

Das Submillimeter-Array auf dem Mauna Kea

VON HENRIK BEUTHER

Auf dem Mauna Kea auf Hawaii wird zur Zeit in mehr als 4000 Metern Höhe das erste Submillimeter-Interferometer (das Submillimeter Array, kurz SMA) fertiggestellt, dessen offizielle Einweihung am 22. November 2003 stattfand. Es besteht aus acht Antennen mit je sechs Metern Durchmesser. Damit steht erstmals ein Instrument zur Verfügung, dessen räumliches Auflösungsvermögen bei Wellenlängen von 300 µm bis 1.3 mm im Bereich einer Bogensekunde und darunter liegt.

Wozu Interferometrie?

Die räumliche Auflösung der Teleskope, d. h. ihre Fähigkeit, unterschiedliche Objekte am Himmel zu trennen, hängt hauptsächlich von ihrer Öffnung und von der Wellenlänge der zu beobachtenden Strahlung ab. Je größer das Teleskop und je kürzer die Wellenlänge, desto höher die räumliche Auflösung. Während der gewählte Wellenlängenbereich von der wissenschaftlichen Fragestellung bestimmt wird, ist die Größe des Teleskops eine bautechnische Frage. Die größten beweglichen Radioteleskope besitzen Spiegel mit ca. 100 m Durchmesser (z. B. das 100-m-Radioteleskop des Max-Planck-Instituts für Radioastronomie in Effelsberg und das Green-Bank-Teleskop (GBT) in den USA). Für viele astronomische Fragestellungen

reicht dies nicht aus, aber es besteht die Möglichkeit, größere Teleskope zu simulieren, indem man kleinere Teleskope in großen Distanzen voneinander zusammenschaltet und deren empfangene Signale miteinander korreliert.

Diese Korrelation heißt Interferenz und die Messmethode somit Interferometrie. Maßgeblich für das Auflösungsvermögen solcher Anordnungen ist dann nicht mehr die Apertur (Öffnung) der Einzelteleskope, sondern die maximale Distanz zwischen zwei Einzelteleskopen innerhalb einer Anordnung. Mittlerweile ist es sogar möglich, Weltraumteleskope zuzuschalten und somit »Aperturen« von einigen 1000 Kilometern zu erzeugen (Space-VLBI, Weltraum-Very-Large-Baseline-Interferometrie).

Technisch gesehen ist dies umso einfacher, je größer die zu beobachtende Wellenlänge ist, und bisherige Interferometer arbeiten zumeist im cm-Wellenlängenbereich (z. B. das Very Large Array in New Mexiko/USA) bis zu kürzesten Wellenlängen von einem Millimeter (z. B. das Interferometer auf dem Plateau de Bure in Frankreich).

Allerdings lassen sich viele aktuelle astrophysikalisch wichtige Fragen weitaus besser durch Beobachtungen bei noch kürzeren Wellenlängen im Submillimeter-Wellenlängenbereich klären, da die kalte und dichte interstellare Materie ihre Strahlung großenteils in diesem Bereich abgibt. Dies macht es erforderlich, auch für diesen Bereich Interferometer zu konstruieren.

Das Submillimeter-Array (SMA)

Ein Konsortium bestehend aus dem Smithsonian Astrophysical Observatory (USA) und der Academia Sinica (Taiwan) hat in den letzten Jahren ein solches Subentwickelt millimeter-Interferometer und auf Hawaii errichtet. Da für dieses Instrument eine äußerst stabile Atmosphäre notwendig ist, bot sich der Mauna Kea mit seinen mehr als 4000 Metern Höhe und seiner seit Jahrzehnten ge-

Didaktisches Material zu diesem Beitrag: www.wissenschaft-schulen.de und www.suw-online.de

wachsenen astrophysikalischen Infrastruktur als Standort geradezu an. Nicht umsonst wurden an diesem Ort bekannte optische Teleskope wie KECK, GEMINI und SUBARU errichtet [1]. Auch im Submillimeterbereich gibt es dort bereits viel Erfahrung mit den Einzelteleskopen CSO (Caltech Submillimeter Observatory) und JCMT (James-Clerk-Maxwell Telescope). Abb. 1 zeigt das SMA mit seinen acht Antennen. Die acht 6-m-Spiegel sind hier in einer sehr kompakten Konfiguration angeordnet, können aber mit dem am rechten Bildrand erkennbaren Transporter bis auf Basislinien von 500 m Abstand voneinander platziert werden.

