

URKNALL

Wie alles begann

Georges Lemaître

Der Urheber der Urknall-Idee

Gravitationswellen

Säuseln des Urknalls

Die ersten Sterne

Kosmische Morgendämmerung



Antje Findekleer
E-Mail: findekleer@spektrum.de

Liebe Leserin, lieber Leser,

vor etwa 13,8 Milliarden Jahren entstanden auf einen Schlag Materie, Raum und Zeit – so besagt es das kosmologische Standardmodell. Dieses Szenario überschreitet unsere Vorstellungskraft, dennoch oder vielleicht gerade deshalb versuchen Forscher, sich den ersten Augenblicken in Formeln und Experimenten immer mehr anzunähern. In jedem Fall entwickelte sich von diesem Moment an das Universum mit all seinen Sternen, Galaxien, Schwarzen Löchern und unzähligen weiteren Objekten aller Größenordnungen. Bis heute stellt die Kosmologie Physiker und Astronomen vor viele Rätsel – ein Blick auf die Geburtsstunde und die Frühzeit des Weltalls.

Eine spannende Lektüre wünscht Ihnen

Erscheinungsdatum dieser Ausgabe: 30.05.2016

Folgen Sie uns:

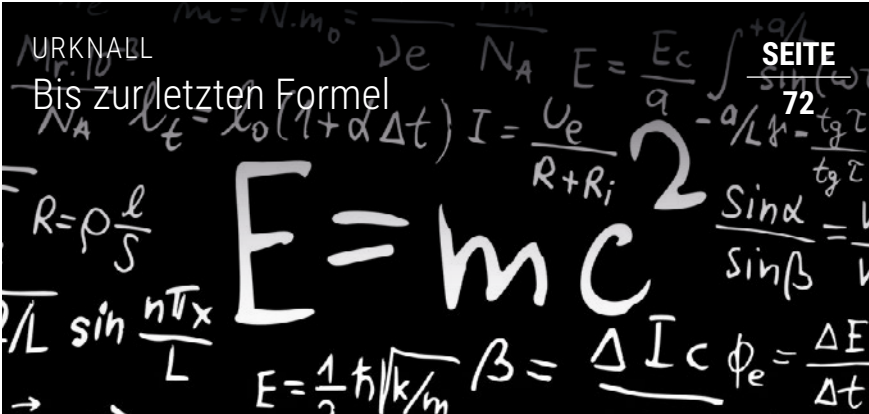
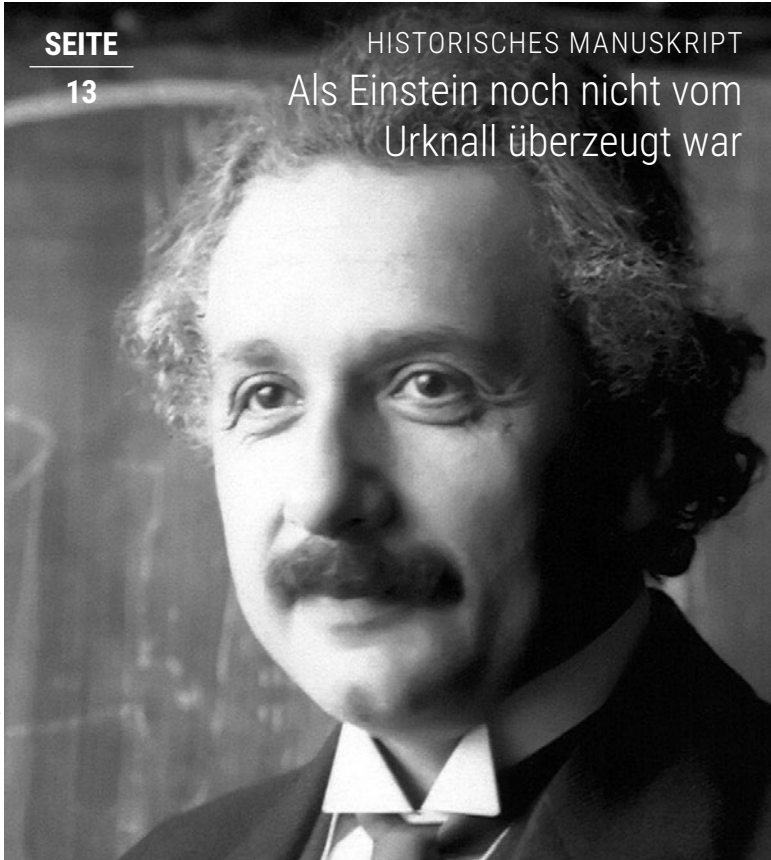


CHEFREDAKTEURE: Prof. Dr. Carsten Könneker (v.i.S.d.P.), Dr. Uwe Reichert
REDAKTIONSLEITER: Christiane Gelitz, Dr. Hartwig Hanser, Dr. Daniel Lingenhöhl
ART DIRECTOR DIGITAL: Marc Grove
LAYOUT: Oliver Gabriel
SCHLUSSREDAKTION: Christina Meyberg (Ltg.), Sigrid Spies, Katharina Werle
BILDREDAKTION: Alice Krüßmann (Ltg.), Anke Lingg, Gabriela Rabe
PRODUKTMANAGERIN DIGITAL: Antje Findekleer
VERLAG: Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Slevogtstraße 3–5, 69126 Heidelberg, Tel. 06221 9126-600, Fax 06221 9126-751; Amtsgericht Mannheim, HRB 338114, USt-Id-Nr. DE147514638
GESCHÄFTSLEITUNG: Markus Bossle, Thomas Bleck
MARKETING UND VERTRIEB: Annette Baumbusch (Ltg.)
LESER- UND BESTELLSERVICE: Helga Emmerich, Sabine Häusser, Ute Park, Tel. 06221 9126-743, E-Mail: service@spektrum.de

Die Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH ist Kooperationspartner der Nationales Institut für Wissenschaftskommunikation gGmbH (NaWik).

BEZUGSPREIS: Einzelausgabe € 4,99 inkl. Umsatzsteuer
ANZEIGEN: Wenn Sie an Anzeigen in unseren Digitalpublikationen interessiert sind, schreiben Sie bitte eine E-Mail an anzeigen@spektrum.de.

Sämtliche Nutzungsrechte an dem vorliegenden Werk liegen bei der Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH. Jegliche Nutzung des Werks, insbesondere die Vervielfältigung, Verbreitung, öffentliche Wiedergabe oder öffentliche Zugänglichmachung, ist ohne die vorherige schriftliche Einwilligung des Verlags unzulässig. Jegliche unautorisierte Nutzung des Werks berechtigt den Verlag zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer. Bei jeder autorisierten (oder gesetzlich gestatteten) Nutzung des Werks ist die folgende Quellenangabe an branchenüblicher Stelle vorzunehmen: © 2016 (Autor), Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Heidelberg. Jegliche Nutzung ohne die Quellenangabe in der vorstehenden Form berechtigt die Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer. Bildnachweise: Wir haben uns bemüht, sämtliche Rechteinhaber von Abbildungen zu ermitteln. Sollte dem Verlag gegenüber der Nachweis der Rechteinhaberschaft geführt werden, wird das branchenübliche Honorar nachträglich gezahlt. Für unaufgefordert eingesandte Manuskripte und Bücher übernimmt die Redaktion keine Haftung; sie behält sich vor, Leserbriefe zu kürzen.



26	KONFORME ZYKLISCHE KOSMOLOGIE Urknall oder nicht?
37	RAYCHAUDHURI-GLEICHUNG Quantentrick schafft Urknall-Singularität ab
40	KOSMOLOGIE Wellenschlag des Urknalls
50	NACHGEFRAGT Wo ist bloß die Energie geblieben?
53	REIONISIERUNG »Grüne Erbsen« erhellten frühes Universum
55	FRÜHES UNIVERSUM Ließ das Higgs-Boson die Antimaterie verschwinden?
60	KOSMISCHE MORGENDÄMMERUNG Die ersten Sterne

RÜCKBLICK

Der Urheber der **Urknall-Idee**

von Harry Nussbaumer



Im Mai 1931 führte der Astronom Georges Lemaître die Idee des Urknalls als quantenphysikalischen Beginn der kosmischen Expansion ein. Im Jahr 1927 hatte er bereits die Vorstellung eines expandierenden Universums theoretisch begründet und mit den damals verfügbaren Beobachtungen untermauert.

Am 21. März 1931 erschien in der renommierten englischen Zeitschrift »Nature« ein Artikel von Sir Arthur Eddington, in dem er die Meinung vertrat, das Universum habe schon immer existiert; er betonte, die Idee eines Anfangs sei ihm zuwider. Georges Lemaître, der Entdecker des expandierenden Universums, widersprach in einem Leserbrief mit dem Titel: »Der Anfang der Welt vom Standpunkt der Quantentheorie«, der am 9. Mai, also knapp zwei Monate später, ebenfalls in »Nature« erschien. Der Kern seiner Aussage war: Das gegenwärtige Universum könnte durch den Zerfall eines Uratoms entstanden sein. Aber werfen wir doch zunächst einen Blick auf das damalige kosmologische Weltbild.

Im Jahr 1917 hatte Albert Einstein in Berlin in seinen »Kosmologischen Be-

trachtungen zur allgemeinen Relativitätstheorie« zwar ein statisches Universum vorgeschlagen, aber damit dennoch den Anstoß zur modernen Kosmologie gegeben. Denn kurz darauf veröffentlichte der Astronom Willem de Sitter in Leiden ein höchst bemerkenswertes Gegenmodell: De Sitters Welt war leer, sie enthielt keine Materie – aber wenn man einen Beobachter und ein Testteilchen hineinsteckte, so sandte dieses Teilchen ein ins Rote verschobenes Spektrum aus. Auch begann es, sich vom Beobachter zu entfernen. Doch de Sitters Theorie war zu undurchsichtig, um eine klare Interpretation zu begünstigen.

Während sich die Theoretiker über de Sitters Weltmodell den Kopf zerbrachen, machten die beobachtenden Astronomen Jagd auf Manifestationen von de Sitters kosmologischer Rotverschiebung. Die von

Vesto Slipher seit 1912 am Lowell Observatory in Flagstaff, Arizona registrierten Nebelspektren, insbesondere die hohen Rotverschiebungen der Spiralnebel, gehörten dazu.

Als der Astronom Edwin Hubble am Mount Wilson Observatory auf der Suche nach einem Bezugssystem zur Darstellung der Sonnenbewegung eine lineare Beziehung zwischen den Distanzen extragalaktischer Nebel und deren Radialgeschwindigkeiten fand und 1929 zusammen mit Milton Humason veröffentlichte, weckte er damit sofort de Sitters Aufmerksamkeit. Im Januar 1930 diskutierten Eddington und de Sitter bei dem monatlichen Treffen der Royal Astronomical Society in London dieses kurz zuvor entdeckte »hubble'sche Gesetz« und fragten sich, welche kosmologische Bedeutung ihm wohl zukomme.

Lemaître las den Sitzungsbericht über diese Diskussion und griff zur Feder. Er informierte Eddington brieflich über seine schon 1927 erschienene Arbeit, in der er die Entfernungs-Geschwindigkeits-Beziehung aus der allgemeinen Relativitätstheorie hergeleitet und auch gleich einen Wert für die hubblesche Konstante berechnet hatte. In jener Arbeit hatte er aus der Kombination von Theorie und Beobachtung auf die Existenz eines expandierenden Universums geschlossen. Er bat Eddington, diese Information auch an die Sitzer weiterzuleiten.

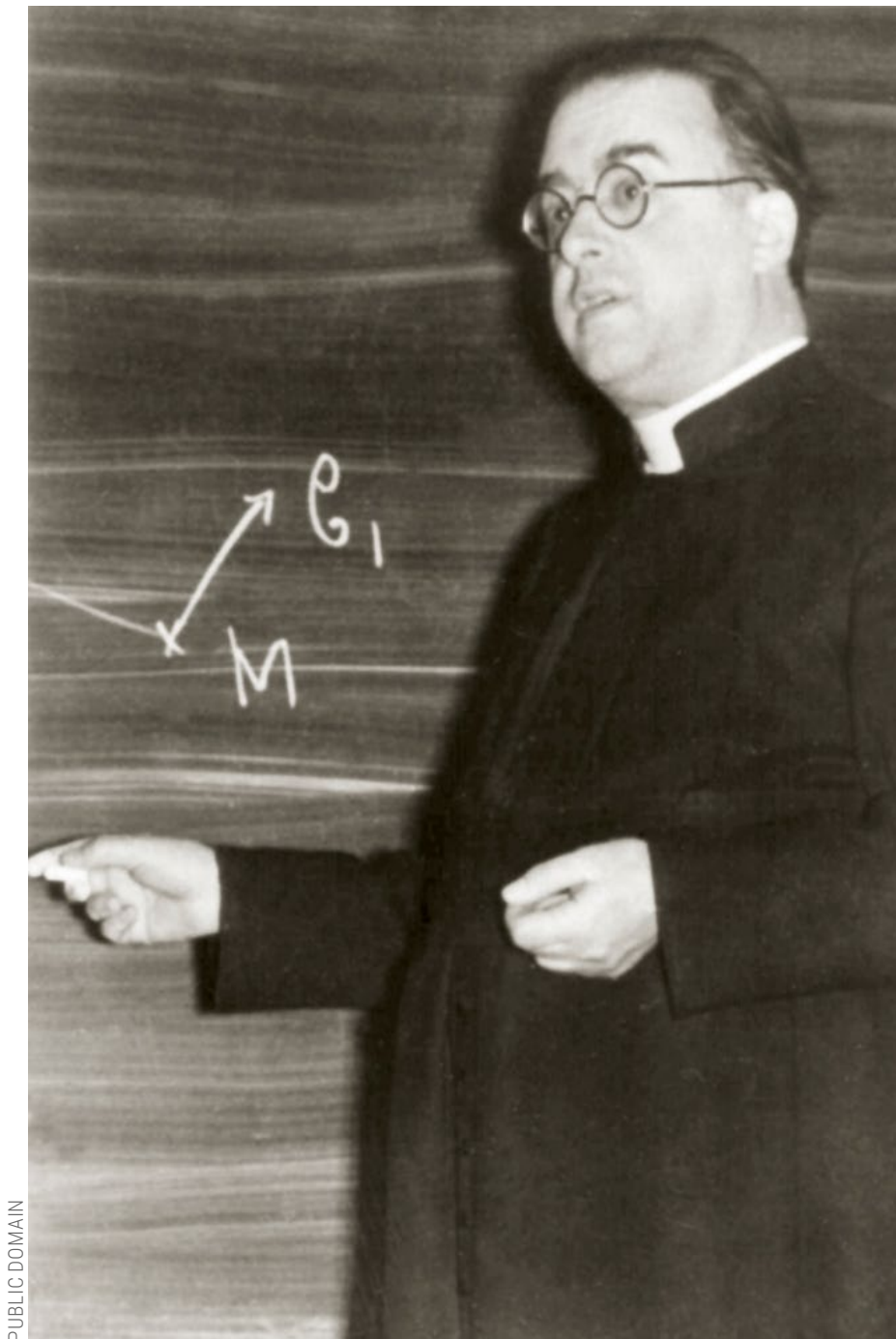
Die Vorstellung eines expandierenden Universums führte sogleich zur Frage nach einem Anfang: Was verursacht die Expansion, und welche Kräfte treiben sie an? Diese neue Fragestellung wurde 1930 und 1931 insbesondere von Eddington und Lemaître intensiv bearbeitet und diskutiert.

Eddington geht ans Grundsätzliche

Als Eddington 1930 zeigte, dass Einsteins statisches Universum instabil ist, vermutete er, dieses Gebilde könnte den ursprünglichen Zustand beschreiben, aus dem sich die Expansion entwickelte. Er betonte, die kleine Störung, die nötig gewesen sei, um

die Expansion einzuleiten, könne sich ohne übernatürliche Beeinflussung ereignen. Allerdings zeigten sich bei den darauf folgenden theoretischen Versuchen, ebendiesen Beginn der Expansion zu erklären, unüberwindliche Schwierigkeiten.

Am 5. Januar 1931 hielt Eddington vor der Mathematical Association eine Ansprache als Präsident mit dem Titel »Das Ende der Welt vom Standpunkt der mathematischen Physik«. Es gehe nicht um das räumliche, sondern um das zeitliche Ende, erklärte er eingangs, um dann allerdings auf den Anfangszustand überzuleiten, der eben kein echter Beginn, sondern Einsteins pseudostatisches Universum sei. Aber habe dieses Universum ohne Anfang ein Ende? Eddington argumentierte thermodynamisch mit der Entropie und kam zum Schluss, dass ein Ende nicht in Sicht sei, wohl aber Veränderungen. Er wagte die Vorhersage, Teilchen würden sich in Strahlung auflösen und das Universum damit in einen sich immer weiter ausdehnenden Strahlungsball verwandeln, in dem die Strahlung sich zu immer größeren Wellenlängen transformiere. Der Text dieser Rede wurde in der »Nature«-Ausgabe vom 21. März 1931 publiziert.



PUBLIC DOMAIN

GEORGES LEMAÎTRE

Georges Lemaître (1894–1966) entdeckte die Expansion des Universums und begründete als Erster die Urknall-Theorie.

Lemaître nimmt den Ball auf

Lemaître reagierte ohne Verzug: »Der Anfang der Welt vom Standpunkt der Quantentheorie« war der Titel der einspaltigen Antwort in »Nature«. Er sah in einem Anfang des Universums nichts Widerwärtiges, und er focht nicht etwa mit theologischen Argumenten, sondern behandelte den Anfang als ernst zu nehmende physikalische Hypothese.

In Lemaîtres Leserbrief finden wir den ersten Vorschlag zur Theorie des Urknalls. Er setzt an den Ursprung ein einziges Uratom, das die Materie des gesamten Universums in sich enthält: »Wenn die Welt mit einem einzigen Quantenteil begann, dann hatten die Begriffe von Raum und Zeit am Anfang überhaupt keine Bedeutung. Sie erhielten erst eine Bedeutung mit dem Zerfall des einen Uratoms in eine hinreichend große Anzahl von Quanten. Falls dieser Vorschlag zutrifft, so begann die Welt kurz vor dem Anfang von Raum und Zeit.« Dieses höchst instabile Atom hätte sich dann in einer Art superradioaktiven Zerfalls aufgespalten.

Mit seinem Vorschlag hatte sich Georges Lemaître allerdings ein neues kosmologisches Problem eingehandelt: das geringe

Alter des Universums. Wenn wir die Expansion zurückverfolgen, bis der »Radius« des Universums, R , auf den Wert $R = 0$ geschrumpft ist, und annehmen, die beobachtete Expansion werde allein durch die gegenseitige Gravitationsanziehung der Materie beeinflusst, so ergibt das Inverse der Hubble-Konstanten H (das ist die Proportionalitätskonstante im Hubbleschen Gesetz), eine obere Grenze, t_0 , für das Alter des Universums. Die damaligen Beobachtungen lieferten $H \approx 500$ Kilometer pro Sekunde und Megaparsec – heute wird $H \approx 70$ als zutreffend betrachtet. Daraus folgte damals für das Alter des Universums eine obere Grenze von $t_0 = 2 \cdot 10^9$ Jahren. Aus dem radioaktiven Zerfall der Elemente wurde der Erde ein geologisches Alter von ebenfalls $2 \cdot 10^9$ Jahren oder gar mehr zugeschrieben, und für die Sonne hatte Edward Condon 1925 eine untere Altersgrenze von $3 \cdot 10^{12}$ Jahren berechnet. Dieser enorme Wert, rund 200-mal höher als das heute gültige Alter, folgte aus seiner Annahme, die Leuchtkraft der Sterne werde durch die vollständige Verwandlung von Teilchen in Strahlung gespeist.

Für Einsteins statisches, zeitlich unbegrenztes Universum stellte der hohe Wert,

der damals für das Alter der Erde und der Sonne galt, kein Problem dar. Auch Eddington hatte das Altersproblem mit seiner Anknüpfung an Einsteins statische Welt elegant umgangen. Doch für Lemaîtres Expansion aus dem primordialen Atom, deren Ursprung höchstens $2 \cdot 10^9$ Jahre zurückliegen sollte, war das Altersproblem noch weit offen.

So standen sich zwei fundamental verschiedene Ansichten über das frühe Universum gegenüber. Lemaître sah den Anfang als explosionsartige Umwandlung eines Uratoms in ein expandierendes Universum mit dem gleichzeitigen Entstehen der Elemente. Für Eddington begann die Expansion durch gravitative Instabilitäten in Einsteins nicht stabilem, quasi statischem Universum. Die beiden Kontrahenten argumentierten wissenschaftlich, aber aus verschiedenen philosophischen Perspektiven. Auch zählte Lemaître auf die Quantentheorie, um sein primordiales Atom besser zu begründen.

Beiden Forschern war Einsteins kosmologische Konstante Λ eine wesentliche Kraft. Sie hielt Eddingtons Anfangszustand so lange im Gleichgewicht, wie es das Alter der Erde und der Sterne erforderte, und sie

The Beginning of the World from the Point of View of Quantum Theory.

SIR ARTHUR EDDINGTON¹ states that, philosophically, the notion of a beginning of the present order of Nature is repugnant to him. I would rather be inclined to think that the present state of quantum theory suggests a beginning of the world very different from the present order of Nature. Thermodynamical principles from the point of view of quantum theory may be stated as follows : (1) Energy of constant total amount is distributed in discrete quanta. (2) The number of distinct quanta is ever increasing. If we go back in the course of time we must find fewer and fewer quanta, until we find all the energy of the universe packed in a few or even in a unique quantum.

Now, in atomic processes, the notions of space and time are no more than statistical notions ; they fade out when applied to individual phenomena involving but a small number of quanta. If the world has begun with a single quantum, the notions of space and time would altogether fail to have any meaning at the beginning ; they would only begin to have a sensible meaning when the original quantum had been divided into a sufficient number of quanta. If this suggestion is correct, the beginning of the world happened a little before the beginning of space and time. I think that such a beginning of the world is far enough from the present order of Nature to be not at all repugnant.

It may be difficult to follow up the idea in detail as we are not yet able to count the quantum packets in every case. For example, it may be that an atomic nucleus must be counted as a unique quantum, the atomic number acting as a kind of quantum number. If the future development of quantum theory happens to turn in that direction, we could conceive the beginning of the universe in the form of a unique atom, the atomic weight of which is the total mass of the universe. This highly unstable atom would divide in smaller and smaller atoms by a kind of super-radioactive process. Some remnant of this process might, according to Sir James Jeans's idea, foster the heat of the stars until our low atomic number atoms allowed life to be possible.

Clearly the initial quantum could not conceal in itself the whole course of evolution ; but, according to the principle of indeterminacy, that is not necessary. Our world is now understood to be a world where something really happens ; the whole story of the world need not have been written down in the first quantum like a song on the disc of a phonograph. The whole matter of the world must have been present at the beginning, but the story it has to tell may be written step by step.

G. LEMAÎTRE.

40 rue de Namur,
Louvain.

¹ NATURE, Mar. 21, p. 447.

LESERBRIEF

Mit diesem kurzen Leserbrief über den »Anfang der Welt«, der am 9. Mai 1931 in der Zeitschrift »Nature« erschien, führte Georges Lemaître den Begriff des Urknalls in die wissenschaftliche Diskussion ein – wenn auch unter einem anderen Namen.

trieb Lemaîtres Expansion an. Als im April 1931 Einstein endlich die Vorstellung eines expandierenden Universums öffentlich anerkannte, sich aber gleichzeitig von Λ verabschiedete, folgten ihm beide Astronomen nicht. Eher würde er zu Newtons Gravitationstheorie zurückkehren, als auf Λ zu verzichten, schrieb Eddington.

Lemaîtres Urknall

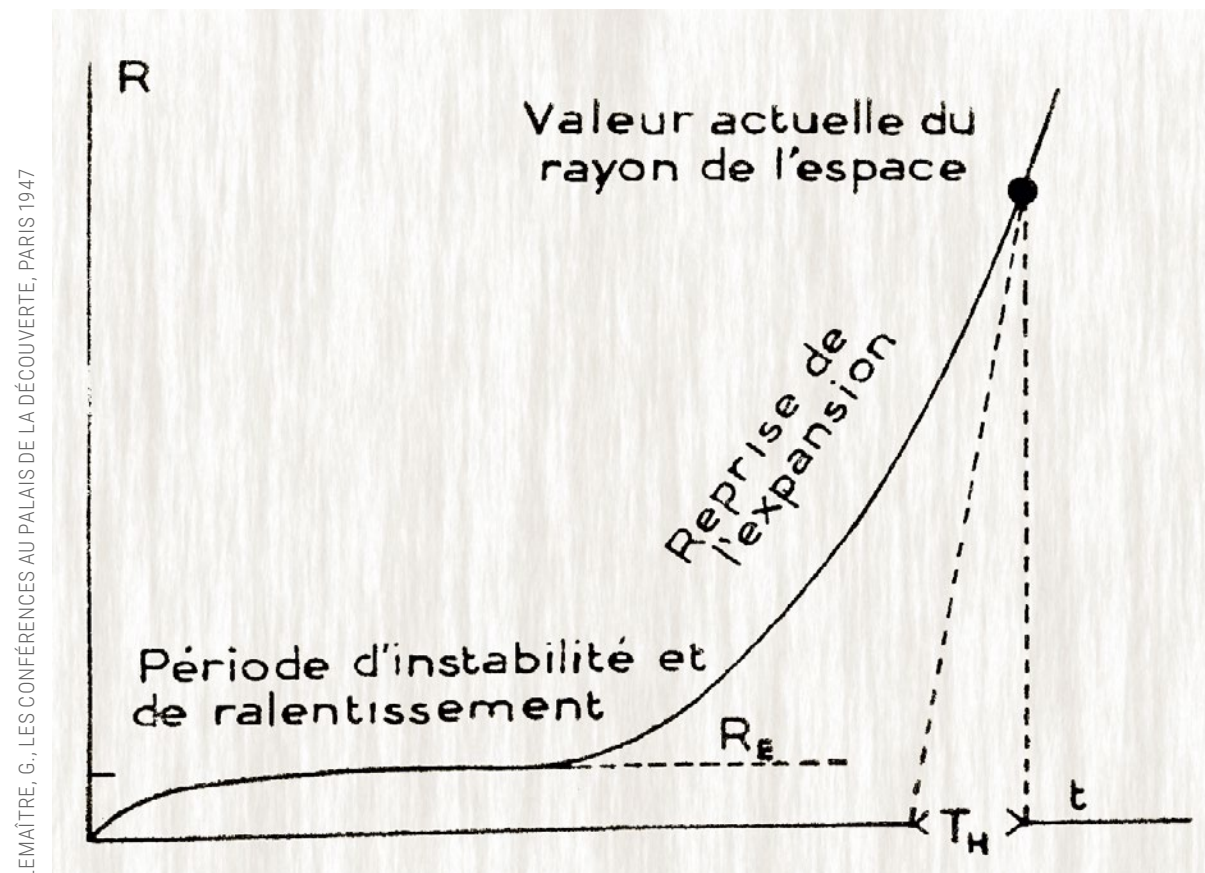
Wie sah Lemaître den Urknall und die Folgen? Er postulierte zwei Phasen der Expansion, und zwar einer Expansion des gesamten mit Materie erfüllten Raums und nicht etwa der Materie in einen Raum hinein. Das gezeigte Bild, das er 1947 veröffentlichte, veranschaulicht seine Vorstellung.

