



Der Urknall – Mythos und Wahrheit

Verwirrt von der Expansion des Universums?

Damit sind Sie nicht allein – selbst Astronomen verstehen den Urknall nicht immer richtig.

Von Charles H. Lineweaver
und Tamara M. Davis

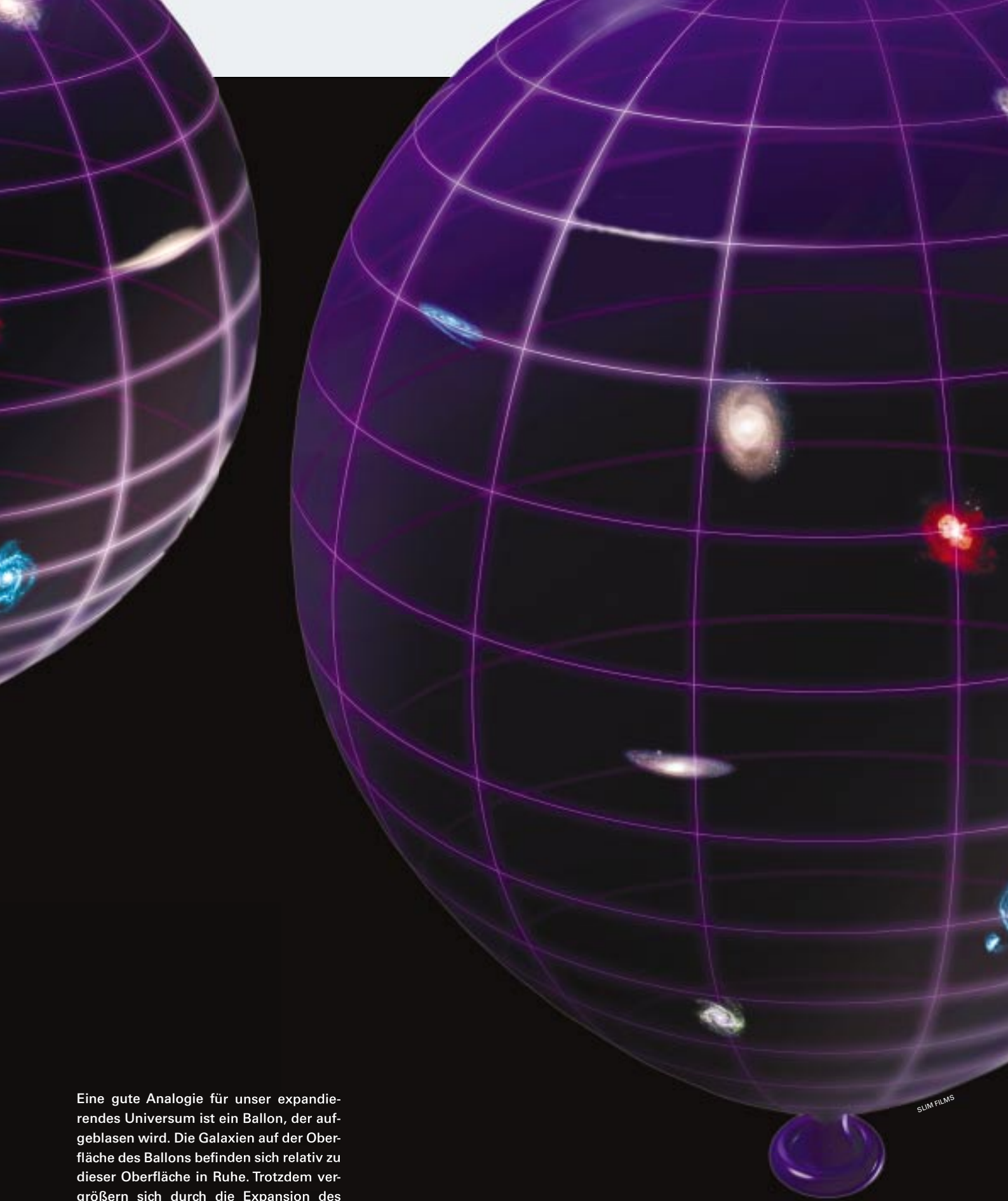
Dass unser Universum expandiert, ist die vielleicht wichtigste Erkenntnis, die wir je über unseren Ursprung gewonnen haben. Ohne diese uranfängliche Ausdehnung des Alls könnten Sie diesen Artikel nicht lesen. Es würden überhaupt keine Menschen existieren. Ja, es gäbe nicht einmal Moleküle, aus denen sich Lebewesen entwickeln könnten, und keine erdähnlichen Planeten, auf

denen Leben entstehen könnte. Alle Strukturen im Kosmos – Galaxien, Sterne, Planeten und so hochkomplexe Dinge wie Artikel in Spektrum der Wissenschaft – konnten sich nur herausbilden, weil sich das Universum nach dem heißen Urknall ausdehnte und abkühlte.

Es ist inzwischen vierzig Jahre her, dass Wissenschaftler eindeutige Belege für die Expansion des Universums entdeckten: die kosmische Mikrowellen-Hintergrundstrahlung, sozusagen das matte Nachglimmen des unvorstellbar heißen und dichten Anfangszustands. Seitdem

bilden Expansion und Abkühlung des Universums das Grundkonzept aller kosmologischen Forschungsarbeiten – ähnlich wie die Darwin'sche Evolutionstheorie in der Biologie. Jede der beiden Theorien liefert in ihrem jeweiligen Fachgebiet den Kontext, in dem sich einfache Strukturen herausbilden und im Laufe ihrer Entwicklung immer komplexer werden. Ohne Evolution gäbe es nicht die moderne Biologie und ohne Expansion nicht die moderne Kosmologie.

Seltsamerweise ähneln sich beide Konzepte noch in anderer Hinsicht: Die ►



SUM FILMS

Eine gute Analogie für unser expandierendes Universum ist ein Ballon, der aufgeblasen wird. Die Galaxien auf der Oberfläche des Ballons befinden sich relativ zu dieser Oberfläche in Ruhe. Trotzdem vergrößern sich durch die Expansion des Ballons die Entfernungen zwischen ihnen. Die Galaxien verändern dabei ihre Größe nicht.

▷ meisten Wissenschaftler glauben, sie verstanden zu haben, doch nur wenige stimmen darin überein, was sie wirklich bedeuten. Anderthalb Jahrhunderte nach dem Erscheinen von Charles Darwins Werk »Vom Ursprung der Arten« bestritten die Biologen zwar nicht mehr den Darwinismus an sich, diskutieren aber noch immer über seinen Ablauf und seine Implikationen – wohingegen ein großer Teil der Öffentlichkeit noch in vordarwinischer Ratlosigkeit verharret. Ähnlich machen sich viele Menschen noch 75 Jahre nach ihrer anfänglichen Entdeckung durch den US-Astronomen Edwin Hubble falsche Vorstellungen von der Expansion des Universums.

