



アルマがわかる
ハンドブック

WHAT
is

ALMA?

アルマ望遠鏡 最新成果

遠くの銀河の姿、星の誕生と死、惑星の誕生。

アルマ望遠鏡は、その比類なき性能で宇宙のさまざまな謎に挑んでいます。

(ここにあげた観測成果の解説は、P18,19をご覧ください。)



動き始めた「人類の新しい眼」

宇宙に一番近い所で天体観測

アルマ望遠鏡（正式には、アタカマ大型ミリ波サブミリ波干渉計：Atacama Large Millimeter/submillimeter Array = 『ALMA』）は、南米のチリ共和国北部にある、アタカマ砂漠の標高約5000メートルの高原に建設されました。アタカマ砂漠は年間降水量が100ミリ以下でほぼ年中晴天なこと、さらに標高が高いため水蒸気による電波吸収の影響を受けにくいことなどから、比較的短い波長（高い周波数）の電波でも観測可能で、アルマ望遠鏡の観測波長域となるサブミリ波もとらえることができます。また、土地も広く平坦なため、たくさんの望遠鏡の建設に適しています。

日本から現地までは、飛行機の乗り継ぎ込みで1日半以上かかりますが、アルマ望遠鏡設置に理想的な観測条件を備えた、地球上で究極の場所と言えるでしょう。

宇宙を見通す巨大な複眼「アルマ望遠鏡」

アルマ望遠鏡は、パラボラアンテナ66台を組み合わせる干渉計方式の巨大電波望遠鏡です。直径12メートルのアンテナを50台組み合わせる「12メートルアレイ」と、直径12メートルのアンテナ4台と直径7メートルアンテナ12台からなる「アタカマコンパクトアレイ（ACA：モリタアレイ）」で構成されています。

アンテナは全て移動可能なタイプです。アンテナを動かして、それらの間隔を最大18.5キロメートルまで広げることで、直径18.5キロメートルの電波望遠鏡に相当する解像度（＝視力）を得ることができ、ミリ波・サブミリ波領域では世界最高の感度と解像度を備えた望遠鏡となります。2002年から建設が始まり、2013年3月13日に開所式を挙行了しました。

略称の「アルマ（ALMA）」は、チリの公用語となっているスペイン語で「たましい」を意味します。

2 ちょうこくしつ座R星の不思議な渦巻き
Credit: ALMA (ESO/NAOJ/NRAO)

3 巨大惑星系形成の現場 HD142527
Credit: ALMA (ESO/NAOJ/NRAO)/NAOJ/Fukagawa et al.

4 原始星から噴き出す分子流 ハービッグ・ハロー 46/47
Credit: ESO/ALMA (ESO/NAOJ/NRAO)/H. Arce. Acknowledgements: Bo Reipurth

01. はじまり

アルマ望遠鏡は一日にして成らず。国際協力で作る巨大望遠鏡計画立案の前には、世界をあっと驚かせた先進的な望遠鏡の建設と、輝かしい観測成果の積み重ねがありました。

アルマ前夜の電波天文学 目に見えない宇宙の観測でトップを走る日本

1982年、長野県の野辺山高原に、巨大なパラボラアンテナが完成しました。「野辺山45メートル電波望遠鏡」の誕生です。この望遠鏡では、物質が出すミリ波（1ミリ～10ミリという波長の短い電波）を受信・解析し、「星が生まれるまでの仕組み」や「星と星の間に浮かぶ分子の探査」など、光では見ることのできない宇宙の謎を明らかにすることが目標とされました。この望遠鏡は、波長の短いミリ波を観測する望遠鏡としては現在でも世界最大級です。当時直径6メートルのミリ波

望遠鏡しか持っていなかった日本が巨大な45メートル望遠鏡を完成させたことは、世界の研究者に驚きをもって迎えられました。

しかし、巨大な45メートル望遠鏡にも弱点がありました。それはなんと、アンテナがまだ小さいということ。意外な事に、45メートルのアンテナでは観測する天体を広くぼんやりとしか捉えられません。さらに細かく観測しようとする、理論上もっと大きなアンテナが必要になってしまうのです。とはいえ、これ以上、巨大なアンテナを作ることは困難です。

そこで、国立天文台では、1946年にイギリスのマーティン・ライルが考案し、後にノーベル賞を受賞した電波望遠鏡の視力＝解像度を上げる方法を採用しました。これは、複数の望遠鏡の観測データを合成し、大直径アンテナと同等の視力に上げる方法で、「開口合成法」と呼びます。そして、このような方法を使う電波望遠鏡を「電波干渉計」と呼びます。

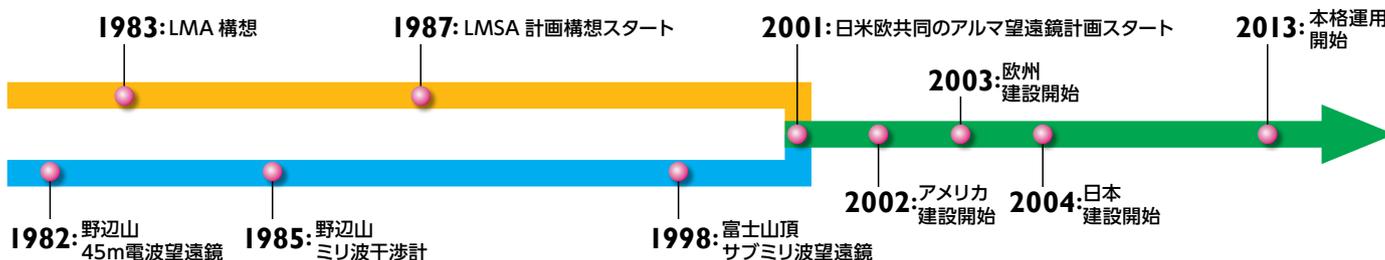
主流はミリ波からサブミリ波へ。 世界が競う、「銀河」「生命」「惑星系」誕生の謎

こうして、直径45メートルの電波望遠鏡だけでなく、直径10メートルのアンテナ5台（後に6台となる）を組み合わせた「野辺山ミリ波干渉計」も同時に野辺山に完成しました。野辺山の望遠鏡群は、銀河の中心にひそむ巨大ブラックホールの証拠や生まれたての星を取り巻くガスの円盤など、数々の発見によって天文学に大きな功績を残し、日本は「目に見えない宇宙」、電波観測の分野でトップを走る事になりました。



野辺山 45m 電波望遠鏡と野辺山ミリ波干渉計





アルマ望遠鏡に至る日本のミリ波・サブミリ波観測の歴史

「野辺山ミリ波干渉計」の完成から10年ほど経ったころ、電波天文学の世界ではさらに先の観測手法が研究されていました。サブミリ波＝波長0.1ミリ～1ミリの電波を観測しようというものです。この波長の電波が高い精度で観測できれば、宇宙が誕生してまもない銀河が生まれるところや星や惑星の誕生の現場を見ることが出来ると考えられていました。また、宇宙空間を漂う有機物質が発生する電波も、この波長で観測できるとされ、生命がどこからやってきたのかの謎に手がかりが見つかるかもしれません。このため、世界中の天文学者がサブミリ波での観測を実現するため、さまざまな働きかけを行っていました。

富士山頂サブミリ波望遠鏡



しかし、サブミリ波観測のためのアンテナや受信機は非常に高い精度が求められ、望遠鏡の開発には巨額な費用がかかってしまうことや、サブミリ波が大気中の水蒸気に吸収されやすい波長であることから、当初の望遠鏡は実験的で小規模なものがほとんどでした。国内で野辺山より標高が高く、大気に邪魔されない乾燥した

