

Der Taktgeber des Urknalls

Es ist die Frage aller wissenschaftlichen Fragen: Wie ist das Universum entstanden? **Jean-Luc Lehnert** vom **Max-Planck-Institut für Gravitationsphysik** in Potsdam-Golm geht sie mit modernsten mathematischen Werkzeugen an und untersucht dabei auch die Möglichkeit, dass es ein Vorläuferuniversum gab.

TEXT **THOMAS BÜHRKE**

Aller Anfang war der Urknall. Diese Grundlage unseres kosmischen Weltbildes ist ebenso fundamental wie unbegreiflich. Wie soll es möglich gewesen sein, dass die enorme Menge an Materie – alle Sterne, Planeten, Gas- und Staubwolken – in einem Punkt zusammengepresst war? Der plötzlich explodierte, wobei Raum und Zeit entstanden sind? Ein unvorstellbares Szenario.

Angesichts dessen beruhigt es direkt ein wenig, wenn selbst ein ausgemachter Fachmann wie Jean-Luc Lehnert vom Max-Planck-Institut für Gravitationsphysik (Albert-Einstein-Institut) die Geburt des Universums „äußerst rätselhaft“ findet. Aber genau das ist der Grund, weshalb er sich seit vielen Jahren damit beschäftigt. „Mich hat schon immer die Frage fasziniert, woher alles kommt“, sagt Lehnert, dessen mit Papier bedeckter Schreibtisch aussieht, als hätte dort kürzlich ein Mini-Urknall stattgefunden ...

Die Indizienlage in Sachen Urknall ist klar. In den 1920er-Jahren entdeckten Georges Lemaître und Edwin Hubble die Expansion des Universums: Sie

zeigt sich in der Tatsache, dass nahezu alle Galaxien von uns fortstreben – je weiter eine Galaxie entfernt ist, desto schneller bewegt sie sich. Kosmologen deuteten diese Galaxienflucht im Rahmen von Einsteins allgemeiner Relativitätstheorie. Demnach dehnt sich das Universum, also der Raum, aus, und die Galaxien entfernen sich voneinander – ähnlich wie Rosinen in einem aufquellenden Hefeteig.

ES BLIEB KEINE ZEIT, UM INFORMATION AUSZUTAUSCHEN

Der belgische Mathematiker und Abt Lemaître kehrte die Expansion in Gedanken um und postulierte 1927 die „Geburt des Universums aus einem Uratom“. Einfach und logisch. „Wir wissen aber schon länger, dass es so einfach nicht gewesen sein kann“, sagt Lehnert. „Der Urknall hat vielmehr an vielen Orten gleichzeitig stattgefunden.“ Das macht die Vorstellung nicht eben einfacher, Lehnert kann es aber erklären.

Wenn man mit den Einstein-Gleichungen den Beginn des sich ausdehnenden Babyuniversums berechnet, dann stellt man fest, dass viele Bereiche

nicht in kausalem Kontakt gestanden haben können. Es blieb nicht genug Zeit, um zwischen diesen Bereichen Information auszutauschen, was grundsätzlich nur maximal mit Lichtgeschwindigkeit möglich ist. Dennoch ist das Universum erstaunlich homogen gewesen.

Das beweist die älteste Kunde aus dem jungen All, die wir im Bereich der Mikrowellen auffangen können: die kosmische Hintergrundstrahlung. Sie spiegelt Temperatur und Dichte des Ur-gases 380000 Jahre nach dem Urknall wider. Sichtbare Abweichungen von einem Mittelwert erreichen nur etwa ein hundertstel Promille. Wie aber konnte das Universum so gleichförmig sein, wenn viele Bereiche keinen Kontakt miteinander hatten? Jean-Luc Lehnert identifiziert jede dieser Regionen mit einem Urknall – der Entstehung von Raum und Zeit aus einer Quantenfluktuation. Bleibt die Frage: Was koordinierte diese „Urknalle“?

Bei einem Vortrag auf einer Falling-Walls-Konferenz hat Lehnert das Problem im Auditorium veranschaulicht. Zehn Zuschauer fanden unter ihrem Sitz ein kleines Becken und einen Stab. Nun forderte Lehnert einen von ihnen



Im Anfang war der Urknall: Das Universum ist nach den Theorien der Kosmologen aus einem Punkt entsprungen. Doch diese Singularität ist selbst für Fachleute äußerst rätselhaft.

