WHAT iS ALMA?

アルマがわかる ハンドブック

ALMA

アタカマ大型ミリ波サブミリ波干渉計：アルマ望遠鏡

アルマ望遠鏡山頂施設（AOS）のアンテナ群
Credit : Clem & Adri Bacri-Normier (wingsforscience.com)/ESO

人類の新しい眼・アルマ望遠鏡

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16キロメートルまで広げることで、直径16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。

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。

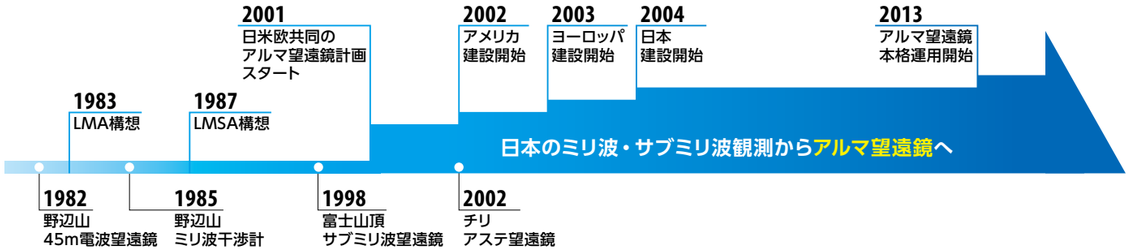
しかし、巨大な45メートル望遠鏡にも弱点がありました。それはなんと、アンテナがまだ小さいということ。意外な事に、45メートルのアンテナでは観測する天体を広くぼんやりとしか捉えられません。さらに細かく観測しようとすると、理論上もっと大きなアンテナが必要になってしまうのです。とはいえ、これ以上、巨大なアンテナを作ることは困難です。

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。

野辺山 45m 電波望遠鏡と野辺山ミリ波干渉計

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ることや、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、本格的な観測は困難でした。そんな中で日本の研究者は2つの先駆的な望遠鏡を建設し、サブミリ波観測に踏み出しました。ひとつは、国内で野辺山より標高が高く乾燥した場所、富士山頂に設置された東京大学富士山頂サブミリ波望遠鏡でした。1998年から2005年まで運用されたこの望遠鏡は、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上げました。もうひとつは、世界で最も乾燥した場所のひとつである南米チリ・アタカマ砂漠に2002年に設置された、国立天文台のアステ望遠鏡（→P.15）です。星が生まれる巨大なガス雲の姿を描き出し、遠方宇宙に多数の爆発的星形成銀河を発見するなど、こちらも大きな成果を上げました。これらの望遠鏡は、サブミリ波観測のための技術開発力を高めると同時にサブミリ波で見た宇宙の豊かさを教えてくれた、アルマ望遠鏡計画に向けた重要なステップでした。

