



# Das kleine 1x1 des Universums

# Das kleine 1x1 des Universums

Wann haben Sie das letzte Mal in einer mondlosen, klaren Nacht unter den Sternen gestanden? Der Blick in den Sternenhimmel kann ein unglaublich erhabener und friedlicher Moment sein. Er lässt uns spüren, wie klein und verletzlich wir Menschen sind und wie groß und gewaltig das Universum. So ähnlich fühlen Menschen womöglich seit tausenden von Jahren.

Diese Ehrfurcht ist geblieben, das Wissen hat sich gewandelt. Noch vor einigen hundert Jahren dachten die Menschen, die Erde sei eine Scheibe und der Himmel eine Kuppel, an der die Sterne angebracht sind. Heute wissen wir: Wir leben in einem riesigen Universum, unvorstellbar groß, mit Abermilliarden von Sternen und Galaxien. Und obwohl wir heute so viel mehr über den Kosmos wissen als unsere Vorfahren, steckt das Universum noch immer voller Rätsel: Schwarze Löcher, Dunkle Materie, Exoplaneten.

Quarks & Co hat bereits viele Reisen zu den Wundern unseres Universums unternommen.

In diesem iBook wollen wir für Sie zusammentragen, was wir über unser Universum wissen und welche Fragen noch offen sind ...



## Kapitel 1

---

# Ein Blick in die Unendlichkeit

## Wie wir unser Universum erforschen

---

Die Astronomie gilt als eine der ältesten Wissenschaften der Menschheit. Schon vor über 5000 Jahren beobachteten die Babylonier den Himmel systematisch. Damals hatten sie nur ihre Augen. Heute haben Astronomen moderne Teleskope, mit denen sie über 13 Milliarden Lichtjahre weit ins All schauen können.



# Der Blick ins Universum



Film 1.1 Wie weit können wir sehen?

Meistens haben wir nur einen Blick für das, was um uns herum auf der Erde passiert. Dabei gibt es auch über uns eine Menge zu sehen. Schon mit bloßem Auge können wir ziemlich weit in den



Ptolemäus war überzeugt, dass die Erde der Mittelpunkt des Weltraums sei

Weltraum blicken. Und frühere Generationen von Astronomen mussten sich darauf und auf einige mathematische Berechnungen verlassen.

So ist zum Beispiel das Ptolemäische Weltbild (nach dem griechischen Mathematiker, Astronomen

und Philosophen Claudius Ptolemäus) entstanden. Ptolemäus war überzeugt, dass die Erde der Mittelpunkt des Weltraums sei und dass alle anderen Himmelskörper sich auf Bahnen um sie herumbewegten.

Wir wissen heute, dass es anders ist. Die Beobachtung und Vermessung des Weltraums ergibt jeden Tag gigantische Datenmengen und mit neuen astronomischen Geräten wird der Blick ins Universum immer weiter ausgedehnt.

Der Mond ist rund 400.000 Kilometer von der Erde entfernt – etwa eine Lichtsekunde: Vom Mond bis zur Erde braucht das Licht etwas mehr als eine Sekunde.



Der Mond ist etwa eine Lichtsekunde von der Erde entfernt

Bei guten Bedingungen können wir mit bloßem Auge ungefähr 3.000 Sterne entdecken. Je dunkler die Umgebung, desto mehr Sterne sehen wir. Zum Beispiel den Doppelstern Alpha Centauri, vier Lichtjahre entfernt. Das sind 40 Billionen Kilometer.

Das weiteste Objekt, das wir ohne Hilfsmittel sehen können, ist die Andromeda-Galaxie – 2,5 Millionen Lichtjahre entfernt!

Mit einem Teleskop können wir noch tiefer ins Universum gucken und



Millionen Lichtjahre entfernt: Die Andromeda-Galaxie



Das Paranal-Observatorium in der chilenischen Atacama-Wüste



Die Sombrero-Galaxie, eine Spiralgalaxie im Sternbild Jungfrau



Eine junge Riesengalaxie, aufgenommen vom Weltraumteleskop Hubble

entdecken zum Beispiel den Kugel-Sternhaufen M 13, der nur schwach leuchtet.

Und es geht noch weiter: In der Atacama-Wüste in Chile stehen die größten Teleskope der Welt. Sie arbeiten ferngesteuert und können so tief ins All blicken wie kein anderes Teleskop auf der Erde.

Damit entdeckt man zum Beispiel den Carina-Nebel und die Sombrero-Galaxie. Und auch die Antennengalaxie können wir sehen. Bis ihr Licht bei uns auf der Erde ankommt, vergehen 75 Millionen Jahre.

Doch die Erdatmosphäre, Lichtverschmutzung und Luftverwirbelungen beeinträchtigen die Aufnahmen vieler Teleskope auf der Erde. Deshalb gibt es Teleskope direkt

im Weltall. Das Weltraumteleskop „Hubble“ macht Aufnahmen mit extrem langer Belichtungszeit. Das Ergebnis ist das Weitesten, was wir jemals gesehen haben: das „Ultra Deep Field“ – unzählige

Galaxien aus der Urzeit des Universums, rund 13 Milliarden Lichtjahre von der Erde entfernt.

Auch wenn wir schon Vieles entdeckt haben – der allergrößte Teil des Universums ist uns noch völlig unbekannt.

## Eine Nacht in meiner Sternwarte

*Von Ranga Yogeshwar*



Draußen ist es kalt, doch der Winter hat für Astronomen einen großen Vorteil: Die Nächte sind lang! Früher habe ich mein Teleskop jedes Mal neu aufgebaut. Ein enormer Aufwand, denn bis alles bereit

ist, vergeht schnell eine Stunde. Deshalb habe ich auf unserem Gartenschuppen ein Rolldach installiert. Alles ist dann an Ort und Stelle und man kann schnell loslegen. Manche Freunde nutzen auch Kuppeln, doch ich mag den offenen Himmel über mir. Heute Abend habe ich mir vorgenommen, unter anderem den Kometen Holmes zu verfolgen.

**20:30 Uhr**



Beispiel einer schlechten

## Kapitel 2

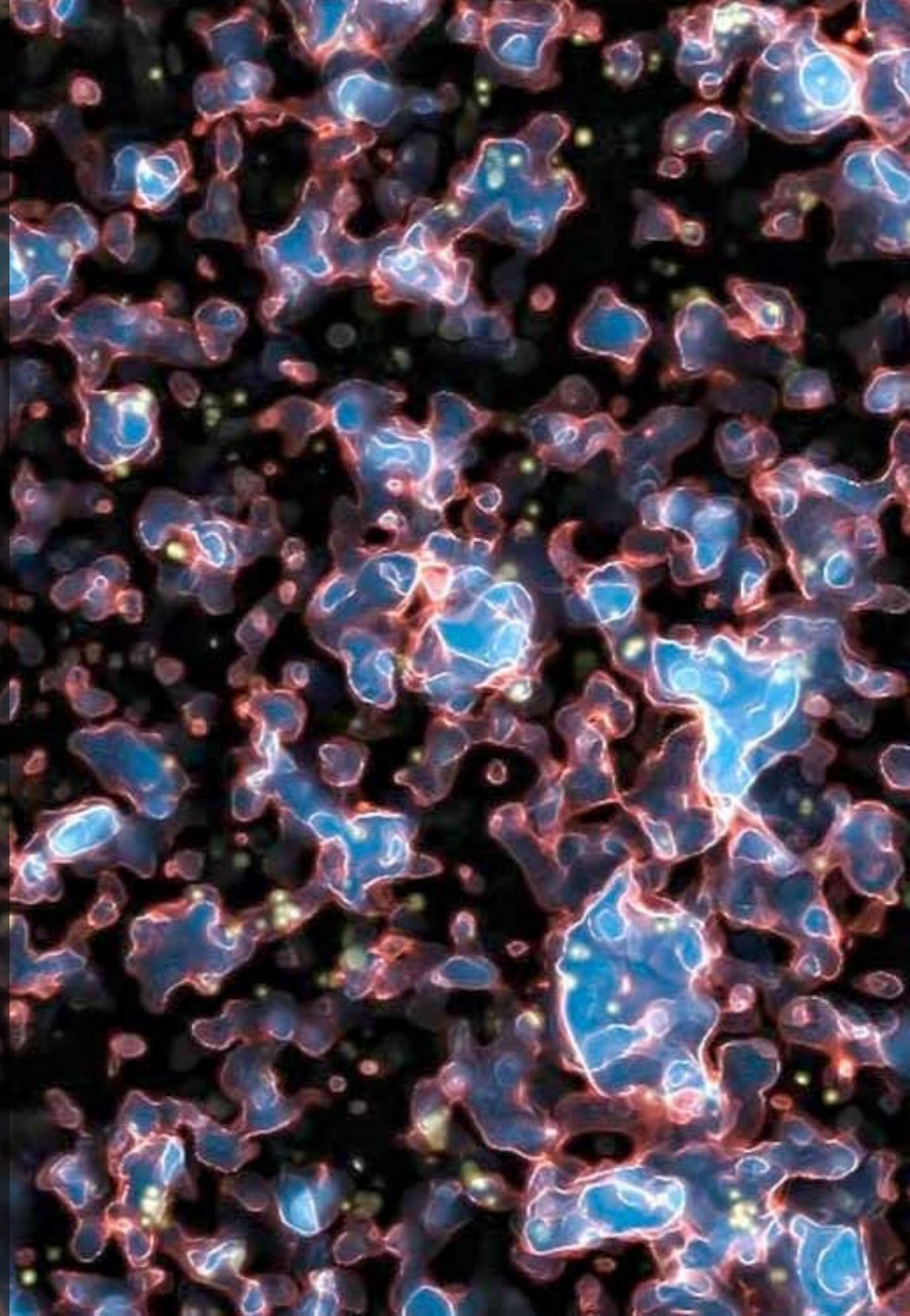
---

# Der Urknall

## Wie das Universum begann

---

Vor 13,7 Milliarden Jahren entstanden Raum und Zeit. Der Urknall ist der Beginn des Universums – so die Theorie der Physiker. Was genau aber beim Urknall passierte und warum das Universum überhaupt entstanden ist, wissen sie bis heute nicht.



## Der Urknall – wie das Universum begann



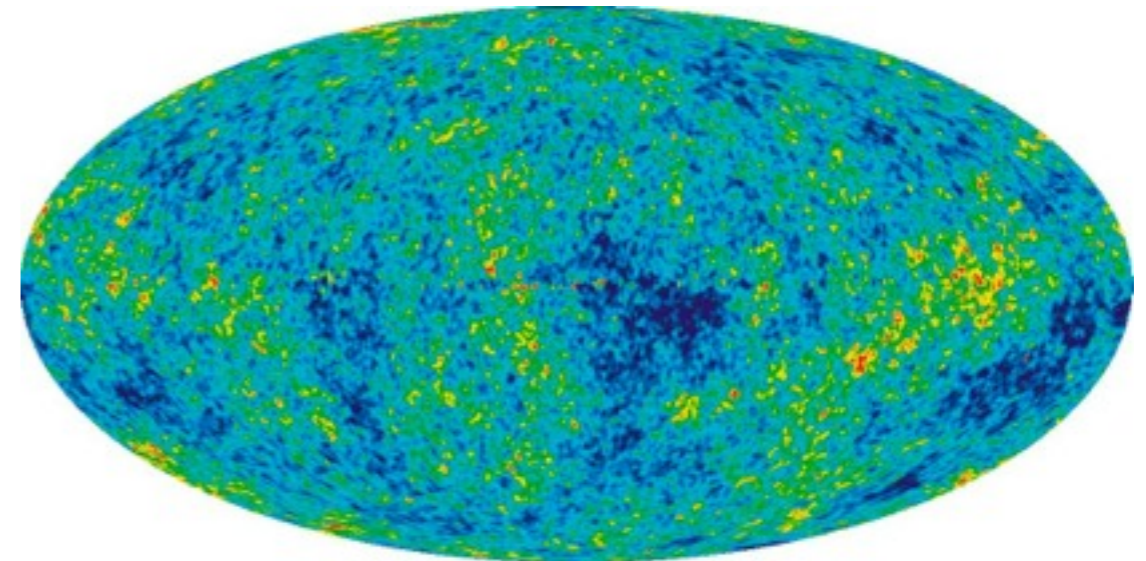
**Film 2.1** Mit dem Urknall beginnt die Geschichte des Universums.

Mit dem Urknall vor 14 Milliarden Jahren beginnt die Geschichte des Universums. Was ist beim Urknall passiert, was war vor dem Urknall und wo hat der Urknall stattgefunden? All das ist eigentlich unbegreiflich: Es gibt kein „vor“ dem Urknall und auch keinen Raum, in dem der Urknall hätte stattfinden können. Raum und Zeit sind erst mit dem Urknall entstanden.

Alles, was es heute im Universum gibt, war einmal in einem winzigen Punkt zusammengepresst. Nach einer ganzen Sekunde hatte das Universum gerade mal einen Durchmesser so groß wie die Entfernung von der Erde zum Mond. Und die gesamte Materie, aus der heute unsere Milchstraße besteht, passte in eine Kaffeetasse. Im Bruchteil einer Sekunde wurde es dann Billionen

Billionen-fach größer. Die Materie verteilte sich dabei im gesamten Raum. Danach wuchs das Universum wieder langsamer - und kühlt seitdem ständig ab.