» Die Theorie vom inflationären Universum besagt, dass es vor dem Urknall einen Zustand gab, in dem alle Teile miteinander in Kontakt standen.

auf, damit einen Klang zu erzeugen. Der Gong stand bildhaft für einen Urknall. Anschließend sollten die anderen neun Zuschauer gleichzeitig gegen das Becken schlagen. Präzise funktionierte das nur, wenn Lehnerts den Takt angab. Wer aber war der Taktgeber des Urknalls?

Es gibt hierfür zwei Vorschläge. Der bekannteste ist die bereits vor mehr als 30 Jahren entwickelte Theorie vom inflationären Universum. Sie besagt, dass

es vor dem Urknall einen Zustand gab, in dem alle Teile miteinander in Kontakt standen. Dann setzte eine kurze Phase ein, in welcher der Raum überlichtschnell expandierte. Dadurch wurden Gebiete so weit voneinander getrennt, dass sie keinen Kontakt mehr hatten. Als diese Phase endete, wandelte sich die Inflationsenergie in Strahlung und Materie um – dieser Moment gilt als Urknall.

Es gibt noch eine zweite Möglichkeit, mit der sich Lehnerts intensiv beschäftigt hat: Demnach könnte der Urknall ein Durchgangsstadium gewesen sein. Vorher existierte ein anderes Universum, das sich am Schluss zusammenzog und dann im Urknall wieder expandierte. „Wenn man eine solche Kontraktionsphase berechnet, stellt man fest, dass diese wohl sehr langsam vonstattenging. Das konnte bewirken, dass das nachfolgende Universum homogen und isotrop wurde“, erklärt der Max-Planck-Forscher. Hier entspricht der Urknall dem Umschwung von der Kontraktions- zur Expansionsphase, wobei wiederum Strahlung und Materie erzeugt wurden.

