

Geheimnisvolle Dunkle Energie

VON MICHAEL DORAN

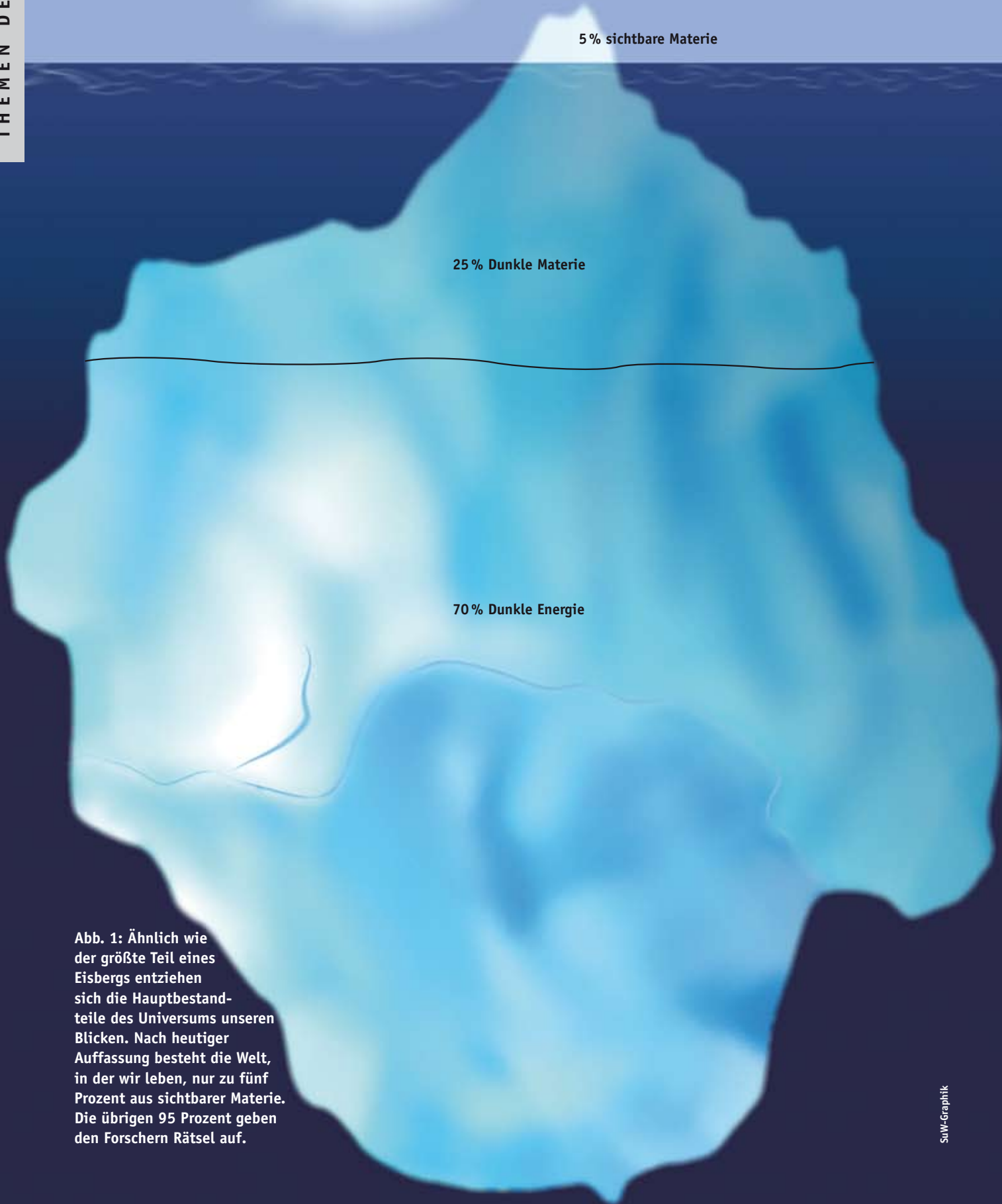


Abb. 1: Ähnlich wie der größte Teil eines Eisbergs entziehen sich die Hauptbestandteile des Universums unseren Blicken. Nach heutiger Auffassung besteht die Welt, in der wir leben, nur zu fünf Prozent aus sichtbarer Materie. Die übrigen 95 Prozent geben den Forschern Rätsel auf.

Seit rund zehn Jahren rätseln Teilchen- und Astrophysiker darüber, was die geheimnisvolle Dunkle Energie ist. Sie beschleunigt die Ausdehnung des Universums und bestimmt seine Zukunft. Die Entdeckung ihrer wahren Natur wird unser Weltbild revolutionieren.

Sterne leuchten – genauer gesagt senden sie Licht aus, welches unsere Netzhaut in Sinnesreize umwandeln kann. Die Wechselwirkung der Photonen mit den Teilchen, aus denen wir bestehen, macht dies möglich. Doch das Universum hält mehr bereit, als der Mensch durch bloßes Anschauen erfassen kann. Es scheint nämlich, dass zu allen Sternen und Galaxien unseres Universums noch einmal die fünffache Menge an durchsichtiger Materie hinzukommt (Abb. 1). Da sie nicht leuchtet, bezeichnen die Astronomen sie als Dunkle Materie.

Als Entdecker der Dunklen Materie gilt der Astronom Fritz Zwicky (1898–1974). Seine Ende der 1920er Jahre mit dem Schmidt-Teleskop am Mount Wilson durchgeführten Untersuchungen der Dynamik von Galaxien ergaben erste Hinweise auf einen erheblichen Anteil an nichtleuchtender Materie. Dabei hatte Zwicky vermutlich nicht durchsichtige, sondern einfach nichtleuchtende normale Materie im Sinn.

Heute weiß man aber, dass die von Zwicky geforderte Dunkle Materie in der Tat nur sehr schwach mit gewöhnlicher Materie in Wechselwirkung steht. Ja, gäbe es die Gravitation nicht, so wüssten wir nicht das Geringste von ihrer Existenz. Und während sie diese Zeilen lesen, könnten Sie durch eine Mauer aus Dunkler Materie rasen, Sie würden es nicht merken. Nichtsdestoweniger verrät sich Dunkle Materie durch ihre Anziehungskraft. Man könnte sagen, der Gravitation entgeht nichts.

Kurz vor Zwickys Entdeckung zeigte der amerikanische Astronom Edwin P. Hubble mit dem damals leistungsfähigsten Fernrohr der Welt, dem 100-Zoll-

Hooker-Teleskop am Mount Wilson, dass es sich bei zuvor als unscharfe Nebel angesehenen Objekten in Wahrheit um entfernte Galaxien handelt. Hubble fand heraus, dass ihr Licht umso stärker rotverschoben erscheint, je größer ihre Entfernung ist. Ähnlich der Dopplerverschiebung eines vorbeifahrenden Krankenwagens sind auch die Lichtstrahlen der Galaxien in ihrer Frequenz verschoben. Die Rotverschiebung bedeutet, dass sich die Galaxien von uns weg bewegen. Im Bild der newtonschen Mechanik entfernen sich die Galaxien umso schneller von uns je größer unser Abstand zu ihnen ist.

Seit Einstein 1916 die Allgemeine Relativitätstheorie vorstellte, kann man diesen Sachverhalt aber auch anders sehen. In seiner Beschreibung ist es der Raum selbst, der sich ausdehnt und die Galaxien dabei mitreißt. Das Universum vergrößert sich wie ein Hefeteig im Ofen, und die Galaxien gleichen Rosinen im Teig, die sich immer weiter voneinander entfernen. Je weiter eine Rosine entfernt ist, desto mehr Teig liegt zwischen ihr und der Rosine des Beobachters. Und da der Teig (Raum) expandiert, bewegen sich weiter entfernte Rosinen (Galaxien) schneller voneinander weg. Auf welche Weise der Teig im Einzelnen aufgeht, hängt bei Einstein davon ab, aus welchen Zutaten er besteht. Nimmt man normale oder auch Dunkle Materie, dann expandiert der Raum genauso, als würde man die Bewegung der Galaxien mit Hilfe des newtonschen Gravitationsgesetzes berechnen.

