

アルマ望遠鏡が描く新しい宇宙の姿

平松正顕 ・ 長谷川哲夫
井口 聖 ・ 立松健一

〈国立天文台チリ観測所 〒181-8588 東京都三鷹市大沢2-21-1〉

e-mail: hiramatsu.masaaki@nao.ac.jp

2011年に初期科学観測が開始されたアルマ望遠鏡は、2013年3月にチリ現地で各国要人をお迎えしての開所式典を執り行い、本格観測にあたるサイクル1の開始を祝いました。これまでに取得された科学評価データおよびサイクル0のデータからは、アルマ望遠鏡の高い感度と空間分解能を活かして、遠方の爆発的星形成銀河から近傍の星・惑星系形成領域に至るまで幅の広い研究が展開されており、驚くべき成果も次々と発表されています。アルマ望遠鏡特集の巻頭言として、アルマ望遠鏡の概要と現状、さらにこれまでに発表された代表的な成果について紹介します。

1. はじめに

青空のもとで一斉に首を振る白いアンテナ群。抱き合う研究者と大統領。湧き上がる拍手と歓声、そして涙。2013年3月13日、アルマ望遠鏡はチリ現地で開所式を迎えました。350人を超える来賓、100名を超える取材陣、そして5万人を超えるストリーミング中継視聴者が見守る中で、アルマ望遠鏡は次の一步を踏み出したのです。

その開所式からさかのぼること1年半、2011年9月末からアルマ望遠鏡は準備が整った一部の装置を用いて『初期科学観測サイクル0』を開始しました¹⁾。2012年いっぱいまで行われたこの観測期間には、アルマ望遠鏡はまだ限られた観測性能しかもたないにもかかわらず多くの観測提案が寄せられ、世界中の研究者たちのアルマ望遠鏡に対する大きな期待が顕在化しました。そしてアルマ望遠鏡は既存のミリ波・サブミリ波干渉計に比して圧倒的な感度と解像度でその期待に応え、各地の研究グループからその成果が続々と発表されています。

今回のアルマ特集では、まず本稿でアルマ望遠

鏡の概要と現状を解説した後、初期科学観測サイクル0ですでに観測成果を出された四つの研究グループにその概要をご紹介します。なおこの特集以前に、アルマ望遠鏡による観測成果としては京都大学の長尾透氏²⁾、国立天文台の廣田朋也氏³⁾による解説が天文月報に報告されているので、併せてお読みください。

2. アルマ望遠鏡の概要

アルマ望遠鏡（正式名称は「アタカマ大型ミリ波サブミリ波干渉計」: Atacama Large Millimeter/submillimeter Array; ALMA）は、南米チリ北部、標高5,000 mのアタカマ高地に設置された電波望遠鏡です。建設地のアタカマ高地は年間降水量が100 mmを下回る乾燥地で、高い標高と相まって水蒸気による電波吸収が少ないことから、波長の短い電波（ミリ波・サブミリ波）の観測に適しています。

アルマ望遠鏡は、66台の高精度パラボラアンテナを東京の山手線とほぼ同じ大きさの敷地に展開し、それらをつなぎ合わせて一つの巨大な電波望遠鏡として機能させる電波干渉計です



図1 標高5,000 mに並ぶパラボラアンテナ群。2012年12月に空撮されたもの。
Credit: Clem & Adri Bacri-Normier (wingsforscience.com)/ESO.

(写真1). 66台のうちの直径12 mアンテナ50台は米欧が開発したもので、12 mアレイと呼ばれます。残りの12 mアンテナ4台と7 mアンテナ12台は日本が開発を担当した「アタカマコンパクトアレイ (Atacama Compact Array; ACA)」を構成します。アタカマコンパクトアレイは、12 mアレイでは観測しにくい、天球上で大きな広がりをもつ天体からの電波も逃さずキャッチする役割を担っています。なおこのアタカマコンパクトアレイには、そのアンテナ直径や配列の決定に大きな貢献をされた故 森田耕一郎 国立天文台教授の功績を称え、正式な別名として「モリタアレイ (Morita Array)」の名が与えられました。

アルマ望遠鏡は、日本の国立天文台を代表とする東アジア、米国国立電波天文台を代表とする北米、ヨーロッパ南天天文台を代表とするヨーロッパの国際共同プロジェクトであり、受入れ国のチ