Lemaître sah die kosmische Entwicklung nach dem Urknall als Folge eines Ungleichgewichts zwischen der Gravitation und der in Λ enthaltenen Energie. Die Natur hat das Verhältnis zwischen dem initialen Impuls, der kosmologischen Konstanten und der Gravitation offensichtlich so gewählt, dass der Urexpansion eine Stagnation folgte, die der Entwicklung der Sterne genügend Zeit einräumte.

Die hohen Temperaturen des Urknalls hinterließen ihre Spuren. Lemaître vermu-

Lemaîtres Vorstellung von der Expansion des Universums

Diese von Georges Lemaître 1947 veröffentlichte Zeichnung zeigt die Veränderung des »Radius« des Universums, R , im Lauf der Zeit t . Die erste, schnelle Expansion nach dem Urknall erfolgt durch den Zerfall des Uratoms unter Entwicklung hoher Temperaturen und dem Entstehen der Elemente. Die ursprüngliche Expansion wird durch die Gravitation fast bis zum Stillstand abgebremst, und das Universum gleitet durch einen quasi statischen Zustand beim Gleichgewichtswert R_E . Der Wert der kosmologischen Konstanten Λ liegt aber geringfügig über dem Gleichgewichtswert, und so wird die Expansion weitergetrieben. T_H ist das Alter des Universums, das sich aus der beobachteten Expansion nach der Zeit $1/H$ ergibt. Die Stagnationsperiode kann fast beliebig lange andauern und löst damit das Dilemma zu kurzer Zeiten für die Entwicklung der Sterne. Lemaître vermutete, dass wir uns gegenwärtig in der dritten Phase befinden, der wieder aufgenommenen, nun beschleunigten Expansion.



Dear Professor Eddington

I just read the February No of the Observatory and the discussion on your suggestion of the investigation of the intermediate solution between the Einstein and the de Sitter.

I made the investigation two years ago. I consider an universe of curvature constant in space but variable with time. And I looked for the existence of a solution for which the apparent receding motion of the nebulae is always a receding one from time $t = 0$ and from time minus infinity to infinity.

This solved the question put forward by the fact that the nebulae are on the receding branch of the hyperbola.

The result is as follows.

The receding motion of the nebulae is a measure of the initial or now asymptotic radius for $t = \infty$. by the formula

$$R_0 \approx \frac{2c}{\sqrt{3}} \quad \text{thickly} \quad \left[\frac{1}{2c^2} = \frac{1}{3R_0^2} + \frac{1}{R^2} - \frac{2}{3R_E^2} \right]$$

see later the whole

ARCHIVES G. LEMAÎTRE, UNIVERSITÉ CATHOLIQUE DE LOUVAIN (UCL)

BRIEF VON LEMAÎTRE AN EDDINGTON 1930

Georges Lemaître wies mit diesem Schreiben aus dem Jahr 1930 seinen Kollegen Sir Arthur Eddington auf die von ihm bereits 1927 publizierte Entdeckung des expandierenden Universums hin. Diese Arbeit hatte bis dahin niemand zur Kenntnis genommen.

tete dieses Relikt in der damals bereits bekannten kosmischen Strahlung, also der hochenergetischen Teilchenstrahlung aus dem Weltall; der Physiker Victor Hess hatte sie 1912 bei einem Ballonflug nachgewiesen und ihr den Namen »Höhenstrahlung« gegeben. Die spätere Entdeckung der kosmischen Hintergrundstrahlung – der elektromagnetischen Drei-Kelvin-Strahlung – muss Lemaître tief befriedigt haben, sie gilt als Bestätigung seiner Idee des Urknalls. Die Entdeckung wurde im Juli 1965 veröffentlicht; Lemaître starb im Juni 1966.

Für Lemaître war die durch Λ repräsentierte Energie wesentlich: Heute wird sie als Dunkle Energie bezeichnet. In einem Vortrag vor der amerikanischen National Academy of Sciences am 20. November 1933 assoziierte er Λ mit der Vakuumenergie: »Alles verhält sich so, als ob die Energie des Vakuums von null verschieden wäre. Damit die absolute Bewegung, das heißt die Bewegung gegenüber dem Vakuum, nicht festgestellt werden kann, müssen wir einen Druck $p = -\rho \cdot c^2$ mit der Energiedichte $\rho \cdot c^2$ des Vakuums assoziieren. Das ist im Wesentlichen die Bedeutung der kosmologischen Konstanten Λ , die einer negativen Vakuumdichte $\rho_0 = \Lambda c^2 / (4\pi G)$

entspricht.« So assoziierte Lemaître die kosmologische Konstante mit der Vakuumenergie. Diese Idee wurde vor einigen Jahren wieder aufgegriffen.

Lemaître gibt auch eine wissenschaftliche Antwort auf eine philosophische Frage: War das Schicksal der Welt in das Uratom eingeschrieben? Nein, lautet seine Antwort, das Unbestimmtheitsprinzip verhinderte es. Zwar war die gesamte Materie schon am Anfang vorhanden, aber die Geschichte wird Schritt um Schritt geschrieben.

Das zyklische Universum: der Phönix der Legende

Während sich Eddington für einen dramatischen Anfang noch immer nicht zu erwärmen vermochte, sinnierte Lemaître wehmütig über eine scheinbar außerhalb der Reichweite des Überprüfbaren liegende Möglichkeit: das Phönix-Universum.

Schon der russische Kosmologe Alexander Friedmann hatte aus den einsteinschen Gleichungen die Möglichkeit eines zyklischen Universums herausgelesen, und gegen Ende seines 1923 auf Russisch erschienenen Buchs »Die Welt als Raum und Zeit« meinte er dazu: »Unwillkürlich denkt man

an die Erzählung aus der indischen Mythologie von den Perioden des Lebens; es ergibt sich auch die Möglichkeit, von der ›Er-schaffung der Welt aus dem Nichts‹ zu sprechen.« Doch, fuhr Friedmann fort, unzulängliche Beobachtungen machen überprüfbare Aussagen unmöglich.

Auch Lemaître konnte sich dem Zauber des zyklischen Universums nicht entziehen. Er beschrieb die Auflösung von Raum und Zeit bei einem Kollaps. Die hohen Dichten würden zwar einen totalen Zusammenbruch bis zum Radius $R = 0$ verhindern, hingegen müsste die Kontraktion zum umgekehrten Vorgang, also zur Expansion führen. Diese Auferstehung aus einem Zustand nahe dem Null-Volumen wäre ein echter Anfang in dem Sinn, dass jede frühere Struktur vollständig ausgelöscht würde; ein solcher Vorgang – Kollaps und Expansion – könnte sich zyklisch wiederholen.

Doch die aus der Hubble-Konstanten berechnete Zykluslänge war damals viel zu kurz, um mit der Sternentwicklung vereinbar zu sein. Lemaîtres Bedauern ist unüberhörbar, wenn er schreibt: »Diese Lösungen, wo das Universum sich aufeinanderfolgend ausdehnt und zusammenzieht,

indem es sich periodisch auf eine Atommasse von der Größe des Sonnensystems reduziert, hatten einen unbestreitbaren poetischen Zauber und erinnerten an den Phönix der Legende.«

Fred Hoyle und der Urknall

Nach Eddingtons und Lemaîtres Formulierung ihrer unterschiedlichen Hypothesen über das ganz frühe Universum tat sich in der Kosmologie bis zum Aufkommen der Steady-State-Theorie Ende der 1940er Jahre nicht viel grundsätzlich Neues. Hingegen wurden auf dem Gebiet des inneren Aufbaus und der Entwicklung der Sterne bedeutende Fortschritte erzielt, insbesondere als 1957 Geoffrey und Margaret Burbidge, William Fowler und Fred Hoyle ihre Ergebnisse zur Nukleosynthese veröffentlichten. Es schien wahrscheinlich, dass eine Reihe von Elementen nicht in Lemaîtres heißem Zerfall des primordialen Atoms entstanden waren, sondern im Innern der Sterne; die Existenz einer anfänglich heißen Phase schien nicht mehr zwingend.

Die Steady-State-Hypothese (*steady state* bedeutet stationärer Zustand) wurde von Hermann Bondi, Thomas Gold und Fred Hoyle erstmals 1948 in Edinburgh der Roy-

al Astronomical Society vorgetragen und dann in zwei Publikationen in den »Monthly Notices« der weltweiten astronomischen Gemeinde vorgestellt. Der Vorschlag einer laufenden Entstehung neuer Materie war echter Zündstoff, und die drei Autoren wurden über Nacht berühmt. Ihr Vorwurf an Eddington und Lemaître war das Festhalten an der kosmologischen Konstanten und dass ihr Universum nur in räumlicher, nicht aber in zeitlicher Hinsicht homogen war. Sie verlangten nach einem auch zeitlich immer gleich bleibenden Universum. Diese Forderung nannten sie *the perfect cosmological principle* (das vollkommene kosmologische Prinzip): Danach zeigt sich unser gesamtes Universum so, wie es schon immer war und wie es immer bleiben wird. Obschon nach der Steady-State-Theorie überall fortwährend neue Materie entsteht, so bleiben doch – infolge der Expansion des Raums – die an einem Ort herrschenden Eigenschaften immer dieselben; es gibt keine qualitative Entwicklung.

Wir verzichten auf eine Schilderung der fast zwei Jahrzehnte dauernden Diskussionen um die Steady-State-Theorie. Sie blieb so lange die einzige ernsthafte Konkurrenz zur Urknalltheorie, bis sie 1965 mit der Ent-

deckung der Drei-Kelvin-Strahlung durch Arno Penzias und Robert Wilson ihr Ende fand.

Die Existenz dieser »kosmischen Hintergrundstrahlung« war bereits 1948 von Ralph Alpher, Hans Bethe und George Gamow theoretisch vorausgesagt worden. Diese Autoren hatten ein expandierendes Universum betrachtet und als dessen Anfangszustand ein heißes, hoch komprimiertes Neutronengas angenommen. Sie hatten vorausgesagt, dass die Wärmestrahlung dieses Gases heute noch als Emission eines Schwarzen Körpers bei der Temperatur von »etwa fünf Kelvin« zu beobachten sein sollte.

Die von Penzias und Wilson entdeckte Hintergrundstrahlung entsprach dieser Vorhersage erstaunlich genau. Ihre Existenz ließ sich durch Lemaîtres Urknallhypothese erklären, nicht aber im Rahmen der Steady-State-Theorie von Bondi, Gold und Hoyle.

In den Jahren 1948 und 1949 wurde Hoyle, er war damals Professor in Cambridge, von der BBC eingeladen, den Radiohörern verschiedene Gebiete der Astronomie näherzubringen. Die Vortragsreihe wurde 1950 publiziert. Am 28. März 1948 sprach

Hoyle über das Universum, und als er die Theorien zum expandierenden Universum vorstellte, prägte er den Ausdruck – : »Wir kommen nun zur Frage der Anwendung der Beobachtungstests auf die früheren Theorien. Diese Theorien beruhten auf der Hypothese, dass die gesamte Materie des Universums in einem großen Urknall (in one –) zu einem bestimmten Zeitpunkt der entlegenen Vergangenheit geschaffen wurde.« Auch in Hoyles gedruckter Version treffen wir mindestens zweimal auf –. Der Ausdruck war geboren, und er blieb haften: Urknall heißt er in deutscher Sprache. ↩

(Sterne und Weltraum, 5/2011)

Spektrum DER WISSENSCHAFT KOMPAKT

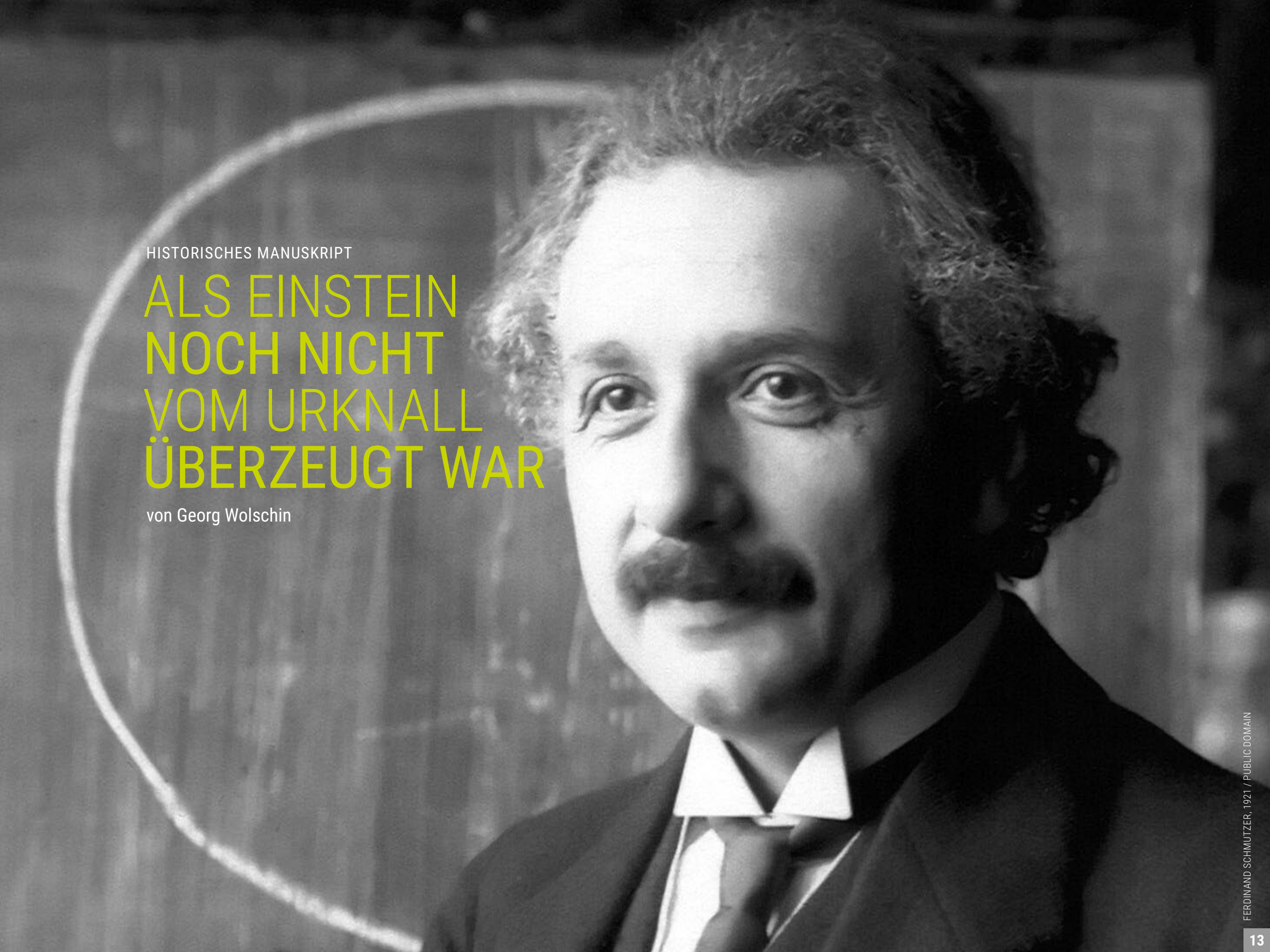
WAS IST ZEIT?

FÜR NUR
€ 4,99

Von kosmischen Zyklen zum
kosmologischen Zeitpfeil

Wie entsteht unser
Gefühl für die Zeit?

HIER DOWNLOADEN

A black and white portrait of Albert Einstein, showing his characteristic wild hair and mustache. He is wearing a dark suit, a white shirt, and a dark tie. In the background, a chalkboard is visible with a large circle drawn on it. The text is overlaid on the left side of the image.

HISTORISCHES MANUSKRIFT

ALS EINSTEIN NOCH NICHT VOM URKNALL ÜBERZEUGT WAR

von Georg Wolschin

Überraschend zeigt ein lange unbeachtetes Manuskript, dass Albert Einstein 1931 über Alternativen zur Urknalltheorie nachsann. Viel früher als Steady-State-Kosmologen wie Fred Hoyle, Hermann Bondi und Thomas Gold stellte er sich ein expandierendes Universum vor, in dem unablässig neue Materie entsteht.

Die Theorie vom Urknall ist nicht nur in der wissenschaftlichen Kosmologie, sondern auch in der breiteren Öffentlichkeit weitgehend akzeptiert. Ähnliches gilt für ihre wichtigste Erweiterung, der zufolge das Universum unmittelbar nach seiner Entstehung durch eine ultrakurze inflationäre Phase gegangen ist. Ein Unbehagen bleibt dennoch: Die Vorstellung einer explosionsartigen, exponentiellen Ausdehnung des Raums (die so genannte Inflation) im Gefolge einer Urknallsingularität (einem mathematischen Punkt ohne Ausdehnung, aber mit unendlich großer Energiedichte) ist zumindest gewöhnungsbedürftig.

Die erhofften ersten experimentellen Belege für die Inflation durch das am Südpol installierte BICEP2-Teleskop haben sich in Staub aufgelöst. Grundsätzliche Zweifel

an der Theorie könnte aber auch dieser Fall nicht auflösen, schließlich handelte es sich nur um ein Messproblem.

Trotzdem lohnt ein Blick auf mögliche Gegenmodelle, und sei es nur, um uns der Entstehungsgeschichte unseres gegenwärtigen Weltbilds noch einmal zu versichern. Überraschenderweise setzt sich ein kürzlich aufgespürtes Manuskript Albert Einsteins – des Schöpfers jener Feldgleichungen, die den gängigen kosmologischen Theorien zu Grunde liegen – tatsächlich mit einer Alternative zum Urknallmodell auseinander. Das handschriftliche und undatierte vierseitige Original trägt den Titel »Zum kosmologischen Problem« und stammt vermutlich aus dem Jahr 1931. Es gehört schon lange zum Bestand des Archivs der Hebräischen Universität in Jerusalem. Bisher sah man es aber irrtümlich als Vorläufer zu Einsteins im selben Jahr

publizierter Arbeit »Zum kosmologischen Problem der allgemeinen Relativitätstheorie« (Sitzungsberichte der Preußischen Akademie der Wissenschaften, 1931, S. 235–237) an – und ignorierte es.

Zeitgleiche Erkenntnis

Unabhängig voneinander haben die Physiker Cormac O’Raifeartaigh aus Irland und Harry Nussbaumer aus Zürich seine wissenschaftshistorische Bedeutung erkannt. Vieles weist darauf hin, dass Einstein das Manuskript während seiner Reise zum California Institute of Technology in Pasadena verfasst hatte, wo er mit dem Theoretiker Richard Tolman im Januar und Februar 1931 intensiv über kosmologische Fragen diskutierte. Ende Januar besuchte er auch Edwin Hubble am nahen Mount Wilson Observatory. Zu diesem Zeitpunkt war ihm bereits bewusst, dass sein Universum, das er in den



VESTO MELVIN SLIPHER

Von der Vorstellung eines expandierenden Universums war Albert Einstein nach Vesto Sliphers Entdeckung der Rotverschiebung von Licht ferner Galaxien und dank der Beobachtungsdaten von Hubble spätestens ab 1931 überzeugt.

Feldgleichungen von 1917 noch mit Hilfe eines »kosmologischen Glieds« – auch als kosmologische Konstante bekannt – als statisch zu konzipieren versucht hatte, nicht der Realität entsprach. Das zeigt unter anderem ein Interview, das er der »New York Times« am 2. Januar 1931 gab.

Unsere Vorstellung von einem expandierenden Universum verdankt sich Vesto Sliphers Beobachtungen der so genannten kosmologischen Rotverschiebung des Lichts entfernter Galaxien. Dieses Phänomen, das Slipher zwischen 1912 und 1917 am Lowell Observatory in Arizona untersucht hatte, gilt als Hinweis darauf, dass die elektromagnetischen Wellen einen sich ausdehnenden Raum durchquert haben müssen, bevor sie auf unsere irdischen Detektoren treffen. In den Jahren von 1929 bis 1931 erkannten dann Edwin Hubble und Milton Humason, dass zwischen der Entfernung von Galaxien und ihrer »Fluchtgeschwindigkeit« ein linearer Zusammenhang besteht. Auf dieser empirischen Basis formulierten der russische Physiker George Gamov und andere schließlich das Urknallmodell.

Nach der Entdeckung der Raumexpansion verwarf Einstein das kosmologische

Glied wieder: In seinen Feldgleichungen hatte es die Funktion einer antigravitativen Komponente, die der anziehenden Gravitation entgegenwirken und seiner Ansicht nach für die Stabilität des Universums sorgen sollte – nun war es verzichtbar geworden. Mathematisch war die Sache ohnehin längst geklärt. Der russische Physiker Alexander Friedmann hatte als Erster darauf hingewiesen, dass Einsteins statisches Universum instabil war. Und bereits 1922 hatte er in seiner Arbeit »Über die Krümmung des Raumes« gezeigt, dass Einsteins Feldgleichungen auch ein expandierendes Universum beschreiben können. Einstein widersprach zwar, ließ sich später aber doch überzeugen. In einer späteren Diskussion mit George Gamov nannte er das kosmologische Glied dann sogar seinen »biggest blunder«, seine größte Eselei.

Altersloses Universum

Das Manuskript zeigt, dass Einstein dennoch weiter mit dem kosmologischen Glied experimentierte – diesmal, um ein sogenanntes Gleichgewichtsmodell (»steady state«) zu entwickeln. Ein Steady-State-Universum expandiert gemäß den beobachteten Rotverschiebungen, seine mittlere

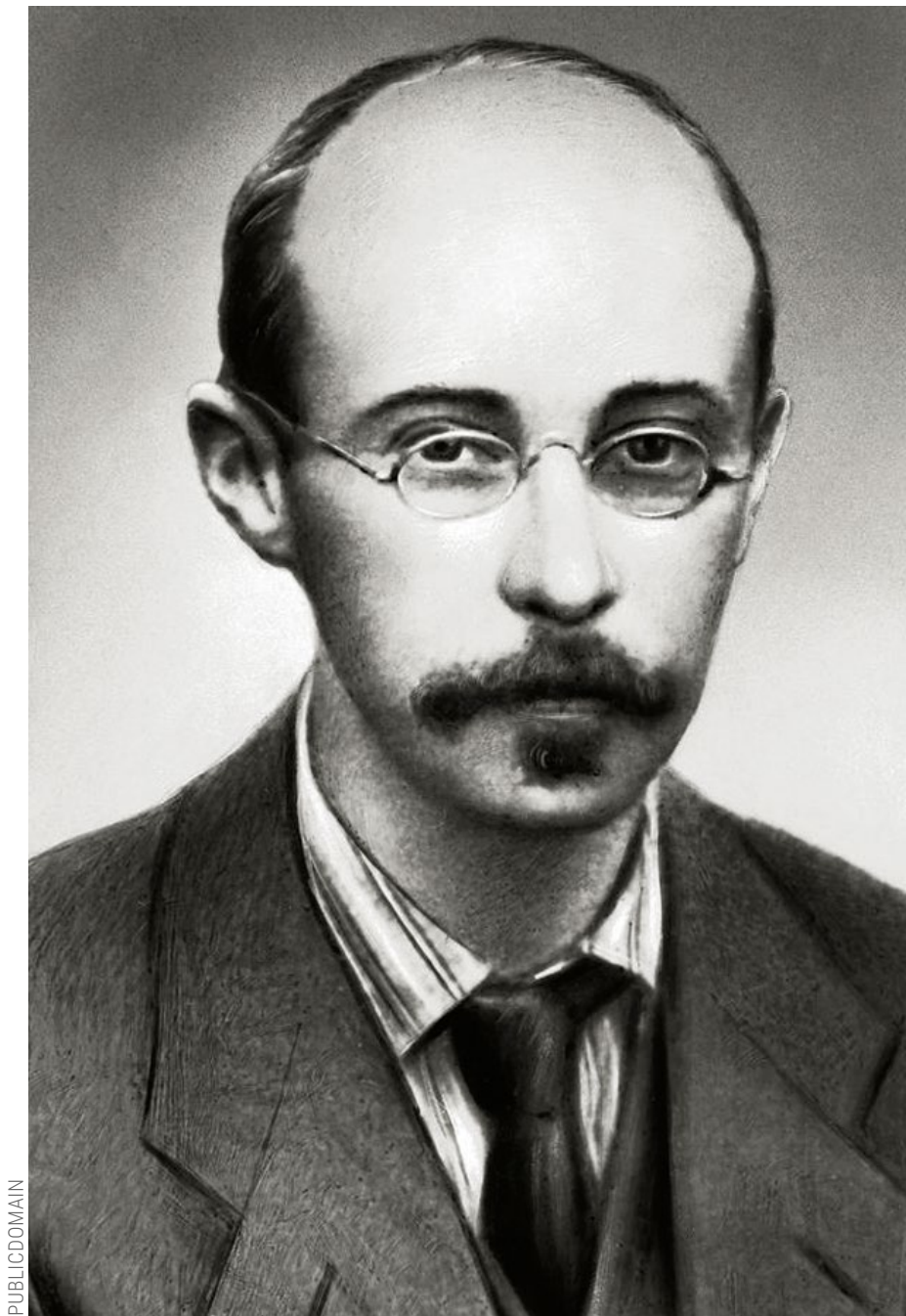
re Materiedichte bleibt aber unverändert, da im ganzen Raum kontinuierlich neue Materie aus der so genannten Vakuumenergie entsteht. Teilchen, die »ihren« Raumbereich verlassen und so zur Expansion beitragen, werden damit durch neu erzeugte Teilchen ersetzt. Das kosmologische Glied diente Einstein nun nicht mehr dazu, (vermeintlich) ein statisches Universum zu garantieren, sondern stellte stattdessen die zur Teilchenerzeugung notwendige Energie bereit. So hoffte er, sein statisches Modell in eines zu überführen, in dem ein dynamisches Gleichgewicht zwischen Expansion und Materieproduktion herrscht – ein quasi altersloses Universum von unbegrenzter Dauer, das auf großen Skalen stets gleich aussieht.

