

**IMPRESSUM:****HERAUSGEBERIN:** Schulleitung der ETH Zürich**REDAKTION:** Lic. phil. I Martina Märki-Koepp (mm), Redaktionsleitung  
Vanja Lichtensteiger-Cucak (vac), En bref  
Roman Klingler, Alumni Aktuell  
Corporate Communications der ETH Zürich  
ETH Zentrum, 8092 Zürich  
Tel. 01-632 42 52 Fax 01-632 35 25**FREIE MITARBEIT:** Stephanie Scholz, Fach-/Bildredaktion Schwerpunkt Universum  
Andreas Koch, Bildbeschaffung**INSERATE:** Go! Uni-Werbung, Rosenheimstr. 12  
9008 St. Gallen, Tel. 071-244 10 10**GESTALTUNG:** inform, Zürich**DRUCK:** NZZ Fretz AG, Zürich**AUFLAGE:** Erscheint 4-mal jährlich  
Auflage dieser Ausgabe 26 000**TITELBILD:** Die 50 Millionen Lichtjahre entfernte Sombrero-Galaxie (M104)  
im Sternbild Jungfrau, aufgenommen mit FORS1, dem  
Focal Reducer/low dispersion Spectrograph, am Very Large Telescope in Chile.  
Bild: ESO

Nachdruck mit Quellenangabe erwünscht. Die nächste Ausgabe, Nr. 291, zum Thema  
«Informationsgesellschaft» erscheint im November 2003.  
Bulletin ist auch abrufbar unter: <http://www.cc.ethz.ch/bulletin/>

# INHALT

- 6\_ Entwicklung antiker Weltmodelle  
**DIE SUCHE NACH DER MITTE  
DES KOSMOS**  
Alfred Stückelberger
- 10\_ Entwicklung der Teleskope  
**DER BEWAFFNETE BLICK ZUM HIMMEL**  
Alex Feller
- 14\_ Der Blick ins Universum  
**EINE REISE DURCH RAUM UND ZEIT**  
Simon Lilly
- 18\_ Röntgen- und Radiowellen im Universum  
**DAS UNSICHTBARE UNIVERSUM**  
Paolo Grigis und Arnold O. Benz
- 20\_ Teilchenphysik und Kosmologie  
**ARCHÄOLOGIE DES UNIVERSUMS**  
Felicitas Pauss
- 23\_ Entstehung des Sonnensystems  
**METEORITEN ALS ZEUGEN KOSMISCHER  
GESCHICHTE**  
Rainer Wieler
- 26\_ Sternentstehung  
**AUS EIS UND STAUB GEBOREN**  
Arnold Benz
- 29\_ Sonnenphysik  
**DIE SONNE – UNSER NÄCHSTER STERN**  
Jan Olof Stenflo
- 32\_ Galaxien und ihre Entstehung  
**DIE VERWANDTEN DER MILCHSTRASSE**  
C. Marcella Carollo
- 36\_ Quasare  
**LEUCHTTÜRME IM UNIVERSUM**  
Hans Martin Schmid
- 38\_ Leben im Universum  
**DIE SUCHE NACH BEWOHNBAREN  
PLANETEN**  
Simon Lilly und Alex Halliday
- 42\_ Neue Kosmologie  
**DAS «DICHT-BUDGET» DES UNIVERSUMS**  
Alexandre Sakharov und Hans Hofer
- 46\_ Die Zukunft des Universums  
**QUO VADIS UNIVERSUM?**  
Fred C. Adams
- 50\_ **SURFTIPPS FÜR STERNGUCKER**
- 52\_ En bref  
**EREIGNISSE AN DER ETH**
- 60\_ Alumni Aktuell



*Deep-Field-Aufnahme im Sternbild Sextant, aufgenommen mit der Weitfeldkamera WFI am 2,2-m-Teleskop der ESO/MPG auf LaSilla, Chile. Komposit aus einer V-Aufnahme (100 min. belichtet) und einer R-Aufnahme (290 min. belichtet). Bild: Klaus Meisenheimer, Christian Wolf, Henning Christ; MPIA*

# DAS DYNAMISCHE UNIVERSUM

MARTINA MÄRKI-KOEPP

Erinnern Sie sich noch an die Nächte in Ihrer Kindheit, in denen Sie schlaflos im Bett lagen und sich fassungslos die Unendlichkeit des Universums vorzustellen versuchten? Die Frage, was eigentlich hinter dem Universum liegt, konnte niemand wirklich zufrieden stellend beantworten, und das Vertrauen in die Allwissenheit der Erwachsenen bekam erste Risse. Heute liegt mein jüngster Sohn gelegentlich so im Bett, und vor lauter Nachdenken wird ihm dann ganz schwindelig. Manchmal darf ich mit ihm gemeinsam nachdenken und staunen – und seine Fragen bleiben letztlich ebenso unbeantwortet wie Ihre und meine. Aber vielleicht lernen wir gemeinsam, dass Fragen viel produktiver sind als Antworten.

Als Galileo Galilei sein Fernrohr zum ersten Mal auf den Mond richtete, in einem Garten in Padua an einem klaren Herbstabend des Jahres 1609, ahnte er noch nicht, dass er das Weltbild einer Epoche erschüttern und verändern würde: Die Erde war nicht das Zentrum des Universums, sondern bewegte sich um die Sonne. Er arbeitete damals mit einem Instrument, das die Objekte in 20facher Vergrößerung vor das Auge holte. Es dauerte weitere Jahrhunderte, bis man erkannte, was Teleskope wirklich waren, nämlich eigentliche Zeitmaschinen, die erlaubten, nicht nur weit entfernte Objekte zu betrachten, sondern tatsächlich in die Vergangenheit des Universums zu schauen. Die Antwort auf die Frage, wo das Universum endet, lautete von nun an nicht mehr «Dort, jenseits dieser Galaxien», sondern «Damals: am Anfang der Zeit». Auf dem Weg ins 3. Jahrtausend begleitet uns schliesslich eine neue Vorstellung vom Universum: ein furioses Panorama von unablässigem Werden und Vergehen, Geburt und Tod von kosmischem Ausmass. Denkbar wurde nicht nur der Anfang, sondern auch das mögliche Ende des Weltalls. Und wir wissen, dass es uns im Zeitalter der Teleskope nur gelungen ist, einen winzigen Teil des Universums zu entdecken. 90 bis 99% des Universums dagegen, die so genannte «dunkle Materie» liegt jenseits aller Wellenlängen, unmessbar, ausser durch den Schwereinfluss der Materie.

1936 schrieb Edwin Hubble: «Die Geschichte der Astronomie ist eine Geschichte der sich erweiternden Horizonte.» ETH Bulletin zeigt einen kleinen Ausschnitt aus dieser scheinbar unendlichen Geschichte – und was Forscherinnen und Forscher der ETH heute dazu beitragen.



**Martina Märki-Koepp**  
Redaktorin ETH-Bulletin

# DIE SUCHE NACH DER MITTE DES KOSMOS

ALFRED STÜCKELBERGER

Schon immer wollten die Menschen wissen, wie das Universum aussieht und welchen Platz unsere Erde darin einnimmt. Die Naturphilosophen der griechischen Antike versuchten erstmals, diese Fragen ohne Hilfe der Mythologie zu beantworten.



Planisphärische Darstellung des Fixsternhimmels (Codex Bernensis 88, 10. Jh.)

Die Frage nach der Beschaffenheit des Erdkörpers und seiner Lage im Kosmos gehört zu den zentralsten Problemkreisen, mit denen sich die frühgriechische Naturphilosophie befasste, aus der sie überhaupt hervorging. Wenn Anaximenes von Milet (6. Jh. v. Chr.) die Erde mit einer «platten schwebenden Scheibe» oder Anaximander von Milet (6. Jh. v. Chr.) mit einer «im unbegrenzten Raum schwebenden Säulentrommel, dreimal so breit wie dick» vergleicht, dann ist daran vor allem der Wille eindrücklich, mit Verstandeskraft, ohne Zuhilfenahme mythologischer Erklärungen, ein Gesamtkonzept des ganzen Kosmos zu entwerfen – ein Bestreben, zu dem es in den umliegenden Hochkulturen keine Parallelen gibt.

### Von der Scheibe zur Kugel

Erstaunlich früh hat sich bereits die Vorstellung von der Kugelgestalt der Erde entwickelt. Sie dürfte, vorerst noch spekulativ, im Kreise der Pythagoreer aufgekommen sein. Der älteste Beleg findet sich bei Platon, der persönliche Kontakte mit Pythagoreern pflegte. Er vergleicht im «Phaidon» (um 365 v. Chr.) die Erde mit einem Lederball. Nun liessen allerdings die bekannten Beobachtungen von Schiffen, die am Horizont verschwinden, oder von Sternen, die je nach Beobachtungsort ihre Höhe über dem Horizont verändern, lediglich auf eine gekrümmte Erdoberfläche schliessen. Darum ist der erste mathematisch einschlägige Beweis für die durchgehende Kugelgestalt der Erde von besonderer Bedeutung: Aristoteles argumentiert absolut schlüssig in seiner Schrift «De caelo» (um 350 v. Chr.), dass bei Mondfinsternissen die Projektion des Erdschattens auf den Mond immer kreisrund sei, der dazwischentretende Körper – die Erde – somit kugelförmig sein müsse.

War die Kugelgestalt der Erde erkannt, lag es nahe, sich Gedanken über deren Dimensionen zu machen. Die Erdumfangsberechnung des Eratosthenes (um 250 v. Chr.) gehört zu den Glanzresultaten antiker Wissenschaften: Er mass zur Zeit des Sommer-solstitiums die Winkeldifferenz der einfallenden Sonnenstrahlen in Syene (heute Assuan, fast genau auf dem Sommerwendekreis) sowie an seinem Wirkungsort Alexandria. Dann multiplizierte er den gemessenen Wert von  $\frac{1}{50}$  des Kreisbogens mit der Basisstrecke Alexandria–Syene von 5 000 Stadien. Er erhielt so einen Erdumfang von 250 000 Stadien bzw. von etwa 39 000 km bis 41 000 km (je nach Umrechnung) – ein Wert, der bis ins 17. Jh. nicht verbessert worden ist.

### Von der Kristallsphäre zu den Epizyklen

In archaischer Zeit taucht die Vorstellung auf, dass die Fixsterne «wie Nägel an einer unsichtbaren kristallartigen Sphäre befestigt seien» und mit dieser den täglichen Umschwung vollzögen (Anaximenes und Empedokles im 6./5. Jh. v. Chr.). Die mehr volkstümliche, noch bis ins Mittelalter anzutreffende Vorstellung von Kristallsphären, die sogar harmonische Sphärenklänge erzeugten (im Schlussmythos von Platons Staat), war allerdings bei Astronomen längst der Annahme von immateriellen, rein mathematischen Modellen gewichen. Dabei wurde etwa von Geminos (1. Jh. v. Chr.) sogar in Erwägung gezogen, dass die einzelnen Fixsterne verschieden weit entfernt sein könnten.

Von den Babyloniern her war bekannt, dass – neben Sonne und Mond – noch fünf weitere Himmelskörper in entgegengesetzter Richtung selbständige Bahnen ziehen. Somit waren neben der Fixsternsphäre noch 7 weitere anzunehmen: Das populäre Modell mit der Erde im Zentrum und den 8 um sie kreisenden Sphären war damit gegeben.

Bei näherem Zusehen stellte man jedoch fest, dass die 5 Planeten viel kompliziertere Bewegungen ausführten: Sie blieben mitunter stehen, liefen zurück oder bildeten Schleifen. Also musste man zur Erklärung der Planetenbahnen weitere Sphären postulieren. Unter der bis Kepler unangefochtenen Annahme, dass bei Himmelskörpern nur Kreisbewegungen möglich seien, behalf man sich mit sog. Epizyklen, auf denen man die Planeten rotieren liess (Abb. 1). Eudoxos (4. Jh. v. Chr.), ein Zeitgenosse Platons, brauchte zur Erklärung aller festgestellten Anomalien 26 Sphären, Kallippos 34 und Aristoteles, diese Erklärungsmethode auf die Spitze treibend, schliesslich deren 55.

### Vom geozentrischen zum heliozentrischen Weltbild

Mit diesen Erklärungsmodellen hatte man recht brauchbare Näherungswerte für die Planetenbahnen gefunden: Man kannte die Abstandsreihenfolge, die ungefähren Umlaufzeiten und die Neigung ihrer Bahnen. Allein vom geozentrischen Standpunkt aus liessen sich die Planetenbewegungen, besonders bei den inneren Planeten, nie widerspruchlos erklären. Darum hatte Aristarch von Samos, «um die Himmelsphänomene zu retten», um 250 v. Chr. die kühne These aufgestellt, «dass die Erde sich um ihre Achse und gleichzeitig in einem ge-

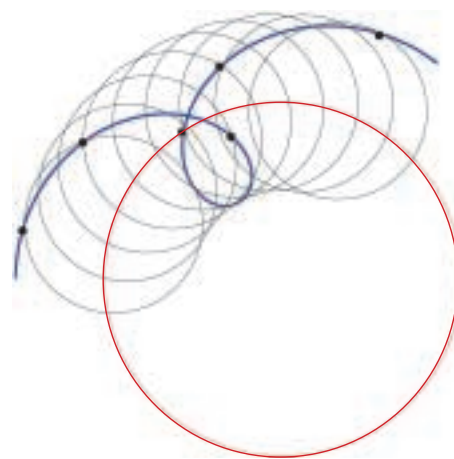


Abb. 1: Mit Hilfe von Epizykeln (schwarz), Kreisen, die auf Kreisen rollen, konnte Ptolemaios die Rückläufigkeit der Planeten erklären. Bild: St. Scholz, A. Koch

neigten Kreis um die Sonne bewege». Damit hatte er zum ersten Mal in der Antike ein heliozentrisches Weltbild entworfen. Das heliozentrische Weltbild wurde in der Folgezeit in Fachkreisen gelegentlich diskutiert, hatte aber – nicht nur in der Antike – gegenüber der Macht der Alltagserfahrung einen schweren Stand. Schliesslich sprechen wir heute auch noch von Sonnenaufgang statt etwa von Erdzuwendung. Besonders folgenschwer war, dass sich Ptolemaios, der grosse Astronom in der ausgehenden Antike, in Kenntnis des Aristarch dezidiert für das geozentrische Weltbild entschieden und damit das sog. «Ptolemäische Weltbild» für anderthalb Jahrtausende festgeschrieben hatte. Wenig bekannt ist der Umstand, dass er dies nicht aus Starrsinn oder Konservatismus tat, sondern aus einer mathematisch absolut schlüssigen Überlegung: Wenn die Erde eine Umlaufbahn um die Sonne machen sollte – seit Aristarchs Abstandsberechnungen von Sonne und Mond hatte man immerhin eine gewisse Vorstellung von deren Dimension –, dann müssten sich doch Veränderungen am Fixsternhimmel einstellen, d. h., es müssten sich Parallaxen der Fixsterne ergeben. Solche Parallaxen liessen sich aber nicht nachweisen.

Als Kopernikus das Konzept eines heliozentrischen Weltbildes wieder aufgriff (in seinem 1543 erschienenen Werk «De revolutionibus orbium caelestium» beruft er sich ausdrücklich auf Aristarch von Samos), war die Welt noch nicht dafür bereit. Selbst der grosse Astronom Tycho Brahe lehnte es ab. Erst in einem mühevollen Ablösungsprozess konnte sich der Paradigmenwechsel vollziehen. Durch die Beobachtung der Supernovae von 1572 und 1604, durch die Entdeckung der Jupitermonde und der Venus-



Abb. 2: Das Ptolemäische Weltsystem stark vereinfacht. (Kupferstich 1742, aus «Wandel des Weltbildes» von Prof. J. Teichmann)

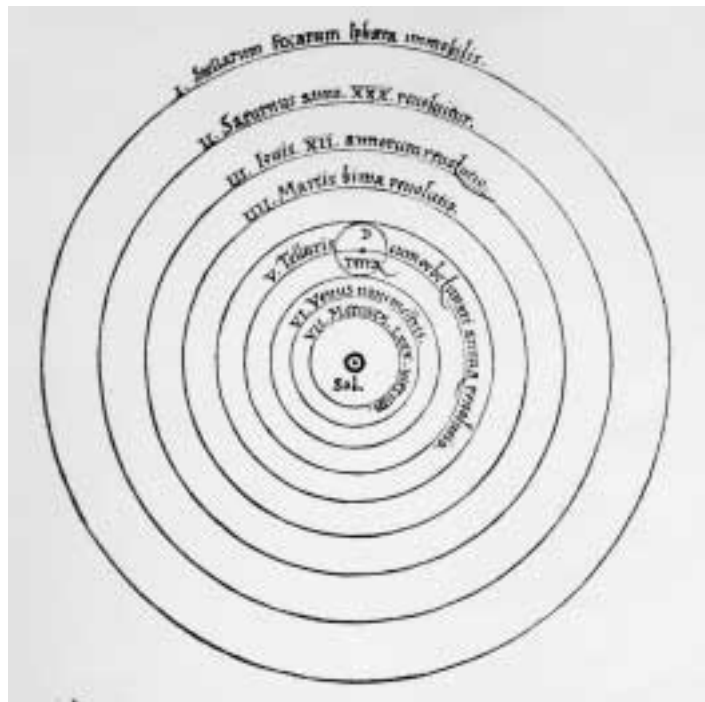


Abb. 3: Das Weltsystem des Kopernikus, von ihm selbst vereinfacht dargestellt. Die Sonne steht im Zentrum der Welt. Die Erde hat nur den Mond als Trabanten behalten und kreist mit ihm um die Sonne. (Holzschnitt 1543, aus «Wandel des Weltbildes» von Prof. J. Teichmann)

phasen durch Galilei («Sidereus Nuntius» von 1610), durch die Erkenntnis der elliptischen Umlaufbahnen der Planeten durch Kepler (1609 in seiner «Astronomia nova») wurde das aristotelische Weltbild Schritt für Schritt demontiert. Dennoch blieb der Widerstand gegen das heliozentrische Weltbild so gross, dass Galilei seine Befürwortung des kopernikanischen Weltbildes in seinem «Dialogo» (1632) bekanntlich abschwören musste; dieses Werk blieb bis 1835 auf dem «Index der verbotenen Bücher».

Das Argument des Ptolemaios gegen das heliozentrische Weltbild, mit dem sich Galilei ausführlich auseinandersetzte, konnte allerdings auch er nicht widerlegen. Erst 1838, als auch die Sonne ihre zentrale Stellung im All bereits verloren hatte, gelang es Friedrich W. Bessel, bei 61 Cygni eine Fixsternparallaxe vom verschwindenden Betrag von ca.  $\frac{1}{3}$  Bogensekunde nachzuweisen und damit Ptolemaios endgültig zu widerlegen.

### Astrophysikalische Ansätze

Weit verbreitet war – nicht nur bei den Griechen – die Vorstellung, dass die Gestirne göttliche Wesen seien; die 7 Planetengötter, die unseren Wochentagen die Namen gaben, zeugen noch davon. Mit dieser mehr populären Vorstellung vertrug sich durchaus das brillante, durch seine Einfachheit bestechende dualistische Kon-

zept des Aristoteles, das von der Stoa, vom Neuplatonismus, von der Scholastik des Mittelalters übernommen wurde und bis zu Galilei seine Dominanz behalten sollte: Im Zentrum liegt die Erde mit ihren vier Elementen, die sich in einem ständigen Veränderungsprozess befinden. Darüber wölbt sich die ewige, unveränderliche Zone der Gestirne mit ihren vollkommenen Kreisbewegungen, in der ganz andere Gesetze herrschen und die notwendigerweise auch einem anderen, «göttlicheren» Element, dem «Aether» oder der später so genannten «Quinta Essentia», vorbehalten blieb. Angesichts solcher Vorstellungen ist der heftige Widerstand verständlich, der aufkam, als schon Demokrit (5. Jh. v. Chr.) behauptete, «es gebe viele Kosmen» und das ganze All bestehe nur aus «Atomen und leerem Raum», oder wenn Anaxagoras (5. Jh. v. Chr.), angeregt durch die Beobachtung eines Meteoritenfalls, die Sonne für einen «feurigen Klumpen» hielt und den Mond als ein «Gebilde aus Erde» bezeichnete: Demokrit ist des Atheismus bezichtigt und Anaxagoras sogar vor Gericht gezogen worden – der Galilei-Prozess scheint vorgespurt.

In dieselbe Richtung geht die einzige aus der Antike erhaltene «astrophysikalische» Schrift, der Traktat des Plutarch «Über das Mondgesicht» (Ende 1. Jh. n. Chr.), in welchem – ganz antiaristotelisch – ein Gesprächspartner aus den seltsamen Flecken auf der Mondoberfläche den Schluss zieht, dass der Mond eine ähnliche Beschaffenheit haben müsse wie die Erde.

Dieser mehr spekulative Kenntnisstand behielt durch das ganze Mittelalter und die Renaissance hindurch weitgehend seine Gültigkeit und erfuhr erst durch Newtons Entdeckung, dass diese Gravitationskräfte auch im kosmischen Raum wirken, die entscheidende Wende («Philosophiae naturalis principia mathematica 1687»).

#### Literatur

A. Stückelberger, Einführung in die antiken Naturwissenschaften, Darmstadt 1988.  
ders., Ptolemaios und das heliozentrische Weltbild, in: Antike Naturwissenschaft und ihre Rezeption 8, 1998, 83–99.

#### Forschungsinformationen

Prof. Stückelbergers Forschungsschwerpunkte sind die antiken Naturwissenschaften und ihre Rezeptionsgeschichte; besondere Beachtung schenkt er den antiken wissenschaftlichen Illustrationen.  
[www.kps.unibe.ch/stueckelberger3.html](http://www.kps.unibe.ch/stueckelberger3.html)  
[www.ptolemaios.unibe.ch](http://www.ptolemaios.unibe.ch)

#### Prof. Dr. Alfred Stückelberger

Leiter der Ptolemaios-Forschungsstelle am Institut für Klassische Philologie der Universität Bern

# Falls Sie nach der Hochschule noch höher wollen.

Da Sie jetzt lange die Hochschule besucht haben, werden Sie Ihre beruflichen Ziele hoch stecken. Und damit Sie diese auch erreichen, helfen wir Ihnen kräftig. Ob als Hotshot oder Trainee: Steigen Sie am besten noch heute bei Swisscom ein. Bei der Nr. 1 der Telekommunikation. Sie erhalten das breiteste Angebot, wahlweise bei Swisscom Fixnet, Swisscom Mobile, Swisscom Enterprise Solutions, Swisscom Systems, Swisscom IT Services, Swisscom Innovations oder Bluewin – wir freuen uns auf Sie!

[www.swisscom.com/getintouch](http://www.swisscom.com/getintouch)



# DER BEWAFFNETE BLICK ZUM HIMMEL

ALEX FELLER

**Der Astronom der Renaissance blickte auf den gleichen Sternenhimmel wie seine Vorgänger in der Antike. Dem blossen Auge bot sich ein nahezu statisches Universum. Nach Galilei sollte sich dies ändern. Die Erweiterung der menschlichen Wahrnehmung durch das Teleskop erlaubte es, Neues zu sehen, und veränderte unser Bild vom Universum vollständig. Die Entwicklung der Teleskope, insbesondere der Übergang von erdgebundenen zu satellitengestützten Teleskopen, brachte der astrophysikalischen Forschung enorme Fortschritte.**

Galileo Galilei richtete im Jahr 1609 sein erstes selbst gebautes Linsenfernrohr auf den Himmel. Diese holländische Erfindung eröffnete der Astronomie eine neue Epoche mit ungeahnten Möglichkeiten. So konnte erstmals beobachtet werden, dass andere Planeten von Monden umwandert wurden, die Erde somit nicht alleiniges Zentrum aller Bewegungen sein kann. Galileos Fernrohre hatten ein konvexes Objektiv und ein konkaves Okular. Sie vergrösserten die betrachteten Objekte bis zu zwanzigmal (Abb. 1). Nach der Veröffentlichung von Galileis «Sternenbote» (1610), einer wichtigen empirischen Unterstützung des kopernikanischen Weltsystems, wurde das Teleskop zum begehrten Hilfsmittel für jeden Mitstreiter in der kosmologischen Debatte. Überall in Europa wuchs sowohl die Nachfrage nach dem Instrument als auch das Interesse an der Verbesserung seiner Leistung. Johannes Kepler verwendete ab 1611 in seinem Fernrohr ein konvexes Okular.

Das so modifizierte Instrument hatte ein grösseres Gesichtsfeld und man konnte Messskalen in der Bildebene des Objektivs anbringen.

Im 17. Jahrhundert bestanden die Linsen aus einem einzigen Glas und konnten nur kugelförmig geschliffen werden. Die Auflösung der Fernrohre war dadurch stark beeinträchtigt: die schlimmsten optischen Fehler waren die sphärische und die chromatische Aberration. Man half sich, indem man nur leicht gekrümmte, langbrennweitige Linsen verwendete und mittels Blenden das einfallende Licht auf den Zentralbereich der Linsen beschränkte. Dadurch ging jedoch viel Licht verloren, und die Fernrohre waren schwer zu handhaben. Johann Hevelius, ein deutscher Beobachter dieser Zeit, besass z.B. Teleskope von bis zu 50 m Länge.

## Spiegel statt Linsen

1663 entwarf der schottische Mathematiker James Gregory ein Teleskop, bei dem er die Objektivlinse durch zwei sphärische Konkavspiegel ersetzte. Ein paar Jahre später baute sich Isaac Newton in Cambridge ein kleines Spiegelteleskop (Abb. 1). Seine Hauptmotivation war die Beseitigung der chromatischen Aberration, die er im Rahmen seiner «Neuen Theorie über Licht und Farben» (1672) als Konsequenz der Lichtbrechung erkannt hatte. Es sollten jedoch noch zwei Jahrhunderte vergehen, bis das Spiegelteleskop zum dominierenden Instrument in der Astronomie wurde.

## Das Teleskop als Winkelmessgerät

In der zweiten Hälfte des 17. Jahrhunderts begann man, mit Messskalen in der Brennebene des Objektivs zu experimentieren, um die Position der Beobachtungsobjekte im Okular präzise ablesen zu können. Bald wurden die klassischen Winkelmessgeräte mit Teleskopen kombiniert, um die Genauigkeit der Positionsmessungen zu steigern. Ein Beispiel ist das Passageinstrument (Abb. 3, siehe S. 12).

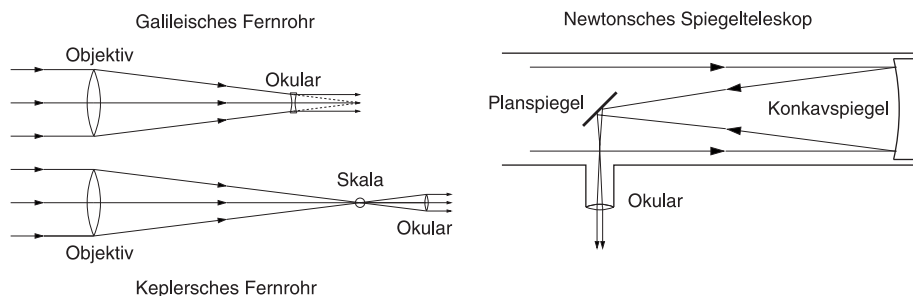


Abb. 1: Links: Strahlengang im galileischen und keplerschen Linsenfernrohr. Rechts: Strahlengang im newtonschen Spiegelteleskop.



Abb. 2: Das HST in seiner Umlaufbahn während einer Wartungsmission. Astronauten befinden sich ausserhalb des Shuttles, um neue Instrumente zu installieren. Unsere Erde bietet einen spektakulären Hintergrund. Eine neue Wartungsmission im Jahr 2004 soll das HST mit einer empfindlicheren Kamera, der Wide-Field-Camera 3, ausstatten, welche vom ultravioletten bis zum nah-infraroten Wellenlängenbereich arbeitet. Bild: NASA

## Optische Teleskope im 19. und 20. Jahrhundert

Im 19. Jahrhundert konzentrierten sich die Teleskopbauer auf die Linsenfernrohre. Man machte grosse Fortschritte in der Herstellung optisch hochwertiger Glassorten. Das wachsende Know-how der Optikfirmen beim Schleifen von Linsenoberflächen und die Verwendung von achromatischen Linsen reduzierten die störenden optischen Fehler der Linsenfernrohre erheblich. Unter den Linsenherstellern ist besonders der Deutsche Joseph Fraunhofer zu nennen. Seine Nachfolger, Merz und Mahler, lieferten 1846 eine Objektivlinse von etwa 1 m Durchmes-

ser an das Yerkes Observatory der Universität Chicago für das grösste je gebaute Linsenteleskop.

Mit der Einführung der Photographie und der Spektroskopie in die Astronomie zeigten die ausgereiften Linsenteleskope wieder eine alte Schwäche. Die achromatischen Linsen waren für visuelle Beobachtungen entworfen worden, die Photoplatten waren jedoch über den sichtbaren Spektralbereich hinaus empfindlich. Die Konsequenzen waren z. B. unscharfe Weisslichtbilder oder defokussierte Abschnitte von Sternspektren. Das Interesse an den farbfehlerfreien Spiegelteleskopen wurde wieder geweckt. Wie aber konnte man die Spiegel verbes-

sern, um eine vergleichbare Abbildungsqualität wie bei Linsen zu erhalten? Die ersten Spiegel des 17. Jahrhunderts wurden aus einer Kupfer-Zinn-Legierung gefertigt – eine wenig zufrieden stellende Lösung. Das Metall war schwer zu formen, beschlug schnell und musste daher ständig neu poliert werden, wobei wiederum die Gefahr bestand, die Spiegelform zu verändern. Um 1853 entwickelte der deutsche Chemiker Justus von Liebig ein Verfahren, um eine sehr dünne Silberschicht auf einer Glasoberfläche aufzubringen. Nun konnten die Optikerhersteller ihr Können beim Schleifen von Glasoberflächen auch in der Spiegelherstellung einsetzen. Das neue Verfahren brachte

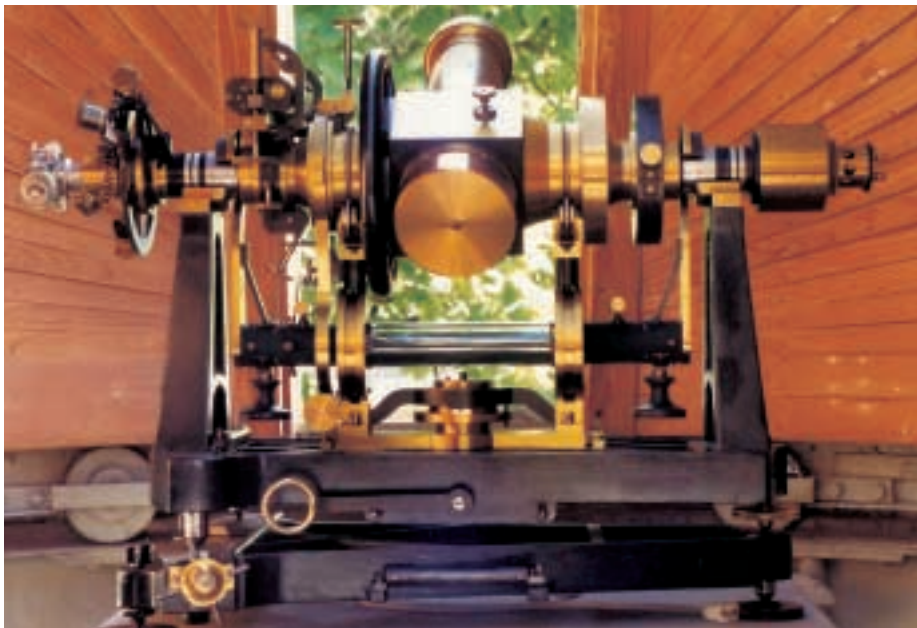


Abb.3: Passageinstrument (19. Jh.) aus der ETH-Sammlung Sternwarte. Das Fernrohr kann in der Nord-Süd-Ebene (Meridian) gedreht werden. Die Koordinate auf dem Himmelsäquator, die Rektaszension, wird aus der Zeit des Durchgangs des Sterns durch den Meridian bestimmt.

wichtige Vorteile gegenüber der Herstellung von Linsen. Erstens musste das Licht nicht durch das Glas hindurch. Man konnte also Glasblöcke von geringerer optischer Qualität verwenden und so grössere Öffnungen fertigen. Zweitens musste nur eine Oberfläche geschliffen werden anstelle der vier für eine achromatische Linse.

In der Folgezeit wurde das Spiegelteleskop zum bevorzugten Instrument. In der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts wurden Spiegel in einem Stück von 2,5 m bis 5 m Durchmesser angefertigt. Die Teleskope waren nun leistungsfähig genug, um z. B. Sternspektren aufzunehmen oder sehr schwache extragalaktische Lichtquellen zu untersuchen. Ein weiterer Leistungssprung gelang in den 60er Jahren mit einer neuen Generation von Grossteleskopen, die aus mehreren Segmenten zusammengesetzt sind und deren kombinierte Spiegelflächen Durchmesser von 10 m bis 20 m entsprechen.

Diese Entwicklung ging einher mit einer Entprivatisierung der Observatorien. Waren führende Beobachter des 19. Jahrhunderts, wie z. B. Herschel oder Rosse, noch zugleich Erbauer und Eigentümer ihrer Teleskope, so werden Bau und Betrieb von professionellen Observatorien im 20. Jahrhundert zu einer nationalen oder auch internationalen Angelegenheit. Beispiele sind die staatlich finanzierte AURA (Association of Universities for Research in Astronomy) in den USA oder die ESO (European Southern Observatory), ein Konsortium von europäischen Staaten, welches die beiden Südsterne in Chile sponsert.

### Radioteleskope

Sichtbares Licht ist nur eines der beiden Spektralbänder, welche die Erdatmosphäre durchlässt. Das andere Band liegt im Bereich der Radiowellen mit Wellenlängen zwischen etwa 1 mm und 30 m. Obwohl Heinrich Hertz bereits 1888 die Ausbreitung von Radiowellen im freien Raum entdeckte, waren die Empfänger für Radioastronomie noch lange Zeit unempfindlich. Erst 1932 konnte Karl Jansky die Radiostrahlung der Milchstrasse im Meterwellenbereich nachweisen. Die Entdeckung der 21-cm-Linie des Wasserstoffs 1951 machte die Radioastronomie zu einem attraktiven Hilfsmittel beim Studium der Bewegung der interstellaren Materie in unserer Milchstrasse und anderen Sternsystemen. Ein ernstes Problem war die Winkelauflösung der Radioteleskope. Diese ist proportional zum Durchmesser des Teleskopes und invers proportional zur Wellenlänge der Strahlung. Radioteleskope müssen also einen viel grösseren Durchmesser haben, um vergleichbare Auflösungen zu erreichen wie im visuellen Bereich. Abhilfe schaffte das Prinzip der Interferometrie um 1950. Ein Beispiel für den Erfolg der Radioastronomie ist die Entdeckung der kosmischen Hintergrundstrahlung, eine wichtige Informationsquelle für unser heutiges Bild von der Entstehung des Universums.

### Teleskope ausserhalb der Erdatmosphäre

Beobachtungen ausserhalb der Lufthülle der Erde erschlossen der Astronomie die Spektralgebiete, die von der Erdatmosphäre vollständig absorbiert werden. Die Weltraumastronomie begann um 1946: mithilfe von V2-Raketen aus deutschen Rüstungsbeständen gewann man erste Ultraviolett- und Röntgenaufnahmen der Sonne. Nach dem erfolgreichen Flug des ersten künstlichen Erdsatelliten Sputnik I begann 1957 eine rasante Entwicklung von Raumsonden zur Erkundung des Sonnensystems (z. B. Voyager, 1977) und von satellitengestützten Beobachtungsinstrumenten. Röntgen- und gammaempfindliche Satelliten gibt es seit 1970. Ein aktuelles Beispiel ist HESSI (Abb. 4). Im infraroten Wellenlängenbereich musste man erst die Eindämmung der Wärmestrahlung durch die Instrumente in den Griff bekommen. Der erste Infrarotsatellit IRAS führte ab 1983 Beobachtungen aus. Im Bereich der Mikrowellen stand ab 1989 mit COBE der erste Satellit für Langzeitmessungen der kosmischen Hintergrundstrahlung zur Verfügung.

Weltraumgestützte Beobachtungen im visuellen Bereich haben vor allem den Vorteil, dass die Bilder nicht durch Luftunruhe verschlechtert werden. Das 1990 gestartete 2,4-m-Hubble-Weltraumteleskop brachte eine Steigerung der Winkelauflösung um etwa einen Faktor 10 gegenüber erdgebundenen Teleskopen (Abb. 2, siehe S. 11). Die Bildstörungen durch die Luftunruhe können zwar heutzutage durch eine so genannte «adaptive Optik» kompensiert werden. Bis jetzt gelingt diese Korrektur jedoch meistens nur in einem kleinen Bereich des Gesichtsfeldes.

