



DAS

Universum

FÜR DIE

HOSENTASCHE

Die kürzeste
Reise durch die
Astrophysik

AUS DEM ENGLISCHEN VON
HANS-PETER REMMLER

NEIL DEGRASSE TYSON,
MICHAEL A. STRAUSS,
und J. RICHARD GOTT

KAPITEL 1

GRÖSSENVERHÄLTNISSE IM UNIVERSUM

Neil deGrasse Tyson

Wir fangen mit unserem Sonnensystem an. Dann geht's hinaus zu den Sternen. Und dann in die Galaxie, ins ganze Universum und darüber hinaus.

Das Universum. Es ist größer, als Sie denken. Es ist heißer, als Sie denken. Es ist dichter, als Sie denken. Und es ist leerer, als Sie denken. Ihre ganzen Vorstellungen vom Universum sind weniger exotisch als die Wirklichkeit. Legen wir uns etwas numerisches Rüstzeug zurecht, bevor wir anfangen. Beginnen wir doch einfach mit der Zahl 1. Sie werden Sie kennen. Es kommen keine Nullen darin vor. In Exponentialschreibweise wird sie zu 10^0 , zehn hoch null. Rechts von dieser 1 stehen keine Nullen, was aus dem Expo-

nenten null hervorgeht. Gehen wir einen Schritt weiter, zur Zahl 10. Die lässt sich natürlich auch als 10^1 schreiben, zehn hoch eins. Gehen wir weiter zur Zahl tausend – 10^3 . Wie lautet das metrische Präfix für tausend? *Kilo-*, wie in Kilogramm (1000 Gramm) oder Kilometer (1000 Meter). Hängen wir weitere drei Nullen dran, und wir sind bei einer Million, 10^6 , mit dem Präfix *Mega-*. Vielleicht konnten die Leute zu der Zeit, als das Megafon erfunden wurde, nur bis zu einer Million zählen. Wenn sie schon bis zur Milliarde gekommen wären, also 10^9 , mit drei weiteren Nullen rechts von der 1, würde das Ding vielleicht Gigafon heißen.

Wissen Sie, wie groß eine Milliarde ist? Was geben wir üblicherweise in Milliarden an?

Gegenwärtig gehen wir auf eine Erdbevölkerung von 8 Milliarden Menschen zu.

Wie ist es mit Jeff Bezos, dem Gründer von Amazon? Was hat der auf der hohen Kante? Über 100 Milliarden Dollar. Wo haben Sie diese Zahl, 100 Milliarden, schon mal gesehen? Na ja, beinahe zumindest bei McDonald's: »Mehr als 99 Milliarden servierte Hamburger.« Das ist wahrscheinlich die größte Zahl, die Sie je im Alltag gesehen haben. Von 100 Milliarden war bei McDonald's nie die Rede, weil sie nur Platz für eine zweistellige Zahl vorgesehen hatten, deshalb endet die Burgerzählung bei 99 Milliarden. Aber dann machten sie einen auf Carl Sagan und es hieß »Milliarden und Abermilliarden serviert«.

Stellen Sie sich 100 Milliarden Hamburger vor, dicht aneinandergereiht. Wir fangen in New York City an und halten uns westwärts. Kommen wir bis Chicago? Aber sicher. Auch bis Kalifornien? Locker. Jetzt müssen wir herausfinden, wie wir die Burger aufs Wasser legen können. Bei dieser Kalkulation gehen wir vom Durchmesser des Brötchens aus, etwa 10 Zentimeter, die plattgedrückte Frikadelle darin ist ja etwas kleiner. Jetzt geht's also hinaus aufs Meer, auf eine große Weltumrundung. Wir überqueren den Pazifik, lassen Australien links liegen, es geht weiter durch den Indischen Ozean, wir passieren Afrika und überqueren den Atlantik, bis wir wieder an unserem Ausgangspunkt in New York City ankommen. Das sind schon eine ganze Menge Hamburger. Aber auch nachdem wir einen kompletten Erdumfang mit Brötchen belegt haben, haben wir noch jede Menge Hamburger übrig. Also drehen wir die gleiche Runde noch einmal, genauer: noch weitere 215-mal. Selbst jetzt sind noch ein paar übrig. Das Umrunden der Erde wird allmählich langweilig, deshalb stapeln wir den Rest ab sofort aufeinander. Wie hoch hinaus kommen wir damit? Wir kommen mit unseren aufeinandergestapelten Hamburgern, jeder davon 5 Zentimeter dick, bis zum Mond und wieder zurück. Nachdem wir die Erde 216-mal umrundet haben, wohlgemerkt. Erst dann haben wir unsere 100 Milliarden Hamburger sämtlich verbraucht. Deshalb haben Rinder Angst vor McDonald's. Zum Vergleich: Die Milchstraße, unsere Gala-