Für Einstein sind Masse und Energie äquivalent, und so verwundert es nicht, dass in seiner Beschreibung die Energie der Masse, aber auch die Bewegungsener-



Fritz Zwicky Stiftung, Glarus, Schweiz

▲ Abb. 2: Der schweizerisch-amerikanische Astronom Fritz Zwicky (1898–1974) schloss aus Beobachtungen der Dynamik von Galaxien, dass diese Sternsysteme einen erheblichen Anteil an nichtleuchtender Materie enthalten.

gie der Teilchen, eine Rolle spielt. Wendet man die Allgemeine Relativitätstheorie auf unseren Kosmos an, so stellt sich heraus, dass es bequem ist, diese Bewegungsenergie als Druck p einer Materieflüssigkeit zu beschreiben. Bei gewöhnlicher Materie ist die Ruhemasse viel größer als die Bewegungsenergie beziehungsweise der ihr entsprechende Druck. Die zerstörerische Kraft einer Atombombe demonstriert dies auf verhängnisvolle Weise: Die Umwandlung eines Teils der Ruhemasse des Urans liefert eine enorme Sprengkraft. Die Bewegung der Uranatome vor der Explosion spielt dagegen keine Rolle.

Bestünde das Universum nur aus gewöhnlicher Materie, so kämen Newton und Einstein auf praktisch dieselben Vorhersagen, denn die Energie der Materie wird vom Beitrag der Ruhemasse dominiert. Während es aus Newtons Sicht die Anziehung der Galaxien ist, die ihr Auseinanderfliegen verlangsamt, sind es für Einstein die Galaxien, die den Raum, in den sie eingebettet sind, so beeinflussen, dass sich seine Expansion verlangsamt.

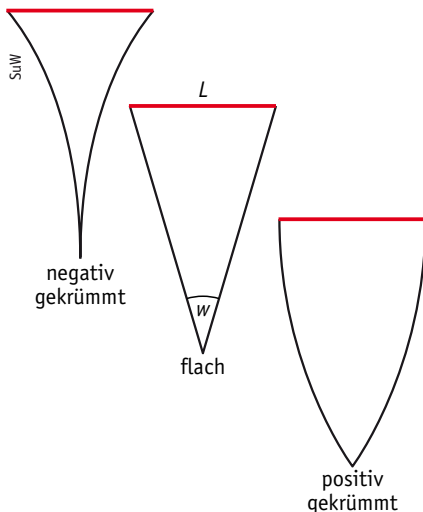
In Kürze

■ Seit langem gehen die Astrophysiker davon aus, dass das Universum in einem **Urknall** seinen Anfang nahm und seitdem kontinuierlich expandiert. Bis vor zehn Jahren vermuteten sie, dass die Schwerkraftwirkung der Galaxien diese Expansion allmählich abbremst.

■ Im Jahr 1997 offenbarten Beobachtungen weit entfernter **Supernovae des Typs Ia** jedoch etwas völlig anderes: Die Expansion des Raums verlangsamt sich nicht, sondern läuft beschleunigt ab.

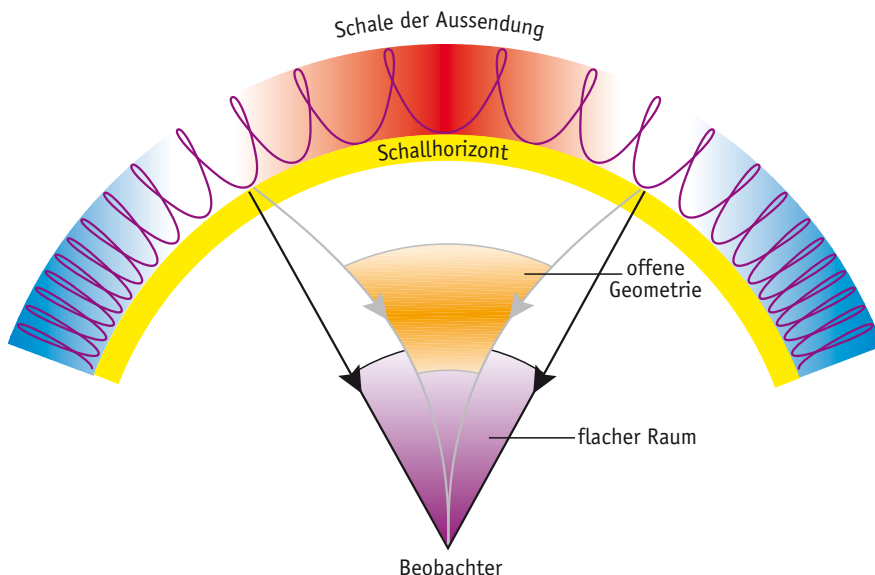
■ Dieser Befund fordert die Astrophysiker zu einem radikalen Umdenken heraus: Das Universum besteht nur zu einem kleinen Teil aus Materie. Siebzig Prozent bestehen aus etwas völlig rätselhaftem, der **Dunklen Energie**.

■ Ein aussichtsreicher Ansatz zu ihrer Erforschung liegt in einer genauen Bestimmung der zeitlichen Entwicklung der **Energiedichte** des Universums. Ihr Verlauf lässt sich mit Modellen der Dunklen Energie vergleichen.



▲ Abb. 3: Abhängig von der Metrik des Raums erscheint ein Stab der Länge L in einer gegebenen Entfernung unter verschiedenen großen Winkeln w .

▼ Abb. 4: Die Oberfläche der Aussendung der kosmischen Hintergrundstrahlung bildet eine Schale um den Beobachter. Die darin beobachteten Strukturen (rot und blau) lassen sich durch Schallwellen mit einer charakteristischen Wellenlänge beschreiben. Der Zusammenhang zwischen der berechneten Wellenlänge und dem Winkel, unter dem sie einem Beobachter erscheint, hängt von der Geometrie des Raums ab. Im Falle einer offenen Geometrie ergeben sich kleinere Winkel (orange) als im Fall eines flachen Raums (violett).



Einstein fand hierfür eine elegante Gleichung. Auf ihrer linken Seite stehen Größen, welche die Geometrie des Raums beschreiben. Auf der rechten Seite steht der so genannte Energie-Impuls-Tensor. In diesem kommt sowohl die Energiedichte als auch der Druck vor.

Was uns die Geometrie verrät

Geht man davon aus, dass das Universum überall ähnlich aussieht, so findet man als Geometrie des Raums die Robertson-Walker-Metrik. Bildlich gesprochen beschreibt sie, in welcher Weise sich Entfernungen infolge der Expansion des Raumes vergrößern. Hierfür lässt die Metrik drei »Geschmacksrichtungen« zu: Der dreidimensionale Raum, in dem wir uns bewegen, kann flach, offen oder geschlossen sein.

Einen flachen Raum kennen wir aus unserer alltäglichen Erfahrung, hier gilt die in der Schule erlernte euklidische Geometrie. Beispielsweise kann ein Betrachter die Länge L eines Stabs in der Entfernung r berechnen, wenn er misst, unter welchem Winkel w er erscheint: $L = 2 r \tan(w/2)$. Diese einfache Formel gilt in geschlossenen und offenen Räumen nicht mehr (Abb. 3). Zum Beispiel ist die Oberfläche der Erde ein geschlossener Raum.

Zum Glück gibt es im Universum eine Möglichkeit, die Relation $L = 2 r \tan(w/2)$ auf riesigen Längenskalen zu testen, und zwar mit Hilfe der kosmischen Hintergrundstrahlung. Sie wurde etwa 400 000 Jahre nach dem Urknall freigesetzt. Vor dieser Zeit war das Universum von einem heißen Plasma erfüllt, in dem sich Photonen nicht frei ausbreiten konnten. Sie stießen ständig mit Elektronen und Protonen zusammen und hinderten diese Teilchen daran, Atome zu bilden. Doch im expandierenden Universum kühlte sich das Plasma so weit ab, dass sich Elektronen und Protonen schließlich zu Was-

serstoffatomen verbinden konnten. Von nun an breiteten sich die Photonen beinahe ungehindert im Weltraum aus. Sie lassen sich heute im Mikrowellenbereich als schwache, nahezu gleichförmig über den Himmel verteilte Strahlung nachweisen.

