

Dominik Elsässer *Hrsg.*

Urknall, Sterne, Schwarze Löcher

Vergangenheit,
Gegenwart
und Zukunft
des Universums

Spektrum
der Wissenschaft

 **Springer**

Urknall, Sterne, Schwarze Löcher

Dominik Elsässer
(Hrsg.)

Urknall, Sterne, Schwarze Löcher

Vergangenheit, Gegenwart und
Zukunft des Universums



Springer

Hrsg.
Dominik Elsässer
Experimentelle Physik Vb
Technical University of Dortmund
Dortmund, Nordrhein-Westfalen
Deutschland

ISBN 978-3-662-57912-1 ISBN 978-3-662-57913-8 (eBook)
<https://doi.org/10.1007/978-3-662-57913-8>

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detailierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Die in diesem Sammelband zusammengefassten Beiträge sind ursprünglich erschienen in Spektrum der Wissenschaft und Spektrum – Sterne und Weltraum.

© Springer-Verlag GmbH Deutschland, ein Teil von Springer Nature 2019

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag, noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Einbandabbildung: deblik, Berlin; Supernova 1994D in the galaxy NGC 4526 (© NASA/ESA)
Verantwortlich im Verlag: Lisa Edelhäuser

Springer ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer-Verlag GmbH, DE und ist ein Teil von Springer Nature

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Heidelberger Platz 3, 14197 Berlin, Germany

Vorwort

Der Blick an den Himmel, zu Sonne, Mond, Sternen und hinaus ins fernere Universum, ist eine fundamentale Naturerfahrung, welche die Menschheit sicherlich schon seit der fernen Vergangenheit der Vorgeschichte fasziniert. In vielen Gesprächen und bei Vorträgen für ganz verschiedene Auditorien dürfen wir Astrophysikerinnen und Astrophysiker immer wieder erleben, dass der Kosmos bis heute nichts von dieser Faszination eingebüßt hat. Und im Vergleich zu vorherigen Epochen der Menschheitsgeschichte ist der Zugang zum Schatz des Wissens heute für viele von uns sehr viel einfacher geworden (was natürlich niemals darüber hinwegtäuschen darf, dass es hier auch weiterhin dramatische Unterschiede zwischen verschiedenen Teilen unserer Welt gibt). Gleichzeitig hängt der Erfolg des großen Abenteuers der Erforschung des Kosmos heute entscheidend davon ab, dass große Teile der Gesellschaft offen für wissenschaftliche Erkenntnisse sind, und dass Grundlagenforschung als Wert an sich anerkannt wird. In einer Gesellschaft leben zu dürfen, in der diese Sachverhalte anerkannt sind, und die bereit ist einen kleinen Teil der öffentlichen Ausgaben auf die Förderung der Grundlagenforschung zu verwenden, ist ein Privileg, das wir als Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler hier und heute genießen dürfen, das aber nie zu selbstverständlich werden darf. Gleichzeitig empfinden wir eine große Freude am Teilen der faszinierenden Erkenntnisse über unser Universum, die uns die modernen Methoden der Astrophysik heute zu erwerben ermöglicht. In diesem Sinne ist es vielen Kolleginnen und Kollegen nicht nur eine Aufgabe, sondern ein echtes Herzensanliegen, eine möglichst große Öffentlichkeit auf die Abenteuerreise mitzunehmen. Das geschieht im Rahmen von Lehrveranstaltungen und weiterer Bildungsarbeit

für verschiedene Auditorien, durch öffentliche Vorträge, aber ganz besonders auch durch allgemeinverständliche Publikationen. Ein ganz vorzügliches und von vielen Kolleginnen und Kollegen höchst geschätztes Forum hierfür bieten die Zeitschriften *Scientific American*, *Spektrum der Wissenschaft* und *Sterne und Weltraum*. Hier berichten namhafte Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler für eine interessierte Leserschaft, häufig direkt von der äußersten Grenze der menschlichen Erkenntnis, von der Kontaktfläche mit dem Unbekannten und von aktuellsten Fortschritten. Hierfür eignet sich ein periodisch erscheinendes Journal natürlich in besonderer Weise. Allerdings, mit dieser Erscheinungsweise ist manchmal auch der Effekt verbunden, dass sorgfältig recherchierte und weit über den aktuellen Jahrgang hinaus relevante Beiträge allzu schnell aus dem Fokus der Leserschaft verschwinden können. Das ist schade, und dem möchten wir mit diesem Buch entgegenwirken. Sie finden in ihm sorgfältig und dabei behutsam redigierte Artikel aus den oben genannten Journalen, die, so hoffen Verlag und Herausgeber, Ihnen gleichzeitig als Reiseführer durch Raum und Zeit, und auch als Kompendium von bleibendem Wert dienen können.

Der wissenschaftliche Fortschritt in der modernen Astrophysik findet an vielen Stellen gleichzeitig mit fast atemberaubender Geschwindigkeit statt. Es war daher keine leichte Aufgabe, eine Auswahl zu treffen und dem Buch einen Rahmen zu geben. Die Wahl fiel schließlich auf eine Reise nicht nur durch den Raum, sondern auch durch die Zeit, sind beide doch im modernen, relativistischen Bild der Welt untrennbar als „Raumzeit“ miteinander verknüpft. Ein zentraler Pfeiler dieses modernen Bildes der physikalischen Realität feierte vor kurzem den einhundertsten Geburtstag: Die Relativitätstheorie, sicher das berühmteste Werk Albert Einsteins. Neben der enormen wissenschaftshistorischen und fundamentalen Bedeutung ergibt sich aus ihr für uns Astrophysikerinnen und Astrophysiker auch eine ganz unmittelbar augenscheinliche Konsequenz: Die Relativitätstheorie setzt mit der Naturkonstante c , identisch mit der Ausbreitungsgeschwindigkeit des Lichtes im Vakuum, eine absolute Obergrenze für die Ausbreitung von Information in unserem Universum. Sie beraubt uns so vielleicht auch der letzten Hoffnung, ferne Bereiche des Universums überlichtschnell bereisen und direkt erforschen zu können. Das Licht allerdings ist seit jeher ein entscheidender Informationsträger in der astronomischen Beobachtung, ein wichtiger – wenn auch heute nichtmehr der einzige – Bote aus dem frühen Kosmos. Und so macht die Endlichkeit der Lichtgeschwindigkeit den Blick hinaus ins Universum immer auch zu einer Zeitreise zurück in die Vergangenheit. Wir können so die Entwicklung des Kosmos in einzigartiger Weise erforschen. Und wie so oft ist die Kenntnis der Vergangenheit

und der Gegenwart auch eine Gelegenheit, fundierte Überlegungen zur Zukunft anzustellen. Die Vergangenheit, die Gegenwart und die Zukunft des Universums sind also der rote Faden, entlang dessen wir herausragende Beiträge ausgewählt haben, die dabei viele aktuelle Fragestellungen der Kosmologie und Astrophysik berühren.

Auch wenn die räumlichen und zeitlichen Skalen im Universum oft weit jenseits der menschlichen Alltagserfahrung liegen, so ist die Erforschung des Kosmos doch eine zutiefst menschliche Geschichte. Moderne technologische Errungenschaften haben unseren Blick auf den Kosmos fast unermesslich erweitert. Sie haben nahezu alle Bereiche des elektromagnetischen Spektrums zugänglich gemacht, ermöglichen die Beobachtung von Teilchen und seit Kurzem auch von Gravitationswellen. Computer unterstützen uns an vielen Stellen, bei der Datenverarbeitung und auch bei Simulationsrechnungen. Die abschließende wissenschaftliche Interpretation dieser Flut an Daten aber bleibt bisher die Domäne des menschlichen Intellekts. Und so geben die Autorinnen und Autoren der hier zusammengefassten Beiträge natürlich immer auch ihre Sichtweise wieder. Nicht als passive Berichterstatter, sondern als aktive Teilnehmer, als treibende Kräfte hinter dem wissenschaftlichen Fortschritt. Dieser Fortschritt entsteht insbesondere immer dort, wo Menschen sich ein klein wenig über die Grenzen des gesicherten Wissens hinauswagen. Er entsteht dabei nicht auf fest vorgegebenen Pfaden. Ein unverzichtbares Merkmal ist das Aufstellen von Hypothesen; ein Teil davon übersteht die Konfrontation mit neuen Daten nicht. Die Geschichte der Wissenschaft ist auch eine Geschichte von Irrtümern und auch von Sackgassen. Und auch das kommt in einigen der Artikel im Buch zur Sprache: mehr und bessere Daten lassen bisherige Interpretationen in neuem, nicht immer bestärkendem, Licht erscheinen. Und wenn gerade das heute leider in manchen Kreisen fast vorwurfsvoll zu hören ist – „die Wissenschaft hat sich doch schon oft geirrt!“ – so ist es umso mehr unsere Aufgabe als Forscherinnen und Forscher, klarzumachen, dass das kein Makel, sondern eine gewaltige Stärke der wissenschaftlichen Methode ist. Wissenschaft ist selbstkorrigierend, sie merzt über die Zeit hinweg falsche Ideen aus ohne dass dies zur Schande und zum Vorwurf für die Urheber dieser Ideen wird. Die Wissenschaft beharrt nicht auf Meinungen um ihrer selbst willen, sondern sie unterwirft sich der Beobachtung und dem Experiment als Richterinnen über Hypothesen und Theorien.

Während viele Aspekte der in diesem Buch zusammengefassten Artikel gut überprüftes Wissen sind, so war und ist es doch auch unser Anspruch, den aktuellsten Stand der Forschung wiederzugeben. Einiges kann also in den kommenden Jahren durch den Fortschritt überholt werden, kann

den Test der Zeit nicht überstehen. Herausgeber und Verlag hoffen aber und sind zuversichtlich, dass diese Inhalte dennoch eine bleibende, positive Wirkung erzielen können. Denn ein noch viel wichtigerer Treiber des Fortschrittes als die Technologie ist schon immer die menschliche Neugierde gewesen. Sie ist es, die uns schon seit Anbeginn der Zivilisation begleitet, und sie ist es die uns und kommende Generationen zu immer weiteren und sicher oft revolutionären Erkenntnissen führen wird. Wenn dieses Buch einen Teil dazu beiträgt, Sie liebe Leserin und lieber Leser zu ermutigen dieser Neugierde nachzugeben und Teilnehmerin oder Teilnehmer der großen wissenschaftlichen Abenteuerreise zu werden, so ist dieses wichtigste Ziel bereits erreicht!

Dortmund
im Juli 2018

Dominik Elsässer

Inhaltsverzeichnis

Teil I Vergangenheit

Was ist Zeit? 3

Andreas Müller

Zeugen des Urknalls 17

Marek A. Abramowicz und Julia Tjus

Weiterführende Literatur 23

Kosmische Inflation auf dem Prüfstand 25

Paul J. Steinhardt

Weiterführende Literatur 35

Wellenschlag des Urknalls 37

Lawrence M. Krauss

Weiterführende Literatur 46

Der verborgene Kosmos 47

Bogdan A. Dobrescu und Don Lincoln

Weiterführende Literatur 55

Teil II Gegenwart

Giganten im All 59

Gerhard Börner

Weiterführende Literatur	72
Die ersten Sterne	73
<i>Michael D. Lemonick</i>	
Weiterführende Literatur	84
Erster Nachweis: Verschmelzende Neutronensterne	85
<i>Markus Pössel</i>	
Weiterführende Literatur	103
Das wechselhafte Leben der Sterne	105
<i>Ralf Launhardt</i>	
Weiterführende Literatur	120
Exoplaneten – eine Spurensuche	121
<i>Lisa Kaltenegger</i>	
Weiterführende Literatur	137
 Teil III Zukunft	
Die ferne Zukunft der Sterne	141
<i>Donald Goldsmith</i>	
Weiterführende Literatur	150
Brisante Dunkle Energie	151
<i>Adam G. Riess und Mario Livio</i>	
Weiterführende Literatur	161
Einsteins Weg zur allgemeinen Relativitätstheorie	163
<i>Michel Janssen und Jürgen Renn</i>	
Weiterführende Literatur	173
Multiversum in Beweisnot	175
<i>George F. R. Ellis</i>	
Weiterführende Literatur	184
Kann die Zeit enden?	187
<i>George Musser</i>	
Weiterführende Literatur	199

Teil I

Vergangenheit

Der Blick weit hinaus in den Kosmos führt uns mit der alltäglichen Vorstellungskraft über beinahe unfassbare Zeitspannen zurück, bis in eine Zeit kurz nach dem heißen Urknall, mit dem vor etwa 13,8 Mrd. Jahren das Universum seinen Anfang genommen hat. Raum und Zeit haben nach allem was wir heute wissen dabei ihren Ursprung genommen. Verborgenen in dieser Aussage steckt aber eigentlich schon eine sehr profunde Frage: was ist eigentlich die Zeit? Auf sehr anschauliche und verständliche Weise wird genau dieses Rätsel in einem Artikel thematisiert.

Die Erforschung des frühen Kosmos ist auch ein Bereich, in dem sich Fragestellungen der klassischen Astro- und Teilchenphysik an vielen Stellen begegnen. Dies geschieht oft unter Randbedingungen, wie wir sie heute in keinem Labor oder Experiment auch nur annähernd nachbilden können. Die moderne Astroteilchenphysik beziehungsweise Teilchenkosmologie kann so vielleicht Türen zu einem völlig neuen Verständnis der fundamentalen Struktur der Welt und der Naturgesetze aufstoßen. Die Trauben hängen dabei allerdings durchaus hoch: anders als bei den Resultaten von wohl geplanten und gut überwachten Experimenten können wir die ersten Phasen des Universums nur anhand der Information, welche die Natur uns liefert, beobachten. Bis zur Rekombination von Elektronen und Protonen, etwa 380.000 Jahre nach dem Urknall, unterlag das Licht häufigen Streuprozessen. Erst nach dieser Rekombination und der damit verbundenen Entstehung des kosmischen Mikrowellenhintergrundes wurde das Universum im klassischen Sinne „durchsichtig“.

Die präzise Beobachtung des Mikrowellenhintergrundes ermöglicht nicht nur Rückschlüsse auf die Bedingungen zur Zeit seiner Entstehung, sondern auch über grundlegende Parameter des frühen Universums. Eine extrem spannende Frage bleibt auch, ob und in welcher Form der Urknall exotischere Relikte wie schwarze Löcher hinterlassen hat, die vielleicht heute noch nachweisbar sein könnten. Und möglicherweise bestimmt mit der dunklen Materie sogar eines dieser Relikte einen großen Teil der heutigen Dynamik von Galaxien und Galaxienhaufen. Selbst wenn uns also fast unvorstellbare Zeitspannen von den frühesten Epochen des Universums trennen, so ist diese Ära dennoch heute eines der spannendsten und dynamischsten Forschungsfelder überhaupt!



Was ist Zeit?

Von kosmischen Zyklen zum kosmologischen Zeitpfeil

Andreas Müller

Der Wecker klingelt. Aufstehen! Wir starten in den Tag und planen unser Programm mit einem wesentlichen Werkzeug: der Uhr. Sie zeigt uns ganz selbstverständlich die Zeit an. Doch was ist Zeit überhaupt? Die uns im Alltag geläufigen Zeitbegriffe sind mit wiederkehrenden kosmischen Vorgängen verknüpft – mit dem Auf- und Untergang der Sonne, dem Mondzyklus und der Umlaufbewegung der Erde. Es gibt aber auch eine Merkwürdigkeit: Die Zeit kennt nur eine Richtung (aus *Sterne und Weltraum* 11/2012).

In Kürze

- Bereits die antiken Philosophen um Aristoteles dachten über das Wesen der Zeit nach. Galilei und Newton sprachen von einer absoluten Zeit.
- In der Physik geht die Zeit in Bewegungsgleichungen ein. Sie beschreiben mathematisch die Dynamik von Systemen.
- Die Zeit hat nur eine Richtung. Wir erleben sie als unbeeinflussbar.

A. Müller (✉)

Redaktion Sterne und Weltraum, Haus der Astronomie,
MPIA-Campus, Heidelberg, Deutschland

E-Mail: andreas.mueller@spektrum.de

Im Alltag unterliegen wir dem Diktat der Zeit. Sie signalisiert uns, wann wir aufstehen und unsere Termine wahrnehmen müssen. Sie ist unser Hilfsmittel, das uns nicht nur bei der Gestaltung des Tages, sondern auch bei der Planung von Wochen, Monaten und Jahren, ja sogar des ganzen Lebens, unterstützt. Die Zeit ist jedoch weit mehr als ein praktisches Werkzeug, und es ist eine naturwissenschaftlich und philosophisch äußerst spannende Herausforderung, ihr Wesen zu hinterfragen: Was ist Zeit? Und warum verrinnt sie selbst dann, wenn wir nicht auf die Uhr schauen?

Wir erleben Zeit als absolut und unbeeinflussbar. Wenn wir überlegen, woran wir ihren Ablauf festmachen, dann wird sofort klar, dass wir das Verrinnen der Zeit anhand von Veränderungen bemerken: Die Bewegung von Gegenständen in unserer Umgebung, das tägliche Wandern der Sonne am Himmel, die Veränderungen der Natur während der Jahreszeiten, das Wachsen von Kindern und unser eigenes Altern – all das signalisiert uns, dass die Zeit voranschreitet. Wir nehmen dabei den Fluss der Zeit ganz bewusst wahr, denn wir haben die Fähigkeit, uns an Vergangenes zu erinnern. Daher können wir aus Fehlern und Erfolgen der Vergangenheit lernen. Wir erleben den Moment der Gegenwart – wissen wir doch, dass er schon im nächsten Moment Vergangenheit sein wird. Genauso können wir unsere Zukunft aktiv gestalten, indem wir mithilfe der Zeit planen.

Die Zeit der großen Denker

Veränderungen sind also offenbar entscheidend, oder man könnte auch sagen, Bewegungen sind wesentlich. Mit dieser Begrifflichkeit sind wir den Denkern der Antike sehr nahe gekommen, allen voran Aristoteles (384–322 v. Chr.), dessen natur- und geisteswissenschaftliches Gedankengut bis ins Mittelalter dominierte. Im aristotelischen Denken finden sich Veränderung und Bewegung im griechischen Begriff „kinesis“.

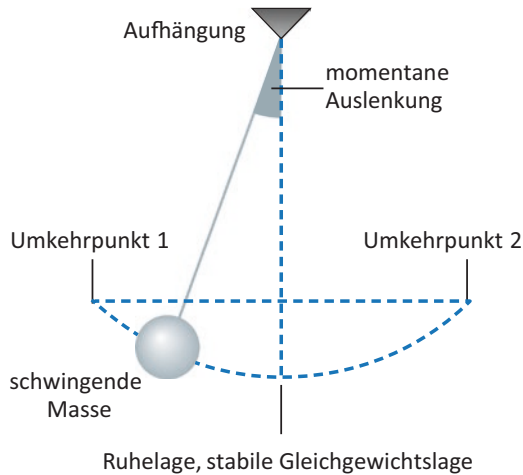
Nach Aristoteles ist alles Seiende bewegt. Er folgerte, dass es ein erstes Bewegendes geben müsse, welches das Seiende bewegt. Dabei muss das Bewegende selbst unbewegt sein, weil es sonst nicht ein erstes Bewegendes wäre. Diesen unbewegten Beweger identifiziert Aristoteles mit Gott. Er bezieht damit eine Gegenposition zu Platon, dessen Schüler er war, denn der platonische Gottesbegriff ist derjenige vom selbst bewegten Beweger. Aristoteles vollzieht damit einen Übergang von der Ontologie, der Lehre vom Sein, zur Theologie, der Lehre von Gott.

Bezogen auf den Zeitbegriff, beschrieb Aristoteles das „Jetzt“ als Übergang von der Vergangenheit, dem „Nicht-mehr-Sein“, in die Zukunft, dem „Noch-nicht-Sein“. Das „Jetzt“ verschwindet augenblicklich und wird abgelöst von einem darauf folgenden „Jetzt“, sodass die „Jetztte“ gewissermaßen ein Kontinuum bilden. Hierbei entstand die Redeweise vom „Fluss der Zeit“, weil sie von der Zukunft durch das „Jetzt“ in die Vergangenheit „fließt“.

Einen entscheidenden Durchbruch in unserem Verständnis des Zeitbegriffs verdanken wir Galileo Galilei (1564–1642) und Sir Isaac Newton (1643–1727). Die beiden Universalgelehrten haben unser Verständnis von der Natur im 16. und 17. Jahrhundert entscheidend geprägt. Hinsichtlich des Zeitbegriffs sind ihre Arbeiten auf dem Gebiet der klassischen Mechanik und der Schwerkraft bedeutend. Sowohl Galilei als auch Newton führten physikalische Experimente durch. Diese beschrieben sie durch mathematische Gleichungen, in denen die Zeit als Variable eine große Rolle spielt. Die Physiker nennen sie Bewegungsgleichungen – wir stoßen also wieder auf den aristotelischen Begriff der Bewegung: *kinesis*.

Im Allgemeinen handelt es sich bei den Bewegungsgleichungen um Differenzialgleichungen, die beschreiben, wie sich der Ort eines Körpers unter der Einwirkung einer äußeren Kraft ändert, beispielsweise beim Hin- und Herschwingen eines Pendels unter dem Einfluss der Schwerkraft. Die mathematischen Lösungen einer Bewegungsgleichung geben darüber Aufschluss, an welcher Stelle sich das Pendel zu einem beliebigen Zeitpunkt befindet, wie schnell es dann schwingt und wie stark es gerade beschleunigt wird. Dieser mathematische Formalismus ist sehr mächtig und besitzt weitreichende Anwendungen in Naturwissenschaft und Technik.

Der Zeitbegriff, der das Fundament dieser Theorie bildet, ist aus unserer alltäglich erfahrbaren Perspektive sehr plausibel, denn die Zeit gilt in der klassischen Mechanik als absolut: Sie ist unbeeinflussbar – oder, wie Newton es in seinem 1687 erschienenen Hauptwerk „*Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*“, formulierte: „Die absolute, wahre Zeit verfließt an sich und vermöge ihrer Natur gleichförmig und ohne Beziehung auf irgendeinen äußeren Gegenstand.“ Ein solcher Ansatz für das Wesen der Zeit ist überaus erfolgreich, aber es sollte sich zeigen, dass mit der modernen Physik des 20. Jahrhunderts das Verständnis des Zeitbegriffs weiterentwickelt werden musste.



Beim mechanischen Pendel hängt eine Masse an einem Faden und schwingt periodisch hin und her. Die Dauer einer Schwingung vom Umkehrpunkt 1 zum Umkehrpunkt 2 und zurück definiert die Schwingungsperiode. Sie ist unabhängig von der Stärke der Auslenkung. Ein solches mechanisches System wird in Pendeluhren zur Zeitmessung genutzt. (Andreas Müller/SuW-Grafik)

Kosmische Taktgeber

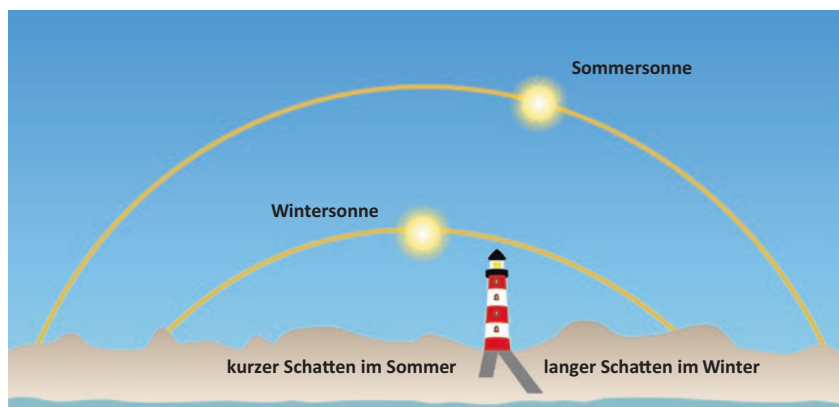
Bevor wir uns dem Wesen der Zeit zuwenden, betrachten wir sie zunächst als Alltagsphänomen. Zeiten messen wir mit Uhren, für die wir einen Taktgeber und einen Zähler benötigen. Ähnlich wie ein frei schwingendes Pendel schwingt auch eine mechanische Pendeluhr gleichmäßig mit einer konstanten Periode hin und her und gibt damit einen Takt vor. Nun benötigt man nur einen Zähler, der registriert, wie oft ein Takt, also eine ganze Periode, in die zu messende Zeitspanne hineinpasst. Die Pendeluhr ist somit eine technisch weiterentwickelte, künstliche Form einer natürlichen Uhr wie das frei schwingende Pendel.

Wir kennen eine Reihe von natürlichen Uhren, denen interessanterweise kosmische Zyklen zugrunde liegen. Zunächst gibt es den Wechsel von Tag und Nacht, ein Vorgang, der regelmäßig im Abstand von rund 24 h wiederkehrt und dessen Periode wir „Tag“ nennen. Er wird von der Rotation unseres Heimatplaneten Erde vorgegeben. Als Konsequenz dieser Drehung rotiert der Himmel scheinbar um die Erde, sodass es zum Sonnenauf- und -untergang und dem damit verbundenen Wechsel von Tag und Nacht kommt. Sieben Tage bilden den Zyklus von einer Woche, und rund vier Wochen ergeben einen Monat. Im Begriff „Monat“ steckt das Wort „Mond“. Dies ist kein Zufall, denn unser Erdrabant durchläuft einen leicht zu beobachtenden

natürlichen Zyklus von Neumond, zunehmendem Mond, Vollmond, abnehmendem Mond und wieder Neumond, der rund 28 Tage dauert.

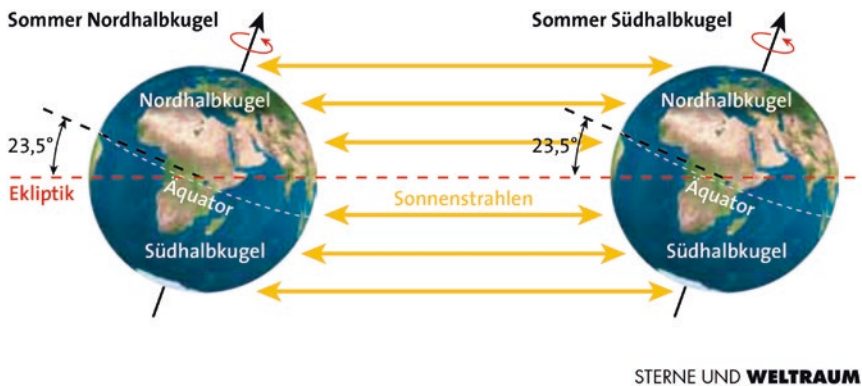
Nach Ablauf von 365 Tagen ist die Zeitspanne von einem Jahr erreicht. Auch dies ist ein natürlicher kosmischer Zyklus, der dadurch festgelegt ist, dass die Erde die Sonne nach einem Jahr vollständig umrundet hat. Während dieses Umlaufs steht die Erdachse nicht immer in der gleichen Orientierung zur Sonne, denn sie ist gegenüber der Erdbahnebene um 233,5 Grad geneigt. Astronomen bezeichnen diesen Winkel als die „Schiefe der Ekliptik“. So kommt es, dass die Sonnenstrahlen während eines Laufs der Erde um die Sonne zeitweise die Nordhalbkugel und zeitweise die Südhalbkugel senkrecht treffen (siehe Bild unten). Wenn dies geschieht, ist auf der jeweiligen Halbkugel Sommer und auf der gegenüberliegenden Halbkugel Winter. Bevor diese Extreme des Sonnenstands erreicht werden, gibt es die Jahreszeiten Frühjahr beziehungsweise Herbst.

Von der Erde aus betrachtet, variiert wegen der „Schiefe der Ekliptik“ die scheinbare Höhe der Sonne über dem Horizont. Die tägliche Bahn der Sonne am Firmament heißt Tagbogen, und dieser verändert sich von Tag zu Tag. Als Konsequenz der geneigten Erdachse haben wir im Sommer lange Tagbögen mit entsprechend langen Tagen und kurzen Nächten. Im Winter gibt es kurze Tagbögen mit entsprechend kurzen Tagen und langen Nächten. Somit verändert sich im Verlauf eines Jahres auch der Schattenwurf, beispielsweise eines Turms: Er wirft den längsten Schatten im Winter und den kürzesten im Sommer.



Wegen der geneigten Erdachse ändert sich im Jahreslauf die Länge des Tagbogens der Sonne. Deshalb sind die Tage im Sommer länger und im Winter kürzer. Basierend auf diesem Phänomen lässt sich ein einfacher Zeitmesser konstruieren: die Sonnenuhr. (Andreas Müller/SuW-Grafik)

Tag, Monat und Jahr sind also kosmisch bedingte Zyklen. Zur Messung längerer Zeitspannen können wir mitzählen, wie viele Tage, Monate, Jahre verstrichen sind, wobei der Uhrentakt vorgibt, für welche Zeitspannen die jeweilige Uhr zum Einsatz kommt. Kurze Zeitspannen können wir mit den kosmischen Uhren nicht mehr so leicht messen, sodass es sinnvoll ist, künstliche Uhren mit kürzeren Perioden zu bauen, wie die erwähnte Pendeluhr. In der Geschichte der Zeitmessung treten jedoch auch Sand-, Wasser- und Öluhren auf, bei denen das beständige Fließen eines Materials von einem Behälter in einen anderen gemessen wurde und als Zeitmaß diente. Moderne Uhren sind die Quarzuhr, die das Schwingungsverhalten eines Quarzkristalls zur Kontrolle der Zeitmessung nutzt, und die Atomuhr, die auf der elektromagnetischen Strahlung basiert, die bei Übergängen zwischen verschiedenen Energieniveaus des Atoms entsteht.



Die Erdachse ist zur Bahnebene, in der die Erde um die Sonne kreist, um 23,5 Grad geneigt. Dadurch können Sonnenstrahlen die Erdoberfläche zeitweise auf der Nordhalbkugel und ein halbes Jahr später auf der Südhalbkugel beinahe senkrecht auftreffen. Dort, wo dies geschieht, ist Sommer, auf der gegenüberliegenden Halbkugel ist dann Winter. (Andreas Müller/SuW-Grafik)

Schritte in eine neue Dimension

Zeitdauern werden immer relativ zu einer Startzeit gemessen, wobei die Festlegung dieses Zeitnullpunkts natürlich willkürlich ist. In unserer christianisierten, westlichen Welt ist der Bezugszeitpunkt die Geburt Jesu. Wir zählen, wie viele Jahre seither vergangen sind, und leben daher im Jahr „2012 nach Christus“. Ganz trivial ist es nicht, einen so lang zurückliegenden Zeitpunkt, der in einer Epoche liegt, in der es noch nicht so genaue Uhren gab, als Bezug zu verwenden, denn es gibt Unsicherheiten in der Überlieferung, wann genau sich die Geburt ereignete. Zudem wurde seither mehrfach der Kalender reformiert, beispielsweise bei der Umstellung vom Julianischen auf den Gregorianischen Kalender zum Ende des 16. Jahrhunderts.

Auch die Verwendung von Kalendern in unserer modernen Zeit ist keinesfalls einfach. So sind wir gezwungen, den Gang von irdischen, künstlichen Uhren immer wieder an den Gang der natürlichen, kosmischen Uhren anzugleichen, denn wir wollen ja nicht, dass es um zwölf Uhr mittags plötzlich Nacht ist oder dass es im Sommer schneit. Hierzu dienen Schaltsekunden und Schalttage, also zusätzliche Sekunden beziehungsweise Tage, die geeignet in die Kalender eingebaut werden. Solche Maßnahmen müssen national und global vereinbart werden. In Deutschland residieren die „Herren der Zeit“ in der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) in Braunschweig und Berlin. Das PTB ist unser nationales Metrologie-Institut, das auch die Standards für andere Maße und Maßsysteme vorgibt und überwacht. Zur Einhaltung der gesetzlichen Zeit in Deutschland betreibt die PTB mehrere Atomuhren – die präzisesten Uhren der Welt.

Zeitnullpunkte und Zeitskalen sind allerdings vollkommen willkürlich und beruhen nur auf praktischen Vereinbarungen. Doch die Zeit als physikalisches Phänomen bleibt. Sie verstreicht, auch ohne dass eine Uhr mitzählt. Wir können sie zwar messen, aber warum schreitet die Zeit beständig, offenbar unaufhaltsam voran? Um dies zu verstehen, lohnt es sich, sie als Dimension des Universums zu betrachten und mit den drei Raumdimensionen zu vergleichen. Hierbei offenbaren sich recht auffällige Unterschiede. Es gibt nur eine Zeitdimension, aber gleich drei Raumdimensionen, nämlich Länge, Breite und Höhe. In den Raumdimensionen können wir uns im Prinzip beliebig bewegen: vor und zurück, nach links und rechts sowie nach oben und unten. Im Unterschied hierzu können wir unsere Bewegungsrichtung bei der Zeit nicht beeinflussen. Noch gravierender ist, dass die Zeit nur eine „Vorwärtsrichtung“ erlaubt und dass diese in die Zukunft weist. Insgesamt können wir also in allen drei Raumdimensionen nach Belieben vor- und zurückreisen, aber keine Zeitreise in die Vergangenheit unternehmen.

Warum ist das so? Betrachten wir dynamische Vorgänge in der Natur sehr genau, so bemerken wir, dass einige davon in der Zeit vorwärts wie rückwärts ablaufen könnten. Sehr deutlich wird das, wenn wir einen rückwärts ablaufenden Film sehen. Irgendwann bemerken wir dabei seltsame Vorgänge, die wir so noch nie in der Natur beobachten konnten: Da entmischt sich ein Milchkaffee, und die Milch formt einen Strahl, der auf wundersame Weise aus dem Kaffee in eine Milchtüte fließt; Porzellanscherben springen vom Boden auf und fügen sich zu einer Tasse zusammen, die perfekt auf einem Tisch zur Landung kommt; ein Fluss fließt stromaufwärts und bildet einen Wasserfall, der komischerweise einen Fels hinaufsteigt. Die Gemeinsamkeit dieser seltsamen, unnatürlichen Phänomene liegt darin, dass es für sie nur eine logische Reihenfolge gibt, in der sie eintreten können – nur eine Zeitrichtung. Solche Vorgänge sind eine heiße Spur zum Verständnis der Zeit!

Das Merkwürdige an ihnen ist, dass sie die Reihenfolge von Ursache und Wirkung umdrehen. Es ist nun einmal so, dass erst die Milch in den Kaffee strömt und sich dann die Flüssigkeiten mischen; erst fällt die Tasse vom Tisch, und dann kommen die Scherben; Wasser fällt natürlicherweise im Schwerfeld der Erde und kann somit nicht einfach bergauf fließen. Das dahinter liegende Prinzip „Erst die Ursache, dann die Wirkung“ wird wissenschaftlich „Kausalität“ genannt. Die seltsamen Phänomene im rückwärts laufenden Film verstoßen gegen das Gesetz der Kausalität – sie sind „akausal“. Diese Überlegungen bilden den ersten Schritt, um dem sogenannten Zeitpfeil auf die Spur zu kommen, welcher der Zeit ihre Richtung vorgibt. Der Grund für seine Existenz lässt sich mit den Mitteln der Physik verstehen.

Präzision aus dem Mikrokosmos: die Atomuhr

Wie jede Uhr, so benötigt auch eine Atomuhr einen Taktgeber. Hier ist es das Schwingen einer elektromagnetischen Welle, die ein Atom von einem energetisch niedrigeren in einen höheren Zustand anregt. Die Frequenz der vom Atom aufgenommenen Strahlung ist mit einigen Milliarden Schwingungen pro Sekunde sehr hoch – und gerade dies macht die Atomuhr zum genauesten Zeitmesser der Welt. Einem Vorschlag des Physikers Isidor Rabi (1898 – 1988) folgend, realisierte der Physiker und Chemiker Willard Frank Libby (1908 – 1980) die erste Atomuhr im Jahr 1946.

In einer Atomuhr wird zur Absorption das Element Cäsium (^{133}Cs) genutzt. Ein Cäsiumatom besteht aus einer Elektronenhülle und einem Atomkern. Diese Konfiguration von Teilchen kann zwei bestimmte Energiezustände einnehmen, die sich hinsichtlich ihres Eigendrehimpulses (Spin) unterscheiden. In der Physik heißen diese beiden Zustände »Hyperfeinstrukturniveau«. Bestrahlt man die Cäsiumatome mit Mikrowellen einer bestimmten Frequenz, so können sie die Energie der Strahlung aufnehmen und auf das energetisch höhere Hyperfeinstrukturniveau wechseln. Salopp sagt man auch: »Der Spin von Cäsium wird umgeklappt.« Dieses Umklappen geschieht nur bei passender Wellenlänge der Mikrowellen, dem Resonanzfall. Die Wellenlänge liegt dann bei 3,26 Zentimetern, was einer Frequenz von 9,19 Gigahertz, also rund 9 Milliarden Schwingungen pro Sekunde, entspricht. Präzise sind es 9 192 631 770 Schwingungen, die das Mikrowellenfeld innerhalb einer Sekun-

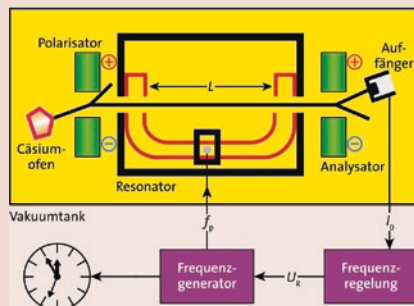
de durchführt. Dies ist der Taktgeber der Atomuhr, der die Länge der Zeiteinheit »Sekunde« definiert.

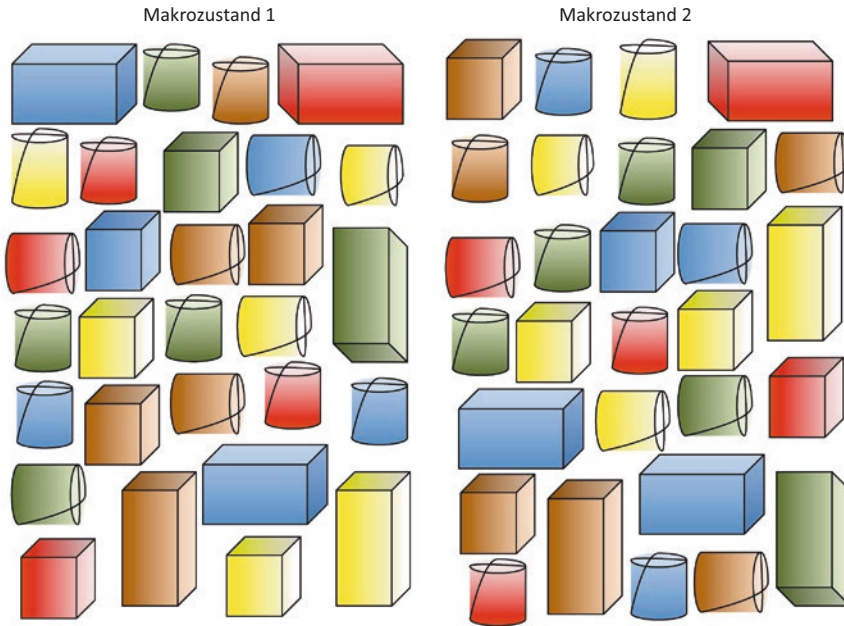
In der Praxis werden Cäsiumatome in einem Ofen verdampft und mit Hilfe eines Magnetfelds sortiert, um sicherzustellen, dass sie in einem ganz bestimmten energetischen Zustand vorliegen (siehe Grafik unten). Danach wird der Cäsiumdampf in einen Hohlraumresonator geschickt, wo er durch Mikrowellen angeregt wird. Die Zahl der angeregten Cäsiumatome ist im Resonanzfall am größten. Diese Einstellung wird von der Apparatur gehalten, und die Schwingungsperioden werden gezählt. Nach genau 9 192 631 770 Schwingungsperioden ist dann eine Sekunde verstrichen.

Cäsium-Atomuhren sind so genau, dass 1967 die Zeitsekunde über dieses »Cäsiumnormal« definiert wurde. Eine Cäsium-Atomuhr der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) in Braunschweig stellt die Referenz für alle Uhren in Deutschland dar. Über Funk steuert sie landesweit Uhren an, die auf diese Weise genau eingestellt, also synchronisiert, werden.

Die PTB-Physiker experimentieren auch mit anderen chemischen Elementen für die Atomuhr. Neuerdings kommt dabei Ytterbium zum Einsatz. Hierbei wird der Übergang nicht mit Mikrowellen, sondern sogar mit sichtbarem Licht bewerkstelligt. Da die Wellenlänge von Licht noch kürzer ist als diejenige von Mikrowellen, ist der »Ytterbium-Takt« kürzer. Dementsprechend genauer ist diese neue Generation von optischen Atomuhren und zwar auf 17 Stellen nach dem Komma.

Aus einem Strahl von Cäsiumatomen filtert ein Magnet diejenigen Atome heraus, die sich im Grundzustand (–) befinden. Sie werden im Resonator mit Mikrowellen bestrahlt und dadurch auf ein höheres Energieniveau (+) angeregt. Die Anzahl der im Auffänger gesammelten angeregten Atome ist am größten, wenn die Frequenz f_p der eingestrahlten Welle die für die Anregung der Cäsiumatome charakteristische Frequenz aufweist.





Die beiden Makrozustände unterscheiden sich nur durch die Anordnung der Elemente. Die Unordnung, beschrieben durch die Entropie, ist jeweils sehr hoch. In geschlossenen Systemen kann die Entropie nur zunehmen – die Ursache des Zeitpfeils. (Andreas Müller/SuW-Grafik)

Die Schwester der Zeit

In der Physik gibt es Größen, an denen sich ablesen lässt, ob ein Vorgang akausal und damit verboten ist – oder ob er erlaubt und natürlich ist. Die dafür zuständige Disziplin ist die Wärmelehre oder Thermodynamik, in der die Physiker Naturgesetze gefunden haben. Eines davon, der zweite Hauptsatz der Thermodynamik, besagt, dass eine Größe namens Entropie, die ein physikalisches System beschreibt, entweder gleich bleibt oder zunimmt – aber sie kann niemals abnehmen! Was beschreibt aber nun diese rätselhafte Größe Entropie, und wie können wir sie anschaulich verstehen?

Stellen Sie sich vor, Sie sind glücklicher Besitzer einer Packung mit Legosteinen. Sie haben die Packung gerade geöffnet, und die Legosteine liegen verstreut am Boden. Davon machen Sie ein Foto und betiteln es mit „Makrozustand 1“. Jetzt mischen Sie einmal kräftig die verstreuten Steine mit der Hand durch. Sie machen wieder ein Foto und nennen es „Makrozustand 2“. Vergleichen Sie die Fotos von „Makrozustand 1“ und „Makrozustand 2“, wird es Ihnen schwerfallen, einen Unterschied festzustellen.

Wir könnten diese Betrachtung mit dem Begriff der Ordnung, vielmehr Unordnung, verbinden. Beide Makrozustände weisen nur ein geringes

Maß an Ordnung auf – oder anders gesagt: Die Unordnung ist sehr hoch. Der Physiker bringt diesen Befund in Zusammenhang mit der Entropie und sagt: „Die Entropie ist sehr hoch.“ Nehmen wir weiterhin an, dass Sie nun die Bausteine zu einem konkreten, möglicherweise sehr ansehnlichen Gesamtkunstwerk zusammenfügen. Damit bringen Sie Ordnung in das System und kombinieren die Legosteine auf eine eventuell sogar einzigartige Weise. Das Maß an Ordnung des Kunstwerks, beispielsweise ein Haus aus Lego, ist sehr hoch. Dementsprechend ist das Maß an Unordnung äußerst gering, und der Physiker sagt: „Die Entropie ist sehr klein.“

Nun schlagen wir den Bogen zum rückwärts laufenden Film. Haben Sie schon einmal gesehen, dass sich Legosteine von selbst zu einem Kunstwerk zusammensetzen? Sicher nicht. Aber lassen Sie einmal ein Lego-Haus aus einem Meter Höhe auf den Boden fallen, dann zerlegt es sich auf natürliche Weise von selbst. Kinder sind von diesem Vorgang so sehr fasziniert, dass sie das Experiment häufig wiederholen. Drücken wir das Ganze mit dem Begriff der Entropie aus, so müssen wir feststellen, dass sich die Entropie natürlicherweise erhöht, aber die Entropie wird sich nicht ohne Weiteres in der Natur von selbst verringern.

Wir haben nun mithilfe eines ganz anschaulichen Beispiels den zweiten Hauptsatz der Thermodynamik in der Praxis betrachtet. In voller Schönheit heißt dieses Gesetz: „Die Entropie kann in einem geschlossenen System gleich bleiben oder zunehmen, aber niemals abnehmen“. In dem großen geschlossenen System, in dem wir leben, im Universum, nimmt die Unordnung also ständig zu. Das ist genauso ein Naturgesetz wie „Alle Gegenstände fallen auf der Erde nach unten“. Mit der Entropie haben die Physiker eine wunderbare Größe entdeckt, die mit der Richtung der Zeit zusammenhängt! Die Entropie nimmt mit der Zeit zu; in der Vergangenheit war also die Entropie eines geschlossenen Systems geringer. Dieser Sachverhalt wird auch als „thermodynamischer Zeitpfeil“ bezeichnet, denn mithilfe der thermodynamischen Größe Entropie lässt sich wunderbar das Verstreichen von Zeit messen; sie ist gewissermaßen die „Schwester der Zeit“.

Der kosmologische Zeitpfeil

Wenn wir uns dem Universum zuwenden, können wir viel über die Zeit lernen. Zunächst müssen wir feststellen, dass schon der Blick in den Spiegel eine Zeitreise in die Vergangenheit darstellt. Sie glauben das nicht? Das geht so: Licht ist der Informationsträger, der uns von den Gegenständen, die wir betrachten, erreicht und über die Augen in unser Gehirn gelangt, wo wir das Gesehene verarbeiten. Licht ist jedoch nicht unendlich schnell, sondern benötigt Zeit, um sich auszubreiten. Die Lichtgeschwindigkeit beträgt im Vakuum rund eine Milliarde Kilometer pro Stunde. Innerhalb einer Sekunde legt ein Lichtstrahl rund 300.000 km zurück. Wenn wir also morgens im Bad

unser Spiegelbild bewundern, war das Licht vom Objekt unseres Entzückens bis zum Auge schon wenige Nanosekunden unterwegs. Demnach sehen wir uns nicht, wie wir gerade sind, sondern wie wir vor wenigen Nanosekunden waren.

In der Astronomie arten derartige Zeitreisen aus, denn das Licht muss einen viel längeren Weg vom beobachteten Gegenstand bis zu uns zurücklegen. Betrachten wir den Mond, so war das Licht schon rund eine Sekunde von der Mondoberfläche bis zum Auge unterwegs; bei der Sonne sind es schon rund acht Minuten, und das von einem typischen Stern in der Milchstraße ausgesandte Licht benötigt schon einige 100 bis 1000 Jahre. Im Extremfall erreicht uns das Licht aus einer Zeit, in der es unser Sonnensystem noch nicht gab, nämlich dann, wenn es von einer Milliarden Lichtjahre entfernten Galaxie stammt. Was geschieht unterwegs mit diesem Licht, und was können wir daraus über die Zeit lernen?

Die moderne Kosmologie lehrt uns, dass die Entwicklung des Universums vor 13,8 Mrd. Jahren im Urknall, einem unvorstellbar heißen und dichten Zustand, begann. Seither dehnt es sich aus. Innerhalb von Sekundenbruchteilen bildeten sich die vier Grundkräfte, und nach rund 400.000 Jahren wurde der Kosmos für sichtbares Licht durchlässig. Nach einigen hundert Millionen Jahren entstanden die ersten Sterne.

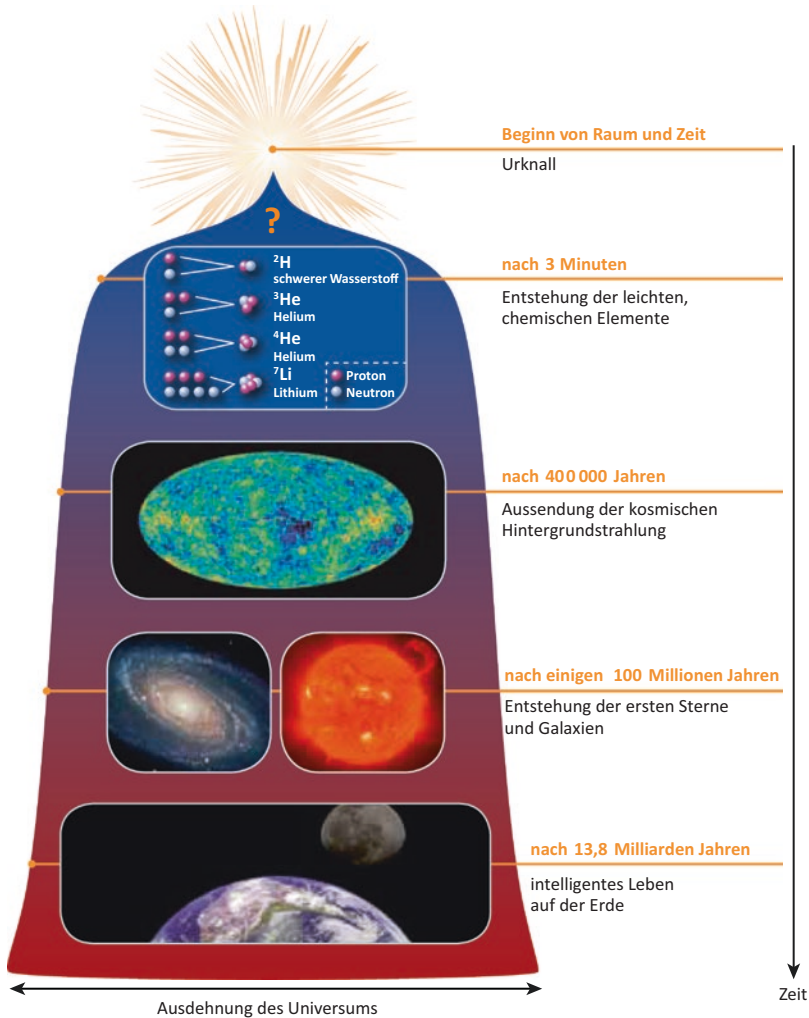
In einigen Entwicklungsphasen verlief die Expansion des Universums sogar beschleunigt. Auch heute expandiert der Raum beschleunigt, sodass die mittleren Entfernungen zwischen den Galaxien und Galaxienhaufen immer schneller zunehmen. Nach allem, was wir wissen, wird sich die beschleunigte Expansion fortsetzen. Dies belegen astronomische Beobachtungen entfernter Himmelsobjekte und Einsteins Relativitätstheorie, welche die kosmische Dynamik korrekt beschreibt.

Bei der Ausdehnung vergrößern sich nicht nur die mittleren Abstände zwischen den Galaxien, sondern selbst Lichtwellen werden auseinander gezogen: Die Wellen von blauem, kurzwelligem Licht, das im frühen Universum vorhanden war, werden durch die Expansion des Universum gedehnt und erscheinen dann als rotes, langwelliges Licht. Diesen Vorgang bezeichnen die Astronomen passenderweise als kosmologische Rotverschiebung.

Dieses Phänomen kann ein Beobachter auch anders ablesen: Zu einer Lichtwelle gehört eine Farbe oder Energie, der eine Temperatur entspricht. Während das Licht durch die kosmische Expansion röter wird, nimmt seine Strahlungstemperatur entsprechend ab. Die kosmische Hintergrundstrahlung, die in unserem lokalen Universum eine Strahlungstemperatur von rund 3 K (rund -270°C) aufweist, war zum Zeitpunkt ihrer Aussendung, 380.000 Jahre nach dem Urknall, viel heißer: rund 3000°C .

Da die kosmische Ausdehnung direkt der zeitlichen Entwicklung folgt, lässt sie sich als Indikator für eine „kosmische Zeit“ betrachten. Die

Ausdehnung vergrößert den mittleren Abstand von Galaxienhaufen und ebenso die mittlere Wellenlänge der Hintergrundstrahlung. Sie verringert hingegen deren mittlere Strahlungstemperatur. Diese Erscheinungen legen den kosmologischen Zeitpfeil fest, also eine Richtung der kosmischen Zeit. In seinen frühen Epochen war das Universum kleiner, heißer und von kurzwelligerer Strahlung angefüllt.



Nach dem Urknall bildeten sich Elementarteilchen, Kräfte und leichte Atomkerne. Nach 400.000 Jahren, als neutrale Atome entstanden waren, konnte sich die Wärmestrahlung des kosmischen Urgases ungehindert im Kosmos ausbreiten. Aus dem Wasserstoff- und Heliumgas bildeten sich die Vorläufer der uns bekannten Sterne und Galaxien. (Exzellenzcluster Universe, Ulrike Ollinger/Bildquellen: CERN, ESA, ESO, USM, LBT Corporation)

Es gibt kein Zurück

Als erstes Fazit halten wir fest, dass wir die Zeit als etwas Unbeeinflussbares erleben: Sie verstreicht einfach – ob wir es wollen oder nicht. Mithilfe natürlicher und künstlicher Uhren kultivieren wir ein „Zeitgefühl“, das sich in alltäglichen Begriffen wie Sekunde, Minute, Stunde, Tag, Monat und Jahr manifestiert. Dass die Zeit nur eine Richtung kennt, lässt sich mikrophysikalisch mit den Gesetzen der Thermodynamik begründen und makrophysikalisch an der Entwicklung des gesamten Universums ablesen.

Andreas Müller ist Mitglied der Chefredaktion der Zeitschrift „Sterne und Weltraum“. Für sein Engagement in der Schulastronomie erhielt er den Johannes-Kepler-Preis 2012 der MNU. Seine Bücher „Raum und Zeit“ (2012) und „10 Dinge, die Sie über Gravitationswellen wissen wollen“ (2017) sind bei Springer Spektrum erschienen.



Zeugen des Urknalls

Marek A. Abramowicz und Julia Tjus

Möglicherweise sind in der Entstehungsphase des Universums winzige Schwarze Löcher entstanden. Ihre Entdeckung wäre eine Sensation – doch bislang entziehen sich die hypothetischen Objekte allen Nachweisversuchen (aus *Spektrum der Wissenschaft* 5/2013).

AUF EINEN BLICK

HAWKINGS SCHWARZE MINIBOMBEN

1. Der Theoretiker Stephen Hawking sagt voraus, dass **alle Schwarzen Löcher strahlen** und sich am Ende in einer Explosion mit Gammastrahlung auflösen.
2. Während **stellare Schwarze Löcher** in einer Supernova entstehen, können sich Schwarze Minilöcher nur kurz nach dem Urknall gebildet haben. Deren finale Gammastrahlung sollten Astronomen noch heute nachweisen können.
3. **Schwarze Minilöcher** könnten auch mit der Erde kollidieren und Beben auslösen. Doch die These, dass der Einschlag am Tunguskafluss von 1908 ein winziges Schwarzes Loch gewesen sein könnte, gilt als widerlegt. Alle astronomischen Suchaktionen nach diesen Objekten blieben bisher ergebnislos.

M. A. Von Abramowicz (✉)

Fakultät für Physik, Universität Göteborg, Göteborg, Schweden

E-Mail: marek.abramowicz@physics.gu.se

J. Tjus

Fakultät für Physik und Astronomie, Ruhr-Universität Bochum, Bochum, Deutschland

E-Mail: julia@tp4.rub.de

Am 30. Juni 1908 ging in Sibirien nahe dem Fluss Tunguska ein kosmischer Querschläger nieder. Er zerstörte 2000 km² der unbewohnten Taiga, knickte Millionen von Bäumen um und tötete zahlreiche Tiere. Von der Kollision erzeugte Druckwellen in der Atmosphäre ließen sich noch in England nachweisen. Doch in Sibirien fanden Forscher bei ihrer Expedition einige Jahre später keinerlei Einschlagkrater. Dies führte zu ausgiebigen wissenschaftlichen Debatten – mit zum Teil bizarren Spekulationen, um welche Art Objekt es sich da gehandelt haben könnte: einen Meteor aus Antimaterie, einen eisigen Kometen, eine Geheimwaffe, ein Ufo?

1973 stellten zwei amerikanische Physiker aus Texas, Albert A. Jackson und Michael P. Ryan, die Hypothese auf, dass in der Tunguska-Region die Miniversion eines Schwarzen Lochs eingeschlagen haben könnte. Ein solches Objekt müsste eine 100-mal größere Masse gehabt haben als der Dinosaurierkiller, der vor 65 Mio. Jahren auf Yukatan niederging. Dabei wäre es winzig gewesen – gerade mal einen Millimeter groß. Solche Schwarzen Minilöcher könnten, wie Stephen Hawking in den 1970er Jahren vermutete, in der allerersten Frühzeit des Universums entstanden sein.

Die Vermutung von Jackson und Ryan ließ sich gut überprüfen. Zum einen hätte ein Miniloch beim Eindringen in die Atmosphäre tatsächlich eine Explosion ausgelöst, die Wälder großflächig zerstört hätte; zum anderen hätte so ein winziges Objekt beim Einschlag mit mehreren dutzend oder hundert Kilometern pro Sekunde kaum einen Krater erzeugt. Es hätte unter flachem Eintrittswinkel die Erdkruste durchstoßen und wäre kurze Zeit später auf der anderen Seite – mitten im Atlantik – wieder ausgetreten und ins All verschwunden. Dabei wären Erd- und Seebeben erzeugt worden. Doch die auch 1908 schon tätigen seismologischen Stationen beiderseits des Atlantiks hatten an jenem 30. Juni keine Auffälligkeiten registriert. Das besiegelte auch schon das Ende der aufregenden Hypothese.

Heute sind fast alle Forscher davon überzeugt, dass in Sibirien 1908 – entgegen obigen Spekulationen – lediglich ein kleinerer Meteorit niedergegangen ist. Dennoch bleibt die Möglichkeit von Schwarzen Minilöchern für Astronomen interessant und führt zu weitergehenden Fragen: Woher stammen solche Minilöcher? Wie häufig könnten sie mit der Erde kollidieren?

Obwohl die Diskussion um diese Objekte sehr spekulativ ist, lassen sich für die Suche danach Grenzen festlegen – teils mit theoretischen Überlegungen, teils durch bereits vorhandene Beobachtungen. Ein Schwarzes Loch kann sich nur bilden, wenn eine stark konzentrierte Masse auf ein kleines Volumen komprimiert wird. Die Größe des zur Verfügung stehenden Raumbereichs hängt ab vom sogenannten Schwarzschild-Radius gemäß der Formel: $\text{Radius} = 3 \text{ km} \times \text{Masse} / \text{Sonnenmasse}$.

In kleinen Schwarzen Löchern müsste Materie noch wesentlich stärker zusammengepresst werden als in Atomkernen – was nur kurz nach dem Urknall passiert sein kann. Zu der Zeit war das Universum derart verdichtet, dass es in seinen eigenen Schwarzschild-Radius passte. Damit bildete der Kosmos selbst zwar noch kein Schwarzes Loch, es zeigt aber, wie dicht Materie und Strahlung seinerzeit komprimiert waren. Gleichzeitig dehnte sich das All sehr schnell aus, sodass ein Kollaps in Schwarze Löcher nur an jenen Orten stattfand, wo Quantenfluktuationen lokal ultradichte Regionen erzeugten. Forscher sind sich weitgehend einig, dass auf diese Weise kleine, so genannte primordiale Schwarze Löcher unterschiedlicher Größe entstanden sein könnten.

Einsteins allgemeine Relativitätstheorie sagt die Existenz Schwarzer Löcher voraus, erlaubt aber keine Aussagen über deren Massen. Die bisher von Astronomen beobachteten Himmelskörper dieses Typs fallen in zwei sehr unterschiedliche Massenbereiche: stellare und supermassereiche.

Entstehung nur kurz nach dem Urknall möglich

Stellare Schwarze Löcher haben mehrere Sonnenmassen sowie einen Durchmesser von wenigen dutzend Kilometern. In den letzten zwei Jahrzehnten wurden in der Milchstraße mehrere dieser Objekte entdeckt – alle in Doppelsternsystemen. Hier kreist jeweils ein Schwarzes Loch um einen gewöhnlichen Stern. Astronomen glauben jedoch, dass unsere Galaxie weit mehr dieser Doppelsternsysteme enthalten dürfte als die rund 20 bislang bekannten.

Stellare Schwarze Löcher entstehen am Ende des Lebens sehr schwerer Sterne in Supernova-Explosionen. Dabei kollabiert das Innere des Sterns unter der eigenen Schwerkraft und komprimiert die eingeschlossene Materie theoretisch bis über alle Grenzen hinaus. Ist die Ausgangsmasse hinreichend groß, bildet sich dabei ein Schwarzes Loch. Dessen Gravitation ist so stark, dass hinter einer bestimmten Grenze, dem sogenannten Ereignishorizont, selbst Licht nicht mehr entweichen kann. Obwohl noch nicht alle Details eines solchen Gravitationskollapses mit heutigen Supercomputern simuliert werden können, gelten seine physikalischen Grundlagen als relativ gut verstanden. Wir glauben daher recht genau zu wissen, wie stellare Schwarze Löcher entstehen.

Ihre supermassereichen Geschwister besitzen hingegen Massen vom Millionen- oder Milliardenfachen unserer Sonne. Ihre Größe reicht vom Durchmesser der Erd- bis zu dem der Pluto-Umlaufbahn. Solche Schwarzen Löcher haben Astronomen in den Zentren der meisten Galaxien aufgespürt, auch in der Milchstraße. Ihre Entstehung ist weniger gut verstanden als die der stellaren Schwarzen Löcher.

Die hypothetischen Schwarzen Minilöcher mit geringen Massen würden sich von den beiden Typen noch einmal deutlich unterscheiden. Sollte eines Tages ein solches Objekt nachgewiesen werden, dürfte es sich um einen primordialen Gast aus der Frühzeit des Universums handeln – einen Zeugen des Urknalls. Denn nur in der allerersten Frühzeit des Universums herrschten die notwendigen Bedingungen für ihre Entstehung, nämlich die überkritische Verdichtung der Materie in Quantenfluktuationen. Die Entdeckung eines derartigen Schwarzen Lochs wäre für Astrophysiker und Kosmologen von fundamentaler Bedeutung. Einerseits würde sie die Prozesse kurz nach dem Urknall beleuchten, andererseits – siehe unten – Stephen Hawking's These belegen, dass Schwarze Löcher nicht gar so schwarz sind, sondern verdampfen und explodieren können.

Trotz intensiver Suche wurden bislang jedoch noch keine Himmelsobjekte dieses Typs gefunden. Daran könnten ungeeignete Nachweismethoden schuld sein, oder Schwarze Minilöcher kommen in unserer Galaxie zu selten vor, oder die Natur hat sie einfach nicht hervorgebracht. Bis heute ist unklar, wo sie am besten aufgespürt werden könnten.

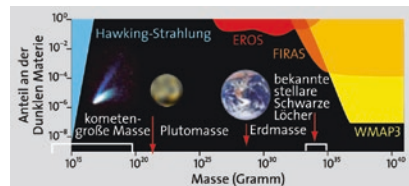
Die Suche nach primordialen Schwarzen Löchern

Einen Blick auf **primordiale Schwarze Löcher** zu werfen, dürfte schon deshalb nicht einfach sein, weil sie sehr klein sind und die meiste Zeit nahezu unsichtbar. Sie könnten allerdings charakteristische Spuren hinterlassen. Das Fehlen aller Hinweise führt zu starken Einschränkungen, wenn man ihren Beitrag zur Dunklen Materie in unterschiedlichen Massebereichen abschätzen will:

- **Kometengroße Massen** ($\sim 10^{15}$ Gramm): Diese Objekte sollten infolge der Hawking-Strahlung verdampfen. Da aber solche Zerfallssignale aus Gammastrahlung bislang nicht beobachtet wurden, dürfte diese Größenklasse primordialer Schwarzer Löcher weniger als das 10^{-8} -fache der Dunklen Materie ausmachen.
- **Planetengroße Massen** ($\sim 10^{25}$ Gramm und mehr): Mit Hilfe des Mikrolinseneffekts konnten ebenfalls noch keine Hinweise entdeckt werden. Mit Suchprogrammen erwarten Astronomen den Beitrag dieser Kategorie auf maximal zehn Prozent der Dunklen Materie einzugrenzen.
- **Sternengroße Massen** ($\sim 10^{30}$ Gramm und mehr): Analysen der kosmischen Hintergrundstrahlung lassen Rückschlüsse auf die Existenz solcher Schwarzer Löcher zu. Die bereits bekannten

derartigen Objekte können aber nicht in der Frühzeit des Universums entstanden sein, weil sie sonst einen starken Einfluss auf den (sehr gleichmäßigen) kosmischen Mikrowellenhintergrund ausgeübt hätten.

Daher können primordiale Schwarze Löcher mit Größen unterhalb von 10^{15} Gramm und oberhalb von 10^{25} Gramm als Hauptbestandteile der Dunklen Materie ausgeschlossen werden. Für die dazwischenliegenden gibt es noch keine guten Nachweismethoden. Diese Objekte mit Massen ähnlich der des Pluto scheinen sich spurlos durch das Universum zu bewegen – sofern sie überhaupt existieren. Selbst Kollisionen mit Objekten wie Sternen blieben für irdische Beobachter bisher verborgen.



SPKTRUM DER WISSENSCHAFT / BUSKE-GRAFIK, NACH: MAREK ABRAMOWICZ

Je mehr Energie Schwarze Minilöcher verlieren, desto heißer werden sie – bis sie explodieren

Manche Forscher halten es für möglich, dass solche Objekte Teil der sogenannten Dunklen Materie sind. Diese wiederum bildet ein Rätsel für

sich. Astronomische Präzisionsbeobachtungen haben zweifelsfrei ergeben, dass es im Universum viel zu wenig sichtbare Masse gibt, um allein gemäß den newtonschen Gesetzen die Geschwindigkeiten zu erklären, mit denen sich die Sterne voneinander wegbewegen. Daraus folgt, dass entweder das Schwerkraftgesetz einer Revision bedarf – oder dass es in der Milchstraße und anderen Galaxien große Mengen unsichtbarer Materie geben muss. Die meisten Forscher plädieren für letztere Erklärung. Andere halten es außerdem für möglich, dass ein Teil davon in unserer Galaxie aus primordialen Schwarzen Löchern besteht.

