



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

bmb+f

Jenseits der Milchstraße

Themenheft



BMBF PUBLIK



Impressum**Herausgeber**

Bundesministerium für Bildung und Forschung
(BMBF)
Referat Öffentlichkeitsarbeit
53170 Bonn
E-Mail: information@bmbf.bund.de
Internet: <http://www.bmbf.de>

Autor

Dr. Thomas Bürke

Informationen zum Inhalt

Deutsche Physikalische Gesellschaft e.V.
Pressestelle
Hauptstrasse 20 a
53604 Bad Honnef
Telefon: (0 22 24) 9 51 95-18
Telefax: (0 22 24) 9 51 95-19
E-Mail: presse@dpg-physik.de

Redaktion

Wolfgang Richter, Manfred Schmidt

Konzept und Gestaltung

Iser & Putscher
Kreativagentur für PublicRelations GmbH,
Bad Honnef

Bildnachweis:

ESA, ESO, DLR, MPA, MPA, NASA, NRAO, RPIF,
P. Aufmuth, Uni Hannover

Titel

Große Abbildung: Spiralgalaxie NGC 1232
Kleine Abbildungen: Orion-Nebel,
Logo „2000: das Jahr der Physik“



2000
das jahr der **physik**

Jenseits der Themenheft Milchstraße

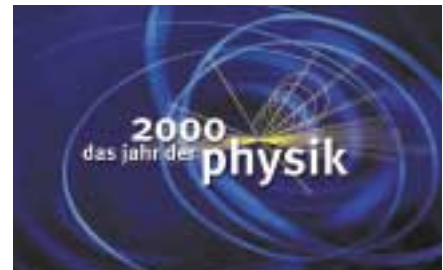
Vorherige Seite: Das wohl berühmteste Sternentstehungsgebiet – der rund 1.500 Lichtjahre entfernte Orion-Nebel (Foto: MPIA)

Bild rechts: Bei der Galaxie ESO 510-13 blickt man unmittelbar auf die Kante. Ein Staubstreifen ist erkennbar, der vermutlich das Zentrum ringförmig umgibt. (Foto: ESO)

„Physik ist lebendig, aufregend und immer wieder überraschend. Sie beantwortet Fragen unter anderem nach Ursprung und Schicksal des Universums, der Struktur der Materie und der Entstehung von Leben auf unserem Planeten. Gleichzeitig besitzt sie eine Schlüsselfunktion in der modernen Technik“, so Alexander M. Bradshaw, Präsident der [Deutschen Physikalischen Gesellschaft \(DPG\)](#).

Beim Jahr der Physik arbeitet das [Bundesministerium für Bildung und Forschung \(bmb+f\)](#) eng mit der DPG zusammen. Neben fünf zentralen Veranstaltungen in Berlin und Bonn finden überall in Deutschland an Universitäten, an Forschungseinrichtungen und an Schulen Aktionen zur Physik statt.

Das Jahr der Physik finden Sie im Internet unter www.physik-2000.de



Die Bundesministerin für Bildung und Forschung, Edelgard Bulmahn, hat zusammen mit den großen Forschungsorganisationen die bundesweite Initiative [„Wissenschaft im Dialog“](#) gestartet. „Wir müssen deutlich machen, dass Forschung für die Menschen da ist und gleichzeitig Innovation und Arbeitsplätze schafft“, so beschreibt die Ministerin den Leitgedanken der Initiative. Die Wissenschaft öffnet sich der Gesellschaft, indem aktuelle Erkenntnisse vieler Fachgebiete spannend, kontrovers und publikumsnah präsentiert werden. Die Initiative startet im Jahr 2000 mit dem Jahr der Physik.

Von der Sonne zum Anfang des Lichts

Die Sonne 4-7

Planeten, Monde und Kometen 8-11

Sterne und Nebel 12-17

Galaxien 18-25

Höchste Ansprüche 26



Die Sonne



Gigantische Gasfontänen, sogenannte Protuberanzen, schießen von der Sonnenoberfläche empor. Sie verlaufen entlang von Magnetfeldlinien und können bis zu einem Jahr stabil bleiben. (Foto: NASA)

Sonne und Erde eine stürmische Beziehung

Im März 1989 gingen in Kanada die Lichter aus, sechs Millionen Menschen saßen mehrere Stunden lang bei Außentemperaturen um minus 15 Grad in Dunkelheit und Kälte. Verursacht hatte diesen Zusammenbruch ein Sturm elektrisch geladener Teilchen, den die Sonne vier Tage zuvor ausgestoßen hatte. Als der Teilchenorkan auf das Erdmagnetfeld stieß, brachte er dieses zum Schwingen und löste darin elektrische Ströme aus. Diese induzierten ihrerseits in Überlandleitungen so hohe Spannungen, dass die Stromversorgung zusammenbrach.

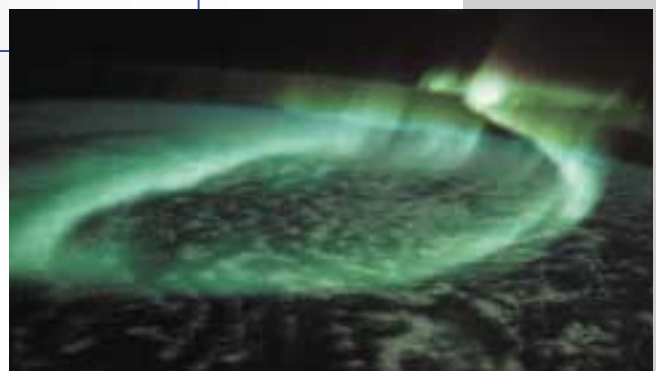
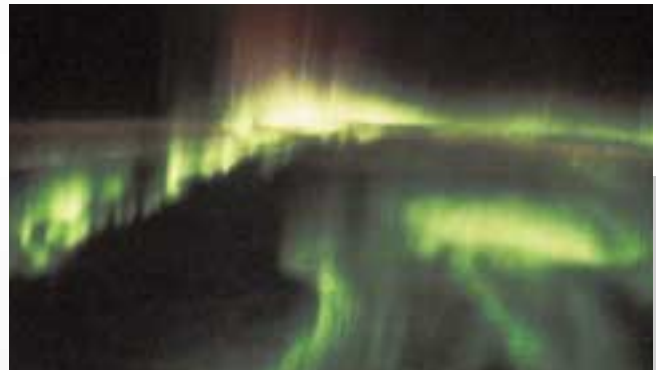
Geomagnetische Stürme dieser Stärke können sich jederzeit wiederholen. Denn wie die moderne Sonnenforschung gezeigt hat, ereignen sich ständig auf der Sonnenoberfläche heftige Explosionen. Innerhalb weniger Stunden breiten sie sich wie Flächenbrände über Gebiete von der Größe Europas aus. [Gasfontänen](#) schießen in Höhen empor, die ein Vielfaches des Erddurchmessers betragen.

Systematische Studien, wie der Teilchenwind der Sonne auf die Erde einwirkt, stehen erst am Beginn. Prallen die Partikel auf das Erdmagnetfeld, werden sie darin eingefangen und rasen mit hoher Geschwindigkeit entlang der Magnetfeldlinien zwischen den beiden Polen hin und her. Läuft dieser Magnetkäfig über, schießen die Teilchen in die Atmosphäre hinunter. Hier stoßen sie mit Atomen und Molekülen zusammen und regen diese zum Leuchten an – farbenprächtige [Polarlichter](#) entstehen.

Auch kleinere Böen im Sonnenwind wirken sich nach neuesten Untersuchungen auf technische Systeme aus. So führen Fachleute den unerwarteten Ausfall des Fernsehsatelliten Telstar im Jahr 1997 auf einen Sonnenausbruch zurück. Es wird auch vermutet, dass in Ölpipelines elektrische Ströme induziert werden, die die Stahlrohre schneller korrodieren lassen. Bei der Herstellung von Halbleitern erhöht sich laut einer Studie bei verstärktem Sonnenwind die Ausschussrate.

Seit einigen Jahren wird zunehmend die Frage diskutiert, ob das „Weltraumwetter“ auch langfristig gesehen einen Einfluss auf das Klima hat. Einige Forscher sehen einen Zusammenhang zwischen einer ungewöhnlich kalten Klimaphase in Europa, der „Kleinen Eiszeit“ im 17. Jahr-

hundert, und der Tatsache, dass zwischen 1645 und 1715 fast keine Sonnenflecken gesichtet wurden. In jüngster Zeit behaupten dänische Meteorologen, einen Zusammenhang zwischen der Länge des Aktivitätszyklus und der Jahresmitteltemperatur auf der Nordhalbkugel gefunden zu haben. Durchschnittlich alle elf Jahre durchläuft die Sonne einen Zyklus, in dessen Maximum vermehrt Sonnenflecken und Eruptionen auftreten.



Großes Bild links: Aus mehreren Bildern zusammengesetzte Sonnenaufnahme im UV- und Röntgenbereich. Sie zeigt neben der Sonnenscheibe die strahlenförmige Korona, die sonst nur bei totalen Sonnenfinsternissen sichtbar wird. (Foto: ESA)

Polarlichter sind die Folge heftiger Sonnenstürme, die auf die Erdatmosphäre niedergehen. Durch die langsame Bewegung dieser Lichtschleier entsteht ein eindrucksvolles Farbschauspiel. (Fotos: NASA)

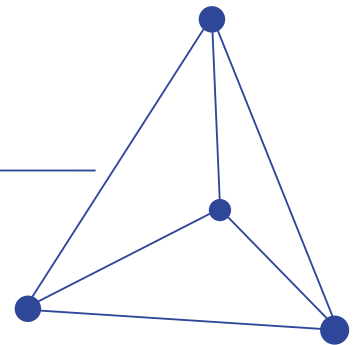
Das Weltraumwetter von morgen

Um die stürmische Beziehung zwischen Sonne und Erde gezielt zu untersuchen, riefen in den achtziger Jahren Wissenschaftler der großen Raumfahrtagenturen das bislang umfangreichste internationale Programm extraterrestrischer Forschung ins Leben: das International Solar-Terrestrial Program, ISTP. Ziel dieses Forschungsprojekts ist es, die gesamte Ereigniskette von den Vorgängen im Sonneninnern über das Abströmen des Sonnenwindes bis zu dessen Einfluss auf unseren Planeten nachzuvollziehen. Irgendwann soll es möglich sein, das Weltraumwetter vorherzusagen, um vor heftigen Stürmen warnen zu können.

Im Rahmen des ISTP wurden seit 1992 rund zehn Raumsonden gestartet, die in verschiedenen Entfernungen und auf unterschiedlich zum Äquator geneigten Bahnen die Erde umkreisen. Hier messen sie den Strom des Sonnenwindes, die Stärke des Erdmagnetfeldes und eine Reihe anderer physikalischer Größen. Zwei zentrale Komponenten in dieser Armada bilden das gemeinsam von

Europa und den USA gebaute Sonnenobservatorium SOHO (Solar and Heliospheric Observatory) sowie das weitgehend unter europäischer Leitung entstandene Satellitenquartett Cluster II. Die beiden Missionen bilden zusammen einen der Ecksteine im Wissenschaftsprogramm „Horizon 2000“ der Europäischen Weltraumbehörde ESA.

SOHO umkreist rund 1,5 Millionen Kilometer von der Erde entfernt die Sonne. Mit bislang unerreichter Genauigkeit lässt sich mit diesem Teleskop, an dem auch deutsche Institute beteiligt sind, verfolgen, wie Partikelschwärme ins All abströmen. Auf welche Weise diese auf das Erdmagnetfeld einwirken, sollen die vier Satelliten Cluster II zeigen. Ihre Umlaufbahnen werden so gewählt, dass das Quartett im Flug die Spitzen eines gedachten gleichseitigen Tetraeders bilden. Auf diese Weise ist es erstmals möglich, die dynamischen Vorgänge in der Magnetosphäre der Erde räumlich zu messen.



