

TEIL III A

Das Tempo der Expansion

Aus der scheinbaren Helligkeit weit entfernter Supernovae schließen Astronomen auf einen entscheidenden Wendepunkt in der Entwicklung des Kosmos. Damals ging eine lange Phase gebremster Ausdehnung in die gegenwärtige Epoche beschleunigter Expansion über.

Von Adam G. Riess und Michael S. Turner

Spätestens seit Isaac Newton im 17. Jahrhundert sein Gravitationsgesetz formulierte, galt die Schwerkraft als Urbild einer rein anziehenden Kraft. Sie drückt uns auf den Boden, verlangsamt den Aufstieg jedes Wurfgegenstands und sorgt dafür, dass der Mond auf seiner Bahn um die Erde bleibt. Die Gravitation hält nicht nur unser Sonnensystem zusammen, sondern bindet auch ganze Galaxien und riesige Galaxienhaufen. Zwar lässt Einsteins Allgemeine Relativitätstheorie im Prinzip auch eine abstoßende Wirkung der Schwerkraft zu, doch darin sahen die meisten Physiker eine rein theoretische Möglichkeit, die mit dem gegenwärtigen Universum nichts zu tun habe.

Bis vor kurzem glaubten die Astronomen einhellig, die Gravitation ver-

langsamt die Expansion des Kosmos. Doch 1998 entdeckten Forscher die abstoßende Seite der Schwerkraft. Beim sorgfältigen Beobachten weit entfernter Supernovae – Sternexplosionen, die für kurze Zeit so hell strahlen wie zehn Milliarden Sonnen – stellte sich heraus, dass sie uns schwächer erscheinen als erwartet. Die plausibelste Erklärung für diese Diskrepanz ist: Das Licht der vor Jahr-milliarden explodierten Supernovae musste einen längeren Weg zurücklegen, als die Theoretiker vorausgesagt hatten. Daraus wiederum folgt, dass die Expansion des Universums sich in Wirklichkeit nicht verlangsamt, sondern beschleunigt.

Abstoßende Schwerkraft?

Einigen Kosmologen war dieser Befund zunächst zu radikal; sie wollten das Defizit der Supernova-Helligkeit auf andere Effekte zurückführen – etwa auf eine Schwächung des Lichts durch intergalaktischen Staub. Doch in den letzten Jahren haben die Astronomen mit dem Vermessen immer fernerer Supernovae die Existenz der kosmischen Beschleunigung zweifelsfrei bestätigt.

Die Frage ist nun: Hat das Tempo der kosmischen Expansion schon seit Anbeginn des Universums zugenommen – oder erst seit relativ kurzer Zeit, das heißt seit rund fünf Milliarden Jahren? Die Antwort hat tief greifende Konsequenzen. Falls sich herausstellt, dass die

Expansion seit jeher beschleunigt ablief, muss die Geschichte des Kosmos komplett umgeschrieben werden. Wenn sich die Beschleunigung aber – wie die Kosmologen erwarten – als relativ spätes Phänomen entpuppt, ließe sich vielleicht die Ursache herausfinden und womöglich auch die größere Frage nach dem künftigen Schicksal des Universums beantworten. Dazu müsste man wissen, wann und wie die Phase beschleunigter Expansion begann.

Vor fast 75 Jahren entdeckte der Astronom Edwin Hubble die Expansion des Universums, als er beobachtete, dass sich die Galaxien von uns entfernen – und zwar umso schneller, je weiter entfernt sie sind. Das nach Hubble benannte Gesetz besagt: Die relative Geschwindigkeit ist gleich Entfernung mal Hubble-Konstante. In der Sprache von Einsteins Allgemeiner Relativitätstheorie ist das Hubble-Gesetz einfach eine Folge der gleichförmigen Expansion des Raumes (Bild S. 44).

In Einsteins Theorie wirkt die Gravitation für alle bekannten Formen von Materie und Energie als anziehende Kraft – selbst in kosmischem Maßstab. Daraus folgt, dass die Expansion des Alls sich in einem Maße verlangsamt, das von der gesamten darin enthaltenen Materie- und Energiedichte abhängt. Aber die Allgemeine Relativitätstheorie schließt auch die Möglichkeit von seltsa-