Wie könnten Astronomen das nachweisen? Und welche Konsequenzen hätte das? Diesen Fragen gehen die Experten nach, seitdem Stephen Hawking 1971 die Existenz von Miniaturlöchern postuliert hatte. Der britische Theoretiker schlug auch eine Methode vor, mit der sie nachgewiesen werden können – nämlich mittels einer Strahlung, die heute „Hawking-Strahlung“ heißt und von Schwarzen Löchern generell ausgehen soll. Demzufolge wären solche Objekte nicht völlig schwarz, sondern emittierten Elementarteilchen – ein Phänomen, das mit Quantenfluktuationen am Ereignishorizont zusammenhängt.

Dieser Teilchenstrom reduziert allmählich die Masse Meines Schwarzen Lochs, bis es sich mutmaßlich in einer gewaltigen finalen Explosion energiereicher Gammastrahlung auflöst. Diesem Prozess lässt sich eine Temperatur zuordnen, die mit $1/M$ variiert, sowie eine Lebensdauer proportional zu M^3 . Das heißt: Kleine Massen erhitzen sich schneller und existieren kürzer, große Massen haben Lebensdauern, die das Alter des Universums übertreffen. Primordiale Schwarze Löcher mit einer Masse von weniger als 10^{15} g (was der eines kleinen Kometen entspricht) wären heute bereits explodiert. Denn ihre Lebensdauer entspricht laut Hawking genau dem Alter des Universums von 13,7 Mrd. Jahren; sie würden also gerade in unserer kosmischen Epoche zerplatzen. Für ein Schwarzes Loch mit einer Sonnenmasse läge die Lebensdauer dagegen bei sagenhaften 10^{67} Jahren, würde aber bei 10^{11} Kg auf relativ kurze 2,7 Mrd. Jahre schrumpfen. Das wäre ein Objekt, das astronomische Spuren hinterlassen haben könnte.

Der Moskauer Astrophysiker Maxim Y. Khlopow und seine Kollegen berechneten, dass wir in der Dunklen Materie die Spuren der Gammastrahlung beobachten können müssten, die bei der Explosion kleiner Schwarzer Löcher freigesetzt würde. Leider konnten solche Strahlungsrelikte bislang nicht entdeckt werden. Das bisherige Fehlen jedes Hinweises in den Beobachtungsdaten lässt eher daran zweifeln, dass primordiale Schwarze Löcher tatsächlich Teil der Dunklen Materie sind.

Eine weitere Suchmethode hat der polnische Physiker Bohdan Paczynski (1940–2007) vorgeschlagen: Man könnte doch Schwarze Minilöcher als winzige Gravitationslinsen nutzen, die gemäß der allgemeinen Relativitätstheorie das Licht jeweils dahinterliegender Lichtquellen ablenken und fokussieren. Das umfangreichste Programm in dieser Richtung läuft derzeit am Ein-Meter-Teleskop des La-Silla-Observatoriums in Chile. Dort wird nach Planeten Ausschau gehalten, die als Mikrogravitationslinsen fungieren könnten. Auch Schwarze Minilöcher lassen sich so vielleicht aufspüren.

Hat die Natur sich gegen uns verschworen?

Laut einigen Forschern müssen auch sternähnliche Schwarze Löcher nicht unbedingt aus einem Sternkollaps hervorgegangen sein, sondern könnten aus der kosmischen Frühzeit stammen. Aber hätten sie sich damals überhaupt schon bilden können? Die Frage kann mithilfe der kosmischen Hintergrundstrahlung überprüft werden. Diese stammt aus der Zeit von etwa 300.000 Jahren nach dem Urknall und stellt einen der wichtigsten Belege dafür dar, dass dieser überhaupt stattgefunden hat. Sie entkoppelte sich damals von der übrigen Teilchensuppe und ist heute im Mikrowellenbereich nachweisbar.

Abgesehen von einer Verschiebung zu größeren Wellenlängen, die auf die Ausdehnung des Universums zurückgeht, blieb diese Strahlung weitgehend unverändert. Aus ihren Eigenschaften haben Theoretiker als Obergrenze abgeschätzt, dass Schwarze Löcher stellarer Masse höchstens 0,1 % der gesamten Dunklen Materie ausmachen können. Sonst hätten sie sich in der kosmischen Hintergrundstrahlung durch größere Fluktuationen verraten müssen, als beobachtet wurden.

So kann ausgeschlossen werden, dass besonders kleine primordiale Schwarze Löcher (unterhalb von 10^{15} g) und solche mit der Masse mehrerer Sonnen signifikant zur Dunklen Materie beitragen. Für solche mit der dazwischenliegenden Größe von Planetoiden (10^{15} bis 10^{21} g) gibt es bis heute keine Nachweismethode. Sollten diese den Löwenanteil der Dunklen Materie ausmachen, müssten sie auch häufig mit der leuchtenden Materie wechselwirken – insbesondere mit Sternen und ähnlichen Objekten.

Nur ließen sich leider solche Kollisionen nicht von der Erde aus beobachten. Denn zum einen müsste ein Schwarzes Miniloch dabei hinreichende Mengen an Energie – als elektromagnetische Strahlung – aussenden. Zum anderen müssten sich derartige Ereignisse häufig genug ereignen, dass wir sie zu unseren Lebzeiten beobachten können.

Die Natur scheint sich also geradezu gegen uns verschworen zu haben: Kollisionen von Schwarzen Löchern mit der Masse von Kometen wären häufig, setzten dann aber zu wenig Energie frei, um mit heutigen Teleskopen nachweisbar zu sein. Bei Zusammenstößen mit schwarzen Minilöchern in der Größenordnung von Planeten entstünden hingegen riesige Energiemengen, diese Objekte wären jedoch äußerst selten. So oder so erhalten wir keine Signale von Schwarzen Minilöchern mittlerer Größe, die mit stellaren Objekten kollidieren. Somit sehen die Astronomen bisher keine Möglichkeit, diese potenziellen Überreste des frühen Universums aufzuspüren, obwohl sie in unserer Galaxie möglicherweise in großer Zahl vorkommen.

Zu den neuesten Forschungsprojekten zählt die Suche nach Hinweisen auf bestimmte Schwingungen, mit denen sich Schwarze Minilöcher mit einer Masse oberhalb von 10^{21} g theoretisch nachweisen ließen: Die Kollision eines primordialen Schwarzen Lochs mit einem Stern ruft in dem Himmelskörper akustische Wellen hervor, die mit seismischen Sensoren gemessen werden könnten. Vielleicht kann man so ja doch noch herausfinden, ob größere Objekte dieser Art zur Dunklen Materie beitragen. Für den Massenbereich zwischen 10^{15} und 10^{21} g müssen Physiker allerdings ganz neuartige Forschungsansätze entwickeln.

Weiterführende Literatur

- Camenzind, M.: Compact Objects in Astrophysics: White Dwarfs, Neutron Stars and Black Holes. Springer, Heidelberg 2007
- Schulz, G., Vaas, R.: Hawkings Kosmos einfach erklärt: Vom Urknall zu den Schwarzen Löchern. Kosmos, Stuttgart 2011
- Sing, S.: Big Bang: Der Ursprung des Kosmos und die Erfindung der modernen Naturwissenschaft. dtv, München 2007

Marek A. Abramowicz promovierte an der Universität in Warschau und ist heute Professor für Astrophysik an der Universität in Göteborg. Er befasst sich vorwiegend mit Schwarzen Löchern, Quasaren, Neutronensternen und Gammastrahlenausbrüchen.

Julia Tjus promovierte an der Technischen Universität Dortmund und arbeitete danach an der Universität in Göteborg zusammen mit Marek Abramowicz über primordiale Schwarze Löcher. Heute ist sie an der Ruhr-Universität Bochum Professorin für Plasma-Astroteilchenphysik und arbeitet vor allem über hoch-energetische Teilchen in astrophysikalischen Quellen.



Kosmische Inflation auf dem Prüfstand

Paul J. Steinhardt

Nach gängiger Meinung blähte sich das Universum unmittelbar nach dem Urknall extrem auf. Doch das Modell dieser so genannten kosmischen Inflation beruht auf derart willkürlichen Annahmen, dass einige Forscher nach Alternativen suchen (aus *Spektrum der Wissenschaft* 8/2011).

AUF EINEN BLICK

FRAGWÜRDIGE VORAUSSETZUNGEN

1. Die **kosmische Inflation** gilt Astrophysikern als verbürgte Tatsache. Demnach lassen sich die „flache“ Geometrie und die Gleichförmigkeit des Kosmos durch einen intensiven Wachstumsschub kurz nach dem Urknall erklären.
2. Doch zu Beginn der Inflation müssen höchst **unwahrscheinliche Bedingungen** vorgelegen haben. Außerdem geht sie ewig weiter und erzeugt **unendlich viele Universen**, in denen völlig beliebige Verhältnisse herrschen können.
3. Manche Forscher bezweifeln, dass es sich dabei nur um Kinderkrankheiten der Theorie handelt. Sie diskutieren daher neue Ansätze, um das Modell zu retten oder durch ein anderes zu ersetzen – etwa jenes eines **zyklisch expandierenden und kollabierenden Universums**.

P. J. Steinhardt (✉)

Department of Astrophysical Science, Princeton University, Princeton, USA

E-Mail: steinh@princeton.edu

Vor 30 Jahren hielt das Wort Inflation in den kosmologischen Sprachgebrauch Einzug. Alan H. Guth, damals angehender Physiker am Stanford Linear Accelerator Center in Menlo Park (Kalifornien), postulierte einen kurzen Ausbruch extrem beschleunigter Expansion in den ersten Momenten nach dem Urknall. Mich faszinierte die Idee sofort, und seither denke ich fast jeden Tag darüber nach. Vielen meiner Kollegen aus der Astrophysik, Gravitations- und Teilchenforschung geht es genauso. Da wundert es kaum, dass die Theorie der kosmischen Inflation ein besonders aktives Forschungsgebiet ist.

Ihre Aufgabe besteht darin, eine klaffende Lücke in der Urknalltheorie zu füllen. Deren Grundidee besagt, dass das Universum sich seit seiner Entstehung vor 13,7 Mrd. Jahren langsam ausdehnt und abkühlt. Expansion und Abkühlung erklären viele Merkmale des heutigen Universums bis ins Detail – allerdings nur unter einer Voraussetzung: Das Universum hatte zu Beginn ganz bestimmte Eigenschaften. Zum Beispiel war es demnach von Anfang an extrem gleichförmig; die Materie- und Energieverteilung durfte nur ganz geringfügig variieren. Zudem musste es „geometrisch flach“ sein. So bezeichnen Astronomen ein Universum, in dem Lichtstrahlen und die Bahnen bewegter Objekte nicht durch weit gespannte Verzerrungen der Raumzeit gebeugt werden.

Aber warum soll das Ur-Universum so gleichförmig und „flach“ gewesen sein? Eigentlich muten diese Bedingungen höchst unwahrscheinlich an. Hier kam Guths Idee ins Spiel: Selbst wenn zu Beginn beliebige Unordnung im Universum herrschte – mit höchst ungleichförmiger Energieverteilung und ausgesprochen runzlicher Geometrie –, würde ein spektakulärer Wachstumsschub die Energie gleichmäßig verteilen und alle Raumverzerrungen schlagartig ausbügeln. Nach dieser Inflationsphase dehnte sich das Universum dann im gemächlicheren Tempo der ursprünglichen Urknalltheorie weiter aus – doch nun herrschten genau passende Bedingungen für die Entwicklung der heutigen Sterne und Galaxien.

Die Idee ist so unwiderstehlich, dass Kosmologen sie heute ihren Studenten und der Öffentlichkeit als feststehende Tatsache präsentieren. Im Lauf der Jahre geschah allerdings etwas Seltsames: Zwar wurden die Argumente für die Inflation immer stärker, jedoch mehrten sich auch die Einwände. Aber nur eine überraschend kleine Minderheit verfolgt die Gegenargumente – zu der auch ich gehöre. Die meisten Astrophysiker überprüfen stattdessen die Vorhersagen der etablierten Inflationstheorie, ohne sich um ihre Anfechtbarkeit zu kümmern. Sie hoffen, die Probleme würden allmählich verschwinden. Leider ist das nicht der Fall.

Da ich sowohl an der Inflationstheorie gearbeitet habe als auch an konkurrierenden Modellen, bin ich hin- und hergerissen. Wie mir scheint, wissen auch viele Kollegen nicht so recht, was sie von den Einwänden halten sollen. Um das Dilemma zuzuspitzen, stelle ich die kosmische Inflation im Folgenden quasi vor Gericht und vertrete dabei zwei entgegengesetzte Standpunkte: Zuerst präsentiere ich als Verteidiger die größten Vorteile der Theorie; dann liste ich als Ankläger die ungelösten Probleme auf.

Plädoyer der Verteidigung

Die Inflation ist so bekannt, dass die Verteidigung sich kurzfassen kann – ein paar Details genügen, um die Vorzüge zu würdigen. Das Modell beruht auf einer speziellen Größe namens inflationäre Energie, die das Universum in einem kurzen Augenblick erstaunlich stark aufzublähen vermag. Die Dichte dieser Energie muss ungeheuer groß sein und während der Inflationsphase fast konstant bleiben. Ungewöhnlich ist, dass ihre Kraft nicht anziehend, sondern abstoßend wirkt. Durch die Abstoßung schwillt der Raum rapide an.

Guths Idee wirkte so plausibel, weil Theoretiker bereits viele mögliche Quellen einer solchen Energie identifiziert hatten. Favorit ist ein hypothetischer Verwandter des Magnetfelds, ein sogenanntes Skalarfeld; im Fall der Inflation heißt es Inflatonfeld. Das berühmte Higgs-Teilchen, das derzeit mit dem Large Hadron Collider am CERN bei Genf gesucht wird, leitet sich von einem ähnlichen Skalarfeld her.

Wie jedes Feld hat das Inflaton in jedem Raumpunkt eine bestimmte Stärke, welche die Kraft angibt, die es auf sich selbst und auf andere Felder ausübt. Während der Inflationsphase ist diese überall fast konstant. Je nach Stärke enthält das Feld einen bestimmten Energiebetrag; Physiker sprechen von potenzieller Energie. Der Zusammenhang zwischen Feldstärke und Energie lässt sich als Kurve in einem Diagramm darstellen. Im Fall des Inflatons verläuft die Kurve wie der Querschnitt durch ein tiefes Tal neben einem sanft geneigten Plateau. Entspricht die Feldstärke anfangs einem Punkt auf dem Plateau, so büßt das Feld allmählich sowohl Stärke als auch potenzielle Energie ein und wandert den Abhang hinab. Gewissermaßen beschreiben die Feldgleichungen einen Ball, der einen Hügel von der Form der Energiekurve hinunterrollt.

Die potenzielle Energie des Inflatons kann eine beschleunigte Expansion des Universums verursachen und es dabei glätten und „verflachen“ – vorausgesetzt, das Feld bleibt lange genug (10–30 s) auf dem Plateau, um das Universum in jeder Richtung um einen Faktor von mindestens 1025 zu strecken. Die Inflation hört auf, wenn das Feld das Ende des Plateaus erreicht

und in das Energietal stürzt. Dort verwandelt sich die potenzielle Energie in die Materie- und Energieformen, die heute das Universum erfüllen – Dunkle Materie, heiße gewöhnliche Materie und Strahlung. Es beginnt eine Phase mäßiger, sich verlangsamender Expansion, in deren Verlauf sich die Materie zu kosmischen Strukturen verdichtet.

Die Inflation glättet das Universum ähnlich einem Gummituch, das bei straffer Spannung seine Falten verliert – zumindest weitgehend. Aufgrund von Quanteneffekten bleiben kleine Unregelmäßigkeiten übrig, denn die Gesetze der Quantenphysik fordern, dass das Feld nicht überall gleich stark ist, sondern zufällig schwankt. Wegen dieser Fluktuationen endet die Inflation in unterschiedlichen Raumregionen zu etwas verschiedenen Zeiten und erwärmt sie auf etwas unterschiedliche Temperaturen. Diese räumlichen Abweichungen sind die Keime späterer Sterne und Galaxien. Der Inflationstheorie zufolge sind die Schwankungen fast skaleninvariant; das heißt, sie hängen nicht von der Größe des Gebiets ab, sondern treten in jedem Maßstab mit gleicher Stärke auf.

Das Plädoyer für die Inflation lässt sich in drei Punkten zusammenfassen. Erstens: Sie ist geradezu unvermeidlich. Seit Guths Vorschlag haben theoretische Physiker Gründe für die Hypothese gefunden, wonach das frühe Universum Felder enthielt, welche die Inflation antreiben konnten; in der Stringtheorie und anderen „großen Vereinigungen“ der Naturkräfte treten solche Felder zu Hunderten auf. Im chaotischen Urzustand des Kosmos gab es gewiss ein Raumgebiet, wo eines dieser Felder die Bedingungen für Inflation erfüllte.

Zweitens erklärt die Inflation, warum das All heute so gleichförmig und geometrisch „flach“ ist. Niemand weiß, wie es unmittelbar nach dem Urknall aussah, aber wegen der Inflation muss man das gar nicht wissen, denn die Phase der beschleunigten Expansion dehnte das Universum in die richtige Form.

Drittens und vor allem liefert die inflationäre Theorie exakt zutreffende Vorhersagen. Viele Messungen der kosmischen Hintergrundstrahlung und der Galaxienverteilung bestätigen, dass die räumlichen Energieschwankungen im frühen Universum fast skaleninvariant waren.

Plädoyer der Anklage

Dass eine Theorie versagt, kündigt sich oft durch kleine Diskrepanzen zwischen Beobachtung und Vorhersage an. Das ist hier nicht der Fall: Die empirischen Daten stimmen hervorragend mit den theoretischen Vorhersagen aus dem Beginn der 1980er Jahre überein. Die Argumente gegen die Inflation betreffen vielmehr das logische Fundament der

Theorie. Funktioniert sie wirklich wie angekündigt? Entsprechen die Vorhersagen von vor 30 Jahren immer noch unserem heutigen Verständnis des Inflationsmodells? Tatsächlich gibt es gute Gründe, beide Fragen zu verneinen.

Das erste Argument der Verteidigung besagte, die Inflation sei unvermeidlich. Doch die Sache hat einen Haken: Schlechte Inflation ist wahrscheinlicher als gute. Mit schlechter Inflation ist eine Periode beschleunigter Expansion gemeint, deren Ergebnis den Beobachtungen widerspricht. Beispielsweise können die Temperaturunterschiede zu groß ausfallen. Das hängt von der genauen Gestalt der Energiekurve ab; diese wird durch einen numerischen Parameter bestimmt, der im Prinzip völlig beliebige Werte annehmen kann. Nur ein extrem schmaler Wertebereich führt zu der beobachteten Temperaturverteilung. In einem typischen Inflationsmodell muss der Wert bei 10–15 liegen, das heißt bei 0,0000000000000001. Eine abweichende Zahl, etwa 10–12 oder 10–8, würde schlechte Inflation ergeben: ähnlich stark beschleunigte Expansion, aber viel zu große Temperaturunterschiede.

Wir könnten die schlechte Inflation ignorieren, wenn sie kein Leben zuließe. Dann würden wir derart große Temperaturschwankungen, selbst wenn sie prinzipiell möglich wären, niemals beobachten. Dieses Argument ist als anthropisches Prinzip bekannt. Doch hier greift es nicht. Größere Temperaturabweichungen würden zu mehr Sternen und Galaxien führen; das Universum wäre sogar noch wohnlicher als heute.

Schlechte Inflation ist wahrscheinlicher als gute, aber noch wahrscheinlicher ist gar keine Inflation. Der Physiker Roger Penrose von der University of Oxford wies darauf erstmals in den 1980er Jahren hin. Aus thermodynamischen Prinzipien, wie sie für Atome und Moleküle in einem Gas gelten, berechnete er die möglichen Anfangskonfigurationen des Inflaton- und Gravitationsfelds. Einige dieser Anordnungen führen zur Inflation und damit zu fast gleichförmiger Materieverteilung und „flacher“ Geometrie. Andere Konfigurationen ergeben aber auch ohne Inflation ein derartiges Universum. Beide Fälle sind allerdings so selten, dass ein „flaches“ Universum insgesamt unwahrscheinlich wird. Der Knalleffekt dabei: Ein solches Universum ohne Inflation ist laut Penrose um den Faktor 10^{100} wahrscheinlicher als eines mit Inflation!

Die Katastrophe ewiger Inflation

Ein anderer Ansatz, der zum selben Schluss kommt, nutzt geltende physikalische Gesetze, um den gegenwärtigen Zustand des Kosmos in die Vergangenheit zu extrapolieren. Die Extrapolation ist nicht eindeutig:

Viele Ereignisfolgen können zum heutigen flachen und glatten Zustand geführt haben. Im Jahr 2008 zeigten Gary W. Gibbons von der University of Cambridge und Neil G. Turok vom Perimeter Institute for Theoretical Physics in Ontario, dass die meisten Extrapolationen nur unwesentlich Inflation enthalten. Das passt zum Ergebnis von Penrose.

Beide Schlussfolgerungen wirken zunächst nicht plausibel, denn ein flaches und glattes Universum ist erst einmal unwahrscheinlich, und die Inflation wäre ein starker Mechanismus, um das nötige Glätten und Verflachen zu erreichen. Doch dieser Vorteil wird anscheinend völlig durch die Tatsache aufgehoben, dass die Bedingungen für das Auslösen einer Inflation noch viel unwahrscheinlicher sind. Demzufolge hätte das Universum seinen gegenwärtigen Zustand wohl ohne Inflation erreicht.

Viele Physiker finden diese theoretischen Einwände allerdings weniger überzeugend als das stärkste Argument für die Inflation: Die vor drei Jahrzehnten formulierten Vorhersagen werden heute durch kosmologische Beobachtungen glänzend bestätigt. Dennoch hat dieser Triumph einen üblen Beigeschmack, denn die Prognosen der frühen 1980er Jahre beruhten auf einem naiven Bild der Inflation – und dieses Bild hat sich als völlig falsch erwiesen.

Der Umschwung begann mit der Erkenntnis, dass die Inflation ewig ist: Wenn sie einmal begonnen hat, hört sie nie wieder auf. Diese Tatsache folgt direkt aus der Quantenphysik einer beschleunigten Expansion. Bekanntlich können Quantenfluktuationen das Ende der Inflation hier und da ein wenig verzögern. Wo diese Schwankungen klein sind, fallen auch ihre Wirkungen minimal aus. Doch die Fluktuationen gehorchen dem Zufallsprinzip. In manchen Raumregionen werden sie groß sein und zu erheblichen Verzögerungen führen.

Echte Verzögerungsgebiete sind freilich so extrem seltene Ausreißer, dass man versucht sein könnte, sie zu ignorieren. Das darf man aber nicht, denn sie blähen sich inflationär auf. Dadurch wachsen sie blitzartig über das Gebiet hinaus, in dem die Inflation rechtzeitig zum Stillstand kam. So entsteht ein Meer von inflationär expandierendem Raum um eine kleine Insel aus heißer Materie und Strahlung. Außerdem bringen Ausreißer weitere Ausreißer hervor sowie neue Materieinseln – jede ein eigenständiges Universum. Der Vorgang schreitet ungehemmt fort und erzeugt eine unbegrenzte Anzahl von Inseln, die von immer mehr inflationär expandierendem Raum umgeben werden. Dieses beunruhigende Bild ist aber noch längst nicht alles – das Beste kommt erst.

Die Inseln sind nämlich nicht alle gleich. Wegen des Zufallscharakters der Quantenphysik sind einige höchst ungleichförmig oder stark gekrümmt.

Ihre Ungleichmäßigkeit scheint der oben beschriebenen schlechten Inflation zu ähneln, sie hat aber eine andere Ursache. Schlechte Inflation tritt auf, weil die Parameter, welche die Form der Energiekurve steuern, meist zu groß sind. Hier jedoch folgt die Ungleichförmigkeit aus ewiger Inflation und zufälligen Quantenfluktuationen, ganz unabhängig von den Parameterwerten.

Und im Grunde handelt es sich nicht nur um einige Inseln, sondern um unendlich viele. In einem ewig inflationären Universum haben unendlich viele Inseln Eigenschaften, wie wir sie kennen – aber unendlich viele andere nicht. Das eigentliche Ergebnis der Inflation hat Guth am besten zusammengefasst: „In einem ewig inflationären Universum geschieht alles, was überhaupt geschehen kann; es geschieht sogar unendlich oft.“

Ist unser Universum also die Ausnahme von der Regel? Das lässt sich bei einer unendlichen Ansammlung von Inseln schwer beantworten. Angenommen, ein Sack enthält endlich viele Ein- und Zweieuromünzen, deren Anzahl wir kennen. Greifen wir blind hinein, können wir vorher-sagen, welches Geldstück wir am wahrscheinlichsten in der Hand halten werden. Doch wenn der Sack unendlich viele Münzen enthält, geht das nicht. Um die Wahrscheinlichkeiten zu bestimmen, können wir versuchen, die entnommenen Münzen in Stapeln zu sortieren.

Zunächst legen wir eine Zweieuromünze hin, dann daneben eine Eineuromünze, dann eine zweite Zweieuromünze und eine zweite Eineuromünze auf die jeweils entsprechende erste und so weiter. Diese Prozedur vermittelt uns den Eindruck, es gebe gleich viele Münzen von jeder Sorte. Doch dann probieren wir ein anderes System aus: Wir stapeln erst zehn Zweieuromünzen, dann eine Eineuromünze, dann wieder zehn zwei Euro, dann eine Eineuromünze und so fort. Nun haben wir den Eindruck, auf jeden einzelnen Euro kämen zehn Zweieuromünzen.

Das Ausmaß unseres Versagens

Welche Zählmethode ist richtig? Die Antwort lautet: keine. Unendlich viele Münzen lassen sich auf unendlich viele Arten sortieren, und das ergibt unendlich viele Wahrscheinlichkeiten. Es gibt kein richtiges Verfahren, um herauszufinden, welche Münze wahrscheinlicher ist. Ebenso wenig lässt sich in einem ewig inflationären Universum die Wahrscheinlichkeit eines Inseltyps bestimmen.

Jetzt sollten Sie wirklich beunruhigt sein. Was bedeutet die Aussage, die Inflation treffe bestimmte Vorhersagen – zum Bei-spiel, das Universum sei gleichförmig oder zeige skaleninvariante Fluktuationen –, wenn alles, was geschehen kann, unendlich oft geschieht? Und wenn die Theorie keine

prüfbar. Vorhersagen macht, wie können die Kosmologen dann weiter behaupten, sie stimme mit den Beobachtungen überein?

Die Theoretiker sind sich zwar des Problems bewusst, aber sie halten es für lösbar. Sie hoffen, das naive Bild der Inflation aus den frühen 1980er Jahren wiederherstellen zu können – obwohl sie seither vergeblich um eine plausible Lösung ringen. Einige versuchen, nichtewige Inflationstheorien auszuhecken, um die unendliche Vielfalt der Universen im Keim zu ersticken. Doch Ewigkeit ist eine natürliche Konsequenz der Kombination von Inflation und Quantenphysik. Um sie zu vermeiden, muss das Universum in einem sehr speziellen Anfangszustand und mit einer speziellen Form von inflationärer Energie beginnen; nur dann hört die Inflation überall im Raum auf, bevor Quantenfluktuationen eine Chance bekommen, sie erneut in Gang zu setzen. In diesem Szenario hängt das beobachtete Ergebnis äußerst empfindlich vom Anfangszustand ab. Das widerspricht jedoch dem eigentlichen Zweck der Inflation: Sie soll das Ergebnis unabhängig von den zuvor herrschenden Bedingungen erklären.

Ein anderer Ansatz nimmt an, dass Inseln wie unser Universum das wahrscheinlichste Ergebnis der Inflation sind. Zu diesem Zweck wird ein sogenanntes Maß postuliert, das regelt, wie man die Wahrscheinlichkeit unterschiedlicher Inseln gewichtet – als würde man uns im Beispiel mit dem Sack Münzen etwa vorschreiben, wir sollten immer drei Zweieuro Münzen pro fünf Eineuro Münzen stapeln. Die willkürliche Einführung eines Maßbegriffs kommt jedoch dem Eingeständnis gleich, dass die Inflationstheorie für sich genommen gar nichts erklärt oder vorhersagt.

Theoretiker haben viele plausible Maße vorgeschlagen, die zu unterschiedlichen Schlüssen führen. Zum Beispiel besagt das Volumenmaß, dass man Inseln durch ihre Größe messen soll – auf den ersten Blick eine vernünftige Wahl, denn die Inflation soll ja große Volumina erzeugen, die so gleichförmig und „flach“ sind wie unser Kosmos. Leider versagt das Volumenmaß, weil es Verzögerung bevorzugt. Das zeigt der Vergleich von Inseln wie der unseren mit anderen, die später – nach mehr Inflation – entstanden sind. Aufgrund des exponentiellen Wachstums der Inflation werden die späteren Regionen ein sehr viel größeres Gesamtvolumen einnehmen. Darum sind Gebiete, die jünger sind als unseres, unermesslich viel häufiger, und es wäre unwahrscheinlich, dass wir überhaupt existieren.

Die Verfechter der Maßidee gehen nach dem Prinzip von Versuch und Irrtum vor. Sie erfinden und erproben ein Maß nach dem anderen, bis eines vielleicht das erhoffte Resultat liefert: dass unser Universum besonders wahrscheinlich ist. Angenommen, sie haben einen Tages Erfolg. Dann werden sie erklären müssen, was dieses Maß vor allen anderen auszeichnet, und

womöglich noch eine Rechtfertigung für diese Erklärung finden müssen, und so weiter.

Andere Forscher berufen sich auf das anthropische Prinzip. Während das Maßkonzept besagt, dass wir auf einer typischen Insel leben, nimmt das anthropische Prinzip an, unsere Insel sei sehr untypisch, biete aber die Voraussetzungen für die Entstehung von Leben. Die Bedingungen in typischen Inseln seien hingegen unvereinbar mit Galaxien oder Sternen oder einer anderen Voraussetzung für Lebensformen unserer Art. Obgleich die typischen Inseln viel mehr Raum einnehmen als solche, die unserer Insel gleichen, könnten wir erstere ignorieren, denn uns interessieren nur Gebiete, in denen Menschen möglich sind.

Diese Idee hat aber leider den Nachteil, dass unser Universum flacher, glatter und präziser skaleninvariant ist, als es sein müsste, um Leben zu ermöglichen. Typischere, insbesondere jüngere Inseln sind fast ebenso bewohnbar wie unsere, aber viel häufiger.

Von der oft zitierten Behauptung, die kosmologischen Daten hätten die wichtigsten Aussagen der Inflationstheorie verifiziert, bleibt im Licht dieser Argumente wenig übrig. Richtig ist, dass die Daten die Vorhersagen der ursprünglichen naiven Theorie bestätigen, aber das ist nicht die inflationäre Kosmologie von heute. Der naiven Theorie zufolge führt die Inflation zu einem Ergebnis, das den Gesetzen der klassischen Physik gehorcht. In Wahrheit gehorcht die Inflation aber der Quantenphysik, und alles, was geschehen kann, geschieht auch. Doch wenn die Inflationstheorie keine klaren Vorhersagen trifft, wozu ist sie dann gut?

Das eigentliche Problem ist, dass Verzögerung nicht bestraft, sondern belohnt wird. Da Ausreißergebiete, die das Ende der Inflation hinauszögern, beschleunigt weiterwachsen, gewinnen sie unweigerlich die Oberhand. Besser wäre es, wenn jede Ausreißerregion langsamer expandieren würde – oder sogar schrumpfen. Der weitaus größte Teil des Universums bestünde dann aus braven Regionen, in denen die Glättungsphase rechtzeitig aufhört, und unser Universum wäre angenehm normal.

Gezähmte Verzögerung

Genau diese Eigenschaft besitzt die so genannte zyklische Theorie, die meine Kollegen und ich vorschlagen. Demnach ist der Urknall nicht der Beginn von Raum und Zeit, sondern eher ein „Rückprall“ (bounce) von einer vorherigen Kontraktions- zu einer Expansionsphase, die mit der Erzeugung von Materie und Strahlung einhergeht. Die Theorie ist zyklisch, denn nach rund einer Billion Jahre geht die Expansion in Kontraktion über, und diese führt dann über einen neuen Rückprall wieder zur Expansion. Entscheidend

ist, dass die Glättung des Universums vor dem Urknall stattfindet – während der Kontraktionsperiode. Alle Ausreißergebiete schaffen sich quasi selbst ab: Die Nachzügler ziehen sich noch weiter zusammen, während brave Regionen bereits rechtzeitig den Rückprall durchmachen und zu expandieren beginnen. Darum bleiben die Ausreißer vernachlässigbar klein.

Die Glättung während der Kontraktion hat eine beobachtbare Konsequenz. Im Lauf jeder Glättungsphase, ob in der inflationären oder der zyklischen Theorie, erzeugen Quantenfluktuationen kleine, sich ausbreitende Verzerrungen der Raumzeit, sogenannte Gravitationswellen, die in der kosmischen Hintergrundstrahlung eine charakteristische Spur hinterlassen. Die Amplitude der Wellen ist proportional zur Energiedichte. Die Inflation müsste bei extrem hoher Dichte des Universums stattfinden, während der entsprechende Vorgang im zyklischen Modell einen praktisch leeren Kosmos voraussetzt. Darum wären die vorhergesagten Spuren völlig verschieden: Ohne Inflation wären sie viel schwächer. Freilich ist die zyklische Theorie relativ neu und mag ihre Probleme haben, doch sie zeigt, dass Alternativen denkbar sind, die nicht mit dem unkontrollierbaren Makel der ewigen Inflation behaftet sind. Unsere bisherigen Resultate legen nahe, dass das zyklische Modell auch andere hier beschriebene Probleme vermeidet.

Gewiss habe ich meine Plädoyers pro und kontra Inflation extrem zugespitzt, ohne Nuancen und ohne ein Kreuzverhör zuzulassen. Viele führende Theoretiker sind überzeugt davon, die erwähnten Probleme seien nur Kinderkrankheiten und sollten unser Vertrauen in die Grundidee nicht erschüttern. Ich und andere wenden ein, die Kritikpunkte beträfen den Kern der Theorie; diese müsse entweder grundlegend verändert oder komplett verworfen werden.

Letzten Endes werden Daten entscheiden, insbesondere Vermessungen des kosmischen Mikrowellenhintergrunds. Schon wird auf Berggipfeln, mit Stratosphärenballons und Satelliten nach den Spuren von Gravitationswellen gesucht; Resultate sind in den nächsten zwei, drei Jahren zu erwarten. Die Entdeckung einer Gravitationswellenspur würde das Inflationsmodell stützen; ihr Ausbleiben brächte es in ernste Schwierigkeiten. Um die Inflation trotz eines Nullresultats zu retten, müssten die Kosmologen für das Inflatonfeld ein speziell geformtes Potenzial annehmen, das die Gravitationswellen unterdrückt – doch das mutet gekünstelt an. Viele Forscher würden dann eher einer Alternative wie dem Modell des zyklischen Universums zuneigen, weil es aus sich heraus ein unbeobachtbar kleines Gravitationswellensignal vorhersagt. Das Resultat wird uns jedenfalls der Antwort auf die Frage, wie das Universum so wurde, wie es ist, und was künftig aus ihm werden soll, ein entscheidendes Stück näher bringen.

Weiterführende Literatur

- Carroll, S.: From Eternity to Here: The Quest for the Ultimate Theory. Dutton Adult, New York 2010
- Guth, A.: Die Geburt des Kosmos aus dem Nichts: Die Theorie des inflationären Universums. Droemer Knaur, München 2002
- Linde, A.: Quantum Cosmology, Inflation, and the Anthropic Principle. In: Barrow, J. D. et al. (Hg.): Science and Ultimate Reality: Quantum Theory, Cosmology and Complexity. Cambridge University Press, 2004
- Steinhardt, P. J., Turok, N.: Endless Universe: Beyond the Big Bang. Doubleday, New York 2007

Weblinks

- www.scientificamerican.com/apr2011/inflation Ein kurzes Video illustriert die ewige Inflation; US-Blogger diskutieren den Artikel.
- <http://arxiv.org/abs/hep-th/0609095> Preprint von Gibbons, G. W., Turok, N.: The Measure Problem in Cosmology. In: Physical Review D 77, Paper Nr. 063516, 2008

Paul J. Steinhardt ist Direktor des Princeton Center for Theoretical Science an der Princeton University (US-Bundesstaat New Jersey). Er ist Mitglied der National Academy of Sciences und wurde 2002 für seine Beiträge zur Inflationstheorie mit der Dirac-Medaille des International Center for Theoretical Physics ausgezeichnet. Außerdem war er an der Entdeckung von Quasikristallen in der Festkörperphysik beteiligt.



Wellenschlag des Urknalls

Lawrence M. Krauss

Die unmittelbar auf den Urknall folgende Phase der kosmischen Inflation erzeugte Gravitationswellen, die im kosmischen Strahlungshintergrund feinste Spuren hinterließen. Die kürzlich beobachtete „Verwirbelung“ der kosmischen Mikrowellenstrahlung wird allerdings größtenteils vom Staub in der Milchstraße erzeugt. Schon bald sollen präzisere Messungen aus den galaktischen Staubsignalen die Spur der kosmischen Inflation herausfiltern (aus *Spektrum der Wissenschaft* 3/2015).

AUF EINEN BLICK

EINE SPUR DER KOSMISCHEN INFLATION?

1. Im März 2014 meldeten Astrophysiker, sie hätten **Gravitationswellen** nachgewiesen, die in den ersten Augenblicken nach dem Urknall entstanden seien.
2. Obwohl diese Entdeckung sich nicht bestätigt hat, suchen Forscher weiter nach Spuren von Vorgängen am **Beginn der Zeit**, insbesondere aus der Phase der kosmischen Inflation.
3. Solche Gravitationswellen würden zudem indirekte Indizien für die **Existenz eines „Multiversums“** liefern, in dem unser All nur eines von vielen separaten Universen wäre.

L. M. Krauss (✉)

Department of Physics, Arizona State University Tempe, Tempe, USA

E-Mail: krauss@asu.edu

Im März 2014 sorgte die Pressekonferenz eines Teams von Astronomen für eine wissenschaftliche Sensation. Die Forscher behaupteten, mit ihrem am Südpol stationierten Mikrowellenteleskop hätten sie ein Signal beobachtet, das praktisch vom Anbeginn der Zeit stamme. Das von ihnen analysierte Polarisationsmuster der kosmischen Hintergrundstrahlung sei von Gravitationswellen bei der Entstehung des Universums verursacht worden – nur 10^{-36} s nach dem Urknall.

Hätte sich das Ergebnis bestätigt, könnten wir nun Ideen über den Ursprung des Alls empirisch testen, die bisher bloße Spekulation waren. Wir könnten unsere Theorien der subatomaren Quantenwelt mit den auf Einsteins allgemeiner Relativitätstheorie beruhenden kosmologischen Modellen verbinden. Und vielleicht fänden wir sogar Indizien für die Existenz anderer Universen.

Allerdings meldeten sich schon bald nach der spektakulären Ankündigung skeptische Stimmen, die letztlich auch Recht behielten. Offenbar sind raffiniertere Experimente nötig, um solche Gravitationswellen definitiv nachzuweisen. Das wird vermutlich nicht lange dauern. Bis dahin herrscht unter Kosmologen gespannte Erwartung.

Die Entdeckung von Inflationsspuren in der Hintergrundstrahlung würde zwei Paradoxien des frühen Universums auflösen. Das erste Problem betrifft die Geometrie des Alls im Großen und Ganzen. In den 13,8 Mrd. Jahren seit dem Urknall hat sich das Universum unentwegt ausgedehnt und ist dabei in seinen drei Dimensionen insgesamt fast völlig „flach“ geblieben – das heißt, in ihm pflanzt sich das Licht im Durchschnitt geradlinig fort.

Allerdings stellt ein solches flaches All gemäß der allgemeinen Relativitätstheorie ein eher unwahrscheinliches Ergebnis der Entwicklung dar. Da Materie und Strahlung fast während der gesamten Geschichte des Universums die vorherrschenden Energieformen waren, muss ein nicht ganz ebenes All sich unter dem Einfluss der Gravitationsanziehung immer mehr vom flachen Gesamtzustand entfernen. Wäre das Universum jemals nur ein wenig krumm geworden, würde es heute einen sattelförmig gekrümmten Raum einnehmen – oder geschlossen wie eine Kugeloberfläche sein. Weil der Kosmos noch immer flach erscheint, müssen seine anfänglichen Eigenschaften ungeheuer fein abgestimmt gewesen sein.



Im Großen und Ganzen sieht das Universum in jeder Blickrichtung gleich aus – es ist isotrop: Die Dichte der Galaxien bietet in jedem Himmelsausschnitt ungefähr das gleiche Bild wie in dieser Aufnahme des Hubble-Weltraumteleskops. Die Isotropie des Weltalls lässt sich am besten durch eine Phase rapider Inflation erklären, die direkt auf den Urknall folgte. (NASA; ESA; G. Illingworth, D. Magee, and P. Oesch, University of California, Santa Cruz; R. Bouwens, Leiden University; and the HUDF09 Team)

Das zweite Paradoxon ist die Tatsache, dass das All in allen Richtungen gleich aussieht: Es ist „isotrop“. Das ist seltsam, denn das von der einen Seite des beobachtbaren Universums ausgehende Licht konnte erst vor Kurzem die andere Seite erreichen. Das bedeutet, dass weit entfernte Regionen früher nicht miteinander kommunizieren konnten – oder wie Physiker sagen: Sie standen nicht in kausaler Verbindung. Wie können sie sich dann derart gleich entwickelt haben?

1980 fand ein junger US-Physiker namens Alan Guth eine Lösung für diese Paradoxien: Er postulierte, das Universum habe sich sofort nach seiner Entstehung rapide ausgedehnt. Guth kam auf diese Idee, die er Inflation taufte, durch die so genannte spontane Symmetriebrechung. Dieser Grundbestandteil des Standardmodells der Teilchenphysik beschreibt, was geschieht, wenn ursprünglich vereinigte Kräfte sich trennen.

Offenbar hat eine spontane Symmetriebrechung bereits mindestens einmal im Universum stattgefunden. Gemäß der elektroschwachen Theorie wirken zwei Grundkräfte – der Elektromagnetismus und die für den radioaktiven Kernzerfall verantwortliche schwache Kraft – heutzutage unterschiedlich, obwohl sie einst eine einzige, vereinheitlichte Kraft bildeten. Als das Universum sich rund 10^{-12} s nach seiner Entstehung abzukühlen begann, fand ein Phasenübergang statt – wie beim Übergang von flüssigem

Wasser zu Eis –, der das Wesen des leeren Raums veränderte. Er füllte sich mit einem Hintergrundfeld, das entfernt dem elektrischen Feld ähnelt, aber viel schwerer zu entdecken ist.

Argumente für die kosmische Inflation

Dieses sogenannte Higgs-Feld beeinflusst die Art, wie sich Teilchen durch den Raum bewegen. Solche, die mit dem Feld wechselwirken – beispielsweise die Quantenteilchen der schwachen Kraft –, erfahren einen Widerstand, durch den sie sich als massetragende Partikel verhalten. Teilchen, die nicht mit dem Feld interagieren – zum Beispiel das Photon, Träger der elektromagnetischen Kraft –, bleiben masselos. Deshalb begannen die schwache und die elektromagnetische Kraft sich unterschiedlich zu verhalten: Die Symmetrie, die sie zuvor vereint hatte, wurde gebrochen. Dieses zunächst rein hypothetische Bild hat sich bestätigt, als 2012 mit dem Large Hadron Collider (LHC) der Europäischen Organisation für Kernforschung Cern bei Genf das Higgs-Boson nachgewiesen wurde.

Wie Guth annahm, fand noch früher eine ähnliche Symmetriebrechung statt. Vor diesem Ereignis waren demnach drei der vier Grundkräfte – mit Ausnahme der Gravitation – miteinander vereinigt: die elektromagnetische und die schwache Kraft sowie die starke Kraft, welche Protonen und Neutronen zusammenhält. Tatsächlich sprechen indirekte Indizien dafür, dass die Symmetrie dieser drei Kräfte rund 10^{-36} s nach dem Urknall gebrochen wurde. Wegen der Abkühlung des Universums könnte ein besonders früher Phasenübergang den Raum verändert und ein Hintergrundfeld erzeugt haben, unter dessen Einfluss sich die elektroschwache Kraft anders zu verhalten begann als die starke Kraft.

Wie im Fall des Higgs-Felds gehören auch zu diesem symmetriebrechenden Feld exotische und sehr massereiche Quantenteilchen – doch ihre Massen müssen noch viel größer sein. Um sie nachzuweisen, müsste man einen Beschleuniger bauen, der zehn Billionen Mal mehr Energie liefert als der LHC. Das hypothetische Modell heißt große vereinheitlichte Theorie oder GUT (grand unified theory), denn es vereinigt die drei Grundkräfte außer der Gravitation zu einer einzigen Kraft.

Guth erkannte, dass eine spontane Symmetriebrechung unmittelbar nach dem Urknall die erwähnten Paradoxien aufzulösen vermag, sofern das symmetriebrechende Feld wenigstens kurzfristig in einem „metastabilen“ Zustand verharret. Wasser gerät in einen metastabilen Zustand, wenn die Umgebungstemperatur schnell unter den Gefrierpunkt fällt. Sobald das unterkühlte Wasser endlich doch gefriert, setzt es Energie frei,

so genannte latente Wärme. In ähnlicher Weise speicherte das für den GUT-Phasenübergang verantwortliche Feld für kurze Zeit enorm viel latente Energie im gesamten Raum. Während der kurzen Inflationsphase erzeugte diese Energie eine abstoßende Gravitationswirkung, die das All mit exponentiell wachsender Geschwindigkeit auseinandertrieb. Der Keim des heute beobachtbaren Universums nahm in weniger als 10^{-36} s um mehr als 25 Größenordnungen zu. Die extreme Expansion machte den Kosmos flach und isotrop wie einen stark aufgeblasenen Luftballon. Damit beseitigt die Inflation auf natürliche Weise die beiden Paradoxien der großräumigen Struktur des Universums.

Zwar ist die Inflation eine überzeugende Idee. Doch vorderhand fehlt uns eine fundamentale Theorie, aus der unter anderem die präzisen Energieniveaus hervorgehen, bei denen die vereinheitlichten Naturkräfte einst auseinanderbrachen. Die einfachsten Inflationstheorien erklären viele Eigenschaften des heutigen Kosmos, aber verschiedene Versionen der Inflation führen zu höchst unterschiedlichen Universen. Was uns fehlt, ist ein direkter Nachweis, dass die Inflation tatsächlich stattfand, sowie Aufschluss über die ihr zugrunde liegende Physik. Gravitationswellen bieten die Möglichkeit dazu.

Gravitationswellen

Als Albert Einstein 1915 seine allgemeine Relativitätstheorie veröffentlichte, erwähnte er, dass aus ihr ein faszinierendes neues Phänomen folge. Die Theorie beschreibt Gravitationsfelder als Verzerrungen der Raumzeit. Eine sich über die Zeit verändernde Energiequelle – ein um seine Sonne kreisender Planet oder ein Doppelsternsystem – erzeugt eine solche zeitlich schwankende Verzerrung, die sich mit Lichtgeschwindigkeit ausbreitet. Wenn derartige Gravitationswellen zwei Objekte in ihrer Nähe passieren, verändern sie deren Abstand zueinander geringfügig.

Da die Schwerkraft viel schwächer wirkt als der Elektromagnetismus, sind Gravitationswellen äußerst schwierig zu entdecken – oder, wie Einstein mutmaßte, überhaupt nicht. 100 Jahre später ist es uns zwar noch immer nicht gelungen, die von kollidierenden Schwarzen Löchern und anderen kosmischen Katastrophen ausgehenden Gravitationswellen direkt zu messen. Doch zum Glück gibt es eine viel stärkere Quelle: die fluktuierenden Quantenfelder unmittelbar nach dem Urknall.

Vor der Inflationsphase war das Universum auf subatomare Größe zusammengepresst. Bei solch winzigen Größenordnungen regiert die Quantenmechanik. Andererseits lassen sich die in diesem fast punktförmigen Raum herrschenden extremen Energien nur relativistisch beschreiben. Darum benötigte Guth die Quantenfeldtheorie; sie vereinigt die Quantenmechanik mit

der speziellen Relativitätstheorie, welche Bewegungen von Teilchen und Feldern in der Raumzeit beschreibt. Der Quantenfeldtheorie zufolge sind alle Felder bei sehr kleinen Größenordnungen wilden Schwankungen unterworfen. Auch die Gravitationsfelder müssen in der Inflationsphase heftig fluktuiert haben.

Im Lauf der Inflation blähte sich jede zunächst winzige Quantenfluktuation durch die exponentielle Expansion zu größeren Wellen auf. Bei genügend großer Wellenlänge übertraf die Schwingungszeit sogar das Alter des damaligen Universums. Die Quantenfluktuation wurde quasi eingefroren, bis das Universum alt genug war, wieder Oszillationen zu erlauben. Während der Inflation wuchsen die eingefrorenen Schwingungen, und die anfänglichen Quantenfluktuationen vergrößerten sich zu makroskopischen Gravitationswellen.

Ungefähr zu der Zeit, als Guth die Inflation postulierte, bemerkten die russischen Physiker Alexei A. Starobinski und Waleri A. Rubakow unabhängig voneinander, dass die Inflation stets einen Hintergrund von Gravitationswellen erzeugt und dass deren Intensität von der im Inflationsfeld gespeicherten Energie abhängt. Das heißt: Wenn wir die Gravitationswellen der Inflation entdecken können, gewinnen wir nicht nur eine direkte Bestätigung für das Inflationsszenario, sondern auch einen Einblick in die Quantenprozesse, die ihm zugrunde liegen.

Strahlende Spuren

Doch wie lassen sich solche zwar großräumigen, aber wegen der schwachen Schwerkraft ungemein geringfügigen Raumzeitschwingungen aufspüren? Da kommt der kosmische Mikrowellenstrahlungshintergrund ins Spiel. Diese Strahlung stammt aus einer Zeit, als das frühe Universum erstmals so weit abkühlte, dass Protonen Elektronen einfangen und neutrale Atome bilden konnten; dadurch wurde das All lichtdurchlässig. Somit ist der Mikrowellenhintergrund die älteste Strahlung, die uns erreicht. Wenn es 380.000 Jahre nach dem Urknall, als diese Strahlung entstand, großräumige Gravitationswellen gab, dann können wir vielleicht deren Spuren im Strahlungshintergrund entdecken.

Damals schwebten die freien Elektronen in einem geringfügig anisotropen Strahlungsbad, denn die großräumigen Gravitationswellen stauchten den Raum in einer Richtung und streckten ihn in einer anderen. Dieser Effekt verzerrte den Strahlungshintergrund ein klein wenig – möglicherweise nachweisbar. Die räumliche Deformierung durch Gravitationswellen bewirkte, dass die Amplitude der Hintergrundstrahlung in einer Schwingungsebene größer war als in der dazu rechtwinkligen Ebene. Das heißt, die Hintergrundstrahlung wurde polarisiert.

Eine Polarisation des Strahlungshintergrunds ist allerdings noch kein Beweis für Gravitationswellen. Sie kann auch von Temperaturschwankungen im Strahlungshintergrund herrühren oder sogar von Quellen im Vordergrund, insbesondere von polarisiertem Staub in der Milchstraße. Erst eine genaue Analyse des räumlichen Polarisationsmusters am Himmel vermag die mögliche Wirkung urchöflicher Gravitationswellen von anderen Effekten zu trennen.

Vor allem ein „verwirbeltes“ Muster, der sogenannte B-Polarisationsmodus, ist charakteristisch für Gravitationswellen, während ein nicht verwirbeltes Muster namens E-Modus von anderen Quellen stammt. Dieser 1997 entdeckte Zusammenhang bedeutet, dass eine Polarisationsmessung der Hintergrundstrahlung ein viel kleineres Gravitationswellensignal zu identifizieren vermag als eine bloße Messung der Temperaturschwankungen im Strahlungshintergrund, in denen der winzige von Gravitationswellen verursachte Anteil wahrscheinlich von anderen Fluktuationen überdeckt wird. Seither suchen zahlreiche irdische und satellitengestützte Experimente nach dem heiligen Gral der Inflation.

Die Forscher stellen ihre Messresultate als das Verhältnis r eines möglicherweise durch Gravitationswellen erzeugten Polarisationssignals zu der Größe der gemessenen Temperaturfluktuation dar. Bis 2014 wurden nur obere Grenzen für die Polarisation der Hintergrundstrahlung angegeben. Das heißt, wir wussten, die Polarisation konnte nicht größer sein, sonst hätten wir sie bemerkt. Den Messungen des Planck-Weltraumteleskops der europäischen Weltraumbehörde ESO zufolge konnte r irgendwo zwischen 0 – keinerlei Gravitationswellen – und 0,13 liegen. Darum war die Aufregung groß, als das BICEP2-Experiment (Background Imaging of Cosmic Extragalactic Polarization 2) im März 2014 meldete, es habe mit seinem genaueren Messinstrument ein größeres r von 0,2 gefunden und somit Gravitationswellen nachgewiesen; die Wahrscheinlichkeit, dass eine Hintergrundstörung das beobachtete Signal produziert habe, sei kleiner als eins zu einer Million. Die Art des Signals spreche deutlich für seine Herkunft aus dem Inflationsprozess.

Leider erwies sich die Behauptung als unbegründet. Auch andere astrophysikalische Prozesse können Effekte erzeugen, die ein Gravitationswellensignal der Inflation vortäuschen – insbesondere der polarisierte Staub in unserer Milchstraße. In letzter Zeit hat der Planck-Satellit neue Messungen geliefert, denen zufolge die Milchstraße mehr Staub enthält, als das BICEP2-Team angenommen hatte. Mehrere Gruppen haben das BICEP2-Signal im Licht der neuen Daten analysiert und bessere Modelle für den galaktischen Staub angewandt. Demnach könnte der polarisierte

Staub das BICEP2-Signal großteils oder sogar vollständig verantworten. Das BICEP2-Team steht dennoch zu seinen Resultaten: Die Form des beobachteten Spektrums passe auffallend gut zu einem Inflationssignal – jedenfalls besser als zu einem bloßen Staubeffekt. Doch geplante neue Experimente – unter anderem die Kollaboration BICEP3 – werden schon bald fortfahren, hinter dem galaktischen Staubschleier das feine Signal der Inflation aufzuspüren.

Die große Vereinigung

Falls ein Inflationssignal die Tests besteht, könnte dadurch unser empirisches Wissen über den Kosmos in nie gekannter Weise wachsen. Gravitationswellen interagieren so schwach mit Materie, dass sie praktisch ungehindert vom Beginn der Zeit zu uns gelangen. Sie würden uns ein direktes Signal vom physikalischen Zustand des nur 10^{-36} s alten Universums übermitteln – 49 Größenordnungen vor der Zeit, als der kosmische Strahlungshintergrund entstand.

Die mutmaßliche Stärke des Gravitationswellensignals besagt, dass die Energie der Inflation dem Energieniveau für die große Vereinigung der drei nichtgravitativen Naturkräfte entsprach – allerdings nur, falls die sogenannte Supersymmetrie gilt. Diese hypothetische Natursymmetrie sagt wiederum zahlreiche neue Teilchen vorher, welche der LHC nachweisen könnte, wenn er mit voller Kraft in Betrieb geht. Das verdeutlicht den engen Zusammenhang zwischen Kosmologie und Teilchenphysik.

Da von der Inflation stammende Gravitationswellen entstehen, wenn sich urtümliche Quantenfluktuationen des Schwerefelds inflationär aufblähen, muss die Gravitation durch eine Quantentheorie beschrieben werden. Derzeit besitzen wir keine hieb- und stichfeste Theorie, welche die Schwerkraft nach den Regeln des Mikrokosmos beschreibt. Ein Kandidat wäre die Stringtheorie, doch sie bleibt vorderhand nur eine attraktive Hypothese. Wie Freeman Dyson vom Institute for Advanced Study in Princeton (New Jersey) betont hat, gibt es keinen irdischen Apparat, der einzelne Gravitationsquanten zu entdecken vermag. Jeder derartige Detektor müsste so groß und dicht sein, dass er zu einem Schwarzen Loch kollabieren würde, bevor er eine Beobachtung vollenden könnte. Dyson vertritt daher den Standpunkt, wir könnten nie mit Sicherheit sagen, ob sich die Schwerkraft überhaupt durch eine Quantentheorie beschreiben lässt.

Doch falls sich Gravitationswellen der Inflation nachweisen lassen, erledigen sie Dysons Argument. Allerdings bleibt ein Schlupfloch übrig. Da die inflationären Gravitationswellen klassische – nicht quantentheoretische – Objekte sind, können wir ihren Ursprung zwar quantenmechanisch

beschreiben, aber das gilt für jedes Resultat der klassischen Physik, etwa für die Bewegung einer Billardkugel. Der Anblick einer rollenden Billardkugel beweist nicht, dass Quantenmechanik dahintersteckt; die Bewegung würde genauso aussehen, wenn es keine Quantenmechanik gäbe. Wir müssen also eigens beweisen, dass die Gravitationswellen der Inflation, anders als Bewegungen einer Billardkugel, aus quantenmechanischen Prozessen hervorgehen.

Dieses Schlupfloch haben mein Kollege Frank Wilczek vom Massachusetts Institute of Technology in Cambridge und ich kürzlich geschlossen. Mit der sogenannten Dimensionsanalyse – sie untersucht physikalische Phänomene anhand der numerischen Einheiten für Masse, Raum und Zeit – konnten wir zeigen, dass ein nur durch Inflation erzeugter Gravitationswellenhintergrund nicht auftritt, wenn die plancksche Konstante gleich null gesetzt wird und somit alle Quanteneffekte verschwinden. Das bedeutet: Falls BICEP2 tatsächlich von der Inflation stammende Gravitationswellen gemessen hat, muss die Gravitation durch eine Quantentheorie beschrieben werden.

Das plausible Multiversum

Wie ist das Universum entstanden? Warum existiert es überhaupt? Auch zu fast metaphysisch anmutenden Fragen können die Gravitationswellen der Inflation etwas beitragen. Die Inflation wird von einem Feld angetrieben, das während eines Phasenübergangs riesige Energiemengen speichert und freisetzt. Zu den notwendigen Eigenschaften dieses Felds gehört, dass es niemals aufhören kann, das Universum aufzublähen. Doch wenn die Inflation endlos weitergeht, kann daraus nicht der uns vertraute Kosmos hervorgehen: Jede vorhandene Materie und Strahlung würde durch die Expansion unendlich verdünnt, und nur ein rasend expandierendes Vakuum bliebe übrig.

Der russische Kosmologe Andrei Linde von der Stanford University in Kalifornien fand einen Ausweg. Wie er zeigte, kann eine anfangs kleine Raumregion nach endlicher Expansion ihren Phasenübergang vollenden und unser ganzes heute beobachtbares Universum umfassen. Im übrigen Raum kann die Inflation ewig weitergehen, wobei sich hier und da kleine „Keime“ bilden, in denen der Phasenübergang jeweils auch irgendwann zum Abschluss kommt. In jedem Keim entsteht durch heißen Urknall ein eigenes Universum.

In diesem Szenario der „ewigen Inflation“ ist unser Kosmos bloß Teil einer viel größeren, vielleicht unendlich großen Struktur; sie enthält eine beliebige Anzahl separater Universen, die längst entstanden sind, gerade entstehen oder einmal entstehen werden. Da in jedem Keim ein anderer Phasenübergang die Inflation beendet, herrscht in jedem Universum

eine eigene Physik. Demnach ist unser All nur eines von unermesslich vielen, physikalisch unterschiedlichen Universen. Möglicherweise haben die Naturkonstanten in unserer Welt nur zufällig ihre Werte. In einem Universum mit anderen Konstanten könnten sich Beobachter wie wir gar nicht entwickeln. Dieses so genannte anthropische Prinzip stößt viele ab; für sie zeigt es nur, wie weit sich die Grundlagenphysik von solider empirischer Methodik zu verabschieden droht.

Doch falls es uns mit BICEP3, LHC und anderen Experimenten gelänge, die Probleme der kosmischen Inflation und der großen Vereinigung zu lösen, könnten wir entscheiden, ob die Existenz unseres Universums Lindes ewige Inflation voraussetzt. Zwar würden wir andere Universen niemals direkt beobachten können, aber wir wären dann von ihrer Existenz ebenso felsenfest überzeugt, wie die meisten Physiker zu Beginn des 20. Jahrhunderts von der Existenz der – damals nicht direkt beobachtbaren – Atome überzeugt waren. Vielleicht wird eine Polarisationsanalyse der kosmischen Hintergrundstrahlung vom Typ des BICEP3-Experiments schon bald Erkenntnisse über die Entstehung des Alls liefern, gegen die sogar der Umsturz der Physik durch die Quantentheorie im 20. Jahrhundert verblasst.

Weiterführende Literatur

- Ade, P. A. R. et al.: (BICEP2 Collaboration): Detection of B-Mode Polarization at Degree Angular Scales by BICEP2. In: Physical Review Letters 112, 241101, 2014
- Gibney, E.: Gravitational-Waves Hunt Enters Next Phase. In: Nature 518, S. 16–17, 2015
- Krauss, L. M. et al: Primordial Gravitational Waves and Cosmology. In: Science 328, S. 989–992, 2010
- Krauss, L. M.: Ein Universum aus Nichts – und warum da trotzdem etwas ist. Knaus, München 2013
- Eine populäre Darstellung des kosmologischen Wissensstands von einem Experten
- Lykken, J., Spiropulu, M.: Supersymmetrie in der Krise. In: Spektrum der Wissenschaft 9/2014, S. 36–43 Wenn der Large Hadron Collider am CERN nicht bald supersymmetrische Teilchen aufspürt, droht eine Krise der Grundlagenphysik.

Lawrence M. Krauss ist theoretischer Physiker und Kosmologe sowie Mitbegründer und Direktor des Origins Project an der Arizona State University in Tempe.



Der verborgene Kosmos

Bogdan A. Dobrescu und Don Lincoln

Viele Beobachtungen im Universum legen nahe, dass es neben der sichtbaren Materie noch eine andere, „dunkle“ Komponente geben müsste. Lange waren die Forscher von nur einer Sorte an Teilchenkandidaten dafür ausgegangen: den WIMPs. Doch möglicherweise ist die unsichtbare Seite des Alls weitaus vielfältiger (aus *Spektrum der Wissenschaft* 11/2015).

AUF EINEN BLICK

SORTENREICHE DUNKLE SEITE

1. Wissenschaftler wissen durch astronomische Beobachtungen, dass es im Universum **mehr Materie** geben muss, als sie in heutigen Experimenten beobachten können.
2. Bislang haben sich viele Physiker vergeblich darauf konzentriert, ein **einzelnes Teilchen** zu finden, das dafür verantwortlich sein könnte. Doch inzwischen erscheinen exotische Theorien immer plausibler, die von einem **Zusammenspiel vieler verschiedener Kandidaten** ausgehen.
3. Derart komplexe Dunkle Materie könnte nicht nur **Atome und Moleküle bilden**, sondern sogar ganze **unsichtbare Galaxien** inmitten der Spiralarme der bekannten Sternensinseln.

B. A. Dobrescu (✉) · D. Lincoln

Theoretical Physics Department at Fermilab, U.S. Department of Energy
Office of Science, Batavia, USA

E-Mail: bdob@fnal.gov

D. Lincoln

E-Mail: lincoln@fnal.gov

Viele Spiralgalaxien wie die Andromedagalaxie stellen uns vor ein Rätsel: Ihre Rotationsgeschwindigkeit lässt sich nicht mit den bekannten Gesetzen der Physik erklären. Denn aufgrund der Schwerkraft der sichtbaren Materie sollten die Sterne in den Außenregionen langsamer rotieren, als sie es tatsächlich tun.

Deshalb glauben Kosmologen, dass eine Form nicht sichtbarer Materie – die so genannte Dunkle Materie – solche Galaxien umgibt und durchdringt. Sie sollte eine zusätzliche Komponente der Gravitation beisteuern, welche die beobachtete Rotationsgeschwindigkeit erklärt. Diese Dunkle Materie, die vermutlich 25 % der Gesamtmasse des Universums ausmacht, könnte auch die Ursache für bestimmte, bisher rätselhafte Effekte im Kosmos sein. So etwa für die extrem hohen Eigengeschwindigkeiten von Galaxien innerhalb von Galaxienclustern, für die Materieverteilung, die sich ergibt, wenn zwei solche Cluster miteinander kollidieren, oder für gewisse Beobachtungen des Gravitationslinseneffekts – die Ablenkung von Licht im Gravitationsfeld ferner Galaxien.

Die einfachsten Modelle postulieren für die Dunkle Materie nur eine einzige Teilchensorte. Doch trotz jahrelanger Suche ist es den Forschern noch nicht gelungen, deren Existenz nachzuweisen. Außerdem weichen einige astronomische Beobachtungen von manchen Vorhersagen dieser einfachen Theorie ab. Aus diesem Grund haben einige Wissenschaftler die traditionellen Vorstellungen infrage gestellt und ein komplizierteres Bild der Dunklen Materie entworfen. Demnach sollte diese aus verschiedenen Teilchensorten bestehen und könnte ähnlich komplex aufgebaut sein wie gewöhnliche Materie.

Möglicherweise wirken sehr starke, bisher ungeahnte Kräfte zwischen diesen Teilchen, welche die gewöhnliche Materie kaum oder gar nicht spürt. Jüngste Beobachtungen von kollidierenden Galaxien könnten diese Hypothese stützen. Außerdem würden solche Kräfte die Abweichung zwischen den einfachen Modellen für Dunkle Materie und einigen anderen Beobachtungen erklären.