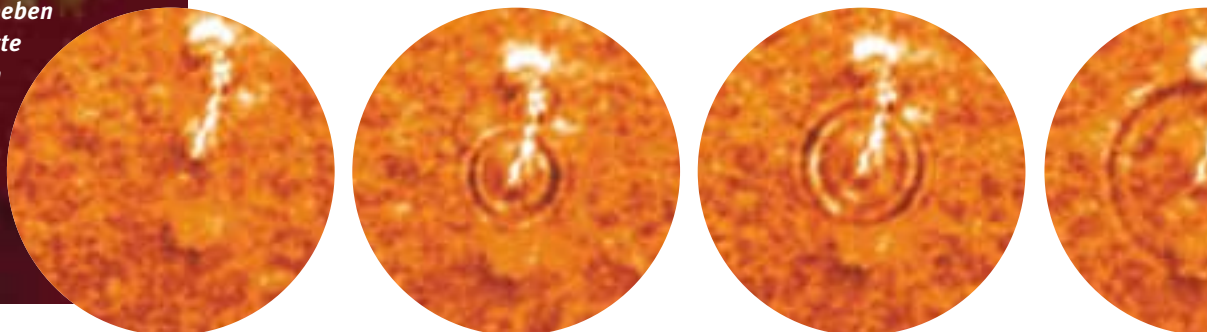
Aufnahme der Sonne vom 14. September 1999 mit dem Weltraumobservatorium SOHO, die das rund 60.000 Grad heiße Helium-Gas zeigt. Die gewaltige Protuberanz erhebt sich soweit über den Sonnenrand hinaus, dass Erdkugeln darunter Platz fänden. (Foto: ESA)

Energieproduzent Sonne

Im Innern der Sonne verschmelzen bei Temperaturen um 16 Millionen Grad Wasserstoffkerne zu Heliumkernen. Die hierbei in jeder Sekunde frei gesetzte Energie würde ausreichen, um den gesamten heutigen Energiebedarf der Menschheit eine Million Jahre lang zu decken.

Auf der Sonnenoberfläche ereignen sich ständig Explosionen, die binnen Minuten bis Stunden Energiemengen freisetzen, die dem derzeitigen Energieverbrauch der Erde über einen Zeitraum von mehreren tausend Jahren entsprechen.

Am 9. Juli 1996 beobachteten Astronomen mit dem Weltraumteleskop SOHO, wie ein Ausbruch ein Sonnenbeben auslöste. Auf der Erde hätte dieses Beben eine Stärke von 11,3 auf der Richter-Skala gehabt. Es war rund 40.000-mal stärker als jenes, das 1906 San Francisco zerstörte.



Die seismischen Wellen eines Sonnenbebens breiten sich ringförmig auf der Oberfläche der Sonne aus. Bei dem am 9. Juli 1996 beobachteten Ereignis nahm dabei die Geschwindigkeit der Wellen von 40.000 Kilometern pro Stunde auf das Zehnfache zu. (Foto: ESA)

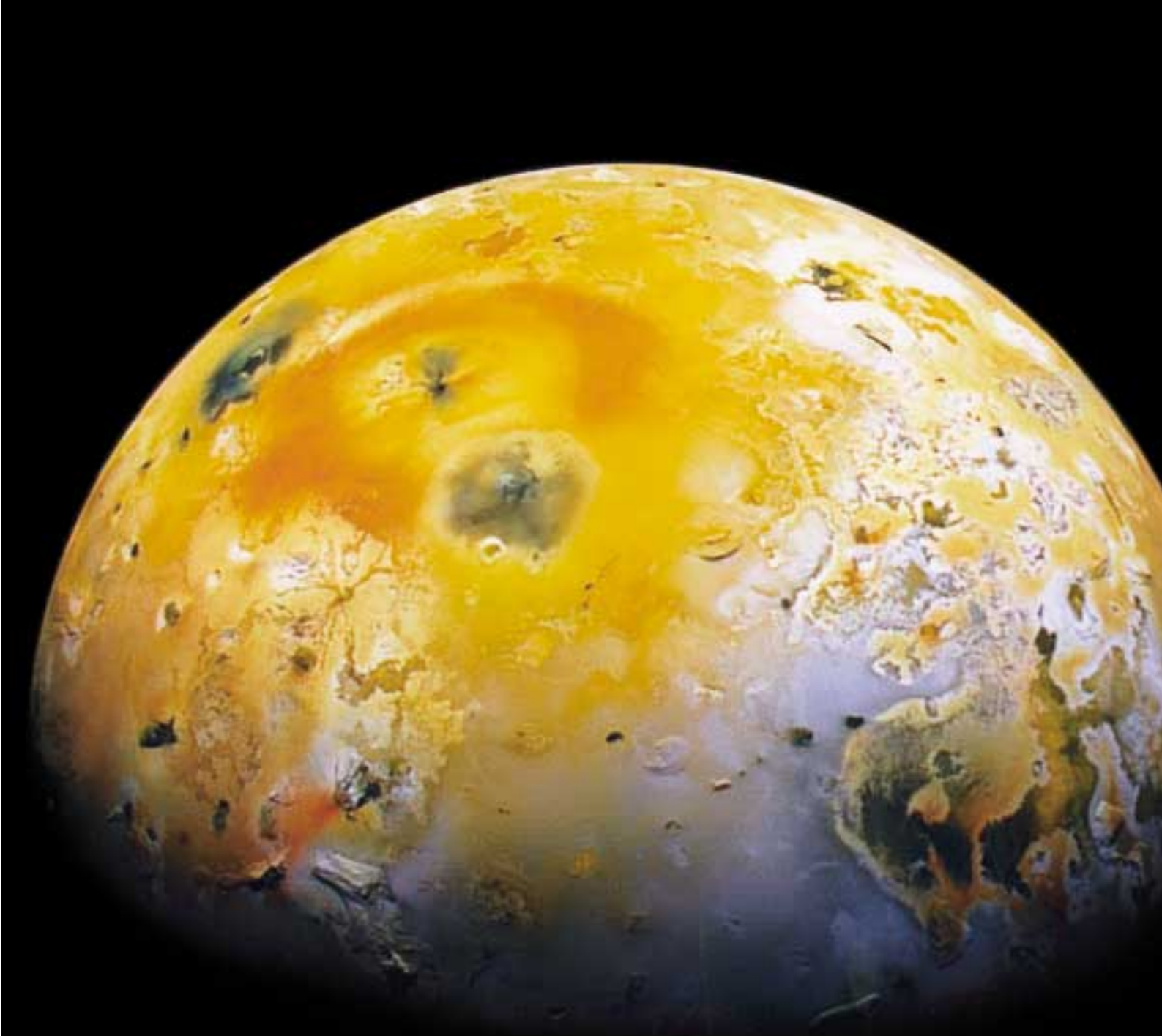


*Fotomontage der erdumkreisenden Satelliten Cluster II
(Foto: ESA)*

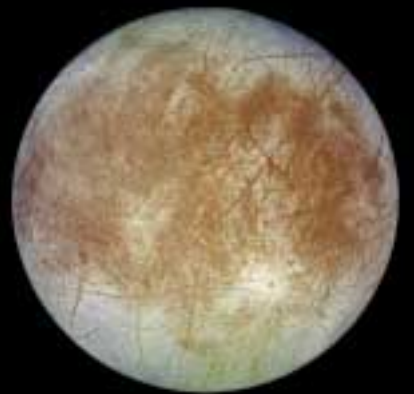


*Das europäische Weltraum-
observatorium SOHO in der
Montagehalle (Foto: ESA)*

H o r i z o n 2 0 0 0



Planeten Monde und Kometen



*Ein kilometerdicker, von Gräben
und breiten Rissen durchzogener
Eispanzer umschließt den Jupiter-
Mond Europa.
(Foto: NASA/RPIF/DLR)*

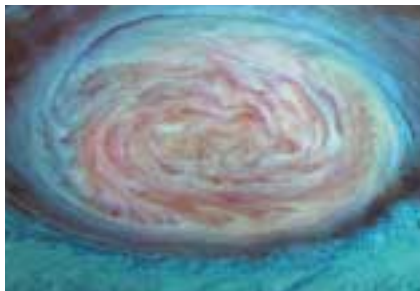
Jupiter

Gasriese mit Flecken

Der größte Planet des Sonnensystems, Jupiter, vereinigt fast drei Viertel der Masse aller Planeten allein auf sich. Über 1300 Erdkugeln fänden in ihm Platz. Bis auf einen Gesteinskern ungefähr von der Größe der Erde besteht er nur aus Gas-schichten. Sichtbar ist von ihm lediglich die oberste Wolkendecke, die von farbigen, parallel zum Äquator verlaufenden Bändern durchzogen ist. Stürme umtosen den Planeten, und Tornados wirbeln wochen- und monatelang in seiner Atmosphäre umher. Im Innern des größten Wirbelsturms, des berühmten Großen

Roten Flecks, fänden leicht zwei Erdkugeln Platz. Seit über 300 Jahren dreht sich dieser Hochdruckwirbel unablässig. Wodurch er seine rötliche Färbung bekommt und warum er über einen so langen Zeitraum stabil bleiben konnte, ist bis heute nicht gänzlich geklärt.

Nachdem die Planetenforscher jahrhundertlang lediglich Jupiters oberste Wolkendecke studieren konnten, ergab sich im Dezember 1995 erstmals die Gelegenheit, etwas tiefer in die Atmosphäre hineinzuschauen. Die Raumsonde Galileo hatte eine kleine Tochtersonde abgestoßen, an deren Bau Forscher aus deutschen Instituten maßgeblich beteiligt waren. An einem Fallschirm schwebte die Kapsel langsam in die Tiefe und übertrug eine Stunde lang Messdaten aus der Jupiter-Atmosphäre zur Erde. Erstmals ließ sich die chemische Zusammensetzung unterschiedlicher Wolkenschichten ermitteln. Sogar Blitze konnten die Forscher aufzeichnen. In über hundert Kilometern Tiefe versagte die Sonde bei einem Druck von 21 Atmosphären und wurde zerstört.



In der Jupiter- Atmosphäre dreht sich seit mindestens 300 Jahren ein Wirbelsturm, der doppelt so groß ist wie die Erde: der Große Rote Fleck. (Foto: NASA)

Io und Europa von den Gezeiten geheizt

Der Jupitermond Io ist der vulkanisch aktivste Körper im Sonnensystem. Ständig quillt schwarzer und roter, schwefeliger Brei aus seinem Innern hervor und wälzt sich über den Boden. Aus einigen Kratern schießen Eruptioswolken bis in 300 Kilometer Höhe auf, und die Ablagerungen verteilen sich in einem Umkreis von 700 Kilometern um die Vulkane.

Io ist so klein, dass sie bereits seit langer Zeit völlig ausgekühlt und somit inaktiv sein müsste. Die Forscher vermuten heute, dass Jupiter für diesen Vulkanis-

mus verantwortlich ist. Er übt auf den Mond so starke Gezeitenkräfte aus, dass dessen Inneres wie ein Teig ständig durchgeknetet und erhitzt wird, ähnlich wie ein Metallstab, den man hin und her biegt.

