

特集「ALMAで迫る惑星科学」 アルマ望遠鏡の現状と機能拡張計画「アルマ2」

アルバロ・ゴンサレス¹, 深川 美里¹, 伊王野 大介¹, 平松 正顕¹,
国立天文台アルマプロジェクトチーム¹

2019年6月29日受領, 査読を経て2019年7月22日受理.

(要旨) アルマ望遠鏡は, 2011年の観測開始以来, 目覚ましい成果をあげている. 原始惑星系円盤を高解像度で観測し, 同心円状の隙間を持つ円盤を多数発見するとともに, 地球にもっとも近い原始惑星系円盤では1天文単位スケールの構造を描き出した. 一方, 観測装置は2000年代の設計思想や技術に基づいている. そこで, アルマ望遠鏡が引き続き天文学を牽引していくために, 今後10年の機能強化の指針となる『ALMA Development Roadmap』が国際的議論に基づき策定された. この機能強化は2020年代に共同利用観測と並行して行われる予定である(日本では「アルマ2」計画と呼ぶ). 機能強化により, 現在の100倍以上に及ぶ数の原始惑星系円盤で1天文単位スケールの構造をとらえることが可能になる. また, 複雑な有機分子の原始惑星系円盤内での分布を明らかにすることができると期待される.

1. アルマ望遠鏡の概要

アルマ望遠鏡(アタカマ大型ミリ波サブミリ波干渉計, Atacama Large Millimeter/submillimeter Array: ALMA)は, 南米チリ共和国・アタカマ砂漠の標高5000 m地点に建設された巨大電波望遠鏡である. 日本が主導する東アジア, 欧州, 北米がチリと協力して運用する国際共同プロジェクトであり, 2011年から科学観測を開始した.

アルマ望遠鏡が観測するのは, 波長0.35 mm ~ 3.6 mm(周波数84 GHz ~ 950 GHz)の「ミリ波・サブミリ波」と呼ばれる電波である. 星間空間に漂う極低温(およそ10 K)のガスやダストは可視光を発することはできないが, ミリ波・サブミリ波を放射することができる. ガスやダストは星や惑星の材料であるから, ミリ波・サブミリ波を観測することで星や惑星, その集合体である銀河の誕生と成長を調べることができる.

アルマ望遠鏡は, 66台のパラボラアンテナ(口径12 mアンテナ54台と7 mアンテナ12台)を同期させて観測し, データを結合することで全体をひとつの巨大



図1: アルマ望遠鏡のアンテナ群.

Credit: Clem & Adri Bacri-Normier (wingsforscience.com)/ESO

望遠鏡として機能させる「電波干渉計」という仕組みを用いている. 一般に望遠鏡は口径を大きくするほど空間解像度が向上する. アルマ望遠鏡ではアンテナを最大で16 kmの範囲に展開することで, 直径16 kmの電波望遠鏡と同じ解像度(最大0.01秒角)を達成できる. アルマ望遠鏡の各アンテナには, 周波数帯(バンド)ごとに最適化された設計を持つ超伝導受信機が搭載されている. 現在はバンド3からバンド10までの受信機が搭載されており, バンド1受信機は開発中, バンド

