

TMT計画の現状と今後

国立天文台 TMTプロジェクト
2020年12月14日

1. TMT計画の概要

超大型望遠鏡 TMT計画

地球型系外惑星探査、初期宇宙史の解明、ダークエネルギーの解明などを期し、国際共同科学事業として、ハワイ島マウナケア山頂に口径30m光学赤外線望遠鏡TMTを建設する。日本は望遠鏡本体や主鏡の製作などを担当する。

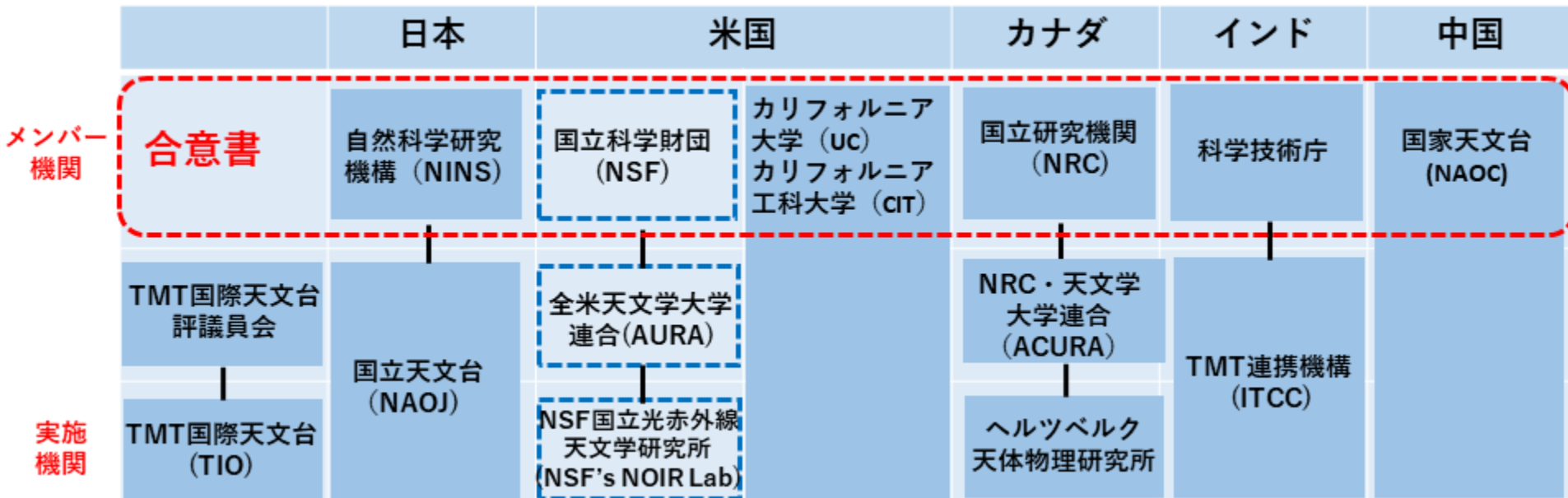
メンバー国・機関：

自然科学研究機構(日本)、
カリフォルニア工科大学、
カリフォルニア大学、
カナダ国立研究機構、
インド科学技術庁、
中国国家天文台
(今後 NSF(米国国立科学財団)が参加予定)



TMT国際協力の枠組みと TMT国際天文台

- TMT国際天文台(TIO)を2014年に米国で法人登記・設立した。TIOは建設期には建設計画全体の統括、現地工事等を担い、完成後は運用を担う。
- 各メンバー機関が任命した代表で構成されるTMT評議員会が意思決定を行う。
- 各国の実施機関は担当箇所の製作とTIOの活動、現地工事のための分担金支払いを担う。

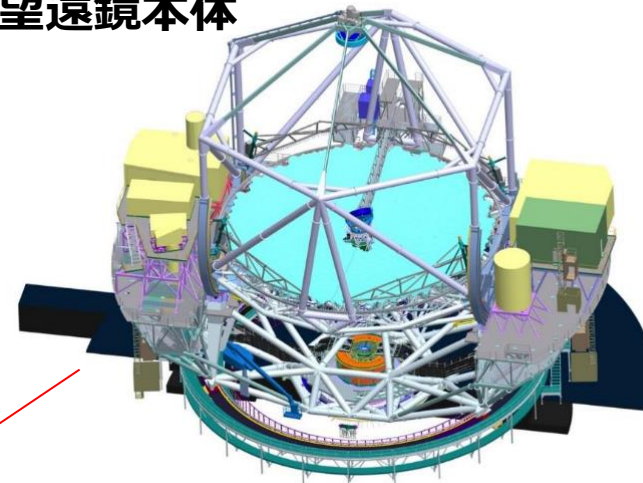


- 米NSFは2023年の正式参加を目指している。
現在はAURAが準メンバーとして参加。

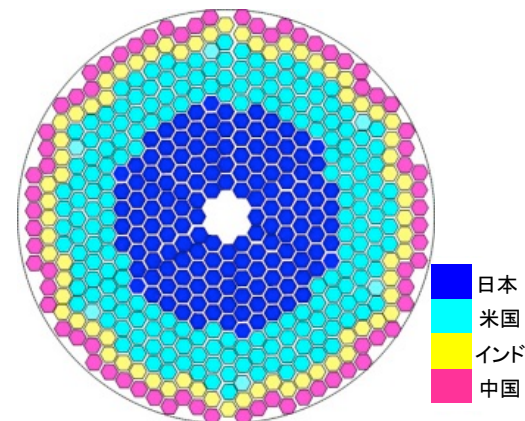
建設における役割分担： 日本は枢要部分である望遠鏡本体 と主鏡を分担

	日本	米国	カナダ	中国	インド
山頂施設	○	○	○	○	○
山麓施設	○	○	○	○	○
ドーム			○		
望遠鏡本体	○				
主鏡材	○				
主鏡研磨	○	○		○	○
主鏡支持機構					○
副鏡		○			
第三鏡				○	
鏡洗浄蒸着機構					○
主鏡制御		○			○
望遠鏡制御	○				○
補償光学システム			○		
観測装置	○	○	○	○	○
天文台運営費等	○	○	○	○	○

