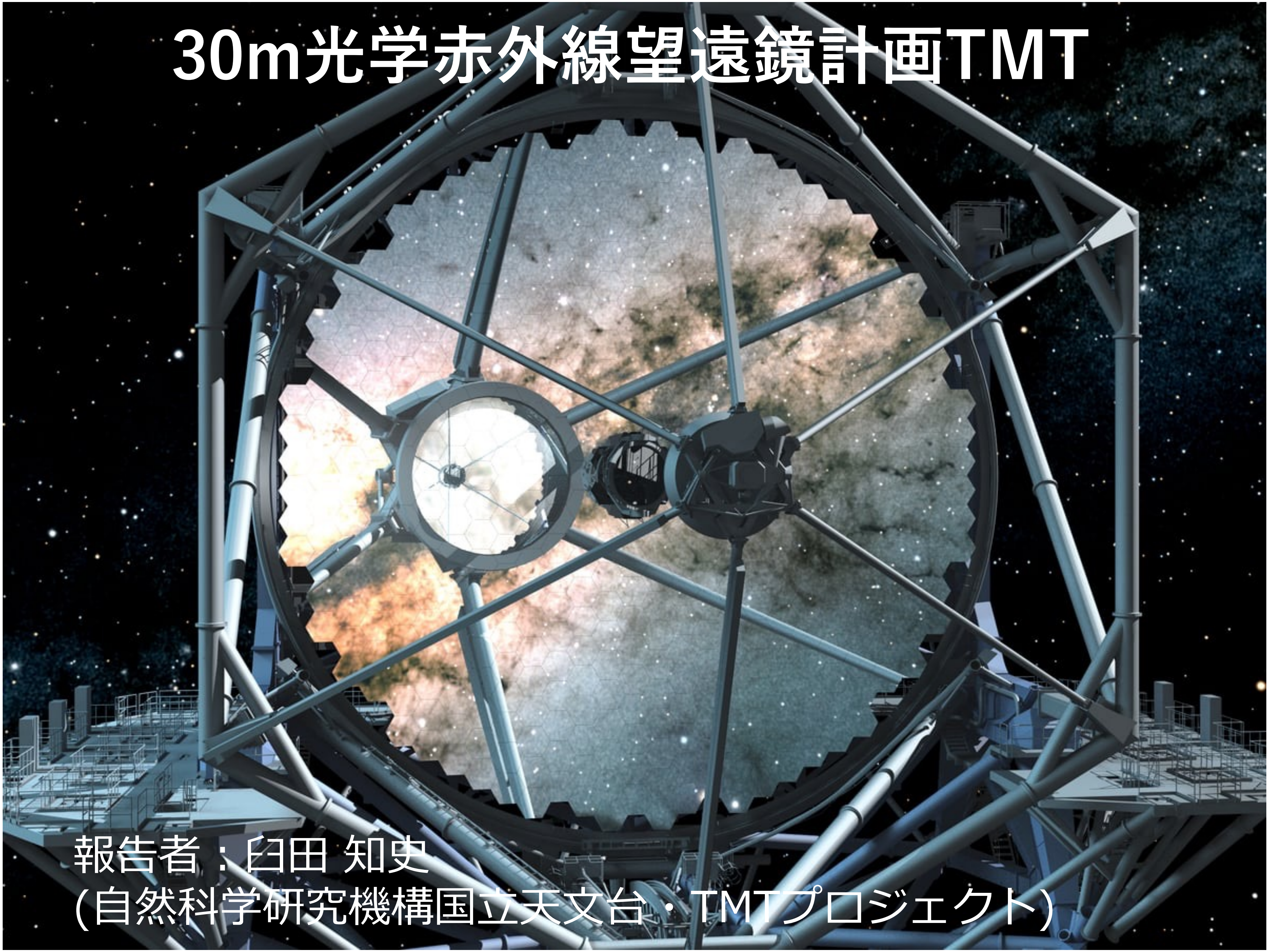
30m光学赤外線望遠鏡計画TMT



報告者：臼田 知史
(自然科学研究機構国立天文台・TMTプロジェクト)

光赤天連をはじめとする研究者の広範な支持を受けた計画の推進

北半球における次世代超大型望遠鏡の必要性は光赤外線天文学コミュニティの総意として繰り返し表明されてきた。すばる望遠鏡を用いた研究分野の広がりを受け、惑星科学や宇宙物理学等の分野でもTMTは次期大型計画として認知されている。

- 2006年11月：光赤外線天文連絡会（光赤天連）提言「地上30m級光学赤外線望遠鏡計画の推進について」
- 2016年：建設地ハワイの状況説明と代替建設候補地についての合意形成（光赤天連等）
- 2018年10月：光赤天連声明「日本が建設に参加しているTMTがハワイに建設されることを強く支持する」
- 2018年12月：光赤天連からマスタープラン2020に向けて「総合評価S」として推薦（マスタープラン2020については、p8で後述）

コミュニティの支持のもと、TMT計画は以下のように評価され、推進されてきた。

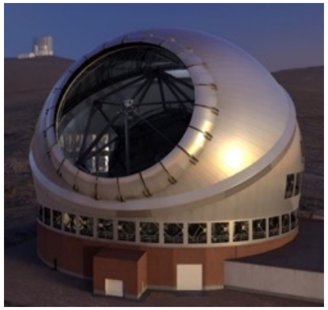
- 学術会議マスタープラン2011で学術の大型施設計画と位置付けられ、マスタープラン2014・2017では区分II（現在実施中の計画）とされた。
- 科学技術・学術審議会 学術分科会 研究環境基盤部会 学術研究の大型プロジェクトに関する作業部会によるロードマップ2012では「基本的な要件が満たされており、一定の優先度が認められる計画」と評価され、2013年度から「大規模学術フロンティア促進事業」に位置付けられ、建設予算を措置されてきた。ロードマップ2014・2017には「これまでのロードマップに記載され、財源が確保されて推進中の計画」として掲載された。