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。

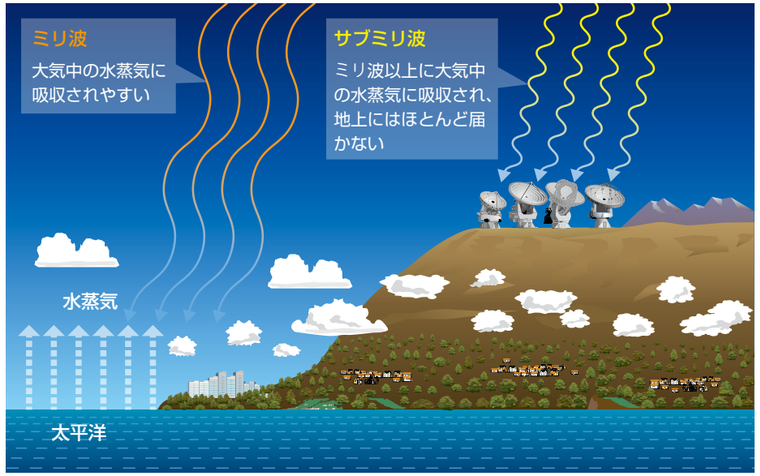
野辺山観測所の悩み

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。



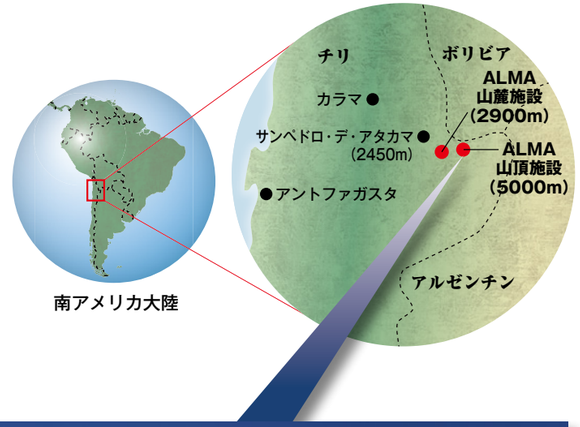
大気中の水蒸気に吸収されやすいサブミリ波の観測には、乾燥した高地が適している

アタカマ砂漠での気象観測の様子

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。



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

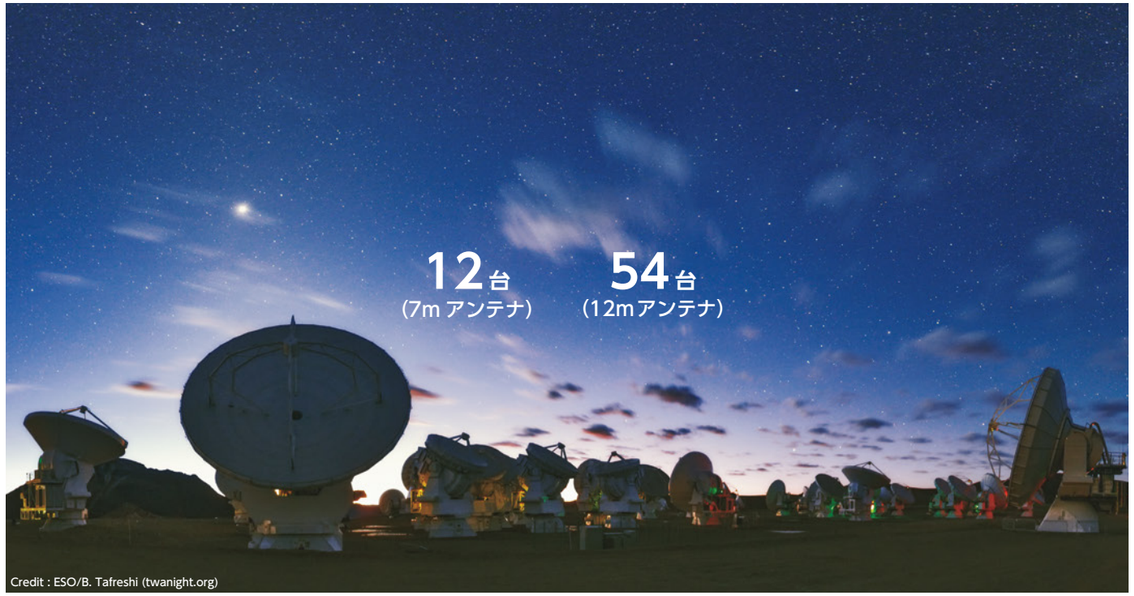
巨大な望遠鏡の建設には、多額の費用とさまざまな分野にまたがる高い技術が必要となります。この困難を克服するカギは、国際協力。「最高の望遠鏡を作る」という旗印のもとに、世界の天文学者が手を取り合うことになりました。

巨大計画が国際共同研究になる理由

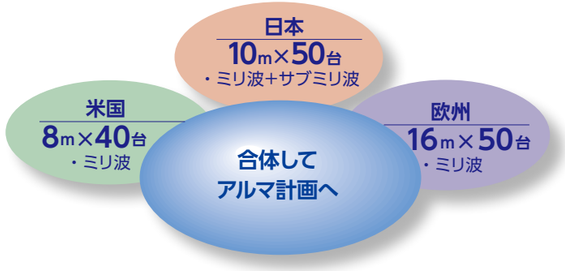
日本の計画が動き出したとき、米国と欧州でも独自に大型電波干渉計を作る計画が始まっていました。どちらも日本の計画とは異なり、サブミリ波ではなくミリ波に重点をおいた干渉計を作る計画ですが、40～50台の望遠鏡を建設するという点では似通っていました。

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のように行われる、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。



Credit : ESO/B. Tafreshi (twanight.org)



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

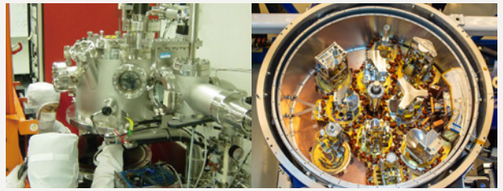
を担当することになりました。

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

Credit : ALMA (ESO/NAOJ/NRAO)

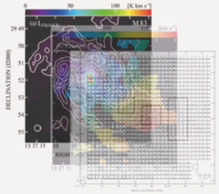
アンテナ

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。



受信機

日本はバンド 4、8、10 の受信機の開発を担当。現在、開発・量産・搭載が進行中のバンド 1、2 にも貢献しています。開発、量産は国立天文台先端技術センターで行っています。



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。

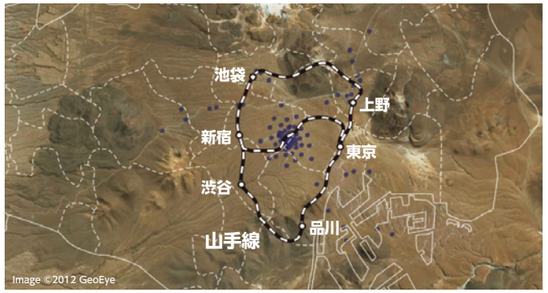
04. 巨大望遠鏡アルマ

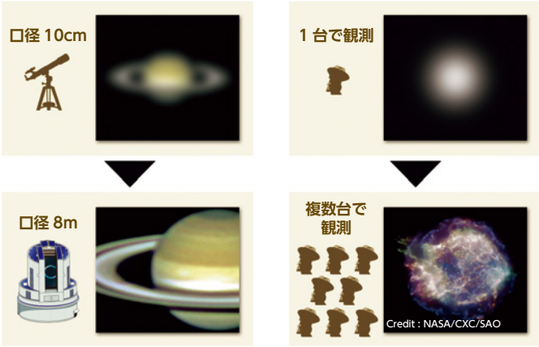
天文学の分野ではこれまでにない規模の国際協力で実現した巨大望遠鏡アルマ。最高の観測性能を実現するために、数々の最先端技術がつぎ込まれています。

