

ASTROPHYSIK ZWEIFEL AN DER DUNKLEN ENERGIE

Zwei Forscherteams stellen in Frage, ob sich das All tatsächlich immer schneller ausdehnt, wie viele Experten vermuten. Doch lässt sich das moderne Weltbild der Kosmologie wirklich so leicht aus den Angeln heben?



Robert Gast ist Physiker und Redakteur bei »Spektrum der Wissenschaft«.

» [spektrum.de/artikel/1714776](https://www.spektrum.de/artikel/1714776)

AUF EINEN BLICK DAS RASENDE UNIVERSUM

- 1 Einige Wissenschaftler melden Zweifel an der Dunklen Energie an, die das All beschleunigt expandieren lassen soll. Sie sei kein reales Phänomen, sondern eine Fehlinterpretation von Messdaten.
- 2 Die Analysen der Kritiker weisen Schwächen auf, nur die wenigsten Forscher schenken ihnen Glauben. Doch die Diskussion könnte dabei helfen, die Messunsicherheiten in der Kosmologie besser zu verstehen.
- 3 Eine der offenen Fragen ist, ob das Weltall tatsächlich in allen Blickrichtungen gleich aussieht – oder ob es in manchen weit entfernten Regionen des Alls andere Strukturen aufweist.

Wie einen Luftballon, in den jemand immer kräftiger hineinbläst – so stellen sich Forscher wie Nobelpreisträger James Peebles (links) das Weltall vor. Oxford-Astrophysiker Subir Sarkar (rechts) und andere Kritiker stellen nun jedoch diese Sichtweise in Frage.

GALAXIE, ESA/HUBBLE © NASA, RELICS (WWW.SPACETELESCOPE.ORG/IMAGES/POTW/1833A/) / CC BY 4.0 (CREATIVE COMMONS) /
LICENSES BY WOLFGANG SCHNEIDER / STOCK.ADO.BE.COM, BEARBEITUNG: SPECTRUM DER WISSENSCHAFT

MOBEL MEDIA AG, FOTO: ALEXANDER MAHMOUD (WWW.HUBELPRIZE.ORG/PRESS/PHOTOS/2019/VEELUS/PHOTO/GALLERY/)



NIELS-BOHR-INSTITUT, MIT PROF. GEN. VON SUBIR SARKAR

Am wichtigsten war Subir Sarkar, dass auch James Peebles von der Sache erfährt. »Jim hatte immer ein offenes Ohr für unsere Kritik«, sagt Sarkar. Er selbst ist Professor für Astrophysik an der ehrwürdigen University of Oxford, doch Jim Peebles steht noch eine Treppenstufe höher: 2019 erhielt der heute 85-Jährige den Physik-Nobelpreis. Peebles gilt als jemand, der sich nicht mit dem Status quo zufriedengibt – und immerzu nach Schwächen im Weltbild der Kosmologie sucht.

Und just solch eine Macke meint Subir Sarkar aufgespürt zu haben. Es ist eine ziemlich große Macke, um nicht zu sagen, eine gigantische. Es geht um das, was Kosmologen »Dunkle Energie« nennen. Sie soll dafür verantwortlich sein, dass das Weltall immer schneller expandiert – eine Art Antischwerkraft, die benachbarte Ansammlungen von Galaxien auseinanderdrückt. Schätzungen zufolge macht sie dabei stolze 68 Prozent des kosmischen Energie-Materie-Haushaltes aus. Sie wäre damit weit häufiger als Dunkle Materie (27 Prozent) und jene gewöhnliche Materie, aus der Sterne, Planeten und Menschen bestehen (5 Prozent).

Sarkar, 66, glaubt nicht an dieses Weltbild. Dunkle Energie und beschleunigte Expansion sind aus seiner Sicht riesige Irrtümer. Verantwortlich sei eine falsche Interpretation von Messdaten. »Die Beschleunigung gibt es zwar, aber sie zerrt uns nur in eine Richtung«, sagt er. »Was wir beobachten, kann daher nicht die Dunkle Energie sein, denn diese müsste in alle Richtungen wirken.«

Sarkar läuft bereits seit Jahren Sturm gegen das beschleunigte Universum. Immer wieder hat er entsprechende Forschungsarbeiten veröffentlicht. Doch im Herbst 2019 sei ihm gemeinsam mit drei jüngeren Kollegen der entscheidende Durchbruch gelungen, erzählt der indischstämmige

Theoretiker. Was ihm noch fehlte, war die Unterstützung einflussreicher Kosmologen. Also schickte Sarkar eine E-Mail an Experten in aller Welt, einer davon James Peebles. Dieser antwortete auch kurz und knapp: Er sei gerade auf dem Weg zur Nobelpreisverleihung in Stockholm und werde sich Sarkars Fachaufsatz im Flugzeug ansehen.