望遠鏡本体



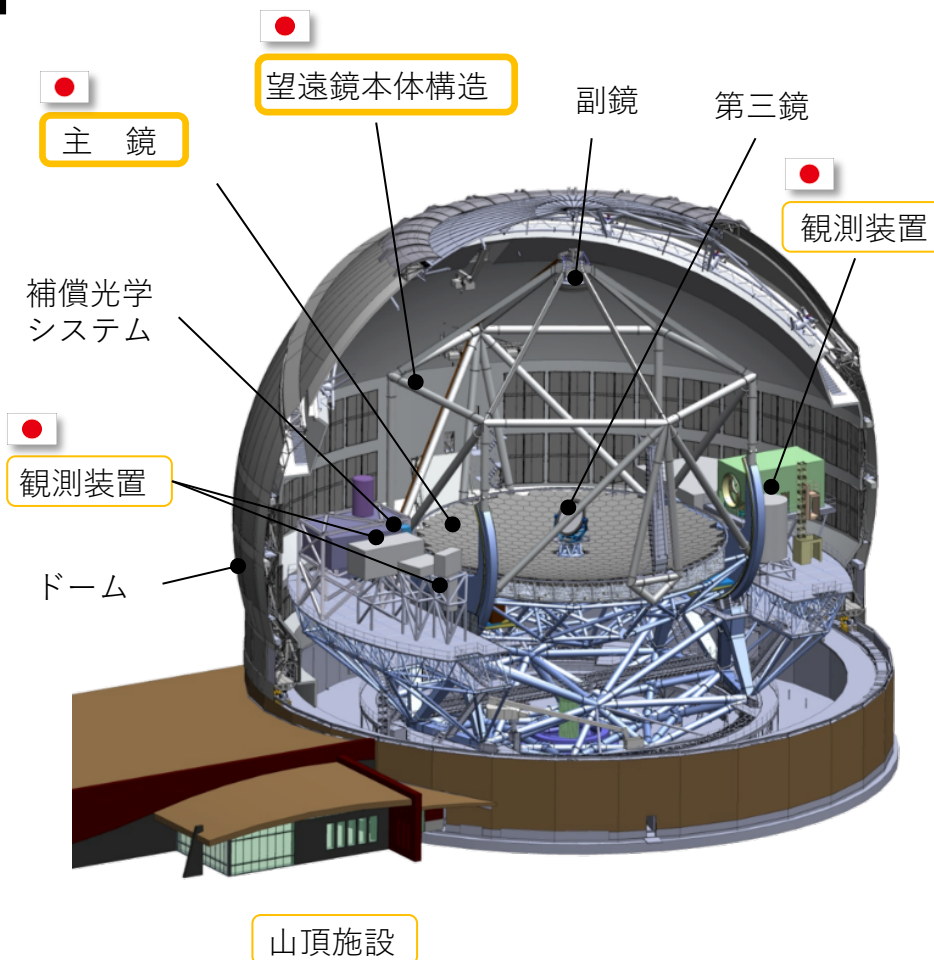
主鏡分割鏡：鏡材すべてと
175枚の研磨を分担



主鏡研磨分担:日本は中央部を分担

計画の枢要部分を日本が担当

- 望遠鏡（本体・制御系）の設計・製造・組立
- 主鏡鏡材(全574枚)の製作
- 分割鏡の約1/3(175枚)の研磨
- 観測装置：第一期観測装置の近赤外線撮像分光装置IRISの撮像部分、可視広視野多天体分光装置WFOS、多天体回折限界近赤外高分散分光器MODHISや、第二期観測装置に向けた開発も行っている。



望遠鏡本体構造の製作

- 8つの国際審査会を完了し、2018年度から製造図面作成等の製造工程に入っている。
- 計画遅延を活用し、**試作試験を実施して完成度を高め、技術的リスクの低減に成功した。**

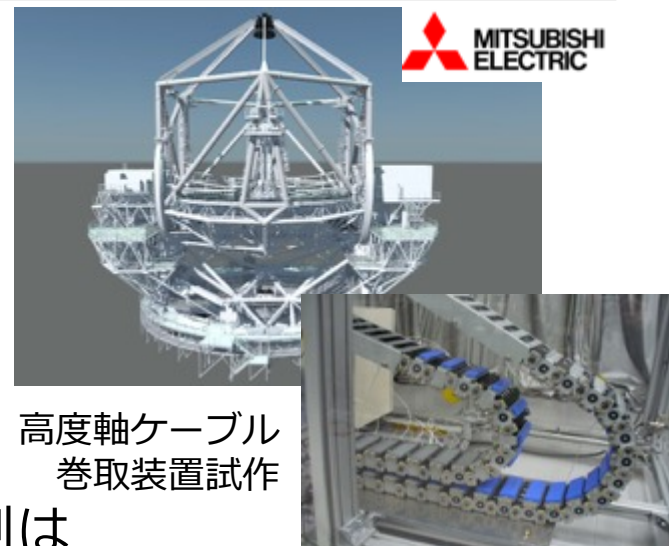
主鏡分割鏡の製作

- 全574枚中356枚の鏡材を製作し、球面研削は341枚完了した。日本分担当の研磨も順調に進めており、これまでに33枚完了している。

観測装置の製作

国立天文台先端技術センターを中心に進行中：

- IRIS：基本設計審査に合格し、詳細設計。
- WFOSは概念設計を進めている。
- 近赤外高分散分光器MODHISが第一期装置に認定。概念設計を進めている。国立天文台寺田准教授がProject Manager就任。



高度軸ケーブル
巻取装置試作



製作された主鏡材



IRISの基本設計審査

TMTの特色と目指す科学研究

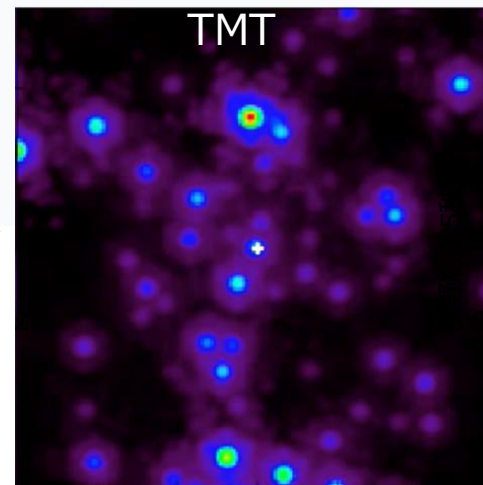
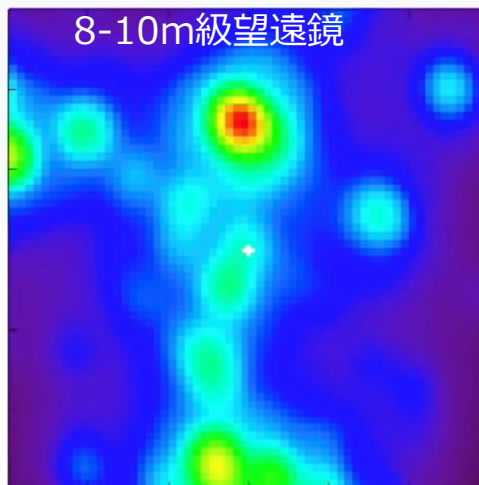
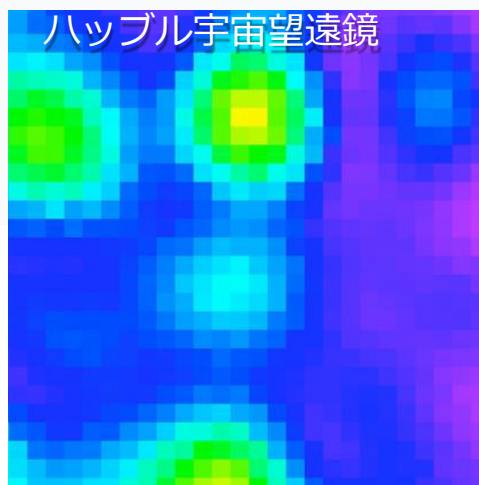
国立天文台TMTプロジェクト



