



NASA, ESA, Johan Richard (Caltech, USA), Davide de Martin & James Long (ESA/Hubble)

KOSMISCHE LINSE

Ein Haufen von mehreren Hundert Galaxien, der so massiv ist, dass er als gigantische kosmische Linse wirkt, die das Licht von weiter entfernten Galaxien verzerrt. Diese Verzerrung des Raumes durch die Schwerkraft wurde von Einstein vorhergesagt. Heute wird sie eingesetzt, um die Verteilung von Dunkler Materie im Universum zu kartografieren.

INTERGALAKTISCHE SUPERHEFE

Die Dunkle Energie zwingt das Universum zu immer rascherer Expansion. Seit ihrer Entdeckung vor zwölf Jahren ringen Astrophysiker um eine Antwort, was diese rätselhafte Dunkle Energie sein könnte. Von Thomas Müller

«Tief in unseren Herzen wissen wir doch, dass das nicht stimmen kann», seufzte Robert Kirshner im Dezember 1997. Der weitherum respektierte Astronom an der Harvard-Universität sprach von den damals heiss gehandelten Gerüchten, dass sich die Expansion des Universums beschleunigte. Jahrzehntlang hatten theoretische und beobachtende Astronomen diskutiert, ob das Universum dereinst wieder in sich zusammenfallen würde oder ob die «Explosionsenergie» des Urknalls ausreichen würde, die Galaxien auf alle Zeiten weiter auseinanderzutreiben. Doch nun behaupteten zwei voneinander unabhängige Forschungs-Konsortien um Saul Perlmutter (Universität von Kalifornien, Berkeley) und den damaligen Harvard-Astronomen Brian P. Schmidt, das Universum gebe Gas, anstatt auf die Bremse zu gehen oder ewig weiterzuwachsen.

SIEGREICHER GEGENSPIELER DER GRAVITATION

Gemessen hatten die beiden Konsortien die Beschleunigung anhand eines bestimmten Typs von Supernovae (SN1a), von denen man annimmt, dass sie immer mit der gleichen Energie explodieren und deshalb auch immer gleich hell aufleuchten. Astronomen sprechen deshalb von «Standardkerzen», mit denen sich Distanzen im Universum vermessen lassen, ähnlich wie sich die Entfernung einer Strassenlampe bestimmen lässt, wenn ihre Leuchtkraft bekannt ist. Kombiniert mit der «Fluchtgeschwindigkeit» einer Galaxie, die sich aus der Verschiebung des Lichtspektrums in den roten Bereich ergibt (Rotverschiebung), lässt sich die Hubble-Konstante bestimmen, die ein Mass für die Expansionsgeschwindigkeit des Universums darstellt. Verblüfft hatten die beiden Konsortien festgestellt, dass die fernsten noch messbaren Supernovae weiter weg sind als erwartet. Das heisst, die Expansion des Universums musste

eine Beschleunigung erfahren haben, von der bislang niemand etwas wusste.

Auch Philippe Jetzer und Uros Seljak, beide auf Kosmologie spezialisierte Professoren am Institut für Theoretische Physik, waren ob der Neuigkeiten überrascht und blieben eine Weile lang skeptisch. Die Resultate wurden jedoch durch eine komplett andere Messmethode ergänzt. Messungen des Echos des Urknalls, der sogenannten kosmischen Hintergrundstrahlung, hatten im Lauf der 1990er-Jahre ergeben, dass wir in einem «flachen» Universum leben, das der (euklidischen) Geometrie unserer Alltagswelt gehorcht. Das bedeutet, dass Licht auf «geradem» Weg zu uns gelangt und das Universum nicht gekrümmt ist.

Diese Feststellung zieht eine irritierende Konsequenz nach sich. Denn der bei weitem grösste Anteil der gesamten im Universum vorhande-

So kurz, so schleierhaft, denn die Natur der Dunklen Energie ist damit nicht erklärt. Auch Seljak und Jetzer ringen um Worte, sollen sie beschreiben, wie Dunkle Energie wirkt. Jetzer zieht einen Vergleich mit dem Verhalten von unterkühltem Wasser heran. Das ist Wasser, das ganz langsam unter den Gefrierpunkt von 0 Grad Celsius abgekühlt wird, sodass es flüssig bleibt. Dann genügt eine winzige Störung, ein Hauch oder ein leichtes Schütteln, und das Wasser gefriert schlagartig und setzt dabei Energie frei. So ähnlich könnte auch der Urknall abgelaufen sein. Das Universum befand sich in einer Art «überspanntem» Energiezustand, bis durch eine winzige (quantenphysikalische) Fluktuation der Knall ausgelöst wurde. Dabei wurde Dunkle Energie frei, die das Universum auseinandertreibt. Auch heute noch.

