

# Astronomie auf höchster Ebene

Ein Besuch beim Atacama Large Millimeter Array ALMA in Chile, das seit 2013 in Betrieb ist

Stefan Jorda



S. Jorda

Stefan Jorda vor einem kleinen Teil der Antennen von ALMA, die sich in der Chajnator-Hochebene auf über 5000 Meter Höhe befinden

**D**urch die Gassen von San Pedro de Atacama ziehen Touristen aus aller Welt. Sie sind in den kleinen Ort in den Norden Chiles gekommen, um die gleichnamige Wüste zu bestaunen, das Tal des Mondes mit seinen Felsformationen, die Salzseen, Geysire und Vulkane. Das Ziel unserer 14-köpfigen Gruppe aus mehrheitlich deutschen Astronomielehrern, die Kontakte zu chilenischen Kollegen knüpfen und zwei Observatorien der ESO besuchen möchten, ist ein anderes. Wir verlassen den auf 2500 Meter Höhe gelegenen Ort mit einem kleinen Bus Richtung Süden.

Bereits nach wenigen Kilometern biegen wir nach links ab und halten vor einer Schranke. Hier beginnt das Gelände des Atacama Large Millimeter Array ALMA, eines Observatoriums für Millimeter- und Sub-Millimeter-Strahlung. Doch bis zu seinem über 5000 Meter hohen Standort sind noch einige Hürden zu nehmen.

Zunächst erhalten wir eine allgemeine Sicherheitsbelehrung über die Gefahren der Höhenkrankheit und über die Notwendigkeit von Kopfbedeckung und Sonnenschutz. Mit dem Bus geht es einige Minuten bergauf bis zur „Operation Sup-

port Facility“ (OSF). In mehreren Flachbauten befinden sich hier unter anderem Kontrollräume, Werkstätten, Gästezimmer sowie eine medizinische Station. Nun wird sich zeigen, wer die Fahrt fortsetzen darf. Als ich an der Reihe bin, liegen meine Sauerstoffsättigung bei 95 % und der Puls bei 85. Das ist in Ordnung, aber der Blutdruck ist jenseits von 160 zu 100 und damit „a little bit high“, so die Ärztin. Ich solle mich auf der Liege entspannen. Das ist einfacher gesagt als getan. Nach zehn Minuten kommt die Ärztin zurück und gibt nach einer weiteren Messung grünes Licht. Geschafft! Vier aus unserer Gruppe müssen aber unten bleiben – die Ärzte haben das letzte Wort.

Nun geht es auf einer breiten Schotterpiste in Serpentina bergauf. Vorne im Bus liegen kleine Dosen mit Sauerstoff, den man sich vor die Nase sprühen kann – angesichts des geringen Volumens ist der Nutzen zweifelhaft. Unser Fahrer und der Führer Danilo haben die vorgeschriebenen Rucksäcke mit Gasflaschen, von denen dünne Schläuche bei Bedarf den Sauerstoff dauerhaft zur Nase führen. Draußen wachsen vereinzelt Kakteen. Bis auf eine Höhe von 4000 Metern sehen wir auch Esel und Vicunjas, deren Wolle sehr teuer ist. Nach rund 40 Kilometern Fahrt ist es draußen trocken, staubig und stei-

Dr. Stefan Jorda ist Geschäftsführer der Wilhelm und Else Heraeus-Stiftung.



