

*The New York Times*-BESTSELLER

EINE  
FANTASTISCHE  
REISE DURCH DIE  
ASTROPHYSIK

HERZLICH  
WILLKOMMEN IM  
UNIVERSUM

NEIL  
DEGRASSE  
TYSON

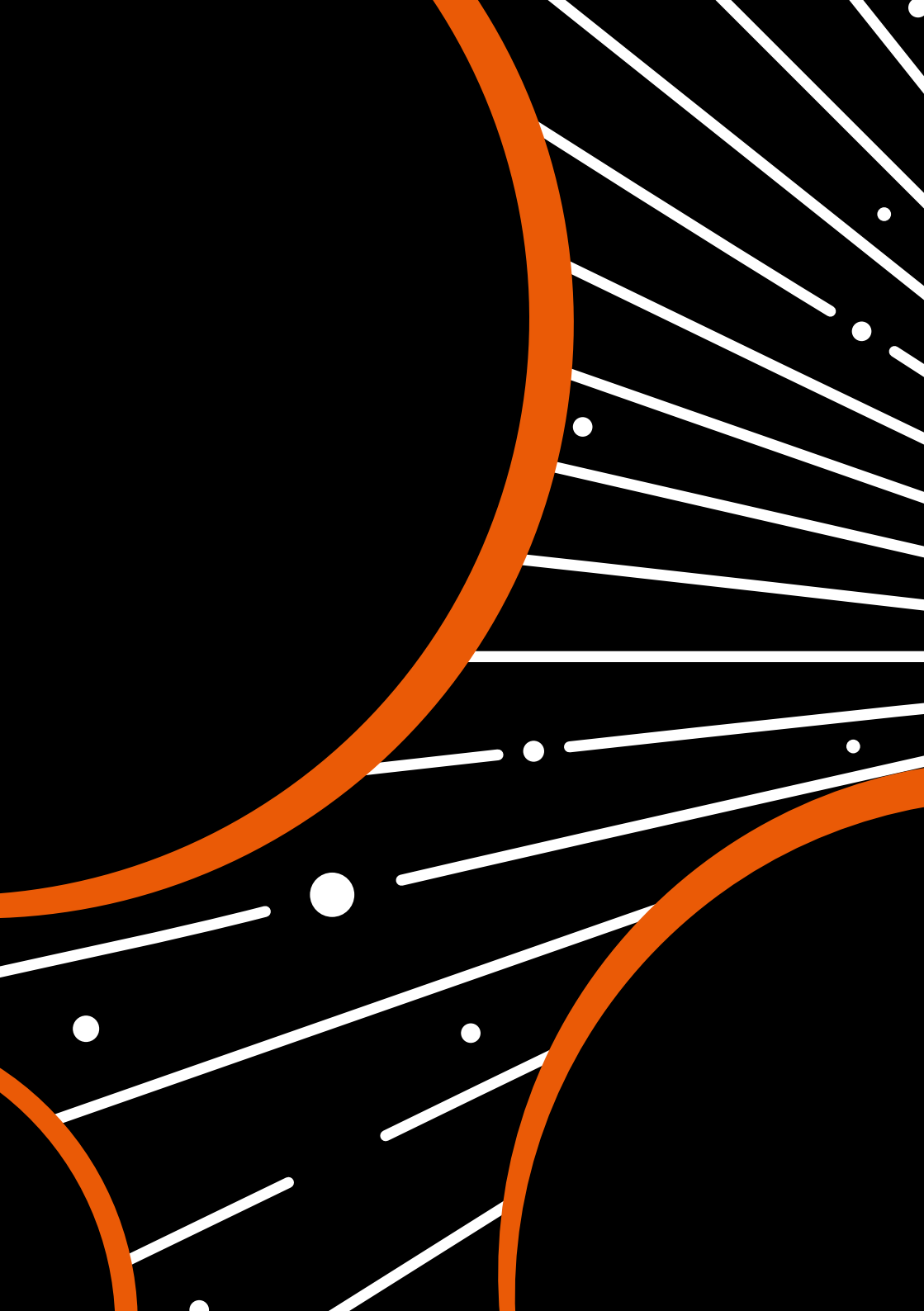
MICHAEL  
A. STRAUSS  
J. RICHARD  
GOTT

J. Richard Gott | Neil deGrasse Tyson | Michael A. Strauss

**HERZLICH WILLKOMMEN**



**UNIVERSUM**



EINE  
FANTASTISCHE  
REISE DURCH DIE  
ASTROPHYSIK

HERZLICH  
WILLKOMMEN IM  
UNIVERSUM

NEIL  
DEGRASSE  
TYSON

MICHAEL  
A. STRAUSS  
J. RICHARD  
GOTT

FBV

**Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek:**

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://d-nb.de> abrufbar.

**Für Fragen und Anregungen:**

[info@finanzbuchverlag.de](mailto:info@finanzbuchverlag.de)

1. Auflage 2019

© 2019 by FinanzBuch Verlag, ein Imprint der Münchner Verlagsgruppe GmbH  
Nymphenburger Straße 86  
D-80636 München  
Tel.: 089 651285-0  
Fax: 089 652096

Copyright der Originalausgabe © 2016 by Neil deGrasse Tyson, Michael A. Strauss und J. Richard Gott. All Rights Reserved. Die englische Originalausgabe erschien 2016 unter dem Titel *Welcome to the Universe. An Astrophysical Tour* bei Princeton University Press, 41 William Street, Princeton, New Jersey 08540. In the United Kingdom: Princeton University Press, 6 Oxford Street, Woodstock, Oxfordshire OX20 1 TR.

Alle Rechte, insbesondere das Recht der Vervielfältigung und Verbreitung sowie der Übersetzung, vorbehalten. Kein Teil des Werkes darf in irgendeiner Form (durch Fotokopie, Mikrofilm oder ein anderes Verfahren) ohne schriftliche Genehmigung des Verlages reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme gespeichert, verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.

