

Einführung

zu "SOFIA -Astronomie und Technologie im 21. Jahrhundert, Astronomy and Technology in the 21st Century"

Hans Peter Röser
Institut für Weltraumsensorik
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, DLR
Rudower Chaussee 5
12489 Berlin

„Welch Begierde fühl' ich, mich in den unendlichen Luftraum zu stürzen,“

Mit diesen Worten drückte Goethe den urzeitlichen Traum der Menschheit aus, fliegen zu können, sich in die Lüfte zu erheben, frei zu sein, um den Erdenball mit größerem Überblick zu schauen und der Sonne und den Sternen näher zu sein.

Warum sollte das nicht auch für die Astronomie gelten? In diesem Falle gibt es neben dem mythologischen Aspekt noch einen äußerst wichtigen wissenschaftlichen Gesichtspunkt, nämlich die Transmission der Erdatmosphäre.

ERDATMOSPHÄRE

Aufgrund des Wasserdampfgehaltes in der Erdatmosphäre und einigen anderen Molekülen, wie z.B. Ozon und Sauerstoff, sind erdgebundene Beobachtungsmöglichkeiten im Submillimeter-Wellenlängenbereich (Submm: 1 mm - 300 μm , 300 GHz - 1 THz) beschränkt auf wenige schmalbandige Atmosphärenfenster, welche nur von ausgewählten, hochgelegenen Orten aus bei extrem guten Wetterbedingungen möglich sind. Nimmt man noch den anschließenden Ferninfrarot- (FIR: 300 μm - 30 μm , 1 THz - 10 THz) und Mittelinfrarot-Wellenlängenbereich (MIR: 30 μm - 3 μm , 10 THz - 100 THz) dazu, so bleiben etwa zwei Frequenzdekaden für die Astronomie vom Erdboden aus nahezu unzugänglich. Dies ist einer der letzten noch wenig erforschten Spektralbereiche des elektromagnetischen Spektrums, der insbesondere die bestehende Lücke zwischen dem Radio- und Infrarotbereich schließt.

Durch die Tendenz zur Tröpfchen- und Eiskristallbildung des Wassermoleküls konzentriert sich der Wasserdampfgehalt der Atmosphäre auf die Troposphäre. Er fällt abrupt nach oben in der Stratosphäre ab. In Verbindung mit der geringeren Druckverbreiterung in großen Höhen reicht dieser Abfall aus, um fast den gesamten Spektralbereich in der Stratosphäre transparent zu machen. Die Höhe der Tropopause - Grenzschicht zwischen Troposphäre und Stratosphäre - schwankt dabei jahreszeitlich und geographisch zwischen etwa 10 km und 17 km, erreicht jedoch kaum mehr als 15 km. Der Einsatz von Teleskopen auf Astronomie-Forschungsflugzeugen, kurz Astroflugzeuge, oder unbemannten Ballonen oberhalb der Tropopause ermöglicht also eine nahezu ungehinderte Beobachtung astronomischer Objekte im FIR und Submm Spektralbereich. Bei einer Höhe von 14 km sind etwa 85% des Spektralbereiches durchsichtig (Siehe auch die Transmissionskurven auf dem Bucheinband). Beobachtungen

ohne jeglichen Einfluß der Erdatmosphäre kann man allerdings erst von Satelliten, Space Shuttle und Raumstation aus durchführen.

ASTROFLUGZEUGE

Im Prinzip könnte man viele kommerzielle Flugzeugtypen als astronomische Plattform verwenden. Obwohl im Vergleich zu Bodenteleskopen dabei nur ein relativ kleines Teleskop und auch nur für eine limitierte Flugzeit eingesetzt werden kann, bieten Astroflugzeuge eine Reihe ganz wesentlicher Vorteile gegenüber nur gelegentlich stattfindenden Ballonflügen und auch gegenüber Satelliten. Da ein fliegendes Observatorium prinzipiell auf jedem größeren Flughafen weltweit starten und landen kann, kann es eingesetzt werden zur Beobachtung von kurz andauernden oder nur lokal auftretenden astrophysikalischen Ereignissen an jedem Ort der Welt, wie z.B. bei Sternbedeckungen, Sonnen- und Mondfinsternissen. Des weiteren ermöglicht es einen kurzfristigen und gezielten Einsatz bei plötzlich auftretenden Ereignissen, wie z.B. Kometen und Supernovae. Gegenüber einem Satelliten bietet das Flugzeug den Vorteil, daß die modernsten Beobachtungsinstrumente zum Einsatz kommen, auch solche, die noch im Prototypstadium während der Beobachtung im Flug die Feinabstimmung und Optimierung durch die persönliche „Handauflegung“ des Erbauers erhalten. Außerdem können durch die vielen Flüge pro Jahr eine Vielzahl von verschiedenen Empfängern eingesetzt und damit auch ein breites Spektrum von unterschiedlichen astronomischen Fragen behandelt werden.

