Deutsches SOFIA-Institut gegründet

Am 27. Januar wurde im Haus der Wirtschaft in Stuttgart die Gründung des Deutschen SOFIA-Instituts feierlich begangen. SOFIA, das »Stratosphären-Observatorium für Infrarot-Astronomie«, ist eine fliegende Sternwarte, die von NASA und DLR gemeinsam gebaut wurde.

Das Deutsche SOFIA-Institut befindet sich an der Universität Stuttgart und dient dem Betrieb der fliegenden Sternwarte. Es wird 15 Mitarbeiter an die Heimatbasis von SOFIA, das *Ames Research Center* in Kalifornien, entsenden und koordiniert die Beiträge deutscher Forscher an diesem Projekt. Es ist für den Betrieb wissenschaftlicher Instrumente verantwortlich, übernimmt aber auch die Versorgung des Flugzeugs mit Ersatztriebwerken.

Die Flugzeugsternwarte SOFIA weist eine lange Vorgeschichte auf, welche bis in die sechziger Jahre zurückreicht. Schon in dieser Zeit war in den USA und auch in Deutschland erkannt worden, dass die Beobachtung des Weltalls im infraroten Wellenlängenbereich große Vorteile bieten müsste. Im Infraroten lässt sich das »kalte Weltall« beobachten, zum Beispiel Gas- und Staubnebel, Planeten und Monde im äußeren Sonnensystem oder intergalaktische Materieansammlungen.

Allerdings lässt sich Infrarotastronomie vom Erdboden aus nur sehr eingeschränkt betreiben, da der immer vorhandene Anteil an Wasserdampf in der Atmosphäre infrarote Strahlung nur innerhalb sehr schmaler Frequenzbereiche passieren lässt. Daher begann man schon in den frühen siebziger Jahren damit, ballongetragene Teleskope in die Hochatmosphäre zu schicken, um einen Blick ins infrarote All zu erhaschen. Ab einer Höhe von etwa 13 bis 14 Kilometern befinden sich mehr als 99 Prozent des atmosphärischen Wassers unterhalb des Beobachters, so dass die filternde Wirkung der Atmosphäre stark abnimmt.

Ab dieser Höhe lassen sich etwa 80 Prozent der ankommenden Infrarotstrahlung beobachten, bessere Bedingungen herrschen nur noch in der Umlaufbahn. Allerdings lassen sich ballongetragene Teleskope nicht allzu oft einsetzen, und auch die Größe des mitgeführten Teleskops ist eingeschränkt.

Fliegende Observatorien

Von 1974 bis 1996 betrieb die US-Raumfahrtbehörde NASA das *Kuiper Airborne Observatory* KAO, welches über ein 91-cm-Spiegelteleskop verfügte und hauptsächlich für Spektraluntersuchungen eingesetzt wurde. Die wohl berühmteste Entdeckung des KAO war der Nachweis der Ringe des Uranus im Jahre 1977. Eine Flugzeugsternwarte bietet den Vorteil, das man sein Teleskop jederzeit an die Orte der Erde bringen kann, von denen sich interessante Himmelsereignisse optimal beobachten lassen. Man ist also nicht darauf angewiesen, dass sich eine Sternwarte dort befindet. So lassen sich zum Beispiel Sternbedeckungen durch Objekte des Kuipergürtels beobachten, die über den Ozeanen stattfinden.

1982 wurde damit begonnen, einen Nachfolger für das KAO zu konzipieren, der ein deutlich größeres Teleskop erhalten sollte. In den ersten Konzepten wurde ein 3-m-Teleskop vorgesehen, so dass als Flugzeug damals nur eine Boeing 747, der berühmte »Jumbo-Jet« in Frage kam. Von Anfang an war Deutschland, welches sich in der Infrarotastronomie einen Namen gemacht hatte, an den Planungen beteiligt. Ursprünglich sollte SOFIA bereits im

Die Flugzeugsternwarte SOFIA auf Einsatzflughöhe mit geöffnetem Teleskopraum (Computergraphik). (Bild: NASA)

Blick in den Teleskopraum von SOFIA. Gut erkennbar der noch nicht mit Aluminium beschichtete Hauptspiegel mit 2.7 m Durchmesser. (Bild: NASA)

Eric Becklin, der zukünftige wissenschaftliche Direktor von SOFIA, erläutert die Vorzüge des Projekts. (Bild: Stefan Seip)

Jahre 1993 abheben, um gemeinsam mit dem europäischen Infrarotsatelliten ISO koordinierte Beobachtungen durchzuführen. Allerdings kam es immer wieder zu Verzögerungen und das Projekt stand mehrmals kurz vor dem Aus.

Schließlich begann die eigentliche Entwicklung von SOFIA im Jahre 1996, als die NASA und die Bundesrepublik Deutschland einen Vertrag zur Entwicklung, Bau und Betrieb der Flugzeugsternwarte abschlossen. Auf Deutschland entfielen dabei 20 Prozent der Gesamtkosten. Aufgrund des in Deutschland vorhandenen Know-hows in der Infrarottechnik konnte man sich den Bau des Herzstücks der Sternwarte sichern, das Teleskop mitsamt der Montierung. Der Hauptspiegeldurchmesser wurde auf 2.7 Meter festgelegt, von denen 2.5 Meter nutzbar sein sollten. Die Planung des Teleskops und seiner Montierung wurde bei der MAN-Technologie in Augsburg durchgeführt. Die Teleskop-Optik wurde von Kayser-Threde entwickelt. Als Trägerflugzeug erwarb die NASA im Januar 1997 eine gebrauchte Boeing 747 SP, Baujahr 1977, die zuvor als Passagierflugzeug der Fluglinien PanAm und der United Airlines gedient hatte.

Um das Teleskop in das Flugzeug einzubauen, wurde im hinteren Teil des Passagierraums eine Öffnung in den Rumpf geschnitten und ein Druckschott eingebaut, welches das Teleskop und seine Montierung trägt. Nur das Teleskop selbst wird den Atmosphärenbedingungen in 13 bis 14 Kilometern Höhe ausgesetzt werden, die Instrumente befinden sich in der Flugzeugkabine und sind während des Flugs direkt zugänglich. So können die beteiligten Forscher und Techniker jederzeit beim Betrieb eingreifen. Nach den Plänen von 1996 sollte SOFIA schon Anfang 2001 erste Flüge durchführen. Nach vielerlei Verzögerungen ist es nun im Frühjahr dieses Jahres so weit, alle Integrationsarbeiten sind abgeschlossen.

First Light für SOFIA

Im April dieses Jahres soll der erste Testflug mit dem Teleskop an Bord durchgeführt werden, allerdings bleibt hierbei die Schutztür über dem Teleskopraum geschlossen. Im Herbst wird dann »*First light*« sein. Mit dem Beginn des Routinebetriebs ist aber nicht vor Ende 2006 zu rechnen. Die Einsatzbasis für die meisten Flüge wird das Ames Research Center sein. Allerdings wird SOFIA mindestens einmal im Jahr nach Deutschland fliegen und von dort aus zu Beobachtungsflügen starten.

