

Wissenschaft in die Schulen!

Didaktisches Material zu diesem Beitrag:  
[www.wissenschaft-schulen.de](http://www.wissenschaft-schulen.de)

# Das Weltraumteleskop HERSCHEL vor dem Start

Die Europäer sind im Weltraum bald wieder vorn!

VON DIETRICH LEMKE

Sein 3,5-Meter-Spiegel ist der größte bisher für ein Satelliten-Teleskop gebaute. An seinem Einsatzort  $L_2$ , von der Erde in antisolarer Richtung 1,5 Millionen Kilometer entfernt, dient HERSCHEL der Erforschung kalter, staubverhüllter sowie hoch rotverschobener Strahlungsquellen im Kosmos. Wir dürfen Bilder unerreichter Schärfe und Spektren höchster Aussagekraft aus dem bisher kaum erschlossenen Bereich des fernen Infraroten erwarten.

Im Wettlauf um die Erkundung des kalten und des frühen Universums werden schon bald wieder die Europäer die Führung übernehmen. Mit dem Start des großen Infrarot-Weltraumobservatoriums HERSCHEL durch die ESA werden gleich mehrere Rekorde aufgestellt: größter Teleskopspiegel, größte Kameras für das ferne Infrarot, reine Strahlungskühlung für den Hauptspiegel, Helium-3-Kühlung bis dicht an den absoluten Temperatur-Nullpunkt für die neuartigen Bolometerkameras. Damit erreicht ein Vorhaben einen Höhepunkt, das im Jahre 1982 mit dem Vorschlag für ein »Far Infrared and Submillimeter Telescope« (FIRST) begann. Es wurde 1984 als Cornerstone-Mission der ESA ausgewählt. An der Entwicklung der wissenschaftlichen Instrumente wird seit 1999 intensiv gearbeitet.

## Führungswechsel

Der Wettlauf zur Erforschung des Universums im Infraroten hatte 1983 mit dem Start des amerikanisch-niederländischen Durchmusterungs-Satelliten IRAS begonnen. Nach zehn Monaten Beobachtungszeit sah die Welt anders aus: Eine Viertelmillion Quellen waren bei Wellenlängen zwischen 12 und 100 Mikrometern entdeckt worden. Neue Klassen von Galaxien, die den größten Teil ihrer Leuchtkraft im fernen Infraroten (FIR) aussenden, Protosterne in dichten Molekülwolken, kalte Staubscheiben, um gewöhnliche Sterne (Wega-Phänomen) und die himmelsumspannenden IR-Zirrus-Wolken gehörten zu den unerwarteten Entdeckungen.

Der überwältigende Erfolg von IRAS hat gleich nach seinem Start den Beschluss zum Bau eines echten Infrarot-Weltraumobservatoriums in Europa be-

fördert. Mit ISO hatten dann die Europäer ab 1995 die Nase vorn. Mit höherer Empfindlichkeit, besserer räumlicher Auflösung, spektroskopischen Messungen und Erweiterung des Wellenlängenbereiches bis zu 200 Mikrometern gelangen detaillierte Untersuchungen tausender Infrarotquellen. Die Entdeckungen mit ISO haben bis heute zu rund 1400 wissenschaftlichen Veröffentlichungen in den bedeutendsten internationalen Zeitschriften geführt.

Ab 2005 wechselte die Führung dann wieder zur NASA. Mit dem Infrarotteleskop SPITZER wurden die Beobachtungsfähigkeiten nochmals verbessert. Dank einer günstigeren Bahn (nachlaufend auf der Erdbahn, gegenüber hochexzentrischer 24-Stunden-Erdumlaufbahn bei ISO) und der Verwendung von strahlungsfesten Kameras, die den Europäern damals nicht zugänglich waren, beeindruckten insbesondere SPITZERS detaillierte Himmelskarten im mittleren Infraroten ( $\lambda < 28 \mu\text{m}$ ).

An diesem europäisch-amerikanischen Wettlauf beteiligt sich neuerdings ein dritter Partner, die japanische Weltraumagentur JAXA. Mit dem heliumgekühlten Satelliten AKARI wird seit 2006 beides angegangen: systematische Himmelsdurchmusterung bis zu 200 Mikrometer Wellenlänge und gezielte Untersuchungen einzelner Objekte im Observatoriumsbetrieb.

Alle bisher gestarteten IR-Satelliten hatten Spiegel mit Durchmesser von etwa 60 bis 85 Zentimetern, da sie wegen der notwendigen Tieftst Kühlung mit flüssigem Helium in einer »Thermosflasche« (einem Kryostaten) untergebracht werden mussten. Diese vergleichsweise kleinen Spiegel erlaubten aber nach der Beziehung  $\alpha \propto \lambda/D$  nur ein bescheidenes räumliches Auflösungsvermögen  $\alpha$ , beispielsweise nur  $\alpha \approx 1$  Bogenminute bei  $\lambda \approx 100 \mu\text{m}$ . Daher war es ein jahrzehntelanger Wunschtraum auf beiden Seiten des Atlantiks, auch im fernen Infrarot (FIR)

## »Sterne und Weltraum« im Physik-Unterricht



Zu diesem Beitrag stehen Ihnen und Ihren Schülern auf unserer Internetseite [www.wissenschaft-schulen.de](http://www.wissenschaft-schulen.de) kostenlos didaktische Materialien zur Verfügung.

Mit dem Weltraumteleskop HERSCHEL soll die Infrarotstrahlung von Objekten im Weltraum gemessen werden. Damit das Teleskop mit seiner eigenen Wärmestrahlung die astronomischen Messungen nicht stört, muss es möglichst

weitgehend abkühlen. In unserem Beitrag denken wir darüber nach, wie stark HERSCHEL von der Strahlung der Sonne und der Erde aufgeheizt wird und wie der Satellit gekühlt wird.

Unser Projekt »Wissenschaft in die Schulen!« führen wir in Zusammenarbeit mit der Landesakademie für Lehrerfortbildung in Bad Wildbad durch. Es wird von der Klaus Tschira Stiftung gGmbH großzügig gefördert.



◀ Abb. 1: Das Weltraumteleskop HERSCHEL ist 7,5 Meter hoch. Im Schatten des großen zur Sonne und Erde gewandten Strahlungsschildes kühlt sich der 3,5-Meter-Hauptspiegel auf eine Temperatur von etwa  $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$  ab.

die im Optischen übliche Bildschärfe im Bogensekundenbereich zu erreichen. Und da hilft nur Größe: Mit seinen 350 Zentimetern Öffnung ist HERSCHEL fast sechsmal so groß wie der Spiegel von ISO, und damit lassen sich noch etwa zehn Bogensekunden große Strukturen erkennen. Dieses bessere Auflösungsvermögen hilft auch die »Konfusionsbegrenzung« der Empfindlichkeit durch den galaktischen Zirkus und durch unaufgelöste (ferne) Galaxien stark zu verringern.

### Der Satellit

HERSCHEL sieht – grob gesagt – wie eine zylindrische Säule von vier Metern Durchmesser und 7,5 Metern Höhe aus (Abb. 1). Die wichtigsten sichtbaren Teile sind mittig ein großer Heliumbehälter, darüber das Teleskop, darunter der warme Satellitenteil mit allen Versorgungs- und Reglern, das Ganze einseitig abgeschirmt durch einen Strahlungsschild. Mit 2400 Litern flüssigem Helium an Bord wiegt HERSCHEL 3,3 Tonnen. Bei einer Verdampfungsrate von zwei Milligramm pro Sekunde reicht dieser Vorrat für eine vierjährige Mission. Drei wissenschaftliche Instrumente befinden sich im Kryo-Vakuum des Heliumbehälters auf Temperaturen nahe dem absoluten Nullpunkt.

Im Satellitenteil befinden sich vor allem die Elektronik für die Lagemessung (Sternsensoren und Kreisel), die Lageregelung (Schwungräder, Gasdüsen) und die Stromversorgung. Weiterhin enthält er die elektronischen Einheiten zur Steuerung der wissenschaftlichen Instrumente, zur Erfassung, Speicherung und Übertragung der Daten sowie zum Empfang von Befehlen der Bodenstation. HERSCHEL ist in drei Achsen stabilisiert und kann mit einer Genauigkeit von  $\pm 2$  Bogensekunden auf die zu untersuchenden Objekte ausgerichtet werden.

Der große einseitige Strahlungsschild gegen die Wärmestrahlung von Sonne und Erde (beide Strahlungsquellen erscheinen in annähernd gleicher Richtung unter einem Winkeldurchmesser von jeweils einem halben Grad) erlaubt in seinem Schatten das passive Abkühlen des Teleskopspiegels auf etwa 80 Kelvin ( $-193\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Die sonnenzugewandte Seite des Strahlungsschildes ist mit Solarzellen belegt. Aus Gründen des Wärmehaushalts und der Energieversorgung

## In Kürze

Nach nahezu 25-jähriger Planungs- und Bauzeit steht das europäische Weltraumobservatorium HERSCHEL kurz vor dem Start seiner neuartigen Mission. Seine wesentlichen Merkmale und Aufgaben sind:

- HERSCHEL wird etwa viereinhalb Jahre lang wartungsfrei am Librationspunkt  $L_2$  (weit jenseits der Mondbahn) beobachten;
- das Observatorium besitzt den größten jemals in der wissenschaftlichen Raumfahrt eingesetzten Hauptspiegel (3,5 Meter Öffnung);
- seine hochempfindlichen Detektoren werden nahezu bis auf den absoluten Nullpunkt ( $0\text{ Kelvin} = -273\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) gekühlt.

- Damit wird HERSCHEL in den bisher kaum erforschten ferninfraroten Spektralbereich vorstoßen und dort eine bisher unerreichte Bildschärfe und spektrale Auflösung besitzen. Seine wissenschaftlichen Programme betreffen zum Beispiel:
  - die Entstehung der Galaxien in der frühesten Jugend des Universums und ihre nachfolgende Entwicklung;
  - die Entstehung von Sternen und ihre Wechselwirkung mit dem interstellaren Medium;
  - die Chemie der Atmosphären und Oberflächen von Kometen, Planeten und ihren Monden;
  - Molekülchemie im Weltraum.



▲ Abb. 2: Der 3,5-m-Hauptspiegel wird aus Siliziumkarbid hergestellt und ist bei großer Steifigkeit und hoher optischer Qualität sehr leicht. Zwölf Sektorteile werden zu dem größten je für den Einsatz im Weltraum gebauten Spiegel zusammengesintert.

ist deshalb ein Kippen der Teleskopachse bis maximal  $\pm 30$  Grad gegenüber der Ekliptik erlaubt. Damit ist ein Ring von 60 Grad bis 120 Grad Sonnenabstand am Himmel beobachtbar, im Laufe eines halben Jahres ist der gesamte Himmel zugänglich.