In den Anfängen des Universums war der Anteil der Dunklen Energie an der Gesamtenergie kleiner als heute; dunkle und helle Materie vermochten deshalb die Expansion zu bremsen. Vor etwa fünf Milliarden Jahren jedoch

Die Dunkle Energie stellt 74 Prozent der Gesamtenergie im Universum – sie durchdringt den Raum gleichförmig und bläht ihn unablässig auf.

nen Energie kann nicht in der hellen, sogenannt baryonischen Materie stecken, aus der wir, die Sterne und das intergalaktische Gas gemacht sind. Angesichts der beobachteten beschleunigten Expansion steuern nur etwa vier Prozent an die Gesamtenergie des Universums bei. Und die rätselhafte Dunkle Materie schlägt nur mit etwa 22 Prozent zu Buche. «Also muss da noch etwas sein, und dieses Etwas ist die Dunkle Energie», erklärt Uros Seljak. Sie stellt 74 Prozent der Gesamtenergie, durchdringt den Raum gleichförmig und bläht ihn unablässig auf. Sie ist somit der siegreiche Gegenspieler der (dunklen und hellen) Materie, die die Gravitation dazu treibt, sich in Form von Galaxien-Filamenten und -Clustern zu verklumpen.

nahm die Dunkle Energie überhand und die Beschleunigung setzte ein. Seither wirkt sie wie eine Superhefe, die einen Kuchen im Ofen immer schneller aufgehen lässt.

OCKHAMS RASIERMESSER

Die pragmatischste Lösung ist, die Dunkle Energie einfach als kosmologische Konstante zu deuten. Albert Einstein hatte sie 1915 erfunden, um seine Allgemeine Relativitätstheorie mit der damals herrschenden Vorstellung eines gleichförmigen, unendlichen und unveränderlichen Universums in Einklang zu bringen. Als der US-Astronom Edwin Hubble Ende der 1920er-Jahre die Expansion des Weltalls beobachtete, strich Einstein die Konstante wieder

und bezeichnete den Fehler als «meine grösste Eselei». Nun erlebt Lambda, wie Astronomen die kosmologische Konstante nennen, eine Renaissance. Diesmal jedoch soll sie in den Modellen der theoretischen Physiker aber kein statisches Universum hervorzaubern, sondern im Gegenteil eines, das immer schneller expandiert. Die kosmologische Konstante ist Teil der sogenannten Zustandsgleichung des Universums und bewirkt eine stetige Bildung von «Raum» zwischen der Materie, gegen die die Gravitation in ihrem steten Bemühen, alles einander zu näherzubringen, nicht mehr ankommt. Aber eben, eine Erklärung der Natur der Dunklen Energie ist auch das nicht, nur eine Beschreibung ihrer Effekte.

Ein zweiter Erklärungsversuch der Dunklen Energie ist die Quintessenz. In der Astronomie steht sie für eine fünfte, noch unentdeckte Kraft und ihr zugehöriges Feld, die die bekannten vier Kräfte Gravitation, Elektromagnetismus und die beiden Kernkräfte ergänzen. Der Vorteil der Quintessenz aus Sicht der Theoretiker ist ihre Flexibilität. Sie ist keine Konstante, sondern dynamisch, kann sich im Lauf der Zeit verändern und könnte somit eine andere Erklärung dafür liefern, warum die Beschleunigung erst vor fünf Milliarden Jahren einsetzte.

«Aber es gibt keinen wirklich guten Grund, auf die Quintessenz oder andere, exotischere Theorien zu setzen», sagt Seljak und zitiert «Ockhams Rasiermesser», eine bei Astronomen beliebte Maxime, nach der bei einer Auswahl von Theorien diejenige weiterverfolgt werden sollte, die die beobachteten Umstände am einfachsten, aber dennoch richtig beschreibt – und das ist die Interpretation der Dunklen Energie als kosmologische Konstante. Da jedoch eine dingfestere Erklärung der Dunklen Energie bis auf Weiteres buchstäblich in den Sternen steht, bleibt vorderhand nichts anderes übrig, als deren Effekte noch genauer auszumessen.

