

# Die Dunkle Energie und ihre Feinde

Seit fast neunzig Jahren wissen die Kosmologen, dass unser Universum sich ausdehnt – doch bis vor kurzem ahnte niemand, dass die kosmische Expansion sich beschleunigt. Wird man in kommenden Jahren den Grund verstehen?

Von Gerhard Börner

## In Kürze

- ▶ **Das Weltall ist nicht statisch**, sondern dehnt sich aus. Das wissen Kosmologen seit vielen Jahrzehnten.
- ▶ Doch dass diese Expansion sich beschleunigt, wurde erst vor wenigen Jahren offenbar. Zur Erklärung berufen sich die meisten Kosmologen auf die **Wirkung einer unbekannten Dunklen Energie**.
- ▶ Manche Forscher versuchen **andere Erklärungen für die kosmische Beschleunigung**, zum Beispiel den so genannten Rückwirkungseffekt; demnach ergibt sich der Beschleunigungseffekt, wenn man die Materieverteilung im Kosmos genauer berücksichtigt.

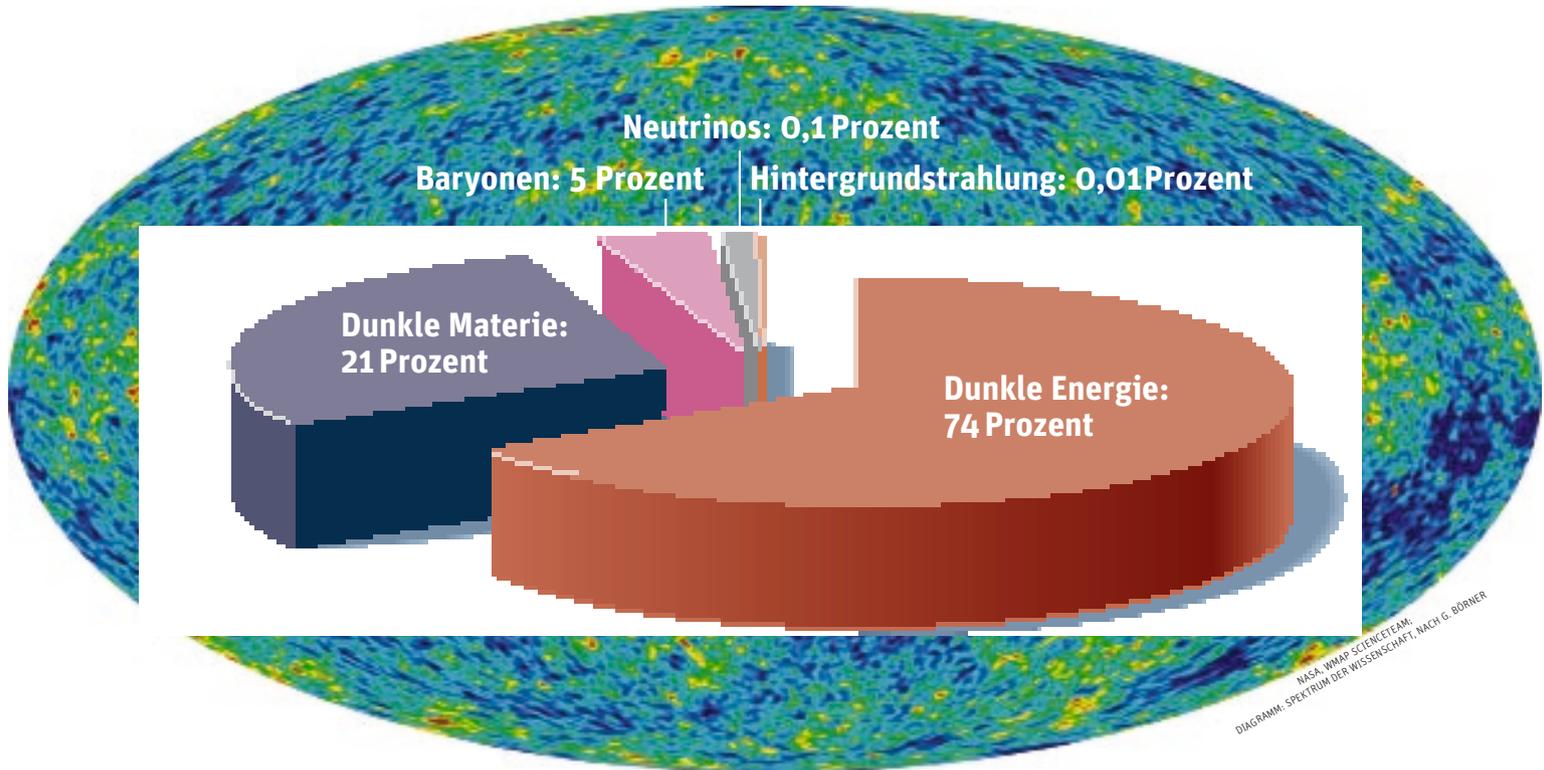
Im letzten Jahrzehnt mussten die Kosmologen sich allmählich daran gewöhnen, dass ihr Verständnis des Universums noch etliche Lücken aufweist. Zwar sind manche Eigenschaften des Weltalls wie seine Ausdehnung, sein Alter und seine mittlere Dichte sehr gut bekannt, aber die Zusammensetzung der kosmischen Materie und Energie gibt neue Rätsel auf: Nur ein geringer Teil, etwa fünf Prozent, des Universums besteht aus der uns bekannten Materie – den chemischen Elementen wie Wasserstoff, Helium, Kohlenstoff und Sauerstoff, aus denen wir selbst, die Erde sowie alle anderen Planeten und die Sonne aufgebaut sind. Etwa 21 Prozent macht die Dunkle Materie aus: nicht leuchtende Wolken oder Klumpen aus bis jetzt noch unbekanntem Elementarteilchen. Der überwiegende Anteil von etwa 74 Prozent scheint aus einem gleichmäßig im Raum verteilten Etwas zu bestehen, das von vielen »Dunkle Energie« genannt wird – eine unglückliche Bezeichnung, denn seit Einstein wissen wir, dass Materie und Energie eigentlich dasselbe sind. Dunkle Materie und Dunkle Energie haben aber nichts miteinander zu tun.

Während Materie und normale, materielle Energie sich im Verlauf der kosmischen Ausdehnung verdünnen, wächst die Dunkle Energie proportional zum expandierenden Volumen an; ihre Dichte bleibt also konstant. Diese Größe verhält sich wie eine Spannung des

Raumes, ähnlich einer elastischen Feder, welche die Ausdehnung des Kosmos unermüdlich vorantreibt.