Die Sammelfläche des SMA ist aufgrund seiner relativ kleinen Antennen geringer als z. B. die des Interferometers auf dem Plateau de Bure (PdBI) mit seinen 15m-Antennen. Da die Intensität kalter Staub- und Gasemission im Submillimeterbereich aber um Größenordnungen höher liegt als im Millimeterbereich, wird bei der Beobachtung der kalten Komponenten der Interstellaren Materie dieser Nachteil leicht aufgewogen. Bei einem maximalen Abstand von mehr als 500 m zwischen zwei Antennen wird das SMA bei den höchsten Frequenzen eine räumliche Auflösung von 0".1 erreichen, vergleichbar mit den besten optischen Teleskopen dieser Tage.

In seiner endgültigen Konfiguration soll das SMA alle Frequenzbänder überdecken, die vom Boden aus aufgrund der nur teilweise durchlässigen Atmosphäre zugänglich sind. Gegenwärtig ist das Instrument mit drei Serien von Empfängern, im 1-mm-, 850-µm- und 450-µm-Band, ausgestattet – die restlichen Frequenzbänder sollen bis zum Jahr 2007

schrittweise fertiggestellt werden. Die Bandbreite des simultan beobachtbaren Frequenzbereichs liegt bei 2 GHz, was einen gewaltigen Fortschritt im Vergleich zu existierenden Millimeter-Interferometern bedeutet. Diese große Bandbreite erhöht zum einen die Empfindlichkeit für das Kontinuum und gleicht den Nachteil der kleineren Teleskope aus. Zum anderen erlaubt sie die simultane Beobachtung vieler molekularer Emissionslinien (siehe auch Abb. 3), und damit eine sehr viel detailliertere und zeitsparendere Analyse der astrophysikalisch interessanten Objekte. In der Tabelle sind die Teleskopparameter des SMA aufgelistet.

Der Submillimeterwellenlängenbereich

Im sogenannten Rayleigh-Jeans-Limit der Schwarzkörperstrahlung hängt die Strahlungsintensität quadratisch von der Frequenz ab. Da sehr viele astrophysikalische Objekte in erster Näherung wie Schwarze Körper strahlen, nimmt deren StrahlungsAbb. 1: Das Submillimeter Array auf dem Gipfel des Mauna Kea. Rechts im Bild der Transporter, links die Montagehalle.

intensität somit überproportional zu, je weiter man zu höheren Frequenzen vordringt. Zum Beispiel hat die Emission von kaltem Staub im interstellaren Medium bei einer Temperatur von ca. 20 K über dem absoluten Nullpunkt ihre stärkste Emission im Submillimeterbereich, sie ist mit bekannten cm-Interferometern wie dem Very Large Array (VLA) in New Mexiko überhaupt nicht zu beobachten. Mit Millimeter-Interferometern wie dem PdBI (Plateau de Bure Interferometer), BIMA (Berkeley Illinois Maryland Array), OVRO (Owens Valley Radio Observatory) oder NMA (Nobeyama Millimeter Array) wurde solche Staubemission im letzten Jahrzehnt intensiv beobachtet, aber wegen des steilen In-

> Teleskop-Parameter des Submillimeter-Arrays.

