Didaktisches Material zu den folgenden vier Beiträgen: www.wissenschaft-schulen.de und www.suw-online.de

Astronomie am Ende der Welt

VON MICHAEL BURTON

Nicht nur geographisch und klimatisch gesehen ist die Antarktis ein extremer Standort. Dort bieten sich auch neue Möglichkeiten für die astronomische Forschung, denn es herrschen Beobachtungsbedingungen vor, die auf unserem Planeten einzigartig sind.

Die Antarktis ist der höchste, trockenste und kälteste aller Kontinente. Sie liegt am Ende der Erde und in jeder Bedeutung dieser Worte ist sie der Inbegriff für etwas, das uns fern liegt und schwer oder sogar unmöglich zu erreichen ist. Wie für alle anderen Dinge, die Menschen in der Antarktis betrieben, ist es auch für die astronomische Forschung die Region der Erde, die zuletzt erreicht werden konnte. Die erste bedeutende astronomische Entdeckung, die dort gelang, wurde vor weniger als einem Jahrhundert gemacht. Die meisten astronomischen Forschungen erfolgten jedoch im vergangenen Jahrzehnt. Gewiss: Es ist nicht leicht, in der Antarktis Astronomie zu betreiben. Dennoch ist dies mit den heutigen technischen Mitteln bereits möglich, und zwar an vorderster Front (Abb. 1 und 2).

Kontinent des Eises

Als fünftgrößter Kontinent weist die Antarktis eine Landfläche von etwa 14 Millionen Quadratkilometern auf. Es ist der Kontinent des Eises. Nur etwa zwei Prozent seiner Fläche sind nicht davon bedeckt. Die eisfreien Regionen befinden sich fast ausschließlich entlang der Küste. Im Vergleich zum Sommer verdoppelt sich im Winter die vom Eis bedeckte Fläche. Im September, dem antarktischen Spätwinter, schiebt sich der Eispanzer bis zu eintausend Kilometer in den südlichen Ozean. Aus der Sicht der Astronomen ist es vor allem die Eismasse, welche die Antarktis so interessant macht. Obwohl sie von einem großen Gebirge durchzogen wird (das Transantarktische Gebirge erstreckt sich über eine Länge von fast 5000 Kilometern), ragen nur dessen höchste Gipfel aus der Eisdecke des Antarktischen Plateaus heraus.

So erreicht das Vinson-Massiv in der westlichen Antarktis eine Höhe von 4897 Metern. Der Großteil des Landes ist unter der bis zu vier Kilometer dicken Eisschicht begraben, wobei die Dicke dieser Schicht von der Küste ins Innere bis zum so genannten Dom Argus auf 4200 Meter anwächst. Der dicke Eispanzer macht die Antarktis zum höchsten aller Kontinente. Die Fläche, in der die Eisdicke mehr als 3000 Meter beträgt, ist annähernd

Abb. 1: Wolkenfreier Himmel, windstill, kalt und trocken – Ein perfekter Tag am Dom C! Das Bild zeigt das AASTINO (Automated Astrophysical Site-Testing Observatory), eine Einrichtung zur Prüfung der Eignung von Dom C als Standort einer Sternwarte. (Bild: Michael Burton)

Abb. 2: Das Innere des AASTINO. (Bild: Michael Burton)

Abb. 3: Südamerika und die Antarktis aus dem Weltraum, aufgenommen von der Raumsonde GALILEO bei ihrem Vorbeiflug am 11. Dezember 1990. (Bild: NASA/Goddard Space Flight Center)

so groß wie Australien. Es ist die kälteste und trockenste Region auf der Erde. In der Nähe der russischen Station Wostok wurde eine Temperatur von –90°C gemessen. Vermutlich wird es am Dom Argus sogar noch kälter – bislang war niemand dort, der eine Temperaturmessung hätte durchführen können.

Extreme Bedingungen

All diese Fakten sind inzwischen wohlbekannt. Dass es auf dem Antarktischen Plateau beinahe vollständig windstill ist, hat sich dagegen bislang kaum herumgesprochen, obwohl dies für astronomische Beobachtungen entscheidend ist. Das atmosphärische Zirkulationsmuster über der Antarktis weist am Südpol ein Zentrum auf. Um diese Achse herum bewegen sich langsam absinkende Luftmassen, die Nachschub für einen Wind liefern, der ständig vom Plateau nach außen herabweht. Es handelt sich um einen katabatischen Wind, also einen Fallwind, der am höchsten Punkt des Plateaus einsetzt und zur Küste hin beschleunigt. Das Gewicht der Luftpakete ist die Antriebskraft dieses Windes. Da das Antarktische Plateau in weiten Gebieten zur Küste hin nur unter einem Winkel von einem Zehntel Grad abfällt, ist der Wind dort recht schwach. In der Nähe der Küste fällt der Eispanzer jedoch steiler ab. Das führt zu einer dramatischen Zunahme der Windgeschwindigkeit – und den heftigen Stürmen, über die häufig berichtet wird, wenn von der Antarktis die Rede ist.

Der geographische Südpol befindet sich am Rand des Antarktischen Plateaus (Abb. 4). Trotz seiner Höhe von 2835 Metern über dem Meeresspiegel ist der Südpol so gut zu erreichen, dass bis heute die meisten astronomischen Forschungen hier durchgeführt wurden, und zwar im Umfeld der US-amerikanischen Station Amundsen-Scott. Derzeit wird unter der Leitung französischer und italienischer Forscher am so genannten Dom C eine neue Station aufgebaut: Concordia. Mit einer Höhe von 3268 Metern über dem Meeresspiegel ist der Dom C einer der höchsten Punkte des Antarktischen Plateaus. Es gibt Pläne für mehrere Einrichtungen, die von den einzigartigen Bedingungen an diesem Ort profitieren sollen.

