

Der infrarote Spektralbereich (IR¹) umfaßt einen Teil des elektromagnetischen Spektrums, der zehnmal größer ist als der sichtbare Bereich. Seine Erforschung wurde seit den sechziger Jahren vor allem durch die Entwicklung neuer Detektoren und Antennenstrukturen vorangetrieben. Inzwischen hat sich die Infrarot-Astronomie zu einem weiten Arbeitsfeld astronomischer und kosmologischer Forschung entwickelt und ein faszinierendes wissenschaftliches Potential entfaltet.

Unabhängig von allen technologischen Fortschritten ist jedoch nicht einmal die Hälfte des Infrarotbereichs vom Erdboden aus mit hinreichender Effizienz zugänglich. Der Großteil der Infrarotstrahlung, die von außen auf unseren Planeten fällt, wird in der Atmosphäre absorbiert, hauptsächlich durch Wasserdampf, Kohlendioxid und Ozon. Abb. 1 zeigt die am Erdboden gemessene Transmission der Atmosphäre. Der Wellenlängenbereich von 30 µm bis 300 µm wird gänzlich durch die Atmosphäre geschluckt. Um diese Absorption zu vermeiden, werden IR-Observatorien auf hohen Bergen errichtet, z. B. auf dem erloschenen Vulkankegel Mauna Kea auf Hawaii in 4200 m Höhe. Eine andere Möglichkeit sind Flugzeugobservatorien, die in 12 bis 15 km Flughöhe arbeiten, wie die beiden von der NASA betriebenen Forschungsflugzeuge Lear-Jet und Kuiper-Airborne Observatory (KAO). Ballongetragene Teleskope arbeiten in einer Höhe von ca. 30 km. Satellitengestützte Beobachtungen wie mit Iso und

SOFIA oder: Warum Astronomen in die Luft gehen

Von Alfred Krabbe, Ruth Titz und Hans-Peter Röser

SOFIA, das Stratosphären-Observatorium für Infrarot-Astronomie an Bord einer Boeing 747 SP, eröffnet eine neue Ära in der Astronomie des mittleren und fernen Infrarot. Ab dem Jahr 2002 wird deutschen und amerikanischen Astronomen diese einzigartige Plattform zur Verfügung stehen. Damit ist der regelmäßige Zugang zum gesamten Wellenlängenbereich zwischen 5 µm und 300 µm möglich, der mit erdgebundenen Teleskopen nicht erschlossen werden kann. Das Teleskop mit einem 2.7 m großen Primärspiegel verbindet hohe räumliche Auflösung mit hoher Empfindlichkeit. SOFIA wird zwanzig Jahre lang im Einsatz sein, sowohl auf der nördlichen als auch auf der südlichen Hemisphäre.

IRAS² werden von der Atmosphäre überhaupt nicht mehr beeinträchtigt.

Beobachtungen an hochgelegenen Observatorien profitieren vor allen Dingen im nahen und mittleren Infrarot (Abb. 2). Aber erst oberhalb der Tropopause können ungefähr 85% des Bereichs erfaßt werden. Die Höhe der Tropopause ist von der Breite, von der Jahreszeit und von täglich wechselnden Wetterbedingungen abhängig und kann 10 km bis 15 km betragen.

Vergleicht man die verschiedenen Plattformen hinsichtlich ihrer astronomischen Möglichkeiten und gewichtet sie mit den Kosten pro verwertbarem Photon, der wissenschaftlichen Flexibilität sowie der räumli-

chen und der spektralen Auflösung, dann schneidet ein Flugzeugobservatorium sehr gut ab. Es kann auf beiden Hemisphären eingesetzt werden und auch nur lokal beobachtbare Ereignisse verfolgen, wie z. B. Sonnen- und Mondfinsternisse, Sternbedeckungen oder Kometen, Novae und Supernovae. Die Instrumente auf einem Flugzeugobservatorium können stets auf den neuesten technologischen Stand gebracht werden. Geräte auszuwechseln, ist kein Problem, und sogar die Optimierung eines Instruments während der Beobachtung ist möglich.

Die Vorgänger von SOFIA, Lear-Jet und KAO, haben gezeigt, wie flexibel, langlebig, wirtschaftlich und für den IR-Bereich technisch ausgereift das Konzept eines Flugzeugobservatoriums ist.

Geschichte des SOFIA-Projekts

1969 begann das NASA-Programm der flugzeuggestützten Astronomie mit einem 30 cm großen Teleskop an Bord eines Lear-Jets. Es folgte das berühmte Kuiper-Airborne-Observatorium (KAO), eine Lockheed L200 Starlifter (C141) mit einem 92 cm großen Cassegrain-Teleskop. Der Heimatflughafen beider Flugzeuge war das NASA Ames Research Center südlich von San Francisco. Sechzig bis achtzig Flüge wurden jedes Jahr mit dem KAO durchgeführt, jeder Flug dauerte etwa sieben Stunden. Bis zu seiner Stilllegung aus finanziellen Gründen im Jahr 1996 war es 22 Jahre lang im Einsatz. Das KAO eröffnete der Astronomie den

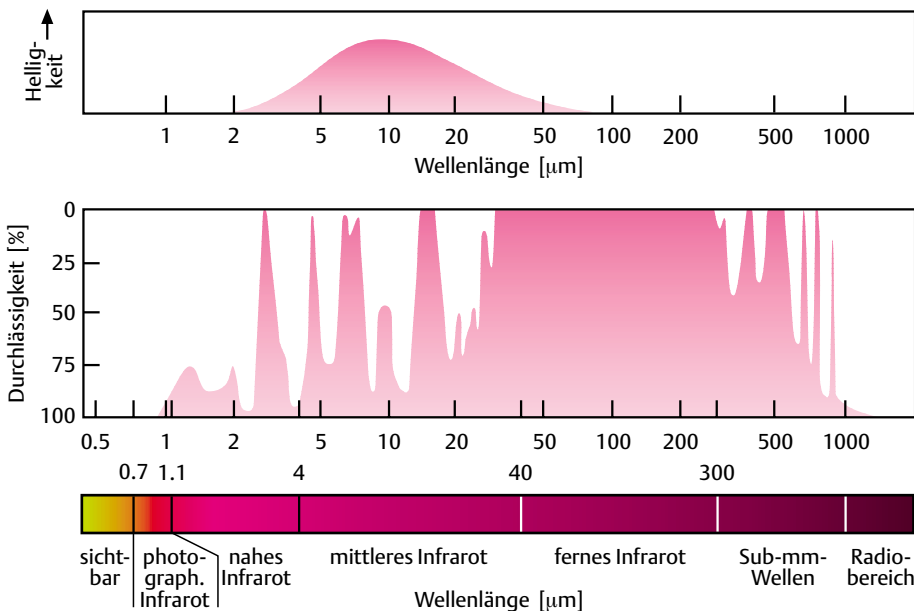


Abb. 1: Durchlässigkeit der Atmosphäre für Infrarotstrahlung bis zum Erdboden, Angaben in Prozent. Die Absorption geschieht überwiegend durch Wasserdampf, Kohlendioxid und andere Moleküle in den unteren Kilometern der Atmosphäre (Troposphäre). Im oberen Teil der Graphik ist die Hintergrundstrahlung angezeigt, die von einem warmen Teleskop und der Atmosphäre emittiert wird und die Grenze für die Empfindlichkeit von Instrumenten festlegt.

¹) Der infrarote Wellenlängenbereich besteht aus dem nahen IR (NIR: 0.9–3 µm), dem mittleren IR (MIR: 3–30 µm), dem fernen IR (FIR: 30–300 µm) und dem Submillimeter-Bereich (Submm: 300 µm–1 mm).

²) Iso: Infrared Space Observatory. IRAS: Infrared Astronomy Satellite.

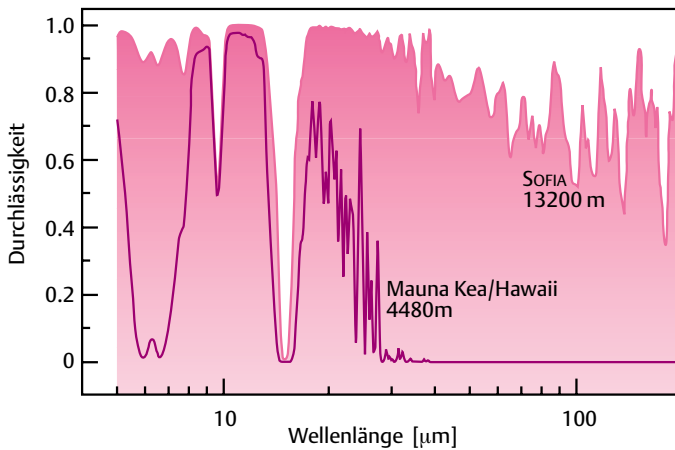


Abb. 2: Durchlässigkeit der Atmosphäre im mittleren und fernen Infrarot für zwei Beobachtungsorte: Mauna Kea auf Hawaii, einen der besten erdgebundenen Standorte für IR-Astronomie, und für SOFIA in rund 13 km Höhe.

stengründen entschied sich die NASA schließlich, das Observatorium zu privatisieren, und schloß mit der Universities Space Research Association (USRA) einen Vertrag über die Entwicklung und den Betrieb des Observatoriums ab, wonach unter anderem das Observatorium in Übereinstimmung mit den Regularien der Federal Aeronautic Administration (FAA), der amerikanischen Luftfahrtbehörde, gebaut und betrieben werden muß. Im Dezember 1996 unterzeichneten NASA und DARA (jetzt DLR, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt) schließlich ein Abkommen über die Entwicklung und den Betrieb von SOFIA. In Tabelle 1 sind einige grundlegende Daten des Projekts aufgelistet.

Tabelle 1: Grunddaten von SOFIA.