リは土地の提供やアルマ望遠鏡の建設・運用について便宜を図ることで参加します。

3. 初期科学観測サイクル0とアルマ望遠鏡の現状

3.1 初期科学観測サイクル0

サイクル0に向けた観測提案は2011年6月末に募集が締め切られ、919件の提案の中から審査を経て113件の“Highest Priority”プロジェクトと51件の“Filler”プロジェクトが選ばれました。サイクル0の観測仕様は齋藤他¹⁾に詳述されているとおりで、使用可能なアンテナは12 mアンテナが16台以上、その配列はコンパクトな配列(アンテナ間隔18-125 m)と広がった配列(同36-400 m)の2種類でした。受信機は、バンド3(観測可能周波数84-116 GHz)、6(211-275 GHz)、7(275-373 GHz)、9(602-720 GHz)の4種類が



図2 山頂施設からの中継を見守るピネウラ大統領
とドゥフ라우合同アルマ観測所長。

すべてのアンテナに搭載されました。サイクル0の観測は2011年9月から開始されましたが、予想外の悪天候や技術的問題などから当初予定より遅れて2013年1月1日に終了となりました。総観測時間のうち11%が最も周波数の高いバンド9（可降水量0.5 mm以下の条件で観測実行）に当てられ、バンド3, 6, 7に割かれた時間の割合はそれぞれ21%, 23%, 45%でした。やはりサブミリ波の入り口である350 GHz帯での観測に対する要求が高かったことがうかがえます。

取得されたデータは、合同アルマ観測所（Joint ALMA Observatory; JAO）および各地域のアルマ地域センター（ALMA Regional Center; ARC）スタッフによって解析され、要求された質のデータが取れているかどうかの確認が行われます。データの「品質保証」を行うということがアルマ望遠鏡を用いた観測における大きな特徴になっており、もし品質が不十分な場合には追加観測を行って提案者が求めるレベルに適合させることとなります。

サイクル0においては、Highest Priorityにランクされた観測提案113件のうち、キャンセルされた2件を除く111件の97%には何らかのデータが

渡り、88%の観測提案では少なくとも一つの「サイエンスゴール（ある周波数帯での観測セット）」が完了しデータが配布されています。ここに挙げたサイクル0についての実績は、ALMA Science Portal*¹に“Summary of ALMA Cycle 0”として掲載されていますので、今後の観測提案作成などの参考にご覧ください。

3.2 アルマ望遠鏡の現状

冒頭に述べたとおり、アルマ望遠鏡の主要部分の完成を祝して、2013年3月13日にチリ・アルマ望遠鏡山麓施設（標高2,500 m）で開所式典が開催されました。チリ共和国のセバステアーン・ピネウラ大統領や福井照文部科学副大臣をはじめとする各国要人、プロジェクト関係者、企業関係者など約350名が参加する盛大な式典となりました。タイス・ドゥフ라우合同アルマ観測所長（当時）は「telescope of the people, by the people, for the people」と述べ、人類全体の『目』としてのプロジェクトが大きなマイルストーンを達成したことに対する祝辞を述べました。またピネウラ大統領は「アルマ望遠鏡は、宇宙や生命の起源を知りたいという人類の熱意と努力の結晶である。アルマ望遠鏡で宇宙を知ることは、人類自身について深く知ることにもつながる」とその意義を強調されました。

式典の最後には山頂施設の様子が式典会場に生中継され、ピネウラ大統領の指示で全アンテナを天の川銀河の中心に向けるというパフォーマンスが行われました。式典後には施設の見学会も行われ、山麓施設でアンテナ搭載前試験中の受信機カートリッジや建造の最終段階にある欧州製パラボラアンテナ、山頂施設の相関器やアンテナ群を多くのゲストにご覧いただきました。これだけたくさんの方を標高5,000 mまで大型バスでご案内するのは異例のことですが、安全管理チームのしっかりした対応の下で大過なく見学会を終える

*¹ <http://almascience.nao.ac.jp/>



図3 山頂施設に勢ぞろいしたモリタアレイの16台のアンテナ。
Credit: ALMA (ESO/NAOJ/NRAO).

ことができました。構想段階から20年以上にわたってプロジェクトを見つめられてきた方々も、同期駆動するアンテナ群やそれを支える施設を実際に目の当たりにし、感慨もひとしおという表情でした。

また4月26日には、日本が開発を担当したモリタアレイのアンテナ16台のうち、最後を飾る7mアンテナ1台が山頂施設に移設されました(図3)。最初の1台が移設されたのが2009年9月ですから、3年半で16台すべての設置を終えたこととなります。北米製・欧州製の一部のアンテナは山麓施設で性能評価試験が続けられており、すべてのアンテナの山頂施設設置を完了させたのは日本が一番乗りとなりました。

