

**Spektrum**  
der Wissenschaft

**KOMPAKT**

# DUNKLE ENERGIE

Rätselhafter Antrieb des expandierenden Universums

**Zukunft des Kosmos**

Modelle auf dem  
Prüfstand

**Minigalaxien**

Ärger für das  
Standardmodell?

**Dark Energy Survey**

Inventur des  
dunklen Alls



Mike Beckers  
E-Mail: [beckers@spektrum.de](mailto:beckers@spektrum.de)

Liebe Leserin, lieber Leser,  
wie Astronomen aus zahllosen Beobachtungen folgern müssen, wird das All ständig größer. Doch sie kennen die Ursache dafür nicht. Dabei macht die Dunkle Energie 70 Prozent der Gesamtenergie des Alls aus. Ihr Wirken wird unsere Galaxie irgendwann physikalisch völlig vom übrigen Universum isolieren. Dieses Wissen – beziehungsweise Nicht-Wissen – erzeugt für mich eine durchaus irritierende Art der Beziehungslosigkeit zum Kosmos: Wenn wir offenbar 70 Prozent seines Wesens nicht verstehen, wie viel dürfen wir uns dann auf unsere Vorstellung vom Übrigen einbilden?

Immerhin, einige Ansätze haben die Physiker. Viel Vergnügen dabei, diesen zu folgen, wünscht Ihnen

Erscheinungsdatum dieser Ausgabe: 11.02.2019

Folgen Sie uns:



**CHEFREDAKTEURE:** Prof. Dr. Carsten Könneker (v.i.S.d.P.)  
**REDAKTIONSLEITER:** Dr. Daniel Lingenhöhl  
**ART DIRECTOR DIGITAL:** Marc Grove  
**LAYOUT:** Oliver Gabriel, Marina Männle  
**SCHLUSSREDAKTION:** Christina Meyberg (Ltg.), Sigrid Spies, Katharina Werle  
**BILDREDAKTION:** Alice Krüßmann (Ltg.), Anke Lingg, Gabriela Rabe  
**PRODUKTMANAGEMENT DIGITAL:** Antje Findekle, Dr. Michaela Maya-Mrschtik  
**VERLAG:** Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Tiergartenstr. 15–17, 69121 Heidelberg, Tel. 06221 9126-600, Fax 06221 9126-751; Amtsgericht Mannheim, HRB 338114, UStd-Id-Nr. DE229038528  
**GESCHÄFTSLEITUNG:** Markus Bossle  
**MARKETING UND VERTRIEB:** Annette Baumbusch (Ltg.), Michaela Knappe (Digital)  
**LESER- UND BESTELLSERVICE:** Helga Emmerich, Sabine Häusser, Ilona Keith, 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 [service@spektrum.de](mailto:service@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: © 2019 (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.

SEITE  
04

RÄTSELHAFTES PHÄNOMEN  
Brisante Dunkle Energie

SELIM DÖNMEZ / GETTY IMAGES / ISTOCK

SEITE  
14

KONTROVERSE UM EINE KONSTANTE  
Streit um Hubbles Erbe

ROST-90 / GETTY IMAGES / ISTOCK

DARK ENERGY SURVEY  
Inventur des dunklen Alls

SEITE  
39

ISTOCK / ACSANDREW / BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

DE-SITTER-UNIVERSEN  
Führt die Stringtheorie ins Sumpfland?

SEITE  
54

MACIEJ REBISZ / FÜR QUANTA MAGAZINE

- 04 RÄTSELHAFTES PHÄNOMEN  
Brisante Dunkle Energie
- 14 KONTROVERSE UM EINE KONSTANTE  
Streit um Hubbles Erbe
- 32 NOBELPREISE 2011  
Das beschleunigte Universum
- 39 DARK ENERGY SURVEY  
Inventur des dunklen Alls
- 45 KOSMOLOGISCHER STREIT  
Dunkle Energie gibt es nicht?  
Nicht so hastig!
- 50 ÜBERRASCHENDE BEOBACHTUNG  
Ärger für das Standardmodell?
- 54 DE-SITTER-UNIVERSEN  
Führt die Stringtheorie ins Sumpfland?
- 63 AUSSERIRDISCHE ZIVILISATIONEN  
Wie Lebewesen der Dunklen Energie  
entkommen könnten

RÄTSELHAFTES PHÄNOMEN

# Brisante dunkle Energie

von Adam G. Riess und Mario Livio

Eine Kraft treibt das Universum auseinander. Aber wie?  
Auch zwei Jahrzehnte nach der Entdeckung verstehen  
Theoretiker das Phänomen nicht. Nun sollen neue  
Experimente Klarheit schaffen.