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うと、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。

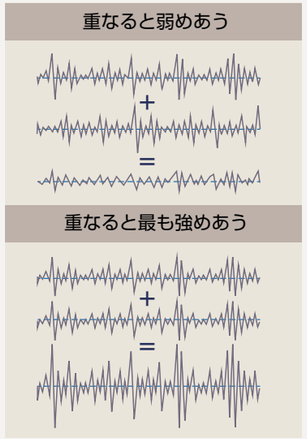
電波干渉計では、望遠鏡（アンテナ）の距離を離せば離すほど、細かい部分が分かるようになります。しかしながら、たった2台の望遠鏡だけでは、観測した天体の構造を描くことはできません。それは、望遠鏡の間に「すきま」があるから。きれいな天体の画像を描くには、離れた望遠鏡の間をうまく埋めてやる必要があり、このために多くの台数が必要になります。アルマ望遠鏡では、最大16キロメートルの範囲に66台の電波望遠鏡を配置することで、天体の非常に細かい様子をスピーディーに観測出来るようになっています。特に日本が開発したACA（モリタアレイ）では、一回り小さな7メートルアンテナを密に配置することで望遠鏡間の隙間を埋め、高画質な電波天体画像の取得を可能にしています。

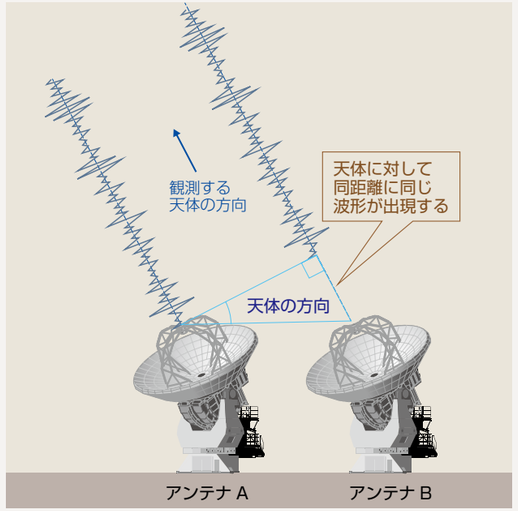
電波干渉計の仕組み

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です。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るのです。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。

05. アルマに生きる日本の技術

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。高度な設計能力と最先端の加工機器、経験豊富な職人たちによる高い加工技術の集大成が、アルマ望遠鏡なのです。

アンテナの鏡面精度、東京ドームでシャーペンの芯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。

一方で、アルマ望遠鏡は太陽も観測します。ピカピカの鏡面では太陽光が集められて装置が燃えてしまうので、アンテナの鏡面には1ミクロン程度の微小な凹凸をつけ、光は散乱するけれどミリ波サブミリ波は集めるという絶妙な加工が施されています。

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。

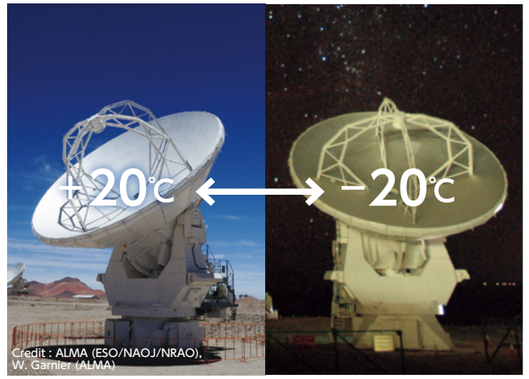
バンド4，8，10の超伝導受信機

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。

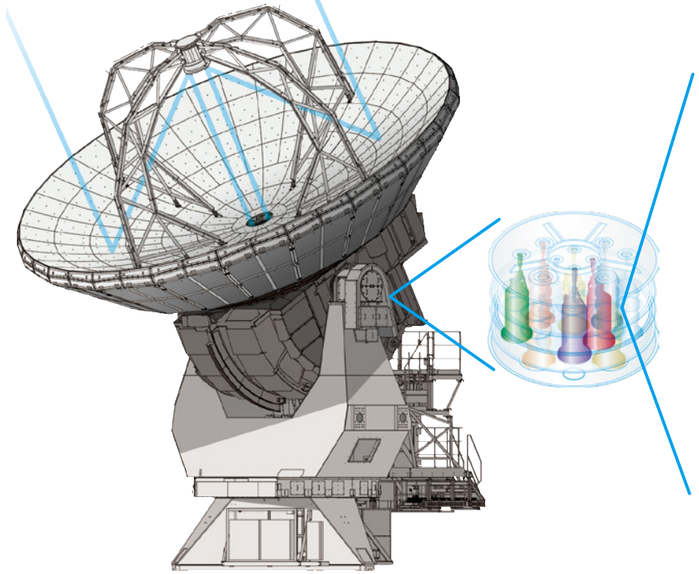
アルマ望遠鏡の桁違いの観測性能を実現するためには、受信機にも非常に高い性能が要求されます。国際協力で進めるため必要となる厳しい統一規格、絶対温度4K（ケルビン）（摂氏マイナス269度）の超低温真空タンク内に設置することによる極限までの低雑音設計、今後30年の利用を前提とした故障の起きにくい構造など、高度な技術開発力がなければ実現不可能です。このように難しい条件の中、日本は唯一複数のバンドを担当し、バンド4,8,10を受信する3つの超伝導受信機を開発しました。