Als Heimatbasis für diese Flüge wird der Flughafen Stuttgart dienen. SOFIA soll für 20 Jahre im Einsatz bleiben. Für den Anfang stehen dem Beobachter neun verschiedene Instrumente zur Verfügung, davon wurden zwei Geräte (GREAT und FIFI LS) an den Max-Planck-Instituten für Radioastronomie (Bonn) und für Extraterrestrische Physik (Garching) entwickelt. Wie bei erdgebundenen Teleskopen lassen sich aber jederzeit neue Instrumente auch bei SOFIA anbringen, so dass man stets auf dem neuesten Stand der Beobachtungstechnik sein kann.

Besonderer Wert wird bei SOFIA auf Bildungsangebote für Studenten und Schüler gelegt. Da SOFIA über eine Passagierzulassung verfügt, ist daran gedacht, interessierte Schüler und Studenten, aber auch Medienvertreter zu Mitflügen bei Beobachtungsprogrammen einzuladen. Die Bildungsangebote sind zur Zeit aber noch im Aufbau. Informationen finden sich unter www.dlr.de/sofia.

TILMANN ALTHAUS

Physikschule »Extrasolare Planetensysteme« der Wilhelm und Else Heraeus-Stiftung

Physikzentrum Bad Honnef, 17.–21. Oktober 2005

Der Kurs gibt einen umfassenden Überblick über den gegenwärtigen Stand der Forschung auf dem Gebiet Extrasolarer Planeten und Planetensysteme. Neben einer historischen Einführung werden Fragen zur Suche nach extrasolaren Planeten, zu ihrer Entstehung in protostellaren Scheiben und zum Sonnensystem behandelt. Die Veranstaltung wendet sich in erster Linie an Studenten und Doktoranden der Physik. Die Zahl der Teilnehmer ist auf 50 bis 60 begrenzt.

Bewerbungen sind bis zum **15. Juni 2005** einzusenden. Das Online-Bewerbungsformular sowie weitere Informationen finden sich unter **http://www.mpia.de/EXTRA2005**.

Organisation/Kontakt: Thomas Henning (MPI für Astronomie), Wilhelm Kley (Universität Tübingen), Joachim Wambsganss (Astronomisches Recheninstitut und Universität Heidelberg), Sebastian Wolf (MPI für Astronomie). E-mail: swolf@mpia.de.

In der Nacht vom 30. auf den 31. Oktober 2003 waren in Mitteleuropa prächtige Polarlichter zu sehen. Dieses Bild zeigt die Polarlichter in Richtung des Großen Wagens, gesehen von Meggenhofen in Oberösterreich aus. (Bild: Stefan Felber)

Radiowellen lassen Polarlichter funkeln

In Alaska ist es gelungen, mit einem starken Radiosender für das bloße Auge sichtbare Flecken im Bereich eines Nordlichts zu erzeugen. Neben neuen Erklärungsansätzen für die Beschleunigung von Elektronen in den Polarlichtern könnte es auch technische Anwendungen geben.

In manchen Kulturen des hohen Nordens werden sie als tanzende Engel beschrieben: Polarlichter. Angesichts der Tiefe der Polarnacht, wo die Dunkelheit lange Zeit vorherrscht, und der erstaunlichen Farben und Formen der Lichter mag man eine derartige Interpretation verstehen. Doch die Wissenschaft klärt uns auf, dass es sich bei den Polarlichtern um von der Sonne ausgelöste Ereignisse handelt. Bei großer Sonnenaktivität schleudert unser Zentralgestirn große Mengen an geladenen Teilchen ins Weltall. Je nach Geschwindigkeit und Richtung des Massenauswurfs kann eine solche Wolke nach mehreren Tagen die Erde erreichen. Hier wird ein Großteil der Teilchen vom Magnetfeld der Erde abgelenkt.

Nahe den Polen, wo die magnetischen Feldlinien in Richtung der Erdoberfläche weisen, können sich die Teilchen entlang dieser Linien ihren Weg zur Erde bahnen und sorgen für das phantastische Schauspiel der Polarlichter. Sie leuchten meist in grün oder rot, verursacht durch die Emission von Sauerstoffatomen im sichtbaren Bereich mit einer Wellenlänge von 558 und 630 Nanometer. Stickstoffmoleküle emittieren überwiegend blaues und violettes Licht. Angeregt werden sie in der Ionosphäre, die in etwa 50 Kilometern Höhe über dem Erdboden beginnt. In der Ionosphäre gibt es elektrisch leitende Schichten, die unter anderem die Ausbreitung elektromagnetischer Wellen mit nicht zu kurzen Wellenlängen ermöglichen.

Leuchten auf Knopfdruck

Todd Pedersen vom Air Force Forschungslabor in Hanscom (Massachusetts) und Elizabeth Gerken von der Cornell Universität in Ithaca (New York) haben den Schauplatz eines Polarlichts genutzt, um das Zusammenspiel elektromagnetischer Wellen und ionisierender Teilchen in einem Plasma zu untersuchen (Nature **433**, 498 [2005]). Das auch als vierter Aggregatzustand der Materie bezeichnete Plasma ist definiert als Ansammlung ionisierter Teilchen.

Die beiden US-amerikanischen Forscher haben in Gakona (Alaska) einen 960-Kilowatt-Radiosender des *High Frequency Active Auroral Research Program* (HAARP) verwendet. Er ist doppelt so stark wie der stärkste Sender der englischen BBC. Am 10. März 2004 gelang es ihnen, mit diesem Sender in einem Nordlicht am Nachthimmel Flecken zu erzeugen, die mit bloßem Auge sichtbar waren. Alles spielte sich innerhalb weniger Minuten ab. Der Radiosender wurde abwechselnd an- und ausgeschaltet. Die Forscher konnten die Flecken eindeutig den Fenstern mit angeschaltetem Sender zuordnen.

Pedersen und Gerken waren von der Helligkeit der künstlichen Flecke überrascht. Frühere Versuche anderer Gruppen hatten immer hochempfindliche Messgeräte zum Nachweis der Leuchterscheinungen benötigt und waren weit davon entfernt, mit bloßem Auge Flecken beobachten zu können. Im Gegensatz zu ihren Vorgängern suchten sich Pedersen und Gerken für ihre Studie eine Nacht mit Polarlicht aus. Sie befassten sich nicht mit der weit entfernten ionosphärischen F-Schicht, 300 bis 400 Kilometer über dem Erdboden, sondern mit der deutlich näheren E-Schicht, die sich in einer Höhe von nur etwa 100 Kilometern befindet. Durch die viel kleinere Entfernung zum Sender am Boden konnte eine wesentlich größere Helligkeit erzielt werden.

Technische Anwendungen?

