



# すばる2と2030年代 のすばる

国立天文台ハワイ観測所  
吉田道利



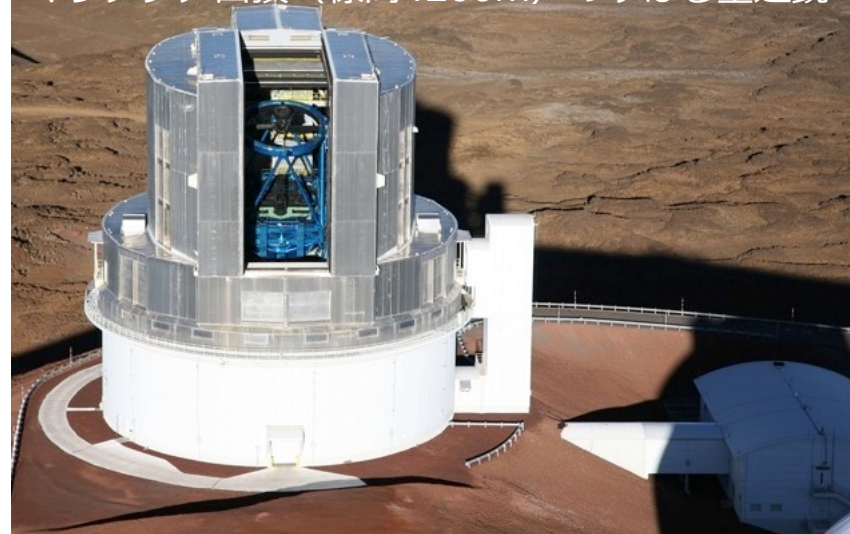
# 大型光学赤外線望遠鏡 「すばる」の共同利用研究

**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。三鷹35人、岡山5名。ハワイ大学との協定に基づいた運用、近隣の天文台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

2021/9/9

## ○ 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。

光赤天連シンポ2021



# Instrument Suit of Subaru

- **facility instruments**

- Optical wide field camera: HSC [Pr]
- Optical camera and spectrograph: FOCAS [Cs]
- Optical high dispersion spectrograph: HDS [Ns]
- Near-infrared multi-object spectrograph: MOIRCS [Cs]
- Near-infrared camera and spectrograph: IRCS [Ns]

- **visiting instruments**

- Near-infrared high-dispersion spectrograph: IRD [Coude]
- Coronagraphic High Angular Resolution Imaging Spectrograph (CHARIS) [Ns]
- Simultaneous-color Wide-field Infrared Multi-object Spectrograph (SWIMS) [Cs]
- Extreme adaptive optics: SCExAO [Ns]

- **adaptive optics**

- Adaptive optics system: AO188 [Ns]

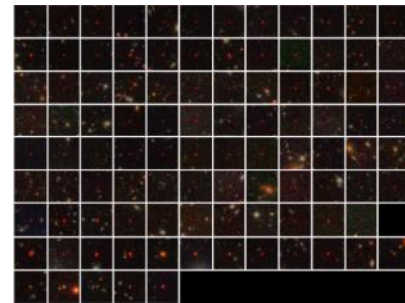


# 2020年までの科学目標に対する成果

「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）」

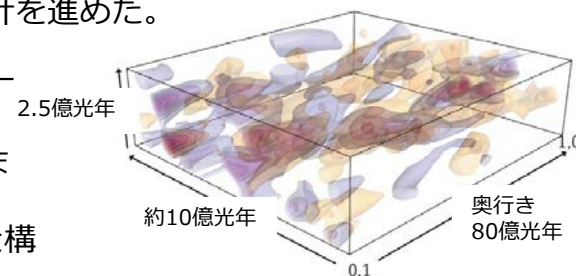
## 科学目標1：ビッグバン後10億年以内の宇宙初期を観測し、宇宙における天体の形成過程を研究する

- 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ともに、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。



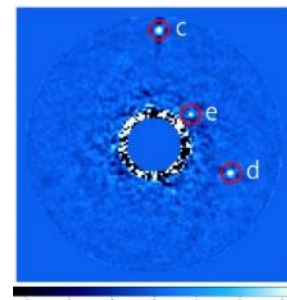
## 科学目標2：遠方宇宙を広い天域にわたって観測することにより、宇宙の大規模構造の起源を研究する