### Das Teleskop

Der 3,5-Meter-Hauptspiegel ist der größte je für ein Weltraumteleskop gebaute. Als monolithischer Spiegel wird er diesen Rekord vermutlich für immer behalten, denn die für die Zukunft geplanten noch größeren Teleskope werden aus kleineren Teilsiegeln zusammengesetzt sein – entweder entfaltbar wie beim James Webb Space Telescope oder im Formationsflug betrieben wie bei der Interferometer-Mission DARWIN. Es wird auch der Einsatz von Folien als Teleskopspiegel, aufspannbar oder als Fresnel-Linse, untersucht.

HERSCHEL'S Spiegel besteht aus Siliziumkarbid (SiC), einem keramischen Material mit der Dichte  $2,5 \text{ g/cm}^3$ . Gegenüber den sonst für gekühlte Weltraumteleskope verwendeten glasartigen (ISO) oder metallischen (IRAS, SPITZER) Spiegeln bietet SiC bedeutende Vorteile: Das neue Material hat eine sehr hohe mechanische Festigkeit und erlaubt deshalb die Fertigung dünnwandiger selbsttragender Strukturen, es kann sehr gut poliert werden und hat bei guter Wärmeleitfähigkeit

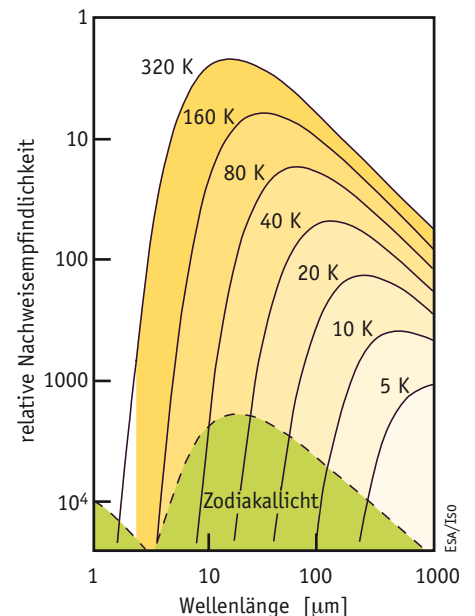
einen kleinen thermischen Ausdehnungskoeffizienten. Die Gesamtmasse des Teleskops beträgt nur 300 Kilogramm.

Der Herstellungsprozess für SiC-Teile ist aufwändig, da sie beim Ausbacken stark schrumpfen. Große Strukturen wie der 3,5-Meter-Spiegel müssen aus kleineren Teilen zusammengesintert werden, hier aus zwölf Sektorteilen (Abb. 2). Die Firma EADS-Astrium (Toulouse) hat das gemeistert und den Spiegel anschließend zum Polieren nach Finnland geschickt. Danach wurde er in der Bedampfanlage des 3,5-Meter-Teleskops des Max-Planck-Instituts für Astronomie am Calar-Alto-Observatorium mit einer Nickel-Chrom-Schicht als Haftgrund, dann mit Aluminium und schließlich mit einer SiO-Schutzschicht bedampft.

Während der Herstellung des Teleskops gab es einige Aufregung. Beim Probe-Abkühlen verschob sich der Brennpunkt stärker als für das neue Material vorhergesagt. Das war beunruhigend, weil HERSCHEL keine Fokussiereinrichtung besitzt. Erinnerungen an den missglückten HUBBLE-Spiegel wurden wach. Während dort eine teure Instandsetzung von der Raumfähre aus möglich war, ist das beim Librationspunkt  $L_2$  vorläufig ausgeschlossen. Wiederholte Abkühlversuche mit dem HERSCHEL-Teleskop führten aber stets zur gleichen Veränderung, die jetzt bei der Justierung vor dem Start berücksichtigt wird.

### Die wissenschaftlichen Instrumente

Erst die Verbindung des großen Teleskops mit modernen Instrumenten in seiner Bildebene bestimmt die Leistungsfähigkeit des Observatoriums. HERSCHEL besitzt drei Instrumente, die alle gleichzei-



▲ Abb. 3: Die thermische Strahlung eines warmen Teleskopspiegels begrenzt die Nachweisempfindlichkeit von Infrarotdetektoren durch zusätzliches Rauschen. Durch Kühlung lassen sich Größenordnungen an Empfindlichkeit gewinnen. Dieses für die photometrischen Kameras von ISO entworfene Bild zeigt, dass bei Kühlung des Teleskops auf  $T \approx 5 \text{ K}$  die Empfindlichkeit nur noch durch den dünnen warmen Staubschleier im Sonnensystem (Zodiakallicht) begrenzt wird. Der Empfindlichkeitsgewinn mit dem auf  $T \approx 80 \text{ K}$  gekühlten HERSCHEL ist geringer. Hier wird der Einfluss der Untergrundstrahlung mit Choppem verringert, außerdem durch die geringere Bandbreite spektroskopischer Messungen.

tig eng benachbarte Teile des Himmels sehen. Aber es wird grundsätzlich nur ein Instrument zur Zeit zum Beobachten benutzt. Es sind dies:

■ PACS, eine photometrische und spektroskopische Kamera; verantwortlicher Wissenschaftler ist Albrecht Poglitsch, Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik, Garching (D);

■ SPIRE, eine photometrische Kamera mit Fourier-Spektrometer; verantwortlicher Wissenschaftler ist Matthew Griffin, Universität von Wales, Cardiff (UK);

■ HiFi, ein hochauflösendes Heterodyn-Spektrometer; verantwortlicher Wissenschaftler ist Thijs de Graauw, SRON National Institute for Space Research, Groningen (NL).

Gemeinsam decken diese Instrumente den großen Wellenlängenbereich von 60 bis 670  $\mu\text{m}$  ab. Körper mit Temperaturen von 50 bis 5 Kelvin senden in diesem Bereich die meiste Strahlung aus. Die drei Instrumente erlauben die nahezu vollständige Analyse der aus dem Kosmos einfallenden Strahlung in diesem Spektralbereich. Die Instrumente ergänzen sich in ihren Fähigkeiten, mit geringen Überlappungen, die Vergleiche erlauben sollen. Die Auslegung der Instrumente wurde durch die am Beginn des Vorhabens aufgestellten Forschungsziele bestimmt:

■ Entstehung von Galaxien im frühen Universum und Verfolgung ihrer Entwicklung

■ Entstehung von Sternen und ihre Wechselwirkung mit dem interstellaren Medium

■ Chemie der Atmosphären und Oberflächen von Kometen, Planeten und ihren Monden

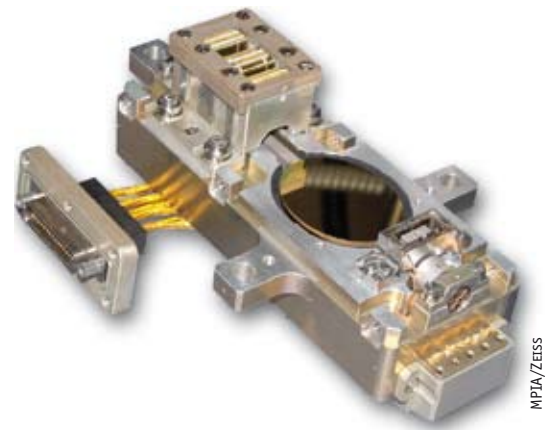
■ Molekülchemie im Weltraum

Eine ins Einzelne gehende Beschreibung der drei wissenschaftlichen Instrumente und ausgewählter Beispiele für Beobachtungsprogramme folgt in den nächsten Abschnitten:

■ **PACS:** HERSCHEL'S Photodetector Array Camera and Spectrometer (PACS) vereint eine Kamera und ein Spektrometer für den Wellenlängenbereich von 60 bis 210  $\mu\text{m}$ . Es erreicht unter den drei Instrumenten die kürzesten Wellenlängen und ermöglicht damit auch viel schärfere Bilder und genauere Spektren interessanter Quellen, die von den bisherigen IR-Weltraumteleskopen ISO und SPITZER nicht aufgelöst werden konnten.

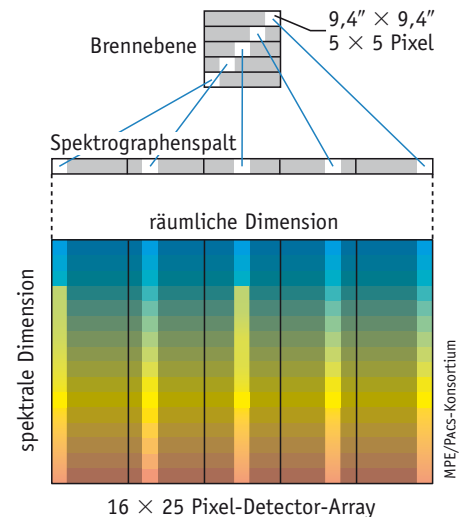
Mit der Kamera können zwei von drei breiten Spektralbändern gleichzeitig beobachtet werden: Dichroitische Strahlteiler und Filter zerlegen den vom Tele-

▶ Abb. 4: Der Chopper des PACS-Instruments, der kleine ovale Spiegel in der Bildmitte, erlaubt durch schnelle Kippbewegungen den Vergleich von Objekt und benachbartem Himmels hintergrund und damit die Beseitigung der in beiden Feldern vorhandenen störenden Eigenstrahlung des Teleskops. Er wird bei  $T \approx -270^\circ\text{C}$  betrieben und benötigt nur zwei Milliwatt Antriebsleistung.



MPTA/ZEISS

▶ Abb. 5: Bilderzerlegung im Spektrometer PACS. Fünf Spiegelscheiben (anschaulich: gegeneinander verdrehte verspiegelte Bücherrücken) zerlegen das Gesichtsfeld in 25 kleine Pixel, deren Licht gleichzeitig durch den Spektrographenspalt geleitet wird. Das auf der Kamera entstehende Bild (unten) enthält also gleichzeitig spektrale (senkrecht) und räumliche (waagrecht) Informationen.



MPE/PACS-Konsortium

skop einfallenden Strahl in die Bänder 60...85  $\mu\text{m}$  und 85...130  $\mu\text{m}$ , von denen eines gleichzeitig mit dem 130...210- $\mu\text{m}$ -Band gemessen wird. Aus den dabei entstehenden Farbkarten kann durch Vergleich mit Planckschen Schwarzkörper-Kurven sofort eine Temperatur für die Quellen im 1,75  $\times$  3,5 Bogenminuten großen Gesichtsfeld abgeleitet werden.

Zuvor muss aber von den gemessenen Signalen noch ein großes Untergrundsignal abgezogen werden, das durch Eigenstrahlung des mit  $T \approx 80\text{K}$  vergleichsweise warmen Teleskops erzeugt wird (Abb. 3). Ein am Eingang des Instruments befindlicher »Chopper«-Spiegel (Abb. 4) lässt das Bild eines Himmelsobjekts auf der Kamera periodisch (mit etwa drei Hertz) um etwa ein bis drei Bogenminuten hin- und herspringen. Auf ein Pixel des Detektors fällt dann abwechselnd das Signal »Objekt + Untergrund« oder nur »Untergrund«. Durch Differenzbildung entsteht daraus das gesuchte Signal des Objekts, befreit vom hohen thermischen IR-Untergrundsignal des vergleichsweise warmen Teleskops.