Der Name »Dunkle Energie« deutet auf eine geheimnisvolle Substanz hin, obwohl zunächst ganz pragmatisch nichts anderes eingeführt wird als eine zusätzliche Bestimmungsgröße des kosmologischen Modells, die durch astronomische Messungen einen bestimmten Wert erhält. Schon Albert Einstein hatte eine solche Größe, von ihm »kosmologische Konstante« genannt, in die Modelle eingesetzt, die aus seiner Theorie hergeleitet werden können. Er wollte ein statisches Weltmodell beschreiben, denn um 1915 waren die meisten Astronomen überzeugt, der Kosmos sei einfach eine Ansammlung von Sternen – gleichförmig, unendlich und unveränderlich. Dazu musste die Gravitationsanziehung der Sterne durch eine abstoßende Kraft, eine Art kosmischer Antigravitation, ausgeglichen werden. Die kosmologische Konstante ergab bei geeigneter Wahl genau diese Abstoßung. Doch als der US-Astronom Edwin Hubble die Expansion des Galaxiensystems entdeckte und der russische Wissenschaftler Alexander Friedmann zeigte, dass einfache Lösungen der Einsteinschen Gravitationstheorie ein dazu passendes Weltmodell liefern, verwarf Einstein seine ursprüngliche Idee und schlug vor, »die kosmologische Konstante gleich Null zu setzen«.

Die Kosmologen folgten dem nicht ganz; denn sie fanden es praktisch, wann immer das kosmologische Modell vermeintlich in Konflikt mit den Daten geriet, die Sachlage durch



eine passend gewählte kosmologische Konstante zu bereinigen. So schien es vor einigen Jahren, es gebe Sterne in Kugelsternhaufen, die älter als das Universum seien. Durch Vergrößerung des Weltalters mit Hilfe einer positiven kosmologischen Konstante war die Diskrepanz rasch beseitigt. Allerdings ergaben verbesserte Sternmodelle und genauere Beobachtungen ein wesentlich geringeres Sternalter, und die Notwendigkeit einer kosmologischen Konstante entfiel wieder.

## Rätselhafte Beschleunigung

In den letzten Jahren erbrachten präzise Beobachtungen deutliche Hinweise auf eine systematische Abweichung von der gleichmäßigen »hubbleschen Expansion«, der zufolge je zwei Galaxien mit einer Geschwindigkeit auseinander fliegen, die proportional zu ihrem gegenseitigen Abstand ist. Genauer gesagt hatte Hubble in den 1920er Jahren entdeckt, dass die in fernen Sternsystemen beobachteten Atomspektren nicht mit den irdischen übereinstimmen. Die Spektrallinien fast aller Galaxien – außer einiger sehr naher – sind zu größeren Wellenlängen verschoben. Diese Rotverschiebung hat jeweils einen charakteristischen Wert, wobei alle Wellenlängen umso mehr gedehnt sind, je weiter die betreffende Galaxie von uns entfernt ist. Eine einfache Erklärung bietet der Dopplereffekt: Die Wellen werden gedehnt, weil sich die Galaxien von uns weg bewegen. Das Maß dieser Fluchtbewegung ist die Hubblekonstante  $H_0$ . Sie lässt sich nur schwer messen, denn um die Beziehung zwi-

schen Rotverschiebung und Entfernung exakt festzulegen, ist ein zuverlässiger Entfernungsmaßstab für weit entfernte Galaxien nötig.

Im letzten Jahrzehnt gelang es den Astronomen, kosmische Distanzen so genau zu bestimmen wie nie zuvor. Sie fanden, dass spezielle Sternexplosionen, so genannte Supernovae von Typ Ia, besonders gut als Entfernungsindikatoren geeignet sind.

Im Spektrum dieser explodierenden Sterne findet man keine Hinweise auf Wasserstoff, nur die Spektrallinien höherer Elemente wie Helium und Kohlenstoff. Vermutlich handelt es sich um explodierte Weiße Zwerge – kompakte Sterne mit dem Radius der Erde und der Masse der Sonne, die schon eine lange Entwicklungszeit hinter sich haben. An sich sind Weiße Zwerge stabile Endstadien von Sternen, doch ein explosiver Schlussakkord ist durchaus vorstellbar, wenn etwa der Weiße Zwerg durch das Aufsammeln von Masse in einem Doppelsternsystem die so genannte Chandrasekhar-Grenze von 1,4 Sonnenmassen überschreitet. Dann treten Instabilitäten auf, die den Stern zerreißen. Supernovae vom Typ Ia sind sehr hell und darum noch in weit entfernten Galaxien sichtbar. Sie leuchten innerhalb einiger Stunden oder Tage hell auf und verblassen dann binnen Wochen.

Die Astronomen haben eine empirische Relation gefunden, mit der sie aus der Form der Lichtkurve auf die Leuchtkraft der Supernova im Maximum schließen. Aus der gemessenen Helligkeit ergibt sich der Abstand der Quelle – einfach gemäß dem Gesetz, wonach die Hel-

**Unser Wissen über die Zusammensetzung des Universums beschränkt sich auf fünf Prozent baryonischer Materie: Das ist der Stoff, aus dem Sterne, Planeten und wir selbst bestehen. Die übrigen 95 Prozent teilen sich Dunkle Materie und Dunkle Energie zu 21 beziehungsweise 74 Prozent. Über das Wesen dieser geheimnisvollen Bestandteile ist noch nichts bekannt. Die Himmelskarte im Hintergrund zeigt Fluktuationen der kosmischen Hintergrundstrahlung im Bereich von millionstel Kelvin, wobei wärmere Regionen rot, kühlere blau kodiert sind. Die Daten wurden vom Satelliten WMAP in mehrjähriger Beobachtung ermittelt.**

ligkeit mit dem Quadrat der Entfernung abnimmt. Nun benötigen die Beobachter noch zwei Dinge: eine möglichst gute Eichung mit Supernovae, deren Entfernung bekannt ist, und möglichst viele Supernovae, die mit einem großen Teleskop erfasst werden. Beides ist im Laufe der letzten zehn Jahre immer besser gelungen, so dass kosmische Entfernungen heute bis auf zehn Prozent genau gemessen werden.