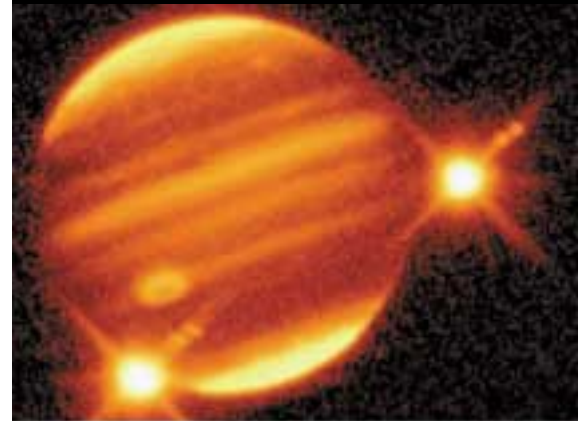
Ios Nachbar, der Jupitermond Europa, fasziniert die Wissenschaftler aus einem anderen Grund. Aufnahmen der Galileo-Sonde zeigen, dass der Mond von einem dicken Eispanzer umgeben ist. Lange Gräben und Brüche ziehen sich durch die mit vereinzelt Meteoritenkratern gezeichnete Eiswüste. Auffällig sind auch große Schollen von bis zu zwanzig Kilometern Durchmesser, die sich offensichtlich früher einmal gedreht und mehrere Kilometer gegeneinander verschoben haben, ähnlich wie Packeis. Die Eisschollen konnten sich nur dann bewegen,

Großes Bild links: Der vulkanisch aktivste Körper im Sonnensystem, der Jupitermond Io, ist von einer Schicht aus farbigen Schwefelverbindungen überzogen. (Foto: NASA/RPIF/DLR)

Goliath im Kometenhagel

Im Juli 1994 wurden die Astronomen Zeugen eines seltenen Ereignisses. Die Bruchstücke des Kometen Shoemaker-Levy 9 rasten im Verlaufe einer Woche mit Geschwindigkeiten von über 200.000 Kilometern pro Stunde in die Jupiter-Atmosphäre und detonierten darin mit der unvorstellbaren Energie von einigen Millionen Tonnen TNT. Der schwerste Brocken erzeugte eine Explosionswolke so groß wie der zweifache Erddurchmesser. Astronomen am Calar-Alto-Observatorium in Südspanien entdeckten den Einschlag des Kometen als erste und übermittelten ihre Aufsehen erregenden Bilder in alle Welt.

Das detaillierte Studium der aufgewirbelten Atmosphärenschichten lieferte wichtige Hinweise auf die chemische Zusammensetzung und den Aufbau der Jupiter-Atmosphäre. Ein ähnlich verheerender Vorgang könnte heutigen Theorien zu Folge vor 65 Millionen Jahren auf der Erde zum Aussterben der Dinosaurier und einer Vielzahl weiterer Tierarten geführt haben.



Als am 16. Juli 1994 das erste Fragment des Kometen Shoemaker-Levy 9 auf Jupiter einschlug, war wenig später der Feuerball (links unten) im Infrarot deutlich zu sehen. Er ist heller als der Mond Io, der rechts oben erscheint. (Foto: MPIA)

wenn sie auf einer Flüssigkeit schwammen. Zahlreiche Forscher vermuten, dass sich noch heute unter dem Eis ein Ozean aus warmem Wasser ausdehnt, der ebenso wie Io durch Jupiters Gezeitenwirkung erwärmt wird. Diese Idee nährt Spekulationen darüber, ob unter Europas Eisschicht Leben entstehen konnte und noch heute existiert. Derzeit wird untersucht, ob es möglich sein könnte, eine unbemannte Sonde zu Europa zu schicken, die die Eisschicht durchbohrt, Proben aus dem Wasser entnimmt und diese analysiert.

Titan Saturnmond mit Atmosphäre

In eine ganz andere Welt führt die im Oktober 1997 gestartete amerikanisch-europäische Mission Cassini/Huygens. Während die Muttersonde Cassini den Ringplaneten Saturn umkreisen und vier Jahre lang detailliert untersuchen soll, wird Huygens auf dessen Mond Titan landen.

Titan ist der einzige Mond im Sonnensystem, der von einer nennenswerten Atmosphäre umgeben ist. Seine Gashölle weist am Boden einen Druck von 1,5 Atmosphären auf und besteht zu etwa 95 Prozent aus Stickstoff sowie zu fünf Prozent aus Methan. Eine ähnliche Zusammensetzung könnte die Uratmo-

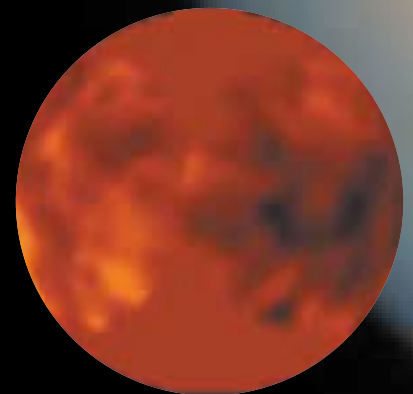
sphäre der Erde gehabt haben, was der Huygens-Mission einen besonderen Reiz verleiht. Titans Oberfläche liegt verborgen unter einer dichten Smogsschicht. Lediglich im Infrarotbereich ließen sich undeutlich einige größere Oberflächenformationen unbekannter Natur ausmachen.

Bei den auf Titan herrschenden Temperaturen um minus 180 Grad Celsius kommt es vermutlich zu einem merkwürdigen Phänomen: In diesem Temperaturbereich kann Methan je nach den genauen Umgebungsbedingungen sowohl gasförmig, fest oder flüssig vorliegen. Diese Substanz übernimmt insofern auf diesem Mond die Rolle, die das Wasser auf der Erde spielt: Sie kann zu einer Flüssigkeit auskondensieren und in der Atmosphäre Wolken bilden. Denkbar erscheint es, dass auf Titans Oberfläche Methan-Meere feste Kontinente umspülen, während ätzendes Acetylen und Smogpartikel unablässig herabrieseln und sich am Grund der Ozeane in dicken Schlammschichten ansammeln.

Im Juli 2004 wird Huygens an einem Fallschirm in der Atmosphäre niedersinken und Messdaten sowie Bilder zur Erde übertragen. Die Forscher hoffen, dass die europäische Sonde den Abstieg heil übersteht und noch eine Zeit lang Aufnahmen von der Oberfläche dieses einzigartigen Mondes zur Erde übermitteln kann.



Das Satellitenduo Cassini und Huygens im Reinraum der NASA in Florida. Huygens verbirgt sich hinter dem goldfarbenen Hitzeschild.
(Foto: Dornier/NASA)



Die Oberfläche des Saturnmondes Titan ist unter einer dichten Smogdecke verborgen. Nur im Infrarot werden Strukturen erkennbar. Worum es sich dabei handelt, soll die Sonde Huygens herausfinden.
(Foto: NASA/ESA)

Rosetta – Suche nach der Urmaterie



Der hellste Komet der jüngeren Vergangenheit: Komet Hale-Bopp im Frühjahr 1997. (Foto: MPIA)

Im Januar des Jahres 2003 soll die europäische Raumsonde Rosetta zu einem langen Flug mit dem Ziel Komet Wirtanen aufbrechen. Wenn alles nach Plan verläuft, wird sie ihn im Frühjahr 2012 erreichen und ein Jahr lang den nur wenige Kilometer großen Kern des Schweifsterns umkreisen. Gleichzeitig soll eine Sonde auf seiner Oberfläche landen, um Bodenproben zu entnehmen und zu analysieren – ein nie zuvor gewagtes Unternehmen.

Mars

kleiner Planet mit dünner Luft

Am 4. Juli 1997 landete die amerikanische Sonde Mars Pathfinder auf dem Roten Planeten. Wenig später entfalteten sich ihre Solarmodule, und einen Tag darauf fuhr das Roboterfahrzeug Sojourner von Bord. Zum ersten Mal hatten Menschen auf einem anderen Planeten ein ferngesteuertes Gefährt abgesetzt, das dort Steine und Staub untersuchte. Die Pathfinder-Mission, an der auch deutsche Institute beteiligt waren, bildete den Auftakt einer groß angelegten Mars-Kampagne, deren eines Ziel es ist, erstmals Gestein vom Roten Planeten zur Erde zu holen.

Der Mars besitzt heute eine zu dünne Atmosphäre und ist zu kalt, um auf seiner Oberfläche flüssiges Wasser halten zu können. Er ist eine leblose Wüste, über die wochen- und monatelang Staubstürme hinwegfegen. Einige Forscher sind aber davon überzeugt, dass unser Nachbarplanet in seiner Anfangsphase von einer dichten Gashölle umgeben war und dort möglicherweise recht „wohnliche“ Temperaturen herrschten. Die Form einiger Marstäler, die wie ausgetrocknete Flussläufe aussehen, und theoretische Modelle zur Entstehung der Planeten unterstützen diese Vermutung. Da der Mars wesentlich kleiner ist als die Erde, konnte er seine Atmosphäre jedoch nicht dauerhaft halten.

Die Vorstellung, dass auf dem Mars einst ein feucht-warmes Klima herrschte, regte nicht nur Science-Fiction-Autoren zu Romanen an, sie ist auch für die heutige Forschung durchaus ein wesentlicher Antrieb. Pathfinder konnte zwar keine Beweise für diese Hypothese liefern. NASA und ESA werden jedoch bis zum Jahre 2013 eine ganze Reihe unbemannter Mars-Sonden starten. Sie sollen beispielsweise mit Radars nach gefrorenem Wasser im Boden suchen und sogar Gestein zur Erde bringen.



Das Mars-Fahrzeug Sojourner. Mit seiner „Schnüffelnase“ konnten die Planetenforscher die chemische Zusammensetzung von Gestein und Staub auf dem Roten Planeten analysieren. (Foto: NASA/MPG)

Für die Forscher werden die Messdaten von unschätzbarem Wert sein, denn sie bohren mit ihren Instrumenten auf der Landesonde quasi ein Archiv an, das Material aus der Entstehungszeit des Sonnensystems unverändert konserviert hat. Nur auf den Kometen – ausgenommen eventuell einige Asteroiden – findet man noch solche Urmaterie. Auf der Erde und ebenso auf den anderen Planeten ist das Ausgangsmaterial, aus dem sich die

Planeten bildeten, im Laufe der vergangenen 4,6 Milliarden Jahre durch chemische, geologische und biologische Prozesse verändert worden. Jegliche Information aus der Urzeit wurde vernichtet.

Kometenkerne hingegen sind so klein, dass es auf ihnen keine geologischen Prozesse, wie Erosion oder Plattentektonik, gibt. Die Forscher beschreiben diese eisigen Körper als „schmutzige

Schneebälle“: sie sind nur lose aus Eis, Staub und Gestein zusammengefügt. Vermutlich muss man sich ihre Oberfläche wie eine verharschte Eiswüste vorstellen, übersät mit Kratern und Spalten, aus denen Eis- und Staubfontänen herauschießen. Mit Rosetta wollen die Planetenforscher die chemische Zusammensetzung des „Urnebels“ ermitteln, aus dem sich unser Sonnensystem gebildet hat.



Sterne und Nebel

Der 23. Februar 1987 ist ein historisches Datum der Astronomie. In einer sternklaren Nacht entdeckte der Astronom Ian Shelton in der Großen Magellanschen Wolke eine Supernova. Seit Johannes Keplers Beobachtung im Jahre 1604 war es das erste Mal, dass ein Mensch mit bloßem Auge einen explodierenden Stern entdeckt hatte. Zudem konnte man zum ersten Mal [diesen Stern auf älteren Aufnahmen genau identifizieren](#). Eine

Supernova-Explosion markiert das Ende eines Sterns, der seinen Brennstoff verbraucht hat und in einem gigantischen Feuerwerk sein Leben beendet. Für die Dauer einer Woche etwa kann eine Supernova heller strahlen als alle hundert Milliarden Sterne einer Galaxie zusammen. Gleichzeitig schleudert sie riesige Mengen an Materie ins All, aus dem sich später neue Sterne und Planeten bilden.