Die beiden Kameras mit 32  $\times$  64 (kurzwellig) und 16  $\times$  32 (langwellig) Pixeln bestehen aus monolithischen Siliziumbolometern, die auf  $T \approx 0,3\text{K}$  gekühlt werden müssen. Es sind die größten je gebauten Kameras für das ferne In-

frarot. Näheres zu den Bolometern und dem  $^3\text{He}$ -Kühler folgt im Abschnitt über das Instrument SPIRE und im Informationskasten »Kühlen mit Helium« auf Seite 40.

Im Spektrometer von PACS dient ein Gitter zur Zerlegung der empfangenen Strahlung in einzelne Wellenlängen. Zusätzlich befindet sich vor dem Eingang in den Spektrographenspalt ein Bilderzweiler, der ein Gesichtsfeld von weniger als einer Quadratbogenminute in 5  $\times$  5 noch kleinere Felder von nur noch 9  $\times$  9 Quadratbogensekunden Größe zerteilt (Abb. 5). Von jedem dieser 25 winzigen Bildelemente entsteht gleichzeitig ein kleines Spektrum. Auf der zweidimensionalen Kamera mit 25  $\times$  16 Pixeln sind dann die räumlichen und spektralen Daten verschachtelt, ein Auswerteprogramm liefert schließlich die Spektren aller 25 Bildelemente im Feld.

So kann beispielsweise eine nicht zu ferne Galaxie in einer Spektrallinie beobachtet werden und aus der örtlichen Veränderung von Dopplerverschiebung und Linienprofilen können Aussagen zu Bewegungen und Energiequellen im Kernbereich dieser Galaxie gewonnen werden (Abb. 6). Die spektrale Auflösung liegt bei  $\lambda/\Delta\lambda \approx 1500$ . Damit können in den Quellen noch Geschwindigkeiten von 175 km/s aufgelöst werden. Bei fes-

## Kühlen mit Helium

**H**oheempfindliche Detektoren für das ferne Infrarot müssen auf Temperaturen dicht beim absoluten Nullpunkt (0 Kelvin, entsprechend  $-273\text{ °C}$ ) gekühlt werden. Die extrinsischen Photodetektoren in PACS erfordern 1,6 Kelvin, die Bolometer in PACS und SPIRE 0,3 Kelvin. Nur dann sind Dunkelstrom und Wärmekapazität ausreichend klein, um mit geringster Infrarotbestrahlung eine messbare elektrische Widerstandsänderung zu erzeugen.

Flüssiges Helium aus dem häufigen Isotop  $^4\text{He}$  hat bei Normaldruck eine Siedetemperatur von 4,2 Kelvin. Verringert man den Druck in einem Heliumbehälter, so kühlt sich die Flüssigkeit weiter ab. Das Pumpen entfernt die »schnellsten« und damit wärmsten Heliumatome. Das Vakuum des Weltraums ersetzt auf einem Satelliten die Pumpe, deren Pumpleistung nur durch Länge und Durchmesser der Abgasrohre begrenzt wird.  $T \approx 1,6\text{ K}$  kann bei einem Druck von  $p \approx 20\text{ mbar}$  erreicht werden. Bei dieser Temperatur ist das  $^4\text{He}$  superflüssig: die Viskosität wird sehr klein, die Wärmeleitfähigkeit sehr groß, das Helium fließt auch entgegen der Schwerkraft zum jeweils wärmsten Punkt des Behäl-

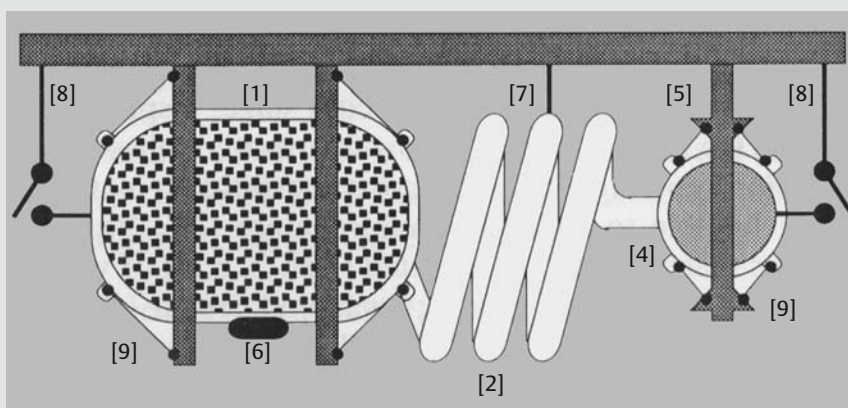
ters. Diesen thermomechanischen Effekt gibt es nur beim flüssigen Helium, er kann quantenphysikalisch erklärt werden. In der Schwerelosigkeit hindert man das superflüssige Helium am Austreten aus dem Behälter (»Superleck«) durch einen porösen Stopfen. Das ist eine Scheibe aus Metallschaum mit mikrometergroßen Poren. Pumpt man an der Außenseite dieses porösen Stopfens, so wird sie durch Verdampfen zum kältesten Punkt und das superflüssige Helium strebt zurück ins Innere des »wärmeren« Tanks.

Das kalte Heliumgas hat, verglichen mit der geringen Verdampfungswärme des flüssigen Heliums, eine sehr große Kühlfähigkeit. Um beispielsweise ein Kilogramm Edelstahl von Raumtemperatur auf vier Kelvin abzukühlen, müssten 33 Liter flüssiges Helium verdampft werden. Benutzt man aber zusätzlich das verdampfende kalte Gas zur Kühlung, so reicht ein Liter. Im HERSCHEL-Kryostaten kühlt das Heliumgas deshalb mehrere Strahlungsschilde, die den Flüssig-Helium-Tank zwiebelschalenartig umgeben. Mit dieser guten Abschirmung fallen nur noch 40 Milliwatt Wärmestrahlung auf den Heliumtank und

der 2300-Liter-Vorrat reicht für eine 4,5-jährige Mission.

Um  $T \approx 0,3\text{ K}$  zu erreichen, wird auf den  $T \approx 1,6\text{ K}$  kalten Tank eine weitere Kühlstufe gesetzt: ein  $^3\text{He}$ -Sorptionskühler. Hier wird das seltene leichte Helium-Isotop benutzt, das bei diesen Temperaturen nicht superflüssig wird. Die Wirkung des Kühlers beruht auf der Verdampfung (und damit Abkühlung) von flüssigem  $^3\text{He}$  durch Pumpen mit einer Sorptionspumpe. Die untenstehende Abbildung zeigt den Aufbau: In der mit Aktivkohle gefüllten Sorptionspumpe [1] wird durch »Ausheizen« das  $^3\text{He}$ -Gas entfernt. Es kondensiert im Verdampfer [4], der durch Schließen eines Wärmeschalters [8, rechts] zum  $T \approx 1,6\text{ K}$  kalten Tank jetzt der kälteste Punkt des Systems ist. Ist alles  $^3\text{He}$  im Verdampfer als Flüssigkeit kondensiert, so kann die Kühlphase beginnen. Dazu wird der Wärmeschalter [8, rechts] geöffnet und der Wärmeschalter [8, links] geschlossen. Jetzt saugt die kalte Sorptionspumpe [1] alles verdampfende  $^3\text{He}$ -Gas ab. Ist der Verdampfer leer gepumpt, beginnt die Wiederherstellungsphase wie anfangs beschrieben. Die Zyklen sind beliebig oft wiederholbar (Kühlen etwa 45 Stunden, Wiederherstellen drei Stunden).

So einfach das Prinzip, so schwierig ist seine technische Umsetzung. Sorptionspumpe und Verdampfer müssen thermisch sehr gut vom großen Heliumtank isoliert werden. Das geschieht durch Auf-



Dokument: ESA/ESR-SP 401 (1997)

◀ Aufbau eines  $^3\text{He}$ -Kühlers. [1] Sorptionspumpe, [2] Pumpröhre, [4] Verdampfer, [5] Kaltfläche  $T \approx 1,6\text{ K}$ , [6] Heizer, [7] Thermische Verbindung, [8] Wärmeschalter, [9] Kevlar-Aufhängung.

ter Stellung des Gitters kann mit dem Bildzerleger gleichzeitig ein Bereich von  $1500\text{ km/s}$  abgedeckt werden. Neben der genauen Untersuchung einzelner Linien erlaubt das Spektrometer durch Drehen des Gitters auch das Durchfahren größerer Wellenlängenbereiche.

Die beiden Kameras für das Spektrometer benutzen als Detektorelemente »extrinsische Fotoleiter«, das sind Germaniumkristalle, die jeweils etwa einen Kubikmillimeter groß und mit Gallium-Atomen dotiert sind. Jeweils 16 Ge:Ga-Kristalle werden zu einer Detektorzeile, und dann 25 dieser Zeilen zu einer  $16 \times 25$ -Pixel-Kamera zusammengefasst (Abb. 7). In einer der beiden Kameras sind alle Pixel, getrennt durch Isolatoren,

hohem mechanischen Druck ausgesetzt (»gedrückt«). Damit werden diese Pixel für noch langwelligere Photonen empfindlich. So kann die obere Grenzwellenlänge der ungedrückten Ge:Ga-Kristalle von  $110\text{ }\mu\text{m}$  nach  $210\text{ }\mu\text{m}$  verschoben werden. Vor jedem Detektorpixel ist ein lichtleitender vergoldeter Konus angebracht. Damit wird die gesamte auf die Kamera fallende Energie auf die kleinen Detektorkristalle konzentriert.

Die Ge:Ga-Photodetektoren haben geringere Ansprüche an die Kühlung als die Bolometer. Für die gedrückten Detektoren reichen  $T \approx 1,6\text{ K}$ , die ungedrückten werden bei  $T \approx 3\text{ K}$  betrieben. Anders als die monolithisch hergestellten Bolometerkameras sind die Ge:Ga-

Photodetektorcameras der Firma ASTEQ in Kelkheim bei Frankfurt am Main Pixel für Pixel in Handarbeit entstanden. Es sind bewundernswerte Meisterwerke der Mechanik, Optik, Elektronik und Kältetechnik.