SERIE

Der beschleunigte Kosmos

Im Mai-Heft

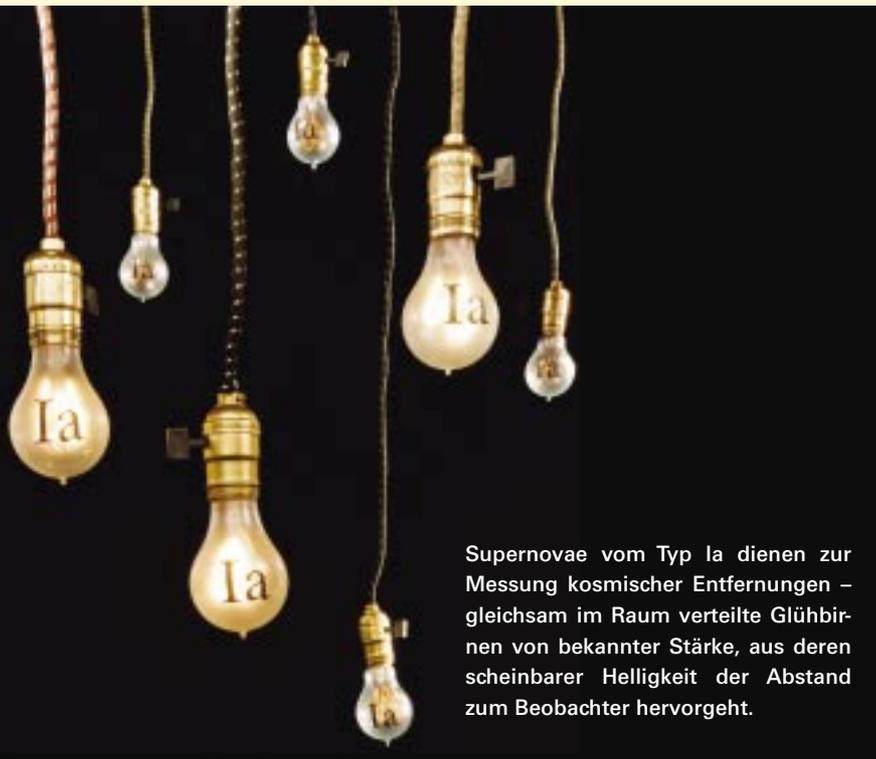
Teil I: Die Symphonie der Schöpfung

Im Juni-Heft

Teil II: Galaktische Wände und Blasen

> In diesem Heft

Teil III: Dunkle Energie und verborgene Dimensionen



Supernovae vom Typ Ia dienen zur Messung kosmischer Entfernungen – gleichsam im Raum verteilte Glühbirnen von bekannter Stärke, aus deren scheinbarer Helligkeit der Abstand zum Beobachter hervorgeht.

DAVID EMMITE PHOTOGRAPHY

würden bei permanenter Beschleunigung zwei entscheidende Aspekte des frühen Kosmos – das Variationsmuster der Hintergrundstrahlung und die Produktion der leichtesten Elemente in den ersten Sekunden nach dem Urknall – nicht mit unseren Beobachtungen übereinstimmen.

Jagd nach Sternexplosionen

Trotzdem ist es wichtig, nach direkten Belegen für eine frühere Phase verlangsamter Expansion zu suchen. Solche Indizien würden zum einen das kosmologische Standardmodell untermauern und zum anderen Hinweise auf die tiefere Ursache für die gegenwärtige Epoche kosmischer Beschleunigung liefern. Da Teleskope in die Vergangenheit schauen, wenn sie das Licht ferner Sterne und Galaxien sammeln, können die Astronomen damit die Expansionsgeschichte des Alls erforschen.

Diese Geschichte geht aus der Beziehung zwischen der Entfernung der Galaxien und der Geschwindigkeit ihrer Fluchtbewegung hervor. Wenn sich die Expansion verlangsamt, ist die Fluchtgeschwindigkeit einer fernen Galaxie größer als nach dem Hubble-Gesetz zu erwarten. Bei beschleunigter Expansion liegt die beobachtete Geschwindigkeit unter dem Hubble-Wert. Oder anders ausgedrückt: Eine Galaxie mit gegebener Fluchtgeschwindigkeit ist weiter entfernt als erwartet – und somit schwächer –, falls das All beschleunigt expandiert.

Um von dieser einfachen Tatsache Gebrauch zu machen, benötigt man astronomische Objekte, deren absolute Helligkeit – pro Sekunde produzierte Strahlungsmenge – bekannt ist und die überall im Universum zu finden sind. Eine spezielle Klasse von Supernovae namens Typ Ia erfüllt beide Bedingungen. Diese Sternexplosionen strahlen so hell, ▶

men Energieformen nicht aus, die eine abstoßende Schwerkraft erzeugen (Kasten S. 45). Die Entdeckung der beschleunigten Expansion weist auf eine solche Energieform hin – die so genannte Dunkle Energie.