従来の望遠鏡の3倍以上の解像度、10倍以上の集光力、100倍以上の感度

解像度の向上

大口径と補償光学技術によりハッブル宇宙望遠鏡の10倍、従来の地上望遠鏡の3倍以上の解像度を実現

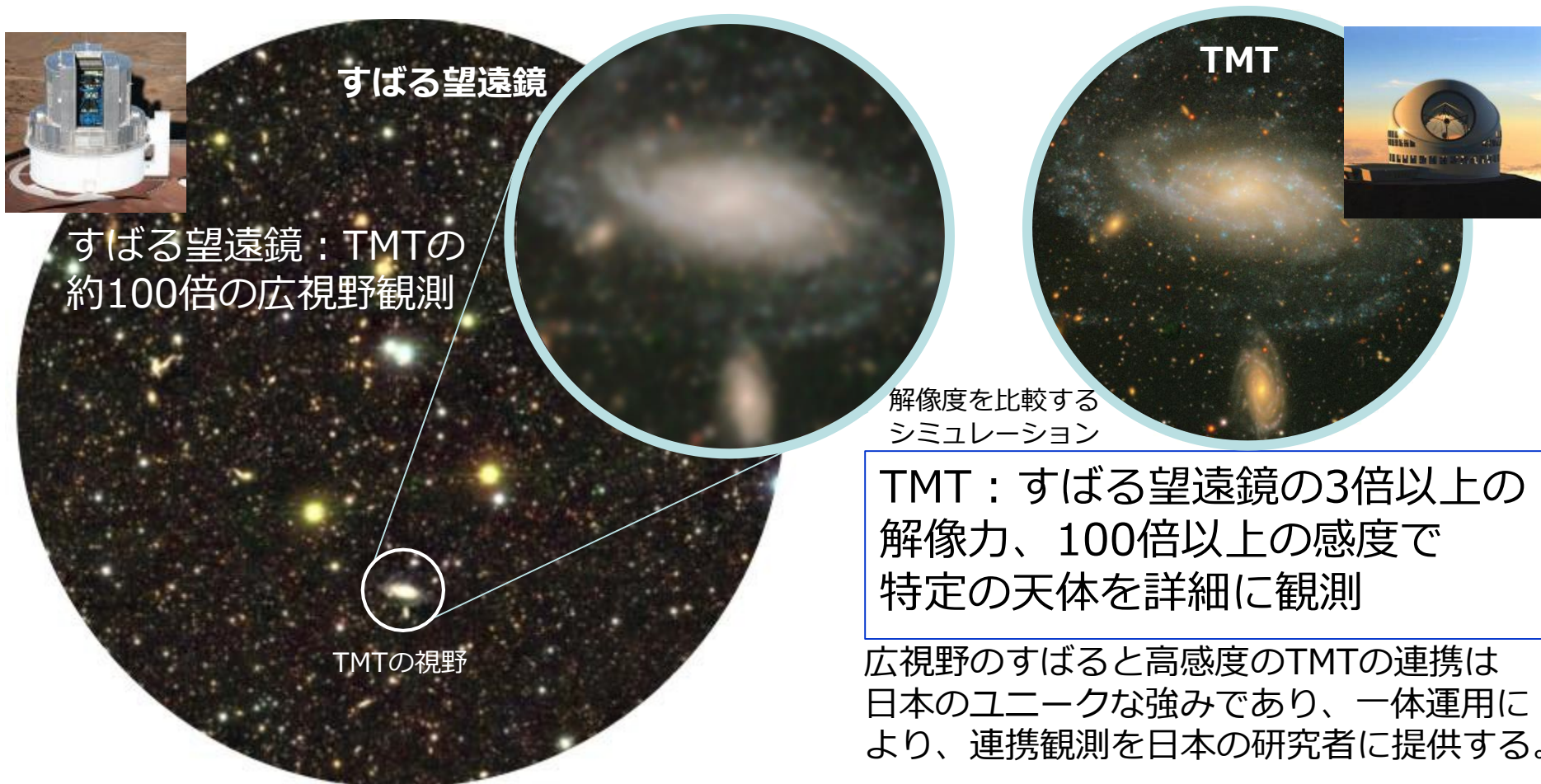


感度の向上

解像度向上により背景光の影響が抑えられる。

星や惑星、最遠方銀河のような点光源の分光観測の感度は従来の望遠鏡の100倍以上に達する。

他の8-10m望遠鏡にない広視野をもつすばる望遠鏡で天体を探査し、TMTの高解像度・高感度観測で天体を解明。



- TMT完成後にすばる望遠鏡とともに観測を行うことで大きな成果が期待できる。

すばる望遠鏡・TMTサイエンスブックを刊行（2020年3月）

- 太陽系、系外惑星、銀河、宇宙論まで、80人の執筆者により制作
- 2020～2030年代を見通し、2つの望遠鏡の組み合わせでこそ成しうる科学研究に焦点をあて、装置や運用について最新の検討結果をまとめた。

サイエンスブック「すばる望遠鏡とTMTが結ぶ新たな宇宙像」
(2020年3月発行)

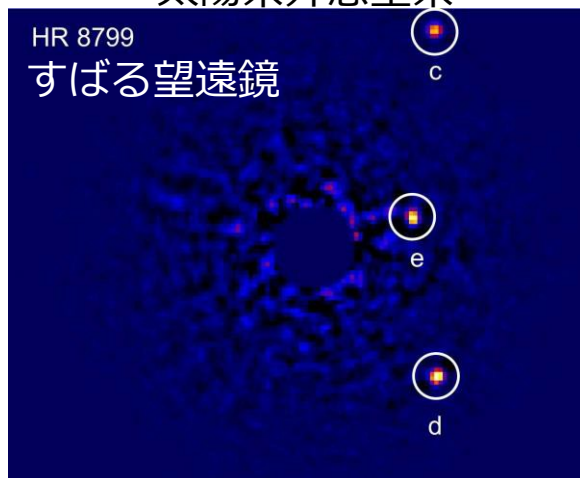
<https://tmt.nao.ac.jp/researchers/science/>