■ **SPIRE:** HERSCHEL'S Spectral and Photometric Imaging Receiver (SPIRE) vereint ebenfalls eine Kamera und ein Spektrometer für das ferne Infrarot und den zu längeren Wellenlängen anschließenden Submillimeterbereich. Das Instrument deckt den Wellenlängenbereich von 200 bis zu  $670\text{ Mikrometern}$  ab. Es dringt damit in den bisher kaum erforschten Spektralbereich jenseits der mit gedrückten Ge:Ga-Kameras erstmals auf

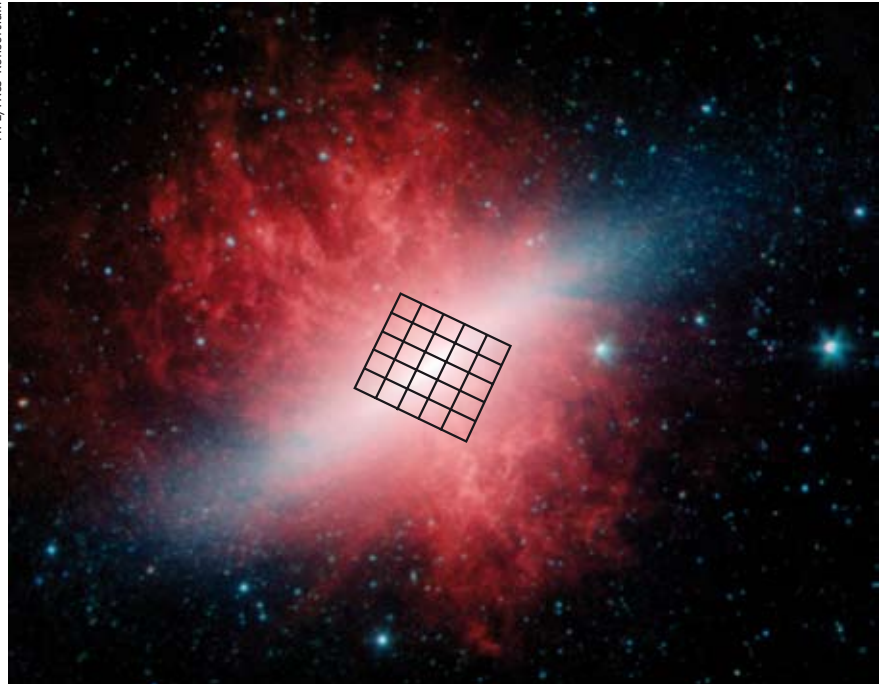
hängung an dünnen Kevlar-Fäden. Diese filigrane Aufhängung muss aber den rauen Raketenstart mit gewaltigen Vibrationslasten überstehen. Das flüssige  $^3\text{He}$  muss bei Schwerelosigkeit im Verdampfer gehalten werden. Dafür wurden Metallschäume gefunden, an die sich  $^3\text{He}$  durch Oberflächenspannung bindet. Durch kluge Auslegung der Pumpröhre [2] und Nutzung der Kühlfähigkeit des Gases können Sorptionspumpe und Verdampfer thermisch entkoppelt werden. Die  $^3\text{He}$ -Kühler für PACS und SPIRE wurden von CEA Grenoble entwickelt. Ihre Kühlleistung beträgt zehn Mikrowatt.

Noch niedrigere Temperaturen können auf Satelliten mit einem  $^3\text{He}/^4\text{He}$ -Entmischungskühler oder durch adiabatische Entmagnetisierung erreicht werden. Im Hochfrequenz-Instrument des Satelliten PLANCK werden in einem Entmischungskryostaten  $T \approx 0,1$  K erreicht. In einer Mischkammer geht gut vorgekühltes flüssiges  $^3\text{He}$  in einem  $^4\text{He}$ -Bad unter Wärmeaufnahme in Lösung und wird an anderer Stelle wieder herausdestilliert. Dabei ergeben sich Kühlleistungen von etwa einem Mikrowatt. Ein solcher Entmischungskühler kann mit Pumpe und Wärmetauscher ohne Unterbrechung arbeiten, benötigt aber Vorkühlstufen für  $T \approx 4$  K.

Woher kommt das Helium?  $^4\text{He}$  ist Bestandteil des Erdgases. An Quellen in Texas, Algerien, Qatar und Russland wird das Gas auf kryogene Temperaturen abgekühlt, wobei alle anderen Bestandteile außer Helium kondensieren. Das seltene  $^3\text{He}$  kann beim radioaktiven Zerfall von Tritium (überschwerer Wasserstoff) gewonnen werden, das wiederum mit Kernreaktoren erzeugt werden kann. Es ist sehr teuer.

Iso erreichten Wellenlängengrenze  $\lambda < 210 \mu\text{m}$  vor.

Wegen der mit der Wellenlänge zunehmenden Größe der Beugungsbilder einer kosmischen Punktquelle müssen auch die Pixelgrößen der Kameras zu größeren Wellenlängen zunehmen. In SPIRE werden deshalb drei Kameras eingesetzt, um für die drei Wellenlängenbereiche um 250, 360 und 520  $\mu\text{m}$  die jeweils höchstmögliche räumliche Auflösung zu erreichen. Abb. 8 zeigt die Pixelfelder der drei Kameras. Zu sehen sind die Eintrittsöffnungen der konischen Lichtleiter, welche die Strahlung auf darunter liegende Detektoren konzentrieren. Letztere sind Bolometer, winzige Germaniumthermometer, die



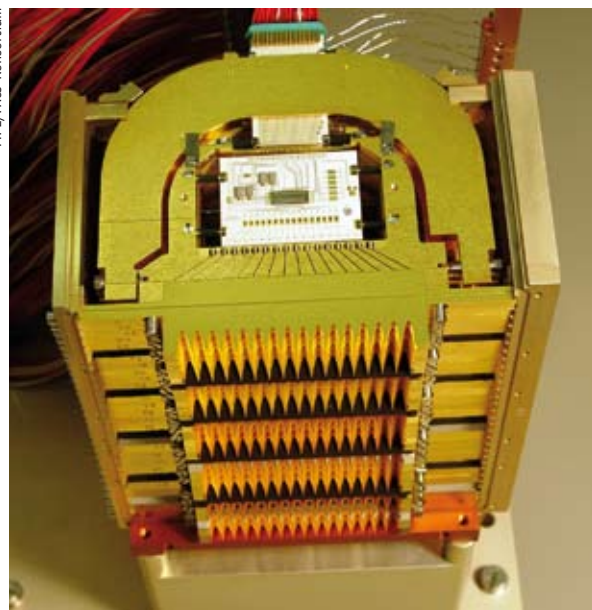
auf geringfügige Erwärmung durch energiearme Infrarotphotonen mit einem kleinen Temperaturanstieg reagieren, der wiederum durch eine kleine Veränderung des elektrischen Widerstands nachweisbar wird. Diese sehr kleinen und thermisch gut isoliert angeordneten Bolometer müssen bei einer Temperatur von 0,3 Kelvin betrieben werden – nur dann ist ihre Wärmekapazität so klein, dass sie von geringem IR-Strahlungseinfall merklich erwärmt werden.

Diese niedrige Temperatur von 300 Millikelvin ist am großen HERSCHEL-Kryostaten nicht verfügbar, das superflüssige Helium kann »nur«  $T \approx 1,6$  Kelvin bieten. Sowohl SPIRE als auch PACS müssen deshalb innerhalb des Instruments einen  $^3\text{He}$ -Kühler verwenden, der, fast baugleich für beide Instrumente, in Grenoble entwickelt wurde. Solche  $^3\text{He}$ -Kühler erlauben eine Betriebszeit von etwa 45 Stunden, dann müssen sie für einen neuen Kühlzyklus regeneriert werden. Das Prinzip eines  $^3\text{He}$ -Kühlers für eine Temperatur von etwa 300 Millikelvin wird im nebenstehenden Informationskasten erläutert.

Der Spektrometerteil ist ein Fourier-Interferometer. Es besitzt keine Gitter oder Prismen, sondern ähnlich wie ein Michelson-Interferometer einen Strahlteiler und einen beweglichen Phasenschieber. Die Strahlung vom Himmel und die von einer eingebauten Eichlampe mit glattem Spektralverlauf gelangen in jeweils einen Arm des Interferometers. Das beim Bewegen des Phasenschiebers entstehende Interferogramm wird mit einer Bolometerkamera aufgezeichnet und anschließend wird durch eine Fourier-Analyse das Himmels-

▲ Abb. 6: Auf einem Bild der Galaxie M82 ist das Blickfeld des Bildzerlegers des PACS-Spektrometers dargestellt. Damit wird die gleichzeitige spektroskopische Untersuchung der Sternentstehung in den unterschiedlichen Bereichen der Galaxie möglich.

▼ Abb. 7: Hier ist die Photodetektor-Kamera des PACS-Instruments zu sehen. Jeweils 16 kleine Ge:Ga-Kristalle werden mit »Schraubzwingen« gedrückt, um ihren Empfindlichkeitsbereich zu größeren Wellenlängen (bis 210  $\mu\text{m}$ ) zu erweitern. 25 dieser gedrückten Detektorzeilen gestapelt ergeben eine der beiden 16  $\times$  25-Pixel-Kameras für das Spektrometer.



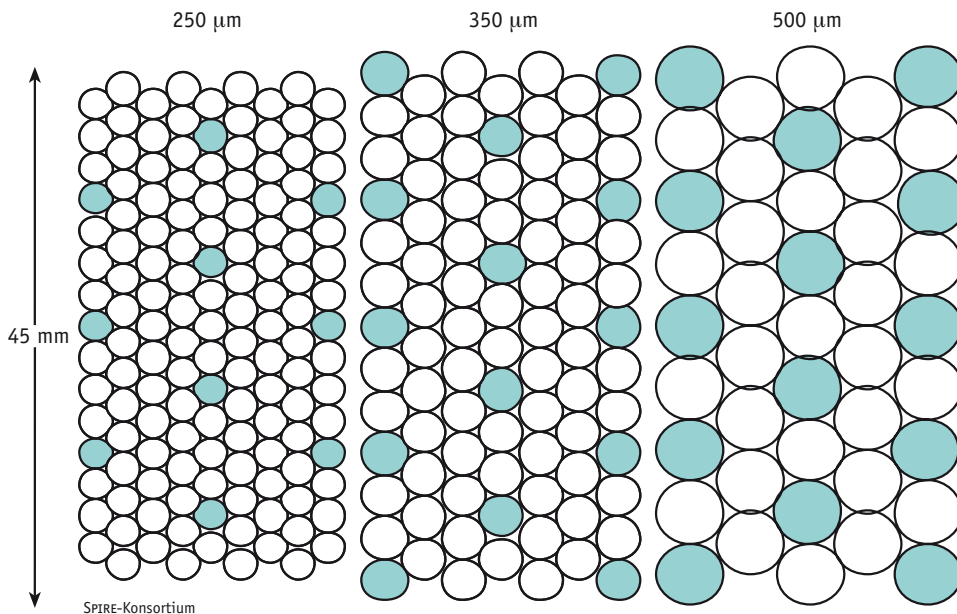


Abb. 8: Die Eintrittsöffnungen der SPIRE-Bolometerkameras sind für gleichzeitige Beobachtungen in den Wellenlängenbändern 250, 350 und 500 µm ausgelegt. Jede Kamera ist 45 Millimeter lang. Mit zunehmender Wellenlänge werden auch die beugungsbegrenzten Pixel größer (18, 25, 36 Bogensekunden) und ihre Anzahl kleiner (139, 88, 43).

spektrum gewonnen. Würde die kosmische Strahlungsquelle beispielsweise nur eine einzige Spektrallinie besitzen, so wäre das Interferogramm eine reine Sinusschwingung. Kompliziertere Spektren ergeben kompliziertere Interferogramme mit scheinbar unregelmäßigen Schwingungen und Schwebungen, aus denen sich aber mathematisch exakt das wirkliche Spektrum der Quelle ableiten lässt. Je nach Bewegungsstrecke des Phasenschiebers (maximal 3,5 cm) können spektrale Auflösungen von  $\lambda/\Delta\lambda \approx 20 \dots 1000$  erreicht werden. Auch die für den Spektralbereich von 200 bis 325 µm aus 37 Bolometer-Pixeln und für den Bereich von 315 bis 670 µm aus 19 Bolometer-Pixeln bestehenden Kameras müssen vom  $^3\text{He}$ -Kühler auf etwa 300 Millikelvin gehalten werden.