Selbst Kosmologen, die wesentliche Beiträge zu diesem Ideengebäude geliefert haben, tun sich gelegentlich damit schwer. Und manche fehlerhafte oder irreführende Aussage zur Expansion des Universums pflanzt sich über astronomische Lehrbücher und populärwissenschaftliche Darstellungen fort. Das ist umso gravierender, als die Expansion die Grundlage des Urknallmodells darstellt. So betörend einfach die Idee ist – aber was genau bedeutet es, wenn man sagt, das Universum expandiere? Wohin expandiert es? Dehnt sich etwa auch die Erde aus? Um die Verwirrung komplett zu machen, scheint sich die Expansion zu beschleunigen – ein Vorgang, der unsere Vorstellungskraft sprengt.

Wie Ameisen auf einem Ballon

Wenn etwas expandiert, so wird es nach allgemeinem Verständnis größer, indem es sich in den ihn umgebenden Raum hinein ausdehnt – gleich, ob es sich um einen verstauchten Knöchel, das Römische Imperium oder eine explodierende Bombe handelt. All diese Dinge weisen ein Zentrum und Begrenzungen auf. Außerhalb ihrer Begrenzungen gibt es

Raum, in den hinein sie sich ausdehnen können. Das Universum hingegen scheint weder Mittelpunkt noch Begrenzungen zu haben – und auch kein Außerhalb. Wie also kann es expandieren?

Eine gute Analogie ist ein Ballon, der aufgeblasen wird. Angenommen, wir wären Ameisen, die auf der Oberfläche dieses Ballons leben. Unsere Welt ist dann zweidimensional: Wir kennen nur rechts, links, vorwärts und rückwärts – aber wir haben keine Vorstellung von »oben« und »unten«. Irgendwann bemerken wir, dass der Weg zum Melken unserer Blattläuse länger wird: Am ersten Tag dauert er fünf Minuten, am nächsten sechs, dann sieben und so weiter. Auch der Weg zu anderen vertrauten Orten wird von Tag zu Tag länger. Wir sind sicher, dass wir uns nicht langsamer bewegen als früher und dass sich die Blattläuse nicht systematisch von uns entfernen.

Das ist ein wichtiger Punkt: Die Entfernung zu den Blattläusen wächst an, obwohl sich diese nicht bewegen. Sie stehen einfach herum, sie ruhen in Bezug auf das Gummi des Ballons. Trotzdem wächst der Abstand von uns zu ihnen und zwischen ihnen an. Aus den Beobachtungen können wir also den Schluss ziehen, dass sich der Boden unter unseren Füßen dehnt. Das ist sehr seltsam, denn wir sind in unserer ganzen Welt herumgelaufen und haben keine Begrenzung entdeckt – und somit auch kein »Außen«, in das hinein unsere Welt expandieren könnte.

Die Expansion unseres Universums ähnelt dem Aufblasen eines Ballons. Die Abstände zu fernen Galaxien wachsen an. Die Astronomen sprechen manchmal von einer Fluchtgeschwindigkeit oder davon, dass sich die Galaxien von uns fortbewegen. Das heißt aber nicht, dass sich die Galaxien durch den Raum von uns wegbewegen würden. Sie sind

keine Splitter einer großen Urknall-Granate, die auseinander fliegt. Vielmehr ist es der Raum zwischen uns und den Galaxien, der expandiert. Zwar bewegen sich die einzelnen Galaxien innerhalb ihres Haufens, dem sie angehören. Doch die Galaxienhaufen selbst befinden sich insgesamt in Ruhe. Der Begriff »in Ruhe« lässt sich dabei durchaus streng definieren. Die Hintergrundstrahlung erfüllt nämlich den gesamten Kosmos und liefert uns so ein universelles Bezugssystem, vergleichbar mit dem Gummi des Ballons. In Bezug auf dieses System können wir die Bewegung messen.

Der Urknall war überall

Der Vergleich mit dem Ballon sollte allerdings nicht überspannt werden. Denn wir betrachten den Ballon von einer außerhalb gelegenen Warte, und die Expansion seiner zweidimensionalen Gummioberfläche ist nur möglich, weil sie in einen dreidimensionalen Raum eingebettet ist. Innerhalb dieser dritten Dimension hat der Ballon einen Mittelpunkt, und seine Oberfläche dehnt sich in die umgebende Luft hinein aus, wenn er aufgeblasen wird.

Daraus könnte man nun folgern, unser dreidimensionaler Raum benötige eine vierte Dimension, in die hinein er expandiert. Aber gemäß der Allgemeinen Relativitätstheorie von Albert Einstein, welche die Grundlage der modernen Kosmologie bildet, ist der Raum selbst dynamisch: Er kann also expandieren, schrumpfen und sich krümmen – ohne in einen höherdimensionalen Raum eingebettet zu sein.

In diesem Sinn ist das Universum in sich abgeschlossen. Es braucht kein Zentrum, von dem aus es expandiert, und keinen leeren Raum außerhalb (was immer das wäre), in den es hineindrängt. Wenn es sich ausdehnt, okkupiert es keinen zuvor freien Raum in seiner Umgebung. Einige neuere Theorien – wie zum Beispiel die Stringtheorie – postulieren zwar durchaus zusätzliche Dimensionen, aber unser dreidimensionaler Raum braucht diese Dimensionen nicht für seine Expansion.

Wie auf der Oberfläche des Ballons, so strebt auch alles in unserem Universum auseinander. Der Urknall war also nicht eine Explosion im Raum, sondern eher eine Explosion des Raums. Er ereignete sich nicht an einem bestimmten Ort, von dem aus das Universum sich

IN KÜRZE

- ▶ **Die Ausdehnung des Universums** ist einer der Eckpfeiler der modernen Wissenschaft – und wird doch häufig falsch verstanden.
- ▶ Wichtig ist, den Begriff »**Urknall**« nicht zu wörtlich zu nehmen. Er ist keine Explosion, die sich im Raum ereignete. Vielmehr explodierte der Raum selbst.
- ▶ Dieser Unterschied zwischen einer **Expansion im Raum** und einer **Expansion des Raums** hat wichtige Folgen für die Größe des Universums, die Fluchtgeschwindigkeit der Galaxien, die Art von Beobachtungen, die den Astronomen möglich sind, sowie für die Natur der beschleunigten Expansion des Universums.
- ▶ Streng genommen sagt das Urknallmodell sehr wenig über den Urknall aus – es beschreibt eigentlich, was **nach dem Urknall** geschehen ist.

Der Urknall – welche Explosion war das?

FALSCH: Der Urknall ähnelt einem Sprengsatz, der an einer bestimmten Stelle im zuvor leeren Raum explodiert ist.