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

Zu dieser verblüffenden Erkenntnis kamen 1998 Adam G. Riess (einer der Autoren) sowie seine Kollegen. Gemeinsam mit Brian Schmidt von der Australian National University leitete Riess die Beobachtung

---

**Adam G. Riess** erhielt 2011 für die Entdeckung der beschleunigten Expansion gemeinsam mit zwei Kollegen den Physik Nobelpreis. Er lehrt an der Johns Hopkins University in den USA. **Mario Livio** arbeitet als Astrophysiker am Space Telescope Science Institute in Baltimore, das unter anderem das Hubble-Weltraumteleskop betreibt. Er ist Autor mehrerer populärwissenschaftlicher Bücher.

und Vermessung ferner Sternexplosionen, so genannter Supernovae. Die Entdeckungen stimmten mit den im gleichen Jahr veröffentlichten Ergebnissen eines anderen Teams um Saul Perlmutter von der University of California in Berkeley überein, das eine ähnliche Methode verwendet hatte. Damit kamen die Astronomen nicht umhin, einen seltsamen Schluss zu ziehen: Irgendetwas verursacht eine immer schnellere Expansion des Weltalls. Aber was?

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

Wir stehen also vor mehreren Rätseln. Was ist die Dunkle Energie? Warum ist sie anscheinend ungemein schwächer, als viele der einfacheren Ansätze nahelegen, und dennoch stark genug, dass wir sie entdecken konnten? Was bedeutet die Erschei-

AUF EINEN BLICK

## Theorien von der Zerreißprobe

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

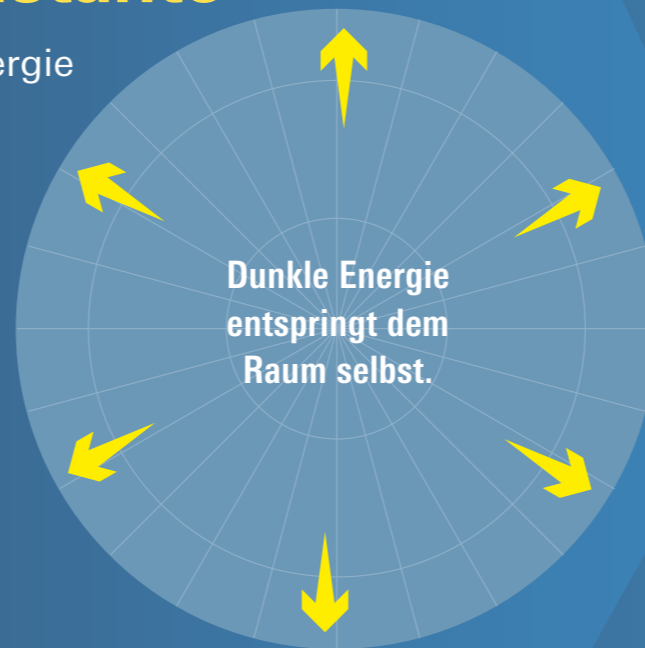
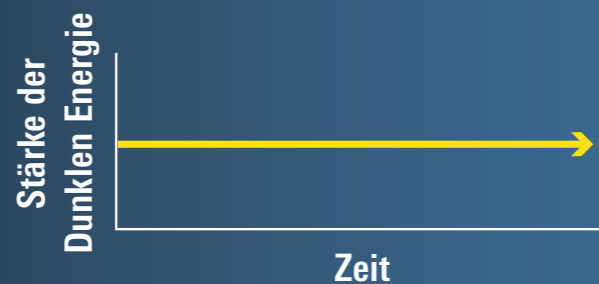
nung für die ferne Zukunft des Kosmos? Möglicherweise sind die seltsamen Eigenschaften gar ein Hinweis auf rein zufällige Werte der Naturkonstanten. Das würde wiederum die Spekulation befeuern, unsere kosmische Heimat sei nur eine von vielen Parallelwelten, nur einer von unzähligen Teilen eines **Multiversums** mit jeweils ganz verschiedenen physikalischen Spielregeln.

