

Veranstalter



Universität zu Köln



Partner



oerlikon
leybold vacuum



Inspiziert und begeistert durch den Erfolg des „Jahres der Physik 2000“ veranstalten die Deutsche Physikalische Gesellschaft und das Bundesministerium für Bildung und Forschung seit 2001 ein jährliches Physikfestival: die „Highlights der Physik“. Das Festival zieht mit jährlich wechselnder Thematik von Stadt zu Stadt. Mitveranstalter sind stets ortsansässige Institutionen. Die vorliegende Broschüre erscheint zu den „Highlights der Physik 2009: Adresse: Milchstraße“ (Köln, 20.9. – 24.9.2009), Infos: www.physik-highlights.de

2009
highlights der **physik**

Adresse: Milchstraße

Wissenschaftsmagazin



INHALT

- 4** Die Entdeckung des Himmels
- 8** Neue Teleskope – neue Weltbilder
- 14** Die Welten vor unserer Haustür
- 20** Die Suche nach der zweiten Erde
- 25** Das unsichtbare Universum



Adresse: Milchstraße

25

IMPRESSUM

HERAUSGEBER

Deutsche Physikalische
Gesellschaft e.V. (DPG)

Bundesministerium
für Bildung und Forschung

AUTOR

Dr. Thomas Bürke

WISSENSCHAFTLICHE BERATUNG

Prof. Dr. Eberhard F. Wassermann

INFORMATIONEN ZUM INHALT

Deutsche Physikalische Gesellschaft e.V.
Pressestelle

Bonner Talweg 8

53113 Bonn

Tel. (0228) 55 525 - 18

Fax (0228) 55 525 - 19

presse@dpg-physik.de

KONZEPT, REDAKTION UND GESTALTUNG

iserundschmidt

Kreativagentur für PublicRelations GmbH
Bonn – Berlin

(Verantwortlich: Timo Meyer,
Marleen Schwalm, Claudia Oly,
Jana Koliotassis)

Juli 2009



4

Die Entdeckung des Himmels

Im Jahre 1609 entdeckte Galileo Galilei durch sein Fernrohr Dinge am Himmel, die nie zuvor ein Mensch gesehen hatte. Im selben Jahr behauptete der deutsche Astronom Johannes Kepler, die Planeten würden nicht auf Kreisen laufen, wie man bis dahin als selbstverständlich annahm, sondern auf Ellipsen. Diese beiden revolutionären Taten verhalfen einem Weltbild zum Durchbruch, in dem nicht länger die Erde im Mittelpunkt des Kosmos stand.

Als der damals noch unbekannte Mathematikprofessor der Universität Padua sein erstes Fernrohr gen Himmel richtete, muss ihn der Anblick geradezu elektrisiert haben. Galileo Galilei (1564–1642) sah, dass das Band der Milchstraße aus unzähligen einzelnen Sternen besteht. Er erkannte, dass die Mondoberfläche „nicht anders als das Antlitz der durch Bergketten und tiefe Täler ... gestalteten Erde“ ist. Erde und Mond schienen also gar nicht so verschieden zu sein – alles in allem ein Bruch mit den überlieferten Vorstellungen.

Im Januar 1610 entdeckte Galilei dann vier kleine Himmelskörper in der Nähe des

Jupiter, deren Positionen sich im Zeitraum von Tagen relativ zum Planeten änderten. Galilei kam schnell auf die richtige Lösung: Es waren **Monde**, die den Planeten umkreisen. Damit bildeten sie zusammen mit Jupiter gewissermaßen ein Sonnensystem im Kleinen. Für Galilei waren das die entscheidenden Entdeckungen, die ihn dazu veranlasste, von nun an eindeutig für die Kopernikanische Lehre einzutreten. Eine Lehre, die die Sonne statt der Erde in den Mittelpunkt der Welt rückte.

Schon wenige Wochen darauf, am 30. März 1610, veröffentlichte Galilei seine Entdeckungen und bestätigte darin die Sonne

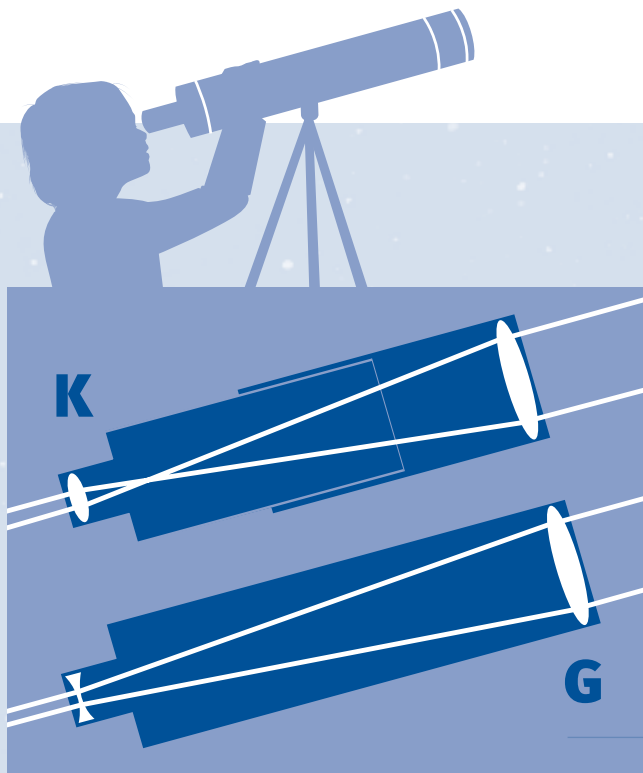
als Mittelpunkt der Welt. In diesem heliozentrischen System bewegen sich alle Planeten um die Sonne und der Mond um die Erde. Damit hatten Erde und Menschheit ihren ausgezeichneten Platz im Universum verloren. Die Erde war nur ein Planet unter den sechs damals bekannten Merkur, Venus, Erde, Mars, Jupiter und Saturn.

Anfangs sah der Vatikan, einschließlich des Inquisitors, darin keinen Widerspruch zum Katholischen Glauben. Und so gingen die ersten 550 Exemplare von Galileis „Sternenbote“ rasch in die ganze Welt hinaus. Doch im Laufe der Jahre formierte sich zunehmend Widerstand gegen das heliozentrische Weltbild. Im Jahre 1616 verbot der Papst Galilei, die ketzerische Lehre zu verbreiten – nicht jedoch, weiter seiner Forschung nachzugehen. Doch als er 1632 sein Werk „Dialog über die zwei hauptsächlichsten Weltsysteme“ veröffentlicht, ist es mit der Geduld des Papstes endgültig vorbei. Er zitiert Galilei nach Rom, wo dieser



▲ Zwei der vier Galileischen Monde werfen ihre Schatten auf Jupiter (links): Ganymed (1.v.r.) und Io (2.v.r.). (Bild: NASA/Johns Hopkins University Applied Physics Laboratory/Southwest Research Institute)

◀ Pisa bei Nacht. In der toskanischen Stadt wurde Galilei 1564 geboren. (Bild: Fabrizio Angius)



▲ Querschnitt und Vergleich der Strahlengänge durch ein Galilei- (G) sowie ein Kepler-Fernrohr (K). (Grafik: ius)

◀ Genie unter Hausarrest: Tito Lessis Gemälde zeigt den von der katholischen Kirche verurteilten und mittlerweile erblindeten Galilei (rechts) zusammen mit seinem Assistenten Vincenzo Viviani in Galileis Landhaus in Arcetri. (Bild: picture-alliance/maxppp)

ein Jahr später im Angesicht der Folter von seiner Lehre abschwört. Erst 1992 hat Papst Johannes Paul II Galilei rehabilitiert und sein Weltbild im Nachhinein bestätigt.

Der Blick durch das Fernrohr war für Galilei die Initialzündung in seinem Leben. Doch erfunden hat nicht er das Instrument, sondern holländische Brillenmacher wie Hans Lipperhey aus Middelburg, der sein erstes Fernrohr bereits 1608 zum Patent angemeldet hatte.

Brillen waren bereits seit dem späten Mittelalter bekannt, aber es gab keine Theorie der optischen Abbildung. Deswegen entstanden die ersten Fernrohre durch Ausprobieren. Galilei brauchte eine Weile, um aus Glaslinsen gute Fernrohre zu bauen. So musste er die Kunst des Linsenschleifens erst lernen. Sein erstes Fernrohr bestand aus einem etwa einen Meter langen Rohr, das vorne eine Sammellinse und hinten eine Zerstreulinse besaß. Es hatte

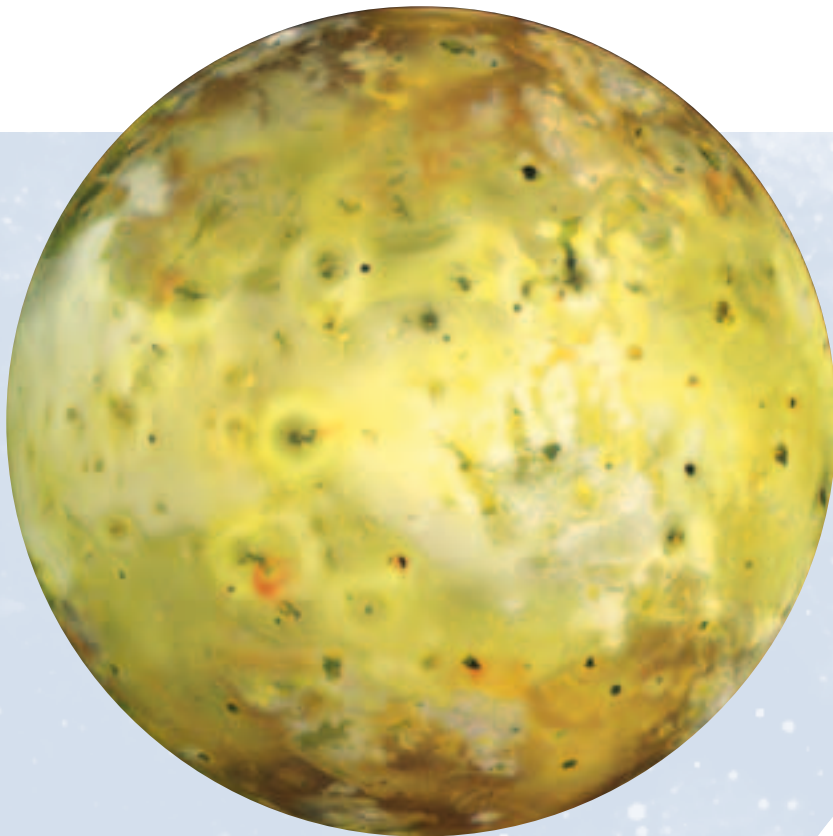
zunächst nur etwa vierfache Vergrößerung – umso unglaublicher daher die Details seiner ersten Entdeckungen. Das Bild seines Fernrohrs stand aufrecht, weshalb es sich insbesondere für militärische Zwecke und auf See sehr gut eignete.

In der Astronomie setzte sich allerdings ein anderer **Fernrohrtyp** durch, den der deutsche Naturforscher Johannes Kepler (1571–1630) völlig unabhängig von Galilei entworfen hatte. Ausgestattet mit zwei Sammellinsen, zeigte das Kepler-Fernrohr ein vergrößertes Bild, das auf dem Kopf stand. Für Himmelsbeobachter war dies kein großer Nachteil. Dafür gab es zwei entscheidende Pluspunkte: Das Fernrohr war lichtstärker als ein Galilei-Fernrohr, und es ließ sich darin ein Fadenkreuz zum Anpeilen von Himmelskörpern anbringen.

Von Holland aus verbreiteten sich die Fernrohre in ganz Europa, und nicht nur Berühmtheiten wie Kepler oder Galilei

studierten mit ihnen den Himmel. So beobachtete der wohlhabende Engländer Thomas Harriott sogar einige Wochen vor Galilei erstmals mit einem Fernrohr den Mond und skizzierte dessen Oberfläche. Doch im Gegensatz zum italienischen Naturforscher hat Harriot seine Beobachtungen nie veröffentlicht und auch nie astronomische Schlüsse daraus gezogen. So ist ihm der große Ruhm versagt geblieben.

Nicht so bei Galilei. Die von ihm entdeckten Jupitermonde Io, Europa, Ganymed und Kallisto sind bis heute von großem wissenschaftlichem Interesse. Io beispielsweise ist der vulkanisch aktivste Körper im Sonnensystem. Ständig schleudern hier Vulkane Gas und Staub bis in 400 Kilometer Höhe und verändern durch das ausgeworfene Material unablässig das Antlitz des Mondes. Die spiegelnde Oberfläche Europas hingegen besteht gänzlich aus Wassereis. Diese Kruste ist mehrere zehn Kilometer dick und wird von Tausenden



▲ Fast 400 Jahre nach seiner Entdeckung durch den Forscher Galileo gerät Jupitermond Io ins Visier der Raumsonde Galileo. Aus 130.000 Kilometern Entfernung gelingen ihr atemberaubende Bilder einer mit Vulkanen übersäten Oberfläche. (Bild: NASA/JPL/University of Arizona)

➤ „Galileis Zeichnung des Kopernikanischen Weltbildes zeigt u.a. die Erde und ihren Mond auf der dritten sowie Jupiter und die Galileischen Monde auf der fünften Kreisbahn. (Bild: picture-alliance/united archives)



▲ Johannes Kepler
(Bild: picture-alliance/maxppp)



von Kilometer langen Furchen durchzogen. Unterhalb dieses Eispanzers vermuten Forscher einen globalen Ozean aus warmem Wasser. Ob es darin Leben gibt, werden eventuell zukünftige Raumfahrtmissionen zeigen.

Der Sieg über den Mars

Wenige Monate, bevor Galilei sein erstes Fernrohr öffentlich vorführte, erschien in Heidelberg das Werk „Astronomia nova“ von [Johannes Kepler](#). Es war das Resultat einer jahrelangen Forschungsarbeit, die darauf abzielte, die Bewegung der Planeten am Himmel mit dem heliozentrischen Weltsystem zu beschreiben.

Schon seit 1601 arbeitete Kepler auf Schloss Benatek bei Prag als Kaiserlicher Mathematiker von Rudolph II. Er hatte die Nachfolge des dänischen Adligen Tycho

Brahe (1546–1601) angetreten, der als führender Astronom seiner Zeit galt und ein begnadeter Instrumentenbauer war. Die Fülle von Brahes sehr genauen astronomischen Daten, ohne Fernrohre nur mit Winkelmessgeräten ermittelt, stand Kepler nach Brahes plötzlichem Tod zur Verfügung und wurde zur Grundlage seiner weiteren Arbeit.

Kepler war schon seit seinen jungen Jahren glühender Anhänger des Kopernikanischen Weltbildes. Er setzte alles daran, die am Himmel beobachtbaren Bewegungen der Planeten sowie von Sonne und Mond im heliozentrischen System zu beschreiben. Doch es wollte nicht gelingen. Insbesondere der Mars zeigte sich problematisch. Zum einen bewegte sich der Planet mit unterschiedlicher Geschwindigkeit über den Himmel, zum anderen änderte er manchmal sogar die Richtung. Dann lief er rückwärts, kehrte nach eini-

gen Wochen wieder um und lief in die ursprüngliche Richtung weiter. Diese Marschleifen ließen sich kaum beschreiben.

Fünf Jahre lang währte der „Kampf mit dem Mars“, wie Kepler selbst schrieb, dann hatte er die Lösung: Der Mars läuft nicht mit gleichförmiger Geschwindigkeit auf einer Kreisbahn, sondern auf einer ellipsenförmigen Umlaufbahn in einer Ebene um die Sonne, die in einem der Brennpunkte der Ellipse steht. Dies nennt man heute das erste Keplersche Gesetz. Es gilt für alle sich umeinander bewegenden Himmelskörper, nicht nur für den Mars.