1. 自然科学研究機構国立天文台
alvaro.gonzalez@nao.ac.jp

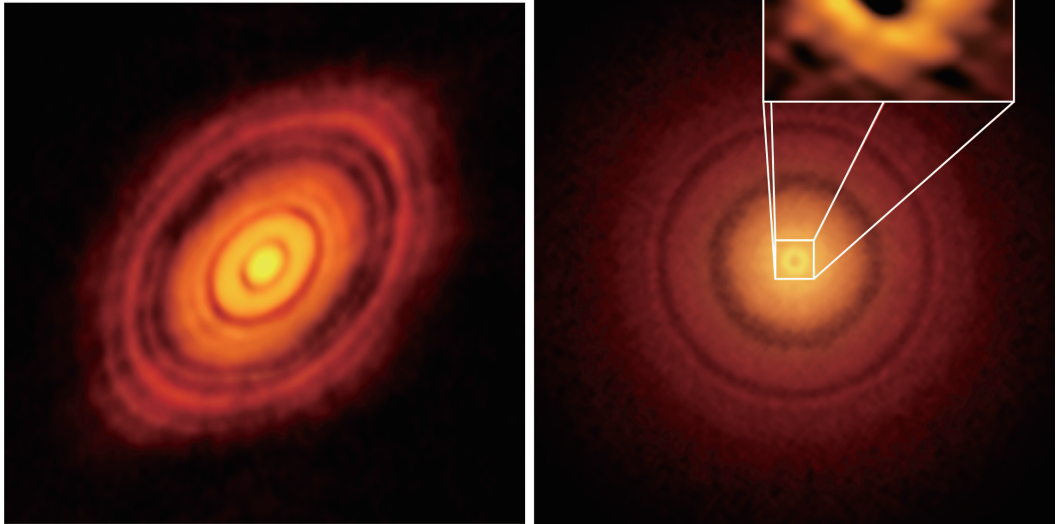


図2：(左) アルマ望遠鏡が撮影したおうし座HL星の原始惑星系円盤。同心円状の複数のリングが写し出されている。Credit: ALMA (ESO/NAOJ/NRAO) (右) アルマ望遠鏡が撮影したうみへび座TW星の原始惑星系円盤。拡大図では、地球軌道スケールの隙間が見えている。Credit: S. Andrews (Harvard-Smithsonian CfA), ALMA (ESO/NAOJ/NRAO)

2受信機は開発検討中である。アルマ望遠鏡は、高精度アンテナと高感度受信機に好適な気象条件も相まって、感度も極めて高い。アルマ望遠鏡は、ミリ波サブミリ波を観測する望遠鏡としては史上最も高性能であり、これにより多くの科学成果を上げている。

2. アルマ望遠鏡のこれまでの観測成果

アルマ望遠鏡は太陽や系内の惑星・衛星・小惑星・彗星から130億光年を超える距離にある原始銀河までさまざまな天体を観測対象としている。なかでもアルマ望遠鏡では、(a) 太陽系以外の惑星系とその形成、(b) 銀河形成と諸天体の歴史、(c) 膨張宇宙における物質進化の探究を科学目標の3本柱としている。

アルマ望遠鏡はその高い感度と空間解像度で、原始惑星系円盤の詳細な構造を描き出すことに成功している。2014年に公開されたのが、年齢10万年程度の若い星おうし座HL星に付随する原始惑星系円盤において発見された、多重の細いリング状構造である[1]。

そのリング状構造の起源には諸説あり、惑星を起源とする説、円盤内の動径温度分布に伴う塵の変化を起源とする説、円盤におけるガスと塵の摩擦に起因する流体力学的不安定性を起源とする説などが提案されているが、まだ解明されていない。また、地球から最も近い原始惑星系円盤であるうみへび座TW星周囲の円盤においては、中心に半径1天文単位程度の穴が空いており、さらに、数本の細いリング状構造が2016年に見いだされた[2,3]。2018年にはDSHARP(Disk Substructures at High Angular Resolution Project: 高解像度による原始惑星系円盤構造観測プロジェクト)と名付けられた大規模観測計画が実施され、およそ5天文単位の解像度で20個の原始惑星系円盤の姿をとらえることに成功している[4]。

銀河形成分野においては、赤方偏移9.11(距離にして132.8億光年)の銀河の2階電離酸素輝線[OIII]を検出し、人類史上最も遠い酸素の検出に成功している[5]。ビッグバン直後の宇宙には水素とヘリウム、ごく微量のリチウムしか存在せず、これより重い酸素は恒

星の中での核融合反応によって合成されたものである。ビッグバン後およそ5億年の天体に酸素が検出されたということは、それよりも前の時代(ビッグバン後およそ2.5億年, 赤方偏移 ~ 15)に多くの星が生まれ、核融合反応を起こし、合成された元素が星の死によって周囲にばらまかれたということを示唆している。この研究成果により、2階電離酸素輝線[OIII]が初期銀河を探る有力なプローブであるということが確立された。さらに、原始銀河団、サブミリ波銀河、重力レンズ、スニヤエフ・ゼルドビッチ効果、分子ガス構造などの観測から宇宙初期の様子が明らかになりつつある。