In dieser Sichtweise begann das Universum mit dem explosionsartigen Auftauchen von Materie an einem bestimmten Ort im bereits vorhandenen Raum. Der Druck war im Zentrum der Materie am größten und in der umgebenden Leere am niedrigsten. Diese Druckdifferenz trieb die Materie nach außen.



RICHTIG: Der Raum selbst explodierte.

Der Raum, in dem wir leben, entstand im Urknall und dehnt sich seitdem weiter aus. Es gab somit kein Explosionszentrum; der Urknall ereignete sich überall. Dichte und Druck waren deshalb überall gleich; es gab folglich keinen Druckunterschied, der eine Explosion im herkömmlichen Sinn hätte antreiben können.



ALLE GRAFIKEN: ALFRED T. KAMAJIAN

dann in eine schon vorher vorhandene Leere ausbreitete – er fand überall gleichzeitig statt.

Könnten wir einmal die Zeit rückwärts laufen lassen, so würden wir beobachten, wie alle Regionen im Kosmos zusammenschrumpfen, alle Galaxien sich näher und näher kommen, bis alles wie bei einem gewaltigen kosmischen Verkehrsunfall aufeinander prallt – das ist der Urknall. Der Vergleich mit zusammenstoßenden Fahrzeugen mag vielleicht suggerieren, dass es sich lediglich um ein lokales Hindernis handele, das sich dank der Hinweise des Verkehrsfunks umfahren ließe. Doch dem Urknall kann man nicht ausweichen. Es ist, als würde die Oberfläche der Erde mit allen Autobahnen zusammenschrumpfen, während sich Anzahl und Größe der Fahrzeuge nicht änderten. Irgendwann ist ihre Packungsdichte so stark angewachsen, dass sie überall Stoßstange an Stoßstange stehen – und kein Verkehrsfunk kann mehr eine Ausweichstrecke empfehlen. Überall krachen die Autos ineinander.

Auch der Urknall fand überall statt – in dem Raum, in dem Sie gerade diesen Artikel lesen, ebenso wie an einem Punkt links von Alpha Centauri. Es war keine kosmische Bombe, die an einem bestimmten Ort detonierte, den wir nun als Explosionszentrum identifizieren könnten. Auch in der Ballon-Analogie gibt es keinen Ort auf der Oberfläche, der das Zentrum der Expansion wäre.

So groß wie eine Pampelmuse – und doch unendlich groß

Diese Allgegenwart des Urknalls ist völlig unabhängig von der Größe des Universums – sogar unabhängig davon, ob der Kosmos endlich oder unendlich groß ist. Kosmologen sprechen manchmal davon, unser Universum sei einst so groß wie eine Pampelmuse gewesen. Was sie wirklich meinen, ist: Der Teil des Universums, den wir heute sehen können – der beobachtbare Kosmos –, war einmal so groß wie eine Pampelmuse.

Beobachter in der Andromeda-Galaxie oder einem noch fernerem Sternsyste-

tem haben ihr eigenes beobachtbares Universum, das sich zwar mit unserem überschneidet, aber doch etwas davon unterscheidet. Von ihrer Warte aus sehen sie nämlich Galaxien, die wir nicht beobachten können – einfach, weil sie sich etwas näher an ihnen befinden –, und umgekehrt. Diese fremden Intelligenzen sehen einen Kosmos, der ebenfalls einst die Größe einer Pampelmuse hatte. Wir können uns also das frühe Universum als einen Stapel von einander durchdringenden Pampelmusen vorstellen, der sich in alle Richtungen unendlich ausdehnt. Dementsprechend ist die Vorstellung, das Universum sei beim Urknall »klein« gewesen, irreführend. Die Gesamtheit des Weltraums kann unendlich groß sein. Lässt man einen unendlichen Raum um einen beliebigen Faktor zusammenschrumpfen, so bleibt er immer noch unendlich groß.

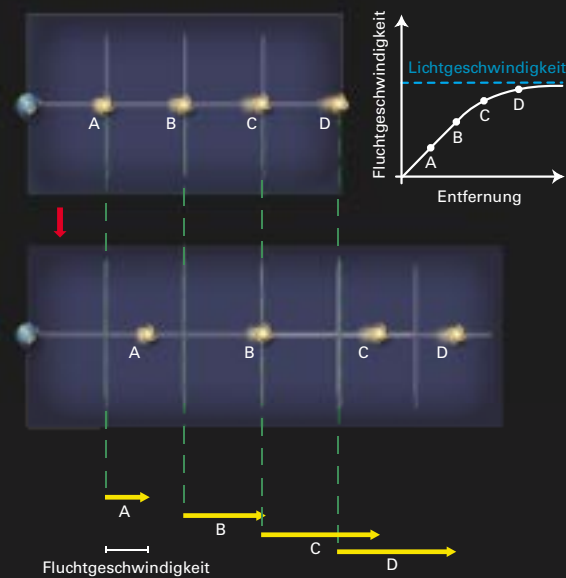
Auch die quantitative Beschreibung der Expansion steckt voller Fallstricke. Die Rate, mit welcher der Abstand zwischen Galaxien anwächst, folgt einer Re- ▷



Können sich Galaxien schneller als Licht von uns entfernen?

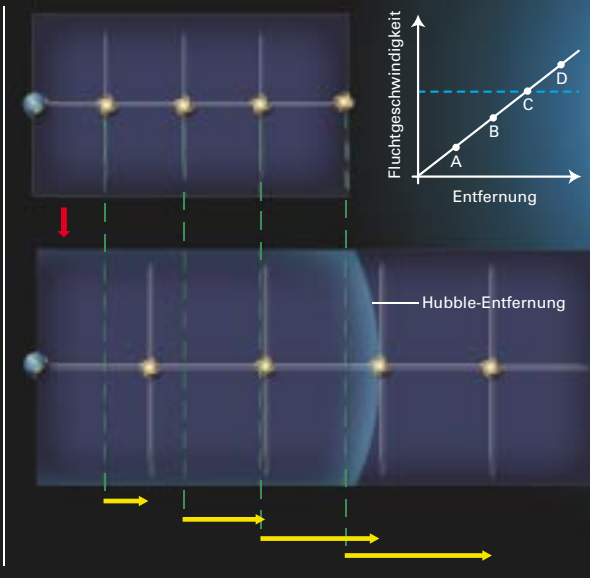
FALSCH: Natürlich nicht – die Spezielle Relativitätstheorie von Einstein verbietet das.

Galaxien – gleich in welchem Raumabschnitt man sie betrachtet – scheinen sich von uns wegzubewegen, und zwar umso schneller, je weiter sie von uns entfernt sind. Wenn allerdings die Lichtgeschwindigkeit die oberste Grenze ist, muss die Zunahme der Fluchtgeschwindigkeit (gelbe Pfeile) bei großen Entfernungen abflachen (Diagramm).