KUIPER AIRBORNE OBSERVATORY (KAO)

Alle Flugzeugobservatorien, die bis jetzt bedeutende astronomische Ergebnisse geliefert haben, wurden vom *NASA Ames Research Center* in Kalifornien betrieben. Das erste Astroflugzeug war ein *Lear Jet* mit einem 30 cm Teleskop, mit dem ab 1969 viele interessante Beobachtungen und Erstentdeckungen gemacht wurden. Sehr viel größer und vielseitig verwendbar war das *Kuiper Airborne Observatory*, das von 1974 bis 1996 sehr erfolgreich im Einsatz war. Das KAO ist ein umgebauter Truppentransporter, Modell *Lockheed L200 Starlifter* (militärische Bezeichnung C141) mit einem eingebauten 91,5 cm Cassegrain-Reflektor, das pro Jahr etwa 60 bis 80 Flügen mit je 7 Stunden Flugzeit absolvierte. Damit hat die Flugzeug-astronomie ihren Siegeszug angetreten, und ist heute ein ganz wesentlicher Bestandteil der multispektralen Analyse von astronomischen Quellen. Das KAO war ein nationales Observatorium, das vorwiegend von US-Wissenschaftlern genutzt wurde. Allerdings gab es drei deutsche Gruppen (Max-Planck-Institut für Astrophysik in Garching, Max-Planck-Institut für Radioastronomie in Bonn, Universität Köln), die erfolgreich mit mehreren Flügen pro Jahr Beobachtungen durchführen konnten. Ich selber habe zusammen mit meiner Gruppe und einem eigenen Heterodynspektrometer eine Reihe von höheren Kohlenmonoxidübergängen in verschiedenen galaktischen Quellen erstmalig nachweisen und zum Teil kartieren können.

GESCHICHTE DES SOFIA PROJEKTES

Bereits beim KAO Symposium 1984, anlässlich des 10. Jahrestages seit Bestehen des KAO, wurde ein Vorschlag für ein neues Astroflugzeug mit größerem Spiegeldurchmesser gemacht. Grobe Abschätzungen schienen ein Teleskop mit ungefähr 3m Durchmesser im Vorderteil einer Boeing 747 als zukünftig realisierbar anzusehen. Im Jahr darauf bewilligte die NASA für das Rechnungsjahr 1986 eine Studie, um die Flugzeugmodifikation zu untersuchen. Es war bis

des großen Interesses von deutscher Seite wurde 1985 in Washington D.C. bei einem Treffen zwischen NASA und DFVLR/BMFT (Deutsche Forschungs- und Versuchsanstalt für Luft- und Raumfahrt, heute DLR/Bundesministerium für Forschung und Technologie, heute BMBF) und der amerikanisch-deutschen *Science Community* vereinbart, daß parallel dazu in Deutschland eine Studie für das Teleskopsystem mit einem Leichtgewichtspiegel gemacht werden sollte. Der erste Technologie Workshop fand im Mai 1986 im *NASA Ames Research Center (NARC)* in Moffett Field statt. Bis Mitte 1987 lagen die Ergebnisse der verschiedenen Studien in USA und Deutschland vor, so daß im September desselben Jahres das *Red Book* als *Phase A System Concept Description* erschien. Dieses ist bis heute die Grundlage des SOFIA-Projektes geblieben. Im Oktober 1988 begann dann die Phase B mit Studien bei NARC zum Flugzeugsystem und in Deutschland zum Teleskop. Der deutsche Anteil beim SOFIA-Projekt wurde auf 20% festgelegt. Dies galt sowohl bei den Kosten für den Bau des Observatoriums als auch für die Beteiligung an den Betriebskosten. Als Gegenleistung sollen dafür 20% der Beobachtungszeit an die deutschen Wissenschaftler gehen.