- 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

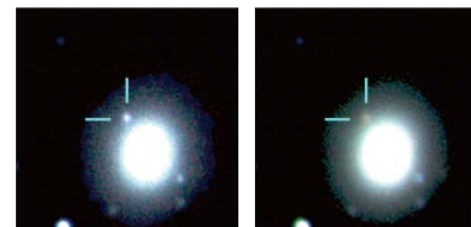
- 高コントラストコロナグラフ撮像装置HiCIAOを用いて8個の太陽系外惑星の直接観測を行い、第2の木星を発見した。
- 近赤外線ドップラー分光装置IRDによる地球型惑星探査の戦略枠プログラムを開始した。
- 近赤外高コントラスト面分光装置CHARISを用いて系外惑星大気研究を進めた。



## 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。

2017.08.18-19      2017.08.24-25



## 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

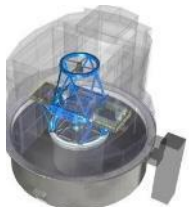
- HiCIAOを用いて多数の原始惑星系円盤を観測し、その構造を解明。  
→ アルマ望遠鏡につながる成果を多数生み出すことができた。



# すばる2コンセプト

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



超広視野撮像



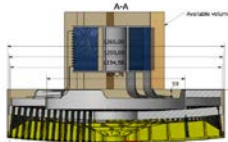
超精密視線速度測定

## 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



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**

## 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

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。5



# Subaru2 wide-field capabilities

## HSC (operational)



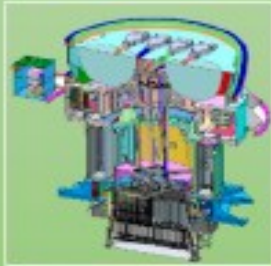
Optical  
(0.38 – 1.1  $\mu\text{m}$ )  
FoV  
1.7 deg<sup>2</sup>

Seeing limited  
( $> 0.4''$ )  
Imager

Limiting mag.  
with 1h exp.

Band	mag
g	27.8
r	27.2
i	26.5
z	25.9

## PFS (2022 -)



Optical – J-band  
(0.38 – 1.26  $\mu\text{m}$ )  
FoV  
1.3 deg<sup>2</sup>

2,400 fibers  
1.05"  $\phi$   
Multi-object sp.  
0.38 – 1.26  $\mu\text{m}$

Limiting mag. with 1h exp.

Band	mag
Blue (0.38 – 0.65 $\mu\text{m}$ )	22.5
Red (0.65 – 0.97 $\mu\text{m}$ )	22.4
NIR (0.97 – 1.26 $\mu\text{m}$ )	21.4

## ULTIMATE (2026 -)



Near-Infrared  
(0.9 – 2.5  $\mu\text{m}$ )  
FoV  
20'  $\phi$

GLAO supported  
0.2" resolution  
(in K-band)  
Imager (14'x14')  
Multi-object sp.  
(w/ MOIRCS)  
IFU sp.

Limiting mag.  
using GLAO  
with 4h exp.

Band	mag
J	26.3
H	25.5
Ks	26.4
NB1340	26.1

In addition, we will support unique visitor (PI-type) instruments with best-effort basis.

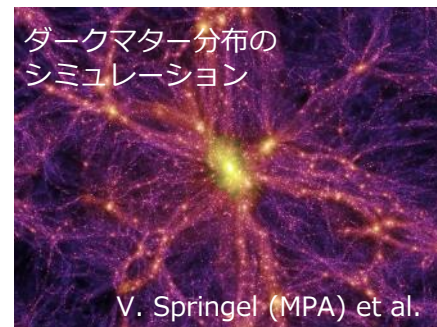


# すばる2の主たる科学目標

(マスタープラン2020重点大型施設計画認定、ロードマップ2020記載)

## 科学目標1：ダークマター・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

- 超広視野主焦点カメラHSC、超広視野多天体分光器PFSを用いてダークマターとダークエネルギーの正体を究明し、ニュートリノ質量を決定する。



## 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

- 広視野高解像赤外線観測装置 **ULTIMATE** で前人未到の超遠方宇宙探査を実現し、宇宙最初期に生まれた天体の性質とその進化過程を解き明かす。



## 科学目標3：マルチメッセンジャー天文学の展開

- 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、他望遠鏡と協力して観測し、物質の起源を探る。



## 科学目標4：地球型系外惑星候補天体の同定

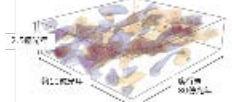
- アストロバイオロジーセンターと密接に連携しながら**IRD**を用いた地球型系外惑星の間接探査を推進し、将来のTMTを用いた直接撮影、生命探査に繋げる。