Übersetzung: Hainer Kober

Fachliche Beratung und Übersetzung Anhang 1: Markus Pössel

Redaktion: Redaktionsbüro Diana Napolitano, Augsburg

Korrektorat: Manuela Kahle

Umschlaggestaltung: Laura Osswald, unter Verwendung des Designs von Chris Ferrante

Satz: Ortrud Müller – Atelier für Buchgestaltung, Köln

Druck: Florjancic Tisk d.o.o., Slowenien

Printed in the EU

ISBN Print 978-3-95972-122-6

ISBN E-Book (PDF) 978-3-96092-214-8

ISBN E-Book (EPUB, Mobi) 978-3-96092-215-5

Weitere Informationen zum Verlag finden Sie unter:

**[www.finanzbuchverlag.de](http://www.finanzbuchverlag.de)**

Beachten Sie auch unsere weiteren Verlage unter [www.m-vg.de](http://www.m-vg.de)

A high-contrast, black and white graphic design. The background is black, filled with numerous white lines of varying lengths radiating from the center, creating a sunburst or starburst effect. Some lines are straight, while others are slightly curved. Scattered throughout the background are small white dots of varying sizes. In the center of the image is a large, solid black circle. Inside this circle, the word "INHALT" is written in a bold, white, sans-serif, all-caps font. The overall aesthetic is modern and minimalist.

# INHALT

<b>VORWORT</b>	11
<b>TEIL I – STERNE, PLANETEN UND LEBEN</b>	15
<b>1. GRÖSSENVERHÄLTNISSE IM UNIVERSUM</b>	17
Neil deGrasse Tyson	
<b>2. VOM TAG- UND NACHTHIMMEL ZU DEN PLANETENBAHNEN</b>	29
Neil deGrasse Tyson	
<b>3. NEWTONS GESETZE</b>	49
Michael A. Strauss	
<b>4. WIE STERNE ENERGIE ABSTRAHLEN (I)</b>	65
Neil deGrasse Tyson	
<b>5. WIE STERNE ENERGIE ABSTRAHLEN (II)</b>	87
Neil deGrasse Tyson	
<b>6. STERNSPEKTREN</b>	101
Neil deGrasse Tyson	
<b>7. LEBEN UND TOD DER STERNE (I)</b>	115
Neil deGrasse Tyson	
<b>8. LEBEN UND TOD DER STERNE (II)</b>	137
Michael A. Strauss	
<b>9. WARUM PLUTO KEIN PLANET IST</b>	157
Neil deGrasse Tyson	
<b>10. DIE SUCHE NACH LEBEN IN DER GALAXIS</b>	183
Neil deGrasse Tyson	

<b>TEIL II – GALAXIEN</b>	215
<b>11. DAS INTERSTELLARE MEDIUM</b>	217
Michael A. Strauss	
<b>12. UNSERE MILCHSTRASSE</b>	229
Michael A. Strauss	
<b>13. DAS UNIVERSUM DER GALAXIEN</b>	247
Michael A. Strauss	
<b>14. DIE EXPANSION DES UNIVERSUMS</b>	259
Michael A. Strauss	
<b>15. DAS FRÜHE UNIVERSUM</b>	279
Michael A. Strauss	
<b>16. QUASARE UND SUPERMASSEREICHE SCHWARZE LÖCHER</b>	303
Michael A. Strauss	



<b>TEIL III – EINSTEIN UND DAS UNIVERSUM</b>	321
<b>17. EINSTEINS WEG ZUR RELATIVITÄTSTHEORIE</b>	323
J. Richard Gott	
<b>18. BEDEUTUNG DER SPEZIELLEN RELATIVITÄTSTHEORIE</b>	339
J. Richard Gott	
<b>19. EINSTEINS ALLGEMEINE RELATIVITÄTSTHEORIE</b>	363
J. Richard Gott	
<b>20. SCHWARZE LÖCHER</b>	377
J. Richard Gott	
<b>21. KOSMISCHE STRINGS, WURMLÖCHER UND ZEITREISEN</b>	405
J. Richard Gott	
<b>22. FORM DES UNIVERSUMS UND URKNALL</b>	437
J. Richard Gott	
<b>23. INFLATION UND NEUE ENTWICKLUNGEN IN DER KOSMOLOGIE</b>	469
J. Richard Gott	
<b>24. UNSERE ZUKUNFT IM UNIVERSUM</b>	503
J. Richard Gott	

<b>DANKSAGUNG</b>	535
<b>ANHANG 1</b>	537
<i>Ableitung von <math>E=mc^2</math></i>	
<b>ANHANG 2</b>	543
<i>Bekenstein, Entropie, Schwarze Löcher und Information</i>	
<b>ANMERKUNGEN</b>	545
<b>EMPFOHLENE LEKTÜRE</b>	550
<b>REGISTER</b>	552

*In Erinnerung an Lyman Spitzer, Jr., Martin Schwarzschild,  
Bohdan Paczyński und John Bahcall, deren Einfluss auf unsere Ausbildung und  
Forschung in der Astrophysik noch heute unvermindert nachwirkt.*

# VORWORT

Als meine Enkeltochter Allison geboren wurde, lautete einer der ersten Sätze, die ich zu ihr sagte: »Willkommen im Universum!« Mein Mitautor Neil Tyson hat ihn in Rundfunk und Fernsehen viele Male gesagt. Es ist einer seiner Erkennungssätze. Wenn Sie geboren werden, werden Sie ein Bürger des Universums. Da gehört es sich für Sie, sich umzuschauen und Ihrer Umgebung mit Neugier zu begegnen.

Den Lockruf des Universums vernahm Neil schon mit neun Jahren, bei seinem ersten Besuch im Hayden Planetarium in New York City. Als Stadtkind erblickte er die strahlende Pracht des Nachthimmels zum ersten Mal, als sie sich an der Kuppel des Planetariums entfaltete. In diesem Augenblick beschloss er, Astronom zu werden. Heute ist er der Direktor dieser Institution.

Wir sind alle vom Universum geprägt. Der Wasserstoff in Ihrem Körper wurde bei der Geburt des Universums erzeugt, während die anderen Elemente, aus denen Sie bestehen, in fernen, längst erloschenen Sternen entstanden. Wenn Sie einen Freund auf Ihrem Handy anrufen, sollten Sie den Astronomen danken. Die Technologie des Mobiltelefons beruht auf den Maxwellschen Gleichungen, deren Bestätigung dem Umstand zu verdanken war, dass die Astronomen bereits die Lichtgeschwindigkeit gemessen hatten. Das GPS, das Ihrem Handy mitteilt, wo Sie sich befinden und Ihnen bei der Orientierung hilft, nutzt Erkenntnisse aus Einsteins Allgemeiner Relativitätstheorie, die verifiziert wurde, als Astronomen die Ablenkung von Sternenlicht in der Nähe der Sonne maßen. Wussten Sie, dass die Informationsmenge, die sich auf einer Festplatte von 15 Zentimeter Durchmesser speichern lässt,

eine absolute Obergrenze hat und dass diese Beschränkung auf der Physik der Schwarzen Löcher beruht? Oder nehmen wir ein alltäglicheres Beispiel: Die Jahreszeiten, die Sie im regelmäßigen Rhythmus erleben, ergeben sich unmittelbar aus der Neigung der Erdachse relativ zur Ebene der Bahn, auf der sich unser Planet um die Sonne bewegt.

