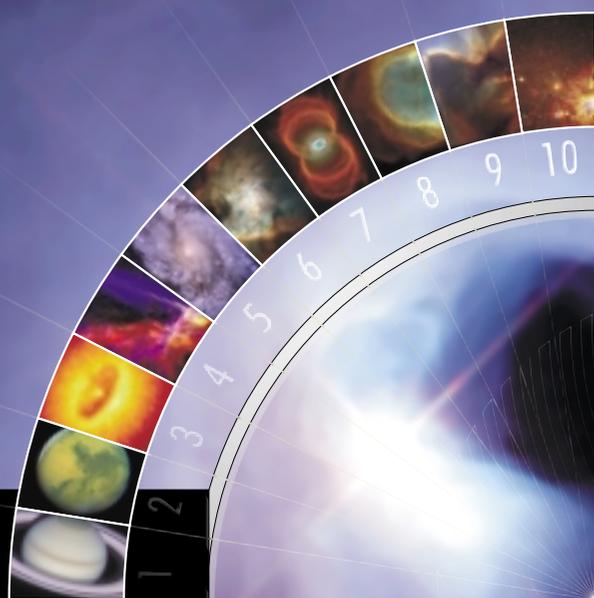


HUBBLE-WELTRAUMTELESKOP



10 JAHRE,
DIE UNSER WELTBILD VERÄNDERT HABEN

- EUROPA & HUBBLE

H
U
B
B
L
E



Das Projekt Hubble

Das Hubble-Weltraumteleskop ist ein Gemeinschaftsprojekt der Nationalen Luft- und Raumfahrtorganisation der Vereinigten Staaten von Amerika (NASA) und der Europäischen Weltraumorganisation (ESA). Die Partnerschaftvereinbarung zwischen ESA und NASA wurde am 7. Oktober 1977 unterzeichnet.

Die ESA stellte ein Paar Sonnenszellenausleger und eines der wissenschaftlichen Instrumente, die Kamera für lichtschwache Objekte, sowie eine Reihe anderer Komponenten, bereit. Darüber hinaus sind 15 europäische Wissenschaftler in dem für den wissenschaftlichen Betrieb des Hubble-Observatoriums verantwortlichen Institut in Baltimore (STScI) tätig, welches von der Hochschulvereinigung für Astronomische Forschung (AURA) im Auftrag der NASA geleitet wird. Als Gegenleistung erhalten europäische Astronomen garantierten Zugang zu 15 % der verfügbaren Beobachtungszeit.

Europäische Hubble-Nutzer werden von der Europäischen Koordinierungsstelle für das Weltraumteleskop (ST-ECF) bei der Europäischen Südsternwarte (ESO) in Garching bei München betreut. Diese Koordinierungsstelle wird von ESA und ESO gemeinsam betrieben.

Text und Zusammenstellung:
Lars Lindberg Christensen

Herausgeber:
ESA Publications Division
ESTEC, PO Box 299,
2200 AG Noordwijk,
Niederlande

Redakteur:
Bruce Battrick

Design und Layout:
Martin Kornmesser und
Lars Lindberg Christensen

Deutsche Übersetzung:
Rolf Wahl, Petra Bartilla, Oliver Jarchow und
Andrea Gruber

Deutsche Bearbeitung:
Florian Kerber (ST-ECF)

Copyright:
© 2000 European Space Agency
ISBN 92-9092-611-2

Weitere Informationen über das
Wissenschaftsprogramm der ESA:
<http://sci.esa.int>

Bilder:

Aufnahmen mit Hubble:
NASA, ESA und zuständige Wissenschaftler

Aufnahmen von Wartungsmissionen:
NASA

Sonnenszellenpaneele auf Seite 15:
Russ Underwood,
Lockheed Martin Missiles & Space

Bilder des VLT auf Seite 16 und des Sitzes der ESO auf Seite 10:
Europäische Südsternwarte (ESO)

Bild des NGST auf Seite 16/17:
NASA

10 Jahre, die unser Weltbild verändert haben – *Europa & Hubble*



Claude Nicollier
ESA-Astronaut und Astronom

Ein großes Teleskop auf der Erde ist stets in eine massive Montierung eingebettet. Hubble schwebt frei im All, leicht, schlank, scheinbar zerbrechlich und doch unglaublich leistungsfähig!

Inhalts

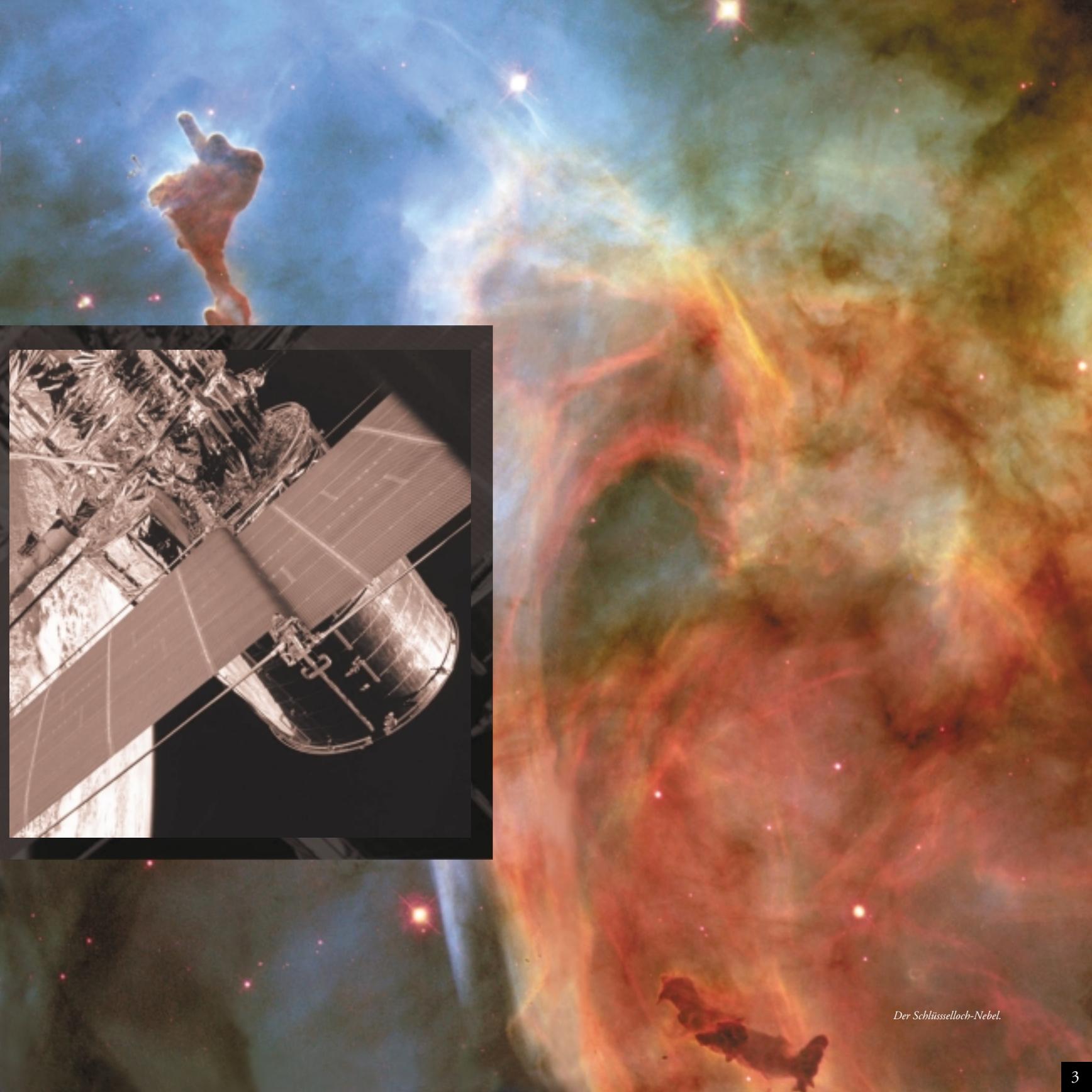
v e r z e i c h n i s

Hintergrund

Ein anderer Blick ins All	4
Zu Hubble	6
Anlaufschwierigkeiten	8
Europa & Hubble - Wissenschaftlicher Betrieb	10
Europa & Hubble - Technologie	12
Der Start und die Wartungsmissionen	14
Die Zukunft	16

Wissenschaftliche Beobachtungen

Einblicke in kosmische Tiefen	18
Größe und Alter des Universums	20
Sternentwicklung	22
Unser Sonnensystem	24
Schwarze Löcher, Quasare und aktive Galaxien	26
Sterngeburten	28
Zusammensetzung des Universums	30
Gravitationslinsen	32



Der Schlüsselloch-Nebel.

Ein anderer Blick ins All



Die Beteiligung der Europäischen Weltraumorganisation am Hubble-Projekt geht bis ins Jahr 1977 zurück. Anfänglich mögen durchaus Zweifel am wissenschaftlichen Ertrag einer solchen Investition bestanden haben, vor allem da die lange Startverzögerung nach dem Challenger-Unglück und die unerwartete Entdeckung der sphärischen Aberration des Teleskopspiegels kurz nach dem Start die Aussichten auf eine wissenschaftliche Ausbeute in weite Ferne zu rücken schienen.

Heute, nach 10 Jahren Betrieb, können wir mit Gewissheit sagen, die europäische Investition in das Hubble-Projekt war und ist ein großer Erfolg für die ESA!

Die für die Astrophysik und Kosmologie so bedeutsamen Ergebnisse der Hubble-Beobachtungen sind in nicht unerheblichem Maße auf den geistigen Beitrag europäischer Wissenschaftler zurückzuführen, die dank der Beteiligung der ESA Zugang zu diesem Observatorium gewonnen haben. Wie klug der damalige Beschluß der ESA zur Teilnahme an Hubble war, zeigt der große Anteil an den Beobachtungsprogrammen und wissenschaftlichen Veröffentlichungen, der unter Mitwirkung europäischer Astronomen zustande gekommen ist.

Neben dem wissenschaftlichen Erfolg von Hubble kann die ESA auch auf die herausragende Qualität ihrer Beiträge zur Technologie und Betrieb des HST stolz sein: die Kamera für lichtschwache Objekte, die Solargeneratoren, die im Institut in Baltimore und bei der Europäischen Koordinierungsstelle

tätigen Wissenschaftler und nicht zuletzt die ausgezeichnete Arbeit, die ihre Astronauten bei den Hubble-Wartungsmissionen geleistet haben. In all diesen Bereichen haben wir uns als zuverlässige Partner erwiesen.

Eine noch bessere wissenschaftliche Ausbeute ist für Europa in den nächsten 10 Betriebsjahren zu erwarten, in denen europäische Astronomen die Synergie zwischen Hubble und den nun verfügbar werdenden großen Teleskopen am Erdboden nutzen werden. Auch ist die ESA jetzt in der Lage, mit der NASA und der Kanadischen Raumfahrtagentur einen wichtigen künftigen Beitrag zum Weltraumteleskop der nächsten Generation (NGST) auszuhandeln.

Angesichts dieser verlockenden Aussichten erscheint es wichtig, daß die europäische Öffentlichkeit, vor allem die Jugend, regelmäßig und auf gezielte Weise über die Fortschritte und Erfolge Europas in diesem Bereich unterrichtet wird. Deshalb hat die ESA ein Hubble-Informationszentrum eingerichtet, das für eine wirksame Kommunikation zwischen den Projekten Hubble und NGST und den europäischen Medien sorgen soll.

Hubble hat bereits unsere Sicht des Universums verändert. Wir sehen nun alle einem zweiten brillanten Jahrzehnt von Hubble-Entdeckungen entgegen!

