

暗黒宇宙の謎に挑むアルマ望遠鏡とその観測成果

Telescope ALMA and Its Observational Performance:
Effort to Unveil Mysteries of Supernovae

自然科学研究機構
国立天文台チリ観測所
助教

平松 正顕

Masaaki Hiramatsu



はじめに

私たちが住む太陽系は、どのようにして生まれたのだろうか。太陽系が含まれる天の川銀河は、いつどのように生まれ、どのように進化してきたのだろうか。そして、生命の材料になるような物質は、宇宙にどれほど漂っているのだろうか。こうした人類が古くから抱いてきた大きな疑問に迫ろうとしているのが、日本を含む22の国と地域が共同で運用するアルマ望遠鏡である。⁽¹⁾

アルマ望遠鏡は、66台のパラボラアンテナを結合させることで、山手線サイズに匹敵する巨大な1台の電波望遠鏡として機能させることができる。建設された場所は、南米チリ北部、標高5,000 mの

アタカマ高地である（図-1）。強い日射が降り注ぎ酸素は平地の半分しかない、人間にとっては厳しい場所であるが、そんなところに建設されたアルマ望遠鏡は、人類が宇宙の深淵をのぞきこむ最新の「窓」とも言える。

本稿では、アルマ望遠鏡に活かされている様々な最先端技術と、アルマ望遠鏡で見えてきた新しい宇宙の姿を紹介する。

「見えない宇宙」を見る電波天文学

アルマ望遠鏡は、可視光ではなく電波を捉える望遠鏡である。可視光の波長はおよそ400～800 nmであるのに対し、国際電気通信連合（ITU）は波長100 μm 以上（周波数に換算すると3 THz以



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

図-1 アルマ望遠鏡

下)の電磁波を電波と定義している。これだけ波長が異なる電磁波は、その放射源も異なる。可視光は、主に恒星やそれに炙^{あぶ}られた高温のガスなどから放射されるが、電波は絶対温度10度(マイナス263℃)という極低温の物質からも、また超巨大ブラックホールから噴き出る高温のガスからも放射される。可視光と電波、エックス線や紫外線など多波長で宇宙を観測することで、様々な天体や現象を捉えることができ、宇宙全体の理解につながる。

電波の中にも様々な波長のものがあり、それぞれ見えるものが異なる。今回紹介するアルマ望遠鏡が観測する電波は波長が10 mmから0.3 mm程度のもので、ミリ波・サブミリ波と呼ばれる。この波長帯の特徴は、先にも述べた低温の星間物質の観測に適していることである。逆に、夜空に輝く星々はほとんど見えない。ミリ波・サブミリ波で見えるのは、星々の間に漂う暗黒の雲、「星間物質」である。星間物質は、主に水素から成るガスと、1 μm 程度かそれより小さい塵の微粒子の混合物である。ガスには、一酸化炭素やアンモニア、メチルアルコールなどの分子も含まれている。こうした分子が、それぞれに特有の波長で電波を発する。宇宙からやってくる電波の波長と実験室で測定済みの電波の波長とを照合することで、観測対象に含まれる分子の種類を同定し、電波の強度から分子の密度や温度を推定することができる。また塵の粒子からは、その温度に応じた波長分布の電波が放射される。星間物質は星や惑星の材料であり、更に星の集合体である銀河の材料とも言える。星間物質から放たれる電波を詳しく観測することで、冒頭に挙げた様々な宇宙の謎に迫ることができる。

「究極の電波望遠鏡」アルマ

約85年の電波天文学の歴史の中で、数多くの電波望遠鏡が作られてきた。アルマ望遠鏡は、その一つの到達点と言える。ここではそのプロジェクトの概要を紹介する。

アルマ望遠鏡は、「アタカマ大型ミリ波サブミリ波干渉計 (Atacama Large Millimeter/submillimeter Array : ALMA)」を正式名称としている。「アタカマ」は、アルマ望遠鏡が建設されたチリ北部の地域の名前である。南北に細長いチリの北半分を占

めるのがアタカマ砂漠であり、年間降水量100 mm以下の世界で最も乾燥した場所の一つである。アルマ望遠鏡はこの砂漠の中、しかもアンデス山脈の標高5,000 mという高地に設置されている。ここは世界各地で観測条件を調査したのちに選ばれた、まさに地球上で最もミリ波・サブミリ波観測に適した場所である。