Als er wenige Tage später einen Rechenfehler im Manuskript korrigierte, wurde ihm allerdings klar: Die von ihm zunächst gefundene Beziehung zwischen der mittleren Dichte des Universums und dem Parameter, der seine Expansion und damit indirekt auch die Teilchenerzeugung bestimmte, war falsch und verlor in der neuen Fassung jegliche physikalische Aussagekraft.

Der erste Anlauf, ein Steady-State-Universum zu beschreiben, war also geschei-

tert – wohl deshalb blieb das Manuskript unpubliziert. Weil Einstein anschließend keine weiteren Versuche in dieser Richtung unternahm, blieb die Arbeit auch ohne direkten Einfluss auf die Entwicklung der Kosmologie. Erst 17 Jahre später entwarfen dann Fred Hoyle sowie Hermann Bondi und Thomas Gold die ersten detaillierten Steady-State-Theorien und publizierten sie im Verlauf des Jahres 1948 in den »Monthly Notices of the Royal Astronomical Society«. Insbesondere Hoyle legte die Feldgleichungen ohne kosmologisches Glied zu Grunde, führte aber stattdessen einen neuen Term ein, der die Teilchenerzeugung beschrieb. So vermied er die inkonsistenten Resultate, wie sie Einstein erhalten hatte. Tatsächlich erfreute sich das Steady-State-Universum einige Zeit lang einer gewissen Popularität. Es wurde aber weitgehend obsolet, als Arno Penzias und Robert Wilson 1965 die kosmische Hintergrundstrahlung nachwiesen und damit nachhaltig das Urknallmodell stärkten.

1998 kehrte die kosmologische Konstante überraschend wieder in die Feldgleichungen der allgemeinen Relativitätstheorie zurück. Zwei Beobachtergruppen hatten bei der Vermessung ferner Supernovae unab-



ALEXANDER FRIEDMANN

Bereits 1922 hatte der russische Physiker und Mathematiker Alexander Friedmann gezeigt, dass Einsteins Feldgleichungen das expandierende Universum auch korrekt zu beschreiben vermögen.

hängig voneinander festgestellt, dass sich die Expansion des Universums seit etwa fünf Milliarden Jahren beschleunigt. Der Abbremsung durch die zwischen den Galaxien herrschende Schwerkraft scheint also eine antigravitative Kraft entgegenzuwirken. Ergänzende Beobachtungen zum Beispiel ferner Galaxienhaufen und der Fluktuation des Mikrowellenhintergrunds sichern diesen 2011 mit dem Nobelpreis für Physik ausgezeichneten Befund inzwischen sehr gut ab.

Die Kosmologen führten darum das Konzept einer Dunklen Energie ein: eine gleichmäßig im All verteilte Energieform, die der Schwerkraft entgegenwirkt. Je nach ihren noch genauer zu bestimmenden Eigenschaften könnte sie sich tatsächlich sehr gut durch Einsteins kosmologische Konstante beschreiben lassen. Allerdings gibt es weiterhin denkbare Alternativen, wie etwa eine zeitlich veränderliche und mit einem neuen skalaren Feld verknüpfte Dunkle Energie. Einige Forscher gehen zudem davon aus, dass vielleicht die grundlegenden Gravitationsgleichungen verändert werden müssen. Zwar haben sie sich auf kleineren Skalen stets als korrekt erwiesen, aber über kosmologische Distanzen hinweg ist ihre Gültigkeit streng genom-

men nur eine unüberprüfte, wenn auch plausible Vermutung. Und schließlich dürfen wir nicht vergessen, dass es vor allem darum geht, endlich auch die noch unbekannten physikalischen Mechanismen hinter den mathematischen Formeln zu entschlüsseln. ↻

(Spektrum der Wissenschaft, 7/2014, aktualisiert)

Planck Collaboration: Planck Intermediate Results. XIX.

An Overview of the Polarized Thermal Emission from Galactic Dust. In: Astrophysics of Galaxies, 5. Mai 2014

Einstein, A.: Zum kosmologischen Problem der allgemeinen Relativitätstheorie. In: Sitzungsberichte der Königlich Preussischen Akademie der Wissenschaften, S. 235-237, 1931

Liu, H., Mertsch, P., Sarkar, S.: Fingerprints of Galactic Loop I on the Cosmic Microwave Background. In: Cosmology and Nongalactic Astrophysics, 7. April 2014

Nussbaumer, H.: Einstein's Aborted Attempt at a Dynamic Steady-State Universe. In: History and Philosophy of Physics, 24. Februar 2014

O'Riافةartaigh, C., McCann, B.: Einstein's Cosmic Model of 1931 Revisited: An Analysis and Translation of a Forgotten Model of the Universe. In: The European Physical Journal H 39, S. 63-85, 2014

Mortonson, M. J., Seljak, U.: A Joint Analysis of Planck and BICEP2 B Modes Including Dust Polarization Uncertainty. In: Cosmology and Nongalactic Astrophysics, 22. Mai 2014

Alles, was Sie
wissen müssen.
Auf Ihrem Bildschirm




DAS SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT **DIGITALABO**

Wissenschaftler berichten
über die aktuellen Erkenntnisse
ihrer Fachgebiete.

Jahrespreis (12 × im Jahr) € 60,-;
ermäßigt (auf Nachweis) € 48,-

HIER ABONNIEREN

The background is a vibrant, colorful image of a cosmic nebula or galaxy, featuring swirling clouds of gas in shades of orange, red, yellow, and blue against a dark space filled with stars. A large black circle is centered on the page, containing the title and authors' names. The text 'ALTERNATIVE HYPOTHESE' is written in a white, sans-serif font along the top arc of the circle.

ALTERNATIVE HYPOTHESE

Das Schwarze Loch am Beginn der Zeit

von Niayesh Afshordi, Robert B. Mann und Razieh Pourhasan

Nach dem kosmologischen Standardmodell begann das Weltall mit der »Singularität« des Urknalls – mit einem Zustand, bei dem alle physikalischen Beschreibungen versagen. Eine neue Hypothese postuliert nun als Ursprung des Alls ein Schwarzes Loch in einem höherdimensionalen Universum.

Das berühmte Höhlengleichnis des antiken Philosophen Platon (428–348 v. Chr.) handelt von Menschen, die ihr Leben angekettet in einer dunklen Höhle verbringen. Hinter ihnen brennt ein Feuer, und zwischen ihnen und dem Flammenschein ziehen Objekte vorbei, die Schatten auf eine vor den Gefesselten liegende Wand werfen. Die zweidimensionalen Schatten sind alles, was diese Menschen je zu sehen bekommen – ihre einzige Realität. Die engen Ketten hindern die Gefangenen daran, zu erkennen, dass die Welt in Wirklichkeit eine zusätzliche Dimension besitzt, womit sich alle Phänomene erklären, die sie sehen.

Platons Gleichnis ähnelt dem neuen kosmologischen Modell, das wir vorschlagen. Vielleicht leben wir alle in einer gigantischen kosmischen Höhle, die mit dem Beginn der Zeit entstand. Dem herkömmlichen Modell zufolge begann das Universum mit einem Urknall, der von einem unendlich dichten Punkt ausging. Doch nach unseren Berechnungen lässt sich der Anfang des Universums auf eine Epoche vor dem Urknall zurückführen, in der es eine zusätzliche Raumdimension gab. Und die-

se hinterließ vielleicht sogar Spuren, die wir durch astronomische Beobachtungen nachweisen könnten.

Das All, das wir wahrnehmen und vermessen, besitzt neben der Zeitdimension drei Raumdimensionen. In unserem Szenario ist dieses »dreidimensionale Universum« nur der »Schatten« einer Welt mit vier Raumdimensionen. Unser gesamtes Weltall entstand demnach, während ein Stern in dem Suprauniversum kollabierte, wobei die Implosion eine dreidimensionale Hülle um ein vierdimensionales Schwarzes Loch erzeugte. Unser Universum ist diese Hülle.

Das holografische Prinzip

Warum postulieren wir etwas, das auf den ersten Blick so absurd anmutet? Wir haben dafür zwei Gründe. Erstens sind unsere Ideen keine leeren Spekulationen, sondern beruhen auf der Mathematik, die Raum und Zeit beschreibt. In den vergangenen Jahrzehnten haben Physiker die so genannte holografische Theorie ausgearbeitet. Mit diesem mathematischen Werkzeug übersetzen sie die Beschreibung von Ereignissen, die in einer gewissen Anzahl von Dimensionen stattfinden, in die Physik einer

AUF EINEN BLICK

Die Ursache des Urknalls

- 1** Die moderne Kosmologie verfügt über ein bemerkenswert genaues Bild von der Geschichte des Universums. Doch dabei bleiben einige grundlegende Fragen offen. Deren größte betrifft das Wesen des Urknalls, mit dem unser Universum plötzlich und heftig aus einem unendlich dichten Punkt hervorging.
- 2** Die Autoren haben eine Hypothese entwickelt, die erklären könnte, was hinter dem Urknall steckt: der Gravitationskollaps eines Sterns in einem Universum mit vier Raumdimensionen.
- 3** Das neue Szenario löst auf einen Schlag mehrere kosmologische Grundprobleme – und es lässt sich durch genaue Analysen der kosmischen Hintergrundstrahlung überprüfen.

anderen Raumgeometrie. Zum Beispiel können Forscher Gleichungen der Flüssigkeitsdynamik in zwei Dimensionen relativ einfach lösen und diese Lösungen verwenden, um Vorgänge in einem viel komplizierteren System zu verstehen – etwa die Dynamik eines dreidimensionalen Schwarzen Lochs. Mathematisch sind die beiden Beschreibungen austauschbar: Die Flüssigkeit dient als perfektes Analogon für das exotische Schwarze Loch.

Der Erfolg des holografischen Prinzips hat viele Wissenschaftler überzeugt, dass dabei mehr im Spiel ist als eine simple mathematische Transformation. Vielleicht sind die Grenzen zwischen den Dimensionen weniger stabil, als wir dachten. Ähnlich wie Platons Gefangene glauben wir möglicherweise nur, die Welt sei dreidimensional, während wir sie erst richtig verstehen können, sobald wir in der vierten Dimension nach Erklärungen suchen.

Der zweite Grund für unser vierdimensionales Weltmodell ist, dass seine genaue Untersuchung uns helfen kann, grundlegende Fragen über Ursprung und Struktur des Kosmos zu klären. Gemäß der modernen Kosmologie folgte unmittelbar auf den Urknall die so genannte Inflation – eine

rapide Expansionsphase des Raums, in der das frühe Universum sein Volumen schlagartig um den Faktor 10^{78} oder noch mehr vergrößerte. Doch diese Expansion liefert keinerlei Erklärung für die Ursache des Urknalls. Unser vierdimensionales Universum hingegen könnte das größte Geheimnis enträtseln: Woraus entstand das Universum?

»Doch die Expansion
liefert keinerlei Erklärung
für die Ursache des
Urknalls«

Fünf kosmologische Probleme

Auf das vierdimensionale Universum kamen wir, als wir die Fragen betrachteten, die das dreidimensionale aufwirft. Der Erfolg der modernen Kosmologie täuscht nämlich über einige grundlegende und komplexe Rätsel hinweg, die sich vielleicht mit einer holografischen Erklärung lösen lassen.

Kosmologen können die gesamte Geschichte des Universums mit nur wenigen

Gleichungen, die vor allem von Albert Einstein stammen, und fünf unabhängigen Parametern vom heutigen Tag bis zu einem winzigen Sekundenbruchteil nach dem Urknall zurückverfolgen. Die fünf Parameter sind die Dichte der gewöhnlichen Materie, der Dunklen Materie und der Dunklen Energie (darüber gleich mehr) sowie die Amplitude und die Form der Quantenfluktuationen im frühen Universum. Dieses so genannte Λ -CDM-Modell (Λ für die kosmologische Konstante Lambda, CDM für Cold Dark Matter, kalte Dunkle Materie) kann hunderte, wenn nicht tausende gemessene Daten erklären, und zwar über Entfernungen, die von einer Million Lichtjahre bis zu 10 Milliarden Lichtjahren reichen – bis an den Rand unseres beobachtbaren Universums. Doch diese Erfolge bedeuten nicht, dass unsere Aufgabe erledigt ist. Noch immer stehen wir vor fundamentalen Fragen über das Wesen des Kosmos.

Problem 1: Wir verstehen die fünf Parameter nicht.

Ein zentrales Rätsel betrifft die Dichte von Materie und Energie im Universum. Bis vor wenigen Jahrzehnten glaubten die Astronomen, die aus den chemischen Elementen

ten des Periodensystems bestehende gewöhnliche Materie sei die vorherrschende Form von Masse und Energie. Neuere kosmologische Beobachtungen haben dieses Bild radikal revidiert – und wurden mit drei Nobelpreisen gewürdigt. Heute wissen wir, dass die Dichte der normalen Materie bloß 5 Prozent der gesamten Energiedichte des Universums ausmacht. Weitere 25 Prozent steuert die Dunkle Materie bei, eine unsichtbare Substanz, die sich nur durch ihre Gravitationsanziehung bemerkbar macht. Und zu 70 Prozent besteht das Universum aus mysteriöser Dunkler Energie. Sie verursacht, dass sich die Expansion des Universums beschleunigt, statt sich wie ursprünglich erwartet durch die Gravitationsanziehung der Materie zu verlangsamen. Was Dunkle Materie und Dunkle Energie sind und warum sie derart große Teile des Alls ausmachen, wissen wir nicht.

SCHWARZES LOCH UMHÜLLT VON GAS- UND STAUBWOLKE

Die runde Gas- und Staubwolke (roter Kreis links im Bild) verhüllt ein Schwarzes Loch – das Überbleibsel einer gewaltigen Sternexplosion in unserem dreidimensionalen Weltraum.

NASA / JPL-CALTECH



Vielleicht fänden wir Antworten auf diese Fragen, wenn wir den Urknall besser verstünden – den abrupten Beginn von Raum und Zeit in einem heißen Plasma aus Strahlung und Teilchen bei einer Temperatur von über 10^{27} Grad. Es ist kaum vorstellbar, wie aus der Situation in den ersten Augenblicken nach dem Urknall der heutige Zustand des Universums hervorgehen konnte: ein Kosmos mit fast gleichförmiger Temperatur und mit im Großen und Ganzen flacher Geometrie, das heißt ohne Raumkrümmung.

Die kosmische Inflation liefert die derzeit beste Erklärung für die großräumige Struktur des Alls: Sie sorgt für ein flaches Universum, indem sie alle gekrümmten Regionen der Raumzeit ausbügelt, und bringt es auf gleichförmige Temperatur. Außerdem bläht sie wie ein kosmischer Vergrößerungsapparat winzige Quantenfluktuationen der Energiedichte auf kosmische Größe auf. Diese Fluktuationen bilden wiederum die Keime für das Wachstum von Strukturen wie Galaxien, Sternen, Planeten und schließlich sogar für die Entstehung von lebenden Organismen.

Die Inflation gilt allgemein als ein sehr erfolgreiches Erklärungsmodell. Jahrzehn-

telang haben Kosmologen dessen Vorhersagen mit immer präziseren Beobachtungen der kosmischen Hintergrundstrahlung verglichen, in der winzige Temperaturschwankungen die Dichtefluktuations im frühen Universum widerspiegeln. Das Planck-Weltraumobservatorium der europäischen Weltraumbehörde ESA hat erst kürzlich die wichtigsten Aussagen des Inflationsmodells bestätigt: Im Wesentlichen ist unser Universum flach, und seine Massenverteilung weicht nur um weniger als 1 zu 60 000 von völliger Gleichförmigkeit ab. Außerdem stimmen Amplitude und Form der großräumigen Materiefluktuationen einigermaßen mit dem erwarteten Vergrößerungseffekt überein, den die Inflation auf das Quantenvakuum ausüben sollte.

Problem 2: Wir verstehen die Inflation nicht wirklich.

Aber was trieb diese Inflation an, für die immerhin eine Menge Energie nötig war? Nach gängiger Vorstellung war das Universum kurz nach dem Urknall von einem hypothetischen Quantenfeld namens Inflaton erfüllt. Das 2012 mit dem Large Hadron Collider am europäischen Kernforschungszentrum CERN entdeckte Higgs-Teilchen hat

viele Eigenschaften mit den Quantenteilchen des Inflatonfelds gemeinsam und ist ein möglicher Kandidat dafür. Das Inflaton wäre sowohl für die anfängliche beschleunigte Expansion verantwortlich als auch für die Struktur unseres Alls, denn die einzigen merklichen Dichteunterschiede im frühen Universum werden durch die winzigen Quantenfluktuationen des Inflatonfelds verursacht. Doch das Inflaton löst unsere Probleme nicht, sondern schiebt sie nur ein Stück zurück. Wir wissen nichts über seine Eigenschaften, seine Herkunft und seinen Nachweis. Wir sind uns nicht einmal sicher, ob es wirklich existiert. Außerdem verstehen die Physiker nicht, was die Inflation beendete. Wenn irgendein Energiefeld ein exponentiell expandierendes Universum antreibt, muss es einen Grund geben, warum dieses Feld plötzlich zu existieren aufhört. Auch haben wir keine befriedigende Erklärung für den Ursprung der fünf Parameter im Λ -CDM-Modell, die sehr präzise gewählt werden müssen, um mit den Beobachtungen übereinzustimmen. Und uns fehlt eine zufrieden stellende Beschreibung der Geschichte unseres Kosmos vor der Inflationsphase, das heißt in den ersten 10^{-35} Sekunden nach dem Urknall.

Problem 3: Wir verstehen nicht, wie alles begann.

Der blinde Fleck der Kosmologie ist der Urknall selbst – die plötzliche, heftige Entstehung von Raum, Zeit und Materie aus einem unendlich dichten Punkt, einer so genannten Singularität. Das ist etwas unvorstellbar Bizarres: Raum und Zeit krümmen sich zu einem Punkt zusammen, Zukunft und Vergangenheit sind ununterscheidbar. Alle physikalischen Gesetze brechen zusammen. Eine Singularität ist ein Universum ohne Gesetz und Ordnung, aus dem alles Mögliche entstehen kann. Nichts spricht dafür, dass eine Singularität ein derart geordnetes Universum wie das unsere zu erzeugen vermag.

Eigentlich sollte daraus eher ein völlig chaotisches Weltall hervorgehen, in dem von einem Punkt zum nächsten riesige Temperaturunterschiede herrschen. Außerdem wäre kaum zu erwarten, dass die Vergrößerungskraft der Inflation alles glatt ausbügelt. Sind die Fluktuationen zu ausgeprägt, kann die Inflation vielleicht überhaupt nicht beginnen. Die Probleme einer Singularität kann Inflation allein jedenfalls nicht lösen. Singularitäten sind seltsam, aber nicht selten. Sie entstehen auch im

Zentrum von Schwarzen Löchern, den kollabierten Überbleibseln massereicher Sterne. Alle Sterne sind natürliche Fusionsreaktoren, die leichte Elemente – vorwiegend Wasserstoff – zu schwereren verschmelzen. Die Kernfusion versorgt den Stern so lange mit Energie, bis sich der Kernbrennstoff schließlich erschöpft und die Schwerkraft die Oberhand gewinnt. Falls die Sternmasse mindestens das Zehnfache unserer Sonne beträgt, kollabiert der Stern und explodiert als Supernova. Wenn der Stern noch größer ist – 15 bis 20 Sonnenmassen –, hinterlässt die Supernova einen ungemein dichten Sternenrest, der unaufhaltsam weiter zusammenstürzt und schließlich als punktförmiges Schwarzes Loch endet.

Dem extrem starken Schwerefeld in der Nähe eines Schwarzen Lochs vermag nichts zu entkommen, nicht einmal Licht. Dieser alles verschluckende Bereich hat eine Außengrenze in Form einer Kugelfläche, den so genannten Ereignishorizont. Sobald irgendetwas, zum Beispiel Sternmaterial, diese Grenze überschreitet, wird es vom übrigen Universum abgeschnitten und unweigerlich zur Singularität im Zentrum gezogen.

Wie beim Urknall brechen im Zentrum eines Schwarzen Lochs die physikalischen Gesetze zusammen. Es gibt aber einen entscheidenden Unterschied: den Ereignishorizont, der äußere Beobachter vor der unberechenbaren, katastrophalen Wirkung der Singularität schützt; dieser Umstand wird als kosmische Zensur bezeichnet. Die Umhüllung durch den Ereignishorizont begrenzt die Wirkung der Singularität. Da ihre krassen Effekte nicht entkommen können, gelten für alle Beobachtungen die gängigen physikalischen Gesetze. Aus einiger Entfernung betrachtet ist das Schwarze Loch eine sehr einfache, glatte und gleichförmige Struktur, die nur durch Masse, Drehimpuls und gegebenenfalls elektrische Ladung beschrieben wird. Wie Physiker scherzhaft sagen, hat das Schwarze Loch »keine Haare«, das heißt keine weiteren Eigenschaften.

Nach üblichem Verständnis versteckt sich die Urknall-Singularität dagegen nicht hinter einem Ereignishorizont, der ihre katastrophale Gesetzlosigkeit bändigen würde. Doch wir schlagen nun ein Szenario vor, das den Urknall in eine Art Fata Morgana verwandelt. Gemäß dieser Idee ist dessen Singularität von einer Hülle umgeben, die

uns vor ihren sprunghaften und regellosen Effekten schützt.

Kollaps in einer zusätzlichen Dimension

Eine solche Hülle unterscheidet sich vom gewöhnlichen Ereignishorizont in einem wichtigen Punkt. Da wir unser Universum in drei Raumdimensionen wahrnehmen, muss auch der Ereignishorizont, der die Singularität im Herzen des Urknalls umgibt, drei Raumdimensionen besitzen und nicht bloß zwei wie jener eines Schwarzen Lochs. Wenn wir annehmen, dass dieser Ereignishorizont ebenfalls aus einem kosmischen Kollaps hervorging – so wie ein zweidimensionaler Ereignishorizont durch den Kollaps eines dreidimensionalen Sterns entsteht –, dann muss jener Zusammenbruch in einem Universum mit vier Raumdimensionen stattgefunden haben.

Ein Szenario mit mehr als drei Raumdimensionen ist fast so alt wie die allgemeine Relativitätstheorie selbst. Die Idee wurde ursprünglich von dem deutschen Mathematiker Theodor Kaluza (1885–1954) und dem schwedischen Physiker Oskar Klein (1894–1977) in den 1920er Jahren entwickelt. Sie geriet fast in Vergessenheit und wurde erst in den 1980er Jahren im Rah-

men der Stringtheorie wieder aufgegriffen; diese Theorie beschreibt Elementarteilchen als Schwingungszustände eindimensionaler Fäden oder Strings. Später nutzten Theoretiker den Ansatz für eine Kosmologie mit so genannten Branen, wobei Bran ein von Membran abgeleitetes Kunstwort ist.

Die Grundidee einer Branwelt besagt, dass unser dreidimensionales Universum in eine größere Welt von vier oder mehr Raumdimensionen eingebettet ist. Das dreidimensionale Universum wird Bran genannt, und das größere Universum Bulk (für englisch: große Menge). Alle bekannten Materie- und Energieformen bewegen sich in unserer dreidimensionalen Bran wie ein auf eine Leinwand projizierter Film – oder wie die Schattenwirklichkeit für Platons Höhlenbewohner. Eine Ausnahme bildet die Gravitation: Sie durchdringt den gesamten höherdimensionalen Bulk.

Falls ein Bulk-Universum mit vier Raumdimensionen schon vor dem Urknall existiert hat, gäbe es in diesem Suprauniversum vermutlich vierdimensionale Sterne und Galaxien. Diese höherdimensionalen Strahlungsquellen würden genau wie unsere dreidimensionalen Sterne im Lauf der

Zeit ihren Brennstoff verbrauchen und zu Schwarzen Löchern kollabieren.

Wie sieht ein vierdimensionales Schwarzes Loch aus? Es hat ebenfalls einen Ereignishorizont – eine Grenzfläche ohne Wiederkehr, aus der kein Licht entkommen kann. Doch an Stelle einer zweidimensionalen Fläche wie beim gewöhnlichen Schwarzen Loch erzeugt ein vierdimensionales einen Ereignishorizont mit drei Raumdimensionen.

Tatsächlich ergibt unser vierdimensionales Kollapsmodell, dass das beim Zusammenbruch ausgestoßene Material eine langsam expandierende dreidimensionale Bran um den dreidimensionalen Ereignishorizont bilden kann. Unser Universum ist diese »Drei-Bran« – eine Art Hologramm eines vierdimensionalen Sterns, der zu einem Schwarzen Loch kollabiert ist. In diesem Modell bleibt die kosmische Urknall-Singularität vor uns verborgen; sie wird für immer hinter einem dreidimensionalen Ereignishorizont eingesperrt sein.

Ein All aus Abfall

Für unser Modell spricht zunächst einmal, dass es die nackte Singularität am Beginn des Universums eliminiert. Aber was ist

mit den anderen hartnäckigen Problemen der Kosmologie, insbesondere mit der Tatsache, dass der Kosmos nahezu flach und äußerst gleichförmig strukturiert ist? Da das vierdimensionale Bulk-Universum schon beliebig lange existiert haben mag, hätten etwaige heiße und kalte Stellen im Bulk viel Zeit gehabt, sich auszugleichen. Das Bulk-Universum wäre glatt, und unser Drei-Bran-Universum würde diese Glätte erben. Außerdem besäße auch ein vierdimensionales Schwarzes Loch fast keine Eigenschaften – es hätte »keine Haare« –, und darum wäre auch unser daraus entstehendes Drei-Bran-Universum glatt. Je größer die Masse des vierdimensionalen Sterns, desto flacher die Drei-Bran. Somit ist unser All einfach deshalb so flach, weil es aus dem Abfall besteht, den der Kollaps eines schweren Sterns hinterlassen hat.

Auf diese Weise erklärt unser Modell des holografischen Urknalls nicht nur die rätselhafte Gleichförmigkeit und Flachheit des Universums, ohne sich auf die Inflation der Standardkosmologie zu berufen, sondern beseitigt auch die zerstörerischen Effekte der anfänglichen Singularität.

Die Idee mag weit hergeholt erscheinen. Daher ist es gut, dass sie sich auf mehrere

Arten testen lässt. Der Schlüssel ist die kosmische Hintergrundstrahlung. Außerhalb unserer Drei-Bran sollte es zusätzliches vierdimensionales Bulk-Material geben, das durch die Schwerkraft des Schwarzen Lochs nahe herangezogen wurde. Nach unseren Berechnungen erzeugen in diesem Bulk-Material auftretende Temperaturfluktuationen ihrerseits Fluktuationen in der Drei-Bran, die wiederum den Strahlungshintergrund geringfügig, aber messbar verzerren.