In seiner Frühphase war das Universum eine „Ursuppe“ aus Teilchen und Energie. Leichte Dichte-Schwankungen und die Expansion des Universums haben dann dazu geführt, dass sich Materie-Strukturen ausbilden konnten.



Strahlungskarte des jungen Universums

Woher wissen wir das? Die erste Strahlung des Universums – die sogenannte Hintergrundstrahlung – kann man messen und daraus Strahlungskarten des jungen Universums errechnen. Die verschiedenen Farben stehen für Temperatur-Unterschiede. Sie zeigen, dass es nicht überall im Universum gleich heiß war. An einigen Stellen gab es mehr Energie und Materie als an anderen. Als sich das Universum weiter ausgedehnt hat, konnte sich die Materie dort unter dem Einfluss der Gravitation zusammenklumpen und Galaxien entstanden.

## Der Urknall – Schritt für Schritt



**Film 2.2** In Sekundenbruchteilen zum riesigen Universum

Die Zeiträume, die beim Urknall eine Rolle spielen, unterscheiden sich zeitlich stark. Einige Prozesse haben sich über Milliarden von Jahren hingezogen, andere passierten in Bruchteilen einer Sekunde. Daher geben wir in der folgenden Darstellung die Zeit in Zehnerpotenzen einer Sekunde an:  $10^0$  Sekunden entsprechen einer Sekunde.  $10^1$  Sekunden sind 10 Sekunden.  $10^2$  sind 100 Sekunden und so weiter. Die nächste Stelle ist immer ein Zehnfaches der vorherigen. Entsprechend steht  $10^{-1}$  Sekunde für eine zehntel Sekunde,  $10^{-2}$  für eine hundertstel Sekunde usw. Insgesamt umfasst die Zeit vom Urknall bis heute  $10^{61}$  Zehnerpotenzen. Vorstellen können sich das auch die Physiker nicht mehr. Aber sie können damit rechnen und die Geschichte des Urknalls entsprechend einteilen.

**$10^{-43}$  Sekunden**

### Die Planckzeit

Der früheste Zeitpunkt nach dem Urknall, über den die Physik eine Aussage treffen kann, beginnt  $10^{-43}$  Sekunden nach dem Urknall, also eine Zehnmillionstel Milliardstel Milliardstel Milliardstel Milliardstel Sekunde. Man bezeichnet sie auch als Planck-Zeit, nach dem Physiker Max Planck, einem Begründer der Quantentheorie.

Eine Aussage der Quantentheorie ist, dass man die Eigenschaften eines Teilchens nicht beliebig genau messen kann, es bleibt eine gewisse Unschärfe. Diese Unschärfe gilt auch für die Zeit. Für Zeiträume, die kürzer sind als die Planckzeit, kann man Ursache und Wirkung nicht mehr auseinanderhalten. Ohne die Unterscheidung von Ursache und Wirkung ist jedoch keine Physik möglich. Daher kommen die Physiker nicht näher an den Urknall heran und schon gar nicht in eine Zeit vor den Urknall.

**Temperatur:  $10^{32}$  Grad Celsius**

**$10^{-37}$  Sekunden**

### Das Universum als Erbse

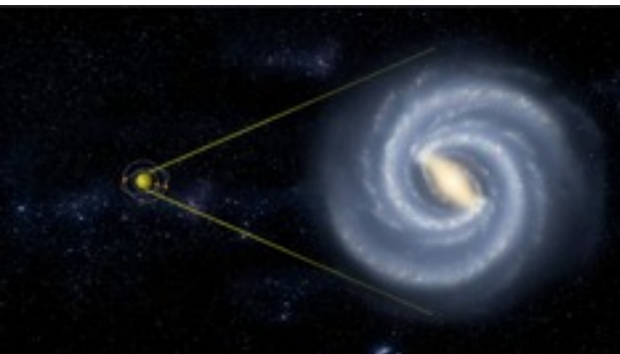
Sobald das Universum entstanden ist, hat es sich auch ausgedehnt, denn die Temperatur und damit der Druck waren unvorstellbar hoch. Hatte das Universum quasi punktförmig begonnen, ist es nach  $10^{-37}$  Sekunden immerhin schon so groß



wie eine Erbse. Bei dieser Größenangabe stellt sich natürlich die Frage: Was war außerhalb? Die Antwort der Physiker ist eindeutig, aber schwer vorstellbar. Der Urknall ist keine Explosion in einem bestehenden Raum, sondern der Raum als solcher ist erst mit dem Urknall entstanden. Folglich gibt es kein Außerhalb. Das gleiche gilt für die Zeit, auch sie ist erst mit dem Urknall entstanden. In dieser Logik kann es also gar kein „vor dem Urknall“ geben. **Temperatur:  $10^{27}$  Grad Celsius**

**$10^{-36}$  bis  $10^{-32}$  Sekunden**

## Die Phase der Inflation



Das Universum hat sich in einem winzigen Augenblick um mehr als das  $10^{26}$ -fache ausgedehnt

Obwohl sich das Universum von Anfang an ausgedehnt hat, kommt es kurzfristig zu einer sehr stark beschleunigten Ausdehnung. Die Physiker nennen dies die Phase der Inflation. Das Universum hat sich in dem winzigen Augenblick zwischen  $10^{-36}$  bis  $10^{-32}$  Sekunden um mehr als das  $10^{26}$ -fache

ausgedehnt. Das bedeutet, jedes Stückchen Raum, das vor der Inflation so groß war wie ein Atomkern, ist danach größer als unsere komplette Milchstraße. Es ist bereits zu diesem frühen Zeitpunkt größer als das heute sichtbare Universum und das hat immerhin einen Durchmesser von fast 80 Milliarden Lichtjahren.

**Temperatur:  $10^{25}$  Grad Celsius**

**$10^{-12}$  Sekunden**

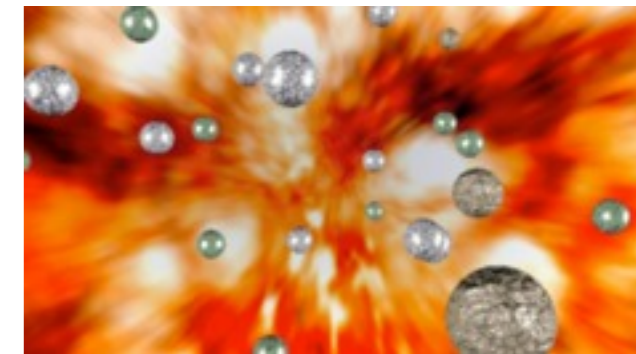
## „Urknall“ im Labor

Am Teilchenbeschleuniger CERN im schweizerischen Genf werden in einer 27 Kilometer langen Röhre Atomkerne auf fast Lichtgeschwindigkeit beschleunigt. Nach mehreren Beschleunigungsrunden werden sie dann an bestimmten Stellen aufeinander geschossen. Dort stehen riesige Messgeräte, sogenannte Detektoren. Mit ihnen versuchen die Physiker, den Zusammenprall so genau wie möglich zu analysieren. Anhand der Teilchen, die sie dabei beobachten, bekommen sie Erkenntnisse darüber, wie die Materie aufgebaut ist und welche Kräfte zwischen ihnen wirken. Die Energien, die im CERN-Beschleuniger erzeugt werden, entsprechen den Bedingungen, die die zum Zeitpunkt  $10^{-12}$  Sekunden (eine Millionstel Millionstel Sekunde) geherrscht haben müssen. **Temperatur:  $10^{17}$  Grad Celsius**

**$10^{-5}$  Sekunden**

## Protonen und Neutronen bilden sich

Das Universum hat sich inzwischen so weit abgekühlt, dass sich die elementaren Quarks-Teilchen zu größeren Teilchen zusammensetzen können. Die stabilsten und bekanntesten dieser Teilchen sind das Proton und das Neutron. Beide bestehen aus jeweils drei Quarks,



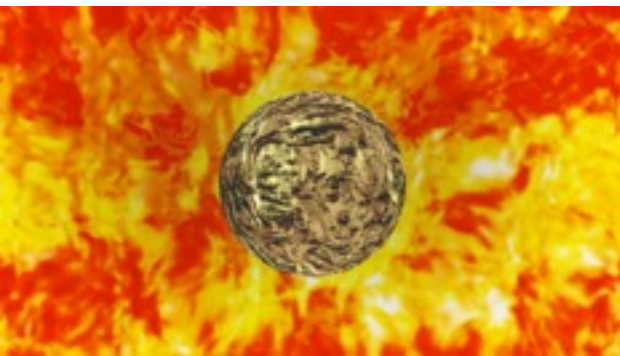
Protonen und Neutronen, die Bausteine der Atomkerne

die durch die starke Kernkraft zusammengehalten werden. Das Proton setzt sich aus zwei sogenannten up-Quarks und einem down-Quarks zusammen. Das Neutron aus zwei down-Quarks und einem up-Quarks.

**Temperatur: 1.000 Milliarden Grad Celsius**

**Eine Sekunde ( $10^0$  Sekunden)**

## Geburt der Atomkerne



Protonen und Neutronen bildeten im frühen Universum vor allem Heliumkerne

Die Temperatur ist mit rund einer Milliarde Grad Celsius inzwischen so „niedrig“, dass sich Protonen und Neutronen zu leichten Atomkernen zusammenschließen können. Am Anfang sind es nur Deuterium- und Helium-Kerne.

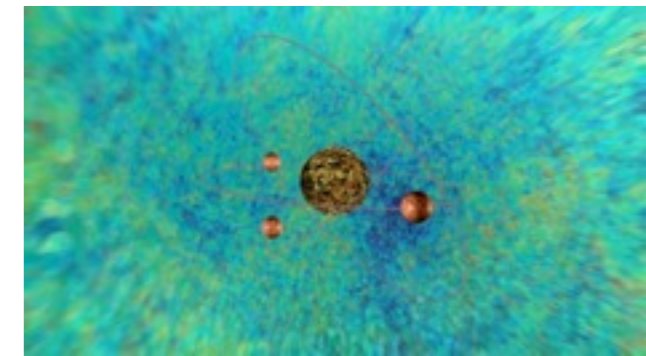
Nach wenigen Minuten bilden sich

auch Tritium-, Beryllium- und Lithium-Atomkerne, also Atomkerne mit immer mehr Protonen und Neutronen. Allerdings nur in geringen Mengen. Rund ein Viertel der Masse des Universums besteht zu diesem Zeitpunkt aus Heliumkernen, und fast drei Viertel aus Wasserstoffkernen. Schwerere Elemente mit noch mehr Protonen und Neutronen, wie zum Beispiel Eisen, bilden sich erst viel später durch Verbrennungsprozesse in den Sternen und schließlich durch die Explosion von Sternen, sogenannten Supernovae. **Temperatur: 1 Milliarde Grad Celsius**

**400.000 Jahre ( $10^{13}$  Sekunden)**

## Das Universum wird durchsichtig

Das Universum ist auf rund 3.000 Grad Celsius abgekühlt. Die thermische Energie ist damit so gering, dass die bisher frei im Raum fliegenden negativ geladenen Elektronen von den positiv geladenen Atomkernen eingefangen werden. Ursache dafür ist die elektromagnetische Anziehungskraft zwischen den unterschiedlichen Ladungen. Auf diese Weise gibt es jetzt erstmals vollständige Atome.



Durch das Einfangen von Elektronen entstehen erstmals vollständige Atome

Dies führt zu einem erstaunlichen Nebeneffekt. Das Universum wird durchsichtig. Um das zu verstehen, muss man sich klar machen, wie wir überhaupt etwas sehen können. Wir erblicken einen Gegenstand, wenn von ihm Licht ausgesendet oder reflektiert wird und dieses Licht in unser Auge gelangt. Statt von Licht kann man auch etwas genauer von Photonen sprechen. Damit man also etwas sehen kann, müssen Photonen ungehindert von einem Ort zu einem anderen gelangen können. Kurz nach dem Urknall war es jedoch so heiß und die vorhandenen Teilchen waren so dicht gepackt, dass ein Photon nicht weit gekommen ist. Ständig wurde es von einem freien Elektron aufgenommen oder abgelenkt. Anders ist es bei den nach 400.000 Jahren entstandenen Atomen. Jetzt sind die Elektronen an die Atomkerne gebunden und können nicht mehr mit jedem Photon reagieren, sondern nur noch mit einigen

wenigen. Dadurch kann ein Photon jetzt tatsächlich eine weite Strecke zurücklegen. Die Folge: Das Universum wird durchsichtig.

**Temperatur: 3.000 Grad Celsius**

**50 Millionen Jahre ( $10^{14}$  Sekunden)**

## Inmitten von Gaswolken

Das Universum hat inzwischen eine angenehme Temperatur von 25 Grad Celsius. Allerdings gibt es kein sonniges Plätzchen, denn noch besteht das Universum nur aus riesigen Gaswolken. Sterne gibt es noch keine. Erst langsam bilden sich aus lokalen Schwankungen in der Gasdichte die Geburtsorte für die ersten Sterne.