場所、それは富士山の山頂でした。1998年、東京大学を中心とするチームが、富士山頂にサブミリ波望遠鏡を設置しました。しかし、設備の整った富士山頂とはいえ、観測に適した冬期は雪に閉ざされてしまいます。そこで、観測者が望遠鏡から離れた場所でも観測が続けられるよう、遠隔制御型の観測施設として建設されました。

この日本初のサブミリ波望遠鏡は、2005年に観測を完了するまでの間に、世界で初めて分子雲が作られる現場を捉えるなど、重要な成果をあげました。この望遠鏡が日本のサブミリ波観測技術を立証したことは、後のアルマ望遠鏡計画への大きな自信へと繋がっていききました。

日本独自のサブミリ波干渉計計画の幕開け

「野辺山ミリ波干渉計」の成果によって、干渉計が果たす素晴らしい役割は明らかでした。当時まだ研究途上だったサブミリ波望遠鏡を、多数の望遠鏡を合成する大規模な干渉計とすることで、宇宙のはじまりの頃の銀河、生まれただばかりの惑星系、惑星間を漂う生命の素が見つかるかもしれない。日本の天文学者たちは、野辺山45メートル電波望遠鏡、野辺山ミリ波干渉計に続く観測装置として、50台のサブミリ波望遠鏡を干渉計とする「LMSA計画」に向けた準備をスタートさせました。

02. 観測地

最高の観測成果を挙げるには、新しい望遠鏡をどこに建設すればいいだろうか。気象条件や望遠鏡建設・運用のしやすさなど、いくつもの条件を兼ね備えた地を求めて、理想の建設地探しが行われました。

野辺山観測所の悩み

ミリ波の電波は大気中の水蒸気に吸収されて弱くなるため、観測には標高が高くとても乾燥していることが重要です。また、まわりが山に囲まれていれば、都会からの人工電波がさえぎられ、宇宙から来たとても弱い電波をとらえるのにも適します。このため、45メートル電波望遠鏡やミリ波干渉計のある「野辺山宇宙電波観測所」は、国内では電波観測に最も適した場所とされてきました。

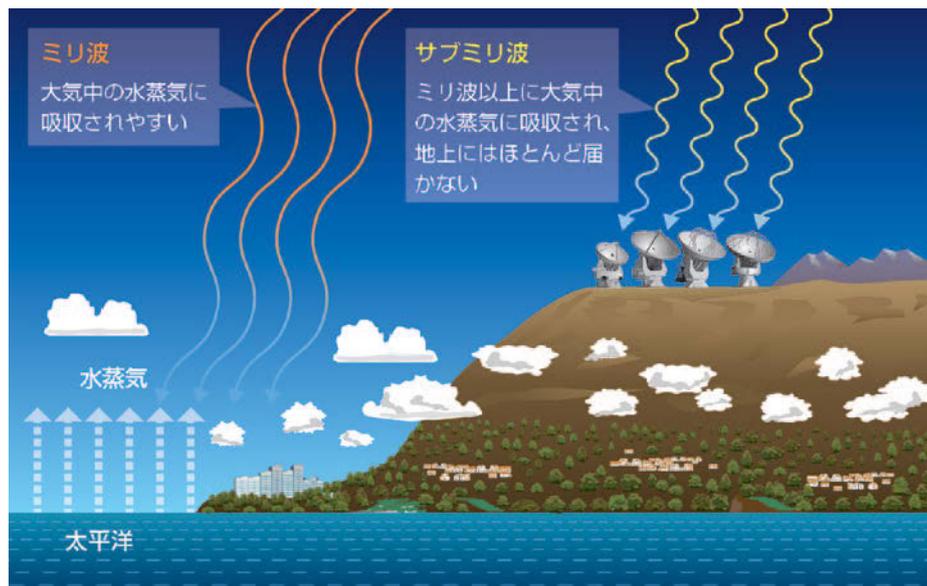
しかし、サブミリ波は、ミリ波以上に大気による吸収の影響が大き

いのです。標高が1350メートルの野辺山では、宇宙から来たサブミリ波のほとんどが、望遠鏡に届く前に大気に吸収されてしまいます。仮に、最高のサブミリ波望遠鏡を野辺山に作ったとしても、これでは宝の持ち腐れになってしまいます。「すばる望遠鏡」があるハワイのマウナケア山頂も、標高4200メートルで大気が乾燥していますが、数十台もの電波望遠鏡を設置するには狭すぎるため、条件に合いませんでした。果たして、地球上にそんな条件に合う候補地があるのだろうか、野辺山の研究者たちは世界を視野に調査を始めました。

日本の天文学者、世界をめぐる

日本独自のサブミリ波干渉計(LMSA)計画が立ち上がると、サブミリ波観測のための厳しい条件をクリアする土地を求めて、野辺山の研究者たちは世界中を駆け巡って観測条件を調査しました。北半

球ではハワイ・マウナケア山や中国中央部の青海省、そしてインド北部のヒマラヤの奥地、南半球ではアンデス山脈と、まさに世界を調べつくし、1994年、ようやくマウナケア山を上回る観測に最適な土地を日本のチームが発見しました。それが、南米チ



大気中の水蒸気に吸収されやすいサブミリ波の観測には、乾燥した高地が適している



アタカマ砂漠での気象観測の様子

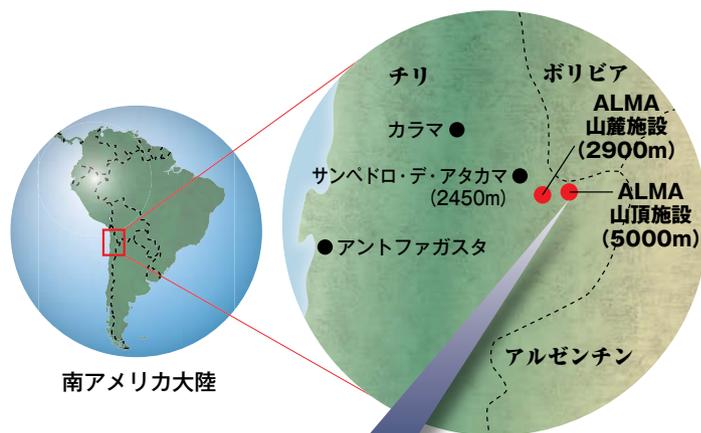
リ北部のアタカマ砂漠でした。アタカマ砂漠の約20か所の候補地で気象観測を行い、最終候補に残った2か所では本格的な電波測定装置による長期的な観測条件の調査も行って、建設地を絞り込んでいきました。

との様々な交渉も、チリではスペイン語となります。とはいえ、純粋にどこに建設すれば最高の成果が出せるのか、という観点では、チャナントール高原に匹敵する場所はありません。新しいサブミリ波干渉計はチャナントール高原に建設する、ということになりました。

最高の建設地「チャナントール高原」

アタカマ地方には標高5000メートルの広い場所（チャナントール高原）があるうえ、天候も1年を通して安定しています。乾燥した大気はサブミリ波の観測には最適な場所でした。調査チームは最高の観測地を発見したのです。

ただし、「観測」に最適な場所が、「建設」にも最適とは限りません。チリは日本から見て地球の反対側に位置し、東京から現地に行くまで1日以上かかります。また時間も季節も正反対です。その上、建設地のチャナントール高原は物資を調達できる大きな都市が近くにはありません。ハワイのすばる望遠鏡建設では英語でよかった現地