Auch die Hubble Konstante  $H_0$  wurde mit dieser Genauigkeit zu  $H_0 = 70 \pm 7$  bestimmt, angegeben in Einheiten von Kilometern pro Sekunde pro Megaparsec; 1 Megaparsec entspricht rund 3,3 Millionen Lichtjahren oder 30 Trillionen Kilometern. Dies bedeutet, dass sich eine Galaxie in 100 Megaparsec Entfernung von uns mit der Geschwindigkeit von 7000 Kilometern pro Sekunde entfernt. Der Kehrwert der Hubble-Konstanten ist eine für die Ausdehnung des Weltalls charakteristische Zeit – etwa 14 Milliarden Jahre gemäß den Supernova-Ia-Messungen.

Überraschenderweise stellte sich heraus, dass die fernsten Supernovae noch etwas weiter entfernt sind, als man nach dem Hubble'schen Gesetz vermutet hätte. Sie mussten eine Beschleunigung erfahren haben – obwohl eigentlich zu erwarten wäre, dass die gegenseitige Schwerkraft das Auseinanderfliegen der Galaxien allmählich abbremst. In den aus der einsteinschen Gravitationstheorie abgeleiteten Modellen kann diese Beschleunigung durch eine positive kosmologische Konstante verursacht werden, die in kosmischem Maßstab wie eine Art Antischwerkraft wirkt. Die sehr präzisen Messungen der Hubble-Relation mit Hilfe von Ia-Supernovae passen am besten zu Modellen, in denen die Materie rund 30 Prozent des kosmischen Substrats ausmacht und die kosmologische Konstante – oder eine nahezu konstante Feldenergie – etwa 70 Prozent.

Dieses spektakuläre Ergebnis astronomischer Messungen wurde durch Analysen des kosmischen Strahlungshintergrunds bestä-

tigt. Zwei Wissenschaftler der Bell Laboratories, Arno Penzias und Robert Wilson, hatten ihn 1964 entdeckt und erhielten später dafür den Physik-Nobelpreis. Die Hintergrundstrahlung mit Wellenlängen zwischen 0,5 Millimetern und 10 Zentimetern trifft aus allen Richtungen fast in gleicher Stärke ein und folgt in ihrer Spektralverteilung dem Gesetz, das Max Planck um 1900 für die Strahlung eines Körpers im Wärmegleichgewicht mit seiner Umgebung gefunden hatte. Diesem kosmischen Mikrowellenhintergrund (kurz CMB für *Cosmic Microwave Background*) entspricht darum eine bestimmte Temperatur. Durch Messdaten des NASA-Satelliten COBE (*Cosmic Background Explorer*) wurde sie sehr genau zu  $2,728 \pm 0,002$  Kelvin bestimmt.

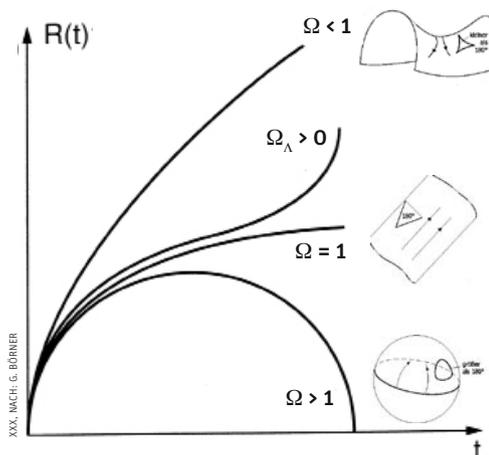
### Ein körniger Hintergrund

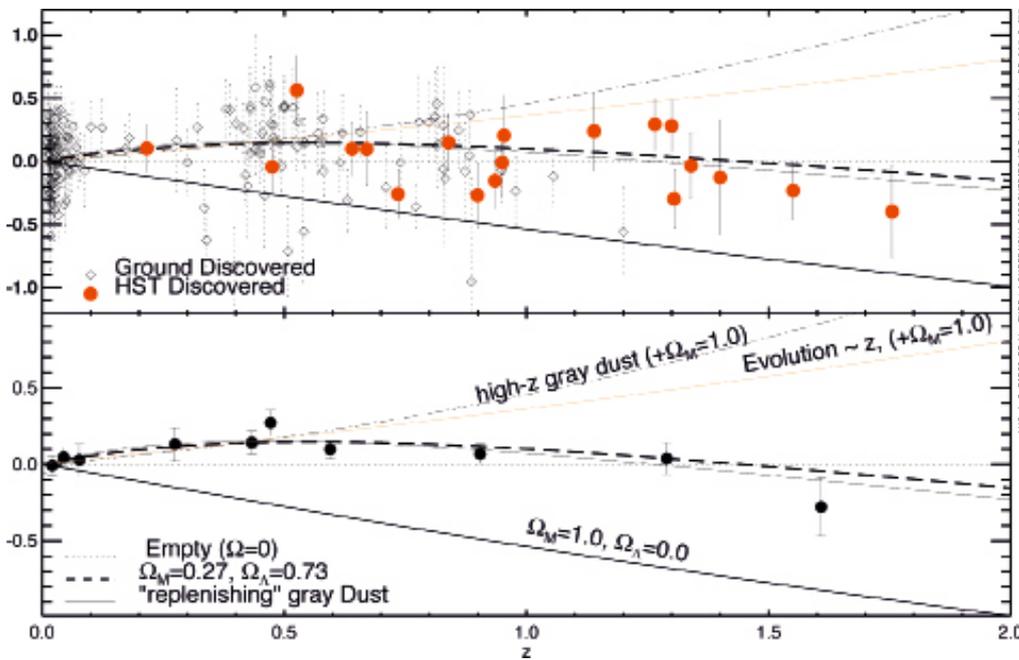
Mit der allgemeinen Expansion des Kosmos hat sich das Strahlungsfeld abgekühlt – das heißt, es war früher dichter und heißer. Es muss eine Zeit gegeben haben, in der das Universum so heiß und dicht war, dass die Atome in Kerne und Elektronen aufgelöst waren – eine Zeit, in der die Streuung von Photonen an freien Elektronen das thermische Gleichgewicht zwischen Strahlung und Materie aufrechterhielt. In jener etwas über 3000 Kelvin heißen Phase bestand die Materie aus einem ziemlich gleichförmigen, heißen Plasma. Erst bei fortschreitender Abkühlung als Folge der Expansion bildeten sich Atome und banden Elektronen, so dass sich die Strahlung von der Materie entkoppelte und von da an das Universum ungehindert durchdringen konnte. Diese frühe Phase in der Geschichte des Kosmos – die Entkopplungszeit – beobachten die Astronomen, wenn sie den CMB vermessen. Durch die weitere Expansion seit der Entkopplung hat sich seine Temperatur inzwischen auf den Wert von 2,7 Kelvin verringert.

