

Dunkle Energie

Seminar Kosmologie, Uni Münster
WS 08/09
Thomas Braun



Inhalt

1. Einleitung
2. Hinweise auf Dunkle Energie
 - 2.1 Supernovae-Daten
 - 2.2 Kosmischer Mikrowellenhintergrund
 - 2.3 Strukturbildung
3. Allgemeine Eigenschaften von Dunkler Energie
4. Kandidaten für Dunkle Energie
 - 4.1 Kosmologische Konstante / Vakuumenergie
 - 4.2 Quintessenz
 - 4.3 Phantomenergie
5. Fazit

1. Einleitung

Dunkle Energie ist ein Phänomen, welches erst seit kurzem ein zentraler Punkt der modernen Kosmologie ist. Verschiedene Messungen, insbesondere die Rotverschiebung entfernter Supernovae, sowie der Anisotropie im Kosmischen Mikrowellenhintergrund, deuten darauf hin, dass unser Universum zum großen Teil aus einer unbekanntem Energieform (Dunkler Energie) besteht, die gegen die Gravitation wirkt und eine beschleunigte Expansion des Universums hervorruft.

2. Hinweise auf Dunkle Energie

2.1 Supernovae-Daten

Bis in die späten 90er Jahre ging man in der Kosmologie davon aus, dass sich die seit langem bekannte Expansion des Universums aufgrund der gravitativen Wirkung des Materieinhalts im Laufe der Zeit verlangsamt. Zur Messung dieser Entwicklung ist es nötig, auf Objekte im Weltall zurückzugreifen, welche eine genau bekannte intrinsische Helligkeit aufweisen. Während der Zeit, die das Licht, das diese Objekte aussenden, benötigt, um zur Erde zu gelangen, vergrößert sich durch die Expansion des Universums die Wellenlänge des Lichtes (kosmische Rotverschiebung). Bei bekannter Helligkeit des Objekts kann man aus der hier beobachteten Helligkeit die Entfernung des Objekts berechnen. Aus diesen Größen kann man damit Informationen über die kosmische Expansion seit dem Aussenden des Lichtes erhalten. Indem man diese Messungen an mehreren Objekten durchführt, kann man die Geschichte der Expansion erhalten. Objekte, die solche Anforderungen erfüllen, bezeichnet man als Standardkerzen.

Besonders gute Kandidaten für solche Standardkerzen waren von jeher Supernovae, die hellen Explosionen von ausgebrannten Sternen. Die bis heute besten Standardkerzen erhält man durch eine weitere Unterteilung der Supernovae in verschiedene Typen. Die sogenannten Supernovae vom Typ I haben keine oder nur sehr schwache Wasserstofflinien in ihrem Spektrum. Anfang der 80er Jahre wurden diese erneut unterteilt, abhängig vom Vorhandensein einer Siliziumlinie im Spektrum bei 615nm. Supernovae mit dieser Linie bezeichnete man danach als Typ Ia. Es stellte sich heraus, dass diese Supernovae Ia ausgezeichnete Standardkerzen darstellen, da sie in allen beobachteten Fällen eine nahezu identische Helligkeitsverteilung zeigten. Dieses identische Verhalten weist daraufhin, dass die Ausgangsbedingungen einer solchen Supernova ebenfalls immer nahezu gleich sein müssen. Die zur Zeit beste Erklärung für die Entstehung einer solchen Supernova beschreibt einen Weißen Zwerg in unmittelbarer Nähe zu einem noch aktiven Stern. Unter geeigneten Bedingungen kann es dann zu einem Materiestrom von dem aktiven Stern auf den Weißen Zwerg kommen, der bei Erreichen einer kritischen Masse (ca. 1,4 Sonnenmassen) in einer Supernova explodiert.

In den 90er Jahren wurde intensiv daran gearbeitet, die Rotverschiebung solcher Supernovae (insbesondere weit entfernter) zu messen, um quantitative Hinweise auf eine verlangsamte Expansion des Universums zu erhalten. Der Durchbruch gelang 1998 gleich zwei Teams, dem „High-Z Supernova Search Team“, sowie dem „Supernova Cosmology Project“. Anstatt jedoch eine verlangsamte Expansion zu messen, wiesen die Daten sogar auf eine beschleunigte Expansion hin (s. Abb. 1). Um eine solche zu erhalten, müsste es im Universum ein Element geben welches der gravitativen Anziehung des Materieinhaltes entgegenwirkt und so die kosmische Expansion beschleunigt.

