



# DIE SUCHE NACH DER WELTFORMEL

**Quantengravitation**

Gibt es eine Wahrheit, die alles erklärt?

**Determinismus**

Ist alles vorherbestimmt?

**Vergangenheit und Zukunft**

Ein neues Konzept der Zeit





Manon Bischoff  
E-Mail: [m.bischoff@spektrum.de](mailto:m.bischoff@spektrum.de)

Liebe Leserin, lieber Leser,  
eine Frage plagt Physiker seit nunmehr 100 Jahren: Wie lassen sich die vier Grundkräfte vereinen? Während der Elektromagnetismus, die starke sowie die schwache Kernkraft offenbar nahtlos zusammenpassen, bleibt die Gravitation als Außenseiter zurück. Fachleute haben inzwischen die wildesten Theorien entwickelt, um das zu ändern: In manchen Szenarien sind Raum und Zeit »körnige« Größen, kein Kontinuum; in anderen sind die Elementarteilchen keine punktförmigen Objekte, sondern eindimensionale, schwingende Fäden. Und manche Forscher führen ein zufälliges Element in die Schwerkraft ein, damit sie besser zu den übrigen Quantentheorien passt. Welche dieser Strategien zum Erfolg führen wird, ist ungewiss – ebenso wie die Frage, ob es überhaupt jemals gelingen wird, eine »Weltformel« zu finden.

Viel Spaß bei der Lektüre wünscht Ihnen

Erscheinungsdatum dieser Ausgabe: 12.02.2024

Folgen Sie uns:



**CHEFREDAKTION:** Dr. Daniel Lingenhöhl (v.i.S.d.P.)

**CREATIVE DIRECTOR:** Marc Grove

**LAYOUT:** Oliver Gabriel, Marina Männle

**SCHLUSSREDAKTION:** Christina Meyberg (Ltg.),

Sigrid Spies, Katharina Werle

**BILDREDAKTION:** Lea Bayer, Alice Krüßmann (Ltg.),

Anke Lingg

**REDAKTION:** Antje Findeklee, 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,

USt-IdNr.: DE229038528

**GESCHÄFTSLEITUNG:** Markus Bossle

**ASSISTENZ GESCHÄFTSLEITUNG:** Stefanie Lacher

**MARKETING UND VERTRIEB:** Annette Baumbusch (Ltg.),

Michaela Knappe (Digital)

**LESER- UND BESTELLSERVICE:** Helga Emmerich, Estefanny Espinosa de

Rojas, Sabine Häusser, Tel.: 06221 9126-743, E-Mail: [service@spektrum.de](mailto:service@spektrum.de)

**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: © 2024 (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. Für unaufgefordert eingesandte Manuskripte und Bücher übernimmt die Redaktion keine Haftung; sie behält sich vor, Leserbriefe zu kürzen.

SEITE  
10

KONKURRIERENDE MODELLE  
Woraus besteht die Raumzeit?

POBYTOV / GETTY IMAGES / ISTOCK

SEITE  
24

QUANTENKOSMOLOGIE  
Grenzen von Raum und Zeit

SABELSKAYA / GETTY IMAGES / ISTOCK

VERGANGENHEIT UND ZUKUNFT  
Ein neues Konzept der Zeit

SEITE  
33

BEE32 / GETTY IMAGES / ISTOCK

DETERMINISMUS  
Ist alles im Universum  
vorherbestimmt –  
wegen der  
Quantenmechanik?

SEITE  
54

PIXELPARTICLE / GETTY IMAGES / ISTOCK

- 04 QUANTENGRAVITATION  
Wird man je eine Weltformel finden?
- 10 KONKURRIERENDE MODELLE  
Woraus besteht die Raumzeit?
- 24 QUANTENKOSMOLOGIE  
Grenzen von Raum und Zeit
- 33 VERGANGENHEIT UND ZUKUNFT  
Ein neues Konzept der Zeit
- 45 ALLES ZUFALL?  
Quanten waren gestern
- 54 DETERMINISMUS  
Ist alles im Universum vorherbestimmt –  
wegen der Quantenmechanik?
- 63 VERSCHRÄNKTE QUANTENSYSTEME  
Ein Labor für die Raumzeit





QUANTENGRAVITATION  
WIRD MAN JE EINE  
**WELTFORMEL**  
FINDEN?

von Sarah Scoles



Die Physik sucht eine vereinheitlichte Theorie. Wird sich diese auf die Grundprinzipien des Universums beschränken? Vielleicht gibt es eine Wahrheit, die wirklich alles erklärt.