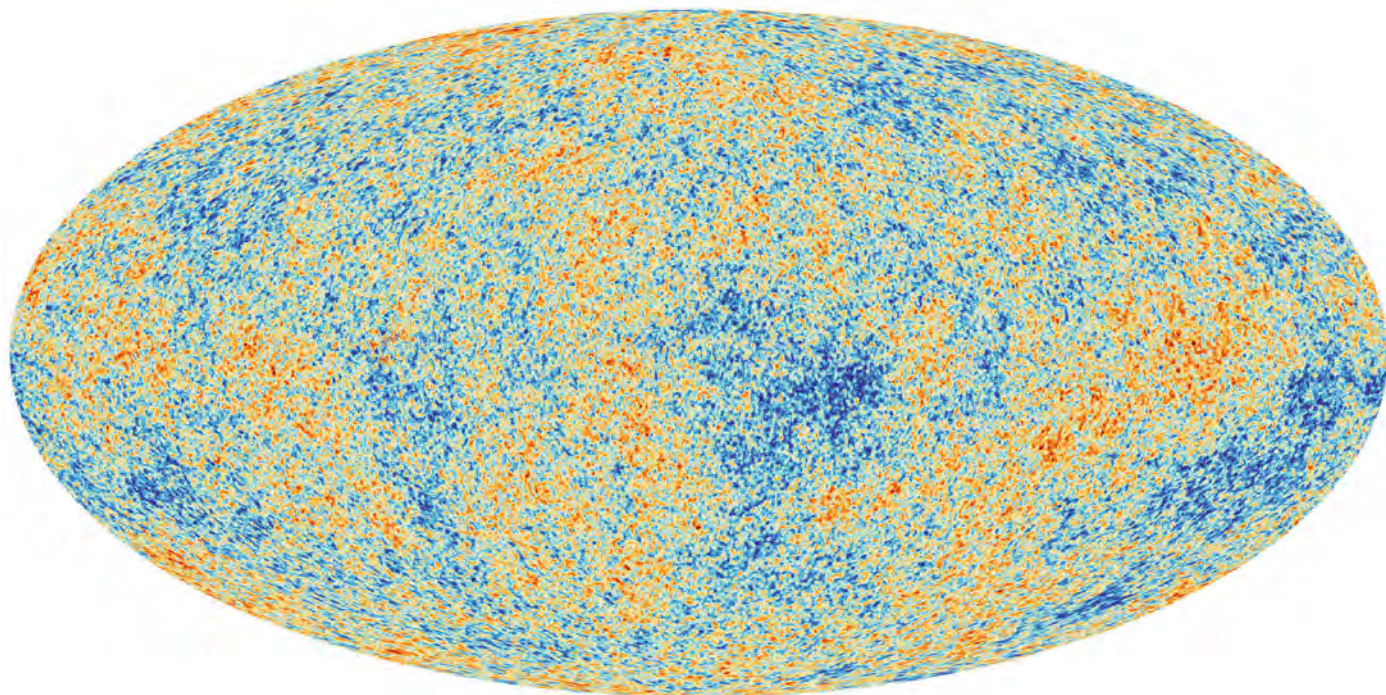
DIE VORHANDENE MATERIE LÄSST EINEN RÜCKPRALL NICHT ZU

Die Idee eines solchen zyklischen Universums erscheint verlockend, hat sie doch Anklänge an alte Mythen der Hindus und Buddhisten. Aber entspricht dieses Szenario der Realität? Jean-Luc Lehnerts ist der Frage nachgegangen – mit dem ernüchternden Resultat, dass die Materie, wie sie im heutigen Universum existiert, einen solchen Rückprall nicht zulässt. Es müsste ein unbekanntes Energiefeld vorhanden gewesen sein, das die Materie zum Umschwung gebracht hat. Könnte das jüngst entdeckte Higgs-Teilchen hierbei eine Rolle gespielt haben?

Das Higgs-Teilchen ist – wie in der Quantenphysik üblich – mit einem Feld

Weiter Blick in die Ferne: Dieser Ausschnitt aus dem Hubble Ultra Deep Field zeigt Galaxien am Rand von Raum und Zeit. Aufgrund der kosmischen Expansion scheinen alle diese Milchstraßensysteme vor uns zu fliehen – je weiter entfernt, desto schneller.





Babybild des Weltalls: Etwa 380 000 Jahre nach dem Urknall wurde das Universum für Strahlung durchsichtig. Der Satellit *Planck* hat diesen Mikrowellenhintergrund mit großer Präzision aufgenommen. Die Karte zeigt winzige Temperaturschwankungen in Regionen mit leicht unterschiedlicher Dichte, aus denen Sterne und Galaxien hervorgegangen sind.

verbunden, das den gesamten Raum erfüllt. Die derzeit bekannte Stärke dieses Feldes würde aber nicht ausreichen, um einen Rückprall der Materie auszulösen. „Ich habe untersucht, ob das Higgs- oder ein ähnliches Feld bei extrem hoher Dichte andere Eigenschaften besessen haben könnte als im heutigen Weltall, aber mit wenig Erfolg“, so Lehnert. Es sieht also nicht so gut aus für die Idee des zyklischen Universums.

Doch der Wissenschaftler will diese Möglichkeit nicht so leicht aufgeben. Zurzeit untersucht er einen anderen Ansatz, der schon in den 1920er-Jahren aufkam, aber nicht intensiv weiterverfolgt wurde. Er beruht darauf, dass bestimmte Teilchen, wie Elektronen, den Raum um sich herum geringfügig verdrehen. Ursache ist ihr sogenannter Spin, den man sich ähnlich vorstellen kann wie die Rotation eines Kreisels. Diese vom Spin hervorgerufene Verdrehung des Raums ist so klein, dass sie unter normalen Bedingungen überhaupt keine Rolle spielt.

Aber vielleicht, so die Idee, entwickelt diese Raumverdrehung unter den Extrembedingungen vor dem Rückprall eine Kraft, welche die sich verdichtende Materie vor dem vollständigen Kollaps

bewahrt und die Kompression in eine Expansion umkehrt. Man kann sich das vielleicht ähnlich vorstellen wie zu einem Zopf verdrehte Gummibänder, die sich wieder entwirren wollen und einen Druck nach außen ausüben.

Diese Art der theoretischen Forschung erfordert das Zusammenführen der allgemeinen Relativitätstheorie, welche die Physik von Raum und Zeit im Großen beschreibt, und der Quantenphysik, die für den Mikrokosmos der Teilchen zuständig ist. Das Ziel besteht seit Jahrzehnten darin, beide Gebiete in einer übergeordneten Theorie der Quantengravitation zu vereinen. Dann könnte man vielleicht Extremzustände – wie den Urknall oder das Innere schwarzer Löcher – verstehen und beschreiben.

