

**Spektrum**  
DER WISSENSCHAFT

**KOMPAKT**

# URKNALL

Wie alles begann

**Georges Lemaître**

Der Urheber der Urknall-Idee

**Gravitationswellen**

Säuseln des Urknalls

**Die ersten Sterne**

Kosmische Morgendämmerung



Antje Findekleee  
E-Mail: [findekleee@spektrum.de](mailto:findekleee@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

**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 Findekleee  
**VERLAG:** Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Slevogtstraße 3–5, 69126 Heidelberg, Tel. 06221 9126-600, Fax 06221 9126-751; Amtsgericht Mannheim, HRB 338114, UStd-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](mailto: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](mailto: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 Rechtsinhaberschaft 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.

Folgen Sie uns:



SEITE

04

RÜCKBLICK  
Der Urheber der Urknall-Idee

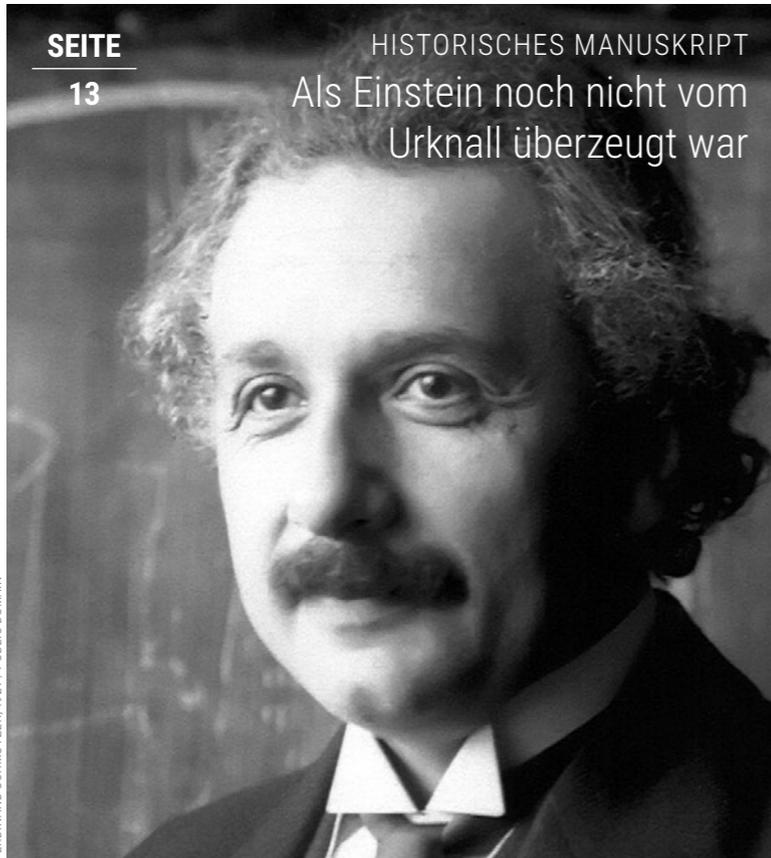


ISTOCK / TIERO

SEITE

13

HISTORISCHES MANUSKRIFT  
Als Einstein noch nicht vom  
Urknall überzeugt war



FERDINAND SCHMÜTZER, 1921 / PUBLIC DOMAIN

ALTERNATIVE HYPOTHESE  
Das Schwarze Loch am  
Beginn der Zeit

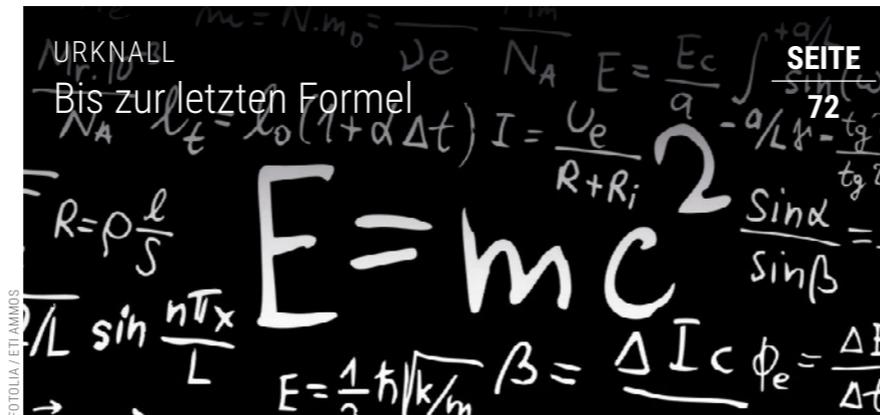


ISTOCK / AGSANDREW

SEITE

18

URKNALL  
Bis zur letzten Formel



FOTOLIA / ETI AMAMOS

SEITE

72

- 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.

