

宇宙と生命の起源を探究する大型ミリ波サブミリ波望遠鏡アルマ 2 計画

① 計画の概要

アルマ 2 計画では、1) 地球型惑星形成領域における惑星系形成過程の理解、2) 惑星系誕生過程での生命素材物質の理解の飛躍的前進、3) 宇宙における元素合成の開始地点の探究を 3 大目標とする。そのためにアルマ望遠鏡の機能を大幅に向上させ、人類史上最高性能 (図 1) の観測装置を国際共同利用に供し、天文学研究に質的転換をもたらす。

アルマ望遠鏡は、日本をはじめとする東アジア、北米、欧州の国際協力で南米チリの標高 5,000 メートルのアタカマ高地に建設した、66 台のアンテナからなる巨大電波望遠鏡である。主に星や惑星の材料となる低温の星間ガスや星間塵が放つミリ波・サブミリ波を観測することで、惑星誕生現場の多重リング構造の発見、宇宙誕生後 5 億年の時代の銀河での酸素の発見、惑星誕生現場での有機分子の発見といった顕著な成果を多数創出している。アルマ 2 計画では、これらの発見そして天文学全体の進展を背景とし、惑星系形成の研究においては木星軌道以遠から地球軌道領域の解像へと大幅に歩を進め、また単に有機分子を検出する段階から、それらの空間分布を捉え惑星の物理・化学環境を理解する段階へと向かう。宇宙最初期の研究では、アルマ望遠鏡による宇宙誕生後 5 億年での酸素の発見を元に、それが示唆する宇宙誕生後およそ 3 億年での星形成活動を直接捉え、初代銀河の形成期における元素合成を明らかにする。本計画ではこれらの科学目標に挑むために、アルマ望遠鏡の感度を約 2 倍、解像度を 2 倍以上、周波数帯域を 2 倍以上、視野を 4 倍以上向上させ、惑星誕生現場で地球軌道領域が解像可能な天体数を約 100 倍、宇宙初期の銀河の観測効率を 10 倍以上向上させる。新しい科学目標と具体的な開発項目の検討は、国際的な研究者コミュニティとの熟議を経て ALMA Development Roadmap としてまとめるなど周至な準備を行ってきた。

② 学術的な意義

現代天文学では、銀河と惑星系の成り立ちに加え宇宙における生命を探る研究の進展が顕著である。この潮流の中で、アルマ 2 計画では以下のような成果が期待できる。

1) 惑星系形成: アルマ望遠鏡は多くの原始惑星系円盤を高解像度で撮影し、その構造の普遍性と多様性を明らかにした。また地球近傍の原始惑星系円盤で地球軌道サイズまで描き出した。アルマ 2 では解像度向上により遠方の天体を詳細観測し、地球軌道サイズが分解できる天体数を約 100 倍に増加させる (図 2)。多数の円盤で、地球型惑星形成領域を含む円盤の全域にわたって惑星材料である塵の成長場所や円盤構造を作り出す惑星の重さと存在場所を突き止め、惑星系の形成過程を明らかにする。

2) 生命素材物質: 原始惑星系円盤内での生命素材物質の分布と進化を明らかにする。また円盤内での重水素存在比の空間分布を明らかにし、水の起源に迫る。はやぶさ 2 などの探査機で行う太陽系内始原天体での水や有機分子の探査、可視赤外線観測による太陽系外惑星大気での生命の兆候探査と組み合わせ、アルマ 2 は地球外生命探査という人類の究極的な課題に挑む上での基本的知見を与える。

3) 初代銀河: アルマ望遠鏡が宇宙年齢 5 億年の時代に電離酸素輝線を検出したことで、その 2 億年前に最初の星が誕生したことが示唆された。これは、宇宙初期の新しい探針として電離酸素輝線が有望であること、宇宙年齢 3 億年 (赤方偏移 $z=15$) が銀河形成史において極めて重要な時期であることを示す。アルマ 2 では感度向上と観測周波数帯域・視野の拡大で遠方銀河の検出効率を 1 桁以上向上させ、この時代の銀河の直接検出を目指す。具体的には、宇宙誕生後約 3 億年で発生したとされる第一世代星の超新星爆発で放出された酸素を直接捉え、最初の星形成の時期を精度よく求めることで、宇宙における元素合成の開始地点を特定する。