Kinder der Sterne

Seit Jahrmilliarden entstehen und vergehen Sterne im Universum. Ähnlich wie in einer Gesellschaft leben auch in einer Galaxie verschiedene Sternengenerationen zusammen. Die Menschen verdanken diesem kosmischen Kommen und Gehen ihre Existenz. Der Grund: Im Urknall entstanden lediglich die leichtesten Elemente Wasserstoff und Helium. Die lebensnotwendigen Stoffe, wie Kohlenstoff, Stickstoff oder Sauerstoff, wurden erst später im Innern der Sterne erbrütet und anschließend ins All abgegeben. Jedes Kohlenstoff-Atom unseres Körpers stammt demnach aus dem Innern eines Sterns. Die Astronomen sind zu der erstaunlichen Erkenntnis gekommen, dass das Universum selbst erst eine Evolution durchmachen musste, bevor sich in ihm Leben bilden konnte.

Seit längerem schon lassen sich nicht nur Atome, sondern auch Moleküle in den interstellaren Wolken nachweisen. Rund hundert verschiedene Sorten hat man bis heute gefunden. Jedes Molekül sendet charakteristische Radiowellen oder Infrarotstrahlen aus, wenn es von den Sternen angestrahlt wird. Auf diese Weise können die Forscher die unterschiedlichen Substanzen genau identifizieren. Die Spanne reicht von einfachen Verbindungen, wie Kohlenmonoxid (CO) oder Cyan (HCN), bis hin zu komplexen organischen Molekülen, wie Cyanopolyacetylen (HC₁₁N). Kürzlich fanden Astronomen sogar Hinweise auf eine Aminosäure – einen Baustein irdischen Lebens. Auf welche Weise die Moleküle in den „kosmischen Elementfabriken“ entstehen und welche Rolle sie bei der Sternentstehung spielen, sind Fragen, die im Mittelpunkt der heutigen Forschung stehen.



Am 23. Februar 1987 leuchtete in der Großen Magellanschen Wolke eine Supernova auf. Es war das erste Mal seit fast 400 Jahren, dass ein solches Ereignis mit bloßem Auge zu sehen war. (Foto: ESO)



Der Planetarische Nebel mit der Bezeichnung IC4406 weist eine nahezu rechteckige Form auf. Wodurch sie zustande kommt, ist nicht abschließend geklärt. (Foto: ESO)

Rohstofflieferanten

Die Sterne geben am Ende ihres Lebens schwere Elemente ans Weltall ab. Die Mengen hängen stark von der Sternmasse und von der Art des Elements ab. Die häufigsten Elemente, die gebildet werden, sind Kohlenstoff, Stickstoff, Sauerstoff, Silizium und Eisen.

Ein Planetarischer Nebel liefert so viele schwere Elemente, dass daraus einige tausend Planeten von der Art der Erde entstehen könnten. Das Material einer Supernova würde sogar für mehrere hunderttausend Erdkugeln ausreichen.

Großes Bild links: Der Eta-Carinae-Nebel ist ein rund 8.000 Lichtjahre entferntes Sternentstehungsgebiet. (Foto: MPIA)

Aus Staub geboren

Sterne entstehen in [großen Wolken](#) aus Gas und Staub. Bereits mit bloßem Auge lassen sich diese Brutstätten im schimmernden Band der Milchstraße als dunkle Flecken wahrnehmen. Die größten Wolken enthalten Materiemengen bis zu einer Million Sonnenmassen. Überschreitet ein solcher Nebel eine bestimmte Größe, so zieht er sich unter dem Einfluss der eigenen Schwerkraft zusammen. Während der Kontraktion zerbricht er in mehrere kleinere Fragmente, die sich weiter verdichten. Diese Wolkenkerne drehen sich, so dass senkrecht zu ihrer Rotationsachse eine Zentrifugalkraft entsteht. Sie zieht den weiterhin kollabierenden Nebel zu einer Scheibe auseinander.

Im Zentrum dieses „protostellaren“ Diskus kontrahiert das Gas immer weiter und erhitzt sich. Steigt die Temperatur bis auf mehrere Millionen Grad an, verschmelzen Wasserstoff-Atomkerne miteinander. Jetzt erzeugt das heiße Gas einen Gegendruck zur Schwerkraft, und der Kollaps des Protosterns kommt zum Stillstand. Der Stern ist entstanden. In der übrigen Staubscheibe kann sich die Materie weiter verdichten. Hier entsteht dann ein zweiter oder sogar mehrere Sterne. Unter welchen Bedingungen sich auch Planeten bilden können, ist eine zentrale Frage.

Lange Zeit blieb diese Vorstellung Theorie, bis Astronomen vor wenigen Jahren in dem wohl berühmtesten Sternentstehungsgebiet, dem [Orion-Nebel](#) mit dem Weltraumteleskop Hubble mehrere Staubscheiben entdeckten. Typischerweise dehnen sich die Scheiben etwa hundert Erdbahnradien weit von ihrem Zentralstern aus und beinhalten rund zehntausend Erdmassen an Staub und Gas. Die Astronomen beobachten hier junge Sternsysteme, die etwa so aussehen wie unser eigenes Sonnensystem vor etwa vier Milliarden Jahren. Schätzungen ergeben, dass mindestens die Hälfte aller jungen sonnenähnlichen Sterne von solchen Staubscheiben umgeben ist.

Theoretische Überlegungen und Laborexperimente deuten darauf hin, dass der Staub in den Scheiben turbulent herumwirbelt. Dadurch stoßen immer wieder kleinste Teilchen zusammen und bleiben aneinander haften. Auf diese Weise wachsen kleinste Partikel, bis ihre Schwerkraft ausreicht, weitere Materie aus der Umgebung anzuziehen. Die auf diese Weise entstehenden „Planetesimale“ mit bis zu tausend Kilometern Durchmesser stoßen auf ihren Bahnen um den Zentralstern hin und wieder zusammen. In einigen Fällen vereinen sie sich dabei und werden noch größer. So entstehen Planeten.

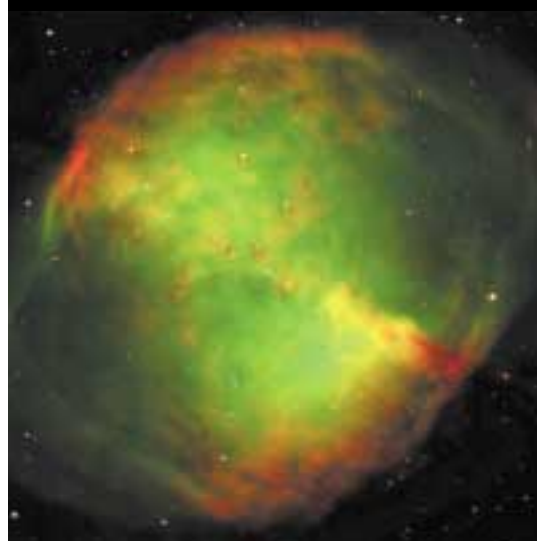
Bei rund zwanzig sonnennahen Sternen, die ihre Staubscheiben bereits verloren haben, ließen sich innerhalb der letzten Jahre auf indirektem Weg Planeten nachweisen. Aus astronomischer Sicht bestehen daher heute keine Zweifel mehr daran, dass es in der Milchstraße und den anderen Galaxien unzählige Planetensysteme gibt, die dem unseren mehr oder weniger ähneln. Ob auf einigen Planeten auch Leben entstehen konnte und wie hoch die Wahrscheinlichkeit dafür ist, lässt sich noch nicht beantworten. Weltweit entwickeln Astronomen jedoch Pläne, wie man die fernen Planeten beobachten und detailliert untersuchen könnte.



Im Innern von Dunkelwolken wie dieser entstehen neue Sterne. (Foto: ESO)



Das wohl berühmteste Sternentstehungsgebiet: der rund 1.500 Lichtjahre entfernte Orion-Nebel (Foto: MPIA)



Der hellste Planetarische Nebel am Nordhimmel: der Hantel-Nebel im Sternbild Föhrchen (Foto: ESO)



Sterne ähnlich wie die Sonne erzeugen am Ende ihres Lebens einen Planetarischen Nebel. Dieser erhielt die Bezeichnung Schmetterlings-Nebel. (Foto: ESO)

Die Geisterteilchen

Neutrinos entstehen zum Beispiel beim radioaktiven Zerfall oder bei Kernfusionen im Innern der Sterne. Ungewöhnlich an ihnen ist, dass sie jede Art von Materie nahezu ungehindert durchdringen. Die Wissenschaftler diskutieren im Moment heftig die Frage, ob die Neutrinos eine Masse besitzen oder nicht. Dies zu beantworten, ist eine der zentralen Aufgaben der heutigen Teilchenphysik.

Auch in der Astrophysik spielen die winzigen Partikel eine große Rolle. So schießen sie, nachdem sie im Innern der Sterne entstanden sind, in den Weltraum hinaus und durchqueren das Planetensystem. Auf der Erde strömen durch jede Fläche von der Größe eines Fingernagels pro Sekunde rund 60 Milliarden Neutrinos, ohne dass wir das geringste davon merken. Da diese „Geisterteilchen“ nur zu einem ganz geringen Prozentsatz mit Materie reagieren, müssen die Forscher großen technischen Aufwand betreiben, um sie überhaupt nachzuweisen.

Zur Zeit beginnt man damit, auch Neutrinos von weit entfernten Himmelskörpern aufzuspüren, zum Beispiel beim Projekt „AMANDA“. Hier werden im ewigen Eis des Südpols mehrere hundert lichtempfindliche Detektoren bis in über einen Kilometer Tiefe abgesenkt. Prallt ein kosmisches Neutrino im Eis zufällig mit einem Atomkern zusammen, entsteht ein Lichtblitz, den die Instrumente registrieren. Ziel dieser Anlage ist es, Neutrinos von Supernovae, Gamma Bursts und anderen Himmelskörpern aufzufangen, um mehr über sie zu erfahren.

Ende mit Feuerwerk

Den weitaus größten Teil seines Lebens leuchtet ein Stern mit nahezu unveränderlicher Intensität. Wie lange diese Phase dauert, hängt von seiner Masse ab. Die Sonne wird insgesamt etwa elf Milliarden Jahre lang strahlen, während ein massereicher Stern von 20 Sonnenmassen seinen Brennstoff bereits nach wenigen Millionen Jahren verbraucht hat. Ein kleiner Stern mit etwa einer halben Sonnenmasse kann hingegen über 15 Milliarden Jahre alt werden.

Im Endstadium werden die Himmelskörper instabil. Der Kern des Sterns kühlt sich ab, der Druck im Inneren verringert sich. Dieser Innendruck hatte vorher verhindert, dass die äußeren Schichten des Sterns aufgrund der Gravitationskraft nach innen stürzen. Je nach Größe reagieren die Sterne unterschiedlich: kleinere (bis zu acht Sonnenmassen) blähen sich zu Roten Riesen auf. Zusätzlich pulsieren sie, das heißt, sie dehnen sich im Rhythmus von einigen Tagen aus und ziehen sich wieder zusammen. Schließlich können sie ihre äußere Gashölle nicht mehr halten, sie strömt ins All ab. Zurück bleibt ein heißer Weißer Zwerg etwa von der Größe der Erde, der langsam ausglüht. Er heizt das ihn umgebende Gas auf, das nun seinerseits als Planetarischer Nebel aufleuchtet.

Besonders spektakulär enden noch massereichere Sterne. Sie explodieren als Supernovae, so wie 1987 in der Großen Magellanschen Wolke. Die äußere Sternhülle wird hierbei abgesprengt und rast mit bis zu 30 000 Kilometern pro Sekunde in den Weltraum hinaus. Sie ist bis zu eine halbe Million Grad heiß und leuchtet gleißend hell auf.

