



APEX – das Atacama Pathfinder Experiment

VON MARTIN J. NEUMANN

Im Frühjahr 2005 nahm das Atacama Pathfinder Experiment (APEX) seinen wissenschaftlichen Betrieb auf. Der in Chile, auf der 5100 Meter hoch gelegenen Chajnantor-Ebene, stationierte 12-m-Spiegel ermöglicht Beobachtungen des südlichen Himmels unter idealen Bedingungen im Submm-Bereich, einem der bislang am wenigsten erforschten Bereiche des elektromagnetischen Spektrums.

Mit dem Submillimeter-Teleskop APEX steht europäischen Astronomen ein »Pfadfinder« für das geplante Großteleskop ALMA zur Verfügung. ALMA soll aus bis zu 64 Antennen bestehen, das Interferometer soll bis zum Jahr 2012 am gleichen Standort einsatzbereit sein. Der Spiegel von APEX ist ein für Einzelteleskop-Anwendungen modifizierter Prototyp der von der Firma Vertex in Duisburg für ALMA entwickelten Antennen. Die Kombination dieses Spiegels

mit neuartigen Empfängern ermöglicht vielversprechende Beobachtungen interessanter Objekte, die von nördlichen Teleskopstandorten aus unzugänglich sind.

Bienvenido a Chile

Den südlichen Himmel beobachteten europäische Astronomen im Submm-Bereich bis zum Jahr 2003 hauptsächlich mit dem Swedish-Eso-Sub-mm Telescope (SEST). Der 15-m-Spiegel, den die ESO 1987 in Zusammenarbeit mit dem Onsa-

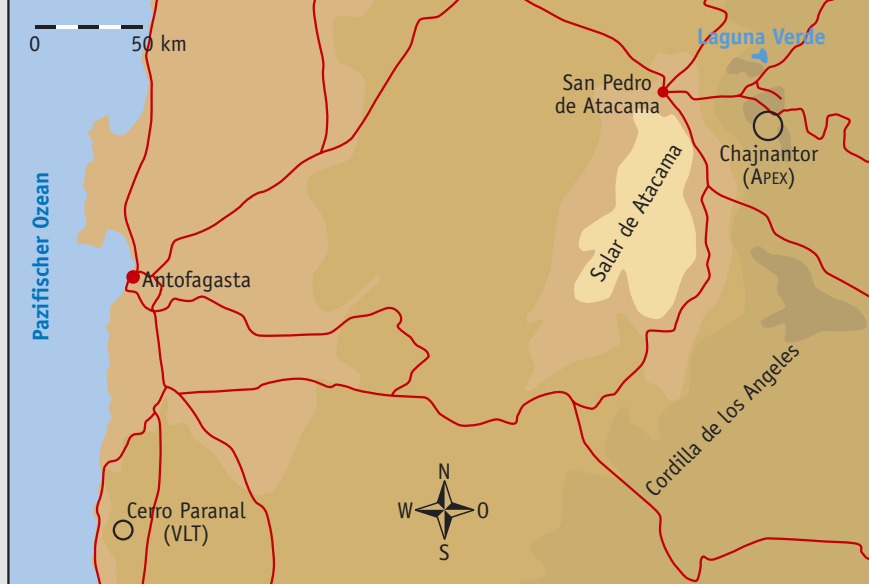
la Space Observatory (Oso) auf dem 2400 m hoch gelegenen Bergrücken La Silla in den chilenischen Anden errichtet hatte, kam bei Wellenlängen von 0,8 bis 3 Millimeter zum Einsatz und erbrachte erstmals detaillierte Karten der Verteilung des Kohlenmonoxids (CO) innerhalb von Sternentstehungsregionen der Magellanschen Wolken.

Einer der am besten für die Submillimeter-Astronomie geeigneten Standorte der Erde blieb jedoch bis vor kurzem ungenutzt: die 5100 Meter hoch gelegene Chajnantor-Hochebene in der chilenischen Atacama-Region. Hier öffnete sich den Astronomen mit APEX im Frühjahr 2005 ein neues Fenster zum Universum, denn die Chajnantor-Ebene erfüllt den Forschern gleich mehrere Wünsche: Einerseits weist hier die Atmosphäre einen extrem geringen Wasserdampfgehalt auf und ist deshalb für Submillimeter-Strah-

Das Submillimeter-Teleskop APEX wird vom Max-Planck-Institut für Radioastronomie (MPIfR) gemeinsam mit dem Onsala Space Observatory (OSO) und der Europäischen Südsternwarte (ESO) betrieben. (Bild: APEX)

Die Chajnantor-Ebene befindet sich in den Anden des nördlichen Chile, unweit der Grenze zu Argentinien. (Bild: APEX)

Die Basisstation Sequitor liegt innerhalb der Oase von San Pedro de Atacama. (Bild: APEX)



lung durchlässig; im Durchschnitt ist hier die mittlere Luftfeuchtigkeit nur halb so hoch wie auf dem Vulkankegel des Mauna Kea (4100 m). Andererseits eröffnet das bei -23 Grad geographischer Breite gelegene Gebiet einen weiten Blick auf den südlichen Himmel. Diese hervorragenden Bedingungen werden allenfalls noch durch die Antarktis übertroffen, wo seit 1995 das Antarctic Submillimeter Telescope and Remote Observatory mit 1.7 Meter Spiegeldurchmesser im Einsatz ist. Der kontinuierliche Betrieb astronomischer Forschungseinrichtungen auf dem weißen Kontinent stellt die Wissenschaftler jedoch vor enorme Herausforderungen (siehe SuW 12/2004, S. 22).

Doch auch der Standort von APEX erfordert große Anstrengungen: Der Luftdruck auf der Hochebene ist weitaus geringer als auf Meereshöhe, so dass sich die Forscher und Techniker nur für die Dauer ihrer Arbeiten, unterstützt durch eine künstliche Sauerstoffzufuhr, am Teleskop aufhalten können. Deshalb wurde das Operationszentrum von APEX rund 50 Kilometer westlich von Chajnantor, nahe dem Ort San Pedro de Atacama errichtet (siehe Karte oben). Das 2,2 Hektar große, »Sequitur« genannte Areal bietet genügend Platz für Kontroll-, Werkstatt- und Bürogebäude sowie 16 Unterkünfte. 25 Menschen, darunter Techniker, Inge-

nieure und Astronomen, sichern hier den reibungsfreien Ablauf der Beobachtungen. Für einen möglichen Fernbetrieb des Teleskops, sowie als Kommunikationsleitung, steht eine 36-Mbit/s-Richtfunkstrecke im Mikrowellenbereich zur Verfügung. Via Internet kann das Teleskop auch von anderen Orten der Welt aus gesteuert werden.

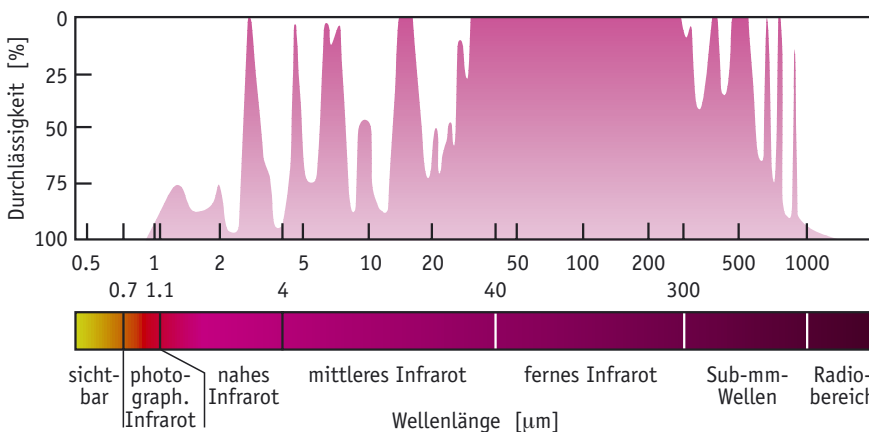
Zwischen Radiowellen und Infrarot

Der Submillimeterbereich umfasst Strahlung mit Wellenlängen von 0,3 bis 1 Millimeter (siehe Graphik unten). Zahlreiche für die Astronomie grundlegende Fragestellungen lassen sich hier verfolgen. Mit Submillimeter-Teleskopen können die Astronomen tief in das Innere von Wolken interstellaren Gases blicken – Regionen, die optischen Teleskopen unzugänglich sind. Hier vollziehen sich grundlegende Vorstufen der Sternentstehung, wie zum Beispiel die Bildung dichter Kerne von Molekülwolken. Geschützt vor dem energiereichen Licht von Sternen können sich hier komplexe Moleküle bilden, deren Spektrallinien bei Submillimeterwellenlängen beobachtbar sind. Aus den gewonnenen Daten lassen sich die physikalischen Bedingungen im Inneren galaktischer und extragalaktischer Molekülwolken ableiten.