R.M. Bonnet
Wissenschaftsdirektor der ESA

„.... das Hubble-Projekt war und ist ein großer Erfolg für die ESA!“

„Wir sehen nun alle einem zweiten

BRILLANTEN JAHRZEHNT

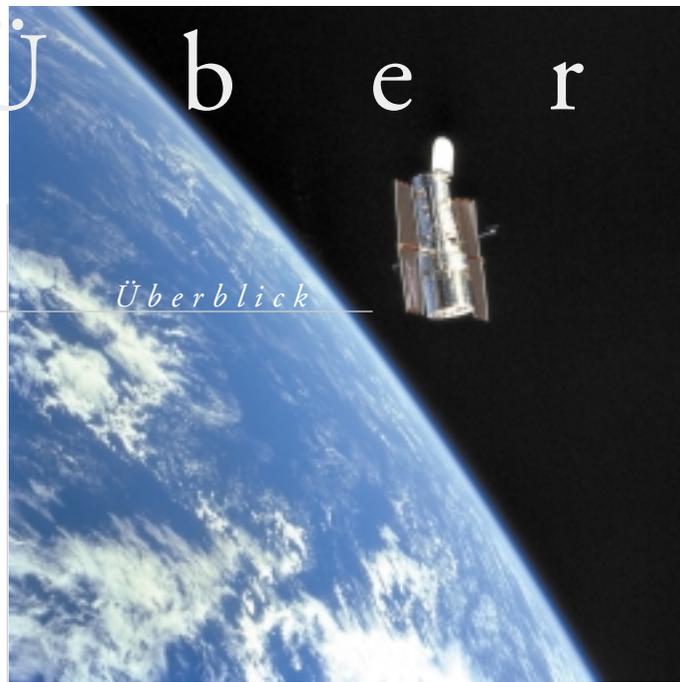
von Hubble-Entdeckungen entgegen!“

Der Helix-Nebel.

Zu Hubble

Das Universum ist wunderbar transparent. Sichtbares Licht kann es Milliarden Jahre lang unverändert durchqueren, doch in den letzten Mikrosekunden, bevor das Licht auf den Spiegel eines irdischen Teleskops trifft, werden beim Durchgang durch unsere turbulente Atmosphäre die feinen kosmischen Details verwischt. Derselbe Effekt ist mit bloßem Auge zu beobachten, wenn wir die Sterne am Nachthimmel blinken sehen.

Dieses Problem läßt sich dadurch umgehen, daß man ein Teleskop im All positioniert. Das Hubble-Weltraumteleskop, ein Gemeinschaftsprojekt der NASA und ESA, hat bereits einige der spektakulärsten Entdeckungen in der Geschichte der Astronomie gemacht. Nach dem amerikanischen Wissenschaftler Edwin Hubble benannt, ermöglicht es Einblicke in den fernen Weltraum, wo tiefste Geheimnisse der Enträtselung harren. Von seiner Warte 600 km über der Erde kann Hubble Licht, bevor es von der Atmosphäre verzerrt wird, mit 'Augen' aufspüren, die zehnmal schärfer sehen als die mächtigsten Bodenteleskope. Außerdem ist Hubble mit dem größten Ultraviolett-Instrument ausgestattet, das je im Weltraum eingesetzt wurde, und kann somit Wellenlängen empfangen, die vor dem Auftreffen auf dem Boden völlig absorbiert werden. Weit oberhalb der Erdatmosphäre stationiert, vermittelt Hubble den Astronomen einen klaren Blick in die fernsten Winkel von Raum und Zeit.



Hubble unmittelbar nach dem Wiedereinsetzen bei der Wärmungsmission 3A.

F a c t s

Starttermin – 24. April 1990

Startmasse – 11 110 kg

Abmessungen – 15,9 m lang, 4,2 m Durchmesser

Sonnenzellenausleger – je 2,4 x 12,1 m

Gegenwärtige Instrumente – WFPC2, STIS, NICMOS, FOC und Feinsteuerungssensoren

Umlaufbahn – kreisförmig, 593 km über der Erde und 28,5° gegen den Äquator geneigt

Voraussichtliche Betriebsdauer – 20 Jahre

Kosten – Das von der ESA für Hubble bereitgestellte Gerät hat einen Wert von 593 Millionen Euro (Preisstand 1999)

Instrumente

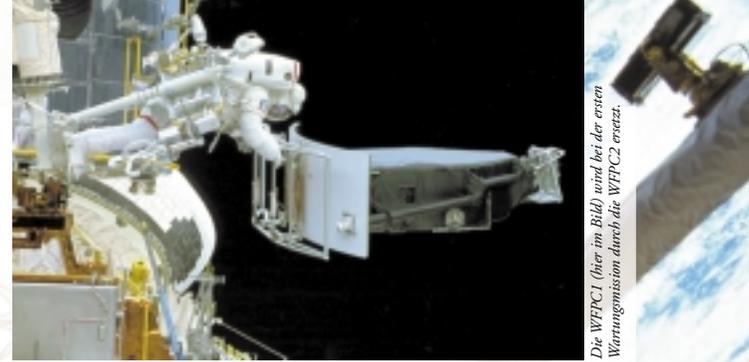
Hubble wurde von Anfang an als ständig im Weltraum positioniertes Observatorium geplant, das unter Einsatz des amerikanischen Space Shuttle gewartet werden kann. Bei diesen Wartungsmissionen können Astronauten die wissenschaftlichen Instrumente des Observatoriums durch neues und moderneres Gerät ersetzen. Hubble ist gegenwärtig mit zwei Kameras, zwei abbildenden Spektrographen sowie Feinsteuerungssensoren (für astrometrische Beobachtungen) ausgestattet. Dank Hubbles Position außerhalb der Erdatmosphäre liefern diese Instrumente hochauflösende Bilder astronomischer Objekte. Bodengestützte Teleskope sind selten – abgesehen von kurzen Phasen – zu einer Auflösung von besser als 0,5 bis 1,0 Bogensekunden fähig. Die Auflösung von Hubble ist mit 0,05 Bogensekunden etwa zehnmal besser.

Weitwinkel-Planetenkamera 2

Die WFPC2 ist das 'Arbeitspferd' unter den Hubble-Instrumenten. Sie bietet für ihre Aufnahmen eine Auswahl von 48 verschiedenen Farbfiltern an, die den Spektralbereich vom fernen Ultraviolett über das sichtbare Licht bis zum nahen Infrarot abdecken. Mit ihr wurden die meisten Bilder gemacht, die die Öffentlichkeit begeistert haben. Wegen ihrer hohen Auflösung und hervorragender Qualität in den ersten 10 Betriebsjahren wurde sie von allen Instrumenten am meisten genutzt.

Abbildender Spektrograph für das Weltraumteleskop

Der STIS ist ein vielseitig einsetzbares Instrument modernster Technologie. Er besteht aus einer Kamera und einem Spektrographen, die in einem breiten Bereich von Wellenlängen vom nahen Infrarot bis zum Ultraviolett arbeiten.



Die WFPC1 (hier im Bild) wird bei der ersten Wartungsmission durch die WFPC2 ersetzt.

The Near Infrared Camera and Multi-Object Spectrometer

Das Instrument NICMOS kann Infrarot-Aufnahmen und spektroskopische Beobachtungen astronomischer Objekte machen. Es erfasst infrarotes Licht bei Wellenlängen zwischen 8000 und 25000 Ångström, das für das menschliche Auge unsichtbar ist. Das Instrument wird gegenwärtig nicht benutzt und wartet auf ein neues Kühlsystem, das bei der nächsten Wartungsmission (3B) eingebaut werden soll.

Kamera für lichtschwache Objekte (FOC)

Die FOC wurde von der Europäischen Weltraumorganisation gebaut. Diese für den optischen und Ultraviolettbereich ausgelegte Kamera ist in der Lage, einfallende Einzelphotonen (Lichtteilchen) zu zählen. Die mit der FOC erzielbare Bildschärfe ist die höchste unter den Hubble-Instrumenten und übertrifft sogar die der WFPC2.

Feinsteuerungssensoren

Hubble ist mit drei Feinsteuerungssensoren (FGS) ausgestattet. Zwei dieser Sensoren dienen jeweils der genauen Ausrichtung des Teleskops auf das Zielobjekt und seiner Stabilisierung, während der dritte gleichzeitig für astrometrische Zwecke, d.h. hochpräzise Positionsmessungen zur Bestimmung der Entfernung von Sternen und zur Untersuchung von Doppelsternsystemen eingesetzt werden kann.



Austausch eines FGS bei der zweiten Wartungsmission.

Hubble mit offener Instrumentenbuchse bei der Wartungsmission 3A.

Anlaufschwierigkeiten



Einbau der Korrekturoptik bei der ersten Wartungsmission.

Sphärische Aberration

Daß das Hubble-Weltraumteleskop reibungslos funktioniert, empfinden wir heute als völlig normal. Kurz nach dem Start wurde jedoch so mancher unsanft daran erinnert, daß Hubble kein gewöhnlicher Satellit, sondern ein komplexes Stück bahnbrechender Technik ist und folglich Kinderkrankheiten haben kann.

Das gravierendste und augenfälligste Problem war ein optischer Fehler – ‘sphärische Aberration’ genannt, der auf die Verwendung einer fehlerhaften Meßvorrichtung beim Polieren des Spiegels zurückzuführen war. Wegen dieses Fehlers konnte Hubble nicht die bestmögliche Bildqualität erreichen, obwohl es die Leistungen bodengestützter Teleskope schon in vieler Hinsicht übertraf. Die nach Klärung des Problems entwickelte Korrekturoptik war ein Meisterwerk der optischen Technik und ein herausragendes Beispiel der fruchtbaren Zusammenarbeit zwischen Ingenieuren und Wissenschaftlern auf beiden Seiten des Atlantiks.

Sonnenzellenausleger

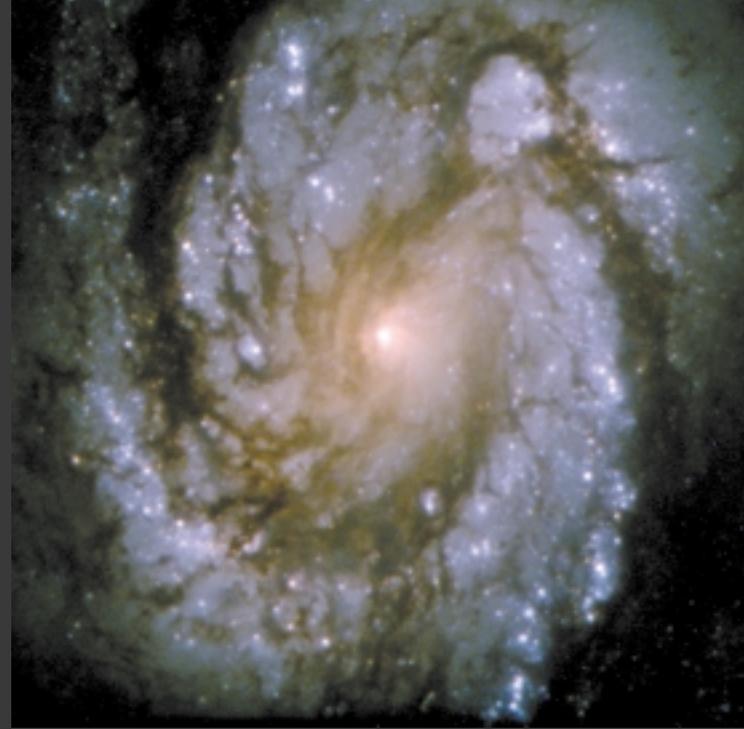
Ein weniger kompliziertes, aber ärgerliches Problem war, daß das Teleskop jedesmal eine kleine, aber unannehmbare Schwingungsbewegung ausführte, wenn es auf seiner Umlaufbahn aus dem Sonnenlicht in den Erdschatten bzw. aus diesem wieder ins Licht trat. Diese Schwingungsbewegung wurde von den Sonnenzellenauslegern verursacht, deren Haltegestänge auf die rund 200° C Temperaturdifferenz zwischen der Tag- und Nacht-Seite der Umlaufbahn durch winzige Ausschläge reagierte.

Die Instandsetzung

Während der ersten HST-Wartungsmission im Dezember 1993 führte die Besatzung alle Reparaturarbeiten aus, die notwendig waren, um die geplante Leistungsfähigkeit des Teleskops doch noch zu erreichen. Obwohl die zwei weiteren Wartungsmissionen, die seither unternommen worden sind, mindestens genauso schwierig und arbeitsintensiv waren, fand die erste Wartungsmission sowohl in der Fachwelt als auch in der breiten Öffentlichkeit einen Widerhall, wie dies bei keiner anderen Raumtransportermission der Fall war. Dank sorgfältiger Planung und brillanter Ausführung war die Mission in jeder Hinsicht ein voller Erfolg. Sie dürfte historisch als einer der Höhepunkte der bemannten Raumfahrt in Erinnerung bleiben.