**Temperatur: 25 Grad Celsius**

**100 Millionen Jahre ( $10^{15}$  Sekunden)**

## Sternenleuchten

Die Wasserstoff-Gaswolken werden an einigen Stellen so dicht, dass sich die einzelnen Gasteilchen aufgrund ihrer Masse stark anziehen und alle zu einem riesigen Gasball zusammenstürzen. Dadurch steigt die Temperatur rasant an. Irgendwann wird es so heiß und



In den Sternen entsteht aus Wasserstoff Helium. Das setzt Energie frei; sie leuchten

der Druck so hoch, dass die Kernfusion einsetzt: Wasserstoff verbindet sich zu Helium und setzt dabei Energie frei. Die ersten Sterne beginnen zu leuchten.

**Temperatur: 22 Grad Celsius**

**500 Millionen Jahre ( $10^{16}$  Sekunden)**

## Galaxien

Immer mehr Sterne entstehen und schließen sich aufgrund ihrer Anziehungskraft zu Galaxien zusammen. Das Weltraumteleskop Hubble hat im Jahr 1996 lange Zeit einen ganz bestimmten Ausschnitt am Himmel beobachtet und dabei einen Blick ganz weit zurück in die Vergangenheit geworfen. Das sogenannte Hubble Deep Field zeigt einen Ausschnitt des frühen Universums, in dem bereits hunderte von Galaxien zu sehen sind.

**Temperatur: 20 Grad Celsius**

**9,5 Milliarden Jahre ( $10^{17}$  Sekunden)**

## Unsere Erde

Nachdem bereits viele Generationen von Sternen entstanden und wieder vergangen sind, leuchtet vor rund 4,5 Milliarden Jahren unsere Sonne auf. Kurz darauf entstehen auch unsere



Vor rund 4,5 Milliarden Jahren leuchtet unsere Sonne auf

Erde und die anderen Planeten in unserem Sonnensystem. Zufällig liegt die Erde in einem Abstand zur Sonne, der es ermöglicht, dass sich Wasser bildet. Und er ist groß genug, so dass sich eine schützende Atmosphäre bilden kann.

**Temperatur: minus 265 Grad Celsius**

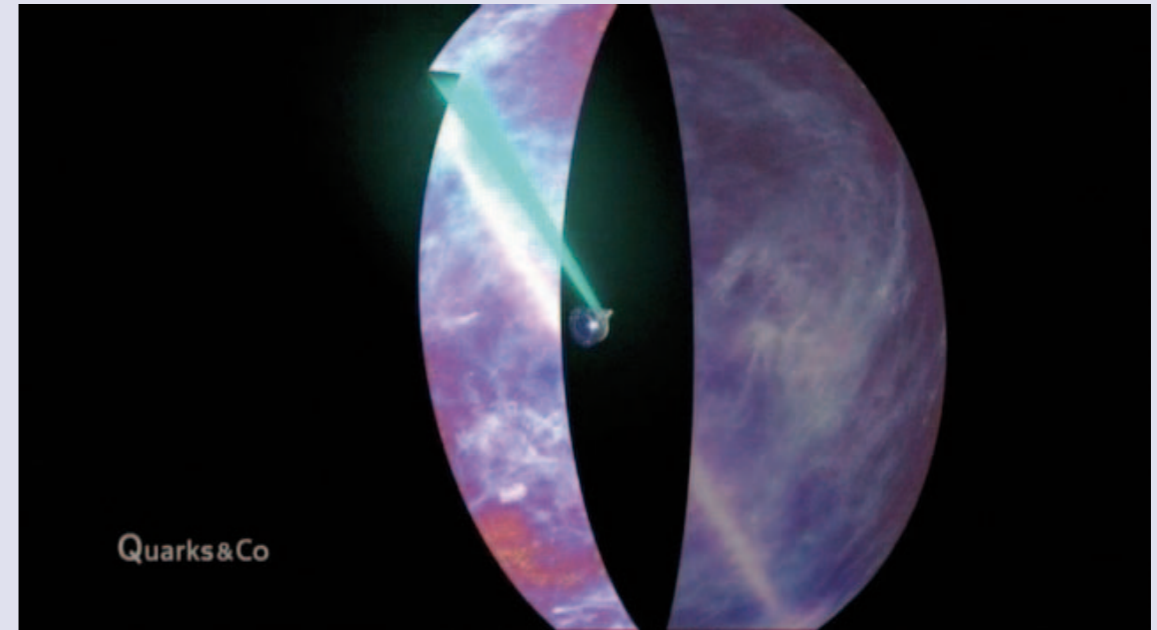
**14 Milliarden Jahre ( $10^{17}$  Sekunden)**

## Heute

Nach fast 14 Milliarden Jahren hat sich aus dem Universum, das kleiner als eine Erbse begonnen hat, ein riesiges Sternenmeer entwickelt. Alleine der für uns sichtbare Teil des Weltalls hat einen Durchmesser von fast 80 Milliarden Lichtjahren. Und nach wie vor dehnt es sich weiter aus, wenn auch viel langsamer als am Anfang. Neue Sterne beginnen zu leuchten und alte verglühen in riesigen Sternenexplosionen. Es vollzieht sich ein ständiger Wandel. Lange Zeit dachte man, das Universum sei schon immer da gewesen und werde auch immer so fortbestehen. Doch dann entdeckte Edwin Hubble 1929, dass sich das Universum ausdehnt und das offenbar auch schon früher getan hat. Verfolgt man diese Entwicklung in der Zeit immer weiter zurück, dann muss das Universum irgendwann einmal in einem gewaltigen Urknall entstanden sein. Auch wenn heute noch nicht alle Fragen zum Urknall geklärt sind – zurzeit ist es das beste Modell, das es gibt.

**Temperatur: minus 270 Grad Celsius**

## Beweise für den Urknall: die Hintergrundstrahlung



**Film 2.3** Die Hintergrundstrahlung

Hintergrundstrahlung ist das Licht, das vom Urknall übrig geblieben ist. Es ist Strahlung, deren Ursprung hinter den Galaxien liegt. Astrophysiker können damit in die Vergangenheit schauen. Die Hintergrundstrahlung ist älter als jedes Licht, das wir kennen. Mit Hilfe des Satelliten Planck wird sie sichtbar und das frühe Universum wie bei einer Fotografie darstellbar.

Erfahren Sie im Film, was Astrophysiker im Urkosmos sehen können und warum Sie hoffen, neue Hinweise zu erhalten, ob das Universum unendlich expandiert oder ob die Welt kollabiert.

## Kapitel 3

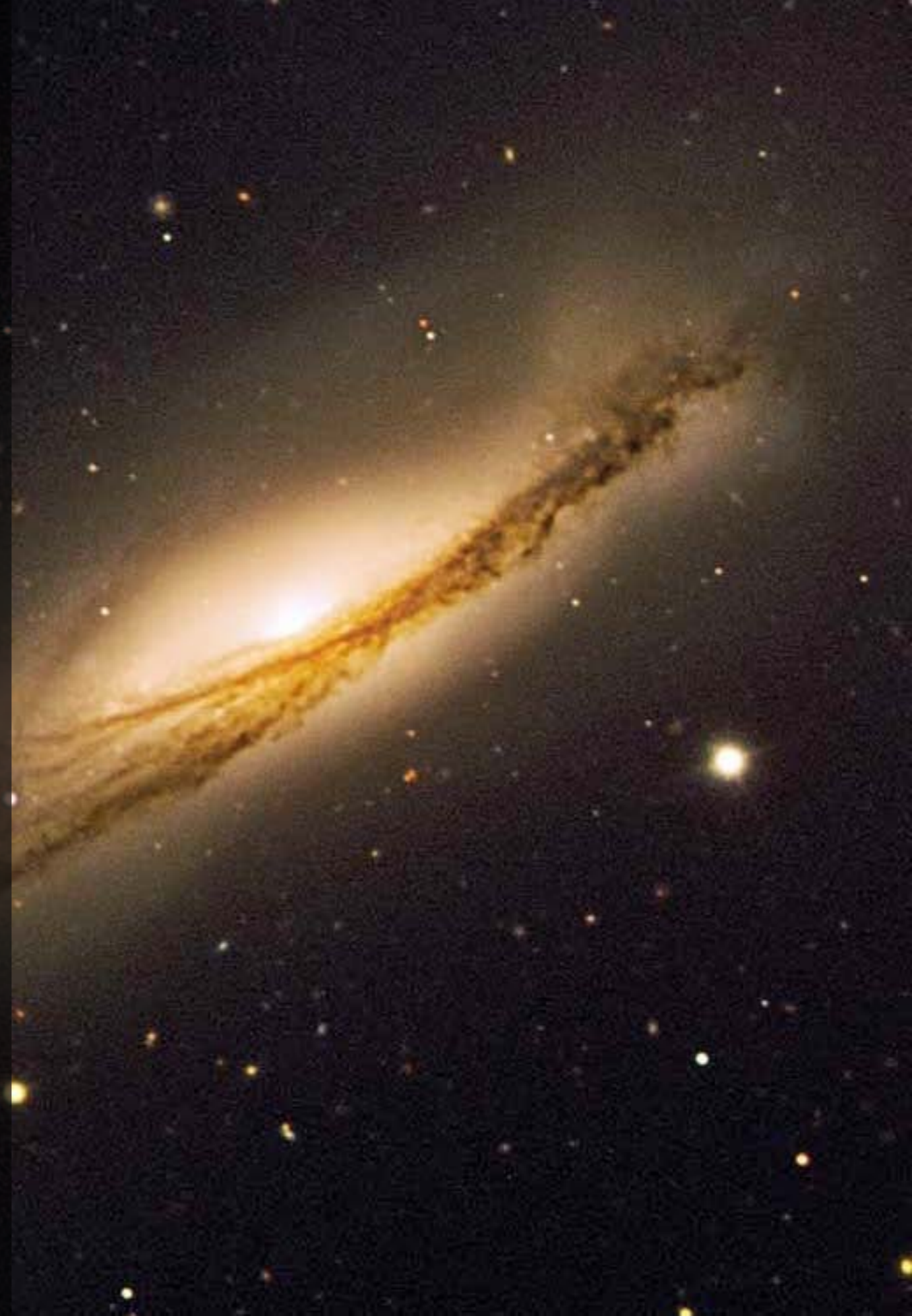
---

# Sonne, Mond und Schwarze Löcher

## Woraus das Universum besteht

---

Etwa 100 Milliarden Galaxien gibt es im Universum, jede davon mit Milliarden von Sternen. Das All scheint voller leuchtender Objekte zu sein. Doch Galaxien und Sterne machen gerade einmal fünf Prozent des Universums aus. Die restlichen 95 Prozent kennen wir nicht.



## Was wir wissen: Sterne und Planeten



Film 3.1 Die kosmische Sternenküche

Als mit dem Urknall alles begann, gab es nur eine Art Grundteig. Wasserstoff und Helium waren die ersten Elemente im jungen Universum. Andere Zutaten gab es noch nicht.

Erst 200 Millionen Jahre nach dem Urknall entstanden die ersten Backöfen unseres Universums – die Sterne. Sie entwickelten sich aus dem kosmischen Grundteig: Durch die Schwerkraft

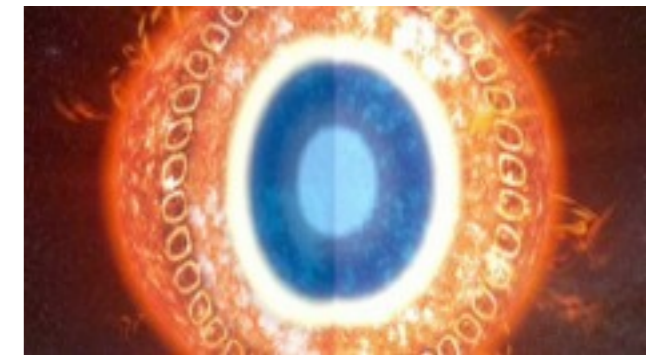
verklumpten die Wasserstoff- und Heliumteilchen zu Gasbällen. Diese Gasbälle wurden immer dichter und heißer – so heiß, dass die Teilchen miteinander verschmolzen. Die ersten Sterne waren geboren.



Die Geburt eines Sterns

In ihrem Inneren begannen die Sterne nun, den Grundteig des Universums in neue Elemente umzuwandeln. Am Anfang verschmolzen Wasserstoff-Teilchen zu noch mehr Helium. Und aus Helium konnten Elemente entstehen, die es beim Urknall noch nicht gab.

Nach und nach bekam ein Stern so eine Zwiebelstruktur aus unterschiedlichen Elementen. Je schwerer der Stern war, desto mehr Elemente konnte er erzeugen. Zum Beispiel Sauerstoff und Kohlenstoff – die Elemente, die für das Leben auf der Erde wichtig wurden.



Zwiebelstruktur eines Sterns

Eisen ist das schwerste Element, das die Sternen-Öfen backen konnten. Noch schwerere – wie zum Beispiel Silber – entstanden auf dramatischere Weise: Wenn alte Sterne in einer Supernova explodieren, erzeugen manche von ihnen genug Energie, um auch schwere Elemente herzustellen.

Wissenschaftler vermuten: Auch die ausgebrannten Sternenleichen – Neutronensterne – könnten bei einer Kollision Elemente wie Silber und Gold erzeugen und sie ins All schleudern.