Existenz im Verborgenen

Zwar wissen wir nicht, wie die Dunkle Materie aufgebaut ist. Aber aus bestimmten Beobachtungen können wir – neben ihrer gravitativen Wirkung auf die gewöhnliche Materie – noch auf einige andere Eigenschaften von ihr schließen. So müssen wir davon ausgehen, dass sie sich sehr viel langsamer als mit Lichtgeschwindigkeit bewegt, aber zugleich eine verhältnismäßig große Ruhemasse besitzt. Sonst hätten aus den Dichtefluktuationen im frühen Universum nicht die heutigen Galaxienstrukturen entstehen

können. Und da sie weder elektromagnetische Strahlung absorbiert noch aussendet, muss die Dunkle Materie elektrisch neutral sein. Zudem scheint sie nicht auf die starke Kraft anzusprechen, welche die Atomkerne der gewöhnlichen Materie zusammenhält. Denn wäre dies der Fall, hätten wir bereits Hinweise auf die Wechselwirkung von Dunkler Materie mit hoch-energetischen, geladenen Teilchen der kosmischen Strahlung beobachten müssen. Allerdings glaubten Wissenschaftler bis vor Kurzem, die Dunkle Materie würde vielleicht über die schwache Kraft wechselwirken, die für den Betazerfall verantwortlich ist. Jedoch widersprechen neueste Beobachtungen auch dieser Vermutung.

Außerdem muss Dunkle Materie über kosmische Zeitskalen hinweg stabil bleiben. Denn es gibt keinen zuverlässigen Mechanismus, der kontinuierlich neue erzeugen könnte. Deshalb sollte sie ebenso wie die gewöhnliche Materie bereits beim Urknall entstanden sein. Ein Teilchen als stabil zu bezeichnen, heißt aber auch: Es besitzt eine Eigenschaft, die unter allen Umständen erhalten bleibt, eine sogenannte Erhaltungsgröße. Das bedeutet, dass ein Teilchen nicht zerfallen kann, falls diese spezifische Eigenschaft dabei verloren ginge. Tatsächlich tendieren Teilchen dazu, in leichtere zu zerfallen – es sei denn, irgendetwas hindert sie daran. Das Elektron zum Beispiel ist geladen. Die einzigen stabilen Teilchen aber, die leichter als dieses sind, tragen keine elektrische Ladung: die Neutrinos und das Photon. Vom Standpunkt der Energieerhaltung könnte das Elektron zwar in diese Teilchen zerfallen, doch die Ladungserhaltung verbietet solche Übergänge.

Die meisten theoretischen Modelle der Dunklen Materie schreiben diesen Teilchen eine Erhaltungsgröße zu, die aus historischen Gründen Parität heißt. Davon besitzen die Dunkle-Materie-Teilchen den Wert -1 , alle Teilchen der gewöhnlichen Materie den Wert $+1$. Die Parität verbietet es einem Dunkle-Materie-Teilchen, in gewöhnliche Materie zu zerfallen und umgekehrt.

Die einfachste Theorie, die all diese Forderungen in sich vereinigt, geht von einem einzigen Dunkle-Materie-Teilchen namens WIMP (Abkürzung für weakly interacting massive particle) aus. Es gibt viele theoretische Gründe, die für WIMPs sprechen. Sie nachzuweisen, gestaltet sich aber viel schwieriger, als die Physiker das ursprünglich erwartet haben. Seit den 1990er Jahren führen sie Experimente durch, mit denen sie versuchen wollen, WIMPs aufgrund der postulierten sehr seltenen Wechselwirkung mit gewöhnlicher Materie nachzuweisen.

Um bei ihren Experimenten die notwendige Messempfindlichkeit zu erreichen, kühlen die Forscher die Detektoren auf extrem niedrige Temperaturen herunter. Außerdem platzieren sie sie tief unter der Erde, um

sie von kosmischer Strahlung abzuschirmen. Diese könnte nämlich ähnliche Signaturen hervorrufen wie die Dunkle Materie. Doch obwohl solche Experimente kontinuierlich verbessert wurden, existieren bisher noch keine schlüssigen Anzeichen für WIMPs. Und selbst wenn das Modell viele Beobachtungen im All erklären kann, lässt es sich nicht mit allen vereinbaren.

Zum Beispiel sagt die WIMP-Theorie eine viel größere Anzahl von Zwerggalaxien voraus, welche die Milchstraße umkreisen sollten, als wir beobachten. Außerdem sollte sich die Dunkle Materie in den Zentren von Galaxien noch mehr konzentrieren, als die gemessenen Rotationsraten es vermuten lassen. Allerdings wurden kürzlich im Rahmen des Dark Matter Survey weitere Zwerggalaxien in der Nachbarschaft der Milchstraße entdeckt. Dies könnte das Problem zumindest Bezug auf unsere Heimatgalaxie lösen. Nichtsdestoweniger haben die Ungereimtheiten die Tür für unkonventionellere Theorien geöffnet.

Komplexe Parallelwelt

Anstatt eines einzigen Dunkle-Materie-Teilchens wäre es auch denkbar, dass verschiedene Teilchenklassen existieren und ebenso eine Vielzahl an Kräften, die nur auf die Dunkle Materie wirken. Diese Teilchen könnten zum Beispiel eine neuartige dunkle Ladung tragen, aufgrund deren sie sich anziehen oder abstoßen, aber dennoch im herkömmlichen Sinn elektrisch neutral sein. So wie gewöhnliche Teilchen mit elektrischer Ladung Photonen – die Träger der elektromagnetischen Kraft – emittieren, könnte die neue Stoffgattung dunkle Photonen aussenden.

Die Parallelen zu der Welt aus gewöhnlicher Materie müssen aber irgendwo ihre Grenzen haben. Denn wir wissen: Normale Materie kann dank der Emission von Photonen Energie austauschen und abstrahlen. Das ist letztlich der Grund dafür, warum Galaxien schließlich Scheiben bilden: Die Gaswolken in ihnen emittieren elektromagnetische Energie, wodurch sie auskühlen und verklumpen. Wegen der Drehimpulserhaltung fällt die Materie aber nicht zentriert in sich zusammen, sondern bildet eine Scheibe. Wenn dieselben Regeln für die Dunkle Materie gelten sollten, müsste auch sie eine solche Scheibe bilden. Doch es ist bekannt, dass die meiste Dunkle Materie, die sich in uns bekannten Galaxien befindet, eher sphärisch verteilt ist. Daher können wir eine solche exakte Spiegelwelt ausschließen.

Eines der einfachsten Szenarien, das von zwei unterschiedlichen dunklen Teilchensorten ausgeht, gibt einen Einblick in die physikalischen Gesetze, wie sie in komplexerer Dunkler Materie gelten könnten. Existierten zwei Arten von dunkler Ladung – eine positive und eine negative –, gäbe es auch

eine Form von dunklem Elektromagnetismus und damit dunkle Photonen. Und so wie sich Teilchen gewöhnlicher Materie gegenseitig annihilieren, wenn sie auf ihre Antiteilchen treffen, sollten dunkle Materieteilchen das ebenfalls können und dabei dunkle Photonen aussenden.

Nun können wir bestimmte Schlüsse über die Stärke des dunklen Elektromagnetismus und die Häufigkeit solcher Vernichtungsreaktionen ziehen, wenn wir bedenken, wie diese Kraft Galaxien indirekt beeinflusst. Da die Dunkle Materie bei den meisten Galaxien in einem sphärischen Halo verteilt und nicht wie normale Materie abgeplattet ist, können wir davon ausgehen, dass die Dunkle Materie nicht mit derselben Rate Energie über dunkle Photonen verliert wie gewöhnliche Materie über ihre Photonen. Falls dennoch eine dunkle Ladung existieren sollte, dürfte diese nach einer Studie von Lotty Ackerman und ihren Kollegen vom California Institute of Technology aus dem Jahr 2009 nur etwa ein Prozent der Ladung gewöhnlicher Materie betragen. Doch selbst bei so einem kleinen Wert könnte sie bedeutsame Folgen für Galaxien und ihre Entwicklung haben.

Eine andere interessante Idee von „teilweise wechselwirkender Dunkler Materie“ haben JiJi Fan, Andrey Katz, Lisa Randall und Mathew Reece von der Harvard University 2013 vorgeschlagen. Dabei gehen die Wissenschaftler davon aus, dass der Hauptanteil der Dunklen Materie aus WIMPs besteht, forderten aber noch zwei weitere Teilchentypen mit den Eigenschaften von Fermionen: ein schweres und ein leichtes, die beide dunkle Ladung besitzen. Fermionen sind Teilchen mit einem quantenmechanischen Spin von $\frac{1}{2}$ wie etwa unsere Protonen, Neutronen und Quarks, aus denen Erstere bestehen. Diese dunklen Fermionen können sich gegenseitig anziehen und dunkle Photonen emittieren.

Die Chemie der dunklen Seite

Zwar darf man die Analogie nicht überinterpretieren, aber der Vorschlag ähnelt doch sehr einem Modell mit einem dunklen Proton, einem dunklen Elektron und einem dunklen Photon. Je nach Masse und Ladung der dunklen Fermionen könnten sie sich zu dunklen Atomen zusammenfinden und ihre eigene dunkle Chemie, dunkle Moleküle und vielleicht sogar noch komplexere Strukturen bilden. Das Konzept der dunklen Atome haben David E. Kaplan, Gordan Z. Krnjaic, Keith R. Rehermann und Christopher M. Wells bereits 2010 an der Johns Hopkins University in Baltimore detailliert untersucht.

Die Harvard-Wissenschaftler mit der Idee zu den dunklen fermionischen Teilchen haben anhand astronomischer Beobachtungen eine obere Grenze für den Anteil der stark über dunklen Elektromagnetismus

wechselwirkenden Dunklen Materie abgeschätzt. Dabei kamen sie zu dem Schluss, dass deren gesamte Masse so groß wie jene der sichtbaren Materie sein könnte. Nach diesem Modell besteht die Milchstraße aus einer großen kugelförmigen Wolke aus WIMP-ähnlichen Teilchen, die 70 % der gesamten Masse ausmacht und in die zwei abgeflachte Scheiben eingebettet sind, die jeweils 15 % beisteuern. Eine dieser Scheiben besteht aus gewöhnlicher Materie und schließt die Spiralarme ein, die wir sehen können. Die andere besteht aus stark wechselwirkender Dunkler Materie. Diese beiden Scheiben dürften eine ähnliche räumliche Orientierung aufweisen. Allerdings sollte diejenige aus Dunkler Materie keine Sterne oder größere Planeten enthalten. Denn deren gravitative Auswirkung auf die gewöhnliche Materie in der Milchstraße hätte man bereits beobachten müssen. Insgesamt würde eine solche zusätzliche Scheibe unsere sichtbare Galaxie kaum beeinflussen.

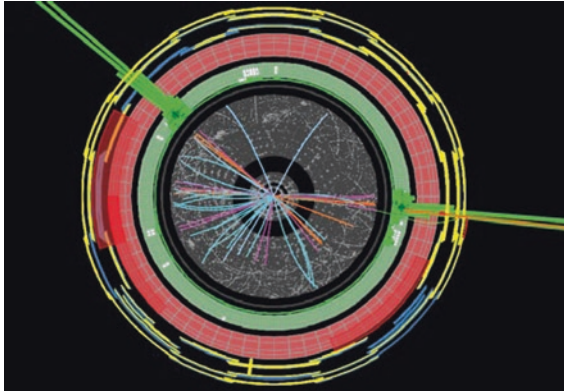
Nach Teilchen komplexer Dunkler Materie suchen Wissenschaftler auf dieselbe Weise wie nach den WIMPs: mit hochempfindlichen Detektoren im Untergrund. Diese sollten die Geräte aber häufiger passieren, als die einfachen WIMP-Modelle es vorhersagen. Und das würde die Wahrscheinlichkeit erhöhen, sie aufzuspüren. Zusätzlich zu solchen Experimenten hoffen Physiker darauf, Dunkle Materie in Teilchenbeschleunigern zusammen mit all den übrigen exotischen Teilchen zu erzeugen.

Ein bunter Strauß an Experimenten

Da wir sehr wenig über die Wechselwirkung von Dunkler Materie mit gewöhnlicher wissen – und damit auch nicht darüber, welche Prozesse in Beschleunigern stattfinden könnten –, haben Wissenschaftler ein breit aufgestelltes Forschungsprogramm in Angriff genommen. Es schließt eine ganze Reihe von Modellen ein, angefangen beim einfachen WIMP bis hin zu komplexeren Formen Dunkler Materie. Doch müssen wir hierbei einige Annahmen machen, nämlich zum Beispiel, dass die beiden Materieformen über eine oder mehrere Kräfte wechselwirken, die zwar stärker als die Gravitation (die ja die schwächste aller bekannten Kräfte ist) sind, aber dennoch so schwach, dass sie sich bisher nicht beobachten ließen. Außerdem wäre diese Kraft anders geartet als die oben vorgeschlagene dunkle elektromagnetische. Sollte Dunkle Materie jedoch allein über die Schwerkraft mit gewöhnlicher wechselwirken, werden wir sie niemals in einem Beschleuniger erzeugen oder sie in irgendeiner direkten Suche finden können.

Außerdem schränkt die Beschleunigerleistung des Large Hadron Collider (LHC) am CERN bei Genf, der weltweit die höchsten Energien erzeugt, die Suche nach schwereren Teilchensorten von Dunkler Materie ein. Denn je schwerer ein Teilchen ist, desto mehr Energie wird benötigt, um es in

einem Beschleuniger zu erzeugen. Dasselbe gilt für solche Dunkle-Materie-Teilchen, die umso häufiger wechselwirken, je höhere Energien sie haben.



Bei Kollisionen mit zwei Protonen wie hier am ATLAS-Detektor des CERN finden sich Signaturen, die mit einigen Modellen für Dunkle Materie vereinbar sind (grüne Linien). (ATLAS Collaboration, CERN)

Da wir bereits wissen, dass Dunkle Materie nur sehr schwach die gewöhnliche beeinflusst, können wir nicht erwarten, sie im Detektor direkt zu beobachten. Dieser besteht ja selbst aus normaler Materie. Deshalb suchen Wissenschaftler stattdessen nach Teilchenkollisionen, bei denen scheinbar Energie verloren geht. So könnten zum Beispiel nach der Kollision zweier Protonen in die eine Richtung ein oder mehrere bekannte Teilchen wegfliegen und einige der Dunklen Materie in die andere Richtung. Als Signatur eines solchen Ereignisses messen wir die Energie auf der einen Seite des Detektors, aber nicht auf der anderen.

Mit einer gewissen Häufigkeit sollten solche asymmetrischen Ereignisse auch für den Fall auftreten, dass es keine Dunkle Materie existiert. Bisher gibt es am LHC keine Anzeichen für einen Überschuss. Das deutet also darauf hin, dass Dunkle Materie mit gewöhnlicher selten wechselwirkt, wenn überhaupt. Doch nachdem der LHC nun nach einer Pause mit höheren Kollisionsenergien wieder in Betrieb ist, gibt es neue Möglichkeiten, um solche Anzeichen zu finden.

Zusätzlich zu diesen Suchmethoden, die sich sowohl für WIMPs als auch für komplexe Dunkle Materie eignen, gibt es Ansätze, die mehr auf letztere Form zugeschnitten sind. Viele davon suchen nach dem dunklen Photon. Einige Modelle gehen davon aus, dass dunkle Photonen sich nach den Gesetzen der Quantenmechanik kontinuierlich in gewöhnliche Photonen umwandeln können und wieder zurück. Letztere sollten sich im

Prinzip beobachten lassen. Manchen Modellen zufolge könnten die dunklen Photonen (anders als die gewöhnlichen) auch eine Ruhemasse besitzen. Dann könnten sie möglicherweise in leichtere Teilchen zerfallen. Und wenn sich das dunkle Photon kurzzeitig in ein gewöhnliches Photon umwandeln kann, besteht eine geringe Wahrscheinlichkeit, dass während dieses Prozesses Elektron-Positron-Paare oder ähnliche Teilchen-Antiteilchen-Paare von Myonen entstehen.

Daher suchen manche experimentelle Kollaborationen nach Kollisionen, bei denen Elektron-Positron-Paare oder Myon-Antimyon-Paare entstehen. Solche Studien laufen am LHC, aber auch an anderen Beschleunigern wie dem KLOE-2-Projekt am Istituto Nazionale di Fisica Nucleare der Laboratori Nazionali di Frascati in Italien. Weitere Studien dazu sind das Heavy Photon Search (HPS) Experiment an der Thomas Jefferson National Accelerator Facility in Newport News und das BaBar Detector Experiment am SLAC National Accelerator Laboratory in Menlo Park. Außerdem durchforsten die Wissenschaftler dazu mehr als zehn Jahre alte Daten des SLAC.

Einen anderen interessanten Ansatz verfolgt das Fermi National Accelerator Laboratory in Batavia, Illinois: Es versucht, Strahlen aus dunklen Materieteilchen zu erzeugen. Fermilab produziert derzeit dichte, energiereiche Neutrinostrahlen, die auf weit entfernte Detektoren treffen. Neutrinos sind sehr leichte subatomare Teilchen, die allein über die schwache Kernkraft Materie beeinflussen. Sollte Dunkle Materie mit gewöhnlicher über Teilchen wie dunkle Photonen wechselwirken, wäre es möglich, dass in diesen Neutrinostrahlen auch Dunkle Materie entsteht, die mit einem der Detektoren des Fermilab registriert wird.

Und schließlich können Wissenschaftler nach astronomischen Anzeichen für Dunkle Materie suchen, etwa wenn zwei Galaxien miteinander kollidieren. Treffen in einem solchen Szenario die Dunkle-Materie-Teilchen aus den beiden Galaxien aufeinander, könnten sie sich abstoßen und dabei dunkle Photonen austauschen. Einige Studien von solchen Galaxienkollisionen konnten bisher keinen Nachweis für dieses Phänomen liefern. Dagegen deuten vor wenigen Monaten veröffentlichte Beobachtungen am Galaxienhaufen Abell 3827, der besonders nah und räumlich günstig ausgerichtet ist, auf genau solch ein Muster hin. Allerdings werden noch weitere Beobachtungen an dieser und anderen Galaxien notwendig sein, um den Hinweis zu bestätigen. Doch die bisherigen Daten sehen viel versprechend für Modelle mit komplexer Dunkler Materie aus.

Ohne Frage stehen wir bei alledem vor einem großen Rätsel. Auf astronomischen Größenskalen verhält sich gravitativ gebundene Materie nicht so, wie es mit der bekannten Physik und der beobachteten Verteilung von sichtbarer Materie vereinbar ist. Aufgrund dieser Diskrepanz sind Wissenschaftler zuversichtlich, dass irgendeine Form von Dunkler Materie existiert. Welche Form sie annehmen könnte, wird jedoch immer umstrittener, da ein Experiment nach dem anderen beim Versuch versagt, die einfachsten Modelle zu bestätigen. Aus diesem Grund und weil weiterhin einige Widersprüche zwischen den Beobachtungen und den Vorhersagen des einfachen WIMP-Modells bestehen, werden Ideen zu komplexer Dunkler Materie immer beliebter. Sie liefern den Theoretikern mehr Parameter, die sie variieren können, um die Übereinstimmung mit Beobachtungen zu erhöhen. Sie passen außerdem besser zur Vielfalt der gewöhnlichen Materie.

Man könnte an diesem Vorgehen durchaus kritisieren, dass man sich hierbei nahezu verrenke, um die Hypothese der Dunklen Materie um jeden Preis aufrechtzuerhalten. Ähnelte diese Situation vielleicht jener im 16. Jahrhundert, als Astronomen zwanghaft versucht haben, das geozentrische Weltbild beizubehalten, indem sie Epizykeln für die Planetenbahnen einführten?

Wir denken nicht. Denn Dunkle Materie erklärt viele astronomische Rätsel ausgesprochen gut, und es gibt a priori keinen Grund, warum Dunkle Materie so einfach gebaut sein muss, wie die WIMP-Hypothese es verlangt. Aber es bleiben noch jede Menge Fragen. Bis wir die Antworten darauf finden, müssen wir offen sein für eine Fülle von Erklärungen, die sogar die Möglichkeit einschließen, dass wir mit einer dunklen Parallelwelt in der Nachbarschaft leben.

Weiterführende Literatur

- Ackerman, L. et al.: Dark Matter and Dark Radiation. In: Physical Review D 79, 023519, 2009
- Fan, J. et al.: Dark-Disk Universe. In: Physical Review Letters 110, 211302, 2013
- Freese, K.: The Cosmic Cocktail: Three Parts Dark Matter. Princeton University Press, 2014
- Kaplan, D. E. et al.: Atomic Dark Matter. In: Journal of Cosmology and Astroparticle Physics 2010, 021, 2010

Die Autoren

Der theoretische Teilchenphysiker **Bogdan A. Dobrescu** forscht am Fermilab in Illinois. Zu seinen Ideen gehört, dass am dortigen Beschleuniger Dunkle Materie erzeugt und später in Neutrinodetektoren nachgewiesen werden könnte. Am Fermilab arbeitet auch **Don Lincoln**, der für seine Untersuchungen Daten vom Large Hadron Collider des CERN verwendet.

Teil II

Gegenwart

Während bereits der einfache Blick an den Nachthimmel ein wunderbares und den menschlichen Wissensdurst anregendes Erlebnis sein kann, so vermag manche profundere Erkenntnis über das Universum diese Faszination noch beträchtlich zu steigern. Wir leben in einem geradezu unvorstellbar vielfältigen Kosmos. Wie wir am Ende des vorhergehenden Abschnittes erfahren haben, wurde ein wichtiger Grundstein für diese Vielfalt bereits im frühen Kosmos gelegt. Die dunkle Materie wirkte sozusagen als Saat für die Strukturbildung der baryonischen Materie, legte den Grundstein für die Entstehung von Galaxien und Galaxienhaufen.

Blicken wir in einer klaren Nacht an den Himmel, so sehen wir das Band unserer Heimatgalaxie, der Milchstraße. Das Licht von Milliarden Sternen, scheinbar unterbrochen und zerteilt von dunklen Wolken aus interstellarem Gas und Staub. Auch heute noch entstehen in dichten Molekülwolken neue Sterne. Den größten Teil der Masse der interstellaren Materie und der neu entstehenden Sterne machen Wasserstoff und Helium als primordiale Elemente aus. Elemente wie Kohlenstoff, Stickstoff und Sauerstoff sind dagegen Produkte der Lebens- und Sterbeprozesse von Sternen. Allerdings, ohne die schwereren Elemente könnte die Entstehung neuer Sternenerationen nicht so ablaufen, wie wir sie beobachten. Dem aufmerksamen Leser drängt sich hier wohl sofort die Frage auf, wie denn dann die ersten Sterne entstanden sein mögen, für die als Ausgangsmaterial ja eben nur die primordialen Elemente zur Verfügung stehen konnten. Dies ist – genau wie die Herkunft der massereichen Schwarzen Löcher in den Zentren der meisten Galaxien – eine der spannendsten Fragen der

modernen Astrophysik. Damit enden aber keinesfalls die spannenden Rätsel. Wir finden überall in der Natur auch noch schwerere Elemente: Silber, Gold und Platin, deren Seltenheit sie seit jeher zu wertvollen Schätzen machte. Uran, dessen Eigenschaften die Menschheit im 20. Jahrhundert zum Guten wie zum Schlechten zu nutzen gelernt hat, und viele weitere Elemente. Brandaktuelle Beobachtungen der Verschmelzung eines Neutronensternpaares legen nahe, dass solche kosmischen Crashes einen wesentlichen Beitrag zur Entstehung der schweren Elemente liefern.

Und schließlich spielen einige der schweren Elemente auch eine wichtige Rolle bei biologischen Prozessen auf der Erde. Die Entstehung der Elemente läuft wohl überall im Universum ab. Nicht erst seit der Entdeckung der ersten extrasolaren Planeten gegen Ende des 20. Jahrhunderts stellt sich daher die ganz große Frage, ob biologische Prozesse vielleicht auch anderswo im Kosmos abgelaufen sind und noch ablaufen. Heute verfügen wir bereits über die Mittel, die Atmosphären solcher fremden Welten zu untersuchen, und vielleicht erste Schritte zur Beantwortung dieser Menschheitsfragen unternehmen zu können.

Giganten im All

Gerhard Börner

Seit in der Milchstraße ein supermassereiches Schwarzes Loch entdeckt wurde, haben Astronomen solche Objekte in fast allen aktiven Galaxien aufgespürt. Heute erforschen sie, wie stark die Gravitationsmonster Entstehung und Schicksal ihrer Galaxien beeinflussen und steuern (aus *Spektrum der Wissenschaft* 5/2013).

AUF EINEN BLICK

SUCHE NACH DEM EREIGNISHORIZONT

1. Erst seit wenigen Jahren gilt die Existenz großer Schwarzer Löcher mit **Millionen und Milliarden Sonnenmassen** als gesichert.
2. Entdeckt wurden sie im Zentrum der Milchstraße sowie vor allem in der Mitte junger, aktiver Galaxien. Die Astronomen rätseln heute darüber, wie ihre Existenz und ihr Wachstum mit der Entwicklung **ihrer jeweiligen Heimatgalaxie** verwoben sind.
3. Künftige Beobachtungen sollen das Geschehen direkt am „Ereignishorizont“ der Gravitationsmonster entschlüsseln. Das könnte klären, ob ihre **fundamentalen Eigenschaften** tatsächlich der Vorhersage von Einsteins Gravitationstheorie entsprechen.

G. Börner (✉)

Max-Planck-Institut für Astrophysik, Garching, Deutschland

E-Mail: gboerner@mpa-garching.mpg.de

Sie sitzen im Zentrum fast jeder Galaxie, wo sie nichts tun außer fressen und wachsen: die supermassereichen Schwarzen Löcher. Millionen bis Milliarden von Sonnenmassen sind sie schwer, aber ihr Appetit ist weiterhin ungestillt. Manche sind bereits auf Diät gesetzt, weil sie ihre Umgebung schon ziemlich leer gefegt haben, wie etwa das vier Millionen Sonnenmassen schwere Objekt im Zentrum der Milchstraße. Andere dagegen verschlingen weiterhin Sterne und Gas in riesigen Mengen, soweit der Nachschub es eben erlaubt.

Direkt beobachten lässt sich keines dieser Objekte. Nur Strahlung lässt sich registrieren, die entsteht, wenn sich Materie beim Absturz in das Schwarze Loch aufheizt. Ihr Energieausstoß ist enorm, und so treten die Schwerkraftmonster trotz ihres Namens als die leuchtkräftigsten Objekte am Himmel in Erscheinung. Laut Beobachtungen entspringen enorme Energiemengen aus sehr kleinen Raumbereichen in der Mitte von Galaxien, wo sich die Materie offenbar mit hoher Geschwindigkeit bewegt. Alles deutet darauf hin, dass dort jeweils ein Objekt großer Masse sitzen muss.

Auf lange Sicht kann das nur ein Schwarzes Loch sein, sagt die Theorie. Alternative Kandidaten, wie ein sehr dichter Sternhaufen oder ein besonders schwerer Stern, würden bald gleichfalls zu einem Schwarzen Loch kollabieren. Seit ihrer Entdeckung vor 50 Jahren faszinieren die „supermassereichen Schwarzen Löcher“ (SMSL) Physiker und Astronomen. SMSL können Teilchen auf ultrarelativistische Energien beschleunigen (auf über 20 Teraelektronvolt, TeV), sie verursachen Ströme von fast lichtschnellen Teilchen. Die Forscher sehen in ihnen eine Quelle der energiereichsten kosmischen Strahlen. Verschmelzen sie mit anderen Objekten, werden nach Albert Einsteins allgemeiner Relativitätstheorie Gravitationswellen emittiert, deren Nachweis ein neues Fenster für die Astronomie und den Zugang zu direkten Tests der einsteinschen Theorie im Bereich starker Gravitationsfelder eröffnen könnte.

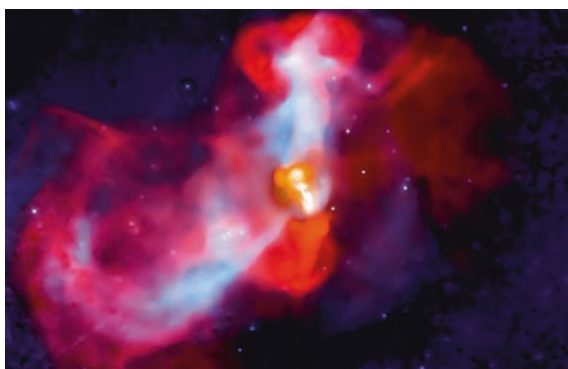
In vielen Fällen konnten diese Gebilde in galaktischen Zentren aufgespürt werden. Wenn also, was Beobachtungen nahelegen, fast jede größere Galaxie ihr eigenes Schwarzes Superloch im Zentrum besitzt, dann besteht wahrscheinlich auch eine enge Verbindung zwischen diesem und der Entstehung und Entwicklung der Galaxie.

Aktive Galaxien und Quasare strahlen riesige Energiemengen ab, die das Licht aller ihrer Sterne noch um ein Vielfaches übertreffen. Die meisten Astronomen glauben, dass die Quelle dahinter stets ein Schwarzes Loch mit hoher Masse ist. Das jeweilige SMSL saugt durch sein starkes Gravitationsfeld Materie aus der Umgebung an. Diese stürzt aber nicht geradlinig auf das Schwarze Loch zu, sondern bewegt sich auf spiralförmigen Bahnen und sammelt sich vor dem endgültigen Absturz in einer rotierenden Akkretionsscheibe.

Bei der Annäherung bewegt sich die Materie auf ihren Umläufen immer rasanter mit mehr als zehn Prozent der Lichtgeschwindigkeit und erhitzt sich dabei so sehr, dass der innere Teil der Scheibe das Objekt schließlich als heiße Kugel nahezu einhüllt. Diese Zone emittiert intensive Röntgenstrahlung, die von einer ganzen Reihe Hochenergiesatelliten registriert wird. Zusätzlich entsteht in diesem Nahbereich entlang der Rotationsachse des Schwarzen Lochs ein gerichteter, eng begrenzter Teilchenstrahl – ein sogenannter Jet, in dem Materie annähernd mit Lichtgeschwindigkeit nach außen rast.

Weiter entfernt vom Zentralkörper, wo es schon etwas kühler zugeht, sendet die Materie nur noch optische und Radiostrahlung aus, die sich auf der Erde und etwa vom Weltraumteleskop Hubble (HST) einfangen lässt. So erhält man ein recht detailliertes Bild der Materiebewegungen.

Ein typisches Beispiel ist M 87, eine aktive Galaxie in 54 Mio. Lichtjahren Entfernung im Sternbild Jungfrau. Mit dem Faint Object Spectrograph auf dem HST gelang es, die Dopplerverschiebung des abgestrahlten Lichts im Zentralgebiet zu messen: Die Materie bewegt sich in einer rotierenden Scheibe teils auf uns zu, was die Spektrallinien ins Blaue verschiebt, und teils von uns weg, was sie ins Rote verlagert. Die Bahngeschwindigkeiten in der Akkretionsscheibe erreichen bis zu 550 km pro Sekunde, fast zwei Prozent der Lichtgeschwindigkeit. Derart hohe Werte können nicht durch Sternhaufen verursacht werden, vielmehr muss es dort eine zentrale Masse geben. Die Beobachtungen zeigen: In einem Bereich von der Größe des Sonnensystems sind drei Milliarden Sonnenmassen konzentriert.



M 87 heißt diese aktive Galaxie, 54 Mio. Lichtjahre entfernt und das größte Objekt im Virgo-Galaxienhaufen (hier eine Aufnahme des Röntgenteleskops Chandra). In ihrem Zentrum verbirgt sich ein Schwarzes Loch mit drei Milliarden Sonnenmassen, das einen 5000 Lichtjahre langen Jet ausstößt. Umkreist wird es von einer Scheibe, die rasend schnell rotiert – teilweise mit 550 km pro Sekunde. (Röntgen: NASA/CXC/KIPAC/N. Werner et al; Radio: NSF/NRAO/AUI/W. Cotton)

Ähnlich ist die Situation in anderen Sternsystemen. So stößt die Galaxie NGC 4261 gewaltige Jets aus, die vom Zentrum aus symmetrisch in beide Richtungen 88.000 Lichtjahre weit in den umgebenden Weltraum eindringen. Die intensive Radiostrahlung, die das Phänomen sichtbar macht, zeigt, dass in dem Jet elektrisch geladene Teilchen und Magnetfelder ins All geschleudert werden. Die Kraftmaschine im Zentrum könnte wiederum ein Schwarzes Loch sein, mit etwa 400 Mio. Sonnenmassen. Gespeist wird es von einer dicken Scheibe mit einem Durchmesser von 800 Lichtjahren. Astronomen haben derartige Gebilde bereits in vielen aktiven Galaxien geortet. Es scheint, als seien Jets eine charakteristische Signatur für die Aktivität eines zentralen Schwarzen Lochs.

Die Sombrero-Galaxie (M 104) im Sternbild Jungfrau, in 30 Mio. Lichtjahren Entfernung, erscheint zwar im optischen Licht relativ unauffällig, sendet dafür aber kräftige Röntgenstrahlung aus, besitzt also offenbar einen aktiven Kernbereich. Entsprechend registrierten Astronomen für Sterne nahe dem Zentrum sehr hohe Geschwindigkeiten. Dies nährte den Verdacht, dass auch in der Mitte des „Sombros“ ein SMSL residiert, und zwar sogar mit einer Milliarde Sonnenmassen.

Es existieren also reichlich Hinweise auf Schwarze Löcher im Zentrum aktiver Galaxien. Die Beobachtungen belegen genau genommen aber nur, dass sich dort in einem kleinen Volumen jeweils eine große Masse zusammenballt. Nur indirekt folgt daraus die Existenz eines Schwarzen Lochs, nämlich aus der Überlegung, dass keine physikalisch plausiblen Alternativen bekannt sind – weder Sternhaufen noch ein einzelner Riesenstern.

Während die Forscher zunächst vor allem die Existenz der SMSL als kompakte Schwerkraftzentren nachweisen wollten, geht es ihnen inzwischen darum, die Physik zu enträtseln, die hinter den Erscheinungen steht: Wie entstehen die aktiven Galaxien? Und wie hängt ihre Entwicklung mit den supermassereichen Schwarzen Löchern zusammen? Gibt es Eigenschaften, die solche Objekte eindeutig identifizieren? Bis jetzt sind keine bekannt. Die Astronomen hoffen, durch noch präzisere und umfassendere Beobachtungen einem direkten Nachweis näher zu kommen. Die besten Chancen dazu bietet wohl unser „hauseigenes“ Gravitationsmonster im Zentrum der Milchstraße, einfach weil es das nächstgelegene ist.



Im Zentrum unserer Heimatgalaxie, der Milchstraße, sitzt die Radioquelle Sagittarius A*. In deren Mitte eingebettet ist ein großes Schwarzes Loch mit 4,1 Mrd. Sonnenmassen. Es wird von etwa einem Dutzend Sternen umkreist (blaue Linien). Das gezeigte Raumgebiet entspricht dem dreifachen Abstand Sonne-Neptun. Das Schwarze Loch hat einen Durchmesser von zwölf Millionen Kilometern, rund ein Fünftel der Merkurbahn. (ESO)

Die Vorgeschichte: Im Jahr 1974 entdeckten Astronomen im Sternbild Schütze die Radioquelle Sagittarius A*, abgekürzt Sgr A*. Deren besondere Eigenschaften nährten gleich den Verdacht, dort könnte ein größeres Schwarzes Loch verborgen sein. Allerdings ist diese Himmelsgegend von der Erde aus notorisch schwer zu beobachten. Denn quer durch die galaktische Scheibe, in der auch wir sitzen, wird fast alle Art von Strahlung durch Gas, Staub und Sterne blockiert. Allein Radio- und Infrarotwellen erlauben Blicke ins Innere der Milchstraße.

Es dauerte einige Jahre, bis Infrarotkameras mit genügender Trennschärfe von Satelliten aus die Gegend ins Visier nehmen konnten. Das Team von Reinhard Genzel am Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik in Garching bei München leistete Pionierarbeit auf diesem Gebiet. Die Forschergruppe ist bis heute führend bei der Analyse der Sternbewegungen um Sagittarius A*. Demnach umkreisen offenbar ein Dutzend Sterne mit hoher Geschwindigkeit ein unsichtbares zentrales Objekt innerhalb eines Radius, der etwa dem dreifachen Abstand zwischen Sonne und Neptun entspricht. Für einen dieser Sterne (S2) wurde eine Umlaufperiode von 16 Jahren und eine Geschwindigkeit von etwa 5000 km pro Sekunde bestimmt. Zum Vergleich: Die Sonne bewegt sich auf ihrer eher randständigen Bahn um das galaktische Zentrum mit rund 220 km pro Sekunde. Interferometrische Radiobeobachtungen zeigten zudem, dass Sgr A* in Bezug auf die Galaxis mit einer Relativgeschwindigkeit von höchstens einem Kilometer pro Sekunde fast stillsteht.

Mit diesen Fakten konnten die Theoretiker für das zentrale SMSL der Milchstraße eine Masse von 4,1 Mio. Sonnenmassen errechnen. Sgr A* ist nach heutigem Wissen also ein Schwarzes Loch – zwar riesig, aber nicht so gigantisch wie die in manch anderen Galaxien. Außerdem scheint dieses Objekt sozusagen auf Sparflamme zu köcheln, denn es emittiert nur wenig Röntgenstrahlung, erhält also nur einen geringen Materiezufuss.

Womöglich könnte sich dies innerhalb der nächsten zehn Jahre ändern. Denn die Astronomen entdeckten eine Gaswolke (G2 genannt), die dann auf ihrer Umlaufbahn in den Einzugsbereich von Sgr A* kommen wird. Sie bewegt sich zwar nicht direkt auf Kollisionskurs, wird aber dem Zentrum doch so nahe kommen, dass ein Teil der Wolke ins Schwarze Loch stürzen dürfte. Die Forscher erwarten einen spektakulären Ausbruch an Röntgenstrahlung sowie detaillierte Daten darüber, wie die Wolke in der Nähe des SMSL durch Gezeitenkräfte verzerrt und zerrissen wird.

Möglichst nahe an das Schwarze Loch vordringen möchten Wissenschaftler mit dem geplanten Event Horizon Telescope (Ereignishorizont-Teleskop, EHT), einer Zusammenschaltung von Radioteleskopen, die um den ganzen Erdball verteilt sind. Das multinationale Gerät soll 2022 in Betrieb gehen. Das dahinterstehende Verfahren der Very Long Baseline Interferometry (VLBI) ist so mächtig, dass sich das galaktische Zentrum prinzipiell mit einer Winkelauflösung von einigen millionstel Bogensekunden beobachten ließe.

Damit könnte man auch einen Apfel auf dem Mond erkennen. Mit dem Event Horizon Telescope könnten die Astronomen die Radiostrahlung mit einer Wellenlänge von 1,3 mm nutzen, um Strukturen innerhalb des zehnfachen Radius des Schwarzen Lochs von Sgr A* abzubilden. So könnten sie die Region erforschen, in der relativistische Effekte wichtig werden. Wichtigster Punkt auf der Agenda: die Überprüfung der Physik eines Schwarzen Lochs, wie es von Einsteins allgemeiner Relativitätstheorie vorhergesagt wurde. Auch das zentrale Objekt von M 87 ließe sich mit dem EHT wesentlich detaillierter untersuchen.

Kurz nachdem Einstein Ende 1915 seine Gravitationstheorie veröffentlicht hatte, fand der deutsche Astronom Karl Schwarzschild eine exakte Lösung der einsteinschen Feldgleichungen. Diese „Schwarzschild-Geometrie“ gilt als Prototyp eines Schwarzen Lochs, zugleich ist es die einfachste Beschreibung eines extremen Endzustands der Materie. Dazu stellen sich die Theoretiker vor, wie sich ein kugelförmiger Materiekumpen, etwa die Sonne, in einem immer kleineren Volumen konzentriert, so wie dies in der newtonschen Theorie bis hin zur idealisierten punktförmigen Masse möglich ist.

Hinter dem Ereignishorizont wird Raum zur Zeit und Zeit zum Raum

Stets gilt dann im leeren Außenraum, also dem Gravitationsvakuum, welches das Schwarze Loch umgibt, die Schwarzschild-Lösung der Feldgleichungen, für die Schwarzschild mathematisch übliche „statische Koordinaten“ für Zeit, Radius und Winkel verwendete. Unterschreitet man aber bei diesem Kollaps einen bestimmten Radius, verlieren diese Koordinaten ihre übliche Bedeutung; sie vertauschen ihre physikalische Bedeutung: Raum wird zur Zeit, Zeit wird zum Raum. Dort „vergeht“ der Raum, so wie in der wirklichen Welt die Zeit. Wir erreichen in diesem Gedankenexperiment dann jedoch nicht das Äquivalent der newtonschen Punktmasse. Vielmehr verschwindet die Masse innerhalb der Grenzfläche, die durch den Schwarzschild-Radius gekennzeichnet ist: des Ereignishorizonts.

Was sich im Inneren dieses Volumens abspielt, bleibt uns als außenstehenden Beobachtern zunächst verborgen. Anhand der Wege, die das Licht in der Umgebung des Objekts nehmen kann, lässt sich jedoch die Struktur der gesamten Raumzeit analysieren, in deren Mittelpunkt das Schwarze Loch sitzt. Es ist von leerem Raum umgeben sowie einem Schwerefeld, das mit der Entfernung immer mehr abklingt bis zum Grenzfall der „flachen“ Raumzeit, in der die Gravitation kaum mehr eine Rolle spielt. Weit außerhalb liegen demnach praktisch die gleichen Verhältnisse vor wie im flachen – für uns normalen – Raum, wo sich Lichtstrahlen stets entlang gerader Linien ausbreiten.

Doch je näher am Ereignishorizont ein Lichtstrahl verläuft, desto stärker krümmt das Schwerefeld seine Bahn. Direkt am Schwarzschild-Radius wird Licht – gleich in welche Richtung – dann so weit abgelenkt, dass es nicht mehr nach außen entweichen kann, sondern innerhalb einer Kugel mit diesem Radius gefangen bleibt. Das gibt es sonst nirgends im All: Lichtstrahlen, die am Ereignishorizont radial nach außen gerichtet sind, bleiben an diesem Ort stehen, obwohl sie sich mit Lichtgeschwindigkeit bewegen. Strahlen, die innerhalb dieses Radius emittiert werden, können der Raumzeitkrümmung nicht entgehen, sondern enden in einer zentralen Singularität (einem Punkt mit theoretisch unendlich großer Gravitation) beim Radius null.

Licht aus dem Außenraum kann freilich auch weiterhin in den Bereich innerhalb des Schwarzschild-Radius eindringen, aber kein Lichtstrahl ihm jemals entkommen. Der Radius legt somit eine „Struktur in der Raumzeit“ fest, einen Horizont, der unausweichlich außen und innen voneinander trennt. Da sich jede Art von Information höchstens mit Lichtgeschwindigkeit übermitteln lässt, wirkt der Horizont wie eine

unsichtbare Membran, die nur in einer Richtung – nach innen – Energie und Information durchlässt. Diese endet schließlich in einer Singularität. Tatsächlich besagt die allgemeine Relativitätstheorie, dass jede Masse innerhalb des Horizonts als singuläre Punktmasse endet, wobei die Materiedichte gegen unendlich und die Ausdehnung gegen null geht.

Solche Singularitäten sind physikalisch sinnlos – würden sie doch bedeuten, dass die bekannten Naturgesetze dort ihre Gültigkeit verlieren. Weil die Physiker aufgrund ihrer Erfahrungen davon überzeugt sind, dass alle in der Natur vorkommenden Größen endlich und genau bestimmbar sind, betrachten sie Singularitäten als Folge einer unzureichenden mathematischen Formulierung oder als Ausdruck einer inneren Unvollständigkeit der Theorie. In diesem Sinn muss die allgemeine Relativitätstheorie noch verbessert werden, wohl durch eine Verknüpfung mit der Quantentheorie.

Der Kollaps innerhalb des Schwarzschild-Radius in die Singularität hat eine verblüffende Konsequenz: Die Raumzeit der Schwarzschild-Geometrie ist ein reines Gravitationsvakuum – außerhalb und innerhalb des Horizonts befindet sich keine Materie, bis auf eine Punktmasse im Zentrum. Ein Beobachter im Außenraum registriert lediglich die Gravitationswirkung der Punktmasse. Dieses Gebilde, von den Astrophysikern Schwarzes Loch genannt, ist also weder ein materieller Körper noch besteht es aus Strahlung – es ist buchstäblich ein Loch in der Raumzeit.

Große Massen erleiden ein katastrophales Schicksal

Gewöhnliche Sterne, Planeten oder andere Alltagsdinge sind freilich weit größer als ihr Schwarzschild-Radius. Für die Sonne beträgt sein Wert drei Kilometer, für die Erde nur 0,9 cm. Er wächst proportional zur Masse, deshalb erreicht er für ein Objekt von einer Milliarde Sonnenmassen etwa drei Milliarden Kilometer; das Schwarze Loch der Milchstraße hat einen Schwarzschild-Radius von zwölf Millionen Kilometern.

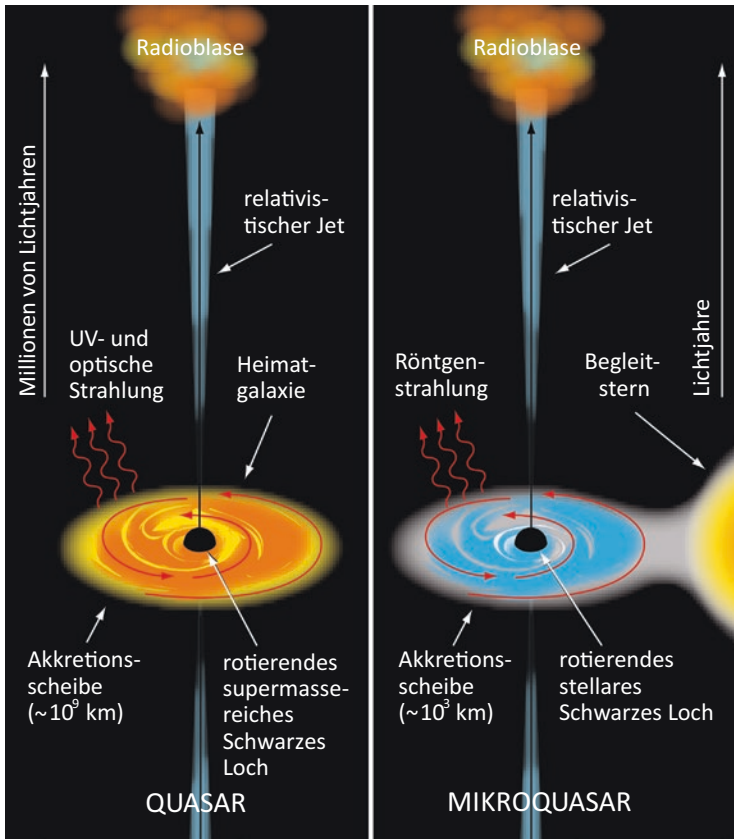
Einsteins Gravitationstheorie sagt vorher, dass als extremer Endzustand der Materie Schwarze Löcher entstehen können. Auch intuitiv führt kein Weg daran vorbei, dass große Massen ein katastrophales Schicksal erleiden müssen. Denn die Gravitation zieht alle Materie in gleicher Weise an. Außerdem reicht diese Kraft unbegrenzt weit, denn sie klingt nur umgekehrt proportional zum Quadrat des Abstands ab. Wird von einer beliebigen Masse immer mehr Materie angehäuft, so wächst die Gravitation quadratisch mit der Teilchenzahl an. Irgendwann gewinnt sie die Oberhand über

alle Druckkräfte, die sich ihr entgegenstemmen könnten – sei es der thermodynamische Druck im Inneren eines Sterns, die abstoßende Kraft zwischen den positiven Ladungen im Inneren der Atomkerne oder der sogenannte Fermidruck, wie ihn Gase quantenphysikalisch „entarteter“ Elektronen oder Neutronen zeigen und wie er in Weißen Zwergen oder Neutronensternen herrscht.

Hinzu kommt, dass auch die Energie gravitativ wirkt und selbst der Schwerkraft unterliegt. Deshalb kann ein riesiger innerer Druck zwar eine große Masse bis zu einer gewissen Grenze im Gleichgewicht halten, aber der Druck trägt selbst zur Schwerkraft bei. So wird er schließlich mitverantwortlich für den Gravitationskollaps. Für große Massen gibt es kein Gleichgewicht mehr; das Gleiche gilt für rotierende Objekte – sie alle müssen zusammenbrechen und als Schwarzes Loch enden. Es ist erstaunlich, dass trotz der reichhaltigen Formen und Strukturen, in denen gravitative Massen auftreten, ihnen ein derart einfaches Endstadium gemein ist.

In den letzten Jahren haben Astronomen immer mehr Hinweise darauf gefunden, dass es eine enge Verbindung der Galaxie mit dem Schwarzen Loch, das sie beherbergt, gibt. Diese Beziehung zeigt sich in der sogenannten M-Sigma-Relation. Sie gibt Hinweise, wie sich in einer Galaxie ein zentraler Wulst („bulge“) entwickelt, der häufig ein Schwarzes Loch enthält. Möglicherweise wird Materie durch Akkretion laufend ins galaktische Zentrum nachgefüttert, was sowohl die Masse des Wulstes als auch das SMSL ziemlich gleichmäßig vergrößern würde.

Allerdings ist das womöglich nur ein Teil der Wahrheit. Das Wachsen und Werden einer jungen Galaxie zeigt sich an der Menge der Sterne, die laufend durch kollabierendes kaltes Gas neu entstehen. Und das supermassereiche Schwarze Loch produziert mächtige Jets und jede Menge hochenergetische Strahlung. Sind diese Prozesse zwangsläufige Folge der Dinge, die sich beim Kollaps des kalten Gases in der Galaxie abspielen? Selbstverständlich kann das SMSL, wenn es Materie verschlingt und aktiv Strahlung und Teilchen emittiert, das Gas stark beeinflussen, es sogar aus der Galaxie hinaus-schleudern. Dort, wo es dann fehlt, wird die Sternbildung zurückgefahren. Gleichzeitig stellt das SMSL auch seine eigene Aktivität auf Sparflamme, weil dadurch die Akkretion von Materie ebenfalls eingeschränkt wird.



Quasare werden durch Materie angetrieben, die in Schwarze Löcher stürzt und dabei Jets ausstößt. In Mikroquasaren spielt sich Ähnliches, nur in Doppelsternen ab. Deren Akkretionsscheibe ist heißer, sodass Röntgenstrahlung frei wird. (SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT/BUSKE-GRAFIK, NACH: MAREK ABRAMOWICZ)

Dunkle Materie – Geburtshelfer der Galaxien

Wie aber könnte ein zentrales Schwarzes Loch überhaupt das Schicksal der Galaxie direkt beeinflussen? Stellen wir uns vor, wir könnten einige Prozent der Masseenergie des SMSL in der Milchstraße auf die Teilchen (Baryonen, hauptsächlich Neutronen und Protonen) der Milchstraße umverteilen – eine Energiemenge, wie sie das Schwarze Loch in der Akkretionsphase als Strahlung ausstößt. Daraufhin könnten diese Baryonen das galaktische Schwerefeld überwinden und aus der Galaxis geschleudert werden. Wenn sich also mit vergleichsweise wenig Energie schon die ganze Galaxie beeinflussen ließe, dann wäre es nicht überraschend, wenn das SMSL tatsächlich ihr Schicksal mitgestalten würde.

Die gängigen Modelle zur Galaxienbildung nehmen an, dass zunächst kleine Verdichtungen des kosmischen Substrats im Lauf der kosmischen Expansion immer mehr anwachsen. Das geht so lange, bis schließlich ein überdichter Bereich sich vom kosmischen Gas abtrennt, kollabiert und allmählich zu einer Galaxie anwächst. Dieser Prozess wird komplizierter, sobald verschiedene, anfangs getrennte Verdichtungen miteinander verschmelzen, weiterhin Gas in das junge Gebilde einströmt und laufend neue Sterne entstehen. Das kosmische Substrat selbst ist auch nicht so einfach aufgebaut, wie es die Theoretiker gerne hätten. Nur zu einem kleinen Teil (etwa fünf Prozent) enthält es die uns vertraute normale baryonische Materie. Rätselhafter sind zwei weitere Komponenten: die Dunkle Materie (mit 21 %), ein stoßfreies Gas nichtbaryonischer Elementarteilchen, sowie die Dunkle Energie, von der wir nichts wissen, außer dass sie 74 % der kosmischen Substanz ausmacht und äußerst gleichmäßig verteilt ist.

Wie kleine Dichteschwankungen anwachsen und schließlich zu Galaxien werden, muss man vor diesem Hintergrund betrachten. Denn lange vor den Galaxien bilden sich Schwerkraftzentren in der Dunklen Materie aus, in denen sich dann das Gas aus normaler Materie ansammelt. Warum das so kompliziert ablaufen muss, verrät eine andere Beobachtung: die kosmische Hintergrundstrahlung. Die winzigen Fluktuationen und Anisotropien in dieser Reststrahlung des Urknalls zeigen ziemlich direkt, dass die anfänglichen Dichteschwankungen in der kosmischen Frühzeit relativ klein gewesen sein müssen. Das erforderte den Umweg über die Dunkle Materie als Geburtshelfer der Galaxien.

Die prägalaktischen Gasklumpen, eingebettet in Dunkle Materie, kühlen sich ab und beginnen Sterne zu bilden. Schließlich entwickeln sie sich zu den Galaxien, wie wir sie kennen. In dieser Phase treten offenbar die Schwarzen Löcher auf die Bühne. Wie und wann genau, ist den Forschern noch immer ein Rätsel. Zwei Varianten sind denkbar.

- Die Schwerkraftzentren bilden sich in der kosmischen Materie um Schwarze Löcher aus, die von Anfang an vorhanden waren,
- oder sie entstehen erst später durch den Gravitationskollaps einer großen Gasmasse.

Das Problem bei der ersten Variante ist, dass im frühen Universum in einem relativ diffusen Medium sich kaum große Massen in einem kleinen Bereich konzentrierten und daraus Schwarze Löcher produzierten. Nachvollziehbarer wäre es, wenn zuerst ein massereicher Stern zum Schwarzen Loch kollabiert

und dieses Objekt dann durch Zufütterung zu einem supermassereichen Objekt anschwillt.

Aber das wirft wieder die Frage auf, wie in einer so frühen kosmischen Epoche ein solcher Stern überhaupt entstehen kann. Die Geburtsfrage bleibt hier offen, und so beginnen fast alle Modelle gleich mit einem kleineren oder mittelgroßen Schwarzen Loch, das durch Akkretion von Materie allmählich anwächst.

Immerhin lassen sich die theoretischen Überlegungen heute durch astronomische Beobachtungen mit Satellitenspähern – wie HST, Spitzer oder Herschel – sowie bodengebundenen Teleskopen im nahen Infrarotbereich des Spektrums überprüfen und erweitern. Damit können Astronomen Galaxien bereits in einem sehr frühen Stadium ihrer Entwicklungsgeschichte entdecken.

Gegenwärtig entstehen in Scheibengalaxien wie der Milchstraße neue Sterne in ziemlicher Regelmäßigkeit. Kaltes interstellares Gas wird verbraucht und zu Sternen verarbeitet – ein Vorgang, der die zentralen Schwarzen Löcher auf Diät setzt und nur wenig zu ihrem Wachstum beiträgt. Offensichtlich verlief die Sternproduktion in der Vergangenheit aber deutlich aktiver. Die Astronomen stoßen immer wieder auf massereiche „rote und tote“ Galaxien bei einer Rotverschiebung von $z \sim 2$, das heißt zu einer Zeit, als das Universum gerade ein Drittel seiner jetzigen Größe hatte.

Diese Gebilde enthalten inzwischen viele rote Sterne und produzieren nur wenig neue. Sie sind die Vorläufer der großen elliptischen Galaxien, wie sie den Kosmos heute dominieren, aber noch wesentlich kompakter. Offenbar erfordert ihre Entstehung das schnelle Verschmelzen sehr gasreicher Vorgänger, in denen Gas sich rasch abkühlt und zu hoher Dichte komprimiert wird. In der Situation könnten auch große Schwarze Löcher durch Akkretion stark anschwellen.

Astronomen haben oft nichtthermische Radio- und Röntgenstrahlung – ein Markenzeichen für das große zentrale Schwarze Loch – in aktiven Galaxien beobachtet, in denen zugleich besonders viele neue Sterne aufleuchten. Nicht nur, so scheint es, sind beide Prozesse eng miteinander verwoben, die SMSL könnten außerdem die Sternbildung deutlich beflügeln. Wie sollte sich das genau abspielen? Noch reichen die Daten nicht für ein klares Bild, aber Astronomen haben sich dafür bereits ein Szenario ausgedacht. Erster Akt: Wenn das zentrale Schwarze Loch zu kräftig Strahlung und Teilchen ausschleudert, dann bremst oder blockiert diese Rückkopplung im Wulst den weiteren Gaszustrom aus den fernen Bereichen der Galaxie, sodass kaum mehr neue Sterne entstehen können.

Im zweiten Akt könnte kaltes Gas, das anfänglich aus dem Halo einer Galaxie entweicht – der Hülle Dunkler Materie, die jede Galaxie unsichtbar umgibt –, im Schwerefeld eines größeren Halo gebunden bleiben, der wie eine äußere Wolke sogar mehrere Galaxien einhüllt. Dritter Akt: Wenn dieser Superhalo später kollabiert, strömt das Gas in die Ausgangsgalaxie zurück, angereichert mit zusätzlichen Teilchenwolken, die in dem größeren Halo enthalten waren. Das würde dann nicht nur die Sternbildung wieder anfachen, sondern auch den Sturz von Gas und Materie in das zentrale Schwarze Loch.

Um dieses Szenario zu erhärten, müssten die Astronomen zuerst alle drei Akte über die gesamte kosmische Entwicklung hinweg verfolgen können. Das verlangt Daten bei hohen Rotverschiebungen, also tief in der Vergangenheit des Universums. Es könnte gut sein, dass der Vorrat an kaltem Gas, der einer Galaxie zur Sternbildung zur Verfügung steht, auch durch ein SMSL reduziert wird, das meistens ziemlich passiv ist, aber immer wieder reaktiviert wird. Ebenso könnte ein zentrales Schwarzes Loch auf Diät, das nur wenig Materie einfängt, in einen Sparmodus übergehen, in dem die Energie hauptsächlich in einem Teilchenstrahl als Bewegungsenergie statt als Strahlung emittiert wird.

Lange ging es den Astronomen nur darum, in den Zentren von Galaxien die Existenz supermassereicher Schwarzer Löcher nachzuweisen. Denn es schien ihnen einfach zu fantastisch, dass solche extremen Gravitationsmonster in Raum und Zeit tatsächlich existieren sollten. Mittlerweile haben sie sich daran gewöhnt; sogar in Filmen, Büchern und Popsongs sind Schwarze Löcher zu alltäglichen Erscheinungen geworden.

Inzwischen geht es um andere Fragen:

- Wie beeinflussen Geburt und Wachstum der zentralen Schwarzen Löcher die Entwicklung der Galaxien?
- Was sind die fundamentalen Eigenschaften Schwarzer Löcher? Wird es gelingen, den Ereignishorizont direkt zu vermessen? Lässt sich seine Symmetrie erkennen und damit die wirkliche Natur dieser Objekte bestätigen, als Lösung der einsteinschen Gravitationstheorie? Und was wäre, wenn Abweichungen davon gefunden würden?

Am besten lässt sich die zentrale Kraftmaschine im inneren Bereich aktiver Galaxien mittels der „harten“ Röntgenstrahlung untersuchen. Dort, wo ihre Energien Kiloelektronvolt überschreiten, stammt die Strahlung aus unmittelbarer Nähe des Schwarzen Lochs. Das ist vorläufig jedoch Zukunftsmusik, denn empfindliche Detektoren für harte Röntgenstrahlung sind schwer zu konstruieren.

Nur mit mehr Daten über die Gase nahe beim Schwarzen Loch und weit entfernt im Halo der Galaxie, über das Ausströmen von Materie aus der galaktischen Scheibe sowie die Sternbildung werden die Kosmologen das Zusammenspiel von Schwarzen Loch und Galaxie durchschauen.

Weiterführende Literatur

Dambeck, T.: Beherrscht vom Schwarzen Loch. In: Spektrum der Wissenschaft 4/2013, S. 13–14

Genzel, R. et al.: The GC Massive Black Hole and Nuclear Star Clusters. In: Reviews in Modern Physics 82, S. 3121–3195, 2010

Börner, G.: Das neue Bild des Universums. Pantheon, München 2009 *Überblick über das aktuelle Wissen in Kosmologie und Quantenphysik*

Weblinks

www.eso.org/public/videos/eso1151a/ Hier finden Sie ein Video einer Simulation der Sterne um Sgr A*.

www.mpa-garching.mpg.de Simulationen zur Galaxienbildung mit Schwarzen Löchern und andere Filme auf der Homepage des Max-Planck-Instituts für Astrophysik

Gerhard Börner promovierte an der Ludwig-Maximilians-Universität München mit einer Arbeit über Teilchenphysik. Nach Auslandsaufenthalten in Japan und den USA habilitierte er sich an der LMU für das Fach Physik und forschte als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Max-Planck-Institut für Astrophysik in Garching. Sein Forschungsschwerpunkt ist die Kosmologie, speziell die Entstehung und Entwicklung der Galaxien.



Die ersten Sterne

Michael D. Lemonick

Bald nach dem Urknall begann eine „dunkle Ära“ des Universums, die rund 100 Mio. Jahre andauerte. Erst danach bildeten sich Sterne, und das All wurde allmählich lichtdurchlässig. Diese frühen Supersterne waren vermutlich millionenfach größer als die Sonne, explodierten als Supernovae und bildeten schließlich gigantische Schwarze Löcher. Doch so viel Kosmologen über diese Prozesse grübeln: Die Einzelheiten des Endes der dunklen Ära liegen noch immer – im Dunkeln (aus *Spektrum der Wissenschaft* 4/2013).

AUF EINEN BLICK

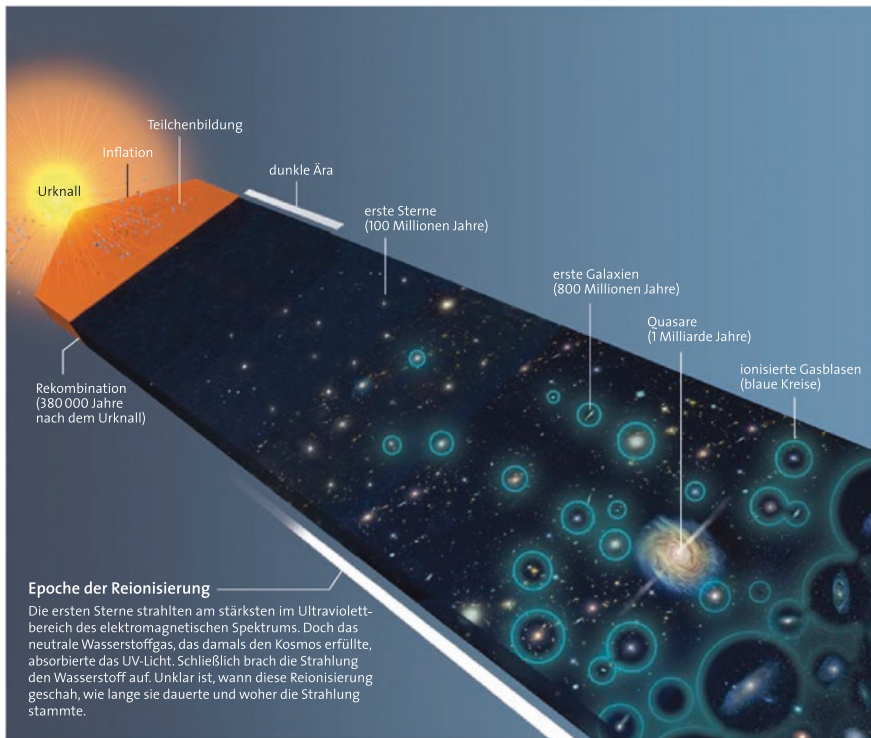
WIE DAS UNIVERSUM TRANSPARENT WURDE

1. Astronomen dringen mit riesigen Teleskopen zu den fernsten und zugleich ältesten Objekten vor, um deren Entstehung zu enträtseln. Die ersten Sterne und Galaxien sahen heutigen **Himmelsobjekten** kaum ähnlich.
2. Die Forscher versuchen zu verstehen, was die sogenannte **Reionisierung des Universums** verursachte. Damals wurden die im Kosmos allgegenwärtigen neutralen Wasserstoffatome durch Strahlung aufgebrochen, und das All wurde durchsichtig.
3. Nach neuen Beobachtungen und Computersimulationen waren die Objekte, welche die Reionisierung antrieben, **Riesensterne mit Millionen Sonnenmassen** oder intensiv leuchtende **Gasjets**, die von Schwarzen Löchern ausgingen.

M. D. Lemonick (✉)
Princeton, USA

Vor rund 13,8 Mrd. Jahren, nur knapp 400.000 Jahre nach dem Urknall, verfinsterte sich das Universum plötzlich. Bis zu diesem Zeitpunkt war das gesamte sichtbare All ein heißes, wild brodelndes Plasma gewesen – eine dichte Wolke von Protonen, Neutronen und Elektronen. Hätte es damals einen Beobachter gegeben, wäre ihm der Kosmos als ein blendend heller Nebel erschienen.

Doch nun begann das expandierende Universum so weit auszukühlen, dass sich je ein Proton und ein Elektron zu einem Wasserstoffatom zusammenfügen konnten. Durch diese Rekombination hob sich der helle Nebel, und alles wurde schnell schwarz, denn atomarer, elektrisch neutraler Wasserstoff schluckt elektromagnetische Strahlung in verschiedenen Wellenlängenbereichen. Auf den unvorstellbar grellen Blitz des Urknalls und sein blendendes Nachleuchten folgte daher die so genannte dunkle Ära.