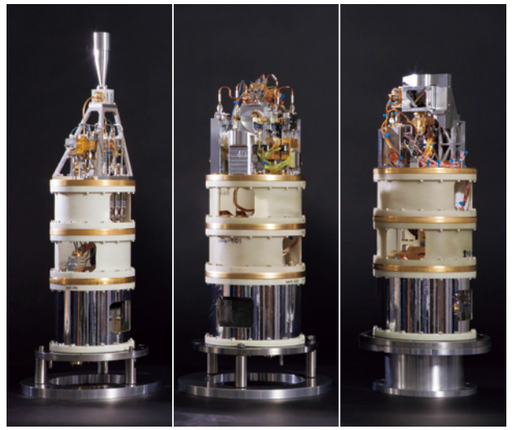
受信機の開発は、波長が短くなるほど加工精度の要求も高くなります。また、もっとも波長の短い電波を受信するバンド10受信機は、その波長の短さから他のバンドの受信機で使用している超伝導素材では十分な性能が出せません。このため国立天文台の開発チームは、新しい超伝導素材の開発から行いました。その結果として完成したバンド10受信機は、雑音の低さで世界最高の性能を誇っています。

©2014 Digital Earth Technology, DigitalGlobe, The GeoInformation Group



Credit : ALMA (ESO/NAOJ/NRAO), W. Garnier (ALMA)





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。

06. 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」

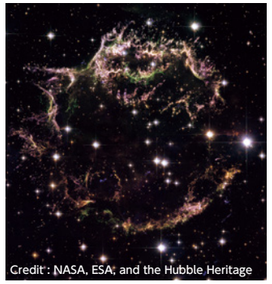
私たちになじみ深いのは、可視光で見た宇宙です。すばる望遠鏡やハッブル宇宙望遠鏡などによって撮影された、きらびやかな星々や星雲が浮かぶ美しい写真を思い浮かべてみてください。一方、センチ波で見る宇宙は、荒々しい高エネルギーの世界を捉えます。例えば、超新星残骸やブラックホール、パルサーなど、強いエネルギーを出している天体を調べるのに適しています。では、ミリ波やサブミリ波で見る宇宙とは、どんな姿なのでしょう。

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ができませんが、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。

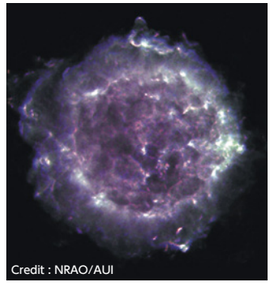
そもそも宇宙から届く電波や光は非常に弱い上に、ミリ波やサブミリ波といった比較的波長の短い電波は、大気中の水分や塵によって吸収されやすいため、受信機（電波望遠鏡の目にあたる部分）に高い性能が要求されます。特にサブミリ波は大気による吸収が激しく、標高の低い場所ではほとんど観測することができません。しかし、これらを解決できるアルマ望遠鏡によって、宇宙や生命の謎に迫ることが出来るのです。たとえば、"ビッグバン後はじめての銀河誕生の謎"、"惑星系誕生の謎"、そして、"生命の起源がどこから来たのかという謎"です。

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。

さまざまな波長で見た天体

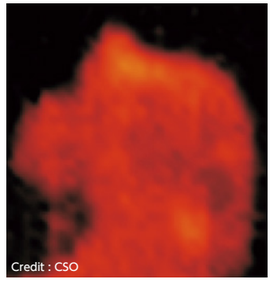


可視光で見た超新星残骸



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）

アルマ望遠鏡の水先案内人 アステ望遠鏡

アステ望遠鏡とは

アステ望遠鏡（Atacama Submillimeter Telescope Experiment：アタカマサブミリ波望遠鏡実験）は、アルマ望遠鏡から北東に約10kmの場所（パンパ・ラ・ボラ平原、標高4860m）で観測を行う口径10mの電波望遠鏡で、国立天文台が運用しています。アステ望遠鏡は南半球初の本格的大型サブミリ波望遠鏡として2002年に設置され、2004年に科学観測を開始しました。

アステ望遠鏡は、アルマ望遠鏡との連携を重視しています。アルマ望遠鏡は比類なき感度と解像度を誇りますが、一度に観測できる視野はあまり広くありません。そこで、広範囲の観測が得意なアステ望遠鏡をファインダーとして活用し、アステ望遠鏡で見つけておいた興味深い天体をアルマ望遠鏡で詳細に観測する、という役割分担で研究を進めることができます。

アステ望遠鏡

装置開発でも、アステ望遠鏡とアルマ望遠鏡は連携しています。将来アルマ望遠鏡に搭載することを目指して開発されている多視野受信機や高性能デジタル分光計の実地試験の場として、アステ望遠鏡の利用が想定されています。これらを通して、電波天文学の将来を担う人材の育成にも貢献しています。