Was bei der Explosion mit dem Zentralbereich des Sterns passiert, lässt sich nicht beobachten. Hier können nur Computersimulationen weiterhelfen. Sie zeigen, dass beim Kollaps des Sterns der Kern innerhalb von Bruchteilen einer Sekunde in sich zusammenfällt. Die Materie verdichtet sich, und es setzen Kernreaktionen zwischen Protonen und Elektronen ein, die zu einem Neutronenstern führen. Dies ist ein schnell rotierender Himmelskörper mit nur 20 Kilo-

metern Durchmesser, in dem die Masse einer Sonne konzentriert ist. Ein Zuckerwürfel aus Neutronensternmaterie würde auf der Erde soviel wiegen wie ein etwa tausend Meter hoher Berg.

Auf diesen extrem harten Sternrumpf, der sich blitzschnell gebildet hat, stürzt nun die Materie aus den äußeren Bereichen des Sterns. Sie prallt ab und rast wieder in die Höhe. Bis Mitte der achtziger Jahre meinten die Theoretiker, dass dieser Rückschwingung ausreicht, um das Gas, wie es beobachtet wird, explosionsartig ins All zu treiben. Die Computermodelle hingegen sagten etwas anderes: Die Schockwelle läuft sich sehr schnell tot und verebbt. Erst in den neunziger Jahren wurde klar, dass man die wesentlichen Akteure vergessen hatte: Die **Neutrinos**, die in enormer Zahl schlagartig in der Detonationswolke frei werden. Diese Teilchen heizen die äußeren Gasschichten so stark auf, dass diese explodieren. Als japanische Astronomen 1987 einen Neutrino-Schauer auf der Erde von der Supernova in der Großen Magellanschen Wolke nachwiesen, galt dies als Sensation. Manche Forscher bezeichnen dieses Ereignis als den Beginn der Neutrino-Astrophysik.



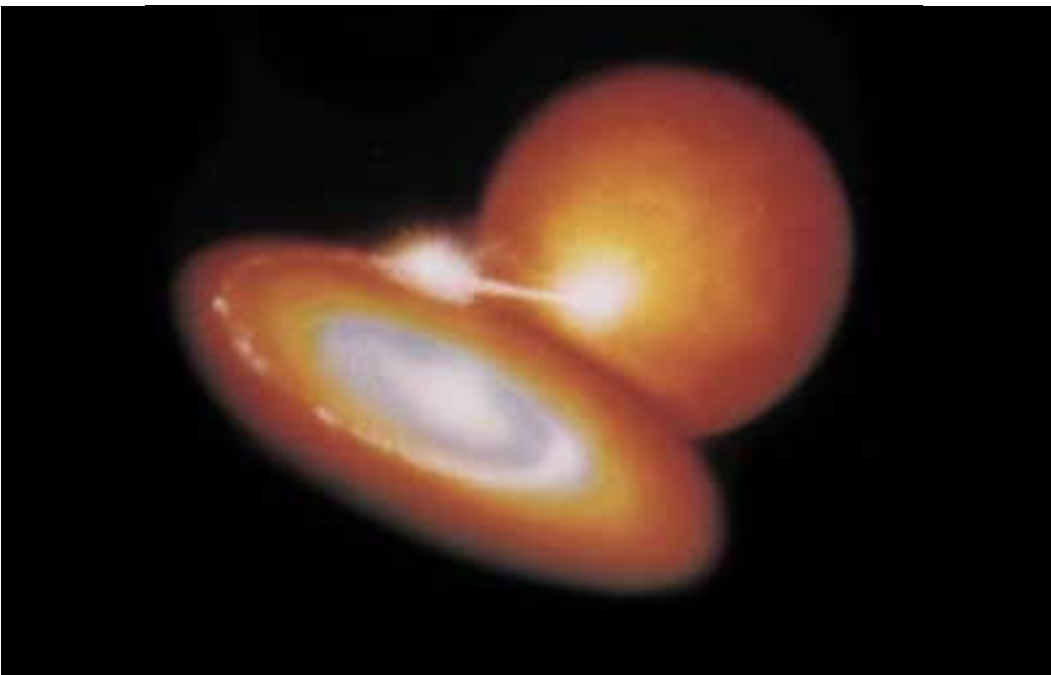
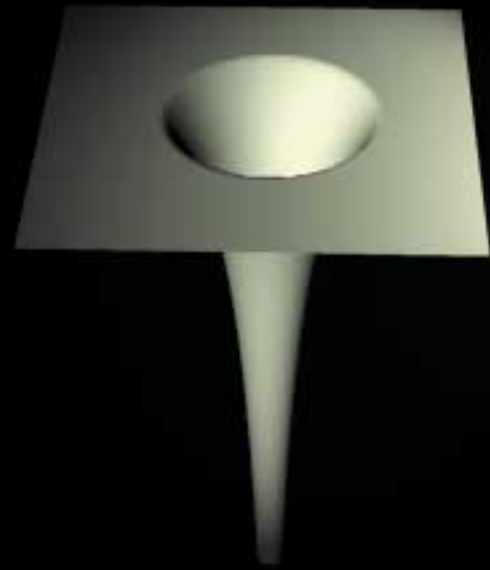
Die Supernova 1987 A ist von Gasringen umgeben. Wahrscheinlich handelt es sich um Material, das der Stern vor seiner Explosion abgestoßen hat, und das nun durch den Explosionsblitz selbst zum Leuchten angeregt wurde. (Foto: NASA)

Das Ende im Schwarzen Loch

Ist ein Stern schwerer als etwa 20 Sonnen, verläuft der Zusammenbruch noch dramatischer. Nun ist der Zentralbereich des Himmelskörpers so schwer, dass keine Kraft den Kollaps aufzuhalten vermag. Die Materie bricht in Bruchteilen einer Sekunde zusammen. Da es heute keine Theorie gibt, die den Zustand der Materie unter so exotischen Bedingungen beschreiben kann, müssen die Forscher noch davon ausgehen, dass der Stern zu einem einzigen Punkt ohne räumliche Ausdehnung schrumpft. Dies ist physikalisch eigentlich unsinnig, da Materie nicht unendlich dicht werden kann.

Die Anziehungskraft dieses Objektes ist nun so stark, dass innerhalb einer bestimmten Umgebung nichts der Schwerkraft enttrinnen kann, nicht einmal Licht. Ein Schwarzes Loch ist entstanden.

Selbst mit den leistungsstärksten Computern ist es den Theoretikern nicht möglich, den Zusammenbruch eines Sterns zu einem Schwarzen Loch detailliert zu simulieren. Es gibt aber Hinweise darauf, dass beim Kollaps der schwersten Sterne entlang der Polachsen Materiestrahlen mit nahezu Lichtgeschwindigkeit ins All hinausschießen und dabei für wenige Sekunden intensive Röntgen- und Gammastrahlen aussenden. Da hierbei noch mehr Energie frei wird als bei einer Supernova, sprechen die Astrophysiker in diesen Fällen von Hypernovae. Einige Forscher vermuten, dass sie die mysteriösen Gamma-Bursts sein könnten.

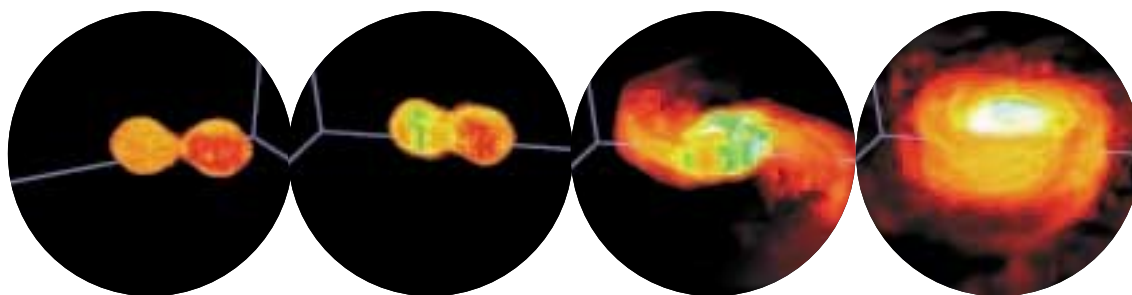


In einem Doppelsternsystem saugt ein Schwarzes Loch Gas von seinem Begleiter ab. Das Gas sammelt sich zunächst in einer Scheibe an, bewegt sich aber auf einer spiralförmigen Bahn nach Innen und stürzt schließlich in das Schwarze Loch hinein.

Schwarze Löcher

Das kleinste Schwarze Loch, das nach heutigen Theorien bei einer Supernova entstehen kann, ist dreimal schwerer als die Sonne. Sein Einflussbereich, auch Ereignishorizont genannt, besitzt einen Durchmesser von 20 Kilometern.

Direkt beobachten lassen sich diese Himmelskörper nicht, da sie kein Licht aussenden. Nur ihre Schwerkraft verrät sie. Werden sie von einem anderen Stern umkreist, kann man aus der Umlaufgeschwindigkeit die Masse des unsichtbaren Objekts ermitteln. Beträgt sie mehr als drei Sonnenmassen, muss es sich um ein Schwarzes Loch handeln. Außerdem ziehen Schwarze Löcher Materie von ihrem Begleitstern ab. Bevor sie im kosmischen Nichts verschwindet, heizt sie sich stark auf und sendet Röntgenstrahlung aus. An ihr erkennen Astrophysiker die Wirkung eines Schwarzen Lochs. Mittlerweile haben die Wissenschaftler eine ganze Reihe von Doppelsternen auf ihrer Liste, in denen eine Komponente vermutlich ein Schwarzes Loch ist. Sie genauer zu studieren, ist eine zentrale Aufgabe zukünftiger Forschung.



Im Computer lässt sich verfolgen, wie zwei Neutronensterne in einem Feuerball miteinander verschmelzen. (Grafik: MPA)

Das Rätsel der Gamma-Blitze

Gamma-Bursts werden bereits seit den sechziger Jahren beobachtet. Sehr kurzwellige Röntgenstrahlung, die Gammastrahlung, blitzt irgendwo am Himmel unvermutet für wenige Sekunden auf und verlöscht wieder. Bis heute wurden über hundert Theorien ersonnen, um dieses Phänomen zu erklären. Erst seit 1997 sind Astronomen in der Lage, die Orte der Blitze mit großen Teleskopen auch im

sichtbaren Wellenlängenbereich zu untersuchen. Diese Beobachtungen zeigten erstmals, dass die Gamma-Bursts nicht in unserer Milchstraße entstehen, sondern in fernen Galaxien. Das bedeutet, dass es die energiereichsten bekannten Vorgänge im Universum sind. Hypernovae könnten die Gamma-Bursts eventuell erklären. Eine andere denkbare Möglichkeit stellen verschmelzende Neutronensterne dar:

Umkreisen sich zwei dieser Sternreste, so nähern sie sich langsam einander an. Irgendwann berühren sich ihre Oberflächen, und in Bruchteilen einer Sekunde verschmelzen die Körper miteinander. Die Materie heizt sich dabei auf über 100 Milliarden Grad auf, und ein Gammablitz entlädt sich.

Gravitationswellen: neues Fenster zum Universum

Bislang beziehen die Astronomen alle Informationen über die Himmelskörper aus elektromagnetischen Wellen, wie Licht, Radiowellen oder Röntgenstrahlen. Mit dem Beginn des 21. Jahrhunderts wollen sie erstmals zu Gravitationswellen vorstoßen. Sie sind eine Voraussage der Relativitätstheorie, die unter anderem besagt, dass der Raum nicht starr ist, sondern sich in der Umgebung materieller Objekte verformt. Wenn zwei Massen stark beschleunigt werden, strahlen sie Gravitationswellen ab, ganz ähnlich, wie schnell bewegte Ladungen Radiowellen aussenden. Gravitationswellen durchziehen das Universum mit Lichtgeschwindigkeit und verformen dabei geringfügig den Raum, etwa so, wie die konzentrisch auslaufenden Wellen eines ins Wasser geworfenen Steins die Oberfläche kräuseln.