Projekt:	Durchgeführt von Entwicklungsbeginn Wissenschaftlicher Erstflug Dauer	NASA und DLR Januar 1997 2002 20 Jahre
Teleskop:	Öffnung Wellenlängenbereich Räumliche Auflösung	2.5 m (2.7 m) 0.3 bis 1600 μm 1" – 3" für $0.3 < \lambda < 15 \mu\text{m}$ $\lambda/9$ für $\lambda > 15 \mu\text{m}$
Betrieb:	Zahl der Flüge Flughöhe Flugzeit Team	ca. 160 pro Jahr 12 – 14 km, 39 000 – 45 000 Fuß 6–7 Stunden oberhalb 12.5 km ca. 12 Personen incl. Piloten, Techniker und Wissenschaftler
Instrumentierung:	Instrumentenwechsel Zugang zu Instrumenten während des Flugs	15 – 25 pro Jahr ständig

mittleren und den fernen Infrarotbereich. Viele Entdeckungen gelangen mit diesem Observatorium, zum Beispiel der Nachweis von interstellarem Wasser in Kometen und die Entdeckung der Uranus-Ringe (siehe Abschnitt »Astronomie mit SOFIA« und Abb. 17). Obwohl das KAO ein rein amerikanisches Projekt war, waren zwei deutsche Gruppen mit ihren eigenen Instrumenten beteiligt, und zwar am Max-Planck-Institut für Radioastronomie in Bonn und am Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik in Garching. Der große wissenschaftliche Erfolg dieser amerikanisch-deutschen Zusammenarbeit spielte bei der Entscheidung, SOFIA als bilaterales Projekt durchzuführen, eine wichtige Rolle.

Im Jahr 1984, am zehnten Geburtstag des KAO, wurde der Plan eines neuen und noch größeren Flugzeugobservatoriums präsentiert: eine Boeing 747 als Plattform für ein Teleskop mit einem Primärspiegel von etwa 3 m Öffnung. 1987 wurde das ausgearbeitete Konzept vorgestellt, das bis heute die Grundlage für das Projekt darstellt. Zusätzlich vereinbarte man einen deutschen Beitrag von 20% an den Gesamtkosten, einschließlich der Herstellungs-, Betriebs- und Personalkosten. Das Teleskopsystem als Herzstück des Observatoriums sollte

von deutscher Seite hergestellt werden. Der optisch nutzbare Durchmesser des Teleskops wurde auf 2.5 m festgelegt. Unter Berücksichtigung des Gesichtsfeldes, der Abschattung durch den Chopper und der Beugungseffekte ergab sich daraus für den Hauptspiegel ein Durchmesser von 2.7 m.

Trotz guter Fortschritte bei den technischen Studien ließ der politische Durchsetzungswille nach. Die Wiedervereinigung Deutschlands und weitreichende Budgetkürzungen bei der NASA warfen das Projekt um mehr als fünf Jahre zurück. Aus Ko-

Das optische System

Das optische System von SOFIA ist ein Cassegrain-Teleskop in Nasmyth-Anordnung. Die Strahlung gelangt über den parabolischen Primärspiegel auf einen hyperbolischen Sekundärspiegel. Abb. 3 zeigt den Strahlengang und Tabelle 2 die wichtigsten Parameter. Der Sekundärspiegel kann um einen Winkel von bis zu ± 5 Bogenminuten mit Frequenzen bis zu 20 Hz bewegt werden.

Ein planer Tertiärspiegel reflektiert den Strahl so, daß der Fokus 30 cm hinter dem Flansch in der Passagierkabine liegt, leicht zugänglich für wissenschaftliche Instrumente. Der Tertiärspiegel kann auch durch einen dichroitischen Spiegel ersetzt werden, der nur das infrarote Licht reflektiert, sichtbares Licht jedoch durchläßt. Dieser sichtbare Lichtstrahl wird durch einen zweiten Spiegel reflektiert und in der Brennebene zur Teleskopnachführung in ein Kamerasystem eingespeist. Zwei weitere Kameras, eine Weitwinkelkamera und eine Kamera mit engerem Blickwinkel sind am vorderen Ring der Haltestruktur über dem Primärspiegel angebracht (vgl. Abb. 5). Einzelheiten über die optischen Eigenschaften dieser Kameras sind in Tabelle 3 zu finden.

Tabelle 2: Optische Parameter des SOFIA-Teleskops.

Eingangsöffnung:	2500 mm
Nominelle Brennweite:	49141 mm
Unvignettiertes Gesichtsfeld:	$\pm 4'$ bei Chopperamplituden bis $\pm 5'$
Ort der Aperturbegrenzung:	Sekundärspiegel
Durchmesser der Aperturbegrenzung:	352 mm
Primärspiegel:	parabolisch
Freier optischer Durchmesser:	2690 mm
Brennweite:	3200 mm
Zentralbohrung für den Tertiärspiegelturm:	420 mm
Material:	Zerodur (Schott Glaswerke)
Masse:	≈ 850 kg
Sekundärspiegel:	hyperbolisch
Krümmungsradius:	954.13 mm
Material:	Siliziumcarbid, SiC

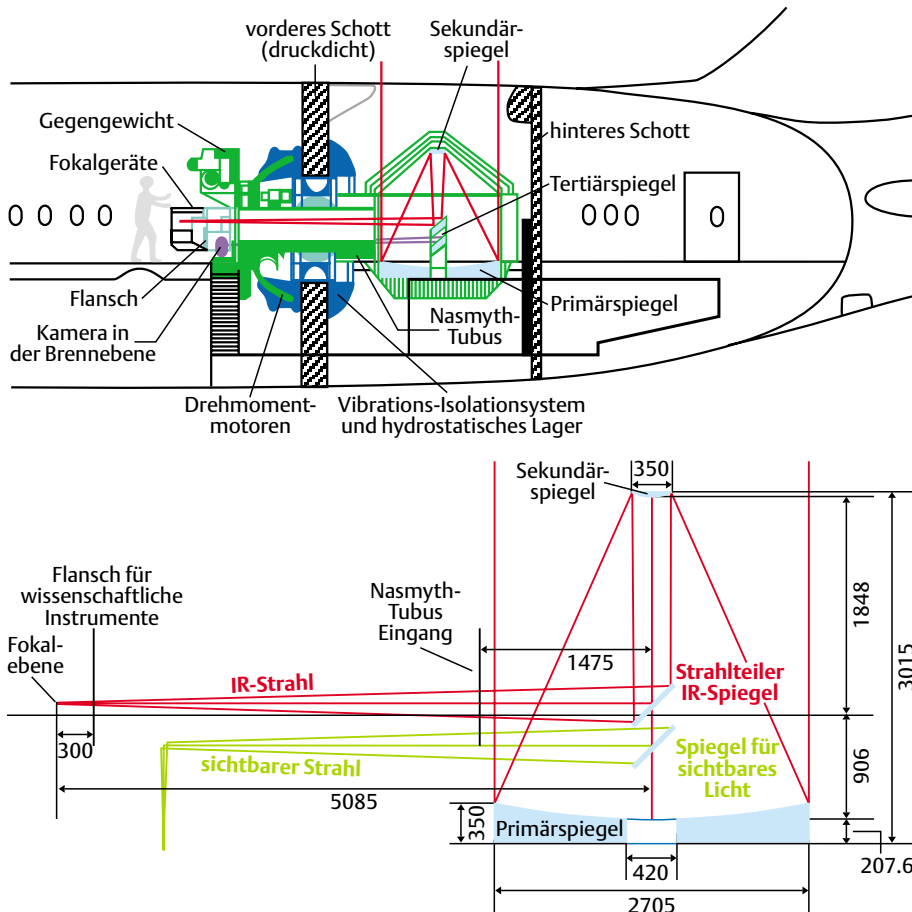


Abb. 3: Das SOFIA-Teleskop. Oben: Querschnitt durch den Teleskopraum. Erkennbar ist die hantelförmige Struktur. Das Gewicht ist im vorderen Druckschott gelagert. Unten: optisches Design (Cassegrain-System mit Nasmyth-Fokus). Der IR-Strahl wird am Tertiärspiegel reflektiert. Wenn man zur Nachführung des Teleskops eine Kamera in der Fokalebene benötigt, kann der Tertiärspiegel auch ein dichroitischer Spiegel sein, der sichtbare Strahlung durchläßt, die dann durch einen voll reflektierenden Spiegel in den Kabinenraum umgelenkt wird.

Tabelle 3: Daten der Kameras

Größe des CCD-Chips:	1024 × 1024 Pixel
Pixelgröße:	14 µm × 14 µm
<i>Kamera mit engem Gesichtsfeld (Fine Field Imager, FFI)</i>	
Optisches System:	Schmidt-Cassegrain
Öffnung des Primärspiegels:	254 mm
Nachempfindlichkeit:	13 mag (nach 2.1 s)
Ausrichtgenauigkeit:	0'35
<i>Weitwinkelkamera (Wide Field Imager, WFI)</i>	
Optisches System:	Petzval
Durchmesser der ersten Linse:	70 mm
Nachempfindlichkeit:	8 mag (nach 0.5 s)
Ausrichtgenauigkeit:	1'8
<i>Kamera in der Brennebene (Focal Plane Imager, FPI)</i>	
Optisches System:	Okular und kommerzielle Contax-1.4/85-mm-Linse
Nachempfindlichkeit:	16 mag (nach 1.7 s)
Ausrichtgenauigkeit:	0'035 (nominell)

Tabelle 4: Räumliche Auflösung von Planeten durch SOFIA im NIR-Bereich.