Pat Newell von der Johns Hopkins Universität in Laurel (Maryland, USA), der sich selbst mit Polarlichtern beschäftigt, ist begeistert von den Ergebnissen seiner Kollegen. Bisher hat man den Leuchtmechanismus der Polarlichter nicht umfassend verstanden. Sicherlich führen Variationen in den elektrischen Feldern der polaren Atmosphäre dazu, die Elektronen zu beschleunigen, welche dann mit Sauerstoff- und Stickstoffmolekülen der dünnen Luft kollidieren. So wird das bekannte grüne und rote Glühen hervorgerufen. Doch wie werden die Elektronen beschleunigt? Dafür gibt es zwei Erklärungsansätze. Einerseits könnte es sich um ein konstantes elektrisches Feld zweier Atmosphärenlagen handeln, welche wie die Pole eines Kondensators wirken. Andererseits könnten Wellen im elektrischen Feld der Ionosphäre die Elektronen hin- und herwerfen und ihnen bei jedem Richtungswechsel mehr Energie zuführen.

Die Ergebnisse von Pedersen und Gerken sprechen für letzteren Mechanismus: Denn mit ihrem Radiosender haben sie selbst eine solche Welle erzeugt und damit eine dem Polarlicht ähnliche Leuchterscheinung hervorgerufen. Das Resultat beruht jedoch nur auf wenigen Minuten einer einzigen Nacht. Sollten sie sich bestätigen, so wären starke Radiosender nützliche Werkzeuge für die Atmosphärenphysik. Und nicht nur die Forscher wären begeistert: Visionäre sehen bereits die Möglichkeit, diesen Effekt in der Straßenbeleuchtung einzusetzen!

KATJA EBERLE

Anzeige

Spektrum
DER WISSENSCHAFT

Wissen aus erster Hand

JETZT ABONNIEREN

Ihr Preisvorteil: Als Abonnent erhalten Sie STERNE UND WELTRAUM für nur € 81,60 im Jahr. Schüler, Azubis, Studenten sowie Wehr- und Zivildienstleistende zahlen auf Nachweis nur € 60,–.

Zusätzlich können Sie als Abonnent kostenlose Kleinanzeigen von bis zu fünf Zeilen in STERNE UND WELTRAUM schalten.

Als Dankeschön können Sie zwischen zwei Präsenten wählen: dem T-Shirt »Sonnen-Protuberanzen« (Größe XL, 100 % Baumwolle) oder dem Buch »Gravitation«.

www.suw-online.de

☐ **Ja,** ich möchte STERNE UND WELTRAUM gegen Rechnung im Abonnement (zwölf Ausgaben/Jahr) für € 81,60 inkl. Versand Inland (ermäßigter Preis auf Nachweis € 60,–) beziehen. Ich kann mein Abonnement jederzeit beenden, zu viel bezahltes Geld erhalte ich zurück. Als Dank für meine Bestellung erhalte ich das Buch »Gravitation« gratis.

Widerrufsrecht: Ich habe das Recht, diese Bestellung innerhalb von 10 Tagen schriftlich bei der Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, c/o Zenit Pressevertrieb GmbH, Postfach 81 06 80, D-70523 Stuttgart, zu widerrufen. Zur Fristwahrung genügt die rechtzeitige Absendung.

Beginn des Abonnements ab Ausgabe ___/05
Gewünschtes Präsent (bitte ankreuzen):
☐ Buch » Gravitation« ☐ T-Shirt »Protuberanzen«

Name/Vorname

Straße/Nr.

PLZ/Wohnort

Datum/Unterschrift 5630136

Senden oder faxen an:
Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH
c/o Zenit Pressevertrieb GmbH
Postfach 81 06 80 • D-70523 Stuttgart
Fax 0711 7252-366

Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH | Slevogtstr. 3–5 | D-69126 Heidelberg | Telefon 06221 9126-600 | Telefax 06221 9126-751
www.spektrum.de | Geschäftsführer: Markus Bossle, Thomas Bleck | Amtsgericht Heidelberg | HRB 2766 | Abonnementsverwaltung: Zenit Pressevertrieb GmbH | Julius-Hölder-Str. 47 | D-70597 Stuttgart | Vertretungsberechtigter: Uwe Bronn

Überlebender Begleiter von Tychos Supernova gefunden

Im Sternbild Cassiopeia wurde ein Stern gefunden, der vermutlich ein Mitglied des Doppelsternsystems war, in dem im Jahr 1572 eine Supernova explodierte. Dieses Ereignis wurde unter anderem von Tycho Brahe beobachtet.

Genau betrachtet begann die Suche vor 433 Jahren nicht minder akribisch und ausdauernd als heute, wenngleich mit einfachsten Mitteln: mit dem bloßen Auge und groben Winkelmessgeräten wie dem Jakobsstab. Damals beobachteten Tycho Brahe und andere Astronomen einen »neuen Stern« in der Cassiopeia: zirkumpolar und 18 Monate lang sichtbar, bis er allmählich verblasste. Ein Jahrhundert nach Erfindung des Buchdrucks löste »Tychos Stern« eine Flut von Briefen und Büchern aus, denn sie erschütterte die Jahrhunderte alte Vorstellung von der Unveränderbarkeit des »Fixsternhimmels« gründlich.

Heute nennen wir das Ereignis SN 1572. Es war eine der seltenen Supernovaexplosionen vom Typ Ia in unserem Milchstraßensystem, ein Ereignis, das sich durch eine typische Maximalhelligkeit und einen charakteristischen Helligkeitsabfall auszeichnet. Der Theorie zufolge entsteht eine Supernova vom Typ Ia in einem Doppelsternsystem. Ein weißer Zwerg ist über einen Massenstrom mit seinem Begleiter verbunden und erhält so lange von diesem Materie, bis eine kritische Masse von etwa 1.4 Sonnenmassen erreicht ist: das Chandrasekhar-Limit.

Rätselhafte Begleiter

Weil Supernovae vom Typ Ia weithin sichtbar sind und ihre Maximalhelligkeit bekannt ist, dienen sie als kosmologische Standardkerzen, mit deren Hilfe Entfernungen und somit auch die Expansion des Universums gemessen werden können. Doch was geht dem Explosionsgeschehen voraus? Beobachtungen würden helfen, die bestehenden Modelle zu präzisieren, denn als Begleiter sind verschiedene Sterntypen denkbar. Für den Fall, dass zwei Weiße Zwerge verschmelzen, erwartet man keine Überlebenden. Handelte es sich beim Begleiter hingegen um Hauptreihensterne, Unterriesen oder Rote Riesen, so müssten diese heute noch innerhalb des Supernovaüberrestes existieren und durch eine für ihre Umgebung ungewöhnlich hohe Geschwindigkeit auffallen. Außerdem könnten sie eine verringerte Oberflächenbeschleunigung aufweisen, da sie Masse verloren haben, jedoch ihre Atmosphäre aufgrund der Supernova thermisch aufgeheizt und expandiert sein kann.