アステ望遠鏡の装置と観測システム

アステ望遠鏡の直径10mパラボラアンテナ鏡面は205枚のアルミパネルでできており、全体で誤差20ミクロン以下の超高精度鏡面を実現しています。

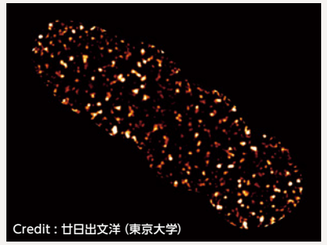
アステ望遠鏡では、分光観測（おもに分子ガスから出る電波をとらえる）と連続波撮像観測（おもに塵から出る電波をとらえる）が可能です。分光観測のために、アルマ望遠鏡バンド7、8に相当する波長0.87mm帯と0.65mm帯（周波数345GHzと460GHz）の2種類の受信機が搭載されています。また連続波観測装置として、マサチューセッツ大学が開発した多素子電波カメラAzTEC（波長1.1mm帯、周波数230GHz）が搭載され大きな成果を上げたほか、新技術を用いたカメラも開発されています。

アステ望遠鏡を用いた観測は、最寄りの町サンペドロ・デ・アタカマの施設および国立天文台三鷹キャンパス（東京都三鷹市）から、インターネットと衛星回線を経由して遠隔操作で行うことができます。

アステ望遠鏡の観測成果

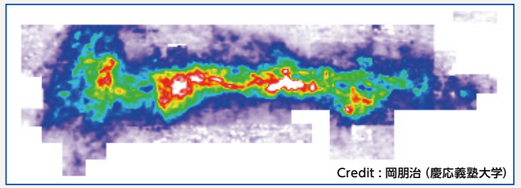
アステ望遠鏡に電波カメラAzTECを搭載して行った観測により、地球から80億光年以上離れた場所に爆発的星形成銀河が多数発見されました。こうした銀河の中では天の川銀河の数百倍もの勢いで星が作られていますが、塵に隠されて可視光では観測が難しいのです。電波観測によって、宇宙初期の銀河進化の謎に迫ることができたといえます。

爆発的星形成銀河



また、天の川銀河中心部の観測も精力的に行っています。天の川銀河の中心には、超巨大ブラックホールとそれを取り囲むガス、活発に星が誕生する領域や超新星残骸など、興味深い天体が数多く存在しています。図は、アステ望遠鏡が明らかにした天の川銀河の中心部のガスの分布です。分子ガスが放つ電波の強度や周波数を精密に測定することで、ガス雲の構造、温度や密度、さらに運動する速度などの情報を得ることができ、謎に満ちた銀河中心領域の環境の理解に一役買っています。

銀河中心



07. 解明される宇宙の謎

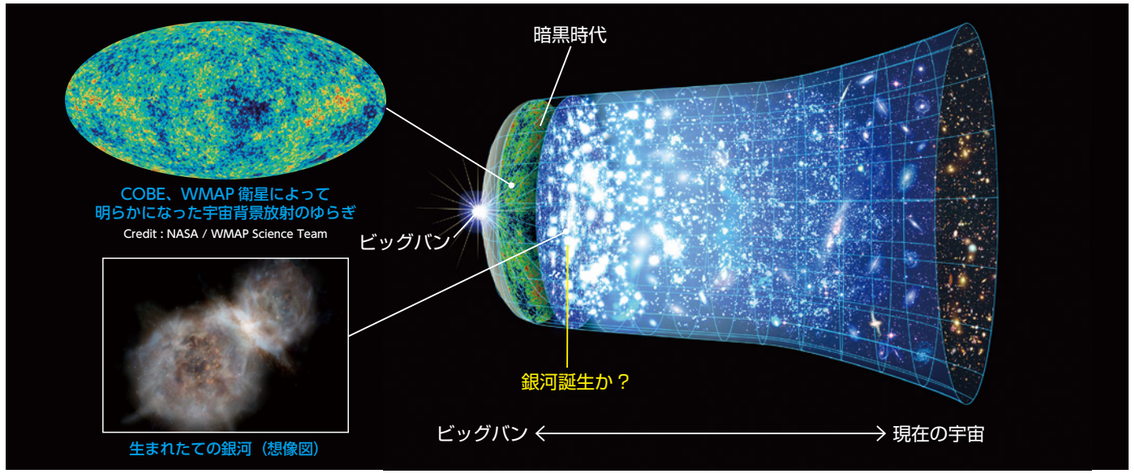
画期的な感度と解像度を持つアルマ望遠鏡に、世界中の天文学者が大きな期待を寄せています。これまで手が届かなかったさまざまな謎に、アルマ望遠鏡で初めて迫ることができるのです。そこには、どんな宇宙が待っているのでしょうか。