Planet	Durchmesser [km]	2" Auflösung entsprechen auf dem Planeten [km]	Anzahl der Elemente über dem Durchmesser
Mars	6800	760	9.0
Jupiter	1 428 000	6100	23.4
Saturn	120 000	12 400	9.7
Uranus	52 000	26 400	2.0

Die räumliche Auflösung

Die räumliche Auflösung eines Teleskops ist im Idealfall nur durch seine Öffnung D und die Wellenlänge λ gegeben: $R = 1.2 \lambda/D$ (im Bogenmaß). Zur Veranschaulichung: Das menschliche Auge hat bei sichtbarem Licht (Pupillenöffnung: 3 mm, Wellenlänge: 500 nm) eine 12mal bessere räumliche Auflösung als das Radioteleskop in Effelsberg (Öffnung: 100 m) für die 21-cm-Linie des atomaren Wasserstoffs. Dieses Auflösungsvermögen wird jedoch unter realistischen Bedingungen nicht erreicht. Bei einem bodengebundenen Teleskop gibt es eine ständige Fluktuation der Dichte der Atmosphäre im Strahl. Diese raschen Veränderungen machen sich bereits für das bloße Auge als Helligkeitsszintillation bemerkbar. Das hat zur Folge, daß das Auflösungsvermögen eines erdgebundenen optischen Teleskops selbst bei hervorragenden Bedingungen nicht besser als etwa 0.5 Bogensekunden betragen kann³.

Diese Störungen sind wegen der Flughöhe bei SOFIA stark reduziert, daneben treten aber durch lokale Windturbulenzen am Flugzeug zusätzliche Beeinträchtigungen auf. Bei Wellenlängen kleiner als 10 µm wird das räumliche Auflösungsvermögen durch Windturbulenzen innerhalb der Teleskopkabine und in ihrer näheren Umgebung begrenzt sein. Bei Wellenlängen größer als 10 µm wird SOFIA beugungsbegrenzt arbeiten. Die räumliche Auflösung, die SOFIA erreichen wird, ist in Abb. 4 dar-

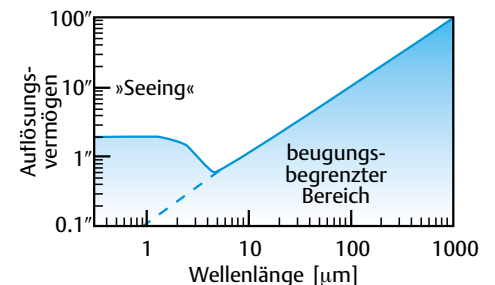


Abb. 4: Vorhergesagte räumliche Auflösung für SOFIA in Bogensekunden.

gestellt Im Wellenlängenbereich zwischen 30 µm und 300 µm wird SOFIA ein bisher nicht erreichtes räumliches Auflösungsvermögen besitzen: viermal besser als der bereits erfolgreiche europäische Infrarotsatellit ISO und dreimal besser als der von der NASA geplante Infrarotsatellit SIRTf.

³) Ein besseres Auflösungsvermögen erreicht man mit der Technik der adaptiven Optik, bei der einzelne Flächen des Teleskops mit hoher Geschwindigkeit nachjustiert werden können, wie z. B. am VLT, dem Very Large Telescope, auf dem Paranal in Chile (0.25 arcsec im NIR)

Anzeige

Das Teleskop

Beim Entwurf des SOFIA-Observatoriums war man stets bestrebt, jedes Bauteil möglichst leicht zu machen, um eine lange Flugzeit in großer Höhe zu erhalten. Jede Tonne Gewichtsersparnis verlängert die nutzbare Beobachtungszeit um ungefähr acht Minuten. Wichtig war es vor allen Dingen, am Teleskop Gewicht einzusparen, weil jedes zusätzliche Kilo, z. B. bei der Haltestruktur des Spiegels, vierfach zählt:

- das zusätzliche Gewicht alleine,
- das Gegengewicht auf der anderen Seite der Teleskoplagerung,
- Ausgleich des gesamten zusätzlichen Gewichts (Gewicht plus Gegengewicht) durch ein Gegengewicht im Bug des Flugzeugs.

Obwohl das Teleskop nur 17 t wiegt, muß die Struktur doch sehr steif sein (siehe auch Abb. 5). Daher wählte man für die einzelnen Bauteile überwiegend kohlefaserverstärkten Kunststoff (CFK). Auf der rechten Seite sieht man Primär- und Sekundärspiegel in der Haltestruktur aus kohlefaserverstärktem Kunststoff, die während des Flugs einer Außentemperatur von ungefähr -50°C ausgesetzt sind. Der vertikale Ring in der Mitte ist in das Druckschott integriert. Hinter dem Ring um den Nasmyth-Fokus befinden sich die Lagerung, die Drehmotoren, die Encoder und das Vibrations-Isolations-System. In der Verlängerung des Nasmyth-Fokus wird das wissenschaftliche Gerät angeflanscht, darunter befindet sich die Nachführkamera in der Brennebene.

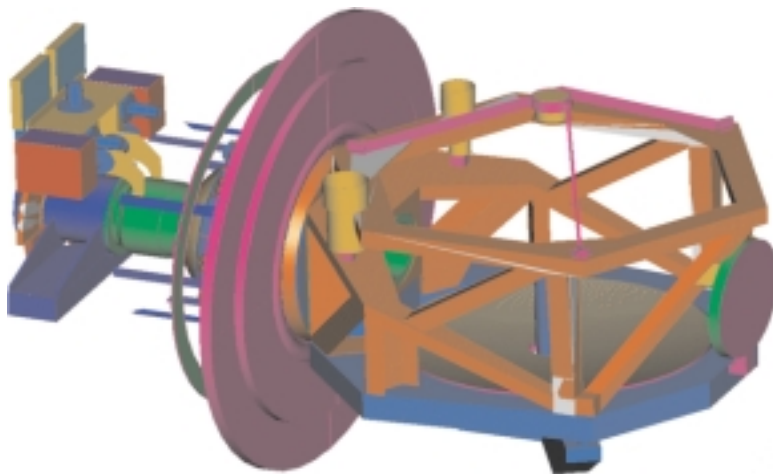


Abb. 5: Vorläufige Teleskop-Struktur.

Abb. 6: Primärspiegel für das SOFIA-Teleskop. *Oben:* Rohling mit Loch für die Halterung des Tertiärspiegels. (Quelle: Schott Glaswerke)
Unten: In die Rückseite des Spiegels wird eine wabenförmige Struktur hineingefräst. Der fertige Spiegel wiegt ca. 850 kg, nur noch ein Viertel vom Gewicht des Rohlings. Die verbleibende Wandstärke beträgt teilweise nur noch 7 mm. (Quelle: REOSC)



Abb. 7: Das SOFIA-Flugzeug vor der Modifikation bei der Firma Raytheon, Waco, Texas, im Frühjahr 1997. Der Platz für das Teleskop ist auf dem Rumpf schwarz markiert.

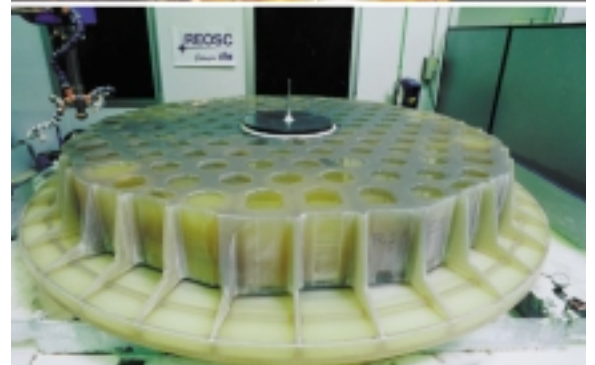
Zur Zeit – Stand März 1999 – ist der Entwurf für das Teleskop durch das Industrie-Konsortium MAN Technologie AG und Kayser-Threde GmbH, München fast fertiggestellt. Das Critical Design Review, die letzte Möglichkeit, Änderungen am Entwurf des Teleskopsystems vorzunehmen, ist für den Sommer 1999 vorgesehen. Bauteile mit langen Lieferzeiten, wie der Primärspiegel, befinden sich aber bereits in einem fortgeschrittenen Stadium (Abb. 6).

Das Flugzeug

Das Flugzeug für SOFIA ist eine gebrauchte Boeing 747 SP, eine verkürzte Version des normalen Jumbo-Jet. Im Frühjahr 1997 be-

schafft, wird es zur Zeit bei der Firma Raytheon in Waco, Texas, umgebaut. Abb. 7 zeigt das Flugzeug während eines Testflugs. Der Bereich der späteren Öffnung für das Teleskop ist schwarz markiert. Ursprünglich war einmal geplant, das Teleskop in den vorderen Teil des Flugzeugs zu setzen. Jedoch stellte sich diese Lösung als sehr teuer heraus, da u. a. zwischen Cockpit und mittlerem Rumpfteil ein druckdichter Tunnel für die Besatzung erforderlich gewesen wäre.

Abb. 8 zeigt einen Blick in den Rumpf des Flugzeugs. Das Teleskop befindet sich im hinteren Teil, abgeschottet von der vorderen klimatisierten Passagierkabine. Im Druckschott ist das gesamte Gewicht des Teleskops gelagert. Das Antriebssystem für



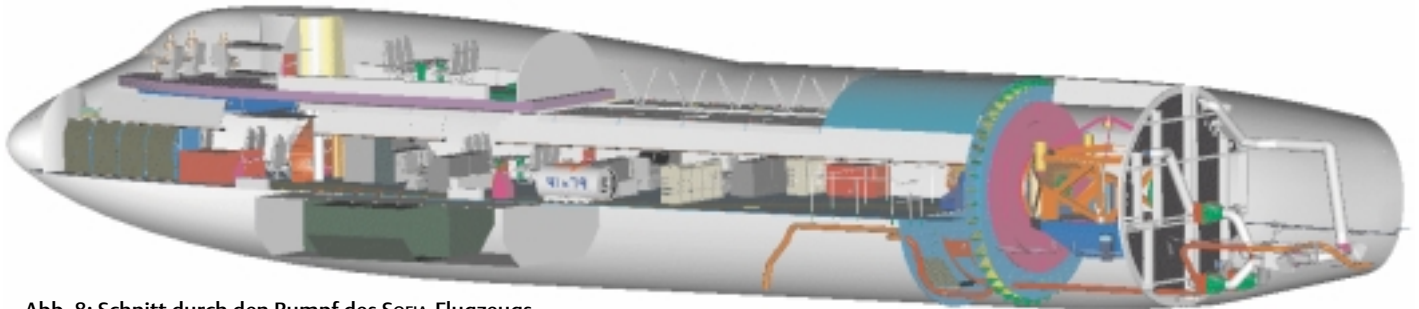


Abb. 8: Schnitt durch den Rumpf des SOFIA-Flugzeugs.