Durchläuft eine Gravitationswelle beispielsweise ein Labor, wird der Raum darin deformiert. Für den Bruchteil einer Sekunde verändern sich die Abstände zwischen allen Punkten. Die Wirkung einer Gravitationswelle ist jedoch minimal: Die Forscher erwarten Abstandsverzerrungen, die weit unterhalb eines Atomkerndurchmessers liegen.

Messen wollen sie dieses Phänomen mit Laserstrahlen, die sie über einen mehrere Kilometer langen Weg durch zwei senk-



recht zueinander verlaufende Röhren schicken und in einem Punkt zusammenführen. Eine Gravitationswelle verändert die Laufstrecken der Laserstrahlen, was sich registrieren lässt. Im Jahre 2000 werden fünf Anlagen in Betrieb gehen: zwei in den USA und jeweils eine in Italien, Japan und Deutschland. Mit ihnen wollen die Forscher erstmals Schwerkraftsignale von explodierenden Sternen oder verschmelzenden Neutronensternen und Schwarzen Löchern auffangen.

Südlich von Hannover entsteht ein Gravitationswellendetektor. Er besteht im Wesentlichen aus zwei Laserstrahlen, die in zwei senkrecht zueinander aufgestellten Metallröhren laufen. Im Zentralhaus (vorne im Bild) werden sie zusammengeführt. Das hierbei entstehende Interferenzmuster beginnt beim Durchlaufen einer Gravitationswelle zu zittern. (Foto: P. Aufmuth, Uni Hannover)



Galaxien

Wie sind die Galaxien entstanden? Wie sind sie im Weltraum verteilt? Wie wird sich das Universum weiter entwickeln? Um die großen Fragen der Kosmologie zu beantworten, gehen die Forscher an die Grenzen der Leistungsfähigkeit heutiger

Technik. Mit modernen Großteleskopen beobachten sie Galaxien in Milliarden von [Lichtjahren Entfernung](#), auf den schnellsten Computern simulieren sie die Milliarden von Jahren währende Evolution kosmischer Strukturen.

Feuerräder im Bann der Dunklen Materie

Mitte der siebziger Jahre stießen Astronomen bei der Beobachtung einiger [Spiralgalaxien](#) auf ein Phänomen, das sie bis heute beschäftigt. Die Sterne in diesen Galaxien umkreisen deren Zentren schneller als es die Astronomen erwarten. Die Umlaufgeschwindigkeit eines Sterns hängt davon ab, wieviel Materie sich innerhalb seiner Bahn befindet. Diese ermitteln Astronomen aus der messbaren Gesamthelligkeit aller Sterne in diesem Gebiet. Das Ergebnis: Die Massen in den Spiralgalaxien reichen nicht aus, um die schnellen Bewegungen der Sterne zu erklären. Auch als die Wissenschaftler die Massen von möglicherweise in der Galaxie vorhandenen Schwarzen Löchern berücksichtigten, konnte das Rätsel nicht gelöst werden. Deshalb vermuten Astrophysiker die Schwerkraftwirkung von großen Mengen an unsichtbarer Materie. Im Mittel scheinen Spiralgalaxien rund zehnmal mehr „Dunkle Materie“ als Sterne zu enthalten. Die Forscher gehen davon aus, dass sich die Dunkle Materie in einem riesigen

kugelförmigen, die Galaxie umschließenden Bereich aufhält. Dies gilt auch für das Milchstraßensystem.

Die Natur der unsichtbaren Materie ist noch völlig unklar. Zum Teil könnte es sich um extrem leuchtschwache Sterne handeln, nach denen derzeit fieberhaft gesucht wird. Möglich erscheint aber auch eine ausgedehnte Wolke, die aus unbekannten Elementarteilchen besteht. Sollte es, wie die Beobachtungen vermuten lassen, wesentlich mehr dunkle als sichtbare Materie geben, so hätte sie einen entscheidenden Einfluss auf die Struktur und Entwicklung des Universums. Vieles deutet derzeit darauf hin, dass sich ohne diese Substanz gar keine Sterne und Galaxien gebildet hätten. Die Suche nach diesem geheimnisvollen Stoff ist daher zur Zeit eines der zentralen Themen der Astrophysik.



Großes Bild links: Die Arme der Spiralgalaxie NGC 6872 dehnen sich ungewöhnlich weit in den Raum aus. Vermutlich hat die kleine Galaxie IC 4970 (knapp oberhalb des Zentrums) an NGC 6872 die Arme bei einem nahen Vorbeiflug mit ihrer Schwerkraft herausgezogen. (Foto: ESO)

Die Spiralgalaxie NGC 1232 im Sternbild Eridanus hat eine ähnliche Form und Größe wie unser Milchstraßensystem. (Foto: ESO)

Kosmische Zeitmaschine

Als es dem dänischen Astronomen Ole Römer 1675 erstmals gelang, die Lichtgeschwindigkeit zu messen, legte er den Grundstein für die moderne Kosmologie. Wenn ein Lichtstrahl unendlich schnell wäre, würden wir alle Himmelskörper zur gleichen Zeit, also in der Gegenwart, sehen. Da er aber eine bestimmte Zeit benötigt, um von einem Himmelskörper zur Erde zu gelangen, blicken die Astronomen stets in die Vergangenheit: Von der Sonne zur Erde ist Licht nur acht Minuten unterwegs. Von der Andromeda-Galaxie benötigt es zwei Millionen Jahre und von den entferntesten Sternsystemen sogar mehrere Milliarden Jahre. Mit jedem Schritt in die Tiefe des Universums schaut man also weiter in die Vergangenheit des Kosmos zurück. Das Licht wird zur „Zeitmaschine“. Auf diese Weise ist es möglich, die Entwicklung des Universums zu rekonstruieren, ähnlich wie Paläontologen aus Versteinerungen die Evolution des Lebens erforschen.



Die rund 155 Millionen Lichtjahre entfernte Spiralgalaxie ESO 269-57 im Sternbild Centaurus. Mit einem Durchmesser von 200 000 Lichtjahren ist sie doppelt so groß wie das Milchstraßensystem. (Foto: ESO)

Kosmische Kollisionen

Zu den herausragenden Forschungsergebnissen der jüngeren Vergangenheit zählt die Erkenntnis, dass Galaxien im Laufe ihrer Existenz häufig nahe aneinander vorbeifliegen oder sogar zusammenstoßen. Markantestes Beispiel in der verhältnismäßig nahen Umgebung der Milchstraße ist die „Antennen-Galaxie“ im Sternbild Raabe. Hier durchdringen sich zwei Spiralgalaxien. In der Kollisionszone wirbeln riesige Staubwolken chaotisch umher, was an vielen Stellen dazu führt, dass sich die Materie verdichtet und neue Sterne hervorbringt. Damit



**Kollidierende Sternsysteme:
Die Antennen-Galaxie im Sternbild
Raabe. (Foto: NASA)**

die riesigen Sternsysteme so verformt werden wie die Antennen-Galaxie, müssen sie sich nicht einmal durchdringen. Ein naher Vorbeiflug reicht für die Wirkung der Gezeitenkräfte bereits aus.

In der Vergangenheit, als das expandierende Universum kleiner war als heute, waren sich die Galaxien noch näher und [galaktische Kollisionen](#) somit häufiger.

Das, so meinen heute viele Astrophysiker, hat auch dazu geführt, dass es im wesentlichen zwei Galaxientypen gibt: spiralförmige und elliptische. Es gibt Anzeichen dafür, dass zwei Spiralgalaxien zu einer elliptischen Galaxie verschmelzen können. Zum einen finden sich die großen elliptischen Galaxien in den Zentralgebieten von Galaxienhaufen, wo die Sternsysteme am dichtesten zusammen stehen. Zum anderen hat man im Innern einiger elliptischer Galaxien kleine spiralförmige Scheiben entdeckt, die genau entgegengesetzt zu den weiter außen befindlichen Sternen rotieren. Offensichtlich sieht man hier die Überreste einer verschluckten Spiralgalaxie.



Die Andromeda-Galaxie ist mit 2,3 Millionen Lichtjahren Entfernung die nächste Spiralgalaxie. (Foto: MPIA)

Feuerräder im All

Die ästhetischsten Gebilde im Universum sind wohl die Spiralgalaxien. Wie gewaltige bengalische Feuerräder bewegen sich die Sterne darin um das Zentrum. Auch das Sonnensystem befindet sich in einer Spiralgalaxie. Da wir im Innern dieses scheibenförmigen Gebildes leben, können wir es nicht als Ganzes wahrnehmen. Blicken wir in die Scheibenebene hinein, sehen wir viele Sterne. Sie umspannen den gesamten Himmel als Band – die Milchstraße. Senkrecht zur Scheibenebene sehen wir dagegen nur noch vereinzelt Sterne.

Die 165 Millionen Lichtjahre entfernte Spindelgalaxie erhielt ihre außergewöhnliche Form wahrscheinlich durch einen Zusammenstoß zweier Sternsysteme, die möglicherweise zu einem verschmolzen. (Foto: ESO)

Das Universum in Farbe

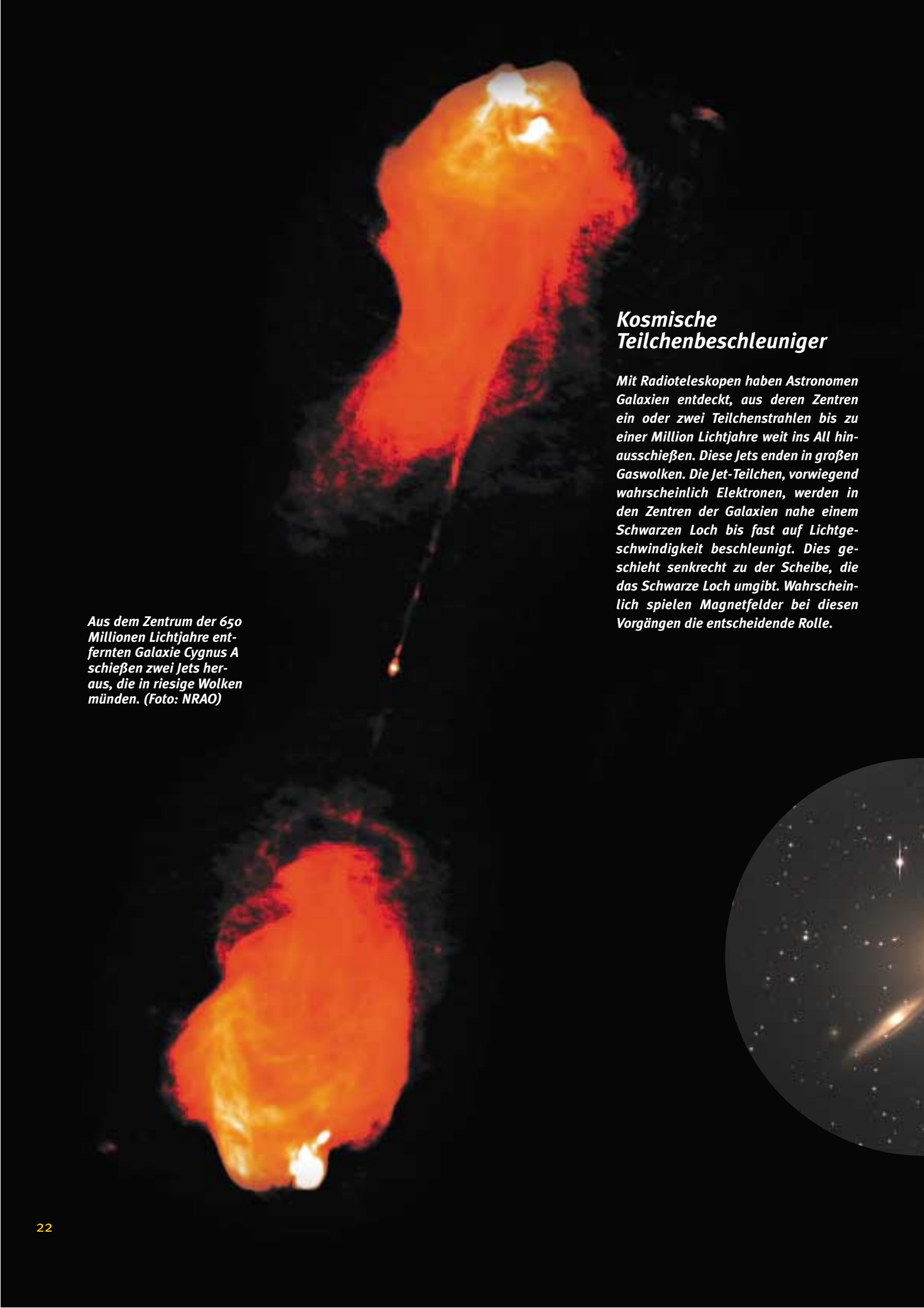
Wenn Astronomen Nebel und Galaxien fotografieren, verwenden sie keine Farbfilme. In den meisten Fällen setzen sie Halbleiterdetektoren ein, so genannte Charge Coupled Devices (CCD), die Licht in elektrische Ladung umwandeln. Am Ende einer Belichtung liest ein Computer das CCD aus und erstellt ein digitales Schwarz-weiß-Bild. Um ein Farbbild zu erhalten, wird das interessierende Himmelsfeld durch verschiedene Farbfilter, beispielsweise ein rotes, grünes und blaues, aufgenommen. Anschließend „färbt“ man die Einzelaufnahmen im Computer mit der Farbe des entsprechenden Filters ein und überlagert sie. Auf diese Weise entsteht ein Foto mit nahezu Echtfarben.