宇宙における物質進化に関連して、生命起源に関連する物質の探査が精力的に進められている。これまでに、単純な糖類分子グリコールアルデヒド[6]、イソシアン酸メチル[7,8]などの複雑な有機分子や、枝分かれした炭素骨格を持つ有機分子[9]を発見した。さらに、原始惑星系円盤にメタノールを初めて検出した[10]。これらの分子は、アミノ酸をはじめとする地球生命の構成要素の形成にとって基礎的な分子と考えられており、その検出には高感度・高波長分解能を誇るアルマ望遠鏡の機能が最大限に発揮されている。また、太陽系内の彗星や惑星・衛星、銀河系内の星形成領域、近傍宇宙の銀河などにおいて多様な有機分子の探索とそれらの形成メカニズムに迫る研究が進んでいる。

3. アルマ望遠鏡の運用とその現状

2011年、アルマ望遠鏡は16台のアンテナと限られた周波数帯(バンド)の受信機を使った初期科学観測を開始し、徐々にアンテナ数と観測可能バンドを拡張しながら現在に至っている。

アルマ望遠鏡は、世界の研究者からの提案をもとに観測を行う共同利用装置である。1年間をひとつの「サイクル」として、サイクルごとに観測提案の募集と審査を行っている。科学観測に供される時間は初期科学運用のころから継続的に増加しており、2019年10月に開始される「サイクル7」では12mアンテナを用いる観測に4300時間が供される。研究者からの要望は非常に多く、最近の各サイクルでの提案件数はおよそ1800件である。共同利用時間に対して観測提案時間数の合計はほぼ常に5倍弱となっており、高い競争倍率を維持している。さらに、アルマ望遠鏡観測データ

に基づく査読論文は2019年6月時点で1500編に迫っており、当該分野の研究を大きく前進させる画期的な成果も多く含まれている。論文数の伸びは、世界のほかの第一線の観測装置とほぼ一致しており、アルマ望遠鏡が確かに天文学を牽引していることがわかる。

2019年10月開始の「サイクル7」以降では、通常の観測提案募集に加えて、アルマ望遠鏡アンテナのうち7mアンテナ12台と12mアンテナ4台からなるアタカマ・コンパクト・アレイ(Atacama Compact Array: ACA, 愛称「モリタアレイ」)だけで観測を行うモード(ACAスタンド・アローン)の追加観測提案募集が行われる予定である。これは、ACAの利用効率を最大化することを目指したものである。ACAスタンド・アローンではアンテナ数とアンテナ展開範囲が限られるため、アルマ望遠鏡全体を使う場合に比べて感度・解像度は劣る。一方で、天球上で広がりを持つ天体の観測には威力を発揮し、またACA 7mアンテナはほかのアンテナに比べて鏡面精度が高いことから短い波長(特に、バンド9・10: 波長0.35 mm $\sim$ 0.5 mm, 周波数602 GHz $\sim$ 950 GHz)での観測に適している。アルマ望遠鏡以外でバンド9・10の波長帯が本格的に観測できるのは、ハーシェル宇宙望遠鏡(すでに運用終了)のような宇宙望遠鏡やアクセスと運用が困難な南極の望遠鏡しかなく、アルマ望遠鏡でこの波長帯を観測する意義は極めて高い。

アルマ望遠鏡は教科書を書き換えるような成果を多く上げている一方、そこで採用されている技術や設計思想は2000年代初期のものであり、今後もアルマ望遠鏡が競争力のある観測装置であるためには機能向上が欠かせない。受信機(フロントエンド)や信号処理システム(バックエンド)の技術開発では近年目覚ましい進展があったことから、一部装置をアップグレードすることによってアルマ望遠鏡の性能はさらに大きく向上すると期待される。