Antennen	Acht Antennen à 6 m Durchmesser, Oberflächengenauigkeit zwischen 12 μm und 25 μm
Konfigurationen	24 Plattformen in 4 Ringen (9 Plattformen getestet)
Basislinien	8 m-508 m
Empfänger	maximal 8 pro Antenne (immer zwei Empfänger simultan in Betrieb) 177–256 GHz (8 in Betrieb) 256–360 GHz (8 in Betrieb) 320–420 GHz (ab 2004) 400–520 GHz (ab 2006) 600–720 GHz (6 in Betrieb) 780–920 GHz (ab 2007)
Korrelator	2-GHz-Bandbreite im Doppelseitenbandbetrieb spektrale Standardauflösung 0.8 MHz, höhere Auflösung über Teile des Bandpasses möglich
Datenrate	Maximum: 10 GByte pro Tag



Abb. 2: Kohlenmonoxid-Emission (CO) und Kontinuum des Planeten Mars bei 1.3 mm Wellenlänge. Die Farbskala stellt die Kontinuumsemission dar: Die stärkste Emission ist in Richtung zur Sonne. Die CO-Spektren zeigen die Absorptionslinien durch die Atmosphäre des Planeten. [3]

tensitätsanstiegs der Emission zu höheren Frequenzen wird dies mit dem SMA in weitaus besserem Maße möglich sein.

Nicht nur Kontinuumsemission ist von Interesse. Das interstellare Medium ist ein Labor, wie es sich viele Physiker und Chemiker nur wünschen können. In den letzten Jahrzehnten wurden in interstellaren Molekülwolken mehr als 120 Moleküle plus etlicher ihrer Isotopomere entdeckt. Die typischen Dichten solcher Molekülwolken liegen zwischen 100 und 10⁸ Teilchen/cm³, sie sind also – auch wenn viele Astrophysiker von Regionen hoher Dichte sprechen - immer noch um einige Größenordnungen geringer als im besten im Labor erreichbaren Vakuum. Typische Temperaturen von Molekülwolken und Sternentstehungsregionen liegen zwischen 10 K und wenigen 100 K. Bei diesen Temperaturen und Dichten finden physikalische und chemische Prozesse statt, die nicht im Labor simuliert werden können. Der Submillimeterbereich ist von besonderem Interesse, da ein großer Teil der beobachtbaren molekularen Emissionslinien in diesem Bereich des elektromagnetischen Spektrums zu finden ist und viele astrophysikalische Phänomene sich nur durch eingehendes Studium dieser Linien untersuchen lassen

Wissenschaftliche Ziele

Die wissenschaftlichen Möglichkeiten des SMA sind außerordentlich vielfältig und überspannen sämtliche Distanzskalen von unserem Sonnensystem bis zu kosmologisch interessanten Quellen. Es werden Objekte des Sonnensystems wie der Mars (Abb. 2) oder Titan beobachtet; bekannte Sternentstehungsregionen wie im Taurus, im Perseus oder im Orion bieten mannigfaltige Studienobjekte; zudem werden Kerne von Molekülwolken, in denen massereiche Sterne entstehen, ausgiebigst studiert, da diese Gebiete in vielen molekularen Übergängen besonders stark emittieren; ferner das Galaktische Zentrum, Sterne im Spätstadium ihrer Entwicklung, kollabierende Wolken, deren innere Dynamik es zu verstehen gilt, Akkretionsscheiben und deren Entwicklung zu möglichen Planetensystemen – um nur einige der Studienobjekte in unserer Galaxis zu nennen.



Auch externe Galaxien können beobachtet werden, z. B. der Andromeda-Nebel oder M 83 in der näheren Umgebung unseres Milchstraßensystems. Schließlich werden auch Galaxien beobachtbar sein, die sich in kosmologischer Entfernung zu uns befinden. Ein Anteil von 0.5 % der Leuchtkraft einer Galaxie wird als Linienstrahlung des ionisierten Kohlenstoffs bei 158 µm Wellenlänge abgestrahlt – diese Strahlung wird durch die kosmologische Rotverschiebung bei $z = 1 \dots 2$ in das Submillimeterband verschoben und ist somit mit dem SMA beobachtbar.