Ob die Expansion sich mit der Zeit beschleunigt oder verlangsamt, hängt von einem Kampf zwischen zwei Giganten ab – der Gravitationsanziehung der Materie und der abstoßenden Kraft der Dunklen Energie. Dabei kommt es auf die Dichte der beiden an. Die Dichte der Materie nimmt im Lauf der kosmischen Expansion ab, weil das Volumen des Raumes zunimmt. Zur Materiedichte tragen übrigens strahlende Himmelsobjekte nur einen kleinen Bruchteil bei; der Großteil besteht aus so genannter Dunkler Materie, die eine anziehende Schwerkraft ausübt, aber ansonsten mit gewöhnlicher Materie oder Strahlung nicht merklich in Wechselwirkung tritt.

Über den großen Gegenspieler, die Dunkle Energie, ist nicht viel mehr bekannt, als dass sich ihre Dichte mit der Expansion des Alls höchstens geringfügig ändert. Gegenwärtig ist diese Dichte höher als die der Materie, aber in ferner Vergangenheit dürfte die Materiedichte dominant gewesen sein und die kosmische Expansion gebremst haben (siehe Kasten S. 46).

Die Kosmologen haben gute Gründe für die Annahme, dass sich die Expan-

sion des Universums nicht immer beschleunigt hat. Andernfalls wäre die Existenz der gegenwärtigen kosmischen Strukturen nicht zu erklären. Nach der gängigen kosmologischen Theorie entwickelten sich Galaxien, Galaxienhaufen und noch größere Strukturen aus kleinen Inhomogenitäten der Materiedichte im frühen Universum, die sich noch heute durch kleine Temperaturunterschiede in der kosmischen Hintergrundstrahlung verraten.

Die stärkere Gravitationsanziehung der dichteren Materieregionen verhinderte deren Expansion und führte zur Bildung gravitativ gebundener Objekte – von Galaxien wie unserer Milchstraße bis zu gewaltigen Galaxienhaufen. Wäre die kosmische Expansion hingegen immer beschleunigt abgelaufen, hätte sie das Entstehen dieser Strukturen schon von vornherein verhindert. Außerdem