- マウナケアにTMTを建設し、すばる望遠鏡と一体的な運用を行うことで科学的成果を最大化する装置・運用計画を引き続き検討

- ① 地球型系外惑星と生命の兆候探査
- ② 宇宙最初の日体の解明
- ③ ダークエネルギーの性質の解明

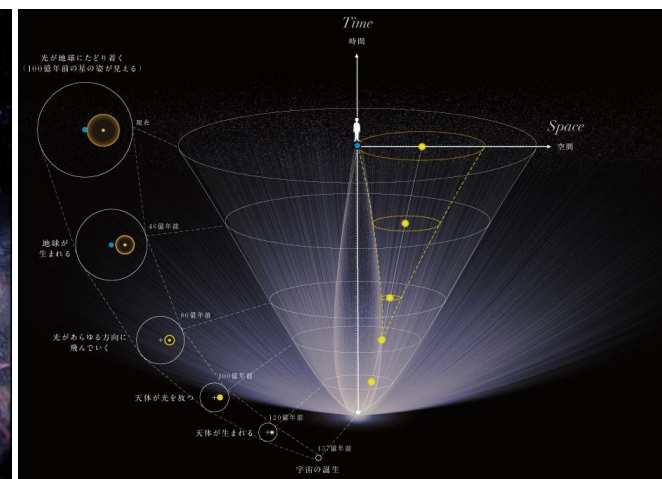
太陽系外惑星系



初代銀河の想像図



宇宙膨張の直接測定



地球型惑星を直接検出し、惑星の表面と生命の兆候を探る

通常の観測

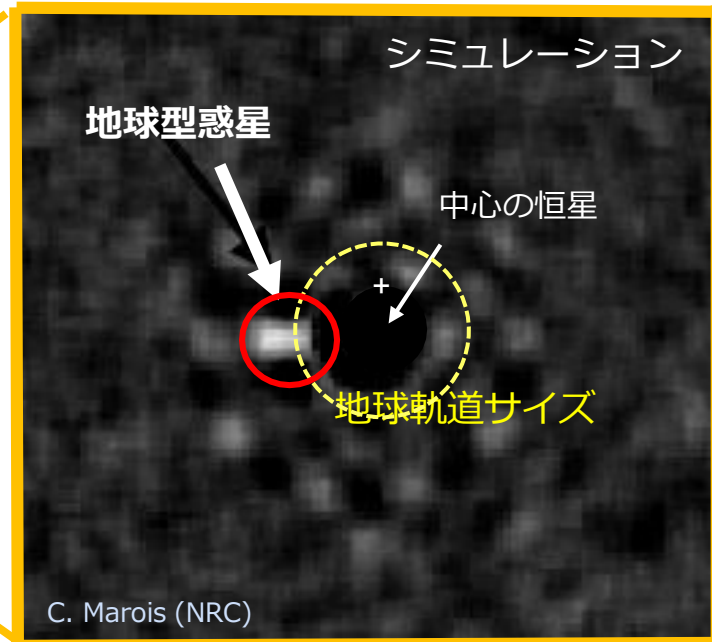
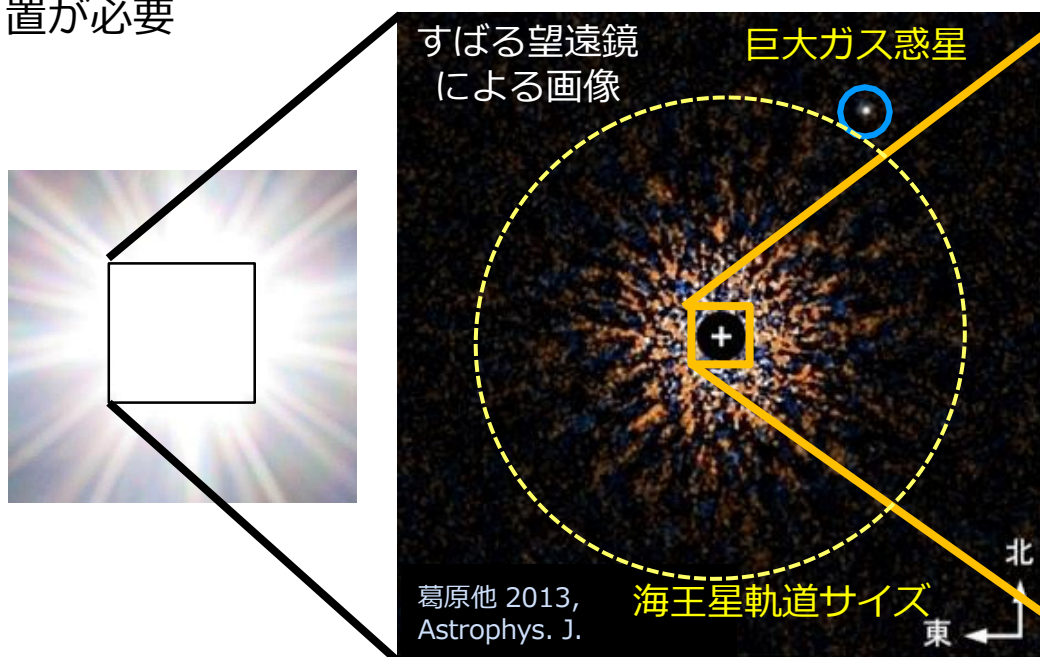
恒星の光に埋もれて
周りの暗い惑星を検
出できない→恒星を
隠すコロナグラフ装
置が必要