Das vorliegende Buch möchte Ihre Bekanntschaft mit dem Universum, in dem Sie leben, vertiefen. Die Idee zu diesem Buch entstand, als wir drei an der Princeton University einen neuen Undergraduate-Kurs anboten, der für Studenten bestimmt war, die kein naturwissenschaftliches Hauptfach belegt hatten – also für Studenten, die möglicherweise noch nie zuvor an einem naturwissenschaftlichen Kurs teilgenommen hatten. Zu diesem Zweck wählte Neta Bahcall, unsere Kollegin und Direktorin des Undergraduate-Studiums, Neil deGrasse Tyson, Michael A. Strauss und mich aus. Neils außergewöhnliche Begabung, Nicht-Naturwissenschaftlern naturwissenschaftliche Erkenntnisse zu erklären, war allgemein bekannt. Michael hatte unlängst den fernsten Quasar entdeckt, der bis dahin im Universum beobachtet wurde, und ich hatte gerade den Preis des Universitätspräsidenten für besondere Verdienste um die Lehre erhalten. Der Kurs wurde so großartig angekündigt und lockte so viele Studenten an, dass wir ihn nicht in unserem eigenen Gebäude durchführen konnten, sondern in den größten Vorlesungssaal des physikalischen Fachbereichs umziehen mussten. Neil sprach über »Sterne und Planeten«, Michael über »Galaxien und Quasare« und ich über »Einstein, Relativitätstheorie und Kosmologie«. Der Kurs wurde im *Time Magazine* erwähnt, als Neil dort 2007 als einer der 100 weltweit einflussreichsten Menschen geehrt wurde. Unter anderem werden Sie in diesem Buch Neil als Professor kennenlernen, der Ihnen die Dinge erläutert, die er auch seinen Studenten erklärt.



Abbildung 1: Die drei Autoren, von links nach rechts: Strauss, Gott und Tyson. Credit: Princeton, Denise Applewhite

Nachdem wir den Kurs einige Jahre lang gegeben hatten, beschlossen wir, diese Ideen für Leser, die es nach einem tieferen Verständnis des Universums verlangte, in Form eines Buches niederzulegen.

Wir bieten Ihnen eine Rundreise durch das Universum aus astrophysikalischer Sicht, das heißt, eine Rundreise, die das Ziel hat, Ihnen verständlich zu machen, was im Universum vor sich geht.

Wir schildern Ihnen, wie Newton und Einstein zu ihren größten Einsichten gelangten. Sie wissen natürlich, dass Stephen Hawking berühmt ist. Aber wir erklären Ihnen, was ihn so berühmt gemacht hat. In dem wunderbaren Film über seine Lebensgeschichte, *Die Entdeckung der Unendlichkeit*, gewann Eddie Redmayne für seine faszinierende Darstellung des gehandicapten Astrophysikers einen Oscar als bester Schauspieler. Der Film zeigt Hawking, wie er seine größten Einfälle hatte, indem er so lange in den Kamin starrte, bis ihm plötzlich die Erleuchtung kam. Wir erzählen Ihnen, was der Film weggelassen hat: Dass Hawking nämlich zunächst die Arbeit des israelischen Physikers Jacob Bekenstein ablehnte, sie schließlich aber bestätigte und aus ihr eine vollkommen neue Einsicht gewann.

Das ist derselbe Jacob Bekenstein, der die absolute Grenze für die Informationsmenge entdeckte, die sich auf Ihrer Festplatte von 15 Zentimeter speichern lässt. Alles hängt mit allem zusammen. In diesem Buch konzentrieren wir uns vor allem auf die Aspekte des Universums, die uns besonders am Herzen liegen, und hoffen, dass unsere Begeisterung ansteckend sein wird.

Seit wir begonnen haben, hat sich das astronomische Wissen erheblich erweitert, und das spiegelt sich in diesem Buch wider. Neils Ansichten über den Status von Pluto sind 2006 in einer historischen Abstimmung der Internationalen Astronomischen Union bestätigt worden. Man hat Tausende von neuen Planeten entdeckt, die andere Sterne umkreisen. Damit werden wir

uns noch beschäftigen. Dank der Ergebnisse des Hubble-Weltraumteleskops, des Sloan Digital Sky Survey, der Wilkinson-Microwave-Anisotropy-Probe (WMAP) und des Planck-Satelliten besitzen wir jetzt außerordentlich genaue Kenntnisse über das kosmologische Standardmodell samt seinen kosmischen Inhaltsstoffen: normale Materie (deren Masse in ihren Atomkernen steckt) und zusätzlich Dunkle Materie und Dunkle Energie. In Europa haben Physiker am Large Hadron Collider das Higgs-Boson entdeckt und uns damit der erhofften *Theorie von Allem* einen Schritt nähergebracht. Das Laser-Interferometer-Gravitationswellen-Observatorium (LIGO) hat den Nachweis der Gravitationswellen zweier Schwarzer Löcher erbracht, die sich spiralförmig aufeinander zubewegten und dann verschmolzen.

Wir erklären, wie Astronomen die Menge an Dunkler Materie bestimmt haben und woher wir wissen, dass sie nicht aus gewöhnlicher Materie besteht – also nicht aus Materie mit Atomkernen, die Protonen und Neutronen enthalten. Weiterhin erläutern wir, wie wir die Dichte der Dunklen Energie in Erfahrung gebracht haben und woher wir wissen, dass sie einen negativen Druck aufweist. Schließlich gehen wir auf aktuelle Spekulationen über den Ursprung des Universums und über seine künftige Entwicklung ein. Diese Fragen führen uns an die äußerste Grenze des gegenwärtigen physikalischen Wissens. Wir haben spektakuläre Bilder des Hubble-Weltraumteleskops, des WMAP-Satelliten und der Raumsonde New Horizons in das Buch aufgenommen, die Pluto und seinen Mond Charon zeigen.

Das Universum ist ehrfurchtgebietend überwältigend, wie uns Neil im allerersten Kapitel zeigt. Das finden viele Menschen faszinierend, fühlen sich aber gleichzeitig winzig und unbedeutend. Doch wir haben das Ziel, Ihnen die Möglichkeit zu geben, das Universum zu verstehen. Daraus sollten Sie Kraft schöpfen. Wir haben herausgefunden, worauf Gravitation beruht, wie sich Sterne entwickeln und wie alt das Universum ist. Das sind Triumphe der menschlichen Intelligenz und Beobachtungsgabe – Dinge, die Sie stolz machen sollten, der Menschheit anzugehören.