Ein Stern explodiert in einer Supernova

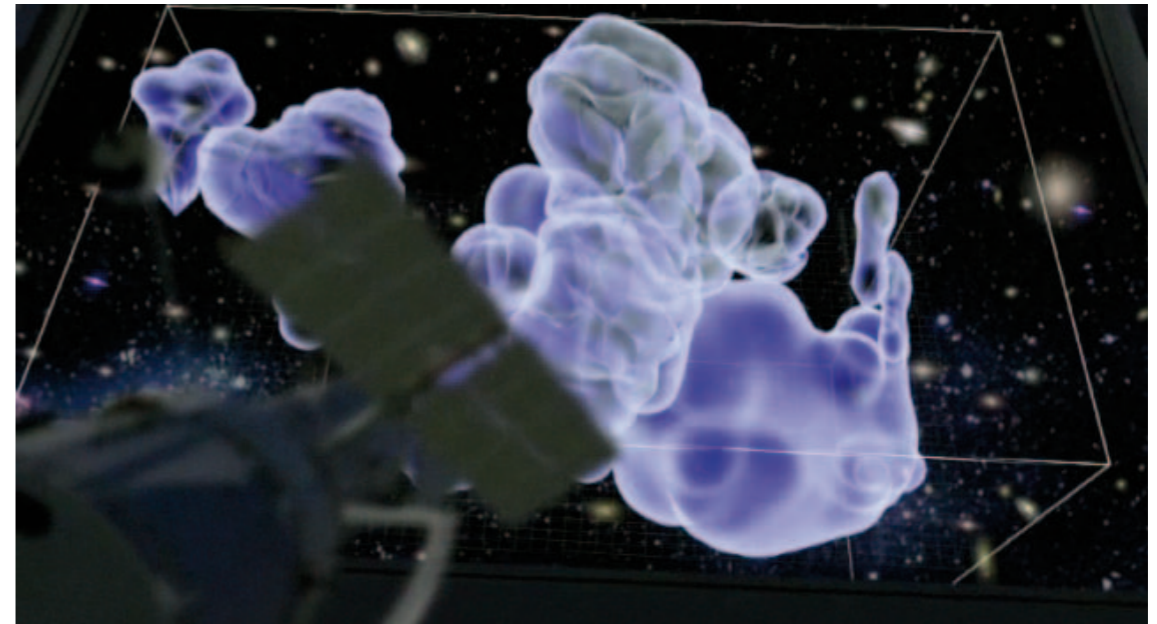
Aber wie kamen die fertig gebackenen Elemente auf die Erde? Unser Sonnensystem entstand vor etwa viereinhalb Milliarden Jahren in einer großen Gas- und Staubwolke – den Überresten vergangener, explodierter Sterne. In dieser Wolke sammelten sich die Staub- und Gasteilchen (darunter auch die verschiedenen Elemente) durch die Gravitation zu einer riesigen rotierenden Scheibe. Im Zentrum der Scheibe entstand durch die Anziehungskraft die Sonne. In den äußeren Bereichen verklumpten die Staubteilchen zu immer größeren Körpern und formten die Planeten.



Gesteinsbrocken verklumpen zu Planeten

Auch das Leben auf der Erde hat sich aus diesen Sternenüberresten entwickelt. Wir sind aus kosmischem Staub gemacht – gebacken vor Jahrmilliarden im Inneren der Sterne.

## Was wir nicht wissen: Dunkle Materie

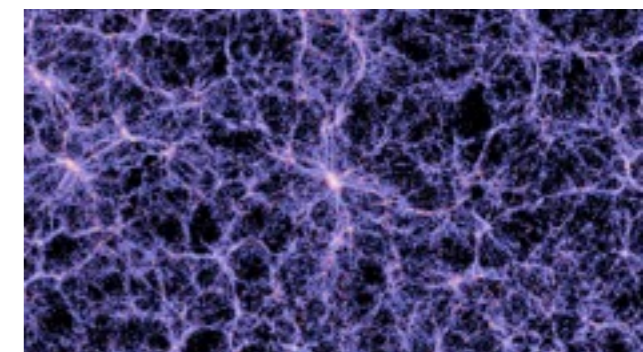


Film 3.2 Die Jagd nach der Dunklen Materie

Ein direkter Beweis für ihre Existenz fehlt noch, aber die Indizien sind erdrückend: In unserem Universum gibt es viel mehr Materie, als wir sehen können – die so genannte Dunkle Materie.

Das Rätselraten über Dunkle Materie begann Anfang der 30er-Jahre des letzten Jahrhunderts.

Damals forschte auf dem Mount Wilson bei Los Angeles am damals größten Teleskop der Erde der Star-Astronom Edwin Hubble. Als Erster entdeckte er, dass es viele Galaxien außerhalb unserer Milchstraße gibt und dass sich das Universum kontinuierlich ausdehnt.



Computersimulation des Max-Planck-Instituts für Astrophysik zur Verteilung der Dunklen Materie im Universum

Doch zur selben Zeit machte dort ein viel weniger prominenter Astronom eine beunruhigende Entdeckung. Fritz Zwicky untersuchte die Bewegung der Galaxien im sogenannten Coma-Haufen. Er kam zu dem Schluss, dass die gegenseitige Anziehung der Galaxien durch ihre Schwerkraft eigentlich nicht ausreichen dürfte, um den Haufen beieinander zu halten. Seine Folgerung: Es musste in dem Haufen eine große Menge unsichtbarer Materie geben – Dunkle Materie. Doch diese Idee fand wenig Resonanz bei den Kollegen – vielleicht auch, weil Zwicky als schwieriger Charakter galt. Die Dunkle Materie geriet in Vergessenheit.



Die Amerikanerin Vera Rubin findet in den 1970er-Jahren Hinweise auf die Dunkle Materie

Erst Anfang der 1970er-Jahre rückte die Dunkle Materie wieder in den Fokus der Wissenschaft. Die junge Astronomin Vera Rubin untersuchte, wie schnell sich die Sterne in Galaxien um das Zentrum drehen. Sie erwartete eigentlich, das Gleiche zu finden wie bei der Bewegung der Planeten in

unserem Sonnensystem: Je weiter weg die Sterne vom Zentrum der Anziehungskraft sind, desto langsamer sollten sie unterwegs sein. Doch zu ihrer Überraschung stellte Rubin etwas anderes fest: In den Außenbereichen der Galaxien waren die Sterne fast genauso schnell wie im Zentrum. Eigentlich müsste das dazu führen, dass die Galaxien auseinanderfliegen, die äußeren Sterne

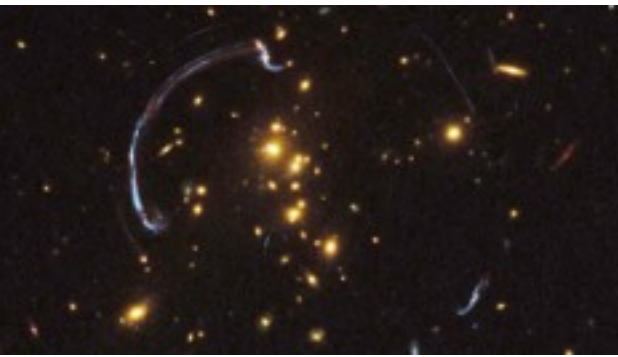
weggeschleudert werden. Doch die Galaxien blieben stabil. Rubins Entdeckung warf tiefgreifende Fragen auf – und belebte Zwickys These neu: Es musste viel mehr Masse geben als die der leuchtenden Sterne. Die rätselhafte Dunkle Materie – es schien sie wirklich zu geben!

## Wie viel Dunkle Materie gibt es?

Weltweit machten sich jetzt Astronomen auf die Jagd nach der fehlenden Masse im Universum. Zunächst versuchten sie, die Dunkle Materie durch herkömmliche astronomische Objekte zu erklären, die nur sehr schlecht zu beobachten sind: erkaltete Sonnen, Planeten, dunkle Gaswolken. Astronomen bezeichnen diese Objekte auch als MACHOs (engl.: Massive Compact Halo Objects). Sogar die damals gerade erst indirekt beobachteten Schwarzen Löcher bezogen sie in die Überschlagsrechnung ein. Doch unter dem Strich war das alles zu wenig. Es blieb ein Defizit. Die Dunkle Materie bestand offenbar aus einem anderen, noch unbekanntem Stoff.

Während die Beschaffenheit der Dunklen Materie unklar bleibt, gelingt es den Astronomen immer besser, ihre Menge abzuschätzen. Das liegt auch an besseren Teleskopen. Seit den 1990er-Jahren liefert zum Beispiel das Hubble Weltraumobservatorium immer genauere Messdaten. Es vereinfacht das Auffinden sogenannter Gravitationslinsen, in denen große Massen-Ansammlungen – wie zum Beispiel





In einer Gravitationslinse verzerren große Massen das Licht dahinter liegender Galaxien.

Galaxienhaufen – den Raum verbiegen und das Licht von dahinter liegenden Objekten verformen. Je mehr Masse in der Linse ist, desto stärker wird das Licht abgelenkt. Auch hier ist das Ergebnis eindeutig: In den Galaxienhaufen ist viel mehr dunkle als leuchtende Materie. Für einen

kleinen Abschnitt des Himmels können die Astronomen auf diese Weise sogar die Verteilung der Dunklen Materie berechnen. Das Ergebnis: Es gibt fünfmal mehr Dunkle Materie als sichtbare.

## Woraus besteht Dunkle Materie?

Auf der Suche nach der Beschaffenheit der Dunklen Materie bekommen die Kosmologen Hilfe aus einer unerwarteten Richtung. Schon seit den 1970er-Jahren postulieren Teilchenphysiker, dass es eine ganze Reihe von noch unentdeckten Elementarteilchen geben könnte. Diese WIMPs (engl.: Weakly Interacting Massive Particles) sollten nicht mit elektromagnetischer Strahlung - also Licht, Röntgenstrahlen, Radiowellen - wechselwirken und deshalb für Teleskope unsichtbar sein. Die Prognosen der Physiker, was die Massen und Häufigkeit dieser Teilchen betrifft, passen erstaunlich gut zu den astronomischen Daten. Doch weder Kosmologen noch Teilchenphysiker haben bis jetzt WIMPs beobachten können.

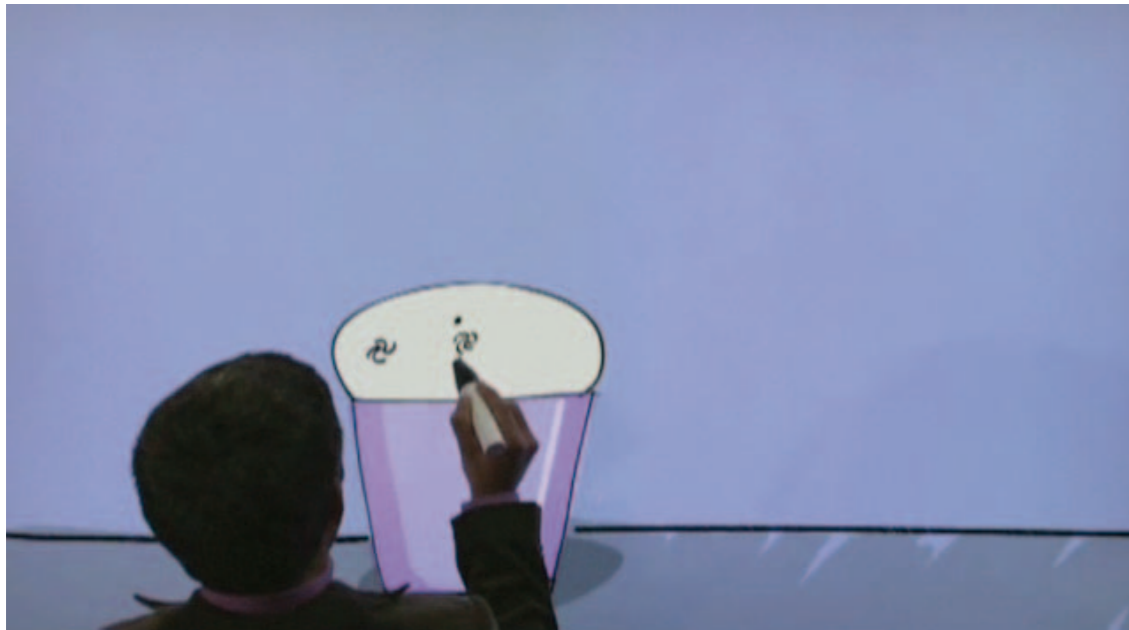
Rund um den Globus laufen zur Zeit etliche Experimente, um die Dunkle Materie direkt nachzuweisen. Hauptansatzpunkt dabei ist die Vorhersage, dass die WIMPs neben der Schwerkraft auch für die sogenannte schwache Kernkraft empfänglich sind. Hunderttausende Teilchen der Dunklen Materie strömen Sekunde für Sekunde durch jeden Quadratzentimeter der Erde. Statistisch gesehen sollte einmal pro Jahr eines von ihnen über die schwache Kernkraft an einem Atomkern hängenbleiben. Die meisten Experimente versuchen, genau diese Kollisionen zu messen.

