

ALMAS TIEFER BLICK in kosmische Kreißsäle

Das neue Großteleskop ALMA verspricht detaillierte Erkenntnisse über die Entstehung von Galaxien, Sternen und Planeten. Die 50 Radioantennen auf einer Hochebene in Chile werden je nach Beobachtungswunsch neu angeordnet.

In den Anden entsteht ein astronomisches Instrument der Superlative. Mit Hilfe eines Transporters können die 50 Radioteleskope des Atacama Large Millimeter Array auf rund 190 Antennenstationen verteilt werden. Die Computergrafik zeigt unterschiedliche Antennentypen: Links vorne ist ein nordamerikanisches Modell zu sehen, rechts daneben die Antenne der europäischen Partner.

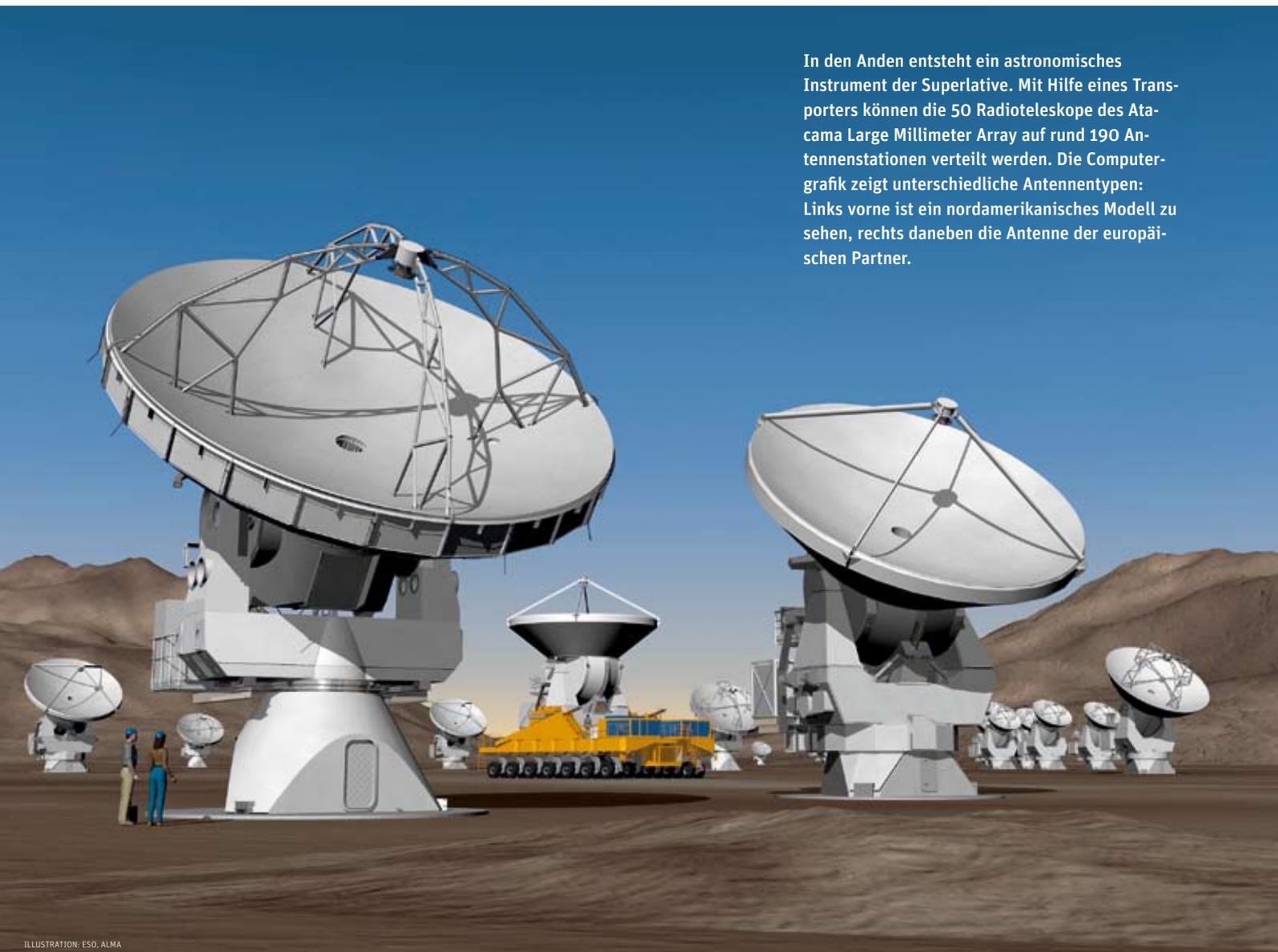


ILLUSTRATION: ESO, ALMA

Vier Radioantennen warten auf der Basisstation bei San Pedro de Atacama in 2900 Meter Höhe auf den Transport zu ihrem endgültigen Standort.

Hören Sie dazu auch unseren Podcast **Spektrum Talk** unter www.spektrum.de/talk



LEONARD BURTSCHER

Von Eva Schinnerer

Ein revolutionäres astronomisches Instrument entsteht in diesen Jahren in der Atacama-Wüste im Norden Chiles, etwa 300 Kilometer vom Very Large Telescope der Europäischen Südsternwarte entfernt. Sein wichtigstes Ziel: die Geburtsstätten von Sternen und Planeten in der Milchstraße ebenso wie ferne Galaxien des jungen Universums aufzuspüren und mit unerreichter Präzision zu untersuchen. Doch schon allein der Bau des Atacama Large Millimeter Array ist eine Herausforderung. Für ALMA müssen 50 je 115 Tonnen schwere Radioantennen – dieses Gewicht entspricht etwa dem zweier Boeing-737-Flugzeuge – auf die in 5000 Meter Höhe gelegene Chajnantor-Hochebene transportiert werden.