Auch interstellarer Staub ist im Submillimeterbereich nachweisbar. Kalter Staub, mit Temperaturen von 10 bis 80 Kelvin, sendet hier thermische Strahlung aus. Warmer Staub hingegen, der durch das Licht junger Sterne aufgeheizt wird, emittiert seine Strahlung hauptsächlich im Infraroten. Betrachtet man jedoch sehr weit entfernte Galaxien, so muss ihr Licht einen langen Weg durch das expandierende Universum zurücklegen und wird dabei rotverschoben. Deshalb ist das von warmem Staub ferner leuchtkräftiger Galaxien ausgesandte Licht im Submillimeterbereich zu beobachten und ermöglicht wertvolle Einblicke in die Frühzeit des Kosmos.

Die hier skizzierten Forschungsprojekte erfordern einen sehr hohen technischen und logistischen Aufwand. Da die Submillimeterstrahlung kosmischer Quellen vom Wasserdampf der Erdatmosphäre absorbiert wird, müssen die Teleskope an möglichst hoch gelege-

Der Submillimeterbereich wird vom Infraroten ($\lambda = 1 \mu\text{m}$ bis $300 \mu\text{m}$) und vom Radiowellenbereich ($\lambda > 1 \text{mm}$) begrenzt. Die Infrarot- und Submillimeterstrahlung kosmischer Objekte wird vom atmosphärischen Wasserdampf stark absorbiert.



APEX im Überblick

Standort:

Llano de Chajnantor, Chile, 67°45'33."0 westl. Länge, 23°00'20."8, südl. Breite

Teleskop-Spiegel:

- Hauptreflektor: 12 m Durchmesser, 264 Aluminium-Paneele
- Mittlere Oberflächengenauigkeit: 17 μm (r. m. s.)
- Gesamtgewicht: 125 t
- mittlere Ausrichtungsgenauigkeit: 2"
- Hersteller: Vertex Antennentechnik GmbH
- Winkelauflösung: $FWHM = 7."8 \times 800/\nu$ [GHz]
- Öffnungsverhältnis: $f/D = 8$

Instrumentierung:

- Beobachtbarer Spektralbereich: 0.2 mm bis 1.5 mm
- Empfänger: Heterodyn-Empfänger für spektrale Untersuchungen, Abbildende Bolometer-Arrays
- Analysegeräte: Autokorrelator und FFT-Spektrometer

nen, extrem trockenen Standorten betrieben werden. Aufgrund der kleinen Beobachtungswellenlängen und der geringen Strahlungsintensität der Objekte müssen besondere Empfängertypen an der Grenze des technisch Möglichen entwickelt werden. Wegen der im Submillimeterbereich zu erwartenden großen wissenschaftlichen Fortschritte sind jedoch weltweit astronomische Institute in diesem Wellenlängenbereich aktiv. Zu den derzeit leistungsfähigsten Teleskopen gehört das Sub-Millimeter-Array (SMA) auf dem Mauna Kea, Hawaii, welches im November 2003 seinen Betrieb aufnahm (siehe SuW 3/2004, S. 36).

Mit diesem Interferometer aus acht Spiegeln von jeweils sechs Metern Durchmesser werden im Bereich von 0.3 bis 1.3 Millimeter erstmals Winkelauflösungen von einer Bogensekunde und darunter erreicht. Am gleichen Standort ist seit 1987 das 15-m-James-Clerk-Maxwell-Teleskop im Einsatz, und auf dem Mount Graham in Arizona betreibt das Max-Planck-Institut für Radioastronomie gemeinsam mit der University of Arizona das 10-m-Heinrich-Hertz-Teleskop (siehe SuW 7/2000, S. 542).

Diese Observatorien befinden sich bei nördlichen geographischen Breiten. Gerade der südliche Himmel bietet jedoch zahlreiche Objekte, deren Beobachtung im Submillimeterbereich besonders vielversprechend ist, zum Beispiel das Galaktische Zentrum, die uns räumlich nächste Aktive Galaxie Centaurus A mit ihrem prominenten Staubstreifen, sowie die Magellanschen Wolken. Mit dem im nördlichen Chile realisierten Atacama Pathfinder Experiment steht den Astronomen das bisher größte und empfindlichste Einzelteleskop unter dem südlichen Himmel zur Verfügung. APEX wurde am Max-

Planck-Institut für Radioastronomie in Bonn unter der Leitung von Karl Menten geplant, von der Max-Planck-Gesellschaft finanziert, und wird gemeinsam mit dem Oso in Onsala und mit der Eso betrieben.

Genauer als Haaresbreite – der Spiegel von APEX

Die Oberfläche des 12-m-Spiegels von APEX besteht aus insgesamt 264 Aluminium-Paneeelen. Nach ihrer Installation war zunächst eine mittlere Oberflächengenauigkeit von 40 Mikrometern erreicht worden. Eine noch genauere Einhaltung der Spiegelform wurde durch die Beobachtung eines 92-GHz-Senders sichergestellt, der sich auf einem benachbarten Berg, dem Cerro Chajnantor, befindet. Mit Hilfe dieses Signals und eines holographischen Verfahrens ließen sich nun kleinste Abweichungen der Spiegeloberfläche von der Idealform kartieren. Durch eine erneute Justierung der Paneele wurde

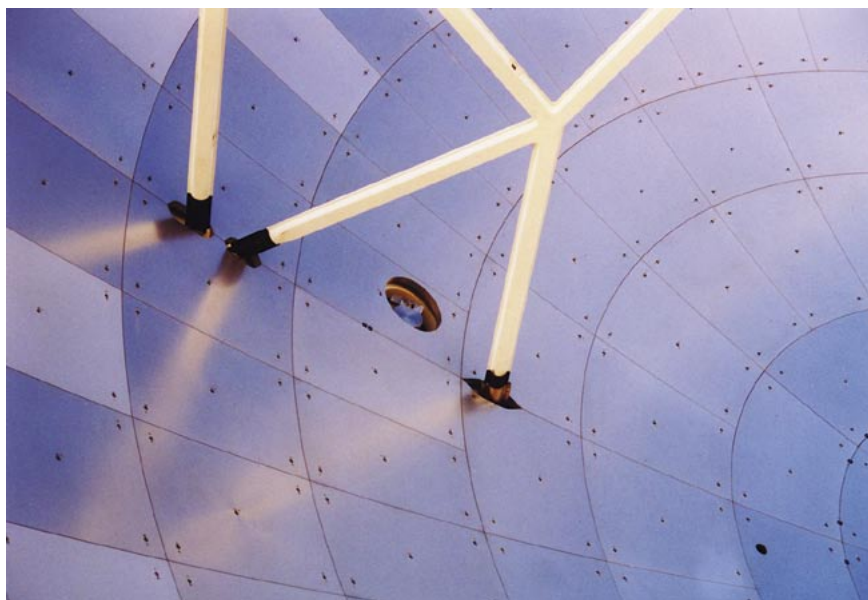
schließlich eine mittlere Genauigkeit von 17 Mikrometern erreicht – ein Fünftel der Dicke eines menschlichen Haars und $1/22$ der kleinsten mit APEX beobachtbaren Wellenlänge (0.37 mm).

Beobachtungen punktförmiger Quellen mit APEX bestätigten, dass die Optik beugungsbegrenzt ist, mit einer maximalen Winkelauflösung von sieben Bogensekunden. Die Genauigkeit, mit der das Teleskop auf eine gewünschte Position ausgerichtet werden kann, beträgt zwei Bogensekunden und wird noch weiter verbessert. Nach dem Ausrichten des Spiegels auf eine gewünschte Quelle kann diese mit einer Genauigkeit von mindestens 0.5 Bogensekunden verfolgt werden.

