4-8-3. すばる望遠鏡の機能更新

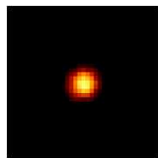
- 世界最先端の広視野赤外線観測機能を獲得するために、すばる望遠鏡を補償光学化することで、赤外線で宇宙望遠鏡に匹敵する解像度を得る。
- そのために、地表層の揺らぎを可変形副鏡で補正する**地表層補償光学 (GLAO)**を実現。

大気揺らぎなし



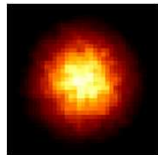
解像度 ~ 0.07 秒角
望遠鏡で分解できる
限界の解像度。

高層揺らぎによる像の乱れ



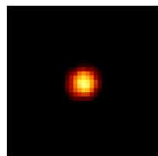
解像度 ~ 0.2 秒角
マウナケアのサイトでは高層の揺らぎは比較的弱い。

地表層+高層揺らぎによる像の乱れ



解像度 ~ 0.5 秒角
マウナケアのサイトでは地表層に揺らぎの大半が集まる。

地表層補償光学 (GLAO)



解像度 ~ 0.2 秒角
地表層揺らぎを補正し、
広視野に渡り均一な
高解像度を得る。