**A**lbert Einstein ist bekannt für seinen Haarschnitt, seine Relativitätstheorie und seine Überzeugung, dass die Begreifbarkeit der physikalischen Welt ein Wunder sei. Er meinte damit die Tatsache, dass der Mensch mit Hilfe von Wissenschaft, Mathematik und seiner eigenen Neurone physikalische Gesetze ableiten kann, denen das Universum zu gehorchen scheint.

Diese Gesetze erklären die Phänomene, die wir um uns herum sehen – dass Glühbirnen aufleuchten, dass Dinge der Schwerkraft folgen und herunterfallen sowie dass Atomkerne zusammenhaften und sich spalten lassen. Und sie helfen uns, künftige Ereignisse vorherzusagen –

---

Sarah Scoles ist Autorin bei »Scientific American«.

wie Kollisionen von Galaxien oder die Explosion von Sternen.

Aber selbst mit diesen Gesetzen und viel Wissen verstehen Fachleute das Universum noch nicht gänzlich – sie sind nicht einmal nahe dran. Was ist zum Beispiel Dunkle Materie, die unsichtbare Substanz, die Galaxien zusammenhält, oder Dunkle Energie, die rätselhafte Kraft, die die beschleunigte Expansion des Universums antreibt? Beide Begriffe tragen die Düsternis sogar im Namen, denn Physikerinnen und Physiker (und alle anderen) tapen angesichts dieser Größen im Dunkeln. Solche Rätsel zeigen deutlich, dass wir besser verstehen sollten, wie der Kosmos tickt.

Einige Fachleute glauben, dass dieses umfassendere Verständnis auf einer Weltformel basieren muss, der »Theory of everything« (englisch für: Theorie von

»Es geht darum, alle Kräfte der Natur in einer einzigen Kraft zu vereinen«

Katherine Freese, Physikerin

## »Die Vereinigung der vier Grundkräfte wird weit von einer Weltformel, der Wahrheit des Universums, entfernt sein«

Demetris Nicolaides, theoretischer Physiker

Allein): einem einzigen theoretischen Grundgerüst, das das Universum erklärt. Andere wiederum glauben nicht, dass das Universum so verständlich ist, wie Einstein vermutet hat. Aus ihrer Sicht ist die Suche nach einer solchen Weltformel Zeitverschwendung – weil es nicht möglich sei, sie zu finden.

Beide Seiten sind sich einig, dass der Mensch niemals eine Theorie von allem und jedem finden wird. Ganz gleich, wie erfolgreich eine Weltformel bei den Grundprinzipien des Universums sein mag, es ist unwahrscheinlich, dass diese jemals erklären kann, warum Sie lieber extra Essiggurken auf Ihrem Cheeseburger essen oder eine irrationale Angst vor Clowns haben. Wenn Personen poetisch

von einer Weltformel schwärmen (oder sich darüber streiten), meinen sie etwas ganz Bestimmtes. »Es geht darum, alle Kräfte der Natur in einer einzigen Kraft zu vereinen«, sagt die Physikerin Katherine Freese, Professorin an der University of Texas in Austin.

Bislang haben Wissenschaftler vier solcher fundamentaler Kräfte entdeckt. »Es gibt den Elektromagnetismus«, erklärt Freese: »Also Elektrizität und Magnetismus – die kennt jeder.« Bekannt ist auch die Kraft, die dafür sorgt, dass man hinfällt: die Schwerkraft. Die beiden anderen sind eher unbekannt: die starke Wechselwirkung bindet Protonen und Neutronen in den Atomkernen zusammen, während die schwache Wechselwir-

kung dazu beiträgt, dass Atome und subatomare Teilchen durch eine bestimmte Form des radioaktiven Zerfalls auseinanderfallen.

