

第1章 計画の概要と特長

1.1 計画の概要

野辺山電波望遠鏡, すばる望遠鏡, X線天文衛星, 赤外線天文衛星, 電波天文衛星, 太陽観測衛星, など, 日本の観測天文学は今や完全に世界の第1線といえる大規模な観測装置を独自に運用する時代を迎えている。しかし, ALMA計画やTMT計画など超大型の国際共同研究も推進する時代にあつて, 中規模の望遠鏡についてはまだまだ整備が不十分であると言わざるを得ない。第1線の観測装置が有効に利用されるためには, それらを学術的に支援できる世界的に見て優秀な観測装置・望遠鏡群が存在することが本質的に重要である。

このような望遠鏡の1つとして, 東京大学大学院理学系研究科附属天文学教育研究センター(以下, 天文センターと略す)では, 南米チリ北部アタカマ地方に口径6.5mの赤外線望遠鏡(以下, TAO望遠鏡と称す)を設置する計画を検討している。本書はその計画内容について紹介するものである。

天文センターでは, これまでに数多くの重要な研究が行われてきた。そのなかでも, 「高赤方偏移クェーサーや超新星による観測的宇宙論」, 「銀河の形成と進化」, 「褐色矮星の大気構造」などは, 大きな赤方偏移であったり, 恒星としては低温であったりすることにより, 赤外線観測が重要な鍵を握るという点で共通している。これらの研究成果を拡大発展させるために, 赤外線観測を自ら推進することが必要となってきた。しかしながら, 大きな発展を期待するには, 汎用の大型望遠鏡を使用する公募観測だけでは不十分であり, 特定の研究テーマについて集中的な観測時間の割り当てを必要とする。従来, このような集中観測には専用の小口径望遠鏡が適切と考えられてきた。実際に, その考えに基づいて建設されたMAGNUM2m望遠鏡, 東大60cm電波望遠鏡などの望遠鏡群は期待された成果を挙げてきた。しかしながら, 世界の第1線の光学赤外線望遠鏡が20mを超える規模へと移行しつつある現状を考えると, 1-2m級では, 厳選された少数のテーマに目的を限っても, もはや全く不十分な時代を迎えつつある。

我々はこの状況を勘案し, 国家プロジェクトとはならない規模の計画として, このような望遠鏡の建設の必要性和可能性について検討を続けてきた。その結果, 観測装置に対して大幅に矛盾した要求にならないような, いくつかの研究テーマに最適化した観測装置を

開発することでコストを最小限に抑えながらも、基本性能では既存の 8–10m 級の望遠鏡に匹敵する性能を持つ赤外線望遠鏡を建設することは可能であるとの結論に達した。具体的には、赤外線観測に最適化した主鏡口径 6.5m の望遠鏡を世界最高高度に設置し、地上望遠鏡としては並ぶものがない広く大気の窓を活かすことで、在来型の同口径鏡を遙かに凌ぐ望遠鏡を建設することである。

1.2 計画の特長

1.2.1 口径 6.5m 赤外最適化望遠鏡

現在、世界最大クラスの可視赤外望遠鏡は 8–10m の主鏡（例えば、すばる望遠鏡）を持つ。これらと比べると 6.5m は多少口径は小さいが、次項で述べる赤外性能を考慮すると、赤外域では、世界最高性能（地上望遠鏡で）が実現できる。これを基に、宇宙論的天体の、探索（サーベイ観測）から詳細な物理の解明（分光観測）までの一貫した天文学を行う。これまで、大学が持つ望遠鏡は中小口径に限られていたため、あるテーマの観測的研究のうち、サーベイ観測のみを大学望遠鏡で行い、研究の詰めとなる詳細な分光観測は共同利用望遠鏡で行わざるを得なかった。その結果、観測時間が限られ、結局大問題に結論を出すことが困難であった。これを改め、結論までを 1 台の望遠鏡で追求するには、6.5m 級の口径が必要である。主鏡は、アリゾナ大学ミラーラボでの製造を予定している。ミラーラボは、2 台のマジェラン望遠鏡（チリ・ラスカンパナス天文台）と新 MMT 望遠鏡の 3 枚の 6.5m と、LBT（大双眼望遠鏡）の 2 枚の 8.4m 鏡を磨いた実績がある。我々は、光学系の詳細な検討を行い、赤外望遠鏡としての能力、とりわけすばる望遠鏡では実現が難しい熱赤外線における世界最高のサーベイ能力と中間赤外線における世界最高の空間分解能の実現を目指す。また機械設計においては高い性能を維持しながらもコストを抑える設計に努め、総合的に、8–10m 望遠鏡と比べて、大変コストパフォーマンスの高い望遠鏡を実現する。