Das Universum ruft. Fangen wir an.

J. Richard Gott  
Princeton, New Jersey



TEIL  
I

STERNE,  
PLANETEN  
UND  
LEBEN





## 1

# GRÖSSENVERHÄLTNISSE IM UNIVERSUM

NEIL DEGRASSE TYSON

Wir beginnen mit den Sternen, fliegen hoch und davon – in die Galaxis, das Universum und noch viel weiter. Wie sagt Buzz Lightyear in *Toy Story*? »Bis in die Unendlichkeit und noch viel weiter!«

Es ist ein riesiges Universum. Ich möchte Sie mit der Größe und dem Ausmaß des Kosmos vertraut machen, der größer ist, als Sie denken. Er ist heißer, als Sie denken. Er ist dichter, als Sie denken. Er ist leerer, als Sie denken. Alles, was Sie über das Universum denken, ist weniger exotisch als die Wirklichkeit. Vergewöhnlichen wir uns ein paar grundlegende Dinge, bevor wir beginnen. Ich möchte Sie in die Welt der großen und kleinen Zahlen einführen, das wird Ihren Wortschatz auffrischen und Ihnen Größenverhältnisse im Universum näherbringen. Lassen Sie mich mit der Zahl 1 beginnen. Sie haben sie schon oft gesehen. Sie hat keine angehängten Nullen. In Exponentialschreibweise wird sie zu zehn hoch null,  $10^0$ . Die Zahl 1 hat keine Nullen rechts von dieser 1, was durch den Exponenten null angegeben wird. Natürlich lässt sich 10 auch als zehn hoch eins schreiben,  $10^1$ . Schauen wir uns tausend an –  $10^3$ . Wie ist das metrische Präfix für tausend? *Kilo*- Kilogramm – tausend Gramm; Kilometer – tausend Meter. Nehmen wir noch 3 Nullen dazu, 1 Million,  $10^6$ , das Präfix ist *mega*-. Vielleicht konnte man noch nicht weiter zählen, als man das Megaphon erfand; hätte man damals von der Milliarde gewusst – drei Nullen mehr –, hätte man es vielleicht »Gigaphon« genannt.

Wenn Sie sich für die Dateigrößen auf Ihrem Computer interessieren, sind Ihnen zwei Wörter geläufig – »Megabyte« und »Gigabyte«. Ein Gigabyte hat 1 Milliarde Byte.<sup>1</sup> Ich bin nicht davon überzeugt, dass Sie wissen, wie groß 1 Milliarde tatsächlich ist. Schauen wir uns in unserer Welt um und prüfen wir, welche Dinge in Milliarden vorkommen.

Zunächst einmal gibt es 7 Milliarden Menschen auf der Erde. Bill Gates? Wie viel hat er? Als ich das letzte Mal nachgesehen habe, waren es an die 80 Milliarden Dollar. Er ist der Schutzheilige der Geeks; zum ersten Mal wird die Welt von Geeks kontrolliert. Während des größten Teils der Menschheitsgeschichte war das nicht der Fall. Die Zeiten haben sich geändert. Wo haben Sie schon einmal 100 Milliarden gesehen? Nun, nicht ganz 100 Milliarden. McDonald's. »Mehr als 99 Milliarden serviert.« Das ist die größte Zahl, die Sie jemals auf der Straße gesehen haben. Ich weiß noch, als das Zählen anfing. Der McDonald's meiner Kindheit verkündete stolz und in großen Lettern: »Mehr als 8 Milliarden serviert.« Nie erschien auf dem McDonald's-Schild die Zahl 100 Milliarden. Man hatte dort nur Platz für zwei Ziffern gelassen, daher endete die Burger-Zählung bei 99 Milliarden. Doch jetzt macht man bei McDonald's auf Carl Sagan und sagt: »Milliarden und Abermilliarden serviert.«

Nehmen Sie 100 Milliarden Hamburger, und legen Sie sie dicht aneinander. Beginnen Sie in New York City, und halten Sie sich westwärts. Erreichen Sie Chicago? Natürlich. Kommen Sie nach Kalifornien? Klar doch. Bringen Sie die Dinge irgendwie zum Schwimmen. Diese Berechnung gilt für den Durchmesser der Brötchen (10 Zentimeter), denn der Burger an sich ist etwas kleiner als das Brötchen. Also, in dieser Rechnung geht es nur um das Brötchen. Jetzt legen Sie die Semmeln auf einer großen kreisförmigen Route als dichte, schwimmende Reihe quer über die Weltmeere – über den Pazifik, vorbei an Australien und Afrika, und kehren Sie zurück über den Atlantik, bis Sie schließlich mit Ihren 100 Milliarden Hamburgern wieder in New York City landen. Das sind eine Menge Hamburger. Trotzdem haben Sie noch ein paar übrig, nachdem Sie die Erde einmal umkreist haben. Und was fangen Sie mit dem Rest an? Sie wiederholen die Reise, genauer: Sie führen 215 weitere Erdumrundungen durch! Immer noch haben Sie ein paar übrig. Diese Kreise um die Erde werden Ihnen langweilig. Was tun Sie? Sie stapeln sie. Nachdem Sie die Erde 216-mal umrundet haben, beginnen Sie also, Ihre Hambur-

ger zu stapeln. Wie hoch kommen Sie nach Ihren 216 Erdumkreisungen? Bis zum Mond und zurück, und das mit gestapelten Hamburgern (jeder 5 Zentimeter hoch). Erst dann werden sie Ihre 100 Milliarden Hamburger aufgebraucht haben. Deshalb haben Kühe Angst vor McDonald's. Zum Vergleich: Die Milchstraße hat rund 300 Milliarden Sterne. Wir sehen also: McDonald's rüstet sich für den Kosmos.

Wenn Sie 31 Jahre, 7 Monate, 9 Stunden, 4 Minuten 20 Sekunden alt sind, haben Sie Ihre milliardste Sekunde erlebt. Als ich das Alter erreicht hatte, habe ich die Sekunde mit einer Flasche Champagner gefeiert. Es war eine winzige Flasche. So oft kommt man nicht zur Milliarde.