国立天文台ではTMTプロジェクト、先端技術センターを中心に、TMT計画を推進してきた。

30m光学赤外線望遠鏡(TMT)計画の概要

日本、米国、カナダ、インド、中国の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、観測装置の製作などを担当する。

従来の地上大型望遠鏡に対し、**10倍以上の集光力**、**3倍以上の解像度**、星のような点光源に対しては**100倍以上の感度向上**を達成する。



- 計画期間：2014年度～2032年度
- 大規模学術フロンティア促進事業
- 建設費総額：約26億ドル（2600億円）
  (日本の建設費 375億円+国内経費 40億円)

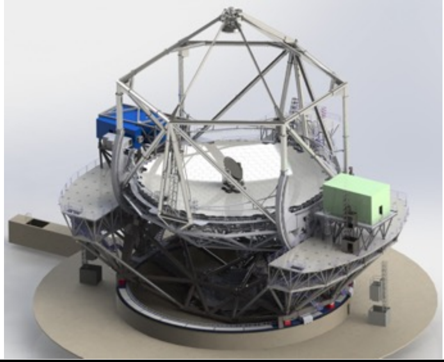
注）総建設費は2020年NSFへの設計段階提案時の値。フロンティア事業の計画上は18億ドル(約1,800億円)。現時点での総建設費は検討中。一部ドル建てのため為替レートによって変動がある。

主要科学目標

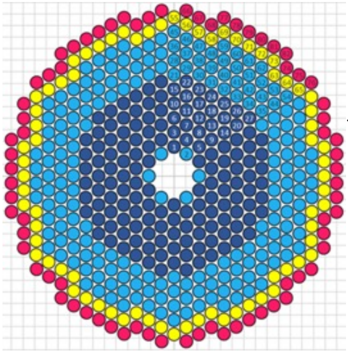
1) **地球型系外惑星の直接検出と生命の兆候探査**
2) **宇宙最初の天体の解明**
3) **ダークエネルギーの性質の解明**
4) **マルチメッセンジャー天文学の発展**

日本が製作を担当する部位

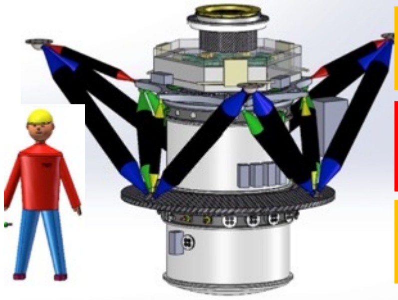
望遠鏡本体



主鏡分割鏡



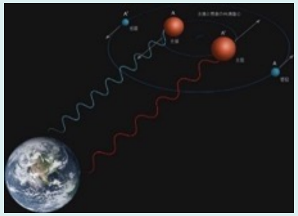
観測装置



すばる２とTMTが明らかにする宇宙の姿

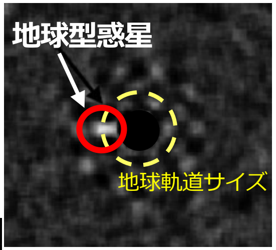
THIRTY METER TELESCOPE

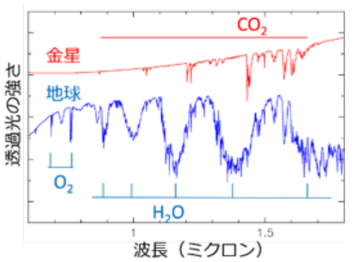
National Astronomical Observatory of Japan