Die Abweichung zwischen Kreis- und Ellipsenbahn ist für die meisten Planeten in unserem Sonnensystem jedoch klein. Zeichnet man die Marsbahn mit einer Achse von 20 Zentimetern Durchmesser auf Papier, so weicht sie von dem idealen Kreis nirgends mehr als einen Millimeter ab.

➤ Auf dieser Aufnahme des Milchstraßenzentrums ist das Schwarze Loch im Herzen unserer Galaxis nicht zu sehen, wohl aber Sterne, die es in relativ geringem Abstand umkreisen. Ihre Umlaufbahnen lieferten den Astronomen wichtige Informationen über das Schwarze Loch. (Bild: ESO)



➤ Der Komet „Hale-Bopp“ ist ein Paradebeispiel für die Keplerschen Gesetze: Auf seiner extrem elliptischen Bahn um die Sonne erreicht er an seinem sonnennächsten Punkt (nahe der Erdbahn) stolze 158.000 km/h, im 300-mal weiter entfernten sonnenfernsten Punkt ist er „nur“ noch mit wenigen hundert km/h unterwegs. (Bild: E. Kolmhofer, H. Raab; Johannes-Kepler-Observatory, Linz, Austria)



INFO

Schwarzes Loch auf der Waage

Im Zentrum unserer Heimatgalaxie, der Milchstraße, befindet sich ein Schwarzes Loch. Dieses verschluckt alles in seiner Nähe, selbst das Licht. Dadurch ist es zwar nicht direkt sichtbar, trotzdem können Forscher aus der Umlaufbewegung naher Sterne auf seine Masse schließen. Ihre Umlaufgeschwindigkeiten hängen nämlich ausschließlich vom Abstand zum Schwarzen Loch und dessen Masse ab.

Astronomen des Max-Planck-Instituts für extraterrestrische Physik in Garching haben über 17 Jahre hinweg die Bahnen von 28 Sternen vermessen, die sich in relativ geringem Abstand um das Milchstraßenzentrum bewegen. Daraus errechneten sie die Masse des Schwarzen Lochs zu beeindruckenden 4,3 Millionen Sonnenmassen. Für diese Rechnung benötigten sie im Grunde nicht mehr als das dritte Keplersche Gesetz.

Auf einer Ellipsenbahn schwankt der Abstand zur Sonne. In der Nähe des Zentralgestirns bewegt sich der Planet schneller als auf dem weiter entfernten Bahnabschnitt. Dabei fiel Kepler etwas auf: Denkt man sich eine Linie von der Sonne zum Planeten, so überstreicht dieser Fahrstrahl in gleichen Zeitabschnitten gleich große Flächen. Dieses Postulat wird heute als [zweites Keplersches Gesetz](#) bezeichnet.

Der Schritt vom Kreis zur Ellipse ist weit mehr als ein Detail. Er ist die Rettung des Kopernikanischen Systems, denn erst dadurch wurde das Weltmodell wirklich einfach und harmonisch. „Ihr habt meine ovale Bahn geschmäht; ich habe Euch die hundertmal törichtereren Spirallinien der Alten entgegen gehalten, denen auch Tycho folgte“, schrieb Kepler dem dänischen Astronomen Longomontanus.

Keplers revolutionäres Werk „Astronomia nova“ erschien 1609 in Heidelberg. Doch wie so oft bei großen Ideen blieb die Resonanz aus. Das mochte auch an der breiten epischen Darstellung des Themas gelegen haben, denn Kepler ließ den Leser wie in einem Tagebuch an all seinen Wegen und Irrwegen teilhaben, so dass die wirklichen Perlen gut versteckt waren. Andererseits gab es auch kaum Astronomen, die von dem gewohnten Ideal kreisförmiger Bahnen abrücken wollten.

Im Jahre 1610 erfuhr Kepler dann von Galileis Beobachtungen. Vor allem die Entdeckung der Jupitermonde sah er als Beweis für das heliozentrische Weltbild an und beglückwünschte Galilei. Dieser wiederum bedankte sich in einem Brief dafür, dass Kepler als erster und fast einziger seinen Aussagen vollen Glauben schenkte. Dennoch hat Galilei, so weit bekannt, Keplers Arbeiten und Konzepte nie aufgegriffen.

Auch zu einer Zusammenarbeit der beiden Forschergrößen kam es nie.

Untrennbar verknüpft ist Keplers Name auch mit dem dritten Planetengesetz: „Die Quadrate der Umlaufzeiten verhalten sich wie die dritten Potenzen ihrer mittleren Abstände zur Sonne.“ Von der Entdeckung dieses fundamentalen Zusammenhangs, veröffentlicht 1619, war Kepler förmlich begeistert. Er fühlte sich hingerrissen „von einem unsäglichen Entzücken über die göttliche Schau der himmlischen Harmonie.“

Dabei gilt das von ihm entdeckte Gesetz universell – also nicht nur für die Planeten im Sonnensystem, sondern für alle Fälle, in denen sich einer oder mehrere Körper um ein schweres Objekt bewegen. Noch heute gehört es zum Standardwerkzeug der Astrophysiker, die damit beispielsweise [Schwarze Löcher](#) vermessen.



8

Neue Teleskope – neue Weltbilder

Galileis Fernrohre besaßen Objektivlinsen mit wenigen Zentimetern Durchmesser und waren durch die optischen Eigenschaften von Glas beschränkt. Heutige Teleskopspiegel sind einige hundertmal größer und erfassen das All bei fast allen Wellenlängen des elektromagnetischen Spektrums. Dabei brachte jede neue Teleskopgeneration auch neue Entdeckungen und ließ Weltbilder wanken. Dies wird mit den Großteleskopen von morgen vermutlich nicht anders sein.

Ein wichtiger Schritt hin zu heutigen Teleskopen war eine Erfindung des britischen Wissenschaftlers Isaac Newton (1643–1727). Dieser stellte 1668 ein Spiegelteleskop vor, bei dem er statt einer Linse, die das Licht bündelte, einen metallischen sphärischen Hohlspiegel verwendete. Der Clou: Das Licht lenkte er mit einem kleinen, in der Brennebene angebrachten Umlenkspiegel seitlich aus dem Fernrohr hinaus, so dass man dort das Bild mit einem Okular beobachten konnte. Eine geniale Erfindung, die sich allerdings nur langsam durchsetzte und erst gegen Mitte des 18. Jahrhunderts durch experimentierfreudige Astronomen neuen Auftrieb

erhielt. Der prominenteste unter ihnen war Friedrich Wilhelm Herschel (1738–1822).

Der deutsche Musiker, 1757 nach England geflohen, avancierte zum größten Astronomen seiner Zeit. Er fertigte die besten Spiegelteleskope der Welt, weil er parabolische statt sphärischer Spiegel verwendete. 1781 entdeckte Herschel den Planeten Uranus, den Forscher vor ihm stets für einen Fixstern gehalten hatten. Durch diesen Fund verdoppelte sich die Ausdehnung des bis dahin bekannten Sonnensystems.

Vier Jahre später entwickelte Herschel ein räumliches Modell der Milchstraße, nach-

dem er Helligkeiten und Himmelspositionen von mehr als hunderttausend Sternen vermessen hatte. Demnach war die [Milchstraße](#) ein scheibenförmiges Gebilde mit annähernd elliptischer Form, in dem sich viele Millionen Sterne befinden. Die Sonne war nur einer von ihnen, und sie befand sich auch nicht genau im Mittelpunkt der Milchstraße.

Damit stand plötzlich nicht mehr unsere Sonne im Zentrum des Universums, sondern die Milchstraße. Viele Astronomen waren davon überzeugt, dass es das einzige Sternsystem sei. Doch Herschel hatte bei seinen Himmelsstudien auch rund 2500 Nebel beobachtet, deren Natur völlig unklar war. Das eine Astronomenlager sah in ihnen Gasnebel, die sich innerhalb der Milchstraße befinden. Für sie blieb die Milchstraße das alleinige Sternsystem im Universum. Die Gegenseite war davon überzeugt, dass es sich um andere Milchstraßensysteme handeln musste, die je-

► Milchstraßenband am Nachthimmel (Bild: © jpanstley, Flickr.com)

◀ Transport eines der Teleskope des Atacama Large Millimeter/Submillimeter Array (ALMA) durch die chilenische Wüste. Mit Anlagen wie ALMA wollen Astronomen in den nächsten Jahrzehnten die letzten Geheimnisse des Alls entschlüsseln. (Bild: ESO/P. Martinez)

► Edwin Hubble am 1,2-Meter-Teleskop des kalifornischen Palomar-Observatoriums. Dem Astronomen zu Ehren erhielt das berühmte Weltraumteleskop Hubble seinen Namen. (Bild: picture-alliance/united archives)



▲ Unsere Milchstraße ist nur eine von vielen: Allein der Galaxienhaufen Abell 1689 enthält tausende Galaxien – hier als gelbe Lichtpunkte erkennbar. Das diffuse Violett entstammt einem überlagerten Bild des Röntgenteleskops Chandra und macht heiße Gaswolken sichtbar. (Bild: X-ray: NASA/CXC/MIT/E.-H. Peng et al.; Optical: NASA/STScI)

doch so weit entfernt sind, dass man die Sterne darin nicht einzeln wahrnehmen kann. Das Universum wäre damit ganz erheblich größer und besäße viel mehr Sterne als bis dahin gedacht.

Welche Seite richtig lag, sollte sich erst zu Beginn des 20. Jahrhunderts klären. Im Jahre 1917 ging in der Nähe von Los Angeles auf Mount Wilson das größte Teleskop seiner Zeit in Betrieb. Sein Spiegel besaß einen Durchmesser von 2,50 Metern. An diesem Riesen, der 30 Jahre lang das größte Teleskop der Erde blieb, gelangen dem amerikanischen Astronomen [Edwin Hubble](#) (1889–1953) zwei bahnbrechende Entdeckungen. Im Jahre 1923 fotografierte er im Andromeda-Nebel so genannte Delta-Cephei-Sterne, deren Entfernung er dank ihrer im Rhythmus von Tagen pulsierenden Helligkeit ermitteln konnte. Das Ergebnis war verblüffend: eine Million Lichtjahre. Ihr Licht hatte also eine Million Jahre gebraucht, um bis in Hubbles Appa-

ratur zu gelangen. Mit diesem Ergebnis war klar, dass der Andromeda-Nebel und weitere Objekte dieser Art, deren Entfernungen Hubble bestimmte, eigene Galaxien waren, die jeweils rund hundert Milliarden Sterne enthielten. Die Diskussion um die Natur von Herschels Nebeln war endlich entschieden.

Sechs Jahre nach dieser Entdeckung fand Hubble zudem heraus, dass sich fast alle Galaxien von unserer Milchstraße entfernen, und diese „Fluchtgeschwindigkeit“ mit zunehmendem Abstand wächst. Ein ungeheurer Befund, der auf den ersten Blick die Milchstraße wieder in die Mitte des Universums zu rücken schien – eine falsche Interpretation der Fluchtgeschwindigkeit, wie sich bald herausstellte.

Die richtige lieferten – auf Einsteins Allgemeiner Relativitätstheorie aufbauend – in den 1920er Jahren die drei Mathematiker Alexander Friedmann, Willem de Sitter und

Georges Lemaître. Sie erkannten, dass die Galaxienflucht das sichtbare Merkmal eines sich ausdehnenden Universums ist: Das All expandiert, und alle Materie in ihm muss dieser Bewegung des Raums folgen, ähnlich wie Rosinen in einem aufquellenden Hefeteig. Ein solches Universum hat keinen Mittelpunkt und enthält unzählige Galaxien.

Eine erstaunliche Schlussfolgerung war mit der kosmischen Expansion verbunden: Lässt man sie in Gedanken rückwärts laufen, dann muss vor langer Zeit die gesamte Materie aus einem Punkt, oder wie Lemaître schrieb, einem „Superatom“, entstanden sein. Damit war das so genannte Urknallmodell geboren. Es bedeutete einen erneuten Umsturz des Weltbildes: Das Universum war nicht unendlich alt, sondern besaß einen zeitlichen Anfang. Zeit und Raum und alle Materie sind im Urknall entstanden.

Aber auch mit dieser überraschenden Erkenntnis scheint die Zeit wankender Welt-



INFO

Größer, schärfer, besser

Bei Teleskopen gilt: Je größer der Durchmesser der Objektivlinse oder des Hauptspiegels, desto mehr Licht wird gesammelt und gelangt in die Kamera. Mit steigender Teleskopgröße lassen sich nicht nur immer lichtschwächere Himmelskörper beobachten, auch das Auflösungsvermögen, also die Detailschärfe, steigt an. Theoretisch besitzt ein 8-Meter-Spiegel im sichtbaren Bereich genug Auflösungsvermögen, um ein hausgroßes Objekt auf dem Mond zu erkennen. Leider erreicht das in der Praxis kein Teleskop, denn die Luftunruhe, die die Sterne von der Erde aus betrachtet funkeln lässt, verschmiert die Himmelsaufnahmen.

Mit einer Technik namens adaptive Optik lässt sich dieses Problem zum Teil beheben. Hierbei analysiert ein spezieller Sensor in Sekundenbruchteilen Intensität und Form der ankommenden Lichtwelle und gibt die Information an einen Rechner weiter. Dieser steuert einen flexiblen Spiegel so, dass die Verzerrung der ankommenden Lichtwelle bei der Reflexion am Spiegel korrigiert wird. Die nun wieder perfekte Welle gelangt dann in die Kamera.

Eine zweite Möglichkeit, die Auflösung zu erhöhen, heißt Interferometrie. Bei diesem Verfahren werden die Strahlengänge von zwei oder mehr Teleskopen in einem Brennpunkt zusammengeführt. Auf diese Weise verwandeln sich die Einzelteleskope in ein einziges gewaltiges Teleskopauge.

bilder noch lange nicht vorüber. So macht nach heutigem Wissen die „normale“ Materie, aus der die sichtbare Welt besteht, nur einen Bruchteil der insgesamt vorhandenen Materie im Universum aus. Die Erforschung des weitaus größeren, scheinbar unsichtbaren Anteils wird eines der

◀ Interferometrie in Aktion: Beim VLT in Chile können alle Teleskope miteinander verkoppelt werden, so auch die kleinen Hilfsteleskope im Vordergrund. Diese liefern zusammen ähnlich scharfe Bilder wie ein fast 100 Meter großer Teleskopspiegel (rote Fläche). (Bild: ESO)



▲ Eines der größten schwenkbaren Radioteleskope der Welt steht in Nordrhein-Westfalen. Die Fläche der Antennenschüssel, mit der das Effelsberg-Teleskop ins All horcht, ist mit 100 Metern Durchmesser größer als die eines Fußballfeldes. (Bild: N. Tacke, Max-Planck-Institut für Radioastronomie)

dominierenden Themen des kommenden Jahrzehnts sein, ebenso wie die Suche nach lebensfreundlichen Planeten außerhalb des Sonnensystems (siehe S. 20).

Fenster zum All

Viele Entdeckungen der letzten Jahrzehnte gelangen nicht im Bereich des sichtbaren Lichts, sondern bei anderen Wellenlängen des elektromagnetischen Spektrums. Jeder Spektralbereich öffnet dabei gewissermaßen ein eigenes Beobachtungsfenster ins All. Dabei gilt die Faustregel: Je kürzer die Wellenlänge, desto höher die Energie der Strahlung und desto heißer sind die Himmelskörper, die sie abgeben.