Was Physiker mit »Alles« in einer Weltformel meinen, ist also ein einziger theoretischer Rahmen, der diese Kräfte als Manifestationen einer übergeordneten Kraft beschreibt. Dennoch: »Die Vereinigung der vier Grundkräfte wäre, falls sie eines Tages experimentell verifiziert wird, eine bewundernswerte Leistung – sie wird allerdings weit von der Weltformel, der Wahrheit des Universums, entfernt sein«, sagt der theoretische Physiker Demetris Nicolaides am Bloomfield College und Autor des Buchs »In Search of a Theory of Everything: The Philoso-

phy behind Physics«. Aber hey, man kann es ja versuchen.

Die Wissenschaftler haben guten Grund zu glauben, dass sie eine Theorie finden können, die zumindest ihr begrenztes »Alles« beschreibt. Immerhin hat es bereits gewisse Vereinheitlichungen gegeben: Der Physiker James Clerk Maxwell brachte vor mehr als 100 Jahren Licht, Elektrizität und Magnetismus zusammen, indem er sie als einzelne Merkmale der größeren Kraft des Elektromagnetismus definierte.

Die schwache Wechselwirkung war das Nächste, das sich der Kraftfamilie anschloss, nachdem Wissenschaftler Hochenergie-Teilchenbeschleuniger entwickelt hatten. In diesen Geräten können Teilchen fast mit Lichtgeschwindigkeit zusammenstoßen. »Damit lässt sich das Universum bei höheren Energien erforschen, was einem früheren Zeitpunkt im Kosmos entspricht«, sagt Freese. Je höher die Energie einer Kollision ist, desto eher kann sie die extrem heißen und dichten Bedingungen nachbilden, die in den ersten Momenten nach dem Urknall geherrscht haben. Wenn Physikerinnen und Physiker mit Teilchenbeschleuni-

gern solche Zustände des »jungen Kosmos« erzeugen, sehen sie, dass der Elektromagnetismus und die schwache Wechselwirkung als eine einzige Kraft wirken – die elektroschwache Wechselwirkung –, was darauf hindeutet, dass diese beiden Kräfte im frühen Universum eins waren.

Es wird vermutet, dass sich die starke Wechselwirkung zu ihnen gesellen würde, wenn Teilchenbeschleuniger genügend hohe Energien erreichen könnten, um das noch heißere, noch jüngere Universum zu simulieren. Zu unseren Lebzeiten werde sich die Technologie aber höchstwahrscheinlich nicht schnell genug weiterentwickeln, um das zu erreichen, sagt Freese.

### **Unerklärliche Schwerkraft**

Die letzte (und schwächste) Kraft, die Schwerkraft, mit den drei übrigen zu verbinden, ist eine viel schwierigere Aufgabe: Forschende konnten zeigen, dass der Elektromagnetismus sowie die starke und die schwache Wechselwirkung im Wesentlichen den seltsamen, jedoch berechenbaren Regeln der Quantenphysik folgen. Die Schwerkraft beschreibt hin-

gegen Einsteins allgemeine Relativitätstheorie, die das Universum auf größeren Maßstäben betrifft. Die Quantenmechanik und die Relativitätstheorie widersprechen sich an manchen Stellen. Erstere stellt fest, dass auf kleinen Skalen fast alles in kleinen Häppchen (Quanten) vorkommt, während die allgemeine Relativitätstheorie davon ausgeht, dass der Kosmos selbst in kleinsten Maßstäben kontinuierlich ist.

»Die größte Herausforderung bei der Suche nach einer Weltformel besteht darin, eine Quantenversion der Gravitation zu finden. Das heißt, die Regeln der Quantentheorie mit den Regeln von Einsteins allgemeiner Relativitätstheorie zu kombinieren – oder völlig neue Regeln zu finden«, sagt Nicolaides. Ohne eine Theorie der Quantengravitation wird sich die Gravitation wohl nicht mit den anderen drei Kräften verbinden lassen.

Aber theoretische Physiker haben inzwischen einige spekulative Ideen entwickelt. Eine davon nennt sich Schleifenquantengravitation. Sie geht davon aus, dass der Raum aus winzigen, unteilbaren Teilen besteht. Nach dieser Theorie ließe sich die Raumzeit selbst quanti-