



ULRICH WALTER, geboren 1954, studierte Physik und reiste 1993 mit der Raumfähre Columbia ins All. Für die fast zehn Tage im Erdorbit musste er einen Reisekostenantrag stellen. Heute ist er Professor für Raumfahrttechnik an der TU München, wobei eines seiner Spezialgebiete die Satelliten-Technik und Abbildung der Erde von ganz oben ist. Er forscht und schreibt über das Weltall.

Im Schwarzen Loch ist der Teufel los in der Presse:

»Sein Buch ist kurzweilig und erfrischend zu lesen.«

Spektrum

»Unterhaltsam und wissenschaftlich zugleich.«

ARD

Ulrich Walter

Im Schwarzen Loch ist der Teufel los

Astronaut Ulrich Walter
erklärt das Weltall



PENGUIN VERLAG

Die Originalausgabe erschien 2016 im Verlag
Komplett-Media, München/Grünwald.

Sollte diese Publikation Links auf Webseiten Dritter enthalten,
so übernehmen wir für deren Inhalte keine Haftung, da wir uns diese
nicht zu eigen machen, sondern lediglich auf deren Stand zum Zeitpunkt
der Erstveröffentlichung verweisen.



Penguin Random House Verlagsgruppe FSC® N001967

3. Auflage

Copyright © dieser Ausgabe 2019 Penguin-Verlag, München

in der Penguin Random House Verlagsgruppe GmbH,

Neumarkter Straße 28, 81673 München

Copyright © der Originalausgabe 2016

by Verlag Komplett-Media GmbH

Robert-Koch-Straße 38, 82031 Grünwald

Umschlag: bürosüd, München, unter Verwendung
einer Vorlage von Marco Slowik, München

Satz: Daniel Förster, Belgern

Druck und Bindung: GGP Media GmbH, Pößneck

Printed in Germany

ISBN 978-3-328-10307-3

www.penguin-verlag.de

INHALT

Editorial	9
Space rocks!	14
Wie kann das Universum aus dem Nichts entstehen?	19
Der Urknall – Was war davor?	20
Der Urknall – Was war direkt danach?	24
Echo des Urknalls entdeckt? Sensationsfund oder viel Lärm um nichts?	29
Eine kurze Geschichte unseres Universums	34
Einsteins Theorien und unsere heutigen Beweise dafür	39
Einsteins Allgemeine Relativitätstheorie für Dummies	40
Einstein-Trilogie – Nichts fliegt schneller als das Licht!	46
Einstein-Trilogie – Das Zwillingsparadox	50
Einstein-Trilogie – Bewegen sich Galaxien mit Überlichtgeschwindigkeit?	56
2:0 für Einstein – Gravitationswellen beweisen Relativitätstheorie	61
Die Grundlagen unseres Universums	67
Unser Universum – Wie für uns gemacht?	68
Wie warm ist es im Weltraum?	73

Was ist eigentlich Gravitation?	77
Was ist Dunkle Materie?	82
Was ist Dunkle Energie?	86
Warum kreisen Himmelskörper?.....	90
Warum rotieren Himmelskörper?.....	93
Schwarze Löcher für Anfänger	97
Wurmlöcher für Anfänger	103
Kann negative Energie Wurmlöcher stabilisieren?	108
Wie groß ist unser flaches Universum?.....	113
Raumkurven – Wie sieht unser Universum aus?	118
Erdähnliche Planeten gefunden, wo sind die Außerirdischen?.....	124
Woher kommt das Wasser unserer Ozeane?	130
Das Ende aller Dinge – Der Big Rip	134
Das Ende aller Dinge – Ein falsches Vakuum?.....	137
Gibt es Parallelwelten? – Die Theorie	141
Gibt es Parallelwelten? – Das Experiment	146
Warum sind wir – und vielleicht nur wir?	151
Das anthropische Prinzip	152
Zu Hause im Universum	157
Sind wir allein im Universum?.....	162
Wo sind die Außerirdischen dort draußen?	167
Wir sind nicht allein!	173
Wie sehen Außerirdische aus?	178
Warum ein Alien-Beweis in zehn Jahren totaler Unsinn ist .	190
So würde eine Alien-Invasion wirklich ablaufen	196
Warum wir nie mit Außerirdischen kommunizieren werden .	202