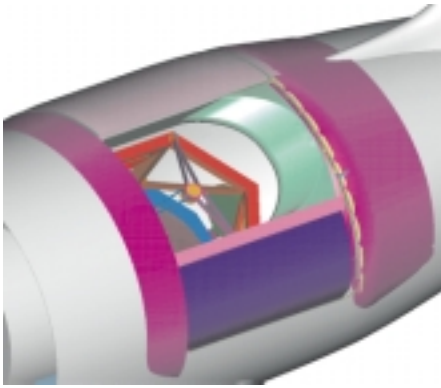


Abb. 9: Blick von außen in die Teleskopkabine. Während Start und Landung ist die Kabine verschlossen, erst nach Erreichen der Flughöhe von 12 bis 15 km wird sie geöffnet. Die Öffnung soll dabei so klein wie möglich gehalten werden, um Turbulenzen in der Kabine zu vermindern. Je kleiner die Windlasten sind, desto besser ist die Qualität der Nachführung.

Aus Gleichgewichtsgründen werden schwere Geräte, z. B. die Teleskopkontroll-elektronik, die Energieversorgung und der Wärmetauscher, im vorderen Teil des Rumpfs platziert. Die Wissenschaftler und die Teleskopoperateure werden sich im Bereich zwischen den Flügeln aufhalten. Ist genügend Platz vorhanden, so kann ein Konferenztisch mit Stühlen untergebracht werden. In vorderen Teil des Flugzeugs, wo sich im normalen Jumbo die erste Klasse befindet, und im ersten Stock wird für mitfliegende Besucher Platz sein.

Das Operationszentrum

Der Heimathafen von SOFIA wird das NASA Ames Research Center in Moffett Field, südlich von San Francisco, sein. Dort befindet sich eine Halle, in der SOFIA geparkt und

gewartet werden wird. In einem angrenzenden Gebäude wird das Betriebszentrum eingerichtet werden, wo ein 80köpfiges, internationales Team für SOFIA arbeiten wird: Wissenschaftler, Ingenieure Techniker und die Verwaltung. Zwanzig Prozent dieses Teams werden von dem DLR in Deutschland rekrutiert. Darüber hinaus gibt es dort auch Laborräume, die beispielsweise zur Untersuchung und Kalibrierung des Teleskops und seiner Komponenten, sowie zur Neubeschichtung der Spiegel benutzt werden können. Zur Organisation des Flugbetriebs stehen Konferenz- und Arbeitsräume bereit. Daneben gibt es zusätzliche Labors und einen Teleskopsimulator, um wissenschaftliche Instrumente vorzubereiten und zu prüfen, bevor sie am Teleskop angebracht werden. Wir hoffen, daß sich diese Einrichtung, die fast alles unter einem Dach bietet, bald zu einem lebendigen wissenschaftlichen Zen-

das Teleskop, die Gegengewichte und der größte Teil des Nasmyth-Tubus befinden sich in der Kabine und sind während des Fluges zugänglich. Ist das Flugzeug am Boden, so kann man die Teleskopkabine durch eine Tür im hinteren Rumpfteil betreten. Hier werden auch die Anlagen zur Kühlung des Teleskops untergebracht. Vor jedem Flug wird die Teleskopkabine evakuiert und das gesamte Teleskop auf -50° Celsius abgekühlt. Nach jedem Flug wird es mit trockenem Stickstoff aufgewärmt, um Tauwasser auf den Spiegeln und auf der Teleskopstruktur zu vermeiden.

Die Teleskopkabine wird durch eine leicht versenkte, tonnenförmige Tür zur Außenluft hin abgeschlossen (siehe Abb. 9). Diese Tür wird nach Erreichen der Beobachtungshöhe geöffnet, jedoch in der Weise, daß die Öffnung so klein wie möglich bleibt. Untersuchungen im Windkanal haben gezeigt, daß eine optimierte Außenform den laminaren Windstrom über der Öffnung der Tür im großen und ganzen erhalten kann. Einige turbulente Windlasten wird es jedoch immer geben, die durch das Ansteuerungssystem des Teleskops kompensiert werden müssen.

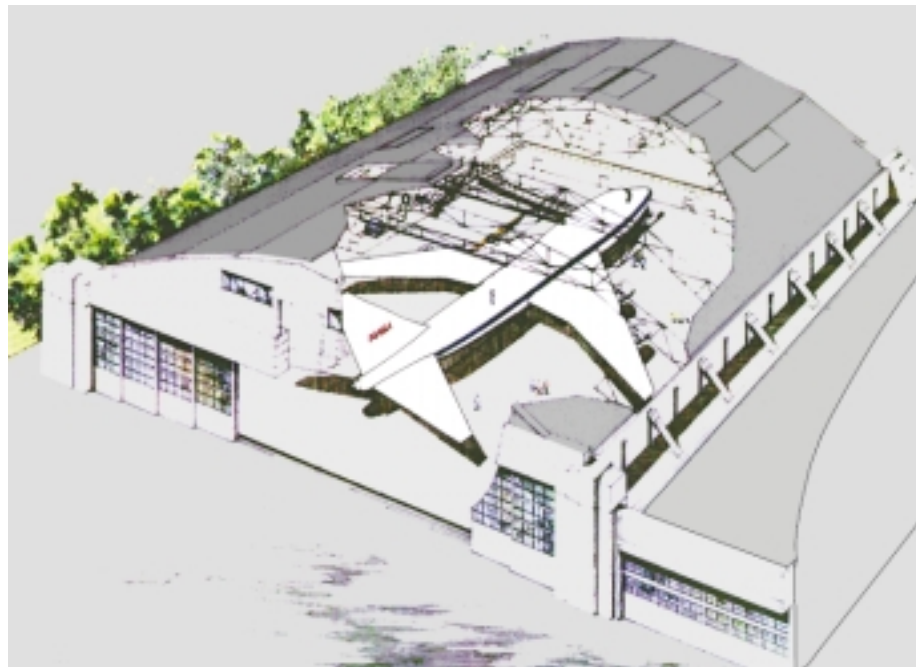


Abb. 10: Das SOFIA Science and Mission Operation Center bietet eine Vielzahl von Einrichtungen: die Halle für das Flugzeug, mehrere Laborräume für optische und mechanische Tests, Einrichtungen zum Beschichten des Primärspiegels, Laborraum zur Vorbereitung und Prüfung der wissenschaftlichen Instrumente, Büro- und Konferenzraum für Wissenschaftler, Verwaltung, Flugplanung sowie Datenreduzierung und -archivierung.

trum entwickeln wird, in dem Menschen verschiedener Disziplinen und Nationen gemeinsam arbeiten. Abb. 10 zeigt, wie Laborgebäude und Flugzeughalle in drei Jahren aussehen sollen.

Der Betrieb

Ein Flugzeugobservatorium bestimmt den Ablauf der Beobachtungen in einer ganz anderen Weise als dies bei einem bodengebundenen Teleskop der Fall ist. Die Länge eines Fluges ist auf 7 bis 8 Stunden begrenzt. Die meisten Beobachtungsfüge werden im gleichen Flughafen beginnen und enden: Moffett Field für die nördliche, und Christchurch, Neuseeland, für die südliche Hemisphäre. Die maximale Beobachtungszeit für ein astronomisches Objekt ist daher auf 3,5 Stunden pro Flug begrenzt. Der nutzbare Elevationsbereich des Teleskops liegt zwischen 20 und 60 Grad, Beobachtungen im Zenith sind nicht möglich. Flüge müssen detailliert geplant werden, um Totzeiten zu vermeiden. Abb. 11 zeigt eine typische Flugroute mit dem KAO, wie sie ähnlich auch mit SOFIA abgeflogen werden könnte.

SOFIA soll 960 Flugstunden pro Jahr absolvieren. Nimmt man eine technische Erfolgsrate von mehr als 80% und 7 Stunden Flugzeit an, so wird das Observatorium alle zwei Tage im Einsatz sein. Um dieses sehr anspruchsvolle Ziel zu erreichen, wird man einen Instrumentenwechsel nicht öfter als einmal pro Woche durchführen. Die Spiegel werden zweimal im Jahr neu bedampft werden. Einmal im Jahr soll SOFIA auch in Deutschland präsent sein, um Wartungsarbeiten vorzunehmen, und als Teil einer wirksamen Öffentlichkeitsarbeit, z. B. bei der Internationalen Luftfahrtausstellung

Tabelle 5: Die Instrumente und ihre Herkunft.

Name des Instruments	Principal Investigator	Institut	Instrumententyp Spezialklasse	Facility/PI
HOPI	E. Dunham	Lowell Observatory	CCD-Photometer zur Messung von Okkultationen	Spezialklasse
AIRES	E. Erickson	NASA Ames Research Center	Gitterspektrometer, 17–210 μm	Facility Instrument
HAWC	D. A. Harper	University of Chicago	FIR-Bolometer-Kamera, 30–300 μm	Facility Instrument
FORCAST	T. Herter	Cornell University	MIR-Kamera, 5–40 μm	Facility Instrument
EXES	J. Lacy	University of Texas	Gitterspektrometer, 5–28 μm	PI
FLITECAM	I. McLean	University of California Los Angeles	Test-Kamera im NIR, 1–5 μm	Spezialklasse
CASIMIR	J. Zmuidzinas	Caltech	Heterodyn-Spektrometer, 250–600 μm	PI
SAFIRE	H. Moseley	NASA Goddard Space Flight Center	Abbildendes Fabry-Perot- Bolometer-Array-Spektro- meter, 145 – 655 μm	PI
GREAT	R. Güsten	MPIfR, Bonn; Uni Köln; DLR, Berlin	Heterodyn-Spektrometer, 75–250 μm	PI
FIFI LS	A. Poglitsch	MPE, Garching	Abbildendes FIR-Spektro- meter, 40–350 μm	PI

(ILA) in Berlin. Das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) wird, unabhängig von den USA, den 20prozentigen deutschen Anteil an der Beobachtungszeit organisieren. Dabei ist an ein Verfahren gedacht, wie es auch für andere Observatorien üblich ist. Fast alle Instrumente, die in Tabelle 5 aufgelistet sind, stehen auch Wissenschaftlern deutscher Forschungseinrichtungen zur Verfügung.