Empfängertechnik auf die Spitze getrieben

Mit APEX lassen sich sowohl räumliche Kartierungen ausgedehnter Himmelsgebiete als auch detaillierte spektrale Beobachtungen einer Vielzahl von Objekten durchführen. Bei der Kartierung ausgedehnter Objekte mit Einzelteleskopen waren die Radioastronomen bislang zumeist auf eine zeitaufwändige Scan-Technik angewiesen: Die Antenne wurde zeilenweise über das Objekt hinweg bewegt und dabei die Intensität der gemessenen Strahlung registriert. Zusammen mit der jeweils bekannten Blickrichtung der Antenne ergab sich daraus eine Radiokarte des abgetasteten Himmelsgebiets. Mit Hilfe dieser 1-Pixel-Technik entstand allmählich ein vollständiges Bild der gewünschten Region. Das APEX-Team nutzt jedoch eine Art Kamera für den Submillimeterbereich, ein so genanntes Bolometer-Array. Mit diesem Instrument ist

- ▼ Die hochgenau justierten Aluminiumpaneele des Hauptspiegels von APEX. (Bild: APEX)



es möglich, ausgedehnte Submillimeterstrahlung aus verschiedenen Positionen innerhalb eines größeren Gesichtsfeldes gleichzeitig zu registrieren und somit innerhalb relativ kurzer Zeit Karten ausgewählter Himmelsregionen zu gewinnen.

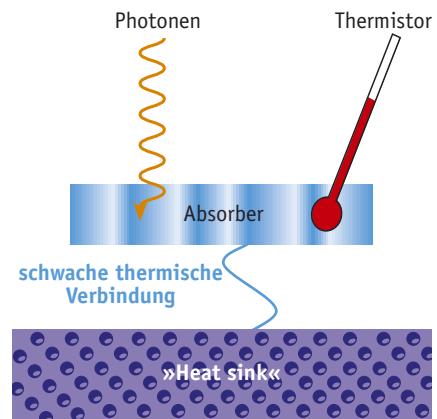
Die für den Submillimeterbereich erforderlichen Bolometer sind nicht kommerziell verfügbar, sondern müssen von den am Projekt beteiligten Wissenschaftlern selbst konstruiert und gebaut werden. Eine der weltweit führenden Einrichtungen zur Entwicklung von Bolometern befindet sich am MPIfR in Bonn. Hier schuf die Bolometer-Gruppe um Ernst Kreysa für APEX das Instrument LABOCA (Large Apex Bolometer Camera). Es besteht aus einer Anordnung (engl. Array) von 295 unabhängigen Empfängern, welche die auftreffende Strahlung mit Hilfe von Bolometern nachweisen. LABOCA wird im Winter 2005 am APEX-Teleskop zum Einsatz kommen.

Bolometer sind über einen weiten Frequenzbereich hinweg einsetzbar. Für den Submillimeterbereich stellen sie den empfindlichsten Empfängertyp dar. Den Eingang eines derartigen Empfängers bildet eine kleine Hornantenne, welche die auftreffende Strahlung sammelt und auf das darunter befindliche Bolometer-Element konzentriert. Dieses besteht aus einer absorbierenden Folie, welche sich beim Auftreffen der Strahlung um eine winzige Temperaturdifferenz erwärmt (siehe Graphik oben rechts). Die Erwärmung des Absorbers im Vergleich zu der Wärmesenke bei konstanter Temperatur (engl. »Heat sink«) wird durch einen Thermistor elektronisch gemessen und als Signal anschließend verstärkt. Bei einigen Bolometer-Konstruktionen sind Absorber und »Thermometer« identisch. Im LABOCA-Array sind sie jedoch voneinander getrennt, es handelt sich hierbei um

so genannte Komposit-Bolometer. Dieser Aufbau bietet den Vorteil, dass Absorber und Thermistor unabhängig voneinander optimiert werden können. Als Thermistoren kommen in LABOCA spezielle Halbleiterthermistoren zum Einsatz.

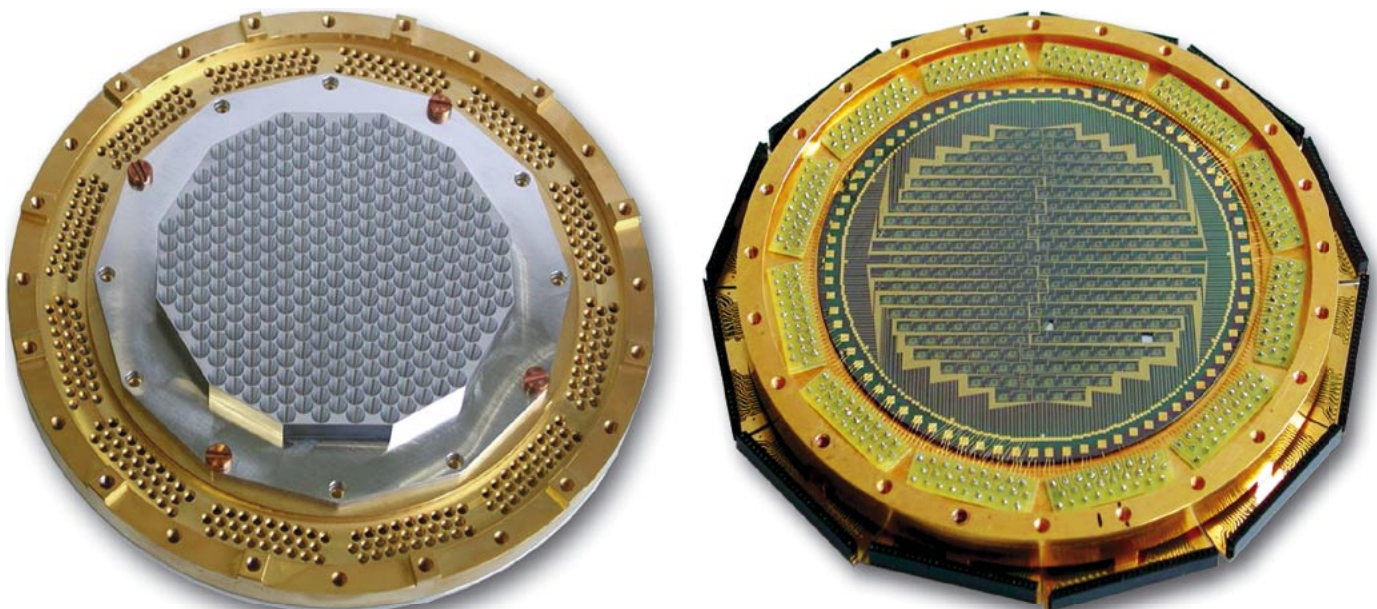
Um kleinste Temperaturschwankungen überhaupt messen zu können, müssen die Bolometer auf 0,3 Grad über dem absoluten Nullpunkt ($-273,15\text{ }^{\circ}\text{C}$) gekühlt werden. Damit wird eine Empfindlichkeit ermöglicht, die nur knapp oberhalb des durch die Quantennatur des Lichts entstehenden Photonenrauschens des thermischen Strahlungshintergrundes liegt. Die Photonenabsorber von LABOCA bestehen aus einer Titan-Schicht, welche auf einer etwa 1 Mikrometer dünnen Membran aus Silizium-Nitrid aufgebracht wurde. Die Membran dient als Trägermaterial für den Absorber und gleichzeitig als schwacher thermischer Leiter. Alle Strukturen, wie Membranen, Absorber, Zuleitungen etc., werden mikrolithographisch auf dünnen Silizium-Scheiben, so genannten Wafern, strukturiert. Es finden die gleichen Verfahren Anwendung, die auch zur Produktion von elektronischen Chips verwendet werden. LABOCA wird – entsprechend der Größe der Hornantennen des Instruments sowie der Bandbreite der vorgeschalteten Filter – für Beobachtungen bei $\lambda = 0,87\text{ mm}$ optimiert.