Allein unter dem Gran Sasso Massiv in den italienischen Abruzzen laufen drei unterschiedliche Experimente. Die Messgeräte sind durch 1.400 Meter Fels von der störenden kosmischen Strahlung abgeschirmt. Eines der Experimente dort sowie eines in den USA und eines auf der internationalen Raumstation ISS geben Hinweise auf mögliche Zusammenstöße von WIMPs mit Atomkernen. Leider passen die Ergebnisse der unterschiedlichen Experimente nicht zusammen, so dass weitere Untersuchungen zeigen müssen, ob wirklich WIMPs die Dunkle Materie ausmachen. Andernfalls müssen die Astronomen nach einer anderen Erklärung für die fehlende Masse im Universum suchen.



Auch der AMS-Detektor an der internationalen Raumstation sucht nach der Dunklen Materie

# Was ist Dunkle Energie?



**Film 3.3** Was ist Dunkle Energie? Ranga erklärt's

Auch wenn die Natur der Dunklen Materie noch unklar ist: Die sichtbare Materie macht nur 4,6 Prozent des Universums aus, haben Astrophysiker errechnet. Die Dunkle Materie veranschlagen sie mit 24 Prozent. Damit ist klar: Es gibt ein noch viel größeres Rätsel als die Dunkle Materie – die „Dunkle Energie“. Sie macht den größten Teil unseres Universums aus – über 70 Prozent.

Wir haben keine Ahnung, woraus sie besteht. Wir wissen nur: Die Dunkle Energie sorgt dafür, dass sich das Universum bzw. der Raum an sich immer schneller ausbreitet.

Alle astronomischen Beobachtungen deuten darauf hin, dass sich das Universum seit seiner Entstehung kontinuierlich ausdehnt.

Wohlgemerkt: der Raum selber dehnt sich aus, es sind nicht die Sterne, die auseinanderfliegen. Diese Ausdehnung des Raums ist vergleichbar mit einem Hefeteig, in dem Rosinen den Galaxien entsprechen. Geht der Hefeteig auf – das ist die Ausdehnung des Raumes – so bewegen sich alle Galaxien voneinander weg, denn der Teig zwischen ihnen dehnt sich aus.

Je weiter zwei Galaxien voneinander entfernt, desto mehr Teig dazwischen, desto schneller bewegen sie sich auseinander. Das lässt sich direkt am Licht der Galaxien beobachten. Durch die Ausdehnung des Raumes wird auf der Reise zu uns auch die Wellenlänge des Lichtes gestreckt, sie wird röter. Das nennt man die Rotverschiebung. Je weiter eine Galaxie entfernt, desto mehr sich ausdehnender Raum dazwischen, desto röter wird das Licht.

Doch wie schnell geht der Teig auf, also wie schnell dehnt sich das Universum aus? Physiker haben es gemessen und eine erstaunliche Entdeckung gemacht: Die Ausdehnung des Universums beschleunigt sich. Es gibt anscheinend eine Kraft, die alles immer schneller auseinander treibt. Das ist die Dunkle Energie.

Über die Dunkle Energie wissen wir noch weniger als über Dunkle Materie – es gibt nur Vermutungen. Doch man braucht die mysteriösen Bausteine, um zu erklären, wie das Universum zu dem wurde, wie wir es heute sehen.

## Wir bauen uns ein Universum



Film 3.4 Inventur des Universums

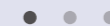
Das Universum besteht aus 100 Milliarden Galaxien, jede davon mit Milliarden von Sternen, Planeten und Asteroiden. Zwischen den Galaxien befinden sich gigantische Mengen von freien Gasnebeln. Und das ist nur ein Bruchteil der Materie im Kosmos. Damit das Universum so funktioniert, wie wir es kennen, benötigt man die noch viel größere Mengen von Dunkler Materie und Dunkler Energie – unvorstellbar eigentlich. „Quarks & Co“ möchte dennoch eine Vorstellung davon vermitteln und hat das Universum nachgebaut – maßstabsgetreu und mit den richtigen Abständen.

Unser Film vermittelt ein Gefühl für die gigantische Größe unseres Universums und für die unvorstellbare Leere, aus der es zum größten Teil besteht.

## Making-of ... „Inventur des Universums“



Um die Größenverhältnisse zeigen zu können, braucht das Team eine riesige Halle – die Kraftzentrale im Landschaftspark Duisburg-Nord.



## Kapitel 4

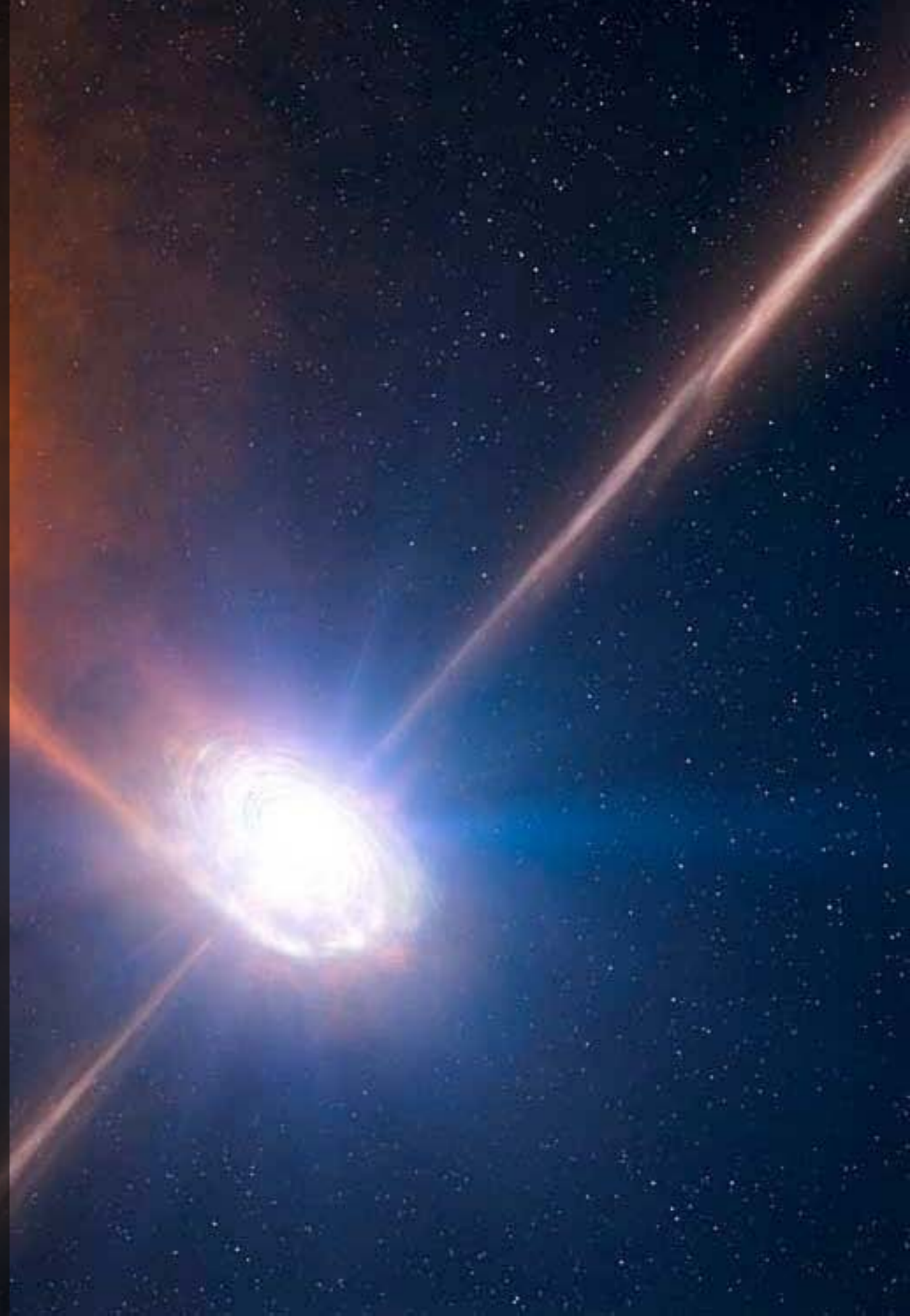
---

# Der kosmische Klebstoff

## Was das Universum zusammenhält

---

Ohne die Gravitation – eine Grundkraft der Physik – geht gar nichts im Kosmos. Ohne die Gravitation hätten sich niemals Sterne und Planeten bilden können. Ohne Gravitation kein Leben. Und obwohl die Gravitation so wichtig ist, wissen wir immer noch nicht ganz genau, wie sie funktioniert.



# Was ist Gravitation?

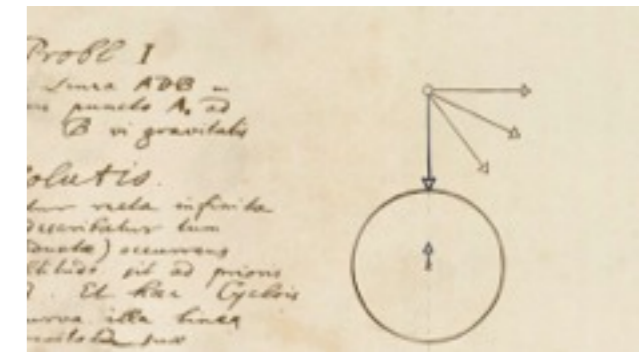


Film 4.1 Gravitation – der kosmische Klebstoff

Was hält Sonne und Planeten, was hält das Universum zusammen? Ohne die Gravitation – eine Grundkraft der Physik – geht gar nichts im Kosmos. Ohne die Gravitation hätten sich niemals größere Strukturen wie Sterne, Planeten und Galaxien bilden können. Ohne Gravitation kein Leben. Und obwohl die Gravitation so wichtig ist, wissen wir immer noch nicht ganz genau, wie sie funktioniert.

Die Geschichte der Entdeckung der Schwerkraft beginnt in Prag im Jahre 1600. Am dortigen kaiserlichen Hof studierte Johannes Kepler die Planeten und ihre Bewegung genauer als je zuvor. Als erster Wissenschaftler ahnte er eine Kraft, die von der Sonne ausgeht und die Planeten um sie kreisen lässt. Er nannte sie Anima motrix - Seele des Bewegers.

Erst über sechzig Jahre später wird sie entdeckt, im Jahre 1666 am Trinity College im britischen Cambridge. Dort lehrte Isaac Newton, der jüngste Physikprofessor Englands – gerade mal 23 Jahre alt. In seinem Garten beobachtete er, wie ein Apfel vom Baum fiel. Warum muss ein Apfel immer senkrecht zu Boden fallen? Warum nicht zur Seite oder senkrecht dazu? Und warum ist der Mond „oben“ und fällt nicht auf die Erde? Newtons Antwort: Erde und Apfel bewegen sich geradlinig aufeinander zu. Weil die Erde so unendlich viel schwerer ist, denkt man, nur der Apfel bewege sich. In Wirklichkeit aber fliegt auch die Erde ein kleines Stück auf den Apfel zu – allerdings so wenig, dass man es nicht messen kann.

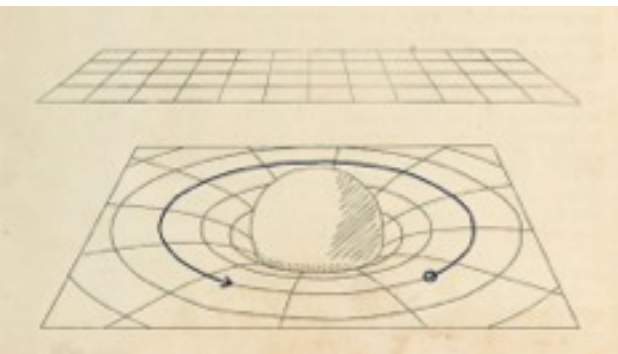


Newtons Erklärung: Massen ziehen sich gegenseitig an

Newton erkannte, dass sich Körper gegenseitig anziehen. Dabei ist die Anziehungskraft dem Quadrat der Entfernung umgekehrt proportional. Der Mond fällt nicht herab und bleibt in einer Erdumlaufbahn, weil sich die Zentrifugalkraft mit der Massenanziehung (Gravitation) die Waage hält. Dennoch fällt der Mond: aufgrund seiner hohen Geschwindigkeit „fällt“ er aber quasi permanent um die Erde herum.

