



ASTROPHYSIK

Ein Tor zum Infrarot-Universum

Das Stratosphären-Observatorium SOFIA hat in seinen 12 Betriebsjahren viele wichtige Erkenntnisse zur Infrarotastronomie geliefert.

Alfred Krabbe

Das Stratosphären-Observatorium für Infrarotastronomie SOFIA war als Fluggerät ein Unikat in der Luftfahrt- und der Wissenschaftsgeschichte. Seine wissenschaftliche Mission ist beendet, doch die Auswertung der astronomischen Daten wird noch Jahre in Anspruch nehmen. Das extrem anspruchsvolle Projekt beschritt sowohl luftfahrt- wie auch messtechnisch Neuland und führte zu zahlreichen wissenschaftlichen Ergebnissen.

In der Astrophysik selektieren die wissenschaftlichen Fragestellungen sehr häufig bereits die Bereiche des elektromagnetischen Spektrums, soweit nicht etwa Gravitationswellen oder In-situ-Beobachtungen eine Rolle spielen. Bei der Behandlung von Fragen, die die Stern- und Planetenentstehung betreffen, die Entwicklung chemischer Moleküle im interstellaren Raum, optisch dichte Gebiete in der Milchstraße oder in anderen Galaxien, gerät wegen der niedrigen Temperaturen und Energien und der Extinktion der Strahlung stets der infrarote Spektralbereich ins Blickfeld. Auch die kosmologische Rotverschiebung verweist auf den infraroten Spektralbereich. Daher deckt das James-Webb-Weltraumteleskop (JWST)¹⁾ nicht nur den nahen Infrarotbereich (NIR) bis etwa 3 µm Wellenlänge ab, sondern auch den mittleren Infrarotbereich (MIR) bis etwa

30 µm. Der ferninfrarote Spektralbereich (FIR) zwischen etwa 30 und 300 µm adressiert vor allem das kalte Weltall mit Temperaturen zwischen 10 und 100 K. Für SOFIA war dies der wichtigste Wellenlängenbereich.

Wegen der etwa 200-mal geringeren Energie der Photonen verglichen mit sichtbarem Licht erweist sich der Nachweis von FIR-Photonen jedoch als technisch aufwändig. Das gilt für den direkten Nachweis und auch für den Nachweis mithilfe von Terahertz-Radiorezeptoren.²⁾ Das zunehmende Interesse an FIR-Photonen bzw. Terahertzwellen in der Astronomie führte in den letzten 50 Jahren zu einer stürmischen technologischen Entwicklung, die mit dem SOFIA-Projekt ihren vorläufigen Höhepunkt erreicht hat.

Astrophysikalische Fragestellungen

Der infrarote Spektralbereich – insbesondere das MIR und FIR – ist mit einigen Grundfragen menschlicher Existenz verknüpft: Wie haben sich Sterne und speziell die Sonne gebildet? Wie ist die Erde entstanden? Wie bilden sich Pla-

1) Mehr zur Mission unter <https://science.nasa.gov/mission/webb> und Physik Journal, Oktober 2025, S. 24

2) Eine Wellenlänge von 100 µm entspricht einer Frequenz von etwa 3 THz.



netensysteme um Sterne? Seit der KEPLER-Mission wissen wir, dass statistisch gesehen praktisch jeder Stern von Planeten umkreist wird. Die Entstehung von Planeten verläuft parallel zu der von Sternen. Aber wie genau entwickeln sich Planeten bei massereichen Sternen, bei denen für diesen Vorgang vergleichsweise wenig Zeit bleibt, nämlich maximal 100 000 bis 200 000 Jahre? Viele dieser Vorgänge laufen tief verborgen in dichten Staub- und Gaswolken ab, aus denen erst THz-Strahlung als kurzwelligstes Licht direkt und relativ unprozessiert entweicht. Wie bilden sich im kalten interstellaren Raum organische und präbiotische Moleküle, die helfen können, die Entstehung des Lebens auf der Erde zu verstehen? Spektrale Signaturen von Molekülen erscheinen vor allem im infraroten Spektralbereich: Vibrationsübergänge zumeist im NIR, die energieärmeren Rotationsübergänge vor allem im FIR und weiter bis in den Sub-Millimeter- (300 μ m bis 1 mm) und Radiobereich (> 1 mm). Atomare Feinstrukturübergänge – vor allem ionisierter Spezies – treten überall im infraroten Spektralbereich auf.

Schwere Elemente und interstellarer Staub sind das Ergebnis stellarer Fusionsprozesse und sammeln sich im Laufe der Sternengenerationen immer weiter an. Aber die nanobis mikrometergroßen Staubpartikel behindern unseren Blick im sichtbaren Spektralbereich. Aus diesem Grund blieb das Zentrum unserer Milchstraße dem Auge lange Zeit verborgen. Erst 1968 entdeckte Eric Becklin es im NIR [1]. Die Größenverteilung interstellaren Staus führt auch dazu, dass dieser, je nach seiner Dichte, die Beobachtungen erst ab etwa 30 bis 70 μ m Wellenlänge nicht mehr behindert. Andererseits leuchtet interstellarer Staub aufgrund seiner Temperatur im Infraroten; heißer Staub in Sternnähe bereits bei etwa 3 bis 10 μ m, kalter interstellarer Staub vor allem im Bereich von 100 μ m. Auch sind interstellare Staubpartikel praktisch nie sphärisch, dazu meist elektrisch geladen, und sie rotieren aufgrund von Stößen mit Photonen oder Gasteilchen. Daher richten sie sich am lokalen interstellaren Magnetfeld aus und emittieren polarisierte Strahlung, die zur Messung des interstellaren Magnetfeldes

dienen kann. Ebenso ist das von solchen statistisch ausgerichteten Partikeln gestreute Licht polarisiert. Dies hilft vor allem im NIR bei der Diagnostik, etwa wenn das gestreute Licht aus Raumbereichen stammt, die der direkten Beobachtung nicht zugänglich sind. Insgesamt bietet der FIR-Bereich eine Fülle diagnostischer Möglichkeiten, um astrophysikalische Fragen zu untersuchen.