Unsere Vorhersagen weichen von den neuesten Daten der Planck-Sonde um rund 4 Prozent ab, doch diese Diskrepanz kann an Nebeneffekten liegen, die wir noch nicht berücksichtigt haben.

Falls das vierdimensionale Schwarze Loch außerdem rotiert – was bei Schwarzen Löchern die Regel ist –, sieht unsere Drei-Bran nicht in allen Richtungen gleich aus. Die großräumige Struktur unseres Universums wäre nicht ganz isotrop. Astronomen könnten diese Richtungsabhängigkeit als kleine Unterschiede des Strahlungshintergrunds in verschiedenen Himmelsrichtungen nachweisen.

Der holografische Urknall löst zwar ein riesiges Rätsel – den Ursprung unseres Uni-


versums –, wirft aber zugleich neue Fragen auf. Vor allem diese: Woher stammt das Vorläuferuniversum unseres Weltalls?

Für die Suche nach einer Antwort können wir wieder Platons Gleichnis heranziehen. Die Gefangenen werden schließlich befreit, doch als sie aus der Höhle treten, blendet die Sonne sie völlig. Es dauert lange, bis ihre Augen sich an das Tageslicht gewöhnen. Zunächst nehmen sie nur Schatten und Widerschein wahr, später können sie am Nachthimmel Mond und Sterne erkennen. Schließlich begreifen sie, dass die Sonne der Grund ist, warum es überhaupt etwas zu sehen gibt – Tag und Nacht, Jahreszeiten und Schatten.

Doch wie es kommt, dass die Sonne scheint, das verstehen Platons befreite Gefangene genauso wenig, wie wir das vierdimensionale Bulk-Universum verstehen. Aber zumindest wissen sie nun, wo sie nach einer Antwort suchen müssen. ↩

(Spektrum der Wissenschaft, 2/2015)

Pourhasan, R. et al: Out of the White Hole: A Holographic Origin of the Big Bang. In: Journal of Cosmology and Astroparticle Physics 2014, Artikel Nr. JCAP04(2014)005, 2014



KONFORME ZYKLISCHE KOSMOLOGIE

URKNALL ODER NICHT?

von Christian Wolf

Möglicher Startpunkt der Expansion des Weltalls ist eine Singularität. Sie ergibt sich aus einer Extrapolation von Einsteins allgemeiner Relativitätstheorie – die dort jedoch nicht mehr gilt. Vermutlich sind es Quanteneffekte, die das Geschehen nahe am Urknall in einem winzigen Weltall bestimmen. Zur Lösung dieser und weiterer Missstände entwickelte Roger Penrose die »konforme zyklische Kosmologie«.

Noch immer umgeben den Urknall viele Geheimnisse. Was geschah da? Was löste ihn aus? Gab es ihn überhaupt? Von dem griechischen Philosophen Aristoteles (384–322 v. Chr.) hatte die Kultur Europas den Glauben an einen unveränderlichen Himmel geerbt, der sich bei Physikern noch bis ins 20. Jahrhundert hielt. Der große englische Astronom Fred Hoyle (1915–2001) vertrat noch in den 1960er Jahren die Ansicht eines statischen Universums (englisch: steady-state theory).

Dabei war Aristoteles nicht unumstritten. Er zerlegte das All in zwei Teile – einen Himmel, dessen Perfektion in statischer, ewiger Ruhe lag, sowie eine von Unbeständigkeit geplagte Erde. Die christliche Kirche propagierte diese Sicht weiter, obwohl sie, wie andere Religionen auch, den Mythos eines Schöpfungsakts pflegte. Lagen die beiden Sichtweisen im Widerspruch? Schon im 11. Jahrhundert diskutierten Kardinäle die Frage »Wenn es einen Anfang gab, was war denn davor?«. Die reine Lehre von der Unveränderlichkeit des Alls wurde erst widerlegt, als Tycho Brahe erkannte, dass der »neue Stern« von 1572 keine mess-

bare Parallaxe aufwies und demzufolge kein atmosphärisches Phänomen sein könne, sondern weit hinter dem Mond unter den Sternen liegen müsse. Wandel fand also auch im Himmel statt!

Doch Anfang des 20. Jahrhunderts erkannte der amerikanische Astronom Vesto Slipher (1875–1969), dass das Licht von Galaxien rotverschoben erscheint. Diese Beobachtung deutete der belgische Astronom und Theologe Georges Lemaître (1894–1966) korrekt als Folge eines expandierenden Alls. Seitdem belegen immer genauere Messungen die stetige Ausdehnung des Universums, wie etwa die bekannte Relation zwischen Rotverschiebung und Geschwindigkeit des US-Astronomen Edwin Hubble (1889–1953). Damit lag die Vermutung nahe, das All möge in vielleicht einem kleinen hochkomprimierten Zustand begonnen haben, in einer Art Schöpfungsakt. Der moderne Begriff »Urknall« wurde tatsächlich erst 1949 von Fred Hoyle in einem BBC-Radiointerview geprägt, als er eben diesen, den »Big Bang«, für absurd erklärte. Ein starkes Argument für den Urknall war aber wiederum Einsteins allgemeine Relativitätstheorie von 1916: Denn rechnete man die Expansion zurück in der Zeit,

AUF EINEN BLICK

Der Urknall in Kürze

- 1 Beim Standardmodell der Kosmologie hatte das Universum beim Urknall die Größe null, war also eine Singularität. Dort versagen bei unendlicher Dichte, Temperatur und Raumkrümmung alle bekannten Naturgesetze.
- 2 Auch die beobachtete Gleichförmigkeit des Universums bereitet Probleme – sie erfordert einen Kunstgriff: seine inflationäre Aufblähung um einen Faktor 10^{70} nur 10^{-36} Sekunden nach dem Urknall.
- 3 Zur Vermeidung der Anfangssingularität und Inflation entwickelte Roger Penrose die konforme zyklische Kosmologie (CCC). Sie verbindet das unendlich ausge dehnte Endstadium des Universums mit dem nächsten unter Vermeidung einer Anfangssingularität und gestattet sogar die Übermittlung von Informationen.

dann führten die Gleichungen auf eine Singularität.

Es ist jedoch wichtig festzuhalten, dass bislang keine Gleichung oder Beobachtung beweist, dass das All in einem Punkt begonnen hat. Die Singularität als möglicher Startpunkt der Expansion ergibt sich aus einer Extrapolation von Einsteins allgemeiner Relativitätstheorie zu einem Punkt, an dem gerade diese Theorie nicht mehr gilt. Physikalische Theorien waren bislang immer Näherungen, die sich unter extremen Bedingungen als unvollständig erwiesen haben. Und nahe am Urknall ist zu vermuten, dass Quanteneffekte das Geschehen modifizieren. Einsteins Relativität greift also schlicht zu kurz, um den Urknall zu beschreiben, und die Suche nach einer vollständigeren Theorie, welche die Quantenphysik mit der Gravitation vereinheitlicht, ist noch lange nicht abgeschlossen. Also beschreibt der heutige Begriff des Urknalls mitnichten den Beginn aller Dinge, sondern markiert nur grob einen Bereich von Zuständen, in dem unsere Theorien unzuverlässig werden. Hier wird die empirische Forschung mit der philosophischen Frage konfrontiert, was wir überhaupt hoffen können verlässlich herauszufinden

und wo wir ewig auf Vermutungen angewiesen bleiben werden.

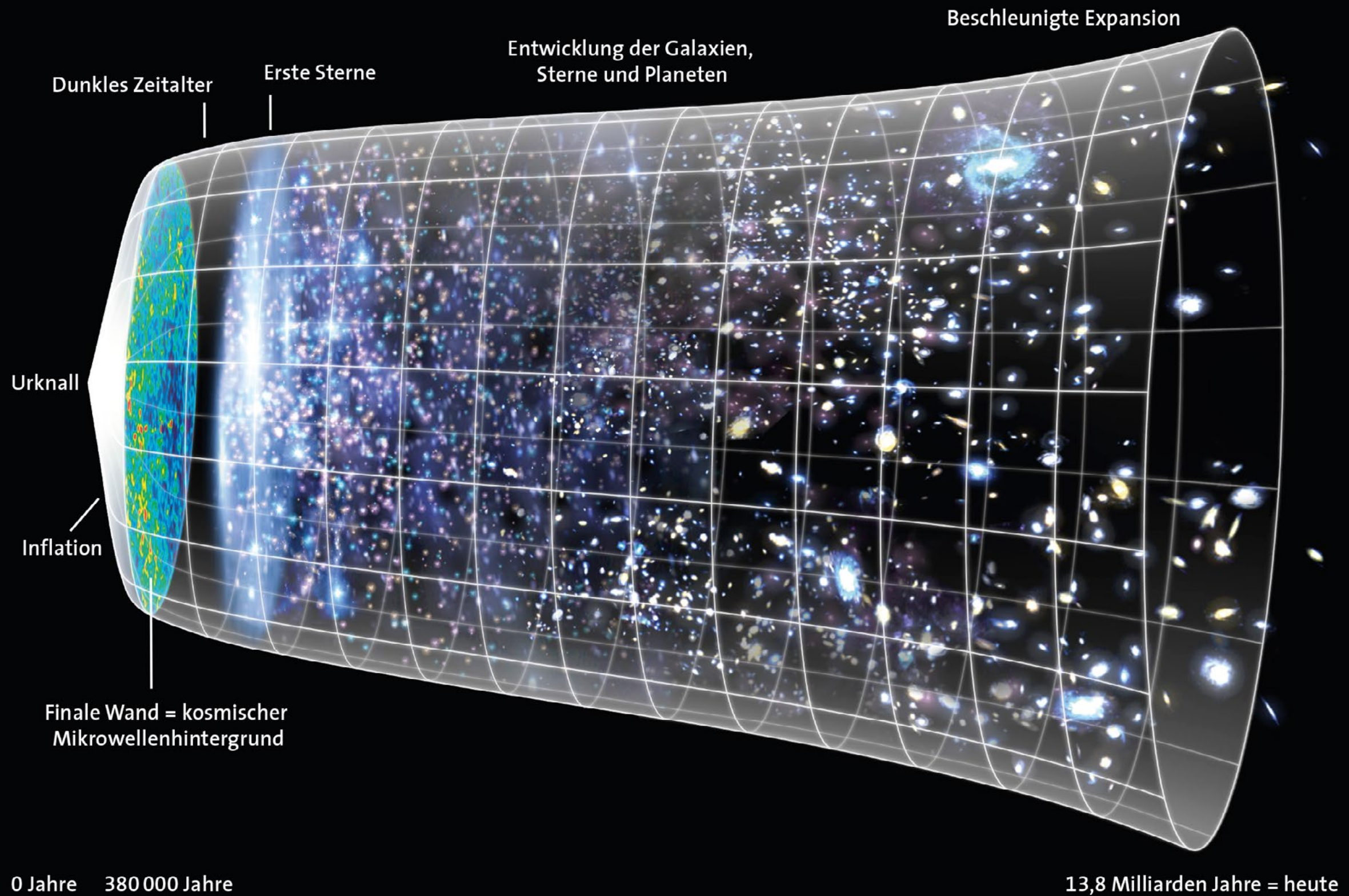
Was auch immer »im Urknall« geschah, Aussicht auf Erfolg hat derzeit zumindest die physikalische Frage, warum sich ausgerechnet ein Universum wie unseres daraus entwickelte. Da wir keine Experimente mit dem Universum veranstalten können, sind wir darauf angewiesen, Beobachtungen mit Vorhersagen unserer kosmologischen Hypothesen zu vergleichen. Die wichtigsten kosmologischen Messgrößen sind dabei die kosmische Mikrowellen-Hintergrundstrahlung und die Anordnung der Galaxien bei verschiedenen Rotverschiebungen. Der Mikrowellenhintergrund wird oft als der leuchtende Überrest des Urknalls bezeichnet, da es sich um die Wärmestrahlung der Ursuppe handelt, die rund 380 000 Jahre nach dem Urknall so weit abgekühlt war, dass sie durchsichtig wurde. Seine Entdeckung überzeugte fast alle Zweifler, ist sie doch der beste Beweis für einen heißen, hochkomprimierten Anfang unseres Alls. Seitdem hat sich das Universum um gut einen Faktor 1000 in jeder Richtung ausgedehnt, womit die Wellenlänge der Ursuppen-Wärmestrahlung um den gleichen Faktor gedehnt wurde. Die anfänglich bei rund



ST. JOHN'S COLLEGE LIBRARY/CAMBRIDGE

FRED HOYLE

Fred Hoyle betrachtete den Urknall zwar als absurde Idee, prägte jedoch den Namen »Big Bang« im Verlauf eines Interviews mit dem britischen Radiosender BBC im Jahr 1949.



DIE ENTWICKLUNG DES UNIVERSUMS NACH DEM URKNALL

Die Entwicklung des Universums nach dem Urknall beginnt gemäß dem Standardmodell der Kosmologie mit einer inflationären Phase. Danach bilden sich Galaxien und Sterne. Später expandiert das Universum unter dem Einfluss der Dunklen Energie beschleunigt.

2700 Grad Celsius (3000 Kelvin) freigesetzte Strahlung ist um diesen Faktor abgekühlt und so zur 3-Kelvin-Hintergrundstrahlung von heute geworden.

Eine Himmelskarte des Mikrowellenhintergrunds zeigt uns heute, welche Strukturen die Ursuppe im Alter von 380 000 Jahren hatte. Und 3-D-Karten der späteren Galaxienanordnung verdeutlichen, wie sich diese Strukturen über die Jahrmilliarden hinweg weiterentwickelt haben. Nur zum Vergleich: Im heutigen Kosmos finden wir pro fünf Kubikmeter Volumen ein Atom sowie zehn Milliarden Photonen des Mikrowellenhintergrunds. Hier scheint alles ganz einfach: Legen wir Fluktuationen der Dichte am Beginn des Universums richtig fest und überlassen dann der Schwerkraft die Arbeit, die überdichten Stellen kontrastreicher zusammenzuziehen, während sich der Raum als Ganzes ausdehnt, dann ergibt sich daraus die Struktur des Mikrowellenhintergrunds und die der späteren Galaxienverteilungen. Die Gasphysik muss während der ersten 380 000 Jahre natürlich berücksichtigt werden, als die Ursuppe noch glühend undurchsichtig war und Schallwellen die Strukturen auf kleiner Skala modifizierten.

Extrem homogene Ursuppe

Wie sich herausstellt, war das All kurz nach dem Urknall in einem ganz besonderen Zustand: Erstens war die Ursuppe extrem homogen und strukturlos. Eigentlich sollte ein zufällig geborenes Universum aber durchaus Struktur aufweisen und diese auch behalten, selbst wenn der Gasdruck einer überdichten Region sie zur Expansion in die unterdichte Nachbarschaft antreibt. Denn die Expansion des jungen Alls verläuft so schnell, dass verschiedene Regionen gar keine Zeit haben, sich durch Kräfte untereinander auszugleichen. Damit sollten die anfänglichen Strukturen der Ursuppe aufgeprägt bleiben. Zweitens ist keinerlei Raumkrümmung nachweisbar, obwohl die dichte anwesende Materie den Raum krümmen sollte. Und drittens ist die Entropie – vereinfacht gesagt, ein Maß für die Unordnung im All – in der Materie maximal hoch. Entropie sollte nach dem zweiten Satz der Thermodynamik mit der Zeit immer nur zunehmen. In idealem Gas geschieht das etwa dadurch, dass es sich mit der Zeit allmählich möglichst gleich auf das verfügbare Volumen verteilt – seltsam, dass sie im Zustand der Urmaterie schon maximal beginnt. Ein zweiter Beitrag zur

Entropie liegt in den Strukturen, die der Schwerkraft unterliegen. Dort steigt sie unter dem Einfluss von Schwerkraft fortwährend durch zunehmende Verklumpung der Materie an, also gerade durch die Strukturbildung im Kosmos. Dieser Teil der Entropie beginnt also minimal, da Strukturen seltsam unterdrückt sind. Per Zufall entsteht so ein spezielles Universum mit einer Wahrscheinlichkeit von 1 zu $10^{10^{124}}$ (10 hoch 10 hoch 124) – eine unsinnige Zahl, die darauf hinweist, dass im Konzept etwas fehlt.

Als Lösung präsentierte Alan Guth vom Massachusetts Institute of Technology (MIT) im Jahr 1980 die Hypothese der kosmischen Inflation. Demnach durchlief das frühe Universum eine Phase exponentieller Aufblähung (englisch: inflate = sich aufblähen). Eine trillionstel Attosekunde nach dem Urknall (10^{-36} Sekunden) sollte sich das Volumen des Alls plötzlich auf das 10^{70} -fache ausdehnen, in einer Zeit, während der die normale Ausdehnung nur das 10^9 -fache bewirkt hätte. Damit wird der Durchmesser eines Atoms auf den des Kuiper-Gürtels am Rand unseres Sonnensystems ausgedehnt. Eine solche Dehnung macht nicht nur die Raumkrümmung unmessbar klein, sie expandiert auch fast das

gesamte Universum jenseits unseres Horizonts. Damit entstammte das gesamte heute sichtbare Universum einer Region, die am Anfang so eng gedrängt war, dass die Materie dort sehr wohl unter den eigenen Kräften homogenisiert wurde. So kann das Universum als Ganzes immer noch Inhomogenität und Raumkrümmung haben, doch müssten wir hinter unseren kosmischen Horizont blicken, um sie zu sehen – und das ist nicht möglich. Und die Entropie? Vielleicht ist deren Betrachtung einfach müßig.

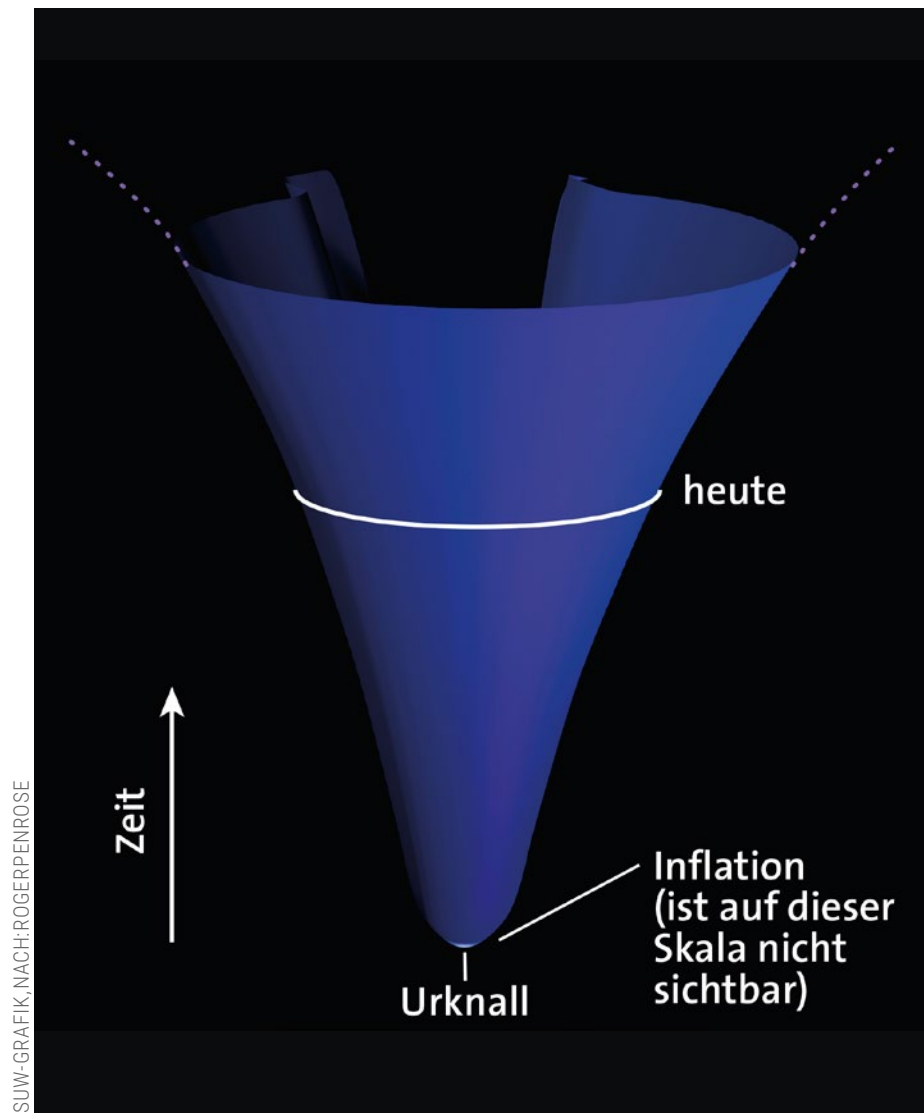
Erstaunlich ist im Szenario der Inflation, dass die winzigen Fluktuationen der Quantenwelt als Inhomogenität ausreichen könnten, um genau solche Strukturen hervorzubringen, die wir in der kosmischen Hintergrundstrahlung und in der heutigen Galaxienverteilung sehen. Deshalb gehört die Inflation heute zum Standardbild des heißen Urknalls. Ihr Problem ist jedoch, dass sie quasi aus dem Hut gezaubert wurde und sich aus keinem bekannten physikalischen Phänomen ergibt. Sie kann zwar so gestaltet werden, dass sie dem Universum die richtigen Eigenschaften verleiht, doch Kritiker sehen sie damit nicht als Lösung, sondern als Verlagerung

der Frage: Woher bezieht nun die Inflation genau die richtigen Eigenschaften?

Alternativen zum Urknall

Es ist daher kein Wunder, dass immer wieder Alternativen zum Standard-Urknall erwogen wurden, wie etwa zyklische Universen, die sich periodisch aufblähen und in sich zusammenfallen, bevor sie wieder in eine Expansion zurückspringen. Allerdings konnten sie niemals bessere Erklärungen anbieten. Ein zusammenstürzendes All etwa müsste einen hohen Grad an Struktur aufweisen – wie sollte es homogenisiert werden, kurz bevor es sich wieder ausdehnt? Zudem zeigten Ende der 1990er Jahre genauere Messungen von Supernovae, dass sich die Expansion des Alls derzeit sogar beschleunigt. Seit diese Messungen durch Beobachtungen mit verschiedenen Methoden gestützt werden, ist eine Rückkehr zur Kontraktion wieder vom Tisch.

Eine Alternative wird von dem über 80 Jahre alten Oxforder Mathematiker Roger Penrose propagiert und konforme zyklische Kosmologie genannt (englisch: conformal cyclic cosmology, CCC). Umstritten ist sie in den letzten Jahren, da möglicher-



DAS KOSMOLOGISCHE STANDARDMODELL

Im Standardmodell beginnt das Universum mit einem Urknall, auf den nach 10^{-36} Sekunden eine inflationäre Phase folgt, in der Dichtevervariationen glatt gebügelt werden. Danach expandiert das Universum und später, unter dem Einfluss der Dunklen Energie, sogar beschleunigt. Zum Schluss bleiben nur Schwarze Löcher übrig. Sie zerfallen wegen der Hawking-Strahlung nach sehr, sehr langer Zeit.

Glossar

SINGULARITÄT:

Gebilde der Ausdehnung null; mathematischer Punkt.

HAWKING-STRAHLUNG:

Am Ereignishorizont Schwarzer Löcher werden virtuelle Teilchenpaare der Vakuumfluktuationen getrennt, die dadurch Energie forttragen und das Schwarze Loch verdampfen lassen.

ALLGEMEINE RELATIVITÄTSTHEORIE:

In Einsteins Theorie sagt die Materie dem Raum, wie er sich zu krümmen hat, und der Raum sagt der Materie, wie sie sich zu bewegen hat.

weise ausgerechnet in der Hintergrundstrahlung ein Phänomen gefunden wurde, das von der CCC-Kosmologie vorhergesagt wird. Penrose sieht eine Analogie zwischen der exponentiellen Aufblähung in der frühen Inflation und der ebenso exponentiellen Aufblähung in der fernen Zukunft unseres Alls. Wenn Einsteins kosmologische Konstante wirklich die Ursache der heutigen sanften Beschleunigung in der Expansion des Alls ist, dann wird dies in ferner Zukunft wieder zu einer inflationsartigen Expansion führen, nur auf anderen Zeit- und Längenskalen.

Penrose spekuliert daher, dass die uns bekannte Inflationsphase vielleicht einfach die späte Beschleunigung in der Ausdehnung einer Vorstufe unseres Universums ist. Mangels weiterer Eindrücke kann man vielleicht vermuten, dass sich das Universum durch eine unendliche Serie solcher Zeitstufen entwickelt, die Penrose Äonen nennt. Einen Urknall gäbe es demnach überhaupt nicht, denn vor unserer jüngsten Inflation lag keine Singularität, sondern unendlich viele frühere Äonen. Mathematisch werden die Äonen durch eine Koordinatentransformation verkettet, die bei jedem Übergang Zeit und Raum neu

skalieren. Wie dabei Temperaturen und Impulse neu skalieren, so dass ein kaltes All am Ende eines Äons zu einer heißen Suppe am Anfang des nächsten Zyklus wird, ist aber noch nicht klar.

Konforme zyklische Kosmologie

In der CCC-Kosmologie von Penrose ergibt sich die erstaunliche Homogenität des frühen Alls ganz von allein. Betrachten wir unsere eigene ferne Zukunft im Rahmen der Standardkosmologie: Nach mehr als 10^{100} Jahren wird nicht nur der Raum auf eine unfassbare Größe ausgedehnt sein, es wird auch jeder Stern erloschen und jedes Schwarze Loch durch Hawking-Strahlung verdampft sein. Das All wird dünn mit Photonen durchzogen sein, die sich mit Lichtgeschwindigkeit bewegen und (im Gegensatz zu massebehafteter Materie) keinerlei Zeitempfinden haben – die Ewigkeit ist für sie nur ein Moment.