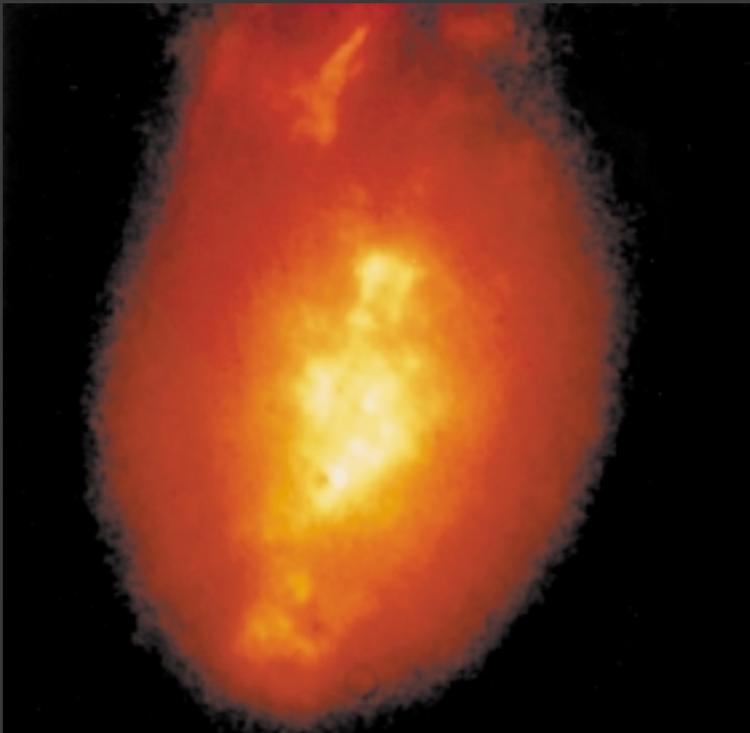
Vor der Korrektur



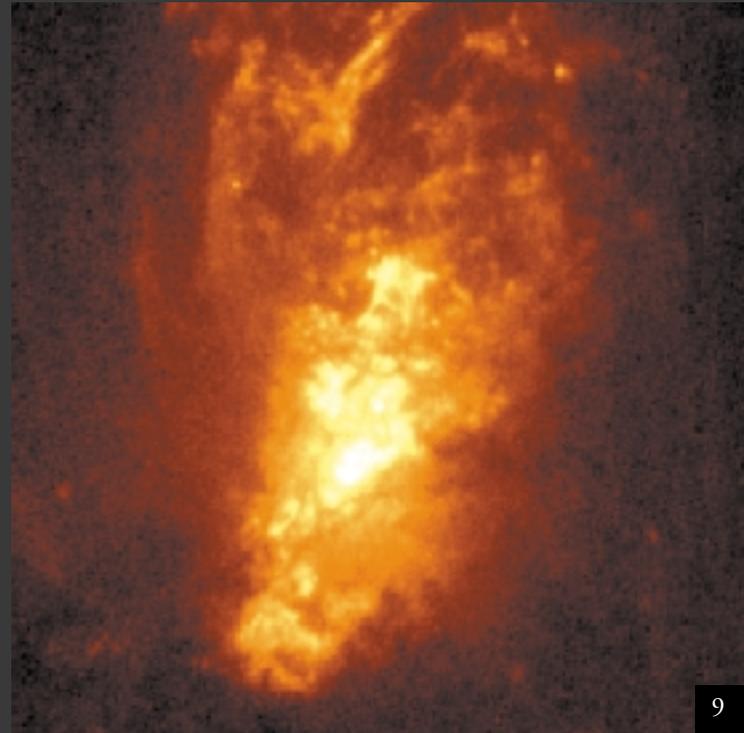
Nach der Korrektur

Die Spiralgalaxie M100 vor und nach der Korrektur von Hubbles Optik.

Vor der Korrektur



Der Kern der aktiven Galaxie NGC 1068 vor und nach der Korrektur von Hubbles Optik.



Nach der Korrektur

Europa & Hubble

Wissenschaftlicher Betrieb



Sitz der ESA in Garching bei München.

Piero Benvenuti
Hubble-Projektwissenschaftler der ESA, Leiter der ST-ECF

Hubble ist für die europäische Astronomie von enormer Bedeutung. Es gibt europäischen Wissenschaftlern die Möglichkeit, ein Observatorium der Weltklasse zu nutzen, das Europa alleine nicht hätte bauen und betreiben können. Wissenschaftler in Europa können somit in der Astrophysik und in der Kosmologie nicht nur weiterhin mithalten, sondern in mehreren Bereichen sogar ihre Führungsrolle behaupten. Die europäische Astronomie ist heute in einer günstigen Position, um ausgehend von ihren Erfahrungen mit Hubble die gegenwärtig im Bau bzw. in der Planung befindlichen großen Observatorien wie das Großteleskop VLT der ESA, die Gemini-Teleskope und das Weltraumteleskop der nächsten Generation (NGST) möglichst wirksam zu nutzen.

Duccio Macchetto
ESA-Astronom, Leiter der wissenschaftlichen Planung im STScI

Zum Beitrag der ESA beim wissenschaftlichen Betrieb von Hubble gehört unter anderem die Arbeit von 15 europäischen Wissenschaftlern am STScI in Baltimore. Das europäische Kontingent hat einen erheblichen Anteil am erfolgreichen Einsatz des Hubble-Observatoriums. Ihm gehören häufig junge europäische Astronomen an, die die Gelegenheit nutzen, in einer äußerst motivierenden Umgebung zu arbeiten. Zahlreiche europäische Hubble-Beobachter haben Forschungsaufenthalte am STScI verbracht, und eine Reihe europäischer Studenten haben dort ihre Doktorarbeit abgeschlossen. Die Investition in das Hubble-Projekt ist wissenschaftlich nach wie vor höchst lohnend.

Europäische Nutzung des Hubble-Teleskops

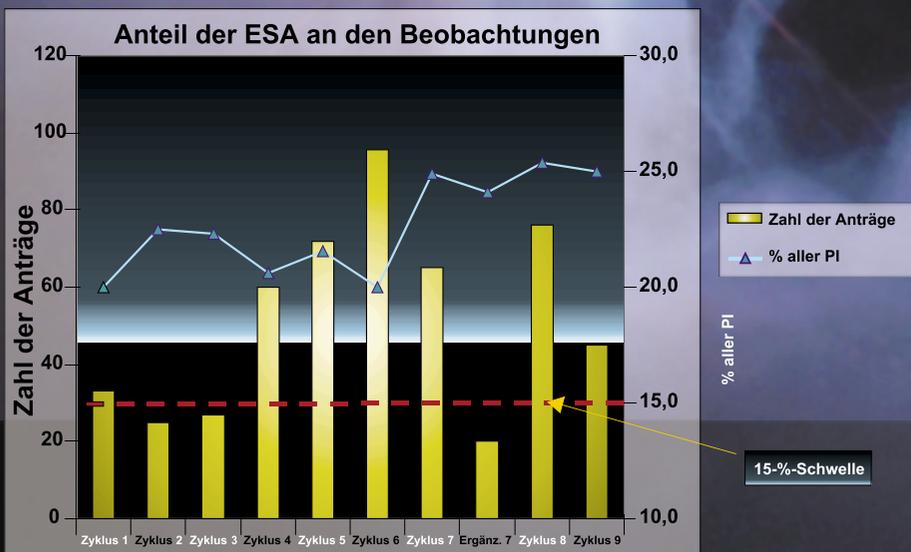
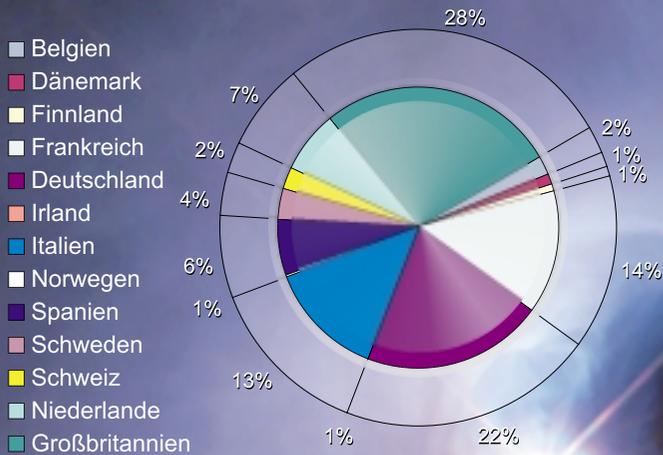
Der Beitrag der ESA zum Hubble-Projekt sichert europäischen Wissenschaftlern 15% der verfügbaren Beobachtungszeit. Diese wird von einem international besetzten Ausschuss, dem auch Europäer angehören, nach rein wissenschaftlichen Kriterien zugeteilt. Während der bisherigen neun Hubble-Beobachtungszyklen (etwa 9 Jahre) konnten europäische Astronomen aber stets mehr als die ihnen garantierten 15% erlangen; in den letzten Jahren kamen sie sogar auf fast ein Viertel der gesamten Beobachtungszeit.

Inzwischen hatten Wissenschaftler aus fast allen ESA-Mitgliedstaaten Gelegenheit, Beobachtungen mit dem Hubble-Teleskop anzustellen. Während der ersten 9 Zyklen waren 864 europäische Astronomen bei mindestens einem erfolgreichen Hubble-Beobachtungsprogramm sogenannte Hauptexperimentatoren (PI) oder Mitexperimentatoren (CoI), und viele von ihnen haben sogar in mehreren Zyklen mitgearbeitet.

Der Erfolg einer wissenschaftlichen Vorhabens läßt sich an der Anzahl und der Qualität der in der Fachpresse veröffentlichten wissenschaftlichen Abhandlungen messen. Die Zahl der jährlich veröffentlichten Artikel über Hubble-Beobachtungen ist seit dem Start des Teleskops kontinuierlich gestiegen. Etwa 30 % dieser Artikel wurden von Europäern mitverfaßt, was die Bedeutung von Hubble für die europäische Astronomie verdeutlicht.



Europäische PI und CoI nach Ländern (Gesamtzahl: 864)



Space Telescope-European Coordinating Facility (ST-ECF)

Die ST-ECF betreut die europäischen Hubble-Nutzer und wird gemeinsam von der ESA und der ESO betrieben. Sie hilft bei der Ausarbeitung von Hubble-Beobachtungsanträgen und bei der wissenschaftlichen Auswertung von Beobachtungsergebnissen. Darüber hinaus betreibt sie das Hubble-Wissenschaftsarchiv, das seine Daten den Astronomen über das Internet zugänglich macht.

Die aus Beobachtungen mit Hubble gewonnenen Daten bleiben ein Jahr lang dem Beobachter vorbehalten, worauf sie der Öffentlichkeit zur Verfügung gestellt werden. In zehn erfolgreichen Betriebsjahren ist das Hubble-Archiv auf mehr als 130 000 einzigartige astronomische Bilder angewachsen und wird damit noch für lange Jahre eine wahre Fundgrube für Astronomen sein.

Space Telescope Science Institute (STScI)

Das STScI in Baltimore ist für den wissenschaftlichen Betrieb von Hubble als internationales Observatorium verantwortlich. Es befindet sich auf dem Homewood-Campus der Johns-Hopkins Universität und wird im Auftrag der NASA von der AURA (Hochschulvereinigung für astronomische Forschung) geleitet. Derzeit arbeiten am STScI etwa 500 Personen, davon rund 100 promovierte Astronomen und andere Wissenschaftler, zu denen 15 Mitarbeiter der ESA gehören.

Die Aufgaben des STScI umfassen hauptsächlich die Auswahl der Hubble-Beobachtungsanträge, ihre Durchführung, die wissenschaftliche Überwachung des Teleskops und seiner Instrumente sowie die Archivierung und Verteilung der Beobachtungsergebnisse.