Die erste Jahrtausende: Nur 380.000 Jahre nach dem Urknall – nach kosmischen Maßstäben ein Augenblick – kühlte das Universum so weit ab, dass sich Wasserstoffatome bilden konnten und eine Phase der Dunkelheit begann. Rund eine Milliarde Jahre später war das Universum wieder vollständig transparent, da Strahlung die Atome zerstörte. Doch welche Objekte verursachten diese Reionisierung? Waren es Sterne, Galaxien oder Schwarze Löcher im Zentrum von Quasaren? (Copyright: Maximo Ave, Dinoj Surendran, Tokonatsu Yamamoto, Randy Landsberg, and Mark SubbaRao <http://astro.uchicago.edu/cosmos/projects/aires/> CC BY 2.5 <https://creativecommons.org/licenses/by/2.5/legalcode>; erstellt mit Sergio Sciutto's AIRES)

Selbst als die ersten Sterne entstanden, blieb es vorerst finster. Denn sie strahlten vor allem im Ultraviolettbereich – just in dem Teil des Spektrums, den die neu gebildeten Wasserstoffatome bevorzugt absorbierten. Wie kam es dann zur Rückkehr des Lichts in die Welt, zur kosmischen Morgendämmerung? Diese Frage beschäftigt die Astronomen seit Langem. Vielleicht riss die intensive Strahlung der ersten Sterne die Wasserstoffatome wieder auseinander, was Experten als Reionisierung bezeichnen. Das machte den Kosmos dann wieder transparent. Möglicherweise stammte die hierfür erforderliche Energie aber auch von der Strahlung, die entsteht, wenn Gas – komprimiert und erhitzt – in massereiche Schwarze Löcher stürzt.

Um das Rätsel der Reionisierung zu lösen, müssen Astronomen sich auf die Suche nach den ältesten Objekten im Universum machen, sie identifizieren und klären, woraus sie bestehen und woher sie kommen. Wann begannen die ersten Sterne zu strahlen, und wie sahen sie aus? Wie versammelten sich einzelne Sterne zu Galaxien, und warum bildete fast jede davon in ihrem Zentrum ein massereiches Schwarzes Loch? Zu welchem Zeitpunkt während dieser Entwicklung fand die Reionisierung statt? Gesah das allmählich oder abrupt?

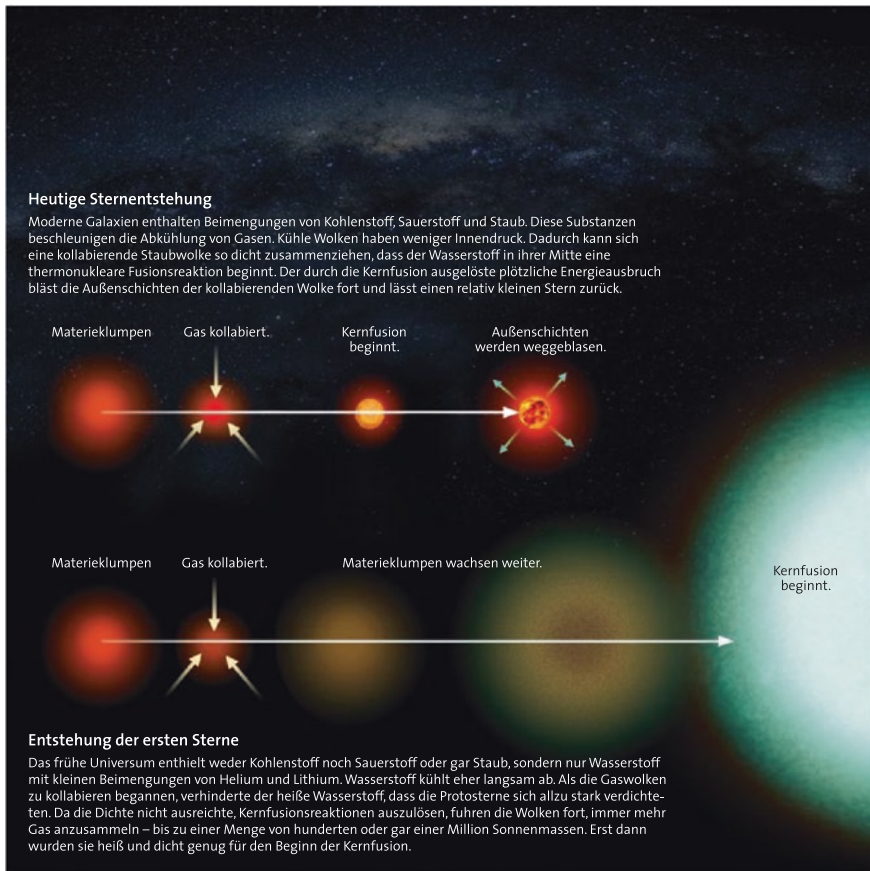
All das fragen sich Astrophysiker nun schon seit den 1960er Jahren. Erst seit Kurzem versprechen leistungsfähige Teleskope und Computermodelle bündige Antworten. Die Teleskope fangen Strahlen auf, die weniger als 800 Mio. Jahre nach dem Urknall entstanden sind, als sich erste Galaxien bildeten; die Modelle simulieren Entstehung und Entwicklung der ersten Sterne.

Supersterne

Zu Beginn des neuen Jahrhunderts meinten die Astronomen schon recht gut zu wissen, wie die erste Sternengeneration entstand. Unmittelbar nach der Rekombination breiteten sich die Wasserstoffatome gleichmäßig über den ganzen Kosmos aus. Hingegen klumpt die Dunkle Materie – eine unsichtbare Substanz aus hypothetischen Teilchen – zu sogenannten Halos mit 100.000 bis zu einer Million Sonnenmassen zusammen. Die Schwerkraft dieser Halos zog den Wasserstoff an, was ihn komprimierte und erwärmte, bis schließlich Sterne erstrahlten.

Im Prinzip war diese erste Generation von Riesensternen – Astronomen sprechen von der Sternpopulation III – fähig, den Schleier des Wasserstoffgases zu zerreißen und das Universum zu reionisieren. Doch dazu brauchten diese Sterne ganz bestimmte Eigenschaften; insbesondere mussten sie ausreichend hell und langlebig sein, was stark von ihrer Größe abhing.

Damals glaubte man, sie wären ausnahmslos gigantisch gewesen, jeweils mit rund 100 Sonnenmassen. Die Begründung dafür: Wenn ein Gasklumpen unter dem Einfluss der Schwerkraft zu kollabieren beginnt, erwärmt er sich. Das erzeugt einen der Schwerkraft entgegenwirkenden Strahlungsdruck. Falls der Stern die Wärme nicht teilweise abgeben kann, kommt sein Kollaps zum Stillstand. Die ersten Sterne bestanden fast nur aus Wasserstoff, der nur langsam Wärme verliert; solche wie unsere Sonne enthalten hingegen geringe, aber wichtige Spuren von Sauerstoff und Kohlenstoff, welche die Kühlung fördern.



Die jungen Riesen des frühen Universums: Warum waren die ersten Himmelsobjekte so groß? Alle Sterne führen einen kosmischen Balanceakt aus: Die Schwerkraft versucht sie möglichst fest zusammenzupressen, aber der Innendruck des Sternengases wirkt der Gravitation entgegen und bläht die leuchtenden Gaskugeln auf. Durch Vergleich der Sternentstehung im heutigen Kosmos mit der Bildung der ersten Sternengeneration im frühen Universum lässt sich erklären, warum die ersten Sterne so massereich waren (Moonrunner Design)

Infolgedessen akkumulierte ein Protostern im frühen Universum immer mehr Wasserstoffgas, aber der hohe Strahlungsdruck verhinderte zunächst die Bildung eines dichten Innenbereichs, in dem eine Fusionsreaktion hätte starten können. Diese treibt normalerweise das umgebende Gas größtenteils in den Weltraum zurück. Daher häufte der Stern immer mehr Gas an, bis schließlich doch die Fusion in dem inzwischen riesenhaften Gebilde zündete.

Doch so einfach scheint das nicht zu sein, gibt Thomas Greif zu bedenken. Der Postdoc an der Harvard University in Cambridge (Massachusetts) hat einige der raffiniertesten Simulationen für die frühe Sternentstehung programmiert. Die neuen Modelle berücksichtigen nicht nur die Gravitation, sondern auch Rückkopplungseffekte im Wasserstoffgas, während dieses beim Kollaps unter immer höheren Druck gerät. Wie sich herausstellt, kann der Kollaps einer Wasserstoffwolke höchst unterschiedlich enden. Manchmal geht daraus ein Stern von sogar der millionenfachen Masse der Sonne hervor. Doch gelegentlich zerfällt die kollabierende Wolke und erzeugt mehrere Sterne mit nur einigen dutzend Sonnenmassen.

Diese Größenunterschiede führen zu gewaltigen Abweichungen bei der geschätzten Lebensdauer der ersten Sterne – und damit auch beim mutmaßlichen Zeitpunkt der Reionisierung. Riesensterne mit mehr als 100 Sonnenmassen leben gleichsam auf der Überholspur und sterben früh. Kleinere Sterne zehren ihren Kernbrennstoff langsamer auf; wären solche Exemplare für die Reionisierung verantwortlich, hätte der Vorgang viele hundert Millionen Jahren gedauert.

Quasare – fern und hell

Alle diese unterschiedlich großen Sterne explodierten letztlich als Supernovae und kollabierten anschließend zu Schwarzen Löchern. Das brachte Astronomen auf einen anderen Gedanken: Vielleicht haben ja nicht die Sterne selbst die Reionisierung angetrieben, sondern die aus ihnen hervorgegangenen Schwarzen Löcher?

Diese Objekte verschlingen gierig das Gas ihrer Umgebung, das dabei komprimiert und auf Millionen Grad erhitzt wird. Zwar verschwindet das meiste Material im Schwarzen Loch, aber ein Teil wird in Form von eng gebündelten Gasstrahlen in den Raum ausgestoßen. Diese Jets strahlen so hell, dass sie über riesige Entfernungen sichtbar bleiben.

In der zweiten Hälfte des vorigen Jahrhunderts boten solche Leuchtfeuer, sogenannte Quasare, den einzigen Zugang zum frühen Universum. Zunächst hatten die Astronomen keine Ahnung, worum es sich handelte. Quasare sahen aus wie nahe Sterne, zeigten aber riesige Rotverschiebungen – eine durch

die Expansion des Universums verursachte Dehnung der Wellenlängen. Das bedeutete, dass die Quasare unmöglich einzelne Sterne sein konnten: Dafür lagen sie viel zu weit entfernt – und strahlten somit zu hell. Der erste entdeckte Quasar 3 C 273 hatte eine Rotverschiebung von 0,16, das heißt sein Strahlungsspektrum war um 16 % langwelliger als das eines nahen Sterns. Das wiederum besagte, dass sich sein Licht vor rund zwei Milliarden Jahren auf den Weg zu uns gemacht hatte.

Schon bald fand man Quasare mit Rotverschiebungen bis zu 2, womit man mehr als zehn Milliarden Jahre zurückblicken konnte. 1991 entdeckten Maarten Schmidt, James E. Gunn und Donald P. Schneider am Palomar-Observatorium in Kalifornien einen Quasar mit Rotverschiebung 4,9. Das entsprach einer Emission vor 12,5 Mrd. Jahren – nur etwas mehr als eine Milliarde Jahre nach dem Urknall.

Doch im Spektrum dieser enorm rotverschobenen Quasarstrahlung tauchten die charakteristischen Absorptionslinien von neutralem Wasserstoff nicht auf. Offenbar war das Universum damals bereits reionisiert.

In den folgenden Jahren wurde kein noch älterer Quasar entdeckt. Zwar nahmen damals mächtige Instrumente wie das Hubble-Weltraumteleskop und das Keck-Teleskop auf dem Mauna Kea (Hawaii) den Betrieb auf, aber Quasare sind einfach ungemein selten. Sie werden nur von besonders massereichen Schwarzen Löchern hervorgerufen, und wir nehmen sie nur wahr, wenn ihre Gasjets zufällig direkt auf uns weisen. Außerdem treten diese Jets nur auf, wenn ein Schwarzes Loch aktiv Gas verschlingt. Das geschah am häufigsten bei Rotverschiebungen zwischen 2 und 3, denn in der entsprechenden Ära enthielten die meisten Galaxien mehr Gas als heute. Bei größeren Rotverschiebungen – also zu noch früheren Zeiten – nimmt die Anzahl der beobachtbaren Quasare rapide ab.

Erst als der Sloan Digital Sky Survey ab dem Jahr 2000 einen riesigen Himmelsabschnitt systematisch mit den damals größten elektronischen Detektoren durchmusterte, wurde der Entfernungs- und Altersrekord gebrochen. „Die Sloan-Durchmusterung war einfach fabelhaft erfolgreich im Aufspüren ferner Quasare“, meint der Astronom Richard Ellis vom California Institute of Technology in Pasadena. „Man fand 40 bis 50 Quasare mit einer Rotverschiebung über 5,5.“ Bei noch höheren Rotverschiebungen – zwischen 6 und 6,4 – erfasste die Durchmusterung nur wenige Quasare.

Aber selbst in dieser Raum- und Zeitferne fand sich keine Spur von neutralem Wasserstoff. Erst als die Himmelsdurchmusterung Infrared Deep Sky Survey mit dem United Kingdom Infrared Telescope (UKIRT) des Mauna-Kea-Observatoriums einen Quasar mit der Rotverschiebung 7,085 aufspürte,

entdeckten die Astronomen kleine, aber signifikante Wasserstoffmengen, die sich durch – extrem rotverschobene – Absorptionslinien im Ultraviolettbereich verrieten. Dieser Quasar namens ULAS J1120+064, der rund 770 Mio. Jahre nach dem Urknall geleuchtet hatte, erlaubte den Astrophysikern endlich einen Einblick in die Ära der kosmischen Reionisierung – aber nur einen sehr oberflächlichen, denn sogar so kurz nach dem Urknall war der neutrale Wasserstoff großteils schon zerstört worden.

Allerdings könnte dieser Quasar möglicherweise zufällig in einer an neutralem Wasserstoff ungewöhnlich armen Region sitzen, und die anderen Quasare in dieser Entfernung sind von dichterem, stärker absorbierendem Gas umgeben. Oder aber ULAS J1120+064 befindet sich umgekehrt in einer besonders dichten Region, und überall sonst war die Reionisierung schon längst abgeschlossen. Ohne weitere Beispiele können die Astronomen keine wirklichen Aussagen über den Ablauf der kosmischen Morgendämmerung machen. Es ist jedoch sehr unwahrscheinlich, dass sie genügend viele derart ferne Quasare für eine statistische Untersuchung finden.

ULAS J1120+064 ist trotzdem eine Fundgrube für Astronomen. Einerseits, erklärt Ellis, fällt die Anzahl der Quasare so stark mit der Entfernung ab, dass Schwarze Löcher unmöglich die Hauptquelle der für die kosmische Reionisierung verantwortlichen Strahlung sein können. Andererseits muss das Schwarze Loch, das diesen Quasar antreibt, die Masse von Milliarden Sonnen haben, sonst gäbe es nicht dessen energiereiche, über derart riesige Entfernungen gut sichtbare Strahlung. „Es ist fast unbegreiflich“, meint Ellis, „wie so etwas in der kurzen Zeitspanne entstehen konnte, die seit der Entstehung des Universums vergangen war“.

Wie allerdings der Astronom Abraham Loeb von der Harvard University betont, kann ein Stern der ersten Generation mit 100 Sonnenmassen einige hundert Millionen Jahre nach dem Urknall zu einem Schwarzen Loch kollabieren und sich anschließend unter geeigneten Bedingungen in der verfügbaren Zeit zu einem Quasar auswachsen. „Man muss das Schwarze Loch aber kontinuierlich füttern“, sagt er, und das sei schwer vorstellbar. „Quasare strahlen so hell, sie produzieren so viel Energie, dass sie das Gas aus ihrer Umgebung vertreiben“. Ohne eine nahe gelegene Gasquelle verlöscht der Quasar vorübergehend und kann nun wieder Gas akkumulieren, bis er erneut aufflammt – und seinen Treibstoffvorrat wiederum wegbläst. „Es ist wie ein Betriebszyklus“, sagt Loeb. „Das Schwarze Loch kann nur in einem Bruchteil der Zeit wachsen“.

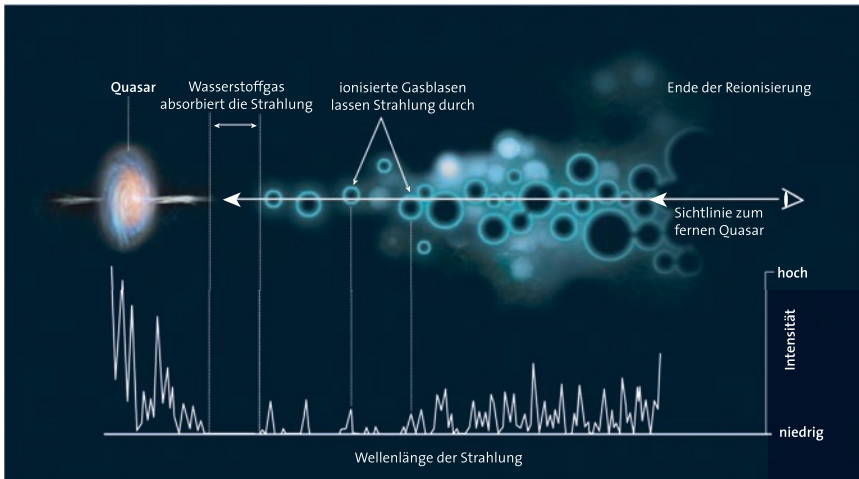
Aber auch durch Verschmelzung miteinander können Schwarze Löcher zunehmen – und zwar viel schneller. Außerdem folgt aus den neuen Untersuchungen der Sterngrößen, dass die ersten Schwarzen Löcher nicht aus Sternen mit etwa 100, sondern mit rund einer Million Sonnenmassen hervorgingen. Diese Idee hat Loeb schon 2003 in einem Fachartikel vorgeschlagen und wird inzwischen unter anderem von Greifs Simulationen unterstützt. „Da diese Sterne so hell strahlen wie die gesamte Milchstraße, könnte man sie im Prinzip mit dem James-Webb-Weltraumteleskop sehen“ – dem für 2018 geplanten größeren Nachfolger des Hubble-Teleskops.

Die ersten Galaxien

Zwar ist die Jagd nach fernen Quasaren mehr oder weniger zum Erliegen gekommen, aber die Suche nach Galaxien, die möglichst bald nach dem Urknall entstanden sind, nimmt jetzt erst richtig Fahrt auf. Am Anfang stand das sogenannte Hubble Deep Field. 1995 richtete Robert Williams, damals Direktor des Space Telescope Science Institute in Baltimore, das Hubble-Weltraumteleskop geschlagene 30 h lang auf einen scheinbar leeren Himmelsabschnitt, um mit der langen Belichtungszeit mögliche schwach strahlende Objekte zu entdecken. „Ein paar sehr ernst zu nehmende Astronomen hielten das für Zeitverschwendung“, erinnert sich der gegenwärtige Direktor Matt Mountain.

Doch das Teleskop registrierte mehrere tausend kleine und schwache Galaxien, die teils zu den entferntesten jemals beobachteten Himmelsobjekten zählen. Mit der 2009 bei einem Weltraumspaziergang installierten, 35-mal effektiveren Wide Field Camera 3 entdeckte die Hubble-Sonde noch weitere urtümliche Sternsysteme. „Anfangs zählten wir vier oder fünf Galaxien mit einer Rotverschiebung von mindestens 7“, berichtet der Astronom Daniel Stark von der University of Arizona in Tucson. „Jetzt sind es mehr als 100“. Eine von Ellis, Stark und anderen 2012 beschriebene Galaxie zeigt eine Rotverschiebung von 11,9 – was eine Zeit von weniger als 400 Mio. Jahren nach dem Urknall bedeutet.

Wie beim Quasar ULAS J1120+064 verrät auch die von jungen Galaxien zur Erde gelangende Strahlung viel über die damalige Verteilung des intergalaktischen Wasserstoffs. Das Gas absorbierte einen signifikanten Bruchteil der galaktischen Ultraviolettstrahlung, wobei dieser Anteil mit steigendem Alter der beobachteten Galaxie allmählich abnahm – bis der Kosmos rund eine Milliarde Jahre nach dem Urknall völlig transparent wurde.



Quasare als Zeitzeugen: Da Quasare zu den hellsten Objekten im frühen Universum gehören, können Astronomen sie über eine Entfernung von mehr als zehn Milliarden Lichtjahren hinweg aufspüren. Während die Strahlung des Quasars quer durch das Universum zu unseren Teleskopen gelangt, wird sie durch die Expansion des Alls gedehnt. Zudem absorbiert atomarer Wasserstoff einen Teil der Strahlung. Astronomen können darum die Absorption als Funktion der Wellenlänge auftragen, um zu sehen, wie sich die Häufigkeit des Wasserstoffs im Lauf der Zeit verändert hat. Wie sich zeigt, wurden separate Blasen aus ionisiertem Gas größer und häufiger, während das Universum sich entwickelte (Moonrunner Design, nach: George Djorgovski, Caltech und Abraham Loeb, Harvard University)

Demnach lieferten die ersten Galaxien nicht nur die ionisierende Strahlung, sondern geben auch Auskunft über den Übergang des Universums vom neutralen zum völlig ionisierten Zustand. Die Sache hat nur einen Haken: Wenn man von den rund 100 bisher gefundenen Galaxien mit Rotverschiebungen über 7 auf den ganzen Himmel hochrechnet, bekommt man nicht genug Ultraviolettstrahlung, um den gesamten neutralen Wasserstoff zu ionisieren.

Doch vielleicht ist die Lösung ganz einfach. Obwohl die Galaxien, die das Hubble-Teleskop gerade noch zu entdecken vermag, für uns schwach aussehen, sind sie vermutlich die hellsten Objekte ihrer Epoche. Es muss in der gleichen Entfernung noch viel mehr Galaxien geben, die für unsere Teleskope einfach nicht stark genug leuchten. Von dieser vernünftigen Annahme ausgehend, meint Ellis, „glauben nun wohl die meisten, dass Galaxien bei der Reionisierung des Universums die Hauptarbeit leisteten“.

Wie neue Galaxien wirklich aussehen und wann sie erstmals aufleuchteten, wissen wir noch nicht. Die bislang jüngsten entdeckten haben bereits bis zu 100 Mio. Sterne, und ihr Spektrum besagt – auch wenn man die Rotverschiebung berücksichtigt –, dass ihre Sterne röter sind, als bei einer sehr jungen Galaxie zu erwarten wäre. „Diese Objekte sehen aus“, meint Stark, „als hätten sie schon seit mindestens 100 Mio. Jahren Sterne gebildet. Mit dem Hubble-Teleskop können wir die erste Sternengeneration noch nicht wirklich sehen; das wird erst mit dem James-Webb-Weltraumteleskop gelingen“.

Doch Hubbles Möglichkeiten sind noch nicht erschöpft. Zwar vermag das Teleskop die schwächsten Objekte nur mit absurd langen Belichtungszeiten wiederzugeben, aber das Universum kommt den Astronomen mit natürlichen Linsen zu Hilfe. Diese „Gravitationslinsen“ beruhen auf der Tatsache, dass massereiche Objekte – in diesem Fall Galaxienhaufen – den umgebenden Raum krümmen, was weit dahinter liegende Objekte verzerrt und manchmal vergrößert.

Wie Astronom Marc Postman vom Space Telescope Science Institute erklärt, „erreichen wir damit enorme Vergrößerungen ferner Galaxien; sie erscheinen 10- bis 20-mal heller als vergleichbare Galaxien ohne Linseneffekt“. Postman ist Chefwissenschaftler des Cluster Lensing and Supernova Survey with Hubble (CLASH); das Programm hat rund 250 zusätzliche Galaxien mit Rotverschiebungen zwischen 6 und 8 identifiziert und sogar einige mit bis zu 11. Anscheinend passen die Resultate zu denen der verschiedenen Deep-Field-Durchmusterungen.

Nun dringt Hubble sogar noch weiter vor: Matt Mountain hat ein neues Projekt namens Frontier Field begonnen, um nach vergrößerten Bildern schwacher und ferner Galaxien zu suchen, die hinter sechs besonders massereichen Clustern liegen. In den kommenden Jahren, sagt Projektleiterin Jennifer Lotz, „werden wir jeden Cluster während 140 Erdumkreisungen von Hubble jeweils 45 min lang fixieren. So tief hat noch niemand ins All geschaut“.

Gammastrahlenausbrüche

In den 1960er Jahren entdeckten Forscher kurze Blitze hochfrequenter Strahlung aus unterschiedlichen Richtungen. Zunächst blieben diese Gammastrahlenausbrüche rätselhaft. Heute glauben die Astronomen, dass sie häufig vom Ende sehr massereicher Sterne künden: Wenn die Sterne zu Schwarzen Löchern kollabieren, speien sie Jets von Gammastrahlen weit in den Weltraum hinaus. Sobald die Jets auf Gaswolken in der Umgebung treffen, erzeugen sie ein intensives Nachglühen von sichtbarem und infrarotem Licht, das man mit herkömmlichen Teleskopen zu sehen vermag.

Daher verläuft die Beobachtung folgendermaßen: Wenn das satelliten-gestützte Swift Gamma-Ray Burst Observatory einen Gammablitz entdeckt, dreht es sich, bis sein Teleskop auf den Herkunftsort zeigt. Zugleich sendet es die Koordinaten an irdische Observatorien. Falls deren Teleskope den Blitz rechtzeitig aufs Korn nehmen, können Astronomen die Rotverschiebung des Nachglühens messen – und somit das Alter der Galaxie, in welcher das Phänomen auftrat.

Wegen ihrer enormen Heftigkeit sind die Ausbrüche wertvolle Botschaften aus den Tiefen von Raum und Zeit. „In den ersten Stunden“, sagt Edo Berger, ein Spezialist für Gammablitze an der Harvard University, „überstrahlen sie Galaxien um das Millionenfache, und sie sind 10- bis 100-mal heller als Quasare“. Man braucht keine langen Belichtungszeiten mit dem Hubble-Teleskop, um sie aufzuspüren. Ein Teleskop auf dem Mauna Kea identifizierte 2009 einen Gammablitz mit Rotverschiebung 8,2; das bedeutet, er fand 600 Mio. Jahre nach dem Urknall statt.

Der Blitz war so hell, berichtet Berger, dass er auch bei einer Rotverschiebung von 15 oder gar 20 sichtbar gewesen wäre. Das entspräche 200 Mio. Jahren nach dem Urknall und somit etwa der Zeit, als vermutlich die ersten Sterne erstrahlten. Berger glaubt, die äußerst massereichen Sterne der ersten Generation hätten durchaus derart energiereiche Ausbrüche auslösen können, dass sie – wenn man sie fände – trotz der noch größeren Entfernung heller erscheinen müssten als die bisher entdeckten Gammablitze.

Quasare kommen nur in Galaxien mit supermassereichen Schwarzen Löchern vor, doch Gammastrahlenausbrüche unterliegen keinen solchen Beschränkungen: Sie verlaufen in winzigen Galaxien genauso heftig wie in großen – und bieten damit eine viel repräsentativere Stichprobe des Universums zu gegebener Zeit.

Allerdings muss Berger zugeben: 99 % der Gammablitze sind nicht auf die Erde gerichtet, und vom kläglichen Rest – Satelliten entdecken rund einen Blitz pro Tag – weist nur ein winziger Bruchteil hohe Rotverschiebungen auf. Es würde mindestens zehn Jahre dauern, eine repräsentative Stichprobe von extrem rotverschobenen Blitzen zu sammeln, aber Berger bezweifelt, dass der Swift-Satellit so lange in Betrieb bleiben wird. Im Idealfall, meint er, müsste man einen Nachfolgersatelliten starten, der Gammablitzkoordinaten an das James-Webb-Teleskop liefert oder an drei geplante bodengestützte 30-Meter-Instrumente. Leider haben bisher weder die US-Raumfahrtbehörde NASA noch die europäische Esa dafür grünes Licht gegeben.

Doch sobald das James-Webb-Weltraumteleskop und die nächste Generation gigantischer Bodenteleskope den Betrieb aufnehmen, werden die Astronomen viel ältere und schlechter sichtbare Galaxien, Quasare und Gammablitzte aufspüren als heutzutage. Unterdessen setzen die Radioastronomen ihre Hoffnung auf Instrumente wie das Murchison Widefield Array in Australien, das Precision Array for Probing the Epoch of Reionisation (PAPER) in Südafrika, das australisch-südafrikanische Square Kilometre Array sowie das Low Frequency Array (LOFAR) mit seinen zahlreichen, über mehrere europäische Länder verteilten Antennen.

Damit soll das langsame Verschwinden der Wolken aus neutralem Wasserstoff verfolgt werden, das sich während der ersten Milliarde Jahre der kosmischen Geschichte ereignet hat. Da der Wasserstoff Radiowellen aussendet, können die Astronomen diese Emissionen über die Rotverschiebung verschiedenen Epochen zuordnen und quasi Momentaufnahmen anfertigen, die zeigen, wie der Wasserstoff im Lauf der Zeit durch hochenergetische Strahlung allmählich aufgefressen wurde.

Weiterführende Literatur

Barkana, R.: The First Stars in the Universe and Cosmic Reionization. In: Science 313, S. 931–934, 2006

Bromm, V., Larson, R. B.: The First Stars. In: Annual Review of Astronomy and Astrophysics 42, S. 79–118, 2004

Miralda-Escudé, J.: The Dark Age of the Universe. In: Science 300, S. 1904–1909, 2003

Loeb, A.: Die dunkle Ära des Universums. In: Spektrum der Wissenschaft 1/2007, S. 47

Wie Forscher einem finsternen Zeitalter kosmologische Informationen entlocken

Michael D. Lemonick schreibt regelmäßig für Climate Central, eine gemeinnützige amerikanische Nachrichten-Website. Vorher war er 21 Jahre lang als Wissenschaftsjournalist für das amerikanische „Time Magazine“ tätig.



Erster Nachweis: Verschmelzende Neutronensterne

Markus Pössel

Ein Meilenstein für die Astronomie, ein Glücksfall für die Forschung: Erstmals gelang es, mit Gravitationswellen und in allen Bereichen des elektromagnetischen Spektrums – von den hochenergetischen Gammastrahlen über das sichtbare Licht bis zu der langwelligen Radiostrahlung – die Kollision von zwei Neutronensternen in einer fernen Galaxie zu beobachten (aus *Sterne und Weltraum* 12/2017).

IN KÜRZE

- Mit der direkten Beobachtung von Gravitationswellen und dem ersten Nachweis verschmelzender Schwarzer Löcher begann vor zwei Jahren das Zeitalter der Gravitationswellenastronomie.
- Nun haben die Detektoren LIGO und Virgo auch die Verschmelzung von zwei Neutronensternen mittels Gravitationswellen nachgewiesen. Andere Observatorien beobachteten dieses Ereignis in allen Bereichen des elektromagnetischen Spektrums.
- Damit gelang der Einstieg in die Mehrkanalbeobachtung oder Multimessenger-Astronomie. Der dadurch ermöglichte Erkenntnisschub hebt die astronomische Forschung auf eine völlig neue Qualitätsstufe.

M. Pössel (✉)

Fakultät für Physik und Astronomie, Universität Heidelberg, Heidelberg,
Deutschland

E-Mail: poessel@hda-hd.de

Das Signal kam blitzartig: Am 17. August 2017, um 12:41:06 Uhr Weltzeit, löste der Gamma-Ray Burst Monitor (GBM) an Bord des Weltraumteleskops Fermi Alarm aus. Gamma-Ray Bursts, zu deutsch Gammastrahlenausbrüche oder Gammablitz, entsprechen einem kurzen, hellen Aufleuchten einer astronomischen Quelle im hochenergetischen Bereich des elektromagnetischen Spektrums. Dass der GBM-Detektor anschlug, war für sich genommen nichts Ungewöhnliches – das Instrument hat jederzeit rund 75 % des Himmels im Blick und weist alle paar Tage einen neuen Gammablitz nach. Dann wird das auf Gammastrahlen spezialisierte Fermi-Teleskop so gedreht, dass sein zweites Instrument, das Large Area Telescope, die Umgebung der Gammastrahlenquelle in Augenschein nehmen kann.

Außerdem wird bei einem solchen Alarm automatisch eine Meldung abgesetzt, eine sogenannte GCN-Notice, die binnen einer Sekunde über das Internet an interessierte Beobachter weitergeleitet wird, die dem Gamma-Ray Burst Coordinates Network (GCN) angeschlossen sind. Wer ein robotisches Teleskop betreibt, kann den Beobachtungsprozess mithilfe solcher Benachrichtigungen automatisieren: Sofort nach Anschlagen des GBM fährt ein solches Teleskop selbsttätig die Himmelsregion an, in welcher der Gammablitz verortet wurde. Allerdings ist die von Fermi abgeschätzte Position nicht sehr genau; interessant sind die Benachrichtigungen daher vornehmlich für Teleskope mit größerem Blickfeld.

Sechs Minuten, nachdem der GBM-Detektor angeschlagen hatte, wurde klar, dass die Lage diesmal alles andere als gewöhnlich war, sondern dass Messungen und Beobachtungen bevorstanden, die es in dieser Form noch nie zuvor gegeben hatte. Bevor wir zu den Details kommen, wollen wir uns in Erinnerung rufen, was die Astronomen überhaupt über Gammablitz wissen – genauer: was sie bis zu diesem 17. August 2017 bereits wussten.

Das Rätsel der Gammablitz

Gammablitz wurden Ende der 1960er Jahre von US-amerikanischen Militärsatelliten entdeckt, die eigentlich Kernwaffenexplosionen aufspüren sollten. Über die Jahre hinweg fanden sich immer mehr solcher rätselhafter Blitze, die aus dem Weltraum kamen. Im Jahr 1997 gelang es erstmals, auch das optische Nachglühen eines Gamma-Ray Bursts zu beobachten: Wenige Stunden, nachdem der Satellit BeppoSAX am 28. Februar 1997 einen Gammablitz registriert hatte (der nach diesem Datum die Bezeichnung GRB 970228 trägt), beobachteten Teleskope an der fraglichen Himmelsposition eine schwächer werdende Lichtquelle. Dieses Nachglühen war mit einer kaum sichtbaren Galaxie assoziiert; Gammablitz schienen also ferne Ereignisse weit außerhalb unseres Milchstraßensystems zu sein.

Wenige Wochen später gelang bereits die nächste optische Nachbeobachtung: Für den Blitz GRB 970508 ließ sich sogar die Rotverschiebung des optischen Nachleuchtens ermitteln. Aus solchen Rotverschiebungen des Signals zu größeren Wellenlängen hin lässt sich die Entfernung der betreffenden Lichtquelle ableiten. GRB 970508 war demnach so weit entfernt, dass sein Licht rund 7 Mrd. Jahre zu uns unterwegs gewesen war (Zum Vergleich: Seit dem Urknall sind knapp 14 Mrd. Jahre vergangen).

Somit wurde klar: Gammablitzte gehören zu den fernsten kosmischen Ereignissen, die sich beobachten lassen. Würde man annehmen, dass sie ihre Energie gleichmäßig in alle Richtungen freisetzen, kämen gigantische Werte heraus, die mit keinem der denkbaren Modelle zu erklären wären. Recht schnell setzte sich deshalb die Erkenntnis durch, dass Gammablitzte ihre Energie gebündelt abstrahlen; einen extrem hellen Ausbruch sehen wir entsprechend dann, wenn das Strahlungsbündel direkt auf die Erde gerichtet ist.

Doch selbst wenn in den Quellen ein starker Bündelungseffekt auftritt: Um über derart große Distanzen so gut sichtbar zu sein, müssen solche Ausbrüche, zumindest innerhalb eines kurzen Zeitraums, enorme Energiemengen freisetzen. Die Strahlungsleistung muss diejenige unserer Sonne um mindestens das Hundertbilliardenfache übertreffen.

Sobald hinreichend viele Beobachtungen vorlagen, zeigte sich, dass es offenbar zwei Typen von Gammastrahlenausbrüchen gibt: einerseits kurze Blitze mit einer mittleren Dauer von einigen Zehntelsekunden und andererseits längere, deren Gammastrahlung im Mittel über eine halbe Minute hinweg bei den irdischen Teleskopen ankam. Die Ausbrüche schienen bevorzugt in Sternentstehungsgebieten zu liegen, in denen man massereiche Sterne erwarten würde. Aber welches Ereignis mit massereichen Sternen konnte derart helle Ausbrüche hervorrufen?

Handelte es sich vielleicht um Neutronensterne – also die kompakten Überreste massereicher Sterne –, die Materie eines Begleiters auf sich gezogen hatten, dadurch zu einem Schwarzen Loch kollabierten und kurzzeitig intensive Strahlung in Form eines Jets aussandten? Spielten Neutronensterne mit extrem starken Magnetfeldern eine Rolle?

Zumindest für die längeren Gammastrahlenausbrüche war ab 2003 sicher, dass Sternexplosionen die Auslöser sind. Als Supernovae explodieren massereiche Sterne, wenn sie ihren Kernbrennstoff verbraucht haben. Die massereichsten Sterne, mit mehr als dem etwa 25-Fachen der Sonnenmasse, explodieren als entsprechend stärkere Hypernovae – und diese, das zeigten gleichzeitige Beobachtungen in mehreren Wellenlängenbereichen, schienen für die länger dauernden Gammablitzte verantwortlich zu sein.

Die kürzeren Gammablitzte blieben rätselhafter. Sie traten auch dort auf, wo keine massereichen Sterne zu erwarten sind. Als mögliche Ursache favorisierten die Astronomen das Verschmelzen von zwei Neutronensternen.

Neutronenstern-Doppelsysteme

Dass es Doppelsternsysteme gibt, in denen beide Partner aus den Resten massereicher Sterne bestehen, ist aus Beobachtungen im Radiobereich bekannt. Denn einige Neutronensterne senden enge Bündel von elektromagnetischer Strahlung aus. Rotiert der Neutronenstern so, dass uns ein solches Bündel in regelmäßigen Abständen überstreicht, sehen wir ihn in regelmäßigen Abständen blinken wie das Licht eines Leuchtturms. Dieses pulsformige Erscheinungsbild gab diesen Objekten den Namen Pulsar. Derzeit ist ein gutes Dutzend Doppel-Neutronensterne bekannt, von denen wir jeweils mindestens einen Neutronenstern als Pulsar sehen.

Solche Systeme sind exzellente kosmische Laboratorien, mit denen sich die Vorhersagen von Einsteins allgemeiner Relativitätstheorie überprüfen lassen. Das liegt daran, dass Neutronensterne sehr kompakt sind, also vergleichsweise viel Masse bei astronomisch gesehen kleinem Radius haben (rund ein bis zwei Sonnenmassen in einer Kugel mit etwa 10 km Radius). Da unter solchen Bedingungen die von der allgemeinen Relativitätstheorie vorhergesagten Effekte sehr ausgeprägt sind, lässt sie sich genau auf die Probe stellen. Bislang hat die Theorie alle entsprechenden Tests mit Bravour bestanden.

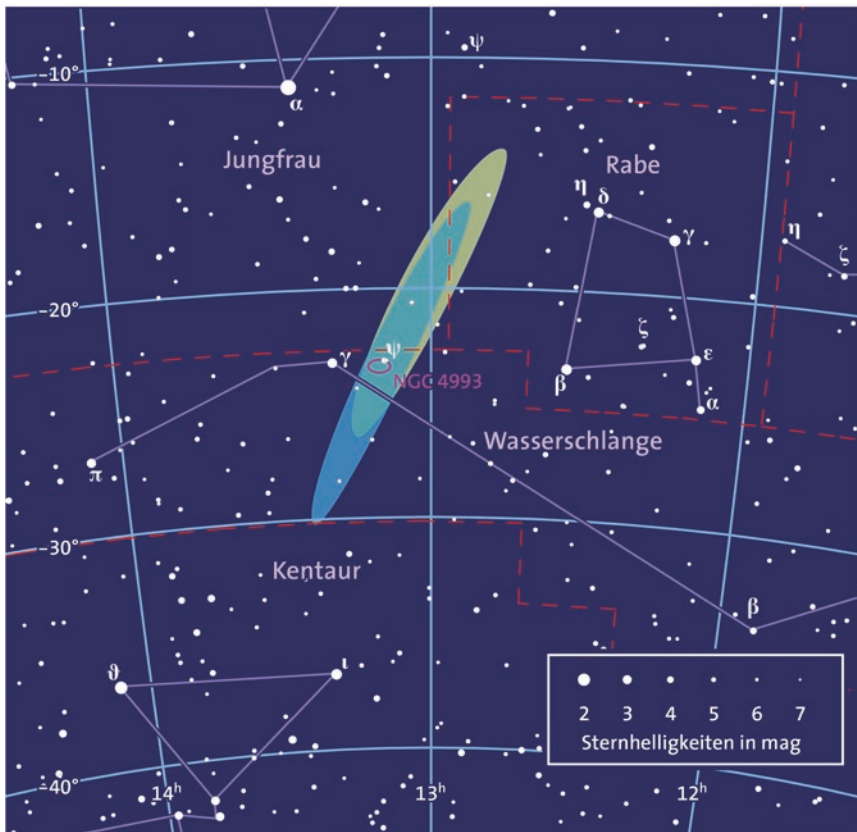
Besonders wichtig ist dabei der folgende von der allgemeinen Relativitätstheorie vorhergesagte Effekt: Einander umkreisende Massen sollten den sie umgebenden Raum in winzige Schwingungen versetzen, die sich wellenartig mit Lichtgeschwindigkeit ausbreiten: Gravitationswellen, mit denen insbesondere auch Energie in den umgebenden Raum abgegeben wird. Infolge des Energieverlusts rücken die beiden Neutronensterne im Lauf der Zeit immer näher zusammen und umkreisen sich deswegen immer schneller. Dieser Effekt lässt sich durch Beobachtungen nachweisen. Seit Entdeckung des ersten Doppel-Neutronensterns im Juli 1974 hat die Umlaufzeit dieses Systems systematisch in genau der Weise um einige tausendstel Sekunden abgenommen, wie es sich auf Grundlage der allgemeinen Relativitätstheorie ausrechnen lässt. Das war der erste, wenn auch indirekte Nachweis für die Existenz von Gravitationswellen. Die Entdecker dieses Systems, Joseph Taylor und sein damaliger Doktorand Russell Hulse, wurden dafür mit dem Physik-Nobelpreis des Jahres 1993 ausgezeichnet.

Eine Eigenschaft eines Doppelsystems aus Neutronensternen ist, dass mit abnehmendem Abstand und immer schnellerer Umkreisung immer mehr Energie in Form von Gravitationswellen abgestrahlt wird. Dieser sich aufschaukelnde, sich selbst beschleunigende Prozess endet erst, wenn die Neutronensterne sich so nahe gekommen sind, dass sie kollidieren und miteinander verschmelzen; was dabei entsteht, ist freilich nicht stabil, sondern kollabiert zu einem Schwarzen Loch.

Für die als Pulsare in unserer Milchstraße nachgewiesenen Doppel-Neutronensternsysteme liegt diese Verschmelzungsphase noch in weiter Ferne. Am ehesten ist das System PSR J0737–3039 an der Reihe, bei dem wir beide Partner als Pulsar beobachten können. Aber selbst diese beiden Neutronensterne werden erst in rund 85 Mio. Jahren verschmelzen.

Gammablitz und Kilonova

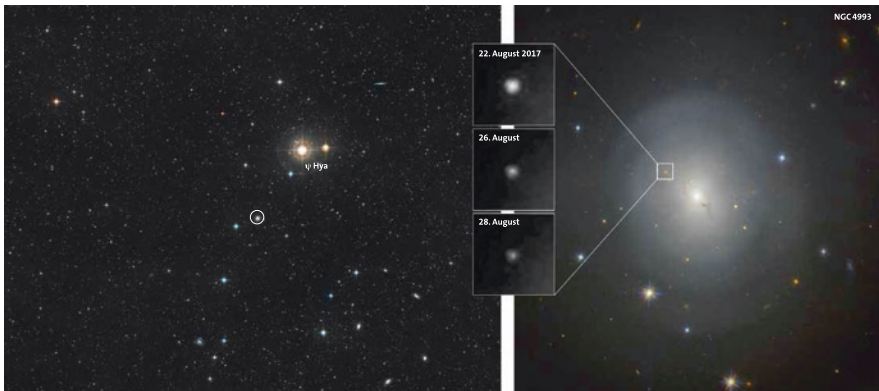
Was dann passiert, lässt sich mit ausgefeilten Computersimulationen nachvollziehen. Indem sie Raum und Zeit gemäß den Gesetzen der allgemeinen Relativitätstheorie modellieren und die Materie der Neutronensterne abbilden, zeigen sie den Verschmelzungsprozess: Ein Teil der Neutronenmaterie kollabiert zu einem Schwarzen Loch, während Reste der Materie einen Torus, einen Ring, darum herum bilden.



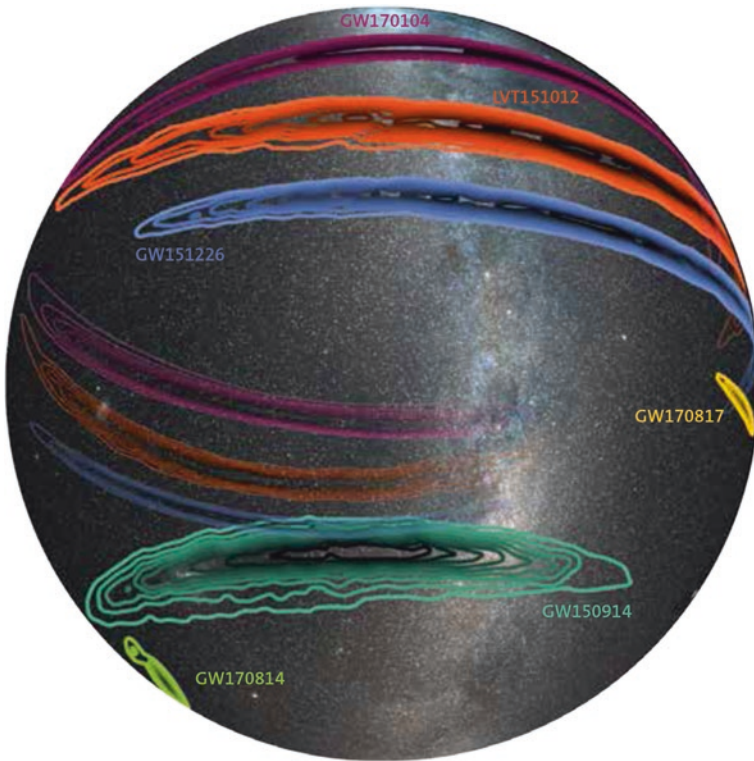
Energiereiche Nova in ferner Galaxie: Mit den kombinierten Daten der Gravitationswellendetektoren LIGO und Virgo ließ sich die Quelle GW170817 in einem schmalen, etwa 30 Quadratgrad großen Himmelsareal verorten (die beiden Ellipsen rühren von zwei unterschiedlichen Auswerteverfahren her) (Ernst E. von Voigt)

Solche Strukturen, die ein Schwarzes Loch oder einen anderen kompakten Körper umringen, bilden in anderen Situationen, etwa bei Röntgendoppelsternen, nachweislich Jets aus, in denen senkrecht zur Scheibenebene ein Plasma hochenergetischer Teilchen nach außen geschleudert wird. Dabei spielen starke Magnetfelder eine Rolle. Ein Teil der Energie der Jets wird in gebündelte, hochenergetische elektromagnetische Strahlung umgesetzt. Ist einer der Jets zufällig so ausgerichtet, dass die Strahlung – je nach Laufzeit viele Millionen Jahre später – die Erde trifft, können irdische Beobachter einen kurzen Gammastrahlenausbruch beobachten.

In der neutronenreichen Umgebung entstehen zudem Atomkerne mit einem hohen Neutronenüberschuss. Diese sind instabil und zerfallen schrittweise in stabile Kerne. Damit sind verschmelzende Neutronensterne eine wichtige Quelle für die Entstehung schwerer Elemente. Die radioaktiven Zerfälle sind dafür verantwortlich, dass auf den Gammablitz noch ein weniger energetisches Nachglühen im sichtbaren und im infraroten Licht folgt: Eine sogenannte Kilonova oder Makronova leuchtet auf. Wenn die neu entstandenen Kerne mit hoher Geschwindigkeit auf das umgebende interstellare Gas treffen, entstehen zudem – etwas verzögert zur Kilonova.



Innerhalb von zwölf Stunden hatten Observatorien das optische Pendant der Quelle in der linsenförmigen Galaxie NGC 4993 identifiziert, die in der Nähe des Sterns Psi Hydrae liegt (links). Der Helligkeitsausbruch, der rund tausendmal stärker war als eine gewöhnliche Nova, ist in Aufnahmen des Weltraumteleskops Hubble deutlich sichtbar (rechts). Die Helligkeit dieser Kilonova nahm im Lauf von sechs Tagen allmählich ab. (Copyright: ESO and Digitized Sky Survey 2 <http://www.eso.org/public/germany/images/eso1733i/> CC BY 4.0; <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/legalcode>; NASA and ESA <https://www.eso.org/public/germany/images/eso1733n/> CC BY 4.0 <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/legalcode>)



Wo am Himmel befinden sich die Quellen? Auf Grund der Bauart von Gravitationswellendetektoren lässt sich die Herkunft eines Signals nur auf lang gestreckte, ellipsenförmige Bereiche am Himmel eingrenzen. Drei statt zwei Detektoren verringern die Größe dieser Fehlerellipsen deutlich. In dieser Grafik sind Lokalisierungsbereiche der bisher nachgewiesenen Quellen von Gravitationswellen auf eine Himmelskugel projiziert. Die Quellen GW150914, LVT151012, GW151226 und GW170104 wurden nur von den beiden (LIGO-Detektoren entdeckt; die Signale GW170814 und GW170817 wurden im August 2017 von allen drei Detektoren des LIGO-Virgo-Netzwerks nachgewiesen. (LIGO/Virgo/NASA/Leo Singer/Axel Mellinger <http://www.hq.eso.org/public/germany/images/eso1733t//CC BY 4.0> <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/legalcode>)

Das Nachleuchten in den verschiedenen Bereichen des elektromagnetischen Spektrums hat für die Beobachtung den Vorteil, dass die Abstrahlung nicht gebündelt, sondern einigermaßen gleichmäßig in alle Richtungen erfolgt. Das Licht und die Radiostrahlung sind im Prinzip also auch dann von der Erde aus nachweisbar, wenn der Gammablitz uns verfehlt.

Insgesamt wurde vermutet, dass die hier skizzierten Neutronenstern-Zusammenstöße entscheidend dazu beigetragen haben, dass es im Universum

überhaupt Elemente wie Gold, Platin, Uran oder Plutonium gibt. Ungefähr die Hälfte der Elemente, die schwerer sind als Eisen, sollte in sogenannten r-Prozessen entstehen, bei denen Atomkerne innerhalb kurzer Zeit weitere Neutronen einfangen (das „r“ steht für das englische „rapid“, schnell). Verschmelzende Neutronensterne böten mit der gewaltigen Menge an freigesetzter Energie und der neutronenreichen Umgebung gute Bedingungen dafür.

Die herausgeschleuderten schweren Atomkerne würden sich im Lauf der Zeit mit dem interstellaren Gas vermischen; entstehen aus diesem Medium neue Sterne und Planeten, verdanken diese zumindest einen Teil ihrer schweren Elemente den Neutronenstern-Verschmelzungen. Gesicherte Daten dazu gab es allerdings nicht; ein konkurrierender Erklärungsansatz bevorzugte Supernova-Explosionen, die zwar wesentlich weniger der entsprechenden Elemente produzieren, dafür aber insgesamt viel häufiger sind.

In Grundzügen war dieses Szenario von den Wissenschaftlern bereits vor dem 17. August 2017 weitgehend akzeptiert, wenn auch eine Reihe von konkreten Details ungeklärt waren: Wie und wo wird das Plasma zum Jet beschleunigt? Woher kommt die Energie für den Jet – welche Rolle spielen beispielsweise Neutrinos, die bei den Kernreaktionen während des Zusammenstoßes freigesetzt werden? Wie entsteht aus dem Jet die elektromagnetische Strahlung – vielleicht als Synchrotronstrahlung, wenn elektrisch geladene Jet-Teilchen spiralförmig um die Magnetfeldlinien herumtrudeln?

Woran es außerdem mangelte, waren Informationen über die Eigenschaften von Neutronenmaterie unter derart extremen Bedingungen. Insbesondere die Zustandsgleichung (der Zusammenhang zwischen dem von der Neutronenmaterie ausgeübten Druck und der Materiedichte) ist nur unvollständig bekannt.

An dieser Stelle wird wichtig, dass verschmelzende Neutronensterne auch Gravitationswellen aussenden – ebenso wie verschmelzende Paare aus zwei Schwarzen Löchern oder aus einem Schwarzen Loch und einem Neutronenstern. Das Signal hat dabei in den letzten Stadien vor der Verschmelzung einen charakteristischen Verlauf, der als „Chirp“, also als „Zirpen“ bezeichnet wird: Sowohl Frequenz als auch Amplitude des Signals steigen in genau definierter Weise an; auf Schallwellen übertragen entspricht dies wirklich einer Art Zirpen. Der Gravitationswellennachweis eines geeigneten Chirps, gekoppelt mit dem Nachweis eines kurzen Gammastrahlenausbruchs aus derselben Himmelsregion, könnte direkt zeigen, ob kurze Gammablitze tatsächlich durch die Verschmelzung von Neutronensternen hervorgerufen werden.

Entsprechend hoch waren die Erwartungen, seitdem den beiden LIGO-Detektoren am 14. September 2015 das erste Mal der direkte Nachweis von Gravitationswellen gelungen war. Allerdings handelte es sich bei allen direkten Nachweisen bis Januar 2017 um verschmelzende Paare von Schwarzen Löchern. Was war mit den Doppel-Neutronensternen? Deren Gravitationssignale sind schwächer; entsprechend konnten die LIGO in der damaligen Konfiguration nur bis zu Abständen von rund 200 Mio. Lichtjahren nachweisen. Da Neutronenstern-Verschmelzungen extrem selten sind, waren in der ersten Messkampagne, die von September 2015 bis Januar 2016 dauerte, den Abschätzungen zufolge nur 0,002 bis zwei solcher Nachweise zu erwarten.

Am 1. August 2017 gesellte sich erstmals der Advanced-Virgo-Detektor in Italien zu den beiden LIGO-Detektoren; letztere hatten bereits seit dem 30. November 2016 ihren zweiten Beobachtungsdurchgang, der noch bis zum 25. August laufen würde. Ein dritter Detektor hat einen entscheidenden Vorteil: Entsprechend dem Nachweisprinzip der interferometrischen Detektoren benötigt man mindestens drei Detektoren, um die Quelle wenigstens einigermaßen genau am Himmel zu lokalisieren; das ergibt sich direkt daraus, dass Signale aus unterschiedlichen Richtungen zu unterschiedlichen Zeiten bei den drei Detektoren ankommen. Mit zwei Detektoren lässt sich der Ort der Quelle nur auf einen länglichen Streifen einschränken.

Diese Fähigkeit stellte das Detektorentrio dann am 14. August 2017 tatsächlich unter Beweis: Gemeinsam wiesen alle drei Detektoren das Signal GW 170814 nach, das wiederum von verschmelzenden Schwarzen Löchern stammte, eines davon mit einer Masse zwischen 28 und 36 Sonnenmassen, das andere zwischen 21 und 28 Sonnenmassen, in rund 1,8 Mrd. Lichtjahren Entfernung. Die Himmelsposition der Quelle konnten die Detektoren auf eine Fläche von rund 60 Quadratgrad einschränken. Ohne Virgo wäre die in Frage kommende Fläche rund 20 Mal größer gewesen.

Allerdings sind auch 60 Quadratgrad noch ein riesiges Himmelsgebiet. Zum Vergleich: Die Vollmondscheibe bedeckt am Himmel eine Fläche von nur 0,2 Quadratgrad. Diese Positionsungenauigkeit für GW170814 mit drei Detektoren entsprach also der Fläche von 300 Vollmonden. Für diejenigen Wissenschaftler aber, die sich für Neutronensterne interessierten, war das ein wichtiger Fortschritt. Denn im Fall einer Neutronenstern-Verschmelzung käme es darauf an, nicht nur die Gravitationswellen und die Gammastrahlung nachzuweisen, sondern auch die Signale im optischen und im Radiowellenbereich. Um dafür die leistungsfähigsten Teleskope einsetzen zu können, sind möglichst präzise Positionsangaben erforderlich.

Die Entdeckung von GW170817

Nach dieser Zusammenfassung des bisherigen Wissenstands kehren wir zurück zum 17. August 2017. Was anfangs nur ein weiterer kurzer Gammastrahlenausbruch gewesen zu sein schien, entpuppte sich sechs Minuten später als das langersehnte, nie zuvor beobachtete Ereignis: Ein kurzer Gammablitzz, der direkt – nur 1,7 s später – auf das charakteristische Chirp-Signal zweier verschmelzender Neutronensterne folgte.

Warum erst nach sechs Minuten? So lange brauchte der Suchalgorithmus, der laufend die Daten des LIGO-Detektors in Hanford auswertet, um festzustellen: Diese Daten enthalten ein deutliches Gravitationswellensignal einer Neutronenstern-Verschmelzung, die knapp zwei Sekunden vor dem kurzen Gammastrahlenausbruch stattgefunden hatte, um 12:41:04 Uhr Weltzeit.

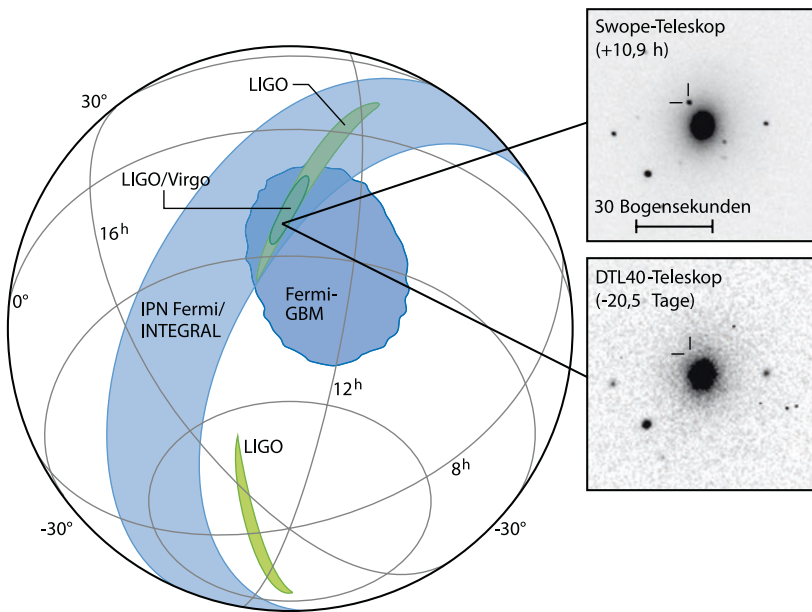
Eine fieberhafte Datenanalyse begann. Ungewöhnlich war, dass die automatisch laufenden Algorithmen keine Koinzidenz zwischen den beiden LIGO-Detektoren gemeldet hatten. Der Grund war rasch gefunden: Dem Gravitationswellensignal im LIGO-Detektor in Livingston hatte sich nahe dem Ende der Verschmelzung ein starkes Störsignal überlagert, das den Algorithmus verwirrt hatte. In den Daten des Virgo-Detektors in Italien war dagegen nur ein äußerst schwaches Signal zu finden. Wie stark eine Gravitationswelle einen der Detektoren mit seinen rechtwinkligen Interferometerarmen beeinflusst, hängt von der Einfallrichtung der Welle ab; offenbar kam diese Gravitationswelle aus einer Richtung, aus der Virgo seiner Orientierung nach nicht sonderlich empfindlich für Gravitationswellen war.

Die genauere Analyse zeigte aber mit immer größerer Sicherheit: Es schien sich tatsächlich um eine Verschmelzung von Neutronensternen zu handeln. Das Signal, der Chirp, hatte eine Dauer von rund 100 s innerhalb des von den Detektoren erfassten Frequenzbereichs. Damit war er ungleich länger als die nur Zehntelsekunden-langen Chirps von verschmelzenden Schwarzen Löchern, die zuvor nachgewiesen worden waren – und mit deutlich geringerer Amplitude in der Endphase. Die Gravitationswellen der Neutronenstern-Verschmelzung hatten zuerst den Virgo-Detektor erreicht, 22 Millisekunden später LIGO-Livingston im US-Bundesstaat Louisiana und weitere drei Millisekunden später LIGO-Hanford im US-Bundesstaat Washington.

Eine arbeitsreiche halbe Stunde später versandte das LIGO-Virgo-Team eine Mail; sie ging an all jene Astronomen, die automatisierte Nachrichten über Gammastrahlungsausbrüche erhielten und sich schriftlich verpflichtet hatten, Informationen über mögliche Gravitationswellenereignisse

vertraulich zu behandeln. Dieses GCN-Circular machte klar: Achtung! GRB 170817 A ist ein Kandidat für einen kurzen Gammablitz, für den gleichzeitig die Gravitationswellen einer Neutronenstern-Verschmelzung beobachtet wurden.

Diese Mail löste weltweit eine zielgerichtete Aktivität aus, besonders an den Observatorien, für die der vermutete Ort der Quelle am Südhimmel zugänglich war. Hier waren vor allem die Teleskope in Chile gefragt. An den Standorten der Europäischen Südsternwarte ESO, des Las Campanas Observatory der Carnegie Institution und des Cerro Tololo Inter-American Observatory der US-amerikanischen Nationalsternwarte sind dort viele der weltweit leistungsfähigsten Teleskope versammelt.



Lokalisierung der Quelle: Damit optische Teleskope das Nachglühen eines Gammablitzes erfassen können, ist das Suchgebiet möglichst exakt einzugrenzen. Auf eine Himmelskugel sind hier die Regionen projiziert, aus denen das Gravitationswellensignal GW170817 und das Gammastrahlensignal GRB 170817 A mit einer Wahrscheinlichkeit von 90 % kamen – berechnet nur mit LIGO-Daten (hellgrün), Daten von LIGO und Virgo (dunkelgrün), aus der Zeitverzögerung zwischen den beiden Satelliten Fermi und INTEGRAL (hellblau) sowie mit Daten von Fermi-GBM (dunkelblau). Das Swope-Teleskop lokalisierte das optische Gegenstück der Quelle als Lichtpunkt in der Galaxie NGC 4993 (mit einem Fadenkreuz markiert). (Copyright: B. P. Abbott et al. (LIGO SCIENTIFIC COLLABORATION, Virgo Collaboration, and Partner Astronomy Groups), Astrophysical Journal Letters, in press. <http://iopscience.iop.org/article/10.3847/2041-8213/AA91C9/> SuW-Grafik)

Die Jagd auf die Kilonova beginnt

Zum Zeitpunkt des Gammablitzes hatte in Chile gerade der Tag begonnen. Immerhin: Nach Einbruch der Dunkelheit rund zehn Stunden später sollte der entsprechende Himmelsabschnitt für ein bis zwei Stunden zugänglich werden. Ein Wettlauf mit der Zeit begann: Würde es gelingen, die Lichtquelle am Himmel rasch genug so genau zu lokalisieren, dass die empfindlichsten der modernen Teleskope das Nachglühen noch würden beobachten, Bilder und Spektren würden aufnehmen können? Erschwerend kam hinzu: Von Tag zu Tag würde die Sonne näher an die betreffende Himmelsregion rücken. Keine optimalen Voraussetzungen also. Zumal sich in dem Suchareal rund 50 Galaxien befanden, die es abzusuchen galt.

Zunächst schlug die Stunde der Durchmusterungsteleskope mit großen Bildfeldern, wie sie zur Suche nach Supernovae und anderen zeitkritischen astronomischen Ereignissen eingesetzt werden. Um 23:33 Uhr Weltzeit war das Swope-Teleskop am Las Campanas Observatory erfolgreich. Die dortigen Astronomen hatten sich in dem Suchfeld auf Galaxien mit besonders vielen Sternen und Sternentstehungsgebieten konzentriert. In dem neunten Bild, das sie aufnahmen, wurden sie fündig: Knapp elf Bogensekunden vom Zentrum der Galaxie NGC 4993 entfernt entdeckten sie einen neuen Lichtpunkt: Er erhielt die Bezeichnung SSS17a, für Swope Supernova Survey 2017a.

Noch bevor das Team den Fund bestätigt und in einem GCN-Circular allen Suchenden bekanntgegeben hatte, war der Lichtpunkt noch von fünf weiteren Teams entdeckt worden, darunter dem großen Infrarotdurchmusterungsteleskop VISTA der ESO und einem 40-Zentimeter-Teleskop des weltweiten Teleskopnetzwerks des Las Cumbres Observatory. Jetzt, wo die genaue Position bekannt war, konnten auch die Großteleskope zum Einsatz kommen, die recht kleine Bildfelder haben.

Die elliptische Galaxie NGC 4993, in einer Entfernung von rund 130 Mio. Lichtjahren im Sternbild Hydra (Wasserschlange) gelegen, wurde nun Beobachtungsziel einer beispiellosen koordinierten Kampagne. Überall, wo die Galaxie am Nachthimmel zu sehen war, wurden die geplanten Beobachtungsprogramme unterbrochen, und die Aufmerksamkeit aller richtete sich auf die Himmelskoordinaten Rektaszension $13^{\text{h}}09^{\text{m}}48^{\text{s}},085$, Deklination $-23^{\circ}22'53'',343$. Auch die Weltraumteleskope für Beobachtungen im Ultravioletten und Infraroten sowie im sichtbaren Licht konnten jetzt zum Einsatz kommen.

Insgesamt beteiligten sich mehr als 70 Observatorien mit rund 100 Teleskopen an der Kampagne. Es gibt Schätzungen, denen zufolge etwa 15 % aller weltweit tätigen Astronomen in die Beobachtungen und

die nachfolgenden Auswertungen eingebunden waren. Die diversen GCN-Circulare, mit denen sich die beteiligten Beobachter wechselseitig auf dem Laufenden hielten, lesen sich wie eine Art moderner Briefroman der beispiellosen Beobachtungskampagne.