»Sie verlassen jetzt die Erde« – Unser Sonnensystem	209
Waren wir auf dem Mond? – Ursprünge des Moon Hoax	210
Waren wir auf dem Mond? – Na klar!	214
Wem gehört der Mond?	224
Terraforming Mars	229
Wann kommt die erste bemannte Mars-Mission?	234
Mars-One-Mission – Was ist da dran?	240
NASAs Mars-Pläne – Das Auf und Ab von Apollo bis heute. . .	246
Weshalb Sie sich den 2. August 2048 notieren sollten	251
Was ein Astronaut vom <i>Marsianer</i> hält	257
Die verblüffende Welt des Pluto	264
Hinweise	271
Abbildungsverzeichnis	272
Über den Autor	273

EDITORIAL

Unser Universum ist ein höllischer Ort, in dem wir mit unserer Erde wie auf einer Insel der Seligen leben. In unserer Sonne fusioniert Wasserstoff bei 40 Millionen Grad Celsius, in größeren Sternen beträgt die Spitztemperatur kurz vor einer Supernova-Explosion gar 10 Milliarden Grad – wirklich höllisch. Nur die gigantische Schwerkraft solcher Sterne kann sie bei solchen Temperaturen noch zusammenhalten.

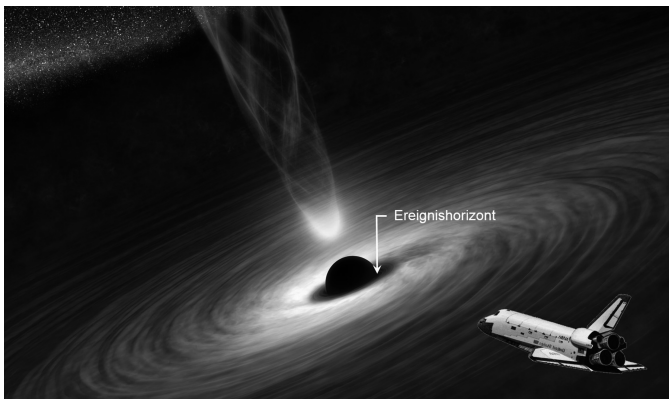
Die teuflischsten Orte in diesem höllischen Universum sind jedoch die Schwarzen Löcher. »Schwarze Löcher«, das hört sich schon gruselig an. In der Tat übersteigt das, was dort passiert, unser Vorstellungsvermögen. In diesem Buch werde ich aber versuchen, das Unvorstellbare durch Vergleiche mit uns bekannten Dingen doch irgendwie verständlich zu machen. Trotzdem, die Realität ist doch viel, viel komplizierter als diese Vergleiche.

Nehmen wir die Relativitätstheorie Einsteins (siehe meine drei Artikel der *Einstein-Trilogie*). Erst sie hat es uns ermöglicht, das, was dort draußen passiert, mathematisch richtig wiederzugeben. Dazu zählt zum Beispiel die Tatsache, dass Zeit zwar von jedem gleich schnell empfunden wird, sie aber je nach Eigengeschwindigkeit oder Schwerfeld, in dem man sich gerade befindet, gedehnt oder gestaucht ist. Dasselbe passiert auch mit dem Raum. Raum und Zeit werden insbesondere in der Nähe eines Schwarzen Loches bis ins Unendliche deformiert. Wir können uns das nicht vorstellen, weil wir selbst Teil dieses Raumes sind und wir daher mitdeformiert werden. Um das zu verstehen, stelle man sich einen Flächenmenschen vor, das ist

so ein Vergleich, um das Unvorstellbare vorstellbar zu machen, der in (nicht auf!) einer Kugeloberfläche lebt. Die Oberfläche ist gekrümmt, und weil der Flächenmensch Teil der Oberfläche ist, ist er mitgekrümmt und merkt nichts von seiner Krümmung. Die erkennt man nur als Außenstehender.

SCHWARZE LÖCHER, SO GROSS WIE EINE NADELSPITZE!

Weil der Raum bis ins Unendliche gekrümmt ist, gibt es Erscheinungen, die einfach verblüffen. Stellen Sie sich zunächst die Größe unserer Sonne vor. Sie hat ein 1,4 millionenfach größeres Volumen als die Erde. Wenn unsere Erde eine Erbse wäre, dann hätte die Sonne einen Durchmesser von etwa einem Meter. Nun stellen Sie sich 4 Millionen Sonnen als eine Massenkugel vor, die hätte in diesem Vergleich einen Durchmesser von 160 Meter. In der Realität hat sie den Durchmesser von 100 Millionen Kilometer! Das Schwarze Loch im Zentrum unserer Milchstraße hat genau diese Masse von 4 Millionen Sonnen. Aber, weil der Raum am Ort, dort wo sich das Schwarze Loch befindet, unendlich gestaucht ist, machen diese 4 Millionen Sonnenmassen keine Kugel von 100 Millionen Kilometer Durchmesser aus, sondern schrumpfen auf einen Punkt so groß wie eine Nadelspitze zusammen. Ein Schwarzes Loch mit Milliarden von Sonnenmassen hat die Abmessungen einer Nadelspitze! Ist das nicht teuflisch? Diese unglaubliche Tatsache wurde erst in den vergangenen Jahrzehnten zur Gewissheit, weil wir Raum- und Zeitschrumpfungen durch Experimente im kleineren Maßstab prinzipiell bestätigen konnten. Einstein hatte also recht.