SOFIA und seine Vorgänger

Während sichtbares Licht und Radiowellen die Erdatmosphäre passieren können, gilt dies für kürzerwelliges Licht glücklicherweise nicht. Aber auch die Infrarotatmosphäre ist wolkig verhangen. Bis etwa 25 μ m gibt es einige spektrale Fenster, die sich vor allem auf hohen Bergen öffnen. Für die Absorption zeichnet vor allem Wasserdampf verantwortlich, gefolgt von den anderen typischen Treibhausgasen wie CO₂ oder CH₄. Die zahlreichen Rotationsübergänge der Moleküle sind zudem atmosphärisch druckverbreitert, sodass der Spektralbereich zwischen 30 und 300 μ m vom Boden komplett verschlossen ist und sich erst im Sub-mm-Bereich ab einer Höhe von etwa 5000 Metern langsam wieder öffnet. In diesem Bereich arbeiten das Atacama Large Millimeter/submillimeter Array ALMA und das Cerro Chajnantor Atacama Telescope (CCAT) in Chile. Die astronomische Forschung findet bei FIR-Wellenlängen daher ausschließlich auf Ballons, in Flugzeugen oder auf Satelliten statt und ist somit aufwändig und teuer. Auf die ersten Flugzeugbeobachtungen mit einem NASA Lear-Jet folgte in den 1970er- und 1980er-Jahren das Kuiper-Airborne-Observatorium mit seinem 90 cm-Teleskop. Der Erfolg deutscher Gastbeobachter um Hans-Peter Röser und Nobelpreisträger Reinhard Genzel auf dieser Plattform führte zu einem gemeinsamen amerikanisch-deutschen Nachfolgeprojekt: ein 2,7 m-Teleskop auf einer Boeing 747SP als bilaterale 80:20-Kooperation zwischen NASA und DLR, wobei das DLR das Teleskop in Deutschland beauftragte.

Nach der Unterzeichnung des Abkommens zwischen NASA und DLR Ende 1996 folgte eine 12-jährige Entwicklungsphase, an deren Ende – luftfahrttechnisch gesehen – ein quasi neues Flugzeug stand: Alle Subsysteme darin



DSI, Chr. Götting, LHT

Abb. 1 Das große zylindrische Tor öffnet sich und gibt in Flughöhe den Blick für das Teleskop von SOFIA frei. Braun im Vordergrund ist die aerodynamische Aperturrampe zu sehen, daneben der Sekundärspiegel mit seinen Halteblättern, darunter befinden sich Primär- und Tertiärspiegel.

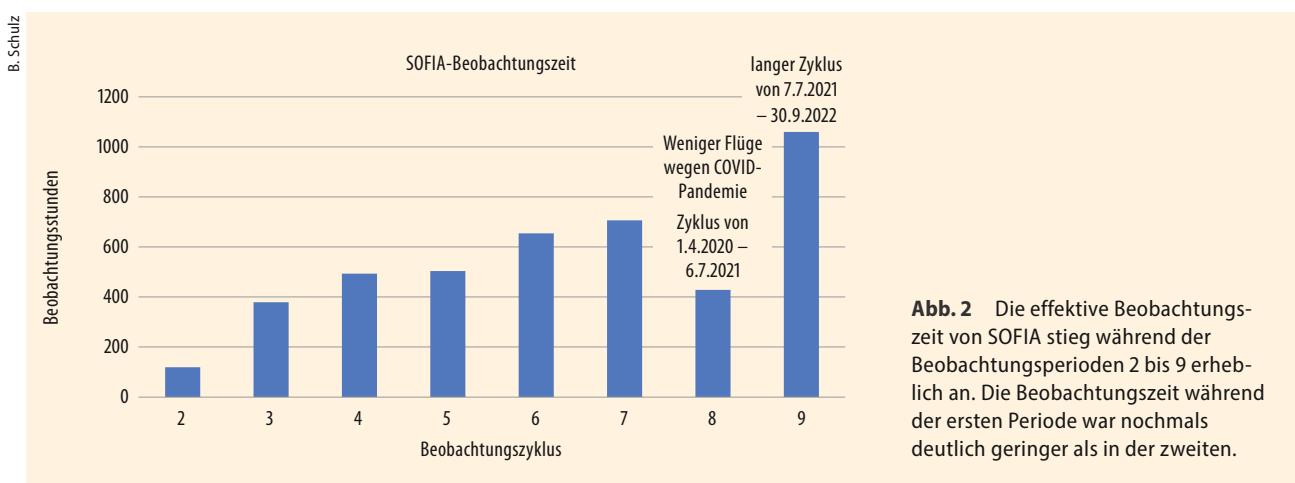


Abb. 2 Die effektive Beobachtungszeit von SOFIA stieg während der Beobachtungsperioden 2 bis 9 erheblich an. Die Beobachtungszeit während der ersten Periode war nochmals deutlich geringer als in der zweiten.

wurden umgebaut und angepasst, um das Teleskop, dessen Hydraulik, das Tor vor dem Teleskop, die Computersysteme und vieles andere zu integrieren. Dazu war es erforderlich, alle mechanischen Teile des Flugzeugs neu zu zeichnen. Parallel fanden zahlreiche Versuche im Windkanal statt, denn ein Flugzeug in der Stratosphäre mit einer Öffnung größer als ein Doppelgaragentor ($4,2 \text{ m} \times 5,5 \text{ m}$) war ein Novum in der Luftfahrtgeschichte (Abb. 1). Auf deutscher Seite schloss das DLR mit der Universität Stuttgart einen Vertrag, der 2004 zur Gründung des Deutschen SOFIA Instituts führte, das den deutschen Anteil am Projektbetrieb gestaltete.