Das Gesichtsfeld der drei photometrischen Kameras beträgt  $4 \times 8$  Quadratbogenminuten. Da der ins Instrument einfallende Strahl durch dichroitische Strahlteiler in die drei breiten Bänder bei 250, 360 und 520 µm aufgeteilt wird, können die drei Spektralbereiche gleichzeitig beobachtet werden. Die Gesichtsfelder der einzelnen Bolometerpixel überdecken das Kamerafeld nicht hundertprozentig, deshalb wird mit einem Chopperspiegel ein zweidimensionales Raster abgefahren, um ein vollständiges Bild zu erhalten. Mit dem spektralen Auflösungsvermögen von  $\lambda/\Delta\lambda \approx 3$  liefern die photometrischen Kameras beispielsweise sofort gute spektrale Energieverteilungen von leuchtkräftigen und stark rotverschobenen Galaxien. Bei einer einstündigen Beobachtung können Quellen mit einer Helligkeit von etwa zehn Millijansky erreicht werden. Ausgedehnte Quellen oder größere Felder können mit dem Chopper abgerastert werden oder erfordern die Rasterbewe-

gung des Satelliten. Ähnliches gilt für das Spektrometer mit seinem kreisförmigen Gesichtsfeld von 2,6 Bogenminuten Durchmesser. Es ist sogar möglich, SPIRE und PACS trotz unterschiedlicher Gesichtsfelder am Himmel parallel zu betreiben, um zeitsparend große Felder zu durchmustern.

■ **HIFI:** HERSCHEL'S Heterodyne-Instrument für das ferne Infrarot (HIFI) wird nicht das erste Instrument dieses aus der Radioastronomie bekannten Typs im Weltraum sein. Auf den kleinen Satelliten SWAS und ODIN wurden vor einigen Jahren mit Heterodyn-Instrumenten interstellare und zirkumstellare  $\text{H}_2\text{O}$ -Emissionsquellen und Emissionslinien des molekularen Sauerstoffs erforscht. HIFI wird aber das bei weitem leistungsfähigste Instrument sein, da es in allen Untersystemen die neuesten technischen Entwicklungen nutzt. Die Wirkungsweise eines Heterodyn-Empfängers kennen wir noch vom Radio zu Hause: Das Empfangssignal wird in einem Mischer mit dem im durchstimmbaren lokalen Oszillator erzeugten Signal überlagert und die entstehende Zwischenfrequenz schmalbandig verstärkt (Abb 9). Bei HIFI

sehen alle diese Komponenten anders aus als im Radiogerät, sind doch die interessierenden kosmischen Frequenzen mit 450 bis 1910 Gigahertz (Terahertz-Bereich) einige tausend Mal hochfrequenter (oder kurzwelliger) als die Frequenzen der irdischen Radiosender. Im vertrauten Infraroten entspricht dieser Frequenzbereich dem Wellenlängenbereich  $150 \mu\text{m} < \lambda < 600 \mu\text{m}$ , überlappt also mit denen der beiden anderen Instrumente.

Im großen Kryostaten befinden sich HIFIs kalte Fokalebene-Einheit, die das Einkoppeln der FIR-Signale in die kalten Mixer besorgt, und außerdem die gekühlten Verstärker für die Zwischenfrequenz. Durch Fenster in der Kryostatenwand werden die Signale von verschiedenen außerhalb des Kryostaten angeordneten lokalen Oszillatoren eingeleitet.

HIFI (Abb. 10) hat im Gegensatz zu den beiden Kamera-Instrumenten nur ein Bildelement (Pixel), kann also Karten von ausgedehnten Himmelsobjekten nur durch Rasterbewegungen des ganzen Satelliten erzeugen. Dafür stellt es die anderen Instrumente aber bezüglich seiner spektralen Auflösung von  $\lambda/\Delta\lambda \approx 10^7$  in den Schatten (PACS-Spektrometer: etwa  $10^3$ ). Damit können Profile von Moleküllinien sehr genau vermessen und bezüglich der in den kosmischen Quellen herrschenden Physik und Chemie gedeutet werden. Diese hohe Auflösung erlaubt es, die Geschwindigkeiten innerhalb der Quellen mit einer Genauigkeit von etwa 0,1 km/s zu bestimmen. Da HIFI über den gewaltigen Frequenzbereich 480...1910 GHz durchstimmbar ist, mussten die auf

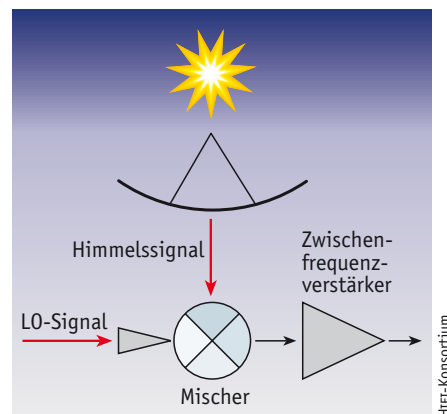


Abb. 9: Vereinfachtes Schema des Heterodyn-Verfahrens, das für das Radio vor achtzig Jahren erfunden wurde und seit Jahrzehnten in der Radioastronomie benutzt wird. Das Signal vom Himmel und das eines durchstimmbaren Oszillators (LO) werden gemischt und eine daraus hervorgehende Überlagerungsfrequenz schmalbandig verstärkt. So erhält man beim Radio hohe Trennschärfe und beim Radioteleskop hohe spektrale Auflösung.

DIE FÜNF BESTSELLER ZUR ASTRONOMIE  
IM SCIENCE-SHOP

1. Vormonat: Platz 1



Hans-Ulrich Keller

■ **Kosmos Himmelsjahr 2008**

Sonne, Mond und Sterne im Jahreslauf. Jetzt mit Tageskalender

Hrsg. v. Hans-Ulrich Keller. Unter Mitarb. v. Erich Karkoschka, 2007, 304 S. m. 266 meist farb. Abb., kart., Kosmos.

Bestell-Nr. 1316. € 14,95 (D), € 15,40 (A)

2. Vormonat: Platz 5



Harald Lesch

■ **Alpha Centauri, Doppelpack: Teil 15 und 16**

DVD-Video

Laufzeit je 143 min., BRW-Service.

Bestell-Nr. 2476.

€ 34,95 (D), € 34,95 (A)

DVD-VIDEO

3. Neueinsteiger



■ **Himmel und Erde Kalender 2008**

Internat. Kalendarium. Text in dtsh. Sprache, 13 farb. Bl., Format 45,5 x 55,5 cm, Weingarten.

Bestell-Nr. 1338.

€ 29,95 (D), € 29,95 (A)

4. Vormonat: Platz 2



Marcus Chown

■ **Das Universum nebenan**

Revolutionäre Ideen in der Astrophysik

2003, 237 S., geb., Komet.

Bestell-Nr. 2449.

Früher € 15,-,

jetzt nur € 9,95 (D), € 10,30 (A)

5. Neueinsteiger



Uwe Reichert, Eckhard Slawik

■ **Atlas der Sternbilder**

Ein astronomischer Wegweiser in Photographien.

Geleitw. v. Richard M. West, Sonderausg., 212 S. m. zahlr. Farbfotos u. zweifarb. Sternktn., geb., Spektrum.

Bestell-Nr. 1712.

€ 19,95 (D), € 20,50 (A)

Mehr zu den Titeln erfahren Sie unter:  
[www.science-shop.de/astrotopfive](http://www.science-shop.de/astrotopfive)



Bequem bestellen: → per E-Mail [info@science-shop.de](mailto:info@science-shop.de)  
→ telefonisch 06221 9126-841

\*Bestellungen in D & A unter € 20,- sowie Bestellungen im sonst. Ausland berechnen wir mit € 3,50. Alle Preise inkl. Umsatzsteuer. Preise unter Vorbehalt. Spektrum der Wissenschaft Verlagsges. mbH

HIFI-Konsortium



▲ Abb. 10: Das HIFI-Instrument deckt den Terahertz-Bereich mit sieben optimierten Empfänger-systemen ab.

Supraleitungstechnik fußenden Mixer für höchste Empfindlichkeit innerhalb von sieben begrenzten Frequenzbereichen optimiert werden. Sie kommen von Instituten in Paris, Köln, Groningen, Pasadena und Göteborg.

**Reise und Reisebegleiter**

HERSCHEL wird zusammen mit dem europäischen Satelliten PLANCK in einer großen Nutzlastspitze gestartet. Träger ist die fünfzig Meter lange Rakete ARIANE 5 (Abb. S. 54), mit der solche Doppelstarts schon wiederholt erfolgreich von Kourou aus durchgeführt worden sind. Sechs Tonnen Nutzlast stehen 750 Tonnen Raketenmasse beim Start gegenüber. Nach 2,5 Minuten Brenndauer werden die beiden Feststofftriebwerke abgetrennt, das Haupttriebwerk brennt für neun Minuten. Schließlich sorgt der 17 Minuten lange Schub aus dem Oberstufentriebwerk für die richtige Flugrichtung und -geschwindigkeit zum Einsatzort am Lagrange-Punkt L<sub>2</sub>, der nach drei Monaten erreicht wird. An diesem Punkt, 1,5 Millionen Kilometer von der Erde entfernt in antisolarer Richtung, »spürt« HERSCHEL die gemeinsame Anziehungskraft von Sonne und Erde und läuft trotz des größeren Sonnenabstands mit der gleichen Winkelgeschwindigkeit um die Sonne wie die Erde.

Für gekühlte Infrarotsatelliten wie HERSCHEL und PLANCK ist L<sub>2</sub> ein idealer Standort: Die beiden unerwünschten Wärmequellen Sonne und Erde liegen stets in der gleichen Richtung. Auf dieser heliozentrischen Bahn herrscht thermische Stabilität, anders als auf den frü-

her verwendeten geozentrischen Bahnen. Da das Halten eines Satelliten in L<sub>2</sub> mit dem Balancieren eines Bleistifts auf der Fingerkuppe vergleichbar ist, werden in der Praxis Bahnen um L<sub>2</sub> gewählt, sie haben bei HERSCHEL Ausschläge von mehreren hunderttausend Kilometern in allen drei Raumrichtungen. Von der Erde aus gesehen beschreiben HERSCHEL und PLANCK Lissajous'sche Schleifen am Himmel um L<sub>2</sub>, bei HERSCHEL mit Ausschlägen von bis zu dreißig Grad. Mehr Einzelheiten zu Bahn-auswahl und -manövern und über die Datenübertragung zu den Bodenstationen der ESA finden sich im Aufsatz von Martin Hechler auf Seite 48 – 55.