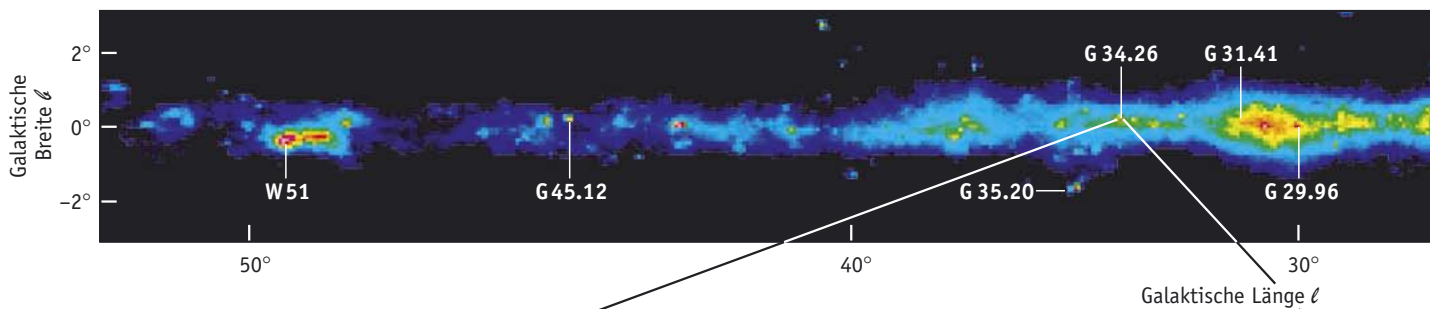
Die Entwicklung von Bolometern am MPIfR ist mit LABOCA noch längst nicht abgeschlossen. Das Bolometer-Array der nächsten Generation, aus 288 Elementen mit supraleitenden Thermistoren bestehend, wird vom MPIfR in Zusammenarbeit mit dem Institut für Physikalische Hochtechnologie in Jena entwickelt. Der wesentliche Vorteil dieser Technologie besteht darin, dass supraleitende Thermistoren mit SQUID (Superconducting Quantum Interference Device) ausgele-



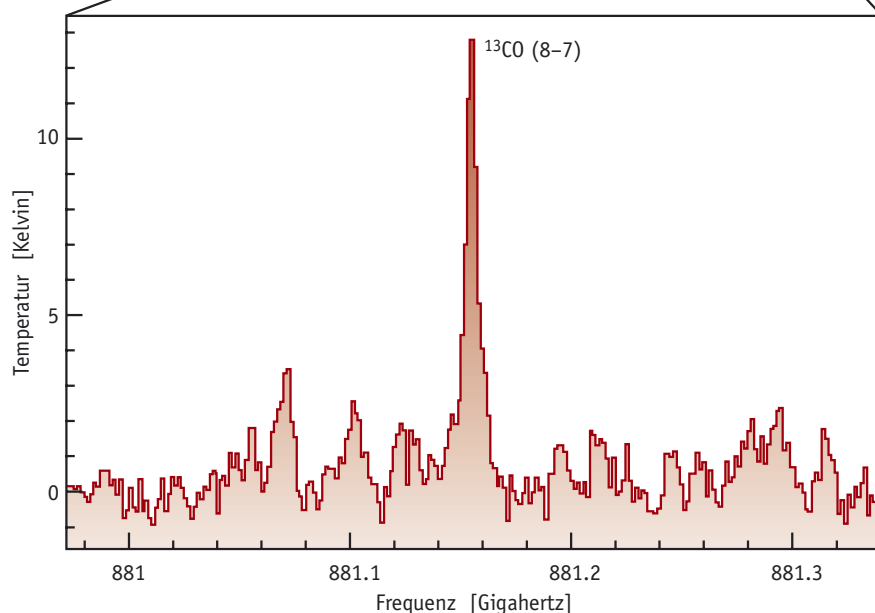
▲ Prinzip eines Bolometer-Elements. Ein Photonen-Absorber ist durch einen schwachen thermischen Leiter mit einer Wärmesenke (»Heat sink«) verbunden, welche auf eine konstante Temperatur von 0,3 K abgekühlt wurde. Treffen Photonen auf den Absorber, so entsteht eine geringe Temperaturdifferenz gegenüber der Wärmesenke, welche der Leistung der einfallenden Strahlung proportional ist. Ein Thermistor transformiert die Temperaturänderung in eine Änderung des elektrischen Widerstandes, die elektronisch ausgelesen wird.

▼ Das Bolometer-Array LABOCA. Links: Die insgesamt 295 Hornantennen des Bolometers in hexagonaler Anordnung. Der Durchmesser der Eintrittsöffnung einer einzelnen Hornantenne beträgt 3,9 mm, der Gesamtdurchmesser des Arrays 80 mm. Rechts: Unterhalb der Hornantennen befindet sich der Wafer mit 100 mm Durchmesser. (Bild: MPIfR)





▲ Die mit dem Satelliten IRAS aufgenommene Infrarotkarte (oben) zeigt die Lage der Sternentstehungsregion G 34.26+0.15 innerhalb der galaktischen Ebene. Die Zahlen hinter dem Buchstaben »G« bezeichnen die jeweilige galaktische Länge in Grad (Bild: IRAS). Das mit dem Spektrometer FLASH des Teleskops APEX beobachtete Spektrum (rechts) der Sternentstehungsregion G 34.26 zeigt neben der Linie des Rotationsübergangs ^{13}CO (8–7) noch zahlreiche schwächere Linien. Sie werden von komplexen organischen Molekülen emittiert, welche sich ebenfalls innerhalb des warmen Kerns der Gaswolke bildeten. (Bild: MPIfR)



sen werden können. SQUIDS stellen äußerst empfindliche Magnetometer dar, die einen Strom hochgenau messen können, wenn man diesen zunächst in ein Magnetfeld umwandelt. SQUIDS eignen sich sehr gut für die Multiplexer-Technologie, mit der mehrere Bolometer mit nur einem Verstärker-SQUID betrieben werden können. Damit kann die Zahl der Signalleitungen und Verstärker drastisch verringert werden. Diese zukunftsweisende Technologie wird es erlauben, die gesamte Fokalebene von APEX mit Tausenden von Bolometerdetektoren zu belegen.

Spektroskopie mit APEX

Galaktische und extragalaktische Molekülwolken bestehen größtenteils aus dunklem, kaltem Gas. Aus den beobachteten Spektren der Moleküle ergibt sich die chemische Zusammensetzung, sowie die Verteilung der Temperatur, Dichte und Geschwindigkeiten innerhalb der Wolken. Die Messung dieser Größen im Submillimeterbereich, zum Beispiel im Licht der Spektrallinien des Kohlenmonoxids (CO), ermöglicht es den Astronomen, die im Optischen unbeobachtbaren Vorstadien der Sternentstehung zu erforschen (siehe Kasten »Spektrallinien interstellarer Moleküle«).

Bei APEX ist seit Juni 2004 ein bislang einzigartiger Empfänger zur Beob-

achtung von Moleküllinien im Einsatz: das von Rolf Güsten und Mitarbeitern am MPIfR entwickelte Instrument FLASH (First Light APEX Submillimeter Heterodyne Instrument). Hiermit lassen sich Spektren in den atmosphärischen Fenstern bei 0.65 mm und 0.37 mm gleichzeitig gewinnen. Messungen bei derart hohen Frequenzen erfordern ein besonderes Signalverarbeitungsprinzip: Das von der Antenne empfangene Signal wird zunächst auf eine niedrigere Frequenz umgesetzt, wo es leichter weiter zu verarbeiten ist. Die Frequenzumsetzung geschieht innerhalb einer so genannten Mischer-Baustufe, in welcher das Originalsignal mit dem künstlich erzeugten Signal eines Oszillators gemischt wird.

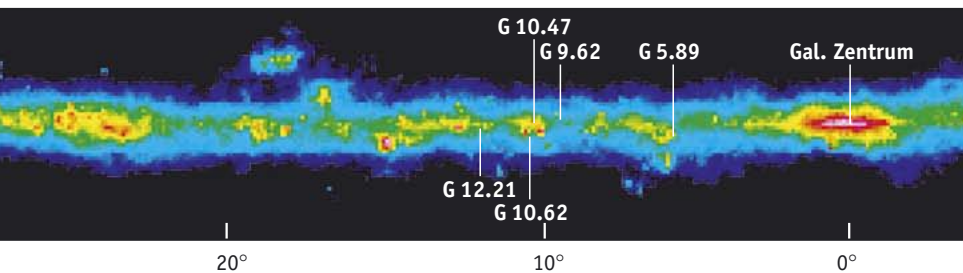
Die Schwingungsfrequenz des Oszillators von FLASH wird so gewählt, dass die bei einer kosmischen Quelle beobachtbaren Spektrallinien bei Frequenzen unterhalb von 10 GHz unverändert wieder auftauchen. Dieses Prinzip der Frequenzmischung, im Englischen als »Heterodyning« bezeichnet, wird auch in gewöhnlichen Rundfunk- und Fernsehgeräten angewandt. Die hierbei interessierenden »Spektrallinien« sind äquivalent zu den Frequenzen der Sender.