Parallel zur Entwicklung des Teleskops und zum Umbau des Flugzeugs galt es, den Pan Am-Flieger aus dem Jahr 1977 in vielerlei Hinsicht an die moderne Technik anzupassen, etwa mit einem „gläsernen“ Cockpit. Der mit großer Spannung erwartete erste Testflug mit geöffneter Tür im Dezember 2009 verlief zur großen Erleichterung aller Beteiligten reibungslos. Dies war der Auftakt zu vielen Testflügen bis zum astronomischen „First Light“ 2010.

Ein Flugzeugobservatorium dieser spektakulären Größe war wegen seiner Komplexität nicht mehr mit seinen Vorgängern vergleichbar und für alle Beteiligten so neu, dass alle Gruppen – von den Piloten über die Avionik-Experten und Mechaniker bis zu den Wissenschaftlern – permanent dazulernen mussten. Im Laufe der Zeit stiegen Effizienz und Leistungsfähigkeit des Observatoriums erheblich an, was auch der Blick auf die absolvierten astronomischen Flugstunden zeigt (Abb. 2). SOFIA entwickelte sich zu einem „bemannten Satelliten mit täglicher Rückkehr“ und war vor allen aufgrund der Qualität und Anzahl seiner Detektoren schließlich um mehr als eine Größenordnung effizienter als etwa der Herschel-Satellit (2009 bis 2013) – obwohl SOFIA nicht im Weltraum unter idealen Bedingungen operierte!

Von den vielen gemeisterten technischen Herausforderungen seien hier drei, an denen vor allem deutsche Gruppen beteiligt waren, näher erläutert:

■ **Pointing-Stabilität:** Jeder weiß aus eigener Erfahrung, dass man ein Fernglas ruhig halten muss. Beton-Fels-Fundamente sind bei modernen Bodenteleskopen daher unabdingbar. In einem Flugzeug muss aber eine andere Lösung her. Das sehr tiefe Verständnis der Teleskopdynamik und dessen Schwingungsmoden führte in Verbindung mit

zahlreichen Sensoren und einigen Sternenkameras sowie einer komplexen Teleskoptechnologie im Laufe einiger Jahre zu einer stetig verbesserten Stabilität des Teleskops bis hinunter zu etwa $0,6''$ rms und kleiner. Die Beugungsgrenze des Teleskops lag im FIR bei $50 \mu\text{m}$ bei etwa $5''$. Der um zwei Achsen kippbare Sekundärspiegel ließ sich nach seiner Weiterentwicklung erfolgreich in die Bildstabilisierung einbinden. Hinzu kamen modernste Regelungsverfahren.

■ **Beobachtungstechnik:** Die infrarote Beobachtungstechnik stützt sich im Allgemeinen auf ein differentielles Messverfahren. Die Atmosphäre und die Teleskopoptik leuchten im FIR hell, und ihre Emissionen verändern sich in Flughöhen zwischen 12 und 14 km kontinuierlich, insbesondere bei einer Geschwindigkeit von 800 km/h. Hinzu kommen Veränderungen der Temperatur des Teleskops, des Streulichts sowie Emissionen der Triebwerke und lokale Änderungen der atmosphärischen Spurengase und kleinere Effekte wie die elevationsabhängige minimale Durchbiegung der Teleskopstruktur. Die Lösung besteht darin, zwei Felder am Himmel mit einer Frequenz zwischen etwa 2 und 20 Hz ständig miteinander zu vergleichen, wobei das zu beobachtende Objekt in einem der Felder steht. Auf diese Weise gelingt es, den Großteil des immensen systematischen Rauschens zu überwinden, während sich das statistische Rauschen nur minimal erhöht. Der systematische Rauschanteil verringert sich weiter, wenn man ein weiteres leeres Feld auf der anderen Seite des Objektes auswählt und die Messprozedur mit dem anderen leeren Feld wiederholt. Dies unterdrückt Gradienten im Himmelshintergrund. Diese kleinen Bewegungen sind dank des mechanisch äußerst komplexen Sekundärspiegels möglich; zum Anfahren des zweiten leeren Feldes bewegt sich das Teleskop. Auf diese Weise gelingt es, das systematische Rauschen um einen Faktor von bis zu 100 000 zu unterdrücken. Abb. 3 zeigt die verschiedenen Felder, die bei einem solchen Messverfahren für die Erstellung eines Mosaiks angefahren wurden. Der gesamte Ablauf ist minutiös geplant. Während der Beobachtung läuft das Messprogramm inklusive Teleskop- und Sekundärspiegelbewegung vollautomatisch ab, lässt sich aber beliebig unterbrechen oder in Teilen wiederholen.

Nach eingehender Analyse des Signalverhaltens wurde nach einigen Jahren das differentielle Messverfahren für

einige Instrumente zum Teil durch spezielle Scan-Verfahren auf dem Himmel ersetzt. Diese erlaubten es, vor allem ausgedehnte Objekte erfolgreich zu beobachten, bei denen sich kaum freie Stellen am Himmel in erreichbarer Nähe befinden. Das verbleibende systematische Rauschen stieg zwar etwas an, gleichzeitig nahm das statistische Rauschen durch Verzicht auf eine differentielle Messung ab.

■ **Wasserdampfkorrektur:** Alle beobachteten Spektren müssen für terrestrische spektrale Signaturen korrigiert werden. Insbesondere die Wasserdampf-Absorptionslinien in der Erdatmosphäre variieren während des Beobachtungsflugs ständig. Die permanente Bestimmung des Rest-Wasserdampfgehalts erwies sich im Betrieb als technisch zu aufwändig. Dafür gelang es, in der globalen Wetterdatenbank des European Center for Medium Weather Forcast (ECMWF) die von SOFIA geflogenen Routen genau nachzubilden und die zugehörigen Wasserdampf-Werte punkt- und zeitgenau auszulesen. Da diese Datenbank bereits zu Beginn der SOFIA-Flüge bestand, ließen sich auf diese Weise alle Beobachtungen von allen wissenschaftlichen Instrumenten mit den tatsächlichen Wasserdampfwerten einheitlich kalibrieren und korrigieren. Dies verbesserte die Datenqualität signifikant.