Man beobachtete bei allen zugänglichen Wellenlängen: Die Weltraumteleskope Fermi, INTEGRAL, Swift, Chandra und NuStar nahmen sich des Gamma- und Röntgenbereichs an, unterstützt von den Tscherenkow-Teleskopen H.E.S.S. in Namibia. Die Weltraumteleskope Hubble und Spitzer beobachteten im Optischen und im Infraroten. Zu größeren Wellenlängen hin beteiligten sich das ALMA-Observatorium mit seinen mehr als 60 Millimeter-/Submillimeterantennen, das Very Large Array, LOFAR und die Radioteleskope in Effelsberg und Parkes. Für das Weltraumteleskop INTEGRAL konnten die Forscher sogar nachträglich rekonstruieren, dass es ebenfalls einen Überschuss an Gammaphotonen gemessen hatte, als Fermi den Alarm auslöste.

Auch die Neutrino-Observatorien ANTARES, IceCube und Pierre Auger beteiligten sich an der Beobachtungskampagne, konnten aber keine Neutrinos aus der betreffenden Himmelsregion nachweisen – auch dies ein durchaus nicht nutzloses Resultat, da es die Eigenschaften der schnellen Materieausflüsse nach der Verschmelzung einschränkt.

Allein aus den optischen Spektren hätten die Astronomen schon sagen können, dass sie da ein ganz und gar ungewöhnliches Ereignis verfolgten. Binnen Tagen wechselte die Farbe der beobachteten Kilonova von blau zu tiefrot, wurde das anfangs sehr starke UV-Licht schwächer und die Nahinfrarot-Anteile nahmen zu, viel schneller als bei allen bislang beobachteten Sternexplosionen. Nach etwa einer Woche verblassten auch die Anteile im sichtbaren und Nahinfrarotlicht.

Neue Einblicke

Diese Abfolge war, wie man sie für eine Neutronenstern-Verschmelzung erwartet hatte, sollten doch das herausgeschleuderte Material das UV- und sichtbare Licht nach und nach abschwächen, Nahinfrarotlicht aber weitgehend ungehindert passieren lassen. Insgesamt war die Kilonova im Optischen heller als erwartet – offenbar schirmte die Materiehülle das sichtbare Licht doch nicht so kräftig ab wie zuvor vermutet.

Die Spektren zeigten außerdem im Vergleich mit entsprechenden Modellen die Spuren von schweren Elementen – genau so, wie man es für eine Neutronenstern-Verschmelzung erwarten würde, bei der Elemente jenseits von Eisen durch schnellen Neutroneneinfang (den r-Prozess) erzeugt und in den Weltraum hinausgeschleudert werden. Alleine schon die tiefrote

Färbung, die das Objekt nach einiger Zeit zeigte, wies in diese Richtung – die entsprechende Materie aus schweren Kernen absorbiert sichtbares Licht viel stärker als beispielsweise die von einer Supernova ausgeworfene Materie und erzeugt so eine charakteristische tiefrote Farbe.

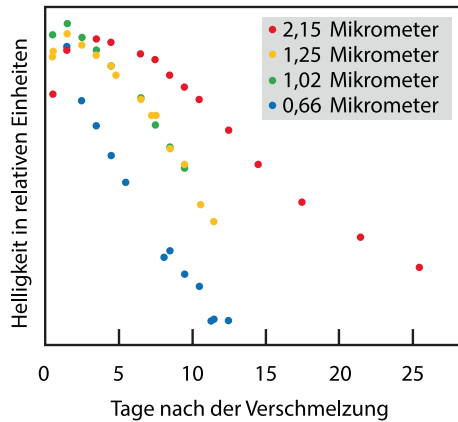
Die Astronomen untersuchten diesen Aspekt aber noch sehr viel genauer; in den entsprechenden Modellen, mit denen die Beobachtungsdaten verglichen werden, gehen die verzweigten Abläufe der Kernreaktionsketten, die Geometrie des Entstehungsszenarios und die Art und Weise ein, wie elektromagnetische Strahlung unter solchen Umständen nach außen dringt.

Insgesamt ergab sich das erste umfassende Bild von der Natur eines kurzen Gammastrahlenausbruchs. Die Gravitationswellensignale zeigen an, dass dort ein kompaktes Objekt von 1,36 bis 2,26 Sonnenmassen mit einem weiteren kompakten Objekt von 0,86 bis 1,36 Sonnenmassen verschmolzen ist – der Masse nach also eindeutig Neutronensterne.

Gefolgt wurde die Verschmelzung von einem vergleichsweise schwachen kurzen Gammablitz. Etwas später folgte eine Kilonova im Bereich des UV-, sichtbaren und Infrarotlichts, angetrieben durch radioaktive Zerfälle von bei der Verschmelzung entstandenen schweren Atomkernen; einige Spektren solcher schweren Elemente wurden auch direkt nachgewiesen. Insgesamt, so die Schätzung aus den Beobachtungsdaten, dürfte die Masse der erzeugten schweren Elemente dem 16.000-Fachen der Erdmasse entsprechen – darunter alleine zehn Erdmassen an Gold und Platin.

Kombiniert man diese Mengenschätzung mit einer Schätzung der Häufigkeit solcher Ereignisse, dann könnten Neutronenstern-Verschmelzungen sogar für die Produktion so gut wie aller Elemente schwerer als Eisen verantwortlich sein, die durch den r-Prozess entstehen; auf Modelle, die zu erklären versuchen, wie solche Elemente auch in Supernovae erzeugt werden könnten, ließe sich dann vollständig verzichten. (Für Elemente bis hin zu Eisen blieben Supernovae freilich nach wie vor die Haupterzeuger!) Nur der langsame Neutroneneinfang in einem Spätstadium bestimmter Sterne (der sogenannten AGB-Sterne) trägt bei einigen der schweren Elemente noch merklich zur Häufigkeit bei. Auf einen Schlag war eine weitere grundlegende Frage entschieden worden, diesmal zur Entstehung der chemischen Elemente im Universum.

Wechselwirkungen der freigesetzten hochenergetischen Teilchen mit dem interstellaren Gas der Umgebung setzten dann mit noch größerer Verzögerung Röntgenstrahlung frei. Beobachtet wurde sie neun Tage nach dem Gammablitz von dem Weltraumteleskop Chandra. Eine Woche später folgte die erste Radiostrahlung, derer sich eine Vielzahl von Radioteleskopen rund um die Welt annahmen, darunter auch das 100-Meter-Radioteleskop in Effelsberg in der Eifel.



Die Helligkeit der Kilonova in NGC 4993 veränderte sich in verschiedenen Farbbereichen unterschiedlich schnell. Im blauen Licht verblasste das Objekt schnell, aber bei längeren Wellenlängen, insbesondere im nahen Infrarotbereich des Spektrums, hellte es sich etwas auf und verblasste dann viel langsamer. Infolgedessen änderte sich die Farbe des Objekts innerhalb von vier Wochen von sehr blau auf sehr rot. (Tanvir et al. <http://www.hq.eso.org/public/germany/images/eso1733f/>/CC BY 4.0 <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/legalcode/>Bearbeitung SuW-Grafik)

Insgesamt passen die Beobachtungen gut zu den bisherigen theoretischen Vorstellungen. Einige Aspekte kamen für die Astronomen allerdings durchaus unerwartet. Der Gammablitz GRB 170817 A selbst war erstaunlich schwach – das stellte sich allerdings erst heraus, als klar wurde, dass uns dieses Ereignis vergleichsweise nahe ist. Mit einem Abstand von 130 Mio. Lichtjahren ist dies sowohl der uns nächste Gammastrahlenausbruch als auch die uns nächste nachgewiesene Quelle von Gravitationswellen! Das bedeutete freilich auch: Was die Forscher anfangs für einen normal hellen, Milliarden von Lichtjahren entfernten Gammablitz gehalten hatten, war in Wirklichkeit ein sehr nahes Ereignis und besaß damit gar keine so große Leuchtkraft wie angenommen.

Im Gegensatz zu anderen kurzen Gammablitzen wurde GRB 170817 A auch nicht sofort von starker Röntgenstrahlung begleitet. Dies alles deutete darauf hin, dass der Jet des Gammablitzes nicht direkt auf die Erde zeigte, sondern knapp an ihr vorbei, sodass irdische Teleskope den Jet nicht direkt, sondern schräg beobachteten. Dass solche Beobachtungen gelingen könnten, war rund zwanzig Jahre zuvor erstmals vorgeschlagen worden; hier gab es nun den ersten direkten Beleg.

Die genaue Auswertung der reichhaltigen Datensätze dürfte noch einige weitere Monate in Anspruch nehmen, und insbesondere die Radioteleskope sind noch weiter am Beobachten – vielleicht treffen die herausgeschleuderten Elemente ja noch auf weitere Wolken interstellaren Gases.

Die Messungen der Gravitationswellen erlaubten dabei bereits erste Rückschlüsse auf die Eigenschaften von Neutronensternmaterie. Bestimmte Zustandsgleichungen, die bei gegebener Masse zu einem größeren Radius von Neutronensternen führen, sind den Messungen zufolge mit einiger Sicherheit ausgeschlossen; solche größeren Neutronensterne hätten bereits bei größeren Abständen verschmelzen müssen, als es den Signalen zufolge der Fall war.

Für die Astronomen haben die neuen Beobachtungen noch eine weitere fundamentale Bedeutung. Allein aus der Wellenform der Gravitationswellen-Chirps lässt sich nämlich abschätzen, wie stark das betreffende Signal am Ort der Quelle war. Im Vergleich mit der Stärke der nachgewiesenen Welle ergibt sich direkt die Entfernung des Verschmelzungsereignisses. Für GW 170817 beträgt diese Chirp-Entfernung 130 Mio. Lichtjahre, mit einer Unsicherheit von 25 Mio Lichtjahren. Das entspricht den früheren Abschätzungen der Entfernung von NGC 4993 und bestätigt somit die bisherigen astronomischen Methoden der Entfernungsbestimmung.

Diese herkömmlichen Entfernungen beruhen auf der astronomischen Entfernungsleiter, einer Kombination aufeinander aufbauender Verfahren, die vom Sonnensystem zu den nächsten Sternen und von dort über mehrere Stufen zu den fernsten bekannten Galaxien führt. Dabei spielen Radarmessungen, Positionsbestimmungen sowie Annahmen über die Eigenschaften von Galaxien und Supernovae eine Rolle. Diese komplexe Verkettung von Verfahren ließ sich nun direkt überprüfen, wenn auch nur an einem einzigen Datenpunkt und noch nicht sehr genau – aber durch einen Vergleich mit einem gänzlich unabhängigen Verfahren, der Chirp-Entfernung, das seinerseits nur von grundlegenden Gesetzen der Physik abhängt, nämlich von denen der allgemeinen Relativitätstheorie.

Und alles andere als unerwartet, aber trotzdem erwähnenswert: Dass Gammastrahlen und Gravitationswellen nach einer Reisezeit von 130 Mio. Jahren in so kurzem Abstand, nämlich weniger als zwei Sekunden auseinander, hier auf der Erde ankamen, bestätigt, dass Gravitationswellen sich tatsächlich mit Vakuum-Lichtgeschwindigkeit ausbreiten, so wie von der allgemeinen Relativitätstheorie vorhergesagt.

Am 16. Oktober 2017 verkündeten die Forscher der LIGO- und Virgo-Kollaborationen und der beteiligten Observatorien ihre Ergebnisse.

Die Öffentlichkeit war durchaus nicht unvorbereitet. Denn bereits ab Ende August hatten sich sehr konkrete Gerüchte verbreitet. Die Beobachtungs-Logbücher einer Reihe von Observatorien sind öffentlich zugänglich, und dass sich am 17. August nach der Fermi-Alarmierung ungewöhnlich viele Großteleskope auf die sonst eher unscheinbare Galaxie NGC 4993 richteten, sprach Bände.

Einstieg in die Multimessenger-Astronomie

Die Monate im Sommer und Herbst 2017 waren für die Forscher sehr aufregend und arbeitsreich. Wie gesagt, hatten die LIGO- und Virgo-Kollaborationen bereits Ende September das von der Kollision Schwarzer Löcher herrührende Gravitationswellensignal GW170814 bekanntgegeben – das erste, das gleich mit drei Detektoren nachgewiesen und dessen Quelle entsprechend genau lokalisiert werden konnte. Der Nachweis mit drei Detektoren erlaubte es dabei erstmals, eine direkte Vorhersage über die Eigenschaften von Gravitationswellen nachzuprüfen, die aus der allgemeinen Relativitätstheorie folgt: dass die Verzerrung aufgrund dieser Wellen nur senkrecht zur Ausbreitungsrichtung stattfindet, in der Sprache der Physiker: dass solche Wellen transversal sind.

Mitten in die Auswertung weiterer Gravitationswellensignale fiel am 3. Oktober die Bekanntgabe, dass drei der LIGO-Pioniere den Physik-Nobelpreis des Jahres 2017 erhalten. Damit würdigte das Nobel-Komitee in Stockholm die große Bedeutung, die der erstmalige direkte Nachweis von Gravitationswellen im September 2015 für die Wissenschaft hat. Mit den neuen Ergebnissen zu GW170817 hat nun mit einem Paukenschlag die Ära der Mehrkanalbeobachtungen in der Astronomie begonnen, die neben elektromagnetischer Strahlung und Teilchenströmen auch Gravitationswellen als astronomische Informationsträger nutzt. Die Beobachtungen ab dem 17. August, mit denen die Natur der kurzen Gammastrahlenausbrüche aufgeklärt wurde, zeigt eindrucksvoll, wie sich die einzelnen Informationsträger ergänzen und Daten zu ganz unterschiedlichen Aspekten ein und desselben Objekts liefern, die sich zu einem aufschlussreichen Gesamtbild fügen. Für diese umfassende Zusammenarbeit zwischen den verschiedenen Nachweis- und Beobachtungstechniken wurde bereits der Begriff Multimessenger-Astronomie geprägt.

Nach dem Ende der gemeinsamen Messkampagne im August sind die Wissenschaftler von LIGO und Virgo nun dabei, ihre Detektoren zu modifizieren und ihre Empfindlichkeit ein weiteres Mal zu steigern. Die Leistung der Laser wird dazu noch einmal erhöht. Zudem soll zum ersten Mal gequetschtes Licht zum Einsatz kommen – das ist eine trickreiche

Technik, mit der sich das durch Quanteneffekte bedingte Rauschen noch weiter dämpfen lässt. Am deutsch-britischen Gravitationswellendetektor GEO600 in Hannover wird dieses Verfahren bereits erfolgreich in großem Stil eingesetzt.

Anfang 2019 soll die dritte gemeinsame Messkampagne von LIGO und Virgo beginnen; durch die Empfindlichkeitssteigerungen sollten sich Verschmelzungsereignisse von Schwarzen Löchern und Neutronensternen dann in einem rund acht Mal größeren Raumvolumen nachweisen lassen als bisher – und entsprechend häufiger sollten solche Nachweise werden (vergleiche das Interview S. 38).

Wenn alles nach Plan läuft, treten wir damit bald in eine Ära ein, in der einzelne Gravitationswellennachweise nichts besonderes mehr sind; dafür wird dann die Statistik dieser Ereignisse interessant: Wie viele sich umkreisende Schwarze Löcher, wie viele entsprechende Neutronensterne gibt es in unserer kosmischen Umgebung? Wie sind ihre Massen verteilt, und was sagt uns das über ihre Entstehung und, allgemeiner, über die Entstehung sehr massereicher (Vorläufer-)Sterne im Universum?

Eine weitere Anwendungsmöglichkeit hat Bernard Schutz von der Universität Cardiff (und ehemals Direktor am Max-Planck-Institut für Gravitationsphysik in Potsdam) bereits 1986 vorgeschlagen: Er wies darauf hin, dass die Gravitationswellen von Doppelneutronenstern-Verschmelzungen direkte Informationen zur Kosmologie liefern. Bei Neutronenstern-Verschmelzungen wie GW170817 gibt es nicht nur die direkte Chirp-Entfernungsbestimmung mittels Gravitationswellen. Aus den elektromagnetischen Beobachtungen lässt sich zusätzlich üblicherweise die Rotverschiebung bestimmen; diese ist ein Maß dafür, wie schnell sich die betreffende Galaxie von uns entfernt. In einem expandierenden Universum wie unserem hängen Entfernung und Rotverschiebung einer fernen Galaxie linear zusammen. In einem Entfernungs-Geschwindigkeits-Diagramm (dem Hubble-Diagramm) bilden die entsprechenden Datenpunkte eine Gerade, deren Steigung so etwas wie den derzeitigen Schwung der kosmischen Expansion anzeigt; diese Größe ist die sogenannte Hubble-Konstante.

Mit nur zehn direkt nachgewiesenen Doppelneutronenstern-Verschmelzungen bis hinaus zu einer Entfernung von knapp 350 Millionen Lichtjahren, so die Abschätzung von Schutz, ließe sich die Hubble-Konstante mit einer Genauigkeit von drei Prozent gänzlich unabhängig von den herkömmlichen Methoden zur astronomischen Entfernungsmessung bestimmen. Das wäre dann entweder eine wichtige fundamental neuartige Bestätigung unserer kosmologischen Modelle. Oder aber es ergibt sich eine unerwartete Abweichung, und damit eine interessante neue Erkenntnis über das Universum. Der erste Datenpunkt, der aus der Beobachtung von GW170817

abgeleitet wurde, ist jedenfalls mit einem Wert von 70 km pro Sekunde und pro Megaparsec konsistent mit den Werten, die mit anderen Verfahren abgeleitet wurden.

Insgesamt ist es sicher nicht übertrieben, festzustellen, dass wir am Beginn einer neuen Ära stehen. Und das Spannendste dürfte noch vor uns liegen. Bislang hat noch jedes neue astronomische Fenster, jeder neu erschlossene Wellenlängenbereich komplett unerwartete Entdeckungen mit sich gebracht. Die können wir uns vom Blick durch das Einstein-Fenster, von der Astronomie mithilfe des direkten Nachweises von Gravitationswellen, mit einiger Zuversicht auch erhoffen.

Weiterführende Literatur

- Abbott, B. P. et al.: GW170817: Observation of Gravitational Waves from a Binary Neutron Star Inspiral. In: Physical Review Letters 119, 161101, 2017
- Kann, D. A. et al.: Kosmische Gammastrahlenausbrüche. In: Sterne und Weltraum 12/2007, S. 42–50
- LIGO Scientific Collaboration et al: Multi-Messenger Observations of a Binary Neutron Star Merger. In: The Astrophysical Journal Letters 848:L12, 2017
- LIGO Scientific Collaboration et al: Gravitational Waves and Gamma-Rays from a Binary Neutron Star Merger: GW170817 and GRB 170817A. In: The Astrophysical Journal Letters 848:L13, 2017
- Metzger, B. D.: Kilonovae. In: Living Reviews in Relativity 20:3, 2017
- Pössel, M., Rezzolla, L.: Mit Gravitationswellen ins Innere der Neutronensterne. In: Sterne und Weltraum 1/2009, S. 40–43
- Reichert, U.: Nobelpreis für Physik – indirekter Nachweis von Gravitationswellen. In: Spektrum der Wissenschaft 12/1993, S. 21–23
- Reichert, U.: Eine neue Ära der Astrophysik. Das Zeitalter der Gravitationswellen-Astronomie hat begonnen. In: Sterne und Weltraum 4/2016, S. 24–35
- Schutz, B. F.: Determining the Hubble Constant from Gravitational Wave Observations. In: Nature 323, S. 310–311, 1986
- Staudte, J., Rezzolla, L.: Verschmelzende Neutronensterne können die kurzen Gammablitze erzeugen! In: Sterne und Weltraum 7/2011, S. 22–23

Markus Pössel ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Max-Planck-Institut für Astronomie in Heidelberg, und er leitet das Haus der Astronomie, ein Zentrum für astronomische Öffentlichkeits- und Bildungsarbeit. Zuvor forschte er am Max-Planck-Institut für Gravitationsphysik in Potsdam-Golm, wo er auch das Webportal „Einstein Online“ gestaltete.



Das wechselhafte Leben der Sterne

Ralf Launhardt

Der funkelnde Nachthimmel erfüllt uns seit jeher mit Ehrfurcht und Staunen. Doch erst jetzt verstehen die Astronomen allmählich, welche Prozesse die Lichtquellen und Elementfabriken des Universums antreiben (aus *Spektrum der Wissenschaft* 8/2013).

AUF EINEN BLICK

UNSER LEBENDIGES FIRMAMENT

1. Der **Fixsternhimmel** galt in der Antike und im Mittelalter als eine ewig unveränderliche Sphäre.
2. Erst die moderne Naturwissenschaft entdeckte, dass im Weltall immerfort neue Sterne entstehen, unterschiedliche Schicksale durchlaufen und ihr Dasein oft mit spektakulären Explosionen beenden. Dabei werden **schwerere Elemente** erzeugt und in den interstellaren Raum ausgestoßen.
3. Offenbar geht die Sternentstehung häufig mit der **Bildung von Planeten** einher, die allerdings nur unter ganz bestimmten Bedingungen Leben tragen können. Viele Details der Stern- und Planetenentstehung sind noch ungeklärt.

Warum fasziniert uns der Sternenhimmel? Ist es das Empfinden der eigenen Winzigkeit im Angesicht der Himmelskuppel, der eigenen Vergänglichkeit angesichts der scheinbar unverrückbar daran fixierten Lichtpunkte? Wenn

R. Launhardt (✉)

Max-Planck-Institut für Astronomie, Heidelberg, Deutschland

E-Mail: rl@mpia.de

Forscher das Schicksal der Sterne untersuchen, gerät dieses Bild in Bewegung und kann uns erst recht in Staunen versetzen.

Kosmologen wissen heute, dass das Universum überwiegend aus unsichtbarer Dunkler Materie und der noch rätselhafteren Dunklen Energie besteht. Nur vier Prozent gewöhnlicher Materie bleiben übrig – und davon bestehen 90 % aus Gas, das meist unvorstellbar dünn im intergalaktischen Raum verteilt ist. Sterne machen am Ende also nur 0,4 % der Gesamtmasse im Kosmos aus. Doch die Vorgänge bei ihrem Werden und Vergehen sind der Grund für unsere eigene Existenz.

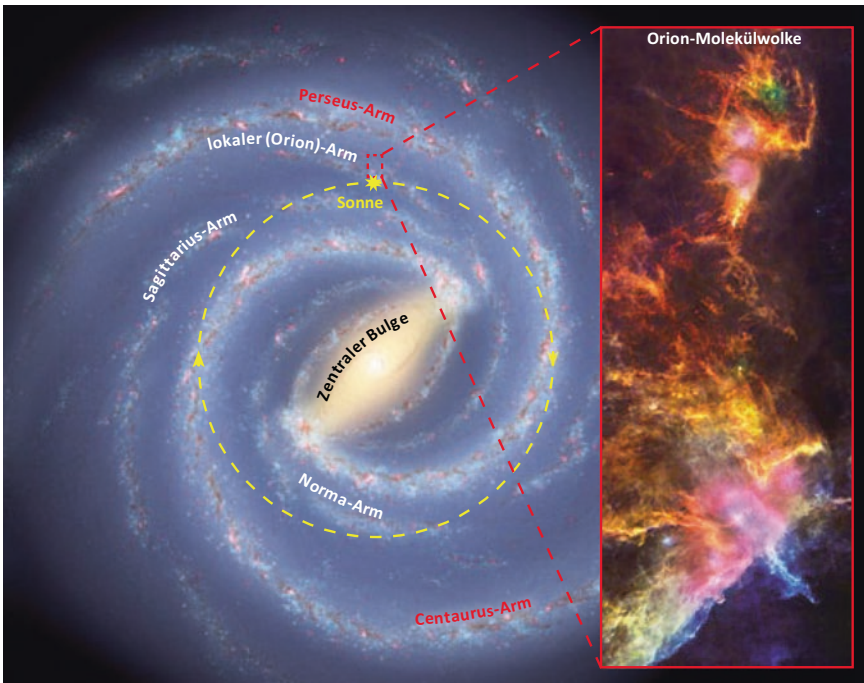
Sterne bilden sich aus diffusem Gas, wandeln es in ihrem Inneren um und geben die veränderte Materie im Lauf der Zeit an den umgebenden Raum ab. Nur so erklärt sich die stoffliche Vielfalt des Universums, denn beim Urknall entstanden lediglich Wasserstoff, Helium und Spuren von Lithium. Erst die Kernfusionen im Inneren der Sterne reicherten das Universum mit schwereren Elementen an. Ohne Sterne gäbe es daher keine Planeten mit festen Oberflächen – und insbesondere kein Leben. Mit anderen Worten: Wir sind aus Sternenstaub geboren.

Allein in unserer Galaxie gibt es mindestens 100 Mrd. Sterne. Deren Anteil am Volumen der Milchstraße ist nahezu verschwindend gering – ein zehnmilliardstel Billionstel –, und doch befindet sich in ihnen zehnmal so viel Masse wie im gesamten restlichen interstellaren Gas. Wenn aus diesem ein neuer Stern entstehen soll, muss sich das dünn und großräumig verteilte Gas enorm verdichten – um 25 Zehnerpotenzen. Solche Größenordnungen liegen weit jenseits unserer Vorstellungskraft und machen es schwierig, die beteiligten Prozesse zu modellieren.

Das Gas in der Scheibe der Milchstraße besteht zu 70 % aus Wasserstoff, zu 29 % aus Helium und nur zu einem Prozent aus schwereren Elementen. Etwa die Hälfte davon ist relativ gleichmäßig und mit rund einem Atom pro Kubikzentimeter extrem dünn verteilt. Der Rest formt Wolken, die immerhin etwa 200-mal dichter sind, sodass sich einzelne Wasserstoffatome zusammenfinden und zu Molekülen verbinden können. Diese Molekülwolken füllen aber bloß 0,3 % des gesamten Raums, und Sterne entstehen nur in den dichten Wolkenkernen.

Wie aber entwickelt das anfangs gleichmäßig verteilte Gas überhaupt solche Strukturen? Die Astronomen haben den Prozess noch nicht ganz verstanden, gehen aber von einem komplizierten Zusammenspiel von Gravitation und Sternentstehung aus. So bilden sich in der galaktischen Scheibe spiralförmige Dichtewellen, die nur langsam ihre Position ändern. In diese Bereiche strömen vergleichsweise schnell Gaswolken, die um das Zentrum rotieren. Die Materie verdichtet sich, bildet neue Sterne und formt so die leuchtenden Arme einer Spiralgalaxie wie der unseren. Auch die Sonne umkreist das Zentrum der Milchstraße und benötigt für einen

Umlauf – ein galaktisches Jahr – etwa 240 Mio. irdische Jahre. Unser vor 4,6 Mrd. Jahren entstandenes Sonnensystem ist jetzt also etwa 20 galaktische Jahre alt. Gegenwärtig befinden wir uns am Rand des Orion-Arms, eines kleinen Zwischenspiralarms. Im verdichteten Gas verbinden sich Wasserstoffatome zu Molekülen. Diese bilden entlang der dichteren Spiralarme große Wolken, die durch ihre eigene Schwerkraft zusammengehalten werden. In ihnen breiten sich immer wieder Stoßwellen aus – ausgelöst von Gaseruptionen entstehender Sterne sowie durch Supernovae, in denen sterbende massereiche Sterne ihre Hüllen explosionsartig abstoßen. Das führt in den Molekülwolken zu turbulenten Strömungen und lokalen Verdichtungen. Deren Anordnung ist nicht beliebig; Astronomen beobachten, dass sie fast immer entlang von Filamenten erfolgt.



Diese künstlerische Ansicht der Milchstraße veranschaulicht das gegenwärtige Wissen der Astronomen über die Struktur unserer Galaxie. In zwei Hauptspiralarmen (rot) und mehreren Zwischenspiralarmen verdichten sich Gas und Staub – hier entstehen zahlreiche neue, helle Sterne. Wie all diese Materie umläuft auch unsere Sonne das galaktische Zentrum (gestrichelter Kreis). Das wohl bekannteste und eindrucksvollste Sternentstehungsgebiet in unserer direkten Nachbarschaft ist die rund 1300 Lichtjahre entfernte Orion-Molekülwolke (Infrarotaufnahme des Herschel-Weltraumteleskops rechts). (Spektrum der Wissenschaft, nach: Ralf Launhardt; links: NASA/JPL-Caltech/R. Hurt (SSC/Caltech); rechts: ESA/Herschel/PACS, SPIRE/N. Schneider, Ph. André, V. Könyves (CEA Saclay, France) for the „Gould Belt survey“ Key Programme https://www.esa.int/spaceinimages/Images/2013/04/Herschel_s_view_of_the_Horsehead_Nebula)

Magnetfelder geben den Anstoß

Wie es dazu kommt, beginnen die Forscher aber gerade erst zu verstehen. Wahrscheinlich spielen Magnetfelder dabei eine wichtige Rolle: Energiereiche Strahlung wirkt ionisierend, das heißt, sie nimmt einigen Atomen Elektronen weg. Die geladenen Teilchen folgen dem Verlauf der Magnetfelder, stoßen dabei mit neutraler Materie zusammen und reißen diese mit sich. So kanalisiert sich allmählich die Bewegung des gesamten Gases. Die Magnetfelder sind aber nur sehr schwer messbar, zudem sehen wir immer nur eine Projektion der Materieverteilung in die Himmelsebene. Ob sich das alles wirklich so abspielt, ist daher noch immer Gegenstand aktueller Forschung.

In den Filamenten genügen kleine Störungen, damit lokal die Gravitation die Oberhand gewinnt, das Gas zusammendrückt und Wolkenkerne bildet, aus denen neue Sterne hervorgehen. Anhand von Beobachtungen und Computersimulationen zeigten Astronomen, dass die Massenverteilung und die räumliche Anordnung von bereits entstandenen Sternen recht stark der von dichten Molekülwolkenkernen ähneln. Offenbar prägen deren Eigenschaften die der neuen Sonnen.

Erstaunlicherweise scheint die Verteilung der Sternmassen nicht von Wolke zu Wolke zu variieren, sondern relativ universell zu sein. Massearme Sterne entstehen immer sehr viel häufiger als massereiche. Auf 20 sonnenähnliche Sterne kommen etwa 100 leichte Exemplare mit nur 0,1 Sonnenmassen – aber nur ein einziges Schwergewicht mit zehnfacher Sonnenmasse.

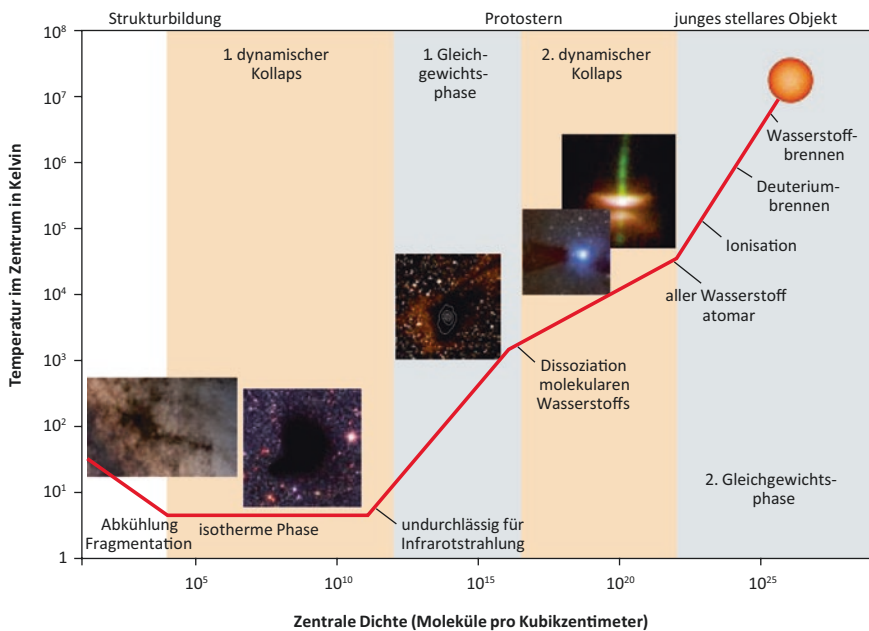
Vom kalten Gas zum heißen Kern

Was geschieht nun, wenn ein Molekülwolkenkern so massereich und dicht geworden ist, dass weder der durch seine Eigenwärme erzeugte auswärts wirkende Druck noch turbulente Strömungen ihn wieder zerstören können? Dem Wolkenkern ist Staub beigemischt, der die Strahlung benachbarter Sterne abschirmt. Gleichzeitig regt die Wärme einige Moleküle dazu an, zu schwingen und Energie abzustrahlen. Somit kühlt das Gas aus, und der darin herrschende Druck sinkt. Jetzt gewinnt die Gravitation den Kampf gegen die auseinandertreibenden thermischen, turbulenten und magnetischen Kräfte. Der Wolkenkern kollabiert nahezu im freien Fall unter seiner eigenen Schwerkraft.

Für einen typischen Kern mit einer Anfangsdichte von einer Million Molekülen pro Kubikzentimeter dauert dieser Kollaps etwa 100.000 Jahre. Dabei steigt der Druck im Inneren wieder an, und es wird Wärme erzeugt. Stöße der Wasserstoffmoleküle übertragen diese auf die Staubteilchen, die sie

als Infrarotstrahlung abgeben. So bleibt die Temperatur konstant bei etwa 7 bis 10 K (Grad über dem absoluten Nullpunkt).

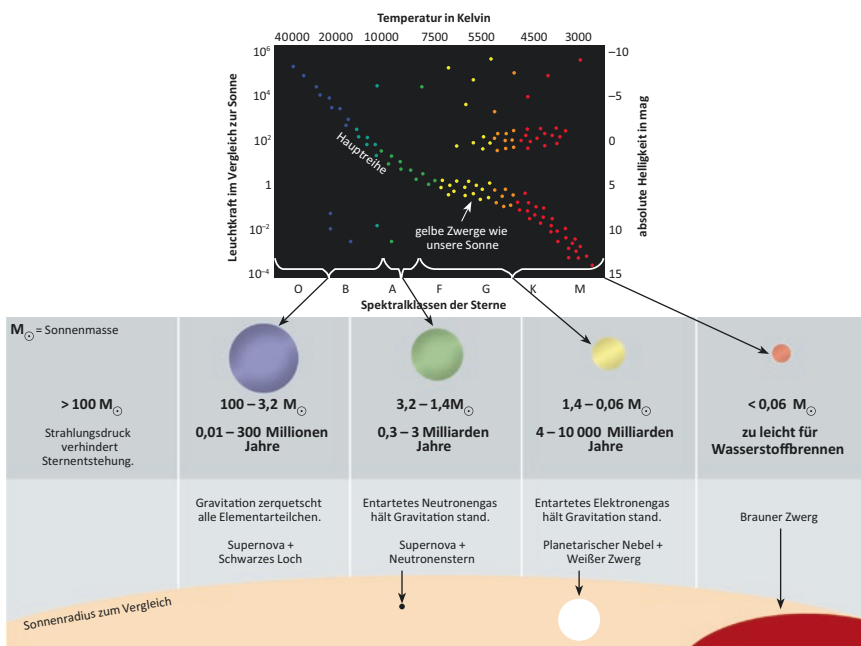
Erst wenn die Dichte im Zentrum einen Wert von etwa zehn Milliarden Molekülen pro Kubikzentimeter übersteigt, wird der Kern für die Wärmestrahlung undurchlässig und heizt sich auf. Mit der Temperatur steigt der dem Gravitationsdruck entgegenwirkende Gasdruck. Der Kollaps stoppt vorerst, allerdings nur im Inneren dieser Sternvorstufe, eines proto-stellaren Objekts. Von außen stürzt weiterhin Materie aus der umgebenden Wolkenhülle in den Kern, der sich dadurch weiter aufheizt und an Masse gewinnt. Theoretisch sollte ein solches Gebilde etwa 1000-mal so groß sein wie unsere Sonne. Es ist allerdings tief in die Wolke eingebettet und leucht-schwach; Astronomen konnten noch keines zweifelsfrei beobachten.



Eine diffuse kosmische Gaswolke durchläuft viele Stationen auf ihrem Weg zum stellaren Objekt. Dabei wechseln sich Phasen ab, in denen das Gas unter seiner eigenen Schwerkraft kollabiert und die Dichte schnell steigt, und Gleichgewichtsphasen, in denen die Temperatur und damit der innere Druck stark anwachsen und der Gravitation entgegenwirken. Erst wenn der Kern endlich dicht und heiß genug ist, dass Fusionsreaktionen im Kern zünden, beginnt das lange Leben des Sterns. (Spektrum der Wissenschaft, nach: Ralf Launhardt; Fotos von links nach rechts: ESO/Y. Beletsky <https://www.eso.org/public/germany/images/yb//CC BY 4.0>; 2. ESO <https://www.eso.org/public/germany/images/eso0102a//CC BY 4.0>; 3. Ralf Launhardt; 4. ESO/F. Comerón <https://www.eso.org/public/germany/images/eso1303a//CC BY 4.0>; 5. Chris Burrows (STScI), the WFPC2 Science Team and NASA/ESA <https://www.spacetelescope.org/images/opo9905j//CC BY 4.0> <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/legalcode>)

Sobald die Temperatur im Zentrum 2000 K erreicht und die Dichte auf etwa zehn Billiarden Moleküle pro Kubikzentimeter angestiegen ist, halten die Bindungen zwischen den Wasserstoffatomen den Teilchenstößen nicht mehr stand: Der molekulare Wasserstoff beginnt wieder in seine Atome zu zerfallen. Diese Dissoziation verbraucht fast die gesamte Energie der weiterhin einfallenden Materie. Temperatur und Druck im Inneren können nicht mehr schnell genug wachsen, um der Gravitation entgegenzuwirken. Der bislang im Gleichgewicht befindliche zentrale Kern kollabiert erneut, bis der gesamte Wasserstoff dissoziiert ist und die Temperatur wieder schneller ansteigt.

Bei einer Temperatur von einer Million Grad wird die Materie im Zentrum komplett ionisiert; sie bildet ein sogenanntes Plasma aus Atomkernen und freien Elektronen. Nun setzt langsam der erste thermonukleare Prozess ein: Kerne des schweren Wasserstoffisotops Deuterium, die aus je einem Proton und einem Neutron bestehen, verschmelzen mit einem freien Proton zu Helium. Dieses eher unergiebiges „Deuteriumbrennen“ setzt allerdings weniger Energie frei als der fortschreitende Gravitationskollaps. Der Protostern befindet sich zu diesem Zeitpunkt noch tief eingebettet in der Wolkenhülle. Der Staub darin absorbiert sämtliche von ihm ausgesendete Strahlung und gibt sie als Wärmestrahlung nach außen ab. Der werdende Stern bleibt also weiterhin unsichtbar; er macht sich nur indirekt in Infrarotkameras oder speziellen Radioteleskopen bemerkbar.



- ◀ Sterne in ihrer längsten Lebensphase liegen in diesem Diagramm grob entlang einer Linie, der „Hauptreihe“. Hier hängen Oberflächentemperatur und Leuchtkraft des Sterns nur von dessen Masse ab. Diese ist auch am Lebensende schicksalhaft: Aus sonnenähnlichen Sternen werden Weiße Zwerge, schwerere Sterne kollabieren zu Neutronensternen oder Schwarzen Löchern. (Spektrum der Wissenschaft, nach: Ralf Launhardt)

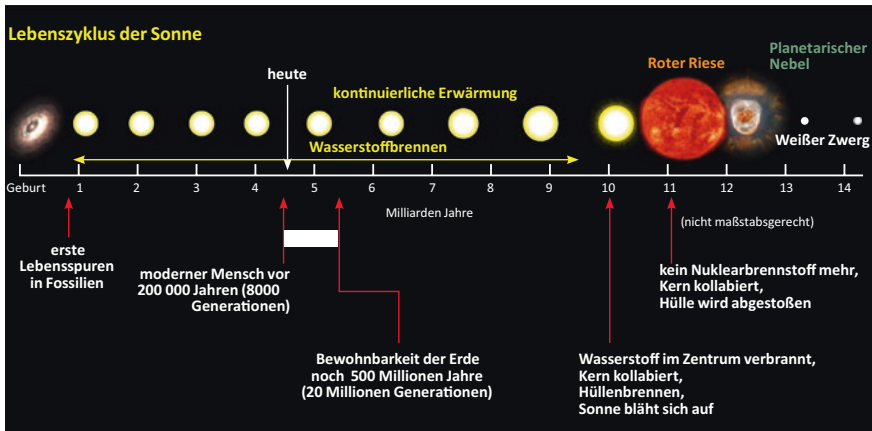
Wolkenkerne drehen Pirouetten

Allmählich gewinnt ein weiteres Phänomen an Bedeutung: Jede interstellare Wolke besitzt einen gewissen Drehimpuls – sie rotiert. Die Rotationsenergie ist allerdings anfangs meist mehr als 100-mal kleiner als die Gravitationsenergie des Molekülwolkenkerns. Während der Kontraktion wirkt jedoch das Prinzip der Drehimpulserhaltung, das sich am Beispiel einer Pirouetten drehenden Eiskunstläuferin illustrieren lässt: Sie dreht sich umso schneller, je mehr sie die anfangs ausgestreckten Arme an den Körper heranzieht. Doch während eine Eiskunstläuferin ihren Durchmesser dadurch höchstens auf ein Viertel verkleinern kann, reduziert sich derjenige eines Molekülwolkenkerns beim protostellaren Kollaps um einen Faktor von einer Million! Eigentlich müsste der rasend rotierende Wolkenkern durch die enormen Fliehkräfte zerrissen werden, lange bevor Dichte und Temperatur im Inneren ausreichen, einen neuen Stern zu bilden. Offenbar wird die Rotationsenergie während der Sternentstehung aber größtenteils abgeführt. Tatsächlich beträgt der Drehimpuls eines typischen Sterns nur etwa ein Millionstel des entsprechenden Werts einer protostellaren Wolke.

Die Astronomen verstehen erst ansatzweise, welche physikalischen Mechanismen dabei wirken. Ein Faktor ist die magnetische Bremsung: Der immer schneller rotierende und kontrahierende Wolkenkern wickelt das im umgebenden Medium verankerte Magnetfeld regelrecht auf, und das bremst die Drehung. Außerdem entsteht um den Protostern aus dem Zusammenspiel von Gravitation und Zentrifugalkraft eine flache, rotierende Gas- und Staubschicht. Durch diese Akkretionsscheibe bewegt sich Masse von der Wolkenhülle nach innen und verliert durch Reibung Drehimpuls.

In der unmittelbaren Umgebung des Protosterns findet dort, wo die Feldlinien des aufgewickelten Magnetfelds parallel zur Drehachse verlaufen, ein besonders spektakulärer Prozess statt: Geladene Teilchen können sich nur in Magnetfeldrichtung bewegen und reißen dabei auch neutrales Gas mit. So entstehen längs der Drehachse zwei dichte und energiereiche Materieströme, sogenannte Jets, die Drehimpuls nach außen tragen. Der Vorgang ist komplex, und erst mit den neuesten Supercomputern können zumindest einfache Konfigurationen simuliert werden. Wie viel Drehimpuls die beschriebenen Prozesse in welchem Stadium genau abführen, verstehen

die Forscher aber noch nicht. Das Drehimpulsproblem der Sternentstehung bleibt damit vorerst eines der ungelösten Rätsel der Astrophysik.



Unsere Sonne entstand vor etwa fünf Milliarden Jahren und wird wohl noch ebenso lang scheinen, bevor sie sich – wenn der Wasserstoffvorrat im Inneren zur Neige geht – zum Roten Riesen aufbläht und schließlich als langsam verblassender Weißer Zwerg endet. Doch bereits jetzt wird sie allmählich heißer. Leben auf der Erde wird daher nur noch etwa 500 Mio. Jahre möglich sein (weißer Balken). (Spektrum der Wissenschaft, nach: Ralf Launhardt; Foto ganz links: ESO/L. Calçada <https://www.eso.org/public/germany/images/eso1325a/> CC BY 4.0; Rote Sonne: NASA-SDO; Nebel: NASA/ESA, Andrew Fruchter (STScI), and the ERO team (STScI+ST-ECF) <https://www.spacetelescope.org/images/heic9910a/> CC BY 4.0 <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/legalcode>)

Letztlich spielen beim Drehimpulsproblem auch Planeten eine Rolle. In unserem Sonnensystem besitzen zum Beispiel alle Planeten zusammen etwa 60-mal mehr Drehimpuls als die Sonne selbst.

Planeten entstehen nebenbei

Planeten gehen aus einem natürlichen Nebenprodukt der Sternentstehung hervor, der Akkretionsscheibe. Doch das muss schnell geschehen, denn ihre Lebensdauer ist auf wenige Millionen Jahre beschränkt. Nur in dieser relativ kurzen Zeitspanne können sich aus dem Akkretionsmaterial Planeten formen. Die Frage lautet also: Was geht in einer zirkumstellaren Scheibe vor sich, außer dass sie Materie auf den Stern zu und Drehimpuls nach außen transportiert?

Durch die wachsende Dichte im Inneren der Scheibe stoßen die Staubteilchen immer häufiger zusammen und haften aneinander. Außerhalb einer „Schneegrenze“ bei etwa drei bis fünf Astronomischen Einheiten – eine

Astronomische Einheit ist der mittlere Abstand der Erde von der Sonne, rund 150 Mio. km – wird zudem die Sternstrahlung so schwach, dass Eisschichten auf den Staubkörnern das Zusammenkleben begünstigen. Allerdings lassen Experimente und Computersimulationen darauf schließen, dass auf diese Weise nur Steinchen bis zu einer Größe von wenigen Zentimetern verklumpen. Danach sollten sie entweder in den Stern stürzen oder durch weitere Stöße zerstört werden. Wie trotzdem größere Brocken und schließlich sogar Planeten wachsen können, ist eines der größten offenen Rätsel der Planetenentstehung. Als Lösungsvorschlag vermuten Astronomen dichte Gaswirbel, welche die Steinchen gefangen halten. Hinweise, dass es sich tatsächlich so abspielen könnte, fanden Forscher erst kürzlich am Alma-Observatorium in der chilenischen Atacama-Wüste: Sie beobachteten eine solche „Staubfalle“ – einen Bereich mit größeren Partikeln – in der Akkretionsscheibe um einen jungen Stern.

Haben sich erst einmal kilometergroße Planetenkeime gebildet, sogenannte Planetesimale, so ziehen diese sich gravitativ an und verschmelzen, bis auf einer bestimmten Umlaufbahn nur noch jeweils ein planetengroßer Körper übrig ist. In den Außenbereichen der Scheibe ist mehr Masse vorhanden als innen. Hier können Gesteinskerne von bis zu zehn Erdmassen entstehen, die durch ihre Gravitation viel Gas anziehen und so Riesenplaneten wie Jupiter formen. Anderen Modellen zufolge können sich Gasriesen auch entwickeln, indem dichte Gasklumpen in den Außenbereichen der Scheibe direkt durch ihre Schwerkraft kollabieren. Unter bestimmten Umständen driften solche Objekte später weit vom Entstehungsort fort. So erklären Forscher viele der neu entdeckten extrasolaren Planetensysteme, die oft völlig anders aufgebaut sind als unser eigenes.

Noch heute können wir mit bloßem Auge Spuren aus der Frühphase unseres Sonnensystems beobachten. Das Zodiakallicht, das in klaren Nächten vor der Morgendämmerung oder nach der Abenddämmerung über dem Horizont schimmert, verursachen kleine Staubteilchen innerhalb der Marsbahn, die das Sonnenlicht streuen. Aus viel größeren Brocken bestehen die Asteroidengürtel zwischen Mars und Jupiter oder der sogenannte Kuipergürtel jenseits der Neptunbahn, aus dem ein Großteil der Kometen stammt.

Doch zurück zur Sternentstehung. Der noch von einer Scheibe und Wolkenhülle umgebene Protostern gewinnt seine Energie hauptsächlich durch Masseneinfall von außen. Das Deuteriumbrennen bläht ihn zwar etwas auf, produziert aber nicht genügend Energie, um den Kern gegen die

Gravitation zu stabilisieren. Wenn der Materienachschub versiegt und das Deuterium verbraucht ist, kühlt der junge Stern ab und schrumpft erneut. Dabei wird er wieder dichter und heißer, da sich durch Reibung erneut Gravitationsenergie in Wärme umwandelt. Bei der Protosonne dauerte diese Gravitationskontraktion etwas weniger als eine Million Jahre. Der junge Stern ist nun nicht mehr in einer Wolkenhülle versteckt; er wird sichtbar. Er heißt zwar nicht mehr Protostern, hat aber auch noch nicht das für richtige Sterne charakteristische Gleichgewichtsstadium erreicht. Er ist nun ein sogenannter Vorhauptreihenstern.

Eine Reihe von Verwandten

Trägt man Temperatur und Helligkeit von Sternen in ein Hertzsprung-Russell-Diagramm ein – benannt nach dem dänischen Astronomen Ejnar Hertzsprung (1873–1967) und seinem amerikanischen Kollegen Henry Norris Russell (1877–1957) –, so liegen die meisten Sterne auf einer Linie, der sogenannten Hauptreihe. In der längsten Lebensphase eines Sterns gibt es einen eindeutigen Zusammenhang zwischen den zwei Größen, die sich letztlich beide auf die Masse des Sterns zurückführen lassen. Bloß für junge, noch kontrahierende Vorhauptreihensterne und sterbende Nachhauptreihensterne gilt die Regel nicht.

Den Zusammenhang zwischen Masse und Leuchtkraft erkannte der britische Astrophysiker Arthur Eddington (1882–1944) bereits in den 1920er Jahren und schuf damit die Grundlage für eine Theorie des inneren Sternaufbaus. Das Wesen der stellaren Energiequellen war allerdings damals noch unbekannt. Erst in den späten 1930er Jahren entdeckten die Physiker Hans Bethe (1906–2005) und Carl Friedrich von Weizsäcker (1912–2007) die Fusionsreaktionen, die in den Sternen ablaufen.

Wenn die Temperatur des beständig schrumpfenden jungen Sterns im Inneren mehrere Millionen Grad erreicht und seine zentrale Dichte mehrere Gramm pro Kubikzentimeter beträgt, setzt die Fusion von Wasserstoffkernen zu Helium ein – das sogenannte Wasserstoffbrennen. Es ist nicht nur viel ergiebiger als das Deuteriumbrennen, sondern liefert sogar mehr Energie als jede andere Kernreaktion – so viel, dass es den Wärmeverlust durch Abstrahlung kompensiert und die Kontraktion stoppt. In der leuchtenden Gaskugel stellt sich ein stabiles Gleichgewicht aus Gravitation und Gasdruck ein: Ein neuer Stern ist geboren.

Die für das Wasserstoffbrennen notwendige Temperatur wird jedoch nur bei einer Gesamtmasse von mehr als etwa sechs Prozent der Sonnenmasse

erreicht. Leichtere Wolkenkerne schrumpfen einfach weiter und kühlen dabei langsam aus. Obwohl sie eigentlich eher rötlich glimmen, nennt man solche Gebilde Braune Zwerge. Sie leuchten so schwach, dass Astronomen ihre Existenz erst Mitte der 1990er Jahre nachweisen konnten. Ein kollabierender Wolkenkern mit mehr als etwa 100 Sonnenmassen heizt sich hingegen den gängigen Modellen zu Folge so stark auf, dass der Strahlungsdruck ihn zerreißt. Deshalb sollte es Sterne nur im Massenbereich zwischen 0,06 und 100 Sonnenmassen geben. Diese Grenzen sind allerdings sehr unsicher; die Untergrenze ist schwer nachprüfbar, und in der letzten Zeit mehren sich Indizien für Sternriesen mit mehreren hundert Sonnenmassen.

Wasserstoff für ein langes Leben

Die Atomkerne der schwereren Elemente fusionieren erst bei sehr viel höheren Temperaturen. Solche Reaktionen spielen nur in den Spätstadien der Sternentwicklung eine Rolle, wenn der meiste Wasserstoff verbrannt ist. Selbst dann können im Inneren der Sterne keine Elemente erzeugt werden, die schwerer sind als Eisen und Nickel, die Elemente mit den am stärksten gebundenen Kernen. Durch Bilden noch schwererer Elemente würde keine Energie mehr freigesetzt. Diese entstehen erst, wenn am Ende eines Sternlebens eine große Zahl Neutronen die Atomkerne der Sternhülle bombardiert.

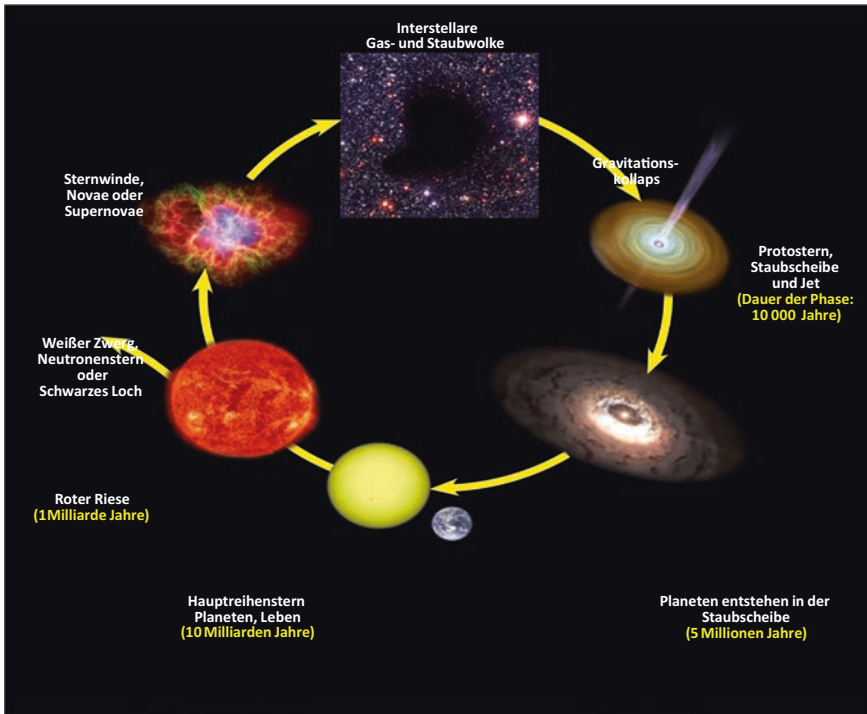
Die Fusion von Wasserstoffkernen ist die langlebigste Energiequelle eines Sterns. Deswegen hängt die Lebensdauer auf der Hauptreihe davon ab, wie viel Wasserstoff zur Verfügung steht und wie schnell er verbraucht wird. Für unsere Sonne beträgt diese Lebensdauer etwa 10 Mrd. Jahre. Die Leuchtkraft und damit der Energieverbrauch eines Sterns steigen mit der vierten Potenz seiner Masse an; deswegen sind massereiche Sterne sehr viel kurzlebiger als massearme. So beträgt die Hauptreihenlebensdauer eines Sterns mit zehn Sonnenmassen nur zehn Millionen Jahre, während sie für Sterne mit weniger als 0,8 Sonnenmassen das bisherige Alter des Universums übersteigt.

Unser Sonnensystem ist rund fünf Milliarden Jahre alt, hat also etwa die Hälfte seines Daseins erreicht; die Sonne wird noch weitere fünf Milliarden Jahre auf die Erde scheinen. Durch Fossilienfunde wissen wir, dass sich Leben bereits weniger als eine Milliarde Jahre nach der Entstehung unseres Planeten entwickelte. Doch dann dauerte es fast vier Milliarden Jahre, bis die Evolution vor rund 200.000 Jahren den modernen Menschen

hervorbrachte. Wir kennen bis heute kein anderes Beispiel eines belebten Planeten und können deshalb nur vorsichtig schlussfolgern, dass die Entstehung von höherem Leben wahrscheinlich nur während einer sehr langen Gleichgewichtsphase des Hauptreihenstadiums eines Sterns möglich ist.

Damit die Erde bewohnbar bleibt, muss sich die Sonneneinstrahlung in sehr engen Grenzen halten: genug, um das Wasser der Ozeane flüssig zu halten, aber nicht so viel, dass es verdampft und aus der Atmosphäre entweicht. Das ist nur innerhalb gewisser Umlaufbahnen möglich. Diese so genannte bewohnbare Zone ist sehr schmal; bereits unsere nächsten Nachbarn, Venus und Mars, liegen außerhalb. Allerdings sind diese Grenzen nicht unverrückbar, da sich die Leuchtkraft der Sonne im Lauf ihres Hauptreihenlebens langsam ändert. Das liegt daran, dass der Gasdruck in ihrem Inneren konstant bleiben muss, um der Gravitation entgegenzuwirken. Mathematisch ist der Gasdruck das Produkt aus Teilchendichte und Temperatur. Doch durch die Fusion von vier Wasserstoffkernen zu jeweils einem Heliumkern sinkt die Teilchendichte. Folglich steigt die Temperatur, und die Sonne wird alle 100 Mio. Jahre etwa 0,7 % heller. Infolgedessen bleibt die Erde „nur noch“ etwa 500 Mio. Jahre bewohnbar. Führt man sich aber vor Augen, dass dies 20 Mio. Menschengenerationen à 25 Jahre entspricht, während die moderne Menschheit erst etwa 8000 Generationen alt ist, so steht unsere Spezies erst am Beginn ihrer Entwicklung. Es liegt an uns, ob wir diese lange Frist nutzen.

Wenn im Kern des Sterns schließlich aller Wasserstoff zu Helium verbrannt ist, versiegt die Energieproduktion, und der Kern kollabiert erneut. Dabei heizt er sich weiter auf, bis Gasdruck und Gravitation wieder im Gleichgewicht sind. Durch die höhere Temperatur kann jetzt auch in der bisher inaktiven Wasserstoffhülle die Fusion zu Helium einsetzen. Dieses sogenannte Schalenbrennen bläht die äußere Hülle des Sterns auf: Er wird zum Roten Riesen. Nach einem Zehntel der Hauptreihenlebensdauer übersteigt die Temperatur im jetzt mit Helium angereicherten Kern 100 Mio. Kelvin, und nun beginnt dort die Fusion von Heliumkernen zu Kohlenstoff und Sauerstoff. Diese neue Energiequelle, die sich nach einiger Zeit auch wieder in die Hülle ausbreiten wird, brennt nur noch relativ kurz, lässt den Riesenstern aber weiter anschwellen.



Gigantische interstellare Wolken liefern das Material für neue Sterne, indem Gas und Staub unter ihrer eigenen Schwerkraft zusammenstürzen: Ein protostellares Objekt entsteht. Umgebende Materie formt eine Scheibe, in der sich auch Planeten bilden. Ist das Leben des Sterns beendet, kollabiert sein Kern, und gewaltige Explosionen schleudern große Mengen Gas aus der Hülle zurück in den interstellaren Raum – mit diesem Ausgangsmaterial beginnt der Kreislauf erneut. (Spektrum der Wissenschaft, nach: Ralf Launhardt; Fotos von oben Mitte im Uhrzeigersinn: ESO <https://www.eso.org/public/germany/images/eso0102a/>/CC BY 4.0; 2. NASA/JPL-Caltech/R. Hurt (SSC); 3. ESO/L. Calçada <https://www.eso.org/public/germany/images/eso1325a/>/CC BY 4.0 <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/legalcode>; 4A. NASA; 4B+5. NASA-SDO; 6. NASA; Röntgen: CXC, J.Hester (ASU) et al.; Optisch: ESA, J.Hester and A.Loll (ASU); Infrarot: JPL-Caltech, R.Gehrz (U. Minn))

Etwa eine Milliarde Jahre nach Versiegen des Wasserstoffbrennens im Kern hat sich ein anfangs sonnenähnlicher Stern auf das über 150-Fache seines ursprünglichen Durchmessers ausgedehnt und leuchtet mehr als 2000-mal so hell. Da die Erde nur etwa 200 Sonnenradien von der Sonne entfernt ist,

müsste sie dann in den oberen Atmosphärenschichten der roten Riesen Sonne liegen. Aber inzwischen wird der Stern durch starke Sonnenwinde auch bis zu 30 % seiner Masse verloren haben. Dadurch hat sich der Bahnradius der Erde derart vergrößert, dass sie diesem Schicksal wohl entkommen wird.

Wenn schließlich das Helium verbrannt ist, muss auch der Kohlenstoffkern kollabieren, und Druck und Temperatur steigen erneut. Bei sonnenähnlichen Sternen reicht das allerdings nicht mehr aus, um weitere Fusionsreaktionen zu zünden. Doch Sterne mit mehr als vier Sonnenmassen können dann Temperaturen von über 500 Mio. Kelvin erreichen und das Kohlenstoffbrennen starten, bei dem Kohlenstoffkerne mit Helium und miteinander fusionieren. Je massereicher ein Stern ist, desto schwerere Elemente kann er – bei immer höheren Temperaturen und immer schneller ablaufenden Fusionsreaktionen – erzeugen und sich dabei zu einem Roten Überriesen aufblähen. Eindrucksvolle Beispiele dafür sind am Nachthimmel mit bloßem Auge sichtbar. Aldebaran, der helle Augensterne des Stiers, ist ein 67 Lichtjahre entfernter Roter Riese mit der 25-fachen Größe der Sonne. Ein sonnenähnlicher Hauptreihenstern in dieser Entfernung wäre mit bloßem Auge nicht mehr sichtbar. Beteigeuze, der linke rote Schulterstern des Orion, ist ein mehr als zehnmal weiter entfernter Überriese mit 25 Sonnenmassen sowie der 660-fachen Größe und der über 50 000-fachen Leuchtkraft unserer Sonne.

Massereiche Sterne unterscheiden sich von masseärmeren vor allem durch ihre sehr viel schnellere Entwicklung sowie durch höhere Leuchtkraft und Temperatur. Ansonsten durchlaufen aber alle Sterne ähnliche Entwicklungsphasen. Dies ändert sich, wenn die Kernfusionsquellen im Inneren versiegen und der ausgebrannte Kern des sterbenden Sterns ein letztes Mal kollabiert. Welchen Endzustand der Kern dann erreicht und wie heftig dabei die verbleibende Hülle abgestoßen wird, hängt von der Masse des Riesensterns ab.

Die drei Tode der Sterne

Bei Sternen mit weniger als 1,4 Sonnenmassen wird der Kollaps des ausgebrannten Kerns am Ende durch einen quantenmechanischen Effekt gestoppt, der verbietet, dass zwei Elektronen den exakt gleichen Zustand einnehmen. So entsteht ein „entartetes Elektronengas“, das für Gegendruck sorgt. Was übrig bleibt, ist ein „Weißer Zwerg“ von der Größe der Erde, aber mit einer Dichte von einer Tonne pro Kubikzentimeter. Weiße Zwerge stellen einen stabilen Endzustand der Sternentwicklung dar. Sie senden durch ihre Restwärme zunächst noch Licht aus, kühlen im Verlauf von Milliarden Jahren dann langsam aus und verblassen. Der uns nächste, nur

mit dem Teleskop sichtbare Weiße Zwerg ist Sirius B – der Begleiter des hellsten Sterns am Nordhimmel, Sirius A.

Schwerere Sterne in dieser Leichtgewichtsklasse, wie beispielsweise unsere Sonne, stoßen während des vorangegangenen Riesenstadiums so viel Material ab, dass die Materiehülle vom Weißen Zwerg zum Leuchten angeregt und als so genannter Planetarischer Nebel sichtbar wird.

Oberhalb der Massengrenze von 1,4 Sonnenmassen, die der amerikanische Astrophysiker und Nobelpreisträger Subrahmanyan Chandrasekhar (1910–1995) theoretisch herleitete, hält selbst das entartete Elektronengas der Gravitation nicht mehr stand. Diese presst die Elektronen in die Atomkerne, und ein reines Neutronengas entsteht. Am Ende stoppt jedoch wiederum die Quantenmechanik den Kollaps durch den Druck des entarteten Neutronengases. Das Ergebnis ist ein Neutronenstern mit etwa 20 km Durchmesser und der unvorstellbaren Dichte von einer Milliarde Tonnen pro Kubikzentimeter. Der Kollaps setzt so viel Energie frei, dass die äußere Hülle des Sterns in einer gewaltigen Supernovaexplosion abgestoßen wird. Der Neutronenbeschuss in der Hülle erzeugt dort nun auch Elemente, die schwerer als Eisen sind.

Falls die Masse des ausgebrannten Riesensterns allerdings mehr als 3,2 Sonnenmassen betragen hat, rettet kein quantenmechanischer Effekt die letzten verbliebenen Elementarteilchen vor der zermalmenden Wirkung der Gravitation. Mit der Supernovaexplosion kollabiert der Kern zu einem Schwarzen Loch, zu einem bisher nur indirekt nachgewiesenen und theoretisch noch nicht vollständig verstandenen Gebilde, das durch seine enorme Schwerkraft sogar das Licht gefangen hält.

Erst wenn ein Stern erlischt, scheidet der stabile Endkern – ob Weißer Zwerg, Neutronenstern oder Schwarzes Loch – aus dem kosmischen Materiekreislauf aus. Im Lauf ihres aktiven Daseins geben die Sterne viel Material an den interstellaren Raum zurück; vor allem die massereichen Exemplare bilden große Mengen schwererer Elemente. Ausgehend von dieser ins All verstreuten Materie beginnt der Prozess von Werden und Vergehen erneut: Gewaltige Gaswolken kollabieren, und das Zusammenspiel von Gravitation und Rotation formt eine zirkumstellare Scheibe, in der sich aus Staub und Gas auch Planetenkerne und ihre Atmosphären bilden. Die Reibung der einstürzenden Materie erzeugt so viel Wärme, dass im Stern Kernfusionsprozesse zünden und ihn gegen die Gravitation stabilisieren – über so lange Zeit, dass auf geeigneten Planeten sogar Leben entstehen kann. Und daraus entwickelt sich mit unwahrscheinlich viel Glück eine Lebensform, welche die Faszination des Sternenhimmels zu begreifen und die spektakulären Prozesse, die ihn erschufen, allmählich zu erklären vermag.

Weiterführende Literatur

Armitage, P. J.: A Trap for Planet Formation. In: Science 340, S. 1179–1180, 2013

Young, E. T.: Die Geburt der Sterne. In: Spektrum der Wissenschaft 2/2011, S. 46

Weblinks

www.spektrum.de/alias/videos-aus-der-wissenschaft/50-der-lebensweg-der-sterne/1155273 *Video eines Vortrags von Ralf Launhardt*

www.almaobservatory.org/en/press-room/press-releases/600-dust-trap-around-distant-star-may-solve-planet-formation-mystery *Pressemitteilung über die Entdeckung einer »Staubfalle« als möglicher Planetenkeim*

Ralf Launhardt studierte Physik und Astronomie an der Universität Jena und promovierte dort 1996 über Probleme der Sternentstehung. Nach Forschungsaufenthalten am Max-Planck-Institut für Radioastronomie in Bonn und am California Institute of Technology in Pasadena ist er nun am Max-Planck-Institut für Astronomie in Heidelberg tätig.