Im Folgenden werden einige der ersten Ergebnisse, die in diesem Jahr mit dem SMA erzielt wurden, dargestellt.

Massereiche Protosterne: Als Beispiel für das Frühstadium massereicher Sterne wurde die sehr junge Infrarotquelle IRAS 18089-1732 bei 1mm und bei 850 mm Wellenlänge beobachtet (Abb. 3). Junge massereiche Sternentstehungsgebiete sind ideale Objekte für Submillimeter-Interferometrie, da sie starke Kontinuumsemission und viele molekulare Emissionslinien zeigen. Abb. 3 zeigt ein Spektrum bei 344 Ghz und exemplarische Karten verschiedener Moleküllinien, dargestellt in Konturen, die der Staubkontinuumsemission (in Farbe) überlagert sind. Allein in diesem Spektrum identifizieren wir schon zwölf Emissionslinien von neun unterschiedlichen Molekülen.

Während man mit einem Einzelteleskop bei der Beobachtung einer Position nur ein Spektrum erhält, ermöglicht es die Interferometrie, alle Spektrallinien innerhalb eines Bandpasses gleichzeitig räumlich zu kartieren. Abb. 3 zeigt, dass die Emission mancher Moleküle morphologisch hauptsächlich der Staubkontinuumsemission folgt (z.B. von CH₃OH und HC₃N), während andere Moleküle starke Emission weiter nördlich zeigen. Die Staubkontinuumsemission im Zentrum repräsentiert den eigentlichen zentralen Kern der Sternenstehungsregion, und wir wissen von anderen Beobachtungen, dass ein sehr energiereicher Ausfluss diesen Kern in nördlicher Richtung verlässt. Somit zeigen die molekularen Beobachtungen Unterschiede in der Chemie zwischen dem zentralen Kern und der nördlichen Region, die vom Ausfluss des eingebetteten Protosterns dominiert wird. Eine genauere Analyse der Linien- und Kontinuumsdaten erlaubt weitere Rückschlüsse über die Kinematik des Kerns und Ausflusses, über die Gasmassen der Region und Staubeigenschaften. Eine besondere Faszination der Interferometrie liegt darin, dass zusätzlich zu der hohen räumlichen Auflösung alle diese Beobachtungen simultan gemacht werden können, während mit Einzelteleskopen üblicherweise sowohl für das Kontinuum als auch für die unterschiedlichen Moleküldaten immer neue Beobachtungen erforderlich sind.

■ Die zirkumstellaren Scheiben massearmer Sterne: Der Stern LkCa15 vom spektralen Typ K5 ist einer der am besten studierten massearmen Protosterne (T-Tauri-Stern) im Taurus-Auriga-Komplex. Sein Alter wird auf drei bis zehn Millionen Jahre geschätzt. Die CO₍₃₋₂₎-Beobachtungen des Sterns zeigen eine Scheibe aus molekularem Gas mit einer Ausdehnung von 700 Astronomischen Einheiten (Abb. 4). Der beobachtete Geschwindigkeitsgradient entlang dieser Gasscheibe ist konsistent mit der Annahme, dass das Gas in der Abb. 3: Spektrum und Karten des massereichen Protosterns IRAS 18089-1732. Oben ein Spektrum mit 1GHz Bandbreite bei 344 Ghz. Unten: Karten der Emission ausgewählter Molekülen, sowohl im 1-mm- als auch im 850-mm-Fenster (Konturen). Die Farbskala stellt die Staubemission bei 850 mm aus dem zentralen Kern der Region dar. Die Ellipse unten links zeigt die räumliche Auflösung an. [3]





Scheibe sich in Keplerscher Rotation um den Zentralstern befindet. Die Elliptizität impliziert eine Neigung der Scheibe von ca. 60 Grad. [4]