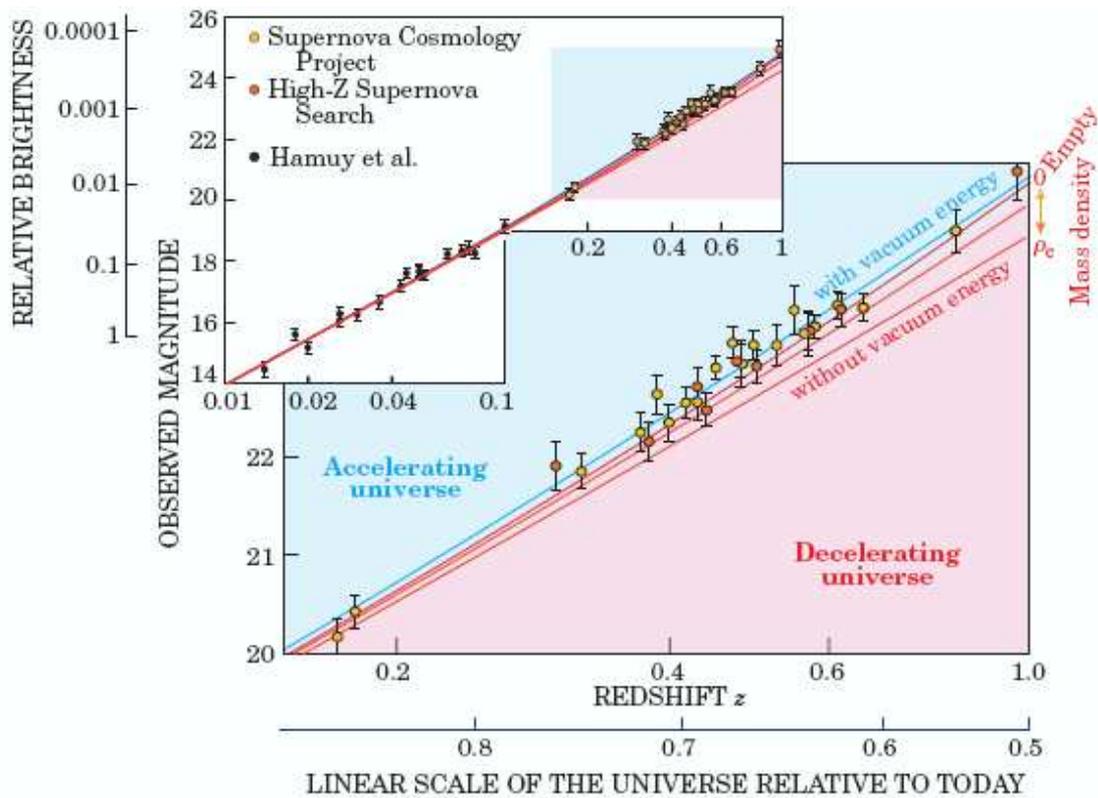


Abb. 1: Daten der Supernova-Messungen

Im Diagramm 1 ist die gemessene (relative) Helligkeit gegen den Abstand (in Rotverschiebung) der Supernovae aufgetragen, die Datenpunkte sind gemessene Ereignisse. Die eingezeichneten Linien geben die theoretischen Erwartungen für verschiedene Modelle wider. Interessant ist insbesondere der vergrößerte Ausschnitt, da man erkennt, dass sich die Linien erst bei größeren Entfernungen unterscheiden. Die unterste Linie beschreibt ein Universum, welches die kritische Energiedichte hat, diese aber nur von Materie ausgemacht wird. Offensichtlich liegen die Datenpunkte deutlich über den Erwartungen eines solchen Modells. Sie liegen sogar über der Linie, die ein komplett leeres Universum beschreibt, obwohl wir aufgrund unserer Beobachtungen wissen, dass dies nicht realisiert ist. Die entfernten Supernovae sind also durchgehend weiter weg, als sie nach den Erwartungen sein dürften. Da sie im blau markierten Bereich liegen, weisen sie also auf eine beschleunigte Expansion des Universums hin. Die blaue Linie, die die Messpunkte am besten interpoliert, ist das aktuelle Modell eines Universums mit ca. 33% der kritischen Dichte an Materie und 67% Dunkler Energie (Vakuumentnergie).