# すばる望遠鏡の科学目標ロードマップ

2013                      2018                      2021                      2022                      2026                      2031

宇宙の大規模構造の起源に迫る



HSCによる広域宇宙探査  
**成果:**  
ダークマターの広域3次元分布。  
ダークマターの正体への制限。  
宇宙論パラメーターの精密測定。

ダークマター・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

HSC、PFSによる超広域宇宙探査  
**目標:**  
ダークマターの性質解明。  
ダークエネルギーの性質解明。  
ニュートリノ質量の決定。

宇宙望遠鏡との共同宇宙探査

宇宙における天体の形成過程に迫る



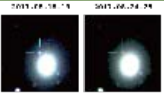
HSCによる宇宙再電離期の研究  
**成果:**  
宇宙誕生後10億年以内に、大量の天体（銀河、原始銀河団、巨大ブラックホール）を発見し、初期宇宙における天体形成の様子を解明。  
宇宙再電離の原因天体を制限。

宇宙の構造形成、銀河形成・進化の物理過程の理解

HSC、PFSによる銀河進化の研究  
**目標:**  
銀河の急成長・形態獲得・星形成の物理過程の探求。  
HSC/PFS(可視光)で見えない、ULTIMATE(赤外線)による宇宙最初期の天体形成過程の探査。

ULTIMATEによる宇宙最初期の天体探査

マルチメッセンジャー天文学を推進する

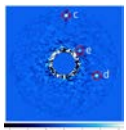


多様な観測装置による重力波源の追跡  
**成果:**  
中性子星合体の光赤外線観測から重元素合成現場を捉えた。

マルチメッセンジャー天文学の展開

多様な観測装置による重力波源、ニュートリノ源の追跡観測  
**目標:**  
多様な重力波源の追跡観測により、宇宙における元素合成の概要を解明。  
ニュートリノ源等の高エネルギー現象の原因天体を特定。

太陽系外惑星の性質を明らかにする



HiCIAOによる巨大惑星の研究      CHARISによる惑星大気の研究  
IRDによる地球型惑星探査  
**成果:**  
第2の木星の発見。  
系外惑星大気の温度と組成を決定。  
地球型系外惑星候補の軌道面を同定。

地球型系外惑星候補天体の同定

IRDによる地球型系外惑星候補天体探査  
**目標:**  
多様な地球型系外惑星候補天体を同定し、その性質を解明

惑星の形成過程に迫る

HiCIAOによる惑星系形成領域の探査  
**成果:**  
原始惑星系円盤の多様な姿を解明。

ALMAでの研究に発展

すばる2 (2022年~)

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







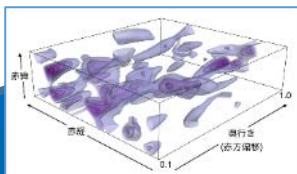
# すばる 2 計画のもたらす多様な天文学

すばる望遠鏡は国際共同利用により、天文学の広い研究領域における科学的成果を挙げ続けている。すばる2では、目玉となる超広視野観測に加えて多彩な観測装置を提供するとともに、大規模サーベイデータを活用して多様な研究を展開する。

130億光年かなたに原始銀河団を発見(播金他2019)



史上最大の暗黒物質の地図(大栗他2018)



観測的宇宙論  
暗黒物質・宇宙膨張

銀河形成・銀河進化  
初期宇宙探査

銀河進化  
近傍銀河研究  
銀河考古学



近傍銀河 NGC1068に過去の銀河合体の証拠を発見(田中他2017)

130億光年かなたに大量の超巨大ブラックホールを発見(松岡他、2019)

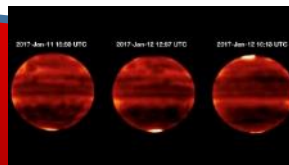


活動銀河中心核  
巨大ブラックホール

銀河系  
星間物質

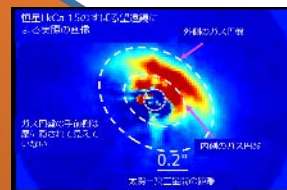


太陽系天体



オーロラによる木星大気加熱機構の解明 (Sinclair他2019)