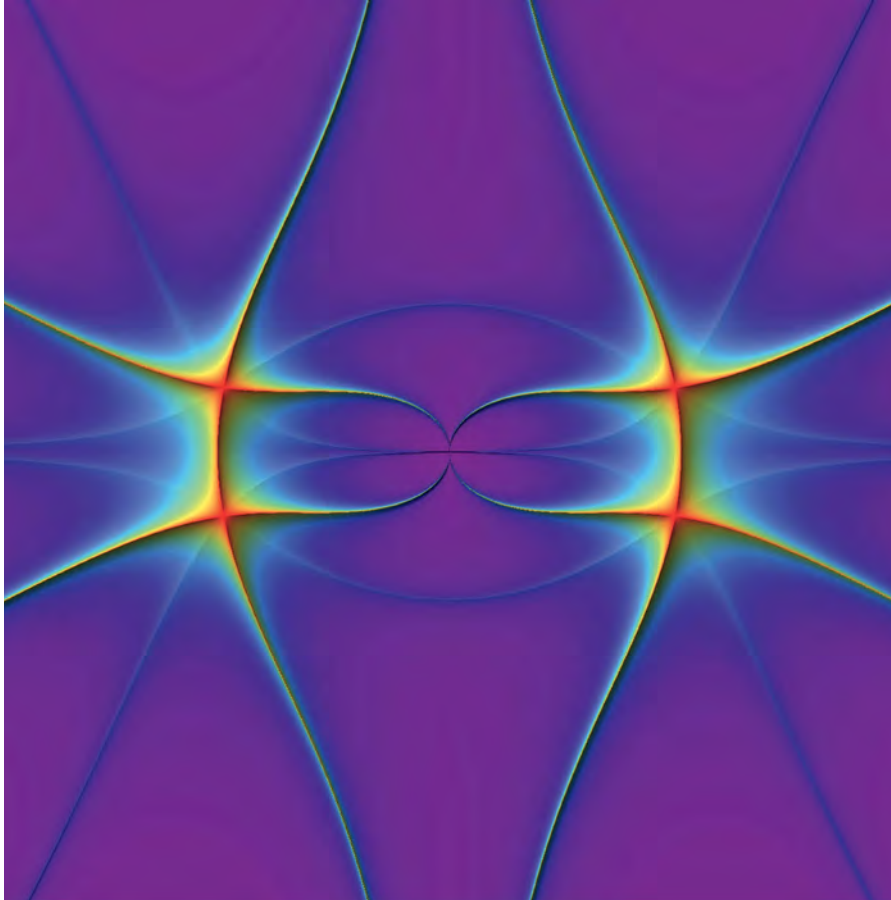
Solange dieses Ziel nicht erreicht ist, müssen die Theoretiker Erkenntnisse der einen Theorie auf die andere anwenden und die Auswirkungen ermitteln. Es ist eine Annäherung an eine abschließende „Theorie für alles“, wobei nie ganz klar ist, wie weit man sich der Wahrheit genähert hat. Vielleicht könnte man dies mit dem Versuch vergleichen, Öl in Wasser vollständig zu lösen. Weil das aber nicht gelingt, schaut man erst einmal nach, was pas-

siert, wenn ein Öltröpfchen (Teilchen) ins Wasser (Raum und Zeit) fällt. Solche Analysen erfordern nicht nur exzellente Kenntnisse der beiden Grundpfeiler der Physik, sondern auch einen sicheren Umgang mit mathematischen Methoden, welche die meisten Physiker zur Verzweiflung bringen würden.

SUPERGRAVITATION ALS THEMA DER DOKTORARBEIT

Diese Fertigkeiten hat der gebürtige Luxemburger Jean-Luc Lehnert in Institutionen von Weltrang erlangt. Bis zu seiner Promotion hielt er sich wechselweise am Imperial College London und in Stephen Hawking's Gruppe an der Universität Cambridge auf. In seiner Doktorarbeit beschäftigte sich Lehnert mit dem Thema Supergravitation. Sie stellt den Versuch dar, eine bestimmte Symmetrie aus der Teilchenphysik auf die Relativitätstheorie zu übertragen.