標高5000メートルに平原が広がる、チャナントール高原

03. 国際プロジェクト

巨大な望遠鏡の建設には、多額の費用とさまざまな分野にまたがる高い技術が必要となります。この困難を克服するカギは、国際協力。「最高の望遠鏡を作る」という旗印のもとに、世界の天文学者が手を取り合うことになりました。

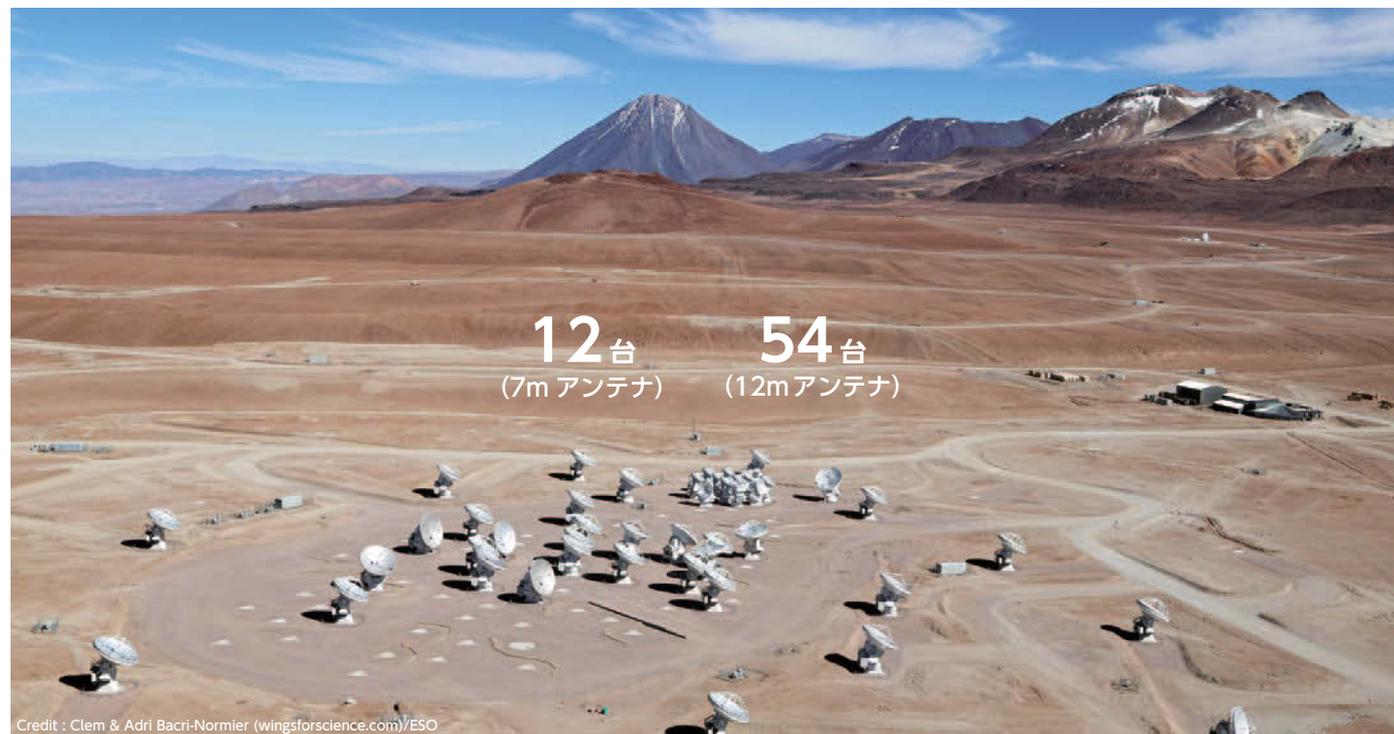
巨大計画が国際共同研究になる理由

日本の計画が動き出したとき、米国と欧州でも独自に大型電波干渉計を作る計画が始まっていました。どちらも日本の計画とは異なり、サブミリ波ではなくミリ波に重点をおいた干渉計を作る計画ですが、

40～50台の望遠鏡を建設するという点では似通っていました。

学術研究は熾烈な国際競争の場ですが、お互いの研究者が自由に行き来したり、国際協力が当たり前に行われる、世界でもっとも平和な分野とも言われています。日米欧の計画は、国際会議ですべてお互いに「筒抜け」の状態で計画の進み具合が発表されるため、お互いの良いところ(サブミリ波を採用したり、建設地をアタカマ砂漠にするなど)を取り入れて行くにつれて、計画はどれも似たものになっていきました。

それぞれが数百億円規模の巨大プロジェクトです。お互い細部では異なったとしても、似たような巨大計画が世界で3つ同時に検討されていることになります。





そんな中、「それぞれの計画を合体させ、一つの国や地域では実現できない理想の望遠鏡を作ってはどうか」という構想が日米欧の研究者たちの中から生まれました。ここに、国際協力プロジェクト、アルマ望遠鏡計画が誕生することになったのです。

日米欧が得意な分野を担当

アルマ望遠鏡計画はスタートしましたが、肝心の日本のチームは国内の予算承認の遅れから建設参加が2年間、米欧より遅くなりました。この間も米欧は建設計画を進め、12メートルアンテナ50台からなる「12メートルアレイ」や受信機の開発を開始。日本も限られた研究予算で12メートルアンテナの試作機を開発し、準備を進めていきました。2004年には正式に日本の建設予算が認められ、アルマ望遠鏡建設に合流することになりました。

最終的に、日本は

- ・ アルマ望遠鏡の中心部に位置する「ACA」を構成する16台の超高精度アンテナ(愛称:いざよい)の開発
- ・ 観測する電波の周波数によって使い分ける10種類の受信機の中で、特に開発が難しいとされた最高周波数帯(バンド10)を含む3種類の受信機の開発と全アンテナ66台搭載分の量産
- ・ 「いざよい」で集められた信号を処理する専用スーパーコンピュータ(相関器)の開発

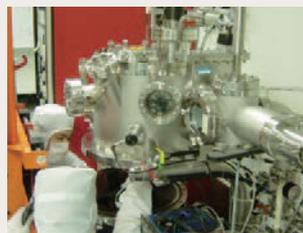
を担当することになりました。

日本は、アルマ計画の中でも技術的に難度の高い分野を担っています



アンテナ

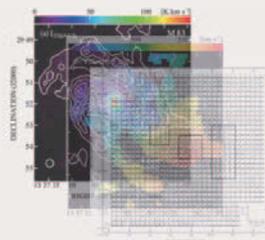
直径12メートルアンテナ4台、7メートルアンテナ12台を日本が分担。干渉計の欠点を補い、大きく広がった天体の正確な電波画像を取得します。