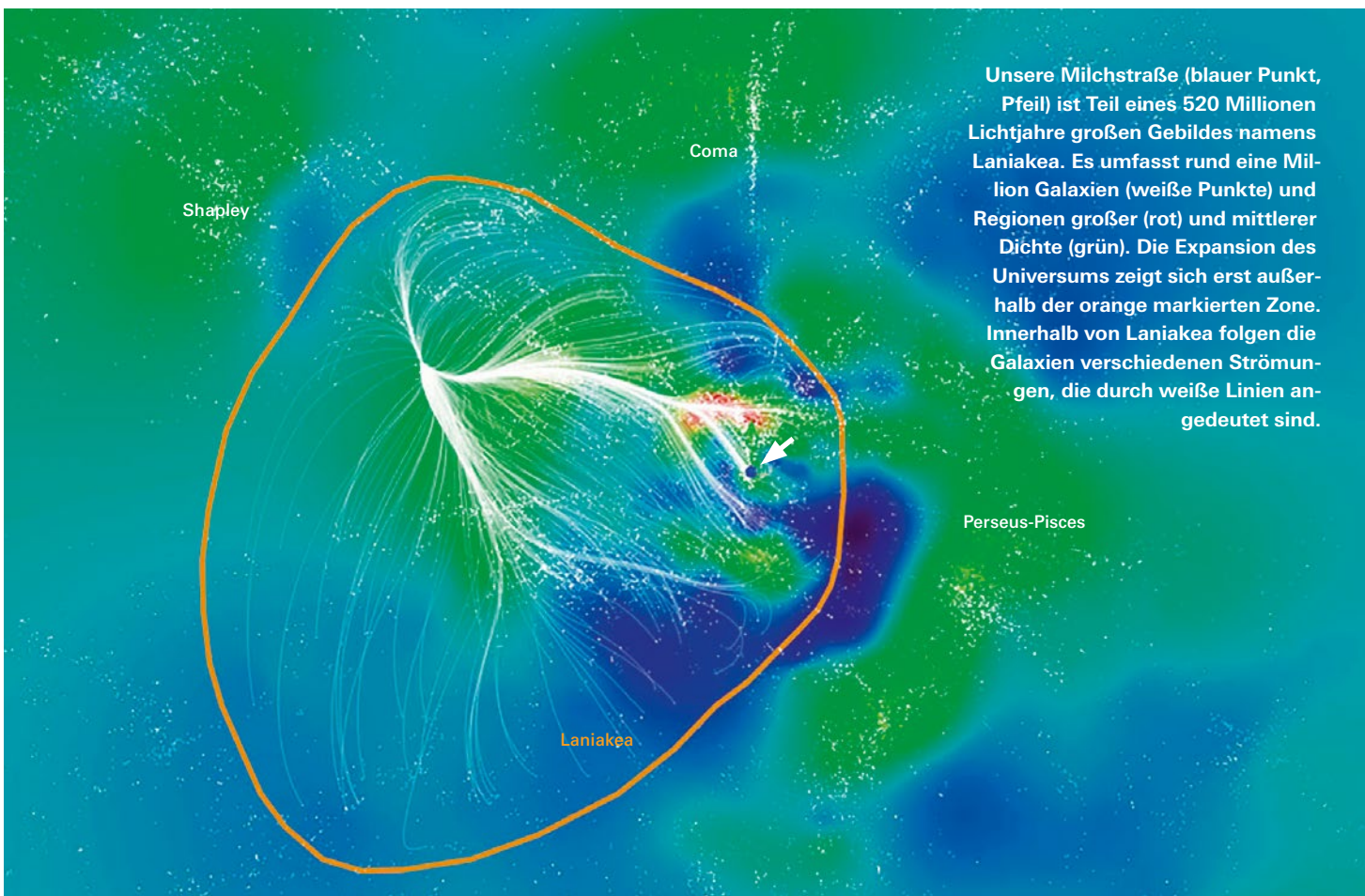
Seitdem herrscht Funkstille zwischen den beiden, und es steht eine große Frage im Raum: Kann der Oxford-Theoretiker mit seinem Vorstoß Recht haben? Ist die Dunkle Energie ein Trugschluss? Oder haben Sarkar und seine Mitstreiter selbst etwas übersehen?

Im Januar 2020 fachte ein weiteres Paper diese Zweifel an: Eine französisch-koreanische Forschergruppe nahm die Datenbasis für die beschleunigte Expansion ins Visier, viele Medien berichteten darüber. Bei interessierten Lesern dürfte der Eindruck hängen geblieben sein, die moderne Astrophysik befinde sich auf dem Holzweg.

Supernovae als Zeugen der Vergangenheit

Wer sich die Mühe macht, die Argumente der Kritiker nachzuvollziehen, stößt auf eine kompliziertere Wirklichkeit. Die Kosmologie hat sich in den vergangenen Jahrzehnten zu einer Präzisionswissenschaft entwickelt, die Teleskopbilder mit komplizierten statistischen Methoden auswertet. Viele dieser Analysen sprechen für die Dunkle Energie. Aber womöglich sind die Unsicherheiten größer, als manche Wissenschaftler sich eingestehen wollen. Das könnte wichtig werden, wenn es in Zukunft darum geht, die Eigenschaften des rätselhaften Phänomens zu ergründen.

Im Zentrum der aktuellen Debatte steht ein besonderer Typ Sternexplosion, Astrophysiker sprechen von Supernovae vom Typ 1a (SN1a). Sie sind das wohl wichtigste Werk-



Von der Expansion zur Beschleunigung

Am Anfang war der Urknall – und seitdem dehnt sich das Weltall immer weiter aus. Damit ist nicht die normale Bewegung von Galaxien gemeint, sondern die Expansion des Raums an sich. Ähnlich wie ein Luftballon, in den jemand Luft bläst, wird der Kosmos immer größer, sämtliche Abstände auf der Ballonoberfläche wachsen. Am stärksten ist der Effekt im Vakuum zwischen Galaxienhaufen, da dort nur wenig Gravitation der Expansion entgegenwirkt. Innerhalb unserer Galaxie ist er hingegen so klein, dass man ihn nicht messen kann.

Bis 1998 gingen viele Forscher davon aus, dass dem Kosmos nach und nach die Puste ausgeht: Seit dem Urknall müsste die Expansion an Schwung verloren haben. Doch das scheint nicht zu stimmen. Zwar ist das All in den ersten sieben Milliarden Jahren seiner Existenz langsamer geworden, da die Gravitation zwischen Massenansammlungen die Expansion abbremsen. Seitdem nimmt die Ausdehnung aber Fahrt auf: Die Abstände wachsen heute schneller als vor ein paar Milliarden Jahren. Am besten lässt sich das erklären, wenn das Vakuum eine bisher unbekannte

Energieform enthält, die den kosmischen Luftballon immer weiter aufpumpt: die Dunkle Energie. Derzeit sieht es so aus, als sei ihre Dichte konstant – in jedem Kubikmeter des Alls scheint sich stets gleich viel von ihr zu befinden. Oder anders formuliert: Je größer das All, desto mehr Dunkle Energie gibt es darin.

Da gleichzeitig die Distanzen zwischen Galaxien wachsen, gewinnt die auseinanderstrebende Kraft mit der Zeit die Oberhand. Die Geschwindigkeit, mit der zwei Punkte im All auseinanderfliegen, nimmt immer weiter zu, die Expansion des Alls beschleunigt sich also.

zeug, wenn es darum geht, die Entwicklung des Weltalls zu rekonstruieren. Mit ihrer Hilfe hatten zwei Forscherteams um die späteren Nobelpreisträger Saul Perlmutter, Brian Schmidt und Adam Riess Ende der 1990er Jahre das beschleunigte Universum aus der Taufe gehoben.

1a-Supernova setzen jeweils ungefähr dieselbe Menge an Strahlung frei. Denn die physikalischen Abläufe, die zur Explosion führen, sind bei ihnen stets mehr oder wenig gleich: Ein weißer Zwergstern zieht Materie aus seinem näheren Umfeld an sich. Irgendwann überschreitet er eine kritische Massengrenze, ab der er unter seiner eigenen Schwerkraft in sich zusammenfällt. Der Kollaps setzt schlagartig enorm viel Energie frei, deren Menge bei jedem der Ereignisse ungefähr gleich groß ist.