これまでの望遠鏡：

- ・ コロナグラフ観測により恒星
から離れた巨大ガス惑星の直
接撮影

TMT：

- ・ 高解像度撮像観測によって、地球
型系外惑星を直接検出する。
- ・ 地球型惑星の光の分析により、惑
星の表面の反射率や色を解明する

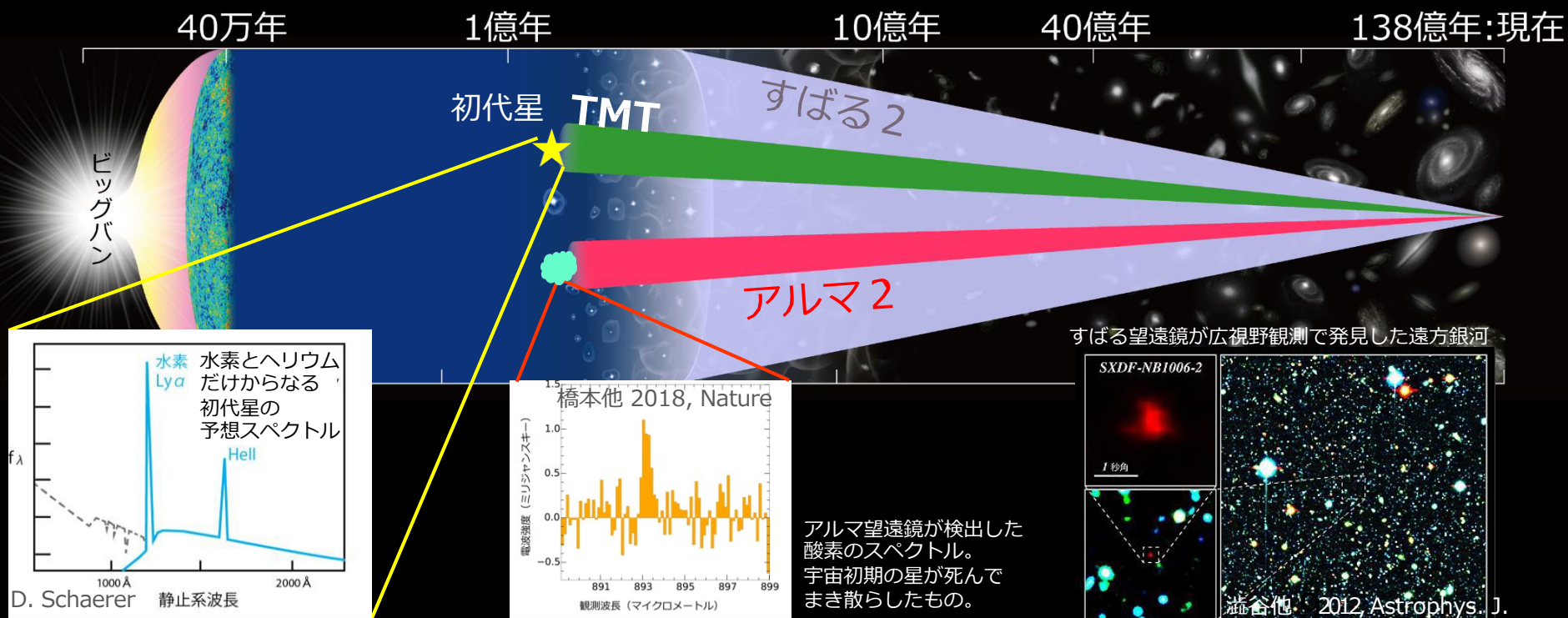


TMTの科学目標②

宇宙最初の日体の解明

ビッグバン後に最初に生まれた天体（初代星）を特定する

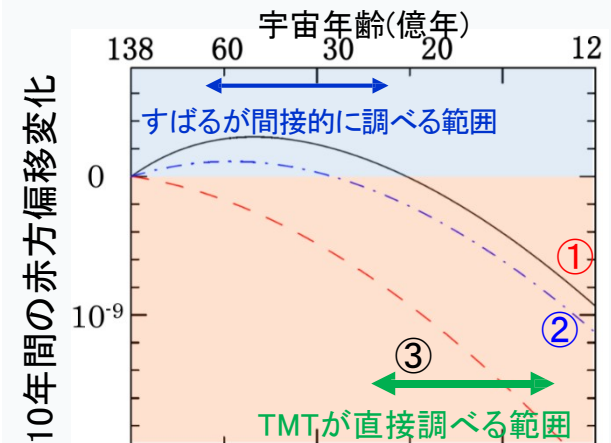
初代星はビッグバンでつくられた水素とヘリウムのみからなり、他の元素を全く含まない。TMTは初代星が放つ特有の光（ヘリウム輝線）を高感度分光観測でとらえることで初代星を特定し、その性質と宇宙全体の進化に及ぼす影響を明らかにする。



宇宙の未来と終焉はダークエネルギーの性質によって決定づけられる
— 静かに膨張を続けるか、加速膨張の果てにすべてが引きちぎられるか —

- | | |
|--|----------|
| 1927-29年 宇宙膨張の発見
ハッブル、ルメートル | 光学望遠鏡 |
| 1965年 宇宙背景放射の発見
ペンジアス、ウィルソン(1978年ノーベル賞) | 電波望遠鏡 |
| 1992年 宇宙背景放射のゆらぎ発見
マザー、スムート(2006年ノーベル賞) | 電波・宇宙望遠鏡 |
| 1998年 宇宙の加速膨張の発見
パールムッター、シュミット、
リース(2011年ノーベル賞) | 光学望遠鏡 |
| 2003年 宇宙論パラメータ精密測定 | 電波・宇宙望遠鏡 |
| 1965年～ ダークマター・ダークエネルギーを含む
標準宇宙論の確立
ピーブルス(2019年ノーベル賞) | |

**TMTは宇宙膨張の速さの
変化を、最も直接的な方法で
測定することに挑む。**



- ① 暗黒エネルギーが宇宙定数で表される場合: $\Omega_M=0.24, \Omega_\Lambda=0.76, w=-1$
- ② 暗黒エネルギーが宇宙定数からずれている場合: $\Omega_M=0.24, \Omega_\Lambda=0.76, w=-2/3$
- ③ 暗黒エネルギーのない宇宙 $\Omega_M=0.24, \Omega_\Lambda=0, w=-1$

次の課題：加速膨張を引き起こすダークエネルギーの性質を宇宙史を通じた膨張の変遷から解明する

重力波を発生させた天体からの光の初検出にすばる望遠鏡が貢献

- 重力波検出後の可視光・赤外線での追跡観測で、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が合成されるという理論と一致