Das erste neue Beobachtungsfenster, das geöffnet wurde, war das zum Radiobereich. In den 1930er Jahren stieß der amerikani-

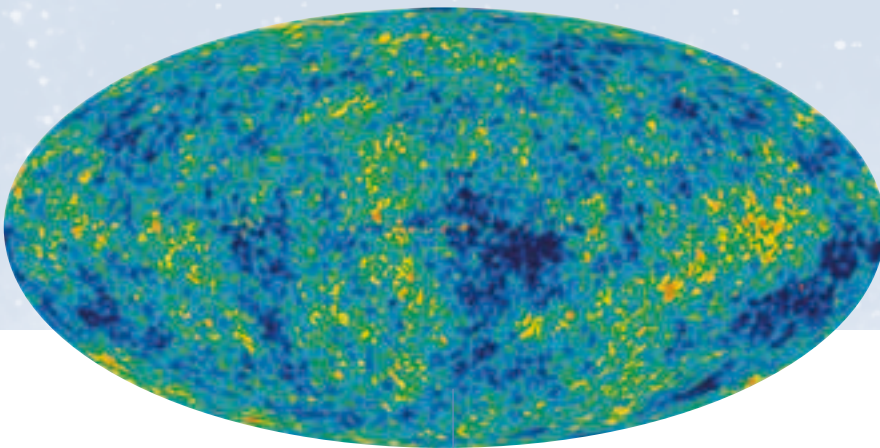
sche Rundfunkingenieur Karl Jansky bei Antennentests zufällig auf ein eigenartiges Rauschen, das aus Richtung des Zentrums der Milchstraße kam. Diese Entdeckung gilt als Geburtsstunde der [Radioastronomie](#), doch richtig in Schwung kam diese erst nach dem Zweiten Weltkrieg, als man auf der Radartechnik aufbauen konnte.

Einer der ersten großen Erfolge war die Messung von Radiowellen, die neutraler atomarer Wasserstoff, das mit Abstand häufigste Element im Universum, bei 21 Zentimetern Wellenlänge aussendet. Die Ursache dafür ist eine energetisch sehr schwache Wechselwirkung zwischen dem magnetischen Moment des Wasserstoff-Atomkerns (Kernspin) und dem magnetischen Moment seines Elektrons. Mit der „21-Zentimeter-Strahlung“ ließ sich die Spiralstruktur der Milchstraße im Detail studieren.



▲ Techniker bereiten das Einsetzen eines Teleskopspiegels in den Rumpf einer umgebauten Boeing 747 vor. Unter dem Namen SOFIA soll das fliegende Observatorium ab Frühjahr 2010 in 12 bis 14 Kilometer Höhe seine Arbeit aufnehmen. (Bild: NASA Photo/Tony Landis)

▼ Das Nachglühen der feurigen Geburt unseres Universums erreicht uns heute aus allen Richtungen des Alls. Diese Hintergrundstrahlung und ihre Temperaturschwankungen von weniger als einem tausendstel Grad Celsius zeigt das Himmelsbild des WMAP-Satelliten in Form von Farbvarianzen. (Bild: NASA/WMAP Science Team)



Heute zählt man auch den Bereich mit Wellenlängen bis zu etwa einem Millimeter zur Radioastronomie. Hier gelang es, die kosmische Hintergrundstrahlung nachzuweisen – die älteste Kunde aus dem Universum. Für ihre Entdeckung und Untersuchung gab es bereits zweimal den Nobelpreis für Physik, 1978 und 2006.

Zwischen Radiobereich und sichtbarem Licht befindet sich die Infrarotstrahlung, für die unsere Atmosphäre ein fast undurchlässiges Hindernis darstellt. Deshalb werden Infrarotbeobachtungen statt mit bodengebundenen Observatorien zum Großteil mit Teleskopen durchgeführt, die an Bord hochfliegender Flugzeuge, Ballons oder Satelliten installiert sind.

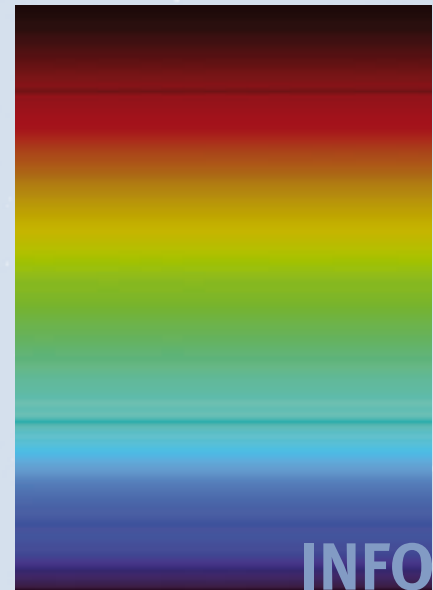
Jeder Körper gibt Strahlung auch im Infrarotbereich ab – wie intensiv, hängt nur von seiner Temperatur ab. Auch die winzi-

gen Staubteilchen in jenen Staubwolken und -scheiben, in denen Sterne und Planeten entstehen, strahlen im Infraroten. Da diese Strahlung mit Wellenlängen von einigen tausendstel Millimetern ähnliche Abmessungen wie die Staubteilchen hat, wird sie an den Teilchen kaum gestreut und kann aus dem Wolkeninneren bis zu uns gelangen. Die dort verborgene Sternentstehung wird so direkt sichtbar.

Jenseits des sichtbaren Lichts schließt sich zu kürzeren Wellenlängen die Ultraviolettstrahlung an. Hier beobachten Astronomen vor allem heiße Körper, wie mehrere zehntausend Grad heiße Weiße Zwerge oder Gaswolken in der Umgebung von jungen, heißen Sternen.

UV-Strahlung lässt sich mit Spiegeln noch fokussieren. Im Bereich der noch kurzwelligeren Röntgenstrahlen ist dies nicht mehr

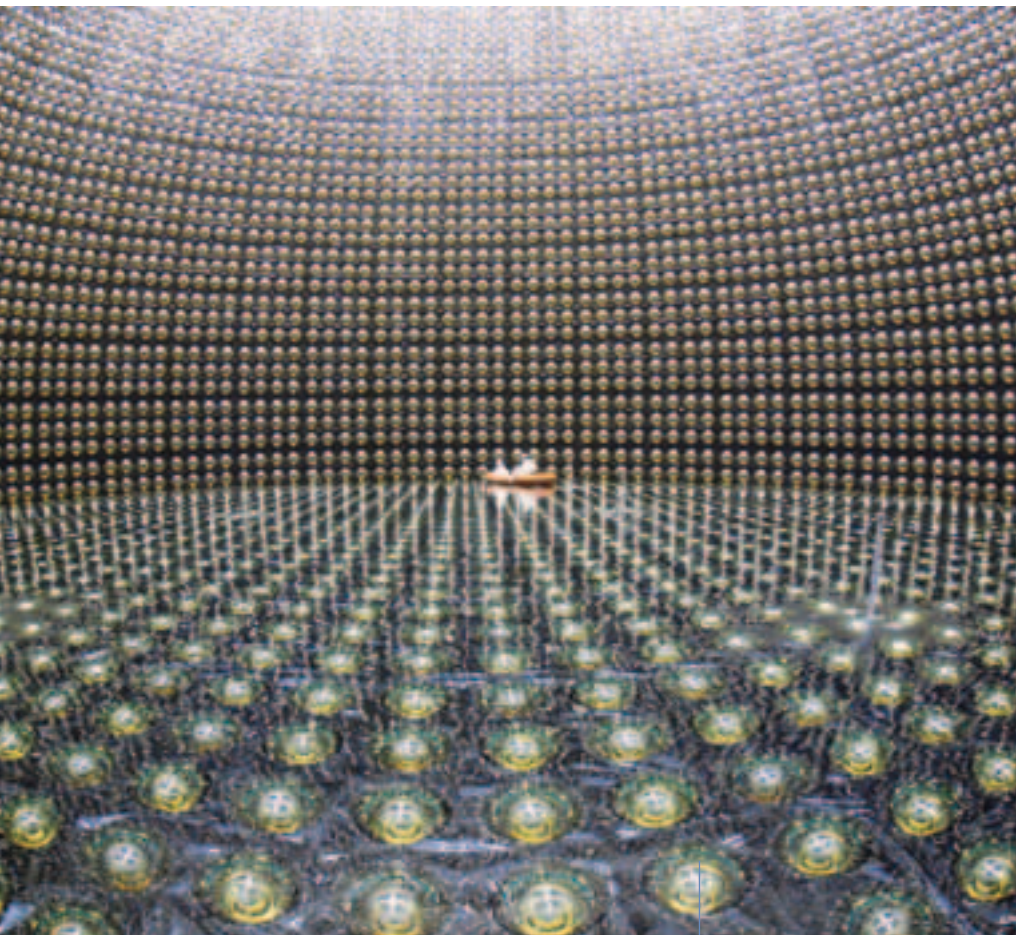
▼ Spektrum des Sterns HD 10032. (Bild: NOAO/AURA/NSF)



Spuren im Spektrum

Wenn man das Licht der Sonne oder eines Sterns in seine Spektralfarben zerlegt, dann zeigen sich darin viele schwarze Linien. Sie sind gewissermaßen die Fingerabdrücke der chemischen Elemente oder Moleküle, die sich in der durchstrahlten Sonnen- oder Sternatmosphäre befinden. Die Elemente verschlucken gerade das Licht der für sie charakteristischen Wellenlängen. Deshalb fehlt an entsprechenden Stellen im Spektrum dieser Farbbereich und erscheint schwarz. Die Absorptionslinien verraten den Astronomen auch viele physikalische Eigenschaften wie Temperatur und Druck in der Sternatmosphäre und die Geschwindigkeit, mit der sich der Stern bewegt. Dabei erfahren die Forscher jedoch immer nur etwas über die Vergangenheit des Sterns, da das Licht für die Strecke von ihm bis zu uns eine Weile braucht – manchmal Millionen oder sogar Milliarden Jahre.

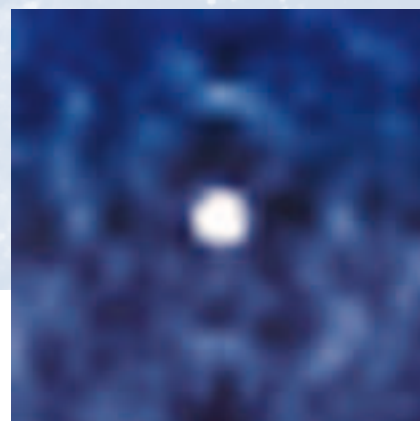
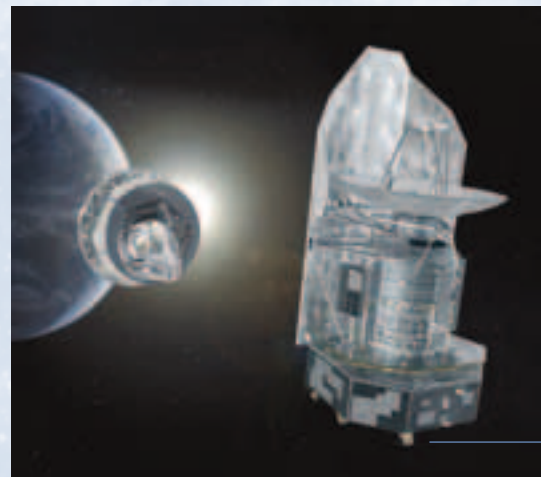
so einfach möglich. Hier stehen vor allem Phänomene am Ende der Sternentwicklung auf dem Beobachtungsplan: Neutronensterne und explodierende Sonnen, so genannte Supernovae. Auch Galaxien, in deren Zentren Schwarze Löcher Materie aus der Umgebung aufsaugen, lassen sich im Röntgenbereich studieren. Ein Meilenstein der Röntgenastronomie war das unter deutscher Leitung gebaute Weltraumteleskop ROSAT. Mit seinem Wolter-



▲ Der japanische „Super-Kamiokande“ spürt die geisterhaften Neutrinos mithilfe von 11.200 Detektoren auf. Diese umschließen 50.000 Kubikmeter Wasser und sind in einem Tank angeordnet, der einen Durchmesser von fast 40 Metern hat. (Bild: Kamioka Observatory, ICRR (Institute for Cosmic Ray Research), The University of Tokyo)

► Ein vom Satelliten Integral aufgenommener Gammablitz (Bild: ESA/ Original image by the Integral IBIS team/ Image processing by ESA/ECF)

▼ Die Grafik zeigt die Weltraumteleskope Herschel (rechts) und Planck, die gemeinsam im Mai 2009 ins All geschossen wurden. (Bild: ESA (image by AOES Medialab))



Teleskop, das die Totalreflexion von Röntgenstrahlen an metallischen Oberflächen nutzt, spürten Astronomen in den 1990er Jahren fast 150.000 Röntgenquellen auf.

Der Nachweis der extrem kurzwelligen und damit energiereicheren Gammastrahlen ist physikalisch ebenfalls sehr schwierig, da sie sich nicht mit Spiegeln oder Linsen ablenken lassen. Neuartige Detektoren, die aus der Teilchenphysik stammen, sind deshalb für die Beobachtungen nötig. Ein Highlight dieses Bereichs ist die Entdeckung der so genannten **Gammablitze**. Obwohl bereits in den 1960er Jahren beobachtet, wurde erst drei Jahrzehnte später klar, dass es sich bei ihnen um die stärksten bekannten Sternexplosionen im All handelt. Ausschließlich im Gammabereich lässt sich zudem der radioaktive Zerfall von Aluminium- und Eisen-Isotopen in den Explosionswolken von Supernovae

beobachten. Hieraus lernen Astrophysiker sehr viel über die Produktion schwerer Elemente, ohne die es unsere Erde vermutlich nicht geben würde.

Die noch kurzwelligere *kosmische* Gammastrahlung lässt sich nur mit spezieller Technik beobachten. Wenn solch hochenergetische Strahlungspartikel in die Atmosphäre hineinrasen und dort mit den Gasmolekülen zusammenstoßen, so zerschießen sie diese, und die atomaren Trümmer fliegen weiter in Richtung Erdboden. Dabei treffen diese auf weitere Atome und lösen so eine Teilchenlawine aus. Diese erzeugt in der Hochatmosphäre einen schwachen Lichtblitz, der sich mit großen Teleskopen am Boden beobachten lässt. Die Hochenergie-Gammaastronomie verwendet also im Grunde die Atmosphäre als riesigen Leuchtschirm. Die derzeit größten Observatorien dieser Art – die unter deutscher Leitung

entstandenen H.E.S.S. in Namibia (siehe S. 27) und MAGIC auf La Palma – haben beide schon einige ungewöhnliche Himmelskörper entdeckt.

Die letzten Fenster zum All werden gerade erst von Astrophysikern geöffnet. So ist es möglich, die leichtesten bekannten Teilchen, **Neutrinos**, nachzuweisen. Am schwierigsten zu öffnen ist das Fenster der Gravitationswellen – jenen von Albert Einstein vorausgesagte Verzerrungen von Raum und Zeit, die von einander umkreisenden Neutronensternen oder Schwarzen Löchern verursacht werden und mit Lichtgeschwindigkeit durchs All eilen. Es gibt derzeit fünf Anlagen, mit denen man versucht, Gravitationswellen mit Hilfe von Laser-Interferometern nachzuweisen. Eine davon heißt Geo600 und liegt unter einem Acker in der Nähe von Hannover.