Abb. 4: Karte der Antarktis mit den wichtigsten Forschungsstationen und astronomischen Beobachtungsstandorten. (Bild: Australian Antarctic Division)

Weitere Orte, an denen man auf dem Antarktischen Plateau astronomische Beobachtungen durchführen könnte, sind die russische Station Wostok (3500 Meter hoch gelegen) und die japanische Station Fuji (3800 Meter). Doch nicht für alle astronomischen Forschungsprojekte ist ein Standort auf dem Plateau erforderlich. Bereits seit längerem gibt es an der australischen Station Mawson sowie der US-amerikanischen Station McMurdo Instrumente zur Beobachtung der Kosmischen Strahlung. Beide Stationen befinden sich an der Küste der Antarktis. An der Station McMurdo gibt es darüber hinaus auch eine Einrichtung für die Durchführung längerer Ballonflüge. Diese machen sich die zirkumpolaren Winde über dem Kontinent zunutze, aufgrund derer die Ballons während des Sommers über 10 bis 30 Tage in der Luft bleiben können und dabei den Antarktischen Kontinent mehrfach umrunden. Abb. 4 zeigt die Lage der wichtigsten Forschungsstationen.

Warum Antarktis?

Zwei Faktoren waren für die Entwicklung der Antarktischen Astronomie entscheidend: Die extreme Kälte und die außerordentliche Trockenheit der Atmosphäre. Doch auch andere Faktoren sprechen

Eine kurze Geschichte von Dom C

Dom C ist einer der abgelegensten Orte der Welt. Selbst im Vergleich zu anderen Orten der Antarktis liegt er im Abseits, denn er befindet sich mitten auf einem Eisplateau, das größer als die Fläche Westeuropas ist. Warum interessieren sich die Astronomen ausgerechnet für diesen Ort? Es gibt dafür einen geographischen und einen politischen Grund. Der geographische Grund ist leicht erklärt: Dom C ist einer der höchsten Punkte des Plateaus, 3200 Meter über dem Meeresspiegel gelegen, bei 75° südlicher Breite und 123° östlicher Länge.

Die Namen der Eisgipfel auf dem Plateau folgen einem einfachen Schema. Sie heißen Dom A, Dom B, Dom C und so weiter. Benannt wurden sie von jemandem, der eine der ersten topographischen Karten des eisbedeckten Südkontinents vor sich hatte und dessen Gipfel markierte. Tatsächlich sind es riesige Eisdome, die drei bis vier Kilometer über den felsigen Grund des Kontinents in die Höhe ragen, und die über eine Distanz von eintausend bis zweitausend Kilometern zu dieser Höhe aufragen.

Es ist ein Niemandsland, das bis heute nur an wenigen Punkten von Menschen erreicht worden ist. Die Gipfelkette, die sich von der japanischen Station auf dem Dom F (77° Süd, 40° Ost, 3800 Meter über dem Meeresspiegel gelegen) über den höchsten Punkt, Dom A (81° Süd, 77° Ost, 4200 Meter), die russische Station Wostok (78° Süd, 106° Ost, 3500 Meter) bis Dom C erstreckt, bietet die besten Ausblicke in das Weltall, die von der Oberfläche der Erde aus möglich sind. Dom A als höchster Punkt dieser Kette ist bis heute noch nicht auf dem Landweg von Menschen erreicht worden. Eine chinesische Expedition hat sich im Südsommer 2004/2005 das Ziel gesetzt, am Dom A eine provisorische Mess-Station zu errichten.

Dom C ist auch deshalb etwas besonderes, weil er sich in der Nähe des geomagnetischen Pols befindet. Diese Tatsache war der Grund dafür, dass vor etwa einem Jahrhundert die ersten Forscher in diese Gegend kamen, und zwar während der britischen Südpolexpedition von 1907 bis 1909. Während die Gruppe des Expeditionsleiters Ernest Shackelton daran scheiterte, erstmals den Südpol zu erreichen, glückte es einer Gruppe von drei Männern, zum magnetischen Pol zu gelangen. Darunter war auch der australische Geologe Douglas Mawson. Vom Startort, einer provisorischen Basis an der Küste, war der magnetische Pol deutlich näher als der geographische Südpol. Zwar war auch die Reise der Gruppe um Mawson dramatisch, doch am 16. Januar 1909 erreichten sie ihr Ziel: einen Punkt in der Eislandschaft bei 73° südlicher Breite und 154° östlicher Länge. Erst später merkten sie, dass sich der geomagnetische Südpol gar nicht an diesem Punkt befindet.

Bereits wenige Jahre später fand die nächste Expedition in diese Gegend der Antarktis statt, die australische Antarktisexpedition unter der Leitung von Mawson (1911–1914). Die Aufgabe dieser Expedition war es, die Küstenregion des so genannten Adelie-Landes zu erkunden. Auf einer der Schlittenfahrten wurde der Adelie-Land-Meteorit gefunden, buchstäblich das erste Stück einer neuen Astronomie, die in der Antarktis enstehen würde. Auf einer weiteren Schlittenfahrt versuchten mehrere Mitglieder der Expedition, darunter der Photograph Frank Hurley, erneut, den magnetischen Südpol zu erreichen. Das gelang ihnen am 21. Dezember 1912, dem Tag der (südlichen) Sommersonnenwende. Die Position: 71° Süd, 148° Ost. Obwohl keine dieser Grup-

Die französisch-italienische Station Concordia am Dom C. Im Vordergrund das AASTINO. (Bild: Michael Burton)

für die Antarktis als Standort für astronomische Beobachtungen. Dazu gehört die Stabilität der Atmosphäre, die Möglichkeit, lange kontinuierliche Beobachtungsreihen durchzuführen, die erhöhte Flussrate der niederenergetischen Kosmischen Strahlung (eine Folge der Nähe zum magnetischen Pol) sowie die riesigen Mengen an Eis, die für manche Experimente nützlich sind. Einige dieser Faktoren haben sich als entscheidend erwiesen. So lässt sich die Dicke des Eispanzers nutzen, um einen Neutrinodetektor mit einem Volumen von einem Kubikkilometer zu betreiben. Dass die Turbulenz der Luft weitgehend auf die atmosphärische Grenzschicht beschränkt ist, schafft wiederum Bedingungen, die zur Korrektur der Wellenfront des Lichts günstig sind – ein kritischer Faktor für den Einsatz großer Teleskope für Beobachtungen im optischen und infraroten Spektralbereich.