Das STScI wurde kürzlich von der NASA als das für den wissenschaftlichen Betrieb des Weltraumteleskops der nächsten Generation (NGST) verantwortliche Institut auserkoren.

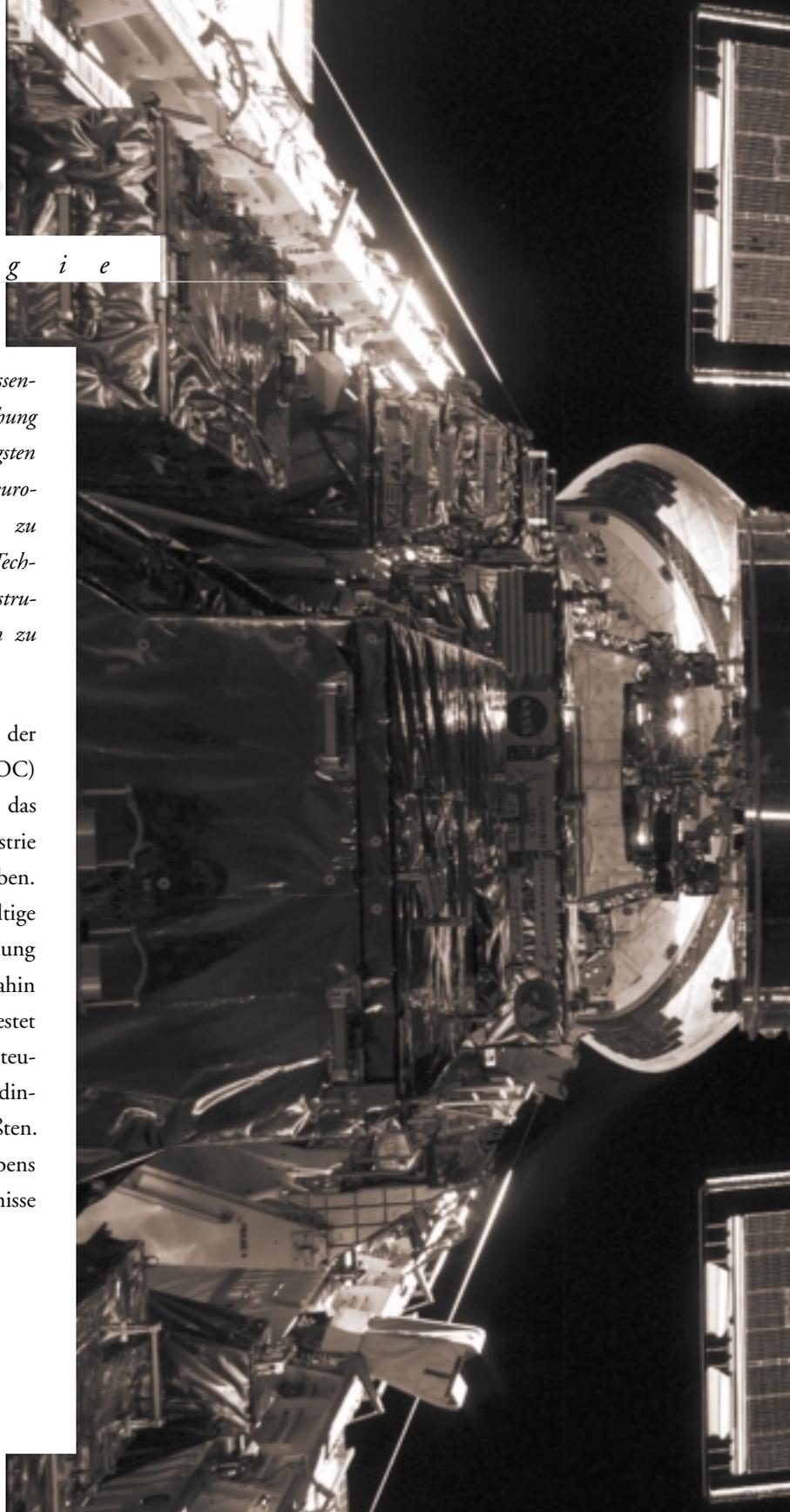
Europa & Hubble

T e c h n o l o g i e

Die FOC

Hubble soll nicht nur europäischen Wissenschaftlern Gelegenheit zu Spitzen-Forschung bieten, sondern auch einen der wichtigsten Zwecke der ESA erfüllen, nämlich der europäischen Industrie die Möglichkeit zu geben, unter Verwendung modernster Technologie ausgeklügelte Geräte und Instrumente für den Einsatz im Weltraum zu bauen.

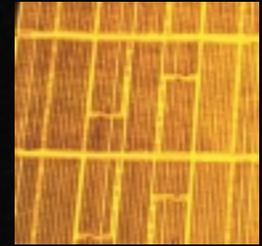
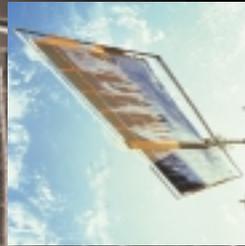
Planung, Entwicklung und Bau der Kamera für lichtschwache Objekte (FOC) waren ein ehrgeiziges Unternehmen, das die ESA und die europäische Industrie gemeinsam in Angriff genommen haben. Die FOC war insofern eine gewaltige Herausforderung, als sie die Verwendung von Technologien erforderte, die bis dahin nur unter Laborbedingungen getestet worden waren und sich nun im ferngesteuerten Einsatz unter den extremen Bedingungen des Weltraums bewähren mußten. Trotz der Schwierigkeit dieses Vorhabens hat das Instrument wunderbare Ergebnisse erzielt.



Die Sonnenzellenausleger

Die Energie für das gesamte Teleskop wird von zwei riesigen Sonnenzellenauslegern erzeugt, die ebenfalls unter Federführung der ESA von der europäischen Industrie entworfen, entwickelt und gebaut wurden. Diese Ausleger sind empfindliche, dünne Strukturen, die auf der Erde unter ihrer eigenen Last zusammenbrechen würden. Sie mußten so verstaut werden, daß sie die extreme Belastung beim Start und beim Aufstieg in die Erdumlaufbahn heil überstehen. In ausgefahrenem Zustand müssen die Solarzellen stets der Sonne zugewandt sein, damit die Batterien des Teleskops aufgeladen bleiben. Die Sonnenzellenausleger mußten ausfallsicher konstruiert werden, da ein Ausfall der Stromversorgung das Ende der Hubble-Mission bedeuten würde.

Die europäische Industrie hat gemeinsam mit der ESA zum Gesamterfolg des Hubble-Weltraumteleskops beigetragen, das eine echte Gemeinschaftsproduktion Europas und der USA ist. Eine solche internationale Zusammenarbeit mag heute nicht mehr außergewöhnlich erscheinen, doch ist zu bedenken, daß Europa zu Beginn des Hubble-Projekts Mitte der 70er Jahre noch nicht so geeint war wie heute. Großprojekte wie das von der ESA und der NASA gemeinsam entwickelte Hubble-Weltraumteleskop und andere Raumfahrtprojekte der ESA haben in nicht unerheblichem Maße zur Entwicklung der Europäischen Union, wie wir sie heute kennen, beigetragen.



Die Sonnenzellenpaneele des Hubble-Weltraumteleskops.

A. Linssen

Leiter der Projektmanagementunterstützung, Wissenschaftsdirektion der ESA

Abgesehen vom wissenschaftlichen Rückfluß sind aus dem Teamgeist, der sich während der jahrelangen Arbeit an Hubble zwischen der ESA und der europäischen Industrie auf der einen und der NASA und der amerikanischen Industrie auf der anderen Seite entwickelt hat, viele Freundschaften entstanden, die auch über die berufliche Tätigkeit hinaus Bestand haben.

Hubble während der zweiten Wartungsmission.



Das Hubble-Weltraumteleskop wurde am 24. April 1990 um 12.34 Uhr UT an Bord der Raumfähre 'Discovery' (STS-31) ins All gestartet. Die Raumfähre setzte Hubble am 26. April um 19.38 Uhr UT auf ihrer höchstmöglichen Umlaufbahn mehr als 600 km über der Erde aus.

Die Wartungsmissionen

Die Wartungsmissionen sind ein besonders innovativer Aspekt des Hubble-Projekts. Sie sorgen dafür, daß das Teleskop und seine Instrumente stets in einem wissenschaftlich optimalen Zustand bleiben. Zunächst war vorgesehen, das Teleskop alle zweieinhalb Jahre im Weltraum zu warten und alle fünf Jahre zu einer größeren Überholung auf die Erde zurückzuholen. Inzwischen ist man davon abgerückt und hat sich statt dessen dafür entschieden, etwa alle drei Jahre den Raumtransporter zu einer Wartungsmission ins All zu schicken, Hubble dazwischen aber nicht zur Erde zurückzubringen.

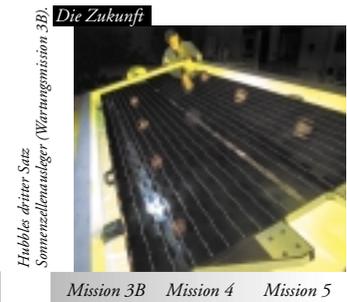
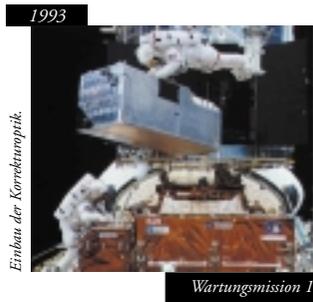
Der Start

und die

Wartungsmissionen

Die erste Hubble-Wartungsmission
Wegen der bereits erwähnten Aberration des Hauptspiegels konnte Hubble in seinen ersten drei Jahren die Erwartungen nicht erfüllen. Während der ersten Wartungsmission im Dezember 1993 (STS-61) haben Astronauten, darunter der Schweizer Claude Nicollier, die Korrekturoptik (COSTAR) installiert, die Hubble als 'Brille' dient. Damit begann Hubbles goldenes Zeitalter: Die Bilder waren so gestochen scharf wie ursprünglich erhofft, und regelmäßig brachten die Beobachtungen erstaunliche neue Ergebnisse. COSTAR nahm den Platz des Hochgeschwindigkeits-Photometers (HSP) ein, und die ältere Weitwinkel-Planetenkamera (WFPC) wurde durch das neuere Modell WFPC2 ersetzt. Auch die Sonnenzellenausleger wurden ausgewechselt, um das Problem der zu starken Durchbiegung zu beheben. Viele der damals Beteiligten sehen in dieser ersten Wartungsmission den Wendepunkt im Hubble-Projekt. Dank der äußerst komplizierten Repara-

Bei meinen beiden Hubble-Wartungsmissionen, 1 und 3A, war ich mir ständig bewußt, wie schön dieses Instrument auf seiner Bahn um die Erde aussieht, besonders wenn die Sonne seine Solarzellenflügel vor dem schwarzen Hintergrund des Weltraums mit Licht überflutet... Ein großes Teleskop auf der Erde ist stets in eine massive Montierung eingebettet... Hubble schwebt frei im All, leicht, schlank, scheinbar zerbrechlich und doch unglaublich leistungsfähig!



turarbeiten, die die Astronauten im Weltraum mit Erfolg durchgeführt haben, wurde Hubble zum leistungsstärksten wissenschaftlichen Instrument, das je gebaut wurde.

Die zweite Hubble-Wartungsmission
Die zweite Wartungsmission (STS-82) fand im Februar 1997 statt und erforderte fünf Weltraumpaziergänge. Hauptziel war der Austausch von zwei wissenschaftlichen Instrumenten der ersten Generation: Der Spektrograph für lichtschwache Objekte (FOS) und der Goddard-Hochauflösungsspektrograph (GHRS) wurden durch zwei neue Instrumente, NICMOS (Near Infrared Camera and Multi-Object Spectrograph) und STIS (Abbildender Spektrograph für das Weltraumteleskop), ersetzt.