Im wesentlichen aus Kostengründen wurde im Januar 1989 in einem Übereinkommen zwischen NASA und DFVLR der Teleskopdurchmesser auf eine nutzbare Größe von 2,5 m mit einem physikalischen Durchmesser von 2,7 m endgültig festgelegt. Ein größerer Durchmesser hätte enorme Kosten bei der Hauptspiegelherstellung unter Einhaltung gleicher Spezifikationen und durch größere Strukturveränderungen im Flugzeugrumpf verursacht. Nach Abschluß der Studien der Phase B in 1989 wurde ein *cost review* erfolgreich durchgeführt und der gemeinsame Projektbeginn für Oktober 1991 festgelegt. Mit dem konkreten Projekt vor Augen wurde die deutsche *SOFIA Science Working Group (SSWG)*, bestehend aus Vertretern der wichtigsten deutschen Forschungseinrichtungen, gegründet, deren Vorsitz ich seit dieser Zeit wahrnehme.

Alles schien auf einen operationellen Beobachtungsbetrieb ab Ende 1993 hinzudeuten, der es auch ermöglicht hätte, während der 18monatigen Flugzeit des ISO-Satelliten sehr schnell auf Neuentdeckungen oder „Kuriositäten“ zu reagieren und sie z.B. mit höherem spektralen und räumlichen Auflösungsvermögen als ISO zu untersuchen.

Aber der Fall der Berliner Mauer im November 1989 und die anschließende Wiedervereinigung Deutschlands im Oktober 1990 sowie der Zerfall der Sowjetunion und drastische Budgetkürzungen bei der NASA Anfang der 90er Jahre haben dann zu einer Verzögerung des Projektes von etwa 5 Jahren geführt. Es war ein Auf und Ab diesseits und jenseits des Atlantiks, und es schien manchmal, als ob SOFIA bereits eine Crashlandung machte, bevor es sich wirklich in die Lüfte erheben sollte.

Im Mai 1990 wurde die DARA gegründet, und die Planung für SOFIA wurden in der Hauptabteilung „Erforschung des Weltalls“ mit viel Engagement weitergetrieben. Mit der deutschen Wiedervereinigung begannen dann immer wiederkehrende Budgetkürzungen für das nationale Programm der deutschen Raumfahrt, die bis heute kein Ende nehmen wollen. Nachdem 1991 im *Bahcall Report* SOFIA als „top priority moderate new mission for NASA“ deklariert wurde, aber auf deutscher Seite wegen der fehlenden Finanzen kein *commitment* gegeben werden konnte, entschied sich NASA für ein reines US-Programm und startete Anfang 1992 entsprechende Teleskopstudien bei der amerikanischen Industrie.

In einer konzertierten Aktion deutscher Wissenschaftler aus verschiedenen Forschungseinrichtungen wurden durch intensive Gespräche mit Parlamentariern ein Teil der Budgetkürzungen wieder rückgängig gemacht, so daß auch das Projekt SOFIA auf deutscher Seite wieder zum Leben erweckt wurde. Aber nun erfolgte eine drastische Budgetkürzung bei NASA, die das Projekt auf amerikanischer Seite zum Scheitern bringen würde. Aufgrund der schriftlichen Zusagen durch die DARA im Oktober 1993 entschied sich NASA für den Erhalt des

ein echter Vorteil eines bilateralen Programms deutlich. Alle Projektteile wurden von Industrie und Wissenschaftlern nochmals einer kritischen Überprüfung unterzogen und führten schließlich zu einer merklichen Kostenreduzierung. Folgende Hauptveränderungen wurden vorgenommen:

- das Teleskop sollte im Rumpf hinter den Flügeln montiert werden und
- die NASA entschied sich, den Bau und den Betrieb des Observatoriums zu privatisieren.

Viele Gespräche amerikanischer aber auch deutscher Wissenschaftler mit US-Senatoren und Kongressabgeordneten sorgten für eine positive Stimmung für das Projekt. Aber erst die SOFIA-Party in der Deutschen Botschaft in Washington D.C. am 27. Juni 1995 mit mehr als 250 Gästen aus Industrie, Politik und Wissenschaft diesseits und jenseits des Atlantiks und vielen offiziellen Reden und Statements besiegelten das amerikanisch-deutsche Projekt. SOFIA war wieder am Himmel !!

Im April 1996 wurde von der NASA das *Request for Proposal* an die amerikanische Industrie herausgegeben und im Juni von der DARA ebenfalls die Aufforderung zum Angebot für den Bau des Teleskops an die deutsche Industrie verschickt.