Giganten gen Himmel

Nicht nur die Behausungen der zukünftigen Teleskopriesen E-ELT, GMT und TMT sind gewaltig. Auch die darunter verborgenen Teleskopspiegel stellen alles bisher Dagewesene in den Schatten. Am rechten Rand ist zum Vergleich ein LKW abgebildet. (Infografik: Melina Diener, Timo Meyer)

European Extremely Large Telescope (E-ELT)

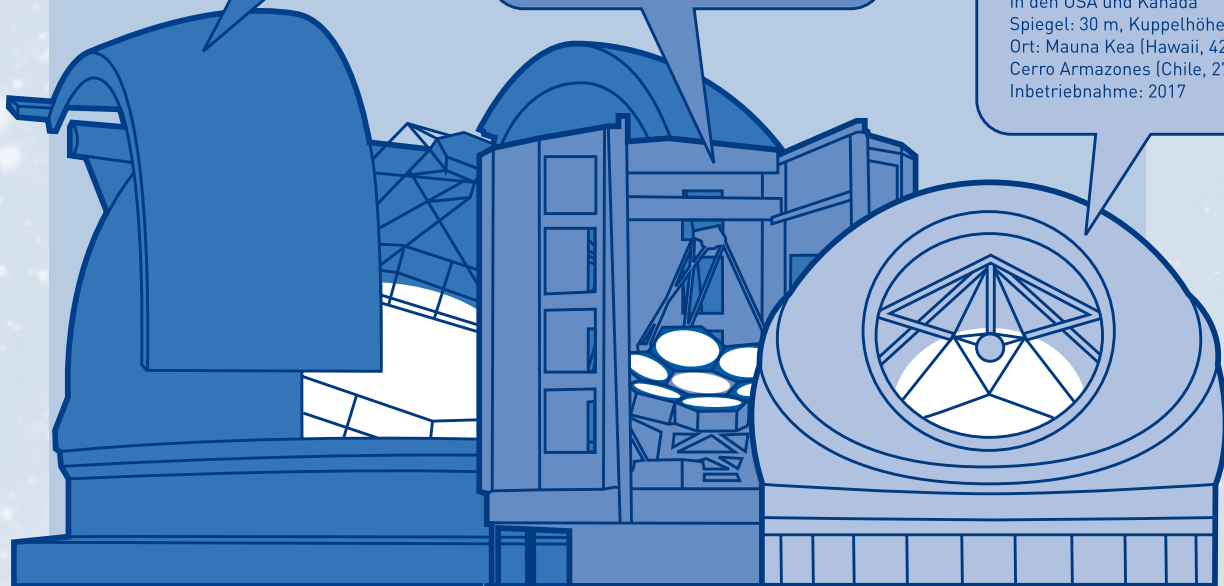
Betreiber: Europäische Südsternwarte, ESO
Spiegel: 42 m, Kuppelhöhe: 80 m
Ort: Entscheidung fällt Ende 2009
Inbetriebnahme: 2017

Giant Magellan Telescope (GMT)

Betreiber: Konsortium aus Instituten in den USA, Australien und Südkorea
Spiegel: 24,5 m, Kuppelhöhe: 65 m
Ort: Cerro Las Campanas (Chile, 2516 m)
Inbetriebnahme: 2018

Thirty Meter Telescope (TMT)

Betreiber: Konsortium aus Instituten in den USA und Kanada
Spiegel: 30 m, Kuppelhöhe: 56 m
Ort: Mauna Kea (Hawaii, 4200 m) oder Cerro Armazones (Chile, 2700 m)
Inbetriebnahme: 2017



Teleskope der Zukunft

Die Entwicklung in der Teleskoptechnik geht immer weiter. So hat in diesem Jahr die Europäische Weltraumorganisation ESA gleich zwei neue Instrumente ins All geschossen, das Infrarotobservatorium [Herschel](#) und das Mikrowellenteleskop [Planck](#). Gleichzeitig steht die Planung für das nächste Jahrzehnt bereits.

Herschel ist das größte Weltraumteleskop, das jemals ins All geschossen wurde. Sein „Auge“, ein gigantischer Sammelspiegel mit 3,50 Metern Durchmesser, kann im infraroten Wellenlängenbereich selbst durch dichteste Staubwolken sehen. Planck hingegen arbeitet bei größeren Wellenlängen bis zu einem Zentimeter. Es wird die kosmische Hintergrundstrahlung mit bislang unerreichter Genauigkeit studieren.

Auch der Nachfolger des Weltraumteleskops Hubble, das James-Webb-Teleskop, wird ab Mitte des nächsten Jahrzehnts im Erdbit seine Arbeit aufnehmen. Sein etwa sechs Meter großer Hauptspiegel passt nur zusammengeklappt in eine Rakete. Erst im Weltraum entfaltet sich der Spiegel zu seiner vollen Größe.

Im nächsten Jahrzehnt wollen die Astronomen auch bei Observatorien im sichtbaren Licht in ganz neue Dimensionen vorstoßen. So planen europäische Forscher derzeit das „[European Extremely Large Telescope](#)“ (E-ELT), das – nomen est omen – über eine Spiegelfläche mit 42 Metern Durchmesser verfügen soll.

Neue Projekte werden auch die Radioastronomie beflügeln. So entsteht in den chilenischen Anden auf 5000 Metern Höhe gerade das „Atacama Large Milli-

meter Array“ (ALMA), ein aus mindestens 50 Parabolantennen bestehendes Interferometer. Hiermit wollen die Astronomen zum Beispiel Staubscheiben um junge Sterne beobachten, in denen Planeten entstehen.

E-ELT und ALMA werden beeindruckende Ausmaße haben, aber das mit Abstand größte internationale Projekt der Zukunft ist das „Square Kilometre Array“ – eine Anordnung aus mehreren tausend Radioantennen unterschiedlicher Art, die über Tausende von Quadratkilometern verteilt sind und zusammen eine Sammelfläche von einem Quadratkilometer besitzen. Ein gigantischer Horchposten, der vielleicht erneut ein Weltbild zu Fall bringen wird.



Die Welten vor unserer Haustür

Vier Jahrzehnte nachdem erstmals Menschen den Mond betreten haben, ist der Erdbegleiter wieder in den Fokus der Wissenschaft gerückt. Ebenso wie der Mars, auf dem einst vermutlich flüssiges Wasser floss und sich vielleicht auch Leben gebildet hat. Faszinierend erscheint auch die Welt des Ringplaneten Saturn. Auf der Oberfläche seines Mondes Titan gibt es Meere aus flüssigem Erdgas.

Der Mond hat Hochkonjunktur. Die amerikanische Raumfahrtagentur NASA hat in diesem Jahr zwei Mondsonden auf die Reise geschickt, Japan, China und Indien haben bereits erfolgreich Raumfahrzeuge in Umlaufbahnen um den Erdbegleiter gebracht. Doch was macht diesen Himmelskörper so interessant?

Für die Planetenforscher ist der Mond so etwas wie ein Fenster in die Vergangenheit des Sonnensystems. Weder tektonische Aktivität noch Wind und Wetter haben ihn im Laufe der Jahrtausende verändert. Der Mond bildet deshalb ein nahezu unverändertes Archiv der geologischen Prozesse aus der Frühzeit des Planetensystems.

In den 1960er und 1970er Jahren brachten die Apollo- und Luna-Sonden [Mondmaterial](#) zur Erde. Das eröffnete erstmals die Möglichkeit, das Alter dieser Proben im Labor zu bestimmen. Der älteste Stein ist 4,56 Milliarden Jahre alt und markiert den Zeitpunkt, als sich der glutflüssige Mond verfestigte. Ihn taufen die Forscher deshalb „Genesis Stone“.

Entscheidend war darüber hinaus, dass Planetenforscher anhand des Mondgesteins ihre „Kraterstatistik“ eichen konnten. Grundsätzlich gilt: Je älter ein Gebiet ist, umso mehr Meteoriten sind dort eingeschlagen und umso höher ist die Kraterdichte. Was lange Zeit fehlte, war eine

absolute Eichung dieser Korrelation. Dies gelang nun mit Mondgestein aus unterschiedlichen Gebieten des Erdtrabanten. Seitdem kann man auch das Alter von Mondregionen bestimmen, von denen keine Proben vorliegen. Und unter gewissen Voraussetzungen lässt sich die Kraterstatistik sogar auf andere Himmelskörper wie den Mars übertragen.

Eine große offene Frage ist, ob der Mond einen Kern besitzt oder nicht. Mondproben von nur neun unterschiedlichen Orten besitzen die Forscher – genug für die Kraterstatistik, aber zu wenig, um daraus den Aufbau des Mondes abzuleiten. Im Aufbau des Erdtrabanten liegt aber der Schlüssel zu seiner Entstehungsgeschichte.

Um das Innere zu erkunden, bieten sich unterschiedliche Methoden an. Zum einen kann man die Bewegung eines Satelliten um den Mond genau verfolgen. Unregelmäßigkeiten im Innern des Körpers, verur-



◀ S. 14: Sechsmal landeten Menschen bereits auf dem Mond – dreimal sogar mit einem Auto im Gepäck. Hier steuert Eugene Cernan im Dezember 1972 das „Lunar Roving Vehicle“ über die Mondoberfläche. (Bild: Apollo 17, NASA/Harrison H. Schmitt)

◀ Mondgestein und die Astronauten, die es von ihrer Reise mitbrachten: Edwin Aldrin (1.v.l.), Michael Collins (2.v.l.) und der erste Mensch auf dem Mond, Neil Armstrong (2.v.r.) im September 1969. (Bild: NASA)

▼ Dieses aufblasbare Habitat könnte Teil einer späteren Mondbasis sein. Als mögliches Datum für eine Rückkehr zum Erdtrabanten wird das Jahr 2020 gehandelt. (Bild: NASA/Jeff Caplan)



sacht zum Beispiel von Verdichtungen unter der Oberfläche, führen dann zu Schwankungen in der Bahnbewegung. Solche Untersuchungen sind den Japanern 2009 mit ihrer Sonde Kaguya gelungen – erstmals auch für die Rückseite des Mondes.

Doch nicht nur im Inneren, auch auf der Oberfläche des Trabanten ist noch vieles rätselhaft. So fand man im Bereich des auf der Mondvorderseite gelegenen Mare Imbrium ungewöhnlich hohe Konzentrationen des Elements Thorium, ein dem Uran nahe stehendes, seltenes, radioaktives Metall mit einer Halbwertszeit von zehn Milliarden Jahren.

Aus wissenschaftlicher Sicht hoch interessant ist insbesondere ein Einschlagsbecken am Südpol namens Aitken-Bassin. Dieses ist mit seinen 2240 Kilometern Durchmesser größer als Indien. In einer frühen Phase des Mondes hat ein Meteorit hier die gesamte Kruste durchschlagen

und vermutlich sogar den darunter befindlichen Mantel angekratzt. Das bietet heute die Möglichkeit, dort etwa 13 Kilometer tief in den Körper hineinzuschauen.

Im Aitken-Bassin gibt es Krater mit so extrem hohen Wänden, dass einige Stellen ewig im Schatten liegen. Radarbeobachtungen von der Erde aus hatten den Verdacht aufkommen lassen, dass sich dort Wassereisvorkommen befinden. Neuere Nachbeobachtungen zum Beispiel mit der Sonde Kaguya konnten dies nicht bestätigen. Dennoch bleibt die schwierige Untersuchung dieser Gebiete ewiger Dunkelheit spannend, auch für Raumfahrtexperten. Sie denken an den Aufbau einer bemannten Station auf einem der Kraterränder. Dort scheint das ganze Jahr über die Sonne und vom Kratergrund ließe sich eventuell lebenswichtiges Wasser gewinnen.

Überhaupt sehen Visionäre den Mond als einen Standort für zukünftige Radioteles-

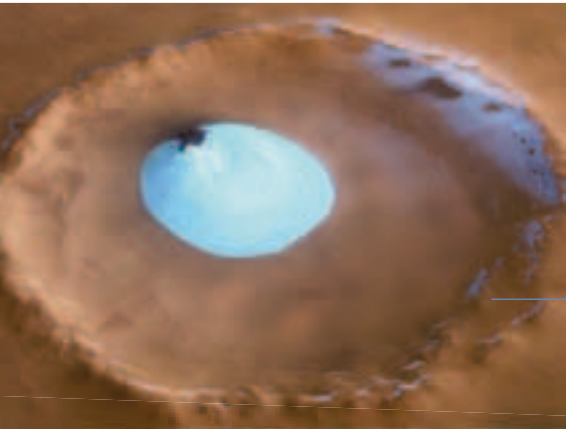
Die Erde ohne Mond

Ohne Mond sähe unsere Erde wohl vollkommen anders aus. Denn trotz der großen Entfernung von durchschnittlich 384.000 Kilometern hat der Mond einen großen Einfluss auf unseren Planeten. So erzeugt neben der Sonne vor allem der Mond mit seiner Schwerkraft die zwei Flutberge der Gezeiten, die wie eine Bremse auf die sich darunter hinweg drehende Erde wirken. Dadurch nimmt die Tageslänge alle 50.000 Jahre um eine Sekunde zu. Hätte es den Mond nie gegeben, so würde die Erde heute schneller rotieren, und ein Tag würde nur 10 bis 15 Stunden dauern.

Als weitere Folge des Gezeiteneffekts entfernt sich der Mond langsam aber stetig von uns. Hierdurch verlängert sich auch die Umlaufdauer um unseren Planeten, also die Dauer eines Monats. Voraussichtlich wird sich der Erdbegleiter nie ganz von unserem Planeten entfernen, in ferner Zukunft könnten aber die Erdtage so lang werden, dass sie die Dauer eines Monats erreichen. Dann wird der Mond scheinbar regungslos am Himmel stehen und nur noch von einer Erdhälfte aus zu sehen sein.

Der Mond wirkt auch stabilisierend, indem er durch seinen Umlauf ein Trudeln der Erdachse verhindert. Vorstellen kann man sich das Ganze wie ein Speichenrad: Die zentral gelagerte Nabe entspricht der Erde und die Felge dem umkreisenden Mond. Die Schwerkraft verbindet beide Körper, ähnlich wie die Speichen des Rades. Computersimulationen belegen, dass die Rotationsachsen von Planeten normalerweise um bis zu 90 Grad schwanken können. Ursache hierfür sind die Schwerkraft anderer Planeten, die die Achsen ähnlich ins Taumeln bringen wie bei einem angestoßenen Brummkreisel. Ohne den Mond wäre das auch der Erde passiert – mit verheerenden Folgen für das Klima und alles Leben auf dem Planeten. (Bild oben: NASA)

kope oder andere astronomische Instrumente. Insbesondere auf der Rückseite, wo die störende Erdkugel nie auftaucht, ergäben sich ideale Bedingungen.



► Die Zeitangaben rechts zeigen: Weltraumreisen können schnell zur Lebensaufgabe werden. Selbst ein Raumschiff, das vom Start weg mit der theoretischen Höchstgeschwindigkeit moderner Ionentriebwerke von 324.000 km/h fliegen und dabei stets die kürzeste Route nehmen würde, bräuhete Jahre, nur um den Rand unseres Sonnensystems zu erreichen. (Grafik: Melina Diener, Timo Meyer)

◀ Diese Aufnahme des Satelliten Mars Express zeigt eine gewaltige Eisfläche am Grund des polaren Marskraters Vastitas Borealis. (Bild: ESA/DLR/FU Berlin (G. Neukum))

▼ Der ExoMars-Rover der Europäischen Raumfahrtagentur ESA soll die Oberfläche des Mars nach Spuren von Leben untersuchen und die geophysikalischen Eigenheiten des Planeten erkunden. (Bild: ESA/JPL-Caltech/Cornell University)

16



Der Wüstenplanet

Kein anderer Planet hat die Fantasie der Menschen so bewegt wie der Mars. Ende des 19. Jahrhunderts erregte die vermeintliche Entdeckung eines Kanalsystems auf seiner Oberfläche Aufsehen. Heute ist bekannt, dass der Mars ein Wüstenplanet ist. Aber das war vermutlich nicht immer so. Er hat eine bewegte Entwicklung hinter sich, und es ist nicht ausgeschlossen, dass dort vor Jahrmilliarden Leben entstanden ist.