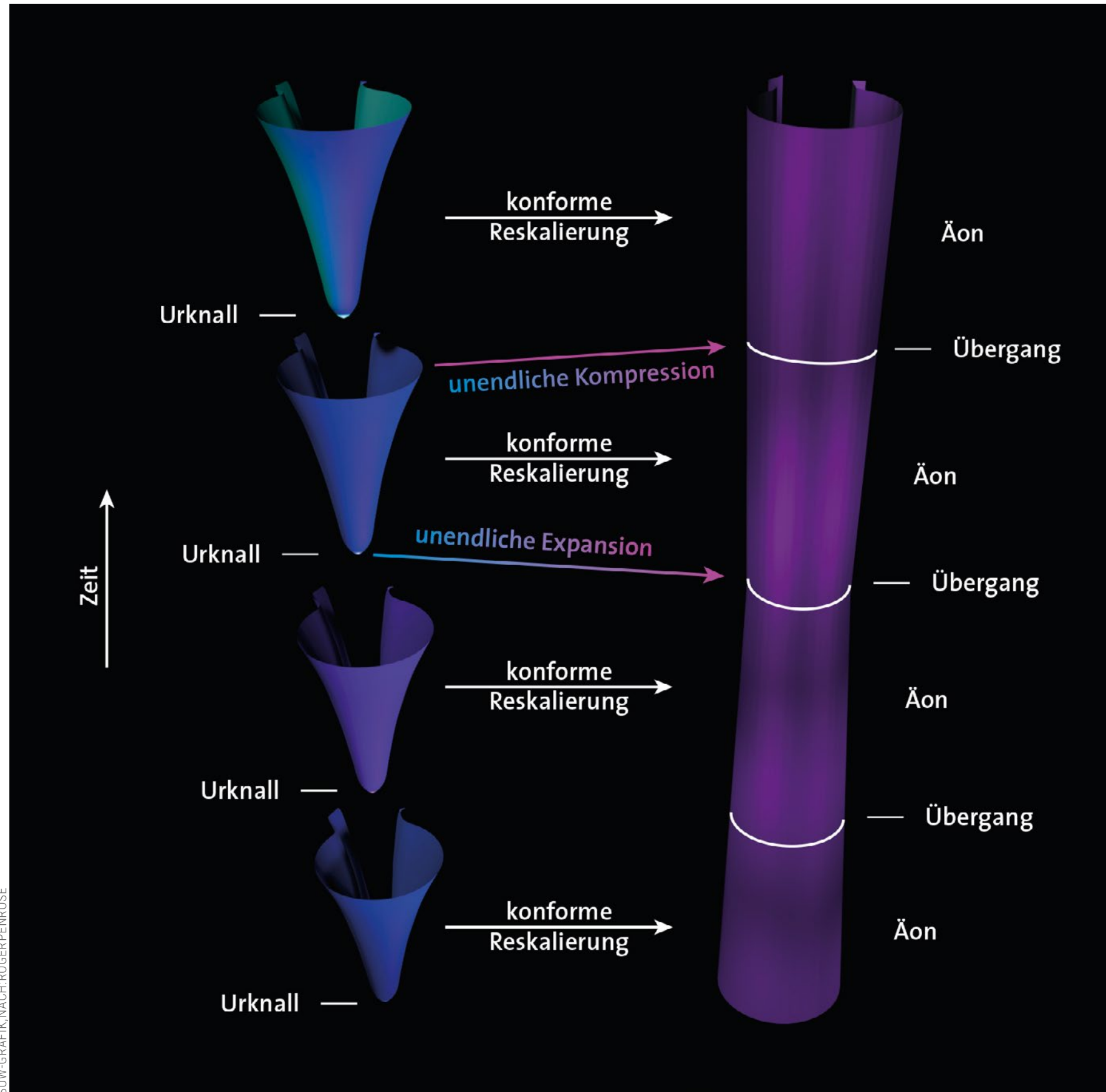
Der lange Aufbau immer deutlicherer Strukturen unter dem Einfluss der Schwerkraft hat über Jahrmilliarden hinweg die Entropie erhöht. Bei der Bildung Schwarzer Löcher wird die Entropie großer Massenkonzentrationen in ihrem Inneren gefangen. So steckt schon heute mehr Entropie

in den extrem massereichen Schwarzen Löchern der Galaxienkerne als in der Mikrowellenhintergrundstrahlung. In ferner Zukunft, wenn alle anderen Prozesse zum Stillstand gekommen sind und die Schwarzen Löcher mangels Vorkommen keine Materie mehr aufsaugen können, wachsen sie zunächst noch weiter durch das Absorbieren kosmischer Hintergrundstrahlung. Sie ist wärmer als die Temperatur massereicher Schwarzer Löcher, die im Nanokelvin-Bereich liegt. Mit der beschleunigten Ausdehnung des Alls kühlt jedoch der Mikrowellenhintergrund rasch gegen null ab, und die Schwarzen Löcher verdampfen langsam – jedoch immer schneller mit abnehmender Masse. Auch dabei steigt die Entropie. Sind die letzten Schwarzen Löcher verdampft, dann wird Energie sehr gleichmäßig im All verteilt sein – genau

ZEITSTUFEN DES UNIVERSUMS

Nach Penrose durchläuft das Universum eine unendliche Serie von Zeitstufen, die er Äonen nennt. Einen Urknall gäbe es danach nicht. Mathematisch werden die Äonen durch eine Koordinatentransformation verkettet, die bei jedem Übergang Zeit und Raum neu skalieren.

SUW-GRAFIK, NACH: ROGER PENROSE



der richtige Ausgangspunkt für das frühe Universum des nächsten Äons.

Die stärkste Vorhersage der CCC-Kosmologie sind aber Strukturen konzentrischer Ringe im Mikrowellenhintergrund eines Äons, die sich aus Ereignissen im vorherigen Äon ergeben. Sie würden uns erlauben, durch den Urknall hindurchzuschauen, den es hiernach freilich gar nicht gegeben hat. Als Vahe Gurzadyan von der Universität Jerewan in Armenien die Himmelskarten des WMAP-Satelliten untersuchte, wurde er anscheinend fündig. Zwar ist die astronomische Gemeinde skeptisch, doch scheinen die Funde nicht per Zufall entstanden zu sein, wie Kritiker vermuteten.

Nach Penrose sind die energiereichsten Ereignisse in der Spätphase unseres Äons Verschmelzungen extrem massereicher Schwarzer Löcher, wie wir sie in den Zentren elliptischer Riesengalaxien finden. Diese Ereignisse sollten Gravitationswellen von enormer Stärke aussenden, die aus der Perspektive des folgenden Äons betrachtet wie Stoßwellen durch die neue »Ursuppe« laufen. In unserer Himmelskarte der Hintergrundstrahlung tauchten dann Ringe gestreuter Strahlung auf, in denen das Temperaturrauschen der Hintergrund-

strahlung etwas herabgesetzt ist. Entscheidend: Elliptische Riesengalaxien treten meist in Galaxienhaufen auf, weshalb im Lauf der Zeit mehrere Verschmelzungen am etwa gleichen Ort auftreten. In der Hintergrundstrahlung sollten daher jeweils mehrere Ringe mit gemeinsamem Zentrum auftreten, wobei der innerste Ring einer Familie der letzten Verschmelzung im alten Äon entstammt.

Tatsächlich findet Gurzadyan in den WMAP-Daten viele konzentrische Ringfamilien mit herabgesetztem Temperaturrauschen. Manche Familien haben bis zu vier Ringe, die dann am Himmel einen Winkel von bis zu 20 Grad einnehmen. Die ungleiche Verteilung am Himmel zeigt dabei die Struktur der Galaxienhaufen in dem kleinen Raumausschnitt des alten Äons, das wir hier sehen. Sind das nun tatsächlich Signale aus einem früheren Äon? Oder handelt es sich vielleicht um unerkannte instrumentelle Effekte?

Hier kommt die Himmelskarte der BOOMERanG-Mission ins Spiel, die einen Teil des kosmischen Hintergrunds mit einem früheren Satelliten kartiert hat. In der doppelt betrachteten Region finden sich die Ringstrukturen in beiden Karten, wo-

mit eine Fehlmessung unwahrscheinlich wird. Die nächste Kritik lautet, dass man in Daten alle möglichen Strukturen finden könnte, solange man nur genügend Fläche danach absucht. Sind die Strukturen nun häufiger als in simulierten Zufallsdaten? Leider sind realistische Simulationen der kosmischen Hintergrundkarte nicht so einfach zu machen, da das Rauschen in der Karte extrem niedrig ist und fast alle Strukturen echte Signale sind, die aber nicht im Detail vom kosmologischen Modell vorhergesagt werden.

Penrose kontert, dass es sich hier nicht um beliebige Strukturen handelt. Sucht man nämlich beispielsweise nicht nach Kreisen, sondern nach Ellipsen, dann wird man nicht mehr fündig. Schon bei einer Elliptizität von nur einem Prozent finden sich dreimal weniger Strukturen. Und zudem geht es nicht um einzelne Kreise, sondern um konzentrische Kreisfamilien, die der Zufall nur selten hervorbringen sollte. Die kosmische Inflation wiederum sollte gar keine Kreisfamilien erzeugen. Gewiss ist die CCC-Kosmologie eine ebenso gewagte Spekulation wie die Theorie der kosmischen Inflation, doch Kosmologie bewegt sich eben an den Grenzen empirischer Erkundung.

Könnte man vielleicht der kosmischen Inflation weiter auf die Schliche kommen? Für Licht war das All in den ersten 380 000 Jahren leider undurchlässig, mit Photonen können wir uns also kein Bild vom noch jüngeren All machen. Allerdings bewegten sich die nur äußerst schwach wechselwirkenden Neutrinos und besonders Gravitationswellen ungehindert durch die Ursuppe. Daher können sie uns auch über frühere Zustände informieren.

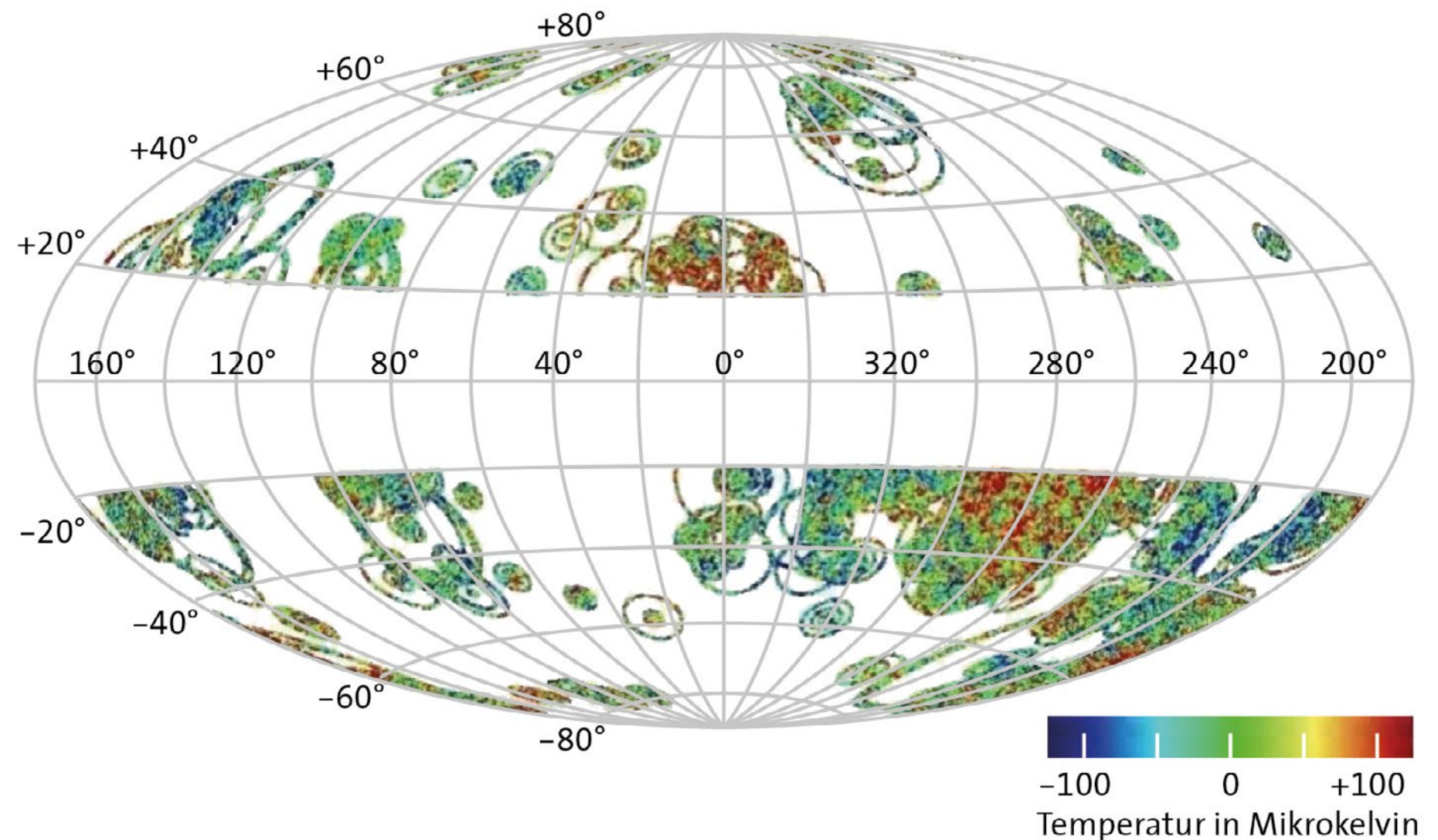
Hier kommen wieder die Quantenfluktuationen zu Anfang des Geschehens ins Spiel: Zunächst handelt es sich dabei um Fluktuationen, bei denen das Vakuum eine begrenzte Menge Energie für eine begrenzte Zeitdauer zur Verfügung stellen kann. Je mehr Energie im Spiel ist, desto früher nimmt sie das Vakuum jedoch wieder zurück. Die Inflation soll es aber durch ihre spontane Extremexpansion geschafft haben – wir erinnern uns: um einen Faktor

10^{70} –, diese Fluktuationen rasch auf eine makroskopische Skala zu vergrößern, die jenseits des Quantenhorizonts liegt. So überlebten sie dann als Kondensationskeime der Fluktuationen im Mikrowellenhintergrund und in der heutigen Galaxienverteilung.

Entscheidend ist, dass die Quantenfluktuationen auch Gravitationswellen erzeugen, welche die Raumgeometrie verzerren, während sie durchs expandierende All lau-

KOSMISCHE HINTERGRUNDSTRAHLUNG

In der vom Satelliten WMAP gemessenen kosmischen Hintergrundstrahlung finden Vahe Gurzadyan und Roger Penrose zahlreiche Sets aus wenigstens drei konzentrischen Kreisen mit Abweichungen gegenüber der Umgebung oberhalb von 15 Mikrokkelvin. Die Farbskala unten rechts zeigt die Schwankungen der kosmischen Hintergrundstrahlung selbst an.



fen. Gravitationswellen, die durch die Ur-suppe liefen, als das Weltall durchsichtig wurde, hinterlassen damit im Mikrowellenhintergrund charakteristische Polarisationsmuster. Die Himmelskarten des WMAP-Satelliten zeigen auch Polarisationsmuster, sind aber noch nicht genau genug, um von der Inflation vorhergesagte Signale aufzudecken. Der Satellit Planck wurde hingegen speziell dafür konstruiert, Polarisationsmuster zu vermessen und nach Spuren der Inflation zu suchen.

Das Planck-Team gab im März 2013 die Ergebnisse bekannt, die in den ersten 15 Monaten der Mission gewonnen wurden. Leider reichten sie noch nicht aus, um die Polarisationsmuster zu analysieren. Mittlerweile hat Planck seine Messkampagne beendet und die Auswertung der Daten läuft. Allerdings gab das Team schon bekannt, dass der Mikrowellenhintergrund durchaus einige Strukturen und subtile Asymmetrien aufweist, für die es derzeit keine Erklärung gibt. In den WMAP-Daten gab es nur grobe Hinweise auf jene Strukturen, weshalb ihre Existenz umstritten war. In den Planck-Daten sind sie jetzt zwar deutlicher zu sehen, doch noch immer weiß niemand, woher sie stammen.

Und die Ringe aus dem letzten Äon? Sobald die Himmelskarten der Planck-Mission der Gemeinde der Wissenschaftler öffentlich zur Verfügung stehen, bieten sie Forschern mit Zeit und Muße die Gelegenheit, die Existenz der Ringe anhand der besseren Daten zu bestätigen – ob sie nun aus einem früheren Äon im ewigen Leben unseres Alls stammen oder eine andere Ursache haben.

Das Universum wird komplexer

Es scheint, als ob unser Bild vom Universum im Lauf der Zeit immer komplizierter wird. Der erste Schritt führte von der immer währenden Stetigkeit zur Expansion, und weitere Schritte fügten Inflation und eine beschleunigte Ausdehnung auf Grund einer geheimnisvollen Dunklen Energie hinzu. Was sonst noch? Hier kann eine Regel namens Ockhams Rasiermesser weiterhelfen: Der englische Franziskaner-Gelehrte William of Ockham (1288–1348) schlug vor, von zwei möglichen Hypothesen diejenige zu bevorzugen, die weniger postulierte Faktoren braucht, um das Geschehen vollständig zu erklären (in Umberto Eco's Roman »Der Name der Rose« taucht William unter verändertem Namen in der

Hauptrolle auf). Wir sollten also so wenige Faktoren postulieren wie möglich, aber so viele, wie wir brauchen, um unsere Messdaten zu erklären. Die Messungen zwingen uns jedoch, allzu einfache Vorstellungen abzulegen. Wo das All gestern noch als homogen und isotrop galt, finden wir heute Hinweise auf großräumige Strukturen, die sich über vier Milliarden Lichtjahre erstrecken, und koordinierte großräumige Strömungen vieler Galaxien, die nicht in das Idealbild passen.

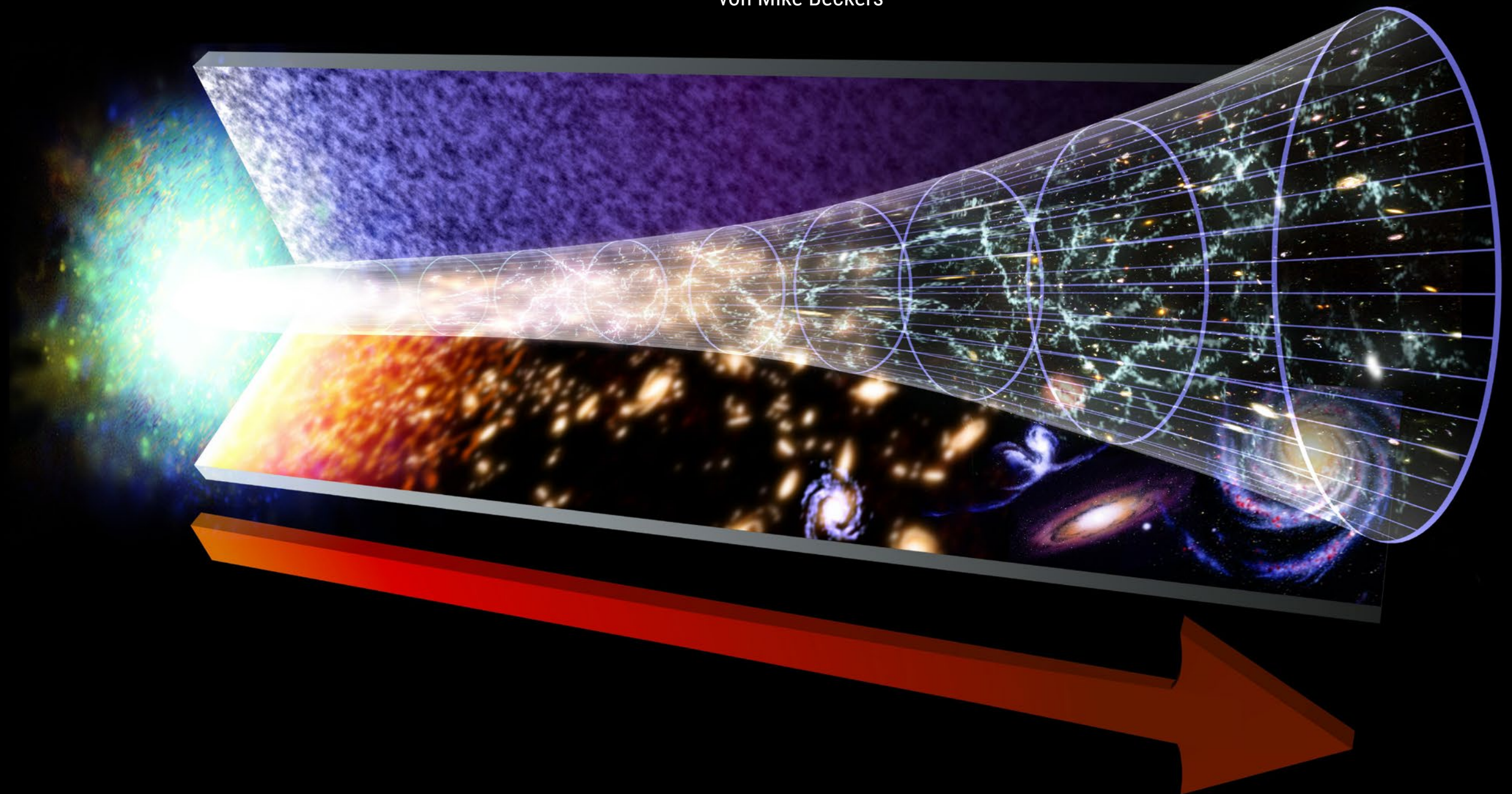
Skeptiker fragen sich, ob die Beweislage für das Standardmodell der Kosmologie wirklich eindeutig ist oder nicht. Dabei gilt, dass wir den Kontext der Erschaffung des Universums wohl kaum je physikalisch erkunden und erklären werden. Nun ist jeder Mensch mit A-priori-Urannahmen ausgestattet. Wir benutzen sie, um bei unklarer Lage die Hinweise für und gegen eine Behauptung zu gewichten. Solange also die Sachlage keine zwingenden Beweise enthält, ruht die empfundene Gültigkeit eines kosmologischen Gesamtmodells letztlich auf den Urannahmen des Individuums. ↩

(Sterne und Weltraum, 2/2014)

RAYCHAUDHURI-GLEICHUNG

Quantentrick schafft Urknall-Singularität ab

von Mike Beckers



Ist das Universum unendlich alt? Zwei Physiker beseitigen mit quantenmechanischen Korrekturen den Punkt am Anfang des Alls.

Die Idee scheint charmant, ist aber noch unausgereift.

Seit Kosmologen in den 1960er Jahren die ersten Spuren des Urknalls nachwiesen, scheint es, als wäre das Universum einem einzigen, unendlich dichten Punkt entsprungen, einer so genannten Singularität. Sollten jedoch die beiden theoretischen Physiker Ahmed Farag Ali und Saurya Das mit ihrem neuen Ansatz richtigliegen, [den sie im Fachjournal »Physics Letters B« veröffentlichten](#), dann gab es diese Singularität nie. Das All hätte schon immer existiert – zumindest in Form einer winzigen, quantenmechanischen Keimzelle.

In ihrer Arbeit mit dem Titel »Cosmology from quantum potential« verwenden der Ägypter und sein indischer Kollege, der in Kanada an der University of Lethbridge lehrt, die so genannte Raychaudhuri-Gleichung. Sie beschreibt, wie sich die Bestandteile des Kosmos bewegen. Die kürzeste Verbindung zwischen zwei Punk-

ten bezeichnet man als Geodäte. Wenn Licht und Teilchen durch das All reisen, sind diese Geodäten gekrümmt – eine Folge der allgemeinen Relativitätstheorie. Verfolgt man diese Bahnen zurück bis zum Urknall, kommt es zur Singularität. Das [folgerten die Physiker Stephen Hawking und Roger Penrose bereits Ende der 1960er Jahre](#) aus Einsteins Gleichungen. Seitdem versuchen Kosmologen, diese Situation mit neuen Theorien und mathematischen Tricks loszuwerden. So unvorstellbar die Lage rund um den Urknall ist, sollten zumindest rechnerisch keine unendlich großen und somit unphysikalischen Werte auftreten. Doch gerade das ist bei einer Singularität der Fall.

Ali und Das skizzieren, was passiert, wenn man dieses Bild mit quantenmechanischen Gleichungen ergänzt. Es handelt sich bei ihrer Idee allerdings nicht um eine lange gesuchte Theorie der Quantengravi-

tation, die Relativitäts- und Quantentheorie insgesamt vereinen würde. Vielmehr korrigieren die beiden Forscher die klassischen Geodäten mit quantenphysikalischen Annahmen. Sie greifen dabei auf eine in der Physikergemeinde eher randständige, alternative Theorie des US-Quantenphysikers David Bohm zurück.

So erhalten Ali und Das eine Interpretation vom frühen Universum, in der sich die Geodäten, nunmehr Quantengeodäten, niemals schneiden. Wenn sie sich aber nicht berühren, bedeutet das zugleich, dass es keinen Punkt gab, an dem das All entstanden sein könnte. Es hätte somit schon immer existiert und sich irgendwann plötzlich rasch ausgedehnt. Danach geschah all das, was Kosmologen heute im allgemein akzeptierten Urknallmodell zusammenfassen. Ali und Das schaffen also nicht den Urknall ab, wohl aber die unbequeme Singularität am Anfang.

Die beiden Physiker behaupten darüber hinaus, ihre Idee liefere möglicherweise auch eine Erklärung für die rätselhafte Dunkle Energie, die unser All auseinander treibt. So schreiben sie in ihrer Veröffentlichung, dass die quantenmechanischen Korrekturterme gerade so ausgelegt werden könnten, dass sie genau für die heute beobachteten Effekte verantwortlich wären. Auch würden ihre Gleichungen eine geringe Masse für das so genannte Graviton vorhersagen, das hypothetische Teilchen, das die Gravitationskraft vermitteln könnte.

Laut einer weiteren Arbeit, die Das mit einem kanadischen Kollegen verfasste und [vorab auf »arXiv.org« veröffentlichte](#), hätten sehr massearme Gravitonen oder ähnliche leichte Teilchen im frühen Universum ein so genanntes Bose-Einstein-Kondensat geformt. Dieser quantenmechanische Zustand wäre wiederum ein Kandidat für Dunkle Materie. Liefern die Veröffentlichungen also eine mögliche Ursache für gleich zwei der größten kosmologischen Rätsel?

Andere Physiker sind erst einmal skeptisch. So äußerte der Heidelberger Kosmologe Matthias Bartelmann gegenüber

»Spektrum.de« Bedenken. Er bezweifelt, dass man die Raychaudhuri-Gleichung derart modifizieren könne, ohne zugleich beobachtbare Phänomene zu verändern, die aus dieser Gleichung in ihrer ursprünglichen Form folgten – beispielsweise Gravitationslinseneffekte. »Ich würde wenig darauf geben«, so Bartelmann.