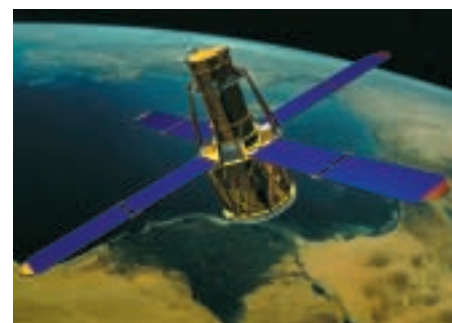


Abb. 4: In den 90er-Jahren ist HESSI (High Energy Solar Spectroscopic Imager) in Zusammenarbeit mit dem Paul Scherrer Institut entwickelt und gebaut worden. Mit HESSI kann erstmals eine hochaufgelöste Abbildung im harten Röntgen- und Gammabereich mit hochauflösender Spektroskopie kombiniert werden. Somit kann von jedem Bildpunkt ein detailliertes Energiespektrum erstellt werden. Bild: NASA



Abb. 5: McMath-Pierce-Sonnenteleskop auf Kitt Peak, Arizona. Mit einem Spiegeldurchmesser von etwa 1,5 m und einer Brennweite von rund 80 m ist es das grösste Sonnenteleskop der Welt. Das Institut für Astronomie der ETH Zürich führt hier mit seinem ZIMPOL-System regelmässig Beobachtungen durch.

## Detektoren

Anders als in den meisten Disziplinen der Physik kann der Astrophysiker keine direkten Experimente an seinen Forschungsobjekten durchführen. Die einzige Möglichkeit, an Information über kosmische Objekte zu gelangen, ist der Nachweis und die Analyse ihrer Strahlung. Ebenso wichtig wie die Teleskope sind dabei die Detektoren. Beschränkt man sich inmitten der Vielfalt der Detektoren nur auf den Nachweis des sichtbaren Lichts und die angrenzenden Bereiche (UV, nahes Infrarot), so geht die Entwicklung über die Photoplatten (um 1880), die «Photomultiplier» (um 1950) bis hin zu den Halbleiterdetektoren wie z. B. den «Charge Coupled Devices» (CCDs, seit 1980), um nur die wichtigsten zu nennen. Auch die ETH Zürich ist an der Entwicklung von Detektoren beteiligt: ZIMPOL (Zurich Imaging POLarimeter), ein Instrument zur Polarisationsanalyse von Licht, wird seit den 90ern erfolgreich an Grossteleskopen in den USA (Abb. 5) und Spanien eingesetzt.

## Glossar

**Chromatische Aberration:** Die verschiedenen Farben des Lichts brechen sich in einer Linse aus einem Glas unterschiedlich stark. Das Bild bekommt einen Farbsaum. In einer achromatischen Linse (Hall und Dollond, 1758) kombiniert man zwei Gläser mit verschiedenen Brechungseigenschaften, sodass sich ihre Farbfehler gegenseitig aufheben.

**Interferometrie:** Bringt man das Licht von zwei Teleskopen in einer Entfernung  $D$  zur kohärenten Überlagerung, so erhält man entlang ihrer Verbindungslinie die Winkelauflösung eines Teleskops mit Durchmesser  $D$ . Dieser kann sehr gross gewählt werden. Verbindet man nun auf eine bestimmte Weise mehrere Teleskope miteinander, so kann man ein zweidimensionales Bild des beobachteten Objekts rekonstruieren: die Winkelauflösung ist viel höher als mit einem Teleskop allein.

**Sphärische Aberration:** Parallele Lichtstrahlen werden von einer kugelförmigen Linse nicht zu einem einzigen Brennpunkt gebündelt.

## Forschungsinformationen

Alex Feller gehört zur Arbeitsgruppe von Prof. Stenflo. Seine Forschungsschwerpunkte liegen in der solaren Astrophysik; speziell doktriert er über die Instrumentierung für solare Polarimetrie.

[http://www.astro.phys.ethz.ch/instrument/zimpol/zimpol\\_nf.html](http://www.astro.phys.ethz.ch/instrument/zimpol/zimpol_nf.html)

[http://www.astro.phys.ethz.ch/home\\_nf.html](http://www.astro.phys.ethz.ch/home_nf.html)

## Alex Feller

Doktorand am Institut für Astronomie der ETH Zürich

# EINE REISE DURCH RAUM UND ZEIT

SIMON LILLY

Heutzutage können wir Strahlung von zahlreichen verschiedenen Objekten im Universum empfangen und untersuchen. Aufgrund der endlichen Lichtgeschwindigkeit schauen wir jedoch immer in die Vergangenheit. Das Teleskop wird zur Zeitmaschine. Mittlerweile haben Beobachtungen Galaxien aufgedeckt, die ihr Licht aussandten, als das Universum noch in den Kinderschuhen steckte.

*Ausschnitt aus dem Sternbild Hydra (Wasserschlange) mit der Spiralgalaxie ESO 510-13. Bild: ESO*

Die endliche Geschwindigkeit des Lichts bewirkt, dass wir astronomische Objekte nicht so wahrnehmen, wie sie «jetzt» sind, sondern wie sie zu dem Zeitpunkt waren, als das Licht, das wir heute empfangen, seine Reise zu uns antrat. Dieser Effekt wurde bereits 1670 von Ole Römer genutzt, um die Lichtgeschwindigkeit aus Beobachtungen von Verdunklungen bei den Jupitermonden mit bemerkenswerter Genauigkeit abzuleiten. Die Zeitverzögerungen in unserem Sonnensystem belaufen sich nur auf Minuten

oder Stunden, aber die Reise des Lichts von den nächsten Sternen bis zu uns dauert Jahre (siehe Sequenz S. 16 und 17).

Wenn wir uns über die Grenzen unserer eigenen Galaxie hinausbewegen, wachsen die Rückschauzeiten beträchtlich: auf Millionen oder sogar Milliarden von Jahren. Das eröffnet die Möglichkeit, das Teleskop als Zeitmaschine für eine Reise in die Vergangenheit zu benutzen und das Universum so zu betrachten, wie es in früheren Zeiten aussah.

Die Ausdehnung des Universums führt dazu, dass das Licht entfernter Galaxien zu längeren Wellenlängen hin verschoben wird (Doppler-Effekt). Die sogenannte Rotverschiebung  $z$  einer Galaxie kann von Astronomen durch den Vergleich der beobachteten Wellenlänge von bestimmten spektralen Merkmalen, wie zum Beispiel den Emissionslinien angeregter Gase, deren Wellenlänge bekannt ist, leicht gemessen werden. Wir definieren die Grösse  $(1+z)$  als das Verhältnis der beobachteten Wellenlänge zur

emittierten Wellenlänge. In einem expandierenden Universum gibt diese Grösse genau das Verhältnis zwischen der relativen Ausdehnung des Universums zum Zeitpunkt, als das Licht ausgesendet wurde, und seiner jetzigen Ausdehnung an.

Hauptziel der Astrophysik und eine der Hauptmotivationen für die Konstruktion der nächsten Generation von Beobachtungsanlagen ist, zu verstehen, wann und wie sich mit unserer Milchstrasse vergleichbare Galaxien gebildet und welche physikalischen Prozesse ihre weitere Entwicklung bestimmt haben. Galaxien waren mit grosser Wahrscheinlichkeit das Resultat von kleinen Dichtefluktuationen im sehr frühen Universum, welche durch die Gravitationsinstabilität zunahmen. Diese anfänglichen Dichtefluktuationen stellt man sich als das Resultat von Quantenfluktuationen während einer anfänglichen «inflationären» Phase in der Ausdehnung des Universums zu einem unvorstellbar frühen Zeitpunkt ( $10^{-35}$  s) vor. Während wir ein erfolgreiches Paradigma für die Entwicklung der Dichtefluktuationen in der zugrunde liegenden Dunklen Materie haben, sind die Interaktionen der baryonischen Materie hoch komplex und nur schlecht verstanden. Wenn wir dieses Phänomen verstehen, wird das unzweifelhaft Auswirkungen auf fast alle Bereiche der Astrophysik haben und einen wichtigen Schritt zum Verständnis des Universums und unseres Platzes darin darstellen.

## Blick in die Frühphase des Universums

Eine der bemerkenswerten Entwicklungen der beobachtenden Astrophysik während des letzten Jahrzehnts war, mit der Milchstrasse vergleichbare Galaxien über einen riesigen Bereich in der Rotverschiebung zu finden und zu studieren. Dies bedeutet «Rückschauzeiten» von bis zu etwa 95 Prozent des gegenwärtigen Alters des Universums. Unsere am weitesten zurückreichenden Bilder, wie das Hubble-Feld (Hubble Deep Field, Abb. 1), breiten die Geschichte des Universums vor unseren Augen aus und ermöglichen uns einen bemerkenswerten Blick auf die Physik im grössten Massstab. Eine der ersten bedeutenderen Untersuchungen des entfernten Universums wurde von mir und einer Gruppe französischer und kanadischer Astronomen in den frühen 90ern durchgeführt. Die Canada-France-Redshift-Survey untersuchte ungefähr 1000 Galaxien zurück bis zu  $z \approx 1$ , als das Universum etwa 40 Prozent seines gegenwärtigen Alters hatte. Zu jenem Zeitpunkt fanden wir ein Universum vor, das dem, das wir heute

sehen, sehr ähnlich sah. Wir fanden ungefähr dieselbe Anzahl grosser Galaxien, viele davon mit denselben Spiralstrukturen, die man heute in Scheibengalaxien sieht. Die Zahl inaktiver Galaxien, die nicht aktiv Sterne bildeten, war ebenfalls ungefähr gleich. Die Ansammlungen von Galaxien, wie wir sie heute sehen, waren also zu dieser Zeit bereits vorhanden. Andererseits beobachteten wir deutliche Hinweise auf sich entwickelnde Galaxienpopulationen. Wir schätzten zudem, dass die Sternensbildungsrate im Universum insgesamt um den Faktor 6–10 höher war als heute.

Wenig später konnten Charles Steidel und seine Mitarbeiter in den USA das neu in Betrieb genommene 10-m-Keck-Teleskop, das erste einer neuen Generation sehr grosser optischer Teleskope, zum Isolieren einer grossen Zahl von Galaxien mit  $z \approx 3$  benutzen, indem sie ein deutliches spektrales Merkmal verwendeten: Man erwartet, dass Galaxien wegen der Lichtabsorption durch Wasserstoffgas in den Galaxien selbst und im umgebenden intergalaktischen Medium bei Wellenlängen unterhalb vom 100 nm dunkel erscheinen. Man sieht diese Galaxien mit  $z \approx 3$  zu einer Zeit, als das Universum erst etwa 20 Prozent seines heutigen Alters hatte. Die Galaxien, die bis zu diesem Zeitpunkt entdeckt wurden, erscheinen deutlich als «junge» Galaxien. Ihnen fehlt die entwickelte morphologische Struktur von Scheibe und Bulge. Ausserdem weisen sie eine hohe Sternentstehungsrate auf. Sie haben nur etwa ein Drittel so viel schwere Elemente, z. B. C, N und O, wie die Sonne. Dies deutet darauf hin, dass wir sie sehr früh in

ihrem Leben betrachten, da schwere Elemente mit der Zeit durch die sukzessive Bildung von Sternen aufgebaut werden.

Jenseits von  $z \approx 3$  wird es viel schwieriger, Galaxien zu finden und zu studieren. Mit zunehmender Rotverschiebung werden sie nicht nur viel leuchtschwächer, sondern ihr Licht wird auch zu immer grösseren Wellenlängen verschoben. Innerhalb des letzten Jahres wurden von verschiedenen Forschungsteams – darunter unser eigenes – Galaxien mit der sehr hohen Rotverschiebung von  $z \approx 6,5$  gefunden. Diese Galaxien sieht man zu einem Zeitpunkt, an dem das Universum weniger als eine Milliarde Jahre alt war – wir schauen zu ihnen über 95 Prozent der bisher verstrichenen Zeit zurück. Die Wellenlängen des Lichtes dieser äusserst weit entfernten Galaxien wurden um den Faktor 7,5 verschoben, sodass sie in optischen Bildern wie zum Beispiel dem Hubble-Feld vollkommen unsichtbar sind, da das Licht der Sterne aus dem optischen Wellenlängenbereich ins Infrarote verschoben wurde.

## Die Suche nach jüngsten Galaxien

An der ETH Zürich haben wir einen neuen und effizienteren Weg gefunden, um nach diesen Galaxien zu suchen. Erste Beobachtungen zur Überprüfung unseres Konzepts mit dem 3,6-m-Canada-France-Hawaii-Teleskop haben bereits ein Multi-Galaxiensystem mit einer wahrscheinlichen Rotverschiebung von  $z = 6,43$  zum Vorschein gebracht. Wir warten im Moment mit Span-

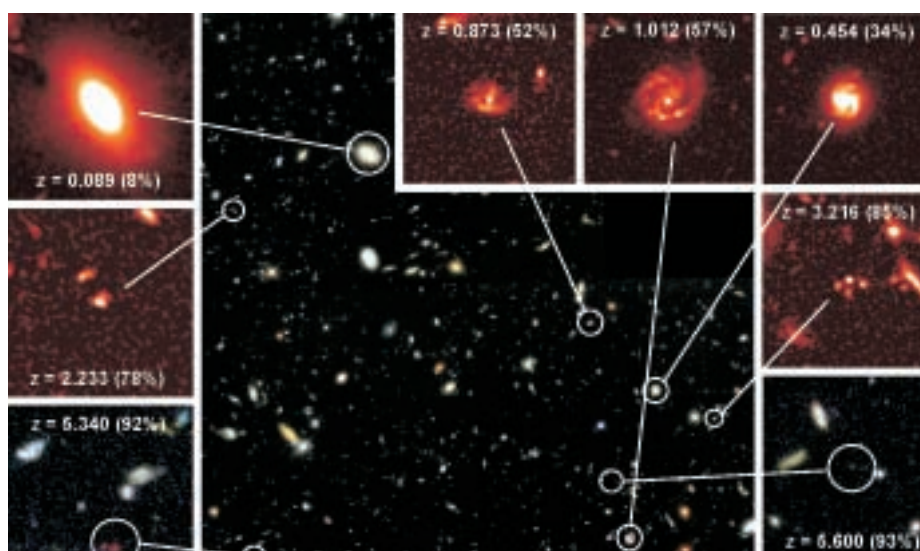
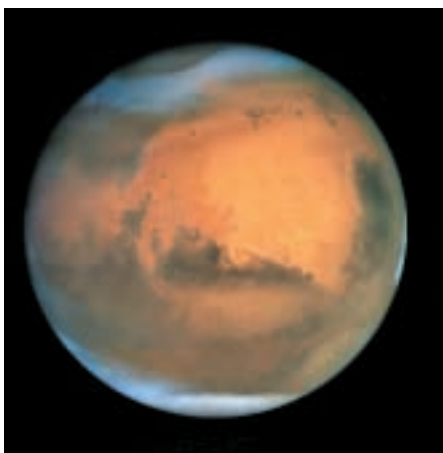


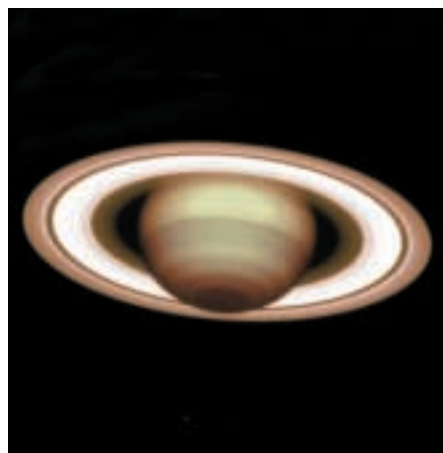
Abb. 1.: Das Hubble-Feld, gegenwärtig das am weitesten zurückreichende Bild des Universums, das je mit optischen Wellenlängen gemacht wurde. Es gibt ungefähr 2000 Galaxien in diesem kleinen Fleck Himmel (ungefähr 1% der Fläche des Vollmondes). Der gemessene Bereich der Rotverschiebung für viele von ihnen reicht von tiefen Verschiebungen von Galaxien in der heutigen Epoche bis zu den am weitesten entfernten Galaxien mit  $z \approx 5,7$ . Ausgewählte Galaxien sind hervorgehoben und ihre Rotverschiebung und die Zeit, in der das Licht zu uns reiste, (als Bruchteil des Alters des Universums) angegeben.



Abb. 2.: Das Very Large Telescope (VLT) der ESO befindet sich auf dem 2600 m hohen Cerro Paranal in der chilenischen Atacama Wüste, wo ausgezeichnete Sichtverhältnisse herrschen. Die gesamte Anlage, die aus vier 8,2-m-Hauptteleskopen sowie mehreren auf Schienen beweglichen 1,8-m-Hilfsteleskopen besteht, stellt zurzeit das grösste optische Teleskopsystem der Erde dar. Neben exzellenten Einzelbeobachtungen mit jedem individuellen Teleskop, besteht die Möglichkeit, das Licht aller Komponenten mit Hilfe der kleineren Teleskope zu interferieren. Dadurch lassen sich Bildqualitäten erzielen, die denen eines einzigen virtuellen Teleskopes mit einem Spiegeldurchmesser von 200 m entsprechen. Dieses erfordert eine mechanische Stabilität des Systems von weniger als  $1 \mu\text{m}$ , eine der herausragenden Leistungen moderner Beobachtungstechnik. Bild: ESO



Mars  
13 Lichtminuten entfernt  
das entspricht 230 Mio. km  
Bild: NASA



Saturn  
80 Lichtminuten entfernt  
das entspricht  $1432 \cdot 10^6$  km  
Bild: ESO



Alpha Centauri  
4,3 Lichtjahre entfernt  
das entspricht  $40,7 \cdot 10^{12}$  km  
Bild: ESO

nung auf weitere Beobachtungen mit dem Very Large Telescope (VLT) auf dem Cerro Paranal in Chile (Abb. 2). Wir erwarten, dass diese Beobachtungen eine noch viel grössere Anzahl von Galaxien mit dieser Rotverschiebung zum Vorschein bringen werden. Beinahe alle beobachtenden Untersuchungen von Galaxien mit sehr hoher Rotverschiebung wurden mit Hilfe von Beobachtungen im optischen und nahen Infrarot-Wellenlängenbereich bei ca.  $1 \mu\text{m}$  durchgeführt. Jedoch weist ungefähr die Hälfte der gesamten Strahlungsenergie, die je von Objekten im Universum emittiert wurde, viel grössere Wellenlängen auf, und zwar im fernen Infrarot und Submillimeter-Wellenlängenbereich um  $100 \mu\text{m}$ . Diese Emission wurde zuerst in den Daten des NASA-Satelliten COBE (Cosmic Background Imager, 1995) als diffuser Hintergrund von ausserhalb unserer Galaxie wahrgenommen. Dieser Hintergrund stammt von Staubkörnern, die Sternenlicht absorbiert haben, das wir andernfalls im optischen Wellenbereich entdeckt hätten. Diese Staubpartikel sind bis auf Temperaturen von ca.  $50 \text{ K}$  aufgeheizt und strahlen diese Energie im fernen Infrarot und im Submillimeterbereich wieder ab.

Während solche Galaxien heute weniger als  $0,3$  Prozent aller von Galaxien emittierten Energie beisteuern, produzierten ähnliche Objekte zum erwähnten Zeitpunkt ungefähr  $20$  Prozent des gesamten Energieausstosses des Universums. Wir vermuten, dass diese extrem leuchtstarken Galaxien den Schlüssel zum Rätsel um die Bildung und frühe Entwicklung von Galaxien darstellen. Um diese Fragen zu beantworten, wird in der Atacama-Wüste in Chile in  $5000 \text{ m}$  Höhe mit dem Bau des europäischen und nordamerikanischen Atacama-Large-Millimeter-Arrays (ALMA) begonnen –

eine Teleskopanlage aus einem Netzwerk von  $64$   $12\text{-m}$ -Antennen für den Millimeter-Wellenlängenbereich.

### Mit dem JWST zur Grenze des Universums

Wenn wir zu immer höheren Rotverschiebungen vorstossen, immer weiter hinaus in den Weltraum und weiter zurück in der Zeit, was wird unsere Sicht begrenzen? Wir wissen, dass es eine endgültige Grenze gibt, die durch die Strecke festgelegt wird, die das Licht seit dem Urknall zurückgelegt haben kann. Tatsächlich stossen wir schon vor dieser endgültigen Grenze auf eine praktisch bedingte. In den ersten  $350\,000$  Jahren nach dem Urknall war das Universum ein undurchsichtiges Plasma, in dem wir einzelne Objekte auch dann nicht sehen könnten, wenn sie tatsächlich existierten. In Wirklichkeit dürften sich die ersten leuchtenden Objekte erst einige Zeit später gebildet haben: Die ersten Sterne und prägalaktischen Objekte bildeten sich bei Rotverschiebungen um  $z \approx 20\text{--}30$ , was einem Zeitpunkt ungefähr  $200$  Millionen Jahre nach dem Urknall entspricht. Würden wir über dieses «erste Licht» hinausgehen, würden wir nur einem dunklen Universum begegnen. Möglicherweise können wir dieses prägalaktische Gas mit der Hilfe der nächsten oder übernächsten Generation von Radioteleskopen entdecken. Aber von diesen Beobachtungen sind wir noch weit entfernt.

Die Entdeckung des «ersten Lichts» selbst, d. h. der ersten Sterne und der prägalaktischen Objekte, die das Universum bildeten, ist das Ziel bei der Entwicklung des James-Webb-Weltraum-Teleskops (JWST). JWST, der Nachfolger des Hubble-Weltraum-Teleskops (HST), soll 2011 mit einer europäi-

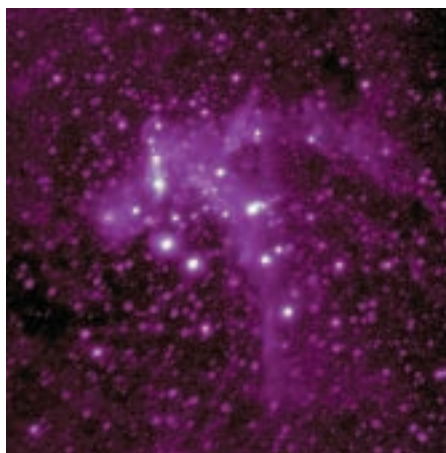
schen Ariane-Rakete in den Weltraum geschossen werden. Das JWST besitzt einen Hauptspiegel von  $6,5 \text{ m}$  Durchmesser. Es wird zum L2-Punkt, einem Punkt eine Million Kilometer von der Erde entfernt, geschossen. Das ist  $4$ -mal weiter entfernt als der Mond. Dort wird das ganze Teleskop bis zu einer Temperatur von ca.  $50 \text{ K}$  abgekühlt, sodass es aussergewöhnlich empfindlich im Infraroten wird. Es ist etwa  $10^5$ -mal so empfindlich wie das grösste Teleskop auf dem Erdboden. Dies sollte es ermöglichen, extrem rotverschobenes Sternenlicht zu entdecken, das wir von Objekten erwarten, die dieses «erste Licht» ausgesendet haben. Mit der Entwicklung von JWST und ALMA wird es Astronomen innerhalb eines Jahrzehntes ermöglicht, Beobachtungen aus der ganzen Geschichte von Sternen und Galaxien im Universum zu machen, indem wir die bemerkenswerte Fähigkeit unserer Teleskope nutzen, uns in die Vergangenheit zu transportieren, um dort unser Universum direkt zu beobachten.

#### Forschungsinformationen

Prof. Dr. Simon J. Lilly wurde letztes Jahr als Interdisziplinär-Wissenschaftler für das JWST ausgewählt und wird nach dem Start einige der ersten Beobachtungen mit dem Teleskop machen. Er ist ebenfalls Schweizer Mitglied des europäischen ALMA-Ausschusses.

#### Simon Lilly

Professor für experimentelle Astrophysik am Institut für Astronomie des Departements Physik der ETH Zürich



Galaktisches Zentrum  
27 000 Lichtjahre entfernt  
das entspricht  $2,6 \cdot 10^{17} \text{ km}$   
Bild: NOAO; AURA; NSF



Andromeda-Galaxie  
 $2,2 \cdot 10^6$  Lichtjahre entfernt  
das entspricht  $2,1 \cdot 10^{19} \text{ km}$   
Bild: MPIA



Deep Field  
Teils  $16,3 \cdot 10^9$  Lichtjahre entfernt  
das entspricht  $1,5 \cdot 10^{23} \text{ km}$   
Bild: MPIA



# DAS UNSICHTBARE UNIVERSUM

PAOLO GRIGIS UND ARNOLD O. BENZ

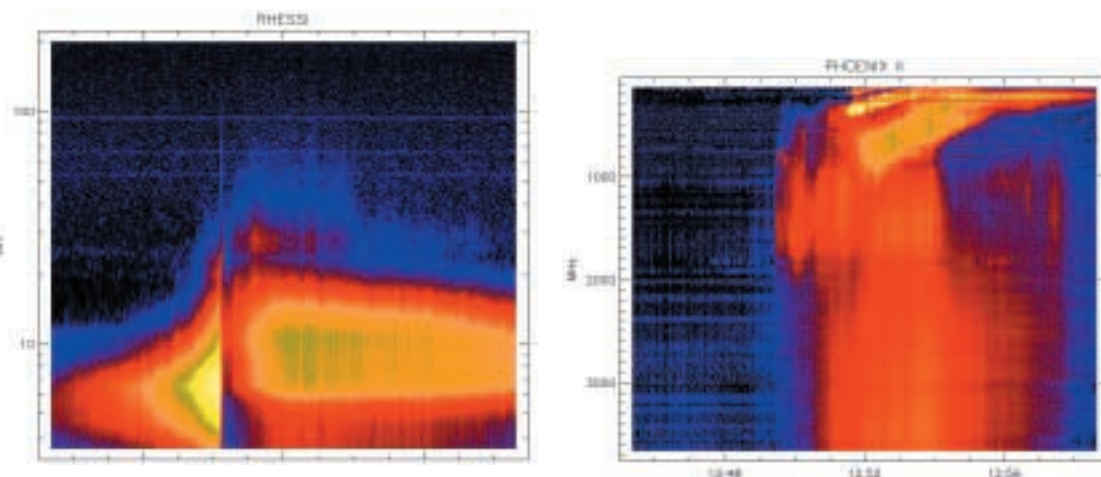
**Röntgenwellen unterscheiden sich von sichtbarem Licht durch ihre tausendfach höhere Frequenz und Energie pro Photo; Radiowellen weisen hingegen eine tausendfach kleinere Frequenz und Energie auf. Viele Himmelskörper strahlen in allen Wellenlängenbereichen vom Röntgen- bis zum Radiobereich. Sind Röntgen- und Radiostrahlung besonders intensiv, ist dies immer ein Indiz für hochenergetische Vorgänge.**

*Farbkodierte Röntgenaufnahme des Zentrums der Milchstrasse, gewonnen mit dem Satelliten CHANDRA. Der Ausschnitt umfasst  $2 \times 0,8$  Grad, entsprechend  $900 \times 360$  Lj. Bild: NASA*

Röntgen- und Radiowellen beinhalten komplementäre Informationen und werden oft zur Fernerkundung von Teilchen mit hoher Energie gemeinsam beobachtet. Die hochenergetischen Vorgänge im Universum sind allgemein von Interesse, da sie mit ihren unvorstellbaren Energien seine Entwicklung mitprägen. Hochenergetische Teilchen durchdringen zum Beispiel selbst Dunkelwolken, in denen Sterne entstehen, und ionisieren sowohl Moleküle als auch Atome. Dies hat entscheidende Auswirkungen auf die Sternentstehung im Allgemeinen sowie auf die

chemische Entwicklung. Hochenergieprozesse sind die Ursache für die heissen Hüllen von Sternen, und in der Folge für Schockwellen und Sternwinde. Einzelne kosmische Hochenergeteilchen erreichen Energien von  $10^{20}$  eV und übertreffen damit die Produkte von irdischen Teilchenbeschleunigern um viele Zehnerpotenzen. Für die kosmischen Beschleunigungsprozesse scheint zu gelten, dass sie umso weniger verstanden werden, je näher sie bei der Erde stattfinden. In Sonneneruptionen werden in wenigen Sekunden grosse Mengen von Elektro-

nen und Protonen beschleunigt, deren totale Energie das Millionenfache des jährlichen Schweizer Stromverbrauchs beträgt. Die Ausgangsenergie liegt im Magnetfeld und in elektrischen Strömen. Sie wird vermutlich zunächst in turbulente Wellen umgewandelt, die ihre Energie den Teilchen der Sonnenkorona weitergeben. Andere Vorgänge wie Schockwellen und elektrische Felder spielen energetisch eine untergeordnete Rolle.



*Abb. 1: Das Spektrogramm von Röntgen- und Radiowellen der Sonneneruption vom 24. April 2003, beobachtet mit RHESSI und dem Spektrometer Phoenix-2 der ETH. Die Intensität der beiden Wellen wird für jedes Energie- bzw. Frequenzintervall (vertikale Achse) und jedes Zeitintervall (horizontale Achse) in Bildform aufgetragen. Die Darstellung erlaubt einen Überblick über die verschiedenen Emissionsprozesse hochenergetischer Elektronen.*

## Entwicklung der Radio- und Röntgenbeobachtungen

Röntgenstrahlen erreichen die Erdoberfläche nicht und müssen im Weltraum beobachtet werden. Das macht Röntgenteleskope teuer und limitiert ihre Grösse. In den 1960er-Jahren wurden von Raketen aus kosmische Röntgenstrahlen entdeckt. Seither haben die Beobachtungsmöglichkeiten beachtlich zugenommen, doch sind sie immer noch durch den kleinen Fluss der beobachteten kosmischen Röntgenphotonen begrenzt. Radiowellen hingegen können auf der Erdoberfläche seit gut 50 Jahren mit viel grösseren Teleskopen gemessen werden. Sie haben ebenfalls von der technischen Entwicklung profitiert. Es gibt heute Interferometer mit zusammenschalteten Teleskopen über ganze Kontinente, welche selbst von relativ kleinen kosmischen Quellen scharfe Bilder machen können.

### Sonnenbeobachtungen mit RHESSI

Die Teilchenbeschleunigung in der Sonnenkorona hinterlässt Spuren in Röntgen- und Radiowellen. Abb. 1 zeigt das Spektrum einer Sonneneruption in beiden Bereichen. Verschiedene Energien und Frequenzen sind vertikal gegen den zeitlichen Verlauf (horizontal) aufgetragen. Je intensiver eine Emission, desto heller wird sie als Bildpunkt im so genannten Spektrogramm eingetragen. Die Röntgenbeobachtungen stammen vom NASA-Satelliten RHESSI (Ramaty High Energy Solar Spectroscopic Imager), der mit Detektoren aus Germanium ausgerüstet ist und die Energie jedes einfallenden Röntgenquants genau messen kann. Die ETH war an der Software-Entwicklung für den Satelliten beteiligt und besitzt ein Datenzentrum, in dem alle Messungen vorverarbeitet und gespeichert werden. Die Radiowellen in Abb. 1 hat das ETH-Spektrometer Phoenix-2 in Bleien bei Gränichen (AG) empfangen. Es ist das breitbandigste Radioteleskop der Erde und speziell für spektrale Übersichtsmessungen geeignet. Die Röntgenphotonen unter 20 keV in Abb. 1 stammen vor allem aus dem über 20 Millionen Grad heissen Plasma der Eruption. Photonen mit höherer Energie wurden durch Hochenergie-Elektronen verursacht. Um 12.50 Uhr am 24. April 2003 bewegte RHESSI eine Absorberplatte vor die Detektoren, um sie vor Sättigung zu schützen. Die Radiostrahlungen beginnen um 12.48 Uhr bei 800 MHz (etwas unterhalb der Frequenz von Mobiltelefonen). Sie werden von Elektronenstrahlen in der Sonnenkorona verursacht. Etwas

später wird von 2000 MHz bis 4000 MHz die intensive Synchrotronstrahlung energiereicher Elektronen sichtbar (rot). Zwischen 1000 und 2000 MHz wurden Pulsationen (rot) registriert, die direkt dem Beschleunigungsprozess zugeschrieben werden. Eine Schockwelle macht sich als driftende Struktur von 600 bis 100 MHz bemerkbar (gelb). Bei etwas höheren Frequenzen zeigt sich vermutlich eine sekundäre Beschleunigungsregion, die sich in der Korona nach aussen bewegt (gelb-grün).

### Strukturen in der Sonnenkorona

Der RHESSI-Satellit kann erstmals die energiereiche Röntgenstrahlung abbilden mittels eines neuen bildgebenden Verfahrens. Zum ersten Mal können Astrophysiker die Sonnenkorona gleichzeitig in den wichtigsten Wellenlängen studieren. In Abb. 2 ist die Quelle der Röntgenstrahlung auf einem Bild des TRACE-Satelliten (Transition Region And Coronal Explorer) eingezeichnet, der die ruhige Korona in einer Spektrallinie des achtfach ionisierten Eisens beobachtet (Temperatur etwa 1,5 Millionen K). Die Radiostrahlung wurde mit dem ETH-Spektrometer identifiziert und auf der Frequenz von 327 MHz mit dem Very Large Array in New Mexico (USA) lokalisiert. Die roten Kreise zeigen ihre Position und Stärke. Im räumlichen Vergleich von Röntgen- und Radiowellen (Abb. 2) zeigen sich überraschende Unterschiede. Während die Röntgenstrahlung aus dem oberen Teil eines Magnetbogens stammt, sind die Radioquellen entlang einer höher liegenden Struktur angeordnet, welche im TRACE-Bild dunkel

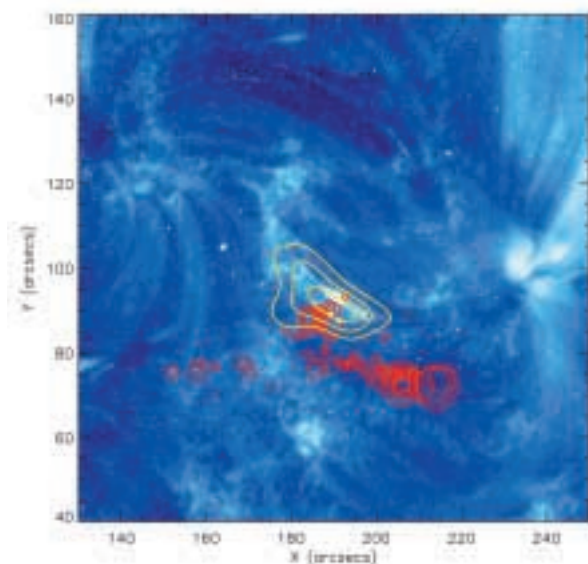


Abb. 2: Die aktive Sonnenkorona in den Wellenlängen des extremen Ultraviolets (blau), Röntgenstrahlen (gelb) und Radiowellen (rot). Der Bildausschnitt zeigt einen Zehntel des Sonnenradius nahe der Mitte der Sonnenscheibe am 1. Oktober 2002.

erscheint. Diese Struktur scheint der Ort zu sein, wo die Koronaaktivität Energie freisetzt. Die mehrere hunderttausend Kilometer lange Struktur ist wahrscheinlich zu heiss für TRACE. Die beschleunigten Elektronen gelangen zum Bogen, wo sie ihre Energie durch Stösse unter Abstrahlung von Röntgenwellen verlieren.

Die Entdeckung von Aktivitätszonen ist nur möglich, indem Röntgen- und Radiowellen kombiniert werden. Noch ist dies nur in speziellen Fällen möglich, wenn verschiedene Instrumente gleichzeitig beobachten. An Abb. 2 waren vier Teleskope beteiligt. Ihre Kombination ist wie ein Puzzle, das erst dann einen Sinn gibt, wenn genügend Elemente zusammengefügt sind.

#### Forschungsinformationen

Paolo Grigis gehört zur Arbeitsgruppe von Prof. Dr. A. Benz. Der Forschungsschwerpunkt dieser Arbeitsgruppe ist die Plasmaphysik. P. Grigis arbeitet im Rahmen seiner Doktorarbeit auf dem Gebiet der koronalen Heizvorgänge, Mikroflares sowie Beschleunigungsprozesse in Sonneneruptionen.

<http://hesperia.gsfc.nasa.gov/hessi/>,  
<http://www.hessi.ethz.ch/pop/>

#### Paolo Grigis

Doktorand am Institut für Astronomie der ETH Zürich

#### Arnold Benz

Professor am Institut für Astronomie der ETH Zürich

# ARCHÄOLOGIE DES UNIVERSUMS

FELICITAS PAUSS

**Allnächtlich fasziniert uns die Pracht des Sternenhimmels. Jedoch ruft der Blick in die unermessliche Ferne auch Fragen auf: «Woraus besteht unser Universum? Wie gross ist es? Hatte es immer diese Form? Wird es immer so bleiben?» Was wissen wir heute über die Entstehung und Entwicklung unseres Universums? Wichtige Thesen dazu können mit Hilfe der Teilchenphysik überprüft werden.**

*30 Doradus, eine Sternentstehungsregion in der Grossen Magellanschen Wolke im Sternbild Doradus (Schwertfisch). Bild: NASA*

Ein Zitat von Einstein lautet: «Das Unverständlichste am Universum ist, dass wir es verstehen!» Was hat Einstein mit dieser Aussage gemeint? Von Einsteins ursprünglicher Annahme, dass das Weltall statisch ist, bis zum heutigen, scheinbar schneller expandierenden Weltraum gab es viele Entwicklungen und Erkenntnisse, zu denen auch die Welt des Mikrokosmos – die Welt der Teilchenphysik – wesentlich beigetragen hat. Gerade diese Verbindung zeigt eine der faszinierendsten Entwicklungen der vergangenen Jahre, nämlich die zunehmende Symbiose zwischen Teilchenphysik und Kosmologie. Gemeinsames Ziel ist es, ein einheitliches Bild der Welt zu erhalten, das von den kleinsten Abständen zur Zeit des Urknalls bis zu kosmischen Dimensionen, d. h. der Grösse unseres sichtbaren Weltalls, gültig ist (Abb. 1). Ein solches Bild, welches die Entwicklung des Universums vom Urknall bis heute zeigt, muss die in den unterschiedlichen Bereichen beobachteten Phänomene durch dieselben Gesetzmässigkeiten miteinander verbinden. Wichtige Voraussagen zur Entstehung des Weltalls können mit Experimenten in der Teilchenphysik überprüft werden. Andererseits hat die Kosmologie einen bedeutenden Einfluss auf teilchenphysikalische Aspekte, wie z. B. die Frage nach der Existenz und Natur neuartiger Materieformen, der offensichtlichen Asymmetrie zwischen Materie und Antimaterie oder der Struktur von Raum und Zeit.