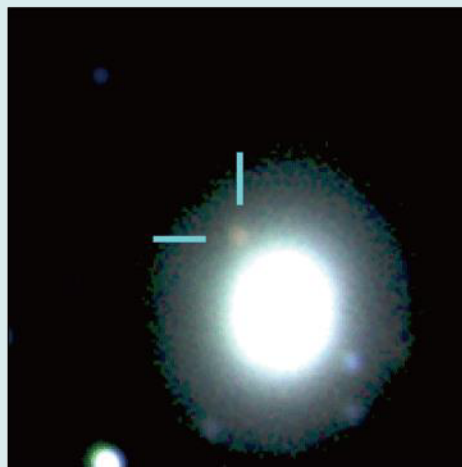
- **TMTは分光観測により中性子星合体による元素合成を解明する**

2017年の重力波天体の観測例

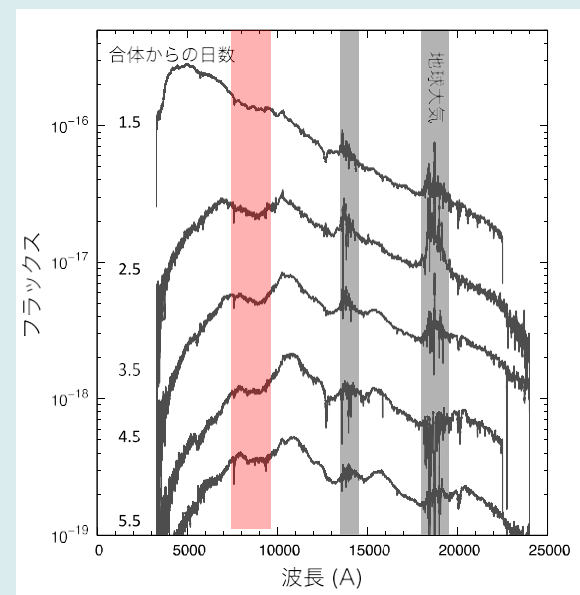
2017.08.18-19



2017.08.24-25



重元素の生成を示唆



すばる望遠鏡がとらえた、重力波源の明るさの変化。
(内海 (Stanford大)他、2017 ; 田中 (東北大)他、2018 ; 富永 (甲南大)他、2018)

ESO/VLTによる分光観測 (Pian 他2017)

2. 建設地ハワイの状況

2. ハワイの状況

- 2005年 国立天文台ELTプロジェクト室発足
- 2009年 日本がTMT計画への参加の意向表明
- 2012年 日本でのTMT計画への予算措置の開始
- 2013年 マウナケアでの建設地利用許可（CDUP）をハワイ州が承認
- 2014年 TMT国際天文台設立
- **2015年 現地工事が抗議活動を受け中断**
- 2015年 ハワイ州最高裁がCDUP無効判断（承認プロセスに問題）
- 2016年 ハワイでの建設が不可能になった場合に備えて代替建設地としてラパルマを選定
- 2017年 CDUPをハワイ州が再承認
- 2019年7月：現地工事再開を予定したが、TMT建設に反対する人々が道路を封鎖し、再開できず。マウナケア天文台群も1ヶ月程度運用を停止。

CDUP承認(2013.4.)

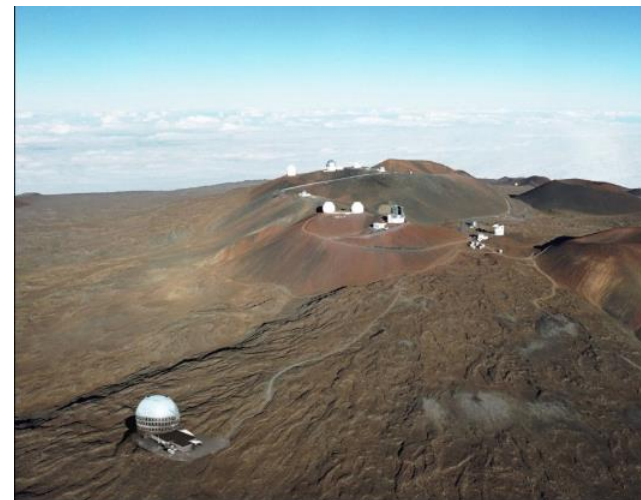


CDUP再承認にむけた公聴会(2016-17)



マウナケアでの望遠鏡建設に 必要な手続き

- マウナケア山頂域はハワイ州の科学保護地区で、ハワイ大学が州から借り受けて管理
- ハワイ州の承認は土地・天然資源委員会（BLNR）が行う
- TMT建設に向けたハワイ州の手続き
 - 環境影響評価（EIS）：
2008年9月手続き開始、2010年5月承認
 - 建設のための保全地区利用許可（CDUP）：
2010年9月申請、2013年4月承認
 - 土地の転貸借許可（サブリース）：
2014年5月申請、同年7月承認



→2014年に手続き完了、TMT国際天文台を設立・建設開始
を宣言

2. ハワイの状況

ハワイでは関係者との協議が継続的に行われている

- TMT建設に反対するグループの最高幹部らとの対話(ホ・オポノポノ)を実施。新型コロナウイルス問題で中断したが、再開の動きがある。
- 米国国立科学財団(NSF)が環境影響調査や歴史遺産保存法に関する手続きに向けて、ハワイ関係者との協議を開始。事態の打開が期待されるが、一方で新たな連邦レベルの訴訟リスクも発生すると想定される。
- TMTの地元ハワイでの信頼関係構築のため、TIOリーダーをはじめスタッフがハワイに居住し活動すること検討を開始した。また、ハワイコミュニティとの連携の戦略立案と遂行に責任を持つTIO担当者を現地で雇用する。現在、人選中。



2019年7月10日 イゲ ハワイ州知事 (中央)
ヤン TMT国際天文台 評議員会議長 (右)



マウナケアへの道路入り口付近の様子
(2019年7月)