正式名称に入る「干渉計」とは、複数のパラボラアンテナを結合させ全体を一つの巨大な望遠鏡とする仕組みのことである。望遠鏡の解像度は望遠鏡の口径に比例し、観測する電磁波の波長に反比例する。建設可能な単一の望遠鏡の口径には技術的な上限があるが、複数のアンテナをつなげることでその上限を突破するというのが干渉計の基本的なアイデアである。アルマ望遠鏡は、約16 kmの範囲に66台のアンテナを展開し、実効的に直径16 kmの口径の望遠鏡と同一の解像度が達成できる。望遠鏡の解像度は見分けることができる角度の大きさを表現され、アルマ望遠鏡の解像度は0.01秒角(1秒角は角度の1度の3,600分の1)である。これは、人間の視力に換算すると6,000に相当し、東京から大阪に落ちている1円玉の大きさが見分けられるほどである。また、すばる望遠鏡やハッブル宇宙望遠鏡と比較しても10倍の解像度を持つことになる。

こうした最先端の科学プロジェクトは、国際協力で進めることが一般的になってきている。アルマ望遠鏡は、日本・台湾・韓国の東アジアグループ、アメリカ・カナダの北米グループ、そして16か国が参加する欧州南天天文台、更に建設地のチリの22の国と地域が共同で運用している。次章で述べる様々なコンポーネントを3極で開発して持ち寄り、人員と運用経費も分担して運用している。東アジアグループは、全体の1/4の貢献をしている。

アルマ望遠鏡に活かされる技術

アルマ望遠鏡は非常に多様な要素から構成される複雑な装置であるが、主要なコンポーネントはアンテナ、受信機、相関器の三つである(図-2)。この章では、それぞれに活かされる技術を簡単に紹介する。

アルマ望遠鏡は66台のアンテナから成ることは既に説明したが、その中に二つのシステムが存在



図-2 アルマ望遠鏡への日本の貢献
(左上)12 mアンテナ, (左下)7 mアンテナ,
(右上)3種の受信機, (右下)ACA相関器

する。直径12 mアンテナ50台から成る「12 mアレイ」と、12 mアンテナ4台と7 mアンテナ12台から成る「アタカマ・コンパクト・アレイ (ACA)」の二つのシステムである。12 mアレイのアンテナは米欧が25台ずつ、ACAのアンテナは日本が開発した。ACAは、その設計に重要な貢献を果たしながらチリで亡くなった森田耕一郎 国立天文台教授の名を取って「モリタアレイ」とも呼ばれる。

アンテナの最も重要な役割は、観測対象天体を正確に追尾し、降り注ぐ電波を高い効率で集めることである。このため、追尾性能と鏡面精度が重要となる。アルマ望遠鏡のアンテナは、一般的な光学望遠鏡とは異なりドームに入っていない。しかも、昼でも夜でも観測を行う。強い日射や温度変化、強風にさらされながらの観測でも天体から狙いを外さないようにするために、様々な工夫が凝らされている。この工夫はアンテナを開発した国・企業によって様々だが、日本製アンテナで言えば、(1) 熱変形しにくい炭素繊維強化プラスチックを主鏡面の骨組みに採用 (12 mアンテナ)、(2) 安価な鉄を使ってコストを抑えつつ、主鏡面の骨組み内部に強制的に風を送って温度を平準化し、熱変形しやすい鉄の欠点を克服 (7 mアンテナ)、(3) アンテナ架台内部に筐体とは独立した骨組みを設置し、骨組みと筐体の間隔をリアルタイムに計測することでわずかな変形を検知し、即座に駆動系にフィードバックする「メトロロジースystem」(12 m, 7 m共通) の3点が代表的である。

これによりアンテナの指向精度は1/6,000度、アンテナ鏡面の理想的なパラボラ面からの誤差は25 μm (髪の毛の太さの1/3程度) という高い精度を実現した。日本製のアンテナは、三菱電機をはじめとする80以上の企業と国立天文台が協力して作り上げたものである。

アンテナが一般的なカメラのレンズに当たるとすれば、撮像素子に相当するのは「受信機」である。アルマ望遠鏡では観測する電波を10の波長帯に分け、それぞれに最適な設計の受信機を開発した。10台の受信機が1セットとなって真空冷凍容器(クライオスタット)に収まり、各アンテナに搭載される。国立天文台は、三つの波長帯(バンド4, 8, 10、それぞれ波長は約2 mm, 0.6 mm, 0.3 mm)に対応する受信機の開発と量産(66台のアンテナ搭載分と予備7台を含む各バンド73台)を分担した。受信機の心臓部はSIS素子と呼ばれるもので、厚さ1 nmほどの酸化アルミニウム薄膜を超伝導体のニオブで挟み込んだ構造を持っている。半導体製造にも使われ、微細な回路の製作が可能な紫外線露光装置を備えたクリーンルームを国立天文台内に整備することで、世界最高性能の素子の開発と安定的な量産を実現することができた。また受信機全体の設計と組み立て、ミラーなどの光学部品の設計と一部製造では、国立天文台先端技術センターの技術職員が大いに活躍した。