RICHTIG: Natürlich – die Spezielle Relativitätstheorie gilt nicht für die Fluchtgeschwindigkeit.

Im expandierenden Raum nimmt die Fluchtgeschwindigkeit linear mit der Entfernung zu und übersteigt oberhalb der so genannten Hubble-Entfernung die Lichtgeschwindigkeit. Das verstößt nicht gegen die Spezielle Relativitätstheorie, da die Fluchtgeschwindigkeit nicht durch eine Bewegung im Raum, sondern durch die Expansion des Raums zu Stande kommt.



▷ gel, die Edwin Hubble 1929 entdeckte: Die Fluchtgeschwindigkeit v einer Galaxie ist proportional zu ihrem Abstand d von uns: $v = H \cdot d$. Die Proportionalitätskonstante H dieser Beziehung, Hubble-Parameter oder Hubble-Konstante genannt, beschreibt dabei, wie schnell der Raum expandiert – und zwar nicht nur um uns herum, sondern um jeden Beobachter an einer beliebigen Stelle im Universum.

Auf den ersten Blick betrachtet scheinen sich nicht alle Galaxien an diese Regel zu halten. So bewegt sich beispielsweise die Andromeda-Galaxie – das uns nächste große Sternsystem – auf uns zu und nicht von uns weg. Solche Ausnahmen gibt es, weil das Hubble'sche Gesetz nur das durchschnittliche Verhalten der Galaxien beschreibt. Diesem überlagert sich eine moderate lokale Eigenbewegung, sie umkreisen einander und ziehen sich gegenseitig an – so wie es unser

Milchstraßensystem und die Andromeda-Galaxie tun. Auch weit entfernte Galaxien weisen solche Eigenbewegungen auf. Aus unserer Perspektive – also aus großen Entfernungen d betrachtet – sind diese Eigenbewegungen (im Raum) indes viel kleiner als die Fluchtgeschwindigkeit (des Raums) und fallen kaum mehr ins Gewicht. Deshalb gilt für ferne Galaxien das Hubble'sche Gesetz mit großer Genauigkeit.

Effekte der Allgemeinen, nicht der ...

Es ist zu beachten, dass die Expansionsgeschwindigkeit dem Hubble'schen Gesetz zufolge mit der Entfernung ansteigt: Wenn sich eine Galaxie mit 1000 Kilometer pro Sekunde von uns entfernt, wird eine andere, die doppelt so weit weg ist, dies mit 2000 Kilometer pro Sekunde tun. Demzufolge müssten Galaxien ab einem bestimmten Abstand von uns, dem so genannten Hubble-Abstand,

sich sogar schneller als mit Lichtgeschwindigkeit von uns entfernen. Für den gemessenen Wert des Hubble-Parameters beträgt dieser Abstand etwa 14 Milliarden Lichtjahre.

Bedeutet diese Vorhersage von überlichtschnellen Galaxien, dass Hubbles Gesetz falsch ist? Sagt denn nicht die Spezielle Relativitätstheorie, dass sich nichts schneller als das Licht bewegen kann? Solche Fragen haben schon Generationen von Studenten verwirrt. Die Lösung ist, dass die Spezielle Relativitätstheorie nur für »normale« Geschwindigkeiten gilt, also für Bewegungen im Raum. Die Fluchtgeschwindigkeit in Hubbles Gesetz hingegen wird durch die Expansion des Raums verursacht. Diese ist ein Effekt der Allgemeinen Relativitätstheorie und unterliegt nicht den Beschränkungen der Speziellen Relativität. Eine Fluchtgeschwindigkeit, die größer ist als die Lichtgeschwindigkeit, verletzt

mithin nicht die Spezielle Relativitätstheorie: Noch immer gilt, dass nichts ein Lichtstrahl überholen kann.

Erste Hinweise auf ein expandierendes Universum hatten die Astronomen in den Jahren von 1910 bis 1930 erhalten, als sie Galaxien spektroskopisch untersuchten. Atome emittieren und absorbieren Licht bestimmter Wellenlängen, die sich in Laborexperimenten messen lassen. In der Strahlung ferner Galaxien zeigt sich das gleiche Muster von Emissions- und Absorptionslinien wie im Labor, doch sind diese Linien zu längeren Wellenlängen hin verschoben. Die Astronomen sprechen von einer »Rotverschiebung« des Galaxienlichts. Die Erklärung für diesen Effekt ist einfach: Expandiert der Raum, dehnen sich auch die Wellenzüge des Lichts, die sich in diesem Raum ausbreiten. Wenn das Universum seine Größe während der Reise der Photonen verdoppelt, strecken sich auch deren Wellenlängen auf das Doppelte und ihre Energie halbiert sich.

... Speziellen Relativitätstheorie

Dieser Prozess lässt sich über den Begriff der Temperatur beschreiben. Die Energie der von einem Körper abgestrahlten Photonen weist nämlich eine Verteilung auf, die in eindeutiger Beziehung zur Temperatur des Körpers steht. Wenn die Photonen sich durch den expandierenden Raum ausbreiten, verlieren sie Energie und ihre Temperatur sinkt. Auf diese Weise kühlt das Universum infolge der Expansion ab, ganz ähnlich wie das in einem Fahrradreifen oder einer Pressluftflasche komprimierte Gas abkühlt, wenn es herausströmt und sich dabei ausdehnt. Die kosmische Hintergrundstrahlung hat heute beispielsweise eine Temperatur von knapp drei Kelvin. Freigesetzt wurde sie hingegen, als das Universum rund 3000 Kelvin heiß war. Während die Temperatur der Photonen also seitdem auf ein Tausendstel gefallen ist, hat sich das Universum entsprechend auf das Tausendfache ausgedehnt. Durch Beobachten von Gas in fernen Galaxien vermochten die Astronomen direkt die Temperatur der Hintergrundstrahlung in der Vergangenheit zu messen. Damit bestätigten sie, dass der Kosmos im Verlauf der Zeit abgekühlt ist.

Über den Zusammenhang zwischen Rotverschiebung und Geschwindigkeit gibt es viele Missverständnisse. So wird die durch die Expansion verursachte

Rotverschiebung oft mit der bekannteren Rotverschiebung durch den Doppler-Effekt verwechselt. Der gewöhnliche Doppler-Effekt, der die Wellenlänge von Schallwellen verändert, wenn sich die Schallquelle relativ zu uns bewegt, ist aus dem Alltag vertraut: Der Ton eines Martinshorns zum Beispiel klingt tiefer, wenn sich der Rettungswagen von uns entfernt. Dasselbe Prinzip gilt auch für die Wellenlänge von Licht, wenn sich die Strahlungsquelle durch den Raum von uns wegbewegt.