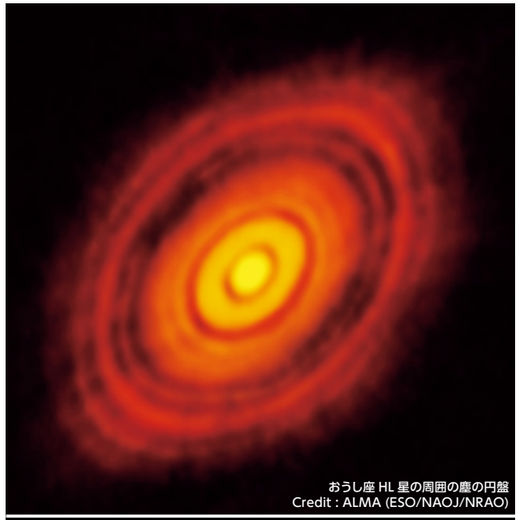
ビックバン後、はじめての銀河誕生は？

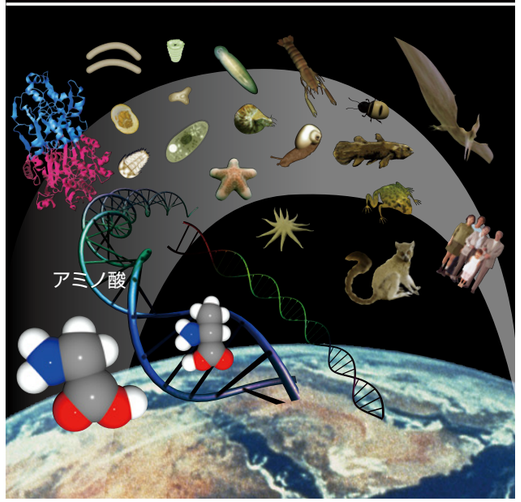
138 億年前に「ビッグバン」によって始まった宇宙は、38 万年後には絶対温度 3000K（ケルビン）ほどに冷えて電子は原子核と結合して原子となり、電磁波で観測可能になる「宇宙の晴れ上がり」を迎えました。この際に放射された電磁波は、宇宙の膨張にともなって波長が伸び（赤方偏移）、宇宙の背景全体を覆い尽くしています。これを宇宙背景放射と言います。この放射は、絶対温度 2.7 度（摂氏マイナス 270 度）に相当するものです。

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。

宇宙誕生から数億年後に存在した天体からの光は、宇宙膨張にともなう赤方偏移によって波長が延びるため、可視光望遠鏡では観測することが難しくなります。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ことが出来ると期待されます。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。




おうし座 HL 星の周囲の塵の円盤
Credit : ALMA (ESO/NAOJ/NRAO)



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 年の最初の発見以降、現在までに 3000 を超える太陽系外惑星が発見されており、惑星系は研究者の予想よりも多様性に富んでいることがわかりました。その原因を探るには、惑星系の誕生現場を調べる必要があります。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はできません。

そこで、ミリ波サブミリ波望遠鏡の出番です。この波長の電波なら、星や惑星になる前のガスや塵を観測できます。しかもアルマ望遠鏡は、従来の電波望遠鏡より圧倒的に高い解像度を持つため、これまではっきり見えなかった星や惑星の誕生現場を高解像度で観測することができるのです。実際、アルマ望遠鏡が観測したおうし座 HL 星では、若い星を取り巻く塵の円盤が克明に写し出されました（左画像）。円盤に刻まれた幾重もの暗い隙間は、その中ですでに惑星が形成されていることを示すものだと考える研究者もいます。アルマ望遠鏡は数多くの若い星を観測し、惑星形成の過程とその多様性の謎に迫っています。

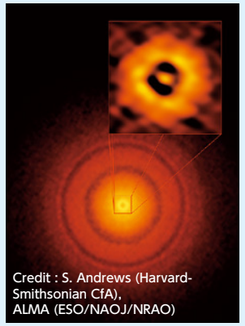
宇宙の漆黒の闇に生命の素が飛んでいる？

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。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ました。これまでのミリ波や赤外線の観測によって、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。

08. アルマ望遠鏡の観測成果（解説）

1 私たちの太陽系に似ている惑星系誕生の現場を目撃



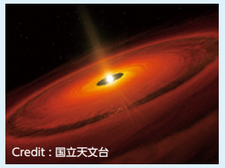
アルマ望遠鏡が観測したうみへび座 TW 星のまわりの原始惑星系円盤。中心部の拡大図にある隙間に地球のような惑星が、円盤のより外側の隙間に巨大氷惑星が、それぞれ形成されているかもしれません。

若い星を取り巻く塵（ちり）とガスの円盤は、惑星の誕生現場です。アルマ望遠鏡による新しい観測で、そうした若い星の周囲の円盤がこれまでになく詳細に描き出されました。うみへび座 TW 星は、地球から 175 光年と非常に近いこと、また約 1000 万歳と若いことから、天文学者がさかんに観測を行っている天体です。しかも、地球からは星の周囲の原始惑星系円盤を真正面から見ることができるので、円盤の全体像を把握するのにうってつけの天体といえます。

うみへび座 TW 星の円盤には、太陽と地球の間に相当する距離のところに隙間が見つかりました。この隙間は、もしかしたら私たちの住む地球とよく似た惑星、あるいはもう少し大きな「スーパーアース」が、今まさに生まれている現場かもしれません。

さらに、アルマ望遠鏡による別の観測では、円盤のより外側にある隙間に巨大氷惑星が誕生している可能性が高いことがわかっています。この隙間の半径は、太陽系では天王星の軌道半径と同じくらいです。

