

## Das derzeitige Standardmodell der Kosmologie

*Erhard Scholz, Wuppertal*

*14. 02. 2005*

Seit den 1960er Jahren hat sich in der Fachwelt und darüber hinaus das Bild eines expandierenden Kosmos durchgesetzt, der aus einem sogenannten *Big Bang* entstanden ist. Die Geometrie von Raum und Zeit wird dabei auf Grundlage der allgemeinen Relativitätstheorie so bestimmt, dass sie mit grundlegenden Annahmen über die Richtungsunabhängigkeit der Raumstruktur ("Isotropie") und den bekannten empirischen Eigenschaften der Astronomie und Astrophysik (kosmologische Rotverschiebung, Mikrowellenhintergrund usw.) übereinstimmt. Mathematisch lässt sich das angenommene System aus kosmischen Raum- und Zeit-Bestimmungen durch 4 Zahlengrößen (Raum-Zeit Koordinaten) angeben; es bildet, wie man sagt, eine (semi-) *Riemannsche Mannigfaltigkeit*. Interessanterweise kann in den gängigen Raum-Zeit Modellen der Kosmologie ein *kosmischer Zeitparameter*  $t$  eingeführt werden. Zu jedem Wert von  $t$  gibt es eine rein räumliche Schicht  $R_t$  des Modells, eine Art instantanen Raumes, den man sich empirisch als durch Galaxien, Quasare, Sternhaufen, Sterne etc. markiert denken kann. Die dabei unterstellte kosmische "Gleichzeitigkeit" gilt nur für eine Klasse von Beobachtern, die der mittleren Bewegung der Galaxien folgen. Sie widerspricht daher nicht der Kritik der speziellen Relativitätstheorie an einer von räumlichen Bestimmungen losgelösten "absoluten" Zeit. Die gesamte kosmische Raumzeit lässt sich aus solchen Raumschichten aufgebaut denken. Die Schichten stehen in für das gewählte Modell typischen geometrischen Beziehungen zueinander.

Am einfachsten ist es anzunehmen, dass sich alle Raumschichten untereinander geometrisch gleichen und die ausgezeichneten Beobachter relativ zueinander ruhen. Aus naheliegenden Gründen spricht man hier von *statischen Modellen* der Kosmologie. Die nächst einfachere Hypothese wäre die, dass die Schichten durch gleichförmige Vergrößerung oder Verkleinerung auseinander hervorgehen (durch eine *Ähnlichkeitsabbildung* mit einem von  $t$  abhängigen Faktor  $a(t)$ ). Dann bewegen sich die ausgezeichneten Beobachter, wie im Mittel auch die Galaxien, aufeinander zu oder voneinander weg, je nachdem die Raumschichten kontrahieren oder expandieren. Die Annahme konstanter Raumschichten wählte Einstein in dem ersten von ihm vorgeschlagenen relativistischen Modell der Kosmologie. Er ging in diesem später nach ihm benannten *Einstein Universum* von Raumschichten aus, die alle die Geometrie einer dreidimensionalen "Sphäre" von konstantem Radius, d.h. der Oberfläche einer 4-dimensionalen Kugel, besitzen. Ein solches kosmologisches Modell könnte nach der allgemeinen Relativitätstheorie nur

Bestand haben, wenn es eine im Mittel überall gleiche Materieerfüllung besäße, das *kosmische Medium* also wie ein ideales Gas oder eine ideale Flüssigkeit eine “konstante Energie/Massedichte” hätte.

Darüberhinaus müssten die von den fernen Massen ausgeübten Gravitationskräfte durch nach innen wirkende Kräfte des kosmischen Mediums im Gleichgewicht gehalten werden. Die “kosmische Flüssigkeit” müsste also wie manche Trägerstrukturen der Baustatik auf Zug statt auf Druck belastet werden können, ohne auseinander zu fallen (oder zu kollabieren). Mathematisch drückt sich dies als eine *negative Druckspannung* aus. Einstein hielt dies für ausgeschlossen und versuchte, das Problem durch die Einführung eines hypothetischen “kosmologischen Terms” in seine Gravitationsgleichungen zu umgehen. Dies brachte jedoch andere Probleme mit sich, wie A. Eddington sofort anmerkte. Sein Zeitgenosse T. Levi-Civita sah dagegen eine solche Belastung des kosmischen Mediums auf Zug durchaus als real möglich an.