Das ist zwar ähnlich, aber nicht identisch zu dem, was mit dem Licht ferner Galaxien geschieht. Die kosmologische Rotverschiebung unterscheidet sich vom normalen Doppler-Effekt. Ungeachtet

dessen bringen viele Astronomen immer wieder diesen Vergleich, womit sie ihren Studenten keinen Gefallen tun. Für die Doppler-Rotverschiebung und die kosmologische Rotverschiebung gelten zwei unterschiedliche Gleichungen. Die erste stammt aus der Speziellen Relativitätstheorie, welche die Expansion des Raums nicht beinhaltet, während die zweite sich aus der Allgemeinen Relativitätstheorie ableitet und ebendiese Expansion berücksichtigt. Die Ergebnisse beider Gleichungen sind für nahe Galaxien fast identisch, divergieren aber für ferne Galaxien.

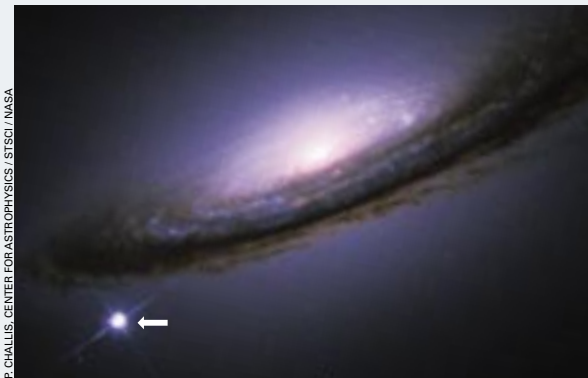
Gemäß normalem Doppler-Effekt strebt die Rotverschiebung von Himmelskörpern umso stärker gegen unendlich, je weiter sich deren Geschwindigkeit

Eine ermüdende Hypothese

Wenn in Spektrum der Wissenschaft ein Artikel über Kosmologie erscheint, treffen kurz darauf Briefe in der Redaktion ein, in denen Leser argumentieren, die Galaxien würden sich gar nicht von uns entfernen – die Expansion des Welt-raums sei vielmehr eine Illusion. In Wahrheit »ermüde« das Licht auf seiner langen Reise zu uns, und dies verursache die beobachtete Rotverschiebung. Irgendein Prozess stehle den Photonen Energie, sodass sich ihre Wellenlängen vergrößern, während sie sich im Raum ausbreiten.

Diese These, die noch aus den Anfangszeiten der spektroskopischen Untersuchung von Galaxien stammt, erscheint auf den ersten Blick plausibel. Doch sie widerspricht den Beobachtungen. Wenn beispielsweise ein Stern als Supernova explodiert, steigt seine Helligkeit zunächst rasch an und fällt dann langsam wieder ab. Für den Supernova-Typ, den die Astronomen zur kosmischen Entfernungsmessung verwenden, dauert dieser Vorgang etwa zwei Wochen. Die Photonen, welche die Supernova innerhalb dieser Zeitspanne aussendet, sollten – so die These von der Lichtermüdung – auf ihrem Weg zu uns Energie verlieren, also langweilliger werden, aber dennoch einen zwei Wochen andauernden Strom von Photonen darstellen.

Die Expansion des Alls streckt jedoch nicht nur die einzelnen Photonen, sondern den gesamten Photonen-



Supernova (Pfeil) in einer Galaxie des Virgo-Haufens. Anhand solcher Sternexplosionen können die Astronomen den Verlauf der kosmischen Expansion untersuchen. Ihre Beobachtungen widerlegen alternative Theorien, in denen der Raum nicht expandiert.

strom. Das innerhalb von zwei Wochen emittierte Licht kommt demnach auf der Erde in einem Zeitraum an, der länger ist als zwei Wochen. Den Effekt konnten die Astronomen jüngst tatsächlich nachweisen: Eine Supernova in einer Galaxie mit einer Rotverschiebung von 0,5 scheint drei Wochen zu dauern, bei einer Rotverschiebung von 1 sogar vier Wochen.

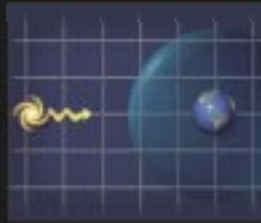
Zudem widerspricht die Lichtermüdungsthese auch dem beobachteten Spektrum der Hintergrundstrahlung und der gemessenen Flächenhelligkeit ferner Galaxien.



Können wir Galaxien sehen, die sich schneller als Licht von uns entfernen?

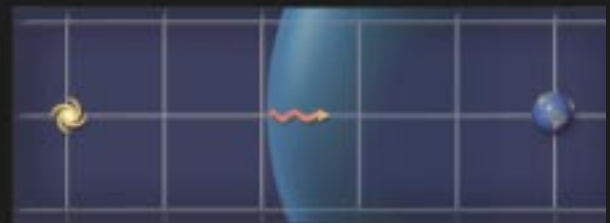
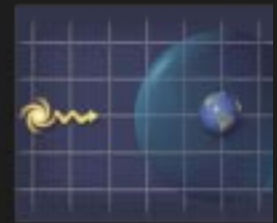
FALSCH: Natürlich nicht. Denn Licht dieser Galaxien kann uns nie erreichen.

Die Fluchtgeschwindigkeit einer Galaxie jenseits der Hubble-Entfernung (Kugelhülle um die Erde) ist höher als die Lichtgeschwindigkeit. Während sich ein von jener Galaxie emittiertes Photon (gelb) durch das Weltall bewegt, dehnt sich dieses aus. Die Entfernung zur Erde wächst schneller an, als sich das Photon bewegt, wie bei einem Schwimmer, der gegen den Strom schwimmt – folglich kann es uns nie erreichen.



RICHTIG: Natürlich, denn die Expansionsrate ändert sich mit der Zeit.

Anfangs wird das Photon tatsächlich durch die Expansion von uns weggedrängt. Doch die Hubble-Entfernung ist nicht konstant: Sie wächst an, und zwar so weit, dass sie schließlich das Photon erreicht. Befindet sich das Photon aber erst einmal innerhalb des Hubble-Abstands, bewegt es sich schneller auf uns zu, als sich die Entfernung zur Erde vergrößert – es kann uns also erreichen.