2019年12月28日以降 通行で
できるようになったマウナケア
アクセスロード

2. ハワイの状況

望遠鏡建設に対する反対の理由は？

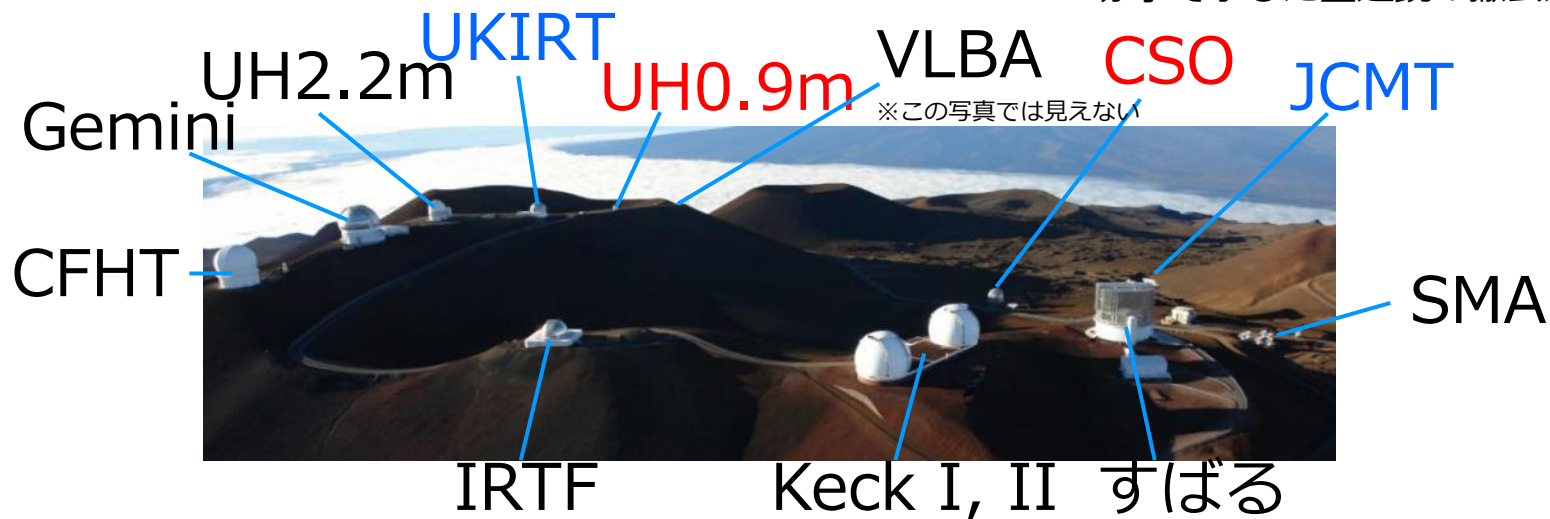
- 望遠鏡台数が多すぎる

- 台数制限があいまい
- 古い望遠鏡撤去がなかなか進まない

- 土地使用料

- これまで事実上なし。ハワイ大学に望遠鏡時間を提供
- TMTは土地の管理経費や教育などへの地元への資金提供を行っている

赤字で示した望遠鏡の撤去が決定



2. ハワイの状況

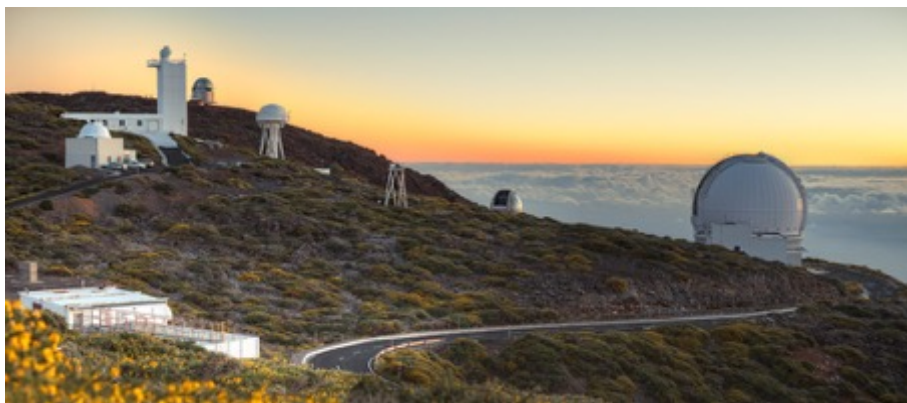
- ハワイ大学ヒロ校の教育用望遠鏡Hoku Kea をハレポハク（マウナケア中腹：標高約2800m）へ移設する計画が進められている。



3. ラパルマの状況

3. 代替建設地 ラパルマ

- 2016年から代替建設地を検討。日本国内でもタウンミーティング等で議論し、2016年TMT推進小委員会(現科学諮問委員会)で複数候補地の中からラパルマを代替建設地として推すことを承認。
- TMT国際天文台(TIO)はラパルマでの建設可能性の調査を続け、2019年11月に建設許可が得られた。
- **建設地変更はTIOメンバーの全会一致が必要。**
- 環境保護団体による反対運動、訴訟のリスクがあり、注視している。



Observatorio del Roque de los Muchachos
Instituto de Astrofisica de Canarias

標高: 約2300m (マウナケア: 約4050m)



3. 代替建設地 ラパルマ

- マウナケアでの建設が進められない場合に備えて、ラパルマの代替建設地としての成立性について以下の検討を進めた。
 - 国立天文台内でラパルマの観測サイトとしての性能評価を行うチームを結成し、TIOや現地観測所が取得したデータを独自に解析するなどして分析を行い、標高の低さからマウナケアよりもやや劣る部分はあるものの、TMTの目指すサイエンスを十分遂行できるサイトであると結論した。
 - ラパルマに建設地を変更した場合の科学研究への影響についてTMT科学諮問委員会で検討し文書にまとめた。これらの検討結果について2020年5月に研究者コミュニティへの説明会を開催した。
- 土地利用許可・建設許可は取得済みで、法的に工事を開始できる状態にある。環境保護団体の訴訟があるが、対応しており相対的にリスクは小さい。

ハワイでの建設が不可能と判明した場合、TMTに対する米国連邦政府予算措置の目処が立てば、代替建設地として選定されているカナリア諸島ラパルマへ移行することとする（2020年1月6日台長年頭感）

3. 代替建設地 ラパルマ

- 国立天文台TMT科学諮問委員会（コミュニティの代表である台外委員を含む）による答申要旨
 - 初期観測装置で推進される可視光・近赤外線での観測ではサイトの違いの影響は小さく、装置仕様等によって、競合する他の超大型望遠鏡や宇宙望遠鏡とも差別化ができる。
 - 北半球にあるすばる望遠鏡とTMTの科学的な連携は、ラパルマでも問題なく可能。

ラパルマに建設地を変更した場合でも、TMTが掲げる科学目標は十分に達成可能であり、高い競争力を持つことができることを確認された。

4. 米国NSF参加に向けた現状

4. 米国NSFの参加

- TMT建設に必要な予算を確保するためにはNSFの参加が欠かせない。
- 北半球のTMT、南半球のGMT合同のUS Extremely Large Telescope Programとして提案
- 2021年初頭のDecadal Surveyの結果で地上大型計画として一位を獲得し、米国の天文学コミュニティにおける強い支持を明確に示すことが前提と考えられている
- NSF MREFC提案 (2020年) → NSFでの審査・承認 (2021-22年) → 予算案提出 → 米国議会での承認 (2023年)
- 2020年5月28日、TIOは**NSF MREFCの設計段階提案を提出**した。建設地はマウナケアとし、代替建設地としてラパルマが記載されている。

※ MREFC: Major Research Equipment and Facilities Construction



NSFは通常、資金要請のための提案書を受理した際、プライバシー保護法上の制約から提出機関や関連する詳細を明らかにすることはできません。しかしながら、TMT国際天文台（TIO）執行部がTMTの計画設計提案書をNSFに提出したことを公表したことから、NSFとして、その提案書を受理したことを正式に発表することができます。

NSFは、マウナケアにTMTを建設する可能性がある計画には配慮を要すると理解しており、ハワイ先住民をはじめとする関係者の意見に耳を傾け、理解するために、早期の段階から非公式に話し合いを行う予定です。この事前の取組みは、NSFが正式に米国政府としての環境影響評価プロセスを開始する前段階の活動になる見込みです。