Im derzeit weithin akzeptierten *Standardbild* der Kosmologie geht man von einer Expansion der Raumschichten aus, die für sich genommen ziemlich genau die Geometrie eines euklidischen Raumes tragen (“fast flache” Raumschnitte). Geht man gedanklich im kosmischen Zeitparameter um etwa 14 Milliarden Jahre zurück, so schrumpft die “Welt” (genauer die Geometrie des Raum-Zeit-Modells) auf einen Punkt zusammen. In der zeitlichen Umgebung dieses Punktes müssten ziemlich extreme physikalische Bedingungen geherrscht haben, falls es ihn gegeben haben sollte. Man spricht daher von einer “Anfangssingularität” des Standardmodells, oder anschaulicher vom “Urknall” oder “Big Bang”.

Einsteins kosmologischer Term tritt in veränderter Weise im Standardmodell wieder auf. Statt diesem nimmt die heutige Lehrmeinung jedoch an, dass das sogenannte *Quanten-Vakuum*, eine Art quantenphysikalisch verstandener “Aktivität der Leere”, einen negativen Druck hervorruft. Der wird nun sogar dynamisch gedeutet, als eine Ursache der Expansion der Raumschichten, und ist von zeitabhängiger Größe. Man arbeitet dabei mit einer Klasse von Modellen, die von zwei freien Parametern abhängen, der relativen Energiedichte von Materie und Strahlung im Kosmos, üblicherweise als  $\Omega_m$  bezeichnet, und dem Anteil der Energiedichte des “Vakuums”  $\Omega_\Lambda$  (der Index  $m$  deutet auf Materie hin, die Bezeichnung  $\Lambda$  wurde ursprünglich von Einstein für seinen “kosmologischen Term” eingeführt und wurde in den geänderten Kontext übertragen). Bei beiden handelt es sich um relative Größen, angegeben durch unbenannte Zahlen.

Bei dem Anteil  $\Omega_\Lambda$  spricht man auch von einer *dunklen Energie*, die die Raumschichten des Modells auseinandertreiben soll — bei den aktuellen Modellparametern sogar in einer *beschleunigten Expansion*, wie häufig betont wird. Das Attribut “dunkel” ist jedoch von unbeabsichtigt selbstironischer Doppeldeutigkeit. Zum einen ist das Quantenvakuum nicht direkt sichtbar, zum anderen ist die zeitliche Veränderung des Anteils der “Dunkelenergie” im Vergleich zur Materieerfüllung so eigenartig, dass hier eine Ungereimtheit

(Anomalie) des Modells vorliegt. Noch irritierender wird es beim Versuch, den Beitrag der “Dunkelenergie” aus den bekannten Quantenfeldtheorien zu berechnen. Er führt zu einem völlig bizarren Ergebnis; die Werte sind um den Faktor  $10^{120}$  zu groß.

Die vier wichtigsten für das Standardmodell der Kosmologie angeführten *empirischen* Argumente sind folgende.

- (i) Die Strahlung fern liegender kosmischer Quellen, Galaxien, Quasare usw., trifft bei uns, den Beobachtern, mit einer systematischen Vergrößerung der Wellenlänge ein. Das sichtbare Licht wird also auf seinem Weg zu uns ins Rötliche hin verschoben (*kosmologische Rotverschiebung*). Je weiter die Lichtquelle entfernt ist, desto größer ist die Verschiebung des Spektrums ins Rötliche. Im Anfangsbereich besteht eine lineare Beziehung, also eine Proportionalität zwischen Entfernung und Rotverschiebung, die üblicherweise mit dem Buchstaben  $z$  bezeichnet wird. Dies wurde von E. Hubble in den späten 1920er Jahren entdeckt und nachgemessen (*Hubble-Gesetz*). Eine mögliche Erklärung ist die Annahme, dass die Galaxien im Mittel auf Punkten expandierender Raumschichten liegen. Dann entfernen sie sich mit dem Fortschreiten des kosmischen Zeitparameters wechselseitig voneinander. Je weiter sie schon voneinander entfernt sind, desto schneller. In Analogie zur Abnahme der Tonhöhe der Sirene eines sich entfernenden Feuerwehrgewagens, dem sogenannten “Doppler-Effekt”, ergibt sich dann eine Rotverschiebung kosmischer Lichtquellen wie beobachtet.
- (ii) Geht man zu größeren Entfernungen, so ist die Beziehung zwischen Entfernung und Rotverschiebung nicht mehr linear (proportional). Es ist allerdings nur bedingt möglich, sichere Angaben über Entfernungen zu kosmischen Beobachtungsobjekten zu machen; denn bei größeren Entfernungen sind solche Angaben immer abhängig von der Theorie, in deren Rahmen man die Beobachtungsdaten auswertet. So ist es sehr hilfreich, dass die Astronomen und Astrophysiker eine Klasse von *Supernovae*, sehr hell leuchtende Sternbrennprozesse, gefunden haben, die aus inneren physikalischen Gründen eine nahezu konstante Leuchtstärke besitzen. Man bezeichnet die am besten fixierbaren Supernovae als von der “Klasse Ia”, abgekürzt SN Ia. Ende der 1990er Jahre wurden in zwei verschiedenen Projekten sehr genaue Messungen über die Abhängigkeit von beobachteter Größenklasse  $m$  (ein Maß der relativen Leuchtstärke beim Beobachter) und der zugehörigen Rotverschiebung  $z$  von Supernovae Ia durchgeführt. Da die relative Leuchtstärke von konstanten Strahlern im wesentlichen von ihrer Entfernung abhängt (wenn man einmal von Absorption absieht), geben diese Messungen eine sehr gute Möglichkeit, die freien Parameter eines kosmologischen Modells zu bestimmen, oder zumindest einzuschränken, und damit die