# Drei Modelle der Expansion und Zukunft des Alls

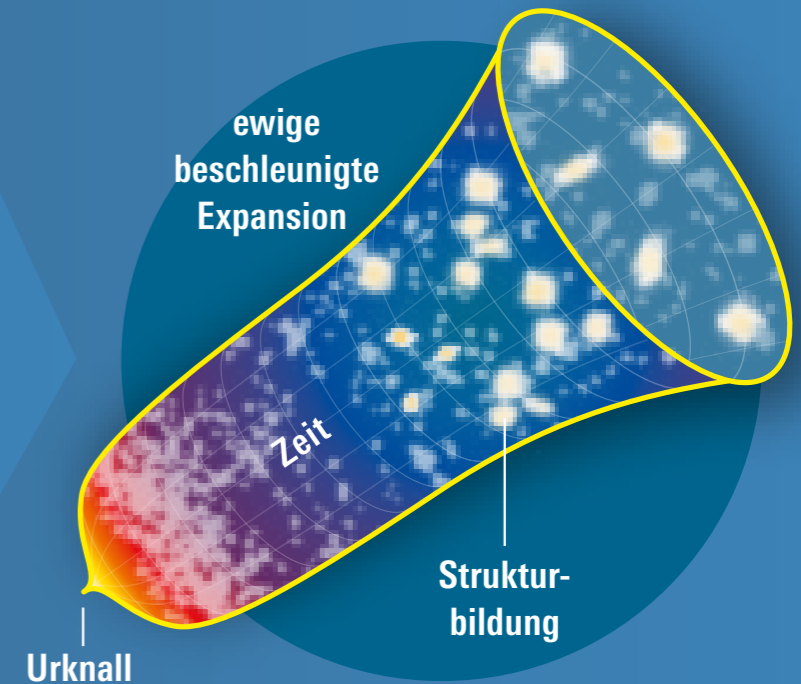
Irgendetwas bewirkt, dass alle Galaxien im Universum sich immer schneller voneinander entfernen. Astronomen haben dafür keine eindeutige Erklärung, aber immerhin einen Namen: Dunkle Energie. Sie ziehen verschiedene Modelle für die Ursache in Betracht.

## 1 Kosmologische Konstante

Wenn der leere Raum eine eigene Energie enthält, könnte sie das Universum auseinandertreiben. Diese Vakuumenergie bliebe über alle Zeiten des Universums konstant.