Auf dem Mars gibt es ebenso Jahreszeiten wie auf der Erde. Allerdings dauert ein

Jahr etwa doppelt so lange wie bei uns. Im Frühjahr setzt das Abtauen der Polkappen ein, und in mittleren Breiten verfärbt sich der Boden dunkel. Früher hielt man dies für Vegetation, die mit Einsetzen der Schneeschmelze erblüht. In Wirklichkeit wehen heftige Stürme hellen Staub fort und legen dunkles Gestein frei.

Die Oberfläche des roten Nachbarplaneten ist von rekordverdächtig großen Einschlagskratern, Canyons und Vulkanen geprägt. Der riesige Olympus Mons zum Beispiel ist der höchste Berg im Sonnensystem. Er steigt etwa 21 Kilometer über die umgebende Hochebene auf und misst an



MOND



MARS



SONNE



SATURN



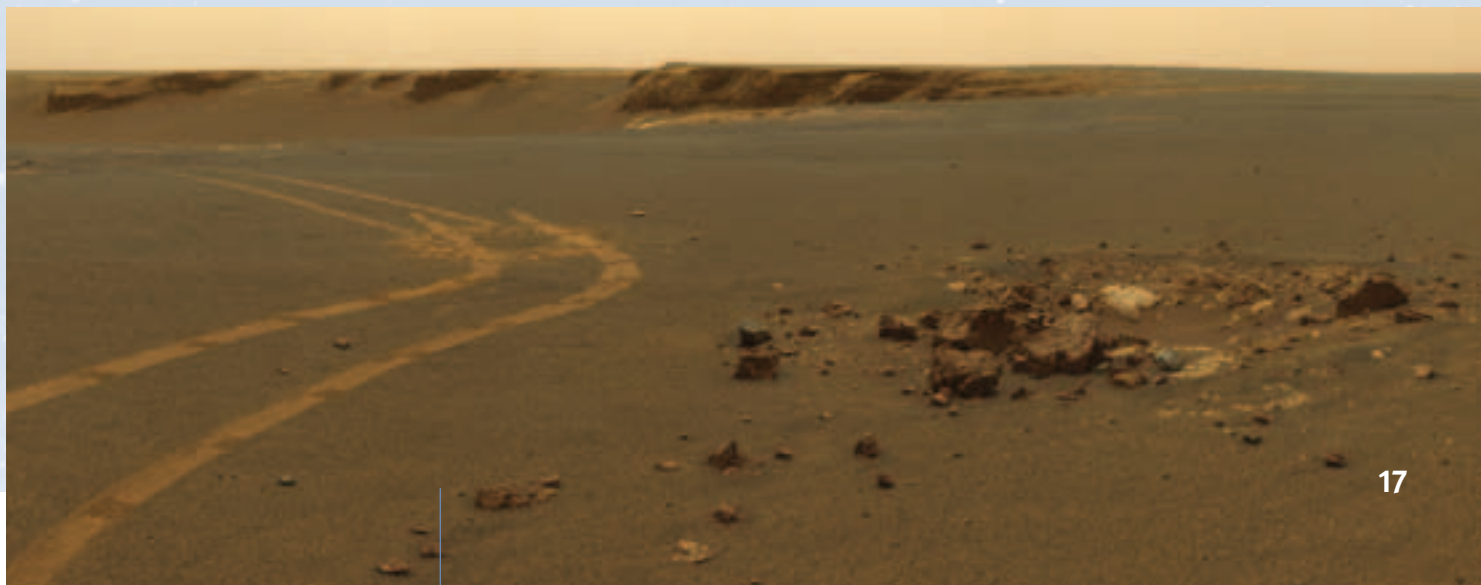
NEPTUN



NÄCHSTER STERN
"PROXIMA CENTAURI"

► Die beiden Landefähren Viking 1 und 2 sandten 1976 die ersten Bilder von der staubigen Marsoberfläche. Tatkräftig unterstützt wurde das Projekt vom Astrophysiker, Fernsehmoderator und Schriftsteller Carl Sagan, der hier stolz mit einem 1:1-Modell des Raumfahrzeugs posiert. (Bild: NASA/JPL)

▼ Schaut ja fast so aus wie bei uns. Das Panoramafoto des Roboterfahrzeugs Opportunity könnte genauso gut in einer Wüstengegend unserer Erde entstanden sein. Es zeigt jedoch einen Ort auf dem Mars, viele Millionen Kilometer von uns entfernt. (Bild: NASA/JPL-Caltech/Cornell University)



der Basis 700 Kilometer im Durchmesser. Das entspricht etwa der Größe der iberischen Halbinsel mit Spanien und Portugal. Dank dieser enormen Basisfläche sind die Hänge des Olympus Mons trotz seiner Höhe nicht sehr steil. Für einen Betrachter, der am Rand seines Gipfelkraters stünde, würden die Flanken des Schildvulkans bis zum Horizont reichen.

Eine dünne Atmosphäre umgibt den Mars, die hauptsächlich aus Kohlendioxid besteht. Nachts sinkt die Temperatur weit unter minus 100 Grad Celsius ab, tagsüber erreicht sie nur im Sommer in einigen Gebieten plus 20 Grad. Unter diesen Bedingungen kann es kein flüssiges Wasser auf der Oberfläche geben. In der Vergangenheit war dies jedoch vielleicht einmal anders.

An vielen Stellen finden sich Kanäle, die an Flussbette erinnern und teilweise wie

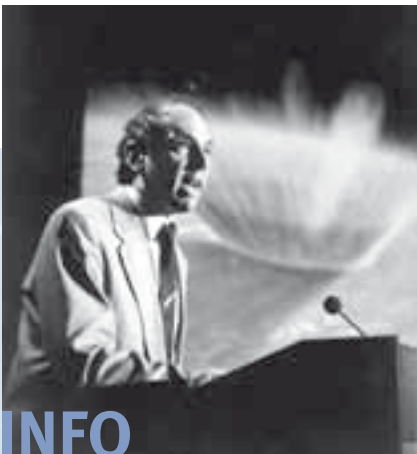
von strömendem Wasser geformte Inseln enthalten. Bodenanalysen der beiden amerikanischen Roboterfahrzeuge „Spirit“ und „[Opportunity](#)“, die seit 2004 auf dem Mars unterwegs sind, unterstützen den Verdacht auf ehemalige Wasservorkommen. Opportunity fand zum Beispiel Gestein mit ungewöhnlich hohem Gehalt an Schwefel und Brom, was sich die Forscher auf folgende Weise erklären: In einem ursprünglichen See waren Salze gelöst. Dann begann das Gewässer zu verdunsten, der Salzgehalt stieg. Als die Sättigungsgrenze überschritten war, fielen die gelösten Salze als feste Stoffe aus und sanken zu Boden. Dort sammelten sie sich in den jetzt von Opportunity untersuchten Schichten an.

Vermutlich war der Mars ursprünglich von einer dichten Atmosphäre umgeben und warm. Damals gab es eventuell ausgedehnte Meere und Flüsse. Doch nach

einer Milliarde Jahren änderte sich das Klima. Die Atmosphäre verflüchtigte sich, und die Temperaturen sanken dramatisch ab. Diese Phase endete vor etwa 3,5 Milliarden Jahren. Seitdem gab es auf der Oberfläche kein flüssiges Wasser mehr. Wohl aber haben sich Reservoirs von Wassereis unter der Oberfläche angesammelt.

Es scheint nicht ausgeschlossen, dass sich einst Leben auf dem Mars entwickeln konnte. Konkrete Hinweise darauf gibt es jedoch nicht.

Überreste von Lebewesen könnten sich ohnehin nur im Boden finden lassen, wo die intensive UV-Strahlung und der Teilchenwind der Sonne sie nicht zersetzen konnten. Deshalb wird der europäische Rover ExoMars, der 2016 zum Roten Planeten aufbrechen soll, mit einem Bohrer



INFO

Wie Amateure zu Profis werden

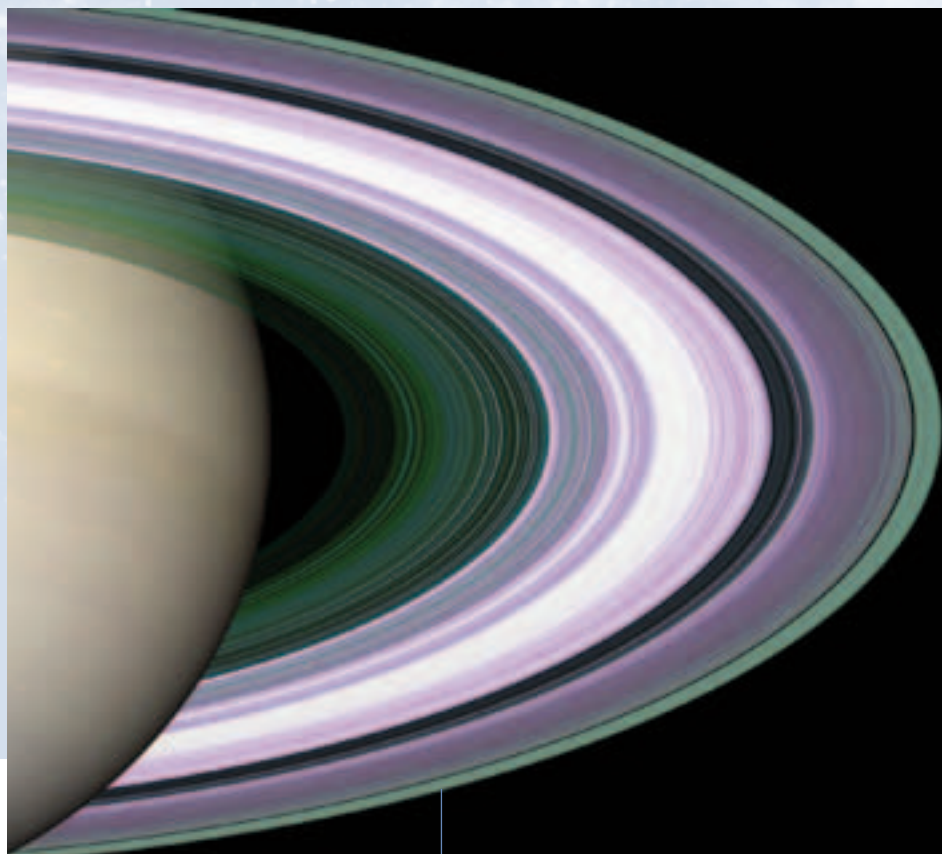
In kaum einer anderen Wissenschaft ist die Bedeutung vermeintlicher Amateure so groß wie in der Astronomie. Vor allem bei der Jagd nach Kometen oder Asteroiden können auch Hobbyastronomen bedeutende Entdeckungen machen. Ihr Vorteil: Sie verfügen zwar über wesentlich kleinere Teleskope als ihre professionellen Kollegen, aber sie können diese jederzeit und so lange sie wollen nutzen. Alle hellen Schweifsterne der jüngeren Vergangenheit haben Sternfreunde bei ihrer unermüdlischen Suche entdeckt. Auf diese Weise wurden die beiden Amerikaner Alan Hale und Thomas Bopp ebenso weltberühmt wie Yuji Hyakutake.

Mittlerweile ermöglicht es das Internet, dass jedermann sich auch an der Analyse bereits gewonnener wissenschaftlicher Daten beteiligen kann. So durchsuchten die Rechner von mehr als fünf Millionen ET-Begeisterten Daten des Arecibo-Radioteleskops auf Puerto Rico nach Signalen außerirdischer Zivilisationen. In einem neuen Projekt suchen mehr als 200.000 Teilnehmer nach so genannten Radiopulsaren – schnell rotierende Neutronensterne, die wie Leuchttürme ihre Strahlung in den Raum schießen.

Bei dem Projekt Galaxy Zoo sind Sternfreunde dazu aufgerufen, auf Himmelsaufnahmen Galaxien nach ihrem Typ zu klassifizieren. Innerhalb von nur 18 Monaten haben Fans rund um den Globus insgesamt eine Million Galaxien aus den Himmelsaufnahmen des Sloan Digital Sky Survey unter die Lupe genommen und eingeordnet. Bei rund 3000 handelte es sich um kollidierende Galaxien. Diese sind so interessant, dass sie mit größeren Teleskopen eingehend untersucht werden – allerdings von Profis.

◀ Einer der prominentesten Amateurastronomen und der mit Abstand erfolgreichste Kometenjäger ist David H. Levy. Das Bild zeigt den Kanadier 1995 während eines Vortrags über den von ihm mitentdeckten Kometen Shoemaker-Levy 9, der nur ein Jahr zuvor spektakulär mit Jupiter kollidiert war. (Bild: NASA/JPL-Caltech)

▼ In diesem aus Radiodaten rekonstruierten Bild der Saturnringe stehen Farben für die Verteilung von kleinsten Ringteilchen: Violett kennzeichnet Zonen, in denen fast keine Partikel kleiner als fünf Zentimeter vorkommen. Grün und Blau kennzeichnen Bereiche mit Teilchen, die sogar kleiner als 1 Zentimeter sind. (Bild: NASA/JPL)



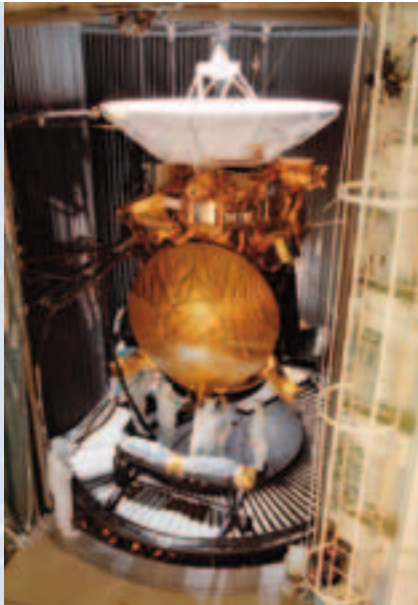
ausgerüstet sein, der Proben aus ein bis zwei Metern Tiefe holen und in einem mitgeführten Labor analysieren kann.

Der Herr der Ringe

Schöner als alle Planeten erscheint uns Saturn bereits durch ein kleines Fernrohr. Tausende von Ringen umgeben ihn und verleihen ihm seine unverwechselbare Erscheinung. Er ist der zweitgrößte Planet im Sonnensystem, die Erde würde 840-mal in ihm Platz finden. Aber seine mittlere Dichte beträgt nur 0,7 Gramm pro Kubikzentimeter. Könnte man ihn in eine mit Wasser gefüllte Wanne legen, so würde er darin schwimmen. Der Grund: Saturn ist ein Gasplanet und besteht fast ausschließlich aus leichten Elementen, nämlich überwiegend aus Wasserstoff und ein wenig Helium.

Das auffälligste Merkmal des Saturn sind seine Ringe, bestehend aus Tausenden von Einzelringen, die zusammen das flachste bekannte Objekt im Universum bilden. Der Durchmesser der Hauptringe beträgt 280.000 Kilometer, entsprechend dem 20-fachen Erddurchmesser. Dabei sind sie jedoch nur wenige zehn Meter dick.