Derzeit findet man hier an manchen Tagen rund 450 Menschen bei der Arbeit. Auf einer Fläche von 250 Quadratkilometern errichten sie das ALMA-Kontrollzentrum und die Antennenstationen sowie die zugehörige Infrastruktur: Labors, Wohnräume und Straßen. Doch das Atmen in dieser Höhe fällt schwer. Zusammengebaut werden die Radioschüsseln mit ihren zwölf Meter Durchmesser daher in der Nähe des Ortes San Pedro. Hier, auf der Basisstation in »nur« 2900 Meter Höhe, wird man sie künftig auch warten. Eigens musste auch eine 43 Kilometer lange Schotterstraße gebaut werden, über die ein Transporter demnächst alle zwei Monate ein neues Exemplar auf die Hochebene schleppt.

Für das Projekt haben sich Europäer, vertreten durch die Europäische Südsternwarte (ESO), und Nordamerikaner, vertreten durch das National Radio Astronomy Observatory

(NRAO), zusammengetan. Die ersten Beobachtungen sind voraussichtlich schon ab dem Jahr 2011 möglich, aber erst im Jahr 2013 wird das für 30 Jahre Betriebszeit ausgelegte ALMA voll einsatzfähig sein. Anfangs sind in den mannshohen Empfängerarkaden, die sich unter jeder Hauptschüssel befinden, jeweils zwei Empfänger für insgesamt sechs Frequenzbereiche untergebracht. Im Lauf der Zeit wollen die japanischen und europäischen Kooperationspartner aber noch zusätzliche Empfänger für mindestens zwei weitere Bänder installieren.

Für die Zwecke der Forscher ist das riesige Interferometer ideal. Denn die Himmelsobjekte sind besonders in ihren frühen Entwicklungsstadien von viel Staub umgeben. Optischen Teleskopen ist die Sicht also durch kleinste Partikel von Silikaten, Graphit, Kohlendioxid- und Wassereis versperrt. Strahlung mit Wellenlängen im Submillimeter- und Millimeterbereich passiert den Staub jedoch mühelos. Beim Eintritt in die Erdatmosphäre stößt sie zwar auf Wasserdampf und wird, vor allem in unteren Luftschichten, teilweise absorbiert. Weil ALMA ebenso wie andere Millimeter-Instrumente in größtmöglicher Höhe betrieben wird, lässt sich dieses Problem aber teilweise umgehen.

Doch es genügt auch nicht, einfach eine Radioantenne auf einer Hochebene zu errichten. Zum Vergleich: Die vier großen Acht-Meter-Spiegel des VLT erreichen im nahen und mittleren Infraroten (also im Wellenlängenbereich zwischen 780 milliardstel Meter und etwa 10 Mikrometer) eine Auflösung von rund 50 Millibogensekunden. Strebt man dieselbe Auflösung bei Wellenlängen von einem Millimeter an, wie sie ALMA untersuchen

In Kürze

- ▶ Das revolutionäre Radiointerferometer Atacama Large Millimeter Array (ALMA) wird derzeit auf **5000 Meter Höhe in den chilenischen Anden** errichtet. 2011 sollen die ersten Beobachtungen stattfinden, 2013 wird ALMA fertiggestellt.
- ▶ Das aus **50 miteinander verbundenen Radioantennen** bestehende Instrument wird Sterne und Galaxien aus der Frühzeit des Universums ebenso untersuchen können wie unsere kosmische Nachbarschaft.
- ▶ Weil je nach Größe der beobachteten Strukturen unterschiedliche Abstände zwischen den **115 Tonnen schweren Antennen** erforderlich sind, werden sie von Transportern je nach Wunsch der Astronomen auf einer Fläche mit einem Durchmesser von mindestens 15 Kilometern verteilt.



Die heutigen Radiointerferometer liefern **nur einen Vorgeschmack** auf das, was mit ALMA möglich sein wird

LAUFEN HEUTIGE STERNGEBURTEN ANDERS AB?

Insbesondere auch der Staubgehalt in Galaxien und seine Wärmestrahlung steht im Fokus der ALMA-Astronomen. Durch ihre Analysen wollen sie herausfinden, ob die physikalischen Umstände der **Sternentstehung in frühen Galaxien** tatsächlich den heutigen Bedingungen gleichen. Denn die Bildung von Metallen bei Supernovae und in sehr massereichen Sternen könnte damals einen größeren Einfluss auf Art und Menge junger Sterne gehabt haben, als Forscher bisher annehmen.

soll, bräuchte man eine Antenne mit einem Durchmesser von vier Kilometern! Denn die Winkelauflösung ist umgekehrt proportional zum Durchmesser des Teleskopspiegels und hängt außerdem von der beobachteten Wellenlänge ab.