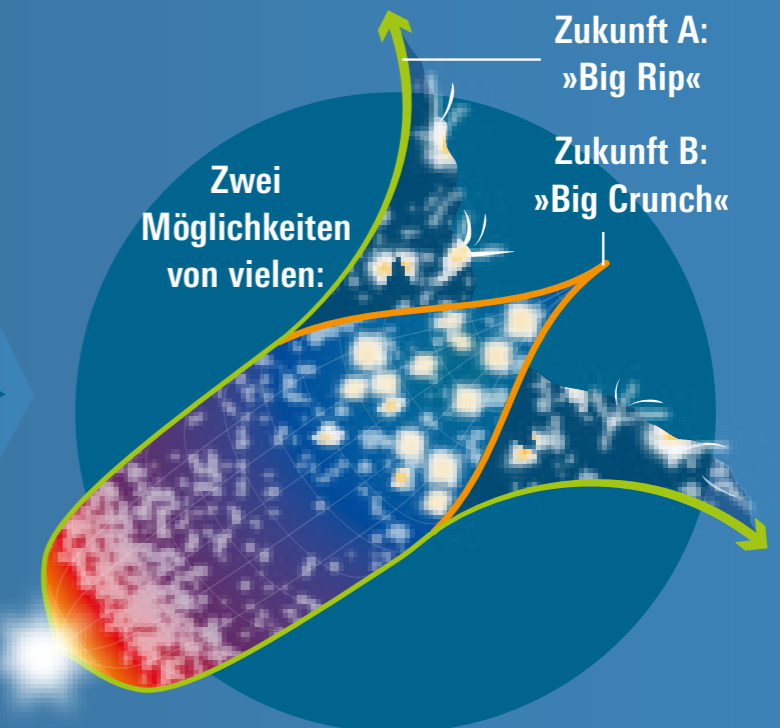
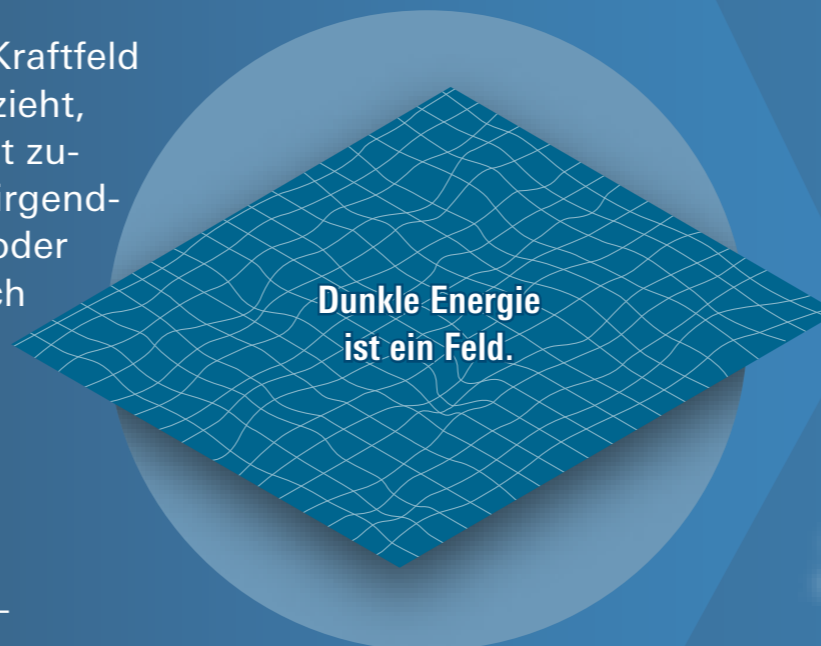
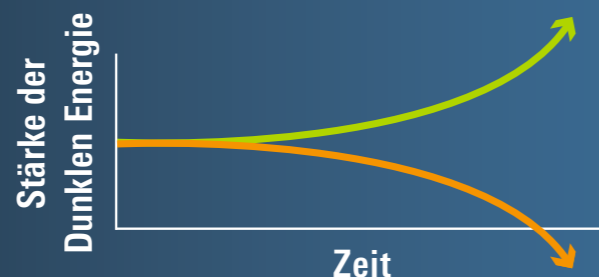


## Zukunft



## 2 Quintessenz

Falls Dunkle Energie von einem Kraftfeld herrührt, das den Kosmos durchzieht, könnte dessen Stärke mit der Zeit zu- oder abnehmen. Dann zerrissen irgendwann entweder alle Strukturen, oder das Universum fiel wieder in sich zusammen.