Die Wartungsmission 3A
Im November 1999 fiel der vierte von Hubbles ursprünglich sechs Lageregelungskreiseln aus. Für die Ausrichtung des Teleskops im Weltraum sind mindestens

drei funktionsfähige Kreisel erforderlich; nach dem Ausfall des vierten Kreisel versetzte sich Hubble automatisch in einen sicheren Betriebszustand, der weitere Beobachtungen verhinderte. Der Austausch der Kreisel wurde damit unerlässlich. Die NASA hatte diese Panne allerdings vorhergesehen und aus der dritten Wartungsmission zwei Teilmissionen gemacht, von denen die erste (3A) vorgezogen wurde, um dieses akute Problem zu lösen. Im Dezember 1999 hob die Raumfähre 'Discovery' ab, deren Besatzung – zu der auch die ESA-Astronauten Claude Nicollier und Jean-François Clervoy zählten – die Reparaturen ausführte und andere geplante Nachrüstungen vornahm, so daß Hubble jetzt wieder voll funktionsfähig ist und herrliche Bilder liefert.

Zukünftige Wartungsmissionen
Während der Wartungsmission 3B (derzeit für 2001 geplant) werden die Astronauten die Kamera für lichtschwache Objekte (FOC) gegen die

Advanced Camera for Surveys (ACS) austauschen, einen neuen Satz Solarzellenausleger montieren und ein Kühlsystem für das Instrument NICMOS einbauen, so daß dieses seinen Betrieb wiederaufnehmen kann. Auch die Auswechslung der thermischen Isolierung soll dann fortgesetzt und das Teleskop in eine höhere Umlaufbahn gebracht werden. Die Planung für eine vierte Wartungsmission befindet sich noch im Anfangsstadium, aber die Entwicklung zweier neuer wissenschaftlicher Instrumente für diese Mission ist bereits im Gange: Der Cosmic Origins Spectrograph (COS) wird die Korrekturoptik COSTAR ersetzen, und die Weitwinkel-Planetenkamera 2 (WFPC2) wird ihrem Nachfolgemodell WFC3 weichen. Nach der gegenwärtigen Planung soll Hubble am Ende seiner Lebensdauer (um 2010) eingefangen und auf die Erde zurückgebracht werden, da ein Absturz des Teleskops nach Ansicht der Experten wegen seiner Größe zu gefährlich wäre.

Die Zukunft

Die Synergie zwischen Boden- und Weltraumteleskopen



Sonnenuntergang über dem Großteleskop VLT der ESO

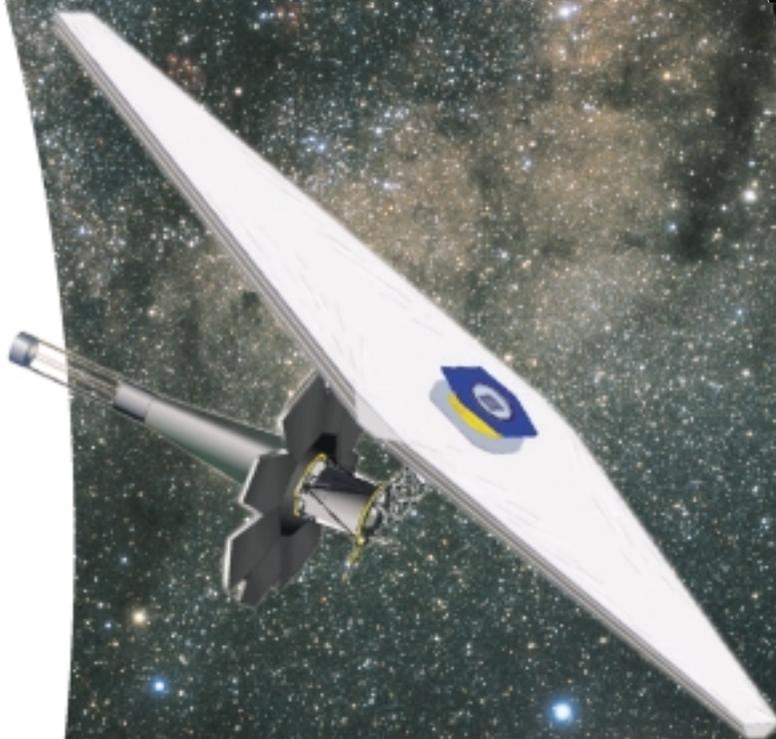
Hubble hat nicht nur viele Durchbrüche in der Astrophysik und der Kosmologie erzielt, sondern auch den Weg für eine effizientere Nutzung großer Bodenteleskope geebnet und den Entwurf neuer Beobachtungsinstrumente nachhaltig beeinflusst.

Ein Beispiel: Dank seiner äußerst hohen Auflösung kann das Teleskop lichtschwache, entfernte Galaxien aufspüren, aber sein relativ kleiner Hauptspiegel ist nicht groß genug, um das Licht dieser entfernten Objekte eingehend analysieren zu können. Hier kommen die Bodenteleskope mit einem Spiegeldurchmesser von 8 bis 10 Metern wie das VLT, die Keck- und die Gemini-Teleskope zum Zuge, die moderne Instrumente zur Analyse dieser schwachen Lichtquellen verwenden und Aufschluß über Art und Zusammensetzung dieser sehr weit entfernten Galaxien geben. Dank der kombinierten Nutzung von Hubble und dieser Bodenteleskope können die Astronomen nicht nur feststellen, *wo* die Objekte sind, sondern auch, *woraus* sie bestehen und *wie alt* sie sind.

Zahlreiche andere geplante Observatorien, sowohl am Boden – wie das ALMA (Atacama Large Millimeter Array) der ESO und die optischen Teleskope mit Spiegeln von 40 bis 100 Metern Durchmesser – als auch im Weltraum – z.B. die Projekte PLANCK und FIRST der ESA und das MAP-Projekt der NASA –, werden ihren Betrieb auf dem soliden Fundament der mit Hubble gewonnenen Erkenntnisse und Erfahrungen aufnehmen.

Catherine Cesarsky
Generaldirektorin der Europäischen Südsternwarte (ESO)

Fortschritte in der Astrophysik und in der Kosmologie beruhen zunehmend auf der Kombination von boden- und weltraumgestützten Beobachtungen. Die Organisationen, die die großen Observatorien betreiben, sollten besondere Anstrengungen unternehmen, um Synergien zwischen den Weltraum- und den Bodeneinrichtungen zu fördern, und zwar sowohl bei ihrem wissenschaftlichen Einsatz als auch bei ihrem Betrieb, wo gemeinsame Nutzung von Technologien und Verfahren erhebliche Einsparungen ermöglichen. Die ESA und die ESO gehen bereits in mehreren strategischen Bereichen mit vereinten Kräften vor und sehen einer noch fruchtbareren Zusammenarbeit in der Zukunft entgegen.



Sergio Volonté
ESA-Koordinator für Astronomiemissionen

Die erfolgreiche Beteiligung der ESA am Hubble-Projekt hat sich für die europäische Wissenschaft als äußerst gewinnbringend erwiesen. Es ist daher nur logisch, daß die ESA nun aktiv mit der NASA und der Kanadischen Raumfahrtagentur als neuem Partner auf die Entwicklung des Hubble-Nachfolgers NGST (Weltraumteleskop der nächsten Generation) hinarbeitet. Das als Infrarotteleskop mit großem Spiegeldurchmesser geplante NGST soll durch das ferne Universum bis in die Zeit des „ersten Lichts“ zurückblicken, als die ersten Sterne und Galaxien zu leuchten begannen.

Das **NGST**

Hubbles gestochen scharfe Bilder von den Tiefen unserer Galaxie und vom fernen Universum haben den Anreiz für neue, noch ehrgeizigere Weltraumprojekte gegeben. Die Ausdehnung des Universums hat zur Folge, daß das Licht zu immer größeren Wellenlängen verschoben wird, je weiter man in die Vergangenheit zurückblickt. Um weiter 'sehen' zu können als Hubble, nämlich bis zurück in die Zeit, in der sich Galaxien gebildet haben, muß im Infrarotbereich beobachtet werden. Das Weltraumteleskop der nächsten Generation (NGST) wird mit seinem ausfaltbaren Reflektor von 8 Meter Durchmesser zehnmal mehr Licht sammeln können als Hubble und für Infrarotlicht außerordentlich empfindlich sein; es soll nach der jetzigen Planung im Jahr 2009 die Nachfolge von Hubble antreten.

An der Planung des NGST sind die Nationale Luft- und Raumfahrtorganisation der USA (NASA), die Kanadische Raumfahrtagentur (CSA) und die ESA beteiligt.

Einblicke in kosmische Tiefen

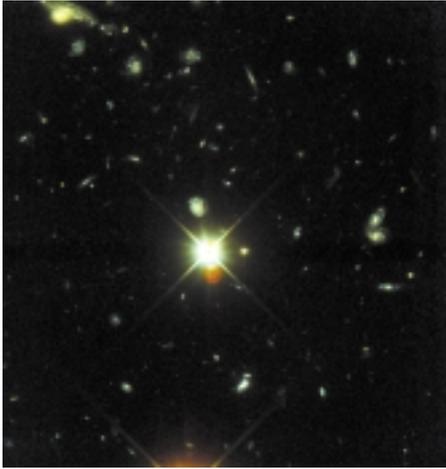
Eines der wichtigsten wissenschaftlichen Ziele beim Bau von Hubble bestand darin, die Größe und das Alter des Universums zu messen und die Theorien über seinen Ursprung zu überprüfen. Aufnahmen lichtschwacher Galaxien geben „fossile“ Hinweise darauf, wie das Universum in der fernen Vergangenheit aussah und wie es sich mit der Zeit weiterentwickelt haben mag. Die Beobachtung tiefer Regionen gewährte den Astronomen den ersten ungetrübten Blick zurück in die Zeit, in der die Galaxien entstanden sind.



Hubble Deep Field (WFPC2).

Stefano Cristiani
Europäische Koordinierungsstelle für das Weltraumteleskop (ST-ECF)

Meiner Ansicht nach haben die mit Hubble gemachten tiefen Aufnahmen den bisher größten Beitrag zur beobachtenden Kosmologie geleistet. Diese eindrucksvollen Vorstöße in die Tiefen von Raum und Zeit haben es den Astronomen gestattet, einen Blick auf die ersten Stadien der Galaxienentstehung vor über 10 Milliarden Jahren zu erhaschen, und gehören ohne Zweifel zu den wichtigsten Vermächtnissen des Hubble-Weltraumteleskops.



Die Idee der intensiven Beobachtung von ausgewählten Regionen geht auf die Ergebnisse der ersten Hubble-Aufnahmen nach der Reparatur im Jahr 1993 zurück. Diese Aufnahmen zeigten viele Galaxien, die sich stark von denen des nahen Universums unterscheiden und mit herkömmlichen bodengestützten Teleskopen nicht beobachtet werden können.

Die erste Region, das Hubble-Deep-Field Nord (HDF-N), wurde an 10 aufeinanderfolgenden Tagen um Weihnachten 1995 ins Visier genommen. Die daraus resultierende Aufnahme besteht aus 342 Einzelbildern mit einer gesamten Belichtungszeit von über 100 Stunden (während sonst Belichtungen von wenigen Stunden üblich sind). Die zu beobachtende Himmelsregion im Sternbild Großer Bär war sorgfältig ausgewählt worden, da sie so leer wie möglich sein sollte, damit Hubble weit über die Sterne unserer Milchstraße und der Nachbargalaxien hinaus schauen konnte.

Die Ergebnisse waren erstaunlich! Fast 3000 Galaxien waren in der Aufnahme zu sehen. Die Wissenschaftler werteten die Aufnahme statistisch aus und stellten fest, daß Hubble bis in das sehr junge Universum zurückgeblickt hatte, wo die meisten Galaxien noch keine Sterne gebildet hatten. Die populärwissenschaftliche Presse meldete daher auch etwas reißerisch: „Hubble blickt zurück zum Urknall“.

Die weit entfernten Galaxien schienen auch kleiner und unregelmäßiger zu sein als unsere Nachbargalaxien. Dies wurde als eindeutiger Hinweis dafür angesehen, daß Galaxien durch gravitative Verschmelzung kleinerer Objekte entstehen.