Forscher können deshalb den Abstand zu uns ermitteln, was bei gewöhnlichen Strahlungsquellen nicht möglich ist. Auf der Erde würde das Prinzip auch mit einer 20-Watt-Glühlampe funktionieren: Entfernt man sich von ihr, wird sie mit jedem Schritt etwas dunkler. Sieht man die Lampe aus der Ferne, kann man aus der wahrgenommenen Helligkeit rekonstruieren, wie viele Schritte sie entfernt sein muss – aber nur, weil man weiß, mit wie viel Watt sie leuchtet.

Das Licht einer Supernova verrät nicht nur ihren Abstand zur Erde. Kosmologen können daraus noch eine weitere Information gewinnen: Hat der Punkt am Firmament einen Rotstich, so hat die Expansion des Raums die Strahlung auf ihrem langen Weg in die Länge gezogen, denn rotes Licht hat eine größere Wellenlänge als blaues. Vergleicht man das Maß dieser »Rotverschiebung« mit der aus der Helligkeit rekonstruierten Entfernung, lässt sich abschätzen, wie stark das All während der Reise gewachsen ist (siehe »Von den Daten zum Weltmodell«, S. 19).

Die Teams um Perlmutter, Schmidt und Riess hatten in den 1990er Jahren dutzende Supernovae beobachtet, die teils Milliarden Lichtjahre entfernt stattgefunden haben. Die

späteren Nobelpreisträger erwarteten eigentlich, ein abbremsendes Universum zu beobachten, da der Schwung aus dem Urknall wegen der sich anziehenden Massen mit der Zeit schwächer geworden sein müsste. Zur Überraschung der Forscher ließen sich die gesammelten Daten jedoch nur dann schlüssig erklären, wenn sich die Ausdehnung des Alls in den letzten paar Milliarden Jahren beschleunigt hat. Beobachtungen aus den vergangenen 20 Jahren haben diesen Trend bestätigt; mittlerweile stützen sich Experten dafür auf mehr als 1000 Supernovae.

Doch im Detail ist die Auswertung der Daten hoch kompliziert. Denn nicht nur die Dunkle Energie kann Licht rötlich erscheinen lassen, indem sie den Raum zwischen den Weltinseln immer größer werden lässt. Auch die Bewegung einer Galaxie, die von der Schwerkraft ihrer kosmischen Nachbarn von uns weggezogen wird, kann die Wellen strecken – ganz so, wie es der aus der Schulphysik bekannte Dopplereffekt für die Schallwellen eines Krankenwagens besagt. Gleiches gilt für unsere eigene Bewegung durchs All. Sie führt ebenfalls dazu, dass sich die Farbe von Licht leicht verändert.

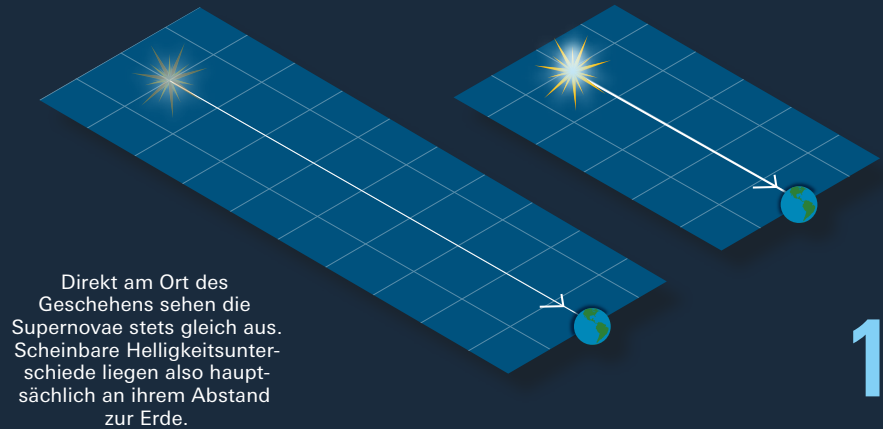
Jenseits von 500 Millionen Lichtjahren

Wie viel von der gemessenen Rotverschiebung kommt also von der kosmischen Expansion, wie viel von der Relativbewegung von Quelle und Beobachter? Für Kosmologen ist das eine knifflige Frage. Sie versuchen daher, die Bewegung von Galaxien infolge der gewöhnlichen Schwereanziehung so gut wie möglich abzuschätzen. Das Ergebnis nutzen sie dann, um die Rotverschiebung von fernen Supernovae zu korrigieren. Idealerweise bleibt dann nur jener Anteil übrig, der auf die Expansion zurückgeht.

Doch dabei müssen sich die Experten auf eine Grundannahme der Kosmologie verlassen: Das kopernikanische Prinzip. Es besagt vereinfacht ausgedrückt, dass das Uni-

Vier Schlüssel zur kosmischen Expansion

Das Universum dehnt sich immer rasanter aus. Mit vier verschiedenen Techniken können Astronomen rekonstruieren, wie sich das All in der Vergangenheit entwickelt hat.

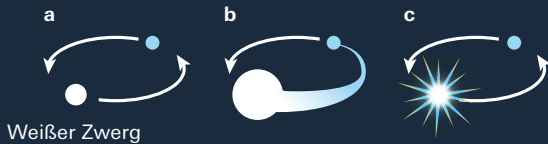


Direkt am Ort des Geschehens sehen die Supernovae stets gleich aus. Scheinbare Helligkeitsunterschiede liegen also hauptsächlich an ihrem Abstand zur Erde.

1

Supernovae des Typs Ia

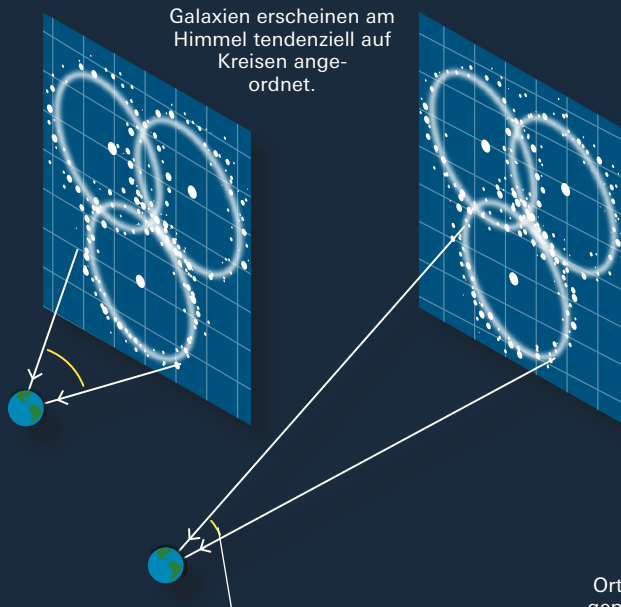
Bestimmte Explosionen dichter Sterne sind immer ähnlich hell. Ihre scheinbare Leuchtkraft am Himmel liegt demnach nur an unterschiedlichen Entfernungen. Viele der Ereignisse gehen auf Weiße Zwerge zurück, die mit einem zweiten Stern ein Doppelsystem bilden (a), diesem Materie entreißen (b) und schließlich beim Erreichen einer definierten Grenzmasse explodieren (c).