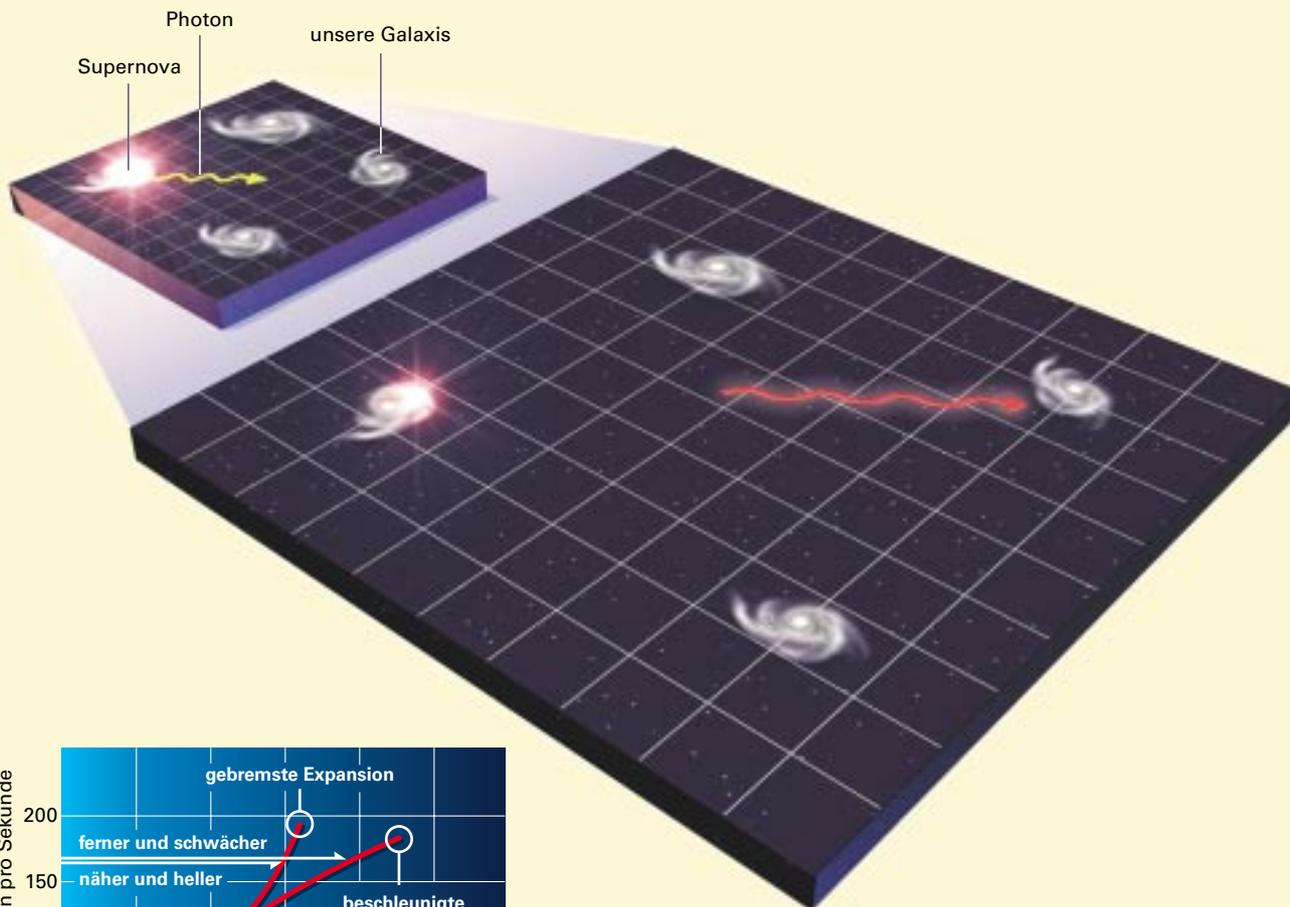
IN KÜRZE

- ▶ Im Jahr 1998 zeigten Beobachtungen an fernen Supernovae, dass **die Expansion des Universums** sich beschleunigt. Seither haben Astronomen diese Entdeckung weiter untermauert.
- ▶ Durch die **Untersuchung noch weiter entfernter Supernovae** fanden die Forscher heraus, dass die Expansion sich verlangsamt, bevor sie schneller wurde – genau wie die Kosmologen vorausgesagt hatten.
- ▶ **Die Bestimmung des Zeitpunkts**, an dem die Verlangsamung in Beschleunigung übergang, gibt vielleicht Auskunft über das Wesen der Dunklen Energie und das künftige Schicksal des Universums.

Wie schnell dehnt sich der Weltraum aus?

Angenommen, in einer fernen Galaxie explodierte eine Supernova, als das Universum nur halb so groß war wie heute (links). Wenn die von der Explosion erzeugte Strahlung unsere Galaxis erreicht, hat sich die Wellenlänge der Strahlung verdoppelt – das Licht ist zum roten Teil des Spektrums verschoben (rechts).

Die Galaxien sind hier nicht maßstabsgerecht dargestellt; der Abstand zwischen ihnen wäre in Wirklichkeit viel größer. Falls die Expansion des Universums sich verlangsamt, ist die Supernova weniger weit entfernt und erscheint heller als erwartet; falls die Expansion sich beschleunigt, ist die Supernova weiter entfernt und leuchtet für uns schwächer (unten).



▷ dass sie von irdischen Teleskopen und erst recht vom Hubble-Weltraumteleskop in den tiefsten Tiefen des sichtbaren Universums aufgespürt werden können. Im vergangenen Jahrzehnt haben Astronomen die absolute Helligkeit der Ia-Supernovae sorgfältig geeicht; darum lässt sich die Entfernung aus der scheinbaren Helligkeit präzise ermitteln.

Die Fluchtgeschwindigkeit einer Supernova ergibt sich aus der Rotverschiebung des Lichts, das ihre Heimatgalaxie

aussendet. Die Strahlung von Objekten, die sich entfernen, wird zu längeren Wellenlängen verschoben, das heißt zu Rot hin. Zum Beispiel verdoppelt sich die Wellenlänge von Licht, das ausgesandt wurde, als das Universum halb so groß war wie heute.

Supernovae – je älter, desto besser

Indem die Forscher die Rotverschiebung und die scheinbare Helligkeit zahlreicher unterschiedlich weit entfernter Supernova

vae messen, können sie eine Geschichte der kosmischen Expansion schreiben. Leider sind Supernovae vom Typ Ia selten: In einer Galaxie wie unserer Milchstraße tritt nur alle paar Jahrhunderte eine einzige auf. Supernova-Jäger beobachten daher immer wieder einen Himmelsausschnitt, der Tausende von Galaxien enthält, und vergleichen die Bilder. Ein plötzlich auftauchender Lichtpunkt könnte eine Supernova sein. Die 1998 gefundenen Indizien für kosmische Be-



schleunigung wurden von zwei Teams gefunden, die Supernovae aus einer Zeit entdeckten, als das Weltall rund zwei Drittel seiner heutigen Größe hatte – vor etwa fünf Milliarden Jahren.