Betrachten wir diese Faktoren etwas genauer:

■ **Die Hintergrundhelligkeit des Himmels im Infraroten.** Wir können den Südpol im Winter mit dem Mauna Kea auf Hawaii, einem der besten Standorte für Beobachtungen im optischen und infraroten Spektralbereich, vergleichen. Setzt man voraus, dass der Himmel wie ein so genannter Schwarzer Körper strahlt, dann sollte am Südpol die störende Hintergrundhelligkeit des Himmels im nahen Infrarot (Wellenlänge: 2.4 Mikrometer) um den Faktor 200 geringer sein. Wäre dem so, dann würde sich die Antarktis als Standort für tiefe kosmologische Studien hervorragend eignen. Messungen zeigten dann jedoch, dass das Hintergrundlicht am Südpol »nur« etwa fünfzig Mal geringer ist als auf dem Mauna Kea. Das liegt am so genannten *air glow*, dem Leuchten aufgrund atomarer und molekularer Emissionsprozesse in der hohen Atmosphäre. Dennoch ist die Helligkeit des Himmelshintergrunds im mittleren Infrarot, also dem Bereich zwischen den Wellenlängen von 3 Mikrometern und 30 Mikrometern am Südpol zehn bis zwanzig Mal so gering wie am besten Standort in den gemäßigten Breitengraden.

■ **Transparenz der Atmosphäre.** Die Menge des Wasserdampfes in der Atmosphäre bestimmt die Qualität eines

pen den Ort erreichte, den wir heute Dom C nennen, fanden sie die erstaunlichen klimatischen Bedingungen vor, die diesen Ort heutzutage für die Astronomen so interessant machen. Das Tagebuch Hurleys ist voller Hinweise auf die bemerkenswerte Windstille auf dem Plateau, den außerordentlich klaren Himmel und den Sonnenschein.

Seit langem ist bekannt, dass jeder Ort auf dem Antarktischen Plateau gute Bedingungen für astronomische Beobachtungen aufweist. Dass die Dome ganz besonders geeignet sind, hatte man ebenfalls schnell begriffen. Da die katabatischen Winde an den höchsten Punkten des Plateaus einsetzen und zur Küste hin wehen, sind die Dome die windstillsten Orte auf der ganzen Erde. Bevor man jedoch Pläne für eine Sternwarte an einem solchen Ort macht, sollte man sich fragen, ob man den dafür gewünschten Standort überhaupt erreichen kann. Erst durch die Gründung der französisch-italienischen Station Concordia (Abb. links) wurde der Dom C zu einem möglichen Standort. In dieser Hinsicht war die Auswahl von Dom C eine politische Entscheidung, denn er ist derjenige Dom, welcher der italienischen Station Terra Nova und der französischen Station Dumont d'Urville am nächsten liegt. Bislang wird die Station Concordia nur während des Antarktischen Sommers betrieben. Zunächst lag der Forschungsschwerpunkt auf der Bohrung von Eiskernen, mit denen langfristige Klimaveränderungen erforscht werden können (siehe Seite 34). Wenn die Station bald ganzjährig betrieben wird, könnte sie sich als neues Zentrum der beobachtenden Astronomie erweisen.

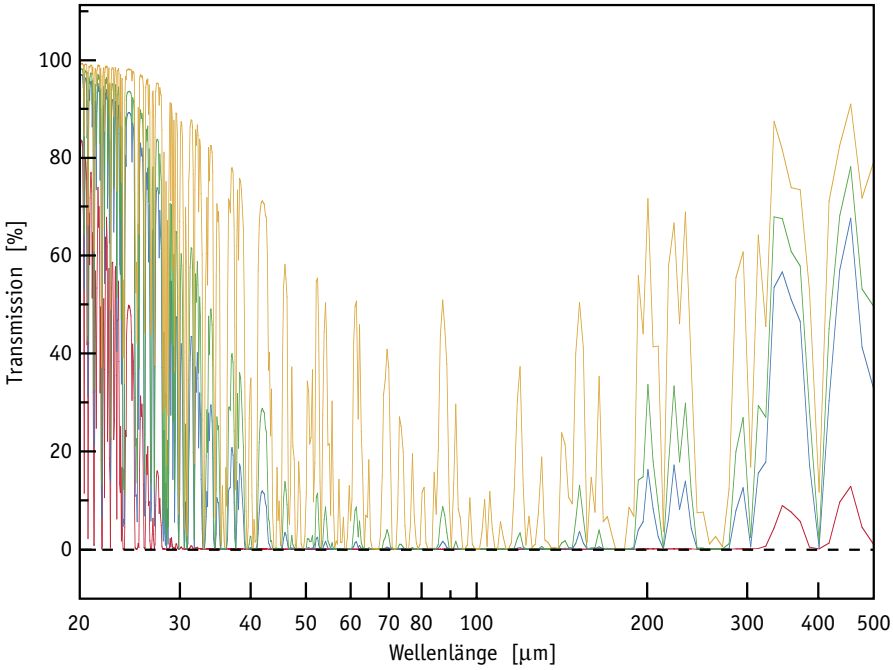

Abb. 5: Modellrechnung der atmosphärischen Transmission vom fernen Infrarot zum Submillimeter-Bereich auf dem Gipfel des Mauna Kea (Rot), dem Südpol (Blau), dem Dom C (Grün) und dem Dom A (Orange). (Bild: J. Lawrence)