xie, hat circa 300 Milliarden Sterne. Vielleicht rüstet sich McDonald's ja bereits für den Kosmos.

Wenn Sie zufällig vor 31 Jahren und 252 Tagen geboren wurden, nehmen Sie die genaue Uhrzeit Ihrer Geburt und addieren dazu 5 Stunden, 33 Minuten und 20 Sekunden, dann wissen Sie ziemlich genau, in welchem Moment Sie eine Milliarde Lebenssekunden hinter sich hatten oder haben werden. Als alter Zahlen-Nerd habe ich mir damals erlaubt, diesen Moment mit einem Schluck Champagner zu feiern.

Aber nun weiter im Text: Welches ist der nächste Schritt, drei Stellen weiter? Eine Billion, 10^{12} . Auch dafür haben wir ein metrisches Präfix, nämlich *Tera*-. Bis zu einer Billion zu zählen, geht überhaupt nicht. Wenn Sie eine Zahl pro Sekunde vor sich hinzählen, würden sie dafür logischerweise 1000-mal 31 Jahre brauchen – 31 000 Jahre. Wir raten deshalb davon ab, es zu versuchen. Tun Sie's nicht, auch zu Hause nicht. Vor einer Billion Sekunden waren die Höhlenbewohner – oder Troglodyten, wie die Archäologen sagen – gerade dabei, ihre Höhlenmalereien an die Wohnzimmerwand zu zeichnen.

Im Rose Center of Earth and Space in New York gibt es eine spiralförmige Zeitachse des Universums, die beim Urknall beginnt und 13,8 Milliarden Jahre darstellt. Auseinandergewickelt ist sie etwa so lang wie ein Fußballplatz. Mit jedem Schritt auf dem spiralförmigen Wandelgang entlang dieser Linie legen Sie 50 Millionen Jahre zurück. Sie gelan-

gen zum Ende der Rampe und fragen sich: Wo stehen wir? Wo finden wir die Geschichte der menschlichen Spezies auf dieser Achse? Der gesamte Zeitraum von vor einer Billion Sekunden bis heute, von den in Höhlen wohnenden Graffiti-Fans bis jetzt, entspricht nur der Dicke eines menschlichen Haares, das wir am Ende dieser Zeitspirale angebracht haben. Sie glauben, wir leben ein langes Leben? Sie glauben, Zivilisationen hätten über lange Zeit Bestand gehabt? Weit gefehlt – jedenfalls in kosmischen Dimensionen betrachtet.

Was haben wir als Nächstes? 10^{15} , eine Billiarde, metrisches Präfix *Peta-*. Laut dem Harvard-Biologen E. O. Wilson leben 1 bis 10 Billiarden Ameisen auf (und in) der Erde.

Und weiter? 10^{18} , eine Trillion, metrisches Präfix *Exa-*. Das entspricht der geschätzten Anzahl Sandkörner auf zehn großen Stränden.

Wir gehen noch drei Nullen oder einen Faktor 1000 weiter und sind nun bei 10^{21} , eine Trilliarden. Wir haben uns vorgearbeitet von Kilometern zu Megafonen zu McDonald's-Hamburgern zu Cro-Magnon-Malern zu Ameisen zu Sandkörnern, und jetzt stehen wir hier: über 10 Trilliarden

– *die Zahl der Sterne im beobachtbaren Universum.*

Es gibt immer wieder Leute, die steif und fest behaupten, wir wären allein in diesem Kosmos. Diese Leute haben einfach keine richtige Vorstellung von großen Zahlen, keine

Vorstellung davon, wie groß der Kosmos ist. Wir werden später genauer darauf zu sprechen kommen, was konkret mit dem *beobachtbaren Universum* gemeint ist, dem Teil des Universums, den wir sehen können.