Bildungs- und Öffentlichkeitsarbeit

Der Vertrag zwischen NASA und USRA über den Bau und den Betrieb von SOFIA

umfaßt auch die Bildungs- und Öffentlichkeitsarbeit. Ziel dieses integrierten Programms ist die Förderung der naturwissenschaftlichen Allgemeinbildung und des Interesses an der Astronomie. Am Beispiel von SOFIA kann gezeigt werden, wie ein modernes Observatorium arbeitet und welche wissenschaftlichen Fragen damit beantwortet werden können. Gerade für die amerikanische Öffentlichkeit bietet SOFIA dazu ausgezeichnete Möglichkeiten: Sein Heimatflughafen liegt in einer dicht besiedelten Gegend und besitzt daher einen großen Wirkungskreis für Besucher. Im Laborgebäude wird es Räumlichkeiten geben, die als Tagungsräume oder Klassenzimmer genutzt werden können und unmittelbaren Einblick in die Aktivitäten rund um SOFIA erlauben.

Der Höhepunkt ist dabei ein Mitflug. Das Flugzeug bietet genügend Platz, um auch Gäste – Lehrer, Journalisten oder Politiker – an Bord lassen zu können. Im vorderen Teil des Rumpfs sind zehn Sitzplätze für Besucher vorgesehen, die über Monitore die Aktivitäten der Teleskopoperateure und Wissenschaftler miterleben können. Dutzende von Lehrern, die sich im Rahmen einer Sommerschule mit den Themen Infrarotastronomie und Technologie vertraut gemacht hatten, sind bereits im Kuiper-Airborne-Observatory mitgeflogen, insbesondere der letzte KAO-Flug war ausschließlich der Bildungs- und Öffentlichkeitsarbeit gewidmet.

Das DLR hat sich entschlossen, das EPO-Programm unabhängig, aber in enger Anlehnung an die USA zu betreiben. Damit soll auch in Deutschland der Öffentlichkeit ein langjähriges, überschaubares Forschungs-



Abb. 11: Beispiel für eine Flugroute mit dem KAO. Dieser Flug hat sieben Stunden gedauert bei einer Flughöhe zwischen 12 und 14 km. Eine Flugroute für SOFIA könnte ähnlich aussehen und häufiger die kanadische Grenze kreuzen, um von der niedrigeren Tropopause bei höheren Breiten zu profitieren.

projekt präsentiert werden, dessen Bau und Betrieb eine ingenieurtechnische Herausforderung darstellt und Wissenschaftlern einmalige Chancen bietet.

Weiterhin ist die Präsentation von SOFIA auf Ausstellungen und Konferenzen, die Zusammenarbeit mit Print-, Video- und Audiomedien, die Erstellung und der Unterhalt von WWW-Seiten, und die direkte und indirekte Zusammenarbeit mit Schulen (Vorträge, Projektstage, Lehrerfortbildung und Unterrichtsmaterial) vorgesehen. Neben der Kommunikation nach außen soll auch der Informationsaustausch in der wissenschaftlichen Nutzergemeinde unterstützt werden.

Astronomie mit SOFIA

Galaxien: Nicht nur die Milliarden Sterne in jeder Galaxie entwickeln sich und haben eine Geschichte, auch Galaxien selbst durchlaufen verschiedene Entwicklungsstadien und altern: Das ist ein grundlegendes Ergebnis aus der Forschung der letzten Jahrzehnte. Die Zeitskalen solcher Entwicklungen sind schon bei Sternen außerordentlich lang, Veränderungen erfolgen nur sehr langsam. Nur manchmal, bei dramatischen Vorgängen wie der Explosion von Novae oder Supernovae, kann man die Entwicklung eines Sterns über Tage und Wochen direkt verfolgen.

Über die Bildung und Entwicklung anderer Galaxien und auch unseres Milchstraßensystems wissen wir noch vergleichsweise wenig. Ihre Ursprünge liegen in der kosmischen Vergangenheit etwa 10 bis 15 Milliarden Jahre zurück. Das Licht dieser Galaxien ist so weit rotverschoben, daß die Lichtwellen inzwischen mehr als zehnmals länger sind, als zum Zeitpunkt ihrer Aussendung. Diese jungen Galaxien leuchten deshalb im optischen Licht nur noch schwach, der größte Teil ihrer wegen der Entfernung ohnehin schwachen Strahlung wird im infraroten Spektralbereich zwischen 1 μm und 1 mm abgegeben. Die Untersuchung der Frühgeschichte der Galaxien erfordert deshalb die Benutzung des astronomischen Instrumentariums vorzugsweise im infraroten Spektralbereich.

Galaxien zeigen keine einheitliche Gestalt. Schon früh versuchte man, die verschiedenen Erscheinungstypen zu katalogisieren und zu klassifizieren, so etwa in der bekannten Hubble-Sequenz. Inzwischen hat man noch andere Erscheinungsformen gefunden, darunter Minigalaxien, irreguläre Gestalten und wechselwirkende Galaxien. Theoretische Modellrechnungen haben ergeben, daß die Galaxien in Galaxienhaufen nicht einfach nur so für sich existieren und sich entwickeln. Wegen ihrer Größe und ihrer Bewegung relativ zu-

einander müssen die meisten von ihnen schon mindestens einmal in eine Kollision verwickelt gewesen sein. Gegenwärtig sehen viele Astronomen in solchen dramatischen Begegnungen den Ansatz zur Erklärung der vielfältigen Galaxiengestalten mit ihren reichen inneren Strukturen (siehe auch Abb. 12).

Bei nahen Vorübergängen oder direkten Zusammenstößen treten starke Gezeitenkräfte auf, die die morphologische Struktur der beteiligten Galaxien vollständig verändern können. Dabei kommt es in den Galaxien zu mehr oder weniger intensiver Sternentstehung, bis hin zu den sogenannten Starbursts, in denen innerhalb »kurzer« Zeit Tausende von Sternen entstehen. Über diese Kollisionsvorgänge weiß man noch sehr wenig. Wegen ihres geringen Durchmessers stoßen Sterne bei einer solchen Wechselwirkung nur selten zusammen. Die Kollision der Gas- und Molekülwolken dagegen erzeugt eine ganze Reihe von beobachtbaren katastrophalen Ereignissen wie Schockwellen, Turbulenzen, Aufheizung der Gasmassen und der Staubpartikel. Als Beispiel seien Staubteilchen erwähnt, die bei solchen Vorgängen auf Temperaturen zwischen 20 bis 60 K aufgeheizt werden und nun ihrerseits Energie abstrahlen. Das Maximum dieser Strahlung liegt bei Wellenlängen zwischen 50 und 150 μm : Genau die-

sen Spektralbereich deckt SOFIA besonders gut und mit hoher Empfindlichkeit und räumlicher Auflösung ab. Eine andere mögliche Folge einer Kollision zwischen Galaxien ist die Entstehung eines aktiven galaktischen Kerns. Dieser entsteht vermutlich, wenn infolge der Kollision große Gasmassen ihren Drehimpuls verlieren und ungebremst in die Zentren der beteiligten Galaxien fallen. Dort bilden sich plötzlich viele neue Sterne und sehr wahrscheinlich auch ein oder mehrere Schwarze Löcher. Die Leuchtkraft der Galaxien im infraroten Spektralbereich steigt daraufhin enorm an.

Der Infrarotsatellit IRAS hat im Jahr 1983 den gesamten Himmel bei vier Infrarotwellenlängen ($\lambda = 12, 25, 60$ und $120 \mu\text{m}$) vermessen. Dabei hat sich gezeigt, daß in der Tat viele Galaxien im infraroten Spektralbereich besonders intensiv leuch-