Auch der US-Astrophysiker Brian Koberlein [rät auf seiner Homepage](#), erst einmal abzuwarten. Das Modell sei interessant, aber sehr einfach gestrickt und vorerst »nicht mehr als ein erster Versuch, die Machbarkeit zu zeigen«. Und auch die Idee, die Singularität des Urknalls abzuschaffen und durch ein unendlich altes All zu ersetzen, sei nicht neu und bereits Teil vieler alternativer Modelle zur kosmischen Inflation.

Die Forschungsgemeinschaft muss also erst noch klären, ob aus der Idee auch Vorhersagen folgen, mit denen der Ansatz untermauert oder widerlegt werden könnte. So lange bleibt fraglich, ob wir uns damit tatsächlich einem besseren Verständnis des Kosmos nähern. ↩

(Spektrum.de, 16. Februar 2015)

Spektrum
DER WISSENSCHAFT

KOMPAKT

FÜR NUR
€ 4,99

GRAVITATIONS- WELLEN

Rippel in der Raumzeit

Wellenschlag des Urknalls

Eine neue Ära der Astrophysik

6 Fragen, die uns Gravitationswellen
beantworten könnten

HIER DOWNLOADEN

The background image is a deep space photograph showing concentric ripples of light in shades of orange, red, and yellow against a dark blue background filled with stars. These ripples represent gravitational waves from the early universe. The text is overlaid on the right side of the image.

KOSMOLOGIE Wellenschlag des Urknalls

von Lawrence M. Krauss

Die unmittelbar auf den Urknall folgende Phase der kosmischen Inflation erzeugte Gravitationswellen, die im kosmischen Strahlungshintergrund feinste Spuren hinterließen. Die 2014 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.

Im März 2014 sorgte die Pressekonferenz eines Teams von Astronomen für eine wissenschaftliche Sensation. Die Forscher behaupteten, mit ihrem am Südpol stationierten Mikrowellenteleoskop 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} Sekunden 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 Milliarden 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 er-

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.

scheint, müssen seine anfänglichen Eigenschaften ungeheuer fein abgestimmt gewesen sein.

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} Sekunden 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 so genannte 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} Sekunden 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 verharrt. 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} Sekunden 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.

BICEP2-MIKROWELLENTESKOP
Das BICEP2-Mikrowellenteleskop an der Amundsen-Scott-Südpolstation durchsuchte von Januar 2010 bis Dezember 2012 einen kleinen Himmelsausschnitt nach indirekten Spuren urtümlicher Gravitationswellen in der kosmischen Hintergrundstrahlung.



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 zu Grunde 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 Doppelsystem – 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 Gra-

vitationsfelder 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 Inflationszenario, sondern auch einen Einblick in die Quantenprozesse, die ihm zu Grunde liegen.

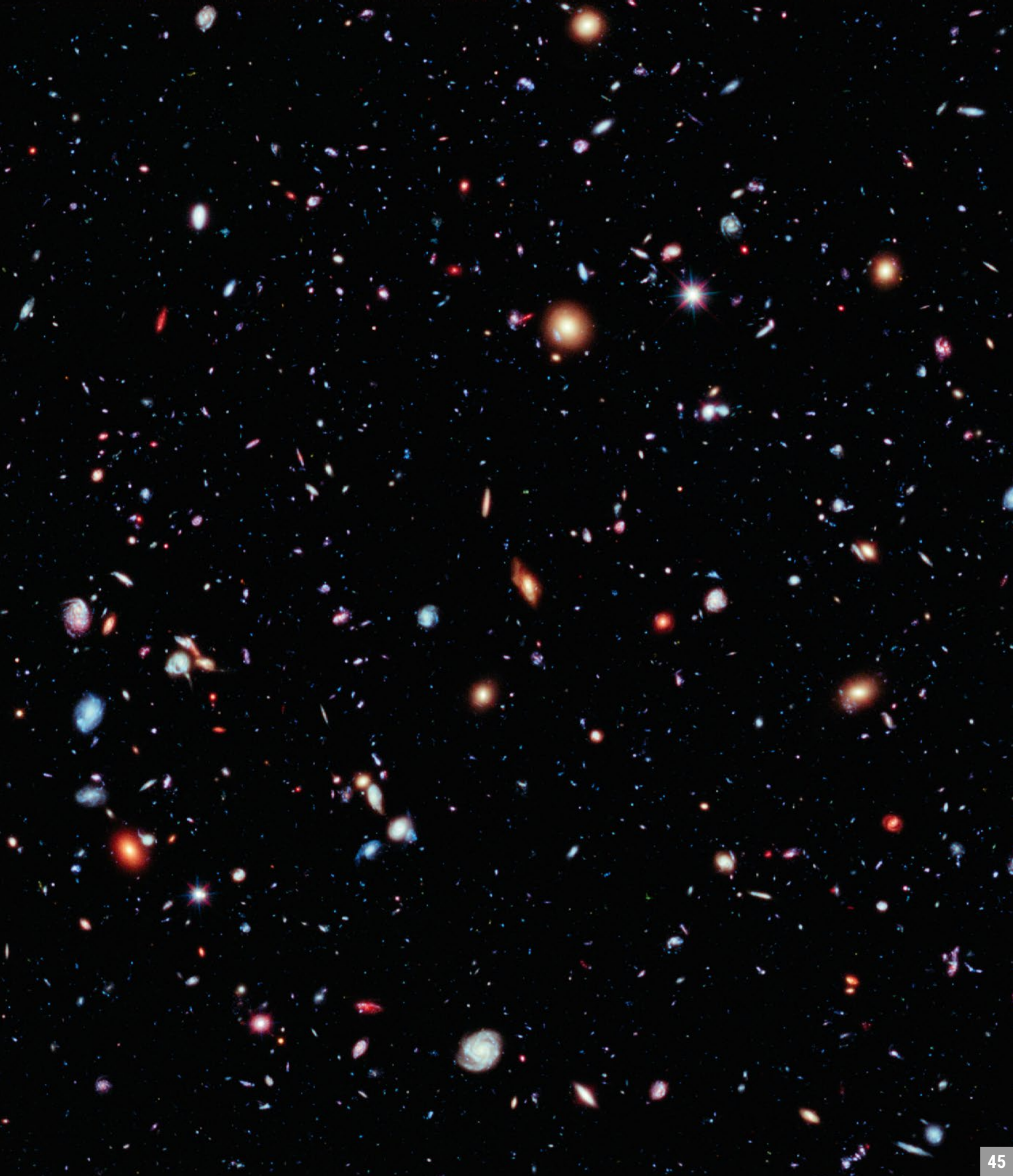
Strahlende Spuren

Doch wie lassen sich solche zwar großräumigen, aber wegen der schwachen Schwerkraft ungemein geringfügigen Raumzeit-schwingungen 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.

ISOTROPIE DES WELTALLS

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 rascher Inflation erklären, die direkt auf den Urknall folgte.

NASA / ESA / GARTH ILLINGWORTH, DANIEL MAGEE & PASCAL OESCH, UC SANTA CRUZ / RYCHARD BOUWENS, LEIDEN UNIVERSITY / HUDF09 TEAM



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 urtümlicher Gravitationswellen von anderen Effekten zu trennen.

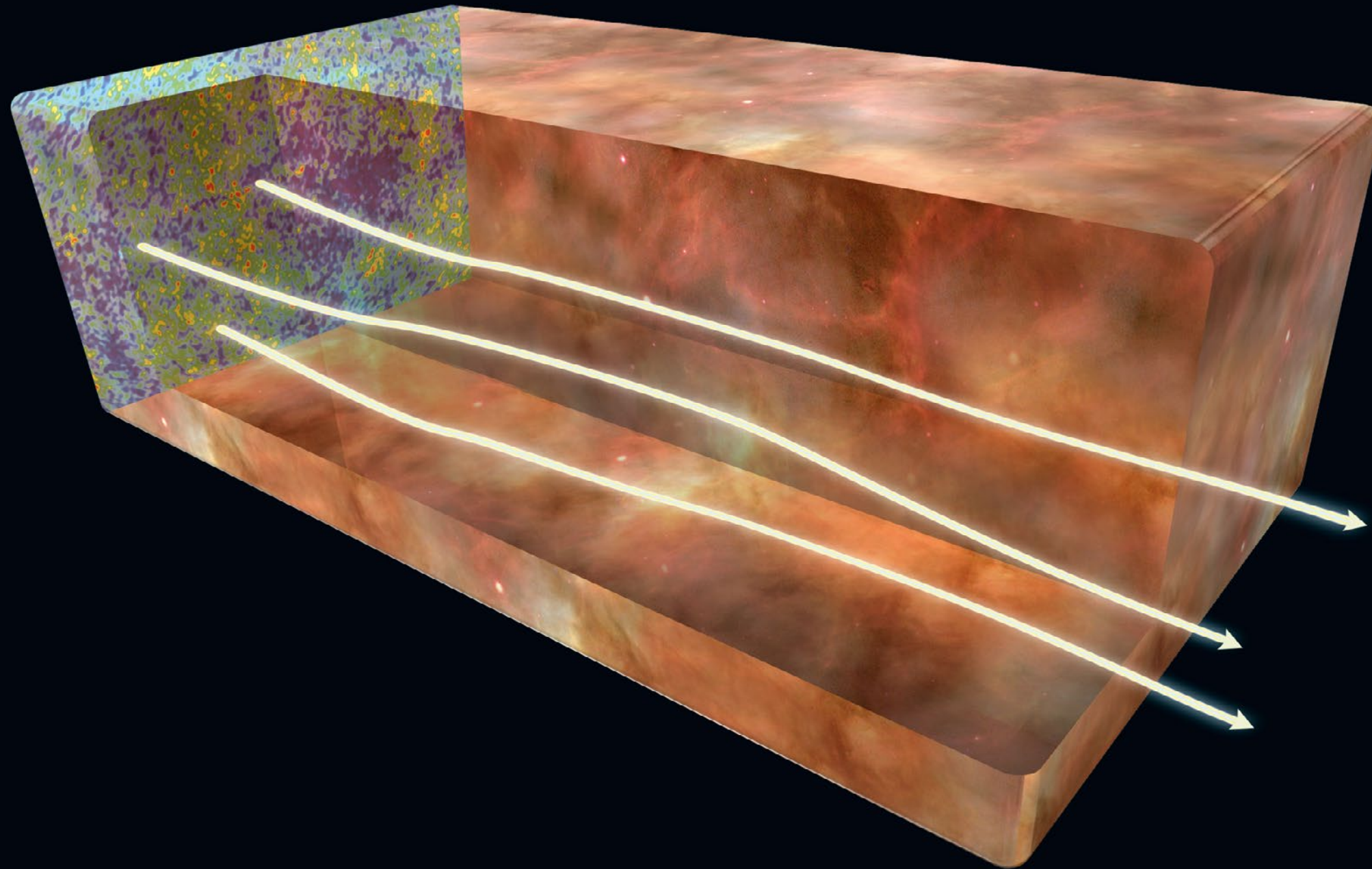
Vor allem ein »verwirbeltes« Muster, der so genannte B- Polarisationsmodus, ist charakteristisch für Gravitationswellen, während ein nicht verwirbeltes Muster namens

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 Ext-

ragalactic 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 Inflations-



DON FOLEY

Störende Effekte

Die 2014 entdeckte Polarisation des kosmischen Strahlungshintergrunds (blau marmorierte Bereich links) ist noch kein definitiver Beweis für Gravitationswellen, da auch andere Effekte im Spiel sind. Beispielsweise werden die Hintergrundstrahlen (weiß) unterwegs durch die Schwerkraft massereicher Galaxienhaufen gekrümmt; dieser Gravitationslinseneffekt polarisiert

die Strahlung. Außerdem senden Staubkörner in unserer Milchstraße ebenfalls polarisierte Strahlung aus, die nur schwer von Hintergrundstrahlung zu unterscheiden ist. Nach neueren Messungen des Planck-Weltraumteleskops ist galaktischer Staub häufiger als früher angenommen und produziert damit auch größere Mengen polarisierten Lichts.

signal – 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} Sekunden 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 so genannte 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 so genannten 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 gemes-

sen 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 ent-

scheiden, 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. ↩

(Spektrum der Wissenschaft, 3/2015)

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., Dodelson, S., Meyer, S.: 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.

NACHGEFRAGT

WO IST BLOSS DIE ENERGIE GEBLIEBEN?

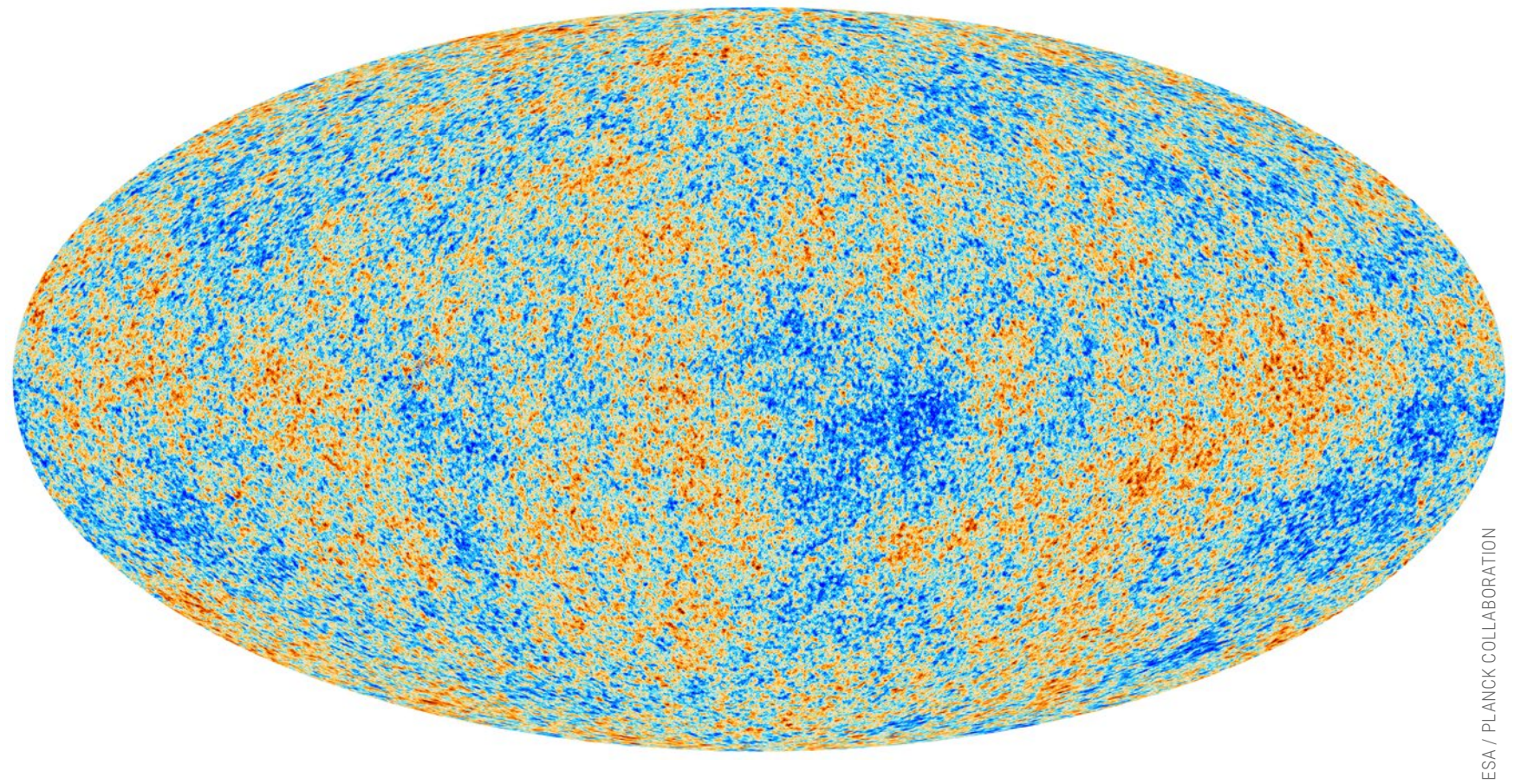


von Björn Malte Schäfer

Laut gängigem Standardmodell entstanden beim Urknall aus der Anfangsenergie rund 50 Prozent Materie und rund 50 Prozent Antimaterie, die sich anschließend gegenseitig weitgehend auslöschten. Aus den verbliebenen vielleicht 0,01 Prozent Materie entstanden unsere Galaxien, Sterne, Planeten und so weiter. Wenn sich 99,99 Prozent oder mehr der Ursprungsenergie des Urknalls erst in Materie umwandelte, sich dann durch die Zerstrahlung von Materie und Antimaterie wieder in Energie zurück verwandelte, wo ist diese Energie dann heute?

Die Energie aus der Vernichtung der Materie und Antimaterie im frühen Universum muss in der Tat übrig geblieben und heute beobachtbar sein. Auch wenn es auf den ersten Blick unglaublich erscheint: Diese Energie ist in Form der schwachen Strahlung des kosmischen Mikrowellenhintergrunds erhalten – um einen Faktor von fast 10^{15} rotverschoben und fast 10^{45} verdünnt.

Mit der Expansion des Universums sank die Temperatur ab, und es fanden teilchenphysikalische Prozesse statt, die der jeweiligen Temperatur entsprachen. So bildeten sich im Standardmodell rund zehn Mikrosekunden nach dem Urknall Baryonen und Antibaryonen aus dem Plasma, das zuvor aus Quarks und Gluonen bestand. Es entstanden dabei ein klein wenig mehr Baryonen als Antibaryonen, wobei der Mechanismus für diese Baryonen-Asymmetrie bisher nicht verstanden ist. Die Größe der Asymmetrie beträgt rund 10^{-9} , das heißt, es gab also für eine Milliarde Antibaryonen eine Milliarde und ein Baryon, die sich deshalb gegenseitig nicht vollständig vernichten konnten.



ESA / PLANCK COLLABORATION

DER KOSMISCHE MIKROWELLENHINTERGRUND IM BLICK VON PLANCK

Babybild des Weltalls: die Unregelmäßigkeiten der kosmischen Mikrowellenhintergrundstrahlung (CMB), wie sie mit Planck beobachtet wurden. Der CMB ist eine Momentaufnahme vom ältesten Licht im Universum, das ausgesandt wurde, als das All erst 380 000 Jahre alt war. Das Bild zeigt winzige Temperaturschwankungen in Regionen mit leicht unterschiedlicher Dichte, aus denen alle Strukturen hervorgegangen sind: die Sterne und Galaxien von heute.

Das bedeutet allerdings, dass sehr viele Photonen bei der Vernichtung der Baryonen und Antibaryonen entstanden, und man muss 10^9 Photonen für jedes überlebende Baryon erwarten. Diese sind tatsächlich im kosmischen Mikrowellenhintergrund heute messbar und hatten

wichtige Auswirkungen auf die Bildung der chemischen Elemente, weil sie das Verhältnis von Neutronen zu Protonen und den Zeitpunkt der Deuteriumproduktion bei der Elementsynthese wenige 100 Sekunden nach dem Urknall bestimmten.

Die Asymmetrie selbst stammt in diesem Bild aus einer noch früheren Phase des Universums, als es wenige Pikosekunden alt war. Das Standardmodell kennt die Baryonenzahl als eine erhaltene Größe, was bedeutet, dass bei allen teilchenphysikalischen Prozessen, wie wir sie kennen, die Zahl der Baryonen minus die Zahl der Antibaryonen immer konstant sein muss. Daher braucht man Prozesse aus der noch gesuchten Vereinheitlichten Theorie der Wechselwirkungen, etwa den Zerfall von X-Bosonen, die bevorzugt in mehr Quarks als Antiquarks (bei gleichzeitiger Ladungserhaltung) zerfallen und auf diese Weise die Baryonen-Asymmetrie erzeugen.

Die X-Bosonen sind postulierte Teilchen, die direkte Wechselwirkungen zwischen Quarks und Leptonen (wie dem Elektron) vermitteln können. Modelle, die diese Teilchen postulieren, hätten als interessante Konsequenz, dass selbst Protonen nicht mehr stabil wären, sondern auf großen Zeitskalen in ein Pion und ein Positron zerfallen, weil eines seiner Quarks sich in ein Positron verwandelt. ↩

(Sterne und Weltraum, 4/2015)

Der ganze Kosmos.
Auf Ihrem Bildschirm.



DAS STERNE UND WELTRAUM DIGITALABO
Erfahren Sie alles über Astronomie und Raumfahrt –
direkt aus den Forschungslaboren der Welt.
Jahrespreis (12 x im Jahr) € 60,-; ermäßigt (auf Nachweis) € 48,-

HIER ABONNIEREN

REIONISIERUNG

»GRÜNE ERBSEN«

erhellten frühes Universum

von Janosch Deeg

Mit ihrer starken UV-Strahlung könnten so genannte Green-Peas-Galaxien die dunkle Phase des Kosmos kurz nach dem Urknall beendet haben.

Etwa 13,8 Millionen Jahren nach dem Urknall kühlte sich das Universum ab und wurde komplett dunkel. Das Wiedererhellen bis hin zum Erscheinen von Sternen und Galaxien ist eine der am wenigsten verstandenen Epochen der kosmischen Geschichte. Ein Team aus Astronomen unter der Leitung von Yuri Izotov von der [Akademie der Wissenschaften der Ukraine](#) berichtet in »Nature«, wie die Green-Peas-Galaxien dabei möglicherweise eine ausschlaggebende Rolle gespielt haben. Green Peas, also Grüne-Erbsen-Galaxien, sind benannt nach ihrem Erscheinungsbild in astronomischen Aufnahmen und können eine große Menge an neuen Sternen bilden. Die Untersuchungen zeigen nun, dass die starke UV-Strahlung dieser vielen Sterne ausreichend wäre, um die Reionisierung des Kosmos zu erklären. In dieser Phase wurde ein Großteil des Wasserstoffs des frühen Universums in seine Bestandteile Protonen und Elektronen aufgespalten. Bislang hatte man geglaubt, dass die meiste Strahlung bereits innerhalb der Galaxien reabsorbiert wird und die Energie für eine Spaltung des intergalaktischen Wasserstoffs nicht ausreichend gewesen wäre.

Mit dem Weltraumteleskop Hubble versuchte das internationale Team deshalb stark strahlende Green-Peas-Galaxien in unserer kosmischen Umgebung zu finden. Insbesondere bei einer Galaxie, benannt J0925+1403, konnten sie schließlich demonstrieren, dass tatsächlich acht Prozent ihrer UV-Strahlung in den intergalaktischen Raum entkommt. Das reicht aus, um dort Wasserstoffgas mit dem mehr als 40-Fachen der Gesamtmasse der Galaxie zu ionisieren. Entsprechend diesen Erkenntnissen schlussfolgert das Team, dass Green-Peas-Galaxien tatsächlich die kosmische Reionisierung vollbringen konnten und sie deshalb wohl eine Schlüsselrolle beim Übergang vom dunklen zum hellen kosmischen Zeitalter innehatten. ↩

(Spektrum.de, 14. Januar 2016)

<http://www.nature.com/nature/journal/v529/n7585/full/nature16456.html#contrib-auth>

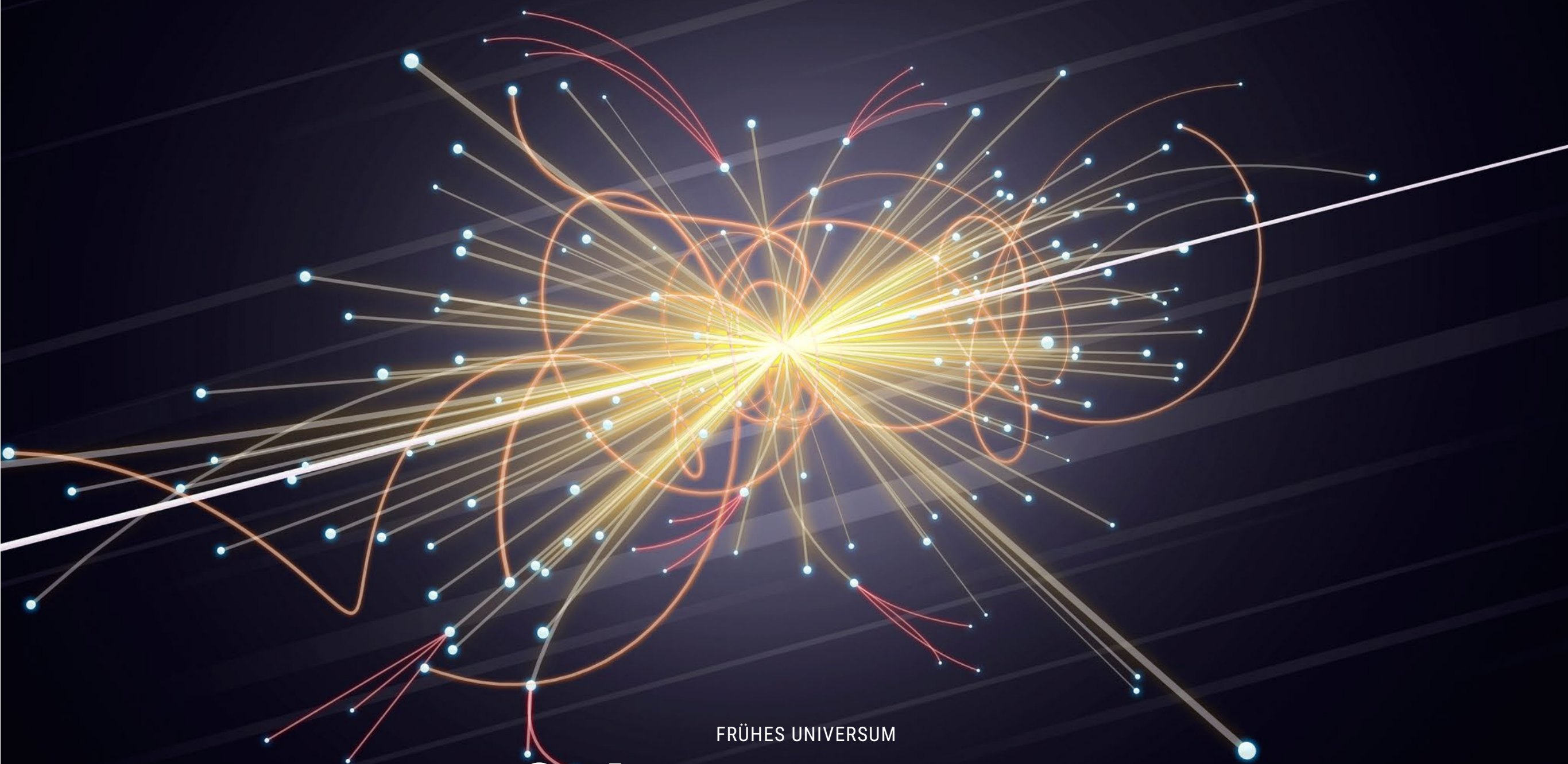
Spektrum DER WISSENSCHAFT KOMPAKT

EXO- PLANETEN Ferne Welten im Blick

- > Eine Spurensuche
- > CARMENES: Späher im Infrarot
- > Besser als die Erde

FÜR NUR
€ 4,99

HIER DOWNLOADEN



FRÜHES UNIVERSUM

Ließ das Higgs-Boson die Antimaterie verschwinden?

von Clara Moskowitz

Warum verflüchtigte sich die Antimaterie fast komplett aus unserem Universum? Das Higgs-Feld ist der Grund, sagen Forscher: Seine Schwankungen setzten die Materie in Vorteil.