Auf die Frage, warum er sich ausgerechnet auf dieses schwierige Terrain gewagt habe, hat Lehnert eine einfache Antwort: „Ich dachte, wenn ich die Theorie jetzt nicht lerne, dann lerne ich sie nie.“ Anschließend ging er an



Komplexe Mathematik: Dieses Bild symbolisiert, wie sich das Integral über die Zeit verhält, wenn man eine Quantentheorie vom Skalenfaktor des Universums (sprich: von seiner Größe) aufstellt. Dieses Integral muss man sich als eine Summe über mögliche Universen vorstellen, die alle verschieden lang brauchen, um am heutigen Zustand anzukommen. In einer Quantentheorie des Kosmos ist es nämlich nicht von vornherein festgesetzt, wie viel Zeit das All benötigt, um vom Entstehungszeitpunkt bis heute zu kommen. Dort, wo sich die Linien im Bild treffen, befinden sich die wahrscheinlichsten Entwicklungen des Universums in diesem Modell.

die Universität Princeton, Einsteins ehemalige Wirkungsstätte, und wechselte nach einem kurzen Zwischenaufenthalt am Perimeter Institute in Kanada an das Max-Planck-Institut in Potsdam-Golm. Hier leitet er seit dem Jahr 2010 die Forschungsgruppe „Theoretische Kosmologie“.

Die Näherungsmethoden der Quantenkosmologie führen oft zu einer Vielzahl an möglichen Lösungen. Erst bestimmte Annahmen, die physikalisch plausibel erscheinen, schränken diese Vielfalt so weit ein, dass im Idealfall nur

noch wenige Lösungen übrig bleiben. „Aber was heißt schon plausibel, wenn wir es mit dem Urknall zu tun haben?“, schränkt Lehnert dieses Verfahren ein. Letztendlich müssen astronomische Beobachtungen darüber entscheiden, ob eine der möglichen Lösungen die Natur richtig beschreibt.

Nun befinden sich die Kosmologen in der einzigartigen Situation, in die Vergangenheit schauen zu können. Der Grund ist die zwar sehr hohe, aber endliche Geschwindigkeit des Lichts. So lassen sich heute Galaxien beobachten,

deren Strahlung etwa 13 Milliarden Jahre benötigt hat, bevor sie unsere Teleskope erreichte. Die Astronomen sehen diese Sternsysteme also in einem Entwicklungszustand, den sie vor 13 Milliarden Jahren oder rund 800 Millionen Jahre nach dem Urknall besaßen.

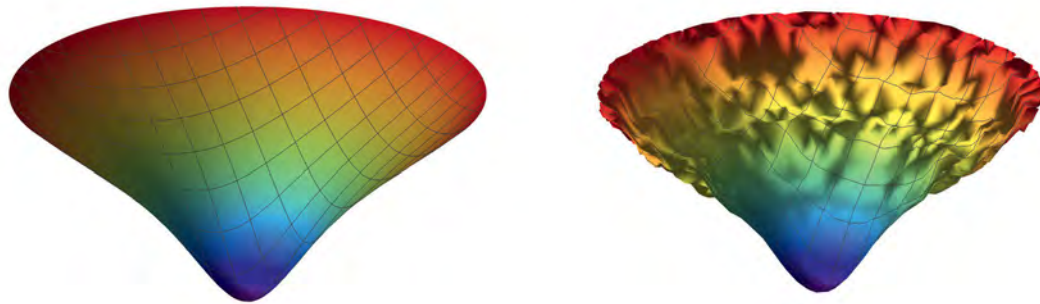
DIE KONTRAKTION DES WELTALLS LIEF EHER GEMÄCHLICH AB

Die Forscher können aber nicht beliebig weit zurückschauen. Die älteste Kunde ist die erwähnte kosmische Hintergrundstrahlung. Sie entstand, als das heiße Urgas durchsichtig wurde, was etwa 380 000 Jahre nach dem Urknall geschah. Auf kosmischer Zeitskala gesehen, ist das eine relativ kurze Zeitspanne. Deshalb enthält dieses Strahlungsfeld auch Informationen über den Urknall und die postulierte inflationäre Phase. In ihr sollten starke Gravitationswellen entstanden sein – Verwerfungen, die den Raum wellenartig stauchen und dehnen. Man kann sie sich ähnlich vorstellen wie Wellen auf der Oberfläche eines Teichs.