今後およそ5年のうちに、アルマ望遠鏡は定常運用を行うフェイズから、定常運用と次の10年の科学研究を切り拓くための機能強化を並行して行うフェイズへと移行する。機能強化の具体的な内容は、新たに設定した科学目標に基づいてALMA Development Roadmap [11]として優先順位をつけてまとめられており、アルマ望遠鏡の最高意思決定機関であるアルマ評議会の承認を受けている。世界中の研究者から寄せ

られる観測提案に基づいて科学運用を継続しながら装置システムの主要コンポーネントのアップグレードを行うことが重要であり、改修中の一部装置が稼働していない状態でも科学成果を最大化するために、高いレベルのシステムエンジニアリングが必要とされる。

4. アルマ望遠鏡のための技術開発

アルマ望遠鏡プロジェクト、特に東アジア陣営は、ALMA Development Roadmapを先に見据えながらALMA Development Programを推進している。ALMA Development Roadmapでは、(a)広帯域受信機の開発、(b)基線の拡大、(c)データアーカイブの向上が優先順位の高い項目として掲げられている。ALMA Development Roadmapには、さらに長期にわたる性能向上を目指して、視野を拡大するためのマルチビーム(多視野)受信機開発や感度を向上させるための12 mアンテナの増設について述べられている。また、アルマ望遠鏡建設地に大口径の単一鏡を設置してアルマ望遠鏡とのシナジーを生み出す案にも触れている。現在のALMA Development Roadmapのさらに先、2030年代以降を見越した研究開発を立ち上げることも重要である。

ALMA Development Programは、アルマ望遠鏡の3つの執行機関(自然科学研究機構国立天文台、欧州南天天文台、米国北東部大学連合/米国国立電波天文台)によって実行される。その内容は、以下のふたつに分けられる。

▶ **Development Projects**: 実際のハードウェアやソフトウェアをアルマ望遠鏡に新たに組み込むことで、アルマ望遠鏡の性能を向上させることを目指すもの。アルマ評議会あるいはアルマ所長による承認が必要である。

▶ **Development Studies**: 将来的にアルマ望遠鏡の性能を向上させることを目指して、基盤技術の開発や技術的な実現可能性を検討する。基礎開発・検討が完了したのち、多くの場合はDevelopment Projectに移行する。各執行機関の責任で開始・実行される。

東アジア地区では、国立天文台が毎年ALMA Development Workshopを主催している。実際にアルマ望遠鏡を使って観測成果を生み出す天文学者と、装置やソフトウェアを開発する技術者が一堂に会し、開

発項目に関するアイデアや優先順位についての意見を交換する場である。この議論は、合同アルマ観測所や各地域の執行機関、また各地域の科学諮問委員会とも連携して行われる。ここ数年のワークショップのテーマは、「広帯域観測が可能な受信機と信号処理系」「テラヘルツ受信機」「多視野受信機」「さらなる長基線観測を実現するための装置開発」であった。

現在、東アジア陣営に関連のあるものとしては以下の3つがDevelopment Projectsとしてアルマ評議会に承認され、進行中である。

▶ **バンド1受信機**: 35~50 GHzの周波数帯を観測する受信機であり、台湾中央研究院天文及天文物理研究所が国立天文台との緊密な協力のもとにリードしており、米国国立電波天文台、チリ大学、ヘルツバーク天体物理学研究所(カナダ)が協力している。バンド1受信機の主要な科学目標は以下の2点である。

(a) 原始惑星系円盤の内側領域における、比較的大きなダスト粒子の分布を明らかにする。この領域はハビタブル惑星が形成される領域であるが、円盤の密度が高いと短い波長の電波では光学的に厚くなるため観測が困難である。

(b) 赤方偏移6~12の宇宙で、低温ガスからの一酸化炭素分子輝線($J=3-2/4-3$)を検出し、その分布を明らかにする。一酸化炭素は、宇宙再電離期に存在した初期銀河での星の材料をトレースすることができる。バンド1受信機は間もなくManufacturing Readiness Reviewを受け、2022年末までのアルマ望遠鏡への搭載を目指して量産が進められる予定である。