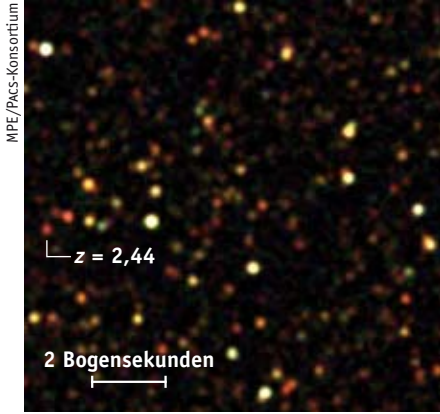
Zwanzig Stunden dauert ein astronomischer Arbeitstag für HERSCHEL. Dann wird der dreiachsstabilisierte Satellit zur Erde gedreht, und alle an Bord gespeicherten Daten werden zur Bodenstation übertragen. Zusätzlich wird das neue Beobachtungsprogramm für die nächsten zwei Tage zum Satelliten gesandt. In dieser Beobachtungspause können auch die <sup>3</sup>He-Kühler wieder aufgefrischt und der Zustand aller Systeme des Observatoriums überprüft und gegebenenfalls be-richtigt werden.

Es ist interessant sich daran zu erinnern, dass zu dieser Zeit HERSCHEL und PLANCK die kältesten Punkte im Welt-raum sein werden. Während das »kos-mische Laboratorium« alle übrigen Re-korde hält (größte Massen und Entfer-nungen, höchste Temperaturen, Dichten und Drücke...) beträgt die tiefste Tempera-tur im Kosmos außerhalb von HERSCHEL und PLANCK nur schlappe drei Kelvin.

**Wissenschaftliche Programme**

Als Observatorium bietet HERSCHEL den Astronomen weltweit den Zugang zu ein-zigartigen Beobachtungsmöglichkeiten.





▲ Abb. 11: In tiefen Durchmusterungen kann die Geschichte der Sternentstehung und der Aktivität Schwarzer Löcher in Galaxienkernen über kosmische Zeiträume verfolgt werden. Das simulierte Bild (Falschfarben aus 70, 100, 160  $\mu\text{m}$ ) zeigt die Erwartung nach 50 Stunden Beobachtungszeit und reicht bei einer Grenzgröße von 0,5 Millijansky bis zu Rotverschiebungen  $z \approx 3$ .

Ausgewählt werden die Vorschläge nach wissenschaftlicher Qualität durch ein unabhängiges und kenntnisreiches Programmkomitee. Dazu werden die Beobachtungsprogramme nach Ausfüllen von Formblättern am heimischen Rechner elektronisch beim HERSCHEL-Bodenobservatorium am European Space Astronomy Centre (ESAC) in Villafranca bei Madrid eingereicht. Unterstützung bei der Planung erhalten die Europäer von ESAC und von den drei nationalen Instrument-Datenzentren, die amerikanischen Astronomen durch ein NASA-HERSCHEL-Zentrum.

Den Erbauergruppen der drei wissenschaftlichen Instrumente sind je 2000 Stunden Beobachtungszeit garantiert. Sie veröffentlichten ihre geplanten Garantiezeitbeobachtungen bereits im Sommer 2007. Damit wurden zwei Ziele verfolgt: Einerseits werden dadurch bestimmte Messungen für bestimmte Objekte blockiert, das heißt, die Erbauer haben hier das Recht der ersten Nacht. Zusätzlich dienen die veröffentlichten Garantiezeitprogramme allen übrigen Astronomen als Beispielsammlung für die wissenschaftlichen Fähigkeiten von HERSCHEL und das Erarbeiten eigener Programme für die offene Beobachtungszeit.

Wenige Beispiele sollen hier andeuten, wo Schwerpunkte der wissenschaftlichen Forschung liegen werden:

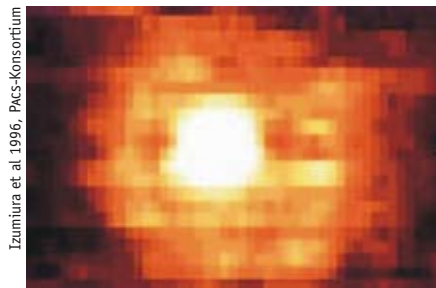
■ Mit sehr lang belichteten Aufnahmen in den Breitbandfiltern der Kameras von PACS und SPIRE sollen Himmelsfelder nach weit entfernten Galaxien durchmus-

tert werden (Abb. 11). Dabei werden Objekte mit Rotverschiebungen bis zu  $z \approx 3$  erreichbar. So kann das im Bereich  $1 < z < 3$  vermutete Zeitfenster der höchsten Sternentstehungsraten im Kosmos endlich genauer untersucht werden. Das bei nahen Galaxien mit Sternentstehung beobachtete Emissionsmaximum um 100  $\mu\text{m}$  fällt mit steigenden Rotverschiebungen immer besser in die mit HERSCHEL neu zugänglichen langwelligen Bereiche des FIR. Es ist zu erwarten, dass mehr als die Hälfte der vom Satelliten COBE gemessenen fern-infraroten Hintergrundstrahlung in Einzelquellen aufgelöst werden kann, gegenüber 15 Prozent mit dem kleineren Teleskop des Iso-Satelliten.

■ In nicht zu fernen Galaxien können in verschiedenen Spektrallinien gewonnene Karten Aufschluss über die großräumige Sternentstehung geben. Die hohe räumliche Auflösung des großen HERSCHEL-Teleskops erlaubt dabei die Unterscheidung der Sterngeburten in Spiralarmen, in den Zwischenarmbereichen und in besonders großen Molekülwolken (Abb. 6).

■ Am Ende ihres nuklearen Lebenslaufs verlieren Sterne Materie zurück an das interstellare Medium. Auch hier ermöglicht die hohe räumliche und spektrale Auflösung des PACS-Instrumentes die Kartierung der ausgedehnten Hüllen dieser am Ende ihrer Entwicklung angelangten Sterne. Die zeitliche Abfolge des nach außen gerichteten Materiestroms, seine chemische Zusammensetzung und seine Auskondensation zu Staubteilchen kann so erstmals in vielen Objekten im Einzelnen untersucht werden (Abb 12).

■ Mit dem spektral höchstauflösenden HIFI-Instrument soll der »Wasserweg« in Sternentstehungsgebieten untersucht werden. Er beginnt mit dem Wasser in dichten Molekülwolken und folgt dann dem Kollaps mit der Bildung von Protosternen. Diese sehr jungen Objekte sind



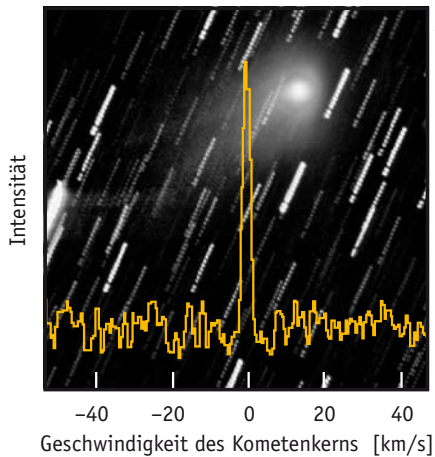
▲ Abb. 12: Im ISOPHOT-Bild zeigt der Kohlenstoffstern Y CVn eine ausgedehnte Hülle. Mit der wesentlich höheren räumlichen und spektralen Auflösung von HERSCHEL werden sich Einzelheiten des Massenverlusts sterbender Sterne erkennen lassen.

umgeben von Staubringen, aus denen sich Planetesimale und möglicherweise Planeten bilden. In allen Entwicklungsstufen sollte Wasser vorhanden sein, für unseren Planeten wissen wir es sicher. Dieser »Wasserweg« kann keinesfalls mit Submillimeter-Teleskopen vom Erdboden aus abgeschritten werden, da der atmosphärische Wasserdampf einen unüberwindlichen Vordergrund darstellt. Nur aus dem Weltraum sind solche Vorhaben möglich (Abb. 13).

Es ist ein gutes Beispiel für das Fortschreiten der Wissenschaft: Alle erwähnten Beobachtungsprogramme sind weiterführende Fragen zu Entdeckungen, die mit den Satelliten der letzten Generation gemacht wurden. Mit Iso zum Beispiel erkannte man, dass Wasser in der Milchstraße häufig ist, oder wie die großskalige Sternentstehung in einigen nahen Galaxien aussieht. Aber wir wollen viel mehr und über viel mehr Objekte erfahren, um unsere kosmische Heimat zu verstehen. Deshalb die stete Entwicklung neuer Technologien und größerer Observatorien. Mit denen ergeben sich dann neue Entdeckungen und wieder neue Fragen...

## Die Macher

Wie in Europa üblich, werden Satellit, Start und Mission von der ESA verantwortet und bezahlt, die wissenschaftlichen Instrumente dagegen werden von den Raumfahrtagenturen der Mitgliedsländer finanziert. Die ESA lässt den Satelliten von der europäischen Raumfahrt-Industrie bauen und hat für HERSCHEL-PLANCK als industriellen Hauptauftragnehmer die Firma Thales-Alenia in Frankreich ausgewählt. Damit wurde der bisher größte Auftrag für ein wissenschaftliches Vorhaben der ESA vergeben. Diese Firma muss nun das Kunststück vollbringen, die Industrie in allen Mitgliedsländern der ESA entsprechend den nationalen Beitragszahlungen zu beteiligen. So sind an HERSCHEL insgesamt 94 Firmen in 15 europäischen Ländern und den USA beteiligt. Beispielsweise kommen die für die Lageregelung wichtigen Drallräder von Teldix aus Heidelberg und die Helium-Ventile von EADS aus Ottobrunn, der Deckel und die Isolation des Kryostatens von Austrian Aerospace aus Wien, der Vakuumbehälter und ein Heliumtank für den Kryostatens von APCO aus Vevey (Schweiz). Den Zusammenbau der wissenschaftlichen Nutzlast besorgt EADS-Astrium in Friedrichshafen (Abb. 14). Die Organisation der zahllosen Schnittstellen und Qualitätsanforderungen, der Liefer- und Testpläne und die Begrenzung der Kosten sind bewundernswerte europäische Gemeinschaftsleistungen. Die sichtbarsten Partner der Wissenschaft-



▲ Abb. 13: Emissionslinie des Wassers bei 557 Gigahertz (Grundzustand) vom Kometen Lee, gemessen mit dem kleinen Satelliten SWAS (Puckett 1999). Mit HIFI können bei vielen Kometen auch die isotopischen Linien bei deutlich höherer räumlicher Auflösung untersucht werden.

ler bei der ESA sind der Projektmanager (Thomas Passvogel) und der Projektwissenschaftler (Göran Pilbratt).