Diese Gravitationswellen sollten sich in einem bestimmten Muster in der kosmischen Hintergrundstrahlung „durchgepaust“ haben. Physiker sagen, die Strahlung sei in ganz charakteristischer Weise polarisiert, schwingt also vornehmlich in einer Ebene. In der Theorie des zyklischen Universums sollten keine oder nur ganz schwache Gravitationswellen entstanden sein, weil die Kontraktion des Vorläuferuniversums eher gemächlich abließ und die Raumzeit nicht so stark erschüttert worden ist.

Insofern bietet die Beobachtung der Polarisation in der kosmischen Hintergrundstrahlung die große Chance, zwischen den Theorien der Inflation und des zyklischen Universums zu unterscheiden. Allerdings sollte das Signal extrem schwach und von anderen Effekten überlagert sein.

Es war deshalb eine Sensation, als im Frühjahr 2014 ein Forscherteam vom Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics behauptete, mit dem am



Ausweg als Holzweg: Die Keine-Grenze-Hypothese von Stephen Hawking (Foto unten) und James Hartle vermeidet die Singularität des Urknalls. Die Quantenfluktuation, aus der das Universum wohl entstanden ist, besaß eine endliche Größe (blau) und expandierte von dort aus inflationär (Aufweitung des Kegels). Doch einen Stresstest hat die Keine-Grenze-Hypothese nicht bestanden: Quantenfluktuationen, die im Lauf der Zeit immer stärker werden (rechts), verhindern ein stabiles Universum wie das unsere.

Südpol arbeitenden Teleskop *Bicep2* genau dieses Polarisationsmuster gefunden zu haben. Einige Kosmologen wähten den Physik-Nobelpreis schon zum Greifen nahe.

Zur Ernüchterung aller stellte sich nach einer Analyse der Beobachtungsdaten des europäischen Weltraumteleskops *Planck* heraus, dass die Forscher etwas übersehen hatten: Das Polarisationsmuster stammte nicht von Gravitationswellen, sondern von Staub in unserer Milchstraße, den die Hintergrundstrahlung auf dem Weg zu uns durchquert hatte. Eine schlichte Fehlinterpretation also! Wegen der großen Bedeutung dieser Beobachtung für die Kosmologie laufen derzeit Messungen der Hintergrundstrahlung mit verbesserter Empfindlichkeit.

Die Entdeckung des Polarisations-signals wäre so etwas wie der Heilige Gral der Kosmologie. Doch für Theoretiker wie Lehnerts bliebe auch nach diesem Erfolg die Frage bestehen: Wie kann man die Singularität des Urknalls mit physikalisch sinnloser, unendlich hoher Dichte und Temperatur verstehen und beschreiben? Vor 35 Jahren sorgten Stephen Hawking und dessen damaliger Mitarbeiter James Hartle mit einer möglichen Lösung für Aufsehen, die sie Keine-Grenze-Hypothese nannten.

Die Idee beruht auf mehreren Annahmen, wie man Quantenphysik und

allgemeine Relativitätstheorie zu einem Modell des Urknalls zusammenfügen und dabei die Singularität vermeiden kann. Einer der entscheidenden Schritte bestand darin, dass Hawking und Hartle die Zeit als komplexe Größe beschrieben. Die nun imaginäre Zeit wird so formal zu einer vierten Raumkoordinate: Raum und Zeit sind ununterscheidbar geworden.

EINE ELEGANTE HYPOTHESE – ABER LEIDER FALSCH

„Man kann eigentlich gar nicht mehr von Raum und Zeit reden. Vielmehr ist das Universum jetzt ein Quantenzustand oder eine Quantenfluktuation“, sagt Jean-Luc Lehnerts. In dieser Beschreibung kann das All in sich selbst geschlossen gewesen sein, ähnlich wie eine Kugel. Es besaß damit keinen Rand, war aber unbegrenzt, so wie man prinzipiell die Erde umrunden könnte, ohne auf einen Rand oder eine Grenze zu stoßen. Auf ihr gibt es auch keine Singularität, also keinen Ort mit physikalisch sinnlosen Größen.