1.2.2 赤外透過率に優れたチリ北部アタカマの 5600m 山頂に建設

赤外線の波長域は、大気の水分子、 H_2O 、 CO_2 などの吸収によって、必ずしもすべての波長帯の光が地上まで到達するわけではない。そこで、できるだけ高地から観測することで、大気の吸収の影響を小さくしたい。ハワイ・マウナケア天文台は 4200m の高度にあり、大気吸収はかなり小さいが、ここで考えているアタカマ地域は、アンデス山脈にあり、高度 5000m を越える。その中のチャナントール山（高度 5600m）山頂は、気圧が 0.5 気圧を下回り、湿度は大変低く、晴天率も高い、天文学、特に赤外線観測には最適地である。一方、

チリは南半球に位置しているため、北半球からでは決して見ることのできない天文学上重要な天域〔特に南銀極、大小マゼラン銀河など〕の観測が可能となる。これはまた、日本の X 線衛星、赤外衛星との強力な共同観測を可能にする。さらにこの場所は、現在、日米欧の国際協力で建設が進行している ALMA 計画（大電波干渉計）のサイトでもある。電波で発見された天体の迅速な確認観測などによって、日本の観測天文学を有機的に発展させる一つの鍵となることは間違いない。

1.2.3 全国共同利用と戦略的共同研究

TAO 望遠鏡は TMT など 30m 級超大型望遠鏡・衛星望遠鏡時代にあって、すばる望遠鏡と共に、日本の研究者が独自の研究を進められる観測環境を提供する。TAO 望遠鏡の観測時間の 4 割は全国共同利用に供し、現在すばる望遠鏡で走り始めている 100 夜を越える規模の戦略枠プログラムによって圧迫されつつある一般の共同利用観測時間を大幅に増加させる重要な役割を負う。共同利用プログラムの採択は、すばる望遠鏡のプログラム小委員会 (TAC) と深く連携あるいは合同で行い、両望遠鏡の最大限の有効利用を諮りたい。これによって太陽系天体から遠方銀河や宇宙論まで広い分野の研究を推進すると共に、すばる望遠鏡の広視野主焦点などを活かした戦略枠プログラムが世界的な競争のなかで有利に実施できるようにする。

一方望遠鏡時間の 5 割は、東京大学が他の大学・研究所と連携をしながら、共同研究プログラムの実施を行う。この共同研究時間では、特に萌芽的な研究や学位論文のための観測を重視し、所属組織によらず次世代の若手の育成を重視した観測時間割り当てを行う。また近赤外線における広視野性能を活かした大型サーベイや、モニター観測、ToO (Target of Opportunity) 観測など、完全共同利用の望遠鏡では実現が簡単ではない種類の観測にも対応する。ただし観測計画の決定過程を透明にし、共同利用観測やすばる望遠鏡の戦略枠などとの重なりを避けつつ、全国の研究者に望遠鏡時間を提供する。特に各大学・組織の研究基盤の発展に貢献するように、視野の広い、そして、長期の展望を持った運用を目指す。

なお望遠鏡時間の 1 割は、望遠鏡を設置するチリ共和国の研究者に提供される。これはチリの政令にもとづき、学術協定を東京大学と締結したチリ大学を通して観測プログラムの採択が行われる。

1.2.4 次世代を担う若手がのびのびと使える大学望遠鏡

望遠鏡が大型になればなるほどその維持は大変になり、効率的な運用には専任のエンジニアが必要になる。そして、通常、まだあまり経験のない大学院生などが望遠鏡に触れら

れる機会が減ってしまう。しかしながら、できるだけ若手の研究者が望遠鏡に触れ、望遠鏡・観測装置の開発・維持の経験を積むことは、望遠鏡の能力を最大限発揮した観測を行うためのみならず、次世代の特長ある様々な計画を推進していくためには不可欠である。TAO 望遠鏡計画においては、望遠鏡や観測装置の開発や運用に興味を持つ若手は、所属組織によらず共同研究者として受け入れていく。限界に挑戦した観測を行い、さらに新しいプロジェクトを進められる人材の育成が可能なのが大学望遠鏡であり、この点を重視することが一つの重要な特長である。