1996 wurde beschlossen, eine zweite Region – das Hubble-Deep-Field Süd (HDF-S) – zu beobachten, um herauszufinden, ob die HDF-N eine besondere Region und daher nicht repräsentativ für das Universum als Ganzes war. Dieses Mal befand sich in dem Himmelsausschnitt auch ein Quasar, der als kosmologischer Leuchtturm benutzt wurde und wertvolle Informationen über die Materie zwischen dem Quasar und der Erde lieferte.

Nach den Hubble-Beobachtungen von HDF-N und HDF-S nahmen auch andere boden- und weltraumgestützte Instrumente dieselben Himmelsregionen über lange Zeiträume ins Visier. Einige der interessantesten Erkenntnisse scheinen sich aus diesen fruchtbaren Synergien zwischen Instrumenten verschiedener Größe, in verschiedenen Umgebungen und mit einer Empfindlichkeit für unterschiedliche Wellenlängen zu ergeben.

Alter und Größe des Universums

Cepheiden

Mit dem Bau von Hubble sollte den Astronomen an erster Stelle die Möglichkeit gegeben werden, die Größe und das Alter des Universums durch die Beobachtung von Cepheiden in fernen Galaxien zu bestimmen. Dieses wissenschaftliche Ziel war so wichtig, daß es die Mindestgröße des Hauptspiegels von Hubble bestimmte.

Cepheiden sind eine besondere Art veränderlicher Sterne mit sehr regelmäßigen und vorhersagbaren Helligkeitsschwankungen. Die Periode dieser Schwankungen hängt von physikalischen Eigenschaften der Sterne wie ihrer Masse und absoluten Helligkeit ab. Das heißt, daß die Astronomen alleine durch Beobachtung der Leuchtkraftvariationen der Cepheiden Rückschlüsse auf ihre physikalische Beschaffenheit ziehen können, aus der sich ihre Entfernung recht genau bestimmen läßt. Aus diesem Grund bezeichnen die Kosmologen die Cepheiden als 'Standardkerzen'.

Mehrere Gruppen von Astronomen haben Hubble zur Beobachtung von Cepheiden eingesetzt und dabei außergewöhnliche Ergebnisse erzielt. Die Cepheiden wurden zur Messung der Entfernung von Supernovae verwendet, die ihrerseits ein Maß für die Größe des Universums lieferten. Heute kennen wir das Alter des Universums viel genauer als vor Hubble: rund 15 Milliarden Jahre.

Gustav A. Tammann
Astronom, Universität Basel

Wir leben in einer wirklich aufregenden Zeit. Hubble hat riesige Fortschritte in der Kosmologie möglich gemacht. Heute haben wir ein viel einheitlicheres Bild des Universums als noch vor fünf Jahren, als man von einer „Krise in der Kosmologie“ sprach. Unsere Depression hat einer Hochstimmung Platz gemacht!

Die Spiralgalaxie NGC 4603 enthält Cepheiden, die für die Entfernungsmessungen verwendet wurden.





Supernovae

Dank seines scharfen Blicks kann Hubble explodierende Sterne sehen – Supernovae, die Milliarden Lichtjahre entfernt und mit anderen Teleskopen nur schwer zu beobachten sind.

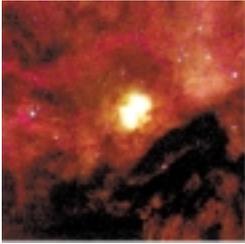
Die meisten Wissenschaftler glauben heute, daß sich das Universum immer schneller ausdehnt. Diese Erkenntnis beruht auf kombinierten Messungen entfernter Supernovae mit fast allen Spitzenteleskopen der Welt, einschließlich Hubble, und war eine große Überraschung. Viele Jahre lang haben die Kosmologen darüber diskutiert, ob sich die Ausdehnung des Universums allmählich verlangsamen und vielleicht sogar völlig zum Stillstand kommen wird. Aus den neuen Beobachtungen scheint eindeutig hervorzugehen, daß die Expansionsgeschwindigkeit keineswegs abnimmt. Aufgrund einer mysteriösen Eigenschaft des Weltraums (der sogenannten Vakuumenergie) dehnt sich das Universum vielmehr ständig schneller aus.

Hubble hat diesen Supernovae-Messungen vor allem wegen seines hohen Auflösungsvermögens weit größere Genauigkeit verliehen. Bei Beobachtungen vom Boden aus vermischt sich das Bild einer Supernova im allgemeinen mit dem ihrer Wirtsgalaxie. Hubble kann das Licht der beiden Quellen voneinander trennen und somit die Supernova direkt messen.

Bruno Leibundgut
Astronom, Europäische Südsternwarte (ESO)

Nach den mit Hubble vorgenommenen Entfernungsmessungen der ersten vier Supernovae wurde uns klar, daß mit unserem bisherigen Bild des Universums etwas nicht stimmte. Obwohl der endgültige Beweis für die zunehmende Expansion des Universums erst später kam, konnten wir unsere Hubble-Beobachtungen nicht mit einem Universum vereinbaren, das sich immer langsamer ausdehnt.

Sternentwicklung



Neugeborene massereiche Sterne im Papillon-Nebel.

Der Großteil des Lichts und der Strahlung, die wir im Universum beobachten können, stammt von Sternen - einzelnen Sternen, Sternhaufen, sowie von durch Sternen angeregte Nebeln und Galaxien, die aus Milliarden von Sternen bestehen. Sterne sind Kugeln aus leuchtendem Wasserstoff und anderen chemischen Elementen, deren enormer Energieausstoß auf Kernreaktionen ähnlich denen in Wasserstoffbomben zurückzuführen ist, bei denen leichte Elemente in schwerere umgewandelt werden. Wie Menschen auch, werden Sterne geboren, wachsen heran und sterben schließlich, jedoch ist ihre Lebensdauer erheblich länger als unsere.

Hubble hat die mit anderen Observatorien erzielbaren Ergebnisse weit übertroffen, weil es die Untersuchung von Geburt, Leben und Tod einzelner Sterne mit den Theorien der Sternentwicklung verknüpft hat. Insbesondere seine Fähigkeit, Sterne in anderen Galaxien zu erforschen, gibt den Wissenschaftlern die Möglichkeit, den Einfluß der verschiedenen Umgebungen auf das Leben der Sterne zu untersuchen. Dies ist wichtig,

um unser Bild von der Milchstraße durch das anderer Galaxien ergänzen zu können.

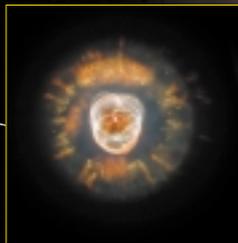
Hubble war das erste Teleskop, das Weiße Zwerge in Kugelsternhaufen direkt beobachtet hat. Weiße Zwerge sind Überbleibsel von Sternen und geben ein 'fossiles' Zeugnis ihrer Vorläufersterne, die so hell schienen, daß sie vor langer Zeit ihren Kernbrennstoff verbraucht haben. Durch diese Messungen läßt sich das Alter dieser uralten Sternhaufen bestimmen, was für die Kosmologie von großer Bedeutung ist.

Ein anderer Bereich, in dem die mit Hubble geleistete Arbeit breite Anerkennung gefunden hat, ist die Verknüpfung der Sternentstehung (siehe auch Seite 28-29) mit der Sternentwicklung. Hubbles Infrarotinstrument NICMOS kann durch den Staub schauen, der neugeborene Sterne umgibt. Eine der bisher überraschendsten Entdeckungen wurde beim Blick durch die Staubwolken um das Zentrum unserer Milchstraße gemacht. Die Astronomen fanden heraus, daß diese Region, die für ruhig und fast 'tot' gehalten wurde, von massereichen Babysternen bevölkert ist, die sich zu Sternhaufen zusammengefunden haben.

Gerard Gilmore
Astronom, Universität Cambridge

Hubble hat meiner Meinung nach die Untersuchung von Kugelsternhaufen – vor allem in anderen Galaxien - revolutioniert. Diese Objekte sind so dicht bevölkert und die Sterne stehen so nah beieinander, daß es fast unmöglich ist, sie mit bodengestützten Teleskopen auseinanderzuhalten. Wir konnten durch Messungen bestimmen, aus welchen Arten von Sternen sie bestehen, wie sie sich entwickeln und welche Rolle die Gravitation in diesen komplexen Systemen spielt.

Der Ringnebel (M57), ein Planetarischer Nebel.



Der Eskimonebel, ein Planetarischer Nebel.

Der alte Sternhaufen *Hodge 301* umgeben von *Supernova-Überresten*.



Die Ringe um die *Supernova 1987A*.



Die letzten Phasen sonnenähnlicher Sterne wurden durch Beobachtungen Planetarischer und Protoplanetarischer Nebel untersucht. Diese farbenprächtigen Gasschalen wurden von sterbenden Sternen in den Weltraum ausgestoßen. Die unterschiedlichen Formen und Farben dieser vielschichtigen Strukturen – wobei die einzelnen Farben von verschiedenen, oft neu geschaffenen chemischen Elementen herrühren – haben gezeigt, daß die letzten Etappen im Leben der Sterne komplexer sind, als man bisher glaubte.

Supernova 1987A

Als die seit Jahrhunderten erste nahe Supernova im Jahr 1987 in der Großen Magellanschen Wolke aufleuchtete, wurde sie mit jedem auf der Erde verfügbaren Teleskop beobachtet. Hubble hat seit seinem Start im Jahr 1990 schon oftmals seinen Blick auf den 150 000 Lichtjahre entfernten Ort dieses einzigartigen Ereignisses gerichtet und dank seines äußerst hohen Auflösungsvermögens den weiteren Verlauf dieser verheerenden Explosion im einzelnen verfolgt. Hubble hat zwei Gasringe gesehen, die der explodierende Stern am Ende seines Todeskampfes mehrere Tausend Jahre vor der letzten Explosion ausgestoßen hat. In den letzten Jahren haben die Astronomen beobachtet, wie verschiedene Teile dieser Ringe von der sich ausdehnenden Stoßwelle der Explosion getroffen wurden.

Unser Sonnen s y s t e m

Pluto und sein Mond Charon.



Rudi Albrecht
Europäische Koordinierungsstelle für das Weltraumteleskop (ST-ECF)

Wir haben mit Hubble eine Reihe intensiver Beobachtungen von Pluto durchgeführt, worauf die Daten am Boden mit modernsten Methoden verarbeitet wurden. Zum ersten Mal in der Geschichte waren Oberflächenmerkmale zu erkennen. Für mich persönlich war es ein unvergeßlicher Moment, als ich diese Aufnahme dem Entdecker von Pluto, Clyde Tombaugh, zeigte und damit Hubble seiner großen Entdeckung Tribut zollen ließ.

Hubbles hochauflösende Bilder der Planeten und Monde in unserem Sonnensystem können nur noch durch Nahaufnahmen von Sonden übertroffen werden, die sie direkt anfliegen. Außerdem kann Hubble seinen Blick regelmäßig wieder auf diese Objekte richten und sie über längere Zeiträume (Jahre) als jede vorbeifliegende Sonde beobachten.

Eine regelmäßige Überwachung der Planetenoberflächen ist für die Untersuchung der Atmosphäre und Geologie der Planeten von großer Bedeutung, da die Entwicklung des Wettergeschehens wie Staubstürme Aufschluß über die zugrunde liegenden Prozesse geben kann. Hubble kann auch geologische Ereignisse wie Vulkanausbrüche direkt beobachten. Der Asteroid Vesta, der einen Durchmesser von nur 500 km hat, wurde von Hubble aus einer Entfernung von 250 Millionen km aufgenommen. Die anschließend erstellte Oberflächenkarte zeigt eine bizarre Welt mit vielen Lavaströmen, die ein riesiger Einschlagkrater dominiert.

Außerdem kann Hubble schnell auf plötzliche dramatische Ereignisse im Sonnensystem reagieren. Fast die ganze Welt richtete in der Zeit vom 16. bis 22. Juli 1994 ihren Blick auf den Kometen Shoemaker-Levy 9, als er in die Atmosphäre des Riesenplaneten Jupiter stürzte. Hubble verfolgte die Fragmente des Kometen auf ihrer letzten Reise und lieferte eindrucksvolle,



Jupiters Wolkenbänder mit seinem in großer Höhe vorbeiziehenden Mond Io und dessen Schatten.