若い恒星の周りの原始惑星系円盤の構造解明 (Currie他2019)



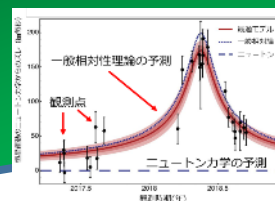
系外惑星・惑星形成

恒星・突発天体

2017.08.18-19 2017.08.24-25



中性子星がったからの光赤外線放射観測による重元素起源の解明(内海他、2017)



銀河系中心の超巨大ブラックホール近傍を周る恒星の運動観測による一般相対論の検証 (Do他、2019)



# すばる2の国際連携

すばる2は国際的な天体観測網の中で  
確固たる地位を築き、連携して科学  
研究を推進する。

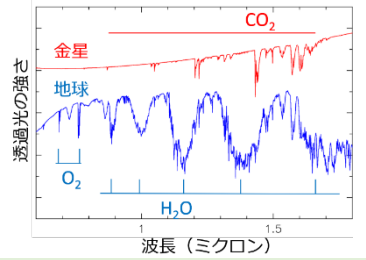
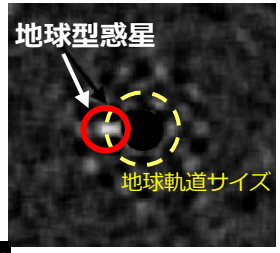


# すばる2とTMTが明らかにする宇宙の姿



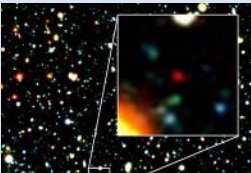
多様な地球型系外惑星候補天体を同定し、その特徴を調査

間接探査の手法で地球型惑星をもつ天体を検出



地球型系外惑星の直接検出  
惑星大気分光観測  
→ 生命の兆候探査

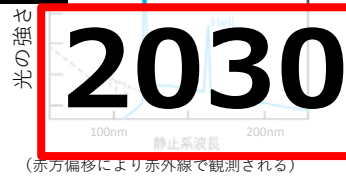
銀河の急成長期（約100億年前）の物理過程の解明。HSC/PFS（可視光）で見えない、ULTIMATE（赤外線）による宇宙最初期の天体形成過程の調査



広視野探査で初代候補を検出



初代星に予想されるスペクトル



初代星の直接検出  
時期と性質の解明

## 2020年代

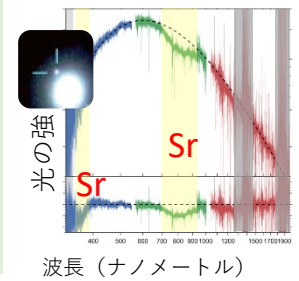
## 2030年代

多様な観測により、宇宙における元素合成の概要を把握。ニュートリノ源等の高エネルギー現象の原因天体を特定。

超広視野探査



重力波・ニュートリノ検出後の速やかな広視野探査の電磁波対応天体を検出

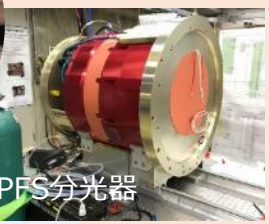
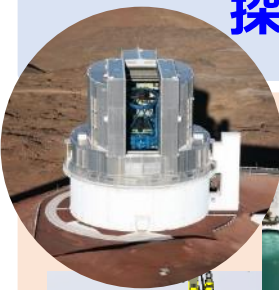


電磁波対応天体の分光観測  
→ 爆発機構・宇宙における元素合成の詳細な解明

超高感度  
高解像度

## すばる2とTMTの共通する基盤技術

- 大型光学系
- 補償光学
- 機械設計・構造解析
- 望遠鏡本体構造

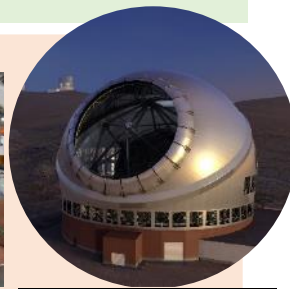
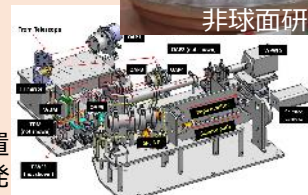