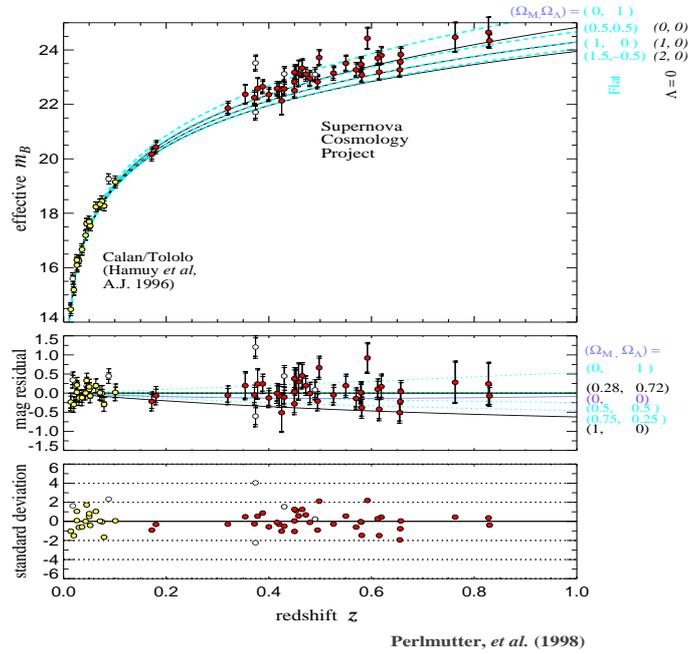


Abbildung 1: Relative Größenklassen  $m_B$  von Supernovae Ia in Abhängigkeit von der Rotverschiebung  $z$ , im Vergleich mit Voraussagen des Standardmodells bei unterschiedlichen Werten der Parameter  $\Omega_m$  und  $\Omega_\Lambda$ , nach S. Perlmutter et al.

Realitätsfähigkeit einer Modellklasse zu testen. Für die Standardkosmologie wurden so die verfügbaren freien Parameter mit relativ großer Genauigkeit bestimmt (Abb. 1). Auf Grundlage dieser Messungen und weiterer Indizien geht man zur Zeit für ein realistisches Modell im Rahmen des Standardansatzes von den Werten  $\Omega_m \approx 0,3$  und  $\Omega_\Lambda \approx 0,7$  aus.

- (iii) Die gesamte Himmelskugel ist von einer im Mikrowellenbereich liegenden (schwachen) Strahlung erfüllt. Diese entspricht sehr genau der Gleichgewichtsstrahlung eines sogenannten “schwarzen Körpers” der Temperatur  $2,73 \text{ K}$ , wie sie von M. Planck auf Grundlage seiner Quantenhypothese berechnet wurde (*Planck-Strahlung*), und ist weitgehend richtungsunabhängig (isotrop). Lediglich im Bereich etwas unter einem Winkelgrad machen sich winzige Abweichungen der Strahlungstemperatur bemerkbar. Dieser sogenannte *kosmische Mikrowellenhintergrund* (CMB) wurde in den 1960er Jahren entdeckt. Seine Eigenschaften, insbesondere die winzigen Richtungsschwankungen, sogenannte “Anisotropien”, wurden im Laufe der Jahre immer genauer vermessen, zur Zeit etwa in einem noch laufenden Satelliten-Projekt WMAP (Wilkin-