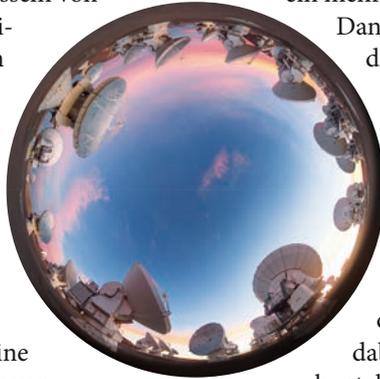
S. Jorda

nig, der Höhenmesser an meinem Handgelenk zeigt 5000 Meter an. Da taucht direkt vor uns eine einzelne Radioantenne auf, das Atacama Pathfinder Experiment APEX. Nach einer Rechtskurve weitet sich der Blick und vor uns liegt die mehrere Quadratkilometer große Chajnantor-Hochebene, eingerahmt von erloschenen Vulkanen. In der Sonne glänzen metallisch die über 50 Radioschüsseln von ALMA. Wenige Minuten später halten wir an der „Array Operations Site“, wo eine weitere medizinische Kontrolle vorgesehen ist. Der Sensor an meinem linken Zeigefinger zeigt eine Sauerstoffsättigung von nur noch 75 % – auf Meereshöhe wäre das ein alarmierender Wert für einen gesunden Erwachsenen. So wird mir eingeschärft, mich langsam zu bewegen. Flau wie ich mich fühle, wäre ich ohnehin nicht auf eine andere Idee gekommen.

Nach einer kurzen Pause fahren wir mitten zwischen die Antennen. Bei strahlend blauem Himmel ist es windstill bei rund 10 Grad. „Heute ist Strandwetter“, sagt Danilo augenzwinkernd. Schließlich kann die Temperatur hier oben auf –20 Grad fallen, oft bläst ein starker Wind, und im Südwinter fällt, wenn auch selten, schon mal ein Meter Schnee. Aus der Nähe fällt auf, dass sich die Antennen unterscheiden. Da ALMA aus nationalen Projekten hervorgegangen ist, haben die Partner eigene Antennen konstruiert und gebaut: Europa und die USA

jeweils 25 Hauptantennen mit 12-Meter-Spiegeln. Hinzu kommen vier weitere große Antennen und ein Dutzend mit einem 7-Meter-Spiegel aus Japan, die sehr nah beieinander stehen und das „Atacama Compact Array“ bilden. ALMA wurde damit in den 1990er-Jahren zum ersten globalen Wissenschaftsprojekt.

Jede Antenne ist so hoch wie ein mehrstöckiges Haus.



P. Horálek / ESO

Danilo ermahnt uns, die Absperrgitter um die Antennen zu respektieren. „Die Antennen werden vom Kontrollraum aus gedreht und geschwenkt, und der Operateur hat dabei keinen Sichtkontakt“, erläutert er.

Gemeinsam bilden die Antennen ein Interferometer, die Signale aller Antennen werden also phasentreu überlagert, sodass sich die Empfindlichkeit und Auflösung einer fiktiven riesigen Einzelantenne erreichen lässt. Je größer diese fiktive Antenne ist, desto höher ist die mögliche Winkelauflösung. Daher lassen sich die Antennen trotz ihrer Masse von rund 100 Tonnen in der Hochebene bewegen: Dazu nehmen zwei in Deutschland gebaute riesige Spezialtransporter die Hauptantennen Huckepack und setzen sie an einem neuen Standort, der bis zu 16 Kilometer entfernt sein kann, millimetergenau wieder ab. An rund 200 betonierten Bodenplatten in der Hochebene sind dafür alle Versorgungs- und Signalleitungen vorbereitet. Die Präzision ergibt sich aus der Wel-

lenlänge im Millimeter-Bereich. Bei den größtmöglichen Abständen beträgt die Winkelauflösung nur wenige Millibogensekunden – das entspricht dem Winkel, unter dem wir einen Basketballkorb auf dem Mond sehen, und ist viel besser als bei anderen Observatorien wie NOEMA auf dem Plateau de Bure in den französischen Alpen.<sup>1)</sup>