Schwarze Löcher schlucken Sterne

Nicht alle Galaxien verhalten sich so normal wie unsere Milchstraße. Es gibt eine Reihe von Sternsystemen, die so große Energiemengen abstrahlen, dass hierfür Sterne allein nicht in Frage kommen. Die Astronomen vermuten hier die Aktivität besonders massereicher Schwarzer Löcher. Sie sitzen in den Zentren der Galaxien und ziehen aus der Umgebung Gas, Staub und ganze Sterne an. Diese Materie sammelt sich zunächst in einer Scheibe um das Schwarze Loch an und umkreist es mit großer Geschwindigkeit. Durch Reibung verliert das Gas an Bewegungsenergie, strudelt dadurch langsam auf spiralförmigen Bahnen zum Zentrum, erhitzt sich und beginnt zu strahlen.

Der Durchmesser eines hundert Millionen Sonnenmassen schweren Schwarzen Lochs entspricht etwa dem der Erdbahn um die Sonne. Dieser Bereich ist viel zu klein, um in den fernen Galaxien beobachtbar zu sein. Dennoch lassen sich die Vorgänge entschlüsseln. Hierzu müssen die Astronomen die aus der nahen Umgebung des Schwarzen Lochs kommende Strahlung vom Radio- bis zum Gamma-bereich analysieren.

Überraschend für viele Forscher war die Einsicht, dass offenbar auch im Zentrum unserer Milchstraße ein Schwarzes Loch mit etwa einer Million Sonnenmassen sitzt. Beobachtungen im Radio- und Infrarotbereich – insbesondere an deutschen Instituten – ließen die Wirkung dieses hinter dichten Staubwolken verborgenen Himmelskörpers erkennen. Dass dort dennoch keine außergewöhnlich intensive Strahlung beobachtet wird, liegt vermutlich daran, dass der Materiestrom in das Schwarze Loch zur Zeit unterbunden ist. Warum das Schwarze Loch hungern muss, ist nicht klar.

A large radio image of the galaxy Cygnus A, showing two bright, irregular lobes of radio emission. Two narrow, dark jets of particles extend from the central region between the lobes. The jets are highlighted with small white dots at their bases and ends. The background is black.

Aus dem Zentrum der 650 Millionen Lichtjahre entfernten Galaxie Cygnus A schießen zwei Jets heraus, die in riesige Wolken münden. (Foto: NRAO)

Kosmische Teilchenbeschleuniger

Mit Radioteleskopen haben Astronomen Galaxien entdeckt, aus deren Zentren ein oder zwei Teilchenstrahlen bis zu einer Million Lichtjahre weit ins All hinausschießen. Diese Jets enden in großen Gaswolken. Die Jet-Teilchen, vorwiegend wahrscheinlich Elektronen, werden in den Zentren der Galaxien nahe einem Schwarzen Loch bis fast auf Lichtgeschwindigkeit beschleunigt. Dies geschieht senkrecht zu der Scheibe, die das Schwarze Loch umgibt. Wahrscheinlich spielen Magnetfelder bei diesen Vorgängen die entscheidende Rolle.

Galaxien-Clans

Galaxien ziehen sich mit ihrer Schwerkraft gegenseitig an und bilden Ansammlungen mit bis zu 50 Millionen Lichtjahren Größe. Während die kleineren Gruppen nur zehn Mitglieder beinhalten, umfassen große Haufen, wie diejenigen in den Sternbildern Virgo und Coma, weit über tausend Galaxien. In einem solchen Haufen dominieren zwar die Sternsysteme das Bild. Mit Hilfe von Röntgenteleskopen wird jedoch im scheinbar leeren Raum zwischen den Galaxien ein rund hundert Millionen Grad heißes Gas erkennbar. Diese Entdeckung allein war bereits überraschend. Noch erstaunter waren die Astronomen jedoch, als sie mit dem Röntgenteleskop Rosat herausfanden, dass diese Materie in den meisten Fällen wesentlich mehr Masse besitzt als alle Galaxien zusammen.

Die Herkunft dieses „Röntgengases“ ist nicht abschließend geklärt. Es wird aber vermutet, dass es von Supernovae stammt, die ihre Gashüllen mit so hoher Geschwindigkeit abgestoßen haben, dass sie aus den Galaxien entweichen konnten.

Denkbar ist aber auch, dass zumindest ein Teil des Gases noch aus der Entstehungsphase des Universums übrig geblieben ist. Aufgeheizt wird es eventuell durch die Reibung mit den Galaxien, die sich mit hohen Geschwindigkeiten durch diesen intergalaktischen Nebel bewegen.

Sterne und Röntgengas bilden nur einen Teil der insgesamt in den Haufen enthaltenen Materie. Wie in den Spiralgalaxien, dominiert auch hier die Dunkle Materie. Dies ist für die Kosmologie von großer Bedeutung, denn die insgesamt im Kosmos enthaltene Masse, genauer ihre durchschnittliche Dichte, entscheidet über die zukünftige Entwicklung des Universums. Ist ein bestimmter kritischer Wert überschritten, wird die Schwerkraft in ferner Zukunft die Expansion des Raumes zum Stillstand bringen und in einen Kollaps umkehren. Das Universum wird dann wieder in sich zusammenstürzen. Im anderen Fall wird der Kosmos ewig weiter expandieren.



Die beiden Galaxien NGC 5090 und NGC 5091 stehen so nahe zusammen, dass sie sich mit ihrer Schwerkraft gegenseitig anziehen. (Foto: ESO)



Eine Gruppe von vier Galaxien, die so genannte Hickson Compact Group 87. Sie wird von den gegenseitigen Gravitationskräften zusammengehalten. Die Galaxien bewegen sich dabei langsam umeinander – in Zeiträumen von Hunderten von Millionen Jahren. (Foto: Nasa)

Linsen aus Raum und Zeit

Einsteins Allgemeine Relativitätstheorie beschreibt den Raum als dynamisches, flexibles „Gebilde“, das sich in der Umgebung von Materie krümmt. Lichtstrahlen, die in ein solches Gebiet der Raumkrümmung hinein geraten, werden darin von ihrem geradlinigen Weg abgelenkt und bewegen sich auf gebogenen Bahnen – ähnlich wie im Innern einer Glaslinse. Auf diese Weise kann auch ein Galaxienhaufen mit seinem Schwerfeld als „Linse“ wirken. Als Folge hiervon sieht man hinter ihm liegende Objekte mehrfach oder kreisförmig verzerrt.

Dieses Ende der achtziger Jahre entdeckte Phänomen ermöglicht es den Astronomen beispielsweise, die Masse, die innerhalb eines Haufens die Linsenwirkung hervorruft, zu ermitteln. Solche Untersuchungen bestätigen, dass sich in den Galaxienhaufen wesentlich mehr unsichtbare Dunkle Materie befindet als in Form von Sternen und Röntgengas zusammen.



In dem Galaxienhaufen CL 2244-02 erscheint nahe dem Zentrum ein leuchtender Bogen. Er ist das verzerrte Bild einer weit hinter dem Haufen stehenden Galaxie. Ursache ist das als Gravitationslinse wirkende Schwerfeld des Galaxienhaufens. (Foto: ESO)

Die kosmische Evolution

Galaxienhaufen sind keineswegs gleichmäßig im Universum verteilt. Sie scheinen sich in gewaltigen länglichen und flächigen Strukturen mit Ausdehnungen von mehreren hundert Millionen Lichtjahren anzuordnen. Zwischen diesen „Galaxienwänden“ existieren weite Lücken, in denen sich nur wenige Galaxien finden. Das Universum scheint auf großräumiger Skala eine blasenartige, schaumige Struktur zu besitzen. Wie sie sich ausbilden konnte, ist eines der größten Rätsel der Kosmologie.

Problematisch wird dieses Phänomen insbesondere im Zusammenhang mit der Beobachtung der so genannten kosmischen Hintergrundstrahlung. Sie entstand bereits wenige hunderttausend Jahre nach dem Urknall. Atome im damaligen Urgas sandten die Strahlung aus, die seitdem das Universum durchzieht und den gesamten Himmel erfüllt. Sie ist die älteste Kunde, die wir aus dem Universum erhalten können. Anfang der neunziger Jahre entdeckten Astronomen schwache Strukturen in diesem Strahlungsfeld. Sie spiegeln Verdichtungen im damaligen Urgas wieder – die Keime der späteren Galaxienhaufen. Allerdings lag die Dichte in den damaligen Wolken nur einige hundertstel Promille über dem

Durchschnitt. Es scheint heute unmöglich, dass sich unter dem Einfluss der Schwerkraft aus diesen schwach ausgeprägten Urwolken die heutigen Galaxienhaufen bilden konnten.