マルチレーザーによる大気トモグラフィ

ULTIMATE 可変形副鏡



TMT系外惑星装置を目指した開発





# すばる 2 を超えて

- すばる 3 は本当に要るのか？
- すばる 3 には何を期待するのか？



# すばる前夜の岡山観測所

- すばるが完成した後、岡山観測所は必要か？
  1. 国内プラットフォームとして維持
  2. 大学に移管
  3. 実験的施設として活用
- 結局どうなったか
  - 1.で凌ぎつつ（HIDESを中心として、系外惑星探査という新しい研究領域を切り拓き、ISLE、KOOLSによって多様な共同利用の需要を満たした）、3.を志向し（MITSuME、OAO-WFCなどを推進しつつ、188cm望遠鏡ではHBS、MUSCUTなどを運用）、さいごは2.（188cm望遠鏡の東工大への運用移管、せいめい望遠鏡の運用支援）に落ち着いた。
  - ただし、このすべてのプロセスにはおよそ20年を要した。つまり、成果を出している観測所の将来を大きく変えるのは簡単ではない。



# 現在のすばる

- 科学的成果は出ている。プロポーザルの競争率は高く、コミュニティの需要はなお非常に高い。
- 次世代観測装置は開発途上であり、それらの装置に対するコミュニティの期待は大変高い。
- ハワイ地元への貢献は大変大きい。
  - 多数の雇用と地元への経済貢献（RCUHで60名超の雇用、職員的生活費の地元還元、運用経費（電気、水、廃棄物など）、地元業者への各種発注など）
  - 地元の科学教育への貢献
  - 日系人社会への支援
- これらはいずれも突然停止されると、ハワイ地元コミュニティへの影響は甚大。特に、雇用については、大量の解雇者が出る。こうした事態は、すばるだけの話ではなく、ハワイにおける天文学研究活動への影響も甚大。



# すばる2のコンセプト

- すばる小委員会（SAC）からの提言
    - すばる望遠鏡はこれから広視野サーベイ観測に特化すべきである。具体的には
      - 広視野可視光撮像 → HSC
      - 広視野可視光多天体分光 → PFS
      - 広視野赤外線観測 → ULTIMATE
- の3つの機能を装備し、これらを基軸に戦略的な観測を進めることを推奨する。