▶ **バンド2受信機**: 67~116 GHzの周波数帯を観測する受信機であり、欧州南天天文台が開発をリードし国立天文台が光学系の開発で貢献する。設計を完了させ最初の6台の受信機を製造する段階までのプロジェクトが、アルマ評議会によって近頃承認された。その科学目標は、以下の3点である。

(a) 宇宙の歴史の中で最も星形成が活発であった赤方偏移2~4の時代の銀河を観測し、低温ガスからの一酸化炭素輝線($J=2-1/3-2/4-3$)を検出し分布を明らかにすること、およびより遠方宇宙(赤方偏移11まで)において、一酸化炭素輝線($J=7-6$)と中性炭素輝線を検出しその分布を描き出すこと。

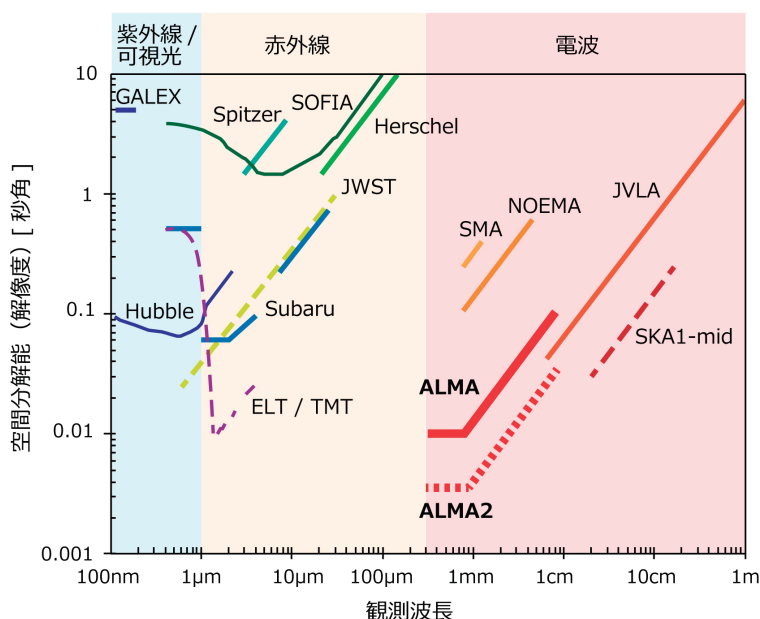


図3：紫外線から電波の波長域における望遠鏡の空間分解能(解像度)。実線は2018年現在で稼働中の望遠鏡、破線は建設中の望遠鏡を示す。アルマ2計画(ALMA2, 破線)は、ミリ波・サブミリ波の波長帯において圧倒的に高い解像度を有する。
Credit: 国立天文台

(b) 硫化炭素や一酸化炭素などの2原子分子とその同位体、重水素化合物、グリコールアルデヒドなどの複雑な有機分子からの電波輝線を検出すること

(c) 原始惑星系円盤において、2.5~4.5 mmのサイズのダスト分布を明らかにすること

▶ **ACA分光計**：韓国天文学宇宙科学研究院が国立天文台との密接な連携のもとに進めるプロジェクトであり、ACA 12 mアンテナ向けに特化した分光計を開発することを目指している。現在稼働中のACA相関器に比べて、信号の線形性、フラックス精度、ダイナミックレンジ、スペクトル応答の点で優れており、ACA 12 mアンテナでの撮像観測能力を強化することができる。さらにACA分光計では一般に使われているGPU技術を応用することで、将来的な拡張性や拡張のための自由度を確保している。

5. 「アルマ2」計画

2020年代、ALMA Development Roadmap に基づいてアルマ望遠鏡の機能を圧倒的に向上させながら科学運用を実行する計画を、日本では「アルマ2」計画と