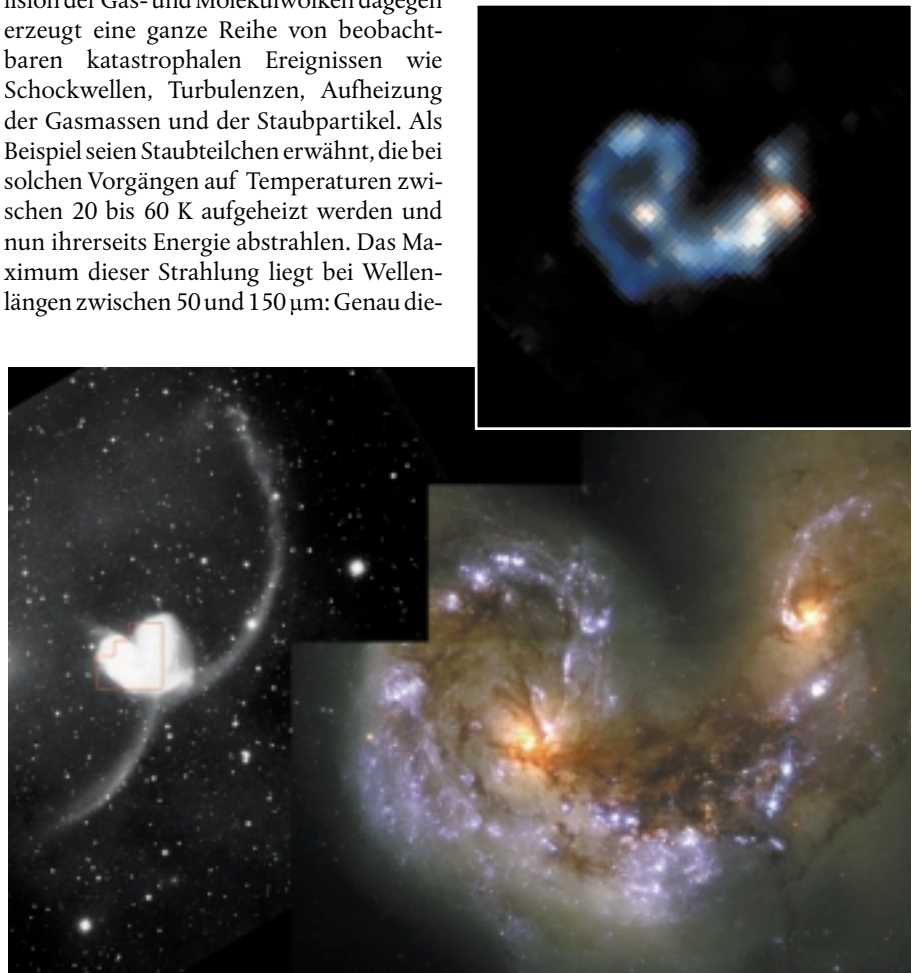


Abb. 12: Die Antennengalaxie ist eines der schönsten Beispiele für ein System wechselwirkender Galaxien. Links das Bild einer optischen Photoplatte, daneben eine Farbaufnahme mit dem Hubble-Weltraumteleskop, ebenfalls im optischen. Oben eine Zweifarbaufnahme im infraroten Spektralbereich mit der Kamera des Iso-Satelliten: blau entspricht Strahlung bei 6 μm , rot Strahlung bei 15 μm Wellenlänge. Die zwei Punktquellen oben links und rechts im Bild entsprechen den Zentren der beiden Galaxien. Das Iso-Bild macht deutlich, daß die stärkste Energieabstrahlung aus einem Gebiet kommt, das im optischen Spektralbereich eher unauffällig wirkt. Es ist hinter dunklen Staub- und Gaswolken verborgen.

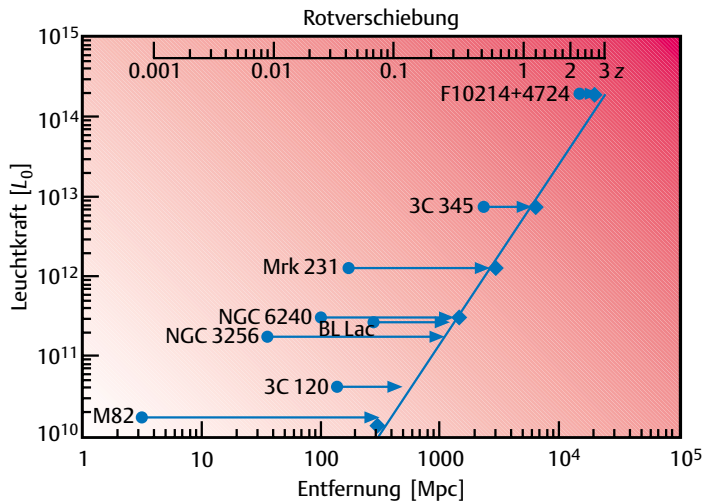


Abb. 13: SOFIAs Nachweisgrenze für Galaxien als Funktion von Leuchtkraft und Entfernung bei einer Stunde Beobachtungszeit. Die bekannte »Starburst«-Galaxie M 82 könnte z. B. bis etwa $z = 0.1$ entsprechend 400 Mpc rotverschoben werden, bevor sie für SOFIA unsichtbar würde.

ten, mehr als 1000mal heller als unsere Milchstraße. Während dieser Messungen wurden viele neue Objekte gefunden, die jetzt darauf warten, mit SOFIA erstmalig im Detail studiert zu werden.

Für die Modellierung der Entwicklung von Galaxien ist es besonders wichtig, diese ab einem möglichst frühen Zeitpunkt ihres Lebens zu untersuchen. In großen Entfernungen lassen sich infrarot helle Galaxien noch am ehesten nachweisen und untersuchen. Das europäische satellitengestützte Infrarot-Observatorium ISO hat hier bereits bedeutende Ergebnisse erzielt. Mit seiner konkurrenzlosen, mehr als viermal so hohen räumlichen Auflösung wird SOFIA sich auch auf ISO-Beobachtungen stützen und in der Lage sein, vor allem die jungen Mitglieder von Galaxienhaufen zu identifizieren und zu untersuchen.

In Abb. 13 ist die Leuchtkraft verschiedener Galaxien gegen ihre Entfernung aufgetragen. Die durchgezogene Linie markiert die Nachweisempfindlichkeit von SOFIA für Galaxien nach einer Stunde Beobachtung. Die Pfeile zeigen an, bis zu welchem Wert die Galaxien rotverschoben werden könnten, bevor sie unter die Nachweisgrenze fallen würden: Die leuchtkräftigsten Galaxien lassen sich noch bei einer Rotverschiebung von $z = 3$ nachweisen. Eine Grenze für eher typische infrarot helle Galaxien wird etwa bei $z = 1$ erreicht sein.

Entstehung und Entwicklung von Sternen: Unser Verständnis der Entstehungsprozesse von Sternen kleiner und großer Masse hat in den letzten Jahren große Fortschritte gemacht. Ganz allgemein entstehen Sterne durch den Kollaps einer Molekülwolke, die dabei in Fragmente zerfällt und einen Sternhaufen bildet.

Dieses einfache Bild trifft generell zu, enthält aber noch viele ungelöste Aspekte: Gibt es eine untere und/oder eine obere Grenze für die Masse von Sternen und wie groß ist sie? Welche Rolle spielt die Umge-

bung der zusammenfallenden Wolke, ihr Strahlungsfeld und die Winde junger Sterne? Wie beeinflusst die Bildung von Sternen mit großer Masse den sich vollziehenden Sternentwicklungsprozess? Welche Rolle spielt die Metallhäufigkeit, also die schweren Elemente in einer Molekülwolke, die den Ofen der Kernfusion in einem Stern schon einmal durchlaufen haben?

Unglücklicherweise kann man die frühen Stadien der Sternentwicklung, wo sich all diese Prozesse abspielen und die Sternmassen festgelegt werden, nicht direkt beobachten. Die interstellare Materie, aus der sich die Sterne bilden, hat Temperaturen zwischen 20 K und 200 K, so daß die ausgesandte Strahlung im Bereich von 150 μm bis 15 μm ihr Maximum erreicht. Gerade dieser Wellenlängenbereich kann aber vom Boden aus wegen der Absorption der Atmosphäre nicht beobachtet werden.

Ein weiteres Hindernis war bislang die geringe räumliche Auflösung der flugzeug- oder satellitengestützten Experimente. Eine räumliche Auflösung von einigen 10 Bogensekunden reicht nicht aus, um feinere Strukturen in den Sternentstehungsgebieten, insbesondere in der Umgebung junger Sterne, zu untersuchen. Zusätzlich sind viele Sternentstehungsgebiete durch dichte, davorliegende Wolken stark abgeschattet. Solche wellenlängenabhängigen Exinktionseffekte sind im Infraroten um Größenordnungen geringer als im optischen oder im ultravioletten Spektralbereich. Die meisten durch solche Staub- und Gaswolken verdeckten Objekte sind bereits im nahen Infrarot zugänglich. Bei tief eingebetteten, meist extrem jungen Sternen gibt es aber selbst hier Probleme, wie das Beispiel des Kleinmann-Low-Nebels im Sternbild des Orion zeigt (siehe Abb. 14). Die für SOFIA geplanten MIR/FIR-Instrumente werden empfindlich genug sein und eine genügend hohe räumliche Auflösung haben, drei Bogensekunden bei 40 μm , um solche Objekte im Detail studieren zu können.

Die Frage nach der Entstehung der Sterne ist eng mit der Frage nach der Entstehung von Planetensystemen verknüpft. Nach heutigem Wissen sind unsere Sonne und die Planeten aus einer rotierenden Gas- und Staubscheibe entstanden. Es ist sehr wahrscheinlich, daß die Entstehung unseres Planetensystems kein zufälliges und einmaliges Ereignis war, sondern, daß Planetensysteme auch um andere Sterne herum existieren. Erste Beispiele sind bereits bekannt, die Beobachtungstechniken reichen jedoch nicht aus, um selbst bei unseren nächsten Sternennachbarn Planeten direkt zu beobachten.

Zirkumstellare Staubkonzentrationen und -scheiben, die als Vorstufen von Planeten gelten, wurden jedoch bereits entdeckt. Das bekannteste Beispiel ist Beta Pictoris, dessen Scheibe (Abb. 15) nach heutigem Erkenntnisstand ein Zwischenglied in der Entwicklung einer proto-planeta- ren Scheibe zu einem Planetensystem mit Riesenplaneten ist. Solche Staubscheiben scheinen recht häufig zu sein, denn selbst bei einem so gewöhnlichen Stern wie Wega hat ISO Staubansammlungen entdeckt.

Will man die Ursachen und Bedingungen von Planetensystemen erforschen, so müssen zunächst möglichst viele solcher Staubscheiben hinsichtlich ihrer Geometrie, Temperaturverteilung und chemischen Zusammensetzung untersucht werden. Die Frage nach der Entstehung von Planetensystemen ist eng mit der Frage nach unserer eigenen Existenz auf dem Planeten Erde verknüpft.