Weißer Zwerg

Spuren von Schallwellen 2

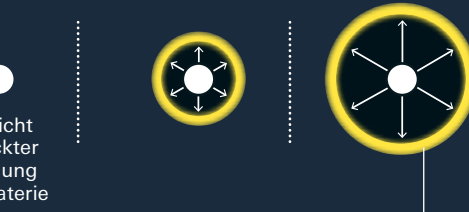
Im frühen Universum breiteten sich Schallwellen aus, bis sich der Kosmos genug abkühlte und Atome entstanden. Die von den Wellen bis dahin zurückgelegte Strecke entspricht im heutigen All 480 Millionen Lichtjahre. Die Distanz prägte sich den Strukturen auf und zeigt sich als kleiner Materieüberschuss auf kugelförmigen Schalen mit ebendiesem Radius. Wir nehmen sie als schwache Ringe von Galaxien wahr.



Galaxien erscheinen am Himmel tendenziell auf Kreisen angeordnet.

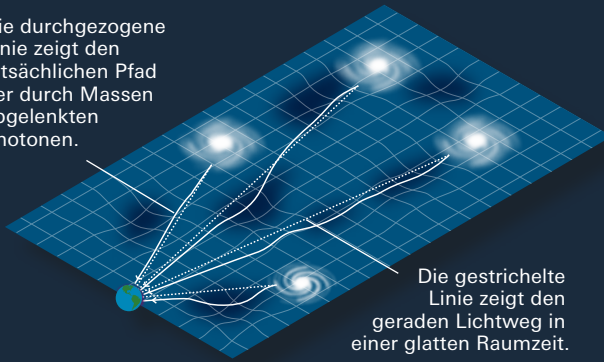
Je weiter die Galaxienkreise entfernt sind, desto kleiner ist der Winkel, unter dem wir sie detektieren. Die Abstände lassen auf die Expansionsgeschichte des Universums schließen.

Ort dicht gepackter Strahlung und Materie

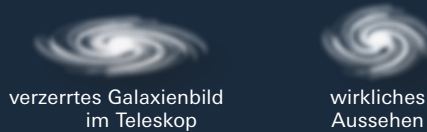


Strahlung riss Materie als Schallwelle mit. Im Zentrum blieb nur Dunkle Materie zurück. So entstanden ringförmige Strukturen. Deren Radius entspricht im heutigen Universum 480 Millionen Lichtjahre.

Die durchgezogene Linie zeigt den tatsächlichen Pfad der durch Massen abgelenkten Photonen.



Die gestrichelte Linie zeigt den geraden Lichtweg in einer glatten Raumzeit.



verzerrtes Galaxienbild im Teleskop

wirkliches Aussehen

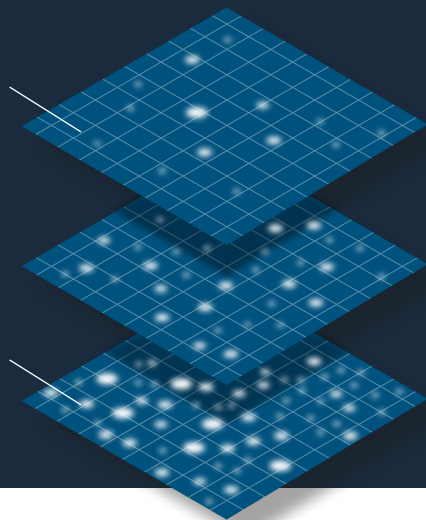
3 Gravitationslinsen

Die Schwerkraft massereicher Regionen lenkt das Licht auf dem Weg zur Erde ab und verzerrt Bilder im Teleskop. Forscher vermessen daher viele Millionen Galaxien, vergleichen sie mit der vermuteten wahren Form und erstellen so eine Karte der unsichtbaren Materie zwischen diesen Objekten und der Erde.

4 Galaxienhaufen

Die Gravitation zieht einzelne Galaxien allmählich zu Haufen zusammen. Forscher kartieren viele dieser Gebilde und erfahren so etwas über die zeitliche Entwicklung der kosmischen Strukturen und wie die Dunkle Energie sie beeinflusst hat.

In großen Entfernungen – und damit vor langer Zeit – haben sich noch nicht viele Galaxien zusammengeballt.



In unserer näheren Umgebung befinden sich viel mehr Galaxienhaufen.

versum überall gleich ist, Physiker sprechen von »Isotropie«. Wenn man auf der Südhalbkugel den Nachthimmel blickt, sollten die dort sichtbaren Galaxien denselben Regeln gehorchen wie kosmische Objekte am nördlichen Firmament. Außerdem sollte die Materie im All gleichmäßig verteilt sein – zumindest wenn man die größten Strukturen im All betrachtet.

Doch kann die Menschheit mit Sicherheit sagen, dass beides der Fall ist? Schließlich kann sie längst nicht das ganze Universum einsehen, sondern nur jenen Teil, aus dem Licht uns in den 13,8 Milliarden Jahren seit dem Urknall erreichen konnte. Und selbst über die sichtbaren Regionen kann sie in Anbetracht der gigantischen Entfernungen oft nur grobe Aussagen machen.

Fest steht auch, dass der Kosmos alles andere als statisch ist. So scheint unsere Milchstraße Teil eines größeren Materiestroms zu sein, der uns und unsere Nachbarn in Richtung des Sternbilds Wasserschlange auf der Südhalbkugel bewegt. Das sieht man unter anderem am kosmischen Mikrowellenhintergrund, einer Art Nachglimmen des Urknalls, das an jedem Punkt des Himmels messbar ist. Die Strahlung scheint mit einer geringfügig höheren Energie auf uns einzuprasseln, wenn man in Richtung des Sternbilds Wasserschlange blickt. Unsere Galaxiengruppe scheint also rasant durchs All zu reisen: Relativ zu einem Beobachter, der die Hintergrundstrahlung isotrop wahrnehmen würde, müssten es 620 Kilometer pro Sekunde sein.