Abb. 6: Das AASTO, ein Vorläufer des AASTINO, war von 1997 bis 2001 am Südpol im Einsatz. (Bild: Michael Burton)

Standorts für Beobachtungen im Infraroten. Sie wird meist als Säulenhöhe bezeichnet. Diese Höhe hätte eine entsprechende Schicht Wasser unter dem in Meereshöhe herrschenden Druck bei 0 °C. Gute Standorte wie die Berge Siding Spring in Australien und Kitt Peak in den USA weisen Säulenhöhen von etwa einem Zentimeter auf. Auf dem Mauna Kea kann die Säulenhöhe bis auf einen Millimeter sinken. Dagegen beträgt sie am Südpol über weite Teile des Jahres weniger als 250 Mikrometer. Auf den Gipfeln des Antarktischen Plateaus sinkt die Säulenhöhe manchmal vermutlich bis auf 100 Mikrometer. Dies entspricht etwa der Menge an Wasser, die ein in der Stratosphäre fliegendes Flugzeug noch über sich hat. Von diesen Gipfeln wird sich ein spektrales Fenster in das Weltall öffnen, das von 3 Mikrometer bis 300 Mikrometer reicht (Abb. 5).

Stabilität der Atmosphäre und Seeing. Am Südpol gibt es keinen 24-stündigen Wechsel zwischen Tag und Nacht, sondern allein sechs Monate Tag und dann sechs Monate Nacht. Deshalb kann jede astronomische Quelle über einen langen Zeitraum hinweg kontinuierlich beobachtet werden – und das bei gleich bleibender Zenitdistanz. Dass der 24-Stunden-Tag entfällt, setzt die sich aus der anderswo im Tagesverlauf ergebenden Temperaturdifferenzen herab – eine entscheidende Quelle für das unerwünschte Seeing. Gleichzeitig existiert über dem Eis der Antarktis im Winter eine ausgeprägte Inversionslage: Anstatt des zumeist beobachteten Abfalls der Lufttemperatur in der Höhe, steigt die Temperatur zunächst an. Das liegt an der Abkühlung bodennaher Schichten durch das Eis und verursacht Seeing. Darüber hinaus gibt es an den meisten Orten den bereits erwähnten katabatischen Wind. All das führt dazu, dass das Seeing am Südpol nur selten besser wird als 1.5 Bogensekunden (Abb. 6). Im Vergleich zu Sternwarten wie La Silla und Paranal in Chile, an denen das Seeing häufig unterhalb einer Bogensekunde liegt, ist das nicht sehr beeindruckend. Was am Südpol hingegen fehlt, ist ein Jetstream: Ein in der höheren Atmosphäre befindlicher Luftstrom, der ebenfalls Seeing verursacht. Das ist ein gewisser Vorteil.

An Orten wie Dom C fällt der durch den katabatischen Wind verursachte Anteil der am Südpol beobachteten Luftunruhe weg. Tatsächlich wird dort ein deutlich geringeres Seeing beobachtet. Der so genannte isoplanatische Winkel, eine kritische Größe bei der Verwendung der Adaptiven Optik, ist dadurch größer – und somit können Sterne für die Korrektur der Wellenfront herangezogen werden, die weiter von den Beobachtungszielen entfernt sind (siehe SuW 10/2004, S. 32). Auf die Benutzung von »Laser-Guide«-Sternen, die sonst gewissermaßen eine Notlösung darstellen, um Techniken der Adaptiven Optik zu verwenden, kann deshalb oft verzichtet werden. Für eine weitere Erleichterung bei der Benutzung der Adaptiven Optik sorgen die geringen Windgeschwindigkeiten auf dem Antark-

Wie man Dom C erreicht

Vor einhundert Jahren konnte man noch zu einem Helden werden, wenn man irgendeinen Punkt in der Antarktis erreichte. Wer das Antarktische Plateau erreichte, hatte einen Platz in den Geschichtsbüchern sicher. Das Wettrennen zum Südpol ist der Stoff von Legenden. Nachdem Robert Scott mit seiner Mannschaft im Jahr 1912 als zweites Team den Pol erreichte, wurde dieser bis zum Internationalen Geophysikalischen Jahr 1957 nicht mehr betreten. Und diesmal waren die Forscher mit dem Flugzeug gekommen!

Flugzeuge sind heute die üblichen Transportmittel in der Antarktis. Es ist recht einfach geworden, damit den Südpol zu erreichen. Eine Reise beginnt meist mit einem Flug von Christchurch (Neuseeland) zur US-amerikanischen Küstenstation McMurdo. Von dort dauert ein zweiter Flug mit einer Transportmaschine vom Typ Hercules C-130 etwa drei Stunden (Abb. 1). Diese Flugzeuge sind mit Schneekufen ausgestattet und landen in der Nähe der US-amerikanischen Station Amundsen-Scott. Während der dreimonatigen Sommerperiode (November bis Januar) gibt es tägliche Flüge zum Pol. Etwa 250 Menschen leben und arbeiten dort in dieser Zeit.

Im Vergleich zum Südpol ist Dom C schwerer zu erreichen. Das hat keinen technischen Grund, sondern liegt einfach daran, dass die Station Concordia noch nicht so weit ausgebaut wurde und weniger Menschen dort arbeiten. Manchmal hat man Glück und kann von McMurdo mit einer Twin Otter, einer kleinen Propellermaschine (Abb. 2), zum Dom C fliegen. Das dauert etwa fünf Stunden, wobei man einen Zwischenstopp zum Tanken einlegen muss. Wahrscheinlicher ist es jedoch, dass man von McMurdo erst einmal zur italienischen Station Terra Nova (kürzlich umbenannt in »Stazione Mario Zucchelli«) weiterfliegen muss, um von dort mit einer Twin Otter zum Dom C zu gelangen.