Interstellare Materie: Neben den Sternen spielt die interstellare Materie eine wichtige Rolle für das Verständnis der Entwicklung

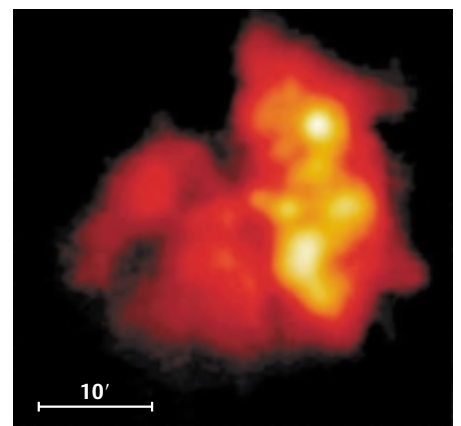


Abb. 14: Hinter dem im optischen so eindrucksvollen Orion-Nebel liegt eine gigantische Molekülwolke, in der neue Sterne geboren werden. Ein kleiner Bereich zeigt im infraroten Licht eine Vielzahl von neuen, heißen Sternen, aufgenommen mit dem IRTF (Infrared Telescope Facility) auf Hawaii bei einer Wellenlänge von 20 μm . (Gezari et al. 1998)

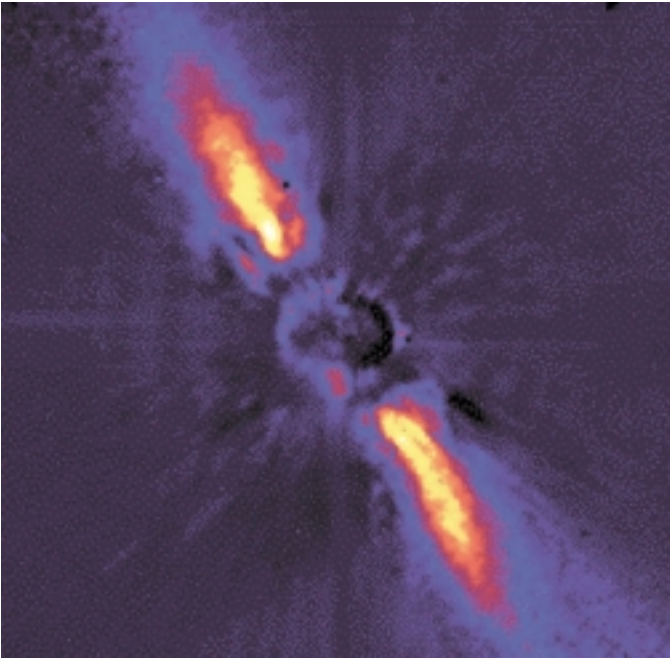


Abb. 15: Wie entstehen Planetensysteme? Die Voraussetzung dafür ist nach heutigem Stand des Wissens eine Staubscheibe um einen Stern. Prominentes Beispiel dafür ist der Stern Beta Pictoris, hier eine Aufnahme mit dem 3.6-m-Teleskop der Eso in Chile (©Eso 1996).

einer Galaxie. In ihr bildet sich sowohl die globale Geschichte einer Galaxie ab, z.B. Wechselwirkungen mit anderen Galaxien, wie auch das lokale Geschehen, etwa die Sternentstehung und die Eigenschaften des Strahlungsfeldes. Die Struktur und Chemie der interstellaren Materie ist komplex, da sich ihre inneren Gleichgewichtszustände wie in einem offenen System ständig, je nach den herrschenden physikalischen und chemischen Bedingungen neu einstellen. Die Temperatur der interstellaren Materie liegt generell nur wenige 10 Grad Kelvin über dem absoluten Nullpunkt. In der Nähe eines heißen Sterns kann sie auch weiter aufgeheizt werden. Die Kontinuums- und Linienstrahlung der interstellaren Materie wird vor allem im MIR-, FIR- und Submm-Bereich abgestrahlt, in hervorragender Weise geeignet, um mit SOFIA untersucht zu werden.

Als Beispiel sei hier kurz die Wirkung des Strahlungsfeldes junger Sterne in einem Sternentstehungsgebiet betrachtet. Das intensive Sternlicht führt in den benachbarten interstellaren Molekülwolken zu chemischen Reaktionen, in denen eine Reihe von Molekülen erzeugt werden, die nur in einem wohl definierten lokalen Gleichgewicht existieren. Das Gleichgewicht wiederum hängt hauptsächlich von der Entfernung zum Stern ab, sowie von dessen Spektrum, der Dichte, der Temperatur, der chemischen Zusammensetzung und von der Ausdehnung der Molekülwolke. Bei Molekülwolken fernab von Sternen spielt das diffuse interstellare Strahlungsfeld die entscheidende Rolle für die chemischen Vorgänge. Beispiele für die gebildeten Substanzen sind Moleküle (z. B. HD, H₂O, CO oder HCN), Atome (H, C oder O),

Ionen (H⁺, C⁺, Ne⁺) und Radikale (z. B. HCO⁺, CO⁺, OH⁺). Durch hochauflösende Heterodynspektroskopie werden sie in den Molekülwolken nachgewiesen und spektral kartiert.

Massereiche Sterne wirken auf ihre Umgebung zunächst durch ihr starkes Strahlungsfeld. Zu einem späten Zeitpunkt ihrer Entwicklung wird stellare Materie in die interstellaren Regionen zurückgeführt. Das kann z. B. durch stellare Winde oder Jets, die Bildung Planetarischer Nebel oder heftige Nova- oder Supernova-Ausbrüche geschehen. Die Sterne geben also prozessierte Materie, d. h. Materie mit einem höheren Anteil schwerer Elemente, an ihre Umgebung zurück. Wenn diese ausgeworfene Materie auf die umgebende interstellare Materie trifft, kommt es zu Schockfronten, die den Staub aufheizen und zerstören, und zur Emission von charakteristischen Spektrallinien. Das Studium der Zusammensetzung des aufgearbeiteten Sternmaterials und seiner Wechselwirkung mit der interstellaren Materie wird unser Verständnis der Chemie und der Dynamik der interstellaren Materie erheblich vertiefen.

Das Sonnensystem: Präsolare Nebel, zirkumstellare Staubhüllen und Staubringe sind die Bausteine eines Sonnensystems und nach heutiger Vorstellung eng mit der Entstehung von Leben verknüpft. Unser Sonnensystem ist offensichtlich der geeignete Ort, um die Bedingungen und Vorgänge zu untersuchen, die zur Entstehung von Planeten und der Entwicklung ihrer Oberflächen und Atmosphären geführt haben und nach Spuren von präbiotischen Molekülen zu suchen. Kometen und Asteroiden stammen aus der Frühzeit unseres Sonnen-

systems und sind seither unverändert geblieben. Sie sind daher neben den entwickelten Planeten und ihren Satelliten ein ideales Beobachtungsziel, um Informationen über die Ursprünge unseres Sonnensystems zu erhalten.

Kometen und Asteroiden: Kometen bestehen aus Eis und Staub und haben Durchmesser von einigen 10 km. Sie lassen sich hinsichtlich ihrer Bahnen in zwei Gruppen teilen: langgestreckte Ellipsenbahnen, deren sonnennächster Punkt bei einer astronomischen Einheit (1 AE = Abstand Sonne-Erde) liegt und die aus der etwa 50 000 AE ausgedehnten Oort'schen Wolke kommen, und Kometenbahnen, deren sonnennächster Punkt ungefähr im Abstand des Jupiters liegt (Kuiper-Gürtel).

Wenn die Körper aus der Oort'schen Wolke auf irgendeine Weise ins innere Sonnensystem abgelenkt werden, sind ihre Oberflächen zunehmend einer intensiven Sonnenstrahlung ausgesetzt und das Eis verdampft schließlich. Da diese Wechselwirkung mit der Sonnenstrahlung vermutlich die erste nach Milliarden von Jahren ist, liefern Kometen Informationen über die Zusammensetzung der Materie zu der Zeit ihrer Entstehung. Ihre verschiedenen Zusammensetzungen scheinen verschiedene Regionen des präsolaren Nebels zu repräsentieren. Einige sind reich an Silikaten, andere an reduziertem Kohlenstoff oder Hydrokarbonaten. Bei anderen kann man wechselnde Anteile von Mineralien wie Olivinen finden. Fast alle haben einen hohen Wassergehalt. Spektroskopische Untersuchungen der wichtigsten flüchtigen Bestandteile der Kometen, u. a. Wasser, Kohlendioxid oder organische Kohlenstoffketten, können nicht vom Boden aus vorgenommen werden. Die Absorption von Wasser und Kohlendioxid in der unteren Atmosphäre blendet genau diese Strahlungsbänder aus. SOFIA ist daher in besonderer Weise zur Beobachtung auch dieser Objekte geeignet, nicht nur weil der Einfluß der Atmosphäre größtenteils umgangen werden kann, sondern auch, weil ein Flugzeugobservatorium die Kometen in beiden Hemisphären verfolgen kann.

Die meisten Asteroiden bewegen sich im Hauptgürtel zwischen den Bahnen von Mars und Jupiter. Man nimmt an, daß Asteroiden aus dem zurückgebliebenen Material der Entstehung und frühen Entwicklung von Planeten bestehen und daher eine wichtige Informationsquelle über die Bedingungen des frühen Sonnensystems sind.

Aus Beobachtungen von Asteroiden im MIR und FIR mit SOFIA können ihre physikalischen Eigenschaften wie Größe und Albedo, Geometrie und Rotation sowie die thermischen Eigenschaften ihrer Oberflä-

chen abgeleitet werden. Asteroiden, deren Eigenschaften man genau kennt, können als photometrische Standards im MIR und FIR dienen, wie mit Iso bereits demonstriert wurde.

Neben der wissenschaftlichen Fragestellung über Ursprung und Zusammensetzung sind die erdnahen Asteroiden möglicherweise auch von Interesse als Quelle für Rohmaterial zukünftiger Generationen und als Ziel für kommende Raumfahrtmissionen.

Planeten und ihre Satelliten: Die Zusammensetzung der Planeten ist ein unmittelbares Spiegelbild der Verteilung von festen und flüchtigen Stoffen während der Bildung unseres Sonnensystems. Die Verteilung der Materie entlang des Radius der zirkumsolaren Scheibe während der Planetenbildung sollte sich in der unterschiedlichen Zusammensetzungen der Planeten widerspiegeln.