Im Bann des großen Attraktors

Kosmologen kennen das Problem seit Langem. Entsprechend korrigieren sie die Rotverschiebung für ferne Supernovae in ihren Analyse und planen dabei eine Art Sicherheitsmarge ein. Die Frage ist, ob die Experten dabei umsichtig genug vorgehen – oder ob sie die Bewegungen von Quelle und Beobachter systematisch falsch einschätzen.

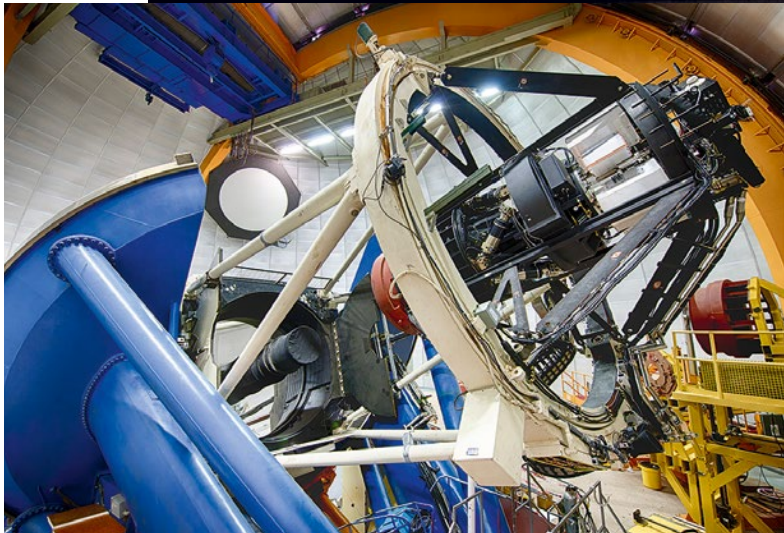
Subir Sarkar jedenfalls glaubt, dass sich seine Kollegen an dieser Stelle in die Tasche lügen. »Die Leute korrigieren die Daten auf Basis unzulässiger Vorannahmen«, sagt er. »Am Ende kommt dann das heraus, was sie gesucht haben.« So gingen Kosmologen standardmäßig davon aus, dass die Eigenbewegung unserer Galaxiengruppe nicht mehr stark ins Gewicht fällt, wenn man Distanzen von mehr als 500 Millionen Lichtjahren betrachtet.

Die Annahme dahinter lässt sich durch eine Analogie aus der Schifffahrt erklären: Dort sind selbst sehr große Wellen vernachlässigbar, wenn man sich für die globalen Ozeanströmungen interessiert. So ähnlich müsse man sich die Materiebewegungen im Weltall vorstellen, argumentieren viele Kosmologen: Aus der Nähe betrachtet mag die Bewegung unserer Milchstraße und ihrer Nachbarn erheblich wirken. Aber wenn man einen hunderte Millionen Lichtjahre großen Bereich überblicke, ist sie vermutlich nur eine von vielen Schwankungen, die sich irgendwann dem »Referenzsystem« der Hintergrundstrahlung angleichen.

Aber ist das wirklich so? Oder reicht der Materiefluss, der unsere Milchstraße bewegt, vielleicht viel weiter ins All hinaus als gedacht? Ordnet er sich möglicherweise gar nicht der Bewegung des Mikrowellenhintergrunds unter? Und noch weitergedacht: Wird das All generell von gewalti-



REIDAR HANW / FERMILAB / WIS.FINAL.GWASSET/IDEAL/RECID=1814513



REIDAR HANW / FERMILAB / WIS.FINAL.GWASSET/IDEAL/RECID=1818671

Das Vier-Meter-Teleskop der Dark Energy Survey behält große Ausschnitte des Nachthimmels über der chilenischen Wüste Atacama im Blick. So können die Forscher Supernovae entdecken.

Energie auf der Kippe, behaupten die Forscher weiter: Was Kosmologen bisher auf die rätselhafte, allgegenwärtige Antischwerkraft zurückgeführt haben, sei in erster Linie die Beschleunigung unserer eigenen Galaxiengruppe. Sie lasse Supernovae in Gegenrichtung etwas röter erscheinen. Und da man diesen Effekt bei der statistischen Auswertung nicht stark genug berücksichtige, entstehe der Eindruck einer Expansion in alle Richtungen, die es gar nicht gibt.

Sarkar glaubt auch, die Erklärung für den Effekt zu kennen: »Ich vermute, dass wir von irgendeiner großen Masse jenseits des 650 Millionen Lichtjahre entfernten Shapley-Galaxienhaufens angezogen werden.« Dass sich dort eine große Massenansammlung befinden könnte, ein »großer Attraktor«, ist seit Längerem ein Thema unter Astrophysikern. Aber lässt sich damit wirklich die Dunkle Energie aus dem Weltbild der Kosmologie tilgen? Oder haben die Kritiker selbst einen Fehler gemacht und Daten einseitig interpretiert?

Außergewöhnliche Behauptungen, aber keine außergewöhnlichen Beweise

Wer mit anderen Astrophysikern spricht, hört immer wieder letztere Vermutung. Insbesondere US-Wissenschaftler haben mit heftiger Ablehnung auf die These des streitlustigen Professors aus Großbritannien reagiert. »Außergewöhnliche Behauptungen erfordern außergewöhnliche Beweise«, sagt etwa Dragan Huterer von der University of Michigan. »Die sehe ich hier in keiner Weise.«

Huterer und andere Forscher verweisen auf andere Studien, die nach einem vergleichbaren Effekt gesucht haben – und zu dem Schluss kamen, dass das Universum, soweit wir es überblicken, im Großen und Ganzen isotrop zu sein scheint. Auch scheinen die Eigenbewegungen weit entfernter Galaxien keinen nennenswerten Einfluss auf die Auswertungen zu haben. Einige Fachleute finden außer-

gen Strömungen beherrscht, ausgelöst von riesigen Materieansammlungen außerhalb der Sichtweite unserer Teleskope, die allgemein gültige Aussagen sehr schwierig, vielleicht sogar unmöglich machen?

Sarkar ist überzeugt von diesem Szenario: »Der Kosmos scheint nicht isotrop zu sein, wir sind also keine kopernikanischen Beobachter.« Entsprechend seien die bisherigen Bewegungskorrekturen für sehr weit entfernte Supernovae fehlerhaft. Als Beleg führen er und seine drei Kollegen einen öffentlich verfügbaren Datenkatalog ins Feld, der aus 740 Sternexplosionen besteht. Das Team machte bei jeder von ihnen die bereits durchgeführten Rotverschiebungskorrekturen rückgängig. Anschließend habe man überprüft, welches kosmologische Modell mit welchen Korrekturen am besten zu den Daten passt, erläutert Sarkar.