Weiter geht's. Was kommt als Nächstes? 1 Billion:  $10^{12}$ . Auch dafür haben wir ein metrisches Präfix: *tera-*. Sie können nicht bis 1 Billion zählen. Natürlich könnten Sie es versuchen. Aber wenn Sie pro Sekunde eine Zahl schaffen, brauchten Sie tausend mal 31 Jahre – 31.000 Jahre, weshalb ich also raten würde, das nicht auszuprobieren, auch nicht zu Hause. Vor 1 Billion Sekunden haben Höhlenbewohner – Troglodyten – Bilder auf die Wände ihres Wohnzimmers gemalt.

Am Rose Center of Earth and Space in New York zeigen wir eine spiralförmige Zeitlinie des Universums, die mit dem Urknall beginnt und sich über einen Zeitraum von 13,8 Milliarden Jahren entfaltet. Auseinandergewickelt hat sie die Länge eines Fußballfeldes. Jeder Schritt, den Sie machen, umfasst 50 Millionen Jahre. Wenn Sie an das Ende der Rampe gelangen, fragen Sie sich, wo sind wir? Wo ist die Geschichte der menschlichen Spezies? Der gesamte Zeitraum von 1 Billion Sekunden bis heute, von den graffitibessenen Höhlenmenschen bis heute, entspricht nur der Dicke jenes einen menschlichen Haares, das wir am Ende dieser Zeitlinie angebracht haben. Sie denken vielleicht, wir leben lange Leben, Sie denken, Zivilisationen überdauern lange Zeiträume – nicht aus Sicht des Kosmos selbst.

Was kommt als Nächstes?  $10^{15}$ . Das ist 1 Billiarde, mit dem metrischen Präfix *peta-*. Sie ist eine meiner Lieblingszahlen. Laut dem Ameisenexperten E. O. Wilson leben zwischen 1 und 10 Billiarden Ameisen auf (und in) der Erde.

Und dann?  $10^{18}$ , 1 Trillion – metrisches Präfix *exa-*. Das entspricht der geschätzten Zahl von Sandkörnern auf zehn großen Stränden. Der berühmteste Strand der Welt ist die Copacabana in Rio de Janeiro. Sie ist 4,2 Kilometer lang und war 55 Meter breit, bevor man sie auf 140 Meter verbreiterte,

indem man sie mit 3,5 Millionen Kubikmetern Sand zuschüttete. Die mittlere Größe von Sandkörnern an der Copacabana beträgt auf der Höhe des Meeresspiegels einen Drittelmillimeter. Das ergibt 27 Sandkörner pro Kubikmillimeter. Folglich enthalten 3,5 Millionen Kubikmeter dieses Sandes rund  $10^{17}$  Sandkörner. Das ist der größte Teil des Sandes, der sich heute dort befindet. Damit hätten zehn Copacabana-Strände rund  $10^{18}$  Sandkörner.

Noch ein Schritt mit dem Faktor 1000, und wir gelangen zu  $10^{21}$ , einer Trilliarde. Wir haben uns hochgearbeitet von Kilometern zu Megaphon, zu McDonald's-Hamburgern, zu Cro-Magnon-Malern, zu Ameisen, zu Sandkörnern auf Stränden, um schließlich hier zu landen: zehn Trilliarden – *die Zahl der Sterne im beobachtbaren Universum*.

Es gibt Menschen, die jeden Tag herumlaufen und behaupten, wir seien in diesem Kosmos allein. Sie haben einfach keinen Begriff von großen Zahlen, keinen Begriff von den Ausmaßen des Kosmos. Später werden wir noch erfahren, was mit dem *beobachtbaren Universum* gemeint ist, dem Teil des Universums, den wir sehen können.

Wenn wir schon einmal dabei sind, gehen wir doch noch ein Stück weiter. Nehmen Sie eine Zahl, die viel größer als 1 Trilliarde ist – wie wäre es mit  $10^{81}$ ? Soweit ich weiß, hat diese Zahl keinen Namen. Es ist die Zahl der Atome im beobachtbaren Universum. Wozu brauchen Sie eine Zahl, die noch größer ist? Was in aller Welt könnten Sie denn zählen? Wie wäre es mit  $10^{100}$ , eine hübsche runde Zahl. Sie heißt ein *Googol*. Nicht zu verwechseln mit Google, dem Internetunternehmen, das »Googol« absichtlich falsch buchstabierte.

Es gibt im beobachtbaren Universum keine zählbaren Objekte, auf die sich ein Googol anwenden ließe. Das Googol ist eine Zahl, die zum Spaß erfunden wurde. Wir können Sie als  $10^{100}$  schreiben, oder, wenn Sie Hochzahlen nicht grafisch darstellen können, auch als  $10^{100}$ . Allerdings lassen sich in bestimmten Situationen solche riesigen Zahlen durchaus anwenden: Zählen Sie nicht die *Dinge* selbst, sondern die verschiedenen Möglichkeiten, die die Dinge haben, um zu geschehen.

Zum Beispiel: Wie viele unterschiedliche Schachpartien sind möglich? Eine Partie kann mit Remis beendet werden, wenn einer der beiden Spieler nach dreifacher Wiederholung einer Stellung das Unentschieden verlangt, wenn jeder 50 Züge gemacht hat, ohne dass ein Bauer bewegt oder eine Figur geschlagen wurde oder wenn nicht mehr genügend Figuren übrig sind, um

ein Schachmatt zu erzwingen. Wenn wir sagen, dass jeder der beiden Spieler in jedem Spiel von der Regel Gebrauch machen muss, sobald sich eine entsprechende Situation ergibt, können wir die Zahl möglicher Schachspiele errechnen. Genau das hat Rich Gott getan und herausgefunden, dass das Ergebnis eine Zahl ist, die kleiner als

$$10^{10^{4,4}}$$

ist. Diese Zahl ist erheblich größer als ein Googol, das, wie wir gesehen haben

$$10^{10^2}$$

beträgt. Sie zählen keine Dinge, sondern die Möglichkeiten, etwas zu tun. Auf diese Weise können Zahlen sehr groß werden.

Ich habe eine noch größere Zahl. Wenn ein Googol eine 1 mit 100 Nullen ist, wie steht es dann mit 10 hoch Googol? Auch die hat einen Namen: ein *Googolplex*. Es ist eine 1 mit einem Googol von Nullen dahinter. Könnten Sie diese Zahl niederschreiben? Wohl kaum. Sie hat ein Googol von Nullen, und ein Googol ist größer als die Zahl der Atome im Universum. Daher müssen Sie sich mit einer der folgenden Schreibweisen begnügen:  $10^{\text{Googol}}$  oder  $10^{10^{100}}$  oder

$$10^{10^{100}}.$$

Wären Sie so motiviert, könnten Sie vermutlich versuchen,  $10^{19}$  Nullen auf jedes Atom im Universum zu schreiben. Aber Sie haben sicherlich Besseres zu tun.