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

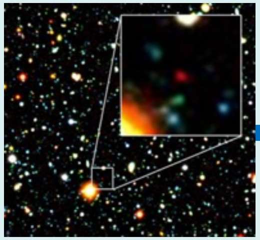
間接探査の手法で地球型惑星をもつ天体を検出



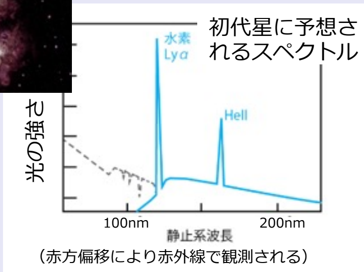


地球型系外惑星の直接検出
惑星大気の分光観測
→生命の兆候探査

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。



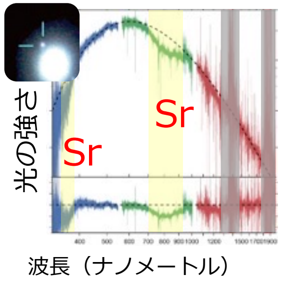
広視野探査で初代銀河候補を検出



初代星からの光の直接検出
→初代星の形成時期と性質の解明

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。

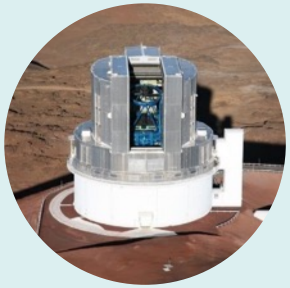
重力波・ニュートリノ検出後の速やかな広視野探査の電磁波対応天体を検出



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

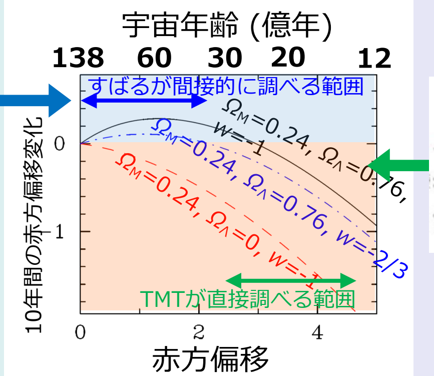
超広視野探査

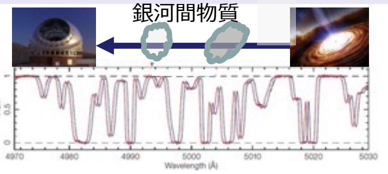
超高感度 高解像度



すばる2

ダークマターの正体解明。
ダークエネルギーの調査。
ニュートリノ質量の決定。





宇宙の膨張の直接測定
→全く新しい手法でのダークエネルギーの性質の解明

TMT

TMT THIRTY METER TELESCOPE

国際協力による着実な計画の進捗

国立天文台 NAOJ National Astronomical Observatory of Japan

- TMT国際天文台(TIO)の強固な国際連携体制の下で計画を推進している。TMTは、**すばる望遠鏡の実績を持つ日本、世界初の分割鏡大型望遠鏡を実現したカルテク・UC、大型ドームの実績を持つカナダが技術面をリード**している。
- 米国国立科学財団(NSF)の参加にむけ、米国のUS-ELTプログラム設計段階提案書を提出済み。2021年度の基本設計審査(PDR)に向けて準備中。
- E-ELTと定期的に技術会議を行っており、ESOには未だ実績が無い大型分割鏡の実現にも協力している。すなわち、**TMTは実績に裏付けされた高い実現性を有している**。
- **各国での設計・製作を進めている。**
  - 日本:
    - 望遠鏡本体構造: 8つの国際審査会を完了し、2018年度から製造工程に入っており、製造リスク低減などの準備を進めている。
    - 主鏡分割鏡: 300枚以上の鏡材製造、250枚以上の非球面研削、30枚以上の非球面研磨を完了。量産工程高速化等を検討中。
    - 観測装置: IRISは、TIOによる基本設計審査に合格し、詳細設計を進めている。
  - 米国: 主鏡分割鏡制御系の試作による実証、分割鏡の非球面研磨を開始
  - カナダ: 補償光学システム、ドームの詳細設計完了、製造準備中
  - インド: 制御ソフトウェア設計、主鏡支持機構の試作
  - 中国: 第３鏡の試作・設計、観測装置冷却システムの試作・設計

望遠鏡本体構造の審査経過

2013年11月	望遠鏡本体構造PDR	合格
2014年4月	望遠鏡制御系PDR	合格
2014年11月	主鏡セグメント鏡交換システム(SHS)PDR	合格
2015年2月	望遠鏡本体構造FDR (FDR-P1)	完了
2015年7月	望遠鏡制御系FDR (FDR-P2)	完了
2015年10月	長納期品の材料調達開始にむけた審査（LPR）	合格
2016年2月	FDR-P2の残り課題の審査（Delta FDR-P2）	完了
2016年12月	SHS等FDR (FDR-P3)	完了
2019年11月	FDR課題確認審査 (FDRC)	合格
2020年3月	第1回製造前審査 (Az部、EL部の一部)	合格

研究者の広範な支持（コミュニティの合意と研究分野の広がり）

計画の現状と今後についても説明と意見交換を重ねている。

2018年10月　光赤天連声明「日本が建設に参加しているTMTがハワイに建設されることを強く支持する」
2019年 9月　計画の現状についての日本天文学会年会会場での説明会
2020年 3月　すばる望遠鏡ユーザー向けの説明会（オンライン会議）
2020年 5月　TMTコミュニティ向け説明会 （オンライン会議）
2020年 9月~2021年 3月 光赤外線・電波・太陽・理論・高エネ等の天文学コミュニティや日本天文学会等での説明
2021年 6月　TMTコミュニティ向け説明会および装置開発・科学運用検討会(オンライン会議)

すばる望遠鏡・TMTサイエンスブックを刊行（2020年3月）

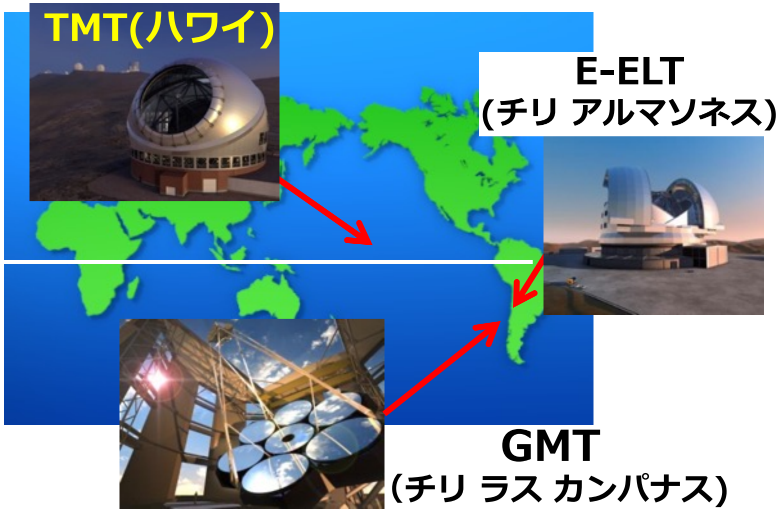
- 太陽系、系外惑星、銀河、宇宙論まで、80人の執筆者により制作。
- 2020～2030年代を見通し、２つの望遠鏡の組み合わせでこそ成しうる科学研究に焦点をあて、装置や運用について最新の検討結果をまとめた。