Daher nutzen Radioastronomen das Prinzip der Interferometrie, um Radiostrahlung, deren Wellenlängenbereich zwischen weniger als einem Millimeter bis hin zu mehreren Metern liegt, mit vertretbarem Aufwand zu detektieren. Ein elektronisches Datenverarbeitungssystem, der Korrelator, wertet dabei die Laufzeitunterschiede der Signale einzelner Radioschüsseln aus. Im Fall von ALMA gelangen diese Signale über Glasfaserkabel ins Kontrollgebäude, wo sie dann in Echtzeit verarbeitet werden. Im einfachsten Fall, bei zwei verbundenen Antennen, wächst die so erzielte Auflösung mit dem Abstand der Antennen.

In Abhängigkeit von diesem Abstand erhalten die Forscher allerdings nur Information über räumliche Strukturen bestimmter Ausdehnung (in der Fachsprache Raumfrequenzen genannt): Je größer die Distanz zwischen zwei Antennen, desto kleinere Strukturen lassen sich untersuchen. Wollen die Wissenschaftler jedoch die Strukturen eines Objekts auf allen Skalen untersuchen – also ein vollständiges Abbild des Himmelsphänomens gewinnen –, müssen sie *alle* Raumfrequenzen erfassen.

Zum Teil hilft ihnen dabei die Erdrotation. Denn diese sorgt dafür, dass sich die Entfernung zwischen zwei Antennen – vom Himmelsobjekt aus gesehen – kontinuierlich ändert (ähnlich wie ein Bildschirm, vor dem man steht, schmaler zu werden scheint, wäh-

rend man sich seitlich von ihm wegbewegt). Zusätzlich aber schalten die Astronomen viele Einzelantennen zu einem Feld zusammen. In einem solchen *array* stehen dann zahlreiche unterschiedliche Antennenabstände (»Basislinien«) zur Verfügung.

Mit dieser Technik beobachten zum Beispiel die beiden erst jüngst aufgerüsteten Instrumente CARMA (Combined Array for Research in Millimeter-Wave Astronomy) in den Kalifornischen Inyo Mountains und das PdBI (Plateau de Bure Interferometer) in den französischen Alpen schon heute im Bereich von ein bis drei Millimetern. Ihre Basislinien von bis zu zwei Kilometer Länge liefern allerdings lediglich einen Vorgeschmack auf das, was mit ALMA möglich sein wird.

Seit 2003 wird auch das SMA (Sub-Millimeter Array) auf dem hawaiianischen Mauna Kea betrieben, das mit acht Radioteleskopen im Submillimeterbereich von 0,3 bis 1,7 Millimetern aktiv ist. Im Verbund mit weiteren Instrumenten kommt es auf immerhin bis zu rund 800 Meter große Antennenabstände.

Den derzeitige Rekordhalter übertrifft ALMA gleich mehrfach

Doch die Astronomen werden mit der Zeit immer anspruchsvoller und fordern nicht nur lange Basislinien, sondern je nach Beobachtungsvorhaben bestimmte Winkelauflösungen. Um so flexibel wie möglich zu sein, sind die ALMA-Antennen darum nicht fest installiert, sondern lassen sich zwischen rund 190 Stationen – die genaue Zahl steht noch nicht fest – verschieben. Während für das Very Large Array im US-amerikanischen Bundesstaat New



Mexico – es umfasst 27 Radioantennen auf rund 2100 Meter Höhe – zu diesem Zweck Schienen verlegt wurden, ließen die ALMA-Verantwortlichen eigens einen Transporter entwickeln. Das 130 Tonnen schwere Gefährt, von denen zwei Exemplare gebaut wurden, befördert die Antennen mit einer Geschwindigkeit von bis zu zwölf Kilometern pro Stunde an beliebige der fest installierten Stationen.

Ist ALMA erst einmal fertig, wird das Instrument zehnmals mehr Basislinien als der heutige Rekordhalter CARMA besitzen und sie werden bis zu neunmal länger sein. Mit der Zahl seiner Antennen wird es das PdBI und das SMA um den Faktor acht übertreffen, seine Sammelfläche (und damit Empfindlichkeit) ist dann sechsmal höher als diejenige des derzeit leistungsstärksten Instruments, des PdBI. Und während die Sicht seiner Vorgänger auf helle Objekte wie die nächstgelegenen oder massereichsten Staubansammlungen beschränkt ist (siehe »Kosmischer Staub«, SdW 2/2001, S. 30), wird ALMA nicht nur Planetengeburt in der kosmischen Nachbarschaft, sondern auch fernste Galaxien aus der Frühzeit des Universums untersuchen – neben den bekannten Exemplaren vor allem auch ihre leuchtschwächeren Verwandten.

Hinzu kommt, dass mit ALMA erstmals auch Radioobjekte in der südlichen Hemisphäre detailliert in den Blick kommen. Trotzdem werden die heutigen Instrumente natürlich auch in Zukunft noch wertvolle Arbeit leisten: durch ihre Beobachtungen nördlicher Objekte ebenso wie als Prüfsteine für neue technologische Entwicklungen, die sich dann auch bei ALMA einsetzen lassen.



ILLUSTRATION: ESO, ALMA; FOTO OBEN: ESO, HANS HERMANN MEYER

Während auf der Chajnantor-Ebene derzeit noch reges Treiben herrscht, wird während des eigentlichen Betriebs mehr Ruhe einklingen. Die Wissenschaftler selbst werden vor allem in Santiago de Chile stationiert sein und nur wochenweise zur Unterstützung der Beobachtungen nach San Pedro beziehungsweise direkt zu ALMA kommen – wenn sie überhaupt die Reise in die Anden auf sich nehmen. Denn die gewünschten Beobachtungsbedingungen, also wenig Wasserdampf, ruhige Atmosphäre und die geeignete Antennenkonfiguration, sind nicht auf Kommando abrufbar. Der Zeitraum, in dem die Beobachtungen durchgeführt werden, kann sich daher über Wochen oder Monate erstrecken, so dass ALMA als »Service«-Instrument konzipiert wurde: Ähnlich wie in den Kontrollräumen der Weltraumteleskope werden Techniker vor Ort das Interferometer gemäß den Wünschen der Forscher konfigurieren und betreiben.