NSFによる提案書の受理や非公式な会合への着手は、いずれかの計画へのNSFの見解を示すものではありません。マウナケアやTMT計画にNSFが参入する可能性について、NSFとの意見交換を希望する場合、AST-MK@nsf.govまでお問い合わせください。

米国下院歳出委員会報告

2020年7月9日

(1) Decadal Survey (Astro2020)について

- NSFの資金提供により、国立光学赤外線天文学研究所 (NSF's NOIR Lab)、国立電波天文台(NRAO)等を通じて、米国の天文学研究が進められている。NSFは既存天文施設のサポートを継続するべきである。
- 議会はAstro2020の結果を待っている段階であるが、歳出委員会としては、次世代の超大型アレイや超大型望遠鏡等、優先度の高い新規施設に対する準備段階の投資を改めて支持し、来年度NSFがこれらの計画への資金提供を継続することを推奨する。

116TH CONGRESS 2d Session	[FULL COMMITTEE PRINT] HOUSE OF REPRESENTATIVES	REPORT 116-XXX
COMMERCE, JUSTICE, SCIENCE, AND RELATED AGENCIES APPROPRIATIONS BILL, 2021		
JULY, 2020.—Committed to the Committee of the Whole House on the State of the Union and ordered to be printed		
Mr. SERRANO, from the Committee on Appropriations, submitted the following		
R E P O R T		
together with		
MINORITY VIEWS		
(To accompany H.R. ____)		
The Committee on Appropriations submits the following report in explanation of the accompanying bill making appropriations for Commerce, Justice, Science, and Related Agencies for the fiscal year ending September 30, 2021, and for other purposes.		
INDEX TO BILL AND REPORT		
Title I—Department of Commerce	Page number	Report
Title II—Department of Justice	2	12
Title III—Science	24	54
Office of Science and Technology Policy	84	114
National Space Council	84	115
National Aeronautics and Space Administration	85	115
National Science Foundation	95	129
Title IV—Related Agencies	99	137
Commission on Civil Rights	99	137
Equal Employment Opportunity Commission	100	137
International Trade Commission	101	138
Legal Services Corporation	101	138
Marine Mammal Commission	103	139
Office of the United States Trade Representative	103	139
State Justice Institute	104	140
Title V—General Provisions	105	140
308-847		

(2) MREFC 予算について (Major Research Equipment and Facilities Construction)

- 地上望遠鏡等の次世代の競争力のある大規模施設の建設と開発について、NSFが計画立案に失敗すると、米国の科学コミュニティに障害が発生し、米国の科学における世界的なリーダーシップが危機的な状況になることを歳出委員会は懸念している。そのため、NSFが包括的かつ優先度のついた大規模施設のリストを作成することを奨励する。

5. TMTプロジェクトの広報・普及活動

社会からの注目と計画への理解を求める取り組み

TMT計画は人類の宇宙の理解を推し進めるプロジェクトとして引き続き期待を受けるとともに、地域社会や文化との共存・融合を考える機会としても注目されている。国立天文台TMTプロジェクトは、小中学校や科学館等での講演・授業に積極的に取り組むとともに、ハワイでの建設に問題意識をもつ方との対話にも努めている。

国内においてもハワイ文化と科学の共存に向けて取り組む



国立天文台公開日における、マウナケアの自然・文化と天文学を考える展示説明での市民との対話

ハワイ文化に関心をもつ市民との対話イベントに参加し発信



2019年度も11都府県の学校・科学館等で50件の講演を実施

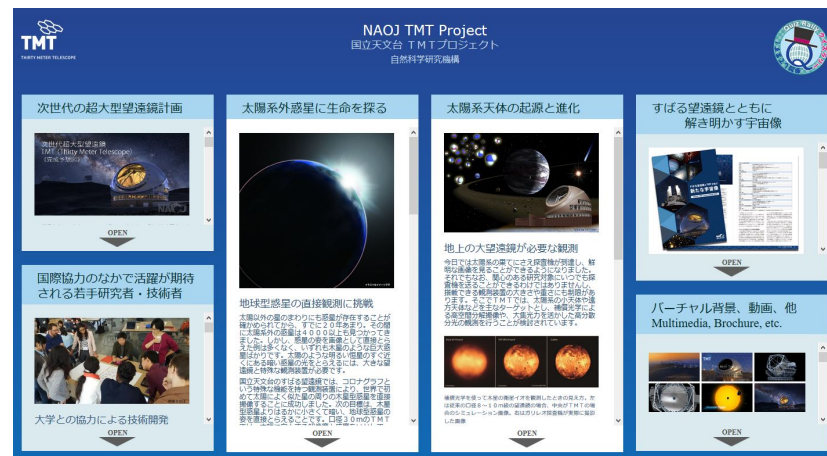


5. 広報・普及活動

- ウェブやニュースレターでの広報活動は継続し、計画の進捗を報告。
- 日本国内でマウナケアでのTMT建設に懸念を示すグループとの対話や、ハワイ文化と天文学の共存への取組みの広報活動も行ってきた。
- コロナ禍により、3月以降はイベントの中止が相次ぎ、普及活動は停滞

日本地球惑星科学連合大会はオンライン開催となり、ポスター展示(iposter)に出展

- コロナ禍が長期化するなか、新たな普及活動を構築中



- TMT応援団ClubTMTと協力し、科学館やプラネタリウム関係者むけのオンライン講演を企画。今後の協力を協議中。
- 国立天文台「ふれあい天文学」をはじめ遠隔授業による出前授業を準備中。

オンライン化の進行により、カリフォルニアやハワイから国内向けの講演・授業の機会が増えることも活用を検討中。

- 今後の日本の天文学にとって、30m級望遠鏡へのアクセスを確保することは必須との認識のもと、TMT計画を実現するための最大限の努力を行う。
- マウナケアでのTMT建設を目指して取組みを続ける。現地工事再開に向けた見通しを得て、日本国内での開発・製造を着実に進めることができる体制や必要な予算確保に努める。
- ただし、新型コロナウイルスによる影響は大きく多岐に渡り、計画の不定性が増えている。マウナケアでの建設がいつ再開できるか、見通しが未だ十分には得られていない状況をふまえ、今後のTIO評議員会・メンバー会議で、慎重な議論と判断が必要であると考えている。
- TIOは、NSFへの予算要求に必要なプロセスの期間中に、建設地を含め、計画を確定させる必要がある。
- 国立天文台としては、ハワイでの建設が不可能と判断され、ラパルマの場合でも米国連邦予算措置の目処が立てば、ラパルマへの建設地変更に対応する。その場合、関係機関等による審議・承認が改めて必要となる。