1.3 世界の大型計画

新しい望遠鏡を建設するに際しては、国家的規模の計画ではなくとも、その完成想定時に、世界の天文観測施設の水準がどのようになっているはずなのかを知っておく必要があろう。そこで、可視および赤外線天文学における現在の大型望遠鏡の状況と、TAO 完成想定時における状況がどのようになっているのかを推測を交えてまとめてみた。

受光装置が写真乾板や単画素検出器から CCD などの固体撮像素子へと改良が進む間、可視・赤外線望遠鏡の主鏡口径は長らくヘール 5m 鏡、ゼレンツクスカヤ 6m 鏡が限界であるとされ、その最大サイズは長らく進歩が見られなかった。しかしながら、20 世紀末に、口径 10m のケック望遠鏡ができ、ハッブル宇宙望遠鏡が運用を始めると、この限界は一気に破られ、2011 年現在、口径 8m 超の望遠鏡だけで、14 基以上が運用を行っている。そして、より巨大な地上の望遠鏡や軌道上の望遠鏡も多数計画されている。今や、すばる望遠鏡もこれら巨大望遠鏡群の 1 つに過ぎず、日本の可視赤外線天文学は、少なくとも観測装置の面では安閑としていられない状況にある。

この状況を具体的に認識するために、ここでは、可視赤外線域で現在運用中および計画中の主な大型望遠鏡、宇宙望遠鏡についてまとめる。

8–10m 級が可能となった技術的背景としては、主鏡の軽量化と経緯台の実用化、および短焦点主鏡によるドームの小型化の 3 点が挙げられる。

主鏡の軽量化は、構造強度をガラス材とは独立することによって達成された。ガラス材の形状によって薄メニスカス、ハニカム、分割鏡の 3 方式が実用化されたが、主鏡面形状を保持する構造強度をガラス材とは独立とし、そこからの能動支持によって保つという基本的な考え方は共通している。薄メニスカス鏡はガラス材単独時の取り扱い、ハニカム鏡はガラス材鑄造工程の複雑化、分割鏡は要素鏡境界線による星像や赤外線放射率の悪化という問題点をそれぞれ持つが、互いに他にはない長所もあり、8—10m 級では甲乙つけがたい。とはいえ、30m 超級ではいずれも分割鏡を採用している。このサイズでは一体のガラスを製造することが不可能であるためである。

光学赤外線望遠鏡は高い角分解能で撮像素子を用いた観測を行うため、非等速回転と像回転が発生する経緯台式望遠鏡を可視赤外線用で実用化するためには、高度な精密制御が必要であったが、コンピュータ制御技術の発展により、1980 年頃には充分実用の域に達した。経緯台式の場合、重力に対する大型構造物支持が自然な形状となる。また、ドーム形状も最小限のクリアランスを確保すればよいので、同じサイズの望遠鏡に対して赤道儀よりも若干小型化することが可能となる。

短焦点主鏡を製造するには、曲率半径が小さな深い主鏡が必要であり、平板ガラス材から製造するには、多くの切削量と十分な精度が必要となる。ガラス鑄造技術とコンピュータを利用した光学設計技術の進歩、およびレーザー干渉測定による高精度測定技術が実用化したことで、主鏡の口径比（口径に対する焦点距離）を非常に小さくすることが可能となった。その結果、主焦点または副鏡位置を主鏡面に近くして、鏡筒長を口径に比べて短くすることが可能となった。これにより望遠鏡の回転モーメントを小さくして、望遠鏡駆動装置への負担を軽減することができた。また、望遠鏡を収容するドーム径も小さくすることができるようになった。

これらの技術は、実際に 8–10m 級望遠鏡を運用した結果のフィードバック及びコンピュータ制御技術・精密測定技術のさらなる進歩によって発展を続けており、今後、10 年程度で、国家プロジェクトあるいは国際共同プロジェクト規模で建設可能な可視赤外線望遠鏡の口径は 30–40m 級に達することが予想される。