Und das im 24-Stunden-Betrieb. Denn wie jedes Radioteleskop kann ALMA rund um die Uhr und an jedem Tag im Jahr beobachten. Gute Planung ist trotzdem nötig: Verlangen Beobachtungsprogramme eine hohe Winkel-

Bald wird auf der Chajnantor-Hochebene (großes Bild) ein Array aus 50 Radioantennen errichtet sein. Ein Transportfahrzeug (kleines Bild, Vordergrund) wird die 115 Tonnen schweren Instrumente je nach Wunsch der Astronomen mit einer Geschwindigkeit von zwölf Kilometern pro Stunde von Station zu Station befördern und dort auf wenige zehntel Millimeter genau positionieren. In der weitläufigsten Konfiguration wird der größte Abstand zwischen zwei Antennen mindestens 15 Kilometer betragen.



BEIDE FOTOS: ESO, ALMA / NRAO

Auf der Basisstation wird eine Antenne für die Montage vorbereitet (links). Der eigens entwickelte Transporter (rechts) wiegt selbst 130 Tonnen. Seinen Namen »Otto« verdankt er dem Besitzer der baden-württembergischen Fahrzeugfabrik, die das Gefährt entwickelte.

WAS GESCHIEHT RUND UM SCHWARZE LÖCHER?

Auch an aktive Galaxienkerne wird sich ALMA heranpirschen, in denen Schwarze Löcher unter enormem Energieausstoß Gaswolken und weitere Materie in ihrer Nähe verschlingen. Warum aber verlassen die Gasmoleküle überhaupt ihre Kreisbahn um das galaktische Zentrum und fallen stattdessen mitten hinein? Untersuchen lässt sich dies im benachbarten Virgo-Galaxienhaufen. ALMA wird bis auf wenige dutzend Astronomische Einheiten an die **Schwarzen Löcher** »herankommen«, die dort in aktiven Galaxien wie der elliptischen Riesengalaxie M 87 beheimatet sind. Das Interferometer ist sogar empfindlich genug, um dort einzelne Molekülwolkenkomplexe zu unterscheiden.

auflösung bei gleichzeitig kurzen Wellenlängen (beispielsweise bei 450 Mikrometer), sind beste Wetterbedingungen erforderlich. Kündigen sich diese an, müssen die Techniker schnell reagieren und den Ablauf der Beobachtungsprogramme den Wetterverhältnissen anpassen. Weniger empfindlich reagieren die Instrumente, wenn größere Wellenlängen von über einem Millimeter untersucht werden – dann beeinflusst auch ein höherer Wasserdampfgehalt der Atmosphäre die Messungen nicht wesentlich.

Deutlich länger sind die Vorlaufzeiten, wenn Forschungsvorhaben eine bestimmte räumliche Anordnung der Antennen benötigen. Der Durchmesser des Antennenareals, der je nach Konfiguration von 150 Metern bis hin zu 15, möglicherweise auch 18 Kilometer reichen soll, lässt sich nur nach und nach verändern. Werden durchschnittlich zwei Antennen pro Woche verschoben, wird es etwa ein halbes Jahr dauern, um von der kompaktesten zur weitläufigsten Konfiguration zu gelangen. Zusätzlich bedeutet dies aber auch, dass die Techniker die jeweiligen Antennen und Empfänger während des Betriebs neu kalibrieren müssen. Vor allem der Standort muss auf wenige Zehntelmillimeter genau bekannt sein.

Erste Pläne für ein großes Submillimeter-Array waren schon in den 1980er Jahren entstanden. Damals hatten sich Forscher in Europa, den USA und in Japan unabhängig voneinander an die Arbeit gemacht. Ernsthaft in Angriff genommen wurde ALMA aber erst Mitte der 1990er Jahre, als sich die europäischen und nordamerikanischen Wissenschaftler zusammaten. Im Lauf dieses Prozesses wuchsen allerdings auch ihre Wünsche: In der nun geplanten Größe wird das Interferometer rund eine Milliarde US-Dollar kosten.

Schon von Anfang an hatten die Forscher auf Grund der hervorragenden Beobachtungsbedingungen einen Standort in den chilenischen Anden favorisiert. 1997 wählte das Planungsgremium dann die Chajnantor-Ebene aus, 1998 erklärte sie der damalige chilenische Präsident zur Science Reserve. Im Jahr 2002 gaben der US-Kongress und der Verwaltungsrat der Europäischen Südsternwarte (ESO) dann die Gelder für den Bau frei, so dass die gleichberechtigten Partner Europa und Nordamerika, sprich ESO und NRAO, das Projekt im November 2003 offiziell starten konnten. Im Juli 2006 beteiligten sich schließlich auch Japan und Taiwan als Juniorpartner.