ミリ波	
バンド1	バンド4
バンド2	バンド5
バンド3	バンド6
サブミリ波	
バンド7	バンド9
バンド8	バンド10

受信機

サブミリ波を中心とする受信機を日本のみ3種担当。国立天文台先端技術センターで開発と量産が行われました。



相関器

分光性能を飛躍的に向上させる高性能相関器。16台のアンテナから送られてくる信号を処理し、電波の周波数や強度を導き出します。

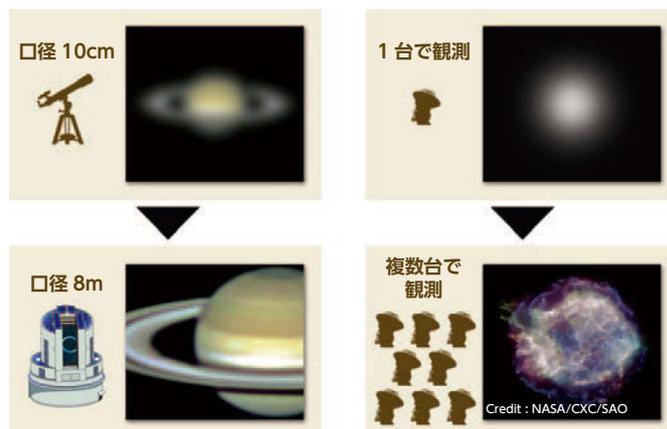
04. 巨大望遠鏡アルマ

天文学の分野ではこれまでにない規模の国際協力を実現した巨大望遠鏡アルマ。最高の観測性能を実現するために、数々の最先端技術が詰め込まれています。

なぜ66台も必要なの？

遠くをはっきりと見るためには、望遠鏡の直径をどんどん大きくする必要があります。たとえば、土星を観測した場合を考えましょう。直径が数センチの小さな望遠鏡では、輪をきれいに見ることはできませんが、直径が30センチくらいの大きな望遠鏡なら、輪がきれいに見えるだけでなく、いくつかの円環に分かれているということも分かります。さらに細かく、輪の構造を詳しく観察しようと思えば、もっと直径が大きな、本格的な望遠鏡設備が必要になってきます。これは光学望遠鏡でたとえましたが、電波望遠鏡でも同じことです。このように、望遠鏡の直径を大きくすれば、観測する対象を細かく捉えることができます。しかしながら、1台の望遠鏡の大きさには限度があり、例えば直径1キロメートル以上の電波望遠鏡を作ることはほとんど不可能です。では、もっと遠くの宇宙を、もっと細かく観察するにはどうしたら良いのでしょうか。

アンテナ設置位置(紫の点)と東京都心の広さを比べると……



口径と像の細かさは比例する

答えは、イギリスのライルが開拓しノーベル賞を受賞した「電波干渉計による開口合成法」の仕組みを使うことです。巨大な1つの電波望遠鏡を作るのではなく、いくつかの電波望遠鏡の観測データを組み合わせ、望遠鏡間の距離を直径とする仮想的な1つの望遠鏡とする方法です。

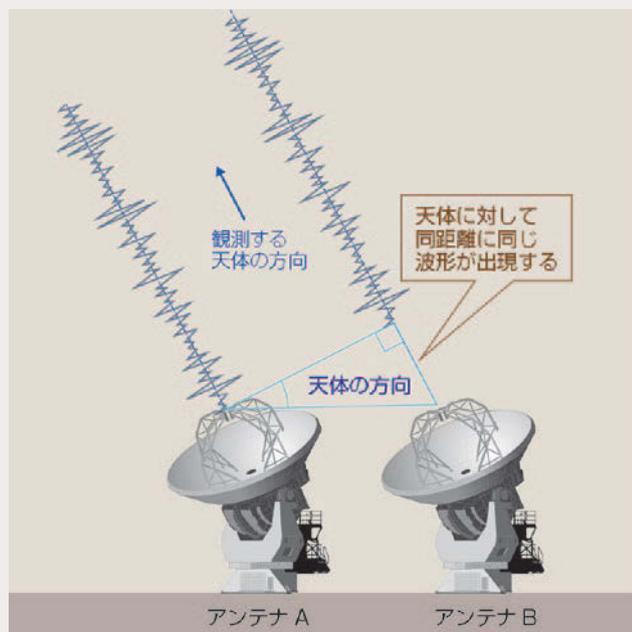
電波干渉計では、望遠鏡(アンテナ)の距離を離せば離すほど、細かい部分に分かるようになります。しかしながら、たった2台の望遠鏡だけでは、観測した天体の構造を描くことはできません。それは、望遠鏡の間に「すきま」があるから。きれいな天体の画像を描くには、離れた望遠鏡の間をうまく埋めてやる必要があります、このために多くの台数が必要になります。アルマ望遠鏡では、最大18.5キロメートルの範囲に66台の電波望遠鏡を配置することで、天体の非常に細かい様子をスピーディーに観測出来るようになっています。特に日本が開発したACA(モリタアレイ)では、一回り小さな7メートルアンテナを密に配置することで望遠鏡間の隙間を埋め、高画質な電波天体画像の取得を可能にしています。

電波干渉計の仕組み

アルマ望遠鏡は、広大な土地に66台の電波望遠鏡を並べ、これらの受信データを組み合わせることで仮想的に一つの巨大な望遠鏡としています。このように複数の電波望遠鏡を組み合わせた仕組みを、電波干渉計と呼びます。

干渉とは、波を重ね合わせることで新しい波を作り出すこと。山の部分が重なり合えばその部分は更に大きな山になり、山と谷が重なり合えばその部分は小さくなってしまいます。同じ波を重ねあわせれば当然、その波は大きくなるわけです。電波干渉計ではこの干渉を使って、複数のアンテナで観測した電波から天体の形を描き出します。

離れた場所にある2つのアンテナで、同時に一つの天体を観測することを考えてみます。天体からの電波は、波の形で地球にやってきます。このとき、2つのアンテナは同じ天体を見ているのですから、2つのアンテナで同じ波が観測されるはず。同じ波を重ねあわせれば干渉によってその波は大きくなるので、2つのアンテナで得られた信号を重ね合わせたら大きな信号がでてくるような気がします。ところがそうはなりません。それはなぜでしょうか。そう、アンテナが離れた場所



にあるためです。1秒間に30万kmも進む電波からすれば本当に微々たるものですが、観測対象の天体との距離がアンテナごとにほんの少しだけ違うので、同じ天体からやってくる電波がアンテナに到達する時間が少しだけずれてしまうのです。電波干渉計では、この2つの電波を波の山と山が重なるように合わせる、つまり干渉させることで、その時間差を割り出します。2つのアンテナ間の距離とこの時間差から、電波源の方向を精密に特定することができます。

少し違う方向から来た電波なら、同じ2つのアンテナで受信しても時間差が少し異なります。こうして、どんな時間差で電波が来ているかを調べることで、電波源の分布(天体の形)を描き出すことができます。また、2つのアンテナの間隔を広げれば広げるほど、天球におけるわずかな方向の差が大きな時間差として計測できるようになり、より詳しい形を描き出すことができる、つまり解像度(視力)が高いということになります。

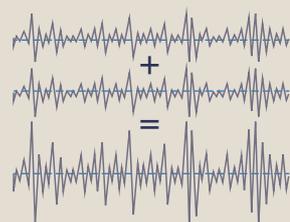
多くのアンテナで一斉に一つの天体の観測を行うことによって、さまざまなアンテナのペアでさまざまな時間差を持つ電波をキャッチし、電波源の分布を精密に描き出す。これが、アルマ望遠鏡をはじめとする電波干渉計の原理です。実際の電波干渉計では、受信された電波を干渉させて時間差を割り出すために、相関器と呼ばれる特殊なスーパーコンピュータが用いられています。

そしてこの観測をさらに高精度のものとするために、地球の自転も利用してしまいます。地球は地軸を軸として自転しているので、天体から見たアンテナの位置は少しずつ変わっていきます。これはつまり、さまざまな位置においたアンテナで天体を観測しているということ。アルマ望遠鏡では66台のアンテナを使って、66台以上の精度で、天体の観測を行っているのです。