Schon 1992 lieferten die COBE-Messungen Himmelskarten des Strahlungshintergrunds, auf denen Temperaturschwankungen um tausendstel Prozente in Form kalter und weniger kalter Flecken erschienen. Der Satellit war allerdings zu »kurzsichtig«, um kleine Strukturen zu erkennen. Die Winkelausdehnung musste mehrere Grad betragen, damit ein Bereich als Messpunkt identifiziert werden konnte; beim Blick auf die Erde wäre ganz Bayern für COBE nur ein Punkt. Die Intensitätsschwankungen, die man als Keime für die Entstehung der Galaxienhaufen erwartet, zeigen sich jedoch erst bei einer Auflösung von deutlich unter einem Grad.

Dies leistet nun der Satellit WMAP (*Wilkinson Microwave Anisotropy Probe*). Er wurde am 30. Juni 2001 auf seine dreimonatige Reise

Das Diagramm zeigt die kosmische Expansion für verschiedene Modelle.  $R(t)$  ist der Krümmungsradius des Raums als Funktion der Zeit  $t$ ; seine Entwicklung hängt von der kosmischen Materie- und Energiedichte  $\Omega$  ab. Für  $\Omega > 1$  ist der Raum positiv gekrümmt, und das Universum kollabiert nach anfänglicher Expansion. Bei  $\Omega = 1$  gilt euklidische Geometrie mit Krümmung null. Für  $\Omega < 1$  herrscht negative Raumkrümmung, das All expandiert immerfort weiter. Kommt durch die Dunkle Energie eine positive kosmologische Konstante  $\Lambda$  hinzu, so expandiert das Universum beschleunigt.





Aus zahlreichen Messungen (oben) versuchen die Kosmologen Aufschluss über die Zusammensetzung des Universums zu gewinnen, indem sie die Daten zusammenfassen und gewichten (unten). Die waagrechte gestrichelte Linie würde einem leeren Universum mit  $\Omega = 0$  entsprechen, die schräg abfallende durchgezogene Gerade einem euklidischen Universum mit 100 Prozent Dunkler Materie und ohne Dunkle Energie. Die dick gestrichelte Linie, die am besten zu den Daten passt, entspricht einem Anteil von 27 Prozent Dunkler Materie und 73 Prozent Dunkler Energie.

zu einem Punkt zwischen Erde und Sonne geschickt. In etwa 1,5 Millionen Kilometer Entfernung von der Erde beobachtet er – immer von der Erde und der Sonne abgewandt – den CMB-Himmel mit einer Auflösung von etwa zwölf Bogenminuten. Die Himmelskarte der WMAP-Daten zeigt die erwarteten feinen Muster von heißen und kalten Flecken.

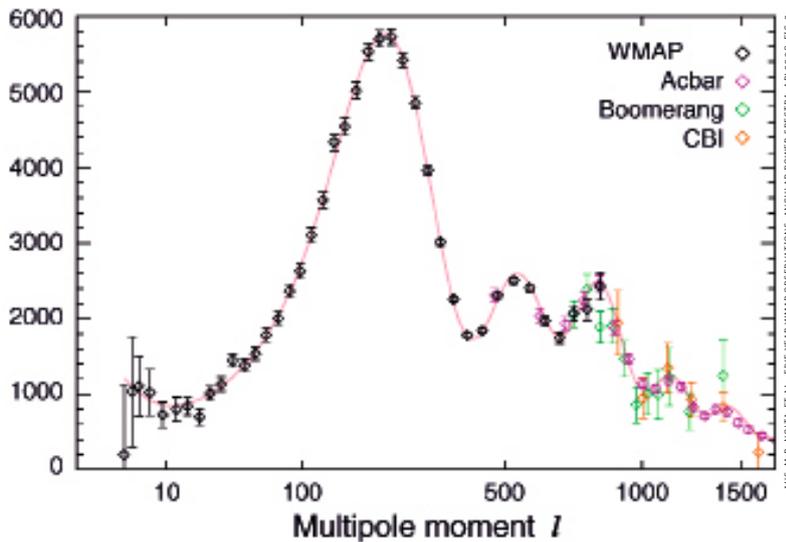
Die winzigen Variationen der Temperatur des CMB lassen sich durch eine so genannte Multipolentwicklung charakterisieren; dieses mathematische Werkzeug wurde ursprünglich entwickelt, um komplizierte Felder als Ergebnis einer Reihe von Ladungen – Monopolen, Dipolen, Quadrupolen und so weiter – darzustellen, die durch den Multipolindex  $l$  charakterisiert werden. Je höher der Index  $l$ , desto feinkörniger die Temperaturverteilung. Im Multipolspektrum der WMAP-Daten erkennt man nun eine Abfolge von klar ausgeprägten Maxima. Was ist die physikalische Ursache dieser Kurve?

Die Antwort hängt eng mit der Strukturbildung im Kosmos zusammen. Vor der Entkopplungszeit hatten sich in der Dunklen Materie schon erste, schwach ausgeprägte Massenkonzentrationen gebildet. Das Plasma aus Photonen und Baryonen – vor allem Protonen und Neutronen – folgte diesen Kondensationen, doch dem Wunsch der Baryonen nach Zusammenballung stand der Druck der Photonen entgegen, der diese Plasmawolken wieder auseinandertrieb. Im Widerstreit der Kräfte begannen sie zu schwingen – ganz analog zu Schallwellen. Die größte schwingende Plasmawolke war gerade bis zur Entkopplungszeit einmal von einer Schallwelle durchlaufen worden. Noch größere Wolken konnten noch kei-

nen Gegendruck aufbauen, sondern folgten einfach der Schwerkraft und zogen sich langsam zusammen. Kleinere Wolken oszillierten mit höherer Frequenz. Alle Schwingungen waren in Phase, perfekt synchronisiert durch den Urknall. Bei Kontraktion und Verdichtung wurde das Photonengas heißer, bei Verdünnung, beim Auseinanderlaufen, kühlte es sich ab. Zur Entkopplungszeit verließen die Photonen die Plasmawolken und finden sich heute mit leicht unterschiedlichen Temperaturen in den Detektoren der Astronomen wieder: Die Temperaturschwankungen zeigen sich als heißere und kühlere Bereiche im CMB.

Die Entstehung der Temperaturfluktuationen im Raum muss nun noch übertragen werden auf die Anisotropien am Himmel. Diese Übertragung wird von drei Größen beeinflusst: vom Spektrum der räumlichen Fluktuationen, von der Entfernung der Fläche, auf der sie entstehen, und von dem Einfluss der Raumkrümmung auf die Ausbreitung der Strahlung zum Beobachter.

Beim Multipolindex  $l = 200$  zeigt sich ein ausgeprägtes Maximum der Temperaturschwankungen. Dies entspricht der größten akustischen Schwingung – der Strecke, die eine Schallwelle vom Urknall bis zur Entkopplungszeit zurücklegen konnte. Diese Länge erscheint am CMB-Himmel als Signal unter einem Winkel von etwa einem Grad. Der Winkel, unter dem man eine bestimmte Strecke sieht, wird durch die Krümmung des Raumes bestimmt. Bei positiver Krümmung nimmt dieselbe Strecke einen größeren Winkel ein als bei Krümmung null, bei negativer Krümmung einen kleineren. Der gemessene Wert passt zur Krümmung null. Das heißt, das Universum



Die Vermessung der kosmischen Hintergrundstrahlung durch irdische Teleskope (Acbar und CBI), durch das Ballonexperiment Boomerang und mit dem Satelliten WMAP offenbart kleine Unregelmäßigkeiten, die in einem so genannten Leistungsspektrum analysiert werden. Das ausgeprägte erste Maximum ist das stärkste Indiz für Raumkrümmung null; die weiteren Maxima erlauben die Festlegung weiterer Parameter des kosmologischen Modells.

gehört der euklidischen Geometrie. Verschwindende Krümmung heißt auch, dass die gesamte Masse- und Energiedichte  $\Omega_{\text{tot}}$  den kritischen Wert eins erreicht. Die genaue Analyse ergibt  $\Omega_{\text{tot}} = 1,02 \pm 0,02$ . Nur noch eine kleine positive oder negative Krümmung ist im Rahmen der Messgenauigkeit zugelassen.

In der akustischen Schwingung folgt auf die Verdichtung eine Verdünnung, die im Multipoldiagramm – welches das Quadrat der Schwankungen zeigt – als zweites Maximum erscheint. Je mehr baryonische Materie vorhanden ist, desto stärker ist die Verdichtung beim Einfall in die Gravitationspotentiale der Dunklen Materie ausgeprägt. Das Verhältnis der Amplituden erlaubt es, für die baryonische Materie  $\Omega_B = 0,0441 \pm 0,0030$  und für die Dunkle Materie  $\Omega_{DM} = 0,214 \pm 0,027$  abzuleiten. Diese Wertebereiche sind in Einklang mit anderen astronomischen Messungen.

**Wie energiereich ist das Vakuum?**

Doch baryonische und Dunkle Materie zusammen erreichen bei weitem nicht den Wert  $\Omega_{\text{tot}} = 1$ . Es muss eine weitere Komponente des Universums geben, die für dieses Defizit gerade steht. Sie muss sehr gleichmäßig verteilt sein, darf keine Klumpung auf der Skala von Galaxienhaufen oder darunter aufweisen – also eine konstante oder nahezu konstante kosmische Energiedichte  $\Omega_\Lambda$ , mit  $\Omega_\Lambda = 0,742 \pm 0,0030$ .

Das erstaunliche Ergebnis der WMAP-Messungen, dass die Gesamtdichte den kritischen Wert  $\Omega_{\text{tot}} = 1$  hat, führt somit auf folgende Zusammensetzung des Kosmos: Nur etwa 5 Prozent beträgt der Anteil der uns bekannten Materie, 21 Prozent sind die unbekanntenen Teilchen der Dunklen Materie, und 74 Prozent kommen von einer rätselhaften Dunklen Energie. Diese Energie bestimmt gegenwärtig und in Zukunft die Expansion des Universums.

In Modellen kann die kosmische Beschleunigung ganz einfach durch eine positive kosmologische Konstante oder durch eine nahezu konstante Feldenergie verursacht werden. Doch die Dunkle Energie verursacht den Theoretikern Kopfschmerzen, denn in moderner Interpretation beruht diese Konstante auf der Energiedichte des leeren Raumes. In der Quantentheorie ist das Vakuum nicht wirklich leer, sondern ein komplexes, von fluktuierenden Energiefeldern erfülltes Gebilde. Im Rahmen der heutigen Physik ist es noch nicht gelungen, diese Vakuumenergie zu berechnen. Alle Schätzungen ergeben allerdings Werte, die riesig sind im Vergleich zu den astronomischen Messwerten – ein eklatanter Widerspruch zwischen Theorie und Experiment, wie es ihn in der Physik noch nie gegeben hat. Übrigens bestünde dieses Problem auch, wenn die kosmologische Konstante null wäre: Dann müsste man erklären, wieso die theoretisch berechneten großen Werte offenbar keinerlei Wirkung im realen Kosmos entfalten, obwohl sie doch in Einsteins allgemeiner Relativitätstheorie als bedeutsame Gravitationsquelle erscheinen sollten.

Die gravitative Wirkungslosigkeit der Vakuumenergie wird auch durch die Supernovamessungen bestätigt. Der geringe astronomisch bestimmte Effekt erfordert, dass die Beiträge der Vakuumenergie mit phantastischer Genauigkeit – bis auf 108 Stellen nach dem Komma – ausbalanciert sein müssen. Wie das zugehen soll, weiß im Augenblick niemand. Hier stoßen die Physiker auf das fundamentale Problem, eine Theorie zu finden, die Gravitations- und Elementarteilchentheorie in einheitlicher Weise umfasst. Eine derartige Theorie ist bis jetzt nicht in Sicht.

Wie könnte man dennoch weiterkommen? In einem »Akt der Verzweiflung«, so der Relativitätstheoretiker Norbert Straumann von der Universität Zürich, hat man die Vorstellung einer Vielzahl von Paralleluniversen entwickelt, in denen die kosmologische Konstante jeweils unterschiedliche Werte annehmen kann. Wir befänden uns – nicht ganz zufällig, sondern weil das gut zur Evolution intelligenter Wesen passt – in einem Universum mit einer sehr kleinen kosmologischen Konstanten.

Es gibt aber auch Vorschläge, die kosmologische Konstante als Energie eines noch unbekanntes Feldes namens Quintessenz zu verstehen. Da diese Feldenergie sich mit der Zeit ändern würde, könnte auch die kosmische Entwicklung damit neue, unerwartete Wendungen nehmen. Die Spekulation über eine zusätzliche Energieform würde an Gewicht gewinnen, wenn es gelänge, sie mit kosmologischen Beobachtungen zu untermauern. Eine

präzise Messung der Abweichungen vom Hubbleschen Expansionsgesetz könnte, wenn die Astronomen Glück haben, einen Unterschied zur kosmologischen Konstante, die einer konstanten Energiedichte entspricht, aufzeigen – wenn sie Pech haben, allerdings lediglich die Konstanz der Dunklen Energie im Rahmen der Messgenauigkeit bestätigen. Bisher grenzen die Messungen mit zunehmender Genauigkeit den konstanten Fall ein.

### Alternative Gravitationstheorien

Für Physiker liegt es – einfach aus den Erfahrungen mit der Quantentheorie – nahe, die Dunkle Materie durch ein noch unbekanntes Elementarteilchen zu erklären und die Dunkle Energie als Vakuumenergie oder als die Energie hypothetischer Felder. Man könnte freilich auch auf die Idee kommen, die fundamentalen Gesetze der Physik etwas abzuändern.

Als Forscher erhält man häufig Briefe von Leuten, die behaupten, sie hätten die Naturgesetze modifiziert, um Beobachtungen besser zu erklären. Oft ist die Gravitation das Opfer der Attacken. Obwohl diese Vorschläge nicht unbesehen in den Papierkorb wandern sollten, gelangen die meisten nach genauerer Prüfung doch dorthin, weil sie nicht in Einklang mit wohlbekannteren Tatsachen sind.

Ein wenig erinnern die alternativen Gravitationstheorien an solche Aktivitäten – allerdings mit dem großen Unterschied, dass die Abänderungen der newtonschen und einsteinischen Theorie mit allen Messungen verträglich sein sollen. Das Ziel ist, auch ohne Dunkle Materie die Dynamik von Galaxien und Galaxienhaufen korrekt zu beschreiben. Insbesondere wird vorgeschlagen, das newtonsche Gravitationsgesetz, wonach die Anziehung zwischen zwei Massen umgekehrt proportional zum Quadrat des Abstandes abnimmt, für große Entfernungen abzuändern. Dieses Gesetz ist ja nur für relativ kleine Distanzen experimentell überprüft und mit hoher Genauigkeit bestätigt worden.

Ein relativ zählbarer Vorschlag stammt von dem israelischen Physiker Mordehai Milgrom: Newtons zweites Gesetz – Kraft ist Masse mal Beschleunigung – wird für kleine Beschleunigungen so abgeändert, dass weniger Kraft benötigt wird, um dieselbe Beschleunigungswirkung zu erzielen. Mit dieser Theorie namens MOND (*Modified Newtonian Dynamics*) lassen sich die Rotationskurven vieler Galaxien ohne Rückgriff auf Dunkle Materie erklären (siehe »Gibt es Dunkle Materie?« von Mordehai Milgrom, Spektrum der Wissenschaft 10/2002, S. 34).

Neben einigen Erfolgen weist MOND aber große Schwächen auf, die es in den Au-

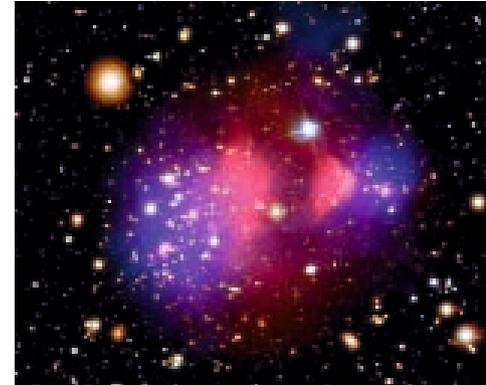
gen vieler Physiker diskreditieren: Das Grundgesetz der Impulserhaltung ist nicht erfüllt, und die Dynamik einiger Galaxienhaufen kann auch MOND nur mit Hilfe Dunkler Materie erklären. Vor allem ist MOND eine nichtrelativistische Theorie, die nicht auf die Kosmologie anwendbar ist und den Gravitationslinseneffekt nicht beschreibt. Dieser Effekt – die Krümmung der Lichtstrahlen durch die Schwerkraft – erzeugt spektakuläre und für Astronomen aufschlussreiche Bilder: zu Ringen verformte ferne Galaxien, Mehrfachbilder von Quasaren sowie im Schwerfeld von Galaxienhaufen leicht verzerrte Scheibchen ferner Galaxienpopulationen.

Jede alternative Gravitationstheorie muss zumindest diesen Linseneffekt enthalten. Darum hat die Suche nach einer relativistischen Alternative begonnen. Im Jahre 2004 publizierte Jacob Bekenstein von der Hebrew University in Jerusalem eine relativistische Version von MOND, die er Tensor-Vector-Scalar Theory, kurz TeVeS nannte. Sie ist wie die Einsteins allgemeine Relativitätstheorie eine geometrische Formulierung der Gravitation, in der das Schwerfeld sich in der Struktur der Raumzeit verbirgt. Bei Einstein enthält ein so genanntes Tensorfeld die Metrik der Raumzeit, die durch die lokale Materie- und Energieverteilung bestimmt ist. Die Erweiterung durch TeVeS besteht nun darin, zusätzlich ein Skalarfeld einzuführen, das an jedem Punkt die Stärke des Gravitationsfeldes festlegt, sowie ein Vektorfeld, das eine Wirkung der Metrik auf Lichtstrahlen auch ohne Materie ergibt.

Diese zusätzlichen Felder erhöhen natürlich die Anpassungsfähigkeit der Theorie. TeVeS führt im Grenzfall hoher Geschwindigkeiten und großer Beschleunigungen auf die einsteinische Theorie; im Falle niedriger Geschwindigkeiten und kleiner Beschleunigungen – wie auf der Erde – ergibt sich die newtonsche Gravitationstheorie, und für sehr kleine Beschleunigungen wird TeVeS zu MOND. Erfreulich ist, dass kosmologische Fragestellungen im Rahmen dieser Theorie diskutiert werden können; doch unerfreulich scheint der »handgestrickte« Charakter der ad hoc eingeführten zusätzlichen Felder. Die einsteinische Theorie erscheint hingegen schön und elegant – »die schönste aller Theorien«, wie es der indische Astrophysiker und Nobelpreisträger Chandrasekhar einmal ausdrückte.

Vorsichtshalber sollte man auch daran erinnern, dass die einstein-newtonsche Gravitationstheorie alle Phänomene, die sich auf Größenordnungen von Millimetern bis zur Bahn Plutos abspielen, perfekt erklärt. Es wäre vielleicht voreilig, die immer noch eher undurchsichtige Entstehungsgeschichte der Galaxien

ROENTGEN: NASA/CXC/CFA, MAXIM MARKEVITCH ET AL.; OPTISCH + LENSING: NASA/ESA, STSCL/II. ARIZONA, DOUGLAS CLOWE ET AL.



Der »Bulle Cluster« ist ein 3,4 Milliarden Lichtjahre entfernter Galaxienhaufen. Die Masse der optisch sichtbaren Galaxien macht nur Bruchteile der Masse an heißem Gas aus, welches Röntgenstrahlung emittiert und rot dargestellt ist. In der rechten Hälfte erkennt man eine Stoßfront von heißem Gas; sie rührt von der Kollision zweier Galaxienhaufen her, die zur Bildung des Bullet Cluster geführt hat. Aus dem Gravitationslinseneffekt des Clusters auf weiter entfernte Hintergrundgalaxien schließen Kosmologen auf zusätzliche Dunkle Materie, die als blau gefärbte Wolken wiedergegeben wird.

als fundamentale Kritik an dieser Theorie heranzuziehen.

TeVes und verwandte Theorien könnte man als Einstein-plus-Theorien bezeichnen, denn sie sind so konstruiert, dass sie sich zur einsteinschen Theorie reduzieren, wenn Größenordnungen wie die des Sonnensystems betrachtet werden, während sie im Maßstab von Galaxien und Galaxienhaufen davon abweichen. Zwar können sie in vielen Fällen die Notwendigkeit für Dunkle Materie aufheben oder reduzieren – doch zur Frage der Dunklen Energie machen sie keine Aussage.

### Radikale Alternativen

Beim Problem der Dunklen Energie könnten nur noch radikalere Alternativen auf neue Wege führen, etwa die von Philip Mannheim an der University of Connecticut entwickelte »konforme Gravitation«. Die Mathematik dieser auf einem »Weyl-Tensor 4. Ordnung« aufgebauten Theorie ist recht kompliziert, und vorläufig ist sie nicht viel mehr als ein origineller Ansatz. Immerhin wird dabei die Gravitation in kosmischen Maßstäben zu einer abstoßenden Kraft; lokal bleibt sie natürlich anziehend. Damit würde die kosmische Beschleunigung sich ganz ohne Dunkle Energie ergeben. Doch noch ist es zu früh, eine Prognose über das Schicksal der konformen Gravitation abzugeben.

Eigentlich entstehen die Probleme nicht aus den astronomischen Beobachtungen, die ja für sich genommen völlig unproblematische Messungen von Helligkeiten und Rotverschiebungen der Ia-Supernovae sind. Bedeutung gewinnen diese Daten erst, wenn man sie zu einem theoretischen Modell in Beziehung bringt, etwa zur Hubbleexpansion in einem einfachen friedmannschen kosmologischen Modell. Nur in diesem Kontext wird es not-

wendig, die Dunkle Energie zu postulieren oder eine andere Erklärung zu suchen. Es ist nicht sinnvoll, ohne ernsthaftes Bemühen um dieses Problem sofort auf komplexere kosmologische Modelle auszuweichen – auf ein abgeändertes Gravitationsgesetz oder variable Naturkonstanten oder gar in Paralleluniversen. Die echte Herausforderung besteht darin, die Supernova-Messungen in das kosmologische Standardmodell, also in ein einfaches friedmannsches Modell, konsistent einzubetten, und dadurch vielleicht neue Einsichten zu gewinnen.

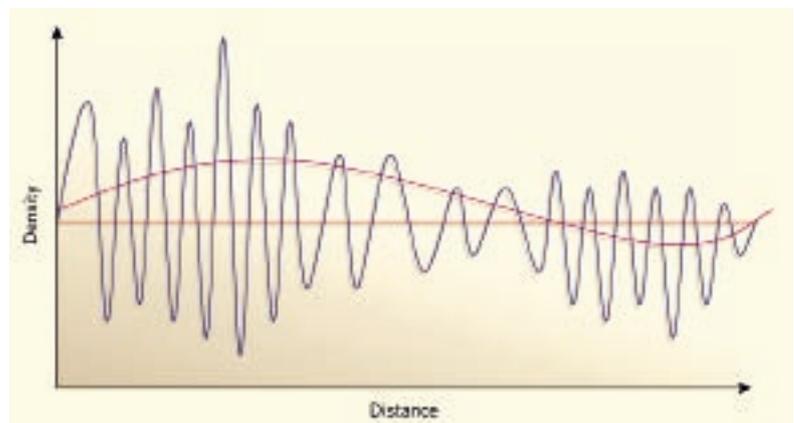
Ein solcher Versuch beruht darauf, die so genannte Rückwirkung von Inhomogenitäten auf die Metrik der Raumzeit genauer zu untersuchen. Diese spezielle Eigenschaft der einsteinschen Theorie soll im Folgenden etwas verdeutlicht werden.

Ein genügend großer Raumbereich des gegenwärtigen Universums umfasst viele Sterne und Galaxien. Gemäß der einsteinschen Theorie verzerrt jede dieser Massenkonzentrationen in ihrer Umgebung das raumzeitliche Maßfeld: Die Raumzeit wird »gekrümmt«. Die Kosmologen sind nicht so sehr an den lokalen Verhältnissen interessiert, sondern an Eigenschaften, die dem Raumbereich als Ganzem zukommen. Sie beschreiben deshalb seinen Masseninhalt nicht im Detail durch die Sterne und Galaxien, sondern durch eine mittlere Dichte, deren Entwicklung sie verfolgen. Diese mittlere Dichte verursacht eine mittlere Krümmung der Raumzeit, die aus der einsteinschen Theorie berechnet werden kann.

Nun zeigt sich aber, dass die gemittelten Einsteinschen Gleichungen im Allgemeinen anders aussehen als die Einsteinschen Gleichungen für die gemittelten Größen. Es ist vielleicht nützlich, sich dieses abstrakte Argument durch ein einfaches Bild zu veranschaulichen: Das homogene kosmologische Modell

## WELCHEN MITTELWERT NEHMEN WIR FÜR DAS UNIVERSUM?

**Eine Alternative zur Dunklen Energie** bietet der so genannte Rückwirkungseffekt. Die drei Kurven geben dieselbe Materieverteilung unterschiedlich gemittelt wieder: Die blaue Kurve zeigt genauere Details, die rosa Kurve lässt immerhin eine gewisse Inhomogenität erkennen, während die rote Kurve nur den kosmischen Mittelwert repräsentiert. Je nach Feinheit der Mittelung gelten unterschiedliche allgemein-relativistische Feldgleichungen. Eine allzu grob gemittelte Massenverteilung im Universum könnte den Beschleunigungseffekt unterschlagen, zu dessen Erklärung gegenwärtig die Dunkle Energie bemüht wird.



XXX, MACH, GEORGE F.R. ELLIS, UNIVERSITY OF CAPE TOWN

sei dargestellt als Luftballon, der gleichmäßig aufgeblasen wird. Dies ist nur eine Analogie für das Friedmannmodell, denn dieses Bild unterschlägt eine Raumkoordinate; die zweidimensionale Ballonoberfläche wird als Bild des Kosmos zu einer bestimmten Zeit betrachtet. Die Galaxien seien als kleine Scheibchen auf dieser Ballonfläche markiert. Beim Aufblasen des Ballons entfernen sich die Galaxien voneinander.

Die glatte Oberfläche des Ballons entspricht einem Raum mit konstanter positiver Krümmung. Die einzelnen Massen bewirken Eindellungen im elastischen Material des Ballons und führen damit zu lokalen Verzerrungen. Der Ballon erscheint nicht mehr glatt, wenn man ihn mit hoher Auflösung inspiziert: Man erkennt Runzeln und Falten, die durch die Massen der Sterne und Galaxien verursacht werden. Ein Mittelungsprozess ersetzt die Runzeln der Oberfläche in einem Raumreich durch eine sanftere Eindellung.

### Der Rückwirkungseffekt

Tatsächlich lässt sich der Einfluss der Inhomogenitäten aber nicht eingrenzen, sondern bleibt weit über das gesamte Mittelungsgebiet hinaus für die gesamte Raumzeit wirksam. Die Krümmung wird veränderbar, Energie kann aus der Krümmung gewonnen und zum Beispiel in eine Beschleunigung der Expansion umgesetzt werden. Der Ballon selbst wird dabei auch im Großen etwas deformiert, ausgebeult oder eingedellt. Für einen großen Bereich des Kosmos – vergleichbar dem beobachtbaren Volumen, dem so genannten Hubblevolumen – führt dieser Mittelungsprozess auf eine Gleichung für die mittlere Dichte und die mittlere Expansion, die einen Zusatzterm enthält. Er wird als Q-Term bezeichnet und hängt vom betrachteten Raumbereich sowie von den gemittelten Größen ab.

Eine ganze Reihe von Physikern befasst sich mit diesem Aspekt der Gravitation, auf den als erster der britisch-südafrikanische Relativitätstheoretiker George Ellis aufmerksam machte. Der neuseeländische Kosmologe David Wiltshire behauptet ganz optimistisch, durch die Wirkung lokaler Inhomogenitäten könne die kosmische Beschleunigung ohne Dunkle Energie erklärt werden. Allerdings bedarf sein Modell noch der Ausgestaltung, denn er hat nicht wirklich die einsteinschen Gleichungen gelöst, sondern stattdessen eine spezielle geometrische Form der Inhomogenitäten postuliert.

Der Münchner Kosmologe Thomas Buchert, der jetzt in Lyon lehrt, mahnt zur Zurückhaltung. Er betont, wie bedeutsam eine konsistente Behandlung des Q-Terms für die Interpretation kosmologischer Modelle sein wird. Eine korrekte quantitative Beschreibung



des Rückwirkungssystems erfordert die Behandlung der nichtlinearen Terme der Einsteinschen Relativitätstheorie – eine Rechnung, die bis jetzt noch nicht gelungen ist. Buchert hat auch gezeigt, dass der Q-Term gleich null wird, wenn man die Inhomogenitäten in einem bestimmten Volumen mit periodischen Randbedingungen betrachtet. Werden also die Dichtefluktuationen in einem fest vorgegebenen, mit der Expansion mitbewegten Volumen gleichsam eingesperrt, so verschwindet die Rückwirkung. Alle numerischen Simulationen zur kosmischen Strukturbildung gehen von einem derartigen Ansatz aus, sind also zumindest selbstkonsistent.

Doch damit ist die Debatte nicht zu Ende. Im Standardmodell der Kosmologie wird die Krümmung des Raumzeithintergrunds fest vorgegeben, und damit entfällt die Möglichkeit einer Rückwirkung. Die Annahme, dasselbe einfache Friedmann-Modell biete den richtigen Rahmen sowohl für unsere lokale, inhomogene Umgebung als auch für das Hubblevolumen, also den gesamten beobachtbaren Bereich, schränkt das Glättungsverfahren von vornherein so ein, dass eine Rückwirkung der Inhomogenitäten auf die globale Raumzeit ausgeschlossen wird.

Den Kosmologen bleibt also die schwierige Aufgabe, herauszufinden, ob die Rückwirkung tatsächlich ein vollwertiger Ersatz für die rätselhafte Dunkle Energie ist. Dies wäre ein großer Schritt, denn eine besonders mysteriöse Zutat des kosmologischen Modells würde dadurch eliminiert. Trotzdem würde der Forschungsbereich der Physiker nicht ärmer: Das Problem, warum die Vakuumenergien der Quantenfelder nicht gravitativ wirksam sind, bliebe bestehen. Zudem könnte ein zeitabhängiger Rückwirkungsterm zu interessanten Vorhersagen über die weitere Entwicklung des Kosmos Anlass geben. ◁



**Gerhard Börner** erforscht am Max-Planck-Institut für Astrophysik in Garching Dunkle Materie, Dunkle Energie und großräumige kosmische Strukturen. Er ist Professor an der Universität München, wo er unter Werner Heisenberg und Hans-Peter Dürr in Teilchenphysik promovierte.

Börner, G.: *Schöpfung ohne Schöpfer? Das Wunder des Universums*. DVA, München 2006.

Börner, G.: *The Early Universe. Facts and Fiction*. Vierte Auflage. Springer, Berlin 2003.

Börner, G.: *Kosmologie*. Fischer, Frankfurt 2002.

Buchert, T.: *Dark Energy from Structure: A Status Report*. In: *General Relativity and Gravitation* (40), S. 467–527 (2008).

Ellis, G.: *Patchy Solutions*. In: *Nature* (452), S. 158–159 (2008).

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter [www.spektrum.de/artikel/XXX\\*\\*\\*??XXX](http://www.spektrum.de/artikel/XXX***??XXX).