Protoplanetarische Nebel: Der protoplanetarische Nebel CRL 2688 ist vor etwa hundert Jahren aus einem Stern entstanden, der gegenwärtig auf seinem Entwicklungsweg durch das Hertzsprung-Russell-Diagramm den Asymptotischen Riesenast durchläuft. Abb. 5 zeigt die CO(3-2)-Emission dieser Region bei 345 Ghz und ein mit dem Weltraumteleskop HUBBLE aufgenommenes optisches Bild. Diese Daten gehören zu den ersten, die im Jahr 2001 mit vier Antennen des SMA im Submillimeterbereich beobachtet wurden [5]. Die CO-Emission folgt zu einem großen Teil dem Ausfluss, der auch im sichtbaren Licht beobachtet wird. Ein weiterer molekularer Ausfluss, der senkrecht

zum optisch sichtbaren Ausfluss orientiert ist, wurde in den $CO_{(3-2)}$ -Beobachtungen entdeckt. Dies zeigt deutlich, wie wichtig Beobachtungen in unterschiedlichen Wellenlängenbereichen sind, da sie sich ergänzen und unterschiedliche Prozesse hervorheben.

Der Kohlenstoffstern V Hydrae: V Hy-

drae ist ein Kohlenstoffstern in einer Distanz von 380 pc von der Sonne. In seiner Entwicklung befindet er sich in der Post-AGB-Phase, d. h. er hat den Asymptotischen Riesenast im Hertzsprung-Russell-Diagramm erst kürzlich verlassen. Abb. 6 zeigt die $CO_{(2-1)}$ -Beobachtungen des Sterns und ein vereinfachtes Modell, das diese Beobachtungen interpretiert. Anders als im Fall von LkCa15 lässt sich das Gas bei Geschwindigkeiten von \pm 15 km/s als eine langsam expandierende Hülle darstellen, die von dem zentralen Kohlenstoffstern ausgeht. Zusätzlich beobachten wir bei weitaus höheren Geschwindigkeiten (\pm 150km/s) CO-Gas, das die Region in Form eines bipolaren Jets verlässt. Solche Jets existieren nicht nur in sehr jungen Sternsystemen, sondern auch im Endstadium der Sternentwicklung. [6]

■ Galaxien: Obwohl das SMA aufgrund seiner relativ geringen Sammelfläche nicht die größte Empfindlichkeit aufweist, lassen sich mit ihm auch externe Galaxien beobachten.

Abb. 7 zeigt SMA-Beobachtungen der $CO_{(2-1)}$ -Emission in den zentralen 4 kpc der relativ nahen, 9.6 Megaparsec entfernten Galaxie M 51 in den Jagdhunden [7]. Daneben zum Vergleich ein optisches Bild der Region, aufgenommen mit dem Weltraumteleskop HUBBLE. Sehr deutlich erkennt man in beiden Bildern den Kern und





- Abb. 5: Der protoplanetarische Nebel CRL 2688. Links die CO₍₃₋₂₎-Emission: Rote und blaue Konturen repräsentieren rot- bzw. blauverschobene Emission [5]. Rechts eine optische Aufnahme derselben Region mit dem HST.
- Abb. 6: Gasemission des Kohlenstoffsterns V Hydrae. Links die rot- und blauverschobenen Gaskomponenten in der CO₍₂₋₁₎Emission bei Geschwindigkeiten von ± 15 km/s (Farbskala) und von ±150 km/s (Konturlinien). Rechts ein vereinfachtes Model der Region mit einer langsam expandierenden Hülle und einem schnellen bipolaren Jet. [6]





die Spiralstruktur der Galaxie. Ein genauer räumlicher Vergleich zeigt, dass die CO-Gasemission in den Spiralarmen sehr gut mit den optisch dunklen Bereichen korreliert. Somit beobachten wir im Optischen die schon entstandenen Sterne, während wir in der CO-Emission die dunklen Gaswolken studieren, in denen in Zukunft weitere Sterne entstehen können. Eine detaillierte Analyse der unterschiedlichen Geschwindigkeitskomponenten des Gases und ein Vergleich mit niedriger angeregtem $CO_{(1-0)}$ führt zu einem genauen Verständnis der Temperaturen und Dichten, sowie der Kinematik des molekularen Gases in dieser Spiralgalaxie.