Die Instrumente werden von Konsortien vieler europäischer Institute entwickelt. Bei Gesamtkosten von jeweils mehr als achtzig Millionen Euro tragen die Raumfahrtagenturen vieler Länder jeweils einige Millionen bei. Am Instrument PACS beispielsweise sind sechzehn europäische Institute beteiligt, aus Deutschland neben dem hauptverantwortlichen Institut, dem Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik in Garching, auch das MPI für Astronomie in Heidelberg. Die Fördermittel für den deutschen Anteil an PACS werden vom Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Bonn, bereitgestellt. Während beim oben beschriebenen industriellen Bau des Satelliten durch Verträge und Vergütungen klare Regeln herrschen, um die sich auch Juristen und Kaufleute kümmern, muss sich der verantwortliche Wissenschaftler eines Instruments bei der Entwicklung auf das Eigeninteresse seiner unabhängigen auswärtigen Partner verlassen. Er kann bei Problemen kaum Druck auf seine akademischen Kollegen ausüben.

### HERSCHEL'S Nachfolger

Die jahrhundertlange Erfahrung in den Naturwissenschaften zeigt, dass mit jedem neuen Experiment Fragen beantwortet, aber noch mehr neue Fragen aufgeworfen werden. Die aus der HERSCHEL-Mission zu erwartenden zahlreichen Entdeckungen werden eine Lawine von neuen Modellvorstellungen und theoretischen Vorhersagen zur Entwicklung der

Galaxien und zur Entstehung der Sterne auslösen, die nur durch Folgebeobachtungen bestätigt oder widerlegt werden können. Viele Befunde werden nach einem noch leistungsfähigeren Infrarot-Weltraumobservatorium verlangen. Und die Nachfolger sind bereits im Bau, in Studienphasen oder in der langfristigen Planung (Abb. 15).

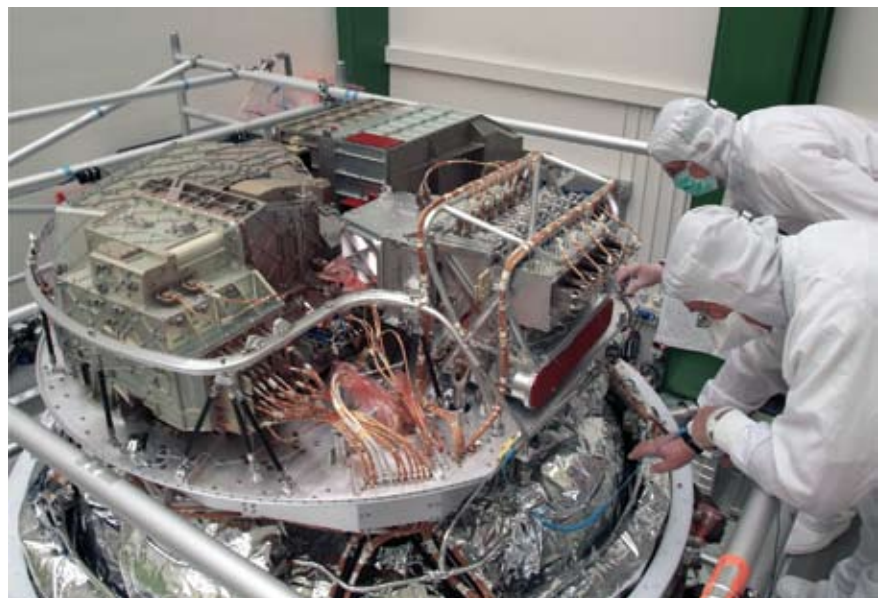
Am weitesten fortgeschritten ist das James Webb Space Telescope (JWST). Sein Hauptspiegel mit 6,5 Metern Öffnung erlaubt noch höhere räumliche Auflösung, allerdings ist er nicht wie bei HERSCHEL monolithisch (aus einem Stück), sondern aus 18 wabenförmigen 1,3-m-Spiegeln zusammengesetzt, die im gefalteten Zustand gestartet werden. Durch Trennung von Teleskop- und Satellitenteil und sorgfältige Strahlungsabschirmung gegen Sonne und Erde wird der JWST-Hauptspiegel sich im Lagrange-punkt  $L_2$  auf 40 Kelvin abkühlen, sodass er im mittleren Infraroten keine empfindlichkeitsbegrenzende Untergrundstrahlung emittieren wird. Damit kann das JWST beispielsweise bei  $\lambda \approx 10 \mu\text{m}$  noch für Quellen von etwa 10 Nanojansky empfindlich sein und eine Winkelauflösung von etwa einer Bogensekunde erreichen. Wichtigste Aufgabe des JWST wird die Entdeckung und Untersuchung der ersten Sterne und Galaxien im noch sehr jungen Universum sein. An dieser Mission sind die Europäer zu 15 Prozent (mit der Trägerrakete ARIANE 5, der Hälfte der wissenschaftlichen Instrumente und beim Betrieb des Bodenobservatoriums) beteiligt. Folgebeobachtungen an den interessantesten HERSCHEL-Quellen bei etwas kürzeren Wellenlängen werden ein weiterer Schwerpunkt dieser Mission sein, für die ein Start im Jahr 2013 angestrebt wird.

Als Nachfolger von HERSCHEL und in Ergänzung zu JWST wird in Japan und

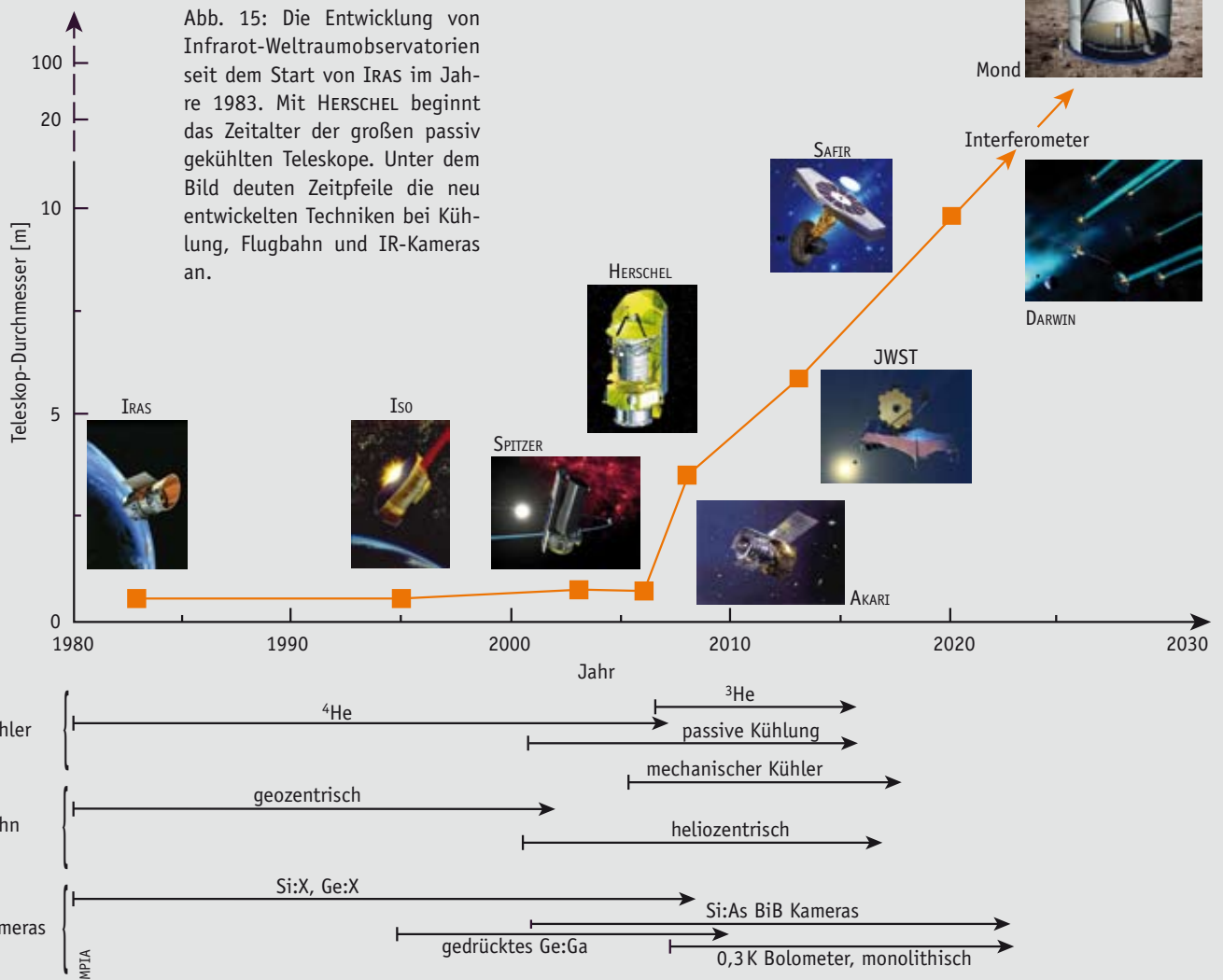
Europa die Mission SPICA studiert. Sie soll ein Teleskop des HERSCHEL-Typs verwenden, diesmal aber heliumgekühlt. Damit kann gegenüber der passiven Kühlung die Empfindlichkeit um Größenordnungen gesteigert werden (siehe dazu Abb 3).

Danach könnte SAFIR kommen, ein Zehn-Meter-Infrarot-Observatorium der NASA. Sein gekühlter Hauptspiegel könnte aus Folien aufgefaltet werden. An einen Start ist frühestens 2018 zu denken. In Europa wird DARWIN studiert, eine Interferometrie-Mission für das mittlere Infrarot, mit dem wichtigen Ziel der Erforschung von Exoplaneten. Da bei dieser Mission mehrere freifliegende Satelliten große Basislängen des Interferometers aufspannen, muss zunächst die Technik des Formationsflugs (längeres Einhalten der gegenseitigen Abstände) entwickelt werden. Auf diesem steinigen Weg sind die ersten Experimente in Vorbereitung, für DARWIN könnte es nach 2020 eine Chance geben. Und schließlich der Mond: Mit einem Flüssigspiegel von zwanzig bis hundert Metern Öffnung, aufgestellt an einem der Mondpole, könnte selbst die Empfindlichkeit von JWST nochmals um zwei Größenordnungen überboten werden. Dieses Vorhaben setzt aber voraus, dass der jetzt von China, Indien und Japan begonnene neue Wettlauf zum Mond von NASA und ESA mit einer bemannten Mondstation zur Vorbereitung eines Marsflugs beantwortet wird. Das alles findet sicherlich nicht früher als 2020 statt...

▼ Abb. 14: Die Integration der drei wissenschaftlichen Instrumente PACS (links), HIFI (rechts) und SPIRE (hinten) in den HERSCHEL-Kryostaten erfolgte Mitte des Jahres 2007 bei EADS-ASTRIUM in Friedrichshafen.