Exoplaneten – eine Spurensuche

Lisa Kaltenegger

Die Anzahl der Planeten außerhalb unseres Sonnensystems steigt stetig; inzwischen kennen wir mehr als 900 davon. Weitere 3000 Objekte gelten als Planetenkandidaten. Doch wie lassen sie sich charakterisieren, auch wenn wir sie bisher nur indirekt beobachten können? Es sind ihre Atmosphären, die dem Sternenlicht spezifische Signaturen aufprägen (aus *Sterne und Weltraum* 9/2013).

IN KÜRZE

- Im Jahr 1995 entdeckten schweizer Astronomen den ersten extrasolaren Planeten, einen heißen Gasriesen, um einen sonnenähnlichen Stern. Inzwischen kennen wir auch masseärmere Exoplaneten, die sogar felsartig sind.
- Aus den im Sternenlicht hinterlassenen Signaturen von Gasplaneten können wir auf die Zusammensetzung von deren Atmosphären schließen. Für derartige Beobachtungen an den kleineren erdähnlichen Planeten fehlen uns derzeit jedoch noch die technischen Möglichkeiten.
- Mit Computersimulationen erstellen Wissenschaftler eine Datenbank möglicher exoplanetarer Atmosphärenmodelle, die ihnen die zukünftige Suche nach einer zweiten Erde erleichtern soll.

L. Kaltenegger (✉)

Carl Sagan Institute, Cornell University, Ithaca, USA

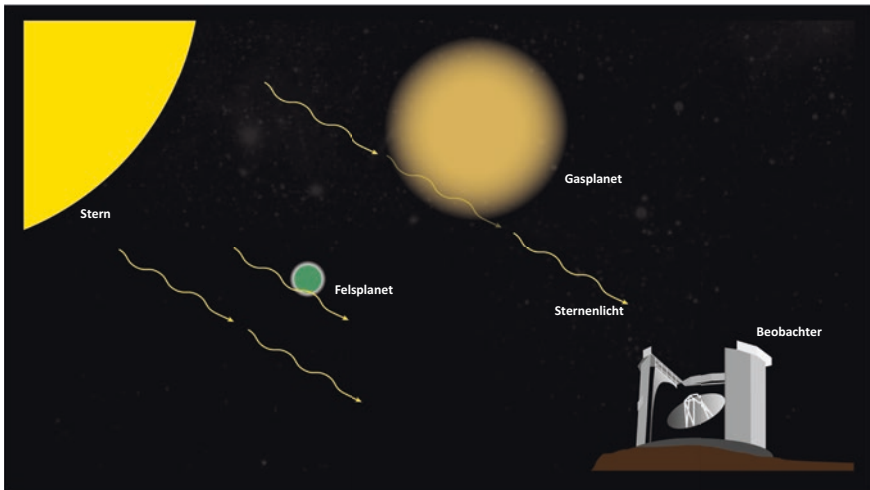
E-Mail: lk433@cornell.edu

In meinem Blick in den Nachthimmel vermischt sich die magische Schönheit des Firmaments mit der Neugier eines Entdeckers, der zum ersten Mal in der Geschichte der Menschheit nicht nur Kontinente, sondern völlig neue Welten entdeckt. Gibt es andere Erden wie die unsere?

Diese Frage entfachte über tausende Jahre hinweg hitzige philosophische Debatten und ließ sogar manche ihrer Verfechter wie Giordano Bruno im Jahr 1600 auf dem Scheiterhaufen landen. Und doch ließ uns die Faszination dieser Fragestellung niemals los: Welcher dieser Milliarden Sterne dort draußen beheimatet einen zweiten Jupiter, eine zweite Venus und vielleicht sogar eine zweite Erde? Und: Wo könnte sich gerade jemand anders dieselben Fragen stellen?

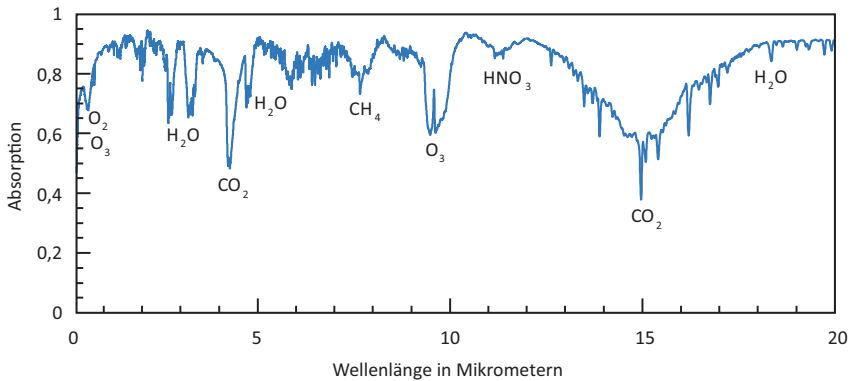
Der technologische Fortschritt hat die Suche nach anderen Welten von der rein philosophischen Diskussion ins Reich der Wissenschaft verlagert und sie dadurch zum ersten Mal greifbar gemacht. Aktuelle Hochrechnungen des Astronomen François Fressin von der Harvard University in den USA, die auf den mit dem NASA-Satelliten Kepler aufgenommenen Daten für Planetenkandidaten basieren, lassen vermuten, dass jeder zweite Stern von mindestens einem Planeten umkreist werden sollte. Allein für unsere Milchstraße mit ihren Milliarden von Sternen führte dies zu Milliarden von Planeten. Die mit den verschiedenen Planetensuchmethoden (Radialgeschwindigkeitsmethode, Transitmethode, Microlensing) bisher erzielten Ergebnisse legen nahe, dass dabei kleine, massearme – also erdähnliche – Felsplaneten weit zahlreicher sind, als massereiche Gasriesen.

Um diese fernen Welten zu erforschen, lange bevor wir die technischen Möglichkeiten haben, interstellare Distanzen zu überwinden, fangen die Astronomen mit den größten Teleskopen etwa in Chile (Very Large Telescope, VLT), Hawaii (Keck Telescope) und Arizona (Large Binocular Telescope, LBT), aber auch mit den Weltraumteleskopen Hubble und Spitzer das Licht der Muttersterne von extrasolaren Gasplaneten ein, nachdem es von deren Atmosphären reflektiert oder gefiltert wurde. Die ersten Nachweise von Spuren von Wasser, Kohlenmonoxid und Natrium in den ausgedehnten Atmosphären von heißen Gasplaneten sind bereits erbracht. Weitere Beobachtungen von anderen Gasen wie zum Beispiel Methan und Kohlendioxid sind noch umstritten und werden derzeit in weiteren Messkampagnen genauer unter die Lupe genommen.



Planetenatmosphären als Filter: Wenn sich Gasplaneten nahe an ihrem Zentralstern befinden, heizt sich deren Atmosphäre auf und dehnt sich aus. Zieht nun ein Planet vor dem Stern vorüber (Transit), wirkt diese Atmosphäre als Filter und prägt dem Sternenlicht, das wir mit Satelliten oder Teleskopen auf der Erde beobachten, den spektralen Fingerabdruck ihrer chemischen Zusammensetzung auf. Bei kleinen, felsartigen Exoplaneten ist die atmosphärische Lufthülle so dünn, dass ihre Spuren im Sternenlicht zu schwach sind, als dass wir sie mit den derzeitigen technischen Möglichkeiten aus dem Sternenlicht herausfiltern könnten. Teleskope der nächsten Generation wie der Transiting Exoplanet Survey Satellite oder das James Webb Space Telescope sollen dies aber ermöglichen (SuW-Grafik)

Um solche Untersuchungen für Felsplaneten mit einer dünnen Atmosphäre, wie die Erde sie besitzt, durchführen zu können, benötigen wir jedoch größere Teleskope. So soll etwa das 6,5-Meter große James Webb Space Telescope (JWST) als Nachfolger des Hubble Space Telescope im Jahr 2018 starten. Außerdem ist für 2022 die Inbetriebnahme des European Extremely Large Telescope (E-ELT) der Europäischen Südsternwarte (ESO) in der chilenischen Atacamawüste geplant. Es soll einen Hauptspiegel mit 39 m Durchmesser erhalten, der sich aus 798 sechseckigen Spiegelementen zusammensetzen wird, und am Cerro Armazones in 3060 m Höhe nur 20 km entfernt vom Cerro Paranal, dem Standort des VLT, errichtet werden.



Die Erde aus der Ferne betrachten, das können wir bisher nur mit dem Spaceshuttle (oben) oder mit Satelliten, die wir hinaus ins All schicken. Dabei gewonnene Spektren des in der Erdatmosphäre gefilterten Sonnenlichts (unten) nutzen die Wissenschaftler, um ihre Atmosphärenmodelle von Exoplaneten zu validieren. (NASA; Lisa Kaltenegger/SuW-Grafik)

Die ersten Exoplaneten

Im Jahr 1992 fanden der polnische Astronom Aleksander Wolszczan und sein kanadischer Kollege Dale Frail die ersten Objekte, deren Massen jener der Erde ähneln und die um einen schnell rotierenden Neutronenstern, den Millisekundenpulsar PSR 1257+12, kreisen. Einer dieser Planeten

besitzt etwa ein Fünftel der Erdmasse, der andere deren Vierfaches. Ebenso viel Masse weist ein drittes, damals bereits vermutetes Objekt auf, dessen Existenz 1994 bestätigt wurde und aus dem exotischen Pulsarsystem ein Dreier-Planetensystem machte.

Wie solche Objekte um Pulsare entstehen können, ob es sich um einstige Begleiter anderer Sterne handelt oder ob sie Planeten zweiter Generation sind, die aus den Überresten des explodierenden Sterns entstanden, ist noch ungeklärt. Da sie einen Neutronenstern umkreisen, der kein Licht aussendet, und ihre Zusammensetzung sich sehr von den Planeten, wie wir sie im Sonnensystem kennen, unterscheiden dürfte, sind diese spannenden Objekte bis heute noch weitgehend unerforscht und sehr mysteriös.

Im Jahr 1995 entdeckten die beiden Schweizer Astronomen Michel Mayor und Didier Queloz dann den ersten extrasolaren Planeten, der einen sonnenähnlichen Stern umläuft. Sein Name: 51 Pegasus b. Dieser heiße Gasriese von einer halben Jupitermasse umrundet seine Sonne in nur vier Tagen mit einer Geschwindigkeit von 136 km pro Sekunde. Sein Abstand von seinem Mutterstern muss also viel kleiner sein als der des Merkur von unserer Sonne. Jener Planet gab uns schon einen ersten Einblick in eine faszinierende Vielfalt von extrasolaren Planeten, die weitaus facettenreicher ist, als wir sie von den acht Planeten in unserem Planetensystem her kennen.

Dort kreisen die Felsplaneten eng um die Sonne und die Gasplaneten weiter entfernt von ihr. Dies ließ die Modelle zur Planetenentstehung zunächst logisch erscheinen: In der Nähe eines Sterns ist es heiß, und Eis und Gas verflüchtigen sich rasch. Deshalb sind die inneren Planeten aus schwer verdampfbarem Gestein geformt. In größerer Entfernung vom Stern, wo es kühler ist, werden Gasplaneten gebildet.

Der Gasriese 51 Pegasus b kreist aber in nur vier Tagen um seinen Stern, ist also extrem schnell und – durch die Nähe zu seiner Sonne – auch besonders heiß. Inzwischen sind einige solcher extrasolaren „heißen Jupiterplaneten“ bekannt. Die Entdeckung derartiger Gasplaneten nahe an ihrem Stern spricht für die sogenannte Migrationstheorie. Nach ihr kann ein Planet durch die Wechselwirkung mit der Gas- und Staubscheibe um den Stern, aus der er entstanden ist, entweder näher zum Stern hin oder weiter von ihm weg wandern.

Einige Schritte in diesem Prozess sind noch nicht ganz verstanden. Aber für die Spurensuche auf fremden Welten erweist sich die Nähe eines solchen Gasplaneten zum Zentralstern als ausgesprochen günstige Möglichkeit, mehr über den Himmelskörper zu erfahren. Denn Gasplaneten haben kleine mittlere Dichten (Saturn würde in einer kosmischen Badewanne schwimmen, während die Erde sinken würde) und ausgedehnte Gashüllen.

Besonders wenn diese Atmosphären durch starke Einstrahlung von ihrem Mutterstern aufgeheizt werden, expandieren sie. Dann erweisen sie sich als exzellente Filter, die im Sternenlicht ihre Spuren hinterlassen.

Zurzeit führen internationale Forscherteams, darunter auch am Max-Planck-Institut für Astronomie (MPIA) in Heidelberg, Beobachtungen solcher heißer Gasplaneten durch und erkunden die Zusammensetzung deren Atmosphären. Die in den Sternspektren vorhandenen Signaturen dieser Planeten geben uns bereits jetzt erste Eindrücke über die Vielfalt der fremden Welten, die wir gerade zu entdecken beginnen. Mit dem Teleskop begeben wir uns auf eine Spurensuche nach den Fingerabdrücken, die diese Planetenatmosphären den Spektren des Lichts ihrer Muttersterne aufprägen.

Die Gemeinsamkeiten und Unterschiede fremder Welten zu unserem Sonnensystem aufzuzeigen, darauf ist das Hauptaugenmerk unserer Emmy-Noether-Forschungsgruppe „Super-Earths and Life“ (Super-Erden und Leben) am MPIA gerichtet. Bei Beobachtungen sind wir jedoch bisher auf (heiße) Gasriesen beschränkt. Um die gesamte Palette an möglichen Planetenwelten erfassen zu können, erstellen wir eine Datenbank mit Modellatmosphären, die die Bandbreite, welche von Gasriesen bis hinunter zu kleinen Felsplaneten reicht, abdeckt. Auf Grundlage dieser Simulationen lassen sich die Teleskope der nächsten Generation planen, mit denen wir auch die spektralen Fingerabdrücke der dünnen Atmosphären von kleineren, erdähnlichen Planeten untersuchen wollen. Denn die Modelle verraten uns, nach welchen chemischen Elementen wir in den Spektren bei welchen Wellenlängen suchen, aber auch, wie empfindlich die neuen Messinstrumente sein müssen, um Felsplaneten in der solaren Nachbarschaft charakterisieren zu können. In diese Simulationen wiederum fließen Daten aus Beobachtungen ein, damit die Ergebnisse möglichst realitätsgetreu ausfallen.

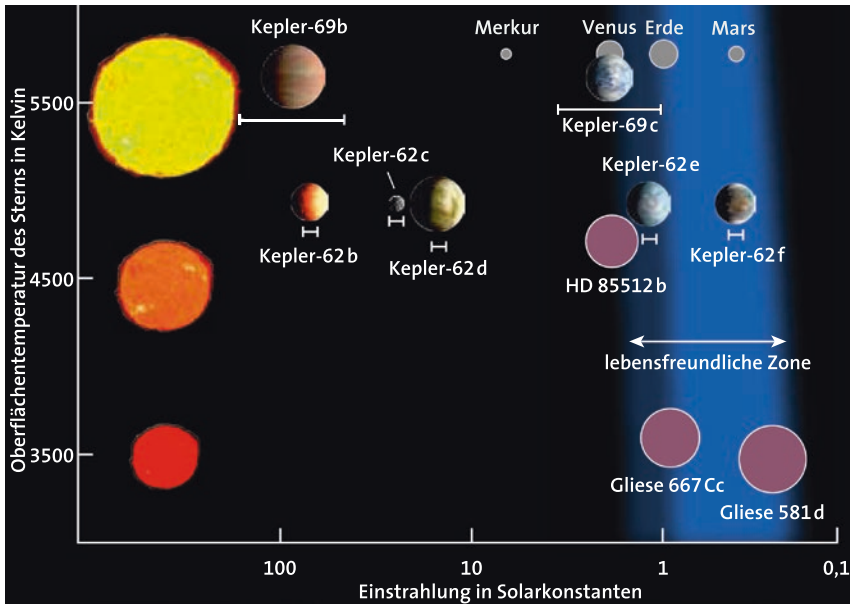
Der erste Blick ist dabei auf unser Sonnensystem gerichtet: Wenn wir ein Planetensystem wie das unsere fänden, was würde dieser spektrale Fingerabdruck über die Felsplaneten dort aussagen? Wie könnten wir gar einen Planeten mit lebensfreundlichen Bedingungen erkennen? In unserem eigenen Sonnensystem ist die Spurensuche verhältnismäßig einfach. Die Distanzen sind aus astronomischer Sicht überschaubar, und durch ein gutes Amateurteleskop sieht man bereits Einzelheiten wie die Ringe

des Saturn sowie auf dem Jupiter die Wolkenbänder und einen großen Wirbelsturm, den Großen Roten Fleck. Doch über kosmische Distanzen hinweg schrumpft jeder Planet zu einem kleinen Lichtpunkt zusammen, den selbst die größten Teleskope in der nahen Zukunft nicht direkt auflösen vermögen.

Die Frage, wie wir Spuren von Leben auf anderen Planeten erforschen können, verlagert sich bei solchen Entfernungen zu der Frage: Welche Spuren in der Atmosphäre können wir über Lichtjahre hinweg mit geringer Auflösung erkennen?

Um dieser Fragestellung nachzugehen, sehen wir uns noch einmal etwas genauer in unserer unmittelbaren Nachbarschaft um. Merkur, Venus, Erde und Mars sind die Felsplaneten in unserem Sonnensystem. Der sonnen-nächste, Merkur, ist zu massearm, um eine dichte Atmosphäre zu halten. Darum nehmen wir ihn aus unserem Vergleich heraus. Venus, Erde und Mars dagegen haben eine ähnliche Beschaffenheit, sowohl was ihre Zusammensetzung als auch ihre Atmosphäre anbelangt. Auf allen drei Planeten könnte anfangs Wasser geflossen sein, das jedoch in der heißen Atmosphäre der Venus verdunstete und schließlich ins Weltall verloren ging und auf dem kalten Mars gefror.

Die Spuren in der Atmosphäre zeigen chemische Unterschiede zwischen der Erde und den anderen beiden Planeten auf. Selbst mit geringer spektraler Auflösung beobachtet, wie sie uns ein Teleskop mit sechs bis zehn Meter Durchmesser im Weltall für erdähnliche Exoplaneten erlauben würde, zeigten Mars und Venus in Entfernungen bis zu 70 Lichtjahren zum Beispiel im Infraroten Spuren von Kohlendioxid in der Atmosphäre, während im Spektrum der Erdatmosphäre zudem noch Absorptionslinien von Wasser, Ozon und Methan zu erkennen wären. Damit sind die Spuren von Leben in einem solchen spektralen Fingerabdruck verborgen: Wasser (H_2O), das als Grundlage für biologische Aktivität gilt, sowie Sauerstoff (O_2) oder Ozon (O_3) als indirekter Indikator für Sauerstoff in Verbindung mit einem reduzierenden Gas wie Methan (CH_4). (Ein reduzierendes Gas ist ein Gas, das mit Sauerstoff zu anderen chemischen Verbindungen reagiert). Diese Kombination lässt darauf schließen, dass aktuell viel Sauerstoff produziert wird, und damit bei einem temperierten Planeten wie der Erde auch auf die Existenz von Leben.



Die lebensfreundliche Zone ist jener Bereich um einen Stern, innerhalb dessen auf einem erdähnlichen Planeten Wasser in flüssiger Form auf der Oberfläche existieren kann. Die Grafik zeigt die zwei kleinen Planeten Kepler-62 e und Kepler-62 f mit jeweils 1,4 und 1,6 Erdradien sowie drei weitere mit der Radialgeschwindigkeitsmethode entdeckte Planeten, Gliese 581 d, HD 85512 b und Gliese 667 Cc mit Massen unterhalb von zehn Erdmassen. Diese fünf Planeten umkreisen ihre Sonne in einer Region der lebensfreundlichen Zone, wo es gerade warm genug ist, um Wasser auf der Oberfläche eines festen Planeten im flüssigen Zustand zu halten. (Lisa Kaltenegger/MPIA)

Die Erde als Exoplanet – ohne unser Sonnensystem aus großer Entfernung beobachten zu können, ist es gar nicht so einfach, eine Datengrundlage für die Validierung von Modellen, die unseren Heimatplaneten aus der Ferne zeigen, zu finden. Keiner unserer Satelliten hat bis jetzt je Distanzen von Lichtjahren hinter sich gebracht. Darum bleiben uns zum Vergleich nur solche Aufnahmen von der Erde, die in unserem Sonnensystem mit dem Spaceshuttle oder einem Satelliten gewonnen wurden, um sie mithilfe der Geometrie für Planeten in Entfernungen von mehreren Lichtjahren umzusetzen.

Die lebensfreundliche Zone

Wir können Venus und Mars als Vergleich für Felsplaneten in unserem Sonnensys verwenden, um Planeten mit von Planeten ohne biologische

Aktivität zu unterscheiden. Denn laut derzeitigem Wissen sind keine Spuren von Leben in den Atmosphären unserer beiden direkten Nachbarn aufzufinden. Die Umlaufbahnen von Venus und Mars werden aber auch verwendet, um empirisch eine lebensfreundliche Zone um einen Stern zu bestimmen. Planeten, die mehr Licht (oder Energie) als Venus von ihrem Mutterstern erhalten, gelten als zu heiß, um flüssiges Wasser auf der Oberfläche und damit eine Grundlage für die Entdeckung von Lebensspuren über Lichtjahre hinweg zuzulassen; Planeten, die weniger Energie als Mars abbekommen, gelten dagegen als zu kalt dafür.

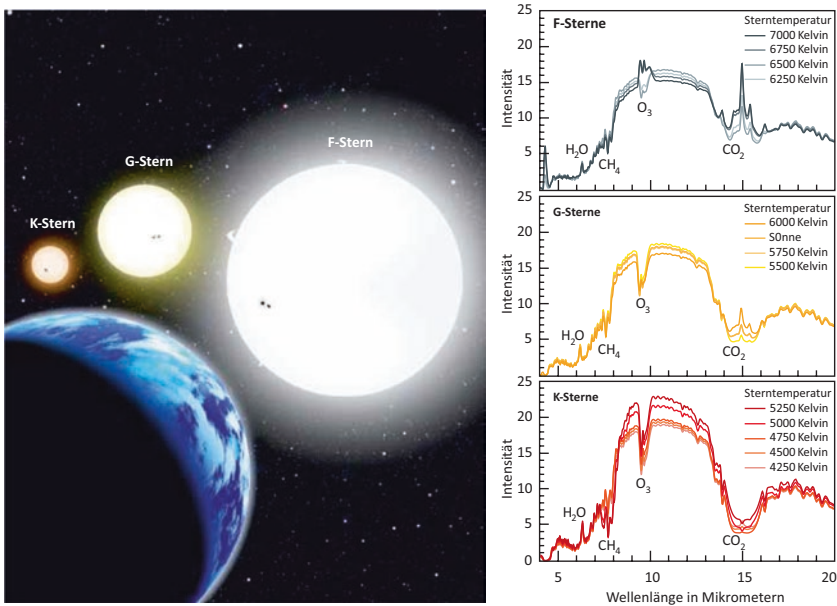
Eigentlich setzt aber Mars kein gutes äußeres Kriterium für die Festlegung einer lebensfreundlichen Zone, da er wegen seiner kleinen Masse nur eine dünne Atmosphäre halten kann und es dadurch keinen ausgeprägten Treibhauseffekt auf ihm gibt. Zudem besitzt er auch keine Tektonik mehr. Auf einem massereicheren, erdähnlichen Planeten, der eine dichtere Atmosphäre besitzt und daher Energie besser speichern kann, wären nach Aussagen von Modellen auch für einen größeren Abstand vom Zentralgestirn noch Oberflächentemperaturen oberhalb des Gefrierpunkts von Wasser möglich. Außerdem können auch Wolken einen Planeten wärmen, sodass – um einen sonnenähnlichen Stern – die äußere Grenze der lebensfreundlichen Zone für einen erdähnlichen Planeten außerhalb der Umlaufbahn des Mars zu suchen wäre, wie etwa der französische Wissenschaftler Franck Selsis 1997 zeigte.

Allerdings hängen Distanz und Ausdehnung der lebensfreundlichen Zone auch vom Sterntyp ab. Außerdem beeinflusst die Spektralklasse des Muttersterns auch die messbaren Spuren in der planetaren Atmosphäre. So verringert sich etwa der Ultraviolett-Anteil der Strahlung von heißen zu kühlen Sternen hin und beeinflusst so die Fotochemie der Planetenatmosphäre auf unterschiedliche Weise. Sarah Rugheimer in meiner Arbeitsgruppe an der Harvard University zeigte vor Kurzem diese unterschiedlichen Signaturen für eine ganze Reihe von Sternen auf und lieferte so weitere Datensätze für unsere Spurensuche.

Obwohl es um einiges einfacher ist, Planeten, deren Umlaufbahnen nahe bei ihrem Stern liegen, zu finden, kennen wir unter den 900 bekannten Exoplaneten bereits die ersten in einer lebensfreundlichen Zone, deren Massen auf solche Felsplaneten hindeuten, welche – falls vorhanden – flüssiges Wasser auf der Oberfläche zuließen.

Ob ein Planet ein Fels- oder Gasplanet ist, lässt sich jedoch momentan nur durch Messungen von Masse als auch Radius bestimmen. Aus diesen Parametern können wir dann die mittlere Dichte eines Planeten berechnen, anhand derer wir Gas- von Felsplaneten unterscheiden können.

Der Radius eines Planeten lässt sich bis jetzt nur bestimmen, wenn der Planet auf seiner Bahn von uns aus gesehen vor seinem Mutterstern vorüberzieht und dabei einen Teil der heißen Sternoberfläche bedeckt (Transit). Dadurch verringert sich das im Visuellen gemessene Sternenlicht um die abgedeckte Fläche. Daraus wiederum lässt sich die Größe des Planeten berechnen. Es gibt auch weitere Möglichkeiten, den Radius eines Planeten zu messen, zum Beispiel durch direkte Abbildung im infraroten Wellenlängenbereich, wo die Temperatur und die Fläche des Planeten die abgestrahlte Energie bestimmen. Doch nur in den seltensten Fällen bietet sich die Chance, um diese Methode anwenden zu können.



Das Sternenlicht verschiedener Spektraltypen – links für die Klassen F, G, K künstlich dargestellt – unterscheidet sich in seinem Ultraviolettanteil. Davon abhängig laufen in einer durchleuchteten planetaren Atmosphäre unterschiedliche photochemische Reaktionen ab. Die daraus resultierenden spektralen Signaturen sind rechts für ein erdähnliches Atmosphärenmodell zu sehen. (David A. Aguilar, Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics; Sarah Rugheimer/SuW-Grafik)

Da die meisten Planeten bisher immer noch indirekt, das heißt mit der Radialgeschwindigkeits- oder der Transitmethode, entdeckt werden, sind die aus diesen Beobachtungen abgeleiteten Werte von Masse und Radius im Allgemeinen aber immer nur so genau, wie auch die Sternparameter (also etwa Leuchtkraft und Masse) bekannt sind. Im Augenblick kennen

wir diese Größen für rund zehn dieser Planeten, die mit einer Masse kleiner als zehn Erdmassen und einem Radius kleiner als zwei Erdradien in den faszinierenden Bereich der – vielleicht felsartige – Planeten in der lebensfreundlichen Zone fallen. Wenn nur die Masse oder nur der Radius bekannt ist, wird die Abschätzung, ob es sich um Gasplaneten (sogenannte Mini-Neptune) oder um Fels- oder Wasser-Planeten (sogenannte Super-Erden) handelt, über theoretische Modelle vorgenommen – darunter auch die Atmosphärenmodelle.

Fest oder gasförmig

Als Richtwerte wurden zehn Erdmassen beziehungsweise zwei Erdradien festgelegt, um zwischen felsartigen und gasartigen Planeten zu unterscheiden. Die Massengrenze ist jedoch derzeit noch nicht klar gesetzt. Wir kennen bereits ein Objekt, Kepler-11 f, dessen Masse unterhalb von zehn Erdmassen liegt, das aber trotzdem die Dichte eines Gasplaneten besitzt. Mit seiner recht kleinen Masse bei einem großen Radius handelt es sich hierbei um einen massearmen Gasplaneten, einen Mini-Neptun. Dieser Fund stellt die Massengrenze von zehn Erdmassen in Frage. Andererseits zeigen Planeten wie Corot 7 b, dass Planeten auch mit Massen oberhalb von sieben Erdmassen noch Felsbrocken sein können. Die Frage, wo sich hier eine klare Trennlinie in der Masse zwischen Super-Erden und Mini-Neptunen ziehen lässt, ist also noch offen.

Die masseärmsten Exoplaneten mit weniger als zehn Erdmassen, die über die Radialgeschwindigkeitsmethode gefunden wurden, jedoch nicht als Transit beobachtbar sind, könnten ebenfalls felsartig sein. Dazu zählen unter anderem die Objekte Gliese 581 d, HD 85512 b und Gliese 667 Cc, die sich in der lebensfreundlichen Zone um ihren Stern befinden. Aber ohne Radiusmessung haben wir noch keine Möglichkeit, dies zu bestätigen. Für Radien unterhalb von zwei Erdradien kennen wir andererseits noch kein Beispiel eines Gasplaneten, darum verwenden wir dieses – auch theoretisch basierte – Kriterium bis jetzt als Abschätzung über die Natur eines Exoplaneten. Dass es solche Mini-Neptune und Super-Erden überhaupt gibt, war ebenfalls ein Überraschungsfund auf diesem Forschungsgebiet. Denn aus unserem Sonnensystem kennen wir solche Objekte nicht.

Die faszinierende Frage nach anderen erdähnlichen Planeten wird erst jetzt mit verbesserten Instrumenten und den ersten Satelliten im Weltraum nach 18 Jahren Forschung seit der Entdeckung des ersten Exoplaneten greifbar. Dies zeigt etwa die Entdeckung des Kepler-62-Systems, mit den ersten

zwei Planeten mit Radien unterhalb von zwei Erdradien (Kepler-62 e mit 1,4 und Kepler-62 f mit 1,6 Erdradien), die sich in der lebensfreundlichen Zone ihres Sterns befinden.

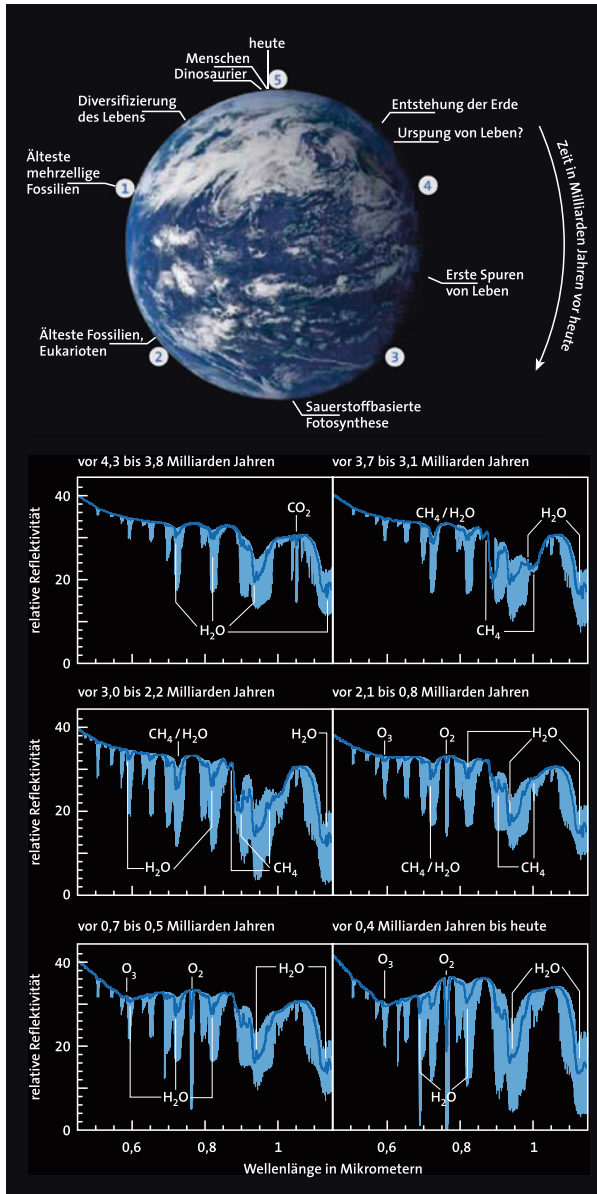
Obwohl die wahren Massen der kleinen Planeten in der lebensfreundlichen Zone noch nicht genau bekannt sind, könnte sich unter diesen Planeten schon eine zweite Erde verstecken – die wir jedoch erst durch ihren spektralen Fingerabdruck werden identifizieren können. Aber diese Planeten könnten auch alle noch kleine Neptune sein. Doch die Anzahl dieser kleinen Planeten in einem günstigen Abstand zum Stern nimmt immer weiter zu. Das bietet uns viele interessante Ziele für die Analyse ihrer Atmosphären.

Treibhauseffekt

Einer der ersten bekannten dieser massearmen Planeten in der lebensfreundlichen Zone seines Sterns, Gliese 581 d, würde etwa sieben Bar an Kohlendioxid in seiner Atmosphäre bei einem Gesamtdruck von 7,5 Bar benötigen, um einen ausreichend starken Treibhauseffekt zu generieren, der die Oberflächentemperatur oberhalb des Gefrierpunkts halten kann. Dieser wäre als Fingerabdruck im Spektralmodell der Atmosphäre durch starke Absorptionslinien von Kohlendioxid bemerkbar. Auf diese Weise steuert Gliese 581 d einen weiteren Modell-Datensatz für unsere Planetendatenbank bei.

Gliese 581 d wie auch die anderen massearmen Exoplaneten werden zuerst um kleine Sterne gefunden, da der gravitative Einfluss der Masse eines Planeten auf einen sonnenähnlichen Stern geringer Masse größer und dadurch anhand der Radialgeschwindigkeitsmethode einfacher aufzuspüren ist. Ebenso verdunkelt etwa ein erdgroßer Planet einen kleinen Stern während eines Transits prozentual mehr als einen großen Stern.

Die Felsplaneten, die wir anhand ihrer mittleren Dichten eindeutig identifizieren können (von denen wir also Radius und Masse aus Messungen kennen), kreisen nahe an ihrem Stern. Das führt zu extrem heißen Temperaturen auf ihren Oberflächen. Die Atmosphären solcher Lavaplaneten werden von Yamila Miguel am MPIA modelliert. Mit der Verbesserung der Messinstrumente und größeren Teleskopen werden wir in Zukunft solche Planeten auch in größeren Abständen zu ihren Muttersternen erforschen können.



Geologische Uhr: Im Laufe der geologischen Entwicklung der Erde erfährt auch die Zusammensetzung ihrer Atmosphäre eine Veränderung. Zu einigen in der Evolutionsuhr der Erde markierten Epochen sind die Modellspektren mit den für das jeweilige Zeitalter markanten Signaturen dargestellt (David Catling und James Kasting/SuW-Grafik; Erde: NASA; Lise Kaltenegger/SuW-Grafik)

Geologische Aktivität

Der hohe Kohlendioxidanteil, den Planeten im äußeren Bereich der lebensfreundlichen Zone in ihrer Atmosphäre benötigen, damit Wasser in flüssiger Form existieren kann, wird auf einem geologisch aktiven Planeten wie der Erde durch den Karbon-Silikat-Zyklus gesteuert. Dieser Kreislauf reguliert den Kohlendioxidgehalt in unserer Atmosphäre über Milliarden Jahre hinweg. Ohne ihn gäbe es keine lebensfreundliche Zone, sondern nur einen lebensfreundlichen Abstand, der sich mit der Entwicklung des Sterns immer weiter von diesem weg schiebt – so wie wir uns von einem Lagerfeuer, das immer heißer brennt, mit der Zeit immer weiter entfernen würden, um uns noch wohl zu fühlen. Doch welche Rückschlüsse lassen sich für Planeten über Lichtjahre hinweg auf geologische Aktivität ziehen?

Es klingt fast wie Sciencefiction, darüber nachzudenken, Vulkanausbrüche auf anderen Welten beobachten zu wollen – ähnlich wie wir bereits jetzt Vulkanausbrüche auf Monden wie Io in unserem Sonnensystem sehen können. Aber um solche Eruptionen über Lichtjahre hinweg als spektrale Fingerabdrücke nachzuweisen, müssten deren Ausmaße dem Zehn- bis Hundertfachen des größten dokumentierten irdischen Ausbruchs, und zwar des Vulkans Pinatubo, entsprechen.

Und doch hinterlassen solche gewaltigen Ausbrüche Spuren in der Atmosphäre ihrer Planeten. So wird etwa Schwefeldioxid (SO_2) bis in die Stratosphäre unserer Erde (oder einer Exo-Erde) transportiert und dadurch für eine heutige Erdatmosphäre über einen Zeitraum von rund 160 Tagen messbar. Solche Spuren könnten mit dem JWST in Zukunft aufspürbar sein und über Unterschiede und Gemeinsamkeiten in der Entwicklungsgeschichte von erdähnlichen Planeten Auskunft geben.

Andere Erden in verschiedenen Evolutionsstadien beobachten zu können, sollte uns einen Einblick in die Entwicklung unseres Heimatplaneten geben, und auch einen Blick in seine mögliche Zukunft. Aber bis das möglich sein wird, können wir als erste Erweiterung unserer Datenbank der spektralen Fingerabdrücke von Planeten einen Blick zurück auf unsere eigene geologische Geschichte werfen. Auf der Evolution unseres Planeten aufbauend lässt sich dann ein erstes Identifizierungsmuster für andere junge Erden erstellen.

Wenn wir eine junge Erde finden werden – oder Astronomen von einer anderen Erde unseren Planeten vor geraumer Zeit oder aus Entfernungen von Millionen bis Milliarden Lichtjahren beobachten könnten: Würden wir oder sie dort Spuren von Leben finden?

Die Evolution unseres Heimatplaneten lässt sich mit Hilfe von Gesteinsfunden rekonstruieren. Je älter die Funde, desto größer werden zwar

die Unsicherheiten der chemischen Zusammensetzung unserer Atmosphäre, die wir daraus ableiten. Aber über die Entwicklungsgeschichte hinweg lässt sich die Komposition der irdischen Lufthülle in groben Zügen rekonstruieren.

Vor 4,5 Mrd. Jahren war die Sonneneinstrahlung schwächer als heute. Denn damals strahlte unser Tagesgestirn, wie jeder Stern am Anfang seines Lebens, weniger Energie ab. Ihre Strahlungsleistung betrug nur rund 70 % des heutigen Werts. Hätte die Erdatmosphäre nun seit jeher ihre aktuelle Zusammensetzung besessen und sich nicht über geologische Zeitalter verändert, wäre die Oberfläche unseres Planeten für etwa die ersten zwei Milliarden Jahre ein Eispanzer gewesen. Gesteinsproben dieser Epoche lassen jedoch darauf schließen, dass die Erde nicht permanent gefroren war. Außerdem zeigen verschiedene andere Indikatoren eine hohe Konzentration von Kohlendioxid und Methan in der Atmosphäre unserer jungen Erde an, die durch geologische und biologische Prozesse reguliert wurde.

Die Modellatmosphären der Erde für diese geologischen Entwicklungsstufen weisen jeweils unterschiedliche spektrale Fingerabdrücke auf, da sie aus verschiedenen Konzentrationen von Gasen zusammengesetzt sind. Könnten wir das Sonnenlicht, das die Erde reflektiert, oder das sie selbst als Wärme im Infraroten abstrahlt, über diese verschiedenen Zeitalter hinweg aufnehmen, würden wir sich ändernde Signaturen im Spektrum beobachten.

Besondere Spuren des Lebens

Da dies für unsere Erde nicht möglich ist, leiten uns hier Atmosphärenmodelle. Dabei gibt die sich verändernde Intensität der Absorptionslinien von Sauerstoff, Ozon, Wasser, Methan und Kohlendioxid einen Einblick in die Entwicklung unseres Planeten. Die Bestandteile CO_2 , CH_4 und H_2O könnten in unterschiedlichen Konzentrationen während der gesamten Entwicklung unseres Planeten beobachtet werden. Dagegen wären die Moleküle von O_2 und O_3 erst seit zwei Milliarden Jahren mit Häufigkeiten in der Atmosphäre vorhanden, die sie über Lichtjahre hinweg nachweisbar machen (O_2 wird erst ab etwa 1/100.000 der jetzigen Konzentration mit einer Auflösung, wie das JWST sie haben wird, beobachtbar).

Der Fingerabdruck, dem wir Leben zuordnen (also Sauerstoff, auch in Form von Ozon, in Verbindung mit Methan und Wasser), ist erst während der zweiten Hälfte der Lebenszeit unserer Erde beobachtbar und könnte als erster Anhaltspunkt zur Identifizierung für die Evolution einer zweiten Erde fungieren. Allerdings könnte die Entwicklung auf anderen Erden durchaus mit einer ganz anderen Zeitskala vorangehen.

Im Vergleich zu jener Zeitspanne, seit sich der spektrale Fingerabdruck von Leben an sich zeigte, waren Spuren von Pflanzen, die sich durch charakteristische Reflexion des Sternenlichts an der planetaren Oberfläche bemerkbar machen, erst seit rund 500 Mio. Jahren weit verbreitet. Doch auch dagegen sind die etwas mehr als 100 Jahre, seit denen die Menschheit durch die Industrialisierung und den technologischen Fortschritt Spuren in der Atmosphäre unseres Planeten hinterlässt, nur ein winziger Bruchteil. Den Aspekt, wie sich die Folgen einer entwickelten Zivilisation in einer planetaren Atmosphäre niederschlagen, untersucht eine Arbeitsgruppe um Heike Rauer am Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) in Berlin. Das ist eine andere spannende Frage, die wir vielleicht in Zukunft anhand von spektralen Fingerabdrücken werden erkunden können.

Ein näherer Blick auf Leben auf der Erde zeigt außerdem, dass es sich den verschiedensten Umgebungen anpassen kann. Wir finden Extremformen von Organismen, sogenannte Extremophile, die unter anderem in Wüsten, Eisflächen und Salzminen existieren können – unter Voraussetzungen also, die die meisten irdischen Lebensformen nicht überleben würden. Doch wie die Vielseitigkeit der bereits entdeckten Exoplaneten vermuten lässt, könnten andere Welten solche Bedingungen überall bieten und dadurch jenen Formen von Leben, die bei uns nur in Umweltnischen existieren, die Vorherrschaft sichern.

Um derartigen Lebensformen im All auf die Schliche zu kommen, untersucht Siddharth Hegde in meiner Arbeitsgruppe am MPIA, welche Signaturen solche Mikroorganismen im spektralen Fingerabdruck anderer Welten hinterlassen würden. Die uns bekannten extremen Lebensformen bevorzugen geologische Umgebungen, die das reflektierte Spektrum der Erde beeinflussen. Würden solche Organismen auf einem erdähnlichen Planeten dominieren, der gefroren oder heißer als die Erde oder salzbedeckt wäre, ließen sich solche extremen Erden von unserer unterscheiden, indem man ein einfaches Farbdigramm erstellt, das statt eines hoch aufgelösten Spektrums die Farben Rot, Grün und Blau aufnimmt.

Doch wie schwierig es in der Praxis ist, die Atmosphäre eines erdähnlichen Planeten auf Lebensspuren abzusuchen, zeigt wieder ein Blick des Space Shuttle auf unseren Heimatplaneten. Die Atmosphäre unserer Erde ist rund 200 km dick. Nachweisbare Spuren von bestimmten Gasen können jedoch eine Veränderung des beobachtbaren Erdradius bis zu 170 km zur Folge haben, je nach dem, in welchem Spektralbereich man beobachtet. Der Erdradius hingegen ist über 6370 km groß. Dieses Phänomen zu erforschen ist das Arbeitsgebiet von Yan Betremieux in meinem Team am MPIA. Auch hier helfen uns die Daten der Shuttle-Mission, unseren theoretischen Blick

auf eine ferne Schwestererde oder umgekehrt jenen eines Astronomen in einem anderen Sonnensystem auf unsere Erde in Modellen nachzustellen.

Für eine derartige Suche nach Lebensspuren über Lichtjahre hinweg wird derzeit der Transiting Exoplanet Survey Satellite (TESS) der NASA gebaut, der 2017 starten soll. Zudem soll TESS die Sterne in Sonnennähe nach Exoplaneten absuchen.

Mit Milliarden von Planeten in unserer Milchstraße und den ersten Planeten in der lebensfreundlichen Zone ihrer Sterne wird die Frage, ob wir alleine im Universum sind, greifbar. Die Beobachtung der spektralen Fingerabdrücke von Exoplaneten hat gerade begonnen. Mit der nächsten Generation von Teleskopen bietet sich uns zum ersten Mal die Möglichkeit der Spurensuche nach Leben über Lichtjahre hinweg. Das macht uns zur ersten Generation, die diese Frage beantworten könnte.

Weiterführende Literatur

- Borucki, W. J. et al.: Kepler-62: A Five-Planet System with Planets of 1.4 and 1.6 Earth Radii in the Habitable Zone. In: *Science* 340, S. 587–590, 2013
- Heller, R.: Auf der Suche nach extrasolaren Transitplaneten. In: *Sterne und Weltraum*, 6/2010, S. 30–35
- Heng, K.: Das Klima auf fremden Welten. In: *Spektrum der Wissenschaft*, Februar 2013, S. 46–53
- Kaltenegger, L. et al.: Characterization of Terrestrial Exoplanets and Detection of Biomarkers. In: *Astrobiology* 10, S. 89–102, 2010
- Kaltenegger, L.: Faszinierende neue Welten. In: *Spektrum der Wissenschaft*, Juli 2013, S. 58–66

Weblinks

Weblinks zum Thema unter: www.sterne-und-weltraum.de/artikel/1202666

In diesem Video berichtet Lisa Kaltenegger über ihre Forschung: <http://goo.gl/yBCCYd>

Lisa Kaltenegger lehrt und forscht an der Cornell University. Vorher leitete sie am Heidelberger Max-Planck-Institut für Astronomie die Emmy-Noether-Forschungsgruppe „Super-Earths and Life“ und lehrte als Research Associate an der Harvard University in Cambridge, USA, und an der Universität Heidelberg.

Teil III

Zukunft

Das Schicksal von Planetensystemen, unserem eigenen, wie denen anderer Sterne, ist natürlich untrennbar mit dem des Zentralgestirns selbst verbunden. In Hunderten Millionen Jahren wird die Leuchtkraft unserer Sonne so weit zugenommen haben, dass Lebensprozesse wie wir sie heute kennen auf der Erde vielleicht nicht mehr möglich sein werden. Wenn schließlich in einigen Milliarden Jahren unsere Sonne zu einem Weißen Zwerg degeneriert, wird sie einen Teil ihrer äußeren Schichten als sogenannten planetarischen Nebel ins interstellare Medium entlassen und dieses so mit schwereren Elementen anreichern. Die Sterne prozessieren das interstellare Medium so Generation für Generation und wandeln Wasserstoff zu schwereren Elementen um. Wasserstoff ist so gut wie ausschließlich im Urknall entstanden. Nach und nach muss also der Prozess der Sternentstehung selbst Änderungen durchlaufen, da sich die Ausgangsmaterialien immer weiter von der primordialen Häufigkeitsverteilung entfernen.

Auch das Universum als Ganzes ist in gewisser Weise bereits in eine späte Entwicklungsphase eingetreten: bereits heute dominiert die rätselhafte dunkle Energie seine Dynamik, ein Effekt der sich in Zukunft nach allem was wir wissen immer weiter verstärken wird. Hier, bei der dunklen Energie, beziehungsweise beim „Lambda-Term“, schließt sich auch wieder ein Kreis zur Relativitätstheorie. Dem Weg Albert Einsteins zur allgemeinen Relativitätstheorie ist daher ein Artikel im folgenden Abschnitt des Buches gewidmet. Ganz am Ende unserer kosmischen Reise stellen wir uns großen, aber heute wohl nicht endgültig zu beantwortenden Fragen: gibt es mehr als ein Universum, und kann die Zeit selbst irgendwann ein Ende finden? Liebe Leserin, lieber Leser, kommen Sie mit in die nähere und die ferne Zukunft, an die Grenzen von Raum und Zeit, und zu neuen Ufern der Erkenntnis!



Die ferne Zukunft der Sterne

Donald Goldsmith

Manche meinen, die glorreichen Tage des Universums seien bereits vorbei – doch weit gefehlt! In den kommenden Milliarden und Billionen Jahren werden völlig neue Himmelsphänomene in Erscheinung treten (aus *Spektrum der Wissenschaft* 6/2012).

AUF EINEN BLICK

REISE ANS ENDE DER WELT

1. Die große Zeit der **Galaxien- und Sternentstehung** ist zwar vorüber, doch im Universum geht es auch weiterhin lebhaft zu. In der Zukunft wird sich das Erscheinungsbild der Sterne verändern, da ihre chemische Zusammensetzung wechselt. Sterne und Planetensysteme werden vergehen.
2. Jetzt noch seltene Himmelsobjekte werden in immer größerer Zahl auftreten, wie etwa **Weißer Zwerge aus Helium**. In mancherlei Hinsicht könnte der Kosmos der Zukunft sogar lebensfreundlicher sein als der heutige.
3. Es ist aber nicht nur die Zukunft des Kosmos selbst, die für Wissenschaftler von Interesse ist. Die ferne Zukunft ist darüber hinaus eine intellektuelle Spielwiese, auf der die Forscher die Folgen ihrer **Theorien und Beobachtungen** erproben können.

D. Goldsmith (✉)
Berkeley, USA

Wie sieht die Zukunft des Kosmos aus? Auf den ersten Blick wirken die Aussichten für uns Menschen düster: In fünf Milliarden Jahren bläht sich die Sonne zu einem Roten Riesen auf und verschlingt dabei das innere Sonnensystem – bevor sie selbst langsam verglimmt. Doch dieser Zeitrahmen erfasst nur einen winzigen Teil – genau genommen einen unendlich kleinen Teil – der gesamten, aus heutiger Sicht unendlich langen Zukunft.

Wenn die Astronomen weit in die Zukunft blicken, etwa für „576 000 Millionen Jahre“, wie es Douglas Adams in seiner Sciencefiction-Satire „Das Restaurant am Ende des Universums“ macht, dann ist das Weltall kaum noch wiederzuerkennen. In solch fernen Zeiten hat die beschleunigte Expansion des Kosmos bereits alles, was sich außerhalb der Galaxis befindet, außer Sichtweite befördert und so den Nachthimmel zunehmend geleert. Der britische Schriftsteller Lord Byron beschrieb die Vorstellung einer solchen himmlischen Ödnis 1816 in seinem Gedicht „Darkness“: „The bright sun was extinguish'd, and the stars/Did wander darkling in the eternal space.“ (etwa: „Die helle Sonne war erloschen, und die Sterne/wanderten dunkler werdend durch ewigen Raum.“)

Doch es gibt auch gute Nachrichten, denn die drohende Dunkelheit stellt nur die halbe Wahrheit dar. Zwar ist die glorreiche Epoche der massenhaften Sternentstehung schon lange vorüber, aber das Universum ist immer noch lebendig. Im Zoo der astronomischen Objekte werden merkwürdige neue Körper auftauchen. Fremdartige Phänomene, die heute noch extrem selten sind, wenn es sie überhaupt gibt, werden irgendwann zum Normalfall. Auch lebensfreundliche Bedingungen werden im künftigen Kosmos häufiger anzutreffen sein als im heutigen.

Die wissenschaftliche Eschatologie (wörtlich: Die Lehre von den letzten Dingen) – vor allem die Untersuchung der fernen Zukunft – hat in Kosmologie und Physik Tradition. Schon für sich allein genommen handelt es sich um ein faszinierendes Forschungsgebiet, aber es hat noch mehr zu bieten: Die ferne Zukunft ist ein Testgelände für neue Theorien und bietet Möglichkeiten, abstrakte Vorstellungen zu konkretisieren. Dazu zählt etwa die Geometrie des Raums. Sie wird greifbarer, wenn Kosmologen schildern, was sie für das Schicksal des Kosmos bedeutet.

Um scheinbar unvereinbare Theorien über Elementarteilchen und fundamentale Naturkräfte miteinander zu versöhnen, prognostizieren Physiker Vorgänge, die erst nach Billionen von Jahren oder noch längeren Zeiträumen auftreten, wie etwa den Zerfall der Protonen oder das Verdampfen Schwarzer Löcher. Im vergangenen Jahrzehnt untersuchten Astrophysiker anhand von Modellen, wie sich Entstehungsprozesse und

chemische Zusammensetzung von Sternen und Galaxien seit dem Urknall verändert haben. Dieses Wissen über die Vergangenheit erlaubt ihnen nun, die Trends in eine ferne Zukunft zu extrapolieren.

Gregory Laughlin von der University of California in Santa Cruz ist Experte für die Entstehung von Sternen. Bereits als Doktorand beschäftigte sich der Astrophysiker mit der Entwicklung extrem massearmer Sterne. Er vergaß jedoch, in sein Simulationsprogramm die Bedingung einzubauen, dass es bei Erreichen des gegenwärtigen Weltalters anhält. So lief die Berechnung immer weiter, für Billionen Jahre in die Zukunft. Wie sich später herausstellte, kamen dabei zwar völlig verkehrte Resultate heraus – aber diese weckten dennoch Laughlins Interesse am weiteren Schicksal des Universums.

Sterne werden in interstellaren Wolken aus Gas und Staub geboren, die die hundertausendfache bis mehrmillionenfache Masse der Sonne enthalten. Überall in der Milchstraße haben sich in solchen stellaren Kreißsälen bereits einige hundert Milliarden dieser Objekte gebildet – und es werden noch einige zehn Milliarden hinzukommen. Doch der Vorrat an Rohmaterial für neue Sterne geht allmählich zur Neige. Die massereicheren unter ihnen explodieren zwar als Supernova und geben so einen Teil ihrer Materie an den interstellaren Raum zurück. Zudem strömt Gas aus dem intergalaktischen Raum in Galaxien hinein. Doch das reicht nicht aus, um all die in Sternen gebundene Materie zu ersetzen. Die Gesamtmasse des interstellaren Gases in der Galaxis beträgt derzeit nur noch etwa ein Zehntel der Gesamtmasse der Himmelskörper.

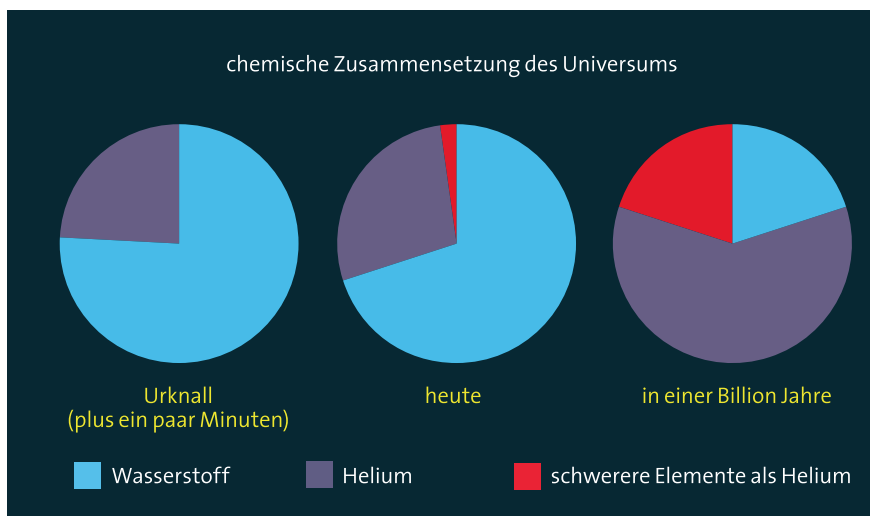
Die gegenwärtig pro Jahr in der Milchstraße entstehenden Sterne kommen insgesamt auf etwa eine Sonnenmasse. Zum Höhepunkt ihrer Produktion, vor acht bis zehn Milliarden Jahren, lag dieser Wert mindestens zehnmal höher. Gregory Laughlin schätzt, dass die Geburtenrate künftig in jedem Zehnfachen der vorherigen Zeitspanne weiter auf jeweils ein Zehntel absinken wird. In 100 Mrd. Jahren wird sie also nur noch ein Zehntel des heutigen Werts betragen, in einer Billion Jahren nur noch ein Hundertstel.

Doch dramatische Veränderungen können den Marsch in die stellare Dunkelheit unterbrechen. Unsere Milchstraße beispielsweise wird schon vergleichsweise bald – in wenigen Milliarden Jahren – mit der Andromeda-Galaxie kollidieren, der uns am nächsten liegenden großen Spiralgalaxie. Die dichten Zentralregionen der beiden Systeme verschmelzen dann entweder miteinander, oder sie beginnen, ihr gemeinsames Massenzentrum zu umkreisen. Interstellares Gas und Staub werden bei der Entstehung von „Milchomeda“ kräftig durcheinandergewirbelt, und dadurch flammt die Sternentstehung zeitweise noch einmal auf. Astronomen nennen so etwas

einen „Starburst“, die explosionsartige Entstehung neuer Himmelskörper. Sobald sich diese Aktivität abschwächt, ähnelt das verschmolzene System immer mehr einer Elliptischen Galaxie, also einem reifen Sternsystem mit nur noch wenig Rohmaterial für die Bildung neuer Objekte und dementsprechend niedriger Entstehungsrate.

Bessere Aussichten für das Leben

Es werden sich aber nicht nur weniger Sterne bilden – sie werden einem anderen Typ angehören, weil sich künftig ihr Ausgangssubstrat umwandelt. Im feurigen Urknall wurden nur die leichtesten chemischen Elemente produziert, also Wasserstoff, Helium und Lithium. Alle schwereren Elemente entstehen erst durch Kernfusion in Sternen – und zwar überwiegend am Ende ihres Lebens: in Roten Riesen, die ihre Hüllen abstoßen, oder bei Supernova-Explosionen. Rote Riesen liefern die leichteren und häufigeren unter den schwereren Elementen, vor allem Kohlenstoff, Stickstoff und Sauerstoff.



Die künftige chemische Zusammensetzung der Sterne: Sterne leuchten, weil sie Wasserstoff zu Helium fusionieren und, am Ende ihres Lebens, Helium zu noch schwereren Elementen. Jede Generation von Sternen beginnt mit einem größeren Anteil an schweren Elementen als die vorherige. Dieser Prozess führt zu einer langsamen Veränderung des Erscheinungsbilds und der Lebensdauer der Sterne. Er könnte außerdem zu einer Zunahme der Zahl der Planeten führen, die mit den Sternen zusammen entstehen. (Copyright: Jen Christiansen. Mit freundlicher Genehmigung von Scientific American (2012) einer Abteilung von Nature America, Inc. Alle Rechte vorbehalten.)

Supernovae dagegen produzieren weitere Elemente bis hin zum Uran. Diese vermischen sich mit dem vorhandenen interstellaren Gas – und starten damit die nächste Sternengeneration mit mehr schweren Elementen als die vorherige. Die Sonne, mit fünf Milliarden Jahren vergleichsweise jung, enthält 100-mal so viele schwere Elemente wie die vor zehn Milliarden Jahren entstandenen Sterne. Tatsächlich finden sich in einigen der ältesten fast überhaupt keine dieser Substanzen. Künftige Sternengenerationen werden noch mehr damit angereichert sein, was die internen physikalischen Abläufe wie ihr Erscheinungsbild verändert.

Im Wesentlichen hat das zwei Auswirkungen auf die neugeborenen Sterne:

- Erstens verringert es die Strahlungsdurchlässigkeit ihrer Außenschichten. Wasserstoff und Helium sind fast transparent, doch schon eine kleine Beimischung schwererer Elemente führt zur Absorption von Strahlung und verringert so die Leuchtkraft des Sterns. Da im Inneren eines Sterns ein Kräftegleichgewicht herrschen muss, reduziert sich die Energieerzeugung, weshalb sich der nukleare Brennstoffvorrat langsamer verbraucht. Gäbe es nur diesen Effekt, so würden Sterne umso länger leben, je mehr schwere Elemente sie enthalten.
- Der zweite Effekt wirkt dem ersten entgegen: Schwere Elemente sind für die Energieproduktion nutzlos – sie nehmen an der Kernfusion nicht teil, verringern den verfügbaren Brennstoff und dadurch auch die Lebensdauer eines Sterns.

Diese beiden Aspekte haben zuerst Greg Laughlin und sein Astrophysikkollege Fred Adams von der University of Michigan 1997 untersucht. Demnach dominiert der erste Effekt für die nächsten 1000 Mrd. Jahre. In dieser Zeit verlängern die schweren Elemente durchaus die Lebensdauer der Sterne. Irgendwann machen sie aber einen signifikanten Anteil der Masse aus, und die Wirkung kehrt sich um. Der kritische Zeitpunkt wird etwa beim Vierfachen des heutigen Werts erreicht sein.

Die zusätzlichen Elemente sollten auch bei der Entstehung von Planeten helfen und somit die Aussichten für Leben verbessern. Astronomen haben dazu die Elementhäufigkeiten in den Sternen untersucht, bei denen Planeten entdeckt worden sind. Ihre Analyse zeigt, dass bei einem höheren Anteil schwerer Elemente auch vermehrt Planeten vorkommen.

„Jupiterähnliche Planeten zeigen definitiv eine Korrelation [mit der Häufigkeit schwerer Elemente]“, sagt John Johnson, Experte für Exoplaneten vom California Institute of Technology. „Da das interstellare Medium stetig [mit diesen Substanzen] angereichert wird, wächst möglicherweise auch die Häufigkeit von Planeten.“

Und was ist mit erdähnlichen Planeten? Die Sammlung entsprechender Beobachtungen von Weltraumteleskopen steckt erst in den Anfängen. Aber da sie fast vollständig aus schweren Elementen bestehen, sollte der Effekt bei ihnen sogar noch stärker auftreten – das Universum der Zukunft dürfte mit Planeten angefüllt sein. Obwohl neue Sterne immer seltener entstehen, wird wohl etwa ein Drittel bis die Hälfte aller Planeten, die jemals existieren, erst noch geboren!

Auf den ersten Blick erscheint diese Zunahme nicht unbedingt als ein Vorteil für die Entstehung von Leben. Denn die meisten Sterne der Zukunft werden deutlich masseärmer und leuchtschwächer sein als unsere Sonne. Doch glücklicherweise können auch solche Himmelskörper lebensfreundliche Bedingungen bieten. Zum Beispiel können Sterne mit nur mit einem Promille der Sonnenleuchtkraft Trabanten auf sehr engen Umlaufbahnen besitzen, deren Temperaturen flüssiges Wasser ermöglichen, vermutlich die Hauptbedingung für die Lebensentstehung.

Planeten treten künftig nicht nur häufiger, sondern sie enthalten auch mehr lebensförderliche chemische Elemente. Denn zumindest die Organismen auf der Erde brauchen nicht nur Wasser, sondern auch Kohlenstoff, Stickstoff und Sauerstoff. Im Lauf der Zeit sollte der wachsende Anteil an diesen Elementen die Planeten also lebensfreundlicher machen. Während einerseits immer weniger Sterne entstehen, sollten diese andererseits immer häufiger auch auf potenziell Leben tragende Planeten herabscheitern. Unabhängig davon, wie viel Leben es im heutigen Universum gibt – in der Zukunft wird es vermutlich mehr und unterschiedlichere Lebensformen geben.

Wie stabil ist das Sonnensystem?

In ferner Zukunft werden Planetensysteme so lange existieren, dass völlig neue Aspekte ins Spiel kommen. Zwar nehmen wir heute die Stabilität unseres Sonnensystems als selbstverständlich hin – wir befürchten also nicht, dass die Bewegung der Erde chaotisch wird und sie vielleicht mit einem Nachbarplaneten kollidiert. Doch diese Zuversicht löst sich auf, wenn wir in Dimensionen von mehreren Milliarden Jahren denken. Im Jahr 2009 führten die Himmelsforscher Jacques Laskar und Mickael Gastineau von der Sternwarte Paris mehrere tausend Computersimulationen der vier inneren Planeten zum Stabilitätsproblem durch. Dabei variierten sie die Anfangsbedingungen der Bahnen um winzige Beträge, zum Teil nur um wenige Meter. Resultat: Im Verlauf von Billionen Jahren werden planetare Kollisionen ziemlich wahrscheinlich. Schon innerhalb von fünf Milliarden Jahren stoßen mit einem Prozent Wahrscheinlichkeit die Nachbarplaneten Merkur und Venus zusammen.

Zudem wird dann die ganze Milchstraße kräftig durcheinandergewirbelt, sobald die Andromeda-Galaxie mit ihr verschmilzt. Das verändert das galaktische Gravitationsfeld und führt möglicherweise zu einer völligen Umstrukturierung des Sonnensystems. Greg Laughlin meint dazu: „Was wir nun noch verstehen müssen, ist, inwieweit die Hand des Chaos, die unser Sonnensystem heute nur leicht berührt, die galaktische Planetenstatistik beeinflusst.“

Ein ähnliches Chaos wie in den Planetensystemen tritt auch auf größeren Skalen in Erscheinung. Sterne in Doppel- und Mehrfachsystemen umkreisen wegen ihrer gegenseitigen Anziehung den gemeinsamen Massenschwerpunkt. Das gilt ebenso für Sternhaufen und Galaxien. In all diesen Gebilden geraten Sterne praktisch nie in direkten Kontakt miteinander – sie sind einfach zu weit voneinander entfernt, selbst als astronomische Nachbarn.

Doch in kosmologisch großen Zeiträumen wird aus „praktisch nie“ oft ein „manchmal“ und schließlich sogar ein „nahezu immer“. So wird jedes Doppelsternsystem irgendwann durch externe Gravitationskräfte zerrissen, oder es verliert durch die Abstrahlung von Gravitationswellen an Energie, worauf ihre Körper zusammenstoßen. Weite Doppelsterne werden eher auseinanderdriften, enge dagegen kollabieren.