Wissenschaftliche Ergebnisse

Von den zahlreichen beachtenswerten wissenschaftlichen Ergebnissen der SOFIA-Mission möchte ich hier eine kleine Auswahl näher erläutern, deren Bedeutung leicht nachvollziehbar ist.

Wasser auf dem Mond

Während die Existenz von Wasser an den Polen des Mondes, insbesondere in tiefen schattigen Kratern, seit längerem bekannt ist, war die Entdeckung von gebundenem Kristallwasser an vielen Orten auf der Tagseite des Mondes eine echte Überraschung. Der Nachweis gelang FORCAST mithilfe eines Beugungsgitters auf einem Prisma (Grism) bei einer Wellenlänge von $6,1\text{ }\mu\text{m}$, die vom Erdboden aus nicht zu beobachten ist. Die Biegungswinkel der beiden Wasserstoffatome im Wassermolekül hat bei dieser Wellenlänge einen charakteristischen Vibrationsübergang, der als Spektrallinie in Emission messbar ist. Die Beobachtung war technisch extrem anspruchsvoll, da der Mond sich pro Stunde um etwa seinen Durchmesser gegen den Sternenhimmel bewegt und die Messungen mit dem durch Gyroskopen inertial stabilisierten Teleskop völlig auf die programmierten nicht-siderischen lunaren Zusatzgeschwindigkeiten vertrauen mussten. Zudem ließ sich wegen der Größe des Mondes und dessen Helligkeit nur alle paar Minuten ein Stern anfahren (Abb. 4).

Wetterstatus auf Pluto

Das Beugungslimit des Teleskops reicht selbst im Optischen nicht aus, um Pluto räumlich aufzulösen – es sei denn, Pluto zieht scheinbar vor einem Stern vorbei. Am 29. Juni 2015 bedeckte Pluto den Stern P20150629 von 12. Größe, was in der Nähe von Neuseeland über dem Pazifik zu beobachten war. Der Lichtstrahl des Sterns tastete Plutos

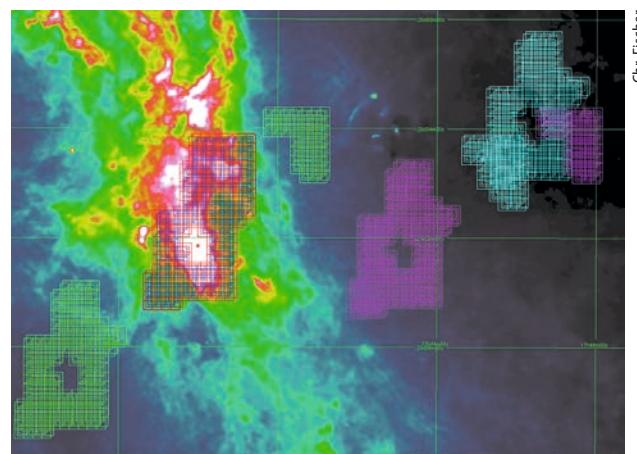


Abb. 3 Die Kartierung eines ausgedehnten Gebiets wie hier des Zentralgebiets der Milchstraße mit dem FIFI-LS-Instrument erfordert die Beobachtung verschiedener Vergleichsfelder (grün, violett, türkis), um das systematische Rauschen zu unterdrücken. Der Sekundärspiegel fährt die grünen Felder direkt an; für die anderen Felder ist zusätzlich das Teleskop zu bewegen. Auf diese Weise lässt sich je ein ausgedehntes rauscharmes Mosaik in beiden Kanälen (rote und blaue Quadrate im Zentrum) erstellen.

Atmosphäre wie ein Bleistiftstrahl ab, verschwand hinter Pluto und erschien auf der anderen Seite wieder. Pluto entfernt sich gegenwärtig (und noch etwa bis 2113) auf seiner hochelliptischen Umlaufbahn von der Sonne. Die damit einhergehende Abkühlung verändert das Klima auf Pluto gegenüber der ersten Messung mit dem Kuiper Airborne Observatory von 1988. Bei der Vorhersage eines solchen Ereignisses kommt es auf Millibogensekunden an – so genau müssen die Bahn von Pluto und die Position des Sterns bekannt sein. Außerdem muss sichergestellt sein, dass der Stern kein doppelter ist, damit die aufwändige Beobachtung nicht misslingt. Daher mussten professionelle Bodenteleskope helfen, die Plutobahn und die Sternposition genau zu bestimmen, um einen Begleiter auszuschließen.

Noch während des Anflugs auf die ermittelte Position im Südpazifik gab es letzte Korrekturen am Flugkurs. Da

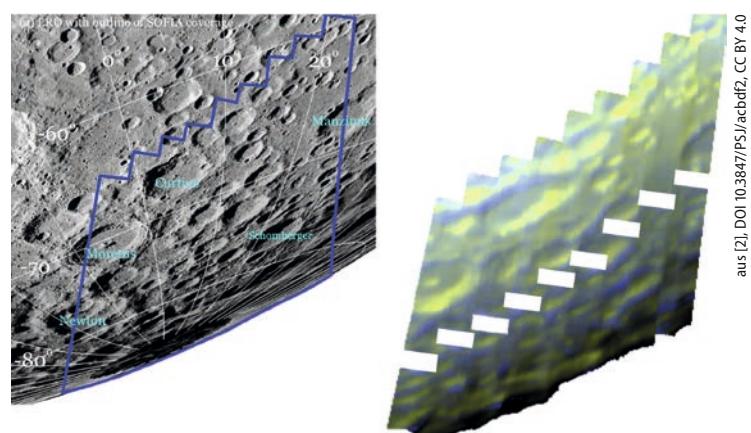


Abb. 4 Mit SOFIA gelang es, Wasser in einer sonnenbeschieneßen Gegend in der Nähe des Mond-Südpols zu beobachten. Das linke Bild zeigt das untersuchte Gebiet, das rechte die Ergebnisse dem Geländeprofil überlagert. Die blaue Farbe markiert ein stärkeres Wassersignal, die gelbe ein schwächeres. Die weißen Felder wurden wegen ungenügender Datenqualität ausgelassen.