Für die äußeren Riesenplaneten und ihre Satelliten existieren gegenwärtig zwei Modelle. Kurz gesagt, bestehen sie entweder aus Wasser, Methan und Ammoniak oder aus Kohlenmonoxid, Wasser und molekularem Stickstoff. Zur Zeit wird für die Planeten eher das zweite Modell bevorzugt, während das erste Modell für deren Monde zuzutreffen scheint. Zur Klärung dieser Fragen sollen die flüchtigen Bestandteile der äußeren Planetenmonde bestimmt und die Zusammensetzung der Atmosphären – falls vorhanden – sowie die Wechselwirkung zwischen Oberflächen und Atmosphären untersucht werden. Dazu ist der Bereich des nahen Infrarot geeignet. Die räumliche Auflösung von SOFIA reicht aus, um einige der planetaren Scheiben (Tabelle 4) räumlich aufzulösen und ihre Atmosphäre zu untersuchen.

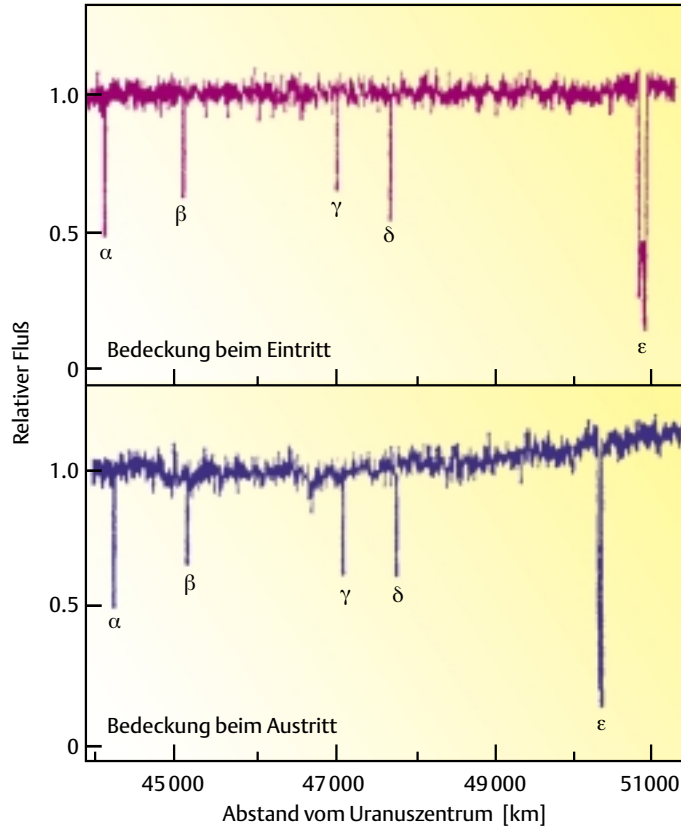


Abb. 17: Die Existenz der Uranusringe wurde mit dem Flugzeugobservatorium KAO nachgewiesen. Die Bedeckung des Sterns SAO 158687 am 10. März 1977 durch Uranus zeigte vor und nach der eigentlichen Bedeckung symmetrische Einbrüche in der Intensität des Sternenlichts, ein Beweis für die Existenz von mindestens fünf Ringen. Oben: die Originalmessung (Elliot et al. 1977). Unten: eine Aufnahme mit dem Hubble-Space-Teleskop. Auf dem Falschfarbenbild kann man drei Ringe erkennen. (NASA/JPL/RPIF/DLR)

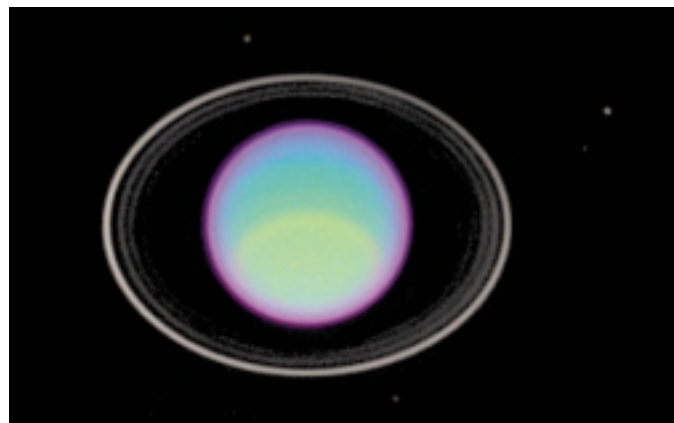


Abb. 16: Woher die Farbe im Großen Roten Fleck des Jupiters stammt, ist bis heute nicht geklärt. Durch Messungen mit SOFIA könnte man der Antwort vielleicht näher kommen. (NASA/JPL/RPIF/DLR)

Mit SOFIA kann der Transport von flüchtigem CO₂ und vielleicht auch H₂O im jahreszeitlichen Verlauf zwischen den Polen und dem Äquator von Mars beobachtet werden. SOFIA wird das Wolkenband auf Jupiter und seine Veränderungen bei NIR- und MIR-Linien spektroskopisch beobachten. Außerdem wird man den Großen Roten Fleck auflösen können, für dessen Farbe es bis heute keine Erklärung gibt (siehe Abb. 16).

Stellare Bedeckungen von Planeten und ihren Satelliten, wie sie durch das Flugzeugobservatorium KAO bestens genutzt worden sind, waren und sind eine wertvolle Quelle von Informationen über planetare Atmosphären und Ringe. Während einer Sternbedeckung 1977 wurden mit dem KAO die Ringe des Uranus entdeckt (Abb. 17).

SOFIA wird auch hier in die Fußstapfen des KAO treten. Mit seiner größeren räumli-

chen Auflösung und höheren Empfindlichkeit werden bessere Beobachtungen möglich sein, die neue wissenschaftliche Überraschungen erwarten lassen.

Instrumente für SOFIA

Nach eingehender mechanischer und optischer Prüfung des Observatoriums wird voraussichtlich Ende des Jahres 2002 das regelmäßige Beobachtungsprogramm mit SOFIA beginnen. Zehn wissenschaftliche Geräte sind als Instrumente der ersten Generation bereits ausgewählt worden (Tabelle 5), darunter auch zwei, die von deutschen Gruppen gebaut werden. Wie auch an bodengebundenen Teleskopen üblich, unterscheidet man zwischen sogenannten Facility-Instrumenten und Principal-Investigator-Instrumenten. Facility-Instrumente stellen die Grundausrüstung des Observatoriums dar. Sie stehen immer zur Verfügung und können von allen Beobachtern genutzt werden.

Principal-Investigator-Instrumente (PI) sind vor allen Dingen auf die Bedürfnisse eines Teams zugeschnitten, stehen jedoch ebenfalls allen Beobachtern zur Verfügung.

Das Spektrometer FIFILS, das im Spektralbereich zwischen 40 μm und 350 μm ar-

beitet, wird vom Max-Planck-Institut für Extraterrestrische Physik in Garching in Zusammenarbeit mit der Universität Jena gebaut. Das Max-Planck-Institut für Radioastronomie in Bonn, die Universität zu Köln und das Institut für Weltraum-sensorik und Planetenerkundung in Berlin arbeiten an einem hochauflösenden Spektrometer im Bereich von 75 μm bis 250 μm .

Schließlich ist FLITECAM die offizielle Testkamera, die benutzt wird, um alle optisch relevanten Eigenschaften des Teleskops zu testen, wie z. B. die Ausrichtungs- und Nachführgenauigkeit des Teleskops, das Chopping des Sekundärspiegels und den Einfluß von Windlasten und anderer Vibrationsquellen.

Ausblick

SOFIA, dieses weltweit einmalige, große Flugzeugobservatorium, wird die Tür zu einer weitgehend noch unbekanntem Dimension unseres Kosmos öffnen. Dabei stützt es sich auf die Erfolge bisheriger Infrarot-Observatorien. Daneben soll mit SOFIA auch das Interesse der allgemeinen Öffentlichkeit an der Astronomie gefördert werden.

Der erfolgreiche Start des Projekts ist vielversprechend und läßt für die astronomische Forschung und für die Öffentlichkeit in den nächsten 20 Jahren noch einige Überraschungen erwarten. □

Literatur

- Hans-Peter Röser, Johannes Schmid-Burgk: Flugzeugastronomie in Deutschland. SuW **28**, 648-653 [11/1989].
- H. P. Röser, P. G. Mezger: SOFIA - A stratospheric observatory for infrared astronomy. *Europhysics News*, Vol. **21**, No. 6, pp 120, June 1990.
- Michael R. Haas, Jacqueline A. Davidson, Edwin E. Erickson (Hrsg.): *Airborne Astronomy. Symposium on the Galactic Ecosystem: From Gas to Stars to Dust*, 5. - 8. Juli 1994. ASP Conference Series, Vol. **73**, ISBN 0-937707-92-9.
- Ruth Titz, Hans-Peter Röser (Hrsg.): *SOFIA, Astronomie und Technologie im 21. Jahrhundert, Astronomy and Technology in the 21st Century*. Wissenschaft & Technik Verlag, ISBN 3-8968-558-1, Berlin 1998.
- Alfred Krabbe, Hans-Peter Röser: *SOFIA, Astronomy and Technology in the 21st Century*. In R. E. Schielicke (Hrsg): *Reviews in Modern Astronomy*. Vol. 12, Hamburg, Astronomische Gesellschaft, 1999.
- Olaf Fischer, Ruth Titz: *SOFIA: neue Perspektiven für astronomische Forschung und Bildung. Zur Veröffentlichung angenommen in: Astronomie und Raumfahrt 5/1999*.
- WWW-Seiten zu SOFIA: <http://www.sofia.dlr.de> und <http://sofia.arc.nasa.gov>

Anzeige