Mit einem Satelliten, dem Cosmic Background Explorer (COBE), entdeckten die Astronomen im Jahr 1992 im Mikrowellenhintergrund winzige Schwankungen im Bereich von Millionstel Kelvin. Diese Schwankungen kartierte der Satellit WMAP im Jahr 2003 mit der bislang höchsten Genauigkeit (siehe SuW 7/2007, S. 36 ff.). Im Grunde betrachtete er dabei Schwingungen im Plasma des frühen Universums, denn wie in einer Flüssigkeit, so gibt es auch in diesem Plasma Schallwellen.

Einen Beobachter umgibt die kosmische Hintergrundstrahlung schalenförmig. Sie verhält sich wie ein Horizont, über den er nicht hinausblicken kann. Für ein gegebenes kosmologisches Modell lässt sich sowohl die Entfernung des Beobachters zur Schale der Aussendung der Strahlung als auch ihre charakteristische Schallwellenlänge berechnen (Abb. 4). Somit weiß man, unter welchem Winkeldurchmesser die Schwingungen der Schallwellen am Himmel zu beobachten sein müssten und kann diesen mit den Daten von WMAP vergleichen.

Die Entfernung zum Schallhorizont beträgt rund 13 000 Megaparsec und die Schallwellenlänge rund 150 Megaparsec. Legt man die Geometrie eines flachen Raums zugrunde, so ergibt sich eine zu erwartende Winkelausdehnung von rund einem Grad – in exakter Übereinstimmung mit den Messungen von WMAP. Im Unterschied zu einem flachen Universum breitet sich Licht in einem offenen oder geschlossenen Universum auf gekrümmten Bahnen aus. Unter dieser Voraussetzung würde dasselbe Phänomen unter einem anderen Winkel erscheinen (Abb. 4). Dies schließen die Beobachtungen mit WMAP jedoch aus.

Doch zurück zu Einstein. Verknüpft man nun die Robertson-Walker-Metrik mit der Einstein-Gleichung, so ergibt sich die sehr elegante Friedmann-Gleichung für einen flachen Raum (siehe »Zum Nachdenken« auf Seite 108f. in diesem Heft). Sie beschreibt den Zusammenhang zwischen der momentanen relativen Ausdehnungsgeschwindigkeit, dem so genannten Hubble-Parameter $H(t)$, mit der Energiedichte $\rho(t)$ des Universums. Während sich der Raum nun ausdehnt, wird die Energiedichte ρ_m der darin enthaltenen Materie stetig verdünnt. Aus der Friedmann-Gleichung folgt dann, dass die Ausdehnungsrate $H(t)$ kleiner wird: die Galaxien fliegen langsamer voneinan-



Harald Lesch

■ Alpha Centauri, Teil 15, DVD-Video
Vom Felsen zum Planeten/
Die Schwerkraft regiert
2007, 143 Min., BRW-Service.
Bestell-Nr. 2477.

€ 19,95 (D), € 19,95 (A)

Harald Lesch

■ Alpha Centauri, Teil 16, DVD-Video
Leben und leben lassen/Merkwürdige Sterne
2007, 143 Min., BRW-Service. Bestell-Nr. 2478.

€ 19,95 (D), € 19,95 (A)

Bestellen Sie gleich beide DVDs im Paket und sparen Sie:

■ Alpha Centauri Teil 15 u. 16 im Paket

Bestell-Nr. 2476. € 34,95 (D), € 34,95 (A)

Was sind Gravitationswellen? Gab es den Stern von Bethlehem? Diese und weitere spannende Themen erklärt Prof. Harald Lesch gewohnt kompetent, einprägsam und kurzweilig in den zwei neuen DVDs zur faszinierenden BR-Sendereihe »Alpha Centauri«. Ein Muss für alle, die die komplexen Phänomene des Kosmos allgemein verständlich erklärt haben wollen.

Ältere Folgen finden Sie hier:

www.science-shop.de/alphacentauri



SONDERPREIS

Michael Benson

■ Jenseits des blauen Planeten

2004, 319 S. m. zahlr. meist farb. Fotos u. Ausklapp-Taf., geb., Knesebeck.

Bestell-Nr. 1663.

Früher € 49,- jetzt nur € 24,- (D), € 25,70 (A)

Ein spektakulärer Fotoband: In diesem Buch werden Sie sich verlieren!

Erleben Sie mit Michael Benson die Erforschung der Planeten. In jahrelanger, akribischer Archivarbeit hat er die Aufnahmen von unbemannten Satelliten und Raumsonden gesichtet und ausgewählt. Entstanden sind beeindruckende Porträts der Oberfläche und Gestalt der Planeten. Hierfür wurden Fotos von Global Surveyor, Sojourner, Voyager und anderen Satelliten koloriert, um die Himmelskörper genau so zu zeigen, wie sie das menschliche Auge wahrnehmen würde.



Restexemplare wieder lieferbar

Eckhard Slawik/Uwe Reichert

■ Atlas der Sternbilder

Ein astronomischer Wegweiser in Photographien. Sonderausgabe.

2004, 224 S. m. zahlr. Farbfotos sowie zweifarb. Sternktn., Beil. 1 Schablone, geb., Spektrum. Bestell-Nr. 1712.

Früher € 50,- jetzt € 19,95 (D), € 20,50 (A)

Der Atlas der Sternbilder ist einzigartig: Erstmals ist der gesamte Himmel in großformatigen Farbfotos hervorragender Qualität abgebildet. Mit einer besonderen Aufnahmetechnik ist es gelungen, die Helligkeitsunterschiede der Sterne so auf dem Film abzubilden, wie das Auge sie wahrnimmt.



NEU

Jim Bell

■ Postkarten vom Mars

Der erste Fotograf auf dem Roten Planeten
2007, XII, 196 S. m. 160 Farbb., geb., Spektrum.

Bestell-Nr. 2485.

€ 49,95 (D),

€ 51,35 (A)

Der Mars – eine fremde Welt, viele Millionen Kilometer von uns entfernt. Aber die Raumsonden Spirit und Opportunity haben den Roten Planeten erreicht und unglaubliche Bilder von dessen Oberfläche zur Erde zurückgesandt. Dieses Buch präsentiert die eindrucksvollsten Aufnahmen – planetarische Landschaftsfotografie vom Feinsten! – und begleitet sie mit den spannenden Erläuterungen von Jim Bell, dem leitenden Fotografen der Mission. Für die deutsche Ausgabe hat er nicht nur ein neues Nachwort verfasst, sondern auch 5 spektakuläre neue Aufnahmen vom Mars aus den letzten Monaten (bis Juli 2007!) hinzugefügt. Vier der atemberaubendsten hyperrealistischen Panoramabildern sind auf großartigen, mehr als einen Meter breiten ausklappbaren Seiten gedruckt.



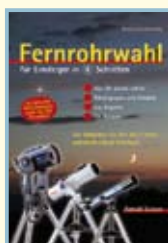
B. May/P. Moore/C. Lintott

■ Bang! Die ganze Geschichte des Universums

2007, 192 S. m. 200 Farbb., geb., Kosmos. Bestell-Nr. 2440.

€ 29,90 (D), € 30,80 (A)

Brian May unterbrach seine Laufbahn als Astrophysiker, um mit der Rockgruppe Queen Musikgeschichte zu schreiben. Jetzt beschäftigt er sich wieder mit dem ganz großen Knall, dem Urknall oder eben Big Bang. Auf dem neuesten Stand der Wissenschaft, in brillanter Klarheit geschrieben und in außergewöhnlicher Qualität illustriert, erzählt »Bang!« die ganze Geschichte des Universums – vom Urknall über die Entstehung der Sterne bis zum finalen Ende in ewiger Finsternis.



Ronald Stoyan

■ Fernrohrwahl für Einsteiger in 4 Schritten

Der Ratgeber für den Kauf eines astronomischen Teleskops

2007, 159 S. m. 100 farb. Abb., kart., Oculum.