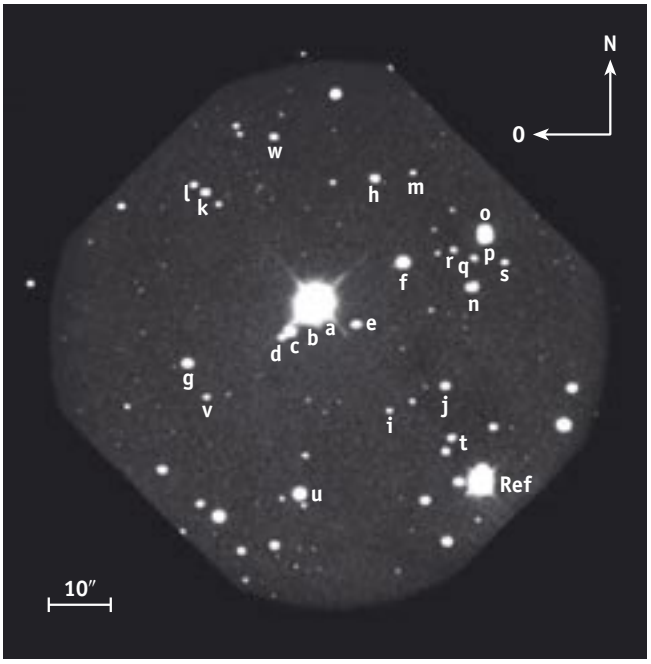
Pilar Ruiz-Lapuente von der Universität Barcelona und ihre Mitarbeiter entschieden sich für die Suche nach dem ehemaligen Begleiter des tychonischen Sterns, denn der Supernovaüberrest befindet sich 190 bis 250 Lichtjahre oberhalb der galaktischen Ebene, in einer Region mit nur wenigen störenden Hintergrundsternen (Nature **431**, 1069 [2004]). Dies sind ideale Fahndungsbedingungen.

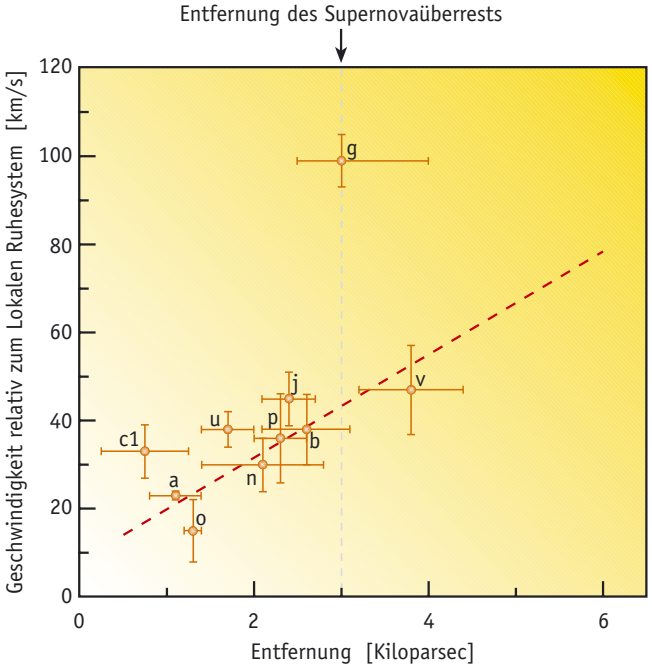
Eingeschränkter Suchradius

Das Röntgen- und Radiostrahlungsgebiet des Supernovaüberrestes befindet sich in einer Entfernung von rund 10000 Lichtjahren. Beide weisen scheinbare Durchmesser von jeweils rund acht Bogensekunden auf, ihre geometrische Mittelpunkte sind jedoch gegeneinander versetzt. Dies ergaben Beobachtungen mit den Röntgensatelliten ROSAT und CHANDRA sowie mit irdischen Radioteleskopen. Mit Hilfe geometrischer Erwägun-

Abb. 1: Die Umgebung des Überrestes der SN 1572, aufgenommen mit dem 4.2-Meter-William-Herschel-Teleskop auf dem Roque de los Muchachos auf La Palma (Kanarische Inseln).

Abb. 2: Abhängigkeit der Radialgeschwindigkeit (in Bezug auf das Lokale Ruhesystem ihrer Umgebung) der in Abb. 1 markierten Sterne von der Entfernung zur Sonne. Der Überrest von SN 1572 befindet sich in einer Entfernung von etwa drei Kiloparsec (etwa 10000 Lichtjahre).





gen konnte das Gebiet für die Suche nach dem Überlebenden der Explosion auf ein Gebiet mit einem Radius von rund 0.5 Bogensekunden um das Radio- beziehungsweise Röntgenzentrum eingeschränkt werden (Abb. 1). Selbst ein fiktiver stellarer »Raser«, der sich seit vier Jahrhunderten mit 300 Kilometern pro Sekunde vom Explosionsort entfernt, würde sich noch heute innerhalb dieser Region befinden.

Mit dem Weltraumteleskop HUBBLE und dem William-Herschel-Teleskop auf La Palma führten die Wissenschaftler wiederholt photometrische und spektroskopische Messungen durch, um Doppelsternsysteme auszuschließen und eine mögliche Variabilität der in Frage kommenden Kandidaten zu prüfen. Zudem wurde die Raumbewegung der Kandidaten ermittelt.

Eines war bald gewiss: Ein Roter Riesenstern hat nicht die Supernova 1572 ausgelöst. Nur ein einziger Roter Riese (von Rui-Lapuente und ihren Kollegen »Tycho A« getauft) befindet sich im Beobachtungsgebiet in der relevanten Entfernung, doch sein Geschwindigkeitsprofil weist keinerlei ungewöhnliche Merkmale auf.

Kandidat Tycho G

Der Stern »Tycho G« vom Spektraltyp G0-G2 erfüllt dagegen die meisten Erwartungen an einen Supernova-Überlebenden. In Hinblick auf die Oberflächentemperatur und Leuchtstärke ist Tycho G sonnenähnlich. Er bewegt sich mit einer Geschwindigkeit von 108 ± 6 Kilometern pro Sekunde relativ zum Lokalen Ruhesystem seiner Umgebung. Das ist mehr als dreimal so schnell wie benachbarte Sterne in seiner Umgebung und kann als Hinweis auf den enormen Impuls verstanden werden, den der Stern bei der Explosion erfahren haben muss (siehe Abb. 2).

Die Schwerebeschleunigung an der Oberfläche von Tycho G ist geringer als die von typischen Roten Riesensternen, jedoch größer als die von Hauptreihensternen. Das passt ebenfalls zur These, dass es sich um den Überlebenden der Supernova handelt. Was die Spektroskopiker allerdings bislang nicht feststellen konnten, sind eindeutige Supernovaspuren in der Sternatmosphäre wie etwa eine ungewöhnliche Häufung von Eisen und Nickel. Die chemische Zusammensetzung scheint derjenigen der Sonne zu ähneln. SUSANNE SCHOOFS

Massereiche, entwickelte Galaxien im jungen Universum entdeckt

Zwei Forschergruppen präsentieren Beweise dafür, dass es bereits drei Milliarden Jahre nach dem Urknall massereiche Galaxien mit einer »alten« Sternpopulation gab. Kosmologischen Modellen zufolge sollten derartige Objekte äußerst selten sein.