すばる望遠鏡のコミュニティの広がりを継承し、新たな研究分野の創成を図る。

緊急性

なぜ、マスタープラン2023に採択される必要があるのか？

- たとえTMTの完成がE-ELTやGMTに対しやや遅れたとしても、技術的優位性、および建設地マウナケアでの**補償光学性能**や**赤外線観測の優位性**から、TMTは**最高性能の地上望遠鏡**として、他の超大型望遠鏡を凌駕する科学的成果をあげることができる。よって、**他の超大型望遠鏡に大きく遅れず**に完成し運用を開始することが国際競争の上で極めて重要である。
- 米国NSFによるUS-ELTプログラムの設計審査（最終設計審査は2023年の予定）では、日本をはじめ参加各国の状況も審査される。
- 現在のスケジュールでは、望遠鏡本体の本格的な製造は2024年度からであり、それに合わせるためには、日本国内において**TMT計画がマスタープラン2023に採択され、再びフロンティア促進事業として適切に予算措置されることが不可欠である**。米国での予算措置のスケジュールもこれに同期している。



主要観測サイト指標の比較

	マウナケア	アルマソネス
標高 (m)	4050	3064
星像の大きさ (秒角、中央値)	0.50	0.50
地球大気の安定性	非常に安定	安定
赤外線観測に適した時間の割合	約50%	約20%
快晴の夜間時間の割合	約70%	約85%

TMT計画の現状

- 日本では、2013年度から大規模学術フロンティア促進事業として建設予算が措置され、TMT枢要部分の設計・開発・製造を着実に進めてきた。
- 米国では、2015年4月および2019年7月に、ハワイで現地工事が開始できなかった。また、米国NSFの正式参加も当初予定より遅れている。
- 2019年11月の学術審議会大型プロジェクト作業部会による進捗評価では、「TMTに対する国の支援については、計画全体の実現可能な見直しが明らかになるまで(中略)厳に慎重に行うべきである。」「2021年度末までにプロジェクト完了の見通しが明らかとなった場合、改めて進捗評価を行う。」とされた。
- 2020年1月、マスタープラン2020の「重点大型研究計画」に選定されなかった。
- マスタープラン2023で重点大型研究計画に採択されないと、2026まで機会がない。(1) TMTの全体工程が成立しなくなる、(2) 国内メーカーがTMTから撤退し、実現不能に陥る、(3) NSF審査において、日本の状況が影響を与え、米国の予算確保もできなくなる。→ マスタープラン2023での位置づけが不可欠。

	すばる	アルマ	TMT
現行計画終期	2021年度	2022年度	2021年度(評価待ち)
後継計画	すばる２	アルマ２	–
ロードマップ掲載状況	RM2020掲載 すばる２	RM2020掲載 アルマ２	–
次期計画開始	2022年度	2023年度	–

現状改善に向けた試み：TMT建設地の準備状況

TIOおよび参加機関がマウナケアでのTMT建設を目指し一致して取組むのみならず、関係機関が合意形成に向けて注力しており、以下の進捗がある。

1. TIOの取組み（ハワイでの体制強化）

- 日本からの強い要請にしたがい、TIO本部のハワイへの段階的移転を評議員会で承認した。第一段階として、TIOプロジェクトマネージャが、2021年6月10日にヒロへ赴任した。それに合わせ、国立天文台TMTプロジェクト長も7月23日にヒロに赴任した。この二人を中心に、**ハワイ地元関係者と直接対話を重ね、支持拡大を推進する**。

Fengchuan Liu
TIOプロジェクトマネージャ代行
と臼田TMTプロジェクト長

2. ハワイ州、ハワイ大学等の取組み

- ハワイ州議会が、今後のマウナケア管理についてのワーキンググループ設立(2021年5月10日）。**先住民グループのリーダー3名がメンバーとなり幸先良いスタート**。2021年末に報告書を州議会に提出予定。
- ハワイ大学Institute for Astronomy所長に、**先住民グループとチャンネルのあるDoug Simons (現CFHT所長)が就任。**
- ハワイ大学は、既存観測所のうちカルテク サブミリ波観測所(CSO) および教育用望遠鏡ホクケアの撤去準備(環境影響調査等を含む)を進めており、2024年までに撤去する予定。