## Einblick in die Milchstraße

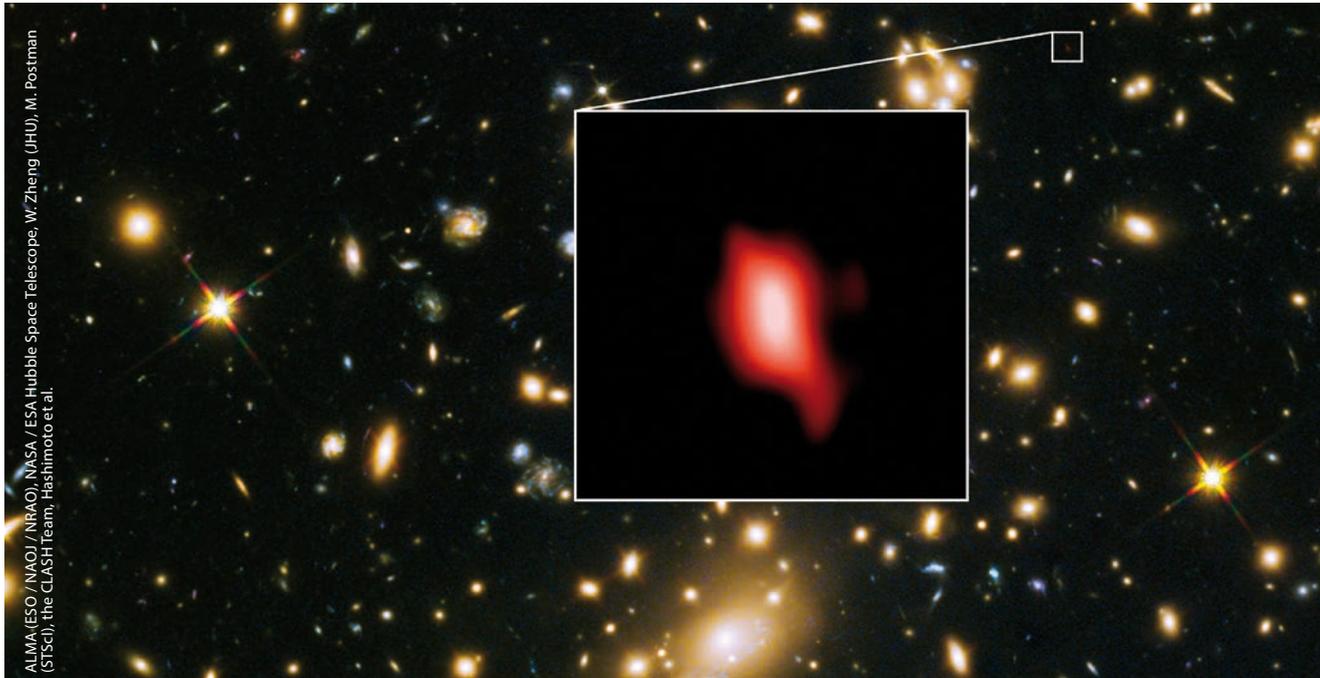
Die Millimeter- und Submillimeter-Strahlung liegt zwischen Infrarot- und Radiobereich und erlaubt Einblicke in kalte interstellare Wolken aus Molekülen und Staub in unserer Milchstraße. In diesen Wolken entstehen neue Sterne und Planeten, für sichtbares Licht sind sie aber undurchsichtig. Auch komplexe organische Moleküle und damit die Bausteine des Lebens oder ihre Vorläufer verraten sich in diesem Spektralbereich. Schließlich erlaubt ALMA einen Blick ins frühe Universum, da die ursprüngliche Infrarot-Strahlung von mehrere Milliarden Jahre alten Galaxien inzwischen in den Millimeter-Bereich rotverschoben wurde. Da Wasserdampf in der Atmosphäre diese Strahlung stark abschwächt, kommen für ein Observatorium auf der Erde nur wenige Standorte infrage.

Bei der Suche nach einem Standort für ALMA hat sich Chajnantor schnell herauskristallisiert. Karl Menten, den ich am Max-Planck-Institut für Radioastronomie in Bonn treffe, erinnert sich an seinen ersten Besuch Ende der 1990er-Jahre: „Angesichts der Höhe, der trockenen Luft und der Ausdehnung der Hochebene war sofort klar: Das

1) Bei NOEMA wird derzeit die Zahl der Antennen verdoppelt und die Elektronik auf den neuesten Stand gebracht.