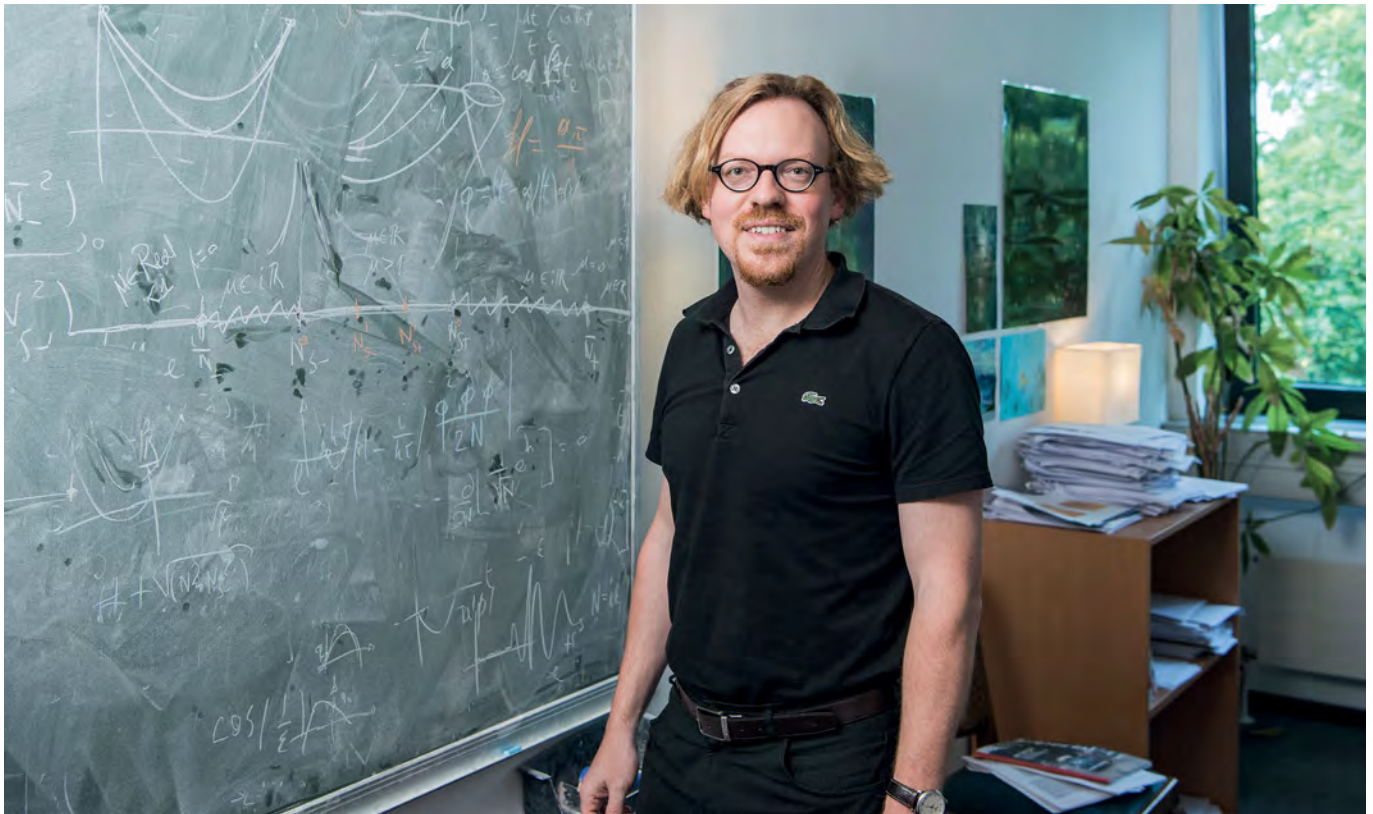
Im Urknall expandierte dieser randlose Quantenzustand, und Raum und Zeit entstanden in der heutigen Form. Interessanterweise benötigt dieses Szenario für den anfänglichen Keine-Grenze-Zustand ein Energiefeld – genauso wie die Theorie der inflationären Expansion. „Aus dem Anfangszustand würde



sich also automatisch ein inflationäres Universum entwickeln“, sagt Lehnerts. Eine elegante Hypothese also, mit der man gleich zwei Probleme gelöst hätte: Die Anfangssingularität des Urknalls wäre vermieden und die Ursache der Inflation geklärt.