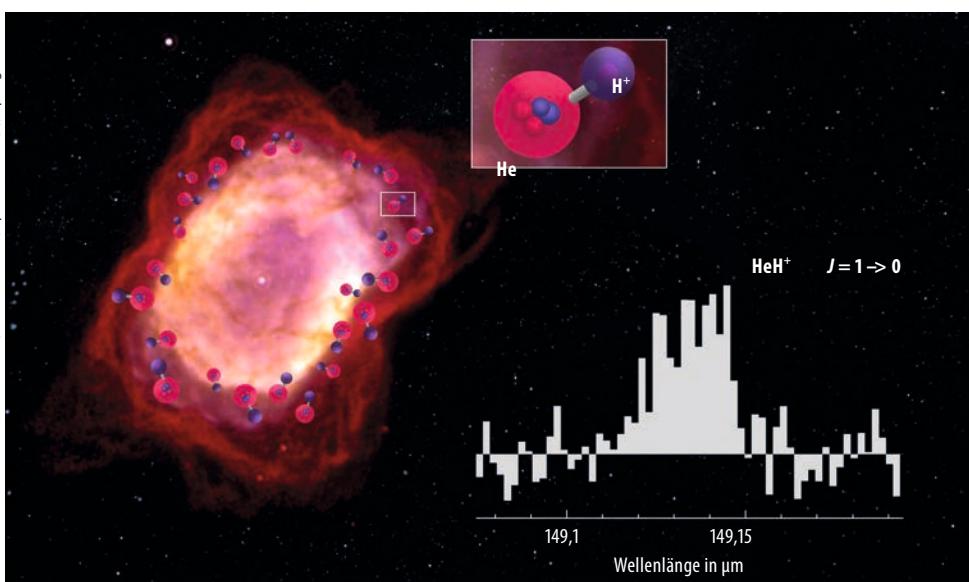


Abb. 5 Mit diesem Spektrum im planetaren Nebel NGC7027 wies GREAT die Existenz von HeH^+ nach. Dabei handelt es sich um das erste Molekül, das sich im Weltraum bildete.

das Teleskop nur auf der linken Seite aus dem Flugzeug schauen konnte, schnitt die Flugroute praktisch immer den Schattenverlauf und musste daher zu einer bestimmten Zeit sekundengenau an einem bestimmten Ort sein. Dank guter Vorbereitung gelang die Messung mit dem HIPO-Instrument und parallel mit dem FPI+ in so guter Qualität, dass sich aus den Lichtkurven der vertikale Temperatur- und Druckverlauf in der Atmosphäre ableiten ließen. Zudem war es erstmals möglich, Wolken in den unteren Atmosphärenschichten nachzuweisen. Wenige Tage später bestätigte die Mission New Horizons diese Dunstschichten.

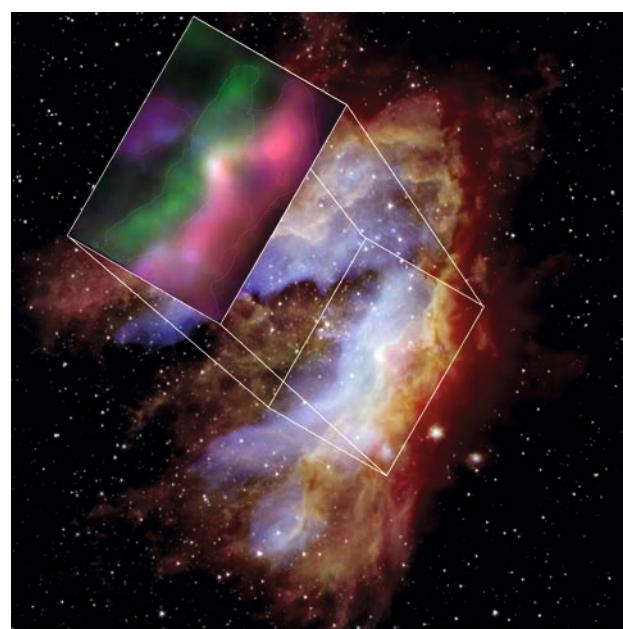
Das erste Molekül im Universum

Alle Atome schwerer als Wasserstoff (H), Helium (He) und Lithium (Li) werden in Sternen synthetisiert. Die Sternbildung erfordert jedoch, dass H als Molekül H_2 vorliegt, weil sonst die Kühlung des Gases und seine Verdichtung zu einem Stern nur schwer möglich sind. Die Bildung von H_2 wiederum erfordert Staub, um die Dissoziationsenergie abzuleiten, denn H_2 bildet sich nicht „einfach so“. Staub entsteht jedoch erst in Sternen. Könnten die ersten Moleküle in der Frühphase des Weltalls helfen, dieses „Henne-Ei-Problem“ zu lösen? Mit H, He und Li ist die Auswahl nicht sehr groß: Lithium lag nur in Spurenmengen vor, und He ist ein Edelgas. Die Vermutung war, dass Heliumhydrid HeH^+ das erste Molekül sein könnte. Aber wo findet es sich, falls es tatsächlich existiert? Der Nachweis gelang GREAT im Planetarischen Nebel NGC 7027 bei der Wellenlänge 149,14 μm , bei der HeH^+ eine eindeutige spektrale Signatur besitzt (Abb. 5). Der Nachweis dieses Moleküls im Welt Raum erlaubt es nun, seine Rolle bei der Frühentwicklung des Universums weiter zu untersuchen und vielleicht das Henne-Ei-Problem zu lösen.