Einige Wissenschaftler fragten sich allerdings, ob die Teams die Daten richtig interpretiert hatten. Konnte nicht ein anderer Effekt als die kosmische Beschleunigung die Supernovae schwächer leuchten lassen als erwartet? Auch intergalaktischer Staub könnte das Licht ferner Supernovae trüben. Oder vielleicht waren solche vor langer Zeit entstandenen Supernovae von sich aus lichtschwächer, weil das Universum damals chemisch anders zusammengesetzt war als heute – mit einem geringeren Anteil an den schweren Elementen, die durch Kernreaktionen in Sternen entstehen.

Zum Glück gibt es einen guten Test für die konkurrierenden Hypothesen. Wenn Supernovae auf Grund einer astrophysikalischen Ursache schwächer scheinen – weil sie von allgegenwärtigem Staub abgeschirmt werden oder in früheren Epochen von vornherein schwächer zu leuchten begannen –, dann müssten diese Effekte mit steigender Rotverschiebung zunehmen. Wenn hingegen eine kosmische Beschleunigung dahinter steckt, die erst nach einer Ära gebremster Expansion begonnen hat, müssen die aus der früheren Verlangsamungsperiode stammenden Supernovae relativ heller erscheinen. Daher vermag die Beobachtung von Supernovae, die explodierten, als das All weniger als zwei Drittel seiner heutigen Größe hatte, zwischen den Hypothesen zu unterscheiden. Natürlich wäre prinzipiell auch ein unbekanntes astrophysikalisches Phänomen denkbar, das exakt die Effekte von Beschleunigung und Verlangsamung simuliert, aber Wissenschaftler halten nicht viel von solchen künstlich abgestimmten Erklärungen.

Derart urtümliche und weit entfernte Supernovae sind freilich schwer zu finden. Eine Ia-Supernova, die explodierte, als das Universum die Hälfte seiner heutigen Größe hatte, ist nur ein Zehnmilliardstel so hell wie Sirius, der hellste Stern am Himmel. Irdische Teleskope können solche Objekte nicht zuverlässig entdecken, aber glücklicherweise gibt es das Hubble-Weltraumteleskop. Im Jahr 2001 gab einer von uns (Riess) bekannt, dass das Instrument zufällig mehrere Bilder einer extrem fernen Ia-Supernova – mit der Nummer SN 1997ff – aufge-

nommen hatte. Aus der Rotverschiebung des Lichts dieser Sternexplosion ging hervor, dass sie vor zehn Milliarden Jahren stattfand, als das Universum ein Drittel seiner heutigen Größe hatte – und das Objekt erschien viel heller, als es nach der Staub-Hypothese hätte sein dürfen. Dieses Resultat war der erste direkte Hinweis auf die Verlangsamungs-epoche. Wir beide schlugen Beobachtungen weiterer Supernovae mit hoher Rotverschiebung vor, um den definitiven Beweis zu erhalten und den Übergang von Verlangsamung zu Beschleunigung zu bestimmen.

Beginn der Beschleunigung: vor fünf Milliarden Jahren

Die Advanced Camera for Surveys, ein 2002 am Weltraumteleskop installiertes Instrument, machte Hubble zu einem regelrechten Supernova-Jagdgerät. Um die erforderliche Stichprobe weit entfernter Ia-Supernovae zu sammeln, leitete Riess ein Programm, das sich die Daten der tiefen Durchmusterung eines kleinen Himmelsfeldes namens Great Observatories Origins Deep Survey zu Nutze machte.

Das Team fand sechs Supernovae, die aus einer Zeit vor mehr als sieben Milliarden Jahren stammten; damals hatte das Universum weniger als die Hälfte seiner heutigen Ausdehnung. Zusammen mit SN 1997ff sind dies die entferntesten Ia-Supernovae, die je entdeckt wurden. Die Beobachtungen bestätigten die Existenz einer früheren Periode gebremster Expansion und legten den Übergang von Verlangsamung zu Beschleunigung in eine Zeit vor fünf Milliarden Jahren (siehe Kasten S. 46). Das passt zu den theoretischen Erwartungen und beruhigt die Kosmologen. Die kosmische Beschleunigung war eine große Überraschung und bleibt in mancher Hinsicht ein ungelöstes Rätsel. Doch so überraschend, dass wir unser Bild vom Kosmos über Bord werfen müssten, ist sie auch wieder nicht.

Die urtümlichen Supernovae lieferten auch neue Erkenntnisse über die Dunkle Energie, den Grund der kosmischen Beschleunigung. Die favorisierte Deutung der Dunklen Energie beruft sich auf die Vakuumenergie; mathematisch entspricht sie der kosmologischen Konstante, die Einstein 1917 einführte, ▷

Wie kann Gravitation abstoßend wirken?