重なると弱めあう



重なると最も強めあう



世界一がいっぱい！日本の望遠鏡技術

厳しい性能が求められるアルマ望遠鏡には、日本が誇るモノづくりの技術が生きています。最先端の技術を開発する部分での優秀さだけでなく、巨大な望遠鏡を実際に作り上げていく上では職人による高い工作技術も必要となります。日本の高い技術はアルマの完成に欠くことのできないものです。

アンテナの鏡面精度、東京ドームでシャープペンの芯1本の誤差

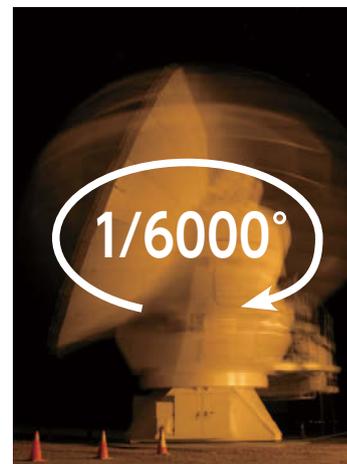
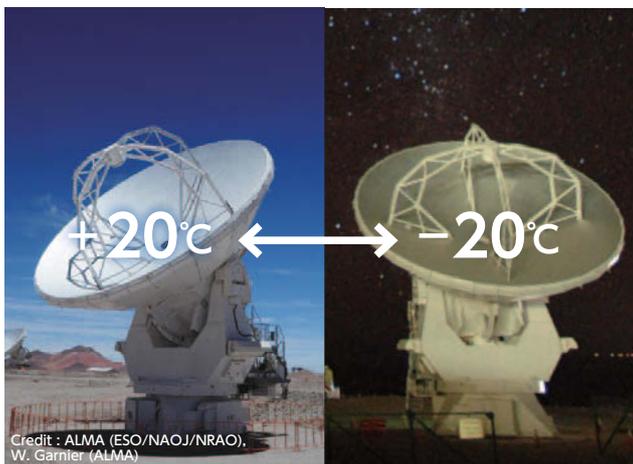
アンテナの働きは、宇宙からの電波を受けて正確に焦点に集めること。そのためには、パラボラアンテナの表面（鏡面）を滑らかにする（でこぼこにならないようにする）必要があります。アルマ望遠鏡では、その誤差を25ミクロン以下という高い精度で実現しました。例えば12メートルのアンテナを東京ドームの大きさに広げても、ごく一般的な0.5ミリのシャープペンの芯1本のでこぼこしかないという滑らかさです。

熱や風による変形の制御

アルマ望遠鏡のアンテナは、目的の天体に対して6000分の1度という高い精度で観測したい天体をとらえることが求められています。しかしながら、アンテナ自体は、日射、昼夜の温度差、強い風など、常に屋外の厳しい自然にさらされており、この精度を達成することはたやすくありません。これらの影響を可能な限り取り除くため、各所に熱による変形が少ないカーボンファイバーが使用されており、またアンテナ自身の微妙なゆがみを自ら計測し、正確に補正する仕組みも採用しています。これらのしくみが協調し、高い観測精度を保つのです。

リニアモーターによる高速ダイレクトドライブ制御

観測中、アンテナは目的の天体に常に向き続ける必要があります。アルマ望遠鏡では、アンテナを動かす部分にリニアモーターを採用しています。リニアモーターは高速で動くので、天体と天体の間をすばやく移動することができます。さらに、リニアモーターは



稼動部分に歯車のような噛み合わせが無いので、非常に滑らかに天体を追いかけて観測することができます。

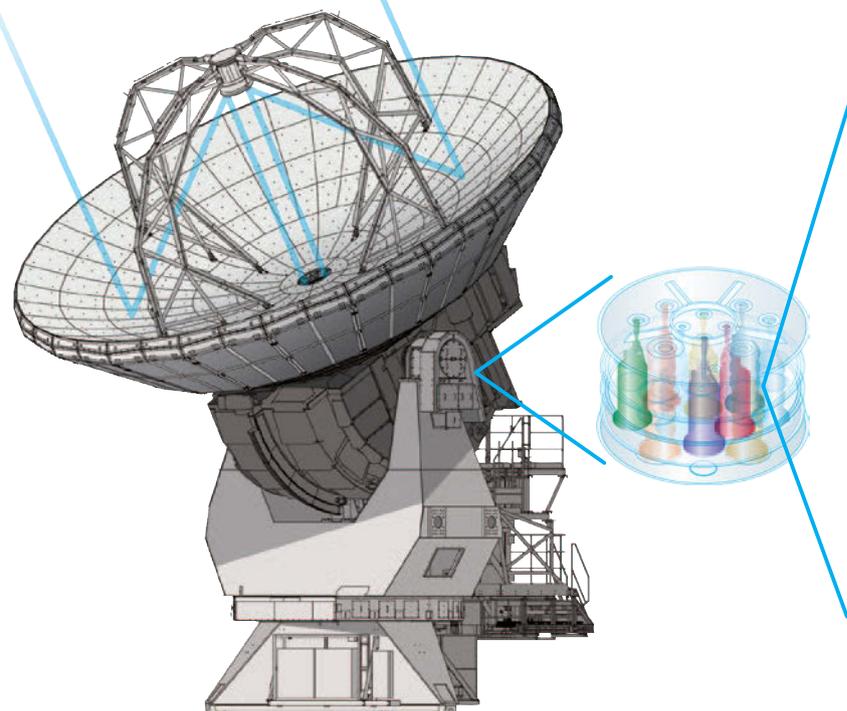
バンド4, 8, 10の超伝導受信機

アンテナによって集められた電波は、周波数帯(バンド)ごとに用意された10種の超伝導受信機によって受信されますが、これらの受信機はバンドごとに日米欧各国で分担して開発されました。

アルマ望遠鏡の桁違いの観測性能を実現するためには、受信機にも非常に高い性能が要求されます。国際協力で進めるため必要となる厳しい統一規格、絶対温度4K(ケルビン)(摂氏マイナス269度)の超低温真空タンク内に設置することによる極限までの低雑音設

計、今後30年の利用を前提とした故障の起きにくい構造など、高度な技術開発力がなければ実現不可能です。このように難しい条件の中、日本は唯一複数のバンドを担当し、バンド4,8,10を受信する3つの超伝導受信機を開発しました。

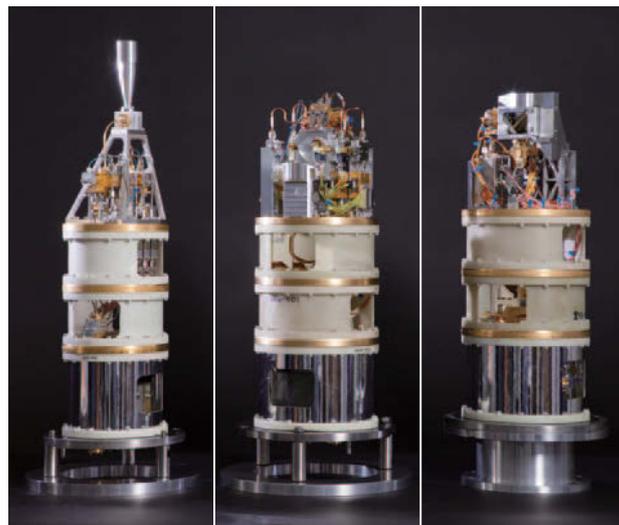
受信機の開発は、波長が短くなるほど加工精度の要求も高くなります。また、もっとも波長の短い電波を受信するバンド10受信機は、その波長の短さから他のバンドの受信機で使用している超伝導素材では十分な性能が出せません。このため国立天文台の開発チームは、新しい超伝導素材の開発から行いました。その結果として完成したバンド10受信機は、雑音の低さで世界最高の性能を誇っています。