In den letzten Jahren verfestigte sich immer mehr die Vorstellung, dass sich Galaxien und große Strukturen wie Galaxienhaufen im Universum im Laufe der Zeit durch die Verschmelzung kleinerer Einheiten bildeten. Durch diese hierarchische Strukturbildung entstanden die größten und massereichsten galaktischen Systeme wie Elliptische Galaxien durch die allmähliche Verschmelzung kleinerer, massearmer Galaxien. Deshalb hatte man sie im jungen Universum nicht unbedingt erwartet.

Eine wichtige Frage ist, wann Elliptische Galaxien, die von alten Sternen dominiert werden und in denen kaum oder überhaupt keine Sterne mehr entstehen, dieses Stadium erreicht haben und in welcher Anzahl sie im Universum zu verschiedenen Epochen zu finden sind. Die am weitesten entfernte, bisher gefundene Elliptische Galaxie ist die Radiogalaxie LBDS 53w091 bei einer Rotverschiebung von $z = 1.552$. Ihr Licht stammt aus einer Zeit, als das expandierende Universum nur etwa 40 Prozent seiner heutigen Größe hatte. Alle bekannten, noch weiter entfernten Galaxien sind Systeme mit intensiver Sternentstehung. Diese wurden bei Rotverschiebungen von bis zu $z \sim 6$ nachgewiesen.

Das Licht dieser Objekte stammt aus einer Zeit, als das Universum erst etwa ein Siebtel seiner heutigen Größe hatte. Dass bisher noch keine alten, massereichen Systeme bei Rotverschiebungen von größer als $z = 1.5$ gefunden wurden, könnte technische Gründe haben. Aufgrund ihrer großen Entfernung zu uns sind sie im sichtbaren Spektralbereich sehr lichtschwach.

Darüber hinaus weisen derartige Objekte im optischen Beobachtungsfenster keine auffälligen spektralen Charakteristika wie Emissionslinien auf, mit denen man ihre Entfernung abschätzen kann. Der Rotverschiebungsbereich von $z = 1.3$ bis $z = 2.5$ ist deshalb auch als sogenannte »Rotverschiebungswüste« bekannt. Dieser Bereich entspricht einem Alter des Universums von etwa einem Viertel des jetzigen Alters. Damals fanden die meisten Aktivitäten galaktischer Sternentstehung und Massenansammlung statt.

Galaxien in der Wüste

Seit mehreren Jahren führen einige Forscherteams vor allem im Infrarotlicht systematische Himmelsdurchmusterungen durch, um nach alten, massereichen

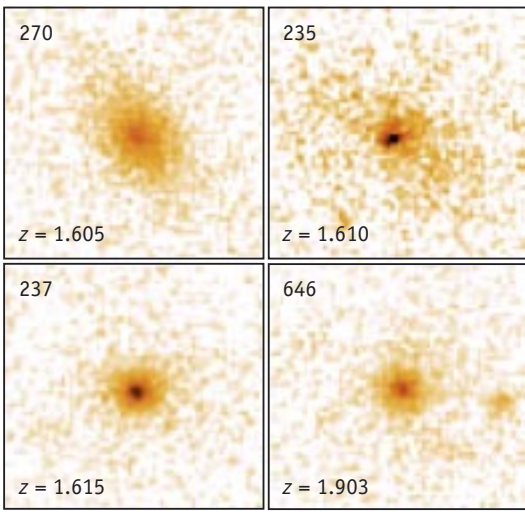


Abb. 1: Mit dem Weltraumteleskop HUBBLE aufgenommene Bilder im nahen Infrarot der vom Team um Andrea Cimatti entdeckten vier alten, massereichen elliptischen Systemen mit Rotverschiebungen zwischen $z = 1.6$ und $z = 1.9$. Der Bildausschnitt beträgt jeweils 2 × 2 Bogensekunden, was einer physikalischen Skala von etwa 17 × 17 Kiloparsec entspricht. Die Morphologie dieser Galaxien ist eher kompakt, wobei der meiste Fluss aus der zentralen Region emittiert wird. (Bild: A. Cimatti et al.)

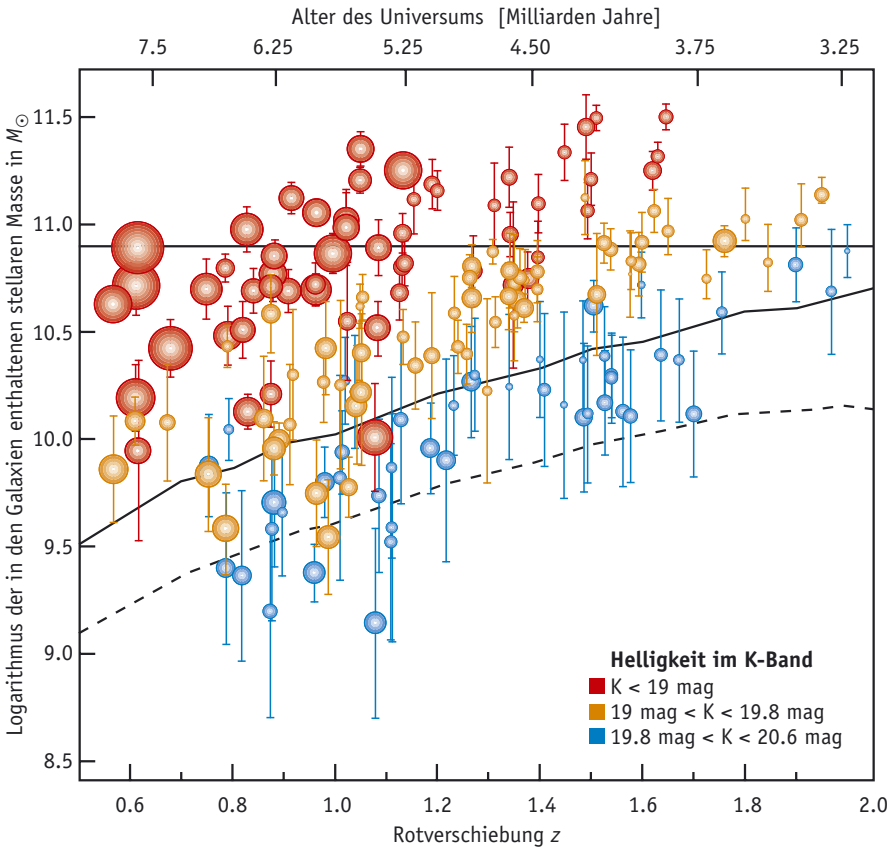


Abb. 2: Die in Sternen enthaltenen Massen und die Rotverschiebung der von Glazebrook und seinen Mitarbeitern beobachteten Galaxien. Die Horizontale gibt die charakteristische Massenskala im lokalen Universum an. Unterhalb der ansteigenden Kurven ist die Stichprobe unvollständig. (Bild: K. Glazebrook et al.)