Doch schon Hawking hatte zu bedenken gegeben, dass die Keine-Grenze-Hypothese nur ein Vorschlag gewesen sei, der sich von keinem tiefer liegenden Prinzip ableiten lasse. Insbesondere wurde dieses Szenario wegen der mathematischen Schwierigkeiten immer mit starken Vereinfachungen gerechnet, von denen niemand wusste, wie realistisch sie waren.

Jean-Luc Lehnerts hat kürzlich zusammen mit seinen Kollegen Job Feldbrugge und Neil Turok vom Perimeter Institute in Kanada Hawkings Modell mit verbesserten mathematischen Me-



Suche nach der Antwort: Wie ist das Universum entstanden? Diese Frage beschäftigt die Menschen seit Jahrtausenden. Jean-Luc Lehnars geht sie am Max-Planck-Institut für Gravitationsphysik in Potsdam-Golm mit modernsten mathematischen Werkzeugen an.

thoden einem Stresstest unterzogen – mit einem interessanten Ergebnis: Es funktioniert nicht! Die Theoretiker untersuchten hierfür die Stabilität der anfänglichen Quantenfluktuationen und fanden heraus: Je größer eine Fluktuation ist, desto chaotischer ist sie. Wenn man sie als Schwingung der Raumzeit ansieht, bedeutet dies, dass diese Schwingungen immer heftiger werden und verhindern, dass sich ein stabiles Universum entwickeln kann wie das unsere. Und: Je größer eine Fluktuation ist, desto größer ist die Wahrscheinlichkeit für ihr Auftreten.

„Nach oben gibt es keine Grenze“, sagt Lehnars. Das heißt, die Wahrscheinlichkeit dafür, dass eine genügend kleine Quantenfluktuation entstanden ist, aus der sich unser Universum entwickeln konnte, ist gleich null. „Wir waren selbst erstaunt, dass die von uns gefundenen Effekte das Modell von Hawking und Hartle praktisch auf den Kopf stellen“, so Lehnars: „Es liefert keine sinnvollen Lösungen.“

Der Forscher sieht dieses unangenehme Resultat keineswegs negativ. Vielmehr weist es ihm den Weg, auf dem er fortfahren will. „Wir haben heu-

te bessere mathematische Methoden, niemand. Aber schließlich handelt es sich um die größte Frage, die der Mensch stellen kann: Wie ist unsere Welt entstanden? ◀

AUF DEN PUNKT GEBRACHT

- Die Geburt des Universums im Urknall ist unter Kosmologen unumstritten. Weniger klar ist allerdings, was genau sich zum Zeitpunkt null wirklich abgespielt hat.
- Die populärste Hypothese geht von einer inflationären, überlichtschnellen Expansion des Babyuniversums aus. Aber auch die Vorstellung eines sanfteren Übergangs von einem Vorläuferuniversum ist nicht ausgeschlossen.
- Kürzlich brachten Jean-Luc Lehnars und zwei Kollegen die Keine-Grenze-Hypothese zu Fall, mit der Stephen Hawking und James Hartle die Anfangssingularität hatten vermeiden wollen.

GLOSSAR

Expansion des Universums: Nachdem der Belgier Georges Lemaître im Jahr 1927 die Expansion des Universums theoretisch entdeckt hatte, bestätigte der US-Astronom Edwin Hubble 1929 diese auch in der Praxis. Hubble beobachtete die Galaxienflucht, die sich als Rotverschiebung der Linien in den Spektren von Milchstraßensystemen zeigt. Diese galaktische Rotverschiebung wiederum hatte der amerikanische Forscher Vesto Slipher bereits im Jahr 1912 gefunden.

Weltraumteleskop Planck: Die 2009 gestartete europäische Raumsonde lieferte bis zu ihrem Missionsende im Jahr 2013 die bisher präziseste Karte der kosmischen Hintergrundstrahlung. Mithilfe des Satelliten legten die Forscher das Alter des Alls auf 13,82 Milliarden Jahre fest. Außerdem leiteten sie sehr genau seine Zusammensetzung ab. Demnach besteht es heute aus 68,3 Prozent Dunkler Energie, 26,8 Prozent Dunkler Materie und 4,9 Prozent baryonischer Materie (Atome).

jugend forscht 2018

schüler experimentieren



Spring!



GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Bis 30.11.2017 anmelden
auf www.jugend-forscht.de