

GEO kompakt

Nr. 29

Die Grundlagen des Wissens

Der Urknall

... und wie die Welt entstand

Wie das Nichts zu Raum und Zeit wurde
Woher die ersten Galaxien kamen
Weshalb das All eine dunkle Seite hat

VOR DEM URKNALL
Forscher suchen nach einem
früheren Universum

DIE ERSTEN MINUTEN
Was geschah, als sich der
Kosmos bildete?

NEUTRONENSTERNE
Das Rätsel der
rotierenden Kugeln

ZUKUNFT
Wie wird das Weltall
einmal enden?

Steigern Sie Ihre **Abwehrkräfte**: gegen Stress, Erschöpfung und Überforderung.

GEO WISSEN

DIE WELT VERSTEHEN

www.geo-wissen.de

GEO WISSEN Nr. 48 Was die Seele stark macht

Was die Seele stark macht

Hilfe bei
Burnout, Ängsten,
Depression



TEST
Wie widerstandsfähig
ist Ihre Psyche?

KINDER
Wenn sich das
Ich verdunkelt

RESILIENZ
Was die inneren
Kräfte weckt

ÜBERLASTUNG
Wege aus der
Perfektionismus-Falle



Heft 9,00 € –
mit DVD 15,90 €*
* Heft ohne DVD: 9,00 € (A: 10,20 €/CH: 18,60 CHF)
Heft mit DVD: 15,90 € (A: 17,90 €/CH: 33,00 CHF)



Liebe Leserin, lieber Leser,

„in diesem Heft werden wir es mit den extremsten, den schwierigsten und den staunenswertesten Phänomenen zu tun bekommen, über die ein Journalist überhaupt berichten kann“, schrieb mein Kollege Dr. Henning Engeln, als er uns vor einigen Monaten sein Konzept für diese Ausgabe redaktionsintern vorstellte.

„Es geht um nichts weniger als die Geschichte von allem: Um die Geburt von Zeit, Raum und Materie, um das Auseinanderfliegen des Weltalls mit Überlichtgeschwindigkeit, um das Leben und Sterben der ersten Sterne und das Wachsen von Galaxien. Nichts ist schwerer vorzustellen und zu verstehen als die Geburt und Entwicklung unseres Universums. Da entstehen Raum und Zeit aus dem Nichts, da trennen sich Urkräfte voneinander wie Eiskristalle, die beim Abkühlen von Wasser plötzlich in der Flüssigkeit auskeimen, da materialisieren sich Atombausteine aus reiner Energie. Und das in Zeiträumen, die einem Menschen unendlich kurz erscheinen.“

Wie nur sollten wir ein solches Thema visualisieren?

Da von Produktionsbeginn an klar war, dass wir in diesem Heft nur auf sehr wenige Fotos zurückgreifen können, stellten wir ein Team auf, dass überlegen sollte, wie sich die ungemein komplexen Vorgänge nach dem Urknall illustrativ darstellen ließen. Zu dieser Mannschaft gehörte der Heftredakteur Engeln, der Art Director Torsten Laaker, der Redakteur und Illustrator Rainer Harf sowie Tobias Hofbaur, Astrophysiker und Wissenschaftlicher Berater der Redaktion – und natür-

lich die beiden Illustratoren Jochen Stuhmann und Tim Wehrmann, die uns schon seit mehreren Jahren mit ihren ungemein kunstvollen Darstellungen des eigentlich Nicht-Darstellbaren unterstützen.

Insgesamt fertigten die beiden sowie Rainer Harf mehr als 90 einzelne Illustrationen für dieses Heft, darunter den Beitrag über die Entstehung der ersten Sonnen (Seite 48) sowie den Bildessay über „Das Werden und Vergehen der Gestirne“ (Seite 90).

Die mit Abstand aufwendigste Produktion aber war der Versuch, die ungemein komplexen Vorgänge während des Urknalls – und in den ersten 380 000 Jahren danach – optisch darzustellen (Seite 30): Die Schwierigkeit bestand nicht nur darin, etwas zutiefst Abstraktes (also etwas, das man eigentlich gar nicht zeigen kann) in verständliche Bilder zu übersetzen. Eine weitere Herausforderung war zudem, aus der Unzahl an Reaktionen und Teilchen, die den Beginn unserer Welt markieren, die bedeutendsten herauszusuchen. Darüber hinaus mussten die Informationen so vereinfacht werden, dass sie auch Laien verständlich waren – durften aber auch nicht derart trivialisiert werden, dass unser Berater Tobias Hofbaur Einwände erhoben hätte.

Wenn Sie mir diese Unbescheidenheit erlauben: Ich finde, diese Aufgabe ist den sechs Kollegen grandios gelungen. Ob Sie meine Ansicht teilen – oder möglicherweise auch nicht – können Sie uns gern mitteilen: auf der „Briefkasten“-Seite von Geokompakt.de.



Für die Illustrationen zuständig (v. l.): Henning Engeln (Heftredakteur), Rainer Harf (Redakteur), Tim Wehrmann (Illustrator), Torsten Laaker (Art Director), Jochen Stuhmann (Illustrator), Tobias Hofbaur (Fachberater)

Herzlich Ihr

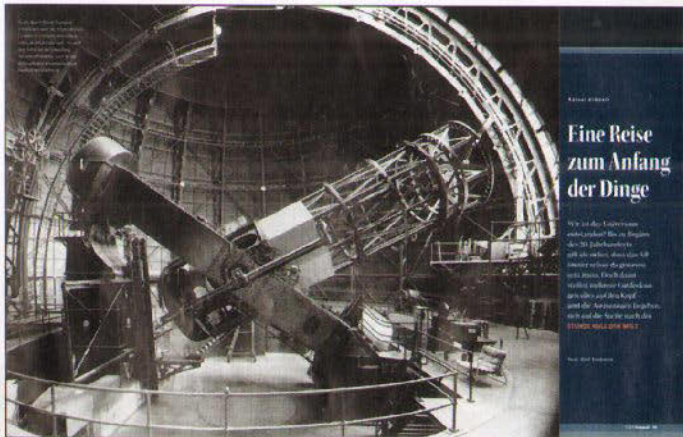
Michael Stoffer



Am Anfang war das Weltall ein unendlich kleiner und heißer Punkt. Seine Explosion schuf Raum, Zeit und alle Bausteine der Welt **30**



Die ersten Sterne erstrahlten, als sich Wasserstoff so weit verdichtet hatte, dass Kernfusion in ihnen enorme Energien entfesselte **48**



In den 1920er Jahren erkannten Astronomen, dass sich alle Galaxien von uns fortbewegen – ein erster Hinweis auf den Urknall **18**



Ein Hyperriese ist ein Stern von riesiger Leuchtkraft. Ist sein Brennstoff verbraucht, explodiert er und hinterlässt ein Schwarzes Loch **90**



Mit hochmodernen optischen Fernrohren, Radioteleskopen und Teilchendetektoren erkunden Forscher die Geheimnisse des Alls **60**



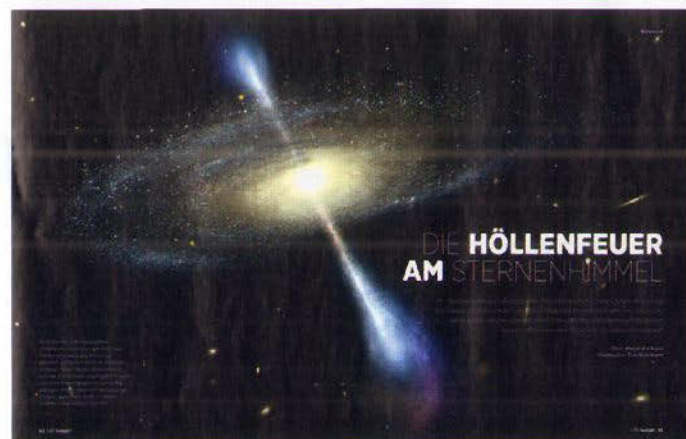
Womöglich war der Urknall nur ein Durchgangsstadium von einem Universum zum anderen – so eine kühne neue These **146**



Gewaltige Archipele von Sternen formten sich eine halbe Milliarde Jahre nach dem Urknall – einer wurde zur Heimat der Erde **6**



Weshalb der Mensch nie alles begreifen und dennoch immer weiter forschen wird, erklärt der Astrophysiker Harald Lesch **102**



Reißt ein Schwarzes Loch im Zentrum einer Galaxie Materie rasend schnell an sich, entsteht das furiose Leuchten eines Quasars **82**

URKNALL

Die Geburt der Welt Obwohl seit 13,7 Milliarden Jahre vergangen sind, lässt sich die Entstehung des Alls zum Großteil präzise rekonstruieren **30**

Die Bausteine des Universums Von Kräften, Elementarteilchen, Atomen, Quanten, Wellen und Einsteins Formel **131**

Was war vor dem Urknall? Wie Astrophysiker herausfinden wollen, ob es doch eine Welt vor unserer gegeben hat **146**

Daten des Kosmos Die verrücktesten Zahlen über unser Universum – und ein Protokoll seines Ursprungs **152**

Das Ende von allem Sechs Szenarien darüber, wie es mit der Welt dereinst weitergehen wird **150**

FRÜHES UNIVERSUM

Die ersten Lichter am Firmament Welche geheimnisvollen Kräfte die ersten Sterne und Galaxien entstehen ließen **48**

Inseln in der Zeit Gigantische Ansammlungen von Sternen prägen seit Jahrmilliarden unser Universum: die Galaxien **6**

Das Rätsel der zwei mächtigsten Kräfte im All Wie Dunkle Materie und Dunkle Energie den Kosmos beeinflussen **74**

Die Höllefeuer am Sternenhimmel Schwarze Löcher im Zentrum von Galaxien erzeugen das hellste Leuchten im Weltraum **82**

Der Pulsschlag der sterbenden Sonne Was hinter dem Phänomen der rasend schnell rotierenden Neutronensterne steckt **112**

Vom Werden und Vergehen der Gestirne Welches Schicksal einem jungen Stern droht, hängt vor allem von seiner Masse ab **90**

KOSMOLOGIE

Eine Reise zum Anfang der Dinge Wie Forscher auf die ungeheuerliche Idee kamen, das All sei aus einem Punkt entstanden **18**

Was das Licht über Gestirne erzählt Aus dem Farbspektrum einer Galaxie lässt sich etwa ihre Geschwindigkeit ermitteln **29**

Die Grenzen des Wissens Professor Harald Lesch über die wichtigsten Fragen, die Astrophysiker heute beschäftigen **102**

Vorstoß in die Unendlichkeit Mit welchen Hightech-Geräten Forscher das Weltall und den Urknall enträtseln **60**

Das Auge der Erkenntnis Wohl kaum ein Gerät hat die Astronomie so bereichert wie das „Hubble“-Weltraumteleskop **118**

Bildnachweis 109

Impressum 109

Vorschau: »Ernährung« 154

Redaktionsschluss dieser Ausgabe:
18. November 2011

Alle Fakten und Daten in
diesem Heft sind vom GEO-

kompakt-Verifikationsteam
auf ihre Präzision, Relevanz und
Richtigkeit überprüft worden.

Informationen zum Thema und
Kontakt zur Redaktion unter
www.geokompakt.de

Titelbild: Jochen Stuhmann

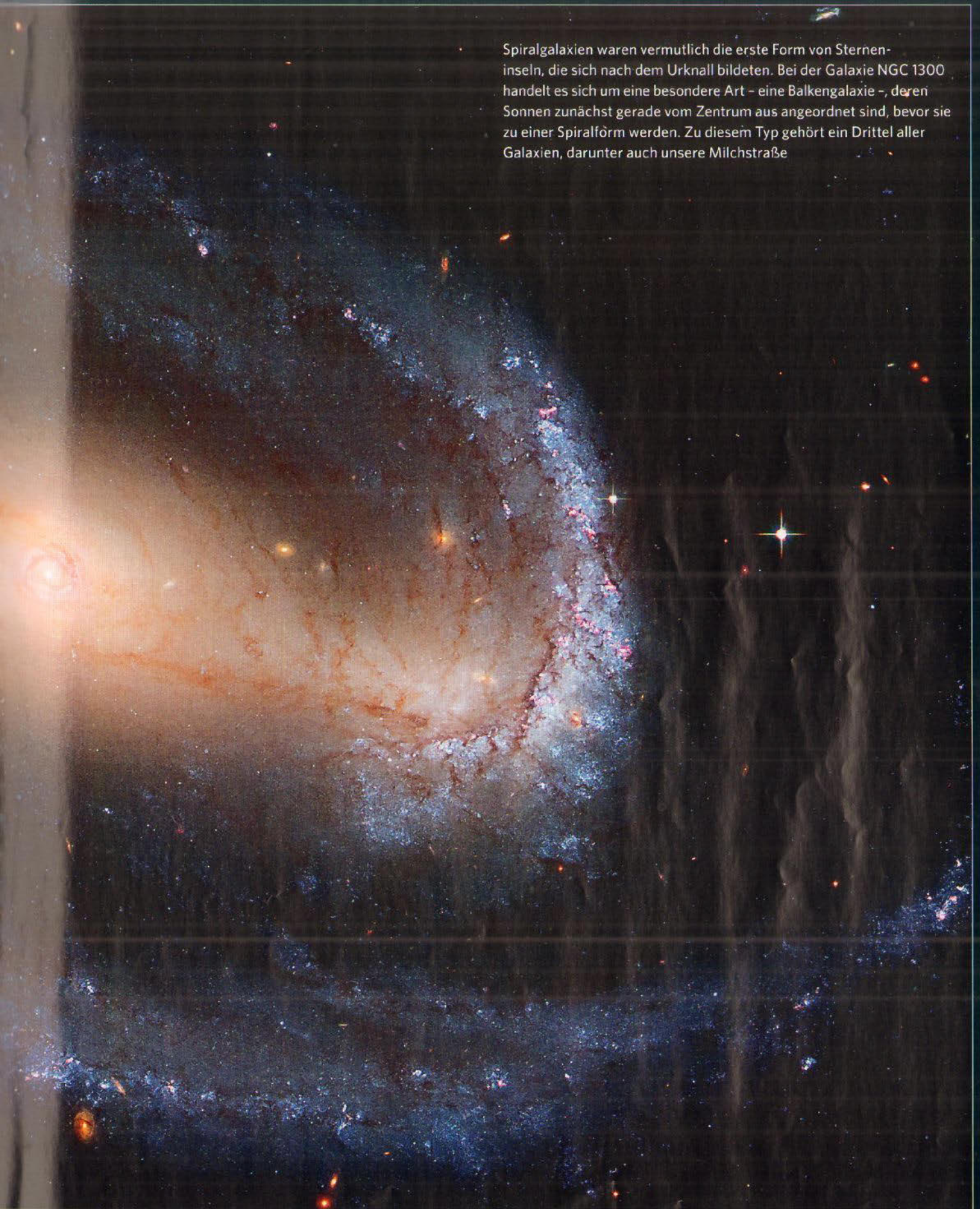


Inseln *in der* Zeit

Texte: Henning Engeln

Vor 13,7 Milliarden Jahren explodierte ein winziger Punkt mit ungeheurer Energie und brachte in Sekundenbruchteilen die Gesetze der Welt, die Grundkräfte und die Bausteine der Materie hervor. Doch es dauerte nach diesem »Urknall« noch rund 100 Millionen Jahre, bis aus Wolken von Wasserstoff und Helium die ersten Sterne entstanden, und weitere 400 Millionen Jahre, ehe sich die Sonnen zu ersten Galaxien organisierten. Seither ziehen diese Sternen-Archipele, die Jahrmillionen von Lichtjahren voneinander entfernt sind, einsam durch Raum und Zeit

Spiralgalaxien waren vermutlich die erste Form von Sternensystemen, die sich nach dem Urknall bildeten. Bei der Galaxie NGC 1300 handelt es sich um eine besondere Art – eine Balkengalaxie –, deren Sterne zunächst gerade vom Zentrum aus angeordnet sind, bevor sie zu einer Spiralförmigkeit werden. Zu diesem Typ gehört ein Drittel aller Galaxien, darunter auch unsere Milchstraße





BEGEGNUNG DER TURBULENTEN ART

Kommen zwei Galaxien einander nahe, hat das meist dramatische Folgen: Sterne beginnen sich über die Schwerkraft gegenseitig zu beeinflussen, geraten aus der Bahn. Schwaden aus Gas- und Staubwolken verdichten sich.

■ Mächtige Staubwolken wirbeln am Rand der »Black Eye Galaxy« – vermutlich hat der Sternenhaufen eine kleinere Galaxie in sich aufgenommen.

■ Durch die Kollision zweier Galaxien hat sich der Spiralarm der oberen zum Ring verformt. Die untere hat sich sogar noch stärker gewandelt.



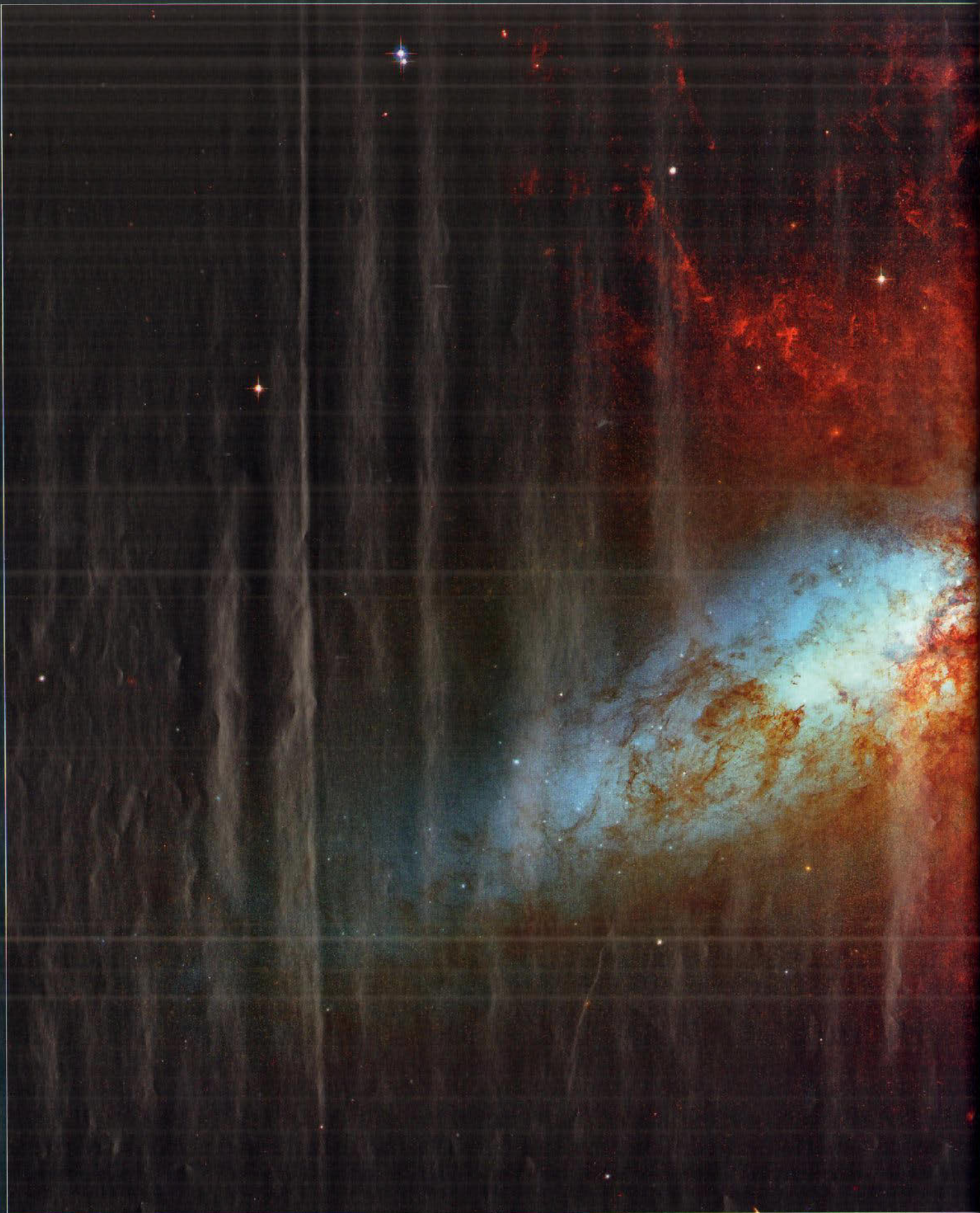




DIE SCHEIBE MIT DEM RING AUS STAUB

Der Sombrero-Nebel ist eine Spiralgalaxie (hier von der Seite aufgenommen) und rund 800 Milliarden Sonnen schwer. Der Staubring enthält mikroskopisch kleine Körner aus schwereren chemischen Elementen, darunter Silizium und Kohlenstoff. Im Zentrum des Nebels befindet sich ein supermassives Schwarzes Loch aus rund einer Milliarde Sonnenmassen. Vermutlich gibt es in jeder Milchstraße ein solches, gigantisches Gebilde, dessen Schwerkraftsog so gewaltig ist, dass ihm kein Lichtstrahl entkommen kann.







SONNENFABRIK IM HERZEN DER GALAXIE

Schon bald nach dem Urknall hatten sich Wasserstoffwolken im Weltraum zu Sternen verdichtet und zu Milchstraßen zusammengeballt. Doch auch heute noch bilden sich neue Sonnen. So haben Schwerkraftwellen aus einer benachbarten Galaxie Gaswolken im Zentrum der Milchstraße M82 durcheinandergewirbelt, sodass die Gase sich an vielen Stellen verdichtet haben und zu neuen, riesigen Sternen wurden. Die brennen derart heftig, dass sie einen Teil ihrer Materie als »Sternenwind« abgeben, wodurch auch heißes Wasserstoffgas (rot) aus der Galaxie getrieben wird.





VOM WANDEL DER STERNEN-ARCHIPELE

Viele Galaxien verändern im Laufe der Jahrtausende ihre Form: Manche werden zu eiförmigen, wenig strukturierten »elliptischen« Galaxien, andere zu formlosen »irregulären« Galaxien, wieder andere bilden einen Ring aus.



So wie NGC 4921 im Sternbild »Haar der Berenike« sehen junge Spiralgalaxien vermutlich immer aus: Staub und Sterne sind relativ gleichmäßig verteilt.



Einst war auch AM 0644-741 ein Spiralnebel. Doch nach der Kollision mit einer anderen Galaxie entstand ein Ring aus blau strahlenden Sternen. Das helle Licht im Zentrum ist der alte Kern der Galaxie.

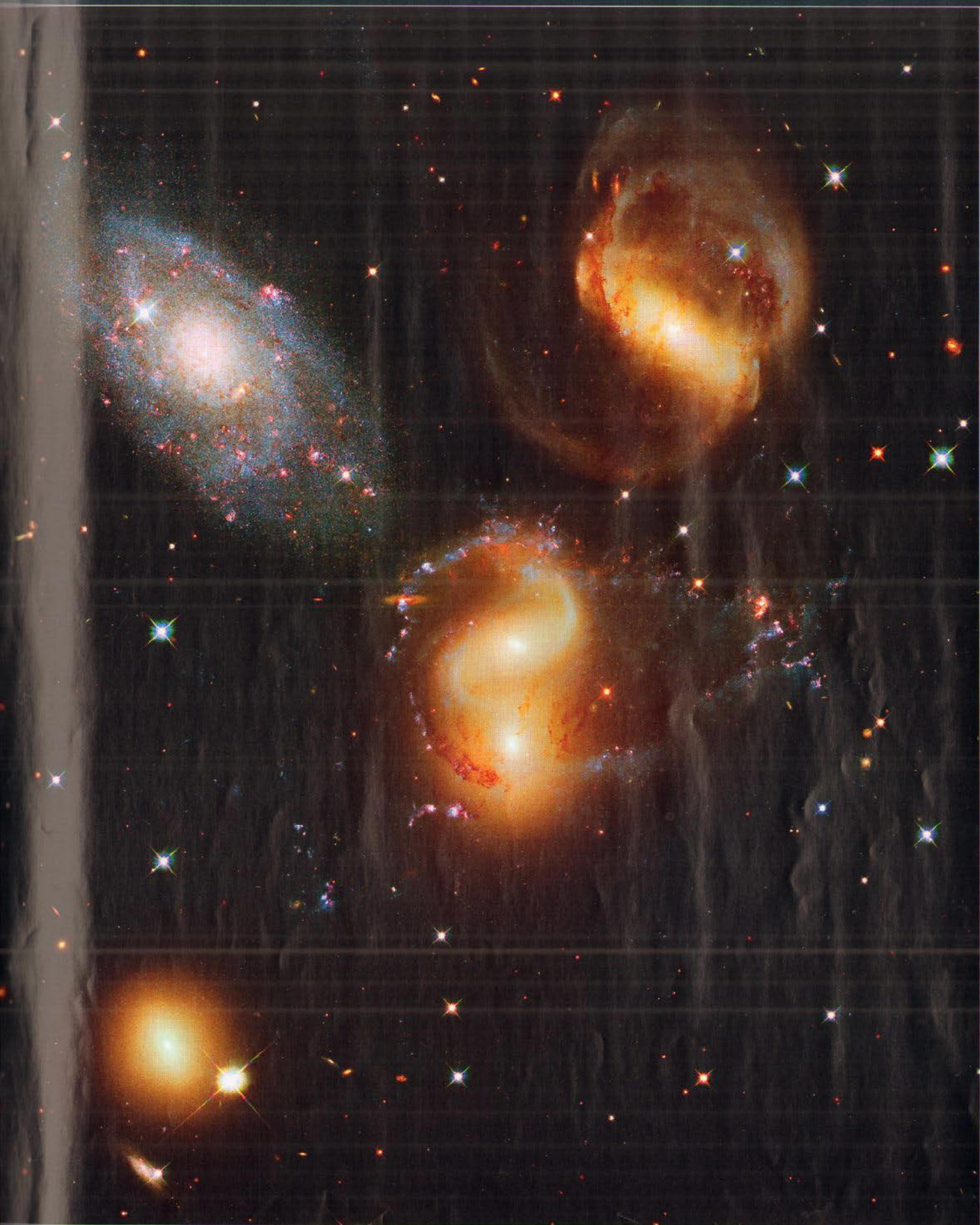


DER LANGE WEG INS NICHTS

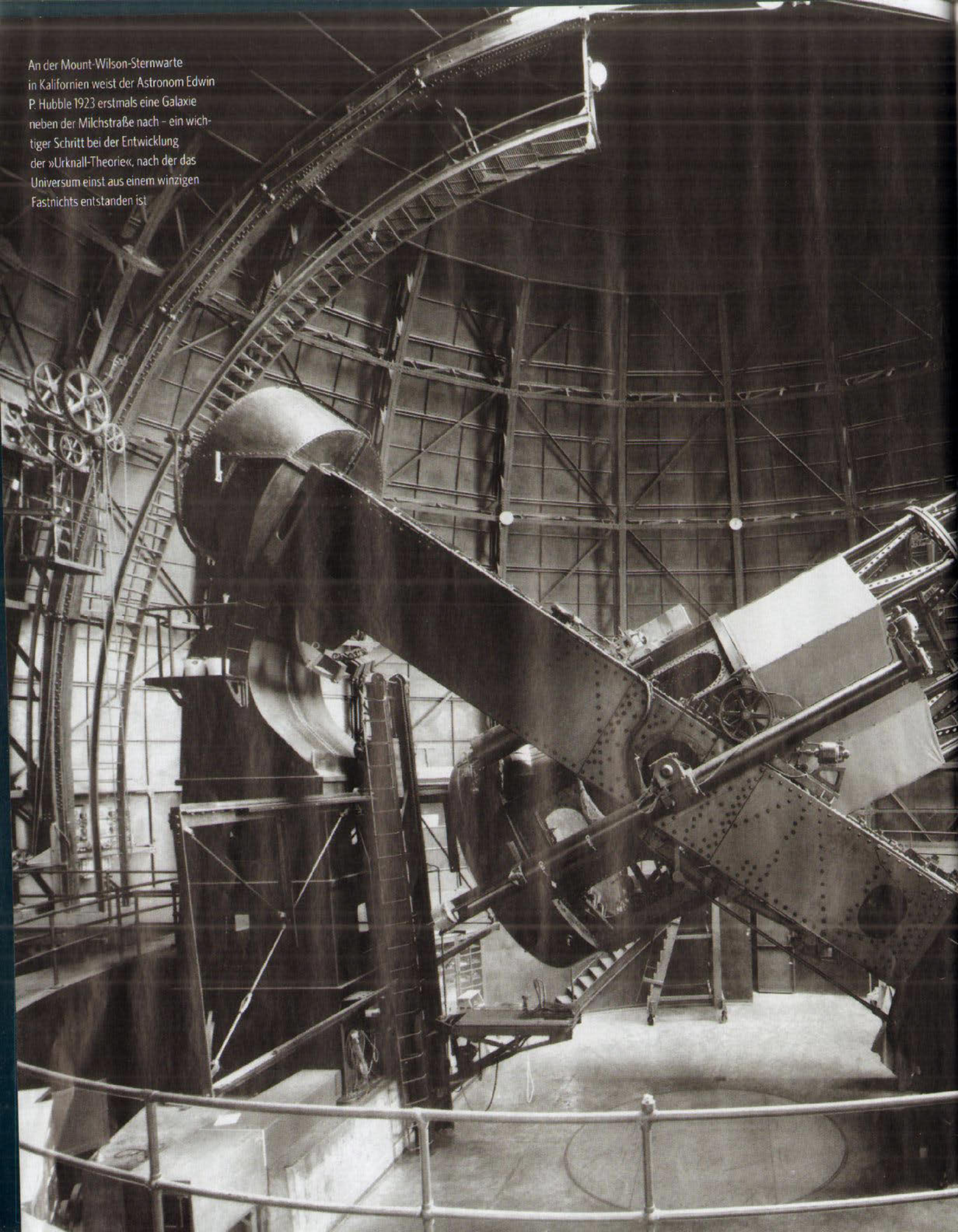
Noch können wir Milliarden von Galaxien erspähen. Doch da sich das All ausdehnt, werden sie sich immer weiter voneinander entfernen und irgendwann im Raum verlieren.

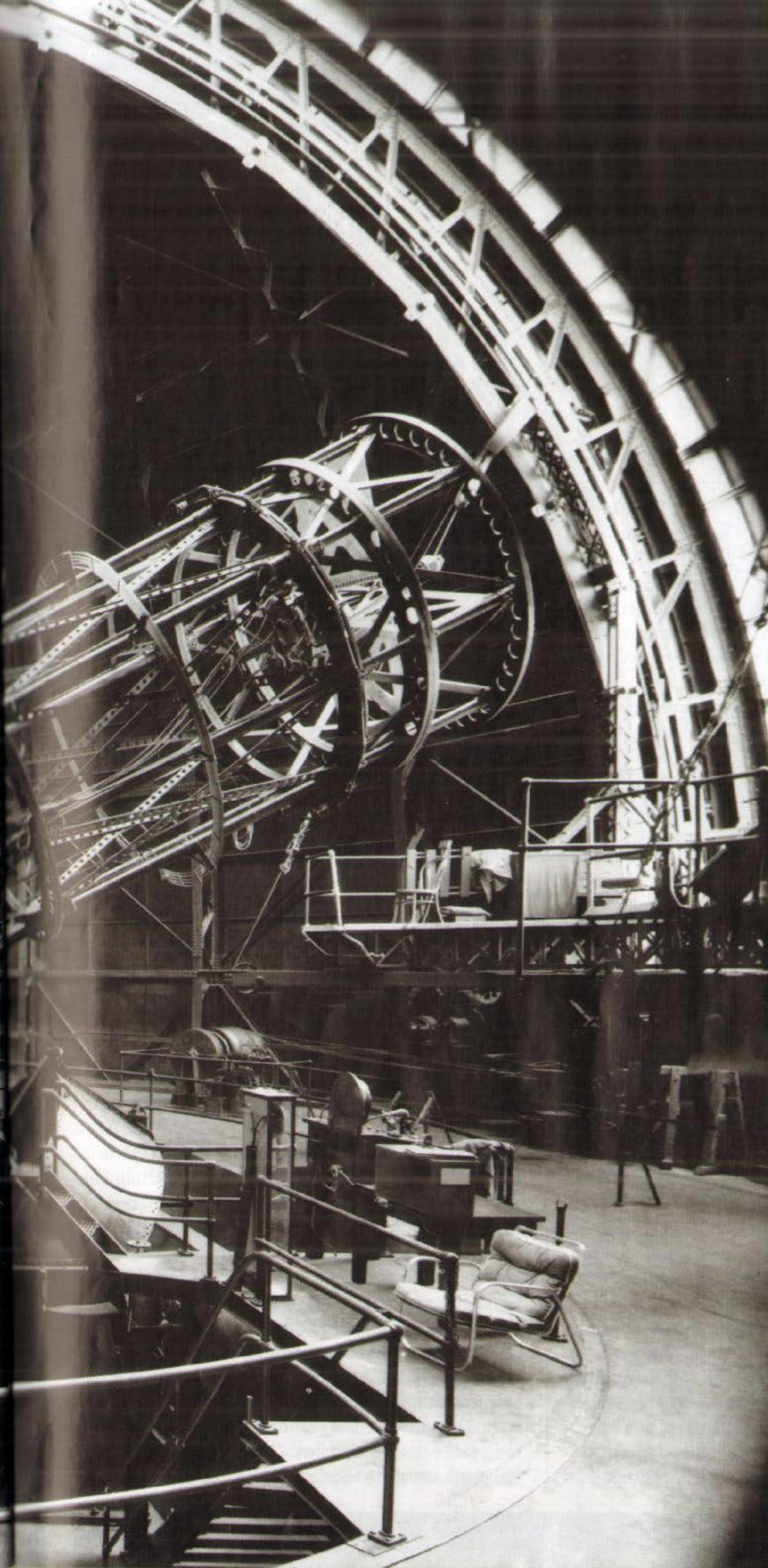
■ Seit mehreren Hundert Millionen Jahren durchdringen sich diese beiden Galaxien. Ihre Sterne stoßen zwar nicht zusammen, aber Gaswolken prallen aufeinander.

■ Diese Gruppe von Galaxien zeigt eine Balkenspirale (o. r.), zwei miteinander kollidierende Milchstraßen (Mitte) sowie eine elliptische (u.) – die möglicherweise aus einer Spirale entstanden ist. □



An der Mount-Wilson-Sternwarte
in Kalifornien weist der Astronom Edwin
P. Hubble 1923 erstmals eine Galaxie
neben der Milchstraße nach – ein wich-
tiger Schritt bei der Entwicklung
der »Urknall-Theorie«, nach der das
Universum einst aus einem winzigen
Fastnichts entstanden ist





Rätsel Urknall

Eine Reise zum Anfang der Dinge

Wie ist das Universum entstanden? Bis zu Beginn des 20. Jahrhunderts gilt als sicher, dass das All immer schon da gewesen sein muss. Doch dann stellen mehrere Entdeckungen alles auf den Kopf – und die Astronomen begeben sich auf die Suche nach der

STUNDE NULL DER WELT

Text: Ralf Berhorst

Im Jahr 1963, Holmdel, 60 Kilometer südlich von New York City. Die beiden jungen Physiker Arno Penzias und Robert Wilson wollen den Himmel nach elektromagnetischen Signalen aus der Milchstraße absuchen, um Intensitäten von Radiowellen zu erforschen und um vielleicht sogar Strahlung aus jener dünnen Sphäre aufzufangen, die unsere Galaxis wie ein Lichthof umgibt. Dazu rüsten sie eine Sechs-Meter-Antenne, die einem riesigen, auf der Seite liegenden Horn ähnelt, mit einem hochsensiblen Empfänger aus. Bisher diente die Anlage Mitarbeitern der Bell Laboratories (die seit Jahrzehnten Grundlagenforschung betreiben) dazu, Signale eines Kommunikationssatelliten aus dem All aufzufangen. Nun aber, dank des Empfängers, verfügen Penzias und Wilson über eines der empfindlichsten Radioteleskope der Welt.

Von Kollegen haben sie gehört, dass die Antenne ein merkwürdiges Rauschen im Mikrowellenbereich registriert, ein Störgeräusch, das wie bei einem schlecht eingestellten Radioempfänger die Signale der Himmelskörper überlagern könnte, nach denen die beiden Physiker eigentlich suchen.

Bevor sie mit ihren Messungen beginnen, machen sich Penzias und Wilson auf die Suche nach der Ursache des Rauschens. Sie überprüfen die Hornantenne, den Empfänger und alle übrigen Teile ihrer Ausrüstung. Sie untersuchen, ob der Boden des Forschungsgeländes ein Hintergrundgeräusch produziert, messen die geringfügige Strahlung, die von der Erdatmosphäre ausgeht. Doch stets zeichnet das Empfangsgerät das gleiche störende Rauschen auf.

Die beiden richten die Antenne auf das nahe New York aus. Vielleicht ist die Metropole mit ihren Millionen von elektronischen Geräten die Ursache der Störung? Das Rauschen bleibt konstant.

Noch einmal nehmen sie ihre Antenne genauer in den Blick, suchen das Teleskop nach Wackelkontakten ab, nach Fehlern in der Verkabelung oder der Elektronik, verstärken Lötstellen mit Aluminiumband. Keine Veränderung.

Schließlich entdecken Penzias und Wilson, dass sich ein Taubenpaar in der Spitze der Hornantenne eingenistet hat und deren Wände von innen verschmutzt sind. Sie fangen die Tauben ein, setzen sie weit entfernt wieder aus und reinigen die Antenne.

Das Rauschen ist nahezu gleich.

rühjahr 1963, Holmdel, 60 Kilometer südlich von New York City. Die beiden jungen Physiker Arno Penzias und Robert Wilson wollen den Himmel nach elektromagnetischen Signalen aus der Milchstraße absuchen, um Intensitäten von Radiowellen zu erforschen und um vielleicht sogar Strahlung aus jener dünnen Sphäre aufzufangen, die unsere Galaxis wie ein Lichthof umgibt.

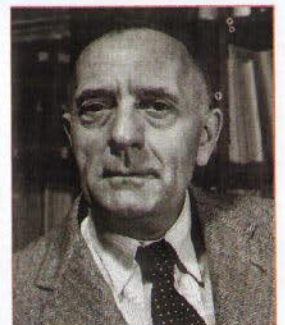
Dazu rüsten sie eine Sechs-Meter-

Fast ein Jahr ist inzwischen vergangen. Auch die Tageszeit oder der Wechsel der Jahreszeiten hat keinen erkennbaren Einfluss auf das Hintergrundgeräusch. Arno Penzias und Robert Wilson können die Ursache der Störung nicht ausfindig machen – eines Signals, das sie aus allen Richtungen des Kosmos empfangen.

Die beiden Physiker ahnen noch nicht, dass ihnen zufällig eine der größten Entdeckungen des 20. Jahrhunderts gelungen ist: dass sie einen fernen Nachhall des Urknalls aufgefangen haben.

Und dass ihre Messungen eine wichtige, noch fehlende Bestätigung für eine der kühnsten Theorien der Physik sind. Sie besagt, „dass das Universum nicht schon ewig existiert, sondern eine Geschichte hat. Vor Milliarden Jahren soll es mit einem glühenden Inferno, einem „Big Bang“, seinen Anfang genommen haben.

Es ist ein langer Weg von den ersten Spekulationen antiker Astronomen bis zur Urknalltheorie und ihrer Bestätigung. Und so ist die Idee letztlich nicht Werk eines Einzelnen, sondern eine kollektive Leistung. Denn es bedurfte vieler genialer Gedankensprünge und technischer Erfindungen, damit Menschen das Erstaunliche gelingen kann: eine konkrete Vorstellung zu gewinnen über den Anfang alles Existierenden – vorzudringen bis zur Geburt von Raum, Zeit und Materie.



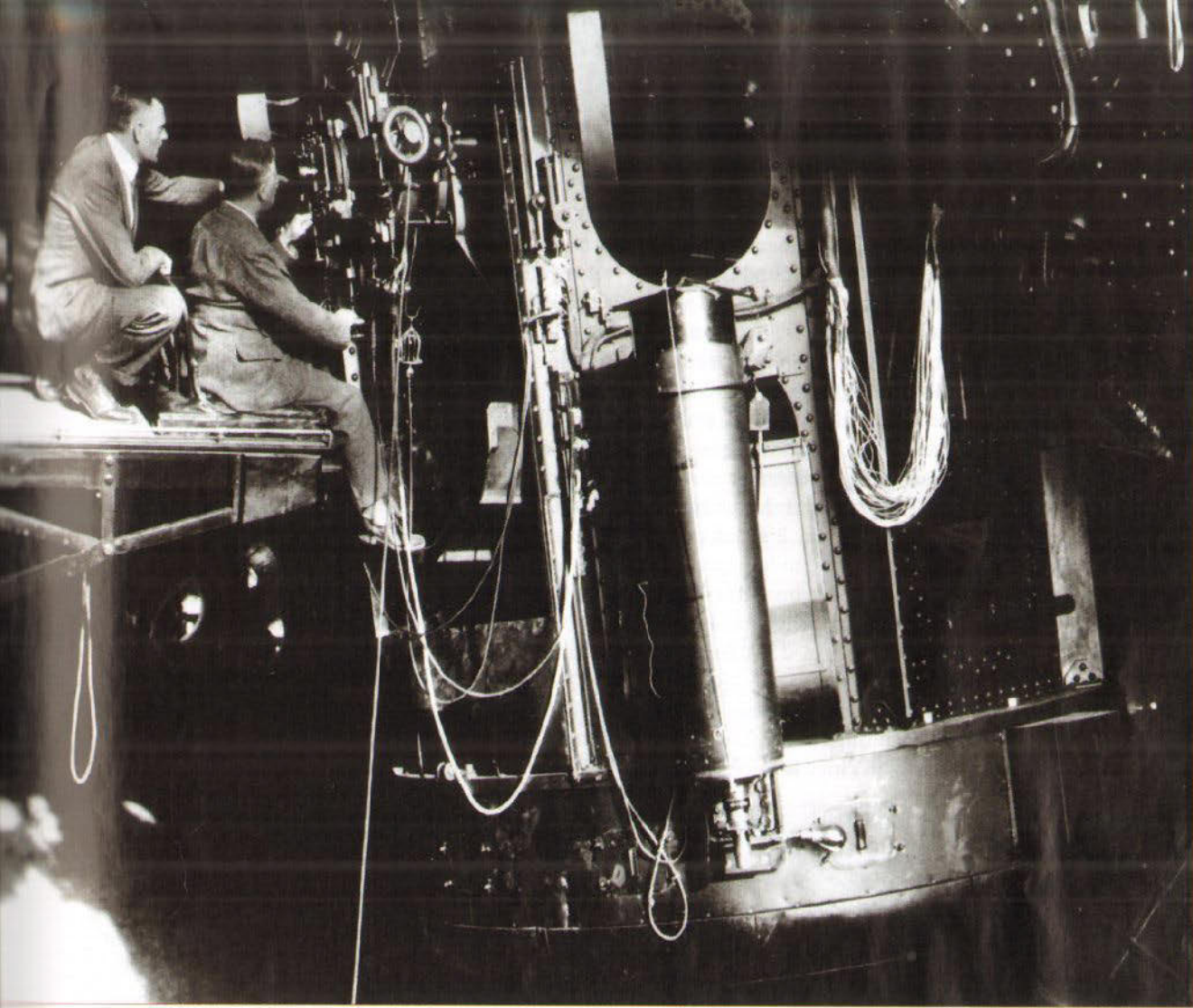
Die Forschungen Edwin P. Hubbles (1889–1953) geben den entscheidenden Impuls für die Suche nach dem Ursprung der Welt

Wenn das All sich stetig ausdehnt, dann muss es einst vereint gewesen sein – in einem denkbar winzigen Punkt

SEIT JAHRTAUSENDEN sinnens Menschen über den Ursprung der Erde, der Gestirne und des Weltalls nach. Dieser Anfang erscheint zunächst als undurchdringliches Rätsel. So erfinden sie Mythen und Sagen, die von der Schöpfung der Welt berichten und das Unerklärliche

begreiflich machen. In fast jeder alten Kultur existiert solch eine Erzählung, meist handelt sie von Göttern oder Giganten. Eine chinesische Legende aus der Zeit um 600 v. Chr. besagt etwa, ein Riese habe einst mit einem Meißel Täler und Berge erschaffen, dann Sonne, Mond und die übrigen Gestirne an den Himmel gesetzt.

In der rund 100 Jahre früher verfassten Welterschöpfungslehre des griechischen Dichters Hesiod ist es die Erdgöttin Gaia, die Himmel, Berge und Meer gebiert.



Nächtelang analysiert Hubble (o. l.) mit dem Teleskop das Licht weit entfernter Galaxien. Sein Ergebnis: Sie bewegen sich von uns fort. Das All expandiert

Die wissenschaftliche Kosmologie (abgeleitet vom altgriechischen *kosmologia*, „Lehre von der Welt“) beginnt im 6. Jahrhundert v. Chr. in Griechenland: Erstmals denken Naturforscher über den Aufbau des Firmaments nach und verzichten dabei auf Götter, Riesen und astrologische Deutungen. Der Mathematiker Pythagoras von Samos etwa erkennt, dass die Erde eine Kugelgestalt besitzen muss: Wenn ihr Schatten während einer Mondfinsternis auf den Erdtrabanten fällt, so ist der Rand dieses Schattens gekrümmt.

Und dem Universalgelehrten Eratosthenes von Kyrene, der als leitender Bibliothekar in Alexandria arbeitet, gelingt es im 3. Jahrhundert v. Chr. sogar, den Umfang der Erde zu berechnen.

Seine Methode ist ebenso genial wie einfach. Eratosthenes hat gehört, dass es in der Stadt Syene, die einige Hundert Kilometer südlich von Alexandria liegt, einen Brunnen gibt, in den am Tag der Sommersonnenwende das Licht mittags so einfällt, dass es keinerlei Schatten wirft. Die Sonne muss in diesem Augenblick also vollkommen senkrecht über Syene stehen.

Steckt man aber zur gleichen Zeit in Alexandria einen Stock aufrecht in den Boden, ist ein Schatten

zu sehen. Eratosthenes nimmt an, dass dies an der Krümmung der Erdoberfläche liegen muss. Das Sonnenlicht trifft Alexandria nicht senkrecht, sondern in einem bestimmten Winkel. Der, so misst der Gelehrte, beträgt rund ein Fünfzigstel eines Kreises.

Man muss also nur die – bekannte – Entfernung zwischen den beiden Orten mit 50 multiplizieren, überlegt Eratosthenes, um den kompletten Kreis zu erhalten und damit den Umfang der Erde zu ermitteln. Und tatsächlich kommt er dem korrekten Wert von 40 100 Kilometern erstaunlich nahe.

Mit dieser Zahl, etwas Geometrie und den Überlegungen älterer Gelehrter kann der Bibliothekar nun auch den Durchmesser der Erde errechnen, den des Mondes abschätzen sowie die Entfernung unseres Trabanten kalkulieren. Erstmals erhalten die Menschen auf diese Weise eine Ahnung von der Größe der Himmelskörper und der Weite des Sonnensystems.

IN DEN JAHRHUNDERTEN danach setzt sich allerdings ein Modell des Universums mit der Erde als Mittelpunkt durch, das unter anderem der einflussreiche Naturforscher Claudius Ptolemäus um 150 n. Chr.

propagiert und das sich 1500 Jahre lang behaupten wird. Erst im 16. und 17. Jahrhundert rücken Forscher wie Nikolaus Kopernikus, Johannes Kepler und Galileo Galilei wieder die Sonne ins Zentrum.

Kein Gelehrter wagt es jedoch, nach der Entstehung des Universums zu fragen, das wäre offene Ketzerei – schließlich steht in der Bibel geschrieben, dass Gott in den ersten vier Tagen der Schöpfung die Erde, den Himmel, die Sonne, den Mond und die übrigen „Lichter an der Feste des Himmels“ geschaffen hat.

Zulässig ist es hingegen, über das Alter des Universums zu spekulieren: So errechnet ein Bischof den angeblichen Zeitpunkt der Schöpfung, indem er zeitliche Spannen wie die Lebensalter der im Alten Testament aufgeführten Patriarchen kurzerhand addiert: Demnach hat Gott den Menschen am 23. Oktober 4004 v. Chr. geschaffen.

Doch es gibt Gegenargumente. Ein französischer Naturforscher, der im 18. Jahrhundert vermutet, die Erde sei aus dem Zusammenprall eines Kometen mit

der Sonne hervorgegangen, errechnet: Unser Planet habe allein 74 000 Jahre benötigt, um auf seine gegenwärtige Temperatur abzukühlen.

Und Geologen, die Gesteinsschichten untersuchen, stellen fest, dass es sehr lange dauert, bis sich Sedimente ablagern. Wenn ähnliche Prozesse in der Vergangenheit in dem gleichen Tempo abgelaufen sind, muss die Erde zumindest einige Millionen Jahre alt sein. Auch Fossilien, die sie im Boden finden, deuten auf ein viel höheres Alter des Planeten hin.

Ab 1757 studiert im englischen Bath der gebürtige Deutsche Friedrich Wilhelm Herschel vom Garten seines Hauses aus den Nachthimmel. Herschel ist von Hannover nach England ausgewandert und arbeitet dort zunächst als Musiklehrer. Als Autodidakt baut er aber inzwischen die leistungsfähigsten Teleskope der Welt. Er gießt und schleift Metallspiegel, die sich größer konstruieren lassen und daher mehr Licht aus dem Weltall auffangen als eine Linse aus Glas.

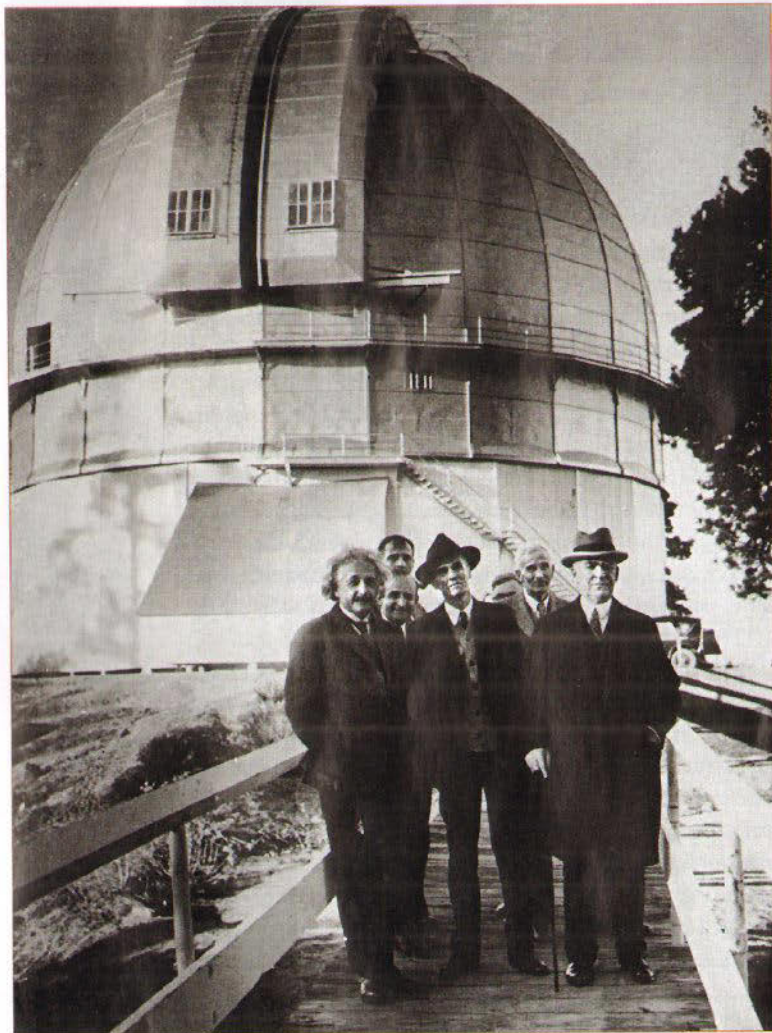
Herschel will die Entfernung zu einzelnen Sternen messen und das Firmament kartieren. Entgegen seinen Erwartungen sind die Himmelskörper jedoch nicht gleichmäßig verteilt, sondern konzentrieren sich in einer länglichen Region. Schon die antiken Astronomen hatten ein milchig-nebliches Lichtband am Nachthimmel mit bloßem Auge ausgemacht. In zahlreichen durchwachten Nächten findet Herschel heraus, dass dieses Lichtband wie eine gewaltige Scheibe geformt ist. Er hat die Milchstraße als System von Sternen erkannt.

Nun schätzt er auch deren Durchmesser ab, doch er geht bei seinen Berechnungen von einer falschen Voraussetzung aus: Er nimmt an, die Leuchtkraft nahezu aller Sterne sei gleich und ihre Helligkeit hänge nur von der Distanz ab. Je schwächer ein Stern, desto weiter sei er entfernt, glaubt er – ein Irrtum.

Erst 1838, 16 Jahre nach Herschels Tod, veröffentlicht der deutsche Astronom Friedrich Wilhelm Bessel als Erster eine konkret bezifferte Entfernung: zu 61 Cygni, einem Doppelstern in der Konstellation Schwan. Er bestimmt dazu die sogenannte Parallaxe des Himmelskörpers.

Die Methode ähnelt dem dreidimensionalen Sehen des Menschen: Hebt man einen Daumen vor das Gesicht und betrachtet ihn abwechselnd nur mit dem linken oder dem rechten Auge, so scheint der vor dem Hintergrund, etwa einem Fensterahmen, hin- und herzuspringen. Grund der scheinbaren Bewegung ist, dass der Finger jeweils aus einer etwas anderen Richtung angepeilt wird.

Und so wie das menschliche Gehirn daraus die Entfernung eines Gegenstandes abschätzen kann, vermag



Albert Einstein - hier 1931 auf dem Mount Wilson (links hinten: Edwin P. Hubble) - bezeichnet die Urknall-Idee anfangs als »scheußliche Physik«

ein Forscher aus der Positionsveränderung eines Gestirns dessen Entfernung zu berechnen. Allerdings sind die Sterne so ungeheuer weit entfernt, dass sie sich nun bei abwechselnder Beobachtung durch jeweils ein Auge vor dem Hintergrund noch weiter entfernter Himmelskörper nicht zu bewegen scheinen – also keine messbare Parallaxe zeigen.

Doch Bessel nutzt die Umlaufbahn der Erde um die Sonne. Immer wieder fixiert er 61 Cygni mit seinem Teleskop im Abstand eines halben Jahres. Er weiß, dass die Erde in dieser Zeit die Hälfte ihrer Bahn um ihr Zentralgestirn zurücklegt. Seine Beobachterposition verändert er damit um rund 300 Millionen Kilometer (dem doppelten Abstand Erde-Sonne). Schließlich kann er eine minimale Positionsveränderung von 61 Cygni messen.

Der Stern muss demnach, errechnet Bessel, 657 700-mal so weit von der Erde entfernt sein wie die Sonne – also rund 100 Billionen Kilometer (er kommt damit auf einen Wert, der gegenüber dem heute bekannten nur um etwa zehn Prozent zu niedrig ausfällt). Das ist eine ungeheuer große Entfernung.

Bessel überschlägt, dass das Licht – von dem er weiß, dass es sich mit der unvorstellbaren Geschwindigkeit von knapp 300 000 Kilometern pro Sekunde ausbreitet – mehr als zehn Jahre brauchen würde, um diese Entfernung zu durchmessen. Ein erstaunliches Resultat.

Erstmals erhalten die Astronomen eine Ahnung von der wahren Größe des Alls – und sind schockiert von den Dimensionen der Milchstraße, die sie nun berechnen (aber um den Faktor zehn unterschätzen).

Und so stellen sie die nächste provozierende Frage: Endet das Universum mit der Milchstraße oder existieren jenseits von ihr noch weitere Galaxien?

SCHON HERSCHEL HAT mit seinem Teleskop 2500 „Nebel“ ausgemacht: verschwommene Lichtflecken am Nachthimmel. Einige von ihnen, etwa den Andromeda-Nebel, kann man von der Erde mit bloßem Auge erkennen. Herschel hatte sie für Staub- und Gaswolken innerhalb der Milchstraße gehalten und vermutet, dass in ihrem Inneren neue Sterne geboren werden. Andere Forscher glaubten, sie lägen außerhalb unserer Galaxie.

Da die parallaktische Methode nur bei relativ nahe gelegenen Objekten funktioniert, sind die Forscher trotz immer leistungsfähigerer Teleskope nicht in der Lage, die Position der Nebel zu berechnen. Dies wird erst Anfang der 1920er Jahre gelingen. Doch zunächst

ist es ein deutscher Physiker, der die Sicht auf das Universum revolutioniert. Er heißt Albert Einstein.

Im Jahr 1915 veröffentlicht Einstein seine Allgemeine Relativitätstheorie. Obwohl sie ein abstraktes, nur schwer zu verstehendes Gedankengebäude ist, hat sie dramatische Konsequenzen für die Vorstellung, wie sich Himmelskörper zueinander verhalten. Denn Einstein präsentiert eine ganz neue Idee der Schwerkraft.

Seiner Theorie nach sind Raum, Zeit und Materie nicht voneinander unabhängig. Große Massen krümmen und verbiegen vielmehr den Raum – so entsteht die Wirkung der Schwerkraft. Und noch eine Folgerung ergibt sich aus der Relativitätstheorie: Der Raum kann sich nicht nur verformen, er kann auch wachsen oder schrumpfen (siehe GEOkompakt Nr. 27 „Das Rätsel Zeit“).

1917 untersucht Einstein in einem Aufsatz mit dem Titel „Kosmologische Betrachtungen zur Allgemeinen Relativitätstheorie“

die Auswirkungen seiner Erkenntnis für das gesamte Weltall. Das Ergebnis ist äußerst beunruhigend: Da jeder Körper im Kosmos von allen anderen angezogen wird, müssten sich alle Sterne, wenn auch zunächst sehr langsam, gegenseitig annähern. Die Bewegung würde stetig an Tempo zunehmen und zu einer kosmischen Katastrophe führen: Das Universum müsste irgendwann in sich zusammenstürzen.

Einstein selbst ist von dem Ergebnis seiner Überlegungen befremdet. „Die Zulassung solcher Fälle scheint mir sinnwidrig zu sein“, so schreibt er.

Er ist – wie fast alle Physiker in jenen Jahren – davon überzeugt, dass das Universum schon immer existiert hat und auf ewig unveränderlich ist. Um diese Vorstellung nicht preisgeben zu müssen, führt er kurzerhand eine „Kosmologische Konstante“ in seine Theorie ein: eine Art Abstoßungskraft, die die Sterne auf Abstand hält und so den finalen Kollaps verhindert.

Ein anderer Forscher indes, der Einsteins Schriften gelesen hat, ist konsequenter. 1922 veröffentlicht der russische Mathematiker Alexander Friedmann in einer Zeitschrift für Physik einen Aufsatz, in dem er – gleichsam gegen ihren Erfinder – die Konsequenzen der neuen Gravitationstheorie zu Ende denkt. Friedmann spielt mehrere Werte der Kosmologischen Konstante durch. In einem der Gedankenmodelle setzt er sie auf null. Das heißt: Er entfernt sie aus der Theorie.

Das verblüffende Resultat dieses Modells ist ein veränderliches Universum, das sich erst ausdehnt und am Ende wieder zusammenzieht. Ist der Kosmos also womöglich von einem anfänglichen Impuls auseinander-

Georges Lemaître
postuliert als Erster, dass
es einen Urknall
gegeben haben muss,
dessen Kraft das
All auseinandertreibt

dergetrieben worden, der seiner Kontraktion noch immer entgegenwirkt?

Friedmanns Hypothesen führen zu einem völlig neuen Bild: einem Weltall, das dynamisch ist und mit jedem Tag seine Gestalt ändert. Eine geradezu abstoßende Vorstellung für viele Physiker.

Auch für Albert Einstein. Der weltberühmte Forscher attackiert den unbekannten russischen Mathematiker. In einem Protestbrief an jene Zeitschrift, die Friedmanns Aufsatz veröffentlicht hat, schreibt er, dessen Berechnungen seien fehlerhaft und mit der Allgemeinen Relativitätstheorie nicht verträglich.

Doch Friedmann wehrt sich. Einstein muss seine Anschuldigung schließlich zurücknehmen: Friedmanns Überlegungen seien zwar formal richtig, gibt er zu, aber wissenschaftlich belanglos.



Als Robert Wilson (l.) und Arno Penzias 1963 erstmals ein rätselhaftes Signal auffangen, ahnen sie noch nicht, dass es sich um ein Echo des Urknalls handelt

ZUR GLEICHEN ZEIT forscht in einem kalifornischen Observatorium ein Astronom, der sich vorgenommen hat, die Frage zu beantworten, ob die mysteriösen „Nebel“ zur Milchstraße gehören. Edwin Hubble hat in Oxford studiert und eine Vorliebe für britische Lebens-

art entwickelt. Er trägt ein Tweedjackett, Mütze, raucht Pfeife, hat sich einen englischen Akzent angewöhnt.

In der Sternwarte auf dem Mount Wilson, unweit der Stadt Pasadena, steht dem 30-Jährigen das beste Spiegelteleskop der Welt zur Verfügung. Es ist mit einer Kamera ausgerüstet, und dank besonders langer Belichtungszeiten der fotografischen Platten ist es inzwischen möglich, auch das schwache Licht ferner Himmels-

körper aufzufangen, die sich sonst nicht aufspüren lassen.

Immer wieder macht sich Hubble im Jahr 1923 nachts auf den 1740 Meter hohen Mount Wilson, kämpft gegen Müdigkeit und die Kälte unter der geöffneten Kuppel des Observatoriums an.

Anfang Oktober gelingt ihm ein Foto des Andromeda-

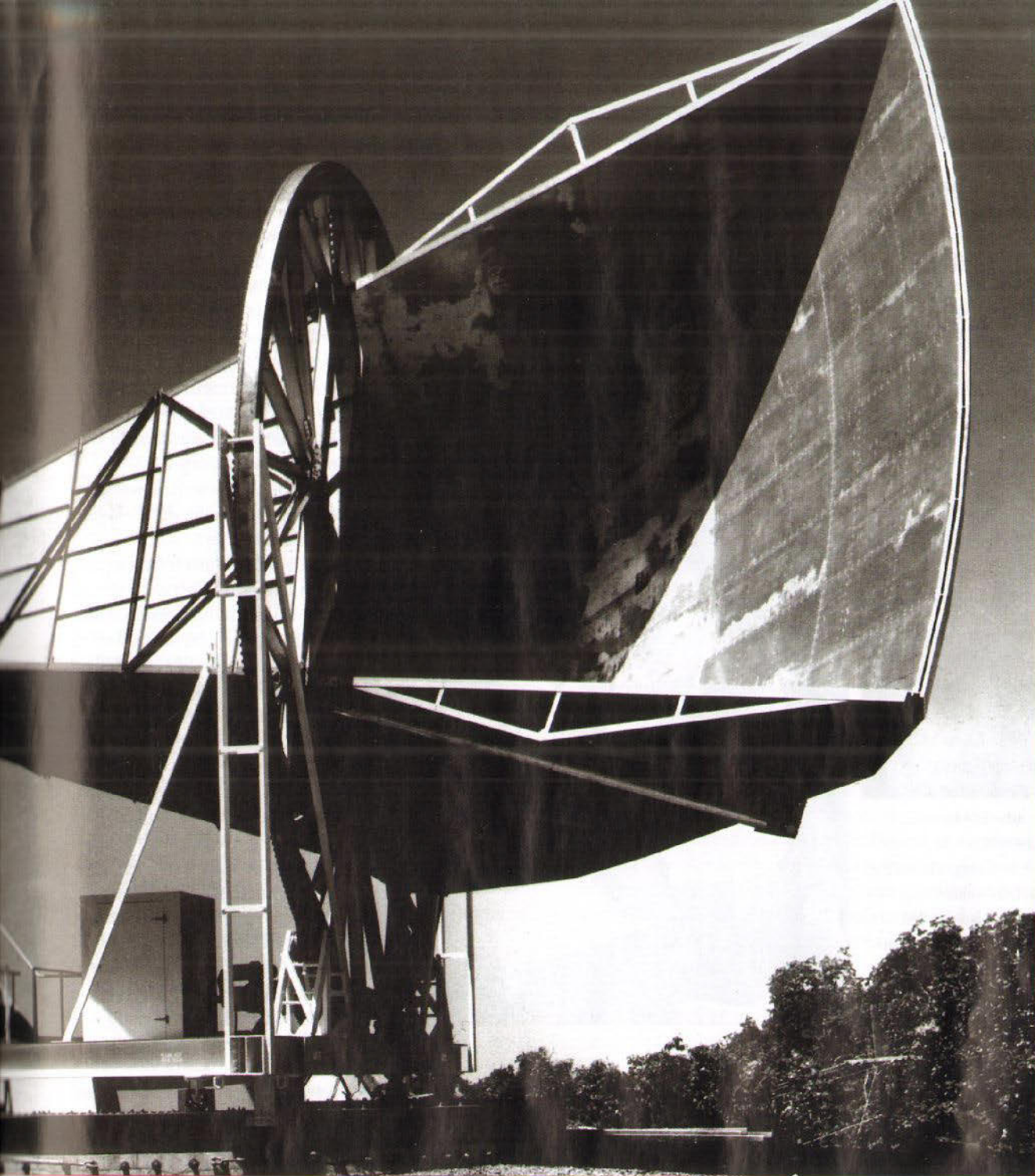
Nebels. Auf dem Bild ist, wie Hubble später erkennt, unter anderem ein Cepheid zu sehen, ein veränderlicher Stern, dessen Helligkeit in bestimmten Abständen schwankt. Es ist der erste Cepheid, der innerhalb eines Nebels entdeckt wird. Und er wird es erlauben, die große Streitfrage nach den Nebeln zu entscheiden.

Als Astrophysiker die geheimnisvolle Strahlung analysieren, erkennen sie: Das ist eine Bestätigung für den »Big Bang«



Denn inzwischen wissen die Astronomen: Es gibt ein exaktes Verhältnis zwischen der absoluten Helligkeit eines Cepheiden und dem Rhythmus seiner Veränderungen. Sie können also aus der Veränderungsperiode seine tatsächliche Helligkeit ermitteln. Und da die beim Beobachter ankommende Lichtmenge umso geringer ist, je weiter entfernt ein Objekt liegt, lässt sich nun seine Distanz berechnen.

Edwin Hubble rechnet die Entfernung des Cepheiden im Andromeda-Nebel aus und kommt zu dem Ergebnis: rund 900 000 Lichtjahre (heute wissen wir,



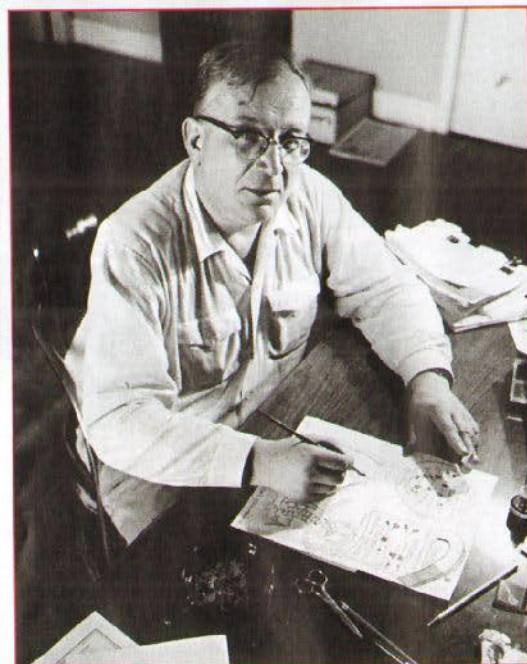
Penzias und Wilson registrieren mit einer Horn-Antenne eine sonderbare Mikrowellenstrahlung aus dem All. Das Merkwürdige: Sie kommt aus allen Richtungen

dass der Andromeda-Nebel in 2,5 Millionen Lichtjahren Distanz liegt). Da aber unsere gesamte Milchstraße, wie die Forscher damals annehmen, einen Durchmesser von 300 000 Lichtjahren besitzt (mittlerweile ist bekannt, dass es 100 000 Lichtjahre sind), muss der Nebel weit außerhalb liegen – eine eigene Galaxie mit vermutlich Abermillionen von Sternen!

Als Edwin Hubble sein Ergebnis veröffentlicht, ist der große Gelehrtenstreit um die Nebel entschieden. Und es wird deutlich: Das Weltall ist viel größer als bis dahin angenommen.

Hubble allerdings macht sich keine Gedanken über den Ursprung des Weltalls. Das tun andere. Zwar kann Alexander Friedmann seine kühne Vision vom dynamischen Universum nicht weiterentwickeln: Er stirbt 1925 mit 37 Jahren, wahrscheinlich an Typhus. Doch nur zwei Jahre später gelangt ein belgischer Forscher – abermals gestützt auf die Allgemeine Relativitätstheorie – zu ganz ähnlichen Resultaten.

Der 33-jährige Georges Lemaître hat in seiner Heimat Physik studiert und zugleich die Weihe als katholischer Priester empfangen, dann forschte er in



Der Mathematiker **Alexander Friedmann** (o. l.) hat 1922 als Erster die Idee, dass sich das All ausdehnt. Der belgische Physiker **Georges Lemaître** (o. r.) entwickelt die These 1927 weiter: Es muss einst auf Atomgröße verdichtet gewesen sein. **George Gamow** (u. r.) berechnet die ungeheure Hitze unmittelbar nach dem Urknall. Der Brite **Fred Hoyle** verspottet das Phänomen anfangs als »Big Bang« – der Begriff hat sich bis heute gehalten

Es muss also einen Moment gegeben haben, in dem das ganze Universum in einem einzigen Atom zusammengepresst war. Bei der Entwicklung dieser Vorstellung hilft Lemaître vermutlich die Kenntnis des radioaktiven Zerfalls: Ihm ist wohl bekannt, dass größere Atome (wie Uran) in kleinere Atome zerfallen können und dabei Teilchen, Strahlung und Energie frei werden.

So könnte er auf das vom ihm so genannte „Uratom“ gekommen sein, das einst wie bei einem radioaktiven Zerfall explodierte, unvorstellbare Mengen an Energie freisetzte und in Bruchstücke zerfiel, aus denen sich die Elemente, Sterne und Galaxien formten.

Die unglaubliche Gewalt dieses Infernos, so der Belgier, treibe die Galaxien noch heute auseinander.

Georges Lemaître veröffentlicht den Grundgedanken seiner Theorie erstmals 1927 in einer kaum bekannten belgischen Zeitschrift. Er ist der Erste, der die Vorstellung eines Urknalls formuliert (noch ohne dieses Wort zu gebrauchen). Doch kein renommierter Kosmologe oder Physiker nimmt sie zur Kenntnis.

Als der Belgier auf einer Konferenz in Brüssel das Gespräch mit Albert Einstein sucht, weist der ihn schroff zurück: „Ihre Berechnungen sind richtig, aber Ihre Physik ist scheußlich!“

Lemaître ist entmutigt. Noch immer glauben die meisten Physiker an ein ewiges und unveränderliches Universum. Der belgische Astronom ist wie Einstein ein theoretischer Denker: Einen Beweis für seine These vermag er so wenig wie der deutsche Physiker zu erbringen.

Cambridge und Harvard. Lemaître kennt Friedmanns Veröffentlichung nicht und dessen Kontroverse mit Einstein. Wie der Russe klammert er die ominöse Kosmologische Konstante weitgehend aus und gelangt so ebenfalls zu der Idee, dass das Universum expandiert.

Doch Lemaître geht noch weiter: Wenn es zutrifft, dass sich das All stetig ausdehnt, dann muss es in der Vergangenheit stärker komprimiert gewesen sein als heute. Und je weiter man die Uhr zurückdreht, desto dichter muss es zusammengedrängt gewesen sein.

Denkt man nur weit genug zurück, so befinden sich auch die Galaxien nahe beieinander. Noch tiefer in der Vergangenheit gibt es zwischen ihnen vermutlich keinerlei unausgefüllten Raum – und davor zwischen den einzelnen Sternen keine Leere. Noch früher keinerlei Distanz zwischen den Atomen und den Elementarteilchen, die sämtliche Materie bilden.

WIEDER IST ES EDWIN HUBBLE, der mit seinen Beobachtungen den Stein ins Rollen bringt. Der Amerikaner macht sich in den späten 1920er Jahren daran, die Bewegungen von Galaxien zu vermessen. Die Geschwindigkeiten von fernen Himmelsobjekten können Astronomen schon seit Längerem anhand der sogenannten „Rotverschiebung“ der Lichtwellen messen (siehe Seite 29).

Das 2,5-Meter-Teleskop am Mount-Wilson-Observatorium ist mit einem Spektroskop zur Zerlegung des Lichts in verschiedene Wellenlängen ausgerüstet. Nacht für Nacht belichten Hubble und sein Assistent Fotoplaten, um die Rotverschiebungen und somit die Geschwindigkeiten der Milchstraßen zu registrieren.

Dank seiner vorangegangenen Studien am Andromeda-Nebel ist Hubble zudem bestens dafür gerüstet, die Distanzen ferner Himmelsobjekte zu ermitteln. So

berechnet er nun die Entfernungen der Galaxien und überträgt die Werte in ein Koordinatensystem, das auch die Geschwindigkeiten enthält.

Dabei fällt ihm ein Muster auf: eine ansteigende Linie. Offenbar existiert eine Beziehung zwischen der Entfernung einer Galaxie und der Geschwindigkeit, mit der sie sich von uns fortbewegt (die Astronomen sprechen von „Fluchtgeschwindigkeit“): Ist eine Sterneninsel doppelt so weit wie eine andere von der Erde entfernt, dann bewegt sie sich auch doppelt so schnell von ihr weg. Ist eine Galaxie viermal so weit entfernt, flieht sie mit vierfacher Geschwindigkeit.

Hubbles Faustregel erlaubt zwei Schlüsse: Die Galaxien in größerer Distanz bewegen sich nicht zufällig durchs All, sondern entfernen sich alle von der Milchstraße – und zwar je weiter entfernt, desto schneller.

Und: Einst müssen die Galaxien stärker zusammengedrängt gewesen sein. Je tiefer man in die Vergangenheit zurückgeht, desto dichter liegen sie beieinander.

Damit ist ein empirischer Beweis für die These vom expandierenden Universum erbracht. Der Kosmos existiert nicht schon ewig und unverändert, sondern ist offenbar aus einem Anfangsstadium unvorstellbarer Dichte hervorgegangen.

Hubble selbst unterlässt solche kosmologischen Mutmaßungen, als er seine Ergebnisse publiziert. Er als nüchterner Beobachter spekuliert nicht über einen möglichen Urknall – diese Schlussfolgerung überlässt er anderen Forschern.

Doch das Resultat ist eindeutig. Georges Lemaître findet endlich die verdiente Anerkennung.

Schon vor Hubbles Entdeckung hatte sich der Belgier mit einem Brief an einen seiner ehemaligen Lehrer gewandt, den berühmten britischen Astrophysiker Arthur S. Eddington, und ihn für seine Idee eines expandierenden Universums zu interessieren versucht. Damals hatte er nicht einmal eine Antwort erhalten.

Nun schreibt Lemaître erneut an Eddington und macht ihn darauf aufmerksam, dass er Hubbles Beobachtung bereits 1927 vorausgesagt hat. Der Brite erkennt beschämt sein Versäumnis. In einem Brief an die hochrenommierte Wissenschaftspublikation „Nature“ würdigt er Lemaîtres Pioniertat, übersetzt dessen Artikel von 1927 ins Englische und sorgt dafür, dass er erneut abgedruckt wird.

Auch Albert Einstein gibt seinen Widerstand gegen Lemaîtres „scheußliche Physik“ auf. Im Februar 1931 wechselt er nach einem Besuch im Observatorium auf dem Mount Wilson offiziell die Seiten. In einer Erklä-

rung vor Journalisten schließt er sich jenen Forschern an, die an ein expandierendes Universum glauben. Und bezeichnet die Einführung seiner Kosmologischen Konstante als die „größte Eselei“ seines Lebens.

Einige Zeit später erhebt er sich nach einem Vortrag Lemaîtres in Princeton und bekundet: „Dies ist die wundervollste und befriedigendste Erklärung der Schöpfung, die ich je gehört habe.“

ALLGEMEIN AKZEPTIERT ist die Theorie damit aber noch längst nicht – viele konservative Physiker lehnen sie nach wie vor kategorisch ab. Zudem bleiben einige fachliche Ungereimtheiten.

So scheint Hubbles Erkenntnis unter anderem auch zu ermöglichen, das Alter des Universums zu bestimmen: Rechnet man von der gegenwärtigen Fluchtgeschwindigkeit der Galaxien zurück, so muss sämtliche Materie vor rund 1,8 Milliarden Jahren in einer Region des Alls zusammengedrängt gewesen sein. Das wäre der Moment, in dem Lemaîtres „Uratom“ in einer Art kosmischem Feuerwerk explodierte.

Doch Geologen, die inzwischen den Zerfall bestimmter radioaktiver Substanzen nutzen, um das Alter von Mineralen zu bestimmen, haben ermittelt, dass schon die Erde mindestens 3,4 Milliarden Jahre alt sein muss.

Einen wichtigen Beitrag für die Weiterentwicklung der Theorie von der Weltenentstehung liefert der ukrainische Physiker George Gamow, ein Schüler des verstorbenen Alexander Friedmann. Gamow ist 1933 aus Stalins Sowjetunion in die USA geflohen und erforscht dort nun die ersten Momente des Universums.

Aus seinen Berechnungen ergibt sich, dass der Kosmos unmittelbar nach der Explosion des „Uratoms“

unvorstellbar heiß und dicht gewesen sein muss. Aufgrund dieser Hitze war sämtliche Materie noch in ihre einfachen Bestandteile zersetzt, in eine Art Ursuppe aus Elementarteilchen (wie man heute weiß: aus Neutronen, Protonen und Elektronen; siehe Seite 30).

Diese Ursuppe umgab ein funkelndes Lichtmeer. Doch alle Lichtwellen brachen sich an den

geladenen Teilchen, sodass sie für das menschliche Auge nicht wahrnehmbar gewesen wären.

Gamow und zwei andere US-Kollegen russischer Herkunft nehmen an, dass das Universum dann allmählich abkühlte, bis sich nach etwa 300 000 Jahren bei rund 3000 Grad Celsius erstmals einfache Atome bildeten: Wasserstoff und Helium. Damit können die Forscher auch erklären, weshalb diese beiden Ele-

Heute ist die
Theorie vom Urknall
die plausibelste
über den Ursprung der
Welt – bis Forscher
eine neue entwickeln

mente so häufig vorkommen; sie machen 99,99 Prozent aller Materie im Universum aus.

Nach und nach, so die Theorie der drei Exilrussen, konnten sich jetzt Lichtwellen ungehindert ausbreiten, weil sie nicht mehr durch geladene Teilchen gestreut wurden. Dieses Licht, so sagen die Forscher 1948 voraus, müsste noch immer durch das Weltall strahlen. Allerdings wurden die Wellen, da sich der Raum gewaltig ausdehnte, um das Tausendfache gestreckt. So verwandelte sich das Licht in eine Strahlung im Mikrowellenbereich. Und die müsste noch immer messbar sein, vermuten die Forscher. Und zwar aus allen Richtungen des Universums. Eine Art Nachhall des Urknalls.

Gelänge es, diese Mikrowellen-Strahlung aufzufangen, so wäre das eine Bestätigung für ein expandierendes Universum, das mit einem Inferno begann.

DOCH NIEMAND SUCHT nach den Mikrowellen. Die Vorhersage gerät in Vergessenheit. Zumal die meisten Physiker die Theorie ja ohnehin ablehnen.

Diese Kritiker haben 1946 sogar ein Gegenmodell entworfen. Es beschreibt ein Universum, das sich zwar ausdehnt, aber zugleich schon ewig und letztlich unverändert existiert: das „Steady State“-Universum – ein Weltall ohne Anfang und Ende. Einer der Kritiker, der

Brite Fred Hoyle, äußert sich 1948 in einer Radiosendung abschätzig über die Hypothese des expandierenden Universum und verspottet ihren Ausgangspunkt als „Big Bang“ – Urknall.

Er ahnt nicht, dass er einen Begriff in die Welt setzt, der bald zum allgemeinen Wortschatz der Menschheit gehören wird.

Dass sich 1951 auch Papst Pius XII. für das Urknallmodell ausspricht, weil es mit einem göttlichen Schöpfungsmoment vereinbar scheint, schadet

indes eher dem Ansehen der Theorie. Georges Lemaître, inzwischen Mitglied der Päpstlichen Akademie der Wissenschaften, macht seinen Einfluss im Vatikan geltend, um den Pontifex von weiterer Einmischung in die Wissenschaft abzuhalten.

Inzwischen ist immerhin das peinliche Zeitproblem gelöst: Ein deutscher Physiker hat einen Fehler in

Hubbles Entfernungsberechnungen entdeckt. Die Andromeda-Galaxie ist doppelt so weit entfernt, wie Hubble aufgrund falscher Annahmen errechnet hat.

Da dieser Abstand zugleich als ein Maßstab gedient hat, um die Distanz zu anderen Galaxien zu berechnen, muss nun auch deren Entfernung verdoppelt werden.

Korrekt jedoch ist die anhand der Rotverschiebung gemessene Fluchtgeschwindigkeit der Sternensysteme. Das aber bedeutet, dass die Galaxien zweimal so viel Zeit benötigt haben, um ihre gegenwärtige Position zu erreichen – und demnach liegt auch der Urknall doppelt so lang zurück wie bis dahin gedacht: 3,6 Milliarden Jahre.

Hubbles Faustformel hat also dennoch Bestand, es müssen nur andere Zahlen eingesetzt werden. Der Amerikaner ist schockiert, als er ein Jahr vor seinem Tod von seinem Versehen erfährt. Die Anhänger der Urknalltheorie jedoch reagieren erleichtert.

Dieses Resultat ist endlich vereinbar mit den Erkenntnissen der Geologen. Später werden die Schätzungen für die Entfernungen der Galaxien und damit für das Alter des Universums auf 5,5 Milliarden Jahre steigen. Nach und nach ergeben sich immer ungeheuerlichere Zeiträume: Heute gilt als gesichert, dass der Kosmos 13,7 Milliarden Jahre alt ist.

Solche Dimensionen sind um 1960 aber noch völlig unvorstellbar. In jenem Jahr, so zeigt eine Umfrage, ist die Gemeinde der Astrophysiker weitgehend gespalten in Anhänger der Urknallthese, in die Verfechter des Steady-State-Universums – und in solche, die sich nicht entscheiden können.

ALS ARNO PENZIAS UND ROBERT WILSON im Frühjahr 1963 die rätselhafte Mikrowellenstrahlung registrieren, wissen sie noch nicht, dass sie den Schlüssel gefunden haben, um den Streit zu entscheiden. Erst Ende 1964 – mehr als ein Jahr, nachdem sie das Rauschen aus dem All erstmals aufgefangen haben – erfährt Penzias zufällig im Gespräch mit einem anderen Physiker, dass sich Forscher im nahe gelegenen Princeton mit der Strahlung aus dem Universum beschäftigen.

Die Gruppe untersucht mithilfe komplizierter Berechnungen, ob sich als Konsequenz der Theorie einer heißen, dichten Anfangsphase des Universums auch in der Gegenwart noch Strahlung aus jener Urzeit auffangen lässt. Die Wissenschaftler vermuten (ohne die 1948 getroffenen Vorhersagen der drei Exilrussen zu kennen), dass es eine Reststrahlung des Urknalls geben müsste, und wollen sie nun ausfindig machen.

Sofort nimmt Penzias Kontakt zu den Kollegen in Princeton auf, die ihn und Wilson besuchen und sich von der Richtigkeit der Messungen überzeugen.

1965 publizieren Penzias und Wilson ihre Ergebnisse in einem Aufsatz im „Astrophysical Journal“. Auf

Memo: **URKNALL-FORSCHUNG**

► **Schon Gelehrte** der Antike skizzieren ein wissenschaftliches Bild vom Aufbau des Alls.

► **Ab 1923 weist** Edwin Hubble die Existenz einer zweiten Galaxie nach, kalkuliert ihre Entfernung und zeigt, dass sie sich von der Erde wegbewegt, ein erster Hinweis auf ein gigantisch großes, dynamisches Universum.

► **Für Astronomen** ist dies ein Nachweis, dass das All einst auf ungeheuer kleinem Raum verdichtet war und sich nach einem Urknall entfaltete.

► **Gut vier Jahrzehnte** später analysieren die Physiker Arno Penzias und Robert Wilson die kosmische Hintergrundstrahlung aus Mikrowellen und erkennen, dass es sich um ein Echo des Urknalls handelt – die zweite handfeste Bestätigung.

Was das Licht über Gestirne erzählt

Anhand ihres Farbspektrums können Forscher die Geschwindigkeiten von Sternen und Galaxien bestimmen

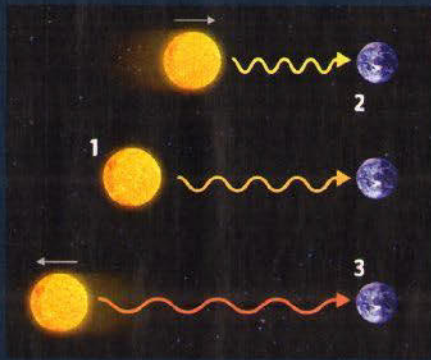
Um die Geschwindigkeit von weit entfernten Himmelskörpern zu ermitteln, nutzen Astronomen seit über 140 Jahren eine Methode, mit der sie Informationen aus Lichtstrahlen herauslesen. Grundlage dafür ist das Spektroskop, das Licht in seine farblichen Bestandteile zerlegt. Bereits 1868 schaltete ein britisches Forscherehepaar ein solches Spektroskop hinter ein Fernrohr, zerlegte damit die Strahlung des Sterns Sirius und ermittelte, dass er sich von uns fortbewegt.

Denn das Farbspektrum enthält nicht nur Informationen über die chemische Zusammensetzung eines Himmelskörpers, sondern auch über dessen Geschwindigkeit relativ zur Erde. Dies aus den Lichtwellen herauszulesen ermöglicht ein seit 1842 bekanntes physikalisches Phänomen: der „Dopplereffekt“. Er besagt, dass die Eigenbewegung eines Körpers jene Wellen beeinflusst, die er aussendet. Bewegt sich die Quelle dieser – akustischen oder optischen – Wellen auf einen Beobachter zu, werden sie aus dessen Sicht gestaucht. Entfernt sich das Objekt, werden die Wellen gedehnt.

Die praktischen Konsequenzen lassen sich im Alltag beobachten: Nähert sich etwa ein Notarzwagen mit eingeschalteter Sirene, so steigt der Ton in die Höhe (die Schallwellen werden gestaucht, die Wellenlänge nimmt ab, dadurch erhöht sich die

Tonfrequenz). Entfernt sich die Ambulanz, klingt die Sirene tiefer (da die Wellen gedehnt werden).

Entsprechend verändern sich auch Lichtwellen: Entfernt sich die Strahlenquelle von uns, nimmt die Wellenlänge zu – und zwar zum Rot hin, denn rotes Licht hat eine größere Wellenlänge als blaues. Astro-



Ein Stern sendet Lichtwellen zur Erde (1). Nähert er sich, werden die Wellen gestaucht (2), entfernt er sich, werden sie gedehnt (3), ins Rote verschoben

nomen sprechen von „Rotverschiebung“. Umgekehrt stauchen sich die Wellen, wenn sich ein Stern auf uns zubewegt, sein Licht wird zum Blau hin verschoben.

Woher aber wissen Astronomen, wie stark sich die Wellenlängen verändert haben? Sie nutzen dafür

die Erkenntnis, dass das Farbspektrum von Sternen charakteristische Linien zeigt, die auf die chemischen Elemente in ihrer äußeren Hülle zurückgehen.

So wird das Licht von Sternen durch den Wasserstoff in ihrer Atmosphäre immer bei einer Wellenlänge von 656,3 Nanometern absorbiert, einem Rot. Wenn das Licht des Sterns bei uns ankommt, müsste also genau diese Wellenlänge fehlen.

Stellt sich nun aber heraus, dass bei einem bestimmten Stern das vom Wasserstoff absorbierte Licht bei einer Wellenlänge von 662,9 Nanometern fehlt – hat sie sich also in Richtung eines noch tieferen Rots verschoben –, lässt sich errechnen, dass sich der entsprechende Stern mit einer Geschwindigkeit von 10 800 000 km/h von uns entfernt.

Erstaunlicherweise zeigen die Sterne in den meisten Galaxien eine Rotverschiebung – und zwar umso größer, je weiter sie entfernt sind. Der Grund dafür ist nicht allein die Eigengeschwindigkeit der Sternensinseln, wie Forscher herausgefunden haben, sondern ein weiteres kosmisches Phänomen: die Ausdehnung des Universums. Da der Weltraum immer weiter expandiert, vergrößert sich ständig der Abstand zwischen den Galaxien; sie scheinen quasi vor uns zu „fliehen“.

Es ist vor allem diese „Fluchtgeschwindigkeit“, die zur Rotverschiebung in den Spektren der fernen Sternensinseln beiträgt. Ralf Berhorst

die kosmologischen Ursachen des Rauschens aber gehen sie nicht näher ein – das ist zum einen nicht ihr Spezialgebiet und zum anderen einem Aufsatz der Princeton-Gruppe in der gleichen Ausgabe der Fachzeitschrift vorbehalten. Auch sind sie sich ihrer Sache noch immer nicht ganz sicher (Wilson empfindet eine Weile sogar eine „gewisse Vorliebe“ für die Steady-State-Theorie).

Dann beginnt auch die Princeton-Gruppe mit Messungen und fängt im Dezember 1965 ebenfalls die kosmische Mikrowellenstrahlung auf. Erst jetzt glauben Penzias und Wilson an die Bedeutung ihrer Messung: Sie haben die vorhergesagte Hintergrundstrahlung aufgefangen, ein Echo des Urknalls.

Nun endlich gibt es ein unbestreitbares Faktum, das auf höchst beeindruckende Weise mit dem theoretischen Modell übereinstimmt, das Lemaître entwickelt und Forscher wie Gamow präzisiert haben.

Nach allen Maßstäben wissenschaftlicher Erkenntnis ist die Urknalltheorie damit die plausibelste Erklärung, wie unser Universum einst entstanden ist – es sei denn, sie wird eines Tages (was derzeit jedoch kaum

vorstellbar erscheint) durch ein anderes, noch überzeugenderes Gedankengebäude ersetzt. Georges Lemaître erfährt noch kurz vor seinem Tod von der Sensation.

Arno Penzias und Robert Wilson werden 1978 mit dem Nobelpreis für Physik geehrt; nun ist das Urknallmodell allgemein akzeptiert. Rund 2500 Jahre, nachdem Menschen erstmals begonnen haben, den Kosmos systematisch zu erforschen, ist es Forschern gelungen, herauszufinden, wie alles einmal angefangen hat.

Damit ist die Geschichte des Urknalls – jenes Moments, in dem das heute gigantisch große Universum mit seinen Trilliarden von Sonnen in einem weit weniger als staubkorngroßen Punkt vereint war und plötzlich unvorstellbare Energien entfesselt wurden – die wohl erstaunlichste Entdeckung, die Wissenschaftler jemals gemacht haben. □

Ralf Berhorst, 44, arbeitet als Wissenschaftsautor in Berlin.

Literaturempfehlungen: Simon Singh, „Big Bang – Der Ursprung des Kosmos und die Erfindung der modernen Naturwissenschaft“, dtv; detaillierte Abhandlung über die Weltentstehung und -erforschung, Alexander Sharov und Igor Novikov, „Edwin Hubble. Der Mann, der den Urknall entdeckte“, Birkhäuser (antiquarisch erhältlich); eine Würdigung von Hubbles Leben und Werk.

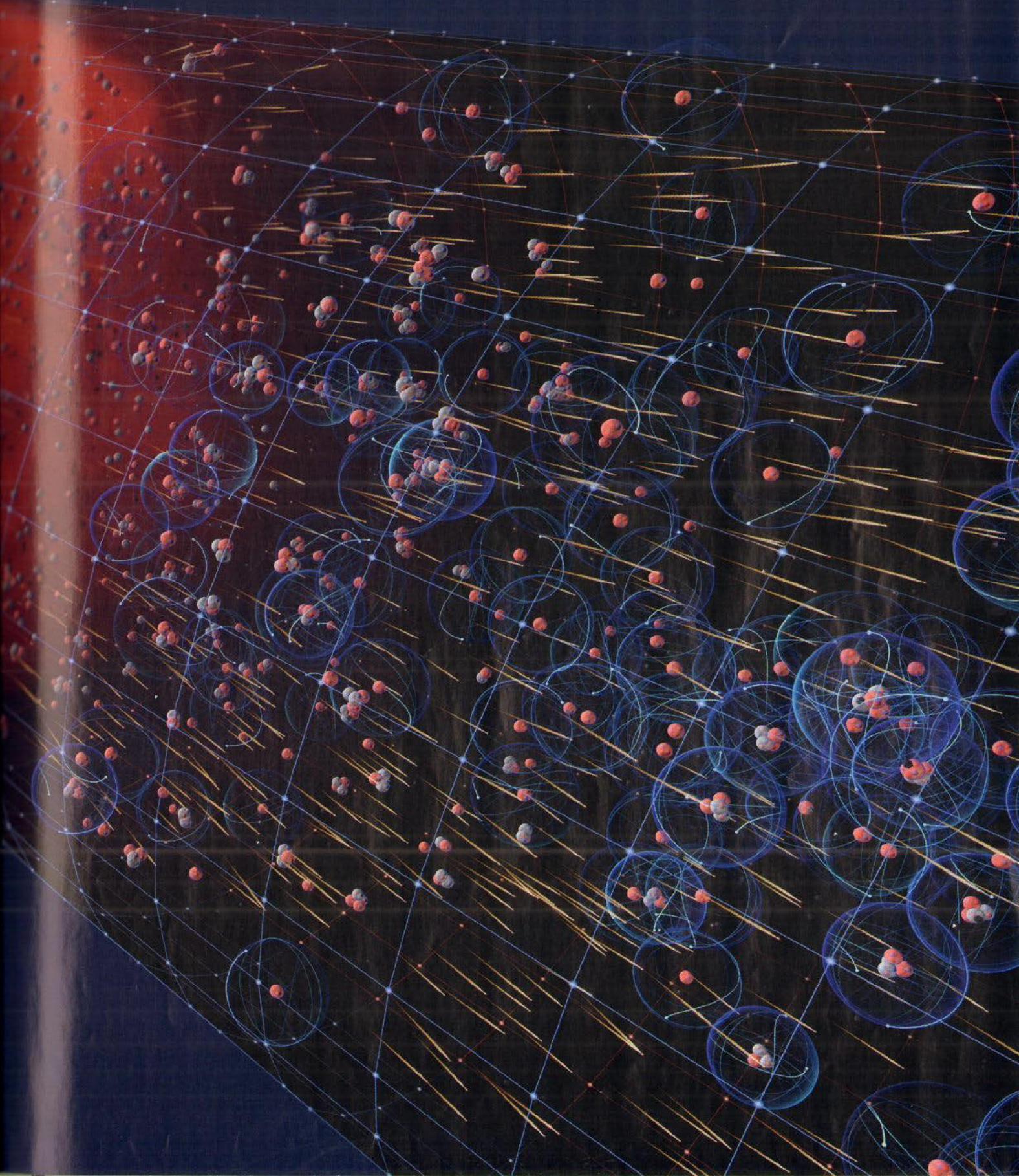


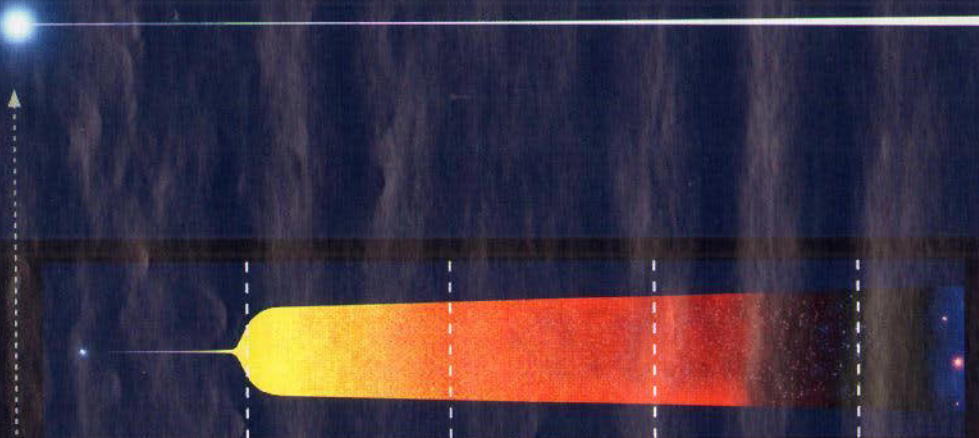
Die Geburt der Welt

Text: Rainer Harf, Illustration: Jochen Stuhmann
Produktion: Torsten Laaker, Tobias Hofbaur und Rainer Harf

Die Entwicklung unseres Universums ist wohl die bizarrste Geschichte, die überhaupt erzählt werden kann. Denn der unvorstellbar große Kosmos mit all seinen Abermilliarden Galaxien hat einmal unendlich klein begonnen: als winziger Punkt, weit kleiner als ein Atomkern, der mit einem Mal in einem Urknall explodierte. Unsere Welt ist damals, vor 13,7 Milliarden Jahren, zutiefst befremdlich. Unmengen exotischer Teilchen schwirren dort umher, und bereits in der ersten aller Sekunden droht sämtliche Materie zu zerstrahlen – in nichts als reine Energie

Unser All entsteht aus einem winzigen Punkt ungeheurer Hitze und Dichte (links), der vor 13,7 Milliarden Jahren explodiert. Der Kosmos dehnt sich aus, schon bald entstehen Partikel, die sich nach 380 000 Jahren zu ersten Atomen zusammenfügen (rechts)



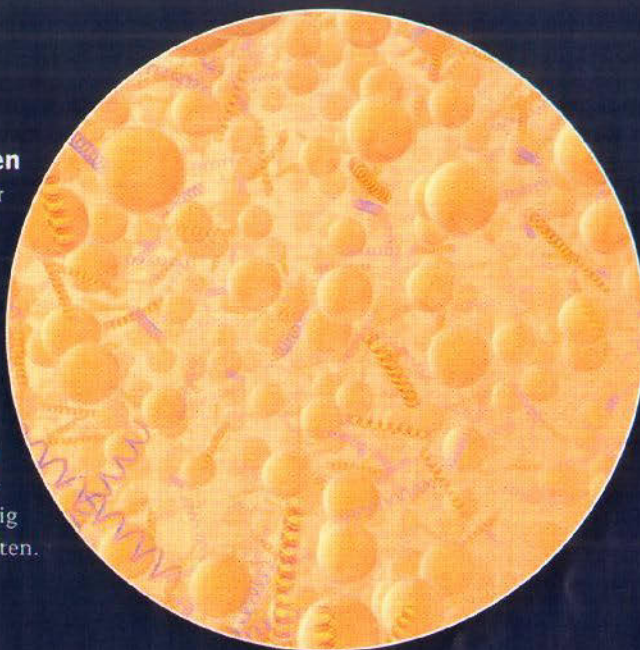


DIE ERSTEN 100 MILLIONEN JAHRE: Die folgenden Illustrationen zeigen die frühe Entwicklung des Alls, von seiner Geburt aus einem extrem heißen Punkt über seine schlagartige Ausdehnung und allmähliche Abkühlung bis hin zur Entstehung der ersten Sterne

Urknall

Die Schwerkraft wird geboren

Infolge der Ausdehnung des Raums kühlt der kosmische Teilchenbrei ab. Vergleichbar mit Wasser, in dem sich bei fallenden Temperaturen Eiskristalle bilden, verwandeln sich auch die Komponenten des frühen Alls: Nach Bruchteilen der ersten Sekunde spaltet sich von der Urkraft die Schwerkraft ab (symbolisiert durch lilafarbene Spiralen) – sie friert gewissermaßen aus der Urkraft aus. Die Schwerkraft wirkt anziehend zwischen den umherschwirrenden Teilchen und stemmt sich so dem Druck des expandierenden Alls entgegen. Doch ist sie nicht mächtig genug, die Ausdehnung aufzuhalten.



10^{-43}
Sek.

ÄRA DER SCHWERKRAFT Von der Urkraft spaltet sich die Schwerkraft ab, die das Tempo, mit dem sich der Raum ausdehnt, ein wenig bremst. Doch der Druck ist so stark, dass sich das All im Hunderttrillionstel eines Trillions-tels einer Sekunde ums Hundertfache dehnt. Die Ära endet, als sich die Urkraft weiter spaltet: in die Starke Kernkraft (sie hält Atomkerne zusammen) und die Elektroschwache Kraft (aus ihr gehen Licht und Radioaktivität hervor).

10^{-36}
Sek.



Die beschleunigte Expansion

Massen an energiereichen Teilchen – sogenannten Inflatonen – schwirren durch den Raum. Auf sie übt die Schwerkraft eine sonderbare Wirkung aus: Sie stößt die Inflatonen voneinander ab. Das führt dazu, dass sich das All blitzartig ausdehnt. War es zu Beginn dieser Phase noch viel kleiner als ein Atomkern, erreicht es am Ende die Größe eines Medizinballs.

Der kosmische »Teilchenzoo«

Nach kurzer Zeit zerfallen die Inflatonen in zahlreiche andere Teilchensorten. Darunter befinden sich Lichtteilchen sowie Materieteilchen und deren gegensätzlich geladene Spiegelbilder – die sogenannten Antimaterieteilchen.



ELEKTRON (blau): negativ geladenes Materieteilchen; **POSITRON** (orangefarben): das positiv geladene Antiteilchen des Elektrons



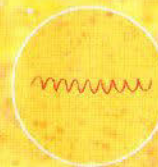
QUARKS (blau und rot): Materieteilchen, die später die Bausteine der Atomkerne bilden; **ANTIQUARKS** (dunkelblau und dunkelrot): aus Antimaterie



NEUTRINO: sehr leichtes, ungeladenes Teilchen. Für Physiker ist es nur schwer nachzuweisen, da es kaum mit anderen Elementarteilchen reagiert



VORLÄUFER-PHOTON: masseloses, ungeladenes Strahlungsteilchen, das sich mit Lichtgeschwindigkeit bewegt. Aus ihm werden Lichtteilchen hervorgehen



GLUON: masseloses Teilchen, durch das die Starke Kernkraft ihre Wirkung entfaltet. Gluonen werden später die Atomkerne zusammenhalten

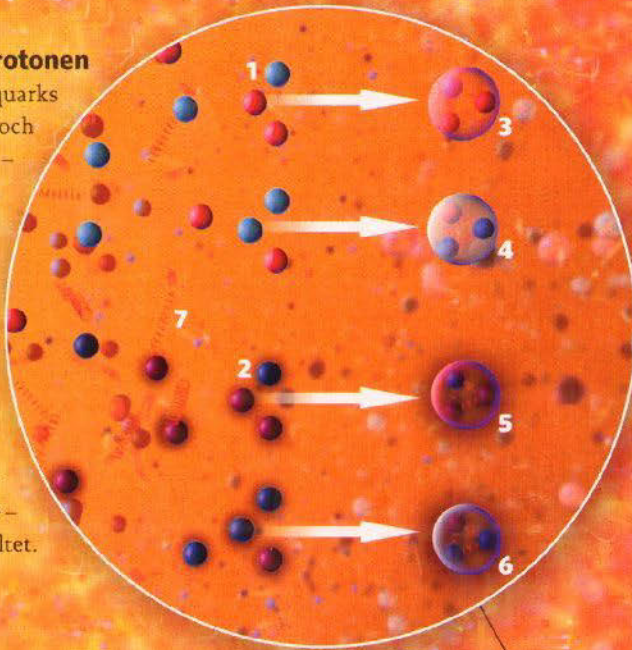
INFLATIONSPHASE Das Aufspalten der Urkraft setzt gewaltige Mengen an Energie frei. Die offenbart sich in Form von Inflatonen, besonderen Teilchen, deren Eigenschaft dazu führt, dass das All in einem Sekundenbruchteil dramatisch anwächst.

10^{-26}
Sek.

ÄRA DES »TEILCHENZOO« Etliche neuartige Partikel entstehen aus den Inflatonen. Auf sie wirkt die Schwerkraft anziehend: Daher dehnt sich das All nun wieder langsamer aus.

Die Bildung von Neutronen und Protonen

Zunächst rasen Quarks (1, rot und blau) und Antiquarks (2, dunkelrot und dunkelblau) noch einzeln umher. Doch eine Hunderttausendstel Sekunde nach dem Urknall – das All ist jetzt zwei Billionen Grad heiß – bewegen sich die Teilchen nicht mehr ganz so schnell und bleiben aneinander haften. Bald flitzen sie nur noch als Dreierpacks durch den Raum. Und je nachdem, in welcher Konstellation sich die Quarks zusammenschließen, bilden sie Protonen (3, auch „Wasserstoff-Atomkerne“ genannt) oder Neutronen (4). Die Antiquarks formen entsprechend Antiprotonen (5) und Antineutronen (6). Zusammengehalten werden die Quarks und Antiquarks durch Gluonen (7, rote Spiralen); das sind masselose Teilchen, durch die eine der vier Elementarkräfte – die Starke Kernkraft – ihre Wirkung entfaltet.



10^{-10}
Sek.

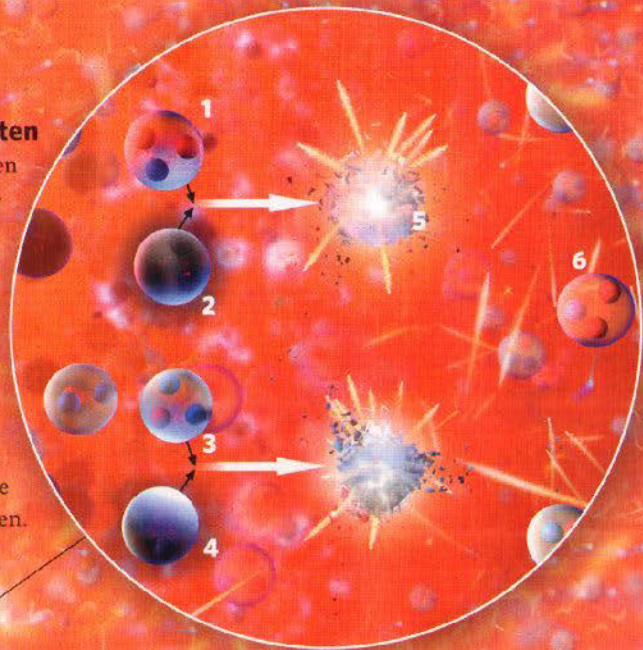
ÄRA DER KRÄFTE Ein letztes Mal zersplittet eine Kraft: Die Elektroschwache spaltet sich in die Schwache und die Elektromagnetische Kraft auf.

10^{-8}
Sek.

PHASE DER KERNBAUSTEINE Das Universum ist von einem zwei Billionen Grad heißen trüben Partikelbrei gefüllt. Nun schließen sich Quarks zu Protonen und Neutronen zusammen, den späteren Bausteinen sämtlicher Atomkerne.

Der Kampf der zwei Welten

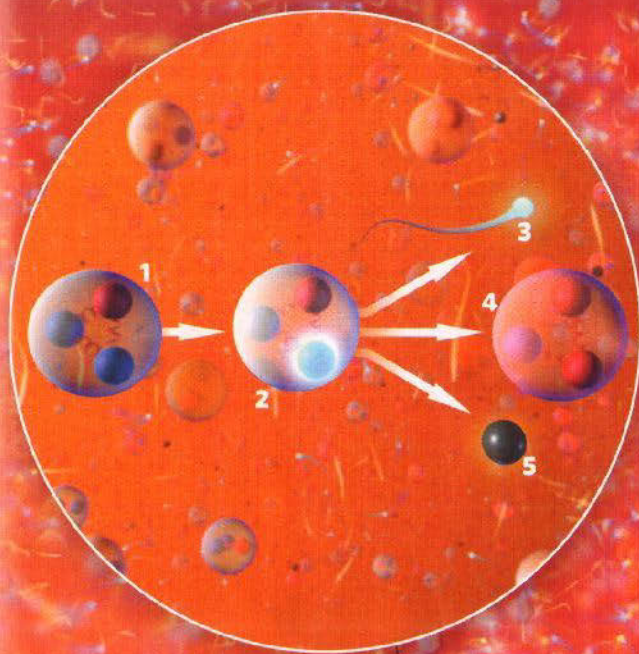
Kurz nachdem sie entstanden sind, beginnen Materieteilchen und Antimaterieteilchen sich gegenseitig zu vernichten. Denn in dem dichten Teilchengewimmel prallen Protonen (1) und Antiprotonen (2) sowie Neutronen (3) und Antineutronen (4) zusammen, zerplatzen in Lichtteilchen, die Photonen (5). Nach Sekundenbruchteilen haben sich alle Teilchen fast vollständig zerstört, es gibt keine Antimaterie mehr. Ein kleiner Teil Materie (6) aber bleibt übrig: Denn auf eine Milliarde Antimaterieteilchen kamen eine Milliarde und ein Materieteilchen.



DIE ÄRA DER VERNICHTUNG

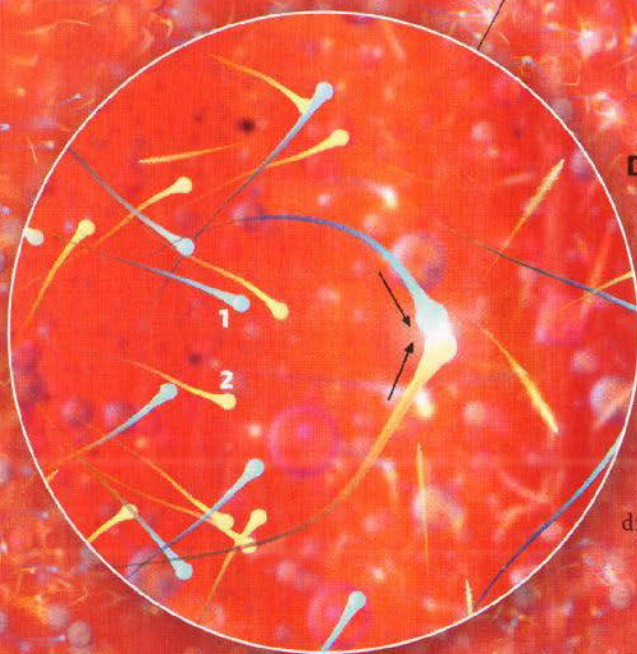
Inzwischen hat das All einen Durchmesser von zehn Billionen Kilometern und ist eine Billion Grad heiß. Nun beginnt einer der dramatischsten Prozesse in der Geschichte unserer Welt: Protonen und Antiprotonen sowie Neutronen und Antineutronen kollidieren miteinander und zerstrahlen – Materie und Antimaterie vernichten sich gegenseitig. Da es aber einen winzigen Überschuss an Materieteilchen gibt, übersteht ein geringer Anteil Neutronen und Protonen den großen Crash.

10⁻⁴
Sek.



Die Schwache Kernkraft tritt auf

Die Neutronen (1) drohen erneut auszusterben, denn im Gegensatz zu Protonen sind sie nicht stabil. Die Schwache Kernkraft entfaltet ihre vernichtende Wirkung: Sie zerrt an den Neutronen und verwandelt sie durch Prozesse im Inneren (2) jeweils in ein Elektron (3), ein Proton (4) und ein Neutrino (5). Binnen kurzer Zeit fliegen daher immer weniger Neutronen durch den brodelnden Kosmos.



Der Sieg der Elektronen

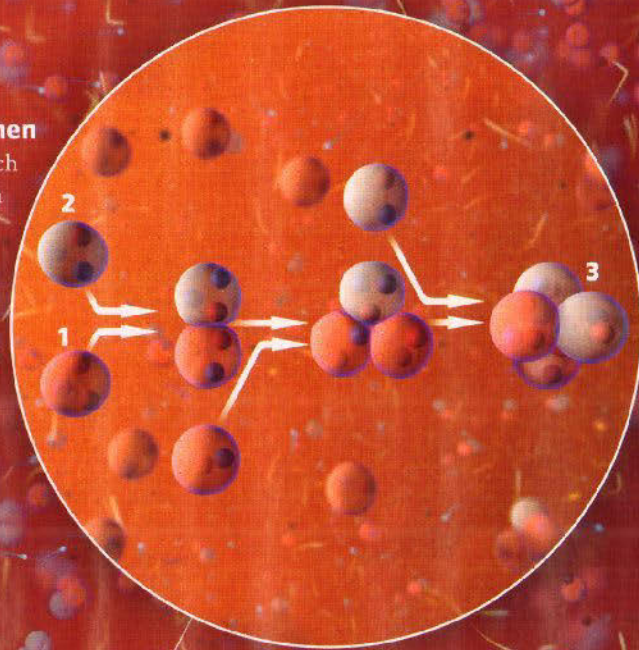
Protonen und Neutronen haben die Ära der Vernichtung bereits überstanden. Aber noch immer schwirren Positronen (2) durchs All – die positiv geladenen Spiegelbilder der Elektronen (1). Nun kollidieren diese beiden Partikel miteinander, zerstrahlen in Photonen, verlieren sich also ebenfalls in reiner Energie. Doch ganz ähnlich wie Protonen und Neutronen gibt es einen hauchzarten Überschuss an Elektronen, welche diese zweite Vernichtungswelle überleben. Ohne sie würde es heute keine Atome geben und somit weder die Erde noch uns Menschen.

0,2
Sek.

ÄRA DES ZERFALLS Das All dehnt sich weiter aus, es ist nach 0,2 Sekunden auf 20 Milliarden Grad abgekühlt und erstreckt sich bereits über 500 Billionen Kilometer. Nun beginnt eine der vier Grundkräfte, die Schwache Kernkraft, Wirkung zu zeigen: Sie zerrt an den Neutronen und wandelt sie in andere Teilchen um. Etwa zeitgleich vernichten sich Elektronen und ihre Antiteilchen, die Positronen. Ähnlich wie bei dem Materie-Antimaterie-Crash zuvor überlebt auch hier die Materie: Ein geringer Anteil an Elektronen bleibt übrig.

Die Rettung der Neutronen

In einem komplexen Prozess vereinigen sich Protonen (1) und Neutronen (2) zu Atomkernen des Elements Helium (3): Zunächst fusionieren ein Proton und ein Neutron zu einem sogenannten Deuteriumkern; mit diesem Gebilde verschmilzt dann ein weiteres Proton sowie ein Neutron zu dem Heliumkern. In diesem Verbund sind die Neutronen vor der zerstörerischen Wirkung der Schwachen Kernkraft geschützt.

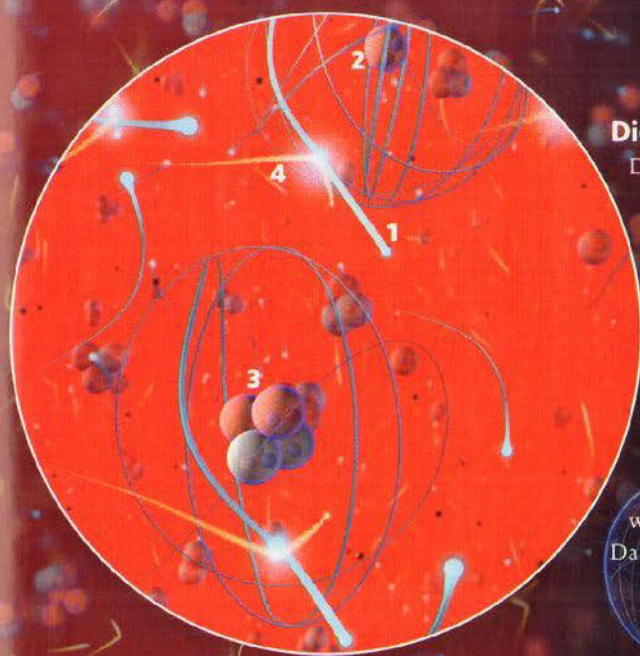


2
Min.

DIE ZEIT DER ATOMKERNE Jetzt vereinigen sich Neutronen und Protonen zu neuartigen Gebilden: zu Atomkernen des Elements Helium. In diesem Verbund kann die Schwache Kernkraft die Neutronen nicht mehr auflösen. Fortan tauchen diese Teilchen nur noch in Kombination mit Protonen auf.

5
Min.

DIE LANGE PHASE DER AB Bedeutendes mehr. Das All bläht Kosmos milchig-trüb: eine Nebel zusammen und können sich nicht

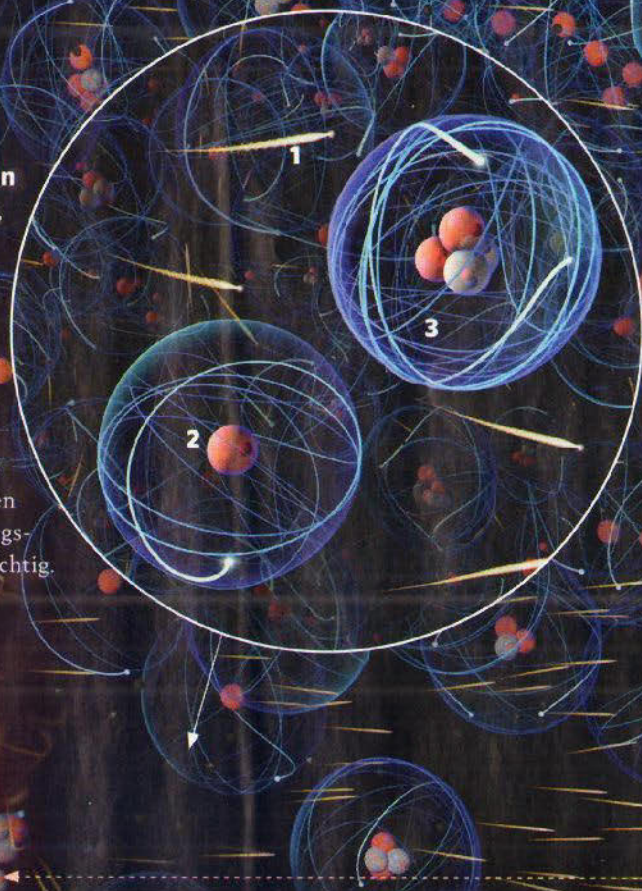


Die Umlaufbahn der Elektronen

Da sich das All beständig ausdehnt und abkühlt, verlieren die Teilchen an Energie, schwirren immer langsamer umher. Nun beginnen negativ geladene Elektronen (1) positive Protonen (Wasserstoff-Atomkerne) zu umkreisen (2). Andere umrunden Heliumkerne (3). Doch die Elektronen werden immer wieder aus ihren Umlaufbahnen gerissen, denn ständig prallen sie mit Photonen (4) zusammen, verlieren den Kontakt zu den Atomkernen und fliegen erneut frei umher. Die Lichtteilchen wechseln durch die Zusammenstöße ebenfalls immer wieder ihre Richtung – ähnlich wie Sonnenlicht, das an den winzigen Wassertropfchen in einem Nebel gestreut wird. Daher gleicht das All einer heißen Nebelwelt.

Die ersten Atome entstehen

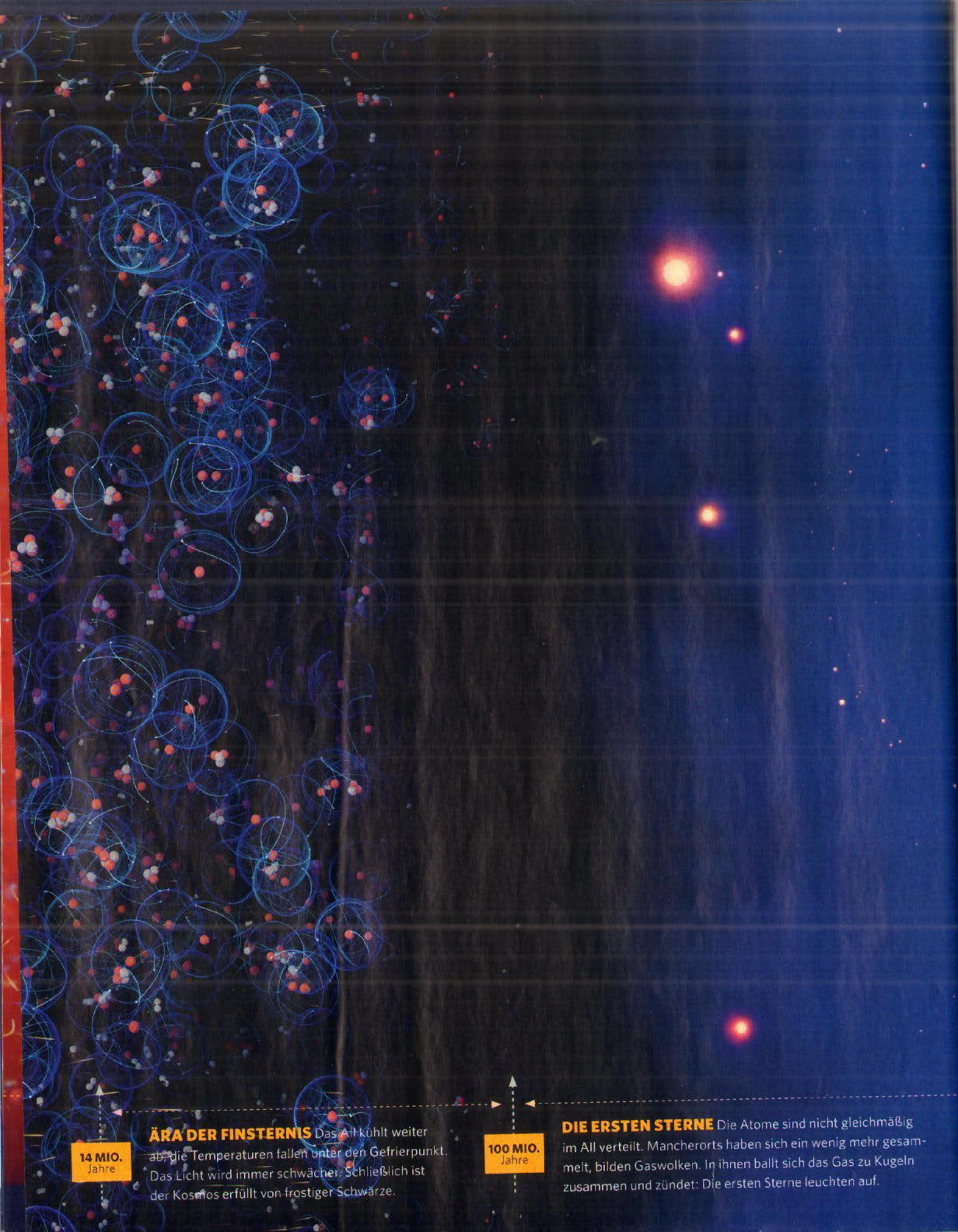
Als die Temperatur auf 2700 Grad Celsius sinkt, haben die Photonen (1) nicht mehr genug Energie, Elektronen aus deren Bahnen zu schubsen: Das führt dazu, dass nun alle Elektronen um Atomkerne kreisen. Damit sind die ersten Atome entstanden. Rund 75 Prozent machen die Atome des Wasserstoffs (2) aus. Fast den gesamten Rest bilden Heliumatome (aufgebaut aus je zwei Elektronen und einem Heliumkern, 3). Da Photonen nun nicht mehr gestreut werden, sondern geradlinig durch den Raum schwirren, ändert sich das Erscheinungsbild des Universums: Es wird durchsichtig.



KÜHLUNG Über Jahrtausende geschieht nun nichts sich weiter auf, wird kälter und kälter. Noch immer aber ist der Welt. Denn Lichtteilchen prallen ständig mit Elektronen ungestört ausbreiten.

380 000
Jahre

ÄRA DER ATOME Im All bilden sich nach 380 000 Jahren die ersten Atome. Licht breitet sich nun ungestört aus. 13,7 Milliarden Jahre später werden Menschen dieses Licht als Nachhall des Urknalls mit Instrumenten aufspüren können.



14 MIO.
Jahre

ÄRA DER FINSTERNIS Das All kühlt weiter ab, die Temperaturen fallen unter den Gefrierpunkt. Das Licht wird immer schwächer. Schließlich ist der Kosmos erfüllt von frostiger Schwärze.

100 MIO.
Jahre

DIE ERSTEN STERNE Die Atome sind nicht gleichmäßig im All verteilt. Mancherorts haben sich ein wenig mehr gesammelt, bilden Gaswolken. In ihnen ballt sich das Gas zu Kugeln zusammen und zündet: Die ersten Sterne leuchten auf.

D

Das Universum ist ein ungeheuerliches Gebilde, ein Koloss von Schwindel erregendem Ausmaß. So riesenhaft, so überreich an Himmelskörpern, dass seine Erscheinung Menschen leicht an die Grenzen ihrer Vorstellungskraft gelangen lässt.

Allein der Abstand zwischen Erde und Sonne beträgt 150 Millionen Kilometer. Das nächste Gestirn, Proxima Centauri, ist gar 40 Billionen Kilometer von uns entfernt. Und unsere Heimatgalaxie – die Milchstraße – erstreckt sich über einen derart gewaltigen Raum, dass ein Lichtstrahl 100 000 Jahre braucht, um ihn zu durchqueren.

Die Milchstraße aber ist nur ein Körnchen in den Weiten des Alls: eine glitzernde Sterneninsel, so wie es 100 Milliarden weitere gibt. In ihnen brodeln viele Trilliarden Sonnen, kreisen unzählige Planeten und Monde, ziehen Myriaden Kometen und Asteroiden ihre Bahnen, wabern mächtige Gaswolken durch die Dunkelheit – und allent-

Es sind Dimensionen, die sich der menschlichen Erfahrungswelt gänzlich entziehen. Und doch sind wir imstande, eine beinahe unerhört einfache Frage zu stellen: Woher stammt all das, die Materie, die Energie, der Raum?

Mit anderen Worten: Wie ist das Universum entstanden? Sind die Dinge ewig, unendlich alt, unveränderlich?

Oder hat die Welt einen Anfang, eine Geschichte?

Lange schon versuchen Wissenschaftler, die Biografie des Kosmos zu enträtseln. Seit Hunderten von Jahren beobachten Astronomen das nächtliche Firmament, vermessen mit Teleskopen die Abstände zwischen Gestirnen, berechnen die Bewegungen von Galaxien.

Um dem Universum das Geheimnis seiner Herkunft zu entlocken, richten sie Antennen gen Himmel, die so empfindlich sind, dass sie bereits geringste Spuren von Strahlung detektieren.

Und nicht allein Sterne und Galaxien befragen die Forscher nach dem Werdegang des Alls. Um zu begreifen, was überhaupt Materie ist, aus welchen Bausteinen sie besteht, wie diese entstehen und welche Kräfte zwischen ihnen wirken, bauen Physiker monströse Maschinen: Teilchenbeschleuniger, in denen sie winzige Partikel – kleiner als Atome – mit solcher Wucht aufeinanderprallen lassen, dass sie bersten und ihr Innerstes preisgeben.

Aus all den Beobachtungen und Berechnungen, Experimenten und Erkenntnissen ist im Laufe von Genera-

es demnach kleiner gewesen sein, viel kleiner. Genauer: Der gesamte Kosmos war einst in einem winzigen Punkt zusammengestaucht.

Unsere Welt hat also einen Anfang, eine Geschichte. Und die beginnt vor 13,7 Milliarden Jahren, als jener Punkt in einer gewaltigen Explosion zerbarst: dem Urknall.

ES IST EINE ZUTIEFST absonderliche Geschichte, vielleicht sogar die bizarrste, die sich überhaupt erzählen lässt. Denn sie handelt von Dingen, die noch fremdartiger, noch unfassbarer sind als das riesenhafte Universum, wie wir es heute kennen.

Sie berichtet von einer Wirklichkeit, die höchst unwirklich erscheint – so exotisch, so abstrakt, dass sich nur schwer Worte dafür finden lassen.

Nicht selten können uns daher allein Bilder und Vergleiche eine Ahnung davon vermitteln, was damals, vor 13,7 Milliarden Jahren, geschah.

Eines der wichtigsten Kapitel dieser Schöpfungsgeschichte spielt in einer schier unermesslich kurzen Zeitspanne.

Denn erstaunlicherweise, so die Theorie, entwickelt sich ein Großteil dessen, was unsere Welt heute ausmacht (beispielsweise die Strahlung, die das All durchkreuzt, oder jene Bausteine, aus denen alle Materie besteht), in weniger als einem Augenblick.

Daher richten Astrophysiker ihr Interesse vor allem auf die allerersten Takte der Genesis. Und sie haben inzwi-

Kosmologen können nicht nur **die ersten Tage** nach dem Urknall nachzeichnen, sondern gar die ersten Minuten, die ersten Sekunden

halbten ballen sich Schwarze Löcher, die gigantische Mengen an Energie und Materie aus ihrer Umgebung aufsaugen und sogar das Licht verschlucken.

All diese kosmischen Körper, so schätzen die Astronomen, schweben durch einen Raum von mehr als 900 000 000 000 000 000 000 000 (900 Trilliarden) Kilometer Durchmesser. Und sie wiegen 10^{53} Kilogramm, das ist eine Eins mit 53 Nullen.

tionen eine hochkomplexe Theorie erwachsen: ein Formelwerk, das Kosmologen weit in die Vergangenheit des Alls blicken lässt. Mittlerweile vermögen sie dessen Historie erstaunlich exakt zu rekonstruieren.

Und sie haben erkannt, dass das Universum mitnichten immer so war, wie es heute erscheint. Denn seit Jahrmilliarden driften die Galaxien auseinander. Das All dehnt sich aus. Früher muss

schen nicht nur herausgefunden, was in den ersten Tagen, den ersten Stunden, den ersten Minuten nach Anbeginn der Zeit vor sich ging: Ihr mathematisches Formelwerk gibt ihnen selbst eine Vorstellung davon, was in Bruchteilen der ersten aller Sekunden geschah.

Dennoch: Ganz kurz, bevor sie den eigentlichen Zeitpunkt null erreichen, jenen magischen Moment der Schöpfung selbst, versagen sämtliche physika-

[illegible]

Astrophysiker bezeichnen die mysteriöse Zeitspanne, in die sie nicht hineinblicken können, als Planck-Ära. Benannt ist sie nach dem deutschen Physiker Max Planck, der zu Beginn des 20. Jahrhunderts die Quantenmechanik begründete und damit ein Theoriegebäude, das die Eigenschaften der kleinsten Materiebausteine beschreibt.

Obwohl sich eigentlich über die Planck-Ära, jenen nebulösen Zeitsplitter, nichts mit Gewissheit sagen und auch keine zeitliche Abfolge darin angeben lässt, spekulieren Kosmologen durchaus darüber, welches Wesen unser All damals hatte.

In einem sind sich die Forscher ziemlich sicher: Das Universum ist zu jener Zeit zwergenhaft klein: Es hat einen Durchmesser von weniger als 10^{-32} Zentimetern, man könnte fast von einem Nichts sprechen.

Existierte in unserer Welt ein Teilchen von vergleichbarer Größe, könnte es kein noch so ausgeklügeltes Hightech-Mikroskop sichtbar machen. Denn der Keim von allem, was uns heute umgibt, ist so verschwindend winzig, dass Abermilliarden von ihm in einen einzigen Atomkern passen würden.

In diesem fast raumlosen Raum herrschen höllische Bedingungen: ein ungeheurer Druck, eine unsagbare Hitze von mehr als 10^{32} Grad Celsius.

Hier gibt es noch keine Atome, keine Elektronen, kein Licht. Strahlung und Materie, so jedenfalls vermuten einige Physiker, unterscheiden sich in der Planck-Ära nicht voneinander, sie sind gewissermaßen miteinander verschmolzen. Vielleicht wirbeln damals Unmengen irgendwelcher exotischer Teilchen dicht gedrängt umeinander.

Eine einzige Macht bestimmt das Geschehen im gerade geborenen Kosmos: die Urkraft. Sie allein dirigiert das Verhalten der Teilchen, lenkt ihre Bewegungen, bestimmt, ob sie einander abstoßen, anziehen, voneinander abprallen, miteinander reagieren.

Um den Zustand der frühen Welt zu verbildlichen, vergleichen Kosmologen das urheiße Einerlei bisweilen mit einem extrem dichten, brodelnden Schaum. Darin blähen sich ständig Bläschen auf, zerplatzen, entstehen neu, um plötzlich wieder zu bersten.

Dieser kosmische Schaum allerdings ist nicht gleichförmig und homogen – und vor allem nicht stabil.

So kommt es, so die Spekulation der Kosmologen, dass durch Zufall eine spontane Schwankung der Energie (um im Bild zu bleiben: eine zufällig aufkeimende Blase) eine dramatische Explosion auslöst. Ein Ereignis, das den weiteren Werdegang der Welt bedingt.

Von nun an dehnt sich das Universum (von lat. *universus*, gesamt) schlagartig aus, vervielfacht sein Volumen.

Diese Explosion ist jedoch überaus kurios. Denn es gibt keinen bestimmten Ort, der hier auseinanderfliegt. Die Geburt des Weltalls kann man nicht mit der Detonation einer Bombe vergleichen, die ein Gebäude sprengt. Vielmehr explodiert das Universum überall, bläht sich an jeder Stelle zugleich aus.

Und: Es dehnt sich nicht in irgendeinen anderen Raum hinein aus wie etwa ein Ballon, den man aufbläst. Das All hat keine Hülle. Dementsprechend gibt es kein Außen, ja im Grunde genommen noch nicht mal ein Nichts, in das hinein sich das Universum drückt.

Der Raum schafft sich selbst Raum. Das Geschehen ist so befremdlich, dass man es sich als Mensch nicht vorstellen kann, man kann es nur akzeptieren.

Eines allerdings ist leichter zu begreifen: Die Expansion des Raumes bewirkt, dass es im All kühler wird. Dies ist die Konsequenz eines physikalischen Gesetzes, das sich auch heute noch beobachten lässt. Strömt zum Beispiel Gas aus einer Pressluftflasche, kühlt es draußen infolge der Ausdehnung ab.

Diese Erkaltung wird fast die gesamte Entwicklung des Universums prägen. Denn die sinkenden Temperaturen haben schwerwiegende Folgen: Sie führen zu einer Metamorphose des Alls, einer Umwandlung von Kräften und Teilchen. Die Abkühlung wird der Welt nach und nach Struktur verleihen.

Man kann diesen Prozess mit dem Gefrieren von Wasser vergleichen. Ist es flüssig, schwirren seine Moleküle wild und ungeordnet durcheinander; fällt die Temperatur jedoch, gehen

Wie die Welt zu Kräften kam

Sekundenbruchteile nach dem Urknall gibt es vermutlich nur eine einzige Kraft im Universum: die Urkraft (1). Sie bestimmt das gesamte Geschehen im jungen All. Die Ausdehnung - und damit Abkühlung - des Kosmos bewirkt, dass sich von der Urkraft zunächst die

Schwerkraft (2) abspaltet: jene Kraft, die anziehend zwischen zwei massereichen Körpern wirkt und heute Planeten um Sterne kreisen lässt. Nur einen Augenblick später gehen aus dem Rest der Urkraft (3) zwei weitere Kräfte hervor: die Starke Kernkraft (4) -

einige von ihnen in einen anderen Aggregatzustand über, bilden hier und da winzige Eiskristalle – geometrisch geordnete Strukturen also. Das Wasser liegt nun in zwei Formen (sogenannten „Phasen“) vor: flüssig und fest.

Bereits unmittelbar nach der Planck-Ära macht sich ein solcher Phasenwechsel auch im Universum bemerkbar: Von der Urkraft spaltet sich die Schwerkraft (oder Gravitation) ab. Obwohl das All noch unvorstellbar heiß ist, sprechen manche Physiker auch davon, dass die Schwerkraft aus der Urkraft „ausfriert“.

Kraft (einen Vorgänger jener Kräfte, deren Wirkung heute für Lichtstrahlung, elektrischen Strom oder Radioaktivität verantwortlich ist; siehe Seite 136).

Das Aufspalten in diese beiden Kräfte setzt, wie Astrophysiker vermuten, gewaltige Mengen an Energie frei. Diese Energie offenbart sich in Form seltsamer Teilchen, die mit einem Mal das junge Universum fluten: sogenannte Inflatonen (von lat. *inflatare*, sich aufblasen).

Auf diese Partikel hat die Schwerkraft eine höchst eigentümliche Wirkung. Vereinfacht gesagt: Sie zieht die Inflato-

Vergleich: Würde ein Stecknadelkopf ebenso stark anwachsen, wäre er in weit weniger als der Dauer eines Wimpernschlags 1000-mal größer als das heutige Universum.

DASS UNSER KOSMOS so ungewöhnlich rasch expandiert, mag zunächst paradox klingen. Denn nichts, so besagt die von Albert Einstein aufgestellte Relativitätstheorie, vermag sich schneller zu bewegen als das Licht. Doch dies ist nur scheinbar ein Widerspruch: Die von Einstein postulierte Höchst-

Anfangs besteht das Universum aus **zwei feindlichen Welten**, die sich gegenseitig vernichten: Materie und Antimaterie

Die Gravitation (jene Kraft, die dafür sorgt, dass zwei massereiche Körper sich anziehen, und die heute Planeten um Sonnen kreisen lässt) wirkt nun auch anziehend auf die Komponenten der gerade geborenen Welt, sie stemmt sich dem Druck des Alls entgegen.

Doch ist sie nicht mächtig genug, um die Expansion aufzuhalten: Der Kosmos streckt sich in weit weniger als dem Trillionstel eines Trillionstels einer Sekunde aufs Zehnfache, aufs Hundertfache.

Dann tritt das Universum in die nächste Entwicklungsphase ein. Und wieder passiert Unglaubliches.

Der Rest, der von der Urkraft übrig geblieben ist, zerfällt in zwei weitere Kräfte: die Starke Kernkraft (sie wird später die Kerne von Atomen zusammenhalten) sowie die Elektroschwache

nen nicht – wie die anderen Bestandteile des frühen Kosmos – an, sie stößt sie voneinander ab.

Mithin bremst die Gravitation den Raum nicht mehr in seiner Ausdehnung. Im Gegenteil: Sie beschleunigt sogar dessen Expansion.

War das Tempo bereits vorher rasant, spritzt das Universum jetzt mit Überlichtgeschwindigkeit auseinander und schwillt dabei – zumindest für damalige Verhältnisse – aufs Riesenhafte an: In einem Sekundenbruchteil poppt das kosmische Pünktchen auf die Größe eines Medizinballs auf.

Seit dem Urknall sind gerade einmal 10^{-36} Sekunden vergangen.

Physiker sprechen von der „Inflationsphase“. Nie wieder wird das All so blitzartig an Volumen zunehmen. Zum

geschwindigkeit bezieht sich stets auf Teilchen oder Strahlen, die sich durch einen Raum bewegen – hier aber bewegt sich der Raum selbst.

Ähnlich wie die Entwicklungsstadien zuvor währt die Inflation allerdings nur kurze Zeit. Denn erneut führt die Abkühlung, die Resultat der räumlichen Entfaltung ist, zu einer Wandlung der Ingredienzen unseres Alls: Die energiegeladenen Inflatonen zerfallen auf wundersame Weise in eine Art „Teilchenzoo“.

So bilden sich beispielsweise Vorläufer von Photonen – jenen Partikeln, aus denen später Sonnenlicht, Röntgenstrahlen, Radio- oder Mikrowellen bestehen. Diese Teilchen verfügen über keinerlei Masse, sie haben also keine Substanz, kein Gewicht: Sie sind gewis-

sie hält Protonen und Neutronen in den Atomkernen zusammen – und die Elektroschwache Kraft (5). Die teilt sich weiter: in die Schwache Kernkraft (6), die Neutronen zerfallen lässt und Radioaktivität hervorruft. Und die Elektromagnetische Kraft (7), die unterschiedlich

geladene Teilchen anzieht und etwa dafür sorgt, dass negativ geladene Elektronen um positiv geladene Atomkerne schwirren. Aus der Urkraft sind so jene vier Kräfte hervorgegangen, die bis heute alle Prozesse im All steuern.

sermaßen nichts als Strahlung, die sich mit Lichtgeschwindigkeit bewegt.

Zudem wirbeln unter den neuen Bestandteilen des heranreifenden Alls bereits etliche massereiche Teilchen umher. Es sind Materiepartikel, die auch heute noch im All zu finden sind:

- Quarks, die später die Bausteine der Atomkerne bilden (siehe Seite 132);
- Elektronen, elektrisch negativ geladene Teilchen, die heute die Atomkerne umschwirren;
- Neutrinos, ungeladene, sehr leichte Teilchen, die Physiker nur schwer nachweisen können, da sie kaum mit anderen Partikeln reagieren.

Keines dieser Materieteilchen entsteht jedoch allein: Zu jedem existiert ein Antiteilchen, das zeitgleich geboren wird – ein Pendant mit entgegengesetzten Ladungen. Bildet sich etwa ein negativ geladenes Elektron, taucht wie aus dem Nichts auch sein Schattenbild auf: ein positiv geladenes Positron.

Auch zu jedem Quark (von denen manche positiv, andere negativ geladen sind) gibt es ein Antiquark, das sich

Energie wiederum materialisiert sich in Form von Teilchen (siehe Seite 142).

Dieser blubbernde Partikelbrei übt einen entscheidenden Einfluss auf die weitere Entwicklung des Kosmos aus. Denn gegenüber Materie- und Antimaterieteilchen entfaltet die Schwerkraft ihre uns vertraute Wirkung: Sie sorgt dafür, dass sie sich – im Gegensatz zu den Inflationen – gegenseitig anziehen.

Zwar dehnt sich das Universum immer noch rasant aus, doch im Vergleich zur Inflationsphase nun gemächlicher.

Der Medizinball wächst heran, auf 100 Meter Durchmesser. Auf 100 Kilometer. Bald ist das All so mächtig wie der Mond, dann die Erde, dann die Sonne – dabei kühlt es weiter und weiter ab.

Im Alter von einer Zehnmilliardenstel Sekunde ist der Kosmos bereits fast so groß wie unser Sonnensystem, die Temperatur ist um 17 Größenordnungen gefallen: auf eine Billiarde Grad.

Die Hitze des Urfeuers übersteigt die Glut im Herzen unserer heutigen Sonne um das Hundertmillionenfache. Und doch ist es inzwischen kalt genug, dass

Teilchen abgelenkt und in alle möglichen Richtungen gestreut – ähnlich wie in einem dichten Nebel, in dem Schleier winziger Wassertropfchen das Sonnenlicht so stark brechen, dass man die Hand vor Augen nicht erkennt.

Es dauert jetzt noch eine Hunderttausendstel Sekunde (die undurchsichtige Brühe ist nun zwei Billionen Grad heiß), da bilden sich neue Strukturen im All aus: Aufgrund der Abkühlung verlieren die Quarks an Energie, sie rasen also nicht mehr ganz so schnell umher. Nähern sich nun zwei dieser Teilchen einander, kommt es immer wieder vor, dass sie aneinander haften bleiben.

Bald flitzen Quarks in Form von Dreierpacks durch den Raum. Verbunden werden sie von sogenannten Gluonen (von engl. *to glue*, kleben). Das sind masselose Teilchen, durch die eine der vier Elementarkräfte – die Starke Kernkraft – ihre Wirkung entfaltet. Physiker nennen Gluonen daher auch „Vermittlerteilchen“: Wie winzige Gummibänder spannen sie sich kraftvoll zwischen jeweils zwei Quarks und halten sie

Nach einer Zehnmilliardenstel Sekunde hat das Universum bereits **die Größe unseres Sonnensystems** erreicht

ebenfalls in der Ladung unterscheidet. Mithin formen sich sozusagen stets Pärchen aus Positiv und Negativ.

Und so baut sich mit der Geburt der Materie eine Art Spiegelwelt auf: die Antimaterie.

Noch immer herrscht im Universum ein glutheißes Gewimmel, ständig prallen Partikel aufeinander, stoßen sich gegenseitig ab, ändern immer und immer wieder ihre Richtung.

Es ist ein dichtes Durcheinander aus Werden und Vergehen: Trifft ein Teilchen auf sein Antiteilchen, vernichten sich die beiden gegenseitig, sie zerstrahlen in Vorläufer von Photonen. Substanz verliert sich in Substanzlosem.

Auch die Vorläufer der Photonen kollidieren miteinander, verwandeln sich dabei in andere Teilchen: in Quarks, Antiquarks, Neutrinos, Elektronen. Masse verflüchtigt sich mithin zu Energie,

ein letztes Mal eine Kraft in zwei Komponenten zersplittert: Die Elektroschwache Kraft trennt sich, so haben Physiker berechnet, zu diesem Zeitpunkt in die Elektromagnetische Kraft und die Schwache Kernkraft auf.

Diese Kräfte haben zwar noch keinen nennenswerten Effekt auf das weitere Geschehen. Doch die einstige Urkraft hat sich nun in vier Elementar- oder Grundkräfte geteilt, die 13,7 Milliarden Jahre später noch immer unsere Welt prägen.

Allmählich nimmt das Universum Gestalt an. Es ist jetzt von einer Art gleißender Flüssigkeit gefüllt. Wäre man – rein theoretisch – imstande, in diese dicke Ursuppe hineinzublicken: Man könnte keinen Millimeter weit schauen.

Denn die Lichtteilchen, die Photonen, werden andauernd von anderen

so zusammen. Von nun an fliegen nie wieder einzelne Quarks frei durchs All.

Die Dreiergespanne sind wichtige Bausteine sämtlicher Atome, die sich später einmal formen werden. Je nach der Konstellation, in der die Quarks eine Bindung miteinander eingehen, entsteht eines von zwei Gebilden:

- entweder ein Proton – ein positiv geladener Materiebaustein (Protonen werden später die Kerne der Wasserstoffatome bilden);
- oder ein Neutron – ein Partikel, das ungeladen ist.

Den gleichen Prozess durchlaufen zur selben Zeit sämtliche Antiquarks: Sie formen Antiprotonen und Antineutronen.

Was nun folgt, gehört zweifellos zu den dramatischsten Momenten in der Geschichte unserer Welt: Das Universum ist noch nicht einmal eine Sekunde

alt, da beginnen sich Materie und Antimaterie bereits für immer zu vernichten. Protonen kollidieren mit Antiprotonen, Neutronen mit Antineutronen, Elektronen mit Positronen – und sie zerplatzen in einem Schauer aus Photonen.

Hatten die Photonen, diese masselosen Lichtteilchen, wenige Momente zuvor noch genügend Kraft, um sich immer wieder in Materieteilchen (etwa Quarks oder Elektronen) zu verwandeln, entzieht ihnen die Ausdehnung des Raumes mehr und mehr Energie. Schließlich sind die Photonen nicht mehr in der Lage, den Pool an zerstrahlender Materie und Antimaterie wieder aufzufüllen.

Immer mehr Masse verpufft also, schwindet dahin. Welt und Gegenwelt drohen einander vollends auszulöschen. Das All dünnt aus. Augenblicklich hat sich fast sämtliche Materie und Antimaterie aufgelöst.

Wenige Sekunden dauert es, dann ist der große Crash vorbei. Die Antimaterie ist Vergangenheit.

Die Materie dagegen hat in Bruchstücken wie durch ein Wunder überlebt.

Denn auf jeweils eine Milliarde Antimateriebausteine, so haben Physiker berechnet, kommen eine Milliarde und ein Materiebaustein.

DER GRUND für dieses geringe Ungleichgewicht ist bis heute nicht bekannt. Es scheint beinahe, als habe eine unerforschte, vielleicht gar unergründliche Macht ein klein wenig mehr Welt als Gegenwelt ins junge Universum gestreut – einen hauchzarten Überschuss, ohne den es uns freilich nicht gäbe: Denn Protonen und

Neutronen, die damals durchs All schwärmen, finden sich 13,7 Milliarden Jahre später in den Körpern aller Lebewesen auf unserem Planeten wieder.

Die Protonen haben fortan nichts mehr zu befürchten. Die Neutronen allerdings befinden sich noch nicht in Sicherheit. Auch wenn ihre Gegenspieler, die Antineutronen, nicht mehr

Da bricht ein neues Zeitalter an: das der Atomkerne. Physiker sprechen auch von der Ära der Nukleosynthese (von lat. *nucleus*, Kern, und *synthesis*, Verknüpfung).

Protonen und Neutronen sind nun so langsam, dass zwischen ihnen die Starke Kernkraft Wirkung zeigt. Ähnlich wie zuvor die Quarks gehen Neutronen und Protonen jetzt eine Liaison ein. In einem komplexen Prozess vereinigen sich je zwei dieser Partikel zu einem Atomkern.

Der wird die Basis für ein noch heute bekanntes Element: Helium.

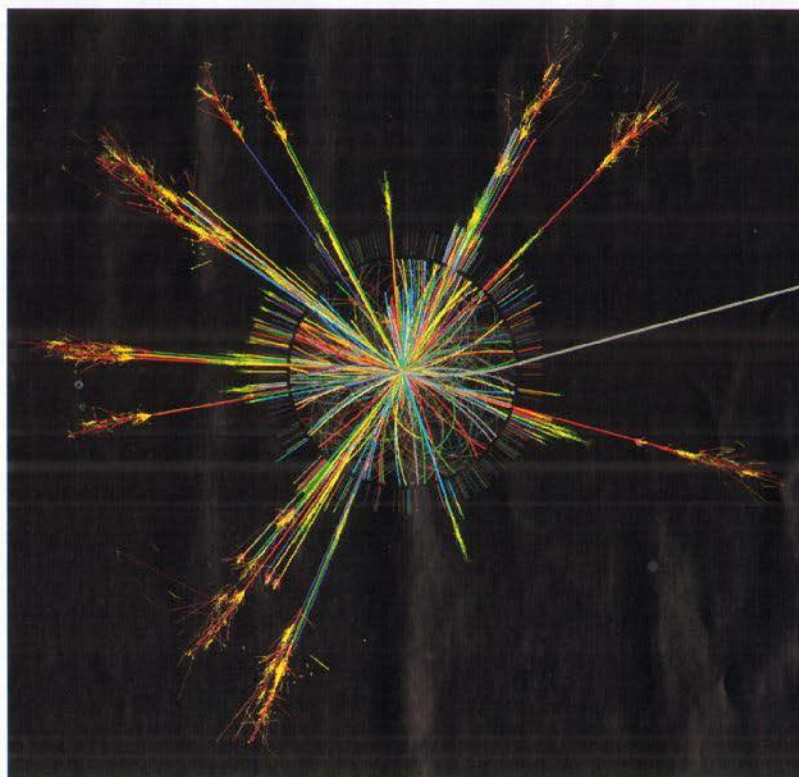
Ab und zu bilden sich auch Pakete aus vier Neutronen und drei Protonen: Kerne eines weiteren Elements, Lithium. Erst der Verbund schützt die Neutronen vor dem Zerfall, denn die Kräfte im Kern hemmen die vernichtende Wirkung der Schwachen Kernkraft.

Fünf Minuten brauchen die Neutronen, bis sie allesamt in Helium- oder Lithiumkerne verbakken worden sind.

Nun tritt das All

in eine ruhigere Phase ein. So übereilt und hektisch die ersten Prozesse und Wandlungen auch abgelaufen sind: Jetzt wird es lange dauern, bis die nächste entscheidende Metamorphose beginnt.

In den folgenden Minuten, Tagen, Jahren geschieht nichts Bedeutendes mehr. Das All bläht sich weiter auf, wird kälter und kälter. Nach einem Jahr erreicht es die sechsfache Größe unserer Milchstraße, ist noch zwei Millionen Grad heiß. Nach 100 Jahren sind die Temperaturen auf 200 000 Grad gefallen, ein Jahrtausend später auf 60 000 Grad.



In Teilchenbeschleunigern erzeugen Physiker Zustände wie kurz nach dem Urknall: Sie lassen Teilchen (hier zwei Protonen) mit hoher Geschwindigkeit aufeinanderprallen. Die Partikel zerbersten und wandeln sich in neue Teilchen um, die es auch im frühen Universum gab (farbige Linien). Sie lösen sich allerdings in Sekundenbruchteilen wieder auf

existieren, drohen sie allesamt zu zerfallen. Denn Neutronen sind nicht stabil, zumindest nicht für sich allein.

Das All ist mittlerweile so weit abgekühlt, dass eine der vier Grundkräfte, die Schwache Kernkraft, an ihnen zu zerren beginnt – bis die Neutronen zerspringen und sich in Protonen, Elektronen und Neutrinos verwandeln.

Gut eine Minute nach dem Urknall sind bereits etliche Neutronen zerfallen. Das Universum misst nun zehn Milliarden Kilometer – bereits ein Hundertstel der Milchstraße; die Temperatur ist weiter gefallen: auf eine Milliarde Grad.

Memo: DER URKNALL

Noch ist der Kosmos milchig: eine glühende Nebelwelt, in der die Lichtteilchen andauernd abgelenkt werden, sich nicht ungestört ausbreiten können. Vor allem prallen die Photonen mit den winzigen Elektronen zusammen, die mit hohem Tempo überall herumrasen.

Das aber wird sich bald ändern.

SEIT DEM URKNALL sind mittlerweile mehrere Hunderttausend Jahre vergangen, und nun zeigt die Elektromagnetische Kraft, die negative und positive Ladungen einander anziehen lässt, ihre Wirkung: Manche der negativ geladenen Elektronen beginnen die positiven Protonen zu umschwirren; andere kreiseln um Heliumkerne, die durchs All treiben; wieder andere wirbeln um Lithiumkerne.

Zunächst werden die Elektronen immer wieder aus ihren winzigen Umlaufbahnen gerissen: Denn nicht selten prallen sie mit vorbeiflitzenden Photonen zusammen, verlieren den Kontakt zu den Atomkernen und rasen wieder frei umher. Doch die Entwicklung, die das Universum eingeschlagen hat, ist unaufhaltbar. Denn es dehnt sich beständig weiter aus, die Teilchen büßen an Energie, an Geschwindigkeit ein.

► **Vor 13,7 Milliarden** Jahren entsteht unser Universum aus einem Punkt extremer Hitze, Dichte und Energie.

► **Eine zufällige Schwankung** der Energie sorgt dafür, dass dieser winzige Raum im selben Moment explodiert und sich das All schlagartig ausdehnt.

► **Diese Ausdehnung** führt zu einer Abkühlung, die wiederum eine Metamorphose des Kosmos hervorruft.

► **So verwandelt** sich Energie bereits in der ersten Sekunde in Elementarteilchen wie Elektronen, Protonen und Neutronen.

► **Wenige Minuten** nach dem Urknall entstehen die ersten Atomkerne.

► **380 000 Jahre** später beginnen Elektronen die Atomkerne zu umkreisen: So entstehen Atome, hauptsächlich Wasserstoff und Helium.

► **Nach weiteren** 100 Millionen Jahren haben sich riesige Wolken aus Wasserstoff und Helium gebildet, in denen die ersten Sterne zünden.

Da fortan kaum noch freie Elektronen kreuz und quer durch die Gegend huschen und die Photonen obendrein zu schwach sind, Elektronen aus dem Atomverbund zu schubsen, breitet sich das Licht nun ungehindert im Raum aus. Die Photonen werden nicht

ander – verlieren die Lichtteilchen weiter an Energie, die Strahlung wird also schwächer und schwächer. Deshalb verfärbt sich auch das All: Das blendende Weiß bekommt einen Gelbstich, tönt sich bald orangefarben, geht über ins Rötliche.

Allmählich kippt es ins Karminrot, in düsteres Purpur. Es wird dunkler, bald ist nur noch ein Hauch von Farbe zu erahnen. Dann wird es schwarz in der Welt.

Und immer kälter: Nach zwölf Millionen Jahren sind vom überheißen Urfeuer wohlige 25 Grad geblieben. Knapp zwei Millionen Jahre später herrschen Minusgrade, die Temperatur fällt schließlich auf rund 270 Grad Celsius unter null.

Der einstmalige winzige, schwere, heiße Krümel All hat sich in einen finsternen, eisigen Giganten verwandelt. Und zunächst deutet nichts darauf hin, dass sich das einmal ändern wird.

Doch in den frostigen Tiefen des Alls braut sich Gewaltiges zusammen. Denn die Materieteilchen sind nicht gleichmäßig im Raum verteilt. In manchen Regionen haben sich etwas mehr Atome gesammelt als anderswo. Aufgrund der Schwerkraft ziehen

100 Millionen Jahre nach dem Urknall kommt es in riesigen Gaswolken erneut zu einer **wundersamen Wandlung des Alls**

Als die Temperatur auf 2700 Grad Celsius gesunken ist – das All ist jetzt 380 000 Jahre alt –, kreisen alle Elektronen auf kleinen Orbits um Atomkerne.

Kurz: Die Atome sind entstanden.

Rund 75 Prozent davon machen die leichtesten und am einfachsten gebauten Atome aus, die des Wasserstoffs. Sie bestehen jeweils aus einem Elektron und einem Proton. Fast den gesamten Rest, also ein Viertel, bilden Heliumatome (aufgebaut aus je zwei Elektronen und einem Heliumkern).

Und dann gibt es da noch Spuren von Lithiumatomen, die durch den Raum schweben; sie setzen sich aus je drei Elektronen und einem Lithiumkern zusammen.

mehr von ihren Bahnen abgelenkt, nicht mehr gestreut.

Es ist, als hätten sich in einem hell leuchtenden Nebel die Wassertröpfchen aufgelöst, ein strahlender Schleier sich gelichtet. Und so übt die Bildung der Atome einen gravierenden Effekt auf das Erscheinungsbild des Universums aus: Es wird durchsichtig!

Erstmals könnte man durchs All schauen. Man würde hineinblicken in eine unendliche Leere, erfüllt von weißem Licht. Viel, viel später werden Menschen einen zarten Nachhall dieser frühen Strahlung als Zeugnis aus der Urzeit des Kosmos empfangen (siehe Seite 18).

In den folgenden Jahrtausenden – der Raum driftet immer mehr ausein-

sie sich gegenseitig an und bilden mächtige Gaswolken aus Wasserstoff und Helium.

100 Millionen Jahre nach dem Urknall findet dort der nächste kosmische Zauber statt. In den dunklen Wolken ballt sich das Gas zu massigen Kugeln zusammen. Einige von ihnen werden immer größer und dichter und heißer. Bis es in ihrem Inneren zu einer atomaren Zündung kommt.

Und in der samtenen Schwärze die ersten Sterne zu funkeln beginnen. □

Rainer Harf, 35, ist Redakteur im Team von GEOkompakt. Der Illustrator **Jochen Stuhmann**, 36, wohnt in Hamburg und arbeitet regelmäßig für GEOkompakt – in dieser Ausgabe hat er auch die Entwicklung der ersten Sterne und Galaxien nachgezeichnet (Seite 48).

Jetzt im Handel



Für alle, die die ganze
Welt lieben: Weltreise
leicht gemacht.

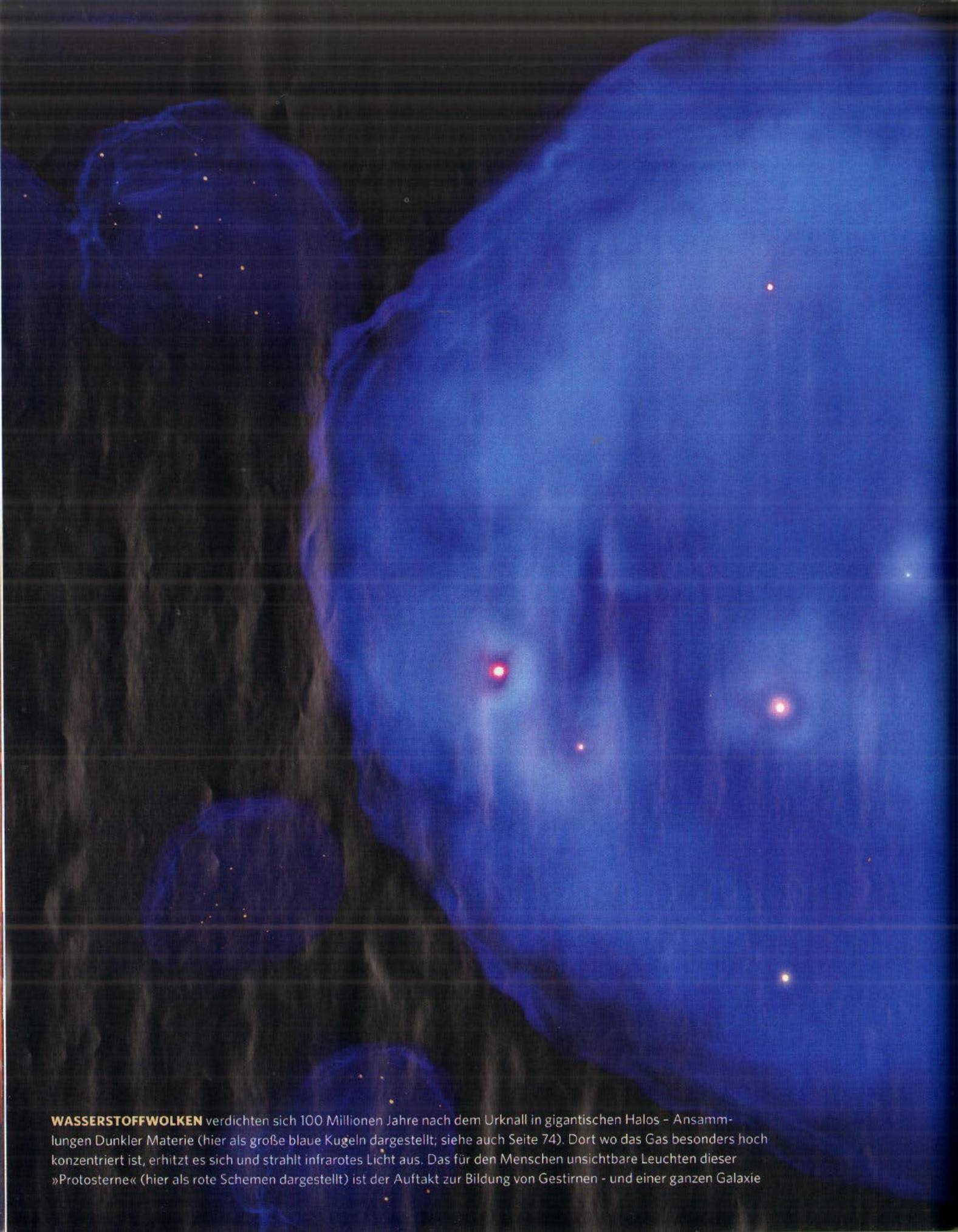


MIT GROSSEM
JUBILÄUMSRÄTSEL

Weltreise zu gewinnen!

www.geo-special.de

Reisen Sie special.



WASSERSTOFFWOLKEN verdichten sich 100 Millionen Jahre nach dem Urknall in gigantischen Halos - Ansammlungen Dunkler Materie (hier als große blaue Kugeln dargestellt; siehe auch Seite 74). Dort wo das Gas besonders hoch konzentriert ist, erhitzt es sich und strahlt infrarotes Licht aus. Das für den Menschen unsichtbare Leuchten dieser »Protosterne« (hier als rote Schemen dargestellt) ist der Auftakt zur Bildung von Gestirnen - und einer ganzen Galaxie

Die ersten Lichter am Firmament

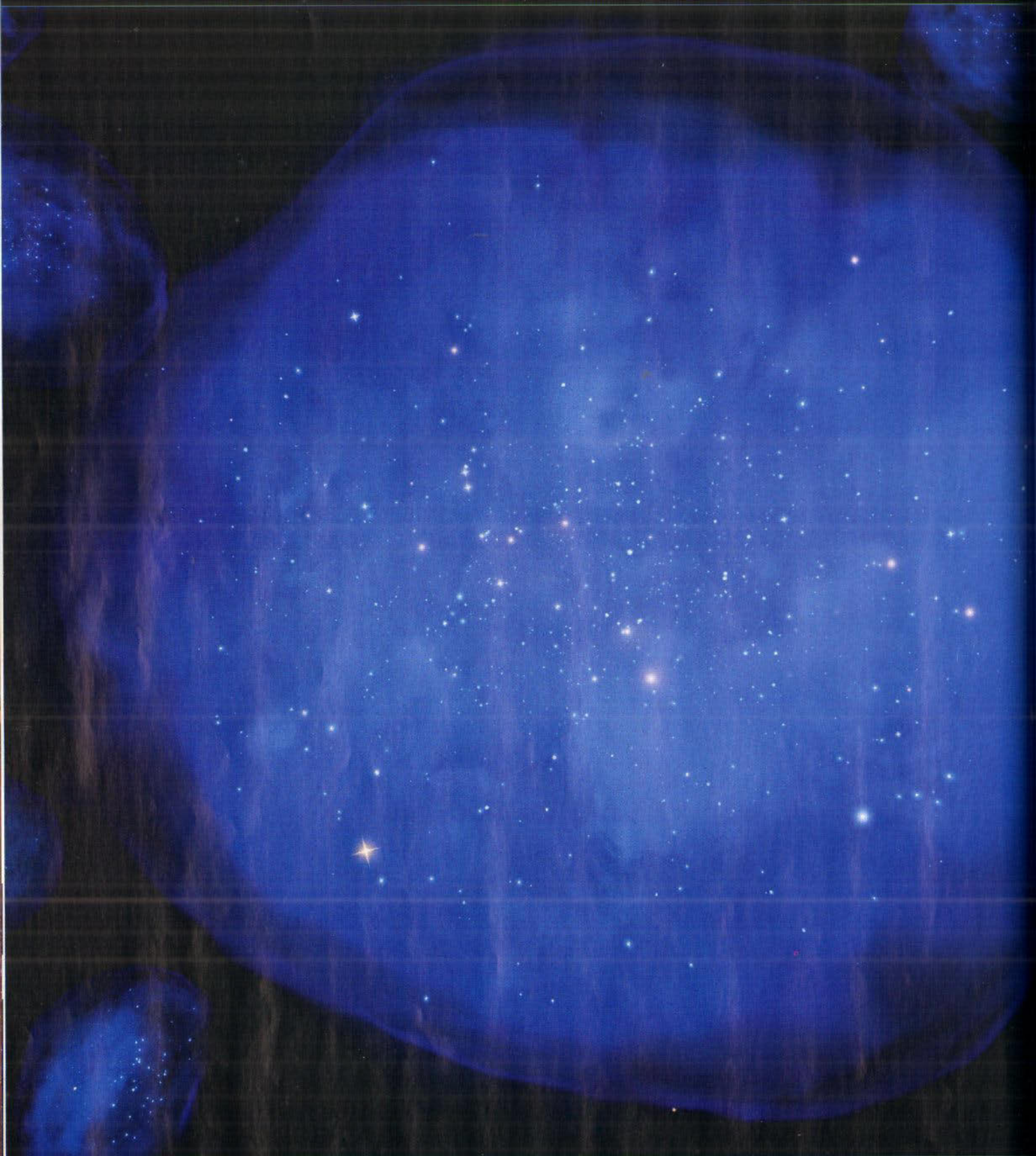
Als 100 Millionen Jahre nach dem Urknall in den Gaswolken des jungen Universums Protosterne aufleuchten, beginnt ein gigantischer Prozess: Immer mehr Gestirne entstehen, und es formen sich strahlende Inseln im All – die ersten Galaxien


Text: Bertram Weiß

Illustrationen: Jochen Stuhmann

Produktion: Torsten Laaker und Rainer Harf

NACH UND NACH verdichtet sich das Gas der Protosterne in dem Halo immer weiter, in ihrem Inneren setzt nun die Kernfusion von Wasserstoff zu Helium ein, und sie geben sichtbares Licht ab. Die - noch chaotische - Galaxie erstrahlt erstmals





Wenn es Nacht wird, öffnet sich am wolkenlosen Firmament die größte Bühne der Welt. Abertausende winziger Lichter erstrahlen. Sie wirken ungeordnet, scheinbar willkürlich verstreut wie glitzernde Sandkörner. Doch in der Fantasie unserer Vorfahren ordneten sich die himmlischen Funken zu kosmischen Wesen – und verwandelten den gestirnten Nachthimmel in ein gewaltiges Welttheater.

In diesem Schauspiel markieren imaginäre Linien, die sich von einem besonders hellen Punkt zu einem anderen spinnen, die Silhouetten kolossaler Figuren: der Sternbilder.

Die Sumerer erdachten um 3000 v. Chr. den „Löwen“ oder den „Skorpion“. Die Griechen bevölkerten das Himmelsgewölbe mit Gestalten aus ihrer Mythologie, etwa „Kentaur“ oder „Andromeda“.

All diese kosmischen Konstellationen halfen den ersten Astronomen, sich im schimmernden Durcheinander am Firmament zu orientieren. Doch den Gelehrten war es ein Rätsel, wieso sich nachts nicht totale Finsternis über die Erde senkt – sondern winzige Leuchtfeuer das Dunkel erhellen.

Heute wissen Forscher: Die meisten der kleinen Lichter sind Sterne – ungeheuer weit entfernte, gleißende Kugeln aus Gas. Es sind riesige Kernfusionsöfen, die bei extremer Hitze Licht in die Tiefen des Alls hinausschleudern.

Doch wann sind die ersten Sterne entstanden? Welchen Gesetzen folgten die Lichtmaschinen? Und wie haben sie sich im Laufe der Jahrmilliarden verändert?

Erst seit wenigen Jahrzehnten vermögen Forscher wissenschaftlich begründete Antworten auf diese Fragen zu geben. Mit komplizierter Mathematik, physikalischen Experimenten und hochauflösenden Teleskopen versuchen sie dem Ursprung der flackernden Lichter am Himmel immer weiter auf die Spur zu kommen. Und auch die geradezu magisch wirkende Geburt der Sterne zu rekonstruieren.

Der Rohstoff, aus dem sich die ersten Sonnen selbst erschaffen, entsteht rund 380 000

Jahre nach dem Urknall. In dieser Zeit hat die ungeheure Hitze des auseinanderrasenden, jungen Universums so weit abgenommen, dass Atomkerne dauerhaft Elektronen einfangen und an sich fesseln können. Stabile Atome wabern nun durchs All: ganz überwiegend Wasserstoff, Helium und Spuren von Lithium (siehe Seite 134).

Doch für den wundersamen Prozess der Sternengeburt, der etwa 100 Jahrmillionen später einsetzen wird, ist eine weitere Zutat nötig. Es ist eine bis heute rätselhafte Substanz, die weitaus häufiger ist als die sichtbare Materie, aber weder zu beobachten noch direkt zu messen ist: die Dunkle Materie (siehe Seite 74).

DIESE MERKWÜRDIGE SUBSTANZ ist – wie auch die sichtbare Materie – nach dem Anbeginn des Universums ungleichmäßig verteilt. Dieses Ungleichgewicht löst einen sich selbst verstärkenden Prozess aus: Regionen mit leichtem Übergewicht an Dunkler Materie ziehen aufgrund ihrer stärkeren Schwerkraftwirkung weitere Dunkle Materie aus der Umgebung an.

Mit der Masse wächst dort auch die Gravitationskraft, und so strömt immer mehr Dunkel-materie zu solchen Orten.

Auf diese Weise sammelt sich die Dunkle Materie (die vermutlich aus bislang unentdeckten Elementarteilchen besteht) allmählich zu mächtigen Blasen, sogenannten Halos.

Und dort, wo sich in diesen Blasen die Dunkle Materie weiter verdichtet, staut sich allmählich auch das Urgas Wasserstoff, durchsetzt von Helium und Lithium, und bildet Gaswolken.

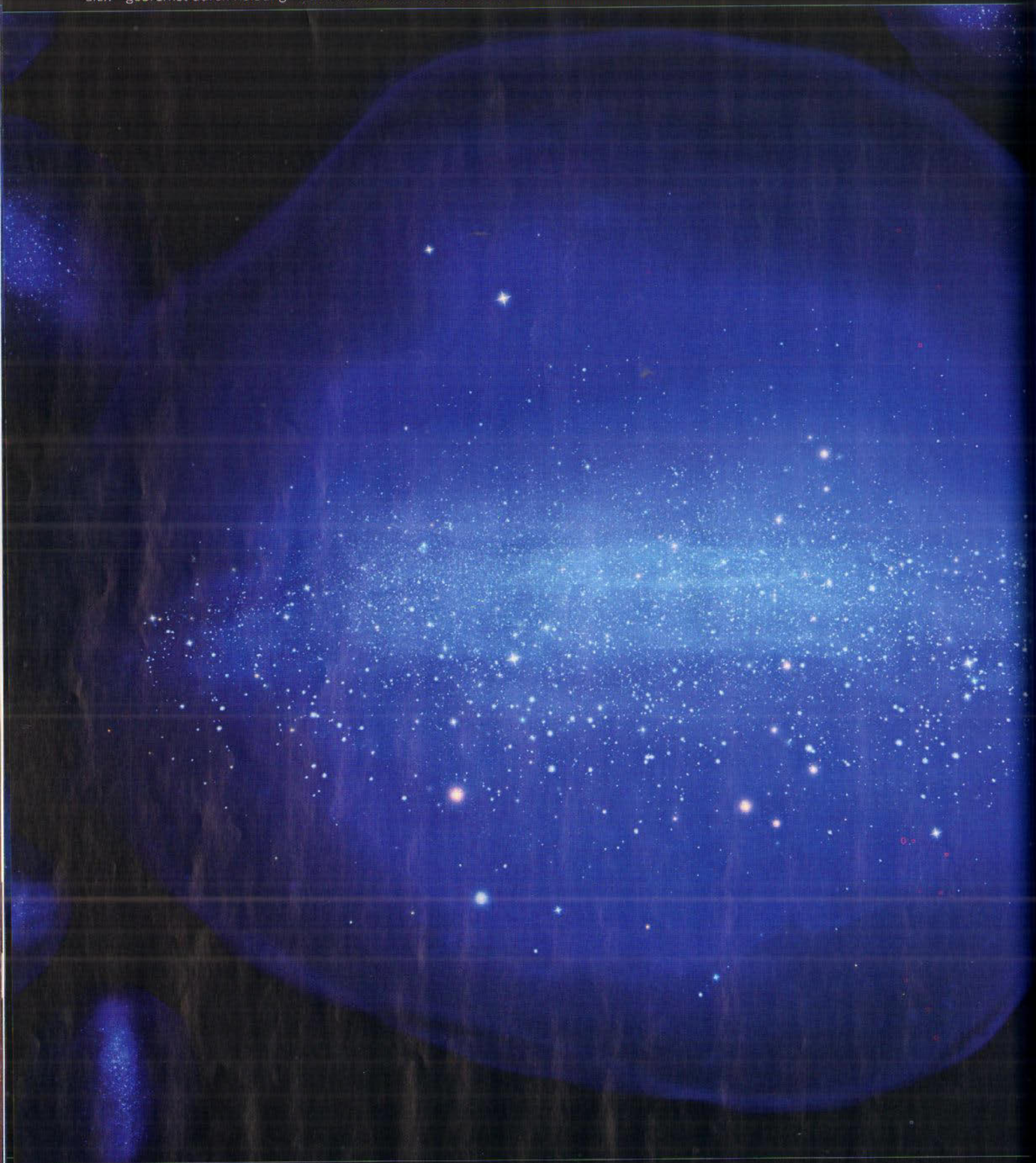
Denn die enorme Schwerkraft, die von diesen Blasen ausgeht, zieht auch die im All verteilten Atome an. Ohne die Dunkle Materie hätte es viel länger gedauert, die „normale“ Materie zu Nebeln zu verdichten – und womöglich gäbe es bis heute keine Sternenansammlungen.

Für das menschliche Auge wären die ersten Gaswolken indes nicht zu erkennen. Denn das All ist in jenem Stadium noch vollkommen dunkel: Kein Licht erhellt das Geschehen; nur für den Menschen unsichtbare Infrarotstrahlen durchleuchten die Finsternis.

Manche der
frühen Sterne sind
**100-mal so
schwer wie unsere
Sonne.**

Und 18-mal
so heiß

500 MILLIONEN JAHRE nach dem Urknall hat sich im Zentrum des Halos mehr und mehr Materie angesammelt: Gas, Staub und Trümmer von bereits erloschenen Sternen. Die bisher auf chaotischen Bahnen kreisenden Sterne ordnen sich – gebremst durch Reibung – nach und nach in einer Scheibe an und rotieren um das Zentrum





Wo die Wasserstoffatome immer näher zusammenrücken, wächst nun auch der Druck.

Das ist ein Grundgesetz der Physik, denn Druck entsteht, wenn Atome sich bewegen und dabei aneinanderstoßen. Er wird umso größer, je häufiger die Teilchen kollidieren, und genau das geschieht, wenn sie enger im Raum konzentriert sind.

Schließlich wird dieser Druck genauso stark wie die Gravitation, nur wirkt er entgegengesetzt. Das führt dazu, dass die Verdichtung des Gases erst einmal stoppt. In der Wolke stoßen die Teilchen nun ständig zusammen. Bei jeder Kollision geben sie etwas Energie ab, die als Strahlung in den Kosmos entweicht.

Die Folge: Die Teilchen verlangsamen ihre Geschwindigkeit, und die Partikelwolke kühlt sich allmählich ab (denn physikalisch betrachtet, ist Wärme ja nichts anderes als die Bewegung von Teilchen).

Je weiter die Temperatur des Gases sinkt, desto stärker nimmt auch dessen Druck ab.

Dadurch aber gewinnt die Schwerkraft wieder überhand.

Die Teilchen im abkühlenden Nebel nähern sich also weiter einander an. Masse ballt sich auf immer kleinerem Raum – und zieht weitere Gasatome aus der Umgebung an.

Doch je näher die kosmische Urmaterie in den Wolken zusammenrückt, desto stärker wächst in ihnen erneut der Druck – und damit ebenfalls die Temperatur (zu einem solchen Prozess kommt es auch, wenn man den Reifen eines Fahrrads aufpumpt: Der Pumpenkolben staucht die Luft zusammen – und das Gas erwärmt sich).

Einen Teil dieser Hitze kann die Materie im Gasnebel in Form von Wärmestrahlung abgeben. So kommt es, dass der heiße Wolkenkern, der sich inmitten des Halos gebildet hat, gewaltige Mengen Energie als Infrarotstrahlung ins All hinausschickt.

Zum ersten Mal beginnt die Materie in dem Nebel zu leuchten – wenn auch noch nicht im sichtbaren Bereich.

Ein „Protostern“ ist geboren.

Im Inneren solcher Sternen-Embryos wirbeln Atome nun so dicht umeinander, dass sich

allmählich ihre physikalischen Eigenschaften verändern: Elektronen, die zuvor die Atomkerne umwandert haben, werden aus ihren Bahnen geschlagen und rasen fortan frei umher.

Dieser Vorgang, die sogenannte Ionisation, verwandelt die Materie in ein „Plasma“.

Es ist gleichsam der vierte Zustand der Materie: Anders als flüssige, feste und gasförmige Stoffe besteht es nicht aus elektrisch neutralen Atomen, sondern aus deren elektrisch geladenen Bausteinen.

Wie in einem Schraubstock wird die Materie durch die Schwerkraft im Inneren des Protosterns immer stärker zusammengepresst, wird ständig heißer, und das bedeutet: Die Teilchen schwirren immer schneller umher.

So kommt schließlich zwischen den einzelnen Atombausteinen eine mächtige physikalische Reaktion in Gang, die noch heute in den meisten Sternen abläuft. Ein Wasserstoffkern (Proton) schießt mit solcher

Kraft auf ein zweites Proton, dass die beiden Teilchen miteinander verschmelzen. Ein Kern „schweren“ Wasserstoffs (Deuterium) entsteht.

Dieser vereinigt sich mit einem weiteren Proton zu einem neuen Element: Helium-3. In einer dritten Stufe verschmelzen zwei Helium-3-Kerne zu Helium-4 und geben dabei wieder zwei Protonen frei. Kurz: Je vier Protonen verwandeln sich in einen Helium-4-Kern.

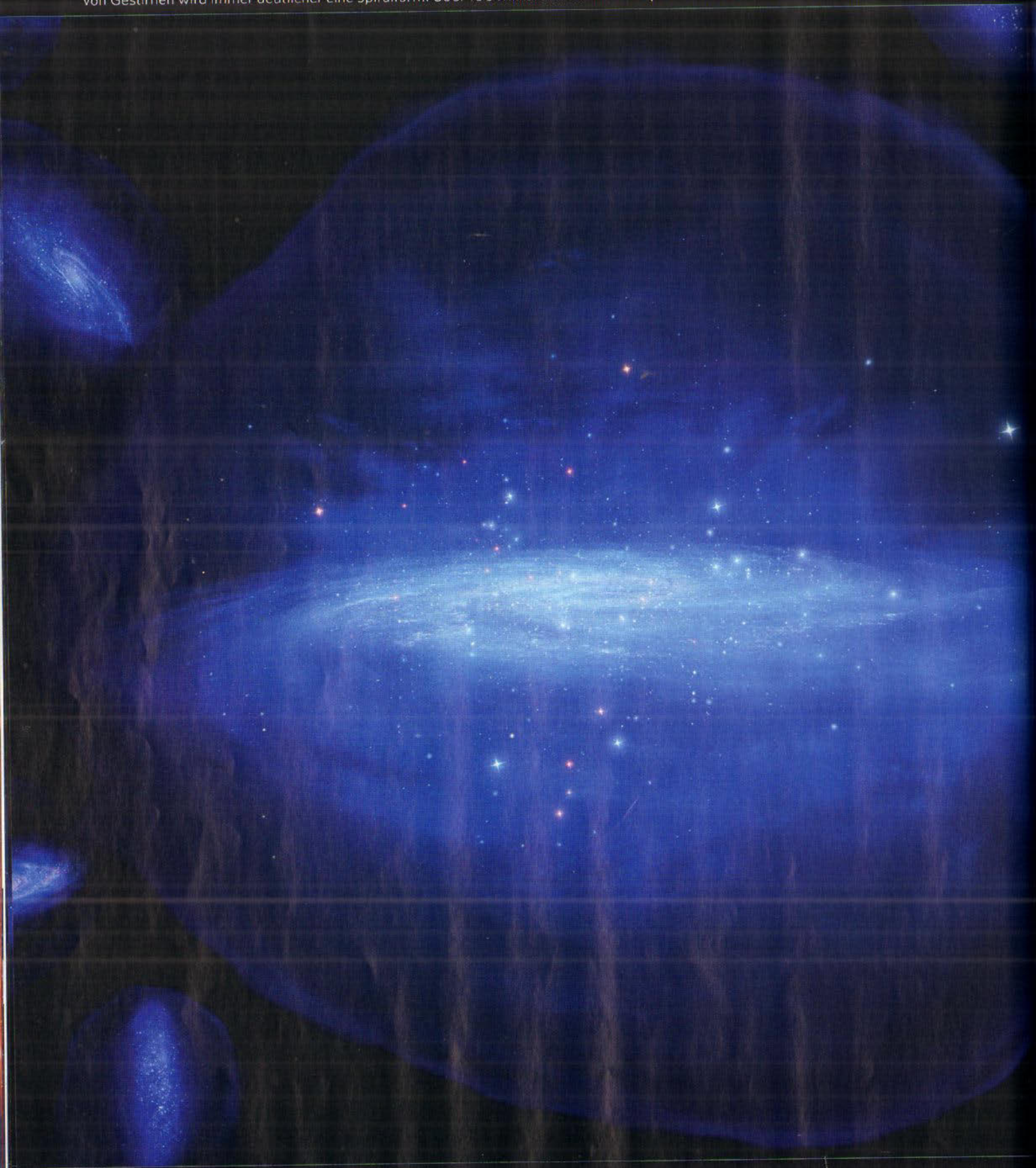
DIESE KERNFUSION setzt im jungen Universum eine verborgene Energie frei: Während sich kurz nach dem Urknall die Energie in Masse verwandelt hat, läuft an den dichtesten und heißesten Stellen des Weltalls nun der umgekehrte Prozess ab: Masse verflüchtigt sich zu Strahlung.

Auch bei einem Lagerfeuer scheint Ähnliches zu geschehen: Das Holz verbrennt, Hitze, Licht und Wärmestrahlung werden abgegeben.

Allerdings gibt es einen wesentlichen Unterschied: Während in den Sternen die Energie aus den Atomkernen stammt, wird beim Feuer nur die chemische gebundene Energie des Holzes freigesetzt. Das geschieht, indem

Als die
**ersten Leucht-
feuer aus-
gebrannt sind,**
detonieren
sie in mächtigen
Explosionen

VIELLEICHT 600 MILLIONEN JAHRE nach dem Urknall bilden sich die Strukturen der ersten Galaxien; aus einer formlosen Ansammlung von Gestirnen wird immer deutlicher eine Spiralform. Über 100 Milliarden Sternensysteme sind so bis heute entstanden





die im Holz gebundenen Atome sich mit Sauerstoff aus der Luft zu gasförmigem Kohlendioxid und Wasser verbinden.

Bei der Kernfusion dagegen wird ein Teil der Atomkern-Masse in Energie verwandelt.

Denn jeder neu geschaffene Heliumkern ist etwas weniger massereich als die vier Protonen zusammen, aus denen er entstanden ist. Die entschwundene Masse, rund 0,7 Prozent, verstrahlt bei der Kernfusion in reine Energie.

Das ist die Quelle, aus der ein Stern sein Lebensfeuer speist (siehe Seite 142).

Inmitten des zusammengeballten Gases glimmt nun erstmals sichtbares Licht auf und schimmert durch den dicken Nebel.

Anfangs ist es nur ein fahler Schein. Doch nach und nach nimmt die Zahl der einzelnen Kernfusionen dramatisch zu – und der heiße Wolkenkern verwandelt sich in einen gleißenden Ball: eine Sonne.

Rund 100 Millionen Jahre nach dem Urknall erhellt zum ersten Mal ein kosmisches Leuchfeuer das Universum.

In rascher Folge entstehen in den Halos nun immer weitere Sterne. Vermutlich sind sie gigantisch, manche 100-mal schwerer als durchschnittlich Sterne heute. Denn in der Anfangszeit des Universums ist viel mehr Masse nötig, damit eine Gaswolke unter ihrer eigenen Schwerkraft zu einer Sonne kollabieren kann.

Der Grund dafür: Es existieren noch keine schweren Elemente wie Kohlenstoff und Sauerstoff. In heutigen Gaswolken dienen die hingegen als eine Art Kühlmittel. Aufgrund ihrer komplexeren Struktur können sie besser als Wasserstoff und Helium die Energie einer Teilchenkollision in der Wolke aufnehmen und als Licht abstrahlen: Temperatur und Gasdruck heutiger Wolken sinken so auf tiefere Werte als in den Urwolken.

Daraus folgt, dass im heutigen Universum bereits eine viel geringere Schwerkraft ausreicht, also weniger Masse, damit sich die Partikel einer Wolke gegen den inneren Druck zu einer Sonne verdichten können.

In den frühesten nuklearen Feuern sind Druck und Temperatur besonders extrem: An der Oberfläche dieser Sterne herrschen

100 000 Grad Celsius, knapp 18-mal mehr als auf unserer Sonne.

Mit ihrer gewaltigen Energie und Masse beginnen die Kolosse, allmählich die Materie zu verändern. Das hat Folgen, und die werden das Aussehen und die Zusammensetzung weiterer Sternengenerationen und damit letztlich die Strukturen im gesamten Universum beeinflussen.

ÜBERALL IM KOSMOS blitzen jetzt Sternensichter auf. Zugleich erbrüten die Titanen in ihrem Inneren neue Stoffe.

Denn da der Druck in der Tiefe des Sterns immer gewaltiger wird, kommen dort weitere Kernfusionen in Gang: Helium verbrennt zu Kohlenstoff, und aus dessen Kernen werden durch Fusion nacheinander weitere chemische Elemente, die bis dahin im Universum nicht existierten – etwa Sauerstoff, Magnesium, Silizium und schließlich Eisen, das sich im Kern des Sterns ansammelt (siehe Seite 134).

All dies geschieht im kosmischen Maßstab rasend schnell. Denn da die Riesen ihre Energie regelrecht verschleudern, existieren sie nur für wenige Millionen Jahre. Und die Sterne bleiben nur so lange im Gleichgewicht, wie der Fusionsofen in ihrem Inneren läuft: Der Druck der Kernfusionen hindert sie daran, unter dem Gewicht der eigenen Masse zu kollabieren.

Ist der Brennstoff aber verbraucht, kommt es zu einem dramatischen Ende. Weil die Fusion von Eisen zu noch schwereren Elementen keine weitere Energie mehr freisetzt, sondern im Gegenteil welche verbraucht, verliert der Stern seine Energiequelle.

Nun hat er der enormen Schwerkraft, mit der seine Masse ihn zusammenpresst,

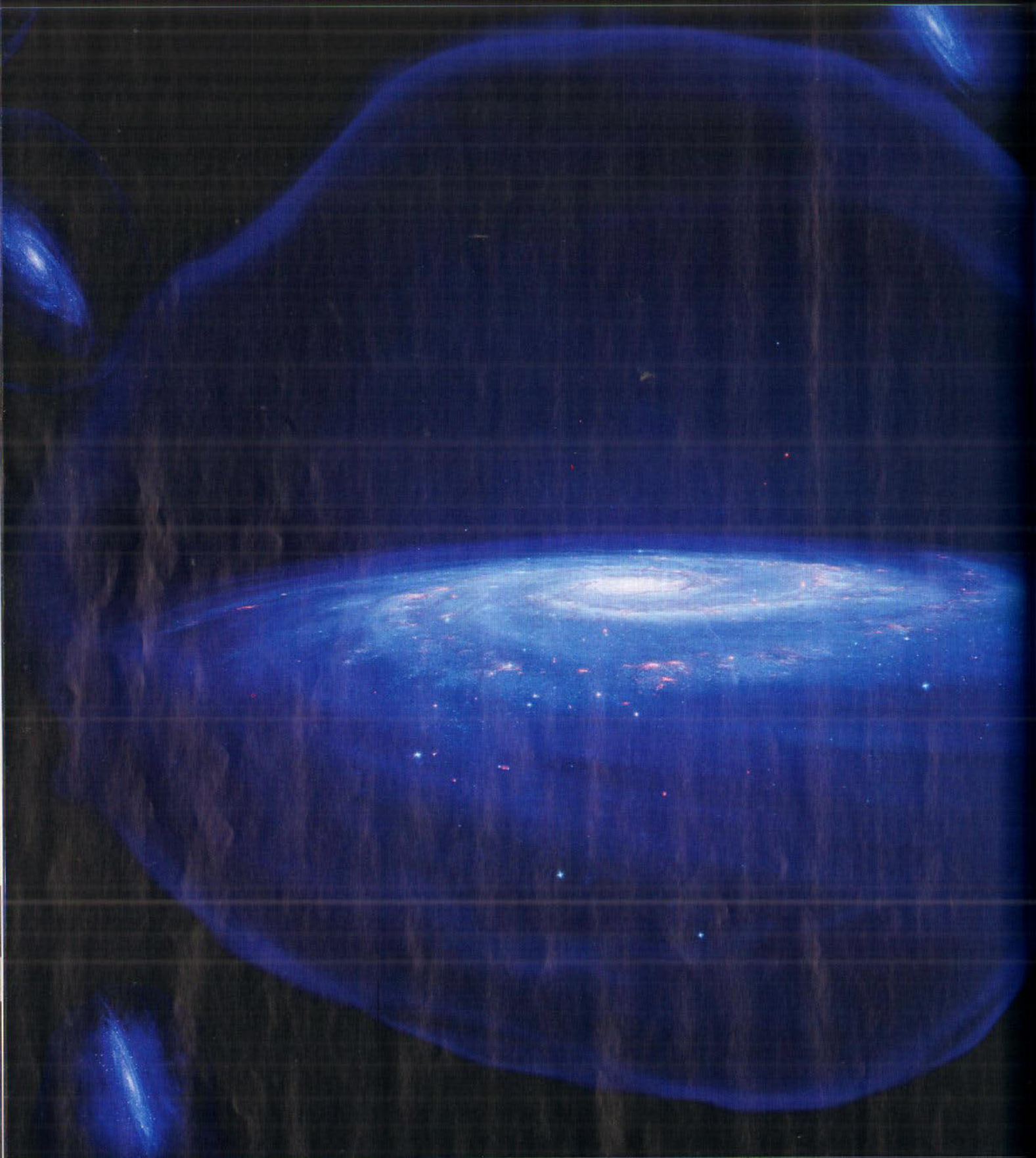
nichts mehr entgegenzusetzen – und bricht in Sekundenbruchteilen in sich zusammen.

Dieser abrupte Kollaps erhöht den Druck im Zentrum so gewaltig, dass die Materie dort zu ungeheurer Dichte zusammengequetscht wird: zu einer festen Masse von Neutronen (siehe Seite 112).

An diesem harten Neutronenkern kommt es zu einem Rückprall, der die Hülle des Sterns in einer titanischen Explosion zerreißt: einer Supernova.

In Sekunden-
bruchteilen **kolla-
bieren die
Ursterne**, explodie-
ren und schleu-
dern massenhaft
Materie ins All

NACH WEITEREN MILLIONEN JAHREN hat sich diese Spiralgalaxie, umgeben von der Blase des Halos (hier stark verkleinert), vollständig ausgebildet. Die meisten Sterne kreisen in der Scheibe um das Zentrum. Sämtliche Materie wird sich nach und nach in der Ebene der Scheibe vereinen





Jede dieser Detonationen setzt eine gigantische Menge Energie frei, die den größten Teil der Sternenmaterie weit in den Weltraum hinausschleudert. So reichern sich im Universum allmählich neben den Urgasen weitere Elemente an.

Zusätzlich hat die Druckwelle des sterbenden Sterns besonders schwere Elemente zusammengebacken, etwa Silber oder Palladium. Noch massereichere Elemente, etwa Blei oder Gold, formen sich vermutlich erst, wenn zwei Sternenleichen (Neutronensterne) kollidieren.

Die Existenz der neuen Elemente hat weitreichende Folgen. Durch ihre kühlende Wirkung in den Gaswolken genügen nun auch kleinere Zusammenballungen von Materie, damit Sterne entflammen.

Ihre Zahl nimmt bereits rund 500 Millionen Jahre nach dem Urknall rasant zu. Doch diese solaren Glutöfen haben neue Eigenschaften.

Ihre gewaltigen Vorgänger haben ihren Brennstoff ja regelrecht verschwendet – wie Kerzen, die an beiden Enden brennen. Die folgende Sternengeneration aber hat zu meist weniger Masse und brennt deshalb sparsamer.

Die kleineren Sterne glühen weniger heiß, sind wesentlich stabiler und werden so alt, dass zwischen ihnen die Gravitation ihre Wirkung entfalten kann – sich die Sterne also über wesentlich längere Zeiträume gegenseitig anziehen können.

Und so kommt es, dass die Schwerkraft die kosmischen Lichter allmählich zu Gruppen zusammenreibt. Und schließlich zu Galaxien.

Es sind leuchtende Sternen-Archipele im sonst nachtschwarzen All, geformt aus Abermillionen einzelnen Sonnen. Aus ursprünglich diffusen Wasserstoffwolken sind komplexe Gebilde geworden.

ANFANGS IST EINE GALAXIE nichts weiter als eine formlose Ballung kosmischer Gase, in denen vereinzelt die ersten Sterne wie schimmernde Juwelen aufleuchten (siehe Seite 50). Doch je mehr Zeit verstreicht, desto mehr gewinnt eine solche Brutstätte an Struktur.

Der Vorgang ist vielleicht vergleichbar mit dem Wachsen einer menschlichen Siedlung: Je mehr Häuser gebaut werden, je unterschiedlichere Typen es gibt und je mehr sie sich um ein Zentrum gruppieren, desto eher spricht man von einer Stadt.

Im Weltall ist es die Schwerkraft, die Ordnung und Form schafft. Sie zieht die Sterne sowohl zueinander hin als auch zur Mitte der galaktischen Wolke. Dabei stürzen die Sonnen nicht direkt ins Schwerkraftzentrum der entstehenden Galaxie, sondern nähern sich ihr auf Spiralbahnen.

Die Galaxien
verteilen sich –
beeinflusst
von der **Dunklen**
Materie – wie
auf unsichtbaren
Schnüren

Durch die Summe der einzelnen Drehbewegungen beginnt das ganze Gebilde nun wie ein Wirbel zu rotieren. Auf immer engeren Bahnen umrunden die Sterne und die Gasnebel das Zentrum, bis sich für jedes Objekt ein Gleichgewicht zwischen eigener Fliehkraft und gravitativer Anziehung durch das Zentrum einstellt – wie bei Planeten, die um eine

Sonne kreisen. Und: Sie finden sich allmählich alle auf einer Ebene ein, sodass der Archipel aus der Ferne wie eine schimmernde Scheibe aussieht.

In manchen Bereichen ist das Gas in diesen wirbelnden Gebilden besonders dicht, sodass dort vermehrt sehr helle Sterne entstehen. Diese Zonen winden sich wie lange Spiralarme um den galaktischen Kern – und verleihen den leuchtenden Inseln ihren wissenschaftlichen Namen: „Spiralgalaxie“.

Im Laufe der Jahrmilliarden entstehen aber auch andere Formen: Zum einen bilden sich kleine, unregelmäßige Haufen, die keine typische Kontur annehmen – die „irregulären Galaxien“. Zum anderen formen sich mitunter nahezu kugelige Sternsysteme, die „elliptischen Galaxien“. Sie entstehen zuweilen auch dort, wo zwei Spiralgalaxien miteinander kollidieren und dabei verschmelzen.

Denn so wie winzige Atombausteine, Staubkörner und sogar Sterne sich gegenseitig anziehen, so driften auch ganze Galaxien seit ihrer Entstehung aufeinander zu, durchdringen und vereinen sich.

Die Galaxien wiederum lagern sich zu großräumigen Strukturen noch höherer Ordnung zusammen. Die Sterneninseln sind nicht etwa

gleichmäßig über das Weltall verteilt, sondern konzentrieren sich in Haufen, die sich zu riesigen Gebilden aneinanderreihen.

Um bei dem Vergleich mit den Städten zu bleiben: Galaxien sind wie die Städte eines Staates, die sich in Ballungsräumen konzentrieren und durch kleinere Ortschaften miteinander verbunden sind, während in den ländlichen Regionen Leere herrscht.

Die einzelnen Staaten mit ihren Städten wiederum ergeben in ihrer Summe die Siedlungsstrukturen der gesamten Erde.

Es ist nicht die Schwerkraftwirkung der sichtbaren Materie allein, die die Bewegungen und die Verteilung der Galaxien im Raum lenkt. Wie schon bei der Geburt der Sterne übernimmt auch hier die Dunkle Materie im Verborgenen die Regie: Die Halos des unsichtbaren Stoffes versammeln sich im Universum zu sogenannten Filamenten. Die sind entstanden, weil sich die Materie infolge des Urknalls unregelmäßig über das All verteilte. Wie riesige Fäden durchziehen die Filamente den Raum und verwirren sich zu einem gigantischen Netzwerk.

Gasnebel, Staubschwaden, Sterne – kurz: Die gesamte sichtbare Materie verfängt sich gleichsam in diesem unsichtbaren Geflecht.

Deshalb reihen sich die meisten Galaxien im Kosmos wie strahlende Perlen auf einem Netz aus unsichtbaren Schnüren aneinander. In den Zwischenräumen öffnet sich dunkle Weite, in der kaum Materie vorhanden ist.

Wo sich die galaktischen Fäden kreuzen, treibt die Schwerkraft besonders viele Galaxien zusammen: Es entstehen sogenannte Superhaufen. Das Ausmaß dieser Sternsysteme ist wahrhaft gigantisch. Allein der Durchmesser des „Virgo-Superhaufens“ mit mehreren Tausend Galaxien beträgt schätzungsweise 150 Millionen Lichtjahre. Am Rand dieser riesigen Ansammlung von Sternen haben sich mehr als

40 Galaxien zur sogenannten Lokalen Gruppe vereint.

Darin befindet sich eine Spiralgalaxie, die wie Milliarden andere im Universum aussieht und doch etwas Besonderes ist: unsere Milchstraße.

Auch sie entsteht vermutlich bereits wenige Hundert Millionen Jahre nach dem Urknall. Im Laufe der Jahrtausenden wachsen und sterben dort Sterne millionenfach. Aus der „Asche“ jeder verloschenen Lichtmaschine werden neue geboren, wieder und wieder.

EINE DAVON, rund 26 000 Lichtjahre vom Zentrum entfernt im „Orion-Arm“, einer Abzweigung von einem der Spiralarme, ist unsere Sonne. Dieser stellare Ofen zündet gut neun Milliarden Jahre nach dem Urknall und rast

von der Sonne seine Bahn und schimmert bläulich im solaren Licht: die Erde.

Von ihr aus schauen Menschen seit Jahrtausenden hinaus in den schimmernden Silberstreif der Milchstraße; zu den Sternen, die sich vor ihren Augen scheinbar zu Figuren gruppieren.

So wie Archäologen, die im Erdbreich nach Spuren alter Kulturen suchen, durchmustern Astronomen die Sternbilder nach Relikten jener Zeit, in der erstmals Licht im Universum erstrahlte.

Doch das Firmament wird nicht für immer so hell wie heute leuchten, denn früher entstanden im Universum viel mehr Sterne als heutzutage – vor neun Milliarden Jahren zum Beispiel rund zehnmal so viele wie heute.

Der Grund: Immer weniger Gas verteilt sich in einem immer größeren Raum im Universum. Denn im Laufe der Jahrtausenden haben die kosmischen Öfen ständig Materie in Energie verbrannt – und sich somit ihres Brennstoffs beraubt. Zudem ist ein Teil der einst freien Materie inzwischen in anderen Himmelskörpern gespeichert, in Planeten, Neutronensternen, Schwarzen Löchern.

Noch dramatischer könnte sich die „Dunkle Energie“ auf die zukünftige Sternentstehung auswirken: Die erst 1998 entdeckte mysteriöse Kraft sorgt dafür, dass sich das

Universum mit wachsender Geschwindigkeit aufbläht (siehe Seite 74). Das intergalaktische Gas verliert sich deshalb in den Weiten des Kosmos und gelangt immer seltener in die Nähe von Galaxien, um dort neue Sterne zu formen.

So werden die Sterne nach und nach ausglühen und die Lichter am Himmel nach und nach verlöschen.

Bis in einer fernen Zukunft schließlich wieder eisige Schwärze herrscht. □

Memo: **STERNE UND GALAXIEN**

► **100 Millionen Jahre** nach dem Urknall formen sich Protosterne, als sich Wasserstoff – angezogen von der im All verteilten Dunklen Materie – in Wolken verdichtet, erhitzt und dabei zu leuchten beginnt.

► **Die Schwerkraft** im Inneren jener Urgestirne nimmt rasch so weit zu, dass sich der Wasserstoff durch die Fusion seiner Kerne zu Helium wandelt und Energie frei wird: Bald entstehen die ersten Sterne und strahlen sichtbares Licht ab.

► **Immer neue Gestirne** bilden sich und vergehen. Nach und nach ordnen sie sich zu Haufen, Galaxien formen sich. Viele nehmen die Gestalt von spiralförmigen Scheiben an.

seither mit rund 800 000 km/h um das Zentrum der Milchstraße.

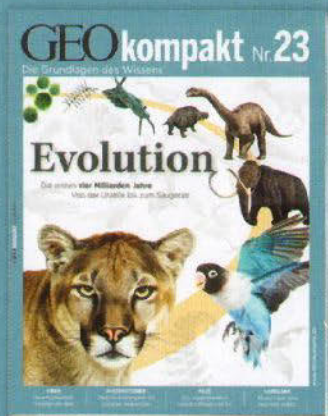
Bald nach der Geburt unseres Zentralgestirns vollzieht sich in seiner unmittelbaren Nähe ein weiterer erstaunlicher Prozess: Mikropartikel, die unsere Sonne sich nicht einverleibt hat, kollidieren im leeren Raum, bleiben aneinander haften, formen erst zentimeterlange Bröckchen, dann kleine Steine und später Felsen.

Schließlich wachsen sie zu festen, anfangs noch glutheißen Gebilden heran. Doch allmählich kühlt die Oberfläche dieser „Protoplaneten“ ab – und sie verwandeln sich in echte Planeten.

Einer von ihnen zieht in ungefähr 150 Millionen Kilometer Entfernung

Bertram Weiß, 28, ist Wissenschaftsjournalist in Hamburg.

Literaturempfehlungen: Ralf Klessen, „Sternentstehung – Vom Urknall bis zur Geburt der Sonne“, Spektrum Akademischer Verlag; eine anschauliche Beschreibung der Entwicklung der Gestirne, Helmut Hetzner, „Kosmologische Strukturbildung: Von der Quantenfluktuation zur Galaxie“, Spektrum Akademischer Verlag; eine Einführung in den Aufbau des Universums.



Alle
Titel auch
mit DVD
erhältlich

Man kann nie genug wissen. GEO kompakt.

Jetzt im gut sortierten Buch- und Zeitschriftenhandel. Falls Sie eines dieser Hefte verpasst haben, bieten sich jetzt folgende Möglichkeiten: Sie können zum Zeitschriftenhändler Ihres Vertrauens gehen und danach fragen. Sie können sich direkt an GEO wenden – Tel. 01805/861 8000* oder Fax 01805/861 8002*. Sie können im Internet unter www.geoshop.de nachschauen. Oder Sie können sich auf das neue Heft freuen.

Weitere Produkte im Internet unter www.geoshop.de

GEO kompakt

VORSTOSS IN DIE **UNENDLICHKEIT**

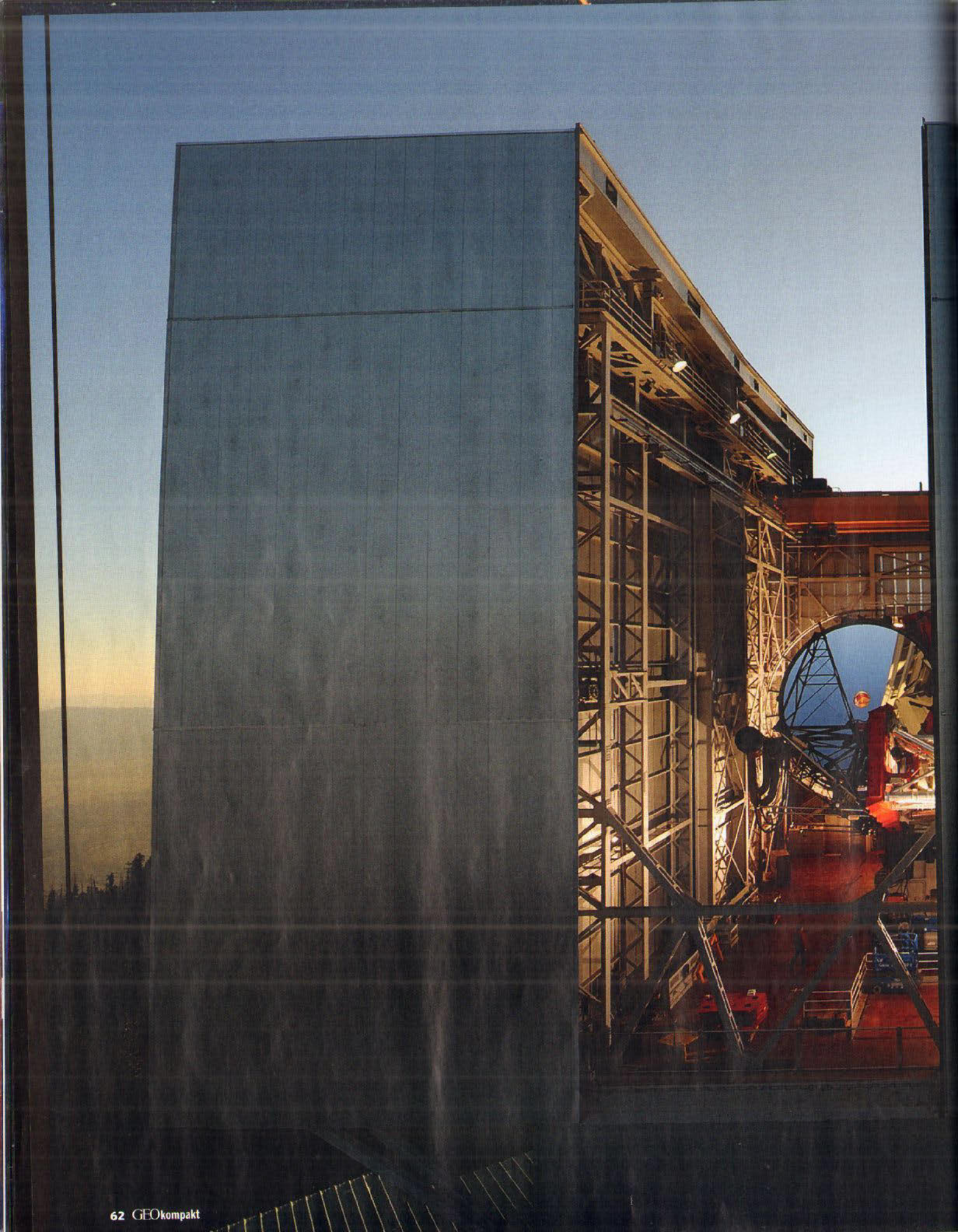
Um die Geheimnisse des Kosmos zu ergründen, haben Forscher riesige Instrumente konstruiert: Mit Teleskopen und Sonden dringen sie in die Tiefen des Raums vor, in gigantischen Maschinen simulieren sie den Urknall, und mit hochsensiblen Detektoren suchen sie nach elementarsten Partikeln

Text: Sebastian Witte



Very Large Telescope, Chile

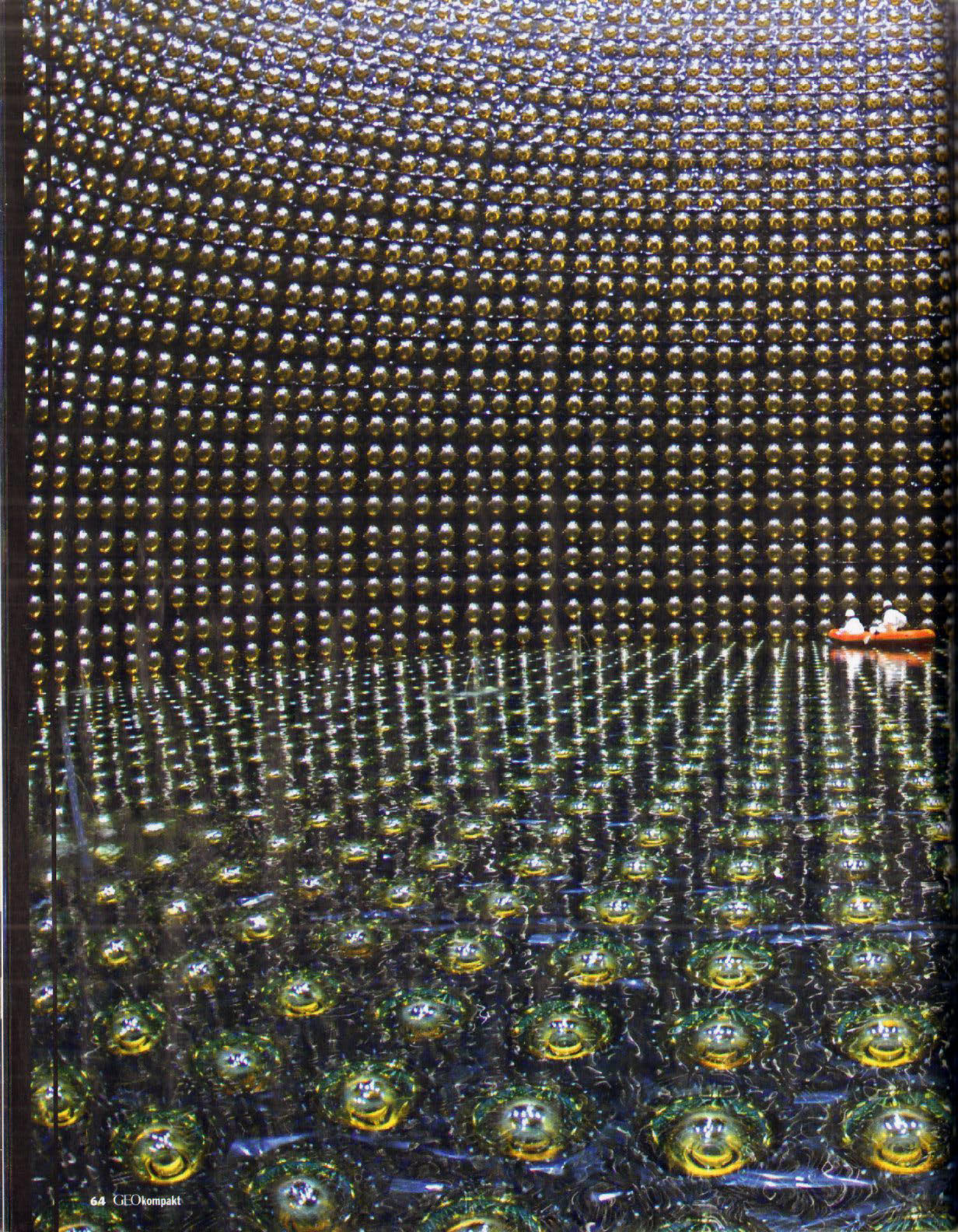
Mit einem Laserstrahl peilt eines dieser vier großen Teleskope die Atmosphäre an: um Turbulenzen zu detektieren, die zu Bildverzerrungen führen würden. Schaltet man die Späher zusammen, vervielfältigt sich deren Auflösungskraft – theoretisch wäre sie gut genug, einen Astronauten auf dem Mond zu erkennen

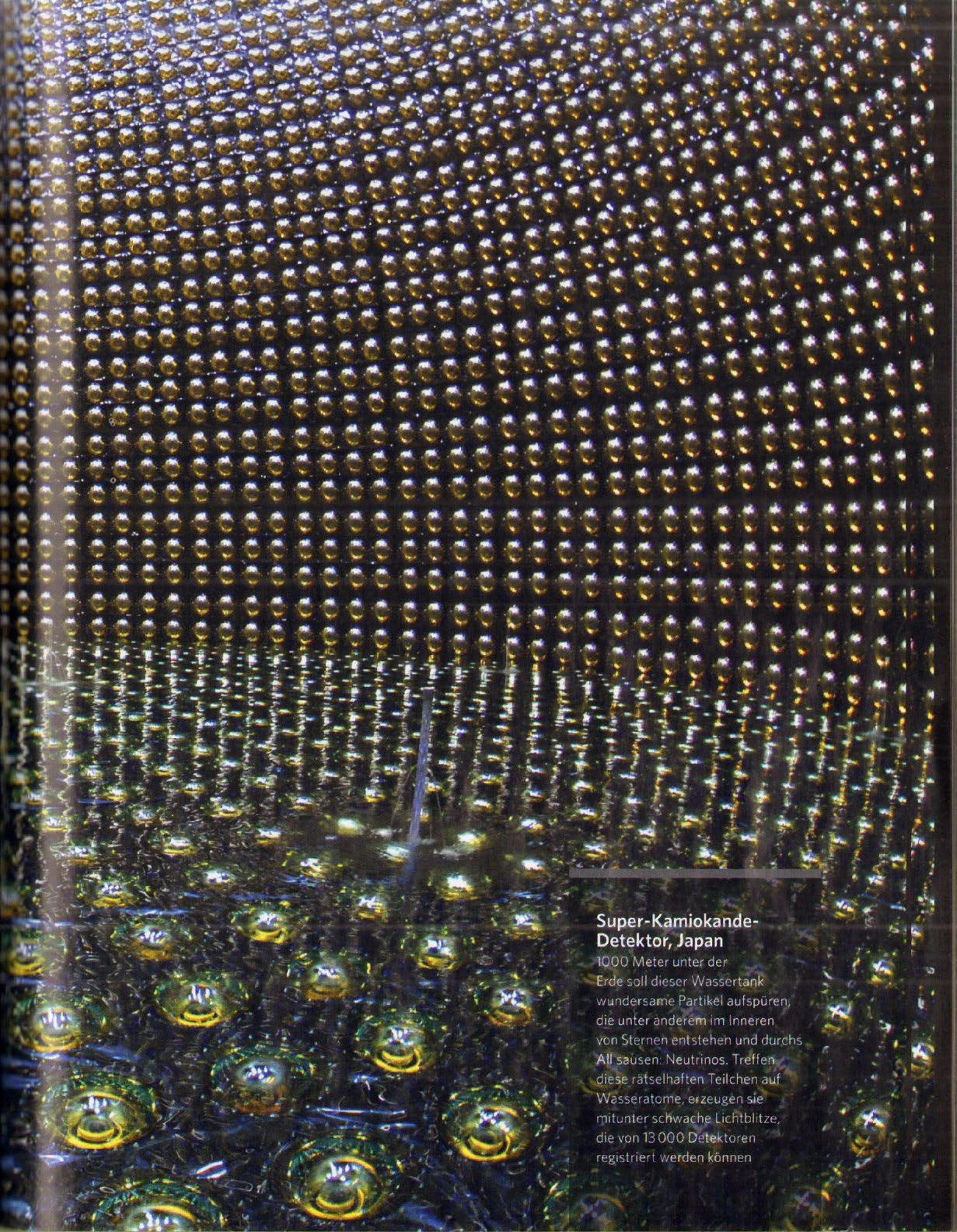




Large Binocular Telescope, Arizona

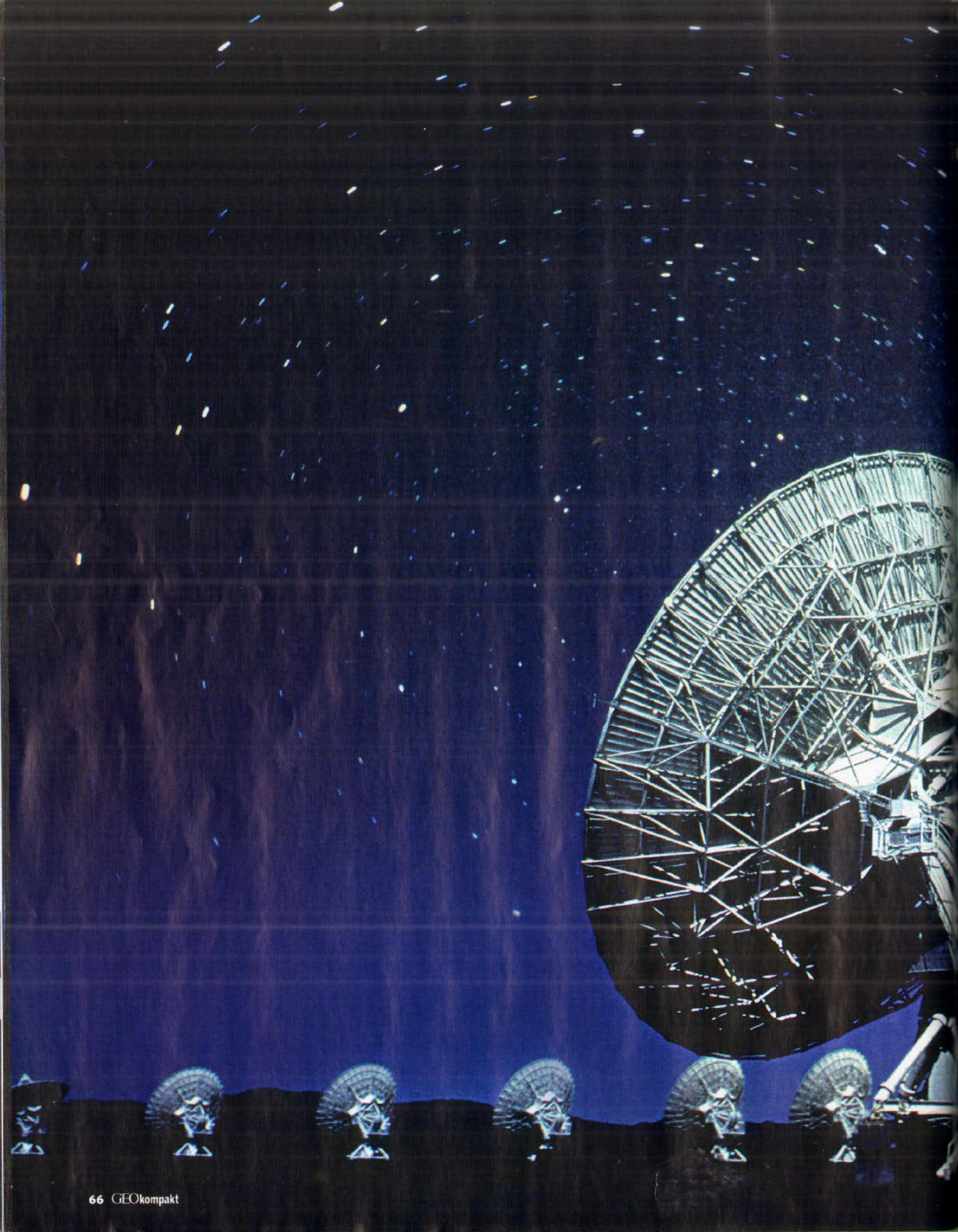
Dieser 2005 in Betrieb
genommene Späher ist der
größte Feldstecher der Welt.
Er besteht aus zwei mitein-
ander verbundenen Spiegeln,
die einen Durchmesser
von je 8,4 Metern haben und
zusammen mehr als 30
Tonnen wiegen. Gemeinsam
nehmen sie zehnmal schärfere
Bilder auf als das Weltraum-
teleskop »Hubble«





Super-Kamiokande- Detektor, Japan

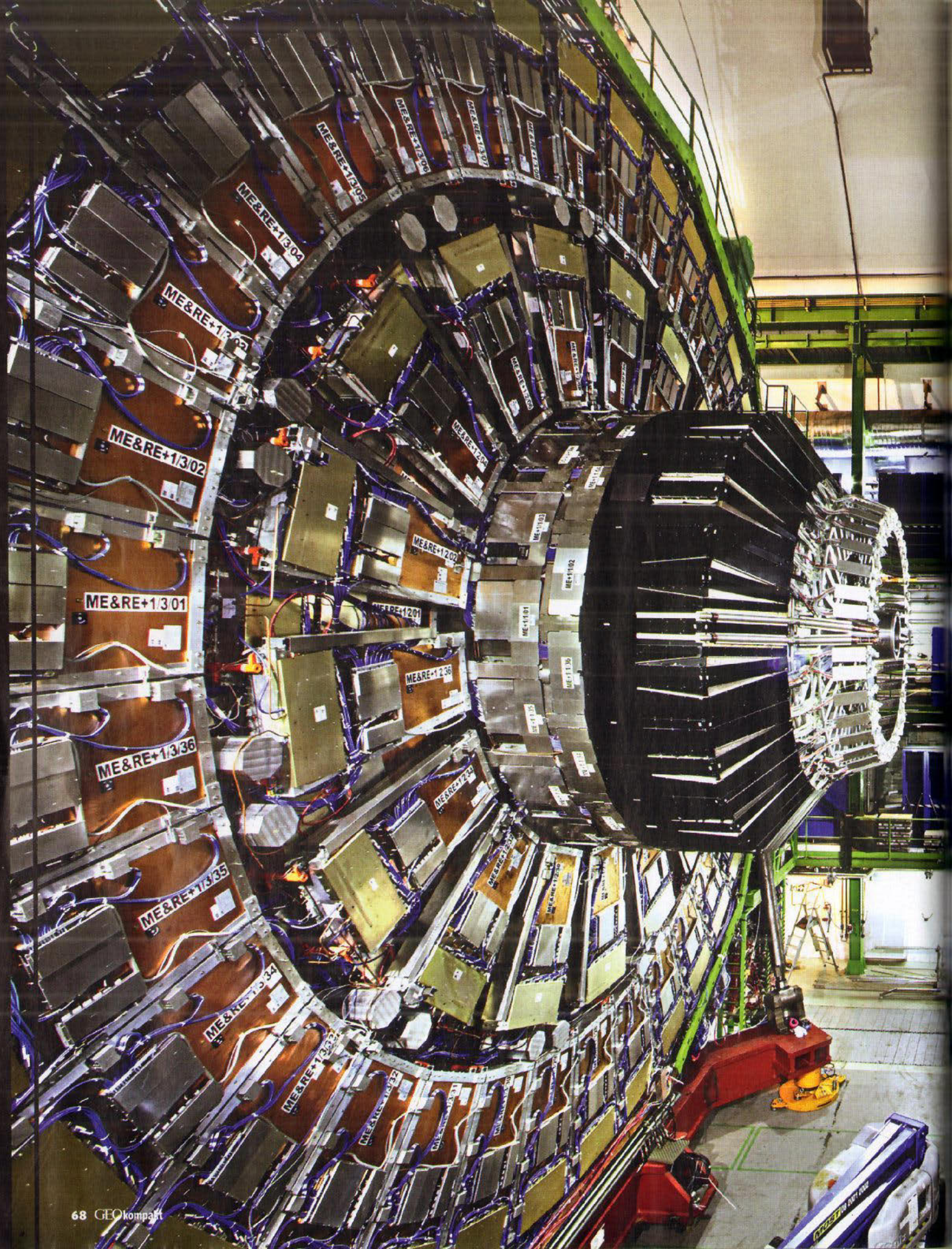
1000 Meter unter der Erde soll dieser Wassertank wundersame Partikel aufspüren, die unter anderem im Inneren von Sternen entstehen und durchs All sausen: Neutrinos. Treffen diese rätselhaften Teilchen auf Wasseratome, erzeugen sie mitunter schwache Lichtblitze, die von 13 000 Detektoren registriert werden können





Very Large Array, New Mexico

Um auch schwache Radiosignale aus den Tiefen des Alls einzufangen, haben Forscher in New Mexico 27 verschiebbare Antennenschüsseln zu einem Riesendetektor zusammengeschaltet. Damit erreicht die Anlage die Auflösungskraft eines Teleskops von 36 Kilometer Durchmesser



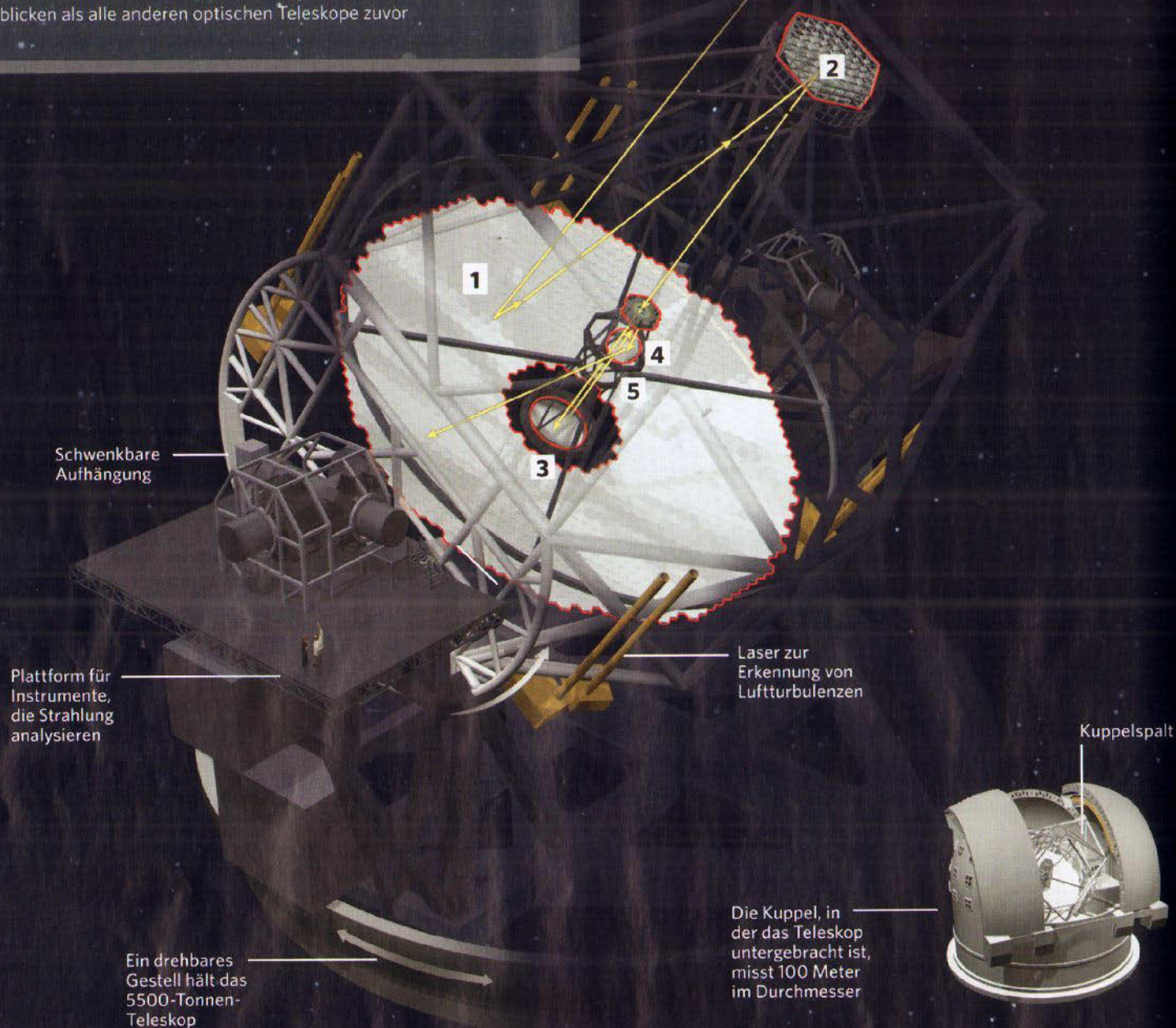


Teilchendetektor »CMS«, Schweiz

Wenig wirken die Techniker vor diesem über 15 Meter hohen Partikeldetektor am Forschungszentrum CERN bei Genf (hier die Bauphase). Die Apparatur ist Teil eines 27 Kilometer langen Rings, in dem bei der Kollision von Materieteilchen Bedingungen wie kurz nach dem Urknall erzeugt werden

Der größte aller Himmelsspäher

Mit einem Spiegeldurchmesser von 39,3 Metern wird das voraussichtlich 2019 installierte Extremely Large Telescope der Europäischen Südsternwarte in Chile deutlich schärfer ins All blicken als alle anderen optischen Teleskope zuvor



ZUKÜNFTIGE GROSSTELESKOPe

● — Durchmesser heutiger Großspiegel
8 bis 10 Meter

Name

Standort

Größe des Hauptspiegels

Voraussichtliche Fertigstellung

Large Synoptic Survey

Cerro Pachón, Chile

8,4 Meter

2020

Giant Magellan

Las Campanas, Chile

Sieben 8,4-Meter-Spiegel

2016

Thirty Meter

Hawaii

30 Meter

2018

1 Der Hauptspiegel bündelt Sternenlicht und wirft es auf einen kleineren Spiegel zurück

2 Dieser lenkt das Licht auf einen noch kleineren, in den Hauptspiegel eingelassenen Reflektor

3 Von dort erreicht die Strahlung einen speziellen Korrekturspiegel in der Mitte des Geräts

4 Mit ihm werden Bildverzerrungen kompensiert, die durch die Atmosphäre entstehen

5 Ein weiterer Spiegel gleicht von Böen verursachte Unschärfen aus und lenkt das Licht auf Instrumente



Extremely Large
Chile
39,3 Meter
2019

Seit jeher suchen die Menschen am Nachthimmel nach Anhaltspunkten für eine Deutung ihrer Welt. Doch Jahrtausende lang stand ihnen dabei nur die eigene Sehkraft zur Verfügung – und so ließen sich mit bloßem Auge, und nur bei völliger Dunkelheit, gerade einmal rund 6000 hell strahlende Sterne erspähen.

Das änderte sich erst, als im Jahr 1608 der Niederländer Hans Lipperhey das Prinzip des Teleskops entdeckte: Der Brillenmacher erkannte, dass sich das Abbild entfernter Gegenstände vergrößert, wenn man zwei verschiedene optische Linsen in bestimmtem Abstand miteinander kombiniert.

Ein Jahr später begann sich der Mathematiker und Astronom Galileo Galilei für die neue Technik zu interessieren – und aus der niederländischen Erfindung wurde ein Instrument der Wissenschaft: Galilei optimierte das Gerät und richtete es als einer der ersten Menschen auf das nächtliche Firmament.

Dadurch eröffnete sich ihm eine überwältigend neue Welt. Der an der Natur höchst interessierte Italiener entdeckte Berge und Täler auf dem Mond, erkannte die Sichelform der Venus, erspähte als Erster die vier größten Trabanten des Jupiter. So wie das kurz zuvor entwickelte Mikroskop die Welt im Kleinen erschloss, erweiterte das Teleskop nun den Blick ins Universum – und begründete damit die Ära der modernen Astronomie.

Fortan versuchten Himmelsforscher, immer tiefer ins All zu blicken und dabei besser und schärfer zu sehen. Dazu mussten sie vor allem größere Teleskope bauen: Denn von dem Durchmesser der Linse hängt zum einen das Auflösungsvermögen eines Fernrohrs ab – also die Fähigkeit, entfernte Objekte konturenscharf abzubilden –, zum anderen sein Vermögen, möglichst viel Licht einzusammeln, um auch schwach leuchtende Objekte aufzuspüren.

Im 17. Jahrhundert vermochten die Optiker jedoch nur Linsen von minderer Qualität zu schleifen. Mit ihnen war es

unmöglich, alle Lichtstrahlen gleichermaßen zu bündeln, was dazu führte, dass die Abbilder der Gestirne verschwommen erschienen. Zudem spalteten sie das Licht in seine Farben auf; das Ergebnis waren störende Farbringe.

Aus dieser Schwierigkeit heraus entstand ein gänzlich neuer Instrumententyp, das Spiegelteleskop. 1668 fertigte der englische Physiker Issac Newton eines der ersten einsatzfähigen Geräte dieser Art: Im Inneren seines röhrenförmigen Apparats bündelte ein gekrümmter Spiegel das einfallende Licht und warf es zurück auf einen kleineren Spiegel, der es an ein seitlich angebrachtes Guckloch lenkte.

Das Prinzip war genial: Denn anders als die Linse spaltet ein Spiegel die Lichtstrahlen nicht auf. Zwar gelang es ab Mitte des 18. Jahrhunderts, die Farbstörungen der Linsenteleskope mit Korrekturgläsern zu unterdrücken – doch der Siegeszug der Spiegeltechnik war in den folgenden Jahrhunderten nicht mehr aufzuhalten.

1918 errichteten Astronomen auf dem Mount Wilson in Südkalifornien ein Teleskop mit einem Hauptspiegel von zweieinhalb Meter im Durchmesser, das theoretisch in der Lage war, noch aus 4000 Kilometer Entfernung eine brennende Kerze zu erkennen.

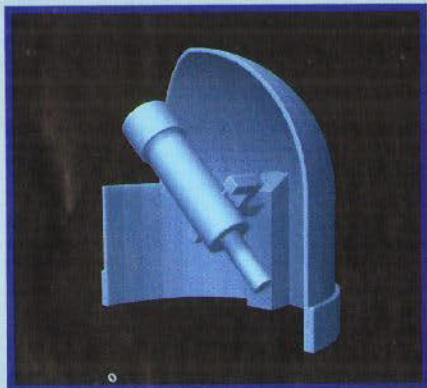
Gut 15 Jahre später erweiterten sich die Methoden der Astronomie erneut – und das so fundamental wie seit Galilei nicht mehr. Mit einer 30 Meter langen, drehbaren Antennenanlage fing der 26-jährige US-Ingenieur Karl Jansky Radiowellen ein, deren Ursprung in der Milchstraße liegt.

Damit stieß er ein völlig neues Fenster ins Universum auf. Denn die Radiowellen gehören zwar – wie das sichtbare Licht auch – zu den elektromagnetischen Wellen (siehe Seite 138), doch haben sie eine millionenfach größere Wellenlänge und liefern daher Informationen über ganz andere Himmelsphänomene.

Wenige Jahre später fanden Forscher heraus, dass Sterne noch weitere, für uns unsichtbare Signale aussenden, etwa Infrarot-, Ultraviolett-, Röntgen- und Gammastrahlen. Die meisten

SAMMLER VON PHOTONEN

Optische Teleskope fangen Licht ein – und damit Daten von fernen Gestirnen



Linse oder Spiegel konzentrieren im Teleskop die Strahlen und lenken sie auf eine Kamera

Optische Teleskope sind die ältesten und am weitesten verbreiteten Instrumente zur Erkundung des Himmels. Bei ihnen wird das von den Sternen ausgesandte sichtbare Licht durch einen Spiegel oder eine Linse gebündelt und auf Fotokameras gelenkt oder zu einem Spektrographen. Dieser zerlegt das Licht in einzelne Farben und erlaubt es, zusätzliche Informationen über einen Himmelskörper zu gewinnen.

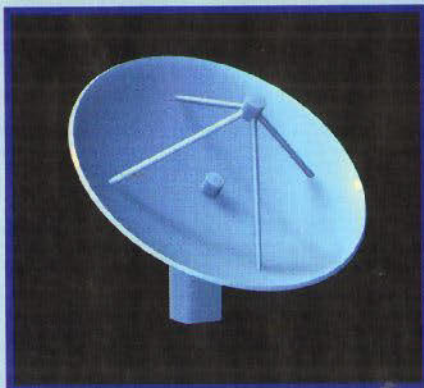
Die Leistungsfähigkeit von Teleskopen hängt von zwei Größen ab: Zum einen entscheidet die *Fläche* des Hauptspiegels darüber, ob auch sehr schwach leuchtende Objekte beobachtet werden können (Lichtsammelvermögen). Zum anderen bestimmt der *Durchmesser* des Spiegels, welche Details unter besten Bedingungen zu erkennen sind (Auflösungsvermögen).

Moderne Teleskope besitzen einen großen Hauptspiegel, der hochpräzise geschliffen und mit einer dünnen reflektierenden Schicht bedampft ist. Neuere Spiegel sind aus mehreren kleinen Elementen zusammengesetzt.

Mithilfe elektronisch gesteuerter, biegsamer Spiegel lässt sich die Luftunruhe korrigieren, die Sterne zum Flimmern bringt und ein verwaschenes Bild erzeugt. Deshalb sind inzwischen von der Erde schärfere Bilder möglich als mit dem Hubble-Weltraumteleskop.

REFLEKTOR FÜR RADIOWELLEN

Die langen elektromagnetischen Wellen benötigen riesige Auffangschüsseln



Beim Radioteleskop reflektiert ein Metallgitter die Wellen auf den Empfänger (Mitte)

Viele Himmelsphänomene lassen sich nicht im Bereich des sichtbaren Lichts beobachten, weil sie auf anderen Wellenlängen Informationen aussenden. Radiowellen etwa erlauben es, die Verteilung des wichtigsten Elements im Weltall zu bestimmen – des Wasserstoffs: Er gibt Strahlung mit einer charakteristischen Wellenlänge von 21 Zentimetern ab. Ultraviolette Strahlen verraten die Existenz junger, heißer Sterne. Kosmische Katastrophen wie Supernovae oder die Entstehung Schwarzer Löcher zeigen sich im Röntgen- und Gammabereich.

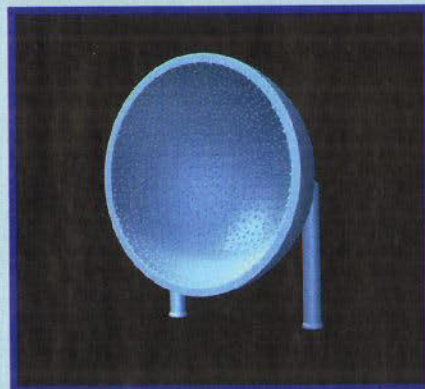
Und Infrarotteleskope gestatten einen Blick auf das Zentrum unserer Milchstraße, das im Bereich des sichtbaren Lichts durch Staubpartikel verhüllt ist.

Manche Strahlen sind von der Erde aus leicht zu empfangen, etwa Radiowellen. Infrarotstrahlung dagegen wird durch Wolken absorbiert und ist daher nur in hoch gelegenen, wolkenarmen Gebieten zu beobachten. Von der Atmosphäre gänzlich abgefangen werden kurzweilige UV-Strahlen sowie Röntgen- und Gammastrahlen. Sie lassen sich allein mit Satellitenteleskopen registrieren.

Besonders ausladend sind die Radioteleskope: Da Radiowellen extrem lang sind, braucht man für eine gute Auflösung mächtige Metallschüsseln: Die derzeit größte hat 305 Meter Durchmesser.

DETEKTOR DER GEISTERTEILCHEN

Mächtige Wassertanks erfassen den Aufprall von Neutrinos als Lichtblitze



Messinstrumente im Tank registrieren, wenn Neutrinos gegen Wassermoleküle prallen

Neutrinos sind exotische Teilchen, die erst 1956 nachgewiesen wurden und äußerst selten mit normaler Materie reagieren. Deshalb sind die extrem leichten Partikel schwer nachzuweisen.

Bislang sind sie nur aus zwei punktförmigen Quellen außerhalb der Erde bekannt: der Sonne und einer Supernova. Der Theorie nach entstehen Neutrinos jedoch bei einer Vielzahl kosmischer Ereignisse, etwa bei der Verschmelzung zweier Neutronensterne. Vermutlich gibt es sie aber auch als Relikte aus der Anfangszeit des Universums. So erwarten Forscher, Neutrinos als Überreste des Neutronenzerfalls während der Frühphase des Kosmos nachzuweisen.

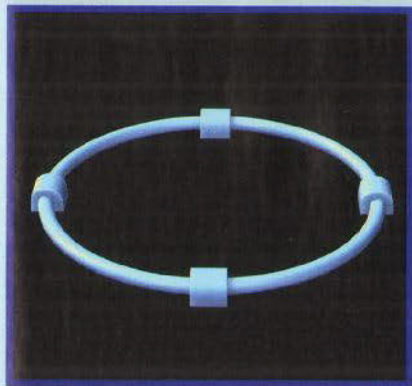
Um Neutrinos aus den Tiefen des Alls zu beobachten, ist es nötig, sie gegen störende Quellen abzuschirmen. Neutrinodetektoren sind daher meist in Bergmassiven, im Eis der Antarktis oder auf dem Meeresgrund installiert.

Zwar reagieren Neutrinos extrem selten mit Materie, doch wenn sie es tun und etwa an ein Wassermolekül stoßen, entstehen mitunter Blitze, die von den Instrumenten des Detektors erfasst werden.

Je größer die Menge des Materials, desto mehr solcher seltenen Kollisionen können registriert werden. Daher bestehen die Detektoren im Berginneren oft aus gewaltigen Wassertanks.

SIMULATOR DES URKNALLS

Im Beschleuniger werden Teilchen fast auf Lichtgeschwindigkeit gebracht



Atomkerne kollidieren mit hoher Energie – es entstehen neue Teilchen, wie beim Urknall

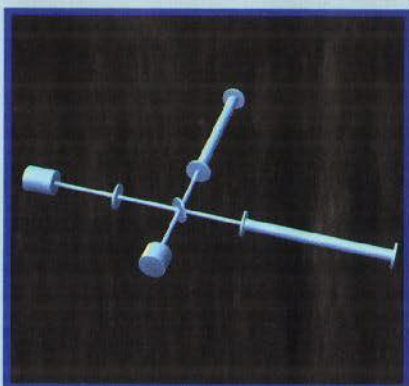
Um herauszufinden, was direkt nach dem Urknall geschah, welche exotischen Teilchen damals existierten, versuchen Physiker, die Bedingungen jener Welt nachzuahmen. Das geschieht in den kreisförmigen, luftleeren Röhren von Teilchenbeschleunigern. Dort werden Atomkerne mithilfe starker Magnetfelder fast bis auf Lichtgeschwindigkeit beschleunigt.

Prallen zwei Kerne aufeinander, summiert sich ihre Energie zu einem gleißenden Feuerball, in dem Bedingungen wie etwa eine Millionstel Sekunde nach dem Urknall herrschen. Es entsteht ein buntes Durcheinander aus Hunderten von Partikeln, die wiederum in etliche weitere Teilchen zerfallen.

Um neue, noch unbekannte Partikel aufzuspüren, müssen die Geschwindigkeiten und Bahnen aller Teilchen nach einer Kollision möglichst genau bestimmt werden. Dies geschieht in Detektoren, die so groß wie Mehrfamilienhäuser sind. Aufwendige Computerauswertungen rekonstruieren die Eigenschaften aller Teilchen – etwa ihre Ladung und Masse – und lassen erkennen, ob sich bisher unbeobachtete darunter befinden. Auf diese Weise hoffen die Forscher, eines Tages unter anderem auf das mysteriöse Higgs-Teilchen zu stoßen (siehe Seite 132).

FALLE FÜR SCHWERKRAFTWELLEN

Ein Detektor für Gravitationswellen reagiert auf winzige Raumverbiegungen



Laserstrahlen in zwei kilometerlangen Röhren messen Abstände in Atomkerngröße

Nach der Allgemeinen Relativitätstheorie verursachen bestimmte Bewegungen von Körpern Veränderungen im Raum, die sich als Wellen ausbreiten. Solche „Gravitationswellen“ – bis heute nur indirekt nachgewiesen – könnten einen Blick auf in kleinem Raum extrem konzentrierte Massen erlauben, so auch auf den Urknall.

Schwerkraftwellen führen zu einer Streckung und Stauchung des Raumes: Ein Ring, durch den eine Gravitationswelle läuft, würde abwechselnd von oben und von den Seiten zusammengedrückt.

Leider ist diese Änderung extrem klein: Die stärksten erwarteten Signale – etwa wenn zwei Schwarze Löcher miteinander verschmelzen – würden die Strecke Berlin–München lediglich um den Durchmesser eines Protons ändern.

Die Detektoren sehen häufig aus wie ein liegendes L und bestehen aus zwei bis zu 4000 Meter langen Armen mit Vakuumröhren. Läuft nun eine Gravitationswelle senkrecht durch das L, wird jeweils ein Schenkel gestreckt und der andere gestaucht. Die Schenkellängen werden mithilfe von Laserlicht gemessen. So offenbaren sich kleinste Längenänderungen – und damit die Gravitationswellen. Die Empfindlichkeit der Anlagen reicht allerdings noch nicht aus, um die Wellen zu detektieren. Tobias Hofbaur

dieser Wellen vermögen jedoch die Erdatmosphäre nicht zu passieren: Um sie zu detektieren, mussten die Astronomen Instrumente in den Weltraum schicken.

Heute funken mehrere Dutzend Beobachtungssatelliten Daten zur Erde, darunter das 1990 gestartete „Hubble“-Weltraumteleskop (siehe Seite 118).

Den im Orbit kreisenden Spähern kommt zugute, dass sie nicht unter jenen Bildverzerrungen leiden, die durch die irdische Atmosphäre verursacht werden. Genau diese Störungen setzten den erdgebundenen Teleskopen lange Zeit unüberwindliche Grenzen. Erst seit einigen Jahren vermögen computergestützte Korrekturverfahren den Effekt zu kompensieren, sodass nun auch die Geräte am Boden gestochen klare Bilder erzeugen.

Mit einem weiteren Kunstgriff, der Interferometrie, haben die Astronomen ihre Sicht ins All weiter geschärft: Dazu führen sie die von mehreren nebeneinanderstehenden Teleskopen eingefangenen Informationen zusammen und überlagern sie zu einem einzigen Bild. So vergrößert sich das Auflösungsvermögen der Instrumente um ein Vielfaches, denn die gekoppelten Teleskope verhalten sich wie die Teilstücke eines einzigen Rieseninstruments.

Seit bekannt ist, dass viele Prozesse im All von den Gesetzen des Mikrokosmos gesteuert werden, versuchen Astrophysiker aber auch, die Vorgänge im Allerkleinsten zu entschlüsseln.

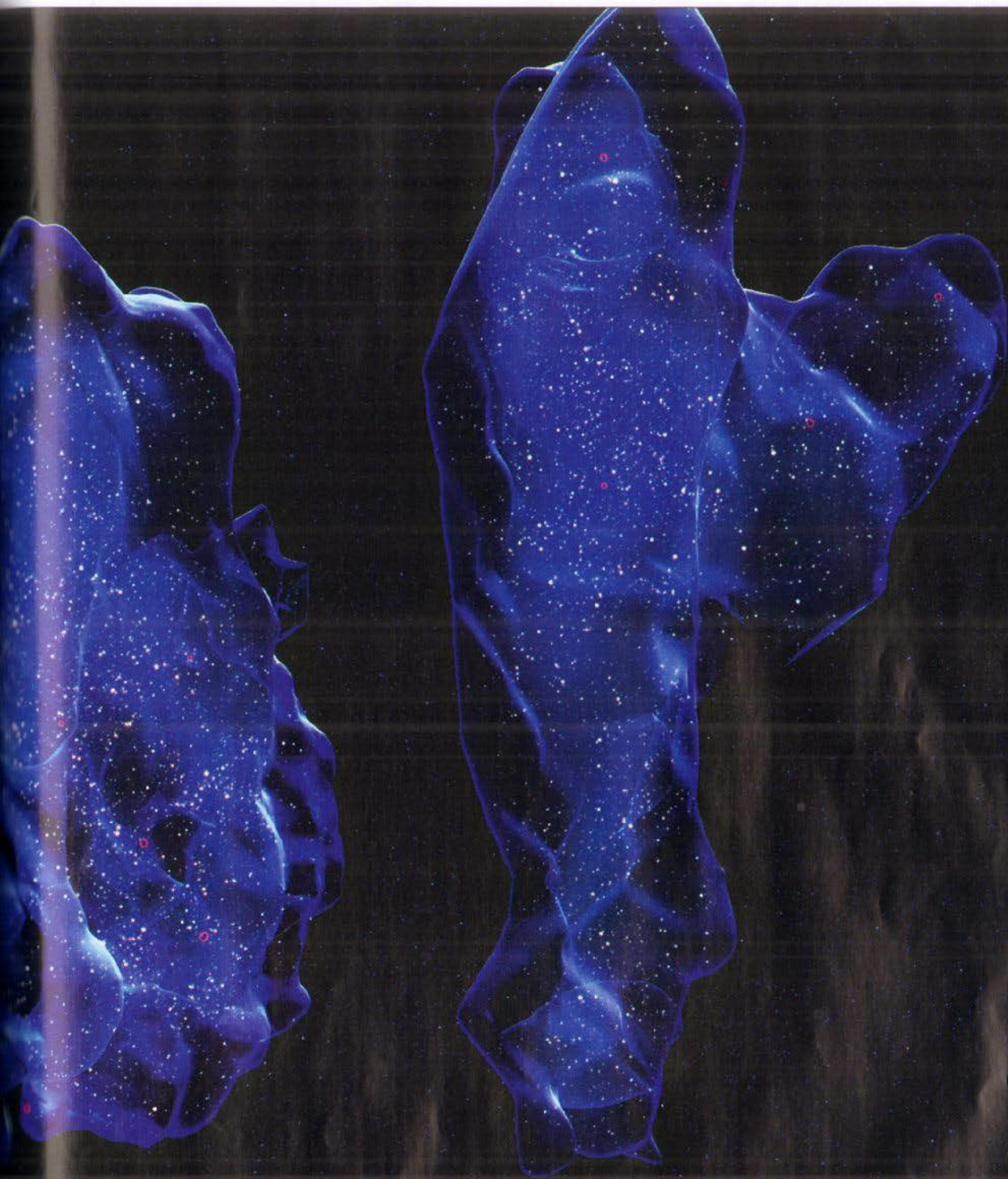
Dazu haben die Forscher weltweit etliche monströse, ringförmige Röhren gebaut, etwa im CERN bei Genf, in denen sie Atomkerne mit nahezu Lichtgeschwindigkeit aufeinanderprallen lassen. Bei den Kollisionen entstehen mitunter völlig neue, bisher unbekannte Elementarpartikel.

Manche dieser Teilchen sollen für einige der rätselhaftesten Phänomene im Universum verantwortlich sein, etwa die Dunkle Materie (siehe Seite 74).

Schlägt die Suche nach ihnen fehl, müssten die Forscher allerdings ganz von vorn anfangen – und ihre Theorien über das All neu formulieren. □

Diese Illustration zeigt die Verteilung der Dunklen Materie für einen etwa sieben Milliarden Lichtjahre großen Ausschnitt des Alls. Zwar kann niemand den rätselhaften Stoff direkt sehen. Doch weil seine Schwerkraft das Licht von Galaxien ablenkt (helle Punkte), lässt sich berechnen, wo die Substanz am häufigsten vorkommt

Das **Rätsel** der zwei mächtigsten **Kräfte** im All



Zwei Phänomene bestimmen vor allem den Aufbau und die Entwicklung des Kosmos: die **Dunkle Materie**, die den Lauf der Sterne beschleunigt und ganze Galaxien zu Häufen zusammentreibt, und die **Dunkle Energie**, die dafür sorgt, dass das Universum immer schneller auseinanderfliegt. Doch was genau sich hinter diesen unsichtbaren Mächten verbirgt, ist noch immer ein Geheimnis

Text: Martin Paetsch

Illustrationen: Tim Wehrmann,
Eric Tscherne

In den Jahren 1967 und 1968 richtet die US-Astronomin Vera Rubin ihre ganze Aufmerksamkeit auf den Andromeda-Nebel. Diese uns benachbarte Galaxie ist gleichsam eine Schwester der Milchstraße. Im Teleskop sieht sie etwa so aus, wie unsere Heimatgalaxie aus zwei Millionen Lichtjahren Entfernung erscheinen würde: als leuchtende Spirale vor dem schwarzen Abgrund des Universums, bestehend aus Abermilliarden von Sternen, die um ein hell strahlendes Zentrum kreisen.

Viele Nächte verbringt Vera Rubin gemeinsam mit ihrem Kollegen Kent Ford an den Teleskopen zweier Observatorien im US-Bundesstaat Arizona, richtet sie auf verschiedene Regionen des Andromeda-Nebels und belichtet zahllose fotografische Platten – jedes Mal für 60 bis 90 Minuten.

Sie sucht nach Beweisen für ein Phänomen, dem sie bereits seit Jahren auf der Spur ist. Dabei hilft ihr ein von Kent Ford entwickeltes Gerät, das die Lichtstrahlen aus dem All elektronisch verstärkt und es erlaubt, die Botschaft selbst schwach leuchtender Himmelsobjekte in ihre Spektralfarben zu zerlegen, um sie anschließend zu analysieren und etwa die Geschwindigkeiten von Sternen zu ermitteln.

Vera Rubin vermutet, dass die Sonnen in der majestätischen Spirale des Andromeda-Nebels sich nicht so bewegen, wie es nach dem Gravitationsgesetz zu erwarten ist.

Normalerweise sollte die Geschwindigkeit, mit der die Sterne um das Zentrum einer Galaxie kreisen, mit zunehmender Distanz zum Zentrum abnehmen – ähnlich wie in unserem

Sonnensystem: Der Planet Jupiter etwa bewegt sich auf seiner Bahn um die Sonne langsamer als die Erde.

Der Grund dafür: Die Gravitationskraft zwischen zwei Objekten nimmt mit ihrem Abstand zueinander ab. Die Sonne „zieht“ also viel stärker an der Erde als an Jupiter. Um nicht in die Sonne zu stürzen, muss die Erde daher der Gravitation eine größere Fliehkraft entgegensetzen als Jupiter – sie muss sich also schneller auf ihrer Kreisbahn bewegen (siehe Kasten rechts).

Entsprechend übt die riesige Ansammlung von Sternen (und damit von Materie) im hell leuchtenden Zentrum einer Galaxie eine umso geringere Schwerkraft auf Sterne in äußeren Regionen aus, je weiter entfernt diese das Zentrum umkreisen. Objekte ganz am Rand einer Galaxie sollten daher besonders geringe Geschwindigkeiten haben.

Die Sterne in der Andromeda-Galaxie, die Rubin studiert, verhalten sich jedoch ganz anders: Selbst in großer Entfernung von der galaktischen Mitte kreisen sie erstaunlich schnell, so als müssten sie einer viel stärkeren Schwerkraft irgendwo aus dem Zentrum der Galaxie trotzen, als von der bekannten, leuchtenden Materie des Sternenchips ausgehen kann.

Anhand der Bewegungen können Rubin und Ford schließlich berechnen, wie viel Masse die Sternansammlung enthalten muss, um diese große Gravitationskraft zu entwickeln – und kommen zu einem scheinbar unmöglichen Ergebnis. Die Galaxie besteht demnach aus zehnmal mehr Materie, als auf den Fotos zu erkennen ist. Rund 90 Prozent ihrer Substanz wären damit unsichtbar.

**95 Prozent
des Uni-
versums sind
uns völlig
unbekannt**

Es scheint also, als enthalte die Andromeda-Galaxie gewaltige Mengen eines unbekannten Stoffes, der sich unseren Blicken entzieht.

ERSTE HINWEISE auf diese Substanz hat es schon früher gegeben. Bereits 1933 ist der Schweizer Fritz Zwicky auf das Problem gestoßen, während er Galaxien beobachtete. Die rasen in der Regel nicht allein durchs All, sondern in Schwärmen; und eine solche Gruppe von Galaxien, den Coma-Haufen, hatte sich der in den USA forschende Astronom vorgenommen.

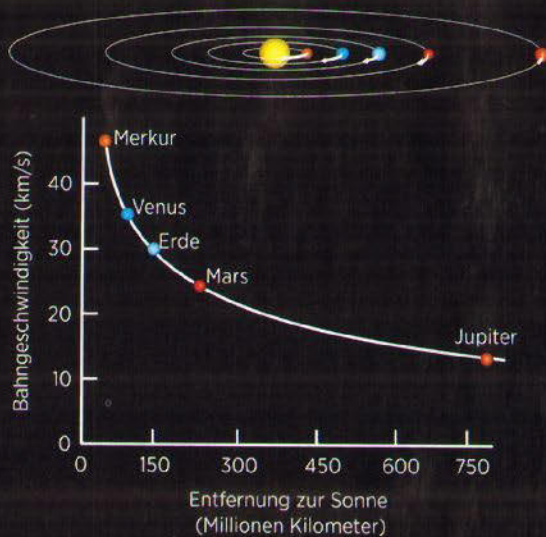
Zwicky berechnete die Geschwindigkeiten, mit denen sich einzelne Galaxien des Coma-Haufens von uns fortbewegen. Dazu untersuchte er die Spektren der fernen Gebilde, die Aufschluss über deren Bewegungen geben: Denn je schneller sich ein leuchtendes Objekt von uns entfernt, desto mehr erscheint sein Licht zum Roten verschoben (siehe Seite 29).

Der Forscher kam zu einem erstaunlichen Ergebnis. Die Galaxien im Coma-Haufen scheinen mit jeweils stark unterschiedlichen Geschwindigkeiten von uns wegzurasen – der Galaxien-Cluster müsste eigentlich auseinanderfliegen, dürfte also gar nicht oder nur für eine sehr kurze Zeit existieren.

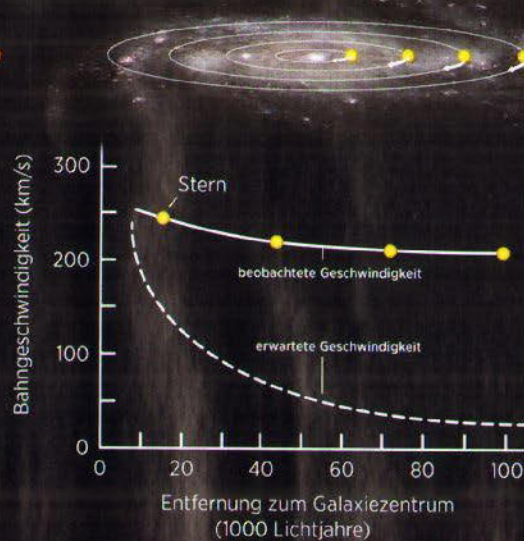
Zwickys Erklärung: Eine gewaltige, im Galaxienhaufen verteilte Masse hält mit ihrer Gravitationswirkung die Milchstraßen zusammen. Die kreisen um ein gemeinsames Zentrum und bewegen sich dadurch relativ zur Erde mit wechselnden Geschwindigkeiten, während der Coma-Haufen als Ganzes sich von uns fortbewegt.

Die bekannte Gesamtmasse der leuchtenden Materie in dieser Gruppe von Galaxien reichte allerdings allein nicht aus, um die nötige Schwerkraft für den Zusammenhalt aufzubringen und so die verschiedenen Geschwindigkeiten zu erklären. Es musste im Coma-

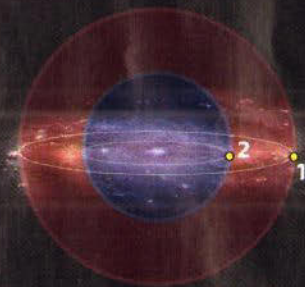
Wie Forscher die Dunkle Materie entdeckten



Dass es neben der sichtbaren eine weitere Form der Materie geben muss, merkten Astronomen, als sie die Bewegung von Sternen in Galaxien untersuchten. Erwartet hatten die Forscher, dass die Sterne das Zentrum einer Galaxie auf ähnliche Weise umlaufen wie unsere Planeten die Sonne (linkes Diagramm). Deren Bahngeschwindigkeit nimmt mit wachsendem Abstand zur Sonne ab. Das liegt daran, dass fast die gesamte Masse des Systems in der Sonne selbst konzentriert ist. Daher bewegt sich ein



Planet umso langsamer, je weiter entfernt seine Bahn liegt. Jupiter, dessen Entfernung zur Sonne etwa fünfmal so groß ist wie die der Erde, bewegt sich nur knapp halb so schnell wie unser Heimatplanet. Auch im Zentrum einer Galaxie ballt sich nahezu die gesamte sichtbare Masse. Dennoch beobachteten Forscher, dass sich die Bahngeschwindigkeit der Sterne nach außen hin kaum verringert (rechtes Diagramm). Vielmehr sind sämtliche Sterne ähnlich schnell unterwegs – unabhängig vom Abstand zur Galaxiemitte.



Der Grund für die geringen Geschwindigkeitsunterschiede in Galaxien liegt darin, dass die Sterne nicht nur von der sichtbaren, sondern auch von der Dunklen Materie angetrieben werden. Die durchdringt den gesamten Raum und ist hier als riesige Kugel dargestellt (dunkelgrau), in deren Zentrum die Galaxie liegt. Die Menge an Dunkler Materie, die auf einen außen liegenden Stern (1) einwirkt, ist sehr viel größer als bei einem innen liegenden Stern (2). Der mit wachsendem Abstand schwindende Einfluss der sichtbaren Materie wird somit kompensiert – und auch entfernte Sterne erreichen ein hohes Bahntempo. Anders als durch die Dunkle Materie ließe sich dieses Phänomen im Einklang mit Einsteins Gravitationstheorie nicht erklären.

Haufen einen bislang unbekannten Stoff geben, der dort in „sehr viel größerer Dichte vorhanden ist als leuchtende Materie“, folgerte Zwicky.

Er nannte ihn „Dunkle Materie“.

Doch der Schweizer Astronom war seiner Zeit weit voraus: Seinen Fachkollegen erschien der Gedanke an einen unsichtbaren Stoff derart ungeheuerlich, dass sie die Resultate von Zwickys Beobachtungen einfach ignorierten.

Im Dezember 1950 präsentiert die 22-Jährige dieses Ergebnis auf der Jahrestagung der Astronomischen Gesellschaft – nur drei Monate nach der Geburt ihres ersten Kindes. Doch die junge Astronomin, die in einem zehnminütigen Vortrag das Resultat ihrer Masterarbeit vorstellt und nicht einmal Mitglied der Astronomischen Gesellschaft ist, erntet von ihren männlichen Kollegen nur Hohn und Spott. Und erhält den Rat, lieber das Fach zu wechseln.

Der „Washington Post“ ist die Arbeit immerhin einen Beitrag auf der Titelseite

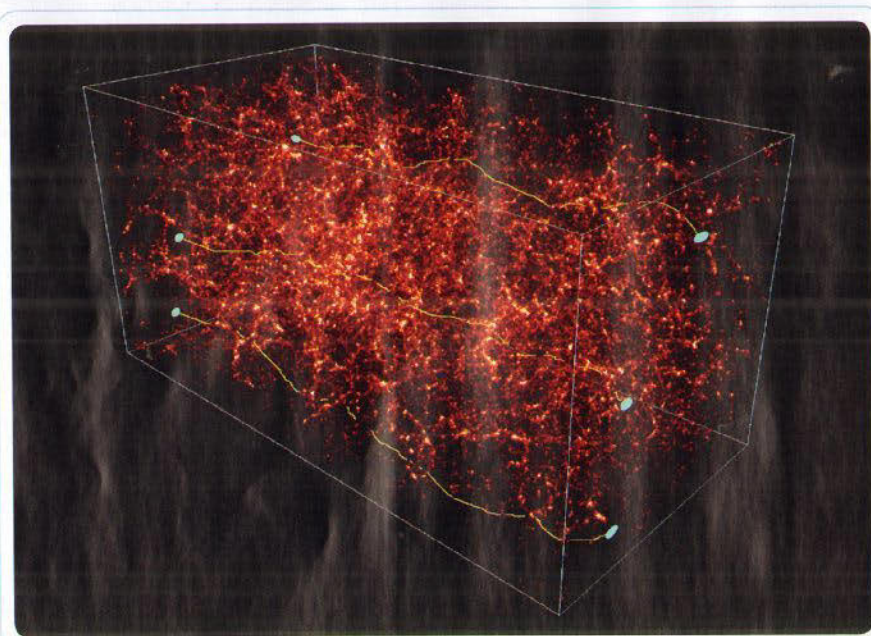
1955 eine Anstellung an der Georgetown University in Washington D.C. und zieht 1963 mit ihrem Mann für ein Jahr nach Kalifornien, wo sie Spektren von Galaxien vermisst.

Es ist eine Zeit, in der Frauen in der Astronomie noch nicht akzeptiert werden. Die Forscher des Palomar Observatoriums in Kalifornien etwa, das über das damals weltweit größte Teleskop verfügt, verweigern Frauen jahrzehntelang den Zutritt mit dem Argument, es gebe keine Damentoilette. Erst im Dezember 1965 darf Vera Rubin dort ihre erste Beobachtungsnacht verbringen.

MIT IHREN UNTERSUCHUNGEN der Andromeda-Galaxie aber erzielt die Astronomin auf Anhieb einen Durchbruch. Als sie ihre Ergebnisse 1970 veröffentlicht, klingen ihre Belege für die rätselhaften Sternen- und Galaxienbewegungen äußerst überzeugend. Und immer mehr Studien bestätigen ihre Ergebnisse: Es muss viel mehr Materie in Milchstraßen und Galaxienhaufen vorhanden sein, als tatsächlich sichtbar ist. Die Fachwelt kann die rätselhafte Substanz nicht länger ignorieren.

Doch woraus besteht dieser Stoff? Welche nicht leuchtende Materie kann in so gewaltiger Menge im Universum vorkommen, dass sie Bewegungen von Sternen und sogar ganzen Galaxien so enorm beeinflusst?

Bei der Suche, die nun beginnt, konzentrieren sich viele Forscher auf große Himmelsobjekte. Denn längst nicht alle Sterne strahlen hell: Manche beenden ihr Dasein als schwach glimmende Kugeln. Andere erreichen nie die nötige Masse, um zu leuchten, und treiben als dunkle Gasbälle durchs All (siehe Seite 92). Daneben existieren noch weitere finstere Objekte – etwa Schwarze Löcher. In ihnen ist Materie so dicht zusammengeballt, dass nicht einmal das Licht ihrer gewaltigen Anziehungskraft entkommen kann (siehe Seite 100).



Passiert das Licht ferner Galaxien (gelb) Ansammlungen Dunkler Materie (rot), wird es wie mit einer optischen Linse abgelenkt, und das Bild der Sternensinsel erscheint verschoben und verzerrt – ein Nachweis für die Existenz der sonst unsichtbaren Substanz

Auch Vera Rubin stößt mit ihren Forschungen anfangs auf Unverständnis. Ähnlich wie Zwicky hat die junge Wissenschaftlerin in den späten 1940er Jahren die Geschwindigkeiten von Galaxien in bestimmten Haufen untersucht. Einige der fernen Leuchtgebilde kreisen offenbar um eine gewaltige Masse, die sich nicht allein durch die leuchtende Materie der Sterne erklären ließ.

wert – wenn auch mit der wohl ironisch gemeinten Überschrift: „Junge Mutter findet das Zentrum der Schöpfung“.

Doch Vera Rubin lässt sich nicht beirren. Sie folgt zwar ihrem Mann, der als Physiker an einer Universität im Staat New York und ab 1951 in Washington D.C. arbeitet. Und bringt in den folgenden zehn Jahren drei weitere Kinder zur Welt, um die sie sich kümmern muss.

Hartnäckig verfolgt sie daneben aber ihre astronomischen Studien: Sie schreibt an ihrer Doktorarbeit über die Zusammenballung von Galaxien, erhält

Solche düsteren Himmelsobjekte könnten möglicherweise die Dunkle Materie bilden. Die Forscher vermuten sie im gesamten Halo einer Galaxie – also jener ausgedehnten, kugelförmigen Region, die über die eigentliche Galaxie noch hinausreicht (siehe Seite 48).

Sie nennen die finsternen Gebilde „MACHOs“ (von engl. „Massive Astrophysical Compact Halo Object“, massives astrophysikalisches kompaktes Halo-Objekt) und überlegen: Vielleicht gibt es in und um die Galaxien zahlreiche solcher MACHOs, die bislang nur noch nicht aufgefallen sind? Doch wie findet man Objekte, die wenig oder gar keine Strahlung aussenden?

Um ihnen auf die Spur zu kommen, bedienen sich die Astronomen eines physikalischen Effektes: Eine große Masse wirkt auf Lichtstrahlen ähnlich wie eine Linse. Das heißt: Ein dunkler Körper, der vor einem Stern im Hintergrund vorbeizieht, kann dessen Strahlung bündeln und ihn für kurze Zeit heller erscheinen lassen (Gravitationslinsen-Effekt). Das verstärkte Leuchten des Sterns verrät also das fast unsichtbare Objekt im Vordergrund.

Zu Beginn der 1990er Jahre starteten Forscher am australischen Mount-Stromlo-Observatorium eine Fahnung nach solchen Ereignissen. Über Jahre hinweg fotografieren sie den Nachthimmel, suchen in den Bildserien nach Sternen, deren Helligkeit sich auf ungewöhnliche Weise verändert hat.

Und sie werden fündig: Einige Leuchtpunkte strahlen plötzlich auf, so als würde ein finsternes Objekt vor ihnen vorbeigleiten. Als die Forscher das „Hubble“-Teleskop auf einen solchen Punkt richten, sehen sie neben dem Hintergrundstern, dessen Licht sich verändert hat, eine schwach glimmende, ausgebrannte Sonne: ein MACHO.

DOCH AUCH WENN diese Objekte – also etwa Sternleichen und dunkle

Gasbälle – tatsächlich existieren: Sie können, so überlegen die Astrophysiker, wohl nur einen kleinen Teil der fehlenden Substanz ausmachen. Denn MACHOs bestehen aus Elektronen, Protonen und Neutronen, den Bausteinen der gewöhnlichen Materie.

Komplizierte kosmologische Berechnungen aber ergeben, dass das Universum nur eine begrenzte Menge dieser Teilchen enthalten kann – nicht genug, um die aus Messungen hochgerechnete Gesamtmasse von Dunkler Materie im

Der Inhalt des Alls muss neu berechnet werden

All zu erklären. Die muss sich zum größten Teil aus einem anderen Stoff zusammensetzen.

Als Kandidaten für die Dunkle Materie konzentrieren sich Wissenschaftler deshalb schon bald auf andere Objekte – winzige Elementarteilchen, die sich in einer ihrer Eigenschaften stark von Elektronen, Protonen und Neutronen unterscheiden: Sie wechselwirken kaum mit gewöhnlicher Materie, reagieren also fast gar nicht auf Atome und Moleküle, aus denen etwa unsere Erde aufgebaut ist. Manche davon können in enormer Zahl vorkommen, ohne dem Menschen jemals aufzufallen – ganz einfach, weil sie ungestört alle Materie passieren, als wäre diese gar nicht vorhanden.

Ein solches Teilchen ist das Neutrino. Diese geisterhaften Partikel haben zwar nur eine geringe Masse, rasen dafür aber annähernd mit Lichtgeschwindigkeit durchs All. Milliarden von ihnen durchschlagen in jeder Sekunde unseren Körper, ohne dass wir sie sehen oder fühlen können – und ohne dass sie auf ein Atom unseres Körpers reagieren.

Ähnlich wie die Strahlung einer Röntgenlampe nahezu ungehindert unser Gewebe passiert und nur die Knochen sichtbar machen, würden wir unter dem Licht einer Neutrinolampe überhaupt keinen Schatten werfen. Die meisten Neutrinos durchqueren die Erde, als würde der Planet nicht existieren. Nur ganz selten kollidieren sie mit einem Atom und erzeugen dabei einen schwachen, aber nachweisbaren Lichtblitz (siehe Seite 72).

Mit hochempfindlichen Messgeräten spüren Forscher den Neutrinos nach. Sie installieren Detektoren in Minen tief unterhalb der Erdoberfläche oder vergraben sie im Eis der Antarktis, um störende Einflüsse durch andere Teilchen auszuschalten. Und sie registrieren tatsächlich Einschläge von Neutrinos.

Besteht die Dunkle Materie also aus diesen Partikeln? Um das zu prüfen, simulieren Theoretiker am Computer, wie sich nach dem Urknall ein Universum entwickeln würde, das hauptsächlich Neutrinos enthält – und stoßen auf Probleme.

In ihrem virtuellen Kosmos bildet sich jenes Gespinnst aus Galaxien und leuchtender Materie, das wir heutzutage am Nachthimmel beobachten können, nur extrem langsam. Die Neutrinos bewegen sich schlicht zu schnell, als dass sie als eine dunkle Masse dienen könnten, unter deren Einfluss sich die „normale“ Materie zu Sternen und Galaxien verdichten kann.

Denn die Dunkle Materie hält nicht nur die Galaxienhaufen und Galaxien zusammen: Durch die von ihr ausgehende Schwerkraft konnten sich einige Hundert Millionen Jahre nach dem Urknall überhaupt erst Galaxien bilden. Damals zogen Gebiete mit besonders hoher Dichte Dunkler Materie die im Weltraum verteilte leuchtende Materie an – ähnlich wie Magnete Eisenspäne – und stießen so den Prozess der Galaxienbildung erst an (siehe Seite 48).

Seither suchen Forscher nach einem Kandidaten mit ähnlichen Eigenschaften wie das Neutrino: einem Elementarteilchen, das ebenso selten wie ein Neutrino mit leuchtender Materie interagiert, aber viel massiver und damit auch langsamer ist als dieses. Damit hätte es genau die richtigen Eigenschaften, um die finstere Substanz zu erklären – falls es denn überhaupt existiert.

Denn bislang können die Astrophysiker nur vermuten, dass es ein solches



Schon 1950 fand die US-Astronomin Vera Rubin Hinweise auf die Dunkle Materie

Teilchen gibt. Aber einen Namen haben sie ihm immerhin schon gegeben: WIMP (von engl. „Weakly Interacting Massive Particle“, schwach wechselwirkendes massereiches Teilchen).

Mit einer Reihe von Experimenten versuchen Forscher inzwischen WIMPs nachzuweisen. So haben sie tief in einer Mine im US-Bundesstaat Minnesota Detektoren aufgestellt, um den Aufprall möglicher WIMPs zu registrieren.

Andere Teams setzen auf Teilchenbeschleuniger wie den Large Hadron Collider in der Nähe von Genf. In dieser Anlage lassen Physiker winzige Partikel mit gewaltiger Energie aufeinanderpral-

len: Dabei könnten nie zuvor beobachtete Teilchen entstehen und vielleicht auch solche, aus denen die Dunkle Materie besteht (siehe Seite 68).

Doch falls bei diesen Experimenten nichts herauskommt – also keine solchen Partikel gefunden werden –, müssen sich die Wissenschaftler fragen, ob im Universum vielleicht noch viel rätselhaftere Kräfte am Werk sind, als sie es sich heute vorstellen.

Schon jetzt spekulieren manche Forscher darüber, ob sich die Schwerkraft möglicherweise anders verhält als bislang angenommen – etwa, weil sie über große Entfernungen womöglich stärker wirkt, als der bisherigen Theorie nach zu erwarten ist.

DOCH DAMIT NICHT GENUG: Zu dem Rätsel der Dunklen Materie kommt 1998 ein weiteres, das die Theorien der Physiker vor noch viel größere Herausforderungen stellt. In jenem Jahr machen zwei Astronomentams eine Entdeckung, die alle bisherigen Annahmen über die Entwicklung des Kosmos auf den Kopf stellt: Aus fernen Sternexplosionen ermitteln sie, dass sich das Universum in den vergangenen fünf Milliarden Jahren immer schneller ausgedehnt hat.

Die rasante Expansion des Universums zwingt die Astronomen dazu, die Zusammensetzung des Weltalls aufs Neue zu berechnen. Seine beschleunigte Ausdehnung können sie sich nur mit einer bis dahin unbekannten Größe erklären – einer Kraft, die so mysteriös ist, dass die Forscher ihr eher hilflos einen ähnlichen Namen wie der Dunklen Materie geben, obwohl beides miteinander überhaupt nicht zusammenhängt: Sie nennen die Kraft „Dunkle Energie“.

Diese mysteriöse Größe ist ganz offensichtlich dafür verantwortlich, dass sich der Weltraum immer schneller ausdehnt. Für diese Expansion aber ist Energie nötig, und die muss auf das Konto der Dunklen Energie zurückgehen – auch wenn noch kein Forscher weiß, was letztlich dahinter steckt.

Herausgefunden haben die Wissenschaftler aber immerhin eine – höchst erstaunliche – Tatsache: Drei Viertel

der gesamten Energie im Universum sind der mysteriösen Dunklen Energie zuzuordnen.

Das restliche Viertel der Energie liegt in Form von Materie vor (nach Albert Einsteins berühmter Formel $E=mc^2$ ist Materie ja auch nur eine Form von Energie; siehe Seite 142).

Und auch bei der Materie überwiegt bei Weitem der für uns Menschen unsichtbare Teil: die Dunkle Materie.

Nur einen kleinen Bruchteil, gerade mal 15 Prozent der Gesamtmasse, macht jener sichtbare Stoff aus, den Laien gemeinhin als „Materie“ verstehen und aus dem unsere Erde und wir selbst bestehen.

Und obwohl die Forscher das Wesen der Dunklen Energie derzeit noch genauso wenig verstehen wie das der Dunklen Materie, haben sie inzwi-

Memo: **DUNKLE MATERIE/ DUNKLE ENERGIE**

► **Sichtbare Materie**, aus der etwa Planeten und Sterne bestehen, macht nur rund 15 Prozent der gesamten im Kosmos vorhandenen Materie aus.

► **Der Rest ist Dunkle Materie**, ein unsichtbarer Stoff, dessen Schwerkraft die Drehung von Galaxien und die Bewegung ganzer Galaxiehaufen bestimmt.

► **Hinzu kommt** eine mysteriöse Kraft – die Dunkle Energie. Sie ist dafür verantwortlich, dass sich das Universum immer schneller ausdehnt.

► **Kosmologen** wissen bis heute nicht, was sich hinter beiden Phänomenen verbirgt. Womöglich handelt es sich um noch unbekannte Elementarteilchen.

schen mehrere Szenarien entwickelt, mit denen sich die Folgen dieser ominösen Größe für das Universum voraussagen ließen; einige von ihnen haben dramatische Auswirkungen auf die Zukunft des Weltalls.

Nach einem dieser Modelle könnte die Ausdehnung des Universums aufgrund der Dunklen Energie urplötzlich zum Stillstand kommen. Bei diesem Szenario, genannt „Big Brake“ („große Bremse“), würde sich das Weltall anschließend wieder zusammenziehen und die Materie sich am Ende in einen Brei aus Elementarteilchen verwandeln (siehe Seite 150).

Anderen Berechnungen zufolge könnte das Universum dagegen noch rasanter als heute expandieren: Die Ansammlungen von Galaxien würden immer weiter auseinanderdriften und sich schließlich auflösen.

Das hätte auch Folgen für die Zukunft unserer Milchstraße – und ihrer Nachbarin, der Andromeda-Galaxie.

Denn bis vor Kurzem hatten die Forscher noch angenommen, dass die beiden Sternansammlungen in ferner Zukunft mit dem Virgo-Haufen verschmelzen werden, einer nahen Gruppe von Galaxien. Doch falls das Universum sich immer schneller ausdehnen sollte, würde es zu dieser Kollision niemals kommen.

Stattdessen würden sich die Virgo-Galaxien immer weiter von uns entfernen. In zwei Billionen Jahren wären sie schließlich aus dem Sichtfeld verschwunden – und die Milchstraße bliebe mit der Andromeda-Galaxie und wenigen anderen Begleitern zurück.

Allein in der Finsternis des Alls.

VERA RUBIN, die Entdeckerin der Dunklen Materie, ist auch heute noch aktiv. Nach wie vor schaut sie durch die Objektive großer Teleskope in den Nachthimmel, etwa auf den größten bekannten Spiralnebel „UGC 2885“, der mit 815 000 Lichtjahren Durch-

messer gut achtmal größer ist als die Milchstraße.

Die inzwischen 83-Jährige Forscherin, die in den vergangenen zwei Jahrzehnten mit zahlreichen wissenschaftlichen Auszeichnungen geehrt wurde (etwa der Goldmedaille der renommierten britischen Royal Astronomical Society), möchte nach wie vor genauer verstehen, wie Galaxien entstehen, Gestalt annehmen, sich wandeln. Und ist rund 60 Jahre nach ihren ersten Beobachtungen noch immer fasziniert vom Blick in die Tiefen des Alls. □

Martin Paetsch, 40, ist Wissenschaftsjournalist in Hongkong.

Literaturempfehlung: Dan Hooper, „Dunkle Materie: Die kosmische Energielücke“, Spektrum; gut verständliches Buch über den Einfluss der mysteriösen Materieform.



Fühlen Sie sich in Ihrer Fremdsprache zu Hause.

Sprechen Sie eine neue Sprache mit der innovativen Rosetta Stone Sprachlern-Lösung.


Mit **Rosetta Stone** lernen Sie eine neue Sprache wie im Land selbst. Ganz **einfach** und **intuitiv**, aber ohne Vokabeln und Grammatik auswendig lernen. Mit **direkter Rückmeldung** zu Ihrer Aussprache.



Intuitiv lernen. Sicher sprechen.
Probieren Sie es aus auf RosettaStone.de/geok911
10% Rabatt über Aktionscode „geok911“

© 2011 Rosetta Stone Ltd. All rights reserved.

RosettaStone



Im Drehpunkt einer Spiralgalaxie (Illustration) leuchtet ein greller Quasar; Plasma-Jets, heiße Gasströme aus elektrisch geladenen Teilchen, schießen zu beiden Seiten heraus. Dieses Phänomen hat Astronomen zu gewagten Thesen über die Entstehungsgeschichte herausgefordert. Heute lassen sich die Vorgänge mit einer gewaltigen Kraft im Inneren erklären (siehe Kasten Seite 87)

DIE **HÖLLENFEUER** **AM** STERNENHIMMEL

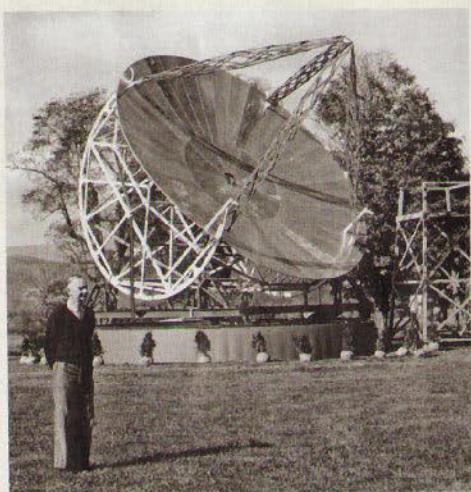
Quasare gehören zu den bizarrsten Phänomenen im All: Diese Objekte im Zentrum von Galaxien strahlen mit der Leuchtkraft Tausender Milchstraßen, sind aber vergleichsweise winzig. Welche Urgewalt steckt hinter den Himmelskörpern, auf deren Spur die Astronomen bei der Erforschung von Radiowellen kamen?

Text: Alexandra Rigos
Illustration: Tim Wehrmann



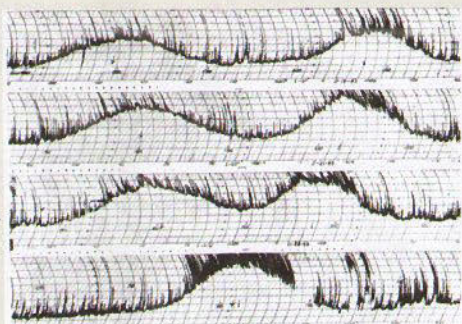
Karl Jansky

Der US-Ingenieur erkennt 1932 als Erster, dass sich manche Himmelskörper anhand von Radiowellen, die sie abstrahlen, untersuchen lassen – darunter auch Quasare



Grote Reber

1937 lässt der amerikanische Astronom in seinem Garten ein Teleskop für Radiowellen errichten: ein Instrument, das entscheidend zur Erforschung der Quasare beiträgt



Eine Langzeitaufzeichnung von Rebers Teleskop: Wo die Verläufe der Graphen Buckel formen, offenbaren sich Himmelskörper, die Radiowellen abgeben

G

enervt von einem hartnäckigen Rauschen in seinem Empfänger, macht sich der junge US-Rundfunkingenieur Karl Jansky im Jahr 1932 daran, die Quelle des Störgeräuschs zu orten. Er arbeitet bei den Bell Telephone Laboratories und soll prüfen, ob sich bestimmte kurze

Radiowellen dazu eignen, Telefongespräche über den Atlantik zu übertragen.

Zu seiner Überraschung kommt das Störgeräusch nicht von der Erde, sondern ist kosmischen Ursprungs. Nach etlichen Monaten der Beobachtung findet er heraus, dass es sich um Strahlung aus dem Zentrum der Milchstraße handelt.

Mit seiner Entdeckung, dass manche Himmelskörper Radiowellen aussenden, wird Jansky die Himmelskunde revolutionieren. Es ist die Geburtsstunde der Radioastronomie, die ein völlig neues Fenster ins All öffnet. Erstmals können die Forscher nicht nur mit optischen Teleskopen auf die Gestirne blicken, sondern auf eine Weise, die ihren Augen bislang verborgen war. Denn die Radiowellen überbringen ebenso Botschaften von fremden Himmelskörpern wie das sichtbare Licht.

Paradoxiertweise wird gerade diese Form der Astronomie zur Entdeckung der hellsten und energiereichsten Objekte des Universums führen: der Quasare.

Wegen der Weltwirtschaftskrise dauert es allerdings noch einige Jahre, bis sich die Radioastronomie etabliert. 1937 errichtet der Ingenieur Grote Reber in seinem Garten auf eigene Kosten eine schüsselförmige Antenne und horcht den Himmel ab, doch erst nach dem Zweiten Weltkrieg bricht unter den Radioastronomen ein regelrechtes Jagdfieber aus. Mit immer größeren Antennen suchen sie das Firmament nach unbekannten Himmelskörpern ab, die ihnen mit den Lichtteleskopen bislang entgangen sind.

Nicht immer wissen sie, was sie dabei eigentlich entdecken. So stoßen einige Forscher mitunter auf merkwürdige Radioquellen, die außergewöhnlich stark strahlen und damit viel Energie aussenden. Manchmal scheint es sich um helle, blau leuchtende Sterne zu handeln, wie Blicke durch optische Teleskope verraten. Manchmal ist in der Umgebung der Strahlenquelle jedoch gar kein sichtbarer Himmelskörper auszumachen.

Bald bürgert sich für sie der Begriff „Quasar“ ein: als Abkürzung für „quasi-stellare Radioquelle“.

Aber handelt es sich bei den seltsamen Objekten wirklich um Sterne? Wie kann eine gewöhnliche Sonne so viel Strahlung aussenden? Und sollten Quasare keine Sterne sein, was verbirgt sich dann hinter den energiestrotzenden Himmelskörpern?

Die Identifizierung der rätselhaften Objekte ist nicht zuletzt deshalb so schwierig, weil die Radioteleskope keine exakten Koordinaten liefern – ihre Auflösung ist vieltausendfach schlechter als die eines Lichtteleskops. Das liegt daran, dass die Wellenlänge von Radiowellen meist im Bereich von Zentimetern bis vielen Metern liegt, die des sichtbaren Lichts dagegen weniger als ein Tausendstelmillimeter beträgt. Und je länger die Welle, desto schwieriger lässt sich ein Objekt damit orten.

Ohne aber die präzise Position einer der geheimnisvollen Radioquellen zu kennen, können die Astronomen nicht sicher sein, zu welchem sichtbaren Stern oder anderem Himmelskörper sie gehört.

CYRIL HAZARD, ein Astronom an der University of Sydney, hat schließlich eine geniale Idee, wie man Quasare exakt orten kann. Der Himmelskörper „3C 273“ (der 273. Eintrag im „3. Cambridge-Katalog der Radioquellen“) steht im Sternbild der Jungfrau. Hazard weiß: Dieser Quasar wird am 5. August 1962 vorübergehend vom Mond verdeckt sein. Wenn der Astronom nun registriert, wann die Radiostrahlung des Objekts abbricht und anschließend wieder auftritt, kann er aus den bekannten Positionsdaten der Mondscheibe ermitteln, wo genau sich der Quasar am Himmel befindet.

Hazard bereitet seinen Versuch sorgfältig vor und bucht Beobachtungszeit am Parkes-Radioteleskop im australischen Busch, 300 Kilometer westlich von Sydney. Doch ausgerechnet an dem entscheidenden Augusttag steigt Hazard in einen falschen Zug.

So bleibt es John Bolton vorbehalten, dem Leiter der Parkes-Sternwarte, das Experiment allein vorzunehmen. Er stößt auf unerwartete Schwierigkeiten. Es stellt sich heraus, dass er sein Riesenteleskop nicht tief genug neigen kann, um der Bahn von 3C 273 zu folgen. Kurz entschlossen lässt Bolton ein paar störende Bäume fällen und entfernt zudem die Sicherheitsarretierung des 64 Meter großen Spiegels.

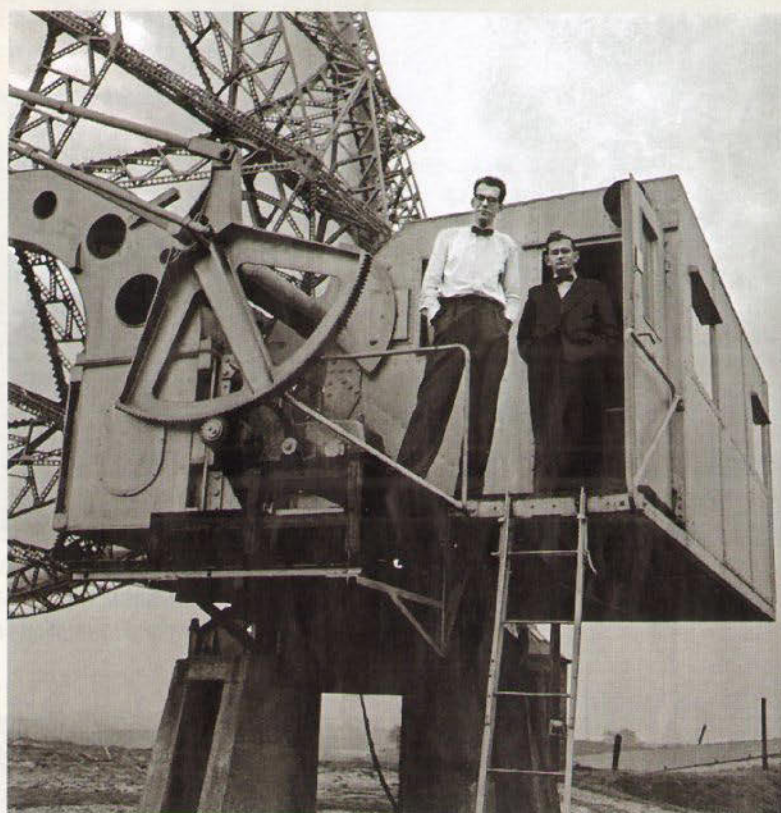
Damit geht er ein großes Risiko ein, denn das brandneue Radioteleskop könnte beschädigt werden. Doch das Experiment endet glücklich, und Bolton kann die Beobachtung fortsetzen. Sie wird als ein Meilenstein der Himmelsforschung in die Geschichte eingehen: als erste präzise Lokalisation eines Quasars.

Cyril Hazard, der den großen Moment verpasst hat, kann anschließend die genauen Koordinaten von 3C 273 bestimmen. Er bittet seinen Kollegen Maarten Schmidt von der Palomar-Sternwarte in Kalifornien, an der entsprechenden Stelle mit einem optischen Teleskop nachzusehen.

Schmidt findet wenig später einen auf den ersten Blick unscheinbar wirkenden Stern. Es stellt sich heraus, dass der Himmelskörper seit mehr als 100 Jahren bekannt ist. Wie bei vielen Sternen schwankt seine Helligkeit gelegentlich.

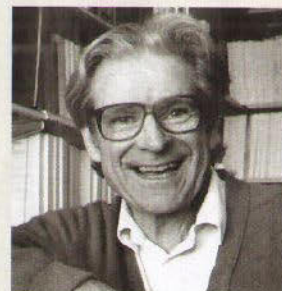
John Bolton

Am 5. August 1962 bestimmt der Leiter einer australischen Sternwarte erstmals präzise die Position eines Quasars mithilfe eines Radioteleskops



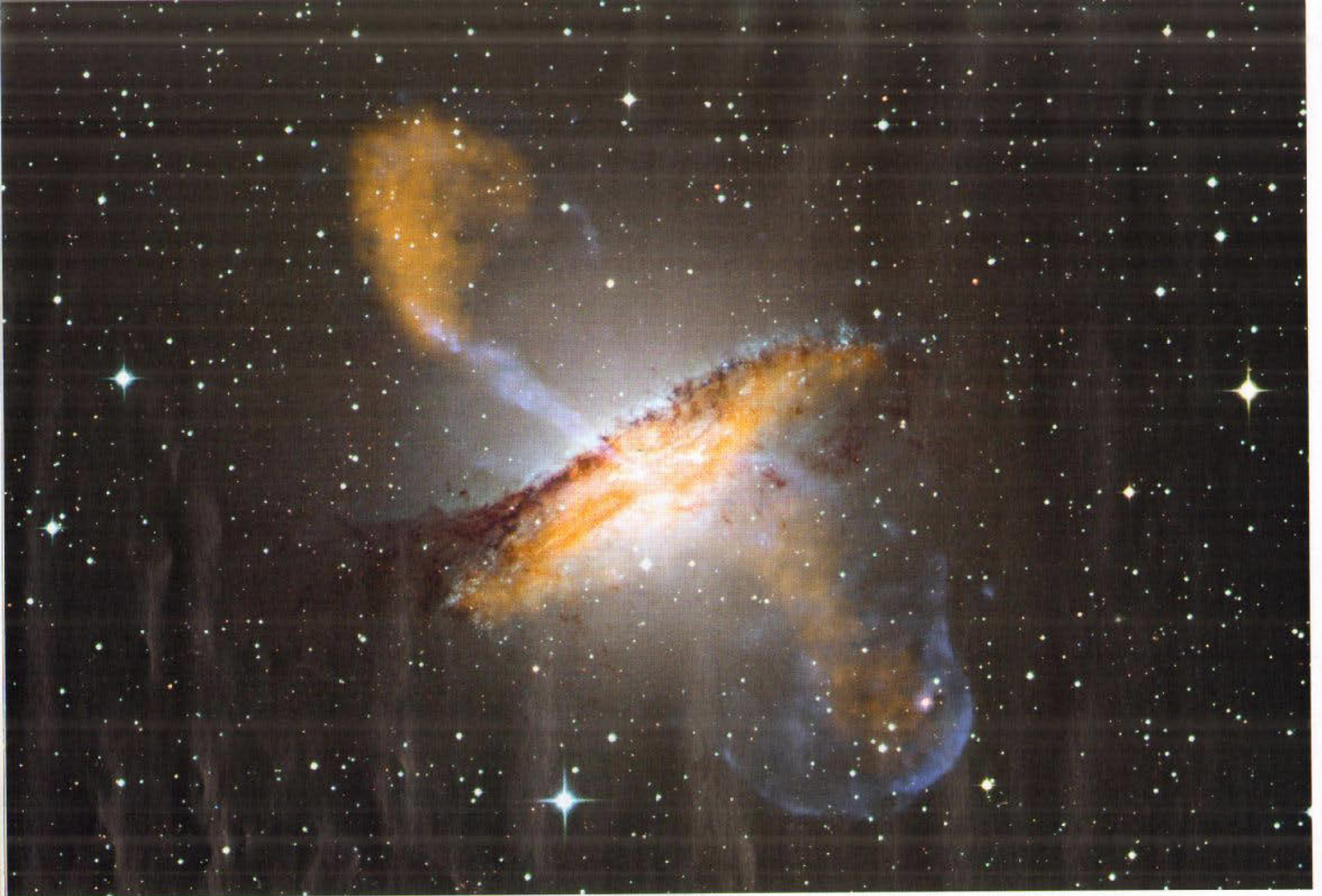
Maarten Schmidt

Der niederländische Astronom (im Bild links) vermisst den ersten Quasar mit einem optischen Teleskop und entdeckt, dass er zwei Milliarden Lichtjahre entfernt ist.



Jakow Seldowitsch und Edwin Salpeter

Die beiden Physiker kommen Mitte der 1960er Jahre unabhängig voneinander auf die entscheidende Idee: Quasare werden angetrieben durch die Gravitation Schwarzer Löcher



Dieses Bild einer Galaxie aus dem Sternbild Zentaur zeigt die abgeschwächte Form eines Quasars. Es besteht aus mehreren Aufnahmen, die jeweils andere elektromagnetische Wellen erfassen. So werden etwa die zu beiden Seiten aufstrebenden Jets erkennbar, die Radio- und Röntgenwellen abgeben, sowie die Sternenscheibe, die sichtbares Licht ausstrahlt

Doch als Schmidt das Licht des vermeintlichen Sterns mit einem neuartigen Spektrometer analysiert, erlebt er eine Überraschung. Wie jede Lichtquelle, gleich ob Glühbirne oder weit entfernter Himmelskörper, sendet auch 3C 273 ein charakteristisches Strahlungsmuster aus. Dieser physikalische Fingerabdruck gibt Aufschluss über die Natur eines Objekts. Da jedes chemische Element bestimmte Wellenlängen des Lichts (Spektrallinien) abstrahlt oder verschluckt (absorbiert), lässt sich anhand der Linien einiges über die chemische Zusammensetzung eines Himmelskörpers aussagen. Doch die Spektrallinien, die Schmidt aufzeichnet, gleichen keinem bekannten Muster.

Schließlich gelingt es Schmidt, das Rätsel zu lösen. Denn irgendwie kommt ihm das bizarre Linienmuster doch vertraut vor. Am 5. Februar 1963 hat er eine Eingebung: Es handelt sich um ganz gewöhnliche Spektrallinien, wie leuchtende Wasserstoffteilchen sie hervorrufen. Nur stehen sie nicht an der gewohnten Stelle des Spektrums, sondern sind weit in Richtung seines roten, langwelligen Endes gerutscht.

Sogleich nehmen sich Schmidts Kollegen einen anderen Stern vor, dessen Spektrum ebenfalls rätselhaft

ist und in dem sie einen Quasar vermuten, dessen Position allerdings nicht so genau bekannt ist. Auch bei diesem 3C 48 genannten Quasar sind die Wasserstoff-Emissionslinien nach Rot hin verschoben – sogar noch weiter als bei 3C 273.

Für dieses Phänomen gibt es nur eine plausible Erklärung: Die Quasare bewegen sich rasend schnell von der Erde weg. Denn wenn sich eine Strahlungsquelle vom Beobachter entfernt, werden die elektromagnetischen Wellen aus dessen Sicht gedehnt (siehe Seite 29).

Maarten Schmidt berechnet, dass 3C 273 mit einer Geschwindigkeit von 47 400 km/s durchs All rast. Und daraus ergibt sich eine weitere, geradezu schockierende Erkenntnis: Dem Hubble'schen Gesetz zufolge, das den Zusammenhang zwischen Geschwindigkeit und Entfernung eines Himmelskörpers beschreibt (siehe Seite 18), muss der Quasar viel weiter von der Erde entfernt sein als anfangs gedacht – unvorstellbare zwei Milliarden Lichtjahre.

Das aber heißt: Der Quasar strahlt noch weitaus stärker, als die Astronomen bis dahin glaubten. Um aus den Tiefen des Alls heraus so gleißend zu leuchten, dass er als Stern von immerhin 13. Größe (ein Stern dieser

Helligkeit kann von einem Amateurastronomen gerade noch erkannt werden) auf der Helligkeitsskala am Himmel steht, muss er mehr als 100-mal so viel Energie abgeben wie unsere gesamte Milchstraße.

Noch mehr staunen die Forscher, als sie die Ausdehnung des Objekts ermitteln. Denn die beträgt höchstens eine Lichtwoche – unsere eigene Galaxis, die Milchstraße, ist mit 100 000 Lichtjahren Durchmesser fünf Millionen Mal größer.

Wie aber kann ein vergleichsweise winziges Gebiet im Kosmos derart viel Strahlung erzeugen? Die Astrophysiker kennen bis dahin keinen physikalischen Vorgang, der einen derart gigantischen Energieausstoß auf begrenztem Raum plausibel erklären könnte.

Forscher in aller Welt überbieten sich daher mit gewagten Hypothesen, um das scheinbar Unmögliche zu deuten: Bremsst die Gravitationskraft womöglich das Licht der Quasare und erzeugt so die Rotverschiebung? Dann wären die schillernden Objekte doch nicht so weit entfernt, sondern könnten ungewöhnlich helle Sterne unserer Galaxis sein. Doch die beobachtete Form der Spektrallinien passt nicht zu dieser Erklärung.

Oder sind Quasare eine Ansammlung explodierender Sterne („Supernovae“), die in einer Kettenreaktion einer nach dem anderen zünden? Aber wie sollen sich auf kleinem Raum so viele Sonnen befinden, ohne zu einem einzigen, großen Stern zu verschmelzen?

Einer dritten Theorie zufolge existieren supermassereiche Sterne, die mehr als eine Milliarde Sonnenmassen in sich vereinigen. Doch ein solcher Himmels-

körper müsste, wenn er nicht ohnehin unter seiner Masse kollabierte, ein anderes Strahlungsmuster aussenden als die Quasare. Am Paradox der gigantischen Energiefabriken verzweifelnd, glauben manche Wissenschaftler sogar, es müsse noch unbekannte Naturgesetze geben, die das Phänomen erklären können.

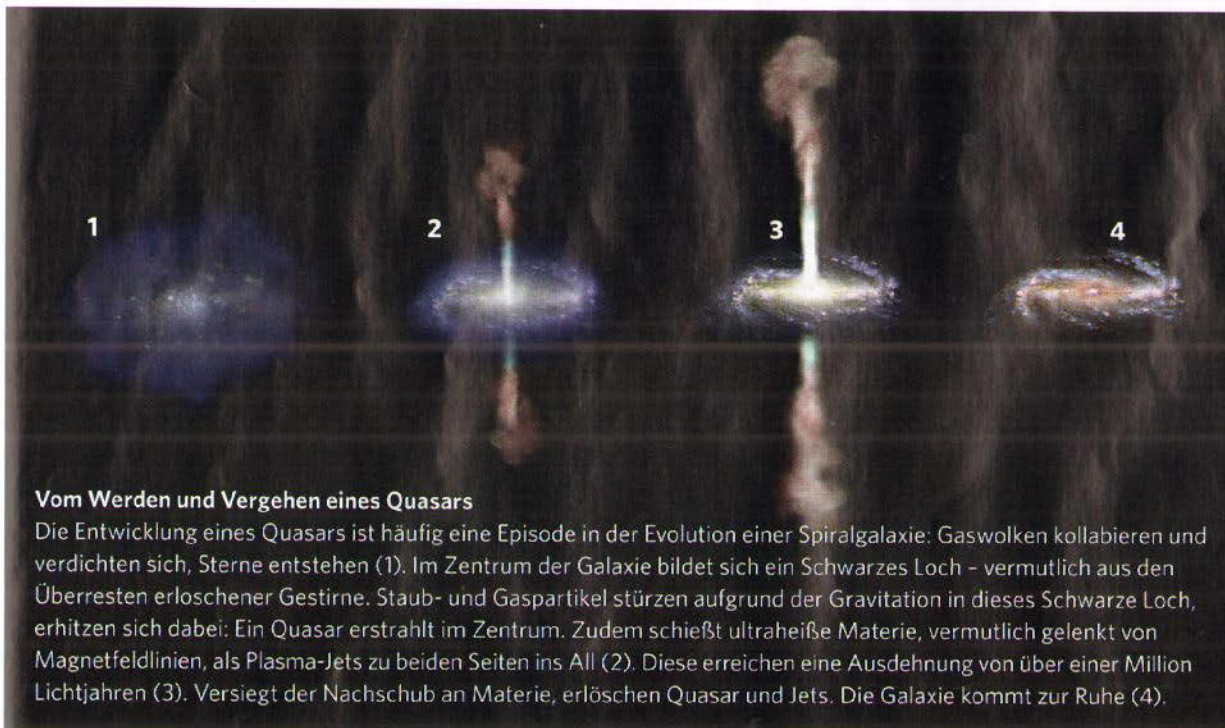
NICHT WENIGER FANTASTISCH klingt die Hypothese, die der sowjetische Kernphysiker Jakow Seldowitsch sowie der aus Österreich stammende Astrophysiker Edwin Salpeter Mitte der 1960er Jahre unabhängig voneinander vertreten: Sie halten Quasare für gewaltige

Selbst mit den besten **Teleskopen lassen**

sich Quasare kaum erfassen – sie überdecken mit ihrer Strahlung jedes Detail der Umgebung

Schwarze Löcher im Zentrum einer Galaxie. Solche massereichen Himmelskörper, deren Anziehungskraft so stark ist, dass nicht einmal das Licht sie verlassen kann, sind bis dahin aber nur rein theoretisch bekannt.

Nach Vorstellung von Seldowitsch und Salpeter saugen Schwarze Löcher in den Zentren von Galaxien Materieströme an, die in ihnen wie in kosmischen Gräbern verschwinden und gleichsam als letztes Aufblitzen vor dem Sturz riesige Strahlenmengen freisetzen.



Vom Werden und Vergehen eines Quasars

Die Entwicklung eines Quasars ist häufig eine Episode in der Evolution einer Spiralgalaxie: Gaswolken kollabieren und verdichten sich, Sterne entstehen (1). Im Zentrum der Galaxie bildet sich ein Schwarzes Loch – vermutlich aus den Überresten erloschener Gestirne. Staub- und Gaspartikel stürzen aufgrund der Gravitation in dieses Schwarze Loch, erhitzen sich dabei: Ein Quasar erstrahlt im Zentrum. Zudem schießt ultraheiße Materie, vermutlich gelenkt von Magnetfeldlinien, als Plasma-Jets zu beiden Seiten ins All (2). Diese erreichen eine Ausdehnung von über einer Million Lichtjahren (3). Versiegt der Nachschub an Materie, erlöschen Quasar und Jets. Die Galaxie kommt zur Ruhe (4).

Doch die Idee, es könnte im All Schwarze Löcher geben, stößt bei vielen Astronomen auf Skepsis: Die Zeit ist noch nicht reif für eine so kühne Vorstellung.

Derweil entdecken die Himmelsforscher durch feinere Messverfahren immer mehr Quasare (heute sind mehr als 130 000 bekannt). Obwohl Radioteleskope die ersten Quasare aufgestöbert haben, stellt

sich nun heraus, dass nur eine Minderheit neben sichtbarem Licht, UV- und Röntgenstrahlung auch Radiowellen aussendet. Statt von Quasaren sprechen Fachleute deshalb lieber von „quasistellaren Objekten“.

Doch lange bleibt ungeklärt, um was genau es sich bei den rätselhaften Himmelskörpern nun handelt. Die Beobachtungen werden dadurch erschwert, dass Quasare mit ihrer Helligkeit alles überstrahlen. Selbst mit den besten Teleskopen lassen sich in den Objekten oder ihrer unmittelbaren Umgebung kaum Details ausmachen.

ERST 1973 gelingt es einem Forscher, um einen gleißenden Quasar das schwache Licht einer

Galaxie nachzuweisen. Zudem wird deutlich, dass es im Herzen vieler Galaxien tatsächlich ein Schwarzes Loch gibt – so wie von Seldowitsch und Salpeter vermutet.

Und so fügen sich die Indizien nach und nach schließlich zu folgendem Bild: Ein Quasar ist ein hell leuchtender Bereich im Zentrum einer Galaxie, dessen Strahlkraft durch ein superschweres Schwarzes Loch in seiner Mitte ausgelöst wird.

Das übt eine derartige Gravitationskraft aus, dass kosmische Trümmer sowie Gas- und Staubteilchen, die in seinen Sog geraten, fast auf Lichtgeschwindigkeit beschleunigt werden, ehe sie in das Loch stürzen. Dabei werden die Partikel mehrere Millionen Grad heiß und geben große Mengen energiereicher Strahlung ab.

Es ist dieses Höllenfeuer, das für die Strahlkraft der Quasare sorgt; das Schwarze Loch in seinem Zentrum dagegen gibt – wie alle Schwarzen Löcher – keinerlei sichtbare Strahlung ab.

Seit die Astronomen mit besseren Teleskopen mehr Details in den Zentren der Galaxien erkennen können, haben sie zudem festgestellt, dass offenbar nicht sämtliche angezogene Materie im Schwarzen Loch im Zentrum eines Quasars verschwindet, sondern dass bei vielen ein Teil dieser Materie während des Sturzes auf das Schwarze Loch abgelenkt und als heißer Materiestrahl (Jet) nach oben und unten aus der Galaxie heraus-

geschleudert wird – vermutlich beschleunigt durch das starke Magnetfeld, das um das Loch herum existiert.

Freilich dauert es nicht lange, bis ein Schwarzes Loch alles an Materie abgeräumt hat, was sich in seiner Nähe befindet (wie hell ein Quasar leuchtet, hängt davon ab, wie massereich sein Schwarzes Loch ist und wie viel Materie es an sich reißen kann).

Und dann erlischt der Quasar für immer – es sei denn, es kommt zu einer Kollision zweier Milchstraßen: Denn bei einem solchen Zusammenstoß gelangt derart viel Staub und Gas in den Kernbereich der Galaxien, dass nichtaktive Quasare neue Materie ansaugen können und anschließend wieder aufstrahlen.

Nach kosmischen Maßstäben sind die Energieschleudern trotzdem kurzlebig: Ihr Feuerwerk dauert vermutlich nur wenige Millionen Jahre an.

WIE SICH EIN SCHWARZES LOCH im Zentrum einer Milchstraße vermutlich herausbildet, dazu haben Astromen bislang zwei Szenarien entwickelt:

- Es formiert sich schon vor den ersten Sternen direkt aus jener Gaswolke, die den Grundstoff der ganzen Galaxie bildet (siehe Seite 48);
- es bildet sich erst später aus den Überresten von Sternen (siehe Seite 90).

Forscher vermuten inzwischen, dass jedes supermassive Schwarze Loch ein potenzieller Quasar ist und dass viele Galaxien eine Phase durchmachen, bei der in ihrem Zentrum ein Quasar leuchtet.

Die meisten dieser Himmelskörper, die wir heute beobachten, sind viele Milliarden Lichtjahre entfernt. Als sich ihr gleißendes Licht auf den weiten Weg zur Erde machte, war das Universum noch jung. Weil sich das Weltall ausdehnt und dadurch der Raum zwischen den Galaxien zunimmt, kommt es heute nur noch selten zu jenen Kollisionen zwischen den Milchstraßen, die für die Neuzündung von Quasaren sorgen können.

Zudem haben die meisten Milchstraßen inzwischen ein beträchtliches Alter erreicht, und der Materienachschub für die Schwarzen Löcher stockt. Deshalb gibt es in unserer näheren Umgebung – also in der Gegenwart – nur noch wenige Quasare. In den entfernten Tiefen des Alls – in der Vergangenheit – aber häufen sie sich.

Der bislang am weitesten entfernte Quasar zündete nur 770 Millionen Jahre nach dem Urknall. Die quasistellaren Objekte, so rätselhaft und exotisch sie anfangs erschienen, haben sich als ein normales kosmisches Phänomen erwiesen – und manche erlauben den Wissenschaftlern einen Blick in die stürmische Jugendzeit unseres Universums.

In jene Zeit, als einige dieser Winzlinge heller leuchteten als 100 000 Milchstraßen. □

Memo: QUASARE

► **In der Mitte** fast aller Galaxien existiert ein aktiver oder ruhender Quasar (ein „quasistellares Objekt“).

► **Im Zentrum** jedes Quasars verbirgt sich vermutlich ein Schwarzes Loch, dessen Anziehung Staub und Gas auf beinahe Lichtgeschwindigkeit beschleunigt, sodass Partikel aneinander reiben und Energie abstrahlen.

► **Besonders gewaltige** Quasare zünden dort, wo zwei Galaxien kollidieren und sich Materie in Massen vermengt.

► **130 000** dieser Himmelskörper wurden bisher entdeckt.

Sternstunde: Tolles Geschenk und bis zu 13 % Ersparnis sichern!

Gratis dazu!



- ✓ Ein Geschenk gratis!
- ✓ Lieferung frei Haus!
- ✓ Ein oder mehrere Magazine zur Wahl!

Edelstahl-Thermoset

Bestens ausgestattet für unterwegs – mit der doppelwandigen 0,75l-Kanne, den 2 stabilen Thermobechern mit Kunststoffverschluss und der praktischen Umhängetasche. Maße: Kanne ca. 7,5 x 29,5 cm, Becher ca. 9 x 15 cm.

✓ Ja, ich möchte mein/e GEO-Wunschmagazin/e zum Vorzugspreis:



1. Die großen Themen der Allgemeinbildung – visuell opulent, leicht verständlich.

GEO kompakt
erscheint 4x jährlich zum Preis von zzt. € 7,75 statt € 8,50 im Einzelkauf mit 9% Ersparnis. **Best.-Nr.**

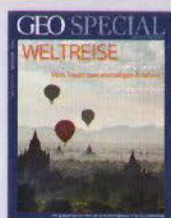
- ☐ selbst lesen! **774 984**
☐ verschenken! **774 985**



2. Aufwendige Reportagen über den Zustand der Welt.

GEO
erscheint 12x jährlich zum Preis von zzt. € 5,65 statt € 6,30 im Einzelkauf mit 10% Ersparnis. **Best.-Nr.**

- ☐ selbst lesen! **774 986**
☐ verschenken! **774 987**



3. Beeindruckende Erkundungen – je Heft ein Land, eine Region oder eine Stadt.

GEO SPECIAL
erscheint 6x jährlich zum Preis von zzt. € 6,95 statt € 8,- im Einzelkauf mit 13% Ersparnis. **Best.-Nr.**

- ☐ selbst lesen! **774 988**
☐ verschenken! **774 989**



4. Die schönsten Reiseziele der Welt – einladend und informativ.

GEO SAISON
erscheint 12x jährlich zum Preis von zzt. € 4,40 statt € 5,- im Einzelkauf mit 12% Ersparnis. **Best.-Nr.**

- ☐ selbst lesen! **774 990**
☐ verschenken! **774 991**



5. Auf den besonderen Spuren der Geschichte.

GEO EPOCHE
erscheint 6x jährlich zum Preis von zzt. € 8,- statt € 9,- im Einzelkauf mit 11% Ersparnis. **Best.-Nr.**

- ☐ selbst lesen! **774 992**
☐ verschenken! **774 993**



6. Rätsel, Bastelspaß und Spiele – für Kinder von 5 bis 7 Jahren.

GEO mini
erscheint 12x jährlich zum Preis von zzt. € 2,90 statt € 3,20 im Einzelkauf mit 10% Ersparnis. **Best.-Nr.**

- ☐ selbst lesen! **774 994**
☐ verschenken! **774 995**



7. Spielerisch-sympathisch lernen – für Kinder von 8 bis 14 Jahren.

GEO lino
erscheint 12x jährlich zum Preis von zzt. € 3,30 statt € 3,60 im Einzelkauf mit 10% Ersparnis. **Best.-Nr.**

- ☐ selbst lesen! **774 996**
☐ verschenken! **774 997**

Senden Sie mir bzw. dem Beschenkten die oben ausgewählte(n) Zeitschrift(en) aus der GEO-Familie ab der nächsterreichbaren Ausgabe. Mein Geschenk erhalte ich nach Zahlungseingang. Nach 1 Jahr kann ich das Abonnement jederzeit beim GEO-Kundenservice, 20080 Hamburg, kündigen. Im Voraus bezahlte Beträge erhalte ich dann zurück. Dieses Angebot gilt nur in Deutschland und nur, solange der Vorrat reicht. Auslandsangebote auf Anfrage.

Meine persönlichen Angaben: (bitte unbedingt ausfüllen)

Name, Vorname _____ Geburtsdatum **19** _____

Straße, Hausnummer _____

PLZ _____ Wohnort _____

Telefonnummer _____ E-Mail-Adresse _____

☐ Ja, ich bin damit einverstanden, dass GEO und Gruner + Jahr mich künftig per Telefon oder E-Mail über interessante Angebote informieren.

Ich bezahle bequem per Bankeinzug: (jährliche Abbuchung)

Kontokartenzahl _____ Kontonummer _____

Geldinstitut _____

☐ Ich zahle per Rechnung.

Ich verschenke ein oder mehrere Magazine aus der GEO-Familie an: (bitte nur ausfüllen, wenn Sie ein oder mehrere Magazine aus der GEO-Familie verschenken möchten)

Name, Vorname des Beschenkten _____ Geburtsdatum **19** _____

Straße, Hausnummer _____

PLZ _____ Wohnort _____

Telefonnummer _____ E-Mail-Adresse _____

☐ Die Belieferung soll frühestens ab dem **20.** _____ beginnen. (Optional)

Als Geschenk erhalte ich: ☒ Edelstahl-Thermoset

Widerrufsrecht: Innerhalb von zwei Wochen nach Absenden meiner Bestellung kann ich diese ohne Begründung beim GEO-Kundenservice, 20080 Hamburg in Textform (z.B. Brief oder E-Mail) oder durch Rücksendung der Zeitschrift widerrufen. Zur Fristwahrung genügt die rechtzeitige Absendung.

Datum _____ Unterschrift _____

Bestellen leicht gemacht:

Per Post:
GEO-Kundenservice,
20080 Hamburg

Per Telefon: (bitte die Bestell-Nr. angeben)
01805/861 80 03

14 Cent/Min. aus dem dt. Festnetz, max. 42 Cent/Min. aus dem dt. Mobilfunknetz.
Abonnenten-Service Österreich und Schweiz: +49 1805/861 80 03

Online mit noch mehr Angeboten:
www.geo.de/familie

Vom Werden und Vergehen der Gestirne

Zwar entsteht jeder Stern auf ähnliche Weise: Gas ballt sich in einer riesigen Wolke zu einer kompakten Kugel zusammen, in der es zu einer Kernfusion kommt und damit zur Zündung der Sonne. Die weitere Entwicklung dieser stellaren Öfen kann jedoch höchst unterschiedlich aussehen und hängt von ihrer Masse ab: Manche explodieren in einer gewaltigen Supernova, andere verglimmen ganz still, wieder andere pusten einen leuchtenden Nebel ins All

Texte: Rainer Harf

Illustrationen: Tim Wehrmann

Produktion: Torsten Laaker



Planetarischer Nebel/Weißer Zwerg

Aus Abermilliarden Tonnen Gas besteht dieser Planetarische Nebel – der Überrest eines Sterns, der am Ende seines Werdegangs seine Hülle in die Weiten des Alls geschleudert hat. Der Kern des einstigen Riesen glüht als erdengroßer Weißer Zwerg im Zentrum des schillernden Gebildes. Ein ähnliches Schicksal wird in rund sechs Milliarden Jahren auch den uns bekanntesten Stern ereilen: die Sonne (siehe Seite 94).

Brauner Zwerg

Von Dichte und Temperatur einer Gaswolke hängt es ab, wie schwer ein Himmelskörper wird. Besitzt dieser weniger als sieben Prozent der Masse unserer Sonne, reicht die Schwerkraft in seinem Inneren nicht aus, um Materie so zusammenzupressen und zu erhitzen, dass es zur Zündung kommt. Ein solcher Stern glüht nur, erkaltet nach einigen Milliarden Jahren und endet schließlich als dunkle Materiekugel.

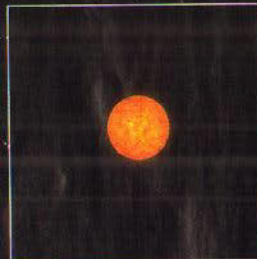
Gaswolke

In einer galaktischen Gaswolke ballt sich eine Materiekugel zusammen, deren Masse weniger als einem Viertel unserer Sonne entspricht



Protostern

Die Gasatome in diesem »Protostern« erhitzen sich, glühen auf. Doch reicht der Druck nicht aus für eine Kernfusion wie in unserer Sonne



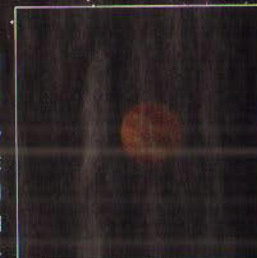
Brauner Zwerg

Der Protostern entwickelt sich nicht zu einem echten Stern, sondern zu einem Braunen Zwerg. Der glimmt lediglich und kühlt allmählich ab



Materiekugel

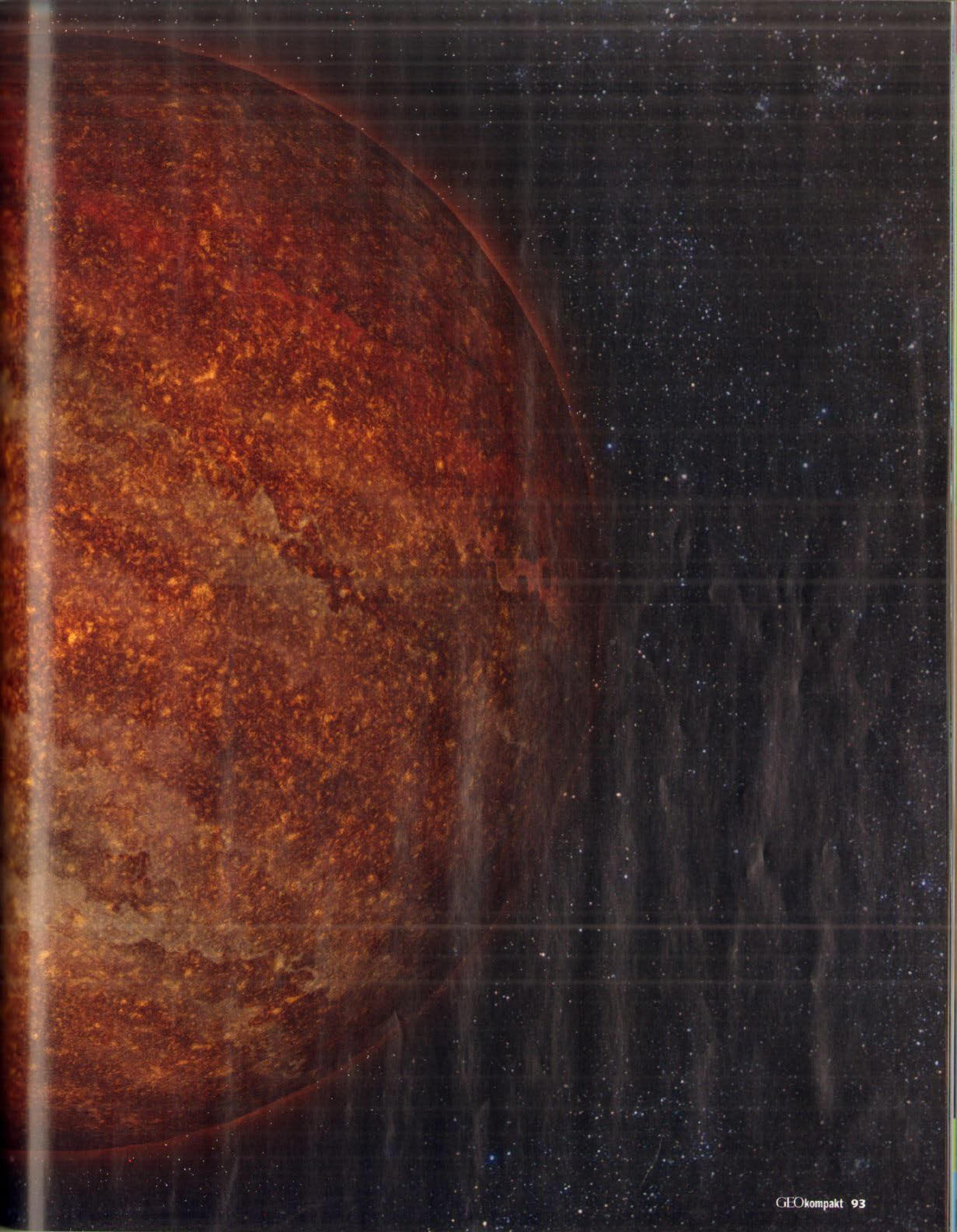
Nach einigen Milliarden Jahren hat sich der ehemals glimmende Braune Zwerg in eine frostige Kugel verwandelt, die dunkel durchs All treibt



SONNE

● BRAUNER ZWERG
Durchmesser: 150 000 Kilometer





Roter Riese

Sterne von der Größe unserer Sonne brennen über viele Milliarden Jahre relativ konstant, indem sie in ihrem Inneren Wasserstoff zu Helium verbacken. Ist der Brennstoffvorrat verbraucht, sackt der Kern in sich zusammen, umliegende Schichten erhitzen sich und blähen den Stern auf den bis zu 400-fachen Durchmesser unserer Sonne auf: zu einem Roten Riesen.

Gaswolke

In einem Nebel aus Wasserstoff und Helium hat sich über Jahrmillionen ein stellares Leuchtfeuer von der Masse unserer Sonne gebildet



Stern von der Größe unserer Sonne

Im Inneren verschmilzt Wasserstoff zu Helium. Bei dieser Kernfusion wird Energie frei, die Hitze steigt auf 15 Millionen Grad



Roter Riese

Nach rund zehn Milliarden Jahren schwindet der Brennstoff, der Sternkern fällt zusammen, äußere Schichten heizen sich auf und schwellen gewaltig an



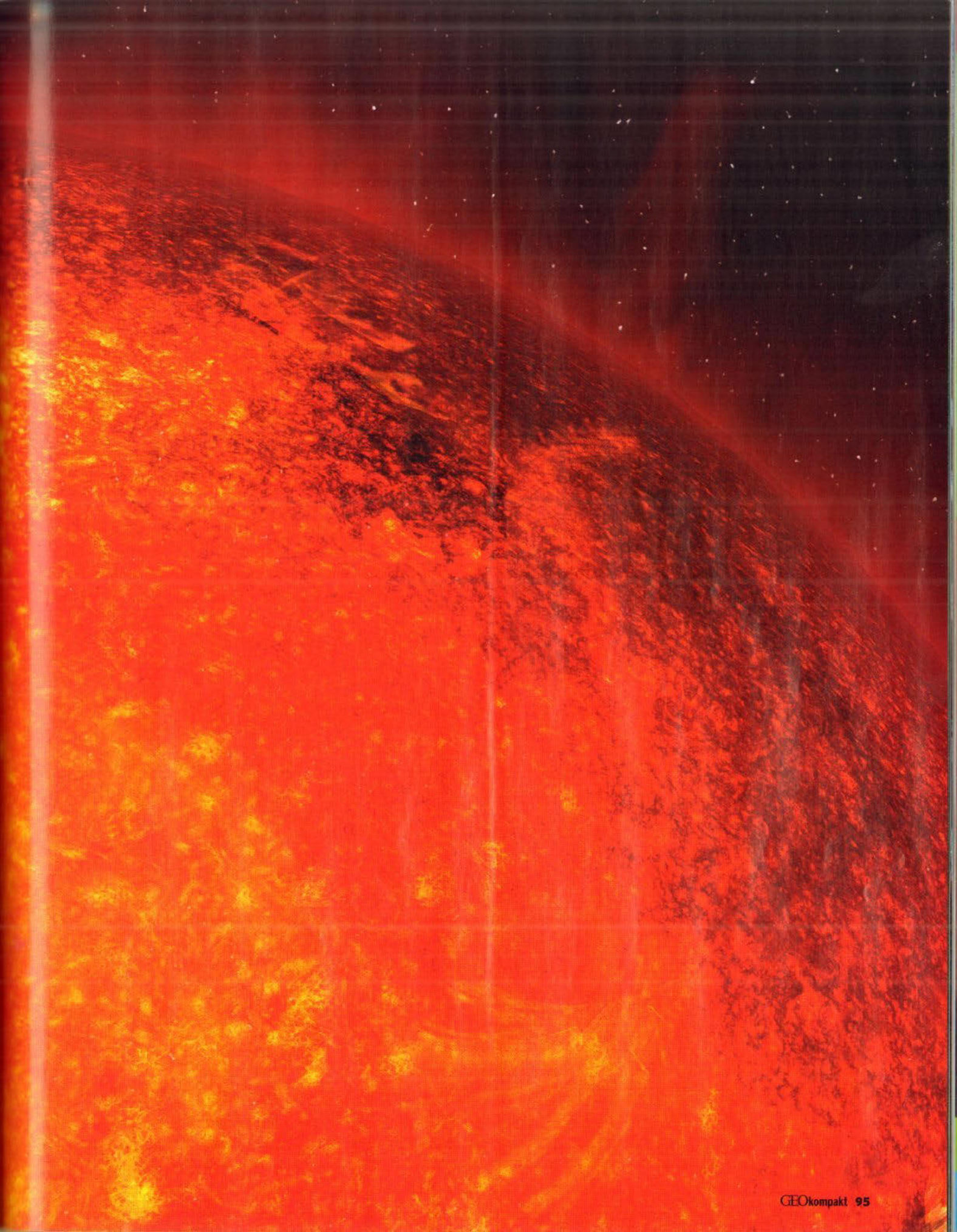
Weißer Zwerg

Seine Gashölle stößt der Rote Riese als planetarischen Nebel ab. Der Kern bleibt als Weißer Zwerg zurück, der noch Jahrmilliarden glüht



SONNE

ROTER RIESE
Durchmesser: bis
zu 550 Millionen Kilo-
meter (400-mal
größer als die Sonne)



Supernova

Sternen mit mehr als der achtfachen Masse unserer Sonne steht ein spektakuläres Ende bevor: Bereits nach Jahr-millionsen haben diese Riesen ihren Treibstoff verfeuert, dann brechen sie in einer Zehntelsekunde unter ihrem eigenen Gewicht zusammen. Der plötzliche Kollaps reißt die Hüllen des Sterns in Stücke, die als Supernova so hell leuchten wie eine Milliarde Sonnen.

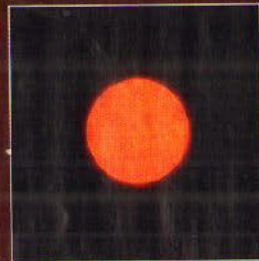
Gaswolke

In Nebeln aus Wasserstoff und Helium kommt es hin und wieder vor, dass ein Stern entsteht, der mindestens achtmal so schwer ist wie unsere Sonne



Überriese

In weniger als 20 Millionen Jahren hat der Stern seinen Brennstoff verbraucht, wächst zum Überriesen heran und strahlt bis zu 100 000-mal so hell wie die Sonne



Supernova

Kommt der Fusionsreaktor im Stern zum Erliegen, bricht der Kern mit Wucht zusammen, die Hülle des Überriesen platzt in einer Supernova-Explosion



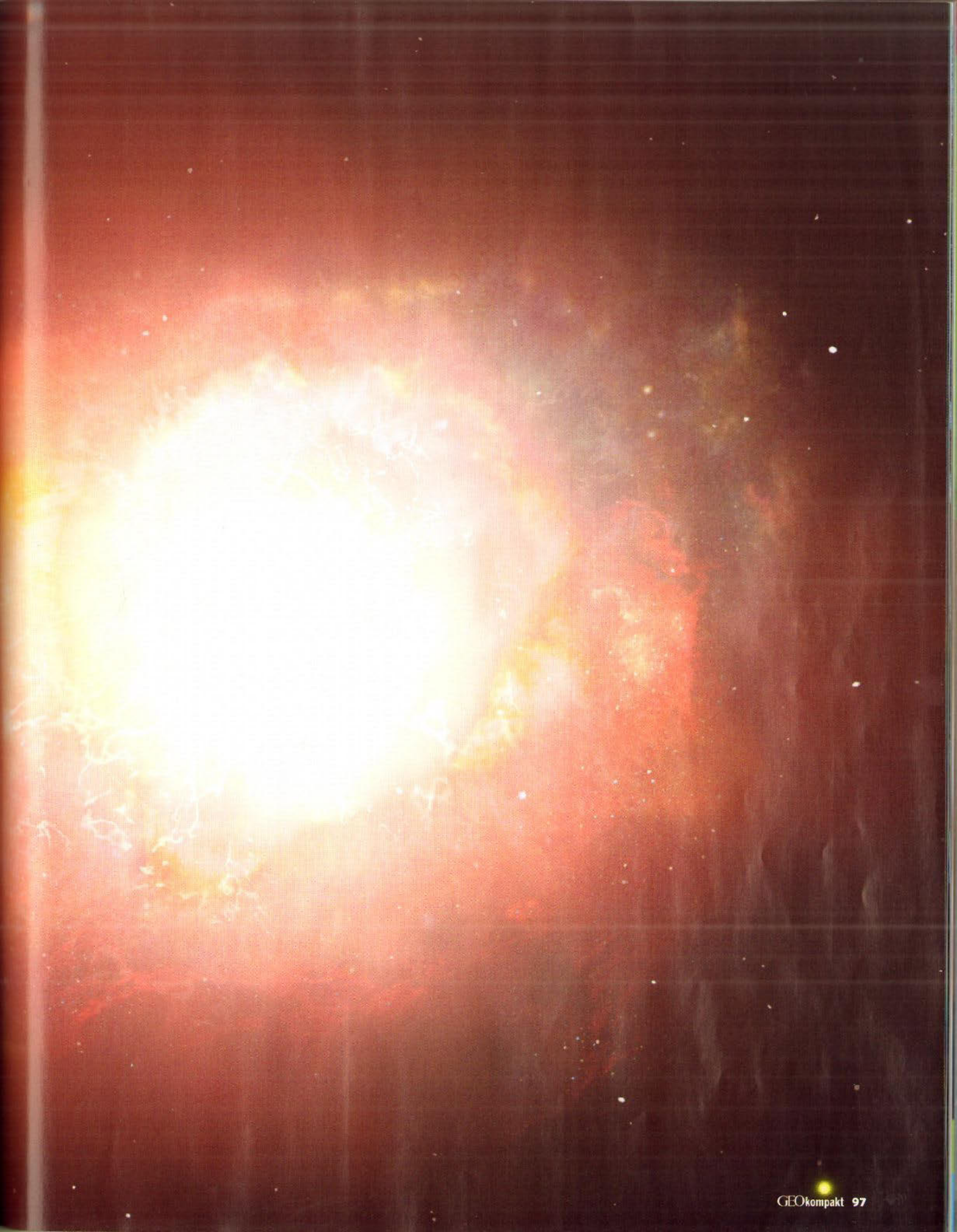
Neutronenstern

Inmitten der Supernova-Reste dreht sich der Kern des einstigen Überriesen. Er hat sich in eine extrem dichte Kugel verwandelt: einen Neutronenstern



SONNE

ÜBERRIESE
Durchmesser: bis zu
1,1 Milliarden Kilometer
(800-mal größer als
die Sonne)



Hyperriese

Die größten aller Sterne sind seltene Gebilde: Rund zwei Dutzend sind in der Milchstraße bekannt. Manche dieser strahlenden Himmelskörper sind so voluminös, dass acht Milliarden Sonnen in ihnen Platz fänden. Allerdings ist ihre Lebensdauer vergleichsweise kurz: Bereits nach wenigen Millionen Jahren explodiert ihre Hülle – und von ihnen bleibt nichts als ein Schwarzes Loch.

Gaswolke

Auch die größten aller Sterne im All wachsen in Gaswolken heran: Hyperriesen, mit einem bis zu 2000-fachen Sonnendurchmesser



Hyperriese

Die Leuchtkraft der Giganten übertrifft die der Sonne um das 100 000-Fache. Im Inneren herrschen Temperaturen von mehreren Milliarden Grad



Hypernova

Ist der Brennstoff verbraucht, stürzt der Kern zusammen, eine gewaltige Schockwelle lässt den Rekordstern als Hypernova explodieren



Schwarzes Loch

Der Kern ist so schwer, dass er unter seiner eigenen Schwerkraft zu einem Schwarzen Loch kollabiert – umschillert von der geborstenen Sternenhülle



SONNE

HYPERRIESE
Durchmesser: bis zu drei Milliarden Kilometer (rund 2000-mal größer als die Sonne)



Schwarzes Loch

Schwarze Löcher sind Objekte von ungeheurer Dichte: In ihnen konzentriert sich derart viel Masse, dass ihrer Schwerkraft weder Materie noch Licht zu entkommen vermögen. Die kosmischen Exoten sind daher unsichtbar – und doch bisweilen zu erkennen: wenn ein Schwarzes Loch von einem Partnerstern umkreist wird, dessen Materie allmählich in den dunklen Abgrund gesogen wird.

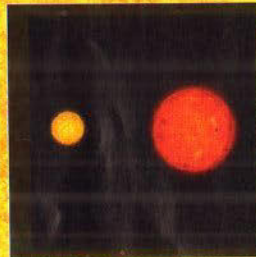
Gaswolke

In einem stellaren Nebel haben sich zwei Sterne so nah beieinander entwickelt, dass sie einander aufgrund ihrer Schwerkraft anziehen und umkreisen



Zwei Partner

Dieses Doppelsternsystem besteht aus einem Über- und einem Hyperriesen; der Große ist mehr als doppelt so schwer wie sein Partner



Ein Stern im Sog

Der Hyperriese hat seinen Brennstoff verfeuert und sich in ein Schwarzes Loch verwandelt, dessen Schwerkraft nun die Materie des anderen Sterns anzieht



Schwarzes Loch

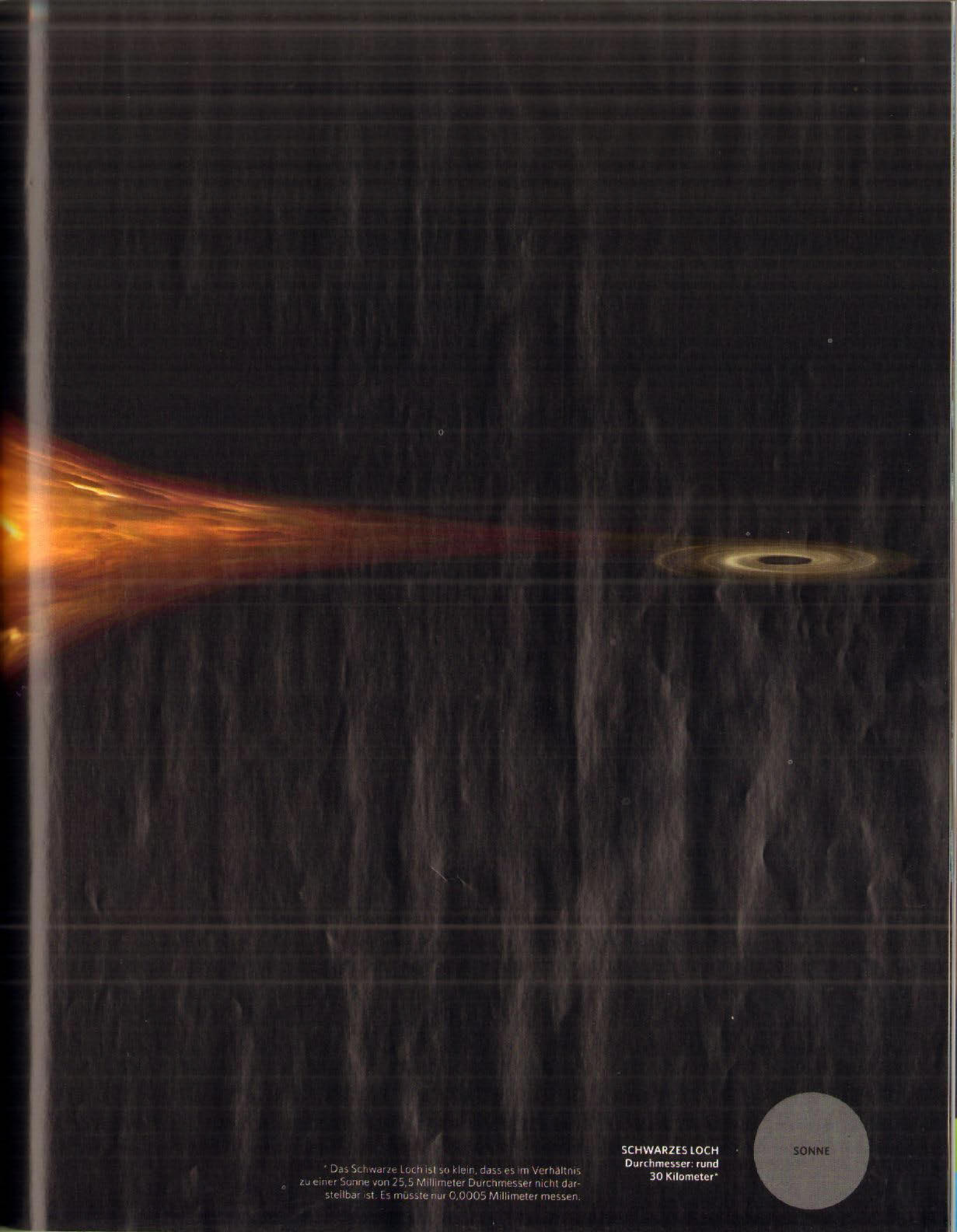
Am Ende ist von den beiden Sternen nichts mehr zu sehen. Ihre Materie befindet sich nun im Abgrund des winzigen Schwarzen Lochs



Wissenschaftliche Beratung Grafiken:
Professor Ralf Klessen, Zentrum für Astro-
nomie der Universität Heidelberg

SONNE

PARTNERSTERN
Durchmesser: 30 Millionen
Kilometer (gut 20-mal
größer als die Sonne)



* Das Schwarze Loch ist so klein, dass es im Verhältnis zu einer Sonne von 25,5 Millimeter Durchmesser nicht darstellbar ist. Es müsste nur 0,0005 Millimeter messen.

SCHWARZES LOCH
Durchmesser: rund
30 Kilometer*



SONNE



Prof. Dr. Harald Lesch von der Universitäts-Sternwarte München ist einer der bekanntesten deutschen Astrophysiker. Zudem arbeitet der 51-Jährige als Dozent für Philosophie



Wie entstanden Raum und Zeit, **Herr Professor Lesch?**

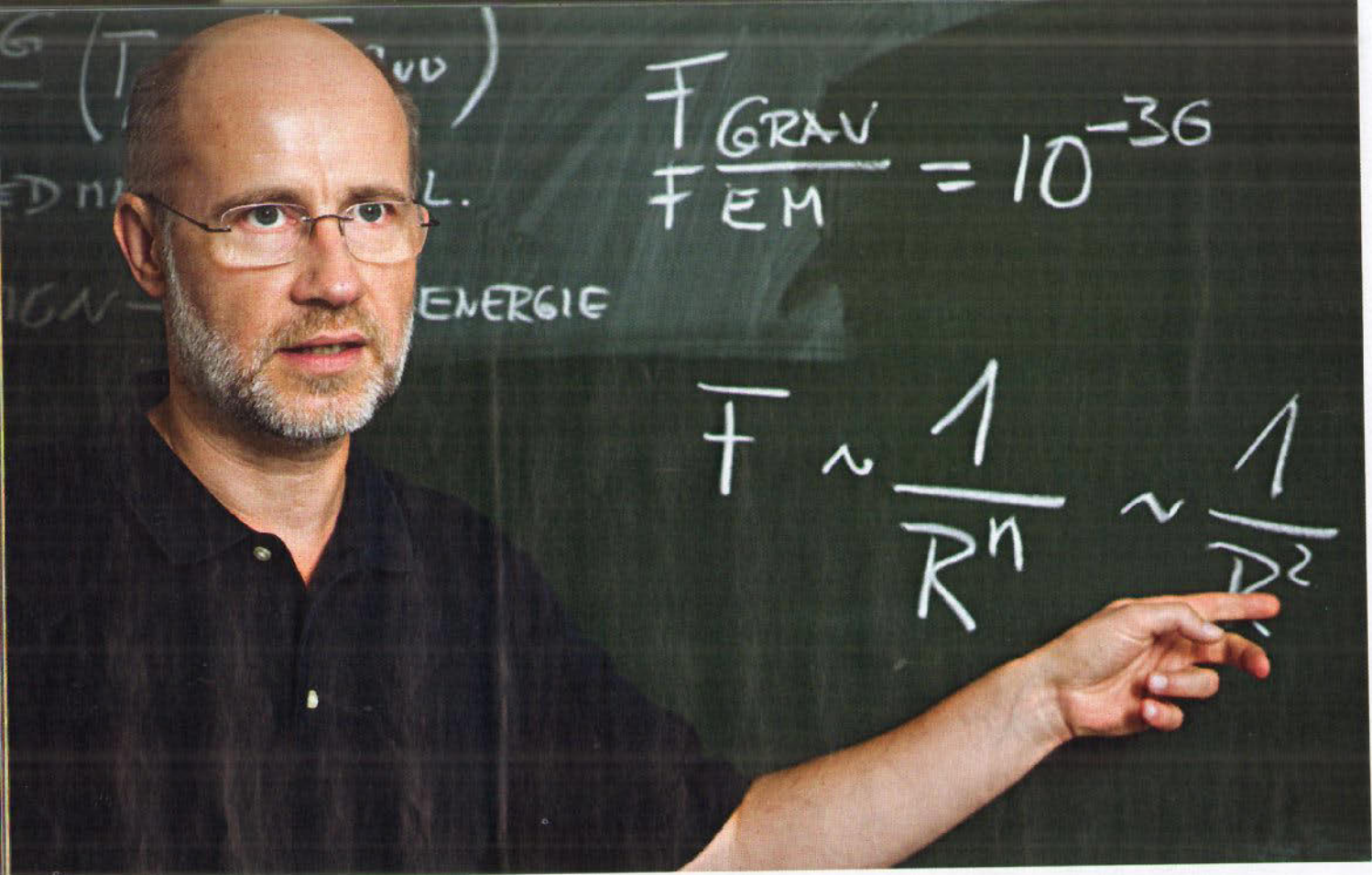


Das werden wir **niemals begreifen!**

Weshalb gibt es überhaupt etwas? Warum ist nicht nichts? Der Astrophysiker Harald Lesch über die Geburt von Raum, Zeit und Materie, die Suche nach der einen »Weltformel« – und die Grenzen unserer Erkenntnisfähigkeit

Interview: Rainer Harf und Henning Engel
Fotos: Achim Mulhaupt





» Die Naturgesetze hat es schon immer gegeben. Auch wenn die Natur nichts davon weiß «

GEOkompakt: Herr Professor Lesch, wird Ihnen nicht manchmal schwindlig, wenn Sie sich mit den riesigen Dimensionen und Zeitskalen des Alls befassen?

Harald Lesch: Schwindlig würde ich nicht sagen. Wahrscheinlich bin ich schmerzunempfindlicher als jemand, der sich nicht ständig damit beschäftigt. Für mich ist der Kosmos ein Naturphänomen und die Astrophysik ein Instrument, um ihn zu erforschen.

Und wie das so ist mit Instrumenten: Am Anfang hat man noch große Ehrfurcht davor, doch irgendwann nimmt man es einfach heraus und spielt darauf. Was mich manchmal erschauern lässt, ist, dass es überhaupt möglich ist, mithilfe der Mathematik so weit jenseits unserer normalen menschlichen Erfahrungsräume Wissenschaft zu betreiben.

Für Laien sind ja die Dimensionen des Universums wie auch seine Phänomene – etwa die Existenz Schwarzer Löcher – extrem schwer zu begreifen. Wie ist es zu erklären, dass die Menschen sich dennoch so sehr für den Urknall und das Weltall interessieren?

Zum einen reizt das Geheimnis. Uns fasziniert die Frage: Was ist denn da draußen? Wir glauben, dass in dieser Welt mehr existiert als das, was uns direkt umgibt. Und zweitens: Astronomie ist harmlos. Das ist in Zeiten, in denen alles in Einheiten von Relevanz und Effizienz gemessen wird, ein großer Vorteil. Hält zum Beispiel ein Klimaforscher einen Vortrag, steht sofort eine ethische Forderung im Raum: Ändere dein Handeln! Tu etwas! All diese sogenannten „relevanten Forschungsgebiete“ erzeugen eben auch den Druck, dass etwas gemacht werden muss.

Wer sich mit Astronomie beschäftigt, muss kein schlechtes Gewissen haben?

Genau, und das ist ein großer Vorteil. Wir Astronomen werden gern eingeladen, weil das, worüber wir zu berichten haben, unglaublich ist, einfach schön – und harmlos.

Gibt es weitere Motive?

Vielleicht die Hoffnung, dort draußen eine Welt zu entdecken, die ganz anders funktioniert als die unsere. In der es Frieden gibt und unsere Probleme gelöst sind. Auf einen Außerirdischen zu treffen, einen E.T., der uns sagen kann, wie wir die Schwierigkeiten, die wir auf der Erde haben, bewältigen können.

Was die Menschen ebenfalls sehr fasziniert, ist der Begriff der „Weltformel“. Danach suchen die Astrophysiker ja praktisch seit

Albert Einsteins Zeiten. Was ist darunter zu verstehen?

Es ist die Hoffnung auf eine Einheit am Anfang. Dass sich der Beginn des Universums und auch die Struktur der Materie mit einer einzigen Formel beschreiben lassen. Bei den extrem hohen Temperaturen direkt nach dem Urknall muss die Welt ganz anders ausgesehen haben, als wir sie heute kennen. Die vier Grundkräfte – Schwerkraft, elektromagnetische Kraft und die beiden Kräfte, die in den Atomkernen wirken – waren dieser Hypothese zufolge in der damaligen Hitze vereinigt. Und für diese Welt, in der die vier Grundkräfte eins waren, sucht man die Weltformel.

Nehmen wir an, Astrophysiker finden irgendwann diese Weltformel. Könnten Sie dann Ihren Job an den Nagel hängen, weil alle Fragen beantwortet sind?

Nein, die Suche wäre nie zu Ende, weil man sich fragen würde, warum sieht die Formel so aus und nicht anders. Es könnte aber auch sein, dass die Weltformel ein Mythos ist, so wie der Heilige Gral oder der Stein der Weisen bei den Alchemisten. Wo es dann letzten Endes gar nicht so sehr darum geht, das Ziel zu erreichen, sondern darüber zu sinnieren: Was passiert mit den Menschen auf dem Weg dorthin? Und wenn dieses Ziel erreicht ist, womöglich zu fragen: Meine Güte, warum ist die Welt so fein aufeinander abgestimmt? Das führt dann eher in philosophische Richtungen als in empirische.

Hätte es irgendeine praktische Konsequenz, wenn jemand auf die Weltformel käme?

Nur für diejenigen, die diese Formel gefunden hätten: Die würden nach Stockholm fahren und sich den Nobelpreis abholen. Und sie müssten sehen, wie sie mit dem Ruhm klarkommen.

Aber man kann es natürlich auch von der erkenntnistheoretischen Seite her sehen: Es wäre der Abschlussstein in der Kathedrale der Physik. Solange die Weltformel fehlt, ist die Kirche nicht vollständig. Es ist wie eine Baustelle.

Also würde es eine gewisse Befriedigung auslösen, wenn man das Problem vollständig gelöst hätte?

Ja. Die menschliche Vernunft könnte sich einen weiteren Pokal in ihren Trophäenschrank stellen. Auf der anderen Seite muss man sagen: Auch wenn bei 99 Prozent aller Wissenschaft im Sinne von Effizienz nichts herauskommt, finden wir ab und zu etwas, das die Welt verändert. Zum Beispiel würde es die heutige Elektronik, all diese digitalen Geräte nicht geben, wenn die Physiker Wolfgang Pauli, Erwin Schrödinger, Werner Heisenberg und andere sich nicht Gedanken gemacht hätten, wie denn nun die Materie funktioniert.

Manche der Erkenntnisse sind ja für einen Laien nur sehr schwer vorstellbar – etwa, dass im Moment des Urknalls sowohl Raum als auch Zeit entstanden sind.

Nicht nur für den Laien, für alle. Das ist überhaupt nicht vorstellbar.

Man denkt immer, da muss doch irgendwas gewesen sein, in das der Raum oder die Zeit explodiert ist.

Nein, da war nichts. Man muss schlicht sagen, dass unsere Erkenntnisfähigkeit nicht ausreicht, um das zu begreifen. Wir sind als Lebewesen Teil der Evolution, und unser Gehirn hat sich in einer mittleren Welt entwickelt, in der Größen wie Meter, Kilogramm und Sekunde eine Rolle spielen. Jetzt reden wir hier über den Anfang, da haben wir ein Universum, das 20 Größenordnungen kleiner ist als ein Proton. Ein Proton

ist ja schon unfassbar winzig. Wir können uns keine Dinge vorstellen, für die es keinen Raum gibt, wir können uns keine Dinge vorstellen, für die es keine Zeit gibt. Denn allein der Gedanke, zu denken, bedeutet: Erst denke ich den Gedanken nicht, dann denke ich ihn, und danach denke ich ihn nicht mehr. Das heißt, ich habe sofort eine Zeitstruktur. Unsere Erkenntnisfähigkeit hängt an der Raum-Zeit-Struktur.

Zu diesen komplizierten und schwer vorstellbaren Dingen gehört unter anderem die sogenannte „String“-Theorie. Was ist darunter zu verstehen?

Es ist eigentlich noch keine Theorie, sondern zunächst einmal experimentelle Mathematik. Wir arbeiten jetzt an den Instrumenten, um vielleicht einmal eine solche Theorie zu formulieren. Sie zielt darauf ab, die vier Grundkräfte zu vereinigen. Doch es stellt sich heraus, dass dafür die normalen vier Dimensionen der Allgemeinen Relativitätstheorie – drei des Raumes und eine der Zeit – nicht reichen, sondern hier müssen noch mindestens sieben Extradimensionen angelegt werden.

Das klingt ziemlich kompliziert.

Nicht nur das, es kommt noch schlimmer. Denn die Stringtheoretiker sagen, diese Extradimensionen sind nur auf extrem kleinen Längen wirksam. Also quasi am Rande der Welt, nämlich bei 10^{-33} Zentimeter. Das ist die sogenannte Planck-Länge, das Kürzeste, was theoretisch denkbar ist. Doch in dieser Größenordnung können wir überhaupt nicht messen, das ist viel zu klein.

Und deshalb können wir die Theorie nicht testen. Als Empiriker würde man da sagen: Ja, das ist eine nette Hypothese, aber sie lässt sich nicht überprüfen – die können wir vergessen.

» Die Grenzen in der Physik lösen sich auf, wenn wir an die Ränder kommen.
Dann ist nichts mehr da «

Jede Theorie muss Ihrer Ansicht nach also konkrete Aussagen machen, und die müssen dann überprüfbar sein?

Unbedingt. Das Experiment unterscheidet die Physik von allen anderen Wissenschaften. Es ist das schärfste Schwert der Kritik. Das Experiment entscheidet, ob wir eine Theorie akzeptieren oder nicht.

Nach bestimmten Hypothesen gibt es nicht nur unseren Kosmos, sondern viele Paralleluniversen. Was ist davon zu halten?

Theorien, die von vornherein eine Beobachtung ausschließen – und dazu gehört die Theorie der Paralleluniversen, denn man kann Paralleluniversen niemals experimentell untersuchen –, sind für mich als empirischen Wissenschaftler völlig haltlos. Eine Weltformel, die

Kann das bedeuten, dass die physikalischen Gesetze, so wie wir sie kennen, sich in diesen Multiversen von den unseren unterscheiden? Oder gehen Sie davon aus, dass die Gesetze ganz universell gültig und in allen denkbaren Teilen gleich sind?

Wir können nur vermuten, dass die Naturgesetze dort die gleichen sind wie bei uns. Aber das ist eine Hypothese. Es gibt Theorien, nach denen die Naturkonstanten sich mit der Zeit verändern. Aber es gibt bislang keine wirklichen Hinweise auf solche Variationen, weder zeitlich noch räumlich.

Man muss sich einmal klarmachen, was sie bedeuten würden: Dann müssten wir unsere gesamte astrophysikalische Forschung auf den Prüfstand stellen! Denn je nachdem, von wo wir Daten erhalten, von wo wir Strahlung

Wirklichkeit gibt, die auch unabhängig von unserem Bewusstsein existiert. Ein Naturgesetz ist im Grunde genommen eine mathematische Frage an die Natur. Und wir erhalten eine mathematische Antwort: Es gibt etwas Messbares. Wenn man dann ein Naturgesetz formuliert, das besonders erfolgreich Aussagen über die Welt macht, ist das wunderbar.

Aber Theorien mussten doch auch immer wieder revidiert werden oder haben sich als komplett falsch erwiesen.

Ja, oft funktioniert es eine Weile gut. Bis man irgendwann feststellt, es gibt Anomalien. Dann wird das Naturgesetz variiert. Seit Kopernikus aber hatten wir keine Revolution mehr in der Physik, sondern jede Art von neuer Theorie enthält die alte erfolgreiche Theorie – aber kann nun noch mehr erklären. Die Allgemeine Relativitätstheorie zum Beispiel enthält die Newtonsche Mechanik vollständig, kann aber zusätzlich erklären, was etwa in der Nähe der Lichtgeschwindigkeit passiert.

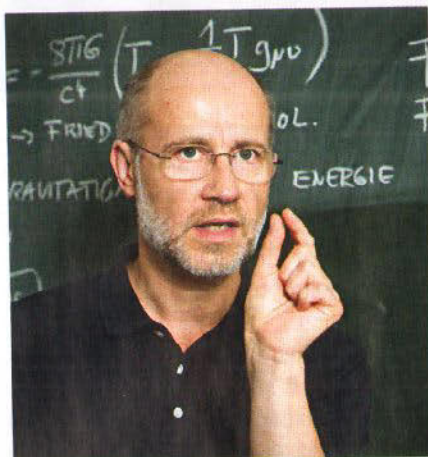
Insofern sind die Naturgesetze, die wir heute haben, nicht mehr die gleichen, die wir früher hatten. Wir irren uns sozusagen empor. Wir arbeiten uns also langsam mit Versuch und Irrtum an eine Erkenntnis heran. Und so finden wir schließlich diese Naturgesetze, die es schon immer gegeben hat, auch wenn die Natur nichts davon weiß.

Aber wir sind noch lange nicht am Ende damit. Es gibt nach wie vor viele Trüffel zu finden im Wald der Erkenntnis.

Auch wenn man als Naturwissenschaftler ein Verständnis für die materielle Welt und ihre Gesetzmäßigkeiten hat, fragt man sich trotzdem: Woher kommt das alles? Geht die Beschäftigung mit dem Kosmos und dem Urknall nicht doch in eine religiöse Richtung?

Letztlich – und davon bin ich fest überzeugt, egal wie atheistisch Forscher auf diesem Gebiet sind – geht es um genau diese Frage: Warum ist nicht nichts? Man möchte wissen, was da passiert ist. Und dann kann man die Schöpferhypothese rausholen und sa-

» Die Dunkle Energie ist eine Provokation für das Gehirn. Sie ist anders als alles, was wir kennen «



besagt, dass es noch 10^{500} Paralleluniversen gibt, macht einfach keinen Sinn mehr. Da wird Physik zur Pseudowissenschaft. In diesem Fall würde ich sagen: Gehen wir einen trinken und reden über etwas anderes.

Und dann existiert auch noch die Theorie von den Multiversen...

Ja, es könnte sein, dass unser Universum, so weit wir es überblicken, nur ein Teil des Teils ist, der anfangs alles war – um Goethes „Faust“ zu zitieren. Dann wären wir eben nur ein Teil davon, und hinterm Horizont, da ließe sich Udo Lindenberg ins Spiel bringen, geht's weiter. Nur können wir das nicht sehen.

bekommen, müssten wir überlegen, welchen Wert eine Naturkonstante dort hat, um die Daten zu interpretieren.

Ich bin überzeugt: In einer Welt, in der wohldefinierte Lösungen existieren, müssen die Gesetzmäßigkeiten einheitlich sein.

Unser Gehirn ist ja durch die Evolution darauf programmiert, die Welt zu deuten. Kann es sein, dass die Naturgesetze von den Menschen formuliert und quasi erfunden wurden? Oder haben sie schon immer objektiv und unveränderlich existiert?

Wir sind als Naturwissenschaftler Realisten und gehen davon aus, dass es außerhalb unseres Bewusstseins eine

gen: Ja, es ist eben gewollt von irgendwas, das wir „Gott“ nennen. Das gibt einem dann das Gefühl des Wohlaufgehoben- und Getragenseins in der Welt.

Oder man nimmt an, es sei eine quantenmechanische Fluktuation gewesen oder was auch immer. Aber immer geht es um diese entscheidende Frage nach den Urgründen der Welt, und da treffen sich Physik, Metaphysik, Theologie.

Da treffen sich alle – und alle haben dafür keine Antwort.

Gibt es unter Physikern viele Atheisten?

Es gibt vermutlich ziemlich viele, die zumindest Agnostiker sind und sagen: Ich weiß es nicht, ich halte mich da völlig raus, und es spielt für mich auch keine Rolle. In der Kosmologie ist die Frage nach Gott nicht so relevant; selbst die Theologen würden sie da nicht stellen. Denn in Hinsicht auf den Urknall wird Gott immer zu einer Lückenbüßervariante. Er springt nämlich da ein, wo die Wissenschaft noch keine Antworten hat.

Aber an der Grenze zum Urknall, bei einer Größe des Universums von 10^{-33} Zentimetern, wäre es eben eine Bonsai-Gott-Variante: Ein Gott nur für eine Winzigkeit, denn etwas Kleineres kann man sich gar nicht mehr vorstellen. Viel interessanter wird es bei der Frage nach dem Leben, nach der Evolution. Für die physikalische Forschung spielt Gott keine Rolle.

Wozu ist Gott denn Ihrer Meinung nach notwendig?

Wir brauchen ihn für die wichtigen menschlichen Fragen, für die nach dem Sinn etwa, für Visionen, für Werte und so weiter. Ich brauche ihn nicht am Anfang des Universums als jemanden, der den Urknall auslöst. Religionen beschäftigen sich mit existenziellen Fragestellungen, die

durch Naturwissenschaften niemals beantwortet werden können.

Und wie halten Sie es persönlich mit der Religion?

Ich bin ein klassischer Protestant, stamme aus einer hessischen Gemeinde, die schon sechs Jahre nach Luther protestantisch wurde. Wenn ich als Physiker rechne, spielt es keine Rolle, ob ich an Gott glaube oder nicht.

Aber ich bin sicher, dass die Art und Weise, wie ich mit Menschen umgehe, wie ich mich verhalte, viel damit zu tun

hat, dass ich ein protestantischer Christ bin. Ich bin in einer bestimmten Art und Weise sozialisiert worden. In der Gemeinde, in der ich lebe, bin ich innerhalb der Kirche tätig, weil mich gewisse Fragen umtreiben. Die haben nichts mit physikalischen Daten zu tun, sondern etwas mit menschlichen Werten. Ich bin sozusagen der typische kantische Lutheraner, bei dem es um Fragen geht wie: „Was ist Pflicht, was soll ich tun?“

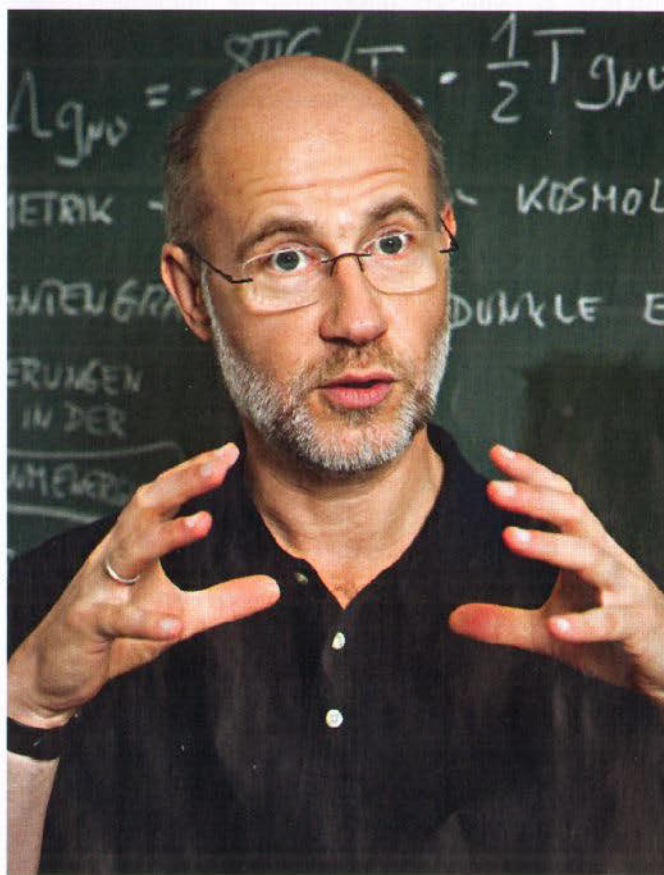
Sie trennen also die Frage nach einem Schöpfer völlig von der Astrophysik?

Für mich ist die Frage nach Gott in vielerlei Hinsicht eine ganz wichtige, aber sie hängt garantiert nicht mit meinem Physiker-Dasein zusammen. Ich finde es hochinteressant, dass immer die Astronomen nach Gott gefragt werden. Offenbar besteht die Vorstellung, Gott sei irgendwo da draußen. Wer fragt schon seinen Tankwart oder die Kassiererin im Supermarkt: „Sagen Sie mal, bevor Sie jetzt hier alles zusammenrechnen, glauben Sie eigentlich an Gott?“

Über Gott zu reden ist eine wunderbare Sache, aber als Physiker bin ich dafür nicht besser geeignet als irgendein anderer.

Gibt es für Physiker eine Grenze der Erkenntnis, an der sie grundsätzlich nicht mehr weiterkommen? Einen Punkt, an dem man sagen sollte, da macht es keinen Sinn mehr, zu forschen?

Als Philosophielehrer würde ich immer sagen: In dem Moment, wo ich eine Grenze erkannt habe, habe ich sie schon überschritten. Da kann ich nämlich schon auf die andere Seite blicken. Es sieht



» **Über Gott zu reden**
ist eine wunderbare Sache, aber
als Physiker bin ich
dafür nicht besser geeignet als
irgendein anderer «

danach aus, dass die Grenzen in der Physik sich auflösen, wenn wir an die Ränder kommen. Dann ist nichts mehr da.

Können Sie das an Beispielen erklären?

Bei hohen Energien besteht Materie plötzlich nicht mehr aus Materie, sondern aus Feldern. Wenn man die Lichtgeschwindigkeit erreicht, bleibt die Zeit stehen, und man weiß nicht, ob Raum und Zeit überhaupt noch da sind. Kommt man in die Nähe von Schwarzen Löchern, bricht die Kausalität zusammen – also die Vorstellung, dass eine Ursache immer eine bestimmte Wirkung haben muss. Überall hat man es nur noch mit Vorhängen zu tun. Es sind keine Grenzen wie eine Mauer, sondern es löst sich einfach alles auf. Für den Prozess der Forschung bedeutet das: Man kann immer weitermachen.

Das heißt, die Wissenschaft ist ein Ausloten von Grenzen, aber an diesen Grenzen verfliegt das Greifbare in abstrakte Mathematik? Kommt man mit diesen Methoden auch an den Urknall heran?

Es sieht so aus. Meinem Kollegen Martin Bojowald ist es ja gelungen, diese Gleichungen durch den Urknall quasi hindurchzurechnen. Daran sieht man, dass das keine wirkliche Grenze ist. Wenn es so zutrifft, wie Bojowald das gerechnet hat, dann geht man einfach durch den Urknall und auf der anderen Seite wieder raus – sozusagen in ein Universum vor unserer Zeit.

Halten Sie es für denkbar, dass man Aussagen machen kann über das, was vor dem Urknall existiert hat?

Der Brite Roger Penrose hat das versucht und auch Vorhersagen gemacht: In den Intensitätsschwankungen der kosmischen Hintergrundstrahlung sollte man Spuren von dem sehen, was vor unserem Universum gewesen ist – also so etwas wie die Nachgeburt des heutigen Universums. Allerdings haben wir bis jetzt nichts gefunden.

Welches sind Ihrer Meinung nach die wichtigsten Forschungsergebnisse der vergangenen Jahrzehnte, die das Weltbild der Kosmologen verändert haben?

Ziemlich schockierend war die Erkenntnis, dass die Leuchtende Materie nicht die einzige ist. In den 1980er Jahren ging man als Kosmologe davon aus, dass es zwar noch ein paar kleinere Probleme gibt, wir aber über das Weltall im Großen und Ganzen genau Bescheid wissen.

Aber dann wurde die Dunkle Materie entdeckt. Zunächst hieß es noch, das könnten vielleicht ausgebrannte Sterne oder Altplaneten sein, irgendein altes Material. Dann stellte sich heraus, dass die Dunkle Materie nicht mit Strahlung wechselwirkt – dass also keine Strahlung abgegeben und keine absorbiert wird.

Es musste etwas ganz anderes sein als das, woraus unsere sichtbare Welt

» Wir sind noch
lange nicht am
Ende. Es gibt noch
viele Trüffel im
Wald der Erkenntnis
zu finden «

besteht. Zunächst dachte man, vielleicht sind es Neutrinos. Aber die sind zu leicht, ließ sich errechnen. Es musste etwas anderes sein. Schwere Teilchen, die nicht mit Strahlung wechselwirken? Aber die gibt es doch überhaupt nicht. Und wir wissen bis heute nicht, was es ist.

Wie lässt sich denn die Dunkle Materie nachweisen, wenn sie keine Strahlung aussendet?

Größere Massen – und Masse hat ja die Dunkle Materie – verbiegen die Lichtwege. Liegt Dunkelmaterie vor Galaxien und Galaxienhaufen, wirkt sie auf das Licht ähnlich wie eine optische

Linse und verzerrt das Bild. Solche sogenannten Gravitationslinsen sind das allerwichtigste Instrument, um Dunkle Materie zu entdecken.

Und welche Rolle spielt die Dunkle Materie für das Universum?

Es gab schon kurz nach dem Urknall Schwankungen – Fluktuationen – in der Verteilung der Dunklen Materie. Und da fiel die Leuchtende Materie schlagartig hinein, und es kam zu einer sehr, sehr schnellen Strukturbildung. Ohne die Dunkelmaterie hätte sich normale Materie bis heute nicht zu Galaxien verdichten können.

Wie kann die Dunkle Materie einen so großen Einfluss haben?

Weil sie fünf- bis sechsmal häufiger im Kosmos vorkommt als die Leuchtende Materie.

Das bedeutet, der für uns sichtbare Teil der Materie im Universum ist der weitaus geringere?

So ist es. Aber es kommt noch schlimmer. Ende der 1990er Jahre haben drei US-Forscher entdeckt, dass sich die Ausdehnung des Universums beschleunigt – und dafür übrigens soeben den Nobelpreis für Physik erhalten. Hinter dieser Beschleunigung steckt die sogenannte Dunkle Energie.

Um was handelt es sich dabei?

Wir wissen es nicht. Die Dunkle Energie ist, ehrlich gesagt, eine Provokation fürs Hirn, selbst für Kosmologen. Sie hat ganz andere Eigenschaften als alles, was wir kennen. Sie wirkt anti-gravitativ – so, als wäre da etwas außerhalb unseres Universums, das einfach alles zu sich zieht. Deshalb sprechen wir auch von negativer Energie.

Und wie hängen Dunkle Energie und Dunkle Materie zusammen?

Nach Einsteins Formel $E=mc^2$ entsprechen sich ja Energie und Materie; sie sind äquivalent. Man kann ausrechnen, dass die Dunkle Energie rund 70 Prozent des gesamten Energie-Materie-Gehalts des Universums umfasst. Den Rest machen mit rund 25 Prozent die

Auf der Spur der Fehler

Vom Zitronensäurezyklus, Edwin Hubble und dem Neandertaler

Susanne Gilges gehört zu den Gründungsmitgliedern von GEOkompakt: Schon 2004 bei der Produktion der Erstausgabe „Die Geburt der Erde“ war die Verifikations-Redakteurin dabei und sorgt seither maßgeblich für die hohe Faktentreue der Reihe.

Dabei hatte sich diese Wendung im Leben der 48-jährigen Biologin anfangs gar nicht abgezeichnet. Nach ihrem Studium hatte sie sich zunächst mit Parasiten – etwa den Erregern von Malaria – befasst. Doch da sie sich nicht auf ein Gebiet festlegen wollte, absolvierte sie noch eine Ausbildung als Wissenschaftsredakteurin.

Verifikateure gelten gemeinhin als „fact checker“ – Leute, die penibel Daten und Fakten überprüfen: Sind die Lebensdaten des Astronomen Edwin Hubble korrekt wiedergegeben? Hat ein Autor einen so komplizierten Sachverhalt wie den Zitronensäurezyklus richtig verstanden, hat er ihn wirklich präzise und sinnvoll darge-

stellt? Muss der Neandertaler als *Homo neanderthalensis* oder *Homo sapiens neanderthalensis* bezeichnet werden?

Doch ihre Arbeit geht weit darüber hinaus. „Wir ordnen etwa Zusammenhänge in das wissenschaftliche Umfeld

ein, schauen, ob ein Beispiel wirklich passt, oder prüfen, ob eine wissenschaftliche Meinung nicht die eines Außenseiters ist“, erklärt Susanne Gilges. „Dazu kontaktieren wir viele Experten. Die Informationen arbeiten wir dann in die Texte ein.“

Meist ist die Verifikation eine Arbeit, die im Verborgenen abläuft – wenn sie erfolgreich ist. Sie droht erst dann die Aufmerksamkeit des Lesers zu erregen, wenn es zu Fehlern kommt. Einmal etwa erkannte Susanne Gilges erst kurz vor Drucklegung, dass im Heft statt des Gehirns eines gesunden Menschen das eines Alzheimer-Patienten abgebildet war – und veranlasste den nötigen Bildertausch.



Seit der Erstausgabe sorgt Susanne Gilges, 48, für Präzision bei GEOkompakt

BILDNACHWEIS/COPYRIGHT-VERMERKE

Anordnung im Layout: l. = links, r. = rechts, o. = oben, m. = Mitte, u. = unten

Titel: Jochen Stuhmann f. GEOkompakt

Editorial: Werner Bartsch f. GEOkompakt: 3 o.; Lars Lindemann 3 u.

Inhalt: siehe entsprechende Seiten

Inseln in der Zeit: STScI/AURA/Hubble Heritage/ESA/NASA: 6/7, 9, 15 + 16; STScI/AURA/Hubble Heritage/NASA: 8, 10/11 + 12/13; K. Cook/ESA/NASA: 14; Hubble SM4 ERO Team/ESA/NASA: 17

Eine Reise zum Anfang der Dinge: Royal Astronomical Society/SPL/Agentur Focus: 18/19; Jon Brenneis/Time & Life Pictures/Getty Images: 20; Elio Segre Visual Archives/American Institute of Physics/Science Photo Library/Agentur Focus: 21; Imagno/Hulton Archive/Getty Images: 22; Photo-shot/Picture-Alliance: 24; Bell Labs: 24/25; Ria Novosti/SPL/Agentur Focus: 26 o. l.; Rolis Press/Popperfoto/Getty Images: 26 u. l.; Carl Iwasaki/Time Life Pictures/Getty Images: 26 u. r.; Rainer Harf: 29

Die Geburt der Welt: Jochen Stuhmann f. GEOkompakt: 30–44; Cem: 45

Die ersten Lichter am Firmament: Jochen Stuhmann f. GEOkompakt: 48–58

Vorstoß in die Unendlichkeit: Serge Brunier/ESO: 60/61; Joe McNally/Getty Images: 62/63; Kamioka Observatory, ICRR (Institute for Cosmic Ray Research), The University of Tokyo: 64/65; Peter Bassett/Science Photo Library/Agentur Focus: 66/67; Peter Ginter: 68/69; Hiram Henriquez/National Geographic Stock: 70; Eric Tschernie f. GEOkompakt: 72/73

Das Rätsel der zwei mächtigsten Kräfte im All: Jochen Stuhmann f. GEOkompakt: 74/75; Eric Tschernie f. GEOkompakt: 77; Yannick Mellier/SPL/Agentur Focus: 78; Rue des Archives/RDA/SZ-Photo: 80

Die Hölle am Sternenhimmel: Tim Wehrmann f. GEOkompakt: 82/83; Jeemage/Images.de: 84 o.; Science Photo Library/Agentur Focus:

84 m. + u.; CSIRO Archives Image No. 710.0021 reproduced with permission of CSIRO – all rights reserved: requests for reproduction to be directed to CSIRO: 85 o.; WERON: 85 m.; Science Photo Library/Agentur Focus: 85 u. l.; Cornell University: 85 u. r.; ESO/WFI; MPIPR/ESO/APEX/A. Weiss et al.; NASA/CXC/CIA/R. Kraft et al.: 86; Rainer Harf: 87

Vom Werden und Vergehen der Gestirne: Tim Wehrmann f. GEOkompakt: 90–101

Wie entstanden Raum und Zeit, Herr Professor Lesch?: Achim Muthaupt f. GEOkompakt: 102–108

Mitarbeiterporträt: Lars Lindemann: 109

Der Pulschlag der sterbenden Sonne: Tim Wehrmann f. GEOkompakt: 112–115; NASA/ESA/CXC/IPL-Caltech/J. Hester + A. Loll (ASU)/R. Gehrtz (UMN)/STScI: 116

Das Auge der Erkenntnis: NASA: 118/119, 121 u., 124–126; Space Frontiers/Hulton Archive/Getty Images: 120 o. l.; SSPL/Getty Images: 120 o. r. + 121 o.; NASA/Getty Images: 122/123

Die Bausteine der Welt: ESO: 131; Infografiken 132–142; Rainer Harf: 132; Science Photo Library/Agentur Focus: 133, 137, 141 + 142; Friedrich Rauch/Interfoto: 135

Was war vor dem Urknall?: Tim Wehrmann f. GEOkompakt: 146–151

Vorschau: Peter Menzel/Agentur Focus: 154/155

Für unverlangt eingesandte Manuskripte und Fotos übernehmen Verlag und Redaktion keine Haftung.

© GEO 2011. Verlag Gruner + Jahr, Hamburg, für sämtliche Beiträge.

GEOkompakt

Gruner + Jahr AG & Co KG, Druck- und Verlagshaus, Am Baumwall 11, 20459 Hamburg. Postanschrift der Redaktion: Brieffach 24, 20444 Hamburg. Telefon 040/37 03-0, Telefax 040/37 03 56 47, Telex 21 95 20. Internet: www.GEOkompakt.de

CHEFREDAKTEUR

Michael Schaper

KONZEPT DIESER AUSGABE

Dr. Henning Engel

ART DIRECTOR

Torsten Laaker

TEXTREDAKTION

Jörn Auf dem Kampe, Rainer Harf, Sebastian Witte

BILDREDAKTION

Lars Lindemann
Freie Mitarbeit: Katrin Kaldenberg

VERIFIKATION

Susanne Gilges, Johannes Kückens, Bettina Süssemlich

TEXTE

Freie Mitarbeit: Dr. Ralf Berhorst, Prof. Dr. Harald Lesch, Dirk Liesemer, Dr. Arno Nehlsen, Martin Paetsch, Alexandra Rigos, Bertram Weiß

ILLUSTRATION

Freie Mitarbeit: Jochen Stuhmann, Eric Tschernie, Tim Wehrmann

WISSENSCHAFTLICHE BERATUNG: Tobias Hofbauer

FOTOGRAFIE

Freie Mitarbeit: Achim Multhaupt

CHEFS VOM DIENST

Dirk Krömer
Rainer Droste (Technik)

SCHLUSSREDAKTION

Ralf Schulte

REDAKTIONSASSISTENZ: Ursula Arens

HONORARE: Angelika Györfy

Verantwortlich für den redaktionellen Inhalt:
Michael Schaper

HERAUSGEBER: Peter-Matthias Gaebe

VERLAGSLEITUNG: Dr. Gerd Brüne, Thomas Lindner

GESAMTANZEIGENLEITUNG: Heiko Hager, G + J Media Sales

VERTREIBSLEITUNG: Sascha Klose, Deutscher Pressevertrieb

MARKETING: Antje Schlunder (Ltg.), Kerstin Marcus

HERSTELLUNG: Oliver Fehling

ANZEIGENABTEILUNG: Anzeigenverkauf: G + J Media Sales/Direct Sales:

Sabine Plath, Tel. 040/37 03 38 89, Fax: 040/37 03 53 02; Anzeigen-disposition: Anja Mordhorst, Tel. 040/37 03 23 38, Fax: 040/37 03 58 87

Es gilt die GEO-Sonderhefte-Anzeigenpreisliste
Nr. 7/2011

Der Experte der Zeitschrift GEOkompakt und deren Vertrieb im Ausland sind nur mit Genehmigung des Verlages startfähig. GEOkompakt darf nur mit Genehmigung des Verlages in Lesezirkeln geführt werden.

Bankverbindung: Deutsche Bank AG Hamburg,
Konto 0322800, BLZ 200 700 00

Heft-Preis: 8,50 Euro (mit DVD: 15,90 Euro)

ISBN 978-3-652-00026-0 (978-3-652-00052-9)

© 2011 Gruner + Jahr Hamburg

ISSN 1614-6913

Litho: 4mat Media, Hamburg

Druck: Mohndruck Mohndruck GmbH, Gütersloh

Printed in Germany

GEO-LESERSERVICE

FRAGEN AN DIE REDAKTION

Tel.: 01805/861 80 03*, Fax: 040/37 03 56 48, E-Mail: briefe@geo.de

ABONNEMENT- UND EINZELHEFTBESTELLUNG

KUNDENSERVICE UND BESTELLUNGEN

Anschrift:
GEO-Kundenservice
20080 Hamburg

E-Mail: geo-service@guj.de

Tel. innerhalb Deutschlands: 01805/861 80 03*

Tel. außerhalb Deutschlands: +49/1805/861 00 03

Telefax: +49/1805/861 80 02

24-Std.-Online-Kundenservice: www.meinabo.de/service

Preis Jahresabonnement 31,00 € (D) / 35,80 € (A) / 64,00 CHF (CH)

Preise für weitere Länder auf Anfrage erhältlich

BESTELLADRESSE FÜR GEO-BÜCHER, GEO-KALENDER, SCHUBER ETC.

KUNDENSERVICE UND BESTELLUNGEN

Anschrift: GEO-Versand-Service, 74569 Blaßfeld

Tel.: +49/1805/2250 59*

Fax: +49/1805/21 66 03*

E-Mail: guj@sigloch.de

* 14 Cent/Min. aus dem deutschen Festnetz, Mobilfunkpreis max. 42 Cent/Min.

Dunkle Materie und mit höchstens fünf Prozent die Leuchtende Materie aus.

Das bedeutet, mehr als 95 Prozent unseres Universums bestehen aus diesen noch weitgehend unbekannten Phänomenen?

Ja, das kann man so sagen.

Welche Wirkung hat die Dunkle Energie auf unser Universum? Wird sich die Ausdehnung zunehmend beschleunigen?

Das ist der empirische Tatbestand momentan: Es wird immer weitergehen und immer schneller auseinanderfliegen. In 100 Milliarden Jahren wird innerhalb unseres sichtbaren Horizonts gar keine Galaxie mehr existieren – außer vielleicht der Andromeda-Nebel. Falls der nicht mit der Milchstraße verschmolzen ist zur „Milkomeda“.

Memo: **KOSMOLOGIE**

► **Astrophysiker** suchen seit Langem nach einer „Weltformel“, die alle vier Grundkräfte – Schwerkraft, Elektromagnetische Kraft sowie die beiden Kräfte, die in den Atomkernen wirken – vereinigt und den Beginn des Universums beschreibt.

► **Die Schwierigkeit** besteht darin, dass bei sehr großen Energien, winzigen Zeitskalen oder hohen Geschwindigkeiten bislang kaum Messungen möglich sind.

► **Kosmologen bedienen** sich daher vor allem der Methoden der theoretischen Physik. Nur sie erlauben es, Aussagen über die Frühphase des Kosmos zu treffen.

► **Einigen Forschern** ist es sogar gelungen, bestimmte Gleichungen durch den Urknall hindurchzurechnen – bis in ein Universum vor unserer Zeit. Es könnte also sein, dass der Urknall gar kein Nullpunkt ist, sondern nur ein „Übergangsstadium“ (siehe Seite 146).

Das heißt, irgendwann dehnt sich der Raum sogar schneller als mit Lichtgeschwindigkeit aus?

Ja. Und je größer das Universum wird, umso kleiner wird der Anteil an Materie, weil sich alles immer mehr ausdünn. Am Anfang war der Materieanteil sehr hoch, heute liegt er bei

30 Prozent, und irgendwann wird er nahe null sein.

Und das wird ewig so weitergehen?

Ja.

Ist das nicht eine ziemlich deprimierende Vorstellung für einen Astrophysiker?

Momentan sieht es eben so aus. Auf der anderen Seite wissen wir nicht, ob sich vielleicht wieder etwas ändert. Bislang ist ja die Natur der Dunklen Energie nicht erforscht. Es ist offenbar eine Form von Energie, die die Materie auseinanderreibt. Irgendetwas zieht wie Gummi an diesem All. Aber letztlich haben wir keinen Schimmer, was es ist.

Ich sage immer, das ist die Kapitulationsurkunde für die Astrophysik. Dieses Rätsel zu lösen, wird noch ein hartes Stück Arbeit. Und die Kollegen, die das machen, sind nicht zu beneiden.

Wenn Sie jetzt als Astrophysiker den ganzen Tag lang über diese großen Probleme des Weltalls nachgedacht haben und abends nach Hause kommen. Können Sie dann überhaupt noch in den Himmel blicken und sich daran freuen?

Oh ja. Der Blick in den Himmel ist nach wie vor das Letzte, was ich am Tag tue – wenn ich die Fensterläden schließe. Und das Erste, was ich morgens mache, wenn ich sie öffne. Der Himmel ist eine ganz wichtige Sache, und ich blicke da oft und gern hin, einfach nur so. Vor Kurzem habe ich über dem Großen Wagen eine Supernova mit dem Feldstecher beobachtet.

Aber sind Sie nicht auch ganz froh, wenn Sie in Ihre kleine, überschaubare Alltagswelt zurückkehren?

Selbstverständlich. Und mein Alltag ist ein ganz normaler. Ich bin großer Fan des 1. FC Köln, spiele Schach und anderes. Mein Privatleben ist völlig unspektakulär. Ich kümmere mich sehr um den Klimawandel und das Thema Gerechtigkeit – vor allem, weil ich auch Dozent für Philosophie bin. Zudem beteilige ich mich an vielen Sachen in meiner Gemeinde, mache all die ganz normalen Dinge, für die man sich eben engagiert in so einer Kleinstadt.

Wenn Sie eine Frage stellen dürften, auf die Sie garantiert eine Antwort erhalten werden: Welche Frage wäre das?

Eine Antwort auf eine dieser wirklich elementaren Fragen würde man vielleicht gar nicht ertragen. Ich würde vielleicht eher etwas weniger Wichtiges wissen wollen, etwa: Wie schaffen wir es, möglichst viele junge Leute für die Naturwissenschaften zu begeistern? Wir haben jede Menge hochgradig interessanter Probleme und Felder, wo wir dringend junge Leute brauchen. Vor allem Querdenker – Leute, die ganz anders funktionieren als diejenigen, die wir sonst hier haben.

Sie hätten also die Befürchtung, Sie könnten Antworten auf grundsätzliche Fragen erhalten, die sich nicht ertragen lassen?

Ich glaube schon, dass das ähnlich ist wie am Anfang von Goethes „Faust“. Als nämlich dieser Erdgeist auftaucht, ist Faust völlig schockiert: Mein Gott, ich ertrage dich nicht, diesen Anblick des Erdgeistes. Weil Faust auf einmal mit einer Dimension des Daseins in Kontakt kommt, die völlig unmenschlich ist. Oder ich würde die Antwort gar nicht verstehen, wenn ich so was fragen würde wie: „Was ist der Sinn des Universums?“ Entweder würde die Zahl 42 rauskommen – wie in Douglas Adams Roman „Per Anhalter durch die Galaxis“ – oder irgendetwas anderes, und ich würde dann dastehen und sagen: „Ach du lieber Gott – so was?“

Lessing hat das sinngemäß einmal so formuliert: Wenn Gott mir die Gelegenheit gäbe, zwischen aller Weisheit oder der Suche nach Weisheit zu wählen, dann würde ich immer die Suche nach Weisheit verlangen. Weil ich alle Weisheit sowieso nicht verstehen kann – die ist nur für Gott.

Das geht mir auch so; ich will da lieber kleine Brötchen backen. □

Dr. Harald Lesch ist seit 1995 Professor für Theoretische Astrophysik an der Ludwig-Maximilians-Universität München und beschäftigt sich unter anderem mit Schwarzen Löchern und Neutronensternen. Das Interview führten die GEOkompakt-Redakteure **Dr. Henning Engeln** und **Rainer Harf**.

Literaturempfehlung: Harald Lesch, Jörn Müller, „Sternstunden des Universums. Von tanzenden Planeten und kosmischen Rekorden“, Goldmann; gut verständliche Schilderung von Phänomenen des Alls – bis hin zur Frage, weshalb es überhaupt etwas gibt.

24 KÜNSTLER + 25 PATEN + 26 UNTERNEHMEN = GROSSARTIGES ENGAGEMENT

Der BMW Kunstadventskalender und das Medienhaus Gruner + Jahr unterstützen die „Aktion Kinder Schlaganfall-Hilfe“ – wir sagen Danke!

Künstler

Andreas Kuhnlein, Chiemgau – Derek Curtis, London – Christian von Grumbkow, Wuppertal – Wolfgang Nocke, Gelsenkirchen – Rolf Sachs, London – Otmar Alt, Hamm – Ekkehard Tischendorf, Dresden/Wien – Tilo Kaiser, London – Amir Baghiri, Lemgo – Hannes Helmke, Köln – Evelyn Sattler, St. Goarshausen – Christian Sauer, Berlin – Susanne Waltermann, Köln – Katharina Schnitzler, Berlin – Jan Davidoff, München – Christian Awe, Berlin – Manfred Bockelmann, Wien/München/Kärnten – Annabel Emson, London – Frank Mutters, Mallorca – Rifat Gecaj, München – Prof. Milan Knížak, Prag – Ulrich Moroder, Wien – Udo Dziersk, Wuppertal – Michael Poliza, Hamburg

Paten

Miroslav Nemec – Martina Gedeck – Anja Kruse und Jule Köhler – Janina Hartwig – Suzanne von Borsody – Michael Mendl – Wolfgang Stumph – Jonas Kaufmann – Dr. Elizabeth Teissier – Mariella Ahrens – Holger Stromberg – Stephan Luca – Cosma Shiva Hagen – Ulrike Folkerts – Hannes Jaenicke – Hinnerk Schönemann – Klaus Doldinger – Francis Fulton-Smith – Christine Neubauer – Miriam Pede – Friedrich von Thun – Elisabeth Lanz – Dorkas Kiefer – Helmut Zierl

Unternehmen

BMW – Weltstadthaus Köln Schildergasse 65-67 – Salamander – Rampold AG – Le Q am Promenadeplatz – Sturmhaube Kampen-Sylt – Lambertz – Bulthaupt – CHEP – Lufthansa – RAFF der Drucker – Geldermann – Lacoste – Annemarie Börland – Jumeirah Frankfurt – Marc O'Polo – Samsonite – Traumschiff MS DEUTSCHLAND – GRK Holding – Weingut Erich & Walter Polz – N24 – Neudahm Hotel Interior Design – Elisabeth-Das Musical – Stromberg* Catering – Süddeutsche Zeitung – Der Tagesspiegel – Gruner + Jahr

Eine der Paten ist **Anja Kruse**. Sie lernte unsere Kinderbotschafterin **Jule Köhler** kennen und ist begeistert von ihrem Engagement. Mit 6 Jahren hatte Jule einen Schlaganfall – heute engagiert sie sich trotz ihrer Lähmungen an Hand und Fuß. Zu ihrem Job gehört es, Kindern Mut zu machen – das überzeugt auch Stars wie Anja Kruse.



STIFTUNG



AKTION KINDER
SCHLAGANFALL
HILFE

DEUTSCHE
SCHLAGANFALL
HILFE



Kinder sind Zukunft – helfen auch Sie!

Stiftung Deutsche Schlaganfall-Hilfe

Spenden unter Konto-Nr. 200 500 7, Bethmann Bank AG,
BLZ 501 203 83, Stichwort: Kinder Schlaganfall
Internet: schlaganfall-hilfe.de



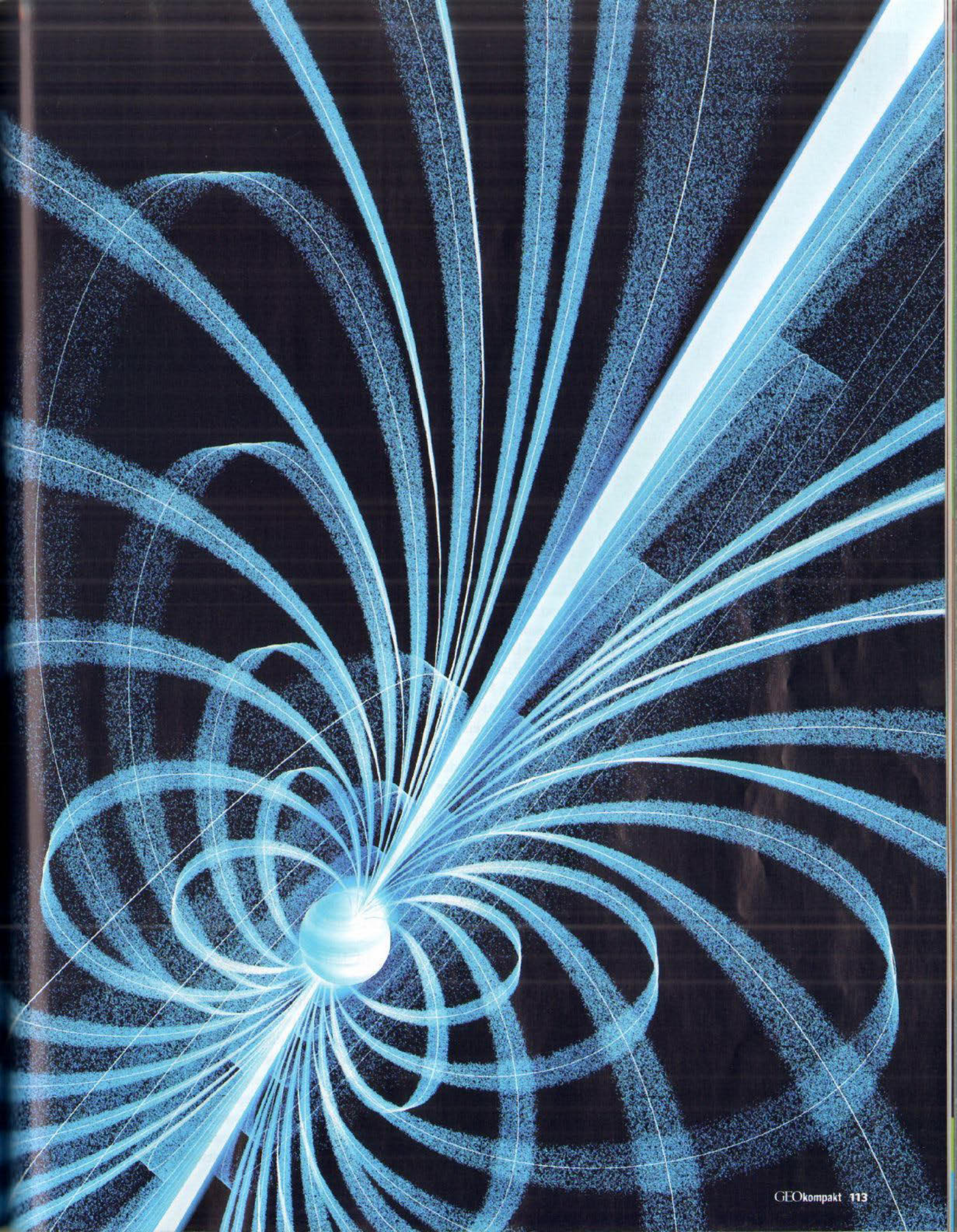
Der **Pulsschlag** der **sterbenden Sonne**

Wenn besonders große Sterne ihren Brennstoff aufgezehrt haben, kommt es zu einem der dramatischsten Ereignisse im Kosmos: Nach Millionen Jahren des Leuchtens kollabieren die Giganten plötzlich binnen Bruchteilen einer Sekunde und schleudern dabei ihre äußeren Hüllen ins All. Übrig bleibt eine extrem kompakte, sich rasend schnell drehende Kugel, die ein gigantisches Magnetfeld besitzt und sonderbare Lichtblitze aussendet: ein Neutronenstern

Text: Sebastian Witte

Illustration: Tim Wehrmann

Aus den Magnetpolen von Neutronensternen (die nicht auf der Drehachse der Himmelskörper liegen) schießen elektromagnetische Strahlenkegel ins All. Sie machen die Winzlinge noch in Zehntausenden Lichtjahren Entfernung sichtbar. Zudem sind die Sonnenleichen von mächtigen Magnetfeldlinien umgeben





us den Tiefen des Alls erreichen uns höchst sonderbare Signale. Sie treffen nicht – wie das Licht vieler Sterne oder Galaxien – ununterbrochen auf der Erde ein. Sondern in Form von Pulsen, so regelmäßig und präzise, dass man eine Uhr nach ihnen stellen könnte.

Einige folgen im Sekundentakt aufeinander, andere sind sogar 1000-mal so schnell. Macht man die Pulsschläge mit Lautsprechern hörbar, dann ertönen sie wie ein

penetrantes Hämmern oder verschmelzen scheinbar zu einem einzigen Pfeifton – weil wir die winzigen Abstände dazwischen nicht mehr wahrnehmen können.

Obwohl die kosmischen Knattergeräusche immer gleich sind und niemals zu versiegen scheinen, rühren sie doch von dahinsiehenden Gebilden her: von längst erloschenen, riesigen Sonnen, die sich am Ende ihres Lebens in rätselhafte Zwerge verwandelt haben und nun gleichsam ihre letzten Atemzüge aushauchen – als Neutronensterne, die zu den bizarrsten Objekten im Universum gehören.

Diese stellaren Leichen sind extrem kompakte Kugeln, derart dicht gepackt, dass in ihnen ein- bis zweimal die Masse unserer Sonne auf den Durchmesser einer Kleinstadt zusammengepresst ist. Ein Teelöffel von ihrer Materie würde auf der Erde eine Milliarde Tonnen wiegen. Zudem besitzen die Sonderlinge gigantische Magnetfelder, die bis zu 100 Billionen Mal stärker sind als das Magnetfeld der Erde.

Und vielleicht am verblüffendsten: Einige der Winzlinge drehen sich mehrere Zehntausend Mal pro Minute um sich selbst.

Nicht jeder Stern im All stirbt als rasende Kugel – noch nicht einmal eine von 100 Sonnen ereilt dieses Schicksal. Doch so erstaunlich die Metamorphose hin

- andere entwickeln sich zu einem ungeheuerlichen Materieschlund, einem Schwarzen Loch, dessen Anziehungskraft nicht einmal das Licht entkommt;

- und wieder andere enden als grotesker Neutronenwinzling.

GEBILDET WIRD DER künftige Neutronenstern wie jeder andere leuchtende Himmelskörper auch: in einer diffusen Wolke aus Gas und Staub. Solche Schwaden wabern vielerorts durchs All und bestehen hauptsächlich aus Wasserstoff, dem leichtesten aller Elemente, dessen Herkunft bis an den Anfang aller Dinge zurückreicht, als sich im Urknall das Universum gleichsam selbst gebar (siehe Seite 30).

Durch ein Teleskop betrachtet, erscheinen die Nebel gewaltig, doch in Wahrheit sind die Gasmoleküle im Inneren dieser Wolken äußerst dünn verstreut: lediglich ein Teilchen schwirrt in einem Kubikzentimeter umher. Das ist ein Fastnichts, allenfalls ein Hauch von Materie. Man müsste ein Schnapsglas voll Wasser auf die Ozeane verteilen, um eine ähnlich verschwindend geringe Dosierung zu erhalten.

Irgendwann aber wird dieser Dunst von mächtigen Druckwellen getroffen, wie sie von kosmischen Katastrophen – etwa der Explosion eines Sterns – ausgelöst werden. Dadurch verdichten sich die Gasteilchen in einigen Bereichen der Wolke millionenfach. Das hat weitreichende Folgen, denn je enger die Partikel zusammenrücken, desto stärker wirkt auch ihre gegenseitige Anziehungskraft. Immer mehr Teilchen drängen sich auf gleichem Raum, immer stärker ziehen sie sich an.

Auf diese Weise kommt ein sich selbst verstärkender, unumkehrbarer Prozess in Gang: Der Urnebel bricht allmählich unter seiner eigenen Masse zusammen. Mehr und mehr Gaspartikel stürzen in sein Zentrum und ballen sich schließlich zu einem dicken, kugeligen Kern zusammen. Dabei stoßen sie so heftig gegeneinander, dass sie den Klumpen zunehmend aufheizen.

Bei einer Temperatur von ein bis zwei Millionen Grad Celsius und ausreichend hohem Druck wird dann

So dicht sind die Sterne gepackt, dass ein Löffel Materie **AUF DER ERDE** eine Milliarde Tonnen wiegen würde

zu einem Neutronenstern anmutet, so unausweichlich ist sie. Denn der Lebensweg einer Sonne hängt in der Regel von der Menge an Materie ab, die sie am Anfang ihrer Existenz mitbekommt.

Drei Szenarien sind möglich:

- Viele Sterne – etwa unsere Sonne – existieren etliche Jahrmilliarden lang ruhig und unauffällig, ehe sie sich zu einem roten Riesenstern aufblähen und letztlich als Weißer Zwerg enden (siehe Seite 94);

ein Vorgang angestoßen, physikalisch so komplex, dass er sich dem Vorstellungsvermögen der meisten Menschen nahezu gänzlich entzieht. Doch jenes Phänomen erst macht die glutheiße Gaskugel zu einer echten Sonne, zu einem leuchtenden Stern. Denn die Kerne der Wasserstoffatome kollidieren mit einer derart großen Kraft, dass sie aneinander hängen bleiben und zu einem neuen Stoff verschmelzen: Helium – dem nach dem Wasserstoff nächstschwereren Element.

Diese atomare Vereinigung setzt gigantische Mengen an Energie frei, weil bei der Verschmelzung von Wasserstoffkernen stets ein winziger Bruchteil der Masse verloren geht. Dieser verwandelt sich in reine Energie: in Strahlung, die zum Teil als sichtbares Licht entweicht.

Hunderttausende Jahre sind vergangen, seit die dünne Urwolke begonnen hat zu kollabieren. Nun leuchtet die Sonne, die einmal als Neutronenzwerg enden wird, das erste Mal auf.

Was wie Zauberei anmutet, hält den neuen Stern fortan im Gleichgewicht. Denn die nach außen stiebende Strahlung sorgt dafür, dass der Gasball nicht weiter unter seinem eigenen Gewicht zusammenbricht. Solange das Sternenfeuer also brennt, ändert sich sein Durchmesser kaum noch.

Doch einmal gezündet, beginnt die kosmische Lichtmaschine gewissermaßen sich selbst zu fressen. Mit jeder einzelnen Fusion büßt sie an Masse ein, wird sie Stück für Stück leichter. Und schon jetzt ist abzu-sehen, dass der gerade auflodernden Sonne ein jähes Ende bevorsteht – als Neutronenstern.

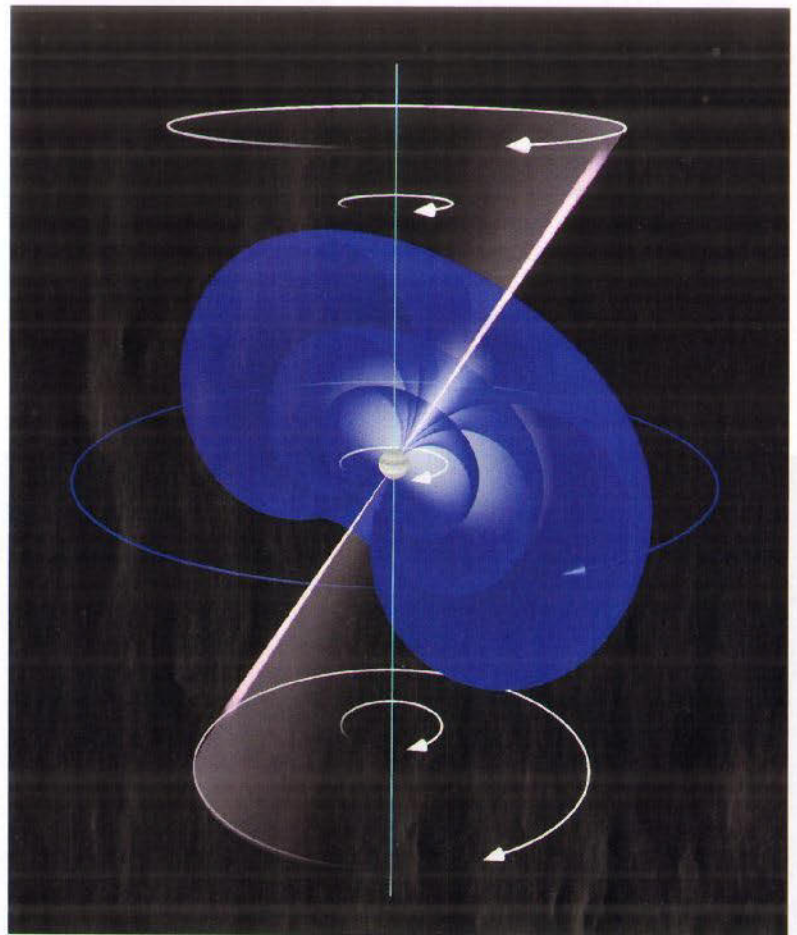
Denn sie hat derart gewaltige Gasmengen aufgesogen, dass sie acht- bis 25-mal massereicher geraten ist als unsere Heimatsonne. Damit ist das Gestirn einer der Giganten unter den Leuchtfeuern am Himmel: ein kosmischer Koloss, in dessen Innerem die Temperatur aufgrund der zahlreichen Teilchenkollisionen auf bis zu drei Milliarden Grad ansteigen kann.

Die Folge ist, dass dieser Riese den Wasserstoff weit-aus rascher verbraucht als weniger massereiche Sonnen. Sein Bedarf an Brennmaterial gleicht dem eines großen Osterfeuers, das trotz riesiger Holzmengen viel schneller abfackelt als ein sparsam glimmendes Lagerfeuer.

Unsere mittelgroße Heimatsonne etwa, die bereits seit mehr als 4,5 Milliarden Jahren leuchtet, wird noch mindestens weitere fünf Milliarden Jahre in ihrer heutigen Form Energie produzieren. In einem Riesenstern brennt der Fusionsofen dagegen oft nur wenige Millionen Jahre. Auf die durchschnittliche Lebens-spanne und das Gewicht eines Menschen übertragen, entspräche er einem Fettwanst vom Gewicht eines Walrosses, der innerhalb nur eines Monats zur vollen Größe heranwächst und zugrunde geht.

Und so kommt es, dass sich der Brennstoff dieser Riesen-sonne in einer Zeitspanne aufgebraucht hat, in der die meisten anderen Sterne ihre Entstehungs-phase gerade erst abgeschlossen haben.

Irgendwann besteht ihr Kern nur noch aus Helium; nun kommt das Wasserstoffbrennen, das sie bisher in innerer Balance hielt, zum Erliegen. Doch noch vermag sie ihr Gleichgewicht zu halten. Denn der Druck des Fusionsofens steigt so hoch, dass das Helium seiner-seits zu einem neuen Element verschmilzt: zu Kohlenstoff. Und der weiter zu Sauerstoff. Wie in einer



Neutronensterne pulsieren nur scheinbar. In Wahrheit senden sie einen konstanten Strahl elektromagnetischer Wellen aus, der an den Magnetpolen austritt und von einem starken Magnetfeld erzeugt wird. Wenn dessen Achse nicht mit der Rotationsachse des Sterns übereinstimmt, bewegen sich die Magnetpole – und mit ihnen der Strahl – kreisförmig. Liegt die Erde zufällig im Weg des Strahls, können wir jedes Mal, wenn er uns streift, einen Puls registrieren

atomaren Zauberküche bilden sich Stufe um Stufe immer schwerere Elemente: Neon, Magnesium, Silizium, Schwefel und schließlich Eisen (siehe Seite 134).

Immer mehr Hitze ist erforderlich, um die mächtiger werdenden Atome miteinander zu verbacken. Vereinigen sie sich schließlich, setzt die Fusion neue Energie frei – nach dem gleichen Prinzip, nach dem der Zusammenschluss von Wasserstoff zu Helium Energie entfesselt hat.

Dieser Verschmelzungskette ist jedoch eine natürliche Grenze gesetzt. Denn das Element Eisen ist derart schwer, dass die Fusion zweier Eisenatome mehr Energie erfordert, als sie hergibt. Der Sternofen würde aus diesem Vorgang also keine weitere Energie gewinnen, sondern müsste im Gegenteil selbst welche hinzufügen.

Daher erlischt der Stern: Sobald sein Inneres nur noch aus Eisen besteht, ist sein grelles Antlitz dahin.

WAS DANN FOLGT, zählt zu den dramatischsten Ereignissen im Kosmos. Denn nun kann die Lichtmaschine einem Zusammenbruch nichts mehr entge-

gensetzen, hat der Riesenstern keine Kraft mehr, der eigenen Schwerkraft zu widerstehen. Nach Millionen Jahren des Leuchtens kollabiert er jetzt innerhalb von nur einer Zehntelsekunde.

Könnte man das Gebilde von außen beobachten, würde es binnen eines einzigen Lidschlages nicht mehr wiederzuerkennen sein.

Sein einstiger Kern, der etwa das Anderthalbfache unserer Sonne an Masse besitzt, bricht urplötzlich von

Dabei beschleunigen die ins Innere stürzenden Teilchen auf rund ein Viertel der Lichtgeschwindigkeit und lassen die Temperatur ein letztes Mal gewaltig ansteigen. Eine unvorstellbare Hitze von mehr als 100 Milliarden Grad sorgt dafür, dass nun auch Elemente noch schwerer als Eisen entstehen – etwa Silber oder Palladium: Der Zusammenbruch selbst liefert die dafür erforderliche Energie. Zugleich löst er eine riesige Schockwelle aus, welche die neu ent-

standenen Stoffe mit sich reißt und die ehemals äußeren Hüllen des Sterns zerfetzt und ins All schleudert.

Als riesige Sternexplosion, als Supernova, leuchten die Reste für kurze Zeit so hell wie eine Milliarde Sonnen – bis sie sich in den Weiten des Kosmos verflüchtigen, nach und nach auskühlen und später zur Brutstätte für neue Sterne und Planeten werden.

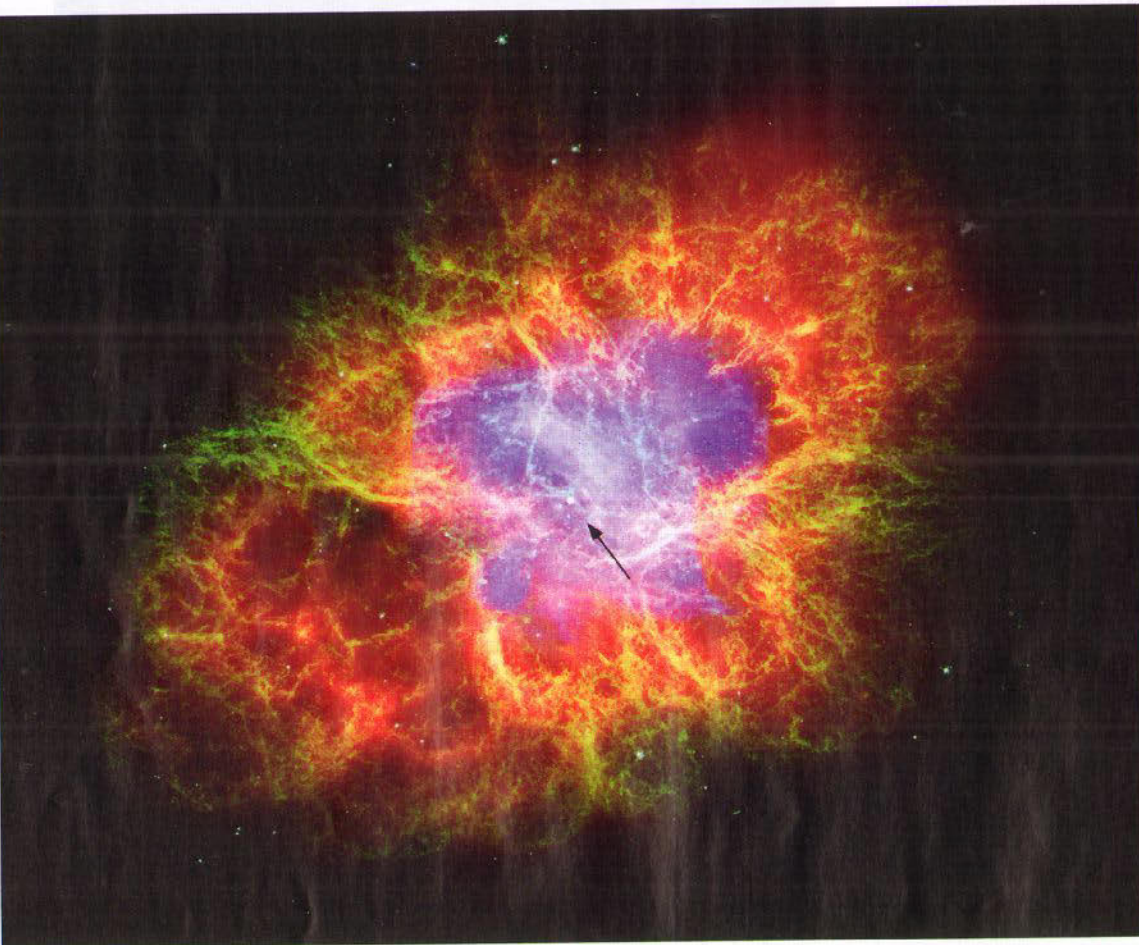
Zurück bleibt nur jener winzige, extrem verdichtete Neutronenball, so ungeheuerlich in seinen Eigenschaften, dass man seine Existenz kaum für möglich hält.

Und doch: Schätzungen zufolge soll es allein in unserer Milchstraße rund eine Milliarde Neutronensterne geben.

Die Schwerkraft dieser Himmelsleichen ist beeindruckend: Wollte man auf ihrer Oberfläche eine Erhebung von einem Millimeter erklimmen, wäre dazu mehr Energie erforderlich als bei der Besteigung des Mount Everest auf der Erde.

Rein theoretisch jedenfalls. Denn ein Mensch könnte einen Neutronenstern niemals lebend betreten: Er würde sofort zu einer mikroskopisch kleinen Pfütze subatomarer Teilchen zusammengequetscht.

Das gleiche Schicksal ereilte die gesamte Erde, käme sie mit einem Neutronenzwerg in Berührung. Die Zehn-Kilometer-Kugel wäre rund 300 000-mal so massereich wie unser Planet und würde ihn – aufgrund ihrer immensen Anziehungskraft – förmlich pulverisieren. Als dichte Materieschicht, kaum dicker als ein Daumen,



Im Zentrum des Krebsnebels – dem Überrest einer explodierten Riesen Sonne – verbirgt sich ein Neutronenstern (Pfeil; das Bild zeigt ihn rund 1000 Jahre nach der Explosion). Seine Strahlung regt das umliegende Gas zum Leuchten an. Der Nebel erstreckt sich über sieben mal zehn Lichtjahre

10 000 Kilometer im Durchmesser auf winzige zehn bis 20 Kilometer zusammen. So heftig ist der Kollaps, dass die Bausteine der Eisenatome zum Teil ineinandergequetscht werden und dabei ihre Identität verlieren: Positiv geladene Protonen verschmelzen mit negativ geladenen Elektronen zu neutralen Teilchen, die keinerlei elektrische Ladung tragen – zu Neutronen.

Dicht an dicht gepackt, formen diese Partikel eines der kompaktesten Objekte, das die Gesetze der Physik überhaupt ermöglicht: einen Neutronenstern.

schlüge sich die Erde binnen Bruchteilen einer Sekunde auf der Oberfläche des Neutronensterns nieder.

DIE ENORME SCHWERKRAFT dieses Winzlings ist aber nicht die einzige extreme Eigenschaft. Als bei seiner Entstehung die Riesensonne kollabierte, wurden dabei auch ihre Magnetfeldlinien, die sich über Millionen mal Millionen Quadratkilometer unter ihrer Oberfläche verbargen, zusammengedrückt. Und sind

Theoretisch bis zu 3500-mal in der Sekunde wirbelt ein Neutronenstern schließlich um sich selbst. Nur ein Objekt, das derart klein und so dicht ist, wird dabei nicht auseinandergezerrt.

Während der aberwitzigen Schleudertour reißt der Neutronenzwerg die beiden Pole seines Magnetfeldes – und mit ihnen die beiden Strahlungsbündel – stets mit sich. Da die Achse des Magnetfeldes nicht mit der Rotationsachse des Sterns übereinstimmt, bewegen

Neutronensterne sind die stärksten **MAGNETE IM ALL:** Sie können sogar einzelne Atome verformen

nun auf kleinstem Raum komprimiert. Diesen Vorgang kann man sich mit den Ähren eines Kornfeldes veranschaulichen: Auf dem Feld sind die einzelnen Halme auf einer viel größeren Fläche verteilt als bei der Ernte, wenn sie zusammengebunden und dabei konzentriert werden.

Und so kommt es, dass sich die Stärke des Magnetfeldes im zusammengebrochenen Stern enorm erhöht – um den Faktor von einer Billiarde.

Neutronensterne sind daher die stärksten Magnete im Universum: Noch in 200 000 Kilometer Entfernung könnten sie Eisenstäbe von der Erde heben.

200 000 Kilometer: Das entspricht etwa der halben Strecke zum Mond.

Die aneinandergedrückten Feldlinien eines Neutronensterns treten an zwei Polen aus der kugelförmigen Oberfläche und reißen dabei elektrisch geladene Teilchen mit sich und beschleunigen sie. Die Teilchen senden Energie aus, die in Form zweier entgegengesetzter, scharf gebündelter Strahlenkegel ins All hinausschießt.

Dabei entsteht eine starke elektromagnetische Strahlung, die das bizarre Gebilde noch in Zehntausenden Lichtjahren Entfernung weithin sichtbar macht.

Doch das ist noch nicht das Erstaunlichste. Das Bemerkenswerteste ist wohl, in welchem Maße der geschrumpfte Riesenball immer mehr Fahrt aufnimmt. Als Riesenstern noch hatte er sich etwa einmal im Monat um seine eigene Achse gedreht. Während er kollabierte, behielt er seinen Drehimpuls bei und rotierte dadurch immer schneller – wie ein Schlittschuhläufer, der bei einer Pirouette die Arme anlegt.

sich die magnetischen Pole kreisförmig (siehe Illustration Seite 115). Wie die Lichtkegel eines Leuchtturms überstreichen sie den Himmel im Millisekundentakt. Liegt die Erde im Weg eines Kegels, erhält sie jedes Mal, wenn eines der Strahlungsbündel sie streift, einen Puls, den wir als ein kurzes Aufblitzen registrieren können.

Von knapp 2000 Neutronensternen haben Astronomen bisher solche Signale vernommen. Doch die

rätselhaften Zwerge sind derart weit von uns entfernt (der uns vermutlich nächste Neutronenstern „Calvera“ 250 bis 900 Lichtjahre), dass nur winzigste Bruchteile ihrer Strahlung auf der Erde eintreffen. Das Umblättern einer Seite in diesem Heft verbraucht Hunderte Mal mehr Energie, als sämtliche Teleskope der Welt bislang von allen bekannten Neutronensternen empfangen haben.

Für die Winzlinge aber sind die Strahlungsverluste so groß, dass ihre Rotationsgeschwindigkeit beständig abnimmt. Bereits nach einigen Zehntausend Jahren – einer für kosmische Maßstäbe äußerst kurzen Zeitspanne – kann

sich solch eine Lichtschleuder verausgaben, kommt sie allmählich zum Stillstand. Irgendwann sendet die Sternenleiche schließlich ihren allerletzten Puls aus.

Und von der aus Gas und Staub geborenen Riesensonne bleibt nicht mehr zurück als ein kleiner, unscheinbarer Ascheklumpen.

Irgendwo in den Tiefen des Alls. □

Memo: **NEUTRONENSTERNE**

► **Erlischt eine Riesensonne**, werden ihre äußeren Teile in einer gigantischen Explosion zerfetzt und ins All hinausgeschleudert.

► **Ihr innerer Rest** bricht zu einem extrem kompakten Gebilde zusammen: einem Neutronenstern.

► **In ihm sind Materie** und Magnetfeld des einstigen Sonnenkerns auf kleinstem Raum zusammengepresst. Zudem rotiert das Gebilde aberwitzig schnell.

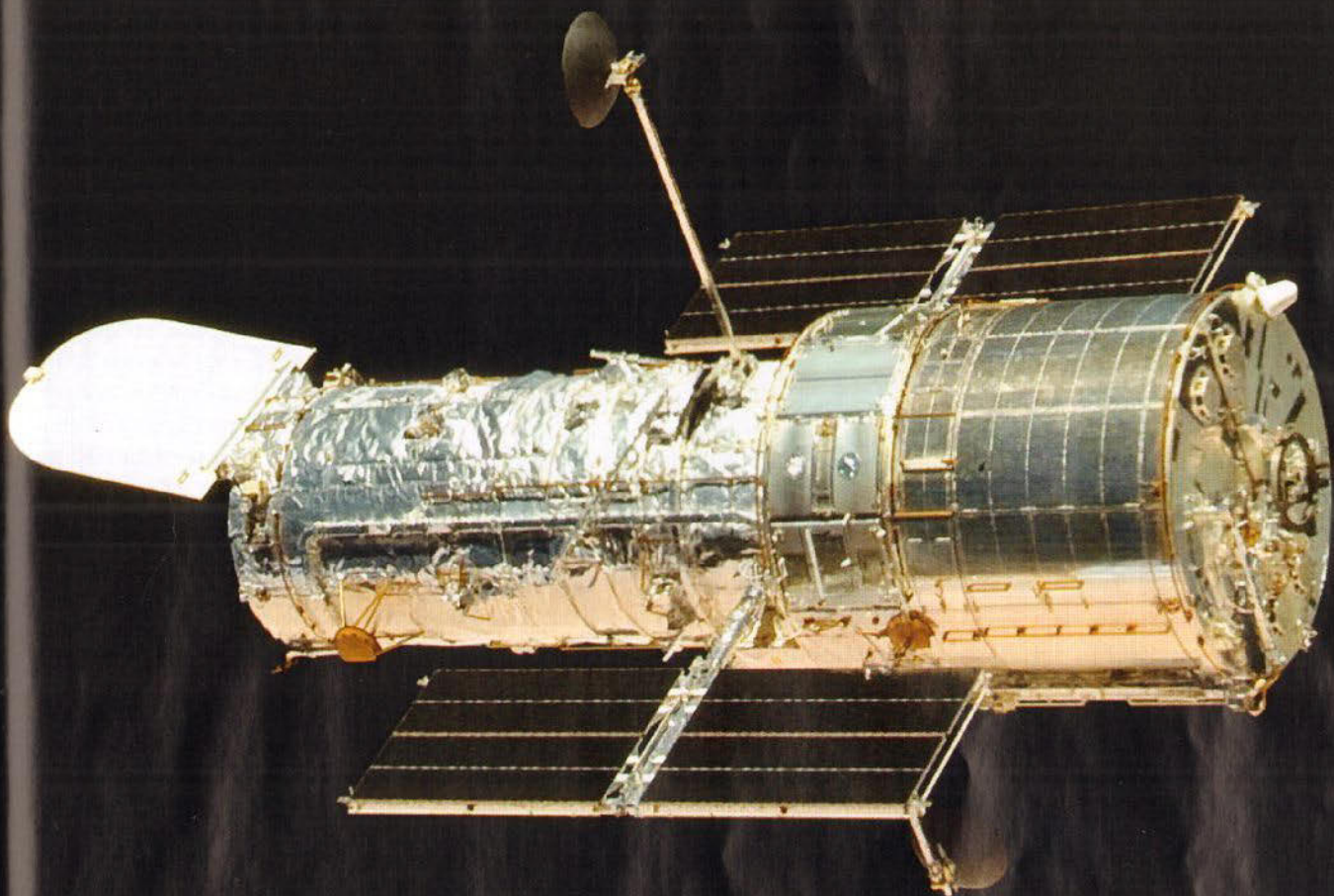
► **Aus den Magnetpolen** des Sterns schießt elektromagnetische Strahlung ins All, die ihn weithin sichtbar macht.

► **Bisher haben Forscher** von knapp 2000 dieser Exoten Pulse registrieren können. Vermutlich gibt es allein in unserer Milchstraße eine Milliarde Neutronensterne.

Das Auge der Erkenntnis

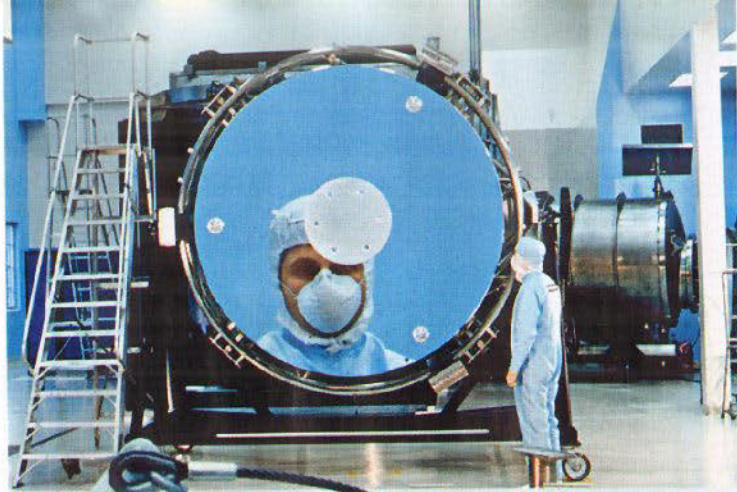
Kein anderes technisches Gerät hat unser Wissen über das All derart erweitert wie das Weltraumteleskop »Hubble«: Mit seiner Hilfe entdeckten Forscher Millionen Lichtjahre entfernte Sterne, bewiesen die Existenz gigantischer Schwarzer Löcher und vermochten in die Frühzeit des Universums zu blicken. Dabei galt der High-tech-Späher anfangs als milliardenteurer Flop

WEIL IM ALL die störende Atmosphäre
der Erde fehlt, vermag Hubble verblüffend
scharfe Bilder aufzunehmen





1977 BEGINNT DER BAU des Teleskops. Experten schleifen den Hauptspiegel so lange, bis sich mit ihm noch aus 60 Kilometer Entfernung zwei Münzen unterscheiden lassen



DURCH DAS LOCH in der Mitte des Hauptspiegels gelangen Lichtstrahlen aus dem Tubus des Teleskops auf die Beobachtungsinstrumente (siehe Seite 124). Die können ultraviolettes, sichtbares und Infrarotlicht analysieren

Kurz vor Weihnachten 1995 beginnt das Experiment: mit der Suche nach dem unscheinbarsten Ort im Weltraum. Er soll keine Objekte der Milchstraße beherbergen: keinen Stern, keinen Himmelskörper, der kosmische Radiowellen aussendet. Zudem soll möglichst wenig Wasserstoff in der Sichtlinie liegen. So leer und dunkel muss der Ort sein, dass nichts den Blick des Weltraumteleskops „Hubble“ in die Tiefe des Alls behindert.

Wie durch ein Guckloch soll das Fernrohr durch diesen dunklen Ort in eine nie zuvor erreichte Ferne schauen. Und damit gleichzeitig in die Frühzeit unseres Kosmos. Denn je weiter ein Objekt entfernt ist, desto länger muss sein Licht zu uns unterwegs sein – und desto jünger ist es.

In rund 600 Kilometer Höhe kreist die Großsternwarte Hubble um die Erde. Sie ist länger als ein Schulbus und etwa so schwer, und sie schaut mit ihren mächtigen Kameras und Spektrometern zehnmal schärfer als je ein Teleskop zuvor in den Weltraum. Seit Ende 1993 begeistert Hubble mit gestochen scharfen Fotos von fantastischen Welten: Planeten, Sonnen, Nebeln und fernen Galaxien. Aber wie tief vermag es unter besten Bedingungen ins All zu schauen?

Text: Dirk Liesemer

Monatelang fahnden Astronomen im Frühjahr und Sommer 1995 deshalb nach dem dunkelsten Himmelsort. Sie arbeiten im Auftrag von Robert Williams, dem Direktor des Space Telescope Science Institute in Baltimore, USA. Williams will für den Blick in die Tiefe zehn Tage seiner wertvollen „Direktorenzeit“ verwenden, die ihm alljährlich zusteht, um die Sternwarte im Weltraum kurzfristig auf unvorhergesehene Ereignisse zu richten, etwa eine plötzliche Supernova.

Schließlich entscheiden sich die Astronomen in Baltimore für einen winzigen Ort am Nordhimmel. Er liegt

am Großen Wagen (Teil des Sternbildes Großer Bär), nördlich des Sterns Delta Ursae Majoris, einem der Sterne der „Deichsel“ des Wagens. Für einen Beobachter auf der Erde ist der Ort so klein wie eine rund 25 Meter entfernte Zehn-Cent-Münze. Ein menschliches Auge erkennt dort oben nichts als Dunkelheit. Nur mit den besten erdbasierten Teleskopen werden eine Handvoll Himmelsobjekte unserer Heimatgalaxie sichtbar.

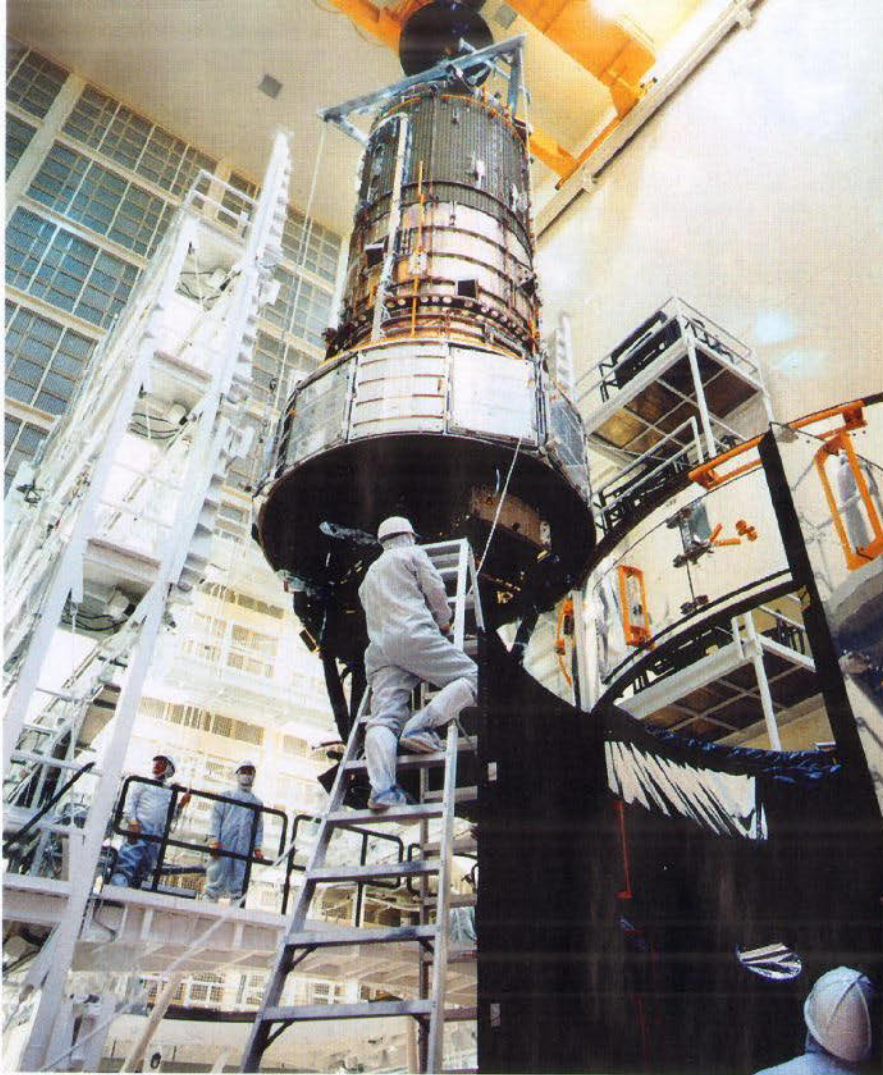
Am 18. Dezember 1995 richten die Forscher das Weltraumauge auf das nahezu leere Himmelsfeld. Zehn Tage lang nimmt es 342 Fotos in vier präzise definierten Lichtwellenbereichen auf: Ultraviolett, Rot, Blau und Infrarot. Je nach Farbe dauert eine Belichtung zwischen 15 und 40 Minuten.

Die Bilder werden mit der „Wide Field and Planetary Camera 2“ aufgenommen, die in Form und Größe einem Konzertflügel ähnelt. Im Inneren der Kamera arbeitet ein Elektromotor und dreht einen Filter für die jeweilige Wellenlänge in den Strahlengang. Später sollen die Fotos zu einem einzigen Farbbild kombiniert werden.

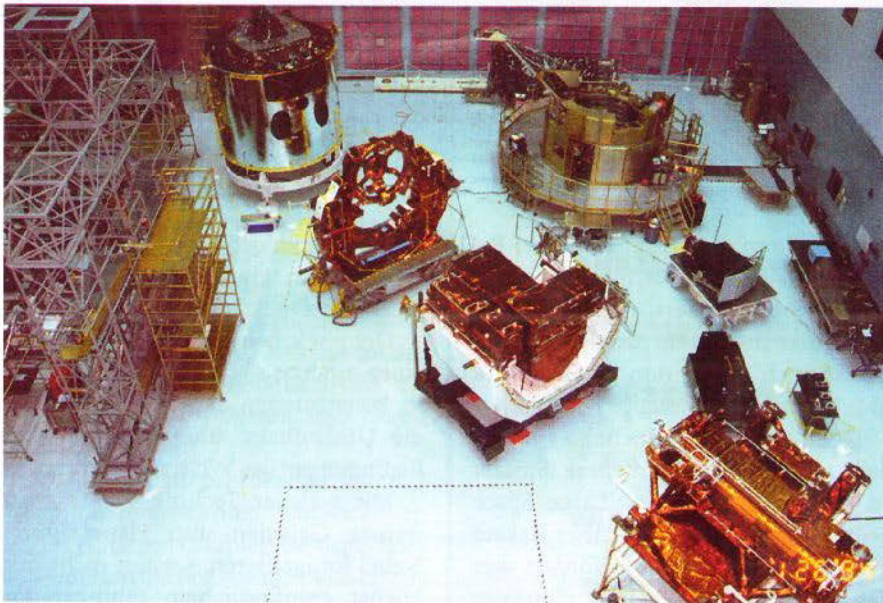
Ob Hubble tatsächlich Staunenswertes in der unendlichen Tiefe des Universums entdecken wird, kann da noch kein Astronom sagen. Sollte es jedoch Licht aus einer fernen Welt auffangen, werden die Strahlen seit Milliarden Jahren unterwegs gewesen sein und aus der Frühzeit des Universums stammen.

In Baltimore hofft Robert Williams deshalb auf ein einzigartiges Foto, das

**NIEMAND
WEISS, DASS BEI
DER PRODUKTION
ETWAS SCHIEF-
GEGANGEN UND
DIE MISSION NUN
GEFÄHRDET IST**



MONTAGE DES HUBBLE-TELESKOPS 1985. Noch schaut der Ingenieur in den weitgehend leeren hinteren Teil des Tubus. Hier befindet sich später das Herzstück des Weltraumspähers: der 2,40 Meter große Hauptspiegel, dessen Feinschliff 25 Wochen in Anspruch genommen hat



IN DIESER 36 000 KUBIKMETER FASSENDEN HALLE – dem größten Reinraum der Welt – lagern spezielle Fahrgestelle, mit denen die einzelnen Hubble-Module zusammengesetzt und in eine Raumfähre gehievt werden. Auf der Erde wiegt das Teleskop mehr als elf Tonnen

vielleicht hilft, einige Geheimnisse der Kosmologie zu lösen.

Etwa: Wie sah das All kurz nach dem Urknall aus? Wann haben sich die ersten Galaxien geformt? Und expandiert das Universum für immer?

Einzig Hubble wird ein solches Beweisfoto liefern können: Es ist zu jener Zeit das schärfste Teleskop der Welt.

MEHR ALS 70 JAHRE zuvor, 1923, hat der deutsche Technikpionier Hermann Oberth in seiner Schrift „Die Rakete zu den Planetenräumen“ als Erster die Vision eines Fernrohrs im All entworfen (allerdings sollte es bei Oberth künftige Astronauten auf ihrem Weg in den Weltraum vor Kometen warnen).

Gut zwei Jahrzehnte später griff der US-Astrophysiker Lyman Spitzer die Idee auf: 1946 schlug er ein gigantisches, im Orbit schwebendes Observatorium vor. Es sollte Sternenlicht mit einem Spiegel von bis zu 15 Meter Durchmesser einfangen, der damit knapp dreimal größer wäre als alle bis dahin gebauten. Spitzer prophezeite, mit einem derart leistungsfähigen Instrument werde man nicht nur die gegenwärtigen Ideen über das Universum ergänzen, sondern völlig neuartige, noch unvorstellbare Phänomene entdecken.

Spitzer sah auch voraus, mit welcher enormer Schärfe ein solches Fernrohr ins Universum schauen würde. Jenseits der Erdatmosphäre, so führte er aus, würden Kameras detail- und kontrastreicher sehen. Zudem könnten sie alle Farbspektren abbilden – darunter Ultraviolett und Infrarot, die von der Atmosphäre weitgehend herausgefiltert werden und für Teleskope auf der Erdoberfläche unerreichbar sind.

Ein Weltraumteleskop würde zudem alle störenden Effekte hinter sich lassen, die eine Beobachtung von der Erde aus behindern: etwa Luftschichten, die das Sternenlicht verzerren, Wolken oder Streulicht aus der Atmosphäre.

In den 1950er Jahren begannen Spitzer und andere Astrophysiker an der Princeton University zu erkunden, auf welche Weise sich ein Teleskop in den Himmel hieven ließe. Sie setzten zunächst auf Heißluftballons – inspiriert



HUBBLE IST SO KONSTRUIERT, dass es in den Frachtraum eines Spaceshuttles passt. Dank des wiederverwendbaren Transporters kann das Teleskop regelmäßig im All gewartet und repariert werden (hier zuletzt im Mai 2009). Bereits 1993 müssen Astronauten ein aus 5300 Einzelteilen bestehendes Gerät in den hinteren Teil des Spähers einbauen: Es soll einen optischen Fehler korrigieren, der Hubbles Sehkraft schwächt

von Physikern, die kosmische Strahlen untersuchten. Denn in ihren oberen Schichten ist die Erdatmosphäre bereits so dünn, dass ein großer Teil der störenden Einflüsse wegfällt.

Ende September 1957 schickten Forscher erstmals ein kleines, ferngesteuertes Spiegelteleskop bis in knapp 25 Kilometer Höhe. Mit Erfolg: Einige der 8000 Fotos, die während der Fahrten entstanden, zeigten verblüffende Details der Sonnenoberfläche.

Doch wenige Wochen später eröffnete sich eine neue Perspektive. Denn als Anfang Oktober 1957 die UdSSR

den Satelliten „Sputnik“ mit einer Rakete in den Orbit schoss, fühlten sich die USA herausgefordert, in einen Wettlauf in den Kosmos einzusteigen. Damit wurde auch die Option eines um die Erde kreisenden Teleskops realistisch.

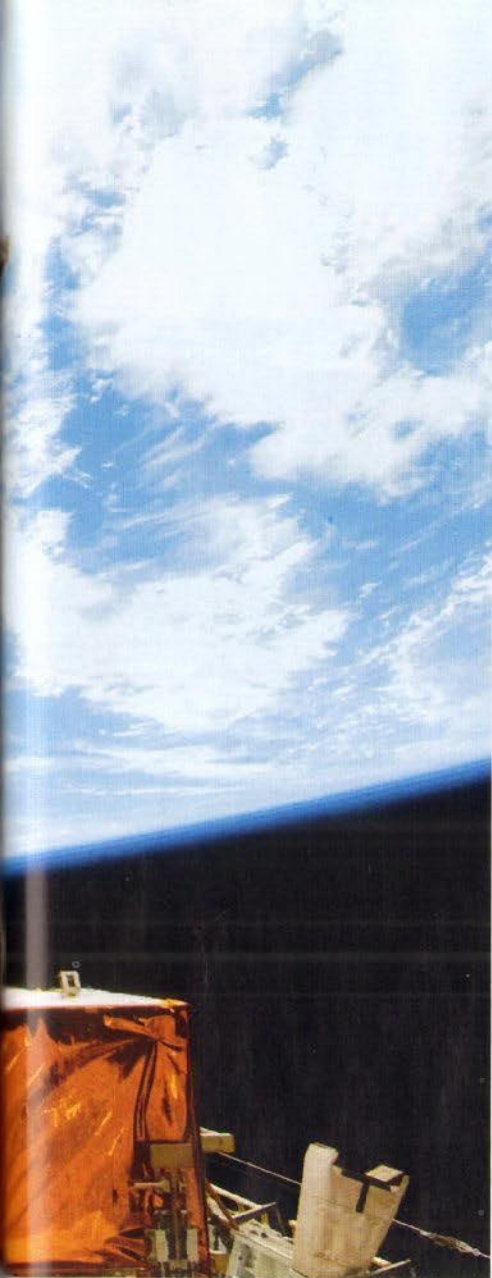
Doch noch war es nicht so weit. In den 1960er Jahren arbeitete Spitzer an einem Plan für ein „Large Space Telescope“. Es sollte mit einer Rakete in eine Erdumlaufbahn befördert werden und einen Spiegel-Durchmesser von nunmehr drei Metern haben.

Die meisten Astronomen beurteilten eine im Himmel schwebende Groß-

sternwarte jedoch skeptisch. Sie fürchteten Kosten von mindestens 100 Millionen US-Dollar und gewaltige Hürden.

Denn wie beispielsweise sollte man einen mehrere Meter großen Spiegel so konstruieren, dass er die Reise in die Umlaufbahn übersteht und den Bedingungen des Weltraums trotzt?

Mit welcher Technik wollte man fernste Galaxien und Planetarische Nebel fotografieren – wenn nicht mit höchst empfindlichem Filmmaterial, das aber nicht unbeschädigt durch den Strahlungsgürtel der Erde befördert werden könnte?



NASA 1972, ein Weltraumteleskop zu entwerfen. Sie beauftragte das Marshall Space Flight Center in Alabama, die Konstruktion zu beaufsichtigen.

Robert O'Dell, der verantwortliche Projektleiter, wollte das Teleskop mit dem geplanten Raumtransporter „Spaceshuttle“ in den Orbit befördern.

Der Vorteil: Dank der wiederverwendbaren Raumfähre könnten Astronauten das Teleskop im All regelmäßig warten, reparieren und veraltetes Instrumentarium austauschen. Die Konstruktion des Teleskops musste also auf die des Raumtransporters abgestimmt werden.

Und die Himmelsforscher glaubten, dass Weltraumflüge bald Routine sein würden: Sie rechneten mit jährlich bis zu 60 Missionen zum Teleskop. Das Weltraumauge, versprach O'Dell, werde damit „die Unsterblichkeit der großen Teleskope auf der Erde erreichen“. Die Kosten wurden auf 500 bis 900 Millionen US-Dollar geschätzt.

US-Präsident Gerald Ford gab jedoch zunächst nur rund drei Millionen US-Dollar für weitere Studien frei und forderte zudem die „substanzielle Mitarbeit anderer Nationen“.

1974 präsentierte O'Dell einen neuen Plan: Das Teleskop war nun so verkleinert, dass es in den Frachtraum eines Spaceshuttles passte. Der Durchmesser des Spiegels maß nur noch 2,40 Meter. Die Gesamtlänge des Teleskops betrug rund 16 Meter, das Gewicht elf Tonnen.

Zumindest dieses Problem wurde 1970 gelöst: Mit einer neuen Art hochsensibler Sensoren ließ sich Licht elektronisch sammeln. Es handelte sich um eine Anordnung winziger lichtempfindlicher Bauteile, die Lichtteilchen (Photonen) einfangen und in elektrische Signale umwandeln. So ließen sich die Daten im Orbit auslesen und durch Funk übermitteln.

Die von einem privaten Telekommunikationsunternehmen entwickelten CCDs (Charged Coupled Devices) revolutionierten die Foto- und Speichertechnik und lösten später in Digitalkameras das klassische Filmmaterial ab.

Von den Argumenten Spitzers schließlich überzeugt, beschloss die

Zudem verhandelte die NASA mit der europäischen Weltraumagentur ESA. Im Oktober 1977 verpflichteten sich die Europäer, 15 Prozent der Kosten zu übernehmen – und erhielten im Gegenzug entsprechend Beobachtungszeit. Sie sagten ferner zu, eine spezielle Kamera für lichtschwache Objekte sowie Solarzellen für die Stromversorgung der Kameras zu konstruieren.

Noch im gleichen Jahr begann endlich der Bau. In hochpräziser Feinarbeit fertigte eine Spezialfirma das wichtigste Teil: den 2,40 Meter großen Hauptspiegel. Er war eine leichtgewichtige Wabenkonstruktion aus Titan-Silikatglas mit einem ausgefrästen Loch in der Mitte, durch das Lichtstrahlen aus dem Tubus des Teleskops auf die Beobachtungsinstrumente gelangen sollten.

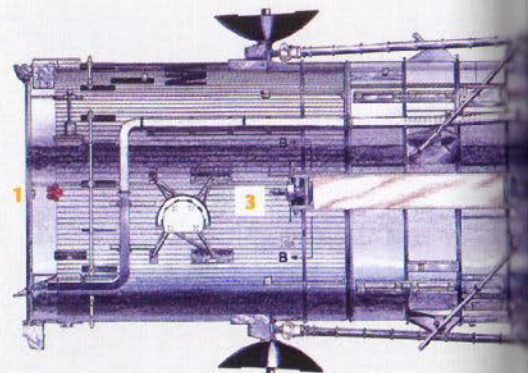
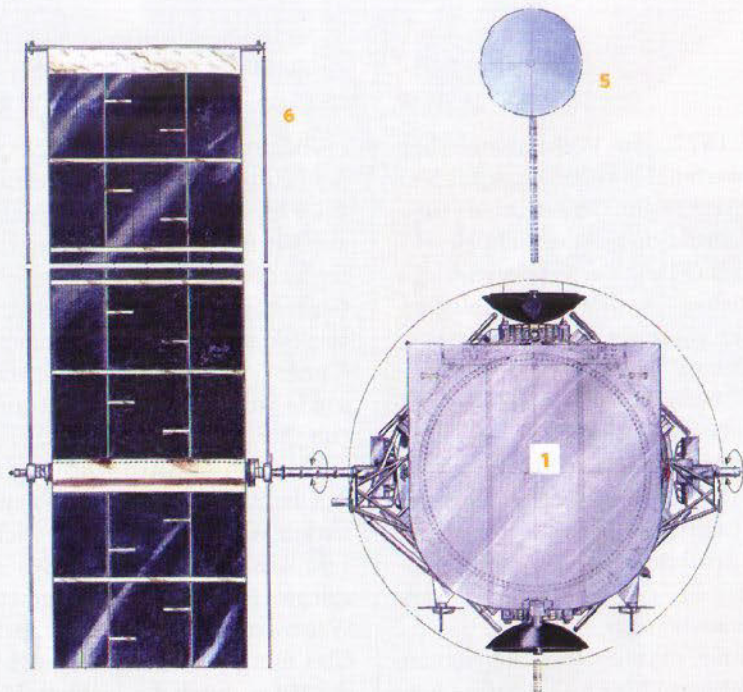
Eine Woche lang wurde der Spiegel mit einer computergesteuerten Poliermaschine bearbeitet. Danach analysierte ein Laser die Oberfläche. Dann wurde wieder poliert, analysiert, poliert, analysiert. Insgesamt 25-mal wiederholten die Spezialisten diese Prozedur.

Anschließend bedampften sie den Spiegel mit Aluminium, damit er reflektiert. Am Ende trugen sie eine Schutzschicht aus Magnesiumfluorid auf. Er ermöglichte derart präzise Aufnahmen, dass sich noch in 60 Kilometer Entfernung zwei Münzen voneinander unterscheiden ließen.

Niemand ahnte, dass dennoch etwas schiefgegangen war, das die gesamte Mission gefährdete.

**ANFANGS SIEHT
DER SPIEGEL DES
TELESKOPS DAS
UNIVERSUM
WIE DURCH EINE
BESCHLAGENE
GLASSCHEIBE**

ALS DAS TELESKOP Anfang der 1980er Jahre nach und nach zusammengesetzt wird, ähnelt es immer mehr einem riesigen Teleobjektiv: Sobald vorn die Schutzklappe offen steht, kann Sternenlicht ins Innere leuchten. In der Mitte des Weltraumauges trifft es auf den großen, gewölbten Hauptspiegel, der das Licht bündelt und auf einen kleinen, über ihm angebrachten Spiegel zurückwirft. Er reflektiert das Sternenlicht durch das Loch im Hauptspiegel in den hinteren Teil der Konstruktion. Dort befinden sich Kameras und Detektoren sowie die Instrumente, mit denen das Teleskop im Orbit gesteuert wird.



SO IST DAS WELTRAUMTELESKOP AUFGEBAUT

Hubble (hier eine Konstruktionszeichnung mit Front-, Seiten- und Rückansicht von 1981) gleicht einem riesigen Teleobjektiv: Sobald vorn die Schutzklappe (1) offen steht, kann Sternenlicht ins Innere gelangen. Im hinteren Teil des Tubus trifft es auf den 2,40 Meter

großen Hauptspiegel (2). Dieser wirft die Strahlen zurück auf einen kleinen Spiegel im vorderen Teil der Konstruktion (3). Er reflektiert das Sternenlicht durch ein Loch im Hauptspiegel in den hinteren Bereich (4). Dort befinden sich Kameras und Detektoren, die die Strahlung – ultraviolettes, sichtbares und Infrarotlicht – analysieren.

Vier telefonzellengroße Geräte ermöglichen es, die Strahlung der Sterne zu analysieren – ultraviolettes, sichtbares und Infrarotlicht.

Energereiches UV-Licht etwa stammt von jungen heißen Sternen, von heißen Materiescheiben und womöglich sogar von Schwarzen Löchern.

Infrarotes Licht dagegen wird von alternden Sternen ausgesendet, von Planetarischen Nebeln und weit entfernten Galaxien.

So erzählt jede Sorte von Lichtstrahlen spezielle Geschichten aus dem Kosmos.

1983 erhält das Weltraumteleskop den Namen „Hubble“ – zur Erinnerung an Edwin P. Hubble.

Im Jahr 1929 hatte der Astronom festgestellt, dass sich fast alle beobachteten Galaxien von unserer Heimat, der Milchstraße, fortbewegen und sich das Universum ausdehnt (siehe Seite 18). Er gilt als „Entdecker des Urknalls“.

Der Start des gleichnamigen Teleskops, der für Oktober 1983 geplant ist, verzögert sich derweil. Die Konstrukteure tüfteln vor allem daran, wie sich die Sternwarte mit großer Genauig-

keit in einer niedrigen Erdumlaufbahn ausrichten lässt.

Denn während einer Belichtung muss das Fernrohr perfekt auf sein Objekt fokussiert bleiben – obwohl es gleichzeitig mit ungeheurer Geschwindigkeit um die Erde rast. Seine Steuerungsinstrumente müssen deshalb mehrere Sterne gleichzeitig erfassen und dafür sorgen, dass Hubble sie nicht aus dem Blick verliert.

UM DAS PROJEKT

ZU RETTEN, ENT-

SCHEIDET SICH

DIE NASA FÜR

EINE 80 MILLIO-

NEN DOLLAR

TEURE SEHHILFE

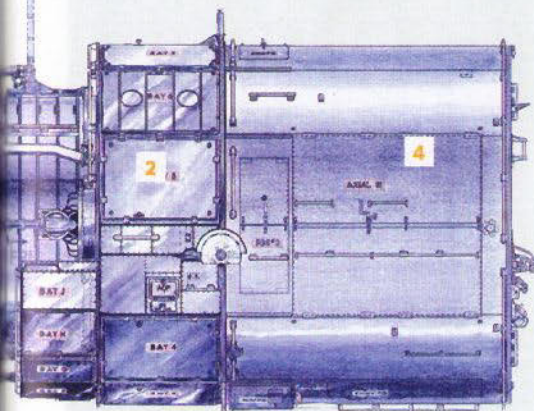
Dazu muss man die präzisen Himmelspositionen der zu beobachtenden Sterne kennen – doch die bis dahin gebräuchlichen Sternenkataloge reichen für die komplizierte Ausrichtung von Hubble nicht aus: Sie umfassen nur die 100 000 hellsten Himmelskörper.

Innerhalb kürzester Zeit legen die Astronomen in Baltimore daher einen Katalog mit den präzisen Positionen von 15 Millionen Sternen an.

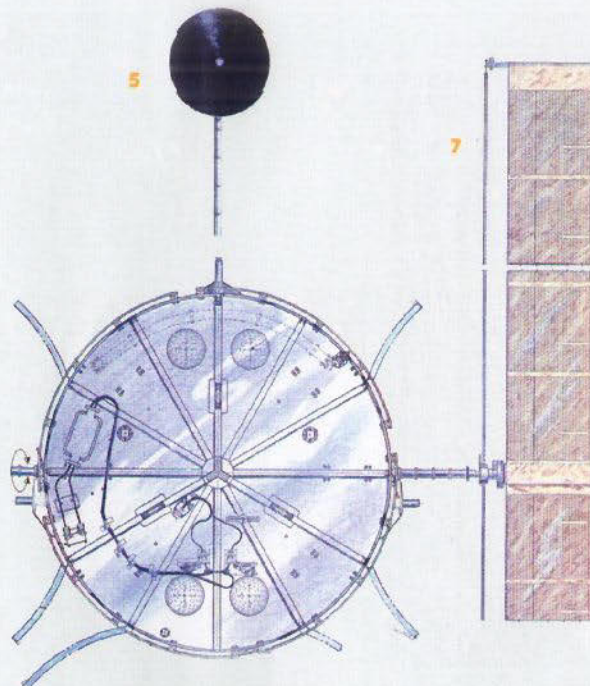
Im Jahr 1986 soll Hubble endlich starten. Doch zuvor kommt es zu einer Katastrophe: Am 28. Januar hebt die US-Raumfähre „Challenger“ ab und explodiert nach 73 Sekunden in der Atmosphäre. Die NASA stoppt vorerst alle Missionen; Hubble wird in einer staubfreien Montagehalle untergebracht, die demontierten Sonnenzellen werden nach Europa geschafft.

Die Kosten für das Weltraumauge summieren sich mittlerweile auf 1,5 Milliarden US-Dollar.

VIER JAHRE DARAUF ist es endlich so weit: Am 24. April 1990 hebt die Raumfähre „Discovery“ vom Weltraumbahnhof Cape Canaveral ab. Mit



Eine Hochleistungsantenne (5) funkt die Datenmengen zur Erde und erhält Befehle von der Bodenstation. Damit sich das Fernrohr im luftleeren Raum drehen und wenden kann, verfügt es in der Nähe des Hauptspiegels über eine Steuereinheit. Mittels rotierender Schwungmassen stellt diese Steuereinheit das



Teleskop auf neue Objekte ein und sorgt dafür, dass es während einer Belichtung perfekt ausgerichtet bleibt. Die erforderliche Energie stammt von zwei Solarpanelen (6, 7), die so dünn sind, dass sie auf der Erde wegen ihres eigenen Gewichts in sich zusammenbrechen würden

dem Teleskop im Frachtraum schießt sie in den Himmel und erreicht nach acht Minuten Flug eine Umlaufbahn in fast 600 Kilometer Höhe: Hubbles künftigen Arbeitsplatz.

Am Tag darauf wird die Großsternwarte mit einem Greifarm aus der Ladebucht gehievt. Die Sende- und Empfangsantennen fahren aus. Und die Solarzellen für die Stromversorgung werden entrollt; sie sind so dünn, dass sie auf der Erde aufgrund ihres eigenen Gewichts in sich zusammenbrechen würden.

Dann wird die Verbindung zur Raumfähre gekappt, und die Discovery zieht sich sehr vorsichtig zurück: Ihre Düsen dürfen die Optik des so sorgfältig sauber gehaltenen Teleskops nicht im letzten Moment noch verschmutzen.

Hubble fliegt von West nach Ost und umrundet alle 96 bis 97 Minuten die Erde. Das Teleskop bewegt sich im nahezu luftleeren Raum, indem es sich an seiner eigenen Trägheit abstößt: Elektromotoren bringen Schwungmassen zum Rotieren, sodass sich das gesamte Teleskop langsam dreht.

Mindestens einmal pro Sekunde prüft der Bordcomputer die Ausrichtung des Teleskops, das mit 27 300 km/h um den Globus rast.

Zwar ist es von Weltraum umgeben, doch gibt es hier im Orbit noch so viele restliche Partikel der Erdatmosphäre, dass das Teleskop allmählich abgebremst wird und mit jeder Woche Meter um Meter tiefer sinkt – etwa alle 15 Jahre muss es deshalb von einer Raumfähre ein gutes Dutzend Kilometer höher hinaufgehievt werden.

Im Verlauf der ersten Wochen im All kühlen die Kameras und Spektrometer aus, und alle Gasreste entweichen. Erst dann dürfen etliche Geräte eingeschaltet werden – etwa die „Faint Object Camera“ für schwach leuchtende Himmelsobjekte. Sie arbeitet mit so hohen elektrischen Spannungen, dass noch vorhandene Gase sich entladen und die Kamera zerstören könnten.

Auf der Erde ringen die Techniker derweil mit dem Navigationssystem des Teleskops. Sie versuchen, es auf Himmelsobjekte auszurichten. Und stoßen dabei auf ein Problem: Hubble verliert jeden Stern aus seinen Messfel-

dern, sobald es bei seiner Erdumrundung von der Nachtseite in den Tag fliegt (und umgekehrt). Denn binnen weniger Momente nehmen die Temperaturen auf seiner Außenhaut dann um 200 Grad Celsius zu (oder eben ab).

Dabei verspannen sich die Solarflügel sprunghaft und lassen die Sternwarte minutenlang trudeln. Das hat zuvor offenbar niemand bedacht. Die komplexen Kreissysteme, mit denen das Teleskop im Orbit gedreht und gewendet wird, können das Flattern nicht ausgleichen.

Das Problem ist vorerst unlösbar.

Am 20. Mai 1990 lädt die NASA Vertreter der Welpresse zum „First Light“ ein, den ersten Bildern des Weltraumteleskops: Vormittags um 11.12 Uhr Ortszeit erfolgt ein Kommando aus Goddard, daraufhin fotografiert Hubble den Sternhaufen NGC 3532 auf der südlichen Himmelshälfte.

Die erste Belichtung dauert eine Sekunde, die zweite 30 Sekunden. Die Bilder funkt Hubble zu einem Relaisatelliten im Orbit, von dort werden die Bilddaten zu einer Bodenstation gesendet. Dann wieder hinauf zu einem zwei-



DIESE HUBBLE-AUFNAHME zeigt die am weitesten entfernten Objekte, die jemals beobachtet wurden. Ihr Licht ist zum Teil schon seit 13 Milliarden Jahren unterwegs. Damit ist dieses Foto ein Blick in die Vergangenheit, in die Frühphase des Universums. Damals, so belegt das Bild, formten sich vergleichsweise häufig unregelmäßige Sternenhaufen, die keine typische Kontur annahmen – sogenannte »irreguläre Galaxien«

ten Satelliten und schließlich in die Rechner in Goddard.

Als sich das erste Bild auf einem Monitor aufbaut, zeigt sich ein großer heller Fleck in der Mitte: ein Stern. Das zweite Foto zeigt ein gutes Dutzend weißer Flecken. Offenbar funktioniert Hubbles Optik.

Allerdings weisen selbst die hellsten Sterne merkwürdige Tentakel auf. Ist womöglich eine der Kameras, die das Licht in elektronische Impulse verwandeln, defekt?

Als Wochen später die Bilder einer zweiten Kamera die gleichen Tentakel zeigen, steht fest: Nicht eine einzelne Kamera ist beschädigt, sondern das Herzstück des Teleskops: der fest installierte, fast zweieinhalb Meter große Hauptspiegel.

Er ist, wie sich bald herausstellt, zu flach geschliffen, und zwar um 2,34 Tausendstelmillimeter – nur ein paar Prozent der Dicke eines Haares.

Eine Kommission wird eingesetzt, um den Schaden zu untersuchen. Sie

stellt fest: „In den Jahren 1981 bis 1982 plagten das Projekt viele Probleme.“ Die geschätzten Kosten waren „um ein Mehrfaches gestiegen, der Zeitplan ins Rutschen gekommen, die Komplexität des Sauberhaltens des Spiegels wurde gerade erst erkannt“. Die konkrete Ursache ist ein ungenau justiertes Messgerät des Spiegelherstellers.

Normalerweise bündelt ein idealer Spiegel die parallelen Lichtstrahlen aus dem All in einem Punkt. Im Hubble-Teleskop existiert aufgrund des Optik-

fehlers kein eindeutiger Brennpunkt: Zwar landen einige Prozent des Lichts in diesem Fokus, aber Licht vom Rand des Spiegels wird fast vier Zentimeter hinter den Strahlen, die von der Mitte des Spiegels kommen, gebündelt.

Die Folge: Jeder Stern gleicht einem verwischten Fleck statt einem präzisen, klar abgegrenzten Punkt.

Der Fehler ist so gravierend, dass sich die Bilder auch mithilfe von Computern kaum verbessern lassen. Hubbles Fotos sind nicht viel schärfer als die von erdbasierten Teleskopen, die unter besten atmosphärischen Bedingungen aufgenommen werden.

Das Teleskop sieht das Universum wie durch eine beschlagene Glasscheibe. Mit dieser Sehschwäche lassen sich weder Planeten anderer Sterne erfassen noch Schwarze Löcher und Galaxien aus der Frühzeit unseres Weltraums entdecken oder gar das Alter des Kosmos bestimmen.

All diese Forschungen werden zurückgestellt, die Wissenschaftler müssen auf eine Wartungsmission hoffen.

Immerhin funktionieren die anderen Geräte an Bord, etwa die zwei Spektrometer. Sie zerlegen Licht in seine verschiedenen Wellenlängen, sodass sich verborgene physikalische und chemische Botschaften aus den Strahlen eines Himmelskörpers herauslesen lassen.

Zumindest diese Instrumente liefern in den folgenden Jahren großartige Erkenntnisse: Sie erkennen Wasserstoffwolken im freien Raum zwischen Galaxien. Beobachten eine Scheibe aus Gas und Staub um den Stern Beta Pictoris, wo sich möglicherweise zurzeit Planeten bilden. Und das Teleskop macht trotz des fehlerhaften Spiegels verblüffende Aufnahmen, etwa von der Supernova 1987A mit ihrem fulminanten, rasch sich im Kosmos ausbreitenden Gasring. Ferner gelingt es erstmals, den Zwergplaneten Pluto und seinen Mond Charon voneinander getrennt zu zeigen.

WISSENSCHAFTLER und Ingenieure rätseln derweil, wie sich der Fehler an Hubbles Hauptspiegel beheben ließe: Soll man das optische Herzstück des

Fernrohrs gewaltsam verbiegen? Oder riesige Korrekturlinsen montieren? Vielleicht gar ein neues Teleskop bauen – schließlich gibt es einen zweiten, identischen Hauptspiegel von einem anderen Hersteller?

Die NASA entscheidet sich für eine Konstruktion namens „Costar“ (Corrective Optics Space Telescope Axial Replacement): ein 80 Millionen Dollar teures, telefonzellengroßes Gerät aus 5300 Einzelteilen, bei dem zehn kleine Spiegel die verschwommenen Bilder korrigieren sollen – wie eine Art Brille.

Am 2. Dezember 1993 wird Costar, zusammen mit 200 Werkzeugen und Hilfsmitteln, an Bord der Raumfähre „Endeavour“ ins All gebracht.

Schon von Ferne kann die Crew des Spaceshuttles das Teleskop erkennen. Aus 60 Kilometern leuchtet es heller als jedes andere Himmelsobjekt, abgesehen von Erde, Mond und Sonne.

Aus 100 Meter Entfernung sehen die Astronauten, wie sich das Blau der Erd-ozeane in den Aluminiumabdeckungen spiegelt. Und aus der Nähe zeigt sich

**HUBBLE
SCHAUT ZURÜCK
IN DIE FRÜHZEIT
DES KOSMOS –
UND ERKENNT
MEHR ALS 3000
GALAXIEN**

ihnen eine Oberfläche, die aussieht wie mit Stahlwolle geschmirgelt: Gasteilchen der irdischen Restatmosphäre in 600 Kilometer Höhe haben das dahinrasende Instrument im Lauf der Jahre bearbeitet.

Um Platz für die Sehhilfe zu schaffen, müssen die Astronauten eines der vier Messinstrumente von Hubble demon-

strieren, das „High Speed Photometer“ zur Eichung von Sternenhelligkeiten.

Zudem ersetzen sie die verspannten Solarflügel, die das Teleskop haben flattern lassen, wechseln die Kreiselinstrumente aus, die Hubble nicht exakt genug stabilisieren konnten, installieren eine neue Weitwinkelkamera.

Die Arbeit im Weltraum ist für die Männer und Frauen extrem mühsam. Es ist, kommentierte Astronautin Kathryn Thornton bei der Vorbereitung der Mission, „als ob man ein Auto kopfüber und mit Skihandschuhen an den Händen reparieren wollte“.

Doch nach sechs Tagen und 35,5 Stunden Außenbordarbeit ist es geschafft: Am 10. Dezember wird das Teleskop wieder sich selbst überlassen.

Mitte Dezember 1993 setzen die Techniker der NASA das Fernrohr erstmals nach der Reparatur ein – und staunen über dessen grandiose Sehkraft: Nun könnten sie eine Armbanduhr aus 15 Kilometer Entfernung ablesen, zehnmal besser aufgelöst als zuvor. Hubble erkennt fantastische Galaxien, gigantische Nebeltürme und zerbers-tende Sterne.

Es beobachtet gewaltige Stürme auf dem Mars und den Wechsel der Jahreszeiten auf dem Saturn. Es sieht, wie sich Sterne in ihrer jugendlichen Drangphase von der äußeren Gashülle befreien. Und wie sich uralte Glutbälle am Ende ihres Daseins in einem Planetarischen Nebel auflösen.

Selbst Sterne, die Hunderte von Millionen Lichtjahre entfernt sind, kann das Teleskop erkennen. Endlich ist die Großsternwarte jenes weltraumtechnische Wunderkind, das die Sehnsüchte der Himmelsforscher erfüllt.

SCHON DIE ERSTEN Langzeitaufnahmen, die jetzt gemacht werden, erweitern den Wissenshorizont. Die Astronomen rechnen nun nicht mehr mit zehn Milliarden Galaxien im Universum, sondern mit fünfmal so vielen.

Bald darauf will der wissenschaftliche Direktor Robert Williams in Baltimore wissen: Wie tief kann Hubble ins Weltall schauen? Deshalb initiiert er jene Suche nach einem dunklen Him-

melfeld, die Ende 1995 zu den Aufnahmen bei Delta Ursae Major führt.

Zwei Wochen lang arbeitet ein Astronomenteam, um die Einzelfotos der verschiedenen Wellenlängen zu einem Bild zu vereinigen.

Dann, am 15. Januar 1996, präsentiert das Team von Robert Williams ein sensationelles Foto aus der Tiefe des Weltraums, aus der Frühzeit des Universums: Dort, wo das menschliche Auge nur Schwarz sieht, hat Hubble in die Kinderstube des Universums geschaut: Mehr als 3000 Galaxien sind zu erkennen, manche in einer Distanz von zehn Milliarden Lichtjahren. Weil deren Licht schon entsprechend lange unterwegs ist, ist es ein tiefer Blick in die Vergangenheit.

Das Foto offenbart nie gesehene Objekte, erstmals sogar eine Galaxie der 30. Größenklasse*: Hubble ist damit zehn Milliarden Mal empfindlicher als ein menschliches Auge.

Und es zeigt einen wunderschönen Urkosmos: Mehr als jede dritte Galaxie erweist sich als ungewöhnlich in der Form oder gar als deformiert (im heutigen Kosmos sind es wenige Prozent). Offenbar sind die Galaxien im jungen Universum deutlich häufiger kollidiert und verschmolzen, was zu solchen verblüffenden Formen führte.

Je tiefer der Blick ins All reicht und je schwächer damit die Galaxien leuchten, desto dramatischer nimmt die Zahl der Sternhaufen zu.

Schließlich stellt sich den Astronomen eine Frage: Hat Hubble in diesem Tiefenfeld, in diesem Ausschnitt des Universums alle Galaxien registriert? Oder verbergen sich in den helleren Bildpunkten des Fotos noch enorm viele Sternsysteme, die unerkant bleiben?

Nach drei Jahren mathematischer Analyse sind sich die Astronomen 1998 sicher: Hubble hat weitgehend das gesamte Weltall in dieser Richtung

dokumentiert. In den kommenden Jahren wird es auf zwei weitere Tiefenfelder ausgerichtet, zuletzt 2004 für eine Belichtungszeit von 28 Tagen (siehe Seite 126).

Die grandiosen Aufnahmen revolutionieren unser Wissen über den Anbeginn des Kosmos: In der ersten Hälfte seiner bisherigen Existenz haben sich im Universum zehnmal so viele Sterne gebildet wie in unserer Epoche. Und Quasare, jene leuchtstarken Objekte in den Zentren vieler Galaxien, kamen Hunderte Male häufiger vor als heutzutage (siehe Seite 82).

Hubble liefert weitere spektakuläre Einsichten über die Welt: Die Beobachtungen mit dem Teleskop legen unter anderem nahe, dass sich im Zentrum fast jeder großen Spiralgalaxie gigantische, Materie verschlingende Schwarze Löcher befinden. Noch erstaunlicher: Hubbles Aufnahmen tragen zu der Erkenntnis bei, dass sich das

Wartungsmissionen auf zehn Milliarden US-Dollar. Dagegen kostete das moderne Keck-Teleskop auf Hawaii – das dank neuerer elektronischer Systeme ähnlich scharf sieht wie Hubble – nur etwa 270 Millionen US-Dollar.

DAS ENDE der Hubble-Mission ist indes absehbar. In den kommenden Jahren soll sein Nachfolger starten: Das „James Webb Space Telescope“, das überwiegend infrarotes Licht analysiert.

Es wird nicht um die Erde kreisen wie Hubble, sondern in 1,5 Millionen Kilometer Entfernung unseren Planeten um die Sonne begleiten. So kann es dort – in Bezug zur Erde – unbeweglich verharren und hat eine weitgehend ungestörte Sicht.

Es wird einen tennisplatzgroßen Sonnenschirm entfalten, der das Gerät vor Sonnenlicht und Wärme schützt und zudem Solarzellen zur Energiegewinnung trägt. Mit seinem 6,50 Meter großen Spiegel wird es schwächstes Infrarotlicht registrieren. Denn es ist vor allem dazu konzipiert, fernste Galaxien zu beobachten, die diese Strahlung aussenden.

Bis dahin wird Hubble voraussichtlich noch Daten liefern. Doch dann droht ihm ein ähnliches Schicksal wie manch anderem Himmelskörper: Da keine Spaceshuttles mehr ins All fliegen, die das Teleskop wieder höher hieven könnten, wird es sich der

Erde immer weiter nähern – und irgendwann zu einem kontrollierten Absturz gebracht.

Es wird durch die Atmosphäre rasen, dabei wie ein Meteor aufglühen und schließlich im Ozean versinken. Das gilt zumindest für die Reste, die dann noch von ihm übrig sind. □

Memo: DAS HUBBLE-TELESKOP

► **Im April 1990** gelangt das **Weltraum-Fernrohr** an Bord einer Raumfähre ins All. Bald darauf wird ein Fehler am Hauptspiegel entdeckt.

► **Drei Jahre später** versehen Astronauten das Teleskop mit einer Sehhilfe. Seither verblüfft es die Fachwelt mit gestochen scharfen Bildern.

► **Kosmologen richten den Späher** auch auf dunkle Himmelsfelder, um möglichst weit entfernte Objekte aufzunehmen.

► **Das Ende des Hubble-Projektes** ist absehbar. In den nächsten Jahren soll sein Nachfolger starten: das „James Webb Space Telescope“.

Universum nicht gleichmäßig ausdehnt, sondern immer schneller expandiert.

Das Weltraumteleskop ist damit endgültig zum Star der Wissenschaft geworden: Rund 9400 wissenschaftliche Studien basieren auf seinen Beobachtungen – weit mehr als auf den danach wichtigsten Missionen der Voyager- und Viking-Sonden. Aber es sind teuer erkaufte Einsichten: Die Kosten summieren sich wegen der

* Astronomen teilen die Helligkeit der Sterne in Größenklassen ein: Je kleiner die Klasse ist, desto heller erscheint der Stern. Unsere Sonne etwa hat die Klasse -27, die schwächsten mit bloßem Auge sichtbaren Objekte haben Klasse 6.

Dirk Liesemer, 34, ist Journalist und Autor in Münster.

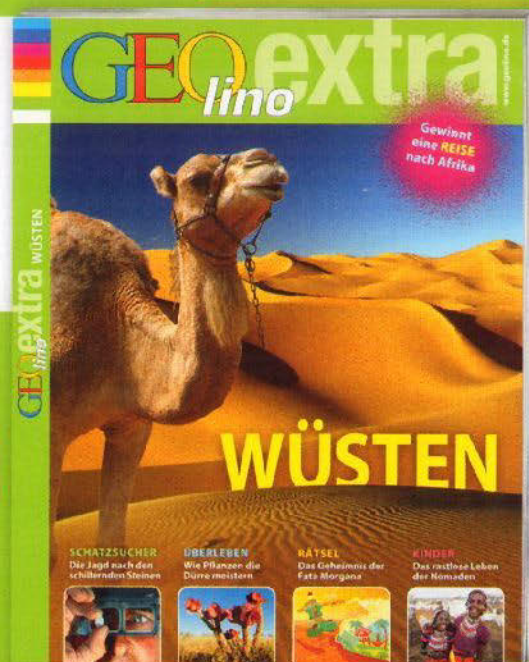
Literaturempfehlung: Robert Zimmerman, „The Universe in a Mirror“, Princeton University Press; lebhafte und detailreiche Schilderung der Hubble-Mission – von der ersten Skizze bis zu den Wartungs- und Reparaturflügen nach dem Start.

Jetzt im Handel

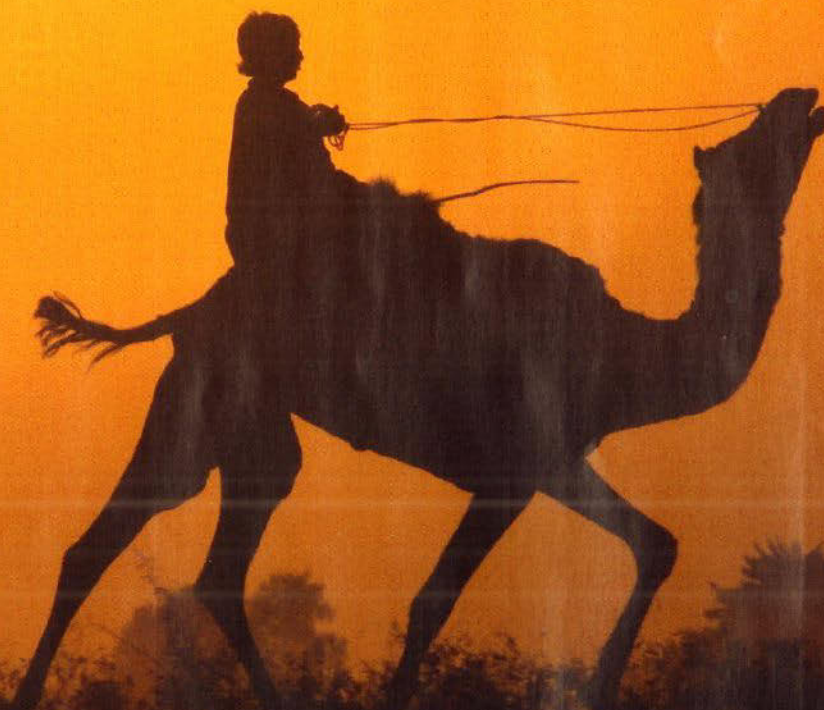
Das haut dich vom Höcker!

Das Extra-Heft für junge Entdecker ab 8 Jahren. In dieser Ausgabe: beeindruckende Überlebenstricks, singender Sand und glitzernde Städte im Nirgendwo.

AUCH MIT
DVD
ERHÄLTlich



GEOlino. Wissen macht Spaß



Sie können dieses Heft auch direkt bestellen unter Tel. 01805/861 80 00*

*0,14 €/Min. aus dem dt. Festnetz, max. 0,42 €/Min. aus den dt. Mobilfunknetzen.

Unendliche Wissenswelten mit 9% Ersparnis!

Lesen oder verschenken Sie jetzt ein Jahr GEOkompakt bequem frei Haus und freuen Sie sich auf ein tolles Wunschgeschenk.

**Gratis
zur Wahl!**



1. Wetterstation

- mit Uhr, Thermometer und Hygrometer
- dekorativer, vertikaler Holzständer
- mit edler Chromumrandung
- Maße: ca. 7 x 25,5 x 8 cm

2. GEOkompakt-Schuber + Ausgabe „Wie der Mensch die Welt eroberte“

- Hartkarton-Schuber für Ihre GEOkompakt-Sammlung
- „Wie der Mensch die Erde eroberte“ – die Erfolgsgeschichte des Homo sapiens

3. Asia-Messerset „Taki“

- bestehend aus einem Koch-, Gemüse- und Sushimeser im japanischen Stil
- Klingen aus Qualitäts-Edelstahl, Griffe aus Holz
- in dekorativer Geschenkbox

Ja, ich möchte GEOkompakt zum Vorzugspreis:

<input type="checkbox"/> selbst lesen! Senden Sie mir bzw. dem Beschenkten GEOkompakt ab der nächsterreichbaren Ausgabe zum Vorzugspreis von zzt. nur € 7,75 (D)/€ 8,95 (A)/Fr. 16.– (CH) pro Ausgabe (inkl. MwSt. und Versand) statt € 8,50 (D)/€ 9,80 (A)/Fr. 17,60 (CH) im Einzelkauf (Studenten zahlen nur € 6,60 (D) pro Ausgabe und legen bitte eine Kopie ihrer Immatrikulationsbescheinigung bei). GEOkompakt erscheint zzt. 4x im Jahr. Mein Geschenk erhalte ich nach Zahlungseingang. Nach 1 Jahr kann ich das Abonnement jederzeit beim GEOkompakt-Kundenservice, 20080 Hamburg, kündigen. Im Voraus bezahlte Beträge erhalte ich dann zurück. Dieses Angebot gilt nur, solange der Vorrat reicht.	Bestell-Nr. 839 871 <input type="checkbox"/> verschenken! Ich verschenke GEOkompakt an: (bitte nur ausfüllen, wenn Sie GEOkompakt verschenken möchten)	<input type="checkbox"/> als Student lesen! Bestell-Nr. 839 873
Meine persönlichen Angaben: (bitte unbedingt ausfüllen!) Name, Vorname _____ Geburtsdatum: 19 ____ Straße, Hausnummer _____ PLZ _____ Wohnort _____ Telefonnummer _____ E-Mail-Adresse _____ <input type="checkbox"/> Ja, ich bin damit einverstanden, dass GEO und Gruner + Jahr mich künftig per Telefon oder E-Mail über interessante Angebote informieren.	Name, Vorname des Beschenkten _____ Geburtsdatum: 19 ____ Straße, Hausnummer _____ PLZ _____ Wohnort _____ Telefonnummer _____ E-Mail-Adresse _____ <input type="checkbox"/> Die Belieferung soll frühestens ab dem 20. ____ beginnen. (Optional)	Als Geschenk wähle ich: (bitte nur 1 Kreuz machen) <input type="checkbox"/> 1. Wetterstation <input type="checkbox"/> 2. Asia-Messerset „Taki“ <input type="checkbox"/> 2. GEOkompakt-Schuber + Ausgabe „Wie der Mensch die Welt eroberte“
Ich bezahle bequem per Bankeinzug: (zzt. € 31.– (D)/€ 35,80 (A)/Fr. 64.– (CH) jährlich) Bankleitzahl _____ Kontonummer _____ Geldinstitut _____ <input type="checkbox"/> Ich zahle per Rechnung.	Widerrufsrecht: Innerhalb von zwei Wochen nach Absenden meiner Bestellung kann ich diese ohne Begründung beim GEOkompakt-Kundenservice, 20080 Hamburg in Textform (z.B. Brief oder E-Mail) oder durch Rücksendung der Zeitung widerrufen. Zur Fristwahrung genügt die rechtzeitige Absendung. Datum _____ Unterschrift _____	

Bestellen leicht gemacht:

Per Post:
GEOkompakt-Kundenservice,
20080 Hamburg

Per Telefon: (bitte die Bestell-Nr. angeben)
01805/861 80 03

14 Cent/Min. aus dem dt. Festnetz, max. 42 Cent/Min. aus dem dt. Mobilfunknetz.
Abonnement-Service Österreich und Schweiz: +49 1805/861 80 03

Online mit noch mehr Angeboten:
www.geokompakt.de/abo

Der Weihnachtsbaum-Sternhaufen (im Bild oben) und der Konusnebel (dunkle Säule unten): Obwohl die Gestirne 2600 Lichtjahre von uns entfernt sind, gelten dort die gleichen Gesetze wie auf der Erde

DOSSIER

Die Bausteine der Welt

Was sind Elementarteilchen, elektromagnetische Wellen und Quanten? Woraus bestehen die Elemente, aus denen der Kosmos aufgebaut ist? Wie wirken die vier Grundkräfte? Und was hat es mit Einsteins berühmter Formel $E = mc^2$ auf sich? Ein Dossier über alles, was unsere Welt zusammenhält

Text: Arno Nehlsen
Illustrationen: Rainer Harf

Der Physiker Dr. Arno Nehlsen arbeitet als Wissenschaftsautor in Hamburg.

Aus dem Inneren der **Atome**

Zwei Sorten Partikel geben der Welt Gestalt: die Materieteilchen, aus denen die Atome aufgebaut sind, sowie die Kraftteilchen, die regeln, auf welche Weise sich die Materieteilchen miteinander verbinden und wie sie sich durch den Raum bewegen. Damit können Physiker nahezu alle bisher beobachteten Phänomene der Mikrowelt erklären

Die Welt ist im Prinzip einfach aufgebaut. Alles, was wir sehen – ob leblose Materie, Pflanzen, Tiere und Menschen, aber auch Sterne, Staub- oder Gaswolken und Milliarden von Galaxien –, besteht aus winzigen Atomen (siehe auch Seite 134). Die wiederum lassen sich zerlegen in Elektronen (nicht weiter teilbar), Protonen und Neutronen.

Wenn man die Protonen und Neutronen zerlegt, stößt man schließlich auf weitere kleinste, unteilbare Bausteine aller Elemente: die sogenannten Quarks. Elektronen und Quarks zählen damit zu den Elementarteilchen. Das **Elektron** ist ein winziges Partikel, stark vereinfacht vorstellbar als Kugel mit einem Durchmesser von höchstens 10^{-18} Meter (das ist der Milliardste Teil eines Millionstel Millimeters). Es ist mit einer negativen elektrischen Ladung versehen und unfassbar leicht: Seine Masse beträgt 9,1 mal 10^{-31} Kilogramm.

Das **Proton** ist mit 10^{-15} Meter Durchmesser mindestens 1000-fach größer und gut 1800-fach schwerer als das Elektron. Seine elektrische Ladung aber ist genauso groß wie die des Elektrons – nur ist sie positiv. Daher ziehen sich Protonen und Elektronen durch die Elektromagnetische Kraft an und formieren sich zu Atomen.

Das **Neutron** ist ähnlich groß wie das Proton und um 0,14 Prozent schwerer, aber elektrisch neutral. In Atomkernen kann es stabil existieren. Wird es dagegen freigesetzt, etwa in einem Kernreaktor, zerfällt das isolierte Teilchen nach durchschnittlich

15 Minuten. Dabei entstehen ein Proton, ein Elektron und ein Neutrino.

Die Protonen und die Neutronen bestehen aus noch kleineren Einheiten. Sie sind aus jeweils drei **Quarks** zusammengesetzt, wobei zwei verschiedene Sorten dieser Elementarteilchen vorkommen: Sogenannte Up-Quarks besitzen eine elektrisch positive Ladung, die zwei Drittel der Proton-Ladung beträgt;

Schon während des Urknalls entstanden große Mengen Neutrinos, und auch heute noch werden sie ständig neu gebildet – etwa bei Kernfusionsprozessen im Inneren der Sterne.

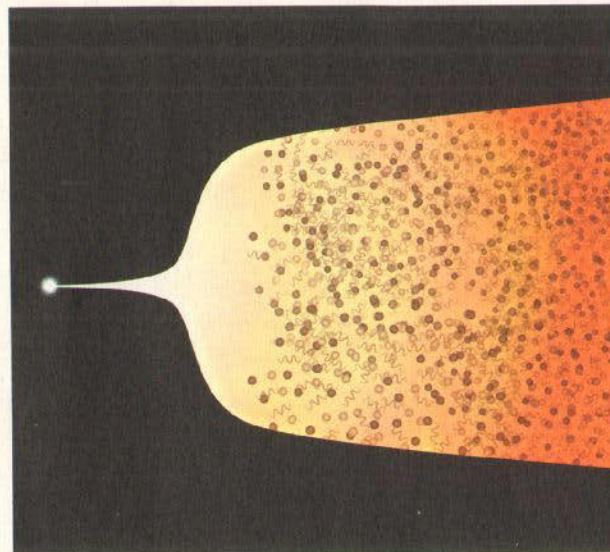
Neutrinos gehören zur Materie im Kosmos, existieren aber in einer eigenen, für uns unsichtbaren Welt, da sie nur der Schwachen Kernkraft sowie der Schwerkraft

unterliegen (siehe Seite 136) und äußerst selten mit anderen Teilchen reagieren, also auch nicht mit den Atomen.

Deshalb durchdringen diese „Geisterteilchen“ den menschlichen Körper, wie Licht durchsichtiges Glas passiert, und durchqueren selbst die ganze Erde, zumeist ohne eine Spur zu hinterlassen (siehe Seite 72). Für das Verhalten der normalen Materie spielen sie daher praktisch keine Rolle.

DARÜBER HINAUS existierte kurz nach dem Urknall eine große Anzahl von **Materieteilchen**, die sich aber schon nach Sekundenbruchteilen in stabile Teilchen oder Strahlung umwandelten – darunter mehrere weitere Sorten Quarks sowie Verwandte des Elektrons: Myonen und Tauonen.

Da diese Teilchen für die Physiker extrem wichtig sind, um den Verlauf der frühesten Phase unseres Kosmos, die Bildung der normalen Materie und die Entwicklung des Universums zu verstehen, bauen sie seit einiger Zeit gigantische Maschinen, sogenannte Teilchenbeschleuniger (siehe Seite 73), in denen Protonen, Elektronen sowie schwere Atomkerne bis fast auf Lichtgeschwindigkeit beschleunigt werden.



Alle Partikel, aus denen die Welt heute besteht – Materieteilchen (Kugeln) und Kraftteilchen (Spiralen) –, bildeten sich bereits in der ersten Sekunde nach dem Urknall, als das All unvorstellbar heiß war

Down-Quarks hingegen sind negativ geladen (mit minus ein Drittel der Proton-Ladung).

Zwei Up-Quarks und ein Down-Quark formieren ein Proton, ein Up-Quark und zwei Down-Quarks ein Neutron.

ZUDEM GIBT es Neutrinos. Die sind wie Neutronen elektrisch neutral und haben eine extrem geringe Masse, millionenfach geringer als die eines Elektrons.



Murray Gell-Mann (* 1929)

Anfang der 1960er Jahre konzipierte der US-Physiker ein Ordnungsschema für die kleinsten bekannten Partikel des Universums: die Elementarteilchen – die Grundbausteine der Materie. Er ist der Namensgeber für eine Art der Atombausteine: die Quarks

Wenn diese Teilchen dann aufeinanderprallen, wird es im Kollisionsbereich so heiß wie in der Anfangsphase unseres Universums, und für Sekundenbruchteile entstehen manche der exotischen Elementarteilchen aus der Urzeit des Weltraums.

Auf diese Weise lassen sich jene Verhältnisse nachahmen, die unmittelbar nach dem »Big Bang« herrschten.

AUSSER DEN Materieteilchen existiert in der Natur aber noch eine zweite Klasse von Partikeln, die **Kraftteilchen** – und sie haben Eigenschaften, die für den Nichtphysiker nur schwer zu begreifen sind.

Denn diese Kraftteilchen regeln, wie die Materieteilchen sich zueinander verhalten: Sie übertragen Kräfte.

Ohne sie wäre die Welt nur eine ungeordnete Ansammlung von Materiekrümeln. Erst die Kräfte geben der Welt ihre Gestalt, bestimmen, wie sich die Materieteilchen miteinander verbinden und wie sie sich durch den Raum bewegen.

Eine jede Kraft in unserer Welt, so die Vorstellung der Wissenschaftler heute, kann nur wirken, indem die Materieteilchen solche Kraftteilchen untereinander austauschen.

Die abstoßende Elektromagnetische Kraft zwischen zwei Elektronen wird beispielsweise durch ein Photon (Teilchen des Lichts) vermittelt. Stark vereinfacht, ist dieser Abstoßungsprozess vergleichbar mit zwei Menschen (Elektronen), die sich mit viel Kraft einen Ball (Photon) zuwerfen. Der Werfer erfährt beim Abwurf einen Rückstoß,

und der Fänger nimmt den Impuls des Balles auf: Werfer und Fänger stoßen sich also gewissermaßen ab.

Zudem gibt es spezielle Klebeteilchen (Gluonen), die die Quarks in einem Proton oder einem Neutron zusammenhalten.

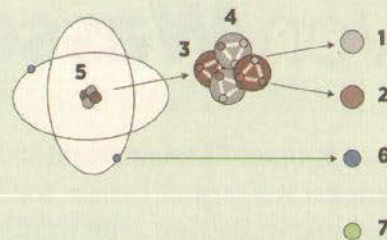
Der Theorie nach existieren auch Kraftteilchen, die für die Schwerkraft sorgen: die **Gravitonen**. Allerdings sind sie bislang nicht nachgewiesen worden.

Auch auf die Entdeckung des **Higgs-Teilchens** warten die Physiker noch. Dabei handelt es sich weder um ein Materie- noch um ein Kraftteilchen, sondern um ein Partikel, das der Theorie nach auf komplizierte Weise mit den Materieteilchen in Beziehung tritt und ihnen dabei ihre Masse verleiht.

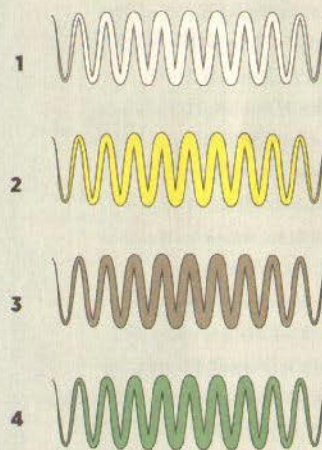
UND ALS WÄRE das alles noch nicht genug, existiert zu jeder Teilchensorte im Universum auch noch ein sogenanntes **Antiteilchen**. Es hat die gleiche Masse, aber die entgegengesetzte Ladung – zum Elektron zum Beispiel gehört das Positron.

Solche **Antimaterie** kann spontan gemeinsam mit Materie aus Strahlung entstehen, wenn die Strahlungsenergie groß genug ist. Auch nach dem Urknall sind Materie- und Antimaterieteilchen immer gleichzeitig aus der Strahlung entstanden, haben sich dann aber gegenseitig fast vollkommen vernichtet (siehe Seite 30).

Weshalb am Ende dennoch ein kleiner Rest Materie übrig blieb, der ausreichte, um das heutige All zu formen: Das ist eines der großen ungelösten Rätsel der Kosmologie. □



MATERIETEILCHEN: Sämtliche Atome (etwa Helium, o. l.) bestehen aus Materieteilchen. Down-Quarks (1) und Up-Quarks (2) bilden in verschiedenen Dreierkonstellationen die Bausteine der Atomkerne, die wiederum aus positiv geladenen Protonen (3) und ungeladenen Neutronen (4) bestehen. Um den Atomkern (5) schwirren negativ geladene Elektronen (6). Außerhalb der Atome existieren zudem sehr leichte Materieteilchen, die kaum mit anderen Partikeln reagieren: die Neutrinos (7). Sie sind wie die anderen Materieteilchen kurz nach dem Urknall entstanden und bewegen sich beinahe mit Lichtgeschwindigkeit durchs All.



KRAFTTEILCHEN: Durch diese Partikel (hier als Wellenzüge dargestellt) entfalten die vier Grundkräfte ihre Wirkung. Gluonen (1) vermitteln die Starke Kernkraft, sie halten Quarks in Atomkernen zusammen. Photonen (2), Träger der Elektromagnetischen Kraft, sorgen dafür, dass sich Elektronen und Protonen anziehen. Durch Gravitonen (3) wirkt die Schwerkraft, die zwei massereiche Körper einander anziehen lässt. Spezielle Bosonen (4) wiederum übertragen die Schwache Kernkraft, die Radioaktivität hervorruft.

Von **Wasserstoff**, Eisen und Gold

Das All, unsere Erde und sämtliche Lebewesen, die sie bewohnen, bestehen aus lediglich 94 verschiedenen Elementen – darunter Wasserstoff, Helium, Kohlenstoff und Silizium. Diese Elemente verhalten sich höchst unterschiedlich, und doch sind sie allesamt ähnlich aufgebaut. Mehr noch: Fast alle entstammen dem glutheißen Inneren alter Sterne

Würde die Welt nur aus Wasserstoff- und Heliumatomen bestehen, wie sie kurz nach dem Urknall vorhanden waren, wäre sie höchst langweilig und einförmig strukturiert. Denn alle Erscheinungsformen der heutigen Materie – etwa Gesteine, Pflanzen und Tiere – sind nur möglich, weil es weitere Sorten von Atomen gibt. Sie sind schwerer und komplizierter gebaut und können sich zu äußerst vielfältigen Molekülen verbinden.

Eine noch relativ einfache solche Verbindung ist das Wassermolekül. Es besteht aus zwei Atomen Wasserstoff und einem Atom Sauerstoff. Der menschliche Körper ist vor allem aus Sauerstoff-, Kohlenstoff und Wasserstoffatomen sowie aus geringeren Anteilen weiterer Atome zusammengesetzt.

94 Sorten von Atomen kommen auf der Erde natürlich vor. Sie werden auch **chemische Elemente** genannt. Doch wie sind diese Atome konstruiert, worin unterscheiden sie sich? Und vor allem: Wie sind sie entstanden?

ALLE ATOME SIND nach dem gleichen Prinzip aufgebaut: Ein elektrisch positiv geladener Kern ist umgeben von einer negativ geladenen Hülle. **Kern** wie **Hülle** bestehen aus verschiedenen Teilchen: der Kern aus positiv geladenen **Protonen** und – wie der Name schon sagt – neutralen **Neutronen**, die Hülle aus negativ geladenen **Elektronen** (siehe Seite 132). Wichtig ist: Im Kern befinden sich genauso viele Protonen wie Elektronen in der Hülle. Deshalb ist das Atom insgesamt elektrisch neutral.

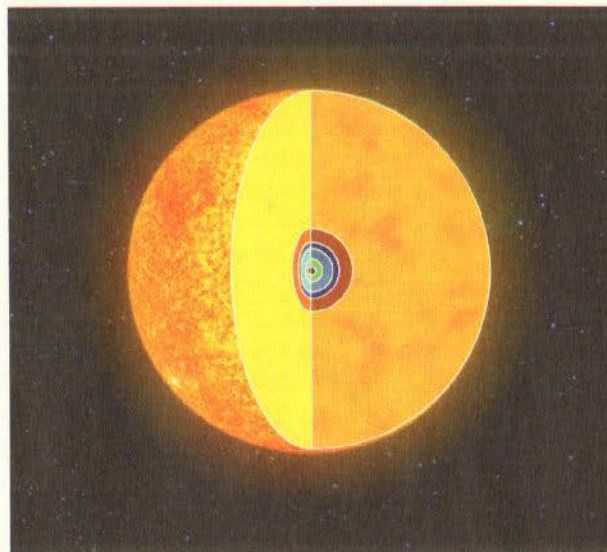
Seine chemische Identität erlangt ein Element einzig durch die Anzahl von Protonen, die in seinem Kern vorkommen (zu den Neutronen weiter unten mehr). Der einfachste mögliche Fall ist der Wasserstoff: Sein Kern enthält nur ein einziges Proton. Das normale Wasserstoffatom besteht also aus einem Proton im Kern sowie einem Elektron in der Hülle um diesen Kern.

Beryllium (vier Protonen), Bor (fünf), Kohlenstoff (sechs), Stickstoff (sieben) und Sauerstoff (acht). So geht es weiter bis zum Uran, das 92 Protonen im Kern trägt, der von 92 Elektronen umschwirrt wird. Es ist das schwerste natürlich vorkommende Element – abgesehen von kleinsten Spuren von Neptunium (93 Protonen) und Plutonium (94 Protonen) in der Erdkruste.

Protonen und Elektronen sind aber nicht die einzigen Bestandteile der chemischen Elemente. Ihr Kern enthält, mit Ausnahme des Wasserstoffs, immer auch Neutronen – und selbst der Wasserstoff kann ein Neutron im Kern enthalten (allerdings kommt das nur bei einem von rund 10 000 Wasserstoffatomen vor). Er heißt dann Deuterium und ist etwa doppelt so schwer wie normaler Wasserstoff. Atome mit gleich vielen Protonen, aber unterschiedlicher Zahl an Neutronen, werden als verschiedene **Isotope** des gleichen Elements bezeichnet. Da sie alle gleich viele Elektronen in der Atomhülle besitzen, verhalten sich die Isotope eines Elements chemisch weitgehend identisch.

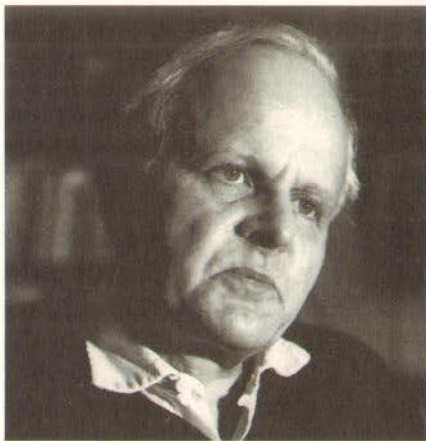
Helium enthält normalerweise zwei, Kohlenstoff sechs

und Uran sogar 146 Neutronen. Die Menge der Neutronen im Atomkern wird durch die komplizierten Gesetze der Kernphysik bestimmt und kann – wie beim Wasserstoff – unterschiedlich sein. Beim Helium gibt es zum Beispiel eine seltene Form mit nur einem Neutron statt zwei und beim Kohlenstoff eine ebenfalls seltene Abweichung, die acht statt sechs Neutronen enthält. Die Isotope sind unterschiedlich schwer – und



Elementeküche: Im Inneren der Sterne entstehen in Reaktionsketten aus Wasserstoff (gelb) nacheinander Helium (rot), Kohlenstoff (blau), Sauerstoff (hellblau), Silizium (grün) und Eisen (schwarz)

Das nächste Element ist Helium: Es enthält einen Kern aus zwei Protonen und im Normalfall zwei Neutronen, der von zwei Elektronen umgeben ist. Helium ist damit rund viermal so schwer wie Wasserstoff, denn Protonen und Neutronen haben etwa die gleiche Masse, während die Elektronmasse etwas weniger als ein Zweitausendstel der Protonenmasse beträgt. Das Element mit drei Protonen im Kern heißt Lithium, dann folgen



Carl Friedrich von Weizsäcker (1912-2007), deutscher Physiker und Philosoph, trug maßgeblich zur Erkenntnis bei, dass die Kernfusion, also das Entstehen neuer Elemente, die Energiequelle aller Sterne ist

manchmal auch instabil, was bedeutet, dass sie radioaktiv sind und zerfallen.

DOCH WIE SIND ALLE diese Elemente entstanden? Die leichtesten von ihnen – Wasserstoff, Helium und Spuren von Lithium – haben sich sehr früh gebildet: bereits rund 380 000 Jahre nach dem Urknall.

Die komplizierten physikalischen Bedingungen in jener frühen Phase führten dazu, dass rund 75 Prozent der gesamten Materie aus Wasserstoff bestanden, rund 25 Prozent aus Helium, während Lithium nur in sehr geringen Mengen vorkam.

Das war zunächst alles. Erst viele Jahrmillionen später, nachdem sich unter dem Einfluss der Gravitation die ersten Sterne zusammengeballt hatten, gewann die Welt der chemischen Elemente an Vielfalt.

Denn im Inneren der Sonnen wurde es durch den gewaltigen Druck der Schwerkraft derart heiß, dass der Wasserstoff zu Helium fusionierte: Je vier Wasserstoff-Atomkerne (Protonen) verschmolzen bei diesem Prozess über mehrere Zwischenschritte zu einem Helium-4-Kern (je zwei Protonen und Neutronen). Bei diesen Reaktionen wurde Energie frei, die von den Sonnen ins All abgestrahlt wurde. War der Wasserstoff im Inneren zu Helium verschmolzen, versiegte die Energiequelle, und die Schwerkraft drückte nun den Kern der Sonne noch stärker zusammen: Die Hitze stieg erneut, und eine zweite Phase der Elemententstehung begann.

Durch die Fusion zweier Heliumkerne im Inneren des Sterns entstand jetzt Beryllium, durch die Fusion dreier Heliumkerne etwa Kohlenstoff. Auch bei letzterem Prozess wurde Energie frei. Zwei Kohlenstoffkerne wiederum konnten in einem späteren Stadium des Sterns – wenn dieser genug Masse besaß und so durch weitere Kontraktion unter der eigenen Schwerkraft noch heißer wurde – zu Neon, Natrium oder auch Magnesium fusionieren. So „erbrütete“ ein Stern in unterschiedlichen Reaktionsketten immer schwerere Elemente – bis hin zum Eisen.

Dann aber war Schluss, denn die Bildung der Kerne noch schwererer chemischer Elemente – etwa Silber oder Blei – setzt keine Energie mehr frei, sondern verbraucht Energie. Deshalb stoppte die Fusion.

Das aber führte zu einer dramatischen Konsequenz: Der Druck im Inneren des Sterns ließ schlagartig nach, er stürzte in sich zusammen, und als Gegenreaktion folgte eine Schockwelle, die die Sonne regelrecht zerfetzte. Dabei wurden ungeheure Mengen an Materie ins Weltall geschleudert – der Baustoff für Planeten und neue Sterne.

Auch ein gewaltiger Neutronenstrom entstand. Die Neutronen drangen, da sie ungeladen waren, leicht in die Atomkerne der explodierenden Materie ein.

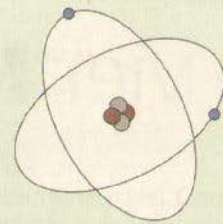
Dort zerfielen die Neutronen zum Teil in ein Proton, ein Elektron und ein Neutrino. Während Elektron und Neutrino den Kern als Strahlung verließen, wurde das zusätzliche Proton dem Kern einverleibt. Durch Wiederholung des Vorgangs entstanden immer schwerere Atomkerne – bis hin zu Silber und Palladium.

Um die Kerne der schwersten aller Elemente wie etwa Gold und Uran zu bilden, reichte die Energie von Sternexplosionen aber wahrscheinlich nicht aus: Sie entstanden vermutlich erst, als zwei Neutronensterne (siehe Seite 112) miteinander kollidierten.

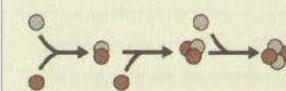
Der Prozess der Kernfusion läuft auch heute noch in vielen Sternen ab. Im Inneren der Sonnen und durch ihren Tod entsteht also die gesamte Vielfalt an Elementen, ohne die es kein Leben und keine menschliche Existenz geben könnte. So gesehen sind wir Menschen nichts als Sternenstaub.

Nur für ein Element, das am Bau unseres Körpers beteiligt ist, gilt das nicht: den Wasserstoff.

Er ist ein Produkt des Urknalls. □



ALLE ATOME (hier Helium) sind nach dem gleichen Prinzip aufgebaut: Um einen Kern aus positiv geladenen Protonen (rot) und ungeladenen Neutronen (grau) kreisen negativ geladene Elektronen (blau).



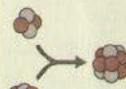
2 Protonen +
2 Neutronen = Helium

SYNTHESE DER ELEMENTE:

Kurz nach dem Urknall entstehen aus zwei Neutronen (grau) und zwei Protonen (rot, auch »Wasserstoffkerne« genannt) Atomkerne des Elements Helium. In Sternen reifen durch Fusionsprozesse und Reaktionsketten weitere Elemente: Heliumkerne verschmelzen etwa zu Beryllium; Beryllium und Helium zu Kohlenstoff; Kohlenstoff und Sauerstoff zu Silizium, und zwei Siliziumkerne zu Eisen.



2 x Helium = Beryllium



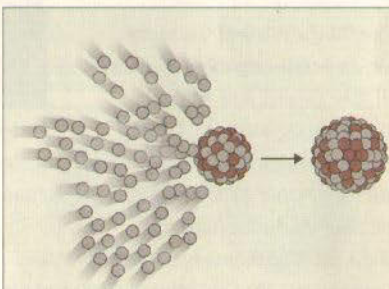
Helium +
Beryllium = Kohlenstoff



Kohlenstoff +
Sauerstoff = Silizium



2 x Silizium = Eisen



SEHR SCHWERE ELEMENTE entstehen, wenn bei einer Supernova-Explosion Unmengen an Neutronen (grau) in schwere Elemente wie Eisen (Mitte) eindringen, und etwa Silberkerne (rechts) bilden.

Die vier **Mächte** im Kosmos

Gravitation, Elektromagnetische Kraft, Schwache und Starke Kernkraft: Diese vier Phänomene prägen sämtliche physikalischen Vorgänge im Universum und gestalten das Aussehen der Welt. Die mächtigen Kräfte sorgen auf komplexe Weise für das Wechselspiel aller Teilchen im All

Vier Grundkräfte halten die Welt zusammen und bestimmen, wie sie aussieht – das zumindest nehmen Physiker und Kosmologen heutzutage an. Jede dieser Kräfte wird durch eine spezielle Eigenschaft der Elementarteilchen, also der Grundbausteine unserer Welt, verursacht:

- die **Schwerkraft** durch die Energie, also auch die Masse der Teilchen (Masse ist nach Einsteins Gleichung $E = mc^2$ eine spezielle Form von Energie);
- die **Elektromagnetische Kraft** durch die elektrische Ladung;
- die **Schwache Kernkraft** durch die sogenannte schwache Ladung;
- die **Starke Kernkraft** durch die starke Ladung.

Statt von Kräften sprechen die Forscher auch häufig von „Wechselwirkungen“. Denn immer, wenn zwei Teilchen eine Wirkung aufeinander ausüben – indem sie sich beispielsweise gegenseitig anziehen oder abstoßen – sind Kräfte im Spiel.

DIE SCHWERKRAFT (Gravitation) erfährt ein Mensch unmittelbar, da er sein eigenes Gewicht spürt. Der Grund: Alle Materie zieht sich gegenseitig an. Die Ursache der Schwerkraft ist also die **Materie** (genauer: ihre **Masse**) selbst. Die Masse ist dabei das Maß für die Materiemenge, die ein Körper in sich vereint – ein Liter Wasser etwa hat die Masse von einem Kilogramm, und je mehr Masse ein Körper hat, desto stärker zieht er einen anderen Körper an.

Und ein Mensch spürt sein eigenes Gewicht, weil die Erde mit ihrer riesigen Masse auf seinen Körper wirkt und ihm so sein

Gewicht verleiht. Doch wirkt die Gravitation nicht nur auf Materie, also „massive“ Teilchen und Körper, sondern auch auf Licht. So lenken beispielsweise Himmelskörper Lichtstrahlen ab und erzeugen den Gravitationslinsen-Effekt.

DIE ELEKTROMAGNETISCHE KRAFT ist ebenfalls anschaulich und erfahrbar. Ein Mensch nimmt elektrische und magnetische Kräfte zwar nicht direkt mit seinen Sinnes-

Die Kraft wirkt nur zwischen elektrisch geladenen Teilchen, beispielsweise den Atombausteinen Elektron und Proton. Da es zwei Ladungsarten gibt – positive, wie die des Protons, und negative, wie die des Elektrons –, existieren zwei Möglichkeiten: Sind die Ladungen gleich, stoßen sich die Teilchen (etwa zwei Elektronen) gegenseitig ab. Sind sie unterschiedlich, wie die der Protonen und Elektronen, ziehen sie sich an.

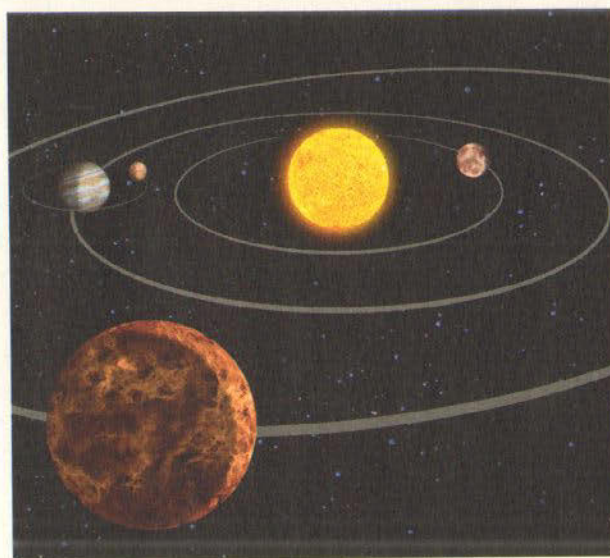
Ursprünglich hielten Physiker elektrische und magnetische Kräfte für zwei voneinander unabhängige Phänomene. Später jedoch entdeckten sie, dass beide Kräfte gleichsam gekoppelt sind und in der Natur meist gemeinsam auftreten: Ein von Strom durchflossener Draht beispielsweise ist stets von einem Magnetfeld umgeben; ein Magnet, der sich etwa in einem Dynamo dreht, erzeugt einen elektrischen Strom.

DIE SCHWACHE KERNKRAFT ist dagegen nicht anschaulich. Sie ist weder anziehend noch abstoßend und lässt sich wohl am besten mit einem chemischen Katalysator vergleichen, der bestimmte Reaktionen in Gang setzt.

Zu den Reaktionen, die die Schwache Kernkraft verursacht, gehören unter anderem der Zerfall

radioaktiver Atome sowie die Fusion von Atomkernen, etwa die Verschmelzung von vier Protonen zu Helium in der Sonne. Dabei bewirkt die Schwache Kernkraft, dass sich zwei der Protonen in Neutronen umwandeln.

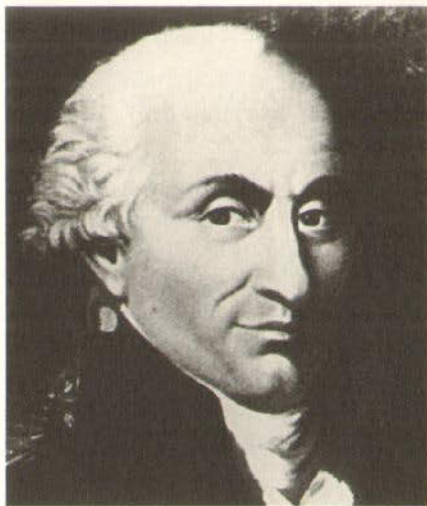
Als ihre Ursache gilt, ähnlich wie bei der Elektromagnetischen Kraft, eine Ladung, allerdings eine andere als die elektrische.



Unter den vier Grundkräften löst die Gravitation die augenscheinlichsten Folgen aus: Sie bewirkt, dass sich Massen anziehen und Himmelskörper sich auf Bahnen etwa um eine Sonne bewegen

organen wahr, spürt sie aber mittelbar: Zwei Stabmagneten können einander anziehen oder abstoßen; ein Elektromotor dreht sich und übt eine Kraft aus; ein Stromschlag erzeugt einen stechenden Schmerz.

Die Ursache der Elektromagnetischen Kraft ist die **elektrische Ladung** – wie die Masse eine Grundeigenschaft der Materie.



Charles Augustin de Coulomb

(1736–1806) beschreibt, dass zwischen elektrisch geladenen Teilchen eine Kraft herrscht: Ungleich geladene Partikel ziehen sich an, gleich geladene stoßen sich ab. Diese »Elektromagnetische Kraft« gehört zu den vier Grundkräften im Universum

Physiker nennen sie **schwache Ladung**. Alle Teilchen, die von der Schwachen Kernkraft beeinflusst werden – etwa indem sie zerfallen oder sich in andere Teilchen verwandeln –, besitzen diese Grundeigenschaft der Materie (genauso wie die Elektromagnetische Kraft nur auf Teilchen wirkt, die die Eigenschaft der elektrischen Ladung besitzen). Für den Menschen ist sie nicht wahrnehmbar.

DIE STARKE KERNKRAFT sorgt dafür, dass die Bausteine der Atomkerne – Protonen und Neutronen – zusammenhalten. Diese Bausteine sind aus noch kleineren Teilchen, den Quarks, zusammengesetzt. Quarks besitzen eine weitere spezielle Ladung, ebenfalls eine Grundeigenschaft der Materie, die die Physiker als **starke Ladung** bezeichnen, und sie ist es, welche die Starke Kernkraft verursacht. Man kann sie näherungsweise durch Gummibänder zwischen den Quarks veranschaulichen; je weiter zwei Quarks voneinander entfernt werden, desto stärker ziehen sie sich an.

Die vier Grundkräfte unterscheiden sich erheblich voneinander: in ihrer Stärke, in ihrer Reichweite und in ihrer Wirkung auf die verschiedenen Arten der Materie.

Die Starke Kernkraft ist am „mächtigsten“, doch sie wirkt nur innerhalb der Atomkerne. Außerdem betrifft sie nicht jede Art von Materie: Elektronen etwa werden von ihr überhaupt nicht berührt.

Auch die Schwache Kernkraft beschränkt ihre Wirkung auf den Atomkern. Die Elektro-

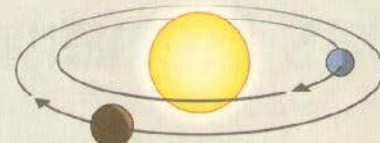
magnetische Kraft dagegen reicht weiter. Sie sorgt für die Anziehung zwischen dem positiv geladenen Atomkern und den negativ geladenen Elektronen und stabilisiert dadurch Atome und Moleküle.

Mit wachsendem Abstand zwischen zwei geladenen Körpern wird die Elektromagnetische Kraft immer kleiner, sie reicht aber unendlich weit. Trotzdem ist ihre Wirkung normalerweise nicht über größere Entfernungen zu spüren.

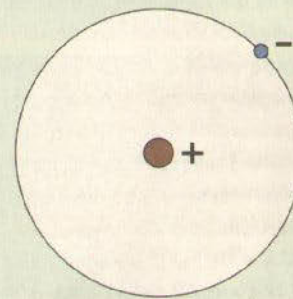
Denn auch wenn Elektron und Proton als Bestandteile der Atome elektrisch geladen sind: Das Atom als Ganzes ist elektrisch neutral. Das liegt daran, dass sich gleich große, aber entgegengesetzte Ladungen ausgleichen, sie addieren sich zu einer Gesamtladung von null. Da ein Atom gleich viele positive und negative Ladungen enthält, geht von ihm keine Elektromagnetische Kraft aus.

Auch die Gravitation reicht unendlich weit. Doch sie lässt sich nicht abschirmen. Deshalb ist es gerade die Gravitation – also die bei Weitem schwächste Kraft –, die für den Zusammenhalt der größten Strukturen im Weltall sorgt. Sie lässt die Planeten die Sonne umrunden, hält die Sterne der Milchstraße zusammen und steuert die Bewegung von Galaxienhaufen.

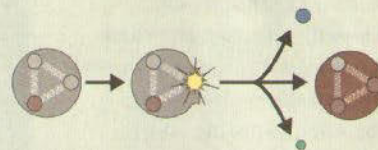
Die vier Grundkräfte hat es nicht immer gegeben. Unmittelbar nach dem Urknall, als sich gigantische Energien auf einen winzigen Raum konzentrierten, gab es vermutlich nur eine einzige Urkraft. Von ihr haben sich die anderen Kräfte bei der Abkühlung des Alls nacheinander abgespalten. □



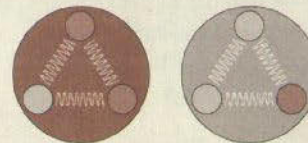
GRAVITATION: Wirkt mittels Masse und hält nicht nur Planetensysteme oder Galaxien zusammen, sondern alle Strukturen im All. Für dessen Architektur und weitere Entfaltung ist sie die wichtigste Größe.



ELEKTROMAGNETISCHE KRAFT: Ungleich elektrisch geladene Teilchen ziehen sich an – im Atom der positiv geladene Kern und die negativ geladenen Elektronen. So bleibt er – und damit die Materie – stabil.



SCHWACHE KERNKRAFT: Bewirkt unter anderem die Umwandlung von Materie. In einem Neutron etwa wandelt sich ein Quark in ein anderes um (gelb), strahlt dabei ein Elektron (blau) und ein Neutrino (grün) ab. Es entsteht ein Proton (braun).



STARKE KERNKRAFT: Stabilisiert die Struktur der Atomkerne, indem sie in Protonen (o. l.) und Neutronen (o. r.) die Quarks (illustriert als kleine Kreise) mit einer Art Kleber (weiße Linien) verbindet.

Das Geheimnis der Strahlen

Sie breiten sich ganz ähnlich wie Schwingungen auf der Wasseroberfläche aus, doch ist ihre Natur eine gänzlich andere: Elektromagnetische Wellen bestehen aus elektrischen und magnetischen Kraftfeldern, sie sind allgegenwärtig, rasend schnell, durchmessen das gesamte Universum und transportieren dabei Informationen und Energie

Licht ist die wichtigste Informationsquelle für Astronomen, denn es überbringt Botschaften von fernen Himmelskörpern und macht die Vorgänge im Kosmos erkennbar.

Denn jedes chemische Element – sei es nun so leicht wie Wasserstoff oder so schwer wie Uran, absorbiert (also verschluckt) Licht bestimmter Farben. Das geschieht beispielsweise, wenn das Licht aus dem Inneren eines Sterns auf seinem Weg ins All auf diese Elemente in der Atmosphäre des betreffenden Sterns trifft. Erreicht das Licht schließlich die Erde, fehlen dementsprechend bestimmte Farben.

Dieses Lichtmuster, das **Spektrum**, ist so charakteristisch wie ein Fingerabdruck. Mit ihm sind die verschiedenen Elemente in der Atmosphäre des Sterns eindeutig zu identifizieren – auch wenn der Lichtjahre entfernt ist.

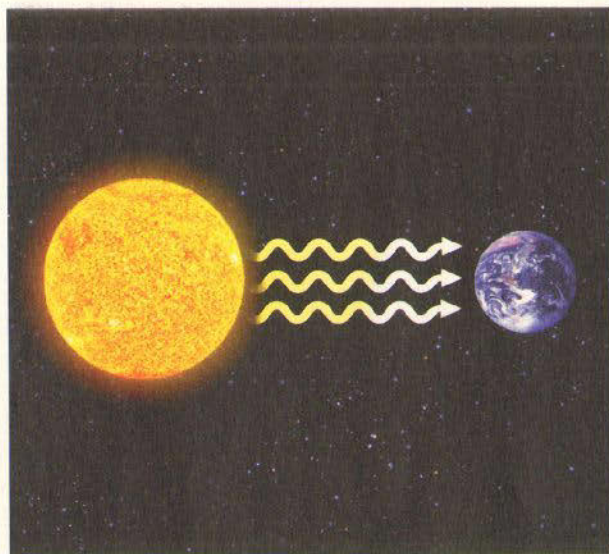
Doch nicht nur das: Bewegt sich so ein Himmelskörper, dann verändert sich das von ihm abgestrahlte Spektrum auf bestimmte Weise und lässt seine Geschwindigkeit relativ zur Erde erkennen (siehe Seite 29).

Dies sind nur zwei Beispiele für die Fülle kosmischer Informationen, die das Licht zur Erde trägt.

PHYSIKALISCH BESTEHT LICHT aus **elektromagnetischen Wellen**, und die sind in der Natur und in der menschlichen Zivilisation allgegenwärtig – und zwar nicht nur als sichtbares Licht der Sonne, sondern auch als unsichtbare Strahlen: etwa als Radiowellen, die Hörfunkprogramme übertragen, als

Mikrowellen (die auch zu den Radiowellen gehören) von Mobiltelefonen oder als Röntgenstrahlung in der Medizin.

Und so unterschiedlich all diese Strahlen erscheinen, im Prinzip sind sie gleich aufgebaut: Es sind elektrische und magnetische Felder (daher der Begriff „elektromagnetisch“), die sich als Schwingungen ähnlich wie eine Wasserwelle ausbreiten.



Wie jeder Stern strahlt auch die Sonne elektromagnetische Wellen ins All. Auf der Erde lässt sich anhand des Wellenspektrums analysieren, dass im Gestirn Wasserstoffatome zu Helium verschmelzen

Wie eine elektromagnetische Welle entsteht, folgt aus den Gesetzen der Elektrodynamik. Danach bilden sich in der Umgebung einer beschleunigten elektrischen Ladung – also zum Beispiel eines Elektrons – immer ein elektrisches und ein magnetisches Feld. Diese Felder werden vom Elektron erzeugt, deshalb folgen sie – vergleichbar der Bugwelle eines Schiffes – der Elektronenbewegung und breiten sich, ebenfalls

wie eine Bugwelle, wellenförmig in den Raum aus.

Das Licht der Sterne entsteht auf diese Weise: Ein Teil der bei der Kernfusion im Sterninneren freigesetzten Energie wird von den dort umherrasenden Elektronen und anderen geladenen Teilchen aufgenommen und in Form von elektromagnetischen Wellen wieder abgegeben.

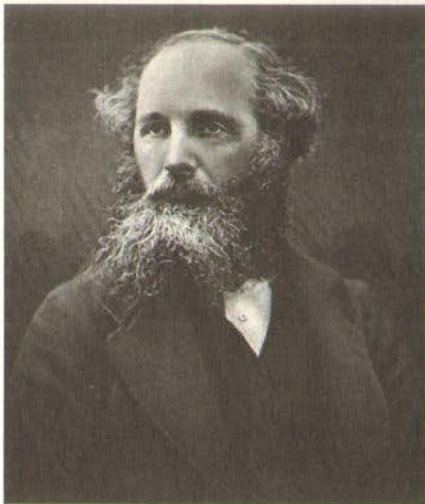
Die werden ins All abgestrahlt und können bis zur Erde gelangen. Denn anders als Wasser- oder Schallwellen, die sich nur in einem materiellen Medium wie Wasser oder Luft auszubreiten vermögen, durchqueren elektromagnetische Wellen auch den leeren Raum.

Bei dieser Bewegung stehen die Schwingungsrichtungen des elektrischen und magnetischen Feldes und die Ausbreitungsrichtung der Welle jeweils senkrecht zueinander.

Durchläuft die Welle zum Beispiel diese Magazinseite von unten nach oben, schwingt das Magnetfeld in der Papierebene nach links und rechts, und das elektrische Feld schwingt senkrecht aus der Papierebene heraus auf den Leser zu und wieder von ihm weg.

Ähnlich wie Wasserwellen unterscheiden sich die verschiedenen elektromagnetischen Wellen im Wesentlichen durch zwei Merkmale: ihre Frequenz und ihre Wellenlänge.

Die **Frequenz** gibt an, in welchem Takt die Welle hin- und herschwingt – Radiowellen beispielsweise schwingen zwischen ein paar Tausend und vielen Milliarden Mal pro Sekunde, sichtbares Licht erheblich schneller.



James Clerk Maxwell (1831-1879)

erkannte 1861 als Erster, dass elektrische und magnetische Kräfte gemeinsam auftreten und durch elektromagnetische Felder erzeugt werden. Auf Grundlage dieser Erkenntnis sagte der schottische Physiker auch die Existenz elektromagnetischer Wellen voraus

Gemessen wird die Anzahl der Schwingungen pro Sekunde in der Einheit Hertz.

Die **Wellenlänge** dagegen ist der Abstand zwischen zwei Wellenbergen (oder zwei Wellentälern). Die Wellenlängen der verschiedenen elektromagnetischen Strahlungen sind extrem unterschiedlich; sie erstrecken sich über einen Bereich von weniger als einem Milliardstel Millimeter bis hin zu Werten von über 100 Kilometer.

JE NACH WELLENLÄNGE werden die elektromagnetischen Wellen eingeteilt in:

- Gammastrahlen (weniger als 0,01 Nanometer; 1 Nanometer = 10^{-9} Meter)
- Röntgen (0,01 bis 10 Nanometer)
- Ultraviolett (10 bis 380 Nanometer)
- Licht (380 bis 780 Nanometer)
- Infrarot (780 Nanometer bis 1 Millimeter)
- Radiowellen (mehr als 1 Millimeter)

Aus dieser Fülle kann das menschliche Auge nur einen winzigen Ausschnitt wahrnehmen: den Bereich von 380 bis 780 Nanometern. Um auf der Erde als Mensch zu leben und sich zu orientieren, reicht das aus.

Doch die Phänomene des Himmels haben weitaus mehr an elektromagnetischen Informationen zu bieten, und so haben die Astronomen eine Fülle von Geräten erfunden, mit denen sie das gesamte Spektrum an solchen Strahlen observieren können – neben den optischen Teleskopen beispielsweise Radioteleskope und Satelliten im Orbit, die etwa UV-, Röntgen-, Gamma- und Infrarotstrahlen auffangen.

Aber noch etwas hilft den Astronomen, die Phänomene des Universums zu erforschen: Alle Materie sendet Licht aus, wenn man sie erhitzt.

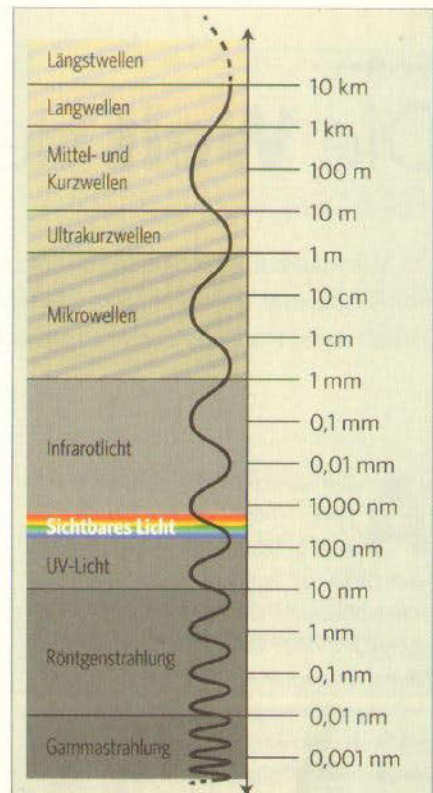
Und jeder Körper produziert damit ein bestimmtes Spektrum an Farben, abhängig von seiner Temperatur: Relativ kühle Sterne etwa erscheinen rötlich, heiß strahlende Sonnen weißblau. Damit können die Physiker jeder Wellenlänge eine bestimmte Temperatur zuordnen.

Das ist auch bei der kosmischen Hintergrundstrahlung möglich (siehe Seite 18). Diese elektromagnetische Strahlung stammt aus der Zeit 380 000 Jahre nach dem Urknall, durchquert seither das Universum und ist auch auf der Erde nachweisbar.

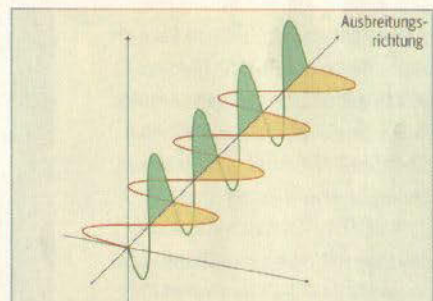
Aber sie hat sich auf ihrer Reise durch Raum und Zeit verändert. Bei ihrer Entstehung war sie noch infrarot, ihre Wellenlänge 1000 Nanometer klein. Durch die Ausdehnung des Universums wurde ihre Wellenlänge immer mehr gedehnt, bis auf ihre heutige Länge von etwa einem Millimeter. Das entspricht einer Temperatur von rund minus 270 Grad Celsius.

Die Hintergrundstrahlung enthält die frühesten Informationen aus der Zeit nach dem Urknall. Es gibt keine physikalischen Messungen aus Zeiten, die näher am Punkt null liegen. Daher ist sie für die Astronomen so wichtig.

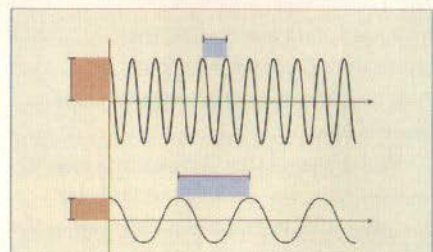
Und sie zeigt einmal mehr die große Bedeutung der elektromagnetischen Wellen für die astronomische Forschung. □



WELLEN werden nach ihrer Länge in einem Spektrum geordnet, von Nanometern bis Kilometern (schraffiert = verschiedene Radiowellen).



AUFBAU: Elektrische (grüne) und magnetische (gelbe) Felder sind miteinander verbunden und schwingen im rechten Winkel zueinander in Ausbreitungsrichtung.



ABMESSUNGEN: Die Wellenlänge beschreibt den Abstand zwischen den Wellenbergen (blau), die Amplitude (blau) die Intensität der Strahlen (braun).

Die Welt des Allerkleinsten

Im Mikrokosmos herrschen vollkommen andere Regeln, als wir sie aus unserem Alltag gewohnt sind: Partikel sind mal Welle, mal Teilchen; Atome befinden sich an vielen Orten im Raum zur gleichen Zeit; und Licht kommt nur in Paketen vor. Doch die eigentümlichen Gesetze der Quantenwelt steuerten einst den Urknall – und sind bis heute gültig

Auch wenn mit dem Urknall der gesamte Kosmos entstanden ist, also das Größte überhaupt, das wir heute kennen: Die entscheidenden physikalischen Prozesse haben sich in der Mikrowelt abgespielt, in der Größenordnung der Elementarteilchen und Atome.

In jener Phase ganz am Anfang war das Universum winzig klein. Strahlung verwandelte sich damals in Materieteilchen, Teilchen vernichteten sich gegenseitig, andere entstanden, und manche von ihnen verbanden sich zu Atomkernen.

All diese Prozesse spielten sich in der Welt der Atome und ihrer Bausteine ab, also im Bereich des Allerkleinsten. Und hier, im **Mikrokosmos**, gelten ganz andere Regeln als in der Makrowelt: Hier sind die Gesetze der sogenannten **Quantenphysik** maßgebend.

Daher müssen sich die Astrophysiker mit deren Regeln befassen, wenn sie den Verlauf des Urknalls verstehen wollen.

DOCH DIE WELT der Quantenphysik ist nicht einfach zu verstehen. Denn viele Phänomene im Bereich der kleinsten Teilchen laufen unserer alltäglichen Erfahrung diametral entgegen; manche muten gar absurd an.

Wie seltsam es im Mikrokosmos zugeht, wird deutlich, wenn man einen Vorgang aus der normalen, unseren Sinnen vertrauten Umgebung auf die Größenordnung der Atome und Elementarteilchen überträgt: In der Makrowelt etwa kann ein Astronom die Bahn eines Asteroiden, der sich durchs All auf die Erde zubewegt, exakt berechnen und

daher mit Sicherheit vorhersagen, ob ein solcher Himmelskörper mit unserem Planeten kollidieren wird oder nicht. Er müsste nur die genaue Position und Geschwindigkeit des Asteroiden messen und diese Daten in die Grundgleichungen der Mechanik einsetzen.

Ganz anders die Situation in der Mikrowelt, wenn der Asteroid klein wie ein Elek-

Geschwindigkeit eines Teilchens nicht gleichzeitig exakt angeben lassen: Das Teilchen ist – im völligen Widerspruch zu unserer alltäglichen Erfahrung – an vielen Orten im Raum zur gleichen Zeit.

Anders als beim Asteroiden ließe sich deshalb nicht vorhersagen, ob das Elektron mit dem Proton kollidieren würde oder nicht. Die Physiker könnten nur berechnen, wie hoch die Wahrscheinlichkeit für einen Zusammenstoß ist.

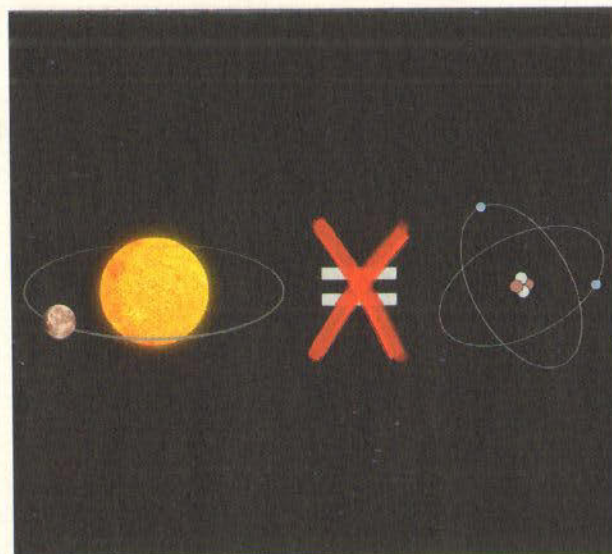
Es gibt also in der Mikrowelt, die die Quantentheorie beschreibt, keine Gewissheiten, sondern nur Wahrscheinlichkeiten.

ENTSTANDEN IST diese Theorie zu Beginn des 20. Jahrhunderts, und der Begriff „Quanten“ geht auf den Physiker Max Planck zurück. Der deutsche Wissenschaftler fand 1900 heraus, dass bei der Wärmestrahlung eines Körpers die von seinen Atomen abgestrahlte Energie in einzelnen Paketen abgegeben wird, sogenannten Quanten.

Dieses ist eine weitere Grundaussage der Quantentheorie: Viele physikalische Größen sind nicht kontinuierlich, sondern kommen nur in abgestuften Werten vor –

im Falle des Lichts in kleinen Paketen (siehe Illustration Seite 141 oben).

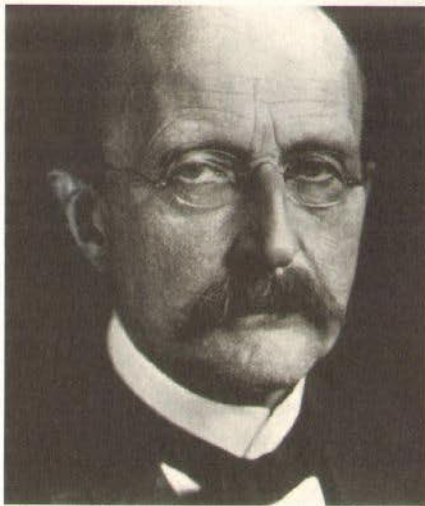
So können in der Mikrowelt beispielsweise auch Geschwindigkeiten in Häppchen unterteilt sein, anders als in der Makrowelt: Während der Fahrer eines Autos jede beliebige Geschwindigkeit zwischen null und vielleicht 200 km/h zu wählen vermag, könnte ein Quantenauto seine Geschwindigkeit nur sprunghaft vergrößern – etwa von



Makro- und Mikrowelt haben nichts miteinander gemein: Während sich etwa die Position und Geschwindigkeit eines Sterns exakt messen lassen, ist das für ein atomares Teilchen nicht möglich

tron wäre und – statt mit der Erde – mit einem Proton kollidierte. Schon die genaue Messung von Ort und Geschwindigkeit des Teilchens würde scheitern. Und anscheinend noch absurder: Je exakter man seinen Aufenthaltsort per Messung festlegen würde, desto weniger genau ließe sich angeben, wie schnell es sich bewegt.

Denn eine der Grundaussagen der Quantenphysik lautet, dass sich Ort und



Max Planck (1858-1947)

Der Deutsche gelangte 1900 zu der Erkenntnis, dass es in der Welt der Atome zu Absonderlichkeiten kommt. Seine Forschungen begründeten die Quantenphysik – jene Disziplin, die sich fortan mit dem Verhalten von Atomen und deren Bestandteilen beschäftigte

zehn auf 20 km/h und dann auf 30, auf 40 km/h und so weiter. Ein Wert dazwischen, zum Beispiel von 35 km/h, wäre dagegen in der seltsamen Welt der Quanten unmöglich.

Nicht minder schwer zu begreifen ist eine dritte Aussage dieser Theorie: Sie besagt, dass sich Teilchen in der Mikrowelt der Atome mal wie eine **Welle** (also verteilt im ganzen Raum), mal wie massive **Partikel** verhalten können, die sich jeweils konzentriert an einem Ort befinden – und zwar je nachdem, mit welchem Experiment sie gerade beobachtet werden.

Aus dem täglichen Leben wissen wir, dass es immer kracht, wenn zwei Autos zusammenstoßen. Bei Quantenautos würde es nur dann krachen, wenn sie beide als Teilchen aufeinanderträfen. Und verblüffenderweise würde in diesem Fall nicht ein Haufen Schrott übrig bleiben, sondern eine Fülle neuer Autos käme zum Vorschein.

Begegneten Quantenautos sich als Wellen, könnten sie sich in Nichts auflösen oder zu einem größeren Auto verschmelzen – wie zwei Wasserwellen, die sich durch Überlagerung verstärken oder auslöschen.

STAUNEN LÄSST AUCH eine vierte Aussage der Quantentheorie. Demnach können sich in der Mikrowelt zwei Teilchen bei bestimmten Vorgängen so miteinander verkoppeln, dass sie eine Einheit bilden, auch wenn sie sich anschließend kilometerweit voneinander entfernen (zwar ist diese Entfernung „makroskopisch“, doch spielen Quantengesetze hier weiterhin eine Rolle, weil die

Teilchen selbst nur winzig sind). Sie verhalten sich dann völlig synchron, obwohl sie keinerlei Informationen austauschen.

Auf das Beispiel der Autos in der Makrowelt übertragen hieße das: Zwei Wagen würden in entgegengesetzte Richtungen losfahren, und jedes Mal, wenn der eine abbiegt, schwenkt der andere zeitgleich herum. Das könnte beliebig weit gehen und funktionieren, ohne dass die beiden Fahrer sich absprechen, weder vor noch während der Fahrt.

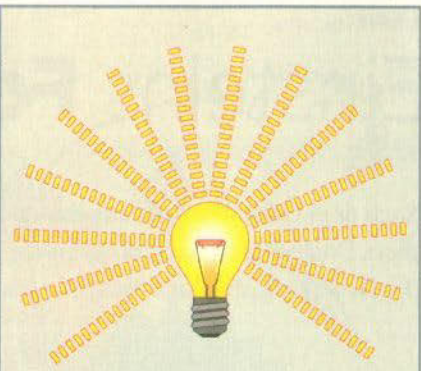
Quantenobjekte – etwa die Teilchen des Lichts, die Photonen – verhalten sich tatsächlich so. Albert Einstein, der Zeit seines Lebens die Quantentheorie als unvollständig ansah, nannte dies „spukhaft“.

Andere Physiker haben schlicht resigniert. „Ich kann mit Sicherheit sagen“, so der Amerikaner Richard Feynman, „dass niemand die Quantentheorie versteht.“

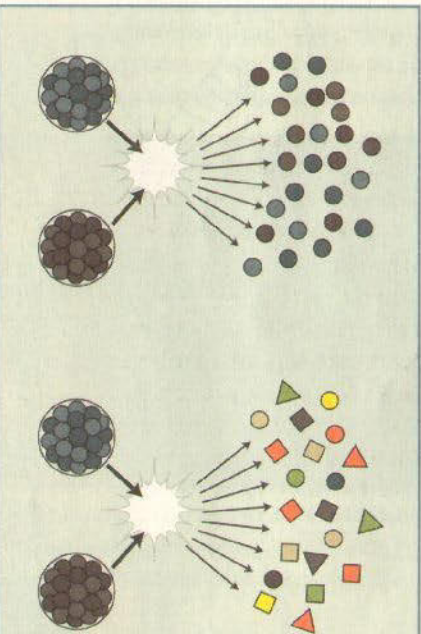
Und doch ist sie die erfolgreichste Theorie der modernen Physik. Sie erklärt drei der vier Grundkräfte der Natur, den Aufbau der chemischen Elemente, die Entstehung der Atomkerne nach dem Urknall und die Energieerzeugung in der Sonne.

Ihre Gesetze lassen verstehen, wieso bestimmte Teilchen nach dem Energieblitz des Urknalls entstanden, weshalb sie sich ineinander verwandelten, sich manche gegenseitig vernichteten, zerfielen oder stabil blieben.

Kurz: weshalb die Welt heute so ist, wie sie ist. □



DIE AUSSENDUNG elektromagnetischer Strahlen (wozu auch Licht und Wärme gehören, etwa von einer Glühbirne) erfolgt nach den Gesetzen der Quantenphysik nicht kontinuierlich, sondern stufenweise, in Form von winzigen Energiepackchen: Quanten.



STOSSEN ZWEI OBJEKTE in der Makrowelt aufeinander, entstehen ihre Trümmer einzig aus den bereits vorhandenen Bausteinen (ganz oben). Wenn dagegen subatomare Teilchen miteinander kollidieren (oben), werden sie in ihre Einzelteile zerlegt und es bilden sich – weil sich die Teilchen ineinander umwandeln können – mitunter ganz neue Partikel: Prallen etwa zwei Protonen aufeinander, entsteht eine Vielfalt neuer Teilchen, die als solche nicht in den Protonen enthalten waren, darunter Elektronen, Positronen und Neutrinos.

$$E = mc^2$$

Einsteins Formel

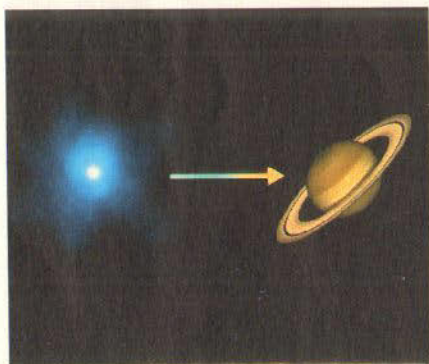
Nach dem Urknall wurde aus Energie Materie, entstanden die Elementarteilchen. Doch es geht auch umgekehrt: Masse kann sich in Energie verwandeln. Die Gleichung, die das beschreibt, entdeckte 1905 Albert Einstein



Albert Einstein (1879-1955) fand heraus, dass Materie eine »eingefrorene« Form von Energie ist

Die drei Buchstaben E, m und c bilden die wohl berühmteste Formel der Welt. Albert Einstein hat sie 1905 veröffentlicht: $E = mc^2$. Der Physiker hatte etwas für die damalige Zeit Ungeheuerliches herausgefunden: Materie und Energie lassen sich ineinander umwandeln.

Einstein war auf diese Erkenntnis gestoßen, als er mit den mathematischen Gleichungen seiner Speziellen Relativitätstheorie arbeitete. In Zusammenhang mit dieser Theorie hatte er erkannt, dass die Lichtge-



Als sich das All nach dem Urknall abkühlte, »gefror« Energie zu Elementarteilchen, die sich zu Atomen, später zu Himmelskörpern fügten

schwindigkeit überall konstant ist und dass sich nichts schneller als Licht bewegen kann. Dann hatte er eine seiner Gleichungen umgeformt, und heraus kam die Formel $E = mc^2$, die Folgendes bedeutet: Jedem Körper mit einer Masse m entspricht eine bestimmte Menge an Energie E.

Dieser Energiebetrag ergibt sich, indem man die Masse, etwa eines Stückes Würfelzucker von drei Gramm, mit dem Quadrat der Lichtgeschwindigkeit c multipliziert: $0,003 \text{ kg} \times (300\,000\,000 \text{ m/s})^2 = 2,7 \times 10^{14} \text{ Joule} = 75 \text{ Millionen Kilowattstunden}$. Daraus lässt sich erahnen, dass ein jedes Stück Materie enorme Mengen an Energie enthalten muss.

Praktisch bedeutet das: Drei Gramm eines Stoffes – gleich ob Wasser, Eisen oder Luft – enthalten so viel Energie, wie man brauchte, um eine Stadt wie Hamburg zwei Tage mit Strom zu versorgen. Ein materieller Körper ist demnach nichts anderes als eine extrem hoch verdichtete Form von Energie.

Doch das war 1905 zunächst eine rein theoretische Erkenntnis. Erst 1933 konnten zwei französische Physiker nachweisen, dass sie auch in der Praxis zutrifft. Irène Curie und Frédéric Joliot-Curie beobachteten bei ihren Experimenten mit hochenergetischen Photonen (aus dem Bereich der Gammastrahlung), wie sich diese Photonen, und damit reine Energie, in Paare von zwei Materieteilchen verwandelten: in ein Elektron und sein Antiteilchen, das Positron (siehe Seite 132), die mit hoher Geschwindigkeit auseinanderflogen. Ähnliche Paarbildungsprozesse ereigneten sich auch unmittelbar nach dem Urknall, als sich aus der anfänglichen Strahlung die ersten Materieteilchen bildeten (siehe Seite 30).

Dabei gilt der Grundsatz: Nichts geht verloren. Stets entsteht bei der Umwandlung eines bestimmten Materiebetraags dieselbe Energiemenge. Und wandelt sich Energie zurück in Materie, ergibt sich auch hier immer derselbe Betrag. Materie und Energie sind also äquivalent: zwei verschiedene Erscheinungsformen derselben physikalischen Größe. Und: Es sind ungeheure Energiemengen in Form von Materie gespeichert.

Im 20. Jahrhundert gelang es der Menschheit, diese neue Energiequelle anzupapfen. In den 1930er Jahren entdeckten Physiker die Kernspaltung und bauten 1942 den ersten Kernreaktor. In einer solchen Anlage zerplatzen schwere Uran-Atomkerne, die von Neutronen bombardiert werden, in leichtere Tochterkerne. Deren Masse zusammen genommen ist geringfügig kleiner als

die des Urankerns. Und genau diese Massendifferenz ist es, die als Energie bei der Spaltung frei wird. Im Kernreaktor geschieht dies kontrolliert, in der wenige Jahre später entwickelten Atombombe explosionsartig. Wie viel Energie dabei entsteht, lässt sich mit Einsteins Formel $E = mc^2$ leicht berechnen.

Noch mehr Energie als bei der Kernspaltung wird bei der Kernfusion frei – der Verschmelzung leichter Atomkerne wie Wasserstoff zu schwereren Kernen wie Helium. Denn der Heliumkern ist leichter als die Summe der Teile, aus denen er entsteht. Die Differenz, die verschwundene Masse, hat sich in Energie verwandelt.



VERSCHMELZEN vier Wasserstoff-Atomkerne zu Heliumkernen, wiegen Letztere weniger. Ein Teil der Masse ist Energie geworden – sie lässt die Sterne leuchten.

Dieser Prozess läuft in der Sonne sowie in allen anderen Sternen ab und ermöglicht ihnen, jahrmilliardenlang zu brennen. Auch der Mensch hat die Kernfusion bereits entfesselt: in der furchtbaren Explosionskraft einer Wasserstoffbombe.

Forscher hoffen, diese Kraft irgendwann für friedliche Zwecke nutzen zu können und Kernfusionsreaktoren zu entwickeln.

Gelänge dies, wären die Energieprobleme der Menschheit wohl für immer gelöst. □



Die Mitmach-Anzeige zum Mitmach-Heft.

Bastelnd, spielend, rätselnd, lesend die Welt entdecken. Mit dem neuen GEOmini.



Vielseitige Bildwelten zum sehenswerten Preis!

Wählen Sie Ihren Wunschkalender und profitieren Sie von attraktiven Rabatten.



nominiert
2012
gregor
international
calendar
award

GEO SAISON-Panorama-Kalender

„Toskana – Ein Panorama der Schönheit“

Weinberge, die der Morgennebel in Watte packt, Zypressen, die ins Himmelblau wachsen, und Dörfer, in denen die Stille wohnt: In großformatigen Bildern fängt der Panorama-Kalender den Zauber der toskanischen Traumlandschaft ein. Maße: 120 x 50 cm.

Best.-Nr.: 6721000

Preise A: € 99,90/CH: Fr. 149,00

€ 99,00

statt UVP € 109,00

Abonnentenpreis € 89,00



GEO SAISON-Panorama-Kalender

„Die schönsten Gärten der Welt“

Natur in Reinkultur: Mit hinreißenden Panorama-fotos entwirft der Kalender ein Portfolio blühender Fantasie. Eine Reise zu den prachtvollsten Gärten der Welt, in denen formale Strenge regiert oder kunstvoll arrangierter Wildwuchs.

Maße: 120 x 50 cm.

Best.-Nr.: 6720900

Preise A: € 99,90/CH: Fr. 149,00

€ 99,00

statt UVP € 109,00

Abonnentenpreis € 89,00



€ 5
Gutschein
für Ihre Wahl!

Jetzt GEO-Lieblingskalender wählen und € 5 Bonus sichern!

Machen Sie jetzt bei der GEO-Kalenderwahl 2012 mit und Sie erhalten sofort einen Gutscheincode im Wert von € 5 für einen Wandkalender aus dem GEO Shop. Gleich teilnehmen und abstimmen unter: www.geo.de/kalenderwahl



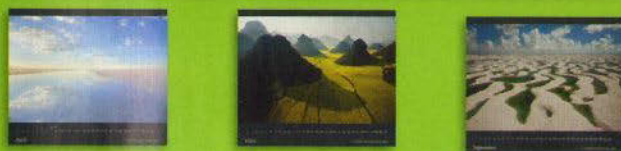
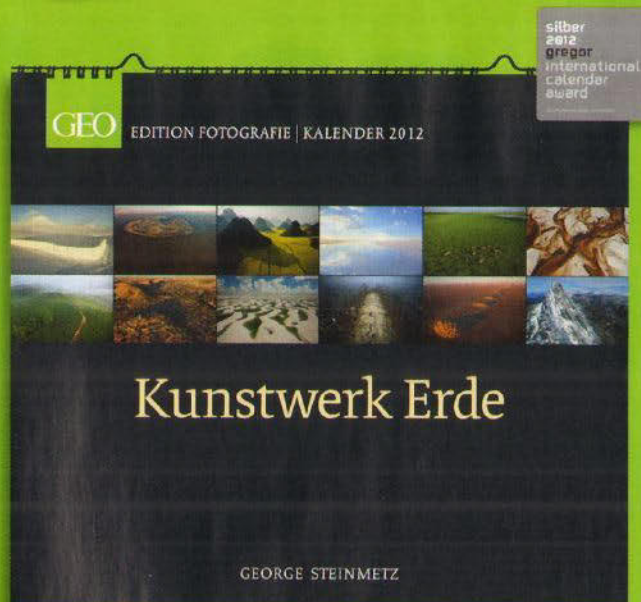
Pünktlich zum Fest!
Bei Bestellung bis zum 19.12.2011*

Keine Versandkosten!
Ab € 80,- Bestellwert

10% Rabatt auf Kalender!
Exklusiv für alle GEO-Abonnenten

GEO Shop

Das Beste von GEO zum Bestellen



GEO-Edition-Kalender „Kunstwerk Erde“

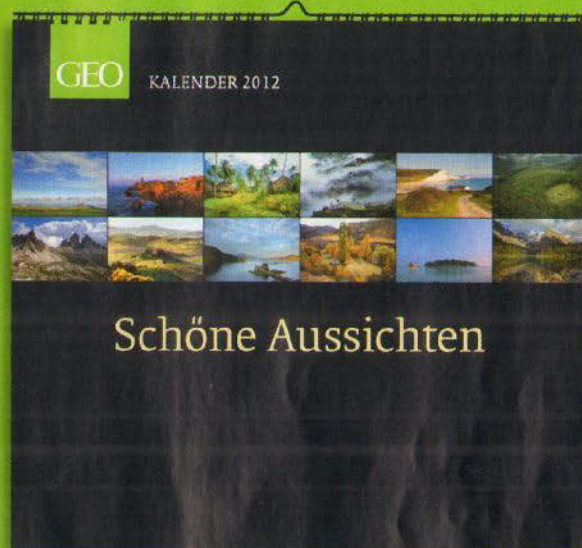
Der Amerikaner George Steinmetz ist ein Überflieger der Fotografie. Mit seinem Ultraleichtflugzeug schwebt er am liebsten über menschenleeren, entlegenen Zonen unseres Planeten, besonders gern über der herben Schönheit der Wüsten oder über dem satten Grün der afrikanischen Tropen. Sein Treibstoff: der Ehrgeiz, gute Bilder durch bessere zu ersetzen. Zwölf der besten zeigt dieser Kalender. Maße: 70 x 60 cm.

Best.-Nr.: G720200

Preise A: € 69,60/CH: Fr. 105.00

€ 69,00

Abonnentenpreis € 61,90



GEO-Klassiker-Kalender „Schöne Aussichten“

Sieben Milliarden Menschen, die Hälfte davon wohnt in Städten. Aber noch hat der Planet Raum für selbstgewählte Einsamkeit: für Hütten, Häuser, Anwesen mitten in der Natur und in dramatischen Landschaften. Zwölf dieser Logenplätze stellt Ihnen dieser Kalender vor: mit freiem Blick auf Wasser, Wälder und Wolken. Von den Buchten des Nordens bis zu den Inseln der Südsee.

Maße: 60 x 55 cm.

Best.-Nr.: G720100

Preise A: € 49,50/CH: Fr. 80.50

€ 49,00

Abonnentenpreis € 44,00



Bestellen Sie online und entdecken Sie viele weitere GEO-Produkte:

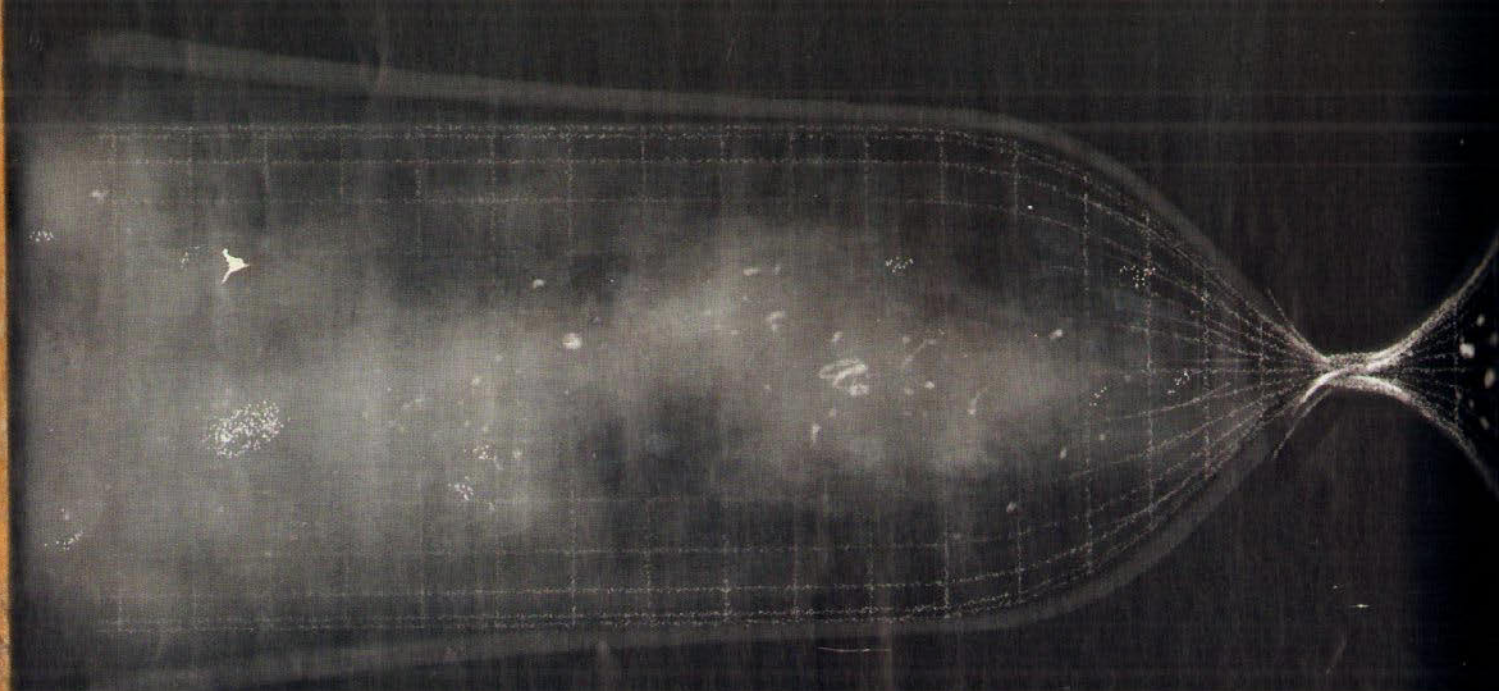
www.geoshop.de/kalender1

Oder per Telefon unter 01805/22 50 59** (Bitte die Aktionsnr. 700 297 angeben)

*Wenn Sie aus Deutschland bestellen, aus Österreich bis spätestens 12.12.2011 und aus der Schweiz bis spätestens 14.12.2011.
**14 Cent/Min. aus dem deutschen Festnetz, max. 42 Cent/Min. aus dem dt. Mobilfunknetz.

Was war vor dem Urknall?

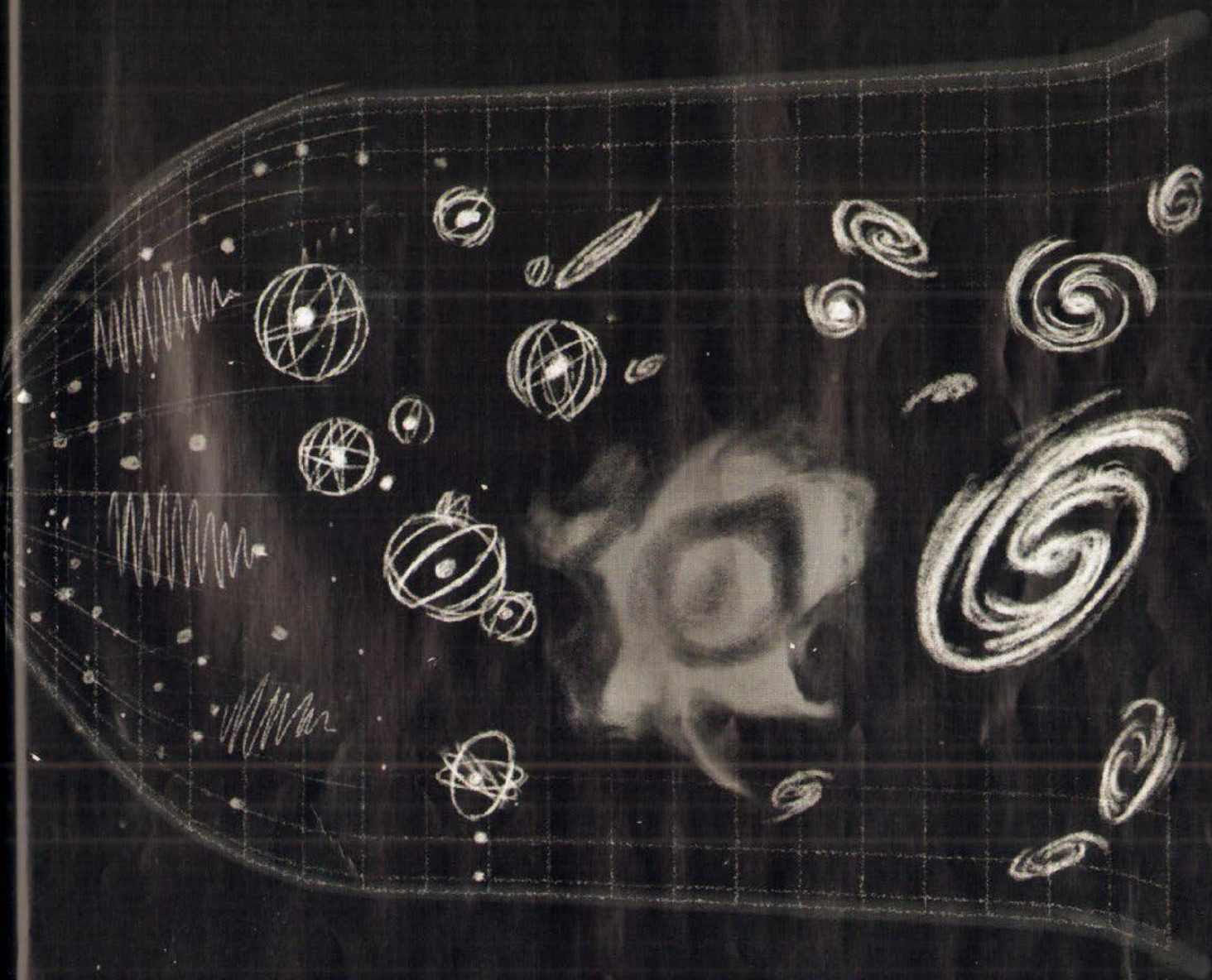
Text: Henning Engeln
Illustrationen: Tim Wehrmann



Nadelöhr von Raum und Zeit

Möglicherweise war der Urknall gar nicht der Anfang von allem, sondern nur ein extremes Durchgangsstadium von einer Welt in die nächste. Mit komplizierten mathematischen Modellen versuchen Physiker das zu beweisen

Den meisten Wissenschaftlern gilt der Urknall als prinzipiell nicht erforschbarer Nullpunkt, an dem sowohl der Raum als auch die Zeit entstanden. Doch einige Astrophysiker wollen sich damit nicht abfinden. Sie haben **mathematische MODELLE ENTWICKELT, MIT DENEN MAN AN DEN BEGINN DER WELT GELANGEN kann** – und sogar darüber hinaus. So kommen sie zu dem aufregenden Schluss, dass es vor unserem Universum ein anderes gegeben hat – und hoffen, irgendwann einen Blick hineinwerfen zu können



10-43

Sekunden – das ist eine Zeitspanne, die sich kein Mensch vorstellen kann. Nicht einmal ein Astrophysiker. Es ist eine Null mit einem Komma und dann 42 weiteren Nullen, bevor die Ziffer 1 auftaucht.

Diesen Hauch eines Nichts nennen die Physiker „Planck-Zeit“. Es ist die nach heute gültigen Erkenntnissen kürzeste mögliche Dauer. Und gleichzeitig bildet diese Spanne eine undurchdringliche Wand.

Denn bislang ist es keinem Forscher gelungen, eine noch kürzere Zeitspanne zu definieren – und damit näher an jenen magischen Punkt heranzurücken, an dem der Urknall geschah. Nur von heute bis zurück zu diesem Zeitpunkt von 10^{-43} Sekunden nach dem Urknall gelten die bekannten physikalischen Gesetze. Jenseits dieser Grenze aber liegt ein bislang unerforschtes Reich, ein Nebel des Ungewissen. Steht die Frage: Was geschah in dem Augenblick, an dem unser Universum geboren wurde, und gab es etwas, das ihm vorausging?

Die meisten Astrophysiker halten es momentan für unmöglich, bis ganz an den Urknall zu gelangen. Ihrer Meinung nach gibt es weder experimentelle Möglichkeiten, den Moment der Schöpfung zu untersuchen, noch mathematische Formeln, die ihn beschreiben könnten. Sie nehmen an, dass erst mit dem Urknall Zeit und Raum in die Welt kamen – und die Frage nach einem Vorher sinnlos ist (siehe Seiten 30 und 102).

Und doch sind einige Forscher dabei, diesen Knoten zu zerschlagen. Sie haben Theorien erdacht, die an den Beginn allen Seins heranreichen und darüber hinaus – bis in ein mögliches Universum vor unserer Zeit.

Ihre Gedanken zu begreifen ist nicht einfach. Doch wer es wagt, sich darauf einzulassen, erhält Einblick in eine Welt, die gleichermaßen bizarr wie fantastisch erscheint – und völlig neue Antworten auf die Frage nach dem Anfang des Seins verspricht.

BISLANG SIND ES VOR ALLEM zwei Probleme, die den Kosmologen Kopfzerbrechen bereiten:

- Zum einen lässt die Relativitätstheorie Einsteins keine mathematische Aussage darüber zu, was wirklich im Augenblick des Urknalls geschah;
- zum anderen ist es nach den Annahmen der Quantentheorie unmöglich, näher als jene 10^{-43} Sekunden an das Ereignis heranzurücken.

Unbestritten ist mittlerweile, dass das heutige Universum vor 13,7 Milliarden Jahren entstanden ist und von einem winzig kleinen Punkt ausgegangen sein muss. Darauf weisen die Beobachtungen von Galaxien hin, die sich alle von uns fortbewegen, und auch die sogenannte kosmische Hintergrundstrahlung, die die Forscher als eine Art Nachhall der Geburt unseres Universums ansehen.

Um sich diesem Punkt, dem Moment des Urknalls, anzunähern, müssen die Astrophysiker die Bewegungen der Galaxien rückwärts berechnen, also ihre Vergangenheit rekonstruieren. Es ist, als würden Kriminalisten aus den Überresten einer gigantischen Explosion, deren Bruchstücke noch immer auseinanderfliegen, zu ermitteln versuchen, wann sie sich ereignet hat – und was da eigentlich zerfetzt wurde.

Das mathematische Rüstzeug, um die Bewegungen der Himmelskörper zu verstehen, lieferte zu Beginn des 20. Jahrhunderts Albert Einstein mit seiner Relativitätstheorie. Mit seinen Formeln können Mathematiker zurückrechnen in jene Zeit, in der die Galaxien dichter nebeneinander lagen als heute und der Raum zwischen ihnen enger war. Und sie können sogar weiter zurückrechnen zu einem Zustand des Universums, in dem die Materie so eng zusammengepresst war, dass sie unermesslich heiß sein musste und anfangs nur in Form von reiner Energie existierte.

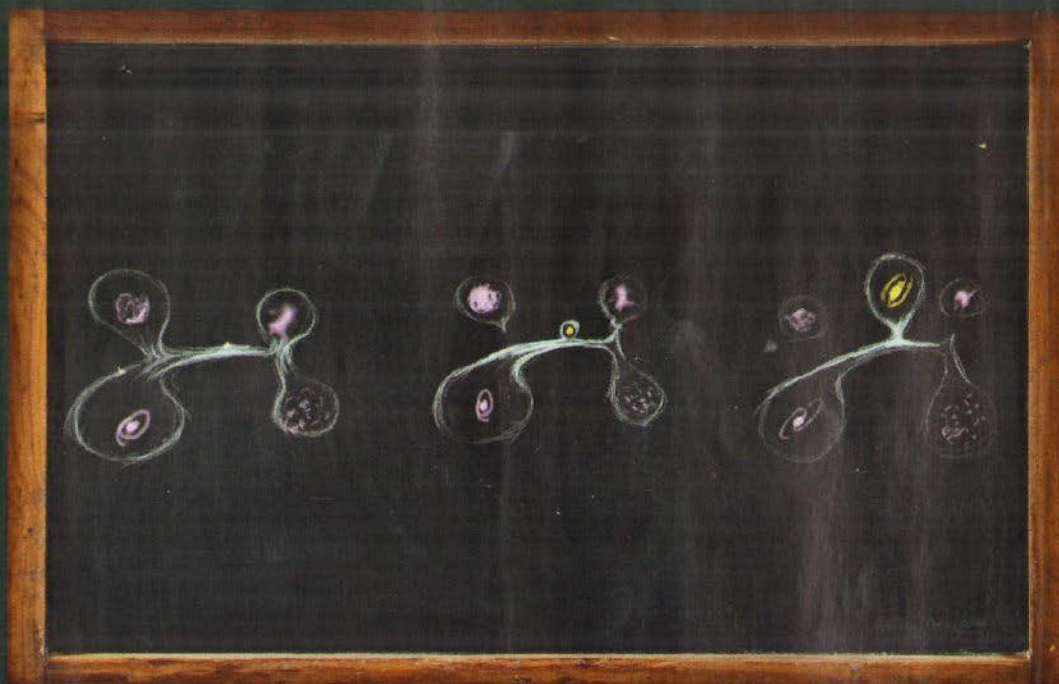
Rechnen die Physiker konsequent weiter mit Einsteins Gleichungen, gelangen sie jedoch zu einem seltsamen Ergebnis: Je näher sie dem Urknall kommen, desto enger wird der Raum, desto höher steigt die Temperatur und desto dichter wird die Materie zusammengequetscht – bis letztlich das All zu einem unendlich kleinen Punkt schrumpft, an dem unendlich hohe Temperatur und Dichte herrschen. Physiker nennen diesen Punkt „Singularität“.

Das Problem ist nur: Mit Unendlichkeiten können sie nicht rechnen. Und deshalb können sie mit Einsteins Theorie über den entscheidenden Moment, über die Geburt des Alls keine Aussage machen.

Nach Einsteins Theorie ist der Urknall eine »Singularität« – ein unendlich kleiner und unendlich heißer Punkt ohne Zeit

NEBEN DER RELATIVITÄTSTHEORIE gibt es ein zweites physikalisches Gedankengebäude, das im 20. Jahrhundert errichtet wurde: die Quantentheorie. Sie beschreibt die Gesetze, die in der Welt der Atome herrschen – und ist daher ebenfalls ein Instrument, um sich dem Urknall zu nähern. Denn direkt nach seiner Geburt war das Universum winziger als ein Atomkern.

Der Begriff „Quant“ geht auf den deutschen Physiker Max Planck zurück. Aufgrund von Experimenten kam er im Jahr 1900 zu dem Schluss, dass Strahlung



Möglicherweise gibt es nicht nur ein Weltall, sondern ein sogenanntes Multiversum, spekulieren manche Astrophysiker. Darunter verstehen sie eine Vielzahl von Welten, die wie Blasen zusammenhängen. Jede von ihnen entstand in einem eigenen Urknall und hat vielleicht eigene Naturgesetze. Erforschen ließen sich solche Welten allerdings nicht

nicht kontinuierlich abgegeben wird, sondern in einzelnen Portionen. Energie ist nicht beliebig teilbar, sondern besteht aus kleinsten Paketen: Quanten.

Um das Jahr 1925 nahm die Quantentheorie dank der Arbeit mehrerer weiterer Forscher eine mathematisch ausgereifte Form an. Die Welt, die sie beschreibt, ist ein seltsame (siehe Seite 140): Von einem Teilchen lässt sich beispielsweise nicht mehr eindeutig sagen, welche Geschwindigkeit es hat und wo es sich befindet. Es kann sogar zur selben Zeit an zwei verschiedenen Orten sein. Teilchen können, zumindest für kurze Zeit, aus dem Nichts entstehen. Zudem kann sich ein Elementarteilchen, etwa ein Elektron, sowohl wie eine Welle als auch wie ein Partikel verhalten. Dinge geschehen nicht zwangsläufig, sondern zufällig: Ob zum Beispiel ein Lichtteilchen an einer Glasplatte reflektiert wird oder durch sie hindurchgeht, lässt sich nur mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit voraussagen.

Doch die Quantentheorie erwies sich als höchst effizient, um das Verhalten von Atomen und Elementarteilchen zu beschreiben – sowie die Kräfte, die sie lenken: die Elektromagnetische Kraft, die Starke und die Schwache Kernkraft. Und da nach dieser Theorie alles in einzelne Portionen, in Quanten, aufgeteilt ist, vermuten die Forscher, dass es für viele physikalische Größen kleinste, unteilbare Einheiten gibt.

Mit den komplizierten Formeln der Quantentheorie und anhand der bekannten Naturkonstanten (etwa der Gravitationskonstante und der Lichtgeschwindigkeit)

können sie sogar Werte dafür berechnen: Die kürzeste Zeiteinheit beträgt demnach 10^{-43} Sekunden, die geringste Länge 10^{-32} Zentimeter. Sie werden heute „Planck-Größen“ genannt (das bedeutet allerdings nicht, dass es nicht doch kürzere Zeiten oder Strecken geben könnte – nur verlieren die Gesetze der bekannten Physik jenseits dieser Größen ihre Gültigkeit).

Die Planck-Zeit ist demnach eine Grenze, über die Quantenphysiker derzeit nicht hinausgelangen können, um sich dem Urknall noch mehr zu nähern. 10^{-43} Sekunden nach dem Urknall geraten sie an eine Wand.

Und gemäß der Einstein'schen Formel lässt sich nur errechnen, dass es am Anfang eine nicht weiter erforschbare Singularität gegeben hat, aus der Raum und Zeit geboren wurden.

Was wirklich damals geschah, bleibt im Nebel. Es fehlen schlicht die Werkzeuge, um es zu untersuchen.

DOCH ES GIBT FORSCHER, die nun dabei sind, diese Grenze zu durchbrechen. Gelingen könnte das mit einem Gedankengebäude, das die Welt der Relativität und die der Quanten miteinander verbindet. Eine solche Theorie wurde maßgeblich von einem jungen deutschen Physiker mitentwickelt. Er heißt Martin Bojowald, stammt aus Jülich und forscht heute an der Penn State University in den USA.

Die Grundidee hinter Bojowalds Theorie: Raum und Zeit, die von Einstein noch als kontinuierliche, beliebig in kleinere Stückchen teilbare Größen angesehen

Das Ende der Welt

Wie die Zukunft des Universums aussieht, ist ungewiss, doch haben Kosmologen mehrere Szenarien entwickelt

1. BIG CHILL: DER KÄLTETOD

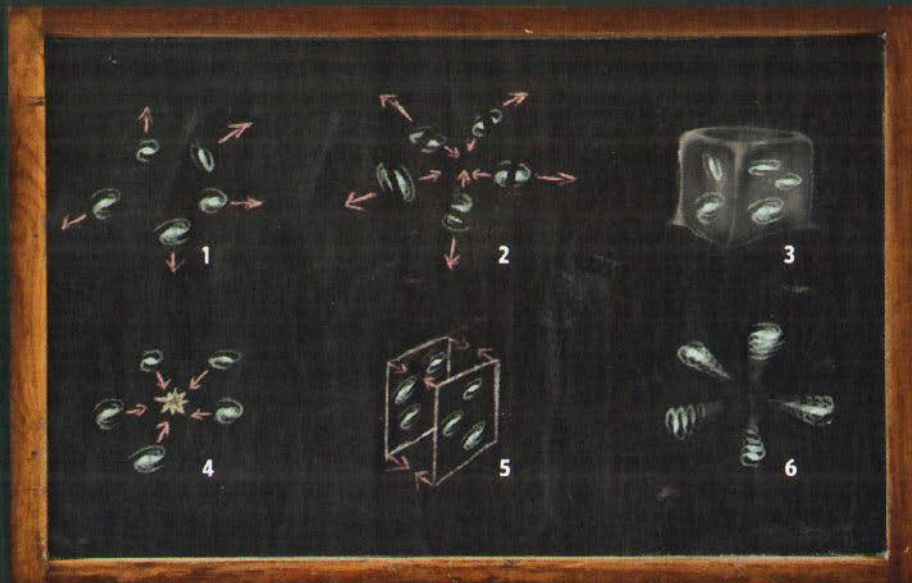
Die Dunkle Energie (siehe Seite 74) übernimmt mehr und mehr die Kontrolle über die Entwicklung des Alls. Das dehnt sich immer weiter aus, wir sehen immer weniger Galaxien. Der Kosmos kühlt weiter ab, bis die Temperatur nur einen winzigen Hauch über dem absoluten Nullpunkt liegt. Ohne Temperaturunterschiede aber gibt es kein Vor oder Zurück, keinen Prozess, der noch Energie zu liefern vermag. Dieses Szenario ist derzeit das wahrscheinlichste.

2. BIG RIP: DAS GROSSE ZERREISSEN

Falls sich herausstellt, dass die Dunkle Energie noch seltsamere Eigenschaften hat, als die Forscher bislang vermuten, könnte sich die Ausdehnung des Universums noch beschleunigen. Die Energie würde ständig zunehmen und mit ihr die Expansion – bis die enormen Kräfte schließlich sogar Atome auseinanderreißen.

3. BIG FREEZE: DAS GROSSE EINFRIEREN

Andere Annahmen besagen, dass die Dunkle Energie schneller zunimmt, als das Universum expandiert.



5. BIG SPLAT: DER GROSSE KLATSCH

Einer Theorie nach existiert unser Universum auf einer vierdimensionalen Membran, die sich durch einen Raum mit noch mehr Dimensionen bewegt (dieses Modell ist – sehr vereinfacht – mit einem Blatt Papier vergleichbar, das durch

Das könnte dazu führen, dass sie (und damit die Dichte im All) irgendwann einen unendlich großen Wert erreicht. Dabei wird alles immer zähflüssiger – so als seien wir statt von Luft zunächst von Wasser umgeben, dann von Honig und schließlich von Beton. Nichts kann sich mehr bewegen, als wären wir eingefroren.

4. BIG CRUNCH: DAS GROSSE ZERMALMEN

Bei diesem Szenario überwiegt irgendwann die Schwerkraft der Materie. Der Raum schrumpft, und unser Universum schnurrt in einer Art zeitlicher Umkehr des Urknalls zusammen, bis sich die Materie wieder in die Urbausteine auflöst. Diese Entwicklung wäre aber nur möglich, falls die Dunkle Energie irgendwann verschwindet und nicht mehr für eine beschleunigte Expansion sorgt. Dies, so Berechnungen, könnte frühestens in 24 Milliarden Jahren geschehen.

ein Zimmer fliegt). Stößt die Membran unseres Weltalls mit einer anderen zusammen, löst der Aufprall ein dramatisches Geschehen aus: Das bestehende Universum stürzt in einem Big Crunch zu einer Singularität zusammen. Daraus folgt ein Urknall, der ein neues Universum gebiert. So wechseln sich Phasen des Entstehens und Vergehens in einem zyklischen Universum fortlaufend ab.

6. BIG BRAKE: DIE GROSSE VOLLBREMSUNG

Eine sechste Theorie sagt noch nicht entdeckte Teilchen voraus – Tachyonen –, die sich schneller als mit Lichtgeschwindigkeit bewegen. Nach einer Zeit der Expansion des Universums sorgen diese Teilchen über einen äußerst komplizierten Mechanismus für eine radikale Abbremsung der Ausdehnung; sie hört schlagartig auf. Anschließend beginnt das Universum sich wieder zusammenzuziehen und endet in einem Big Crunch. Tobias Hofbauer

wurden (siehe GEOkompakt Nr. 27 „Das Rätsel Zeit“), haben ebenfalls eine Quantenstruktur. Es gibt sozusagen Raumzeitquanten und Raumzeitatome. Das klingt simpel, ist aber mathematisch extrem kompliziert.

Das kosmologische Modell, das Martin Bojowald und einige Kollegen entwickelt haben, heißt „Schleifen-Quanten-Gravitation“. Es vereint Einsteins Konzept von Raum und Zeit und seine Beschreibung der Schwerkraft mit den Gesetzen der Quantentheorie.

Diesem Modell zufolge wächst der Raum und dehnt sich aus, indem neue Raumzeitatome quasi aus dem „Nichts“ entstehen: ähnlich wie in der Welt der Quanten Materieteilchen aus reiner Energie entspringen.

Man kann sich diese Raumzeitquanten – in einem extrem vereinfachten Bild – wie eine Art Seifenschaum vorstellen, in dem an verschiedenen Stellen neue Bläschen entstehen: So expandiert der Raum. Oder sie platzen und verschwinden; der Raum schrumpft.

Doch was geschieht, wenn die Raumzeitatome auf sehr engem Raum mit hoher Energie zusammengepresst werden, also unter Bedingungen, wie sie beim Urknall herrschten? Nach der klassischen Einstein'schen Relativitätstheorie nimmt ja die Schwerkraft immer mehr zu, je dichter die Materie gepackt ist. Und im Moment des Urknalls sind die Dichte und die Temperatur des Universums unendlich

groß, die Ausdehnung unendlich klein, Raum und Zeit noch nicht vorhanden.

Anders aber ist es bei der Bojowald-Theorie: Die schrumpfende Struktur aus Raumzeitatomen saugt immer mehr Energie auf. Irgendwann ist die Energiedichte so hoch, dass keine weitere Kompression möglich ist. Denn die Raumzeitatome haben eine Eigenschaft ähnlich wie ein Schwamm, der sich mit Wasser vollsaugt: Ist er komplett gefüllt, kann er nicht mehr von dem Nass aufnehmen. Entsprechend ist es mit den Raumzeitatomen: Ihr Stauraum für Energie ist erschöpft, sie können keine weitere aufnehmen.

In diesem Augenblick aber verändert sich das Wesen der Schwerkraft: Von einer anziehenden Kraft wandelt sie sich zu einer abstoßenden. Und das hat atemberaubende Konsequenzen. Denn es gibt eine maximale Verdichtung, die das Universum annehmen kann. Sie liegt bei einem unvorstellbar hohen Wert, der sich aber berechnen lässt: Etwa eine Billiarde Sonnenmassen auf dem Raum eines Protons konzentriert.

Das bedeutet: Dichte und Temperatur steigen nicht ins Unermessliche. Und damit kann die neue Theorie auch eines der großen Probleme der bisherigen Sicht vom Urknall lösen: Die Singularität mit ihrem Problem der Unendlichkeiten wird vermieden.

Der Raum schrumpft bei der neuen Theorie also nicht auf die Größe null. Das heißt aber auch, dass der Zeiger der Zeit nicht auf null gestellt wird, die Zeit also nicht im Moment des Urknalls in die Welt gekommen ist. Wenn das zutrifft, könnte es auch eine Zeit vor unserer gegeben haben.

Der Urknall wäre dann kein Anfang, sondern ein Nadelöhr, durch das die Welt sich beim Übergang von einem zum nächsten Universum zwängen musste.

Bojowald und seine Mitstreiter halten es daher für möglich, dass es vor dem Beginn unseres Universums eine Vorgänger-Welt gegeben hat. Am Ende ihrer Existenz stürzte diese unter der Anziehungskraft der Gravitation in sich zusammen. Dadurch nahm die Dichte so weit zu, dass die Raumzeitatome sich mit Energie vollsogen und die Schwerkraftwirkung sich ins Gegenteil verkehrte. Die Folge: Das Ganze explodierte – und unser Weltall entstand.

So gesehen war der Urknall kein absoluter Beginn, sondern ein Übergang. Auch andere theoretische Modelle, etwa der sogenannten String-Theorien, kommen zu dem Schluss, dass es keine Singularität gegeben habe, sondern vor unserem Universum eine andere

**Einige Kosmologen
nehmen an, es
gebe ewige Zyklen
aus Urknall,
Ausdehnung und
erneuter Explosion**

Welt existierte. Einige Kosmologen, wie der Brite Roger Penrose, glauben inzwischen sogar an einen ewigen Zyklus: Er beginnt mit einem Urknall, der ein sich ausdehnendes Universum

hervorbringt, das an seinem Ende in einen neuen Urknall und ein neues Universum mündet.

WIE ABER KÖNNTE jene Vorgänger-Welt ausgesehen haben? Bojowalds erste Rechnungen ließen vermuten, dass es ein Gebilde ähnlich dem heutigen All gewesen sein könnte – mit Schwerkraft, Sternen und Galaxien.

Diese Annahme erwies sich jedoch als fragwürdig, als der Forscher zusätzliche Quanteneffekte in seinen Gleichungen berücksichtigte. Möglicherweise gab es eine der unseren spiegelbildliche Welt, da sich im Moment des urknallartigen Übergangs der Raum quasi umstülpte – so wie ein Luftballon, aus dem man die Luft herauslässt und ihn anschließend so aufbläst, dass die Innenseite außen liegt.

Bislang sind solche Vermutungen reine Spekulation. Das Problem: Während des Durchgangs durch die Phase der höchsten Dichte wurden fast alle Informationen gelöscht, die Botschaften aus der Anders-Welt zu uns bringen könnten. Dennoch hofft Bojowald, winzige

Spuren jenes Vorgänger-Universums zu finden. So könnten Gravitationswellen (sich wellenförmig ausbreitende Stauchungen und Streckungen der Raumzeit, deren Existenz jedoch bis heute nicht direkt nachgewiesen ist) oder Neutrinos Nachrichten aus der Zeit vor dem Urknall in sich tragen (siehe Seiten 72 und 73). Möglicherweise enthält auch die kosmische Mikrowellen-Hintergrundstrahlung entschlüsselbare Botschaften aus jener Vor-Zeit.

Martin Bojowald entwickelt seine Theorie derzeit weiter und hofft, irgendwann Messdaten zu haben, die Aussagen über eine

mögliche Welt vor unserer Zeit erlauben. Noch ist es dafür zu früh, und noch ist der Ansatz des 38-jährigen Physikers nicht bewiesen. Doch es besteht die Hoffnung, in vielleicht einigen Jahrzehnten definitiv zu wissen, ob es eine Welt vor der unsrigen gab – und womöglich sogar zu beschreiben, wie sie aussah. □

Memo: VOR DEM URKNALL

► **Die meisten Physiker** gehen davon aus, dass der Urknall ein absoluter Nullpunkt ist, an dem Zeit und Raum begannen.

► **Neueren Theorien zufolge** könnte der Urknall dagegen lediglich ein Durchgangsstadium von einem Universum in ein anderes gewesen sein.

► **Forscher hoffen**, Spuren eines Alls vor dem unseren zu finden – etwa in Schwerkraftwellen oder bei Neutrinos.

► **Der Kosmos vor unserer Zeit** könnte eine der unseren spiegelbildliche Welt gewesen sein.

GEOKompakt-Redakteur **Dr. Henning Engeln**, 57, hat diese Ausgabe konzipiert.

Literaturempfehlung: Martin Bojowald, „Zurück vor den Urknall: Die ganze Geschichte des Universums“, Fischer; populär geschriebene, meist gut verständliche, an manchen Stellen recht anspruchsvolle Darstellung der verschiedenen Modellvorstellungen zum Urknall, vor allem der „Schleifen-Quanten-Gravitation“.

130

TRILLIARDEN STERNE gibt es nach Schätzungen von Astronomen **IM WELTALL**. Das ist eine 13 mit 22 Nullen.

3×10^{-22} Gramm

wiegt das schwerste bekannte Elementarteilchen: das sogenannte **TOP-QUARK**. Es ist damit fast so schwer wie ein Goldatom, existiert allerdings nur 6×10^{-25} **SEKUNDEN**.

46

MILLIARDEN LICHTJAHRE

ist ein Stern heute von uns entfernt, dessen **LICHT 13 MILLIARDEN JAHRE LANG ZUR ERDE UNTERWEGS WAR**. Das liegt daran, dass sich der Abstand in der Zeit, die das Licht für den Weg benötigte, aufgrund der Ausdehnung des Weltalls ständig vergrößert hat.

0,3

PROTONEN sind im Durchschnitt in jedem Kubikmeter des Weltalls enthalten.

3

GENERATIONEN VON STERNEN hat das Universum seit dem Urknall bislang hervorgebracht.

1 zu 40 **BILLIARDEN**

beträgt die Wahrscheinlichkeit, dass **ZWEI STERNE** im Verlauf von 100 000 Jahren bei ihrer Bewegung durch unsere Milchstraße zusammenstoßen.

120

KILOMETER

PRO SEKUNDE

beträgt die Geschwindigkeit, mit der sich **UNSERE MILCHSTRASSE** und die benachbarte Andromeda-Galaxie aufeinander zubewegen. In gut drei Milliarden Jahren werden sie kollidieren.

25 000 000 000

(25 Milliarden) **KILOWATTSTUNDEN ENERGIE** sind in einem Kilogramm Materie „eingefroren“. (Nach Einsteins Formel $E = mc^2$ ist Materie ja nichts anderes als hochverdichtete Energie.)

ZEITLEISTE ZUM URKNALL

URKNALL

Vor 13,7 Milliarden Jahren entstehen aus einem Punkt unermesslicher Dichte und Hitze Raum und Zeit.

PLANCK-ÄRA (0 BIS 10^{-43} SEK.)

Vermutlich beherrscht eine einheitliche Urkraft diese Ära; der Durchmesser des Alls beträgt weniger als 10^{-32} Zentimeter, die Temperatur mehr als 10^{32} Grad.

ÄRA DER SCHWERKRAFT (10^{-43} BIS 10^{-36} SEK.)

Die Schwerkraft spaltet sich von der Urkraft ab. Der Kosmos dehnt sich um das Hundertfache aus.

INFLATIONSPHASE (10^{-36} BIS 10^{-32} SEK.)

Die Starke Kernkraft spaltet sich ab (sie wird später die Kerne von Atomen zusammenhalten). Dadurch werden gewaltige Mengen Energie frei, die das

Universum mit Überlichtgeschwindigkeit von einem winzigen Pünktchen auf die Größe eines Medizinballs anschwellen lassen (Inflation).

ÄRA DES »TEILCHENZOOS« (10^{-32} BIS 10^{-10} SEK.)

Eine Vielzahl von Teilchen entstehen: Quarks, die Bausteine der Atomkerne, dazu negativ geladene Elektronen sowie die ungeladenen, sehr leichten Neutrinos – und die entsprechenden

Antiteilchen (Antimaterie). Außerdem bilden sich Vorläufer von Photonen (Lichtteilchen).

ÄRA DER KRÄFTE (10^{-10} BIS 10^{-5} SEK.)

Nochmals spaltet sich eine Kraft auf: Die Schwache Kernkraft und die Elektromagnetische Kraft entstehen. Zusammen mit der Schwerkraft und der Starken Kernkraft bilden sie die vier Grundkräfte.

PHASE DER KERNBAUSTEINE (10^{-5} BIS 10^{-4} SEK.)

Quarks vereinigen sich zu Protonen (den Atomkernen des Wasserstoffs) sowie zu Neutronen – den späteren Bausteinen sämtlicher Atomkerne.

ÄRA DER VERNICHTUNG (10^{-4} BIS 0,2 SEK.)

Materie und Antimaterie löschen sich gegenseitig zum größten Teil aus. Übrig bleibt ein winziger

Alles, was das Universum und den Urknall betrifft, ist extrem: entweder gigantisch groß oder winzig klein. Und in der Regel für uns Menschen zwar bezifferbar, nicht aber vorstellbar

100

TEILCHEN der **MYSTERIÖSEN DUNKLEN MATERIE**, so schätzt der Astrophysiker Simon White, gibt es **ALLEIN IN SEINEM BÜRO** in Garching.

$8,1 \times 10^{36}$

KILOGRAMM

beträgt die Masse des Schwarzen Lochs im **ZENTRUM UNSERER MILCHSTRASSE**. Das entspricht 4,1 Millionen Sonnenmassen.

92

MILLIARDEN LICHTJAHRE groß ist der Durchmesser jenes Teils des Universums, der unserer Beobachtung zugänglich ist.

30

MILLIARDEN

NEUTRINOS durchqueren **JEDE SEKUNDE JEDEN QUADRATZENTIMETER** unseres Körpers, ohne dass wir sie spüren. Sie werden im Inneren der Sonne erzeugt.

100 000 000 000 000 000
000 000 000 000 000 000 000 000
000 000 000 000 000 000 000
000 000 000 000 000 000 (10⁸⁰)

PROTONEN (einer von zwei Bausteinen des Atomkerns) gibt es im Weltall. Noch häufiger sind aber die Lichtteilchen, die Photonen. Auf **JEDES PROTON KOMMEN EINE MILLIARDE PHOTONEN**.

10³²

GRAD CELSIUS betrug die **TEMPERATUR DES UNIVERSUMS** direkt nach dem Urknall. Sie ist bis heute auf minus 270 Grad Celsius abgekühlt.

500 Milliarden Grad Celsius

war die **HÖCHSTE JEMALS GEMESSENE TEMPERATUR IM WELTALL** in einer Supernova in der großen Magellanschen Wolke. Die niedrigste Temperatur jedoch gibt es nicht im Kosmos, sondern in den Kältelabors der Physiker auf der Erde. Sie beträgt nur wenige Milliardstel Grad über dem absoluten Nullpunkt von **MINUS 273,15 GRAD CELSIUS**.

Überschuss von Protonen und Neutronen.

ÄRA DES ZERFALLS
(0,2 SEK. BIS 2 MIN.)

Das All ist nun auf 20 Milliarden Grad abgekühlt. Die Elektronen und ihre Antiteilchen, die Positronen, vernichten sich fast komplett gegenseitig; nur ein geringer Anteil an Elektronen bleibt übrig. Neutronen zerfallen in je ein Proton, Elektron und Neutrino.

ZEIT DER ATOMKERNE
(2 BIS 5 MIN.)

Neutronen und Protonen vereinigen sich zu Atomkernen des Elements Helium. Es bleibt aber ein Überschuss von Protonen (Atomkernen des Wasserstoffs) übrig.

PHASE DER ABKÜHLUNG

(5 MIN. BIS 380 000 JAHRE)
Das Weltall wächst und kühlt dabei ab. Nach fünf Minuten misst es bereits 17 Milliarden Kilometer im

Durchmesser, nach 380 000 Jahren 800 Trillionen Kilometer.

ÄRA DER ATOME

(380 000 BIS 14 MIO. JAHRE)
Lichtteilchen prallen nicht mehr ständig mit Elektronen zusammen, sondern können sich ungestört ausbreiten: Das All wird durchsichtig. Protonen und Heliumkerne fangen Elektronen ein und werden zu Wasserstoff und Helium. Damit sind die ersten Atome entstanden.

ÄRA DER FINSTERNIS

(14 BIS 100 MIO. JAHRE)
Die Temperaturen fallen unter den Gefrierpunkt, das Licht wird immer schwächer.

ZEIT DER ERSTEN STERNE

(100 BIS 500 MIO. JAHRE)
Atome verdichten sich in Gasnebeln so sehr, dass eine Kernfusion einsetzt und die zu Kugeln verdichteten Nebel irgendwann als Sterne aufleuchten.

ÄRA DER GALAXIEN

(500 MIO. JAHRE BIS HEUTE)
Die ersten extrem großen, schnelllebigen Sterne explodieren an ihrem Ende und bringen dabei neue chemische Elemente hervor. Diese Elemente führen zur Entstehung kleinerer, sehr lange existierender Sterne. Im Laufe vieler Jahrmillionen ordnen sich diese Sterne zu Galaxien - vor allem zu Spiralgalaxien, die bis heute das Bild des Universums prägen. □

GEOkompakt Nr. 30 erscheint am 7. März 2012

WIE WIR UNS ERNÄHREN

Vom Brennwert bis zur Evolution des Geschmacksinns: Was Forscher über das tägliche Essen wissen

Der Mensch ist ein Hochleistungsunternehmen, das stetig versorgt werden muss: Das Herz eines Erwachsenen pumpt 290 Liter Blut pro Stunde durch die Gefäße, ohne Unterlass kommuniziert das Hirn mit den restlichen Organen, ständig ist ein Teil der 640 Muskeln in Bewegung. Das alles kostet Energie. Und permanent muss unser Körper selber reparieren, was verschlissen ist – zum Beispiel Tag für Tag 200 Milliarden rote Blutkörperchen. Dafür benötigt der Mensch Baustoffe. Beides, Energie und Baumaterial, kann er nur über eines gewinnen: sein Essen. *Homo sapiens* ist dabei die einzige Spezies auf der Welt, die die Art und Menge ihrer Nahrung kontrollieren und intellektuell erfassen kann. Doch was gut und gesund ist, darüber streiten sich Experten.

In seiner nächsten Ausgabe berichtet GEOkompakt über den neuesten Stand des Wissens rund ums Essen. Beschreibt dabei die körperlichen Vorgänge, erläutert, woher unsere Nahrung

stammt und wie sie fabriziert wird. Wie unser Erbgut uns zu Süßem und Fettem verleitet. Was von der Grünen Gentechnik zu halten ist. Und weshalb uns erst die Kunst des Kochens zu Menschen gemacht hat.

Weitere THEMEN

- **Psychologie:** Wie sich die Größe des Tellers auf unser Essverhalten auswirkt.
- **Energie:** Wo sich der Treibstoff des Lebens verbirgt.
- **Kinder:** Was sie wann essen dürfen – und wie sich Eltern verhalten sollten.
- **Bausteine:** Wie der Körper Zucker, Eiweiß, Vitamine nutzt.
- **Mythen:** Warum Fett nicht fett macht und Abendmahlzeiten unbedenklich sind.
- **Diäten:** Welche Methoden schaden, welche nützen.

GEOkompakt Nr. 31 erscheint am 6. Juni 2012

CHEMIE: DIE MACHT DER MATERIE

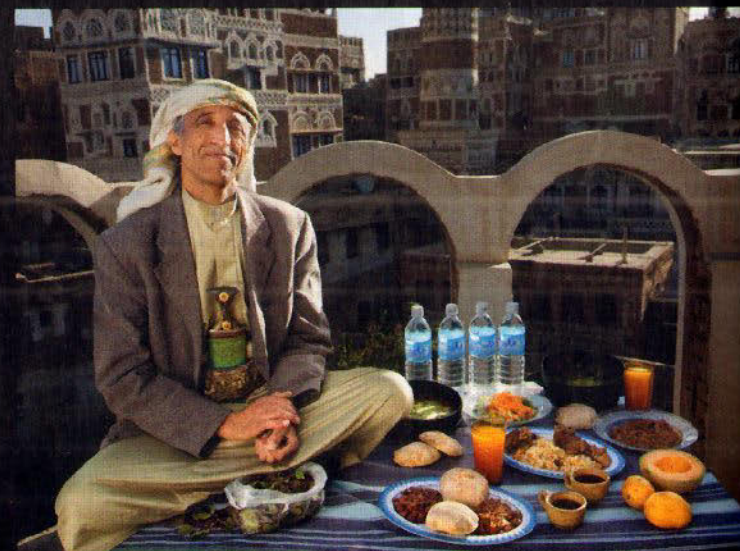
Weshalb Dynamit explodiert, Diamanten vergänglich sind und sich Gold nicht herstellen lässt: die Stoffe der Erde, ihre Verwandlung und ihre Bedeutung für die Menschheit



Teri Bezuidenhout, Trucker, Namibia, mit Tagesration: 8400 Kilokalorien



Bäcker Akbar Zareh aus Iran mit Eiern, Fladenbrot, Trauben, 4900 Kilokalorien



Ahmed Ahmed Swaid, Kat-Verkäufer im Jemen: Bohnen, Mangos, Lamm, 3300 Kilokalorien



6500 Kilokalorien nimmt der grönländische Jäger Emil Madsen zu sich



Suppe, Salat, Kartoffeln: Hebamme Maria Ayme Sichigalo, Ecuador, 3800 Kilokalorien



Xu Zhipeng, China, Grafiker, Computerspieler: 1600 Kilokalorien täglich



3900 Kilokalorien benötigt Bio-Farmer Joel Salatin, USA (Mitte, mit Familie)



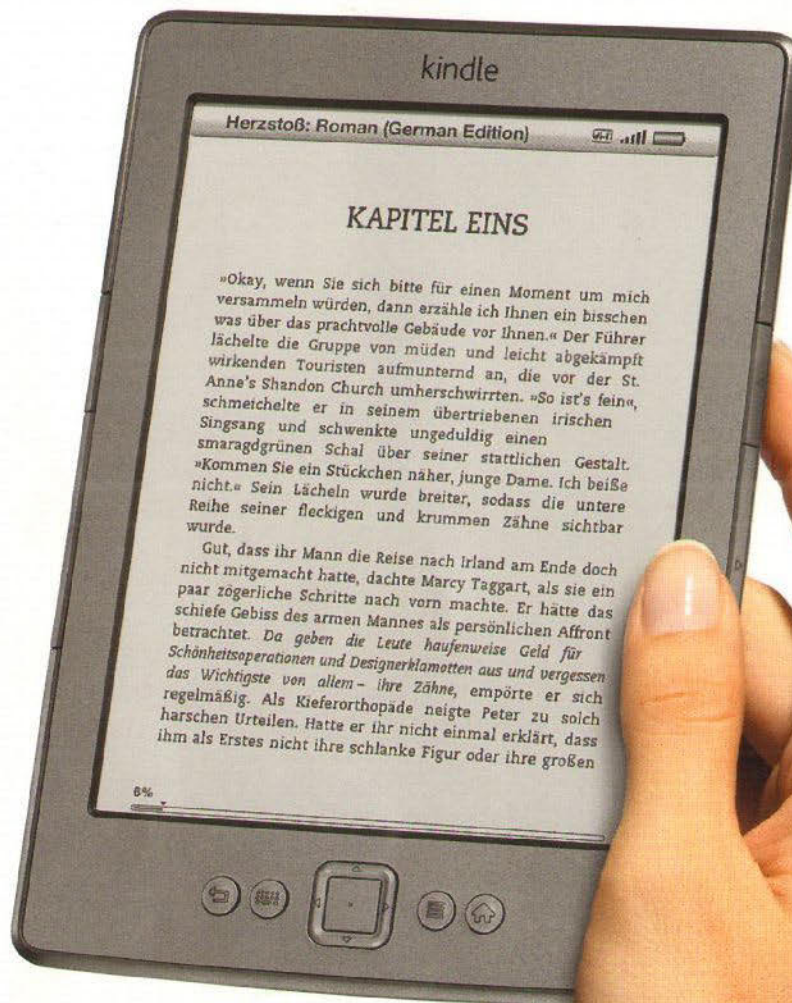
Maisbrei, Milch: Rinderhirtin Viahondjera Musutua, Namibia, 1500 Kilokalorien



Straßenköchin Lin Hui-wen, Taiwan: Fisch, Tofu, Tee, 2700 Kilokalorien

JETZT NEU: DER AMAZON KINDLE

Nur 99 €



Entdecken Sie Kindle – den neuen eReader von Amazon

Lesen wie auf echtem Papier, sogar in der Sonne.
Speichert bis zu 1.400 Bücher.
Leichter als ein Taschenbuch.
Riesige Auswahl an Büchern in Deutsch.
Deutsche Menüführung.

amazonkindle

Erfahren Sie mehr unter www.amazon.de

99 €