*Einschlagstelle eines Fragments
des Kometen Shoemaker-Levy 9.*

hochauflösende Aufnahmen der Einschlagstellen, aus denen wichtige neue Informationen über die Bedingungen in der Atmosphäre des Jupiter hervorgingen.

Die Voyager-Sonden hatten bei ihren Vorbeiflügen an Jupiter und Saturn entdeckt, daß auf diesen Gasriesen Polarlichter ähnlich den Nordlichtern auf der Erde auftreten. Jedoch zeigten erst die mit Hubble gemachten Aufnahmen der Polarlichter ihre feine Struktur, die viele Wissenschaftler so beeindruckte. Zwei Kameras an Bord von Hubble sind für ultraviolette Strahlung empfindlich, die von unserer Atmosphäre absorbiert wird und daher für bodengestützte Observatorien unsichtbar ist.

Pluto ist der einzige Planet, der noch nicht von Raumsonden besucht wurde, jedoch machte Hubble 1994 die ersten scharfen Aufnahmen, auf denen Pluto und sein Mond Charon aus einer Entfernung von 4,4 Milliarden Kilometern als getrennte Objekte zu erkennen waren.



Der Mars mit Zyklonwolken.

Schwarze Löcher, Quasare und aktive Galaxien



Schwarzes Loch in der Galaxie NGC 7052 mit 300millionenmal mehr Masse als unsere Sonne.

In den fünfziger und sechziger Jahren entdeckten Astronomen Himmelsobjekte wie Quasare und Radioquellen, deren Energieabstrahlung so gewaltig war, daß sie nicht mit einer üblichen Energiequelle, wie die der Sterne erklärt werden konnte. Die plausibelste Erklärung für die Freisetzung solch riesiger Energiemengen war, daß sich im Zentrum dieser Objekte ein massereiches Schwarzes Loch befindet.

Bereits vor dem Start von Hubble wurden mehrere Objekte untersucht, in deren Zentralbereich man Schwarze Löcher vermutete. Die bodengestützte Astronomie konnte jedoch wegen der ihr gesetzten Grenzen die Existenz Schwarzer Löcher nicht eindeutig nachweisen.

Schwarze Löcher selbst können naturgemäß nicht beobachtet werden, da sie alles Licht verschlucken. Was Astronomen jedoch sehr wohl erforschen können, ist die Wirkung Schwarzer Löcher auf ihre Umgebung. Dazu gehören mächtige Elektronenstrahlen, sogenannte Jets, die sich vom Mittelpunkt der Galaxien weg über Entfernungen von mehreren Tausend Lichtjahren erstrecken. Auch ist zu beobachten, daß Materie, die von Schwarzen Löchern angesaugt wird, hell aufleuchtet. Durch Messung der Geschwindigkeit der

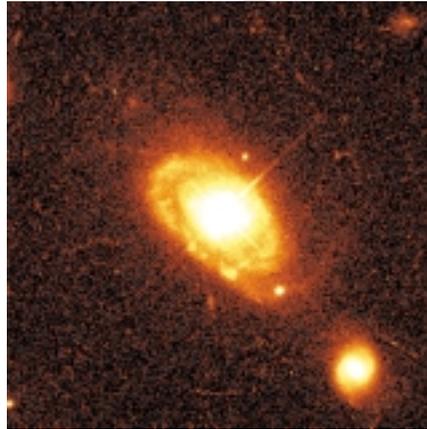
in ein Schwarzes Loch stürzenden Materie kann außerdem die Masse des Schwarzen Lochs bestimmt werden. Für diese schwierige Aufgabe sind jedoch Messungen außerordentlicher Genauigkeit erforderlich, wie sie Hubble durchführt.

Die mit Hubble angestellten Beobachtungen waren für die Untersuchung der Elektronenstrahlen und Materiescheiben um Schwarze Löcher von grundlegender Bedeutung. Erstmals waren genaue Massenbestimmungen möglich. Hubble spürte im Zentrum von Galaxien Schwarze Löcher mit einer Masse auf, die dreimilliardenmal größer ist als die der Sonne.

Ogleich theoretisch vorhersehbar, hat Hubble doch für allgemeine Überraschung gesorgt, als es starke Hinweise darauf lieferte, daß im Zentrum aller Galaxien Schwarze Löcher existieren. Und da diese um so größer zu sein scheinen, je größer die sie umgebende Galaxie ist, muß zwischen der Entstehung einer Galaxie und der ihres Schwarzen Loches ein gewisser Zusammenhang bestehen. Diese Vermutung dürfte die Theorien von der Entstehung und Entwicklung von Galaxien nachhaltig beeinflussen und in den nächsten zehn Jahren noch Gegenstand umfassender Forschungsvorhaben mit Hubble sein.

Quasars

In den achtziger Jahren zeigten Beobachtungen mit verschiedenen bodengestützten Teleskopen, daß einige Quasare von diffusem Licht umgeben sind. Es wurde vermutet, daß sich die Quasare innerhalb von Galaxien befinden und das diffuse Licht von den Wirtsgalaxien stammt. Die Bilder der hochauflösenden Hubble-Kamera für lichtschwache Objekte (FOC) erbrachten dann den Nachweis, daß diese Vermutung zutrifft. Im Gegensatz zu früheren Theorien, wonach Quasare ausschließlich in elliptischen Galaxien vermutet wurden, kann nun davon ausgegangen werden, daß sie in allen Arten von Galaxien anzutreffen sind. Dies ist insofern von Bedeutung, als angenommen wird, daß das Quasare umgebende Licht von Schwarzen Löchern im Zentrum der Wirtsgalaxien stammt. Astronomen können nunmehr nachweisen, daß dies tatsächlich der Fall ist und die Wirtsgalaxien dieser Quasare dem Wesen nach mit unseren Nachbargalaxien vergleichbar sind. Diese Erkenntnis wirft wiederum die Frage auf, warum die meisten Nachbargalaxien, unsere Milchstraße inbegriffen, 'schlummernde', also derzeit inaktive Schwarze Löcher beherbergen. Zur Klärung dieser Frage sind weitere Beobachtungen mit dem Hubble-Teleskop geplant.



Quasar PG 0052+251 und eine Wirtsgalaxie.

Einheitliches Modell

Die meisten Astronomen glauben heute, daß Quasare, Radiogalaxien und die Kerne sogenannter aktiver Galaxien lediglich unterschiedliche Erscheinungsformen sind, die mehr oder weniger denselben Ursprung haben: ein Schwarzes Loch, das nach zwei Seiten Energiebündel abstrahlt. Zielt der Strahl genau auf uns, sehen wir den hellen Leuchtkegel eines Quasars. Ist das System anders ausgerichtet, erscheint es uns als aktive Galaxie oder Radiogalaxie. Eine Reihe von Hubble-Beobachtungsprogrammen haben dieses 'einheitliche Modell' weitgehend bestätigt. Die stark vereinfachenden ersten Vorstellungen sind aber inzwischen einer komplexeren Sicht dieser Erscheinung gewichen, die sich in den kommenden Jahren zweifellos noch verfeinern wird.

Duccio Macchetto

ESA-Astronom und Leiter der wissenschaftlichen Planung im STScI

Hubble lieferte starke Anhaltspunkte dafür, daß alle Galaxien Schwarze Löcher enthalten, deren Masse das Millionen- bis Milliardenfache unserer Sonne beträgt. Dies hat unsere Sicht der Galaxien drastisch verändert. Ich bin überzeugt, daß Hubble in den nächsten zehn Jahren zu der Erkenntnis führen wird, daß Schwarze Löcher bei der Entstehung und Entwicklung von Galaxien eine weit wichtigere Rolle spielen, als wir heute vermuten. Wer weiß, vielleicht wird es sogar unsere Vorstellung vom Aufbau des Universums grundlegend verändern?

Sterngeburten



Für den Astronomen wie für den Laien hat die Frage, wie die Sterne entstanden sind, seit jeher einen besonderen Reiz. Wichtige Schlüssel zum Verständnis unserer eigenen Entstehungsgeschichte liegen hinter dem oft berückend schönen Schleier der Staub- und Gaswolken verborgen, in denen sich neue Sterne bilden. Unsere Erde wurde mit unserem Sonnensystem vor 4,6 Milliarden Jahren 'geboren'. Über dieses Ereignis ist uns wenig bekannt. Deshalb verfolgen Astronomen die Geburt anderer Sterne und Sternsysteme in benachbarten 'stellaren Brutstätten' und nutzen diese gewissermaßen als Zeitmaschine, um Vorgänge der Art, wie sie sich bei der Schaffung unseres Sonnensystems abspielten, in 'Uraufführung' mitzuerleben.

Hans Zinnecker
Astrophysiker, Astrophysikalisches Institut Potsdam

Hubble hat in zwei Bereichen einen bedeutenden Beitrag zum Verständnis der Sternentstehung geleistet. Erstens hat es die Bildung von sonnenähnlichen Sternen beobachtet und die Staubscheiben, aus denen sich später ganze Planetensysteme um diese Sterne entwickeln können, zum ersten Mal sichtbar gemacht. Zweitens hat Hubble Erkenntnisse auf einem Forschungsgebiet vermittelt, das als 'kosmologische Sternbildung' bezeichnet werden könnte und die Entstehung der Sterne im gesamten Universum untersucht. Die Beobachtung des Hubble-Deep-Field Nord eröffnete uns den Blick ins ferne Universum und gestattete uns, die Entstehungsgeschichte der Sterne durch das ganze Universum hindurch zurückzuverfolgen und die 'kosmische Entwicklung' der Sterne zu untersuchen.

Im Orion-Nebel (M42) sind mehrere 'protoplanetare Scheiben' zu erkennen (rot), diese können in der Entstehung befindliche Planetensysteme darstellen.



Der Adler-Nebel (M16).

Das große Mosaik aus 15 Hubble-Aufnahmen, das den zentralen Teil des Orion-Komplexes zeigt (Seite 28), ist eines der detailliertesten Bilder, das je von einem Sternentstehungsgebiet gemacht wurde. Es läßt einen sehr jungen Sternhaufen erkennen, der im Überrest seiner Geburtswolke aus leuchtendem Gas eine Blase bildet, die im sichtbaren Licht den Blick auf die dahinterliegenden Sterne freigibt – ähnlich wie bei einem Waldbrand, wenn die Hitze des Brandherds den Rauch verdrängt.

Die hohe Auflösung des Hubble-Teleskops ermöglichte die Untersuchung der Staubscheiben, der sogenannten 'protoplanetaren Scheiben', um die neugeborenen Sterne im Orion-Nebel. Diese protoplanetaren Scheiben könnten junge Planetensysteme in den Frühstadien ihrer Entstehung sein. Das hochempfindliche Teleskop gibt weit feinere Details zu erkennen, als dies bei bodengestützten Instrumenten der Fall ist, und so verfügen wir dank Hubble heute über den optischen Nachweis, daß junge Sterne häufig von Staubscheiben umgeben sind.

Da sich Sterngeburten stets in einer Staubhülle zu vollziehen scheinen, kommt der Leistungsfähigkeit des Teleskops im Infrarotbereich große Bedeutung zu. Das Infrarotinstrument NICMOS kann Staub weitgehend durchdringen und so die komplexen Vorgänge in Sternentstehungsgebieten enthüllen. So wurden sonst unsichtbare eng gruppierte Doppel- und Mehrfachsterne und lichtschwache substellare Braune Zwerge als Begleiter von Sternen entdeckt. Dank NICMOS und seinem optischen Gegenstück, der Weitwinkel-Planetenkamera WFPC2, konnte Hubble beobachten, wie neugeborene Sterne, die von großen Staubscheiben umgeben sind, gigantische Materiejets ausstoßen. Ein atemberaubender Einblick in die Kinderstube der Sterne.

Zusammensetzung des Universums

Die chemische Zusammensetzung des Universums und die physikalische Natur seiner Bausteine beschäftigen die Wissenschaftler seit Jahrhunderten. Von seinem Logenplatz über der Erdatmosphäre aus kann Hubble einen bedeutenden Beitrag zu diesem Forschungsgebiet leisten.