▷ keit im Raum der Lichtgeschwindigkeit nähert. Die Wellenlängen sind schließlich so weit rotverschoben, dass sie nicht länger beobachtbar sind. Wäre das für Galaxien die richtige Beschreibung, so müssten die fernsten, gerade noch sichtbaren Objekte am Himmel eine Fluchtgeschwindigkeit von knapp unterhalb der Lichtgeschwindigkeit haben. Doch die Formel für die kosmologische Rotverschiebung liefert ein anderes Resultat: Im gegenwärtigen Standardmodell der Kosmologie ist die Fluchtgeschwindigkeit der Galaxien bereits bei einer Rotverschiebung von 1,5 – wenn also Wellenlängen der Strahlung 50 Prozent länger sind als im Labor – gleich der Lichtgeschwindigkeit. Die Astronomen haben inzwischen rund tausend Galaxien mit Rotverschiebungen größer als 1,5 beobachtet. Das heißt: Für mindestens tausend Objekte ist die Fluchtgeschwindigkeit größer als die Lichtgeschwindigkeit. Umgekehrt gilt, dass auch wir uns von diesen Galaxien mit Überlichtgeschwindigkeit entfernen. Die Strahlung des Mikrowellenhintergrunds hat eine noch längere Reise hinter sich und weist eine Rotverschiebung von 1000 auf. Als

das heiße Plasma des frühen Universums die Strahlung emittierte, die wir jetzt empfangen, entfernte es sich von uns mit fünfzigfacher Lichtgeschwindigkeit.

Anrennen gegen die Expansion

Die Vorstellung, wir könnten Galaxien sehen, die sich schneller als Licht bewegen, erscheint zunächst geradezu mystisch. Es ist die Änderung der Expansionsrate, die dieses Phänomen ermöglicht. Angenommen, ein Lichtstrahl, der weiter als die Hubble-Entfernung von 14 Milliarden Lichtjahren von uns entfernt ist, versuche, sich in unsere Richtung zu bewegen. Relativ zu seiner lokalen Umgebung strebt er mit Lichtgeschwindigkeit auf uns zu – aber diese lokale Umgebung entfernt sich infolge der kosmischen Expansion mit einer Fluchtgeschwindigkeit von uns, die größer als die Lichtgeschwindigkeit ist.

Wenngleich sich also der Lichtstrahl mit der größtmöglichen Geschwindigkeit auf uns zu bewegt, vermag er mit der Expansion des Raums nicht Schritt zu halten. Photonen, die sich exakt in der Hubble-Entfernung befinden, ergeht es so wie Alice im Wunderland und der

roten Königin: Obwohl sie so schnell laufen, wie sie können, bleiben sie doch am selben Ort.

Daraus könnten wir schließen, Licht von jenseits der Hubble-Entfernung könne uns niemals erreichen, seine Quellen wären uns auf ewig verborgen. Doch der Hubble-Abstand ist keine konstante Größe, denn er hängt vom Hubble-Parameter ab, der sich im Lauf der Zeit ändert. Der Hubble-Parameter ist proportional zu der Rate, mit der sich der Abstand zwischen zwei Galaxien durch die Expansion ändert, geteilt durch den Abstand selbst. (Diese Rechnung kann dabei mit zwei beliebigen Galaxien durchgeführt werden.) In den kosmologischen Modellen, die mit den Beobachtungsdaten übereinstimmen, wächst der Nenner schneller an als der Zähler – der Hubble-Parameter nimmt also mit der Zeit ab.

Auf diese Weise nimmt der Hubble-Abstand im Lauf der Zeit zu. Demzufolge gelangt Licht, das ursprünglich außerhalb des Hubble-Abstands war, irgendwann durch diese Front hindurch. Die Photonen befinden sich dann in einem Bereich mit einer Fluchtgeschwindigkeit, die kleiner ist als die Lichtgeschwindigkeit.

keit – und können uns deshalb nun erreichen.

Doch die Galaxie, von der die Photonen stammen, mag sich durchaus weiterhin mit Überlichtgeschwindigkeit von uns entfernen. Aus diesem Grund können wir das Licht von Galaxien registrieren, die sich stets mit Überlichtgeschwindigkeit von uns entfernt haben – und dies auch künftig tun werden. Anders ausgedrückt: Der Hubble-Abstand ist keine feste Größe und markiert darum nicht die Grenze des beobachtbaren Universums.

Was aber begrenzt den beobachtbaren Raum? Auch bei dieser Frage gibt es einige Verwirrung. Würde das Weltall nicht expandieren, so könnten wir bis in eine Entfernung von 14 Milliarden Lichtjahren blicken – denn genau diese Strecke kann das Licht seit dem Urknall vor 14 Milliarden Jahren zurückgelegt haben. Aber weil das Universum expandiert, wächst der Raum, den ein Photon bereits durchquert hat, während seiner

weiteren Reise an. Dadurch ist die gegenwärtige Entfernung der fernsten Objekte, die wir sehen können, etwa dreimal so groß, nämlich 46 Milliarden Lichtjahre.

Kosmischer Ereignishorizont

Die jüngste Entdeckung, nämlich dass sich die kosmische Expansion beschleunigt, macht die Dinge noch interessanter. Zuvor hatten die Kosmologen geglaubt, dass wir in einem Universum leben, dessen Expansionsgeschwindigkeit abnehme – und dass folglich nach und nach immer mehr Galaxien in unser Blickfeld gerieten. In einem Universum mit beschleunigter Expansion hingegen sind wir von einer Grenze umgeben, hinter der Dinge geschehen, die wir niemals sehen werden – ein kosmischer Ereignishorizont. Wenn uns das Licht von Galaxien erreichen soll, deren Fluchtgeschwindigkeit die Lichtgeschwindigkeit übersteigt, dann muss die Hubble-Entfernung anwachsen. Doch in einem be-

schleunigt expandierenden Kosmos hört die Hubble-Entfernung irgendwann auf, größer zu werden. Ferne Quellen mögen Licht in unsere Richtung aussenden, doch dieses Licht ist wegen der beschleunigten Expansion hinter der Hubble-Entfernung gefangen.

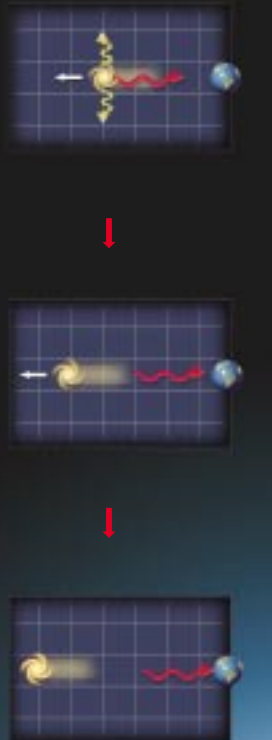
In dieser Hinsicht ähnelt ein Universum mit beschleunigter Expansion einem Schwarzen Loch: Beide haben einen Ereignishorizont, hinter den wir nicht blicken können. Die augenblickliche Entfernung zu unserem kosmischen Ereignishorizont beträgt 16 Milliarden Lichtjahre, er befindet sich also deutlich innerhalb des von uns beobachtbaren Bereichs. Licht, das jetzt von Galaxien ausgeht, die sich jenseits des kosmischen Ereignishorizonts befinden, kann uns niemals erreichen – der Raum zwischen ihnen und uns expandiert zu schnell. Wir werden zwar solche Ereignisse sehen können, die in diesen Galaxien stattfanden, bevor sie den Horizont überquerten; aber nachfol-



Warum gibt es eine kosmische Rotverschiebung?