Bestell-Nr. 2364. € 17,90 (D), € 18,40 (A)

Ausführlich werden die Fernrohrtypen mit ihren Vor- und Nachteilen vorgestellt, sinnvolle Auswahlkriterien besprochen, nützliches Zubehör vorgestellt und erläutert, wie man die Qualität eines Fernrohrs schnell beurteilt. Einzigartig ist die umfangreiche tabellarische Übersicht von mehr als 500 auf dem deutschen Markt erhältlichen Teleskopmodellen, von denen die 20 beliebtesten Einsteigergeräte ausführlich besprochen werden.



Arnold Hansmeier

■ Einführung in Astronomie und Astrophysik

2. Auflage 2007, 586 S., m. 235 Abb., geb., Spektrum. Bestell-Nr. 2470.

€ 34,95 (D), € 35,93 (A)

Dieses Astronomielehrbuch vermittelt das Grundwissen über Astronomie und die

wichtigsten Aspekte astronomischer Forschung auf dem Niveau einer einführenden Vorlesung. Die Neuauflage wurde nicht nur aktualisiert, sondern um moderne didaktische Elemente erweitert.



Helmut Hetzner

■ Expansionsgeschichte des Universums

Vom heißen Urknall zum kalten Kosmos

2007, XII, 108 S. m. 40 Abb. (10 farb.), kart., Spektrum. Bestell-Nr. 2472.

€ 14,50 (D), € 14,91 (A)

Hetzner zeigt anhand der physikalischen Modelle, wie man aus der Strahlung von Sternen und Galaxien und dem Energieausbruch am Beginn des Urknalls die Evolutionsgeschichte des Universums entschlüsselt. Knapp und kompakt, mit vielen Abbildungen.

Portofreie Lieferung in D & A ab einem Bestellwert von € 20,-*



Robert J. Nemiroff/
Jerry T. Bonnell

■ Das Universum – Tag für Tag

Immerwährender Kalender

2003, 25 x 17 cm, 744 Seiten, mit 365 farb. Abb., geb., Knesebeck. Bestell-Nr. 1714.

Früher € 33,- jetzt € 9,95 (D), € 10,30 (A)

Mit der Astronomie durch's Jahr: 365 Tage mit 365 Astronomie-Bildern, die jeweils von einem kompetenten Begleittext kommentiert werden.



Hansjörg Geiger

■ Aufbruch zu neuen Welten

Die Zukunft der Raumfahrt

2007, 144 S. m. 150 Farbb., geb., Kosmos. Bestell-Nr. 2474.

€ 19,95 (D), € 20,60 (A)

50 Jahre Raumfahrt liegen

hinter uns – was wird die Zukunft bringen? Nach einem kurzen Rückblick nimmt dieses Buch den Leser mit auf eine Reise zu den kühnen Plänen der Raumfahrtationen. Mit vielen beeindruckenden Abbildungen werden die spektakulären Erfolge der Vergangenheit und die ambitionierten Pläne der Zukunft vorgestellt.

Weitere interessante Astronomietitel unter www.science-shop.de/astronomie



Bequem bestellen:

→ direkt bei
www.science-shop.de

→ per E-Mail:
info@science-shop.de

→ telefonisch
06221/9126-841

→ per Fax:
0711/7252-366

→ per Post:
Postfach 810680 • 70523 Stuttgart

der weg. Ein Universum, das aus Materie besteht, bremst also ab. Im newtonschen Bild geschieht dies durch die gegenseitige Anziehung der Galaxien.

An dieser Stelle sollten wir an die Ergebnisse Fritz Zwickys erinnern. Zählt man die leuchtende Materie und die von ihm berechnete Dunkle Materie zusammen, so kann man berechnen, wieviel Materie ein Kubikmeter des Universums durchschnittlich enthält. Dies ergibt den bescheidenen Wert von 3×10^{-27} Kilogramm pro Kubikmeter, was zwei Wasserstoffatomen innerhalb eines Würfels mit einem Meter Kantenlänge entspricht. Im Vergleich zu uns Menschen und selbst der Luft ist das Universum demnach von geringer Dichte. Was hier banal klingen mag, ist wiederum alles andere als offensichtlich. Denn die Dichte ist nur deshalb so gering, weil das Universum sehr groß und alt ist. Nichtsdestoweniger reicht diese Dichte aus, um rund fünfzig Prozent der Ausdehnungsgeschwindigkeit unseres Universums zu erklären.

Setzt man nämlich die Dichte in die Friedmann-Gleichung für den flachen Raum ein, so findet man einen Hubble-Parameter von 35 Kilometern pro Sekunde und Megaparsec, was ungefähr der Hälfte des gemessenen Werts von siebzig Kilometern pro Sekunde und Megaparsec entspricht. Da der Hubble-Parameter quadratisch von der Dichte abhängt, gibt es dafür nur zwei plausible Erklärungen: Entweder muss Einsteins Gravitationsgesetz überarbeitet werden, oder aber siebzig Prozent unseres Universums bestehen aus etwas anderem als Materie.

Im Prinzip spricht nichts dagegen, dass Einsteins Gleichung ein wenig komplizierter sein könnte als von ihm gedacht. Schließlich konstruierte er sie so, dass sie für schwache Gravitationsfelder und kleine Längenskalen mit dem newtonschen Gravitationsgesetz übereinstimmt. Die Attribute »schwach« und »klein« sind dabei im wahrsten Sinne des Wortes relativ: Das Gravitationsfeld der Sonne ist in diesem Sinne schwach und der Durchmesser des Sonnensystems klein. Es könnten durchaus weitere Terme in der Einsteingleichung auftauchen, die sich für das Sonnensystem kaum auswirken, wohl aber für das große Ganze eine Rolle spielen.

Andererseits bestand die Einsteingleichung bislang alle Tests mit Bravour. Möchte man an ihr festhalten, so bleibt demnach nur eines übrig: Siebzig Prozent des Universums bestehen aus etwas recht Mysteriösem. Diese Substanz tritt mit uns nur sehr schwach in Wechselwirkung, denn sonst hätten wir sie wohl schon zuvor entdeckt. Deshalb bezeichnen die Astrophysiker sie ebenfalls mit dem At-

tribut »dunkel«. Allerdings unterscheidet sie sich in ihren physikalischen Eigenschaften wesentlich von Materie. Deshalb trägt sie auch die Bezeichnungen »Dunkle Energie« oder auch »Quintessenz«.

Zwickys überraschendes Erbe

Um etwas über die Eigenschaften der Dunklen Energie zu erfahren, wenden die Astronomen eine Messmethode an, die auf eine Idee Fritz Zwickys zurückgeht. Er schlug vor, Supernovae des Typs Ia zur Messung der Abbremsung der Expansion zu nutzen. Man vermutet, dass derartige Supernovae innerhalb enger Doppelsternsysteme entstehen (Abb. 5). Ein Weißer Zwerg saugt Gas von einem roten Riesenstern ab, bis seine Masse einen kritischen Wert, die so genannte Chandrasekhar-Grenze, überschreitet. Sobald dies geschieht, kollabiert der Weiße Zwerg. Er besitzt noch große Mengen an Kohlenstoff, der beim Kollaps fusioniert, woraufhin der Weiße Zwerg als Supernova explodiert.

Da dieser Mechanismus bei allen Ia-Supernovae sehr ähnlich verläuft, lassen sie sich als Standardkerzen verwenden: Legt man bei jeder Ia-Supernova die gleiche Leuchtkraft zugrunde, dann lässt sich aus der beobachteten scheinbaren Helligkeit ihre Distanz berechnen. Gleichzeitig misst man die Rotverschiebung ihres Lichts. Aus mehreren Beobachtungen

unterschiedlich weit entfernter Ia-Supernovae lässt sich dann ein Entfernungs-Rotverschiebungs-Diagramm erstellen. Zwickys Idee bestand nun darin, einen Effekt zu nutzen, der auf den ersten Blick keineswegs verständlich ist: Die einer gemessenen Rotverschiebung entsprechende Entfernung ist umso größer, je kleiner die Ausdehnungsgeschwindigkeit in der Frühzeit des Universums war (siehe »Zum Nachdenken« Seite 108 f.).

Für ein Universum, das zu fast hundert Prozent aus Materie besteht, lässt sich die Ausdehnungsgeschwindigkeit zu einem früheren Zeitpunkt aus der Friedmann-Gleichung berechnen. Gäbe es zusätzlich zur Materie eine weitere Substanz, die sich jedoch anders komprimiert, so würde diese die Ausdehnungsgeschwindigkeit zu früheren Zeiten in charakteristischer Weise beeinflussen.

Kurz vor der Jahrtausendwende hatten die Astronomen die Beobachtungstechnik so weit entwickelt, dass sie den Vorschlag Zwickys in die Tat umzusetzen konnten. Die Daten des High-Z-Supernova-Search-Teams und des konkurrierenden Supernova-Cosmology-Projekts bargen jedoch eine handfeste Überraschung: Die für Ia-Supernovae mit hohen Rotverschiebungen ermittelten Entfernungen sind größer als erwartet. Zudem dehnte sich der Raum früher deutlich langsamer aus als zu erwarten wäre, wenn das Uni-

Justin R. Maund und Wsa





◀ Abb. 5: Eine Supernova des Typs Ia entsteht innerhalb eines engen Doppelsternsystems, in dem Gas von einem Roten Riesen (links) auf einen Weißen Zwerg überströmt. Das Gas sammelt sich zunächst in einer Akkretionsscheibe um den kompakten Begleiter und fällt schließlich auf seine Oberfläche. Überschreitet die Masse des Begleiters eine kritische Grenze, so explodiert er und wird dabei völlig zerrissen.

aus. Es ist die Energie des Quantenvakuums, die es ermöglicht, dass Teilchen aus dem Nichts entstehen und wieder verschwinden. Berechnet man, wie viele Quantenfluktuationen zur Vakuumenergie beitragen, so ergibt sich eine Energiedichte, die einer Materiedichte von 10^{90} Kilogramm pro Kubikmeter entspricht. Die heutige Dichte des Universums beträgt jedoch nur etwa 10^{-27} Kilogramm pro Kubikmeter. Die Vakuumenergie ist also um beinahe 120 Zehnerpotenzen größer als nötig wäre, um die Expansion des Universums zu erklären.

Es ist jedoch durchaus möglich, dass sich Energiebeiträge positiver und negativer Quantenfluktuationen gegenseitig aufheben. Dies war stets die Hoffnung der Physiker. Beispielsweise tragen Fermionen, wie zum Beispiel das Elektron, in umgekehrter Weise bei wie Bosonen, zu denen auch das Photon gehört. Ein noch unbekannter Mechanismus sollte dafür sorgen, dass die Vakuumenergie exakt verschwindet. Um aber eine kleine, nicht verschwindende Vakuumenergie zu erklären, müssten sich die Fluktuationen auf 120 Stellen nach dem Komma wegheben – aber nicht weiter.

Wundersame Skalarfelder

Infolge der Expansion des Raums dehnen sich physikalische Längen aus. Von einer Zeit t_i bis zu einer späteren Zeit t_e wird ein Abstand a um den Faktor $a(t_e)/a(t_i)$ größer. Somit wächst das Raumvolumen mit der dritten Potenz von $a(t)$ an, und Materie verdünnt sich umgekehrt proportional zur dritten Potenz von $a(t)$. Strahlung verdünnt sich sogar noch schneller, weil während einer Expansion nicht nur die bestehenden Photonen auf einen größeren Raum verteilt werden, sondern zudem ihre Wellenlänge auch gestreckt wird. Insgesamt ergibt das vier Potenzen von $a(t)$.

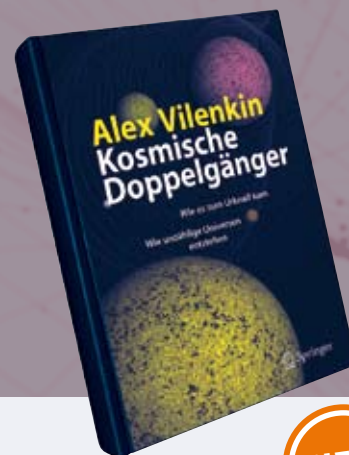
Eine gleichbleibende Energiedichte, wie sie einer kosmologischen Konstante entspricht, erscheint auf den ersten Blick sehr seltsam. Jedoch weist die quantenmechanische Beschreibung der Wechselwirkungen zwischen den Elementarteil-

versum heute zu hundert Prozent aus Materie bestünde. Ja, das Universum bremst heute gar nicht ab, es beschleunigt! Die Beschleunigungsgleichung ergibt, dass man es mit einem höchst seltsamen Stoff zu tun hat: Um die Expansion des Raums zu beschleunigen, muss der Druck negativ sein und mindestens ein Drittel zur Energiedichte beitragen.

Angesichts dieser Daten wäre Isaac Newton wohl stark ins Grübeln gekommen, denn die durch sein Gravitationsgesetz beschriebene Kraft wirkt stets anziehend. Eine Abstoßung kommt nicht darin vor. Doch Albert Einstein könnte schmunzeln. Seine Allgemeine Relativitätstheorie ist sehr wohl dazu geeignet, eine beschleunigte Expansion des Universums zu beschreiben. Er hätte sogar eine gute Erklärung dafür: die kosmologische Konstante. Diese führte er selbst in die Einsteingleichung ein, und hierbei kann man sie als konstanten Beitrag zur Energiedichte betrachten. Allerdings entspricht diesem Beitrag ein ungewöhnlicher Druck: Er ist negativ und exakt gleich groß wie die Energiedichte. Es ist dieser negative Druck, der in Einsteins Kosmologie für eine beschleunigte Ausdehnung des Universums sorgt.

Im Grunde könnte sich Einstein nun zufrieden zurücklehnen – wäre da nicht die Quantentheorie. Diese sagt nämlich eine solche ungewöhnliche Energie vor-

 Springer



NEU

Kosmische Doppelgänger

Wie es zum Urknall kam und wie unzählige Universen entstehen

A. Vilenkin

Alex Vilenkin, einer der kreativsten Kosmologen unserer Zeit, zeichnet leicht verständlich das faszinierende Weltbild der modernen Kosmologie. Er schildert die Urknall-Theorie und ihre Erweiterung durch das Szenario der Kosmischen Inflation. Und warum ständig neue Universen entstehen. Eine der erstaunlichsten Aussagen: Dass es Regionen im Kosmos geben muss, unendlich viele sogar, die mit unserer identisch sind. Es gibt Welten mit exakten Doppelgängern von uns! Die Folge: Der Abschied von unserer Einzigartigkeit! Dieses reich illustrierte Buch gibt viele verblüffende Antworten.

2008. 278 S. 50 Abb. Geb.

ISBN 978-3-540-73917-3

► € (D) 19,95 | € (A) 20,50 | *sFr 32,50

springer.de

Bei Fragen oder Bestellung wenden Sie sich bitte an

► Springer Distribution Center GmbH, Haberstr. 7, 69126 Heidelberg ► Telefon: +49 (0) 6221-345-4301

► Fax: +49 (0) 6221-345-4229 ► Email: SDC-bookorder@springer.com ► € (D) sind gebundene Ladenpreise in Deutschland und enthalten 7% MwSt; € (A) sind gebundene Ladenpreise in Österreich und enthalten 10% MwSt. Die mit * gekennzeichneten Preise für Bücher sind unverbindliche Preisempfehlungen und enthalten die landesübliche MwSt. ► Preisänderungen und Irrtümer vorbehalten. ► Springer-Verlag GmbH, Handelsregistersitz: Berlin Charlottenburg, HR B 91022. Geschäftsführer: Haank, Mos, Hendriks

013315x

chen, die Quantenfeldtheorie, den Physikern hier einen interessanten Weg. Es handelt sich um so genannte skalare Felder. Ein Beispiel hierfür ist das vom Standardmodell der Elementarteilchenphysik geforderte Higgs-Feld. Es durchzieht das gesamte Universum und verleiht den Elementarteilchen ihre Masse. Je nachdem, wie stark ein Teilchen mit dem Higgs-Feld in Wechselwirkung tritt, ist seine Masse kleiner oder größer.

Hinsichtlich ihres Verdünnungsverhaltens sind skalare Felder wahre Verwandlungskünstler, denn ihre Energiedichte kann sich während der Expansion des Raums beinahe beliebig verhalten. Die Möglichkeiten reichen von einem konstanten Wert bis zur sechsten Potenz von $a(t)$ und höheren Potenzen. Das tatsächliche Verhalten hängt nur davon ab, wie die Energie des Skalarfelds zwischen der Bewegungsenergie und der potenziellen Energie aufgeteilt ist, und dieses Verhältnis kann sich im Laufe der Zeit ändern.

Wie erwähnt, beschreibt man die Bewegungsenergie als Druck. Materie besitzt einen im Vergleich zu ihrer Energie kleinen Druck, Licht besitzt jedoch einen Strahlungsdruck, der ein Drittel seiner Energie ausmacht. In dieser an die Mechanik der Flüssigkeiten erinnernden Terminologie besitzt ein Skalarfeld, das sich weniger stark verdünnt als Materie, einen negativen Druck. Sofern es gänzlich konstant bleibt, ist der Beitrag des negativen Drucks so groß wie seine Energie. Damit verhält sich das Feld praktisch wie eine kosmologische Konstante.

Skalarfelder können aber noch mehr. Denn wie schon erwähnt, teilt sich die Energiedichte des Universums heute in dreißig Prozent Materie und siebenzig Prozent Dunkle Energie auf.

Da sich die Dichte von Materie aber mit der Expansion des Universums verdünnt, war sie im frühen Universum viel größer als heute. Eine kosmologische Konstante bleibt hingegen stets gleich. Im frühen Universum spielt sie deshalb keine Rolle. Doch ausgerechnet in unserer Epoche – nicht früher und auch nicht später – sind Materie und Dunkle Energie nahezu gleichermaßen wichtig. Da Physiker ungern an Zufälle glauben, gilt dies als Hauptargument gegen eine echte kosmologische Konstante.

Wesentlich eleganter wäre ein Mechanismus, der erklärt, weshalb eine beschleunigte Expansion gerade heute auftritt. Zumindest sollten die Parameter der Theorie nicht auf 120 Stellen nach dem Komma feinjustiert sein. Hier helfen Skalarfelder, denn legt man das richtige Potenzial zugrunde, können Skalarfelder der dominanten Spezies im Universum folgen. Im frühen Universum, in dem Strah-

Wo versteckt sich die Dunkle Energie?

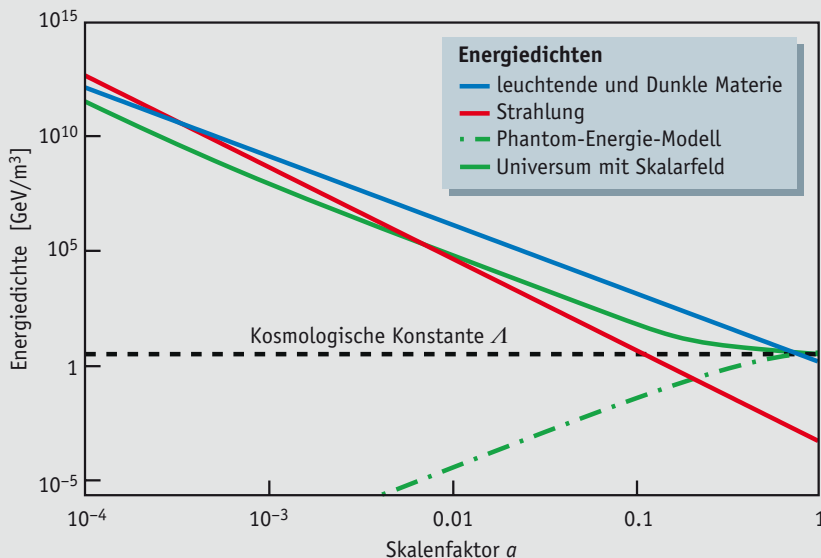
Zwar lässt sich die Dunkle Energie nicht direkt beobachten, jedoch können die Astronomen ihre Auswirkungen auf die Entwicklung des Kosmos studieren. Detaillierte Vergleiche zwischen Theorie und Beobachtungen gestattet die Energiedichte.

Das Diagramm zeigt die Entwicklung der Energiedichten im expandierenden Kosmos als Funktion des Längenskalenfaktors a . Dieser gibt an, um welchen Faktor sich die Distanz zwischen zwei Punkten infolge der Expansion vergrößert. Im Diagramm ist er so normiert, dass der Gegenwart $a = 1$ entspricht. Kleinere Werte von a beziehen sich auf die Vergangenheit.

Eingezeichnet sind die Energiedichten für leuchtende und Dunkle Materie

(blau), Strahlung (rot) sowie Modelle der Dunklen Energie (grün). Die gestrichelte waagrechte Linie stellt den Beitrag einer kosmologischen Konstante dar. Im Vergleich zu den Beiträgen von Materie und Strahlung wird er erst im heutigen Universum wichtig. Die grüne gepunktete beziehungsweise gestrichelte Linie entspricht »Phantom-Energie-Modellen«, die zu einem gewaltvollen Ende des Universums führen würden.

Zur Beschreibung der Dunklen Energie postulieren die Astrophysiker ein im ganzen Kosmos vorhandenes Skalarfeld. Den sich daraus ergebenden Verlauf zeigt die grüne durchgezogene Linie. Im Unterschied zu den Phantom-Energie-Modellen folgt sie weitgehend den Energiedichten für Materie und Strahlung.



lung dominierte, verdünnte sich die Energie des Skalarfelds gemäß der Strahlung. Mit fortlaufender Expansion dominierte jedoch der Einfluss der Materie, denn diese verdünnt sich ja um eine Potenz von $a(t)$ langsamer als Strahlung. Nun folgte das Skalarfeld der Energiedichte von Materie. Sollte das Feld stets ungefähr den gleichen Beitrag zur Energiebilanz des Universums liefern, so müsste sich dies auch heute nachweisen lassen.

Da trifft es sich gut, dass zwei Forscher ein solches Skalarfeld bereits 1988, also lange vor der Entdeckung der beschleunigten Ausdehnung, in die Diskussion einbrachten. Unabhängig voneinander und nur im Abstand von wenigen Wochen, veröffentlichten Christof Wetterich vom Institut für Theoretische Physik der Universität Heidelberg sowie Jim Peebles gemeinsam mit Bharat Ratra von der Universität Princeton jeweils Rechnungen, die ein Skalarfeld im heutigen Universum

zugrunde legen. Die Zielrichtung der beiden Arbeiten war dabei unterschiedlich. Während Wetterich das Skalarfeld nutzte, um das Verschwinden der kosmologischen Konstante zu erklären, betrachteten Peebles und Ratra das Feld aus eher astrophysikalischer Sicht. Sie benutzten das Skalarfeld, um die fehlenden siebenzig Prozent der Energiedichte des Universums zu erklären.

Der Kosmos im Computer

Um die dem Skalarfeld gewidmeten Veröffentlichungen der Forscher in Heidelberg und Princeton blieb es lange Zeit ruhig. Mitte der 1990er Jahre befasste sich Christof Wetterich in einer Publikation wiederum mit dem Skalarfeld und betrachtete erstmals eine mögliche Wechselwirkung zwischen Materie und Dunkler Energie. Doch das Thema dümpelte weiterhin nahezu unbeachtet vor sich hin.

Dies änderte sich schlagartig, als die Beobachtungen von Supernovae im Jahr 1997 eine beschleunigte Expansion des Universums ergaben. Robert Caldwell, Rahul Dave und Paul Steinhardt von der Universität Princeton nahmen die Idee von Wetterich, Peebles und Ratra auf und verallgemeinerten sie. Gleichzeitig gaben sie der neuen Substanz den geschichtsträchtigen Namen »Quintessenz«. Immer mehr Kosmologen widmeten sich nun dem Problem der Quintessenz, die bald darauf als »Dunkle Energie« bezeichnet wurde.

Es gab allerdings noch immer Zweifel, ob nicht astrophysikalische Effekte anstatt einer beschleunigten Expansion die aus den Beobachtungen der Supernovae gewonnenen Daten erklären könnten. Beispielsweise könnte der Explosionsmechanismus bei stark rotverschobenen und damit sehr frühen Supernovae anders verlaufen sein als im heutigen Universum.

Kurz vor der Jahrtausendwende begann Christof Wetterich an der Universität Heidelberg eine Forschungsgruppe aufzubauen. Ihr Ziel bestand darin, möglichst viel über die Natur der Dunklen Energie zu lernen. Dabei verfolgten die Forscher zwei Ansatzpunkte parallel. Einerseits untersuchten sie das generische Verhalten von Dunkler Energie theoretisch.

Beispielsweise geht es dabei um das Verhalten von Dichteschwankungen im Universum, die schließlich zu Galaxien und Sternen anwachsen. Sie berechneten auch die Auswirkung der Dunklen Energie auf die kosmische Hintergrundstrahlung. Zudem verglichen sie Vorhersagen verschiedener Modelle der Dunklen Energie mit den vielfältigen Experimenten, die allmählich ein Standardmodell des Uni-

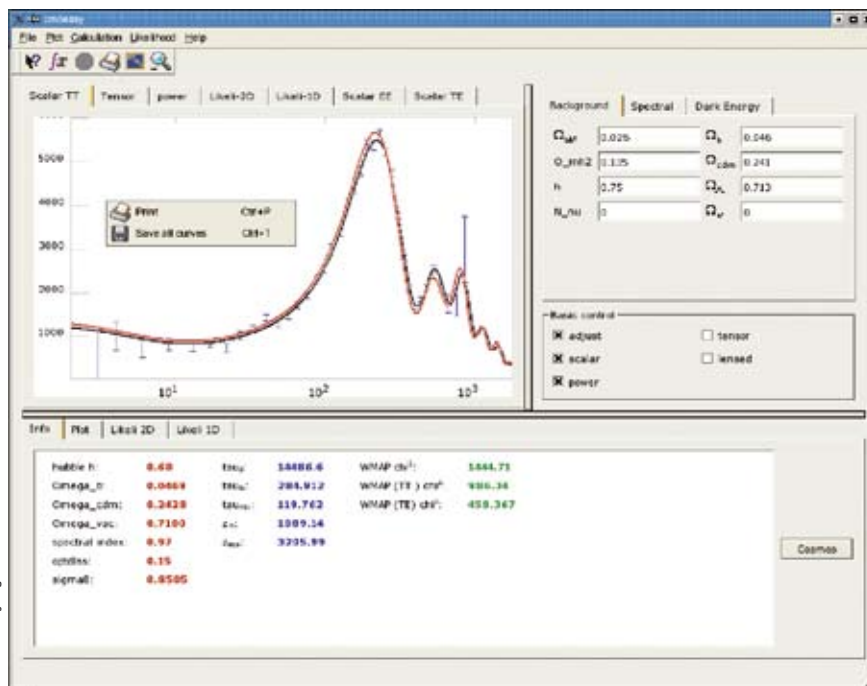
versums ergaben – und dieses benötigte die Dunkle Energie.

Zu den Ergebnissen aus den Beobachtungen der Ia-Supernovae gesellten sich im Frühjahr 2001 Daten der Experimente Maxima und Boomerang. Diese Ballonmissionen zur Messung der kosmischen Hintergrundstrahlung ergaben eine noch recht schwache Präferenz hin zur Dunklen Energie. Um die Modelle anhand der Messdaten vergleichen zu können, entwickelten Heidelberger Forscher die Software »cmbeasy« (Abb. 7).

Das umfangreiche Programm berechnet aus Messdaten die Spektren der kosmischen Hintergrundstrahlung und der Galaxienverteilung. Es ist besonders für die Erforschung Dunkler Energie geeignet. Mit cmbeasy lässt sich das Verhalten der Dunklen Energie auf der Basis unterschiedlicher Daten erforschen, unter anderem aus Messungen der Hintergrundstrahlung, der Verteilung der Galaxien und von Ia-Supernovae.

Mit den Jahren kamen immer mehr Beobachtungen hinzu, die alle dasselbe Bild ergaben: die Dunkle Energie scheint real zu sein. Als schließlich im Februar 2003 der Satellit WMAP ebenfalls die Existenz

Abb. 7: Mit dem von Heidelberger Forschern entwickelten Programm »cmbeasy« lassen sich beobachtete Daten mit den Voraussagen kosmologischer Modelle vergleichen. Das Beispiel zeigt das vom Satelliten WMAP gemessene Winkelleistungsspektrum von Strukturen des Mikrowellenhintergrunds sowie die theoretischen Kurven der gezeigten kosmologischen Parameter.



Besuchen Sie uns im Internet!



In unserem Online-Archiv finden Sie alle bisher erschienenen **Sterne und Weltraum**-Artikel seit 2005.

>> Hier können Sie nach einzelnen Artikeln recherchieren und diese für € 1,- als PDF-Dateien kaufen:

www.suw-online.de/archiv

>> Sie können **Sterne und Weltraum** auch komplett als Online-Ausgabe abonnieren:

www.suw-online.de/digitalabo

>> Der Podcast von **Sterne und Weltraum** und **astronomie heute** enthält aktuelle Nachrichten rund um Weltraumforschung und Amateurastronomie

Diesen und weitere kostenlose Service-Angebote finden Sie unter

www.suw-online.de

Dunkle Energie bestätigte, gab es kein Halten mehr. Die Wissenschaft der Dunklen Energie erlebte nun einen regelrechten Boom. Den stürmischen Anfangsjahren der Theoretiker folgten bald Vorschläge für neue Missionen. Im Gegensatz zu klassischen astronomischen Beobachtungen kommt es für Kosmologen auf die schiere Menge an. Für die Statistik der Strukturentstehung auf großen Skalen benötigt man Hunderttausende von Galaxien. Und auch von den Ia-Supernovae dürften es ruhig ein wenig mehr sein.

Die Jagd nach Supernovae

Zum Glück für die Kosmologen gelangen den Astronomen in den letzten Jahren große Fortschritte. Mit ausgefeilten Techniken vermaßen sie Hunderte von Galaxien gleichzeitig, und in Zukunft werden sie kosmologischen Fragestellungen eigene Teleskope widmen. Beispielsweise wird das geplante Large Synoptic Survey Telescope (LSST), mit seinem 8,4-Meter-Spiegel in jeder Nacht einen großen Teil des Himmels beobachten (Abb. 8). Dank seines großen Lichtsammelvermögens wird es innerhalb von nur drei Nächten schwächste Objekte am gesamten vom Beobachtungsort aus sichtbaren Himmel erfassen.

Der Vergleich aufeinanderfolgender Durchmusterungen gestattet es, innerhalb kurzer Zeit zahlreiche Supernovae zu entdecken: Während sich die Astronomen 1997 mit 42 Ia-Supernovae zufrieden geben mussten, um die beschleunigte Expansion des Kosmos zu zeigen, wird das LSST ab dem Jahr 2013 die unvorstellbare Anzahl von 250 000 Ia-Supernovae pro Jahr vermessen. Zwicky würde wohl vor Verzückung Luftsprünge machen. Allerdings müssen die Forscher noch viel über Ia-Supernovae lernen. Denn während die große Zahl in Zukunft vermessener Supernovae den statistischen Fehler verkleinern wird, bleibt der systematische Fehler – eben unsere Unwissenheit über die Details der Explosionen – gleich groß und wird ansonsten die Messungen dominieren (siehe SuW 5/2005, S. 22).

Derzeit versucht man das Verhalten der Dunklen Energie von der Gegenwart bis zurück ins frühe Universum zu verfolgen. Dies ist nicht zuletzt auf die Arbeit der Heidelberger Gruppe zurückzuführen, denn noch vor wenigen Jahren konzentrierte sich die Diskussion auf die kosmologische Konstante oder aber auf eine Dunkle Energie mit konstantem Verhältnis des Drucks zur Energie. Dieses Verhältnis wird durch eine Zustandsgleichung beschrieben und bestimmt das Verdünnungsverhalten während der kosmischen Expansion. Die Zustandsgleichung kann durchaus zeitabhängig sein,

und auch ein typisches Skalarfeld zeigt eine Zeitabhängigkeit. In den von Heidelberger Astrophysikern entwickelten Modellen, welche die Dunkle Energie im frühen Kosmos beschreiben, spielt beispielsweise die Dunkle Energie bereits kurz nach dem Urknall eine messbare Rolle.

Demzufolge dürfte die Dunkle Energie zu frühen Zeiten jedoch nicht siebenzig Prozent, sondern höchstens fünf Prozent zur gesamten Energiedichte beigetragen haben. Denn während Dunkle Materie im Laufe der Entwicklung durch Gravitation zu Galaxien zusammenklumpt, trifft dies auf die Dunkle Energie nicht zu. Eine kosmologische Konstante muss überall im Universum gleich groß sein, sonst wäre sie ja nicht konstant. Somit kann sie keine »Klumpen« bilden.

Skalarfelder dürfen zwar räumlich und zeitlich fluktuieren. Sollen sie jedoch die Dunkle Energie darstellen, dann

müssen die Teilchen, die das Skalarfeld beschreibt, eine äußerst geringe Masse aufweisen – so leicht, dass sie praktisch masselos sind. Sie lassen sich dann nicht durch die Gravitation einer Galaxie einfangen, sondern entkommen nahezu mit Lichtgeschwindigkeit aus jedem noch so dichten Bereich.

Das entsprechende Skalarfeld lässt sich somit für alle praktischen Zwecke als homogen im gesamten Universum betrachten. Der Wert des Felds und damit sein Energiebeitrag ändern sich also nur zeitlich, kaum aber räumlich. Dies bedeutet allerdings, dass das Feld auch nicht aktiv an der Entstehung von Strukturen im Universum teilnehmen kann. Gibt es also zuviel Dunkle Energie im frühen Universum, so entstehen weniger Galaxienhaufen als wir heute beobachten. Dies beschränkt den Beitrag auf die schon erwähnten fünf Prozent.

Michael Mullen Design, LSST Corporation



Literaturhinweise

Matthias Bartelmann: Das Standardmodell der Kosmologie. Teil 1: SuW 8/2007, S. 38, Teil 2: SuW 9/2007, S. 36

Wolfgang Hillebrandt, Friedrich Röpke: Supernovae vom Typ Ia – Die Physik der Explosionen. SuW 5/2005, S. 22

Axel M. Quetz: Dunkle Materie. Zum Nachdenken. SuW 1/2005, S. 94

Wolfgang Rau: Auf der Suche nach der Dunklen Materie. SuW 1/2005, S. 32

Hartmut Schulz: Dunkle Energie – Antrieb für die Expansion des Universums. Teil 1: SuW 10/2001, S. 854, Teil 2: SuW 11/2001, S. 948

Spektrum der Wissenschaft: Dossier 5/07. Kosmische Ursprünge. Wie Astronomen die Geschichte des Universums enträtseln.



◀ Abb. 8: Dieses im Computer erzeugte Bild zeigt das geplante Large Synoptic Survey Telescope (LSST), das auf dem Cerro Pachón in Chile entstehen soll. Mit seinem 8,4-Meter-Spiegel werden die Astronomen innerhalb von drei Nächten den gesamten vom Standort aus sichtbaren Himmel aufnehmen. Jede Einzelbelichtung soll innerhalb von fünfzehn Sekunden ein Gesichtsfeld von zehn Quadratgrad erfassen.

Neue Lösungsansätze

In der heutigen Diskussion innerhalb der Forschungsgemeinschaft bemüht sich die Heidelberger Gruppe, den Blick etwas weg von der Zustandsgleichung, hin zur zeitlichen Entwicklung der Energiedichte der Dunklen Energie, zu lenken. Grob gesagt beschreibt die Zustandsgleichung die zeitliche Änderung der Energiedichte auf die Strukturbildung und die kosmische Hintergrundstrahlung ist jedoch die Energiedichte selbst und nicht die Zustandsgleichung entscheidend. Das ist intuitiv verständlich: Wenn die Energiedichte so klein ist, dass die Dunkle Energie innerhalb einer gewissen Epoche des Universums keine Rolle spielt, kann die Zustandsgleichung machen was sie will – sie wird keinen messbaren Effekt erzeugen.

Das Ziel der Heidelberger Kosmologen ist es daher, die Energiedichte der Dunklen Energie als Funktion der Zeit möglichst genau zu bestimmen. Daraus lassen sich dann Rückschlüsse auf Modelle zur Dunklen Energie ziehen. Bislang zeichnen jedoch alle Experimente dasselbe Bild einer kosmologischen Konstante. Daher lassen sich zurzeit nur Obergrenzen für den Beitrag der Dunklen Energie im frühen Universum angeben. Wichtig ist dies trotzdem, denn es schränkt die möglichen theoretischen Modelle ein.

Das Rätsel der Dunklen Energie beschäftigt Astronomen und Theoretischen

Physiker gleichermaßen. Um die Kräfte in Deutschland zu bündeln, finanziert die Deutsche Forschungsgemeinschaft seit Oktober 2006 den überregionalen Verbund »Transregio TRR 33 – The Dark Universe« von Universitäten sowie Max-Planck-Instituten aus Bonn, Heidelberg und München. Die Lösung des Rätsels wird unser Bild von der Natur entscheidend beeinflussen. Dabei gibt es gleich mehrere spannende Möglichkeiten. Falls die zukünftigen Beobachtungen gut durch eine kosmologische Konstante beschrieben werden, werden die theoretischen Physiker den kleinen beobachteten Wert erklären müssen. Wenn man von anthropischen Argumenten absieht (siehe SuW 3/2007, S. 48), wird eine erfolgreiche Erklärung sicherlich das Modell der Elementarteilchen und der Feldtheorie revolutionieren.

Was aber, wenn sich die Beobachtungen nicht mit einer kosmologischen Konstante in Einklang bringen lassen? Dann verhält sich entweder die Gravitation auf großen räumlichen Skalen anders, als wir sie uns vorstellen oder aber ein neues Skalarfeld wird entdeckt. Eine Wette mag man heute aber schon wagen: Wenn das Rätsel der Dunklen Energie gelüftet ist, wird es uns wie Schuppen von den Augen fallen. Denn die wirklich fundamentalen Fortschritte waren in der Vergangenheit stets auch sehr elegant. □

Interessante Weblinks zum Thema finden Sie unter www.suw-online.de/artikel/906238



Michael Doran promovierte im Jahr 2002 in Heidelberg und war danach als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Dartmouth College in den USA tätig. Im Jahr 2006 habilitierte er am Institut für Theoretische Physik in Hei-

delberg über die Dunkle Energie. Seit Dezember 2006 leitet er den technischen Vertrieb der Schmid Technology GmbH, Schwetzingen.



 **Hofheim
Instruments**

Hofheim Instruments M. Tennigkeit
Hattersheimerstr. 29 a
D 68719 Hofheim
Telefon +49 (0) 61 92 22 333

Service@HofheimInstruments.com
www.HofheimInstruments.com

Die neue Leichtigkeit: 12 Zoll, 12 Kilo.

Diesen leistungsstarken 12 Zoll Leichtbau-Reise-Dobson können Sie ganz leicht zerlegen, vollständig in zwei Transportboxen verladen und damit besonders leicht transportieren.

Alles ist drin: exzellenter, nur 12 Kilo leichter f/5-Newton in Glitterbauweise, präziser 2-Zoll-Drehfokussierer, Leichtbau-Dobson-Montierung mit allen Stangen.

Industriell gefertigt, komplett ohne Werkzeug zu handhaben, stabil und solide aus Edelstahl, Aluminium und Birke-Multiplex. Mit faszinierender optischer Leistung, die kein Detail auslässt. Perfekt für ein völlig neues Astronomie-Erlebnis in Ihrem nächsten Urlaub.