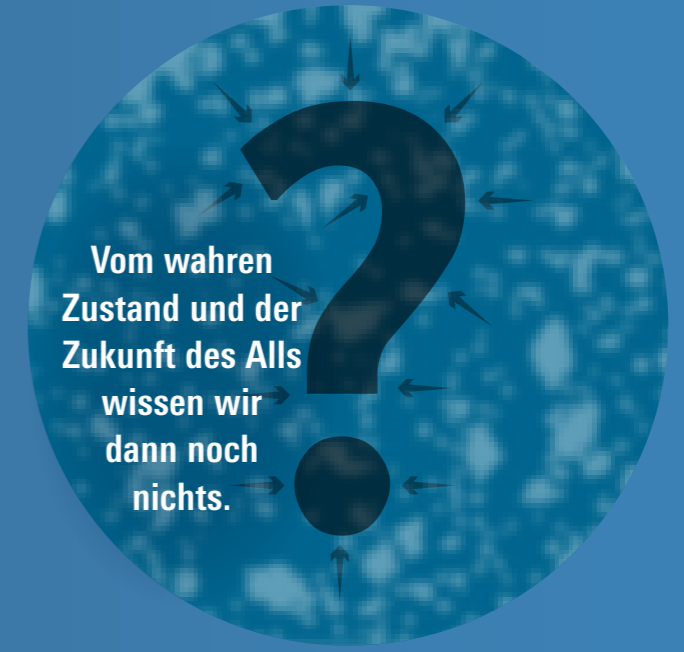
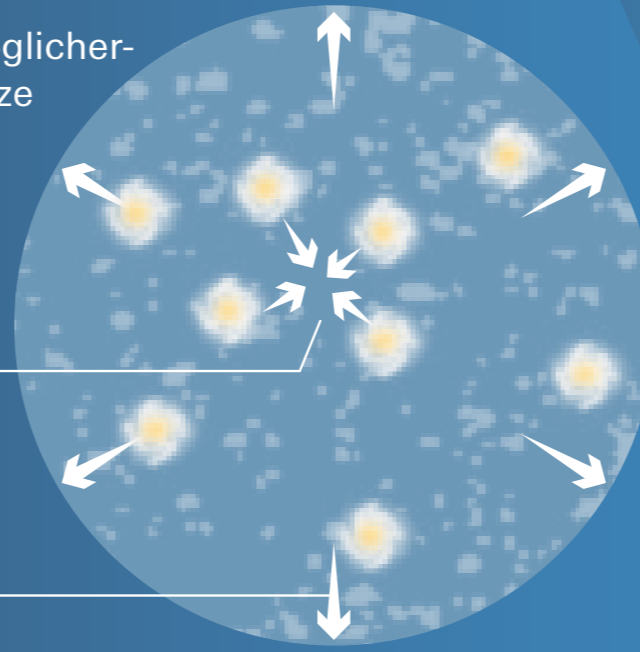


# 3 Es gibt keine Dunkle Energie

Die beobachteten Effekte beruhen möglicherweise lediglich darauf, dass die Gesetze der Schwerkraft anders funktionieren, als wir heute denken.

Auf der Skala von benachbarten Galaxien gehorchen Objekte der allgemeinen Relativitätstheorie.

Das Universum als Ganzes dehnt sich hingegen nur scheinbar beschleunigt aus. Um es korrekt zu beschreiben, sind neue Formeln nötig.



NIGEL HAWTIN / SCIENTIFIC AMERICAN MÄRZ 2016; BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

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

Im Moment haben Theoretiker noch verschiedenste konkurrierende Vorstellungen darüber, was die schnell wachsende Aus-

dehnung des Universums antreiben könnte. Ein besonders eleganter und daher von vielen Physikern bevorzugter Kandidat leitet sich aus den Eigenschaften des leeren Raums her und schlägt eine Brücke von der Kosmologie zur Quantenmechanik. Diese kennt kein Nichts. Stellen wir uns einen Kasten mit undurchdringlichen Wänden vor, aus dem wir alles restlos entfernen – Atome, Teilchen, Strahlung, Dunkle Materie. Im Inneren wäre dann ein perfektes Vakuum. Gemäß der klassischen Physik hätte es keine Energie. Doch die Quantenmechanik ermöglicht »virtuelle Teilchen«. Das sind Paare aus Teilchen und Antiteilchen, die spon-

tan entstehen und sich nach kürzester Zeit gegenseitig wieder vernichten. Diese flimmernden subatomaren Objekte enthalten Energie, die genau wie Masse die Gravitation beeinflusst. Anders als Masse kann Energie allerdings auch einen negativen Druck ausüben, der statt zu einer anziehenden zu einer abstoßenden Kraft führt. Zumindest hypothetisch könnte daher der leere Raum das Universum auseinandertreiben. Diese Vorstellung entspricht einem Gedanken, den bereits Albert Einstein hatte, als er die **kosmologische Konstante** in seine Feldgleichungen einführte. Der Name dieser Größe deutet darauf hin, dass ihr Wert über-