Seither nimmt das Vorhaben immer konkretere Züge an. Die erste Antenne erreichte Chile im April 2007. Mittlerweile befinden sich schon sieben Antennen des amerikanischen Partners und vier japanische Exemplare im Aufbau. Ende 2008 wird auch die erste europäische Antenne erwartet. Und jüngst vermeldeten die Astronomen »*first fringes*«, also die ersten Interferenzmuster auf ihren Schirmen. Diese Premiere fand auf der Teststation in New Mexico statt, wo zwei ALMA-Antennen erfolgreich zusammenschaltet worden waren.

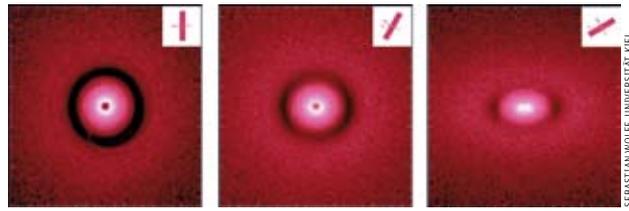
Das ganze Universum im Blick

Gemeinsam mit dem Array ACA (siehe Kasten rechts »Juniorpartner«) erfasst das hochflexible Instrument das kontinuierliche Spektrum ebenso wie Moleküllinien mit Bandbreiten von acht Gigahertz (Milliarden Hertz) bis etwa vier Kilohertz. So können die Astronomen praktisch alle astronomisch interessanten Objekte in den Fokus nehmen, Planeten und Kometen im Sonnensystem ebenso wie die ersten Sterne und Sternsysteme im

WIE ENTSTEHEN PLANETEN?

Planeten wachsen in der Staubscheibe um Protosterne allmählich heran, indem sie bei ihren Umläufen Material aufsammeln. Ein junger jupiterähnlicher Planet dürfte so eine Lücke von ein bis zwei Astronomischen Einheiten Durchmesser reißen, die sich mit ALMA direkt abbilden lässt. Um dies in nahen Sternentstehungsgebieten etwa im Sternbild Taurus oder Hydra bei einer Wellenlänge von 0,8 Millimetern zu beobachten, genügt eine Auflösung von 35 Millibogensekunden. Den nötigen Antennenabstand von vier Kilometern erreicht ALMA mühelos. In den Simulationen ist rechts oben jeweils die Neigung der Bahnebene relativ zur (gestrichelten) Beobachterblickrichtung zu sehen.

Eine weitere indirekte Methode zum Nachweis von Planeten nutzt die Tatsache aus, dass sich der Schwerpunkt eines Sternsystems kontinuierlich leicht ändert, wenn Planeten darin ihr



Zentralgestirn umkreisen. Um diese winzige Veränderung aufzuspüren, muss die absolute Sternposition am Himmel aber höchst genau bestimmt und über Jahre hinweg verfolgt werden. Forscher, die rund 1000 sonnenähnliche Sterne mit ALMA untersuchen wollen, müssten rund eine Woche Beobachtungszeit beantragen, verteilt über drei Jahre. Dabei würde vor allem der Staub um jüngere Sterne analysiert.

Universum. Auch detaillierte Studien von Regionen in unserer Milchstraße und nahen Galaxien wird das Interferometer erlauben, aber auch den Blick auf das interstellare Medium eröffnen, also auf Gas- und Staubwolken innerhalb von Galaxien (siehe »Das Gas zwischen den Sternen«, SdW 3/2002, S. 30).

Dort interessieren die Astronomen vor allem die Kühlungslinien der Gasmoleküle. Diese Linien in den gewonnenen Spektren entsprechen Energien, bei denen die Moleküle Strahlung emittieren und dadurch Energie verlieren, das Gas kühlt also ab. Sie verraten den Forschern nicht nur die physikalischen Eigenschaften des Gases wie Temperatur und Dichte, sondern auch dessen Kinematik. Bei ihren Beobachtungen werden sie ebenso auf Gasscheiben rund um werdende Sterne stoßen wie auf deren riesige Verwandten um supermassereiche Schwarze Löcher in den Zentren naher Galaxien. Selbst »Details« wie die Staubhüllenreste von al-

ternden Sternen oder den exakten Verlauf der Gasströmung innerhalb galaktischer Spiralarme werden die Daten enthüllen.

»Dabei sein«, wenn ein Stern zündet

Erstmals wird ALMA auch die Untersuchung der exakten Struktur einzelner Molekül- und Staubwolken mit durchschnittlichen Größen von einem Parsec ($3 \cdot 10^{16}$ Meter) erlauben. Wenn Teile solcher Gebilde unter dem Einfluss der Schwerkraft kollabieren, können daraus einzelne Sterne entstehen, solche wie unsere Sonne ebenso wie Exemplare mit zehn- bis hundertmal größeren Massen. Genauer beobachten lässt sich dieser Prozess, weil ALMA die Fragmentierung der Wolken auf Skalen von bis zu zehn Astronomischen Einheiten (eine AE ist der Abstand zwischen Erde und Sonne) sichtbar machen kann und die chemische Zusammensetzung der Objekte ermitteln hilft.