③ 国内外の動向と当該研究計画の位置づけ

アルマ 2 計画と同波長帯で同等以上の性能を有する計画は存在しない。また本計画は電波天文学に限らないインパクトをもたらし、天文学全体をより一層強力に牽引することができる。例えばすばる望遠鏡の広域探査から超遠方天体候補を絞り込んだ上で、30m 級可視赤外線望遠鏡 (TMT) で最初に誕生した大質量星の集団が放つ紫外光を直接検出する。アルマ 2 でその大質

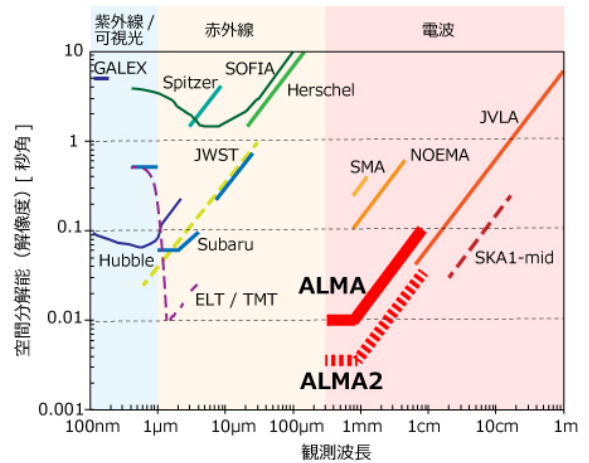


図 1 紫外線から電波の波長域における望遠鏡の空間分解能 (解像度)。実線は 2018 年現在で稼働中の望遠鏡、破線は建設中の望遠鏡を示す。

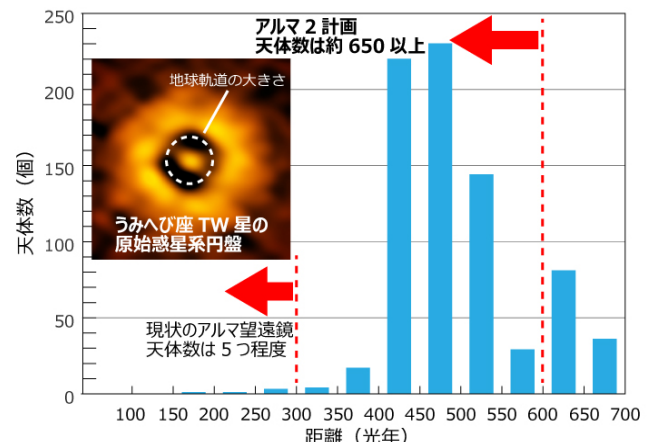


図 2 現在のアルマ望遠鏡の解像度では、地球軌道サイズを描き出せる天体は 5 つ程度に限られるが、アルマ 2 計画では約 650 以上となる。

量星の超新星爆発によって放出された酸素などの重元素存在量を測定し、初代星の形成時期や質量等を定量化することで宇宙最初期の銀河形成の詳細を明らかにすることができる。また、原始惑星系円盤の表層に現れる惑星形成の兆候をすばる望遠鏡が、円盤の奥深くでの惑星の誕生をアルマ2が、さらに惑星本体をTMTが検出し、惑星の成長過程の理解を前進させる。なお、天文学・地球惑星科学分野においては、太陽系を含む惑星系の普遍性と特殊性の理解、ひいては宇宙における生命の理解が2030年代以降の最重要課題の一つに位置付けられている。アルマ2はこの世界的潮流の中でいち早く惑星形成現場における生命素材物質の分布とその進化を明らかにし、宇宙生物学へとつながる研究の本格的な端緒を開く。

④ 実施機関と実施体制

実施機関は日米欧の三者（日本の自然科学研究機構、米国の国立科学財団、欧州南天天文台）である。実際の運用は、三者協定で定められた日米欧の執行機関（日本の国立天文台、米国の北東部大学連合と国立電波天文台、欧州南天天文台）が中心となる。米欧のパートナーは大規模観測施設を世界中で展開している屈指の研究機関であり、国立天文台はこれらと対等な立場でアルマ望遠鏡の運用に貢献している。さらに、日本を中心とする東アジアでは台湾中央研究院天文及天文物理研究所と韓国天文学宇宙科学研究所が、米国を中心とする北米ではカナダの国立研究機関が、そして16カ国の加盟国を有する欧州南天天文台が参加し、国際連携が構築されている。最高意思決定機関であるアルマ評議会の12名の委員は北米と欧州で4名、東アジアから3名、チリから1名を選出することが三者協定で定められており、日本が強い主導権を発揮できる体制となっている。