Galaxien in der Rotverschiebungswüste zu suchen. Für die Auswahl von Kandidaten sind Aufnahmen im infraroten Licht entscheidend. In diesem Wellenlängenbereich wird vor allem das Licht von alten, roten Sternen beobachtet, die hauptsächlich zur Masse Elliptischer Galaxien beitragen. Mit spektroskopischen Beobachtungen der Kandidaten mit 8-Meter-Teleskopen wie dem GEMINI Nord auf dem Mauna Kea in Hawaii und dem *Very Large Telescope* (VLT) auf dem Paranal in Chile kann die eigentliche Identifikation der gesuchten Systeme erfolgen.

Eine Forschergruppe um Andrea Cimatti vom Osservatorio Astrofisico di Arceti (Florenz) führte in den letzten Jahren die Durchmusterung K20 durch und entdeckte dabei erstmalig vier alte, massereiche, elliptische Systeme bei Rotverschiebungen von z = 1.6 bis z = 1.9 (Nature **430**, 184 [2004]). Die eindeutige Identifikation gelang mit Hilfe der optischen Spektroskopie.

Die Spektren wurden am VLT mit dem optischen Kamera- und Spektrographensystem FORS 2 gewonnen. Belichtet wurde zwischen drei und 16 Stunden. Da Elliptische Galaxien in ihrem Spektrum keine Emissionslinien aufweisen, sind derartig lange Belichtungszeiten nötig, um ihre Absorptionslinien nachzuweisen. Dass es sich in der Tat um massereiche und bereits vollständig gebildete galaktische Systeme handelt, wurde durch optische Aufnahmen mit dem Weltraumteleskop HUBBLE bestätigt (Abb. 1).

Diese zeigen eine ähnliche Morphologie und Struktur wie die Elliptischen Galaxien im lokalen Universum ($z \leqslant 0.3$). Das Alter dieser Systeme lässt sich auf 1.0 bis 1.5 Milliarden Jahre schätzen.

Überraschende Häufigkeit

Ein amerikanisch-kanadisches Forscherteam um Karl Glazebrook von der John Hopkins University in Baltimore untersuchte mit Hilfe des *GEMINI Deep Deep Survey* (GDDS) die Häufigkeit alter, massereicher Galaxien im Rotverschiebungsbereich z = 0.8 bis z = 2.0 (Nature **430**, 181 [2004]). Von 150 zuvor ausgewählten Kandidaten schätzten sie durch den Vergleich der Beobachtungen mit simulierten Sternpopulationen die Massen und das Alter der Galaxien ab.

In 90 Prozent der Fälle gelangen spektroskopische Identifizierungen, welche die Rotverschiebung und die Form des Spektrums beinhalten. In diesen Objekten haben sich seit z = 1.8 mindestens zwei Drittel der stellaren Masse gebildet. Allerdings fand das Astronomenteam keine Anzeichen für eine rasche zeitliche Entwicklung dieser massereichen Systeme, sondern dafür, dass vollständig ausgebildete alte, massereiche Galaxien viel häufiger waren als es von theoretischen Modellen und Simulationen vorhergesagt wird (Abb. 3).

Zusammengenommen werfen die Ergebnisse die Frage auf, ob die Effizienz der Sternentstehung in der Frühzeit des Universums größer war als jetzt.

HELMUT DANNERBAUER

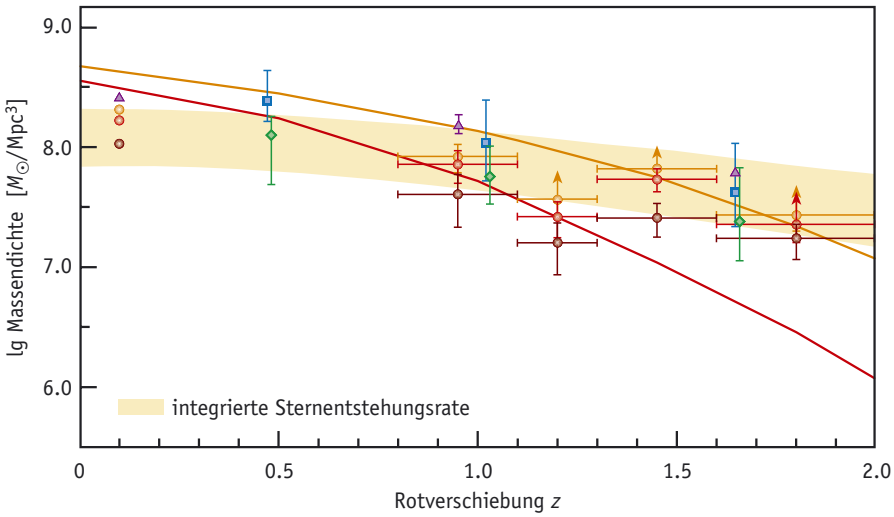
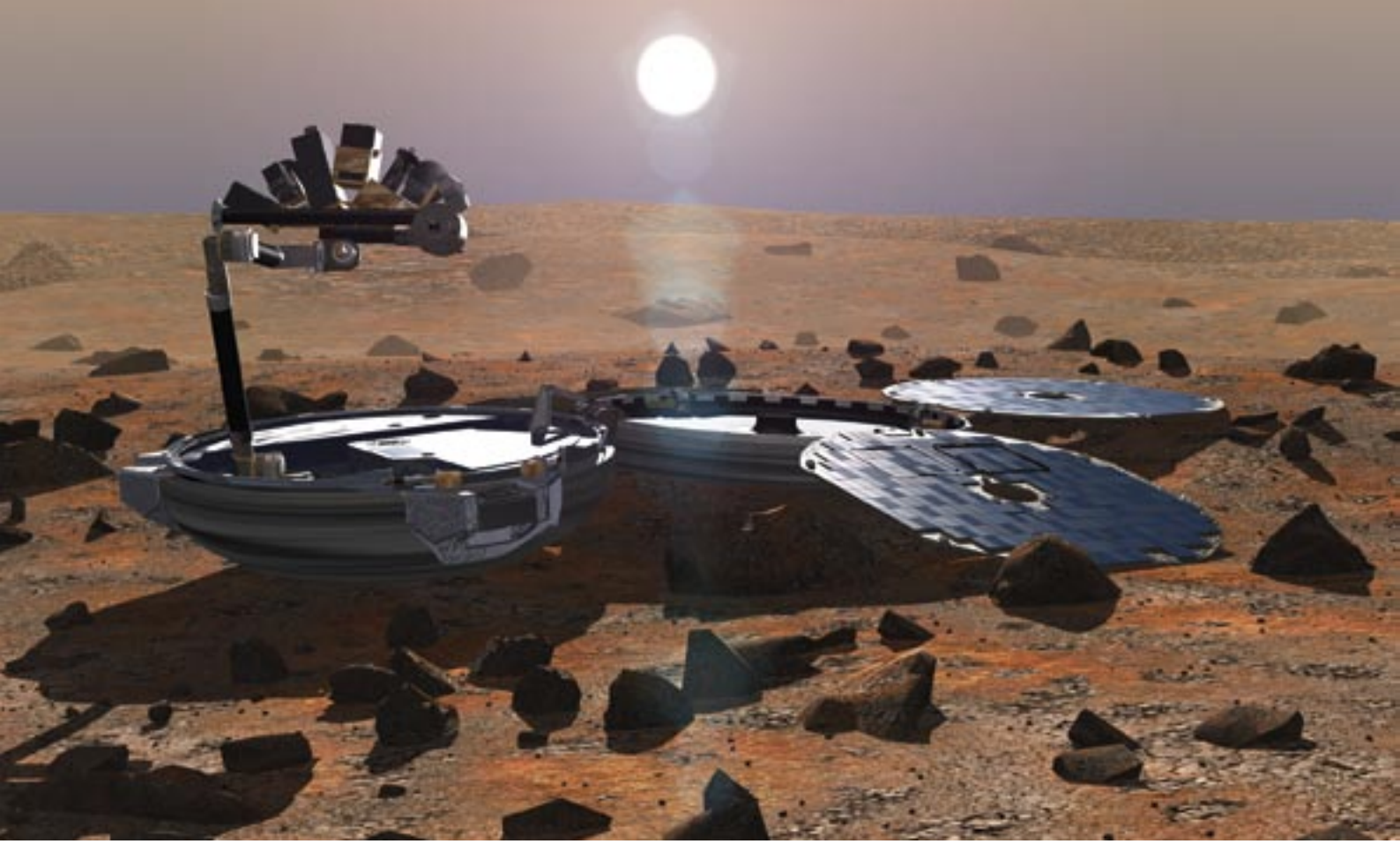