Die Alternative wäre, sich in Hobart im australischen Tasmanien auf der »Astrolabe« einzuschiffen, dem Versorgungsschiff für die französische Station Dumont d'Urville, und von dieser Station wiederum eine Twin Otter zu besteigen. Das Schwergepäck muss jedoch über Land transportiert werden, und zwar mit einem von drei Traktorzügen, welche pro Saison zum Dom C unterwegs sind. Die Traktoren benötigen für die 1000 Kilometer lange Strecke zehn bis elf Tage. Wenn es den Astronomen gelingt, die Geldmittel zum Bau eines großen Teleskops am Dom C einzuwerben, dann wird der Spiegel auf diesem Weg dorthin gelangen.

Seitdem Forscher mit dem Flugzeug unterwegs sind, ist kaum einer von ihnen auf die Idee gekommen, sich zu Fuß auf längere Reisen in der Antarktis zu begeben. Zumindest nicht bis vor wenigen Jahren, als private Abenteurer die Antarktis für sich entdeckt haben. Heute wird der Südpol immer mal wieder von Leuten besucht, die auf Skiern vorbeikommen. Die meisten lassen sich dann jedoch lieber ausfliegen, anstatt aus eigener Kraft den beschwerlichen Rückweg anzutreten. Zum Dom C ist seit Mawson und Hurley niemand zu Fuß gekommen. Mal sehen, wann die Abenteurer auch diesen Punkt für sich entdecken...

Abb. 1: Die Hercules C-130 ist das wichtigste Arbeitspferd unter den Transportflugzeugen in der Antarktis. (Bild: Michael Burton)

Abb. 2: Die Twin Otter ist ein Flugzeug, das in der Antarktis für kleinere Transporte benutzt wird. (Bild: Michael Burton)

tischen Plateau, denn dadurch sind die Kohärenzzeiten vergleichsweise lang und die Optik kann mit geringerer Frequenz korrigiert werden.

Antarktische Astronomie heute

Obwohl es sich um ein recht junges Arbeitsgebiet handelt und die Anzahl der beteiligten Forscher gering ist, sind die gegenwärtigen astronomischen Aktivitäten in der Antarktis erstaunlich vielfältig. Thematisch folgen diese Arbeiten der Agenda der aktuellen Forschung. Im Mittelpunkt stehen Arbeiten zur Entstehung von Planeten, Sternen, Galaxien und dem Universum. Besonders intensiv wird gegenwärtig die Kosmische Hintergrundstrahlung beobachtet, Molekülwolken im Milchstraßensystem und Sterne, um deren Umgebung Planeten existieren könnten. Sehen wir uns diese Forschungsgebiete einmal näher an:

■ **Anisotropie der Kosmischen Hintergrundstrahlung.** Die Untersuchungen der Kosmischen Hintergrundstrahlung stellen bislang zweifellos den wichtigsten Beitrag der Antarktischen Astronomie dar. Dem Experiment DASI (Degree Angular Scale Interferometer) gelang im Jahr 2002 erstmals der Nachweis, das ein gewisser Anteil dieser Strahlung in charakteristischer Weise polarisiert ist (siehe SuW 5/2003, S. 26). Die Messungen von Experimenten wie ACBAR und BOOMERANG lieferten neue Indizien für eine flache Geometrie des Universums (siehe Kasten »Klarer Blick zum kosmischen Hintergrund« auf Seite 28). Mit dem SPT (South Pole Telescope), einem 10-Meter-Radioteleskop, das für das Südpol-Observatorium geplant ist, soll demnächst versucht werden, systematische Beobachtungen des Sunyaev-Zeldovich-Effektes durchzuführen. So wird die Abnahme der Temperatur der Hintergrundstrahlung in Richtung zu Galaxienhaufen genannt, ein für kosmologische Untersuchungen besonders aufschlussreiches Phänomen.

■ **Submillimeterastronomie.** Die meisten neuen wissenschaftlichen Arbeiten der Antarktischen Astronomie stammen aus diesem Bereich. Das ist nicht verwunderlich, wenn man bedenkt, dass AST/RO (Antarctic Submillimeter Telescope and Remote Observatory), ein 1.7-Meter-Teleskop am Südpol, das bereits seit 1995 kontinuierlich in Betrieb ist (Abb. 7). Obwohl es nicht sehr groß ist, hat es bedeutende Resultate geliefert. Weltweit ist es das einzige Teleskop, das regelmäßig durch das Wellenlängenfenster bei 350 Mikrometern beobachten kann. So lassen sich atomarer Kohlenstoff und Kohlenmonoxid in der Milchstraße beobachten.

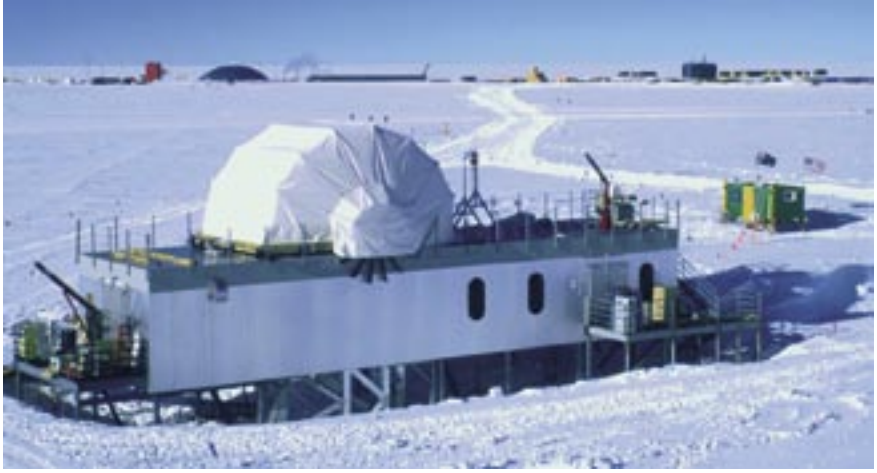

Abb. 7: AST/RO, das Antarctic Submillimeter Telescope and Remote Observatory, befindet sich am Südpol und wird seit 1995 kontinuierlich betrieben. (Bild: Michael Burton)