Bei der computergestützten Suche ließ die Gruppe einen Parameter zu, der eine Richtungsabhängigkeit der Rotverschiebung ausdrückt. Wenn weit entfernte Supernovae in einer Himmelsrichtung allesamt etwas röter erscheinen als in Gegenrichtung, sollte der Parameter einen von null verschiedenen Wert annehmen. Laut Sarkar schnitten Modelle mit einer derartigen »Dipol-Komponente« deutlich besser ab als solche, in denen die Rotverschiebung unabhängig von der Blickrichtung ist. Das galt insbesondere dann, wenn der Dipol in die Richtung zeigte, in der sich unsere Galaxiengruppe bewegt. Damit stünde die Dunkle

dem, dass sich die Veröffentlichung von Sarkar selbst widerspricht: In einer Tabelle im Anhang ist aufgelistet, wie gut das konventionelle, dipolfreie Modell die analysierten Supernova-Daten erklärt. »Wenn man das mit dem Modell der Autoren aus einer anderen Tabelle im Paper vergleicht, sieht man, dass dieses sehr viel schlechter zu den Daten passt«, sagt Dragan Huterer.

Sarkar hingegen bestreitet, dass man die Einträge der verschiedenen Tabellen in seinem Fachaufsatz einfach so vergleichen könne – und verweist auf eine andere statistische Sichtweise, der zufolge sein Modell besser abschneide. Aber wieso geht das aus dem Paper dann nicht hervor? Es sei ein Fehler gewesen, das in der Veröffentlichung nicht deutlicher zu machen, rechtfertigt er sich. Geändert hätte das ohnehin wenig: »Dann hätten diejenigen, die unsere Schlussfolgerung nicht mögen, eben einen anderen Knüppel gefunden, um auf uns einzudreschen.« Sarkar dürfte damit unter anderem David Rubin von der University of Hawaii meinen, der einst bei Saul Perlmutter promoviert

hat. Rubin hat gemeinsam mit einer Studentin mehrere Kritikpunkte zusammentragen und ins Internet gestellt. Der US-Amerikaner hat bereits vor drei Jahren die Klagen mit Sarkar gekreuzt, als dieser schon einmal die Auswertung von Supernova-Daten bemängelt hatte. Damals ging es um Korrekturen, die nötig sind, um den Einfluss von interstellarem Staub auf die Rotverschiebung zu berücksichtigen.

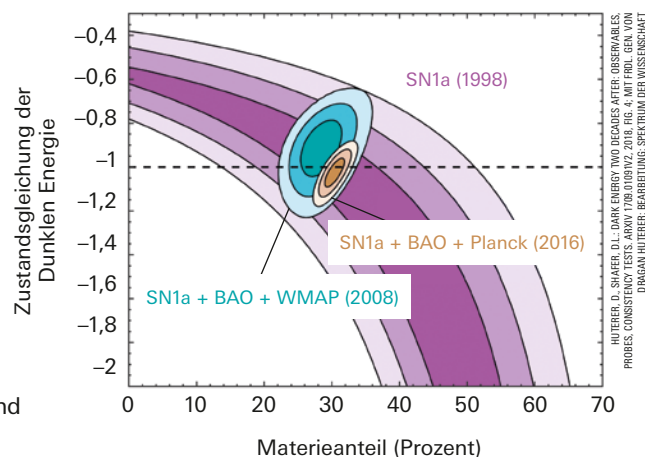
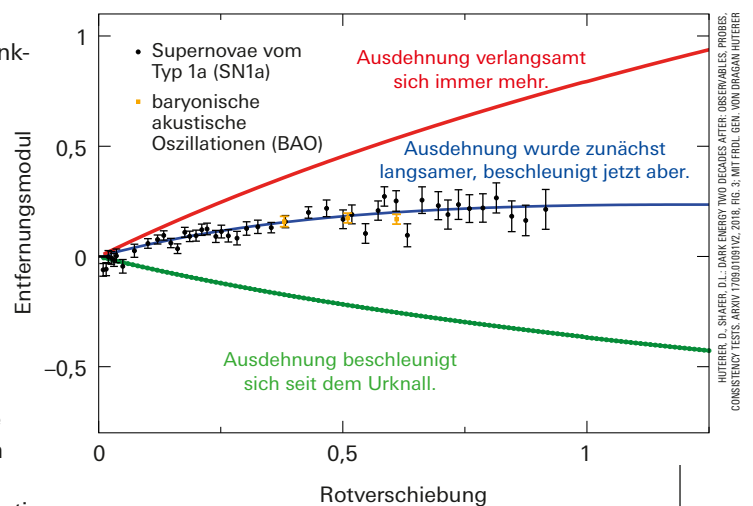
Nun wirft Rubin seinem Kontrahenten unter anderem vor, für seine Neuanalyse keine repräsentative Datenbasis ausgewählt zu haben. Der verwendete Supernova-Katalog, die »Joint Lightcurve Analysis«, stamme aus dem Jahr 2014, obwohl es mittlerweile neuere und größere Datensätze gebe. Wegen solcher Details begegnen viele Astrophysiker Sarkar und seinen Einwänden mittlerweile mit Skepsis: Ihm eilt zuweilen der Ruf voraus, vor allem jene Daten zu betrachten, die sein Argument stützen.

Auch scheint manchem Experten mittlerweile die Lust vergangen zu sein, sich detailliert mit den Ausführungen

Von den Daten zum Weltmodell

Viele Beobachtungen aus dem All sprechen für die Dunkle Energie. Deutlich wird das, wenn man für verschiedene Supernova-Explosionen Rotverschiebung und das aus der scheinbaren Helligkeit abgeleitete Entfernungsmodul vergleicht (Diagramm rechts oben). Jeder schwarze Punkt steht hier für mehrere zusammengefasste SN1a, die Balken geben jeweils die Unsicherheiten an. Die drei geschwungenen Linien zeigen, welche Daten man für verschiedene Szenarien der kosmischen Vergangenheit erwarten würde. Die Beobachtungen passen demnach am besten zu einem Universum, dessen Ausdehnungsgeschwindigkeit zunächst für ein paar Milliarden Jahre langsamer wurde, seitdem jedoch – angetrieben durch die Dunkle Energie – immer mehr an Fahrt aufnimmt (blaue Linie). Auch die baryonischen akustischen Oszillationen passen gut zu diesem Modell. Gemeint sind großräumige Strukturen im Universum, aus denen sich ableiten lässt, wie stark der Kosmos seit dem Urknall gewachsen ist.