Verschmelzen zwei Sterne miteinander, können sie zeitweilig einen massereichen, leuchtkräftigeren Stern bilden. Auch ein Planet von Jupiterformat kann, sobald er mit seinem Muttergestirn fusioniert, einen ähnlichen, wenngleich schwächeren Einfluss ausüben. Nehmen wir einen bescheidenen Stern mit einem Zehntel der Sonnenmasse, der von einem jupiterähnlichen Planeten umkreist wird. Hat dieser eine Umlaufzeit von mehr als ein paar Tagen, wird er irgendwann das System verlassen. Bewegt er sich aber auf einer engeren Bahn, kann er in den Stern stürzen und diesem so einen frischen Vorrat an Wasserstoff zuführen. Das würde zu einer kurzzeitigen, aber dramatischen Erhöhung des Energieausstoßes führen, die als supernovaähnlicher Ausbruch sichtbar wird.

In ferner Zukunft wird solches Aufflackern das langsame Verschwinden der Sterne begleiten. Selbst in einer Billion Jahren können Astronomen der Zukunft also noch seltsame Phänomene bei der sich ausdünnenden Sternpopulation ihrer Heimatgalaxien beobachten.

In 10 oder 100 Mrd. Jahren wird trotz sinkender Entstehungsrate immer noch eine immense Anzahl von Sternen leuchten – hauptsächlich Himmelskörper mit niedrigen Massen und damit extrem hoher Lebenserwartung. Denn Sterne mit großer Masse sind so leuchtkräftig, dass sie schnell ausbrennen und schon nach wenigen Millionen Jahren explodieren.

Sterne mit deutlich geringerer Masse als unsere Sonne können dagegen viele hundert Milliarden oder gar Billionen Jahre lang leuchten. Sie verbrauchen ihren Brennstoffvorrat so langsam, dass er trotz seiner geringen Menge für immense Zeiträume ausreicht.

Schwerer Stern, kurzes Leben

Je nach Masse variiert auch ihr finales Schicksal. Die Sonne als stellares Mittelgewicht wird sich einst zu einem Roten Riesen aufblähen und ihre Außenschichten ins All abstoßen. Zurückbleiben wird ein Weißer Zwerg: ein dichter, erdgroßer Sternenleichen, der nahezu vollständig aus Kohlenstoffatomkernen und Elektronen besteht.

In Sternen mit weniger als der Hälfte der Sonnenmasse bleibt die Temperatur im Zentrum zu gering, um jene Kernfusionsreaktionen auszulösen, die einen Roten Riesen entstehen lassen. Stattdessen werden diese Objekte später, so spekulieren die Astronomen, zu Weißen Zwergen, die fast nur aus Helium bestehen. Im heutigen Universum entstehen solche Sterne nur gelegentlich, und zwar wenn sie sich in einem engen Doppelsystem gegenseitig die Hüllen entreißen, bevor ihr Heliumzentrum zünden kann. Einen isoliert entstandenen Weißen Heliumzwerg haben die Astronomen bislang nicht gefunden. Seit dem Urknall ist dafür einfach noch nicht genug Zeit verstrichen. Damit liefert er ein herausragendes Beispiel für jene neuen Phänomene, die unsere Nachfahren eines fernen Tages erstmals beobachten könnten.

Sterne mit größeren Massen sterben einen dramatischeren Tod. Ihr Zentrum kollabiert zu einem Neutronenstern oder einem Schwarzen Loch. Dies löst eine Stoßwelle aus, was die Außenschichten des Sterns ins All schleudert, welche dann als Supernova aufleuchten. Wenn die massereichen Sterne vom Himmel verschwunden sind, ist es auch vorbei mit all diesen Explosionen, die derzeit regelmäßig die Galaxien überstrahlen. Doch eine andere Supernova-Art („Typ Ia“) wird auch weiterhin gelegentlich den Himmel erhellen. Zu solchen Eruptionen kommt es in Doppelsternsystemen, bei denen sich einer der Sterne bereits zu einem Weißen Zwerg entwickelt hat. Bei einigen dieser Paare strömt dabei gemäß Modellrechnungen wasserstoffreiche Materie vom zweiten Stern zum Weißen Zwerg. Das Gas akkumuliert auf dessen Oberfläche, bis Kernfusionsreaktionen einsetzen und der Stern als Supernova explodiert. Solche Ereignisse sind so lange möglich, wie ausreichend massereiche Sterne existieren, also grob geschätzt noch die nächsten 100 Mrd. Jahre.

In einem ähnlichen Supernova-Modell, das gleichfalls auf Doppelsternen beruht, umkreisen sich zwei Weiße Zwerge auf extrem engen Bahnen.

Das System sendet Gravitationswellen aus und verliert so Bahnenergie. Dadurch schrumpfen die Umlaufbahnen, und die Sterne bewegen sich spiralförmig aufeinander zu, bis sie in einem kurzen finalen Crash miteinander verschmelzen. Solche Ereignisse könnten sogar noch in Billionen von Jahren auftreten.

Heller als Supernovae sind Gammastrahlungsausbrüche. Es gibt zwei unterschiedliche Arten dieser Megaexplosionen, die offenbar auch auf ganz verschiedene Weise entstehen:

- Lang andauernde Gammaausbrüche, die höchst energiereiche Strahlung mehr als zwei Sekunden lang aussenden, entstehen vermutlich, wenn der Kern eines massereichen Sterns zu einem Neutronenstern wird.
- Kurze Gammaausbrüche von weniger als zwei Sekunden Dauer sind wahrscheinlich die Folge der Verschmelzung zweier Neutronensterne oder eines Neutronensterns mit einem Schwarzen Loch.

Die lange Variante wird im Verlauf der Äonen immer seltener, da sich immer weniger massereiche Sterne bilden. Die kurzen Ereignisse können dagegen noch in Billionen von Jahren den Kosmos mit energiereicher Strahlung überschütten.

Wenn wir die kosmische Zeit nicht mehr in Milliarden, sondern in Billionen von Jahren messen, dann gelangen wir in eine Epoche des Universums, in der keine neuen Sterne mehr entstehen. Alle außer denen mit ganz geringer Masse sind längst ausgebrannt, explodiert oder verglimmen als Weiße Zwerge. Abgesehen von der Dunklen Materie, deren Zusammensetzung immer noch ein Geheimnis ist, enthält die Milchstraße – ebenso wie andere Galaxien – in dieser fernen Zukunft in erster Linie Schwarze Löcher, Neutronensterne, Weiße Zwerge und einige rote Sterne. Letztere leuchten jedoch so schwach, dass kein einziger von ihnen ohne Fernrohr zu sehen wäre, selbst wenn sie uns so nahe wären wie heute der nächste Nachbarstern. Doch selbst die allmählich verlöschenden Objekte produzieren von Zeit zu Zeit noch enorme Strahlungsausbrüche – eine Erinnerung an das nukleare Inferno, das einst den Himmel mit Milliarden von Sternen spickte.

Wenn die überlebenden Sterne Planeten auf engen Umlaufbahnen besitzen, dann könnte auf diesen langfristig flüssiges Wasser und damit auch Leben existieren. Dieses überdauert dann womöglich Zeiträume, die jede Vorstellungskraft sprengen, solange sie jedenfalls nicht Opfer einer nahen Supernova oder eines Gammastrahlungsausbruchs werden.

Das führt uns zu einer offenen Frage: Könnte eine hoch entwickelte Zivilisation – sofern sie existiert und fortbesteht – den Verlauf der kosmischen Geschichte beeinflussen? Schon vor über 30 Jahren hat sich Freeman Dyson vom Institute for Advanced Study in Princeton mit dieser Frage auseinandergesetzt. „Ich glaube, es gibt gute wissenschaftliche Gründe dafür“, schrieb der theoretische Physiker, „die Möglichkeit ernst zu nehmen, dass Leben und Intelligenz dieses Universum erfolgreich nach ihren Bedürfnissen formen können.“ Heute, gerade mal 14 Mrd. Jahre nach dem Urknall, gibt es allerdings kaum Hinweise darauf, dass Lebensformen den Kosmos in größerem Maßstab beeinflusst haben. Aber der Zug der Zeit hat den Bahnhof erst verlassen. In ferner Zukunft ist Überleben nur möglich, wenn das Leben größere Teile der kosmischen Ressourcen beherrscht.

Da wir nur einen winzigen Ausschnitt der langen Reise direkt beobachten können, werden wir keine absolute Sicherheit darüber erhalten, was künftig geschieht. Doch unser freier Geist kann so weit in die ferne Zukunft schweifen, wie wir wollen. Oder, wie der englisch-amerikanische Schriftsteller Wystan H. Auden 1957 in einem Gedicht schrieb: „Were all stars to disappear or die/I should learn to look at an empty sky/And feel its total darkness sublime/Though this might take me a little time.“ – „Würden alle Sterne verschwinden oder sterben/so müsste ich lernen, an einen leeren Himmel zu schauen/und die Erhabenheit seiner völligen Dunkelheit zu spüren/auch wenn ich dafür eine Weile bräuchte.“

Weiterführende Literatur

- Adams, F., Laughlin, G.: *The Five Ages of the Universe – Inside the Physics of Eternity*. Free Press, Washington D. C. 2000
- Chiappini, C.: *The Formation and Evolution of the Milky Way*. In: *American Scientist* 89, S. 506–515, November/Dezember 2001
- Goldsmith, D.: *The Runaway Universe – The Race to find the Future of the Cosmos*. Basic Books, New York 2000

Donald Goldsmith ist möglicherweise der einzige Astronom, der früher als Anwalt für Steuerrecht gearbeitet hat. Diese Karriere war zwar lukrativ, aber kurzlebig. Er promovierte 1969 an der University of California in Berkeley und war als Berater für die Fernsehserie „Cosmos“ von Carl Sagan tätig.



Brisante Dunkle Energie

Adam G. Riess und Mario Livio

Eine Kraft treibt das Universum auseinander. Aber wie? Auch zwei Jahrzehnte nach seiner Entdeckung verstehen Theoretiker das Phänomen nicht. Nun sollen neue Experimente Klarheit schaffen (aus *Spektrum der Wissenschaft* 9/2016).

AUF EINEN BLICK

THEORIEN VOR DER ZERREISSPROBE

1. Die Galaxien im All entfernen sich immer schneller voneinander. Doch die physikalische Ursache dafür ist unbekannt.
2. Theoretiker haben zwei Erklärungsansätze. Entweder verstehen wir die Gesetze der Schwerkraft nicht richtig, oder aber hinter allem steckt „Dunkle Energie“.
3. Für Dunkle Energie gibt es zurzeit zwei fundamental verschiedene Modelle. Jedes von ihnen hätte ganz andere, dramatische Konsequenzen für die ferne Zukunft des Kosmos.

A. G. Riess (✉)

Department of Physics and Astronomy, Johns Hopkins University, Baltimore, USA

E-Mail: ariess@stsci.edu

M. Livio

Space Telescope Science Institute, Baltimore, USA

E-Mail: mlivio@stsci.edu

Unser Universum wird ständig größer. Die Abstände zwischen Galaxien wachsen, Galaxienhaufen fliegen voneinander weg, und der leere Raum zwischen all diesen Objekten wird weiter und weiter. Das erkannten Astronomen bereits in den 1920er Jahren. Heute wissen sie obendrein: Dieser Vorgang verlangsamt sich nicht allmählich, sondern beschleunigt sich sogar rasant. Zwei beliebige Galaxien, die sich noch vor wenigen Minuten mit einer bestimmten Geschwindigkeit voneinander entfernten, driften in diesem Moment bereits schneller auseinander.

Zu dieser verblüffenden Erkenntnis kamen 1998 Adam G. Riess (einer der Autoren) sowie seine Kollegen. Gemeinsam mit Brian Schmidt von der Australian National University leitete Riess die Beobachtung und Vermessung ferner Sternexplosionen, sogenannter Supernovae. Die Entdeckungen stimmten mit den im gleichen Jahr veröffentlichten Ergebnissen eines anderen Teams um Saul Perlmutter von der University of California in Berkeley überein, das eine ähnliche Methode verwendet hatte. Damit kamen die Astronomen nicht umhin, einen seltsamen Schluss zu ziehen: Irgendetwas verursacht eine immer schnellere Expansion des Weltalls. Aber was?

Inzwischen hat sich für die noch heute unbekannte Ursache dieses seltsamen Phänomens der Begriff „Dunkle Energie“ eingebürgert. Auch nach fast zwei Jahrzehnten sind die Physiker kaum weiter damit gekommen, eine plausible Erklärung zu formulieren. Im Gegenteil: Neuere Untersuchungen verkomplizieren das Gesamtbild nur noch mehr, und einige Beobachtungen scheinen den bisher bevorzugten theoretischen Ideen sogar zu widersprechen.

Wir stehen also vor mehreren Rätseln. Was ist die Dunkle Energie? Warum ist sie anscheinend ungemein schwächer, als viele der einfacheren Ansätze nahelegen, und dennoch stark genug, dass wir sie entdecken konnten? Was bedeutet die Erscheinung für die ferne Zukunft des Kosmos? Möglicherweise sind die seltsamen Eigenschaften gar ein Hinweis auf rein zufällige Werte der Naturkonstanten. Das würde wiederum die Spekulation befeuern, unsere kosmische Heimat sei nur eine von vielen Parallelwelten, nur einer von unzähligen Teilen eines **Multiversums** (siehe Glossar) mit jeweils ganz verschiedenen physikalischen Spielregeln.

Glücklicherweise gibt es mittlerweile aufwendige Beobachtungskampagnen, mit denen Astronomen der Dunklen Energie gezielt und mit zuvor unerreichter Genauigkeit nachspüren. Innerhalb des kommenden Jahrzehnts werden wir entweder die Ursache der beschleunigten kosmischen Expansion entdecken – oder die Lösung des Mysteriums auf unbestimmte Zeit vertagen müssen, weil wir alle gegenwärtig umsetzbaren Möglichkeiten und alle Ideen ausgeschöpft haben.

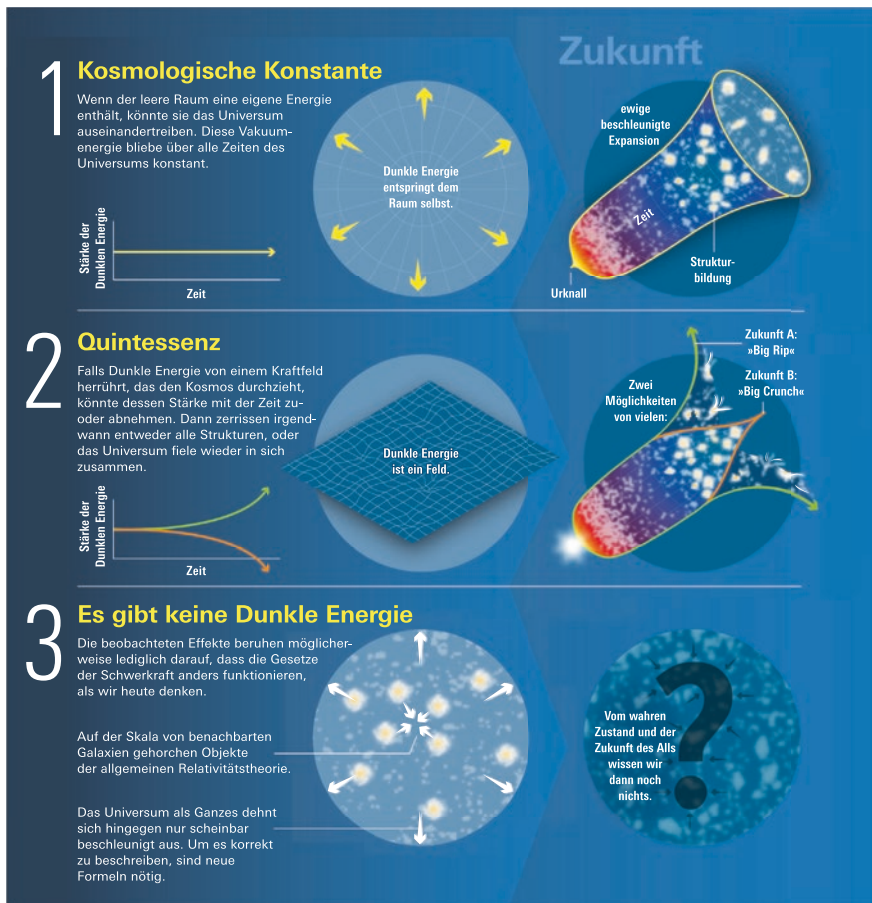
Im Moment haben Theoretiker noch verschiedenste konkurrierende Vorstellungen darüber, was die schnell wachsende Ausdehnung des Universums antreiben könnte. Ein besonders eleganter und daher von vielen Physikern

bevorzugter Kandidat leitet sich aus den Eigenschaften des leeren Raums her und schlägt eine Brücke von der Kosmologie zur Quantenmechanik. Diese kennt kein Nichts. Stellen wir uns einen Kasten mit undurchdringlichen Wänden vor, aus dem wir alles restlos entfernen – Atome, Teilchen, Strahlung, Dunkle Materie. Im Inneren wäre dann ein perfektes Vakuum. Gemäß der klassischen Physik hätte es keine Energie. Doch die Quantenmechanik ermöglicht „virtuelle Teilchen“. Das sind Paare aus Teilchen und Antiteilchen, die spontan entstehen und sich nach kürzester Zeit gegenseitig wieder vernichten. Diese flimmernden subatomaren Objekte enthalten Energie, die genau wie Masse die Gravitation beeinflusst. Anders als Masse kann Energie allerdings auch einen negativen Druck ausüben, der statt zu einer anziehenden zu einer abstoßenden Kraft führt. Zumindest hypothetisch könnte daher der leere Raum das Universum auseinanderreiben. Diese Vorstellung entspricht einem Gedanken, den bereits Albert Einstein hatte, als er die **kosmologische Konstante** in seine Feldgleichungen einführte. Der Name dieser Größe deutet darauf hin, dass ihr Wert überall der gleiche ist und sich über Raum und Zeit hinweg nicht ändert.

Alternativ könnte es sich bei der Ursache der Dunklen Energie auch um ein **Quintessenz** genanntes Energiefeld handeln. Es durchdringt das Universum und versieht jeden Punkt des Raums mit einer Eigenschaft, die der anziehenden Gravitation entgegenwirkt. Physiker kennen solche Erscheinungen bereits aus dem Elektromagnetismus und der Gravitation. Sollte es sich auch bei der Dunklen Energie um ein Feld handeln, wäre dieses aber nicht zwangsläufig konstant. Dann hätte die Dunkle Energie einstmals kleiner oder größer sein können und folglich das Universum verschieden beeinflusst. Ebenso könnte sich damit in Zukunft die Wirkung der Quintessenz wandeln. Es gibt zwei radikal verschiedene Varianten, die für die Evolution unseres Universums ganz unterschiedliche Folgen hätten: Je nachdem, ob die Stärke der Dunklen Energie abnimmt oder wächst, würde unser All irgendwann entweder nicht weiter expandieren oder umso schneller auseinandergerissen werden.

Und schließlich gibt es noch die Möglichkeit, dass Dunkle Energie gar nicht existiert, sondern das Phänomen lediglich auf unserem falschen physikalischen Verständnis von Gravitation beruht. Eventuell erklären Einsteins allgemeine Relativitätstheorie und die bekannten Gesetze der Schwerkraft die beschleunigte Expansion deshalb nicht, weil die Theorien selbst unvollständig sind. Auf den extremen Skalen, die wir inzwischen beobachten, mag die Anziehungskraft unter Massen anders funktionieren, als wir heute denken. Folgt man dieser Argumentation, ergeben sich einige interessante Ansätze. Doch sie alle krankten daran, dass keiner zur Gesamtheit der verschiedenen Messdaten passt, die wir inzwischen haben.

Einige Ideen konnten mit Hilfe von Beobachtungen bereits ausgeschlossen werden – so etwa die Vermutung, die kosmische Beschleunigung beruhe auf grob ungleich verteilter Materie im All, oder auch die Vorstellung einer fehlerhaften Struktur des Raums. Im Moment räumen Kosmologen dem Konzept der Dunklen Energie daher deutlich bessere Erfolgschancen ein als der Idee eines modifizierten Gravitationsgesetzes. Jedoch befriedigt keine der bislang vorgeschlagenen Erklärungen für die Dunkle Energie wirklich.



Drei Modelle der Expansion und Zukunft des Alls: Irgendetwas bewirkt, dass alle Galaxien im Universum sich immer schneller voneinander entfernen. Astronomen haben dafür keine eindeutige Erklärung, aber immerhin einen Namen: Dunkle Energie. Sie ziehen verschiedene Modelle für die Ursache in Betracht. (Copyright: Nigel Hawtin. Mit freundlicher Genehmigung von Scientific American (2016) einer Abteilung von Nature America, Inc. Alle Rechte vorbehalten. Bearbeitung: Spektrum der Wissenschaft)

Theorie und Experiment klaffen um 120 Größenordnungen auseinander

So folgt aus der kosmologischen Konstanten eine wesentlich stärkere Dunkle Energie, als wir beobachten können. Wenn man unbedarft an die Sache herangeht und für die Vakuumenergie einfach alle Werte der verschiedenen möglichen Quantenzustände aufsummiert, die in diesem brodelnden See von virtuellen Teilchen und Antiteilchen vorkommen sollten, erhält man einen um 120 Größenordnungen zu hohen Betrag. Um so viele Zehnerpotenzen weicht die Theorie von dem ab, was Astronomen tatsächlich messen! Dieser für jedes Modell vernichtend riesige Abstand zur Realität lässt sich zwar deutlich reduzieren, indem man weitere Annahmen macht und zum Beispiel Hypothesen wie die „Supersymmetrie“ berücksichtigt. Bei diesem nicht bewiesenen Konzept hat jedes Teilchen einen unentdeckten, wesentlich schwereren Partner. Allerdings bleiben immer noch einige dutzend Größenordnungen Diskrepanz übrig. Das spricht nicht prinzipiell dagegen, dass sich die Dunkle Energie mit der kosmologischen Konstanten erklären lassen wird. Allerdings verlagert sich dann die Frage auf eine andere Unzulänglichkeit unseres Weltbilds: Warum bloß ist die Vakuumenergie so gering?

Der anderen möglichen Erklärung ergeht es kaum besser. Für das Feld, das die Dunkle Energie verursachen soll, nehmen die Theoretiker einfach an, das Minimum seiner potenziellen Energie liege sehr niedrig. So wird nur eine kleine Menge Dunkler Energie über das Universum verteilt, die zu den Beobachtungen passt. Das erscheint allerdings sehr willkürlich. Außerdem darf die Dunkle Energie in diesen Modellen – abgesehen von ihrer abstoßenden Wirkung – mit allen anderen Bestandteilen des Universums nur wenig wechselwirken. Auch das ist schwer zu erklären. Trotz dieser Probleme: Überzeugendere Ideen als kosmologische Konstante und Quintessenz gibt es derzeit nicht.

Dabei hängt die Zukunft unseres Universums entscheidend davon ab, was hinter der Dunklen Energie steckt, und jeder kleine Unterschied hätte dramatische Konsequenzen. Wenn tatsächlich die Energie des Vakuums Ursache ist, dann geht die beschleunigte Expansion unaufhörlich weiter. In etwa einer Billion Jahren wird unsere Milchstraße mit ihren unmittelbaren Nachbarn eine einzige, elliptische Galaxie gebildet haben. Alle anderen Galaxien entfernen sich unterdessen schneller als mit Lichtgeschwindigkeit voneinander, sodass keine von ihnen mehr von hier aus wahrzunehmen sein wird. Selbst das uralte Nachglühen des Urknalls, das wir heute überall

Für viele Theoretiker ist das Konzept der Vakuumenergie verführerisch, doch dann müssen sie auch ihren erstaunlich geringen Wert erklären. Das hat der Physiker Steven Weinberg von der University of Texas sogar schon erkannt, bevor die beschleunigte Expansion entdeckt wurde. Er schlug vor, die kosmologische Konstante nicht als etwas zu interpretieren, was durch die Naturgesetze eindeutig vorgegeben ist. Stattdessen beruhe ihr Wert eventuell auf purem Zufall. Wenn man eine Vielzahl möglicher Universen betrachte, funktioniere die Vakuumenergie in jedem von ihnen anders. In einigen dieser Parallelwelten wäre die Konstante bedeutend größer, und die Abstoßung wäre so heftig, dass Materie nie zu Galaxien zusammenklumpen und Planeten mit Leben bilden könnte. Doch offensichtlich existieren wir. Daraus folgerte Weinberg: Wir leben in einer Variante dieser Universen, in der die kosmologische Konstante zufällig gerade den richtigen Wert hat. Diese Vorstellung, welche andere Wissenschaftler wie Alexander Vilenkin von der Tufts University, Martin Rees von der University of Cambridge oder Mario Livio (einer der Autoren) weiterentwickelten, wird auch anthropisches Prinzip genannt.

Für die Vorstellung eines Multiversums mit zahllosen sehr verschiedenen Welten sprechen noch weitere Argumente. Beispielsweise blähte sich der weithin akzeptierten Urknalltheorie zufolge unser Universum im Bruchteil der ersten Sekunde seiner Entwicklung enorm auf. Vilenkin und Andrei Linde von der Stanford University wiesen nach, dass sich diese so genannte kosmische Inflation, sobald sie einmal begonnen hat, unmöglich wieder aufhalten lässt und immer von Neuem aufbrodelt. So könnten unendlich viele Tochteruniversen entstehen, voneinander vollkommen isoliert und mit ganz verschiedenen physikalischen Eigenschaften.

Ein Multiversum scheint auch bei Stringtheorien vorzukommen, die oft als Kandidaten für eine Vereinigung aller Naturkräfte gehandelt werden. Berechnet man etwa für einen speziellen Vertreter, die sogenannte M-Theorie, wie viele Universen es geben könnte, landet man bei der irrwitzigen Menge von 10^{500} Parallelwelten, von denen jede einzelne möglicherweise einen individuellen Satz von Naturkonstanten und sogar Raumdimensionen hat.

Doch schon die bloße Erwähnung des Begriffs Multiversum erhöht bei vielen Physikern den Blutdruck. Denn das Konzept erscheint nicht nur spekulativ, sondern schlicht unüberprüfbar und wird unserer bewährten wissenschaftlichen Methode vielleicht niemals zugänglich sein. Ob es überhaupt gelingen kann, die Existenz von Paralleluniversen nachzuweisen, ist höchst fraglich.

Dennoch können wir versuchen, das Phänomen Dunkle Energie wenigstens in unserem eigenen Kosmos besser zu verstehen. Dazu müssen wir es genauer vermessen, und das geht am besten mit dem sogenannten w -Parameter. Diese rechnerische Größe bezeichnet letztlich das Verhältnis vom Druck, den die Dunkle Energie ausübt, zu ihrer Dichte, also dazu, wie viel von ihr in einem gegebenen Volumen des Kosmos steckt. Sollte Dunkle Energie die Energie des Vakuums sein, wäre der w -Parameter stets konstant und gleich -1 . Ist hingegen ein Feld ihre Ursache, das sich im Lauf der Zeit verändert, erwarten wir einen Wert, der von -1 abweicht. Und sollten wir die Gesetze der Gravitation modifizieren müssen, würden wir vermutlich verschiedene w -Parameter auf unterschiedlichen Skalen des Kosmos feststellen.

Astronomen haben gewitzte Strategien entwickelt, um Druck und Dichte der Dunklen Energie indirekt zu bestimmen. Da sie der normalen, stets anziehenden Schwerkraft entgegenwirkt, verhindert oder verändert sie etwa die Bildung von Galaxienclustern. Indem Wissenschaftler beobachten, wie solche Strukturen allmählich gewachsen sind, können sie bestimmen, wie stark die Dunkle Energie in diesen Phasen der Geschichte des Universums war. Dazu nutzen sie den so genannten schwachen Gravitationslinseneffekt, der darauf beruht, dass massereiche Objekte das Licht weit entfernter Galaxien ablenken und dadurch deren Form verzerrt erscheint.

Es gibt mehrere mögliche Messgrößen: Vom Licht entfernter Objekte bis zur Galaxienverteilung

Eine weitere Möglichkeit, etwas über Dunkle Energie zu erfahren, besteht darin, die Expansionsgeschwindigkeit des Universums zu verschiedenen Zeiträumen zu messen. Das gelingt den Forschern, indem sie die „Rotverschiebung“ des Lichts von weit entfernten Quellen bestimmen – ein Effekt, der darauf beruht, dass sich die Wellenlänge allmählich gemeinsam mit dem umgebenden Raum streckt. Durch dieses Phänomen wurde die beschleunigte kosmische Expansion ursprünglich entdeckt. Es gibt noch weitere geeignete Größen, zum Beispiel „baryonische akustische Oszillationen“; das sind Schwingungen aus der Urzeit des Alls, die sich der heute sichtbaren Verteilung von Galaxien aufgeprägt haben.

Die meisten Ergebnisse passen mit einer relativ hohen Genauigkeit zu einem Wert des w -Parameters von -1 . Das würde sich mit der Erklärung

decken, dass die kosmologische Konstante die Expansion verursacht. Jedoch gab es in den letzten Jahren einige Messungen, die an diesem Bild kratzten. Beobachtungen des kosmischen Mikrowellenhintergrunds ergaben in Kombination mit Untersuchungen der Materieverteilung mittels des schwachen Gravitationslinseneffekts einen Wert, der stärker negativ ist als -1 . Das Gleiche gilt für Beobachtungen von mehr als 300 Supernovae bei einer Himmelsdurchmusterung mit dem PanSTARRS-Teleskop. Dazu kommen neuere Beobachtungen von baryonischen akustischen Oszillationen bei sehr weit entfernten und besonders hellen Galaxien, sogenannten Quasaren, die nahelegen, dass die Dunkle Energie bis heute zugenommen hat. Das sind viele Momentaufnahmen, aus denen sich aber leider noch keine klare Schlussfolgerung ziehen lässt. Wir brauchen mehr Daten, um die gemessenen Abweichungen entweder zu erhärten oder als fehlerhafte Ausreißer zu entlarven.

Dem haben sich neue Beobachtungskampagnen verschrieben, die in den nächsten Jahren bis zu 100-fach genauere Messwerte liefern könnten. Zu ihnen gehören der 2013 gestartete Dark Energy Survey, aber auch zukünftige Projekte wie das Large Synoptic Survey Telescope, das um das Jahr 2021 damit beginnen soll, die Strukturen des Alls zu kartieren. Hinzu kommen geplante Weltraumteleskope der US-amerikanischen und europäischen Raumfahrtbehörden, die ebenfalls in den 2020er Jahren ihren Betrieb aufnehmen sollen. Nicht nur Dinge in den entlegenen Winkeln des Universums werden uns bei der Suche nach der Quelle für die Dunkle Energie helfen. Auch hochpräzise Messungen innerhalb unseres Sonnensystems könnten aufschlussreich sein, um die Möglichkeit eines modifizierten Gravitationsgesetzes zu überprüfen. Dazu wird etwa Laserlicht auf den Mond gestrahlt und dort von Reflektoren zurückgeworfen, die Astronauten bei vergangenen Mondmissionen aufgestellt haben. Und auch mit ausgeklügelten Laborexperimenten suchen Forscher nach Lücken in unserem Verständnis von der Schwerkraft.

Alle, die sich mit Dunkler Energie befassen, blicken gespannt auf das kommende Jahrzehnt. Angesichts der vielen ambitionierten und aufwendigen Projekte, die sich dem Rätsel der beschleunigten kosmischen Expansion widmen, hegen wir die begründete Hoffnung, dass wir bald Antworten erhalten – Antworten, die uns nichts weniger offenbaren werden als die Zukunft unseres Kosmos.

Glossar

Kosmologische Konstante Eine erstmals von Albert Einstein eingeführte Größe, die zu einer abstoßenden Kraft im All führen würde. Ihr Wert ist überall gleich und zu allen Zeiten unveränderlich. Theoretisch könnte sie durch das quantenmechanische Phänomen erklärt werden, dass selbst der leere Raum »Vakuumenergie« trägt.

Multiversum Die Gesamtheit der unendlich vielen Universen, die außerhalb unseres eigenen existieren könnten. Wenn sie alle unterschiedliche Eigenschaften besitzen, wären die Werte gewisser physikalischer Konstanten in unserer Realität schlicht Zufall.

Quintessenz Ein hypothetisches Energiefeld im Universum, das der anziehenden Gravitation entgegenwirkt. Anders als bei der kosmologischen Konstanten könnte es in der Vergangenheit stärker oder schwächer gewesen sein.

Weiterführende Literatur

Perlmutter, S. et al.: Measurement of Omega and Lambda from 42 High-Redshift Supernovae. In: *Astrophysical Journal* 517, S. 565–586, 1999

Riess, A. G. et al.: Observational Evidence from Supernovae for an Accelerating Universe and a Cosmological Constant. In: *The Astronomical Journal* 116, S. 1009–1038, 1998

Adam G. Riess erhielt 2011 für die Entdeckung der beschleunigten Expansion gemeinsam mit zwei Kollegen den Physiknobelpreis. Er lehrt an der Johns Hopkins University in den USA.

Mario Livio arbeitet als Astrophysiker am Space Telescope Science Institute in Baltimore, das unter anderem das Hubble-Weltraumteleskop betreibt. Er ist Autor mehrerer populärwissenschaftlicher Bücher.



Einsteins Weg zur allgemeinen Relativitätstheorie

Michel Janssen und Jürgen Renn

Mit seiner neuen Theorie der Gravitation revolutionierte Albert Einstein vor 100 Jahren unser Denken. Doch auf dem Weg zu jenen Formeln, die heute jeder Physikstudent lernt und Handwerkszeug der theoretischen Astrophysik und Kosmologie sind, rang er jahrelang um eine Lösung (aus *Spektrum der Wissenschaft* 10/2015).

AUF EINEN BLICK

PER ASPERA AD ASTRA

1. Als Albert Einstein über eine **neue Theorie der Gravitation** nachdachte, stieß er rasch an die Grenzen seiner mathematischen Kenntnisse. Daher holte er sich Rat bei dem befreundeten Schweizer Mathematiker **Marcel Grossmann**.
2. Der Weg hin zu den endgültigen Feldgleichungen war steinig: Nachdem Einstein und Grossmann mit einer rein **mathematischen Vorgehensweise** zunächst nicht weiterkamen, gingen sie zu einer **physikalisch-heuristischen** über.
3. Die Bedeutung der allgemeinen Relativitätstheorie für **Astro- physik und Kosmologie** konnte Einstein damals kaum erahnen. Erst eine neue Generation von Physikern machte sie für diese Gebiete hoffähig.

M. Janssen (✉)

School of Physics and Astronomy, University of Minnesota, Minneapolis, USA

E-Mail: janss011@umn.edu

J. Renn

Max-Planck-Institut für Wissenschaftsgeschichte, Berlin, Deutschland

E-Mail: rennoffice@mpiwg-berlin.mpg.de

Vor 100 Jahren, am 25. November 1915, präsentierte Albert Einstein in einer Sitzung der Preußischen Akademie der Wissenschaften in Berlin eine kurze Abhandlung: „Die Feldgleichungen der Gravitation“. Es war der Schlussstein des Theoriegebäudes, das wir heute als allgemeine Relativitätstheorie (ART) kennen, der Höhepunkt in Einsteins wissenschaftlicher Karriere.

Ihre Entstehung ist eine der erstaunlichsten Episoden der Wissenschaftsgeschichte. Denn für eine neue Theorie der Schwerkraft gab es kaum eine ernst zu nehmende empirische Begründung. Newtons Modell konnte die astronomischen Tatsachen mit großer Präzision erklären, bis auf einen winzigen Effekt: eine minimale zusätzliche Komponente der Periheldrehung des Merkurs, die Einstein im November 1915 schließlich berechnen konnte. Doch dafür hätte es möglicherweise andere Erklärungen geben können als eine Modifikation des newtonschen Gravitationsgesetzes.

Mit seiner neuen Theorie revolutionierte Einstein unser Weltbild nachhaltig. Anders als in der newtonschen Mechanik sind Raum und Zeit in der allgemeinen Relativitätstheorie keine feste Bühne mehr, auf der sich das physikalische Geschehen zuträgt. Vielmehr werden sie durch ein dynamisches Feld bestimmt, das seinerseits an diesem Geschehen teilhat, indem es physikalischen Wirkungen unterliegt und ebensolche verursacht. Dieses Feld beschreibt die Geometrie von Raum und Zeit. Darüber hinaus ist es Ursache für zwei Erscheinungen, die in der klassischen Physik völlig unterschiedlichen Kräften zugeschrieben werden: der gegenseitigen Anziehung von Massen durch die Schwerkraft sowie den Effekten, die bei beschleunigten Bewegungen wie in einem Karussell auf die Trägheitskräfte zurückgeführt werden. Nach der allgemeinen Relativitätstheorie sind jedoch Schwerkraft und Trägheit wesensverwandt, etwa so wie sich elektrische und magnetische Kräfte im Elektromagnetismus als zwei verschiedene Aspekte desselben Felds auffassen lassen.

Bereits im Jahr 1907, als Einstein noch am Schweizer Patentamt arbeitete, formulierte er eines der grundlegenden Prinzipien der allgemeinen Relativitätstheorie: das **Äquivalenzprinzip** (siehe Glossar), welches die Wesensgleichheit von Gravitations- und Trägheitskräften begründet. Es besagt, dass in zwei Laboren, von denen das eine gleichförmig und geradlinig beschleunigt wird, während das andere in einem homogenen Schwerfeld entsprechender Stärke ruht, dieselben physikalischen Gesetze gelten. Ein Beobachter kann also nicht zwischen der Trägheitskraft im beschleunigten Labor und der Schwerkraft im ruhenden Labor unterscheiden.

Damit treten beschleunigte Testlabore oder Bezugssysteme, wie theoretische Physiker sie nennen, ruhenden oder gleichförmig bewegten, kräftefreien **Inertialsystemen**, wie Einstein sie in seiner speziellen Relativitätstheorie (SRT) verwendete, gleichberechtigt an die Seite: Sie lassen sich als ruhend auffassen, wenn man nur annimmt, dass in ihnen ein Gravitationsfeld bestimmter Art wirksam ist. In dieser Zulassung beschleunigter Bezugssysteme sah Einstein die Verallgemeinerung des **Relativitätsprinzips** aus seiner speziellen Relativitätstheorie.

Um ihre Gedankenmodelle zu beschreiben, bedienen sich die Physiker der Sprache der Mathematik, und was dem Physiker das Bezugssystem, ist dem Mathematiker sein Koordinatensystem. So suchte Einstein für seine neue Theorie der Schwerkraft zunächst nach Gleichungen, die ihre Form möglichst unter beliebigen Koordinatentransformationen beibehalten. Die Mathematik bezeichnet solche Gleichungen als **allgemein kovariant**. Später stellte sich allerdings heraus, dass diese mathematische Forderung nicht zu einem Relativitätsprinzip im gleichen Sinn führt, wie es für die spezielle Relativitätstheorie gilt. Denn das klassische Relativitätsprinzip ist in der besonderen Symmetrie dieser Theorie begründet, die wiederum damit zusammenhängt, dass die spezielle Relativitätstheorie eine flache Raumzeit beschreibt, während die allgemeine Relativitätstheorie Raumzeiten mit beliebigen Krümmungen zulässt.

Eine neue Sprache – der absolute Differenzialkalkül

Inzwischen als Professor an der Karls-Universität in Prag tätig, publizierte Einstein 1911 einen Vorschlag zur Beobachtung der Lichtablenkung im Gravitationsfeld während einer Sonnenfinsternis, der noch allein auf dem Äquivalenzprinzip beruhte. Zu einer vollständigen Feldtheorie der Gravitation gehörte aber die Aufstellung zweier fundamentaler Gleichungen, wie Einstein aus der Theorie des elektromagnetischen Felds wusste: eine Bewegungsgleichung, welche die Bewegung im Feld beschreibt, und eine Feldgleichung, die bestimmt, wie das Feld durch seine Quellen erzeugt wird.

Bei der Konstruktion einer solchen Feldtheorie ging Einstein systematisch vor. In der Folgezeit beschäftigte er sich zunächst mit dem Spezialfall des statischen Gravitationsfelds. Dabei hatte er bereits das umfassendere Theoriegebäude im Blick, das dynamische Gravitationsfelder einschloss. Mitte 1912 wurde ihm klar, dass seine Gravitationstheorie nach einer neuen mathematischen Ausdrucksweise verlangte. Der Durchbruch war die Erkenntnis, dass sich die Bewegungsgleichung in solchen dynamischen Gravitationsfeldern als Gleichung einer im weitesten Sinn geraden Linie

in einer gekrümmten Raumzeit schreiben lässt. Das bedeutete zugleich, dass sich das Gravitationsfeld als Ausdruck der Geometrie der Raumzeit verstehen ließ.

Dafür war der so genannte absolute Differenzialkalkül die geeignete Sprache, die wir in heutiger Terminologie Differenzialgeometrie in **Tensordarstellung** nennen würden. Die Mathematiker Elwin Bruno Christoffel, Gregorio Ricci-Curbastro und Tullio Levi-Civita hatten sie basierend auf den Arbeiten von Carl Friedrich Gauß und Bernhard Riemann seit dem 19. Jahrhundert entwickelt; den damaligen Physikern war sie allerdings fast unbekannt. Als Einstein im Sommer 1912 von Prag nach Zürich zurückkehrte, um eine Professur an der Eidgenössischen Technischen Hochschule (ETH) anzutreten, bat er daher verzweifelt seinen Freund, den Mathematiker Marcel Grossmann, um Hilfe. Die beiden waren Klassenkameraden am Eidgenössischen Polytechnikum in Zürich gewesen – 1911 umbenannt in Eidgenössische Technische Hochschule – und sie waren nun wieder an ihrer Alma Mater vereint.

Auf der Suche nach einer mathematisch konsistenten Darstellung seiner Theorie machte sich Einstein gemeinsam mit Grossmann als nächsten Schritt daran, nun auch **Feldgleichungen** zu finden, die ihre Form unter möglichst unterschiedlichen Koordinatentransformationen beibehielten. Die physikalischen Gesetze sollten also in allen denkbaren Bezugssystemen – egal ob relativ zueinander ruhend, sich gleichförmig bewegend, beschleunigt oder gar rotierend – ihre Gültigkeit in derselben Form beibehalten. Ausgehend vom **Riemann-Tensor**, dem zentralen mathematischen Objekt des absoluten Differenzialkalküls, suchte Einstein nach einer Feldgleichung, die beschreiben sollte, wie die Geometrie der Raumzeit und damit das Gravitationsfeld durch die Wirkung von Massen und Energien erzeugt wird.

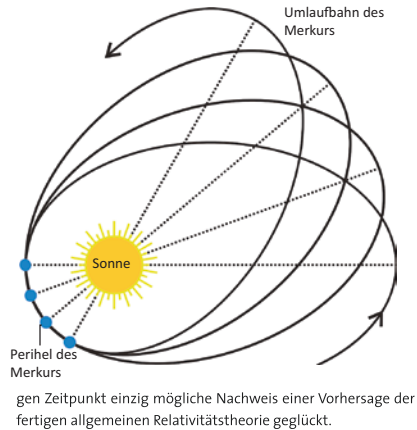
Zugleich aber musste diese Feldgleichung plausiblen physikalischen Forderungen genügen. Insbesondere sollte sie selbstverständlich das bekannte Wissen über Gravitation, wie es im klassischen newtonschen Gravitationsgesetz verkörpert ist, einschließen. Und sie sollte natürlich auch mit den altbewährten Prinzipien der Erhaltung von Energie und Impuls verträglich sein. Einstein und Grossmann sahen sich also genötigt, die neue Mathematik der Raumzeit mit dem bekannten physikalischen Wissen ins Gleichgewicht zu bringen – ein Balanceakt, der ihnen zunächst nicht gelang. Denn sie mussten erst noch mühevoll lernen, wie sich dieses bewährte Wissen in den neuen Formalismus einbetten ließ.

Periheldrehung des Merkurs

Alle Planeten des Sonnensystems bewegen sich auf einer Ellipse, in deren einem Brennpunkt die Sonne steht. Der sonnennächste Punkt auf dieser Umlaufbahn heißt Perihel. Wegen des Einflusses der Schwerkraft der übrigen Planeten rotieren diese elliptischen Bahnen ihrerseits um die Sonne, und damit auch das Perihel des jeweiligen Planeten.

Bei Merkur, dem sonnennächsten und zugleich masseärmsten Planeten tritt dieser Effekt besonders »stark« zu Tage. Beobachtungen hatten gezeigt, dass die Periheldrehung des Merkur 5,74' (Bogensekunden) pro Jahr betrug. Die newtonsche Mechanik sagte aber nur 5,32' vorher. Die Differenz zwischen Beobachtung und Theorie machten also pro Jahrhundert 43" aus.

Einstein's Entwurfgleichungen sagten aber eine zusätzliche Drehung des Merkurperihel von nur 18" pro Jahrhundert voraus. Nach den neuen Feldgleichungen betrug der noch fehlende Wert 43,02" pro Jahrhundert, was sehr gut mit den Beobachtungen übereinstimmt. Damit war der erste und zum damali-



(Copyright: Mpfiz https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Perihelion_precession.svg / public domain; Bearbeitung: Spektrum der Wissenschaft)

Einstein's und Grossmann's Ringen mit diesem Spannungsverhältnis von Physik und Mathematik ist im Einzelnen in den Notizen nachzulesen, die Einstein in seinem Züricher Notizbuch festgehalten und die eine Forschergruppe am Max-Planck-Institut für Wissenschaftsgeschichte umfassend ausgewertet hat. Wie sich diesen Aufzeichnungen entnehmen lässt, waren sie damals den richtigen Feldgleichungen bereits sehr nahegekommen, ohne sich dessen bewusst zu sein. Doch erst in den Sitzungsberichten für die Berliner Akademie kehrte Einstein im November 1915 zu Gleichungen zurück, wie sie die elegante Mathematik von Gauß, Riemann und deren Kollegen bereits in jenem Winter 1912/1913 nahegelegt hatte.

Statt des bisherigen mathematischen Ansatzes schlugen sie damals einen physikalisch motivierten, heuristischen Weg ein. Sie konstruierten ihre Feldgleichungen gerade so, dass diese den richtigen **newtonschen Grenzfall** ergaben und a priori mit der Energie-Impuls-Erhaltung kompatibel waren. Zudem stützten sie sich dabei ganz wesentlich auf die Analogie zwischen Gravitationsfeldern und elektromagnetischen Feldern. Im Juni 1913 veröffentlichten sie ihre Arbeiten dazu unter dem Titel „Entwurf einer verallgemeinerten Relativitätstheorie und Theorie der Gravitation“.

Wie die endgültige Theorie beschreibt schon die Entwurftheorie das Gravitationspotenzial durch einen **metrischen Tensor**, der die metrischen Eigenschaften einer im Allgemeinen gekrümmten vierdimensionalen Raumzeit bestimmt. Die Bewegung eines Testteilchen in einer solchen Raumzeit wird durch die Bewegungsgleichung bestimmt, für die es eine

einfache Interpretation gibt: Wenn keine anderen Kräfte wirken, beschreibt sie die Bewegung in der gekrümmten Raumzeit entlang einer so genannten **Geodäte**. Die Krümmung selbst ist durch eine Feldgleichung gegeben, die vorschreibt, wie Masse und Energie das Verhalten des metrischen Tensors festlegen.

Die Feldgleichung, die Einstein in der Entwurftheorie aus dem Gravitationspotenzial abgeleitet hatte, bevorzugte bestimmte Koordinatensysteme und genügte daher nicht dem allgemeinen Relativitätsprinzip, wie er es verstand. Um diesen Bruch mit seiner ursprünglichen Heuristik zu rechtfertigen, ersann Einstein nun eine Reihe von Argumenten, mit denen er belegen wollte, dass es allgemein kovariante Feldgleichungen gar nicht geben konnte, dass also die Entwurfgleichungen unter diesen Umständen in der Tat die bestmögliche Lösung darstellten. Allerdings waren ihre Kovarianzeigenschaften unklar und Einstein änderte während der nächsten zwei Jahre immer wieder seine Ansicht darüber, ob sie beispielsweise unter Transformationen zu rotierenden Koordinatensystemen kovariant sind oder nicht.

Das war eine wichtige Frage, da seine Heuristik von Anfang an darauf gegründet war, die in einem rotierenden Bezugssystem auftretenden Beschleunigungen als Wirkungen verallgemeinerter Gravitationskräfte auffassen zu können. Die Transformation zu einem rotierenden Koordinatensystem sollte deshalb zu den erlaubten Transformationen innerhalb der Entwurftheorie gehören. Denn so konnte er, im Geist des Äquivalenzprinzips, die Corioliskraft und die zentrifugalen Kräfte in einem rotierenden Bezugssystem als Gravitationskräfte interpretieren.

Zudem hatte die Entwurftheorie noch ein offensichtlicheres Manko: Für die einzige Anwendung, anhand der sie sich zur damaligen Zeit überhaupt überprüfen ließ, nämlich der Periheldrehung des Merkurs, lieferte sie den falschen Wert. Dennoch war Einstein mehr als zwei Jahre lang davon überzeugt, diese Theorie stelle die Lösung seines Problems dar. Denn er sah keine andere Möglichkeit, seine im Äquivalenzprinzip begründete Idee einer relativistischen Gravitationstheorie mit dem bewährten Wissen der klassischen Physik über Gravitationskräfte und Erhaltungssätze zu vereinbaren.

Fortschritte durch das Variationsprinzip

Vor dem Hintergrund dieser Überzeugung, dass die Entwurftheorie die endgültige Lösung des Gravitationsproblems sei, bemühten Einstein und Grossmann sich um ihren systematischen Ausbau. Im Frühjahr 1914 gelang es ihnen, die Entwurfgleichungen aus einem Variationsprinzip für die Feldgrößen abzuleiten. Damit griffen sie auf eine Technik zurück, die

im 18. Jahrhundert im Rahmen der analytischen Mechanik entwickelt worden war. Ausgangspunkt ist dabei die **Lagrange-Funktion** für das Gravitationsfeld, mit deren Hilfe man ein so genanntes Wirkungsintegral bildet, das über alle möglichen Werte des Gravitationsfelds variiert wird und für das man einen Extremalwert sucht. Einstein betrachtete diese Technik nur als ein nützliches Hilfsmittel, schrieb ihr jedoch keine tiefere Bedeutung zu. Doch es ermöglichte Einstein und Grossmann nicht nur einen besseren Zugriff auf die Kovarianzeigenschaften dieser Feldgleichungen, sondern auch andere Einsichten in die Struktur ihrer Theorie, vor allem in den Zusammenhang zwischen Energie- und Impulserhaltung einerseits und zulässigen Koordinatentransformationen andererseits. Ihre Ergebnisse darüber veröffentlichten die beiden Freunde im Mai 1914 in einem zweiten und letzten gemeinsamen Artikel. Damals war Einstein bereits von Zürich nach Berlin umgezogen.

Anhand dieses Variationsansatzes fand Einstein insbesondere heraus, dass dieselben Bedingungen, die die Kovarianz der Lagrange-Funktion und damit ebenso die der aus ihr folgenden Feldgleichungen bestimmen, ebenfalls sicherstellen, dass die Feldgleichungen mit der Energie-Impuls-Erhaltung verträglich sind. Einstein war damit auf einen Spezialfall eines der Theoreme gestoßen, die Emmy Noether 1918 veröffentlichen würde; darin verknüpfte sie Symmetrien und Erhaltungssätze. Einsteins Blick auf dieses Resultat 1914 war jedoch ein anderer: Aus seiner Sicht erfordert die Energie-Impuls-Erhaltung eine Beschränkung der Kovarianz der Feldgleichungen.

Aber der Triumph dieser neuen mathematischen Behandlung der Entwurftheorie schien noch weiterzugehen: Einstein überzeugte sich sogar davon, dass sein Ansatz auf eindeutige Weise genau zur Lagrange-Funktion der Entwurfgleichungen führte. „Wir sind nun“, erklärte er, „auf rein formalem Wege, das heißt ohne direkte Heranziehung unserer physikalischen Kenntnisse von der Gravitation, zu ganz bestimmten Feldgleichungen gelangt.“ Auch wenn Einstein die mathematische Reinheit dieser neuen Ableitung der Entwurfgleichungen übertrieb, kann man seinen Enthusiasmus doch leicht verstehen. Hier schienen endlich die mathematischen und physikalischen Denkwege zusammenzulaufen, die im Züricher Notizbuch noch divergierten.

In dieser Form präsentierte Einstein seine Theorie in einer Vorlesungsreihe an der Universität Göttingen im Sommer 1915. Doch bald darauf begann sein Vertrauen in diese Feldgleichungen zu zerbröckeln. Im September 1915 prüfte Einstein erneut, ob die Entwurfgleichungen unter Transformationen zu einem rotierenden Koordinatensystem kovariant sind. Zu seiner großen Überraschung stellte er fest, dass sie es nicht sind und dass

seine frühere Überprüfung dieser Tatsache auf einem Rechenfehler beruhte. Darüber hinaus fand er, dass sein „rein formaler Weg“ keineswegs zu einer eindeutigen Ableitung der Entwurfgleichungen führte, wie er geglaubt hatte, sondern auch Alternativen zuließ.

Das war zweifellos ein Rückschlag, aber die Ausarbeitung der Entwurftheorie und insbesondere ihre Formulierung mit Hilfe des Lagrange-Formalismus eröffnete auch neue Möglichkeiten. Der für die Entwurftheorie entwickelte Formalismus wirkte jetzt wie ein Baugerüst, mit dessen Hilfe sich das eigentliche Gebäude, die allgemeine Relativitätstheorie, errichten ließ. Einstein konnte nun außerdem andere Lagrange-Funktionen heranziehen und dabei den allgemeinen Formalismus der Entwurftheorie nicht nur intakt lassen, sondern für eine erneute Suche nach Feldgleichungen produktiv nutzen.

Dem Vorbild der Elektrodynamik folgend, war es für Einstein nahe liegend, die Lagrange-Funktion des elektromagnetischen Felds nachzubilden, wie er es schon für die Entwurftheorie getan hatte, aber jetzt die Definition des Gravitationsfelds zu verändern. Die zeitgenössischen Dokumente sprechen dafür, dass Einstein genau dieses tat.

In einem Brief an seinen Münchener Kollegen Arnold Sommerfeld über die endgültigen Feldgleichungen schrieb Einstein zum Beispiel: „Den Schlüssel zu dieser Lösung lieferte mir die Erkenntnis, dass nicht (ein Term mit einem Gradienten der Metrik), sondern die damit verwandten **christoffelschen Symbole** als natürlicher Ausdruck für die ‚Komponente‘ des Gravitationsfeldes anzusehen ist.“ In der klassischen Feldtheorie hängt die Feldstärke mit der räumlichen Variation des Potentials zusammen, die sich durch den so genannten Gradienten ausdrücken lässt. Dass dieser Zusammenhang in der neuen Gravitationstheorie durch die viel komplizierteren christoffelschen Symbole auszudrücken ist, erkannte Einstein erst, nachdem die Verwendung des einfachen Gradienten im Rahmen der Entwurftheorie gescheitert war.

Mit dieser neuen Definition des Gravitationsfelds erhält man Feldgleichungen, die im Wesentlichen jenen entsprechen, auf die Einstein und Grossmann bereits 1912/1913 gestoßen waren, sie damals aber fallen gelassen hatten, unter anderem weil sie nicht sahen, wie sie mit der Energieerhaltung verbunden waren. Jetzt lieferte paradoxerweise ausgerechnet der Formalismus der Entwurftheorie genau diesen Zusammenhang frei Haus.

Bis November 1915 hatte sich schließlich Einsteins Verständnis der Beziehung zwischen Kovarianz und Energie-Impuls-Erhaltung geändert, auch wenn er diese neue Beziehung in voller Allgemeinheit erst im November 1916 beweisen würde. Das verblüffende Resultat war: Die Energie-Impuls-Erhaltung beschränkt nicht die Kovarianz der Feldgleichungen, wie er zunächst

angenommen hatte; sondern deren Kovarianz garantiert die Energie-Impuls-Erhaltung – ganz im Sinn der späteren **Noether-Theoreme**.

Kopf an Kopf mit Hilbert?

Im Wissen darüber, dass David Hilbert von der Theorie gefesselt war, und in Sorge, der überragende Göttinger Mathematiker könne bald auf dieselben Probleme stoßen, die er selbst gefunden hatte, also etwa die Schwierigkeiten mit der Rotationsmetrik, beeilte sich Einstein, die neuen Feldgleichungen in Druck zu geben. So legte er im November 1915 die neue Form seiner Theorie in vier aufeinander folgenden Sitzungen in der Preußischen Akademie der Wissenschaften in Berlin vor, wobei er zwischen den einzelnen Veröffentlichungen immer wieder Korrekturen zu bestimmten Punkten vornahm.

Am 20. November, fünf Tage bevor Einstein sein endgültiges Resultat bekannt gab, präsentierte Hilbert seine Theorie in Göttingen. Jedoch zeigen Druckfahnen von Hilberts Artikel mit einem Datumstempel vom 6. Dezember, dass die von Hilbert vorgeschlagene Theorie konzeptionell zu diesem Zeitpunkt der Entwurftheorie noch näherstand als Einsteins neuer Theorie. Als der Artikel schließlich im März 1916 mit Veränderungen, die genau diese Verbindung zur Entwurftheorie betrafen und sie überwandten, publiziert wurde, hatte der Mathematiker Einsteins Theorie vollständig akzeptiert und sprach ihrem Schöpfer vorbehaltlos das Verdienst daran zu.

Im Nachhinein gesehen hätte sich Einstein im November 1915 also Zeit lassen können und sich nicht darüber beunruhigen müssen, dass Hilbert ihm zuvorkommen könnte. Die beiden Männer tauschten während dieses hektischen Monats einige Briefe aus, aber keiner von beiden hatte eine klare Vorstellung davon, worauf der andere aus war. Dennoch beklagte Einstein sich bei zwei seiner engsten Freunde in der Schweiz, dass Hilbert in seinem Revier wildere. Am 26. November schrieb er an Heinrich Zangger, ein bestimmter Kollege habe seine Theorie nostrifiziert, und vier Tage später an Michele Besso, das Verhalten gewisser Kollegen (die er nicht beim Namen nennt) sei scheußlich gewesen. Zwischen diesen beiden Briefen, am 28. November, schickte Einstein – wahrscheinlich auch, um seine Priorität zu sichern – an seinen Freund Arnold Sommerfeld einen detaillierten Bericht, warum er die alten Feldgleichungen aufgegeben und die neuen angenommen hatte. Doch welch böses Blut es auch immer zwischen Einstein und Hilbert in diesem Monat gegeben haben mag, das Kriegsbeil wurde schnell begraben. Am 20. Dezember schickte Einstein einige versöhnliche Zeilen an Hilbert.

Die Feldgleichungen vom 25. November 1915 bildeten den Schlusspunkt der mühevollen Suche nach einer relativistischen Theorie der Schwerkraft, die Einstein acht Jahre zuvor begonnen hatte. Einstein konnte auf ihrer Grundlage die kleine Abweichung der Drehung der Merkurbahn von den klassischen Vorhersagen erklären, konnte aber zunächst keine anderen empirischen Belege für seine Theorie anführen. Es sollte noch einige Jahre dauern, bis die von der Theorie vorhergesagte Lichtablenkung im Gravitationsfeld wirklich bestätigt werden konnte, und noch viel länger, bis sich andere ihrer Vorhersagen nachprüfen ließen. Für die Theorie sprach zunächst einmal vor allem, dass sie als plausible Verallgemeinerung der klassischen Physik und der speziellen Relativitätstheorie gelten konnte, wenn man das Äquivalenzprinzip postulierte.

Ihre überragende Bedeutung für die Kosmologie und die Astrophysik waren noch kaum zu erahnen. Einstein hat die Theorie in der Folge noch selbst vervollständigt und wesentlich zu ihrer Interpretation beigetragen. So formulierte er etwa grundlegende Konzepte für das Verständnis von Gravitationswellen. Doch die eigentlichen revolutionären Entwicklungen, die der allgemeinen Relativitätstheorie ihre heutige fundamentale Bedeutung verliehen, waren das Werk einer späteren Generation und vor allem der Physiker, die Begriffe wie Urknall und Schwarze Löcher ausarbeiteten und auf neue kosmische Phänomene bezogen. In ihrer unvermuteten Anwendbarkeit auf diese Phänomene liegt ein besonderer Zauber der Theorie und auch eine Herausforderung für die Wissenschaftsgeschichte.

Glossar

Äquivalenzprinzip: Nach dem Äquivalenzprinzip, das Einstein zum Ausgangspunkt der ART machte, sind Gravitations- und Trägheitskräfte wesensgleich. Es beruht auf der Gleichheit von schwerer und träger Masse. Diese Annahme wurde durch ein Experiment des Physikers Loránd Eötvös im Jahr 1890 untermauert.

Christoffelsche Symbole: Die christoffelschen Symbole erhält man aus partiellen Ableitungen der Metrik. Mit ihrer Hilfe lässt sich die Parallelverschiebung eines Vektors im gekrümmten Raum beschreiben. Sie tauchen in der Bewegungsgleichung eines Teilchens in der ART auf, da sie das Gravitationsfeld darstellen.

Feldgleichungen: Sie beschreiben in einer Feldtheorie, wie eine Quelle ein Feld erzeugt. Typischerweise bestehen sie aus einer linken Seite, in der ein Differenzialoperator auf das Feld wirkt, und einer rechten Seite, die die Quelle wiedergibt. In den einsteinschen Feldgleichungen wird die Quelle durch den Energie-Impuls-Tensor der Materie dargestellt und das Feld durch Ableitungen des metrischen Tensors.

Geodäte: Eine Geodäte ist die am wenigsten gekrümmte Verbindung zwischen zwei Punkten in der Raumzeit. In der euklidischen Geometrie ist dies eine Gerade; auf einer Kugel verläuft sie entlang eines Großkreises. In einer gekrümmten Raumzeit schmiegt sie sich an die lokale Geometrie.

Inertialsystem: Inertialsysteme sind in der klassischen Physik gleichförmig bewegte Bezugssysteme. In ihnen haben die physikalischen Gesetze dieselbe Form wie in einem kräftefreien, ruhenden System.

Kovarianz, kovariant: Gleichungen heißen kovariant, wenn sie unter einer Koordinatentransformation ihre Form beibehalten. **Allgemein kovariant** nennt man Gleichungen, wenn diese Eigenschaft für sämtliche Koordinatentransformationen gilt.

Lagrange-Funktion: Die Lagrange-Funktion ist eine einzige Größe, mit der sich die Dynamik eines physikalischen Systems konzipieren lässt. In der klassischen Mechanik ist dies etwa die Differenz von potenzieller und kinetischer

Energie. Aus ihr lassen sich die Bewegungsgleichungen des Systems ableiten.

Metrik: Die Metrik ist eine Vorschrift für die Berechnung von Abständen in gekrümmten Räumen, in denen die Koordinaten selbst keine unmittelbar messbare Bedeutung mehr haben. In Einsteins ART wird sie durch einen **metrischen Tensor** dargestellt. Mit seiner Hilfe lässt sich die Gravitation als Eigenschaft einer gekrümmten Raumzeit beschreiben.

Noether-Theorem: Die Mathematikerin Emmy Noether verknüpfte physikalische Erhaltungsgrößen mit Symmetrien bei Koordinatentransformationen. Jeder kontinuierlichen Symmetrie eines physikalischen Systems ist eine Erhaltungsgröße zugeordnet. So gehört zur Translations-symmetrie bezüglich der Zeit die Erhaltung der Energie. Entsprechend folgt aus der Unabhängigkeit des Systems gegenüber Translationen und Rotationen des Koordinatensystems die Erhaltung von Impuls beziehungsweise Drehimpuls.

Newtonscher Grenzfall: Im Grenzfall schwacher und statischer Gravitationsfelder führt die ART näherungsweise auf das bekannte newtonsche Gravitationsgesetz.

Tensor: Tensoren sind eine Verallgemeinerung des Vektorbegriffs auf Größen, die durch beliebig viele Komponenten charakterisiert sind und sich etwa als Matrizen darstellen lassen.

Relativitätsprinzip: Das Relativitätsprinzip aus der SRT besagt, dass in allen Inertialsystemen physikalische Gesetze die gleiche Form haben und identische Messanordnungen gleiche Ergebnisse. In der ART versuchte Einstein diese Gleichberechtigung von Bezugssystemen auch auf beschleunigte Testlabore auszuweiten.

Riemann-Tensor: Der Riemann-Tensor, auch als Krümmungstensor bezeichnet, besteht aus zehn unabhängigen Komponenten, die man aus partiellen Ableitungen der christoffelschen Symbole erhält. Er ist ein Maß für die Krümmung der Raumzeit.

Weiterführende Literatur

Stachel, J. et al. (Hg.): The Collected Papers of Albert Einstein. Princeton University Press, 1987

Gutfreund, H., Renn, J.: The Road to Relativity. Princeton University Press 2015
Erläutert ausführlich die Entstehung der allgemeinen Relativitätstheorie

Janssen, M., Lehner, C. (Hg.): The Cambridge Companion to Einstein. Cambridge University Press, 2014
Über Einsteins wissenschaftliches Denken und Wirken

Michel Janssen ist Professor im Program for History of Science, Technology, and Medicine an der University of Minnesota in Minneapolis. Sein wichtigstes Forschungsgebiet ist die Entwicklung der Relativitäts- und Quantentheorie in den ersten Jahrzehnten des 20. Jahrhunderts.

Jürgen Renn ist Direktor am Max-Planck-Institut für Wissenschaftsgeschichte in Berlin. Er beschäftigt sich mit dem Strukturwandel von Wissenssystemen und hat unter anderem über den Umbruch geforscht, durch den die moderne aus der klassischen Physik hervorgegangen ist. Sein besonderes Interesse gilt den langfristigen Prozessen der Wissensentwicklung und ihrer Dynamik.



Multiversum in Beweisnot

George F. R. Ellis

Viele Kosmologen fasziniert die Idee, es gebe unzählige Paralleluniversen mit jeweils eigenen Naturgesetzen. Doch das Problem ist: Niemand wird je nachprüfen können, ob ein solches Multiversum überhaupt existiert (aus *Spektrum der Wissenschaft* 11/2011).