アルマ望遠鏡は現在、第2期目の観測である「サイクル1」を実行しています。使用可能なアンテナ数は43台、最大基線長は1kmと、いずれもサイクル0に比べて2.5倍程度増強されています。またサイクル1からは日本が開発を担当したモリタアレイも共同利用観測に供されており、米欧が開発した12mアレイだけでは観測の難しい、空間的に広がった成分をもつ天体の観測に威力を発揮してくれることでしょう。

4. アルマ望遠鏡の科学成果

2013年7月8日現在、アルマ望遠鏡による観測に基づいた論文は45本発表されています。そのうち5本はNature/Science誌に掲載されており、インパクトの大きさがうかがえます。さらに特筆すべきことは、一般に公開されている科学評価(Science Verification)観測のデータを使った論文が45本中24本に上るということです。これは、サイクル0での厳しい競争を勝ち抜いて観測時間を獲得した研究者だけでなく、広く公開されているデータを利用することで誰でもアルマ望遠鏡を使った研究を行うことができるということの証です。なかには一つの科学評価観測データをもとに複数の論文が書かれているケースもあり、これまで日本ではあまり盛んではなかったアーカイブ天文学の大きな可能性を感じることができました。またサイクル0の観測でも、「データが提案者に渡されてから1年間」という占有期間を過ぎたデータが順次データアーカイブに登録されており、これらもまた研究材料の宝庫と言えるでしょう。

次に、これまでのアルマ望遠鏡の観測成果のう

ち主なものを紹介しましょう。デンマーク、ニールス・ボーア研究所のJ. K. Jørgensen氏を中心とする研究グループは、へびつかい座分子雲の原始連星 IRAS 16293-2422 をターゲットにした科学評価観測のデータから、この原始星の周囲に最も単純な糖類分子であるグリコールアルデヒド ($C_2H_4O_2$) を検出しました⁴⁾。この分子はこれまで星間雲中では発見されていましたが、惑星形成領域で発見されたのはこれが初めてでした。また原始連星のうち IRAS16293B の方向では、明るい連続光を背景に赤方偏移した吸収線が観測されま

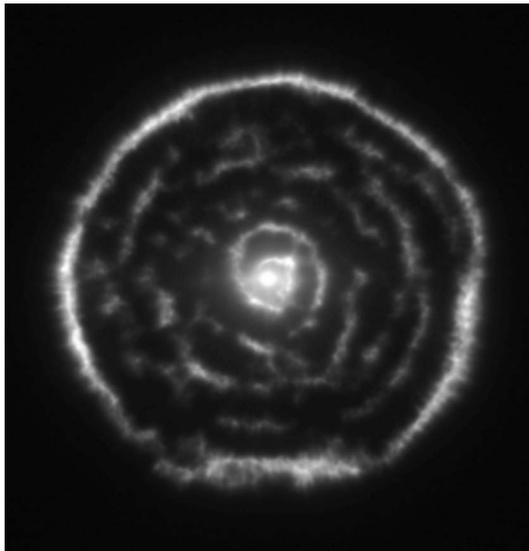


図4 アルマ望遠鏡がとらえた、ちょうこくしつ座R星の周囲の渦巻き構造。
Credit: ALMA (ESO/NAOJ/NRAO).

した。これはグリコールアルデヒドを含むガスが IRAS16293B に向かって降着していることを表しています。この成果は、そこで形成される惑星に有機分子が降り積もる可能性を指摘するもので、生命関連分子を探索するというアルマ望遠鏡の大きな目標への一里塚と言えるものです。

欧州南天天文台のM. Maercker氏の研究チームはアルマ望遠鏡を使ったCO(3-2)輝線の観測で、漸近赤色巨星ちょうこくしつ座R星の周りに不思議な渦巻き構造とそれを取り囲む球殻構造を発見しました⁵⁾(図4)。この観測では45視野をつなぐモザイク観測を行うことで、50秒角四方に広がる構造全体をカバーしています。ガスの膨張速度と渦巻の間隔から、この星は1,800年前に爆発的な核融合反応を起こして爆発的な質量放出を経験したと考えられます。またこの渦巻き構造は、見えない伴星の軌道運動に伴うものと考えられています。この天体に対する過去の観測では星近傍のガスしかとらえられていませんでしたが、アルマ望遠鏡の高い感度のおかげで淡い渦巻き構造が明瞭に描き出されました。

カリフォルニア工科大学のJ. Vieira氏をはじめとする国際研究チームは、南極点望遠鏡(SPT)を用いて1,300平方度に及ぶ超広域サーベイ観測を行い、高赤方偏移($z > 1$)天体のカタログを構築しました。そして次にアルマ望遠鏡を用いてそのうちの47天体を波長 $870\ \mu\text{m}$ の連続波で高解像度観測、26天体をバンド3受信機で分光観測しま