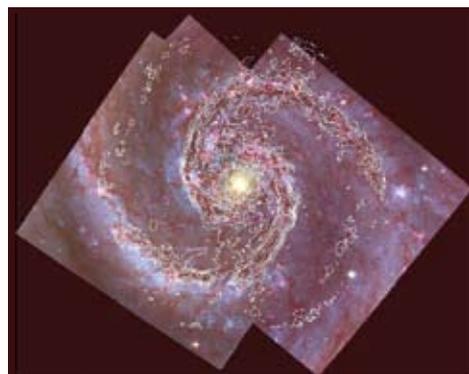
Insbesondere hoffen die Forscher, den Kollaps von kaltem Gas zu einem Protostern so-

JUNIORPARTNER

Auch der Bau eines weiteren Bestandteils von ALMA, nämlich das von Japan und Taiwan beigesteuerte Atacama Compact Array (ACA), hat begonnen. Die zwölf Sieben-Meter-Schüsseln des ACA werden sich vergleichsweise eng zusammenstellen lassen, so dass sie ALMA vor allem bei Beobachtungen großskaliger Strukturen ergänzen. Dazu gehört zum Beispiel die **großflächige Verteilung der Molekülwolken** in den nahen Sternentstehungsgebieten des Carina-Nebels oder im Sternbild Perseus. ACA besteht darüber hinaus aus vier Zwölf-Meter-Antennen, die als Einzelteleskope genutzt werden. Sie liefern wichtige Kalibrationsmessungen für beide Arrays, lassen sich aber auch für die Untersuchung noch größerskaliger Strukturen wie der Spiralarme in unserer Nachbargalaxie Andromeda nutzen. Werden beide Interferometer gemeinsam betrieben, können sie auch komplex strukturierte Objekte wie die Spiralarme naher Galaxien optimal abbilden.

AUFSCHLUSSREICHE MOLEKÜLWOLKEN

Beobachtungen der Verteilung molekularen Gases in nahen Galaxien werden mit ALMA zur Routine. Die Messung der Größe einzelner Molekülwolken, ihrer Bewegung in der Galaxienscheibe und ihrer Lage relativ zu nahen Sternentstehungsgebieten soll Aufschluss über Auslöser und Mechanismen für die Sternentstehung geben. Das Bild zeigt die Kohlenmonoxidverteilung in der Whirlpool-Galaxie M51 in einer Konturdarstellung. Unterlegt ist eine optische Aufnahme des Weltraumteleskops Hubble.



Was sich bislang nur in **extremen Einzelfällen** belegen ließ, wird ALMA anhand ganz normaler Galaxien überprüfen können

wie die anschließende Zündung seines Brennstoffs und sein Wachsen zu beobachten. Das ist allerdings nur indirekt möglich. Diese Prozesse gehen, auf astronomischen Zeitskalen gesehen, zwar ziemlich schnell vor sich und dauern beispielsweise bei massereichen Sternen deutlich weniger als eine Million Jahre. So viel Zeit haben irdische Beobachter aber trotzdem nicht. Wir müssen stattdessen eine Vielzahl von Objekten studieren, um einzelne davon in Zeitsequenzen einordnen zu können und aus dem Verhalten der Gesamtpopulation schlüssige Aussagen zu gewinnen.

Auch weitere zu lösende Rätsel existieren reichlich. So entstehen die meisten Sterne in den Spiralarmen der Milchstraße, doch gegenwärtige Theorien zur Frage, wo und wie genau dies geschieht, widersprechen einander (siehe »Sternentstehung in Spiralgalaxien«, SdW 9/2000, S. 46). Ebenfalls zu klären wäre, inwieweit die chemische Zusammensetzung von Gaswolken die korrekte Bestimmung ihrer Masse beeinflusst.

In anderen Projekten wird ALMA weit in die Frühgeschichte des Kosmos blicken. Bei

tiefen optischen Durchmusterungen des Himmels fanden Forscher heraus, dass die damalige Sterngeburtenrate diejenige, die wir heute im lokalen Universum beobachten, um ein Vielfaches übertrifft. Einige Milliarden Jahre nach dem Urknall aber, als das Universum etwa halb so alt wie heute war, begann die Zahl der neu hinzukommenden Sonnen kontinuierlich abzunehmen. Frühe Galaxien dürften also, so vermuten die Theoretiker, über wesentlich mehr molekulares Gas als Grundstoff für die Sternentstehung verfügt haben.

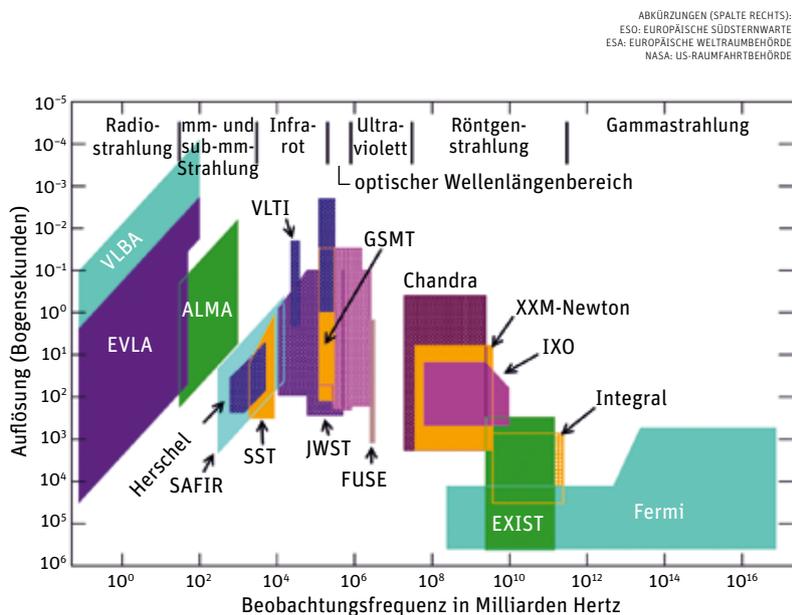
»Erwarte das Unerwartete!«

Belegen ließ sich dies bislang allerdings nur in besonderen Einzelfällen, etwa bei extremen Starburstgalaxien, die tausendfach mehr Sterne hervorbringen als gewöhnliche Galaxien, weil die Sternentstehung beispielsweise durch Galaxienkollisionen angeregt wurde (siehe »Galaxien im Ausnahmezustand«, SdW 9/2003, S. 38). Dank ALMA wird man diese Theorie erstmals auch anhand normaler Sternensysteme wie unserer Milchstraße überprüfen können.