Wechselwirkung zwischen Sternen und Molekülwolken

Sterne bilden sich in dichten Staub- und Gaswolken (auch Molekülwolken genannt). Sobald entstehende massereiche Sterne jedoch ihre Strahlkraft erreicht haben, heizen sie die kalten Umgebungswolken auf und dissoziieren durch ihre

UV-Strahlung Moleküle wie H_2 , CO_2 und andere. Diese „Photon Dominated Regions“ (PDR) eignen sich ideal, um die Vorgänge interstellarer Chemie genauer zu verstehen. Im Nebel M17 lässt sich ein solches Gebiet von der Seite untersuchen (Abb. 6). Abhängig von der Entfernung von dem Haufen junger Sterne entdeckte FIFI-LS unterschiedliche Elemente in neutraler oder ionisierter Form in sehr signifikanter Schichtung. Aus dieser leitete sich das lokale Strahlungsspektrum in den verschiedenen Entfernung von den jungen Sternen ab. Dies trug zum Verständnis bei, wie die Strahlung junger Sterne die sie umgebenden Molekülwolken beeinflusst und wie sie sich chemisch entwickeln, und half, die atomaren und molekularen Prozesse in den Wolken zutreffend zu modellieren.



aus [4], DOI 10.3847/1538-4357/acb823, CC BY 4.0

Abb. 6 Im Zentrum dieses Nebels befindet sich ein Haufen junger Sterne. Die Beobachtung des markierten Rechtecks zeigt eine deutliche Schichtung unterschiedlicher chemischer Spezies, darunter O^{2+} , C^+ und O , die hier nach Farben getrennt erscheinen.

Interstellare Magnetfelder

Die Existenz interstellarer Magnetfelder und ihre Bedeutung etwa für die Sternentstehung sind seit langem bekannt, doch wurden sie wegen technischer Herausforderungen bislang nur wenig erforscht. Mit dem Instrument HAWC+ auf SOFIA erfolgten erstmals umfangreiche Polarisationsmessungen im interstellaren und extragalaktischen Raum. Aus diesen leiten sich Aussagen über die Richtung und Stärke interstellarer Magnetfelder ab. Hierbei zeigt sich eine Fülle von Details und Mustern in der Milchstraße und in nahen Galaxien, die uns bislang verborgen geblieben waren. Im Zentralgebiet der Milchstraße etwa umgibt eine Materie-Ringstruktur das zentrale Schwarze Loch (**Abb. 7**). Die Magnetfeldrichtung folgt dem Fluss des auf den Ring aus verschiedenen Richtungen einströmenden Materials. Dies war zuvor zwar vermutet, aber noch nie beobachtet worden.

Ausblick

SOFIA suchte von Beginn an den Kontakt zur Öffentlichkeit. Dazu gab es ein eigenes substanzielles DLR-Budget für die Öffentlichkeits- und Bildungsarbeit. Vorbild hierfür war die NASA, bei der alle Projekte über einen solchen Etat verfügen. SOFIA-Partnerschulen, Lehrkräftefortbildungen, sogar Mitflüge von Lehrkräften und Journalisten waren möglich [7]. Das Medienecho war überwältigend.

Trotz vieler einzigartiger Ergebnisse und stetig ansteigender wissenschaftlicher Effizienz entschied die NASA, den wissenschaftlichen Flugbetrieb zum Herbst 2022 einzustellen. Mit einem Jahresbudget von rund 90 Millionen Euro war SOFIA gewiss kein finanzielles Leichtgewicht, aber dennoch mit den Kosten und dem Nutzen einer großen Satellitenmission durchaus vergleichbar. Vermutlich passte SOFIA etwa 25 Jahre nach Projektbeginn nicht mehr in die politische NASA-Landschaft, in der sich neue Projekte zum Mond und zum Mars entfalten.

Nachdem die Ferninfrarotastronomie mit SOFIA eine große Blüte erlebt hat, stellt sich die Frage, wie es nach dem Projektende weitergeht und wie wir den Verlust dieses einzigartigen Know-hows verhindern können. Nur die Boeing 747 SP war in der Lage, die erforderliche Flughöhe von bis zu 13,7 Kilometern und Flugdauern von vielen Stunden zu erreichen. Die moderneren und für den Passagierbetrieb optimierten Flugzeuge schaffen das nicht (mehr). Neue FIR-Satelliten sind bei der NASA formal zwar in der Überlegung, aber konkret innerhalb der nächsten Dekade nicht in Sicht. So bleiben Stratosphärenballons oder Luftschiffe momentan die einzige Alternative. Die Entwicklung intelligenter autonomer Systeme im Flugzeug- und Drohnenbau kann auf Ballons portiert werden und zu einem intelligenten Landeverhalten von Ballonnutzlasten führen. Bislang sind Ballonnutzlasten nur für einmalige Nutzung vorgesehen. Auf die Dauer käme das aber zu teuer und wäre für wiederholte FIR-Missionen nicht akzeptabel. Das DLR ist infolge der Zusammenführung von Forschung am Boden und im Weltraum im Bundesministerium für Forschung, Technologie und Raumfahrt seit dieser Legislaturperiode glücklicherweise wieder für In-situ-Forschung in der Stratosphäre zuständig, was zuvor nur in Ausnahmefällen möglich war.



Polarisation: NASA/SOFIA/HAWC+; Staubbeteiligung: [6] DOI 10.1088/0004-637X/775/1/37, © AAS, reproduced with permission. Sterne: NASA/Hubble Space Telescope/NICMOS

Abb. 7 Der Verlauf des Magnetfeldes im zirkumnuklearen Ring unserer Milchstraße ist in diesem Bild durch wellenförmige Streifen auf einem SOFIA-Infrarotbild der Ringstruktur illustriert. Das Hintergrundsternfeld wurde mit HST/NICMOS aufgenommen.

