

Karl Lanius

## **Kosmologie heute – ein Beitrag zum Weltbild\***

Das grundlegendste und umfassendste Weltbild, d. h. das Bild vom Ursprung, der Natur und der Entwicklung des Weltalls – Kosmos oder Universums –, wird durch die Physik gegeben. Heute verstehen wir unter Kosmos das größte der Beobachtung zugängliche System, in dem die Gravitationswechselwirkung bestimmenden Einfluß besitzt.

Wenn wir das Universum als das nicht erweiterbare Größte, d. h. als einen Grenzbegriff verstehen, so stellt die Kosmologie eine im Laufe der Zeit dem jeweiligen Erkenntnisstand entsprechende Beschreibung eines einmaligen Systems dar.

Soweit die geschriebene Geschichte der Menschheit zurückreicht, haben wir Zeugnisse von Weltbildern. Die ersten uns schriftlich überlieferten Antworten sind die religiösen Mythen, die den Menschen ihrer Zeit ein dem damaligen Stand ihrer gesellschaftlichen Entwicklung adäquates Weltbild gaben. Wie wir heute wissen, waren dies zwar unvollkommene, aber ganzheitliche Antworten, die alle Menschen erreichten. Über zehntausende von Jahren war für unsere Vorfahren die Erde der Mittelpunkt des Universums. Mit der Entwicklung der Wissenschaft lernten wir, daß die Menschheit weder das Zentrum noch der Zweck des Universums ist. Das naturwissenschaftliche Weltbild seit Galilei, Newton und Einstein gestattete uns ein tieferes Eindringen in den Mikro- und Makrokosmos, aber es erreichte nur das Bewußtsein einer kleinen intellektuellen Elite. Eine Massenwirksamkeit erreicht das Weltbild des 20. Jahrhunderts nicht mehr.

In wenigen Wochen endet das 20. Jahrhundert. Gehen wir um hundert Jahre zurück. Astronomen und Physiker bezeichneten auch damals das Universum als ein gravitativ wechselwirkendes System. Aber ihre Beobachtungs- und Meßtechniken endeten an den Grenzen der Milchstraße. Die

\* Vortrag, gehalten vor der Klasse für Naturwissenschaften der Leibniz-Sozietät am 18. November 1999.

Physik wußte zu wenig über die Eigenschaften der Atomkerne und die Äquivalenz von Energie und Masse war unbekannt.

Lassen wir zwei vormalige Akademiemitglieder zu Wort kommen. 1904 schrieb Hugo von Seeliger, Direktor der Münchener Sternwarte an Hermann Vogel, Direktor des Astrophysikalischen Instituts in Potsdam zur Frage, ob Nebelflecke Teil der Milchstraße oder Welteninseln ähnlich der unseren seien: „...bisher ist keine Tatsache bemerkt worden, die dazu zwänge, in einigen der genannten Gebilde etwa Weltensysteme zu erblicken, die als unserem Sternsystem koordiniert angesehen werden müssen.“

Obwohl es abweichende Meinungen gab, und einige Astronomen in den am Himmel sichtbaren Spiralnebeln ferne Milchstraßensysteme vermuteten, stellte sich Vogel auf den Standpunkt des beobachtenden Astronomen. Er bemerkte: „Es läßt sich aber noch nicht sagen, ob diese Vermutung richtig ist, da über die Verteilung der Spiralnebel am Himmel aus Mangel an Material noch keine Untersuchungen haben angestellt werden können.“

Das Bild des Kosmos vor hundert Jahren beschreibt der amerikanische Astronom Simon Newcomb in seinem Buch „*The Stars. A Study of the Universe*“, London 1902. Am Ende des Buches faßt er seine Schlüsse u. a. in folgenden Sätzen zusammen:

„Soweit wir aus der Abzählung der Sterne in allen Richtungen und aus dem Anblick der Milchstraße schließen können, ist unser Sonnensystem dem Mittelpunkt des Universums nahe... Die Begrenzung unseres Universums ist wahrscheinlich etwas unbestimmt und unregelmäßig... Die Zeit, die das Licht braucht, um die entsprechende Entfernung zu durchheilen, ist größer als dreitausend Jahre.“ Und schließlich sagt er: „Die Gesamtzahl der Sterne ist nach Hunderten von Millionen zu zählen.“

Welches Bild vom Universum haben wir zum Ausgang des 20. Jahrhunderts? Unser Milchstraßensystem ist eine Spiralgalaxis mit vier Spiralarmen. In der nachfolgenden Tabelle sind einige ihrer Daten zusammengestellt.