Diese postulierte Dunkle Energie muss einen negativen Druck haben, um die Expansion zu beschleunigen und nicht abzubremsen, wie Materie das tut. Weiterhin muss sie sehr gleichförmig im Universum verteilt sein, d.h. nicht zur Clusterbildung neigen, da sie sonst gravitative Effekte auf kleineren Maßstäben stören würde.

Aktuellere Supernovae-Daten bestätigen die Ergebnisse und legen ebenfalls ein Universum mit ca. 70% Dunkler Energie nahe (s. Abb.2)

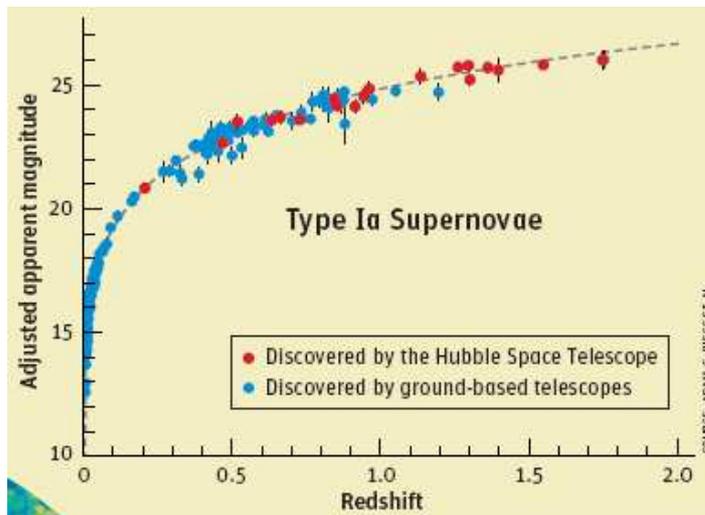


Abb.2: Supernova-Daten, gestrichelte Linie: Erwartungen für 70/30 Modell

2.2 Kosmischer Mikrowellenhintergrund

Die Daten aus der Anisotropie des Kosmischen Mikrowellenhintergrundes (CMB, Cosmic Microwave Background) machen in erster Linie eine Aussage über die Form des Universums, stützen damit aber auch die Existenz Dunkler Energie.

Der Energieinhalt des Universums hat einen unmittelbaren Einfluss auf die Gestalt des Universums, d.h. auf die Krümmung des Raumes. Für eine Energiedichte, die größer als eine bestimmte kritische Dichte ist, wäre der Raum positiv gekrümmt, was ein geschlossenes Universum bedeutet. Ist die Energiedichte kleiner, wäre die Krümmung negativ und das Universum offen. Ist die Energiedichte gleich der kritischen Dichte, dann wäre das Universum flach (s. Abb.3).

Die Messung der Krümmung erfolgt über die Anisotropie im CMB. Dieser hat eine beinahe homogene Temperatur von ca. $2,7K$. Es treten jedoch Temperaturschwankungen in der Größenordnung $10^{-4} K$ auf. Diese Temperaturschwankungen haben einen charakteristischen Winkelabstand, welcher sich für verschiedene Energiedichten unterscheidet. Je nachdem, ob die tatsächliche Energiedichte größer, gleich, oder kleiner der kritischen Energiedichte ist, erwartet man Winkelabstände von $1,5^\circ$, 1° bzw. $0,5^\circ$.