Die Regierungsentscheidung im Sommer 1996, die DARA in die DLR zu integrieren und die damit verbundenen Kürzungsmaßnahmen, führte nochmals zu kleineren Turbulenzen auf deutscher Seite, die aber durch ein starkes Engagement der deutschen Wissenschaftler und beträchtliches Stehvermögen der DARA Mitarbeiter erfolgreich überstanden wurden. Im Dezember 1996 war es dann soweit. Die NASA unterschrieb den SOFIA-Vertrag mit *USRA (Universities Space Research Association)*, die DARA unterschrieb den Teleskopentwicklungsvertrag mit MAN Technologie AG und Kayser-Threde GmbH und das *Memorandum of Understanding (MoU)* zwischen NASA und DARA wurde unterzeichnet.

Für 2001 sind die ersten Testflüge geplant und voraussichtlich wird der Operationsbetrieb Anfang 2002 beginnen. Deutschland wird als 20prozentigen Anteil das Teleskopsystem liefern und ebenfalls sich mit 20% an den jährlichen Betriebskosten beteiligen. Dafür stehen den deutschen Wissenschaftlern jährlich 32 der 160 geplanten Forschungsflüge zur Verfügung, wobei jeder Flug eine maximale Beobachtungszeit von 7,5 Stunden abhängig von der Flughöhe zwischen 10 km und 15 km bietet. Der Heimatflughafen wird wie für das KAO bei NARC in Kalifornien sein, wobei auch regelmäßige Südhimmelkampagnen voraussichtlich von Neuseeland aus gestartet werden. Es ist vorgesehen, daß SOFIA einmal pro Jahr auch in Deutschland zu sehen sein wird. Das SOFIA-Team in USA setzt sich aus etwa 80 Mitarbeitern zusammen, von denen etwa 15 aus Deutschland kommen werden. Dies bietet den deutschen Wissenschaftlern als auch dem heranwachsenden Nachwuchs eine hervorragende Möglichkeit, sich bei diesem Projekt engagiert einzubringen.

WISSENSCHAFTLICHE AUFGABEN

Infrarot- und insbesondere die Ferninfrarotastronomie sind sehr junge Forschungsgebiete verglichen mit der optischen Astronomie. Sie erschließen Gebiete und Objekte unseres Weltalls, die im visuellen Wellenlängenbereich nicht zu beobachten sind. Von besonderem Interesse sind dabei kühle und kalte Objekte, die wegen der Planck-Kurve ihr Strahlungsmaximum im FIR haben. Außerdem können aufgrund der sehr geringen Absorption von Staub Objekte beobachtet werden, die sich hinter dichten Staubwolken verbergen. Daneben haben Staubteilchen ihre charakteristischen Spektrallinien im IR Bereich als auch ein Großteil der Moleküllinien ihre Rotationsübergänge im FIR und Submm Bereich. Das SOFIA Teleskop bietet zusammen mit verschiedenen Instrumenten eine Kombination aus hoher räumlicher und spektraler Auflösung

ausgerichtet werden, sondern auch auf ferne Galaxien und Galaxienhaufen. Gemeinsam ist diesen Objekten, daß sie unterschiedliche Entwicklungsstufen unseres Weltalls repräsentieren: die Entstehung von Planeten, Sternen und Galaxien und den Kreislauf von interstellarer Materie durch Geburt und Tod von Sternen. Von ganz besonderem Interesse sind UV- und optische Linien weit entfernter Objekte, d. h. aus der Frühzeit des Weltalls, die ins FIR und Submm Wellenlängengebiet „rotverschoben“ sind.

Eingebettet in riesige Molekülwolken entstehen neue Sterne, deren Abstrahlung wiederum die umgebende Wolke zur Strahlung im FIR anregt. Diese Strahlung kann ungehindert durch den davor liegenden Staub hindurchdringen und ist damit ein Indikator für Sternentstehung. Beobachtungen von Kontinuumsstrahlung als auch schmale Atom- und Moleküllinien geben Auskunft über den physikalischen Zustand und die Dynamik solcher Objekte.

Im Sternbild des Schützen liegt das Zentrum unserer Milchstraße, das als aussichtsreicher Kandidat für ein schwarzes Loch gilt, wie es theoretisch vorhergesagt wird. Mit optischen Teleskopen kann dieser Bereich wegen den davor liegenden Staubwolken nicht beobachtet werden. Erst durch Beobachtungen im Wellenlängenbereich IR bis Millimeter wird er zugänglich.