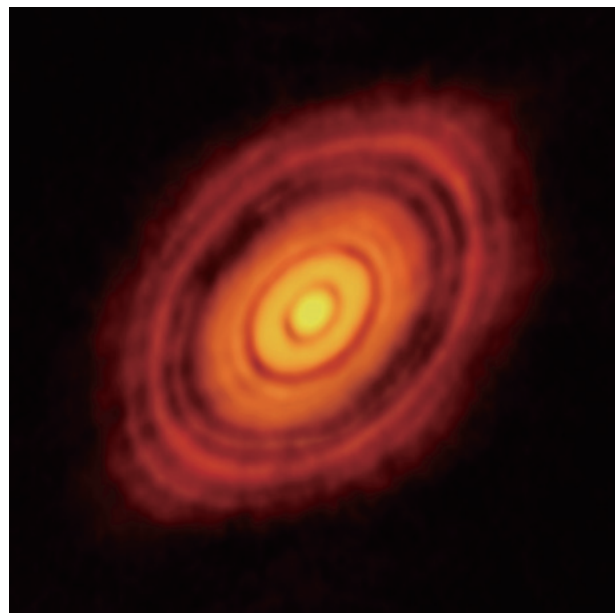
受信機で電気信号に変換された宇宙からの電波は、デジタル化され光ファイバーを通して専用計算機の役割を果たす「相関器」に送られる。相関器の働きは、多数のアンテナから出力される信号を合成して全体を一つの望遠鏡として機能させる(相関処理)ことと、信号の周波数情報を取り出して電波のスペクトルを得る(フーリエ変換)ことである。建物内のラックに収まるその姿はあまり目立たないが、まさに干渉計の頭脳と言って良い重要な要素である。アルマ望遠鏡の相関器は、米欧のアンテナからの信号を処理する「64素子相関器」と、日本が開発したACAの信号を処理する「ACA相関器」の二つがあり、ACA相関器は富士通と国立天文台ほか協力して開発・製造したものである。その開発には、やはりいくつかの困難があった。まずは処理すべきデータの量である。ACA相関器の場合、16台のアンテナからの入力デー

タ量は毎秒256 Gバイトであり、次々に送られてくるデータを毎秒120兆回のリアルタイム演算で処理する。この処理速度は、現地設置当時のスーパーコンピュータ速度ランキングTOP500の4位（日本では1位）に相当する。ACA相関器には5,152個のFPGA（Field Programmable Gate Array）が使われており、柔軟性と低コスト化が実現されている。もう一つの困難は、相関器が設置される場所が標高5,000 mの山頂施設内であることによる。気圧が平地の半分ほどのこの場所では、空冷効率が落ちる。これを克服するため、相関器内部での熱発生を平準化し効率的な冷却方法が模索された。その実証には、低圧チャンバーでの長時間の稼働テストも行われている。また、気圧が低いことによってハードディスクの故障率が上昇してしまうため、山頂施設ではディスクレス構成とし、コントロールルームなどがある標高2,900 mの山麓施設に置かれた計算機からのネットワークブートとなっている。更に、簡単にはメンテナンスに行けない場所にあるため、日本からのリモートメンテナンス機能を充実させるなどの工夫も行われている。⁽²⁾

アルマ望遠鏡による観測成果

アルマ望遠鏡は、2011年9月に全世界の研究者の提案に基づく科学観測を開始し、2016年7月現在で400を超える査読論文が出版されている。ここでは、その代表的な成果を紹介する。

これまでのアルマ望遠鏡による観測を代表する成果としては、若い星おうし座HL星の観測が挙げられる。⁽³⁾ この星は誕生後100万年という非常に若い段階にあり、その周囲にはガスと塵の円盤（原始惑星系円盤）が取り巻いている。アルマ望遠鏡が0.03秒角の解像度（視力2,000に相当）で描き出したのは、同心円状の多数のリングから成る円盤の姿であった（図-3）。こうした多重リング構造がはっきり写し出されたのはこれが初めてであり、それまでの原始惑星系円盤の観測結果とは一線を画すものであった。筆者も初めてこの画像を見たときには、イラストレーターが描いた想像図かと勘違いした。多重リングの成因はいくつかの説が提唱されており、決着はまだついていない。一つの説は、既に形成されつつある巨大な惑星がリングの隙間に存在し、惑星の重力によって塵が「掃



Credit : ALMA (ESO/NAOJ/NRAO)

図-3 おうし座HL星を取り巻く円盤

除」された結果として隙間ができた、というものである。こうした隙間の形成機構自体はこれまでの理論予測に合致するものであるが、隙間を作るほどの大きな惑星が100万歳という若い段階で既に形成されているというのは予想外であった。もしこの説が正しければ、惑星の形成は実はもっと短期間に進行することになり、理論の再考を迫られることになる。一方で惑星ではなく、塵の衝突合体や破壊の進行によってリングができるという説、円盤に含まれるガスと塵の間に働く摩擦によってリングができるという説も提唱されている。アルマ望遠鏡が高精細な画像を撮影したことによって、むしろ謎が増えたといってもいいかもしれない。しかしそれは、研究の醍醐味でもある。