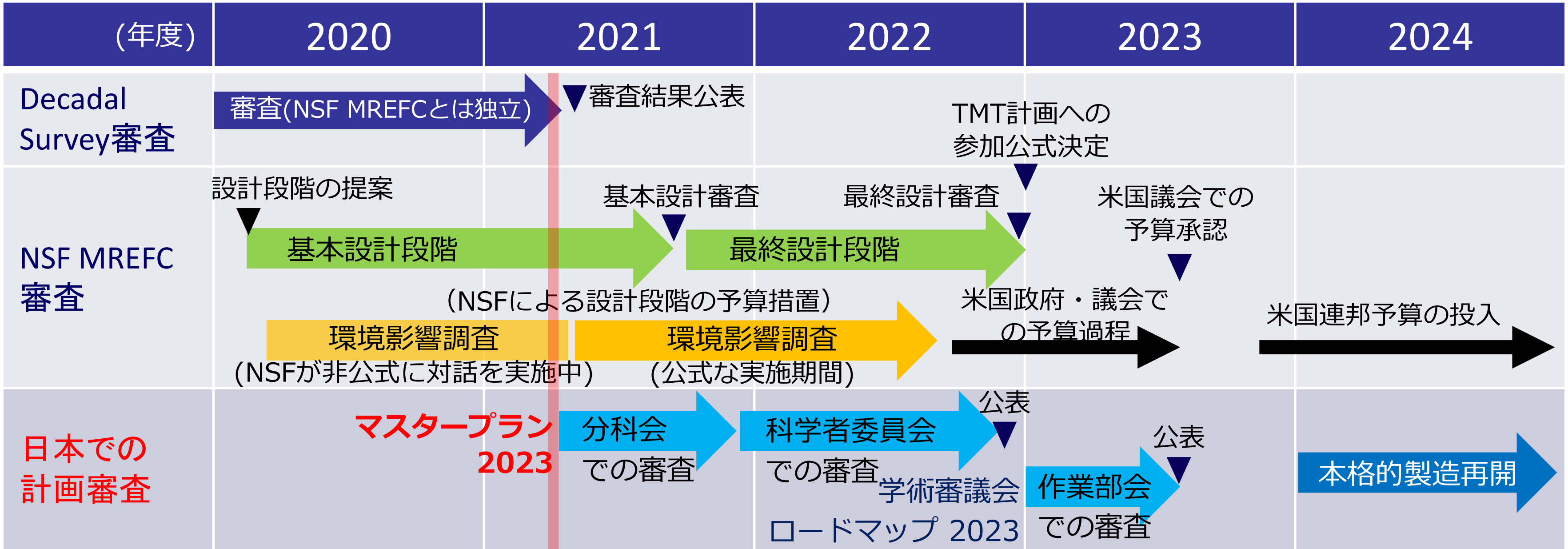
Scott Saiki
ハワイ州議会下院議長

TMT THIRTY METER TELESCOPE

現状改善に向けた試み：NSF参加・米国資金投入に向けた動き

国立天文台 NAOJ National Astronomical Observatory of Japan

1. 2019年7月: TIO, GMT, AURAは3者共同で、TMTとGMTを南北両半球に建設する**US-ELTプログラム**として**Decadal Surveyへの提案を提出**。現在結果待ち。
2. 2020年5月: NSFに対し**US-ELTプログラムの設計段階提案書を提出**した。
3. 今後、以下の二つがNSFにより2021-2022年度に並行して進められる。
   1) 建設予算(MREFC)の審査: 基本設計審査(PDR)、最終設計審査 (FDR)
   2) 連邦レベルでの環境影響調査及び国家歴史遺産保存法106条に関するプロセス
   - これらの結果を受けて、NSFはTMT計画参加についての公式決定を行う。
   - 参加の公式決定に先立ち、NSFは予算案作成を連邦行政管理予算局(OMB)他と進める。公式決定後、US-ELTプログラムは予算案に組み入れられる。
   - 連邦議会の審議・承認により、2024年からの米国連邦政府資金投入を想定している。



今後のTMT計画について

30m級超大型望遠鏡は、人類の宇宙探究のフロンティアをひろげるために必須である。大学共同利用機関である国立天文台は、日本の研究者が最先端の研究を行う機会を確保できるよう、今後のTMT計画に以下のとおり取り組んでいく。

- マスタープラン2023で、TMTが重点大型研究計画に採択されることが不可欠。そのため、幅広いコミュニティの支持を得るべく国立天文台として取り組む。
- コミュニティの支持が明確化できず、適切な予算措置ができないと、TMT計画が実現できないのみならず、これまでにTMT計画に投じてきた国費に対する国立天文台の責任を問われると共に、フロンティア促進事業という制度にも深刻な影響を与える。その影響は、天文学全体、自然科学研究全体にまで及んでしまう。
- 国立天文台としては、そのような事態を避けるべく、全力で取り組んでいる。光赤天連をはじめとするコミュニティの皆さんのご理解・ご協力をお願いしたい。

- 米国連邦政府予算投入が決定（2023年度予定）するまで、**日本国内およびTIOの支出を最小化しつつ、完成までの工期短縮・コスト抑制を図りリスクを低減するための活動を継続**する。このために最小限の予算措置の継続が必要である。
- これらを通じてTMT完成までの道筋を明確化し、国内においてマスタープラン2023およびロードマップ2023を乗り越える事により、米国NSFと同期して、2024年度から本格的な製造を開始できる概算要求の実現を目指す。

TMT
THIRTY METER TELESCOPE

国立天文台 NAOJ National Astronomical Observatory of Japan

2021年9月7日 NEWS

代替建設地(ラパルマ)での土地利用許可について

スペイン カナリア諸島ラパルマは、ハワイ・マウナケアでTMT建設ができない場合に備えて、2016年に代替建設地としてTMT国際天文台(TIO)評議員会で承認されました。

TIOは、ラパルマの自治体とホスト研究機関であるカナリア天体物理研究所(IAC)と協議した上で、法に則って手続きを進めてきており、2019年に自治体からIACに対してTMT建設のための土地利用許可が認められています。

国内で一部報道がありましたが、2021年7月末に、スペイン・カナリア州の行政裁判所は、環境保護団体からの訴えの一部(自治体はIACではなく、TIOに土地利用許可を与えるべきであったという点)を認めて、土地利用許可の無効判断を行いました。訴訟には環境保護上の問題も含まれていましたが、今回の裁判所の判決はそれへの判断は示さず、土地利用許可の手続き上の瑕疵を認めたものです。TIOは、地元自治体やIACと対応を協議しており、控訴する方向で検討を行っています。控訴を通じて土地利用許可を有効に戻し、代替建設地として有効な状態にすることを目指しています。また、代替建設地であるラパルマで工事作業を実施する予定は当面ありません。

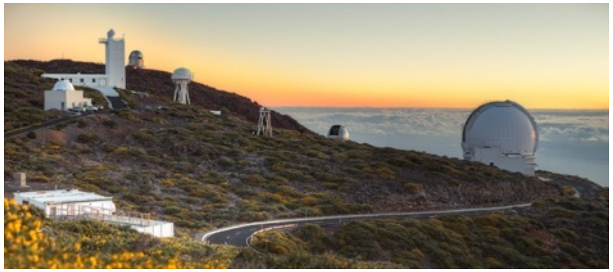
カナリア州の自治体やスペイン政府は、環境影響評価に加えて、経済効果、教育普及効果も評価した上で、TMTの誘致に積極的であり、地元の世論調査でもTMT建設への高い支持が示されています。TIOとしては、環境保護団体からの訴訟については今後も注意を払い、地元自治体、IACと協力して対応していく考えですが、現時点で代替建設地としてのラパルマの位置づけを変更することはありません。