In der Newton'schen Theorie ist die Schwerkraft stets anziehend, und ihre Stärke hängt nur von der Masse des anziehenden Objekts ab. Doch in der Theorie Einsteins wird die Stärke der Gravitationsanziehung auch durch die Zusammensetzung des Gegenstands beeinflusst, der sie hervorruft. Physiker charakterisieren die Zusammensetzung einer Substanz durch ihren inneren Druck.

Die Schwerkraft eines Objekts ist proportional zu seiner Energiedichte plus dem Dreifachen des Drucks. Unsere Sonne zum Beispiel ist eine heiße Gaskugel mit positivem – nach außen gerichtetem – Druck; weil der Gasdruck mit der Temperatur ansteigt, ist die Gravitationsanziehung der Sonne geringfügig größer als die einer kalten Materiekugel mit gleich großer Masse. In einem Gas aus Photonen herrscht hingegen ein Druck, der einem Drittel der Energiedichte entspricht; darum ist in diesem Fall die Anziehungskraft doppelt so groß wie die

einer äquivalenten Masse aus kalter Materie.

Die Dunkle Energie zeichnet sich durch ihren negativen Druck aus. Auch elastische Gegenstände – etwa ein Gummiband – haben einen negativen, das heißt nach innen gerichteten Druck.

Wenn der Druck unter minus ein Drittel der Energiedichte fällt, wird die Summe aus Energie und dreimal Druck negativ, und die Schwerkraft wirkt abstoßend. Da das Quantenvakuum einen Druck von minus eins mal Energiedichte besitzt, ist die Gravitation eines Vakuums stark abstoßend. Andere hypothetische Formen der Dunklen Energie haben einen Druck zwischen minus ein Drittel und minus eins mal Energiedichte. Einige dieser Energietypen wurden herangezogen, um die kosmische Inflation – eine sehr frühe Phase rapider kosmischer Beschleunigung – zu erklären. Andere Typen sind Kandidaten für die Dunkle Energie, von der die heutige Beschleunigung ihren Schwung bezieht.

DAS TEMPO DER EXPANSION

▷ später allerdings wieder verwarf. Weil Einstein zunächst dachte, er müsse ein statisches Modell des Universums konstruieren – die kosmische Expansion war noch nicht entdeckt –, postulierte er die kosmologische Konstante, um die Gravitationsanziehung der Materie zu kompensieren. Nach diesem Rezept war die Dichte der Konstante halb so groß wie die der Materie. Doch um die beobachtete Beschleunigung des Universums zu erzeugen, muss die Konstante doppelt so groß sein wie die Materiedichte.

Woher könnte diese Energiedichte stammen? Aus dem Unbestimmtheitsprinzip der Quantenmechanik folgt, dass das Vakuum von Teilchen erfüllt ist, die quasi von geborgter Zeit und Energie leben, indem sie unentwegt auftauchen

und sofort wieder verschwinden. Aber wenn Theoretiker versuchen, die Energiedichte dieses Quantenvakuums zu berechnen, kommen sie auf Werte, die um mindestens 55 Zehnerpotenzen zu groß sind. Wäre die Vakuumenergiedichte wirklich so hoch, müsste die gesamte Materie des Universums schlagartig auseinander fliegen, und niemals hätten sich Galaxien gebildet.

Dunkle Energie als Retter in der Not

Diese Diskrepanz ist die schlimmste Peinlichkeit der theoretischen Physik genannt worden – aber sie könnte auch eine große Chance bedeuten. Zwar werden neue Versuche, die Vakuumenergiedichte abzuschätzen, vielleicht just den richtigen Wert ergeben, um die kosmi-