Über 200 Jahre bleiben Newton's Arbeiten zur Schwerkraft unangefochten. Doch im Berlin von 1915 arbeitet ein junger Physiker namens Albert Einstein an einer ganz neuen Erklärung:

Anders als alle Physiker vor ihm geht Einstein nicht mehr davon aus, dass der Raum, in dem sich Sonne und Planeten bewegen, absolut und unveränderlich ist. In seiner Relativitätstheorie postuliert Einstein Raum und Zeit als relativ. Die Zeit vergeht nicht überall gleich schnell, sondern ist abhängig davon, mit welcher Geschwindigkeit man sich bewegt und wo man sich befindet. Eine Revolution in der Physik, denn bis dahin galten Raum und



Einsteins Erklärung: Massen krümmen die Raumzeit

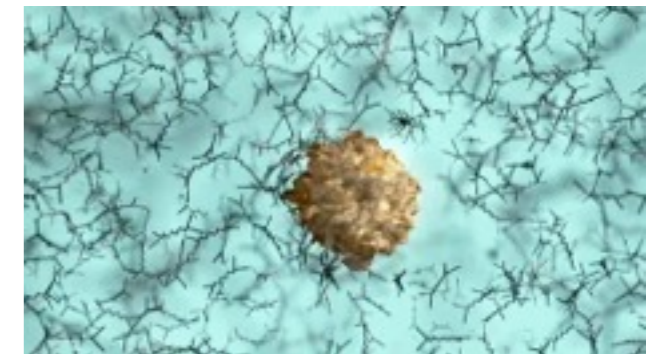
Zeit als feststehende, nicht zu beeinflussende Größen. Einstein aber fasst Raum und Zeit zur „Raum-Zeit“ zusammen. Und er sagt, dass Masse diese Raum-Zeit krümmt:

Raum und Zeit, so Einstein, kann man sich vorstellen wie eine Fläche

– wie ein aufgespanntes Tuch. Wenn keine Masse da ist, dann ist die Raum-Zeit flach – das Tuch bleibt gespannt. Die Sonne aber beispielsweise krümmt durch ihre Masse die Raum-Zeit, so als würde man eine schwere Kugel auf das gespannte Tuch legen: das Tuch wölbt sich nach unten. Das Tuch, also die Raum-Zeit ist nicht mehr flach, sondern gekrümmt. Lässt man jetzt eine kleinere Kugel über das Tuch rollen, so wird diese sich durch die Wölbung auf einer Kreisbahn um die große Kugel herum bewegen – genau wie die Erde um die Sonne. Die Gravitation ist nach Einstein also die Krümmung der Raum-Zeit durch Massen. Die gekrümmte Raum-Zeit sorgt für die Umlaufbahnen der Planeten um die Sonne.

Dass seine Theorie funktioniert, will Einstein schon wenige Jahre später beweisen. Die Überlegung: Wenn Masse die Raum-Zeit krümmt, dann müsste sie auch Licht ablenken. Für eine Sonnenfinsternis berechnet Einstein, wie die Masse der Sonne das Licht von dahinterliegenden Sternen ablenkt. Seine Beobachtungen zeigen: die Sonne krümmt tatsächlich den Raum und verändert so den Lauf der Lichtstrahlen.

Doch warum Körper überhaupt eine Masse haben, die den Raum krümmt, bleibt unbeantwortet – bis ins Jahr 1964. Peter Higgs, ein frisch gebackener Physik-Professor vom King's College in London, veröffentlicht eine kühne These: Neben den zwölf bekannten



Higgs-Bosonen heften sich an ein Quark

Elementarteilchen führt er ein dreizehntes, letztes ein: Das Higgs-Teilchen. Higgs-Teilchen erfüllen den ganzen Raum, behauptet Higgs. Sie seien der kosmische Klebstoff, der sich an die Materie heftet. Ein Teilchen wie das Elektron zum Beispiel bindet nur wenige dieser Higgs-Teilchen. Das Elektron ist daher leicht. Andere Elementarteilchen wie Quarks dagegen binden viel mehr Higgs-Teilchen. Sie sind also schwerer. Fast 50 Jahre lang bleibt das Theorie – bis man 2012 am Teilchenbeschleuniger CERN in Genf bekanntgibt, man habe das seit Jahrzehnten gesuchte Higgs-Boson höchstwahrscheinlich gefunden.

Doch ob das die letzte Erklärung der Gravitation sein wird?

## Drehen an der Gravitationskonstante



**Film 4.2** Drehen an der Gravitationskonstante

Wäre es möglich, an der Gravitationskonstante zu drehen und sie kleiner zu machen, würde sich die Welt verändern. Alle Gegenstände würden an Gewicht verlieren. Man könnte höher springen und sich leichter fortbewegen. Pflanzen und Tiere würden im Laufe der Zeit filigraner werden. Bei zunehmender Gravitation hingegen würde alles schwerer. Tiere und Pflanzen müssten stabiler gebaut sein.

Der Film zeigt, warum weder eine geringere noch eine zunehmende Gravitation besonders hilfreich wäre und warum es in beiden Fällen das Leben auf der Erde vernichten würde.

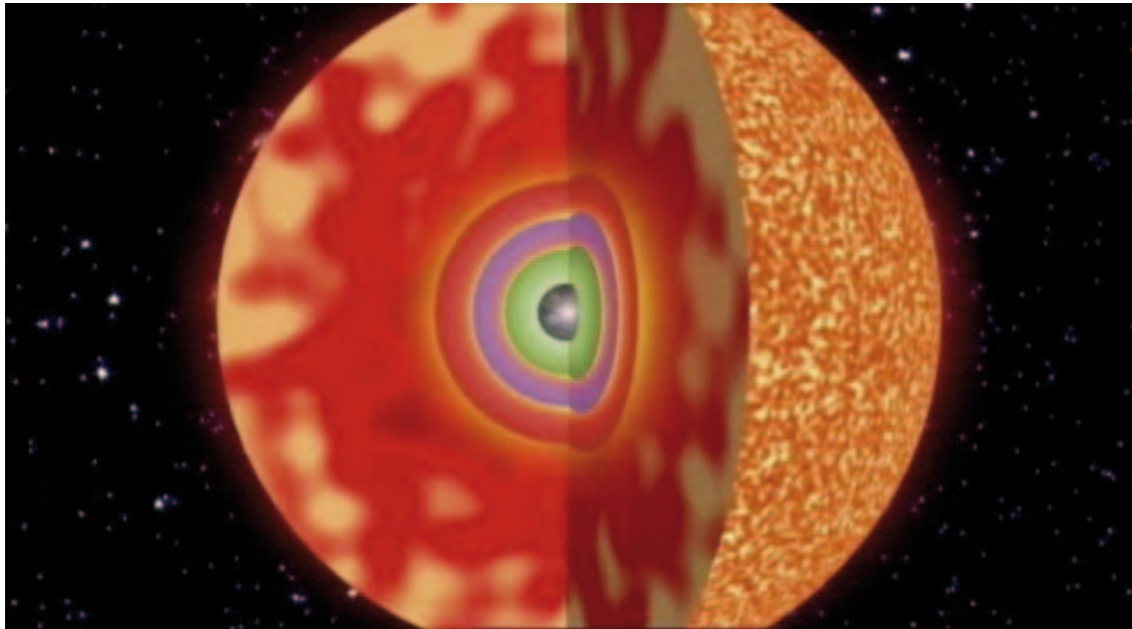
## Was sind Schwarze Löcher?

Obwohl wir sie als einzige physikalische Kraft im Alltag spüren, ist die Gravitation doch die schwächste von ihnen. Das erkennt man, wenn man die Schwerkraft mit der elektromagnetischen Kraft vergleicht: Eine Eisenkugel wird von der Gravitation nach unten gezogen. Doch schon ein kleiner Magnet wirkt der Schwerkraft entgegen und hält die Kugel zurück.

Aber bei großen Massen erkennt man die Macht der Gravitation. Diese Macht sehen wir, wenn wir uns weiter von unserem Sonnensystem entfernen und weiter ins All reisen. Dort begegnen uns Sterne, die mehr als zehn mal so schwer sind wie unsere Sonne. Wenn ein solcher Stern seinen Brennstoff verbraucht hat, bläht er sich zu einem roten Riesen auf.

In seinem Inneren verschmelzen die Atome zu immer schwereren Elementen, bis hin zum Eisen. Hier stoppt die Fusionskette, weil aus der Verschmelzung zweier Eisenkerne keine Energie mehr gewonnen werden kann. Der Eisenkern des Sterns ist schließlich so schwer, dass er unter seinem eigenen Gewicht in sich zusammen fällt.

Die gesamte Gashülle des aufgeblähten Sterns stürzt daraufhin in Richtung des kollabierten Eisenkerns. Dort prallen die Gase ab, und der Stern wird in einer gewaltigen Detonation zerrissen, die seine Materie in den Weltraum schleudert. Astronomen nennen das eine Supernova-Explosion.



Film 4.3 Wie entsteht ein Schwarzes Loch?

Zurück bleibt ein extrem kompakter Rest. Wenn der schwer genug ist, dann presst die Schwerkraft diese Masse zu einem Himmelskörper zusammen, den Astronomen „Schwarzes Loch“ nennen.

Die Dichte dieses Schwarzen Loches ist unendlich hoch. Und die Anziehungskraft – die Raumzeitkrümmung – ist so groß, dass sogar Lichtstrahlen ihr nicht mehr entkommen können. Materie und Licht in der Umgebung werden in das Schwarze Loch gerissen.

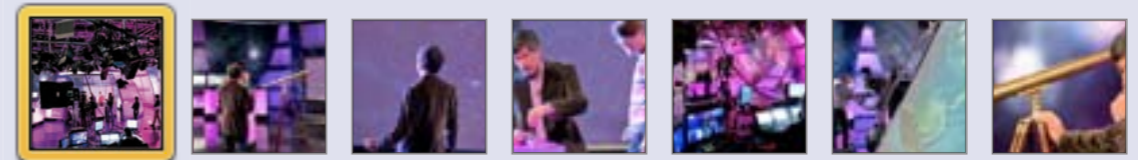
Schwarze Löcher sind spektakulär, doch nur wenige Sterne werden am Ende ihres Lebens zu einem Schwarzen Loch kollabieren. Unsere Sonne wird nicht als Schwarzes Loch enden. Damit es entstehen kann, muss ein Stern mindestens drei mal so schwer sein, wie unsere Sonne. Nach der Supernova-Explosion

muss der zurückbleibende Sternen-Kern noch mindestens 2,5 mal so schwer wie die Sonne sein – dann formt sich ein Schwarzes Loch. Beste Chancen haben Sterne mit einer Anfangsmasse von nicht weniger als 25 bis 40 Sonnenmassen.

## Ein kleines „Making-of“ der Universum-Sendung



„Quarks & Co“ ist Team-Arbeit: Was Ranga zeigt, ist von vielen vorbereitet und richtig in Szene gesetzt.





# Exoplaneten

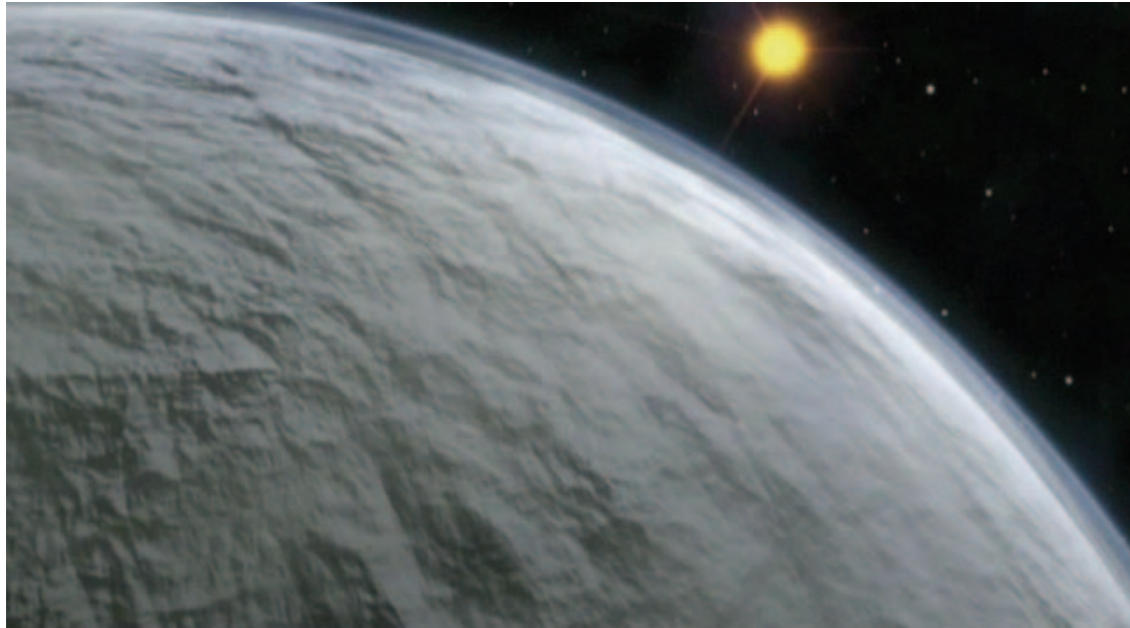
## Die Suche nach außerirdischem Leben

---

Seitdem wir um die Größe unseres Universums wissen, fragen sich Menschen, ob es noch anderes intelligentes Leben im All gibt. Signale von Außerirdischen haben wir bis heute nicht empfangen. Einige Astrophysiker gehen daher einen neuen Weg: Sie suchen nach Planeten außerhalb unseres Sonnensystems, auf denen theoretisch Leben existieren könnte.



## Ist da jemand?



Film 5.1 Gibt es außerirdisches Leben im All?