Und wenn wir schon dabei sind, wie wär's mit einer Zahl, die noch viel größer ist als 1 Trilliarde – wie wär's mit 10^{81} ? Das ist die Anzahl der Atome im beobachtbaren Universum. Warum sollte man jemals eine Zahl benötigen, die *noch* größer ist als diese? Was »in aller Welt« wollen wir damit zählen? Wie wär's mit 10^{100} , eine hübsche runde Zahl. Das nennt man ein *Googol* – nicht zu verwechseln mit dem Internetkonzern *Google*, die haben in ihrem Namen nämlich »Googol« absichtlich falsch geschrieben.

Es gibt nicht genug Objekte im Universum, die man mit einem Googol noch zählen könnte. Die Zahl haben wir einfach nur zum Spaß. Wir können schön 10^{100} schreiben, es ginge aber auch 10^{100} , falls Sie keine Funktion für Hochzahlen in Ihrer Textverarbeitung haben, und das gilt natürlich für alle unsere großen Zahlen und Exponenten. Dennoch können Sie selbst mit so großen Zahlen in bestimmten Situationen etwas anfangen: Zählen Sie keine *Dinge*; zählen Sie stattdessen Möglichkeiten, was mit Dingen passieren könnte. Ein Beispiel: Wie viele theoretisch mögliche, spielbare Schachpartien gibt es? Nach einer dreifachen Wiederholung der Stellung (bei gleichem Spieler am Zug) kann jeder Spieler Remis beantragen, ebenso wenn 50 Züge

lang weder ein Bauer gezogen noch eine Figur geschlagen wird, oder wenn nicht mehr genug Figuren auf dem Brett verblieben sind, um ein Schachmatt zu konstruieren. Wenn wir davon ausgehen, dass ein Spieler das Remis erklären *muss*, sobald eine dieser drei Bedingungen erfüllt ist, können wir die Anzahl aller theoretisch möglichen Schachpartien berechnen. Das hat Richard Gott erledigt (weil er eben genau solche Dinge macht), und er fand heraus, dass die richtige Antwort eine Zahl unter $10^{(10^4,4)}$ ist. Das ist eine ganze Menge mehr als ein Googol, das wäre $10^{(10^2)}$. Auch hier zählen wir keine Dinge, wir zählen Möglichkeiten, wie Dinge sich entwickeln könnten. Auf diese Weise können Zahlen sehr, sehr groß werden.

Hier kommt eine noch größere Zahl. Wenn ein Googol eine 1 mit 100 Nullen ist, wie sieht es dann bei 10 hoch Googol aus? Auch dafür haben wir einen Namen: ein *Googolplex*. Das ist eine 1 mit einem Googol Nullen dahinter. Lässt sich diese Zahl überhaupt ausschreiben? Keine Chance. Dafür bräuchten Sie ein Googol Nullen, und ein Googol ist mehr als die Anzahl Atome im Universum. Wir müssen uns also mit folgenden Schreibweisen bescheiden: 10^{Googol} , oder $10^{10^{100}}$ oder $10^{(10^4 100)}$.

Wir haben nicht die Absicht, Ihre Zeit zu verschwenden. Hier kommt eine Zahl, die noch größer ist als ein Googolplex. Jacob Bekenstein erfand eine Formel, die es uns ermöglicht, die maximale Anzahl möglicher Quantenzustände zu

schätzen, deren gesamte Masse und Größe unserem beobachtbaren Universum vergleichbar sind. Angesichts der Quantenunschärfe, die wir beobachten, wäre das die maximale Anzahl separater beobachtbarer Universen wie dem unseren. Das wären $10^{(10^{124})}$, und diese Zahl hat 10^{24} -mal mehr Nullen als ein Googolplex. Diese $10^{(10^{124})}$ Universen reichen von ausgesprochen beängstigenden Exemplaren, die größtenteils aus schwarzen Löchern bestehen, bis zu solchen, die genau so sind wie unseres, nur dass dort Ihrer Nase ein Sauerstoffmolekül fehlt und die Nase irgendeines Aliens ein Sauerstoffmolekül mehr hat.