Künstlerische Darstellung des Anflugs eines Shuttles auf ein Schwarzes Loch, von dem man nur den Ereignishorizont, die Oberfläche einer schwarzen Kugel, sieht (Bild: NASA/U. Walter)

EINE TEUFLISCHE ERKUNDUNGSREISE

Teuflisch wäre auch eine Reise als Astronaut in einem Raumschiff zu einem Schwarzen Loch, aber doch anders als man sich das vielleicht vorstellt. Was würde man von dem Loch sehen? Nehmen wir an, es ist das Schwarze Loch in unserer Milchstraße. Aus großer Entfernung sähe man dann vor sich eine schwarze Kugel mit etwa 17 Sonnendurchmessern. Diese Kugel ist nicht das Schwarze Loch selbst, sondern ihre Oberfläche, der sogenannte Ereignishorizont, der den Loch-Punkt verhüllt. Was die schwarze Kugel ist und was in ihr passiert, sehen wir gleich.

Außerdem sähen wir glühende Materie in einer Scheibe in einem großen Abstand um das Loch kreisen, die sich ihm dabei langsam nähert. Diese Materie, das Überbleibsel zerrisse-

ner Sterne, die dem Loch zu nahe gekommen sind, glüht umso heller, je näher sie dem Loch kommt. Große Sterne werden schon in großer Entfernung zerbröseln, kleinere Gegenstände, wie wir, erst später. Aber noch geht es uns ganz gut.

Wenn wir im Abstand von 24 Millionen Kilometern vom Ereignishorizont in einen Orbit einbiegen, das ist etwa die Hälfte des Abstands zwischen Merkur und Sonne, dann müssen wir bereits verflucht aufpassen. Denn dieser Abstand ist die innere Grenze des Bereiches, wo wir noch eine stabile Umlaufbahn haben, wir fliegen im freien Fall um das Schwarze Loch herum und brauchen dabei nichts tun. Dabei haben wir aber schon fast Lichtgeschwindigkeit, umrunden das Loch also alle 12,5 Minuten.

DER HÖLLENRITT IN EIN SCHWARZES LOCH

Wenn wir uns nun dem Loch etwas weiter nähern, begeben wir uns auf einen unumkehrbaren Höllenritt. Zunächst wird unser Orbit instabil, was bedeutet, wir müssen ständig die Antriebe feuern, damit wir die Bahn beibehalten. Tun wir das nicht und sind bei 6 Millionen Kilometer Abstand vom Ereignishorizont angekommen, nützen uns auch die besten Antriebe nichts mehr, wir werden unweigerlich ins Schwarze Loch stürzen. Bei diesem Abstand fliegt auch Licht nicht mehr gradlinig am Loch vorbei, sondern umkreist es einmal alle 6,5 Minuten. Licht, das vom Loch direkt nach außen fliegt, kann dem Loch aber noch entkommen. Wenn wir den Ereignishorizont erreicht haben, ist aber auch damit Schluss. Wir, mitsamt allem, was sich um das Loch herum bewegt, einschließlich des Lichts, egal wie es anfangs fliegt, fällt auf Nimmerwiederse-

hen ins Schwarze Loch. Das ist übrigens der Grund dafür, warum die schwarze Kugel um das Loch herum schwarz erscheint. Wenn nämlich nicht einmal mehr Licht der Kugel entkommen kann, fällt von dort auch kein Licht mehr in das Auge eines Betrachters, und daher erscheint der Bereich stockdunkel.

Dass wir uns bereits in der schwarzen Kugel befinden, davon merken wir aber nichts, denn über uns, aber auch seitlich, fällt ständig neues Licht nach, sodass es recht hell um uns herum ist. Dann geht aber alles sehr schnell. Innerhalb des Bruchteils einer Sekunde wird das Shuttle durch die sogenannten Gezeitenkräfte, also der Zunahme der Schwerkraft in Flugrichtung, zerrissen, dann unser Körper zerfetzt. Schließlich lösen sich die Fetzen in einzelne Atome auf, und die wiederum werden in einzelne Elementarteilchen aufgespalten, die auf das Zentrum treffen, dort wo die 4 Millionen Sonnenmassen lagern und durch unsere Körpermassen weiter anwachsen. Aber davon merken wir schon nichts mehr.