EINE LÜCKE FÜR ALMA

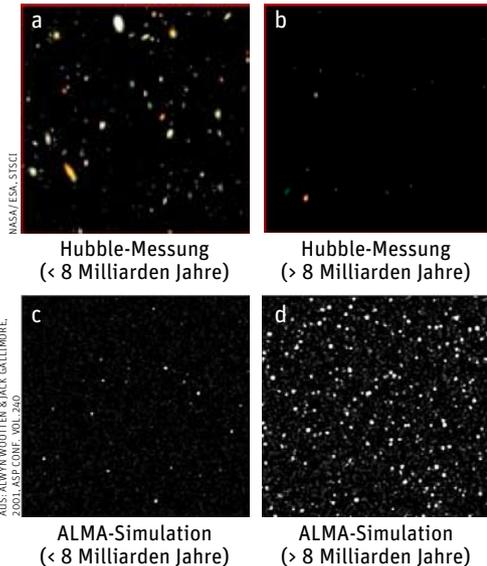
ALMA füllt einen weiteren »weißen Fleck« auf der Himmelskarte. Denn das Radiointerferometer deckt einen großen Bereich an Kombinationen von Beobachtungsfrequenzen bei bestimmten Auflösungen ab, der sich bisher noch nicht untersuchen ließ. Außerdem übertrifft die Empfindlichkeit von ALMA diejenigen heutiger Millimeter-Interferometer um fast eine Größenordnung.

Die Grafik stellt das Leistungsvermögen von ALMA in einen Zusammenhang mit den Fähigkeiten anderer großer Teleskope, ob bodenbasiert oder im Weltraum stationiert. Die hier genannten Instrumente sind in unterschiedlichen Entwicklungsphasen, manche haben bereits ihr Betriebsende erreicht, für andere wird erst das Konzept erarbeitet (siehe rechte Spalte).



ABKÜRZUNGEN (SPALTE RECHTS):
ESO: EUROPÄISCHE SÜDSTERNWART
ESA: EUROPÄISCHE WELTRAUMBÜRO
NASA: US-RAUMFAHRTBEHÖRDE

- Chandra:** Weltraum-Röntgenteleskop (Teil des »Great Observatory Program« der NASA, seit 1999 im Orbit)
- EVLA:** Radiointerferometer, umfassende Modernisierung des Very Large Array (im Bau, USA)
- EXIST:** Weltraumobservatorium für harte Röntgenstrahlen (NASA, Konzeptphase)
- FUSE:** spektroskopische Weltraummission für das ferne Infrarot (NASA, seit 2007 beendet)
- Fermi:** (zuvor Glast) Weltraumteleskop für Gammastrahlung (NASA, seit 2008)
- GSMT:** optisches 30-Meter-Teleskop aus der Klasse der Extremely Large Telescopes mit mehr als 20 Meter Spiegeldurchmesser (USA, Konzeptphase)
- Herschel:** Weltraumteleskop für Infrarotstrahlung (ESA, Start 2009)
- HST:** (Hubble Space Telescope) Weltraumteleskop für sichtbare, ultraviolette und infrarote Wellenlängen (ESA/NASA, Teil des »Great Observatory Program«, seit 1990)
- Integral:** Weltraum-Gammaobservatorium (ESA, seit 2002)
- IXO:** (Verschmelzung von XEUS und Con-X) spektroskopisches Weltraum-Röntgenobservatorium (NASA/ESA, Konzeptphase)
- JWST:** (James Webb Space Telescope) Infrarot-Weltraumteleskop, oft als Hubble-Nachfolger bezeichnet (NASA/ESA, geplant für 2013)
- SAFIR:** Weltraumteleskop für das ferne Infrarot, möglicher Nachfolger für SST und Herschel (NASA, Konzeptphase)
- SST:** (Spitzer Space Telescope) Infrarot-Weltraumteleskop (Teil des »Great Observatory Program« der NASA, seit 2003)
- VLBA:** Radiointerferometer (USA, seit 1993)
- VLTi:** interferometrisches Teleskop für infrarote und optische Wellenlängen (ESO, seit 2001)
- XMM-Newton:** Weltraum-Röntgenobservatorium (ESA, seit 1999)



MAKALESA, STSCI

AUS: ALIYUN WOOTEN & JACK GALLIMORE, 2001, ASP CONF. VOL. 240

Das Hubble-Weltraumteleskop entdeckt vor allem Galaxien, die vor weniger als acht Milliarden Jahren entstanden (a). Objekte, die sich noch früher bildeten (b), findet das optische Instrument kaum. ALMA-Simulationen zeigen hingegen, dass das Interferometer insbesondere im jungen Kosmos häufiger fündig wird (d). Denn die Wärmestrahlung weit entfernter Galaxien verschiebt sich bei ihrer Reise durch das expandierende Universum in genau den Wellenlängenbereich, der von ALMA optimal detektiert wird.