## Die Welt der Elementarteilchen

Mit immer komplexeren Experimenten bei höchsten zur Verfügung stehenden Teilchenstrahlenergien ist es in den vergangenen Jahrzehnten gelungen, die Grundbausteine der Materie und ihre Wechselwirkungen zu erforschen. Seit 1989, dem Beginn der Datennahme am Large-Electron-Positron Collider (LEP), dem Beschleuniger am CERN in Genf, wissen wir, dass es zwölf Grundbausteine der Materie gibt: sechs Quarks und sechs Leptonen. Neben diesen Grundbausteinen gibt es auch noch weitere Teilchen. Diese sind für die Kräfte, die zwischen den Grundbausteinen wirken, verantwortlich. Die als «Standardmodell der Teilchenphysik» bezeichnete Theorie beschreibt die verschiedenen Wechselwirkungen zwischen den Grundbausteinen und gehört wegen ihrer genauen, von Experimenten bestätigten Vorhersagen zu den grossen Errungenschaften der modernen Teilchenphysik. Insbesondere haben die am LEP erhaltenen Ergebnisse, welche auf einer zwölfjährigen Datennahme und Analyse der  $e^+e^-$ -Kollisionen bei Schwerpunktenenergien bis zu 209 GeV beruhen, einen wesentlichen Beitrag dazu geleistet.

## Fundamentale offene Fragen

Trotz des bisher enormen Erfolges des Standardmodells lässt es einige fundamentale Fragen unbeantwortet. Für die weitere Entwicklung und somit für ein besseres Verständnis der Physik des Mikrokosmos sollten in der Zukunft Antworten auf folgende Fragen gefunden werden:

## Der Ursprung der Teilchenmassen:

Was ist die Ursache für die mehrere Zehnerpotenzen auseinanderliegenden Teilchenmassen? Wie erhalten Teilchen ihre Masse? Der so genannte Higgs-Mechanismus ist im Standardmodell für die Erzeugung der Teilchenmassen verantwortlich. Sein experimenteller Nachweis oder das Aufdecken alternativer Möglichkeiten ist eine zentrale Aufgabe am zukünftigen Large Hadron Collider (LHC) des CERN (vgl. Kasten S. 22).

## Die Vereinigung der fundamentalen Kräfte in einer einheitlichen Theorie:

Gibt es eine Kraft als gemeinsamen Ursprung der bekannten fundamentalen Kräfte? Die am LEP sehr genau vermessenen Stärken der Kräfte (elektromagnetische, schwache und starke Wechselwirkung) deuten auf eine Vereinheitlichung der fundamentalen Kräfte hin, die sich bei sehr hohen Energien manifestieren, wie sie in den ersten Augenblicken nach dem Urknall existierten. Die supersymmetrische Erweiterung des Standardmodells sagt eine solche Vereinheitlichung voraus und stellt auch eine Symmetriebeziehung zwischen den Grundbausteinen der Materie und den Trägerteilchen der Wechselwirkungen her. Als Konsequenz dieser Theorie müsste es auch eine neue Art von Materie geben, die gleichzeitig mit der uns bekannten Materie existieren kann. Diese neue Welt des Mikrokosmos zu entdecken und ihre Gesetzmässigkeiten zu studieren, gehört mit zu den wichtigsten Zielsetzungen am LHC.

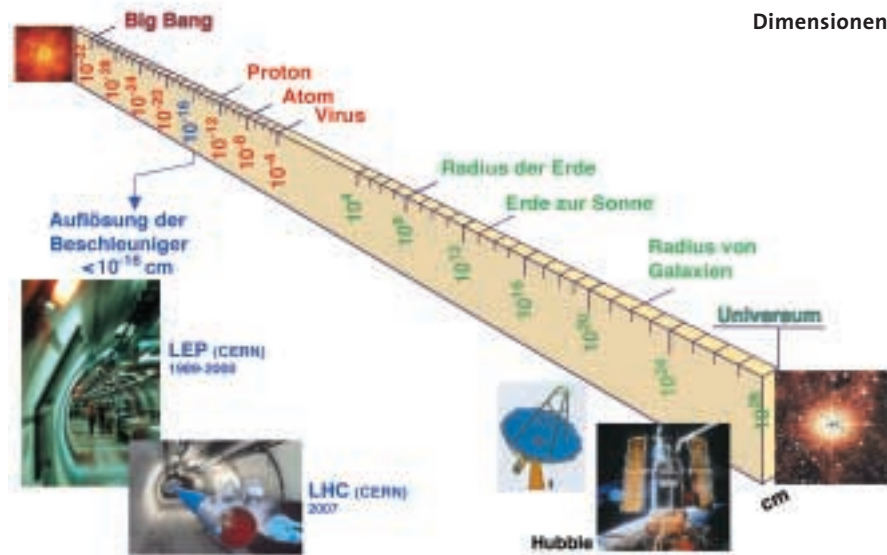


Abb. 1: Dimensionen vom Urknall bis zur Grösse des sichtbaren Universums.

### Die Erforschung von Raum und Zeit im Mikrokosmos:

Gibt es mehr als vier Raumzeit-Dimensionen? Bisher hat man angenommen, dass die Stärke der Gravitation erst bei Energien nahe der Planck-Skala ( $10^{19}$  GeV) mit der Stärke der teilchenphysikalischen Kräfte vergleichbar wird. Neueste theoretische Konzepte sagen voraus, dass dies bereits bei viel niedrigerer Energie auftreten könnte. Als Konsequenz muss die bekannte vierdimensionale Raumzeit um weitere Raumdimensionen erweitert werden. In hochenergetischen Teilchenkollisionen am LHC könnten als Folge dieser «Extra-Dimensionen» neue Phänomene beobachtet werden, welche die Gravitation direkt mit der Teilchenphysik bereits im multi-TeV-Energiebereich ( $10^3$  GeV) verknüpft.

stellten, studieren. Aus diesem Grunde lassen sich die grossen Teilchenbeschleuniger auch als «Instrumente der Archäologie des Universums» verstehen. Mit den am LHC erreichbaren Energien von 14 000 GeV wird es ermöglicht, noch weiter in Richtung Urknall zu gelangen. Falls jedoch das Konzept der Supersymmetrie die richtige Beschreibung des Mikrokosmos liefert, sollte man auch am LHC neue Teilchen und Signaturen entdecken, deren detaillierte Studien Rückschlüsse über die Gesetzmässigkeiten des Universums ermöglichen, als dieses  $10^{-33}$  Sekunden alt war, d.h. zu einem Zeitpunkt, an dem die drei teilchenphysikalischen Kräfte (elektromagnetische, schwache und starke Kraft) dieselbe Stärke hatten.

### Dunkle Materie

Astrophysikalische Untersuchungen grosser kosmologischer Strukturen ergaben, dass mehr als 90 Prozent der Masse des Universums den heutigen experimentellen Methoden nicht zugänglich ist. Offensichtlich muss es viel mehr Materie im Universum geben als aus den Beobachtungen der sichtbaren Sterne und Galaxien berechnet wird. Woraus besteht diese fehlende Materie, auch Dunkle Materie genannt, welche durch ihre Gravitations-Wechselwirkung bemerkbar ist und wesentlich mehr zur Masse des Universums beiträgt als alle bekannten Materiearten? Kandidaten dafür kommen aus der Teilchenphysik. Supersymmetrische Theorien, in denen das leichteste supersymmetrische Teilchen ungeladen und sta-

### Archäologie des Universums

Nach unserem heutigen Verständnis der Entwicklung des Universums hat sich das Weltall nach dem Urknall ausgedehnt und dabei abgekühlt (Abb. 2). Während der ersten Sekunden nach dem Urknall fielen wichtige Entscheidungen, die von den Gesetzen der Teilchenphysik gesteuert wurden. Kennzeichnend für die ersten Augenblicke des Universums waren die extrem hohen Energien. Unmittelbar nach dem Urknall entsprach dies der Planck-Energie von  $10^{19}$  GeV. Mit dem LEP-Beschleuniger konnten Bedingungen reproduziert werden, wie sie etwa eine zehnmilliardstel Sekunde nach dem Urknall herrschten, d.h., man konnte damit die physikalischen Gesetzmässigkeiten, wie sie sich zu diesem Zeitpunkt dar-

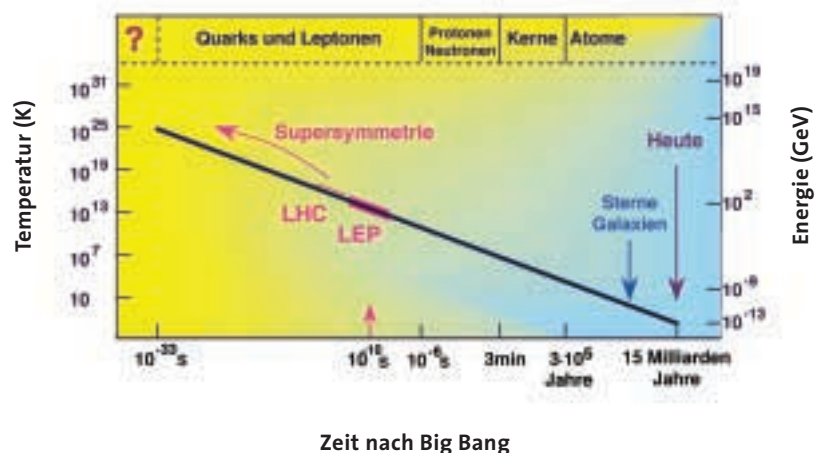


Abb. 2: Die Entwicklung des Universums von den ersten Augenblicken nach dem Urknall bis heute.



Abb. 3: Das zurzeit im Bau befindliche Compact-Muon-Solenoid-Experiment (CMS) ist eine der beiden Grossdetektoranlagen am zukünftigen Large Hadron Collider (LHC). Das Bild zeigt die vollständig zusammengebauten Ringe des CMS-Barrel-Magneten und die äussere Schale des Vakuumtanks, welcher am zentralen Ring befestigt ist.

bil ist, bieten eine sehr attraktive Lösung zu diesem Rätsel: Dieses Teilchen könnte für den Grossteil der Dunklen Materie verantwortlich sein. Supersymmetrie spielt also eine zentrale Rolle sowohl in der Teilchenphysik als auch in der Kosmologie!

### Zukunftsperspektiven

Von den Ergebnissen der Teilchenphysikexperimente – vor allem am LHC – erwarten wir weitere wichtige Rückschlüsse auf die Gesetzmässigkeiten in den ersten Augenblicken des Universums, welche die zeitliche Entwicklung des Universums festlegen. Das ultimative Ziel ist es, die Struktur und die Entwicklung des Weltalls mit den grundlegenden Gesetzen des Mikrokosmos zu verbinden. Heute haben wir dieses Ziel noch nicht erreicht, jedoch sind Antworten auf die fundamentalen offenen Fragen der Teilchenphysik wichtige Meilensteine auf diesem Weg, der auch in der Zukunft Teilchenphysik und Kosmologie untrennbar miteinander verbinden wird.

#### Das CMS-Experiment am LHC

Das Grossbeschleunigerprojekt LHC (Large Hadron Collider) soll im Jahre 2007 im bereits existierenden, 27 km langen Tunnel des LEP am CERN in Genf in Betrieb genommen werden. Die nach einer langjährigen Planungs- und Entwicklungsphase derzeit im Bau befindliche Anlage ist ein technisch äusserst anspruchsvolles und weltweit einzigartiges Projekt und wird als «Flaggschiff» der Teilchenphysik der kommenden Jahre angesehen.

Am LHC werden Proton-Proton-Kollisionen bei einer bisher unerreichten Energie von 14 000 GeV untersucht. Die dabei auftretenden extrem hohen Wechselwirkungsraten von nie zuvor erreichter Intensität stellen enorme technische Anforderungen an die geplanten Experimente. In den vergangenen Jahren wurden grosse Anstrengungen unternommen, um neue Detektoren und Elektronik zu entwickeln, die diesen Ansprüchen genügen. Die Ergebnisse dieser Forschungs- und Entwicklungsarbeiten bilden die Basis für das Design des Compact-Muon-Solenoid-Experiments (CMS). Der CMS-Detektor (Abb. 3) hat eine zylindrische Form mit einer Länge von 21,5 m, einem Durchmesser von 15 m und hat ein

Gesamtgewicht von 12 500 Tonnen. Die einzelnen Detektorkomponenten sind wie Zwiebelschalen um den Wechselwirkungspunkt angeordnet, wobei jede dieser Komponenten eine ganz bestimmte Aufgabe erfüllt. Das Institut für Teilchenphysik der ETH Zürich zeichnet hauptverantwortlich für das Kristallkalorimeter. Zusätzlich ist es auch am Pixeldetektor und Silizium-Streifendetektor massgeblich beteiligt. Der wichtige Beitrag zur Entwicklung und Produktion der Supraleiterkabel für den Magneten (20 Kabel mit einer Gesamtlänge von 51 km) ist bereits abgeschlossen.

Das CMS-Experiment besitzt ein hohes Potenzial für richtungweisende Entdeckungen, welche Antwort auf fundamentale offene Fragen geben sollen. Die dazu notwendigen Untersuchungen der Physik im 1000-GeV-Bereich ist die grosse Herausforderung für die Teilchenphysik in den kommenden Jahren – eine Aufgabe, die nur in weltweiter Zusammenarbeit bewältigt werden kann. Gegenwärtig sind rund 2000 Wissenschaftler und Ingenieure von 159 Instituten aus 36 Nationen im CMS involviert.

#### Forschungsinformationen

Der Forschungsschwerpunkt von Felicitas Pauss liegt auf dem Gebiet der Grundbausteine der Materie und ihrer Wechselwirkungen. Diese Grundlagenforschung wird mit Experimenten an Hochenergiebeschleunigern (CMS-Experiment am zukünftigen LHC am CERN, Genf) sowie im Weltraum (AMS-Experiment) durchgeführt. Mit diesen Experimenten sollen Antworten auf fundamentale offene Fragen in der Teilchenphysik gefunden werden, welche auch dazu beitragen, die Entwicklung unseres Universums nach dem Urknall besser zu verstehen.

<http://www.ipp.phys.ethz.ch/>;

<http://cmsinfo.cern.ch/Welcome.html/>

#### Felicitas Pauss

ordentliche Professorin für experimentelle Teilchenphysik und Vorsteherin des Instituts für Teilchenphysik der ETH Zürich

# METEORITEN ALS ZEUGEN KOSMISCHER GESCHICHTE

RAINER WIELER

Sterne entstehen aus dunklen Gas- und Staubwolken. Höchstwahrscheinlich bilden sich um viele junge Sterne auch Planeten, so wie vor 4,6 Milliarden Jahren die Planeten unseres Sonnensystems aus dem «solaren Nebel» hervorgegangen sind. Beobachtungen von Sterngeburten erlauben Rückschlüsse auf die Entstehung und frühe Entwicklung der Sonne und ihrer Planeten. Es gibt aber auch Proben aus jener Zeit, mittels deren wir die Geschichte des frühen Sonnensystems im Labor studieren können. Dies sind die Meteoriten und Mikrometeoriten.

*Die Mutterkörper der Meteorite sind vor fast 4600 Mio. Jahren aus einer scheibenförmigen Ansammlung von feinem Staub und Gas um die junge Sonne gebildet worden. Bild: W. Hartmann (weitere Bilder von W. Hartmann: [www.psi.edu/hartmann](http://www.psi.edu/hartmann))*

Man glaubt heute, die Entstehung der inneren Planeten – von Merkur bis Mars – in groben Zügen zu verstehen. Staubkörner von etwa einem Tausendstelmillimeter Grösse haben im solaren Nebel zuerst grössere Aggregate gebildet. Daraus entstand die erste makroskopische feste Materie im Sonnensystem, die sich aufgrund konstruktiver Kollisionen, bei denen das grösste entstandene Fragment grösser war als der grössere der beiden Ausgangskörper, innert weniger Millionen Jahre zu immer grösseren «Planetesimalen» verband. Aus letztendlich etwa 20 solcher Planetesimale von ungefähr Marsgrösse sind dann innert vieler zehn Millionen Jahre die vier erdähnlichen Planeten entstanden. Natürlich wird dieser Prozess nicht monoton abgelaufen sein, sondern es

dürften zur gleichen Zeit Körper verschiedenster Grössen – vom Staubkorn bis zum grossen Planetesimal – vorhanden gewesen sein. Das Erarbeiten der Details dieser Planetenakkretion ist eines der wichtigsten Ziele der Planetarwissenschaften. Meteorite können hierzu einen entscheidenden Beitrag leisten, weil einige Planetenbausteine bis heute überlebt haben: Asteroide und Kometenkerne. Meteorite sind meist Bruchstücke von Asteroiden. Ein Teil des heute in der Stratosphäre aufgesammelten Staubes aus dem interplanetaren Raum stammt von Kometen.

Ein primitiver Meteorit stammt aus einem kleinen Mutterkörper, welcher nie so heiss wurde, dass die Spuren seiner frühen Geschichte völlig ausgelöscht wurden. Meteorite

sind also eine Art «kosmische Sedimente» und haben wie geologische Sedimente die Geschichte ihrer Bildung gespeichert. Wie in vielen anderen Sedimenten ist diese Aufzeichnung allerdings nicht leicht lesbar, weil auch kleinere Mutterkörper entweder warm wurden oder ihre Mineralien Wasser aufnahmen.

Die älteste Materie in Meteoriten ist sogar älter als das Sonnensystem. Abb.3 (siehe S.25) zeigt links ein Graphitkorn, welches aus einem Meteoriten herausgeätzt wurde. Es kondensierte vermutlich in der abkühlenden Hülle eines kurzlebigen massereichen Sterns in dessen Endstadium. Wir wissen dies aufgrund der vollkommen anomalen Isotopenverhältnisse in diesem Korn.

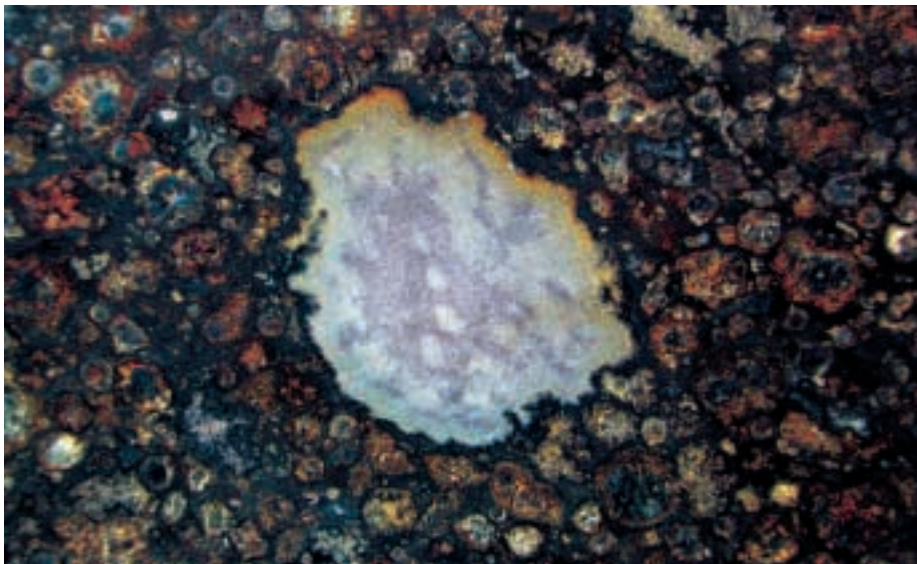


Abb. 1: Der etwa 1 cm grosse helle Kalzium-Aluminium-reiche Einschluss und die etwas kleineren K ugelchen (Chondren) im Meteoriten Allende spiegeln die fr hste Phase der Bildung der Planeten vor 4567 Mio. Jahren wider.

Während in normaler Materie – ob irdisch oder meteoritisch – zum Beispiel das C-12/C-13-Verhältnis überall innerhalb weniger Prozent gleich ist, variiert es in solchen zirkumstellaren K ornern um mehrere Grössenordnungen. Diese Partikel spiegeln deshalb Unterschiede in der Synthese chemischer Elemente in verschiedenen Sterntypen wider. Isotopenmessungen an zirkumstellaren K ornern in primitiven Meteoriten sind somit «Astrophysik im Labor».

Am Departement für Erdwissenschaften der ETH werden Edelgase in einzelnen zirkumstellaren K ornern gemessen. Dies ist mit Hilfe eines sehr empfindlichen Massenspektrometers möglich. Neuerdings kann man auch zeigen, dass innerhalb einzelner interplanetarer Staubteilchen die Häufigkeiten der Sauerstoffisotope teilweise stark variieren (Abb. 3). Ungefähr 0,5 Prozent der Materie in Kometen scheint also intakter Sternstaub zu sein.



Abb. 2: Gesamtaufnahme der Meteoritenprobe Allende.

## Glossar

### Halbwertszeit:

Radioaktive Isotope zerfallen mit einer charakteristischen Geschwindigkeit in bestimmte Isotope eines anderen Elementes. Ein Mass für diese Geschwindigkeit ist die Halbwertszeit, innerhalb der jeweils die Hälfte der verbliebenen Kerne zerfällt.

### Isotope:

Atome desselben Elementes mit verschiedener Masse, d. h. unterschiedlicher Zahl Neutronen im Atomkern.

### Planetenakkretion:

Bildung der Planeten aus der scheibenförmigen Ansammlung von Gas und Staub um die junge Sonne. Die erdähnlichen Planeten entstanden wohl in einem hierarchischen Prozess: zuerst bildeten Staubkörner grössere Aggregate, aus denen sich dann immer massivere Körper zusammenballten. Bei den jupiterähnlichen Planeten sind möglicherweise in einem ähnlichen Prozess zuerst Kerne aus Gestein und Eisen gebildet worden, welche dann Gas- und Eish llen anzogen. Denkbar ist auch, dass die grossen Planeten direkt aus einer Instabilität der Gas- und Staubwolke kollabiert sind.

### Radioaktiver Zerfall:

stellt die Grundlage der Altersbestimmung von Gesteinen dar. Dabei wird die Häufigkeit der Isotope mit einem Massenspektrometer sehr präzise gemessen. In diesem Zusammenhang haben «kurzlebige» radioaktive Isotope eine Halbwertszeit in der Grössenordnung von einigen Hunderttausend bis einigen Millionen Jahren. Diese Isotope wurden in benachbarten Sternen kurz vor der Bildung des Sonnensystems gebildet und in die feste Materie eingebaut. Auch wenn sie heute ausgestorben sind, lassen sie sich doch durch Überschüsse ihrer Tochterisotope nachweisen.

### Staub:

Staubpartikel in Molekülwolken sind grösstenteils weniger als ein Tausendstelmillimeter gross. Sie bestehen häufig aus einem Kern aus Silikaten oder Oxiden, umgeben von einem Mantel aus flüchtigem Material, vor allem Wassereis sowie organischen und anorganischen Kohlenstoffverbindungen.

### Supernova:

Massereiche Sterne beenden ihr Leben mit einer gewaltigen Explosion – einer Supernova. Der ehemalige Stern verliert hierbei einen Grossteil seiner Materie oder wird vollständig zerstört.

St. Scholz, R. Wieler

## Das Alter des Sonnensystems

Die ältesten Festkörper, die im Sonnensystem entstanden, sind die Kalium-Aluminium-reichen Einschlüsse (CAI). Ein solcher ist in Abb. 1 gezeigt. Die Mineralien in CAI sind auch bei sehr hohen Temperaturen stabil. Deshalb müssen sie sehr früh kondensiert sein, wie Altersbestimmungen mit der Uran-Blei-Methode zeigen. Der neueste Wert beträgt  $4567,2 \pm 0,6$  Millionen Jahre. Dieses Alter der CAI wird im Allgemeinen als das Alter des Sonnensystems bezeichnet, da CAI auch Zerfallsprodukte von kurzlebigen radioaktiven Atomkernen enthalten. Kleine Überschüsse des Isotops Magnesium-26 zum Beispiel bedeuten, dass die CAI einst radioaktives Aluminium-26 enthielten. Dieses ist in einem Stern in der Nähe der jungen Sonne in dessen Endphase synthetisiert worden. Weil Aluminium-26 eine Halbwertszeit von nur 700 000 Jahren hat, können zwischen der Isolation des solaren Nebels und der Bildung der CAI höchstens einige wenige Millionen Jahre liegen.

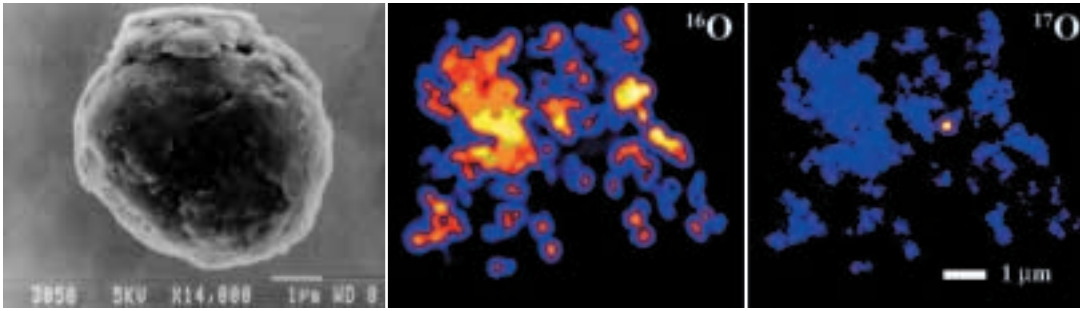


Abb. 3: Links: ein «präsolares» Graphitkorn aus dem Meteoriten Murchison. Dieses Korn kondensierte in der expandierenden Hülle eines schweren Sternes am Ende seines Lebens. Rechts: Die Häufigkeit der beiden Sauerstoffisotope  $^{16}\text{O}$  und  $^{17}\text{O}$  variiert innerhalb eines Staubteilchens aus dem interplanetaren Raum, das vermutlich von einem Kometen stammt. Ein kleiner Teil dieses Kornes ist am seltenen Isotop  $^{17}\text{O}$  stark angereichert (heller Punkt). Dies zeigt, dass vielleicht ein halbes Prozent der Materie in Kometen intaktes präsolares Material ist, ähnlich dem Graphitkorn. Bildquelle: Science 300, Issue 5616, 4. 4. 2003, 105–108, S. Messenger et al.; Copyright 2003 AAAS.

## Radioaktive Elemente im frühen Sonnensystem

Mit kurzlebigen radioaktiven Atomen können auch Altersunterschiede zwischen verschiedenen Komponenten des meteoritischen Sediments gemessen werden. Die etwa 1 mm grossen Kügelchen im Anschliff in Abb.3 heissen Chondren. Sie bauten rund 10-mal weniger Aluminium-26 ein als CAI und sind deshalb wahrscheinlich ungefähr zwei oder drei Millionen Jahre jünger als diese. Das scheint ein kleiner Unterschied zu sein, gemessen an den seither vergangenen fast 4600 Millionen Jahren. Aber dieser kleine Unterschied stellt ein grosses Problem dar: Die CAI können nicht für mehrere Millionen Jahre im solaren Nebel als Körper mit Grössen im Zentimeterbereich überlebt haben, sondern wären in viel kürzerer Zeit auf spiralförmigen Bahnen in die Sonne gefallen. Hat es deshalb im frühen Sonnensystem vielleicht ganze Planetesimale aus CAI-Material gegeben, die dann wieder in kleine Bruchstücke fragmentierten, welche schliesslich mit den Chondren und anderem Material die endgültigen Meteoritenmutterkörper bildeten?

Besonders interessant sind extrem neutronreiche kurzlebige Nuklide, da sie nur in einer Supernovaexplosion entstanden sein können. Gemäss einer langgehegten Vermutung ist der Kollaps des solaren Nebels durch die Schockwelle einer nahen Supernova ausgelöst worden. Diese Vermutung konnte kürzlich gestützt werden, indem winzige Überschüsse von Nickel-60 aus dem Zerfall von Eisen-60 in Mineralien mit extrem hohen Eisen/Nickel-Verhältnissen gefunden wurden. Eisen-60 hat allerdings eine relativ lange Halbwertszeit von 1,5 Millionen Jahren. Damit lässt sich das Intervall

zwischen Supernova und Kollaps des Nebels nicht sehr präzise eingrenzen.

Am Departement für Erdwissenschaften suchen wir deshalb nach Tellur-126, dem Zerfallsprodukt von Zinn-126 mit einer Halbwertszeit von nur 235 000 Jahren. Wir versuchen, Überschüsse von Tellur-126 auch in CAIs zu finden. Sollten wir erfolgreich sein, wäre dies ein sehr guter Hinweis dafür, dass unser Sonnensystem seine Existenz wirklich der Explosion eines massereichen Sterns verdankt.

Die Zerfallsprodukte von ausgestorbenen Nukliden mit längeren Halbwertszeiten erlauben uns auch, die frühe Geschichte der Erde, des Mondes und des Planeten Mars zu studieren. Das Isotop Hafnium-182 zerfällt mit einer Halbwertszeit von etwa 9 Millionen Jahren in Wolfram-182. Das System Hafnium-Wolfram eignet sich dazu, die «Akkretion» dieser Planeten aus kleineren Planetesimalen zu studieren, weil dieser Prozess in der Grössenordnung von einigen Halbwertszeiten von Hafnium-182 gedauert hat.

Ausserdem wandert bei der Differentiation eines Planeten in einen Kern aus Eisen und einen Mantel aus Gestein das Wolfram bevorzugt in den Kern, das Hafnium aber vorwiegend in den Mantel. Je früher diese Trennung stattfand, desto unterschiedlicher wird also die Häufigkeit von Wolfram-182 in Gesteinsproben von Planeten von seiner ursprünglichen Häufigkeit in den Planetenbausteinen sein. Weil die Kernbildung vermutlich sehr rasch abläuft, datiert das Hafnium-Wolfram-System somit im Wesentlichen die Planetenakkretion. Durch Messungen von Wolfram-182 in ursprünglichen Meteoriten sowie in Proben von Mars, Mond und der Erde konnten wir zeigen, dass sich der kleine Planet Mars in nur etwa

10 Millionen Jahren bildete, die grössere Erde dazu aber rund 50 Millionen Jahre gebraucht hat. Diese Zeitspannen sind in guter Übereinstimmung mit Resultaten von Computersimulationen der Planetenakkretion.

Auch der Mond hat sich vermutlich etwa 50 Millionen Jahre nach Bildung der ersten Festkörper von der Erde abgespalten, sehr wahrscheinlich als das Resultat einer Kollision eines Planetenbausteins von etwa Marsgrösse mit der jungen Erde. In diesem Sinne kann man also unseren Nachbarn Mars auch als übriggebliebenen Planetenbaustein der letzten Generation betrachten, der auch ein Bestandteil der Erde hätte werden können.

### Forschungsinformationen

Ein Forschungsschwerpunkt des Labors für Geochemie und Kosmochemie der Edelgase ist das Studium der Frühgeschichte unseres Planetensystems mittels Edelgasanalysen an Meteoriten.

[www.igmr.ethz.ch/isotopes/NobleGases/Noble\\_Cosmo.html](http://www.igmr.ethz.ch/isotopes/NobleGases/Noble_Cosmo.html)

### Prof. Dr. Rainer Wieler

Leiter des Labors für Geochemie und Kosmochemie der Edelgase am Departement für Erdwissenschaften der ETH Zürich



# AUS EIS UND STAUB GEBOREN

ARNOLD BENZ

Jupiter und Saturn haben Monde, die beinahe ausschliesslich aus Wassereis bestehen. Jenseits von Neptun gibt es eine riesige Zahl neu entdeckter Eis-Objekte. Die Kometen und selbst Pluto scheinen hauptsächlich aus gefrorenem Wasser zu bestehen. In den Molekülwolken dagegen, aus denen Sterne entstehen, fand man bis jetzt nur wenig oder gar kein Wasser. Ein neuer Satellit soll dem Ursprung des Wassers im Universum auf die Spur kommen.



Abb. 1: Wolken von gleissendem, heissem Gas mischen sich mit Strähnen von Dunkelwolken im Trifid-Nebel. Ein einzelner Stern in der Bildmitte verursacht den Grossteil des heissen Gases. Der Bildausschnitt ist 20 Lichtjahre gross. Trifid ist 5000 Lj entfernt von der Erde und erst etwa 300 000 Jahre alt. Bild: Gemini North

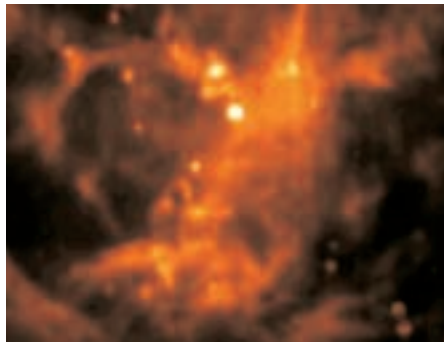


Abb. 2: Trifid-Nebel im infraroten Licht. Die Dunkelwolken, welche in Abb. 1 das heisse Gas grob in drei Gebiete unterteilen, erscheinen hell, weil sie im Infraroten mehr strahlen als das heisse Gas. Wir sehen die Wärmestrahlung des sehr kalten Staubes. Einzelne helle Punkte stammen von dichten Wolchenkernen, wo Sterne entstehen. Bild: ISO/ESA

Heutzutage ist gut gesichert, dass Sterne in molekularen Dunkelwolken entstehen. Zehn Kelvin kalte Wolkenkerne, die knapp vor der kritischen Dichte zum Kollaps stehen, können im Infrarotbereich beobachtet werden (Abb. 1 und 2). Sowohl für die Lichtundurchlässigkeit und die Infrarotstrahlung sind kleinste Staubkörner verantwortlich. Den Absorptionslinien im Submillimeter-Wellenlängenbereich zufolge bestehen sie vor allem aus Silikaten und Graphit. Allerdings müssen auch Kohlenwasserstoff und schwerere Elemente im Staub enthalten sein. Es scheint einen gleitenden Übergang von grossen Molekülen zu kleinen Agglomerationen von Molekülen und zu Mikrometern grossen Staubpartikeln zu geben. Auf den Stauboberflächen, die von der kosmischen Strahlung bombardiert und elektrisch geladen werden, finden vermutlich Prozesse statt, die von jenen in irdischen Chemielabors völlig verschieden sind. Die Materie in Molekülwolken ist chemisch äusserst aktiv.

### Von der Molekülwolke zum Protostern

Wenn sich Wolkenkerne weiter verdichten, kann der Gasdruck der Gravitation nicht mehr standhalten. Der Kern fällt in sich zusammen und rotiert wegen der Drehimpulserhaltung immer schneller, bis die Fliehkraft wichtig wird und die Schwerkraft kompensiert. Das neue Gleichgewicht zwingt den ursprünglich kugelförmigen Wolkenkern in die Form einer sich drehenden Scheibe. Ihre Dichte ist wesentlich höher als im Wolkenkern. Das scheint der Grund zu sein, weshalb sich in kollabierenden Wolkenkernen verschiedene Moleküle auf den Staubkörnern ablagern und daher nicht mehr beobachtet werden. Man nennt dies

das Ausfrieren von Molekülen. Insbesondere das Wassermolekül  $H_2O$ , falls überhaupt vorhanden, verschwindet völlig im inneren Teil von kollabierenden Wolkenkernen.

### Akkretionsscheiben – wichtige Chemielaboratorien

Scheiben haben verschiedene Auswirkungen. Zum einen sind sie ein Durchlaufsystem, durch das Gas und Staub zum entstehenden Stern hin fliesst und seine Masse vergrössert. Man spricht daher von Akkretionsscheiben. Die Akkretion kann nur weiter verlaufen, wenn die Scheibenmaterie Drehimpuls abgeben kann. Es ist noch nicht klar, ob dies durch Reibung in der Scheibe oder über polare Ausflüsse geschieht, wie sie in allen entstehenden Sternen senkrecht zur Scheibe beobachtet werden. Der Vorgang der Akkretion setzt Gravitationsenergie frei. Die Scheibe und der entstehende Stern wärmen sich daher auf. Ebenfalls unklar ist, ob es hunderte oder tausende von Graden sind. Auf jeden Fall sublimieren im Inneren der Scheibe die ausgefrorenen Moleküle auf den Staubpartikeln – unter anderem auch die Wassermoleküle, die dann wieder in Gasform vorliegen. In gewissen Objekten strahlen Wassermoleküle sehr dominant und scheinen eine wichtige Rolle in der Energiebilanz zu übernehmen. Der Strahlungsdruck des Protosterns und sein früher Sternwind blasen aber schliesslich die Wassermoleküle wie einen Kometenschweif aus der inneren Akkretionsscheibe. Nur so lässt sich erklären, warum Wasser heute im äusseren Sonnensystem viel häufiger anzutreffen ist als im Innern.

## Planeten entstehen

Scheiben müssen auch die Entstehungsorte von Planeten, Asteroiden und Kometen sein. Sie heissen in der entsprechenden Phase daher protoplanetare Scheiben. Die Vorgänge, die sich dabei abspielen, sind praktisch noch unbekannt. Die heute vorherrschende Meinung besagt, dass Planeten nicht durch die gegenseitige Anziehung von immer grösseren Objekten entstehen, sondern Staubteilchen sich durch sanfte Stösse zu grösseren Objekten vereinen. Dabei scheinen die Oberflächeneigenschaften von Staubkörnern und ihre Eismäntel eine wichtige Rolle zu spielen. Nur so lässt sich erklären, dass Zusammenstösse auch konstruktiv sein können und sich Planetoiden und schliesslich Planeten bilden.

Wo die Wassermoleküle aus der Verbindung von Wasserstoff und Sauerstoff entstehen, ist noch nicht bekannt. Es gibt dazu mehrere Möglichkeiten: Am wahrscheinlichsten ist die Gasphase in dichten oder bereits kollabierenden Wolkenkernen. Die Verbindungen von O, C und N mit  $H_2$  sind jedoch endotherm und finden nicht bei den tiefen Temperaturen von Dunkelwolken statt. Die entsprechenden Atome und Moleküle sind aber zum Teil ionisiert. Elektrisch geladene Atome und Moleküle reagieren anders und sehr viel schneller als neutrale. Eine zweite Möglichkeit sind die Oberflächen von Staubteilchen, wo Wasserstoff und Sauerstoff sich ebenfalls begegnen und zu  $H_2O$  vereinen können.

## Wasser beobachten

Wassermoleküle im fernen Universum beobachtet man in den charakteristischen Linien des Wasserdampfs. Bei den vorherrschenden niedrigen Temperaturen in Wolkenkernen und protoplanetaren Scheiben sind nur die niedrigsten Molekülzustände angeregt. Daher liegt ihre Emission bei Wellenlängen zwischen 0,1 mm und 1 mm, wo viele andere Moleküle ebenfalls strahlen. Ein bestimmtes Molekül wird dann identifiziert, wenn es auf mindestens drei charakteristischen Linien mit entsprechender Intensität beobachtet wird. Die Beobachtung von Wasser trifft nun aber auf zwei grosse Probleme: Erstens enthält unsere Atmosphäre sehr viel Wasserdampf, der die kosmische Strahlung von vielen dieser Moleküle und insbesondere natürlich von Wasser absorbiert. Es ist daher unmöglich, vom Erdboden und selbst von Flugzeugen aus Wasser zu beobachten. Zweitens sind die erforderlichen Wellenlängen vergleichbar mit

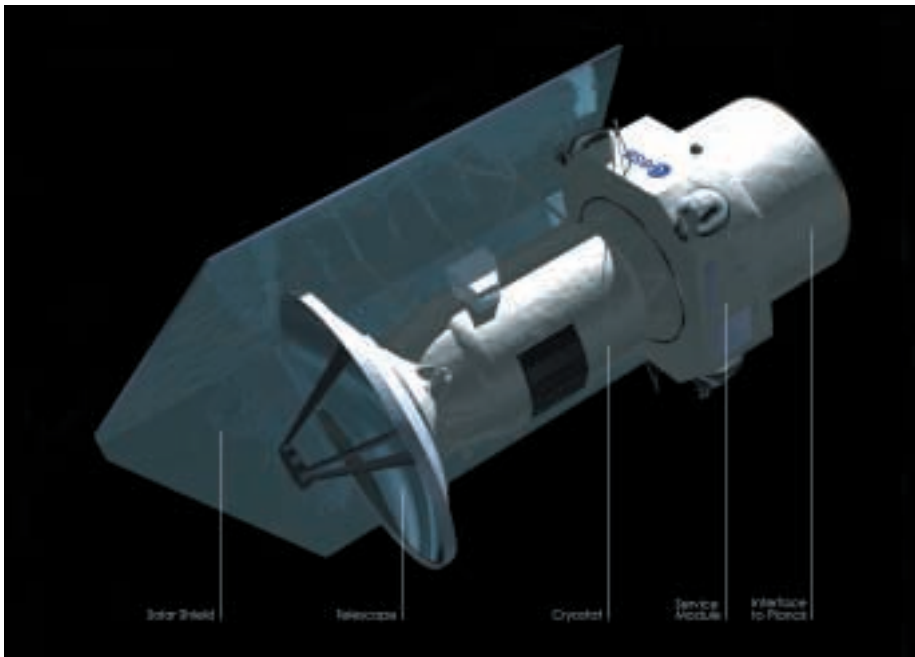


Abb. 3: Der Satellit Herschel der ESA hat sein Wärmeschild gegen die Erde und die Sonne gerichtet. Er ist etwa 7 m lang und wiegt 3,25 Tonnen. Im Jahre 2007 wird er mit einer Ariane-5-Rakete in eine stabile Position 1,5 Millionen km von der Erde gebracht. Der 3,5 m grosse Parabolspiegel sammelt Submillimeter-Strahlen aus Entstehungsgebieten von Sternen und Planeten und fokussiert sie auf die mit Helium gekühlten Empfänger. Bild: ESA

denjenigen der Wärmestrahlung der Erdatmosphäre und der irdischen Teleskope. Die Beobachtung lichtschwacher Objekte wird dadurch massiv gestört.

Der geheimnisvolle Ursprung von Wasser und sein verwickeltes Vorkommen und Verschwinden sind aus diesem einfachen Grund noch wenig bekannt. Wasserdampf und damit die Entstehung und Geschichte des Wassers lassen sich nur mit Teleskopen auf Satelliten beobachten. Satelliten in Erdumlaufbahnen werden durch die irdische Wärmestrahlung auch bei bester Abschirmung auf eine Temperatur von mindestens  $-20^{\circ}\text{C}$  aufgeheizt. Will man kosmische Submillimeterwellen empfindlicher beobachten, muss man sich weiter von der Erde entfernen.

### Ein neuer Satellit soll weiterhelfen

Ein neuer Satellit, benannt nach dem Astronomen Friedrich Wilhelm Herschel, ist unter der Leitung der ESA im Bau (Abb. 3). Er hat das Ziel, dem Ursprung des Wassers auf die Spur zu kommen. Der Satellit Herschel wird sowohl erdnahe wie extragalaktische Sternentstehungsgebiete im Submillimeter-Wellenlängenbereich beobachten. Seine Detektoren werden mit flüssigem Helium auf weniger als 1 K gekühlt, um ihre eigene Wärmestrahlung zu vermindern. Nach dem Start im Jahre 2007 wird Herschel an den Lagrangepunkt L<sub>2</sub> gebracht, ungefähr 1,5 Millionen Kilometer von der Erde entfernt in der Gegenrichtung zur Sonne. Dort kreist er mit der Erde in 365 Tagen um die Sonne.

Das Institut für Astronomie der ETH und das Institut für Feldtheorie und Höchstfrequenz sind am Bau eines hoch auflösenden Spektrometers für Herschel beteiligt. Das Gerät funktioniert zunächst wie ein optisches Teleskop und fokussiert mittels Spiegeln die Wellen auf einen Mischer, der die einfallende Strahlung wie ein Radioempfänger auf eine viel kleinere Zwischenfrequenz hinunter transformiert, wo sie dann elektronisch verstärkt wird. Der optische Teil konnte an die Schweizer Industrie vergeben werden, ein kühlerer Verstärker wird im Haus entwickelt. Der Spektrometer hat genügend Auflösung, um Moleküllinien auch der kältesten Gebiete erstmals im Detail zu analysieren. Als Gegenleistung werden die Astronomen der ETH Beobachtungszeit mit Herschel erhalten. Mit einem 3,5-m-Spiegel ausgerüstet, wird Herschel das bisher weitaus grösste Submillimeter-Teleskop sein und in einem praktisch noch unerforschten Wellenlängenbereich beobachten.

#### Forschungsinformationen

Die Arbeitsgruppe von Prof. Benz beschäftigt sich mit der Dynamik der heissen Hüllen von Sonne, Sternen und Protosternen sowie der Teilchenbeschleunigung in Sonneneruptionen.

<http://www.astro.phys.ethz.ch/herschel/>  
<http://www.astro.phys.ethz.ch/rapp/>

#### Glossar

##### Akkretion:

Ist eine Molekülwolke gravitationsinstabil geworden, beginnt sie zu kollabieren. Die einzelnen Massezentren akkretieren Materie, die mit Drehimpuls behaftet ist. Aufgrund der Drehimpulserhaltung nähert sich die Materie dem anziehenden Körper auf Spiralbahnen – eine scheibenförmige Materiekonfiguration, eine Akkretionsscheibe, entsteht (accretio = Zuwachs).

##### Molekülwolken:

Bei diesen Bereichen des interstellaren Mediums handelt es sich um Gebiete grösserer Dichte mit Werten bis zu  $10^6$  Teilchen/cm<sup>3</sup> und extrem niedriger Temperaturen von ca. 10 K bis 50 K. Hierdurch können zahlreiche Moleküle entstehen.

##### Protostern:

Kollabiert eine Molekülwolke, zerbricht sie in einzelne Fragmente. Wenn das Zentrum eines Fragmentes optisch dick wird, geht der Kollaps in eine wesentlich langsamere Kontraktion über. Es ist ein Protostern, ein sich noch nicht im hydrostatischen Gleichgewicht befindender Stern, entstanden.

##### Staub:

Als Staub bezeichnet man im astrophysikalischen Sinn kleinste Festkörperpartikel mit Grössen im Nanometerbereich, d.h. Moleküle, die ausreichend gross sind, um Festkörpereigenschaften aufzuweisen. In Molekülwolken spielen diese kleinen Festkörper eine wichtige Rolle: Staub in den äusseren Bereichen bildet einen «Schutzschild» für die Wolke. Sie schirmen ihr Inneres vor interstellarer UV-Strahlung ab, sodass Moleküle und Festkörperpartikel nicht zerstört werden. Wenn sich aus den Molekülwolken Sterne bilden, dient der Staub aufgrund seiner Emission im Infraroten als «Kühlmittel» für die Protosterne.

St. Scholz

#### Arnold Benz

Professor am Institut für Astronomie der ETH Zürich

# DIE SONNE – UNSER NÄCHSTER STERN

JAN OLOF STENFLO

Ohne die Sonne als zuverlässige Energiequelle wäre das Leben auf der Erde undenkbar. Auch in der Astrophysik spielt die Sonne eine zentrale Rolle, obwohl sie nur ein ganz gewöhnlicher Stern unter hundert Milliarden anderen Sternen in unserer Heimatgalaxie, der Milchstrasse, ist. Nur an der Sonne können wir die Physik eines Sterns detailliert erforschen und die theoretischen Ansätze der Astrophysik in Einzelheiten überprüfen.

*Die Sonne aufgenommen mit dem Extreme ultraviolet Imaging Telescope (EIT) der Raumsonde SOHO (Solar and Heliospheric Observatory) der ESA. Auffälligstes Merkmal ist eine gewaltige Protuberanz am linken unteren Bildrand, die sich über mehrere 100 000 km erstreckt. Bild: ESA, NASA*

Da sich unser Wissen über entferntere kosmische Objekte massgebend auf die Ergebnisse aus der Sonnenforschung stützt, wird die Sonne oft als der «Rosettastein der Astrophysik» bezeichnet. Die von der Sonne abgestrahlte Energie entsteht durch thermonukleare Fusion von Wasserstoff zu Helium. Jeder Stern ist ein von der Schwerkraft eingeschlossener Fusionsreaktor. Der für diesen Prozess zugängliche Brennstoff ist aber begrenzt. Bisher hat die Sonne etwa die Hälfte davon aufgebraucht. Nach Verbrauch

dieses Brennstoffs wird kein Leben mehr auf der Erde möglich sein. Die Sonne entwickelt sich dann zu einem Roten Riesenstern mit einem Radius, vergleichbar mit dem der Erdbahn. Am Ende dieser Phase stösst die Sonne einen grossen Teil ihrer Hülle ab und zieht sich anschliessend enorm zusammen zu einem so genannten Weissen Zwergstern mit einem einhundertmal kleineren Radius als dem der jetzigen Sonne. Ihre Dichte wird zu dieser Zeit eine Million mal grösser als die von Wasser sein.

Als Weisser Zwerg hat die Sonne keine weiteren nuklearen Energiequellen zur Verfügung. Deshalb kühlt sie durch Abstrahlung der gespeicherten Wärmeenergie allmählich ab und endet damit auf dem «kosmischen Friedhof» als Schwarzer Zwergstern. Hans Bethe aus den USA erhielt 1967 den Nobelpreis für Physik für seine theoretische Erklärung, wie Sonne und Sterne ihre Energie durch Fusion von Wasserstoff zu Helium produzieren. Heute können wir die durch diese Fusionsprozesse erzeugten Neu-

trinos direkt beobachten und damit bestätigen, dass Fusion von Wasserstoff tatsächlich für die Energieproduktion der Sonne verantwortlich ist. Für ihre Pionierleistungen bei der Entwicklung der Neutrino teleskope wurden im letzten Jahr der Amerikaner Raymond Davis Jr. und der Japaner Masatoshi Koshihira mit dem Nobelpreis für Physik ausgezeichnet.

## Das Innere der Sonne sichtbar machen

Die dem beschriebenen stellaren Entwicklungsweg zugrunde liegenden theoretischen Vorstellungen können an der Sonne überprüft und auf ein empirisches Fundament gestellt werden. Besonders erwähnenswert ist hier die in den letzten zwei Jahrzehnten entwickelte Methode der «Helioseismologie». Man kann beobachten, dass die ganze Sonne bei wohldefinierten Frequenzen schwingt. Es handelt sich um globale Schallwellen, die sich im Innern der Sonne ausbreiten und durch konstruktive und destruktive Interferenz ein reichhaltiges diskretes Spektrum mit einer Vielfalt von wohldefinierten «Tönen» produzieren. Solche Töne entstehen auch, wenn man eine Metallkugel anschlägt oder in jedem Musik-

instrument. Welche Töne oder Frequenzen entstehen, hängt von der Variation der Schallgeschwindigkeit im Innern der Kugel ab. In der Sonne verhält sich die Schallgeschwindigkeit proportional zur Wurzel der Temperatur. Das beobachtete Spektrum der Schwingungsfrequenzen wird mathematisch invertiert, um die Variation der Temperatur mit der Tiefe im Innern der Sonne empirisch zu finden. Diese Bestimmungen haben die theoretischen Standardmodelle der Sonne detailliert bestätigt.

## Ein kosmisches Plasmalabor

Im Gegensatz zur Sonnenscheibe erscheinen die Sternscheiben meistens unaufgelöst als Punktobjekte. Die Sonne bietet uns die Möglichkeit zu untersuchen, welche physikalischen Prozesse sich in den Sternatmosphären abspielen. Die klimatischen Prozesse auf den Sternen unterscheiden sich aber grundlegend von den gasdynamischen Prozessen der Erdatmosphäre. Wegen der hohen elektrischen Leitfähigkeit der Sternmaterie können nämlich starke elektrische Ströme durch Induktionseffekte erzeugt werden. In einem solchen Medium, auch Plasma genannt, spielen die magnetischen Kräfte eine fundamentale Rolle. Die Wech-

selwirkung der Magnetfelder mit den turbulenten und zyklonischen Plasmabewegungen führt zur grossartigen Variabilität von Sonne und Sternen. Sichtbar wird sie in Sonnenflecken (siehe Abb. 2), Eruptionen, dem 11-jährigen Aktivitätszyklus und einer Vielzahl anderer Erscheinungen. Durch das Studium der Sonne versuchen wir zu verstehen, wie sich diese physikalischen Effekte auf andere astrophysikalische Systeme übertragen lassen.

Als plasmaphysikalisches Labor kann die Sonne nicht durch Erdlaboratorien ersetzt werden, da man bei einer Anpassung der solaren Dimensionen an die Laboratorien auf der Erde die magnetischen und elektrischen Feldstärken entsprechend aufskalieren müsste, um wesentliche Eigenschaften des Plasmas invariant zu halten. Dies würde zu Feldstärken führen, die viele Grössenordnungen jenseits der künstlich herstellbaren Feldstärken liegen. Am Beispiel der Sonne erforscht man deshalb einen Bereich der Plasmaphysik, der mit anderen Mitteln nicht untersucht werden kann. Das dadurch erweiterte Verständnis der Plasmaphysik befruchtet indirekt andere anwendungsorientierte Bereiche, z. B. die Plasmafusion zur Lösung der Energieversorgung der Erde.

## Solare Magnetfelder

In einem Versuch, das Auftreten von Sonnenflecken zu erklären, hat der Schwede Hannes Alfvén die Magnetohydrodynamik, einen wichtigen Zweig der Plasmaphysik, entwickelt und wurde dafür 1970 mit dem Nobelpreis für Physik belohnt. Heute sucht man die Erklärung der magnetischen Aktivität der Sterne im Rahmen der so genannten Dynamotheorien, mit denen das Entstehen makroskopischer Magnetfelder überall im Kosmos erklärt werden soll, wie z. B. das Magnetfeld der Milchstrasse oder das der Erde. Der 11-jährige Aktivitätszyklus der Sonne ist ein Spezialfall eines kosmischen Dynamos, der eine 11-jährige topologische Schwingung zwischen einem poloidalen und toroidalen Zustand des Magnetfeldes aufweist. Durch ihre Nähe zu uns bietet die Sonne die einzigartige Möglichkeit, die Dynamotheorien detailliert zu überprüfen. Wie die chemischen Elemente, hinterlassen auch die Magnetfelder ihre «Fingerabdrücke» oder Signaturen im Sonnenspektrum, und zwar in der Polarisation der Spektrallinien. Durch Spektropolarimetrie ist es möglich, Struktur, Dynamik und Entwicklung der Sonnenmagnetfelder empirisch zu untersuchen und mit den Plasmatheorien zu vergleichen. Solche Untersuchungen bilden ei-

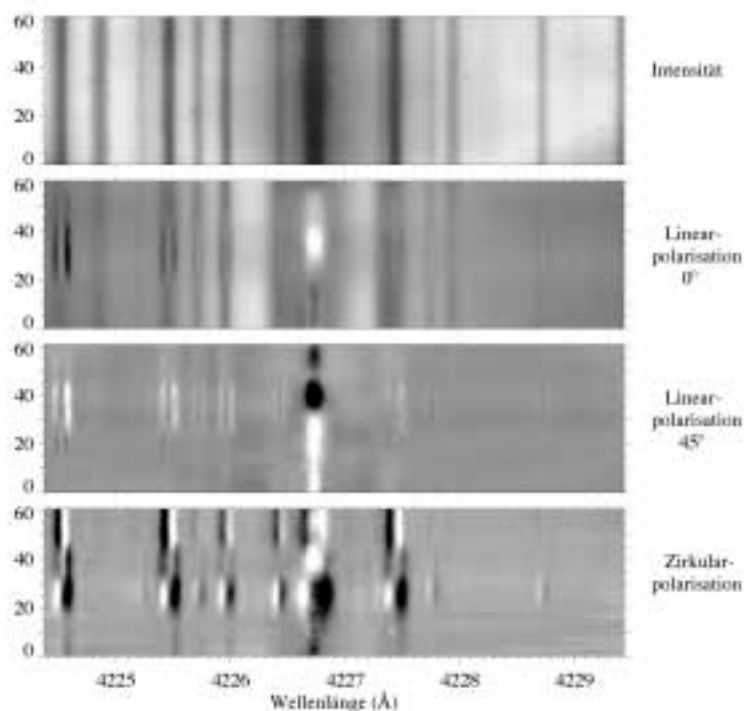


Abb. 1: Spektrales «Gesicht» der Sonne. Gezeigt wird ein winziger Ausschnitt aus dem blauen Teil des polarisierten Sonnenspektrums, aufgenommen mit dem Zurich Imaging Polarimeter (ZIMPOL) der ETH Zürich am Kitt Peak Observatorium (Arizona) am 9. März 2002 (siehe Abb. 5, S. 13). Die vier gleichzeitigen Bilder repräsentieren (von oben nach unten) die Intensität, zwei Linearpolarisationen und die Zirkularpolarisation. Die vertikale Skala gibt die relative Position auf der Sonnenscheibe längs dem Spektrographenspalt in Einheiten von 1000 km an. Die spektralen Strukturen enthalten in verschlüsselter Form reichhaltige Informationen über die physikalischen Prozesse in der Sonnenatmosphäre.

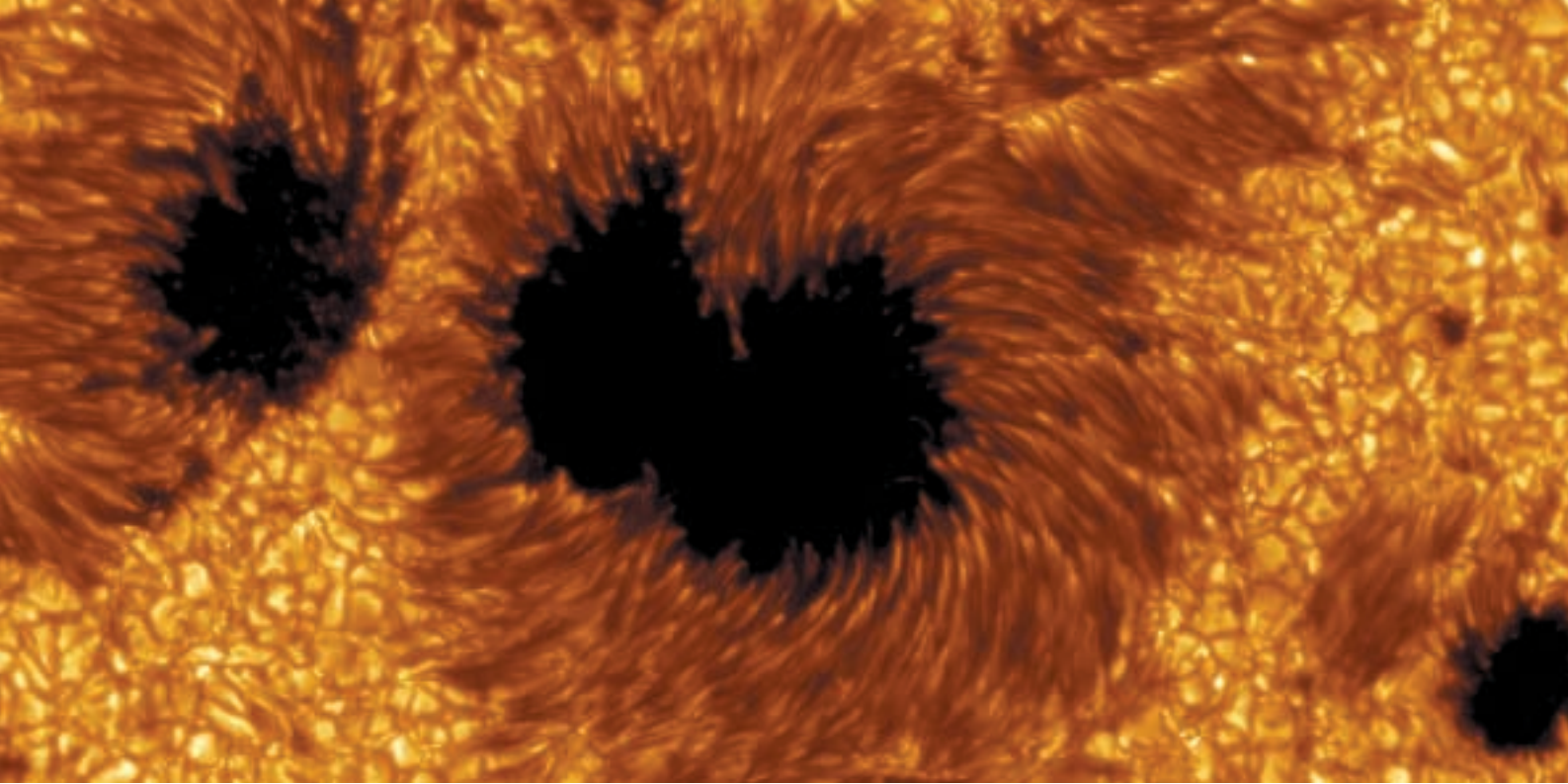


Abb. 2: Sonnenflecken, Ausdruck der magnetischen Aktivität eines Sterns. Das Bildfeld entspricht etwa 0,2% der Fläche der Sonnenscheibe. Die Aufnahme wurde am 15. Juli 2002 auf La Palma mit dem neuen Teleskop der Königlich Schwedischen Akademie der Wissenschaften gemacht.

## Glossar

### Dynamotheorien:

Wie aufwendige Laborexperimente mittlerweile bestätigen, können rotierende, elektrisch leitende Flüssigkeiten ein stabiles Magnetfeld verursachen. Solche Plasmen und Schmelzen sind in der Sonne und der Erde zu finden und zeichnen sich dort für die Magnetfelder dieser Objekte verantwortlich.

### Hanle-Effekt:

Die magnetische Beeinflussung der Polarisation der Lichtemission. Dabei bewirkt ein Magnetfeld in Beobachtungsrichtung eine mit zunehmender Feldstärke wachsende Depolarisation der Strahlung (1924).

### Plasma:

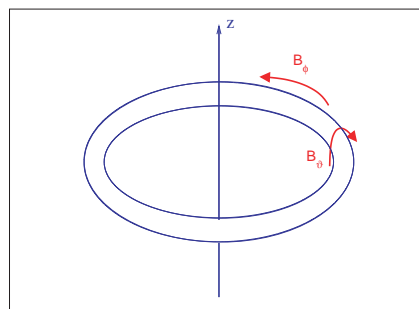
Ein Gasgemisch extrem hoher Temperatur, das sich aus freien Elektronen und Ionen zusammensetzt.

### Polarisation:

Schwingt die elektromagnetische Welle (das «Licht») in einer Ebene, spricht man von linear polarisiertem Licht. Beschreibt die Spitze des Lichtvektors in einer zur Ausbreitungsrichtung senkrechten Ebene einen Kreis, handelt es sich um zirkular polarisiertes Licht. Wird hingegen eine Ellipse beschrieben, nennt man das Licht elliptisch polarisiert.

### poloidaler/ toroidaler Zustand:

Zwei verschiedene Moden magnetischer Felder. Die einfachste Realisierung eines Toroidfeldes ist das ringförmige Feld um einen geraden Leiter ( $B_\phi$ ). Die poloidale Komponente ( $B_\theta$ ) verläuft entlang des Polarwinkels, z.B. in Dipolfeldern. Magnetfelder enthalten i.A. Anteile beider Moden (siehe Abbildung).



### Zeeman-Effekt:

Im Jahr 1896 hat Pieter Zeeman festgestellt, dass sich Spektrallinien im Magnetfeld aufspalten. Aus der Aufspaltung der Spektrallinien lassen sich Rückschlüsse auf die Atomstruktur ziehen.

St. Scholz, A. Koch

nen Schwerpunkt der Forschung am Institut für Astronomie der ETH. Unter Verwendung elektrooptischer Technologien haben wir ein hochpräzises Polarimetriesystem entwickelt, mit dem zweidimensionale Bilder des vollen Polarisationszustandes mit viel höherer Genauigkeit als mit anderen vergleichbaren Systemen der Welt aufgenommen werden können. Ein Bild des Polarisationsvektors lässt sich in den vier gleichzeitigen Bildern von Intensität, zwei Linearpolarisationen und Zirkularpolarisation darstellen. Ein Beispiel sehen wir in Abb. 1. Die auftretenden polarisierten Spektralstrukturen sind Signaturen nicht nur von Magnetfeldern durch Zeeman- und Hanle-Effekte, sondern auch solche von schlecht verstandenen Prozessen der Atom- und Quantenphysik. Die Sonne dient also auch als ausgezeichnetes atomphysikalisches Labor.

### Forschungsinformationen

Die Forschungsinteressen der Arbeitsgruppen um Prof. Stenflo gelten der solaren Astrophysik, insbesondere der astrophysikalischen Polarimetrie.  
[http://www.astro.phys.ethz.ch/home\\_nf.html](http://www.astro.phys.ethz.ch/home_nf.html)

### Prof. Dr. Jan O. Stenflo

ordentlicher Professor für Astronomie und Vorsteher des Instituts für Astronomie der ETH Zürich

# DIE VERWANDTEN DER MILCHSTRASSE

C. MARCELLA CAROLLO

Teleskope können heutzutage sowohl Licht von weit entfernten Galaxien erfassen als auch nahe Galaxien im Detail erforschen. Sie ermöglichen es, die physikalischen Prozesse, die in kosmologischen Zeiträumen zu der beobachteten Komplexität der lokalen Galaxienpopulation führten, zu verstehen. Dies ist eines der grundlegenden Ziele der modernen Astrophysik.

*Die Kleine Magellansche Wolke, eine 190 000 Lj entfernte irreguläre Galaxie der Lokalen Gruppe in der Konstellation Tukan, aufgenommen mit dem 4-m-Blanco-Teleskop am Cerro Tololo Inter-American Observatory (CTIO) in Chile. Bild: NOAO/AURA/NSF*

Der Menschheit ist erst seit weniger als 100 Jahren bewusst, dass unsere eigene Galaxie, die Milchstrasse, nicht das gesamte Universum darstellt. Tatsächlich ist die Galaxis nur eine von ungefähr 100 Milliarden ähnlicher Galaxien. Die Tür zum extragalaktischen Universum wurde von Edwin Hubble in den 1920er-Jahren geöffnet. Hubble konnte 1925 zum ersten Mal die Distanz zu schwach leuchtenden Nebeln messen. Mit Entfernungen von Millionen von Lichtjahren liegen diese Objekte weit jenseits der Grenzen der Milchstrasse. Es handelt sich um Galaxien wie die unsere. Jede dieser Galaxien beherbergt einige Dutzend oder sogar Hunderte von Milliarden Sternen, die sich über Distanzen in der Grössenordnung von  $10^{21}$  m erstrecken. Während der Rest des

Universums weiterhin expandiert und sich somit der relative Abstand zwischen den Galaxien vergrössert, bleiben die Galaxien selbst, als durch die eigene Gravitationskraft gebundene Systeme, bestehen.

## Die zwei Materiearten im Universum

Die leuchtenden Galaxien, die am Himmel beobachtbar sind, bilden nur einen kleinen Bestandteil der eigentlichen Anhäufung von Materie. Aktuelle Beobachtungen haben ergeben, dass nur etwa ein Zehntel der gesamten Materie im Universum in Form von normaler, baryonischer Materie vorkommt. Die anderen 90 Prozent sind «dunkel» und von unbekannter Natur. Höchstwahrschein-

lich handelt es sich dabei um ein unentdecktes, massives, fundamentales Teilchen, welches nicht wechselwirkt – möglicherweise das leichteste supersymmetrische Teilchen. Die Materie selbst, baryonische und dunkle zusammen, scheint nur gerade 25 Prozent des gesamten Energiegehalts des Universums auszumachen. Der Rest existiert in einer exotischen Form, bekannt als Vakuumenergie. Nichtsdestotrotz ist es die baryonische Materie, die verantwortlich ist für die Entstehung der Sterne, der Planeten und letztendlich auch des Lebens. Es ist die baryonische Materie, die wir beobachten und detailliert studieren können, um zu bestimmen, wann bzw. wie die gesamte Struktur entstand.

## Unsere Nachbarschaft

Die lokale Galaxienpopulation zeigt eine gewaltige Strukturvielfalt und deckt einen grossen Bereich von Grössen und Massen ab – von ungefähr 10 Millionen bis mehr als 100 Milliarden Sonnenmassen. Unsere eigene Milchstrasse ist eine Scheibengalaxie, eine eher typische und gewöhnliche Art von Galaxie im lokalen heutigen Universum. Die meisten Sterne der Milchstrasse befinden sich in einer abgeflachten Scheibe und umkreisen das Zentrum in ungefähr kreisförmigen Umlaufbahnen. Ein markantes spiralförmiges Muster in der Scheibe wird durch heisse, junge Sterne beschrieben, deren Entstehung durch spiralförmige Dichtewellen ausgelöst wurde. Eingebettet in der zentralen Scheibenregion innerhalb eines Gebietes mit einem Radius von ungefähr 5000 Lichtjahren ( $10^{19}$  m), beinhaltet die Milchstrasse eine viel dichtere, dreidimensionale Struktur – bekannt als Bulge. Im Bulge bewegen sich die Sterne typischerweise auf willkürlichen Umlaufbahnen und sind viel älter als die Sterne in der umgebenden Scheibe. Die Population der nahen Galaxien reicht von der reinen Scheibengalaxie mit keinem feststellbaren Bulge (Abb. 1) bis hin zu reinen Sphäroiden ohne Scheibenkomponente (Abb. 2, siehe S. 34). Ein wichtiger Hinweis auf den Ursprung einer solchen Vielfalt kommt von den auffallenden Beziehungen zwischen den strukturellen Eigenschaften der Galaxie und der lokalen Galaxiendichte. Die meisten Galaxien sind weit über das ganze Weltall verstreut. Nur ein relativ kleiner Teil der Galaxien ist in Galaxienhaufen zu finden. Galaxienhaufen sind Ansammlungen von einer bis zu einigen tausend Galaxien, die meist sehr massereiche, reine Sphäroidgalaxien sind.

## Wie entstehen Galaxien?

Ein Modell zur Entstehung von Galaxien, das in den vergangenen zwei Jahrzehnten entwickelt wurde, stützt sich auf kalte, dunkle Materie (Cold Dark Matter, CDM). Während der Expansion nach dem Urknall entwickelten sich dynamische Instabilitäten innerhalb der Regionen, die nur etwas dichter als die durchschnittliche Dichte des Universums sind. In diesen Regionen steigt die Dichte aufgrund ihrer eigenen Gravitation. Letztendlich überwindet die Eigengravitation die kosmische Expansion. Diese Regionen lösen sich von der globalen Expansion und beginnen zu kollabieren. Die Baryonen können ein hydrostatisches Gleichgewicht erlangen, da sie Energie durch direkte



Abb. 1: Die Scheibengalaxie Messier 83 befindet sich ungefähr 15 Millionen Lichtjahre entfernt im südlichen Sternbild Hydra. Beobachtet wurde sie mit einer der vier 8-m-Einheiten des VLT des ESO. Ihre Spiralstruktur, durchwoben mit Regionen, wo neue Sterne entstehen, gleicht unserer eigenen Galaxie. Bild: ESO

Stösse austauschen, d. h., es entsteht ein Gleichgewicht zwischen Druck und Anziehungskraft bei einer Temperatur von einigen Millionen Grad. Im Gegensatz dazu sind die schwach wechselwirkenden CDM-Teilchen nicht in der Lage, Energie mit anderen Teilchen auszutauschen. Sie können ihren Gleichgewichtszustand nur erreichen, indem sie Energie mit dem Gravitationsfeld, das durch die gesamte Anhäufung der Materie erzeugt wird, austauschen. Die Baryonen können Strahlung freisetzen und somit abkühlen, kontrahieren und eine hohe Dichte im Zentrum der ausgedehnten CDM-Halos erreichen. In diesen Zentren hoher Dichte entstehen und sterben Sterne. Sie geben Metalle und Energie zurück ans diffuse Medium, aus dem wiederum neue Sterne geboren werden. Dieser Zyklus erzeugt die Strukturen, welche wir heute als leuchtende Galaxien bezeichnen – Sternensysteme, die in ihrem Zentrum mehr als 100 Milliarden Mal dichter sind als das Universum im Durchschnitt. Die Evolution von Materieregionen mit höherer Dichte, die zu den Galaxien geführt hat, war bei weitem kein isolierter Prozess. Speziell

im frühen Universum scheinen Verschmelzungen und Wechselwirkungen zwischen verschiedenen Halos und Klumpen eine fundamentale Rolle in der Entstehung der Galaxienpopulation, die wir im Universum heute beobachten, gespielt zu haben. Obwohl dieses Standardbild der Galaxienentstehung einen nützlichen Rahmen bietet, ist noch nicht von einem vollkommen konsistenten Bild der Entstehung von Galaxien zu sprechen. Ein weitgehend ungelöstes Problem bei der Galaxienentstehung ist die Rolle der Anfangsbedingungen, der Umgebungseffekte und der relativ späten galaxieninternen Evolutionsprozesse. Zum Beispiel könnte sich die grosse Dichte in den Bulges entwickelt haben, da während ihrer Entstehung beträchtliche Energie durch Gas abgeführt wurde, oder sie zeigt einfach die Entstehung der Bulges zu einem sehr frühen Zeitpunkt auf (oder aber eine Kombination dieser beiden Varianten). Die relativ kleine Grösse des Bulges kombiniert mit dessen bescheidener Rotationsgeschwindigkeit führt zu einem kleinen Wert des Drehimpulses pro Einheitsmasse, verglichen mit der Scheibe. Bulges könnten also in Re-





Abb. 2: Ein optisches VLT-Bild der bulge-dominierten Galaxien NGC 5090 (rechts) und NGC 5091 (links), welche sich im südlichen Sternbild Stier befinden. Die Sterne, welche sich wie diese in einem massiven Bulge befinden, sind durchschnittlich bedeutend älter als die Sterne, die man in Spiralarmen von Scheibengalaxien findet. Bild: ESO

gionen von Protogalaxien mit niedrigem Drehimpuls entstehen. Alternativ dazu könnte man Transport von Drehimpuls vor der Entstehung des Bulges postulieren. Man führt Drehimpuls von der zentralen Region ab und deponiert diesen im Randgebiet der Galaxie. Ein solcher Transport nach aussen könnte vielleicht während der hierarchischen Fusion von Subklumpen – aufgrund dynamischer Reibung und Gravitationsdrehmomenten im frühen Universum – auftreten. Nicht axialsymmetrische, dynamische Instabilitäten, die sich später innerhalb relativ entwickelter Scheiben gebildet haben, könnten ebenfalls den Transport von Drehimpuls nach aussen verursachen und zu einer hohen zentralen Dichte innerhalb der Scheibe führen. Galaxienfusionen werden immer noch im lokalen Universum beobachtet (Abb. 3). Sie scheinen jedoch weit weniger häufig und relevant zu sein, als in der Vergangenheit. Es ist möglich, dass interne Prozesse nun die dominanten Treiber der galaktischen Evolution für spätere Epochen sind.

Die heutigen Beobachtungsmöglichkeiten erlauben es, in den Kosmos vorzudringen und machen es sogar möglich, Galaxien in einem sehr frühen Stadium zu beobachten. Doch leider sind keine der physikalischen Prozesse, die die Entwicklung der Galaxien beeinflussen, direkt beobachtbar. Die Entwicklungen in der Galaxienpopulation geschehen in einem Zeitrahmen von Milliarden von Jahren. Die Antwort auf die Frage, welche von allen Entwicklungsmöglichkeiten die Galaxien gewählt haben, um ihren heutigen Zustand zu erreichen, wird die Suche nach Zusammenhängen zwischen den physikalischen Eigenschaften von Galaxien geben.

### Galaxienkerne als Paradebeispiel

In den Kernregionen der Galaxien erwartet man die entscheidenden Hinweise für ein besseres Verständnis der Entstehung von Galaxien. Das Hubble-Space-Teleskop (HST) kann ins Innere der Galaxienkerne zoomen. In den Zentren von sehr massiven Bulges

findet man supermassive Schwarze Löcher von ungefähr einer Million bis einer Milliarde Sonnenmassen eingebettet. Zwischen der Masse dieser zentralen supermassiven Schwarzen Löcher und der Masse ihrer umgebenden Bulges existiert eine enge Korrelation. Unsere Milchstrasse mit einem Schwarzen Loch von drei Millionen Sonnenmassen, welches die ihm nahen Sterne zwingt, sich mit Geschwindigkeiten von mehreren Tausend Kilometern pro Sekunde zu bewegen, ist hier keine Ausnahme. Wie hat sich diese symbiotische Beziehung zwischen Schwarzen Löchern und Bulge entwickelt? Ist die Dichte der Baryonen oder eher das globale Potenzial der hauptsächlichlichen Faktor, der die Entstehung von zentralen Schwarzen Löchern beeinflusst? Ist die Beziehung zwischen Schwarzen Löchern und Bulgemasse eine lineare bis hin zur kleinstmöglichen Bulgemasse? Waren die Bedingungen, um zentrale Schwarze Löcher zu formen, im frühen, dichteren Universum besser oder sind junge, dichte Strukturen zu einem späteren Zeitpunkt ebenso effizient, um ihre eigenen Schwarzen Löcher zu bil-



Abb. 3: Ein VLT-Bild von Centaurus A – ein galaktisches System, das ca. 10 bis 13 Millionen Lichtjahre von uns entfernt ist. Wahrscheinlich handelt es sich um eine kürzliche Fusion von einer massereichen Sphäroidgalaxie und einer Scheibengalaxie. Bild: ESO

den? Die Zentren von Scheiben mit kleiner oder gar keiner Bulgekomponente sind viel schwieriger zu beobachten als Zentren von massiven Sphäroiden. Dennoch verspricht deren Erforschung viele grundsätzliche Fragen zu klären.

An der ETH sind wir an einer umfangreichen Beoberkungskampagne beteiligt, um die Population der nahe gelegenen Scheibengalaxien von kleinsten bis zu grössten Skalen zu untersuchen. Diese Beobachtungen involvieren zum einen das HST (Siehe Abb. 2, S. 11), das seit 1990 in einer Umlaufbahn rund 600 km über der Erdoberfläche atemberaubende Bilder des Universums macht, sowie auch die bodengebundenen Observatorien. Die optischen und nah-infraroten HST-Bilder haben bereits ein überraschendes Resultat hervorgebracht: Die meisten nahen Scheibengalaxien beheimaten in ihrem Kern ausgeprägte, kompakte, jedoch räumlich aufgelöste Objekte neben der Scheibe und dem Bulge. Viele dieser Objekte sind eindeutig sehr dichte Sternhaufen von ungefähr 1 bis 100 Millionen Sonnenmassen. Neue Daten der Advanced Ca-

mera for Surveys des HST werden gebraucht, um grundlegende Eigenschaften wie Alter und Masse der zentralen dichten Sternhaufen und deren Heimatgalaxie zu bestimmen. In Anbetracht des hohen Vorkommens von dichten Sternhaufen im Zentrum von Scheibengalaxien und die allgemein akzeptierte Vorstellung des hierarchischen Galaxienaufbaus als Ursprung der sehr massereichen Bulges, stellt sich die Frage, ob die dichten zentralen Sternhaufen eine Rolle in der Entstehung von supermassiven Schwarzen Löchern und deren umgebenden Bulges spielen. Für das HST wird bereits eine neue Kamera, die Wide-Field-Camera-3, entwickelt. Ebenso plant man bereits die nächste Generation von Teleskopen, z. B. das 6,5-m-James-Webb-Space-Teleskop oder ALMA (Atacama Large Millimeter Array). Diese Instrumente werden unser Wissen über die Kerne der Galaxien und die Entstehung der ganzen umgebenden Struktur voranbringen.

#### Forschungsinformationen

Prof. Dr. C. Marcella Carollo ist Mitglied des wissenschaftlichen Aufsichtsrates, der die Planung der Wide-Field-Camera 3 beaufsichtigt, die im Jahre 2004 ins Hubble-Weltraum-Teleskop eingesetzt wird. Als Vorsitzende des wissenschaftlichen Organisationskomitees ist sie verantwortlich für die internationale Astrophysik-Konferenz vom 18. bis 22. August 2003 am ETH Zentrum in Zürich. (<http://www.exp-astro.phys.ethz.ch>)

#### C. Marcella Carollo

ausserordentliche Professorin am Institut für Astronomie am Departement Physik der ETH

# LEUCHTTÜRME IM UNIVERSUM

HANS MARTIN SCHMID

**Quasare gehören zu den spektakulärsten Objekten des Universums. Ihre extrem hohen Rotverschiebungen weisen darauf hin, dass sie die am weitesten von uns entfernten Objekte sind und so die Grenze des heutzutage bekannten Universums markieren.**

*Der Galaxiencluster Abell 370 – die zwei hellsten roten Galaxien über dem Gravitationsbogen sind die massereichsten und tragen somit stark zum Linseneffekt bei. Bild: ESO*

Quasare wurden Ende der 50er-Jahre mit den ersten Radiointerferometern entdeckt. Einige dieser Radioquellen konnten mit sternähnlichen, auf Photoplatten sichtbaren Objekten identifiziert werden, und sie wurden deshalb als quasi-stellare Radioquellen oder kurz Quasare bezeichnet. Allerdings blieben die Spektren der Quasare vorerst unverstanden, bis Maarten Schmidt 1963 erkannte, dass die dominierenden Linien nichts anderes als Wasserstofflinien mit extrem grosser Rotverschiebung sind. Interpretiert man dies als kosmologische Rotverschiebung – damals eine heftig umstrittene Annahme – so ergeben sich typische Distanzen von mehreren Milliarden Lichtjahren (Lj). Heute gilt es als gesichert, dass die Entfernungen der Quasare vergleichbar sind mit dem Radius des beobachtbaren Universums. Die Tatsache, dass wir diese Objekte aus so grosser Entfernung beobachten können, bedeutet, dass Quasare unglaubliche Energien abstrahlen müssen. In der Tat sind Quasare die leuchtkräftigsten Objekte im Universum. Die hellsten sind  $10^{15}$ -mal heller als die Sonne oder 1000-mal heller als grosse, normale Galaxien.

## Zeugen der Vergangenheit

Quasare sind enorm wichtig für die Erforschung des Universums: sie haben die Funktion heller Leuchttürme. Da Quasare mit immer grösseren Entfernungen gefunden werden, setzen sie immer engere zeitliche Grenzen für die Bildung der ersten Galaxien im frühen Universum. Der heutige Rekordhalter muss schon 800 Millionen Jahre nach dem Urknall existiert haben. Das Quasarlicht kann auch als Hintergrund-

quelle benützt werden, um das diffuse Gas zwischen den Galaxien aus den Absorptionslinien im Quasarspektrum zu erforschen. Zudem wurden mehrere Dutzend Quasare entdeckt, deren Bild durch das Gravitationspotenzial von Vordergrundgalaxien abgelenkt, vervielfacht und verstärkt wird (Abb. 1). Die so entstandenen Mehrfachbilder des Quasars sind ideal zur Untersuchung der Massenverteilung in Galaxien und für die Bestimmung von absoluten Distanzen im Universum. In diesem Artikel gehen wir nicht auf diese Anwendungen ein, sondern betrachten nur die Struktur der Quasare und verwandter Objekte.

## Die Struktur der Energiemonster

Quasare sind Galaxien mit einem aktiven Kern. Bis heute wurden mehrere 10 000 Objekte entdeckt. Davon sind aber nur wenige zugleich starke Radioquellen, weshalb zwischen «radio-leisen» QSO (quasi-stellare Objekte) und «radio-lauten» Quasaren unterschieden wird. QSO und Quasare sind verwandt mit weniger extremen, dafür weit häufigeren «radioleisen» Seyfert-Galaxien und «radiolauten» Radiogalaxien. Solche aktiven Galaxien befinden sich auch bei weitaus kleineren Entfernungen als Quasare und QSO. Daher können deren aktive Kerne auf sehr viel kleineren räumlichen Skalen untersucht werden.

Trotz der rasanten Entwicklung der astronomischen Beobachtungstechnik konnte bisher die Struktur der zentralen Energiequelle nicht direkt aufgelöst werden. Die Daten zeigen aber, dass die Energie innerhalb eines sehr kleinen Raumvolumens, kleiner als 1 Lj im Durchmesser, freigesetzt

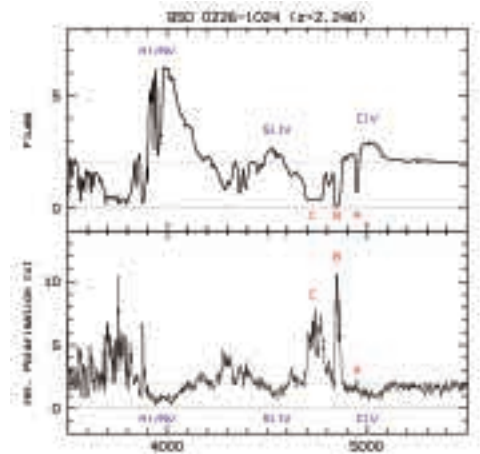


Abb. 1: VLT-Spektropolarimetrie für einen Quasar mit dem Flussspektrum (oben) und der relativen Polarisation (unten). Die gestrichelte blaue Linie zeigt die Kontinuumsmission bzw. die Kontinuumpolarisation. H1/NV, SiIV und CIV bezeichnen breite Emissionslinien und A, B, und C Linienabsorptionen für CIV.

wird. Viele Modelle wurden für die Energiequelle der aktiven Galaxienkerne vorgeschlagen, einzig die Akkretionsscheibe um ein superschweres Schwarzes Loch hat alle bisherigen Tests überstanden. Das weitgehend akzeptierte Grundmodell für aktive Galaxienkerne besteht entsprechend der Modellskizze in Abb. 2 aus folgenden Komponenten:

- Ein Schwarzes Loch mit einer Masse im Bereich  $10^6$  bis  $10^{10}$  Sonnenmassen.
- Eine heisse Akkretionsscheibe, durch die Gas in einer Spiralbewegung in das Schwarze Loch fällt. Diese Scheibe produziert die enorme Leuchtkraft durch Umwandlung der potenziellen Energie des hereinfallenden Gases in thermische Energie und Energieabstrahlung. Etwa eine Sonnenmasse muss jährlich verschluckt werden, um die Leuchtkraft eines Quasars zu erzeugen.
- Dichte Gaswolken, die von der Strahlung

der Akkretionsscheibe ionisiert werden und anhand ihrer Emissions- und Absorptionslinien beobachtbar sind.

– Ein breiter, für optische Strahlung opaker Torus aus kühlem Gas und Staub. Die Achse des Staubtorus fällt mit der Rotationsachse der Akkretionsscheibe und der Jetrichtung in «radio-lauten» Objekten zusammen.

– In «radio-lauten» Objekten werden zusätzlich zwei entgegengesetzte Gasjets mit nahezu Lichtgeschwindigkeit aus dem Zentrum ausgestossen. Diese Jets verursachen starke Radiostrahlung und in Vorwärtsrichtung auch Röntgen- und Gammastrahlen. Es gibt deutliche Hinweise, dass zumindest viele normale Galaxien ein zentrales, superschweres Schwarzes Loch besitzen. In der Milchstrasse konnte beispielsweise die Existenz des Schwarzen Lochs durch die Bahnbewegung der Umgebungssterne nachgewiesen werden. Der hauptsächlichliche Unterschied zwischen unserer Milchstrasse und einer aktiven Galaxie besteht vor allem darin, dass das Schwarze Loch in der Milchstrasse praktisch keine Materie akkretiert.

## Spektropolarimetrie mit dem VLT

Obwohl das Grundmodell für Quasare in seinen Grundzügen gut gesichert ist, blieben bisher viele Aspekte über die geometrische Struktur und Dynamik der dichten, ionisierten Gaswolken ungeklärt. Auch die vertikale Ausdehnung des Staubtorus ist unsicher, und die Beschleunigung des Jetgases ist nur in Ansätzen verstanden. Weil aktive Galaxienkerne auch für unsere besten Teleskope nur Punktobjekte sind, kann

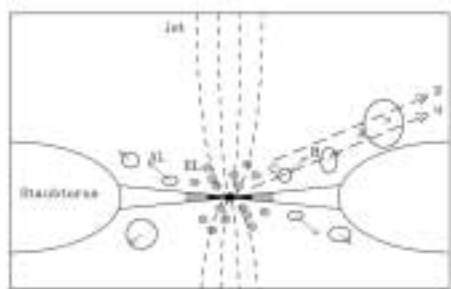


Abb. 2: Modellskizze für einen Quasar (zentraler Schnitt senkrecht zur Akkretionsscheibe). Das Schwarze Loch ist der Punkt im Zentrum, umgeben von der inneren, hellen Akkretionsscheibe. EL bezeichnet die ionisierten Wolken, aus denen die breiten Emissionslinien stammen. In derselben Ebene liegt der Staubtorus und senkrecht dazu in «radio-lauten» Objekten der Gasjet. Eingezeichnet ist auch die vermutete geometrische Verteilung und Bewegungsrichtung von schnell ausströmenden Gaswolken AL, wie sie im Quasarspektrum in Abbildung 3 als Absorptionslinien A, B und C sichtbar sind. Die gestrichelten Pfeile zeigen den Weg der ungestreuten, d. h. unpolarisierten, Kontinuumsstrahlung von der zentralen Quelle (u) und den Weg der gestreuten, d. h. polarisierten, Strahlung (p). Dabei wurde angenommen, dass die Streuregion mit den ionisierten Wolken EL identisch ist.

ihre geometrische Struktur nur durch indirekte Methoden bestimmt werden.

Am Institut für Astronomie der ETH wird die Geometrie von Quasaren mit spektropolarimetrischen Beobachtungen mit dem 8-m-Very-Large-Teleskop der ESO in Chile untersucht. Bei spektropolarimetrischen Messungen wird das Licht der Himmelsobjekte nicht nur nach deren Wellenlänge analysiert, sondern auch nach der Schwingungsrichtung der Lichtwellen quer zur Ausbreitungsrichtung, d. h. die Polarisation des Lichtes. Dies ist besonders nützlich zur Untersuchung von Streustrahlung, weil Lichtstreuungsprozesse durch Gasteilchen linear polarisiertes Licht verursachen.

Bei Quasaren kann nun mit Hilfe von polarimetrischen Messungen zwischen ungestreuter, d. h. unpolarisierter, Strahlung und gestreuter (polarisierter) Strahlung unterschieden werden. In Kombination mit einer spektroskopischen Analyse ist dies für verschiedene spektroskopische Komponenten möglich. Abb. 3 zeigt ein Beispiel für solche Beobachtungen für einen Quasar mit einer Rotverschiebung von  $z = 2,25$ , d. h. einer Entfernung von etwa 10 Milliarden Lichtjahren. Eine mögliche Interpretation der Beobachtungen ist in der einfachen Modellskizze in Abb. 2 veranschaulicht.

Spektroskopisch zeigt dieses Objekt die kontinuierliche Emission der inneren Akkretionsscheibe und starke Emissionslinien von H I, N V, Si IV und C IV der ionisierten Gaswolken in der Nähe des Schwarzen Lochs.<sup>1</sup> Zusätzlich sieht man bei jeder Emissionslinie auch Absorptionskomponenten (bei C IV mit A, B und C bezeichnet), die zu kürzeren Wellenlängen verschoben sind. Diese Absorptionen entstehen durch Gas, das entsprechend dem Dopplereffekt mit sehr hoher Geschwindigkeit von etwa 5000 km/s bis 30 000 km/s aus dem System strömt. Es wird vermutet, dass dieser Massenausfluss von der rotierenden Akkretionsscheibe stammt, und durch Zentrifugalkräfte oder den Strahlungsdruck der zentralen Quelle beschleunigt wird.

Die relative Polarisation der verschiedenen Komponenten unterscheidet sich stark. Das Kontinuum zeigt eine konstante Streupolarisation von etwa 2 Prozent. Sehr viel höher ist die Polarisation in den Absorptionskomponenten B und C. Die Erklärung dafür ist, dass das schnell herausströmende, absorbierende Gas die unpolarisierte zentrale Quelle verdeckt, nicht aber die polarisierte Strahlung aus der Streuregion. Bei Komponente A ist die Polarisation nicht erhöht, weil sie beides, die unpolarisierte zentrale Quelle und die Streuregion, verdeckt. Die Polarisation ist klein in den Emissionslinien,

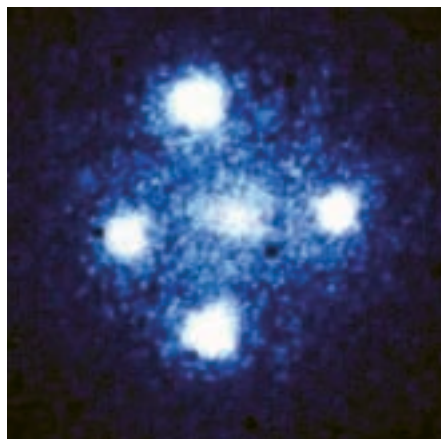


Abb. 3: Einstein-Kreuz: Ein schönes Beispiel für eine Gravitationslinse bei der eine Vordergrundgalaxie (diffuser Fleck in der Mitte) mit einer Distanz von etwa 400 Millionen Lj vier Bilder eines dahinter liegenden Quasars mit einer Distanz von 8 Milliarden Lj erzeugt – aufgenommen vom HST. Bild: STScI und NASA

weil diese Strahlung weiter aussen emittiert wird und deshalb nicht oder zumindest weniger gestreut wird. Dieses Beispiel illustriert die diagnostischen Möglichkeiten der Spektropolarimetrie. Sie dient dazu, sonst unzugängliche geometrische Informationen über die Struktur der punktförmigen Quasare zu gewinnen. Das Ziel unserer Untersuchungen ist ein besseres Verständnis der physikalischen Eigenschaften und der Entwicklung dieser faszinierenden Objekte im fernen Universum.

<sup>1</sup>H I oder C IV bezeichnen Spektrallinien der Elemente H oder C, wobei die römische Zahl nach dem Elementzeichen den Ionisationsgrad des Atoms angibt: I = neutral, II = einfach ionisiert, III = zweifach ionisiert usw.

### Forschungsinformationen

Das Institut für Astronomie der ETH verfolgt verschiedene Forschungsprojekte in astrophysikalischer Polarimetrie. Hans M. Schmid befasst sich mit polarimetrischen Messungen von Quasaren, Sternen und extrasolaren Planeten ([www.astro.phys.ethz.ch/staff/schmid](http://www.astro.phys.ethz.ch/staff/schmid)). Die beschriebenen VLT-Beobachtungen von Quasaren werden in Zusammenarbeit mit Prof. Appenzeller, Landessternwarte Heidelberg, durchgeführt. Informationen zum VLT: [www.eso.org](http://www.eso.org). und über Quasare: [www.astr.ua.edu/keel/agn](http://www.astr.ua.edu/keel/agn). Weitere Informationen über E-Mail: [schmid@astro.phys.ethz.ch](mailto:schmid@astro.phys.ethz.ch)

**Dr. Hans M. Schmid**

Privatdozent am Institut für Astronomie der ETH Zürich

# DIE SUCHE NACH BEWOHNBAREN PLANETEN

SIMON LILLY UND ALEX HALLIDAY

**Neue Entdeckungen und technische Entwicklungen haben einen regelrechten Wettbewerb hervorgerufen, die Frage zu klären, ob Leben im Universum häufig oder ungewöhnlich ist. Auch wenn es zur Klärung der Frage noch Jahrzehnte dauern wird, ist der Weg dorthin bereits relativ klar. Die Antwort – auch auf die Frage unserer eigenen Herkunft – ist so grundlegend, dass in den kommenden Jahren viel Geld in diese Forschung fließen wird. Ein neues Forschungsfeld zwischen Astrophysik, Biologie und Geologie entsteht.**

*Abb. 1: Oberflächenmerkmale auf dem Jupitermond Europa. Diese weisen auf eine Eisschicht hin, die eine flüssige Oberfläche bedeckt. Trotz seines grossen Abstands zur Sonne wird Europa durch Gezeitenkräfte von Jupiter erwärmt. Es ist durchaus möglich, dass sich Leben in solch einer Umgebung entwickelt. Bild: NASA*

Wenige Fragen sind so faszinierend wie die, ob es ausserhalb der Erde Leben gibt, und wie dieses aussehen könnte. Obwohl dieses Thema bereits in der griechischen Philosophie behandelt wurde, stammt die erste wissenschaftliche Abhandlung von Christiaan Huygens. Er spekulierte im späten 17. Jahrhundert über die physischen Eigenschaften der Bewohner anderer Planeten, die unter verschiedenen Bedingungen Leben ermöglichen würden. Im 18. Jahrhundert berechnete Georges Louis Leclerc, Comte du Buffon, wie lange schon Leben auf Planeten existierte oder wann sich erste Lebensformen entwickeln würden. Seitdem wurde die Frage nach ausserirdischem Leben mit stark wechselndem Interesse diskutiert.

## Was ist Leben?

Die meisten Leute können mühelos Eigenschaften aufzählen, die für ein lebendes System typisch sind, aber eine genaue Definition von «Leben» ist erstaunlich schwierig. Aus rein astrophysikalischer Sicht kann Leben als ein Zustand extremer Komplexität definiert werden. Lebende Systeme sind viel höher «geordnet» als jedes andere System im Universum. Ein Stern, eine Galaxie,

selbst das Universum als Ganzes können mit viel weniger Parametern beschrieben werden als auch nur das einfachste Protein. Mehrere Argumente sprechen dafür, dass Planetensysteme die geeignetsten Orte für die Entwicklung von Leben sind. Planeten um langlebige, also massearme Sterne können in grosser Menge Energie niedriger Entropie bereitstellen. Somit bilden sie eine stabile Umgebung, aus der sich hoch geordnetes Leben entwickeln kann, ohne dass der zweite Hauptsatz der Thermodynamik verletzt würde. Auf erdähnlichen Planeten gibt es die nötige Vielfalt chemischer Elemente, welche die Entstehung komplexen Lebens ermöglicht. Erdähnliche Planeten sowie Monde von grossen Gasplaneten bestehen fast ausschliesslich aus Elementen schwerer als Wasserstoff und Helium. Diese schweren Elemente werden durch Kernreaktionen in Sternen und Supernovaexplosionen erzeugt. In Gasplaneten sind sie viel seltener als in erdähnlichen Planeten. In Sternen und noch grösseren Strukturen tragen sie als «Verunreinigungen» nur noch ca. 2 Prozent zur Gesamtmasse bei.

## Die Wurzeln irdischen Lebens

Wie sich Leben auf der Erde bildete, ist unklar. Eindeutige Anzeichen für Leben finden sich in geologischen Formationen, die älter als zwei Milliarden Jahre sind. Jenes mikrobiologische Leben war schon relativ fortgeschritten. Deshalb können sich erste Lebensformen bereits wesentlich früher entwickelt haben. Jedoch ist die oft zitierte Evidenz aus noch älteren Gesteinen schwach und wurde oft angefochten. Wir wissen nicht, wie leicht oder schwierig es war, erstes Leben zu bilden. Vielleicht ist Leben auch mehrfach neu entstanden. Es könnte aber auch sein, dass auf unserem Planeten etwas extrem Ungewöhnliches passiert ist, wie es sich woanders im Universum nur selten wiederholt. Wenn wir Beweise für ausserirdisches Leben im Sonnensystem oder auf erdähnlichen Planeten um andere Sterne hätten, würde uns dies sicher helfen, solche Fragen zu beantworten. Jedoch konnte noch nicht einmal die Existenz eines extrasolaren terrestrischen Planeten bewiesen werden.

## Die Suche nach anderen Planetensystemen

Mehrere neue Entwicklungen haben zu einer starken Aktivität auf diesem Gebiet geführt. Besonders bedeutend ist die Entdeckung, dass Planetensysteme um Sterne ähnlich unserer Sonne recht häufig sind: mindestens um 5 Prozent aller sonnenähnlichen Sterne kreist wenigstens ein Planet. Da heutige Beobachtungstechniken an technische Grenzen stossen, ist diese Zahl aber in Wirklichkeit sicher höher. Innerhalb der nächsten zwanzig Jahre könnte es gelingen, lebensfreundliche und vielleicht auch belebte Planeten zu erkennen. In der Top-Ten-Liste des Wissenschaftsmagazins «Nature» wird dies als einer der zehn wahrscheinlichsten wissenschaftlichen Durchbrüche im 21. Jahrhundert genannt.

Die Anzeichen, dass Planetensysteme in der Galaxis gewöhnlich sind, haben sich innerhalb der vergangenen Jahre stetig verdichtet. Die anfänglichen Hinweise waren indirekt: Man fand, dass neu gebildete Sterne von einer Scheibe kalten Staubes umgeben sind. Dies passte gut zu den vorherrschenden Ideen, wie das Sonnensystem entstanden sei. Mittlerweile ist klar, dass solche Gas- und Staubscheiben ein natürliches Resultat der Sternbildung sind.

Direkt bewiesen wurde die Existenz extrasolarer Planeten erst 1995, als die Gruppe um Michel Mayor an der Universität Genf die Entdeckung eines Planeten meldete, welcher um den sonnenähnlichen Stern 51 Pegasi kreist. Seitdem wurden etwa 100 Planeten um andere Sterne durch ihre Gravitationswirkung gefunden: Die auf der Erde auftreffende Wellenlänge des Sternlichtes hängt gemäss dem Dopplereffekt von der Relativgeschwindigkeit des Sterns zur Erde ab. Weil das System Planet-Stern um sein gemeinsames Massenzentrum kreist, ändert sich die Geschwindigkeit des Sternes relativ zur Erde. Dies führt zu einer regelmässigen, messbaren Änderung der Wellenlänge des Sternlichtes, die ausreicht, um jupiterähnliche Planeten zu detektieren. Die Genfer Astronomen konnten zeigen, dass der Begleiter von 51 Pegasi ein Planet von der Grösse Jupiters ist. Er braucht für einen Umlauf jedoch nur 4,2 Tage, verglichen mit den 12 Jahren von Jupiter. Auch die anderen bis jetzt gefundenen Planetensysteme sind in dieser Beziehung völlig von unserem verschieden, was zu neuen theoretischen Vorstellungen über Planetenbildung führt.

Die Existenz derartiger extrasolarer Planetensysteme steht heute ausser Zweifel. Ein System steht genau so zur Erde, dass der Planet periodisch vor seinem Stern vorüber-

zieht und dabei das Sternenlicht abdunkelt. So können die Grösse und mit Hilfe der aus der Geschwindigkeitsvariation gewonnenen Masse auch die Dichte des Planeten bestimmt werden. Letztere ist tatsächlich ähnlich der von Jupiter. Auch wird ein kleiner Anteil des Sternenlichts von Natriumdampf in der Planetenatmosphäre absorbiert – die erste Bestimmung eines chemischen Elements in einem extrasolaren Planeten. Das direkte Abbilden von extrasolaren Planeten ist schwieriger. Problematisch ist die unmittelbare Nähe des Muttersterns, der im sichtbaren Wellenlängenbereich etwa eine Milliarde mal heller leuchtet als der Planet, im Infraroten etwa eine Million mal heller. Trotzdem ist zu erwarten, dass eine Kombination optischer Techniken bald zur direkten Beobachtung eines jupiterähnlichen Planeten um einen anderen Stern führen wird. Eine solche Technik ist die adaptive Optik. Etwa in der zweiten Hälfte des kommenden Jahrzehnts sollen Interferometer im Weltraum, wie z. B. die DARWIN-Mission der ESA (vgl. Abb. 2), sogar das Licht von erdähnlichen Planeten sehen können.

Dies wird es erlauben, Planeten zu charakterisieren. Man wird nach Eigenschaften von Atmosphären oder Oberflächen suchen können, welche entweder das Potenzial zur Entwicklung von Leben aufzeigen oder gar beweisen können, dass ein Planet tatsächlich Leben trägt. Natürlich kann die Suche auch negativ ausfallen, selbst wenn Leben existiert. Schliesslich wissen wir heute noch immer nicht mit Sicherheit, ob es auf unserem nächsten Nachbarn Mars oder den Monden Europa und Titan Leben gibt oder je gegeben hat. Jedoch sollte es möglich sein, in Atmosphären von erdähnlichen Planeten Gase zu finden, die ein chemisches Ungleichgewicht anzeigen würden, wie z. B. Sauerstoff oder Methan in der Erdatmosphäre. Dies wäre ein klares Anzeichen für biologische Aktivität. Möglicherweise könnte Chlorophyll in den Spektren entdeckt werden, auch wenn das Leben nicht auf Photosynthese angewiesen ist – auf der Erde entwickelte sich diese weit nach den ersten anaeroben Zellen. Chlorophyll ist z. B. in Spektren von irdischem Licht nachgewiesen worden, welches vom Mond reflektiert wird.

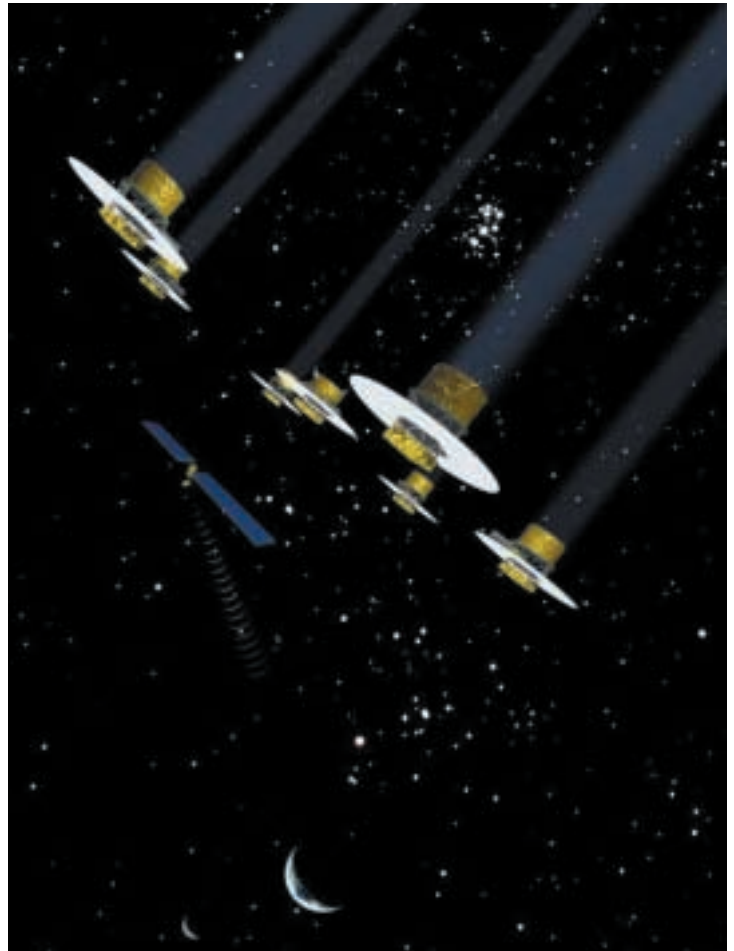


Abb. 2: Künstlerische Darstellung eines Alcatel-Konzeptes zur DARWIN-Mission, die das Licht extrasolarer Planeten isolieren und nach Biosignaturen suchen soll. Dieses Konzept basiert auf einer Anordnung von freifliegenden Teleskopen, deren Licht interferometrisch in einer Kontrollstation zusammengeführt wird. Ein solch fortschrittliches Observatorium könnte bereits 2020 starten. Bild: ALCATEL

## Unser Sonnensystem

Erst im Laufe der letzten 20 Jahre hat man die Vielfalt der Planeten in unserem eigenen Sonnensystem richtig zur Kenntnis genommen. Jeder Planet ist einzigartig in Bezug auf seine chemische Zusammensetzung und wie er sich um seine eigene Achse und die Sonne dreht. Dasselbe gilt für die Monde von Jupiter und Saturn. Dieses breite Spektrum von Eigenschaften ist eine der wichtigsten Herausforderungen auf dem Weg, die Bildung und Entwicklung von Planeten zu verstehen. Es stellt uns aber auch vor dieselben Fragen, welche schon Huygens und LeClerc zu beantworten versuchten. Welche Orte im Sonnensystem mögen einst lebensfreundlich gewesen sein? Gibt es im Sonnensystem sogar heute Leben ausserhalb der Erde? Was verstehen wir eigentlich genau unter einem «lebensfreundlichen» Planeten?

## Die Entstehung lebensfreundlicher Planeten

In diesem Zusammenhang müssen wir uns zuerst vergegenwärtigen, wie sich Planeten aus der Staub- und Gasscheibe um junge Sterne bilden. Man glaubte dies recht gut zu verstehen, bis 1995 die extrasolaren Planeten entdeckt wurden. Bis dahin war das einzig bekannte Sonnensystem unser eigenes. Man wusste nicht einmal, inwiefern dieses typisch war. Unser Sonnensystem entstand vor ca. 4,5 Milliarden Jahren. Die grossen Gas- und Eisplaneten sind mehr als 5-mal weiter von der Sonne entfernt als unsere Erde. Alle Planeten, die näher an der Sonne liegen, sind – wie die Erde – klein und felsig. Der Grund dafür muss in einer Abhängigkeit der Akkretion vom Abstand zur Sonne liegen.

Seither stehen wir vor der Tatsache, dass offenbar in vielen aussersolaren Planetensystemen Riesenplaneten dort existieren, wo es im Sonnensystem nur kleine, erdähnliche Planeten gibt. Dies ist bis heute schlecht verstanden, aber möglicherweise haben die sternnahen Riesenplaneten die Bildung erdähnlicher Planeten in Nähe zum Muttergestirn erschwert. Um solche neuen Theorien überprüfen zu können, benötigen wir zusätzliche Methoden, um zu lernen, wie und wann die Planeten unseres eigenen Sonnensystems entstanden.

Die Leistungsfähigkeit rechnerischer Methoden nimmt ständig zu. Neue Computer-codes, wie die von Willy Benz (Universität Bern) und Ben Moore (Universität Zürich), können heute wesentlich detaillierter die

Dynamik der Planetenbildung simulieren. Auch werden in den USA zunehmend neue Erkenntnisse über chemische Reaktionen unter den extremen Druck- und Temperaturbedingungen bei Kollisionen von Planetenbausteinen veröffentlicht. Wir sollten deshalb die chemischen Änderungen innerhalb von Planeten während ihres Wachstums durch solche Kollisionen nachvollziehen können. Mit den Techniken der Isotopegeologie, wie sie auch an der ETH benutzt werden, können die Modelle anhand von Daten aus dem eigenen Sonnensystem getestet und verfeinert werden. Wir sind sehr zuversichtlich, dass innerhalb der nächsten zehn Jahre die grundlegenden Mechanismen der Planetenbildung gut verstanden sein werden. Unser bisheriges Wissen zeigt klar, dass die erdähnlichen Planeten unter Bedingungen entstanden, welche dem Start von Leben alles andere als förderlich waren.

## Wie werden Planeten lebensfreundlich?

Ohne Frage entstanden die Erde und ihre Nachbarn auf eine sehr dramatische Art und Weise. Um dieses in den Kontext der Aufrechterhaltung von Leben zu setzen, braucht man sich nur das Beispiel der Dinosaurier vor Augen zu halten. Die Idee, dass ein 10 km grosser Asteroid zum Massensterben von Arten führte, welchem vor 65 Millionen Jahren auch die Dinosaurier zum Opfer fielen, ist heute weitgehend akzeptiert. Viel früher in der Erdgeschichte kam es aber häufig zu viel grösseren Einschlägen, von Impaktoren mit 100 km bis 5000 km Durchmesser, die die Erde auf ihre heutige Grösse reduzierten.

Gemäss einer allgemein akzeptierten Theorie bildete sich der Mond aus Materie, die durch eine Kollision der Protoerde mit dem grossen Planetenbaustein Theia in eine Umlaufbahn geworfen wurde. Theia selbst war bereits ein eigentlicher Planet von Marsgrösse. Dieser Einschlag ereignete sich etwa 50 Millionen Jahre nach der Bildung der ersten Festkörper im Sonnensystem und dürfte die ganze Erde zerrissen haben. Ein Ozean aus flüssigem und eine Atmosphäre aus verdampftem Gestein waren die Folge. Auch nachdem die Erde sich soweit abgekühlt hatte, dass sich an der Oberfläche eine feste Kruste und Ozeane aus Wasser bilden konnten, erlebte unser Planet ein so starkes Bombardement, dass die Ozeane wiederholt verdampften. Das Bombardement war während der ersten 500 Millionen Jahre besonders stark. Anshei-

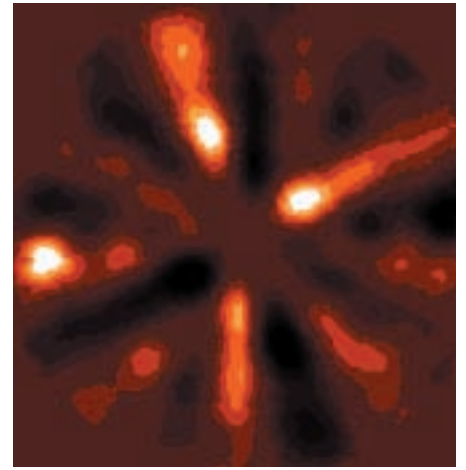


Abb. 3 : Simulation zur Beobachtung eines extrasolaren Planetensystems mit einem Instrument wie z. B. DARWIN. Die hellen Punkte sind äquivalent zu Merkur, Mars und Venus. Obwohl die Simulationsdaten signifikante Artefakte enthalten, zeigen sie, dass Licht von entfernten Planeten hinreichend genau detektiert werden kann, um nach Biosignaturen zu suchen.

gend hat kein Gestein dieses Zeitalter überstanden. Falls es damals schon Leben gegeben hat, wurde es vollständig ausgelöscht. Wenn es andererseits leicht war, Leben zu bilden, muss es ebenso leicht gewesen sein, Leben neu zu bilden. Flüssiges Wasser ist nötig, damit auf einem Planeten Leben gedeihen kann, wie wir es kennen. Wenn die Temperatur zu hoch ist, verdampft das Wasser – es dissoziiert in der Atmosphäre zu Wasserstoff, der so leicht ist, dass er aus der

### Astrobiologie – eine Verbindung von Astrophysik, Biologie und Geologie

Astrobiologie ist die Wissenschaft der Ursprünge, Entwicklung, Verteilung und der Zukunft des Lebens im Universum. Sie ist wahrlich interdisziplinär, mit Wurzeln in Molekularbiologie, Ökologie, Planetarwissenschaften, Astrophysik, Informatik, Weltraumtechnologie und anderen benachbarten Gebieten. In den USA werden neue Initiativen in Astrobiologie staatlich gefördert, um deren Finanzierung zu sichern. Diese bemerkenswerte Aktivität spiegelt die spektakulären Fortschritte in der Erkundung des Sonnensystems, grossenteils im Rahmen der NASA, wider. Die planetarwissenschaftlichen Aspekte der Astrobiologie expandieren somit parallel zu den astrophysikalischen Entwicklungen.

Atmosphäre einweicht. Dies ist vermutlich auf der sonnennahen Venus vorgefallen, deren CO<sub>2</sub>-Atmosphäre einen Treibhauseffekt aufrechterhält.

Die ursprüngliche Atmosphäre der Erde bestand vermutlich vorwiegend aus Gasen aus der solaren Gas- und Staubscheibe. Spuren davon finden wir in der Form von Edelgasen, welche durch Vulkane aus dem tiefen Erdinneren entweichen. Diese erste Atmosphäre war vermutlich sehr heiss, dicht und chemisch stark reduzierend, also für Leben völlig ungeeignet. Die heutigen Atmosphären der Planeten im inneren Sonnensystem sind nicht mehr so. Vermutlich haben der erwähnte Rieseneinschlag und andere Kollisionen diese ersten Atmosphären «weggeblasen». Die heutige Atmosphäre und die Hydrosphäre der Erde entstanden vermutlich durch weiteres Ausgasen flüchtiger Verbindungen aus dem Erdinneren oder durch spätere Einschläge wasserreicher Asteroide.

### Ein bevölkertes Universum?

Wie auch immer das Wasser auf die Erde kam, wie hat sich danach das erste Leben entwickelt? Viel Aufmerksamkeit erhalten heute Extremophile, Organismen, welche offenbar in sehr unfreundlichen Umgebungen wie an submarinen vulkanischen Schloten überleben können. Eine ausführliche Erforschung des Meeresbodens begann erst, nachdem wir den Mond besucht hatten. Eine tiefe Biosphäre wurde entdeckt, erstaunliche Lebensformen in den Tiefseeböden und den darunter liegenden Gesteinen. Viele dieser Organismen sind im Vergleich zu den primitivsten Lebensformen schon relativ fortgeschritten. Sie haben uns gelehrt, dass Leben sehr wohl unter extremen Bedingungen gedeihen kann.

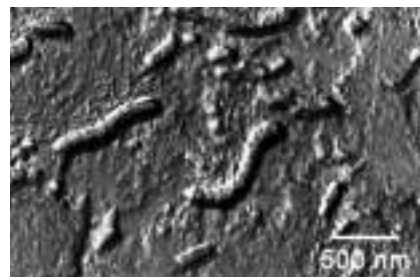
Das Universum mag sehr wohl eine breite Palette von Planeten und Monden beherbergen, welche Lebensformen als Heim dienen können – vorausgesetzt, erstes Leben in irgendeiner Form kann relativ leicht entstehen. Selbst wenn man davon ausgeht, dass Leben auf Asteroiden zur Erde gebracht wurde, steht die Frage nach den Wurzeln noch aus. Der Schritt von den primitivsten Lebensformen zu einer komplexen Biota wie auf der Erde ist allerdings sehr gross. Um darüber hinaus zu intelligentem Leben zu gelangen, bedarf es wohl noch einer ganzen Reihe weiterer unwägsamer Faktoren.

Das führt uns zur letzten Frage. Wenn Leben schwer zu bilden ist und intelligentes Leben erst recht wenig wahrscheinlich erscheint, mag es fraglich sein, ob wir mit an-

### Leben auf dem Roten Planeten?

Am 27. August um 9:51 Weltzeit erreicht der Abstand zwischen Erde und Mars ein neues Minimum. Deshalb steht der Mars dieses Jahr ganz besonders im Mittelpunkt der Forschung. Die ESA hat mit ihrer Mission «Mars Express» die diesjährige «Marssaison» eröffnet: Am 2. Juni trat die Raumsonde ihre Reise zum Mars an, um dort nach Wasser unter der Oberfläche zu suchen. Die Landefähre «Beagle 2», ebenfalls an Bord dieses Projektes der ESA, soll Mikroorganismen und organischem Material auf die Spur kommen. Dies stellte jedoch nur den Anfang intensiver Marsforschung dar: Am 10. Juni hat die NASA «Spirit», den ersten Rover eines Zwillingsprojektes, mit einer Delta-II-Rakete von Cape Canaveral aus gestartet. Am 7. Juli hat der zweite Rover der NASA seine Reise zum Mars angetreten. Er soll ebenfalls die Oberfläche und die Bodenbeschaffenheit im Detail studieren.

Schon lange fasziniert uns unser Nachbarplanet. Bereits Immanuel Kant schrieb in seiner «Allgemeinen Naturgeschichte und Theorie des Himmels», dass «Intelligenz und Moral der Planetenbewohner mit dem Abstand von der Sonne zunehmen». Im Jahr 1877 vermutete Giovanni Schiaparelli in Linien auf dem Mars bereits künstlich angelegte Kanäle. In der Mitte des letzten Jahrhunderts legten Forschungsergebnisse jedoch nahe, dass Leben auf dem Mars extrem unwahrscheinlich ist: Seine dünne Atmosphäre besteht grösstenteils aus CO<sub>2</sub> und die durchschnittlichen Temperaturen liegen bei -53°C. Dennoch haben die USA und



Rasterelektronen-Mikroskopaufnahme von dem Marsmeteoriten ALH 84001. Wissenschaftler der NASA vermuteten 1996 in diesen Strukturen fossile Bakterien. Bild: LPJ

Russland seit 1960 mehr als 30 Missionen auf die Reise zum Mars geschickt.

Auch wenn einige gescheitert sind, so hat im August 1996 eine Meldung der NASA für grosses Aufsehen gesorgt: «Im Marsmeteoriten ALH 84001 sind Spuren primitiven Lebens entdeckt worden.» Zwei Hinweise deuteten für die Wissenschaftler auf früheres Leben hin: Strukturen, die in ihrer Form fossilen Bakterien gleichen und die perlenartige Aneinanderreihung von Magnetitkristallen. Den zweiten Punkt sah die NASA darin bestätigt, dass manche irdische Bakterien Magnetitkristalle ausscheiden, die linienhaft angeordnet sind. Da eine solche Anordnung nicht natürlich auftritt, vermuteten Wissenschaftler der NASA, dass die Magnetitkette in ALH 84001 von Bakterien gebildet wurden. Inzwischen glaubt jedoch nur noch eine Minderheit, dass dies ein Beweis für Leben war.

Stephanie Scholz

deren Lebensformen im Universum kommunizieren können. Jedoch sollten wir vielleicht diesen Gedanken umdrehen. Beachtet man die erstaunliche Entwicklung von intelligentem Leben auf der Erde innerhalb der letzten gerade 0,1 Prozent der Erdgeschichte und die unglaublich rasche Entwicklung der Raumfahrt im letzten hundertmillionsten Teil dieser Geschichte. Wir sind erst in der Mitte der Lebensdauer der Sonne angelangt, und dem Leben auf der Erde verbleiben noch mindestens ein paar hundert Millionen oder ein paar wenige Milliarden Jahre zur Weiterentwicklung. Ist es wirklich so weit hergeholt, sich vorzustellen, dass über solche Zeitskalen hinweg Technologien entwickelt werden könnten,

die es den «Erdlingen» ermöglichen, bewohnbare Planeten um andere Sterne zu kolonisieren? Über geologische Zeiträume kann viel passieren, und die gegenwärtigen Veränderungen auf der Erde sind atemberaubend.

### Simon Lilly

Professor für experimentelle Astrophysik an der ETH Zürich

### Alex Halliday

Professor am Institut für Isotopengeologie und mineralische Rohstoffe der ETH



# DAS «DICHTE-BUDGET» DES UNIVERSUMS

ALEXANDRE SAKHAROV UND HANS HOFER

Neueste Entwicklungen in der Kosmologie weisen darauf hin, dass alle Strukturen im Universum, von Superhaufen bis zu Planeten, in ihren frühesten Momenten wahrscheinlich einen quantenmechanischen Ursprung hatten. Kosmologische Parameter wie die Gesamtdichte und die Expansionsrate des Universums werden zum ersten Mal präzise gemessen. Ein konsistentes Standardmodell des Universums beginnt sich abzuzeichnen.



Abb. 1: Die Entwicklung des Universums. Bild: A. Sakharov

Unser heutiges Verständnis des Universums basiert auf der «heissen Urknall»-Theorie, welche die Entwicklung des Universums vom ersten Sekundenbruchteil bis zu unserer Zeit, etwa 13 Milliarden Jahre später, erklärt. Diese Theorie beruht auf vier zentralen Säulen:

– dem theoretischen Rahmen, der auf der allgemeinen Relativitätstheorie von Einstein und Friedmann aus den 20er-Jahren basiert, sowie auf den folgenden drei beobachtbaren Tatsachen:

1. Die Expansion des Universums – ein Auseinanderdriften von Galaxien mit einer Geschwindigkeit proportional zu ihrem Abstand von uns, entdeckt von Hubble in den 30er-Jahren.
2. Der relative Überfluss von leichten Elementen, vorwiegend von Helium, Deuterium und Lithium, die durch nukleare Reaktionen eine Sekunde bis einige Minuten nach dem Urknall entstanden sind, als das Universum wesentlich heisser als der Kern der Sonne war. Dies wurde von Gamow in den 40er-Jahren erklärt.
3. Der kosmische Mikrowellenhintergrund (Cosmic Microwave Background – CMB), das «Nachglühen» des Urknalls, das 1965 von Penzias und Wilson entdeckt wurde; eine sehr isotrope Schwarzkörperstrahlung bei einer Temperatur von etwa 3 Kelvin, die ungefähr 400 000 Jahre nach dem Urknall ausgestrahlt wurde, in einer Phase, als das Universum kalt genug war, um neutrale Atome und von der Materie entkoppelte Photonen bilden zu können. Heute sind diese Beobachtungen bis auf einige Prozen-te genau bestätigt und haben geholfen, das Paradigma der Kosmologie des inflationären «heissen Urknalls» als das bevorzugte Modell des Universums zu etablieren.

## Das Universum, wie wir es sehen

Die gesamte moderne Kosmologie beruht im Wesentlichen auf der Anwendung von Kopernikus' Prinzip: Wir sind nicht im Zentrum des Universums. Tatsächlich führen wir heute die Idee des Kopernikus einen Schritt weiter und postulieren das kosmologische Prinzip: Niemand ist im Zentrum des Universums.

Von jedem beliebigen Punkt aus, sieht das Universum immer genau gleich aus. Diese Hypothese (wie auch andere Symmetrieregeln, die den Teilchenphysikern vertrauter sind) entpuppt sich als eine unermesslich mächtige Idee. Insbesondere führt dies zur unvermeidlichen Schlussfolgerung, dass das Universum ein endliches Alter hat. Es gab einen Anfang der Zeit.

Dieses kosmologische Prinzip kann durch das Anwenden von Symmetrien auf die Einstein-Gleichung ausgedrückt werden, die die Raum-Zeit-Geometrie mit dem Masseneinhalt des Universums verbindet. Die einfachsten Symmetrien dieser Art sind Homogenität und Isotropie. Mit Homogenität meinen wir, dass das Universum invariant unter räumlichen Translationen ist, während Isotropie Invarianz unter Drehungen bedeutet. In diesem Sinne kann das Universum als vollkommene Flüssigkeit mit einer bestimmten Zustandsgleichung modelliert werden. Während dies natürlich eine schlechte Beschreibung des Inhaltes des Universums auf kleinen Skalen ist, wie die Grösse von Planeten oder sogar Galaxien, ist es eine ausgezeichnete Näherung, wenn wir über extrem grosse Skalen im Universum mitteln, über welche – wie wir aus Beobachtung wissen – die Materie sehr gleichmässig verteilt ist. Die allgemeine Relativität, kombiniert mit Homogenität und Isotropie, führt zu einer überraschenden Schlussfolgerung: Die Raum-Zeit ist dynamisch. Das Universum ist nicht statisch: Entweder dehnt es sich aus oder schrumpft zusammen.

In der Tat unternahm Hubble 1929 ein Projekt, die Abstände zu den so genannten «Spiralnebeln» zu messen. Hubble verwendete dafür Cepheid-Variablen. Diese haben die nützliche Eigenschaft, dass die Periode ihrer Variation mit ihrer absoluten Helligkeit korreliert. Folglich kann man mit Messungen der scheinbaren Helligkeit und der Periode eines entfernten Cepheiden seine absolute Helligkeit und seine Distanz bestimmen. Hubble wandte diese Methode auf eine Vielzahl von nahen Galaxien an und fand heraus, dass fast alle von der Erde zurückweichen. Ausserdem entfernte sich eine Galaxie umso schneller, je weiter sie von der Erde entfernt war, ungefähr nach der linearen Relation:  $v = H_0 d$ . Das ist das berühmte Hubblesche Gesetz, das die Fluchtgeschwindigkeit  $v$  mit der Distanz  $d$  und der Hubble-Konstante  $H_0$  verbindet. Die beste gegenwärtige Schätzung dieser Konstante wurde erzielt, indem mit dem Hubble-Space-Teleskop Cepheiden in bisher unerreichbar weit entfernten Galaxien beobachtet wurden. Sie beträgt:

$H_0 = 71 \pm 6 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Mpc}^{-1}$ . Genau solch ein Hubble-Gesetz würde man vom so genannten expandierenden Friedmann-Robertson-Walker-Universum (FRW) erwarten. Die Expansion des Universums hat einige interessante Effekte zur Folge. Einer davon ist die kosmologische Rotverschiebung von Photonen, die am besten mit Hilfe des Hubbleschen Gesetzes erläutert wird: Weit entfernte Galaxien scheinen sich mit der Ge-

schwindigkeit  $v = H_0 d$  zu entfernen, was bedeutet, dass Photonen, die von diesem Objekt ausgestrahlt werden, um die Fluchtgeschwindigkeit der Quelle rotverschoben werden. Es gibt auch einen anderen Weg, denselben Effekt zu betrachten: Wegen der Expansion des Raums nimmt die Wellenlänge des Photons mit dem Skalenfaktor  $\lambda \sim a(t)$  zu, sodass ein Photon, das sich während der Expansion des Universums im Raum fortpflanzt, zu immer längeren Wellenlängen verschoben wird. Die Rotverschiebung  $z$  eines Photons ist durch das Verhältnis des heutigen Skalenfaktors zum Skalenfaktor zum Zeitpunkt der Emission des Photons gegeben:  $1 + z = a(t_0)/a(t_{em})$ . Diese Rotverschiebung, verursacht durch die Expansion, gilt nicht nur für Photonen, sondern auch für andere Teilchen. Für einen massiven Körper, der sich relativ zur Expansion mit einem Impuls  $p$  bewegt, kommt es auch zu einer «Rotverschiebung» des Impulses:  $p \sim 1/a(t)$ . Wir haben dann ein bemerkenswertes Resultat: In einem expandierenden Universum kommen sich frei bewegende Körper schliesslich zum Stillstand bezüglich des expandierenden Koordinatensystems. So verursacht die Expansion des Universums eine Art dynamische Reibung für alles, was sich darin bewegt. Wenn wir ein Bündel Teilchen nehmen, das sich im thermischen Gleichgewicht befindet und eine Temperatur  $T$  hat, werden die Impulse all dieser Teilchen linear mit der Expansion abnehmen, und das System wird sich abkühlen. Für ein Gas im thermischen Gleichgewicht ist die Temperatur  $T$  umgekehrt proportional zum Skalenfaktor:  $T \sim 1/a(t)$ . Die gegenwärtige Temperatur des Universums beträgt  $2,725\text{K} \pm 0,005\text{K}$ .

## Wie dicht ist es wirklich?

Eines der Dinge, welches die Kosmologen am liebsten präzise messen möchten, ist die totale Dichte des Universums. Diese wird oft ausgedrückt in Einheiten der kritischen Dichte, die benötigt wird, um die Geometrie des Universums flach zu machen. Beobachter haben versucht, mit Hilfe von verschiedenen Methoden die Dichte des Universums zu messen unter Einbezug von Messungen der galaktischen Rotationskurven, der Geschwindigkeiten von Galaxien, die in Haufen kreisen, der Röntgenstrahlung von Galaxienhaufen, der Geschwindigkeiten und der räumlichen Verteilung von Galaxien auf grossen Skalen sowie der Messungen von Gravitationslinsen. Diese Messungen haben immer wieder auf die Existenz einer grossen Menge von dunkler

Materie hingewiesen, die sich von den baryonischen Bestandteilen von Sternen und Planeten unterscheidet. Ausserdem hat das Supernova-Kosmologie-Projekt kürzlich das Bild eines Universums mit flacher Geometrie ergeben: Die Materie, die sowohl Baryonen als auch die mysteriöse dunkle Materie enthält, macht nur etwa 30 Prozent der Energiedichte des Universums aus. Die restlichen 70 Prozent des Universums bestehen aus etwas, das mehr wie ein Fluid mit negativem Druck aussieht, was die jetzige Expansion des Universums etwas beschleunigt. Diese dunkle Energie kann möglicherweise als die Vakuumenergie identifiziert werden, die durch die Quantenfeldtheorie vorhergesagt wird, ausser dass die Energiedichte 120 Grössenordnungen kleiner ist, als aufgrund einer naiven Betrachtung erwartet würde. Dieses «Dichte-Budget» des Universums wird mit hoher Zuverlässigkeit von neuen, faszinierenden Resultaten des Wilkinson-Microwave-Anisotropy-Probe-Satelliten (WMAP) bestätigt, der eigentlich ein Photo des Universums aus der Zeit gemacht hat, als es nur 400 000 Jahre alt war. Demzufolge ist die kritische Dichte  $4,7 \pm 0,6\%$  für die leuchtende Materie,  $24 \pm 7\%$  für die dunkle Materie und für die dunkle Energie  $71,3 \pm 8\%$ .

### Thermische Geschichte des Universums und danach . . .

Das grundlegende Bild eines expandierenden, abkühlenden Universums führt zu einer Anzahl von Vorhersagen wie beispielsweise die Bildung von Kernen und einen daraus resultierenden ursprünglichen Überfluss von Elementen sowie die spätere Bildung von neutralen Atomen, was den kosmischen Hintergrund von Photonen zur Konsequenz hatte. Wenn wir in der Zeit zurückgehen, wird das Universum heisser und heisser, und somit steigt der Energiebetrag, der für Wechselwirkungen unter den Teilchen verfügbar ist. Was wir über die Hochenergie-Wechselwirkungen der Materie wissen, stammt von Teilchenbeschleunigern, die die Details dieser fundamentalen Wechselwirkungen aufdecken, wenn wir ihre Energie erhöhen. Trotzdem darf nicht vergessen werden, dass die physikalischen Bedingungen, die in unseren Hochenergie-Beschleunigern auftreten, sich sehr unterscheiden von denen, die im frühen Universum vorhanden waren. Jene Maschinen können niemals die Dichte- und Druckbedingungen wiedergeben, die in diesem rapide expandierenden thermischen Plasma

herrschten. Dennoch sind diese Experimente entscheidend, um die Art und die Rate der lokalen fundamentalen Wechselwirkungen zu verstehen, die bei diesen Energien verfügbar sind. Was die Kosmologen interessiert, sind die statistischen und thermischen Eigenschaften, die ein solches Plasma haben müsste, insbesondere der Zeitpunkt, an welchem sich bestimmte Teilchen vom Plasma entkoppelten. Darunter versteht man den Moment, wenn die Wechselwirkungen der Teilchen im Vergleich zur Expansion des Universums nicht mehr schnell genug sind und sie sich nicht mehr mit dem Plasma im Gleichgewicht befinden. Man kann die Evolution des Universums von seinem Ursprung bis heute verfolgen.

Gemäss der allgemein akzeptierten Ansicht muss das Universum aus einer Quantengravitations-Fluktuation in der Planckschen-Ära entstanden sein ( $10^{19}$  GeV,  $10^{-43}$ s). Es muss gar nicht erwähnt werden, dass Quantengravitations-Phänomene immer noch im Bereich der physikalischen Spekulation angesiedelt sind, obwohl die neuesten astrophysikalischen Sonden bereits die Effekte der Quantengravitation auf dem Energieniveau der Grand-Unified-Theories (GUTs), etwa bei  $10^{16}$  GeV,  $10^{-35}$ s spüren können. Es ist jedoch einleuchtend, dass zu diesem Zeitpunkt eine «Vor-Big-Bang»-Ära der kosmologischen Inflation ihren Anfang nahm. Die Idee der Inflation – eine Periode der beschleunigten Expansion, bevor die Friedmann-Robertson-Walker-Expansion (FRW) begann –, liefert eine elegante Lösung zum Aufstellen der Anfangsbedingungen für die standardisierte Big-Bang-Kosmologie. Zu einer früheren Zeit, gerade bevor das Universum die GUTs-Ära erreicht haben konnte ( $10^{16}$  GeV,  $10^{-35}$ s) und noch nicht thermalisiert war, wurde die Energiedichte des Universums von einem bestimmten Material mit negativem Druck dominiert (Inflationsfeld). Unter einer solchen Annahme führt die Einstein-Gleichung zur Schlussfolgerung, dass während der «Vor-Big-Bang»-Ära die Expansion des Universums exponentiell beschleunigt wurde und dadurch die Bedingungen, die in einem kleinen, kausal verbundenen Gebiet vorherrschten, über riesige Distanzen verbreitet wurden. Die letzte Schlussfolgerung erklärt insbesondere, wie das Universum so gross und so gleichförmig werden konnte, bevor es zum FRW-Universum wurde.

### Als die Materie noch nicht existierte . . .

Quantenfluktuationen des Inflationsfeldes haben dann ihre Spuren als kleine Störungen in einem ansonsten sehr homogenen Flecken des Universums hinterlassen. Eine der erstaunlichsten Vorhersagen der Inflation ist die Tatsache, dass Quantenfluktuationen des Inflationsfeldes, die durch die exponentielle Expansion ausgedehnt wurden, Störungen der Raum-Zeit-Geometrie auf grossen Skalen verursachen. Die Muster der Störungen in der Geometrie sind wie Fingerabdrücke, die eindeutig die Periode der Inflation charakterisieren. Wenn Materie in die Gravitationsräder der Muster fällt, verursacht sie Dichtestörungen, die wegen der Gravitation kollabieren und Galaxien, Haufen und Superhaufen von Galaxien formen. Der vielleicht interessanteste Aspekt der modernen Kosmologie ist die Tatsache, dass die Strukturen auf den grossen Skalen in einer extrem frühen Epoche der Entwicklung des Universums gesät wurden, als sogar das Konzept der Materie im üblichen Sinne noch nicht existierte. Ausserdem ist diese Tatsache mittels Beobachtungen mit einer sehr hohen Genauigkeit bereits geprüft: Es handelt sich um eine Kombination von neuen Resultaten des WMAP-Satelliten und der «2dF galaxy redshift survey».

### Kosmologie und Teilchenphysik im Zusammenspiel

Am Ende der Inflation wurde die riesige Energiedichte des Inflationsfeldes in Teilchen umgewandelt, die bald thermalisiert und zum Ursprung des heissen Urknalls wurden. Einen solchen Prozess nennt man «reheating» des Universums. Seit damals ist das Universum strahlungsdominiert. Es ist wahrscheinlich (obschon auf keinen Fall sicher), dass die Asymmetrie zwischen Materie und Antimaterie gleichzeitig mit dem Rest der Energie des Universums aus dem Zerfall der Inflation entstanden ist. Dieser Prozess ist unter dem Namen Baryogenese bekannt, denn die Baryonen (damals vor allem Quarks) mussten zu diesem Zeitpunkt entstanden sein, und zwar aus den Überresten der gegenseitigen Vernichtung mit Antibaryonen. Jeder Mechanismus der Baryogenese erfordert eine Verletzung von Baryonenzahl sowie der C- und CP-Erhaltung und das Verlassen des thermischen Gleichgewichts. Die ersten zwei Bedingungen können nur im Rahmen eines Teilchenphysik-Modells diskutiert werden, das eindeutig weiter geht als das Standard-Modell. Diese



Abb. 2: AMS-Detektor auf der internationalen Raumstation. Bild: NASA

Tatsache ist vielleicht das beste Beispiel des perfekten Zusammenspiels zwischen Kosmologie und Teilchenphysik.

Während das Universum abkühlte, ging es möglicherweise durch den Quark-Gluon-Phasenübergang ( $10^2$  MeV,  $10^{-5}$  s), als Baryonen (vor allem Protonen und Neutronen) aus ihren konstituierenden Quarks entstanden. Ein kleiner Teil von Antimaterie-Gebieten, welcher von der Baryogenese übrigblieb, kann sich zu kondensierten Antimaterie-Objekten entwickeln: Dies sind wichtige Spuren von frühen Phasenübergängen, welche weit über elektroschwachen Energien stattfanden. In diesem Sinne entpuppt sich die Suche nach der Antimaterie im Weltall mit Hilfe des AMS-02-Experimentes als ein wichtiger Schritt zum tieferen Verständnis der Physik über das Standard-Modell hinaus, welche sich im frühen Universum ereignete.

### Von Quantenfluktuationen zu Strukturen des Universums

Das weiteste Fenster, das wir zum frühen Universum haben, ist zurzeit die primordiale Nukleosynthese (1-0,1 MeV, 1 s–3 min), als Protonen und Neutronen kalt genug waren, sodass sich, bald nach der Neutrino-Entkopplung, gebundene Systeme bilden

konnten und die leichtesten Elemente entstanden: Dies ist der Bereich der Kernphysik. Der beobachtete relative Überfluss von leichten Elementen stimmt mit den Vorhersagen der Theorie des heissen Urknalls überein. Unmittelbar danach findet die Elektron-Positron-Vernichtung statt (0,5 MeV, 1 min) und ihre ganze Energie geht in Photonen über. Viel später, bei etwa (1 eV,  $\approx 10^5$  yr), haben Materie und Strahlung die gleichen Energiedichten. Bald danach binden sich die Elektronen mit den Atomkernen und bilden Atome (0,3 eV,  $3 \cdot 10^5$  yr) in einem Prozess, der als Rekombination bekannt ist: Das ist das Gebiet der Atomphysik. Unmittelbar danach entkoppeln sich Photonen vom Plasma und reisen zukünftig frei umher. Das sind die Photonen, die wir als CMB beobachten. Der COBE-Satellit, der 1990 gestartet wurde, beobachtete eine kleine Anisotropie in der Winkelverteilung der CMB-Temperatur. Man glaubt, dass diese Anisotropie intrinsische Fluktuationen im CMB selbst darstellt, und zwar als Folge der Anwesenheit von kleinen primordialen Dichtefluktuationen in der kosmologischen Materie zum Zeitpunkt der Rekombination. Diese Dichtefluktuationen sind von grossem physikalischem Interesse, weil das die Fluktuationen sind, die später kollabiert sind, um danach alle Strukturen des Universums, von Superhaufen bis zu Planeten, zu

bilden. Viel später ( $\approx 1-10$  Gyr) wuchsen die kleinen Inhomogenitäten, die während der Inflation entstanden waren, durch Gravitationskollaps zu Galaxien, Haufen und Superhaufen von Galaxien: Dies charakterisiert die Epoche der Strukturbildung. Das ist das Gebiet der langreichweitigen Gravitationsphysik, dominiert von dunkler (Vakuum-) Energie. Schliesslich entstanden die Sonne, die Erde und das biologische Leben von früheren Sternengenerationen respektive von einer Ursuppe aus organischen Komponenten (3 K, 13 Gyr).

Eine der schwierigsten Herausforderungen, denen sich die neue Kosmologie stellen muss, ist das Verständnis des Ursprungs der dunklen Energie, deren Verhalten ähnlich demjenigen des Inflationfeldes ist, aber 13 Milliarden Jahre später. In diesem Sinne zeigt uns die Kosmologie einen Weg, wie wir eine Frage, die von zentraler Bedeutung für die Teilchentheorie ist, nämlich die Natur des Vakuums in der Quantenfeldtheorie, untersuchen sollen. Dies ist etwas, was in Teilchenbeschleunigern nicht untersucht werden kann. In diesem Sinne öffnet die Kosmologie ein einzigartiges Fenster in die Teilchenphysik.

Übersetzung aus dem Englischen von Vanja Lichtensteiger-Cucak.

#### Forschungsinformationen

Alexandre Sakharov erforscht die Kosmologie und Astrophysik jenseits des Standardmodells, insbesondere Quantengravitation, die Entstehung primordialer schwarzer Löcher und hochenergetische kosmische Strahlung. Ausserdem beschäftigt er sich mit Modellen zur Baryogenese und der Kosmologie unsichtbarer exotischer Elementarteilchen. Webseiten:

[http://www.damtp.cam.ac.uk/user/gr/public/cos\\_home.html](http://www.damtp.cam.ac.uk/user/gr/public/cos_home.html)

<http://lambda.gsfc.nasa.gov/>

#### Alexandre Sakharov

arbeitet mit Prof. H. Hofer am CERN in Genf zusammen.

# QUO VADIS UNIVERSUM?

FRED C. ADAMS

Die wesentlichen kosmologischen Parameter zur Beschreibung unseres Universums können heutzutage mit bemerkenswerter Genauigkeit gemessen werden. Doch was genau wissen wir über die Zukunft des Universums? Die besten astronomischen Daten legen nahe, dass unser Universum sich für immer ausdehnen wird – oder zumindest lange genug, dass sich Myriaden von astronomischen Ereignissen entfalten können.

Neueste Beobachtungen der kosmischen Mikrowellen-Hintergrundstrahlung zeigen, dass die räumliche Geometrie unseres Universums flach ist. Messungen der Rotverschiebungs-Entfernungs-Relation mittels Supernovae vom Typ Ia weisen darauf hin, dass das Universum sich beschleunigt ausdehnt und einen beachtlichen Anteil dunkler Vakuumenergie enthält.

Da die Expansionsrate des Universums sich zu beschleunigen beginnt, ist die Bildung von Galaxien, Haufen und grösseren kosmischen Strukturen im Wesentlichen abgeschlossen. In der nahen Zukunft wird sich das Universum einem Zustand exponentieller Ausdehnung annähern, und wachsende kosmologische Fluktuationen jeglicher Gröszenordnung werden eingefroren. Schon existierende Strukturen werden isoliert. Numerische Simulationen veranschaulichen diesen Trend und zeigen, wie das Universum in eine Ansammlung von «Insel-Universen» aufbricht, wovon jedes einen gebundenen Haufen oder eine Gruppe von Galaxien beinhaltet (siehe Abb. 2). Jede dieser Galaxiengruppen muss sich nun nicht nur in physikalischer Isolation entwickeln, sondern die fortschreitende Expansion wird auch die anderen Galaxienhaufen aus ihrer Sicht entziehen.

### Die Milchstrasse auf Kollisionskurs

Auf kleineren räumlichen Skalen sind Planeten, Sterne und Galaxien selbst dazu bestimmt, eine weitaus längere Zeit zu bestehen als das jetzige Alter des Universums. Galaxien begegnen sich oft innerhalb ihres Galaxienhaufens und verzerren gegenseitig ihre Struktur durch ihre starken Gravitationsfelder. Zum anderen führen diese Wechselwirkungen zu Galaxienkollisionen und -verschmelzungen (Abb. 3, siehe S. 48). Ein dramatisches Beispiel für solch einen Zusammenstoss steht unmittelbar bevor: Unsere Nachbargalaxie, die Andromeda-Galaxie (Abb. 1), steuert direkt auf unsere Milchstrasse zu. Auch wenn diese Kollision mit unserer Schwestergalaxie frühestens in 6 Milliarden Jahren stattfinden wird, ist unser Schicksal schon besiegelt – die beiden Galaxien sind ein gebundenes Paar und werden möglicherweise zu einer verschmelzen.

### Was wird aus der Erde?

Das Schicksal unseres eigenen Sonnensystems ist für uns von unmittelbarem Interesse. Mit zunehmendem Alter wird die Sonne heller, und in 3,5 Milliarden Jahren

wird die Sonnenstrahlung einen «Runaway-Greenhouse-Effekt» – einen fortschreitenden Treibhauseffekt – entfachen. Während die Ozeane verdampfen, kann unsere grüne Biosphäre dem Hitzetod nicht entgehen. Milliarden Jahre später wird der Wasserstoff im Innern der Sonne – welcher ihr Treibstoff ist – erschöpft sein. Unser Stern wird seine Struktur anpassen und sich zu einem Roten Riesen aufblähen. Die Sonnenoberfläche erreicht dann zuerst den Merkur, bevor die Venus verschluckt wird. Da die Sonne im Laufe ihrer Entwicklung Masse verliert, entflieht die nun «keimfreie» Erde in eine grössere Umlaufbahn. Doch während sie durch den Sonnenwind pflügt, wird die Erde wiederum zurück zur Sonne gezogen, von der sie allmählich vereinnahmt wird.

### Wenn die Sterne erlöschen

Mit einem gegenwärtigen Alter von 14 Milliarden Jahren befindet sich das Universum nun inmitten seiner Stellaren Ära, einer Epoche, in der permanent Sterne entstehen, leben und sterben. Der Grossteil der Energie, die im Universum erzeugt wird, entstammt der Kernfusion im Innern sonnenähnlicher Sterne. Im Laufe der Zeit steigt der Einfluss der am häufigsten im Universum vertretenen Sterne – der als «Rote Zwerge» bekannten massearmen Sterne. Auch wenn ein Roter Zwerg nur weniger als eine halbe Sonnenmasse aufweist, dominiert die Gesamtmasse aller Roten Zwerge aufgrund ihrer grossen Anzahl die stellare Massenbilanz einer Galaxie. Diese Roten Zwerge verbrennen ihren Wasserstoffvorrat allerdings äusserst langsam zu Helium. Da sie ihre Energieressourcen aufsparen, werden sie auch noch in Billionen von Jahren leuchten – lange nachdem ihre grossen Brüder ihren Treibstoff erschöpft und sich zu Weissen Zwergen entwickelt haben oder als Supernovae explodiert sind.

Dieses leuchtende Zeitalter endet, wenn den Galaxien der Wasserstoff ausgeht, keine Sterne mehr entstehen und auch die langlebigsten Roten Zwerge langsam verblassen. Wenn die Sterne zu guter Letzt aufgehört zu leuchten, wird das Universum ungefähr 100 Billionen Jahre alt sein.

Nachdem die Sterne ausgebrannt sind und keine Sternentstehung mehr stattfindet, ist ein Grossteil der gewöhnlichen Materie in den entarteten Überresten gebunden, die als Relikte der Sternentstehung und -entwicklung zurückbleiben. Der Bestand entarteter Objekte umfasst Braune und Weisse Zwerge sowie Neutronensterne. In diesem Zusammenhang bezieht sich «Entartung»



Abb. 2: Numerische Simulation zur Strukturbildung in einem beschleunigten Universum mit dunkler Vakuumenergie. Oben ist ein Teil unseres Universums zur jetzigen Zeit abgebildet (kosmisches Alter 14 Milliarden Jahre). Die eingefasste Region der oberen Abbildung expandiert zu dem Bild in der mittleren Abbildung (bei einem Alter von 54 Milliarden Jahren). Der Kasten in der Mitte dehnt sich zum Bild bei 92 Milliarden Jahren im unteren Abbildungsteil aus. Bis zu dieser Zeit hat sich die Galaxie in der Bildmitte der unteren Abbildung gewissermassen abgekoppelt.

nicht auf den generellen Zustand des Universums, sondern auf den Zustand der hoch verdichteten Materie, die in den Sternresten eingeschlossen ist. Bei solch hohen Dichten bestimmt die quantenmechanische Unschärferelation die Druckkräfte, die den Stern zusammenhalten. Während dieser Entartungs-Ära wird das Universum ausgesprochen anders aussehen als jetzt: Keinerlei sichtbare Strahlung normaler Sterne erhellt den Himmel, wärmt die Planeten oder stattet die Galaxien mit dem schwachen Glanz aus, den sie heute aufweisen. Das Weltall wird dann dunkler, kälter und verlassener sein.

Vor diesem öden Hintergrund werden nun langsam wieder Ereignisse von astronomischem Interesse stattfinden. Während tote Sterne auf ihren Bahnen ziehen, führen nahe Begegnungen von Galaxien zu Streueignissen, woraufhin die Galaxie allmählich ihre Struktur korrigieren muss. Einige Sternreste werden aus dem Einflussgebiet der Galaxie herausgeschleudert, während andere auf das Zentrum zustürzen. Über die nächsten hundert Milliarden Jahre hinweg setzen diese Wechselwirkungen die dynamische Zerstörung der ganzen Galaxie durch. In der Zwischenzeit werden auch Braune Zwerge zusammenstossen und zu neuen, massearmen Sternen verschmelzen, welche dann wiederum für Billionen von

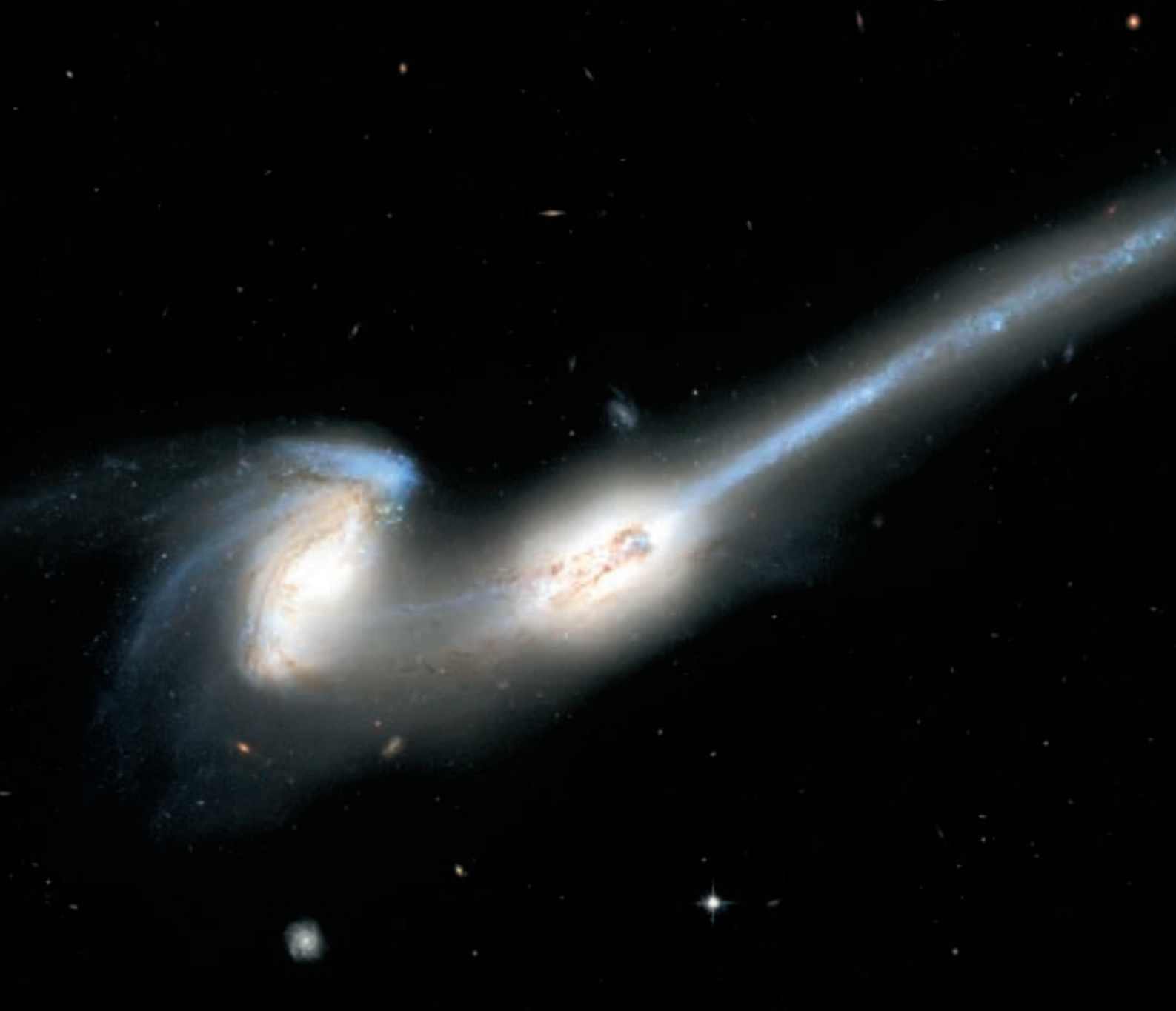


Abb. 3: Bei einer Galaxienkollision verformen sich beide Kollisionspartner stark. Zahlreiche Sterne werden aus den Galaxien herausgeschleudert. Ähnlich wird es der Milchstrasse und der Andromeda-Galaxie ergehen. Hier abgebildet ist NGC 4676 – auch als «die Mäuse» bekannt. Bild: NASA

Jahren leuchten. Zu jeder Zeit beherbergt eine typische Galaxie von der Grösse unserer Milchstrasse einige wenige derartiger Sterne. Noch seltener geschieht es, dass Weisse Zwerge miteinander kollidieren und als Supernova explodieren, wodurch ein spektakuläres Feuerwerk gegen den dunklen Hintergrund der neuen Galaxie entsteht.

### Neue Energiequellen und Schwarze Löcher

In dieser fernen Epoche werden die Weissen Zwerge einen grossen Teil der gewöhnlichen baryonischen Materie enthalten. Diese Weissen Zwerge saugen dann schwach wechselwirkende dunkle Materieteilchen auf, die die Galaxie in einem enorm diffu-

sen Halo umkreisen. Sind diese Teilchen erst einmal im Innern eines Weissen Zwergs gefangen, löschen sie sich gegenseitig aus und stellen somit eine wichtige Energiequelle für das Weltall dar. Die Zerstrahlung von Dunkler Materie ersetzt nun konventionelle Kernfusionsreaktionen in Sternen als die dominante Energiequelle.

Letzten Endes werden jedoch auch die Weissen Zwerge aus der Galaxie geschleudert, die Zufuhr an Dunkler Materie wird verarmen, und diese Methode der Energieerzeugung muss notwendigerweise ein Ende finden.

Obgleich die Lebensdauer des Protons ungewiss ist, gehen grundlegende physikalische Theorien davon aus, dass auch Protonen nicht für immer leben. Über grosse Zeiträume hinweg wird die Massenenergie, die innerhalb der Weissen Zwerge und an-

deren entarteten Sternresten gespeichert ist, abdampfen, sobald ihre Konstituenten – Protonen und Neutronen – zerfallen. Im Laufe der Protonenzerfälle im Innern des Weissen Zwerges erzeugt der Stern eine Leistung von ungefähr 400 Watt – ausreichend um ein paar Glühbirnen zu betreiben. Eine ganze Galaxie aus diesen Sternen erscheint somit leuchtschwächer als unsere Sonne heutzutage. Wenn nun der Zerfallsprozess der Protonen vollendet ist – in etwa  $10^{40}$  Jahren – gibt es auch keine entarteten Sternreste mehr im Universum.

Nach dem Zerfall der Protonen wird das Universum noch dunkler und ausgedünnter. Die einzigen noch verbleibenden sternähnlichen Objekte sind Schwarze Löcher – Raum-Zeit-Regionen mit solch starker Schwerkraft, dass nicht einmal Licht von ihren Oberflächen entweichen kann. Sie sind nicht

vom Protonenzerfall betroffen und schlüpfen unbeschadet durch das Ende der vorherigen Ära.

Aber sogar Schwarze Löcher können nicht ewig leben. Trotz ihres Namens sind Schwarze Löcher nicht vollständig schwarz. Sie leuchten ungemein schwach durch die Emission eines thermischen Photonspektrums sowie von Gravitonen und anderen Teilchen. Durch diesen quantenmechanischen Prozess, der als Hawking-Strahlung bekannt ist, verdampfen Schwarze Löcher im Schneckentempo. In ferner Zukunft werden Schwarze Löcher die hellsten Objekte am Himmel sein und somit die Hauptenergiequellen des Universums darstellen. Jede grosse Galaxie ist in der Lage, Millionen von stellaren Schwarzen Löchern zu produzieren, die dann bis zu  $10^{70}$  Jahre überdauern. Beinahe jede Galaxie beherbergt in ihrem Zentrum ebenfalls ein supermassives Schwarzes Loch; solche Giganten überleben schätzungsweise bis zu  $10^{100}$  Jahre. Dennoch müssen alle Schwarzen Löcher am Ende verdampfen. Jene Epoche der Schwarzen

Löcher wird vorbei sein, wenn die grössten Schwarzen Löcher ihr explosives Ende gefunden haben.

## Das Ende

Wenn nun das kosmische Alter  $10^{100}$  Jahre überschreitet, werden die Schwarzen Löcher verschwunden sein. Das Weltall ist angefüllt mit den übrig gebliebenen Abfallprodukten vorangegangener Epochen: Neutrinos, Elektronen, Positronen und Photonen mit unglaublichen Wellenlängen. In diesem kalten und entfernten Zeitalter verlangsamt sich jegliche physikalische Aktivität im Universum nahezu bis zum Stillstand. Die verfügbare Energie ist begrenzt, die Zeitdimensionen sind unvorstellbar, und dennoch setzt das Universum hartnäckig seinen Betrieb fort. Zufällige Begegnungen zwischen Elektronen und Positronen bringen Positronium-Atome hervor, welche instabil sind und letztlich zerfallen. Andere Auslöschungsereignisse kommen ebenfalls noch auf nied-

rigster Stufe vor. Angesichts der Verarmung dieser fernen Epoche wird die Erzeugung von Energie und Entropie jedoch zunehmend schwieriger.

Am Anfang bestand das frühe Universum aus Elementarteilchen und Strahlung – im Wesentlichen weil der Hintergrund zu heiss war, als dass grössere Einheiten bestehen könnten. Das Universum der fernen Zukunft wird ebenfalls aus Teilchen und Strahlung bestehen – in diesem Fall, da das All zu alt sein wird, als dass grössere Strukturen intakt blieben. All die schönen Galaxien, Sterne und Planeten, die heute das Universum bevölkern, sind doch nur flüchtige Phänomene, vorherbestimmt, im wandelnden Getriebe der Zeit zu vergehen. Asche zu Asche, Staub zu Staub, Teilchen zu Teilchen – dies ist das endgültige Schicksal unseres Universums.

Übersetzung aus dem Englischen von Stephanie Scholz.

## Glossar

### Braune Zwerge:

Unterschreitet die Masse eines Protosterne etwa  $0,08$  Sonnenmassen, setzt bereits bei einer zu niedrigen Temperatur Entartung ein, d.h. dass seine Zentraltemperatur von etwa  $10^6$  K nicht weiter steigen kann. Deshalb werden die zum Zünden des Wasserstoffbrennens nötigen Werte nie erreicht. Das Objekt entwickelt sich zu einem «planetenartigen» Zwergstern.

### Entartung:

In der Quantenmechanik treten die atomaren Energien nicht kontinuierlich auf, sondern nur in bestimmten, erlaubten Niveaus. Fallen mehrere, vollständig mit Elektronen besetzte Niveaus energetisch zusammen, spricht man von Entartung. Dieses quantenmechanische Extremum zeichnet sich durch eigenartiges physikalisches Verhalten von Druck, Temperatur und Teilchendichte aus.

### Neutronenstern:

Ein extrem dichtes Objekt aus Kernmaterie, das als Überrest aus einer Supernovaexplosion zurückbleiben kann. Dabei ist ca. 1 Sonnenmasse in einem Radius von nur ca. 10 km eingeschlossen.

### Supernovae Ia:

Supernovae Ia sind in allen Galaxientypen zu finden. Sie entstehen, wenn ein Weisszer Zwerg von einem Begleitstern hinreichend Material akkretiert, um eine kritische Masse zu überschreiten. Es kommt daraufhin zu einer explosiven Zündung – der Supernova.

Da die Lichtkurven der Supernovae Ia einen festgelegten zeitlichen Verlauf aufweisen, lassen sie sich in ein festes Schema einordnen. Ihre gesamte Leuchtkraft ist eng korreliert mit ihrer Entfernung, sodass sie als kosmologische Entfernungsmesser, als so genannte Standardkerzen, dienen.

### Weisser Zwerg:

Sterne, die zu Beginn ihres Lebens weniger als 10 Sonnenmassen aufweisen, stossen gegen Ende ihres Lebens in einer so genannten «Superwind-Phase» ihre äusseren Schichten ab. Aus diesen geht ein Planetarischer Nebel hervor, das Innere des Sterns entwickelt sich zu einem Weissen Zwerg. Ein solches Objekt weist eine extrem grosse Dichte auf; seine innere Stabilität wird durch sein entartetes Neon- und Sauerstoffgas aufrechterhalten.

St. Scholz

## Forschungsinformationen

Die Forschungsschwerpunkte von Prof. Adams sind die Entstehung von Sternen und Kosmologie. Im Rahmen von Sternentstehungsprozessen erforscht er insbesondere die Strahlung des Sternentstehungsprozesses, die Dynamik zirkumstellarer Scheiben und die Physik von Molekülwolken. Sein kosmologisches Forschungsinteresse gilt der Inflationsphase, den kosmologischen Phasenübergängen, magnetischen Monopolen, kosmischer Strahlung, insbesondere der Hintergrundstrahlung. Seine neuesten Arbeiten befassen sich mit dem langfristigen Schicksal des Universums. Er ist Autor von «Origins of Existence: How life emerged in the Universe» und Co-Autor von «Die 5 Zeitalter des Universums – Eine Physik der Ewigkeit». Nähere Informationen:

<http://www.physics.lsa.umich.edu/departments/directory/bio.asp?ID=1>

<http://www.amazon.com/exec/obidos/tg/detail/->

[/0684854228/ref=pd\\_sim\\_books\\_1/103-2539179-3536640?v=glance&s=books](http://www.amazon.com/exec/obidos/tg/detail/-/0684854228/ref=pd_sim_books_1/103-2539179-3536640?v=glance&s=books)

<http://www.amazon.com/exec/obidos/tg/detail/->

[/0743212622/ref=pd\\_sim\\_books\\_1/103-2539179-3536640?v=glance&s=books](http://www.amazon.com/exec/obidos/tg/detail/-/0743212622/ref=pd_sim_books_1/103-2539179-3536640?v=glance&s=books)

## Fred Adams

Professor für Physik an der University of Michigan in Ann Arbor



# SURFTIPPS FÜR STERNGUCKER

## WELTRAUMORGANISATIONEN

European Southern Observatory (ESO):  
<http://www.eso.org/>

European Space Agency (ESA):  
<http://www.esa.int/>

National Aeronautics and Space Administration (NASA):  
<http://www.nasa.gov/>

## WISSENSWERTES ÜBER ASTRONOMIE

Alles über Astronomie, insbesondere sämtliche Sternbilder, Astrolexikon sowie aktuelle Beobachtungsereignisse:  
<http://www.astroinfo.org/>

Planetenkunde und Raumfahrtmissionen sowie zahlreiche Buchtipps:  
<http://www.astrolink.de>

Der Sonnensystem-Simulator:  
<http://space.jpl.nasa.gov/>

## LITERATURTIPPS

Starobserver – österreichische Zeitschrift, monatlich:  
<http://www.starobserver.com/>

Sky and Telescope – amerikanische Zeitschrift, monatlich:  
<http://skyandtelescope.com/>

Astronomy now – englische Zeitschrift, monatlich:  
<http://www.astronomynow.com/>

Interstellarum – deutsche Zeitschrift von Amateuren für Amateure, vierteljährlich:  
<http://www.oculum.de/interstellarum/>

## PLANETARIEN/STERNWARTEN

Die Urania-Sternwarte in Zürich:  
<http://urania.astronomie.ch/>

Das Planetarium in Zürich:  
<http://www.plani.ch/>

Sternwarten in der Schweiz:  
<http://www.astronomie.ch/obs/obspublic.d.html>

## ATEMBERAUBENDE BILDER

Astronomy picture of the day – die schönsten Bilder der Astronomie archiviert:  
<http://antwrp.gsfc.nasa.gov/apod/astropix.html>

Das Universum aufgenommen mit dem Hubble-Space-Teleskop der ESA – neben einer Best-of-Hubble-Sammlung und Links zu den anderen Missionen der ESA gibt es Nebel, Sterne, Galaxien und das Sonnensystem:  
<http://hubble.esa.int/science-e/www/object/index.cfm?fobjectid=33314>  
<http://hubble.stsci.edu/gallery/>

Galerie des Hubble-Heritage-Projektes:  
<http://heritage.stsci.edu>

Photogalerie der ESO – die Bandbreite astronomischer Objekte aufgenommen mit dem VLT (Very Large Telescope), dem WFI (Wide Field Imager) und SOFI (Son of ISAAC):  
<http://www.eso.org/outreach/gallery/astro/>

Sloan Digital Sky Survey – Galaxien und Spektren:  
<http://www.sdss.org/gallery/index.html>

Galaxien und grössere Strukturen:  
<http://skyserver.fnal.gov/en/tools/places>

Jet Propulsion Laboratory der NASA – Unser Planetensystem sowie Bau von Teleskopen und Galaxienbilder:  
<http://photojournal.jpl.nasa.gov/>

Sonnenbeobachtungen mit SOHO:  
<http://sohowww.nascom.nasa.gov/>

Stephanie Scholz

# INTERN

AN DER ETH WIRD DIE INNOVATIONS-INITIATIVE LANCIERT

## «DIE TOLLEN GESCHICHTEN SCHREIBT DIE BASIS»

Die Grundpfeiler für einen neuen Förderungsschub an der ETHZ sind eingeschlagen: Mit der Innovations-Initiative (INIT) und 250 000 Franken pro Projekt und Jahr sollen in Zukunft neue Forschungsschwerpunkte gefunden werden. Ein Gespräch mit Ulrich W. Suter, Vizepräsident für Forschung.

Mit der Innovations-Initiative (INIT), welche die Schulleitung im Mai gutgeheissen hat, soll ein Programm zur Förderung neuer wissenschaftlicher Schwerpunkte auf Wettbewerbsbasis an der ETH eingeführt werden. Anträge von Forschenden werden von der Kommission für Innovations-Initiativen (KINIT) begutachtet. Ziel ist, pro Jahr im Normalbetrieb etwa zwei neue wissenschaftliche Schwerpunkte zu lancieren, wobei die Projektlaufzeit auf drei Jahre befristet ist. Nach Ablauf der drei Jahre kann das Projekt mit eigenem Budget weitergeführt oder in den Grundauftrag überführt und beispielsweise Basis für die Entstehung einer neuen Professur werden. Auf den 1. Juli können erstmals Anträge berechtigter Personen eingereicht werden. Ulrich W. Suter hat die Richtlinien für die INIT-Anträge erlassen und die Forschungsverantwortlichen informiert.

### Herr Suter, warum diese Dynamik? Ist die ETHZ nicht mehr innovativ genug?

Im Gegenteil! Die ETH ist innovativ wie noch nie. Aber die Infrastruktur zur Förderung der Forschung existiert mit dem Auslaufen der Strategischen Erfolgs-Projekte (SEPs) nicht mehr. Wir haben aus den Erfahrungen mit ihnen gelernt, übernehmen die Idee, die hinter den SEPs steht und setzen sie in einer bescheidenen, aber vernünftigen Weise – in diesem Fall auf Wettbewerbsbasis – um.

### Wie erkennt man Innovation?

Indem man eine Kommission bildet, die aus grossartigen und respektierten Köpfen der Hochschule besteht. Diese Kommission evaluiert und rangiert die eingereichten Gesuche. Innovation muss immer einen Neuigkeitswert haben, originell und zukunftsorientiert sein.

### Besteht nicht auch die Gefahr, dass man mit den bewilligten Projekten das Risiko eingeht, dass sie sich nicht als künftige wissenschaftliche Schwerpunkte etablieren?

Natürlich. Und genau aus diesem Grunde geben wir den ausgewählten INIT-Projekten mit den 250 000 Franken «nur» einen finanziellen Anschub. Nach zwei Jahren werden die Projekte durch die KINIT wieder evaluiert und sie wird danach vorschlagen, ob sie weitergeführt werden können. Wir rechnen mit einer Erfolgsquote von etwa 50 Prozent.

### Man will ja neue Schwerpunkte an der ETH Zürich setzen. Wäre es nicht besser, die Laufzeit der SEPs zu verlängern und hier nachhaltiger zu wirken? Life-Science-Projekte sind beispielsweise sicher genug vorhanden?

Die SEPs, die Ende dieses Jahres auslaufen, werden zum Teil in den Grundauftrag überführt. Wichtige Projekte, zum Beispiel aus dem Life-Science-Bereich, werden sicher weitergeführt.

### Wenn Sie persönlich «Gas geben» wollten, wo würden Sie ansetzen?

Ich persönlich bin nicht in der Lage zu sagen, wie sich die ETH entwickeln müsste. Diese Aussage müssen die Wissenschaftlerinnen – die Professorinnen sowie die Angehörigen des Mittelbaus, die Leute an der Front sozusagen – machen. In der Administration kann man nur aufgrund der Anstösse entscheiden und man muss sich klar bewusst sein, dass Innovation nicht von oben kommt. Die tollen Geschichten schreibt «die Basis».



Ulrich W. Suter hofft, der Welt einen Schritt voraus-eilen zu können.

### Sind denn Doppelspurigkeiten bei Gesuchen an die Forschungskommission und die KINIT nicht vorprogrammiert?

Ich hoffe nicht. Bei den Gesuchen an die Forschungskommission handelt es sich um wohl definierte Projekte mit entsprechenden Vorarbeiten, Zielen und Budgets. Bei den INIT-Projekten geht es um visionäre Vorstellungen mit meist vagem Budget, deren Zielsetzungen über einzelne Forschungsgruppen hinausgehen. Ich vermute, dass jetzt, zu Beginn der Ausschreibung, ein Nachholbedarf an Projektfinanzierungen bestehen wird. Entsprechend wurde auch der Antrag zur Mittelzuteilung an die Schulleitung formuliert.

### **Kommen diese aus dem Topf der Forschungskommission? Gehen sie damit nicht den dort eingereichten Gesuchen verloren?**

Ganz sicher nicht. Die Mittel für die Finanzierung der INIT-Projekte kommen aus dem Bereich Forschung, in dem auch die SEPs eingeordnet waren. Der Finanzbedarf für die kommenden Jahre wird korrekt im Gesamtbudget der ETHZ budgetiert werden müssen. Geht man davon aus, dass im Jahr etwa zwei INITs lanciert werden können, werden wir für das Programm im Normalfall pro Jahr 1,5 Millionen Franken benötigen, mit einer Projektlaufzeit von drei Jahren und einem jährlichen Budget von 250 000 Franken pro INIT. Es werden im Mittel sechs Projekte parallel durchgeführt werden können.

### **Welche Hoffnungen verbinden Sie mit diesem Konzept für die Förderung neuer wissenschaftlicher Schwerpunkte?**

Eine Hochschule braucht die permanente Erneuerung. Das geht jedoch nicht, ohne dass dafür nicht etwas Altes, vielleicht auch Überholtes «stirbt». Wir rechnen damit, dass fünf bis zehn Prozent jener Ressourcen, welche in die übliche Weiterführung durch Nachfolgeprofessuren fliessen, als Folge der INIT umgewidmet werden. Die ETHZ will also jedes Jahr 0,1 bis 0,2 Prozent des Budgets für ihre Erneuerung einsetzen. Ich denke, die Aktivitäten, welche die Hochschule der Zukunft ausmacht, sollen die ETH-Angehörigen mit innovativen Ideen initiieren, die Leute, die an der Front tätig sind – technisches und administratives Personal eingeschlossen. Ich hoffe, dass wir so der Welt einen Schritt voraus sein werden.

Interview: Regina Schwendener

*Dieser Bericht erschien erstmals in «ETH Life», der täglichen Webzeitung der ETH:  
[www.ethlife.ethz.ch](http://www.ethlife.ethz.ch)*

### **Die KINIT und ihre Träger**

Die Schulleitung wählte für die Amtszeit vom 1. Juli 2003 bis 30. Juni 2007 die Mitglieder der Kommission für Innovations-Initiativen (KINIT): die Professoren Peter Bachmann (Präsident der Studienkommission, D-FOWI), Peter Chen (D-CHAB), Jürg Dual (Präsident der Planungskommission, D-MAVT), David Guggerli (D-GESS), Markus Gross (D-INFK), Wolfgang Kinzelbach (D-BAUG), Manfred Morari (D-ITET) und Ulrich Suter (D-BIOL). Professor Alan Green, Präsident der Forschungskommission (D-ERDW), präsidiert die KINIT.

Das Reglement für die KINIT finden Interessierte unter:

[www.rechtssammlung.ethz.ch/pdf/414\\_reglement\\_k-init.pdf](http://www.rechtssammlung.ethz.ch/pdf/414_reglement_k-init.pdf),

weitere detaillierte Informationen zur Initiative unter:

[www.research.ethz.ch](http://www.research.ethz.ch) oder

[www.verw.ethz.ch/sfw/pub/init.html](http://www.verw.ethz.ch/sfw/pub/init.html).

## **IN EIGENER SACHE**



Prof. Konrad Osterwalder, Rektor der ETH Zürich

### **Herausforderungen der Bologna-Reform**

Seit bald vier Jahren arbeiten die meisten Universitäten Europas an der so genannten Bologna-Reform, die oberflächlich gesehen in der Gliederung der Diplomstudiengänge

in zwei Stufen, Bachelor- und Masterstufe, sowie in der Einführung des Europäischen Credit Transfer Systems (ECTS) besteht. So einfach das tönen mag, so anspruchsvoll wird es, wenn man beschliesst, den Anlass zu einer alles umfassenden Studienreform zu nutzen: Viele grosse Herausforderungen! Wird ein Auslandsaufenthalt während des Bachelor-Studiums noch möglich sein? Lässt sich das Zulassungsverfahren zur Masterstufe so gestalten, dass Leute aus der ganzen Welt aufgenommen werden können, ohne dass während dem nur drei Semester dauernden Studium einige wieder weggewiesen werden müssen, weil sie den Anforderungen nicht gewachsen sind? Wie sind die Passerellen zwischen Fachhochschulen und universitären Hochschulen zu gestalten? Die Liste kann beliebig fortgeführt werden.

Besonders beschäftigt die ETH (und viele andere Universitäten) die Frage, wie trotz – oder gerade mit – dem Kreditpunktesystem die Anforderungen an die Studierenden so gestaltet werden können, dass die Selbstständigkeit und die Eigenverantwortung in der Zusammenstellung der Studienfächer gefördert wird, ohne dass dabei den Minimalisten Vorschub geleistet oder einer völligen Beliebigkeit Tür und Tor geöffnet werden. Den Spitzenleuten genügend Gestaltungsfreiraum zu gewähren und gleichzeitig den Mindeststandard eines ETH Abschlusses sicherzustellen: Dies ist eines der wichtigen Ziele, welches die ETH im Rahmen der Bologna-Reform mit Entschiedenheit verfolgt.

PROJEKTORIENTIERTES LERNEN AM INSTITUT FÜR MASCHINENBAU

## MEHR ALS EIN SOMMERPLAUSCH

Auch dieses Jahr konnten innovative Produkte von Maschinenbaustudierenden in der ETH-Haupthalle bewundert werden, dieses Mal vorwiegend im Zeichen diverser Pedalo-Prototypen. Hier die Gewinner des Publikums-Wettbewerbes.



Abb. 1: Bei der Probefahrt des «Barracuda-Pedalos» auf dem Zürichsee war auch das Schweizer Fernsehen dabei. Foto: Jakob Lindenmeyer



Abb. 2: Macht das «Gehen übers Wasser» möglich: Das «Katwalk-Pedalo». Foto: Jakob Lindenmeyer

den Wasserspiel mit viel Strategie und Action teilzunehmen. Es sieht wie ein schwimmender Turm aus, ist von zwei Personen tragbar und soll ohne Verbindung zum Land als unabhängige «Insel» funktionieren können. Das Zentrum von Floyd ist eine elektronische Steuereinheit, welche den Spielablauf mit Sensoren kontrolliert und steuert. Seine Aufgabe ist es, die Punkte der beiden spielenden Mannschaften zu verwalten, die Bälle aufzunehmen und sie wieder ins Spiel abzuschliessen und somit durch verschiedene Spielmodi das Spiel interessant zu halten.



Abb. 3: Innovative Wasserball-Spielmaschine: Ein schwimmender Turm «kontrolliert» den Spielablauf. Foto: ETH Zürich

(vac) Im Rahmen des Fachs «Produkt-Entwicklung» unter der Leitung von Prof. Markus Meier präsentierten die Maschinenbaustudierenden des vierten Semesters auch dieses Jahr vor den Sommerferien ihre Innovationsprojekte in der Haupthalle der ETH. Die zwölf beteiligten Teams konnten diesmal zwischen zwei Themen wählen: «Sport- und Rehabilitations-Geräte» oder «Reinigungs-Geräte». Am Ende der Ausstellung erkor das Publikum die drei Besten, die Preise im Gesamtwert von 3000 Franken erhielten.

Den ersten Publikumspreis gewann das «Katwalk-Pedalo», ein neuartiges Wasserfahrzeug, das dem Benutzer die Illusion vermittelt, über das Wasser zu «gehen». Die Idee: Den Wassersportbegeisterten und «tretmüden» Pedalofahrern neue Horizonte

zu öffnen sowie eine Alternative zum «Treten an Ort» im stickigen Fitnessstudio oder dem Rennen auf schmutzigen Strassen zu bieten.

Mit dem CAX/PDM Preis wurde das «Barracuda-Pedalo» gewürdigt, ein zusammenlegbares «Tragflügel-Pedalo», welches sich einiges schneller als die herkömmlichen Ausflugspedalos bewegt: Bei genügend hoher Geschwindigkeit erzeugt der Tragflügel ausreichend Auftrieb, um die Schwimmer aus dem Wasser zu heben und somit den Gleitwiderstand erheblich zu senken.

Der Geberit-Preis für Innovationsgehalt im Wert von 1000 Franken ging an das «Swim-tastic Floyd»-Team. Floyd ist eine für Hallen- und Freibäder konzipierte innovative Wasserball-Spielmaschine, welche es zwei Mannschaften erlaubt, an einem spannen-

# TRANSFER

10 JAHRE TECHNOPARK ZÜRICH

## NATÜRLICHE WIRKSTOFFE AUS DEM BIOTOP

**Es soll ein Biotop sein für junge Start-up-Firmen – der neue Life Science Inkubator, der Anfang Juli auf dem Wagi-Areal in Schlieren eröffnet wurde. Und er soll zu einem Biotop für eine neue Art von pflanzlichen Arzneimitteln werden, wenn es nach den Ideen der jungen Start-up-Firma NaproMed GmbH geht, die als erste Räume im «biotop – Life Science Inkubator Schlieren» bezogen hat.**

«Für uns stimmt hier alles», sagt Jürg Gertsch, einer der Gründer der ETH-Spin-off-Firma NaproMed GmbH. Mit «hier» meint Gertsch den neuen Life Science Inkubator «biotop» auf dem Wagi-Areal in Schlieren, mitten im Biotech Center Zürich. NaProMed GmbH ist die erste Start-up-Firma, die das von der ETH Zürich, der Universität Zürich, dem Amt für Wirtschaft und Arbeit des Kantons Zürich sowie der Stadt Schlieren aufgebaute Angebot nutzt. Gertsch und seine drei Kollegen gründeten ihre Firma vor rund einem Jahr. «Mit Dienstleistungsaufträgen konnten wir die Basis dafür schaffen, nun hier auch vermehrt unsere eigenen Ideen verfolgen zu können.» Dazu sei der Inkubator in Schlieren optimal, hält Gertsch fest. Nicht nur optimal eingerichtete Büros und Labors können zu fairen Konditionen genutzt werden, sondern mit den umliegenden Firmen des Biotech Centers Zürich, wie etwa dem ETH-spin-off Cytos oder der Firma Prionics, bestehe auch ein ideales Umfeld. «Gerade richtig für uns, unsere nächsten Schritte zu unternehmen.»

### Potenzial pflanzlicher Wirkstoffe

Die Gründer von NaproMed GmbH setzen auf das riesige, jedoch noch wenig genutzte Potenzial von pflanzlichen Wirkstoffen für Arzneimittel. Mit den von NaproMed entwickelten molekularbiologischen Analysemethoden können diese Wirkstoffe nun erst richtig erkannt werden: So möchten die jungen Wissenschaftler die Basis dafür schaffen, zum Beispiel Cortison durch einen pflanzlichen Wirkstoff zu ersetzen. Dank der von ihnen entwickelten und patentierten Methode können pflanzliche Wirkstoffe erkannt und auf ihre, bisher unbekannte Wirkung getestet werden. Gleichzeitig kann auch ein adäquater Produktionsprozess entwickelt werden. «Dafür jedoch suchen wir Partner», hält Gertsch fest. Und er ist auch überzeugt, diese zu finden.

### Idealer «Kunde»

Auch Andreas Klöti von ETH transfer ist begeistert von den ersten Mietern im «biotop», den er als Vertreter der ETH betreut. «Genau solche Kunden schwebten uns vor, als wir daran gingen, die Idee «biotop» umzusetzen», hält er fest. Als die von der ETH genutzte Räumlichkeiten im Wagi-Areal frei wurden, war es so weit: Die Idee, darin einen Inkubator zu schaffen, stiess beim Amt für Wirtschaft und Arbeit des Kantons Zürich und der Stadt Zürich auf offene Ohren, nachdem ein erstes Projekt für einen Life-Science-Park auf dem Areal gescheitert war. Das Projekt wurde auch von der Universität Zürich unterstützt.

Nach einem bescheiden gehaltenen Umbau im Frühjahr konnte der Inkubator nach einer relativ kurzen Vorlaufzeit am 4. Juli durch Vertreter von ETH, Universität, Stadt Schlieren und dem Kanton Zürich offiziell eröffnet werden. Nun sind auch die nächsten Mieter daran, einen Büroraum zu beziehen.

biotop bietet Start-up-Firmen im Life-Science-Bereich fünf Labor- und Büroeinheiten zur Miete an. Ein Seminarraum und weitere Einrichtungen runden das Angebot ab.

Die angebotenen Laborflächen sind zwischen 32 m<sup>2</sup> und 52 m<sup>2</sup>, die dazugehörigen Büros um 24 m<sup>2</sup> gross. Die Laboreinrichtung beinhaltet Laborbänke, Kühlschrank, Gefrierschrank, Strom- und Wasser- sowie Telefon- und Computeranschlüsse. Zentral angeboten auf 60 m<sup>2</sup> werden Waschküche mit Autoklav, Tiefgefrierschrank, Reinstwasser und Mediumküche. Zusätzlich steht ein Seminarraum von 40 m<sup>2</sup> zur Verfügung. Der Durchschnittspreis für eine Labor- und eine Büroeinheit inklusive der Benützung der gemeinschaftlichen Infrastruktur beläuft sich für einen Start-up auf zwischen 2400 und 3100 Schweizer Franken pro Monat.

Matthias Erzinger

# FORSCHUNG

NEUE WOHNFORMEN IN ZÜRICH: KRAFTWERK<sub>1</sub> UND REGINA KÄGI-HOF

## EINE VERWIRKLICHTE UTOPIE

Wie wohnen Menschen heute? Was sind ihre Bedürfnisse? Wie wirken sich gesellschaftliche Entwicklungen auf den Bau von Wohnungen im städtischen Umfeld aus? Diesen Fragen geht das ETH Wohnforum in seinem neuesten Projekt nach.



Der Regina Kägi-Hof: Viel Glas und viel Licht, doch nicht jedermanns Sache, da die Wohnungen von aussen Einsicht bieten. Foto: Reinhard Zimmermann

(vac) Sie nehmen nicht nur den Bau unter die Lupe: Die Menschen darin und ihr Wohlbefinden sind Gegenstand ihrer Forschung. Das ETH Wohnforum ist ein 12-köpfiges interdisziplinäres Team, das der Professur von Dietmar Eberle im Departement Architektur angegliedert ist. Vor kurzem haben die Forscher die Evaluation von zwei innovativen Zürcher Siedlungen, KraftWerk<sub>1</sub> und Regina Kägi-Hof, abgeschlossen und sind mit den Resultaten an die Öffentlichkeit gelangt.

### Lange die einzigen «Wohnforscher» in der Schweiz

Das ETH Wohnforum war schon von Anfang an eine interdisziplinäre Gruppe: Es wurde 1990 gegründet mit dem Ziel, die Bezüge zwischen gesellschaftlichen – also wirt-

schaftlichen, sozialen und kulturellen – Entwicklungen und Formen des Wohnens und deren architektonischer Ausgestaltung zu erforschen.

«Das ETH Wohnforum ist die einzige universitäre «Stelle», die in den letzten zehn Jahren im Bereich Wohnen kontinuierlich Forschung gemacht hat», betont Dr. Margrit Hugentobler, Mitglied des Leitungsteams und Projektleiterin.

Neben den Forschungsaktivitäten ist das ETH Wohnforum auch in der Lehre tätig. Die Organisation von Events, im Sinne der Öffentlichkeitsarbeit, gehört ebenfalls zu seinem Aufgabenbereich, wie zum Beispiel die gut besuchte Ausstellung «Stand der Dinge – Neustes Wohnen in Zürich» im Unterwerk Selnau des EWZ vom letzten Jahr.

### Ein Wohnexperiment

Die Evaluationsstudie der beiden Zürcher Siedlungen Regina Kägi-Hof in Zürich Nord und KraftWerk<sub>1</sub> in Zürich West wurde in Zusammenarbeit mit der Hochschule für Soziale Arbeit Zürich respektive der Fachhochschule Solothurn Nordwestschweiz gemacht. «Parallel zu einer schriftlichen Befragung wurden Gruppendiskussionen sowie Interviews mit Experten geführt», erklärt Dr. Andreas Huber, ebenfalls Leitungsmitglied und an der Evaluation beteiligter Forscher. «Wir haben eine Totalerhebung gemacht, wobei jede einzelne Person über 18 Jahre angeschrieben wurde. Die Rücklaufquote betrug erfreuliche 74 Prozent pro Haushalt für beide Siedlungen.»

«Das KraftWerk<sub>1</sub> ist explizit ein Experiment und eine Wohnutopie», meint Huber und erklärt, was daran utopisch ist: «Die Idee von autonomen Siedlungen, die selbstversorgend sind, stammt schon aus den 80er-Jahren: Viele von den damaligen Ansprüchen in punkto ökologische Anforderungen und Energiestandard konnten im KraftWerk<sub>1</sub> verwirklicht werden.»

Neu im KraftWerk<sub>1</sub> seien, so Huber, fünf Grosshaushalte mit sechs bis fünfzehn Personen, wobei der grösste Haushalt zwei Wohnungen – eine 12- und eine 7,5-Zimmer-Wohnung – bewohnt. «Neben dem vielfältigen neuen Wohnangebot gibt es im KraftWerk<sub>1</sub> zusätzliche Dienstleistungen wie beispielsweise einen Kindergarten, eine Kinderkrippe, die so genannte «Pantoffel-Bar», wo man sich täglich trifft, ein gutes Restaurant, zwei bis drei Läden, das Näh-Atelier, einen Wasch-Salon und ein Gäste-Zimmer, das man bei Bedarf mieten kann», ergänzt Hugentobler.

Es gibt auch Gruppen, die sich speziell gebildet haben: Im grossen Gemeinschaftsraum im obersten Geschoss trifft sich einmal pro Woche ein Kochklub namens «Circolo», wo vier Leute abwechslungsweise für feines Kochen für insgesamt 40 Leute verantwortlich sind. Eine Filmgruppe sorgt für die Projektion von spannenden Filmproduktionen, die jeweils unter einem anderen Motto laufen: «Wenn zum Beispiel ein spanischer Film gezeigt wird, gibt es spanische Tapas dazu», erzählt Huber.

Der Regina Kägi-Hof, eine Siedlung der Allgemeinen Baugenossenschaft Zürich, der grössten Genossenschaft in der Schweiz, entstand nach Entwürfen des bekannten Architekten Theo Hotz. «Diese Siedlung ist sehr offen gebaut und spricht vielleicht nicht jedermann an, da es viel Glas und viel Licht gibt und die Wohnungen von aussen Einsicht bieten», erzählt Hugentobler. «Die im Erdgeschoss angeordneten Waschküchen zeigen», betont Hugentobler, «dass solche Räume einen hohen Stellenwert haben und auch als Begegnungsorte dienen.» Ausserdem können die Bewohner im Erdgeschoss zusätzliche Ateliers mieten, die sie als Bastelraum oder Büro nutzen und damit den Wohnraum erweitern können.

Auch das gute Preis/Leistungs-Verhältnis sowie die kinderfreundliche Umgebung wissen die Bewohner des Regina Kägi-Hofs zu schätzen: «Hier hat es 80 Prozent Haushalte mit Kindern», so Hugentobler.



Ein Experiment und eine verwirklichte Wohnutopie: Das KraftWerk1 ist eine Siedlung mit Grosshaushalten und zusätzlichen Dienstleistungen. Foto: Allreal AG

### Wenn die Pfannen zu gross sind ...

Die Evaluation zeigte, dass die Bewohner in den beiden Siedlungen grundsätzlich sehr zufrieden sind. Ein wenig Kritik gab es auch: Die kontrollierte Bedarfslüftung in KraftWerk1 beispielsweise, bei der die Tür unten einen Lüftungsschlitz haben muss, behindert die Schallisolation: «Bei einer WG kann das schon unangenehm sein», sagt Huber. Oder: Was macht man, wenn man für eine riesige «Familie» kochen möchte, dementsprechend grosse Pfannen hat, aber der Herd zu klein ist? Auch hohe Räume, die durchaus schön aussehen mögen, werden zum Nachteil, wenn es drinnen zu laut wird. Die Lösung: Ein Theatervorhang kann auch als «Lärmschutz» dienen, wie die Mitglieder eines Grosshaushalts im KraftWerk1 beweisen.

Ein direkter Vergleich zwischen den beiden Siedlungen lässt sich nicht ziehen, da sie eine unterschiedliche Bewohnerschaft mit verschiedenen Bedürfnissen ansprechen sollen. «Statt Standard-Wohnungen zu bauen, muss man sich überlegen, wie man mit interessanten Bauten die Wünsche von verschiedenen Zielgruppen erfüllen kann», schlägt Hugentobler vor und weist auf eine der Zukunftsabsichten des ETH Wohnforums hin: «Aufgrund von solchen konkreten Evaluationen wollen wir Instrumente zur systematischen Erfassung von Veränderungen der Bewohnerschaft entwickeln, die dann in verschiedenen Siedlungen auch im Zeitverlauf verwendet werden können.»

## NEWS

**(CC/vac) Graue Literatur in der ETH-Bibliothek:** Mit einer neuen Publikationsplattform bietet die ETH-Bibliothek die Möglichkeit, gleichzeitig Literatur ausserhalb des traditionellen Verlagswesens zu publizieren und diese auch einfach aufzufinden. Weitere Informationen unter folgendem Link: <http://e-collection.ethbib.ethz.ch/>

**Neue Studie zu CO<sub>2</sub>:** Unter der Federführung des Centre for Energy Policy and Economics (CEPE) der ETH Zürich kommt ein Forschungskonsortium zu folgendem Schluss: Die Schweiz muss grosse Anstrengungen unternehmen, wenn sie die CO<sub>2</sub>-Emissionen bis 2010 um 10% senken will und somit die Ziele des Kyoto-Protokolls einhalten möchte. Nach den Berechnungen des Forschungsteams werden die CO<sub>2</sub>-Emissionen in den nächsten acht Jahren lediglich um 1,3% sinken, wenn keine zusätzlichen Massnahmen getroffen werden.

**CSCS/Manno unter neuer Leitung:** Ab dem 1. Juli 2003 leitet die Physikerin Marie-Christine Sawley neu das Zentrum für Hochleistungsrechner CSCS der ETH in Manno. Sie ist Nachfolgerin von Michele Parinello, welcher als Forscher und Professor an der ETH bleibt.

**Forschungsabkommen Schweiz-EU:** Die Verhandlungen zwischen der Schweiz und der EU zur Erneuerung des bilateralen Forschungsabkommens wurde erfolgreich abgeschlossen: Ab 1. Januar 2004 sollte die Schweiz voll an das 6. Rahmenprogramm assoziiert werden. Dies bedeutet, dass die Forschenden aus der Schweiz dieselben Beteiligungsrechte wie ihre Partner aus den Mitgliedsstaaten der EU erhalten. So lange das Abkommen noch nicht unterzeichnet ist, gelten die Empfehlungen des BBW.



# GALERIE

**Martin J. Lössner ist seit dem 1. April 2003 ordentlicher Professor für Lebensmittel-mikrobiologie am Institut für Lebensmittel- und Ernährungswissenschaften der ETH Zürich.**



Geboren am 17. Februar 1963 in Wuppertal, Deutschland, studierte er Biologie an der Albert-Ludwigs-Universität in Freiburg, Deutschland. Nach einem Master-Abschluss in Biologie in Michigan, USA, promovierte er anschliessend an der Technischen Universität München in Freising. Es folgte weitere Tätigkeit als Postdoktorand und wissenschaftlicher Assistent am Institut für Mikrobiologie des Forschungszentrums für Milch und Lebensmittel der TU München, unter der Anleitung von Siegfried Scherer. Nach Auslandsaufenthalten an der University of Nottingham, England, und an der Ben-Gurion-Universität in Beer-Sheva, Israel, wurde er nach seiner Habilitation im Jahr 2000 zum Privatdozenten für das Lehrgebiet Mikrobiologie an der TU München ernannt.

Im Anschluss an einen Forschungsaufenthalt im Jahr 2001 als Gastprofessor an Department für Molekular- und Zellbiologie der University of California in Berkeley, USA, folgte er im April 2003 dem Ruf an das Institut für Lebensmittel- und Ernährungswissenschaften der ETH Zürich.

Forschungsschwerpunkte der Arbeitsgruppe von Martin Lössner sind mikrobielle Krankheitserreger in Lebensmitteln und deren spezifische Bakteriophagen. Grundlagenforschung dient der Entwicklung neuer, innovativer Methoden zur Detektion und Kontrolle pathogener Bakterien wie zum Beispiel *Listeria monocytogenes*, *Staphylococcus aureus* und *Clostridium perfringens*. Rekombinanter Proteine zur Markierung und Immobilisierung von von bakteriellen Zellen sowie der Konstruktion gentechnisch optimierter Mikroorganismen für den Einsatz im Bereich der Herstellung und Konservierung von Lebensmitteln sind aktuelle Themen. Diese wissenschaftlichen Arbeiten

wurden mehrfach mit Preisen ausgezeichnet. Neben der engen Zusammenarbeit mit mehreren internationalen Forschungspartnern besteht auch guter Kontakt zu der Lebensmittel verarbeitenden und molekularbiologisch-diagnostisch orientierten Industrie.

## Akademische Ehrungen

**Prof. Dr. Henry Baltes**, Professor der ETH Zürich für physikalische Elektronik, ist von der Universität Bologna die Ehrendoktorwürde der Elektrotechnik verliehen worden.

**Prof. Dr. Helmuth Boelcskei**, Professor der ETH Zürich für Kommunikationstechnik, ist in Orlando mit dem IEEE Signal Processing Society Young Author Best Paper Award der IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP) 2001 ausgezeichnet worden.

**Prof. Dr. Martin Fussenegger**, Inhaber der SNF-Förderungsprofessur für molekulare Biotechnologie, ist der Förderpreis der Solothurner Vigier-Stiftung verliehen worden.

**Prof. Dr. Lino Guzzella**, Professor der ETH Zürich für Thermotronik, hat zusammen mit Dr. Felix Weber und Dr. Christoph Onder vom Institut für Mess- und Regeltechnik die Thomas Hawksley Gold Medal der Institution of Mechanical Engineers (I MECH E) erhalten.

**Prof. Dr. Ari Helenius**, Professor der ETH Zürich für Biochemie, ist – zusammen mit Prof. Dr. Reinhard G. Lührmann vom Max-Planck-Institut für Biophysikalische Chemie, Göttingen – der Ernst-Jung-Preis für Medizin 2003 verliehen worden.

**Prof. Dr. Lorenz Hurni**, Professor der ETH Zürich für Kartographie, ist zum Mitglied der Deutschen Akademie der Naturforscher Leopoldina gewählt worden.

**Prof. Dr. Peter Marti**, Professor der ETH Zürich für Baustatik und Konstruktion, ist für seine Verdienste um die «Swisscodes» zum Ehrenmitglied des Schweizerischen Ingenieur- und Architektenvereins SIA gewählt worden.

**Prof. Dr. Christian Menn**, Professor i. R. der ETH Zürich für Baustatik und Konstruktion, ist zusammen mit dem Büro Bänzinger + Küppel + Brändli + Partner, Chur, für den Entwurf, die Planung und Realisierung der Sunnibergbrücke bei Klosters mit dem Deutschen Ingenieur-Preis 2002 ausgezeichnet worden.

**Prof. Dr. Adolf Muschg**, Professor i. R. der ETH Zürich für deutsche Geschichte und Literatur, ist zum Präsident der Berliner Akademie der Künste gewählt worden.

**Prof. Dr. Helga Nowotny**, Professorin i. R. der ETH Zürich für Wissenschaftsphilosophie und Wissenschaftsforschung, ist das «Österreichische Ehrenkreuz für Wissenschaft und Kunst 1. Klasse» verliehen worden. Zudem ist sie in den Stiftungsrat der Georg-August-Universität Göttingen gewählt worden.

**Prof. Dr. Gabor Oplatka**, Professor i. R. der ETH Zürich für Leichtbau und Seilbahntechnik, ist an der Universität Kosice der «Apfel der Weisheit» verliehen worden.

**Prof. Dr. Konrad Osterwalder**, Rektor der ETH Zürich, ist in Anerkennung seiner Verdienste als Forscher auf dem Gebiet der Physik und als Förderer der Zusammenarbeit zwischen den europäischen Universitäten die Ehrendoktorwürde der Universität Helsinki verliehen worden.

**Prof. Dr. Felicitas Pauss**, Professorin der ETH Zürich für Experimentelle Teilchenphysik, ist das «Grosse Ehrenzeichen des Landes Steiermark» verliehen worden.

**Prof. Dr. Dimos Poulikakos**, Professor der ETH Zürich für Thermodynamik, ist der Heat Transfer Memorial Award 2003 der Heat Transfer Division der American Society of Mechanical Engineers (ASME) verliehen worden.

**Prof. Dr. Linda Thöny-Meyer**, Professorin der ETH Zürich für Molekulare Mikrobiologie, ist an der Gordon Research Conference «Metals in Biology» in Ventura mit dem Paul D. Saltmann Memorial Award geehrt worden.

# NEUE BÜCHER

Paul Meyer-Meierling (Hg.)

## BKKS 2.0 Baukosten-Kennzahlensystem

Budgetplanung für Neubauten und Erneuerungen

CD-ROM (dt./frz.) für PC und Mac, mit Booklet (pdf), Fr. 248.–

vdf Hochschulverlag AG an der ETH Zürich, 2003



Das Baukosten-Kennzahlensystem BKKS 2.0 macht es den Baufachleuten und vor allem auch den Laien möglich, Baukosten schnell und einfach zu ermitteln – und dies in einer sehr frühen Phase der Planung, wenn man noch am meisten Einfluss auf die Kosten nehmen kann. Die Kostendaten und deren Beziehungen zu Qualität und Quantität werden überschaubar dargestellt und nach Bedarf mit Plan, Bild und Beschrieb ergänzt. Die umfangreiche Datenbank mit über 70 ausführlich dokumentierten Referenzobjekten unterstützt den Anwender bei der Berechnung der Neubau- und der Erneuerungskosten.

Benchmarking: Das BKKS 2.0 macht es möglich, Objekte, die Ihrer Vorstellung entsprechen, zu vergleichen und die Auswertung grafisch darzustellen. Varianten können untersucht und damit die Weichen für Ihr Projekt gestellt werden.

Um die Preisschwankung bei den Berechnungen mit BKKS 2.0 darzustellen, werden folgende Indizes verwendet:

- Zürcher Index der Wohnbaukosten
- Schweizerischer Baupreisindex (BFS). Leistungsumfang, Design und Benutzerinterface sind gegenüber Version 1.0 ausgebaut worden. Ein einfaches, leichtverständliches Instrument für die Kostenberechnung und das Benchmarking in der strategischen Planung.

Gabriele Richter, Winfried Hacker

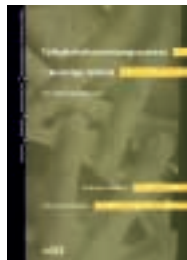
## Tätigkeitsbewertungssystem – Geistige Arbeit (für Arbeitsplatzinhaber)

Reihe «Mensch – Technik – Organisation»

Band 35

120 Seiten, viele Abbildungen und Tabellen, Format 16 x 23 cm, broschiert, Fr. 68.–

vdf Hochschulverlag AG an der ETH Zürich, 2003



Im Buch wird die partizipative Variante des Tätigkeitsbewertungssystems für geistige Arbeit (TBS-GA) vorgestellt. Es enthält das Handbuch, den Merkmalsteil, Erhebungsbogen und merkmalsbezogene Gestaltungshinweise.

Das Verfahren ist wie die Langform des TBS-GA handlungsregulationstheoretisch fundiert. Für die Einbeziehung der ArbeitsplatzinhaberInnen in die Analyse, Bewertung und Gestaltung ihrer Arbeitstätigkeiten wurden insgesamt 29 Merkmale regressionsanalytisch sowie hypothesengeleitet aus den fünf Hauptgruppen der Langform (A: organisatorische und technische Bedingungen, B: Kooperation und Kommunikation, C: Verantwortung, D: erforderliche kognitive Leistungen, E: Qualifikations- und Lernerfordernisse) abgeleitet und für das methodische Vorgehen adaptiert. Die ArbeitsplatzinhaberInnen werden durch Beispiele und Bilder bei der Einstufung unterstützt.

Durchgeführt werden kann eine orientierende Analyse der Gesamttätigkeit, eine vertiefende Screeninganalyse der Teilaufgaben oder eine umfassende Analyse von Teiltätigkeiten. Sowohl Einzelpersonen als auch Gruppen von ArbeitsplatzinhaberInnen, die gleiche oder ähnliche Arbeitsaufgaben ausführen, können neben dem Ist- den gewünschten Sollzustand ihrer Arbeit ermitteln. Die eigenen Wunschvorstellungen bedingen eine hohe Akzeptanz durchzuführender Massnahmen des Arbeits- und Gesundheitsschutzes.

Bruno Jenny

## Projektmanagement

### Das Wissen für eine erfolgreiche Karriere

292 Seiten, durchgehend vierfarbig, Format 20 x 24 cm, gebunden, Fr. 72.–

vdf Hochschulverlag AG an der ETH Zürich, 2003



Unternehmen realisieren ihre zahlreichen Innovations- und Änderungsvorhaben in Form von Projekten. Das ist notwendig, um die Herausforderung der Globalisierung, der Marktdynamik und eines harten Wettbewerbs erfolgreich zu bewältigen.

Der gewünschte Projekterfolg wird jedoch nur dann erreicht, wenn Projekte weitgehend auf einer professionellen, methodischen Führungs- und Durchführungsebene basieren. Und noch mehr: Das moderne Projektmanagement beruht auf einem umfassenden (zukunftsweisenden) Managementsystem. Die Effizienz dieses Systems besteht, neben der richtigen Integration, aus der optimalen Interaktion der einzelnen System-Elemente. So wird beispielsweise mit Hilfe der klassischen Projektabwicklung meist «nur» eine funktionale Veränderung erreicht, während ein zudem qualifiziert eingesetztes Changemanagement auch den psychologischen Veränderungsprozess, welchen alle Betroffenen durchlaufen müssen, auf eine professionelle Weise unterstützt. Dieses Buch zeigt auf, dass Projektarbeit wesentlich mehr ist als «trendy». Es vermittelt, unterstützt mit vielen Grafiken, echtes Projektmanagement-Wissen, unabhängig von der Fachrichtung und der Hierarchiestufe. Eine leicht verständliche Sprache, prägnante Lerninstrumente wie Lernziele, Checklisten, Aufgabenstellungen, Musterlösungen und ein aufschlussreiches Fallbeispiel ermöglichen es, die komplexe Thematik des modernen Projektmanagements auf eine interessante Art und Weise im Selbststudium zu erlernen.

# IM GESPRÄCH

INTERVIEW MIT PHILIPP REZA HECK, ASSISTENT AM INSTITUT FÜR ISOTOPENGEOLOGIE

## KAMPF FÜR KLARE SICHT AUF DIE STERNE

Philipp Reza Heck ist Dipl. Natw. ETH und Assistent am Departement Erdwissenschaften. Als Doktorand forscht er in Zeiträumen von Milliarden von Jahren. Als Präsident des Vereins Dark-Sky Switzerland engagiert er sich hier und jetzt gegen die Lichtverschmutzung am Nachthimmel.

### Herr Heck, glauben Sie an Ausserirdische?

Ja. Bakterien gibt es vielleicht sogar in unserem Sonnensystem, höhere Lebensformen auf einigen Planeten anderer Sterne unserer Galaxie. Intelligentes Leben kann ich mir in anderen Galaxien vorstellen. Ich weiss aber nicht, ob ich mit meiner Schätzung eher zu optimistisch oder zu pessimistisch bin. Es sind einfach noch zu viele Faktoren unbekannt über die Entstehung von Leben, so wie wir es kennen.

### Wann haben Sie das letzte Mal in die Sterne geguckt?

Wenn immer der Himmel klar ist, wendet sich mein Blick nach oben. Mit dem Fernrohr der Urania-Sternwarte Zürich praktisch einmal pro Woche. Um der starken Lichtverschmutzung von Zürich zu entkommen, muss ich aber in die Voralpen oder Alpen flüchten. Doch auch dort gibt es keinen natürlich dunklen Himmel mehr, dazu sind das Mittelland und die Poebene zu hell.

### Sie präsidieren eine Vereinigung mit dem geheimnisvollen Namen Dark-Sky Switzerland. Was steckt dahinter?

Wir von der Dark-Sky Switzerland (DSS) wollen weniger Lichtverschmutzung, das heisst, keine künstliche Aufhellung des Nachthimmels. Ziel unseres Vereins ist es, dass Lichtverschmutzung als eine ernstzunehmende Form von Umweltverschmutzung anerkannt wird und der Staat und grosse Umweltschutzorganisationen sich der Problematik bewusst werden.



Philipp Reza Heck: «Lichtverschmutzung ist nicht nur für Menschen ein Problem. Zugvögel und Insekten orientieren sich nachts an natürlichen Lichtquellen wie dem Mond und den Sternen.»

### **Sie sind also eine Art Meister Proper des Nachthimmels ...**

... Wenn Sie so wollen. Uns geht es darum, das nächtliche Ökosystem zu schützen, eine sichere und angenehme nächtliche Umgebung in Stadt und Land zu fördern und den Sternenhimmel als Inspirationsquelle der Menschheit zu erhalten.

### **Ist das nicht illusorisch, in Städten wie Zürich per Befehl Lichterlöschen zu verordnen zu wollen?**

Dies wäre tatsächlich für die meisten Stadtbewohner und auch für Dark-Sky nicht wünschenswert. Zum Glück verträgt sich die Reduktion der Lichtverschmutzung wunderbar mit dem Grossstadtleben. Durch sinnvoll angebrachte, gut abgeschirmte, blendfreie Leuchten lässt sich die urbane Lebensqualität sogar verbessern. Nächtliche Spaziergänger könnten sich unter einem mit Sternen übersäten Himmel durch eine angenehm und sicher ausgeleuchtete Stadt bewegen. Ich behaupte, dass bei einer vollständig optimierten Aussenbeleuchtung aus der Stadt Zürich die Milchstrasse wieder gut sichtbar wäre.

### **Aber mehr Licht heisst doch gerade auch für Verkehrsteilnehmer mehr Sicherheit ...**

Mehr Licht heisst nicht zwingend mehr Sicherheit und Wohlbefinden. Zu viel Licht blendet und macht die Dunkeladaptation des menschlichen Auges zunichte. Oft sind entlang von Fusswegen in Parks und Promenaden sehr helle Kugelleuchten platziert. Fussgänger und Fussgängerinnen werden dadurch geblendet und sehen direkt in die helle Lichtquelle, der Gehweg ist aber nur mässig gut ausgeleuchtet, und seitlich ist kaum etwas zu erkennen – man fühlt sich unsicher, da das Auge auf das helle Licht eingestellt ist und die Übersicht fehlt. Die Lichtquelle soll somit nicht direkt einsehbar sein, und es sollte nur so hell wie nötig beleuchtet werden.

### **Die SBB planen, alle Regionalbahnhöfe mit Lichtsäulen auszustatten. Gehe ich recht in der Annahme, dass Sie dies nicht gut finden?**

Die «Railbeams» der SBB sind Dark-Sky ein Dorn im Auge, weil die acht Meter hohe Säule von unten her beleuchtet wird. Dies hat unweigerlich zur Folge, dass ein Teil des Lichts direkt in den Himmel als «Lichtabfall» gestrahlt wird und den Himmel merklich aufhellt. Seit 2001 haben wir unsere Kritik den Bundesbahnen immer wieder mitgeteilt. Nachdem auch die Vogelwarte

Sempach Kritik geäussert hat und zahlreiche Medienberichte erschienen sind, entschlossen sich die SBB Massnahmen zu ergreifen. Die gesamte Lichtleistung soll nun unter den ursprünglichen «Lichtabfall» gesenkt werden. Filter sollen eine starke Ablenkung von Vögeln und Insekten verhindern. Leider wird aber immer noch von unten nach oben beleuchtet.

### **Ihr Engagement in Ehren, aber ist es nicht etwas viel verlangt, die Aussenbeleuchtungen anzupassen, damit Sie ungestört in den Nachthimmel schauen können?**

Lichtverschmutzung ist nicht nur für Menschen ein Problem. Zugvögel und Insekten orientieren sich nachts an natürlichen Lichtquellen wie dem Mond und den Sternen. Eine helle, nach oben strahlende künstliche Lichtquelle lenkt die Nachtflieger ab. Wissenschaftliche Studien belegen, dass die Tiere in ihrem natürlichen Verhalten gestört werden. Dies kann im schlimmsten Fall fatale Folgen haben und ganze Nahrungsketten gefährden.

Viele Lebewesen der Erde, einschliesslich der Menschen, haben sich in ihrer stammesgeschichtlichen Entwicklung auf einen natürlichen Wechsel von hellem Tag und dunkler Nacht eingestellt und sind darauf angewiesen. Eine Aufhebung des Unterschieds zwischen Tag und Nacht bzw. ein saisonal unabhängiger permanenter nächtlicher Dämmerungszustand wie er heute vielerorts durch Lichtverschmutzung hervorgerufen wird, stört das natürliche Gleichgewicht.

### **Wie sind Sie zu der Dark-Sky-Bewegung gekommen?**

Als ich mit meinem eigenen Teleskop immer weniger Sterne sehen konnte und die Milchstrasse kaum mehr zu Gesicht bekommen habe, engagierte ich mich mit Kollegen, um auf Lichtverschmutzung aufmerksam zu machen. 1996 gründeten wir dann Dark-Sky Switzerland. Mittlerweile sind wir die offizielle Schweizer Sektion der International Dark-Sky Association, Mitglied der Schweizer Licht Gesellschaft und Fachgruppe der Schweizerischen Astronomischen Gesellschaft.

### **Sie betreiben mit Kollegen unter [www.astro-info.org](http://www.astro-info.org) eine Website für Freizeit-Astronomen. Offenbar stammen die meisten aus dem Zürcher Unterland. Hat es dort besonders viele Astronomen?**

Ich kann mir vorstellen, dass die Unterländer Sternwarten Bülach und Rümlang viele Leute für die Astronomie begeistern können. Die Ursprünge von astro!Info liegen wahrscheinlich deshalb im Zürcher Unterland und stammen aus der Zeit von Videotext. Später lief der astronomische Informationsservice auf einem Server der ETH im Rahmen von ezInfo, bis wir uns 1997 einen eigenen Server leisten konnten und die Internetverbindung vom Provider Dolphins Network Systems gesponsert wurde.

### **Was ist für Sie als Wissenschaftler spannend an einer Arbeit, die sich an ein breites Publikum wendet wie beispielsweise mit astro!Info?**

Die Urania-Sternwarte Zürich und astro!Info stellen für mich wertvolle Brücken zur Wissens- und Ideenvermittlung vom Wissenschaftsbetrieb zum interessierten Publikum dar. Es ist eine spannende Aufgabe, naturwissenschaftliche Erklärungen und Erkenntnisse verständlich aufzubereiten und weiterzugeben, sodass sich das Vermittelte im Kopf der Besucher und Besucherinnen als neues Puzzleteil an ihr eigenes Weltbild fügt.

Interview: Roman Klingler

Philipp Reza Heck ist Dipl. Natw. ETH und Assistent am Institut für Isotopengeologie. Dieser hat sich spezialisiert auf die Analyse von Edelgasen (z. B. Helium und Neon) in interplanetaren Staubteilchen, fossilen Meteoriten sowie in so genanntem präsolaren Sternenstaub, der seit seinem Entstehen in Sternen vor mehr als 4,6 Milliarden Jahren erhalten geblieben ist. In seiner Dissertation bei Professor Rainer Wieler untersucht Heck fossile Meteoriten. «Wir versuchen damit unser Verständnis über katastrophale Kollisionen im Asteroidengürtel und deren Auswirkungen auf die Erde zu erweitern.» Seine weitere berufliche Zukunft lässt der ETH-Absolvent noch offen. Er kann sich aber gut vorstellen, seine Forschungstätigkeit an einer Hochschule fortzuführen.

# TREFFPUNKT

## ETH ALUMNI-PREIS AN DER SOLA-STAFETTE

### 5000 FRANKEN FÜR GUTEN ZWECK

An der Sola-Stafette 2003 wurde erstmals der ETH Alumni-Preis verliehen. Mit diesem Preis möchten die Alumni der ETH einen guten Zweck innerhalb des ETH Campus unterstützen. Der Vorstand der ETH Alumni-Vereinigung hat beschlossen, dass der erste ETH Alumni-Preis an der Sola-Stafette der Stiftung Kinderbetreuung im Hochschulraum für den Ausbau des Spielplatzes der neuen Kinderkrippe in der Studentenwohnanlage Bülacherhof, Zürich, zukommen soll. Die Sola-Stafette ist mit über 8000 Teilnehmern, Studenten, Alumni und Mitarbeiter der Hochschulen, einer der grössten öffentlichen Sportanlässe der Schweiz und damit eine optimale Plattform für die ETH Alumni, um als Teil des ETH Campus wahrgenommen zu werden.

Originell und rechnerisch durchaus ETH-würdig ist die Art, wie die Preissumme zu-

stande kommt: Der Preis wird von derjenigen Mannschaft gewonnen, welche im Zwischenklassement bei der Universität Irchel um ca. 12.00 Uhr mit Rang Nummer 77 ankommt. Ihr Rückstand auf den ersten Rang in Sekunden ergibt den Preis in Franken. Die gelaufene Zeit von Rang 77 war dieses Jahr 47' 15" und der Preis damit CHF 2835.00. Die UBS, einer der Partner der ETH Alumni-Vereinigung, fand Gefallen an der Idee und rundete den Preis spontan auf. Damit konnte Sergio Tassinari, der Geschäftsführer der Stiftung Kinderbetreuung bei der Rangverkündigung am Abend den Betrag von CHF 5000 entgegennehmen. Damit lassen sich sicher einige interessante Spielmöglichkeiten auf dem Spielplatz der Kinderkrippe aufbauen. Auch die Mannschaft, die den Preis gewonnen hat, zufällig das Team mit der Nr. 77, ist nicht leer ausgegan-



Kaspar Egger, Direktor des ASVZ, hilft Peter Brunner, Geschäftsführer ETH Alumni, bei der Übergabe des Preises

gen. Als kleines Dankeschön durfte sich jedes Mitglied ein T-Shirt der ETH Alumni auslesen.

Die ETH Alumni hoffen, dass mit diesem Beitrag der Spielplatz nach den Wünschen der Kinder gestaltet wird und wünschen ihnen viel Spass beim Spielen.

## DIE ETH LÄDT EIN ZU EINEM AMBITIONIERTEN DISKUSSIONSFORUM

### WISSENSCHAFT KONTROVERS!

Eine Hochschule mit dem Anspruch, wissenschaftliche Spitzenleistungen zu erbringen, muss auch vorbildlich in ihren Standards der Wissenskultur sein. Was ohne bewusste Pflege leicht zur Worthülse wird, soll in einer ETH-weiten Diskussion und darüber hinaus kritisch befragt, kontrovers diskutiert und gezielt mit Inhalt gefüllt werden. Im Mittelpunkt der Veranstaltungsreihe mit dem Titel «Wissenschaft kontrovers. Eine Selbstbefragung über Geld, Kultur und Qualität» stehen Fragen wie: Was ist wissenschaftlich korrekt? Wer bestimmt dies? Wie eng sollten die Beziehungen zwischen Wissenschaft und Wirtschaft sein? Wo werden wissenschaftliche Kontroversen ausgetragen? Wie gehen wir damit um, wenn wissenschaftliche Themen im Brennpunkt der öffentlichen Diskussion und verschiedener Interessen stehen? Aktuell werden diese Fragen deshalb, weil gesellschaft-

licher Wandel sich auch auf die Wissenschaften auswirkt. Bürgerinnen und Bürger stehen den Wissenschaften selbstbewusster und kritischer gegenüber. Im Wissenschaftsbetrieb entstehen durch neue Methoden, Informationssysteme und Organisationsformen Unsicherheiten – neue Standards der Wissenskultur müssen gefunden werden. Der Wissenschaftsbetrieb, seine ethischen Fragen und die Verantwortung der Forschenden stehen im Fokus der 2-semesterigen öffentlichen Veranstaltung, die vom Collegium Helveticum in Zusammenarbeit mit der Schulleitung der ETH realisiert wird. Namhafte Exponenten aus Wissenschaft, Wirtschaft und Politik werden sich an der Diskussion beteiligen. Doch es geht nicht um eine Diskussion ex cathedra – Ziel der ambitionierten Veranstaltung ist es vielmehr, mit neuen Formen das Publikum an der Kontroverse mitwirken zu lassen.


Die Diskussionsreihe findet im Wintersemester 2003/04 zweiwöchentlich am Montagabend um 19.30 Uhr im Audimaximum im Hauptgebäude der ETH Zürich an der Rämistr. 101 statt. Auftakt am 3.11.03 zum Thema «Kultur der Wissenschaften – eine Auseinandersetzung im Spannungsfeld Wissenschaft, Wirtschaft und Gesellschaft».

Informationen zur Veranstaltung:  
[www.collegium.ethz.ch/event/index.de.html](http://www.collegium.ethz.ch/event/index.de.html)

## ETH Alumni

Vereinigung der Absolventinnen und Absolventen der ETH Zürich, ETH Zentrum, 8092 Zürich, Tel. 01-632 51 00, Fax 01-632 13 29, [info@alumni.ethz.ch](mailto:info@alumni.ethz.ch), [www.alumni.ethz.ch](http://www.alumni.ethz.ch)





Severine Felley/April 2002

## Unlimited global career opportunities

Zukunftschancen, persönliche Weiterentwicklung,  
Verantwortung, Herausforderungen, Wachstum,  
Zufriedenheit, Anerkennung

Wir nehmen «unlimited» wörtlich.

Wir bei UBS glauben, dass die Mitarbeiter der Schlüssel zum Erfolg eines Unternehmens sind. Deshalb suchen wir engagierte und qualifizierte Nachwuchskräfte und bieten ihnen die Möglichkeit, sich weiterzuentwickeln und ihr Potenzial auszuschöpfen.

Werden Sie Teil eines dynamischen, globalen Unternehmens, das in den Bereichen Asset und Wealth Management sowie Investment und Retail Banking führend ist. Wir nehmen Ihre Ambitionen ernst und machen uns dafür stark, dass Sie Ihre Ziele erreichen.

[www.ubs.com/graduates](http://www.ubs.com/graduates)



## Unser Planet im Kosmos Wir beobachten die Erde



Auf ENVISAT, dem europäischen Umweltsatelliten, sind wir mit verschiedenen Systemen an Bord. Mit der Erdbeobachtung als Frühwarnsystem für die Umweltqualität unseres Planeten helfen wir mit unseren Produkten, die Erde zu erhalten.

Ingenieure tragen mit ihren Leistungen dazu bei, dass unsere Produkte in Raumfahrtmissionen erfolgreich eingesetzt werden. Wir helfen mit, sowohl die Erde als Ganzes zu erfassen, als auch die Weiten des Universums und ihre Einflüsse auf unser irdisches Leben zu erforschen. Dazu stellen wir uns mit Phantasie und kreativem Engagement Aufgaben, die zuvor noch nie gelöst wurden.



Contraves Space AG  
Schaffhauserstrasse 580  
CH-8052 Zürich  
Phone +41 1 306 22 11  
Fax +41 1 306 29 10  
[www.contravesspace.com](http://www.contravesspace.com)