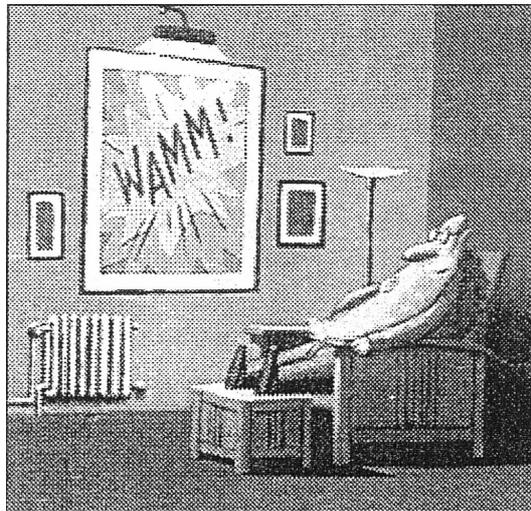


Abbildung 2: “Mit unglaublicher Geistesgegenwart hatte Gott ein Bild des Urknalls geschossen, das er noch immer ziemlich beeindruckend fand.” (Dankend entnommen aus B. Pfarr: *Eines Tages war Zeus das Blitzeschleudern leid*, Frankfurt/Main: 2001)

son Microwave Anisotropy Probe). Im Standardbild wird der kosmische Mikrowellenhintergrund als ins Rote verschobene Reststrahlung eines heißen Zustands des Kosmos, einige hunderttausend Jahre nach dem Big Bang, interpretiert. Die Anisotropien werden als Signale gedeutet, die Aufschluss über die “frühen Geschichte” der kosmischen Evolution geben sollen, ein bisschen wie bei einem Schnappschuss des Kosmos kurz nach dem Big Bang (Abbildung 2).

- (iv) Durch Beobachtungen des Spektrums des bei uns einfallenden Lichtes von Sternen und Galaxien haben die Astronomen und Astrophysiker Abschätzungen über die Verteilung der chemischen Elemente in der kosmischen Materie gewonnen. Dabei hat sich ein hoher Anteil an leichten Elementen des Periodensystems ergeben, insbesondere von Wasserstoff, Deuterium, Helium und Lithium. Durch kernphysikalische Prozesse im Inneren der Sterne entstehen in verschiedenen “Brennzyklen” schwere Elemente; man könnte also meinen, dass so viele leichte Elemente im Kosmos eigentlich gar nicht mehr vorhanden sein können. Gegenüber einer ersten, naiven Erwartung gibt es also zuviel davon. Man spricht von einer kosmischen *Abundanz der leichten Elemente*. In den späten 1940er Jahren stellten G. Gamow und andere die Hypothese auf, dass sich die Atomkerne in einer sehr frühen Phase der “kosmischen Evolution” überhaupt erst gebildet haben. Nach heutigen Annahmen müsste das etwa 2-3 Minuten nach dem Beginn der abso-

luten Zeitrechnung, dem “Big Bang”, stattgefunden haben. Bei dieser ursprünglichen Herausbildung der Atomkerne, vornehmer als “primordiale Nukleosynthese” bezeichnet, konnte man auf einen Überschuss der leichten Elemente schließen. Dagegen vertraten F. Hoyle und andere Physiker die Hypothese, dass die Elementverteilung durch Umbildungsprozesse im Kosmos, wie wir ihn sehen, zu verstehen seien. Sie konzentrierten sich zunächst auf das Studium der unterschiedlichen Brennzyklen in den Sternen. Mit steigendem Verständnis der Sternprozesse (“stellare Nukleosynthese”) erwies sich ihre Annahme für die höheren Elemente als erheblich fruchtbarer als Gamows. Lediglich für die Abundanz der leichten Elemente wird zur Zeit im Standardbild der Kosmologie noch immer eine verfeinerte Version der Gamowschen primordialen Nukleosynthese als gültig angesehen.