Doch selbst damit ist das Spektrum des neuen Instruments noch lange nicht abgedeckt. Das Interferometer wird auch Aufschluss darüber geben, ob sich die Feinstrukturkonstante – und mit ihr möglicherweise elementare Größen wie die Lichtgeschwindigkeit oder die Ladung des Elektrons – im Lauf der kosmischen Evolution geändert hat. Und es kann unser Verständnis darüber erweitern, wie die kosmische Hintergrundstrahlung durch das heiße Gas in fernen Galaxienhaufen absorbiert und damit gekühlt wird (siehe »Veränderliche Naturkonstanten«, SdW 10/2005, S. 78 und »Auf der Spur der Sternreise«, SdW 9/2008, S. 24).

Doch für neue Erkenntnisse müssen wir nicht immer in die Ferne schweifen. Natürlich wird ALMA auch Details unseres eigenen Planetensystems, etwa den Aufbau der Planeten und Monde und die Struktur ihrer Atmosphären, enthüllen. Weil das Interferometer viele verschiedene Moleküle zu beobachten erlaubt – darunter Sauerstoff, Ozon, Wasserstoffperoxid, halbschweres Wasser (HDO), Zyanwasserstoff, Chlorwasserstoff, Kohlenmonoxid, Methylcyanid und Stickstoffmonoxid –, werden wir mit seiner Hilfe genaue Auskunft über die chemische Zusammensetzung der Planetenatmosphären und ihre Dichtestruktur als Funktion der Höhe gewinnen. Selbst Rückschlüsse auf Winde und eventuelle Jahreszeiten werden die Sonnensystemforscher ziehen können.

Letztlich aber bedeutet der Quantensprung in Auflösung, Empfindlichkeit und Abdeckung von Wellenlängenbereichen, den ALMA vollzieht, dass uns auch völlig neue Dimensionen eröffnet werden könnten. Wenn das Interferometer endlich an den Start geht, wird es unter den Forschern vor allem auch heißen: »Erwarte das Unerwartete!«



Eva Schinnerer forscht am Heidelberger Max-Planck-Institut für Astronomie. Zu ihren Arbeitsgebieten gehören Sternentstehungsprozesse außerhalb der Milchstraße, die Dynamik von Gas, das in aktive galaktische Kerne stürzt, sowie interferometrische Beobachtungsprojekte etwa am Very Large Array und am Plateau de Bure Interferometer. Sie wird zu den Wissenschaftlern gehören, die ALMA für Beobachtungen nutzen können.

Keller, H.-U.: Staub im Weltall. In: *Sterne und Weltraum*, S. 44, 3/2008.

Rohlfs, K., Wilson, T. L.: *Tools of Radio Astronomy*. Springer, Berlin, Heidelberg 2006.

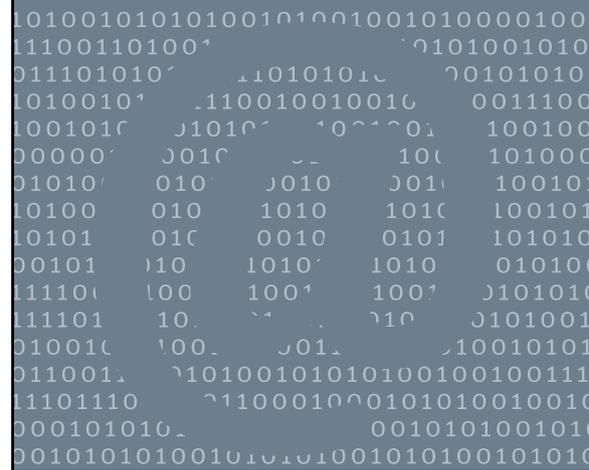
Beuther, H.: »Das Submillimeter-Array auf dem Mauna Kea«. In: *Sterne und Weltraum*, S. 36, 3/2004.

ALMA-Homepage:
www.almaobservatory.org

Wissenschaftliche ALMA-Projekte mit hoher Priorität: www.eso.org/sci/facilities/alma/science/drsp

ALMA-Animationen: www.alma.cl/alma_board/

Weitere Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/972369.



wichtige onlineadressen

- ▶ **Brainlogs**
Blogs für die Welt im Kopf
www.brainlogs.de
- ▶ **Ingwer und Meerrettich**
zur wirkungsvollen Entzündungshemmung
bzw. Antibiose bei Pferd und Mensch
www.freenet-homepage.de/Brosig-Pferde-Ingwer/
- ▶ **Kernmechanik – von Kernspin bis Kosmologie, von Dunkler Materie und Energie**
www.kernmechanik.de
- ▶ **KOSMOpod**
Astronomie zum Hören
www.kosmopod.de
- ▶ **WISSENSlogs**
Science unplugged
www.wissenslogs.de

Hier können Sie den Leserinnen und Lesern von Spektrum der Wissenschaft Ihre WWW-Adresse mitteilen. Für € 83,00 pro Monat (zzgl. MwSt.) erhalten Sie einen maximal fünfzeiligen Eintrag, der zusätzlich auf der Internetseite von Spektrum der Wissenschaft erscheint. Mehr Informationen dazu von

GWP media-marketing
Susanne Förster
Telefon 0211 61 88-563
E-Mail: s.foerster@vhb.de