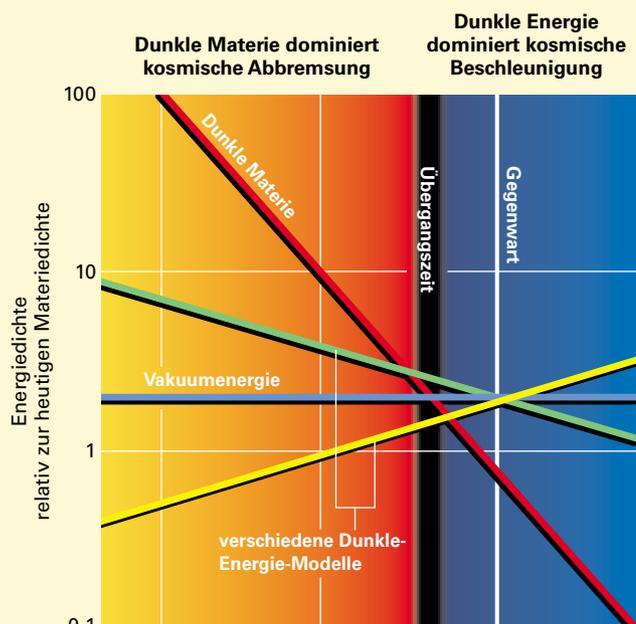
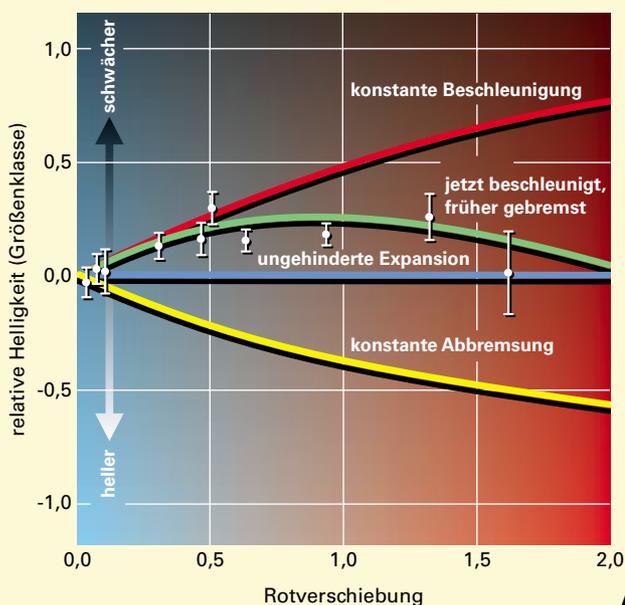
sche Beschleunigung zu erklären. Doch nach Überzeugung vieler Theoretiker wird eine korrekte Berechnung mit Hilfe eines neuen Symmetrieprinzips zu dem Schluss führen, dass die Energie des Quantenvakuums schlicht null ist: Auch ein Quanten-Nichts wiegt nichts. Falls das zutrifft, muss etwas anderes die Expansion beschleunigen.

Theoretiker haben dazu vielerlei Vorschläge gemacht – vom Einfluss zusätzlicher verborgener Dimensionen bis zu einer neuen Naturkraft namens Quintessenz. Meist postulieren diese Modelle eine Dunkle Energiedichte, die nicht konstant ist, sondern im Lauf der Expansion abnimmt; es gibt aber auch die Idee, dass die Dunkle Energie mit der kosmischen Expansion anwächst. Die

Der Übergang von verlangsamerter zu beschleunigter Expansion

Neuere Beobachtungen weit entfernter Supernovae zeigen an, dass die Expansion des Universums sich zunächst verlangsamt und erst später begann, sich zu beschleunigen (links). Typ-Ia-Supernovae mit größeren Rotverschiebungen als 0,6 erscheinen heller, als zu erwarten wäre, wenn das Universum sich immer beschleunigt ausgedehnt hätte – oder wenn intergalaktischer Staub ihr Licht trüben würde. Jeder Datenbalken bezeichnet Supernovae mit fast gleicher Rotverschiebung.

Die Resultate zeigen, dass der Übergangspunkt zwischen Verlangsamung und Beschleunigung rund fünf Milliarden Jahre in der Vergangenheit liegt. Wenn die Astronomen diese Übergangsepoche präziser zu bestimmen vermöchten, könnten sie daraus ableiten, wie sich die Dichte der Dunklen Energie im Laufe der Zeit entwickelt hat, und vielleicht ihr geheimnisvolles Wesen ergründen (rechts).



Alter des Universums in Milliarden Jahren	2	5	10	14	25
Rotverschiebung	3,6	1,2	0,25	0	–
Größe des Universums relativ zur Gegenwart	0,2	0,5	0,8	1	2

BRYAN CHRISTIE DESIGN



wohl radikalste Idee besagt, die Dunkle Energie existiere gar nicht; vielmehr müsse Einsteins Gravitationstheorie modifiziert werden (siehe den nachfolgenden Artikel).

Da das zeitliche Verhalten der Dunklen Energie vom theoretischen Modell abhängt, ergibt jede Theorie einen anderen Zeitpunkt für den Übergang von verlangsamer zu beschleunigter Expansion. Wenn die Dunkle Energiedichte während der Expansion abnimmt, tritt der Übergang früher ein als bei einem Modell mit konstanter Dunkler Energiedichte. Auch die Modelle mit modifizierter Gravitation haben merkbare Auswirkungen auf diesen Zeitpunkt. Die neuesten Supernova-Daten passen zu Theorien mit konstanter Dunkler Energiedichte – aber auch zu den meisten Modellen mit variabler Dunkler Energiedichte. Nur Theorien, die starke Schwankungen dieser Größe postulieren, können jetzt ausgeschlossen werden.