EADS/ESA



## Neuerungen

Rückblick und Ausblick auf die Infrarot-satelliten vor und nach HERSCHEL zeigen deutlich, wie der wissenschaftliche Fortschritt durch technische Neuerungen ermöglicht wird (Abb. 15, unten). IRAS und ISO flogen auf Erdumlaufbahnen und hatten Störungen in ihren Kameras durch die Strahlungsgürtel der Erde hinzunehmen. Der auf diesen geozentrischen Bahnen zu einem gegebenen Zeitpunkt beobachtbare Himmel war eingeschränkt. Mit den neuen heliozentrischen Umlaufbahnen von SPITZER (auf der Erdbahn) und HERSCHEL (in L<sub>2</sub>) bleiben sowohl die thermischen Verhältnisse bezüglich Sonne und Erde, als auch die kosmische Strahlung lange Zeit konstant. Außerdem ist stets fast die halbe Himmelskugel beobachtbar. Mit dem mutigen Schritt, das Teleskop warm zu starten und passiv im Weltraum abkühlen zu lassen, wie erstmals bei SPITZER geschehen und nun für HERSCHEL und JWST vorgesehen, kann die »Thermosflasche« viel kleiner werden oder gänzlich entfallen. Damit werden auch längere Missionsdauern möglich. Mit dem neuen Helium-3-Kühler bei HERSCHEL kann das gesamte ferne Infrarot erschlossen werden, Mit der mecha-

nischen Kühlmaschine ( $T \approx 6$  K) auf JWST kann auf flüssiges Helium gänzlich verzichtet werden. IRAS hat mit Ge:Ga-Dektoren das Fenster ins ferne Infrarot bis 100  $\mu\text{m}$  geöffnet, ISO mit gedrückten Ge:Ga-Kristallen bis zu 200  $\mu\text{m}$  und HERSCHEL mit Bolometern bis zu 600  $\mu\text{m}$ . Mit den ursprünglich für militärische Anwendungen entwickelten strahlungsfesten Si:As-BIB-Kameras kann SPITZER jetzt bis zu 28  $\mu\text{m}$  Bilder liefern, die uns an die Güte von CCD-Aufnahmen erinnern.

Was bleibt zum Schluss zu sagen? Ein Dank, an diesem aufregenden »Goldenen Zeitalter« der Astronomie aktiv teilgenommen oder es interessiert verfolgt zu haben. Den Jüngeren, die Freude auf das Abenteuer der HERSCHEL-Mission und auf die Entwicklung seiner Nachfolger und neue wissenschaftliche Entdeckungen zu wünschen (»...nach HERSCHEL ist vor JWST...« usw.). Zunächst aber begleiten HERSCHEL und alle Verantwortlichen unsere besten Wünsche: Gute Reise nach L<sub>2</sub> und viele neue Erkenntnisse aus dem kalten und fernen Kosmos! □

Der Verfasser dankt Ulrich Klaas, MPIA, und Albrecht Poglitsch, MPE, für die Durchsicht des Manuskripts.

## Literaturhinweise

**Dietrich Lemke:** HUBBLES Nachfolger: Das James-Webb-Weltraumteleskop. SuW 8/2006, S. 26–34

**Dietrich Lemke:** Die Geschichte der ISO-Mission. SuW Special 1/2004, S. 52–73

Interessante Weblinks zum Thema finden Sie unter [www.suw-online.de/artikel/911905](http://www.suw-online.de/artikel/911905)



**Dietrich Lemke** war am Max-Planck-Institut für Astronomie in Heidelberg über viele Jahrzehnte für die Weltraumprojekte des

Instituts verantwortlich. Dazu gehören die Beteiligungen des MPIA an den Infrarotobservatorien ISO, HERSCHEL und JWST, an denen er als Principal oder Co-Investigator teilnahm.



### Teleskop-Service

Keferlohner Marktstraße 19C  
85640 Pützbrunn - München  
Telefon: 089 - 189287 - 0  
Fax: 089 - 189287 - 10  
Web: www.Teleskop-Service.de  
E-Mail: Info@Teleskop-Service.de

- **Kompetente Beratung von Hobbyastronomen**
- **Große Auswahl ohne Markenbindung**
- **Günstige Preise durch Großverkauf und Direktimport**

## Celestron SE Serie

Die High-Tech Klassiker!

Celestron hat mit den SE Teleskopen einen neuen Standard für Hobbyastronomen und Naturbeobachter geschaffen. Celestron kehrt mit der neuen Serie zu seinen Wurzeln zurück und kombiniert ein bewährtes System mit modernster Vergütungstechnik und Elektronik. Besonders viel Wert wurde auch auf Transportabilität gelegt.



- Optik mit Griff abnehmbar
- Auch andere Geräte sind montierbar!
- Präzises GOTO mit 40.000 Objekten
- Astrofotografie tauglich
- Stabiles Stativ
- StarBright XLT Vergütung für höchste Transmission

Verfügbare Modelle:

• NexStar 4 SE	102 / 1325 mm	... 675 €
• NexStar 5 SE	125 / 1250 mm	... 1125 €
• NexStar 6 SE	150 / 1500 mm	... 1495 €
• NexStar 8 SE	203 / 2000 mm	... 1980 €

## TS UCF1 - universaler Kontrastfilter

Der TS UCF 1 ist ein Allrounder - für den Einsteiger genauso geeignet, wie für den fortgeschrittenen Amateurastronom. Er dient der Kontraststeigerung bei einer Vielzahl von Objekten:



- Mars, Jupiter, Saturn & Mond
- Dämmerungsbeobachtung & Tagesbeobachtung
- Beobachtung von Nebeln jenseits des Sonnensystems

**NEU!**  
... 24,90 €

## GSO Newton 200/1000 mit 2" 1:10 Crayford-Auszug

Ein vielseitiges Gerät mit ausgezeichneter Abbildung an Mond und Planeten. Dieses Gerät bietet unseres Erachtens in Sachen Leistung und Ausstattung ein höheres Niveau ... überzeugen Sie sich selbst! In der aktuellen Version wird er mit einem 2" Crayford-Auszug mit 1:10-Micounterstellung ausgeliefert!

Lieferumfang: Tubus/Optik, Rohrschellen,  
2" Crayford Auszug 1:10, 8x50 Sucher

... 478 €

## Celestron SkyScout

Der CELESTRON SkyScout ist ein revolutionäres neues "Handplanetarium" mit eingebautem GPS-Empfänger.



Peilen Sie ein Himmelsobjekt an und der SkyScout informiert Sie am Display und auch per Sprachausgabe über das Objekt! Gespeichert sind Datenbanken mit über 6000 Sterne, 1500 Doppel- und Veränderliche Sterne, 100 Gasnebel, Galaxien und Sternhaufen, Planeten und alle 88 Sternbilder!

Lieferumfang: SkyScout mit Tragetasche und Trageriemen, Kopfhörer, USB Kabel, Software CD

... 429 €

## TS Filter-Klemmhalter für Canon EOS

Der Klemmhalter wird auf modernsten Maschinen lasergeschneitten und kann, ohne Werkzeug, in sekunden-schnelle direkt in den Kamerakörper eingesetzt werden. Wir führen ein großes Filter-Sortiment mit Klemmhalterung!



**NEU!**

Folgende Astronomik-Filter sind in dieser Version erhältlich:

AS Klar	... 79 €	AS CLS	... 129 €	AS IR-742	... 89 €
AS L	... 89 €	AS OIII	... 139 €	AS IR-807	... 89 €
AS Ha 13nm	... 179 €	AS OIII CCD	... 179 €	AS UHC-E	... 109 €
AS Ha 6nm	... 279 €	AS Hβ	... 139 €		

## Artemis 4021 CCD Kamera

Die neue Artemis 4021 CCD Kamera wurde als weitere wirkliche HighEnd Kamera im CCD Bereich entwickelt, und schließt nun endlich die Lücke zwischen den extreme erfolgreichen CCD Kameras der ATIK 16HR und der Artemis 11002 Serie.



Hier wurde der Kodak KAI4021 Chip ausgewählt, welcher als ideal für die Bedürfnisse der Amateurastronomie erscheint. Trotz „nur“ 23mm Chipgröße in der diagonalen bringt der Chip eine Leistung von 4 Megapixeln.

Eigenschaften:

- Chip: Kodak KAI4021
- Auflösung: 2048 x 2048 pixels
- Chip Größe: 16,67mm x 16,05mm (=23mm diagonal)
- Pixel Größe: 7,4 x 7,4 µm

... 2995 €

## TS Planetary HR 1,25" Okuläre 60°

TMB - ein Hersteller hochwertiger apochromatischer Refraktoren - hat eine Okularserie entwickelt, die zu diesen hochwertigen Geräten passt.



Das Ergebnis ist eine ausgezeichnete Abbildung an Mond und Planeten. Sehr guter Kontrast und ein helles Bild ermöglichen auch genussvolle Deep Sky Beobachtungen.

Brennweiten: 2,5, 4, 5, 6, 7, 8 und 9 mm

... je 89 €

Aktionspreis: 2 Okulare nach Wahl nur ... 144 €!

## TS SWM 1,25" Okuläre 66°

Die neuen TS SWM sind leistungsfähige Universalokulare für alle Bereiche der Amateurastronomie. Der gute Kontrast durch die geschwärzten Linsenränder bietet gute Erkennungsmöglichkeit feiner Details ohne Überstrahlungen befürchten zu müssen.



Zudem ermöglicht der angenehme Augenabstand von ca. 18mm auch Langzeitbeobachtungen ohne Ermüdungserscheinungen. Zudem besitzen sie eine angenehme Gummiaugenmuschel.

Brennweiten: 6, 9, 15 und 20 mm

... je 49,99 €

## TS 8x50 Sucher mit 90°-Einblick

Die TS Sucher verfügen über ein gutes zweilinsiges Objektiv mit einer guten Sternabbildung über das gesamte Gesichtsfeld. Die Abbildung der TS Sucher ist aufrecht und seitenrichtig. Objektiv und Okular sind voll multivergütet.



Eigenschaften: 50mm Öffnung, 8-fache Vergrößerung, wahres Gesichtsfeld ca. 4,5° inkl. Halterung und Sucherschuh.

... 89 €

## ATIK ATK-161C CCD-Kamera

ATIK CCD Kameras bieten Ihnen viele Vorteile und ein sehr gutes Preis-/Leistungsverhältnis - semiprofessionelle Astrofotografie wird mit diesen Kameras für Sie erschwinglich!



Eigenschaften:

- Auflösung: 640x480 Pixel
- Pellierkühlung zur besseren Rauschunterdrückung
- Einfache Adaption an das Teleskop über T-2 und 1,25"
- Besonders hohe Empfindlichkeit durch leistungsfähige SONY Chips. Bei den schwarz / weiss Kameras können z.B. LRGB Filter eingesetzt werden.
- Einsatz von Kontrastfiltern ist möglich
- Wahlweise Farb- oder S/W-Chip

... 530 €