目を宇宙向けると、ハッブル宇宙望遠鏡 (HST) の次世代として計画されている NASA の James Webb 宇宙望遠鏡 (JWST) がある。2002 年まで、次世代宇宙望遠鏡 (NGST) として検討されていたものである。JWST は、口径 6m だが、観測条件が地上とは比較にならない宇宙空間に設置されるため、カタログ仕様では他の望遠鏡計画の追従を許さない。HST に比べて赤外線性能の向上を優先課題としたため、HST のような機器更新の可能性を捨て、地球からの放射を避け、地球–太陽が作る L2 点に設置することになっている。地上望遠鏡の口径が 30–100m 級となっているのは、JWST の撮像能力に対応する分光能力を目標としているためでもある。なお JWST は大変野心的な計画であるが、2011 年までに 35 億ドルの建設費を要し、さらに同程度あるいはそれ以上の予算が 2018 年以降のうちに必要であるとの報告がなされている。米国国家予算の大規模な赤字削減計画の進む中、本稿執筆段階では JWST プロジェクトの存続が危惧されている。

JWST の観測能力が落ちてくる遠赤外線に的を絞ったのが宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究本部 (JAXA-ISAS) で検討している SPICA である。口径 3m クラスの主鏡冷却望遠鏡を JWST と同じく L2 に設置することを予定している。遠赤外線観測を狙った天文衛星は、これに先駆けて 2010 年に打ち上げられたハーシェル宇宙望遠鏡 (旧称 FIRST) や 2006 年に打ち上げられた JAXA のあかり衛星 (運用を 2011 年に終了)、2003 年に運用を開始した Spitzer Space Telescope (旧称 SIRTf) がある。宇宙望遠鏡は、衛星寿命

や搭載できる観測装置に限られることから、勢い、特定の研究テーマに的を絞ったものが多くなる。地上から観測困難な遠赤外線域での主要研究テーマとして現在世界的に注目されているのは宇宙背景放射と太陽系外惑星である。

したがって、共同利用を行い汎用の観測を目的とした地上望遠鏡を新規に建設するとなると、口径 10m を大きく上回らないと世界の観測天文学の水準から大きく後れをとることとなる。これより口径が小さな望遠鏡を建設するには観測条件が格段により場所に、最低 6m 以上、できれば 10m 級の口径を持つ望遠鏡を建設し、観測テーマを絞り、望遠鏡の仕様や観測時間を戦略的に集中させるなどの対策を立てる必要がある。

主な望遠鏡計画についての具体的な仕様などをまとめて Appendix D に付録に掲載した。

1.4 日本の大型観測施設の中での TAO 計画の位置づけ

日本の大口径光赤外望遠鏡としては、国立天文台が建設し 2000 年より共同利用観測を行なっている、すばる望遠鏡がある。これは北半球に建設されており、我々の TAO 望遠鏡と合わせると、宇宙論及び銀河形成・星形成の研究分野での最重要な 5 つの天域 [2 つの銀極、大小マゼラン銀河、銀河中心、オリオン星雲] がカバーできる。さらに、国立天文台は北米連合、ヨーロッパと共同で ALMA (大規模ミリ波干渉計) をアタカマに建設しており、この ALMA で検出された未知の天体の同定、詳細な観測が TAO 望遠鏡を用いて日本独自に行える。さらに、日本の X 線天文衛星「すざく」、赤外線天文衛星「あかり」がうちあげられ、全天で様々な天体を観測している。TAO 望遠鏡によって、これらとの共同観測・追加観測がすばる望遠鏡での観測が可能な北天に限られることなく、全天にわたって行える。また、以上の大望遠鏡、天文衛星はすべて国立共同利用機関 (国立天文台と宇宙科学研究所) が建設・運用し、国際共同利用が行われているが、米国などでは大型光学赤外線望遠鏡の約 8 割が大学中心となって建設・運用がなされている。さらなる 21 世紀の日本の大型計画を科学的にも技術的にも推進していく若手の育成のためには、日本においても今後 TAO 望遠鏡のような大学望遠鏡がより大きな役割を果たしていく必要があるのは疑う余地がない。