Abb. 8: Das Teleskop SPIREX, der South Pole Infra-Red Explorer, war von 1994 bis 1999 am Südpol in Betrieb. (Bild: Michael Burton)

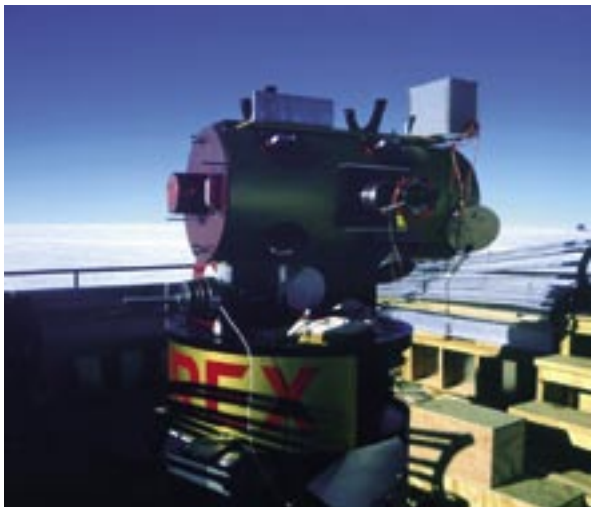

Abb. 9: Die Sternentstehungsregion NGC 6334, aufgenommen mit SPIREX bei einer Wellenlänge von 3.3 Mikrometern. (Bild: Michael Burton)

■ **Infrarotastronomie.** Das 60-cm-Teleskop SPIREX (South Pole Infrared Explorer) der University of New South Wales in Sydney (Australien) wurde zwischen 1994 und 1999 am Südpol betrieben (Abb. 8). Im Laufe der Zeit kamen zwei unterschiedliche Kameras zum Einsatz. SPIREX war 1994 das einzige Teleskop, mit dem alle Einschläge der Bruchstücke des Kometen Shoemaker-Levy 9 auf den Jupiter beobachtet werden konnten. Das wichtigste Ergebnis von SPIREX war der Nachweis ausgedehnter Schalen so genannter PAKs (polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe) in den Umgebungen galaktischer Sternentstehungsgebiete sowie die Entdeckung heißen Staubes in den Scheiben um junge Sterne (Abb. 9). Mit diesen Beobachtungen demonstrierte SPIREX, dass die zuvor nur berechnete Empfindlichkeit von Infrarot-Teleskopen in der Antarktis tatsächlich erreicht werden kann. Aufgrund der Konkurrenz durch Teleskope der 8-Meter-Klasse und des recht schlechten Seeings am Südpol ist die Entwicklung der Infrarotastronomie in der Antarktis ins Stocken geraten. Die Entwicklung der Station Concordia am Dom C könnte diese Situation ändern. Eine Gruppe um Gino Tosti von der Universität Perugia (Italien) plant bereits für 2005, dort ein 80-cm-Teleskop für Beobachtungen im nahen Infrarot zu installieren. Bewährt sich dieses Projekt, dann ist die Entwicklung eines 2-Meter-Teleskops für diesen Standort vermutlich nur eine Frage der Zeit.

■ **Hochenergie-Astrophysik.** Untersuchungen der energiereichen Kosmischen Strahlung werden in der Antarktis vor allem an den Stationen Mawson und McMurdo sowie am Südpol durchgeführt. Dort werden Detektoren für den Nachweis der Kosmischen Strahlung, Neutronendetektoren und Myonenteleskope betrieben. Die wichtigste Entwicklung am Südpol-Observatorium ist ein Experiment zur Suche nach den Quellen der kosmischen Neutrinos: AMANDA (Antarctic Muon And Neutrino Detector Array). Dieses riesige Instrument besteht aus einer Vielzahl empfindlicher Lichtsensoren, so genannter Photomultiplier (»Photovervielfacher«), die in Löchern im Eispanzer versenkt werden und in Tiefen zwischen mehreren Hundert Metern und drei Kilometern einfrieren. Damit soll die Cerenkov-Strahlung nachgewiesen werden, die bei der Wechselwirkung von kosmischen Neutrinos mit den Kernen von Atomen, die das Eis und den Felsuntergrund bilden, entsteht (siehe S. 27). Weitere Entwicklungen der antarktischen Hochenergie-Astrophysik sind RICE und ANITA. Beide Experimente wurden für den Nachweis der Radiostrahlung entwickelt, die bei der Wechselwirkung der energiereichen Kosmischen Strahlung mit Atomkernen frei wird.

In der Antarktis forschen

Erfolg oder Scheitern bei der Forschung in der Antarktis hängen vor allem von der Logistik ab. Ohne die schwierige Realisierung einer funktionierenden Infrastruktur und Versorgungsmöglichkeiten ist dort keine Spitzenforschung möglich. Mag sein, dass es Abenteurern noch heute gelingt, im Alleingang nie zuvor beschrittene Routen über das Transantarktische Gebirge zu beschreiten. Dennoch gehört das Zeitalter der Helden in der Antarktis zur Vergangenheit. Natürlich haben die Expeditionen von Scott, Amundsen, Shackleton und Mawson eine ganze Generation von Forschern inspiriert, und tun dies bis heute. Als Orientierung für die eigene Arbeit können sie jedoch nicht mehr gelten. Wer den Himmel über der Antarktis erforschen will, muss sich auf die Unterstützung durch andere verlassen können, die für Transport, Unterkunft und Verpflegung sorgen. Die Herausforderung der Himmelsforscher liegt anderswo, und zwar darin, komplizierte Geräte an einem Ort zum Laufen zu bringen, an dem völlig andere Bedingungen vorherrschen als im heimatlichen Labor.