Einige Galaxien, insbesondere Spiralgalaxien, zeichnen sich durch eine extrem starke Infrarotstrahlung aus, die bis zu tausendmal stärker sein kann als die Abstrahlung im sichtbaren Bereich und damit neue Strukturen offenbart, die bislang noch kaum verstanden sind. Theoretisch vorhergesagt wird Materie, die nicht über optische Methoden nachweisbar ist. Diese sogenannte „Dunkle Materie“ versteckt sich möglicherweise zum Teil in schwachen roten Galaxien.

SCHLUSSBEMERKUNG

Der vorliegende Band ist eine Zusammenfassung des ersten deutschen SOFIA-Workshops vom 12./13.06.97 im DLR Forschungszentrum in Berlin. Er gibt einen Einblick über die Motivation für das SOFIA-Projekt und stellt aus deutscher Sicht die wissenschaftlichen Ideen und Fragestellungen dar, denen nachgegangen werden soll, sowie das dazu notwendige Instrumentarium, das in den verschiedenen Forschungseinrichtungen entwickelt werden soll bzw. wird. Die Beiträge der deutschen Industrie beschreiben das Teleskopkonzept und geben Details zum optischen System und wie die einzelnen Spezifikationen erreicht werden sollen. Eric Becklin, Leiter des gesamten SOFIA Projektes bei USRA und designerter erster Direktor des SOFIA Observatoriums sowie Jackie Davidson und Ed Erickson geben einen Überblick über das gesamte Programm und die Instrumentenkonzepte.

Die Realisierung eines solchen bilateralen und langlebigen Projektes verlangt und schafft starke, verbindende Elemente über den Atlantik, über politische Grenzen und Zeitzonen hinweg und begründet und festigt lebenslange Freundschaften, die das Fundament für ein erfolgreiches Observatorium sind. Auch ist es bemerkenswert, wieviel Phantasie, Energie und wissenschaftliche Neugierde durch das Kommen solch eines fliegenden Labors frei gesetzt wird. Ein zwanzigjähriger Betrieb ist Grundlage für eine hervorragende Nachwuchsförderung mit vielen Diplom- und Doktorarbeiten und bietet langfristige Entwicklungsszenarien für Instrumente, die einer stetigen Verbesserungen bedürfen.

Für die deutsche Industrie ist die Entwicklung des Teleskops eine große Herausforderung und verlangt außergewöhnliche Ingenieurleistungen. Aber als Lohn der Anstrengungen winkt der Ruhm für eine weltweit einmalige Spitzenleistung.

Ich bin sicher, daß auf deutscher Seite sowohl die Industrie als auch die Wissenschaftler mit diesem Projekt in der IR-Astronomie und in der ganzen IR-Technologie weltweit großes An-

Teleskopen (ISO, FIRST, SIRTf) werden deutsche Wissenschaftler ihre internationale Spitzenstellung in der IR/FIR/Submm-Astronomie sichern und erweitern und herausragende Beiträge zu fundamentalen Fragen der Astrophysik leisten können.

An dieser Stelle möchte ich im Namen aller SOFIA-Wissenschaftler all denen von ganzen Herzen danken, die das Projekt möglich gemacht haben und es immer wieder vor dem Absturz bewahrt haben.

Schließen möchte ich mit der ersten Textzeile des Chansons von Reinhard Mey

„Über den Wolken muß die Freiheit wohl grenzenlos sein“

und hoffnungsvoll auf den Jungferflug mit grenzenlosem Blick in das Universum warten. Ein aufregende Zeit wird beginnen.

Berlin, im Januar 1998

Hans Peter Röser

Literatur

The Decade of Discovery in Astronomy and Astrophysics
„Bahcall Report“
National Academy Press, 1991
ISBN 0-309-04381-6

Flugzeugastronomie in Deutschland
Hans Peter Röser, Johannes Schmid-Burgk
Sterne und Weltraum, Vol. 28, Nr. 11, pp 648-653, 1989

DLR - Projekte und Missionen
SOFIA
Institut für Weltraumsensorik, Berlin
DLR-PR-200-15d-4/98

NASA Conference Publication #2353
Airborne Astronomy Symposium
July 11-13, 1984

SOFIA - A stratospheric observatory for infrared astronomy
P.G. Mezger, H.P. Roeser
E. Bussoletti, A.A. Vittone (eds.): Dusty Objects in the Universe
Kluwer Academic Publisher, pp 123-130, 1990

ASP Conference Series, Vol. 73
Airborne Astronomy Symposium on the Galactic Ecosystem: From Gas to Stars to Dust
Edited by M.R. Haas, J.A. Davidson, E.F. Erickson
1995