TMTの建設予定地はハワイ・マウナケアであり、TIOおよびTMT参加機関は、マウナケアでのTMT建設を目指して一致して取り組んでいます。TIOは地元コミュニティとの信頼関係の改善に向けて、地道な対話を行っており、国立天文台としてもTIOのハワイでの取組みを引き続き支援します。

TMT建設地の準備状況

代替建設候補地（ラパルマ島）の状況

- 建設に必要な許可・手続きは2019年11月に得られている。
- 州による環境アセスメントは実施済みで自治体からの許可が出ているが、環境保護団体による訴訟活動があり、状況を注視している。
- 日本においてラパルマ島の観測条件と期待できる科学研究について詳細な評価を実施し、ラパルマにTMTを建設する場合でも、TMTの強みを活かし、競争力の高い研究が可能と結論した。
- 2020年1月に、国立天文台の見解「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、ラパルマへ移行することとする」を台長年頭所感として公表した。



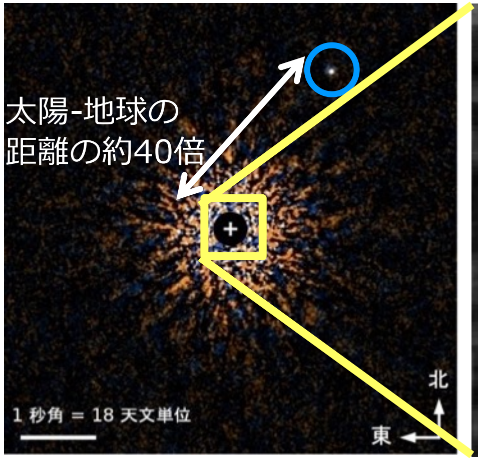
Observatorio del Roque de los Muchachos
Instituto de Astrofisica de Canarias (ORM)
標高約2,300m (マウナケアは約4,000m)

学術的価値

① 地球型系外惑星の直接検出と生命の兆候探査

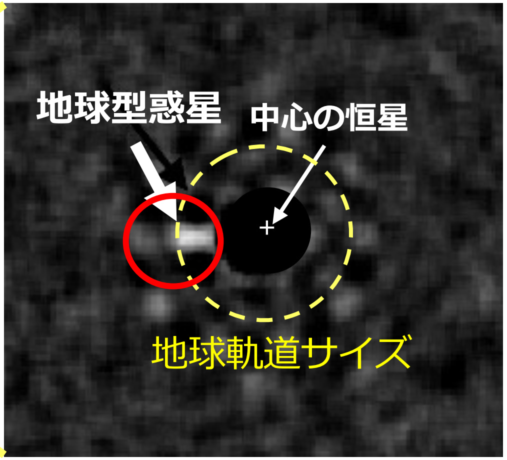
太陽系外の地球型惑星を直接観測し、生命の兆候を探る

- すばる望遠鏡では、恒星から離れた巨大ガス惑星の直接撮影に成功している。
- 恒星近くにある地球型系外惑星は、これまでは間接的にしか検出されていない。
- TMTでは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。
- **系外惑星大気**を高感度・精密分光し、酸素分子や水、メタンなどを発見して、生命存在の可能性を探る。



すばる望遠鏡で捉えた、地球から約60光年離れた恒星の周りのガス惑星 (青丸)。

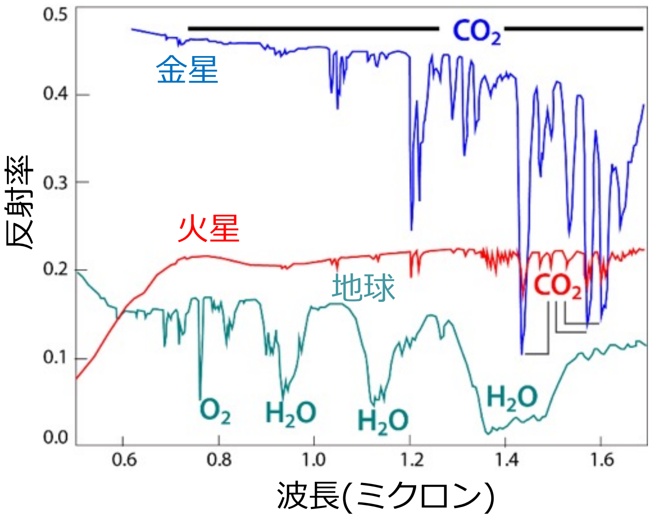
葛原他 2013, Astrophys. J.