Ein mathematisches Theorem enthielt einmal die vollkommen krasse Zahl $10^{(10^{(10^{34})})}$. Diese nennt sich *Skewes-Zahl*, und sie stellt alle anderen in den Schatten.

Höchste Zeit, ein Gefühl für die Extreme im Universum zu entwickeln.

Wie sieht es mit der Dichte aus? Sie wissen intuitiv, was Dichte ist, aber denken wir einmal an die Dichte im Kosmos. Zuerst erkunden wir die Luft in unserer Umgebung. Sie atmen $2,5 \times 10^{19}$ Moleküle pro Kubikzentimeter ein – 78 Prozent Stickstoff und 21 Prozent Sauerstoff (dazu noch 1 Prozent »Sonstiges«). Wenn wir hier von Dichte sprechen, geht es um die Anzahl der Moleküle, Atome oder losen Partikel, aus denen die entsprechende Materie besteht.

Eine Dichte von $2,5 \times 10^{19}$ Molekülen pro Kubikzentimeter ist wahrscheinlich mehr, als Sie gedacht hatten. Wie steht

es mit der besten Vakuumtechnik in unseren Laboren? Gar nicht so übel, wir schaffen es heutzutage, die Dichte auf circa 100 Moleküle pro Kubikzentimeter herunterzufahren. Was haben wir im interplanetaren Weltraum? Der Sonnenwind, der so weit von uns entfernt ist wie die Sonne von der Erde, enthält etwa 10 Protonen pro Kubikzentimeter. Und was ist mit dem interstellaren Raum, dem Weltraum zwischen den Sternen? Dort schwankt die Dichte, je nachdem, wo Sie gerade unterwegs sind; aber Regionen, in denen die Dichte auf weniger als 1 Atom pro Kubikzentimeter fällt, sind nichts Ungewöhnliches. Im intergalaktischen Raum liegt der Wert noch viel niedriger: 1 Atom pro Kubikmeter.

Auch in unseren besten Laboratorien bekommen wir derart »leere« Vakuumbedingungen nicht hin. Es gibt da den alten Spruch »Die Natur verabscheut das Vakuum«. Die Leute, die das behaupteten, haben die Erdoberfläche niemals verlassen. In Wirklichkeit *liebt* die Natur das Vakuum, denn der größte Teil des Universums ist genau das: ein Vakuum. Als sie »Natur« sagten, meinten sie damit gerade einmal den Grund dieser dünnen Hülle aus Luft, die wir Atmosphäre nennen, und diese Luft ist in der Tat bestrebt, Leerräume auszufüllen, wo immer sie welche antrifft.

Werfen Sie ein Stück Kreide an eine Tafel, sodass es in tausend Stücke zerspringt, und heben sie eines der Bruchstücke auf. Sagen wir, ein solches Bruchstück hat einen Durchmesser von 1 Millimeter. Stellen Sie sich vor, das wäre ein

Proton. Kennen Sie das einfachste Atom? Es ist das Wasserstoffatom. Sein Kern enthält ein Proton, und normaler Wasserstoff hat ein Elektron, das in einem kugelförmigen Raum um das Proton herum zu Hause ist. Diese Räume bezeichnen wir als Orbitale. Wenn das Kreidestückchen das Proton ist, wie groß wäre dann das gesamte Wasserstoffatom? Hundert Meter im Durchmesser – ein Fußballplatz ist ungefähr hundert Meter lang. Atome sind also ziemlich leer, wenn auch klein: etwa 10^{-10} Meter im Durchmesser. Das ist ein zehnmilliardstel Meter. Erst wenn sie bis 10^{-14} oder 10^{-15} Meter heruntergehen, messen Sie die Größe des Atomkerns. Es geht aber noch kleiner. Wir kennen den Durchmesser des Elektrons noch nicht. Es ist kleiner, als wir messen können. Allerdings besagt die Superstring-Theorie, dass es sich um einen winzigen, vibrierenden String mit einer Länge von $1,6 \times 10^{-35}$ Metern handeln könnte. Materie ist somit als Ort für Leere bestens geeignet.