Forscher können auch eingrenzen, wie viel Materie und wie viel Dunkle Energie das Universum enthalten sollte (Diagramm rechts unten). 1998 waren hier noch viele Werte denkbar (lila Schattierungen). 2006 waren es schon etwas weniger (blaue Schattierungen), auch dank des Satelliten WMAP, der die kosmische Hintergrundstrahlung analysierte. Mit den Daten seines Nachfolgers Planck lässt sich die Dunkle Energie heute nochmals besser charakterisieren (beige Schattierungen). Demnach kann der Kosmos nur zu rund 30 Prozent aus Materie bestehen, der Rest muss auf die rätselhafte Energieform entfallen. In Frage kommen auch nur manche Werte der »Zustandsgleichung«: Sie gibt an, in welchem Verhältnis Druck und Dichte der Dunklen Energie stehen. Der Wert hat ein negatives Vorzeichen, man hat man es mit einer abstoßenden Kraft zu tun.



des Oxford-Forschers zu befassen, nachdem seine früheren Angriffe letztlich nie eine überzeugende Lücke ins Weltbild der Kosmologie gerissen haben.

Andere Experten können den Einwürfen des Oxford-Professors dennoch etwas Positives abgewinnen. Da ist zum Beispiel Bruno Leibundgut. Der Schweizer gehörte Ende der 1990er Jahre zu einem der Teams, die die beschleunigte Expansion entdeckt haben, und war später Wissenschaftsleiter der Europäischen Südsternwarte ESO. Mit Blick auf Sarkars Paper sagt er: »Ich finde, das sind durchaus Fragen, die man stellen kann.« Im Detail überzeugt ihn die These seines Kollegen aber ebenfalls nicht – unter anderem vermisste er eine gründliche Diskussion der Unsicherheiten der Neuanalyse.

Generell müsse man zwei Aussagen der Veröffentlichung unterscheiden, findet Leibundgut: Da sei zum einen die Frage, ob man die Blickrichtung bei der Rotverschiebung stärker berücksichtigen müsse als bisher. »Wir können bisher nicht ausschließen, dass es hier einen Dipol gibt«, sagt er. Die andere Frage sei, ob man daraus folgern könne, dass die Dunkle Energie ein Trugschluss ist. »Das geben die Daten meiner Meinung nach nicht her.«

So ähnlich sieht es auch Dominik J. Schwarz von der Universität Bielefeld: »Ich finde es absolut richtig, die Supernova-Daten nicht zu korrigieren, bevor man ein Modell anpasst, sondern diese Korrekturen als Teil des Modells zu betrachten – und nicht als Teil der Daten«, sagt Schwarz. Letzteres sei bei vielen Kosmologie-Analysen Standard, könne aber im schlimmsten Fall die Ergebnisse verfälschen. Er forsche deshalb zu ähnlichen Fragen.

Der Heidelberger Kosmologe Matthias Bartelmann will die Arbeit ebenfalls nicht rundum verurteilen. »Sie greift den wichtigen Punkt auf, dass es in den Supernova-Daten noch ungeklärte Abhängigkeiten geben mag, die die Signifikanz der daraus abgeleiteten Ergebnisse verringern.« Die daraus gezogene Schlussfolgerung geht ihm aber viel zu

weit: »Allein auf Grund dieses Befundes zu behaupten, es gäbe keine Dunkle Energie, ist angesichts vieler anderer Daten einfach abenteuerlich«, sagt Bartelmann.

Eine berechnete Frage, aber eine völlig überzogene Schlussfolgerung – so beurteilen Kosmologen auch den Vorstoß der zweiten Gruppe von Astrophysikern, die in den vergangenen Monaten für Schlagzeilen sorgte. Das koreanisch-französische Team um Yijung Kang von der Yonsei University in Seoul beleuchtet darin eine andere Quelle der Unsicherheit bei der Auswertung von Supernova-Daten. Die Sternexplosionen vom Typ 1a könnten demnach bei Weitem keine »Standardkerzen« sein, die immer gleich viel Strahlung freisetzen, sondern je nach Alter des Vorgängersterns unterschiedlich heftig explodieren.

27 von 1000 Supernovae – das ist ein zu kleiner Datensatz für eine Revolution


Auch diesem Einwand tragen die Supernova-Analysen seit Langem Rechnung, indem sie eine entsprechende Sicherheitsmarge enthalten. Kang und Kollegen halten das Vorgehen jedoch für unzureichend: Im frühen Universum, als Sterne noch jünger waren, könnten sie weniger hell explodiert sein, da sie damals eine andere chemische Zusammensetzung hatten, behauptet das Team. Dadurch würde man die vom Licht zurückgelegte Entfernung systematisch überschätzen – und fälschlicherweise auf ein Universum schließen, das sich immer schneller ausgedehnt hat.

Die Forscher wollen Hinweise auf einen entsprechenden Trend in einem Datensatz aus 27 Supernovae aufgespürt haben. Aber auch sie ernten für ihre methodische Auswertung viel Kritik: Von einem Paper mit solch einer gewagten Hypothese würde man eine größere Datenbasis erwarten, sagt Dillon Brout von University of Pennsylvania. »Wenn man von den mehr als 1000 verfügbaren Supernovae nur 27 für seine Analyse nutzt, besteht die große Gefahr, eine verzerrte Stichprobe auszuwählen.«

Brout bemängelt außerdem, dass die Autoren die statistischen Unsicherheiten ihrer Analyse offenkundig stark unterschätzen. Nur so seien sie in der Lage, ihre Aufsehen erregende These aufrechtzuerhalten. »Einen so großen Effekt hätte man bereits in anderen Datensätzen und Analysen entdecken müssen«, sagt Brout. Da man dies nicht getan habe, stehe die Kritik auf sehr wackeligen Beinen. Das unterstreicht auch das Paper eines Teams um Nobelpreisträger Adam Riess aus dem März 2020: Die Forscher wiederholten die strittige Auswertung für einen größeren Supernova-Datensatz – und fanden keinen entsprechenden Effekt.

Dass Arbeiten wie die von Kang oder Sarkar dennoch so viel mediale Aufmerksamkeit bekommen, ärgert Kosmologen. »Ich finde diese Das-Haus-steht-in-Flammen-Rhetorik zunehmend ermüdend«, schrieb etwa die Astrophysikerin Renée Hložek von der University of Toronto jüngst auf Twitter. Und ihr Kollege Graeme Addison von der Johns Hopkins University ergänzte: Bei den strittigen Veröffentlichungen habe offenbar das Peer-Review durch unabhängige Gutachter nicht richtig funktioniert. »Es ist sehr frustrierend, solche Paper in angesehenen Fachzeitschriften zu sehen.«

Tatsächlich wird die Dunkle Energie mittlerweile von einem ganzen Studienkanon gestützt. Supernovae mögen



Die Galaxie NGC 1015 ist 119 Millionen Lichtjahre von der Erde entfernt. 2009 leuchtete rechts oberhalb des Zentrums eine Supernova auf (Pfeil).