Ich habe nicht die Absicht, Ihre Zeit zu verschwenden, aber ich habe eine Zahl, die größer als Googolplex ist. Jacob Bekenstein entwickelte eine Formel, die uns ermöglicht, die Höchstzahl der verschiedenen Quantenzustände zu schätzen, deren Masse und Größe ungefähr dieselben Werte hätten wie in unserem beobachtbaren Universum. Aufgrund der Quanteneigenschaften des Kosmos wäre das die größtmögliche Zahl verschiedenartiger beobachtbarer Universen wie des unseren. Sie lautet

$$10^{10^{124}}$$

eine Zahl, die  $10^{24}$  mal so viele Nullen besitzt wie Googolplex. Die Beschaffenheit dieser  $10^{(10^{124})}$  Universen reicht von entsetzlichen Welten voller Schwarzer Löcher bis zu Universen, in dem Ihrem Nasenloch ein Wassermolekül fehlt und das Nasenloch irgendeines Außerirdischen im fernen All eines zu viel hat.

Letztlich haben wir also für einige sehr große Zahlen durchaus Verwendung. Ich wüsste nicht, wofür wir Zahlen brauchten, die größer sind als diese, aber Mathematiker sehen das sicherlich anders. Ein Theorem enthielt einmal die krasse Zahl

$$10^{10^{10^{34}}}$$

Sie wird als *Skewes-Zahl* bezeichnet. Mathematiker haben Freude daran, weit über alle physikalischen Realitäten hinauszudenken.

Schauen wir uns andere Extreme im Universum an.

Was ist mit der Dichte? Intuitiv wissen Sie, was Dichte ist, aber wir wollen uns mit der Dichte im Kosmos beschäftigen. Betrachten wir zunächst die Luft in Ihrer Umgebung. Sie atmen  $2,5 \times 10^{19}$  Moleküle pro Kubikzentimeter ein – 78 Prozent Stickstoff und 21 Prozent Sauerstoff.

Eine Dichte von  $2,5 \times 10^{19}$  Molekülen pro Kubikzentimeter ist wahrscheinlich höher, als Sie gedacht haben. Doch sehen wir uns unsere besten Laborvakua an. Wir verstehen uns heute ziemlich gut darauf und können die Dichte auf 100 Moleküle pro Kubikzentimeter reduzieren. Wie sieht es mit dem interplanetaren Raum aus? Zwischen Erde und Sonne weist der Sonnenwind ungefähr 10 Protonen pro Kubikzentimeter auf. Wenn ich hier von Dichte rede, beziehe ich mich auf die Zahl der Moleküle, Atome oder freien Teilchen, aus denen sich das Gas zusammensetzt. Wie sieht es im interstellaren Raum aus, also in dem weitgehend leeren Raum zwischen den Sternen? Seine Dichte schwankt, je nachdem wo Sie sich befinden, aber Regionen, in denen die Dichte auf 1 Atom pro Kubikzentimeter absinkt, sind nicht selten. Im intergalaktischen Raum wird diese Zahl noch viel kleiner: 1 pro Kubikmeter.

Selbst in unseren besten Laboratorien können wir keine so leeren Vakua erzeugen. Es gibt eine alte Redensart: »Die Natur verabscheut das Vakuum.«

Die Menschen, die das sagten, haben die Erdoberfläche nie verlassen. Tatsächlich *liebt* die Natur das Vakuum, denn daraus besteht der größte Teil des Universums. Als sie »Natur« sagten, meinten sie lediglich den Ort, an dem wir uns jetzt befinden, am Grunde der Luftschicht, die wir unsere Atmosphäre nennen und die in der Tat äußerst bestrebt ist, leere Räume auszufüllen, wenn sie es vermag.

Nehmen wir an, ich werfe ein Stück Kreide zu heftig gegen eine Wandtafel, sodass es in kleine Stücke von, sagen wir, 1 Millimeter Durchmesser zerplatzt. Ich hebe ein Bruchstück auf. Stellen wir uns vor, das wäre 1 Proton. Wissen Sie, was das einfachste Atom ist? Wasserstoff, wie Sie vielleicht vermutet haben. Sein Kern besteht aus einem einzigen Proton, und bei normalem Wasserstoff ist das Orbital, das den Kern umgibt, von einem einzigen Elektron besetzt. Wenn das Proton 1 Millimeter groß wäre, wie groß wäre im gleichen Maßstab dann das Wasserstoffatom? Hätte das Atom die Größe eines Wasserballs, wenn das Kreidestück das Proton wäre? Nein, es wäre viel größer. Sein Durchmesser betrüge 100 Meter – vergleichbar einem 30-stöckigen Gebäude. Wie kommt das? Atome sind ziemlich leer. Es gibt keine Teilchen zwischen dem Kern und dem einsamen Elektron in seinem ersten Orbital, das, wie wir aus der Quantenmechanik wissen, den Kern sphärisch umgibt. Gehen wir tiefer und tiefer in die Welt der ganz kleinen Dinge hinein, bis wir an eine andere Grenze des Kosmos gelangen, die Grenze des Messbaren – Dinge, die so winzig sind, dass sie nicht einmal mehr gemessen werden können. Bislang wissen wir nicht, welchen Durchmesser das Elektron hat. Es ist kleiner, als wir messen können. Doch nach der Superstringtheorie ist es möglicherweise ein winziger, schwingender String – eine Saite also –, dessen Länge mit  $1,6 \times 10^{-35}$  Meter angegeben wird. Die Größe von Atomen beträgt rund  $10^{-10}$  (ein Zehnmilliardstel) Meter. Was ist mit  $10^{-12}$  oder  $10^{-13}$  Meter? Zu den bekannten Objekten in diesem Bereich gehören Uran mit nur 1 Elektron und eine exotische Form des Wasserstoffs mit 1 Proton, in dessen Orbit sich ein *Myon* befindet, ein schwererer Verwandter des Elektrons. Bei einer Größe von einem Zweihundertstel eines gewöhnlichen Wasserstoffatoms besitzt das myonische Wasserstoffatom eine Halbwertszeit von lediglich 2,2 Mikrosekunden infolge des spontanen Zerfalls seines Myons. Erst in einem Größenbereich von  $10^{-14}$  oder  $10^{-15}$  Metern können Sie die Ausmaße des Atomkerns messen.