バンド4
(125-163 GHz)

バンド8
(385-500 GHz)

バンド10
(787-950 GHz)



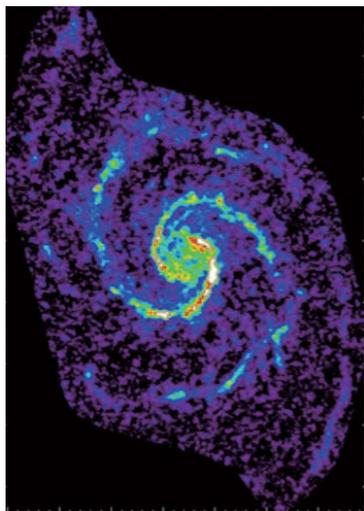
日本が開発した3種類の受信機。全高約50cmの「カートリッジ」というタイプで、他のバンドの受信機と一緒に超低温真空タンクに入れられ、アンテナに搭載される。

05. ミリ波・サブミリ波

アルマ望遠鏡が観測する「ミリ波・サブミリ波」。電波の中ではもっとも波長が短い部分に相当します。ミリ波・サブミリ波は、冷たく暗い宇宙を見通す重要なツールになります。

ミリ波・サブミリ波で暗黒宇宙を「見る」

私たちになじみ深いのは、可視光で見た宇宙です。すばる望遠鏡やハッブル宇宙望遠鏡などによって撮影された、きらびやかな星々や星雲が浮かぶ美しい写真を思い浮かべてみてください。一方、センチ波で見る宇宙は、荒々しい高エネルギーの世界を捉えます。例えば、超新星残骸やブラックホール、パルサーなど、強いエネルギーを出している天体を調べるのに適しています。では、ミリ波やサブミリ波で見る宇宙とは、どんな姿なのでしょう。



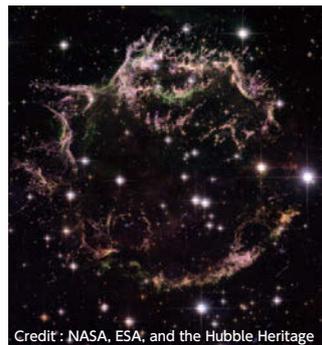
ミリ波で見た渦巻き銀河 M51。可視光では星が渦巻き状に分布しているのがわかるが、電波で観測するとガスも同様に渦巻き状の分布をしていることがわかる。

宇宙に存在する物質は、それが星でも、星間ガスでも、太陽でも、必ず電波を出しています。この電波をとらえて、目には見えない性質を調べるのが電波天文学です。その中でも、ミリ波やサブミリ波では、超低温の世界を観測できます。星と星との間に広がる何もないように見える宇宙空間は、摂氏マイナス260度という超低温ですが、ここにも物質（ガスや小さい砂粒のような固体微粒子）が存在しています。オリオン

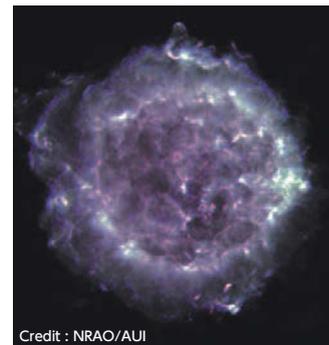
座の馬頭星雲では、赤い光を背景に馬の頭部が漆黒のシルエットとして浮かび上がりますが、この黒い部分にはガスが広がっています。これらは光らないため、可視光の望遠鏡ではガスの成分やその中で何が起きているかを調べることはできませんが、ミリ波やサブミリ波の電波を出しているため、ミリ波やサブミリ波の望遠鏡ではその構造を詳しく観測することができます。

そもそも宇宙から届く電波や光は非常に弱い上に、ミリ波やサブミリ波といった比較的波長の短い電波は、大気中の水分や塵によっ

さまざまな波長で見た天体



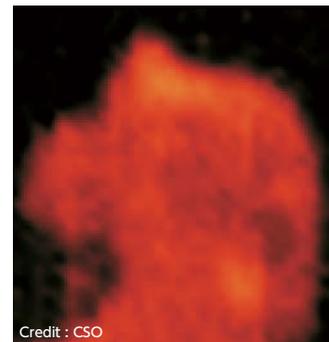
可視光で見た超新星残骸



センチ波で見た超新星残骸



可視光で見た馬頭星雲



ミリ波で見た馬頭星雲(着色部)

て吸収されやすいため、受信機(電波望遠鏡の目にあたる部分)に高い性能が要求されます。特にサブミリ波は大気による吸収が激しく、標高の低い場所ではほとんど観測することができません。しかし、これらを解決できるアルマ望遠鏡によって、宇宙や生命の謎に迫ることが出来るのです。たとえば、"ビッグバン後はじめての銀河

誕生の謎"、"惑星系誕生の謎"、そして、"生命の起源がどこから来たのかという謎"です。

アルマ望遠鏡は、すばる望遠鏡やハッブル宇宙望遠鏡の10倍の視力をもつ、画期的な望遠鏡です。アルマ望遠鏡によって、多くの謎が解明されることでしょう。

何が違う？宇宙をみる様々な望遠鏡

現在、世界で活躍中の望遠鏡には、観測する対象によってさまざまな種類があります。



Credit : NASA

ハッブル：太陽系の惑星から星雲星団、遠方の銀河まで多彩な天体を対象にします。

ハッブル宇宙望遠鏡

可視光・赤外線

スペースシャトルで打ち上げられた直径 2.4 メートルの宇宙望遠鏡。大気によるゆらぎの影響のないクリアな目で高精度の撮像が可能です。

ジャンスキー・ベリー・ラージ・アレイ (JVLA)