Im ganzen Universum verhalten sich Sterne wie überdimensionale Kraftwerke, die leichte chemische Elemente in schwerere umwandeln. Die ursprüngliche Zusammensetzung des Weltalls wird in allen Einzelheiten untersucht, weil sie ein Schlüssel zum Verständnis der Vorgänge im Frühstadium des Universums ist.

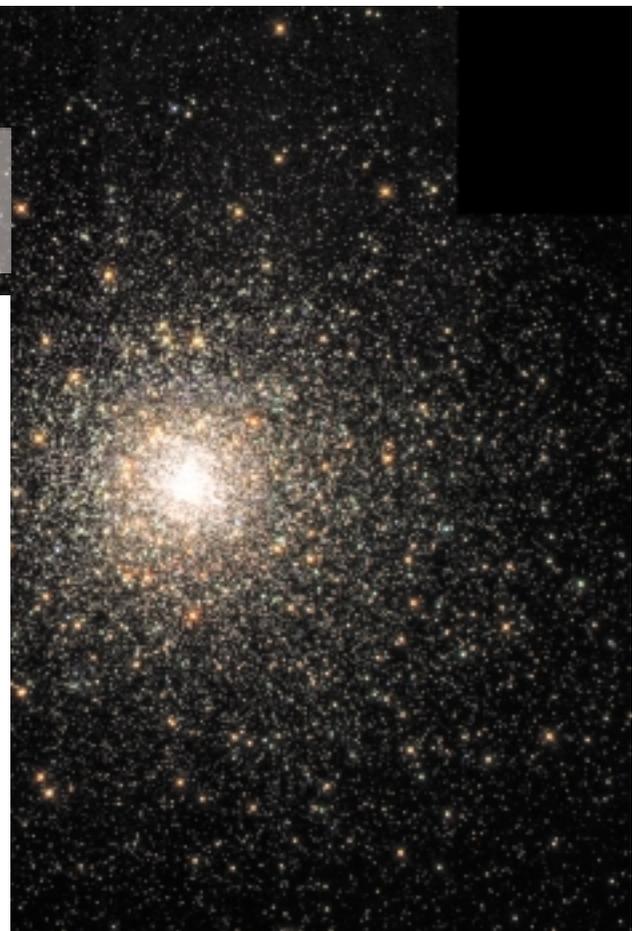
Helium im frühen Universum

Kurz nachdem die erste Wartungsmission das Problem der sphärischen Aberration des Hubble-Spiegels beseitigt hatte, untersuchte ein von dem europäischen Astronomen Peter Jakobsen geleitetes Team die gasförmige Materie, die den gesamten intergalaktischen Raum ausfüllt. Durch die Beobachtung des ultravioletten Lichts eines fernen Quasars, das sonst von der Erdatmosphäre verschluckt wird, fanden sie die lang gesuchte Signatur des Elements Helium im frühen Universum - ein wichtiges Beweisstück für die Theorie des Urknalls. Damit bestätigten

sich auch die Erwartungen der Wissenschaftler, daß die im sehr frühen Universum noch nicht in Sternen und Galaxien gebundene Materie fast vollständig ionisiert war, d.h. daß die Elektronen nicht an die Atome gebunden waren. Für die Kosmologie stellt diese Erkenntnis einen wahren Quantensprung dar.

Quasare als Leuchttürme

Die Suche nach Helium im frühen Universum ist eines von vielen Vorhaben, bei denen Hubble ferne Quasare als Leuchttürme nutzte. Wenn das Licht von Quasa-



Der Kugelsternhaufen M80.

Peter Jakobsen
ESA-Astronom und NGST-Planer

Ich glaube, daß wir inzwischen eine recht gute Vorstellung von der Menge und Zusammensetzung der 'normalen' Materie im Universum haben. Durch Beobachtungen, die immer weiter in Raum und Zeit zurückreichen, kommen wir nach und nach der Entwicklungsgeschichte dieser Materie auf die Spur, die einst beim Urknall entstand und schließlich zu den im heutigen Universum erkennbaren Sternen und Galaxien kollabierte. Hubble hat bei der Enthüllung dieser Geschichte eine entscheidende Rolle gespielt. Mit NGST, dem Weltraumteleskop der nächsten Generation, hoffen wir, sogar noch weiter in die Vergangenheit zurückblicken zu können und vielleicht einmal Zeuge der ersten Sterngeburten zu werden.

ren die intergalaktische Materie passiert, gibt die Veränderung des Lichtsignals Aufschluß über die Zusammensetzung des durchquerten Gases. Auf diese Weise wurden Erkenntnisse gewonnen, die für die Bestimmung der Gesamtzusammensetzung unseres Universums in Gegenwart und Vergangenheit von großer Bedeutung sind.

Dunkle Materie

Die Astronomen nehmen heute an, daß nahezu 95% der Masse unseres Universums aus sogenannter dunkler Materie besteht, einer Substanz, die sich grundlegend von der 'gewöhnlichen' Materie in der uns vertrauten Welt unterscheidet. Hubble hat bei den Arbeiten zur Bestimmung des Anteils der dunklen Materie im Universum und ihrer Zusammensetzung eine wichtige Rolle gespielt. Das Rätsel der geisterhaften dunklen Materie ist zwar noch längst nicht gelöst, doch haben Hubbles unglaublich scharfe Beobachtungen zum Beispiel von Gravitationslinsen (siehe Seite 32-33) den Grundstein für künftige Forschungsarbeiten auf diesem Gebiet gelegt.



Sternwolke im Sternbild Schütze.

Materie

Gravitationslinsen

Licht breitet sich nicht immer geradlinig aus. Einstein sagte in seiner Allgemeinen Relativitätstheorie voraus, daß massereiche Objekte eine Krümmung des Raumes bewirken. Wenn Licht ein solches Objekt, beispielsweise einen Galaxienhaufen, passiert, wird es leicht abgelenkt. Dieser 'Gravitationslinse' genannte Effekt ist nur in seltenen Fällen sichtbar, und nur die besten Teleskope können die dadurch hervorgerufenen Erscheinungen wahrnehmen.

Dank seiner Empfindlichkeit und hohen Auflösung kann Hubble auch noch schwache und ferne Gravitationslinsen beobachten, die sich mit bodengestützten Teleskopen, deren Bildschärfe durch die Erdatmosphäre beeinträchtigt wird, nicht mehr erfassen lassen. Eine Gravitationslinse bewirkt Mehrfachbilder einer Galaxie, die meist bananenförmigen Bogenstücken ähneln.

Hubble ließ als erstes Teleskop Einzelheiten in diesen multiplen bananenförmigen Bögen erkennen. Seine scharfen Aufnahmen enthüllen die Gestalt und den inneren Aufbau der abgebildeten Hintergrundgalaxien, so daß man mit bloßem Auge erkennen kann welche der verschiedenen Bogenstücke der betreffenden Hintergrundgalaxie zuzuordnen sind.

Da die Stärke des Effekts direkt von der Gesamtmasse des Galaxienhaufens abhängt, läßt sich aus ihm die Masse des Galaxienhaufens ableiten. Dies hat zu einem besseren Verständnis der Verteilung der 'verborgenen' dunklen Materie in Galaxienhaufen und damit im Universum als Ganzes beigetragen.

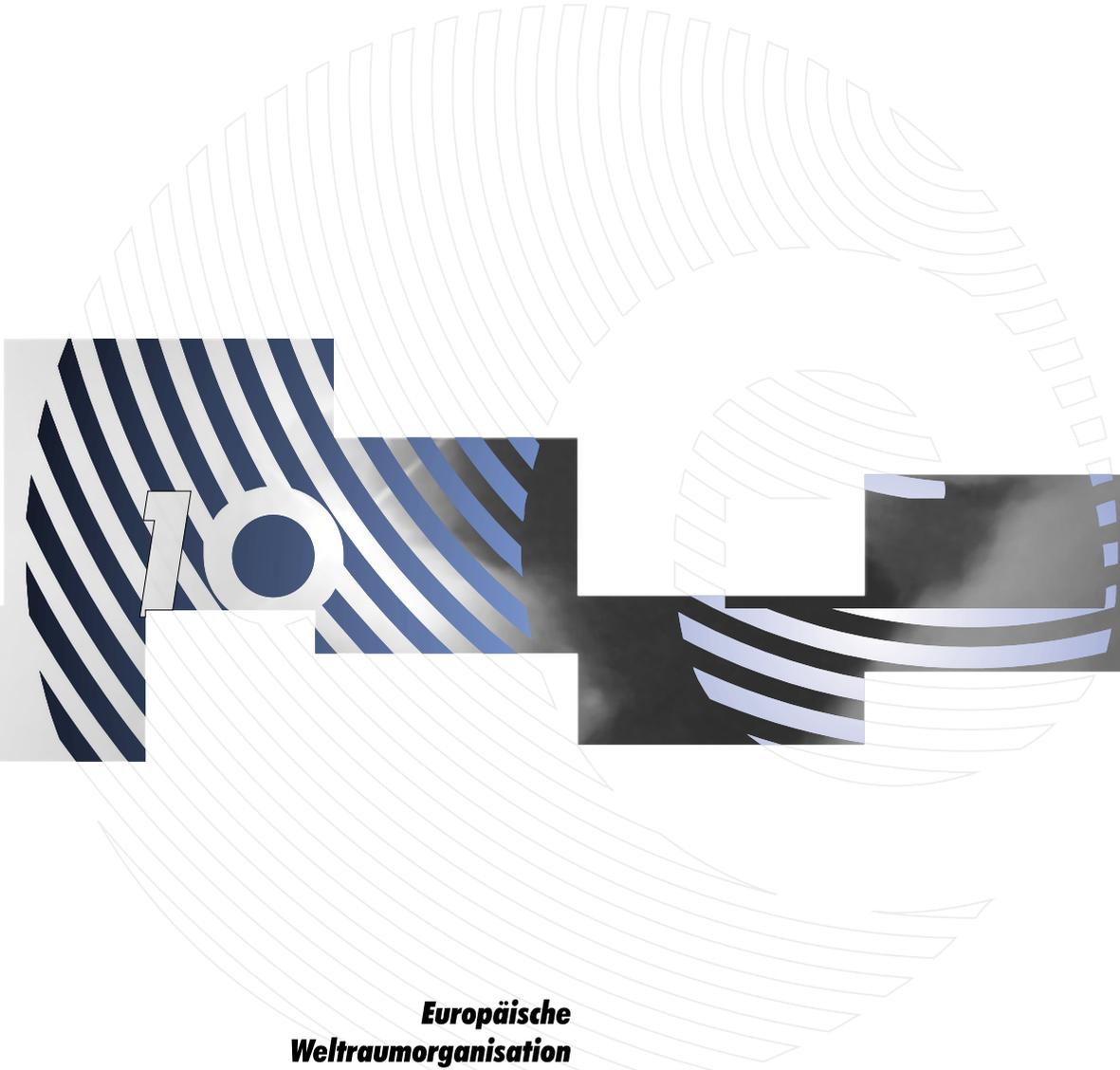


Aktuelle Aufnahme des Galaxienhaufens Abell 2218 mit Gravitationslinseneffekten.

Richard Ellis

Astronom an der University of Cambridge und dem California Institute of Technology

Als wir 1995 mit Hubble erstmals den Galaxienhaufen Abell 2218 ins Visier nahmen, wollten wir lediglich diesen Haufen und seine Einzelgalaxien erkunden. Zu unserer großen Überraschung zeigten die Bilder jedoch Dutzende und Aberdutzende von durch Gravitationslinsen verursachten Abbildungen ferner Hintergrundgalaxien. Als wir diese superscharfen Bilder unseren Kollegen zeigten, erkannten diese sofort, daß sich die Gravitationslinsen hervorragend als Werkzeuge der kosmologischen Forschung nutzen lassen.



**Europäische
Weltraumorganisation**

Ansprechpartner: ESA Publications Division
c/o ESTEC, PO Box 299, 2200 AG Noordwijk, Niederlande
Tel. (31) 71 565 3400 - Fax (31) 71 565 5433

Web-Adresse für das Hubble-Informationszentrum der ESA
<http://hubble.esa.int>

Web-Adresse für das Wissenschaftsprogramm der ESA
<http://sci.esa.int>