Gehen wir jetzt in die entgegengesetzte Richtung, und steigen wir auf zu immer höheren und höheren Dichten. Was ist mit der Sonne? Ist sie sehr dicht oder nicht allzu dicht? Die Sonne ist in ihrem Zentrum ziemlich dicht (und irrsinnig heiß), in den äußeren Regionen aber deutlich weniger dicht. Die durchschnittliche Dichte der Sonne ist nur rund 1,4-mal so hoch wie die des Wassers. Und die Dichte des Wassers kennen wir – 1 Gramm pro Kubikzentimeter. Im Zentrum der Sonne liegt die Dichte bei 160 Gramm pro Kubikzentimeter. Doch die Sonne ist in dieser Hinsicht ziemlich gewöhnlich. Sterne können sich in erstaunlicher Weise (fehl-)verhalten. Einige expandieren und werden auf diese Weise groß und bauchig, andere stürzen in sich zusammen, bis sie klein und dicht sind. Denken Sie an meinen Protonensplitter und an den einsamen, leeren Raum drumherum. Es gibt Prozesse im Universum, die Materie zusammenpressen, bis sie die Dichte eines Atomkerns hat. In solchen Sternen ist jeder Atomkern Wange an Wange mit dem Nachbarkern. Wie sich zeigt, sind die Objekte draußen im All, die diese außergewöhnlichen Eigenschaften aufweisen, überwiegend Neutronensterne – superdichte Regionen im Universum.

In unserer Zunft neigen wir dazu, die Dinge genauso zu bezeichnen, wie wir sie sehen. Große rote Sterne heißen bei uns *Rote Riesen*, kleine weiße Sterne *Weißer Zwerge*. Sterne, von denen wir regelmäßige Strahlungsimpulse empfangen, nennen wir *Pulsare*. In der Biologie haben sie vollmundige lateinische Wörter für die Objekte ihres Interesses. Ärzte schreiben ihre Rezepte in einer Geheimsprache, die die Patienten nicht entziffern können, sondern nur die Apotheker verstehen. Offenbar schlucken wir lange, ausgefallene chemische Sachen. In der Biochemie hat das bekannteste Molekül zehn Silben – die Desoxyribonukleinsäure! Den anfänglichen Beginn von Raum, Zeit, Materie und Energie können wir dagegen mit nur zwei Silben beschreiben: *Big Bang* – *Urknall*. Wir fassen uns kurz, weil das Universum auch so schon schwierig genug ist. Es hat keinen Sinn, große Worte zu machen, um Sie noch mehr zu verwirren.

Sie haben noch nicht genug? Im Universum gibt es Orte, an denen die Gravitation so stark ist, dass das Licht ihnen nicht entkommen kann. Wenn Sie dort hineinfallen, kommen auch Sie niemals wieder aus solch einer Region heraus: *Schwarze Löcher*. Wir brauchen nicht mehr als diese vier Silben. Tut mir leid, aber das musste ich mal loswerden

Wie dicht ist ein Neutronenstern? Nehmen wir einen Fingerhut voll von dem Material eines Neutronensterns. Vor langer Zeit haben die Menschen alles mit der Hand genäht. Ein Fingerhut schützt Ihre Fingerspitze vor Verletzungen durch die Nähnadel. Treiben Sie, um eine Vorstellung von der Dichte eines Neutronensterns zu bekommen, eine Herde von 100 Millionen Elefanten zusammen und pressen Sie sie in diesen Fingerhut. Mit anderen Worten, wenn Sie 100 Millionen Elefanten auf die eine Seite einer Wippe stellen und einen Fingerhut voll Material eines Neutronensterns auf die andere, wird sich der Balken im Gleichgewicht befinden. Wahrhaftig, ein dichter Stoff! Ist auch die Gravitation eines Neutronensterns so hoch? Begeben wir uns auf seine Oberfläche, um es herauszufinden.

Eine Möglichkeit, um in Erfahrung zu bringen, mit wie viel Gravitation Sie es zu tun haben, besteht darin, dass Sie sich fragen, wie viel Energie erforderlich ist, um etwas anzuheben? Wenn die Gravitation stark ist, brauchen Sie zum Anheben entsprechend mehr Energie. Ich wende eine gewisse Energiemenge auf, um eine Treppe hochzusteigen, was deutlich innerhalb der Grenzen meiner Energiereserven liegt. Aber stellen Sie sich auf einem hypothetischen Riesenplaneten mit erdähnlicher Gravitation eine 20.000 Kilometer hohe Felswand vor. Messen Sie die Energiemenge, die Sie aufwenden müssen, um vom Boden bis zur Spitze zu gelangen, wobei Sie während der gesamten Kletterpartie gegen die Gravitationsbeschleunigung kämpfen, wie wir sie hier auf der Erdoberfläche erfahren. Das ist eine Menge Energie. Mehr Energie, als Sie am Boden der Felswand gespeichert hatten. Auf den Weg nach oben werden Sie Energieriegel oder andere kalorienreiche, leichtverdauliche Kost essen müssen. Selbst wenn Sie ein flottes Tempo von 100 Metern in der Stunde vorlegten und 24 Stunden am Tag kletterten, würden Sie mehr als 22 Jahre brauchen, um den Gipfel zu erreichen. Das entspricht exakt der Energie, die Sie brauchten, um auf ein einziges Blatt Papier zu treten, das auf der Oberfläche eines Neutronensterns läge. Auf Neutronensternen gibt es wahrscheinlich kein Leben.

Wir haben mit 1 Proton pro Kubikmeter begonnen und sind zu 100 Millionen Elefanten pro Fingerhut gelangt. Was habe ich vergessen? Was ist mit der Temperatur? Sprechen wir über Wärme. Beginnen wir mit der Oberfläche der Sonne. Rund 6000 Kelvin – 6000 K. Das reicht, um alles zu verdampfen, was mit ihr in Berührung kommt. Deshalb besteht die Sonne aus Gas (eigent-

lich sogar: aus Plasma). Bei derartigen Temperaturen verdampft alles. (Zum Vergleich, die Durchschnittstemperatur der Erdoberfläche beträgt gerade einmal 287 K.)

Wie sieht es mit der Temperatur im Zentrum der Sonne aus? Wie Sie vielleicht bereits vermuten, ist das Zentrum der Sonne noch deutlich heißer als ihre Oberfläche – dafür gibt es zwingende Gründe, wie wir an späterer Stelle in diesem Buch sehen werden. Im Zentrum der Sonne beträgt die Temperatur 15 Millionen K. Bei dieser Temperatur passieren faszinierende Dinge. Die Protonen bewegen sich schnell, sehr schnell sogar.