### Die Suche nach einer zweiten Erde

Kaum eine Frage fasziniert uns Menschen so wie die nach außerirdischem Leben im Weltall. Eine Frau, die diese Frage beantworten will, ist die Astronomin Lisa Kaltenegger. Sie begann ihr Studium 1995, dem Jahr, in dem der erste Planet außerhalb unseres Sonnensystems entdeckt wurde. Der Planet 51 Pegasi b ist 40 Lichtjahre von der Erde entfernt, ein sogenannter Exoplanet. Um seinen Stern zu umkreisen, benötigt er etwa vier Tage.

Kaltenegger arbeitet heute am Max-Planck-Institut für Astronomie in Heidelberg und lehrt an der US-amerikanischen Eliteuniversität Harvard. Sie gehört zu den internationalen Experten, die im All

nach Exoplaneten suchen und herausfinden wollen ob es auf ihnen Leben geben kann. „Die Suche ist wahnsinnig schwierig,“ erklärt sie. „Wenn Sie in den Himmel schauen, sehen Sie die Sterne. Aber ein Planet ist viel, viel kleiner. Und er reflektiert das Licht vom Stern ja nur. Es ist wie ein kleines Glühwürmchen neben einem riesigen Suchscheinwerfer.“



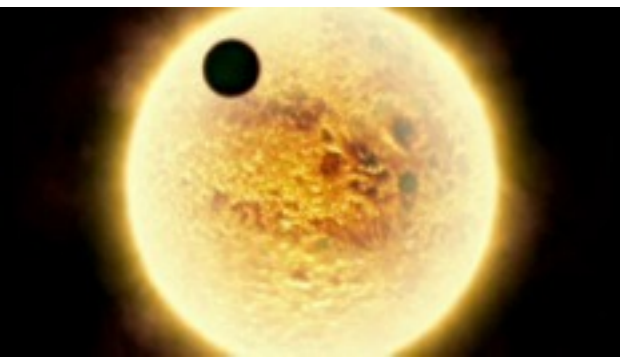
Lisa Kaltenegger gehört zu den internationalen Experten bei der Planetensuche

Heute wissen Astronomen schon von hunderten Exoplaneten, mehrere tausend scheinen entdeckt und warten auf eine Bestätigung – und das allein im Sternbild „Schwan“ in unserer Milchstraße. Den allergrößten Teil des Nachthimmels hat man noch gar nicht nach Exoplaneten abgesucht.

### Das Sternenlicht verrät die Planeten

Um Exoplaneten aufzuspüren, nutzen Astronomen hauptsächlich zwei Methoden: Bei der „Wobbelmethode“ beobachten sie, ob sich ein Stern bewegt, ob er sozusagen wackelt. Dieses „Wobbeln“ entsteht, wenn ein oder mehrere Planeten um einen Stern kreisen, weil Massen gegenseitig Kraft aufeinander ausüben. Selbst ein vergleichsweise winziger Planet bewirkt durch seine Umrundung, dass sich ein Stern bewegt.

Um die Bewegung eines Sterns zu messen, nutzen Astronomen den sogenannten Dopplereffekt, eine physikalische Eigenschaft, die für alle elektromagnetischen Wellen gilt: Bewegt sich der Stern auf den Beobachter zu, ist die Wellenlänge seines Lichts kürzer, als wenn der Stern sich vom Beobachter weg bewegt. Mit dieser Methode können Astronomen messen, ob ein Stern von einem Planeten umkreist wird, wie weit dieser vom Stern entfernt ist und welche Masse er hat. „Das Problem bei der „Wobbelmethode“, so Kaltenegger: „Die Masse allein sagt uns noch nicht, ob das ein Felsbrocken ist oder ein Gasplanet wie ein kleiner Saturn oder ein kleiner Neptun.“



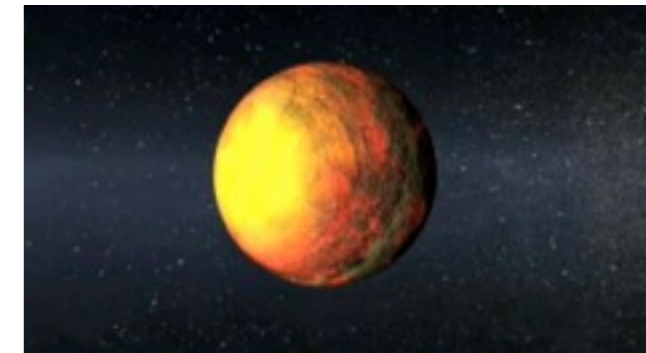
Für die Transitmethode muss der Planet von der Erde aus gesehen vor dem Stern vorbeiziehen

Um mehr über den Planeten zu erfahren, benötigen die Wissenschaftler ein weiteres Instrument: die „Transit-Methode“. „Transit“ bedeutet, dass ein Planet vor einem Stern vorbeizieht. Dadurch verändert sich das Licht des Sterns, es wird dunkler. Anhand solcher

Lichtschwankungen können Astronomen die Größe des Exoplaneten errechnen. Seit 2009 sucht das NASA-Weltraumteleskop Kepler mit dieser Methode nach fremden Welten. Kepler beobachtet über 150.000 Sterne im Sternbild „Schwan“. Die aus diesen Beobachtungen gewonnenen Daten zeigen, dass um mindestens jeden zweiten Stern ein Planet kreist.

## Voraussetzungen für Leben

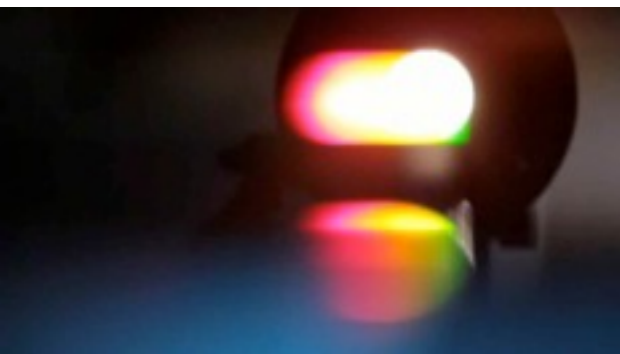
Die ersten fernen Planeten, die entdeckt wurden, waren Gasriesen in der Größe Jupiters, dem größten Planet unseres Sonnensystems. Doch in den vergangenen Jahren haben Astronomen sogenannte Supererden nachgewiesen. Das sind Planeten mit bis zu zehnfacher Erdmasse. Könnte auf einem solchen Planeten tatsächlich Leben existieren, so wie wir es kennen? Dazu müssen verschiedene Voraussetzungen erfüllt sein. Erstens muss der Planet aus Gestein sein. Gestein kann sich nur im Massebereich der Supererden bilden. Außerdem ist die Entfernung zum jeweiligen Stern entscheidend. Die sogenannte habitable Zone, in der Leben auf einem Planeten möglich ist, variiert nach Größe und Leuchtkraft des Sterns. Wie bei einem Lagerfeuer nimmt die ausgestrahlte Hitze des Sterns mit zunehmender Entfernung ab. Wichtig ist, dass die Temperatur auf dem Planeten zwischen null und einhundert Grad liegt. Nur dann kann es dort Wasser geben. Einer der ersten Exoplaneten aus Gestein, den Astronomen entdeckt haben, heißt Kepler 10b. Er kreist allerdings so nah um seinem Stern, dass auf ihm Temperaturen bis zu 1.400 Grad Celsius herrschen.



Der Planet Kepler 10b befindet sich im Sternbild Drache in 560 Lichtjahren Entfernung. Er ist um die Hälfte größer als die Erde und fast fünf Mal schwerer. Er ist allerdings so nah an seinem Stern, dass er ihn in weniger als einem Tag umrundet

## Ist Leben möglich?

Die Entfernung des Planeten zu seinem Stern, sowie seine Masse und seine Größe lassen sich inzwischen zuverlässig messen. Doch eine eindeutige Aussage über die Beschaffenheit des Planeten erlauben die bisherigen Messungen nicht. Genau hier setzt Kalteneggers Forschung an. Sie analysiert die Planeten mithilfe des Sternenlichts, denn Sternenlicht besteht aus einem Lichtspektrum mit unterschiedlichen Wellenlängen. Hat ein Planet eine bestimmte Atmosphäre, absorbieren die Moleküle in der Atmosphäre Lichtwellen des Sterns. Zieht also ein Planet vor einem Stern vorbei, filtert seine Atmosphäre einzelne Wellenlängen aus dem Sternenlicht heraus. Es entsteht ein individueller spektraler Fingerabdruck der Planetenatmosphäre.



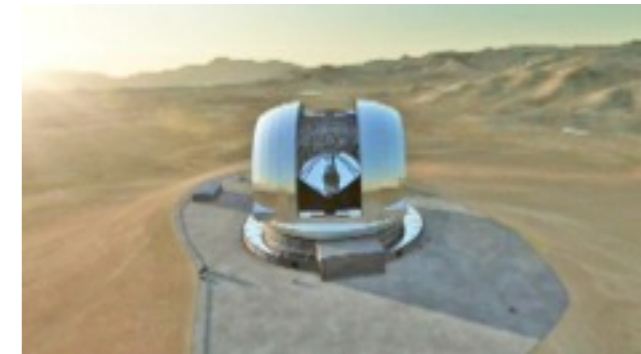
Der spektrale Fingerabdruck eines Planeten lässt durch die Bestimmung der Atmosphäre Rückschlüsse auf seine gesamte Beschaffenheit zu

Lisa Kaltenegger entwickelt Analysemodelle für die Atmosphären ferner Exoplaneten. *„Das Licht, das durch eine Planeten-Atmosphäre gefiltert wird oder vom Planeten reflektiert wird, sagt uns, welche Chemikalien - Wasser, Sauerstoff, Methan, Kohlendioxid - es in der Atmosphäre eines solchen*

*Planeten gibt, und sagt uns, ob es ähnlich ist wie bei der Erde oder ganz anders.“* Die Atmosphäre eines Exoplaneten gibt also darüber Auskunft, ob auf diesem Himmelskörper Leben möglich wäre oder nicht.

## Eine Frage der Zeit?

Bisher haben Astronomen aber nur die Atmosphären von riesigen Gasplaneten messen können. Das Problem liegt in den Größenverhältnissen von Atmosphäre und Planet, erklärt Lisa Kaltenegger: *„Die Atmosphäre der Erde ist etwa einhundert Kilometer hoch, der Radius der Erde beträgt über 6.000 Kilometer. Diese dünne Schale, die dünne Atmosphäre, ist vergleichbar mit der Schale eines Apfels. Und in dieser dünnen Schale ist die ganze Information über die Atmosphäre enthalten. Und die ist Lichtjahre weit weg. Man braucht ein großes Teleskop, um so viel Licht wie möglich einzufangen. Nur dann funktioniert die Spurensuche.“* Wie es auf den kleinen Planeten aussieht, soll spätestens das geplante „European Extra Large Telescope“ (E-ELT) in Chile in Erfahrung bringen oder das Weltraumteleskop „James Webb“, das 2018 starten soll. Die Erwartungen sind hoch. Auch Lisa Kaltenegger hat große Hoffnungen: *„In unserer Galaxie gibt es Milliarden von Sternen. Und wenn jetzt jeder Stern, jeder zweite, mindestens einen Planeten hat, dann haben Sie schon Milliarden von Planeten allein in unserer Milchstraße, in unserer Galaxie. Und wir wissen ja, da draußen gibt es Milliarden von Galaxien. Das heißt, wenn man es hochrechnet, sollte es ziemlich spannend werden in nächster Zeit.“*



Das E-ELT soll mit knapp 40 Metern Hauptspiegeldurchmesser vier- bis fünfmal größer als heutige Spitzenteleskope werden und 15-mal mehr Licht auffangen