Galileo Galilei hatte die Ringe bereits im Jahre 1610 durch sein Fernrohr gesehen. Es dauerte jedoch noch 250 Jahre, bis man genaueres über ihren Aufbau wusste. Der Schotte James C. Maxwell bewies, dass die Ringe aus Stabilitätsgründen keine riesigen massiven Scheiben sein konnten, sondern dass sie aus Staub und Eis bestehen. Unzählige Partikel ganz unterschiedlicher Größe umkreisen den Planeten mit bis zu 50.000 km/h – vom tausendstel Millimeter großen Staubkorn bis hin zu Felsen von der Größe eines Einfamilienhauses.



► Schon vor mehr als 20 Jahren vermutete man Methanseen auf Titan. Doch erst Cassinis Radaraufnahmen lieferten Gewissheit. Orte, an denen die Forscher aus den Messdaten auf Erdgasmeere schließen, sind hier zur Verdeutlichung blau eingefärbt. (Bild: NASA/JPL/USGS)

◀ Die Raumsonde Cassini im Jahre 1996, ein Jahr vor ihrem Start. An der Vorderseite sitzt die Huygens-Sonde, an der Spitze thront eine große Radioantenne, mit der Cassini Kontakt zur Erde hält. (Bild: NASA/JPL)

◀ Die von Enceladus Geysiren versprühten Eisteilchen sind hier deutlich als bläuliche Wolke erkennbar. (Bild: Cassini Imaging Team, SSI, JPL, ESA, NASA)



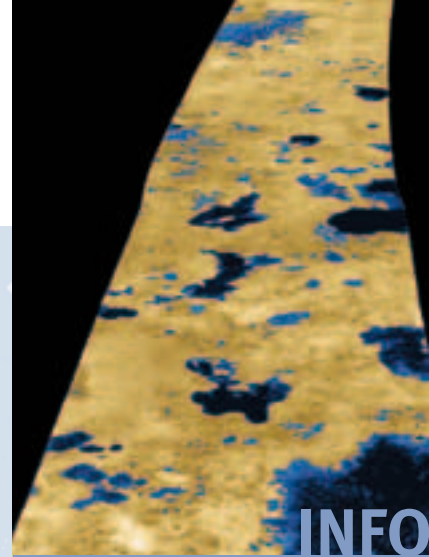
Die Frage, wie der Saturn zu seinen Ringen gekommen ist, lässt sich mit letzter Sicherheit noch nicht beantworten. Klar ist aber, dass das Ringsystem kein unveränderliches Phänomen ist. Die Ringteilchen stoßen häufig zusammen und zerreiben sich mit der Zeit gegenseitig. Sie fallen dann langsam in die Saturn-Atmosphäre hinein, so dass sich die Ringe nach und nach auflösen.

Nach der derzeit gängigsten Theorie entstand das Hauptringsystem in Folge eines gigantischen Zusammenstoßes. Ein rund 500 Kilometer großer Mond, der dort kreiste, wo jetzt die Ringe sind, wurde von einem Asteroiden getroffen und zerbrach in mehrere Einzelteile. Weitere Asteroidentreffer, ein unablässiger Beschuss durch kleinste Meteoriten und gegenseitige Zusammenstöße ließen die Felsbrocken dann nach und nach zerbröseln. Die abspalternden Teilchen verteilten sich auf

unterschiedlichen Umlaufbahnen und bildeten das heutige Ringsystem.

Mit der Raumsonde Cassini gelang es, eine Quelle für einige schwache Nebenebene auszumachen, die Saturn jenseits des Hauptringsystems umgeben. So legt der Mond [Enceladus](#) auf seiner Umlaufbahn eine feine Spur aus Eisteilchen, die permanent aus seinem Inneren hervorschießen. Andere dünne Ringe existieren nur deshalb, weil schnelle kosmische Teilchen aus den Oberflächen von Monden Partikel herauschlagen, die sich dann auf deren Bahnen verteilen.

Alle Forschungsergebnisse deuten also darauf hin, dass die Ringe des Saturn einem ständigen Wechsel unterliegen. Möglicherweise leben wir gerade in einer Ära, in der dieses Phänomen besonders prächtig erscheint.



INFO

Bizarrer Titan

Zurzeit sind 61 Monde bekannt, die Saturn umkreisen. Die meisten sind nur wenige Kilometer groß. Der mit Abstand interessanteste Begleiter ist Titan. Mit einem Durchmesser von 5150 Kilometern ist er größer noch als der Planet Merkur, und als einziger Mond im gesamten Sonnensystem umgibt ihn eine dichte Atmosphäre. Diese besteht fast ausschließlich aus Stickstoff und Methan und erreicht am Boden Temperaturen um minus 180 Grad Celsius. Das lässt eine tiefgefrorene Landschaft vermuten, und doch ist dieser ungestaltliche Mond neben der Erde der einzige Körper im Sonnensystem, auf dem eine Flüssigkeit existiert. Kein Wasser wie bei uns, sondern Methan und Ethan: flüssiges Erdgas.

Die europäische Sonde Huygens, die im Januar 2005 auf spektakuläre Weise auf der Titanoberfläche gelandet ist, und Radarbeobachtungen des Raumschiffes Cassini haben den Wissenschaftlern Details dieser bizarren Welt vor Augen geführt. Die von Huygens gemachten Aufnahmen zeigen verästelte Kanäle, in denen zumindest früher einmal eine Flüssigkeit geströmt ist. Ob dies auch heute noch der Fall ist, lässt sich derzeit nicht sagen.

Mit Cassinis Radar entdeckten amerikanische Wissenschaftler zudem in hohen nördlichen Breiten riesige Seen mit extrem glatter Oberfläche, in die flussähnliche Gräben münden. Untersuchungen zeigten, dass diese Becken mit flüssigem Methan und Ethan gefüllt sind, gespeist aus feinen Niederschlägen, die aus Methanwolken herab regnen. Kaum zu glauben, aber unter den Extrembedingungen auf Titan bildet flüssiges Erdgas einen Kreislauf wie bei uns das Wasser.



20

Die Suche nach der zweiten Erde

Als die Astronomen Michel Mayor und Didier Queloz 1995 den ersten Planeten entdeckten, der einen fernen Stern umkreist, waren die Astronomen gleichermaßen begeistert und geschockt. Begeistert deswegen, weil eine jahrzehntelange Suche endlich zum Erfolg geführt hatte. Geschockt, weil es einen extrasolaren Planeten mit den von Mayor und Queloz beobachteten Eigenschaften eigentlich gar nicht geben durfte. Mittlerweile sind mehr als 350 so genannte Exoplaneten bekannt – eine zweite Erde ist bislang nicht darunter.

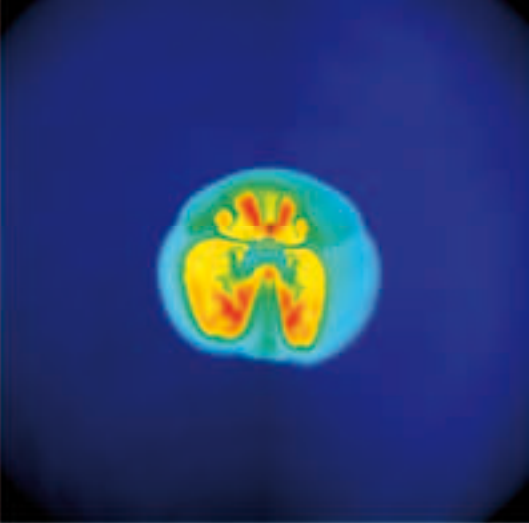
Was der Schweizer Astrophysik-Professor Michel Mayor und der Doktorand Didier Queloz vom Observatorium Genf am 6. Oktober 1995 verkünden, ist eine kleine Revolution: die Entdeckung des ersten extrasolaren Planeten. Die zweite Überraschung erlebt die Forschergemeinde, als die Daten des 51 Pegasi b getauften Himmelskörpers bekannt werden. Der Gasplanet ähnelt zwar unserem Jupiter, umkreist seinen Zentralstern allerdings in einer Entfernung von nur 0,05 Astronomischen Einheiten (1 AE = 150 Mio. km), also 20-mal enger

als die Erde die Sonne. Nach den bis dahin geltenden Vorstellungen können solche großen Planeten in Sternnähe aber gar nicht entstehen. Es ist dort zu heiß, und es gibt zu wenig Staub und Gas, aus denen sich der Planet zusammenballen könnte. Dennoch gehört etwa ein Drittel aller bisher entdeckten Exoplaneten zu dieser Gruppe der „heißen Jupiter.“ Wie kann das sein?

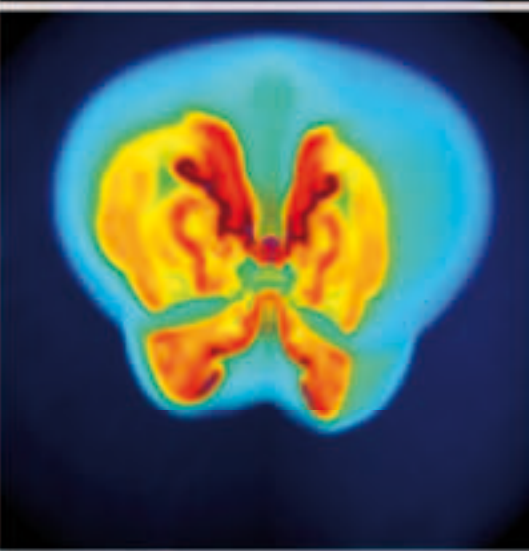
Die meisten Astrophysiker vermuten heute, dass die Riesenplaneten sich in großer Entfernung von mehr als etwa 5 Astrono-

mischen Einheiten von ihrem Zentralstern bilden. Dies geschieht in der so genannten protoplanetaren Scheibe aus Staub und Gas, die sich um den entstehenden Stern dreht. Die Schwerkraftwechselwirkung mit Scheibenmaterial kann den Planeten abbremsen, so dass dieser auf einer Spiralbahn langsam an den Stern herandwandert.

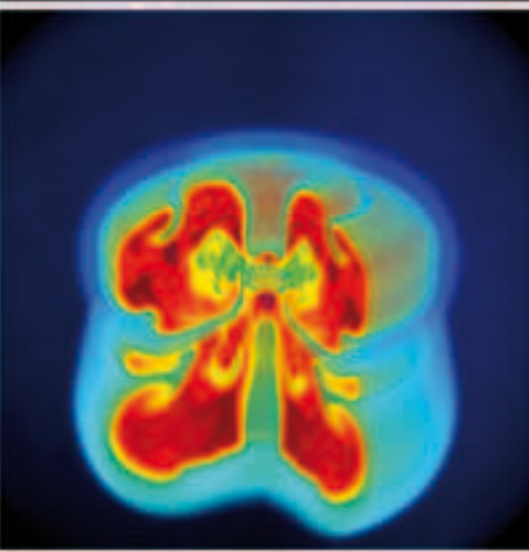
Diese „Migration“ kann durchaus auch mehrere Planeten gleichzeitig betreffen. Das junge Planetensystem rüttelt sich also gewissermaßen erst einmal zurecht, bevor es seine endgültige Konfiguration erreicht hat. Das ist dann der Fall, wenn sich die protoplanetare Scheibe nach einigen Millionen Jahren aufgelöst hat. Was genau die wandernden Riesenplaneten zuvor davor bewahrt hat, geradewegs in ihre Sonne hinein zu laufen, ist Gegenstand intensiver astronomischer Forschung.



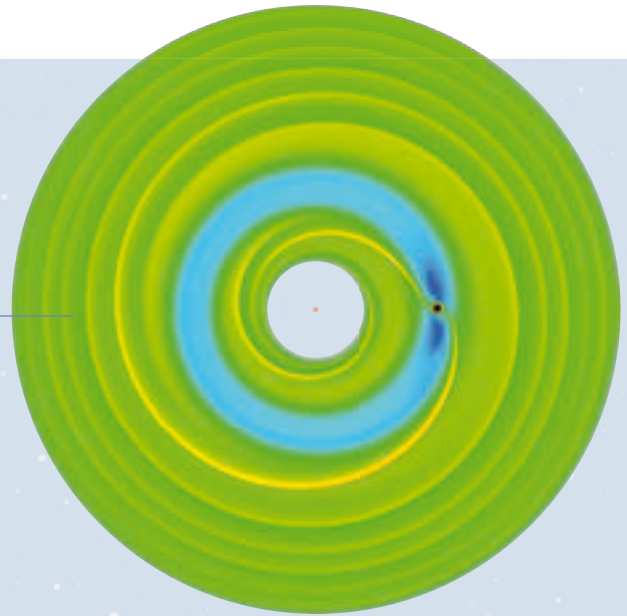
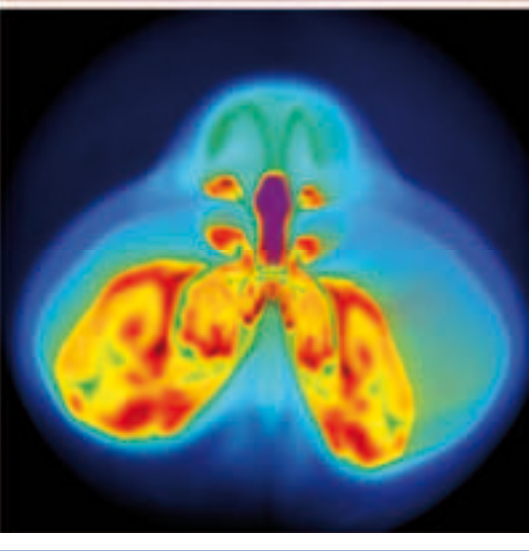
◀ S. 20: Den Exoplaneten HR 8799 b (hier aus Künstlersicht) fanden Forscher in alten Aufnahmen des Hubble-Teleskops. (Bild: NASA, ESA, and G. Bacon (STScI))



► Die Simulation zeigt: Innerhalb der protoplanetaren Scheibe erzeugt der neue Planet (rechts der Mitte) eine spiralförmige Dichtestörung, die als Auslöser der Migration gilt. (Bild: W. Kley, Uni Tübingen)



◀ Den Baustoff für neue Sterne und Planetensysteme liefern Sternexplosionen. Diese Computersimulation zeigt vier Momentaufnahmen einer solchen Supernova – nach (von oben nach unten) 525, 610, 650 und 700 Millisekunden. (Bilder © A. Marek, H.-Th. Janka, Max-Planck-Institut für Astrophysik)



▲ Stephane Udry (r.) und Michel Mayor verkünden im April 2007 die Entdeckung des Exoplaneten Gliese 581 c. (Bild: picture-alliance/dpa)

Die Mehrzahl der bekannten Exoplaneten stellen riesige Gasplaneten: rund Zweidrittel sind massereicher als Jupiter. Mittlerweile haben Astronomen auch mehr als 35 Systeme entdeckt, in denen mehrere Planeten einen Stern umkreisen. Bisheriger Rekordhalter mit fünf Planeten ist der 42 Lichtjahre entfernte Stern 55 Cancri.

Weder das 55 Cancri-System noch irgendein anderes gleicht jedoch dem unseren. Auch wurden bislang kaum masseärmere Gesteinsplaneten entdeckt, die der Erde ähneln könnten. Dies liegt an den Grenzen der Messgenauigkeit der bisherigen Nachweismethoden und spiegelt höchstwahrscheinlich nicht das wahre Aussehen der Exoplanetensysteme wider. Dennoch mussten die Astronomen lernen, dass die Natur über wesentlich ausgefallenerer „Konstruktionspläne“ verfügt, als sie vor der Entdeckung von 51 Pegasi b angenommen hatten.