TMTによる、約12光年の距離にある太陽に似た恒星の観測シミュレーション。地球型惑星（赤丸）を直接検出できる。

C. Marois (NRC)

系外惑星大気の分光



惑星大気のシミュレーション。CO_2が卓越する金星・火星に対し、地球では水および酸素の存在が分かる。系外惑星大気の分光により地球に似た大気組成をもつ惑星を探査する。

Meadows, 2006

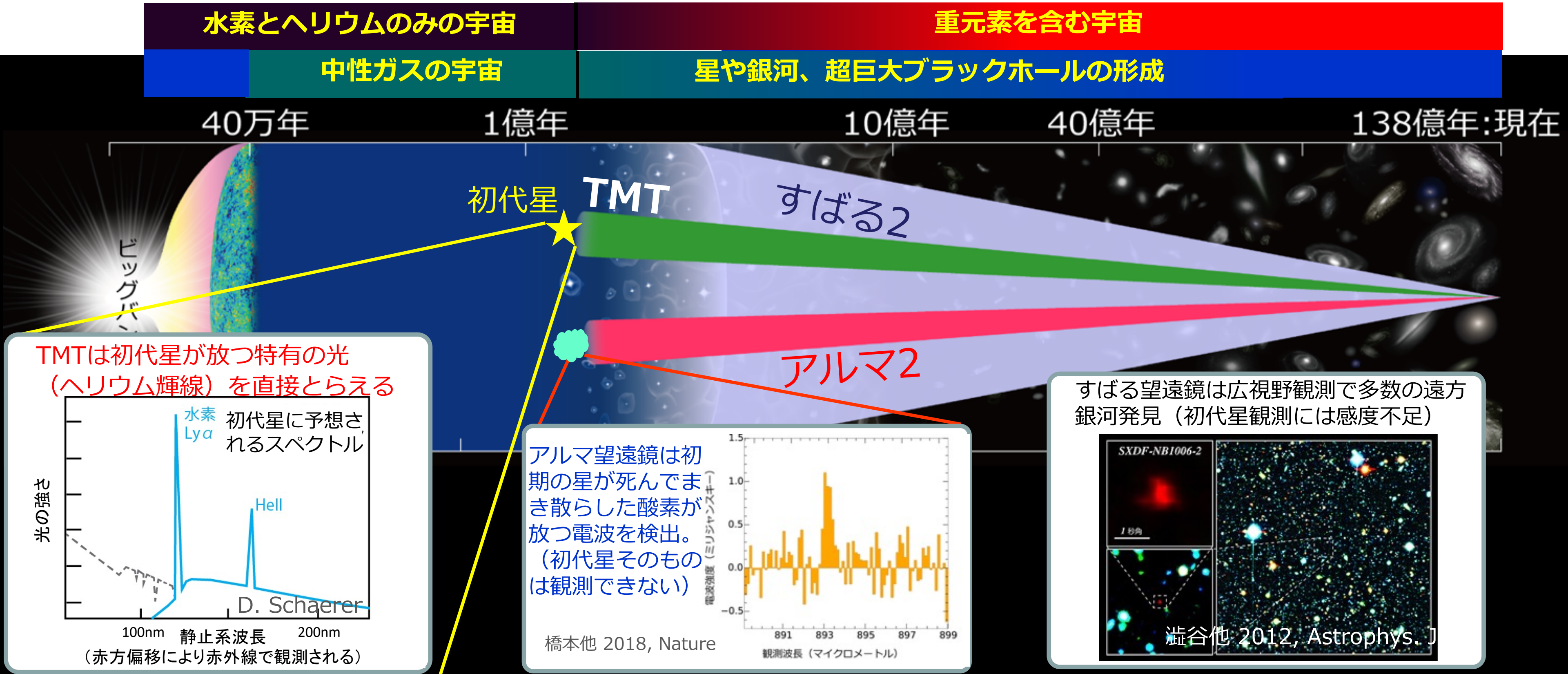
TMT
THIRTY METER TELESCOPE

② 宇宙で最初に誕生した星の検出

国立天文台 NAOJ National Astronomical Observatory of Japan

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、水素とヘリウムのみから成っていた宇宙に初めて重元素をもたらすと共に、紫外線放射や超新星爆発により以後の星・銀河形成、さらには超巨大ブラックホール形成に大きな影響を与えた。初代星の質量や明るさを観測で明らかにすることが重要課題となっている。
- すばる望遠鏡は広視野観測で候補を探査するが、感度不足で特定はできない。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、その性質を明らかにする。