Schwarze Löcher sind also Nimmersatts, sie werden mit der Zeit immer schwerer, bis sie irgendwann die gesamte Materie im Universum in sich aufgesaugt haben. Aber bis dahin ist es noch sehr, sehr lange hin, viele Milliarden Milliarden Milliarden Jahre. Bis dahin lassen wir uns faszinieren von den anderen Geheimnissen, die uns dieses Universum zu bieten hat.

Begleiten Sie mich in diesem Buch auf dieser Erkundungsreise durch unser Universum.

Ulrich Walter

D-2 Astronaut

SPACE ROCKS!

Mehr als 100 Astronauten aus allen Ländern trafen sich im September 2015 in Stockholm und begeisterten bei ihren Besuchen in Schulen landesweit Tausende Schüler – und die Schüler uns.

Es ist inzwischen eine alte Tradition. Einmal im Jahr treffen sich Astronauten irgendwo auf der Welt, nicht nur, um sich wiederzusehen, sondern auch um wichtige Raumfahrtthemen zu diskutieren und sich mit jungen Menschen zu treffen.

WAS ASTRONAUTEN VON RAUMFAHRERN UNTERSCHIEDET

Es ist schon ein sehr exklusiver Club, die ASE, die Association of Space Explorers, also die Vereinigung aller geflogenen Astronauten weltweit. Nicht jeder, der im Weltraum war, sogenannte Raumfahrer (space travelers), darf Mitglied werden, da ist die ASE pingelig. Tatsächlich stammt von der ASE die einzige Definition, wer Astronauten sind, und hier zählt jedes Wort: »[Ein Astronaut ist] jede Person, die wenigstens eine Erdumrundung in einem Raumfahrzeug vollzogen hat.«

Es gibt halt auch Weltraumtouristen, die lediglich suborbital fliegen, also einen kurzen Hopser über 100 Kilometer Höhe machen, dort wo laut IAF der Weltraum beginnt, und gleich wieder im Sturzflug zurückfliegen. Solche Raumfahrer waren zwar im Weltraum und erhalten von Unternehmen wie Virgin

Galactic, die solche Flüge für 250.000 \$ anbieten, auch ein schönes Zertifikat, das das bestätigt, aber sie sind eben keine orbitalen Astronauten. Sie bekommen von den Amerikanern sogar die sogenannten »Astronaut Wings«, weil nach amerikanischer Tradition jeder, der über 50 nautische Meilen – etwa 80 Kilometer – hoch fliegt, ein solches Abzeichen bekommt.

WIE FIRMEN MIT RAUMFAHRT GELD MACHEN

Aber das ist nach internationalen Normen nichts wert (siehe mein Kapitel *Wem gehört der Mond?*), genauso wie man beim Amerikaner Dennis Hope Grundstücke auf dem Mond kaufen kann und dafür auch ein Zertifikat bekommt. Nach amerikanischem Recht ist dagegen nichts einzuwenden, aber nach internationalem Recht, dem sogenannten Outer Space Treaty, ist die Beanspruchung von Territorien außerhalb der Erde nicht zulässig.

Dass Weltraumtouristen, die für wenige Minuten in den Weltraum hopsen und dafür Astronaut Wings erhalten, trotzdem keine Astronauten sind und nicht in die ASE aufgenommen werden, dafür habe ich bereits bitterböse E-Mails von denen erhalten, die solche Flüge gekauft haben. Aber da ist die ASE hart.

TOURISTEN-ASTRONAUT-SEIN KOSTET

Es gibt natürlich auch Weltraumtouristen, die auf der Internationalen Raumstation waren und somit viele Erdumkreisungen gemacht haben. Sie sind daher ASE-Mitglieder. Dieses Jahr waren zwei von ihnen dabei, die bildhübsche Anoushi Ansari und der steinreiche Richard Garriott. Er ist übrigens der Sohn des berühmten Apollo-Astronauten Owen Garriott. Auch er ist bei

allen ASE-Treffen dabei. Die Garriotts gibt's bei den ASE-Treffen also immer im 4er-Pack mit ihren Frauen. Geld ist für ISS-Touristen übrigens nicht unwichtig, denn ein Flug dorthin kostet zurzeit 45 Millionen \$. Beneidenswert, die Menschen, die so etwas aus der Portokasse zahlen können. Berufsastronaut zu werden und nichts zu zahlen, ist aber auch nicht schlecht.