Abb. 3: Zeitliche Entwicklung der Massendichte von Galaxien mit einer Masse größer als ein definierter Schwellenwert. Die Datenpunkte stammen vom GDDS-Team und drei anderen Forschergruppen. Theoretische Vorhersagen sind als Linien dargestellt. Massereiche, vollständig ausgebildete Systeme bei hoher Rotverschiebung sind deutlich häufiger als von den Modellen vorhergesagt. Die zeitliche Entwicklung verlief hingegen weniger rasch als von den Modellen vorhergesagt. (Bild: K. Glazebrook et al.)



Der Beagle-2-Skandal

Anfang Februar veröffentlichte das British National Space Center den bis dahin geheimgehaltenen Abschlussbericht zum Verlust der europäischen Marslandesonde Beagle-2. Dieses 42 Seiten lange Dokument weist schwere Versäumnisse in der Planung und eine dilettantische Durchführung des Projekts nach.

Die kleine europäische Marslandesonde Beagle-2 sollte bekanntlich Weihnachten 2003 in der Region Isidis Planitia auf dem Roten Planeten aufsetzen (siehe SuW 3/2004, S. 22). Beagle-2 war als zusätzliche Nutzlast an Bord der Esa-Raumsonde Mars Express mitgereist, die Weihnachten 2003 in eine Umlaufbahn um den Mars einschwenkte. Am 19. Dezember, also sechs Tage vor Erreichen des Ziels, war Beagle-2 von der Muttersonde abgeworfen worden und sollte sich erst nach der Landung wieder melden. Allerdings hörte man nie wieder von ihr: Die Mission war offensichtlich gescheitert.

Um Licht in das Dunkel zu bringen, setzten die Europäische Weltraumagentur Esa und das *British National Space Center* (BNSC) am 4. Februar 2004 eine mit internationalen Experten besetzte Untersuchungskommission ein, die ihren Bericht am 5. April 2004 vorlegte (siehe SuW 8/2004, S. 12). Damals wurden allerdings nur die Empfehlungen der Untersuchungskommission veröffentlicht, der Bericht selbst sollte geheimgehalten werden. Nachdem er nun doch in Folge eines richterlichen Beschlusses aufgrund des in Großbritannien neu erlassenen Gesetzes »*Freedom of Information Act*« und einer Klage der britischen Wissenschaftszeitschrift »New Scientist« zugänglich wurde (siehe auch www.suw-online.de), kann man durchaus verstehen, warum.

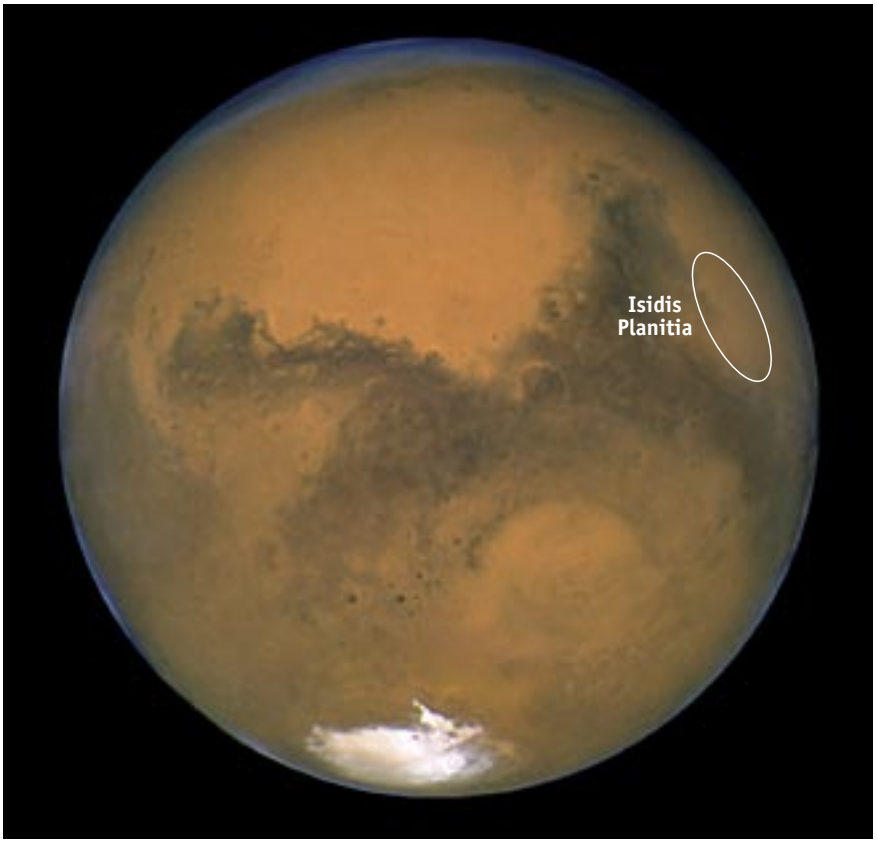
Die Kritikpunkte der Experten

Einer der wichtigsten Kritikpunkte der Kommission ist, dass Beagle-2 wie alle anderen Instrumente an Bord von Mars Express behandelt wurde. Die Verantwortung für die gesamte Planung und Entwicklung des Landers lag allein bei dem Universitätsteam um den Chefwissenschaftler Colin T. Pillinger an der *Open University* in Milton Keynes, England. Dies stellte sich als großer Organisationsfehler heraus, aus dem viele schwerwiegende Probleme hervorgingen. Das Projekt Beagle-2, so die Studie, hätte von Anfang an wie eine eigene komplexe Raumsonde behandelt, und dementsprechend von einer Organisation wie dem BNSC oder der Esa geführt werden müssen.