## Kapitel 6

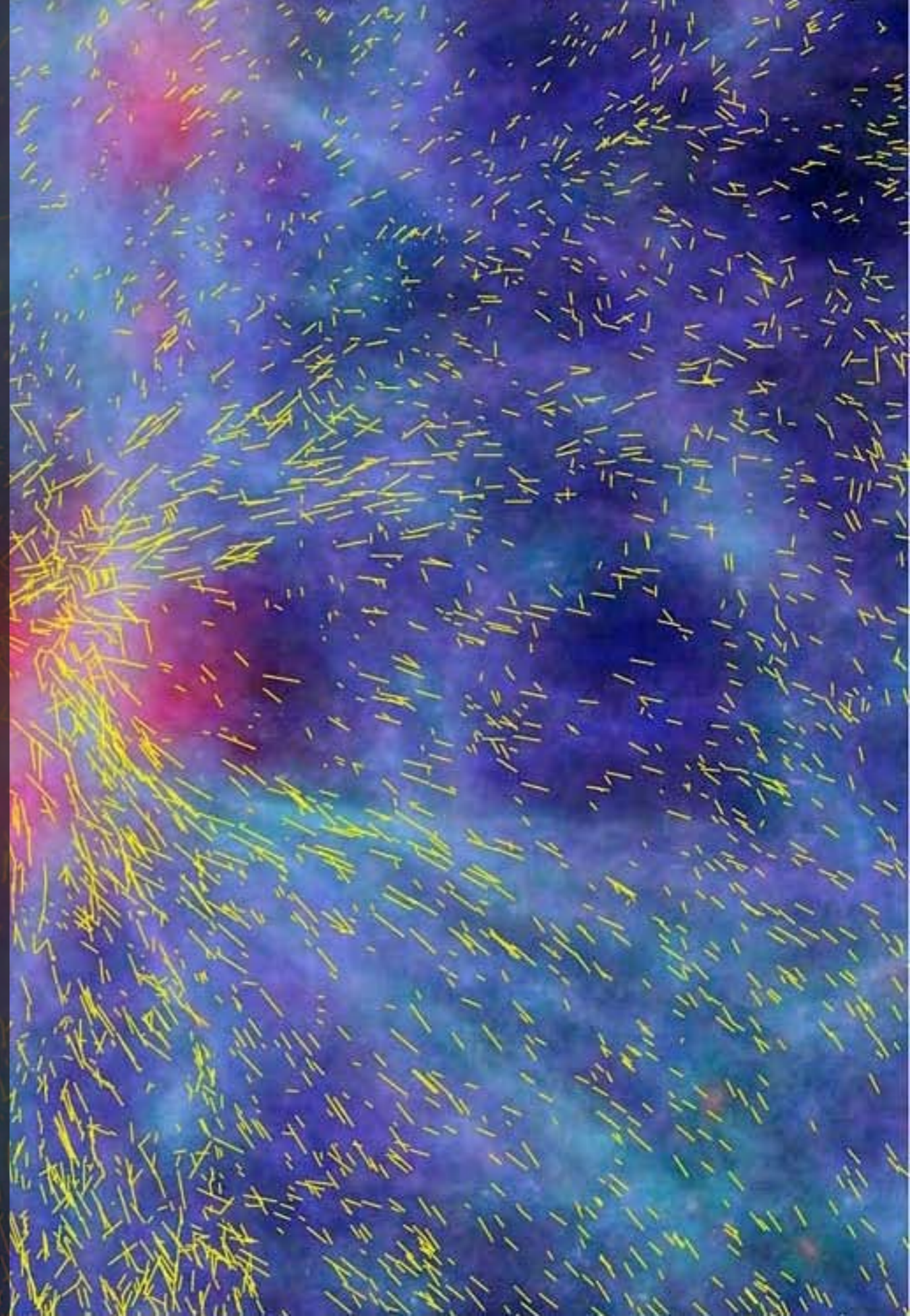
---

# Big Crunch, Big Freeze oder Big Rip?

## Wie das Universum enden wird

---

Mit dem Urknall ist das Universum entstanden, da sind sich die meisten Astrophysiker ziemlich sicher. Aber wie wird es zu Ende gehen? Hier gibt es rivalisierende Theorien: die einen glauben, das Universum stürzt in sich zusammen, die anderen vermuten, dass das Universum eines Tages in Stücke reißt.



## Wann und wie wird das Leben auf der Erde enden?



Film 6.1 Wann es wirklich dunkel wird

Noch herrschen auf der Erde lebensfreundliche Bedingungen. Die Sonne spendet Licht und Wärme – doch eines Tages wird sie uns zum Verhängnis. Denn in den kommenden Milliarden Jahren geht ihr der Brennstoff aus.

Immer weniger Wasserstoff ist für die Kernfusion verfügbar. Dadurch wird die Sonne nicht etwa kleiner. Sie bäumt sich noch einmal auf, dehnt sich aus und strahlt dabei mehr Energie ab als zuvor – und verwandelt sich in einen Roten Riesen. Dadurch wird es auf der Erde immer heißer. In 800 Millionen Jahren liegt die Durchschnittstemperatur auf der Erde bei über 45 Grad Celsius. Das ist mehr als doppelt so warm wie heute. Die Pflanzen sterben ab.

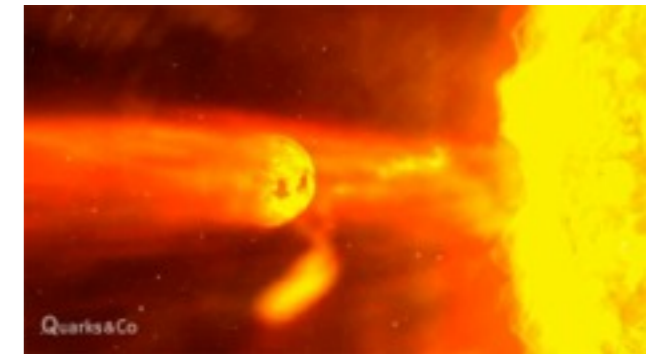
Ohne Wurzeln fehlt dem Boden jedoch der Halt. Wind und Regen können ihn einfach forttragen und verwandeln die Erdoberfläche in eine trostlose Mondlandschaft. Und die Temperatur steigt weiter. Das Wasser in Flüssen, Seen und Ozeanen verdampft. Zurück bleiben riesige Salzseen.

In etwa 3,5 Milliarden Jahren gibt es dann überhaupt kein flüssiges Wasser mehr auf der Erde. Die Temperatur liegt dann bei über 100 Grad Celsius. Organisches Leben hat keine Chance mehr.



In etwa 3,5 Milliarden Jahren gibt es kein flüssiges Wasser mehr auf der Erde

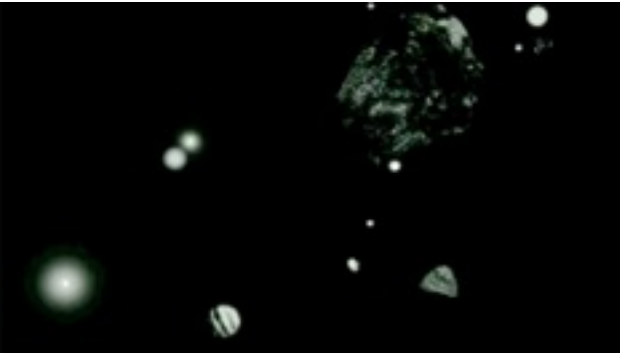
In rund 7 Milliarden Jahren hat die Sonne ihren größten Durchmesser erreicht. Sie wird die Erde zwar nicht komplett verschlucken. Trotzdem ist es auf der Erdoberfläche so heiß, dass Gestein schmilzt. Die Erde ist bedeckt von Ozeanen aus Magma.



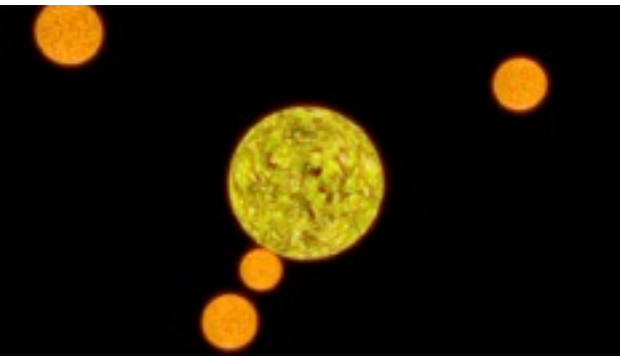
In rund 7 Milliarden Jahren ist die Erde bedeckt von Ozeanen aus Magma

In 8 Milliarden Jahren ist die Sonne dann komplett ausgebrannt und in sich zusammengefallen. Die verkohlten Überreste der Erde drehen im Dunkeln ihre Bahn. So wie der Sonne ergeht es früher oder später allen Sternen im Universum: Ihnen geht der Brennstoff aus.

In etwa 100.000 Milliarden Jahren werden die letzten Sterne ausbrennen. Durch das kalte dunkle Universum fliegen nur noch Sternenleichen, Planeten und Asteroiden.



In etwa 100.000 Milliarden Jahren werden die letzten Sterne ausbrennen



Irgendwann wird sich die Materie wieder auflösen und die Atomkerne werden zerfallen

Materie, wie wir sie kennen, existiert nicht mehr.

Was bleibt ist eine unendliche Leere.

Nur ab und zu wird die trostlose Dunkelheit erhellt, wenn zwei weiße Zwerge miteinander kollidieren. Lange Zeit bleibt das Universum in diesem Zustand. Doch selbst die traurigen Überreste des einstmaligen funkelnenden Universums sind dem Untergang geweiht.

In einer Milliarde Milliarde Milliarde Milliarde Jahren beginnt sich die Materie aufzulösen. Die inneren Bausteine der Atomkerne, die Protonen, zerfallen.

Ohne Protonen gibt es jedoch keine Atome, keine Moleküle, keine Zellen und auch kein Leben. Die

## Big Crunch, Big Freeze oder Big Rip?



Film 6.2 Die drei großen Endzeitszenarien

Mit dem Urknall ist das Universum entstanden, da sind sich die meisten Astrophysiker ziemlich sicher. Aber wie wird es zu Ende gehen? Hier gibt es rivalisierende Theorien: Wird es zu einem „Big Crunch“ kommen, bei dem das Universum wieder in sich zusammenfällt und alles zermalmt?

Oder eher zu einem „Big Freeze“, bei dem es immer weiter expandiert und erkaltet? Oder wird es den „Big Rip“ geben, bei dem das Universum, angetrieben durch eine unbekannte Energie, immer schneller expandiert, bis es in Stücke reißt?



Seit dem Urknall dehnt sich das Universum ständig aus. Die Galaxien entfernen sich immer weiter voneinander

Wie Beobachtungen der letzten Jahre gezeigt haben, lässt eine bis heute nicht verstandene „Dunkle Energie“ das Universum immer schneller expandieren.

Lange gab es für die meisten Kosmologen nur die Frage, wie stark sich die Ausdehnung des Universums mit der Zeit verlangsamt. Die Anhänger des „Big Crunch“ sind überzeugt, dass die Gravitation der Sterne und Galaxien die Ausdehnung des Universums irgendwann komplett abbremst. Danach würde der Kosmos erst langsam und dann immer schneller in sich zusammenstürzen – quasi der Urknall im Rückwärtslauf.

Ganz anders dagegen der „Big Freeze“! Seine Anhänger meinen, dass es nicht genug Materie gibt, um die Ausdehnung abzubremsen. Die Folge: das Universum würde immer weiter auseinanderdriften, die Sterne würden ausbrennen und am Ende alles Licht und Wärme erlöschen.

Die Astrophysiker messen und schätzen alle Massen im Weltraum – denn deren Gravitation bremst die Expansion des Universums. Zusätzlich beobachten die Astronomen sehr ferne Supernovas. Damit messen sie, wie stark sich die Ausdehnung schon verlangsamt hat. Das überraschende Ergebnis: die Ausdehnung des Kosmos hat sich nicht verlangsamt – sie ist immer schneller geworden!

Damit sind die Anhänger des „Big Crunch“ im Nachteil – ihre Theorie scheint jetzt sehr unwahrscheinlich. Aber auch die

Anhänger des „Big Freeze“ sind verunsichert. Was treibt das Universum immer schneller auseinander? Was ist die mysteriöse Dunkle Energie? Wird sie auch in Zukunft den Raum ausdehnen? Und wie stark? Die Kosmologen wissen darauf noch keine Antwort.

Aber vielleicht kommen ja die Anhänger der dritten Theorie zum Zuge. Sie gehen davon aus, dass die dunkle Energie immer stärker wird. Demnach wird sich der Raum auch in Zukunft immer schneller ausdehnen. Die Galaxien werden sich dabei immer weiter voneinander entfernen. Und in wenigen Milliarden Jahren soll die Dunkle Energie dann sogar Galaxien, Sterne, Planeten – sogar jedes einzelne Atom in Stücke reißen – der „Big Rip“.



Der „Big Rip“: Das Universum reißt auseinander



## Impressum:

Herausgeber: Westdeutscher Rundfunk Köln

Verantwortlich: Quarks & Co – Thomas Hallet

Redaktion: Jonathan Focke

Autoren: Ilka aus der Mark, Anna Behrend, Heinz Greuling, Ulrich Grünewald, Philip Häusser, Ulf Kneiding, Daniel Münter, Silvio Wenzel, Ranga Yogeshwar

Gestaltung: Designbureau Kremer & Mahler, Köln

© WDR, 2013

## Bildnachweis:

Titel gr: ESO; kl., l.: ESO/José Francisco Salgado (<http://www.josefrancisco.org>); kl., m.: ESO/L. Calçada; kl., r.: MPA/Springel et. al.

Kap. 1/Titel: ESO/José Francisco Salgado (<http://www.josefrancisco.org>)

S. 3, u.l.: akg-images; m.r.: mauritius images, u.r.: dapd; S. 4, o.l.: ESO/S. Guisard (<http://www.eso.org/~sguisard>); m.l.: mauritius images; u.l.: ddp images; S.4, r.: alle: Ranga Yogeshwar

Kap. 2/Titel: M. Alvarez (<http://www.cita.utoronto.ca/~malvarez>), R. Kaehler, T. Abel

Kap. 3/Titel: ESO

S. 14, u.r.: MPA/Springel et. al.; S. 15: akg/ Science Photo Library; S. 16, l.: NASA/ESA; S. 16, r.: NASA

Kap. 4/Titel: ESO/L. Calçada/M.Kornmesser; S. 23, r.: alle: K. Görgen

Kap. 5/Titel: ESO/L. Calçada; S. 26, l.: ESA/Hubble/M. Kornmesser, L. L. Christensen; S. 26, r.: NASA/Kepler Mission/Dana Berry; S. 27, r.: ESO/L. Calçada

Kap. 6/Titel: Klaus Dolag/VIMOS-VLT Deep Survey  
alle anderen Bilder: WDR