Die Suche nach einer „zweiten Erde“ geht mit Hochdruck voran. Damit auf einem Gesteinsplaneten Leben, wie wir es kennen, entstehen kann, muss auf ihm dauerhaft flüssiges Wasser existieren. Dies ist nur möglich, wenn er eine Atmosphäre besitzt, in der ganz bestimmte Druckverhältnisse herrschen, die durch seine Gravitation und damit durch seine Masse bestimmt werden. Außerdem muss sich der Planet in einem geeigneten Entfernungsbereich, der bewohnbaren Zone, um seinen Heimatstern bewegen.

Es gibt einen Planeten, bei dem dies der Fall ist. Er heißt Gliese 581 d und umkreist den 20 Lichtjahre von uns entfernten Stern und Namensgeber Gliese 581 innerhalb von 67 Tagen. Der Planet, aufgespürt durch das Team um den Schweizer [Planetenjäger Stephane Udry](#), ist mindestens siebenmal schwerer als die Erde und deshalb



21 km

misst der marsianische Vulkanberg Olympus Mons. Er ist damit mehr als 2,5-mal so hoch wie der Himalaya-Gigant Mount Everest.



100 km

tief könnte der Ozean sein, den man unter dem Eis des Jupitermondes Europa vermutet – zehnmal tiefer als die Abgründe des pazifischen Marianengrabsens.

Rekordwelten

Wie vielfältig und extrem die Bedingungen auf Welten außerhalb unseres Sonnensystems sein könnten, das zeigt bereits ein Blick in unser eigenes. Neben kochenden Atmosphären, mondgroßen Ozeanen und rekordverdächtigen Berggipfeln wirkt unsere Erde fast schon etwas langweilig. Darüber sollten wir uns allerdings eher freuen – die Bedingungen auf unserem Planeten waren für die Entwicklung des Menschen genau richtig. (Infografik: Melina Diener, Timo Meyer)



-235 °C

zeigt das Thermometer auf dem Neptunmond Triton. Nur zum Vergleich: Der Rekordwert auf der Erde steht bei -89°C, gemessen 1983 in der Ostantarktis.



92 bar

erreicht der Atmosphärendruck an der Oberfläche der Venus. Dies entspricht dem 91-fachen des Erdluftdrucks.



169

... Vulkane hat man bisher auf dem Jupitermond Io gezählt. Doch nicht ihre Zahl, sondern die Stärke ihrer Ausbrüche macht den Mond zur Feuerhölle Nr.1. Allein sein Vulkan Loki setzt permanent mehr Wärme frei als alle irdischen Vulkane zusammen.



620 km/h

erreichen Spitzenböen im Inneren des Supersturms „Little red spot“ auf dem Jupiter – fast doppelt so viel wie der bisher stärkste Hurrikan auf der Erde.



+465 °C

herrschen auf der Venus. Für den gewaltigen Treibhauseffekt sorgt ihre extrem dichte und zu fast 97 Prozent aus Kohlendioxid bestehende Atmosphäre.

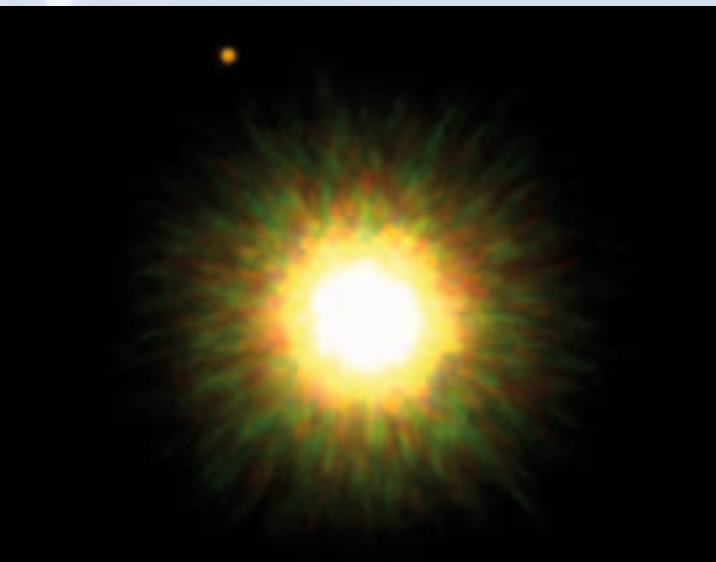


99 %

... des Sonnenlichts reflektiert der Jupitermond Enceladus. Der strahlend weiße Himmelskörper ist vollständig mit Schnee und Eis bedeckt.



◀ Wie außerirdisches Leben aussehen könnte, darüber haben sich auch Filmregisseure wie etwa Steven Spielberg Gedanken gemacht. In seinem Film „E.T.“ von 1982 holt er die Außerirdischen sogar zu uns auf die Erde. (Bild: picture-alliance/dpa)



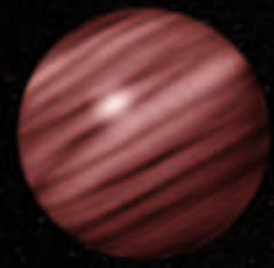
◀ Ein Bild mit Seltenheitswert: Die Aufnahme des Gemini-Observatoriums zeigt über dem Stern den schwachen Schein eines Objekts, das Astronomen für einen Exoplaneten halten. (Bild: Gemini Observatory/AURA)

vermutlich kein reiner Gesteinsplanet. Er könnte aber von einem Ozean aus Wasser bedeckt sein, wie einige Theoretiker vermuten. Voraussetzung hierfür ist allerdings die Existenz einer Atmosphäre, in der Gase wie Kohlendioxid oder Wasserdampf einen natürlichen, moderaten Treibhauseffekt entwickeln und für ein warmes, ausgeglichenes Klima sorgen.

Kandidaten für eine zweite Erde sind nur Exoplaneten, bei denen es gelingt, mit Spektrographen bestimmte Substanzen, wie Ozon oder molekularen Sauerstoff, in der Atmosphäre nachzuweisen. Diese Gase weisen auf die Aktivität von **Leben** hin. Dazu sind jedoch Messempfindlichkeiten nötig, die heute noch in weiter Ferne liegen. Bislang ist es nur unter ganz besonders günstigen Bedingungen möglich, das Spektrum eines Exoplaneten aufzunehmen – so wie im Falle von HD 189733b. In der Atmo-

sphäre dieses 62 Lichtjahre entfernten heißen Jupiter entdeckten Forscher mit dem Hubble-Weltraumteleskop Spuren von Wasserdampf, Kohlendioxid und Methan.

Eine interessante Frage, die sich die Astronomen seit langem stellen, ist: Kann jeder Stern typ Planeten besitzen, oder muss er bestimmte Voraussetzungen erfüllen? Unter den sonnenähnlichen Sternen, die man untersucht hat, scheinen nach bisherigen Beobachtungen 10 bis 20 Prozent mit Planeten ausgestattet zu sein. Möglicherweise ist der Anteil noch höher, wenn viele von ihnen von kleinen Gesteinsplaneten umgeben sind, die sich bislang nicht nachweisen lassen. Doch auch bei kühlen Zwergsternen, die nur etwa ein Drittel der Sonnenmasse besitzen, wurden Planeten gefunden, ebenso bei massereichen Sternen bis zur doppelten Sonnenmasse.



INFO

Stern oder Planet?

Was die Körper unseres Sonnensystems betrifft, fällt die Antwort stets eindeutig aus. Es gibt jedoch Objekte im All, bei denen die Grenze verwischt: die so genannten Braunen Zwerge. Sie sind weder Stern noch Planet und werden auch als „verhinderte“ Sonnen bezeichnet. Um zu verstehen warum, muss man sich anschauen, was im Inneren eines typischen Sterns geschieht.

Im Zentralgebiet eines Sterns sind Temperatur und Druck so hoch, dass Wasserstoffkerne in mehreren Stufen zu Helium verschmelzen. Dabei wird Energie frei, weil die Bindungsenergie der Kernbausteine im Helium relativ höher ist als in den einzelnen Wasserstoffatomen. So erzeugt auch unsere Sonne seit 4,56 Milliarden Jahren die für uns lebenswichtige Energie. Auf ganz ähnliche Weise sollen zukünftig Fusionsreaktoren Energie produzieren. Die Wasserstofffusion zündet aber nur, wenn der Stern mindestens sieben Prozent der Masse unserer Sonne besitzt. Planeten erreichen diese Grenze nicht. Sie bringen weniger als etwa ein Prozent der Sonnenmasse auf die Waage. In dem schmalen Bereich dazwischen existieren die Braunen Zwerge.

Auch wenn sie nicht leuchten wie ausgewachsene Sterne, reicht ihre Masse zumindest für ein kurzes Glimmen. Braune Zwerge können kurz nach ihrer Entstehung einige zehn Millionen Jahre lang Schweren Wasserstoff (Deuterium) zu Helium verbrennen. Wenn das Deuterium verbraucht ist, erlischt das Fusionskraftwerk. Der Beinahe-Stern glüht langsam aus und wird immer dunkler. So dunkel, dass Planetenjäger darauf achten müssen, den Himmelskörper nicht mit einem Exoplaneten zu verwechseln.

Braune Zwerge können durchaus auch selbst ein Sonnensystem bilden und Planeten besitzen. Nur dürfte es auf deren Oberfläche, kaum erwärmt durch ihr ausgekühltes Zentralgestirn, viel zu kalt für Leben sein. (Bild oben: Douglas Pierce-Price, Joint Astronomy Centre)

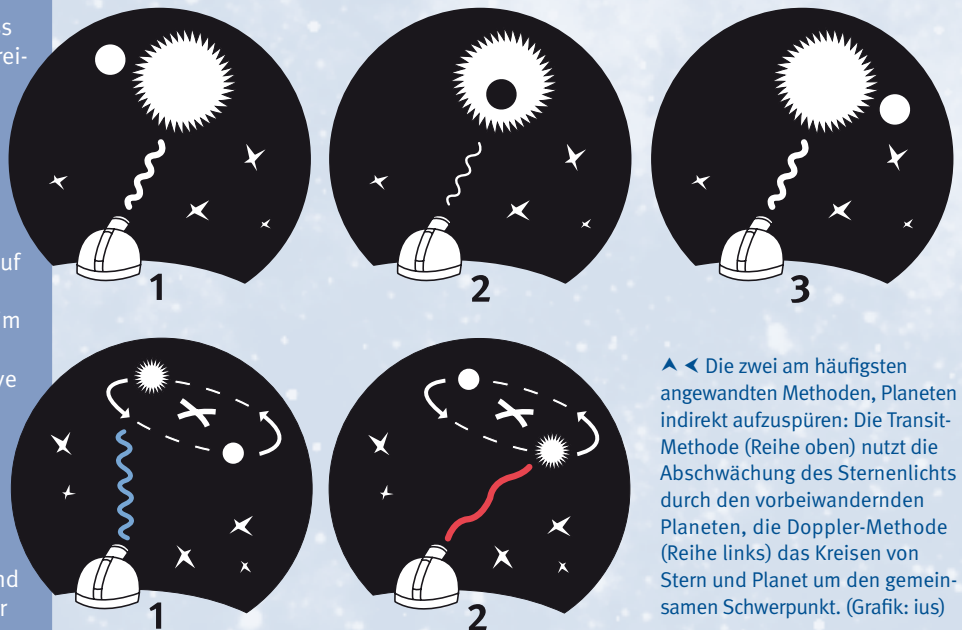
So jagt man Planeten

Exoplaneten sind meist nicht direkt sichtbar. Sie verraten sich aber beispielsweise durch ihren Einfluss auf den Zentralstern, den sie umkreisen. Stern und Planet ziehen sich gegenseitig mit ihrer Schwerkraft an und bewegen sich um ihren gemeinsamen Schwerpunkt. Von der Erde aus gesehen schwingt daher das Gestirn am Himmel mit der Umlaufperiode des Planeten auf den Beobachter zu und von ihm weg. Diese Bewegung macht sich im Spektrum des Sterns wegen des Doppler-Effekts durch eine relative Wellenlängenänderung bemerkbar.

Mit der Doppler-Methode können die Astronomen Sternbewegungen bis herunter zu etwa 1 Meter pro Sekunde messen. Zum Vergleich: Unsere Sonne bewegt sich aufgrund der Schwerkraftwirkung des Jupiter mit 12 Metern pro Sekunde um den gemeinsamen Schwerpunkt, während die viel masseärmere Erde eine Schwankung von nur 10 Zentimetern pro Sekunde verursacht. Dieses „Zeitlupentempo“ kann man mit der heutigen Doppler-Technik nicht messen; zu winzig ist die damit verbundene Wellenlängenänderung. Deshalb lassen sich auch auf diese Weise nur massereiche Planeten entdecken.

Eine andere bewährte Methode setzt eher auf Schatten als Licht: Wenn die Umlaufbahn eines Exoplaneten zufällig so liegt, dass dieser bei jedem Umlauf vor dem Stern vorbeizieht, so schwächt sich das Sternenlicht bei jedem Vorbeigang geringfügig ab. Es ereignet sich eine Art Mini-Sonnenfinsternis, die den Planeten verrät. Sein Durchmesser ergibt sich unmittelbar aus der Stärke des Lichtabfalls.

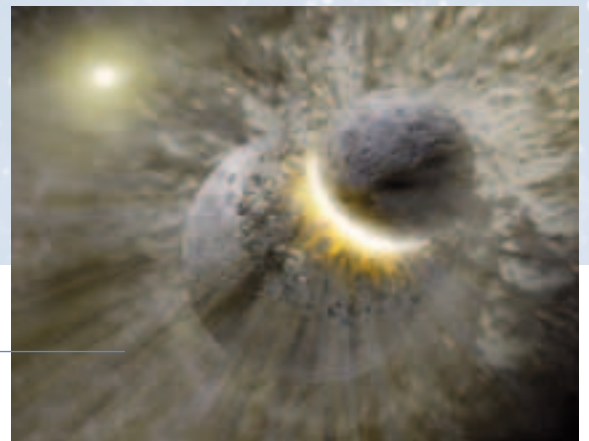
Kombiniert man die Transit-Methode mit der Doppler-Methode, so ist es möglich, die wahre Masse eines Planeten und mit dem bekannten Durchmesser auch dessen Dichte zu ermitteln. Dies ist bereits bei etwa einem Dutzend Exoplaneten gelungen – mit teils überraschendem Ergebnis: Der „leichteste“ unter ihnen ist mit 0,2 Gramm pro Kubikzentimeter gerade einmal so dicht wie Balsaholz und fast 30-mal dünner als unsere Erde.



► S. 25: Falschfarbenaufnahme des Coma-Galaxienhaufens. (Bild: NASA/JPL-Caltech/GSFC/SDSS)

▲ ◀ Die zwei am häufigsten angewandten Methoden, Planeten indirekt aufzuspüren: Die Transit-Methode (Reihe oben) nutzt die Abschwächung des Sternenlichts durch den vorbeiziehenden Planeten, die Doppler-Methode (Reihe links) das Kreisen von Stern und Planet um den gemeinsamen Schwerpunkt. (Grafik: ius)

► Zusammenstoß zweier mondgroßer Planetesimale aus Künstlersicht. (Bild: NASA/JPL-Caltech/T. Pyle (SSC))



Einige Wissenschaftler schätzen, dass bis zu zwei Drittel der Sterne in unserer Umgebung, bei denen Planeten gefunden wurden, einen relativ hohen Anteil an schweren Elementen aufweisen. Dies ließe sich gut erklären: Die chemische Zusammensetzung des Sterns entspricht nämlich in etwa derjenigen der protostellaren Scheibe, in der die Planeten entstehen. Enthält der Stern also neben seinen Hauptbestandteilen Wasserstoff und Helium auch viel Kohlenstoff, Silizium und Eisen, so gilt das auch für die Scheibe. Diese schweren Elemente bilden das Basismaterial der Staubeilchen, aus denen in einem Wachstumsprozess durch Zusammenstoß und Haftung zunächst kilometergroße Planetesimale entstehen. Diese ziehen sich mit ihrer Schwerkraft gegenseitig an und verklumpen schließlich zu großen Planetenkörpern.