Das Band der Milchstraße über den ALMA-Antennen





ALMA (ESO / NAOJ / NRAO), NASA / ESA Hubble Space Telescope, W. Zheng (JHU), M. Postman (STScI), the CLASH team, Hashimoto et al.

2) Die Schlüssel von APEX wird gerade auf 10  $\mu\text{m}$  optimiert, um bei 200  $\mu\text{m}$  beobachten zu können.

ist es!“ Menten war damals intensiv an der Planung von ALMA beteiligt und brachte mit APEX das erste Teleskop an diesem Standort zum Laufen. Im Gegensatz zu ALMA ist APEX ein Einzelteleskop, mit dem sich eine Quelle in Echtzeit und vor Ort beobachten lässt. APEX war in mehrfacher Hinsicht Wegbereiter für ALMA: So fanden mit ihm systematische Durchmusterungen der Milchstraße und kosmologisch vielversprechender Felder statt, um interessante Quellen zu identifizieren, die sich nun mit ALMA im Detail untersuchen lassen. APEX hat es zudem erlaubt, wertvolle Erfahrungen zu den Anforderungen für den Menschen zu sammeln. „Natürlich ist es hart, da oben zu arbeiten, das Gehirn arbeitet langsamer. Aber wenn man sich an die Vorsichtsmaßnahmen hält, ist es kein großes Problem“, sagt Menten. APEX basiert auf einem Prototypen einer ALMA-Antenne, der sich unter den rauen Bedingungen bewähren

musste. Auf einer mechanischen Konstruktion aus kohlefaserverstärktem Kohlenstoff und Invar-Stahl sind die Aluminium-Paneele angebracht – die Abweichung von der Paraboloidform darf nur 25 Mikrometer betragen.<sup>2)</sup>

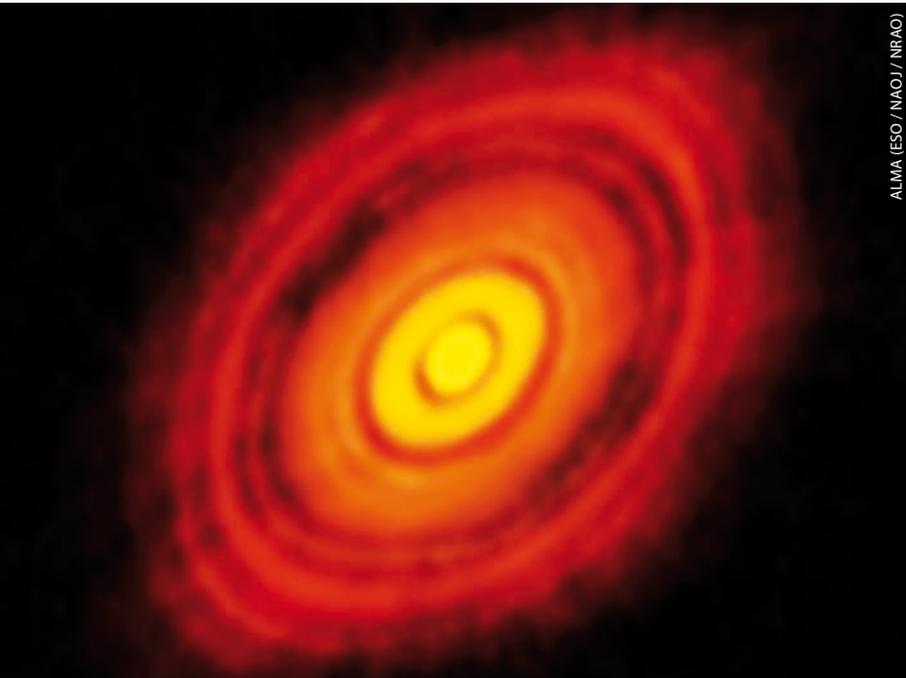
Im optischen Spektralbereich lassen sich mehrere Teleskope interferometrisch koppeln, indem man das von ihnen empfangene Licht mittels spezieller optischer Systeme überlagert – darauf beruht das Very Large Telescope Interferometer der ESO, das die vier Teleskope auf dem Cerro Paranal in Chile verbindet. Aufgrund der größeren Wellenlänge ist dies bei Millimeter-Wellen nicht möglich. Stattdessen geschieht die Überlagerung per Computer. Dazu wird die Millimeter-Strahlung in supraleitenden Detektoren mit dem Signal eines sog. Lokaloszillators gemischt. Die Mischfrequenz liegt im Radiobereich und ist elektronisch weiterzuverarbeiten. Bei ALMA decken bislang acht Detektoren, die sich wahlweise in den Antennenfokus bringen lassen, Wellenlängen von 0,32 bis 3,6 Millimeter ab; später sollen weitere Detektoren die obere Grenze auf 8,6 Millimeter schieben.