Wünschenswert wäre es, im europäischen Kontext eine Forschungsinfrastruktur zu schaffen, die – anders als das europäische Ballon-Programm HEMERA – einen beständigen und regelmäßigen Zugang zu Plattformen in der Stratosphäre erlaubt und die sich planmäßig für astronomische Forschung im Ferninfrarotbereich sowie für andere Disziplinen wie Umwelt, Klima oder Kommunikation nutzen ließe.

*

Im Buch „SOFIA – Mission infrarotes Universum“ finden sich viele weitere Informationen: <https://elib.uni-stuttgart.de/items/698347c5-37d7-4e4d-b013-c6e218ee9c72>. Exemplare des Buchs können beim Autor bei Interesse kostenlos und solange der Vorrat reicht angefordert werden.

Literatur

- [1] E. E. Becklin und G. Neugebauer, *Astroph. J.* **151**, 145 (1968)
- [2] W. T. Reach et al., *Planet. Sci. J.* **4**, 45 (2023)
- [3] R. Güsten et al., *Nature* **568**, 356 (2019)
- [4] R. Klein et al., *ApJ* **945**, 29 (2023)
- [5] W. Lim et al., *ApJ* **888**, 98 (2020)
- [6] R. M. Lau et al., *ApJ* **775**, 37 (2013)
- [7] Physik Journal, Juli 2015, S. 24 und März 2016, S. 58

Der Autor



Bayerischer Rundfunk und A. Krabbe

Alfred Krabbe (FV Extraterrestrische Physik) studierte in Münster und Heidelberg. Nach der Promotion am Max-Planck-Institut für Astronomie verbrachte er einige Jahre am MPI für Extraterrestrische Physik in Garching und an der Universität in Berkeley, USA. Zurzeit arbeitet er als Astrophysiker an der Universität Stuttgart. Als Leiter des Deutschen SOFIA Instituts (DSI) war er verantwortlich für die Gestaltung des deutschen Beitrags zum SOFIA-Projekt.

Prof. Dr. Alfred Krabbe, Institut für Raumfahrtsysteme/DSI, Pfaffenwaldring 29, 70569 Stuttgart

Wissenschaftliche Instrumente

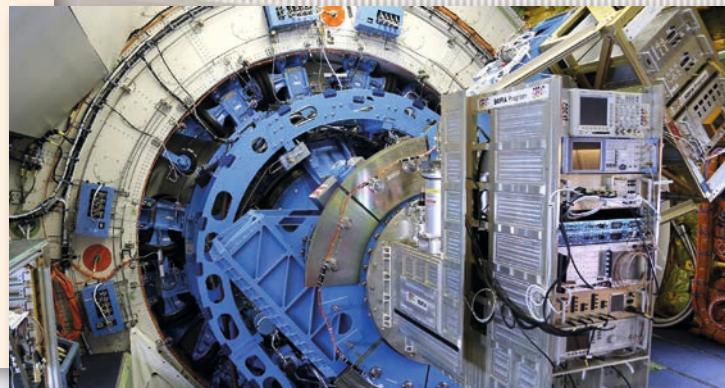
Für eine Flugserie von üblicherweise ein bis zwei Wochen kam meist eines von sechs wissenschaftlichen Instrumenten zum Einsatz. Deutsche Gruppen steuerten drei bei, amerikanische die anderen drei.

Alfred Krabbe

German REceiver for Astronomy at Terahertz Frequencies (GREAT)

Der modulare Heterodynempfänger wurde für spektral hochauflösende Beobachtungen im ferninfraroten Spektralbereich entwickelt. Das Instrument arbeitete in ausgewählten Frequenzbändern zwischen 0,5 und 5 THz und lieferte Beiträge vor allem zur galaktischen Astrochemie und Sternentstehung. Dieser „Weltraumradioempfänger“ profitierte von der rasanten Entwicklung der Antennen-, Mischer- und digitalen Korrelatoren-technologie für den FIR-Bereich in den letzten 30 Jahren. Aufgrund seiner modularen Bauweise stieg seine Leistungsfähigkeit während der Betriebszeit des Observatoriums permanent steil an. Mit einer spektralen Auflösung von $> 10^6$ und angepasst an die schmalen interstellaren Absorptions- und Emissionslinien entwickelte sich GREAT zum erfolgreichsten SOFIA-Instrument: Es absolvierte 235 Flüge, aus denen mehr als 150 Publikationen entstanden.

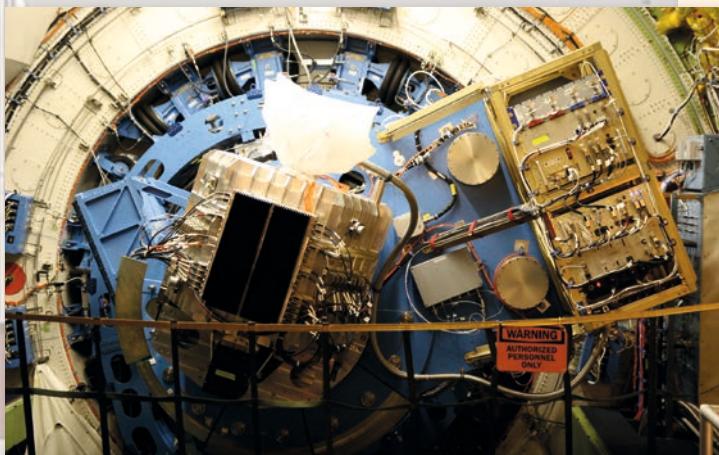
GREAT wurde unter Federführung des Max-Planck-Instituts für Radioastronomie in Bonn von einem Konsortium entwickelt und betrieben, zu dem neben einer Gruppe an der Kölner Universität zwei Gruppen in Berlin (DLR) und in Göttingen (MPS) gehörten.