アルマ望遠鏡の高い解像度により、惑星が生まれる現場を詳しく調べることができるようになってきました。

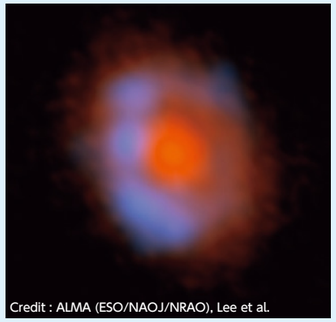


うみへび座 TW 星の想像図

2 急増光した若い星のまわりに多数の有機分子を発見

韓国・キョンヒ大学のジョンユァン・リー氏と東京大学の相川祐理氏をはじめとする国際研究チームは、アルマ望遠鏡を使って若い星オリオン座 V883 星を取り巻くガスと塵の円盤（原始惑星系円盤）を観測し、メタノール（CH_3OH）、アセトアルデヒド（CH_3CHO）、ギ酸メチル（CH_3OCHO）、アセトニトリル（CH_3CN）など多数の複雑な有機分子を発見しました。さらに、円盤内におけるメタノールとアセトアルデヒドの分布を描き出すことにも成功しました。

若い星はときどき急増光を起こすことが知られていて、オリオン座 V883 星はまさにその最中にある星です。星が明るくなると原始惑星系円盤内の温度が急激に上昇するため、円盤に含まれる氷が解けます。すると、この氷に閉じ込められていた多くの有機分子がガスとして放出されるのです。今回検出されたガスの成分が、太陽系内の彗星の成分と似ていることも明らかになりました。この研究は、惑星の誕生現場における有機分子の組成と進化を探る重要な手がかりを与えてくれます。

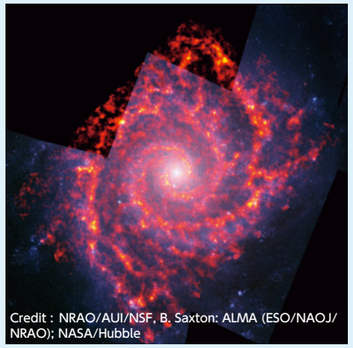


アルマ望遠鏡で観測したオリオン座 V883 星の疑似カラー画像。星を取り巻く円盤における塵の分布をオレンジ、メタノール分子の分布を青で示しています。

3 74 個の銀河の中にある「星の工場」の分布を明らかに

国際研究チームは、74 個の銀河をアルマ望遠鏡でくわしく観測し、銀河に含まれるガス雲の分布を明らかにしました。ガス雲は星を生み出すもととなる存在であり、「星の工場」とも言えます。今回の観測では、合計で 3 万個もの「星の工場」が高精細に描き出されました。

宇宙にはさまざまな大きさや形の銀河があり、その中での星の作られ方もさまざまです。その謎に、高感度・高解像度を誇るアルマ望遠鏡が挑んでいます。多数の銀河を観測し、個々の「星の工場」の性質から銀河全体のようすまでを網羅的に捉えるのです。これまでに 750 時間という長い観測時間を投入し、「星の工場」の性質が次第に明らかになってきました。生まれたばかりの星たちが出す強烈な光やガス、あるいは短寿命の巨大星が起こす超新星爆発などによって、周囲のガス雲がすぐに壊れてしまうことが確かめられたのです。研究チームは得られたデータをより詳しく調べ、銀河における星の誕生過程を包括的に理解することを目指しています。

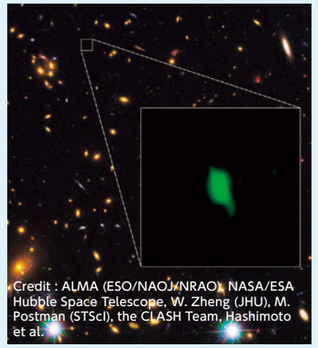


アルマ望遠鏡とハッブル宇宙望遠鏡で観測した渦巻銀河 M74。アルマ望遠鏡で得られた、一酸化炭素ガスが放つ電波の強度をオレンジ色に着色しています。渦巻銀河の中に広がるガス、つまり「星の工場」の分布がよくわかります。

