

Quintessenz – die fünfte Kraft

Welch dunkle Energie dominiert das Universum?

Christof Wetterich

Eine uralte Frage lautet: Woraus besteht unser Universum? Diese Frage stellt sich erneut, denn eine dunkle Energie dominiert unser Universum – und wir wissen nicht, was sie ist und welchen Platz sie im Gebäude der Physik einnehmen könnte. Vielleicht ist sie die von Einstein erfundene und wieder verworfene kosmologische Konstante – oder aber ein dynamisches Quantenfeld, die „Quintessenz“. Quintessenz war schon immer geheimnisumwittert: Die Griechen der Antike sahen in diesem Äther ein im Gegensatz zu Erde, Wasser, Luft und Feuer unfassbares fünftes Element. Im Mittelalter wollten Alchimisten die Quintessenz als reinstes Elixier destillieren. Und auch für die Kosmologen und Astrophysiker von heute ist Quintessenz die große Unbekannte.

Sterne, Gaswolken, überhaupt die Materie, aus der im Wesentlichen wir, unsere Erde und die Sterne bestehen, machen gerade einmal etwas weniger als fünf Prozent der Energiedichte des Universums aus. Nicht etwa durch das „Zählen der Sterne“ – die übrigens noch viel weniger ausmachen –, sondern durch unser Verständnis der Element-Entstehung im frühen Kosmos und durch Details der Anisotropie der Hintergrundstrahlung haben wir eine recht genaue Abschätzung dieser Zahl. Es ist vielleicht enttäuschend: Nicht nur, dass wir uns seit Kopernikus nicht mehr im Zentrum des Sonnensystems sehen und auch unsere Sonne nur am Rande der Milchstraße liegt. Auch die Materie, aus der wir bestehen, Baryonen genannt, ist nur eine kleine, wenn auch wohl die interessanteste Zugabe zur Substanz des Universums. In gewissem Sinn sind wir der zwar hochkomplexe, aber nicht allzu gewichtige „Staub des Universums“.

Der Großteil der Substanz des Universums kann dagegen weder mit Licht noch mit Radiowellen oder Röntgenstrahlen gesehen werden – er ist dunkel. Oder genauer genommen nicht dunkel wie so manch schwer zu identifizierendes Objekt, sondern vollständig durchsichtig! Dieser Teil des Universums emittiert weder Lichtstrahlen noch absorbiert oder reflektiert er sie. Auch mit größten Anstrengungen ist der dunkle Teil des Universums keiner Beobachtung mit elektromagnetischen Wellen zugänglich. Dies ist dann auch unsere Definition von „dunkel“: Dunkle Materie nimmt nicht an der elektromagnetischen Wechselwirkung teil, sodass



Abb. 1: Die kleinen blauen Bögen in dieser Aufnahme des Hubble Space-Teleskops sind Mehrfachbilder einer Galaxie, die sich hinter dem Galaxienhaufen nahe der Bildmitte befindet. Die Ursache dieses Gravitationslinsen-Effekts ist die Lichtablenkung im Gravitationsfeld des Galaxienhaufens. (Quelle: NASA-GSFC)

nur die Gravitation oder die schwache Wechselwirkung für ihre Entdeckung zur Verfügung stehen. Wie wir später sehen werden, kommen für den Nachweis der dunklen Energie sogar nur die Gravitationswechselwirkung auf kosmologischen Längenskalen oder noch schwächere unbekannte Wechselwirkungen in Frage.

Von einem Teil des Geheimnisses erhalten wir wenigstens indirekt Kunde. Die dunkle Materie klumpt in Galaxien. So besteht auch unsere Galaxie, die Milchstraße, zum größten Teil aus dieser dunklen Materie. Und wo etwas klumpt, da zieht die Gravitation andere Objekte an. Ebenso wie wir aus den Bahnen und Geschwindigkeiten der Planeten die Masse der Sonne bestimmen können, erlaubt die Messung von Teilchen und Objekten, die sich in und um eine Galaxie bewegen, die Bestimmung der Masse dieser Galaxie. Und zwar einschließlich der dunklen Materie. Mit dieser Methode lässt sich die Konzentration der dunklen Materie in Galaxien und Galaxienhaufen abschätzen. Zusammen mit unserer guten Kenntnis der kosmischen Dichte der Baryonen erlaubt dies recht sichere Schlüsse darüber, wieviel dunkle Materie insgesamt in unserem Universum vorhanden ist.

Klumpen dunkler Materie kann man auch durch die Ablenkung von Lichtstrahlen auf die Spur kommen. Wie eine Linse verzerrt jede Massenkonzentration (also sowohl Baryonen als auch dunkle Materie) das Bild eines dahinter liegenden Objekts. Ähnliche Zerrbilder lassen sich beim Schauen durch ein Weinglas beobachten. Abb. 1 zeigt, wie ein Galaxienhaufen im Vorder-

Prof. Dr. Christof Wetterich, Institut für Theoretische Physik, Universität Heidelberg, Philosophenweg 16, 69120 Heidelberg

grund eine dahinter liegende Galaxie so stark verzerrt, dass sie gleich mehrfach in der Form von Bogenstücken sichtbar ist. Aus der Stärke der Verzerrungen dieses „Gravitationslinsen-Effekts“ lässt sich die totale Masse des dazwischenliegenden Galaxienhaufens bestimmen. Diese stellt sich in der Tat als um ein Vielfaches größer als die „leuchtende Masse“, also die Masse der strahlenden Baryonen, heraus.