Die Tradition der ASE will es, dass das Treffen immer in einem Land eines geflogenen Astronauten ausgerichtet wird. Im besagten Jahr 2015 hatte der ESA-Astronaut Christer Fuglesang nach Schweden eingeladen. Man traf sich am 20. September für vier Tage im Grand Hotel in Stockholm, wo der komplette sechste Stock für uns reserviert war. Auf dem Programm standen Besuch der Königlich Technischen Universität, KTH, wo wir viel mit den Studenten weltraumfachlich diskutierten, Empfang und Shakehands mit König Carl Gustaf und seiner Tochter Victoria gleich im Schloss gegenüber und dem wichtigsten Teil unserer jährlichen Mission, dem sogenannten Community Day.

COMMUNITY DAY!

An diesem Tag schwirren alle Astronauten in Autos oder Fliegern manchmal sogar in die entferntesten Landesteile aus, um Schulen zu besuchen und dort die Schulkinder zu begeistern. In diesem Jahr hatte ich es nicht weit, ich fuhr in meinem Flight Suit, ein Muss für solche Besuche bei Kindern, in die Deutsche Schule am nördlichen Rand des Stadtkerns von Stockholm. Mit mehr als 400 Jahren ist sie eine der ältesten deutschen Schulen weltweit und mit etwa 600 Schülern auch ziemlich groß. In der Aula warteten aufgeregte Schüler im Alter zwischen 12 und 16

Jahren. Ein Video von mir, das einen Flug der ISS über die Erde bei Nacht mit den wunderschön erleuchteten Städten und den magisch flatternden Nordlichtern zeigte, machte den Anfang der Veranstaltung. Danach gab es Wissenschaft im Weltraum light: »Kocht Wasser im Kochtopf im Weltraum? (Antwort: Nein) und »Brennt eine Kerze in der Schwerelosigkeit?« (Antwort: Ja, aber ganz anders). Dazu Bilder der entsprechenden Experimente, was selbst für mich immer wieder verblüffend aussieht.

FÄK-CHÖ

Am Donnerstag reisten wir weiter nach Süden zu der Stadt mit dem unaussprechlichen Namen Växjö (ausgesprochen: Fäk-chö, wobei das »ch« ein für Deutsche kaum aussprechbarer tiefliegender Rachenlaut ist). Dort gab es am Freitag einen weiteren Community Day. Mein Shuttle-Kollege Tom Henricks und ich besuchten eine kleine Grundschule in Timfors. Etwa 80 Kinder in gnadenlos toller Stimmung. Die Eltern hatten im Vorhof eine etwa vier Meter hohe Rakete aus Edelstahl einzementiert, auf der wir uns mit Unterschriften verewigen mussten und daneben, auf einem kleinen Stück Rasen, haben wir unter dem Gejohle aller Kinder einen Apfelbaum gepflanzt. Dafür revanchierten Tom und ich uns mit Bildern der Klassiker: Wie geht man im Weltraum auf die Toilette? Wie isst man? Wie wäscht man sich die Haare? Und wie schläft man in der Schwerelosigkeit des Alls?

DAS BESTE ZUM SCHLUSS

Am Freitag mussten die Kinder dann angeblich in einer Schulstunde ihre Erlebnisse des Besuches in kurzen Sätzen zusam-

menfassen, die uns bei der Abschiedsfeier am vergangenen Sonntag präsentiert wurden. Es machte einfach Spaß, deren aufrichtige Begeisterung zu lesen. Ein kleiner blonder Junge schrieb: »Das war der schönste Tag in meinem Leben!« und Nancy, 9 Jahre, formulierte es kurz und knapp: »Space rocks!«.

WIE KANN DAS
UNIVERSUM
AUS DEM
NICHTS
ENTSTEHEN?

1

DER URKNALL – WAS WAR DAVOR?

Begann unser Universum erst mit dem Urknall,
oder gab es bereits davor etwas?

Diese Frage ist zurzeit eine der interessantesten in der Kosmologie. So eigenartig es klingt, aber ob es bereits vor dem Urknall etwas gab, hängt davon ab, woran die Kosmologen glauben!

WAS IST DAS PROBLEM?