Normalerweise stoßen sich zwei Protonen ab, weil sie die gleiche (positive) elektrische Ladung haben. Aber wenn man schnell genug ist, kann man diese Abstoßung überwinden. Wird der Abstand klein genug, kommt eine vollkommen neue Kraft ins Spiel – nicht die abstoßende elektrostatische Kraft, sondern eine Anziehungskraft, die bei sehr kleinen Abständen wirksam wird. Wenn man 2 Protonen einander stark genug annähert, werden sie bei einem hinreichend kurzen Abstand aneinanderhaften. Diese Kraft hat einen Namen. Wie nennen Sie die *starke Kraft*. Ja, das ist ihre offizielle Bezeichnung. Diese starke Kernkraft kann Protonen aneinander binden und neue Elemente aus ihnen machen, etwa das nächste Element nach dem Wasserstoff im Periodensystem – Helium. Sterne können Elemente herstellen, die schwerer sind als diejenigen, mit denen sie geboren wurden. Dieser Prozess vollzieht sich tief in den Kernregionen eines Sterns. Mehr davon in Kapitel 7.

Sprechen wir über Temperaturen. Welche Temperatur hat das Universum als Ganzes? Es hat tatsächlich eine Temperatur – ein Überbleibsel des Urknalls. Damals, vor 13,8 Milliarden Jahren, war alles, was Sie bis zu einer Entfernung von 13,8 Lichtjahren an Raum, Zeit, Materie und Energie sehen können, extrem dicht zusammengequetscht. Das frühe Universum war ein heißer brodelnder Kessel aus Materie und Energie. Seither hat die kosmische Expansion das Universum allerdings auf nur rund 2,7 K abgekühlt.

Auch heute noch setzt sich diese Expansion und Abkühlung fort. So beunruhigend das auch erscheinen mag, alle Daten zeigen, dass wir uns auf einer Reise ohne Rückfahrkarte befinden. Wir wurden im Urknall geboren und expandieren auf ewig. Die Temperatur wird weiterhin fallen, wird auf 2 K absinken, auf 1 K, 0,5 K und asymptotisch gegen null gehen. Letztlich wird sich die Temperatur bei rund  $7 \times 10^{-31}$  K einpendeln, infolge eines von Stephen

Hawking entdeckten Effektes, den Rich in Kapitel 24 erörtern wird. Doch das ist kein Trost. Die Sterne werden all ihren Brennstoff aufbrauchen, einer nach dem anderen verlöschen und vom Himmel verschwinden. Interstellare Gaswolken werden neue Sterne bilden, aber am Ende natürlich ihren Gasvorrat erschöpfen. Es beginnt mit Gas, Sterne entstehen, die Sterne durchlaufen ihren Lebenszyklus und lassen schließlich einen Kadaver zurück – die toten Endzustände der Sternentwicklung: Schwarze Löcher, Neutronensterne und Weiße Zwerge. Das geht so weiter, bis die Lichter der Galaxis ausgehen, eines nach dem anderen. Das Universum wird dunkel. Übrig bleiben Schwarze Löcher, die ein schwaches Licht verbreiten – was ebenfalls von Stephen Hawking vorhergesagt wurde.

Und der Kosmos endet. Nicht mit einem Knall, sondern mit einem erbärmlichen Wimmern.

Lange bevor das geschieht, wird die Sonne, um jetzt wieder einmal von der Größe zu sprechen, enorm anwachsen. Ich kann Ihnen versichern, dass Sie dann nicht zugegen sein möchten. Wenn die Sonne stirbt, kommt es in ihrem Inneren zu komplizierten thermodynamischen Vorgängen, die die Außenfläche der Sonne zur Expansion veranlassen. Sie wird immer größer und größer und größer werden und dabei Ihr Gesichtsfeld am Himmel zunehmend ausfüllen. Schließlich verschlingt die Sonne die Bahn des Merkurs und dann die der Venus. In 5 Milliarden Jahren wird die Erde ein verkohltes Stück Asche sein, das seine Kreise unmittelbar über der Oberfläche der Sonne zieht. Die Ozeane werden in siedendem Aufruhr sein und in die Atmosphäre verdampfen. Die Atmosphäre selbst wird so stark erhitzt, dass alle ihre Moleküle ins All entweichen. Leben, wie wir es erkennen, wird es nicht mehr geben, noch lange bevor andere Kräfte in rund 7,6 Milliarden Jahren dazu führen, dass die verkohlte Erde auf spiralförmiger Bahn in die Sonne stürzt und dort verdampft.

Einen schönen Tag wünsche ich Ihnen!

Mit diesen kurzen Ausführungen habe ich versucht, Ihnen einen Eindruck von der Größe und der Großartigkeit unseres Gegenstands zu vermitteln. Alles, was ich dort kurz erwähnt habe, wird in den kommenden Kapiteln eingehender und ausführlicher behandelt werden. Willkommen im Universum.



## 2

# VOM TAG- UND NACHTHIMMEL ZU DEN PLANETENBAHNEN

NEIL DEGRASSE TYSON

In diesem Kapitel werden wir 3000 Jahre Astronomie behandeln. Alles, was seit der Antike, der Zeit der Babylonier, bis zum 17. Jahrhundert geschah. Allerdings soll das kein Geschichtsunterricht werden, weil ich nicht die Absicht habe, mich in allen Einzelheiten mit der Frage zu befassen, wer was zuerst gedacht oder entdeckt hat. Ich möchte Ihnen nur eine Vorstellung vom Umfang dessen vermitteln, was in dieser Zeit gelernt wurde. Beginnen wir mit dem Versuch der Menschen, den Nachthimmel zu verstehen.

Hier ist die Sonne (vgl. Abb. 2.1). Daneben wollen wir die Erde einzeichnen, nicht maßstabsgerecht, weder der Größe noch der Entfernung nach. Die Abbildung soll einfach bestimmte Merkmale des Erde-Sonne-Systems verdeutlichen. Weit draußen am Himmel sind natürlich die Sterne. Ich werde so tun, als bestünde der Himmel nur aus Lichtpunkten an der Innenseite einer großen Kugel, was mir erleichtert, einige andere Dinge zu beschreiben.

Wie Sie wahrscheinlich wissen, dreht sich die Erde um eine Achse, die relativ zu unserer Umlaufbahn um die Sonne geneigt ist. Dieser Neigungswinkel beträgt 23,5 Grad. Wie lange brauchen wir für eine Umdrehung? Einen Tag. Wie lange brauchen wir für einen Umlauf um die Sonne? Ein Jahr. Die zweite Frage beantworteten 30 Prozent der amerikanischen Laienöffentlichkeit falsch.