**A**m 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.

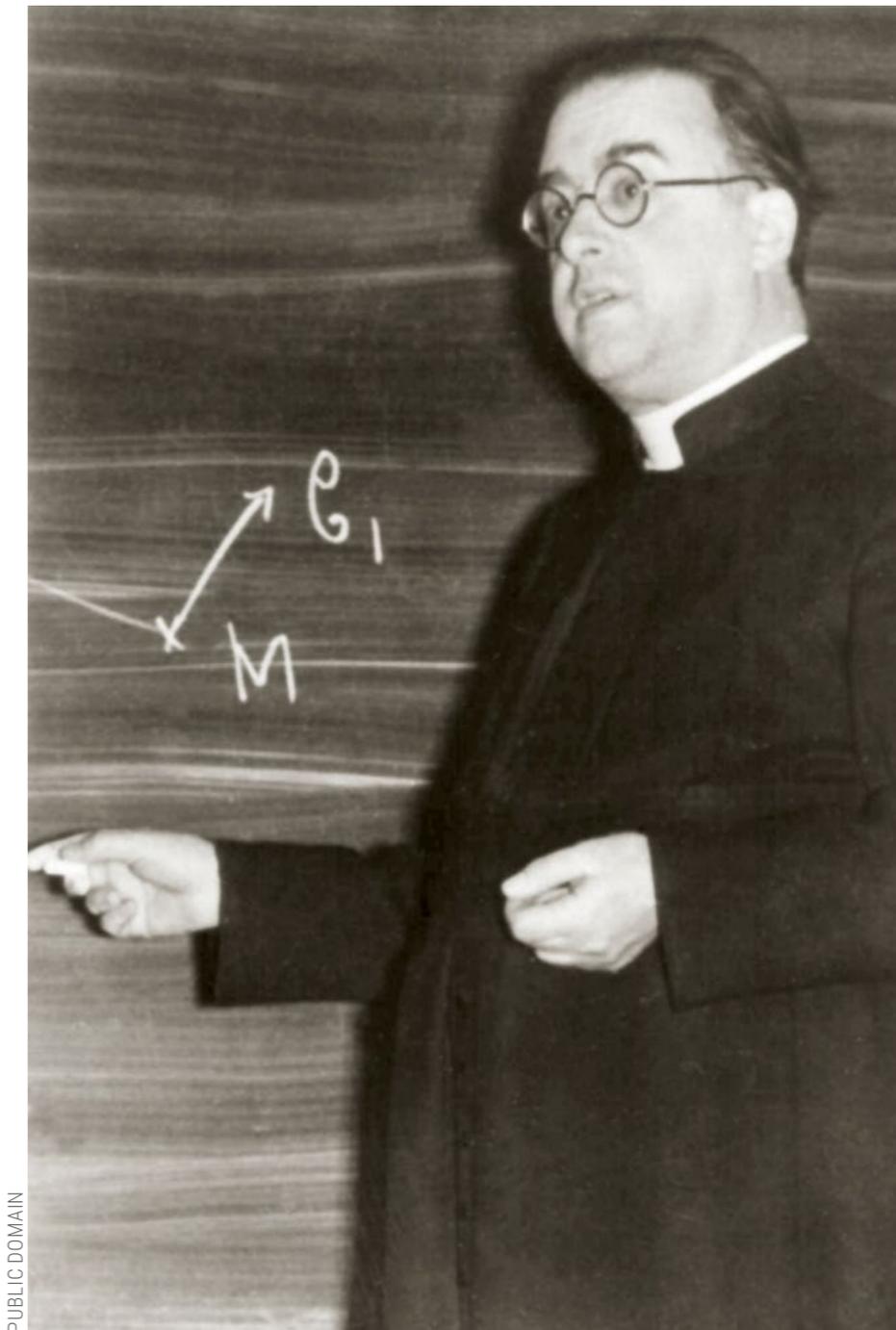
Die Vorstellung eines expandierenden Universums führte sogleich zur Frage nach einem Anfang: Was verursacht die Expansion, und welche Kräfte treiben sie an? Diese neue Fragestellung wurde 1930 und 1931 insbesondere von Eddington und Lemaître intensiv bearbeitet und diskutiert.

### **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  $\Lambda$  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 EDDINGTON<sup>1</sup> 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.

<sup>1</sup> 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.