Eins nach dem anderen. Die Kosmologen sind diejenigen Wissenschaftler, die sich offiziell mit dem Ursprung und der Entwicklung unseres Kosmos, also Universums, beschäftigen. Eines wissen wir heute mit ziemlicher Sicherheit: Unser Universum entstand vor $13,80 \pm 0,02$ Milliarden Jahren. Und alles begann wahrscheinlich an einem winzigen Punkt. Aber hier beginnen bereits die Probleme. Da ist zunächst das Verständnisproblem: Denn eine oft gestellte Frage lautet: »Wo war dieser Punkt in Universum?« Diese Frage ist ein einziges logisches Missverständnis, denn beim Urknall handelt es sich nicht um einen Punkt im Raum, sondern unser dreidimensionales Universum, also der Raum selbst war zu einem Punkt zusammengeschnürt. Die nächste Frage, die dann gleich darauf gestellt wird, ist: »Was war um diesen kleinen Punkt herum? Also, worin ist unser Universum eingebettet?« Die Antwort lautet: Nir-

gendworin. Nur weil wir uns etwas nur dann vorstellen können, wenn es in einem größeren, ihn umgebenden Raum ist, muss das nicht auch so sein. Mathematisch ausgedrückt lautet das einfach: Das dreidimensionale, stark gekrümmte, kompakte, punktförmige Universum war einfach da.

WAS IST EIN PUNKT?

Jetzt das andere Problem. Wie groß war anfänglich der zusammengeschnurrte Punkt? Genau daran scheiden sich die Geister der Wissenschaftler. Bis vor wenigen Jahren herrschte die Meinung vor, es sei wirklich ein mathematischer Punkt, eine sogenannte Singularität mit Dimension Null, gewesen. Der Grund dafür waren die Einstein'schen Gleichungen der Allgemeinen Relativitätstheorie. Sie beschreiben zuverlässig alles was kosmologisch ist und insbesondere bei großen Massendichten passiert. Wenn man diese auf unser Universum anwendet, erhält man ein mit der Zeit expandierendes Universum, das, wenn man es zurückverfolgt, in einer Singularität vor 13,80 Milliarden Jahren beginnt. Obwohl Einsteins Allgemeine Relativitätstheorie bis heute vielfach so exakt bestätigt wurde, dass es keinen Zweifel mehr gibt, dass sie zutrifft, hat sie dennoch ein bekanntes Problem, das man bis vor Kurzem außer Acht gelassen hat. Sie ist eine klassische Feldtheorie im Makrokosmos, das heißt, sie beschreibt Wechselwirkungen, wie etwa elektrische Ladungswchselwirkung, durch Felder (elektrisches Feld). Im Mikrokosmos, also auf Elementarteilchenebene, gelten quantenmechanische Verhältnisse, und da braucht man Quantenfeldtheorien. Die kennen wir für alle bekannten vier Wechselwirkungskräfte, mit einer Ausnahme: Die Quantengravitati-

onstheorie. Aber genau die bräuchte man, um die Verhältnisse am Urknall zu beschreiben. Es gibt zwar erste Ansätze für eine Quantenfeldtheorie, die die Quantengravitation beinhaltet, etwa die 10+1-dimensionale Stringtheorie (10 Raumdimensionen, eine Zeitdimension) oder die Theorie der Schleifenquantengravitation, aber von beiden wissen wir nicht, ob sie richtig sind. Aber eines haben alle Quantenfeldtheorien gemeinsam, ihre kleinste Einheit ist ein Quant, also ein ausgedehntes Etwas – in der Stringtheorie ist es ein String von der Plancklänge 10^{-32} cm, was verdammt klein ist – und keine Singularität.

WAS ALSO WAR VOR DEM URKNALL?

Aber genau das macht den entscheidenden Unterschied. Wenn nämlich der Urknall nicht in einem Punkt, sondern mit einem ganz kleinen Raumgebiet entstand, dann bleiben beim Rückwärtsrechnen die grundlegenden Eigenschaften des Universums – zum Beispiel Anzahl der String-Raumdimensionen = 10 – in diesem Raumgebiet erhalten. Dies ermöglicht einem aber im Prinzip auch, noch weiter zurückzurechnen, also vor den Urknall. Das geht nicht, wenn man nur eine Singularität mit Dimension Null hat, denn die Informationsmenge eines strukturlosen Punktes beträgt nur 1 Bit – entweder er ist da oder nicht da. Daraus kann man nicht ablesen, ob und was es davor gegeben hat. Genau das ist das Problem einer Singularität. Während also die klassischen Kosmologen immer behauptet haben, die Welt sei mit dem Urknall entstanden und davor habe es nichts gegeben, behaupten die Quantenfeld-Kosmologen, vor dem Urknall könnte es etwas gegeben haben, muss es aber nicht. Was genau es davor gegeben haben könnte, werden