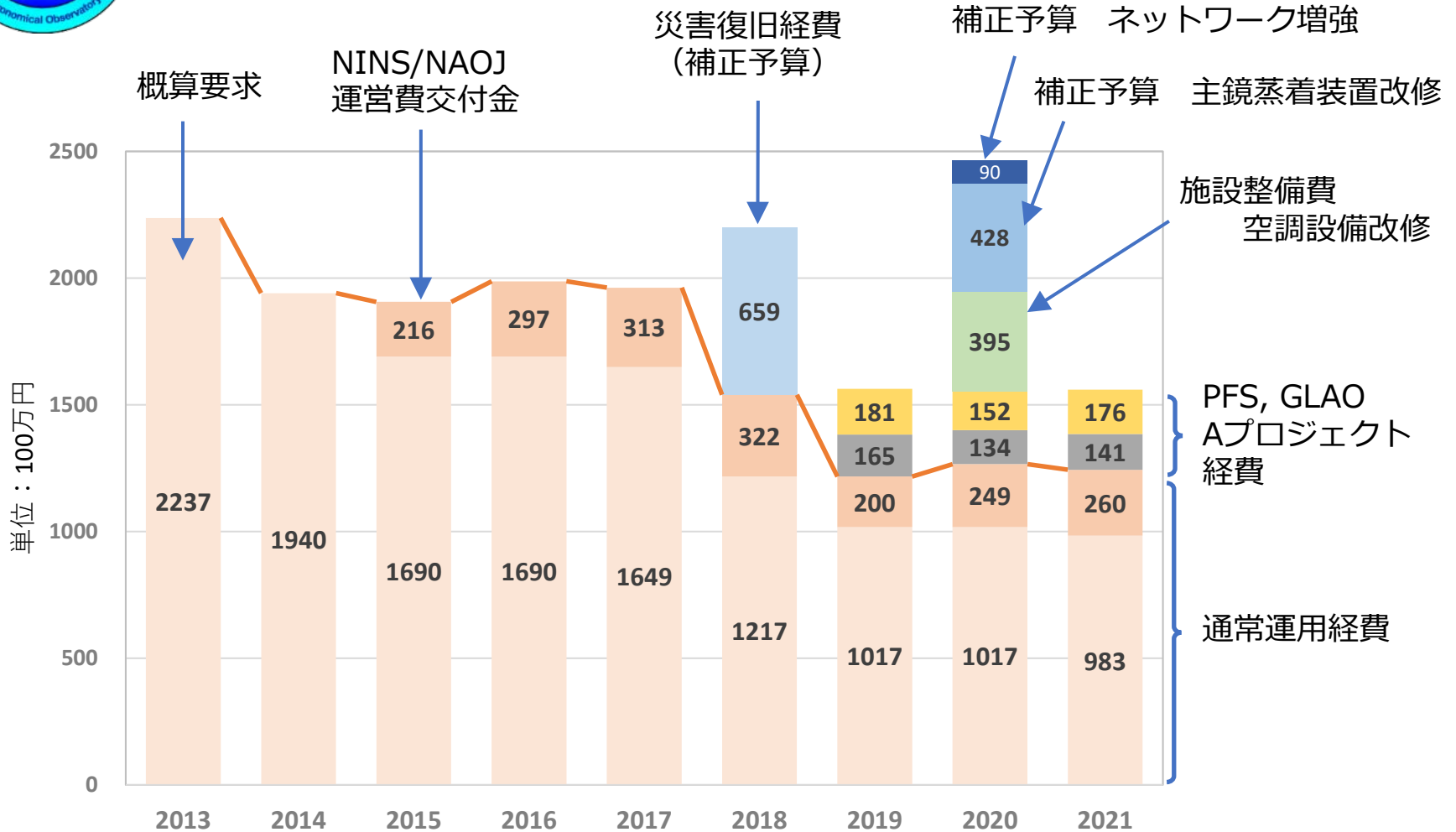
# すばるをどうするのか？

- TMT、次世代宇宙望遠鏡、などがある中で、2030年代に本当にすばるは必要なのか？
  - ただ、今のままのすばるがほしい、というのはもはや通用しない。
  - 科学的価値がなりより重要。すばるクラスになると、「これまで頑張っているんだから、これからも認めてください」は成り立たない。
  - コミュニティからの強い支援と、具体的かつ魅力ある科学戦略がないと、すばる2以降は(すばる2さえも)、いつ、運用経費がゼロと査定されてもおかしくはない。
  - いずれにせよ、運用の簡素化と運用経費の削減は必須。→フルリモート観測、ロボット観測、機能削減 = 観測装置削減





# 厳しい財政状況



もはや、概算要求（フロンティア予算）だけでは通常運用経費も不足。  
 老朽化対策費は、補正予算でしか措置されない。開発費・・・。  
 「すばる2」でのV字回復は・・・ ???