Lichtstrahlen von einer weit entfernten Galaxie am Rande unseres Universums durchqueren auf ihrer mehr als zehn Milliarden Jahre langen Reise vielfach Schwankungen im Gravitationspotential verschiedenster Massekonzentrationen. Die mittlere Verzerrung ist zwar nur klein, lässt sich aber inzwischen messen. Man sieht mit diesem „schwachen“ Gravitationslinsen-Effekt alles, was klumpt, und findet auch hier, dass die dunkle Materie ungefähr ein Viertel der Energiedichte des Universums beisteuert. Es gibt heute kaum noch Zweifel, dass es wesentlich mehr dunkle Materie als Baryonen gibt. Ohne sie wäre auch die Bildung der kosmischen Strukturen wie Galaxienhaufen und Galaxien aus ursprünglich winzigen Schwankungen der Energiedichte nicht quantitativ zu verstehen. Doch noch wurden die Bestandteile der dunklen Materie an keinem Teilchenbeschleuniger der Hochenergiephysik gesehen. Auch große Anstrengungen des Nachweises von schwach wechselwirkenden Teilchen in der kosmischen Strahlung, die als WIMPs (Weakly Interacting Massive Particles) Kandidaten für die dunkle Materie wären, sind bisher nicht von Erfolg gekrönt.

Die dunkle Energie

Als wäre dies nicht Rätsel genug, sind die meisten Kosmologen heute davon überzeugt, dass auch die dunkle Materie gemeinsam mit den Baryonen nur weniger als ein Drittel der Energiedichte des Universums ausmacht. Der Großteil der Substanz des Kosmos besteht damit aus einer noch geheimnisvolleren Komponente – der dunklen Energie. Im Gegensatz zur dunklen Materie ist diese völlig strukturlos und in perfekter Gleichförmigkeit über das ganze Universum verteilt! Bei der dunklen Energie handelt es sich um keine Teilchen, und sie klumpt auch nicht in Galaxien oder Galaxienhaufen. Diese Homogenität der dunklen Energie ist der wesentliche Unterschied zur klumpenden dunklen Materie.

Die Existenz der dunklen Energie folgt aus einer denkbar einfachen Rechnung: Wie wir sehen werden, kennen wir sehr genau die totale Energiedichte im Universum. Wenn man nun findet, dass die Summe aller Materieformen, die klumpen, also Baryonen und dunkle Materie, nur ungefähr 30 % der totalen Energiedichte ausmachen, dann müssen die restlichen 70 % homogen über das ganze Universum verteilt sein. Dies bringt Kosmologen in einen Erklärungsnotstand: Alle Teilchen mit genügend großer Masse müssen unter dem Einfluss der gravitationellen Anziehung Klumpen bilden („Gravitationsinstabilität“) und sollten sich daher

in Galaxien oder Galaxienhaufen konzentrieren. Bekannte masselose oder extrem leichte Teilchen, die der Schwerkraft der Galaxienhaufen entfliehen könnten, sind das Photon und die Neutrinos. Beide kommen aus anderen Gründen nicht als Kandidaten für die dunkle Energie in Frage. Und kein leichtes Teilchen mit elektromagnetischen, starken oder schwachen Wechselwirkungen kann sich vor den präzisen Experimenten der Elementarteilchenphysik verstecken.

In der Tat hat die Theorie des Urknalls, das „inflationäre Universum“, schon seit langem vorhergesagt, dass die totale Energiedichte ρ des Universums gleich einer kritischen Energiedichte ρ_{krit} sein muss. Diese kritische Energiedichte entspricht einer Dichte von ca. 6 Protonen pro Kubikmeter.

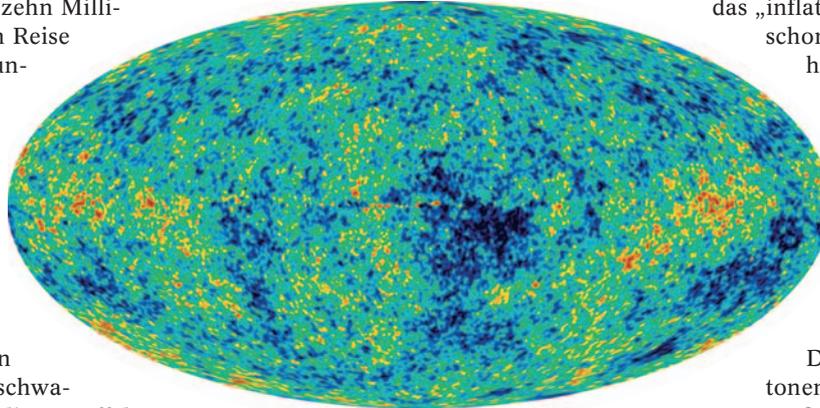
Ist ρ größer (kleiner) als ρ_{krit} , so ist das Universum gekrümmt und geschlossen (offen). Bei $\rho = \rho_{\text{krit}}$ ist das Universum offen, aber räumlich flach.