Sowohl Jetzer wie auch Seljak sind an Forschungen beteiligt, die dazu einen Beitrag leisten können. Seljak versucht, die Verklumpung von dunkler und heller Materie und damit die grossräumigen Strukturen des Universums sowohl theoretisch als auch beobachtend zu erfassen. Er ist am Sloan Digital Sky Survey beteiligt, bei dem 100 Millionen Galaxien be-

obachtet werden. Sie sind nicht etwa gleichmässig über den Raum verteilt, sondern ballen sich in Clustern und reihen sich in Filamenten auf, die das Universum durchziehen wie die Anden, der Himalaya oder die Alpen unsere Kontinente. Zwischen den Galaxienhaufen und Filamenten weiten sich ozeanische Leeren, in denen es nichts gibt ausser Dunkle Energie, die die Expansion des Raumes unablässig vorantreibt.

Seljak und seine Mitstreiter verwenden bei dieser Vermessung des Universums den Gravitationslinseneffekt. Stehen zwei Galaxien von der Erde aus betrachtet hintereinander, wirkt die vordere wie eine Linse und lenkt das Licht der hinteren ab. Mit dieser Technik lässt sich ableiten, wie die Verklumpung des Universums in naher Vergangenheit vonstatten ging. Das lässt wiederum Rückschlüsse zu, wie sich die «Potenz» der Dunklen Energie, die der Verklumpung entgegenwirkt, entwickelte, und ob allenfalls doch regionale Unterschiede auftreten.

Um weiter zurück in die Vergangenheit zu blicken, sind kräftigere Lichtquellen nötig als Galaxien. Quasare sind hier das Objekt der Begierde, weil sie zu den strahlungskräftigsten Lichtquellen im Universum gehören. Sie sitzen im Zentrum von Galaxien und senden ähnlich wie ein Richtsender ein ungeheuer kräftiges Radiosignal aus, das, sofern man sich in dessen Abstrahlungskegel befindet, weit herum zu empfangen ist. «Noch ist es zu früh, um zwischen der kosmologischen Konstante und Quintessenz-Theorien zu unterscheiden, nicht zu-

Effekt verschiedener Ursachen, die in ihrer Summe bewirken, dass der sonnennächste Punkt der Planeten im Lauf der Zeit um das Zentralgestirn herum wandert. Auch die Krümmung des Raumes, wie sie von Einsteins Allgemeiner Relativitätstheorie beschrieben wird, trägt zur Periheldrehung bei. Die korrekte Berechnung der Periheldrehung der Merkurlaufbahn war einer der ersten Triumphe von Einsteins Relativitätstheorie.

Jetzer hat nun aus heute zur Verfügung stehenden, wesentlich präziseren Daten über die Bewegungen der Planeten eine obere Grenze für die Grösse der kosmologischen Konstante abgeleitet. Da die Dunkle Energie wie eine Abstossungskraft wirkt, die proportional zum Abstand zwischen zwei Körpern – in diesem Fall zwischen Sonne und Planet – wächst, trägt sie einen kleinen Teil zur Periheldrehung bei. «Damit betreiben wir eine Art Hochpräzisionskosmologie, die es dereinst erlauben könnte, unsere «lokale» kosmologische Konstante mit derjenigen zu vergleichen, die sich durch Messungen der grossräumigen Strukturen des Universums ergeben hat.» Treten dabei Differenzen zutage, würde das bedeuten, dass die kosmologische Konstante nicht überall im Universum gleich gross ist.

Das wäre in der Tat spannend, aber ob es weiterhelfen würde, um die Natur der Dunklen Energie zu klären, erscheint fraglich. Tatsache ist: Zwölf Jahre nach ihrer Entdeckung weiss niemand, was hinter der Dunklen Energie

Zwischen den Galaxienhaufen und Filamenten weiten sich ozeanische Leeren, in denen es nichts gibt ausser Dunkle Energie.

letztes deshalb, weil es sich bei den Quintessenz-Theorien um eine ganze Familie von Theorien handelt, die alle unterschiedliche Ergebnisse prognostizieren», erklärt Seljak.

SUCHE IM ASTRONOMISCHEN HINTERHOF

Jetzer hingegen hat die kosmologische Konstante gewissermassen in unserem astronomischen Hinterhof bestimmt, und zwar anhand der Periheldrehung von Planeten in unserem Sonnensystem. Dabei handelt es sich um einen

steckt. Die Komponente, die drei Viertel der Energie im Universum ausmacht, ist zum neuen Mysterium der Kosmologie geworden. «Dass ich erkenne, was die Welt im Innersten zusammenhält», war Fausts Antrieb, sich der Magie zu ergeben. Jetzer und Seljak werden das nicht tun, doch wird sie die Frage, was die Welt im Äussersten auseinandertreibt, noch lange beschäftigen.

KONTAKT Prof. Phillipe Jetzer, jetzer@physik.uzh.ch; Prof. Uros Seljak, seljak@physik.uzh.ch