Jetzt gehen wir in die andere Richtung, zu immer größerer Dichte. Wie sieht es mit der Sonne aus? Sie ist in ihrem Zentrum ziemlich dicht (und unfassbar heiß), am äußeren Rand jedoch viel weniger dicht. Die durchschnittliche Dichte beträgt etwa das 1,4-Fache von Wasser. Und wir kennen die Dichte von Wasser sehr genau: 1 Gramm pro Kubikzentimeter. In ihrem Kern hat die Sonne eine Dichte von 160 Gramm pro Kubikzentimeter. Allerdings ist die Sonne in diesen Dingen eher gewöhnlich. Sterne können sich diesbezüglich auf

faszinierende Weise (daneben)benehmen. Manche dehnen sich aus und werden riesig und knollenförmig bei sehr geringer Dichte, andere kollabieren und werden extrem klein und dicht. Denken Sie an das Kreide-Proton-Bruchstück und den einsamen, leeren Raum, der es umgibt. Es gibt Prozesse im Universum, die Materie kollabieren lassen und so dicht zusammenpressen, dass zwischen dem Nukleus und den Elektronen, die ihn umgeben, kein Platz mehr frei bleibt. In diesem Zustand erreicht die Materie die Dichte eines Atomkerns. Innerhalb solcher Sterne liegt jeder Nukleus gewissermaßen Wange an Wange zu seinen Nachbar-Nuklei.

Die Objekte mit solch außergewöhnlichen Eigenschaften bestehen zufällig größtenteils aus Neutronen – ein Bereich des Universums mit superhoher Dichte.

In unserer Zunft benennen wir die Dinge in der Regel so, wie wir sie sehen. Große rote Sterne nennen wir *Rote Riesen*. Kleine weiße Sterne heißen bei uns *Weißer Zwerge*. Wenn die Sterne aus Neutronen bestehen, heißen sie *Neutronensterne*. Sterne, bei denen wir ein Pulsieren beobachten, sind *Pulsare*. In der Biologie kommen sie mit ellenlangen lateinischen Begriffen um die Ecke. Mediziner schreiben Rezepte in einer Art Keilschrift, die kein Patient versteht, vom Apotheker jedoch beherrscht wird. In der Biochemie hat der Name des beliebtesten aller Moleküle zehn Silben: Desoxyribonukleinsäure. Der Anfang allen Raums und aller Zeit, Materie und Energie im Kosmos heißt dagegen schlicht

Urknall oder *Big Bang*. Wir sind einfache Leute, mit einem ziemlich einsilbigen Lexikon. Das Universum ist schließlich kompliziert genug, wozu also noch komplizierte Wörter erfinden, nur um Sie noch mehr zu verwirren?

Darf's noch etwas mehr sein? Im Universum gibt es Orte, an denen die Schwerkraft so stark ist, dass kein Licht mehr durchkommt. Sie fallen in diesen Raum und kommen nicht mehr heraus. Diese Orte heißen *Schwarze Löcher*. Wieder haben wir mit ziemlich wenigen Silben alles gesagt.

Wie dicht ist ein Neutronenstern? Packen Sie eine Herde mit 100 Millionen Elefanten in die Hülle eines Lippenstifts. Anders ausgedrückt: Wenn Sie 100 Millionen Elefanten auf eine Seite einer Wippe setzen und eine Lippenstiftöhle angefüllt mit der Materie eines Neutronensterns auf die andere Seite, dann ist die Wippe im Gleichgewicht. Ganz schön dicht, das Zeug, finden Sie nicht?

Wie sieht es mit der Temperatur aus? Ein heißes Thema. Beginnen wir mit der Oberfläche der Sonne. Etwa 6000 Kelvin – 6000 K (eine Temperaturangabe in Kelvin entspricht der Temperatur in Grad Celsius plus 273). Da verdampft alles, was in die Nähe kommt. Deshalb besteht die Sonne aus Gas, denn bei der Temperatur verdampft ja alles. Zum Vergleich: Die durchschnittliche Temperatur auf der Erdoberfläche beträgt nur 287 K.