Für die Erzeugung eines Bilds aus Signalamplitude und -phase jeder einzelnen Antenne liefert ein nach den niederländischen Physikern van Cittert und Zernike (Physik-Nobelpreis 1953) benanntes mathematisches Theorem die Grundlage. Demnach ergibt jede Korrelation zwischen zwei Antennen (eine „Basislinie“) eine Fourier-Komponente der Helligkeitsverteilung der Quelle. Wenn alle Antennen live sind, entspricht dies zu jedem Zeitpunkt über 1000 Fourier-Komponenten. Da sich eine Quelle während der Beobachtung am Himmel bewegt, ändern sich die Basislinien, sodass weitere Fourier-Komponenten hinzukommen. In der Array Operations Site steht ein Computer mit über 100 Millionen Prozessoren, der alle Komponenten abspeichert und die inverse Transformation durchführt. Bei der Einweihung war er einer der schnellsten Supercomputer weltweit.

Bis ein wissenschaftliches Spektrum oder ein Bild vorliegt, sind weitere Schritte notwendig: So müssen die Daten kalibriert und Fehler aufgrund der Atmosphäre korrigiert werden. Auch gilt es, Artefakte zu eliminieren, die wegen der endlichen Zahl an Fourier-Komponenten entstehen – Aufgaben, die in weiten Teilen ALMA übernimmt. Die Astronomen schicken eine Datei mit den Beobachtungsspezifikationen – beispielsweise mit Wünschen zu Antennenkonfiguration oder Wellenlängenband – an das Observatorium und erhalten hinterher eine Mail mit einem Link



ALMA (ESO / NAOJ / NRAO)



ALMA (ESO / NAOJ / NRAO)

◀◀ Diese ALMA-Aufnahme (linke Seite) zeigt eine Emissionslinie von ionisiertem Sauerstoff (Inset, rot) in der über 13 Milliarden Lichtjahre entfernten Galaxie MACS 1149-JD1. Durch die Rotverschiebung ist die Emission aus dem ferninfraroten in den sub-mm-Bereich verschoben. Das Hintergrundbild wurde mit dem Hubble-Weltraumteleskop im Optischen aufgenommen.

◀ Der 450 Lichtjahre entfernte Stern HL Tauri im Stier (rechte Seite) ist von einer Staubscheibe mit konzentrischen Ringen umgeben. Obwohl der Stern erst eine Million Jahre alt ist, entstehen um ihn also offenbar bereits Planeten. Diese Aufnahme wurde in der Konfiguration mit der höchsten Winkelauflösung gemacht.

zum Download der Daten. „Das ist schon sehr abstrakt und ist, auch wenn es altmodisch klingt, im marxistischen Sinne entfremdete Arbeit“, sagt Menten. Daher findet er es essenziell, dass der wissenschaftliche Nachwuchs an kleineren Observatorien wie APEX vor Ort beobachten und Erfahrungen sammeln kann, um nicht den Bezug zur Hard- und Software zu verlieren. Zudem lassen sich dort einfacher neue Technologien ausprobieren.