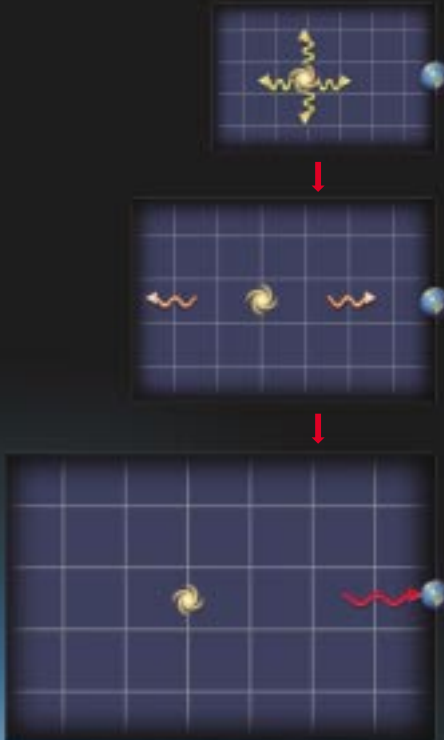
FALSCH: Da sich die entfernenden Galaxien durch den Raum bewegen und ihr Licht dabei eine Doppler-Verschiebung erfährt.

Entfernt sich die Lichtquelle von der Erde, werden die emittierten Lichtwellen durch den Doppler-Effekt gestreckt, also zu roten Wellenlängen verschoben (oben). Während der weiteren Ausbreitung im Weltall ändert sich die Wellenlänge des Lichts nicht (Mitte). Der Beobachter empfängt das Licht, misst seine Doppler-Rotverschiebung und berechnet daraus die Geschwindigkeit der Galaxie (unten).



RICHTIG: Da der expandierende Raum alle Lichtwellen während ihrer Ausbreitung dehnt.

Die Eigenbewegung der Galaxien ist im kosmologischen Rahmen vernachlässigbar. Das von ihnen emittierte Licht hat also in allen Richtungen dieselbe Wellenlänge (oben). Da das Weltall expandiert, wird auch die Wellenlänge des Lichts gestreckt; die Rotverschiebung nimmt also zu (Mitte und unten). Die kosmologische Rotverschiebung unterscheidet sich von derjenigen, die der Doppler-Effekt hervorgerufen würde.



▷ gende Ereignisse werden für alle Zeiten außerhalb unserer Sichtweite bleiben.

In dem Film »Der Stadtneurotiker« erklärt der vom jungen Woody Allen gespielte Alvy Singer seinem Therapeuten und seiner Mutter, warum er seine Hausaufgaben nicht machen kann: »Das Universum expandiert ... Das Universum ist alles – und wenn es expandiert, wird es eines Tages auseinander brechen, und das ist das Ende von allem!« Doch seine Mutter weiß es besser: »Du bist hier in Brooklyn. Und Brooklyn expandiert nicht!«

Warum Brooklyn nicht expandiert

Manche Leute denken wie Alvy: Wenn der Weltraum expandiert, müsse sich auch alles, was sich innerhalb des Welt-raums befindet, ausdehnen. Aber das stimmt nicht. Die Ausdehnung des Raums an sich – also ohne Beschleunigung oder Abbremsung – übt keine Kraft aus. Die Wellenlänge von Photonen dehnt sich mit dem Universum aus, weil Photonen im Gegensatz zu materi-

ellen Dingen wie Atomen und Städten keine zusammenhängenden Körper sind, deren Größe durch ein Gleichgewicht von Kräften reguliert wird. Eine Änderung der Expansionsrate verursacht zwar eine zusätzliche Kraft, aber selbst diese führt nicht dazu, dass Körper sich ausdehnen oder schrumpfen.

Würde beispielsweise die Schwerkraft stärker, so würde unser Rückenmark so weit zusammengestaucht, bis die Elektronenhüllen der Atome in unserer Wirbelsäule ein neues Gleichgewicht erreicht hätten. Dadurch würden die Atome etwas näher beieinander liegen und wir wären etwas kleiner als zuvor, doch wir würden nicht weiter schrumpfen. Ganz ähnlich verhielte es sich in einem Universum, in dem die Anziehungskraft der Gravitation dominierte. Die Expansion würde durch die Anziehungskraft abgebremst und daher einen schwachen Druck auf alle Körper im Kosmos ausüben, die dadurch eine etwas kleinere Gleichgewichtsgröße hätten. Aber sie würden nicht beständig weiter schrumpfen.

Bis vor Kurzem noch glaubten die Kosmologen, wir würden in einem solchen Universum leben. Doch die Expansion beschleunigt sich, und das führt zu einer kleinen, nach außen gerichteten Kraft auf alle Körper. Alle gebundenen Körper sind also etwas größer, als sie es in einem Universum mit gleichmäßiger Expansion wären, weil die Kräfte ihr Gleichgewicht bei einer geringfügig größeren Abmessung einnehmen. Auf der Oberfläche der Erde beträgt diese nach außen gerichtete Kraft nur einen winzigen Bruchteil (10^{-30}) der nach innen gerichteten Gravitation. Wenn sie konstant ist, führt sie nicht zu einer Expansion der Erde, sondern nur dazu, dass die Erde ihr statisches Gleichgewicht bei einem etwas größeren Durchmesser erreicht.

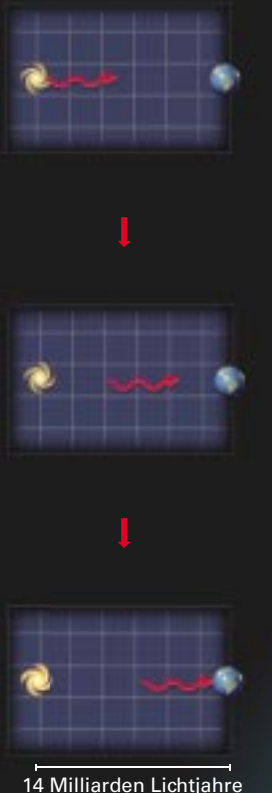
Diese Argumentation gilt natürlich nicht mehr, wenn die Beschleunigung nicht konstant ist, wie einige Kosmologen spekulieren. Wenn die Beschleunigung selbst anwächst, könnte sie irgendwann so stark werden, dass sie alle Strukturen im Kosmos

Wie groß ist das beobachtbare Universum?