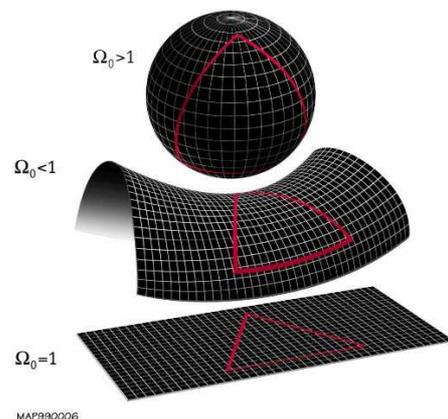


Abb.3: Raumkrümmung

Diese Abstände wurden mithilfe der WMAP-Sonde gemessen (s. Abb.4) und man erhält einen Winkelabstand zwischen $0,9^\circ$ und 1° , was auf ein flaches Universum mit kritischer Energiedichte hindeutet. Die beobachtete Materie mitsamt dunkler Materie macht jedoch nur ca. 30% der benötigten Energiedichte aus, so dass 70% von einer weiteren Energieform beigesteuert werden müssen, der Dunklen Energie.

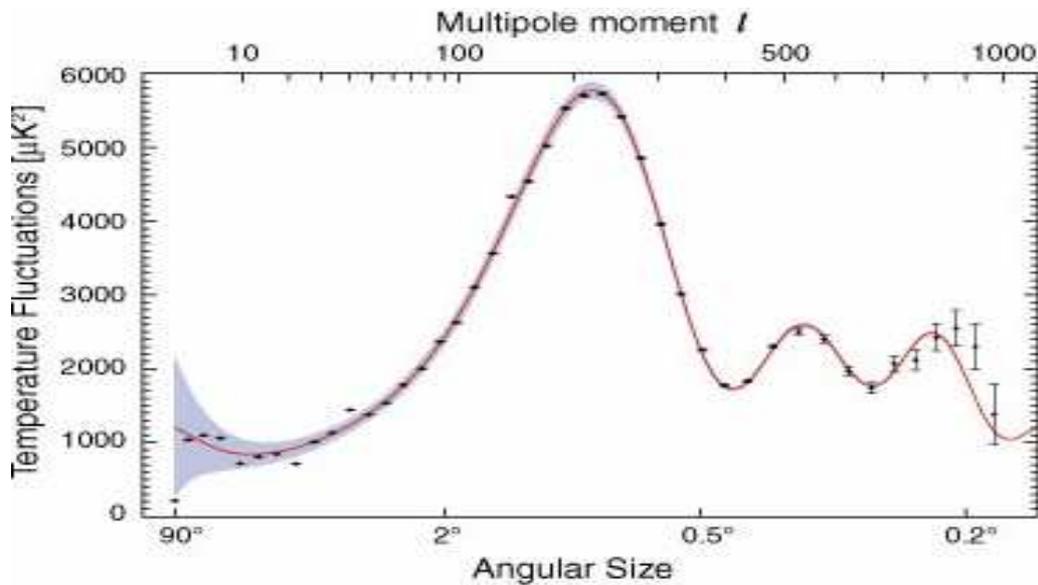


Abb.4: WMAP-Daten zur Anisotropie des CMB

2.3 Strukturbildung

Die heute beobachtete Struktur im Universum (Cluster, Superhaufen, Voids etc.) wird in Simulationen, die heute möglich sind, am Besten beschrieben durch so genannte LCDM-Modelle, welche von 70% Dunkler Energie (L wie Lambda = Kosmologische Konstante) und 30% Materie (insbesondere kalte dunkle Materie, CDM). Dies ist ein weiterer Anhaltspunkt, dass ein solches Modell für unser Universum momentan allen Anforderungen gerecht wird. Für weitere Details empfehle ich den Vortrag zur Strukturbildung desselben Seminars.

Vereint man die Daten, die man aus den Messungen von Supernovae, CMB und Strukturbildung erhält, so kann man ein Diagramm wie in Abb.5 erhalten. Jede Messung grenzt das Verhältnis von Materiedichte und Vakuumenergiedichte ein, zusammen kann man die Anteile schon recht präzise ablesen. Der gelbe Kreis zeigt, welche Beschränkung man von einem zukünftigen Experiment, der SNAP-Sonde zur Vermessung weiterer Supernovae erwartet.

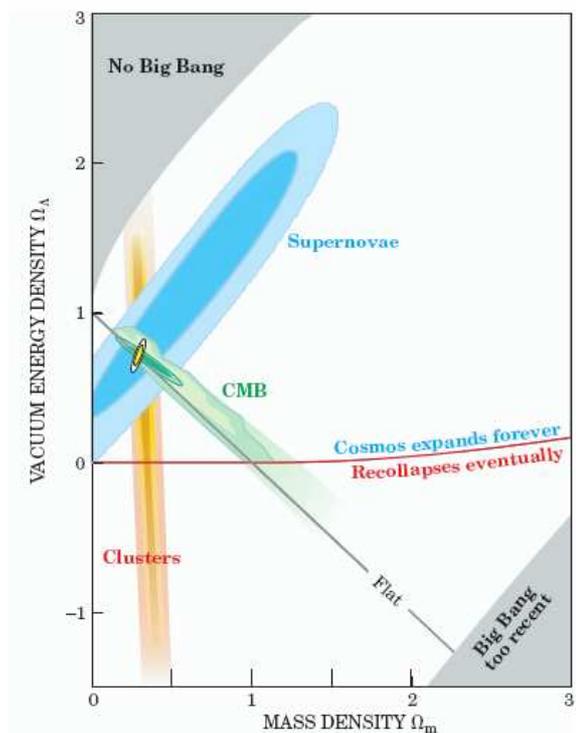


Abb.5: Experimentelle Grenzen der Energiedichten

3. Allgemeine Eigenschaften von Dunkler Energie

Aus den bisherigen Resultaten haben wir bereits einige Eigenschaften der Dunklen Energie abgeleitet, sie muss einen negativen Druck haben, um die beschleunigte Expansion zu bewirken und sollte gleichförmig verteilt sein. Weiterhin beträgt ihr Anteil an der kritischen Energiedichte ungefähr 70%. Charakterisiert wird die Dunkle Energie durch ihren Zustandsparameter

$w = \frac{p}{\rho}$, der das Verhältnis von Druck und Energiedichte beschreibt.

Dieser Parameter ist für auch für die anderen Inhalte des Universums definiert, für Materie (nichtrelativistisch) ist sein Wert Null, für Strahlung $\frac{1}{3}$.

Da wir für die dunkle Energie einen negativen Druck annehmen, erhalten wir bei einer positiven Energiedichte einen negativen Wert für w .

Dieser Wert lässt sich durch eine einfache Rechnung abschätzen, dazu bedient man sich des sog. Verzögerungsparameters, den man aus einer Umstellung der Friedmann-Gleichung erhält:

$$q = -\frac{\ddot{a}}{aH^2} = \sum_i \frac{4\pi G\rho_i}{3H^2}(1+3w_i) = \frac{1+3w_X\Omega_X}{2}$$

Mit $\Omega_i = \frac{8\pi G\rho_i}{3H^2}$ sowie der Annahme eines flachen Universums $\sum_i \Omega_i = 1$

Dabei steht X für die Dunkle Energie.

Wir wissen bereits, dass $\Omega_X \approx \frac{2}{3}$ ist, dies können wir in die Gleichung für q einsetzen und erhalten eine Grenze aus der Bedingung, dass q für ein beschleunigtes Universum negativ sein muss.

$$\Rightarrow w_X < -\frac{1}{2}$$

Dies ist natürlich nur eine grobe Abschätzung, aktuelle Daten (WMAP) grenzen w genauer ein auf $-1,06 < w < -0,90$.

Weiterhin benötigt man w für die Entwicklung der Energiedichte mit dem Skalenfaktor a :

$$\rho \propto a^{-3(1+w)}$$

Dementsprechend erhält man für Materie eine Proportionalität zu a^{-3} , für Strahlung zu a^{-4} . Wie wir gesehen haben, liegt w für Dunkle Energie um -1. Für $w = -1$ wäre die rechte Seite konstant, und die Energiedichte würde sich nicht mit dem Skalenfaktor verändern. Dies wäre der Fall einer echten Kosmologischen Konstanten, andernfalls würde sich die Energiedichte der Dunklen Energie auch verändern.

4. Kandidaten für Dunkle Energie

4.1 Kosmologische Konstante / Vakuumenergie

Die Kosmologische Konstante Λ wurde von Albert Einstein in seine Gleichungen eingeführt, zunächst um ein statisches Universum zu gewährleisten. Später wurde diese verworfen, als die Expansion des Universums entdeckt wurde. Mit der Entdeckung der beschleunigten Expansion hat sie jedoch eine Renaissance erfahren, da eine positive Kosmologische Konstante gerade für eine beschleunigte Expansion sorgt.

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} \quad \text{Einstein-Gl. mit Kosm. Konstante}$$

Wie wir bereits gesehen haben, muss der Zustandsparameter für eine Kosmologische Konstante gleich -1 sein. Die KK beschreibt also eine Energiedichte, welche überall im Universum homogen verteilt ist und sich auch mit der Ausdehnung des Universums nicht ändert. Daher ist es plausibel, diese Energieform als Vakuumenergie anzunehmen. Eine Vakuumenergie ungleich Null macht auch durchaus Sinn, da auch im Vakuum für sehr kurze Zeit Teilchen entstehen können, man spricht von Vakuumfluktuationen. Diese sind nachgewiesen und können zu einer Vakuumenergie beitragen. Beim Versuch diesen Beitrag zu berechnen (mit Cut-off bei der Planck-Skala) erhält man jedoch einen Wert, welcher um 120 Größenordnungen über dem liegt, was man nach den experimentelle Daten für die Expansion erwarten würde. Für diese enorme Diskrepanz zwischen Berechnung und Beobachtung hat man bisher keine Erklärung gefunden, lediglich die Größenordnung der Abweichung kann durch einen anderen Cut-Off in der Berechnung (z.B. bei der QCD-Skala) abgemildert werden. Es scheint also nötig zu sein, dass der enorme berechnete Wert der Vakuumenergie durch einen unbekanntem Prozess oder eine Symmetrie genau auf den beobachteten Wert zurechtgestutzt wird, was ohne eine Erklärung willkürlich erscheint. Daher gibt einige Theorien, die von einem Prozess ausgehen, der die Vakuumenergie genau Null werden lässt. Dadurch wäre allerdings eine neue Erklärung für die Dunkle Energie nötig.

Eine weitere Eigenschaft der Kosmologischen Konstanten, die einigen unangenehm erscheint, betrifft den zeitlichen Aspekt. Mit rapide abnehmenden Energiedichten von Strahlung und Materie, aber konstanter Vakuumenergiedichte, verändert sich der Anteil der Vakuumenergie an der Gesamtenergiedichte laufend. Dies führt dazu, dass nach einer Phase durch Gravitation gebremster Expansion die Vakuumenergiedichte erst vor kosmologisch relativ kurzer Zeit (ca. 5 Mrd. Jahren) begonnen hat, beschleunigt zu expandieren. Im Moment gehen wir von 70% Vakuumenergie und 30% Materie aus, d.h. die beiden Komponenten sind etwa vergleichbar. Es erscheint also nach kosmologischen Maßstäben recht zufällig, dass wir gerade zu einer Zeit leben, in der die Anteile so ähnlich sind. Natürlich kann man anthropisch argumentieren, dass sich bei einer anderen Entwicklung, mit deutlich mehr oder weniger Vakuumenergie, unser Leben nicht hätte entwickeln können. Dennoch macht diese Zufälligkeit weiterhin Kopfzerbrechen. Nichtsdestotrotz bleibt die Vakuumenergie der beste Kandidat für die dunkle Energie und wird weithin akzeptiert. Sollte hinter der Dunklen Energie wirklich die Vakuumenergie stecken, erwarten wir die zeitliche Entwicklung aus Abb.6, unser Universum würde ewig weiter beschleunigt expandieren und schließlich einfach auskühlen.

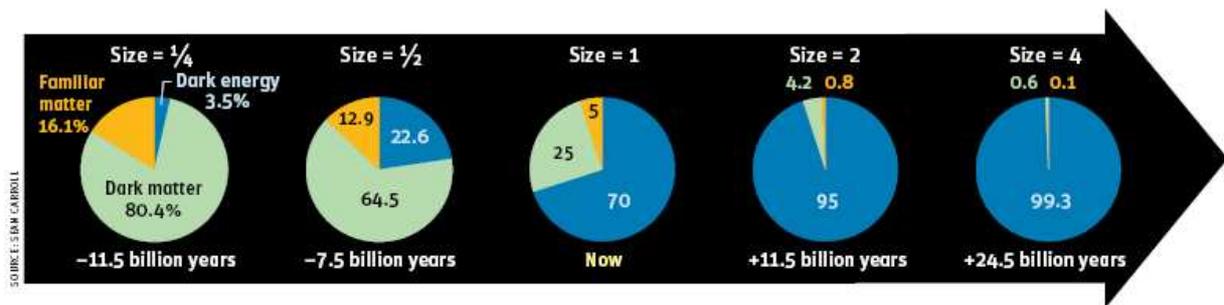


Abb.6: Zeitliche Entwicklung der Energieanteile im Falle einer Kosmologischen Konstanten

4.2 Quintessenz

Einen anderen Kandidaten für Dunkle Energie erhält man, wenn man eine nicht konstante Zustandsgleichung annimmt, d.h. w ist im Allgemeinen größer als -1 . Wie wir gesehen haben, führt dies zu einer zeitlich veränderlichen Energiedichte. Der meistgenutzte Ansatz für ein solches Szenario ist ein skalares Feld, das sog. Quintessenz-Feld mit einer Lagrange-Dichte

$$L = \frac{1}{2} \dot{\phi}^2 - V(\phi)$$

Sowie Energiedichte und Druck $\rho = \frac{1}{2} \dot{\phi}^2 + V(\phi)$ bzw. $p = \frac{1}{2} \dot{\phi}^2 - V(\phi)$

Aus unserer abgeschätzten Bedingung $w < -\frac{1}{2}$ erhalten wir damit die Bedingung

$$\dot{\phi}^2 < \frac{2}{3} V(\phi)$$

Die Dunkle Energie wird also hier durch ein skalares Feld erklärt, welches sich zeitlich nur langsam entwickeln sollte. Für das Potenzial V gibt es praktisch beliebig viele Ansätze, die man natürlich so wählen muss, dass die Ergebnisse zu den heutigen Beobachtungen passen. Besonders interessant sind Theorien, die ein sog. Tracker-Verhalten aufweisen. Das bedeutet, das Quintessenz-Feld verhält sich in seiner zeitlichen Entwicklung zunächst wie die jeweils dominierende Energiekomponente, d.h. zunächst wie Strahlung, dann wie Materie, bevor es zu einem bestimmten Zeitpunkt beginnt selbst dominant zu werden (s. Abb.7). Dies führt dazu, dass die Ähnlichkeit der Energieanteile heute erklärbar wird, jedoch müssen die Potenziale genau so angepasst werden, damit das Verhalten des Feldes sich im richtigen Moment ändert. Die Willkür ist also immer noch in der Wahl des Potenzials wiederzufinden.

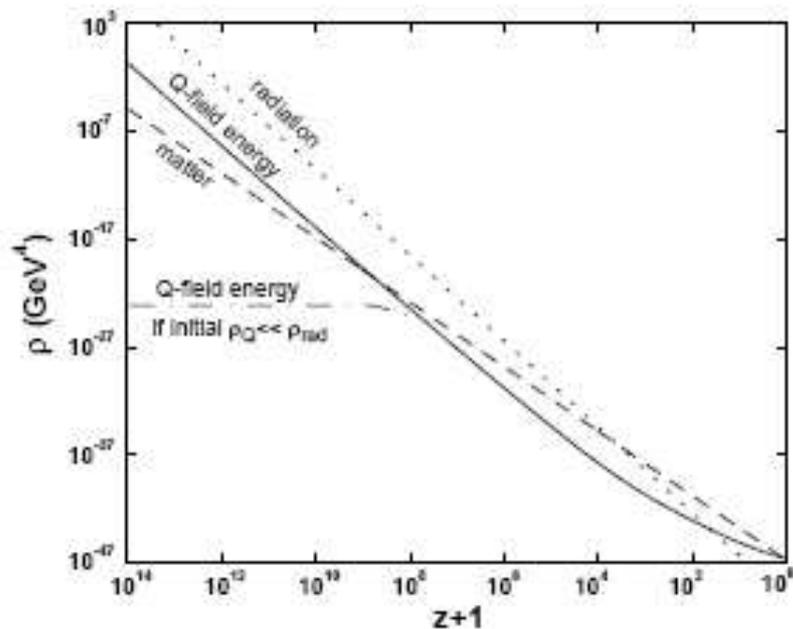


Abb.7: Tracker-Verhalten eines Quintessenz-Feldes

4.3 Phantomenergie

Ein weiterer Kandidat mit einer nicht konstanten Zustandsgleichung ist die sog. Phantomenergie. Dabei geht man davon aus, dass $w < -1$ ist. Die Phantomenergie ist ein recht exotischer Kandidat für Dunkle Energie, denn diese Bedingung führt zu einigen merkwürdigen Konsequenzen. Zunächst würde die Energiedichte der Dunklen Energie mit der Zeit zunehmen und immer größer werden, d.h. das Universum würde auch immer schneller expandieren. Schließlich käme es zu einem Szenario, welches als Big Rip bezeichnet wird. Da die kosmische Expansion über alle Maße zunimmt, werden alle materiellen Objekte auseinander gerissen, beginnend mit großen Strukturen bis hin zu Atomen und Kernen. Am Ende bleibt ein Universum mit einzelnen Elementarteilchen, die keinerlei Wechselwirkung mit einem anderen Teilchen ausüben können. Gerade diese Konsequenz ist ein Hauptgrund, weshalb die Phantomenergie nicht viele Befürworter hat. Einige führen jedoch an, dass durch die auf diese Weise begrenzte Lebensdauer des Universums, wie wir es kennen, das Problem der zeitlichen Zufälligkeit entschärft werden könnte, da ein solches Universum einen erheblichen Teil seiner Existenz in einem Zustand befände, wie wir ihn beobachten.

Auch weitere Kandidaten als die hier vorgestellten werden von kreativen Köpfen der Physik diskutiert. Darunter sind z.B. eine auf großen Maßstäben abgeänderte Gravitation, Modelle mit zusätzlichen Dimensionen etc. Der momentan noch recht spekulative Zustand der Dunklen Energie lädt auch weiterhin zu neuen exotischen Theorien ein.

5. Fazit

Wie wir gesehen haben, ist es heute nahezu unstrittig, dass es eine Form von Dunkler Energie geben muss, welche für eine beschleunigte kosmische Expansion sorgt. Der Favorit unter den Kandidaten ist trotz einiger ungeklärter Fragen die Vakuumenergie, hierfür spricht auch, dass man den Zustandsparameter w immer mehr um -1 eingrenzen kann. Zukünftige Experimente müssen diese Grenzen noch enger stecken, um mehr und mehr andere Modelle ausschließen zu können, oder aber eine zeitliche Entwicklung zu entdecken, die eine Kosmologische Konstante ausschließt. Beispiele für solche Experimente sind die SNAP-Sonde, welche ab 2013 eine große Zahl von Supernovae vermessen soll, sowie das Planck-Weltraumteleskop, welches die Anisotropie des CMB weitaus präziser als bisher messen kann.

Die Antwort auf die Dunkle Energie ist eines der zentralen Anliegen der heutigen Kosmologie und eine entscheidende Information über den Inhalt unseres lieb gewonnenen Universums.

Literaturangaben:

Sean Carroll: Dark Energy and the Preposterous Universe, Sky & Telescope, März 2005

Varun Sahni: Dark Matter and Dark Energy, April 2004

Saul Perlmutter: Supernovae, Dark Energy, and the Accelerating Universe,
Physics Today, April 2003

Michael Turner: Dark Energy and the New Cosmology

Marc Kamionkowski: Dark Matter and Dark Energy

J.S.Alcaniz: Dark Energy and Some Alternatives: a Brief Overview

Weitere Informationen und Graphiken von der Website von NASA/WMAP:
<http://map.gsfc.nasa.gov/>