Mit Daten des NOEMA-Interferometers hat sich Eva Schinnerer bereits in ihrer Diplom- und Doktorarbeit beschäftigt. Heute leitet sie eine Forschungsgruppe am Max-Planck-Institut für Astronomie in Heidelberg, und bis Juni war sie Vorsitzende des ALMA Scientific Advisory Committee. Selbst konnte sie ALMA aber noch nicht besuchen. Beim bislang einzigen Versuch legten die Ärzte ein Veto ein. „An dem Tag durfte die Hälfte der Gruppe nicht hoch, einschließlich des europäischen Projektleiters von ALMA“, erinnert sie sich. Die Aufgaben des Komitees bestehen darin, die Weichen zu stellen für die weitere technische Entwicklung, damit sich auch künftig die spannendsten wissenschaftlichen Ziele verfolgen lassen. So soll beispielsweise jede Antenne in einigen Jahren Detektoren mit einigen Pixeln erhalten, um das Gesichtsfeld

zu steigern. Zudem befasst sich das Komitee mit der Frage, ob im Begutachtungsprozess die „richtigen“ Projekte durchkommen. Angesichts der Tatsache, dass an ALMA viermal so viel Beobachtungszeit beantragt wird wie zur Verfügung steht, ist diese Frage besonders wichtig.<sup>3)</sup>

Ein großer Teil der Beobachtungsanträge dreht sich um die Sternentstehung. Dazu beobachtet man die Emission von kleinen Partikeln von Silikaten, Graphit, Kohlendioxid- und Wassereis („Staub“) ebenso wie die von Molekülen wie CO. Die Beobachtungen erlauben es, die Dichte der Staub- und Molekülwolken zu kartieren und der Frage nachzugehen, unter welchen Voraussetzungen die Entstehung eines Sterns durch einen Gravitationskollaps möglich ist.

### Unerwartete Wissenschaft

In den ersten Jahren hat ALMA bereits eine Fülle an spannenden wissenschaftlichen Ergebnissen ermöglicht. So hat ALMA kürzlich Hinweise auf Sternentstehung in einer über 13 Milliarden Lichtjahre entfernten Galaxie gefunden. Der Nachweis von Sauerstofflinien in dieser Galaxie zeigt, dass nur 500 Millionen Jahre nach dem Urknall die ersten Sterne wieder vergangen waren und Sauerstoff ausgestoßen

hatten. Offenbar war die Sternentstehungsrate im frühen Universum wesentlich höher als heute, da in Galaxien im frühen Universum mehr Gas als „Rohstoff“ gefunden wird als in heutigen Galaxien. In unserer kosmischen Nachbarschaft der Milchstraße entstehen auch heute ständig neue Sterne, beispielsweise in einer Region im Sternbild Stier. Dort wurden in der Staubscheibe um den nur eine Million Jahre alten Stern HL Tauri konzentrische helle und dunkle Ringe beobachtet. Deren Ursache sind vermutlich entstehende Planeten – was bei einem so jungen Stern sehr überraschend ist und darauf hindeutet, dass Planeten schneller entstehen als bislang angenommen. In der Umgebung anderer junger Sterne ist es gelungen, komplexe organische Moleküle wie Ameisensäureethylester oder das verzweigte Iso-Propylcyanid nachzuweisen – offenbar sind diese Verbindungen sehr viel häufiger als bislang vermutet. Wie komplex Moleküle im interstellaren Raum überhaupt werden können, ist eine der vielen offenen Fragen, denen sich ALMA in den nächsten Jahren widmen wird. Angesichts der enormen Auflösung und Empfindlichkeit ist Eva Schinnerer jedenfalls zuversichtlich, dass ALMA für weitere Überraschungen sorgen wird: „Wir erwarten das Unerwartete“.

3) Damit ist die Überbuchung nach wenigen Jahren des Betriebs bereits so hoch wie bei dem wesentlich älteren VLT.