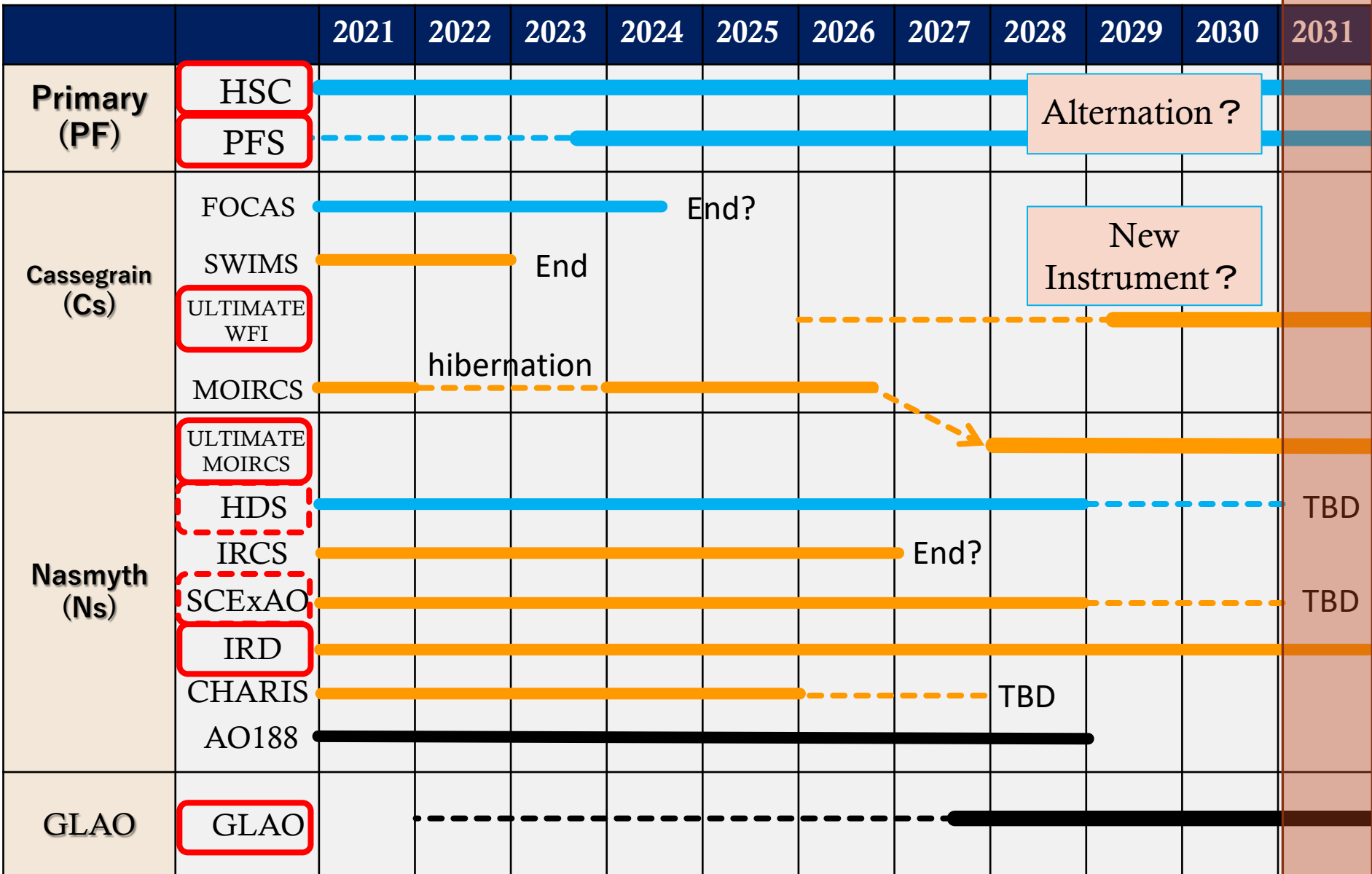
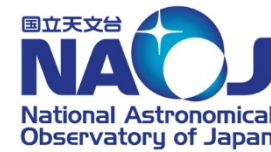


# すばる3のコンセプト

- すばる3のコンセプトは？ 広視野観測追求で大丈夫か？  
すばる2を超えるコンセプトは？
- どういった方向に向かうべきか？
  - どのような観測装置を開発するのか？
  - ULTIMATEは2032年では稼働から4年程度→脂が乗っている。  
HSC、PFSは生きている。
  - 新たな装置か、アップグレード（CMOS-HSC？、IR-HSC？、  
IFU-PFS？）か。
  - 戦略的な方向性の検討が必要。
- TMT（+GMT）との連携は当然として、それだけで2030年代をやっていけるのか？
- Rubin、宇宙望遠鏡群、MSEなどとの連携、そうした最先端装置の中での存在感をどう担保していくのか？



# Subaru Instrumentation Plan



Alternation ?

New Instrument ?

TBD

TBD

TBD



# 先達の例：CFHT

## • 特徴ある装置ラインアップ°

- **MegaPrime**, a wide 1 degree field 0.18" pixels imager → HSC
- **WIRCam**, a wide-field infrared camera (20'x20', 0.3" pixels) → ULTIMATE
- **ESPaDOnS**, an Echelle SpectroPolarimetric Device for high resolution spectroscopy and polarimetry → HDS
- **SITELLE**, an optical imaging Fourier transform spectrometer (IFTS) → ??
- **SPIRou**, a near-infrared spectropolarimeter with high radial-velocity precision → IRD