uns aber auch die Quantenkosmologen nie genau sagen können. Denn viel mehr Informationen als über den grundlegenden Aufbau eines Universums sind in einem Quantum nicht Platz. Selbst wenn es also vor unserem Universum ein anderes gegeben hat, in dem wahrscheinlich dieselben physikalischen Gesetze geherrscht haben wie bei uns, werden wir nie erfahren, wie groß es damals war und ob es dort erdähnliche Planeten gegeben hat oder vielleicht sogar Zivilisationen. Ganz zu schweigen davon, dass wir mit denen nie Kontakt haben werden können.

VON EWIGKEIT ZU EWIGKEIT

Eines ist jedoch noch ganz wichtig zu wissen. Während die Allgemeine Relativitätstheorie besagt, dass mit dem Urknall nicht nur unser Raum, sondern auch die Zeit entstand, weswegen es in der Relativitätstheorie keinen Sinn ergibt zu fragen, was vor dem Urknall war, sehen das die Quanten-Kosmologen etwas anders. Die Zeit bleibt als Beschreibungsgröße voll erhalten und lässt sich durch den Urknall rückwärts verlängern. Statt also zu sagen: »Unser Universum hatte vor 13,8 Milliarden Jahren einen Anfang und dehnte sich von da an in alle Ewigkeiten aus«, könnte es sein, dass es bereits seit Ewigkeiten ein Universum gab, das kollabierte, in einem neuen Knall vor 13,8 Milliarden Jahren sich zu unserem neuen Universum aufblähte und sich in alle Ewigkeiten weiter ausdehnen wird und daher nie wieder rekollabieren wird.

Amen

DER URKNALL – WAS WAR DIREKT DANACH?

Was passierte direkt nach dem Urknall unseres Universums, und was war die Inflationsphase?

Die für unser Universum entscheidenden Dinge passierten in der Zeit vom Urknall bis 0,00000000000000000000000000000001 Sekunden, also 10^{-32} s, danach. Diese extrem kurze Zeitspanne wollen wir uns im Folgenden anschauen. Obwohl man über diesen Zeitraum bisher nur indirekt Aussagen machen konnte, lässt sich das heute sogar berechnen. Die Veröffentlichung dazu war die wohl aufsehenerregendste des Jahres 2013¹. Das entscheidende Ereignis in diesem Zeitraum war die sogenannte Inflationsphase von 10^{-35} s bis 10^{-32} s. Daher unterscheidet man grundsätzlich in die Präinflationsphase, 0 s bis 10^{-35} s, die Inflationsphase und die Postinflationsphase, 10^{-32} s bis heute.

PRÄINFLATIONSPHASE: URKNALL BIS 10^{-44} s

Wir können heutzutage nichts über die Zeit von 0 s bis 10^{-44} s aussagen. Letzteres ist die sogenannte Planckzeit. Mit der Planckzeit – oder ganz allgemein den Planck-Einheiten – endet der Gültigkeitsbereich unserer heute bekannten physikalischen Gesetze. Viel können wir über diese Zeit zwar nicht sa-

1 Nachzulesen: <http://bit.ly/2c3YIUX>

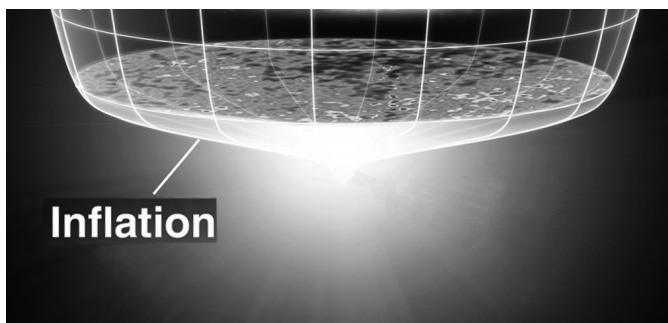
gen, aber es gibt wahrscheinlich auch nicht viel zu sagen, außer dass das Universum so extrem klein war, dass die Gesetze der Quantengravitation herrschten. Man glaubt, dass Raum und Zeit nicht wie heute sauber getrennt voneinander waren, sondern eine Art Raumzeitschaum bildeten. Es gab nicht wie heute vier separate Kräfte (gravitative, elektromagnetische, schwache und starke Kraft), sondern nur eine vereinheitlichte Kraft. Stellen Sie sich die vereinheitlichte Kraft wie Wasserdampf vor. Beim Abkühlen (des sich ausdehnenden Universums) kondensiert zuerst flüssiges Wasser (Gravitation) und beim weiteren Abkühlen Eis (eine der anderen Kräfte) heraus.