AUF EINEN BLICK

UNSICHTBARE PARALLELWELTEN

1. Die Idee, es gebe jenseits unseres Weltalls noch **andere Universen**, war bis in die 1990er Jahre allein ein Thema für Sciencefiction-Romane. Doch heute behaupten viele Forscher, außerhalb unseres Kosmos lägen unzählige weitere Welten.
2. All diese **Paralleluniversen**, in denen unter Umständen jeweils eigene physikalische Gesetze herrschen sollen, bilden zusammen das hypothetische **Multiversum**.
3. Allerdings wird eine **astronomische Beobachtung** dieser anderen Universen niemals möglich sein. Bestenfalls sprechen **indirekte Argumente** für das Multiversum – doch selbst wenn es existiert, bleiben grundlegende Naturrätsel ungelöst.

G. F. R. Ellis (✉)

Department of Mathematics and Applied Mathematics, University of Cape Town, Kapstadt, Südafrika

E-Mail: George.ellis@uct.ac.za

Seit einigen Jahren debattieren Kosmologen über eine kühne These: Außer dem expandierenden Universum, das wir wahrnehmen, sollen noch ungezählte weitere Universen existieren. Es gäbe demnach nicht nur einen Kosmos, sondern ein Multiversum. Der amerikanische Physiker Brian Greene bezeichnet diese Vorstellung als „super-kopernikanische Revolution“, da ihr zufolge nicht nur unser Planet einer unter vielen ist, sondern sogar unser gesamtes Universum in kosmischem Maßstab unbedeutend.

Was genau ist das, ein Multiversum? Zunächst einmal hat das Wort mehrere Bedeutungen. Astronomen vermögen bis zu einer Entfernung von rund 42 Mrd. Lichtjahren zu sehen; diese optische Grenze definiert unseren kosmischen Horizont. Es gibt aber keinen Grund, warum das All dort aufhören sollte. Jenseits des Horizonts dürften viele – sogar unendlich viele – Bereiche liegen, die dem für uns sichtbaren Kosmos gleichen. Zwar war die Materie anfänglich in jedem dieser Bereiche anders verteilt, aber in allen gelten dieselben Naturgesetze. Fast alle Experten akzeptieren diesen Typ des Multiversums, den der amerikanische Kosmologe Max Tegmark „Ebene 1“ nennt.

Doch manche Theoretiker gehen weiter. Sie postulieren völlig unterschiedliche Universen mit einer jeweils anderen Physik, mit einer eigenen Geschichte oder gar mit unterschiedlich vielen Raumdimensionen. Die meisten dieser hypothetischen Welten sind lebensfeindlich, doch einige wimmeln von Organismen. Ein Hauptvertreter dieses „Ebene-2“-Multiversums ist der russisch-amerikanische Physiker Alexander Vilenkin. Er entwirft das dramatische Bild einer unendlichen Menge von Universen mit unendlich vielen Personen darin, die Ihren Namen tragen und gerade diesen Artikel lesen.

Derlei Behauptungen sind in vielen Kulturen nichts Neues. Neu ist allein der Anspruch, das Multiversum sei eine wissenschaftliche, also mathematisch strenge und experimentell prüfbare Theorie. Ich bin da skeptisch und glaube nicht, dass die Existenz dieser anderen Universen bewiesen wurde – ja überhaupt beweisbar ist. Indem die Befürworter des Multiversums unseren Begriff von physikalischer Realität ins Unermessliche erweitern, definieren sie stillschweigend die Bedeutung von Wissenschaft neu.

Das astronomische Jenseits

Wenn Astronomen ihre Teleskope auf den Himmel richten, können sie bis zu einer Entfernung von rund 42 Mrd. Lichtjahren sehen. Dieser kosmische Horizont gibt an, wie weit das Licht seit dem Urknall reisen konnte, während sich das Universum zugleich ausdehnte. Unter der plausiblen Annahme, dass der Raum dort nicht einfach aufhört, formulieren die Kosmologen Hypothesen über die Welt jenseits des Horizonts.

- **Das Ebene-1-Multiversum: Plausibel**
Die einfachste Annahme besagt, dass unser Raumvolumen ein repräsentatives Beispiel des Ganzen darstellt. Weit entfernte Außerirdische sehen andere Volumina, die sich aber alle gleichen – abgesehen von zufälligen Unterschieden der Materieverteilung. Insgesamt bilden die sichtbaren und unsichtbaren Gebiete eine einfache Art von Multiversum.
- **Das Ebene-2-Multiversum: Fragwürdig**
Viele Kosmologen gehen weiter und vermuten, dass in genügend großer Entfernung ganz andere Bedingungen herrschen. Unsere Umgebung ist demnach nur eine von vielen Blasen, die in einem ansonsten leeren Hyperraum treiben. In jeder Blase sollen jeweils eigene Naturgesetze gelten. Die anderen Blasen sind prinzipiell nicht direkt beobachtbar. Skeptiker halten die-sen Typ des Multiversums für zweifelhaft.

Über den Horizont hinaus

Die Vertreter eines weiten Multiversumbegriffs machen verschiedene Vorschläge, wie derart viele Universen entstehen könnten und wo sie alle sich aufhalten mögen. Liegen sie weit jenseits unseres Raumgebiets, wie das Modell der chaotischen Inflation von Alan H. Guth und Andrei Linde behauptet? Existieren sie zu unterschiedlichen Zeiten, wie das Modell des zyklischen Universums von Paul J. Steinhardt und Neil Turok vorsieht? Oder existieren sie, wie der britische Physiker David Deutsch behauptet, sogar im selben Raum wie wir, aber in einem anderen Zweig der quantenmechanischen Wellenfunktion? Vielleicht haben sie überhaupt keinen Ort, sondern sind von unserer Raumzeit völlig abgekoppelt, wie Max Tegmark und Dennis Sciama annehmen.

Die am meisten akzeptierte Variante ist die chaotische Inflation, auf die ich mich konzentrieren will, doch gelten meine Anmerkungen im Prinzip auch für die übrigen Vorschläge. Die Idee besagt, dass der Raum insgesamt eine ewig expandierende Leere darstellt, in der Quanteneffekte fortwährend neue Universen hervorbringen. Das Inflationsmodell stammt aus den 1980er Jahren, und Physiker haben es auf Grundlage der Stringtheorie – einer „großen Vereinheitlichung“ der Naturkräfte mit Ausnahme der Gravitation – weiterentwickelt. Gemäß der Stringtheorie können die blasenförmig keimenden Universen ganz unterschiedlich aussehen. Jede Blase beginnt demnach nicht nur mit einer zufälligen Materieverteilung, sondern auch mit einem beliebigen Materietyp. Zum Beispiel enthält unser Universum Elektronen und Quarks, die elektromagnetisch wechselwirken; in anderen Universen könnte es ganz andere Teilchen und Kräfte geben – und somit andere physikalische Gesetze. Die Gesamtmenge der zulässigen lokalen Gesetze wird als Stringlandschaft

bezeichnet. Laut einigen Interpretationen ist diese Landschaft riesig und erlaubt eine enorme Vielfalt von Universen.

Viele Physiker, insbesondere Befürworter der Stringlandschaft, interessieren sich eigentlich nicht besonders für Paralleluniversen. Einwände gegen den Begriff des Multiversums halten sie für unerheblich. Ihre Theorien stehen und fallen mit der inneren Widerspruchsfreiheit und werden, so hoffen sie, letztlich empirisch bestätigt. Das Multiversum betrachten sie nur als theoretischen Rahmen, während ihnen seine Entstehung ziemlich egal ist – anders als den Kosmologen.

Für diese bildet der kosmische Horizont das Grundproblem jeder Art von Multiversum. Weiter als bis zu diesem Horizont können wir nicht sehen – denn die mit Lichtgeschwindigkeit reisenden Signale hatten seit Beginn des expandierenden Universums keine Zeit, uns aus noch größeren Entfernungen zu erreichen. Sämtliche Paralleluniversen liegen jenseits unseres Horizonts und werden auch mit noch so raffinierter Zukunftstechnik für immer unsichtbar bleiben. Sie sind derart weit entfernt, dass sie niemals den geringsten Einfluss auf unser Universum ausüben können. Darum lässt sich keine Aussage über das Multiversum direkt bestätigen.

Die Anhänger der Vielweltenthese meinen, wir könnten aus den innerhalb des Horizonts gewonnenen Daten in groben Zügen folgern, was an Orten geschieht, die 1000, 10^{100} , $10^{1.000.000}$ oder unendlich Mal so weit entfernt liegen wie der kosmische Horizont. Das ist eine gewagte Extrapolation. Vielleicht schließt sich das Universum in sehr großem Maßstab, und es gibt da draußen keine Unendlichkeit. Vielleicht hört die gesamte Materie im Universum irgendwo auf, und danach kommt nur noch leerer Raum. Vielleicht enden Raum und Zeit an einer Singularität, die das Universum begrenzt. Kurzum: Wir wissen einfach nicht, was wirklich der Fall ist, denn wir besitzen über diese Regionen keine Information – und das wird immer so bleiben.

Sieben fragwürdige Argumente

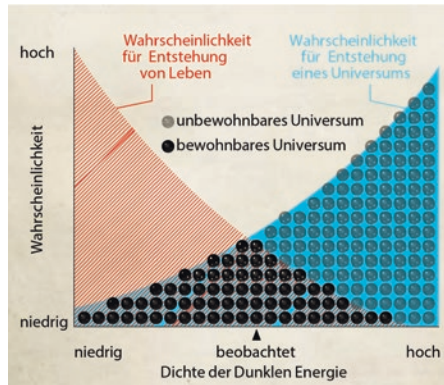
Die meisten Verfechter des Multiversums sind seriöse Wissenschaftler, die sich des Problems völlig bewusst sind; sie meinen aber, wir könnten dennoch fundierte Vermutungen über die Vorgänge dort draußen anstellen. Ihre Argumente lassen sich grob in sieben Klassen einteilen, die samt und sonders problematisch sind.

DER RAUM HAT KEIN ENDE. Kaum jemand bestreitet, dass der Raum sich über unseren kosmischen Horizont hinaus erstreckt und dass jenseits des für uns Sichtbaren viele andere Bereiche liegen. Wenn dieser

eingeschränkte Typ von Multiversum existiert, können wir von dem, was wir sehen, auf Regionen außerhalb des Horizonts schließen, wobei die Ungewissheit mit wachsender Entfernung zunimmt. Man kann sich dann leicht in immer größerer Entfernung kompliziertere Variationen ausmalen – etwa eine andere Physik. Doch das Problem mit dieser Extrapolation vom Bekannten zum Unbekannten ist, dass niemand sie zu widerlegen vermag. Wie können Forscher entscheiden, ob ihr Bild einer unbeobachtbaren Raumzeitregion eine vernünftige oder abstruse Extrapolation darstellt? Haben andere Universen abweichende Anfangsverteilungen der Materie, oder gelten dort andere Werte für fundamentale Naturkonstanten, etwa für die Stärke der Kernkräfte? Beides wäre möglich.

DIE PHYSIK SAGT SEPARATE DOMÄNEN VORAU. Manche vereinheitlichte Theorien enthalten sogenannte Skalarfelder – hypothetische Verwandte des Magnetfelds und anderer raumfüllender Kraftfelder. Sie sollen die kosmische Inflation antreiben und unendlich viele Universen erzeugen. Die Modelle sind theoretisch gut begründet, aber das Wesen der hypothetischen Felder ist unbekannt: Ihre Existenz wurde noch nicht experimentell bestätigt, niemand hat je ihre mutmaßlichen Eigenschaften gemessen. Vor allem haben die Physiker nicht erklärt, warum die Dynamik dieser Felder in verschiedenen Blasenuniversen zu unterschiedlichen Naturgesetzen führen sollte.

DIE THEORIE, DIE UNENDLICH VIELE UNIVERSEN VORAUSSETZT, WIRD DURCH BEOBACHTUNGEN BESTÄTIGT. Die kosmische Hintergrundstrahlung enthüllt, wie das Universum am Ende seiner anfänglichen, heißen Expansionsphase aussah. Aus dem räumlichen Verteilungsmuster der Strahlung geht hervor, dass es wirklich einst eine Periode der Inflation gab. Aber nicht alle Arten von Inflation setzen sich ewig fort und erzeugen unendlich viele Blasenuniversen. Aus den Beobachtungen lässt sich nicht auf einen bestimmten Inflationstyp schließen. Einige Kosmologen wie Paul J. Steinhardt meinen sogar, eine ewige Inflation würde nicht zu den tatsächlich beobachteten Mustern in der Hintergrundstrahlung führen. (siehe „Kosmische Inflation auf dem Prüfstand“ von Paul J. Steinhardt). Andrei Linde und andere widersprechen. Wer hat Recht? Das hängt davon ab, welche Annahmen man über die Physik des inflationären Felds macht.



Passt die Dunkle Energie?: **Als Indiz für das Multiversum** zitieren Befürworter die Dichte der Dunklen Energie, welche gegenwärtig für die beschleunigte Expansion des Universums sorgt. Die ewige Inflation verleiht jedem Paralleluniversum einen zufälligen Dichtewert seiner Dunklen Energie. Nur wenige Universen haben niedrige Werte, die meisten höhere (blaues Gebiet). Doch allzu große Dunkle Energie zerreißt die komplexen Strukturen, die zur Entstehung von Leben nötig sind (rotes Gebiet). Darum sollte in den meisten bewohnbaren Universen eine mittlere Dichte Dunkler Energie herrschen (Spitze des schwarzen Gebiets) – und genau das ist in unserem Universum tatsächlich der Fall. Doch Skeptiker halten dieses Argument für einen Zirkelschluss: Es gilt nur, wenn man von vornherein das Multiversum unterstellt. (Copyright: Jen Christiansen. Mit freundlicher Genehmigung von Scientific American (2011) einer Abteilung von Nature America, Inc. Alle Rechte vorbehalten.)

NATURKONSTANTEN SIND FEIN AUF DIE ENTSTEHUNG VON LEBEN ABGESTIMMT. Unser Universum hat die bemerkenswerte Eigenschaft, dass die physikalischen Konstanten just passende Werte haben, um komplexe Strukturen und insbesondere Leben zu ermöglichen. Wie Steven Weinberg, Martin Rees, Leonard Susskind und andere Theoretiker behaupten, liefert ein exotisches Multiversum eine gute Erklärung für diesen scheinbaren Zufall: Wenn in einer genügend großen Menge von Universen alle möglichen Werte vorkommen, müssen gewiss irgendwo lebensfreundliche Bedingungen herrschen. Dieses Argument wurde unter anderem bemüht, um die Dichte der Dunklen Energie zu erklären, von der man annimmt, dass sie die gegenwärtige Expansion des Universums beschleunigt. Ich gebe zu, dass das Multiversum möglicherweise diese Dichte erklärt. Jedenfalls haben wir derzeit keine bessere wissenschaftliche Erklärung – aber wir werden sie nie durch Beobachtungen überprüfen können. Außerdem unterstellen die meisten einschlägigen Analysen, die physikalischen Grundgleichungen seien überall gleich, nur die Konstanten variierten. Doch wenn man das Multiversum ernst nimmt, muss das nicht so sein.

NATURKONSTANTEN ENTSPRECHEN VORHERSAGEN DES MULTIVERSUMMODELLS.

Dieses Argument verfeinert das vorherige, indem angenommen wird, das Universum sei nur gerade so weit auf die Entstehung von Leben abgestimmt wie unbedingt nötig. Die Befürworter ermitteln die Wahrscheinlichkeit für verschiedene Dichtewerte der Dunklen Energie. Je höher der Wert, desto wahrscheinlicher ist er, aber desto lebensfeindlicher verhält sich das Universum. Der Wert, den wir beobachten, sollte genau an der Grenze zur Unbewohnbarkeit liegen, und anscheinend trifft das in der Tat zu. Der Haken ist nur, dass wir nicht mit Wahrscheinlichkeiten argumentieren dürfen, falls es gar kein Multiversum gibt, auf das der Wahrscheinlichkeitsbegriff anwendbar wäre. Das Argument setzt demnach voraus, was es beweisen will; wenn nur ein Universum existiert, gilt es schlicht nicht. Die Wahrscheinlichkeit ist ein Test für die Widerspruchsfreiheit des Multiversummodells, aber kein Existenzbeweis.

DIE STRINGTHEORIE SAGT EINE VIELFALT VON UNIVERSEN VORAUSS. Die Stringtheorie trat mit dem Anspruch an, alles zu erklären, erweckt aber eher den Anschein, in ihr sei alles möglich. In der gegenwärtigen Form besagt sie, dass viele wesentliche Eigenschaften unseres Universums pure Zufälle sind. Wenn es nur ein Universum gibt, erscheinen diese Eigenschaften unerklärlich. Wie sollen wir beispielsweise verstehen, warum die Physik just so beschaffen ist, dass sie Leben ermöglicht? Doch falls das Universum bloß eines unter vielen ist, ergibt das – nach den oben erwähnten Argumenten – sofort Sinn. Nur ist die Stringtheorie weder empirisch bestätigt noch überhaupt vollständig. Erst wenn experimentell bewiesen wäre, dass sie zutrifft, wären ihre theoretischen Vorhersagen ein legitimes Argument für ein Multiversum. Ein solcher Beweis steht bislang aus.

ALLES, WAS GESCHEHEN KANN, GESCHIEHT TATSÄCHLICH. Um zu erklären, warum die Natur gewissen Gesetzen gehorcht und anderen nicht, haben einige Physiker und Philosophen angenommen, die Natur treffe gar keine Wahl: Alle erdenklichen Gesetze gälten irgendwo. Die Idee wurde teilweise von der Quantenmechanik angeregt, die nach einem denkwürdigen Ausspruch des Theoretikers Murray Gell-Mann besagt, dass alles, was nicht verboten ist, zwangsläufig der Fall ist. Ein Teilchen nimmt alle Wege, die es nehmen kann, und was wir sehen, ist der gewichtete Mittelwert all dieser Möglichkeiten. Vielleicht gilt das Gleiche für das gesamte Universum – und schon landen wir beim Multiversum. Doch Astronomen haben nicht die kleinste Chance, dieses Multiversum von Möglichkeiten zu beobachten. Wir können nicht einmal wissen, von welchen Möglichkeiten die Rede ist. Die Idee ist nur dann sinnvoll, wenn wir ein unbeweisbares Organisationsprinzip voraussetzen, das entscheidet, was erlaubt ist und was nicht – zum Beispiel,

dass alle möglichen mathematischen Strukturen in irgendeiner physikalischen Region verwirklicht sein müssen, wie Tegmark meint. Wir haben aber keine Ahnung, welche Arten von Existenz dieses Prinzip zur Folge hat – außer der Tatsache, dass es notwendigerweise die uns umgebende Welt einschließen muss. Auch können wir die Existenz oder das Wesen eines solchen Organisationsprinzips niemals überprüfen. Die Idee mag attraktiv sein, aber ihr angeblicher Bezug zur Wirklichkeit ist pure Spekulation.

Fehlende Indizien

Obwohl die theoretischen Argumente nicht ausreichen, haben Kosmologen mehrere empirische Tests für Paralleluniversen vorgeschlagen. Die kosmische Hintergrundstrahlung birgt vielleicht Spuren von anderen Blasenuniversen, falls unser Universum einst mit einer anderen Blase kollidiert ist, die aus dem chaotischen Inflationsszenario hervorging. Die Hintergrundstrahlung könnte auch Überbleibsel von Universen enthalten, die vor dem Urknall in einem endlosen Zyklus von Universen existierten. Dies würde uns echte Indizien für andere Universen liefern. Alle Behauptungen, man hätte entsprechende Hinweise gefunden, sind freilich höchst umstritten, und viele der hypothetischen Universen würden keinerlei Spuren hinterlassen. Darum lassen sich nur spezielle Typen von Multiversummodellen auf diese Weise überprüfen.

Ein zweiter Test versucht, winzige Abweichungen einzelner Naturkonstanten aufzuspüren; das würde die Annahme bestätigen, dass die Naturgesetze doch nicht ganz unveränderlich sind. Einige Astronomen behaupten, sie hätten solche Variationen gefunden. Doch den meisten Forschern erscheint die Beweislage zweifelhaft.

Ein dritter Test beruht auf der Raumkrümmung des beobachtbaren Universums: Ist es sphärisch (positiv gekrümmt), hyperbolisch (negativ gekrümmt) oder „flach“ (nicht gekrümmt)? Im Allgemeinen besagen die Multiversumszenarien, das Universum sei nicht sphärisch, denn eine Kugel hat nur ein endliches Volumen. Leider ist dieser Test nicht schlüssig. Jenseits unseres Horizonts könnte das Universum eine andere Form annehmen. Außerdem schließen nicht alle Multiversumtheorien eine sphärische Geometrie aus.

Ein besserer Test ist die Topologie des Universums: Ist es ringförmig geschlossen wie ein Torus oder eine Brezel? Dann wäre es endlich groß; das würde die meisten Versionen der Inflation – insbesondere die chaotische – definitiv widerlegen. Eine solche Gestalt würde wiederkehrende Muster am Himmel erzeugen, etwa riesige Kreise in der kosmischen Hintergrundstrahlung. Astronomen haben vergeblich nach solchen Mustern

gesucht, aber das ist noch kein Grund, einem Multiversum den Vorzug zu geben.

Schließlich könnten die Physiker versuchen, einige der Theorien, die ein Multiversum vorhersagen, zu bestätigen oder zu widerlegen. Vielleicht finden sie empirische Indizien, die gegen die chaotische Inflation sprechen; vielleicht entdecken sie mathematische oder empirische Widersprüche im stringtheoretischen Landschaftsmodell. So etwas würde der Idee des Multiversums einen schweren Schlag versetzen.

Vages Konzept statt definierter Theorie

Alles in allem sind die Argumente für das Multiversum nicht überzeugend. Den Hauptgrund dafür bildet die extreme Schwammigkeit der Idee: Es handelt sich eher um ein vages Konzept als um eine definierte Theorie. Aus dem Mechanismus der ewigen Inflation folgt nicht automatisch, dass in jedem Teil des Multiversums eine andere Physik herrschen muss; dafür soll eine weitere spekulative Theorie herhalten. Zwar lassen sich beide kombinieren, aber das ist nicht zwingend.

Der entscheidende Schritt zur Begründung eines Multiversums ist die Extrapolation vom Bekannten zum Unbekannten, vom Überprüfbaren zum Unprüfbaren. Je nach Wahl der Extrapolation ergeben sich unterschiedliche Resultate. Da Theorien, die mit einem Multiversum operieren, fast alles zu erklären vermögen, kann jede Beobachtung zu irgendeiner Variante der Theorie passen. Die verschiedenen „Beweise“ suggerieren eigentlich, dass wir eine theoretische Erklärung an stelle einer empirischen Prüfung akzeptieren sollen. Doch bisher war Empirie die Grundvoraussetzung jeder wissenschaftlichen Forschung.

Zweifellos ist eine einheitliche Hypothese, die viele Phänomene erklärt, einem Sammelsurium von separaten Ad-hoc-Annahmen vorzuziehen. Dafür wäre man geneigt, sogar die Existenz unbeobachtbarer Paralleluniversen zu akzeptieren. Doch werden im Fall des Multiversums ungeheuer viele – oder gar unendlich viele – unbeobachtbare Gebilde postuliert, nur um ein einziges vorhandenes Universum zu erklären. Das passt schlecht zu der Maxime des englischen Philosophen William von Ockham (1285–1314), dass „Entitäten nicht unnötig vervielfacht werden sollen“.

Schließlich führen die Befürworter des Multiversums ein letztes Argument an: Es gebe keine guten Alternativen. Wissenschaftler fänden den Wildwuchs paralleler Welten vielleicht abstoßend, aber eine bessere Erklärung sei nicht in Sicht. Wer das Multiversum verwerfe, möge gefälligst einen brauchbaren Ersatz vorschlagen. Doch die Suche nach Alternativen hängt davon ab, was wir als Erklärung akzeptieren. Die Physiker hoffen seit

jeher, dass die Gültigkeit der Naturgesetze unvermeidlich ist: Die Dinge sind, wie sie sind, weil sie gar nicht anders sein können. Aber anscheinend lässt sich so etwas nicht beweisen. Vielleicht ist das Universum ein bloßes Zufallsprodukt; es ist nun einmal so geworden, wie es ist. Oder vielleicht sollen die Dinge so und nicht anders sein; ihrer Existenz läge dann ein Zweck oder eine Absicht zugrunde. Das sind aber keine wissenschaftlichen Fragen, sondern metaphysische Spekulationen, die keine physikalische Theorie zu entscheiden vermag – weder für ein einziges Universum noch für ein Multiversum.

Um neue Erkenntnisse zu gewinnen, müssen wir an der Idee festhalten, dass Empirie den Kern der Wissenschaft ausmacht. Ohne eine kausale Verbindung zu den Wesenheiten, die wir vorschlagen, verlieren wir uns in Hirngespinnsten. Diese Verbindung kann durchaus ein wenig indirekt sein. Wenn eine Entität zwar unbeobachtbar, aber absolut notwendig ist für andere, tatsächlich verifizierte Entitäten, kann sie selbst als verifiziert gelten. Aber dann muss das Netzwerk von Erklärungen die Beweislast tragen. Meine kritische Frage an die Befürworter des Multiversums lautet: Könnt ihr beweisen, dass unsichtbare Paralleluniversen nötig sind, um die sichtbare Welt zu erklären? Ist die Verbindung wesentlich und unausweichlich?

Bei aller Skepsis halte ich das Konzept des Multiversums für einen ausgezeichneten Anlass, um über das Wesen der Wissenschaft und den Grund unseres Daseins nachzudenken. Das führt zu neuen, interessanten Erkenntnissen und ist somit ein produktives Forschungsprogramm. Wir sollten den Begriff des Multiversums vorurteilsfrei betrachten, aber nicht voraussetzungslos. Wir begeben uns dabei auf unsicheres Terrain.

Ob Paralleluniversen existieren oder nicht, bleibt unentschieden. Mit dieser Ungewissheit müssen wir leben. Gegen eine philosophische Spekulation auf wissenschaftlicher Grundlage – um nichts anderes handelt es sich beim Multiversum – ist an sich nichts einzuwenden. Nur sollten wir dann das Kind beim Namen nennen.

Weiterführende Literatur

- Carr, B. (Hg.): *Universe or Multiverse?* Cambridge University Press, Cambridge 2009
- Ellis, G. F. R.: *Issues in the Philosophy of Cosmology*. In: Butterfield, J., Earman, J. (Hg.): *Philosophy of Physics*. Elsevier, Amsterdam 2006

Greene, B.: The Hidden Reality: Parallel Universes and the Deep Laws of the Cosmos. Knopf, New York 2011

Kragh, H.: Higher Speculations: Grand Theories and Failed Revolutions in Physics and Cosmology. Oxford University Press, Oxford 2011

George F. R. Ellis ist Kosmologe und emeritierter Mathematikprofessor an der University of Cape Town (Südafrika). Er ist ein führender Experte für Einsteins allgemeine Relativitätstheorie und hat 1975 mit Stephen Hawking das grundlegende Fachbuch „The Large Scale Structure of Space-Time“ veröffentlicht.



Kann die Zeit enden?

George Musser

Ein Ende der Zeit erscheint einerseits unmöglich, andererseits geradezu unvermeidlich. Jüngste physikalische Forschungsansätze deuten auf eine Lösung für dieses Paradoxon (aus *Spektrum der Wissenschaft* 5/2011).

AUF EINEN BLICK

WELTUNTERGANG AUF RATEN

1. Die allgemeine Relativitätstheorie Einsteins sagt voraus, dass die Zeit in sogenannten **Singularitäten** enden kann, beispielsweise im Zentrum eines Schwarzen Lochs oder beim Kollaps des ganzen Universums in einem „**Big Crunch**“. Doch zugleich besagt die Theorie, dass solche Singularitäten unmöglich sind.
2. Einen Ausweg aus diesem Paradoxon bietet die Vorstellung, dass die Zeit nicht abrupt aufhört zu existieren, sondern ihre Eigenschaften **Richtung, Dauer und Kausalität** nach und nach verliert.
3. Eine Physik, die das Ende der Zeit beschreibt, muss ihrerseits auf **Begriffen ohne Zeitbezug** aufbauen.

Es gibt immer ein Danach, sagt uns eine tief verwurzelte Überzeugung. Wir werden zwar sterben, aber die Materie unseres Körpers existiert – in zerstreuter Form – weiter. Selbst wenn in ferner Zukunft die Sonne explodiert,

G. Musser (✉)

Scientific American, New York, USA

wird höchstwahrscheinlich kein Mensch mehr beobachten können, was danach geschieht; aber wir sind sicher, dass danach irgendetwas geschehen wird.

Wird das für immer so sein? Oder könnte es in der fernen Zukunft einen Zeitpunkt geben, nach dem einfach gar nichts mehr kommt? Die moderne Physik liefert gute Gründe dafür, dass die Antwort „Ja“ lautet. Die Zeit selbst könnte enden. Und damit wäre nicht nur jegliches Geschehen zu Ende, sondern auch die Möglichkeit jeglichen Geschehens. Das Ende der Zeit wäre das Ende schlechthin.

Dieses tiefschwarze Bild von der Zukunft ist eine unerwartete Konsequenz aus der allgemeinen Relativitätstheorie Einsteins, auf der unser modernes Verständnis der Gravitation basiert. In der klassischen, vorrelativistischen Physik ist die Zeit so etwas wie ein Trommelschlag, nach dem das ganze Universum marschiert, oder der alles beherrschende Rhythmus, zu dem die Mitglieder einer Jazzband improvisieren: Er ist immer gleich, lässt sich durch nichts beeinflussen und hört vor allem nie auf. Einstein zeigte, dass der Kosmos eher einer großen, polyrhythmischen Jamsession gleicht. Hier läuft die Zeit langsamer, dort schneller, und manche Rhythmen sind so fetzig, dass der Zusammenhang des Universums zerreißt.

Die rhythmische Variabilität der Zeit macht sich bereits bei der alltäglichsten aller Kräfte bemerkbar, der Gravitation. Alle materiellen Körper fallen in Richtung auf einen Ort, an dem die Zeit langsamer vergeht. Und die Zeit beeinflusst nicht nur das Verhalten der Materie, sondern reagiert auch auf sie, gleich Schlagzeugern und Tänzern, die sich gegenseitig in rhythmische Ekstase treiben. Das kann bis zu dem Punkt gehen, in dem die Zeit sich auflöst – wie wenn ein Schlagzeuger vor lauter Erregung Feuer fangen und sich in Rauch auflösen würde.

Solche dramatischen Augenblicke nennen die Physiker Singularitäten. Die Bezeichnung bezieht sich genau genommen nicht nur auf das Ende der Zeit, sondern auf jede Begrenzung, insbesondere ihren Anfang. Die bekannteste Singularität ist der Urknall, jener Moment vor ungefähr 13,7 Mrd. Jahren, an dem unser Universum seinen Anfang nahm – und damit auch die Zeit. Falls das Universum jemals aufhört zu expandieren und sich wieder zusammenzieht, wird es sich schließlich in einer Umkehrung des Urknalls auf einen Punkt verdichten. Bei dieser „großen Zermalmung“ („Big Crunch“ in Analogie zu „Big Bang“, der englischen Bezeichnung für den Urknall) kommt auch die Zeit zum Stillstand.

Was ist paradoxer: Ein Ende der Zeit – oder eine Zeit ohne Ende?

Doch die Zeit muss nicht zwangsläufig überall enden. Gemäß der Relativitätstheorie erlischt sie im Inneren eines Schwarzen Lochs, während sie im Rest des Universums weiterläuft. Schwarze Löcher haben zu Recht einen üblen Ruf als Zerstörer – und übertreffen ihn noch. Wer in ein Schwarzes Loch hineinfällt, wird nicht nur zerfetzt; seine Überreste geraten in eine Singularität im Zentrum des Lochs, und dort endet ihre Existenz. Da steigt nicht nur kein neues Leben aus der Asche, es gibt keine Asche mehr, nicht einmal deren Elementarteilchen, geschweige denn Atome.

Es dauerte mehrere Jahrzehnte, bis die Physiker bereit waren zu akzeptieren, dass aus der Relativitätstheorie ein solch unwiderrufliches Ende folgt. Und bis heute sind sie sich nicht sicher, was sie damit anfangen sollen. Nicht umsonst streben sie so intensiv nach einer großen vereinheitlichten Theorie, die Einsteins Relativitätstheorie mit der Quantenmechanik zu einer Quantentheorie der Gravitation verschmilzt. Denn in einer solchen Theorie würden sich möglicherweise die Singularitäten erübrigen.

Aber Vorsicht: Vielleicht ist das gar kein so erstrebenswertes Ziel. Ein Ende der Zeit ist zwar schwer vorstellbar; aber eine Zeit ohne Ende könnte noch paradoxer sein.

Schon lange vor Einstein hatten Philosophen darüber debattiert, ob die Zeit sterblich sein könnte. Immanuel Kant (1724–1804) befand, dass es sich hierbei um eine „Antinomie“ handle: Es gebe gute Gründe für die eine wie für die andere Antwort, sodass das Nachdenken in einem unauflöselichen Widerspruch endet.

Der antike Denker Aristoteles (384–322 v. Chr.) argumentierte, dass die Zeit weder Anfang noch Ende haben könne. Jeder Augenblick ist zugleich das Ende einer Ära und der Beginn einer neuen; jedes Ereignis ist sowohl Folge von etwas als auch Ursache von etwas anderem. Wie also könnte die Zeit jemals enden? Was sollte das letzte Ereignis der Geschichte daran hindern, ein weiteres Ereignis zu verursachen? Wie sollten wir überhaupt ein Ende der Zeit definieren, wenn schon unser Begriff von „Ende“ die Existenz von Zeit voraussetzt?

„Es ist logisch nicht möglich, dass die Zeit ein Ende hat“, behauptet auch der Philosoph Richard Swinburne von der University of Oxford. Wenn aber die Zeit nicht enden kann, dann muss das Universum ewig fortbestehen – und damit tritt der Begriff des Unendlichen mit all seinen Schwierigkeiten und Paradoxa auf den Plan. Nicht umsonst haben die Wissenschaftler bis in die frühe Neuzeit hinein dem Unendlichen jede reale Existenz abgesprochen.

Mit dem Triumph der Urknalltheorie und der Entdeckung Schwarzer Löcher schien die Frage nach dem Ende der Zeit zunächst erledigt. Das Universum

ist mit Singularitäten durchsetzt, und die Zeit in ihm wird früher oder später zusammenbrechen – irgendwie. Wenn nicht der früher favorisierte „Big Crunch“ stattfindet, darf es auch ein „Big Rip“, „Big Freeze“ oder „Big Brake“ sein; die Kosmologen verfügen da über eine beträchtliche Fantasie (Kasten oben). Wenn wir aber genauer nachfragen, was Singularitäten wirklich sind, ist die Antwort plötzlich weniger klar. „Die Physik der Singularitäten steht zur Disposition“, gesteht Lawrence Sklar von der University of Michigan in Ann Arbor, ein führender Philosoph der Physik.

Ebendie Theorie, die diese Monster hervorgebracht hat, liefert auch gute Gründe für ihre Nichtexistenz. So sagt die Relativitätstheorie aus, dass in der Urknall-Singularität die Materie des ganzen Universums, die Vorläufer aller heute sichtbaren Galaxien eingeschlossen, in einem einzigen Punkt konzentriert war – nicht in einem kleinen Raum von der Ausdehnung eines Stecknadelkopfs, sondern in einem echten mathematischen Punkt mit der Ausdehnung null. Auf einen ebensolchen infinitesimalen Punkt wird ein unglücklicher Astronaut zusammengedrückt, der in ein Schwarzes Loch fällt. In beiden Fällen ist die Massendichte in einem solchen Punkt, zu berechnen als Masse geteilt durch Volumen, unendlich, denn das Volumen ist null. Andere Arten von Singularitäten führen nicht unbedingt auf unendlich große Dichten, aber dafür auf andere Unendlichkeiten.

Die modernen Physiker hegen zwar nicht mehr die gleiche Aversion gegen das Unendliche wie Aristoteles und Kant, aber sie nehmen es doch als ein Indiz dafür, dass sie eine Theorie über ihre Grenzen hinausgetrieben haben. Nehmen wir beispielsweise die in der Schulphysik so beliebte Strahlenoptik. Sie erklärt sehr schön, wie Brillen und Zerrspiegel funktionieren. Aber sie behauptet auch, dass eine ideale Linse das Licht einer fernen Quelle in einem einzigen mathematischen Punkt versammelt; dort müsste dessen Intensität unendlich werden. Tatsächlich sammelt sich das Licht nicht in einem Brennpunkt, sondern in einem Brennfleck endlicher Größe. Deswegen ist die Lichtintensität dort zwar hoch, aber niemals unendlich. Die Strahlenoptik liefert ein falsches Ergebnis, weil sie die Wellennatur des Lichts außer Acht lässt.

Nach einem gleichartigen Argumentationsmuster vermuten fast alle Physiker, dass die Massendichte in einer kosmischen Singularität zwar hoch, aber endlich ist. Die Relativitätstheorie liefert ein falsches Ergebnis, weil sie eine wichtige Eigenschaft der Materie oder der Gravitation nicht richtig erfasst, die in der Nähe von Singularitäten zum Tragen kommt und die Dichte endlich hält. „Die meisten Leute würden Singularitäten für ein Zeichen halten, dass die Theorie hier zusammenbricht“, so der Physiker James B. Hartle von der University of California in Santa Barbara.

Das perfekt glatte Baby-Universum

Die Singularitäten der Strahlenoptik wurden durch eine umfassendere Theorie des Lichts erledigt, nämlich die Quantenmechanik. Nach der Theorie, die Entsprechendes für die Singularitäten der Relativitätstheorie leistet, wird noch gesucht. Die Physiker gehen davon aus, dass es eine Quantentheorie der Gravitation sein wird. Insbesondere wird sie der Materie – wie die gewöhnliche Quantentheorie dem Licht – wellenartige Eigenschaften zuschreiben. Auf diese Weise würde die Singularität zu einem endlichen Maximum „verschmiert“, wodurch sich eine Division durch null erübrigt. Dann muss auch die Zeit nicht enden.

Damit ist die Frage nach dem Schicksal der Zeit wieder offen, und beide denkbaren Antworten finden ihre Verfechter unter den Physikern. Einige glauben in der Tat, dass die Zeit enden wird. Allerdings sind sie dann genötigt, gleich eine neue Physik zu erfinden. Denn die bekannten Gesetze der Physik setzen die Zeit voraus; sie sagen aus, wie die Dinge sich im Lauf der Zeit bewegen und entwickeln. Endpunkte der Zeit liegen außerhalb der Grenzen dieser Beschreibung. Zu ihrer Erfassung wäre also nicht einfach ein neues Bewegungsgesetz erforderlich, sondern ein physikalisches Gesetz ganz neuer Art, das zeitbezogene Begriffe wie Geschwindigkeit und Beschleunigung meidet und zeitlose an deren Stelle setzt.

Ein solcher Begriff ist bemerkenswerterweise die geometrische Eleganz. Vor wenigen Jahren präsentierte Brett McInnes von der National University of Singapore eine Lösung auf Basis der Stringtheorie, eines der führenden Kandidaten für eine Quantentheorie der Gravitation. Demnach hatte unser Universum im Urzustand die Form eines Torus (eines Fahrradschlauchs oder Donuts). Dieser Torus musste vollkommen gleichförmig und glatt sein; nur unter dieser Bedingung konnte das Universum im Wortsinn aus dem Nichts entstehen. Das gilt jedenfalls, wenn man über die Geometrie der Raumzeit einige gewöhnungsbedürftige, aber begründbare Annahmen macht.

Beim Untergang des Universums oder in einem Schwarzen Loch gilt diese geometrische Forderung nicht: Geboren werden muss das Universum in perfekter Glätte, sterben darf es beliebig runzlig. Diese Eigenschaft kommt den Theoretikern sehr zupass, erklärt sie doch die Asymmetrie des Zeitpfeils. Die klassischen physikalischen Gesetze sind symmetrisch in der Zeit, das heißt, sie gelten gleichermaßen vorwärts wie rückwärts, wir aber beobachten gewisse Prozesse wesentlich häufiger als ihre zeitliche Umkehrung: Wer hat schon einmal ein zerbrochenes Ei sich von allein wieder zusammenfügen gesehen? Die Zunahme der Entropie („Unordnung“) unterscheidet für uns die Zukunft von der Vergangenheit. Wenn man plausibel begründen kann, warum der Zustand des Universums in der fernen Vergangenheit extrem

geordnet (entropiearm) war, hat man einen guten Grund für eine wesentliche Eigenschaft der Zeit gefunden – dass die Zukunft etwas ganz anderes ist als die Vergangenheit.

Andere Quantengravitationsforscher glauben dagegen, dass sich die Zeit in alle Ewigkeit erstreckt, also weder Anfang noch Ende hat. Ihrer Ansicht nach war der Urknall lediglich ein dramatischer Übergang im ewigen Leben des Universums. Vielleicht ist das Vor-Urknall-Universum in einem Big Crunch kollabiert und begann dann wieder zu expandieren, als die Dichte zu hoch wurde, wie ein Flummiball, der vom harten Boden kurzzeitig komprimiert wird und dann wieder hochspringt. Die Kosmologen sprechen hier vom Big Bounce, dem großen Rückprall. Spuren der kosmischen Vorgeschichte könnten sogar heute noch bemerkbar sein (Spektrum der Wissenschaft 5/2009, S. 26). Ganz ähnlich lässt sich argumentieren, dass der singuläre Fleck im Herzen eines Schwarzen Lochs kocht und blubbert wie ein miniaturisierter Stern. Wer in ein Schwarzes Loch fällt, erleidet zwar nach wie vor einen schmerzhaften Tod, aber für die Überreste seines Körpers endet die Zeit nicht. Vielmehr plumpsen diese in den singulären Fleck hinein und hinterlassen eine Spur, die künftige Generationen in dem schwachen Glimmen des Schwarzen Lochs ausmachen können.

Wer annimmt, dass die Zeit ewig weitergeht, muss zwar keine neue Physik erfinden, hat dafür aber andere Probleme. So nimmt die Ordnung im Universum im Verlauf der Zeit immer weiter ab. Wenn es also seit ewiger Zeit besteht, wieso ist im heutigen Kosmos die Entropie nicht schon längst unendlich? Und wie kann das Licht, das angeblich von den Dingen kündigt, die in ein Schwarzes Loch gefallen sind, dessen Schwerkraft überwinden?

Tod auf Raten

Insgesamt geht es den Physikern mit ihren Antinomien also nicht besser als den Philosophen. Ein Pionier der Quantengravitation, der 2008 verstorbene John Archibald Wheeler, schrieb dazu: „Einsteins Gleichungen sagen: ‚Dies ist das Ende‘, und die Physik sagt: ‚Es gibt kein Ende‘.“ Angesichts dieses Dilemmas zucken manche Leute mit den Achseln und ziehen den Schluss, dass die Wissenschaft niemals entscheiden kann, ob die Zeit ein Ende hat oder nicht. Für sie sind die Grenzen der Zeit zugleich die Grenzen der Vernunft und der Empirie. Andere sind davon überzeugt, das Rätsel erfordere lediglich einige neue Ideen. „Das Problem liegt nicht außerhalb der Reichweite der Physik“, erklärt der Physiker Gary Horowitz von der University of California in Santa Barbara. „Die Quantengravitation sollte in der Lage sein, uns eine definitive Antwort zu liefern.“

Die moderne Intensivmedizin hat uns vor Augen geführt, dass der Übergang vom Leben zum Tod nicht unbedingt plötzlich, sondern sehr allmählich stattfinden kann. Viele Physiker und Philosophen versuchen das Ende der Zeit analog zum Ende des menschlichen Lebens zu begreifen. Leben ist ein emergentes Phänomen, das aus leblosen Molekülen entsteht, die sich selbst organisieren. Entsprechend könnte die Zeit ein emergentes Phänomen sein, das aus elementaren zeitlosen Bestandteilen entsteht, die sich selbst in eine Ordnung bringen (Spektrum der Wissenschaft 10/2010, S. 32). Eine Welt mit Zeit ist hochgradig strukturiert. Die Zeit sagt uns, wann, wie lange und in welcher Reihenfolge Ereignisse stattfinden. Vielleicht wurde diese Struktur dem Universum nicht von außen aufgezwungen, sondern entstand von innen.

Verlust von Richtung und Dauer

Alles, was entstehen kann, kann auch wieder vergehen. Wenn die Struktur zerfällt, endet die von ihr erzeugte Zeit. So gesehen ist ein Ende der Zeit kein größeres Paradoxon als der Zerfall jedes anderen komplexen Systems. Wie der menschliche Tod ist es kein Ereignis, sondern ein Prozess. Stück für Stück verliert die Zeit ihre Eigenschaften und taucht ein in die Dämmerung zwischen Existenz und Nichtexistenz.

Als Erstes könnte die eindeutige Richtung der Zeit verschwinden, der Zeitpfeil, der von der Vergangenheit in die Zukunft weist. Seit Mitte des 19. Jahrhunderts wissen die Physiker, dass diese Gerichtetheit nicht eine Eigenschaft der Zeit selbst ist, sondern der Materie. Dass sich für uns die Zukunft so augenfällig von der Vergangenheit unterscheidet, liegt an der Zunahme der Entropie. Wenn das so weitergeht, strebt das Universum in ferner Zukunft dem „Wärmetod“ zu – einem Gleichgewichtszustand, in dem es nicht mehr unordentlicher werden kann. Einzelne Teilchen werden sich zwar noch bewegen, aber das wird sich ausmitteln: Das Universum als Ganzes verändert sich nicht mehr. Was auch immer dann noch die Rolle einer Uhr spielen könnte, wird mit gleicher Wahrscheinlichkeit vorwärts wie rückwärts laufen, Zukunft und Vergangenheit werden nicht länger voneinander zu unterscheiden sein (Spektrum der Wissenschaft 8/2008, S. 26).

Einige Physiker spekulieren, dass sich der Pfeil der Zeit irgendwann umkehren könnte, das Universum also langsam wieder ordentlicher würde. Doch für sterbliche Wesen, deren Existenz von einem vorwärts gerichteten Zeitpfeil abhängt, würde eine solche Umkehr ebenso ein Ende der Zeit bedeuten wie der Wärmetod.

Neuere Forschungen deuten darauf hin, dass die Richtung nicht die einzige Eigenschaft ist, die der Zeit bei ihrem langsamen Tod abhandenkommt.

Ähnliches könnte der Dauer widerfahren. Die Zeit, wie wir sie kennen, lässt sich in Einheiten messen: Sekunden, Tage, Jahre. Wäre dem nicht so, könnten wir zwar noch sagen, welches von zwei Ereignissen dem anderen vorausgeht, aber nicht mehr, wie lange sie andauern. Ein solches Szenario präsentiert Roger Penrose, Physiker an der University of Oxford, in seinem neuen Buch „Zyklen der Zeit“.

In seinem ganzen wissenschaftlichen Leben hat sich Penrose immer wieder mit dem Thema „Zeit“ auseinandergesetzt. Gemeinsam mit Stephen Hawking von der University of Cambridge zeigte er in den 1960er Jahren, dass Singularitäten nicht nur unter speziellen Bedingungen, sondern nahezu überall auftreten sollten. Außerdem behauptete er, dass Materie, die in ein Schwarzes Loch fällt, nicht weiterexistiert und dass die Zeit in einer wahrhaft grundlegenden Theorie der Physik keinen Platz hat.

Seinen jüngsten Anschlag auf die Zeit beginnt Penrose mit einer elementaren Beobachtung über das frühe Universum. Er vergleicht die Situation mit einer Kiste voller Legosteine, die auf dem Fußboden ausgeschüttet und noch nicht zu irgendetwas zusammengesetzt wurden – ein Mischmasch aus Quarks, Elektronen und anderen Elementarteilchen. Daraus mussten sich Schritt für Schritt und ganz von selbst Strukturen wie Atome, Moleküle, Sterne und Galaxien bilden. Der erste Schritt war die Entstehung von Protonen und Neutronen, die jeweils aus drei Quarks bestehen und etwa ein Femtometer (10^{-15} m) groß sind. Diese Teilchen bildeten sich etwa zehn Mikrosekunden nach dem großen Knall (oder dem großen Rückprall oder welchem großen Ereignis auch immer).

Vor diesem Zeitpunkt gab es nichts, was aus mehreren Teilchen zusammengesetzt war, und damit insbesondere nichts, was die Funktion einer Uhr hätte haben können. Jede Uhr, das heißt jedes physikalische System, das die Zeit in gleiche Abschnitte teilt, benötigt zum Funktionieren einen räumlichen Abstand: die Länge eines Pendels, den Abstand zwischen zwei Spiegeln oder wenigstens die Größe eines Orbitals in einem Atom. Nichts dergleichen gab es. Teilchen konnten sich vorübergehend zu Klumpen zusammenballen, aber die konnten die Zeit nicht messen, da sie keine feste Größe hatten. Quarks und Elektronen allein sind als Grundlage für Uhren ebenfalls ungeeignet, da sie überhaupt keine Größe haben: Sie erscheinen stets punktförmig, einerlei wie dicht ihnen die Teilchenphysiker auf den Leib rücken. Ihre einzige größenartige Eigenschaft ist ihre sogenannte Compton-Wellenlänge. Dieser für Quanteneffekte wesentliche Wert ist umgekehrt proportional zur Masse, und selbst er war bis etwa zehn Pikosekunden nach dem Urknall nicht definiert, denn erst dann setzte der Prozess ein, der die Teilchen mit Masse versehen hat.

„Wenn es keinerlei Uhren gibt“, sagt Penrose, „merken die Dinge auch nicht, wie die Zeit vergeht.“ Ohne irgendeine Struktur, die das Vergehen der Zeit im Prinzip bemerkbar machen könnte, konnte es für die Teilchen in der „kosmischen Ursuppe“ keinen Unterschied machen, ob eine Attosekunde oder eine Femtosekunde (10^{-18} oder 10^{-15} s) vergangen war.

Penrose behauptet, diese Situation beschreibe nicht nur den Anfang, sondern auch das Ende der Zeit. Lange nachdem alle Sterne vergangen sind, wird das Universum zu einem düsteren Eintopf aus Schwarzen Löchern und einzelnen Teilchen. Doch selbst die Schwarzen Löcher zerfallen irgendwann, zurück bleiben nur noch Teilchen. Die meisten von ihnen werden masselos sein, zum Beispiel Photonen, und damit wieder ungeeignet zum Bau von Uhren. Auch in den alternativen Untergangsszenarien wie dem Big Crunch sieht es für Uhren schlecht aus.

Man könnte einwenden, ein Begriff wie Dauer bleibe selbst dann sinnvoll, wenn es kein Mittel mehr gibt, diese Größe zu messen. Doch Physiker haben die Angewohnheit, die Existenz einer Größe, die sich nicht einmal im Prinzip messen lässt, grundsätzlich in Frage zu stellen – so geschehen beim absoluten Raum, welcher der Relativitätstheorie mangels Messbarkeit nicht standhielt. Entsprechend wäre die Unmöglichkeit, eine Uhr zu bauen, für die Forscher ein Zeichen dafür, dass die Zeit eine ihrer definierenden Eigenschaften verloren hat. „Wenn Zeit das ist, was eine Uhr misst, und es gibt keine Uhren, dann gibt es auch keine Zeit“, sagt der Physikphilosoph Henrik Zinkernagel von der Universidad de Granada (Spanien), der sich ebenfalls mit dem Fehlen der Zeit im frühen Kosmos auseinandergesetzt hat.

Trotz seiner Eleganz hat das Szenario von Penrose Schwächen. Nicht alle Teilchen in der fernen Zukunft sind masselos. Zumindest einige Elektronen werden überleben, und das genügt für eine Uhr. Penrose spekuliert, dass die Elektronen irgendwie ihre Masse verlieren werden, aber er gibt selbst zu, dass er sich damit auf unsicherem Boden bewegt: „Das ist eine der unbequemerer Seiten dieser Theorie.“ Und außerdem: Wenn das frühe Universum keinen Längenmaßstab hatte, was soll es dann heißen, dass es expandierte, sich ausdünnte und abkühlte?

Wenn Penrose jedoch auf dem richtigen Weg sein sollte, hätte das bemerkenswerte Konsequenzen. Obwohl das dicht gepackte frühe Universum und der immer leerer werdende Kosmos der fernen Zukunft so gegensätzlich wie nur möglich scheinen, leiden sie doch in gleicher Weise unter der Abwesenheit von Uhren und anderen Maßstäben. „Der Urknall ähnelt der fernen Zukunft“, so Penrose. Kühn äußert er die Vermutung, dass beide tatsächlich ein und dieselbe Phase eines großen kosmischen Zyklus sein könnten – daher auch der Titel seines neuen Buchs „Zyklen der Zeit“.

Wenn die Zeit endet, läuft sie gewissermaßen zum Anfang zurück, und es gibt einen neuen Urknall. So könnte Penrose, der einen großen Teil seines wissenschaftlichen Lebens mit dem Studium der Singularitäten verbracht hat, die der Zeit ein Ende machen, einen Weg gefunden haben, wie sie dennoch weitergeht. Der Henker der Zeit ist zugleich ihr Retter.

Zeit wird zu Raum

Selbst wenn der Begriff der Dauer bedeutungslos wird und der Unterschied zwischen Femto- und Attosekunden verschwimmt, ist die Zeit noch nicht völlig tot. Sie bestimmt immer noch die Reihenfolge von Ursache und Wirkung. In dieser Hinsicht unterscheidet sie sich vom Raum, welcher der Anordnung der Gegenstände in ihm kaum Beschränkungen auferlegt. Zwei in der Zeit benachbarte Ereignisse – ich tippe auf meine Tastatur, und ein Buchstabe erscheint auf dem Bildschirm – sind unauflöslich miteinander verknüpft. Zwei im Raum benachbarte Gegenstände – die Tastatur und ein Klebezettel darauf – müssen nichts miteinander zu tun haben. Räumliche Beziehungen haben einfach nicht die gleiche Zwangsläufigkeit wie zeitliche.

Doch unter bestimmten Bedingungen könnte die Zeit selbst diese elementare Ordnungseigenschaft verlieren und dadurch zu einer weiteren räumlichen Dimension werden. Diese Idee kam erstmals in den 1980er Jahren auf, als Hawking und sein amerikanischer Fachkollege James B. Hartle versuchten, den Urknall als den Moment zu erklären, in dem Raum und Zeit begannen, sich voneinander zu unterscheiden. Vor drei Jahren haben Marc Mars von der Universidad de Salamanca sowie José M. M. Senovilla und Raúl Vera von der Universität des Baskenlands in Bilbao (beide Spanien) eine ähnliche Idee auf das Ende der Zeit angewandt.

Die drei Forscher ließen sich von der Stringtheorie inspirieren, nach der unsere vierdimensionale Raumzeit nur ein sehr „dünner“ Teil eines viel höherdimensionalen Raums ist – eine „Membran“, die in diesem sehr geräumigen Umfeld treibt wie ein Blatt im Wind. Nacheinander hat die Stringtheorie viele Varianten solcher Membranen entwickelt; seit eine von ihnen abgekürzt „M-Brane“ genannt wurde, heißen alle derartigen Membranen nur noch „Branen“ (branes). Wir sind auf unserer Bran gefangen wie eine Raupe, die sich an das Blatt klammert. Gewöhnlich können wir uns frei in unserem vierdimensionalen Gefängnis bewegen. Doch wenn die Bran sich heftig genug windet, dann können wir uns nur noch festklammern, aber nicht mehr bewegen. Genauer gesagt, müssten wir schneller als das Licht sein, um unseren Ort auf der Bran zu verändern, aber das ist unmöglich. Da alle Prozesse irgendeine Art von Bewegung erfordern, kommt alles zum Stillstand.

Die Weltlinie eines Gegenstands auf der Bran, das ist die Menge aller Punkte in der Raumzeit, in denen der Gegenstand sich befindet, endet in diesem Fall nicht – von außen betrachtet. Sie wird lediglich von einer zeitartigen zu einer raumartigen Linie verbogen. Die Bran ist immer noch vierdimensional, aber alle vier Dimensionen sind räumlich. Mars beschreibt es so: „Alle Gegenstände werden von der Bran dazu gezwungen, sich mit Geschwindigkeiten zu bewegen, die sich immer mehr der Lichtgeschwindigkeit annähern. Schließlich werden ihre Trajektorien so stark deformiert, dass sie sich tatsächlich mit Überlichtgeschwindigkeit bewegen und für sie keine Zeit mehr existiert. Ein wichtiger Punkt dabei ist, dass sie selbst nichts von alledem bemerken.“

Da auch alle unsere Uhren langsamer werden und schließlich stehen bleiben, hätten wir keine Möglichkeit festzustellen, dass die Zeit sich in Raum verwandelt. Wir würden lediglich bemerken, dass ferne Objekte wie etwa Galaxien sich immer schneller bewegen. Es ist geradezu unheimlich: Genau das beobachten die Astronomen tatsächlich – und pflegen es einer unbekannten Art von Dunkler Energie zuzuschreiben. Könnte es vielmehr der Schwanengesang der Zeit sein?

Modell Hologramm

Doch selbst wenn es weder Dauer noch Kausalität gibt, kann man die Ereignisse noch in eine Reihenfolge bringen. Auf welche Weise wird die Zeit auch diese letzte Eigenschaft verlieren? Mehrere Gruppen von Stringtheoretikern haben unlängst diese Frage einer Antwort nähergebracht. Emil J. Martinec und Savdeep S. Sethi von der University of Chicago, Daniel Robbins von der Texas A&M University, der oben genannte Gary Horowitz, Eva Silverstein von der Stanford University und Albion Lawrence von der Brandeis University in Waltham (Massachusetts) haben mit dem holografischen Prinzip, einer mächtigen Idee der Stringtheorie, untersucht, was mit der Zeit in den Singularitäten Schwarzer Löcher geschieht.

Ein Hologramm ist ein flaches Bild, das seinen Betrachter glauben macht, vor dem Bild selbst schwebt ein dreidimensionaler Gegenstand im Raum. Das holografische Prinzip besagt, dass unser ganzes Universum einer holografischen Projektion ähnelt (Spektrum der Wissenschaft 11/2003, S. 34). Ein komplexes System wechselwirkender Quantenteilchen kann die Wahrnehmung von Tiefe erzeugen, also eine räumliche Dimension, die in diesem System gar nicht vorhanden ist.

Allerdings ist nicht jede zweidimensionale Struktur ein Hologramm; sie muss das richtige Muster tragen. Zerkratzt man ein Hologramm, so geht die räumliche Illusion verloren. Entsprechend erzeugt nicht jedes Teilchensystem

ein Universum wie das unsere, vielmehr muss es dafür mit einem bestimmten Muster ausgestattet sein. Nehmen wir nun an, in einem ursprünglich ungeordneten System bilden sich die erforderlichen Regelmäßigkeiten aus. Dann entsteht in diesem Moment die dritte Dimension – und verschwindet wieder, sowie sich die zugehörige Ordnung auflöst.

Das Schmelzen der dritten Dimension

Was passiert nun, wenn ein Stern zu einem Schwarzen Loch kollabiert? Wir nehmen ihn als dreidimensional wahr, aber „in Wirklichkeit“ ist er nur ein bestimmtes Muster in einem zweidimensionalen Teilchensystem. Während seine Masse zunimmt, gerät dieses zweidimensionale System in zunehmend heftigere Bewegung. Schließlich bricht seine Ordnung zusammen – das ist der Moment, in dem die Singularität entsteht. So wie die Wassermoleküle eines Eiswürfels beim Schmelzen von einer regelmäßigen kristallinen Anordnung in die chaotischen Verhältnisse einer Flüssigkeit übergehen, schmilzt die dritte Dimension gewissermaßen dahin.

Genauso ergeht es auch der Zeit. Wenn man in ein Schwarzes Loch hineinfällt, hängt die von einer mitfallenden Uhr angezeigte Zeit vom Abstand zum Zentrum des Schwarzen Lochs ab. Dieser Abstand aber schmilzt mitsamt der dritten Dimension, in der er definiert ist, hinweg, und mit ihm auch die Zeit. Es lässt sich weder festlegen, zu welchem genauen Zeitpunkt ein Ereignis geschieht, noch an welchem genauen Ort ein Objekt sich aufhält. „Der konventionelle geometrische Begriff von der Raumzeit geht verloren“, sagt Martinec.

Damit geben Raum und Zeit der Welt keine Struktur mehr. Versucht man, die Position eines Dings zu messen, findet man es an mehreren Orten gleichzeitig. Räumlicher Abstand hat keine Bedeutung mehr, Dinge bewegen sich von einem Ort zum anderen, ohne den Raum dazwischen zu durchqueren. Genau dadurch kann auch die Spur eines unglücklichen Astronauten, der in das Schwarze Loch gefallen ist, dieses wieder verlassen. „Wenn es nahe einer Singularität weder Raum noch Zeit gibt, ist auch der Ereignishorizont nicht mehr wohldefiniert“, so Horowitz.

Damit stellt sich die Stringtheorie nicht nur als eine Art Reparaturpaste dar, mit der man die hässlichen Singularitäten zuschmiert, ohne dabei den Rest des Universums nennenswert zu verändern. Vielmehr untergräbt sie die Begriffe von Raum und Zeit, mit Auswirkungen, die weit über jede Singularität hinausreichen. Natürlich benötigt die Theorie immer noch so etwas wie eine Zeit in dem Teilchensystem, dessen holografisches Bild das Universum sein soll. Zwar arbeiten die Wissenschaftler bereits an einer Dynamik, die völlig ohne Zeit auskommt. Aber noch ist die Zeit so tief

in der Physik verankert, dass die Wissenschaftler sich bislang ihr totales Verschwinden kaum vorstellen können.

Die Wissenschaft erschließt uns das Unbegreifliche, indem sie es in handliche Stücke zerlegt und damit zeigt, dass auch die größte Reise letztlich aus kleinen Schritten besteht. So ist es auch mit dem Ende der Zeit. Und während wir darüber nachdenken, lernen wir auch unsere eigene Stellung im Kosmos neu einzuschätzen.

Die Eigenschaften, die die Zeit Schritt für Schritt verliert, sind nämlich sämtlich Voraussetzungen für unsere Existenz. Wir brauchen die Richtung der Zeit, um uns selbst zu entwickeln; wir benötigen Dauer und Maßeinheit, um komplexe Strukturen bilden zu können; wir brauchen eine kausale Ordnung, damit Ereignisse mit Ursache und Wirkung stattfinden können, und wir brauchen räumliche Abstände, damit unsere Körper kleine Bereiche der Ordnung in der Welt erschaffen können. Wenn auch nur eine dieser Eigenschaften dahinschmilzt, ist das mit unserem Überleben unvereinbar. Ein Ende der Zeit können wir uns vielleicht vorstellen, aber niemals selbst erleben – ebenso wenig, wie wir im Moment unseres Todes bei vollem Bewusstsein sein können.

Weiterführende Literatur

Mars, M. et al.: Is the Accelerated Expansion Evidence of a Forthcoming Change of Signature on the Brane? In: Physical Review D 77, S. 027501, 2008. Online unter <http://arxiv.org/abs/0710.0820>

Martinec, E. J. et al.: Toward the End of Time. In: Journal of High Energy Physics 8/2006, Artikelnummer 025. Online unter <http://arxiv.org/abs/hep-th/0603104>

Penrose, R.: Zyklen der Zeit. Eine neue ungewöhnliche Sicht des Universums. Erscheint im Mai 2011 bei Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg

Weblinks

www.math.nus.edu.sg/~matmcinn/ Website von Brett McInnes, mit ausführlicher Erläuterung seines Modells vom torusförmigen Uruniversum

<http://xxx.unizar.es/abs/0805.1947v1> Svend Erik Rugh, Henrik Zinkernagel: On the Physical Basis of Cosmic Time. Studies in History and Philosophy of Modern Physics 40, S. 1–19, 2009

George Musser ist Redakteur bei „Scientific American“.

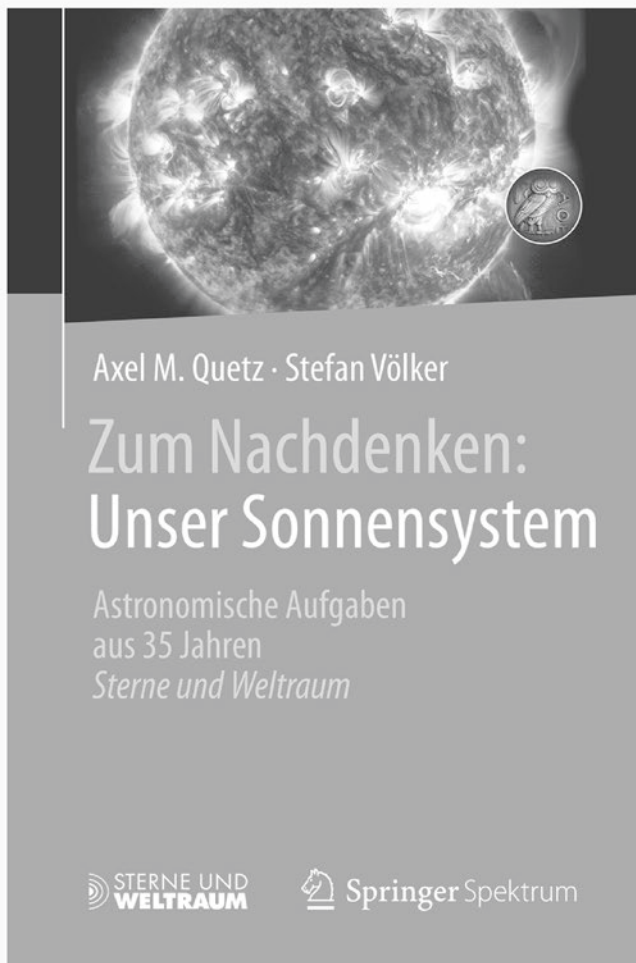
Erweitern Sie Ihren Horizont.
Und zwar ins Unendliche.



ROST-90 / GETTY IMAGES / ISTOCK

In **Sterne und Weltraum** erfahren Sie monatlich
alles über Astronomie & Weltraumforschung!

www.sterne-und-weltraum.de



Jetzt im Springer-Shop bestellen:
springer.com/978-3-662-55147-9