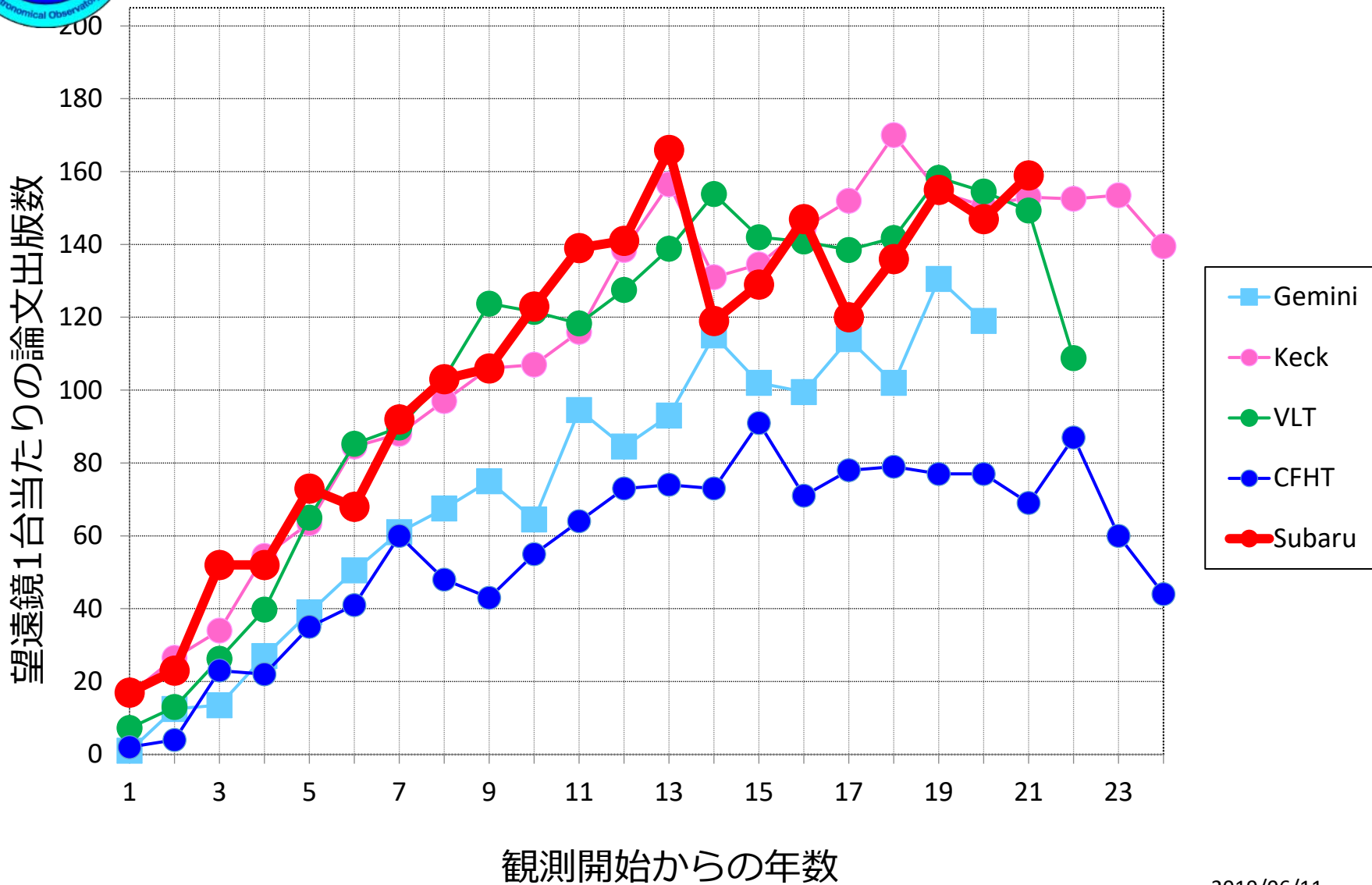
# 先達の例：CFHT

- 観測時間の集中投資：大規模プログラム
  - CFIS, the Canada-France Imaging Survey (MegaPrime) → HSC-SSP
  - VESTIGE: A Virgo Environmental Survey Tracing Ionised Gas Emission (MegaPrime)
  - SLS, the SPIRou Legacy Survey (SPIRou) → IRD-SSP
  - SIGNALS, the Star formation, Ionized Gas, and Nebular Abundances Legacy Survey (SITELE)

ある程度バラエティに富んだ装置を運用しつつ、集中的時間投資で成果を挙げている。装置ラインアップ（多様性）の確保とレガシーデータの生産のバランスが重要。



# 査読論文出版数の推移（他の天文台との比較）





# 建設後40年を超えた望遠鏡の活躍