センチ波

25 メートルアンテナ 27 基で構成される大規模な電波干渉計。Y字に敷いた一辺 21 キロメートルのレールに沿って様々な配置が可能です。



Credit : NRAO/AUI

JVLA：巨大ブラックホールから噴き出す高エネルギージェットを高精細に描き出すなど、30年の長きにわたりセンチ波天文学をけん引しています。



Credit : NASA/CXC/NGST

チャンドラ：銀河団を包む超高温ガスの分布や、かに星雲中にあるパルサーの様子を克明に描き出しました。

チャンドラX線観測衛星

X線

楕円軌道で地球を周回する直径 1.2 メートルのX線望遠鏡。ハッブル宇宙望遠鏡やJVLAに迫る視力で観測することが可能です。

アルマ望遠鏡

ミリ波・サブミリ波

66台のアンテナで構成される世界最大のミリ波・サブミリ波干渉計。ハッブル宇宙望遠鏡やJVLAの10倍の視力を持ちます。



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

アルマ：他の波長では見えない超低温のガスや固体微粒子を観測し、銀河や星、惑星の誕生に迫ります。

06. 解明される宇宙の謎

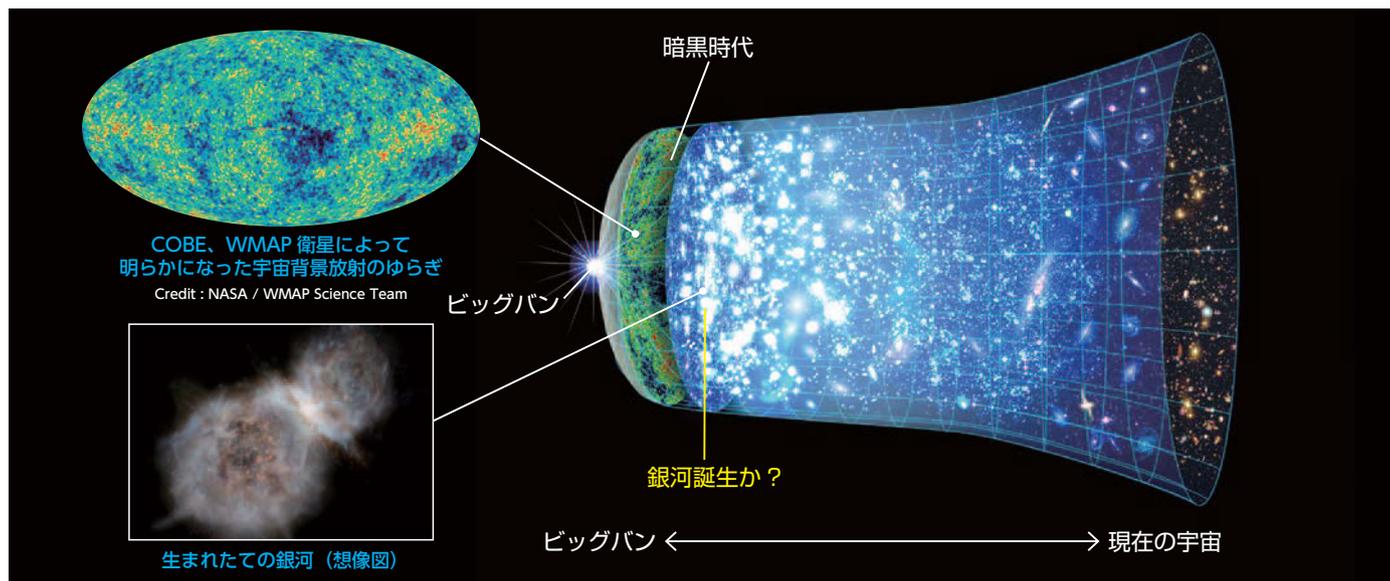
画期的な感度と解像度を持つアルマ望遠鏡に、世界中の天文学者が大きな期待を寄せています。これまで手が届かなかったさまざまな謎に、アルマ望遠鏡で初めて迫ることができるのです。そこには、どんな宇宙が待っているのでしょうか。

ビッグバン後、はじめての銀河誕生は？

138億年前に「ビッグバン」によって始まった宇宙は、38万年後には絶対温度3000K（ケルビン）ほどに冷えて電子は原子核と結合して原子となり、電磁波で観測可能になる「宇宙の晴れ上がり」を迎えました。この際に放射された電磁波は、宇宙の膨張にともなって波長が伸び（赤方偏移）、宇宙の背景全体を覆い尽くしています。これを宇宙背景放射と言います。この放射は、絶対温度2.7度（摂氏マイナス270度）に相当するものです。

1992年、COBE衛星の観測結果から、宇宙の背景放射は均一ではなく、方向によって10万分の1のゆらぎがあることが判明しました。また、2001年にはWMAP衛星でそのゆらぎの性質がさらに調べられました。現在では、このゆらぎから、銀河、銀河団、超銀河団などの宇宙の構造が出来たと考えられています。しかし、このゆらぎからどのようにこれらの構造が出来たのかは、大きな謎となっています。

宇宙誕生後8億年後までは、すばる望遠鏡でも見る事が出来ませんが、それより過去にさかのぼろうとすると、赤方偏移の効果で光学望遠鏡では見る事が次第に難しくなります。しかし、赤方偏移の効果により逆にミリ波やサブミリ波で銀河などは明るくなること、銀河自身が含む塵がミリ波サブミリ波を放射することなどから、アルマ望遠鏡なら宇宙の暗黒時代直後の銀河の誕生を見る事が出来るかと期待されます。暗黒時代直後の銀河の成り立ちへの手がかりを、アルマ望遠鏡がとらえることが期待されています。

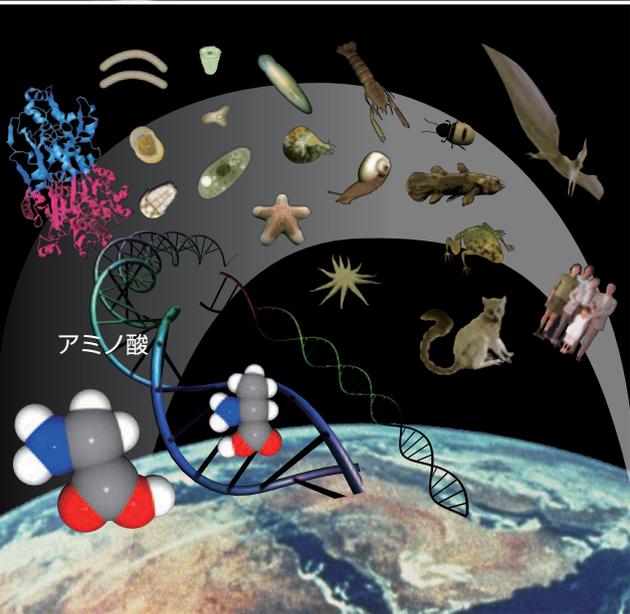




太陽系と惑星はどうやって生まれる？

太陽系のような惑星系は、どのように生まれてきたのでしょうか。1995年の系外惑星の発見以降、現在までに1000を超える系外惑星が直接的、間接的に発見されています。その結果わかったことは、惑星系は非常に多様な形態を持っているということです。その原因を探るためには、惑星系の生まれている現場を観測する必要があります。しかしながら、惑星の材料であるガスや塵は温度が低く、光学望遠鏡で見ることができません。

では、ミリ波サブミリ波望遠鏡ではどうでしょう。この波長の電波なら、まだ星や惑星系になる前のガスや塵の状態を観測できます。しかし、これまでの望遠鏡では視力（解像度）が不足しているため、おおまかにしか観測できませんでした。アルマ望遠鏡は、これまでの望遠鏡の解像度を大幅に超える能力を持つため、恒星の生まれる仕組みやそれに伴う惑星系の誕生の過程を非常に高解像度で観測することが出来ます。これまでの様々な望遠鏡による観測では見えなかった、惑星誕生の現場を詳しく調べることが、アルマ望遠鏡の大きな狙いです。



宇宙の漆黒の闇に生命の素が飛んでいる？

私たち生命の誕生は、単に地球上だけで起きた化学反応の結果なのでしょうか。惑星系誕生の際に生命の種を持っていたのでしょうか。もしかすると、生命の素は宇宙空間に漂っていたのかもしれませんが。生命の誕生にはさまざまな説がありますが、アルマ望遠鏡では、その有力な証拠をつかむことも目的としています。