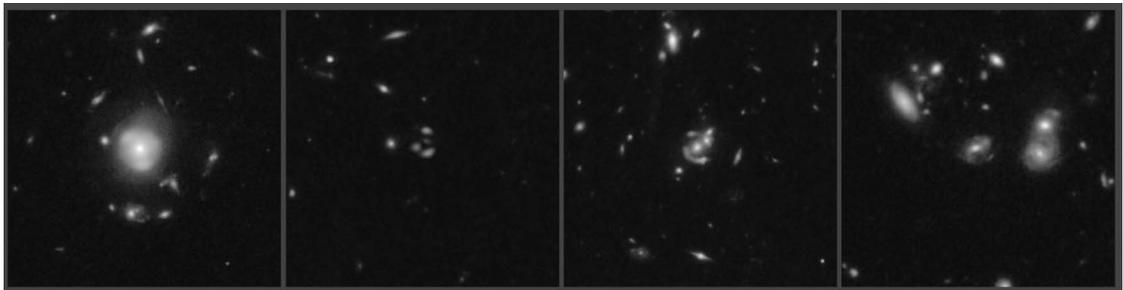


図5 ハッブル宇宙望遠鏡でとらえた銀河の周りに、アルマ望遠鏡でとらえたアインシュタインリングが見える。
Credit: ALMA (ESO/NRAO/NAOJ), Y. Hezaveh et al.

した。連続波観測からは複数のアインシュタインレンズ画像が取得され(図5)、分光観測からは23天体の赤方偏移が精密に測定されました。その結果、10天体は $z > 4$ という大きな赤方偏移をもつことがわかり、 $z = 5.699$ というスターバースト銀河としては最も大きな赤方偏移をもつものも発見されました⁶⁾⁻⁸⁾。また $z = 5.656$ の天体からは水分子の輝線も発見されており、水分子が検出された銀河としては最遠方記録となりました。

5. アルマ望遠鏡の今後

アルマ望遠鏡は現在サイクル1の観測を行っており、これは2014年5月まで継続されます。次のシーズンであるサイクル2の観測提案募集は2013年10月に開始され、締め切りは2013年12月となる予定です。審査期間を経て、サイクル2の観測は2014年6月に開始される見込みとなっています。多くの方により良い観測提案を準備していただくために、国立天文台チリ観測所でユーザーサポートを担当する東アジア・アルマ地域センターでは、各種ワークショップやタウンミーティングを計画しています。サイクル2の詳しい観測仕様、観測提案およびタウンミーティングの日程については、ALMA Science Portalおよびtennetなどで随時お知らせします。

もちろんサイクル2を待たず、アーカイブで公開されている科学評価データやサイクル0のデータを活用して研究を進めていただくことも推奨しています。データを手にした研究者からは「やはりアルマのデータの質は桁違いだ」という声も多

数届いています。ぜひ次はあなたの手で、アルマ望遠鏡の新しい宇宙を描いてみてください。

参考文献

- 1) 齋藤正雄, 奥村幸子, 平松正顕, 2011, 天文月報 104, 416
- 2) 長尾 透, 2013, 天文月報 106, 142
- 3) 廣田朋也, 2013, 天文月報 106, 491
- 4) Jorgensen J. K., et al., 2012, ApJ 757, L4
- 5) Maercker M., et al., 2012, Nature 490, 232
- 6) Vieira J., et al., 2013, Nature 495, 344
- 7) Hezaveh Y. D., et al., 2013, ApJ 767, 132
- 8) Weiß A., et al., 2013, ApJ 767, 88

ALMA Opens a New Window on the Universe

Masaaki HIRAMATSU, Tetsuo HASEGAWA,
Satoru IGUCHI, and Ken'ichi TATEMATSU

Chile Observatory, National Astronomical Observatory of Japan, 2-21-1 Osawa, Mitaka, Tokyo 181-8588, Japan

Abstract: ALMA started the first science operation in 2011, and inaugurated March 2013 at the ceremony with distinguished guests from the partner countries. With its unprecedented sensitivity and spatial resolution, ALMA is breaking new ground of researches, from distant starburst galaxies to nearby planet forming regions. Remarkable findings have been reported based on the Science Verification and Cycle 0 data, and Cycle 1 observations with higher capability has started since this year. As a foreword of the ALMA special issue, we describe the outline and the current status of ALMA, as well as scientific highlights.