Im Grunde genommen könnten alle Dinge im Universum – wir inbegriffen – aus Antimaterie statt aus Materie bestehen. Denn der Urknall ließ vermutlich beide Materieformen zu etwa gleichen Teilen entstehen. Doch von der einst reichlich vorhandenen Antimaterie blieben nur mehr Spuren. Irgendein Effekt muss in der Frühzeit des Universums dafür gesorgt haben, dass die normale Materie die Oberhand gewann. Nur welcher? [In der Fachzeitschrift »Physical Review Letters« haben Wissenschaftler nun eine neue Theorie vorgestellt](#), der zufolge das kürzlich entdeckte Higgs-Boson dafür verantwortlich sein könnte; genauer: das mit ihm verknüpfte Higgs-Feld.

Dieses Feld soll den gesamten Raum ausfüllen und allen Teilchen, die mit ihm in Wechselwirkung treten, eine Masse verleihen. Besaß das Higgs-Feld im frühen Universum einen sehr hohen Wert, der erst im Lauf der Zeit auf den aktuellen niedrigeren Wert absank, könnten sich die Massen von Teilchen und ihren Antiteilchen kurzzeitig unterschieden haben – und das

wäre ungewöhnlich, denn laut Definition besitzt jedes Antiteilchen zwar die entgegengesetzte Ladung, aber exakt dieselbe Masse wie das entsprechende Materieteilchen. Sollten sich ihre Massen jedoch einstmals unterschieden haben, wäre es denkbar, dass im jungen Kosmos mehr Materie als Antimaterieteilchen entstanden. Und das wiederum könnte schließlich zum heute beobachteten Überschuss an Materie geführt haben.

»Das ist eine schöne Idee, die man weiter erforschen sollte«, sagt Kari Enqvist von der Universität Helsinki, der nicht an der neuen Studie beteiligt war, aber bereits selbst der Frage nachgegangen ist, ob der Wert des Higgs-Felds mit der Zeit abgenommen hat. »Die Wahrscheinlichkeit, dass das Higgs-Feld nach der Inflation einen höheren Wert besaß als heute, ist sehr groß«, sagt Enqvist.

Leichtere Materieteilchen wären im Vorteil

Unter Inflation verstehen Physiker eine von Theoretikern postulierte, kurze Phase im frühen Universum, in der sich die Raum-

zeit unglaublich schnell ausdehnte. »Die Inflation weist eine sehr besondere Eigenschaft auf: Sie erlaubt es Feldern, [zwischen verschiedenen Werten] hin- und herzuspringen«, erklärt der Leiter der Studie, Alexander Kusenko von der University of California in Los Angeles. Während der Inflation veränderte sich der Kosmos grundlegend – und das in deutlich weniger als einer Sekunde. Auch das Higgs-Feld könnte damals auf Grund von Quantenfluktuationen zwischen verschiedenen Werten geschwankt sein, um dann, am Ende der Inflationsphase, bei einem sehr hohen Wert hängen zu bleiben. Anschließend sank dieser Wert wieder ab, bis ein »Gleichgewichtswert« erreicht war. Gut möglich, dass der sich ändernde Wert den Materieteilchen eine andere Masse verlieh als ihren Gegenstücken aus Antimaterie, meinen nun Kusenko und Kollegen.

Wären die Materieteilchen durch diesen Vorgang leichter geworden als ihre Gegenstücke, so dürften sie deutlich häufiger entstanden sein – und schnell die Antimaterie überholt haben. Denn je leichter ein Teil-

chen ist, desto weniger Energie ist für seine Produktion nötig.

Dass das Higgs-Feld während der Inflation so einfach seinen Wert ändern konnte, wie Kusenko und Kollegen vermuten, liegt an der relativ geringen Masse des Higgs-Bosons – also jenes Teilchens, das mit diesem Feld verknüpft ist. 2012 entdeckten Physiker das Boson im Large Hadron Collider (LHC) und bezifferten seine Masse auf etwa 126 Gigaelektronvolt, etwa das 118-Fache der Protonenmasse.

Das ist etwas leichter, als laut verschiedenen Theorien zu erwarten war. Man kann sich das Higgs-Feld als ein Tal zwischen zwei schroffen Felswänden vorstellen. Der Wert des Felds entspricht der Höhe des Tals, und die Masse des Bosons bestimmt die Steigung der Felswände. »Ist das Tal sehr tief eingeschnitten, dann sind die Felswände wahrscheinlich sehr steil«, erklärt Kusenko. »Genau das haben wir nun gezeigt. Der Wert sagt uns, dass die Wände nicht sehr steil ausfallen – das heißt, das Higgs-Feld konnte herumspringen und zu Tälern in höheren Lagen aufsteigen.« Sein Kollege Kari Enqvist stimmt ihm zu: Das Higgs-Feld könnte sehr wohl mit einem deutlich höheren Wert als heute angefangen haben.

Nachweis des Higgs-Bosons

Im Juli 2012 war es endlich so weit. Am Large Hadron Collider (LHC) fand man, wonach man seit den 1960er Jahren gesucht hatte: das Higgs-Boson. Die Sehnsucht der Forschungsgemeinde nach diesem Teilchen speist sich aus der Hoffnung, damit ein physikalisches Modell zu komplettieren, das alle bekannten Elementarteilchen und deren Wechselwirkungen beschreibt. Hätten sie das vorhergesagte Higgs-Boson nicht ausfindig machen können, wäre womöglich ihr gesamtes Theoriegebäude – das so genannte Standardmodell der Teilchenphysik – ins Wanken geraten.

Sieht man von Raumfahrtmissionen ab, handelt es sich wohl um das aufwändigste Experiment, das die Menschheit bislang konzipiert hat. Am LHC in Genf werden in kilometerlangen unterirdischen Anlagen winzige Teilchen auf enorme Geschwindigkeiten beschleunigt, um sie dann zerschellen zu lassen. In den Trümmern fahndeten tausende Wissenschaftler nach den Grundbausteinen unserer Materie.

Die Entdeckung des Higgs-Teilchens hat zwar Probleme gelöst, aber gleichzeitig weitere Fragen aufgeworfen. Beispielsweise ist das Teilchen leichter als erwartet. Ein bisher nicht entdecktes Partnerteilchen könnte dafür verantwortlich sein. Es bleiben also genügend Rätsel, die in zukünftigen, noch leistungsfähigeren Teilchenbeschleunigeranlagen erforscht werden können.

SUCHE AM CERN

Um das variable Higgs-Feld für die Verteilung von Materie und Antimaterie verantwortlich machen zu können, benötigen die Physiker einen noch hypothetischen vierten Neutrino-typ. Nach diesem Majorana-Neutrino, das sein eigenes Antiteilchen ist, wird unter anderem am LHC intensiv gefahndet – bislang jedoch vergeblich.

Doch dass dies gleichzeitig der Materie zu einem Vorteil gegenüber der Antimaterie verhalf, sei »ein Stück weit Spekulation«, so der Forscher.

Majorana-Neutrinos erlauben Verwandlungstrick

Denn die Dominanz der Materie hängt in diesem Szenario auch vom Vorhandensein eines bisher nur hypothetischen Teilchens ab: des so genannten Majorana-Neutrinos. Neutrinos sind Elementarteilchen, die in drei bekannten Typen – Elektron-, Myon- und Tau-Neutrino – auftreten. Darüber hinaus könnte mit dem Majorana-Neutrino noch ein viertes existieren, das allerdings viel massereicher sein dürfte als die anderen und daher schwieriger nachzuweisen wäre (denn je schwerer ein Teilchen ist, desto mehr Energie muss ein Beschleuniger aufbringen, um es zu erzeugen). Es hat überdies die kuriose Eigenschaft, sein eigenes Antiteilchen zu sein: Das Majorana-Neutrino und das Anti-Majorana-Neutrino wären ein und dasselbe.

Durch ihr Doppelleben könnten diese Neutrinos eine Brücke zwischen Materieteilchen und Antimaterieteilchen schlagen: Die Gesetze der Quantenwelt erlau-

ben es einem Teilchen, sich für einen kurzen Moment in ein anderes Teilchen zu verwandeln. Der Wechsel von Materie zu Antimaterie oder umgekehrt ist dabei aber normalerweise untersagt. Doch würde sich ein Antimaterieteilchen – beispielsweise ein Anti-Elektron-Neutrino – in ein Majorana-Neutrino umwandeln, wäre nicht mehr klar, ob es sich ursprünglich um ein Teilchen aus Materie oder aus Antimaterie handelte – dadurch kann sich das Anti-Elektron-Neutrino genauso gut in ein gewöhnliches Elektron-Neutrino zurückverwandeln. Und wäre das entsprechende Neutrino im frühen Universum auf Grund des variierenden Higgs-Felds etwas leichter gewesen als das Antineutrino, sollte dies das wahrscheinlichere Resultat sein – was der Materie einen Vorteil gegenüber der Antimaterie verschafft hätte.

Magnetische Spurensuche im Universum

»Falls dem so war, würde das ein großes Rätsel in der Teilchenphysik lösen«, sagt der Physiker Don Lincoln vom Fermi National Accelerator Laboratory in Illinois, der nicht an der Studie beteiligt war. Doch bislang sei die Existenz des Majorana-Neutrinos reine Spekulation: »Es hat sich einem

Nachweis bislang entzogen – obwohl man in Experimenten am LHC ganz gezielt danach sucht. Die Wissenschaftler werden aber dieses Konzept sicher im Hinterkopf behalten, wenn sie die neuen LHC-Daten sichten, die ab Frühsommer 2015 generiert werden.«

Kusenko und seine Kollegen hoffen auch noch von anderer Seite auf Unterstützung für ihre Theorie. Die von ihnen postulierte bewegte Vergangenheit des Higgs-Felds könnte Magnetfelder mit bestimmten Eigenschaften hervorgerufen haben, die noch heute im Universum existieren und möglicherweise nachweisbar sein sollten. Ließen sich solche Felder tatsächlich aufspüren, wäre das ein Beweis dafür, dass der Wert des Higgs-Felds vor langer Zeit wirklich abnahm. Die Wissenschaftler wollen nun berechnen, welche Eigenschaften diese Magnetfelder genau besitzen und wie wahrscheinlich es wäre, sie zu beobachten. Es besteht also die Hoffnung, dass ihre Theorie überprüfbare Aussagen macht – und es uns damit vielleicht erlaubt, das Rätsel um die verschwundene Antimaterie ein für alle Mal aufzulösen. ↩

(Spektrum.de, 16. März 2015)

KOSMISCHE MORGENDÄMMERUNG

DIE ERSTEN STERNE

von Michael D. Lemonick

Bald nach dem Urknall begann eine »dunkle Ära« des Universums, die rund 100 Millionen 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.

Vor rund 13,8 Milliarden 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.

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

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 so genannte 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.

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? Geschah 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 Millionen Jahre nach dem Urknall entstanden sind, als sich erste Galaxi-

en 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 klumpten die Dunkle Materie – eine unsichtbare Substanz aus hypothetischen Teilchen – zu so genannten 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

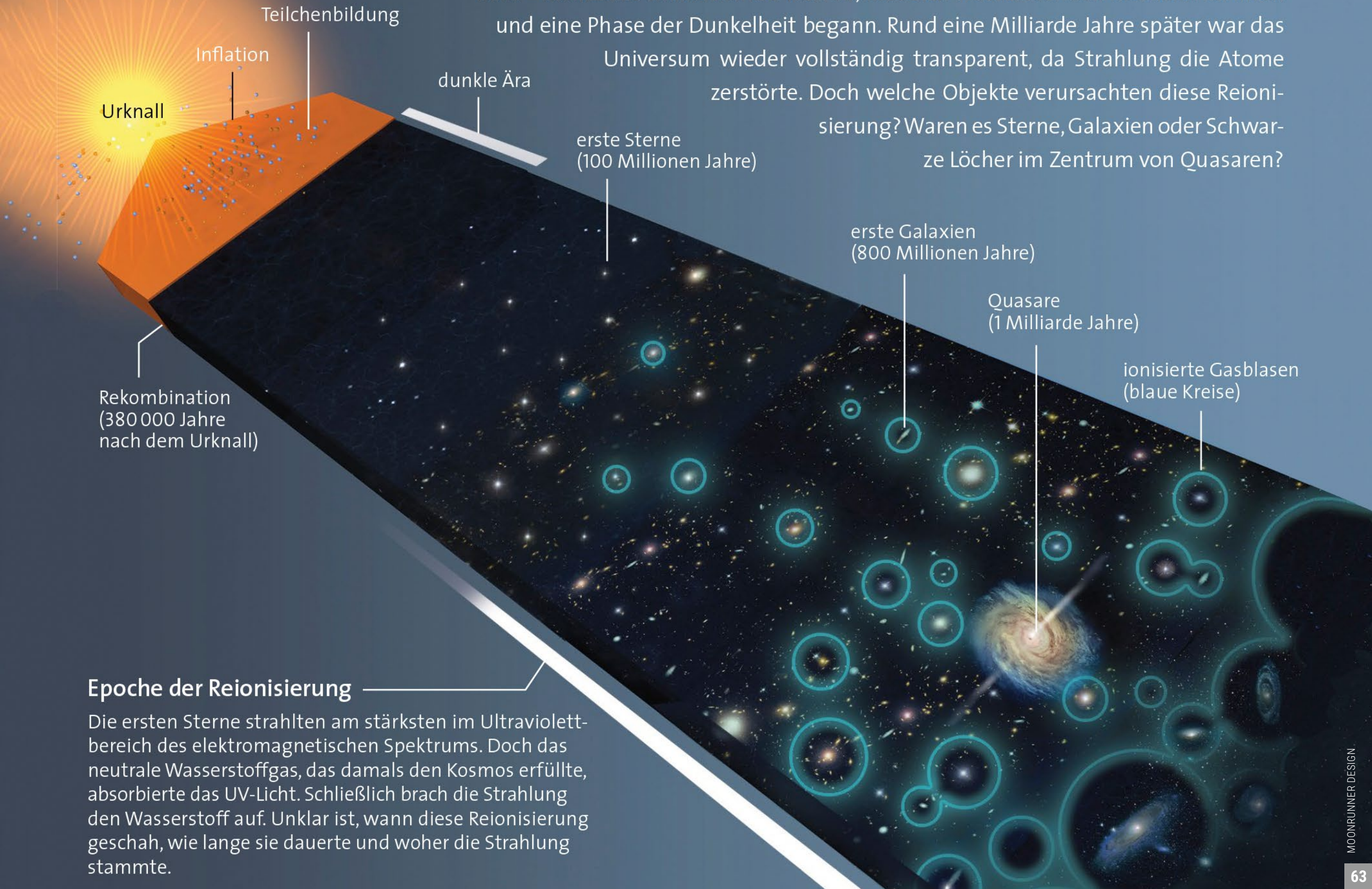
rund 100 Sonnenmassen. Die Begründung dafür: Wenn ein Gasklumpen unter dem Einfluss der Schwerkraft zu kollabieren beginnt, erwärmt er sich. Das erzeugt einen der Schwerkraft entgegenwirkenden Strahlungsdruck. Falls der Stern die Wärme nicht teilweise abgeben kann, kommt sein Kollaps zum Stillstand. 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.

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

Die erste Jahrmmilliarde

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?



Epoche der Reionisierung

Die ersten Sterne strahlten am stärksten im Ultraviolettbereich des elektromagnetischen Spektrums. Doch das neutrale Wasserstoffgas, das damals den Kosmos erfüllte, absorbierte das UV-Licht. Schließlich brach die Strahlung den Wasserstoff auf. Unklar ist, wann diese Reionisierung geschah, wie lange sie dauerte und woher die Strahlung stammte.

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, so genannte 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 3C 273 hatte eine Rotverschiebung

von 0,16, das heißt, sein Strahlungsspektrum war um 16 Prozent 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 Milliarden 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.

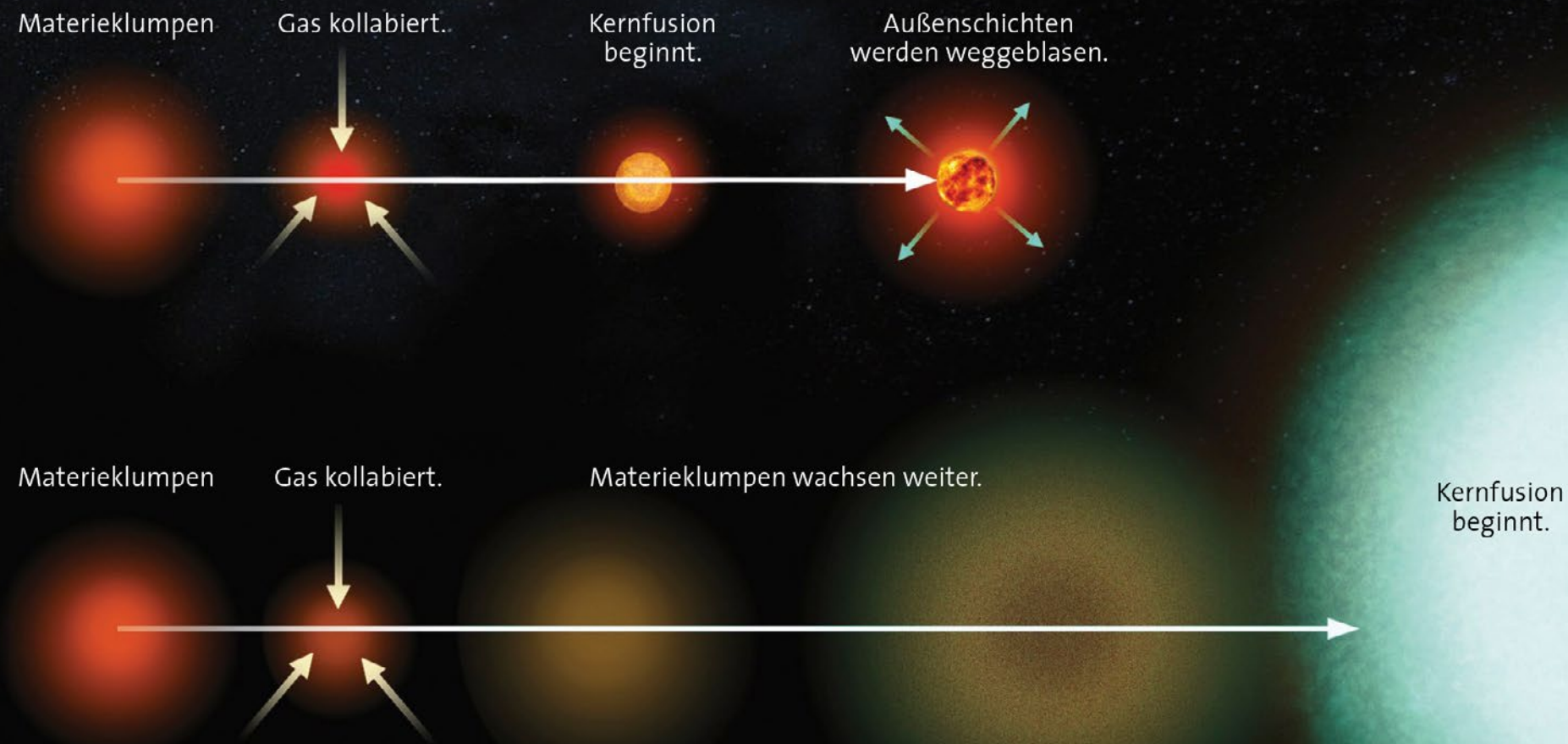
In den folgenden Jahren wurde kein noch älterer Quasar entdeckt. Zwar nahmen damals mächtige Instrumente wie das Hubble-Weltraumteleskop und das Keck-Teleskop auf dem Mauna Kea (Hawaii) den Betrieb auf, aber Quasare sind einfach ungemein selten. Sie werden nur von besonders massereichen Schwarzen

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.

Heutige Sternentstehung

Moderne Galaxien enthalten Beimengungen von Kohlenstoff, Sauerstoff und Staub. Diese Substanzen beschleunigen die Abkühlung von Gasen. Kühle Wolken haben weniger Innendruck. Dadurch kann sich eine kollabierende Staubwolke so dicht zusammenziehen, dass der Wasserstoff in ihrer Mitte eine thermonukleare Fusionsreaktion beginnt. Der durch die Kernfusion ausgelöste plötzliche Energieausbruch bläst die Außenschichten der kollabierenden Wolke fort und lässt einen relativ kleinen Stern zurück.



Entstehung der ersten Sterne

Das frühe Universum enthielt weder Kohlenstoff noch Sauerstoff oder gar Staub, sondern nur Wasserstoff mit kleinen Beimengungen von Helium und Lithium. Wasserstoff kühlt eher langsam ab. Als die Gaswolken zu kollabieren begannen, verhinderte der heiße Wasserstoff, dass die Protosterne sich allzu stark verdichteten. Da die Dichte nicht ausreichte, Kernfusionsreaktionen auszulösen, fuhren die Wolken fort, immer mehr Gas anzusammeln – bis zu einer Menge von hunderten oder gar einer Million Sonnenmassen. Erst dann wurden sie heiß und dicht genug für den Beginn der Kernfusion.

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 Millionen 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 größtenteils 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 wirk-

»Die ersten Sterne waren
unvorstellbar groß –
vielleicht eine Million Mal
so massereich wie
unsere Sonne«

lichen 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

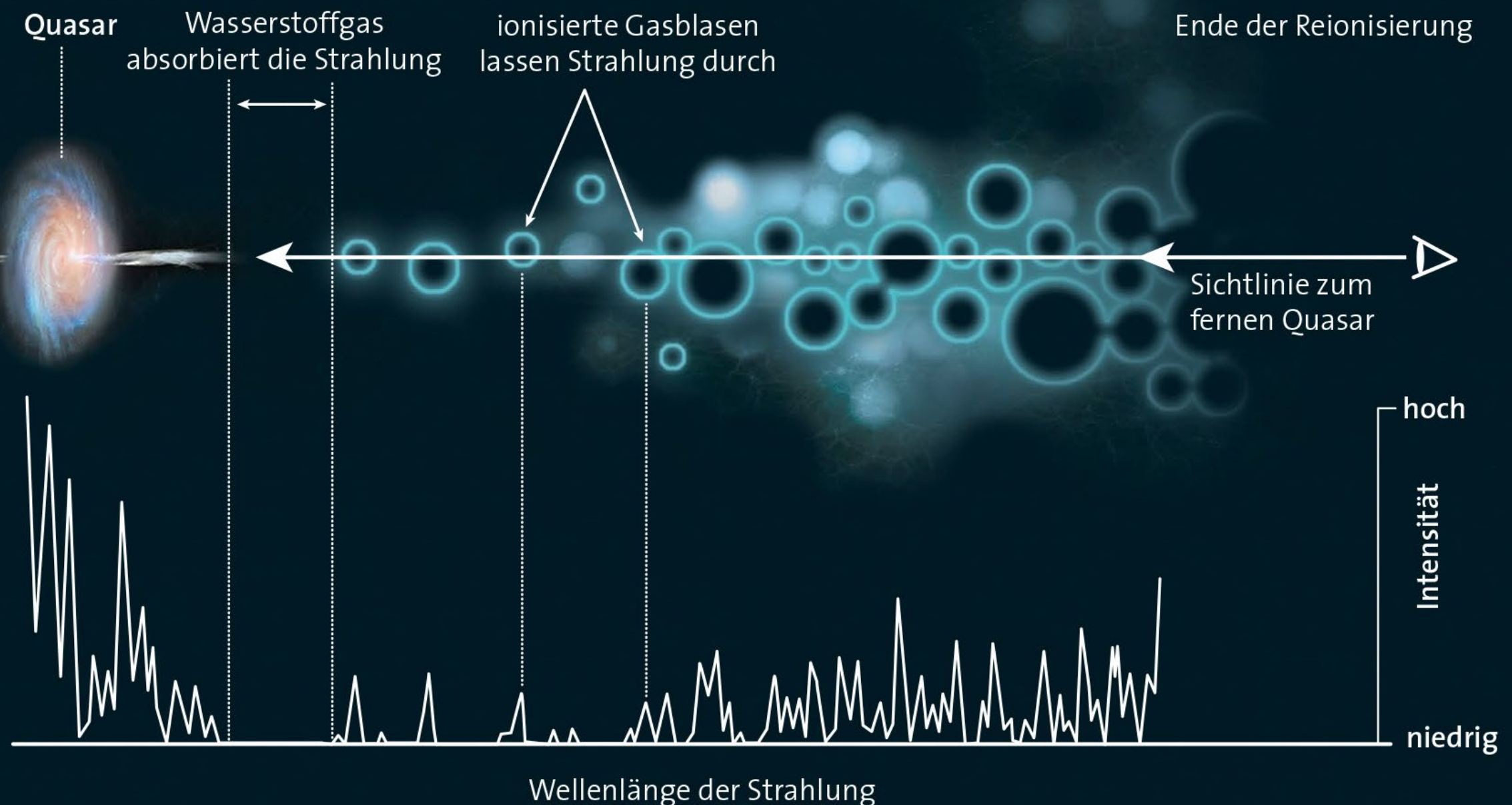
Zwar ist die Jagd nach fernen Quasaren mehr oder weniger zum Erliegen gekommen, aber die Suche nach Galaxien, die möglichst bald nach dem Urknall entstanden sind, nimmt jetzt erst richtig Fahrt auf. Am Anfang stand das so genannte Hubble Deep Field. 1995 richtete Robert Williams, damals Direktor des Space Telescope Science Institute in Baltimore, das Hubble-Weltraumteleskop geschlagene 30 Stunden 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

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.

serstoff 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.



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 Millionen 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.

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 Millionen 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 Millionen 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 dahinterliegende 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 Minuten 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 satellitengestützte 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 Gammablitz 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 Millionen 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 Millionen 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 durch-

»Wenn die Sterne zu
Schwarzen Löchern
kollabieren, speien sie
Jets von Gammastrahlen
weit in den Weltraum
hinaus«

aus derart energiereiche Ausbrüche auslösen können, dass sie – wenn man sie fände – trotz der noch größeren Entfernung heller erscheinen müssten als die bisher entdeckten Gammablitz.