アルマ望遠鏡は、遠方の宇宙も観測対象としている。電磁波の伝搬に時間がかかることから、遠方の宇宙を見ることは昔の宇宙を見ることと同義である。まるでタイムマシンのように130億年以上も宇宙の歴史を遡り、数千億の星を含む銀河がどのように生まれ進化してきたのかを目撃することができる。実際アルマ望遠鏡は、約130億年前に存在した銀河をいくつも観測している。昔の銀河の観測で重要なことは、その銀河の組成を求めることである。炭素や酸素といった身近な元素（天文学で言う「重元素」）は、星の中の核融合反応で作

られ、星の死によって宇宙空間にまき散らされた。星の世代交代に伴って重元素が次第に宇宙に蓄積されたのである。重元素がどのように蓄積されてきたかを調べることで、銀河の進化と星形成史に迫ることができる。アルマ望遠鏡では、131億年前の銀河に酸素があることを発見した⁽⁴⁾ また同時期の銀河で極端に塵や炭素原子が少ないものも見つかっている。アルマ望遠鏡は、その高い感度を活かして古い時代の銀河を数多く観測することで、宇宙全体がどのように進化してきたのかを明らかにしつつある。

更にアルマ望遠鏡は、生命の起源と関連するかもしれない有機分子の宇宙における探査にも挑んでいる。地球上の生命がどのように生まれたかはまだ明らかでないが、宇宙空間で形成された複雑な有機分子（例えばアミノ酸）が種になった可能性も指摘されている。アルマ望遠鏡はその高い感度で、アミノ酸分子が出す電波を検出できると期待されている。おうし座HL星のような惑星誕生領域でアミノ酸がもし豊富に存在すれば、そこで作られる惑星にアミノ酸が取りこまれ、生命誕生のきっかけになるかもしれない。もちろん生命の発生はそれほど単純ではないだろうが、少なくとも材料が宇宙にどれくらい普遍的に存在するのかは、アルマ望遠鏡が明らかにしてくれるだろう。アルマ望遠鏡はまだアミノ酸を見つけてはいないが、原始星IRAS16293-2422の周囲にアミノ酸の材料になるような糖類分子グリコールアルデヒドを発見した⁽⁵⁾ また星形成領域いて座B2では、アミノ酸のように枝分かれした炭素の骨格を持つ有機分子が大量に存在することも明らかにした⁽⁶⁾

アルマ望遠鏡は、土星の衛星タイタンの大気における有機分子の偏りの発見や、死にゆく星から噴き出したガスの広がりを高精細に描き出すことを成功した。このほかにも、巨大ブラックホールの周囲を回るガスの運動を解析してブラックホールの質量を測定するなど、様々な天体の新しい姿を明らかにしてきている。アルマ望遠鏡がカバーできる天体や現象は非常に広範であり、天文学の様々な分野で変革を起こしつつある。

おわりに

アルマ望遠鏡の公式なスローガンは、「In search

of our Cosmic Origins」である。冒頭に挙げた銀河や惑星の誕生の謎を探るアルマ望遠鏡は、まさに宇宙に私たちのルーツをたどる営みとも言える。世界の多くの国々とそこに住む人たちが力を合わせて実現させたアルマ望遠鏡は、人類普遍の謎に挑むために、今日も厳しい環境のもとで観測を続けている。更なる成果を是非ご期待いただきたい。

参考文献

- (1) アルマ望遠鏡ウェブサイト.
<http://alma.mtk.nao.ac.jp/j/>
- (2) 阿部勝己ほか:ALMAを支える関連器制御システム. FUJITSU, Vol.59, No.5, p.513-519 (2008).
<http://img.jp.fujitsu.com/downloads/jp/jmag/vol59-5/paper04.pdf>
- (3) ALMA Partnership et al. : The 2014 ALMA Long Baseline Campaign : First Results from High Angular Resolution Observations toward the HL Tau Region. The Astrophysical Journal Letters, Vol.808, L3 (2015).
- (4) A. K. Inoue et al. : Detection of an oxygen emission line from a high-redshift galaxy in the reionization epoch. Science, Vol.352, Issue 6293, p.1559-1562 (2016).
- (5) J. K. Jorgensen et al. : Detection of the simplest sugar, glycolaldehyde, in a solar-type protostar with ALMA. The Astrophysical Journal Letters, Vol.757, L4 (2012).
- (6) A. Belloche et al. : Detection of a branched alkyl molecule in the interstellar medium : iso-propyl cyanide. Science, Vol.345, Issue 6204, p.1584-1587 (2014).