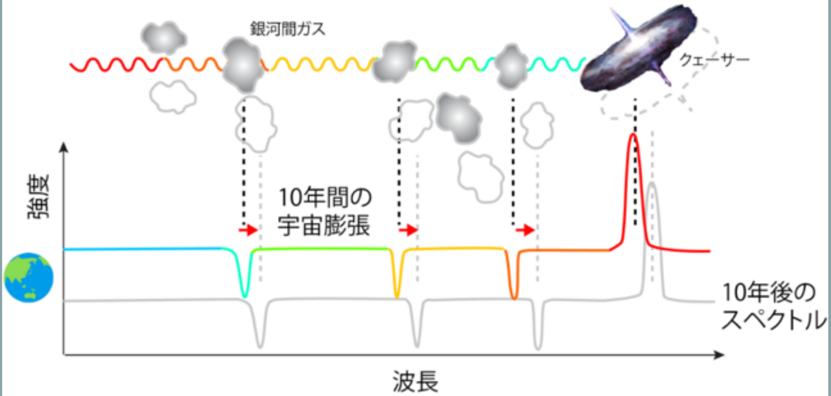


③ ダークエネルギーの性質の解明

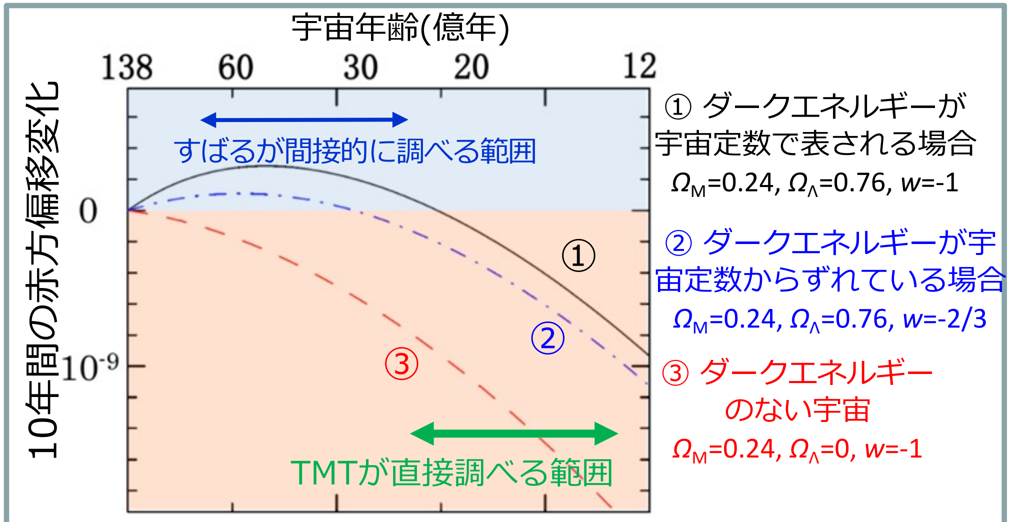
直接測定による宇宙加速膨張の検証

- ダークエネルギーの正体に迫るには、**宇宙の膨張がどのように変化してきたのか**を測定することが鍵となる。
- TMTは宇宙膨張の速さの変化を、宇宙論モデルによらない、**最も直接的な方法**で測定することに挑む。

【TMTによる宇宙膨張の直接測定】



- 10年程度の期間をおいて遠方のクェーサーを精密分光観測し、様々な距離にある銀河間ガスの赤方偏移のわずかな変化を検出することで、ダークエネルギーによる宇宙膨張の速さの変化を直接測定する。
- 極めて高い分光測定精度が必要であり、現在の8-10m級望遠鏡では集光力不足で不可能。



宇宙年齢ごとの変化を調べ、正しい宇宙論モデルを判別する。

- すばる望遠鏡は多数の銀河の距離測定で統計的・間接的にダークエネルギーの影響を調べるのに対し、TMTは宇宙論モデルに依存せず宇宙膨張を直接測定できる。
- すばる望遠鏡とTMTで、異なる時代の宇宙膨張を調査し、宇宙史全体での膨張の様子を明らかにすることができる。

学術的価値

④「マルチメッセンジャー天文学」において起源天体やつくられる重元素を解明する

TMT THIRTY METER TELESCOPE

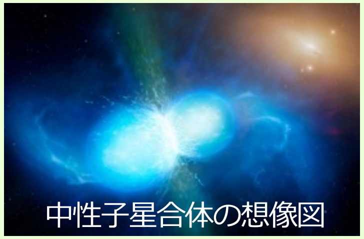
国立天文台 NAOJ National Astronomical Observatory of Japan

重力波やニュートリノの測定と様々な電磁波の観測で宇宙の爆発現象に迫る「マルチメッセンジャー天文学」が急速に進展

→TMTはすばる望遠鏡などで同定された天体の分光観測により、爆発メカニズムやつくられる元素を決定する。

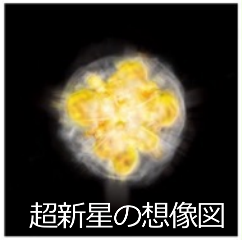
電磁波観測が期待される天体

重力波：連星中性子星合体



中性子星合体の想像図

ニュートリノ：特殊な超新星や活動銀河核

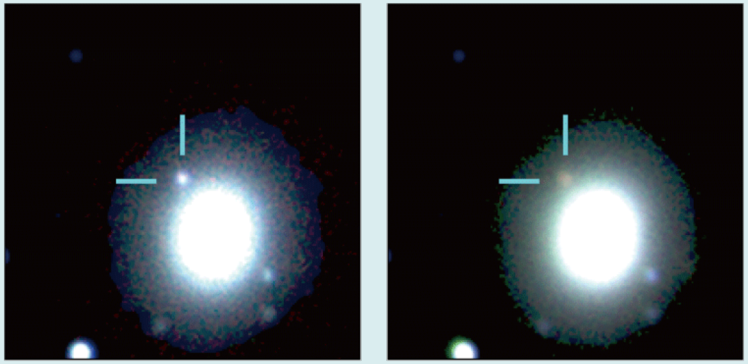


超新星の想像図

2017年の重力波天体の観測例

（比較的近距離で起こった稀な例）

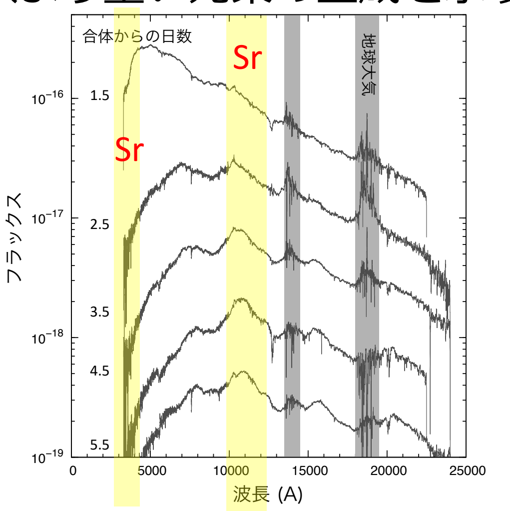
2017.08.18-19　　2017.08.24-25



すばる望遠鏡がとらえた、重力波源の明るさの変化。

(内海 (Stanford大)他、2017；田中 (東北大)他、2018；冨永 (甲南大)他、2018)

鉄より重い元素の生成を示唆



ESO/VLTによる分光観測：重力波検出から5日後まで測定（Pian 他2017）

- **すばる望遠鏡などで今後同定される天体の多くは遠方で見かけ上暗いものになる**
- **爆発現象から時間が経過した段階のほうが生成された元素を特定しやすいが、暗くなる**

→分光観測にはTMTの高感度が必要不可欠