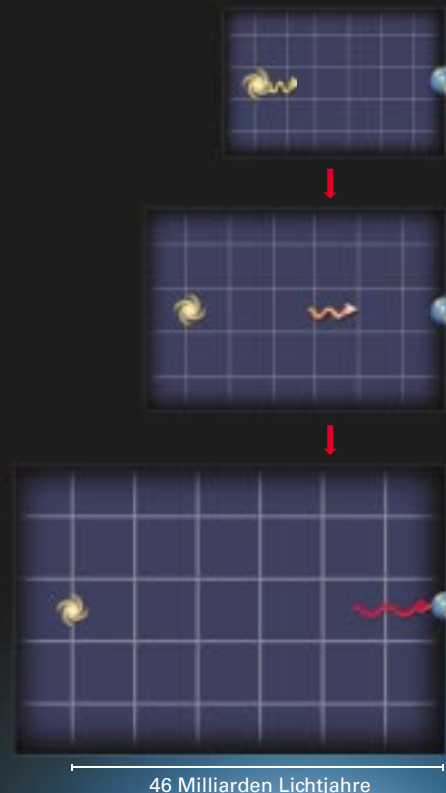
FALSCH: Das Universum ist 14 Milliarden Jahre alt, also beträgt der Radius des beobachtbaren Universums 14 Milliarden Lichtjahre.

Betrachten wir die fernste, gerade noch beobachtbare Galaxie: Die von ihr kurz nach dem Urknall ausgesendeten Photonen erreichen uns gerade jetzt. Ein Lichtjahr ist die Entfernung, die ein Photon in einem Jahr zurücklegt. Also hat ein Photon dieser Galaxie 14 Milliarden Lichtjahre zurückgelegt.



RICHTIG: Da das Weltall expandiert, ist der beobachtbare Teil unseres Universums größer als 14 Milliarden Lichtjahre.

Während sich ein Photon auf dem Weg zu uns befindet, dehnt sich der von ihm durchquerte Raum aus. Zum Zeitpunkt seines Eintreffens bei uns ist also die Entfernung seiner Strahlungsquelle von uns größer als der sich aus der Reisezeit des Photons ergebende zurückgelegte Lichtweg – und zwar etwa dreimal so groß.



Expandieren die Himmelskörper im Universum ebenfalls?

FALSCH: Ja, die Expansion lässt das Universum und alles, was sich in ihm befindet, anwachsen.

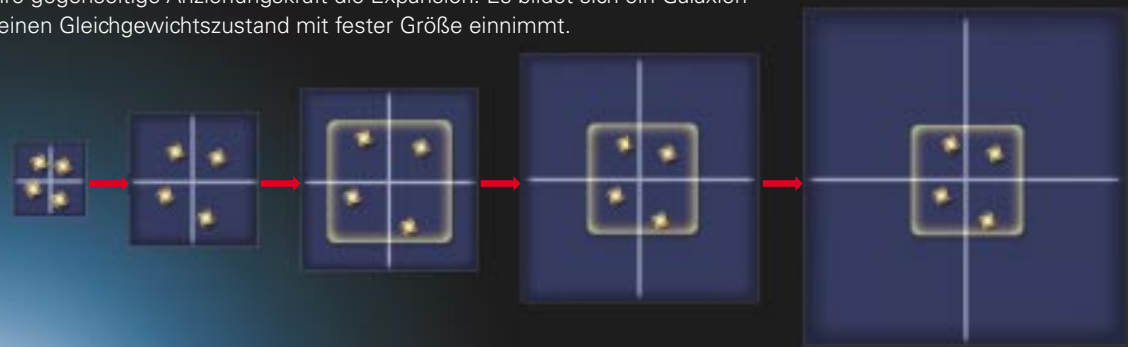
Greifen wir ein Objekt heraus – einen Galaxienhaufen. Wenn das Universum größer wird, wachsen auch die Galaxien und der Haufen. Die äußere Begrenzung des Galaxienhaufens (gelber Rahmen) bewegt sich nach außen.

Galaxienhaufen



RICHTIG: Nein. Nur das Universum expandiert, zusammenhängende Objekte in ihm verändern sich nicht.

Anfangs werden benachbarte Galaxien tatsächlich auseinander gezogen, doch irgendwann überwiegt ihre gegenseitige Anziehungskraft die Expansion. Es bildet sich ein Galaxienhaufen, der einen Gleichgewichtszustand mit fester Größe einnimmt.



zerreißt. In Analogie zum »Big Bang«, dem englischen Begriff für den Urknall, sprechen die Kosmologen vom »Big Rip«, dem großen Riss. Doch zu diesem finalen Zerreißen des Kosmos käme es nicht auf Grund der Expansion oder der Beschleunigung an sich, sondern auf Grund der beschleunigten Beschleunigung.

Das Urknallmodell stützt sich inzwischen auf eine Reihe von Beobachtungsbefunden: die Expansionsbewegung des Universums, die kosmische Mikrowellen-Hintergrundstrahlung, die Häufigkeitsverteilung der chemischen Elemente im All sowie die klumpige Anordnung der Materie. Wie alle wissenschaftlichen Ideen wird dieses Modell eines Tages durch ein anderes abgelöst werden. Aber von allen gegenwärtigen Modellen erklärt es die beobachteten Daten am besten. Neue und genauere Messungen werden es den Kosmologen erlauben, die Expansion und deren Beschleunigung

immer besser zu verstehen. Deshalb können sie immer grundlegendere Fragen über die frühesten Zeiten und die größten Strukturen im Kosmos stellen.

Was löste überhaupt die Expansion aus? Viele Kosmologen sehen die so genannte Inflation als mögliche Ursache, eine Form der beschleunigten Expansion im frühen Kosmos. Doch das kann nur ein Teil der Antwort sein, denn zum Auslösen der Inflation scheint bereits ein expandierendes Universum nötig zu sein.

Und was ist mit den größten Strukturen, jenseits all dessen, was wir sehen können? Expandieren verschiedene Teile des Universums verschieden schnell? Ist unser Universum eine inflationäre Blase in einem viel größeren Multiversum? Niemand weiß es. Viele Fragen sind noch offen. Doch während unser Universum auf ewig expandieren wird, hoffen wir, dass die Verwirrung über die Expansion mit der Zeit schrumpft. ◁



Charles H. Lineweaver und **Tamara M. Davis** arbeiten als Astronomen am Mount-Stromlo-Observatorium in der Nähe von Canberra (Australien).



Anfang der 1990er Jahre, während seiner Zeit an der Universität von Kalifornien in Berkeley, war Lineweaver Mitglied des »Cosmic Background Explorer«-Teams, das winzige Schwankungen in der kosmischen Hintergrundstrahlung entdeckt hat. Davis arbeitet an der »Supernova/Acceleration Probe«, einem in der Entwicklung befindlichen Weltraumobservatorium.

Der Urknall. Anfang und Zukunft des Universums. Von Hans-Joachim Blome. C.H.Beck, 2004

Kosmologie. Spektrum der Wissenschaft, Dossier 2/2000

Cosmology: the science of the universe. Von Edward R. Harrison. Cambridge University Press, 2000

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.