2018年6月、アルマ評議会にて2020年代のアルマ望遠鏡の科学目標と開発項目を示すALMA Development Roadmapが策定され、アルマ望遠鏡の国際実施体制を維持しつつ、その機能を次の10年間で質的に生まれ変わらせる計画が合意された。日本はその策定において主要な貢献を行い、これに完全に整合する計画を日本では「アルマ2計画」と呼称している。アルマ2計画は、日本が東アジア地域とともに新機能の開発に貢献し、国際的な合意のもとで掲げた新しい科学目標の実現を目指すものであり、三者協定で合意した30年+αの運用を実現するものである。さらに、国立天文台は国内の大学（電気通信大学、大阪府立大学等）や研究機関（情報通信研究機構等）とも連携し、アルマ2計画に関わる技術開発を行っている。

⑤ 所要経費

アルマ2計画は、アルマ望遠鏡による共同利用観測を行いながら、並行して新機能を追加し、2020年代においても世界トップレベルの科学成果を上げる望遠鏡として生まれ変わらせる計画である。このため、運用経費と機能強化経費が必要となる。運用経費は、本計画期間（2023～2034年予定）の12年間で総額約1,368億円（毎年約114億円）であり、このうち日本は協定書に定められたとおり全体の25%、約342億円（毎年約28.5億円）を分担する。機能強化費は、12年間で総額約216億円となる見込みであり、東アジアはその25%に相当する約54億円の貢献を行う。機能追加のための開発予算の年次プロファイルは、アルマ2計画に係る国際的な合意に依存するが、東アジアの貢献については台湾と韓国と調整の上、日本が主導して決定する。

⑥ 年次計画

アルマ2計画におけるアルマ望遠鏡の機能更新は、共同利用観測に極力支障を与えないよう、段階を踏んで行う。主要な更新は2023年～2034年の間で適時行い、性能実証の後に科学観測を実施する。具体的には、感度を2倍、周波数帯域幅を2倍以上にする超伝導デバイスやデジタル信号処理システムの開発、データ伝送システムやフォトニック技術による高精度信号発生システムの開発、およびデータアーカイブやITインフラ等の大幅な改善を実施する。さらに、解像度を2倍以上向上させるために、アンテナを30～50キロメートルの範囲に配置して長基線での干渉計実験を行い、性能実証を実施する。

アルマ2計画の期間後半には、機能更新後のアルマ望遠鏡による科学成果や周辺学問分野の進展状況に基づいて、2034年以降の科学目標の検討を行う。この検討は2034年以降のアルマ3計画（暫定名称）の提案へつながるものである。一方、顕著な科学的前進が見込めない場合には、アルマ2計画の終盤にアルマ望遠鏡の運用終了へ向けた作業を行う。

アルマ2計画の実施にあたっては、アルマ望遠鏡の現在の運用に携わる人的リソースを活用し、科学目標達成へ向けて基礎開発を進める（国立天文台アルマプロジェクトの職員は約90名、合同アルマ観測所の国際職員約40名のうち日本からの派遣は約10名）。これらの人員は、日常的に海外との協力・競争を経験しており、アルマ3計画のみならず、国際協力による今後の大型計画の主導・推進に必要な若手研究者を含む人材の育成につながる。さらに、これらの人材が天文学以外の学問分野や、企業、大学といった各所へ移り、日本の国際競争力の維持・強化に資することが期待される。

⑦ 社会的価値

アルマ望遠鏡についての理解を得るため、ウェブサイト・SNS、プレスリリース、講演会等の広報活動を精力的に行っている。「宇宙における私たちのルーツ」を探る試みは人類普遍の興味であり、社会との共有は知的価値も高い。特に、重要なプレスリリースは日本だけでなく国際共同運用を行う海外機関を通じて世界に同時発信され、日本の研究者や研究機関の世界的プレゼンスの向上につながっている。アルマ2計画でもこれを強化する。

アルマ望遠鏡開発で培われた大型精密構造物の製作技術や受信機部品の超精密加工技術は産業界に蓄積され、JAXA深宇宙通信アンテナに活かされるなど天文学にとどまらない波及効果を持つ。アルマ2計画で開発する受信機や分光計には、日本の技術力を活かした超伝導デバイス開発やデジタル信号処理、フォトニック技術を使った高精度信号発生技術が重要となる。これらの技術は、環境中に存在する様々な物質や創薬に必要な各種物質の特定、次世代通信網5Gの技術基盤としての応用が期待できる。政府が掲げるSociety 5.0の技術的課題である革新的センシング技術やビッグデータ処理に貢献することを通じて、SDGsの達成に資する。

⑧ 本計画に関する連絡先

井口 聖（自然科学研究機構国立天文台）