PRÄINFLATIONSPHASE: 10^{-44} s BIS 10^{-35} s

10^{-44} s nach dem Urknall hatte das Universum einen Durchmesser von nur etwa 10^{-26} Metern. Zu diesem Zeitpunkt entstand die Gravitationskraft als eigenständige Kraft, während die drei anderen Kräfte zur vermuteten sogenannten *großen vereinheitlichten Theorie* (Grand Unified Theory oder auch kurz GUT), deren Entwicklung ein aktuelles Forschungsgebiet ist, zusammenblieben. Die Quantenteilchen dieser GUT, also die Teile, die die Kraft zwischen den damals bereits existierenden Quarks und Leptonen vermittelten, wie etwa die Photonen der heutigen elektromagnetischen Kraft, nennt man X-Teilchen. Man muss sich das damalige Universum also als Suppe extrem dichtgepackter Quarks und Leptonen vorstellen, die durch die X-Teilchen und Gravitation wechselwirkten und sogar ineinander umgewandelt wurden. In dieser Phase hatten alle diese Teilchen noch keine Masse, und der Raum expandiert schnell, aber nicht extrem schnell.

INFLATIONSPHASE: 10^{-35} s BIS 10^{-32} s

10^{-35} s nach dem Urknall passierte zweierlei: Durch die Ausdehnung und damit verbundene Abkühlung des Universums verfestigte sich die starke Kraft, also die Kraft, die zwischen den Kernteilchen wirkt. Sie wird beschrieben durch die heute bekannte *Quanten-Chromodynamik* (QCD) mit den sogenannten Gluonen als kraftvermittelnde Teilchen. Zurück blieb die sogenannte *elektroschwache Kraft*. Weit wichtiger war aber die sogenannte Inflation, die ebenfalls bei 10^{-35} s begann.



Die Inflationsphase direkt nach dem Urknall. Horizontal der Raumbereich, die Zeit läuft von unten nach oben. (Bild: NASA/U. Walter)

INFLATION

Um es vorweg zu sagen: Man ist sich nicht sicher, ob es diese Inflation des Universums gab, aber sie erklärt viele wichtige Eigenschaften unseres Universums auf verblüffend einfache Weise, weshalb die meisten Kosmologen an sie glauben. Es gibt

aber einige namhafte Vertreter dieser Zunft, die das bestreiten, wie etwa Paul Steinhardt, der sein Modell des ekpyrotischen Universums dem entgegenstellt.

Die Inflation des Universums war eine extrem, extrem starke und kurzzeitige Expansion des Universums, die das Universum in jede der drei Raumrichtungen um mindestens 50 Größenordnungen explodieren ließ. Was war ihre Ursache? Der treibende Faktor war das Ungleichgewicht des Raumes. Was bedeutet das? Man muss sich das so vorstellen: Durch die relativ langsame Expansion in der zweiten Präinflationsphase erfuhr der Raum selbst, das sogenannte Vakuum, eine Anhebung seines Grundzustandes. Dadurch wurde es zum sogenannten *falschen Vakuum*. Das bedeutet, das Vakuum musste seine innere Struktur ändern, um zum heutigen richtigen Vakuum zu werden. Dadurch konnte es seine angehobene Grundzustandsenergie wieder so weit absenken, dass gigantische Mengen Energien – umgerechnet in Massen entspricht dies 10^{74} kg pro Kubikzentimeter! – in den Raum gepumpt wurden.

Dieser Inflations-Übergang bewirkte zweierlei. Erstens entstand mit dem strukturellen Übergang des Vakuums das im letzten Jahr indirekt durch die Higgs-Teilchen nachgewiesene Higgs-Feld. Dieses Feld verlieh durch den gigantischen Energiegewinn allen damals existierenden Teilchen ihre Massen. Außerdem führte dieser Strukturwandel zu der gigantischen Expansion des Universums. Wie man schnell nachrechnen kann, haben sich die Teilchen dabei mit weit über Lichtgeschwindigkeit voneinander entfernt. Wie kann das sein, wo doch Einsteins Relativitätstheorie Überlichtgeschwindigkeiten verbietet? Die Antwort: Nicht die Teilchen bewegten sich im Raum auseinander, sondern die im Raum ruhenden Teilchen