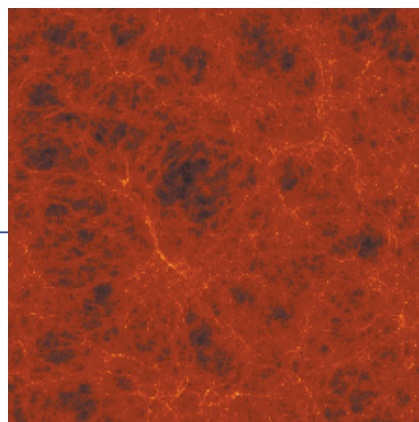
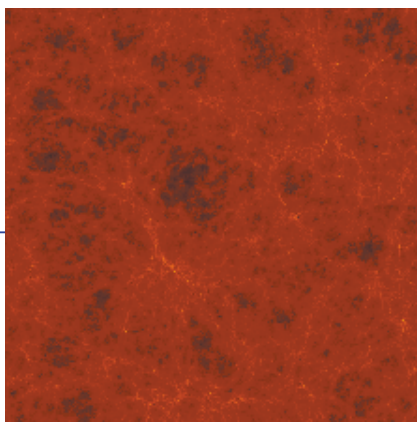
Einen möglichen Ausweg sehen Kosmologen in der Existenz noch unbekannter Elementarteilchen der Dunklen Materie. Diese Partikel müssten die Eigenschaft besitzen, zwar aufgrund ihrer Masse Schwerkraft auszuüben, jedoch keine Strahlung auszusenden oder zu verschlucken. So wäre es möglich, dass im Urgas bereits dichtere, unsichtbare Klumpen Dunkler Materie vorhanden gewesen sind, die aber in der Hintergrundstrahlung nicht erscheinen. Die normale Materie hätte sich in den Schwerefeldern dieser Dunklen Wolken ansammeln und weiter zu den Galaxien zusammenballen können. Ob diese Hypothese stimmt, wollen die Forscher mit zukünftigen Weltraumobservatorien, an denen auch deutsche Institute beteiligt sein werden, herausfinden.

Eine andere Möglichkeit, dieses Problem anzugehen, besteht darin, die Entwicklung der Materie vom nahezu gleichmäßig verteilten Urgas zu den heutigen Galaxien und Galaxienhaufen mit den

leistungsstärksten Computern zu [simulieren](#). Die derzeit umfangreichsten Rechnungen dieser Art leistet eine Gruppe von deutschen, britischen und amerikanischen Theoretikern. Sie ersetzen die Materie im Universum durch eine Milliarde virtueller Teilchen und lassen diese unter dem Einfluss der Schwerkraft frei agieren. Mit einer Milliarde Teilchen lassen sich zwar nicht einmal alle Galaxien im Kosmos darstellen, aber die Forscher bekommen einen Eindruck von der Selbstorganisation der Materie unter dem Einfluss der Schwerkraft.

Damit haben die Kosmologen den vielleicht letzten Schritt auf dem Weg zur Relativierung der menschlichen Existenz getan. Kopernikus machte klar, dass die Erde nicht im Mittelpunkt des Kosmos ruht, Hubble zeigte, dass unser Milchstraßensystem nur eines unter Milliarden anderen ist und dass alle diese Sternsysteme voneinander fortstreben.

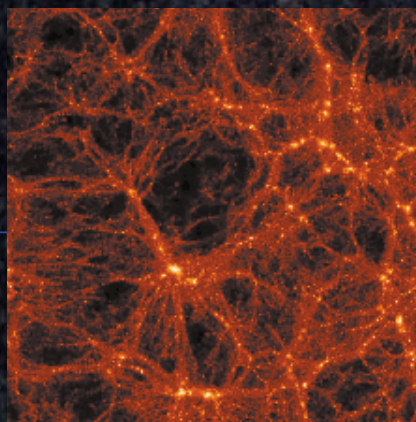
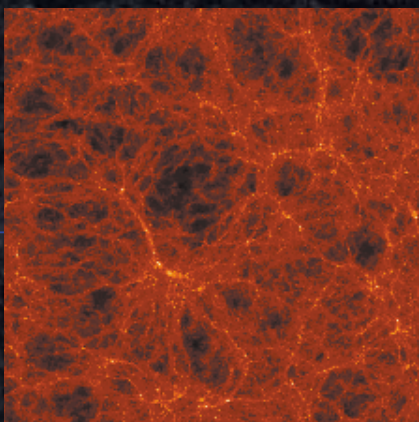
Heute finden die Kosmologen immer mehr Hinweise darauf, dass alle Sterne und Galaxien nur einen Bruchteil der gesamten Materie im Universum ausmachen und eine unsichtbare Substanz die Evolution der Welt steuert.



Rund hundert Stunden Rechenzeit sind nötig, um die 13 Milliarden Jahre währende Evolution des Kosmos zu rekonstruieren. Die anfangs nahezu gleichmäßig verteilte Materie findet sich in Klumpen und länglichen Gebilden zusammen. (Foto: MPA)



Die bislang weitreichendste Himmelsaufnahme gelang Ende 1995 mit dem Weltraumteleskop Hubble. Auf einer Fläche entsprechend einem zehntel des Vollmondes entdeckte man auf einem Bild mehr als 20.000 Galaxien. (Foto: NASA/ESA)



Höchste Ansprüche

Astronomen sind schon immer mit extremen Forderungen an die Industrie herantreten. Auf diese Weise war diese Grundlagendisziplin in der Vergangenheit häufig Katalysator für High-Tech-Entwicklungen.

So entwickelten die Schott-Glaswerke in Mainz eine spezielle Keramik für Teleskopspiegel. Heute wird dieses so genannte Zerodur nicht nur in der Astronomie verwandt, sondern ist auch Grundlage der Ceran-Kochplatten. MAN und Krupp leisteten zu Beginn der achtziger Jahre Pionierarbeit auf dem Gebiet kohlefaserverstärkter Kunststoffe für den Bau astronomischer Antennen. Heute sind die Firmen mit diesen Entwicklungen auf dem Weltmarkt führend.

Die Oberfläche der großen Teleskopspiegel muss mit einer unvergleichlichen Präzision poliert werden. Denkt man sich einen solchen Reflektor auf die Fläche Berlins vergrößert, so würde keine Unre-

gelmäßigkeit höher als ein zehntel Millimeter sein. Die Firma Carl Zeiss profitiert von dieser Fähigkeit in vielen Bereichen ihrer Produkte. Im Satellitenbau konnte sich das Unternehmen Dornier Satellitensysteme in Friedrichshafen in Europa einen Spitzenplatz sichern. Unter seiner Leitung entstanden nicht nur astronomische Satelliten wie Cluster oder das Röntgenteleskop XMM, sondern auch kommerzielle Telekommunikationssatelliten.



Bei den Schott Glaswerken gelang es zum ersten Mal, einen Spiegel mit 8,60 Metern Durchmesser zu gießen. (Foto:ESO)



Alle vier Teleskope des Very Large Telescope werden Mitte 2000 betriebsbereit sein. (Foto: ESO)

Globalisierung in der Astronomie schon lange Standard

Was sich in der Wirtschaft langsam durchsetzt, ist in der Astronomie, wie auch schon in anderen Bereichen der physikalischen Forschung, längst Alltag: die internationale Zusammenarbeit.

So sind heute in der Europäischen Südsternwarte (ESO) mit Sitz in Garching acht Mitgliedsstaaten Westeuropas vereint. 14 Teleskope für den sichtbaren sowie ein 15-Meter-Teleskop für den Submillimeterbereich stehen den Astronomen auf dem 2400 Meter hohen Berg La Silla in den chilenischen Anden zur Verfügung. Die jüngste Errungenschaft: das Very Large Telescope auf dem Andengipfel Paranal. Diese aus vier 16-Meter-Teleskopen bestehende Anlage wird im Jahr 2000 die leistungsfähigste Sternwarte der Erde bilden.

Das Pendant in der Weltraumforschung ist die Europäische Weltraumbehörde, ESA, in der sich 14 Staaten organisiert haben. Sie hat Mitte Dezember 1999 ihren bislang größten Wissenschaftssatelliten gestartet, das Röntgenobservatorium [X-ray Multi Mirror, XMM](#).

Die größten Projekte werden sich zukünftig indes nur noch in weltweiter Kollaboration realisieren lassen, so zum Beispiel das Atacama Large Millimeter Array (ALMA), eine Anlage aus 64 12-Meter-Teleskopen, verteilt auf einer Fläche von zehn Quadratkilometern. ALMA entsteht in europäisch-amerikanischer Zusammenarbeit und wird voraussichtlich im Jahre 2009 das größte Observatorium für Beobachtungen im Bereich von Millimeterwellen sein.



Computer-Grafik des Röntgenobservatoriums XMM. Drei parallele Röntgenteleskope suchen gleichzeitig das All nach kosmischen Strahlenquellen ab. (Quelle: ESA)



Astro-Links

Die Aussteller von „Jenseits der Milchstraße“:

Astronomisches Institut der Ruhr-Universität Bochum:
www.astro.ruhr-uni-bochum.de

Astrophysikalisches Institut der Universität Jena
und Universitätssternwarte:
www.astro.uni-jena.de

Astrophysikalisches Institut Potsdam:
www.astro.physik.uni-potsdam.de

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt:
www.dlr.de

Europäische Südsternwarte, ESO
www.eso.org

Landessternwarte Heidelberg:
www.lsw.uni-heidelberg.de

Max-Planck-Institut für Astronomie, Heidelberg:
www.mpia-hd.mpg.de

Max-Planck-Institut für Aeronomie, Katlenburg-Lindau:
www.linmpi.mpg.de

Max-Planck-Institut für Astrophysik, Garching:
www.mpa-garching.mpg.de

Max-Planck-Institut für Chemie, Mainz:
www.mpch-mainz.mpg.de

Max-Planck-Institut für Extraterrestrische Physik,
Garching:
www.mpe.mpg.de

Max-Planck-Institut für Radioastronomie, Bonn:
www.mpifr-bonn.mpg.de

Max-Planck-Institut für Kernphysik, Heidelberg:
www.mpi-hd.mpg.de

Physikalisches Institut der Universität Köln:
www.physik.uni-koeln.de

Radioastronomisches Institut der Universität Bonn,
Sternwarte der Universität Bonn:
www.astro.uni-bonn.de

Institut für Astronomie und Astrophysik der TU Berlin:
export.physik.tu-berlin.de

Weitere Links:

European Space Agency (ESA):
www.esa.int

Wissenschaftsseite der ESA:
sci.esa.int

NASA:
www.nasa.gov

„Jet Propulsion Laboratory“ der NASA:
www.jpl.nasa.gov

Zeitschrift Sterne und Weltraum:
www.sterne-und-weltraum.de

Astronomische Gesellschaft
www.astro.uni-jena.de/Astron_Ges

Hubble Weltraum-Teleskop:
www.stsci.edu

Das Weltraumwetter:
windows.engin.umich.edu/spaceweather/more_details.html

Das Sonnensystem:
<http://photojournal.jpl.nasa.gov>

Astronomy picture of the day
antwrp.gsfc.nasa.gov/apod

Jahr der Physik:
www.physik-2000.de

Deutsche Physikalische Gesellschaft
www.dpg-physik.de

Bundesministerium für Bildung
und Forschung
www.bmbf.de



Bundesministerium für Bildung und Forschung

bmb+f

Diese Druckschrift wird im Rahmen der Öffentlichkeitsarbeit vom Bundesministerium für Bildung und Forschung unentgeltlich abgegeben. Sie ist nicht zum gewerblichen Vertrieb bestimmt. Sie darf weder von Parteien noch von Wahlbewerbern oder Wahlhelfern während eines Wahlkampfes zum Zwecke der Wahlwerbung verwendet werden. Dies gilt für Bundestags-, Landtags- und Kommunalwahlen sowie für Wahlen zum Europäischen Parlament. Missbräuchlich ist insbesondere die Verteilung auf Wahlveranstaltungen und an Informationsständen der Parteien sowie das Einlegen, Aufdrucken oder Aufkleben parteipolitischer Informationen oder Werbemittel. Untersagt ist gleichfalls die Weitergabe an Dritte zum Zwecke der Wahlwerbung.

Unabhängig davon, wann, auf welchem Weg und in welcher Anzahl diese Schrift dem Empfänger zugegangen ist, darf sie auch ohne zeitlichen Bezug zu einer bevorstehenden Wahl nicht in einer Weise verwendet werden, die als Parteinahme der Bundesregierung zugunsten einzelner politischer Gruppen verstanden werden könnte.

BM BF PUBLIK