Das Leben in einer modernen Forschungsstation ist zwar kein Luxus, doch es ist auch nicht gerade unerträglich. Wie in einer Jugendherberge muss man sich das Zimmer teilen, man darf nur ein- oder zweimal pro Woche jeweils zwei Minuten lang duschen und plagt sich mit der Ge-

Klarer Blick zum kosmischen Hintergrund

Für Beobachtungen der Kosmischen Hintergrundstrahlung bietet die Antarktis die besten Beobachtungsbedingungen auf der Erde. Der Südpol liegt fast drei Kilometer über dem Meeresspiegel, die Atmosphäre darüber ist stabil und äußerst trocken. Und während anderswo in der Antarktis Stürme wüten, weht auf dem Hochplateau nur ein laues Lüftchen. Das allein sind schon gute Voraussetzungen für die empfindlichen Messungen. Doch man muss nicht einmal einen festen Boden unter den Füßen haben. Im Gegenteil: Für Himmelsbeobachtungen mit Ballonexperimenten gibt es in der Südpolarregion ein weiteres Schmankerl. Es gibt dort Windsysteme, die rund um den Pol verlaufen. Anstatt einem Ballon nach dem Start hinterher zu reisen, kann man in der Antarktis einfach abwarten, bis der Ballon wieder am selben Ort vorbeikommt.

Boomerang misst das Leistungsspektrum

Perfektioniert wurde dies von Boomerang (Balloon Observations of Millimetric Extragalactic Radiation and Geophysics), einem gemeinsamen Projekt von Universitäten und Forschungsinstituten in Kanada, Italien, Frankreich, Großbritannien und den USA. Boomerang war zweimal in der Antarktis unterwegs, zuletzt bei einem 15-tägigen Flug im Januar 2003 (siehe Abb. 1–4). Beim ersten Flug von Boomerang zur Jahreswende 1998/99 landete die Ballongondel in einer Entfernung von gerade einmal 50 km zum Startpunkt.

Diesem Flug folgte eine gründliche Auswertung der Messdaten. Der Aufwand lohnte sich. Im April 2000 veröffentlichte die Kollaboration ihre ersten Ergebnisse. Im Leistungsspektrum der Hintergrundstrahlung waren deutlich zwei sanfte Scheitelpunkte zu erkennen. Bei solchen Spektren wird die durchschnittliche Stärke der Temperaturdifferenz zweier Richtungen am Himmel in Abhängigkeit des Winkels zwischen den beiden Richtungen aufgetragen. Dabei wird jede Richtung am Himmel mit jeder anderen Richtung verglichen. Die Form des Leistungsspektrums hängt empfindlich von kosmologischen Parametern ab, unter anderem der Geometrie des Universums. Auf eindrucksvolle Weise bestätigte das von Boomerang gemessene Leistungsspektrum das gegenwärtige »Standardmodell« der Kosmologie (siehe SuW 11/2004, S. 24).

Dasi und die Polarisation

Während Boomerang rund um den Pol schwebte, schlief die Konkurrenz am Boden keineswegs. Am Südpol hatten es die Forscher des Experiments Dasi (Degree Angular Scale Interferometer) nicht nur auf die Temperaturschwankungen der Hintergrundstrahlung abgesehen (Abb. 5). Sie wollten zusätzlich die Polarisation des Mikrowellenlichts messen. Theoretisch erwartete man, dass die Amplitude der Polarisationsschwankungen nur ein Zehntel der Amplitude der Temperaturschwankungen beträgt. Um diesen kleinen Effekt zu messen, wurde das Experiment Dasi als Interferometer konstruiert. Damit wird die Differenz der Signale von jeweils zwei Detektoren berechnet. Das ermöglicht eine sehr elegante Messung. Zum einen unterdrückt die Bildung der Differenz das störende instrumentelle Rauschen, andererseits können die so genannten E– und B–Moden der Polarisation, welche die Theoretiker vorhersagen können, sehr direkt bestimmt werden. Und die Arbeit der Forscher im ewigen Eis sollte sich lohnen. Tatsächlich konnte mit Dasi erstmals die Polarisation der Kosmischen Hintergrundstrahlung nachgewiesen werden – genau wie vom kosmologischen Standardmodell vorhergesagt (siehe SuW 5/2003, S. 26). Ein erneuter Flug von Boomerang im Januar 2003 galt ebenfalls dem Nachweis der Polarisation. Die Daten werden zur Zeit ausgewertet.

Durch die Arbeit von Boomerang, Dasi und anderen Experimenten entwickelte sich so ein Bild des Kosmos und dessen Zusammensetzung. Im Februar 2003, zwei Jahre nachdem die ersten Ergebnisse von Boomerang veröffentlicht wurden, trat die Erforschung der Hintergrundstrahlung in eine neue Ära ein. Der Satellit Wmap lieferte Daten der Mikrowellenstrahlung in bislang unerreichter Genauigkeit (siehe SuW 11/2004, S. 24). Doch während Wmap damit das Zeitalter der Präzisionskosmologie eröffnete, hatten sich Boomerang und

▲ Abb. 1: Vorbereitungen für den Start von Boomerang am 6. Januar 2003 in der Nähe der US-amerikanischen Station McMurdo. Links ist die Gondel mit dem Teleskop zu sehen, rechts wird der Ballon mit Helium gefüllt. (Bilder: Boomerang Kollaboration)

▲ Abb. 2: Die Gondel mit den Messgeräten von Boomerang.

▼ Abb. 3: Start von Boomerang.

Abb. 4: Am 21. Januar 2003 stürzte die Gondel nach einem 15-tägigen Flug über der Antarktis in der Nähe von Dom Fuji ab.