Man mag natürlich anzweifeln, ob man die totale Energiedichte des Kosmos so gut kennt, wie es die Theoretiker behaupten. Aber gerade diese Vorhersage wurde in den letzten Jahren beeindruckend durch Beobachtungen bestätigt. Mit dem Satelliten COBE ist es erstmals gelungen, ein „Foto“ des Urknalls zu schießen – etwas präziser ist es ein „Foto“ des Universums im Alter von 400 000 Jahren, also seiner frühen Kindheit, als das extrem heiße Plasma zum erstenmal für Lichtstrahlen durchlässig wurde. Zu diesem Zeitpunkt „klärte sich der Himmel auf“. Vorher war das Universum so heiß, dass Protonen und Elektronen getrennt waren – man nennt dies ein Plasma. An diesen Ladungsträgern streuten die Photonen so häufig, dass sie keine weiten Strecken ohne Streuung zurücklegen konnten. Ähnlich wie eine Wolke war das Universum undurchsichtig. Bei der Abkühlung des Universums unter eine bestimmte Temperatur konnten Protonen und Elektronen zu stabilen Wasserstoffatomen kombinieren. Damit wurde der Großteil der Teilchen im Universum elektrisch neutral. Die Streuung der Photonen wurde plötzlich so selten, dass diese Photonen seit dem Zeitpunkt der „Rekombination“ kaum mehr streuen – wie bei der Auflösung einer Wolke herrschte nun „blauer Himmel“. Ohne wesentliche weitere Störung haben die damals freigesetzten Photonen den weiten Weg von 13,7 Milliarden Lichtjahren bis zu uns zurückgelegt und kommen hier als kosmische Hintergrundstrahlung an. Die Tatsache, dass die Temperatur nur mehr 2,73 K beträgt und nicht etwa eine typische Dissoziationstemperatur des Wasserstoffatoms, liegt einzig an der Rotverschiebung durch die Expansion des Universums.

Die kosmografische Karte

Der Nachfolgesatellit WMAP hat bereits eine präzise „Landkarte“ des Universums dieser frühen Epoche erstellt (Abb. 2). Auf der Karte sieht man die kosmische Hintergrundstrahlung, die zum präzisen Zeitpunkt der „letzten Streuung“ überall im Universum entstand.

Abb. 2: Ein „Schnappschuss des Urknalls“: Der Satellit WMAP lieferte eine detaillierte Karte der kosmischen Hintergrundstrahlung, deren Anisotropie essenziell für die Entwicklung des Universums ist. Geringfügig wärmere Gebiete sind rot eingefärbt, kältere blau. (Quelle: NASA/WMAP)



Was wir heute sehen, ist die Strahlung von einer Kugeloberfläche um uns herum, die eine Strecke von 13,7 Milliarden Lichtjahren zurückgelegt hat, da sie vor 13,7 Milliarden Jahren entstanden ist. Die Strahlung ist eine fast perfekte Schwarzkörperstrahlung mit einer Temperatur von 2,73 Kelvin. Sie kommt fast isotrop mit gleicher Temperatur aus allen Richtungen – aber eben nur fast! Schaut man sich genauer die Temperatur in Abhängigkeit des Winkels an, so beobachtet man winzige Schwankungen von weniger als einem Teil in Zehntausend. Die geringfügig wärmeren Regionen sind auf der Karte rot gefärbt, die kälteren blau. Es ist wirklich wie eine geografische (besser „kosmografische“) Karte – nimmt man erneut ein Foto in hundert Jahren, wird alles noch genauso aussehen, bis in die kleinen Details.

Schon mit (etwas geübtem) bloßen Auge kann man auf der Karte eine charakteristische Größe der Schwankungsregionen erkennen, entsprechend einem Winkel von ungefähr 1°. Dies enthält nun entscheidende Informationen über die totale Energiedichte des Universums. Die physikalische Längenskala für die Fluktuationen ist bekannt. Sie entspricht im Wesentlichen der damaligen „Größe“ des Universums, genauer ist sie durch den Horizont zum Zeitpunkt der Entstehung der Hintergrundstrahlung gegeben. Der Winkel jedoch, unter dem wir diese Längenskala sehen, wird von der Geometrie des Universums beeinflusst. Diese wiederum hängt direkt mit der totalen Energiedichte zusammen. Aus dem beobachteten Winkel kann man berechnen, dass die Lichtstrahlen auf geraden Linien gelaufen sind, was genau der kritischen Energiedichte entspricht, und nicht etwa auf gekrümmten Bahnen, wie es eine „überkritische“ oder „unterkritische“ Energiedichte vorhersagt. Dies lässt sich natürlich auch quantitativ ausdrücken. Abb. 3 zeigt die Amplitude der Temperaturschwankungen in Abhängigkeit des Winkels. Man sieht ein charakteristisches Maximum bei einem Winkel von 1°. Für eine totale Energiedichte wesentlich kleiner als die kritische Dichte wäre dieses Maximum weit nach rechts verschoben. Die Daten von WMAP sind so präzise, dass die Energiedichte höchstens einige wenige Prozent von der kritischen Dichte abweichen kann – während die klumpende dunkle Materie und die Baryonen zusammen nur ungefähr 30% der kritischen Dichte ausmachen.