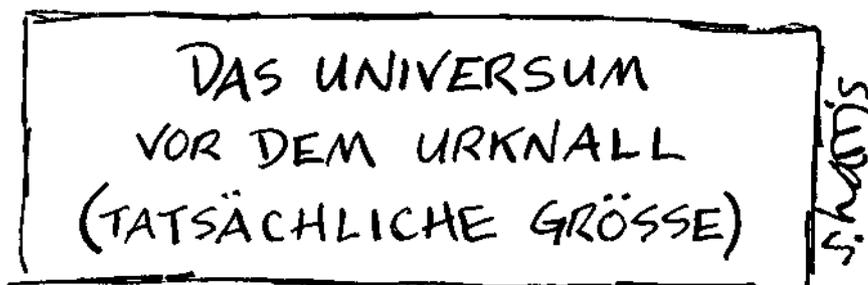
Kosmische Zukunft – Kollaps oder Hyperbeschleunigung?

Um den theoretischen Spielraum einzuschränken, sammelt das Hubble-Weltraumteleskop weiter Supernova-Daten, welche die Details der Übergangsphase präzisieren könnten. Das Weltraumteleskop bleibt zwar das einzige Mittel, die Frühgeschichte der kosmischen Expansion zu erforschen, aber mehrere bodengestützte Programme versuchen die – zeitlich wie räumlich näher liegende – Beschleunigungsphase immer präziser auszumessen und dadurch das Geheimnis der Dunklen Energie zu ergünden. Das ehrgeizigste Projekt ist die Joint Dark Energy Mission (JDEM), die das US-Energieministerium und die Nasa gemeinsam vorgeschlagen haben. JDEM ist als Weltraumteleskop mit Zweimeter-Spiegel und großem Gesichtsfeld konzipiert; es soll Tausende von Ia-Supernovae entdecken und präzise messen. Ob JDEM allerdings im nächsten Jahrzehnt die Arbeit aufnehmen wird und ob das Hubble-Teleskop überhaupt bis dahin seine Supernova-Jagd fortsetzen kann, ist angesichts jüngster Budgeteinschränkungen ungewiss.

Das Rätsel der kosmischen Beschleunigung hängt eng mit dem künftigen Schicksal unseres Universums zusammen. Falls die Dunkle Energiedichte konstant ist oder mit der Zeit zunimmt,

werden in rund hundert Milliarden Jahren auf Grund der extremen Rotverschiebung nur noch ein paar hundert Galaxien am Himmel zu sehen sein. Wenn die Dunkle Energiedichte hingegen abnimmt und die Materie wieder die Oberhand gewinnt, wird unser kosmischer Horizont wachsen und zusätzliche Bereiche des Universums enthüllen.

Sogar noch extremere – und tödliche – Zukunftsszenarien sind denkbar. Falls die Dunkle Energiedichte nicht fällt, sondern immerfort steigt, muss das Universum letztlich eine »Hyperbeschleunigung« erleiden, die nacheinander Galaxien, Sonnensysteme, Planeten und Atomkerne zerreißt. Das Universum könnte aber auch wieder kollabieren, wenn die Dunkle Energiedichte auf einen negativen Wert fällt. Erst wenn es uns gelingt, das geheimnisvolle Wesen der Dunklen Energie zu enträtseln, sind Prognosen über unsere kosmische Zukunft möglich. ◁



Adam G. Riess (links) ist Astronom am Space Telescope Science Institute, der Wissenschaftszentrale für das Hubble-Weltraumteleskop; er lehrt Physik und Astronomie an der Johns-Hopkins-Universität. 1998 war er Hauptautor des Artikels, in dem das High-z-Supernova-Team die Entdeckung der beschleunigten Expansion bekannt gab.

Michael S. Turner ist Professor an der Universität Chicago und derzeit stellvertretender Direktor für Mathematik und Physik bei der National Science Foundation. 1995 sagte er mit Lawrence M. Krauss die kosmische Beschleunigung voraus und prägte den Begriff Dunkle Energie.

Connecting quarks with the cosmos. Von: Committee on the Physics of the Universe, National Research Council. National Academies Press, 2003

The extravagant universe: exploding stars, dark energy and the accelerating cosmos. Von Robert P. Kirshner. Princeton University Press, 2002

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