呼称する。「アルマ2」では(a) 基線長を現在の16 kmから30 km程度まで拡張し、解像度を2倍向上、(b) アンテナに搭載される受信機を改良し、感度を2倍、同時観測可能な周波数帯域を2倍以上に拡張する。第2章で紹介した通り、現在のアルマ望遠鏡では地球に近い惑星誕生現場であるうみへび座TW星の原始惑星系円盤において、1天文単位スケールの構造を見出すことに成功した。太陽系近傍における原始惑星系円盤の分布を考えると、同スケールの構造が見分けられる天体は5天体程度に限られるが、「アルマ2」で解像度が2倍に向上することでこれが100倍以上に増加する。また、受信機の感度を2倍、同時観測可能な周波数帯域を2倍以上に向上させることで、分子・原子輝線の検出効率が大きく向上する。これにより、例えば原始惑星系円盤において多数の複雑な有機分子の輝線を効率よく検出し、生命の起源につながる可能性のある有機分子の分布と起源を明らかにすることができる。期待される。また遠方銀河においても、酸素をはじめとする重元素(星内部の核融合によって合成された元素)の輝線を効率よくとらえることができる。輝線は赤方偏移、すなわち距離を測定するために重要な手がかりである。可視光赤外線の撮像観測によって大ま

かにしか赤方偏移が決定されていない場合は、広い周波数帯域にわたって観測し輝線を探す必要があるが、同時観測可能な周波数帯域を拡大することで、効率よく遠方銀河の観測を実行することが可能になる。同時に、ビッグバン後5億年未満しかたっていない初期の銀河から重元素の輝線をとらえることで、宇宙で最初に重元素が作られたのはいつかという問いに迫ることができる。

6. 結 論

アルマ望遠鏡は、科学観測の開始から数年で革新的な観測成果を上げ続け、プロジェクト開始時に定められた所期の目標を達成しつつある。例えば、原始惑星系円盤では同心円状の隙間だけでなく三日月型構造や渦巻き型構造など、多様な構造があることを明らかにしつつある。また、原始惑星系円盤にメタノールをはじめとするいくつかの有機分子を発見している。アルマ望遠鏡が所期の目標を達成しつつあることを受けて、新しい科学目標を設定し、その達成を目指してアルマ望遠鏡の機能を強化させるALMA Development Roadmapが策定された。日本では自然科学研究機構国立天文台が、「アルマ2」計画としてこれを推進する準備が進められている。「アルマ2」計画によって、アルマ望遠鏡は地球上で最も先進的なミリ波サブミリ波望遠鏡として、今後も画期的な成果を上げ続けることができる。特に惑星系形成分野の研究では、1天文単位の空間解像度で数百の原始惑星系円盤を観測することができることの意義はたいへん大きく、円盤の内側から外側までの全域で進行する惑星系形成過程を理解することを目指す。また、有機分子輝線を単に検出するだけでなく、円盤内におけるその分布を明らかにすることで、生命の材料になりうるような複雑な有機分子が原始惑星系円盤にどのように分布しているのかを明らかにできると期待される。さらに、円盤内の重水素存在比の分布を明らかにすることで、水の起源に迫ることも重要である。太陽系内始原天体での水や有機分子の探査、可視光赤外線観測による太陽系外惑星大気での生命兆候探査と組み合わせることで、「アルマ2」は地球外生命探査に向けた基本的な知見を与えることを目指す。

参考文献

- [1] ALMA Partnership et al., 2015, ApJL 808, L3.
- [2] Andrews, S. et al., 2016, ApJL 820, L40.
- [3] Tsukagoshi, T. et al., 2016, ApJ 829, L35.
- [4] Andrews, S. et al., 2018, ApJL 869, L41.
- [5] Hashimoto, T. et al., 2018, Nature 557, 392.
- [6] Jørgensen, J. et al., 2012, ApJL 757, L4.
- [7] Martín-Doménech, R. et al., 2017, MNRAS 469, 2230.
- [8] Ligterink, N. F. W. et al., 2017, MNRAS 469, 2219.
- [9] Belloche, A. et al., 2014, Science 345, 1584.
- [10] Walsh, C. et al., 2016, ApJL 823, L10.
- [11] <https://www.almaobservatory.org/en/publications/the-alma-development-roadmap/>