Katastrophal gering war auch die anfängliche finanzielle Ausstattung des Projekts. Infolgedessen wurde teilweise auf abenteuerliche Weise versucht, durch kommerzielle Aktivitäten Mittel im Internet einzuwerben und Sponsoren zu finden. Dies gelang nicht, so dass es immer wieder zu extremen finanziellen Engpässen kam. Dadurch wurden wichtige Entwicklungsarbeiten stark verzögert, so dass Beagle-2 unter starken Zeitdruck geriet. Diese Probleme waren zumindest teilweise auch der Esa bekannt, so dass die Kommission feststellte, dass die Esa schon frühzeitig das Projekt hätte abbrechen müssen.

Einen deutlichen Warnschuss erhielt die Raumbehörde bereits im September 2000 von einer unabhängigen Kommission unter der Führung von John Casani vom *Jet Propulsion Laboratory* (JPL) der Nasa. Diese Kommission stellte beim Status des Projekts, insbesondere beim Bau der Geräte, schwere Mängel fest und ging insbesondere mit dem vorgesehenen Landesystem scharf ins Gericht. Die Empfehlungen dieser Kommission wurden offenbar nicht umgesetzt.

Ein weiterer Schlag ins Kontor war der Rückzug der Firma Martin Baker Aircraft Company (MBA) aus dem Projekt, eines weltbekannten Herstellers von Schleudersitzen und pyrotechnischen Rettungssystemen. MBA sollte die Pyrotechnik für Beagle-2, die Fallschirme und Airbags



So hätte es aussehen können, wenn BEAGLE-2 besser vorbereitet gewesen wäre: Messungen im Gebiet von Isidis Planitia. (Bild: ESA/BEAGLE-2)

Der Mars am 26. 8. 2003, aufgenommen mit dem Weltraumteleskop HUBBLE. Das Landegebiet von BEAGLE-2 ist eingezeichnet. (Bild: NASA/STScI)

liefern. Diese Arbeiten gingen nun an EADS/Astrium über, ohne dass die bereits geleisteten Arbeiten sorgfältig dokumentiert worden wären. Dies geschah teilweise aufgrund unklarer Vertragsbestimmungen nicht, außerdem konkurrieren in diesem Feld MBA und EADS/Astrium miteinander, und keine Firma lässt den Konkurrenten gerne in die eigenen Karten schauen.

Daher nahmen die Ingenieure von EADS/Astrium an, dass das Landesystem auf bereits erprobten Komponenten aufbauen würde, was allerdings nicht der Fall war. Im Juli 2001 waren die Gesamtkosten von BEAGLE-2 auf mehr als 60 Millionen Euro angestiegen, wodurch die ESA bis zu 25 Millionen Euro zum Projekt zuschießen und EADS/Astrium sich auf einen Vertrag mit Festbetrag einlassen musste. Spätestens hier hätte die Notbremse gezogen werden müssen. Warum an dem Projekt dennoch festgehalten wurde, geht auch aus dem Untersuchungsbericht nicht hervor.

Technische Probleme

Im Frühjahr 2002 zeigte sich bei Tests, dass die für BEAGLE-2 vorgesehenen Airbags nicht funktionierten und dass die Entwicklung eines neuen Fallschirms notwendig war. Hierdurch geriet das Projekt unter enormen Zeitdruck, die Kommission bezeichnet es »fast als ein Wunder, dass BEAGLE-2 noch rechtzeitig zum Start fertig wurde«. Besonders gravierend sind die Aussagen, dass ein Risiko-Management dieses Projekts praktisch nicht existierte, und dass es im Team keine Fachleute gab, die sich mit dem komplexen Landesystem der Sonde auskannten, so dass das Konzept im Ganzen niemals kritisch hinterfragt wurde. Die Leser unserer Rubrik »Zum Nachdenken« konnten sich schon letztes Jahr in SuW 3/2004 und 5/2004 mit dem Landeverfahren auseinandersetzen; als wichtigste Erkenntnis ließ sich ableiten, dass die Airbags von BEAGLE-2 einen fünfmal so heftigen Aufprall wie die beiden erfolgreichen Marsrover SPIRIT und OPPORTUNITY abfangen mussten – und das mit einem niemals vollständig getesteten System.

Absolut dilettantisch war das Fehlen detaillierter Schaltpläne der Gesamtsonde. So konnten sich leicht grobe Fehler in der Elektronik einschleichen. Durch den extremen Zeitdruck wurden detaillierte Tests des Gesamtsystems stark reduziert oder fielen gänzlich aus. Die schlechte Dokumentation trug nach Meinung der Kommission entscheidend zum Versagen der Sonde bei.

Die wahrscheinlichsten Fehlerursachen

Da nach dem Abwurf von MARS EXPRESS keinerlei Verbindung mit BEAGLE-2 möglich war, ist es der Untersuchungskommission nicht gelungen, eine eindeutige Fehlerursache festzustellen. Die folgenden Punkte werden aber als wahrscheinlichste Fehlerursachen angesehen:

- Das Design der Airbags war nicht ausgereift und das Testprogramm absolut ungenügend. Wahrscheinlich ist deshalb die Sonde schlicht zerschellt.
- Ebenfalls nicht untersucht worden war, dass die rückwärtige Abdeckung der Sonde nach ihrem Abwurf kurz nach Atmosphäreneintritt mit dem Fallschirm hätte kollidieren und ihn dabei zum Zusammenfallen hätte bringen können.
- Eine weitere Möglichkeit wäre das Abprallen des in die Airbags gehüllten Landers vom Marsboden, so dass dieser sich im zuvor abgeworfenen Fallschirm verhedderte.
- Auch ein Abwurf der Airbags zur Unzeit kommt als Fehlerursache in Betracht: auch dies hätte zu einem Zerschellen der Sonde führen können.

Fazit

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass BEAGLE-2 in dieser Form niemals hätte gestartet werden dürfen. Das Management dieses Projekts war mit der Komplexität der Aufgabe völlig überfordert, was aber eher untypisch für ein europäisches Raumfahrtprojekt ist. Insbesondere die Raumsonden-Projekte der Europäischen Raumfahrtagentur ESA gelten international als gut organisiert, was sich auch an der hohen Erfolgsrate erkennen lässt. Vergleicht man allerdings BEAGLE-2 mit den großen Fehlschlägen der US-Raumfahrtbehörde NASA, zum Beispiel den Verlust der beiden Marssonden MARS POLAR LANDER und CLIMATE ORBITER im Jahre 1999, so wird deutlich, dass krasse Management-Fehler auch anderswo auftreten können. Im Falle von CLIMATE ORBITER führte ein Kommunikationsproblem zwischen dem Management des Herstellers und dem JPL dazu, dass metrische Einheiten mit denen der nur noch in den USA verwendeten »*Imperial Units*« verwechselt wurden. Daher flog die Raumsonde zu dicht an den Mars heran und verglühte in der Atmosphäre. Das Scheitern der beiden Raumsonden kostete die NASA etwa 600 Millionen Dollar, im Vergleich zu den 60 Millionen Euro von BEAGLE-2 ein deutlich herberer Verlust. TILMANN ALTHAUS