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 Prozent der Gammablitz 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 bis-

her 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 Gammablitz 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 aufgefrisst wurde. ↩

(Spektrum der Wissenschaft, 4/2015)

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

$$E_k = \frac{1}{2} m v^2 \quad \text{tg } \vartheta_B = \frac{w_2}{w_1} = w_{21} \quad \rho V = n R T \quad \vec{\psi}$$

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{d^2 \psi}{dx^2} + V \psi = E \psi \quad M_e = \sigma T^4 \quad \phi_e = \frac{L}{4\pi r^2} \quad \int \frac{\Delta \varphi}{2\pi} = \frac{\Delta x}{\lambda} = \frac{x_2 - x_1}{\lambda}$$

$$U_{ef} = U_m \quad E = \hbar \omega \quad \Delta t = \frac{\Delta t'}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad X_L = \frac{U_m}{I_m} = \omega L = 2\pi f$$

$$\vec{B} = \mu_0 \frac{NI\sqrt{2}}{l} \quad v = \frac{w h}{2\pi r m_e} \quad \phi_E = \frac{E_e}{\phi_0} = k \frac{\phi}{r^2} \quad \phi = |\phi_A - \phi_B| \quad T = \frac{4 n_1 n_2}{(n_2 + n_1)}$$

$$K = \rho^2 \frac{l}{2m} m_0 = \frac{M_m}{N_A} = \frac{M_r \cdot 10^{-3}}{N_A} \quad m = N \cdot m_0 = \frac{Q}{v_e} \frac{M_m}{N_A} \quad E = \frac{E_c}{a} \int_0^{a/L} \sin$$

$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{2eUm_e}} \quad R = \rho \frac{l}{S} \quad E = mc^2 \quad \frac{\sin \alpha}{\sin \beta}$$

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{l}} \quad \psi(x) = \sqrt{\frac{2}{L}} \sin \frac{n\pi x}{L} \quad E = \frac{1}{2} \hbar \sqrt{k/m} \quad \beta = \frac{\Delta I_c}{\Delta I_B} \quad \phi_e = \frac{2\pi}{\phi}$$

$$\oint \vec{B} d\vec{l} = \mu_0 \iint_S \vec{J} d\vec{S} \quad \vec{J} = \frac{1}{\mu_0} (\vec{E} \times \vec{B}) \quad E_k = \frac{\hbar^2}{8mL^2} \quad \hbar^2$$

$$v_k = \sqrt{\frac{3kT}{m_0}} = \sqrt{\frac{3kTN_A}{M_m}} = \sqrt{\frac{3R_m T}{M_r \cdot 10^{-3}}} \quad E = \hbar k^2 \quad 1 \text{ pc} = \frac{1 \text{ AU}}{r}$$

$$\lambda = \frac{\ln 2}{T} \quad F_h = Sh\rho g \quad f_0 = \frac{1}{2\pi \sqrt{CL}} \quad \sigma = \frac{Q}{M} = \frac{r}{S I_m^2} = \frac{U_m^2}{I_m^2}$$

$$\left(\frac{E_t}{E_0} \right)_{\parallel} = \frac{2 \cos \vartheta_1 \cos \vartheta_2}{\cos(\vartheta_1 - \vartheta_2) \sin(\vartheta_1 + \vartheta_2)} \quad \int \vec{E} d\vec{l} = - \iint_S \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \cdot d\vec{S} \quad \rho = \frac{E}{c} = \frac{\hbar f}{c} = \frac{\hbar \omega}{c}$$

$$E_y = E_0 \sin(kx - \omega t) \quad R = R_0 \sqrt[3]{A} \quad \oint \vec{H} d\vec{l} = \iint_S (\vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}) \cdot d\vec{e} \quad \mu = U_m \sin$$

$$S = \frac{1}{A} \frac{dW}{dt} \quad \oint \vec{H} d\vec{l} = \iint_S (\vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}) \cdot d\vec{e}$$

URKNALL

BIS ZUR LETZTEN FORMEL

von Robert Gast

Die Materie, aus der Menschen, Sterne und Planeten bestehen, ist entschlüsselt. Nun wollen Forscher den Urknall verstehen. Aber kann das je gelingen?

Die eine Dame und die 28 Herren hatten ihre Hüte abgenommen, ihre Schlipse zurechtgerückt und sich auf den Holzstühlen niedergelassen. Max Planck zog noch einmal an seiner Zigarette, Marie Curie legte die Hände in den Schoß, und Werner Heisenberg setzte sein Spitzbubenlächeln auf. Als der Fotograf an diesem Oktobertag des Jahres 1927 den Auslöser drückte, schauten die meisten der 29 Forscher selbstbewusst in die Linse. Nur Albert Einstein wirkt auf dem Bild so, als hätte er sich verlaufen.

Die Schwarz-Weiß-Aufnahme hält einen historischen Moment fest: Die fünfte [Solvay-Konferenz](#) im Oktober 1927 gilt als Höhepunkt der modernen Physik. In den ersten zweieinhalb Jahrzehnten des 20. Jahrhunderts hatten die Naturforscher zwei wissenschaftliche Revolutionen auf den Weg gebracht: Sie hatten das mechanische Weltmodell Isaac Newtons vom Podest gestoßen und es mit Albert Einsteins allgemeiner Relativitätstheorie ersetzt. Und sie hatten die Widersprüchlichkeiten im klassischen Atommodell mit den druckfrischen Gesetzen der Quantenphysik aufgelöst. Doch 1927 waren noch nicht alle Fra-

gen geklärt, im Gegenteil: Die Forscher diskutierten erbittert über die Interpretation der Quantenmechanik. Aber das Fundament war gelegt für die nächsten 90 Jahre Physik. Für einen Tiefenrausch bis ins Innerste des Atomkerns und bis an den Anfang des Universums.

Heute löst der Blick auf das Solvay-Foto Nostalgie aus. Nie wieder war die Physik so erfolgreich wie damals. Je tiefer Forscher ins Innerste der Natur vordrangen, desto komplizierter wurden ihre Modelle. Der Aufwand, der für jeden weiteren Verständnisschritt nötig war, ist zuletzt rasant gestiegen. Und seit einigen Jahrzehnten häuft sich wieder das Unverständnis. Zahlreiche Beobachtungen im Weltall – allen voran die Dunkle Materie und die Dunkle Energie – stellen die Forscher vor große Rätsel. Und die große Hoffnung des älteren Albert Einstein, alle Naturgesetze auf einen gemeinsamen Ursprung zurückzuführen, ist bis heute unerfüllt geblieben. Physiker warten auf einen neuen Paukenschlag, auf die nächste wissenschaftliche Revolution.

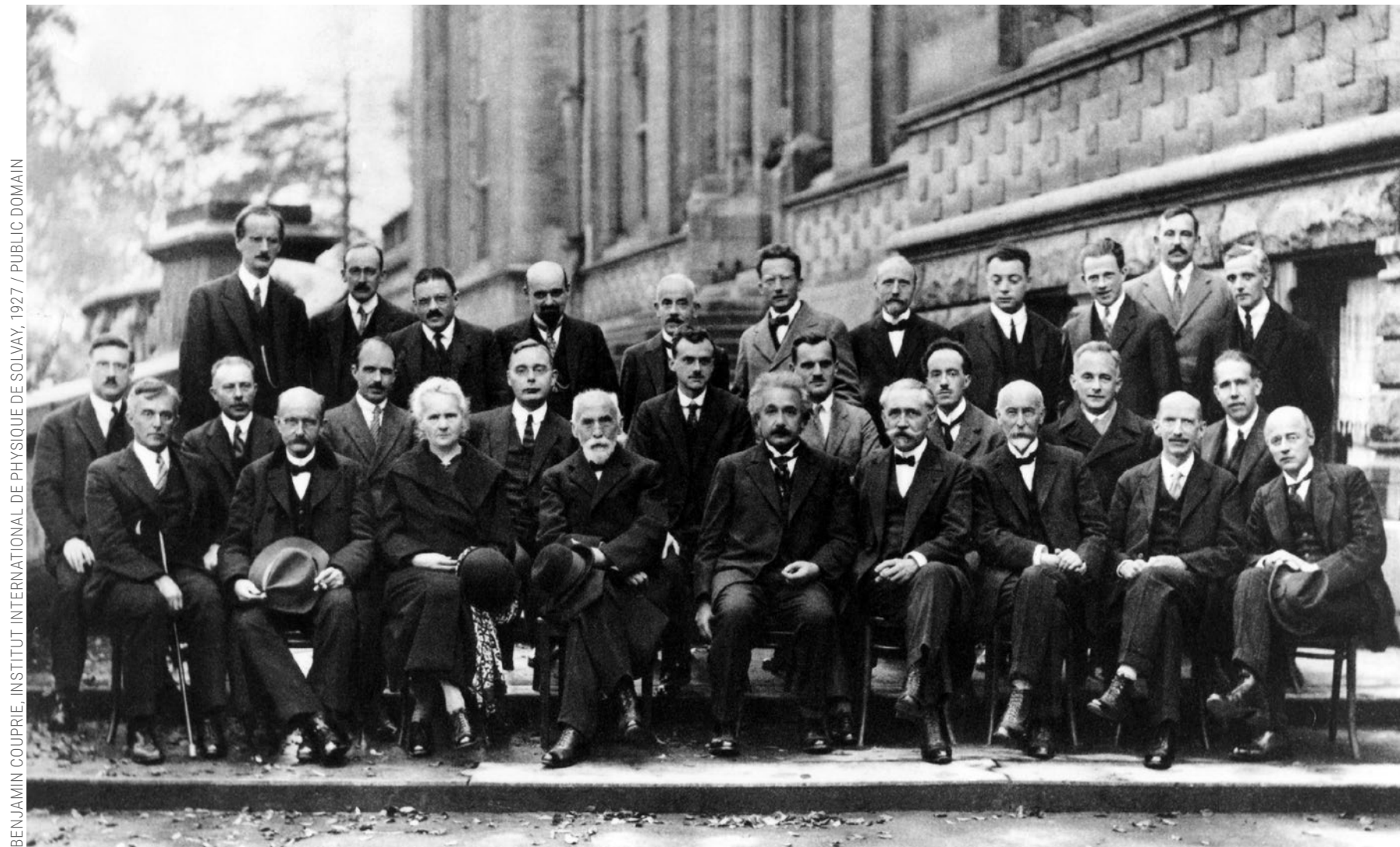
Die Ästhetik mathematischer Gleichungen

In der Vergangenheit konnten sie sich stets auf ein mächtiges Werkzeug verlassen: Die

»Wie Politik und Krieg
sind Eichtheorien zu
wichtig, um sie nur
Experten zu überlassen«

Ästhetik mathematischer Theorien war ein Wegweiser, der meistens den Weg in Richtung Wahrheit zu deuten schien. Davon machte schon James Clerk Maxwells »Elektrodynamik« Gebrauch: Die vier Gleichungen zur Vereinheitlichung von einer Vielzahl magnetischer und elektrischer Phänomene passen auf einen Bierdeckel; sie haben Stromleitungen, Glühbirnen und Funktürme möglich gemacht. Wer kommt da nicht ins Schwärmen? Auch Albert Einsteins allgemeine Relativitätstheorie war erst ein elegantes Luftschloss aus [riemannschen Mannigfaltigkeiten](#), ehe eine ihrer Vorhersagen bei einer Sonnenfinsternis im Jahr 1919 bestätigt wurde.

Doch der eigentliche Rausch begann in den 1970er und 1980er Jahren, als das Zeitalter der »Eichtheorien« begann. Unter Physikern hatte sich eine verblüffende Erkenntnis durchgesetzt: Das Chaos zählt man nicht, indem man über die ständigen Veränderungen Buch führt, sondern indem man das festhält, was unverändert bleibt. Seitdem suchen Physiker nach »Symmetrien« – mathematischer Jargon für physikalische Größen, die gleich bleiben, wenn sich die Umgebung verändert. Mit ihnen als Ausgangspunkt können sie



BENJAMIN COUPRIE, INSTITUT INTERNATIONAL DE PHYSIQUE DE SOLVAY, 1927 / PUBLIC DOMAIN

elegante »Eichtheorien« konstruieren, die bestimmte Felder und Elementarteilchen enthalten müssen.

Mit diesem Werkzeug konnten Physiker auf dem Reißbrett ein Modell bauen, das zwei der vier Naturkräfte als Facetten einer übergeordneten Grundkraft beschreibt. Geleitet von mathematischer Ästhetik erkannten [Steven Weinberg](#), Abdus Salam und Sheldon Glashow im Jahr 1967 die »elektro-

GRUPPENBILD MIT DAME

Auf der 5. Solvay-Konferenz kam es zum Stelldichein der damaligen Physikelite: 17 der 29 Anwesenden besaßen oder bekamen in der Folgezeit den Nobelpreis für ihre Forschung – darunter Einstein, Curie, Heisenberg, Planck und Dirac.

schwache« Kraft: Sie umfasst Elektromagnetismus und »schwache Kernkraft«, die Atomkerne zerfallen lässt. Heute ist diese Urkraft das Herzstück des Standardmodells der Teilchenphysik – durch das Higgs-Teilchen, das jüngst mit dem Nobelpreis vergoldet wurde, ist die Theorie komplett. Bei ihr hatte sich das Prinzip der Symmetriesuche bewährt, denn auch die starke Kernkraft konnte mit Hilfe einer Eichtheorie gebändigt werden. »Wie Politik und Krieg sind Eichtheorien zu wichtig, um sie nur Experten zu überlassen«, schwärmte der Autor eines Physiklehrbuchs im Jahr 1983.

61 Elementarteilchen und drei Grundkräfte haben die Physiker mit Hilfe des »Standardmodells der Teilchenphysik« zusammengefasst. Es könne so gut wie alles beschreiben, prophezeite ein Physiker einst: von den Reaktionen, welche die Sonne brennen lassen, bis zu den Kräften, die eine Schneeflocke zusammenhalten. In Verneigung vor der Formelsprache nennen es die Physiker » $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$ «. Die Mathematik zeige eine unheimliche Nützlichkeit, schrieb der Nobelpreisträger [Eugene Wigner](#) einmal. »Wir sind in einer ähnlichen Situation wie ein Mann, der einen

Schlüsselbund in die Hand gedrückt bekommt, um mehrere Türen zu öffnen, und der immer beim ersten oder zweiten Versuch den richtigen Schlüssel wählt.«

Mathematik als einzige korrekte Sprache

Für Wigner und seine Kollegen war sicher: Mit der Mathematik war die einzig korrekte Sprache gefunden, das Universum zu beschreiben – bis zu ihren tiefsten Wahrheiten. So überrascht es wenig, dass mancher Forscher heute davon schwärmt, mit Hilfe der Mathematik die nächste arabische Revolution vorherzusagen oder ein Menschenhirn im Computer zu simulieren. Es ist ein Glaube, den wohl niemand so unverblümt formuliert hat wie der US-Kosmologe Frank Tripler: »Alles, einschließlich des Menschen, kann vollständig von der Physik beschrieben werden.«

Dabei mahnten andere früh zur Demut: »Je mehr uns Teilchenphysiker über die grundlegenden Naturgesetze verraten, desto weniger Relevanz scheinen sie für die Probleme der anderen Wissenschaften zu haben, ganz zu schweigen von denen der Gesellschaft«, schrieb der Festkörperphysiker und spätere Nobelpreisträger [Philip W. Anderson](#) 1972 in »Science«. Die Warnung

»Alles, einschließlich des Menschen, kann vollständig von der Physik beschrieben werden«

[Frank Tripler]

stieß auf taube Ohren, Anderson ist spätestens seit seinem Eintreten gegen den [Superconducting Super Collider](#) in den USA eine kontroverse Figur unter Physikern, die weiter von der großen Vereinheitlichung von allgemeiner Relativitätstheorie und Standardmodell träumen. Dazu müssten zunächst starke und elektroschwache Kernkraft auf einen gemeinsamen Ausgangspunkt zurückgeführt werden – das Standardmodell begreift sie eher als wesensähnliche Brüder.

Doch den Weg größter mathematischer Einfachheit hat die Natur nicht gewählt: Eine Eichtheorie rund um die [Symmetrie »SU\(5\)«](#) könnte auf dem Papier die starke Kernkraft mit der elektroschwachen Kraft auf eine gemeinsame Urkraft zurückführen, gewissermaßen den Vater der Brüder beschreiben. Aber die Vorhersagen der Theorie bestätigten sich nicht: Ihr zufolge wäre das Proton instabil, worauf Physiker trotz langer Suche mit gewaltigen Detektoren keinen Hinweis gefunden haben.

Und auch das Standardmodell kann sie nicht restlos überzeugen. Jetzt, wo es vollständig ist, lenken Physiker den Blick auf seine Unvollkommenheit. Wichtige Fragen ließen sich nicht auf übergeordnete mathe-

mathematische Prinzipien zurückführen, monieren sie: Wieso haben die Elementarteilchen die Massen, die sie haben? Und wieso sind die drei im Standardmodell enthaltenen Kräfte so unterschiedlich stark? In ihre eleganten Gleichungen müssen die Physiker etwa 20 »freie Parameter« für die Massen der Teilchen und die Stärke der Kräfte per Hand einsetzen. Ein Hauch von Willkür – für den Stand der Physiker eine Kampfansage. Sie wollen weiterbuddeln auf dem Weg ins Innerste der Natur. Die Anthropologin Arpita Roy von der University of California in Berkeley, die das CERN zweieinhalb Jahre lang mit dem Blick einer Ethnologin erforschte, kommt in ihrer Doktorarbeit zu dem Schluss: »Die Teilchenphysik ist begierig darauf, in die Zukunft zu schreiten, auch wenn der gegenwärtige Stand ziemlich zufrieden stellend ist.«

Es droht der Holzhammer

Für die Physiker war nach dem Aus der SU(5)-Eichtheorien die Zeit gekommen, den Holzhammer auszupacken. In den 1970er Jahren ersannen einige von ihnen eine [»Supersymmetrie«](#): In der Glut des Urknalls soll jedes der bekannten Elementarteilchen einen Tanzpartner gehabt ha-

ben. Damit ließe sich die Masse des Higgs-Teilchens elegant herleiten – einer der »freien Parameter«, der besonders am Stolz der Physiker nagt. »Susy« führe die elektroschwache Kraft und starke Kernkraft auf einen gemeinsamen Ausgangspunkt zurück, so der Ansatz. Ein netter Nebeneffekt: Mit der Zeit erkannten die Physiker, dass eines der vielen neuen Teilchen ein guter Kandidat für die Dunkle Materie wäre.

Aber um die Vorgabe der nun über 100 Elementarteilchen lassen sich zig Modelle konstruieren. Ob eines von ihnen (und wenn ja, welches) die Natur beschreibt, weiß niemand. »Ohne wirklichen Hinweis auf Physik jenseits des Standardmodells haben sich die Physiker entschlossen, eine Wette einzugehen«, schreibt der Wissenschaftsautor Jim Baggot über die aufwändige Suche nach der Supersymmetrie. Und die vergangenen Jahre brachten nicht den erhofften Erlös. Wären die einfachsten Kandidaten einer Supersymmetrie Realität, hätten die Forscher in ihren Teilchenbeschleunigern längst erste Superpartner erzeugt. Aber am Genfer Riesenbeschleuniger LHC tauchte trotz großer Hoffnungen im Vorfeld nichts dergleichen auf. Nun hoffen die Physiker, dass der LHC nach seiner

»Ohne wirklichen
Hinweis auf Physik
jenseits des
Standardmodells haben
sich die Physiker
entschlossen, eine
Wette einzugehen«

[Jim Baggot]

Umbauphase größere Chancen als zuvor hat, Susy-Partikel zu erzeugen.

Derweil werben sie für den nächsten großen Beschleuniger. Statt im Kreis würde er Teilchen auf einer geraden Strecke beschleunigen. 31 Kilometer soll der International Linear Collider (ILC) lang werden, statt mit Protonen und Antiprotonen wollen die Forscher ihn mit Elektronen und Positronen befüllen. Damit soll das Higgs-Teilchen ganz genau vermessen werden. Die Hoffnung: Hinweise auf winzige Abweichungen vom Standardmodell, die den Weg zu einer tieferen Theorie deuten.

Der ILC wird vermutlich nicht mehr kosten als die Olympischen Sommerspiele in London, gegenüber dem Militärbudget der USA wäre er geradezu spottbillig. Aber ob sich in Zeiten von Klimawandel und Finanzkrise die gesellschaftliche Unterstützung für das Projekt finden lässt, ist zweifelhaft. Oder wie Steven Weinberg, der Vater der elektroschwachen Vereinheitlichung, im Jahr 2012 in dem Aufsatz »[The Crisis of Big Science](#)« schrieb: »Es wird sehr schwer werden, das zu verkaufen.« Als Präzedenzfall dient Weinberg der tragische Fall des in jeder Hinsicht vor Superlativen strotzenden »Superconducting Super Col-

lider«, der Anfang der 1990er Jahre in Texas entstehen sollte und mitten im Bau vom US-Repräsentantenhaus die Gelder gestrichen bekam.

Beim Geldeintreiben hilft nicht, dass die Physik, um die es mittlerweile geht, sich weit von den Naturphänomenen der Erde entfernt hat. Schon das Higgs-Teilchen sei »für 99,9 Prozent der Menschen nicht mehr nachvollziehbar«, sagte der Fernsehphysiker Harald Lesch 2012 in einem Interview mit der »Süddeutschen Zeitung«. Und die große Vereinigung der Kräfte war – wenn überhaupt – für einen unvorstellbar kurzen Bruchteil einer Sekunde Realität, vor 13,8 Milliarden Jahren. Die dafür nötigen Energien sind 100 Millionen Mal so hoch wie die der elektroschwachen Vereinheitlichung. Dass sie jemals auf der Erde erzeugt werden können, ist unwahrscheinlich, sofern nicht eine bahnbrechend neue Beschleunigertechnologie erfunden wird.

Der Frust regiert

Auch auf konzeptioneller Seite gibt es Frust: Professoren sind oft mehr Manager als Forscher, und Nachwuchswissenschaftler klagen darüber, dass ihnen die Zeit fehle, Arbeiten außerhalb ihres Nischenthemas

zu lesen. Denn die Forschungsliteratur wächst unaufhaltsam: Im renommierten Physik-Journal »Physical Review« erschienen 1983 gerade einmal 24 Aufsätze. Dieses Jahr werden es in der zu den »[Physical Review Letters](#)« angeschwollenen Zeitschriftenfamilie voraussichtlich 4050 Arbeiten auf ungefähr 20 000 Seiten sein. »Die Physik ist sehr viel fragmentierter als früher«, sagt [Jürgen Renn vom Max-Planck-Institut für Wissenschaftsgeschichte](#). Dabei werde es immer schwieriger, in fundamentale Gebiete der Physik vorzudringen.

Die große Krise vor der Formulierung von Quantenphysik und Relativitätstheorie hätten Einstein und Co. überwunden, indem sie ganz viel Wissen aus verschiedenen Physikrichtungen zusammengetragen hätten. Ob solch eine Synthese heute noch einmal gelingen könne – und ob Physiker vor dem Hintergrund von Publikationsdruck und Karrierezwängen noch die nötigen kreativen Freiräume hätten –, sei die große Frage, so Renn. Dennoch gibt sich der Wissenschaftshistoriker insgesamt zuversichtlich: »Es gibt sehr viele kluge Leute unter den Physikern«, darunter viele, die in eine andere Richtungen als die des Mainstreams forschen.

Das zeigt sich aktuell beispielsweise am CERN. [Michael Krämer von der RWTH Aachen](#) etwa hat zusammen mit Kollegen eine Arbeitsgruppe »Simplified Models« gegründet, die diskutieren soll, inwieweit man noch unvoreingenommen an die Datenanalyse des Riesenbeschleunigers LHC herangeht: nicht, dass man am Ende spannende neue Physik verpasst, weil man zu sehr auf die Vorhersagen einiger mathematischen Modelle getrimmt ist. Noch ist jedoch denkbar (wenn auch zunehmend unwahrscheinlich), dass die Physiker nach wie vor auf dem richtigen Weg sind, aber noch mehr Geduld aufbringen müssen. Irgendwann könnten sich supersymmetrische Teilchen am LHC zeigen, sagen die Optimisten unter den Gelehrten. Sie glauben an die [String-Theorie](#), an der aktuell etwa 1500 Menschen weltweit arbeiten. Sie fußt auf zwei komplexen Eichtheorien und der Supersymmetrie. Die String-Theorie fasst Elementarteilchen als winzige Schwingungen in einer unvorstellbar komplexen kosmischen Landschaft auf.

Mittlerweile konnten die Theoriekönige berechnen, wie viele Weltmodelle mit ihren Gleichungen kompatibel sind. Es ist eine Zahl mit bis zu 500 Nullen. Die sehr optimistische Interpretation: Jede dieser Möglichkeiten soll

einem Universum mit eigenen Naturgesetzen entsprechen. Und eines von ihnen – welches genau, können die String-Theoretiker bisher nicht genau sagen – soll einer Welt mit just jenen Parametern entsprechen, die Physiker in unserem Kosmos messen.

Darüber, ob die String-Theorie noch falsifizierbare Wissenschaft ist, streiten Wissenschaftler und Philosophen seit Jahren erbittert. So oder so: Die Hypothese der »Multiversen« würde mit einem Schlag die Spuren der Willkür erklären, die Physiker am [Standardmodell](#) stört. Die »freien Parameter« hätten den Wert, den sie haben, weil es uns sonst nicht geben würde. Es ist ein aus Verzweiflung geborener Gedanke, wie der Physiker Mikhail Shifman 2012 konstatierte. Und er ist die größte vorstellbare Ironie der Physikgeschichte. Im Kampf gegen die Beliebigkeit der Natur, auf der Suche nach kosmischer Ordnung, stoßen die Physiker darauf, dass unsere Existenz, ja unser ganzes Universum nicht mehr sein könnte als eine Laune des Chaos. Vielleicht war es ja eine böse Vorahnung davon, die Albert Einstein 1927 ein wenig irrlichternd in die Linse gucken ließ. ↩

(Spektrum.de, 16. Oktober 2013)

Das Kombipaket im Abo: App und PDF

Jeden Donnerstag neu! Mit News, Hintergründen, Kommentaren und Bildern aus der Forschung sowie exklusiven Artikeln aus »nature« in deutscher Übersetzung. Im Abonnement nur 0,92 € pro Ausgabe (monatlich kündbar), für Schüler, Studenten und Abonnenten unserer Magazine sogar nur € 0,69.

JETZT ABONNIEREN!