Kosmologische Konstante oder Quintessenz

Der Name ist bisher in erster Linie ein Platzhalter – was sich hinter der Dunklen Energie verbirgt, ist unbekannt. Ist es ein unsichtbares Energiefeld, das den ganzen Kosmos füllt? Oder doch eher eine inhärente Eigenschaft der Raumzeit? Aktuell debattieren Kosmologen eher darüber, ob sich die Dichte der Dunklen Energie mit der Zeit verändert. Bisher gehen die meisten Fachleute davon aus, dass dies nicht der Fall ist. Die Dunkle Energie entspräche damit der »kosmologischen Konstante«, die bereits Albert Einstein (vorübergehend) in die Feldgleichungen seiner Relativitätstheorie aufnahm. Jeder Kubikmeter Weltraum würde in diesem Fall stets gleich viel Dunkle Energie enthalten, die kosmische Expansion würde sich damit immer weiter beschleunigen.

Doch nicht alle Messungen passen zu diesem Szenario. So gibt es derzeit Streit um die gegenwärtige Expansionsrate des Alls, die so genannte Hubble-Konstante. Er ließe sich auflösen, wenn das All früher mit einer anderen Beschleunigung expandiert wäre als heute. In diesem Fall hätte sich die Dichte der Dunklen Energie mit der Zeit verändert. Ein populäres Modell dafür ist die so genannte Quintessenz. Demnach könnte das All in Zukunft auch wieder langsamer werden. Wie die Dunkle Energie wirklich beschaffen ist, sollen mehrere Projekte in den kommenden Jahren zeigen, etwa das ESA-Teleskop EUCLID oder das US-amerikanische Vera Rubin Observatory.

dabei die wichtigste Säule sein, aber sie sind nicht die einzige (siehe »Vier Schlüssel zur kosmischen Expansion«, S. 16/17). Hinweise liefert auch die kosmische Hintergrundstrahlung, aus der Forscher die Materieverteilung 380 000 Jahre nach dem Urknall folgern können. Indirekt lässt sich aus dem Babybild des Kosmos folgern, dass er große Mengen einer unbekannteren Energieform enthalten muss.

Die großräumige Verteilung der Materie im heutigen Universum ist ein weiterer Pfeiler: Die kosmischen Strukturen sehen so aus, als handele es sich um die aus der Hintergrundstrahlung ersichtlichen Dichteschwankungen, die in den letzten 13,8 Milliarden Jahren stark vergrößert wurden – mit just einer Geschwindigkeit, wie man sie von einem von Dunkler Energie dominierten Universum erwarten würde. Auch die aus »Gravitationslinsen« gewonnenen Daten sind ein Indiz für die Dunkle Energie. Gemeint sind große Masseansammlungen wie Galaxienhaufen, die laut Albert Einsteins Relativitätstheorie Dellen in die Raumzeit machen. Licht macht daher einen Bogen, wenn es eine solche Region durchquert. Auf Teleskopaufnahmen erschei-

nen helle Strahlungsquellen, die sich hinter einem Galaxienhaufen verbergen, daher oft leicht verzerrt. Aus dem Grad der Verzerrung lässt sich ermitteln, wie viel Materie sich im Umfeld des Galaxienhaufens befindet. Und da verschiedene Gravitationslinsen jeweils unterschiedliche Zeitpunkte während der kosmischen Evolution widerspiegeln, können Forscher rekonstruieren, wie sich die Masse im Lauf der Zeit verteilt hat.

Einen ähnlichen Lackmustest ermöglicht eine Auswertung der Abstände zwischen Galaxien am Firmament bei unterschiedlichen Rotverschiebungen. Damit lässt sich ebenfalls eingrenzen, wie stark sich das All im Lauf der Zeit ausgedehnt hat. Beide Techniken haben rund 400 Wissenschaftler in den vergangenen Jahren genutzt, um den Einfluss der Dunklen Energie in der jüngeren kosmischen Vergangenheit abzuschätzen; als Datenbasis dienten 650 000 Galaxien. Die Ergebnisse dieser der Dark Energy Survey (DES) sprechen stark für ein Universum, das immer schneller expandiert, wie die Forscher 2018 berichteten. Daneben gibt es mittlerweile Analysen, die alle Indizien kombinieren und Supernova-Explosionen bewusst ausklammern. Ihnen zufolge ist ein Universum, in dem es keine Dunkle Energie gibt, extrem unplausibel.

Querdenker wie Subir Sarkar werden wohl in all diesen Arbeiten Stellen finden, an denen sich Fehler verbergen könnten. Man müsse alle Indizien für die Dunkle Energie einzeln und außerhalb des gegenwärtigen kosmologischen Weltmodells betrachten, sagt er. Dem würden wohl die wenigsten Experten widersprechen. Dass die Fehlersuche am Ende auf ein Universum ohne Dunkle Energie hinausläuft, halten die allermeisten von ihnen jedoch für sehr unwahrscheinlich.

Dennoch könnte die Debatte dabei helfen, die Werkzeuge der Kosmologie zu schärfen. Vielleicht lässt sich so ein seit Jahren tobender Streit über die heutige Expansionsrate des Weltalls, die so genannte Hubble-Konstante, beenden (siehe »Spektrum« Juli 2018, S. 12). Bei ihm spielen Supernovae von Typ Ia ebenfalls eine Schlüsselrolle. Und am Ende sind sie womöglich doch etwas weniger zuverlässig als gedacht.

So ähnlich scheint es Jim Peebles zu sehen. Zwar hat der frisch gebackene Nobelpreisträger bis heute nicht Subir Sarkars E-Mail reagiert. Aber in seinem Stockholmer Festvortrag nahm er indirekt Bezug auf die Dunkle Energie – wenn auch wohl anders, als Sarkar sich erhofft haben dürfte: »Sie ist real und wir brauchen sie«, sagte Peebles kurz und knapp. »Wir wissen allerdings immer noch nicht, was sich dahinter verbirgt.« ◀

QUELLEN

Colin, J. et al.: Evidence for anisotropy in cosmic acceleration. *Astronomy & Astrophysics* 631, 2019

Huterer, D., Shafer, D.L.: Dark energy two decades after: Observables, probes, consistency tests. *Reports on Progress in Physics* 81, 2017

Kang, Y. et al.: Early-type host galaxies of type Ia supernovae. II. evidence for luminosity evolution in supernova cosmology. *The Astrophysical Journal* 889, 2020