DASI den Ruhm, Pionierarbeit geleistet zu haben, redlich verdient. Das Zeitalter der Experimente am Südpol ist dennoch nicht zu Ende. Bei Messungen mit sehr hoher Auflösung kann man WMAP noch ein Schnippchen schlagen, wobei der so genannte Sunyaev-Zeldovich-Effekt im Mittelpunkt steht. Außerdem können am Südpol Komponenten getestet werden, die im Jahr 2007 bei der europäischen Satellitenmission PLANCK zum Einsatz kommen. Ein viel versprechendes Experiment ist beispielsweise QUAD (Quest at DASI), welches die Infrastruktur von DASI übernimmt und die Detektoren von PLANCK verwendet.

So kalt der Pol auch sein mag, die Jäger des Kosmischen Hintergrunds zieht er auch weiterhin an. MICHAEL DORAN

Abb. 5: Das Radio-Interferometer DASI mit einigen der Projekt-Wissenschaftler. (Bild: DASI-Kollaboration)

wöhnung an das ungewohnte Klima herum, vor allem wegen der trockenen Luft und der großen Höhe. Auch das kontinuierliche Tageslicht im Südsommer bereitet dem einen oder anderen Forscher Schwierigkeiten. Sich für jeden Gang vor die Tür fünf Minuten lang anzuziehen kann einem außerdem auf die Nerven gehen. Da kann man schon einmal vom unkomplizierten Leben zu Hause träumen! Doch das war dann auch schon alles. Denn wer in einer modernen Forschungsstation arbeitet, muss sich nicht darum kümmern, sein Essen selbst zu kochen, Lebensmittel einzukaufen oder nach der Arbeit den Zug nach Hause zu erwischen. Es gibt andere, die für die Grundbedürfnisse des täglichen Lebens sorgen.

Doch trotz moderner Bequemlichkeit bringt das Leben in der Antarktis reale Gefahren mit sich. Alle Nationen, die dort Forschungsprojekte durchführen, müssen Einrichtungen schaffen, die sicher und zweckmäßig sind. So kommen auf jeden Wissenschaftler vier oder fünf Mitarbeiter in der Logistik: Köche, Installateure, Mechaniker, Funktechniker, Ärzte und Computerexperten – von Managern und Verwaltung einmal ganz abgesehen! Wer diesen Aufwand scheut, ist nicht in der Antarktis, um Wissenschaft zu betreiben.

Wissenschaftler in der Antarktis können sich meist ganz auf ihre Forschungen konzentrieren. Das bedeutet jedoch nicht, dass es keine Schwierigkeiten gibt. Im Südsommer sind die meisten Forschungsstationen überfüllt und der Arbeitsraum für die einzelnen Wissenschaftler ist begrenzt. Zeitpläne regeln die Belegung von Laboren. Man muss schon genau planen, wie man ein Experiment durchführt, denn die Verfügbarkeit der Logistik oder die letzte Rückflugmöglichkeit im Flugzeug vor dem Beginn des Antarktischen Winters können unerwartete Probleme aufwerfen.

In der Antarktis zu überwintern ist eine Sache, in die man sich kaum hineinversetzen kann, wenn man es nicht selbst erlebt hat. Ich habe das nicht ausprobiert. Die sechs Monate ohne Sonnenlicht am Südpol können ziemlich lang werden, auch wenn es nicht die gesamte Zeit völlig dunkel ist. Die Dämmerung dauert einen Monat und wenn der Mond am Himmel steht, kann man schon einiges in der Landschaft erkennen. Es ist eher die Kälte, die den Forschern das Leben zur Qual machen kann. Sich über acht Monate mit den wenigen anderen Mitarbeitern einer Station auf engem Raum aufzuhalten, kann zu intensiven Freundschaften führen – oder zu persönlichen Konflikten. Viele fangen an, die Tage zu zählen, die bis zur Rückkehr noch zu überstehen sind. Wenigstens sorgt die moderne Kommunikationstechnik für ein paar Erleichterungen. Man kann im Internet surfen, E-mails schreiben und über eine Webcam Familie und Freunde mit aktuellen Bildern auf dem Laufenden halten. Dennoch hat man das Schwierigste noch vor sich, denn den meisten Überwinterern fällt die Eingewöhnung an ihre Heimatumgebung schwerer als der Aufenthalt in der Antarktis.

Zum Schluss sei bemerkt, dass es für einzelne Forscher gar nicht so teuer sein muss, in der Antarktis eigene Forschungsprogramme durchzuführen. Sie können meist auf die von ihren Heimatländern entwickelte Infrastruktur zurückgreifen, deren Finanzhaushalt bereits als Gesamtpaket zuvor genehmigt wurde. Es geht einem dabei wie Benutzern des Weltraumteleskops HUBBLE, die sich nicht an den Start- und Betriebskosten des Satelliten beteiligen müssen. □

(Deutsche Bearbeitung: Götz Hoeppe)

Michael Burton ist Astronom an der University of New South Wales in Sydney. Neben Arbeiten über Sternentstehung hat er sich im vergangenen Jahrzehnt der Entwicklung der Astronomie in der Antarktis gewidmet. Er ist Vorsitzender der Arbeitsgruppe »Antarktische Astronomie« der Internationalen Astronomischen Union (IAU).

Antarktische Astronomie im Internet

Auf mehreren Seiten im Internet finden sich interessante Informationen zu den im Artikel erwähnten Projekten:

JACARA, das Joint Australian Centre for Astrophysical Research in Antarctica in Sydney (Australien): **http://www.phys.unsw.edu.au/jacara/**

CARA, das Center for Astrophysical Research in Antarctica an der University of Chicago (USA): **http://astro.uchicago.edu/cara/**

Die **BOOMERANG**-Kollaboration: **http://cmb.phys.cwru.edu/boomerang/**

Und schließlich **DASI**: **http://astro.uchicago.edu/dasi/**