Da astronomische Objekte mit FLASH in zwei Frequenzbereichen gleichzeitig spektroskopiert werden sollen, sind auch zwei getrennte Oszillator-Mischer-Systeme innerhalb des Empfängers erforderlich.

Jedem dieser beiden Empfängerzweige ist ein eigener Spektrum-Analysator nachgeschaltet, der das vom entsprechenden Mischer kommende Signal mit mindestens acht Bit abtastet. Aus den so gewonnenen Daten wird mit Hilfe eines mathematischen Verfahrens, der Fast-Fourier-Transformation, das Frequenzspektrum errechnet und in 16384 Frequenzkanälen dargestellt.

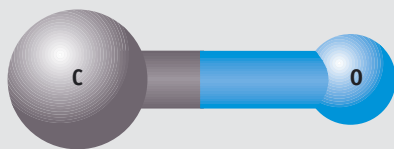
Stellte FLASH bereits ein innovatives Konzept dar, so geht man mit dem geplanten Nachfolger, CHAMP+, noch einen bedeutenden Schritt weiter. Mit CHAMP+ soll nicht nur ein einziges Spektrometer, sondern ein Array aus insgesamt 14 Heterodyn-Empfängern verwirklicht werden. Es besteht aus zwei Bündeln von jeweils sieben Empfängern, die für unterschiedliche Frequenzbereiche empfindlich sind, so dass wiederum in zwei atmosphärischen Fenstern (bei 0.35 mm und 0.45 mm) gleichzeitig gemessen werden kann. Damit wäre auch in der Submillimeter-Spektroskopie – analog zur abbildenden Kartierung mit dem Array LABOCA – die »1-Pixel-Barriere« durchbrochen, denn CHAMP+ wird die gleichzeitige Aufnahme der Spektren an mehreren Positionen innerhalb eines größeren Gesichtsfeldes ermöglichen.

Ein Prototyp dieses abbildenden Spektrometers wurde bereits auf dem Mauna



Spektrallinien interstellarer Moleküle

Mehr als 130 Moleküle, darunter auch komplexe organische Verbindungen, wurden bislang in interstellaren Gaswolken entdeckt. Eine besonders wichtige Rolle bei der Untersuchung dieser Wolken spielen die Radiospektrallinien des Kohlenmonoxids CO. Vereinfacht kann man sich das CO-Molekül wie eine Hantel vorstellen, an deren einem Ende sich ein 12fach positiv geladener Kohlenstoffkern und an deren anderem Ende



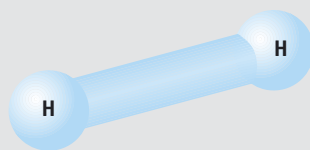
sich ein 16fach positiv geladener Sauerstoffkern befindet. Die beiden Atomkerne sind von einer gemeinsamen negativ geladenen Elektronenwolke umgeben. Da der Kern des Sauerstoffatoms eine höhere Kernladung als der des Kohlenstoffatoms aufweist, ist die Elektronenwolke beim Sauerstoff stärker konzentriert. Auf der »Kohlenstoff-Seite« der Hantel herrscht somit ein Mangel an Elektronen (d.h. ein Überschuss an positiver Ladung). Auf der »Sauerstoff-Seite« besteht hingegen ein Elektronenüberschuss. Insgesamt besitzt die Hantel somit die Eigenschaften eines elektrischen Dipols.

Wird ein elektrischer Dipol in Rotation versetzt, so emittiert er elektromagnetische Wellen. Quantenmechanisch betrachtet, kann er jedoch nicht beliebig rotieren, sondern nur bestimmte, stationäre Zustände einnehmen, welche jeweils durch eine Drehimpulsquantenzahl J charakterisiert werden. Jedem dieser Rotationszustände entspricht ein von J abhängiges Energieniveau. Im Unterschied zum vereinfachten Modell einer elektrisch geladenen Hantel verursachen nur Übergänge zwischen den Rotationszuständen eine Abstrahlung elektromagnetischer Wellen. Diese sind im Falle des CO-Moleküls als Spektrallinien im Submillimeter-Bereich zu beobachten.

Die in einer interstellaren Wolke beobachtbaren Spektrallinien lassen auf den physikalischen Zustand (Temperatur, Dichte, Geschwindigkeit) des Gases schließen. Typisch für das Innere von Sternentstehungsregionen, in denen sich massereiche Sterne bilden, ist die bei 881 GHz beobachtbare Emission der Linie ^{13}CO (8–7), wobei in Klammern die Quantenzahlen J des Übergangs stehen und die Zahl 13 auf das Kohlenstoffisotop ^{13}C verweist.

Der Nachweis dieser Linie bei interstellaren Molekülwolken deutet auf einen hohen Anregungszustand des CO und damit auf ein erwärmtes Wolkenzentrum hin ($T > 100$ K). In den kühleren Randzonen solcher Wolken ist hingegen der zwischen den niedriger angeregten Zuständen, von $J = 2$ nach $J = 1$ verlaufende Übergang CO (2–1) wahrscheinlicher.

Da das CO-Molekül asymmetrisch ist, sind seine Spektrallinien einfacher zu beobachten als jene des millionenfach häufigeren Wasserstoffmoleküls H_2 . Letzteres besteht aus zwei Wasserstoffkernen (Protonen), welche von einer ge-



meinsamen Hülle (zwei Elektronen) umgeben sind und ist somit symmetrisch. Beim Übergang zwischen zwei Energieniveaus verhält es sich nicht wie ein elektrischer Dipol; seine Spektrallinien sind deshalb nur relativ schwach, als so genannte Quadrupolemission, nachweisbar (siehe SuW 8/2005, S. 14). Innerhalb von Molekülwolken wechselwirken H_2 -Moleküle jedoch intensiv durch Stöße mit den CO-Molekülen, welche hierdurch zur Linienemission, zum Beispiel CO (1–0) bei 2.6 Millimeter, angeregt werden. Deshalb dient die Strahlung des Kohlenmonoxids als verlässlicher Indikator für das Auftreten von H_2 .

Kea erfolgreich getestet und anschließend am MPIfR für das APEX-Projekt weiterentwickelt. CHAMP+ soll ab November 2005 einsatzbereit sein und die mit einem einzigen Heterodyn-Empfänger erreichbare Effizienz um das Zehn- bis Hundertfache steigern.