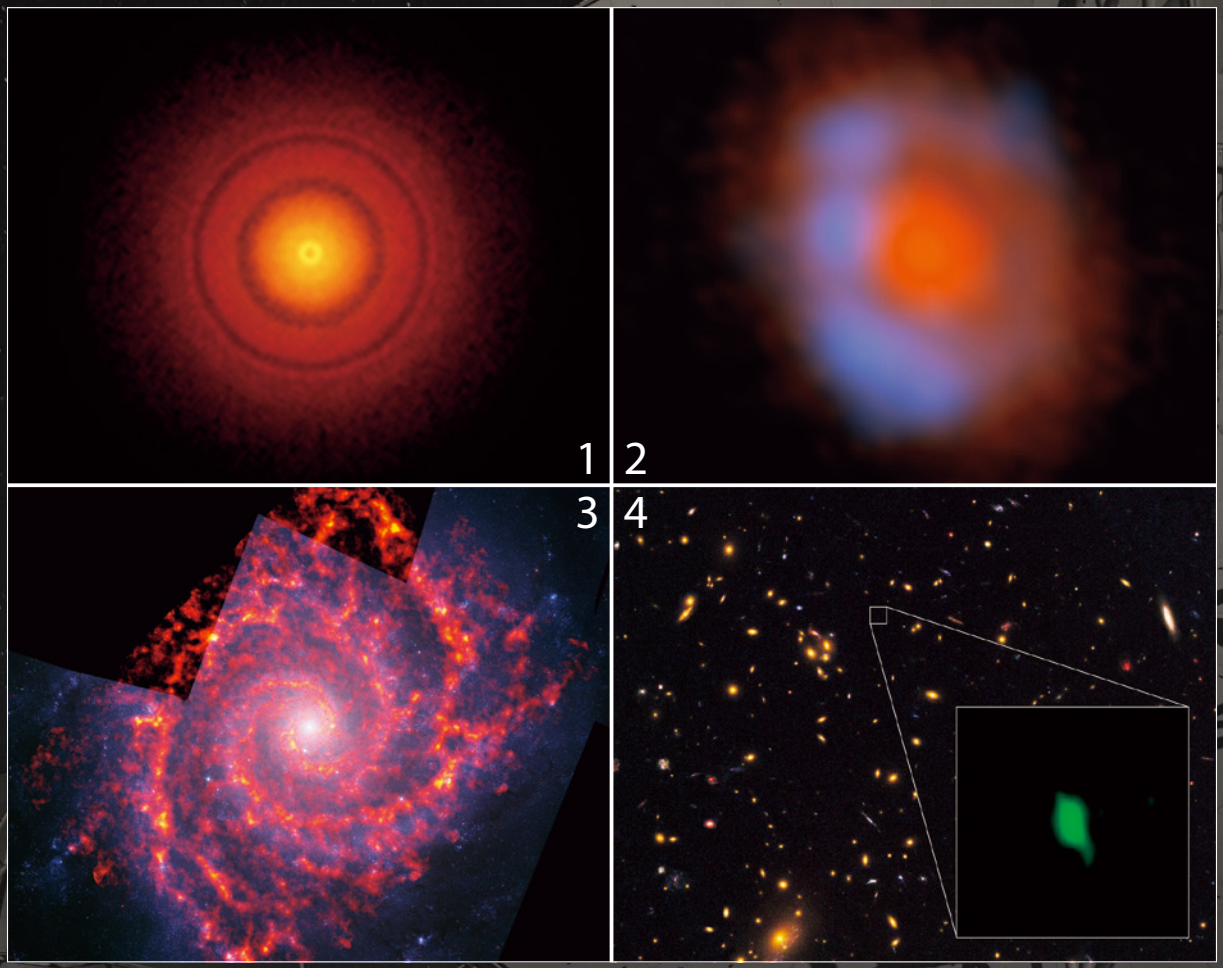
4 132.8 億光年先の銀河に酸素を検出、最遠記録をさらに更新

大阪産業大学／国立天文台の橋本拓也氏と井上昭雄氏らの国際研究チームは、アルマ望遠鏡を使って非常に遠方にある銀河 MACS1149-JD1 を観測しました。その結果、この銀河が地球から 132.8 億光年の距離にあることが判明しました。さらに研究チームは、この銀河に酸素が含まれていることを発見しました。これまで最も遠くで発見されていた酸素の記録を塗り替え、観測史上最も遠方で酸素を発見したことになります。ハッブル宇宙望遠鏡などでの観測成果と合わせると、この銀河の中では宇宙誕生からおよそ 2.5 億年が経過したころから活発に星が作られ始めたと考えられます。

アルマ望遠鏡では、これまでに 131 億光年先の銀河に酸素を発見（2016 年）、132 億光年先の銀河に酸素と塵を発見（2017 年）と、着実に遠方銀河の観測記録を塗り替えてきました。アルマ望遠鏡の高い感度により、宇宙最初の星や銀河が生まれたその時代にまた一歩迫ることができました。



ハッブル宇宙望遠鏡が赤外線で撮影した銀河団 MACS J1149.5+2223 の画像の一角に、アルマ望遠鏡が電波で観測した銀河 MACS1149-JD1 を合成した画像。アルマ望遠鏡が観測した酸素の分布を緑色で表現。



●アルマ望遠鏡の観測成果（解説は 18・19ページをご覧ください）

1 私たちの太陽系に似ている惑星系誕生の現場を目撃
Credit : S. Andrews (Harvard-Smithsonian CfA), ALMA (ESO/NAOJ/NRAO)

2 急増光した若い星のまわりに多数の有機分子を発見
Credit : ALMA (ESO/NAOJ/NRAO), Lee et al.

3 74個の銀河の中にある「星の工場」の分布を明らかに
Credit : NRAO/AUI/NSF, B. Saxton: ALMA (ESO/NAOJ/NRAO); NASA/Hubble

4 132.8億光年先の銀河に酸素を検出、最遠記録をさらに更新
Credit : ALMA (ESO/NAOJ/NRAO), NASA/ESA Hubble Space Telescope, W. Zheng (JHU), M. Postman (STScI), the CLASH Team, Hashimoto et al.

Credit : ESO/B. Tafreshi (twanight.org)

2023.10

●お問い合わせ先
国立天文台アルマプロジェクト
〒181-8588 東京都三鷹市大沢 2-21-1
電話：0422-34-3843 アルマ望遠鏡ウェブサイト ：https://alma-telescope.jp
FAX：0422-34-3764 アルマ望遠鏡 X アカウント：@ALMA_Japan
NAOJ 国立天文台