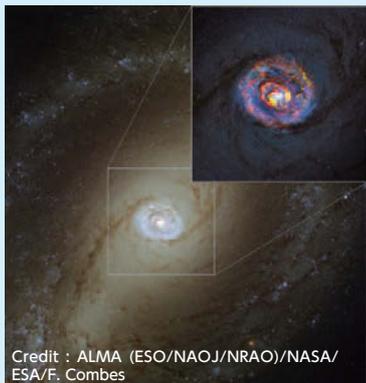
ビッグバン以降、宇宙空間では物質が次第に性質の異なる物質に進化しながら、多様な天体や星間物質を形作り、ついに地球上で生命の誕生にいたりしました。これまでのミリ波や赤外線観測によって、星間物質は極めて多様で、変化に富む進化をとげることがおぼろげに分かってきました。アルマ望遠鏡では、これらの複雑な分子の集合体である星間物質を高い解像度と感度によってどのような物質でできているのかをくわしく調べ、その進化を研究することができます。アルマ望遠鏡は、宇宙の物質が進化してきた歴史を解き明かし、生命の起源に迫ることが期待されています。

07. アルマ望遠鏡 最新成果 (解説)

1 | 渦巻き銀河 NGC1433 の ガスの渦巻きと巨大ブラックホール

私たちの住む天の川銀河を含め、ほぼすべての銀河にはその中心に太陽の数億倍の質量をもつ巨大なブラックホールがあります。ブラックホールと周囲のガスの関係を明らかにすることは、銀河の進化を調べるための重要なヒントを与えてくれます。

渦巻き銀河 NGC1433 は地球から約 3200 万光年かたにある渦巻き銀河で、中心に巨大なブラックホールがあると考えられます。アルマ望遠鏡を使った高感度・高解像度の観測により、その中心部でうずまくガスと、ブラックホールから噴き出すガスの流れ（ジェット）の様子が明らかになりました。ジェットがあると周囲のガスもそれに引きずられて銀河の外に流れ出してしまい、銀河の中心部から星の材料となるガスが失われて星の誕生にブレーキがかかります。中心部から非常に激しくジェットを噴き出す銀河（活動銀河）も多く知られていますが、それらと比べると NGC1433 はとても穏やかで、今回見つかったジェットは銀河の中心で見つかったものとしては史上最小、長さ 150 光年しかありませんでした。今回、非常に穏やかな銀河の中心にあるブラックホールでもジェットが見つ



かったことは、銀河の中での星形成活動の進化にブラックホールが大きく影響しているということを改めて教えてください。

ハッブル宇宙望遠鏡で撮影された NGC1433 とその中心部のクローズアップ（青：ハッブル宇宙望遠鏡、赤・黄：アルマ望遠鏡）

2 | ちょうこくしつ座 R 星の 不思議な渦巻き

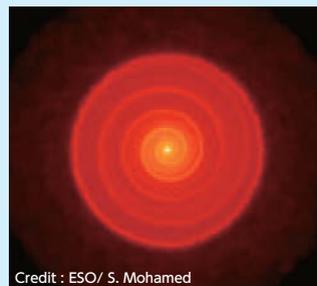
夜空に輝く星は、ある時に星間ガスや固体微粒子が集まって生まれ、『燃料』である中心部の水素やヘリウムを使い尽くすとガスを噴き出して一生を終えます。アルマ望遠鏡は、こうした星の観測でもその素晴らしい性能を発揮しています。



ちょうこくしつ座 R 星と周囲の星々

取り囲むように球殻状のガスが広がっていることがわかりました。年老いた星のまわりにガスの渦巻き構造と球殻構造が見つかったのは、このアルマ望遠鏡での観測が初めてのことでした。シミュレーション研究との比較から、これらのガスは約 1800 年前に R 星の中で起きた爆発的な核反応によって噴き出し、R 星を回る見えない小さな星によってかきまぜられることで渦巻きの構造ができたと考えられます。

私たちの体を作る炭素や酸素といった元素は、星の中で合成され、星の死とともに宇宙にばらまかれます。今回の観測は、身近な元素がどのようにして宇宙に供給されたのかをよりよく理解する手がかりになります。



R 星からガスが噴き出す様子のコンピュータシミュレーション画像

3 | 巨大惑星系形成の現場 HD142527

太陽系のような惑星系はどのようにしてできるのか。アルマ望遠鏡の3大テーマの一つに迫る観測成果も、続々と出てきています。

アルマ望遠鏡を用いた観測で、おおかみ座の方向にある若い星 HD142527 の周囲を取り巻くガスと固体微粒子の円盤が、これまでにない高い解像度でとらえられました。この観測によれば、HD142527 のまわりでは、太陽と太陽系の最も外側を回る惑星である海王星の距離の約5倍に相当するところに大量の微粒子が集積していることがわかりました。また微粒子はきれいなドーナツ型ではなく、馬の蹄の形のような分布で中心星を取り囲んでいることもわかりました。微粒子の多いところでは、木星のような巨大ガス惑星か、地球のような岩石惑星が作られていると考えられます。これほど中心星から離れた場所で惑星が作られている証拠が見つかったのは、今回の観測が初めてのことでした。

現在では、太陽以外の星のまわりに1000個を超える惑星が見つかっており、その中には太陽系とは異なる性質を持つ惑星も多くあります。こうした惑星系の多様性の原因はまだわかっていませんが、中心星から非常に遠方での惑星形成の兆候が発見されたことは、そうした謎に迫る成果として注目されています。

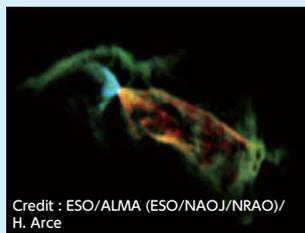


HD142527 を取り巻く円盤の想像図

4 | 原始星から噴き出す分子流 ハービッグ・ハロー 46/47

星が誕生する現場は、星間ガスと固体微粒子の集合体の奥深く。ただし固体微粒子によってさえぎられてしまうので、可視光ではその現場を捉えることができません。アルマ望遠鏡は、そうした星間物質にさえぎられない電波を観測し、星の誕生の様子を調べます。

アルマ望遠鏡を使って観測されたのは、ハービッグ・ハロー 46/47 と呼ばれる、生まれたばかりの星から噴き出すガスの流れです。可視光で撮影された写真とアルマ望遠鏡の観測画像を重ねると、星間物質のかたまりの中央にある赤ちゃん星から、



Credit : ESO/ALMA (ESO/NAOJ/NRAO)/
H. Arce

アルマ望遠鏡がとらえた赤ちゃん星からのジェット



Credit : ESO/ Bo Reipurth

可視光望遠鏡でとらえたハービッグ・ハロー 46/47 周辺には星間物質のかたまりが黒い雲として見える

左上と右下にガスが噴き出しているのがわかります。このうち右下に流れ出すガスがアルマ望遠鏡によって観測されたものです。このガスは、星間物質のかたまりの向こう側に流れ出しているため、可視光では星間物質にさえぎられてしまってみることができません。アルマ望遠鏡による「見えないガス」の観測から、このガスの噴き出し方がこれまで考えられていたよりずっとエネルギーッシュであることがわかりました。電波観測により、可視光観測だけではわからない天体の真の姿に迫ることができました。

●お問い合わせ先

国立天文台チリ観測所

〒181-8588 東京都三鷹市大沢 2-21-1

phone : 0422-34-3843

fax : 0422-34-3764

email : alma-info@nao.ac.jp

URL : <http://alma.mtk.nao.ac.jp/j/>

twitter : @ALMA_Japan

合同アルマ観測所

Joint ALMA Observatory

<http://www.almaobservatory.org/>

米国国立電波天文台

National Radio Astronomy Observatory

<http://www.nrao.edu/>

ヨーロッパ南天天文台

European Southern Observatory

<http://www.eso.org/>