Erste Beobachtungen mit APEX

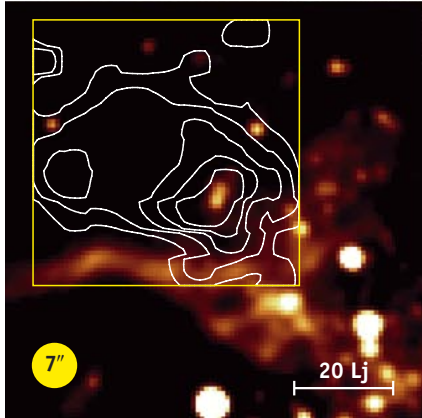
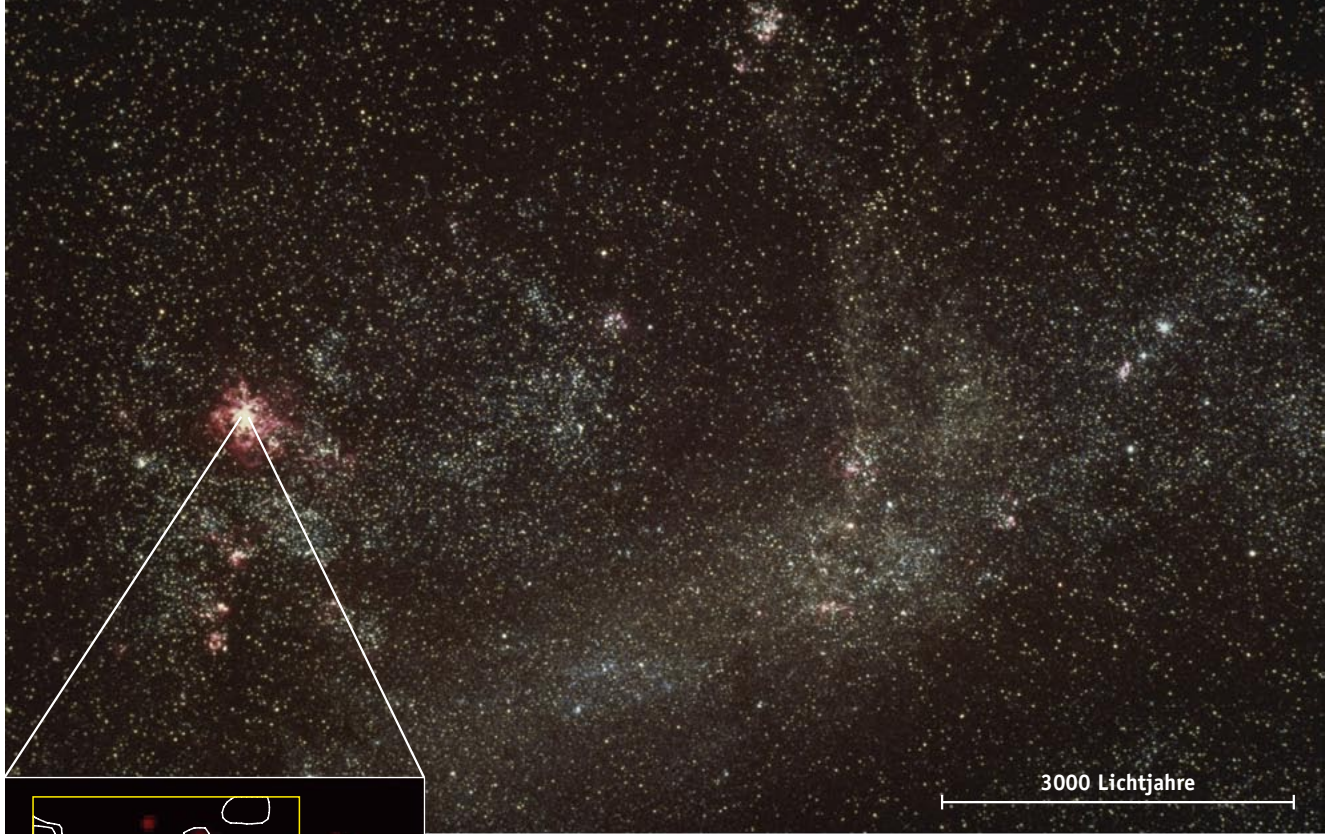
Galaktische Sternentstehungsstätten:

Mit APEX können Molekülwolken im Inneren von Sternentstehungsregionen mit hoher Auflösung beobachtet werden, zum Beispiel im Licht des Kohlenmonoxids. Untersucht wurde die Region G 34.26+0.15 (siehe Abbildung links). Innerhalb von G 34.26+0.15 befindet sich ein junger, massereicher Stern, dessen intensives Licht das Gas seiner unmittelbaren Umgebung ionisiert. Abseits davon ist jedoch noch viel neutrales, molekulares Gas vorhanden, welches bei der Entstehung des Sterns übrig blieb. Dank der hohen Winkelauflösung von APEX (7") konnte erstmals das Spektrum der innersten, drei Parsec durchmessenden Region von G 34.26+0.15 im Submillimeterbereich untersucht werden. Hierin zeigt sich deutlich die Linie des Rotationsübergangs ^{13}CO (8–7) bei 881 GHz. Sie ist charakteristisch für die innere Zone dichter Molekülwolken, in denen Temperaturen von mehr als 100 Kelvin vorherrschen. Zu dieser Aufheizung können außer einem benachbarten massereichen Stern auch im Staub verborgene Protosterne beitragen.

Einige der mit APEX gewonnenen Ergebnisse können unmittelbar mit denen des 30-m-Teleskops des IRAM auf dem Pico de Veleta verglichen werden. Mit beiden Teleskopen wurden in zwölf galaktischen Sternentstehungsregionen CO-Liniemissionen beobachtet. Die Spektren des IRAM-Teleskops zeigen CO-Linien, welche geringere Anregungstemperaturen erfordern als die mit APEX beobachteten. Aus den Intensitätsverhältnissen der mit beiden Teleskopen gemessenen Linien konnten die Astronomen für insgesamt zwölf galaktische Sternentstehungsregionen das bislang umfassendste Bild der im Inneren ablaufenden physikalischen und chemischen Vorgänge gewinnen: die Temperaturen, die Dichten und die Struktur der Wolkenkerne.

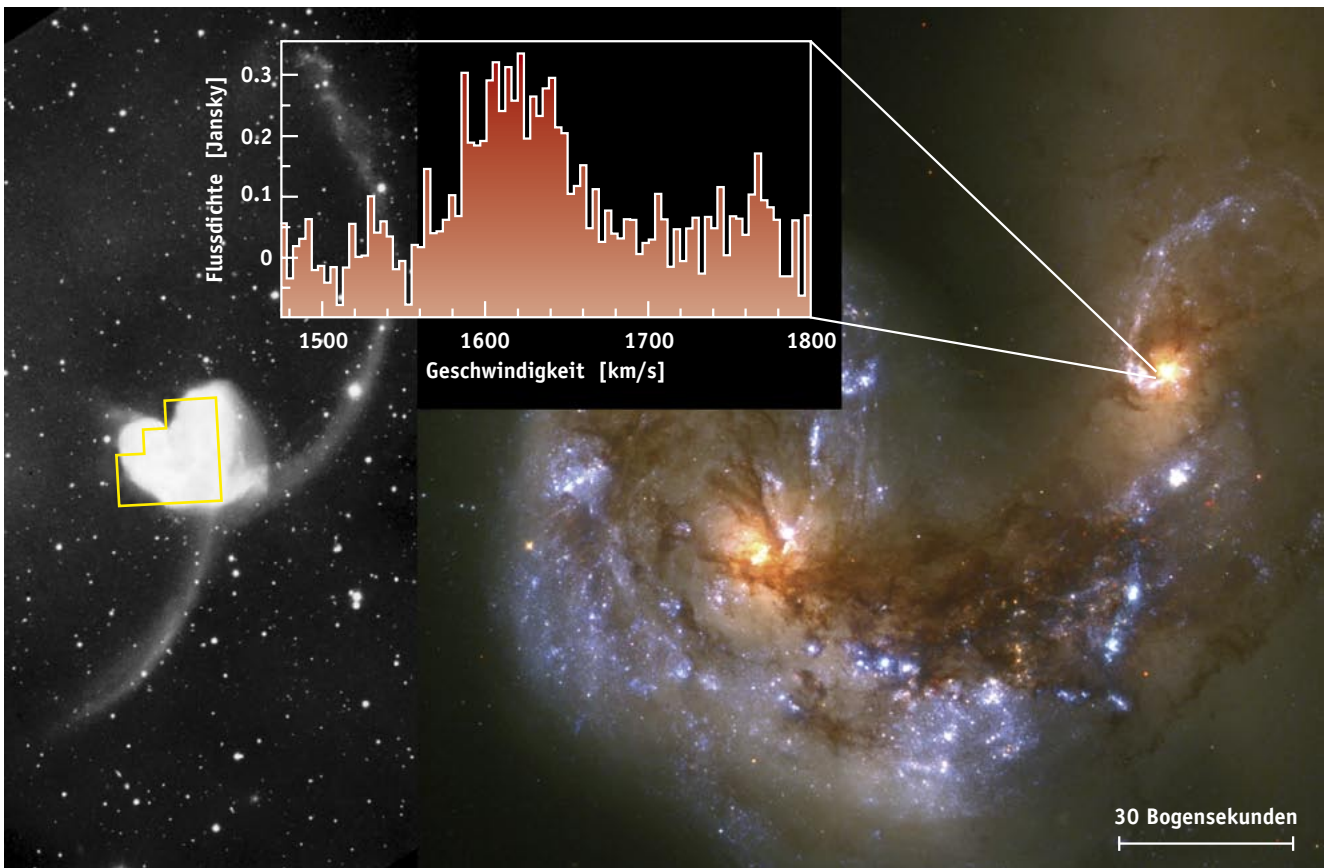
Extragalaktische Molekülwolken:

Die besondere Aufmerksamkeit der APEX-Forscher gilt der Großen und der Kleinen Magellanschen Wolke (LMC bzw. SMC). Diese irregulären Zwerggalaxien sind Begleiter unserer Galaxis und zeichnen sich durch besonders aktive Sternentstehung aus. Die Abbildung auf Seite 42 oben zeigt eine Beobachtung der Sternentste-



◀ Die mit APEX gemessene Karte der CO-Emission (Konturen) der Sternentstehungsregion 30 Doradus in der Großen Magellanschen Wolke (Abbildung oben) wurde hier einem mit 2MASS beobachteten Infrarotbild überlagert. Der Kreis zeigt die Winkelauflösung der CO-Karte von sieben Bogensekunden an. (Bild: MPIfR/2MASS)

▼ Die Antennengalaxie NGC 4038/39, aufgenommen mit dem Weltraumteleskop HUBBLE, und das mit dem APEX-Heterodynempfänger FLASH im Licht der Linie CO (4-3) gewonnene Spektrum des Kohlenmonoxids. Die Wellenlängen des Spektrums wurden in Geschwindigkeiten des emittierenden Gases umgerechnet. (Bild: STScI/MPIfR)



hungsregion 30 Doradus in der Großen Magellanschen Wolke, die mit APEX im Licht einer Spektrallinie des Kohlenmonoxids kartiert wurde. Die in 30 Doradus entstandenen Sterne beeinflussen ihre Umgebung durch intensive Sternwinde und energiereiches ultraviolettes Licht.

Die ursprünglichen Molekülwolken, aus denen die Sterne einst entstanden, lösen sich hierbei allmählich auf. Interessant ist der Vergleich der CO-Karte mit einer Infrarotaufnahme von 2MASS (2 Micron All-Sky Survey). Die im nahen Infraroten, bei zwei Mikrometern beobachtete Strahlung stammt von Sternen und dem von ihnen aufgeheizten Staub. Die darübergelegten Konturen der CO-Karte von APEX zeigen, dass trotz der in der 30-Doradus-Region herrschenden extremen Bedingungen noch große Mengen molekularer Gase vorhanden sind, aus denen weitere Sterne entstehen können.

Die gesamte chemische Entwicklung der Magellanschen Wolken ist noch nicht so weit fortgeschritten, wie die in unserer näheren kosmischen Umgebung: Elemente, die schwerer als Helium sind, kommen in der LMC viermal, in der SMC zehnmalseltener als im Milchstraßensystem vor. Von der weiteren Untersuchung der Magellanschen Wolken mit APEX erhoffen sich die Astronomen neue Erkenntnisse über Galaxien in frühen Entwicklungsstadien.

■ **Wechselwirkende Galaxien:** Das 90 Millionen Lichtjahre entfernte Sternsystem NGC 4038/39 ist ein eindrucksvolles Beispiel zweier kollidierender Galaxien. Aufgrund von Gezeitenkräften, die bei der Verschmelzung auftraten, bildeten sich zwei lange Gasschweife, die diesem außergewöhnlichen System den Namen »Antennengalaxie« einbrachten. Nahe dem Zentrum, wo die Gasmassen beider Systeme frontal aufeinander stoßen, befindet sich ein Gebiet intensiver Sternentstehung (siehe SuW 8/2005, S. 14). Hier wurde mit dem Heterodyn-Empfänger FLASH von APEX intensive Strahlung im Licht des Rotationsübergangs CO (4-3) beobachtet, was auf ein reiches Vorkommen an erwärmtem, molekularem Gas hindeutet. Das CO-Spektrum gehört zu den ersten mit APEX aufgenommenen Daten dieser Art und konnte dank der großen Empfindlichkeit des Instruments innerhalb weniger Minuten gewonnen werden.

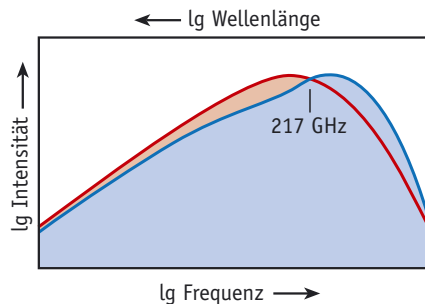
Der südliche Himmel öffnet sich

Zu den ehrgeizigsten mit APEX verfolgten Zielen gehören große Himmelsdurchmusterungen im Submillimeterbereich. Sie dienen zur systematischen Suche nach

Protosternen, aber auch zur Erforschung des Universums als Ganzes.

■ **ATLASGAL:** Im Jahr 2006 beginnt eine mehrere hundert Quadratgrad umfassende Durchmusterung der Milchstraßenebene bei 0.87 mm mit dem Bolometer LABOCA. ATLASGAL (APEX Telescope Large Area Survey: the Galaxy) wird den Astronomen einen weiträumigen Überblick über die Sternentstehungsgebiete ermöglichen. Die Durchmusterung wird durch Beobachtungen bei 0.35, 1.4 und 2 Millimetern ergänzt, mit denen Gebiete kartiert werden, in denen massereiche Sterne entstehen. Hieraus werden die Massen und Temperaturen dieser Regionen bestimmt – und dies bis zu einer Entfernung von 30000 Lichtjahren, der Distanz des Galaktischen Zentrums. Darüber hinaus werden gezielte spektroskopische Beobachtungen im Licht der CO-Linien neue Hinweise auf die Struktur und Dynamik des Milchstraßensystems liefern.

■ **Sunyaev-Zeldovich-Effekt:** Galaxienhaufen gehören zu den größten gravitativ gebundenen Systemen im Universum. Die Haufenmitglieder sind in ein mehrere Millionen Kelvin heißes, dünn verteiltes Gas eingebettet, welches nur bei Röntgenwellenlängen direkt beobachtet werden kann. Im Radio- und Submillimeterbereich macht sich das Gas jedoch indirekt bemerkbar: Die hierin enthaltenen Elektronen streuen die Pho-



▲ Schematische Spektren des kosmischen Mikrowellenhintergrundes, unverfälscht (rot) und vom SZ-Effekt modifiziert (blau). Der SZ-Effekt ist hier stark übertrieben dargestellt. Die Grenze zwischen der Zu- und Abnahme der Strahlungsintensität liegt bei 217 GHz, entsprechend einer Wellenlänge von 1.38 mm. Blickt man im Submillimeter-Bereich in die Richtung eines Galaxienhaufens, so erscheint hier die Intensität des Hintergrundes größer als in seiner Umgebung, wo der ungestörte Hintergrund beobachtet wird.

Bei uns sind Sie umfassend und aktuell informiert. Der Internetservice für Astronomie und Raumfahrt.

http://www.astronomie.info/

Am Himmel | Astrolexikon | Finsternisse | Planetarium | Sternbilder

Am Himmel
News und Monatsübersichten

Monatlich stellen wir für Sie das Wichtigste zur Himmelsbeobachtung zusammen. Hier finden Sie z.B. die Planetenübersicht, Mondkalender, einen Spaziergang am Sternenhimmel und ein aktuelles Schwerpunktthema. Hier finden Sie natürlich auch Schlagzeilen aus Astronomie und Raumfahrt.

Astrolexikon
Astronomie in Stichworten

Unsere Astronomie-Lexikon umfasst Hunderte von Begriffen und zahlreiche Schwerpunktartikeln. Sie finden hier zu fast allen Themenbereichen der Astronomie Hintergrundwissen. A - B - C - D - E - F - G - H - I - J - K - L - M - N - O - P - Q - R - S - T - U - V - W - X - Y - Z. Auch Java-Applets und vieles mehr...

Finsternisse
Alles über Finsternisse und Transits

Ringförmige Sonnenfinsternis in Portugal und Spanien. Berichterstattung zu Finsternissen. Finsternisse sind ein Schwerpunkt von astro!info - deshalb haben wir Hunderte von Karten und Fotos erstellt um Ihnen die Erlebnisse Sonnenfinsternis und Transit möglichst nahe zu bringen. Sie finden aber auch Details über Bedeckungsveränderliche Sterne und Schattenspiele der Jupitermonde.