Trotz aller Überraschung müssen wir uns wohl mit der Existenz einer homogen verteilten Energiedichte, über die wir kaum etwas wissen, abfinden. Die Homogenität der dunklen Energie ist wohl ihre wesentlichste bekannte Eigenschaft. Und sie verhindert gleichzeitig jede mögliche Entdeckung in lokalen Systemen wie z. B. Galaxien. Etwas Gleich-Verteiltes kann keine Kraft auf andere Körper ausüben – in welche Richtung sollte die Kraft denn auch ziehen? Und es kann kein Licht ablenken – warum sollte das Licht in eine Richtung eher als in eine andere abgelenkt werden?

Es scheint, als sei die dunkle Energie auf die perfekte mögliche Weise versteckt! Und doch bestimmt sie die Entwicklung des Kosmos als Ganzem, und das gibt uns die Chance, ihr auf die Spur zu kommen. Ihre vielleicht erstaunlichste Eigenschaft: In Wechselwirkung mit der Gravitation treibt sie das Universum wie in einer Explosion auseinander.

Wir wissen, dass die dunkle Energie in früheren Epochen der kosmologischen Entwicklung weit weniger bedeutend war. Zu früheren Zeiten dominierte im Universum die dunkle Materie, und während der ersten

100 000 Jahre beherrschte die Strahlung das Geschehen. Diese „normalen“ Formen der Materie bremsen die Expansion des Universums durch ihre gravitative Anziehung. Andererseits verdünnt die Expansion die dunkle Materie, deren Energiedichte damit stetig abnimmt, umgekehrt proportional zum Quadrat der kosmischen Zeit.

Bis vor wenigen Jahren glaubten fast alle, dass diese Verlangsamung der Expansionsgeschwindigkeit auch heute noch anhält. Dunkle Energie hat jedoch genau die gegenteilige Tendenz, da ihr Druck negativ wird, wenn sie sich zeitlich nicht zu stark verändert. Wenn unser Universum in „jüngster Zeit“ – das sind

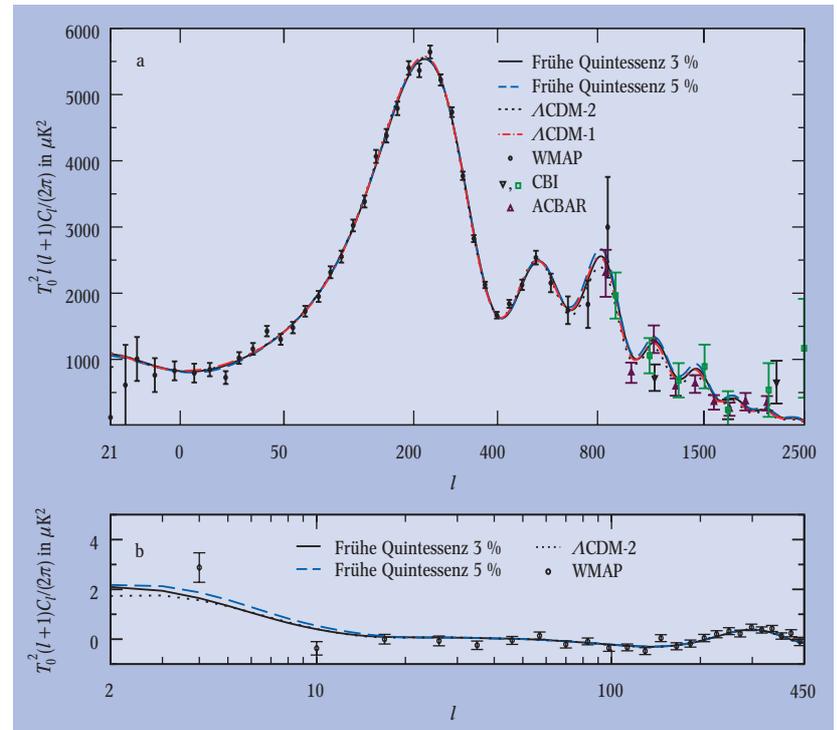


Abb. 3: Anisotropie der Hintergrundstrahlung. ► a) Die Ordinate zeigt die quadratischen Temperaturschwankungen der kosmischen Hintergrundstrahlung, die Abszisse den Drehimpuls, der ungefähr dem inversen Winkel zwischen zwei Beobachtungsregionen entspricht. Das Maximum entspricht einem Winkel von einem Grad. Für eine kosmische Energiedichte wesentlich kleiner als die kritische Dichte wäre dieses Maximum weit nach rechts verschoben. Die Beobachtungsdaten sind von WMAP, ACBAR und CBI. ► b) Die von WMAP gemessene Korre-

lation zwischen Polarisation und Temperaturschwankung. Die theoretischen Modelle geben die komplexe Form der Kurven präzise wieder. Für den Fall einer kosmologischen Konstanten Λ werden dabei die kosmologischen Parameter von WMAP alleine bestimmt (Λ CDM-1) oder unter Einbeziehung weiterer kosmologischer Beobachtungen (Λ CDM-2). Daneben werden zwei Modelle mit früher dunkler Energie gezeigt, für die der Anteil an dunkler Energie zum Zeitpunkt der Aussendung der Hintergrundstrahlung 5 % bzw. 3 % beträgt.

für einen Kosmologen immer noch ein paar Milliarden Jahre – unter die Herrschaft der dunklen Energie fiel, dann sollte sich die verlangsamte Expansion in eine beschleunigte Expansion umgekehrt haben [1]. Und genau dies wurde durch die Messung der Luminosität und Rotverschiebung weit entfernter Supernova-Explosionen beobachtet! [2] Hält diese beschleunigte Expansion auch in der Zukunft an, so werden für zukünftige Beobachter die fernsten heute beobachtbaren Galaxien wieder aus dem Gesichtsfeld verschwinden.

Viel mehr als die homogene Verteilung der dunklen Energie und ihren negativen Druck kennen wir heute nicht. Nun werden manche einwenden: Wenn die Kosmologen schon so im Dunklen tappen, woher nehmen

sie dann diese Überzeugung, dass ihre Gedankengebäude nicht völlig realitätsfremd sind? Nun, im Gegensatz zur Quintessenz-Suche der Alchimisten des Mittelalters haben wir eine Reihe weiterer beeindruckender Hinweise darauf, dass unser Universum wirklich von dunkler Energie dominiert wird. Dunkle Energie beeinflusst nicht nur die Lage des ersten Maximums der Anisotropien der kosmischen Hintergrundstrahlung, sondern den gesamten charakteristischen Verlauf der Kurve mit Maxima und Minima. Die Übereinstimmung der in Abb. 3 eingezeichneten Modelle dunkler Energie mit den Beobachtungspunkten ist überzeugend. Aus den winzigen Anisotropien im frühen Universum entstanden später die Galaxien und Galaxienhaufen (Abb. 4). Wir können die Stärke der Schwankungen vor 13,7 Milliarden Jahren mit der Hintergrundstrahlung messen und dann für ein gegebenes kosmologisches Modell berechnen, wie die heute beobachteten Galaxien verteilt sind. Für Modelle mit dunkler Energie stimmt die Beobachtung gut mit den Rechnungen überein, während ohne dunkle Energie die Strukturen im Universum schneller gewachsen wären. Auch das aus den Anisotropien der Hintergrundstrahlung berechnete Alter des Universums deckt sich mit unserem Wissen über die ältesten Sterne der Galaxie. Gibt es dunkle Energie, so passt dies auch zum beobachteten Wert des Hubble-Parameters, der die Expansionsgeschwindigkeit des Universums angibt.

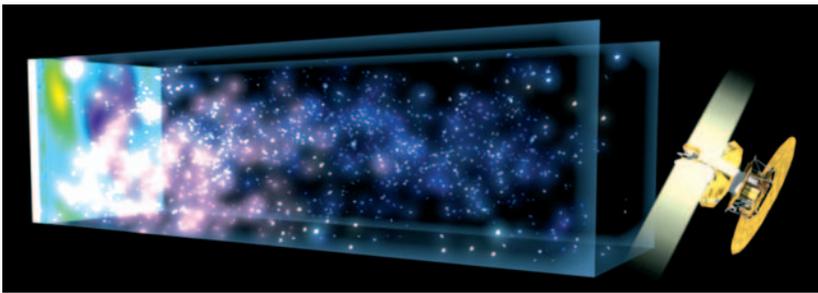


Abb. 4: Die Fluktuationen in der Hintergrundstrahlung (links), die heute von WMAP beobachtet werden, spiegeln Fluktuationen in der Materialverteilung rund 400 000 Jahre nach dem Urknall wider. Daraus sind heiße Gaswolken entstanden, die unter dem Einfluss der Gravitation rund 200 Millionen Jahre später zu den ersten Sternen kondensierten. Aus diesen entstanden Galaxien und Galaxienhaufen (rechts), die wir heute beobachten. (Quelle: NASA/WMAP)

Doch keine große Eselei?

Was ist nun die dunkle Energie? Eine Möglichkeit wäre die schon von Einstein eingeführte, dann aber als „die größte Eselei meines Lebens“ wieder verworfene kosmologische Konstante. Diese geistert seit Jahrzehnten mit Auf und Ab durch die Kosmologie, bereitet den theoretischen Physikern aber größtes Kopfzerbrechen. Bei naiven Rechnungen kommt sie um 120 Größenordnungen größer heraus als beobachtet. In der Tat tragen die Quantenfluktuationen im Vakuum zu einer konstanten Energiedichte bei. Dieser Beitrag wird durch die Fluktuationen auf den kürzesten Abständen dominiert. Setzt man naiv als relevante Skala die kleinste bekannte Längenskala, die Planck-Länge, ein, so sollte der natürliche Wert der kosmologischen Konstanten von der Größenordnung der vierten Potenz der Planck-Masse sein – also der größten bekannten Energiedichte und nicht etwa winzig. Es gibt wohl nur wenige Abschätzungen, die noch mehr daneben liegen! Natürlich ist diese Überlegung recht naiv, aber den Theoretikern ist trotz intensiver jahrelanger Bemühungen kein über-

zeugendes Modell eingefallen, das eine kleine kosmologische Konstante erklären könnte. Zudem gliche es einem extremen Zufall, dass die kosmologische Konstante präzise einen solchen winzigen Wert hat, dass sie gerade *heute* in der Kosmologie wichtig wird, und nicht viel früher oder später. In der Not wird immer wieder das anthropische Prinzip ins Spiel gebracht, nachdem unser sichtbares Universum nur eine winzige Ecke des gesamten Universums darstellt, mit extrem unwahrscheinlichen Eigenschaften. Aber die Bedingungen für Leben sind nach diesen Ideen eben nur in einer extrem unwahrscheinlichen Umgebung realisiert.

Die Quintessenz

Die Alternative wäre eine sich dynamisch verändernde dunkle Energie. Schon vor 17 Jahren wurde vom Autor erstmals vorgeschlagen [3], dass ein Skalarfeld, das Kosmon, für eine sich zeitlich verändernde kosmologische „Konstante“ verantwortlich ist. Die homogen verteilte potentielle und kinetische Energie des Skalarfelds – später Quintessenz genannt [4] – verringert sich über kosmologische Zeiten ähnlich wie die anderen Energieformen. Der winzige Betrag der dunklen Energie lässt sich dann durch das enorme Alter des Universums erklären. In der Tat haben wir bereits eine gute Erklärung für eine der winzigen dimensionslosen Größen, die in der Kosmologie auftauchen: Das Verhältnis der Energiedichte in dunkler Materie zur vierten Potenz der Planck-Masse ist ebenfalls von der winzigen Größe 10^{-120} . Da dieses Verhältnis jedoch mit der Zeit kontinuierlich abnimmt, muss man nur lange genug warten, bis das Universum ein so hohes Alter erreicht hat, dass das Verhältnis den heute beobachteten Wert erreicht hat. Da liegt es nahe, für die dunkle Energie, die sich nur durch einen Faktor zwei von der dunklen Materie unterscheidet, eine ähnliche Erklärung zu suchen.

Für eine große Klasse von Quintessenz-Modellen folgt die richtige Größenordnung der dunklen Energie dann aus der Existenz von „kosmischen Attraktorlösungen“, für die sich die dunkle Energie an die Energie in anderen Materieformen anpasst. In diesen Modellen hat die Dynamik des Kosmons (bestimmt durch seine potentielle Energie als Funktion des Feldwerts) die Eigenschaft, dass nach einer gewissen Zeit das Verhältnis von dunkler Energie zu Strahlung oder von dunkler Energie zu dunkler Materie immer einen konstanten Wert annimmt, unabhängig vom unbekanntem „Anfangszustand“ zu einem sehr frühen Zeitpunkt im Universum. Die einfachsten Modelle erklären damit bereits zwar sehr schön, warum dunkle Energie und dunkle Materie fast gleich wichtig sind, stimmen aber mit den präzisen neuen Beobachtungen noch nicht überein.

Für eine realistische Kosmologie muss Quintessenz in der heutigen Epoche die dunkle Materie übertrumpfen. Wir wissen, dass der Anteil der dunklen Energie an der Gesamtenergie heute ungefähr 70 % beträgt, aber ein realistisches Wachsen von Strukturen nur mit einem Anteil von höchstens 10 % in früheren Epochen verträglich ist [5]. Dies erfordert besondere Modelleigenschaften, wie J. Peebles und B. Ratra in Princeton vor vielen Jahren bemerkten [6]. Inzwischen gibt es eine Vielzahl von Quintessenzmodellen, die mit allen bisherigen Beobachtungen verträglich sind. Die theoretische Unsicherheit, welches denn nun das richtige Modell ist, ist entsprechend hoch.

Lassen sich die Alternativen Quintessenz und kosmologische Konstante durch Beobachtungen unter-

scheiden? Ein wesentlicher Unterschied liegt in der Zeitabhängigkeit. Die kosmologische Konstante kann in den frühen Stadien der Entwicklung des Universums völlig vernachlässigt werden. Im Gegensatz dazu mag Quintessenz schon zu Zeiten der Nukleosynthese, der Entstehung der kosmischen Hintergrundstrahlung oder während der Strukturbildung eine gewisse Rolle gespielt haben. Auch die Beschleunigung der Expansion des Universums könnte für Quintessenz etwas geringer ausfallen als für eine kosmologische Konstante. Bisherige Messungen schließen bereits einige der vorgeschlagenen Quintessenz-Modelle aus.

Eine besonders interessante Klasse von Quintessenz-Modellen mit „früher dunkler Energie“ lässt sich jedoch erst bei weiter gesteigerter Präzision der Beobachtungen von einer kosmologischen Konstanten unterscheiden (s. Abb. 3) [7]. In diesen Modellen hat die dunkle Energie über einen langen Zeitraum der kosmischen Entwicklung nur einige Prozent der gesamten Energiedichte ausgemacht. In diesem Zeitraum änderte sich der Wert des Kosmon-Felds. Als Konsequenz dieser Zeitentwicklung wurden die potentielle und kinetische Energie des kosmischen Skalarfelds im Verlauf der Expansion des Universums immer geringer und ihr Verhältnis zur dunklen Materie blieb im Wesentlichen eingefroren. Erst in jüngster Zeit (für die Kosmologen bei einer Rotverschiebung $z < 1-2$) verlangsamte sich die Zeitänderung des Kosmon-Felds beträchtlich und führte zum Einsetzen der beschleunigten Expansion.

Künftige Satellitenmissionen

In den kommenden Jahren wird von neuen Satelliten sowie einer detaillierten Durchmusterung des Himmels mit leistungsstarken Teleskopen eine große Flut spannender Daten erwartet, die über die Gültigkeit solcher Quintessenz-Modelle Aufschluss geben können. Die Beobachtung einer größeren Anzahl von Supernovae mit hoher Rotverschiebung könnte klären, ob die dunkle Energie in jüngster Zeit eher dynamisch oder statisch ist. Eine weitere Verbesserung der Statistik der anisotropen Fluktuationen in der Hintergrundstrahlung könnte die Hypothese der kosmologischen Konstanten bestätigen – oder eben eine solche statische dunkle Energie ausschließen. Hier wird der europäische Satellit PLANCK eine große Rolle spielen.

Die zukünftigen äußerst umfangreichen Galaxienkataloge, z. B. aus dem OmegaCam-Projekt, werden auch reichhaltige Informationen über Rotverschiebung und andere Eigenschaften der Galaxien enthalten. Dies ermöglicht gleich in mehrerer Hinsicht Aufschluss über die Entwicklung des Universums. Mit Hilfe des schwachen Gravitationslinseneffekts lässt sich die Zeitentwicklung des Anteils an dunkler Materie über viele Milliarden Jahre verfolgen. Dies ist auch indirekt durch eine präzise Messung der Korrelation von Galaxien möglich, wenn der genaue Zusammenhang zwischen der Verteilung von leuchtender Materie in Galaxien und der Verteilung der dunklen Materie geklärt ist. Zur Klärung dieses Zusammenhangs sind umfangreiche numerische Simulationen der Strukturentstehung im Universum geplant und im Gange – sozusagen das „Universum im Computer“. Eine Kombination dieser Erkenntnisse wird eine genaue Abschätzung der heutigen Amplitude der Dichteschwankungen gestatten, und diese ist wiederum ein ausgezeichneter „Gradmesser“ für das Vorhandensein früher dunkler Energie. Auch detailliertere Eigenschaften, wie die Häufigkeit des

starken Linseneffekts (wie in Abb. 1) hängen stark vom Betrag früher dunkler Energie ab.

Die Häufigkeit und Verteilung von Galaxienhaufen werden mit dem geplanten DUO-Satelliten durch Beobachtung der Röntgenstrahlung bestimmt. Die Verteilung der dunklen Materie in den großräumigen Haufenstrukturen legt ein sehr direktes Zeugnis der Entwicklung von dunkler Materie und dunkler Energie ab, da sie kaum von der komplexen Entwicklung der Baryonen beeinflusst wird. Der „Schatten“ von Galaxienhaufen in der kosmischen Hintergrundstrahlung (Sunjaev-Zeldovich-Effekt) wird mit Hilfe des APEX-Teleskops präzisen Aufschluss über die Zeitentwicklung der Haufenhäufigkeit und damit wiederum über frühe dunkle Energie gestatten. Findet man frühe dunkle Energie, so ist die kosmologische Konstante ausgeschlossen. Damit wäre der dynamische Charakter der dunklen Energie eindeutig bewiesen.

Eine fünfte Kraft?

Quintessenz basiert auf der Quantenfeldtheorie für das skalare Kosmon-Feld. Durch den Austausch von virtuellen Kosmon-Quanten wird eine Kraft vermittelt – ebenso wie die elektrischen und magnetischen Kräfte durch den Austausch virtueller Photonen zustande kommen. Statt des „fünften Elements“ der Antike haben wir es nun mit einer neuen „fünften Kraft“ zu tun. Im Gegensatz zur kosmologischen Konstanten impliziert Quintessenz eine neue fundamentale makroskopische Wechselwirkung! Auf der Erde oder in unserem Sonnensystem ist diese Wechselwirkung zwar bedeutend schwächer als die Gravitation, aber ihre Existenz hätte recht spektakuläre Konsequenzen, die mit zukünftigen Präzisionsmessungen nachgewiesen werden könnten. Insbesondere wird das Äquivalenzprinzip verletzt. Körper mit gleicher Masse aber verschiedener Zusammensetzung fallen auch im Vakuum nicht mehr gleich schnell. Der Unterschied in ihrer relativen Beschleunigung ist zwar nur winzig – typische Modelle kommen auf einen Wert von 10^{-14} . Die neuesten Präzisions-Experimente mit Torsionswaagen erreichen aber schon fast diese Genauigkeit. Und die Genauigkeit lässt sich durch entsprechende Experimente im Weltraum noch steigern. So sollte der geplante Satellit MICROSCOPE gut in der Lage sein, eine Verletzung des Äquivalenzprinzips im Bereich von 10^{-14} zu messen.

Vielleicht noch spektakulärer: Quintessenz sagt eine Zeitabhängigkeit der fundamentalen „Konstanten“ vorher [8]. Die elektrische Ladung und Masse des Protons hätten in der frühen Kosmologie nicht exakt den gleichen Wert wie heute. Der Grund dafür ist einfach: Die fundamentalen „Konstanten“ hängen vom Wert des Kosmon-Felds ab, und dieses verändert sich mit der Zeit. Dieser Effekt ist nur winzig – sonst würden Aussagen über den Zustand des frühen Universums viel komplizierter. Leider kennen wir auch die Größe des Effekts nicht, da diese von der unbekanntenen Kopplungsstärke des Kosmonfelds an die Materie abhängt. Die vielleicht präziseste Möglichkeit, nach einer Zeitänderung der Kopplungskonstanten im frühen Universum zu fahnden, misst die Änderung der Feinstrukturkonstanten durch Absorptionslinien im Licht ferner Quasare. Die Auswertung dieser Messungen ergibt zur Zeit ein widersprüchliches Bild. Während eine Gruppe findet, dass die Feinstrukturkonstante bei einer Rotverschiebung von $z = 1-3$ ungefähr um den Bruchteil $0,5 \times 10^{-5}$ kleiner war als heute [9], kann eine zweite Gruppe

keinen solchen Effekt erkennen [10].

Noch viel weiter in die Vergangenheit kann man mit der Analyse der Element-Entstehung blicken. Auch hier hängen die Details vom Wert verschiedener Kopplungskonstanten ab, die im Rahmen vereinheitlichter Theorien miteinander verknüpft sind [11]. Und diese könnten im frühen Universum etwas unterschiedliche Werte als die heutigen haben. Durch die Messung der Anisotropie der Hintergrundstrahlung ist ein wichtiger Parameter für die Nukleosynthese, die Häufigkeit der Baryonen, gut bestimmt. Die damit berechnete Häufigkeit von primordiales Deuterium stimmt gut mit den Beobachtungen überein, während sich für Helium und Lithium zur Zeit Diskrepanzen ergeben. Könnten die jetzigen primordialen Häufigkeiten durch gesteigerte Präzision der Beobachtungen bestätigt werden, könnten wir Rückschlüsse darauf ziehen, dass sich die Werte der fundamentalen Kopplungen einige Minuten nach dem Urknall von den heutigen Werten noch geringfügig unterschieden [12].

Dies eröffnet eine faszinierende Perspektive: Könnte man aus Messungen der Absorptionslinien bei hoher Rotverschiebung oder durch eine Präzisionsbetrachtung der Nukleosynthese eine Zeitabhängigkeit der elektromagnetischen, schwachen oder starken Wechselwirkungen feststellen, so geriete ein weiterer Pfeiler eines statischen Weltbildes ins Wanken: Selbst die fundamentalen Kopplungen würden sich ändern! Wie schon die Griechen der Antike wussten: „Alles fließt“. Die fundamentalen Gesetze der Welt werden zeitabhängig – wenn auch nur ein wenig. Sie hängen ab vom Zustand des Kosmos-Feldes. Und das ist schon fast wieder so etwas wie der Äther der antiken griechischen Philosophen.

Literatur

- [1] *D. Giulini* und *N. Straumann*, Physik Journal, November 2000, S. 41
- [2] *A. Riess* et al., Astron. J. **116**, 1009 (1998); *S. Perlmutter* et al., Astrophys. J. **517**, 565 (1998)
- [3] *C. Wetterich*, Nucl. Phys. **B302**, 668 (1988)
- [4] *R. Caldwell*, *R. Dave* und *P. Steinhardt*, Phys. Rev. Lett. **80**, 1582 (1998)
- [5] *P. Ferreira* und *M. Joyce*, Phys. Rev. Lett. **79**, 4740 (1997)
- [6] *P. J. E. Peebles* und *B. Ratra*, Astrophys. J. Lett. **325**, L17 (1998)
- [7] *R. Caldwell*, *M. Doran*, *C. Müller*, *G. Schäfer* und *C. Wetterich*, Astrophys. J. **591**, L75 (2003)
- [8] *C. Wetterich*, Nucl. Phys. **B302**, 645 (1988)
- [9] *J. K. Webb* et al., Phys. Rev. Lett. **82**, 884 (1999)
- [10] *H. Chand* et al., Astron. Astrophys. **417**, 853 (2004)
- [11] *H. Fritzsch*, Physik Journal, April 2003, S. 49
- [12] *C. Müller*, *G. Schäfer* und *C. Wetterich*, astro-ph/0405373

Der Autor

Christoph Wetterich hat in Paris, Köln und Freiburg Physik studiert und an der Universität Freiburg promoviert und habilitiert. Nach Aufenthalten am CERN, der Universität Bern sowie bei DESY wurde er 1992 auf eine Professur in Heidelberg berufen, wo er sich mit der Physik des frühen Universums und Phasenübergängen in der Teilchenphysik beschäftigt. Die Idee der Quintessenz kam ihm beim Versuch zu erklären, warum die kosmologische Konstante Null sein sollte.