Allerdings ist warnend hinzuzufügen, dass die Annahme einer solchen ursprünglichen Atomkernsynthese auf eine ziemlich niedrige Obergrenze der zugehörigen Materiedichte führt (üblicherweise als “Baryondichte”  $\Omega_b$  bezeichnet,  $\Omega_b \approx 0,01$ ). Diese liegt weit unter der aus anderen Daten erschlossenen Materiedichte insgesamt ( $\Omega_m \approx 0,3$  — siehe oben). Im Standardmodell der Kosmologie wird daher die ad-hoc Hypothese eingeführt, dass diese Lücke von einer *gänzlich unbekannt*en, wie man auch sagt *exotischen*, Art “dunkler Materie” geschlossen wird.<sup>1</sup>

Durch die Entwicklung neuer Beobachtungstechniken (Erweiterung der astronomischen Signalfrequenzen unter anderem in den Radio, UV und Röntgenbereich hinein, Verfeinerung der Beobachtungen im sichtbaren Spektrum, Satellitenbeobachtungen etc.) und damit im Zusammenhang stehender neuer Beobachtungsobjekte (Quasare, Radio-, Röntgenquellen usw.) gibt es viele andere Beobachtungen, die von einem kosmologischen Modell erfasst werden müssen, damit es Anspruch auf realistische Geltung erheben kann.

Aus mathematischer Sicht erweist sich das Standardmodell als geeignet, die verschiedenen Datentypen der beobachtenden Kosmologie unter einen (theoretischen) Hut zu bringen. Allerdings ist eine gesunde Skepsis gegenüber dem häufig erhobenen “Realitätsanspruch” dieses Modells mittlerweile mehr als angebracht. Die über Jahrzehnte mit großer Begeisterung auch von theoretischen Elementarteilchenphysikern betriebene Suche nach Kandidaten für die (nicht-baryonische) “dunkle Materie” ist erfolglos geblieben. Nach sonst üblichen strikten Gültigkeitskriterien physikalischer Theorien wäre nun die *Hypothese der primordialen Nukleosynthese eigentlich als empirisch widerlegt* anzusehen. Diese naheliegende Schlussfolgerung wird aber nur von wenigen Physikern gezogen. Weiter sind die aus dem Ansatz des Standardmodells

---

<sup>1</sup>Ursprünglich war mit “dunkel” lediglich gemeint, dass es um einen Anteil der kosmischen Materie geht, der außerhalb der (leuchtenden) Sterne liegt. Erst die erwähnte Hypothese des Standardmodells fügte die unbeabsichtigt hintergründige Doppelbedeutung qualitativer Unerklärbarkeit hinzu.

folgenden dynamischen Eigenschaften der "Dunkelenergie" physikalisch unerklärt und vermutlich unerklärbar. Man darf daher daran Zweifel haben, dass sich diese und andere *Dunkelheiten* im Rahmen des Modells aufklären lassen.

Eine große Mehrheit der derzeit an der Kosmologie arbeitenden Wissenschaftler ist trotzdem weiterhin fest davon überzeugt, dass die jüngsten Ergebnisse zur Rotverschiebung von Supernovae, zur Anisotropie des Mikrowellenhintergrundes usw. das mit dem Standardmodell verbundene Weltbild einer beschleunigten Expansion bestätigen. Die Nachdenklicheren sehen in den genannten Schwierigkeiten Anomalien, die die bisherige Gewissheit des Bildes fraglich erscheinen lassen. Bisher hat jedoch nur eine Minderheit der wissenschaftlichen Community die Konsequenz gezogen, an alternativen Erklärungsansätzen zu arbeiten. Wir dürfen gespannt sein, ob daraus eine tragfähige Alternative hervorgeht und in welche Richtung die zukünftige Entwicklung geht.

## Literatur

- Arp, Halton; Bondi, Hermann; Narlikar, Jayant; Peratt, Anthony e.a.. 2004. "An open letter to the scientific community." *New Scientist* May. In [<http://cosmologystatement.org/> visited 02. 02. 2005].
- Börner, Gerhard. 2003. "Ein Universum voll dunkler Rätsel." *Spektrum der Wissenschaft* Dez.:28–35.
- Carroll, Sean. 2001. "The cosmological constant." *Living Reviews in Relativity* 4:1–77.
- Earman, John. 2001. "Lambda: the constant that refuses to die." *Archive for History of Exact Sciences* 55:189–220.
- Filk, Thomas; Giulini, Domenico. 2004. *Am Anfang war die Ewigkeit*. München: Beck.
- Hawking, Stephen. 1988. *Eine kurze Geschichte der Zeit*. Deutsche Übersetzung von: A Brief History of Time. Hamburg: Rowohlt.
- Kragh, Helge. 1996. *Cosmology and Controversy : The Historical Development of Two Theories of the Universe*. Princeton: University Press.