Sternbilder
Diamanten am Nachthimmel

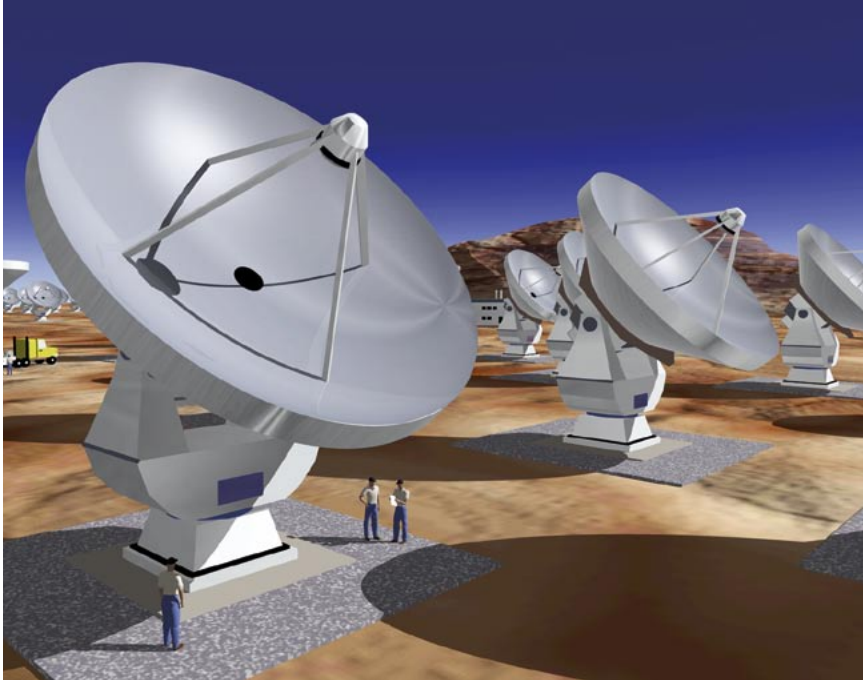
Der Sternenhimmel ist voll von schönen Deep-Sky Objekten - finden Sie sie! In unserem Sternbildkatalog finden Sie Beschreibungen von einer Fülle von Deep-Sky Objekte! Natürlich ist jedes einzelne der 88 Sternbilder dargestellt.

Calsky

Der Astrokalender im Internet, individuell konfigurierbar:

- Satelliten (z.B. ISS, Iridium)
- Planeten, Sonne und Monde
- Sonnen- & Mondfinsternisse
- Kometen, Asteroiden, Deep-Sky
- Polarlichtwarnungen
- Email-Warnservice

http://www.calsky.com/



◀ ALMA ist ein großes Interferometer aus 12-m-Spiegeln, die am Standort von APEX aufgebaut werden sollen. (Bild: Eso)

tonen des 2.7-Kelvin-Mikrowellenhintergrundes, wobei die Photonen Energie gewinnen. Die gestreuten Photonen sind somit bei höheren Frequenzen zu beobachten als die ungestreuten. Deshalb erscheint das Spektrum des Mikrowellenhintergrundes in Richtung des Galaxienhaufens verzerrt (Graphik auf Seite 43). Dieses Phänomen wird als »Sunyev-Zeldovich-Effekt« (SZ) bezeichnet.

Die Intensität der ungestörten Hintergrundstrahlung folgt einer Planck-Kurve und ist bei 1.3 Millimetern maximal. Auch im benachbarten Submillimeterwellenlängenbereich ist sie noch relativ groß, und der SZ-Effekt sollte hier besonders deutlich beobachtbar sein. Von einer weiträumigen Durchmusterung mit APEX

erwartet man, den SZ-Effekt bei etwa 1000 Galaxienhaufen messen zu können, um daraus kosmologische Parameter abzuleiten.

Die SZ-Durchmusterung mit APEX wird in Zusammenarbeit mit der University of California durchgeführt, welche auch das dabei eingesetzte Bolometer-Array entwickelt hat. Weitere Partner sind unter anderem die Universität Bonn, sowie mehrere Max-Planck-Institute, welche komplementäre Daten in anderen Wellenlängenbereichen beisteuern werden.

Ein Pfadfinder für ALMA

Mit dem erfolgreichen Abschluss der Testphase haben Wissenschaftler des MPIfR in Bonn, des OSO in Onsala,

Schweden, und der Eso die Möglichkeit geschaffen, den gesamten südlichen Himmel mit modernster Spiegel- und Empfängertechnik im Submillimeterbereich beobachten zu können. Auf der Südhalbkugel der Erde ist APEX das Einzelteleskop mit der bislang höchsten Winkelauflösung und Empfindlichkeit im Submillimeterbereich, mit einer zwölfmal so großen Spiegelfläche wie der geplante Infrarotsatellit HERSCHEL. Im Verbund mit Submillimeter-Teleskopen anderer Observatorien der Welt wird APEX auch interferometrische Beobachtungen mit sehr großen Basislängen (VLBI) ermöglichen. Zudem ist APEX als »Pfadfinder« für das geplante Interferometer ALMA (Atacama Large Millimeter Array) gedacht, welches Beobachtungen mit Basislängen von bis zu 14 Kilometern ermöglichen wird.

Die ersten 25 Teleskope für ALMA wurden im Juli 2005 von den amerikanischen Partnern des Projekts, repräsentiert durch das National Radio Astronomy Observatory (NRAO), bei der Firma Vertex RSI bestellt, eine Anzahl weiterer Teleskope wird von europäischer Seite, repräsentiert durch die Europäische Südsternwarte (Eso), folgen. Die erste Antenne soll im Jahr 2007 geliefert werden, und bis 2012 sollen mindestens 50 Antennen einsatzbereit sein.

Doch APEX wird nicht nur in technischer sondern auch in wissenschaftlicher Hinsicht ein echter Pfadfinder sein, denn die hiermit durchgeführten Himmeldurchmusterungen dienen als Vorstudien für spätere, detailliertere Beobachtungen mit ALMA. Somit bildet APEX den Auftakt zu einer groß angelegten Erforschung des südlichen Himmels innerhalb eines noch wenig genutzten atmosphärischen Fensters – von unserer unmittelbaren kosmischen Nachbarschaft bis zu den fernsten Galaxien. □

Weitere Informationen

APEX-Homepage: www.apex-telescope.org

APEX-Webseiten des Max-Planck-Instituts für Radioastronomie (MPIfR): www.mpifr-bonn.mpg.de/div/mm/apex.html

Millimeter und Submillimeter-Astronomie am MPIfR: www.mpifr-bonn.mpg.de/div/mm/

European Science Foundation (Hrsg.): Craf Radio Astronomy Handbook. www.astron.nl/craf/handbook.htm

Onsala Space Observatory: www.oso.chalmers.se/oso/index.html

Vertex Antennentechnik GmbH: www.vertexant.com

Atacama Large Millimeter Array (ALMA): www.eso.org/projects/alma/

Report of the ALMA Scientific Advisory Committee Regarding the Number of Antennas: www.eso.org/projects/alma/newsletter/Report_22march.pdf

SuW-Special 3/2003 »Europas neue Teleskope«. Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Heidelberg.

Ernest Krmpotic: Wenn Spiralgalaxien kollidieren. SuW 8/2005, S. 14.

Karl Menten, Ernst Kreysa, Frank Bertoldi: Große Bolometerempfänger für die (Sub)millimeter-Astronomie. MPIfR, Bonn, 2004. [www.mpifr-](http://www.mpifr-bonn.mpg.de/public/pr/pr_pmorris.html)

www.mpifr-bonn.mpg.de/public/pr/pr_pmorris.html

Henrik Beuther: Das Submillimeter-Array auf dem Mauna Kea. SuW 3/2004, S. 36.

Peter Mezger, Richard Wielebinski, Tom L. Wilson: Das Heinrich-Hertz-Teleskop für Millimeter- und Submillimeter-Astronomie. SuW 7/2000, S. 542.



Martin J. Neumann erhielt seine Ausbildung am MPI für Radioastronomie in Bonn und

am MPI für Astronomie in Heidelberg. Seit 1997 ist er Redakteur der Zeitschrift Sterne und Welt- raum.