Die Zukunft und ALMA

Wir haben hier nur wenige Ergebnisse aus einer ersten Serie von Arbeiten über Beobachtungen mit dem SMA vorgestellt, die kürzlich beim Astrophysical Journal zur Veröffentlichung eingereicht wurden. Viele der mit einem neuartigen Instrument erzielten Entdeckungen lassen sich im Vorhinein nur schwer abschätzten, und es ist wahrscheinlich, dass das SMA auch auf anderen Gebieten, als den hier angesprochenen. wichtige Beiträge leisten wird.

Wie hoch die Bedeutung der Submillimeterinterferometrie heute eingeschätzt wird, lässt sich auch am Großprojekt ALMA (Atacama Large Millimeter Array)

Literaturhinweise und Internetadressen

- [1] P. Ho, J. Moran und K. Lo: The Submillimeter Array, eingereicht bei ApJ.
- [2]A. Seifahrt: Mauna Kea Weißer Berg im Licht, SuW 7/2003, S. 34 ff.
- [3] Mark Gurwell und das SMA-Team für Planeten.
- [4] Beuther et al.: SMA multiline observation of the massive starforming region IRAS18089-1732, eingereicht bei ApJ.
- [5] **Charlie Qi** und das SMA-Team für zirkumstellare Scheiben.
- [6]**SMA-Team** für Sterne im Spätstadium.
- [7] Hirano et al.: High velocity bipolar outflow and disk-like envelope in the carbon star V Hya, eingereicht bei ApJ.
- [8]Satoki Matsushita, Kazushi Sakamoto und SMA-Team für externe Galaxien.

Submillimeter Array (SMA): http://sma-www. harvard.edu Plateau de Bure Interferometer (PdBI): http://www.iram.fr Berkeley Illinois Maryland Association (Bima): http://bima.astro.umd.edu Owens Valley Radio Observatory (Ovro): http://www.ovro.caltech.edu Combined Array for Research in Millimeterwave Astronomy (Carma): http://www.

mmarray.org Nobeyama Millimeter Array (NMA): http://www.nro.nao.ac.jp/~nma/index-e. html

Very Large Array (VLA): http://www.vla.nrao.edu Atacama Large Millimeter Array (ALMA): http://www.vla.nrao.edu Abb. 7: Die Spiralgalaxie M 51. Rechts ein Mehrfarbenkomposit im sichtbaren Licht (HST). Weiß eingerahmt die links gezeigte, mit dem SMA in CO₍₂₋₁₎ beobachtete Region (N ist oben rechts, [7]).

erkennen-einem von Nordamerika, Europa und wahrscheinlich auch Japan geplanten und gebauten Submillimeter-Interferometer, das aus 64 Antennen zu je zwölf Metern Durchmesser in der Atacamawüste in Chile auf über 5000 Metern Höhe realisiert werden soll (siehe auch SuW-Special 3/2003 »Europas neue Teleskope«). Die offizielle Grundsteinlegung war am 6. November 2003, erste Antennen werden vermutlich in den Jahren 2007/2008 in Chile einsatzbereit sein, das vollständige Interferometer wohl aber kaum vor 2012. ALMA wird in jeglicher Hinsicht die Astronomie revolutionieren, gleichwohl ist das SMA ein erster Schritt in diese Richtung, und es wird bis zur Fertigstellung von ALMA eine herausragende Vorreiterrolle spielen. \square



Henrik Beuther hat 2002 seine Promotion am Max-Planck-Institut für Radioastronomie in Bonn abgeschlossen. Gegenwärtig ist er Em-

my-Noether-Stipendiat der Deutschen Forschungsgemeinschaft und arbeitet als Post-Doc in der SMA-Gruppe des Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics.