

NR. 51

# GEOkompakt

Die Grundlagen des Wissens

Die  
neuesten  
Erkenntnisse  
der  
Forschung

ISBN 978-3-652-00645-1

## Die Geburt des Universums

Wie aus dem **Nichts**  
die **Welt** entstand



Deutschland 9,50 € • Österreich 11,00 € • Schweiz 17,60 sfr • Benelux 11,00 € • Frankreich 12,50 € • Spanien 12,50 €

### URKNALL

Was im allerersten  
Moment geschah

### DUNKLE MATERIE

Warum es uns ohne  
sie nicht gäbe

### WELTFORMEL

Die Suche nach der  
Theorie von allem

### EXOPLANETEN

Neue Hoffnung auf  
eine zweite Erde

# Warum die beste Lösung manchmal der Konflikt ist.

## GEO WISSEN

Den Menschen verstehen

NR. 59 · Deutschland € 9,90 · Schweiz 14,90 sFr · Österreich € 10,90 · Spanien € 11,90 · Portugal € 12,90 · Polen / Tschechien € 12,90 · Griechenland € 13,90

### Die Kunst zu streiten

Wie wir  
**Konflikte**

besser  
bewältigen –

und warum  
**Harmonie**  
nicht immer  
gut ist



Auch mit  
DVD erhältlich

Jetzt  
im Handel.

**Test**  
Wie konfliktfähig  
sind Sie?

**Verhandeln**  
Eigene Interessen  
fair vertreten

**Arbeitsplatz**  
Vom guten Umgang  
mit Differenzen

**Vergebung**  
Weshalb es wichtig  
ist, zu verzeihen

Liebe Leserin, lieber Leser

**W**ir haben in dieser Heftreihe schon mehrfach über die Mysterien des Universums und deren Erforschung berichtet, etwa über die Suche nach dem geheimnisvollen Higgs-Teilchen am Teilchenbeschleuniger CERN bei Genf. Nun nehmen wir uns dieses Thema erneut vor, und auch zum CERN haben wir wieder einen Reporter geschickt. Denn es hat sich in den vergangenen Jahren einiges getan in der Weltraumforschung.

So sind beispielsweise die bereits von Albert Einstein theoretisch vorausgesagten Gravitationswellen erstmals nachgewiesen worden, die den Raum etwa nach der Kollision zweier Himmelskörper durcheinander.

Auch bei der Suche nach einer zweiten Erde sind die Astronomen vorangekommen; kürzlich erst gaben sie die Entdeckung eines Sterns bekannt, dessen sieben Trabanten unserem Heimatplaneten ähneln und von denen einige womöglich sogar Leben hervorgebracht haben.

Und auch bei der Erforschung der wohl faszinierendsten Objekte im All – der massereichen Schwarzen Löcher – ist Spektakuläres in Arbeit. Astrophysiker haben im April insgesamt neun Radioteleskope weltweit zusammenge schlossen und auf diese Weise das größte virtuelle Fernrohr aller Zeiten hergestellt. Damit wollen sie erstmals überhaupt versuchen, eines dieser Massemonster abzubilden.

Darüber hinaus haben die Forscher in den letzten Jahren neue Erklärungsansätze zum Urknall, zur Wirkung der geheimnisvollen Dunklen Materie sowie zur Entstehung der Galaxien entwickelt. Sie sehen: Es gibt Gründe genug, wieder einmal ein ganzes Heft der Erforschung des Kosmos zu widmen. Auf den folgenden mehr als 150 Seiten bringen wir Sie auf den neuesten Stand der Wissenschaft und stellen Ihnen zudem einige der derzeit bedeutendsten Physiker, Astronomen und Astrophysiker vor – Frauen und Männer, die einen anstecken mit ihrer Begeisterung über ihren Werdegang und ihren Beruf.



Kernteam der Ausgabe (v. l.): Tim Wehrmann (Illustration), Dr. Götz Froeschke (Verifikation), Maria Kirady (Konzept), Rainer Harf (Stellv. Chefredakteur), Angelika Fuchs (Redaktionsassistenz)



Besonders ans Herz legen möchte ich Ihnen die Reportage meines Kollegen Cay Rademacher, mit dem ich bei einer anderen Heftreihe zusammenarbeitete, dem Geschichtsmagazin *GEO EPOCHÉ*. Ich habe ihn gebeten, zum CERN zu reisen, um sich von den Experten so einfach wie möglich erklären zu lassen, woran sie forschen, damit auch er als Laie es verstehen und anschaulich vermitteln kann.

Ich finde, das ist ihm sehr gut gelungen (auch wenn das Thema noch immer reichlich komplex ist). Ich jedenfalls habe erstmals richtig verstanden, worum es bei der Erforschung des Quark-Gluonen-Plasmas geht – und was das mit der Entstehung der Welt zu tun hat.

\*

Ich möchte Ihre Aufmerksamkeit auf drei weitere Hefte aus der *GEO*-Gruppe lenken, die kürzlich erschienen sind.

Die neue Ausgabe von *GEO WISSEN GE SUNDHEIT* widmet sich den „Muskeln, Knochen, Gelenken“ in unserem Körper und der Frage, wie wir sie fit halten können (und was zu tun ist, wenn wir sie dennoch verletzen).

In *GEO WISSEN ERNÄHRUNG* geht es diesmal um die Wissenschaft vom guten Geschmack und die Frage, was die besondere Qualität mancher Lebensmittel ausmacht.

Und *GEO WISSEN* widmet sich der „Kunst zu streiten“ – also der Frage, wie es in einem Konflikt mit anderen gelingen kann, zu einer Lösung zu kommen, die keine Wunden hinterlässt.

Alle drei Titel liefern Erkenntnisse der Grundlagenforschung, sollen den Lesern aber auch helfen, ihren Alltag besser zu gestalten. Damit sind sie so etwas wie das Kontrastprogramm zu dem vorliegenden Heft. Ich hoffe, beide Ansätze sagen Ihnen zu.

Herzlich Ihr

*michael sieber*

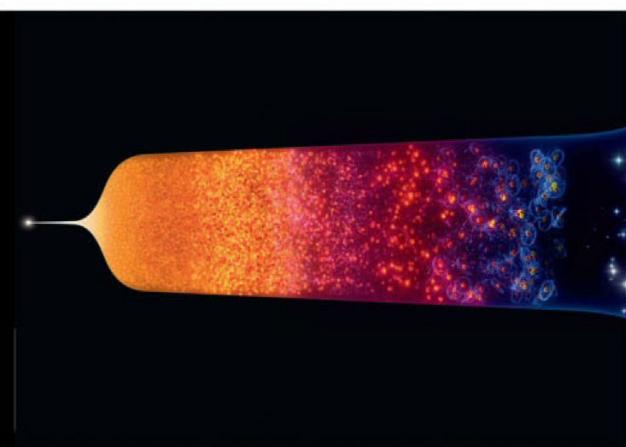


Weitere Hefte aus der Wissen-Gruppe, die aktuell am Kiosk erhältlich sind



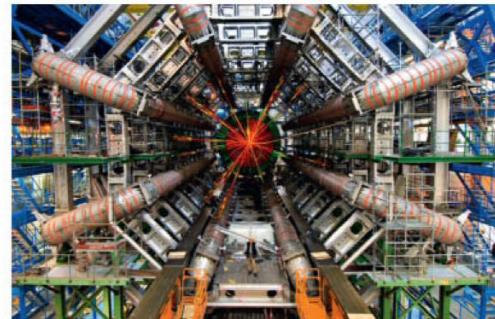
## 080 DER WANDEL DER STERNE

Das Werden einer Sonne (oben) kann ganz unterschiedlich verlaufen: Mancher Glutofen explodiert in einem furiosen Finale.



## 136 SPITZEN-FORSCHUNG

Mithilfe einer Höllenmaschine simulieren Wissenschaftler am Genfer CERN den Urknall.



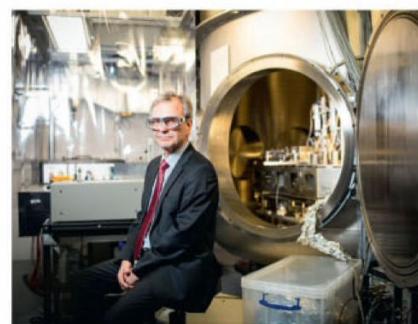
## 024 DER URKNALL

Was genau geschah in den ersten Sekunden und Minuten nach der Geburt unseres Kosmos?



## 094 GEISTERTEILCHEN

An extremen Orten spüren Wissenschaftler mit High-tech-Apparaten den geheimnisvollen Neutrinos nach.



## 112 SENSATIONSFUND

Forscher haben eine Jahrhundert-Entdeckung gemacht: Gravitationswellen.



## 86 ATOME

Weshalb alles um uns herum – Ozeane, Berge, sogar der menschliche Körper – aus dem Inneren von Sternen stammt.





## 072 WELT- FORMEL

Ein Physiker über die Suche nach der Theorie, die alles erklärt.

## 120 FREMDE WELTEN

Fast täglich werden neue Exoplaneten entdeckt. Manche sind bizarer als lange gedacht.



## 006 JAGD NACH ERKENNTNIS

Forscher erzählen, wie sie versuchen, die Rätsel des Universums zu entschlüsseln.



# INHALT

NR 51

**Forscher** Vom Kleinsten und vom Größten **006**  
Über den Reiz, in den Kosmos zu blicken und die Grenzen der Erkenntnis zu erweitern

## WIE ALLES BEGANN

**Urknoten** Die ersten Sekunden **024**  
Als im Bruchteil eines Augenblicks aus dem Nichts Raum, Zeit und Materie entstanden

**Galaxien** So kam das Licht in die Welt **042**  
In einem erstaunlichen Prozess formten sich aus ersten Gaswolken gigantische Archipele

**Sterne** Biografie der Leuchtfelder **080**  
Wann entstehen Sonnen? Was geschieht in ihrem Inneren? Wie enden die heißen Gasbälle?

**Atome** Die Geburt der Elemente **086**  
Auf wundersame Weise wurden sämtliche Bausteine unserer Welt einst in Sternen gebacken

## KOSMISCHE PHÄNOMENE

**Schwarze Löcher** Rätselhafte Objekte **104**  
Bergen die unheimlichen Massegiganten den Schlüssel zum Verständnis des Kosmos?

**Exoplaneten** Suche nach zweiter Erde **120**  
Rund 3500 extrasolare Planeten sind bekannt. Schon bald könnten wir auf fremdes Leben stoßen

GEO-Leserservice, Bildnachweis **093** • Impressum **093** • Die Welt von GEO **152** • Vorschau »Der Wald« **154**

Alle Fakten und Daten in diesem Heft sind vom GEOkompakt-Verifikationsteam auf Präzision, Relevanz und Richtigkeit überprüft worden. Kürzungen in Zitaten werden nicht kenntlich gemacht.  
Redaktionsschluss dieser Ausgabe: 08. Mai 2017.  
Weitere Informationen zum Thema und Kontakt zur Redaktion: [www.geokompakt.de](http://www.geokompakt.de).

**Planetensysteme** Schräge Umlaufbahnen **125**  
Wie ferne Welten um ihre Sonne kreisen

**Dunkle Materie** Substanz im Verborgenen **130**  
Das All ist von einem überaus seltsamen Stoff erfüllt. Und ohne ihn würde es uns nicht geben

## ASTROFORSCHUNG

**Himmelsspäher** Der Blick nach oben **060**  
Eine neue Generationen von Superteleskopen lässt Astronomen tiefer ins All blicken denn je

**Weltformel** Die Theorie von allem **072**  
Forscher wollen sie endlich finden: eine Gleichung, die alle Phänomene der Physik beschreibt

**Neutrinos** Botschafter aus der Urzeit **094**  
Jede Sekunde rasen Milliarden von ihnen durch unseren Körper, teils sind sie so alt wie das All

**Gravitationswellen** Endlich entdeckt! **112**  
Vor 100 Jahren von Albert Einstein vorhergesagt, wurden sie nun spektakulär nachgewiesen

**CERN** Vorstoß in den Mikrokosmos **136**  
Wie Forscher bei Genf den Elementarteilchen ihre letzten Geheimnisse entlocken wollen

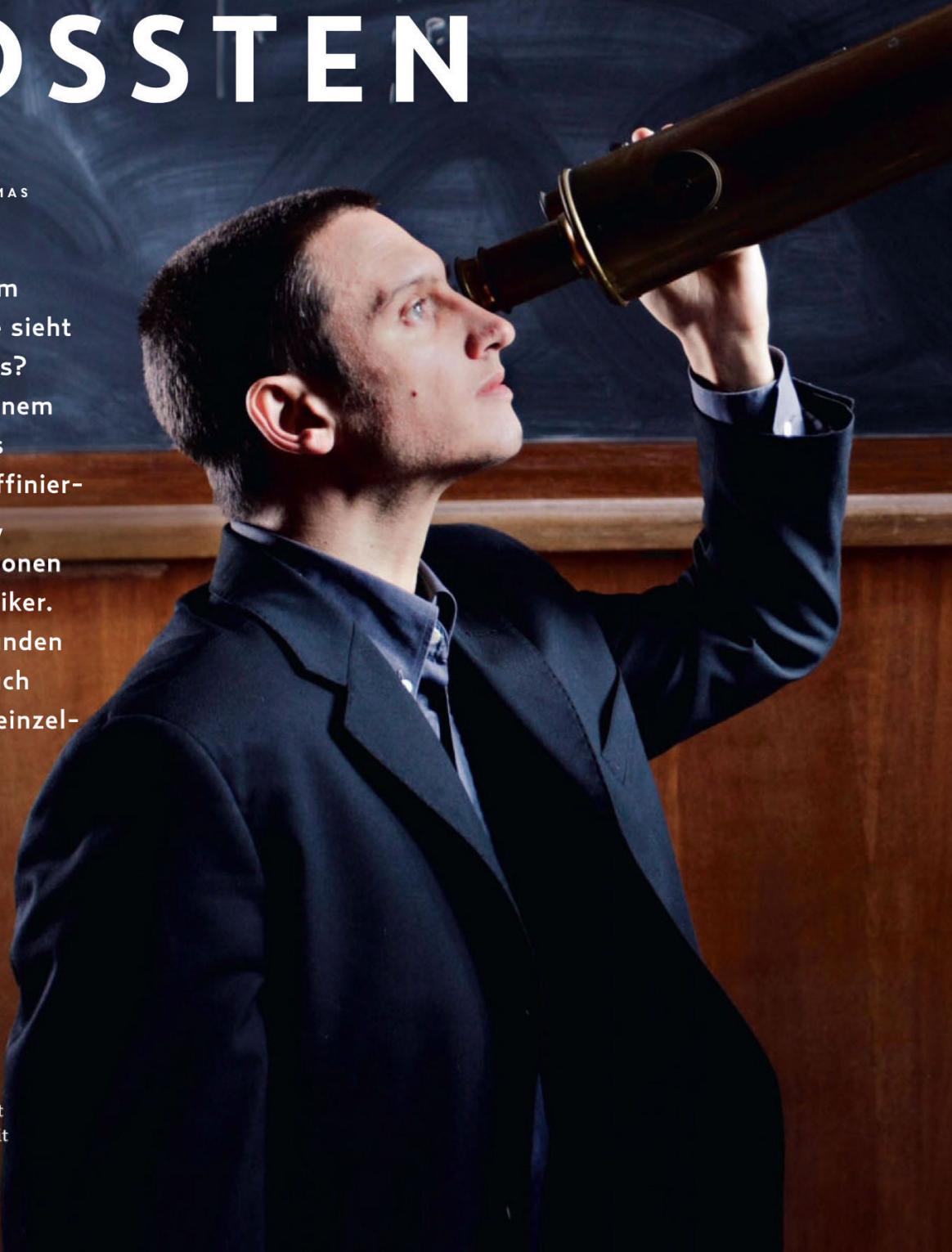
**Standardmodell** Die Vielfalt der Partikel **149**  
Vom Elektron bis zum Charm-Quark: Überblick zu allen Teilchen, aus denen unsere Welt besteht

Titelbild: Tim Wehrmann  
In Bezug auf etliche astrophysikalische Aspekte (etwa Schwarze Löcher oder den Urknall) gibt es unterschiedliche Modelle und Erklärungsansätze, die sich teils widersprechen. Die Beiträge in diesem Heft orientieren sich an den jeweils gängigsten Theorien und berücksichtigen dabei stets neueste Forschungsergebnisse.

# VOM KLEINSTEN UND VOM GRÖSSTEN

PROTOKOLLE: OLAF TARMAS

Wie ist das Universum entstanden? Und wie sieht der Kosmos heute aus? Für die Suche nach einem 6 detailreichen Bild des Weltalls bedarf es raffinierter Messinstrumente, aufwendiger Simulationen und Tausender Techniker. Doch noch immer gründen neue Erkenntnisse auch auf der Geisteskraft einzelner, herausragender Menschen



Der Astronom Dr. Massimo Meneghetti, Jg. 1974, erforscht an der Universität Bologna weit entfernte Sternenarchipele



Massimo Meneghetti, Galaxienforscher, Italien

## Das Rätsel der Dunklen Materie

**M** eine Forschung fühlt sich oft an wie ein Hobby. Ich empfinde geradezu Entspannung beim konzentrierten Grübeln: Wenn ich in Berechnungen vertieft bin, vergesse ich schlicht die Zeit. Die Daten für meine Forschung bekomme ich von Teleskopen geliefert. Anhand der Zahlen errechne ich Modelle, mit denen wir Aufbau und Eigenschaften sehr weit entfernter Galaxien und Galaxienhaufen verstehen können.

Besonders interessiert mich der Gravitationslinsen-Effekt. Er entsteht dadurch, dass das Licht weit entfernter Himmelskörper auf dem Weg zur Erde durch die Schwerkraft großer Massen, etwa Galaxienhaufen, abgelenkt wird – ähnlich wie durch eine optische Linse. Dank dieses Effekts können wir weit entfernte Objekte sehen, deren Licht sonst zu schwach wäre.

Anhand der Ablenkung von Lichtstrahlen vermögen wir sogar zu erkennen, wo im All sich die mysteriöse Dunkle Materie ballt – denn manche optischen Verzerrungen weisen auf sie hin. 2020 wird die Europäische Raumfahrtagentur ESA das

Weltraumteleskop Euklid ins All schießen, das weitere Aufklärung über die Dunkle Materie bringen soll.

Dafür bereite ich die Rechenmodelle vor, mit denen wir die neuen Daten dann verarbeiten können. Natürlich tue ich das als Mitglied eines europaweiten Teams: Forschung heute bedeutet nicht, als einsames Genie in seinem Büro zu sitzen, sondern vernetzt in Projekten zu arbeiten, mit wöchentlichen Telefonkonferenzen und Treffen in ganz Europa.

Bei aller Technik und allen Super-Teleskopen: Der Blick in einen natürlichen Sternenhimmel hat etwas unvergleichbar Greifendes.

Ein Freund meines Vaters war ebenfalls Astronom. Als Sechsjähriger ging ich einmal mit ihm unter einem grandiosen Nachthimmel spazieren. Das einzige, was er sagte, als wir beide nach oben blickten, war: „Ich fühle mich überwältigt.“

Und genauso geht es mir noch heute angesichts ferner Galaxien oder jener Myriaden Sterne, die nachts das Firmament zum Glitzern bringen.



Die Italienerin Dr. Violette Impellizzeri, Jg. 1977, betreut das weltweit größte Radioteleskop ALMA in der chilenischen Atacama-Wüste



Violette Impellizzeri, Radio-Astronomin, Chile

## Auf der Spur der Schwarzen Löcher

**M**it ALMA, einem Verbund aus 66 Einzel-Teleskopen, die auf einem 5000 Meter hoch gelegenen Plateau in der Atacama stehen, kann man weiter und schärfer sehen als mit jedem anderen Teleskop der Erde.

Schon als Studentin habe ich die Pioniere unter den Astrophysikern bewundert, die immer an der Grenze der Erkenntnismöglichkeiten ihrer Zeit gearbeitet haben. Zum Beispiel die Astronomin Jill Tarter, die sich mit der Suche nach außerirdischem Leben befasste.

Als ich 2012 die Möglichkeit bekam, ALMA mit einzurichten, sah ich meine Chance, in ähnliche Grenzbereiche vorzustoßen. Zunächst war ich damit betraut, die hochpräzisen Antennen zu kalibrieren – eine heikle Aufgabe. Immer wieder mussten wir die teuren Teleskope schwenken und neu justieren. So glich die Ausrichtung von 66 Einzelschüsseln einem Tanz, einem Teleskop-Ballett.

Die Hochebene, auf der die Anlage steht, ist ein Ort, der nicht mehr von dieser Welt zu sein scheint. Nachts ist der Himmel mit Sternen übergossen, man sieht die Milchstraße so deutlich wie nirgendwo sonst auf der Erde. Selbst tagsüber schimmert das Schwarz des Weltalls durch das Blau des Himmels.

Die Wüstenluft ist in dieser Höhe extrem dünn und trocken – perfekt für Himmelsbeobachtungen. Aber für körperliche Arbeiten braucht man eine Sauerstoffmaske, man ermüdet schnell und hat ständig gereizte Atemwege.

Das Kontrollzentrum des Observatoriums liegt einige Kilometer entfernt auf 3000 Meter Höhe. Dort arbeite ich jeweils für acht Tage am Stück, oft bis zu 16 Stunden pro Tag, bevor ich völlig übermüdet zurück ins Flachland fahre, um mich eine Woche zu erholen.

Meine Aufgabe ist es, die vielen Beobachtungsaufträge von Universitäten und astronomischen Instituten aus aller Welt technisch umzusetzen. Aber ich habe als Wissenschaftlerin natürlich auch noch ein eigenes Projekt. Ich bin seit jeher fasziniert von Schwarzen Löchern. Manche sind unvorstellbar klein, andere von so gewaltiger Kraft, dass ganze Galaxien um sie herumkreisen.

Ich arbeite daran, ihnen mit einer besonderen Messmethode näherzukommen: Ich analysiere Strahlen im Mikrowellenbereich, die große Wasserstoffwolken am Rande Schwarzer Löcher aussenden.

Als Astronomin fühle ich mich vor allem durch dieses Projekt meinen Pionier-Vorbildern verbunden. Allerdings merke ich, wie sehr sich die Forschung seither verändert hat: Die Zeit der herausragenden Einzelkämpfer ist weitgehend vorbei, heute arbeiten wir mit ganzen Wissenschaftler-Netzwerken an riesigen Projekten wie ALMA, die zudem enorme Summen Geld verschlingen.

Der Druck, Resultate zu erzielen, ist heutzutage unglaublich hoch, die Freiheit, eigene Forschung oder inspirierende Lehre zu betreiben, schrumpft dagegen – leider.

Christian Spiering, Physiker, Deutschland

## Geisterteilchen aus dem Kosmos

Eine Art Erweckungserlebnis war für mich die Beobachtung einer Supernova in der Großen Magellan'schen Wolke, unserer Nachbargalaxie. Das war 1987. Noch bevor der Lichtblitz der Sternenexplosion auf der Erde wahrgenommen wurde, waren weltweit zwei Dutzend Neutrinos registriert worden.

Wegen ihrer geringen Reaktionsneigung hatten sie als einzige Teilchen dem extrem dichten kollabierten Stern entweichen können und gaben uns nun Auskunft über die Temperatur in dessen Innerem. Diese kosmischen Informationsträger wollte auch ich untersuchen.

Mein Interesse hatten die geisterhaften Teilchen schon früh geweckt: Als Student hatte ich den Science-Fiction-Roman „Die Stimme des Herrn“ des Polen Stanisław Lem gelesen, in dem eine außerirdische Zivilisation Neutrinos für die Kommunikation zu nutzen scheint. Nicht dass ich so etwas für wahrscheinlich hielt – aber verrückt genug, um für mich anziehend zu sein, war es allemal.

Der Versuch, kosmische Neutrinos aus extremen Entfernungen nachzuweisen, ist ein Abenteuer. Neutrino-Detektoren sind hochsensible Anlagen, die tief unter der Erde, unter Wasser oder im Eis installiert werden müssen, um sie gegen andere Strahlung abzuschirmen. 1988 schloss ich mich einem Projekt an, bei dem ein Neutrino-Detektor in ein Kilometer Tiefe im Baikalsee in Sibirien installiert werden sollte.

Arbeit bei minus 25 Grad auf dem winterlichen Eis, das war nicht nur eine körperliche Herausforderung, sondern auch ein großartiges Erlebnis, bei

dem man endlich nicht nur im Labor oder am Rechner saß.

Später verlagerte ich meinen Schwerpunkt an den geografischen Südpol, wo beim Projekt IceCube mehr als 5000 Sensoren im kilometerdicken Eispanzer eingeschmolzen wurden. Bei dem amerikanisch-schwedischen Vorläuferprojekt stiegen wir 1994 ein, IceCube selbst wurde von 2004 bis 2010 installiert. Als wir Ende 2012 noch immer keine extraterrestrischen Neutrinos entdeckt hatten, bekam ich allerdings ein mulmiges Gefühl: Waren wir selbst mit diesem Projekt der Superlative noch zu kurz gesprungen, war auch IceCube mit seinen 270 Millionen Dollar Baukosten noch zu klein?

Dann endlich zeichneten unsere Sensoren zwei wirklich gewaltige Lichtblitze auf: Hinweise auf die kosmischen Neutrinos. Von da an dauerte es noch 18 Monate, bis das Ergebnis hieb- und stichfest war. In dieser Zeit waren wir sehr vorsichtig mit Erfolgsmeldungen.

Denn zu den größten Unarten der Forschung zählen vorschnelle Verkündigungen, die sich dann als nicht haltbar erweisen. Ohnehin gibt es selten Momente, in denen die Sekt-korken knallen.

Wir sind Dickbrettbohrer: Ich habe 1988 auf diesem Gebiet angefangen, und es dauerte 25 Jahre, bis wir fündig wurden. Das steht man ohne Ausdauer, ausgeprägte Neugier und Begeisterungsfähigkeit und vor allem ohne ebenso verrückte Mitarbeiter nicht durch.

Alles in allem kann ich sagen: Ich bin dankbar, dass ich ein solches Stück spannender Forschung mitgestalten durfte.





11

Prof. Christian Spiering,  
Jg. 1948, leitete das Deutsche  
Elektronen-Synchrotron am  
Standort Zeuthen in Brandenburg

Lisa Randall, Theoretische Physikerin, USA

## Die geheimen Gesetze des Universums

Der Kosmos erscheint mitunter wie ein sehr unordentlicher Ort: Materie ballt sich auf eine Weise zusammen, die wir nicht durchschauen; Galaxien verhalten sich anders, als sie es tun würden, wenn sie nur aus gewöhnlicher Materie bestünden. Es stellt uns vor viele Rätsel. Das gefällt mir. Schon als Schülerin habe ich an komplizierten Gleichungen geknöpft, bis ich sie gelöst hatte.

Heute faszinieren mich Fragen wie: Woraus besteht Materie? Wie ist der Raum strukturiert? Es geht darum, Ideen zu entwickeln, die einen tieferen Einblick in die Natur des Alls erlauben und verifizierbar sind.

1999 habe ich mit einem Kollegen eine solche Idee vorgestellt. Sie beschreibt das Universum als ein gekrümmtes Raum-Zeit-Gebilde, in das eine fünfte, für uns nicht zugängliche Dimension eingelagert ist.

Allerdings hapert es am experimentellen Nachweis dieser Theorie: Der große Teilchenbeschleuniger des CERN bei Genf scheint nicht genügend Energie aufzubringen, um bestimmte Vorhersagen über das Verhalten von Elementarteilchen bestätigen zu können. Also eine Sackgasse? Noch wissen wir es nicht.

Mein Büro in Harvard ist noch unordentlicher als das Universum: Auch hier klumpt Materie nach undurchschaubaren Gesetzen zusammen – Stapel von Büchern und Artikeln, die ich alle noch lesen will. Mitte drin eine Couch und eine Tafel. Ich liebe es, in dieser Atmosphäre mit Kollegen über abstrakte Themen zu diskutieren. Momentan beschäftigen wir uns mit der Dunklen Materie. Wir wissen, dass es sie geben

muss, aber wir können sie nicht direkt sehen. Was also ist sie?

Um solche Fragen anzugehen, muss man sich trauen, Dinge anders zu betrachten als gewohnt, neue Zusammenhänge zu sehen. Meine Forschung dreht sich um die Frage, wie man astronomische Daten verwenden kann, um tiefere Einsichten in die Natur von Dunkler Materie zu erlangen. Dabei knüpfe ich auch Verbindungen zwischen scheinbar weit entfernt liegenden Phänomenen.

In einem Buch stellte ich beispielsweise die zusammen mit einem Kollegen entwickelte Hypothese vor, dass der Kometeneinschlag, der die Dinosaurier auslöste, von einer Scheibe Dunkler Materie in der Mitte unserer Milchstraße ausgelöst worden sein könnte. Zugegeben, eine sehr spekulative These.

Viele Kritiker bemängelten dies auch, was aber am eigentlichen Zweck der Hypothese vorbei ging. Sie diente vor allem dazu, das Basiswissen über die uns bekannte Welt der Materie mit den rätselhaften Eigenschaften der Dunklen Materie zu verknüpfen. Im Grunde veranschaulichte sie eine derzeitige Vermutung: dass sich eine hochverdichtete Schicht Dunkler Materie in der Mittelachse unserer Galaxie befindet und Auswirkungen auf unsere Welt hat.

Jede Theoriebildung beginnt mit einer Hypothese. Ich habe schon oft an Problemen herumgerechnet, die kompliziert schienen, bis ich plötzlich auf eine ganz einfache Lösung kam. Es gibt nichts Schöneres.

Dann erscheint mir das Universum für einen Augenblick wie ein Ort, in dem doch große Ordnung herrscht.

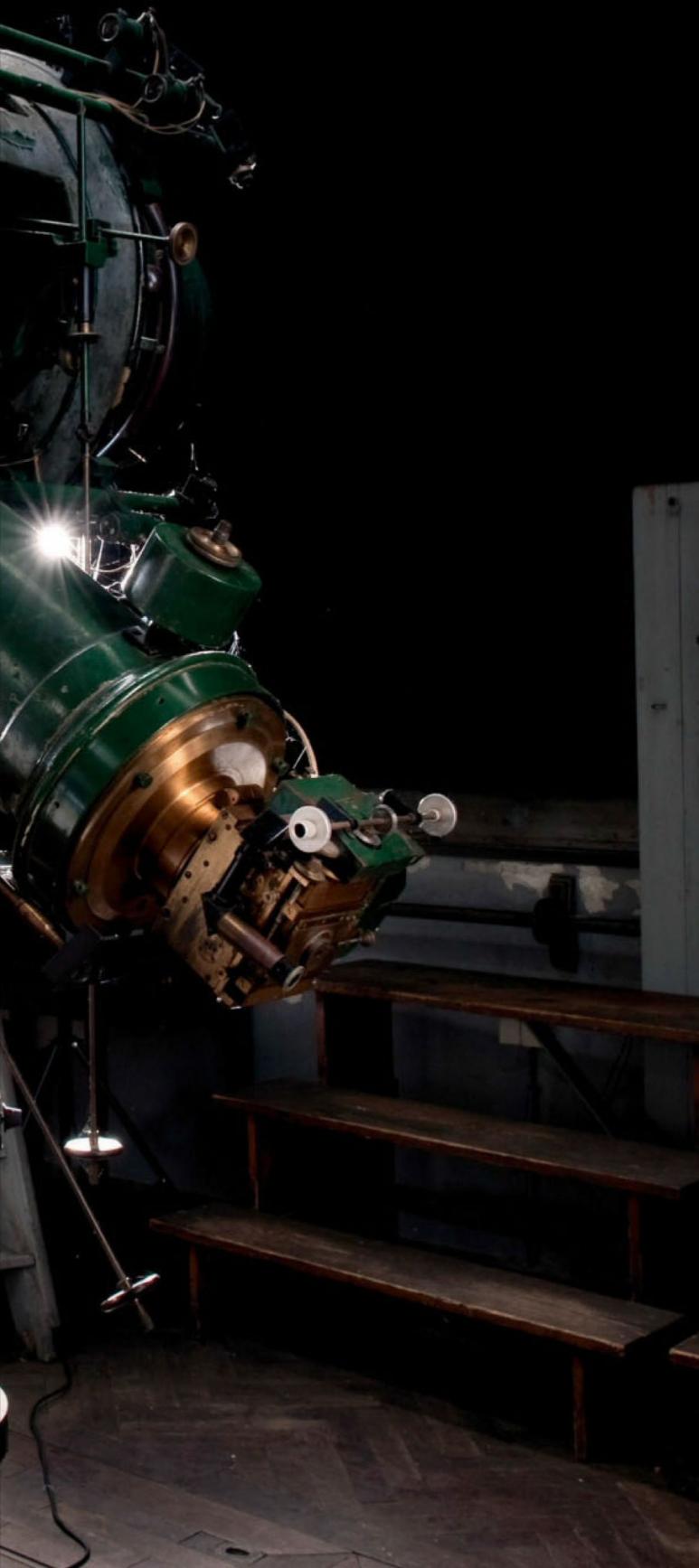




Prof. Lisa Randall, Jg. 1962,  
forscht an der Harvard  
University in den USA und ist  
eine der weltweit führenden  
theoretischen Physikerinnen



Prof. Harald Lesch, Jg. 1960,  
lehrt Theoretische Astrophysik  
an der Ludwig-Maximilians-  
Universität München



Harald Lesch, Astrophysiker, Deutschland

## Von der Ordnung zum Chaos

Ich bin mit so etwas wie der Gnade des großen Staunens gesegnet. Auch nach vier Jahrzehnten in der Astrophysik starre ich überwältigt und voller Freude in den Sternenhimmel. Am liebsten auf das Sternbild Orion mit seinem Stern Betelgeuze, der möglicherweise schon vor langer Zeit explodiert ist – wir wissen es nur noch nicht, weil der Lichtblitz so lange zur Erde unterwegs ist.

Diese Faszination für das Weltall habe ich mir aus Kindertagen bewahrt. Ich war neun Jahre alt, als Neil Armstrong den Mond betrat. Noch heute hängt ein großes Foto von ihm in meinem Büro, das sein Kamerad Buzz Aldrin aufgenommen hat. Ich fand diese Typen damals so cool, dass ich einen Brief an die NASA schrieb und mich als Astronaut bewarb. Ich bekam sogar eine Antwort: Man teilte mir mit, dass man keine Brillenträger nehme, ich solle lieber Astronomie studieren.

Das habe ich dann auch getan – was keineswegs selbstverständlich war. Ich komme aus einer Arbeiterfamilie, in der das Geld knapp war, und daher war es für mich immer wichtig, meinen Eltern verständlich zu machen, was ich an der Uni so treibe. Auf Bierdeckeln und Servietten, mit möglichst einfachen Worten habe ich versucht, ihnen die Astrophysik zu erklären.

Vielleicht hat sich damals schon angebahnt, was heute einen Großteil meiner Zeit ausmacht: als Professor und TV-Moderator interessierten Menschen komplexe Sachverhalte nahezubringen – möglichst ohne professoralen Duktus, anschaulich und zugleich wissenschaftlich korrekt.

Ich verbringe rund 70 Prozent meiner Arbeitszeit in der akademischen Lehre, 20 Prozent als Moderator und zehn Prozent in der Forschung. Dort interessiert mich vor allem eines: das Verhalten komplexer, instabiler Systeme. Schon der Urknall war ja eine unerhörte Unregelmäßigkeit, eine Instabilität. Der Aufbau von Galaxien folgt zwar bestimmten Gesetzmäßigkeiten, zugleich gibt es aber auch hier viele Irregularitäten. Diese Verschränkung aus Regeln und Chaos fasziniert mich.

Seit einigen Jahren setze ich mich mit dem Einfluss des Menschen auf das Klima auseinander. Ich nutze für Vorkommnisse in der Erdatmosphäre die gleichen Formeln wie für die Berechnung von Eruptionen in anderen Galaxien. Und ich stelle mir ähnliche Fragen: Wo liegt der Kipp-Punkt eines komplexen Systems, an dem es instabil wird und unumkehrbar in einen anderen Zustand springt?

Infofern beschäftige ich mich jetzt mit zunehmend relevanten Themen. Astrophysiker sind ja bei vielen Menschen beliebt, weil sie aufregende Dinge über entfernte Welten berichten – die aber keine Konsequenz für den Alltag haben.

Das ist anders, wenn ich mich zur Zukunft unseres Planeten äußere: Da werde ich gleich viel kritischer beäugt.

Und doch zieht es mich immer wieder in meine alten Themenfelder zurück, etwa um ein Buch über die Entstehung unseres Sonnensystems zu schreiben. Oder, wie vor wenigen Jahren, als ich bei einer TV-Aufzeichnung mit dem Helden meiner Jugend einen Wodka trinken konnte: Neil Armstrong.

Nina Lanza, Planetenforscherin, USA

## Aufbruch in fremde Welten

Ich war sechs, als meine Eltern mich zu einem astronomischen Vortrag mitnahmen. Es war das Jahr, als der Halley'sche Komet an der Erde vorbeizog. Von dem Vortrag habe ich nicht viel verstanden – aber als ich durch ein Teleskop den Kometen beobachten durfte, war ich in den Bann geschlagen. Mir wurde bewusst, dass der Himmel keine Kuppel ist, sondern ein Raum, durch den sich Körper bewegen. Ich nahm mir vor, Astronomin zu werden und fremde Planeten zu erkunden.

Heute habe ich genau das erreicht: Mit dem Rover „Curiosity“ erforsche ich die Oberfläche des Mars. Ich steuere das wohl coolste Instrument dieses Gefährts, die „ChemCam“ – eine Kombination aus einem leistungsstarken Spezial-Laser und mehreren Spektrometern, die an den rund zwei Meter hohen Mast des Rovers montiert sind.

Mit dem Laser ziele ich auf Marsgestein; der Strahl erzeugt Temperaturen, die höher sind als an der Oberfläche der Sonne. Dadurch verdampft die Materie zu einem Plasma, von dem wiederum bestimmte Lichtemissionen ausgehen. Anhand des Spektrums und der Intensität dieses Lichtes kann das Spektrometer feststellen, um welche Art von Gestein es sich handelt.

Gleich die erste Probe, die wir an der Landestelle von „Curiosity“ nahmen, barg eine Sensation: Wir hatten mit vulkanischem Basaltgestein gerechnet, fanden aber ein Konglomerat aus Sediment- und verschiedenen Gesteinsarten, die nur durch Wassereinwirkungen zu stande gekommen sein können.

Damit hatten wir den geologischen Nachweis erbracht,

dass es einmal flüssiges Wasser auf dem Mars gegeben haben muss. Das wiederum ist eine wichtige Voraussetzung für das Ziel unserer Mission: herauszufinden, ob der Mars einst habitabel, also für Leben geeignet gewesen ist.

Der aufregendste Tag meiner Karriere aber war die Landung von „Curiosity“ am 6. August 2012. Nach Jahren der Vorbereitung und einer Reise von 560 Millionen Kilometern war das Absetzen des Rovers auf dem Mars der alles entscheidende Moment der Mission.

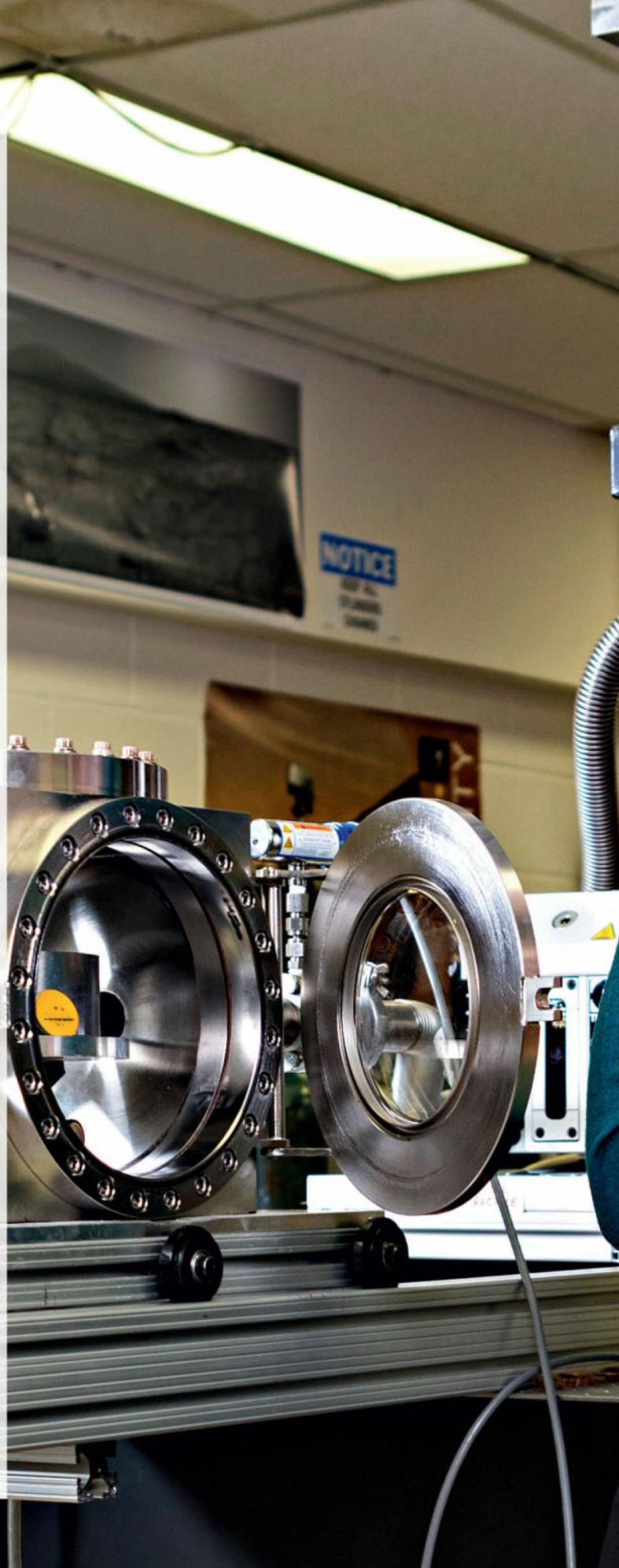
Die Signale von „Curiosity“ trafen jeweils mit sieben Minuten Zeitverzögerung ein – es waren die längsten Minuten meines Lebens. Ich war so nervös und angespannt, dass ich während der Landephase die meiste Zeit händeringend und bangend auf dem Boden des Kontrollzentrums kniete.

Als schließlich klar wurde, dass alles glatt gegangen war, war der Jubel unbeschreiblich. Wir sind alle ausgeflippt vor Freude – und mussten doch im nächsten Moment wieder hochkonzentriert an die Arbeit, um den Rover auf der Marsoberfläche startklar zu machen.

Von diesem Moment an lebten wir drei Monate völlig im Rhythmus der Marszeit, das heißt mit 25-Stunden-Tagen.

Der Beginn meiner Arbeitstage verschob sich dadurch immer weiter in die Nacht hinein. Aber diese erste Zeit war so aufregend, dass das kaum ins Gewicht fiel.

Im Jahr 2020 wird dann der nächste Rover zum Mars reisen und die Arbeit von „Curiosity“ fortsetzen. Und ich möchte, keine Frage, wieder dabei sein.



A portrait of Dr. Nina Lanza, a woman with short, light-colored hair, smiling and standing in a laboratory. She is wearing a teal long-sleeved shirt and has her arms crossed. The background shows laboratory equipment, including a large metal frame structure and a workbench with various tools and a computer monitor. A text overlay is positioned in the upper right corner of the image.

Die Geologin Dr. Nina Lanza,  
Jg. 1981, arbeitet am Los Alamos  
National Laboratory im  
US-Bundesstaat New Mexico

Andrei Linde, Astrophysiker, USA

## Wenn das Weltall Blasen wirft

Den bedeutendsten Schritt als Forscher machte ich 1986, in der schlimmsten Zeit meines Lebens. Ich fühlte mich krank und depressiv, lag in meiner Moskauer Wohnung im Bett und las nur Kriminalromane.

Es war die Zeit der Perestroika – ein großer Umbau der Gesellschaft, der für Wissenschaftler aber Stillstand zur Folge hatte, denn es gab noch keine neuen Regeln. Ein Jahr lang konnte ich nichts veröffentlichen, hatte kaum Kontakt zu Kollegen im Ausland, fühlte mich isoliert und kaltgestellt.

Da wurde ich gebeten, in Italien einen populärwissenschaftlichen Vortrag über Astronomie zu halten und zuvor eine Zusammenfassung einzureichen. Das interessierte mich nicht, ich meldete mich krank. Doch mein Institut setzte mich unter Druck, und so quälte ich mich am Abend vor Ablauf der Frist an den Schreibtisch.

Dort wurde mir schlagartig klar, welch große Chance sich mir bot: Wenn es mir gelänge, meine Erkenntnisse der letzten Jahre in einem Aufsatz zusammenzufassen, könnte ich den zusammen mit meinem Vortrag nach Italien schicken – und meine Isolation wäre beendet.

Ich legte meine ganze Kraft in diesen Moment – und formulierte binnen 30 Minuten die „ewige chaotische Inflationstheorie“ zur Entstehung des Universums. Es war der wohl wichtigste Durchbruch in meinem wissenschaftlichen Denken.

Im Nachhinein kommt es mir vor, als sei mein Intellekt durch das Jahr der Isolation eine aufs Engste zusammengedrückte Sprungfeder gewesen – als der Druck auf einmal nachließ,

machte sie einen gewaltigen Satz. Mein Lebensmut und mein Forscherdrang waren wie durch ein Wunder wieder hergestellt.

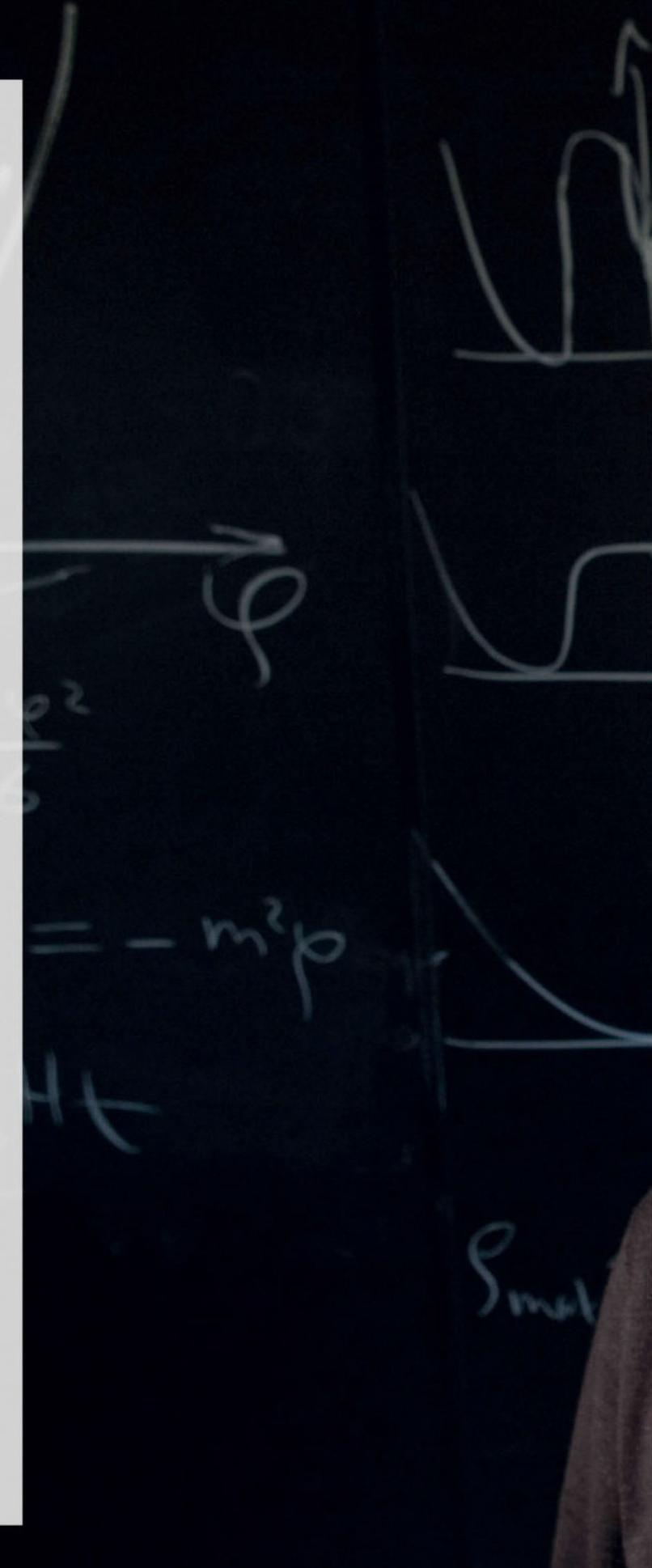
Meine Theorie besagt im Wesentlichen, dass das Weltall nach dem Urknall nicht gleichmäßig expandierte, sondern sich „inflationär“, also sprunghaft erweiterte – und dass diese Entwicklung in einigen Teilen des Universums bis heute anhält.

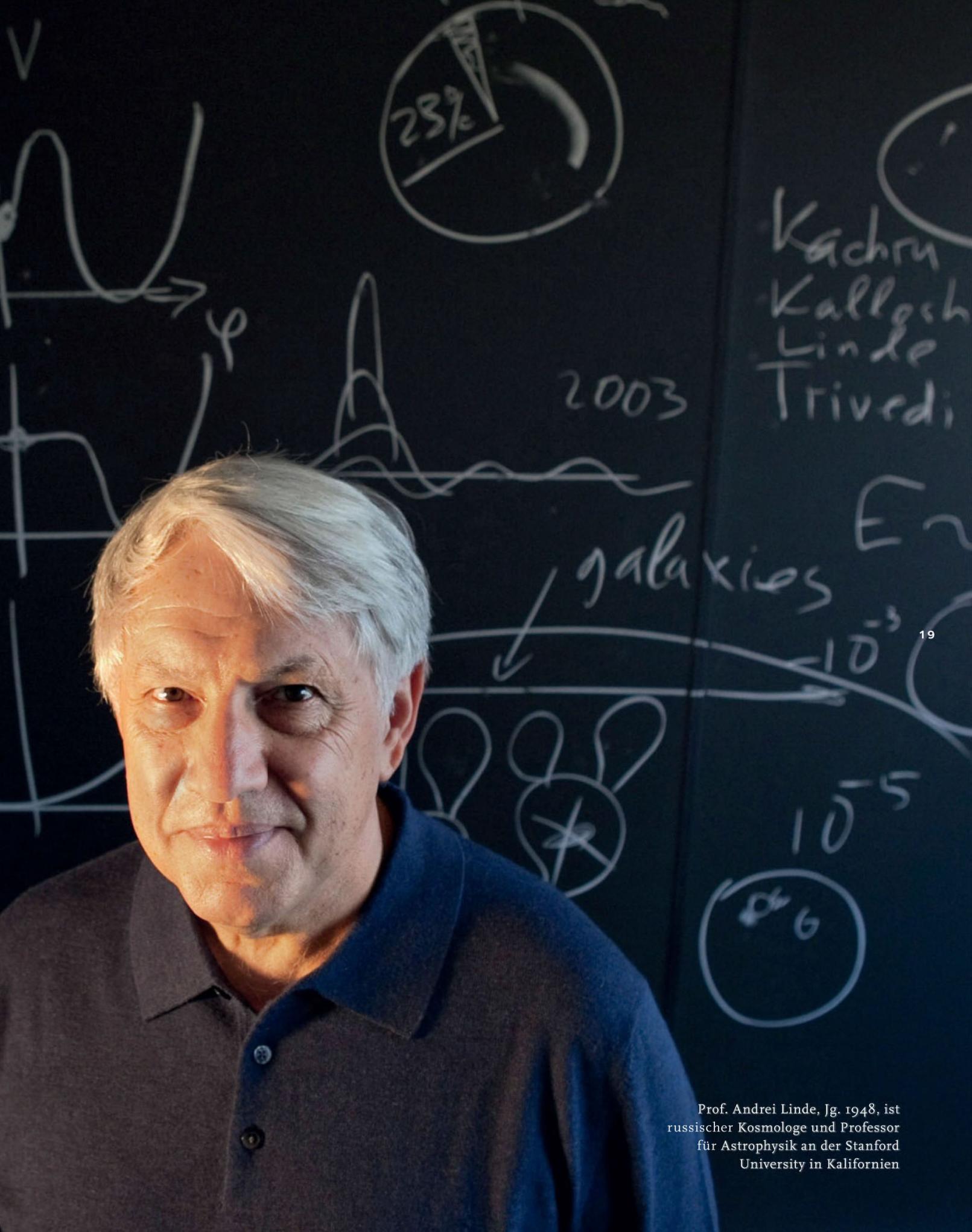
Der Zusatz „chaotisch“ bedeutet, dass die Geschwindigkeit dieser Expansion in verschiedenen Teilen des Alls unterschiedlich hoch ist und dass es Bereiche gibt, in denen es exponentiell schneller wächst als in anderen. Diese Teile des Universums vergrößern sich wie schnell anschwellende Blasen, die so riesig werden, dass die darin lebenden Bewohner nur ihr eigenes Universum sehen können und sonst nichts.

Das bedeutet, dass wir in einem „Multiversum“ leben – auch wenn wir die Existenz der anderen Universen vielleicht nie werden bestätigen können. Ich gebe zu, dass die Theorie wie ein Science-Fiction-Trick anmutet. Aber sie löst viele Fragen, die das Urknall-Modell nicht beantworten kann. Und sie findet immer mehr Anhänger.

Zwar war die Inflationstheorie und besonders die Vorstellung eines Multiversums anfangs sehr umstritten, doch die Menschheit hat immer wieder wissenschaftliche Revolutionen erlebt und ihr Verständnis unserer Welt immer weiter vertieft.

Ich bin sicher, dass die Inflationstheorie im Wesentlichen richtig ist. Aber ich weiß auch, dass einige ihrer Bestandteile eines Tages von einer noch besseren Theorie ersetzt werden.





Prof. Andrei Linde, Jg. 1948, ist  
russischer Kosmologe und Professor  
für Astrophysik an der Stanford  
University in Kalifornien

LISA KALTENEGGER, ASTRONOMIN, USA

## Die Suche nach der zweiten Erde

Ich erinnere mich noch genau daran, wie ich als Jugendliche ein Foto der Erde sah, das die Raumsonde Voyager 1 aus großer Entfernung aufgenommen hatte. Darauf erschien unser Planet als blassblauer Punkt inmitten des Alls. Wunderschön – und gleichzeitig verletzlich.

Dieser Anblick hat mich tief berührt. Und schon damals fragte ich mich, ob die Erde einzigartig ist. Oder ob es im All noch andere Himmelskörper gibt, die Leben beherbergen.

Inzwischen sind etwa 3500 Exoplaneten bekannt. Viele dieser fernen Welten kreisen in der habitablen Zone um ihre jeweilige Sonne – sie sind also weder zu nah und zu heiß noch zu fern und zu kalt für lebende Organismen –, und rund 30 davon sind kleine Planeten, die unserer Erde ähnlich sein könnten.

Diese fernen Welten zu erforschen und nach Spuren von Leben Ausschau zu halten ist eines der größten Abenteuer unserer Zeit. Eine Revolution unseres Weltbildes, wohl nur mit der kopernikanischen Wende vergleichbar: Unser Platz im Universum wird eingebettet in einen großen kosmischen Zusammenhang.

Mit dem James Webb Space Telescope, das 2018 in den Orbit geschossen werden soll, und dem European Extremely Large Telescope, das 2024 in Chile in Betrieb gehen wird, können wir erstmals die Atmosphäre von kleineren, erdähnlichen Exoplaneten in der habitablen Zone analysieren. Finden wir eine charakteristische Zusammensetzung der Atmosphäre – unter anderem aus Sauerstoff und Methan –, haben wir die ersten Hinweise auf Leben entdeckt.

Als Studentin bin ich 1998 nach Korsika geflogen und teilte mir mit zwei Kommilitonen ein Zimmer, um an einer der ersten Konferenzen überhaupt zum Thema Exoplaneten teilzunehmen. Alle in diesem jungen Forschungsgebiet waren ebenso enthusiastisch wie ich.

Diese Konferenz inspirierte mich, und ich bewarb mich um eine Stelle für junge Forscher bei der European Space Agency, wo ich meine Ausbildung als Ingenieurin und Wissenschaftlerin in die Planung einer Weltraummission einbrachte. Dann ging es nach Harvard, danach an das Max-Planck-Institut für Astronomie in Heidelberg und dann nach Cornell auf die Suche nach fernen Welten.

Seit 2015 leite ich das Carl-Sagan-Institut an der New Yorker Cornell University, das ich gegründet habe, um der Frage nachzugehen, wie wir Leben innerhalb und außerhalb unseres Sonnensystems aufspüren können. Es ist nach jenem Astrophysiker benannt, dem Leiter des Teams, das die Raumsonde Voyager mit Datenplatten ausstattete, die eine Grußbotschaft für mögliche Bewohner des Weltalls enthalten.

Auf seinen Vorschlag hin ließ die NASA damals Voyager jene Aufnahme unserer Erde machen, die noch heute das am weitesten entfernte Bild unseres Heimatplaneten ist und ihn als blassblauen Punkt vor den Tiefen des Weltalls zeigt.

Wir leben in einer Zeit, in der wir die ersten Aufnahmen von Welten, die um andere Sonnen kreisen, zum Album der Planeten hinzufügen können – und hoffentlich bald auch die Bilder anderer Erden.



Die Österreicherin Prof. Lisa Kaltenegger,  
Jg. 1977, leitet in New York das  
Carl-Sagan-Institut zur Erforschung  
extraterrestrischen Lebens

MARTIN ALEKSA, TEILCHENPHYSIKER, SCHWEIZ

## Vorstoß ins Allerkleinste

Zwei Höhepunkte gab es bis jetzt in meinem Forscherleben. Beide hängen mit dem Teilchenbeschleuniger Large Hadron Collider am CERN bei Genf zusammen, wo ich seit 20 Jahren forsche. Am 30. März 2010 drängte ich mich mit Hunderten Kollegen im Kontrollraum, um die erste Kollision zweier Strahlen mit Milliarden von Protonen zu verfolgen.

Wir hofften, dass beim Zusammenprall der Teilchen neue Elementarteilchen entstehen, die uns tiefere Einblicke in die Bestandteile von Materie offenbaren würden und uns etwas darüber verraten, aus welchen kleinsten Bausteinen das Universum letztlich besteht und welche Kräfte darin walten.

Es war das erste Mal, dass wir mit dem LHC zwei Protonenstrahlen nahezu auf Lichtgeschwindigkeit beschleunigten und in entgegengesetzter Richtung durch die 27 Kilometer langen Röhren jagten. Wir verringerten nach und nach den Abstand, in dem sie aneinander vorbeischossen – und ließen sie schließlich kollidieren.

Ich war für die Datennahme des ATLAS-Experiments zuständig, eines Detektors, der die Spuren des Zusammenpralls registrieren sollte.

Gespannt starnten wir auf die Monitore, die die ersten Spuren zeigen sollten – und plötzlich erschienen diese ersten Spuren der Teilchenkollisionen.

Es herrschte Champagnerstimmung im Kontrollzentrum: Wir waren in eine Welt vorgedrungen, die weit jenseits unserer Wahrnehmung liegt!

Das hat mich immer schon an der experimentellen Teilchenphysik begeistert: der

direkte Kontakt zu einem Bereich unseres Universums, dem wir uns zunächst nur durch Logik und durch mathematische Berechnungen nähern können.

Der zweite Höhepunkt kam zwei Jahre später, am 4. Juli 2012, mit dem Nachweis des Higgs-Bosons, eines völlig neuen Teilchens, das bis dahin nur in der Theorie existierte.

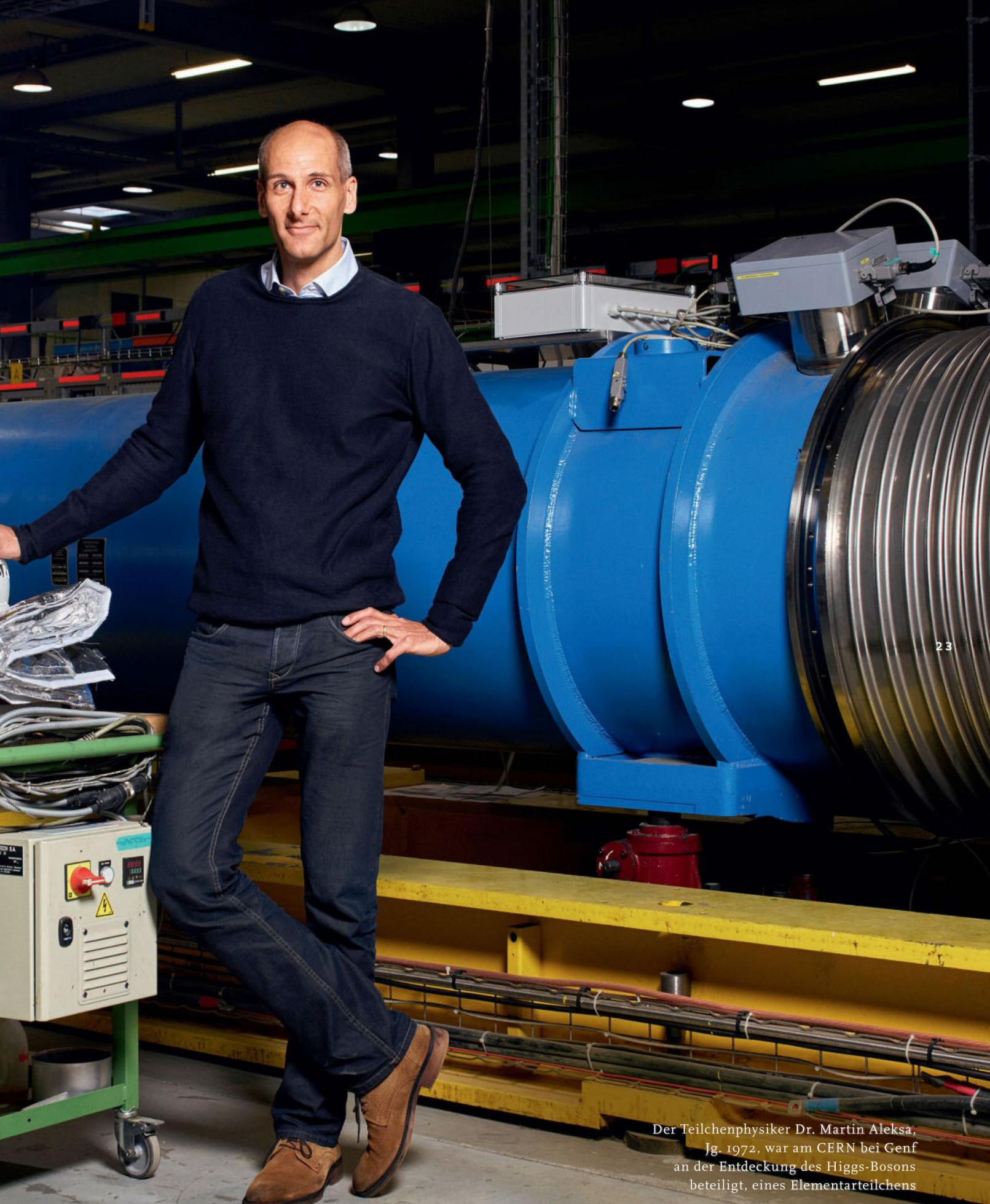
Es ist dafür verantwortlich, dass die kleinsten Bausteine der Welt eine Masse haben – und beantwortet damit eine der drängendsten Fragen zum Wesen des Universums, die Physiker seit Jahrzehnten umgetrieben hat. Das war der wissenschaftlich bislang bedeutsamste Tag in meinem Leben.

Allerdings mag ich die ruhige, stetige Arbeit am Detektor lieber als diese flirrenden Stress-Tage, an denen die Öffentlichkeit ihre Aufmerksamkeit auf uns richtet. Was ich an der Arbeit am CERN aber am meisten schätze, ist der kollegiale Geist, in dem hier Tausende Forscher zusammenarbeiten.

Allein am Betrieb und der Datenanalyse des ATLAS-Detektors sind 4000 Physiker in aller Welt beteiligt, davon etwa 300 direkt am CERN. Ich bin der gewählte Projektleiter des sogenannten „Flüssig-Argon-Kalorimeters“, das unter anderem die Energien von Photonen und Elektronen (aber auch anderer schwererer Teilchen) misst.

Als Nächstes werden wir versuchen, Hinweise auf gänzlich neue, „supersymmetrische“ Elementarteilchen zu finden – das sind besonders massereiche Partikelteilchen aller bereits bekannten Partikel, deren Existenz manche physikalischen Theorien vorhersagen.

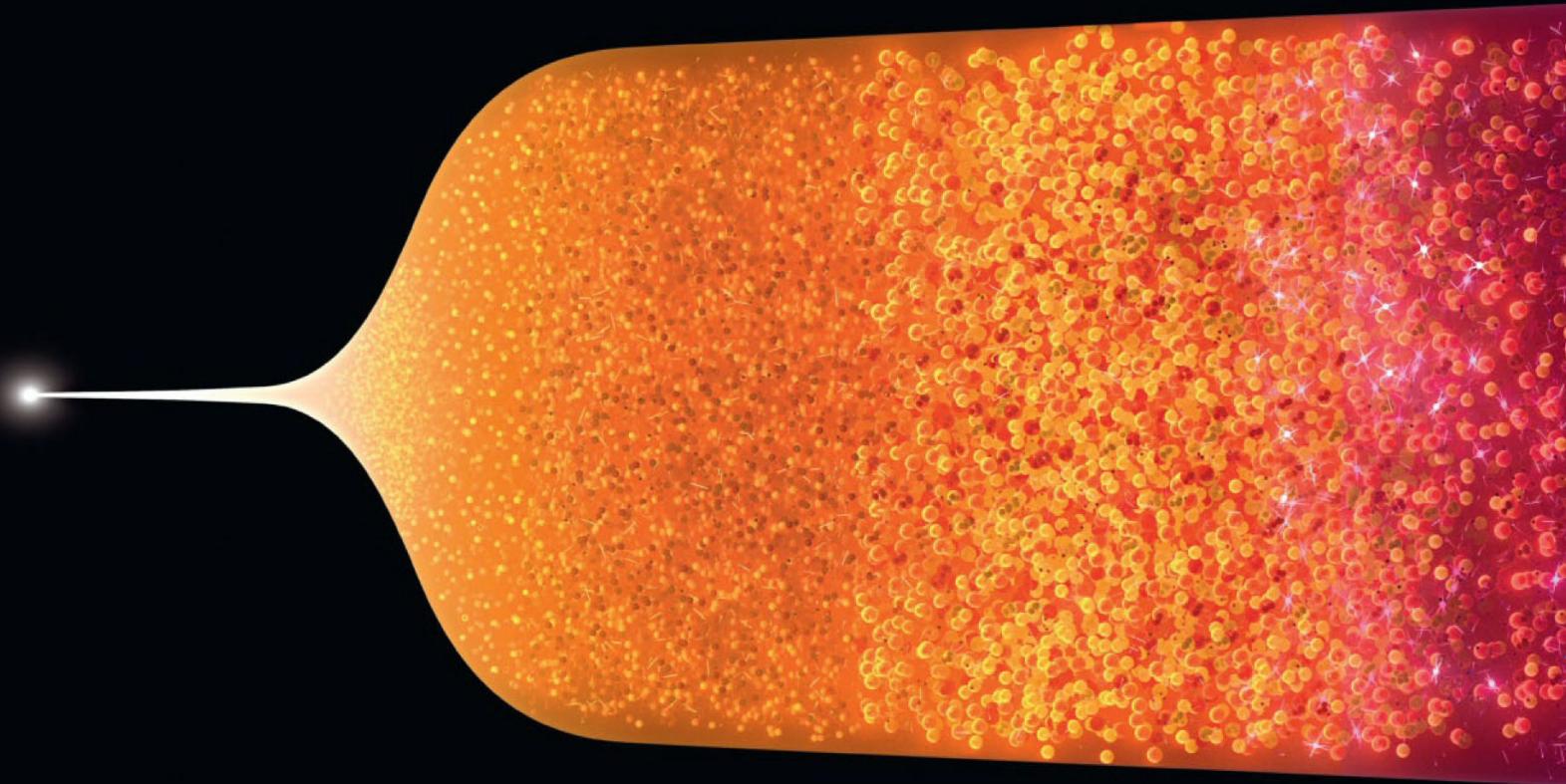




Der Teilchenphysiker Dr. Martin Alekse, Jg. 1972, war am CERN bei Genf an der Entdeckung des Higgs-Bosons beteiligt, eines Elementarteilchens

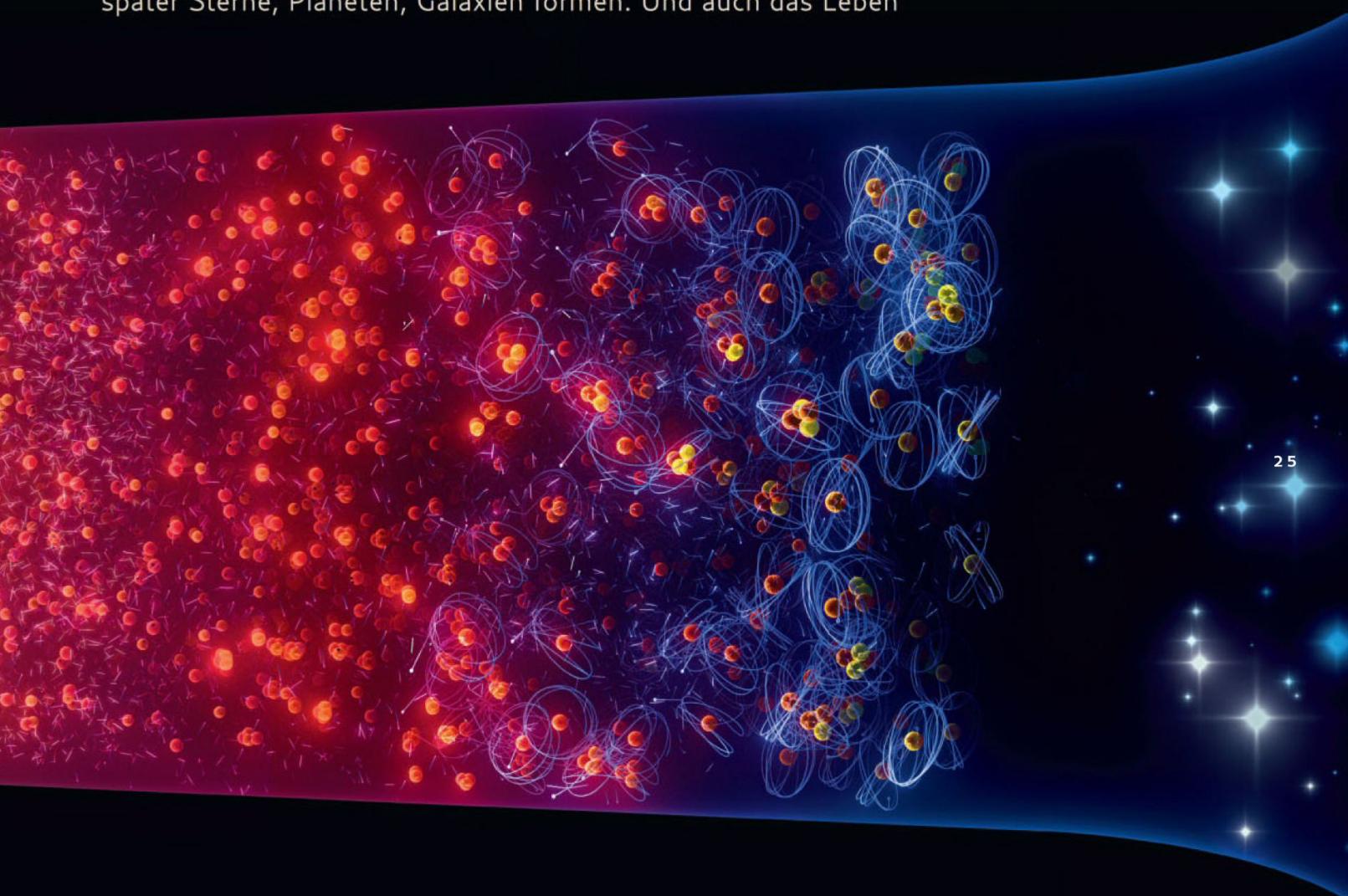
KOSMISCHE GEBURT

# DER



# URKN

Es ist das spektakulärste Ereignis aller Zeiten: jener Moment, in dem ein winziger, unvorstellbar dichter Punkt im kosmischen Nichts gleichsam explodiert und **das Universum gebiert**. Binnen Sekundenbruchteilen entstehen – so jedenfalls die gängige Theorie – Zeit, Raum sowie sämtliche Zutaten des Alls, aus denen sich später Sterne, Planeten, Galaxien formen. Und auch das Leben



# ALL

TEXT: RAINER HARF  
UND MARIA KIRADY

ILLUSTRATIONEN: TIM WEHRMANN

# M

Mount Wilson, Winter 1928. In dem Observatorium auf dem Berg nahe der kalifornischen Stadt Pasadena will der Astronom Edwin Hubble herausfinden, wie schnell sich Galaxien in der Nachbarschaft unserer Milchstraße durchs All bewegen. Dazu richtet er das in 1740 Meter Höhe montierte Spiegelteleskop – damals das größte der Welt – auf die Sternenarchipele. Das Licht wird auf eine Fotoplatte gelenkt, auf deren Oberfläche sich das Bild der Galaxien einbrennt.

26 Hubble ist an dem Observatorium angestellt und darf es für seine Forschungen nutzen. Noch ahnt er nicht, dass er auf dem Wege ist, eine der aufregendsten Entdeckungen des 20. Jahrhunderts zu machen, die eine Suche nach dem Anfang aller Dinge in Gang setzen wird.

Gemeinsam mit einem Assistenten belichtet Hubble Nacht für Nacht Fotoplatte um Fotoplatte. Oft kämpfen sie gegen Müdigkeit und die Kälte unter der offenen Kuppel des Observatoriums an.

Mit einem Spektroskop zerlegen die beiden das Licht der Sternenarchipele in verschiedene Wellenlängen. So können sie die sogenannte Rotverschiebung auf den Platten festhalten: Denn sobald sich eine Galaxie von der Erde weg bewegt, wird das Licht, das sie aussendet, in die Länge gezogen und erscheint dem Beobachter rötlicher. Anhand des Farbspektrums lässt sich so messen, wie schnell sich ein benachbartes Sternenarchipel von uns entfernt. Hubble

notiert exakt die Geschwindigkeit und Entfernung jeder einzelnen untersuchten Galaxie in einem Koordinatensystem.

Dabei fällt ihm ein verblüffender Zusammenhang auf: Ist eine Sterneninsel doppelt so weit wie eine andere von der Erde entfernt, dann bewegt sie sich auch in der Regel doppelt so rasch von ihr weg. Ist eine Galaxie viermal so weit entfernt, ist sie nahezu mit vierfacher Geschwindigkeit unterwegs. Offenbar existiert eine direkte Beziehung zwischen der Entfernung einer Galaxie und der Schnelligkeit, mit der sie sich von uns fortbewegt.

Die Galaxien treiben also nicht etwa zufällig durchs All, sondern bewegen sich von der Milchstraße weg – und zwar umso schneller, je weiter entfernt sie sind.

Und dies betrifft fast sämtliche Sterneninseln. Alle weit entfernten Galaxien im All fliegen von uns weg (nur nahe Galaxien wie etwa Andromeda bewegen sich aufgrund von Wirkungen der Schwerkraft auf die Milchstraße zu).

Das bedeutet im Umkehrschluss: Wenn alle Galaxien auseinanderdriften,

dann müssen sie einst viel dichter zusammengedrängt gewesen sein.

Mehr noch: Gemäß dieser Logik muss das gesamte Weltall einst viel kompakter und kleiner gewesen sein als heute.

Das wäre im Jahr 1928, als die Forscher noch davon ausgehen, dass der Kosmos schon ewig existiert, eine Sensation: Es würde bedeuten, dass jenes unermesslich große, magisch anmutende Reich am Firmament, das seit Jahrtausenden gleich zu bleiben scheint, offenbar alles andere als statisch ist. Es hat eine Geschichte!

Edwin Hubble selbst mag die Tragweite seiner Entdeckung schon früh erahnt haben, aber er verzichtet auf derartige kosmologische Schlussfolgerungen, als er seine Ergebnisse publiziert – sondern überlässt sie anderen Forschern.

So ist es ausgerechnet ein astronomisch gebildeter katholischer Priester, der Belgier Georges Lemaître, der eine Theorie formuliert, die den Menschen endgültig aus dem Mittelpunkt der Schöpfung verbannen wird. Er behauptet, das gesamte Universum sei einst einem

winzigen Punkt entsprungen, der noch viel kleiner war als ein Atomkern. In diesem punktförmigen Etwas (Lemaître nennt es „Uratom“, später prägen Forscher den Begriff „Singularität“) steckte unvorstellbar viel Energie. Und als es urplötzlich auseinanderflog, schuf es jenes All, das wir heute kennen.

So radikal und umstürzlerisch ist die Theorie, so absurd scheint der Gedanke, dass viele



**Edwin Hubble**  
beobachtete 1928,  
dass der Raum  
mitsamt den Galaxien  
seit Urzeiten ausein-  
anderstrebt



**Arno Penzias und  
Robert Wilson**  
entdeckten 1964 eine  
Art Echo des Urknalls:  
die kosmische  
Hintergrundstrahlung

Forscher ihn zunächst ablehnen. Einer der Gegner, der Brite Fred Hoyle, verspottet diesen dramatischen Beginn des Alls als „Big Bang“: Urknall. Er ahnt nicht, dass er einen Begriff prägt, der bald zu den bekanntesten der Welt gehören wird.

Einige Forscher aber verfolgen Lemaitres Ansatz weiter. Sie mutmaßen, dass es möglich sein müsse, den Urknall an sich zu bestätigen. So sagen sie etwa voraus, dass die ersten, in der Frühzeit des Universums entstandenen Lichtstrahlen noch heute durchs All rasen müssten.

Allerdings wären die Wellen um das 1000-Fache gestreckt, da sich der Raum, sollte die Theorie stimmen, nach dem Urknall gewaltig ausgedehnt habe. Dabei habe sich das Licht in eine Strahlung im Mikrowellenbereich verwandelt. Die müsste noch immer messbar sein. Und zwar aus allen Richtungen des Kosmos.

## E

Es dauert bis 1964, ehe eine weitere Entdeckung genau diesen Beweis liefert: Als die beiden Physiker Arno Penzias und Robert Wilson vom US-Staat New Jersey aus mit einer Riesenantenne den Himmel nach elektromagnetischen Signalen aus der Milchstraße absuchen, bemerken sie zufällig eine Mikrowellenstrahlung.

Und weil sie aus allen Richtungen auf die Antenne trifft, muss sie, so wie die Theorie besagt, aus einer Zeit stammen, in der der gesamte Kosmos von glühend heißer Materie erfüllt war. Die Strahlung wäre so eine Art Nachhall des Big Bang.

Mit ihrer Entdeckung liefern Penzias und Wilson die endgültige Bestätigung, dass unsere Welt einst im heißen Urknall geboren wurde – und geben den Auftakt zu einer völlig neuen Forschung.

Was nun folgt, ist die größte Fahndung in der Geschichte der Menschheit, der Aufbruch in eine bis dahin völlig unbekannte Welt: Wissenschaftler weltweit beschäftigen sich fortan mit der Frage, wie sich aus dem winzigen Punkt am Anfang jenes riesigen Weltall entwickeln konnte, in dem wir heute leben.

Um dem Kosmos das Geheimnis seiner Herkunft zu entlocken, richten die Forscher seither riesige Antennen gen Himmel, die bereits geringste Spuren von Strahlung detektieren. Sie schießen Satelliten ins All, die mit hochempfindlichen

---

Solange wir **nicht wissen**, ob es vor dem **Urknall** schon **etwas** gegeben hat, können wir annehmen, dass der **winzige Anfangspunkt** unseres Weltalls buchstäblich aus **Nichts heraus einfach da war**

---

Temperatursensoren und hochauflösenden Kameras weit hinausblicken und die kosmische Hintergrundstrahlung am gesamten Himmel kartieren.

Aber nicht allein an Sternen und Galaxien erforschen die Wissenschaftler den Werdegang des Alls. Um zu begreifen, was die Welt im Innersten zusammenhält, was überhaupt Materie ist, aus welchen Bausteinen sie besteht, wie diese Partikel entstanden sind und welche Kräfte zwischen ihnen wirken, bauen sie monströse Teilchenbeschleuniger, in denen sie winzige Partikel mit solcher Wucht aufeinanderprallen lassen, dass sie bersten und ihr Innerstes preisgeben (siehe Seite 136).

Und sie erstellen mithilfe von Supercomputern gigantische Simulationen, mit denen sie die Struktur des Weltalls vom Urknall, der den Berechnungen zufolge vor 13,8 Milliarden Jahren stattfand, bis zu seiner heutigen Gestalt modellieren.

Stück für Stück setzen sie ihre Ergebnisse wie Puzzleteile zu einem erstaunlich exakten Bild zusammen, bis sich gleichsam vor ihren Augen die Geschichte des Kosmos zu entfalten beginnt.

Auf diese Weise lassen sich vier übergeordnete Phasen identifizieren, in denen das All während des Urknalls – und in den ersten Millionen Jahren danach – seine Gestalt angenommen hat:

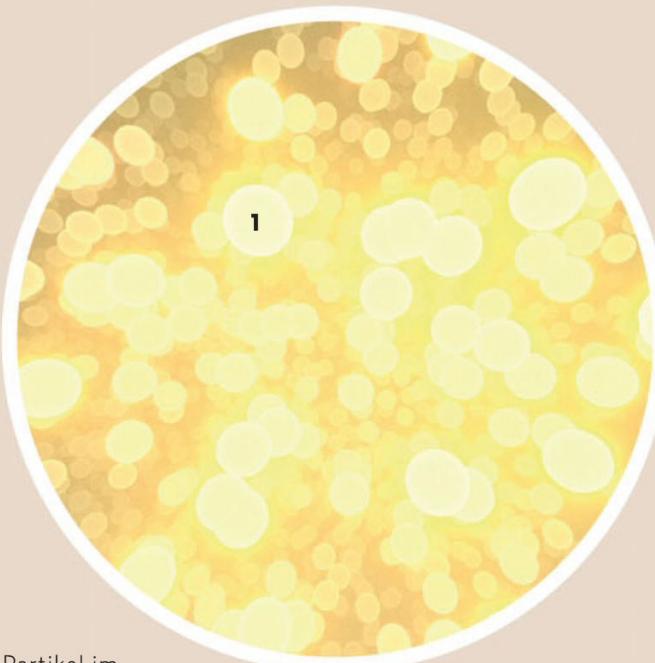
- 1. Entfaltung. Das Universum besteht zunächst aus einem winzigen Punkt, in dem das Geschehen vermutlich von einer geheimnisvollen Urkraft dirigiert wird. Plötzlich dehnt sich der Raum aus. Angetrieben wird die Expansion einer Theorie nach durch ein Feld, das zu einer extrem schnellen Aufblähung des Kosmos führt. Die Urkraft spaltet sich in drei Kräfte auf – Gravitation, starke Kernkraft, elektroschwache Kraft – und setzt dabei gewaltige Mengen an Energie frei, die die inflationäre Ausdehnung weiter beschleunigt.

- 2. Teilchengeburt. Das Universum kühlt mit zunehmender Größe ab. Die Bausteine der uns heute bekannten Welt entstehen und erhalten durch einen raffinierten Mechanismus ihre Masse. Die elektroschwache Kraft spaltet sich in die schwache Kernkraft und in die elektromagnetische Kraft auf.

- 3. Vernichtung. Die ersten komplexen Strukturen – die Bausteine der Atom-

# ENTSTEHUNG

Die Genese des Weltalls verlief in mehreren Phasen, die Forscher in den letzten Jahren immer besser



Partikel im  
heissen Urbrei der  
Planck-Ära

## 1. ENTFALTUNG\*

$0 - 10^{-33}$  SEK.

**Das Universum** ist zunächst ein winziger Punkt, viel kleiner noch als ein Atomkern. Zwar vermag kein Modell der Physiker Auskunft darüber zu geben, was genau sich darin abspielt, aber Forscher spekulieren dennoch, wie das Universum in dieser frühesten Phase, der **Planck-Ära**, beschaffen ist. So müssen im Inneren des bizarren Gebildes höllische Temperaturen herrschen. Womöglich schwirren exotische Teilchen umher (1), die von einer rätselhaften Urkraft gelenkt werden. Niemand weiß genau, wie lange dieser Urzustand anhält. Fest steht nur, dass der Punkt irgendwann in einem spektakulären Akt auseinanderfliegt und der Raum sich schlagartig ausdehnt. Schließlich trennt sich von der Urkraft die **Schwerkraft** (Seite 35) ab und stemmt sich der Ausdehnung entgegen. Doch ein mysteriöses Feld – das Inflatonfeld – lässt das All mit enormer Wucht und Schnelligkeit auseinanderdriften. Bald teilt sich der Rest der Urkraft abermals: in die elektroschwache Kraft und die starke Kernkraft. Dabei werden gewaltige Energien freigesetzt, die das Inflatonfeld speisen und die Expansion des Raumes gewaltig beschleunigen – und so poppt das kosmische Küßchen in der kurzen **Phase der Inflation** (Seite 35) zur Größe eines Medizinballs auf.

## 2. TEILCHENGEBURT

$10^{-33} - 10^{-5}$  SEK.

**Im Bruchteil** einer Sekunde zerfallen die Inflatonen. Sie zersplittern in dieser Ära in zwei Gruppen von **Elementarteilchen** (Übersicht auf Seite 149): Zu den sogenannten »Kraftteilchen« zählen etwa die Gluonen, die im Inneren von Atomkernen die starke Kernkraft übertragen. Außerdem Vorläufer von Photonen, die der elektroschwachen Kraft ihre Wirkung verleihen, sowie das Higgs-Boson, das den anderen Teilchen über einen komplexen Mechanismus ihre Masse gibt. Die Gruppe der »Materienteilchen« besteht unter anderem aus Elektronen und Quarks, die sich später zu Atomen zusammenschließen werden, sowie elektrisch neutralen Neutrinos. Außerdem bildet sich zu jedem Materienteilchen ein komplementäres Antiteilchen. Vermutlich, so die gängige Theorie, entsteht auch die bislang noch unentdeckte Dunkle Materie. Als das All schließlich so groß ist wie unser heutiges Sonnensystem, spaltet sich in der **Ära der Kräfte** die elektroschwache Kraft in die elektromagnetische Kraft und die schwache Kernkraft auf. Die Vorläufer-Photonen wandeln sich dabei zu den heutigen Lichtteilchen und den Überträgern der schwachen Kernkraft (die aber sofort zerfallen).

\* Die Phasen und Ären richten sich nach wissenschaftlichen Standards.  
Die – vereinfachende – Aufteilung in vier Kapitel erfolgte durch die Redaktion.



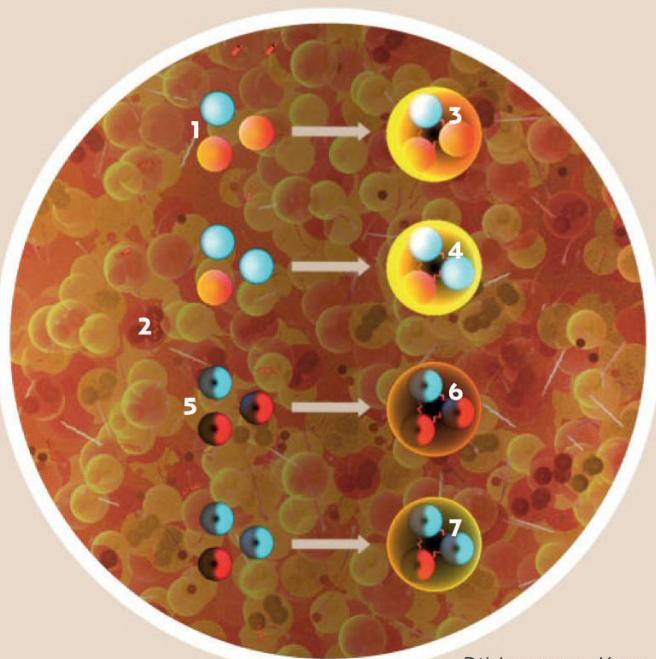
# IN VIER AKTEN

entschlüsselt haben. Alles begann vermutlich mit einem bizarr anmutenden, winzigen Gebilde

## 3. VERNICHTUNG

$10^{-5}$  SEK. – 5 MIN.

**Langsam** dehnt sich das Weltall weiter aus, bis es eine Größe von mehreren Milliarden Kilometern erreicht. Das All hat sich jetzt so weit abgekühlt, dass sich in der nun eintretenden **Phase der Kernbausteine** (rechts) erstmals stabilere Teilchen bilden. So formen etwa je drei Quarks (1), die untereinander über Gluonen (2) verbunden sind, sogenannte Protonen (3) und Neutronen (4). Und ebenso lagern sich je drei Antiquarks (5) zu Antiprotonen (6) und Antineutronen (7) zusammen. Jedoch sind die Gebilde nicht von Dauer: Treffen Materie und Antimaterie aufeinander, zerstrahlen sie in Photonen, also zu Licht. Zunächst ist die Hitze noch groß genug, um daraus wieder neue Teilchen zu formen. Doch mit zunehmender Abkühlung geschieht das immer seltener. In der **Ära der Vernichtung** (Seite 38) beginnt daher die Zahl der Protonen und Neutronen zu schwinden. Das Gleiche geschieht in der **Ära des Zerfalls** (Seite 38) mit Elektronen und Neutrinos. Nur wie durch ein Wunder überlebt ein geringer Überschuss an Materie, die Antimaterie zerstrahlt vollständig. Etliche der verbliebenen Protonen und Neutronen lagern sich schließlich zu größeren Gebilden, den **Atomkernen** (Seite 39), zusammen.

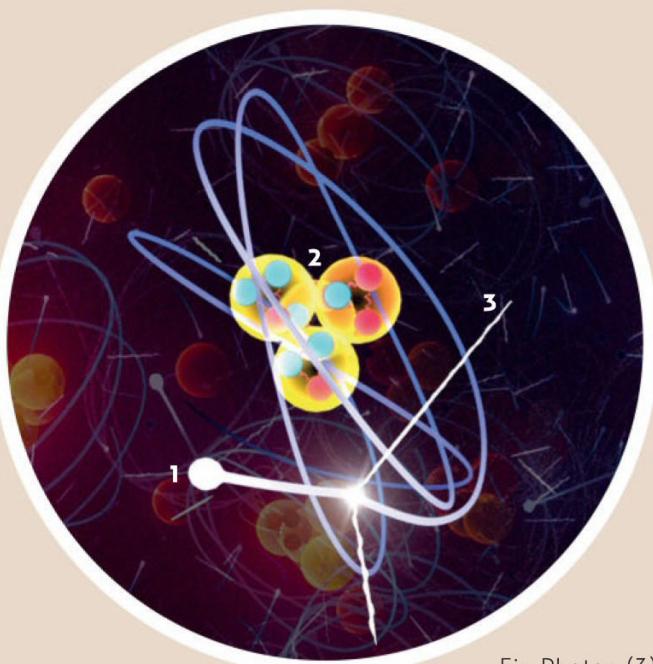


Bildung von Kernbausteinen aus Materie und Antimaterie

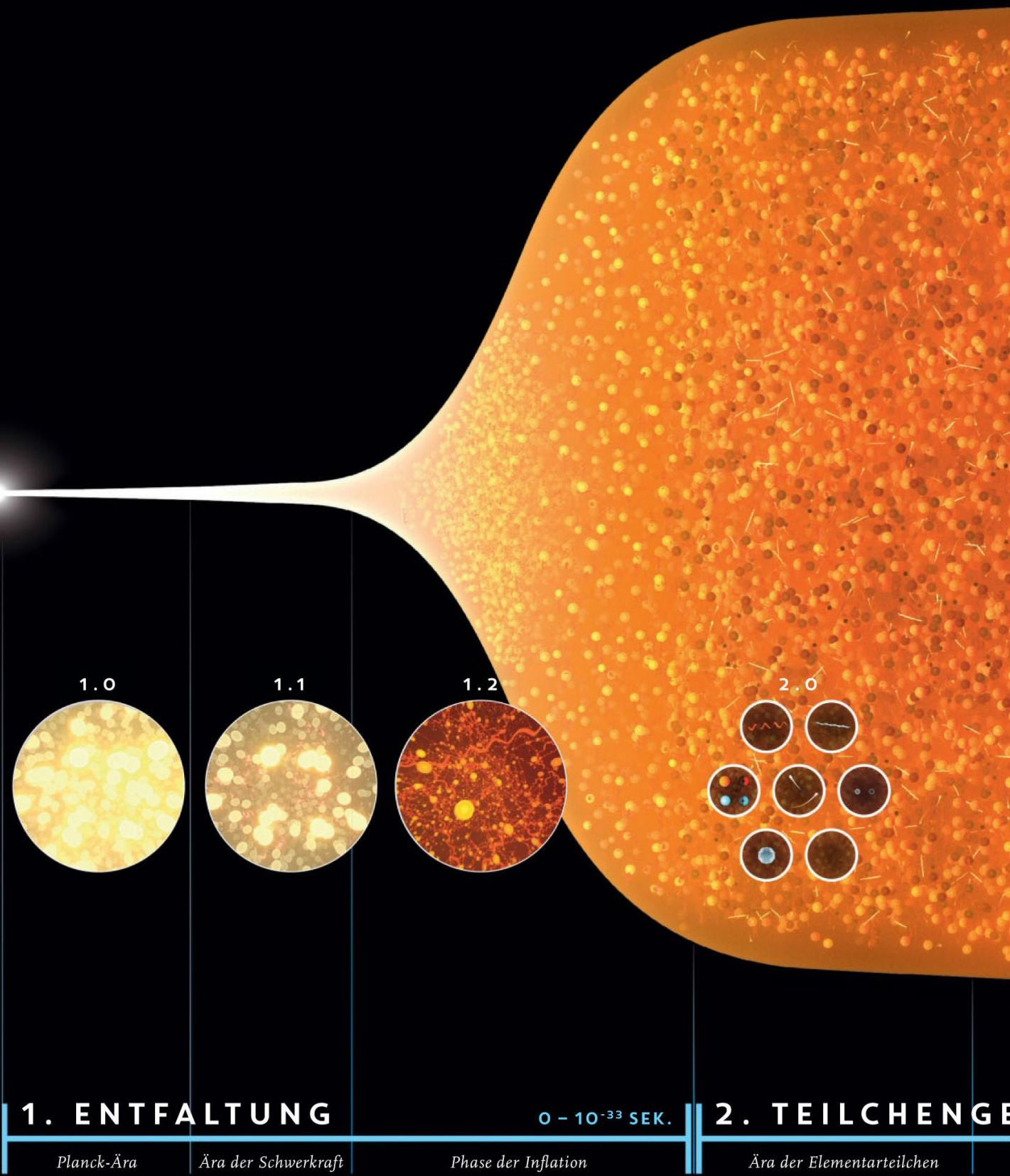
## 4. ELEMENTENTSTEHUNG

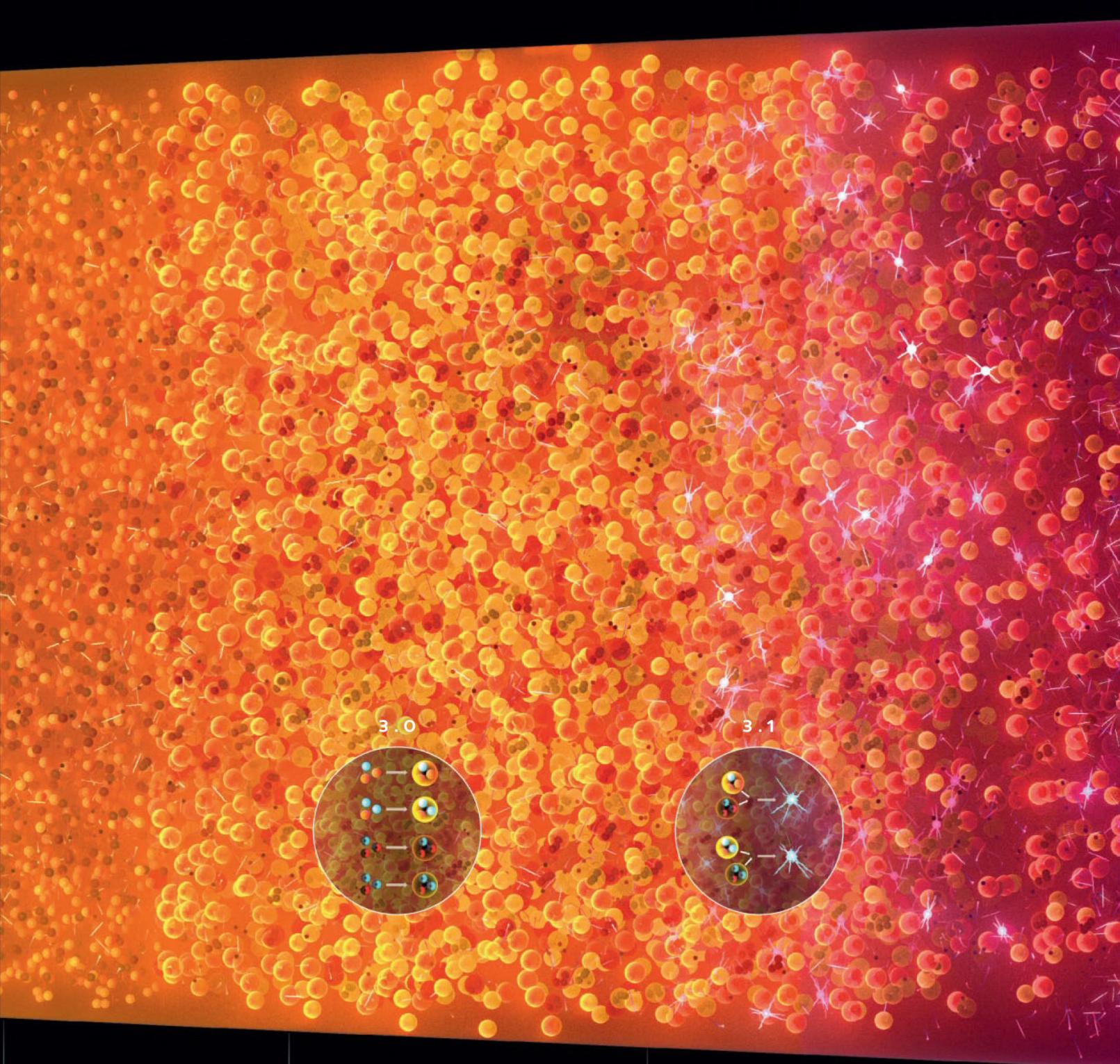
5 MIN. – 100 MIO. JAHRE

**Nachdem** viele der Neutronen und Protonen zu Atomkernen verschmolzen sind, beginnt eine lange **Phase der Abkühlung**. Die nächsten Minuten, Tage, Jahre und Jahrtausende tritt keine große Veränderung ein. Hin und wieder beginnen negativ geladene Elektronen (1) positiv geladene Atomkerne (2) zu umkreisen. Doch werden sie ständig von umhersausenden Photonen (3) aus der Bahn geworfen (rechts). Erst 380 000 Jahre nach dem Urknall ist das Universum so weit erkaltet, dass die Teilchen langsamer werden. Die Elektronen halten nun immer stärker an ihren Umlaufbahnen fest. So bilden sich in der **Ära der Atome** (Seite 41) erstmals stabile Elemente, die als heiße Gase das All erfüllen: Wasserstoff, Helium, Lithium, Beryllium. Auch das Licht wird nicht länger gestreut, sondern kann sich fast ungehindert im Universum ausbreiten. Allerdings verliert es dabei zunehmend an Energie und Leuchtkraft, sodass bald **Finsternis** einkehrt und frostige Kälte. Erst nach vielen Millionen Jahren beginnen sich die Gasschwaden im Dunkel zu formieren, ballen sich zu immer dichteren Kugeln, werden heißer, bis dann **die ersten Sterne** darin zünden – und das All zu erleuchten beginnen.



Ein Photon (3) wirft ein Elektron (1) aus seiner Umlaufbahn





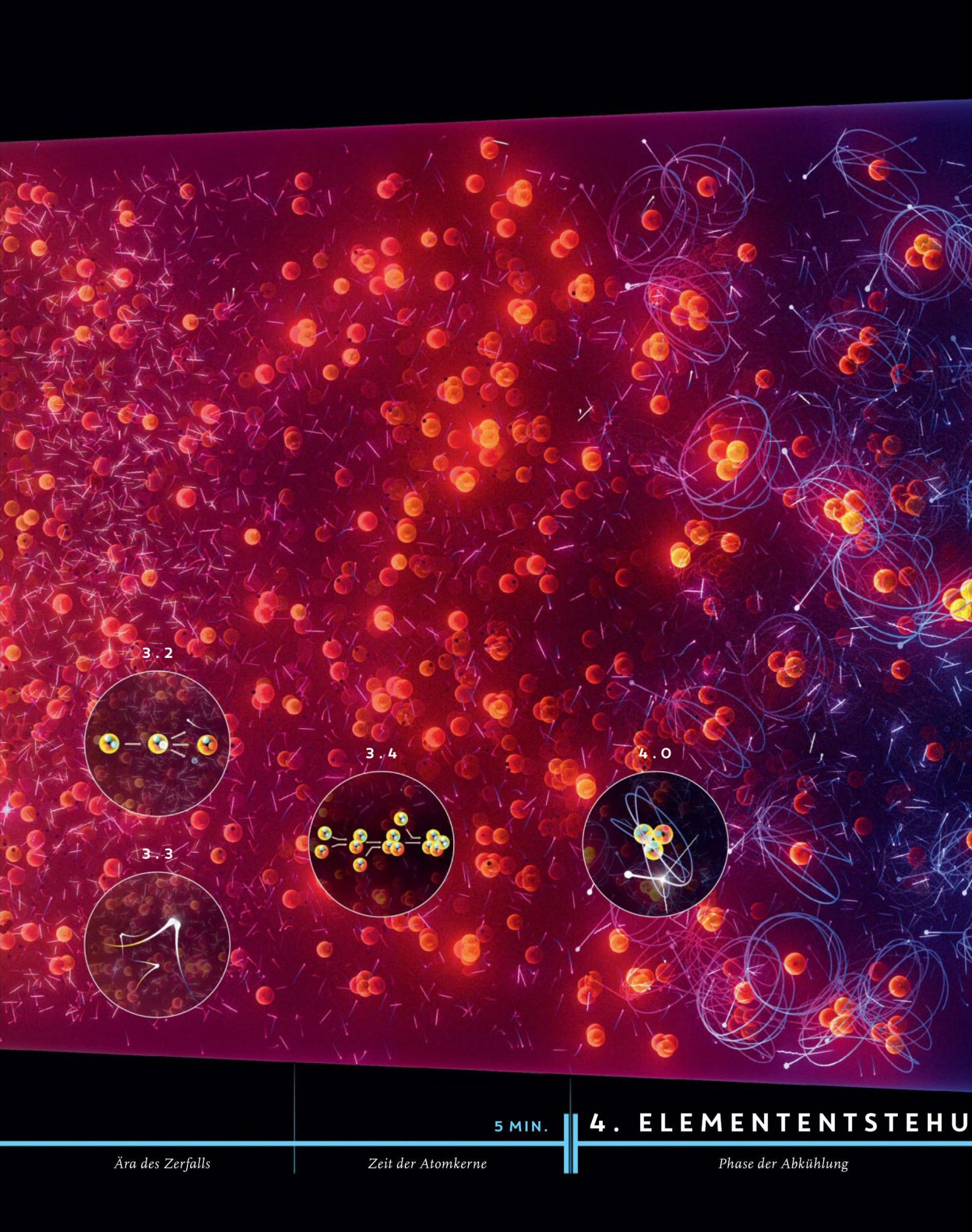
**GEBURT  $10^{-5}$  SEK.**

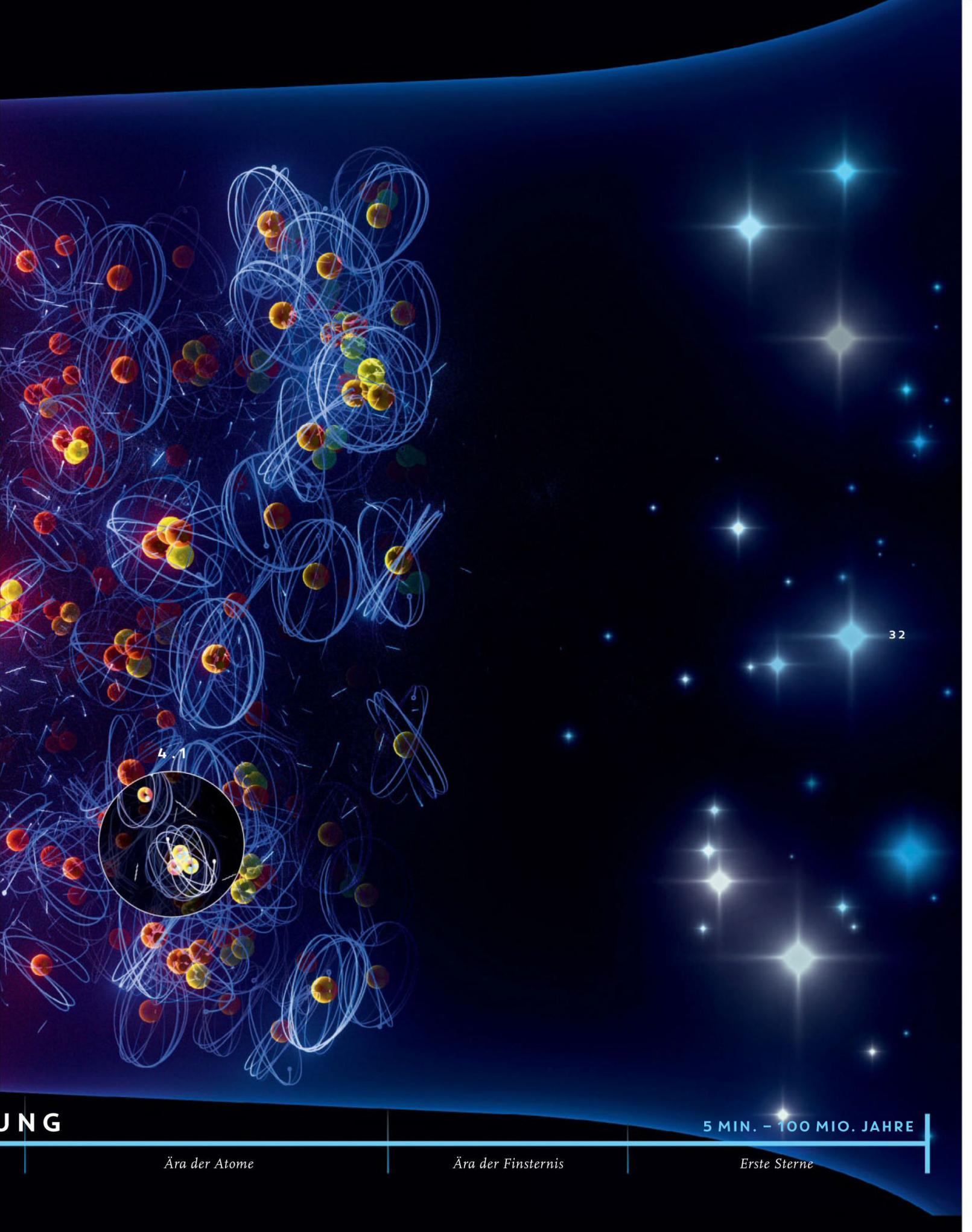
**3. VERNICHTUNG**

Ära der Kräfte

Phase der Kernbausteine

Ära der Vernichtung





JUNG

Ära der Atome

Ära der Finsternis

5 MIN. – 100 MIO. JAHRE

Erste Sterne

kerne – formen sich. Kurz darauf beginnen Materie und Antimaterie sich gegenseitig auszulöschen. Wie durch ein Wunder bleibt ein geringer Überschuss an Materie übrig. Diese Kernbausteine lagern sich teils zu Atomkernen zusammen.

• 4. Elemententstehung. Die Atomkerne fangen Elektronen ein und bilden die vier Grundelemente unseres Kosmos: Wasserstoff, Helium, Lithium und Beryllium. Später werden sich daraus Sterne und Galaxien formen. Zudem kann sich das Licht nun erstmals ungehindert durchs All fortbewegen.

Es ist ein zutiefst komplexes Gedankengebäude von Hypothesen, das die Forscher da erdacht haben, vielleicht sogar die bizarrste Geschichte, die sich überhaupt erzählen lässt. Denn sie handelt von Dingen, die noch fremdartiger sind als viele unfassbare Phänomene des Universums – und für die sich mitunter nur schwer Worte finden lassen. Nicht selten können uns daher allein Vergleiche eine Ahnung davon vermitteln, was damals geschah, vor 13,8 Milliarden Jahren.

## 1. ENTFALTUNG

34

*Wieso wir über den Moment der Schöpfung so gut wie nichts wissen und weshalb sich das Universum plötzlich in einem dramatischen Akt aufbläht*

Die Geburt der Welt beginnt mit einem Rätsel. Denn obwohl die Wissenschaftler inzwischen sehr viel über den Ablauf des Urknalls herausgefunden haben – und obwohl sie die Vorgänge im jungen Universum in den ersten Tagen, den ersten Stunden, den ersten Minuten, ja gar den Bruchteilen der ersten Sekunde nachvollziehen können –, ist eine der fundamentalsten Fragen noch immer ungelöst: Was geschah im allerersten Moment?

Zwar vermögen sich die Forscher dem Beginn bis auf eine Winzigkeit anzunähern, aber kurz bevor sie den eigentlichen Zeitpunkt null erreichen, jenen magischen Augenblick der Schöpfung selbst, versagen sämtliche Modelle und mathematischen Formeln der Physiker.

Sie können sich dem Anfang aller Dinge bis auf genau  $10^{-43}$  (0,oooooooooooooooooooooooooooooooo) Sekunden nach dem Urknall nähern, doch dann schließt sich der Vorhang der Erkenntnis.

Die Zeit davor ist bislang ein Reich reiner Spekulation. Denn die uns bekannten Gesetze der Physik gelten nur für Vorgänge, die sich in Intervallen abspielen, die länger als  $10^{-43}$  Sekunden währen.

Deshalb können wir auch nichts darüber wissen, was vor dem Urknall war oder ob überhaupt etwas war. Und sofern der Kosmos nicht Teil eines viel größeren Multiversums ist (siehe Seite 18), könnte man annehmen, dass der winzige Anfangspunkt unseres Alls, die Singularität, vor 13,8 Milliarden Jahren buchstäblich aus dem Nichts heraus einfach da ist.

Und genau zwischen dem Auftauchen der Singularität (die aus Einsteins Theorie hervorgeht) und dem Zeitpunkt von  $10^{-43}$  Sekunden danach, von dem an die Gesetze der Physik greifen, liegt der mysteriöseste Abschnitt der Weltgeschichte. Eine Spanne, über die sich nichts mit letzter Sicherheit sagen lässt.

Forscher nennen diese Phase die Planck-Ära, nach dem deutschen Physiker Max Planck, der zu Beginn des 20. Jahrhunderts die Quantenmechanik begründet hat – eine Theorie, die das Verhalten der kleinsten Bausteine der Welt erklärt.

So paradox es klingen mag, wir wissen noch nicht einmal, wie lange die Planck-Ära tatsächlich währt (vielleicht dauert sie ewig lang). Denn vermutlich fließt die Zeit nicht kontinuierlich, folgt nicht ein Ereignis auf das nächste, sondern geschieht alles auf völlig sprunghafte, bizarre Weise. Möglicherweise bilden Raum und Zeit während der Planck-Ära eine Art „Raumzeitschaum“, sehr viel kleiner noch als ein Atomkern, in dem Blasen aufkeimen und wieder zerplatzen.

Es ist ein Zustand, der sich jeder Vorstellungskraft entzieht. Niemand kann sich die Vorgänge wirklich begreiflich machen. Man kann sich ihnen nur durch Mutmaßungen annähern.

Dennoch spekulieren Physiker durchaus, welchen Charakter das All in der Planck-Ära hat. In einem etwa sind sie ziemlich sicher: Es hat einen Durchmesser von weniger als  $10^{-32}$  Millimetern – man könnte fast von einem Nichts sprechen.

In diesem Nichts müssen höllische Bedingungen herrschen, ein ungeheuerer Druck, eine unsagbare Hitze von mehr als  $10^{32}$  Grad.

Es gibt noch keine Atome, keine Elektronen, kein Licht. Kräfte und Materie, so vermuten einige Forscher, unterscheiden sich in der Planck-Ära nicht voneinander, sie sind gewissermaßen eins. Möglicherweise existieren sie in Form exotischer Teilchen, die dicht gedrängt umeinanderwirbeln.

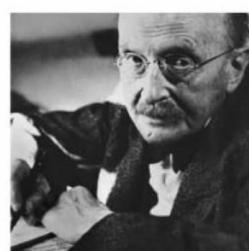
Eine einzige Macht, so eine Theorie, bestimmt das Geschehen in diesem bizarren Gefüge: die Urkraft. Sie dirigiert das Verhalten der Teilchen, lenkt ihre Bewegungen, legt fest, ob sie einander abstoßen, anziehen, voneinander abprallen, miteinander reagieren.

Zwar gibt es noch keine Formel, um diese Urkraft zu beschreiben, daher können wir über ihre Eigenschaften nur spekulieren, aber die meisten Physiker sind sich einig, dass es diese Kraft geben muss.

Wenn nämlich Materie und Strahlung zu dieser Zeit eins sind, dann muss das auch für sämtliche Kräfte gelten, die zwischen diesen beiden Komponenten wirken. Sie sind zur Urkraft vereint und werden sich erst später mit der Trennung von Strahlung und Materie in verschiedene Kräfte aufspalten.

Wahrscheinlich ist es irgendein Zufall, eine winzige Schwankung, die dafür sorgt, dass der Kosmos nicht im Minaturzustand verharrt, sondern plötzlich eine spektakuläre Wandlung durchläuft.

Denn vermutlich  $10^{-43}$  Sekunden nach dem Anbeginn aller Dinge tritt eine schlagartige Veränderung ein: Der winzige Punkt wird aus irgendeinem Grund instabil und explodiert gleichsam in einem dramatischen Akt – dem Urknall.



**Max Planck**  
formulierte um  
1900 ein Grundprinzip  
der Quantenphysik und gilt als ihr  
Begründer

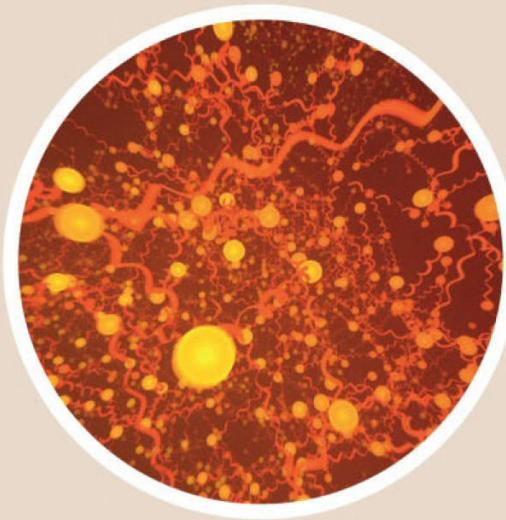
Was nun folgt, ist die blitzschnelle Entfaltung von Raum, Zeit und Materie: Das Universum dehnt sich schlagartig aus, vervielfacht sein Volumen. Doch gibt es keinen bestimmten Ort, der hier auseinanderfliegt. Die Geburt des Alls kann man nicht mit der Detonation einer Bombe vergleichen, viel-



## 1.1 ÄRA DER SCHWERKRAFT

 $10^{-4} - 10^{-6}$  SEK.

Da sich der Raum weiter ausdehnt, kühlt der kosmische Teilchenbrei ab. Vergleichbar mit Wasser, in dem sich bei fallenden Temperaturen Eiskristalle bilden, verwandeln sich auch die Komponenten des frühen Alls: Obwohl das Universum noch unvorstellbar heiß ist, »friert« nach Bruchteilen der ersten Sekunde die Schwerkraft (rosafarbene Spiralen) aus der Urkraft aus. Die so entstandene Gravitation wirkt anziehend auf die umherschwirrenden Teilchen und stemmt sich so für kurze Zeit dem Druck des expandierenden Alls entgegen, wodurch sich dessen Ausdehnung verlangsamt.



## 1.2 PHASE DER INFLATION

 $10^{-6} - 10^{-5}$  SEK.

Ein mächtiges Feld – das Inflatonfeld – erfüllt das All, es wird von Teilchen, den Inflatonen (gelb), gebildet. Sie wirken der Schwerkraft (Spiralen) entgegen, indem sie die kosmische Ausdehnung extrem beschleunigen. Die Folge: Das All bläht sich plötzlich gewaltig auf. In dieser Inflationsphase spaltet sich der Rest der Urkraft abermals auf: in die starke Kernkraft und die elektroschwache Kraft. Dabei werden gewaltige Mengen Energie frei, die das Inflatonfeld weiter füttern. Das Universum expandiert mit unfassbarem Tempo um 26 Größenordnungen.

mehr dehnt sich der Kosmos überall aus, an jeder Stelle zugleich.

Und: Er dehnt sich nicht in irgendeinen anderen Raum hinein aus wie etwa ein Ballon, den man aufbläst. Denn das All hat ja keine Hülle. Daher gibt es kein Außen, ja im Grunde genommen noch nicht mal ein Nichts, in das hinein sich das Universum drückt. Vielmehr schafft der Raum sich selbst Raum.

Das Geschehen ist so befremdlich, dass man es sich nicht vorstellen kann – man kann es nur akzeptieren.

Eines allerdings ist leichter zu begreifen: Die Expansion des Raums bewirkt, dass es im All kühler wird.

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

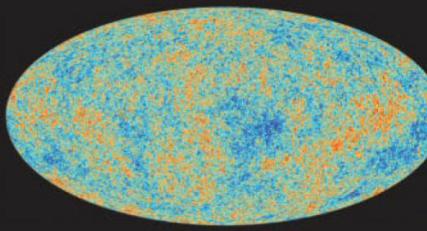
Man kann diesen Prozess mit dem Gefrieren von Wasser vergleichen. Ist es flüssig, schwirren seine Moleküle ungeordnet durcheinander; sobald die Temperatur abnimmt, gehen einige dieser Moleküle in einen anderen Aggregatzustand über, bilden hier und da winzige Eiskristalle – geometrisch geordnete Strukturen also. Das Wasser liegt am Ende des Prozesses schließlich in fester Form (oder Phase) vor.

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

Die Gravitation sorgt dafür, dass massereiche Körper sich gegenseitig anziehen, dass etwa die Planeten um die Sonne kreisen. Sie wirkt auch auf die Komponenten der gerade geborenen Welt anziehend und stemmt sich so dem Druck des Alls entgegen.

Doch sie ist nicht mächtig genug, um die Expansion aufzuhalten: Der Kosmos streckt sich in weit weniger als dem Trillionstel eines Trillionstels einer Sekunde aufs Zehnfache, dann aufs 100-Fache.

Mehr noch: Das All ist (einer Theorie nach) zu jener Zeit erfüllt von einem mysteriösen Feld – dem Inflatonfeld. Es manifestiert sich durch Teilchen, Inflatonen, die eine höchst eigenümliche Wirkung



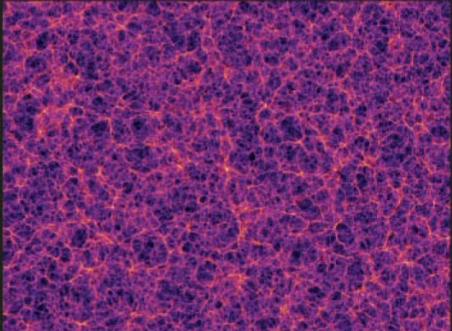
Dieses Bild der kosmischen Hintergrundstrahlung zeigt die Verteilung der Materie 380 000 Jahre nach dem Urknall. An den blauen Stellen ist sie etwas dichter – hier werden später Galaxien entstehen

auf den Kosmos haben: Sie wirken der Gravitation entgegen. Und beschleunigen dadurch urplötzlich – etwa ab der Zeit von rund  $10^{-36}$  Sekunden nach dem Urknall – die Ausdehnung des Raums auf extreme Weise. Physiker sprechen auch von der „Inflationsphase“.

Und wieder geschieht Unglaubliches. Der Rest, der von der Urkraft übriggeblieben ist, zerfällt in zwei weitere Kräfte: in die starke Kernkraft (sie wird später die Kerne von Atomen zusammenhalten) und in die elektroschwache Kraft (einen Vorgänger jener Kräfte, deren Wirkung heute für Lichtstrahlung, elektrischen Strom, Radioaktivität verantwortlich ist).

Das Aufspalten in diese beiden Kräfte setzt, wie Astrophysiker vermuten, gewaltige Mengen Energie frei. Diese Energie speist das Inflatonfeld weiter, sie verstärkt also die Wirkung der Inflatonen noch mehr. Und so schwollt das All aufs Riesenhafte an: In einem Sekundenbruchteil poppt das kosmische Pünktchen um

36



Mit Computersimulationen (oben) lässt sich berechnen, wie sich an den dichten Stellen von einst immer mehr Materie ballte und über die Zeit netzartige Verbände von Galaxien entstanden

26 Größenordnungen auf die Maße eines Medizinballs auf. Seit dem Urknall sind  $10^{33}$  Sekunden vergangen.

Nie wieder wird das Universum so blitzartig an Volumen zunehmen. Zum Vergleich: Würde ein Stecknadelkopf ebenso stark anwachsen, würde er in weit weniger als der Dauer eines Wimpernschlags auf  $10^{23}$  Meter an, also zehn Millionen Lichtjahre. Das entspräche der Entfernung von der Erde bis zum nächsten Galaxienhaufen.

Ähnlich wie das Entwicklungsstadium zuvor währt die Inflation allerdings nur kurze Zeit. Denn erneut führt die Abkühlung, die ja Resultat der räumlichen Entfaltung ist, zu einer Wandlung der Ingredienzen unseres Alls: Das energiegeladene Inflatonfeld löst sich auf, die Inflatonen zerfallen in verschiedene Partikel.

## 2. TEILCHENGEBURT

*Wie bilden Bruchteile einer Sekunde sämtliche Materie des Universums geschaffen wird und deren Elementarteilchen durch einen raffinierten Mechanismus ihre Masse erhalten*

Was nun folgt, ist die vielleicht schillerndste Epoche in der Geschichte des Kosmos. Denn in einem einzigen kurzen Augenblick – der etwa  $10^{-10}$  Sekunden andauert – wird die ganze Vielfalt der Elementarteilchen geboren, ohne die letztlich nichts von Bedeutung existieren würde: keine Materie, keine Sterne, keine Planeten, keine Menschen.

In dieser Phase dehnt sich das Universum zwar noch immer rasant aus, doch dadurch, dass die Inflationsphase beendet ist, läuft die Expansion nun deutlich gemächlicher ab. Der Medizinball wächst langsamer heran, auf 100 Meter Durchmesser. Dann auf 100 Kilometer. Schließlich ist das All so groß wie der Mond, dann die Erde, dann die Sonne.

Durch den Zerfall der Inflatonen bilden sich zwei große Gruppen von Elementarteilchen. Die eine Gruppe, die sogenannten Kraftteilchen, verleiht den gerade neu entstandenen Kräften, starke Kernkraft sowie elektroschwache Kraft ihre Wirkung. Zu diesem Zeitpunkt gibt es unter anderem folgende Arten von Kraftteilchen:

- die Vorläufer der Photonen; diese Partikel (aus denen später Sonnenlicht, Röntgenstrahlen, Radio- oder Mikrowellen

bestehen werden) bewegen sich mit Lichtgeschwindigkeit durch den Raum und übertragen die elektroschwache Kraft.

- die Gluonen (von engl. *to glue*, kleben); sie verschaffen der starken Kernkraft ihre Wirkung, sie „kleben“ Materiebausteine (Quarks) zu Paaren und Trios zusammen und werden später mit zum Zusammenhalt der Atome beitragen.

Zur zweiten Gruppe gehören alle Teilchen, aus denen sich später die Materie zusammensetzt, unter anderem:

- Quarks, die später zusammen mit den Gluonen die Bausteine der Atomkerne bilden werden;

- Elektronen, elektrisch negativ geladene Teilchen, die heute die Atomkerne umschwirren;

- Neutrinos, sehr leichte, elektrisch neutrale Teilchen, die sich nur schwer nachweisen lassen, da sie kaum mit anderen Partikeln reagieren (siehe Seite 94);

- die Bestandteile der Dunklen Materie – unsichtbare Partikel, über die noch nichts bekannt ist, außer dass sie heute einen Großteil der Materie im Universum ausmachen und so gut wie nie mit den sichtbaren Teilchen wechselwirken.

Bis auf die Dunkle Materie (siehe Seite 130) haben Physiker inzwischen all diese Teilchen in Teilchenbeschleunigern – die die Bedingungen kurz nach dem Urknall nachahmen – nachgewiesen.

Keines der Materieteilchen entsteht in dieser Frühzeit jedoch allein: Zu jedem existiert ein Antiteilchen, das zeitgleich gebildet wird – ein Gegenstück mit entgegengesetzter elektrischer Ladung. So gehört zum negativ geladenen Elektron stets ein positiv geladenes Positron.

Auch zu jedem Quark (von denen manche positiv, andere negativ geladen sind) gibt es ein Antiquark, das ebenfalls die genau entgegengesetzte Ladung zu seinem Partner hat.

Mithin formen sich sozusagen stets Pärchen aus Positiv und Negativ. Auch die neutralen Neutrinos haben zugehörige Antineutrinos. Und so baut sich mit der Geburt der Materie eine Art Spiegelwelt auf: die Antimaterie.

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

Es ist ein Durcheinander aus Werden und Vergehen: Trifft ein Teilchen auf sein Antiteilchen, vernichten sich die beiden gegenseitig, sie zerstrahlen in die energie-

geladenen Vorläufer der Photonen. Substanz verliert sich in Substanzlosem.

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

All das mag für Laien fantastisch anmuten – für Physiker jedoch ist es längst nichts Besonderes mehr. In den Beschleunigern erzeugen sie bei ihren Versuchen ständig auch Antiteilchen, die im nächsten Augenblick wieder zerstrahlen.

Während dieser Metamorphose schreitet die Ausdehnung und Abkühlung des Weltalls weiter voran. Im Alter von einer Zehnmilliardstelsekunde ist der Kosmos bereits fast so groß wie unser Sonnensystem, die Temperatur ist um 17 Größenordnungen gefallen: auf zehn Billiarden Grad Celsius.

Damit übersteigt die Hitze des Urfeuers die Glut im Herzen unserer heutigen Sonne immer noch milliardenfach. Und doch ist es inzwischen so kalt, dass ein letztes Mal eine Kraft in zwei Komponenten zersplittet: Die elektroschwache Kraft trennt sich in die elektromagnetische Kraft und die schwache Kernkraft auf.

Im Verlauf dieses Prozesses wandeln sich auch die Vorläufer der Photonen um, unter anderem in die heutigen Lichtteilchen – und die wiederum verleihen der elektromagnetischen Kraft ihre Wirkung. Sowie in die Überträger der schwachen Kernkraft, die jedoch instabil sind und sofort wieder vergehen. Sie werden erst später eine wichtige Rolle spielen, zu einer Zeit kurz nachdem sich die Bausteine der Atomkerne gebildet haben.

## D

Die einstige Urkraft hat sich nun in vier Kräfte geteilt, die 13,8 Milliarden Jahre später noch immer unsere Welt prägen.

Auch die Elementarteilchen haben sich fast alle schon gebildet – wobei diese Partikel nicht für alle Zeiten existieren, sondern sich unter bestimmten Bedingungen ineinander umwandeln können.

Nur ein letzter großer Baustein fehlt noch, und bis vor wenigen Jahren war völlig rätselhaft, wie die Lücke zu füllen sei. Im Mittelpunkt stand dabei eine Frage, die auf den ersten Blick verblüffend banal anmutet und deren Lösung zur Entde-

---

Was auch immer den **hauch-dünnen** Überschuss an Materie gegenüber der **Antimaterie** bewirkt haben mag: Ohne ihn **gäbe es uns nicht**. Denn die **Elementarteilchen** von damals finden sich heute in den Körpern **aller Lebewesen** wieder

---

ckung eines vollkommen neuen Partikels führen sollte: Warum haben die Teilchen unterschiedliche Massen? Weshalb etwa wiegt ein ruhendes Photon absolut nichts, hat ein Elektron oder ein Quark dagegen eine genau definierte Masse?

Auf den ersten Blick mag diese Frage trivial erscheinen. Schließlich wiegen auch die Materialien unserer Alltagswelt unterschiedlich viel. Eine Handvoll Federn etwa ist deutlich leichter als eine Handvoll Sand. Warum sollte Ähnliches nicht auch für Elementarteilchen gelten?

Für Physiker aber war genau das aus Gründen, die mit den Gesetzen der Quantenphysik zusammenhängen, bis vor wenigen Jahren äußerst mysteriös.

Woher also kommt die Masse?

1964 fanden mehrere Forscher, darunter der Brite Peter Higgs und der Belgier François Englert, eine elegante Lösung. Sie postulierten, dass der Kosmos von Beginn an von einem unsichtbaren Feld durchzogen gewesen sein müsste (dem „Higgs-Feld“, wie es später genannt wurde), durch das sich alle Teilchen hindurchbewegten und das auch heute noch existiert. 2013 bekamen Higgs und Englert hierfür den Nobelpreis verliehen.

Ihrer Theorie nach spielt sich in den ersten Sekundenbruchteilen nach dem Urknall Folgendes ab: Als das Universum noch sehr jung und heiß ist, ist das Higgs-Feld extrem durchlässig, vergleichbar einem Gelee, das sich bei hoher Temperatur verflüssigt. Nach der Aufspaltung der elektroschwachen Kraft aber kühlt das All so weit ab, dass das Feld fester zu werden beginnt.

Das Higgs-Feld, durch das sich die Teilchen hindurchbewegen, wird also zäher. An Quarks, Elektronen und Neutrinos bleibt es nun haften. Diese Teilchen kommen nur noch mühsam voran. Um sie in Bewegung zu versetzen, braucht es einen Anschub, zusätzliche Energie.

Von außen wirkt es nun so, als seien die durch das Higgs-Feld gebremsten Teilchenträger und schwerer geworden. Und genau diese Trägheit werden Physiker später als „Masse“ bezeichnen.

Andere Teilchen aber, etwa Photonen, sind so geformt, dass sie mit dem Gelee nicht interagieren und es mühelos durchqueren können – ähnlich einer scharfen Messerschneide, die ohne zusätzlichen Kraftaufwand alles durchdringt. Weil sie nicht gebremst werden, beträgt die Masse

der Photonen daher null, sie bestehen aus reiner Energie. Da sie nicht wie die ebenfalls masselosen, aber äußerst bindungsfreudigen Gluonen an anderen Teilchen festhaften, können sie als Einzige ungehindert mit der höchstmöglichen Geschwindigkeit durch den Raum rasen.

Und die Neutrinos wiederum können sich leichter durch das Higgs-Feld bewegen als die Quarks. Sie haben daher eine geringere Masse.

Lange Zeit ist die Higgs-Theorie nicht mehr als eine These, die Physiker nutzen, um ihre Formeln mit den Erkenntnissen der Teilchenphysik in Einklang zu bringen. Ob sie wirklich stimmt oder ob es vielleicht eine ganz andere Erklärung dafür gibt, dass bestimmte Teilchen eine Masse haben und andere nicht, wissen die Wissenschaftler schlicht nicht.

Im Jahr 2012 aber gelingt es den Forschern des CERN bei Genf, das Higgs-Feld tatsächlich nachzuweisen (siehe Seite 136). Durch hohe Energien regen sie das unsichtbare Gefüge derart stark an, dass es sich zu einem neuen Teilchen manifestiert: dem Higgs-Boson.

Diese Higgs-Bosonen bilden gewissermaßen das Gelee, das den gesamten Kosmos durchzieht und das folglich alle Partikel durchqueren müssen. Sie lassen sich nur unter bestimmten Bedingungen im Teilchenbeschleuniger für einen kurzen Augenblick sichtbar machen, weshalb es so lange dauerte, sie zu entdecken.

Ihnen ist es zu verdanken, dass es überhaupt eine Masse der Elementarteilchen gibt – und dass der Kosmos nun in die nächste Stufe seiner Entwicklung eintritt kann.

38

### 3. VERNICHTUNG

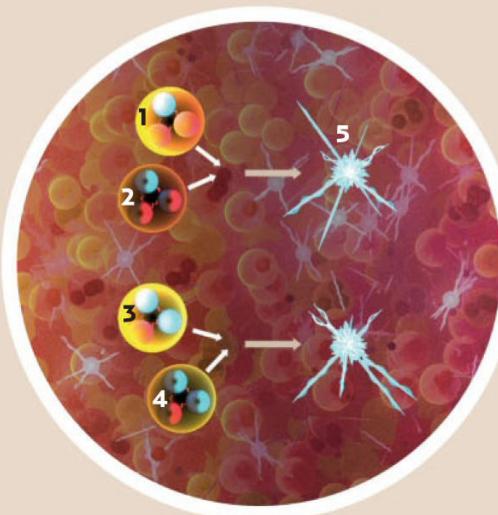
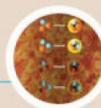
*Weshalb nahezu alle Materie in einem dramatischen Akt ausgelöscht wird – und wie ein merkwürdiger Zufall die Welt vor der völligen Auflösung bewahrt*

Seit dem Urknall ist gerade einmal eine hunderttausendstel Sekunde vergangen, und doch erstreckt sich das All bereits über Milliarden Kilometer.

Es ist jetzt von einer Art gleißender, zwei Billionen Grad heißer Teilchensuppe gefüllt. Wäre man imstande, in diese dicke Brühe hineinzublicken: Man könnte keinen Millimeter weit schauen.

### 3. VERNICHTUNG

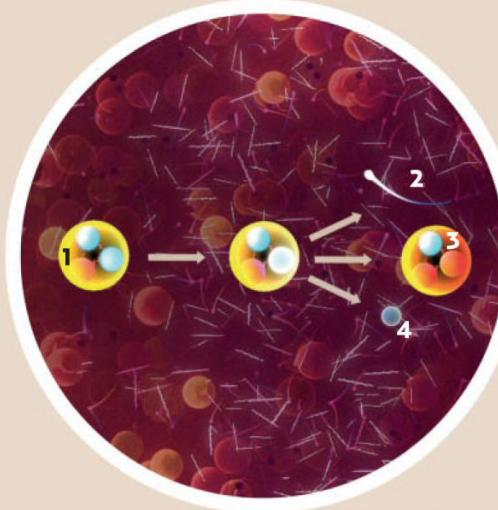
→ SIEHE SEITE 33



#### 3.1 ÄRA DER VERNICHTUNG

10<sup>-4</sup> – 0,2 SEK.

Als die Temperatur im Weltall auf zwei Billionen Grad fällt, setzt ein unvergleichlicher Akt der Zerstörung ein: Die neu gebildeten Protonen (1) und Antiprotonen (2) sowie die Neutronen (3) und Antineutronen (4) vernichten sich gegenseitig, zerstrahlen in masselose Photonen (5). Konnten diese sich zuvor noch zurückverwandeln, wird ihnen die dafür nötige Energie durch die weitere Abkühlung des Alls entzogen. Protonen und Neutronen schwinden also. Erst als alle Antiteilchen aufgebraucht sind, stoppt die Vernichtung. Aus noch rätselhaften Gründen ist etwas Materie übrig geblieben.



#### 3.2 ÄRA DES ZERFALLS 1

0,2 SEK.–2 MIN.

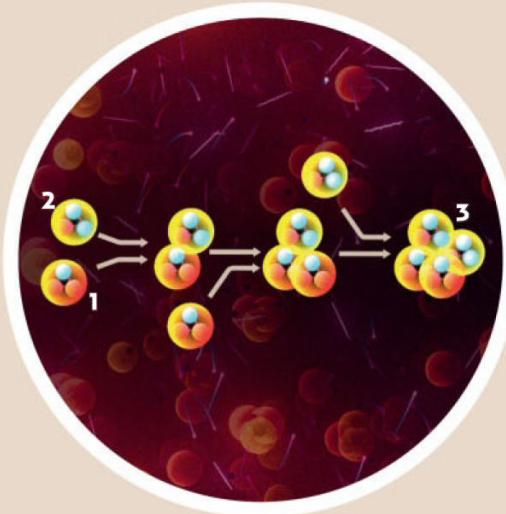
Jene Protonen, die die Vernichtung überstanden haben, sind weitgehend in Sicherheit. An den Neutronen (1) aber beginnt nun die schwache Kernkraft zu zerren. Denn im Gegensatz zu den Protonen sind sie äußerst instabil: Durch Prozesse in ihrem Inneren zerfallen sie in ein Elektron (2), ein Proton (3) und ein Neutrino (4). So fliegen binnen kurzer Zeit immer weniger Neutronen durch den mittlerweile 500 Billionen Kilometer umspannenden Kosmos. Die Protonen sind jetzt bei Weitem in der Überzahl – und dieser Umstand wird sich auf die künftige Zusammensetzung des Weltalls auswirken.



### 3.3 ÄRA DES ZERFALLS 2

0,2 SEK.-2 MIN.

Nahezu zeitgleich zum Zerfall der Neutronen, ab einer Temperatur von 20 Milliarden Grad, tritt die Vernichtung in die nächste Phase ein: Elektronen (1) und ihre Antiteilchen, die Positronen (2), zerstrahlen in Photonen. Die neuerliche Abkühlung sorgt dafür, dass die Energie der Photonen immer seltener dazu ausreicht, eine Rückreaktion in Gang zu setzen. Das Gleiche geschieht mit den Neutrinos und Antineutrinos. Sämtliche Antimaterie wird zerstört. Doch auch jetzt bleibt ein Rest an Materie bestehen: Elektronen und Neutrinos schwirren in geschrumpfter Zahl weiter durchs All.



### 3.4 ZEIT DER ATOMKERNE

2 MIN.-5 MIN.

Die Strukturbildung des Universums schreitet durch Abkühlung weiter voran. Erstmals bleiben Protonen und Neutronen aneinander haften und formen etwas Neues: Atomkerne verschiedener Elemente. In diesem Verbund kann die schwache Kernkraft den Neutronen kaum etwas anhaben. So bildet entweder ein alleiniges Proton oder ein Proton in Verbindung mit einem Neutron den Atomkern von Wasserstoff. Je zwei Protonen (1) und ein bis zwei Neutronen (2) verbinden sich zu einem Helium-Atomkern (3). Weiterhin entstehen Lithium-Kerne und Beryllium-Kerne.

Denn die Lichtteilchen, die Photonen, werden andauernd von freien Elektronen abgelenkt und in alle möglichen Richtungen gestreut, ähnlich wie in einem Nebel, in dem Schleier von Wassertropfen das Sonnenlicht so stark brechen, dass man die Hand vor Augen nicht erkennt.

In dieser trüben Brühe setzt sich ein Prozess in Gang, der zur fast völligen Vernichtung sämtlicher Masse führen wird.

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 Zweier- und Dreierpacks durchs All. Verbunden werden sie von den Gluonen. Wie winzige Gummibänder spannen sich diese Kraftteilchen zwischen jeweils zwei Quarks und halten sie so zusammen.

Hatten die Quarks in der Hitze des Urfeuers noch genügend Energie, um sich der Bindung eines Gluons wieder zu entwinden, bleiben sie jetzt unentzerrbar kleben. Von nun an fliegen nie wieder einzelne Quarks frei durch den Kosmos.

Einige der Dreiergespanne sind wichtige Bausteine sämtlicher Atome, die sich später einmal formen werden. Je nach Konstellation kann eines der folgenden Gebilde entstehen:

- ein Proton – ein positiv geladener Materiebaustein;
- oder ein Neutron – ein Partikel, das ungeladen ist.

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

W

Was nun folgt, gehört 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 gegenseitig zu vernichten.

Protonen kollidieren mit Antiprotonen, Neutronen mit Antineutronen – und zerplatzen in einem Schauer aus Photonen. Später auch Elektronen mit Positronen und Neutrinos mit Antineutrinos.

Hatten die Photonen, diese masselosen Lichtteilchen, wenige Momente zuvor noch genügend Energie, um sich bei einer Kollision mit einem anderen Pho-

ton wieder in Materieteilchenpaare (etwa Quarks und Antiquarks) zurückzuverwandeln, reicht nun die Energie immer seltener dazu aus, eine Rückreaktion in Gang zu setzen. Dadurch ist die Vernichtung nicht mehr aufzuhalten, und es entsteht immer mehr Strahlung. Immer mehr Masse schwindet dahin.

In Sekundenbruchteilen hat sich sämtliche Antimaterie aufgelöst, ist unvergänglich in Photonen zerstrahlt. Von der Materie aber bleibt verblüffenderweise ein winziger Überschuss zurück.

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

Über den Grund für dieses geringe Ungleichgewicht lässt sich nur spekulieren. Eine der Theorien besagt, dass das Higgs-Feld womöglich geschwankt und den Materieteilchen mittels eines komplexen Mechanismus einen geringen Vorteil verschafft hat. Damit diese Rechnung aufgeht, bedürfte es allerdings eines bislang noch unentdeckten Teilchens – eines Neutrinos mit speziellen Eigenschaften, von dem bislang noch jede Spur fehlt.

40 Doch was auch immer für den hauchdünnen Überschuss von Materie gesorgt haben mag: Ohne ihn gäbe es uns Menschen und den ganzen Rest des Universums heute nicht. Denn jene Protonen und Neutronen, die damals durchs All schwärmt, finden sich 13,8 Milliarden Jahre später in den Körpern aller Lebewesen auf unserem Planeten wieder.

Die Protonen haben fortan kaum noch etwas zu befürchten. Die Neutronen allerdings befinden sich noch nicht in Sicherheit. Auch wenn ihre Gegenspieler, die Antineutronen, nicht mehr existieren, drohen sie allesamt zu zerfallen. Denn Neutronen sind nicht stabil. 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 etwa zehn Billiarden Kilometer; die Temperatur ist weiter gefallen: auf eine Milliarde Grad.

Da bricht ein neues Zeitalter an, das für die Rettung der verbliebenen Neutronen sorgen wird: das der Atomkerne. Physiker sprechen auch von der Ära der

Nukleosynthese (von lat. *nucleus*, Kern, und *synthesis*, Verknüpfung).

Jene Protonen und Neutronen, die Auslösung und Zerfall überlebt haben, sind nun so langsam, dass zwischen ihnen Kernkräfte Wirkung zeigen.

Viele Protonen bleiben zwar weiterhin frei und bilden den Kern des häufigsten Elements im Universum: Wasserstoff.

Andere aber gehen jetzt mit Neutronen eine Verbindung ein. In einem komplexen Prozess vereinigen sie sich zu stabilen Atomkernen. Die einfachste Kombination besteht aus je einem Proton und Neutron (es ist der Atomkern von schwerem Wasserstoff). Auch überschwerer Wasserstoff bildet sich: ein Trio aus einem Proton und zwei Neutronen. In weiteren komplexen Kombinationen entstehen Heliumkerne und in geringem Maße die Elemente Lithium und Beryllium.

Etwa fünf Minuten brauchen die Neutronen, bis sie allesamt in Wasserstoff-, Helium-, Lithium- oder Beryllium-Atomkernen gebunden sind. Mit der Bildung dieser Atomkerne tritt das All nun in eine

ruhige, geordnete Phase ein. Und so hektisch die ersten Prozesse abgelaufen sind: Jetzt wird es sehr lange dauern, bis die nächste entscheidende Wandlung beginnt.

## 4. ELEMENTENTSTEHUNG

*Wie sich Atomkerne und Elektronen zusammentreten, um die ersten Elemente zu bilden – und warum das All erst von einem rötlichen Licht durchströmt und anschließend stockfinster wird*

In den folgenden Minuten, Tagen, Jahren und Jahrtausenden geschieht nichts Bedeutendes mehr. Das All bläht sich weiter auf, wird kälter und kälter.

Nach einem Jahr erreicht es die sechsfache Größe unserer Milchstraße und ist noch zwei Millionen Grad heiß. Nach 100 Jahren sind die Temperaturen auf 200 000 Grad gefallen, ein Jahrtausend später auf 60 000 Grad.

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.

Als seit dem Urknall weit mehr als 100 000 Jahre vergangen sind, beginnen sich negative und positive Ladungen verstärkt anzuziehen: Manche negativ geladenen Elektronen beginnen die positiven Protonen zu umschwirren. Andere kreiseln um Heliumkerne, die durchs All treiben; wieder andere wirbeln um Lithium- oder Berylliumkerne.

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 da sich das Universum ständig weiter ausdehnt, büßen die Teilchen an Energie, an Geschwindigkeit ein.

Als die Temperatur des Alls nach 380 000 Jahren auf 2700 Grad Celsius gesunken ist, kreisen alle Elektronen des Universums auf kleinen Umlaufbahnen um Atomkerne. Kurz: Die ersten vollständigen Atome sind entstanden.

Rund drei Viertel davon machen die leichtesten und am einfachsten gebauten Atome aus, die des Wasserstoffs. Fast den

### Auf einen Blick

#### Anfang

Forscher können sich dem Beginn des Universums nur bis auf Sekundenbruchteile nähern. Der Moment des Urknalls selbst bleibt rätselhaft.

#### Expansion

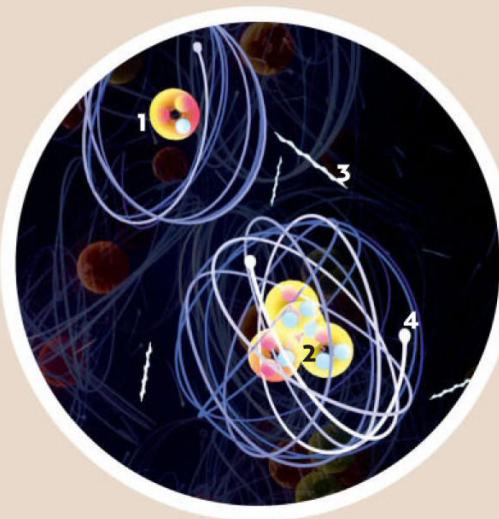
Im Urknall dehnt sich das All für einen kurzen Moment dramatisch aus – und die heutigen Grundkräfte entstehen.

#### Teilchengeburt

Mit den Grundkräften kommen auch Materie und Antimaterie in die Welt, die sich aber gegenseitig fast auslöschen.

#### Atome

Ein winziger Überschuss an Materie bleibt übrig und bildet die Grundsubstanz der Welt. Es formen sich Atomkerne und schließlich die Atome.



#### 4.1 ÄRA DER ATOME 380 000 JAHRE – 14 MIO. JAHRE

Gut 380 000 Jahre nach dem Urknall, bei 2700 Grad Celsius, kommt es zu einem entscheidenden Prozess: Die positiv geladenen Atomkerne fangen negativ geladene Elektronen ein und halten sie in ihrer Umlaufbahn fest. Auf diese Weise entstehen die ersten Elemente Wasserstoff (1), Helium (2), Lithium und Beryllium. Sie werden später die Bausteine der Sterne und Galaxien bilden. Dank dieser neuen Ordnung kollidieren die Photonen (3) zudem nicht mehr ständig mit umhersausenden Elektronen (4), sondern können zwischen den Atomen hindurchrasen: Das All wird durchsichtig.

gesamten Rest, also ein Viertel, bilden Heliumatome. Und dann schweben auch noch Spuren von Lithium- und Berylliumatomen durch den Raum. Erst später werden im Inneren von Sternen und bei Sternexplosionen noch schwerere Elemente entstehen (siehe Seite 86).

Da sich fortan kaum noch freie Elektronen kreuz und quer durch die Gegend bewegen, breitet sich das Licht nun ungehindert im Raum aus: Denn die Photonen werden von den Elektronen nicht mehr von ihren Bahnen abgelenkt, nicht mehr gestreut. Es ist, als hätten sich in einem hell leuchtenden Nebel die Wassertröpfchen aufgelöst, als hätte sich ein strahlender Schleier gelichtet. Und so übt die Bildung der Atome einen gravierenden Effekt auf das Erscheinungsbild des Universums aus: Es wird durchsichtig.

Erstmals könnte man nun durchs All schauen. Man würde hineinblicken in eine unendliche Leere, erfüllt von rotem Licht.

In den folgenden Jahrtausenden – der Raum driftet weiter und weiter auseinander – wird es immer kälter. Nach

zwölf Millionen Jahren herrschen im Kosmos wohlige 25 Grad Celsius. Knapp zwei Millionen Jahre später ist die Temperatur auf rund 270 Grad Celsius unter null gesunken, den absoluten Kältepunkt.

Zugleich verlieren die Lichtteilchen durch die Ausdehnung des Universums an Energie. Die Strahlung wird röter und schwächer, und dieses Dunkelrot wird immer düsterer, bis es schließlich verschwindet. Es wird finster und kalt im All.

Doch das erste Licht der Weltgeschichte ist nicht etwa verschwunden, es verschiebt sich nur immer mehr in den für das menschliche Auge unsichtbaren Mikrowellenbereich.

Viel, viel später werden die Forscher Penzias und Wilson einen zarten Nachhall dieser frühen Strahlung als Zeugnis aus der Urzeit des Kosmos empfangen; gewissermaßen ein Babyfoto des Universums im Alter von 380 000 Jahren, das Forschern so manches über die Anfänge des Alls verrät.

So sind auf späteren Aufnahmen der kosmischen Hintergrundstrahlung, die

Weltraumsatelliten erstellt haben (siehe Seite 36), winzigste Temperaturschwankungen zu erkennen: Dort, wo die Strahlung um den hunderttausendsten Teil eines Grades kühler ist, muss sich die Masse des jungen Universums einen Hauch dichter geballt haben.

Im Laufe der Zeit und mit der Expansion des Kosmos nehmen diese Unregelmäßigkeiten zu, wachsen zu immer größeren Masseklumpen heran; schließlich werden daraus Ansammlungen von Sternen: die Galaxien und Galaxienhaufen (siehe Seite 42). Bis der Kosmos nach einigen Milliarden Jahren gigantische Ausmaße erreicht und von weit mehr als 200 Milliarden Sterneninseln bevölkert ist.

Junge Galaxien verschmelzen anfangs noch mit ihren unmittelbaren Nachbarn, vergrößern sich, verändern ihre Gestalt. Später aber treibt der expandierende Raum sie immer weiter auseinander, sodass es nur noch selten zu Kollisionen kommt.

So bewegen sich auch die meisten Sterneninseln immer schneller von der Milchstraße fort. Ihr Licht wird durch die Ausdehnung des Raums zwischen uns und der jeweiligen Galaxie in die Länge gezerrt, verfärbt sich ins Rötliche und wird dabei auch dunkler. Nach einer viele Jahrtausende währenden Reise durch den Weltraum trifft es dann auf der Erde ein.

Dort fällt es im Winter 1928, gut 13,8 Milliarden Jahre nach dem Urknall, in das Objektiv eines Riesenteleskops auf dem Mount Wilson nahe Pasadena. Es nimmt seinen Weg durch das meterlange Rohr und gelangt schließlich in ein Spektroskop, das nur den Rotanteil hindurchlässt.

Die Strahlen werden dann auf eine Fotoplatte geworfen, wo sie ein Bild hinterlassen.

Eine Aufnahme, die beweist, dass der Raum nicht statisch ist, sondern sich seit Urzeiten ausdehnt; und die das gesamte damalige Weltbild umstürzen wird, nachdem sich ein amerikanischer Astronom namens Edwin Hubble dieses Bild genauer angesehen hat. •

**RAINER HARF**, Jg. 1976, ist Stv. Chefredakteur von GEOkompass. **MARIA KIRADY** ist Textredakteurin im Team von GEOkompass.

**TIM WEHRMANN**, Jg. 1974, arbeitet als Illustrator in Hamburg. Wissenschaftliche Beratung: **DR. ANDREAS MÜLLER**, Jg. 1973, ist Astrophysiker, Wissenschaftsmanager und Mitglied im »Exzellenzcluster Universe« der Technischen Universität München.

WIE

DAS  
LICHT

IN

DIE WELT

TEXT: UTE KEHSE UND MARIA KIRADY

ILLUSTRATIONEN: TIM WEHRMANN

Mehr als 200 Milliarden Galaxien strahlen heute im Kosmos, und zu jeder von ihnen gehören wiederum Abermilliarden Sterne. Dabei war anfangs, in der Zeit kurz nach dem Urknall, alle Materie in einem heißen, undurchsichtigen Gasnebel verteilt. Erst nach und nach brachte dieser Dunst die ersten Sterne hervor – und im Laufe der Jahrmilliarden entstand das kosmische Netz der Galaxien

## DIE ERSTEN LICHTER AM FIRMAMENT

---

Schon bald nach dem Urknall begannen sich an vielen Stellen im jungen Universum Gasnebel, die vor allem aus Wasserstoff und Helium bestanden, zu verdichten und zunehmend kompakte Wolken zu bilden. Je enger die Atome darin gepackt waren, desto heißer wurde es – bis schließlich, etwa 100 bis 200 Millionen Jahre später, die ersten Sterne im bis dahin dunklen All zündeten. Schon wenige Millionen Jahre danach häuften sich an manchen Stellen zahlreiche Sterne zu kleinen Archipelen

K A M

## ENTWICKLUNG DER GALAXIEN

---

- 44 Nach etwa 500 bis 700 Millionen Jahren sammelten sich jene kleinen Sternenarchipele aus der Anfangszeit und verschmolzen zu größeren Gebilden: Es waren die ersten Galaxien, die noch recht unregelmäßig geformt waren. Wohl Millionen Jahre später formierten sich die Sterne zu einer Art rotierender Scheibe. Auch weitere gigantische Gasmassen strömten in Richtung der sich ausbildenden Galaxie. Im Zentrum des Sternenarchipels wuchs ein Schwarzes Loch heran – mit der millionenfachen Masse der Sonne



## IM AUGE DES MATERIESTURMS

---

- 46** Das Schwarze Loch im Zentrum der Galaxie entwickelte sich zu einem extrem massereichen Ungetüm: Seine gewaltige Schwerkraft zog alles in der Umgebung an und versetzte Gasmassen in derart schnelle Rotation, dass sie sich auf viele Billionen Grad aufheizten und ein Teil in einem glühenden Strahl aus der Galaxie herausgeschleudert wurde. Weil dieser Strahl Radiowellen aussendet, nennen ihn die Astronomen Quasar: quasi-stellare Radioquelle



## NEUER GLANZ

---

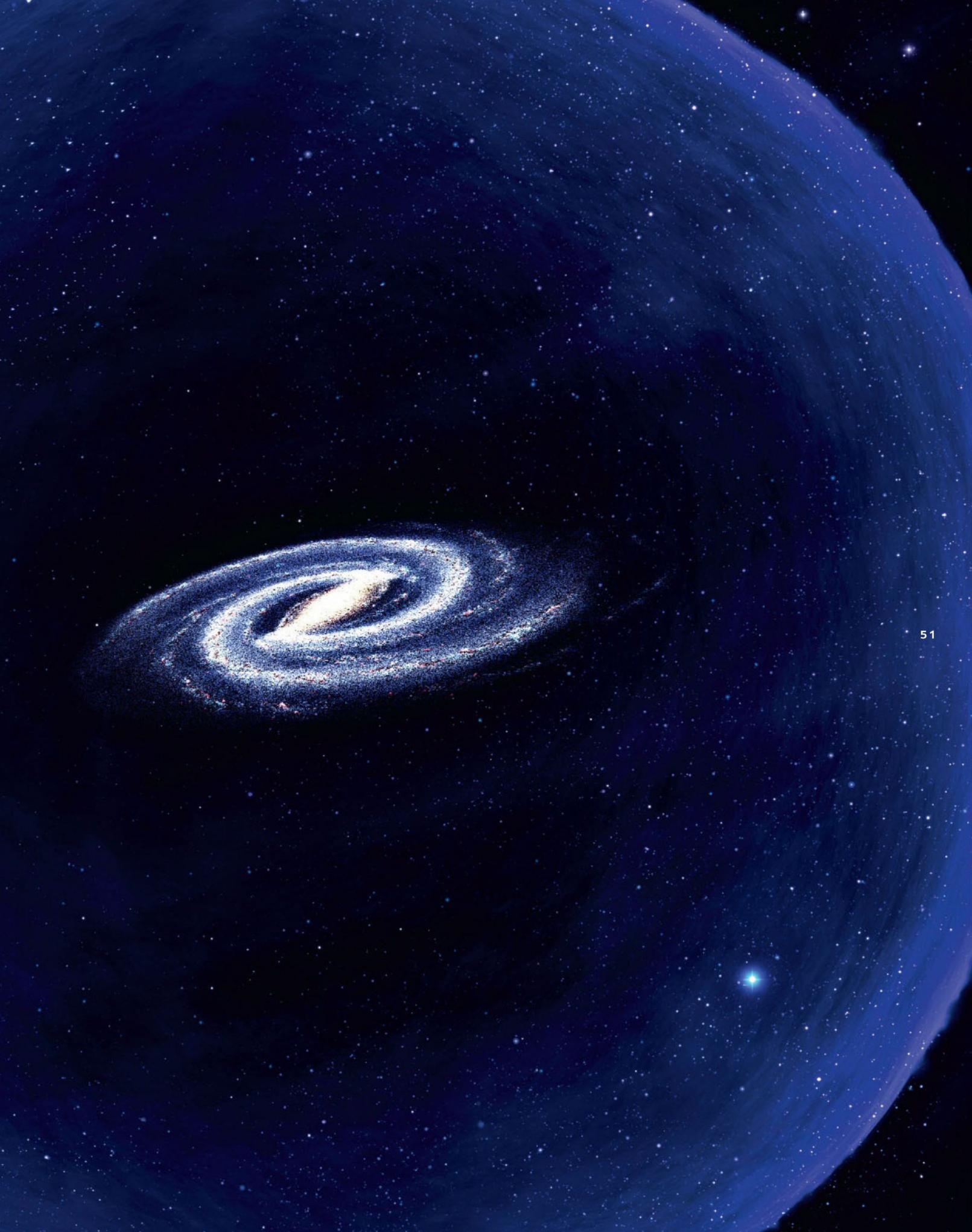
- 48 Nach einer Million Jahren, vielleicht aber auch erst 100 Millionen Jahre später, erlosch schließlich der Quasar im Zentrum der hier beschriebenen Galaxie. In den Außenbereichen des Sternenarchipels aber hatte sich mittlerweile so viel Materie gesammelt, dass dort überall neue Sonnen zündeten, die die ganze Galaxie erstrahlen ließen. Inzwischen hat die Galaxie auch immer mehr Struktur bekommen: So bildeten sich aufgrund hochkomplexer astrophysikalischer Mechanismen deutliche Spiralarme



## DER ANFANG VOM ENDE

---

- 50 Die meisten Galaxien erreichten nach rund sechs Milliarden Jahren ihre weitgehend finale Größe. Sie hatten in der Regel einen Durchmesser von 10 000 bis 500 000 Lichtjahren. Jedes Sternenarchipel schwebte inmitten einer gigantischen Sphäre aus Dunkler Materie: dem Halo (hier stark vereinfacht als Kugel dargestellt). Er war ein letztes Überbleibsel jener anfänglichen Phase der Galaxienbildung, als noch kein einziger Stern leuchtete – und sich nur eine gewaltige Wolke aus Gas im All zusammenballte



# A

Am 14. Mai 2009 verschiebt sich für alle den Kosmos erforschenden Wissenschaftler der Horizont des sichtbaren Universums. An jenem Tag erhält das Weltraumteleskop Hubble ein neues Auge: die Wide Field Camera 3. Mehrere Stunden sind zwei Astronauten eines Space-shuttles damit beschäftigt, den Apparat von der Größe eines kleinen Konzertflügels an dem Observatorium anzubringen, während sie 550 Kilometer über der Erdoberfläche im All schweben.

Die Mühe lohnt sich: Die hochauflösende Kamera hat einen weitaus schärferen Blick als das Vorgängermodell und fängt neben sichtbarem Licht auch Teile des ultravioletten und infraroten Spektrums auf. Das erlaubt ihr, in noch weiter entfernte Regionen des Alls vorzudringen.

Was sie von dort empfängt, sind faszinierende Botschaften aus der Vergangenheit. Denn die Lichtstrahlen aus den abgelegenen Gefilden des Kosmos brauchen einige Zeit, um den unermesslich weiten Raum zu durchqueren und zu uns zu gelangen. Sie zeigen ihren Ursprungsort daher so, wie er zu Beginn ihrer Reise aussah. Aus diesem Grund können wir nicht einmal den nächstgelegenen Nachbarstern unserer Sonne, Proxima Centauri, in seiner heutigen Gestalt betrachten. Er ist so weit entfernt, dass Lichtstrahlen von

dort mehr als vier Jahre brauchen, bis sie die Erde erreichen.

Und weil alles, was wir am Himmel sehen, in Wahrheit schon viel älter ist, erlaubt das Hubble-Teleskop spektakuläre Einblicke in die Geschichte des Alls. Es kann sogar Licht empfangen, das seit über 13 Milliarden Jahren unterwegs ist.

Auf diese Weise lässt sich, wie bei einem rückwärts spulenden Film, die Frühzeit des Kosmos und die Entstehung der ersten Galaxien sichtbar machen.

So veröffentlicht die US-Raumfahrtagentur NASA 2012 das Bild einer kleinen, recht unspektakulär erscheinenden Himmelsregion in der Südhemisphäre, das „Hubble eXtreme Deep Field“. Für diese Aufnahme hat das Hubble-Teleskop seine Kameras gut 23 Tage lang auf einen unauffälligen Ausschnitt des Firmaments gerichtet, um so auch noch die schwächsten Lichtstrahlen einzufangen.

Das Foto ist eine Sensation. Denn es zeigt nie zuvor Gesehenes: rund 5500 teils winzige rötliche und blau gefärbte Ovale, Scheiben und unregelmäßig geformte Punkte – Galaxien in unterschiedlichen Stadien ihrer Entwicklung, zum Teil aus der Anfangszeit des Universums.

Im Vordergrund des Bildes sind größere Sterneninseln auszumachen, wie sie seit einigen Jahrhunderten typisch sind – elegante Spiralen, die in ihrer Form der Milchstraße ähneln. Zahlreiche kleinere, verwischte Flecken zeigen weiter entfernte und mittelalte Galaxien.

Am interessantesten aber sind einige der winzigen roten Punkte. Denn diese unregelmäßig geformten, kleinen Leucht-

quellen sind die ältesten Galaxien, die Forscher bis heute gesehen haben. Es ist quasi ein Blick in die Kinderstube jener riesigen Sternenarchipele, die heute das All bevölkern. Das Bild zeigt sie, wie sie nur etwa 500 Millionen Jahre nach dem Urknall ausgesehen haben.

Diese ersten Sterneninseln sind ein Schlüssel zum Verständnis des Universums. Denn seit ihrem Anbeginn geben die schillernden Gebilde aus Milliarden von Sonnen dem All gleichsam seine großräumige Struktur. Die Galaxien sind die zentralen Orte, an denen sich die Masse des Kosmos konzentriert, wo aus sich verdichtenden Gaschwaden funkeln Sterne geboren werden – und wieder vergehen. Wie gigantische Maschinen saugen diese kosmischen Gebilde Materie aus dem Weltall an und verwandeln sie in Milliarden strahlender Himmelskörper.

# L

Lange Zeit aber war unklar, wie es überhaupt zu ihrer Entstehung gekommen ist. Erst dank komplizierter Mathematik, aufwendiger Simulationen und anhand der Aufnahmen hochauflösender Apparate wie des Hubble-Teleskops ist es Forschern gelungen, den Ursprung der Sternenarchipele zu entschlüsseln.

Stück für Stück konnten die Wissenschaftler auf diese Weise die Entwicklung der Galaxien rekonstruieren. Und fanden so heraus, dass ihre Geschichte in mehreren, teils turbulenten Etappen verlief:

- 380 000 Jahre nach dem Urknall war das All erfüllt von heißen, dichten Nebeln, die allmählich Form annahmen, seltsame Strukturen und Blasen bildeten und sich immer weiter verdichteten.

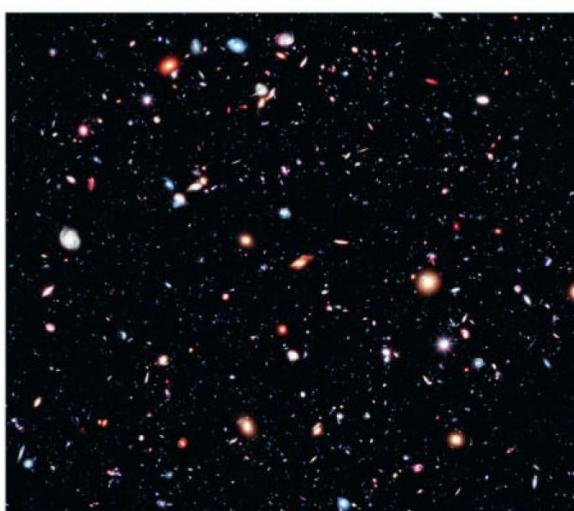
- 100 bis 200 Millionen Jahre später zündeten die ersten Sterne, die oft – je nach ihrer Masse – bereits nach zwei oder drei Millionen Jahren in spektakulären Explosionen wieder vergingen. Aus der Asche dieser Ur-Sonnen entwickelte sich eine noch viel größere Zahl von neuen Gestirnen, die sich nach einiger Zeit zu kleinen, unregelmäßig geformten Galaxien zusammenschlossen.

- 500 bis 700 Millionen Jahre nach dem Urknall kollidierten diese Sterneninseln miteinander und wuchsen auf diese Weise zu immer größeren Gebilden heran. Zugleich verdichtete sich die Materie im Zentrum einer jeden größeren Galaxie

## DAS TIEFSTE BILD DES UNIVERSUMS

Diese Aufnahme zeigt rund 5500 Galaxien in unterschiedlichen Entwicklungsstadien. Die winzigen roten Punkte kennzeichnen die ältesten Sternenarchipele,

größere bläuliche oder gelbe Strukturen sind mittelalte und jüngere Galaxien. Das Licht der ältesten Galaxien hat den weitesten Weg hinter sich: Es wurde vor mehr als 13 Milliarden Jahren ausgesandt

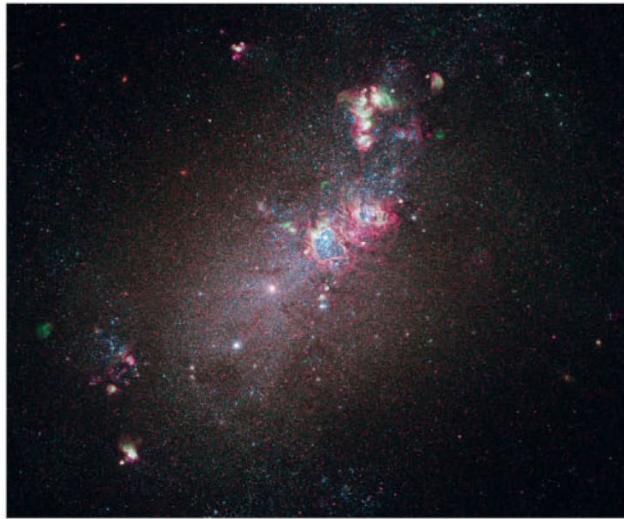


## Die Formenvielfalt der Sterneninseln

Galaxien lassen sich nach ihrem Erscheinungsbild in vier Kategorien einordnen



Vermutlich rund 30 Prozent der Galaxien sind spiralförmig. Die zentrale Scheibe mit mehreren Armen entsteht etwa, wenn eine Galaxie kleinere Nachbarn anzieht



Irreguläre Galaxien ohne erkennbare Struktur waren im jungen Universum vermutlich recht häufig. Heute sehen nur geschätzte drei Prozent der Sternenarchipele so aus



Balkengalaxien sind eine Sonderform der Spiralgalaxie. Sie entstehen, wenn sich die Materie im Zentrum nicht kreisförmig, sondern auf länglichen Bahnen bewegt



Ellipsoide Galaxien – die häufigste Form – können sich durch Fusion zweier ähnlich großer Spiralgalaxien bilden. Von ferne haben sie eine Ei- oder abgeflachte Kugelform

so sehr, dass die Masse von Millionen Sonnen auf einem winzigen Punkt zusammenfiel. Die so entstandenen extrem massereichen Schwarzen Löcher verschlangen gewaltige Mengen Gas. Dabei erstrahlten zuweilen Leuchtfeuer heller als Milliarden Sonnen.

- Nach drei Milliarden Jahren erreicht die Verschmelzung der Galaxien offen-

bar ihren Höhepunkt; sie brachten in dieser Zeit mehr Sterne hervor denn je, die sie hell leuchten ließen.

- Weitere drei Milliarden Jahre später hatten die Archipele den Großteil ihrer Gase in Sterne verwandelt und nun ihre mehr oder minder finale Gestalt erreicht.
- Heute, weitere 7,1 Milliarden Jahre später, entstehen erheblich weniger neue

Sterne als früher. Stattdessen verglimmt Gestirn um Gestirn. Dadurch streben auch die Galaxien allmählich ihrem Ende entgegen, bis sie irgendwann in der Schwärze des Alls versinken werden.

**Um die Geschichte der Galaxien** im Detail zu verstehen, muss man aber ganz an den Anfang zurückkehren. In eine Zeit

380 000 Jahre nach dem Urknall, die vor der Hubble-Aufnahme liegt und in der noch fast nichts auf die galaktischen Giganten hindeutet. Es ist eine düstere und öde Epoche.

In dieser Zeit bilden die Atome des frühen Universums – Wasserstoff, He-

# DIE ERSTEN STERNE SIND SCHWER WIE 100 SONNEN – UND MILLIONEN – MAL HELLER

54

rium und Spuren von Lithium und Beryllium – ein einförmiges, etwa 2700 Grad Celsius heißes Plasma. Das Universum gleicht einem dicken, undurchsichtigen Nebel ohne erkennbare Struktur.

Und weil der gesamte Raum sich seit dem Urknall ausdehnt und alle Masse auseinanderzieht, hätte es leicht geschehen können, dass sich dieses gleichförmige Gemisch im Laufe der Zeit immer weiter verdünnt und erkaltet. Dann gäbe es heute keine Sterne und Galaxien, geschweige denn Planeten oder Leben.

Dass es ganz anders kommt, gilt Astronomen als eines der größten Wunder in der Geschichte des Universums. Denn ihre Simulationen ergeben, dass Bewegung in das Gas kommt. Plötzlich formen sich Schwaden und strömen aufeinander zu. Teilchen beginnen, an bestimmten Stellen zu verklumpen. So bilden sich älterste zarte Strukturen im Nebel.

Forscher vermuten, dass die Gasteilchen sich nicht von allein in Bewegung setzen, sondern von einer unsichtbaren Masse angezogen werden, der Dunklen Materie. Die besteht aus rätselhaften Teilchen, die nahezu ausschließlich mittels Gravitation mit der sichtbaren Materie interagieren, aber so gut wie nie direkt

mit ihr in Kontakt treten. Daher ist es bislang auch noch nicht gelungen, sie zu entdecken oder ihre genauen Eigenschaften zu entschlüsseln (siehe Seite 120).

Die Wissenschaftler vermuten, dass die Dunkle Materie fünfmal mehr Masse im All auf sich vereint als die sichtbare Materie. Folglich muss auch die Wirkung ihrer Gravitationskraft um ein Fünffaches überwiegen. Die Dunkle Materie wirkt daher wie ein Magnet, der die sichtbaren Gasteilchen zu lenken vermag.

Und das Entscheidende dabei ist: Sie ist aufgrund winzig kleiner Unterschiede in der Materiedichte nicht gleichmäßig im Raum verteilt – und dieser kaum messbare Unterschied ist fundamental für die weitere Entwicklung des Kosmos.

Denn ohne diese Schwankungen hätten sich die Anziehungskräfte im Weltall zu allen Seiten hin ausgeglichen, und kein Gas hätte sich je verklumpt.

Da die Dunkle Materie an den kompakteren Stellen größere Anziehungskraft ausübt als in weniger dichten Regionen, setzt sie eine Art Kettenreaktion in Gang: Masse ballt sich zusammen und zieht immer schneller noch mehr Masse an. So bilden sich anfangs, zunächst im Verborgenen, Klümpchen aus Dunkler Materie, die zu immer größeren überdichten Regionen heranwachsen. Dank ihrer Schwerkraft ziehen die schließlich auch die gewöhnlichen Gasteilchen an.

Auf diese Weise wachsen sich die winzigen Unregelmäßigkeiten zu immer größeren Strukturen aus. So bilden die Klumpen aus Dunkler Materie bereits die ersten Keime späterer Galaxien – und sie werden auch ihr weiteres Schicksal maßgeblich bestimmen.

## D

Denn gut 100 Millionen Jahre nach dem Urknall haben die Klumpen bereits eine Größe von mehreren Billionen Kilometern Durchmesser erreicht. Astronomen bezeichnen sie als „Halos“.

Sie bilden gewissermaßen eine unsichtbare Sphäre, in deren Zentrum – dort wo die Anziehungskraft der Dunklen Materie am größten ist – sich immer mehr Gas der gewöhnlichen Materie ansammelt. Und irgendwann drängt sich so viel intergalaktisches Gas auf engem Raum in der Mitte des Halos, dass einzelne Teilchen gegeneinanderprallen.

Je dichter die heiße Masse wird, desto eher stoßen die Teilchen zusammen, bis sie ständig kollidieren. Schließlich berühren sich sogar die Kerne der einzelnen Atome selbst.

Nun kommt es zu einem wundersamen Prozess: Die Atomkerne verschmelzen miteinander. Wasserstoff und Wasserstoff vereinigen sich in einer komplexen Reaktion zum nächsts schwereren Element Helium (siehe Seite 86). Helium und Helium wiederum verbinden sich zu Lithium. Bei jeder dieser Kernfusionen verwandelt sich ein Teil der Materie in pure Energie, in Strahlung. Der Gasklumpen bläht sich nun auf zu einem monströsen Feuerball, bis zu 100-mal schwerer als unsere Sonne – und bis zu millionenfach heller.

Und genau dieser Augenblick des Aufleuchtens, 100 bis 200 Millionen Jahre nach dem Urknall, markiert einen der erhabensten Momente in der Geschichte des Weltalls: Ein Riesenstern entzündet sich in der Schwärze des Kosmos.

Und bringt erstes Licht ins All.

Anfangs lodern vielleicht zwei oder drei dieser gewaltigen Sonnen im Inneren eines jeden Halos, oft paarweise oder in kleinen Gruppen. Sie bilden nun winzige Inseln von Sternen in den Weiten des Alls – gleichsam erste Minigalaxien.

Doch die Glutbälle in den Halos existieren nicht lange. Weil die ersten Sterne so unfassbar heiß und leuchtkräftig brennen, haben sie nach nur wenigen Millionen Jahren ihren Treibstoff verbraucht. Sobald kein Brennstoff mehr zur Verfügung steht, werden die Gestirne instabil und brechen in sich zusammen.

Dieser Kollaps erzeugt eine Schockwelle, die so gewaltig ist, dass sie viele der massereichen Sterne in einer gigantischen Explosion auseinanderreißen.

Das sterbende Gestirn wird dabei komplett zerstört, sämtliche in seinem Inneren gebildeten Elemente ins All geschleudert, es bleibt kein Kern übrig.

Allerdings gibt es Ausnahmen: Übersteigt ein Stern eine bestimmte Masse, kann der Kollaps seine Materie derart stark verdichten, dass sie sich auf unfassbar kleinem Raum konzentriert – so sehr, dass die Anziehungskraft des Gebildes nicht einmal mehr Licht entweichen lässt. Solche Objekte nennen die Forscher „Schwarze Löcher“ (siehe Seite 104).

Immer wieder werden die jungen Galaxien nun von solchen Detonationen

erschüttert. Zur gleichen Zeit verschmelzen die Halos aus Dunkler Materie (die ja nicht direkt mit sichtbarer Materie wechselwirkt und vom Toben der ersten Sterne völlig unberührt bleibt) miteinander zu noch gigantischeren und schwereren Halos. Die saugen dank ihrer nun noch größeren Schwerkraft noch riesigere Mengen Gas aus der Umgebung an: Rohstoff für die zweite Sternengeneration.

# A

Allerdings unterscheiden sich die neuen Gestirne fundamental von ihren Vorgängern. Denn das Gas, aus dem sie entstehen, ist mit der Asche der Ur-Sonnen vermengt – und die enthält schwerere Elemente, etwa Kohlenstoff oder Sauerstoff, die durch die Verschmelzung von Atomkernen entstanden sind. Diese Vermengung sorgt dafür, dass nun auch kleinere Sonnen entstehen – die sich nicht mehr ganz so riesenhaft aufblähen wie die Massemonster der ersten Generation.

Erstmals bildet sich also eine Vielzahl kleiner und längerlebiger Sterne. Viele von ihnen sind in etwa so schwer wie unsere Sonne.

Aufgrund komplexer Prozesse gruppieren sich diese neuen Himmelskörper zu einer Art rotierendem Sternhaufen im Zentrum des Halos. Auch die weiter in den Halo einströmenden Gasmassen setzen sich dort ab – und bilden so frühe Vorläufer späterer Spiralgalaxien.

Etwa 500 Millionen Jahre nach dem Urknall enthalten diese Babygalaxien je-

weils bereits mehrere Tausend Sterne. Sie entsprechen jetzt genau jenen unregelmäßig geformten, rötlichen Flecken, die auf dem Foto des eXtreme Deep Field zu sehen sind.

Vermochten Astronomen ihre Geschichte bis hierhin nur anhand von Annahmen, Berechnungen und Simulationen zu rekonstruieren, erlauben ihnen Geräte wie das Hubble-Teleskop nun, die weitere Entwicklung gewissermaßen in Echtzeit mitzuverfolgen.

Und so können die Wissenschaftler genau beobachten, wie diese winzigen Sternenarchipele offenbar allerorten miteinander verschmelzen.

Auch die Halos aus Dunkler Materie, in die die Galaxien eingebettet sind, fusionieren miteinander, wie astronomische Messungen nahelegen. Und saugen anschließend noch mehr Gas aus der Umgebung an, was wiederum die Sternentstehung ankurbelt.

Und noch etwas erkennen die Wissenschaftler dank des Hubble-Teleskops: Mit jeder Verschmelzung sortieren sich die Galaxien gleichsam neu, verändern ihre Struktur. Kollidieren etwa zwei ähnlich große Galaxien miteinander, werden die Scheiben zerstört und die Sterne auf chaotische, irreguläre Umlaufbahnen gezwungen. Die gesamte Galaxie erhält dann die Form eines Ellipsoids, einer abgeflachten Kugel. Verlebt sich aber ein größeres Sternenarchipel viele kleinere ein, entsteht wie bei unserer Milchstraße die Form eines Wirbels mit ausgeprägten Spiralarmen (siehe Kasten Seite 53).

Allerdings, das beobachteten Forscher Anfang 2017, ist die Bewegung der Sterne innerhalb der ersten Spiralgalaxien zu Beginn noch deutlich langsamer als in späteren Zeiten.

Da die Geschwindigkeit der Gestirne maßgeblich von der Anziehungskraft der Dunklen Materie im Zentrum des Halos bestimmt wird (siehe Grafik Seite 133), ist dies eine weitere Bestätigung für die Wissenschaftler, dass sich dort durch Verschmelzung immer mehr Dunkle Materie verdichtet und auch von außen weiter nachströmt.

In der Mitte vieler Spiralgalaxien befindet sich zudem eine helle Aufwölbung, der „Bulge“. Er besteht vor allem aus älteren, rötlich leuchtenden Gestirnen.

Sie überstrahlen einen Himmelskörper, der sich vermutlich im Herzen einer jeden großen Galaxie verbirgt: ein gigantisches Schwarzes Loch – also ein wahres Monster mit der millionenfachen Masse der Sonne (siehe Seite 104).

Über den Ursprung dieser seltsamen Gebilde ist wenig bekannt. Die Astronomen rätseln, wieso es schon in der Jugendzeit des Universums extrem massereiche Schwarze Löcher geben konnte – so schwer, dass die Reste der ersten Sternengeneration bei Weitem nicht ausgereicht hätten, um gleichsam als Saatkörper zu dienen.

Möglicherweise entstanden sie aus Unmengen extrem verdichteten Gases, das ohne den Umweg über die Sternentstehung direkt kollabierte. Und indem solche Massemonster sämtliches Gas und auch etliche Sterne in ihrer direkten Umgebung verschlangen, legten sie offenbar immer weiter an Masse zu.

**Mehr noch:** Gerade in ihrer Anfangszeit erzeugen die Schwarzen Löcher im Zentrum einiger besonders großer Galaxien oft ein erstaunliches Phänomen – sie bringen die todgeweihte Materie so stark zum Leuchten, dass sie die restliche Galaxie 1000-fach zu überstrahlt vermag.

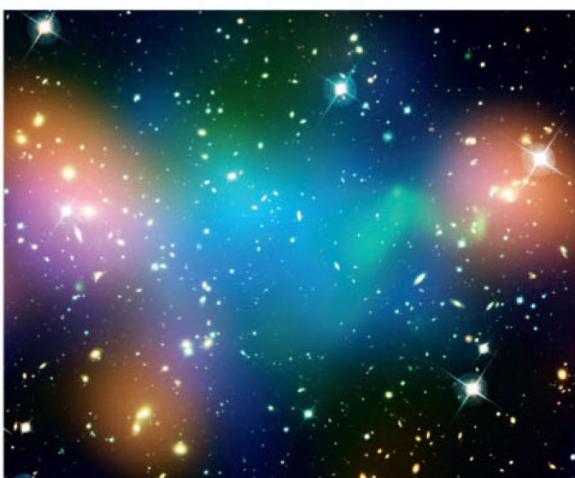
Denn dieses Gas stürzt nicht geradewegs in das Massemonster, sondern nähert sich ihm auf einer spiralförmigen Umlaufbahn, gleichsam einem Strudel, kaum größer als unser Sonnensystem.

Immer schneller und enger rast die Materie um das Schwarze Loch herum – und sendet dabei Licht sämtlicher Wellenlängen aus: sichtbare Strahlung, aber auch ultraviolettes und infrarotes Licht

## DIE UNSICHTBARE KRAFT

Wo sich Galaxien bilden und wo nicht, bestimmt die Dunkle Materie (hier bläulich dargestellt), die ungleichmäßig im All verteilt ist. Aufgrund der

Schwerkraft sammelt sich in ihrer Nähe auch mehr der sichtbaren Materie – zum Beispiel heiße Gasmassen (grünlich). In Bereichen hoher Gasdichte entstehen Sterne und Galaxienhaufen (ihr Sternenlicht ist hier orangefarben dargestellt)



sowie Radiowellen, Röntgen- und Gammastrahlung. Es werden derart starke Kräfte entfesselt, dass ein Teil der Materie schließlich doch der Anziehungskraft des Schwarzen Lochs entkommt und als gleißender Teilchenstrahl ins All hinauschießt (siehe Illustration Seite 46).

Da die leuchtenden Zentren dieser jungen Galaxien aus der Ferne wirken wie ein einzelner Stern und als Erstes durch ihre Radio-Emissionen entdeckt wurden, haben Forscher sie „quasi-stellare Radioquellen“ genannt, kurz: „Quasare“. Auch auf der Aufnahme des eXtreme Deep Field ist das Leuchten eines Quasars zu sehen.

# E

Erst drei Milliarden Jahre nach dem Urknall lässt das kosmische Leuchtfieber allmählich nach. Denn die Schwarzen Löcher in den Zentren vieler Galaxien haben nun alle Materie in ihrer unmittelbaren Umgebung verschlungen. Zugleich bricht jetzt ein Zeitalter an, in dem die Sternenarchipele in einem Glanz ganz anderer Art erstrahlen.

56

Da sie nach und nach immer weiter an Masse zugelegt haben, erreichen sie nun eine Phase, in der sie so viele neue Sterne gebären wie nie zuvor (und wie nie wieder danach). Die Galaxien weisen jetzt Milliarden junger, heller Sonnen auf.

Manche Archipele sind nun in einem Stadium, das Astronomen „Starburst“ (Sternenausbruch) nennen, in dem die Zahl junger Sterne geradezu explosionsartig zunimmt: Die Galaxien verwandeln binnen weniger Millionen Jahre so viel Gas in Sterne, dass sie ihren Rohstoff für neue Gestirne bald aufgebraucht haben. Darum währt diese galaktische Glanzzeit auch nicht lange.

Die Phase, die danach folgt, leitet den schlechrenden Niedergang der Sternenarchipele ein. Da das im Weltall vorhandene Gas zunehmend aufgebraucht ist, halbiert sich im Laufe der nächsten drei Milliarden Jahre die Rate, mit der die Galaxien neue Gestirne erzeugen. In den größten Sterneninseln kommt die Neubildung gar völlig zum Erliegen.

So haben die meisten Galaxien sechs Milliarden Jahre nach dem Urknall nun ihre weitgehend finale Größe. Ihr Durchmesser beträgt meist 10 000 bis 500 000 Lichtjahre (so lange braucht ein Strahl,

um von ihrem einen Ende zum anderen zu gelangen), und in ihrem Inneren befinden sich im Schnitt – so wie in der Milchstraße – jeweils mehrere Hundert Milliarden Sonnen. Auch vereinigen sich die Galaxien nur noch selten zu noch größeren Sterneninseln, denn die Abstände im

## 95 PROZENT ALLER STERNE, DIE ES JE GEBEN WIRD, SIND BEREITS ENTSTANDEN

Kosmos werden durch die allumfassende Expansion mit der Zeit immer weiter.

Wer nun gewissermaßen von außen auf das Universum blicken könnte, würde darin eine Struktur erkennen, die einem gigantischen Netz ähnelt: Denn jene Bereiche, an denen sich ganz zu Anfang im heißen Urnebel des Kosmos die Dunkle Materie ein klein wenig dichter ballte, waren gleichsam die Saatkörner für riesige Ansammlungen von Galaxien viele Jahrhunderte später.

Diese Haufen sind, so nehmen Forscher an, über eine Art unsichtbare Fäden aus Dunkler Materie, in denen sich nur vereinzelt Galaxien befinden, miteinander verbunden.

Dazwischen aber haben sich ausgedehnte Hohlräume geformt, in denen das Universum gleichförmig leer wirkt: Alle sichtbare und Dunkle Materie, die einst dort existierte, ist durch die Schwerkraft zu dichteren Stellen hingezogen worden.

Heute, 13,8 Milliarden Jahre nach dem Urknall, enthält dieses kosmische Netz mehr als 200 Milliarden Galaxien (neue Auswertungen, unter anderem von Daten des Hubble-Teleskops, legen sogar nahe, dass es möglicherweise noch weitaus mehr sein könnten). An dieser

Zahl wird sich nun kaum noch etwas ändern.

Denn es ist weitgehend Ruhe eingekehrt im All: Rund 95 Prozent aller Sonnen, die das Universum jemals beherbergen wird, sind bereits entstanden.

Die Milchstraße etwa erzeugt längst nicht mehr so viele Sterne wie ehedem. Sie ist auf dem Weg, eine alte Galaxie zu werden, die zunehmend röthlich leuchtet, weil die meisten Gestirne darin verglimmen. Auch alle anderen Archipele werden dieses Schicksal irgendwann erleiden.

# U

Und so wird vermutlich eines Tages, viele Milliarden Jahre nach unserer Zeit, wenn alles Gas in den Galaxien aufgebraucht ist, zwangsläufig auch der letzte Stern verglühen und wieder tiefe Finsternis im Weltall einkehren.

Der belgische Priester und Astrophysiker Georges Lemaître, der als Begründer der Urknalltheorie gilt, verglich das heutige Universum einmal mit einem langsam verlöschenden Feuerwerk.

Nur ein paar Leuchtstreifen hier und dort, etwas Asche und Rauch zeugten noch von der einstigen Pracht: „Wir stehen auf einem Stück gut gekühlter Schlauch“, schrieb Lemaître, „sehen, wie die Sonnen verblassen, und versuchen, den verschwundenen Glanz zu ermessen, in dem diese Welten entstanden sind.“

Die Suche nach dem Anbeginn der Galaxien aber ist für uns Menschen noch lange nicht vorbei: Im Jahr 2018 wird der Nachfolger des Hubble-Observatoriums ins All geschossen – das James-Webb-Space-Teleskop. Dank eines riesigen Spiegels und besserer Kamerä wird es in der Lage sein, noch tiefer in den Kosmos zu blicken – und damit noch weiter zurück in die Vergangenheit als je zuvor.

Und dann, so hoffen die Forscher, werden sie die Entstehung der allerersten Sternenarchipele auf einem Bild festhalten können.

Die Geburt der Galaxien •

**UTE KEHSE**, Jg. 1969, ist Wissenschaftsjournalistin in Delmenhorst. Der Illustrator **TIM WEHRMANN**, Jg. 1974, lebt und arbeitet in Hamburg. Wissenschaftliche Beratung: **PROF. DR. VOLKER BROMM**, University of Texas in Austin; **PROF. DR. JOCHEN WELLER**, Ludwig-Maximilians-Universität München.

# Kokosprodukte Rasendünger Kühlboxen

Jetzt im Handel!

Nr. 06 | Juni 2017 | 4,50 €

www.oekotest.de

ÖKO-TEST RICHTIG GUT LEBEN

**TEST Erdbeer-konfitüre**

Weitere TESTs

- Arbeitshandschuhe
- Kokosprodukte
- Rückkauf von Rentenabschlägen
- Wundcremes
- Schnuller
- Fußbalsam

**EXTRA** Babys und Kleinkinder



Durchdruck 4,50 € | D 0311 | Schmal 1,30 €

06

4190531104506

Ab 29.6. im Handel!

Nr. 07 | Juli 2017 | 4,50 €

www.oekotest.de

ÖKO-TEST RICHTIG GUT LEBEN

**TEST Nagellack**

Weitere TESTs

- Rasendünger
- Freizeitsandalen
- Kühlboxen
- Babyphone
- Erfrischungsgetränke

**50 SEITEN EXTRA Sommer**



Durchdruck 4,50 € | D 0311 | Schmal 1,30 €

07

4190531104508

# Wir testen alles. Testen Sie uns!

**ÖKO-TEST-Magazin – für Sie monatlich am Kiosk!**

Bestellen Sie auch direkt per Telefon 069 / 365 06 26 26 oder im Shop unter [shop.oekotest.de](http://shop.oekotest.de)

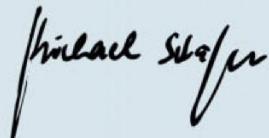
# Die ganze Welt des Wissens.

Lesen oder verschenken Sie 4x GEOkompakt mit einer exklusiven Prämie zur Wahl.

“

GEOkompakt äse ti rt die Gr ndlagen de  
W sse schaf – le t verstä di her Spr he, m  
ufwen ge ustrationen u d brillanter Fotogra e.

Herz hst  
Ihr



“



Chefredaktor GEOkompakt



NR. 51 **GEOkompakt**  
Die Grundlagen des Wissens

Die neuesten Erkenntnisse der Forschung

Die Geburt des Universums

Wie aus dem Nichts die Welt entstand.

URKNALL Was im allerersten Moment geschah

DUNKLE MATERIE Warum es uns ohne sie nicht gäbe

WELTFORMEL Die Suche nach der Theorie von allem

EXOPLANETEN Neue Hoffnung auf eine zweite Erde

IHRE Ab vor i

1. Wunsch-Prämie
2. Jederzeit kündbar
3. Bequem
4. Bildungsrabatt



1. GEOkompakt-Bestseller

- „Sport“
- „Wie“



2. Schraubendreher-Set, 49-teilig

- r
  - 4
  - : €
- ubendreher,  
Bits

Prämie  
zur Wahl



3. Sporttasche „Iceland“, schwarz-grau

- H , r i i .
  - m r Gurt
  - 9 m
- €



4. Amazon.de-Gutschein, Wert: 10, €

- wi ri i i
  - r d c s
  - ä c A
  - Bü v m.
- Zuzahlung

1 Jahr GEOkompakt für nur 38,- € bestellen – Karte abschicken oder

per Telefon (beteiligt Nr. 167878)  
167878 167476 167477 al S de te e (xkl P me) 6 7 78

online mit noch mehr Angeboten

+49(0)40/55558990

[www.geo-kompakt.de/abo](http://www.geo-kompakt.de/abo)

# DER BLICK NACH OBEN

TEXTE: TILMAN BOTZENHARDT

UND BERTRAM WEISS

60



Mit gewaltigen Apparaten dringen Forscher immer weiter ins All vor und ergründen so seinen Ursprung. Nun ist eine neue Generation hochsensibler Teleskope und Detektoren in Planung, die selbst feinste Strahlung aus den Tiefen des Raums aufspüren sollen

# Botschaften aus dem All

## Cherenkov Telescope Array

Himmelsphänomene wie beispielsweise Neutronensterne senden extrem energiereiche Strahlung aus. Wenn solche elektromagnetischen Wellen auf die Lufthülle der Erde treffen, leuchten typische blaue Lichtblitze auf. Diese Funken flammen allerdings so kurz auf, dass sie für das menschliche Auge nicht wahrnehmbar sind. Wissenschaftler vermögen sie ausschließlich mit Spezialteleskopen (hier eine Simulation) und sehr schnellen Kameras einzufangen, um aus diesen Daten Informationen über natürliche kosmische Teilchenbeschleuniger wie Supernova-Explosionen und Doppelsternsysteme zu gewinnen. Um möglichst viele dieser Blitze zu erfassen, wollen Forscher weltweit mehr als 100 Stationen mit solchen Detektoren errichten lassen und sie dann zu einem einzigen großen Teleskop zusammenschalten. Voraussichtlicher Baustart ist 2018.

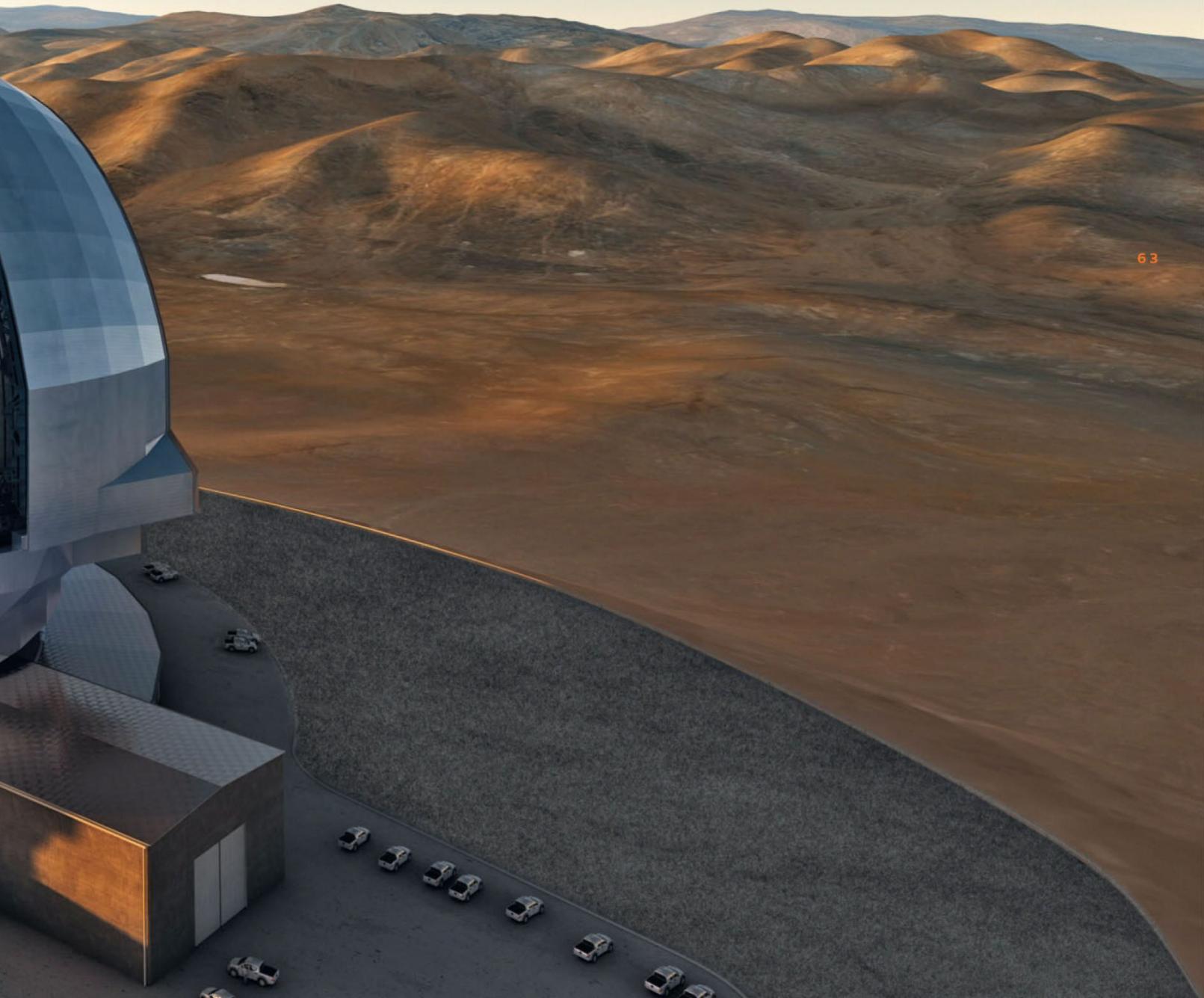




# Beobachter ferner Welten

## European Extremely Large Telescope

Das von den Sternen ausgesandte sichtbare Licht bündeln optische Teleskope mithilfe eines Spiegels. Auf diese Weise offenbaren sie Einzelheiten am Firmament, die für das bloße Auge nicht wahrnehmbar sind. Je größer der Durchmesser der reflektierenden Lichtsammler, desto mehr Himmelskörper sind zu erkennen – solche in äußerster Ferne wie auch Objekte, die nur wenig Licht abstrahlen. Deshalb entwickeln Forscher immer größere Anlagen. Mit einem Spiegeldurchmesser von 39 Metern wird das Extremely Large Telescope der Europäischen Südsternwarte, installiert auf einem Berggipfel in Chile, wo die Luft besonders klar und ruhig ist, voraussichtlich ab 2024 weitaus schärfer ins All blicken als alle anderen optischen Teleskope zuvor (Details siehe Seite 70).

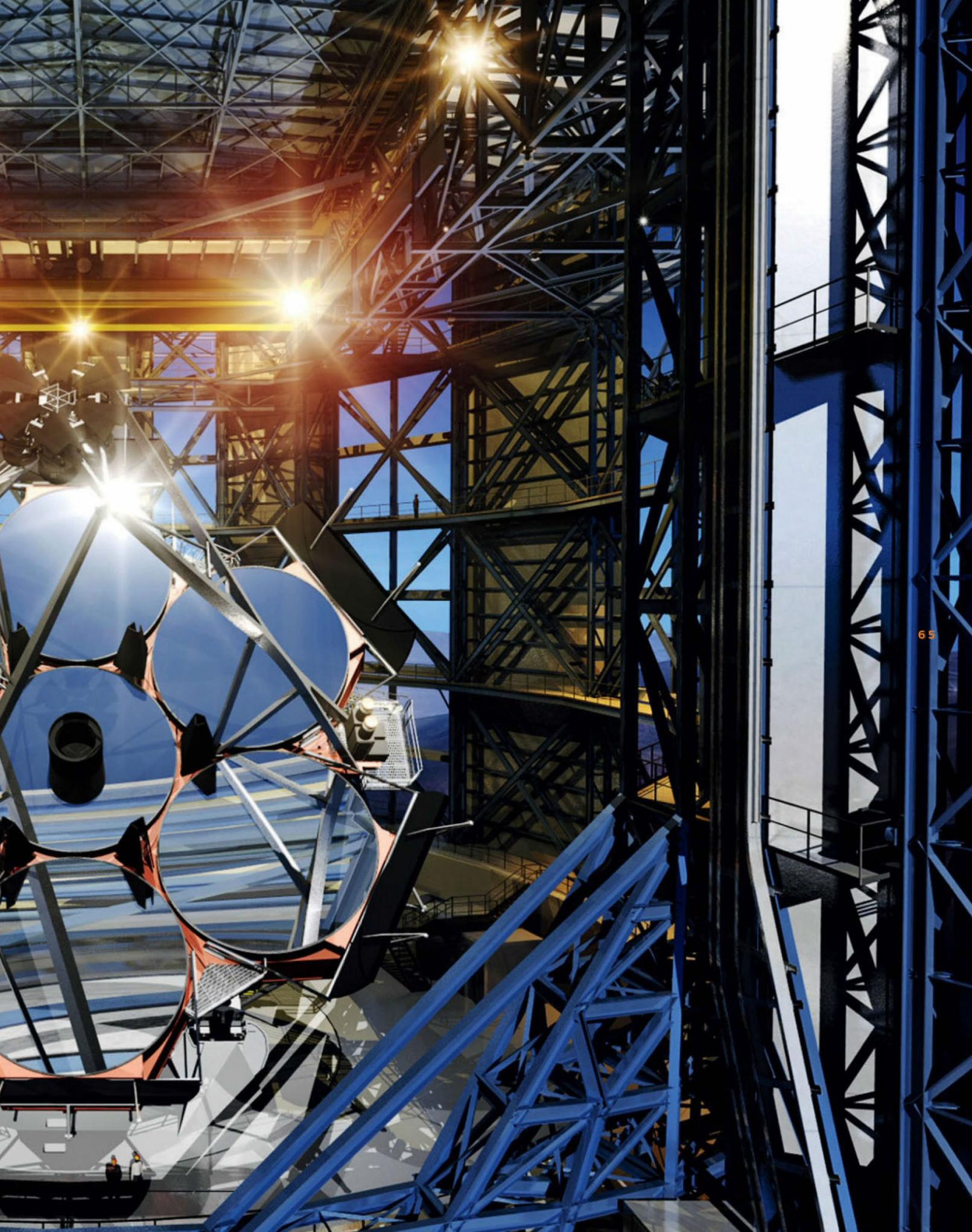


# Signale aus der Unendlichkeit

## Giant Magellan Telescope

**A**b 2022 soll am Las Campanas Observatory in Chile ein Spiegelteleskop von bislang ungekannter Komplexität den Betrieb aufnehmen. Sieben Spiegel mit jeweils einem Durchmesser von 8,40 Metern und sieben weitere kleinere Reflektoren bündeln gemeinsam Licht von den Sternen und lenken es auf eine Kamera (siehe auch Seite 71). Die Spiegel sind beweglich, sodass selbst kleinere Wirbel in der Erdatmosphäre korrigiert werden können, die andernfalls jedes Bild der Sterne verwischen. Auf diese Weise sollen von der Erde aus zehnmal schärfere Darstellungen kosmischer Objekte möglich sein als mit dem Hubble-Weltraumteleskop, das weit über der turbulenten unteren Atmosphäre stationiert ist.



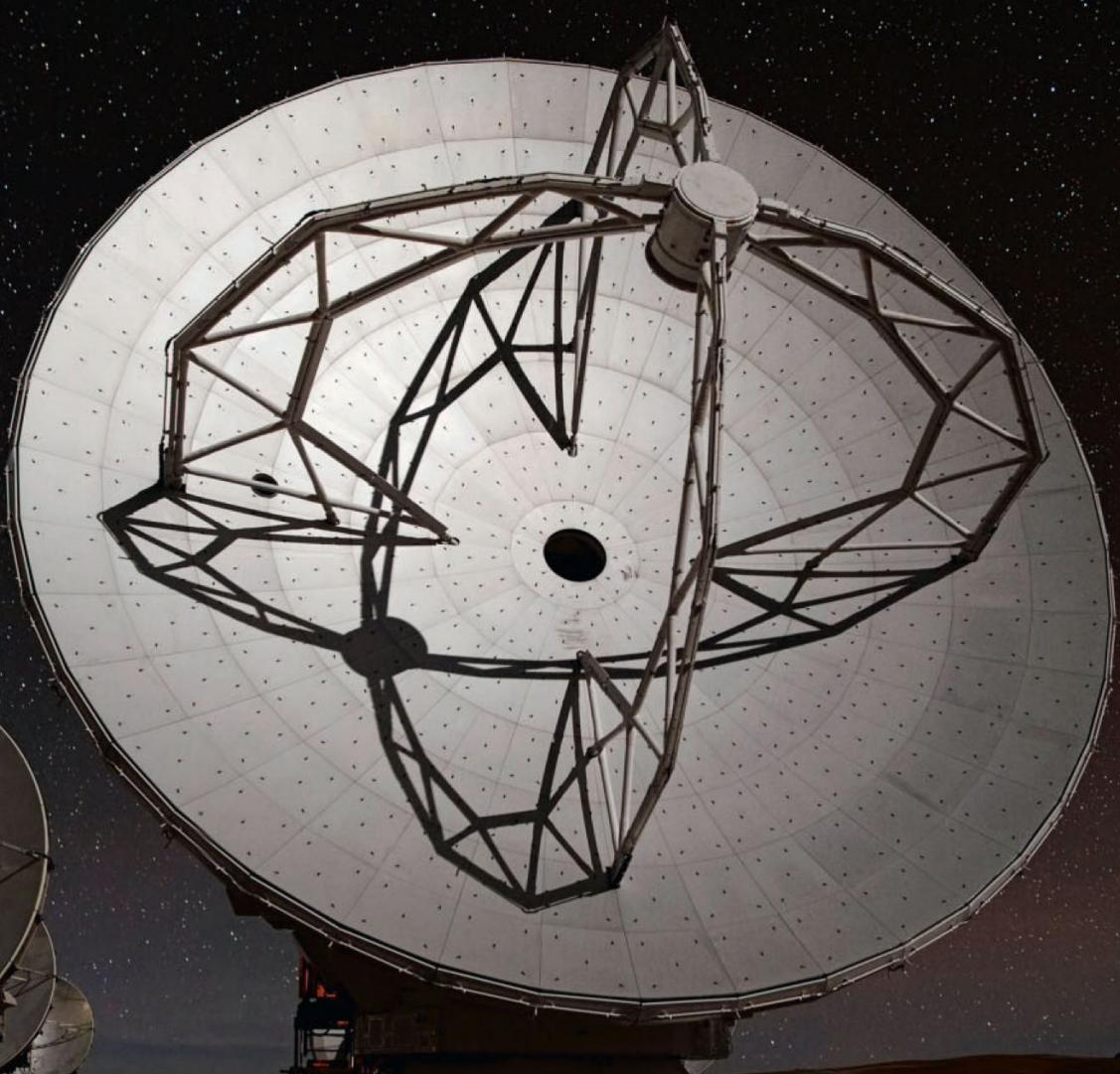


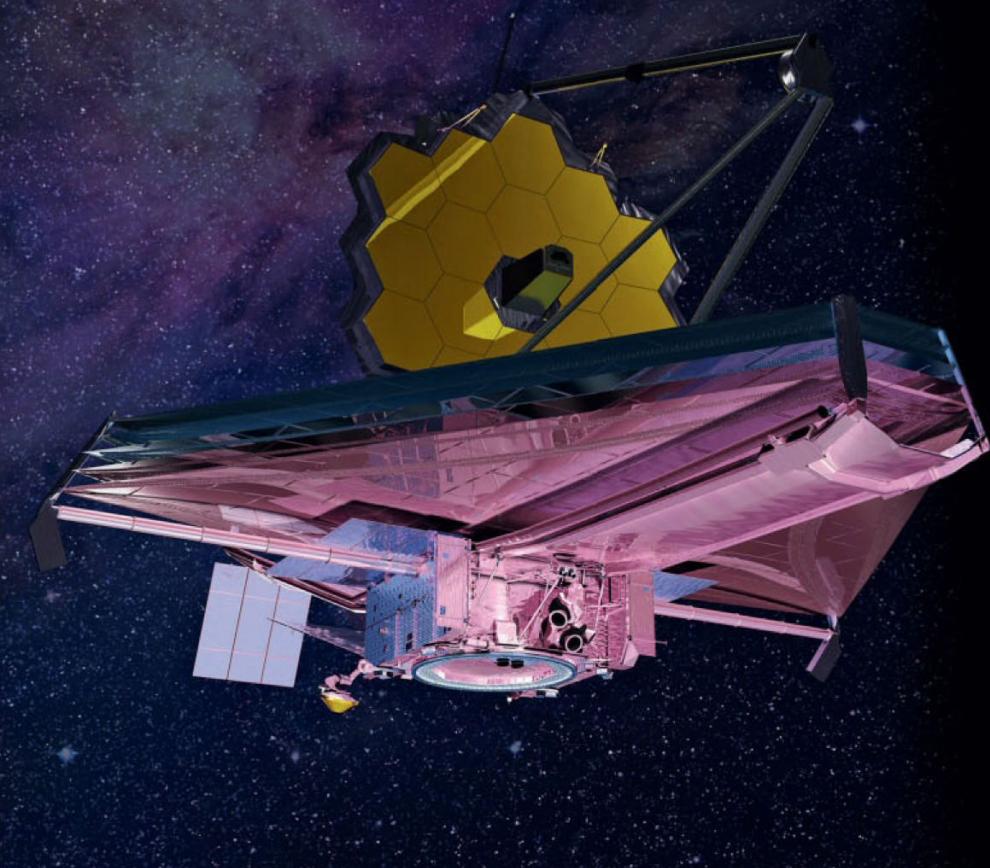
# Reflektoren für Radiowellen

## Atacama Large Millimeter/submillimeter Array

Menschen können mit ihren Augen nur einen kleinen Bereich der elektromagnetischen Strahlung wahrnehmen. Viele Phänomene im Universum senden Wellen aus, die für uns unsichtbar sind, aber für Wissenschaftler wichtige Informationen enthalten. Seit den 1930er Jahren entwickeln Astronomen daher Radioteleskope: Sie sammeln und bündeln Strahlung, deren Wellenlänge weitaus größer ist als die des sichtbaren Lichts. Forscher und Techniker der Europäischen Südsternwarte haben auf einer Hochebene in der chilenischen Atacama-Wüste, 5000 Meter über dem Meeresspiegel, 66 mobile Antennen positioniert (Abbildung), um auch extrem schwache Strahlung mit Wellenlängen im Bereich von etwa einem Millimeter einzufangen. Aus den Überlagerungen der einzelnen Signale errechnet ein Computer äußerst hochauflösende Bilder. Die 2013 eingeweihte Anlage ist so empfindlich, dass sich mit ihr sogar extrem kalte Molekülwolken beobachten lassen, aus denen neue Sterne entstehen.







## Das Auge im All

### James Webb Space Telescope

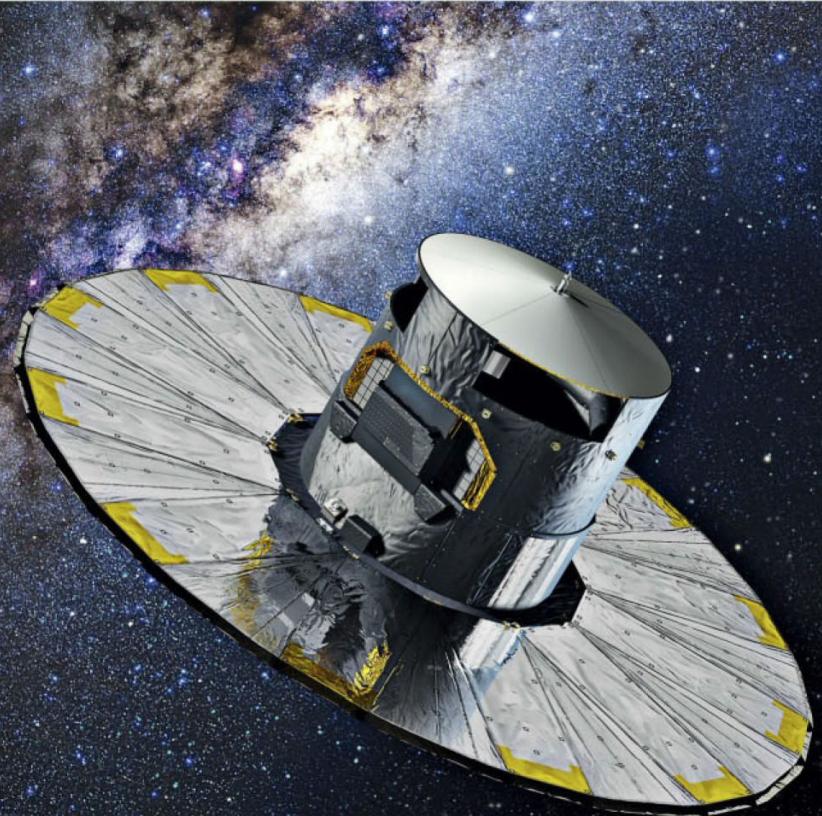
Ab 2018 soll dieses Weltraumteleskop von einer Position auf der sonnenabgewandten Seite der Erde bis an die Grenzen des sichtbaren Universums blicken und das Licht der ersten Sterne und Galaxien aufspüren, die nach dem Urknall entstanden sind. Dazu sammelt der Hauptspiegel für das menschliche Auge unsichtbare Infrarotwellen, die auf der Erdoberfläche größtenteils von der Atmosphäre absorbiert würden. Ein mehrlagiger Schutzschild schirmt die Anlage dabei gegen die starke Infrarotstrahlung ab, die von Sonne und Erde ausgeht. Zudem verfügt der Weltraumspäher über eigene Triebwerke zur Kurskorrektur.

68

## Sternensammlerin

### Gaia

Ein Punkt in 1,5 Millionen Kilometer Entfernung von der Erde umkreist die Raumsonde Gaia und bewegt sich dabei gemeinsam mit unserem Heimatplaneten um die Sonne. Innerhalb von fünf Jahren sollen ihre Instrumente, die noch in 1000 Kilometer Entfernung ein Haar wahrnehmen könnten, mehr als eine Milliarde Sterne in der Milchstraße und benachbarten Galaxien erfassen. Mit den seit 2014 übermittelten Daten über Position, Entfernung, Bewegung, Helligkeit und Farbe erstellen Hochleistungscomputer fortlaufend eine dreidimensionale Karte, aus der sich auch Vergangenheit und Zukunft ablesen lassen. Denn die Bewegung der Sterne verrät, woher sie kommen und wohin sie gehen.



## Besondere Kamera

### Spitzer Space Telescope

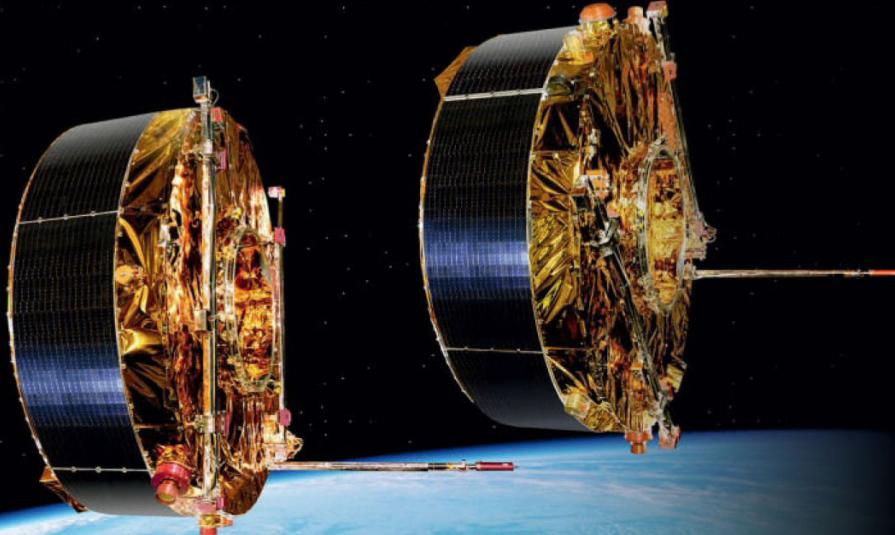
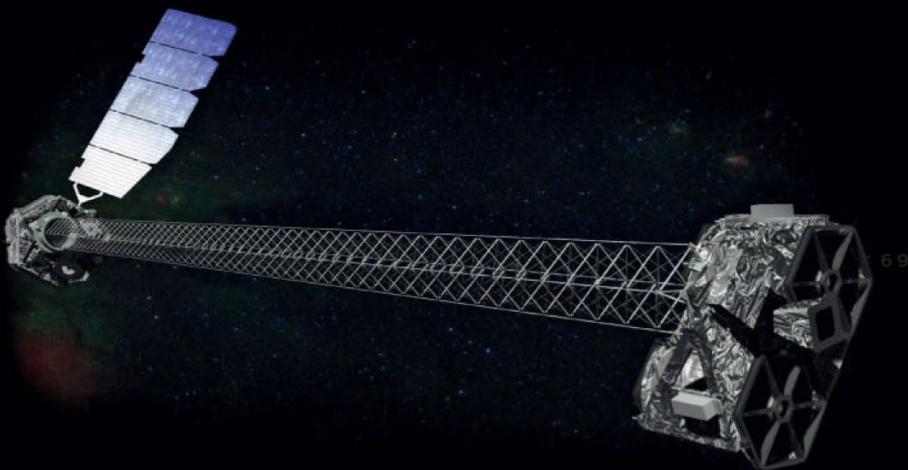
**S**chon seit 2003 folgt das Spitzer-Weltraumteleskop der Erde mit wachsendem Abstand auf ihrem Sonnenorbit; inzwischen beträgt die Entfernung mehr als 237 Millionen Kilometer. Noch immer fängt ein Teil der Instrumente an Bord Infrarotstrahlung ein und übermittelt Daten zur Erde, aus denen Astronomen Erkenntnisse über ferne Welten und das frühe Universum gewinnen, aber auch über relativ nahe gelegene Exoplaneten.



## Strahlenfänger

### NuSTAR (Nuclear Spectroscopic Telescope Array)

**S**upermassereiche schwarze Löcher und die Überreste explodierender Sterne machen sich vor allem durch besonders energiereiche Röntgenstrahlung bemerkbar. Der 2012 in eine Erdumlaufbahn gebrachte NuSTAR-Satellit empfängt diese Signale mit zuvor unerreichter Genauigkeit – zwei spezielle Teleskope an einem zehn Meter langen Ausleger fokussieren die einfallende Strahlung und leiten sie zu Detektoren im Satellitenkörper.



## Im Sonnenwind

### Cluster II

**N**eben Licht sendet die Sonne auch einen gefährlichen Strom aus elektrisch geladenen Teilchen in Richtung Erde. Doch das Magnetfeld unseres Planeten schafft eine Barriere, die dieser »Sonnenwind« nicht durchdringen kann. Die vier baugleichen, in variabler Konstellation fliegenden Satelliten der Mission Cluster II ermöglichen es Forschern, die veränderliche Struktur und Begrenzung dieser geschützten Zone – der Magnetosphäre – genau zu vermessen.



## Horchen im Kosmos

### FAST (Five-hundred-meter Aperture Spherical Telescope)

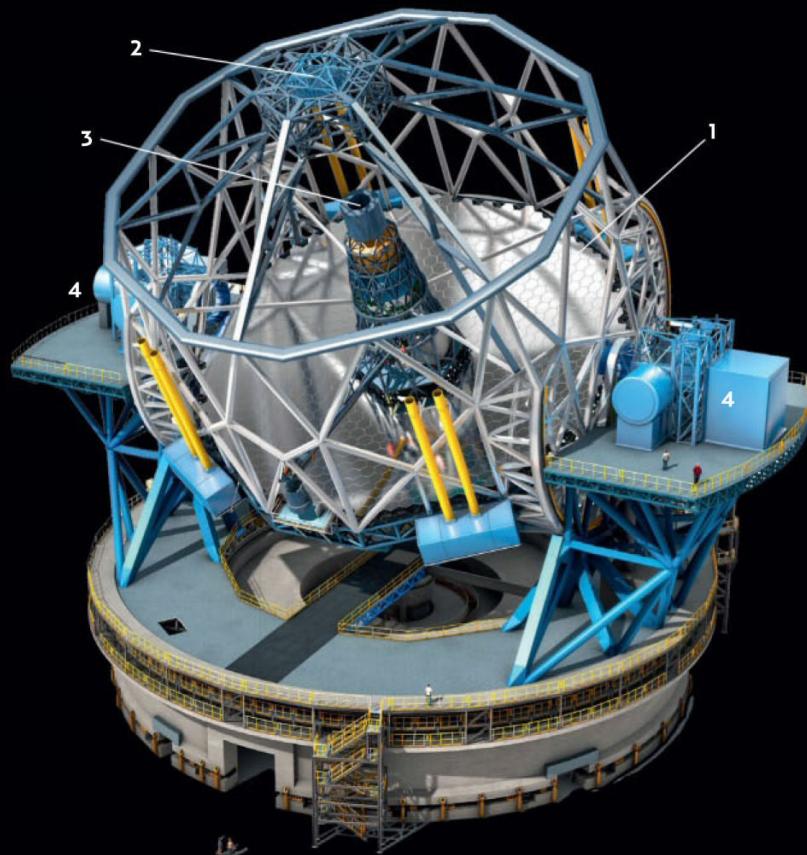
Seit Herbst 2016 zeichnet dieses Radioteleskop mit der weltweit größten Reflektorfläche elektromagnetische Wellen aus den Tiefen des Universums auf: 500 Meter misst die riesige Schüssel, die Ingenieure im Süden Chinas aus 4600 Paneelen zusammengesetzt haben. Sie reflektieren die Signale aus dem All auf einen Empfänger, den sechs rund 100 Meter hohe Masten über der Schüssel in Position halten. Von den Daten erhoffen sich Forscher unter anderem neue Erkenntnisse über schwer zu beobachtende Himmelskörper wie etwa Pulsare – Überreste erloschener Sterne. Daneben unterstützt das Teleskop die Suche nach Signalen außerirdischer Zivilisationen.

70

## Spiegelkabinett

### European Extremely Large Telescope

Diese Darstellung zeigt das geplante Riesenteleskop (siehe Seite 62) ohne den äußeren Schutzbau: Eine gewaltige Mechanik erlaubt das Drehen der gesamten Anlage sowie das Kippen des 39 Meter großen Hauptspiegels (1). Er leitet einfallendes Licht zunächst auf den Sekundärspiegel (2) am oberen Ende der Konstruktion. Von dort fällt das Licht in die Spitze des auf dem Hauptspiegel montierten Turms (3). Drei weitere, zum Teil verformbare Spiegel in dessen Innenraum korrigieren Bildstörungen durch atmosphärische Luftwirbel und leiten das Licht seitlich aus dem Turm zu den wissenschaftlichen Instrumenten (4), die auf den erhöhten Plattformen links und rechts neben dem Hauptspiegel stehen.



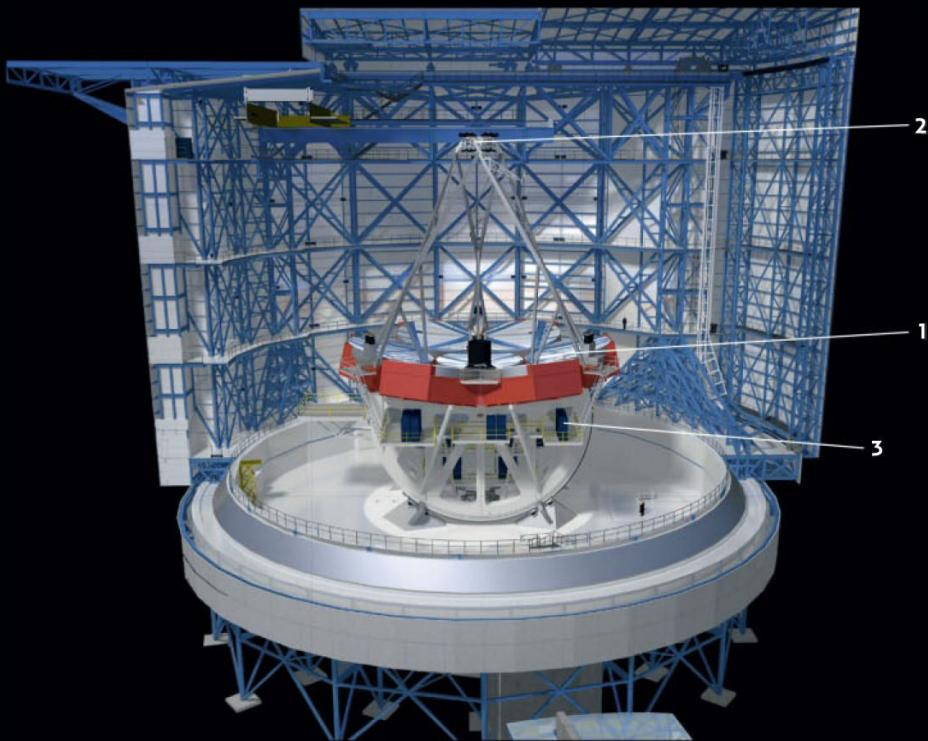
## Suche im Quartett

### Very Large Telescope

Vi  
ier optische Teleskope mit Hauptspiegeln von 8,2 Meter Durchmesser stehen auf dem Gipfel des Cerro Paranal in Chile. Schon im Alleinbetrieb vermag jedes von ihnen Himmelskörper aufzuzeichnen, deren Licht vier Milliarden mal schwächer ist als bei mit bloßem Auge sichtbaren Objekten. Ihre ganze Kraft offenbart die Anlage aber erst, wenn das Licht der Einzelteleskope über Spiegel und unterirdische Tunnel zusammengeführt wird: Ihre optische Leistung gleicht dann der eines Teleskops mit einem Hauptspiegel von rund 130 Meter Durchmesser. 2004 ermöglichte das Very Large Telescope die erste Entdeckung eines Exoplaneten allein durch direkte Beobachtung.



71



## Fernrohr von morgen

### Giant Magellan Telescope

Die Illustration links zeigt die gewaltigen Dimensionen des geplanten Teleskops (siehe Seite 64): Allein der umgebende, drehbare Schutzbau (vordere Hälfte im Bild entfernt) ist rund 50 Meter hoch. Sein Dach und die Seitenwände enthalten bewegliche Strukturen und können sich öffnen und schließen, um die sieben Hauptspiegel (1) des Teleskops von Wind, Wetter und störendem Streulicht des Mondes abzuschirmen. Die Hauptspiegel werfen das Sternenlicht auf sieben über ihnen montierte Sekundärspiegel (2), von wo es auf ein Loch im zentralen Hauptspiegel zurückfällt und dort eine Kamera oder wissenschaftliche Messgeräte erreicht (3).

# EINE FORMEL FÜR DIE WELT





**Was geschah beim Urknall?**

**Welches Wesen haben  
Raum und Zeit? Ist unser  
Universum nur eines  
von vielen? Der Physiker  
Hermann Nicolai grübelt  
über die größten Rätsel  
des Kosmos – und  
ist auf der Suche nach  
einer Gleichung, die  
alles erklärt**

73

INTERVIEW: RAINER HARF UND MARIA KIRADY

FOTOS: BENNO KRAEHAHN

Prof. Hermann Nicolai – hier im Potsdamer Einsteinturm, benannt nach dem Vater der Relativitätstheorie – ist Direktor des Max-Planck-Instituts für Gravitationsphysik.

Er sucht nach einer Theorie, die das Geschehen im frühen Universum umfassend beschreibt, und ist 2017 mit einem der renommiertesten europäischen Forscherpreise (ERC Advanced Grant) für seine Arbeit ausgezeichnet worden

## GEOkompa

kt: *N co i  
u h n c n n n h  
de e es da*

**Prof. Hermann Nicolai:** Wir suchen nach einer einzigen Formel, mit der man sämtliche Phänomene im Universum beschreiben kann. Und zwar von den kleinsten Elementarteilchen über die Atome, Moleküle und komplexeren Strukturen bis zu Planeten, Sternen, Galaxien und dem Aufbau und der Entwicklung des Universums.

*a e*

Ist es auch. Aber letztlich ist es das Ziel, auf das alle Bemühungen hinauslaufen, auch wenn das vielleicht utopisch und anmaßend klingen mag. Um zu verstehen, warum so etwas überhaupt denkbar ist, muss man wissen, dass die Physik eine reduktionistische Wissenschaft ist. Anders als etwa die Biologie, welche die Spezies und Subspezies in all ihrer Vielfalt erst einmal beschreibt und klassifiziert, versucht die Physik die Dinge auf ihren einfachsten Kern zu reduzieren: Sie sucht nach den kleinsten Bausteinen der Welt und nach den Gesetzen, nach denen diese Bausteine miteinander wechselwirken. Die Weltformel wäre gewissermaßen die kompakteste Zusammenfassung aller dieser Gesetze, das Urprinzip, nach dem die gesamte Welt funktioniert.

*n nn  
o  
g , w die W  
fu e*

Natürlich. Wir verfügen in allen Gebieten der Naturwissenschaft bereits über sehr gute Modelle, die in ihrem jeweiligen Bereich äußerst verlässliche Ergebnisse und Vorhersagen liefern. Die Chemie zum Beispiel verwendet das etablierte Atommodell der Quantenphysik, um zu erklären, wie Sauerstoff, Wasserstoff und andere Elemente komplexere Strukturen bilden, und erlaubt uns so, unüberschaubar viele Phänomene zu verstehen. Trotzdem bildet sie nur einen Teilaspekt der Realität ab – die Entwicklung des Universums beispielsweise nicht. Eine Weltformel müsste dagegen alles umfassen – und in sich vollkommen widerspruchsfrei sein.

*k m m*

Indem man die Gesetze der Physik immer weiter vereinheitlicht. Und das ist Forschern in der Vergangenheit auch sehr gut gelungen. So haben wir heute im Wesentlichen zwei große Theoriegebäude, die zusammengenommen bereits ziemlich umfassend sind.

*e ch n da ?*

Auf der einen Seite Einsteins Allgemeine Relativitätstheorie, die für die Physik bei großen Abständen zuständig ist. Die Kraft, die auf diesen Skalen dominiert, ist die Schwerkraft oder Gravitation. Mit ihr lassen sich sämtliche Phänomene der Himmelsmechanik erklären. Wir können nachvollziehen, wie sich Planeten, Sterne und Galaxien bewegen und wie große Massen die Struktur des Raumes und den Lauf der Zeit beeinflussen.

Dagegen beschreibt das Standardmodell der Teilchenphysik – das die Quantenphysik mit einschließt und auf ihr basiert – die Welt im ganz Kleinen. Es enthält die winzigen Teilchen, aus denen alle Materie aufgebaut ist. Zudem umfasst es die drei Kräfte, die zwischen diesen kleinen Bausteinen wirken: die elektromagnetische Kraft, die starke und die schwache Kernkraft.



»Ohne die Erkenntnisse der Quantenphysik würden wir noch so leben wie **im 19. Jahrhundert.**  
Es gäbe keine Digitalisierung, keine Computer und **keine Smartphones**«

*t d ä u ?*

Die elektromagnetische Kraft bestimmt alles, was mit Magnetismus, Elektrizität und Energieübertragung von einem Ort zum anderen zu tun hat. Sie ist der Grund, warum Strom fließt, aber auch, warum wir Dinge sehen und die Wärme der Sonne spüren. Denn Licht- und Wärmestrahlen bestehen aus elektromagnetischen Wellen.

Die schwache und die starke Kernkraft dagegen können wir nicht wahrnehmen. Sie wirken nur im Inneren des Atomkerns. Dazu muss man wissen, dass

jedes Atom aus drei Grundbausteinen besteht. Den Kern bilden neutrale Neutronen und positiv geladene Protonen, und um den Kern herum schwirren negativ geladene Elektronen. Die starke Kernkraft sorgt nun dafür, dass die positiv geladenen Protonen, obwohl auf engstem Raum zusammengesperrt, sich nicht gegenseitig abstoßen, sondern zusammenhalten. Die schwache Kernkraft wiederum kann den Kern unter bestimmten Umständen instabil werden lassen, sodass er zerfällt und Energie freisetzt. Das nennt man dann Radioaktivität.



Mit Formeln, die auf ein Blatt Papier passen, können wir den Kosmos quantitativ, vom Allergrößten bis zum Allerkleinsten, bereits nahezu komplett erklären, sagt Nicolai – aber eben nur nahezu

b dies  
Gr ndkrä e der W rm näher?

Man muss sich klarmachen, dass die heutige Physik letztlich auf Erkenntnissen aufbaut, die zum Teil ins Altertum zurückreichen. Indem Physiker immer wieder neue Gemeinsamkeiten zwischen verschiedenen Phänomenen entdeckten, konnten sie diese in immer größere Zusammenhänge einordnen und so ihre Theorien zunehmend vereinheitlichen.

önn n en B p nenn n?

Schon die Menschen in der Antike wussten von Elektrizität und Magnetismus. Man kannte Zitterale und Metall mit magnetischen Eigenschaften, dachte aber, dass es sich dabei um zwei völlig verschiedene Phänomene handele. Erst im 19. Jahrhundert gelang Michael Faraday und James Clerk Maxwell der Nachweis, dass Elektrizität und Magnetis-

mus im Grunde ein und dasselbe sind: Alle diese Erkenntnisse lassen sich elegant und kompakt in den Maxwell'schen Gleichungen zusammenfassen, die die Krönung der theoretischen Physik des 19. Jahrhunderts bilden.

Erst als man diesen Zusammenhang verstanden hatte, war man etwa in der Lage, durch ein Verfahren, das auf der elektromagnetischen Induktion basiert, in industriellem Maßstab große Mengen Strom zu erzeugen. Das geschieht zum Beispiel in vielen Kraftwerken. Das wiederum erlaubte ganz neue Erfindungen wie die Telegrafie oder die Glühbirne, die die Industrialisierung entscheidend vorantrieben.

N wen g Ja rzehn pä r a r  
E n da d Re  
ä eo

Auch das ist wieder eine Vereinheitlichung: Einstein entdeckte, dass Raum

und Zeit nicht als völlig separat anzusehen sind, sondern eng zusammenhängen und gemeinsam die Raumzeit bilden. Große Massen, so fand er heraus, können Raum und Zeit verbiegen. Es ist diese Krümmung, die wir als Gravitation wahrnehmen. Ausgehend von dieser Überlegung stellte Einstein 1915 die nach ihm benannten Gravitationsfeldgleichungen auf, mit denen sich die Dynamik sämtlicher Himmelskörper, auch entfernter Galaxien und des Universums selbst, mit nie da gewesener Präzision beschreiben lässt.

Die von Max Planck, Werner Heisenberg, Erwin Schrödinger und anderen Wissenschaftlern entwickelte Quantenphysik ist ebenfalls eine vereinheitlichte Theorie, so komplex sie auch anmuten mag. Denn sie lässt sich in einer einzigen Formel zusammenfassen, der sogenannten Schrödinger-Gleichung, der alle quantenmechanischen Vorgänge gehorchen.

h E k  
d a ?  
Sie haben das Leben der Menschen komplett verändert. Ohne Quantenphysik würden wir noch so leben wie im 19. Jahrhundert. Es gäbe keine Digitalisierung, keine Laser, keine Speichermedien, keine Computer, keine Atomkraft, keine Solarzellen und keine Smartphones. Fast alles, was mit Hochtechnologie zusammenhängt, beruht letztlich auf Quantenphysik.

Aber auch Effekte der Relativitätstheorie spielen in unserem Alltag eine große Rolle, etwa für die Kommunikation mittels Satelliten im All. Weil die Gravitation auf der Erde stärker ist als im Weltraum, verläuft die Zeit nahe der Erdoberfläche langsamer. Diese sogenannte Zeitdilatation muss berücksichtigt werden, wenn wir etwa mithilfe von GPS-Satelliten navigieren. Ohne Einstein würden manche Autos im Straßengraben landen, weil das Navigationsgerät uns erst hinter der Kreuzung zum Abbiegen auffordern würde.

e a d Qu ä  
da en Kr m g n n n  
d e e R theorie  
d ä ga G β g na  
da nz Gr ?

Grob gesagt, immer dort, wo die Schwerkraft dominiert. Das beginnt schon in dem Raum, in dem wir hier sitzen. Denn wir spüren die Anziehungskraft der Erde. Auch die Gegenstände fliegen nicht schwerelos umher, sondern

bleiben an Ort und Stelle. Über diese uns vertrauten Effekte der Schwerkraft hinaus sagt die Einstein'sche Allgemeine Relativitätstheorie völlig neue Effekte voraus – nicht nur Schwarze Löcher, sondern zum Beispiel auch Gravitationswellen, deren direkter Nachweis erst kürzlich gelang.

di a  
Eben e n R ?

Nein. Die Gravitation ist mit Abstand die schwächste der vier Grundkräfte. Das lässt sich am besten an einem Beispiel erläutern: Wenn ich eine Heftklammer in die Luft halte und loslasse, fällt sie auf den Boden. Sie wird von der Schwerkraft der Erde angezogen. Halte ich aber einen Magneten an die Heftklammer, bleibt sie daran kleben und fällt nicht herunter. Das bedeutet, die elektromagnetische Kraft des kleinen Magneten ist so stark, dass sie mühelos die Anziehungskraft des gesamten Planeten schlägt. Genau gesagt ist sie um den Faktor  $10^{40}$  stärker als die Gravitation. Das ist eine Zahl mit 40 Nullen.

G a u ü a  
sch ac e k a t ?

76 Ja, deshalb fällt die Gravitation in der Teilchenphysik nicht ins Gewicht. Andererseits haben die drei anderen Kräfte eine begrenzte Reichweite. Der Magnet kann die Heftklammer nur in einem Abstand von wenigen Zentimetern anziehen, und elektrische Kräfte wirken nicht über größere Abstände, weil sich dort positive und negative Ladungen neutralisieren. Die Kernkräfte wirken sogar nur im Atom selber. Auf großen Skalen im Universum spielt daher nur die Gravitation eine Rolle. Denn ihre Reichweite ist so groß, dass sie das Verhalten ganzer Galaxien bestimmt.

Und weil sich die Allgemeine Relativitätstheorie und die Quantenphysik auf großen und kleinen Skalen so wunderbar ergänzen, sind wir heute in der Lage, mit diesen beiden Theorien nahezu alle Vorgänge im Kosmos quantitativ exakt beschreiben zu können – und zwar vom kleinsten Bestandteil eines Atoms bis zum Rand des Universums, mit Gleichungen, die auf ein Blatt Papier passen. Das kommt einer Weltformel schon ziemlich nahe.




---

»Die Weltformel könnte eine völlig  
absurde Wirklichkeit offenbaren, etwa eine  
Physik ohne Zeit und Raum«

---

i g d b  
Th or en z n r F rm z er nen?

Weil sie bei genauer Analyse partout nicht zusammenpassen. Es gibt immer noch Phänomene, die sich mit keiner der beiden Theorien richtig erklären lassen.

c n da ?

Zum Beispiel sogenannte Singularitäten, wo Größen wie Dichte und Temperatur unendliche Werte annehmen, was keinen Sinn ergibt. Der Urknall ist eine solche Singularität. Vor 13,8 Milliarden Jahren, bevor sich das Weltall schlagartig

ausdehnte, war sämtliche Energie des Universums, ja sogar der Raum selbst in einem winzigen Punkt konzentriert, viel kleiner noch als ein Atom. Und bei diesen extrem kleinen Abständen müsste nun eigentlich die Quantenphysik ins Spiel kommen. Da aber in diesem Punkt zugleich eine unvorstellbar große Energie dichte herrscht, wird die Gravitation auf einmal genauso stark wie die anderen Kräfte. Ich kann sie nicht mehr außen vor lassen. Um zu berechnen, was in der Singularität passiert, muss ich also beide Theorien gleichzeitig berücksichtigen.



Um die Weltformel zu finden,  
so Nicolai, müsste man  
sämtliche Gesetze der Physik  
in einer Gleichung vereinen

Zeit und Raum – die Planeten kreisen um die Sonne, das Sonnensystem rotiert um das Zentrum der Milchstraße. Das kann ich alles exakt mit den Einstein'schen Formeln beschreiben und vorausberechnen.

a i e d Qu e a

Die Quantenphysik basiert auf Zufall, Unschärfe und Wahrscheinlichkeit. Ein Beispiel: Ich lege ein radioaktives Atom auf den Tisch. Ich weiß, irgendwann wird die schwache Kernkraft dafür sorgen, dass es zerfällt. Aber ich kann nicht vorhersagen, ob das in einer Sekunde oder in einer Million Jahren passieren wird. Exakt bestimmen kann ich nur die Halbwertszeit. Das ist die Zeit, nach der von einer großen Menge an Atomen die Hälfte zerfallen ist. Ich muss also eine sehr große Zahl von Ereignissen betrachten, bevor ich zu einer quantitativ nachprüfbaren Aussage gelange. Aus der Summe der unvorhersagbaren Einzelereignisse bekomme ich dann eine genaue Vorhersage für das statistische Mittel, das in gewissem Sinne dann wieder deterministisch ist. Auf ganz kleinen Skalen aber passieren absolut unvorhergesehene Dinge.

Kön S noc B pen ?

Nehmen wir das Atommodell. Noch Niels Bohr dachte, dass das Elektron wie ein Miniplanet um den Atomkern herumfliegt. So wie der Mond, der binnen einer bestimmten Zeit die Erde umkreist. Aber in Wahrheit ist es ganz anders. Das Elektron hat gar keine Flugbahn, es hat noch nicht einmal einen festen Ort. Die Quantenphysik lehrt uns: Im Grunde ist da gar kein Teilchen, sondern nur eine Wahrscheinlichkeitswolke, die mir sagt, mit welcher Wahrscheinlichkeit sich das Elektron gerade an einem bestimmten Punkt aufhalten könnte. Erst beim genaueren Hinsehen, wenn ich also eine Messung vornehme, manifestiert es sich an einem bestimmten Ort. Wenn ich die Gesetze der Quantenwelt ins Makroskopische übertragen könnte, wäre das, als würde

jedes Mal, wenn ich nachts zum Himmel schaue, der Mond an einer anderen Stelle stehen. Aber solange ich nicht hinschaue – und das ist das eigentlich Entscheidende –, wäre der Mond überall und nirgendwo.

Da kann man n hw v n

Das kann man sich überhaupt nicht vorstellen. Aber all unsere Experimente bestätigen, dass es genau so ist – auch wenn der menschliche Geist es nicht begreifen kann. Und die Gleichungen der Quantenphysik funktionieren fantastisch gut, ob man die Wirklichkeit dahinter nun versteht oder nicht.

Wir haben also zwei fabelhafte, aber miteinander inkompatible physikalische Theorien, um die Welt zu beschreiben. Dazwischen klafft eine Lücke, die uns vor ganz grundsätzliche Probleme stellt. Um die zu lösen, müssen wir in eine völlig neue Richtung denken.

E T  
g u d k  
og n nn S r ng heo e beson  
a e h dah e ?

Sie besagt im Wesentlichen, dass sämtliche Teilchen aus winzigen Fäden, „Strings“, bestehen, die wie die Saiten einer Geige unterschiedlich schwingen. Je nachdem, mit welcher Frequenz so ein String vibriert, habe ich ein anderes Teilchen. Mit dieser Annahme ließen sich tatsächlich die Gleichungen der Quantenphysik mit der Relativitätstheorie zusammenbringen. Der Haken aber: Die Stringtheorie funktioniert nur mit weiteren Dimensionen der Raumzeit, von denen es bisher keine Spur gibt. Obendrein sagt sie die Existenz weiterer Elementarteilchen voraus. Die hofft man mithilfe des Teilchenbeschleunigers am Genfer CERN zu finden. Bislang vergebens.

ie e a e D  
nen d r Ra mzei na hw sen?

Indem man zum Beispiel nach Ereignissen am Teilchenbeschleuniger fahndet, bei denen Energie aus dem Detektor gewissermaßen „ins Nichts“ verschwindet, das heißt also, der physikalische Lehrsatz von der Erhaltung der Energie scheinbar verletzt ist. Das könnte man dann so deuten, dass sich Bruchstücke aus der Kollision in Extra-Dimensionen verflüchtigt haben, die uns unzugänglich sind. Man hat aber bisher nichts dergleichen beobachtet. Darüber hinaus, und das ist

n da un ner n ?

Nein, wenn ich versuche, die existierenden Widersprüche mit den Gleichungen der Quantenphysik und der Relativitätstheorie aufzulösen, kommt nur Unsinn heraus. Das Gleiche gilt für das Innere eines Schwarzen Lochs. Auch in dessen Zentrum lauert eine Singularität, die jeden Eindringling auf einen Punkt zusammenpresst. Wir können schlicht nicht sagen, was dort passiert, weil die normalen Gesetze der Physik versagen.

Wa g na ma d den Th or n  
nv b ?

Ein Problem ist, dass es sich um völlig verschiedene Arten von Theorien handelt. Die Allgemeine Relativitätstheorie ist im klassischen Sinne deterministisch. Das heißt, sie basiert auf dem Prinzip von Ursache und Wirkung, auf Kausalität. Ich weiß, zumindest im Prinzip, wenn A passiert, dann muss zwangsläufig B passieren. Objekte befinden sich immer an einem genau definierten Ort. Und sie bewegen sich auf geordneten Bahnen durch

die umstrittenste Annahme, postuliert die Stringtheorie, dass wir in einem Multiversum leben.

as v h an un e ?

Unser Universum wäre dann nur eines von vielen, wie eine Blase in einem Topf mit kochendem Wasser. Solche Blasen entstehen und vergehen ständig, und genau so könnte unser Universum sich erst ausdehnen und dann wieder verschwinden, um Platz zu lassen für neue Universen. Diese Universen könnten der Stringtheorie zufolge völlig unterschiedliche Eigenschaften aufweisen. Es wären Myriaden von Welten mit unterschiedlichen Kräften und Elementarteilchen, in denen die sogenannten Naturkonstanten jeweils zufällig die Werte haben, die sie haben.

w e s e s ch e u u s ide ?

78

In einem solchen Paralleluniversum könnte es zum Beispiel ganz andere als unsere vier Grundkräfte geben und auch völlig andere Materie. Vielleicht gäbe es auch gar kein Licht, und die Gravitation wäre die stärkste Kraft. Dann würde dieses andere Universum sofort nach seinem Urknall zu einem gigantischen Schwarzen Loch zusammenschrumpfen.

Zugleich würde das bedeuten, dass die Naturkonstanten in unserem Universum auch nur ein Produkt des Zufalls wären. Und nur weil ausgerechnet bei uns die Bedingungen so günstig waren, hat sich Materie geformt, konnten sich Sterne und Planeten bilden, auf denen schließlich intelligente Wesen entstanden sind, die sich die Frage stellen, warum die Welt genau so und nicht anders beschaffen ist.

o m ä di Pa  
ve sen a h ch, önn n w ann  
do e ? um B d e  
loch

Nein, das halte ich für ausgeschlossen. Und zwar nicht, weil es Wurmlöcher nicht geben könnte – die gibt es schon in der Einstein'schen Theorie: Zum Beispiel ist durchaus denkbar, dass sich im Kosmos über ein Schwarzes Loch eine Art Brücke bildet zwischen zwei weit entfern-

ten Orten innerhalb unserer Raumzeit, quasi eine Abkürzung zum Paralleluniversum. Wurmlöcher kennt man ja aus Science-Fiction-Filmen: Wenn Hollywood ein Raumschiff in ein Wurmloch hineinfliegen lässt, dann wackelt es ein bisschen wie in der Straßenbahn, und irgendwann kommt das Raumschiff unbeschadet auf der anderen Seite wieder heraus. In Wirklichkeit ist es aber ganz anders, nämlich so, als würde unmittelbar neben Ihnen eine Atombombe detonieren.

ist, und warum nicht anders. Er wollte „dem Alten auf die Schliche kommen“, hat er einmal gesagt.

Und e den w je a d c  
omm

Das weiß man erst, wenn es so weit ist. Seit 40 Jahren beschäftigen sich Tausende der schlauesten Köpfe weltweit mit dieser Frage, aber bisher vergebens. Deshalb kann es durchaus sein, dass wir die Weltformel nie finden werden. Vielleicht ist unser Verstand einfach nicht dafür gemacht, alles zu verstehen.

Nehmen Sie zum Beispiel meinen Hund. Wenn ich einen Ball werfe, und mein Hund fängt ihn, dann hat er offenbar eine irgendwie geartete Vorstellung von den Gesetzen der Mechanik – zwar nicht bewusst oder mit Formeln, doch sein Gehirn muss eine

präzise Rechenarbeit leisten, damit er den Ball schnappen kann. Aber wenn ich nun versuchen wollte, ihm ein Gefühl für die Quantenmechanik zu vermitteln, würde er das niemals auch nur im Ansatz begreifen. Und so ergeht es uns vielleicht auch: Wir können mit unserem Verstand zwar eine Menge erfassen, aber möglicherweise eben nicht alles.

en mm n F r änden d W  
f m o a d ä

Wenn das gelänge, da bin ich ziemlich sicher, würde uns die sich in dieser Formel offenbarende Wirklichkeit noch absurd vorkommen als alles, was sich Physiker bisher ausgedacht haben. Zum Beispiel könnte das eine körnige Struktur von Raum und Zeit sein oder sogar eine Physik ohne Raum und Zeit. Aber da ein normaler Mensch ja schon die Quantenphysik nicht wirklich versteht, könnte er mit der neuen Sicht vermutlich noch viel weniger anfangen.

Für Physiker jedoch wäre es unglaublich reizvoll, wenn es gelänge, das gesamte Wissen der Physik in einer Formel zu vereinen. Eine Zeile, die alles umfasst, vom Allerkleinsten bis zum Allergrößten. Und vielleicht könnten wir dann sogar die Frage aller Fragen beantworten: Warum überhaupt *etwas ist* und nicht einfach *nichts* •

»Es kann sein, dass wir die  
**Gleichung niemals** finden,  
vielleicht ist unser Verstand einfach  
**nicht dafür gemacht**«

nieren: Nach diesem Trip bliebe von den Astronauten nicht mehr viel übrig.

e e  
n ema s rr ch n önn n, w önnen  
E n ü p

Gar nicht, und das ist der Grund, warum viele Kollegen – und ich selbst auch – solche Aussagen nicht mehr als Teil der Naturwissenschaft akzeptieren; ob man dem Multiversum und ähnlichen Vorhersagen der Stringtheorie Glauben schenkt oder nicht, ist dann fast schon eine religiöse Frage. Die Formeln der Stringtheorie sind zwar schlüssig und von einer gewissen Eleganz, weil sie viele mathematische Probleme, die wir in der Physik haben, im Prinzip lösen könnten. Aber das entscheidende Kriterium für eine überzeugende physikalische Theorie ist und bleibt, dass sie sich im Experiment überprüfen und gegebenenfalls widerlegen lässt.

Das ist bei der Quantentheorie der Fall. Die mutet zwar ebenfalls ziemlich absurd an, aber sie hat ihre Richtigkeit und ihren praktischen Nutzen bereits hunderttausendfach unter Beweis gestellt.

Die Stringtheorie dagegen ist in ihrer vorliegenden Form nicht in der Lage, eine Vorhersage zu treffen, mit der die Theorie steht oder fällt. Da halte ich es lieber mit Albert Einstein, der wirklich verstehen wollte, warum unsere Welt so ist, wie sie

# EIN JAHR KOMPAKTES WISSEN FÜR KLUGE KÖPFE

Unser Geburtstagsangebot: Drei Wochen gratis lesen



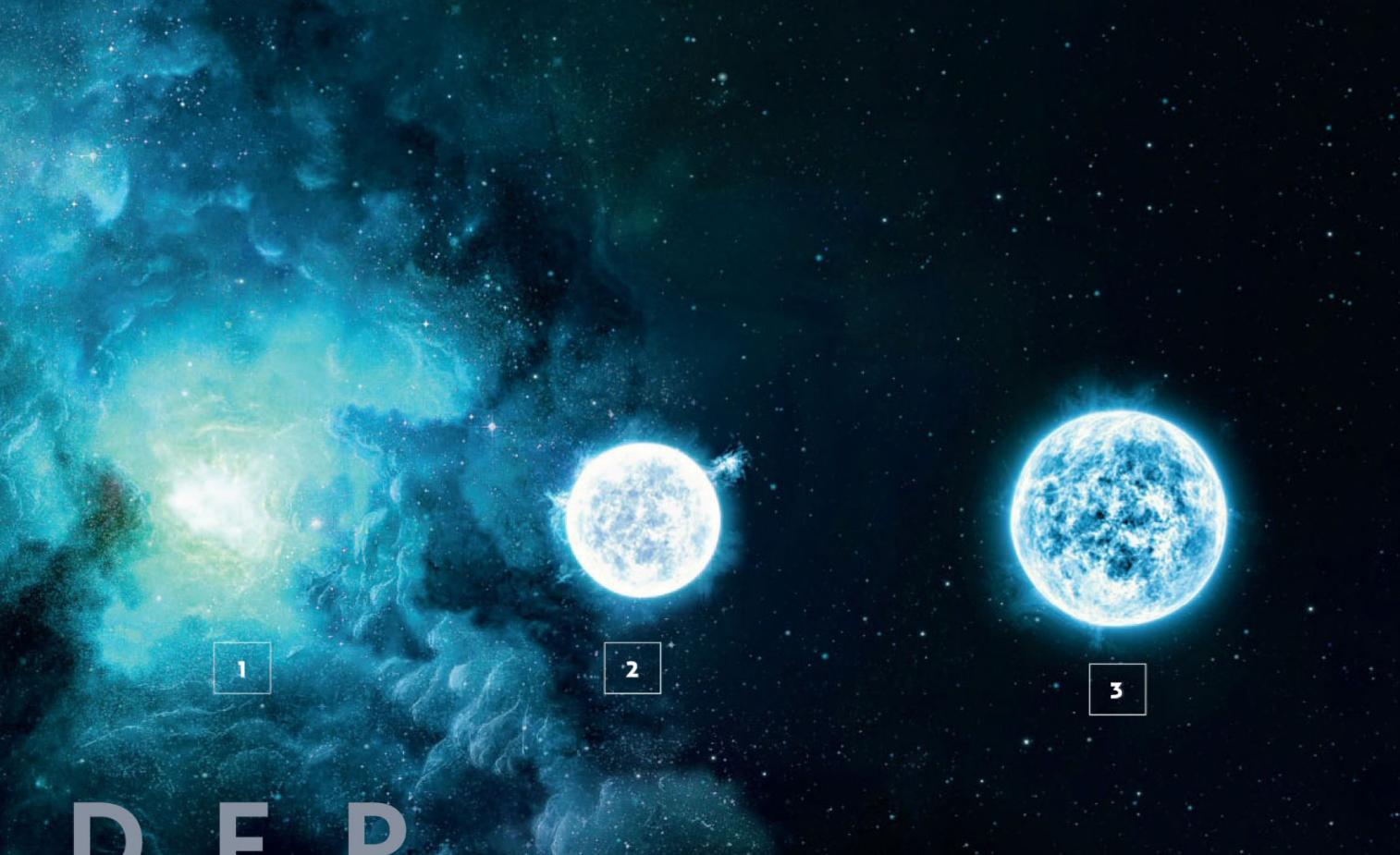
Die wichtigen Themen aus Politik, Wirtschaft, Kultur, Gesellschaft und Wissen – gewohnt fundiert und ungewohnt kompakt.



Auch als  
E-Paper

F.A.Z. WOCHE

MEHR ERFAHREN AUF FAZWOCHE.DE



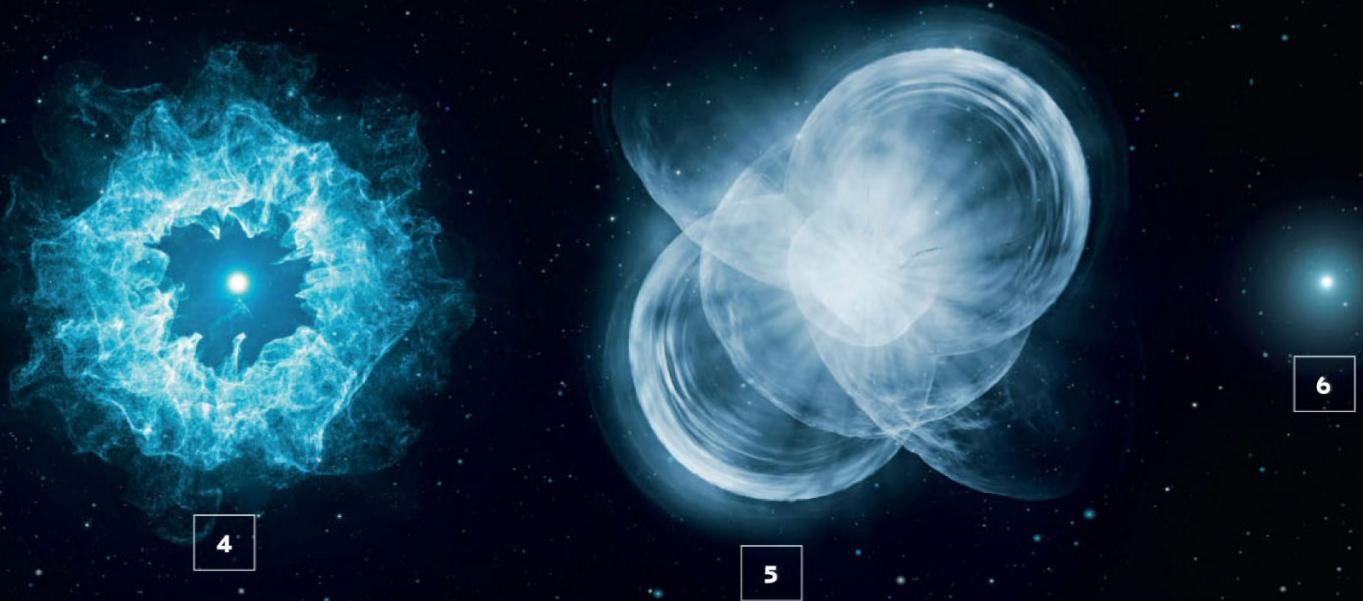
80

# DER WANDEL

Sterne sind faszinierende Gebilde, in deren Innerem Millionen Grad heiße Feuer brennen und die den Nachthimmel als ein Meer von Leuchtpunkten erscheinen lassen. Doch so gleichartig diese stellaren Öfen aus großer Ferne anmuten mögen: Ihre Entwicklung verläuft höchst unterschiedlich – und endet zuweilen furiös

D E R

# SONNEN



ILLUSTRATIONEN: TIM WEHRMANN  
TEXT: SEBASTIAN WITTE

## Von der *Materiewolke* zum *Neutronenstern*

Wie lange ein Stern leuchtet und wie er eines Tages endet, hängt entscheidend von seiner Masse ab: Je mehr Materie sich im Zentrum ballt, desto höher steigen dort Druck und Temperatur – und desto schneller verbraucht er seinen Brennstoff.

Geburtsstätten sämtlicher Sterne sind Gas- und Staub-Wolken (1). Die meisten neu gebildeten Sterne sind eher klein und entwickeln sich langsam. Mitunter entstehen aber auch große Himmelskörper (2) von mehr als der achtfachen Masse unserer Sonne. Die höhere Temperatur dieser Massemonster lässt sie weiß oder hellblau erstrahlen.

Sie blähen sich nach und nach zu Überriesen (3) auf – Gasbällen, in denen unser gesamtes Sonnensystem mit allen Planeten Platz hätte.

Schließlich kollabieren die Riesen unter ihrem eigenen Gewicht. Ab einem Durchmesser von weniger als 50 Kilometern wird die Dichte zu hoch, um weiter komprimiert zu werden, komplizierte Prozesse führen zu einer gigantischen Schockwelle, die den Stern in einer Supernova (4) auseinanderreißt. Die Hülle (5) fliegt davon, und zurück bleibt nur der extrem komprimierte Kern: ein unvorstellbar dicht gepackter Neutronenstern (6).



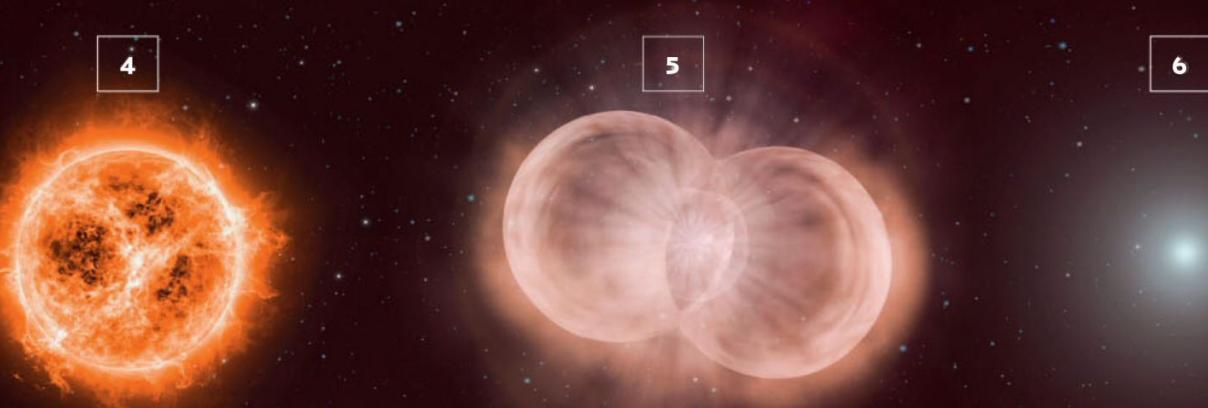
## Vom stellaren Nebel zum Schwarzen Loch

**Z**uweilen, wenn auch selten, entsteht in einer Ansammlung stellaren Staubes (1) ein gigantisch großer Stern (2) – manchmal ist er so voluminös, dass unsere Sonne acht Milliarden Mal in ihm Platz fände.

Allerdings ist seine Lebensdauer eher kurz: Aufgrund seiner enormen Energieabstrahlung leuchtet er in gleißendem Hellblau und verfeuert seinen Brennstoff binnen einiger Hunderttausend Jahre. Dabei bläht er sich zu einem Riesen oder gar Hyperriesen auf (3) – einem Objekt, dessen Leuchtkraft die der Sonne um das 100 000-Fache übertrifft.

Kurz darauf folgt dann meist das spektakuläre Ende der Giganten: Eine gewaltige Supernova-Explosion (4) zerfetzt den Riesenstern. Während die äußere Hülle in alle Richtungen davonfliegt (5), kollabiert das Innere zu extrem kompakter kosmischer Materie. Hat diese zusammenstürzende Materie, im Gegensatz zu leichteren Objekten wie Neutronensternen, noch mindestens drei Sonnenmassen, geht der Kollaps hier noch weiter. Es entsteht ein Phänomen von extrem verdichteter Masse, dessen Schwerkraft so unvorstellbar groß ist, dass ihm nicht einmal Licht entkommt: ein Schwarzes Loch (6).





## Von der Gaswolke zum Weißen Zwerg

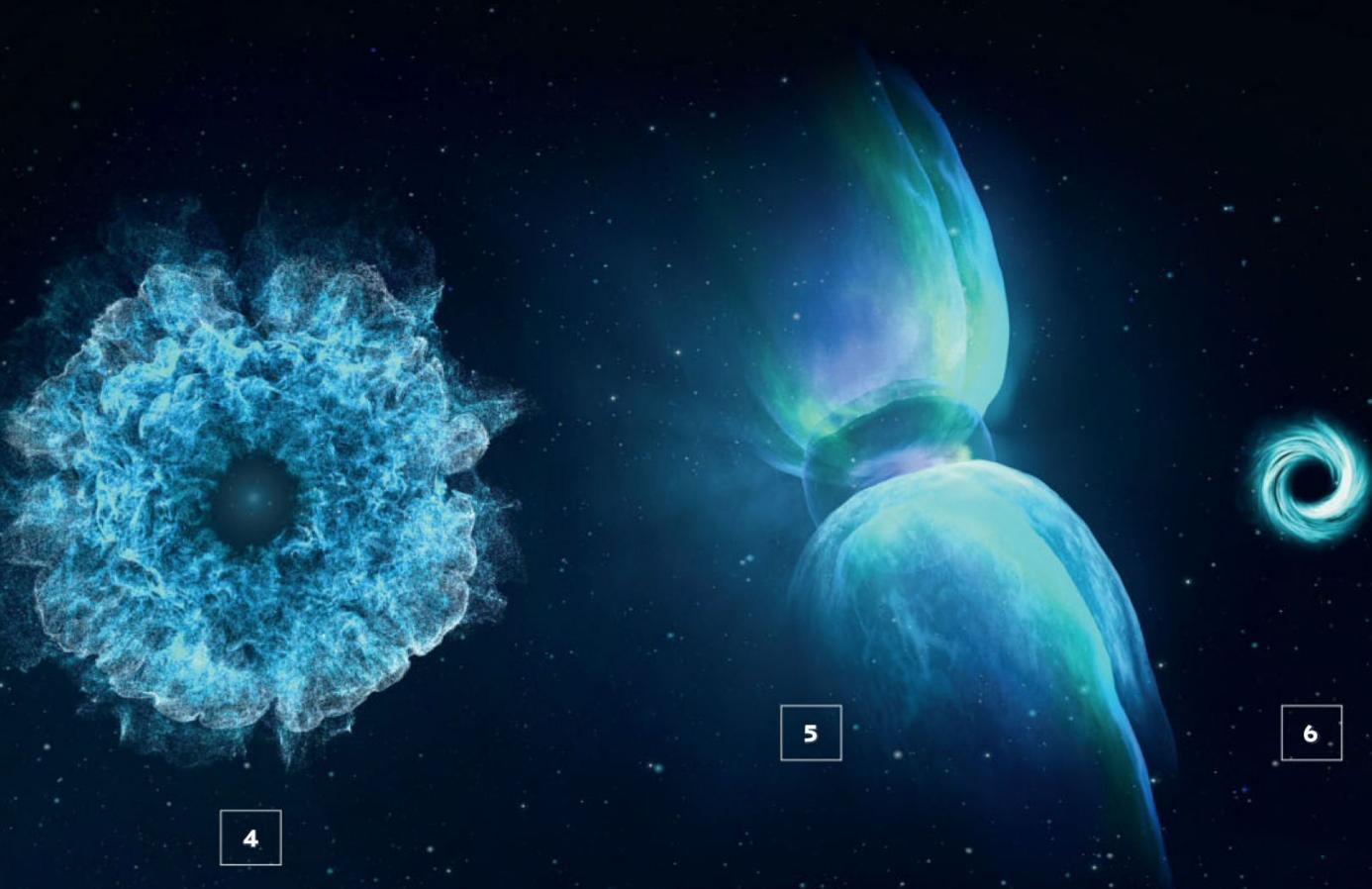
**B**ildet sich in einer Gaswolke (1) ein Stern von der Größe unserer Sonne (2), kann das stellare Leuchtfeuer über viele Milliarden Jahre relativ konstant brennen. Die Temperatur in seinem Inneren beträgt mehr als zehn Millionen Grad, und es leuchtet gelblich (3).

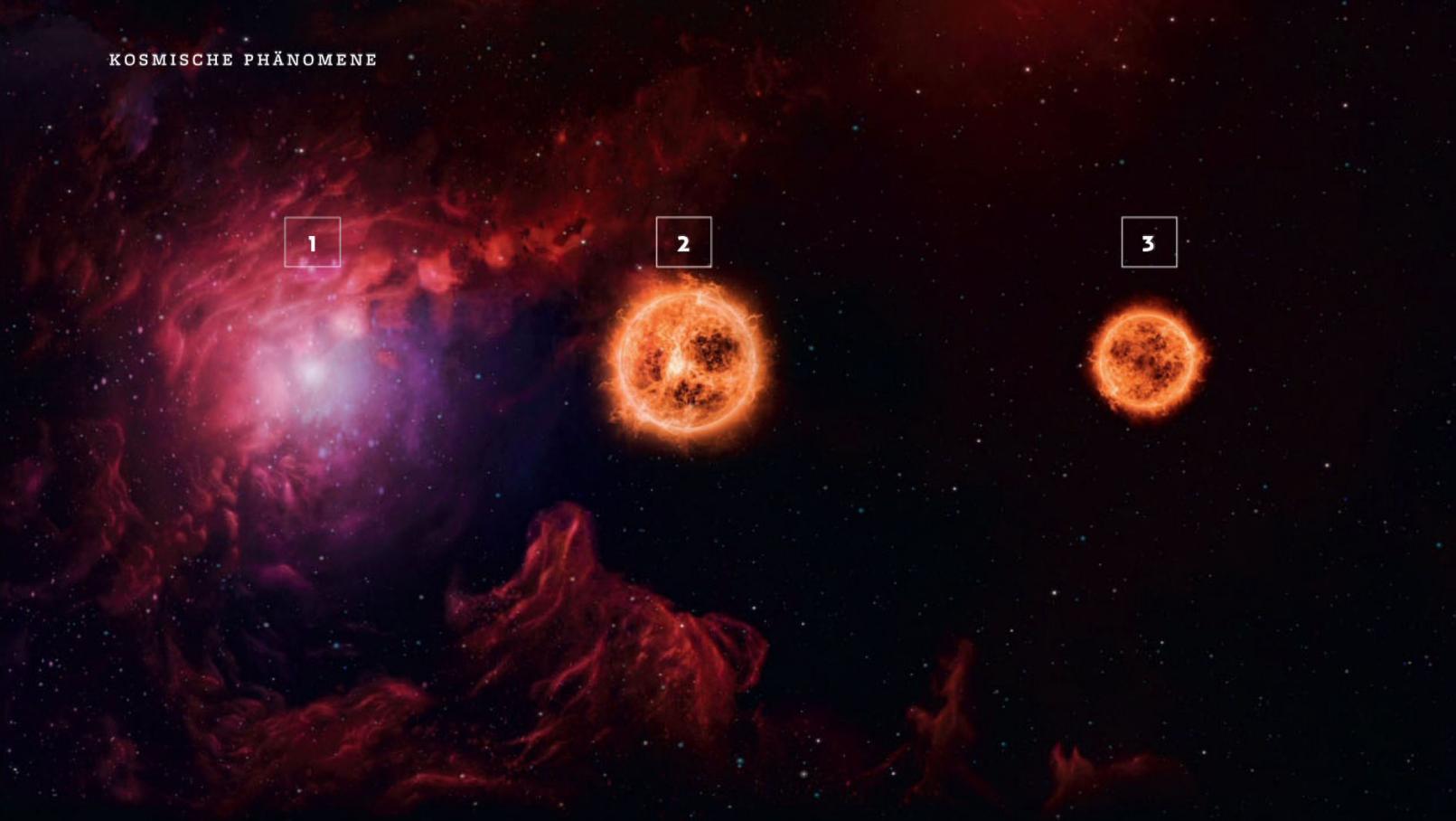
Doch wenn der Wasserstoff-Vorrat im heißen Zentrum des Sterns aufgezehrt ist, erlischt der Kern und fällt in sich zusammen. Die äußeren Hälften dagegen dehnen sich gewal-

tig aus; dabei schwollt der Stern auf ein-Vielfaches seiner ursprünglichen Größe an, er wird zu einem Roten Riesen (4). Die Gashülle des Sterns entweicht nach und nach in Form planetarischen Nebels ins All (5). Bis zu 80 Prozent der einstigen Masse verflüchtigt sich so in den Kosmos.

Zurück bleibt ein sogenannter Weißer Zwerg (6), kaum größer als unsere Erde. Er ist der ausgebrannte Kern des Sterns, der noch Milliarden Jahre glüht.

83





Wie der Sonnenreaktor funktioniert

## IM INNEREN DES INFERNOS

Sterne verwandeln in ihrem Inneren Materie in extrem helle Strahlung. Bei stellaren Glütofen von der Größe unserer Sonne (rechts) brennen die Feuer meist mehrere Milliarden Jahre mit konstanter Leuchtkraft.

Die dazu nötige Energie beziehen die Sterne aus einem physikalisch komplexen Vorgang: Unter gigantischem Druck und einer Hitze von etwa 15 Millionen Grad prallen im Kern (1) Wasserstoffatome aufeinander, verschmelzen miteinander und bilden unter der Wucht des Zusammenstoßes das nächstschwerere Element Helium.

Bei dieser nuklearen Fusion wird stets ein wenig Ursprungsmasse in reine Energie verwandelt: in Strahlung.

Während sich im Zentrum des Sterns durch die Kernfusion des Was-

serstoffs nach und nach immer mehr Helium anreichert, strebt die Strahlung nach außen und durchdringt dabei verschiedene Bereiche.

Unmittelbar an den Kern grenzt die Strahlungszone (2) – so benannt, weil die Strahlung hier auf extrem dichtes Gas trifft und dieses aufheizt. Bei dieser Interaktion verliert die Strahlung ungemein viel Energie, wird gewissermaßen abgebremst. Und zwar derart stark, dass sie mehrere Millionen Jahre benötigt, um diesen Abschnitt zu durchdringen.

Erst dann gelangt die Strahlung in einen Bereich, den Wissenschaftler „Konvektionszone“ nennen (3). Dort hat die Strahlung bereits einen großen Teil ihrer einstigen Energie eingebüßt – im Mittel beträgt

die Temperatur jetzt zwei Millionen Grad.

In diesem Abschnitt zirkulieren gewaltige Gasströme, die die Strahlungsenergie weiter nach außen transportieren. Am äußeren Rand der Zone kühlt das Gas ab, sinkt daraufhin zurück in Richtung Kern. Durch erneutes Aufheizen entsteht der Kreislauf des Gases.

Nach dieser Zone gelangt die Strahlung in den letzten Bereich, die nur wenige Hundert Kilometer dicke Photosphäre (4). Sie bildet – mit einer Temperatur von rund 6000 Grad – die sichtbare Oberfläche des Sterns.

Jenseits dieser Hülle kann sich die Lichtenergie schließlich ungehindert (mit Lichtgeschwindigkeit) in alle Richtungen des Raums ausbreiten.



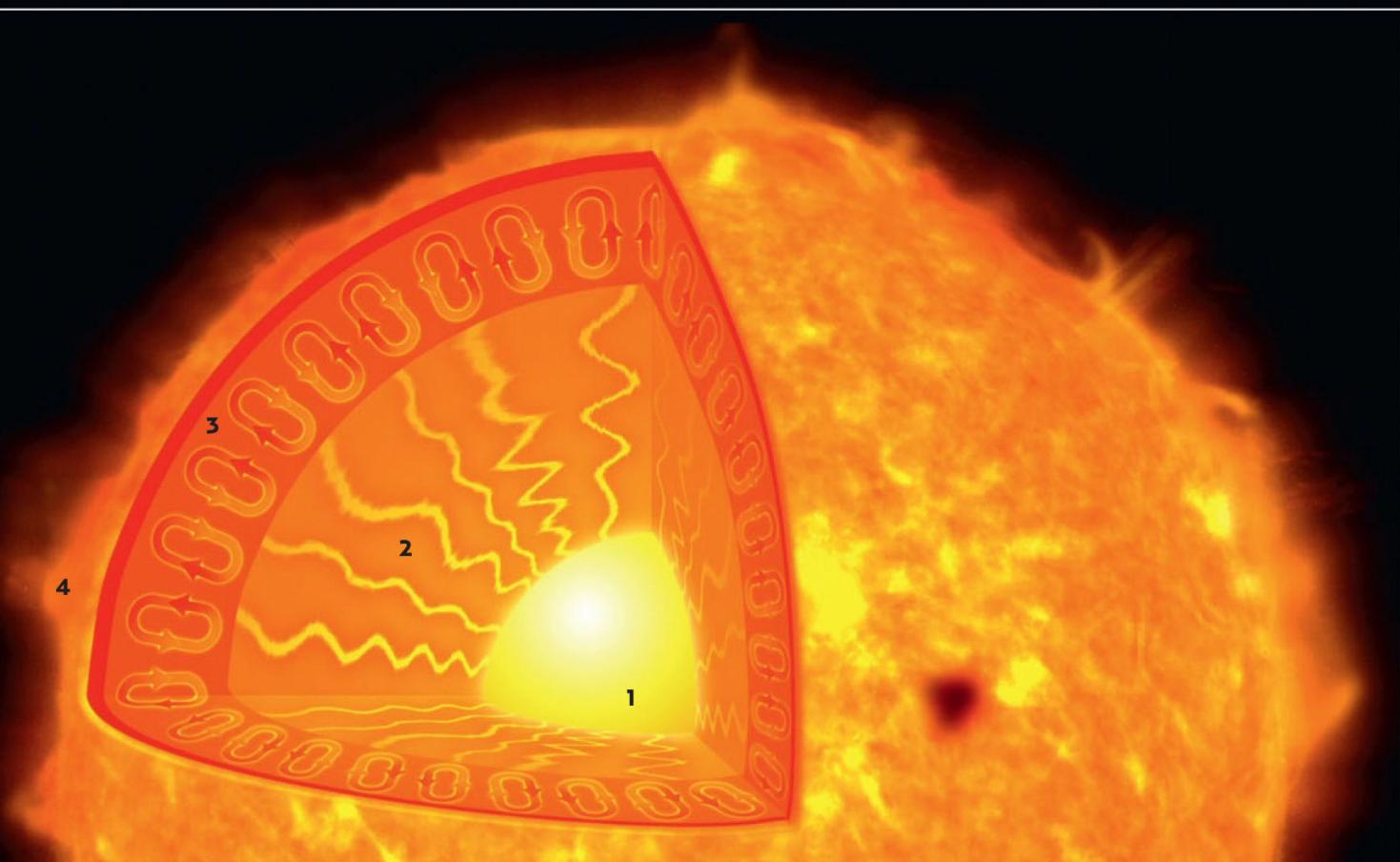
## Vom Staubwirbel zum Brauner Zwerg

Ballt sich in einer Gaswolke (1) langsam Materie zusammen, entsteht zunächst ein sogenannter Protostern (2), der sich aufgrund seiner Schwerkraft immer weiter zusammenzieht. Dabei steigt auch die Temperatur in seinem Zentrum beständig. Besitzt der Stern jedoch weniger als acht Prozent der Masse der Sonne, wird es in seinem Inneren nicht heißer als zehn Millionen Grad.

Das aber ist zu wenig, um die komplexen physikalischen Fusionsprozesse in Gang zu bringen, die die schwereren Sterne so hell erstrahlen lassen (siehe unten). Daher

entwickelt sich der Protostern in diesem Fall nicht zu einem echten Stern – es entsteht ein sogenannter Brauner Zwerg (3). Der Himmelskörper glüht nur: in einem blassen Rot (4).

Allmählich strahlt er die Wärme aus seinem Inneren in den Weltraum ab und leuchtet immer schwächer (5). Da der Braune Zwerg keine Materie verbrennt und auch nicht wie andere Sterne explodieren kann, ist seine Lebensdauer beinahe unbegrenzt. Doch irgendwann ist der Zwerg kaum noch zu erblicken und endet als erkalte Materiekugel (6).



# VOM URSPRUNG ALLER

Ob Sauerstoff oder Eisen, Silizium oder Gold: Die Vielfalt der Elemente verdanken wir einzig dem **Werden und Vergehen der Sterne**. Denn erst im Inneren dieser kosmischen Öfen und durch ihren Tod entstand die große Fülle all jener Substanzen, aus denen unser Planet aufgebaut ist – und alles, was auf ihm existiert

TEXT: ANDREA RICHTER

UND PATRICK BLUME

86

Alles auf der Erde ist aus Elementen aufgebaut: die Luft, die wir atmen; das Wasser, das wir trinken; der Boden, auf dem wir stehen – und auch wir selbst, jede einzelne Faser unseres Körpers.

Die trockene Luft ist ein Gasgemisch hauptsächlich aus Sauerstoff und Stickstoff, das Wasser eine Verbindung aus Sauerstoff und Wasserstoff, das Gestein der Erdkruste besteht in weiten Teilen aus Silizium.

Und Bio-Moleküle, ob sie nun die Blätter einer Pflanze oder Gehirnzellen eines Menschen bilden, gäbe es nicht ohne Kohlenstoff. Unsere moderne Technik wiederum wäre ohne Metalle wie Eisen, Kupfer und Aluminium undenkbar.

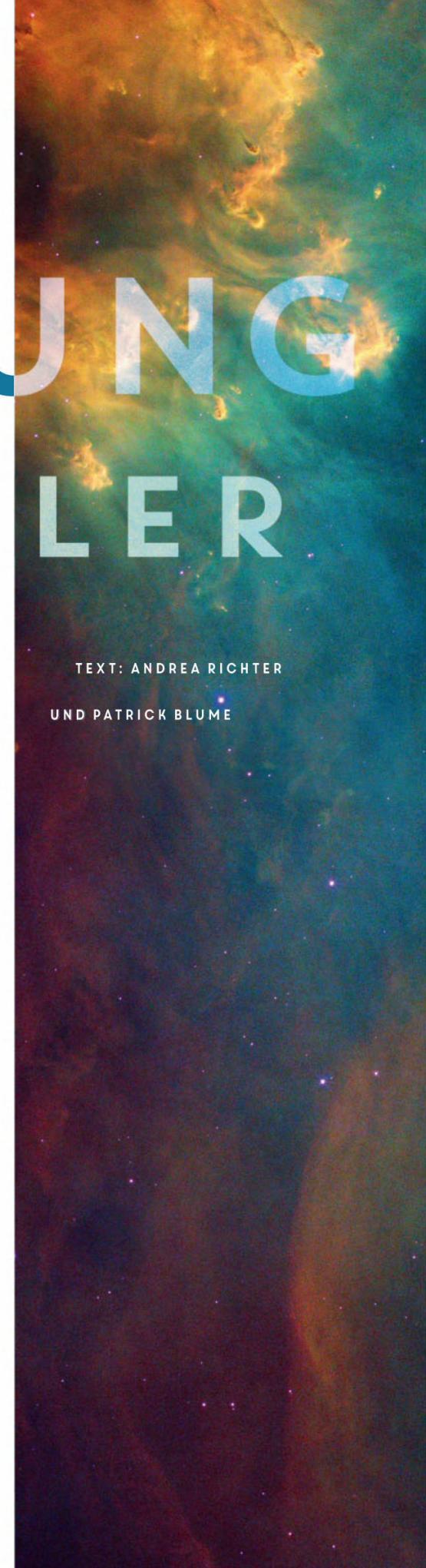
Genau 94 verschiedene Elemente kommen in der Natur vor. Manche in rauen Mengen, andere wiederum sind so selten, dass sie zu Höchstpreisen gehandelt werden, beispielsweise Indium und Tantal, die für die Herstellung von Computerchips benötigt werden und ohne die kein modernes Smartphone funktionieren würde.

# A

Doch diese Vielfalt ist alles andere als selbstverständlich. Erst nach und nach sind die Elemente seit den ersten 100 bis 200 Millionen Jahren nach dem Urknall entstanden – und zwar im glutheißen Inneren der Sterne oder wenn sie vergehen. Und wie all das abgelaufen ist, das gehört zu den großen Wundern des Kosmos.

**Kurz nach dem Urknall** ist sämtliche Materie im Universum von äußerst gleichförmiger Gestalt: Das All besteht nur aus einer einzigen dunklen Gaswolke, gebildet fast ausschließlich aus Wasserstoff und Helium, den beiden einfachsten chemischen Elementen (siehe Seite 24). Noch gibt es keinerlei kosmische Strukturen, weder Galaxien noch Sterne oder Planeten – und schon gar nicht Leben.

Das All dehnt sich unaufhörlich aus, die Gasteilchen stieben fortwährend auseinander. In dieser 100 bis 200 Millionen Jahre währenden Phase deutet nichts darauf hin, dass sich an dieser Eintönigkeit etwas ändern sollte.



# D I N G E

87

## Kosmischer Kreislauf

Hier schleudert ein junger Stern (Mitte, etwa bei zehn Uhr, glitzernd) gewaltige Mengen an Gas (blau) ins All. Darunter auch Substanzen, die zuvor in seinem Inneren entstanden sind und nun als Rohmaterial für neue Himmelskörper dienen

### Nebel aus Gas und Staub

Diese vom Hubble-Weltraumteleskop aufgenommenen Schwaden des Adlernebels erstrecken sich über eine Entfernung von fünf Lichtjahren und bestehen aus Wasserstoff und den Elementen längst erloschener Sterne





Doch im Dunkel des Gasnebels walten bereits Kräfte, die diese scheinbar so öde Wolke radikal verändern. Schon bald werden sich Millionen Grad heiße Sterne bilden und in ihrem Inneren weitere chemische Elemente erbrüten. Und auch bei Explosionen in den Weiten des Alls werden neue Substanzen produziert. Bis schließlich auch unser Heimatplanet entsteht – und alles, was darauf existiert.

**So gigantisch die Dimensionen** dieser Ereignisse sind: Stets geht es dabei auch um Veränderungen im Kleinsten – um die Entstehung der chemischen Elemente. Die Eigenarten dieser Bausteine unserer heutigen Welt werden durch ihren atomaren Aufbau bestimmt (siehe Seite 148):

- Ausschlaggebend für die chemischen Eigenschaften ist die Anzahl der **Protonen**, der positiv geladenen Teilchen in ihrem Atomkern; sie definieren, um welches Element es sich handelt, denn

kommende Element mit der höchsten Protonenzahl ist Plutonium, sein Kern enthält 94 positiv geladene Teilchen.

Damit sich mehrere Protonen zu einem schwereren Atomkern zusammenballen, bedarf es allerdings einer gehörigen Menge Energie. Denn Teilchen mit gleicher elektrischer Ladung stoßen sich eigentlich ab. Nur unter unvorstellbarem Druck und bei extremen Temperaturen von mehreren Millionen Grad rasen sie so schnell umher, dass sie – wenn es zwischen ihnen zu einer Kollision kommt – die Abstoßungskräfte überwinden und miteinander verschmelzen.

Die Hitze des Urknalls ist dafür kurzzeitig groß genug. Alle Heliumkerne, die im jungen Universum immerhin ein Viertel der kosmischen Gaswolke ausmachen, bilden sich in den ersten drei oder vier Minuten nach der Entstehung der Welt aus Wasserstoff. In winzigen Spuren entstehen in diesen ersten Minuten auch

## Kurz vor dem Tod eines Sterns kommt das Erbrüten chemischer Elemente erst richtig in Gang

89

jedes weitere Proton macht aus einem Stoff eine vollkommen andere Substanz.

- Um den Kern herum schwirren wiederum negativ geladene **Elektronen** in exakt der gleichen Anzahl. Daher sind Atome elektrisch neutral.

- Zudem können auch die Kerne noch elektrisch neutrale Bausteine enthalten, die **Neutronen**. Sie machen die Atome zwar schwerer, verändern aber nicht ihre chemischen Eigenschaften.

Das einfachste aller Elemente ist der Wasserstoff: Sein Atomkern besteht nur aus einem einzigen Proton, also nur einem positiv geladenen Teilchen. Wasserstoffkerne entstehen schon Sekundenbruchteile nach dem Urknall aus Quarks.

Die Atomkerne des Heliums, des nächstkomplexeren Elementes, haben zwei Protonen und ein oder zwei Neutronen.

Es folgen die Elemente Lithium (drei Protonen, vier Neutronen) und Beryllium (vier Protonen, drei Neutronen). Und so geht es weiter: Kohlenstoff hat sechs Protonen und Neutronen, Sauerstoff jeweils acht, Kalzium je 20. Das natürlich vor-

die nächstschwereren Elemente Lithium und Beryllium. Dann aber sinkt die Temperatur unter das nötige Maß, und die Kernverschmelzung stoppt.

Der Schöpfungsakt wird gleichsam unterbrochen, das dunkle, kalte Zeitalter des Universums bricht an.

# A

llerdings nicht überall: In einigen Regionen, in denen Wasserstoff- und Heliumwolken etwas verdichtet sind, ballen sich die Gasmassen durch die eigene Schwerkraft, die Wirkung der Dunklen Materie sowie selbstverstärkende Prozesse immer dichter zusammen (siehe Seite 42) – bis sie zu ersten Sternen werden, viel massereicher und heißer als unsere Sonne.

Schließlich, 100 bis 200 Millionen Jahre nach dem Urknall, übersteigt die Temperatur in diesen Himmelskörpern den kritischen Wert von zehn Millionen Grad – und die Atomkerne des Wasserstoffs beginnen erneut zu Heliumkernen

zu verschmelzen, so wie in den ersten Minuten nach dem Urknall.

Für diesen Prozess, die Kernfusion, muss aber zunächst Energie aufgebracht werden, um die elektrische Abstoßung zwischen den Atomkernen des Wasserstoffs zu überwinden, erst dann setzt ihre Verschmelzung zum nächsts schwereren Heliumkern Energie frei.

Man kann sich den Vorgang anhand eines schweren Steins verbildunglich, der auf einem hohen Balkon liegt. Fällt er hinunter, gibt er Energie ab: Die Wucht des Aufpralls kann großen Schaden anrichten. Doch von allein würde der Stein diese Energie nie abgeben. Man muss zunächst noch weitere aufbringen – und ihn über die Brüstung heben.

Die Energie, die bei der Verschmelzung von Wasserstoff- zu Heliumkernen frei wird, zeigt sich auch in Form von Strahlung und Wärme. Und so bringt die Kernfusion im Inneren der ersten Sterne erstmals Licht in das Dunkel des Alls.

Bis heute läuft die Kernfusion von Wasserstoff zu Helium in den Sternen

ab – und sie ist die bei Weitem wichtigste Energiequelle. Ihr verdanken wir das Licht und die Wärme unserer Sonne. Und weil die Reaktion selbst wiederum Energie erzeugt, bleiben die nötigen hohen Reaktionsparameter wie Druck und Temperatur im Inneren eines Sterns bestehen.

**Dennoch ist irgendwann** der Wasserstoff im Kern des Feuerballs verbraucht. Und das verändert den Stern grundlegend (siehe Seite 80). Denn bis dahin befand er sich in einem Gleichgewicht: Einerseits zog die Schwerkraft die äußeren Schichten ständig in Richtung Zentrum, andererseits strahlte der Fusionsreaktor in seiner Mitte nach außen ab, erzeugte so einen Gegendruck und sorgte damit dafür, dass der Stern nicht kollabierte.

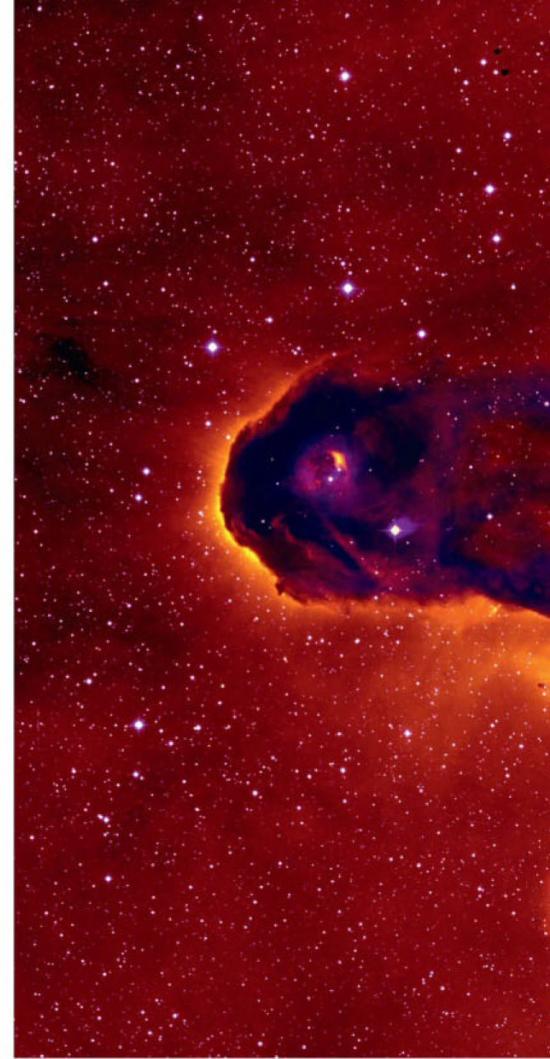
Erlöscht die Kernfusion aber, gerät der Stern schlagartig aus der Balance: Ohne Gegendruck von innen stürzt er in sich zusammen. Mehr und mehr Masse drängt sich zum Zentrum, der Druck steigt und mit ihm auch die Temperatur.

Bei einem Stern von der Größe unserer Sonne erhitzen sich dadurch die um das Zentrum liegenden, wasserstoffhaltigen Schichten derart extrem, dass es nun dort zur Kernfusion kommt.

Gleichzeitig strahlt der Brutofen im Inneren stärker als zuvor, wodurch die Heliumkerne zu Kernen eines ganz neuen Elements verschmelzen: Es entsteht Kohlenstoff. Doch dann reichen Druck und Hitze nicht mehr aus, um die Kernfusion fortzuführen, sie endet abrupt. Die Sternenhülle stiebt als planetarischer Nebel ins All. Zurück bleibt der heiße Kern, ein „Weißer Zwerg“.

Besonders massereiche Sterne (die etwa acht- bis zehnmal so schwer sind wie unsere Sonne) blähen sich zu Riesen auf, und das Erbrüten neuer Elemente kommt nun erst richtig in Gang. Denn die Schwerkraft presst den Kern jetzt so zusammen, dass seine Temperatur 100 Millionen Grad überschreitet. Diese Hitze führt dazu, dass die Fusion nicht beim Kohlenstoff endet, sondern dass er mit einem weiteren Heliumteilchen zu einem neuen Element verschmilzt: Sauerstoff.

Der Fusionsofen brennt jetzt noch heißer als zuvor, immer neue Fusionen bringen immer neue Substanzen hervor: Ein Teil des Sauerstoffs verschmilzt mit Kohlenstoff zu Silizium, aus dem wiederum Eisen entsteht. In späteren Stadien dieses Prozesses liegen um den Kern



## Auf einen Blick

### Anfängliche Ödnis

Kurz nach dem Urknall bestand sämtliche Materie im All fast ausschließlich aus den Elementen Wasserstoff und Helium.

### Stellare Fusionsöfen

Jahrtausende später ballten sich unter dem Einfluss der Gravitation die ersten Sterne zusammen; in ihnen bildeten sich weitere Elemente, darunter Kohlenstoff oder Silizium.

### Schöpferische Katastrophen

Sternexplosionen und –kollisionen setzten derart viel Energie frei, dass die schwersten aller Stoffe entstehen konnten, etwa Gold oder Uran.

### Natürliche Vielfalt

Heute kommen auf der Erde 94 verschiedene Elemente vor. Ohne diese Vielfalt gäbe es keine Planeten wie den unseren – und damit auch keine Menschen.

des Sterns mitunter mehrere Kugelschalen, in denen die verschiedenen Fusionsreaktionen gleichzeitig ablaufen. Andere Prozesse bringen Magnesium, Natrium, Phosphor und Schwefel hervor.

Doch der Brennstoff geht durch die enormen Temperaturen rasch zur Neige, der Stern verzehrt sich in irrwitzigem Tempo selbst. Und Elemente, die mehr Protonen als Eisen (26) haben, kann auch der massereichste Stern nicht hervorbringen: Solch eine Fusion setzt keine Energie mehr frei, sondern verbraucht sie stattdessen. Hat sich alle Materie im Zentrum des Feuerballs in Eisen verwandelt, erlischt ein Stern daher für immer.

Und doch gibt es Elemente mit mehr als 26 Protonen – so zum Beispiel Nickel (28) oder Zinn (50). Sie entstehen aber durch ganz andere physikalische Vorgänge als die Kernfusion und bilden sich nur unter besonderen Bedingungen – etwa durch einen komplizierten Prozess in den Schalen großer Sterne oder durch zwei Arten extremer kosmischer Spektakel: zum einen die unermessliche Hitze gewaltiger Explosionen (Supernovae), zu



denen es kommt, wenn sehr massereiche Sterne am Ende ihres Lebens vergehen; zum anderen, wenn zwei hochverdichtete, längst erloschene Sterne kollidieren.

Die Hauptrolle bei der Erzeugung solch besonders schwerer Elemente spielen die Neutronen – jene elektrisch neutralen Teilchen, die gemeinsam mit den positiv geladenen Protonen die Atomkerne bilden. Denn sie sind ungeladen und dringen mitunter in den positiv geladenen Atomkern ein. Da sie sich unter bestimmten Bedingungen in Protonen umwandeln, können etwa aus Eisen Elemente mit höherer Protonenzahl hervorgehen.

**D**och in jungen Sternen kommen freie Neutronen selten vor. Sie entstehen vor allem bei einer Supernova: wenn also in einem massereichen Stern die Kernfusion zum Erlöschen kommt und das ausgebrannte Innere der Schwerkraft nichts mehr entgegensetzen kann. Dann ist die Materie im Kern so zusam-

### Neue Lichter am Firmament

In etwa 2400 Lichtjahren Entfernung befindet sich dieser Nebel – eine Region, in der Gasmassen unter dem Einfluss der Gravitation nach und nach neue Sterne hervorbringen

mengepresst, dass sie sich auf 100 Milliarden Grad erhitzt. Bei solchen Bedingungen können die Eisenkerne nicht mehr zusammengehalten werden. Ihre Elektronen werden regelrecht in die Protonen der Kerne hineingepresst. Durch diesen Prozess wandeln sich nun sämtliche Protonen des Sternenkerns in ungeladene Neutronen um.

Die in das Zentrum stürzende Materie prallt gegen den hochverdichteten Kern und wird mit ungeheurer Wucht ins

All zurückgeschleudert. Ein Teil der Neutronen wird von der zurückprallenden Sternhülle mitgerissen und von den darin enthaltenen Atomen eingefangen. Schlagartig entstehen so noch schwerere Elemente, darunter Thorium (90 Protonen) und Uran (92 Protonen).

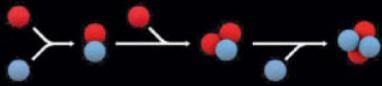
Noch dramatischer mutet ein weiteres Szenario an, in dem schwere Elemente entstehen: die Kollision zweier erloschener Neutronensterne. Bei diesen Himmelskörpern handelt es sich um die extrem verdichteten Überreste, die nach dem Verlöschen einer Supernova zurückbleiben. Sie bestehen größtenteils aus Neutronen. Nur die äußerste Hülle bildet ein Panzer aus solidem Eisen.

Eigentlich ist es unvorstellbar, dass in den Weiten des Alls zwei dieser nur zehn

**Bei der Kollision zweier Neutronensterne entstehen binnen Minuten große Mengen schwerer Stoffe**

## WUNDERSAME VERSCHMELZUNG

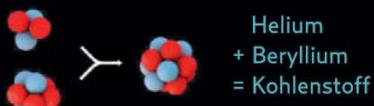
Wie leichte Elemente zu immer schwereren Stoffen fusionieren



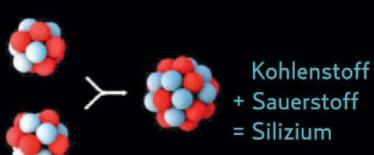
2 Protonen + 2 Neutronen = Helium



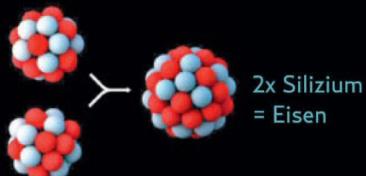
2x Helium = Beryllium



Helium + Beryllium = Kohlenstoff



Kohlenstoff + Sauerstoff = Silizium



2x Silizium = Eisen

Bereits kurz nach dem Urknall entstanden aus je zwei Protonen (rot, auch »Wasserstoffkerne« genannt) und ein oder zwei Neutronen (blau) die Atomkerne von Helium. Im Inneren von Sternen bildeten sich durch Fusionsprozesse und Reaktionsketten weitere Elemente: Heliumkerne verschmolzen zu Beryllium, Beryllium und Helium zu Kohlenstoff, Kohlenstoff und Sauerstoff zu Silizium, und zwei Siliziumkerne vereinigten sich zu Eisen.

bis 20 Kilometer großen Objekte zusammenstoßen könnten. Doch gibt es Sterne, die sich ständig umkreisen. Werden sie zu Neutronensternen, so führt sie der Sog ihrer Schwerkraft irgendwann zusammen. Bei dieser Kollision treten derart gigantische Kräfte auf, dass ein Materiestrahl in den Weltraum schießt. Gleichzeitig wird hochfrequente Gammastrahlung schlagartig ins All entlassen, ein „Gammablink“ erstrahlt.

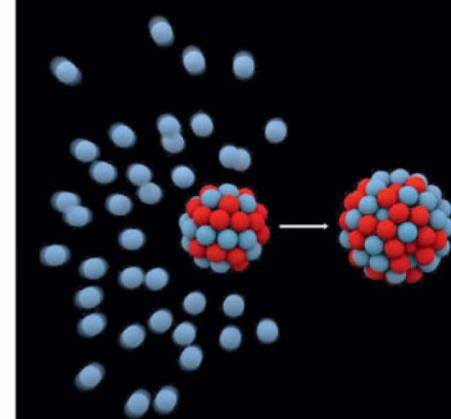
Sobald die neutronenreiche Materie etwas abkühlt, bilden sich große Mengen schwerer Elemente. So entstand bei einem Gammablink, den Astronomen 2013 beobachteten, wohl so viel Gold, dass sich der Mond damit aufwiegeln ließe.

Noch ist nicht geklärt, ob nun Gammablitze oder aber Supernovae die Hauptquelle schwerer Elemente im Kosmos sind. Doch bei beiden Ereignissen wird der ganze Reichtum schwerer Elemente in den Weltraum hinausgetragen – wenn auch die Mengen im Vergleich zu denen aus den stellaren Fusionsreaktoren klein sind.

Das ist auch der Grund, weshalb schwerere Metalle auf der Erde so selten vorkommen. Von wenigen Spurelementen wie Jod und Selen abgesehen, spielen diese Substanzen in der Biologie daher eine nur geringere Rolle. Das Leben basiert hauptsächlich auf den weitaus häufigeren, leichteren Elementen. Sollten auf fernen Planeten Lebewesen existieren, müsste auch ihr Stoffwechsel auf jene Zutaten zurückgreifen, die in ausreichender Menge vorhanden sind. Womöglich würden sie also nicht grundlegend anders funktionieren als irdische Organismen.

**Denn wo immer sich** ein neues Sonnensystem bildet, ist stets die Asche ausgebrannter Sterne sein Rohstoff. In diesen Gas- und Staubschwaden beginnen sich einzelne Atome zu größeren Einheiten zusammenzufügen: erste Moleküle bilden sich. Sie können aus mehreren Teilchen einer Art bestehen, wie es etwa beim Luftsauerstoff  $O_2$  der Fall ist. Oder sie enthalten verschiedene Elemente – so wie Wasser, zusammengesetzt aus einem Sauerstoff- und zwei Wasserstoffatomen.

Dem Puzzlespiel der Atome scheinen kaum Grenzen gesetzt: Millionen von Kombinationen hat die Natur (und der Mensch in seinen Laboren) inzwischen hervorgebracht. Und oft haben die Moleküle völlig andere Eigenschaften als ihre



### Die Geburt massiger Elemente

Stoffe, schwerer als Eisen, entstanden zum Beispiel, als bei einer Supernova-Explosion Unmengen an Neutronen (blau) in Elemente wie Eisen (Mitte) eindrangen und so etwa Silberkerne (rechts) bildeten.

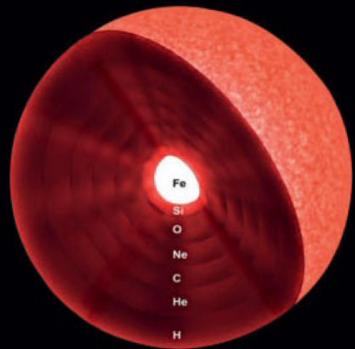
einzelnen Bestandteile. In Reinform ist etwa Chlor ein giftiges grün-gelbes Gas, zusammen mit Natrium bildet es hingegen einen harmlosen weißen Feststoff: Kochsalz. Und in Verbindung mit Stickstoff entstehen Chloramine, die den typischen Hallenbadgeruch erzeugen.

Ethanol, eine Verbindung aus Kohlenstoff, Wasserstoff und Sauerstoff, ist der Alkohol in Bier und Wein. Methanol, eine andere Form von Alkohol, das nur ein Kohlenstoffatom und zwei Wasserstoffatome weniger enthält, ist dagegen schon in kleinen Dosen giftig und kann zu Erblindung oder gar zum Tod führen.

Viele Moleküle bestehen aus Dutzenen oder Hunderten Elementen, manche sind gar aus mehreren Millionen Atomen zusammengesetzt, zum Beispiel die Desoxyribonukleinsäure (DNS), die Trägerin unserer Erbinformation.

Doch inzwischen begnügt sich der Mensch nicht mehr damit, die vorhandenen Elemente neu zu kombinieren. Mit gigantischen Maschinen setzen Kernphysiker auf der Erde fort, was einst im Weltall begann. Sie erweitern die Vielfalt der chemischen Elemente, indem sie Materie in Teilchenbeschleunigern mit ungeheurer Energie kollidieren lassen.

So entstehen überschwere Atome, die auf der Erde normalerweise nicht vorkommen. 2016 erkannte eine Wissenschaftlerkommission vier neue Elemente offiziell an, darunter die bislang schwers-



## Aufbau des Fusionsofens

In seiner Endphase ist ein massereicher Stern in Schalen gegliedert: Von außen nach innen entstehen in komplexen Reaktionsketten aus Wasserstoff (H) nacheinander Helium (He), Kohlenstoff (C), Neon (Ne), Sauerstoff (O), Silizium (Si) und Eisen (Fe).

ten: Tennessee (117 Protonen, 175 Neutronen) und Oganesson (118 Protonen, 176 Neutronen). Damit umfasst der Baukasten der Materie heute, 13,8 Milliarden Jahre nach dem Urknall, 118 verschiedene Grundzutaten.

Die neuen Elemente gewähren Forschern neue Einblicke in das Wesen der Materie, praktische Bedeutung für das Leben auf der Erde werden sie aber wohl nie erlangen: Die instabilen Konstrukte zerfallen innerhalb von Sekundenbruchteilen.

Der Gehalt von Kohlenstoff und Sauerstoff, Silizium, Eisen und den meisten anderen Elementen im Universum wird indes ganz ohne menschliches Zutun weiter steigen – denn noch immer bestehen 98 Prozent der sichtbaren Materie aus Wasserstoff und Helium. Doch mit jeder Sternengeneration entsteht mehr Material, aus dem sich erdähnliche Planeten entwickeln könnten – und sogar Leben.

Einmal hat es ja schon funktioniert: Jedes Eisenatom in unserem roten Blutfarbstoff, jedes Sauerstoffteilchen, das unsere Lunge aufnimmt, jedes Natriumatom, das für die Weiterleitung von Impulsen unserer Nervenzellen wichtig ist, wurde einst im Inneren strahlender Giganten erbrütet. Und so sind auch wir letztlich nichts anderes als eine sehr komplexe Ansammlung von Sternenstaub. •

**PATRICK BLUME**, Jg. 1985, arbeitet in der Textredaktion von GEOkompakt.

## IMPRESSUM

Gruner + Jahr GmbH & Co KG,  
Am Baumwall 11, 20459 Hamburg.  
Postanschrift der Redaktion: Brieffach 24, 20444 Hamburg  
Telefon: 040/37 03-0, Fax: 040/37 03 56 47  
Internet: [www.GEOkompakt.de](http://www.GEOkompakt.de)

**CHEFREDAKTEUR**  
Michael Schaper

**STELLVERTRETENDE CHEFREDAKTEURE**  
Rainer Harf, Claus Peter Simon

**ART DIRECTION**  
Torsten Laaker

**TEXTREDAKTION**

Maria Kirady (Konzept dieser Ausgabe);  
Patrick Blume, Tilman Botzenhardt, Bertram Weiß,

Sebastian Witte

**BILDREDAKTION**  
Carla Rosarius (Leitung);

Dorit Eichmann, Ulrike Jürgens, Katrin Trautner

**VERIFIKATION**

Regina Franke, Dr. Götz Froschke; Susanne Gilges,  
Stefan Sedlmair, Bettina Süssmilch

**LAYOUT**  
Uwe Fischer

**SCHLUSSRÄDAKTION**

Ralf Schulte; Olaf Stefanus

**GESCHÄFTSFÜHRENDE REDAKTEURIN**

Maike Köhler

**TECHNISCHER CHEF VOM DIENST**

Rainer Drost

**REDAKTIONSSISTENZ**  
Angelika Fuchs; Ümmük Arslan, Anastasia Mattern,  
Helen Oqueka, Thomas Rost

**HONORARE/SPESSEN**  
Angelika Györffy

**VERANTWORTLICH FÜR DEN REDAKTIONELLEN INHALT**

Michael Schaper

**PUBLISHER**

Dr. Gerd Brüne

**PUBLISHING MANAGER**

Toni Willkommen

**EXECUTIVE DIRECTOR DIRECT SALES**  
Heiko Hager/G+J Media Sales

**VERANTWORTLICH FÜR DEN ANZEIGEYTEIL**  
Daniela Krebs, Director Brand Solutions,  
G+J e/MS, Am Baumwall 11, 20459 Hamburg. Es gilt die jeweils  
aktuelle Preisleiste. Infos hierzu: [www.gujmedia.de](http://www.gujmedia.de)

**DIRECTOR DISTRIBUTION & SALES**  
Torsten Koopmann, DPV Deutscher Pressevertrieb

**MARKETING**

Anja Wittfoth

**HERSTELLUNG**

G+J Herstellung, Heiko Belitz (Ltg.), Oliver Fehling

Der Export der Zeitschrift GEOkompakt und deren Vertrieb  
im Ausland sind nur mit Genehmigung des Verlages statthaft.  
GEOkompakt darf nur mit Genehmigung des Verlages  
in Lesezirkeln geführt werden.

Bankverbindung: Deutsche Bank AG Hamburg,  
IBAN: DE30200700000032280000,

BIC: DEUTDEHH

Heft-Preis: 9,50 Euro (mit DVD: 16,50 Euro)

ISBN 978-3-632-00649-1 (978-3-632-00653-8)

© 2017 Gruner + Jahr Hamburg, ISSN 1614-6913

Litho: 4mat Media, Hamburg

Druck: appl druck GmbH,

Senefelderstraße 3-11, 86650 Wemding

Printed in Germany

## GEO-LESERSERVICE

Fragen an die Redaktion  
Tel.: 040/37 03 20 84, Fax: 040/37 03 56 48,  
E-Mail: [briefe@geokompakt.de](mailto:briefe@geokompakt.de)

### ABONNEMENT- UND EINZELHEFTBESTELLUNG

#### Kundenservice und Bestellungen

Anschrift: GEO-Kundenservice, 20080 Hamburg

persönlich erreichbar: Mo.–Fr. 7.30 bis 20.00 Uhr,

5.9.00 bis 14.00 Uhr,

E-Mail: [geokompakt-service@guj.de](mailto:geokompakt-service@guj.de)

Tel. innerhalb Deutschlands: 040/55 55 89 90,

Tel. außerhalb Deutschlands:

+49/40/55 55 89 90, Fax: +49/1805/861 80 02\*

Preis Jahresabonnement: 38,00 € (D)/

44,00 € (A)/70,40 sfr (CH)

Preise für weitere Länder auf Anfrage erhältlich.

### BESTELLADRESSE FÜR GEO-BÜCHER,

### GEO-KALENDER, SCHÜBER ETC.

### Kundenservice und Bestellungen

Anschrift: GEOkompakt-Kundenservice,

74569 Blauffelden,

Tel.: +49/40/42236427, Fax: +49/40/42236663,

E-Mail: [gui@sigloch.de](mailto:gui@sigloch.de)

\* 14 Cent/Min. aus dem deutschen Festnetz,

Mobilfunkpreis max. 42 Cent/Min.

## BILDNACHWEIS

Anordnung im Layout: l. = links, r. = rechts,  
o. = oben, u. unten

### TITEL:

Tim Wehrmann für GEOkompakt

### EDITORIAL:

Benne Ochs für GEOkompakt: 3 o.; Lucas

Wahl für GEOkompakt: 3 u.

### INHALT:

siehe entsprechende Seiten

### VOM KLEINSTEN UND VOM GRÖSSTEN:

Martino Lombezi/contrasto/laif: 6/7; Michèle Huneault: 8/9; Benno Kraehahn für GEOkompakt: 10/11; Malte Jäger/laif: 12/13; Achim Mülhaupt für GEOkompakt: 14/15; Gabriela Marks: 16/17; Ryan Anson/AP/picture alliance: 18/19; Bernd Hartung/Agentur Focus: 20/21; Sébastien Agnelli/13photo: 22/23

**DER URKNALL:** Emilio Segre Visual Archives/American Institute of Physics/Science Photo: 26 l.; Photoshot/picture alliance: 26 r.; Bettmann Archive/Getty Images: 34; Illustrationen: Tim Wehrmann für GEOkompakt: 24–41, außer: The Planck Collaboration/ESA: 36 o.; Springer et al./Max-Planck-Institut für Astrophysik: 36 u.

**WIE DAS LICHT IN DIE WELT KAM:** Illustrationen: Tim Wehrmann für GEOkompakt: 42–51; Fotos: G. Illingworth, D. Magee, P. Oesch, R. Bouwens, ESA/NASA: 52; Judy Schmidt/ESA/Hubble & NASA: 53 l. o.; R. O’Connell und die WFC3 Scientific Oversight Committee/NASA/ESA und the Hubble Heritage Team/ESA/NASA: 53 r. o.; P. Knezek/WIYN, The Hubble Heritage Team/ESA/NASA: 53 l. u.; R. M. Crockett, S. Kaviraj, J. Silk, M. Mutchler/Space Telescope Science Institute, R. O’Connell, the WFC3 Scientific Oversight Committee/ESA/NASA: 53 r. u.; M.J. Jee/ A. Mahdavi/San Francisco State University/CXO/CFHT/ESA/NASA: 55

**DER BLICK NACH OBEN:** Illustrationen: Akihiro Ikeshita/Mero-TSK/International/CTA: 60/61; ESO: 62/63, 70 u., 71 o.; Giant Magellan Telescope/GMTO Corporation: 64/65, 71 u.; B. Tafreshi/ESO: 66/67; Northrop Grumman: 68 o.; D. Ducros/ESA: 68 u.; JPL-Caltech/NASA (2): 69 o.; J.-L. Atteley/ESA: 69 u.; FAST: 70 o.

**EINE FORMEL FÜR DIE WELT:** Wenzel Kraehahn für GEOkompakt: 72–77

**DER WANDEL DER SONNEN:** Illustrationen: Tim Wehrmann für GEOkompakt: 80–85, außer: J. Drake & P. Testa/CXC/NASA, Illustration: M. Weiss/CXC/NASA: 85 u.

**VOM URSPRUNG ALLER DINGE:** NASA, ESA und the Hubble Heritage Team: 86/87, 88/89; Nick Wright/IPHAS: 90/91; Illustrationen: Tim Wehrmann für GEOkompakt: 92; Stocktrek Images/Getty Images: 93

**DIE JAGD NACH DEN GEISTERTEILCHEN:** Sven Lidström: 94/95; K. Freund/GERDA Collaboration: 97 o.; action press: 98/99; Roy Kaltschmidt/Lawrence Berkeley National Lab: 100/101; Volker Steger/Science Photo Library: 102/103; Illustrationen: IceCube Collaboration: 96; ABACA Press/action press: 97 u.; Paul Wootton/Science Photo Library: 98 u.; Tim Wehrmann für GEOkompakt: 100 l., 102 u.

**IM SOG DER EWIGKEIT:** Illustrationen: JPL-Caltech/NASA: 104/105; Rainer Harf für GEOkompakt: 106/107; S. Gezari/The Johns Hopkins University/NASA: 108; O’Furtak/ESO: 109

**DER JAHRHUNDERTBEWEIS:** Franz Bischoff/laif: 112/113; Caltech/MIT/LIGO/Science Photo Library: 116; Enrico Sacchetti: 118 o.; Caltech/MIT/LIGO: 118 u.; Franz Bischoff/laif: 119; Illustrationen: T. Pyle/LIGO: 114; Acoustic Acoustics/Science Photo Library: 115; Rainer Harf für GEOkompakt: 117

**DER TRAUM VON EINER ZWEITEN ERDE:** Collage: Martin Vargic/Halcyon Maps: 120/121; Illustrationen: Tim Wehrmann für GEOkompakt: 122–127; R. Hurt, T. Pyle/JPL-Caltech/NASA: 128

**DIE VERBORGENEN KRAFTE IM KOSMOS:** Daniel auf der Mauer für GEOkompakt: 130–134; Illustrationen: Rainer Harf für GEOkompakt: 135

**AUF DER SUCHE NACH DEM ANFANG DER ZEIT:** Antoni Saba/CERN: 136/137, 140/141; Sophia Bennett/CERN: 138; Massimo Dallaglio/dpd images: 142/143; CERN: 144/145, 147 u.; Valeriane Duvivier/CERN: 147 o.; Illustrationen: CERN: 139; Tim Wehrmann für GEOkompakt: 148–149

**VORSCHAU:** Kilian Schönberger: 154/155

Neutrinos interagieren höchst selten mit Materie. Um die raren Ereignisse aufzuzeichnen, benötigen Forscher daher riesige Detektoren fernab von Störsignalen. Der größte liegt in der Antarktis: Unterhalb der Forschungsstation überwachen 5160 Sensoren einen Kubikkilometer Eis

94



# DIE JAGD NACH DEN GEISTERTEILCHEN

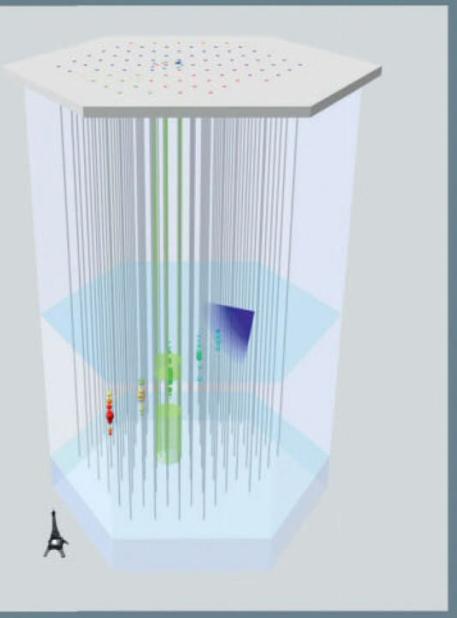
TEXT: HENNING ENGELN  
UND SEBASTIAN WITTE

**Sie durchqueren meist ungehindert ganze Galaxien, das Innere von Sonnen, den Körper des Menschen.** Und senden uns Botschaften aus den entlegensten Winkeln des Kosmos. Seit Jahrzehnten schon versuchen Forscher den Neutrinos auf die Spur zu kommen – riesige Teilchen-Fallen sollen ihnen jetzt ihre Geheimnisse entlocken

# S

## IceCube, Antarktis

Kollidiert ein Neutrino mit einem Materie-Teilchen, entsteht ein schwacher Blitz. Den sollen die 5160 Detektoren von »IceCube« registrieren, die an 86 Kabeln bis zu fast 2,5 Kilometer tief in das antarktische Eis eingelassen sind. Dank seiner Größe kann IceCube besonders gut die Richtung bestimmen, aus der kosmische Geisterteilchen stammen.



ie werden „Geisterteilchen“ genannt, und kein anderer Ausdruck wäre wohl passender. Denn Neutrinos sind weder zu sehen noch zu spüren, und ihre Eigenschaften sind so unglaublich, dass sie unseren Verstand an seine Grenzen bringen. Kann man sich Geschosse vorstellen, die wie Neutrinos eine dicke Felswand durchdringen, als sei sie eine Nebelbank?

Mehr noch: Sie können unseren Planeten passieren, als sei er nicht vorhanden. Und fliegen selbst durch die Millionen Grad heiße und ungeheuer stark zusammengepresste Materie im Inneren eines Sterns, ohne Schaden zu nehmen.

Es scheint, als könnte nichts sie aufhalten oder auch nur ablenken.

Neutrinos rasen auf ihrem Weg durchs All annähernd so schnell wie das Licht, und ihre Massen sind viel, viel kleiner als selbst die der winzigen Elektronen, die den Kern von Atomen umschwirren.

Zudem sind sie so zahlreich, dass es die Vorstellungskraft sprengt: Pro Sekunde durchschießen mehr als 60 Milliarden Geisterteilchen jeden Quadratzentimeter unseres Körpers, ohne dass wir etwas davon spüren. Diese seltsamen, rätselhaften Teilchen gehören zweifellos zu den verblüffendsten Erscheinungen des Weltalls.

Und das Besondere: Sie bieten Forschern Einblicke in kosmische Vorgänge, die sonst verborgen blieben.

Denn Neutrinos erreichen uns auch aus Regionen des Alls, von denen aus nie ein Lichtstrahl zu uns dringen wird – etwa von weit entfernten Sternen-Explosionen oder den Materiestrudeln massereicher Schwarzer Löcher, die sich im Zentrum vieler Galaxien befinden. Studieren Forscher Neutrinos, gewinnen sie also auch wertvolle Erkenntnisse über andere Phänomene.

Doch damit nicht genug: Manche Geisterteilchen sind gerade eben erst gebildet worden, während andere so alt sind wie das Universum: Sie entstanden mit dem Urknall vor 13,8 Milliarden Jahren und durchreisen seither in einer nie endenden Reise die gigantischen Weiten des Raumes.

Damit bergen sie vermutlich einzigartige Informationen über den Anbeginn der Zeit, also jene unfassbar dramatischen Sekunden und Minuten direkt nach dem Urknall – und könnten so helfen, den faszinierendsten kosmischen Vorgang überhaupt besser zu verstehen: die Geburt des Universums in seiner ersten Millionstelsekunde sowie seine frühe Entwicklung.

Dass die Menschheit überhaupt von den flüchtigen Teilchen erfahren hat, ist dem Genie einiger Wissenschaftler des 20. Jahrhunderts zu verdanken. Den Anstoß gab der österreichische Physiker Wolfgang Pauli, der sich um 1930 mit dem Phänomen der radioaktiven Strahlung befasste – jener Energie, die entsteht, wenn bestimmte Atomkerne zerfallen.

Diese Form des radioaktiven Zerfalls ließ die Physiker schier verzweifeln. Denn ihren Berechnungen zufolge hätten die entsprechenden Atomkerne mehr Energie herausschleudern müssen, als die Forscher zu messen vermochten. Für Pauli konnte diese unerklärliche Lücke nur eines bedeuten: Beim Zerfall der Kerne musste ein bislang völlig unbekanntes Teilchen gänzlich neu entstehen. Ein Teilchen, das die fehlende Energie gleichsam aufnahm und davontrug, ohne dass die Wissenschaftler dies messen konnten.

Viele Kollegen hielten die These anfangs für falsch, gar „verrückt“. Zu den wenigen Forschern, die davon ausgingen,

dass Pauli mit seiner Vermutung richtig lag, gehörte Enrico Fermi. Der italienische Physiker war es auch, der dem hypothetischen Teilchen 1933 einen wissenschaftlichen Namen gab: Neutrino (ital. für „kleines Neutron“).

Doch erst 1956 erbrachte ein US-Team den experimentellen Beweis: Die Forscher konnten mit Hilfe einer kompli-

*Manche Neutrinos entstanden – beim Urknall – und durchreisen seither ungebremst das All*

zierten Versuchsanordnung tatsächlich die Existenz eines Neutrinos nachweisen – zwei Jahre vor Paulis Tod. Inzwischen ist sogar bekannt, dass Neutrinos nicht nur beim Zerfall von bestimmten Atomen entstehen, sondern auch dann,



97

### Laboratori Nazionali del Gran Sasso, Italien

Im Zentrum dieser Anlage soll ein Detektor bestimmte Eigenschaften von Neutrinos erforschen, die beim hochkomplexen Zerfall von Germanium-76 entstehen. Ein mit Wasser gefluteter Tank (hier bei Wartungsarbeiten nicht befüllt) soll das unterirdische Messinstrument tief im Inneren der Abruzzen (Illustration rechts) gegen störende kosmische Strahlung isolieren.

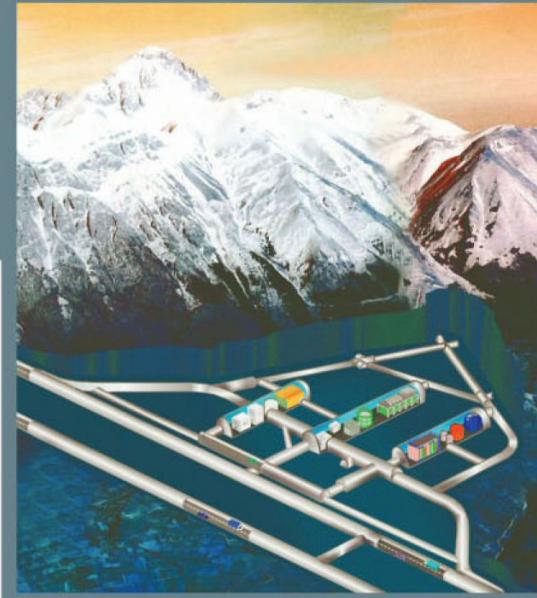
wenn zwei Atomkerne miteinander verschmelzen – etwa bei jenen Fusionsprozessen, die in Sternen ablaufen.

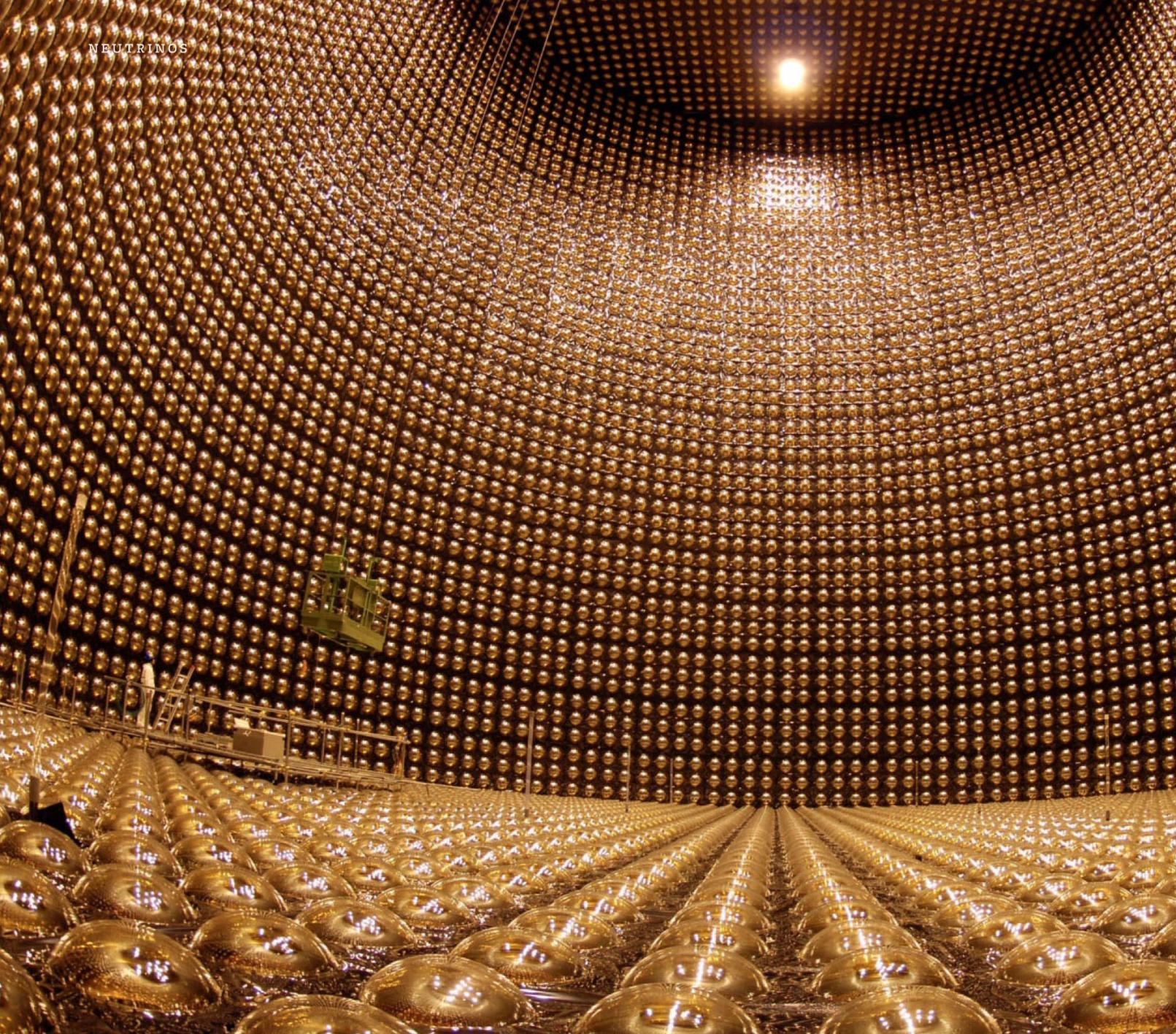
N

Nicht zufällig dauerte die Suche nach dem Geisterteilchen derart lange. Denn die erstaunliche Fähigkeit der Neutrinos, einfach durch Materie hindurchzurauschen – sei es nun Felsgestein oder ein Ozean –, macht es so schwer, sie überhaupt mit Messgeräten zu detektieren.

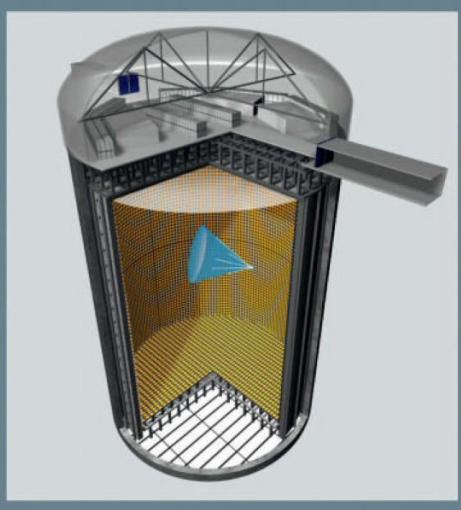
Das liegt letztlich daran, dass Materie und somit auch jedes Messgerät größtenteils aus leerem Raum besteht, so sehr dies unserer Alltagserfahrung auch zu widersprechen scheint. Denn die Atome, aus denen sämtliche Materie aufgebaut ist, sind alles andere als kompakte Gebilde.

Im Gegenteil: In der Mitte befindet sich – stark vereinfacht gesagt – ein winziger Kern, um den herum noch viel kleinere Elektronen schwirren (siehe Illustration Seite 148). Dazwischen aber ist nichts als ein elektromagnetisches Feld. Vergrößerte man beispielsweise das am einfachsten gebaute Atom (das Wasserstoffatom, um dessen Kern nur ein Elektron rast) auf den Durchmesser eines

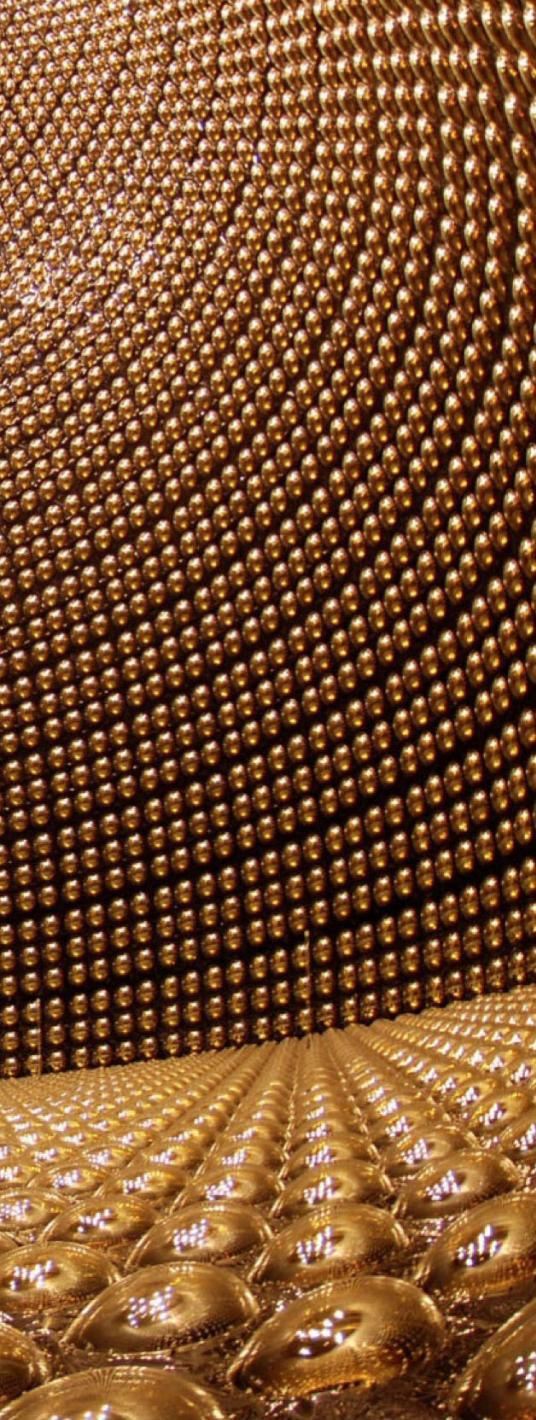




Super-Kamiokande, Japan



Einen Kilometer unter der Erdoberfläche ist diese Neutrino-Falle eingelassen: ein 41 Meter hoher und 39 Meter breiter Stahlzylinder, der mit 50 000 Tonnen hochreinen Wassers gefüllt ist. 13 000 Sensoren sollen jene Blitze detektieren, die bei der Kollision eines Neutrinos mit einem Wassermolekül aufleuchten und sich anschließend in der Anlage ausbreiten (links blau dargestellt). Vermessen werden so vor allem Neutrinos, die in der Sonne oder durch kosmische Strahlung in der Erdatmosphäre entstehen.



Fußballstadions, wäre der Kern etwa so groß wie eine Murmel. Das Elektron wiederum würde als verschwindend kleiner Punkt überall im Stadion herumsausen.

Da die fast masselosen Neutrinos im Unterschied zu vielen anderen Teilchen im Universum elektrisch nicht geladen sind, hat die Kraft des elektromagnetischen Feldes in einem Atom auf sie keine Wirkung. Daher können sie geradewegs durch die Atome hindurchfliegen. Sie müssen schon direkt auf den Atomkern oder ein Elektron prallen, wenn sie durch die Kollision gestoppt werden sollen. Und das geschieht eben extrem selten.

Von den mehr als 60 Milliarden Neutrinos, die jede Sekunde durch einen Quadratzentimeter unserer Haut rauschen und dann weiter durch den Erdball fliegen, kollidiert gerade einmal ein Dutzend irgendwo auf dem Weg durch den Planeten mit einem Atomkern. Mit anderen Worten: Neutrinos machen fast nie auf sich aufmerksam.

Derart selten sind die Zusammenstöße, dass die Forscher gewaltige Apparaturen konstruieren müssen, die vom Volumen her größer sind als jedes andere Messgerät, um diese Reaktionen aufzuzeichnen. In der Regel bestehen die Detektoren aus gigantischen Tanks, die mit einer Flüssigkeit gefüllt sind – in der Hoffnung, dass irgendwann ein Neutrino mit den Atomen der Flüssigkeit in Wechselwirkung gerät.

Zudem sind die Neutrino-Detektoren tief in der Erde, im Meerwasser oder im arktischen Eis installiert, um sie von störenden Signalen abzuschirmen – anderen Teilchen oder Strahlen aus dem All, die ebenfalls mit der Flüssigkeit reagieren. Sonst würde der Detektor regelrecht mit Signalen überflutet.

Daher liegt beispielsweise der japanische Detektor „Super-Kamiokande“ rund 1000 Meter tief in einem Bergmassiv. Er besteht aus einem gewaltigen Tank – fast 40 Meter breit und hoch wie ein zehngeschossiges Haus –, der 50 000 Kubikmeter extrem reinen Wassers enthält.

Die Wand dieses Kolosses ist mit 13 000 hochempfindlichen Sensoren bestückt, die wie Augen ins Innere des Tanks schauen. Prallt ein Neutrino auf seinem Weg durch den Wassertank auf den Kern oder ein Elektron eines der zahllosen Atome der Detektorflüssigkeit, entstehen aufgrund einer komplexen physikalischen Reaktion winzige Lichtblitze, welche die Sensoren aufzeichnen.

Noch gigantischer ist ein Neutrino-Detektor, den Forscher kilometertief in das 100 000 Jahre alte Eis der Antarktis getrieben haben: Mit Heißwasserstrahlen bohrten sie 86 Löcher in den Frost, um in

rund 1500 Meter Tiefe jeweils 1000 Meter lange, senkrecht nach unten führende Ketten mit insgesamt 5160 Sensoren zu installieren. Auch diese Messfühler nehmen Lichtblitze auf, die entstehen, wenn ein Neutrino auf einen Atomkern oder ein Elektron im Eis trifft und dabei neue, elektrisch geladene Teilchen erzeugt.

Die Trossen sind so im Eis verteilt, dass die Sonden eine Art dreidimensionales Gitter bilden und dabei ein Volumen von einem Kubikkilometer überspannen.

Damit ist „IceCube“ das größte je von Menschen geschaffene Messinstrument.

Dank seiner ungeheuren Ausmaße versetzt es die Forscher in die Lage, die Herkunftsrichtung eintreffender Neutrinos exakter als in anderen Detektoren zu bestimmen und zu

dem besonders hochenergetische, aber seltene Neutrinos aufzuspüren, die aus dem Kosmos herangerast kommen.

99

## *Sogar durch Atome können Neutrinos fliegen,*

## ohne eine Spur zu hinterlassen

F

Für die Wissenschaft ist die Jagd nach den Geisterteilchen eine völlig neue Art, etwas über das Universum zu erfahren. Bislang nutzten Forscher dazu vor allem Teleskope – also Geräte, die elektromagnetische Strahlen auffangen, die aus dem Weltall zu uns gelangen, darunter etwa das für unsere Augen sichtbare Licht.

Doch obwohl die Teleskope in den vergangenen Jahrzehnten immer empfindlicher geworden sind, haben sie einen großen Nachteil: Um kosmische Objekte überhaupt abilden zu können, benötigen sie freie Sicht. Die aber ist im Weltall nicht immer gegeben.

Vielmehr versperren häufig Nebelschwaden oder ganze Galaxien den Blick auf entfernte Objekte. Strahlen werden abgelenkt, verfälscht oder gänzlich verschluckt. Aus diesem Grund bleiben viele Phänomene dem menschlichen Auge ver-



Daya Bay, China

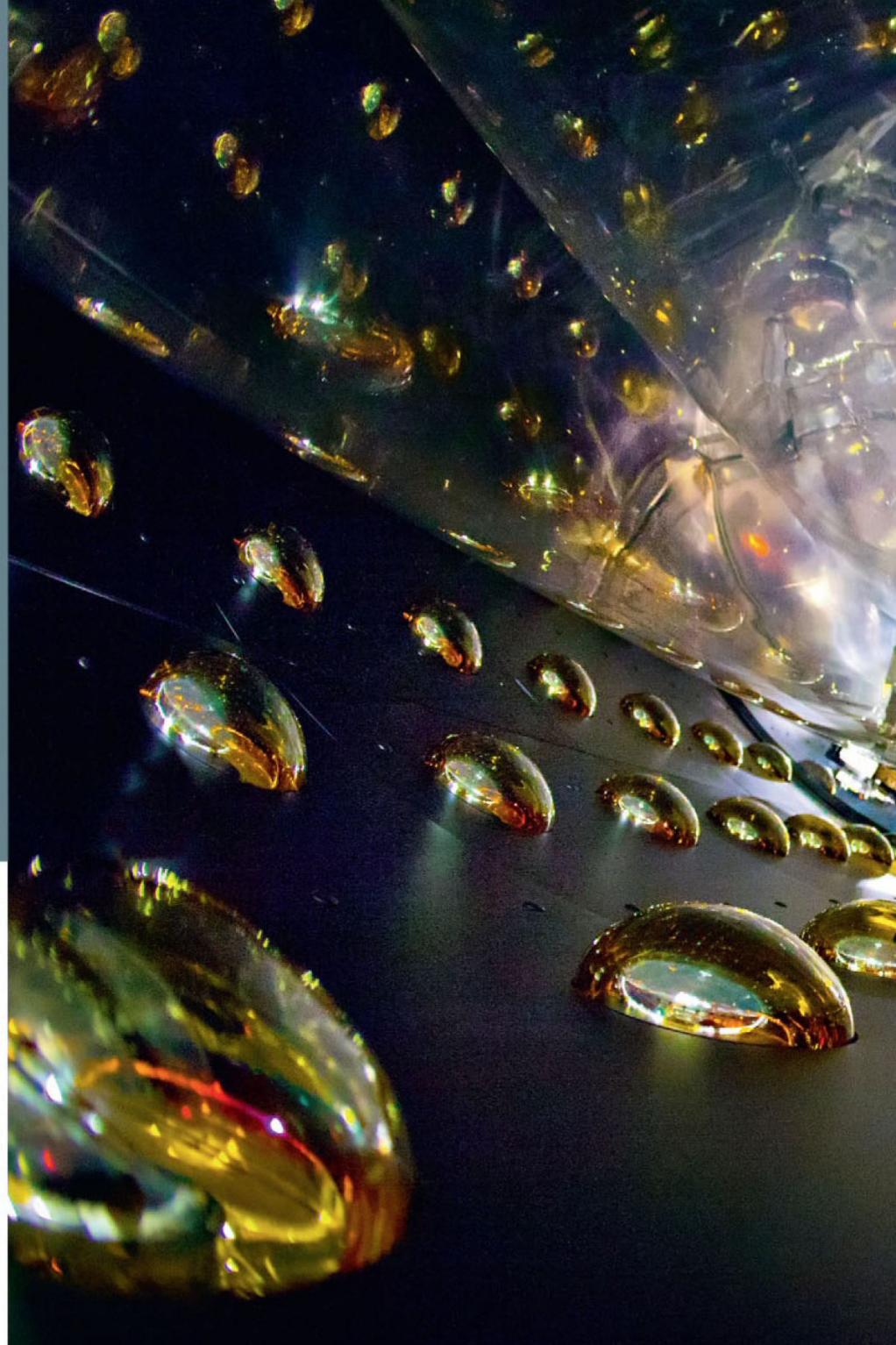
Diese Messvorrichtung in der Nähe von Hongkong detektiert Lichtblitze, die von sogenannten Antineutrinos erzeugt wurden. Die Teilchen existierten für kurze Zeit nach dem Urknall (siehe Seite 36) und entstehen heute noch bei manchen physikalischen Prozessen. In diesem Falle als Nebenprodukte der Kernspaltung in einem nahe gelegenen Atomkraftwerk.

**100** borgen. Neutrinos aber vermögen diese galaktischen Hindernisse mühelos zu durchdringen, da sie ja kaum mit Materie interagieren. Sie können auf diese Art Hinweise liefern auf kosmische Erscheinungen wie Schwarze Löcher, Neutronensterne oder Sternenkollisionen, die sich dem Blick der Teleskope entziehen.

# D

Denn bei vielen dieser urgewaltigen kosmischen Prozesse werden Atome derart ungeheuren Kräften ausgesetzt, dass in komplexen kernphysikalischen Reaktionen Neutrinos entstehen und in das All hinausgeschickt werden. Diese Geisterteilchen können den Forschern beispielsweise Details darüber verraten, wie Schwarze Löcher mit ihrer gewaltigen Gravitationskraft Gas- und Staubmassen ansaugen, sie fast auf Lichtgeschwindigkeit beschleunigen und einen Teil davon in den Kosmos hinausschleudern.

Dabei verrät die Energie, mit der die Geisterteilchen auf die Erde einprasseln,



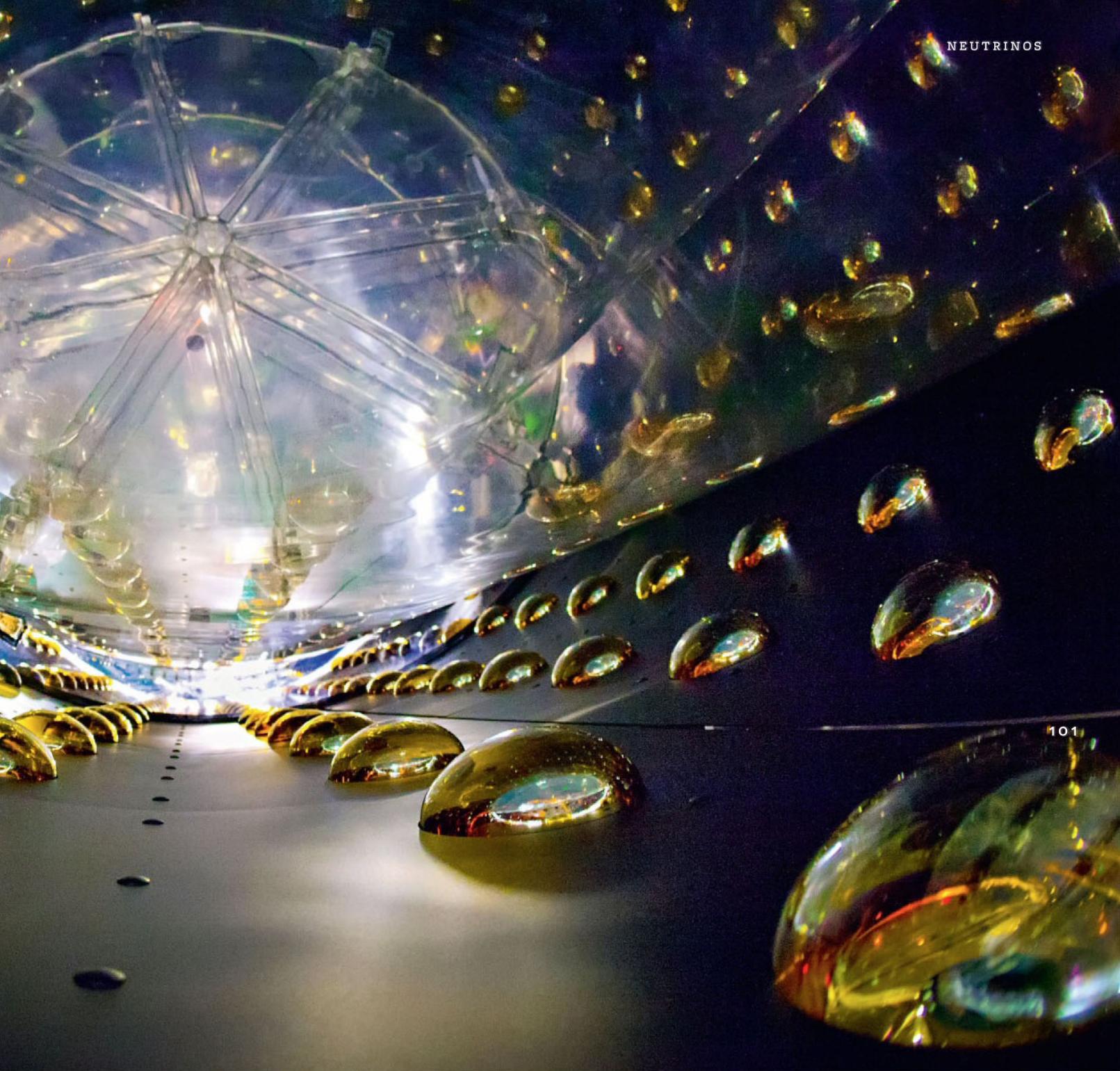
etwas über ihre kosmische Geburt – also über den Prozess, in dessen Verlauf die Atomkerne einst zerfallen oder verschmolzen sind.

Zudem gibt die Richtung, aus der die Winzlinge eintreffen, Aufschluss darüber, wo sich das entsprechende Himmelsphänomen abgespielt hat. Weil ihre Informationen durch nahezu nichts anderes verwischt oder verfälscht werden, können die unsichtbaren Neutrinos wie eine

Art Geheimschrift des Kosmos dazu beitragen, unsere Karte des Weltalls zu vervollständigen.

So haben Wissenschaftler unter anderem eine Vielzahl jener Myriaden von Neutrinos analysiert, die unsere Sonne in jedem Augenblick in Richtung Erde bläst.

Denn der Großteil der Billionen Geisterteilchen, die sekündlich unseren Körper durchfliegen, stammt von unserem Zentralgestirn.



In der Sonne verschmelzen, wie in anderen Sternen auch, gigantische Mengen Wasserstoff zu Helium: Diese sogenannte Kernfusion verleiht dem Gestirn seine große Leuchtkraft.

Lange Zeit konnten Forscher allerdings nur mithilfe mathematischer Modelle grob abschätzen, was genau bei der Verschmelzung von Wasserstoff zu Helium im Sonneninneren vor sich geht – wie stark zum Beispiel die Aktivität im

glühend heißen Zentrum unseres Zentralgestirns schwankt.

Da die bei der Kernfusion im Inneren der Sonne entstandenen Neutrinos mühelos bis zur Erde fliegen, ermöglichen sie den Wissenschaftlern nun erstmals einen unverstellten Blick auf das zentrale Geschehen – und könnten in Zukunft unter anderem beispielsweise Aufschluss darüber geben, ob und in welchem Maße sich die Stärke des inneren

Höllenfeuers von Zeit zu Zeit verändert. Denn solche Schwankungen würden sich in einer Zu- oder Abnahme der ausgesandten Neutrinos widerspiegeln.

Mithilfe der Neutrino-Detektoren haben die Forscher mittlerweile Millionen von Geisterteilchen registriert, deren Eigenschaften analysiert und so dazu beigetragen, dass sich das Dunkel um die seltsamen Winzlinge in den letzten Jahren immer weiter gelichtet hat. So

konnten die Wissenschaftler inzwischen errechnen, dass Neutrinos die häufigsten Vertreter der Masse tragenden Elementarteilchen überhaupt sind, also jener kleinsten Grundbausteine wie etwa Quarks oder Myonen (siehe Seite 149), aus denen sich das Universum zusammensetzt.

Damit sind die Geisterteilchen zahlreicher als die Neutronen, Protonen und Elektronen, aus denen die Atome aller Elemente im Kosmos gebildet sind.

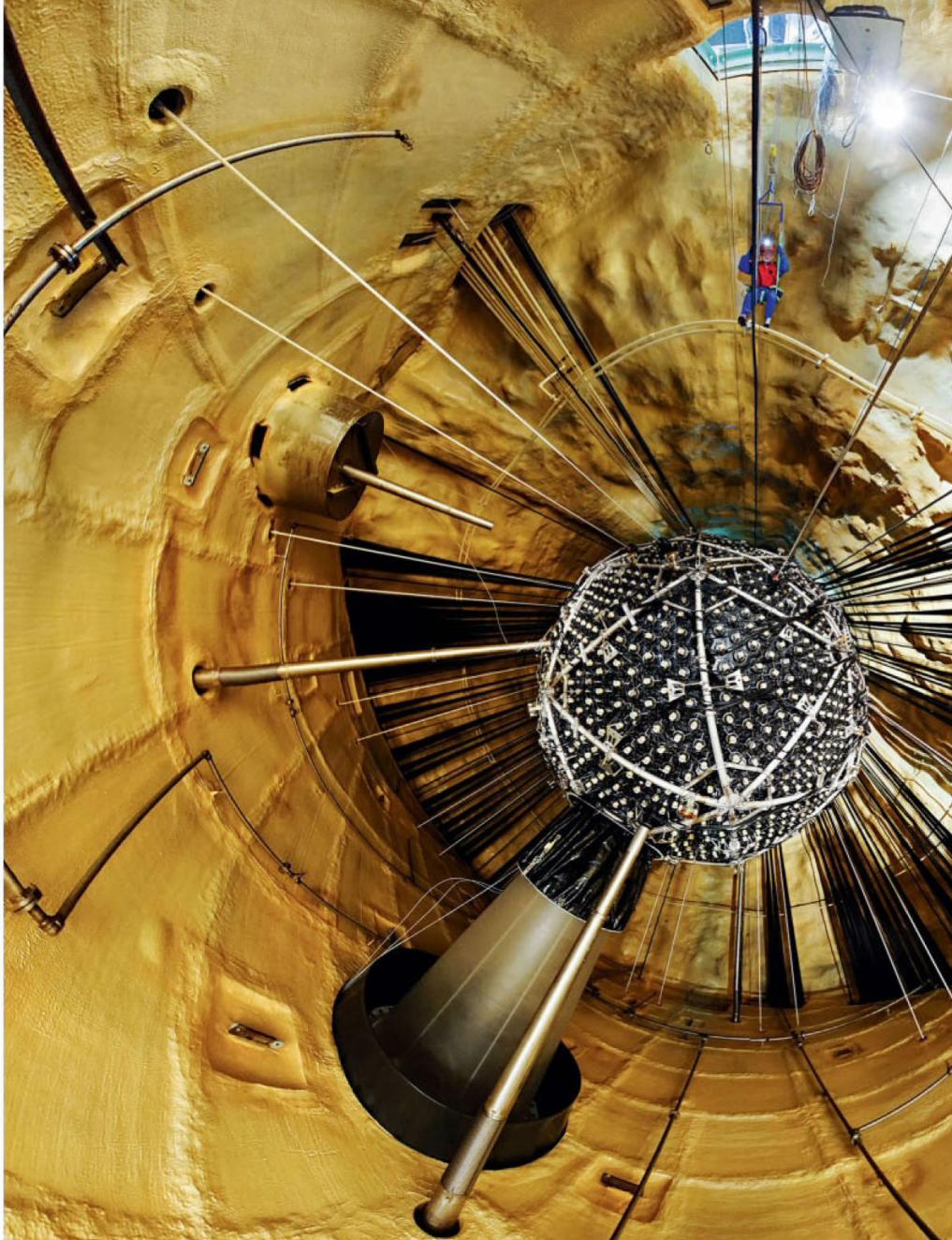
# A

Aber obwohl die Neutrinos nicht zum Aufbau der Atome gehören und somit kein Teil der uns vertrauten materiellen Welt sind, konnten Wissenschaftler jüngst nachweisen, dass sie nicht gänzlich masselos sind – eine Sensationentdeckung, die den Forschern 2015 den Physiknobelpreis einbrachte.

Für Laien mag es irrelevant erscheinen, ob es überhaupt etwas oder wie viel ein Neutrino auf die Waage bringt. Doch für Kosmologen ist es ein bedeutender Fortschritt und ein weiteres Puzzleteil zum besseren Verständnis der hochkomplexen Teilchenwelt.

Wie groß die Masse der Neutrinos genau ist, können Forscher noch nicht exakt bestimmen. Klar ist jedoch, dass ein

102



## SNOLAB, Kanada

Mit dem Detektor »SNO« in einem zwei Kilometer tiefen Bergwerk gelang es zu bestätigen, was zuvor bereits Messungen des Super-Kamiokande-Experiments nahelegten: Neutrinos haben eine – wenn auch winzige – Masse. Für diese Erkenntnis erhielten Forscher bei der Projekte 2015 den Nobelpreis. Derzeit wird SNO umgebaut. Als »SNO+« soll er bald helfen, unter anderem die Größe der Neutrino-Masse genauer zu bestimmen.

Neutrino leichter ist als ein Millionstel dessen, was ein Elektron wiegt. Und schon dieses Teilchen ist fast zweitausendfach leichter als die Bausteine der Atomkerne – Protonen und Neutronen.

Doch so winzig ihr Gewicht auch sein mag: Astronomen haben berechnet, dass nach dem Urknall gigantische Mengen an Neutrinos entstanden sein müssen. Und weil die Geisterteilchen von Beginn an so viel häufiger waren als alle anderen Elementarteilchen, summieren sich die Leichtgewichte bereits kurz nach der Geburt des Kosmos auf eine Masse, die ungefähr der sämtlicher Sterne im Universum entspricht.

Daher muss ihr Einfluss in der Anfangsphase, als das All noch winzig klein



## Auf einen Blick

### **Neutral**

Neutrinos sind nicht elektrisch geladen. Deshalb interagieren sie kaum mit Materie.

### **Unaufhaltsam**

Die Winzlinge durchdringen Planeten, Bleiplatten und selbst unser Gehirn, meist ohne irgend eine Spur zu hinterlassen.

### **Unverfälscht**

Weil manche dieser Geisterteilchen seit dem Urknall durch das All rasen, enthalten sie Informationen aus der Geburtsstunde des Universums.

### **Ultraleicht**

Anders als etwa Lichtteilchen sind Neutrinos nicht masselos. Im Vergleich zu anderen Teilchen ist ihre Masse aber winzig: Sie beträgt weniger als ein Millionstel dessen, was ein Elektron wiegt.

und alle Materie dicht beisammen war, unfassbar groß gewesen sein.

Eine noch unbekannte und rein hypothetische Form von Neutrinos könnte sogar verhindert haben – so ergaben es jedenfalls komplizierte mathematische Berechnungen –, dass sich weniger als eine hunderttausendstel Sekunde nach dem Urknall die gerade entstandenen Materie- und Antimaterieteilchen wieder gegenseitig vollständig zu vernichten begannen und in reine Energie zerstrahlten.

Wenn die Berechnungen stimmen, ist es dieser (wie gesagt: noch rein hypothetischen) Variante der neutralen Winzlinge zu verdanken, dass nach der großen Vernichtungsphase genug Materie übrig blieb, um später die gewaltigen Galaxien

mit ihren Sonnen, Gaswolken und Planeten zu formen.

Und auch die weitere Entwicklung der Sterneninseln könnten die Geisterteilchen maßgeblich geprägt haben, so der Dortmunder Physiker Heinrich Päs, der die Neutrinos intensiv erforscht hat.

Im jungen Universum neigte die Materie dazu, sich zu großen Gasklumpen zusammenzuballen, aus denen sich die ersten Sterne und schließlich Galaxien formten (siehe Seite 42).

Die Neutrinos flogen durch diese Klumpen hindurch und rissen sie durch ihre Gravitationskraft ein klein wenig auseinander – fast so, als würden zahllose Gewehrkugeln durch eine dichte Rauchwolke fliegen und die Schwade

etwas auseinandertreiben. Auf diese Weise beeinflussten die Geisterteilchen vermutlich die Art und Weise, in der sich Galaxien im frühen Universum bildeten. Wie stark dieser Effekt letztlich allerdings war, wissen die Forscher bislang noch nicht.

Nicht weniger verblüffend ist, was Neutrinos wohl am Ende eines Sternenlebens bewirken – es ist eine kurze, heftige Reaktion, der wir letztlich unsere Existenz verdanken. Denn sobald ein Stern seinen Brennstoff aufgebraucht hat, sodass keine weiteren Atome in seinem Inneren miteinander fusionieren können, bricht er gewissermaßen unter seiner eigenen Schwerkraft zusammen. Es kommt zu einer Sternenexplosion (siehe Seite 81).

Dabei werden auf einen Schlag gigantische Mengen an Geisterteilchen gebildet, die ins All hinausschießen. Diese Art von „Neutrino-Wind“ ist derart stark, dass er die äußere Hülle des Sterns mit sich ins All reißt.

Und diese Sternenhülle enthält gewissermaßen den Keim unserer Existenz – denn in ihr befinden sich schwere Elemente wie Kalzium, Nickel oder Eisen, die zuvor im Stern in komplexen physikalischen Reaktionen aus Wasserstoff und Helium erzeugt worden sind (siehe Seite 86). Und aus denen sich später Planeten formen können, wie die Erde einer ist.

Würden die Sternenhüllen jedoch auf den Kern einstürzen und mit ihm verschmelzen, könnten sich im All niemals genügend schwere Elemente für die Entstehung eines Planeten ansammeln.

Ohne die nach außen stiebenden Neutrinos, die die schweren Elemente mit sich reißen, gäbe es also keine Planeten und somit keine Erde – und auch nicht jene Wesen, die selber ebenfalls Neutrinos bilden.

Denn auch im Inneren des Menschen kommt es ununterbrochen zum radioaktiven Zerfall von besonders schweren Kaliumatomen – einem Vorgang, bei dem pro Sekunde mehrere Tausend Neutrinos entstehen.

Ohne dass wir es bemerken, verlassen sie unseren Organismus. Und machen sich auf eine weite Reise durchs Universum.

**DR. HENNING ENGELN**, Jg. 1954, ist Wissenschaftsjournalist in Hamburg.

A simulation of a supermassive black hole accretion disk. The central black hole is a dark, irregular shape with a bright, blue-tinted region at its center. It is surrounded by a thick, rotating disk of gas and dust, depicted in shades of red, orange, and yellow. The disk is highly turbulent, with many wispy, pinkish-purple filaments of gas being pulled inwards. The background is a dark, star-filled space.

Die größten Schwarzen Löcher  
(hier eine Simulation) ziehen  
derart gewaltige Mengen von Materie  
aus dem Kosmos an, dass die sich  
in einer rotierenden Scheibe und einer  
extrem heißen Zone, der Korona,  
(Bildmitte) verdichtet

IM

# SOG

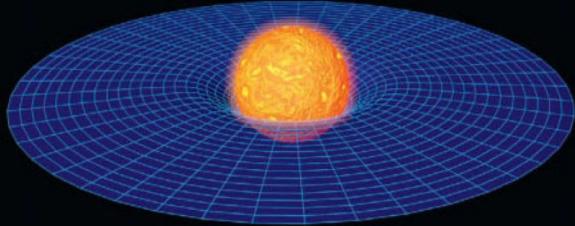
DER

# EWIGKEIT

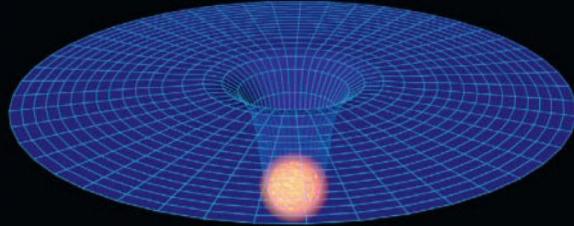
105

TEXT: CHRISTOPHER PILTZ  
UND MARIA KIRADY

Schwarze Löcher sprengen die Vorstellungskraft:  
An der Grenze dieser bizarren Himmelsphänomene bleibt die Zeit  
quasi stehen, der Raum verbiegt sich ins Absurde. Und in  
ihrem Inneren gelten die Gesetze der herkömmlichen Physik nicht  
mehr. Doch Wissenschaftler hoffen, dass sich durch ihre  
Erforschung fundamentale Einsichten über den Anbeginn  
des Kosmos gewinnen lassen



**1. KRÜMMUNG** Massereiche Körper wie etwa ein Stern verbiegen das Raum-Zeit-Gefüge (blaues Gitter)



**2. VERDICHTUNG** Komprimiert sich die Masse des Sterns, krümmt sich die Raumzeit noch stärker

# N

Nur wenige kosmische Gebilde bringen Wissenschaftler so an die Grenzen des Vorstellungsvermögens wie die Schwarzen Löcher. Sie zählen zu dem Erstaunlichsten, was das All zu bieten hat.

106

Dank ihrer gewaltigen Masse vermögen sie nicht nur das Gefüge aus Raum und Zeit (siehe Seite 72) zu verbiegen und alle Materie, selbst das Licht, in ihrer unmittelbaren Umgebung für immer zu verschlingen. Die größten unter ihnen entfesseln gigantische Entladungen, die die Strahlkraft einer Galaxie um ein Tau sendfaches übertreffen und die Gestalt der Sternarchipele maßgeblich mitprägen.

Besonders interessiert sind Forscher an Vorgängen, die sich jeder Beobachtung entziehen, weil sie sich im Inneren der Objekte abspielen. Denn könnten wir ein Schwarzes Loch betreten, würden wir an einen Ort gelangen, der zwar noch zu unserem Universum gehört, an dem aber die derzeit gültigen Gesetze der Physik außer Kraft sind: eine Welt der Extreme, in der alles auf einen winzigen Punkt zusammengeschrumpft ist.

Es wäre eine Reise in eine wissenschaftliche Grauzone, weil bislang niemand sagen kann, was dort wirklich vor sich geht. Daher hoffen die Astrophysiker, durch die Erforschung dieser Phänomene auf neue Einsichten über das Wesen des Universums zu stoßen, etwa zum Charakter von Raum und Zeit oder zur Be-

schaffenheit von Materie – und darüber, was geschieht, wenn all das auf ein Minimum zusammengequetscht wird.

Zwar kann man ein Schwarzes Loch nicht aus der Nähe sehen, doch für die meisten Wissenschaftler ist umstritten, dass es die Ausnahmeobjekte gibt. Sie verraten ihre Existenz etwa dadurch, dass sie die Bewegungen von Gaswolken und Sternen in ihrer Umgebung beeinflussen.

Und erst jüngst ist es Wissenschaftlern mithilfe hochempfindlicher Messgeräte gelungen, eine durch das All rassende Stoßwelle zu registrieren, die entstand, als zwei gewaltige Schwarze Löcher miteinander kollidierten (siehe Seite 82). Aufgrund komplizierter Berechnungen und durch astronomische Beobachtungen haben sie sogar eine recht genaue Vorstellung davon, wie die Gebilde entste-

hen, wie groß sie werden und warum ihre Anziehungskraft so überwältigend ist.

Vieles aber ist noch unklar: Was geschieht mit jener Materie, die die Schwelle eines Schwarzen Lochs überschreitet? Welche Rolle spielen die Gebilde in der Geschichte des Kosmos? Und was können sie uns über den Urknall verraten, als das Universum wohl einem winzig kleinen Punkt entsprang?

**Um darauf Antworten** zu finden, gilt es zu verstehen, woher die Schwarzen Löcher kommen, wie sie aufgebaut sind und welche Kräfte in ihrem Inneren walten.

Schon die Geburt eines Schwarzen Lochs beginnt mit einem außergewöhnlichen Spektakel: der Explosion eines gigantischen Sterns (siehe Seite 80). Ein Schergewicht von der vielfachen Masse unserer Sonne entsteht, wenn sich gewaltige Mengen an Wasserstoffgas auf engem Raum zusammenballen.

Aufgrund seiner beachtlichen Größe verfeuert ein solcher Riesenstern in seinem Inneren derart viel Brennstoff, dass er 100 000-fach heller strahlt als unser Zentralgestirn. Doch wegen seiner unglaublichen Feuerkraft hat der Gigant eine vergleichsweise kurze Existenz: Es dauert manchmal nur wenige Millionen Jahre, bis der Treibstoff aufgebraucht ist. Danach explodiert der Himmelskörper, und es folgt ein fulminanter Kollaps.

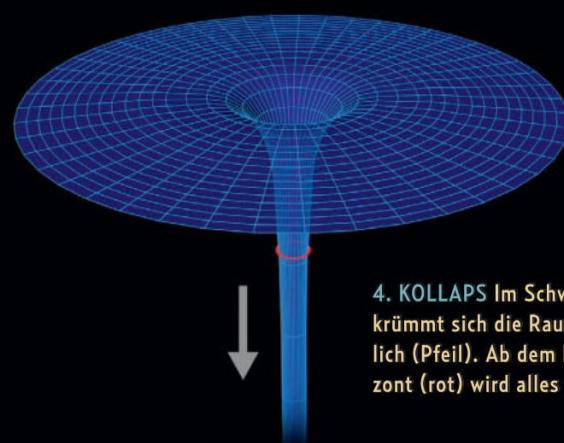
Dazu muss man wissen, dass sich ein Stern zeit seines Daseins in einem fein austarierten Gleichgewicht befindet: Die Schwerkraft zieht beständig alle Masse des Feuerballs zu seinem Mittelpunkt hin – die Hitze in seinem Inneren aber steuert dem entgegen, indem sie sämtliche Teilchen und damit den Stern selber auseinandertreibt. Es ist diese Balance aus Schrumpfung und Ausdeh-

Das **Universum**  
ging einst aus einem  
**unendlich kleinen**  
**Punkt** hervor.

Genau solch einen  
Punkt birgt  
womöglich jedes  
**Schwarze Loch**



**3. SCHRUMPFUNG** Die Masse verdichtet sich immer weiter, die Raumzeit verbiegt sich ins Extreme



**4. KOLLAPS** Im Schwarzen Loch krümmt sich die Raumzeit unendlich (Pfeil). Ab dem Ereignishorizont (rot) wird alles verschlucht

nung, die dem Gestirn seine Stabilität verleiht.

Sobald aber das Feuer des Riesen nachlässt, überwiegt die Schwerkraft, und der Stern beginnt zu schrumpfen – bis zu dem Punkt, an dem er plötzlich unter seiner eigenen Masse zusammenbricht. Das ist der Moment, in dem sich der leuchtende Glutball in sein schieres Gegenteil verwandelt: ein finstres Nichts.

Denn durch den Kollaps fällt der Kern des ehemaligen Riesen binnen Millisekunden in sich zusammen. Und zwar so stark, dass sich – der gängigen Theorie zufolge – die verbliebene Materie auf engstem Raum verdichtet.

Eine unvorstellbar kleine, unvorstellbar komprimierte Masse entsteht. Astrophysiker nennen dieses Etwas eine „Singularität“.

Sie bildet das Zentrum des Schwarzen Lochs. Und ihre Schwerkraft ist so gewaltig, dass sie das Gefüge aus Raum und Zeit in ihrer unmittelbaren Nähe völlig verzerrt. Sie reißt dank dieser ungeheuren Gravitation im wahrsten Sinne des Wortes einen Abgrund, eine Art „Loch“ ins All, in das alle Masse aus der Umgebung hineinfällt.

Das mag merkwürdig klingen, doch nach der Einstein'schen Relativitätstheorie ist die Schwerkraft nichts als eine Krümmung von Zeit und Raum – große Massen erzeugen eine Art Delle im Raum, die kleinere Objekte auf sie zurollen lässt.

Man kann sich das Phänomen mit einem gespannten Gummiball versinnbildlichen, auf dem kleine Metallkugeln

## GENESE EXTREME VERDICHTUNG

**M**ithilfe eines Gedankenmodells lässt sich begreifen, wie mancher Stern am Ende seiner Existenz zu einem Schwarzen Loch wird. Denn gemäß der Einstein'schen Relativitätstheorie ist das Raum-Zeit-Gefüge kein starres, unveränderliches Gebilde. Vielmehr wird es durch massereiche Körper gekrümmt, etwa einen Stern. Veranschaulichen lässt sich dies durch ein Gummiball, in das eine Kugel einsinkt (1). Verdichtet sich die Masse, verbiegt sich die Raumzeit immer stärker (2), so wie eine schwerere Kugel tiefer im Gummiball einsinkt. Dieser Prozess setzt sich immer weiter fort (3) – bis manchmal der Stern zu einem Schwarzen Loch kollabiert (siehe Seite 82). Dabei zieht sich (so Einstein) seine Masse in einem unendlich kleinen Punkt zusammen, der Singularität (4). Im Gummiballmodell wäre ein unendlicher, bodenloser Trichter die Folge. Um die Singularität bildet sich eine unsichtbare Grenze, der Ereignishorizont (rote Linie) – der Rand eines Schwarzen Lochs und für die Forscher das Ende des bekannten Universums.

Damit so etwas überhaupt möglich ist, müssen Raum und Zeit in seinem Inneren auf unbeschreiblich groteske Weise verzerrt und in sich „verdrillt“ sein, wie Physiker sagen. So sehr, dass man es sich mit den Möglichkeiten des menschlichen Geistes schlicht nicht mehr vorstellen kann.

## U

107

Um diesen Krater mit der Singularität im Zentrum zieht sich wie ein Bannkreis eine Zone, in der die Gravitation so stark ist, dass alles Licht verschlucht wird. Forscher sprechen vom „Ereignishorizont“. Er bildet gewissermaßen die äußere Umrundung des Schwarzen Lochs: jene Grenze, hinter die wir nicht blicken können. Und er ist umso ausgedehnter, je massereicher ein Schwarzes Loch ist. Meist beträgt sein Durchmesser einige Dutzend Kilometer.

Erst außerhalb dieser Zone vermag das Licht dem Schwarzen Loch zu entkommen. Denn die Anziehungskraft der Singularität ist jenseits des Ereignishorizonts so schwach, dass sie die Lichtstrahlen dort nicht mehr festhalten kann.

Nur: Was geschieht mit Materie, die auf das Schwarze Loch zufliegt und den Ereignishorizont überschreitet?

Darüber können Wissenschaftler allenfalls spekulieren. Doch wenn man den derzeitigen Modellen vom Aufbau Schwarzer Löcher folgt, dann lässt sich zumindest erahnen, was da passiert. In

verteilt sind. Jede Murmel drückt das Gewebe ein wenig ein. Legte man aber nun eine besonders schwere Bleikugel in die Mitte des Tuchs, dann würde sie derart tief einsinken, dass augenblicklich alle Murmeln in der Umgebung in diese Versenkung hinabkullerten. Die Anziehung, die die Murmeln nach unten rollen lässt, ist die Gravitation.

Und genau wie die Bleikugel in dem Beispiel verursacht auch das Schwarze Loch eine Einbuchtung im Raum-Zeit-Gefüge – allerdings deutlich steiler und von unermesslicher Tiefe. Das zumindest haben die theoretischen Berechnungen der Forscher bislang ergeben.



Im Bann des Giganten:  
Diese Illustration zeigt, wie  
eine Gaswolke von einem  
Schwarzen Loch (o. l.) in die  
Länge gezogen und allmäh-  
lich verschlungen wird

108 einem Gedankenexperiment haben For-  
scher sich zum Beispiel die Frage ge-  
stellt, was einem Astronauten widerfah-  
ren würde, der sich einem Schwarzen  
Loch näherte. Demnach geriete der Raum-  
fahrer in den Sog des Massemonsters,  
es würde ihn immer stärker und schnel-  
ler anziehen. So jedenfalls würde er es  
selber erleben.

Von außen aber sähe es paradoxer-  
weise so aus, als bewegte sich der Astro-  
naut ausgesprochen träge und immer  
langsamer auf das finstere Objekt zu.  
Mehr noch: Während für den Mann in  
unmittelbarer Nähe des Schwarzen Lochs  
nur wenige Stunden vergingen, würden  
auf der Erde Jahrhunderte verstreichen.

Der Grund: Dieses Ausnahmeobjekt  
dehnt in seiner Umgebung nicht nur den  
Raum, es streckt auch die Zeit – sodass  
sie im Vergleich zu unserem Heimat-  
planeten immer langsamer verstreicht, je  
näher der Weltraumreisende dem dunklen  
Ungetüm kommt.

Denn an verschiedenen Orten im  
Universum (auch das ist eine Erkenntnis  
aus Einsteins Relativitätstheorie) kann die  
Zeit in völlig unterschiedlichem Tempo  
verstreichen, je nachdem, wie stark dort  
die Krümmung des Raumes ist.

Der Lauf der Zeit ist also keineswegs  
konstant, sondern klafft mehr oder weni-

ger deutlich auseinander, wenn man zwei  
Orte mit unterschiedlichen Rahmenbe-  
dingungen vergleicht.

Der Raumfahrer selber bekäme von  
der Verzögerung nichts mit, für ihn ver-  
ginge die Zeit so, wie er es gewohnt ist.  
Denn nicht nur seine Bewegungen, auch  
die Prozesse in seinem Körper, die seine  
Wahrnehmung steuern, ließen mit der  
gleichen Langsamkeit ab. Sobald er den

Ereignishorizont überschritte, fröre seine  
Gestalt von uns aus betrachtet gar völlig  
ein. Er hinterließe ein allerletztes Abbild  
am Rande des Schwarzen Lochs.

Der Astronaut aber wäre gefangen  
in einer Sphäre, in die man zwar eindrin-  
gen, die man aber nie wieder verlassen  
kann. Er würde seine Reise im Inneren  
des Ungetüms fortsetzen und vermutlich  
auf einer mörderischen Einbahnstraße  
immer schneller auf den Mittelpunkt des  
Schwarzen Lochs zufliegen.

Weil die Schwerkraft an seinen Fü-  
ßen stärker zerren würde als an seinem  
Kopf, würde sein Körper wohl von einem  
bestimmten Punkt an unfassbar in die  
Länge gezogen und schließlich in seine  
Einzelteile zerlegt. Irgendwann würden  
sich die Atome seiner Körperzellen auflö-  
sen, dann die Elementarteilchen selbst.  
Bis das, was vom Astronauten noch übrig  
wäre, mit dem Zentrum verschmolze: der  
Singularität. Und genau hier, inmitten  
des Schwarzen Lochs, befindet sich eines  
der größten Rätsel des Universums.

Forscher hoffen: Wer  
versteht, was im Inneren  
eines **Schwarzen Lochs**  
passiert,

der begreift auch,  
was beim **Urknall genau  
geschah**

**Denn dieser winzige Punkt**, in dem alle  
Masse konzentriert ist, stellt Physiker vor  
bislang unlösbare Schwierigkeiten.

Wenn man nämlich Einsteins Relati-  
vitätstheorie, die überall sonst im Univer-  
sum gilt – und deren Formeln die Exis-

tenz Schwarzer Löcher bestätigen –, zu grunde legt, müssten den Berechnungen zufolge Raum und Zeit in der Singularität unendlich stark gekrümmmt sein.

Konkret bedeutet das: Sie hätten keine feste Ausdehnung mehr.

Niemand weiß, ob das wirklich den Tatsachen entspricht, aber wenn es stimmen sollte, dann wären Zeit und Raum in einem undefinierbaren Zustand, den sich kein Mensch – auch kein Astrophysiker – mehr vorstellen kann. Genauso wenig können wir uns vergegenwärtigen, was dort vor sich gehen mag, wie die Materie beschaffen ist, welchen Gesetzen sie gehorcht. Hinzu kommt: Wir können es uns nicht nur nicht *vorstellen*, wir können es nicht einmal *berechnen*.

Denn all jene Formeln, die uns helfen, die Welt zu verstehen und verlässliche Vorhersagen zu treffen, ergeben in der Singularität keinen Sinn mehr.

Hier offenbart sich zugleich ein großes Defizit von Einsteins Relativitätstheorie, die ja immerhin als eine der grundlegendsten in der heutigen Physik gilt: Sie sagt mit der Singularität ein Phänomen voraus, dessen genaue Eigenschaften sie selber nicht beschreiben kann. So ist letztlich jede Aussage darüber, was im Zentrum des Schwarzen Lochs vor sich gehen mag, reine Spekulation. Möglicherweise herrschen hier völlig eigene Gesetze, von denen wir noch nichts ahnen.

Dennoch interessieren sich Wissenschaftler brennend dafür, wie man die Singularität treffender beschreiben, die Formeln in Einklang bringen könnte.

Denn nicht zuletzt ist ja unser gesamtes Universum mit seinen Milliarden Sterneninseln einst aus einer Singularität hervorgegangen, die noch um einiges rätselhafter anmutet: dem Urknall.

Und bis heute können wir anhand von komplexen Berechnungen und Experimenten zwar die Vorgänge in den allerersten Sekunden (siehe Seite 24) gut nachvollziehen – aber am entscheidenden Moment, an dem Augenblick, in dem aus einem winzigen Etwas alles entstand, dem Urknall selbst, bricht unser gesamtes Formelwerk in sich zusammen.

Wir haben kein Mittel, um den Ursprungszustand unserer Welt treffend zu beschreiben. Eine Lösung für das Rätsel im Zentrum

des Schwarzen Lochs könnte daher den Schlüssel bergen zum endgültigen, vollkommenen Verständnis des Kosmos.

Sie könnte uns gänzlich neue Einsichten in das Wesen von Materie, Zeit und Raum geben.

# A

Auch aus diesem Grund versuchen Astrophysiker mit allen erdenklichen Mitteln mehr über die eigentlich unsichtbaren Gebilde zu erfahren, sie nach Möglichkeit direkt zu beobachten. Das größte Hindernis dabei ist allerdings, dass die Schwarzen Löcher nur schwer am Firmament auszumachen sind. Zudem sind sie meist zu weit entfernt, um ihre Eigenschaften zu untersuchen.

Zum Glück für die Astronomen aber bleiben Schwarze Löcher nicht immer so winzig wie zu ihrer Geburt. Sie können wachsen, indem sie weitere Materie verschlingen, und sich zu riesigen Ungetümen zusammenschließen, zu „supermassereichen Schwarzen Löchern“, wie die Forscher sie nennen.

Diese Giganten von zuweilen milliardenfacher Masse unserer Sonne und einer Ausdehnung von mehreren Millionen Kilometern entfesseln die gewaltigsten Kräfte im gesamten Kosmos. Und sie sind an prominenten Orten im Universum zu finden: im Zentrum von Galaxien.

Viele Wissenschaftler gehen derzeit davon aus, dass sich im Lauf der Galaxientstehung im Herzen großer Sternen-

archipele viele kleine Schwarze Löcher zu den riesigen, supermassereichen Gebilden zusammengeballt haben. Vor allem dann, wenn zwei Galaxien miteinander verschmolzen, vereinten sich auch die Schwarzen Löcher in ihrer Mitte. Und indem sie weitere Sterne und Gaswolken in sich aufnahmen, konnten sie im Laufe der Jahrtausenden zu beachtlicher Größe anwachsen.

Das zumindest schließen Forscher aus diversen Beobachtungen. Wenn sich ein solcher Gigant Materie einverleibt, kommt es nämlich mitunter zu einem spektakulären Phänomen: zu einer Entladung riesiger Blitze, tausendfach heller als die Galaxie, der sie entspringen.

Diesen Ausbrüche entstehen, wenn das Schwarze Loch große Mengen an Materie in seiner Umgebung anzieht und dabei fast bis auf Lichtgeschwindigkeit beschleunigt.

Anstatt direkt in das Schweremonster hineinzustürzen, rast die Masse aufgrund physikalischer Gesetzmäßigkeiten zunächst auf einer kreisförmigen Umlaufbahn um das Schwarze Loch herum und nähert sich ihm dabei immer weiter an.

Ein mächtiger Strudel aus Sternen und Gaswolken, Gesteinsbrocken und Staubschwaden bildet sich, der sich durch die Reibung von Teilchen auf mehrere Millionen Grad aufheizt.

Bei den gewaltigsten Wirbeln kann es vorkommen, dass ein Teil der rotierenden Masse plötzlich ausbricht und zu beiden Seiten der Galaxie ins All hinauschießt (siehe Seite 46). Forscher ver-

muten, dass etwa vier Prozent der Masse, die um ein Schwarzes Loch tobt, nicht in seinem Inneren verschwindet, sondern mit ungeheurer Kraft ins All gefegt wird.

Von der Erde aus betrachtet, wirken diese aufleuchtenden Galaxien manchmal wie Sterne. Und weil wir nicht nur ihr Licht sehen, sondern sie sich auch durch das Aussenden von Radiowellen verraten, heißen sie Quasare (für „quasistellare Radioquelle“).

**Für die Wissenschaftler** noch interessanter aber sind jene supermassereichen Schwarzen Löcher, die bereits fast alle Materie in ihrer nächsten Umgebung aufgesogen haben und daher keine großen Massewirbel mehr erzeugen. Denn



Dem Schwarzen Loch auf der Spur: Für das »Event Horizon Telescope« verbinden Forscher seit April 2017 Beobachtungsstationen weltweit und erzeugen so ein Teleskop von der Größe der Erde

von dieser Sorte gibt es einige in unserer kosmischen Nachbarschaft, und sie eignen sich wegen ihrer Nähe zur Erde besonders gut für eine Beobachtung.

# B

Berechnungen zufolge ist ein solcher Gigant beispielsweise im Zentrum unserer eigenen Galaxie, der Milchstraße, zu finden. „Sagittarius A\*“ verbirgt sich hinter Wolken aus Gas und Staub sowie älteren gelblich leuchtenden Sternen, die das Zentrum der Galaxie umkreisen.

Da die Gravitation dieses Schwarzen Lochs an der Bahn der umliegenden Gestirne zerrt, können Forscher aus der Bewegung der Sterne ablesen, wie mächtig das Ungetüm in ihrer Mitte ungefähr ist: Sagittarius A\* entspricht mehr als vier Millionen Sonnenmassen.

Und weil es das von uns aus nächstgelegene supermassereiche Schwarze Loch ist, sind Astronomen sehr daran interessiert, es genauer zu untersuchen.

Die Mittel, die sie dazu aufwenden, sind enorm: Die größten und leistungsstärksten Radioteleskope der Welt sollen demnächst erstmals einen genauen Blick auf Sagittarius A\* ermöglichen.

Dazu haben die Forscher neun verschiedene Radioteleskope überall auf der Welt zusammengeschaltet: etwa in der Atacama-Wüste Chiles, in den Gipfeln der Sierra Nevada Spaniens, auf den Pinaleño Mountains in Arizona, auf Hawaii und am Südpol. Denn die schärfsten Aufnahmen von Himmelsphänomenen entstehen, wenn einzelne Messinstrumente, die möglichst weit voneinander entfernt sind, miteinander verbunden werden.

Die Bilder der Astronomen erreichen dadurch eine bisher noch nie erlangte Auflösung. Und indem die Wissenschaftler die Observatorien weltweit kombinieren, können sie ein virtuelles Teleskop erzeugen, das theoretisch so groß ist wie die gesamte Erde.

Hunderte Astronomen, Astrophysiker und Programmierer sind an dem Projekt mit dem Namen „Event Horizon Telescope“ (EHT) beteiligt. Ihr Ziel: den Rand des Schwarzen Lochs, den Ereignishorizont, exakt abzubilden.

Und genau dafür braucht es die gebündelte Kraft der Radioantennen. Denn mit bisherigen Messmethoden konnten Astronomen allenfalls die grobe Umge-

bung des Schwarzen Lochs beobachten. Die Wolken und Sterne, die sich im Zentrum von Galaxien ballen, versperren den Forschern in der Regel die Sicht auf das Loch in der Mitte.

Die Radioteleskope aber liefern nicht nur eine nie da gewesene Schärfe, sie empfangen zudem Strahlen mit einer Wellenlänge von 0,87 bis 1,3 Millimetern. Dieses Spektrum wird nur wenig durch die galaktischen Staubwolken im Zentrum des Sternensystems aufgehalten und dringt daher bis zu uns vor. So könnte das EHT den vorläufig präzisesten Blick auf ein Schwarzes Loch ermöglichen.

Die erste Messung hat bereits stattgefunden: Im April 2017 richteten sich neun Teleskope rund um den Globus alle zur gleichen Zeit auf das Zentrum der Milchstraße. Jedes der Instrumente zeichnete dabei Datenmengen von bis zu 32 Gigabyte auf – pro Sekunde. Über neun Tage hinweg kamen so mehrere Petabyte an Daten zusammen.

Um die Informationen auszuwerten und zu einem Gesamtbild zusammenzusetzen, bedarf es allerdings der Rechenleistung eines Supercomputers – und viel Zeit. Voraussichtlich erst im Frühjahr 2018 ist mit einem Ergebnis zu rechnen.

Dann hoffen die Forscher ein schwarz-weißes Bild zu sehen, das einer

## Auf einen Blick

### **Erlöschene Kolosse**

Schwarze Löcher können durch den Zusammenbruch eines ausgebrannten, massereichen Sterns entstehen.

### **Jenseits der Physik**

Im Innern eines Schwarzen Lochs sind die derzeit gültigen Gesetze der Physik außer Kraft, denn die Masse ist zu einem unvorstellbar kleinen Punkt verdichtet.

### **Fackeln am Firmament**

Besonders große Schwarze Löcher schleudern grell leuchtende Teilchenströme in den Raum. Astronomen nennen sie »Quasare«.

frühen Ultraschall-Aufnahme eines Ungeborenen gleicht und die genauen Abgrenzungen des Schwarzen Lochs zeigt. Ihre Beobachtungen wollen sie mit den Vorhersagen der Allgemeinen Relativitätstheorie abgleichen – und daran gewissermaßen Einsteins Annahmen testen.

Denn dessen Gleichungen besagen, dass das Massemonster nicht exakt kreisrund sein dürfte, sondern zu einer Seite hin etwas verzerrt sein müsste.

Stimmt diese Annahme nicht mit der tatsächlichen Beobachtung überein – sollte sich also eine andere Form zeigen als die erwartete –, dann müssten wir unsere Vorstellungen vom Schwarzen Loch völlig neu überdenken und erweitern.

# S

So hat etwa der britische Physiker Stephen Hawking die These aufgestellt, dass die Schwarzen Löcher nach einiger Zeit wieder zu schrumpfen beginnen. Denn unter bestimmten Voraussetzungen könnte es speziellen Teilchen möglich sein, dem finsternen Objekt in winzigen Portionen Energie zu entziehen.

Dadurch würde es nach und nach gewissermaßen „verdampfen“ – allerdings im Laufe einer unvorstellbaren Zeitspanne, trilliardenfach länger, als unser Universum existiert. Die frei gewordene Energie würde sodann als „Hawking-Strahlung“ ins All davonfliegen.

Ob diese Strahlung aber wirklich existiert und wie sie genau beschaffen ist, ist ein weiteres großes Rätsel um das Wesen der skurrilen Ungetüme.

Aber zu welchen Erkenntnissen und spektakulären Thesen Astrophysiker in Zukunft auch gelangen und welche Bilder uns die schärfsten Teleskope vom Rande der dunklen Objekte überbringen mögen – eines werden die Forscher wohl nie sehen können: das Innere eines Schwarzen Lochs. Seine räumlichen Grenzen sind auch unsere Grenzen des Sichtbaren.

Und so werden sich die seltsamen Gebilde vermutlich für immer ein letztes Geheimnis bewahren •

**CHRISTOPHER PILTZ**, Jg. 1988, ist Journalist in Hamburg. Die GEOkompass-Redakteurin **MARIA KIRADY**, Jg. 1985, hat das Konzept dieser Ausgabe erstellt. Wissenschaftliche Beratung: **PROF. DR. EDUARDO ROS**, Max-Planck-Institut für Radioastronomie, Bonn.

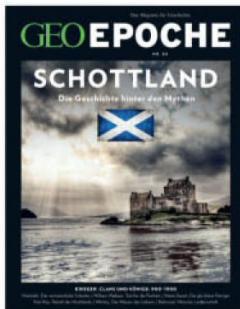
# Eine Auswahl für jeden Anspruch.

Lesen oder verschenken Sie Ihre Wunszeitschrift und sichern Sie sich eine tolle Prämie.



**GEO** für nur 90,–€

Die Welt erkennen, die Welt verstehen – in großartigen Fotoreportagen. 12x im Jahr.  
Selbst lesen: 157 4690 Verschenken: 157 4691



**GEO EPOCHE** für nur 60,–€

Die spannendsten Seiten unserer Geschichte. 6x im Jahr.  
Selbst lesen: 157 4700 Verschenken: 157 4701



**GEO kompakt** für nur 38,–€

Alle Bausteine für Ihre Bibliothek des Wissens. 4x im Jahr.  
Selbst lesen: 157 4696 Verschenken: 157 4697



**GEO WISSEN** für nur 38,–€

Relevante Bereiche der Wissenschaft. 4x in zwei Jahren.  
Selbst lesen: 157 4698 Verschenken: 157 4699



**GEO SAISON** für nur 78,–€

Die Nr. 1 unter den Reisemagazinen. 12x im Jahr.  
Selbst lesen: 157 4692 Verschenken: 157 4693



**GEO SPECIAL** für nur 54,–€

Fängt an, wo der Reiseführer aufhört. 6x im Jahr mit 5% Ersparnis.  
Selbst lesen: 157 4694 Verschenken: 157 4695



**GEO lino** für nur 47,40 €

Deutschlands größte Kinderzeitschrift. Für alle ab 9 Jahren. 12x im Jahr.  
Selbst lesen: 157 4702 Verschenken: 157 4703



**GEOmini** für nur 42,–€

Das Magazin für neugierige Erstleser ab 5 Jahren. 12x im Jahr.  
Selbst lesen: 157 4704 Verschenken: 157 4705



**PLUS:  
Prämie  
dazu!**

Weitere Prämien finden  
Sie im Online-Shop.

- Eine Wunsch-Prämie für Sie
- Lieferung frei Haus
- Ein oder mehrere Magazine Ihrer Wahl
- Ideale Geschenkidee

GEO-Magazine online bestellen und noch mehr Angebote unter:

**[www.geo.de/familie](http://www.geo.de/familie)**

**+49 (0)40/55 55 89 90**

Bei telefonischer Bestellung bitte immer die Bestellnummer angeben

# DER JAHR

112

TEXT: UTE EBERLE  
UND SEBASTIAN WITTE

Vor 18 Monaten gelang  
Forschern eine wissenschaftliche  
Sensation: der erste direkte  
Nachweis einer Gravitationswelle.  
Die Entdeckung lieferte den finalen  
Beleg für Einsteins Raumzeit-  
Theorie – und eröffnet Astrophysikern  
nun eine völlig neue Sicht auf die  
Entstehung des Universums

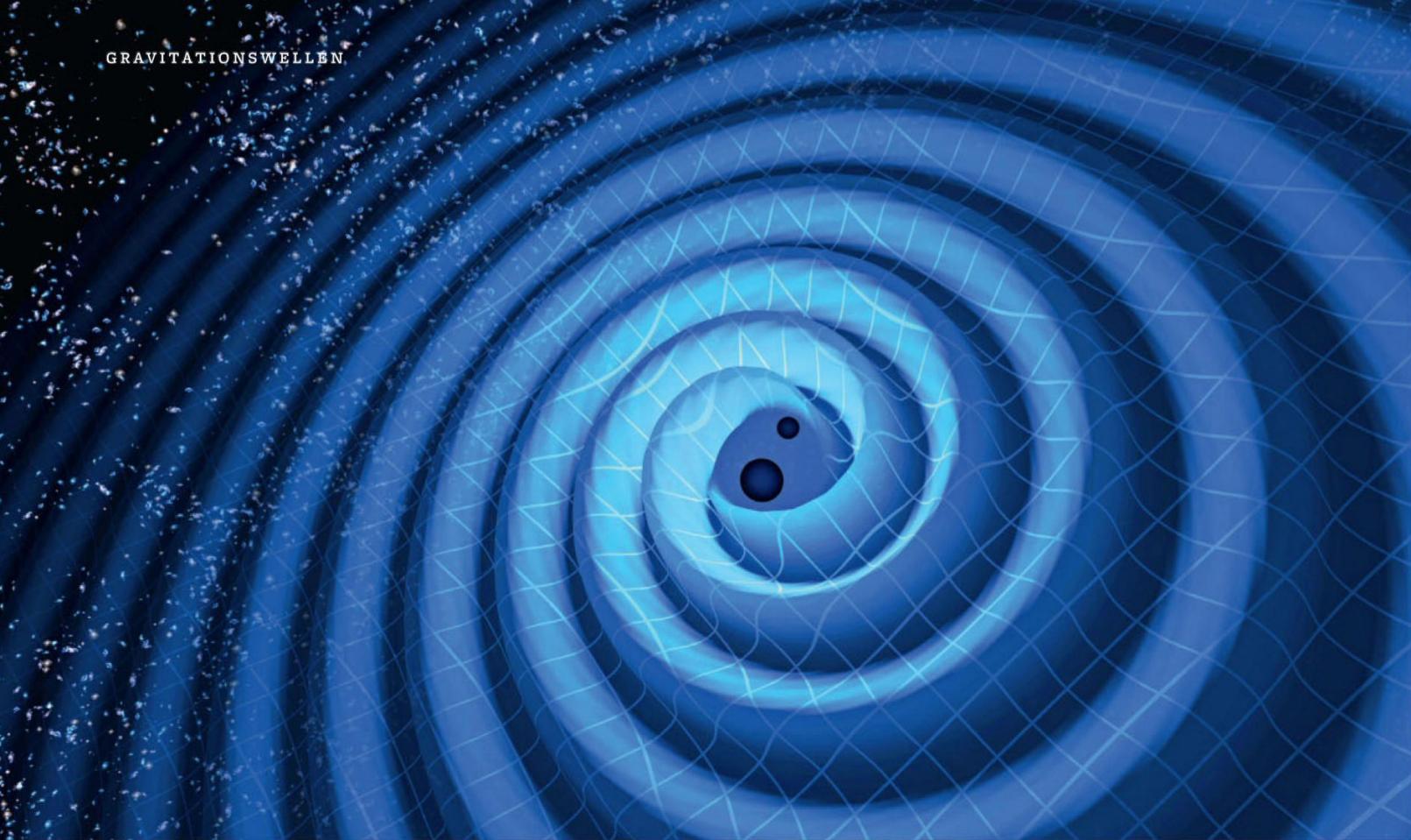


# HUNDERT- BEWEIS



113

Beschleunigen Objekte im Kosmos, verursachen sie sogenannte Gravitationswellen – Schwingungen der Raumzeit. Professor Dr. Karsten Danzmann hat maßgeblich dazu beigetragen, diese Voraussage der Allgemeinen Relativitätstheorie zu bestätigen: Am Max-Planck-Institut für Gravitationsforschung in Hannover haben er und seine Mitarbeiter die Entwicklung hochempfindlicher Gravitationswellen-Detektoren (hier ein Modell) mit vorangetrieben, die in zwei Forschungsanlagen in den USA erstmals solche Wellen aufgespürt haben



**Umkreisen sich zwei Schwarze Löcher (Mitte),** krümmt die Bewegung ihrer gewaltigen Massen die Raumzeit. Dabei entstehen Gravitationswellen (blau), die durchs All laufen – und nun erstmals detektiert werden konnten

# E

Es ist genau 10.53 Uhr, als am 14. September 2015 der Zacken einer Kurve auf einem Bildschirm von einem wissenschaftlichen Durchbruch kündet, wie ihn die Astronomie wohl nur alle 50 Jahre erlebt. Der Ausschlag markiert den vorläufigen Höhepunkt einer umfassbar komplizierten Suche, die Forscher bereits seit Generationen antreibt und die bislang mehr als eine Milliarde Dollar an Forschungsgeldern verschlungen hat. Einer Suche, welche die Art und Weise, wie Menschen ins All blicken, für immer verändert.

Der erste Zeuge dieser Entdeckung ist der Italiener Marco Drago, ein Wissenschaftler, der am Max-Planck-Institut für Gravitationsphysik in der Nähe von Hannover arbeitet. Sein Blick fällt an diesem Vormittag auf eine automatisch generierte E-Mail zweier monströser Messgeräte, die ein Forscherteam aus mehr als einem Dutzend Nationen an zwei Standorten in den USA installiert hat, in Louisiana und im Staat Washington.

Ungläubig betrachtet Drago die Kurve, die eine Software auf Grundlage aktueller Messdaten drei Minuten zuvor erstellt hat. Sie zeigt einen ganz bestimmten Ausschlag, auf den die Forscher zwar insgeheim bereits gewartet haben – aber nicht schon zu diesem Zeitpunkt, nicht in dieser Deutlichkeit. Denn eigentlich laufen die Detektoren noch im Testbetrieb.

Daher mag der Italiener den Daten zunächst kaum trauen. Dann, nach zehnminütigem Zögern, zieht er einen weiteren Forscher hinzu. Beide machen sich daran, sofort ihre Kollegen in den USA zu informieren, die um diese Zeit gerade

schlafen und erst wenige Stunden zuvor an den Detektoren gearbeitet haben.

Der charakteristische Zacken in der Kurve scheint zu belegen, dass die Messgeräte einen Vorgang registriert haben, der bislang reine Mathematik war und noch nie direkt beobachtet werden konnte: Für einen kurzen Moment muss sich das Gefüge aus Raum und Zeit, in dem wir leben und das gewissermaßen das gesamte Universum ausfüllt, genau dort, wo die Detektoren in den USA stehen, minimal gestaucht und wieder gedehnt haben.

Mit anderen Worten: Die Anlagen müssen eine sogenannte Gravitationswelle registriert haben, die über die Sensoren der Geräte gleichsam hinweggerollt ist.

Albert Einstein hat die Gravitationswellen vor mehr als 100 Jahren vorhergesagt – wenngleich er selbst zuweilen an seiner eigenen Theorie zweifelte.

Der Jahrhundertphysiker revolutionierte damals unsere Vorstellung vom Kosmos, als er unter anderem erkannte, dass das Raum-Zeit-Gefüge nicht statisch ist, sondern sich verändert.

So verursacht jedes Objekt aufgrund seiner Masse eine Delle in der Raumzeit – ganz so wie eine Eisenkugel (in einem sehr vereinfachten Modell) ein Gummitych einbeult, auf das man sie legt. Je schwerer solch ein Objekt (im Kosmos etwa ein Stern) ist, desto größer ist seine Gravitation und desto tiefer die Delle in der Raumzeit (siehe Illustration Seite 106).

Wann immer das Objekt nun seine Geschwindigkeit oder Richtung ändert, ändert sich auch die Delle. Dadurch gerät die Raumzeit regelrecht in Schwingung, eine Welle entsteht und pflanzt sich – so die Einstein'sche Theorie – mit Lichtgeschwindigkeit in alle Richtungen fort.

Stark vereinfacht kann man Gravitationswellen mit jenen Wellen verglichen, die ein Fisch im Wasser erzeugt, der plötzlich in eine andere Richtung schwimmt, an Tempo zulegt oder abbremst. Auch dann wird das Wasser entsprechend gedrückt und gedeckt, Wellen breiten sich kreisförmig vom Ort ihrer Entstehung aus und flauen mit zunehmendem Abstand ab.

Allerdings gibt es bei den Gravitationswellen kein Medium wie Wasser oder Luft, das die Welle „trägt“ – es ist vielmehr die Raumzeit selbst, die schwingt.

Den Modellen zufolge erzeugen also prinzipiell alle Objekte, die ihre

Geschwindigkeit oder ihre Richtung im All ändern, Gravitationswellen. Auch von der Erde gehen permanent solche Raumzeitwellen aus. Sie sind jedoch so schwach, dass es wahrscheinlich unmöglich ist, sie jemals zu registrieren.

Mehr noch: Lange Zeit gingen viele Physiker, darunter auch Einstein, davon aus, dass Menschen überhaupt nie in der Lage sein würden, eine Stauchung oder Dehnung der Raumzeit experimentell zu ergründen – zu filigran erschien ihnen das Phänomen.

So kam es, dass jene Forscher, die sich dennoch auf die Jagd nach den Gravitationswellen machten, von Beginn an die gewaltigsten kosmischen Objekte im Blick hatten, die wir kennen: Neutronensterne sowie Schwarze Löcher, die unvorstellbar viel Masse auf sich vereinen und bisweilen mit irrem Tempo umeinander rasen. Und die dementsprechend vergleichsweise mächtige Gravitationswellen erzeugen.

Albert Einstein sagte das Phänomen schon vor  
mehr als 100 Jahren voraus – aber zweifelte selbst  
zuweilen an der eigenen Theorie

**Das erste Signal einer Gravitationswelle** empfingen Forscher im September 2015.  
Die Visualisierung zeigt den Ausläufer einer Woge (rot), die vor 1,3 Milliarden  
Jahren durch eine Kollision Schwarzer Löcher ausgelöst wurde

Doch den Berechnungen zufolge erreichen selbst Wellen solchen Ursprungs die Erde nur in nahezu unvorstellbar schwacher Ausprägung – unter anderem auch deshalb, weil sie (wie jede Welle) mit zunehmender Entfernung zum Entstehungsort an Stärke verlieren. Daher mussten die Physiker Messgeräte von nie da gewesener Raffinesse und Präzision konstruieren – Maschinen wie die zwei Anlagen in Louisiana und Washington.

**D**ie beiden Detektoren mit dem Namen „LIGO“ (für *Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory*) bestehen im Prinzip aus zwei jeweils vier Kilometer langen Betonröhren, die ein Vakuum enthalten, im rechten Winkel zueinander liegen und einen gemeinsamen Schnittpunkt haben. An diesem Schnittpunkt befindet sich eine hochkomplexe Appara-

Einen kurzen Moment lang muss sich  
das Gefüge aus Raum und Zeit im Detektor  
**gestaucht und gedehnt haben**

tur, die einen außerhalb der Messkonstruktion erzeugten Laserstrahl in zwei Teile aufspaltet und in beide Röhren leitet. An den jeweiligen Enden der Tunnel reflektieren Spiegel die Laserstrahlen – so rasen sie mit Lichtgeschwindigkeit von einem Ende zum anderen, hin und her.

Unter normalen Umständen geschieht dies völlig simultan: Beide Teilstrahlen kehren stets zum exakt gleichen Zeitpunkt zum Messpunkt zurück. Läuft aber eine Gravitationswelle durch den Detektor, dehnt und staucht sie für winzige Bruchteile einer Sekunde die Raumzeit, sodass (je nach Winkel der eintreffenden Welle) die Wegstrecke in einer der

Röhren kurzzeitig länger, in der anderen Röhre kürzer wird.

Das bedeutet: Einer der Laser-Teilstrahlen, die in diesem Augenblick durch die Röhren rasen, benötigt (im Vergleich zum anderen) minimal mehr Zeit, um zum Scheitelpunkt zurückzukehren.

Und genau diese Differenz kann der Detektor registrieren. Allerdings beträgt der Unterschied gerade einmal einen tausendstel Teil vom Billionstel einer Billionstelsekunde.

LIGO arbeitet damit derart feinfühlig, dass das Gerät theoretisch imstande wäre, eine Veränderung der Raumzeit zu registrieren, die etwa den australischen Konti-

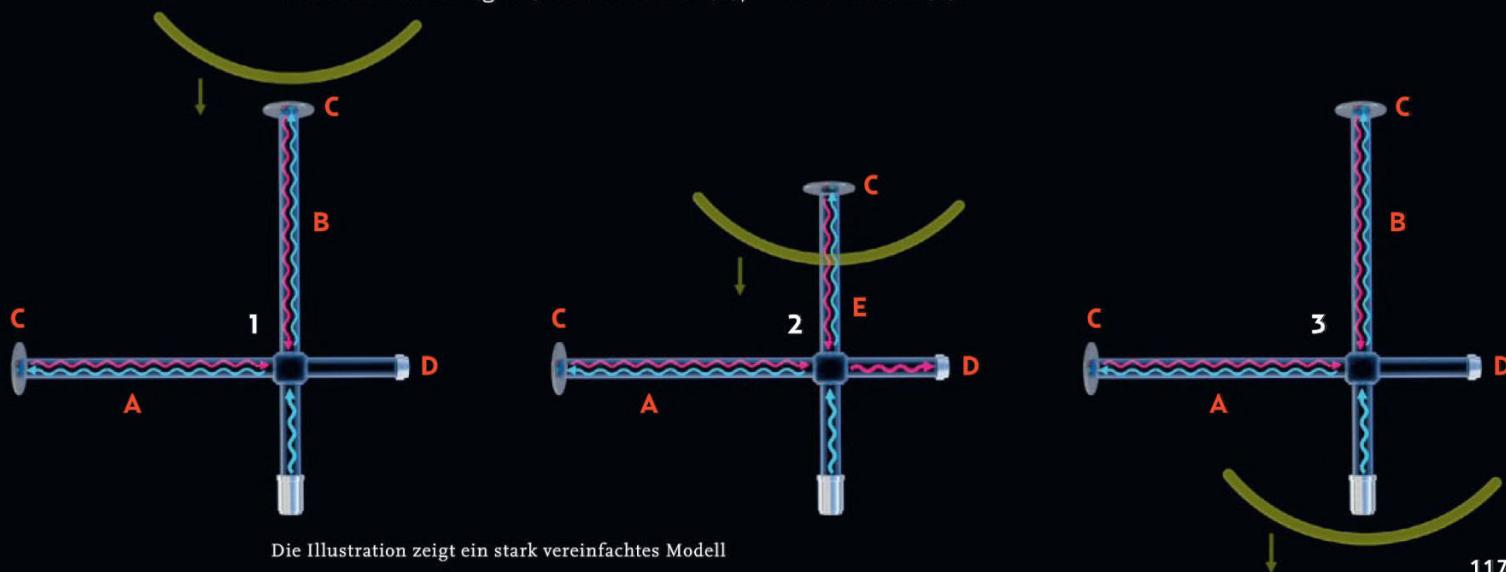
**Der LIGO-Detektor in Hanford (USA)** ist eine von zwei baugleichen Forschungsanlagen, die das Signal der Gravitationswelle aufzeichneten. Die beiden Röhren des Detektors sind jeweils vier Kilometer lang



## WIE FORSCHER GRAVITATIONSWELLEN MESSEN

Um Gravitationswellen aufzuspüren, leiten Forscher einen Laserstrahl (blau) in zwei Röhren (A, B), an deren Ende je ein Spiegel montiert ist (C). Die zurückgeworfenen Lichtwellen (rot) treffen am Kreuzungspunkt so aufeinander, dass sie sich gegenseitig neutralisieren – und kein Signal den Lichtsensor (D) erreicht (1). Durchquert eine Gravitationswelle (grün) den Detektor (2),

verändert sie die Länge der Röhre um weniger als den Durchmesser eines Atomkerns (E). Die Strahlen kehren daher nicht synchron zurück und neutralisieren sich nicht an der Kreuzung. Der Sensor empfängt ein Signal und misst so den Effekt der Gravitationswelle. Ist die Welle hindurchgezogen, kehrt der Detektor zum ursprünglichen Zustand zurück (3).



Die Illustration zeigt ein stark vereinfachtes Modell

117

nennt um den Durchmesser eines Atomkerns stauchen oder dehnen würde.

Die Spiegel, die die Laserstrahlen reflektieren, sind an frei schwingenden Glasfasern aufgehängt, die bereits zu zittern beginnen, wenn im Umland der Anlage ein Lastwagen über die Straße rollt oder sich 100 Kilometer entfernt eine Ozeanwelle an der Küste bricht.

Die Anfälligkeit für Störsignale ist der Grund dafür, dass Ingenieure gleich zwei dieser Anlagen errichtet haben, gut 3000 Kilometer voneinander entfernt. Nur wenn beide Detektoren ein identisches Signal empfangen, können sich die Wissenschaftler sicher sein, dass es nicht aus der näheren Umgebung stammt.

Zwar stehen beide Anlagen in den USA, doch haben deutsche Forscher von den Max-Planck-Instituten für Gravitationsphysik in Potsdam und in Hannover die Schlüsseltechnologien für LIGO entscheidend mitentwickelt. So erscheint es wie ein passender Zufall, dass sich ausgerechnet dort die Sensationsmeldung vom 14. September 2015 als Erstes verbreitet.

Allerdings erscheint das Signal, das die Geräte aufgezeichnet haben, den führenden Köpfen des Forscherteams fast zu perfekt, um sofort die Öffentlichkeit zu informieren – und sich womöglich mit einer Falschmeldung zu blamieren.

**N**un gehen daher viele der insgesamt rund 1000 Wissenschaftler aus 16 Nationen alle denkbaren Szenarien durch: Könnte es sich um einen fehlerhaften Alarm handeln? Einen Programmierfehler in der komplizierten Software? Hat jemand die Daten manipuliert, um die Wachsamkeit der Wissenschaftler zu testen? Monatlang prüfen die Experten jede denkbare Erklärung.

Erst am 11. Februar 2016 sind die Projektleiter von ihren Daten so überzeugt, dass sie die Entdeckung öffentlich verkünden und dem Signal, das ihre Messgeräte aufgezeichnet haben, einen Namen geben: GW150914.

Und sie glauben sogar zu wissen, was die Erschütterung der Raumzeit hervorgerufen haben muss: eine Kollision zweier gigantischer Schwarzer Löcher, die zu einer mächtvollen Gravitationswelle führte. Denn das Signal, das die Geräte aufgezeichnet haben, entspricht exakt der theoretischen Vorhersage, die Physiker mithilfe der Gleichungen Einsteins für ein solches Ereignis getroffen haben.

Die Berechnungen zeigen: Die Kollision war so gewaltig, dass der Energieausstoß für den Bruchteil einer Sekunde die Strahlungsleistung sämtlicher Sterne in allen Galaxien um ein Vielfaches übertraf.

Diese Energie haben die Massemonster jedoch nicht in Form von Licht, Wärme oder anderer Strahlung abgegeben, sondern in Form von Gravitationswellen.

Um als Laie den Triumph der Forscher angemessen bewerten zu können, muss man sich klarmachen: Mit dem Nachweis von Gravitationswellen haben die Physiker gewissermaßen den Schlussstein der Einstein'schen Raumzeit-Theorie geliefert. Sie haben die letzte, bis da-



**Wo sich die zwei Versuchsröhren** des LIGO-Detektors kreuzen (M.), vereint eine Optik die darin verlaufenden Laserstrahlen. Durchläuft eine Gravitationswelle die Anlage, ändert sich das dabei erzeugte Lichtsignal

hin noch nicht überprüfte Vorhersage dieser fundamentalen Theorie bewiesen – und damit deren Gültigkeit belegt.

Mehr noch: Die Entdeckung hat den Wissenschaftlern zudem neue Einblicke ermöglicht, etwa in die Natur Schwarzer Löcher. Denn bislang konnte man nicht untersuchen, ob die gegenwärtigen kosmologischen Modelle bei derart extremen Bedingungen überhaupt gültig sind.

Nie zuvor ist eine heftigere Explosion registriert worden. Nun haben die Physiker sowohl für die Existenz solcher Phänomene als auch für die Korrektheit der Gleichungen eine Bestätigung erhalten.

**O**bendrein verfügen die Wissenschaftler mit LIGO nun über einen Detektor, der ein völlig neues Fenster in den Kosmos aufstößt. Und der es prinzipiell möglich macht, die Entwicklung des Universums bis zu dessen Ursprung zurückzufolgen.

Denn bislang gründen kosmische Beobachtungen auf der Analyse elektromagnetischer Strahlung – also Wellen, zu denen auch das sichtbare Licht gehört. Die liefern allerdings oft nur verschwommene Bilder. Das liegt unter anderem daran, dass die Wellen auf ihrem Weg zur Erde nicht selten abgefangen und gestreut werden, etwa von riesigen Gaswolken oder durch Staub.

Zudem führen auf elektromagnetischer Strahlung basierende Beobachtungen zu blinden Flecken bei der Erforschung des Alls. So besitzen etwa Schwarze Löcher derart viel Masse, dass sie sämtliche Information und Materie in ihrem Umfeld schlucken, auch Lichtstrahlen. Daher war es bislang unmöglich, sie direkt zu beobachten. Kein Teleskop der Welt hätte die Kollision einfangen können, die zum Signal GW150914 führte – obwohl der Zusammenstoß mächtiger war als jedes kosmische Ereignis, das man bisher kennt. Mithilfe der Beobachtung von Gravitationswellen ist dieser Zugang zum All nun gefunden.



**Eine komplexe Aufhängung** schirmt die empfindliche Optik des LIGO-Detektors (M.) von Erschütterungen ab

Seit dem 14. September 2015 haben die Wellenforscher eine Reihe weiterer Signale detektiert, die auf extraterrestrisch ausgelöste Raumzeitvibrationen hindeuten, allerdings keines, das an GW150914 heranreicht.

Dennoch sind die Wissenschaftler zuversichtlich, mithilfe der Technik Gravitationswellen von vielen weiteren Objekten im All auffangen zu können.

**A**uch hoffen die Forscher, in den kommenden Jahren solche Wellen zu detektieren, die bereits unmittelbar nach dem Urknall entstanden. Damals hat sich die Raumzeit, so jedenfalls lautet die gängige Theorie, für einen kurzen Moment unvorstellbar schnell ausgedehnt (siehe auch Seite 35). Viele Wissenschaftler glauben, dass diese „Inflationsphase“ bis heute in Form eines Echos aus Gravitationswellen durch den Kosmos hallt. Anders als bei GW150914 würde es sich dabei aber eher nicht um eine einzelne Welle handeln, sondern um ein regelloses Muster, das die Raumzeit des Universums darstellt, vergleichbar mit dem Muster im Schlick des Wattenmeers.

Selbst LIGOs erstaunliche Messfähigkeiten werden allerdings nicht ausreichen, um solch frühzeitliche Schwingungen zu erfassen, denn dazu müssten die Detektoren noch viel feinere Signale aufspüren können.

Doch Astronomen arbeiten bereits an einer neuen Generation von Geräten. So plant etwa die Europäische Weltraumbehörde ESA, innerhalb der nächsten 20 Jahre einen Gravitationswellendetektor namens LISA (Laser Interferometer Space Antenna) ins All zu schicken.

Wie LIGO wird LISA die Laufzeit von Laserstrahlen messen, um Stauchungen und Dehnungen der Raumzeit aufzuspüren. Doch während LIGOs Messtunnel gerade mal vier Kilometer lang sind, wird LISA mit separat fliegenden Satelliten arbeiten, sodass sich die Wegstrecken der Laserstrahlen über Hunderttausende von Kilometern erstrecken können.

Auf diese Weise soll der Detektor noch weitaus mächtigere Ereignisse aufspüren – wie etwa superschwere Schwarze Löcher, die besonders große Wellenlängen generieren. Erste Versuche mit Testsatelliten waren bereits erfolgreich.



**Der Physiker Dr. Marco Drago** sah als erster Forscher das Signal einer Gravitationswelle: Die Daten des Detektors erreichten ihn am Max-Planck-Institut für Gravitationsphysik in Hannover

119

#### Auf einen Blick

##### Gravitationswellen

Schwarze Löcher verursachen gleichsam mächtige Beulen in der Raumzeit: Gravitationswellen.

##### Neue Erkenntnisse

Gravitationswellen verbreiten sich ungehindert im All und erlauben so einen Blick auf ansonsten nicht zu beobachtende Phänomene.

##### Zukunft

Der LIGO-Detektor könnte auch helfen, die Inflation der Raumzeit besser zu verstehen.

##### Jahrhundert-Beweis

2015 wiesen Forscher erstmals Gravitationswellen nach: der finale Beleg für Einsteins Theorie.

Abzuwarten bleibt, was die Forscher mithilfe solcher Instrumente alles entdecken werden. Ob sie etwa endlich verstehen, was genau kurz nach der Geburt des Universums vor sich ging. Denn auch für die von der Urknalltheorie beschriebene Inflation der Raumzeit fehlt bis heute der experimentelle Beleg.

In nicht allzu ferner Zukunft könnten Physiker dank der Gravitationswellen also bereits zu einer nächsten Jahrhundertentdeckung gelangen. Schon jetzt steht für viele fest, dass LIGOs bahnbrechender Fund sich einen Nobelpreis verdienen wird. Allerdings können dabei nicht alle fast 1000 Wissenschaftler der Forschergruppe auch gewürdigt werden.

Und so wird ausgerechnet Marco Drago, der als erster Mensch überhaupt Zeuge einer Gravitationswelle wurde, am Ende möglicherweise leer ausgehen. •

**UTE EBERLE**, Jg. 1971, ist Wissenschaftsjournalistin in Baltimore, USA.

**SEBASTIAN WITTE**, Jg. 1983, gehört zum Redaktionsteam von GEOkompakt.

# Der Traum von einer zweiten Erde

Auf der Suche nach neuen Welten  
haben Wissenschaftler bislang rund  
3500 Planeten entdeckt. Neue  
Methoden und Messgeräte ermöglichen  
spektakuläre Funde. Immer  
näher kommen Astronomen so  
ihrem großen Ziel: auf  
fremden Planeten  
Leben nachweisen  
zu können

TEXT: KATHARINA VON RUSCHKOWSKI





Diese Illustration zeigt einige Hundert der bislang entdeckten Exoplaneten. Sie sind – dem derzeitigen Forschungsstand entsprechend – so angeordnet, dass ihre Temperatur von oben nach unten und ihre Dichte von rechts nach links zunimmt. Der Planet ganz oben links (Kepler 296f) hat einen Durchmesser, der 1,8-mal so groß ist wie der unserer Erde



Die Menschen haben schon früh den Himmel studiert, später über die Jahrhunderte hinweg die besten Denker ihrer Zeit mit der Frage betraut und schließlich mehr als 50 Jahre lang Radiosignale ins Universum gesandt – alles in der Hoffnung, eine Antwort auf eine der faszinierendsten Fragen zu erlangen: Sind wir allein im Universum? Oder hat sich anderswo im All ebenfalls Leben entwickelt?

Am Ende, alles deutet derzeit darauf hin, wird es vermutlich nüchterne Statistik sein, die dieses große Rätsel löst – endlose Zahlencodes, die die Bildschirme der Wissenschaftler fluten, oder erfasste Lichtkurven weit entfernter Sterne, die für den Laien wie verwirrende Pünktchenwolken aussehen. Himmelsforscher jedoch vermögen darin zu lesen; und sie werden in diesen Daten vielleicht Spuren außerirdischen Lebens entdecken.

22. Februar 2017, Washington D. C., NASA-Zentrale. Im Pressezentrum ist jeder Platz besetzt. Und Tausende verfolgen per Live-Übertragung die Konferenz, die

an jenem Mittwoch um 13 Uhr Ortszeit beginnt, oder sie sind zugeschaltet. Ganz vorn sitzen die Wissenschaftler, drei Männer, zwei Frauen, und die Erkenntnisse, die sie zu verkünden haben, sprudeln förmlich aus ihnen heraus.

Ihre Entdeckung sei ein Meilenstein auf der Suche nach erdähnlichen Planeten, auf denen womöglich auch außerirdisches Leben existieren könnten, so NASA-Chef Thomas Zurbuchen.

Sie ist zugleich der triumphale Höhepunkt eines Großforschungsprojekts voller Überraschungen. Und einer regelrechten Datenschlacht.

Fast vier Jahre lang haben knapp drei Dutzend Astronomen aus aller Welt die Umgebung des Zwergsterns Trappist-1 in den Blick genommen, um dort unter anderem nach Voraussetzungen für außerirdisches Leben zu forschen.

Ihre Erkenntnis: Trappist-1, rund 39 Lichtjahre von der Erde entfernt, ist ein sogenannter Roter Zwerg, er besitzt nur etwa acht Prozent der Sonnenmasse, ist vergleichsweise kühl und lichtschwach – unsere Sonne hat eine 200-mal stärkere Leuchtkraft.

Kollegen haben die Trappist-1-Forscher in dieser Zeit immer wieder heftig kritisiert. Amaury Triaud, einer der führenden Köpfe des Forscherteams, erinnert sich noch daran, wie mancher sie anfangs gar aufforderte, die Forschung einzustellen. Denn Rote Zwerge, diese „schwachen Funzeln“, seien denkbar ungünstige Orte im All, um dort nach Lebensformen zu fahnden.

Doch die Wissenschaftler beharrten auf ihrem Plan. Sie vermaßen Trappist-1 und analysierten sein Licht – so präzise das eben geht über eine Distanz von rund 370 Billionen Kilometern.

Was sie dabei entdeckten, verblüffte sie so, dass sie ihre Messungen mehrere Male mit unterschiedlichen Teleskopen wiederholten, auf Fehler hin überprüften, sie Kollegen zur Kontrolle vorlegten.

Doch jede weitere Untersuchung beförderte weder Fehlschlüsse noch Irrtümer zutage, sondern immer neue Entdeckungen. Bis Ende 2016 hatten die Himmelsforscher Trappist-1 und seine Umgebung fast 1500 Stunden beobachtet und rund 15 000 Bilder ausgewertet. Erst da waren sie sich sicher, dass die Informationen eine Sensation bargen.

Die Erkenntnis der Wissenschaftler: Um Trappist-1 im Zentrum ziehen gleich



Mittlerweile  
entdecken  
Astronomen

fast täglich  
neue Planeten

sieben Exoplaneten (so werden Planeten außerhalb unseres Sonnensystems genannt) ihre Bahn. Zwar haben Astronomen in den vergangenen Jahren Tausende Exoplaneten erspäht, doch höchst selten so viele um einen einzigen Stern herum. Es ist ein Welten-Wunder.

Hinzu kommt: Durch die außergewöhnlich günstige Konstellation der Trabanten zu ihrem Stern konnten die Forscher sie größtenteils präzise vermessen.

**Demnach sind alle sieben** Planeten ungefähr so groß und wohl auch so masse-



**Kürzlich haben Forscher um den Stern Trappist-1** gleich sieben erdähnliche Planeten entdeckt. Bei einem von ihnen, Trappist-1e (o.), ragen vermutlich Felsen aus einem Ozean flüssigen Wassers. Am Himmel sind drei weitere Planeten vor dem Zentralgestirn zu erkennen

reich wie die Erde, die ermittelte Dichte lässt vermuten, dass es sich vornehmlich um steinerne Himmelskörper handelt, die möglichen Organismen eine feste Oberfläche und damit Halt böten.

Zudem gelang es den Wissenschaftlern, die Atmosphären von zweien dieser Gesteinstraßen grob zu untersuchen. Die ersten Ergebnisse seien „nicht eindeutig, aber aufschlussreich“, heißt es.

Immerhin konnten die Forscher definitiv ausschließen, dass diese beiden Exoplaneten eine windumtoste Wasserstoff-Atmosphäre besitzen, die typisch ist

für Gasgiganten wie Neptun – und die Entstehung von Leben unmöglich macht.

Diese erste Erkenntnis lässt nun tatsächlich die Spekulation zu, dass auf einem der Exoplaneten im Trappist-1-System Leben möglich ist.

Zumal die Forscher eines mit großer Wahrscheinlichkeit sagen können: Mindestens drei der untersuchten Trabanten kreisen in Entfernnungen zu ihrem Stern, in denen gemäßigte Temperaturen herrschen und möglicherweise vorhandenes Wasser fließt – eine wichtige Bedingung für Leben, wie wir es kennen.

Nur wenige aller bislang gefundenen rund 3500 Exoplaneten erfüllen dieses Kriterium.

Dank immer besserer Messmethoden beginnen sich die Funde nun zu häufen. So gaben Forscher im April 2017 die Entdeckung eines weiteren Planeten bekannt, der Leben beherbergen könnte: Der Planet LHS 1140b, rund 39 Lichtjahre von uns entfernt, hat eine fast siebenmal so schwere Masse wie die Erde und kreist (in einer vermutlich lebensfreundlichen Temperaturzone) ebenfalls um einen Roten Zwerg.

Bald schon könnten noch weitaus mehr solcher Trabanten entdeckt werden. Denn kleine, kühle Zwergerne wie Trappist-1 sind weit verbreitet im Universum. Allein unsere Galaxie birgt wohl etwa 160 Milliarden Rote Zwerge.

Bislang galten sie als lebensfeindlich. Nun aber zeigt die Erforschung von Trappist-1, dass möglicherweise gerade diese Minisonnen die Entstehung von Zwillingserden und außerirdischem Leben begünstigen – weil sie ihre Energie dosiert abgeben, daher vergleichsweise lange existieren und dem Leben viel Zeit für seine Entwicklung lassen. Trappist-1 könnte darum die Suche nach einer zweiten Erde geradezu revolutionieren.

NASA-Wissenschaftsdirektor Thomas Zurbuchen ging an jenem Februaritag in Washington sogar noch weiter, als er sagte: „Unsere Entdeckung legt nahe, dass wir irgendwo da draußen auf eine zweite Erde stoßen werden. Die Frage ist nur noch: wann?“



124

Kaum 20 Jahre ist es her, dass die Forscher kurz davor waren, die Suche nach fernen Planeten und Leben außerhalb unserer Galaxie ganz einzustellen. Noch im September 1995 schrieb der Astrophysiker David Black: „Bis heute sind keine anderen Planetensysteme gefunden, und das Fehlen einer solchen Entdeckung beginnt, statistisch signifikant zu werden.“

Anders ausgedrückt: Gäbe es Planeten außerhalb unseres Sonnensystems, wären sie längst entdeckt.

Zwar waren die meisten Astronomen davon überzeugt, dass die Erde keine Ausnahmeerscheinung im Universum ist, sondern der Regelfall. Millionen fremder Planeten zögen sicher auch anderswo im All ihre Bahnen. Nur: Man sah sie einfach nicht. Selbst mit den besten Teleskopen der Zeit und den raffiniertesten Raumsonden ließen sich die vermuteten Himmelskörper nicht entdecken.

Doch nur wenige Wochen nach der Aussage von Black, am 5. Oktober 1995, berichteten die Schweizer Michel Mayor und Didier Queloz von der Universität Genf von einer aufsehenerregenden Himmelsbeobachtung. Die Astronomen hatten bei dem rund 50 Lichtjahre entfernten Stern 51 Pegasi Hinweise auf einen jupitergroßen Planeten entdeckt.

Die Erstbeobachtung dieses Exoplaneten begründete rasch eines der dynamischsten und populärsten Felder in der Astrophysik: Mittlerweile stoßen Wissenschaftler fast täglich auf neue Welten. In wohl kaum ein anderes Forschungsgebiet werden in den kommenden Jahren so viele Gelder fließen.

Der Finanzbedarf ist immens, denn es erfordert einen immer größeren Aufwand am Rande des technisch Möglichen, den fernen Sternensystemen ihre Geheimnisse zu entlocken.

Exoplaneten ziehen in weiter Distanz zur Erde ihre Bahnen. Die Planeten um Trappist-1 etwa sind mit den Mitteln der heutigen Technik unerreichbar. Ein Düsenflugzeug bräuchte für den Trip in das Trappist-1-System 44 Millionen Jahre.

Hinzu kommt: Die Sternenbegleiter leuchten kaum. Sie von der Erde aus zu beobachten gleicht dem Versuch, eine Fliege vor einem aufgeblendetem Flutlichtmast erkennen zu wollen. Bisher gelang es daher erst 83 Mal, einen Exoplaneten durch direkte Aufnahmen zu entdecken. Darum spüren Astronomen die fernen Planeten meistens indirekt auf.

Eine Möglichkeit ist die Radialgeschwindigkeitsmethode. Sie beruht auf folgendem Prinzip: Ein Stern zieht mit seiner starken Gravitation einen Planeten an, der ihn deshalb umrundet; doch auch

die Anziehungschaft des ungleich kleineren Planeten zerrt an dem umkreisten Stern, lässt ihn leicht torkeln – und dadurch Licht in für den Beobachter unterschiedlicher Wellenlänge abstrahlen.

Der Grund: Entfernt sich der Stern auch nur minimal von uns, erscheint sein Licht längerwellig, also rötlicher; bewegt er sich auf uns zu, wird das Sternenlicht in den kurzweligen bläulichen Bereich verschoben. Diese Wellenlängenverschiebung lässt nicht nur auf die Existenz eines Trabanten schließen, aus ihrer Stärke lassen sich zudem Rückschlüsse auf die Masse des Planeten ziehen.

**Mehr als 700 Exoplaneten** wurden bereits mithilfe der Radialgeschwindigkeitsmethode entdeckt. Ihr größter Vorteil: Sie ist relativ kostengünstig, da dafür häufig erdglobale Teleskope genügen. Sie birgt aber auch Nachteile. Denn mit ihrer Hilfe lassen sich am ehesten große, schwere Sternenbegleiter nachweisen, die ihre Sonnen in engen Umlaufbahnen umkreisen und so recht starke Sternenbewegungen verursachen.

Kleinere, masseärmere Planeten sind dagegen häufig besser mit der Transitmethode aufzuspüren. Dabei messen Astronomen mit hochsensiblen Teleskopen die Helligkeitsschwankung, die immer dann auftritt, wenn ein Planet vor seiner Sonne vorüberzieht und dabei einen minimalen Teil des Lichts abschirmt.

Aus den Messungen lassen sich zusammen mit anderen Daten Größe und Masse des Planeten berechnen und damit auch dessen mittlere Dichte. Daraus wiederum können die Forscher in der Regel auf die Beschaffenheit des Trabanten schließen – etwa ob es sich um einen Gas- oder Gesteinsplaneten handelt.

Seit März 2009 erleichtert das Weltraumteleskop Kepler die Suche nach Exoplaneten. Ungestört von der Erdatmosphäre hat Kepler einen weit besseren Blick auf die Himmelskörper als erdglobale Teleskope.

In einer Himmelsregion zwischen den Sternbildern Schwan und Leier sucht es systematisch mehr als 150 000 Sonnen nach deren verschatteten Begleitern ab; Helligkeitsmessungen werden kontinuierlich aufgenommen und ungefähr einmal im Monat zur Erde gesendet.

Zwar musste das Weltraumauge zwischenzeitlich wegen technischer Defekte abgeschaltet und repariert werden. Doch

Manche neue  
Welten zeigen  
Eigenschaften,

die zuvor als  
undenkbar galten

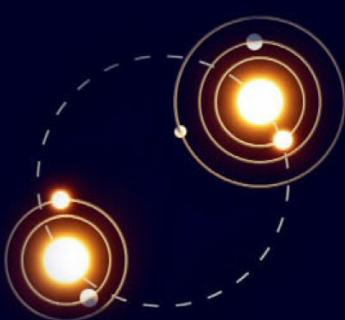
# EXOPLANETEN-SYSTEME

## IM BANN DER FREMDEN SONNEN

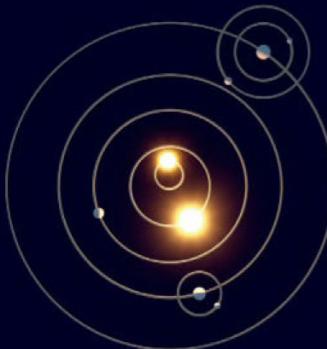
**V**iele Planetensysteme ähneln in ihrer Struktur\* dem unsrigen: Auf fast kreisförmigen Bahnen umkreisen Gasplaneten (4), Gesteinsplaneten (7) oder, wie in unserem Sonnen-

system, eine Kombination aus beidem (6) das Zentralgestirn. Dieser Stern kann wiederum unterschiedlicher Art sein, etwa ein gigantischer Roter Riese (5) oder ein winziger Weißer Zwerg (9). Häufig

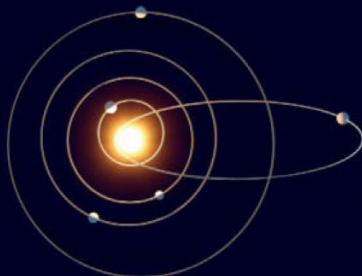
gibt es auch Gruppen von zwei (2) oder gar vier Sternen (1), um die mehrere Planeten kreisen. Mitunter umrunden die ihre Sonne auch auf stark elliptischen (3) oder zueinander gekippten (8) Orbits.



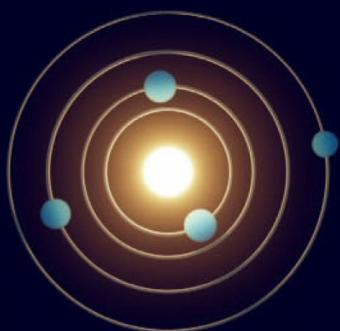
1. Vierfach-System



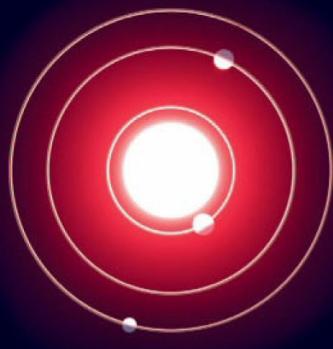
2. Doppel-System



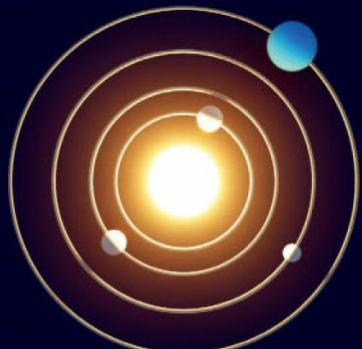
3. Elliptische Bahnen



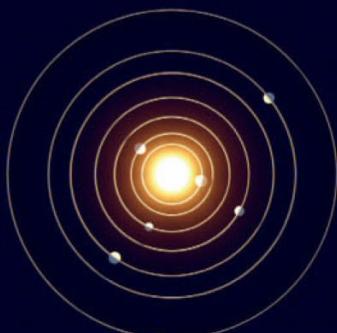
4. Gasplaneten



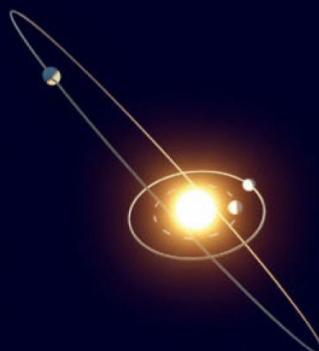
5. Roter Riese



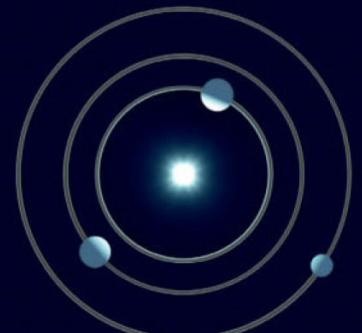
6. Gas- und Gesteinsplaneten



7. Gesteinsplaneten (Trappist)



8. Verdrehte Orbits



9. Weißer Zwerg

die Suche liefert Astronomen bis heute Hinweise auf mögliche Exoplaneten. Etwa 2500 der rund 3500 Planeten-Entdeckungen sind Kepler zu verdanken.

Die Prüfungen, ob die Daten wirklich auf einen Trabanten hinweisen, sind extrem aufwendig. Denn einen Planetentransit können viele kosmische Phänomene vortäuschen – etwa zufällig vorbeiziehende andere Sterne, ein Sternbeben (dabei kommt es durch Plasmabewegungen im Inneren des Sterns zu Schallwellen, die Helligkeitsänderungen verursachen können) oder dunkle Areale auf der Oberfläche der gerade beobachteten Sonne. All diese Störquellen gilt es durch komplexe Verfahren herauszufiltern.

Daher gibt es in der Forschung fast nie den *ein* Moment der Entdeckung. Zwischen der ersten Aufnahme eines Planetentransits und der eindeutigen Identifikation eines Exoplaneten vergehen in der Regel Monate, oft Jahre. Trappist-1 und seine Begleiter beschäftigen die Forscher nun schon seit fast zwei Jahren.

Im September 2015 hatte das Trappist-1-Team rund um den Stern erstmals Signale gemessen. Die Forscher intensivierten die Beobachtung und schlossen aus den gewonnenen Daten, dass es sich um mindestens zwei, wahrscheinlich gar drei Exoplaneten handelte. Zudem, so zeigte sich später, bewegen sich die Planeten auf sehr kleinen Bahnen um ihre Sonne: Für ihre Umläufe benötigen sie nur anderthalb bis knapp 19 Tage.

126



Schon diese Entdeckung sorgte bei der Veröffentlichung der Funde im Mai 2016 für ein großes Echo in der Forschergemeinde. Doch die Astronomen werteten dies allenfalls als Zwischenergebnis – und verfolgten Trappist-1 weiter.

Den Durchbruch brachte schließlich eine 20-tägige Beobachtungsphase mit dem Weltraumteleskop Spitzer der NASA, das Aufnahmen im Infrarotbereich erstellt. Kühle Sterne wie Trappist-1 leuchten in infrarotem Licht gut 1000-mal heller als im sichtbaren Licht. Die neuen Bilder zeigten, dass noch vier weitere Planeten den Stern umkreisen.



**Trappist-1h** ist der äußerste Planet im Trappist-System. Und der kälteste. Sollte es hier Wasser geben, wäre es zu ewigem Eis erstarrt

Die sieben Trabanten – derzeit tragen sie (von innen nach außen) die Bezeichnungen Trappist-1b bis -1h – gehören zu einer großen Zahl von Exoplaneten, die in den vergangenen Jahren aufgespürt worden sind. Und es ist vor allem die ungeheure Vielfalt der entdeckten Welten, die die Forscher immer wieder überrascht und die es inzwischen nötig gemacht hat, ganz neue Unterkategorien von Planetenklassen zu definieren.

So unterscheiden sie nicht mehr nur Gesteins- von Gasplaneten, wie wir sie aus unserem Sonnensystem kennen, sondern haben inzwischen auch „Heiße Jupiter“ gefunden (Gasriesen, deren Masse der des Jupiter entspricht und die sehr nahe ihren Stern umkreisen) sowie „Super-Erden“ (die eine bis zu zehnfache Erdmasse und maximal zwei Erdradien aufweisen) und „Mini-Neptune“: Gaszwerge mit Massen kleiner als die von Neptun.

**Und dann gibt es da noch** jene Exoplaneten, die alles bislang Vorstellbare übertreffen. „Die Wissenschaft ist längst dabei, die Science-Fiction zu überholen“, sagt Lisa Kaltenegger, eine Pionierin der Exoplanetenforschung (siehe Seite 20). So haben Forscher im Sternbild Krebs die

Supererde Cancri e entdeckt, deren enorme Masse vermuten lässt, sie könnte zu einem großen Teil aus Kohlenstoff bestehen, der unter seiner Oberfläche hier und da zu Diamanten gepresst ist. Das amerikanische Wirtschaftsmagazin „Forbes“ unternahm gar den Versuch, den Wert des Exoplaneten zu bemessen. Es kalkulierte ihn auf rund 27 Quintillionen Dollar (eine Zahl mit 30 Nullen).

Im Sternbild Fuchs stießen die Himmelsforscher auf einen azurblauen Planeten namens HD 189733b, der sich bei genauerer Betrachtung als wahre Höllenwelt erwies. Denn für die blaue Färbung sorgen nicht etwa Wassertropfen, sondern wohl Wolken aus Silikatpartikeln, die vor allem blaues Licht streuen und kleine Tropfen geschmolzenen Glases herabregnen lassen.

Im Sternbild Drache tauchte ein Himmelskörper auf, der auf bislang unerklärliche Weise fast alles Licht seiner Sonne verschluckt: Exoplanet TrES-2b reflektiert kaum ein Prozent dieser Strahlen und ist damit schwärzer als Kohle.

Und der Trabant TrES-4, fast 1400 Lichtjahre entfernt im Sternbild Herkules, ist einer der größten je entdeckten Exoplaneten. Er ist fast dreimal so mächtig



wie Jupiter, besitzt aber nur 92 Prozent von dessen Masse – und stellt die Forscher damit vor ein Problem. Denn bislang erschien ihnen ein solches Größe-Masse-Verhältnis als unmöglich.

Vermutlich ist der Planet durch ungemein heiße Gase derart extrem aufgebläht, dass seine mittlere Dichte nun geringer ist als die von Kork.

## Dass Leben auf Exoplaneten entstehen könnte,

streitet heute kein Forscher mehr ab

Undenkbar erschien Wissenschaftlern auch, was sie im Sternbild Zentaur erspähten: einen Planeten mit drei Sonnen. Lange hielt man es für ausgeschlossen, dass ein solcher Trabant eine stabile Umlaufbahn haben könnte. Er würde, so die Annahme, durch die Gravitationskräfte der drei Sonnen schnell in Unwucht gebracht und ins All hinausgeschleudert.

HD 131399Ab aber umrundet den massereichsten Körper des Sternentrios. Die beiden anderen, kleineren sind so weit entfernt, dass sie ihn nicht beeinflussen. Und sind dennoch deutlich zu erkennen. Auf HD 131399Ab gehen die Sonnen je nach Jahreszeit daher täglich bis zu dreimal auf und unter.



Viele Sternenbegleiter umrunden ihre Sonnen zudem auf bislang ungekannten und auch für unmöglich gehaltenen Bahnen. So umkreist der Gasplanet HAT-P-7b im Sternbild Schwan seinen Stern gegen dessen Rotationsrichtung – eine Bewegung, die in unserem Sonnensystem unbekannt ist, denn hier umlaufen alle Planeten die Sonne in ihrer Rotationsrichtung. Wahrscheinlich sind die Gravitationskräfte benachbarter Sterne für die andere Drehrichtung verantwortlich.

Die wohl exzentratischste aller Umlaufbahnen hat HD 20782 b, ein Gasriesen von etwa doppelter Jupitermasse, der sich rund 116 Lichtjahre von der Erde entfernt bewegt. Er schwingt auf einer elliptischen, lang gezogenen Bahn um seinen Stern und erlebt dabei Temperaturextreme: Auf seinem rund 597 Tage währenden Umlauf kommt er seinem Stern so nahe, dass er mit Hitze geflutet wird, die seine potenziell gefrorene Atmosphäre etwas antauft lässt. Verschwindet er auf dem Weiterflug in den eisigen Außenwelten des Alls, kühlte er wieder vollkommen ab.

So fantastisch und faszinierend all diese fernen Welten auch sein mögen: Die Astronomen widmen ihre Aufmerksamkeit derzeit vor allem den ihnen vertrauten Himmelskörpern – Trabanten wie den Begleitern von Trappist-1, deren Größe, Beschaffenheit und Umlaufbahn eher jenen der Erde ähneln. Und die da-

mit dem Leben, wie wir es kennen, gute Voraussetzungen zur Entwicklung bieten könnten.

Allerdings ist der oft gebrauchte Begriff „erdähnlich“ mitunter etwas trügerisch. Denn er beschreibt nicht viel mehr als Planeten, die hauptsächlich aus Stein und Metall bestehen: Er sagt aber nur wenig über die tatsächliche Bewohnbarkeit eines Planeten aus. So gelten in unserem Sonnensystem auch der öde Wüstenplanet Mars und die unwirtliche Treibhaushölle Venus als erdähnlich.

Die Trappist-1-Trabanten aber – und das unterscheidet sie dann doch von der Vielzahl anderer Planeten – bietet dem Leben weitaus mehr als eine steinerne, feste Grundlage. Mindestens die drei mittleren Planeten erfüllen weitere, unverzichtbare Bedingungen, damit das Leben dort Fuß fassen kann.

So konnten die Forscher beispielsweise herausfinden, dass das mittlere Planetentrio Trappist-1e bis -f in jenem eng begrenzten Korridor um seine Sonne kreist, in dem Wasser in flüssiger Form existieren könnte. Denn kommt es der Sonne zu nahe, verdampft es, ist der Abstand zu groß, erstarrt es zu Eis.

Flüssiges Wasser wiederum zählt zu den Hauptvoraussetzungen für die Entwicklung uns vertrauten Lebens: Es ist ein unverzichtbares Lösungs- und Transportmittel.

Eine Substanz wie etwa Kohlenstoff, auf der unser Leben aufbaut und die auch bei der Entstehung vieler Planeten reichlich vorhanden ist, muss gelöst werden, umherschwimmen und mit anderen Bausteinen zusammentreffen, damit der Zufall erste simple Organismen überhaupt erschaffen kann.

Zudem benötigen alle uns bekannten Wesen – so extrem ihre Lebensräume auch sein mögen – Wasser zum Überleben: Sie nehmen es in ihre Zellen auf und transportieren Nährstoffe darin, ihr gesamter Stoffwechsel ist darauf aufgebaut.

Ob es wirklich Wasser auf einem der Trappist-Planeten gibt, ist bislang noch pure Spekulation. Berechnungen des Forscherteams kommen zu dem Schluss, dass die Trabanten Trappist-1e bis -f mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit Ozeane tragen. Allerdings setzen die Wissenschaftler dabei voraus, dass alle Sternenbegleiter eine erdähnliche Atmosphäre besitzen – eine weitere Grundbedingung für die Entstehung des Lebens.

## TRAPPIST-1

## EINE SONNE MIT SIEBEN PLANETEN

**D**ie Illustration zeigt, wie das Trappist-1-System aussehen könnte: Da die Planeten dem Stern offenbar immer dieselbe Seite zuwenden, besitzen alle eine stets wärmere Tag- und eine stets kältere Nachthälfte. Planet 1b und 1c sind zu heiß, um Leben

zu beherbergen. Planet 1d aber könnte an der Tag-Nacht-Grenze flüssiges Wasser aufweisen. Riesige Ozeane mit Eiskappen auf der Nachthälfte prägen 1e und 1f; sie liegen wie der Felskoloss 1g in der bewohnbaren Zone. Planet 1h ist womöglich völlig von Eis bedeckt.



1b

1c

1d

1e

1f

1g

1h

Denn eine solche Hülle aus Gas schützt (zumindest wenn sie bestimmte Moleküle enthält) mögliche Organismen vor der tödlichen UV-Strahlung, mit der fast jeder Stern seine Umgebung flutet.

Zudem mäßigt sie das Klima und bewahrt den Planeten des Nachts vor Auskühlung. Dass die Trappist-1-Planeten von einer solchen Atmosphäre umhüllt sind, ist nicht ausgeschlossen – aber auch längst noch nicht bewiesen. Die Analyse steckt noch in den Anfängen.



Um über viele Lichtjahre Entfernung hinweg abzuschätzen, ob ein Planet eine Atmosphäre besitzt, wie sie zusammengesetzt ist und ob sie Stoffe enthält, die auf Leben hinweisen, bedienen sich die Astronomen einer Erkenntnis: Schiebt sich ein Planet vor seinen Stern, wird anfangs nur seine Atmosphäre (falls vorhanden) vom Sternenlicht durchstrahlt.

Spezielle Moleküle in der Gashülle lassen dabei bestimmte Lichtwellen nicht ungehindert durch, sondern fangen sie ab – absorbieren sie also. Diese charakteristischen Absorptionen lassen sich messen und geben Auskunft über die Beschaffenheit der Atmosphäre.

So entdeckten Wissenschaftler im Frühjahr 2017, dass der Planet Gliese 1132b, der in rund 39 Lichtjahren Entfernung ebenfalls um einen Roten Zwerg kreist, womöglich eine Atmosphäre aus heißem Wasserdampf besitzt.

Zwar halten die Forscher Leben auf seiner brodelnden Oberfläche, die vermutlich von einem Meer aus Magma durchzogen ist, für unwahrscheinlich.

Doch sollten die Messungen sich bestätigen, würde dies zumindest zeigen, dass Planeten in unmittelbarer Nähe eines Roten Zwergs generell eine stabile Atmosphäre entwickeln können.

Derzeit fahnden die Trappist-1-Forscher mit dem Weltraumteleskop Hubble nach möglichen Atmosphären der von ihnen entdeckten Planeten.

Doch die Messungen dieses im All fliegenden Observatoriums sind vergleichsweise grob und kaum dazu in der Lage, etwa Spuren von Ozon oder Sauerstoff an diesen relativ kleinen Felsplaneten nachzuweisen. Die aber wären ein mögliches Zeichen für Leben, da sie auf biologische Aktivität hindeuten würden.

Erst mit der kommenden Generation großer, hochauflösender Himmelsaugen werden die Forscher ihre Suche nach Leben präzisieren können. So wird schon im kommenden Jahr das James-Webb-Weltraumteleskop, das größte seiner Art, die Arbeit im All aufnehmen.

Und für 2024 ist der Start des European Extremely Large Telescope (E-ELT)

geplant. In einer Hochebene der chilenischen Atacama-Wüste wird es mit seinem 39-Meter-Hauptspiegel den Himmel auch nach Lebensspuren absuchen (siehe Seite 62). Das Planetensystem um Trappist-1 wird dabei eines der ersten sein, die es in den Blick nimmt.

Doch es wird wohl noch ein knappes Jahrzehnt vergehen, bis das E-ELT Daten an die Forscher übermittelt – darunter möglicherweise Informationen, die uns Antwort geben können auf die Frage: Sind wir allein im Universum?

Den Trappist-1-Forschern aber bleibt in der Zwischenzeit mehr als nur: abzuwarten. Denn die derzeit aktiven Teleskope erkunden das Planetensystem weiterhin, senden Daten, die das Puzzle komplettieren – mitunter aber auch ein ganz neues Bild zeichnen.

So brachte jüngst eine Nachbeobachtung des Trappist-1-Sternensystems mit dem Weltraumteleskop Kepler zutage, dass es in seinen schwer zu beobachteten Randbereichen keine weiteren Planeten birgt als die bekannten sieben.

Zudem ermittelte das internationale Forscherteam, dass Trappist-1 offenbar wesentlich älter ist als zunächst angenommen.

Er besteht demnach nicht erst seit 500 Millionen Jahren, sondern bereits seit drei bis acht Milliarden Jahren; zudem war das Planetensystem wohl über einen langen Zeitraum hinweg erstaunlich stabil. Das steigert die Chancen, dass

es auf einem der Trabanten zur Entstehung von Leben gekommen ist.



Doch wie wahrscheinlich ist es nun, dass auf den Planeten irgendwann irgendwelche Organismen entstanden sind?

Auch wenn die Bedingungen auf einigen Trappist-1-Planeten recht gut geeignet scheinen für Oasen im All, wäre Leben dort dennoch fortwährend bedroht.

Denn einerseits rotieren diese Planeten um den Roten Zwergh wahrscheinlich immer gebunden. Das bedeutet: Wie der Mond der Erde, wenden sie nur eine ihrer Hemisphären stets dem Stern zu, während auf der anderen Seite ewig frostige Nacht herrscht. Organismen würden daher – wenn überhaupt – wohl am ehesten in der Dämmerungszone überleben.

Zum anderen neigen Rote Zwerge zu starken Strahlungsausbrüchen und setzen mögliche Organismen damit dem Dauerfeuer des glutroten Himmelskörpers aus. Wiederholt flutet er seine Umgebung mit lebensgefährlicher UV- und Röntgenstrahlung, die selbst *Deinococcus radiodurans* kaum überleben würde – eine besonders strahlenresistente irdische Bakterie, die Forscher unter anderem in den Kühlwasserkreisläufen von Atomreaktoren entdeckt haben.

Aber vielleicht ist das Leben anderswo ja noch resistenter als das uns bekannte, hat noch raffiniertere Schutzmechanismen entwickelt, um sich selbst in äußerst lebensfeindlichen Umgebungen zu behaupten.

**Eine faszinierende Hypothese** dazu hat kürzlich Lisa Kaltenegger aufgestellt. Mit einem Kollegen malte sie sich mögliche Lebensformen für Proxima Centauri b aus, den uns nächsten Exoplaneten in 4,2 Lichtjahren Entfernung – und in vielem mit den Trappist-1-Trabanten vergleichbar.

Denn auch bei der Sonne von Proxima Centauri b handelt es sich um einen Roten Zwergh, der gefährliche UV-Strahlen in seine Umgebung abfeuert. Und: Der Sternenbegleiter ist vermutlich von einem uferlosen Meer bedeckt, an einigen Stellen bis zu 200 Kilometer tief. Auch

für das mittige Trappisten-Trio halten Wissenschaftler ein wasserreiches Szenario für denkbar. Welche Organismen könnten in der Umgebung eines furcht-erregenden Flackersterns überleben, wie es die meisten Roten Zwerge sind?

Anfangspunkt von Lisa Kalteneggers Überlegungen war ein real existierendes, irdisches Vorbild: Einige Korallenarten können schädliche UV-Strahlen in harmloses Licht umwandeln. Sie fangen die Strahlen ein und beginnen gespenstisch zu leuchten. Dank dieser Variante der Biofluoreszenz schützen die Korallen Algen, mit denen sie in Symbiose leben.

Lisa Kaltenegger hält es für denkbar, dass Organismen, die einem strahlungsintensiven Stern ausgesetzt sind, solche Fähigkeiten entwickeln, um zu überleben.

Möglicherweise ließe sich diese Überlebensstrategie gar aus der Ferne wahrnehmen. Denn wenn es auf Proxima Centauri b etwa gigantische Korallenriffe gäbe, die bei UV-Feuer zu leuchten beginnen, dann könnten diese Organismen farbenprächtige Signale im Lichtspektrum des Planeten hinterlassen. Mit der

nächsten Generation von Teleskopen, mutmaßt die Forscherin, würde man diese womöglich gar von der Erde aus wahrnehmen können. Das Leben sei schließlich sehr einfallsreich.

Kaum ein Astronom will heutzutage mehr ausschließen, dass es außerirdisches Dasein gibt. Viele halten mittlerweile selbst die Existenz höher entwickelter, intelligenter Wesen für immer denkbarer.

Denn weshalb sollte ein Prozess, der auf Erden zur Menschwerdung geführt hat, nicht irgendwo anders im All noch ein zweites oder drittes Mal abgelaufen sein? Genauso oder ganz anders?

Zu einem direkten Kontakt mit außerirdischen Wesen wird es aber wohl dennoch nie kommen. Dazu sind die Entferungen zwischen den Sternensystemen zu groß. Selbst ein Lichtstrahl benötigt mehrere Jahre zum nächsten Exoplaneten; damit scheint Kommunikation in einem überschaubaren Zeitrahmen quasi unmöglich. Zumal sich mögliche Zivilisationen mit einer Wahrscheinlichkeit nicht gleichzeitig entwickelt haben und entsprechend schwerlich in der Lage wären, in Kontakt zu treten.

Und trotzdem können die Menschen offenbar nicht ganz von diesem uralten Traum, mit Außerirdischen zu kommunizieren, lassen. Selbst einige Wissenschaftler hegen noch immer die Hoffnung, irgendwann eine Botschaft von weit draußen zu erhalten. Als sie kürzlich wiederholt kurze, extrem energiereiche Radioblitze registrierten, die binnen Millisekunden die Energie von 500 Sonnen freisetzen, brachten zwei US-Physiker Außerirdische als Urheber ins Spiel: Vielleicht wollten Bewohner der Nachbargalaxien uns mit diesen künstlich erzeugten Strahlungsimpulsen etwas mitteilen.

Natürlich sind Annahmen wie diese hochspekulativ und schwer zu überprüfen. Doch den Astronomen erscheint nichts mehr unmöglich. Die Exoplanetenforschung fördert immerzu Überraschendes zutage. So wurden die Wissenschaftler bereits von der ungeheuren Vielfalt der Planeten überwältigt.

Lisa Kaltenegger sagt voraus, dass wir irgendwann auch noch über eine zweite Vielfalt staunen werden: den ungeheuren Reichtum des Lebens im All. •

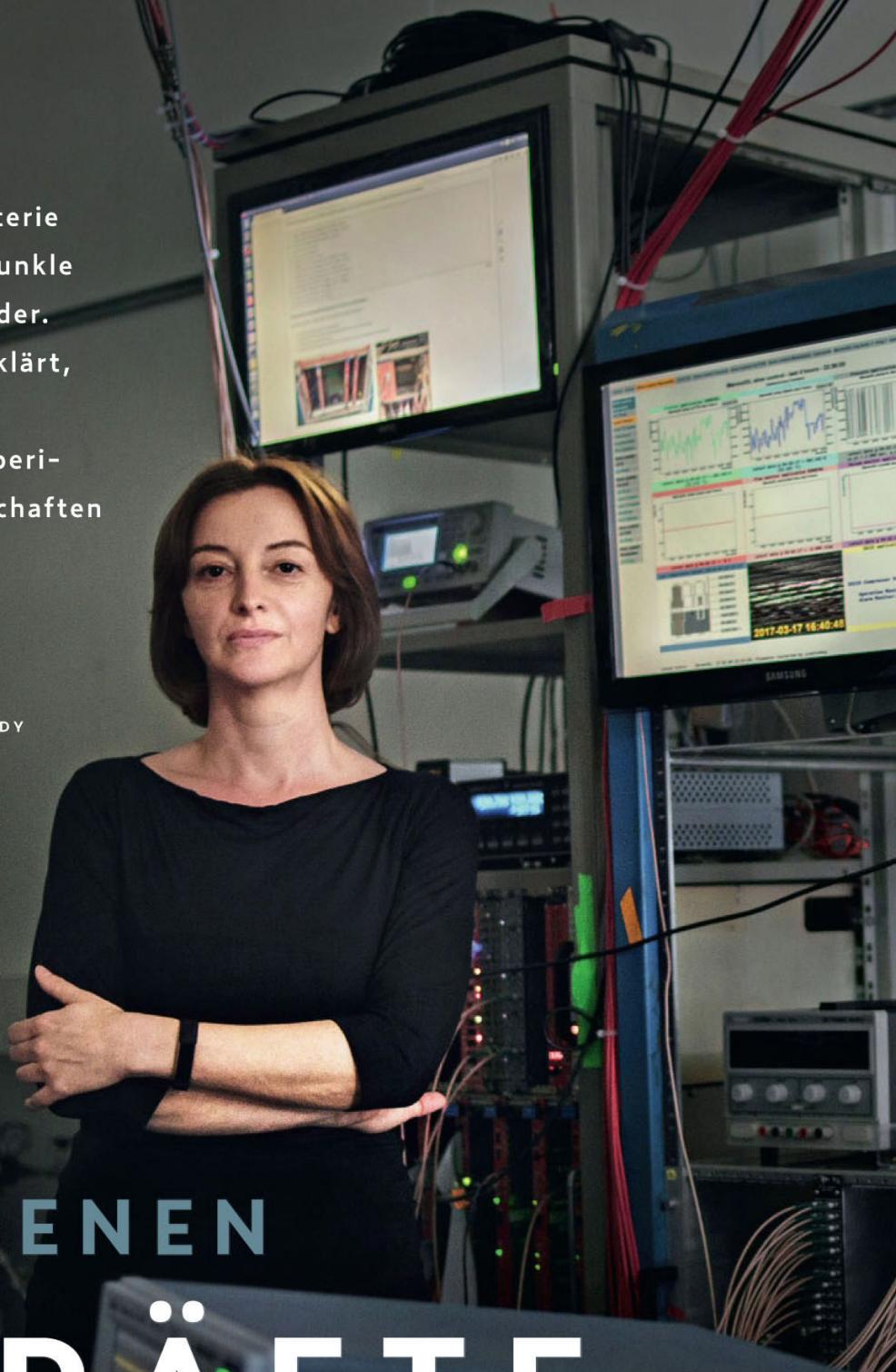
Zwei gewaltige Mächte prägen das Universum: Die Dunkle Materie hält Galaxien zusammen, die Dunkle Energie treibt das All auseinander. Die Physikerin Laura Baudis erklärt, was Forscher über diese Kräfte wissen – und wie komplexe Experimente ihre rätselhaften Eigenschaften aufdecken sollen

INTERVIEW: RAINER HARF UND MARIA KIRADY

FOTOS: DANIEL AUF DER MAUER

130

# DIE VERBORGENEN KRÄFTE IM KOSMOS





Prof. Laura Baudis in ihrem Labor an der Universität Zürich:  
Die Forschungsgruppe der gebürtigen Rumänin gehört zu  
den weltweit führenden Teams bei Versuchen, Partikel der  
mysteriösen Dunklen Materie nachzuweisen

**GEOkompakt:** Frau Professor Baudis, Sie beschäftigen sich mit einem der großen Rätsel des Universums, der Dunklen Materie. Warum?

**Prof. Laura Baudis:** Die Dunkle Materie ist eine ganz besondere Form von Materie: Wir können sie nicht sehen, da sie nicht leuchtet. Weder strahlt sie Licht ab – im Gegensatz zur sichtbaren Materie eines Sterns. Noch reflektiert sie Licht – anders als die sichtbare Materie, aus der zum Beispiel Steine, Wolken oder unser Körper bestehen. Die Dunkle Materie ist mithin völlig durchsichtig und für uns gänzlich unsichtbar.

Wir gehen davon aus, dass sie wie die sichtbare Materie auch aus dem Urknall hervorgegangen ist und somit die Entwicklung des Weltalls von Anfang an mit geprägt hat. Doch im Gegensatz zur sichtbaren Materie kennen wir ihre Zusammensetzung nicht. Wir können anhand komplizierter Messungen zwar Rückschlüsse darauf ziehen, welche Masse die Dunkle Materie im Universum einnimmt und wie sie verteilt ist. Ob sie aber aus einer Sorte von Teilchen besteht oder aus unterschiedlichen, lässt sich noch nicht mit Gewissheit sagen.

Und zur Lösung dieses Rätsels beizutragen, das reizt mich ungemein.

131

Weshalb haben sich keine Sterne aus der Dunklen Materie gebildet?

Das liegt unter anderem daran, dass sich deren Teilchen offenbar ganz anders verhalten als die der sichtbaren Materie. In der uns bekannten Welt treten die kleinsten Teilchen – etwa Quarks – in vielfache Wechselwirkung miteinander. Ein Beispiel: Mehrere Quarks schließen sich zu größeren Partikeln, den Protonen und Neutronen, zusammen. Die wiederum bilden die Kerne von Atomen, in deren Hülle winzige Elektronen schwirren. Und die Kerne können unter hohem Druck miteinander verschmelzen – das geschieht in Sternen. So werden andere Elemente gebacken. Aus Wasserstoff wird Helium, dann Lithium, später Kohlenstoff, Sauerstoff und Eisen. Und verschiedene Elemente können schließlich Verbindungen eingehen – Wasserstoff und Sauerstoff etwa bilden Wasser.

Die Partikel der Dunklen Materie dagegen treten kaum in Wechselwirkung miteinander; sie bilden wahrscheinlich

schon auf der Ebene der Teilchen keine komplexeren Strukturen. Sie schwirren eher einzeln und frei umher, wie die Teilchen in einem idealen Gas.

### Was ist noch über die mysteriösen Teilchen der Dunklen Materie bekannt?

Erstaunlich wenig. Obwohl sie mehr als 80 Prozent der Materie im Universum ausmachen und es zahlreiche Projekte gibt, die einen Nachweis zum Ziel haben, ist es bisher nicht gelungen, auch nur ein einziges Teilchen der Dunklen Materie direkt mithilfe eines Detektors aufzuspüren.

Eine Zeit lang dachten die Forscher, dass es sich bei der Dunklen Materie in Wahrheit um Neutrinos handeln könnte, winzige Elementarteilchen, die sich mit annähernder Lichtgeschwindigkeit fortbewegen und ebenfalls durch gewöhnliche Materie hindurchsausen. Inzwischen wissen wir aber, dass die gesamte Masse der Neutrinos nicht ausreicht, um die Wirkung der Dunklen Materie zu erklären.

Es müssen also noch völlig unbekannte Teilchen dahinterstecken.

### Wo kommt die Dunkle Materie vor?

132 Sie existiert überall im Universum, sie durchzieht das gesamte All. Die Dunkle Materie ist auch hier auf der Erde vorhanden, wir werden sogar beständig von ihr durchströmt: Die Partikel, aus denen die Dunkle Materie besteht, wehen einfach durch uns hindurch. Nur bekommen wir davon überhaupt nichts mit.

### Weshalb merken wir nicht, dass uns die Teilchen durchströmen?

Weil sie mit den Atomen, die unseren Körper bilden, nicht – oder kaum – interagieren. Daher fühlen wir sie nicht, wir haben keine Sensoren, sie wahrzunehmen. Aber die Dunkle Materie ist stets da.

### Von wie vielen dieser Partikel werden wir durchströmt?

Einer gängigen Theorie zufolge rauschen durchschnittlich pro Sekunde rund 100 000 Teilchen der Dunklen Materie durch eine Fläche, die so groß ist wie ein Daumennagel. Das mag viel klingen, ist aber tatsächlich vergleichsweise wenig. Denn die Dichte der Dunklen Materie liegt damit hier auf der Erde, wo die sichtbare Materie extrem kompakt ist, rund 20 Größenordnungen unter der von Luft. Deshalb übt ihre Masse auch keine besondere Anziehungskraft auf unseren Körper

aus. Ihre Wirkung macht sich erst in größerem Maßstab – auf der Ebene von Galaxien – bemerkbar.

### Die Dunkle Materie scheint sich der uns bekannten Welt zu entziehen. Wie sind Physiker auf ihre Existenz gestoßen?

Schon in den 1930er Jahren hat der Schweizer Astrophysiker Fritz Zwicky die Existenz einer unsichtbaren Form von Materie postuliert. Der Wissenschaftler hatte die Geschwindigkeit mehrerer weit entfernter Galaxien beobachtet, die eine Art Ansammlung bilden. Aufgrund komplexer Berechnungen stellte Zwicky fest, dass die Galaxien eigentlich auseinanderfliegen müssten. Gäbe es nur die sicht-

vorhanden, müssten sich den Gesetzen der Physik zufolge jene Sterne, die sich weit entfernt vom Zentrum einer Galaxie befinden, weitaus langsamer bewegen, als sie es tatsächlich tun.

### Gab es weitere Hinweise auf die Existenz der Dunklen Materie?

Ja, etwa den Gravitationslinseneffekt: Dunkle Materie, die Galaxien umgibt, lenkt das Licht ferner, weit dahinter liegender Himmelskörper durch ihre immense Masse und die dadurch wirkende Gravitationskraft ab. Das Resultat: Von der Erde aus gesehen, erscheinen die hinter der Galaxie befindlichen Objekte verzerrt – gerade so, als würde man sie durch eine Art Linse betrachten.

Und es findet sich noch ein anderer Hinweis auf die Existenz der Dunklen Materie. Es gibt eine Strahlung, die das ganze All erfüllt, sie stammt aus der Frühzeit des Universums und ist eine Art Echo des Urknalls: die kosmische Hintergrundstrahlung. Durch deren präzise Vermessung kann man berechnen, wie viel Masse schon in der Urzeit des Universums vorhanden war. Diese physikalischen Quantifizierungen offenbaren, dass die Masse weitaus höher ist als jene, aus der die für uns wahrnehmbare Welt – etwa Sterne, Planeten, Asteroiden, Gaswolken – besteht. Man könnte auch sagen: Man hat das All gewogen und festgestellt, dass noch ein erheblicher Teil an Materie fehlt.

### Wie viel Dunkle Materie gibt es?

Die Dunkle Materie macht etwa 85 Prozent der Gesamtmasse im Kosmos aus, die sichtbare den Rest.

### Wie hat die Dunkle Materie die Entwicklung unseres Universums beeinflusst?

Sie hat bei der Entwicklung des Alls gewissermaßen die Hauptrolle gespielt, denn sie hat dem Kosmos Struktur gegeben. Keines der spektakulären, riesenhaf-ten Gebilde, die wir im Universum erblicken – etwa Galaxien, Galaxienhaufen oder auch netzartige Verbände aus Tausenden Galaxienhaufen –, kann ohne die Kraft der Dunklen Materie erklärt werden.

Inzwischen können Physiker mithilfe moderner Computersimulationen die Strukturbildung und insbesondere die Entstehung der Galaxien im Universum recht genau nachvollziehen. Diese Simulationen kommen ohne die Dunkle Materie gar nicht aus.

## Sichtbare MATERIE macht nur rund FÜNF PROZENT der Masse und Energie des Universums aus

bare Materie, also hauptsächlich die Masse der Sterne und des Gases dazwischen, dürften sich gar keine Galaxienhaufen bilden – ihre Gravitationskraft wäre schlicht nicht groß genug, die Sternenarchipelen aneinander zu binden.

### Was nahm Zwicky an?

Es musste weitaus mehr als die sichtbare Materie vorhanden sein – etwas, das die Galaxien wie eine Art Klebstoff zusammenhält. Doch Zwicky's Theorie wurde von Kollegen belächelt, seine Entdeckung lange Zeit ignoriert.

Erst in den 1970er Jahren machte die US-Physikerin Vera Rubin eine weitere revolutionäre Beobachtung, die schließlich auch von Astrophysikern weltweit ernst genommen wurde: Sie ermittelte, mit welchem Tempo sich Sterne um das Zentrum einer Galaxie bewegen. Dabei stellte die Forscherin fest, dass die unterschiedlichen Geschwindigkeiten der Gestirne nur durch die Existenz einer großen, unbekannten Masse zu erklären sind. Wäre allein die sichtbare Materie

Und wenn man bei Simulationen die Dunkle Materie außen vor lässt?

Berücksichtigen Forscher in den Berechnungen ausschließlich die Teilchen, aus denen die sichtbare Materie besteht, bilden sich weder Sterne noch Galaxien. Das All sähe ohne die Dunkle Materie heute recht öde aus: Es gäbe zwar Atome – Wasserstoff, Helium. Aber der Kosmos wäre finster, keine Sonne würde leuchten, keine Planeten schwirrten umher. Das Universum wäre erfüllt von einem dünnen Gas, hauptsächlich aus Wasserstoff.

Wie hat die Dunkle Materie Struktur ins All gebracht?

In der Frühzeit des Alls war die Dunkle Materie nicht gleichmäßig im Raum verteilt. In einigen Regionen gab es etwas mehr, dort schwirrten die Dunkle-Materie-Teilchen etwas dichter umher. Da die Partikel eine Masse besitzen und mithin Schwerkraft entfalten, sammelte

sich mit der Zeit – getrieben von der Gravitation – an den dichten Stellen immer mehr Dunkle Materie. Es bildeten sich schließlich riesige kugelförmige Ansammlungen Dunkler Materie, die Halos.

Diese Kugeln entwickelten eine ungeheure Gravitationskraft, die auch riesige Mengen sichtbarer Materie anzog. Die Halos sogen gleichsam Wasserstoffatome aus der Umgebung an, die mit der Zeit gigantische Wolken bildeten (siehe Seite 42, die Redaktion).

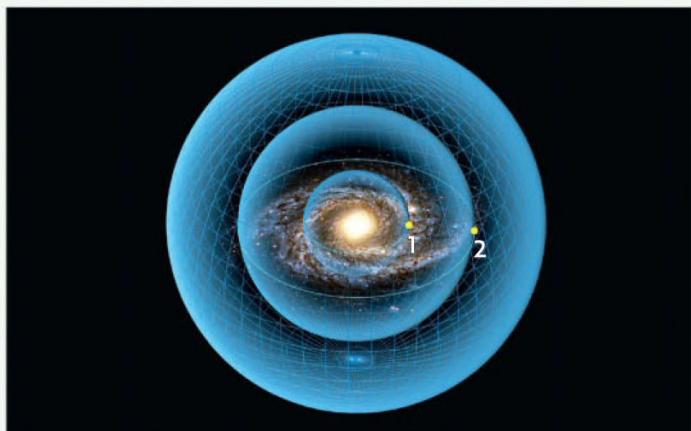
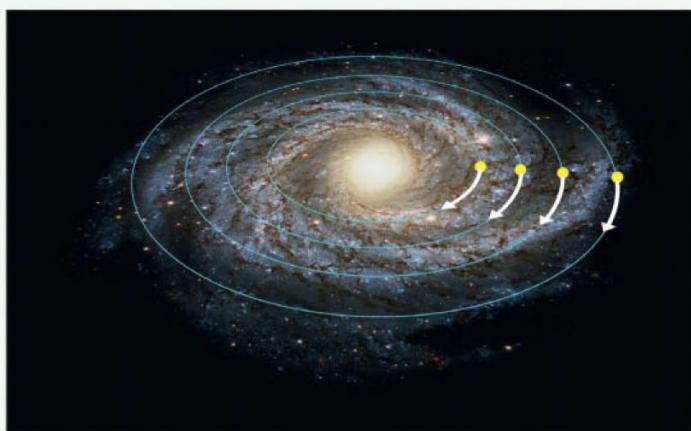
Und erst als sich der Wasserstoff derart zusammenbraute, konnte er selbst eine für die weitere Entwicklung des Alls relevante Gravitationskraft entwickeln. In der Folge ballte sich in manchem Wolkenteil so viel Wasserstoff-Gas, dass es zur atomaren Fusion kam – und die ersten Sterne zündeten.

Inmitten der Halos aus Dunkler Materie war die Gravitation am stärksten, dort sammelte sich das meiste Wasser-

stoff-Gas, dort zündeten die meisten Sterne. Und die leuchtenden Himmelskörper formierten sich schließlich – ebenfalls durch die gewaltige Kraft der Dunklen Materie dirigiert – zu jenen glitzernden Sterneninseln, die wir milliardenfach im All bestaunen können: den Galaxien.

*Mit welchen Methoden versuchen Forscher, die mysteriösen Partikel der Dunklen Materie aufzuspüren?*

Eine Methode besteht darin, die Dunkle Materie neu zu erschaffen. Das soll mithilfe von großen Teilchenbeschleunigern wie etwa dem CERN nahe Genf gelingen. In den Geräten bringt man zum Beispiel zwei Protonen nahezu auf Lichtgeschwindigkeit und lässt sie dann zusammenprallen. Bei der Kollision entstehen zahlreiche neue Teilchen. Und möglicherweise befindet sich unter diesen neuen Partikeln eben auch ein Teilchen der Dunklen Materie.



## DIE ENTDECKUNG DER DUNKLEN MATERIE

133

Dass Galaxien mehr als nur die sichtbare Materie enthalten müssen, bemerkten Forscher, als sie die Umlaufbahnen von Sternen in Galaxien beobachteten. Der Gravitationstheorie zufolge müssten Himmelskörper das massereiche Zentrum einer Galaxie umso langsamer umkreisen, je weiter außen ihre Bahn verläuft – denn die Schwerkraft lässt mit der Entfernung nach. Tatsächlich aber bewegen sich die Sterne auf jeder Bahn annähernd gleich schnell (weiße Pfeile). Es müssen also weitere Gravitationskräfte wirken – hervorgerufen durch eine nicht sichtbare Form von Materie. Diese Dunkle Materie, so die gängige Theorie, bildet einen riesigen Halo (hier dargestellt als äußere bläuliche Kugel), in dessen Zentrum die Galaxie schwebt. Die Bahngeschwindigkeit eines innen rotierenden Sterns (1) wird von vergleichsweise wenig Dunkler Materie (kleine Kugel) beeinflusst. Sterne auf einer außen liegenden Umlaufbahn (2) stehen in Bezug auf ihr Tempo unter dem Einfluss von weit mehr Dunkler Materie (mittlere Kugel). So kommt es, dass die äußeren Sterne eine ähnlich hohe Geschwindigkeit erreichen wie die inneren Sterne.

*Das ließe sich dann messen?*

Ja, allerdings nur indirekt: Das besagte, neu gebildete Teilchen selber würde nämlich, wie alle Partikel der Dunklen Materie, geradewegs durch die riesigen Detektoren, die um den Kollisionspunkt aufgestellt sind, hindurchfliegen. Deren Sensoren könnten es nicht registrieren.

Die meisten anderen Teilchen hingen – mit Ausnahme der Neutrinos –, die bei der Kollision entstehen, würde man in den Detektoren auffangen. Aus den gewonnenen Daten ließe sich ein solches Ereignis herauslesen, die Physiker würden also feststellen, dass bei der Kollision etwas verloren gegangen ist. Und sie würden zudem auch Aussagen über manche Eigenschaften des Dunkle-Materie-Teilchens treffen können. Etwa, wie schwer es genau ist. Oder wie schnell es sich – vereinfacht gesagt – um sich selbst dreht.

*Welche Ansätze gibt es noch, die Teilchen nachzuweisen?*

Wir gehen zwar davon aus, dass die Dunkle Materie fast gar nicht mit der sichtbaren interagiert – aber eben nur fast.

Zuweilen kann es, so die Vermutung, zu sehr seltenen Zusammenstößen zweier Partikel kommen. Weil sie so wenig reaktionsfreudig sind, bezeichnen Forscher die hypothetischen Teilchen der Dunklen Materie daher auch als „WIMPs“, das ist das englische Wort für „Schwächlinge“. Zugleich ist WIMP eine Abkürzung für „Weakly Interacting Massive Particle“, was auf Deutsch so viel wie „schwach wechselwirkendes massereiches Teilchen“ heißt.

Wenn es sich bei den Partikeln der Dunklen Materie nun tatsächlich um WIMPs handelt, dann müsste es hin und wieder vorkommen, dass ein solches schwach wechselwirkendes Teilchen auf einen Atomkern prallt. Genau auf dieser Annahme basiert unser Detektor, der sich in einem Untergrundlabor im italienischen Gran-Sasso-Gebirgsmassiv befindet. Es ist der weltweit größte seiner Art.

*Wie funktioniert das Gerät?*

Das Herzstück des Detektors ist ein mächtiger Tank, der 3,3 Tonnen hochreines, flüssiges Xenon enthält. Xenon ist ein chemisches Element, dessen Atome äußerst stabil und dessen Atomkerne recht groß und schwer sind. Falls Teilchen der Dunklen Materie mit den Xenonatomen zusammenstoßen – ähn-



Ohne die Dunkle Materie hätten sich weder Sterne noch Planeten gebildet, sagt Laura Baudis: Das All wäre nur eine öde Wüste aus Gas

lich wie zwei Billardkugeln –, würde unseren Berechnungen zufolge ein extrem schwacher Lichtblitz entstehen.

Über einen raffinierten Mechanismus könnten wir dieses Lichtsignal um ein Millionenfaches verstärken. Unsere Sensoren sind so empfindlich, dass wir ein einzelnes Lichtteilchen – ein Photon – sicher detektieren können.

Die Schwierigkeit bei dem Vorhaben besteht darin, dass wir versuchen müssen, alle möglichen Störquellen auszuschließen. Daher befindet sich der Detektor im Inneren eines Berges – das Gestein schirmt das Gerät vor kosmischer Strahlung ab. Außerdem muss das Xenon so sauber wie nur möglich sein. Jede Verunreinigung verursacht Störsignale.

Und zum Schutz haben wir den Xenontank noch mit einer zehn Meter dicken Wasserschicht umhüllt und so noch stärker von der Außenwelt isoliert. Und doch wird es immer einen sogenannten Hintergrund an Störungen geben, die nicht zu vermeiden sind.

*Noch ist es Ihnen nicht gelungen, eines der gesuchten Teilchen nachzuweisen.*

Unser Gerät ist erst seit wenigen Wochen in Betrieb. Und auch wenn sich 3,3 Tonnen Xenon im Detektor befinden, erwarten wir allenfalls eine Handvoll Kollisionen pro Jahr. Und dann kommt es natürlich darauf an, diese seltenen Ereignisse auch aus den Daten herauslesen und von besagten Störungen unterscheiden zu können – dafür entwickeln wir höchst komplexe Simulationen und Computerprogramme.

*Angenommen, Sie können keinen Zusammenstoß registrieren: was dann?*

Ein größerer Detektor ist bereits in Planung: ein Acht-Tonnen-Tank. Und auch der übernächste schon: ein Detektor mit 50 Tonnen Flüssig-Xenon. Denn selbst wenn wir mit unserem Detektor die mysteriösen Teilchen erstmals nachweisen, wird ein größeres Gerät hoffentlich dabei helfen, viel mehr Daten zu erhalten. Und die werden wir brauchen,

um immer genauere Aussagen über die Beschaffenheit der Teilchen zu treffen.

*Was würde es bedeuten, wenn Sie ein Partikel nachweisen könnten?*

Es wäre eine Sensation! Zwar würden wir nicht die Dunkle Materie an sich nachweisen; dass es die geben muss, weiß man ja bereits seit Langem. Und dennoch wäre es eine gigantische Entdeckung, denn Sie müssen sich vergegenwärtigen: Wir wissen derzeit nach wie vor nicht, wie jene Teilchen beschaffen sind, die den Großteil der Materie im Universum ausmachen.

Wenn wir zeigen, dass die Dunkle Materie aus noch unbekannten neuen Teilchen besteht, und nach und nach mehr über deren Eigenschaften herausfinden, dann könnten wir noch viel genauere Modelle entwickeln zur Galaxienentstehung.

Vor allem aber würde dies das Standardmodell der Teilchenphysik, das die Eigenschaften der kleinsten Materiebausteine unserer Welt beschreibt, vor immense Herausforderungen stellen. Denn bislang sind darin keine Partikel der Dunklen Materie vorgesehen. Das Standardmodell bezieht sich allein auf die Teilchen der sichtbaren Materie und müsste somit erweitert werden (siehe auch Seite 149, die Redaktion).

Es wäre ein unglaublich wichtiger Stein der Erkenntnis in einem Puzzle, das es schon seit mehr als 80 Jahren gibt und Generationen von Physikern beschäftigt.

*Ein zweites mysteriöses Phänomen, das Physikern Rätsel aufgibt, ist die Dunkle Energie. Was versteht man darunter?*

Die Dunkle Energie ist etwas fundamental anderes als die Dunkle Materie. Woraus diese Form der Energie besteht, weiß man noch nicht. Doch sie ist eindeutig vorhanden. Und sie hat eine recht ungewöhnliche Wirkung: Die Dunkle Energie lässt den Raum immer weiter auseinanderstreben. Sie ist die treibende Kraft, die unser Universum expandieren lässt.

Vor allem aber: Ihre Wirkung nimmt immer weiter zu; mit der Folge, dass die Ausdehnung des Raumes sich zunehmend beschleunigt. Diese Form der Energie ist auch schon seit Langem bekannt. Sie taucht bereits in Einsteins Gleichungen auf – dort heißt dieser Energieterm „kosmologische Konstante“,

er wirkt der anziehenden Kraft der Gravitation entgegen.

*Wie kann man sich die Dunkle Energie vorstellen?*

Sie füllt das ganze Universum aus, wie ein unsichtbares Feld. Vergleichbar mit einem Magnetfeld. Ein Energiefeld, das alle Strukturen im Kosmos beschleu-

nen. Zum Beispiel mit Satellitenexperimenten oder mit großen, erdgebundenen Teleskopern messen. Sie zeigt sich nur auf ganz großen Skalen – das heißt, sie offenbart sich nur, wenn man weit ins All hinausschaut. Sie beeinflusst das Wachstum der kosmischen Strukturen, und man versucht herauszufinden, ob ihre Wirkung früher anders war als heute. Denn eine der offenen Fragen ist: Ist sie eine konstante Eigenschaft des Raumes selbst, oder verändert sie sich mit der Zeit?

*Welchen Anteil hat die Dunkle Energie in einer Gesamtbilanz des Universums?*

Rechnet man die gesamte Masse und Energie im All zusammen, kommt die Dunkle Energie auf einen Anteil von etwa 68 Prozent. Die Dunkle Materie macht in dieser Rechnung ca. 27 Prozent aus. Die sichtbare Materie – das uns vertraute Universum mit allen Sonnen, Planeten, mit allen Gasnebeln und uns Menschen – kommt nur auf nahezu fünf Prozent.

Das heißt: Rund 95 Prozent liegen noch im Wortsinne ziemlich im Dunkeln.

*Welche Auswirkung hat die Dunkle Energie auf das weitere Schicksal des Universums?*

Früher hat man vermutet, dass die Expansion des Alls irgendwann zum Ende kommen wird, dass sich irgendwann alle Galaxien aufgrund ihrer Gravitationskraft wieder anziehen, der Raum sich wieder verkleinert. Das Universum würde danach in einem *Big Crunch* enden – kollabieren.

Aufgrund der Dunklen Energie weiß man nun: Das Gegenteil ist der Fall.

Das Universum wird sich mit immer größerer Geschwindigkeit ausdehnen – irgendwann wird sich der Raum zwischen den Galaxien schneller als das Licht vergrößern. Dann können keinerlei Informationen mehr von A nach B gelangen; zum Beispiel werden sich benachbarte Galaxien so rasch voneinander entfernen, dass das Licht der einen nicht mehr zur anderen gelangt. Und irgendwann wird auch der Sternenhimmel finster.

Alles wird dann voneinander abgeschnitten sein, ein großes dunkles Nichts. Und nach Äonen wird auch innerhalb der Galaxien das Auseinanderstreben dominieren. Dann wird sich alles auflösen. Nichts wird mehr bleiben.

Dann wird jene Kraft, von der wir derzeit kaum etwas wissen, die Oberhand über alles gewinnen: Für alle Ewigkeit wird es die Zeit der Dunklen Energie sein. •

## Die DUNKLE ENERGIE wird das Universum in ferner Zukunft in NICHTS auflösen

nigt auseinandertreibt. Stellen Sie sich vor, Sie werfen einen Apfel hoch in die Luft und dieser würde sich immer schneller nach oben bewegen, anstatt umzukehren und auf die Erde zurückzufallen.

*Ist die Dunkle Energie – ähnlich wie die Dunkle Materie – ebenfalls an manchen Orten dichter oder stärker wirksam?*

Nein, die Dunkle Energie ist gleichförmig im Universum verteilt, das ist ganz wesentlich. Nirgendwo lässt sie den Raum stärker oder schneller expandieren als anderswo. Sonder überall dehnt sich der Raum gleichförmig aus.

*Gibt es eine Möglichkeit nachzuweisen, was genau die Dunkle Energie ist?*

Das ist noch deutlich schwieriger als bei der Dunklen Materie. Denn: Die Dunkle Energie kann man nur indirekt,

### Literatur

Lisa Randall, **Dunkle Materie und Dinosaurier**, S. Fischer. Die Astrophysikerin erklärt anschaulich die Rolle der Dunklen Materie in der Entwicklung des Universums.

Heather Cooper und Nigel Henbest, **Space. Eine Entdeckungsgeschichte des Weltalls**, Mairisch. Die Autoren schildern aus historischer Sicht die Erforschung der Dunklen Materie und anderer kosmischer Phänomene.

# AUF DER SUCHE NACH DEM ANFANG DER ZEIT

TEXT: CAY RADEMACHER



Niemand vermag tiefer  
in die Vergangenheit zu  
blicken als jene Physiker  
am CERN, die in einem  
gigantischen Beschleuniger  
Teilchen aufeinander-  
prallen lassen. Und  
damit Bedingungen  
erzeugen, wie sie einen  
winzigen Augenblick  
lang nach dem Urknall  
herrschten

**PARTIKELSUCHE**  
In einem Tunnel bei  
Genf haben die Physiker  
des CERN den Detektor  
ALICE errichten lassen: Mit  
Hilfe des 16 Meter hohen  
Geräts wollen die Wissen-  
schaftler verstehen, wie  
sich Teilchen kurz nach  
der Geburt des Universums  
verhielten

# A

**An einem kühlen Märzmorgen** fahren die beiden deutschen Physiker Alexander Kalweit und Jan Fiete Große-Oetringhaus zum ältesten Geheimnis des Universums.

Die beiden Forscher rollen durch eine Neubausiedlung, Genf ist nicht weit, und am Horizont glänzt die Pyramide des Montblanc. Sie erreichen eine Halle, versperrt durch eine gelbe Metallschleuse. Ein Augenscanner überprüft die Iris der Besucher, gibt dann den Weg frei.

Die Wissenschaftler setzen Schutzhelme auf und hängen sich ein Dosimeter um, ein Messgerät, das ausschlägt, wenn sie Strahlung abbekommen.

Dann steigen sie in einen Fahrstuhl und sinken in den Felsen des Jura. Als sich 50 Meter tiefer endlich wieder die Kabine öffnet, glaubt sich der Besucher in ein zukünftiges Jahrhundert versetzt.

Denn in einer gewaltigen Kaverne steht ein 26 Meter langer und 16 Meter hoher, 10 000 Tonnen schwerer Koloss aus Metall, dominiert von einem gigantischen achteckigen Magneten, der wie ein rot lackierter Panzer die Hightech-Geräte im Inneren umhüllt, versorgt von Kabeln und Gasschläuchen. Das Licht ist weiß und kalt. Man fühlt sich hier so winzig wie eine Ameise vor einem Raumschifftriebwerk und genauso deplatziert.

Nach und nach erkennt man Einzelheiten: Die Vorderseite dieser seltsamen Maschine steht offen, zwei hohe Stahlportale sind aufgesperrt.

Die technischen Eingeweide dahinter sind in nahezu perfekter Gleichform aufgebaut, wie Zwiebelschichten, die sich um ein Zentrum hüllen.

Durch dieses Zentrum führen zwei Röhren, jede nicht dicker als ein Unterarm, die sich hier für ein kurzes Stück zu einem Strang vereinen. Und genau in diesem halb verborgenen Strang wird es in wenigen Wochen hunderttausendfach heißer werden als im Innern der Sonne.

Dort werden Atomkerentrümmer in alle Richtungen strahlen – und die Riesenmaschine wird diese winzigen Partikel einfangen und aufzeichnen. Sie wird Kalweit, Große-Oetringhaus und einer Schar weiterer hoch spezialisierter Physi-

ker zeigen, was sich in den ersten Augenblicken nach dem Urknall ereignet hat.

Kein Mensch kann tiefer in die Vergangenheit blicken als sie: 13,8 Milliarden Jahre zurück, bis auf eine Winzigkeit direkt zum Ursprung von allem. Sie sind Archäologen des Universums, die Gott am ersten Tag der Schöpfung filmen.



**ALICE heißt der Gigant** im Berg: *A Large Ion Collider Experiment*. Es ist, wenn man so will, eine extrem komplexe Kamera, die binnen Bruchteilen von Bruchteilen



### Bis zum Zeitpunkt null

Alexander Kalweit (o. l.) und Jan Fiete Große-Oetringhaus untersuchen am CERN, welche Teilchen aus einem Quark-Gluonen-Plasma hervorgehen: einem Materiezustand, der kurz nach dem Urknall das Universum erfüllte

von Sekunden unfassbar winzige und sich unfassbar schnell bewegende Teilchen registriert und daraus am Computer ein Bild zusammensetzt.

Das 2008 in Betrieb gegangene ALICE ist eines der spektakulärsten und neuesten Werkzeuge am CERN, der Europäischen Organisation für Kernforschung – und wohl berühmtesten naturwissenschaftlichen Institution weltweit.

CERN wurde 1954 durch den *Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire* gegründet, einen von zwölf europäischen Staaten gebildeten Rat, dessen Abkürzung bis heute als Name dient. Es war damals auch ein politisches Projekt. Bei

der Grundlagenforschung sollte das ewig verfeindete Europa endlich friedlich zusammenwachsen.

Heute finanzieren 22 Nationen CERN, und einige Tausend Physiker aus etwa 100 Staaten forschen hier: Manche über viele Jahre, die meisten bloß mehrere Monate für besondere Experimente.

Es sind einige der klügsten Köpfe der Welt, und sie arbeiten sich im Schatten des Montblanc seit Jahrzehnten an einer Frage ab: Woraus besteht das Universum?



**»Universum« bedeutet** ja nicht bloß Sonne, Mond und Sterne – Universum bedeutet: alles. Die Frage nach dem Charakter des Universums ist also die Frage nach allem: im Allerkleinsten wie im Allergrößten.

Alle uns geläufige Materie besteht aus Atomen. Atome bestehen aus Elektronen und einem Kern aus Protonen und meist auch Neutronen. Protonen und Neutronen wiederum bestehen aus noch kleineren Teilen, den Quarks. Und die werden zusammengehalten von der sogenannten starken Kernkraft, deren Träger Gluonen sind (siehe Kasten Seite 148).

Diese Welt der ultrakleinen Partikel gibt Rätsel auf, über die man eigentlich gar nicht intensiv nachdenken will, um nicht dem Wahnsinn zu verfallen.

Ein Beispiel: Ein Proton hat eine Masse von  $1,67 \times 10^{-27}$  Kilogramm. Das sind 0,000000000000000000000000167 Kilogramm.

Jedes Proton besteht aus drei Quarks – doch diese drei Quarks bringen es zusammen bloß auf etwa ein Hundertstel dieser eh schon unfassbar kleinen Masse.

Wo aber kommen die anderen 99 Prozent der Protonenmasse her? Sie stammen, so das Modell der Physiker, von der *Energie* der Bestandteile – also von der Wechselwirkung, die zwischen den Quarks herrscht: der starken Kernkraft.

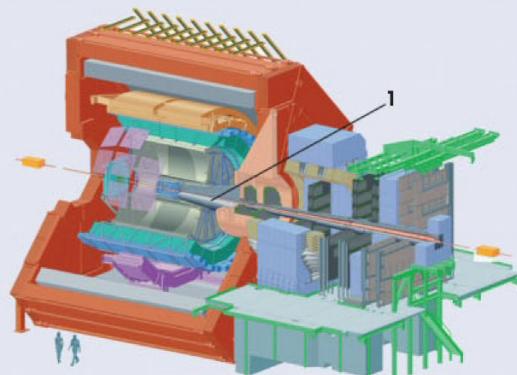
Wenn man jetzt noch bedenkt, dass ein Proton (und ein Neutron) etwa 2000-mal schwerer ist als ein Elektron und dass alle geläufige Materie des Universums aus Protonen, Neutronen und Elektronen

## Die Maschine, die den Urknall filmt

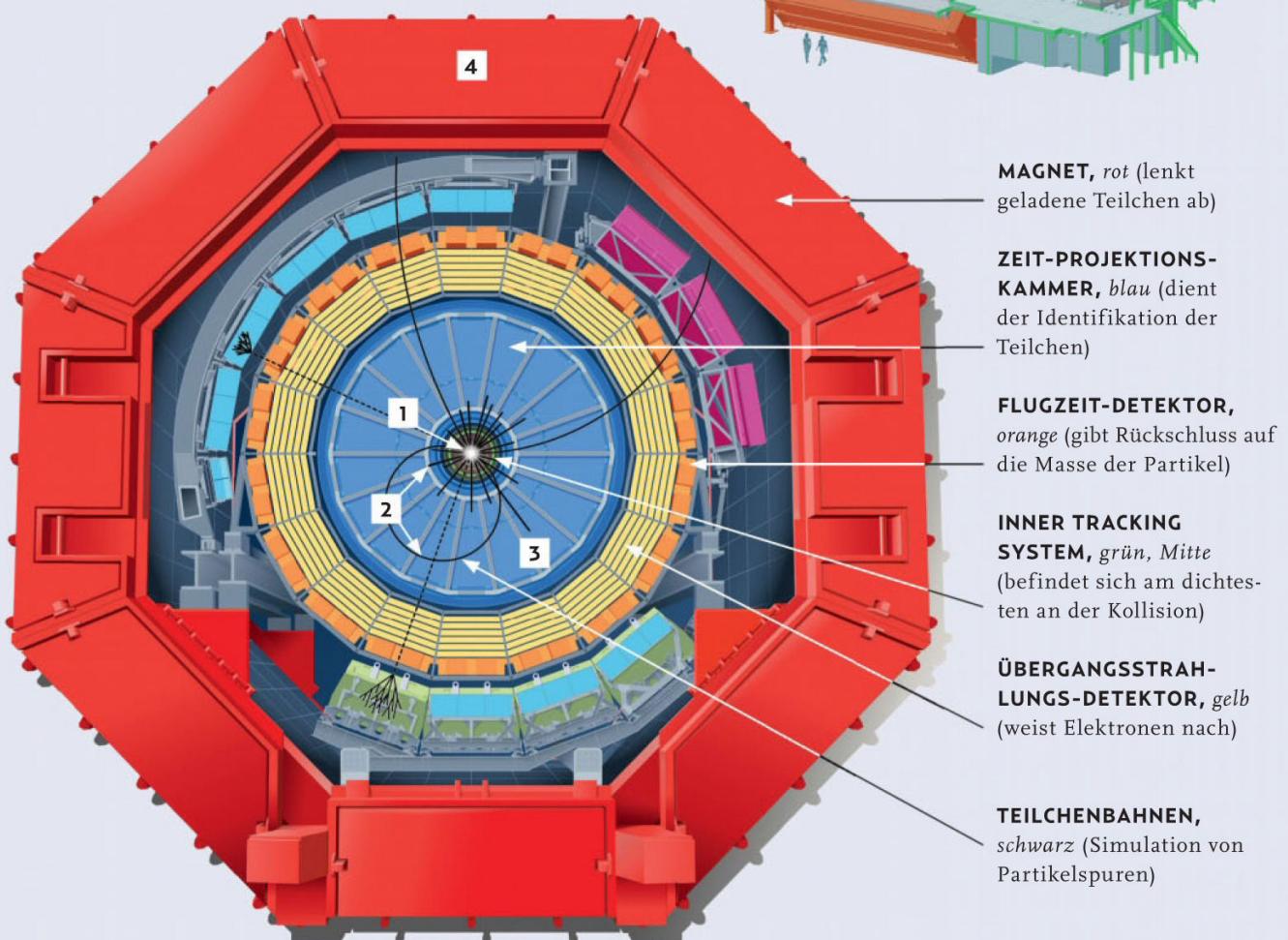
In Teilchenbeschleunigern kollidieren Atomkerne beinahe mit Lichtgeschwindigkeit. Detektoren wie ALICE sind so konstruiert, dass sie den Crash der Partikel hochpräzise registrieren

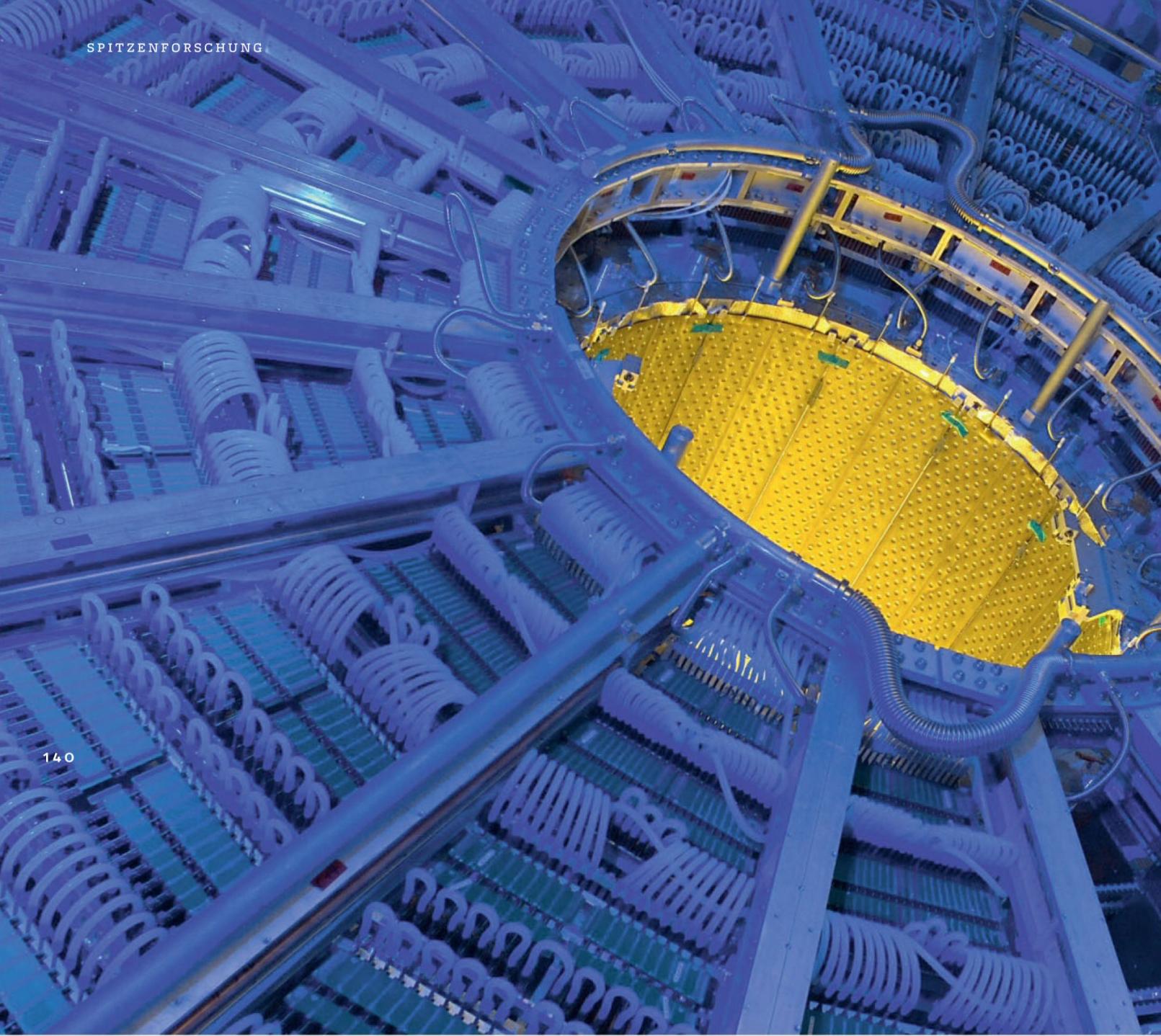
In der Röhre (1) des Beschleunigers werden Partikel (zum Beispiel Atomkerne) auf extreme Geschwindigkeiten gebracht und prallen schließlich im Zentrum eines Detektors aufeinander. Die Energie der Crashes ist so hoch, dass unter Umständen ein Zustand eintritt, der dem kurz nach dem Urknall ähnelt. Ein Teil der Energie wandelt sich in Masse: Neue Partikel entstehen, die in alle Richtungen davonfliegen (2) und dabei mehrere – zwiebelförmig um die Röhre liegende – Schichten des Detektors (3) durchqueren. Ein riesiger Magnet (4) lenkt die Teilchen auf unterschiedliche Bahnen ab. Aus den jeweiligen Flugdaten können Physiker ableiten, welche Partikel wo entstanden sind – und auch auf Teilchen rückschließen, die bereits vor Erreichen des Detektors in andere zerfallen sind. So lassen sich selbst höchst instabile Partikel nachweisen, die nur kürzeste Zeit nach der Kollision existieren.

**DAS STRAHLROHR** (1), in dem die Partikel aufeinanderprallen, ist nur einige Zentimeter dick. Der Hauptteil des 10 000 Tonnen schweren Detektors dient der Analyse der Kollision



139





### DEN TEILCHEN AUF DER SPUR

Dieser mehr als fünf Meter hohe Zylinder ist eine entscheidende Komponente des ALICE-Detektors (siehe auch Illustration Seite 139): Er dient der genauen Identifikation jener Elementarteilchen, die sich bei der Kollision von Atomkernen für Sekundenbruchteile bilden

zusammengebaut ist: Dann bedeutet dies, dass alle Materie, von einer Zelle in unserem Herzmuskel bis zur Sonne am Himmel, hauptsächlich aus purer Energie besteht. Aus einer Energie, die im tiefsten Inneren der Atome auf deren winzigste Bestandteile wirkt.

Zwei der drei Quarks eines Protons sind positiv geladen – doch positiv geladene Teilchen stoßen sich nach den Ge-

setzen des Elektromagnetismus ab. Ein Proton müsste daher eigentlich auseinanderplatzen. Doch die starke Kernkraft zwingt die Quarks im Proton zusammen.

Sie überwindet also in den winzigen Dimensionen des Atomkerns eine andere, nämlich die elektromagnetische Kraft. Mehr noch: Die starke Kernkraft schafft eine derart mächtige Bindung zwischen den Quarks, dass die nie isoliert

als freie Teilchen auftreten, sondern immer und überall in Gebilden aus genau zwei oder drei Quarks. Physiker nennen dieses Phänomen „Confinement“.

Wie funktioniert das?

Die starke Kernkraft, so die Forscher, wirkt zwischen den Quarks (aber nicht auf andere Elementarteilchen wie etwa Elektronen) und wird durch „Kraftteilchen“ vermittelt, die Gluonen.



Die Vorstellung, dass eine Kraft zwischen Teilchen durch wieder andere Teilchen ausgetauscht wird, ist für den Laien fraglos schwer verständlich, sie bildet aber die Grundlage für das weitgehend akzeptierte Standardmodell der Elementarteilchenphysik (siehe Seite 149). Entsprechend sind etwa die Photonen (oder Lichtteilchen) die Kraftteilchen der elektromagneti-

schen Wechselwirkung, die zwischen elektrisch geladenen Partikeln besteht.

Die Besonderheit der starken Kernkraft liegt nun darin, dass sie nicht nur auf die Quarks wirkt, sondern auch auf die Gluonen. Diese Kraftteilchen (die wie Photonen keine Masse besitzen) vermitteln also die Wechselwirkung und unterliegen ihr zugleich selbst (im Gegensatz zu Photonen, die nicht elektrisch geladen sind).

Anschaulich nachvollziehen lässt sich dieser Gedanke kaum noch. Doch die Physiker haben darauf eine Theorie gegründet, die mit den experimentell gewonnenen Erkenntnissen über das Verhalten der kleinsten Teilchen weitgehend übereinstimmt. So können sie etwa erklären, warum Quarks nie einzeln, sondern stets zu zweit oder zu dritt vorkommen. (Und auch, dass Verbindungen von vier oder fünf Quarks zwar theoretisch denkbar sind, aber äußerst selten und extrem kurzlebig wären – nach Hinweisen, dass sie dennoch existieren, fähndet ein weiteres großes Projekt am CERN).

Doch längst sind noch nicht alle Fragen geklärt. So können die Forscher nicht exakt beschreiben, was genau geschieht, wenn Gluonen Verbindungen zwischen Quarks aufbauen und es zum Confinement kommt, zum festen Zusammenschluss von Quarks in größeren Teilchen wie den Protonen und Neutronen.

Diese Fragen gelten aber nicht nur für das Allerkleinsten – sie betreffen auch das Allergrößte: den Kosmos.



**Denn alle Materie** im Universum, die wir beobachten können, ist aus der Vereinigung von Quarks und Gluonen hervorgegangen. Diese Elementarteilchen unterliegen in fernsten Galaxien den gleichen Gesetzen wie in den Laboren der irdischen Forscher – oder in unserem Wohnzimmer. Und nichts wäre so, wie wir es kennen, wenn diese Gesetze auch nur ein winziges Bisschen abweichen würden.

Wer also ins Innerste der Atome vorstößt, um die dort waltenden Kräfte und Gesetzmäßigkeiten zu verstehen, der untersucht zugleich, warum das Universum so ist, wie es ist.

Die ALICE-Forscher gehen aber noch einen Schritt weiter: Sie beschwören die Millionstelsekunden nach dem Urknall herauf, in denen das All erst entstand. Jenen Wimpernschlag der Zeit, in dem das gesamte Universum aus fast nichts anderem bestand als einer Suppe von Quarks und Gluonen – sowie unfassbaren Mengen von Energie. Sie untersuchen also: wie das Universum wurde, wie es ist.



**Eigentlich fällt ein Blick** zurück in Richtung Urknall ganz leicht: Man muss bloß den Kopf heben und in den Himmel schauen. Denn wer in den Weltraum

**Ganz gleich, ob die  
Sonne oder eine  
Zelle unseres Körpers:  
Atomare Materie  
besteht zum Großteil aus  
reiner Energie**

schaut – etwa mit Satelliten oder Radioteleskopen –, der blickt nicht nur in den Raum, sondern auch zurück in die Zeit. Da Licht 299 792 458 Meter pro Sekunde zurücklegt, sind die von den entferntesten Sternen ausgesendeten Strahlungen, die wir auf der Erde auffangen können, auch die ältesten: Ihr Licht hat Äonen gebraucht, um bis zu uns zu gelangen. Sie zeigen deshalb das Universum, wie es vor langer Zeit gewesen ist.

Das Problem: Der Blick zurück reicht nur bis auf 380 000 Jahre an den Urknall heran – denn erst ab da konnte sich Licht frei im Raum ausbreiten. Was davor geschah, bleibt für immer unsichtbar.

Doch es gibt einen Weg, diese Wand in der Zeit zu überwinden. Wenn man die frühesten Phasen des Universums nicht *beobachten* kann, dann muss man sie halt noch einmal *erschaffen*.

Man muss Bedingungen herstellen, wie sie in der Sekunde null herrschten, man muss den Film zurückspulen und noch einmal ablaufen lassen.

Genau das ist es, was die Physiker am CERN machen: Sie erschaffen den Augenblick nach dem Urknall, dem „Big Bang“, neu, um ihn studieren zu können.



**Die Werkstatt des Big Bang** sind zwei Röhren in einem Tunnel, der bis zu 175 Meter unter dem Erdboden einen Ring mit knapp 27 Kilometer Umfang bildet.

Dies ist der LHC (*Large Hadron Collider*) des CERN, der 2008 eingeweihte, drei Milliarden Euro teure, weltgrößte Teilchenbeschleuniger, der auch von ALICE genutzt wird – einem von gleich vier großen Detektoren am LHC.

Teilchenbeschleuniger waren schon immer das Herz des CERN. Es sind Werkzeuge, wie sie wohl nur Physiker er-

denken können: zugleich genial einfach und ultrakompliziert.

Am Anfang der meisten Experimente steht eine simple Gasflasche. Darin ist Wasserstoff, das leichteste Element. Die Forscher lassen nun ein wenig Gas in einen Apparat strömen, der den Wasserstoff ionisiert – das heißt, er trennt die Elektronen von den nur aus einem Proton bestehenden, positiv geladenen Atomkernen ab. Dieses Proton wird in eine Röhre eingespeist, deren Abschnitte abwechselnd negativ und positiv geladen sind.

Da das Proton positiv geladen ist, wird es von einem Abschnitt mit negativem elektrischen Feld angezogen und rast dorthin. Doch sobald es die negativ geladene Zone der Röhre erreicht, wechselt dort das elektrische Feld und ist nun positiv geladen. Zugleich bekommt der nächste Abschnitt eine negative Ladung.

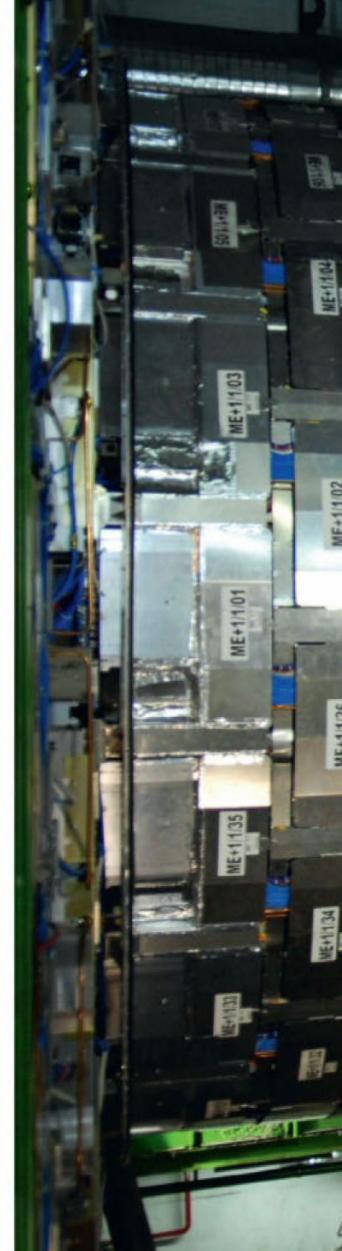
Die Folge ist eine Art Schieben und Zerren am Proton: Es wird von dem nun ebenfalls positiv geladenen Bereich fortgestoßen und rast zum folgenden Abschnitt, denn dessen negative Ladung zieht es ja an. Doch kaum erreicht es diese Zone, wechselt auch da die Ladung – während nun der nächste Abschnitt ein negativ geladenes Feld aufweist...

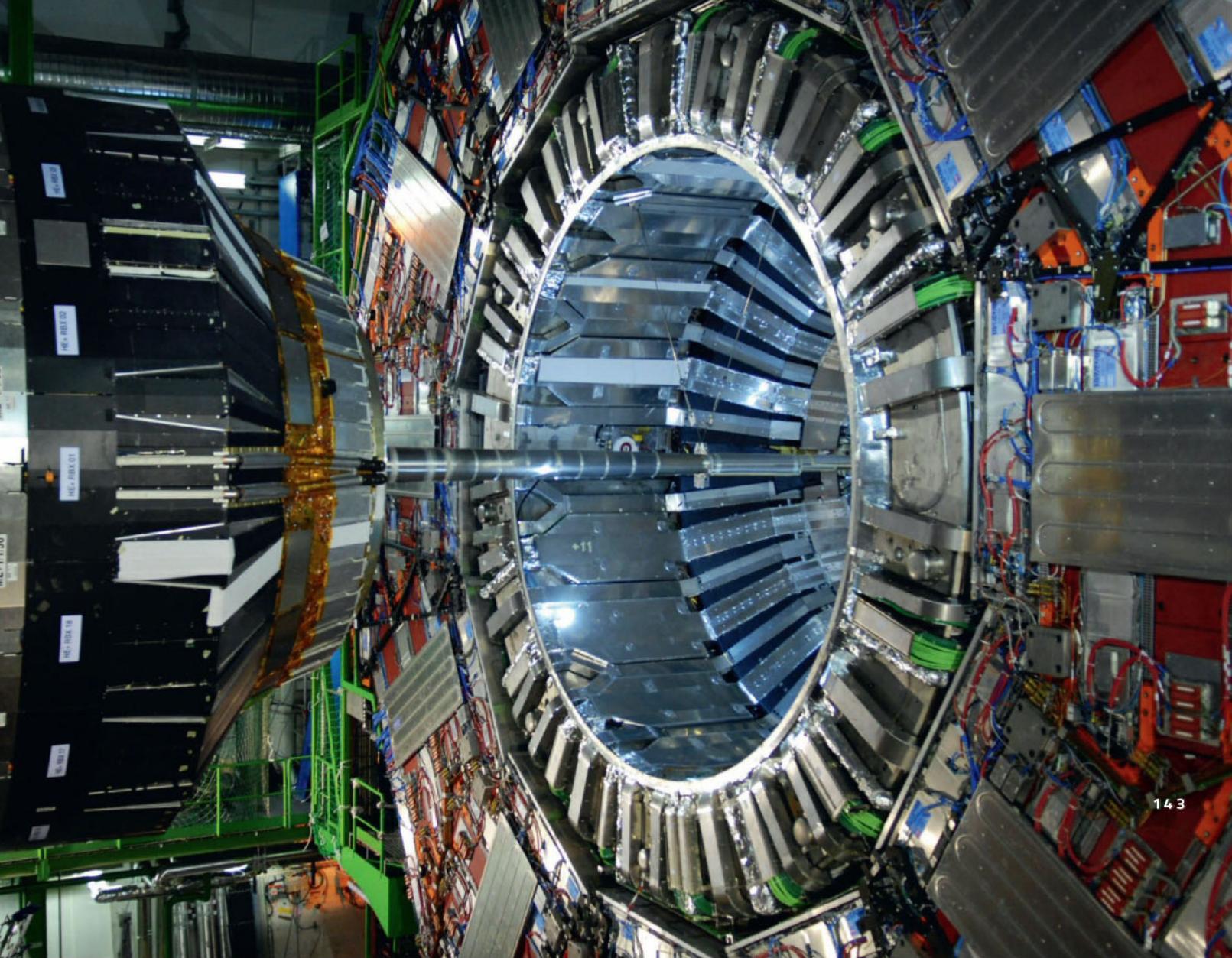
Das Proton wird also fortwährend durch entsprechend geladene elektrische Felder angezogen und wieder weitergestoßen – und so immer stärker beschleunigt. (In der Röhre herrscht ein nahezu perfektes Vakuum, sodass eine Kollision mit anderen Teilchen extrem unwahrscheinlich ist.)

Dieses – vergleichsweise einfache – Verfahren ist geeignet, um ein Teilchen durch eine gerade Röhre zu jagen, doch stößt man da relativ rasch an technische und finanzielle Grenzen. Bildet die Röhre hingegen einen Kreis, kann das Proton, einmal dort eingespeist, immer und immer schneller werden, wie in einem irre gewordenen Karussell.

Wie aber bringt man ein ultrakleines Teil, das am Ende 99,9999991 Prozent der Lichtgeschwindigkeit erreichen wird, auf eine Kreisbahn? Indem man zusätzlich um die Röhre Magnete baut, deren Felder das Proton von seinem geraden auf einen gebogenen Kurs zwingen.

Es sind also elektromagnetische Felder verschiedener Art, die Protonen antreiben und sie auf Kurs halten (und dazu noch zu einem fokussierten, in separate Pakete unterteilten Strahl bündeln).





### Die Fotofalle der Physiker

Der 14 000 Tonnen schwere CMS-Detektor, einer von vier großen Detektoren am Large Hadron Collider des CERN (siehe Seite 147), ist darauf ausgelegt, Higgs-Bosonen aufzuspüren – Teilchen, die der Materie Masse verleihen. Obendrein hoffen Forscher, mit dem 18 Meter hohen Gerät Hinweise auf die geheimnisvolle Dunkle Materie zu finden

Nur zu diesem Zweck umklammern beim LHC insgesamt 1232 Elektromagnete die Röhren. Jeder Magnet ist 15 Meter lang und wiegt 35 Tonnen, in den Niob-Titan-Kabeln ihrer Spulen fließt Strom mit einer Stärke von 12 000 Ampere.

Schickte man diese 12 000 Ampere durch normale Kabel, würden die sofort schmelzen. Im CERN sind die Elektromagnete deshalb supraleitend, das heißt, sie werden auf minus 271,3 Grad Celsius heruntergekühlt, knapp zwei Grad über dem absoluten Nullpunkt.

In dieser Kälte verlieren die Niob-Titan-Kabel ihren elektrischen Widerstand, der Strom läuft ungehemmt, die Leitun-

gen erhitzen sich nicht. Dafür werden die Magnete am LHC durch 10 000 Tonnen flüssigen Stickstoff vorgekühlt, ihre endgültige Temperatur erreichen sie mithilfe von 120 Tonnen flüssigen Heliums.

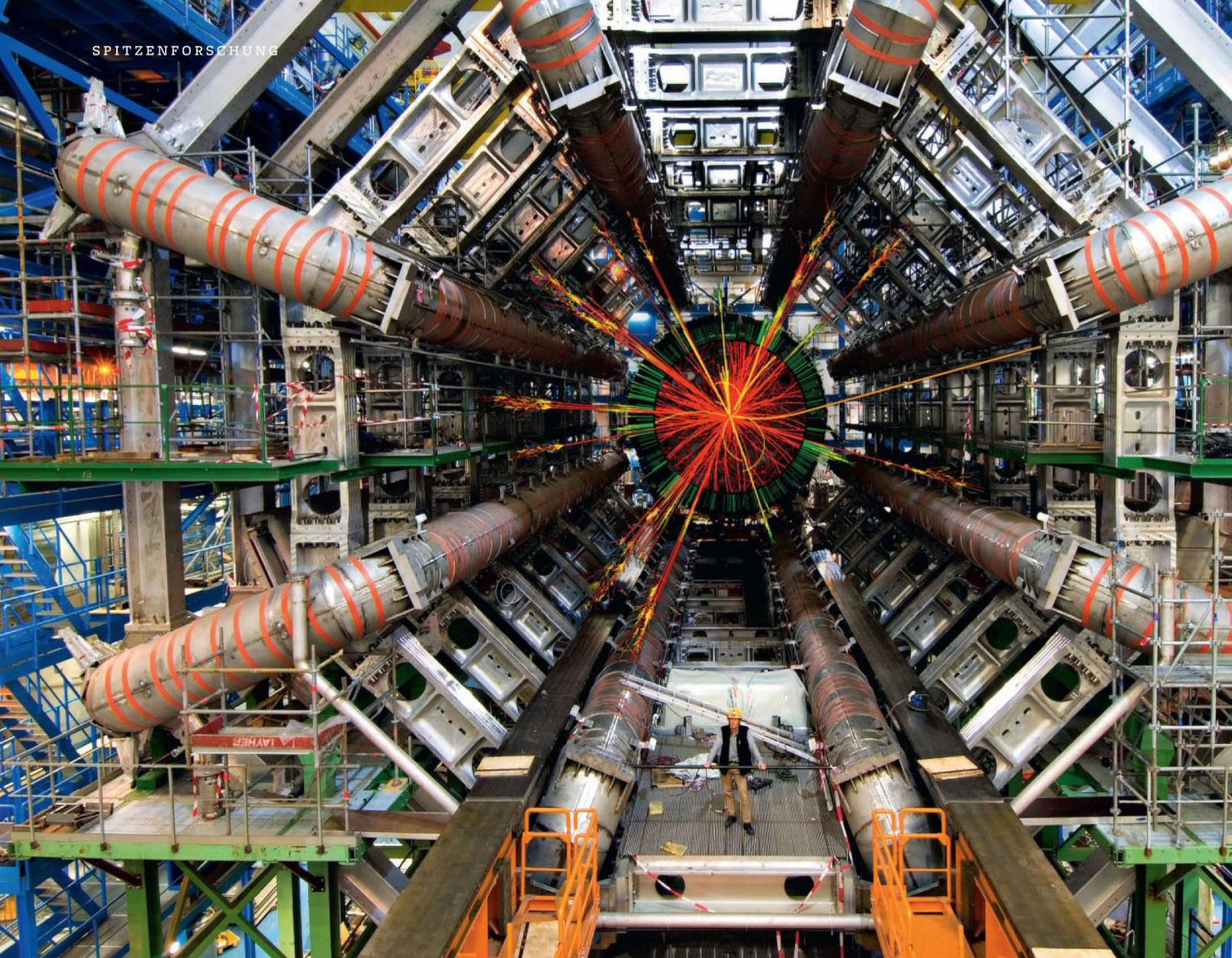


**Der Riesenring ist so empfindlich** wie ein kostbares Musikinstrument. So müssen beispielsweise die Verbindungsstücke zwischen den Magneten nach dem Ziehharmonika-Prinzip beweglich gebaut werden, denn während der Abkühlung ziehen sich die Magnete mit all ihren Strom- und Kühlleitungen um vier Zentimeter zusammen.

Röhre und Magnete stecken zudem ja tief im Jurafelsen. Der Mond aber walkt mit seiner Gravitation das Gestein genau so durch wie das Meer, wo er Ebbe und Flut auslöst. Im Felsen sind die daraus entstehenden Abweichungen selbstverständlich winzig klein – doch in der Welt der Elementarteilchen sind es immer noch beachtliche Distanzen.

Mithilfe weiterer Magnete muss der Protonenstrahl deshalb, je nach Mondstellung, immer neu justiert werden.

Und hin und wieder muss er auch neu eingestellt werden, weil sich das Gebirge selbst bewegt: Diese tektonische Hebung ist unfassbar langsam und ge-



### Blitze, die nur eine Milliardstel Sekunde andauern

Der ATLAS-Detektor am CERN ist 46 Meter lang. Riesige Magnetspulen in den acht Röhren umschließen einen Teil der Anlage. Die Illustration in diesem Foto (Mitte) zeigt, wie Partikel nach einer Kollision zu allen Seiten wegstieben

ring und doch so stark, dass sie den Ring über die Jahre hin ganz leicht deformiert.

Nur an vier Stellen weitert sich der Tunnel des LHC zu großen Kavernen. Dort stehen vier Detektoren, darunter ALICE. Und dort finden die rasenden Protonen ihr Ende.



**Um die Versuche vorzubereiten**, speisen Wissenschaftler und Techniker zuerst ein wenig ionisierten Wasserstoff ins System. Die Protonen gelangen dabei zunächst in einen geraden (oder linearen) Teilchenbeschleuniger aus der Frühzeit von CERN.

Nicht viele Protonen passen in diesen ersten Vorbeschleuniger, sie werden

auch nur auf vergleichsweise bescheidene Geschwindigkeiten hochgejagt: 31 Prozent der Lichtgeschwindigkeit, also rund 335 Millionen km/h.

Haben die Teilchen erst einmal genügend Fahrt aufgenommen, werden sie von Magneten in einen zweiten Vorbeschleuniger gelenkt, einen Kreisbeschleuniger mit 50 Meter Durchmesser.

Und auf diesen ersten Kreis folgen dann noch zwei weitere.

Man muss sich das so vorstellen, als würden immer mehr Kirmesgäste von langsamem, kleinen Karussells auf schnellere, größere überspringen.

Nach etwa 20 Minuten ist der LHC so über mehrere Vorbeschleuniger nach

und nach gefüllt worden. Durch jede der beiden Röhren rasen nun 2808 Päckchen mit jeweils etwa 115 Milliarden Protonen – zwei haarfeine Strahlen aus dahineilenden Teilchen.

Genau bei den vier Detektoren werden die Strahlen so gekreuzt, dass jeweils zwei Päckchen miteinander kollidieren: 115 Milliarden Protonen aus einer Richtung, 115 Milliarden aus der Gegenrichtung, jedes mehr als eine Milliarde km/h schnell, ein Frontalcrash wie bei zwei fehlgeleiteten ICEs.

Und nichts geschieht.

Fast nichts. Die Protonen sind so klein, dass selbst dann, wenn viele Milliarden in Haarsbreite gegeneinander-



rasen, die meisten einfach aneinander vorbeifliegen. Aber nicht alle.



**Denn bei jeder Kollision** der 115-Milliarden-Pakete treffen doch ein paar wenige Protonen aufeinander: Ungefähr 20 Paare zerplatzen in diesen Crashs, und dabei werden zahllose Teilchen in alle Richtungen davongeschleudert.

Jeder dieser Zusammenstöße ist wie eine winzige Explosion und nach 0,000 000001 Sekunden schon wieder vorbei – dann sind alle Teilchen durch den Detektor gerauscht.

Zwanzig ultrakurze Kollisionen bei 230 Milliarden Protonen – das klingt we-

nig, bis man anfängt zu rechnen. Jedes Protonenpaket ist so schnell, dass es pro Sekunde 11 245-mal durch den LHC rast.

So viele Gelegenheiten hat es also in einer einzigen Sekunde, an einem Detektor gegen ein anderes Protonenpaket zu krachen. Und ein Protonenstrahl wird unter normalen Bedingungen viele Stunden lang durch den LHC gejagt.

Diese möglichen Kollisionen sind das Geschäftsmodell von CERN – der Grund, weshalb Physiker aus aller Welt nach Genf pilgern.

Denn die winzigen Teilchen machen unter normalen Bedingungen nur sehr selten irgendetwas Interessantes: Elektronen umkreisen Atomkerne, in denen Protonen und Neutronen verklumpt sind, die wiederum aus Quarks und Gluonen bestehen. Punkt.

Will man in dieser Mikrowelt etwas analysieren, dann muss man sie durcheinanderwirbeln; erst dann geschieht früher oder später irgendetwas, was ein Physiker beobachten kann.

Bis zu 600 Millionen Kollisionen provozieren die Wissenschaftler so in den großen Detektoren am LHC – pro Sekunde. Das ist dann doch genug, um die Geheimnisse des Universums zu studieren.



**Die meiste Zeit im Jahr** jagen die Forscher und Techniker Protonen durch den LHC. Für insgesamt einen Monat aber füllen sie ihn mit Blei-Ionen. (Und für einige Monate bleibt der Riesenring aus verschiedenen Gründen inaktiv.)

Dafür wird eine kleine Menge Blei erhitzt, bis es verdampft. Aus dem Bleegas werden dann sämtliche Elektronen abgezogen, wobei die zunehmend positiv ionisierten Atome auch schon eine Reihe von Vorbeschleunigern durchlaufen. Schließlich sind nur noch die Blei-Atomkerne – 82 Protonen und 126 Neutronen – übrig, und die werden ganz ähnlich in den LHC eingebracht wie die Wasserstoff-Protonen.

Die Blei-Ionen sind allerdings mehr als 200-mal so schwer wie die Wasserstoff-Protonen; es sind also vergleichsweise gewaltige Brocken, die mit an nähernder Lichtgeschwindigkeit aufeinander zurasen – und dabei eine weitaus höhere Bewegungsenergie aufnehmen als ein einzelnes Proton.

Und wenn gleich Hunderte Protonen und Neutronen zum selben Zeitpunkt zusammenstoßen, zerplatzen sie nicht bloß

**Über manche Rätsel  
der Physik möchte  
man gar nicht intensiv  
nachdenken: um  
nicht dem Wahnsinn  
zu verfallen**

wie zwei kollidierende Wasserstoff-Protonen. Im Moment der Kollision werden die Kernbausteine der aufeinanderprallenden Blei-Ionen mit gigantisch hoher Energie so dicht zusammengepresst, dass Außergewöhnliches geschieht: Die Quarks der Protonen und Neutronen überwinden das Confinement, also die feste Bindung durch die starke Kernkraft.

Doch die Teilchen zerstieben nicht einfach in verschiedene Richtungen – vielmehr kollidieren sie nun auch miteinander, und es entsteht ein Quark-Gluonen-Plasma, eine Art winziger Tropfen, in dem sich Quarks und Gluonen – bei einer unfassbaren Temperatur von etlichen Billionen Grad Celsius – frei im Raum bewegen, vergleichbar mit den Molekülen einer Flüssigkeit.

Vor allem aber schwimmen darin nicht nur die Bruchstücke der Blei-Kerne herum. Wie bei jeder Beschleuniger-Kollision entstehen auch zahllose neue Teilchen. Woher die kommen? Als Laie möchte man meinen: aus dem Nichts.

Ein Physiker hingegen konstatiert, dass sich ein Teil der ungeheuren Energie der Crashs in Masse umwandelt – die unter bestimmten Bedingungen mit bestimmten Wahrscheinlichkeiten die Form bestimmter Teilchen annimmt.

In dem Quark-Gluonen-Plasma finden sich daher nicht nur jene Up- und Down-Quarks, die als Bausteine Protonen und Neutronen bilden, sondern auch Quarks mit bizarren Namen wie Strange- oder Charm-Quark und ebenso bizarren Eigenschaften: Ein Charm-Quark etwa gleicht zwar einem Up-Quark – aber seine Masse ist mehrere Hundert Mal größer.

Die Zeit, in der das Quark-Gluonen-Plasma im LHC besteht, ist fast unsagbar kurz – sie liegt im Bereich von Quadrillionstelsekunden. Gleichwohl sind sich

**Am Ende meldet jedes  
Detektor-Element  
durch einen einfachen  
elektrischen Impuls,  
dass ein Teilchen es  
getroffen hat**

die Physiker sicher: Es existiert. Und genau darauf richten sich die Instrumente von ALICE.



**Zwar registrieren** alle vier Detektoren am LHC fast alle Arten von Kollisionen, doch allein ALICE ist auf die besonders heftigen Blei-Ionen-Crashes spezialisiert. Nur hier trennen wenige Meter die supraleitenden Magnete, die so kalt sind, wie es kälter kaum geht, von dem Plasma, das vielleicht so heiß ist wie kaum ein zweiter Punkt im Universum – und, in gewisser Weise, auch so alt wie kein zweiter Punkt.

Denn in ALICE entzündet sich ein Höllenfeuer, wie es seit 13,8 Milliarden Jahren nicht mehr gelodert hat.

Das Quark-Gluonen-Plasma ist nämlich ein Zustand, so vermuten Physiker, wie er in den ersten Millionstelsekunden nach dem Urknall geherrscht hat.

Denn für einen winzigen Augenblick bestand das gesamte Universum damals ausschließlich aus diesem Plasma, es war so heiß, dass sich noch nicht einmal die Bausteine der Atomkerne bilden konnten (siehe Seite 24).



**Der künstlich erzeugte** Plasma-Tropfen expandiert nach der Kollision, er bläht sich auf und kühlte dabei ab – bis zu einer kritischen Marke von etwa zwei Billionen Grad. Die Energie der Teilchen reicht bei dieser Temperatur nicht mehr aus, die starke Kernkraft zu überwinden.

Quarks und Gluonen vereinen sich zu neuen Gebilden – und so werden Tausende neue Partikel erzeugt, die, der Expansionsrichtung folgend, nach allen Seiten fortgeschleudert werden, hinein in die gewaltigen, ringförmig um die Röhren angeordneten Detektoren von ALICE.

Bei den Kollisionen der Blei-Ionen entstehen vielerlei neue Teilchen. Manche sind schwerer als andere, manche sind geladen, andere nicht. Sie dringen deshalb unterschiedlich weit und auf unterschiedlichen Bahnen in die meterdicken Detektorschichten von ALICE ein, ehe sie ihre Energie verlieren.

Bei Detektoren wie ALICE bewirkt zudem ein starkes magnetisches Feld, dass die geladenen Partikel in ihrer Bewegung abgelenkt, ihre Bahnen also in charakteristischer Weise gekrümmmt werden.

Deshalb sind die vier Detektoren am LHC so groß: Denn um den Weg der winzig kleinen Teilchen nachzuvollziehen, bedarf es mehrerer Meter von Detektorenlagen, die ein Partikel Schicht für Schicht durchdringt. (Die in den Crashes zuweilen ebenfalls erzeugten Neutrinos rasen jedoch ungebremst hindurch, ohne Spuren zu hinterlassen; siehe Seite 94).

„Wir Physiker“, sagt Alexander Kalweit, „sind wie Polizisten, die zur Unfallstelle gerufen werden. Den Crash zweier Autos haben wir nicht gesehen. Aber wir sehen die überall herumliegenden Teile und rekonstruieren daraus, wie der Unfall abgelaufen sein muss.“



**Die vier Detektoren** sind dabei so etwas wie Fotofallen. Ihre Aufnahmegeräte umschließen in mehreren Hüllen die Röhre, in der die Teilchen kollidieren. Die Geräte nutzen unterschiedliche Aufnahmetechniken, manche sind weniger hochauflösend konstruiert, zwischen manchen Detektorschichten liegen zudem Materialmatten, deren Aufgabe nur darin besteht, bestimmte Gruppen der rasenden Teilchen abzubremsen oder ganz abzufangen.

Am Ende meldet jedes einzelne Detektor-Element nur durch einen elektrischen Impuls, dass ein Teilchen es getroffen hat, mehr nicht. Ein Computer setzt aus den Messwerten aller Detektoren dann ein Bild zusammen, auf dem zu sehen ist, wo ein Teilchen zum ersten Mal auf eine Aufnahmeschicht getroffen ist, welche Bahn es geflogen ist, mit welcher Wucht es in den Detektor gerast und wie weit es in welcher Zeit gekommen ist.

So entsteht ein Bild wie bei einem Feuerwerk: zahllose Spuren von Trümmern, die auf Bahnen unterschiedlicher Länge und Krümmung nach allen Seiten fortgeschleudert worden sind. Anhand dieser Bahnen können Forscher schlie-

ßen, welche Teilchen dabei wohl entstanden sein müssen.

Um bei allen 600 Millionen Kollisionen pro Sekunde sämtliche Signale der Detektoren zu registrieren, müssten die mit ihnen gekoppelten Computer etwa 600 Terabyte pro Sekunde abspeichern, was kein Rechenzentrum dieser Welt leisten könnte. Physiker haben die Computer deshalb nach bestimmten Kriterien so programmiert, dass sie nur einige Hundert Crashes pro Sekunde aufzeichnen und verarbeiten.

So unsinnlich also, in Computergrafiken und Trümmerspuren und Messwerten, blicken Wissenschaftler zurück zum Anbeginn der Zeit.



**Es liegt eine gewisse** Ironie in der Tatsache, dass die Forschung am CERN bislang mehr Fragen als Antworten geliefert hat. Nach früheren Berechnungen der Physiker etwa sollte es zwar bei der Kollision zweier Blei-Ionen zu einem Quark-Gluonen-Plasma kommen, nicht aber beim Crash zweier Protonen. Die Messwerte von ALICE aber legen nun nahe, dass auch bei einzelnen Protonen-Kollisionen vermutlich für einen winzigen Sekundenbruchteil ein Plasma entsteht. Wieso, weiß bislang niemand.

ALICE hat über die Jahre die Spuren von Milliarden Teilchen aufgefangen – aber stets solche, welche die Physiker zuvor schon kannten (anders als bei den anderen Experimenten des CERN; so wurde 2012 das bereits zuvor theoretisch vorausgesagte Higgs-Boson – das der Materie ihre Masse verleiht – an zwei anderen Detektoren des LHC entdeckt, eine spektakuläre Leistung). Solche Erfolge sind bei ALICE bislang ausgeblieben.

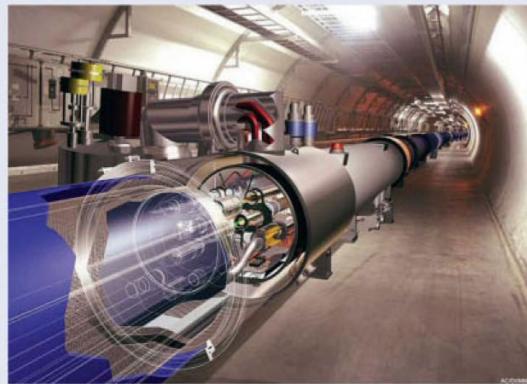
Doch darauf haben es die Wissenschaftler dort auch gar nicht angelegt. Ihnen geht es vielmehr darum, genau auszuwerten, mit welcher Häufigkeit die bekannten Teilchen nachgewiesen werden, um aus der statistischen Verteilung dann Rückschlüsse über die Kollisionen zu ziehen – und über das dabei entstandene Quark-Gluonen-Plasma.

Stück für Stück arbeiten sie auf diese Weise daran, die etablierten Theorien über die kleinsten Partikel und die Geburt des Universums endlich auch in Versuchen zu belegen und zu präzisieren: um auf diese Weise besser zu verstehen, wie sich im Plasma große Mengen freier

## Eine große Maschine für das Allerkleinste

Mithilfe mächtiger Magnete werden im Large Hadron Collider bei Genf winzige Partikel auf immer schnellere Kreisbahnen gezwungen

So komplex die Technik auch ist, das Prinzip von Teilchenbeschleunigern wie dem Large Hadron Collider (LHC) des CERN ist recht simpel: Partikel wie etwa Atomkerne kreisen mit annähernder Lichtgeschwindigkeit in gegenläufiger Richtung in einem Ring. An bestimmten Stellen werden die Partikelströme frontal aufeinandergelenkt, sodass einige der Teilchen mit hoher Energie zusammenstoßen. Besondere Detektoren zeichnen auf, welche Partikel bei diesen Kollisionen neu entstehen.



### ABLENKER

Im LHC lassen 1232 je 15 Meter lange Magnete (blau) die Teilchen in Kurven fliegen. Die Illustration eröffnet den Blick auf die Versorgungsleitungen der Magnete und die zwei Strahlrohre



147

**RIESENRING:** Mit 27 Kilometern Umfang ist der LHC der größte Teilchenbeschleuniger der Welt. An vier Stellen können die Partikelstrahlen gekreuzt werden. Vier große Detektoren – CMS, LHCb, ATLAS und ALICE – umgeben die Kollisionspunkte und sind auf den Nachweis von jeweils anderen Partikeln spezialisiert

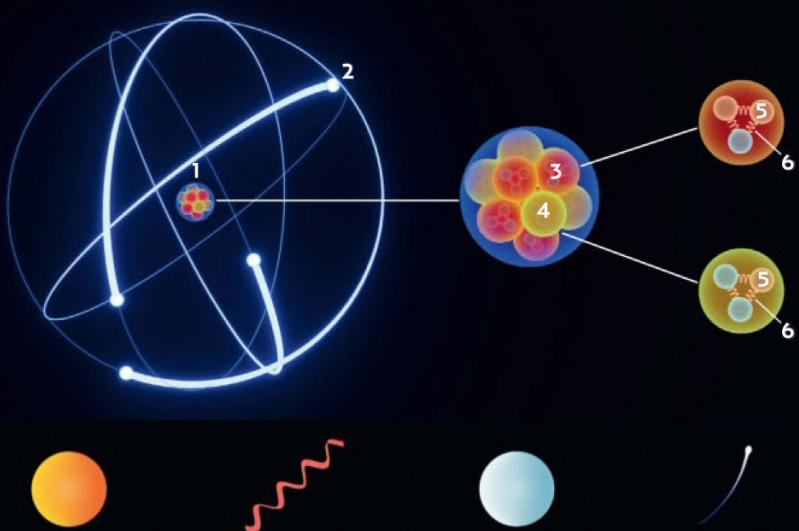
## Die Anatomie des Allerkleinsten

Unsere Welt ist aus winzigen Atomen aufgebaut – und die wiederum bestehen aus noch kleineren Teilen

Die uns vertraute Materie – Steine, Luft, Wasser, auch unser Körper – ist aus unzähligen Atomen zusammengesetzt. Diese winzigen Bausteine bestehen aus einem positiv geladenen Kern (1), um den negativ geladene Elektronen (2) schwirren (hier ein vereinfachtes Modell). In dem Kern ballen sich neben positiven Protonen (3) meist auch ungeladene Neutronen (4). Jedes Neutron und jedes Proton besteht wiederum aus drei Elementarteilchen.

teilchen, den Quarks (5). Die werden von den Vermittlern der sogenannten starken Kernkraft zusammengehalten: den Gluonen (6). Neben den Grundbausteinen der Atome gibt es noch weitere Elementarteilchen (siehe Seite 149). So treten etwa W-Bosonen, Überträger der schwachen Kernkraft, für einen kurzen Moment in Erscheinung, wenn Kernbestandteile zerfallen. Wieder andere Teilchen, die Neutrinos, reagieren nur extrem selten mit Atomen.

148



Zwei **Up-Quarks**  
bilden mit einem  
Down-Quark ein  
Proton, das Teil  
des Atomkerns ist

Das **Gluon** vermittelt die starke Kernkraft und hält Up- und Down-Quarks zusammen

Zwei **Down-Quarks** und ein Up-Quark bilden ein Neutron, einen Kernbaustein

Das negative **Elektron** umkreist den positiv geladenen Kern und komplementiert das Atom.

Quarks und Gluonen verhalten. Um exakter zu bestimmen, bei welcher Temperatur das Plasma quasi einfriert, die Teilchen sich also zu festen Zweier- oder Dreiergruppen zusammenschließen. Und um genauer nachzuvollziehen, wie die (außerhalb des Plasmas) unüberwindlichen Bindungen zwischen den Quarks im Einzelnen zustande kommen.

An den Urknall sind die Physiker schon sehr nahe herangekommen. Bei den großen Rätseln des Alls ist aber auch der beste Detektor blind – noch jedenfalls.

**Die Detektoren vom CERN** teilen mit allen technischen Großprojekten ein Dilemma: Ist das Gerät endlich fertig, ist

es eigentlich schon veraltet. Denn stets werden in der Zwischenzeit neue, bessere Komponenten entwickelt, die beim Bau nicht berücksichtigt werden können.

ALICE erhält daher regelmäßig Upgrades, so auch im Frühjahr 2017 – weshalb es überhaupt möglich war, zu der Maschine hinunterzusteigen und ihre geöffneten Eingeweide zu bestaunen. Und an der nächsten, für 2019/20 geplanten Grunderneuerung wird auch schon gebaut: Dann werden noch viel empfindlichere Detektoren in ALICE eingefügt.

Einige dieser Detektoren werden in einem Reinraum gestestet, einer Halle, in der möglichst staubfrei gearbeitet wird.

**Jan Fiete Große-Oetringhaus** zwängt sich dort gerade in einen weißen Ganzkörperoverall, in Schutzschuhe, Gummihandschuhe und Gesichtsmaske.

In einem Testgerät prüft er die zukünftigen Detektoren von ALICE: bronzeschimmernde Siliziumchips mit jeweils  $512 \times 1024$  Pixeln, jedes so groß wie ein Keks, dabei aber so dünn wie eine Folie.

Es werden die empfindlichsten Detektoren am ganzen LHC sein. Mit dem bloßen Auge sehen die eingefügten elektrischen Kontakte wie weißliche Staubpunkte aus. Das Gitter winziger Leitungen, das sich von ihnen aus durch das Silizium legt, ist derart fein, dass es nur unter Vergrößerung sichtbar wird.

Große-Oetringhaus testet mit der Maschine jedes einzelne Pixel aus. Funktionieren alle (oder zumindest so gut wie alle), wird der Chip behalten, ansonsten wird er aussortiert.

Insgesamt 24120 dieser Chips sollen in ALICE verbaut werden. Sie werden sich dann, in sieben Lagen angeordnet, ganz eng um die LHC-Röhre im Innern legen, ganz nah am Plasma: eine hochempfindliche Digitalkamera mit 12,6 Milliarden Pixeln für das Feuer nach dem Urknall – die in der Lage sein wird, 100 Mal mehr Blei-Ionen-Kollisionen aufzuzeichnen als bislang und zudem noch weit genauere Informationen über jedes einzelne Teilchen zu liefern.

Ihre wichtigste Aufgabe: möglichst viele Charm-Quarks aufzufangen.

Genauer gesagt: Zerfallsprodukte bestimmter Verbindungen, die die kurzebigen Charm-Quarks für einen winzigen Moment mit anderen Quarks (siehe Kasten rechts) eingehen. Denn diese Partikel

## Das System der Partikel

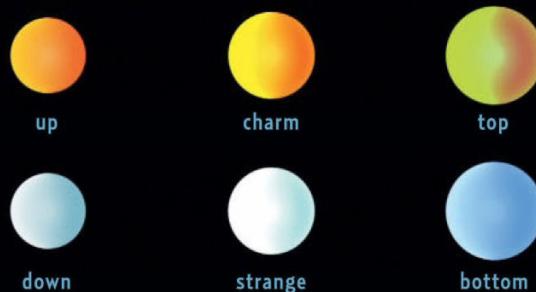
Das Standardmodell der Elementarteilchenphysik beschreibt die kleinsten Bausteine der Materie und ihre Wechselwirkungen. Damit lassen sich viele Phänomene der Mikrowelt erklären

Physiker entdeckten im 20. Jahrhundert, dass Atome aus verschiedenen Partikeln bestehen und es noch zahlreiche Teilchen jenseits der atomaren Materie gibt. Ordnung in diese Vielfalt bringt das Standardmodell der Elementarteil-

chenphysik, das die nach heutigem Wissensstand nicht weiter teilbaren Materie- teilchen (unten links) umfasst und mit- hilfe der Kraftteilchen (unten rechts) drei der vier Grundkräfte beschreibt. Zu jedem Teilchen gibt es noch ein Antiteilchen

(hier nicht gezeigt), etwa ein Antiquark. Kollidieren die beiden, zerstrahlen sie in Energie. Noch aber gibt es Wissens- lücken. Die versuchen Forscher durch Experimente an Teilchenbeschleunigern wie dem LHC des CERN zu schließen.

**Quarks:** Sie gehören zu den Materie- teilchen und sind elektrisch geladen. Up- und Down-Quarks kommen in den Kernbausteinen der Atome vor. Die anderen vier Sorten existieren nur für Sekundenbruch- teile und zerfallen dann in andere Partikel. Bei extrem energiereichen Kollisionen in Teilchenbeschleunigern können auch diese Quarks erzeugt und anhand ihrer Zerfallsprodukte nachgewiesen werden.



**Negative Leptonen:** Sie tragen alle eine negative elektrische Ladung. Die leichten Elektronen umkreisen die Kerne von Atomen. Myonen und Tauonen sind dagegen deutlich schwerer und instabil. Myonen entstehen etwa bei Teilchenkollisionen in der Erdatmosphäre.



**Neutrinos (neutrale Leptonen):** Diese elektrisch neutralen Teilchen haben eine äußerst geringe Masse – die des Elektron-Neutrinos ist millionenfach kleiner als jene des Elektrons. Solche Neutrinos entstanden unmittelbar nach dem Urknall, und sie bilden sich auch heute noch beständig, etwa bei den Kernfusionen in Sternen.



**Kraftteilchen:** Durch diese auch »Eichbosonen« genannten Partikel entfalten die elektromagnetische Kraft, die starke Kernkraft und die schwache Kernkraft ihre Wirkung. Dem Standardmodell zufolge bestimmt der Austausch dieser Kraftteilchen, wie sich sämtliche Materie- teilchen in der Mikrowelt zueinander verhalten.



erlauben die besten Rückschlüsse auf die Zustände im Quark-Gluonen-Plasma.

Vermutlich wird der Chip, den Groß-Oetringhaus gerade testet, in vier Jahren die Spur solcher Teilchen aufzeichnen – nicht einmal oder 100-mal, sondern millionenfach. Und vielleicht werden Messwerte auf einer Siliziumscheibe mitten in ALICE dazu beitragen, ein Rätsel des Universums zu lösen.

Aber nur dann, wenn nicht jemand anderes am CERN schneller ist.



**Denn das LHC beschleunigt** nicht nur Teilchen, sondern auch Teilchenphysiker. Es ist ein 27 Kilometer langes Hamsterrad, in dem sich etliche Hundert Genies wie verrückt abstrampeln.

Schließlich stehen hier ja vier große Detektoren, neben ALICE noch der LHCb (*Large Hadron Collider beauty*), der CMS (*Compact Muon Solenoid*) und der ATLAS (*A Toroidal LHC Apparatus*). Jeder Detektor ist anders aufgebaut, jeder wird von einem anderen Team betreut – aber alle suchen im gleichen Augenblick und im gleichen Protonenstrahl nach dem Wesen der allerkleinsten Teilchen.

150

Der Nachweis des Higgs-Bosons (siehe auch Seite 37) etwa gelang nach sechs Billiarden Kollisionen, von denen in ATLAS und im CMS je fünf Milliarden ausgewertet worden waren – von denen schließlich rund 400 mögliche Spuren des Teilchens zeigten.

Wer wird die nächste vergleichbare Entdeckung machen? Die Physiker bei ALICE? Die Forscher bei einem der anderen Detektoren? Und was geschieht, wenn ein Detektor Spuren aufzeichnet, die anderen jedoch nicht? Findet der eine Detektor möglicherweise gerade dort Teilchen, wo die anderen drei aus technischen Gründen blind bleiben? Oder handelt es sich um einen Messfehler oder eine Fehlinterpretation von Ergebnissen?

Immer wieder müssen die Physiker, die an den vier Detektoren arbeiten, deshalb in Konferenzen um die richtigen Interpretationen ringen. Müssen sich einige, ob eine bestimmte Beobachtung mit hoher Wahrscheinlichkeit etwas Neues zeigt oder nicht. Müssen versuchen, Ergebnisse eines Detektors irgendwie doch auch im anderen zu reproduzieren, um wirklich sicherzugehen. Müssen ihre Berechnungen und theoretischen Voraussagen an die Wirklichkeit anpassen.

Denn Physik ist Teamwork, ein Ping-pong aus Präsentation und Kritik, Verbesserung und Bestätigung, ist eine Form, an der viele Wissenschaftler knobeln, ist ein Experiment, an dem Tausende mitwirken. Der Nachweis des Higgs-Bosons zum Beispiel war einer der größten Erfolge der Physik seit Jahrzehnten – aber man könnte nicht mit dem Finger auf einen einzigen Forscher zeigen und sagen: „Der hat's entdeckt.“ Für seinen experimentellen Nachweis wird es deshalb keinen Physik-Nobelpreis geben, denn der wird nicht an Kollektive verliehen.

Und so arbeiten Kalweit und Groß-Oetringhaus wie in einem großen Getriebe. Von Kaffee gestärkt, arbeiten sie nachts, denn dann wird man so selten gestört. Sie arbeiten am Wochenende, denn im CERN kannst du zu jeder Zeit etwas zu essen bekommen und zur Not auch Zahnpasta aus dem Automaten. Sie arbeiten über Jahre und wissen doch, dass die Arbeit niemals aufhören wird.



**Alexander Kalweit wurde** 1984 geboren – da waren gerade die ersten Entwürfe für den LHC vorgelegt. Seit viereinhalb Jah-

ren forscht er nun selbst bei ALICE. Doch eigentlich, sagt er, müssten sie an einem noch größeren Teilchenbeschleuniger arbeiten. Und tatsächlich denken sie beim CERN längst über einen Ring von mindestens 80 Kilometer Umfang nach.

Sie müssten eben noch mehr Energie in einen Teilchenbeschleuniger hineinstecken, sagt Kalweit, müssten noch mehr Partikel noch viel häufiger kollidieren lassen, mehr und mehr und immer noch mehr. Ausgerechnet die Wissenschaftler, die sich mit dem Allerkleinsten befassen, träumen also vom Gigantismus.

Sie lassen Abermilliarden Protonen zerplatzen, sie pumpen den Strom gigawattstundenweise in ihre Anlagen, sie erschaffen die heißesten und kältesten Orte im Universum, sie zwingen Monstermaschinen in Felshöhlen, bestückt mit Tausenden ultraauflösender Chips, die in einer Sekunde größere Datenmengen liefern als alle Bibliotheken der Welt.

Wenn der 27-Kilometer-Ring unter dem Fuß des Jura nicht mehr reicht, wenn die Kollisionen von Protonen oder Blei-Ionen keine durchschlagenden Erkenntnisse erbringen: Vielleicht muss man andere Teilchen mit noch mehr Energie doch wieder, wie früher, durch einen Linearbeschleuniger jagen? Irgend ein Gerät, das genial einfach ist und doch wahnsinnig kompliziert? In dem sie die Higgs-Teilchen viel genauer untersuchen können? In dem sie so vielleicht dem Geheimnis der Gravitation, ja aller Grundkräfte auf die Spur kommen? In dem sie auch, endlich, die Dunkle Materie (siehe Seite 130) erhellen können?

Ideen dafür gibt es bereits. FCC, ILC und CLIC heißen die Projekte. Kalweit erzählt von ihnen begeistert, auch wenn er weiß, dass diese Super-Super-Teilchenbeschleuniger wohl frühestens 2030 oder 2040 in Betrieb gehen werden.

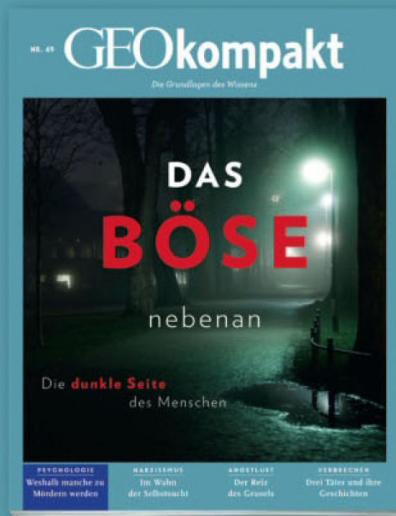
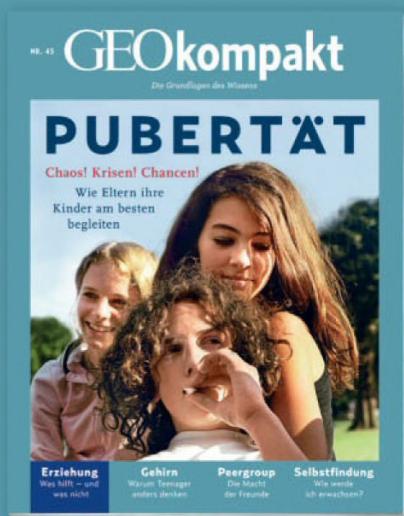
Der Urknall liegt dann wieder eine Winzigkeit weiter entfernt in der Vergangenheit, und manche der Forscher, die dann mit Quarks und Gluonen, Myonen und Bosonen und den anderen seltsamen Teilchen arbeiten werden, sind heute noch nicht einmal geboren.

Aber die entscheidende, so uralte Frage wird dann vielleicht immer noch unbeantwortet sein:

Woraus besteht das Universum? •

**CAY RADEMACHER**, Jg. 1965, ist Autor im Team von GEOEPOCHE.

# Man kann nie genug wissen. GEO kompakt



Alle  
Titel auch  
mit DVD  
erhältlich

Heft verpasst? Diese und weitere Produkte können Sie im **GEO Shop** bestellen.  
Telefonisch unter 040/5555 89 90 und im Internet auf [www.geoshop.de](http://www.geoshop.de).

**GEO** Shop

# SO BLEIBEN SIE BEWEGLICH

Wie wir Muskeln, Knochen und Gelenke gesund erhalten



Das Heft enthält fünf ausführliche Dossiers mit allem Wichtigen zu den Themen Rücken, Knie, Hüfte, Schulter sowie Hand und Fuß: die besten Therapien, wirksame Vorsorge – dazu konkreter Expertenrat

152



**D**as Zusammenspiel von mehr als 200 Knochen, über 600 Muskeln und rund 200 Gelenken lässt uns rennen und springen, klettern und schwimmen, filigran greifen und kraftvoll zupacken. Kaum etwas schränkt uns empfindlicher ein als der Verlust dieser Mobilität – weil sich Gelenke entzünden, Knorpel schwindet, Knochen porös werden oder Bänder reißen.

GEO WISSEN GESUNDHEIT erklärt, wie wir unseren Körper beweglich halten, welche Beschwerden an Knochen, Muskeln und Gelenken drohen und was Mediziner und andere Therapeuten tun können, um sie zu lindern – von sanften Bewegungsübungen bis hin zum Einsatz von Gelenkprothesen. Das Magazin präsentiert zudem wissenschaftliche Erkenntnisse über die Heilkraft von Ayurveda und Yoga – und klärt über die richtige Ernährung bei rheumatischen Erkrankungen auf.

**GEO WISSEN GESUNDHEIT** »Musken, Knochen, Gelenke« (180 Seiten) kostet 11,50 Euro; mit DVD (»Beweglich von Kopf bis Fuß!«) 16,50 Euro. Weitere Themen: Faszien • Motivation • Test: Finden Sie heraus, wie beweglich Sie sind

# KONFLIKTE BESSER BEWÄLTIGEN

Von der Kunst, richtig zu streiten

**D**ie Sehnsucht ist wohl in jedem verankert: nach einem Leben ohne Konflikte. Doch kaum einem gelingt das. Ob in der Partnerschaft, der Familie oder am Arbeitsplatz: Wo Menschen aufeinandertreffen, flammt hin und wieder Streit auf. Doch wie gelingt es, eine Eskalation zu vermeiden? Was ist das Geheimnis der Schlagfertigkeit? Wie lernen wir, auch einmal Nein zu sagen? Welche Rolle spielen Gefühle in einem Zerwürfnis? Und wie finden wir nach einer Fehde wieder zueinander? Antwort auf diese Fragen gibt die neue Ausgabe von GEO WISSEN. Zudem enthält sie ein umfangreiches Dossier mit wissenschaftlich fundierten Selbsttests, um die eigene Konfliktfähigkeit am Arbeitsplatz und in der Partnerschaft besser einzuschätzen – und zu verbessern.



**GEO WISSEN** »Die Kunst zu streiten« (164 Seiten) kostet 9,50 Euro, mit DVD (»Gelassenheit lernen«) 16,50 Euro. Weitere Themen: Kindererziehung • Vergebung • Mediation

## EINFACH GESUND GENIESSEN

Die Erforschung des Geschmacks



Was stellen die Produzenten hochwertiger Lebensmittel alles an, um ihren Kunden Qualität zu liefern? Wie lassen sich Aromen ungewöhnlich zusammenstellen, um neue Geschmackserlebnisse zu ermöglichen? Mit welchen Tricks arbeiten Sterneköche? Und wie kann ich meinen Weingeschmack verfeinern?

In seiner neuen Ausgabe erklärt GEO WISSEN ERNÄHRUNG, wie erlesene Produkte entstehen – warum aber Gutes oft auch ganz einfach sein kann. An vielen Beispielen beschreiben die Autoren die Kunst der Verfeinerung.

Und was sagt die Wissenschaft über das Thema Genuss? Der Physiker Thomas Vilgis lüftet Geheimnisse guten Geschmacks: dass etwa viele Aromen verloren gehen, wenn man eine selbst gemachte Gemüsebrühe zu früh salzt.

**GEO WISSEN ERNÄHRUNG** hat 172 Seiten Umfang und kostet 9,50 Euro; mit DVD (»Mehr Genuss mit Wein«) 16,50 Euro. Weitere Themen: Gute Fertigkost • Olivenöl • Gewürze

## BURGEN UND SCHLÖSSER

Mächtige Festungen, prächtige Residenzen



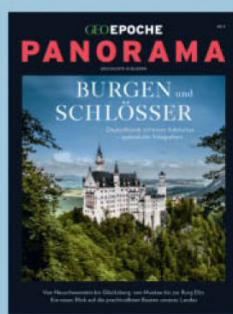
Ab 1850 lässt der Preußenkönig Friedrich Wilhelm IV. die Hohenzollernburg in Schwaben neu errichten – sie ist einer der zahlreichen Bauten, mit denen die Herrscher des 19. Jahrhunderts das Mittelalter nachahmen und feiern

153

**B**urgen und Schlösser sind steinerne Zeugen der Vergangenheit: Nichts erzählt anschaulicher vom Leben der Ritter, von ihren Fehden, Raubzügen und Kriegen, als die trutzigen Bastionen, die der Kriegeradel im Mittelalter errichtet hat. Und kein Relikt kündet so plastisch vom Prunk jener Aristokraten, die in späteren Jahrhunderten einen pompösen Lebensstil pflegten, wie ihre Paläste.

In seiner neuen Ausgabe präsentiert GEO EPOCHE PANORAMA Deutschlands schönste Adelssitze – viele von ihnen mithilfe einer Kameradrohne aus bisher ungesenen Perspektiven fotografiert. Von Flensburg bis zum Alpenrand, von der niederländischen Grenze im Westen bis zur Neiße im Osten zeigt das Heft die imposantesten Kastelle und Herrenhäuser. So wie die Burg Eltz in den Höhen der Eifel, die nie erstürmt werden konnte. Oder die Hohenzollernburg, Stammhaus der preußischen Könige und deutschen Kaiser. Und natürlich Deutschlands wohl berühmtestes Schloss: Neuschwanstein, den Traum des bayerischen Monarchen Ludwig II.

**GEO EPOCHE PANORAMA** »Burgen und Schlösser: Deutschlands schönste Adelssitze« hat 136 Seiten im Großformat und kostet 15 Euro.



# DER WALD

*Von sprechenden Pflanzen,  
heilenden Hölzern und Bäumen,  
die in die Zukunft planen*

**S**o vertraut uns der Wald auch erscheint: Erst allmählich erkennen Forscher, wie komplex die Prozesse sind, die dieses Ökosystem bestimmen – und die sich zum Großteil im Verborgenen abspielen. So verständigen sich etwa Bäume fortwährend miteinander, schicken sich flüchtige Signale, warnen einander vor Fressfeinden. Mehr noch: Das unfassbar filigrane Geflecht an Wurzeln und Pilzfäden, das den gesamten Boden durchzieht, dient den Wesen des Waldes gleichsam als Kommunikationsnetzwerk. Über dieses „Wood Wide Web“ tauschen unzählige Bäume Botschaften aus, versorgen einander mit Nährstoffen. Inzwischen steht wohl fest: Bäume haben sogar ein Gedächtnis. Und sie planen in die Zukunft. Wie Forscher dem Wald seine Geheimnisse entlocken – in der nächsten Ausgabe von GEO kompakt.





Am Ökosystem Wald – etwa einem Buchenwald – sind bis zu 7000 Tierarten, 3000 Pilzspezies, 280 verschiedene Flechten und 130 Bakterienarten beteiligt. Sie alle schaffen eine perfekte Kreislaufwirtschaft, in der kein Blatt ungenutzt bleibt und alles wiederverwertet wird

155

**GEOkompakt**

**NR. 52**

**ERSCHEINT AM**

**06. SEPTEMBER 2017**

Das Beste für Rücken, Knie und Hüfte.

**GEO WISSEN**  
GESUNDHEIT

NR. 5

Alles über  
Knie, Rücken  
Hüfte, Schulter,  
Hand und  
Fuß

**Muskeln,  
Knochen,  
Gelenke**

Jetzt  
im Handel.

So **bleiben** Sie  
fit und **beweglich!**

**Ernährung**  
Richtig essen bei  
Rheuma und Arthrose

**Therapien**  
Was wirklich gegen  
Schmerzen hilft

**Ayurveda**  
Ist sanfte Heilung  
möglich?

**GEO WISSEN**  
GESUNDHEIT DVD  
**Beweglich  
von  
Kopf  
bis  
Fuß!**  
Mobilitätstraining mit einem Sportwissen-  
schafter und Sport-Physiotherapeuten

Mit DVD erhältlich:  
Mobilitätstraining

WISSEN ist die beste Medizin.