Welche Temperaturen haben wir im Zentrum der Sonne? Sie haben es wahrscheinlich bereits erraten: Im Kern ist die

Sonne noch viel heißer als an der Oberfläche. Im Kern liegen wir bei ungefähr 15 Millionen K.

Kühlen wir uns ein bisschen ab. Welches ist die Temperatur des gesamten Universums? Es hat tatsächlich eine Temperatur – die ist vom Urknall übriggeblieben. Am Anfang, vor 13,8 Milliarden Jahren, war sämtlicher Raum, alle Zeit, Materie und Energie, die Sie sehen, bis hinaus in 13,8 Milliarden Lichtjahren Entfernung, ganz dicht zusammengequetscht. (Ein Lichtjahr ist die Strecke, die das Licht bei einer Geschwindigkeit von 300 000 Kilometern pro Sekunde in einem Jahr zurücklegt – circa 10 Billionen Kilometer). Das im Entstehen begriffene Universum war eine Sekunde nach seiner Geburt extrem heiß, um die 10 Milliarden K, ein brodelnder Kessel aus Materie und Energie. Seitdem hat die kosmische Ausdehnung das Universum auf ganze 2,7 K heruntergekühlt.

Diese Ausdehnung und Abkühlung setzen sich bis heute fort. So beunruhigend es auch sein mag, alles spricht dafür, dass wir uns auf einer Reise ohne Wiederkehr befinden. Wir wurden beim Urknall geboren und dehnen uns immer weiter aus. Die Temperatur wird immer weiter sinken, bis auf 2 K, dann auf 1 K, dann ein halbes Kelvin, wir nähern uns asymptotisch dem absoluten Nullpunkt an. Letztendlich dürfte die Temperatur des Universums bei nahezu 7×10^{-31} K liegen (oder 0,7 Millionstel-Billionstel-Billionstel eines Grads über dem absoluten Nullpunkt). Grund dafür ist ein Effekt, den

Stephen Hawking entdeckt hat und auf den wir in Kapitel 8 zu sprechen kommen werden. Sehr beruhigend ist diese Tatsache allerdings nicht. Die Sterne werden damit zum Ende kommen, ihren gesamten thermonuklearen Treibstoff zu verschmelzen, und bei einem nach dem anderen werden die Lichter ausgehen, und sie werden vom Nachthimmel verschwinden. Interstellare Gaswolken erzeugen zwar neue Sterne, aber natürlich geht das auf Kosten ihres Gasvorrats. Sie fangen an mit Gas, Sie erzeugen Sterne, die Sterne werden alt, und zurück bleibt eine Leiche – die Endprodukte am Ende der Sackgasse der stellaren Evolution: Schwarze Löcher, Neutronensterne und Weiße Zwerge. Das geht so lange weiter, bis alle Lichter der Galaxie erloschen sind, eines nach dem anderen. Die Galaxie wird dunkel. Das Universum wird dunkel. Damit bleiben Schwarze Löcher zurück, die nur einen schwächlichen Lichtschein abstrahlen – auch das nach einer Vorhersage von Stephen Hawking.

Und so endet der Kosmos. Nicht in einem Feuerwerk, sondern eiskalt. Und nicht mit einem gewaltigen Knall, sondern mit einem kläglichen Wimmern.

Ich wünsche Ihnen einen schönen Tag! Und herzlich willkommen im Universum.

KAPITEL 2

PLUTOS PLATZ IM SONNENSYSTEM

Neil deGrasse Tyson

Das Rose Center am American Museum of Natural History in New York, dessen Direktor ich bin, zeigt in einem großen Glaswürfel eine Kugel mit einem Durchmesser von rund 27 Metern. In der oberen Hälfte der Kugel befindet sich die Kuppel des Hayden-Planetariums, in der unteren das Big Bang Theater, das den Besuchern eine fantastische Simulation des Urknalls zeigt. Die Konstruktion unterstreicht, dass das Universum Kugeln liebt – in Erkenntnis der Tatsache, dass sich die Gesetze der Physik dazu verschwören, Dinge rund zu machen, seien es nun Sterne, Planeten oder Atome. Ausgehend von einer runden baulichen Struktur setzten wir es als Ausstellungsstück ein, das es uns ermöglicht, die