Die weit entfernten Welten zu entdecken ist noch eine große Herausforderung für die Astronomen. Fast alle Exoplaneten können bislang nur indirekt nachgewiesen werden. Auf Direktaufnahmen überstrahlt sie ihr Zentralstern. Zum Vergleich: Einen heißen Jupiter direkt abzulichten, wäre in etwa so, als wolle man aus 1000 Kilometern Entfernung eine Kerze beobachten, die einen Meter neben einem Leuchtturm-Scheinwerfer flackert. Im Jahre 2008 gelang es trotzdem, einige Planeten direkt zu fotografieren. Große Fortschritte erhoffen sich die Astronomen hier von zukünftigen Teleskopen, wie dem Weltraumteleskop James Webb und dem European Extremely Large Telescope.

Das unsichtbare Universum

25

Bei der Untersuchung von Galaxiengeschwindigkeiten stieß der Astronom Fritz Zwicky 1933 auf ein Problem: Die Sternsysteme waren so schnell, dass ihre gemeinsame Schwerkraft nicht ausreichte, um sie in dem Haufen, dem sie angehörten, zu binden. Zwicky schloss daraus, „dass dunkle Materie in sehr viel größerer Dichte vorhanden sein muss als leuchtende Materie.“ Ende 1998 kam mit der Dunklen Energie eine weitere unsichtbare Komponente des Universums hinzu. Beide zählen heute zu den größten Rätseln der Kosmologie.

Was Zwicky in den 1930er Jahren an dem aus tausend Milchstraßensystemen bestehenden [Coma-Haufen](#) beobachtete, konnte bis heute an vielen weiteren Galaxienhaufen bestätigt werden: Es muss in den Haufen eine unsichtbare Form von Materie geben, die mit ihrer Schwerkraft die Galaxien aneinander bindet. Einen Teil davon entdeckten Astronomen viele Jahrzehnte nach Zwicky: Es handelt sich um mehrere Millionen Grad heißes Gas, das nur auf Röntgenaufnahmen sichtbar wird. Doch seine Masse reicht nicht aus, um die Haufen vor dem Auseinanderfliegen zu bewahren. Es bleibt ein großer unerklärbarer Rest.

Deutlich erkennbar wird die Schwerkraftwirkung der Dunklen Materie auch bei Spiralgalaxien. In ihnen rotieren alle Sterne um das Zentrum. Doch ihre Geschwindigkeiten sind so groß, dass die gemeinsame Schwerkraft aller Sterne nicht ausreicht, um sie in der Galaxie zu halten. Auch hier ist Dunkle Materie für die Stabilisierung des Sternsystems nötig.

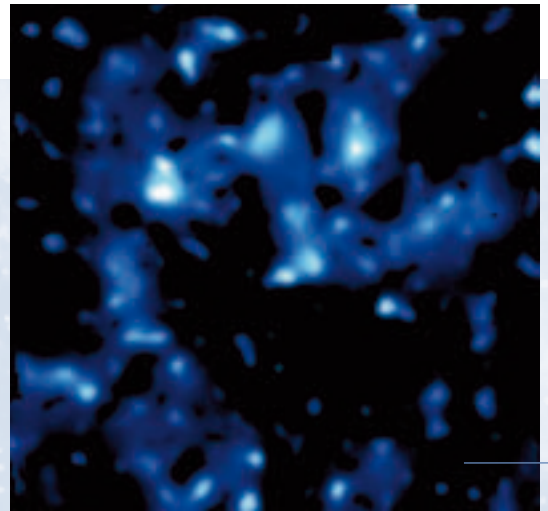
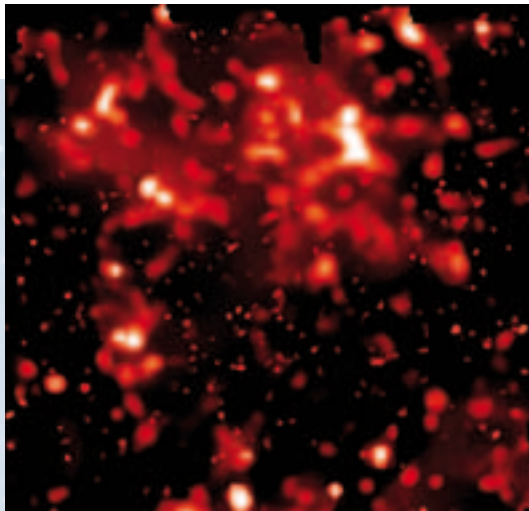
Es gibt viele weitere Möglichkeiten, Dunkle Materie indirekt nachzuweisen, stets mit dem gleichen Ergebnis: Sie sendet kein Licht aus und verschluckt auch keines, weswegen sie unsichtbar ist. Auch über

elektrische oder magnetische Felder gibt es keine nachweisbare Wechselwirkung. Einzig ihre Schwerkraftwirkung lässt sich beobachten.

Astrophysiker vermuten, dass die Dunkle Materie aus einer unbekanntem Art von Elementarteilchen besteht. Diese hat sich in riesigen Wolken angesammelt, die die Galaxien umschließen. Nach heutiger Kenntnis gibt es im Universum rund fünfmal mehr Dunkle als normale Materie, aus der die Sterne, Planeten und wir Menschen bestehen.

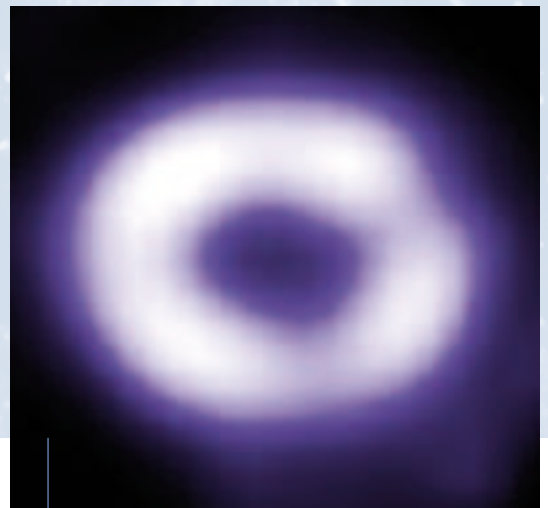
Alle bisherigen Versuche, die mutmaßlichen Dunkle-Materie-Teilchen im Labor nachzuweisen, sind gescheitert. Neue Hoffnung setzen Physiker auf die größte Maschine der Welt, den 27 Kilometer langen Teilchenbeschleuniger [Large Hadron Collider](#) am europäischen Teilchenlabor CERN in Genf. Dort werden bei Zusammenstößen von Protonen neue Teilchen ent-

➤ „Normale“ Materie (in rot) und Dunkle Materie (in blau) im Vergleich: Die Falschfarbenaufnahmen desselben Himmelsausschnitts zeigen, wie Galaxien, Sterne und Gas in ein Netz aus Dunkler Materie eingebaut sind. (Bild: NASA, ESA, and R. Massey (California Institute of Technology))



▼ Wenn durch den Ring des LHC, an dem ein Techniker hier arbeitet, fast lichtschnelle Teilchen auf Kollisionskurs gehen, ergeben sich vielleicht ganz neue Einsichten in Sachen Dunkler Materie. (Bild: © CERN)

▼ Eine der bekanntesten Supernova SN1987A im Röntgenlicht. Ein heißer Gasring umgibt den ausgekühlten und deshalb hier unsichtbaren Sternrest. (Bild: NASA/CXC/PSU/S.Park & D.Burrows)



stehen – möglicherweise auch solche, aus denen die Dunkle Materie besteht.

Während Astrophysiker noch über die Natur der Dunklen Materie grübelten, stießen Astronomen Ende 1998 auf ein vielleicht noch tiefgründigeres Phänomen. Sie hatten explodierende Sterne, so genannte Supernovae, in unterschiedlichen Entfernungen beobachtet. Nun ist der Blick in weite Entfernungen wegen der Endlichkeit der Lichtgeschwindigkeit gleichzeitig ein Blick in die Vergangenheit des Universums. So konnten die Astronomen aus der Helligkeit, mit der Supernovae erscheinen, deren Entfernung und daraus letztlich die Ausdehnungsgeschwindigkeit des Universums in der Vergangenheit ermitteln. Das Ergebnis verblüffte: Die Geschwindigkeit hat in den vergangenen Milliarden Jahren zugenommen.

Das widersprach der damaligen Lehrmeinung, wonach sich der Raum immer langsamer ausdehnen sollte, denn die Schwerkraft aller Materie im Universum sollte die Expansion abbremsen. Wenn der Raum sich stattdessen beschleunigt ausdehnt, so kann dies nur bedeuten, dass eine unbekannte Form von Energie – wie ein Druck – den Raum auseinandertreibt. Astrophysiker taufen diese Energieform „Dunkle Energie“.

Nach Einsteins berühmter Formel $E = mc^2$ sind Energie E und Masse m äquivalent und lassen sich ineinander umformen. Das c steht dabei für die Lichtgeschwindigkeit. Ordnet man auf diese Weise der Dunklen Energie eine Masse zu, so ergibt sich folgende Zusammensetzung des Alls: Dunkle Energie 73 Prozent, Dunkle Materie 23 Prozent, Materie in Sternen, Planeten und Gas 4 Prozent.

Die Dunkle Energie bedeutet eine echte Revolution in der Physik. Niemand weiß, worum es sich handelt, oder woher sie kommt. Anders als die Dunkle Materie durchzieht sie gleichmäßig das gesamte Universum. Vermutlich spiegelt sie einen Energiezustand des Vakuums wider, doch von einem Verständnis dieses Phänomens sind die Physiker noch weit entfernt. Vielleicht steckt in ihr der Schlüssel zu einem neuen Verständnis der Naturkräfte.

Der Antimaterie auf der Spur

Dunkle Materie und Dunkle Energie sind die geheimnisvollsten Zutaten im Universum. Ungewöhnlich ist auch ein weiteres Ingredienz: die Antimaterie. In Science-Fiction-Romanen ist sie meist Stoff für sagenhafte Raketenantriebe; in der realen

Beschuss aus dem All

Unser ganzes Leben lang sind wir Menschen einem Beschuss kosmischer Teilchen ausgesetzt. Mit nahezu Lichtgeschwindigkeit durchbohren sie unseren Körper. Doch es ist fast wie ein Wunder: Wir bemerken sie nicht, und sie fügen uns keinen Schaden zu. Die Teilchen sind so klein, dass sie mit Materie fast keine Wechselwirkung eingehen.

Überwiegend handelt es sich bei ihnen um Neutrinos, die zum größten Teil im heißen Urknall entstanden sind, andere werden immer noch bei Kernreaktionen im Innern der Sonne freigesetzt. Weitere Teilchen (Sekundärteilchen), wie Myonen, Protonen und Elektronen, entstehen, wenn Partikel aus dem Kosmos in die Atmosphäre hineinrasen und dort mit Atomkernen zusammenstoßen. Diese zerplatzen in viele neue Teilchen, die in weiteren Kollisionen noch mehr Teilchen losschlagen und so eine wahre Lawine auslösen. Letztlich ist das Universum auch angefüllt mit Dunkle-Materie-Teilchen, deren Zahl sich aber nur schätzen lässt.

Übrigens: In der Zeit, die Sie zum Lesen dieses Textblockes benötigt haben, sind mehr als 200 Billionen Teilchen durch diese Magazineinseite gerauscht, darunter:

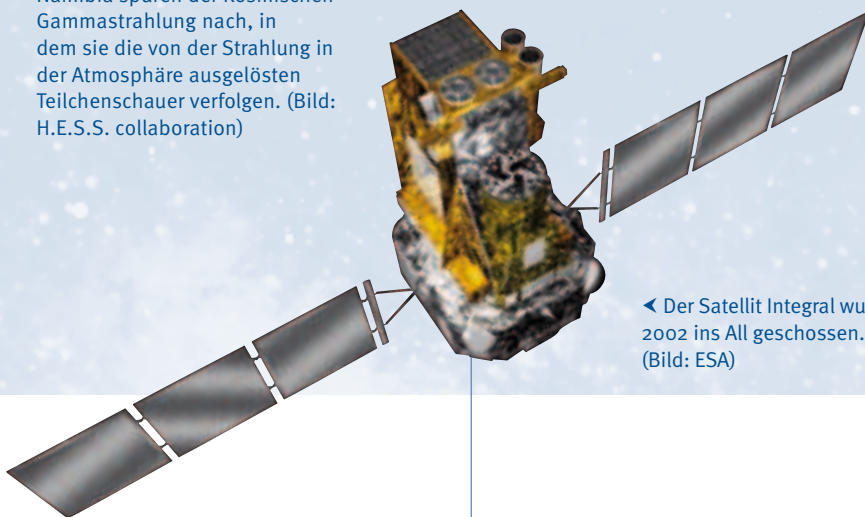
- 1 Billiarde Sonnenneutrinos
- 200 Billionen Neutrinos aus dem Urknall
- 200 Millionen Dunkle-Materie-Teilchen
- 1,5 Millionen Elektronen*
- 40.000 Protonen*
- 20.000 Neutrinos*
- 800 Myonen*

* als Sekundärteilchen der kosmischen Strahlung

Positronen in den heißesten Bereichen dieser Scheiben. Treffen sie auf Elektronen, so vernichten sie sich, und übrig bleibt die von Integral gemessene Gammastrahlung.



▲ Die H.E.S.S.-Teleskope in Namibia spüren der Kosmischen Gammastrahlung nach, in dem sie die von der Strahlung in der Atmosphäre ausgelösten Teilchenschauer verfolgen. (Bild: H.E.S.S. collaboration)



◀ Der Satellit Integral wurde 2002 ins All geschossen. (Bild: ESA)

Welt hat man sie bisher nur in kleinen Mengen im Labor erzeugen können.

In der Natur kommen Atome oder ganze Moleküle aus Antimaterie nicht vor. Und das aus folgendem Grund: Ein Teilchen und sein Antiteilchen haben die gleiche Masse, ansonsten jedoch entgegengesetzte Eigenschaften. Begegnen sich Materie- und Antimaterieteilchen, so lösen sie sich vollständig in Energie auf.

Im Urknall ist nach heutigem Wissen Materie und Antimaterie in fast gleicher Menge entstanden – aber eben nur fast. Aus bislang nicht gänzlich geklärter Ursache muss damals beim Zerstrahlen von jeweils mehreren Milliarden Materie-Antimaterie-Paaren ein Teilchen übrig geblieben sein. Dieser winzige Überschuss bildet heute die insgesamt im Universum vorhandene Materie.

Um so erstaunter waren Astronomen, als sie vor 30 Jahren aus dem Zentralbereich der Milchstraße Gammastrahlung registrierten, die von der Vernichtung von Elektronen und Anti-Elektronen, den so genannten Positronen, stammte. Viele Theorien wurden aufgestellt, um die Herkunft der Antimaterie zu erklären. Auch exotische Erklärungen, wonach diese entstehen, wenn Teilchen der hypothetischen Dunklen Materie zerfallen, wurden diskutiert.

Beobachtungen mit dem europäischen [Gammaweltraumteleskop Integral](#) deuten nun darauf hin, dass Positronen in sogenannten Röntgen-Doppelsternen entstehen: Ein kompakter Neutronenstern oder ein Schwarzes Loch zieht von einem Begleitstern Materie ab, die sich in einer heißen Gasscheibe um den kompakten Körper ansammelt. Vermutlich entstehen die