Field-Imaging Far-Infrared Line Spectrometer (FIFI-LS)

Das wissenschaftliche Ferninfrarot-Spektrometer wurde ab 2014 an Bord eingesetzt. Mit einer mittleren spektralen Auflösung von etwa 1000 bis 2000 deckte es den Bereich von 50 bis 203 μm komplett ab. Das abbildende 2-Kanal-FIR-Spektrometer war darauf spezialisiert, im gesamten FIR-Bereich die Emissionslinien galaktischer und extragalaktischer Objekte zu vermessen. FIFI-LS erlaubte es, die chemische Zusammensetzung, Temperatur und Dichte von interstellarem Gas zu untersuchen und auch dynamische Vorgänge zu beobachten. Die beiden 25×16 Ge:Ga-Arrays erzeugten instantan für jedes räumliche Pixel auf einem Gesichtsfeld von 5×5 Pixeln je ein Spektrum und damit einen Datenkubus von $5 \times 5 \times 16$ Pixeln, parallel je einen im Bereich von 50 bis 100 μm und 100 bis 203 μm . FIFI-LS konnte sehr effizient ausgedehnte galaktische wie extragalaktische Emissionsgebiete kartieren. Diese Karten bauten sich als Mosaik aus den kleinen 5×5 -Pixel-Feldern auf. Auch FIFI-LS wurde während des Betriebs weiter optimiert und entwickelte sich zu einem der drei gefragtesten Instrumente.

Die Entwicklung dieses Instruments wurde am Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik in Garching begonnen und an der Universität Stuttgart abgeschlossen.





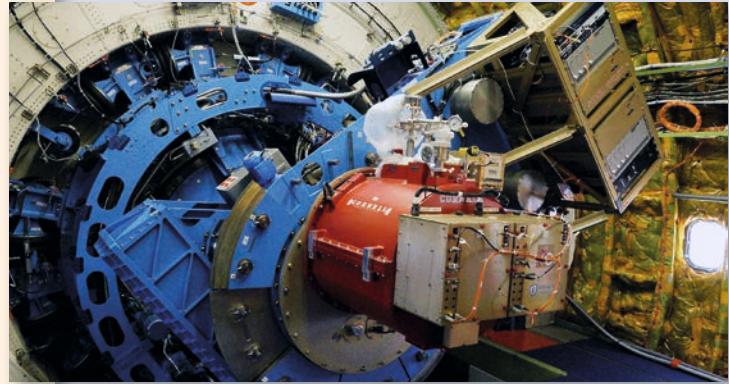
Focal Plane Imager+ (FPI+)

Die vom Deutschen SOFIA Institut entwickelte optische Kamera diente zunächst als diagnostisches Kamerasystem für das SOFIA-Teleskop und ersetzte nach wenigen Jahren die vormalige Nachführkamera, da sie deutlich empfindlicher war und zudem Bilder mit einer Frequenz von etwa 3 bis 10 Hz (ohne binning) oder bis zu 330 Hz (mit binning) auslesen konnte. Diese Fähigkeit war vor allem für die Beobachtung planetarer Bedeckungsereignisse nötig – einem weiteren, wichtigen Standbein des mobilen Observatoriums. Da es möglich war, zwischen beiden Betriebsmodi umzuschalten, war die Kamera als drittes deutsches Instrument permanent mit ihrem Filtersatz am Teleskop installiert und stand für Messungen zur Verfügung.

Faint Object infraRed CAmera for the SOFIA Telescope (FORCAST)

FORCAST war eine 2-Kanal-Weitwinkelkamera für den Wellenlängenbereich von 5 bis 40 μm , der als „thermisches Infrarot“ bekannt ist. Sie benutzte einen 256^2 Si:As BIB-Detektor (BIB steht für Blocked Impurity Band) bis 25 μm und jenseits davon einen gleichformatigen Si:Sb BIB-Detektor. Die Kamera war mit mehreren Breit- und Schmalbandfiltern ausgestattet und konnte Objekte im Temperaturbereich von -200 bis 300 $^{\circ}\text{C}$ aufspüren und abbilden. Ein zuschaltbares Gitterprisma (Grism) erlaubte es zudem, niedrig aufgelöste Spektren mit $R \approx 200$ zu gewinnen.

Die Kamera wurde von einem Team der Cornell University entworfen und gebaut.



Echelon-Cross-Echelle Spectrograph (EXES)

Dieses hochauflösende Echelle-Spaltspektrometer erzielte im MIR-Spektralbereich zwischen 5 und 28 μm spektrale Auflösungen bis 10^5 und diente vor allem der Untersuchung von Punktobjekten. Die hohe Auflösung half insbesondere, Moleküle wie H_2O oder CH_4 im Weltall zu beobachten. Das MIR-Echelle-Gitter hatte bei einer Länge von einem Meter einen Furchenabstand von 7,6 mm und arbeitete bei einer Betriebstemperatur von 7 K. EXES profitierte besonders von der sich stetig verbessernden Pointing-Stabilität des Teleskops.

EXES wurde von einer Gruppe unter Federführung der University of California Davis entwickelt.

High-Resolution Airborne Wideband Camera (HAWC+)

Diese Ferninfrarotkamera arbeitete im Spektralbereich von 50 bis 220 μm und wurde als neu entwickeltes Instrument 2018 kommissioniert. Die Kamera war in der Lage, das von bodengebundenen Observatorien unbeobachtbare Licht des fernen Infrarots in vier Spektralbändern beugungsbegrenzt abzubilden. Ihre Besonderheit lag in der Fähigkeit, anhand der Polarisation des einfallenden FIR-Lichts die Richtung von Magnetfeldern im interstellaren Raum zu bestimmen. HAWC+ benutzte drei spezielle Bolometerarrays mit je 31×40 Pixeln, die mithilfe adiabatischer Demagnetisierung auf 0,1 bis 0,2 Kelvin gekühlt wurden.

Die Kamera wurde von einem Konsortium aus mehr als einem Dutzend Universitäten und Regierungslabors entwickelt, darunter die Rice University.