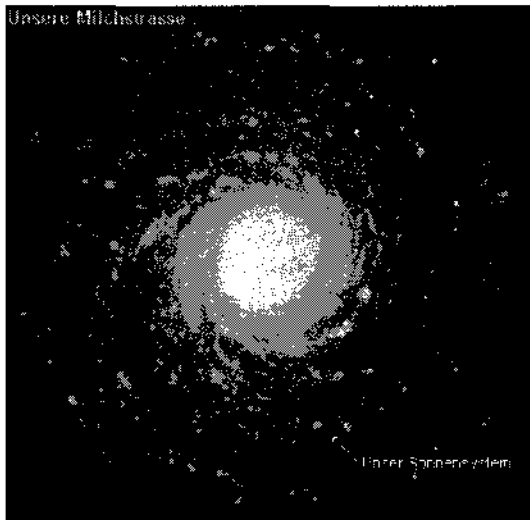
Durchmesser in der galaktischen Ebene	100 000 Lichtjahre
Dicke im Kernbereich	16 000 Lichtjahre
Dicke in den äußeren Regionen der Scheibe	3 000 Lichtjahre
Durchmesser des galaktischen Halos	160 000 Lichtjahre
Abstand der Sonne vom galaktischen Zentrum	28 000 Lichtjahre
von der galaktischen Ebene	45 Lichtjahre (nördlich)
Gesamtmasse	$1,4 \cdot 10^{12}$ Sonnenmassen
Kugelsternhaufen (geschätzte Zahl)	300
offene Sternhaufen (geschätzt)	15 000
Rotationsgeschwindigkeit am Ort der Sonne	220 km/s
Rotationsdauer am Ort der Sonne	$200 \cdot 10^6$ Jahre
Alter der Galaxis	ca. 1010 Jahre

*Tabelle. Einige wichtige Daten zum Milchstraßensystem*

Die Galaxis gehört zur lokalen Gruppe von Galaxien, zu der auch der Andromedanebel und die beiden Magellanschen Wolken zählen. Die lokale Gruppe, der annähernd 30 Galaxien angehören, hat eine Ausdehnung von einigen Millionen Lichtjahren. Sie liegt am Rande eines Galaxienhaufens, des Virgo-Haufens. Er umfaßt ca. 2000 Galaxien. Sein Zentrum befindet sich in einer Entfernung von rund 50 Millionen Lichtjahren.

Galaxienhaufen sind die größten durch Gravitation zusammengehaltenen Strukturen im Universum. Sie wiederum bilden Superhaufen. Der Virgo-Haufen und, neben zahlreichen anderen, auch unsere lokale Gruppe gehören zum Virgo-Superhaufen.

Superhaufen mit einer Ausdehnung von rund 100 Millionen Lichtjahren bilden langgestreckte netzartige Filaments, die gigantische Leerräume umschließen. Erst weit oberhalb einer Ausdehnung von 100 Millionen Lichtjahren wird die räumliche Verteilung der Galaxien im Universum, von dem wir mehr als 10 Milliarden Lichtjahre überblicken, nahezu gleichförmig.



*Abb. 1 Bild der  
Milchstraße*

Wie weit haben wir uns vom Mittelpunkt entfernt, in dem der *Homo sapiens sapiens* den weit überwiegenden Teil seiner Existenz zu leben glaubte? Vom Geozentrismus zum Heliozentrismus, von dort in einen der Spiralarme der Milchstraße, in der die Sonne als ein Stern neben 100 Milliarden anderen seit 4,6 Milliarden Jahren ihr Licht aussendet. Das Milchstraßensystem ist eine Spiralgalaxie unter 100 Milliarden anderen. Sie ist angesiedelt in einer der unzähligen lokalen Gruppen am Rande eines Galaxienhaufens. Weder im kosmischen Maßstab noch im irdischen, von einer Sonderstellung des Menschen ist nichts geblieben.

Alle vorstehend skizzierten Einsichten in die Struktur und Ausdehnung des Universums danken wir der Entwicklung neuer Instrumente und neuer Beobachtungs- und Meßtechniken in der Astronomie.

## Die Expansion des Universums

Die beiden wichtigsten Schritte zur Erschließung des Universums in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts sind mit den Namen der amerikanischen Astronomen Harlow Shapley und Edwin Hubble verbunden.

Shapley begann 1914 seine Arbeit am Mount-Wilson-Observatorium in

Kalifornien. Das Problem jener Jahre war die Fixierung eines geeigneten Maßstabs zur Vermessung der räumlichen Ausdehnung der Galaxis. Die Astronomen kannten veränderliche Sterne, die Cepheiden, benannt nach dem Stern Delta im Sternbild Cephus, deren Leuchtkraft eindeutig mit der Periode zusammenhängt.\* Die Helligkeit des Sterns Delta-Cephei ändert sich periodisch in einem 5,4tägigen Rhythmus. Durch Beobachtung der Helligkeitsänderung solcher Sterne als Funktion der Periode fand man einen linearen Zusammenhang zwischen Leuchtkraft und Periode: Je größer die Periode um so heller der Stern. Da ein eindeutiger Zusammenhang zwischen Periode und Leuchtkraft besteht, läßt sich aus der Periode die Leuchtkraft ermitteln und aus der scheinbaren Helligkeit des Sterns seine Entfernung. Zur Eichung des Verfahrens muß man jedoch wenigstens die Entfernung eines Delta-Cephei-Sterns kennen. Die Lösung dieses Problems gelang dem jungen Shapley. Damit war den Astronomen eine „Standardkerze“ zunächst zur Vermessung der Galaxis und bis in die Gegenwart zur Vermessung entfernterer Galaxien gegeben.

1921 wurde das 2,5m-Spiegelteleskop auf dem Mount Wilson in Betrieb genommen. In den Jahren 1923/24 fand Edwin Hubble in Spiralnebeln 36 Delta-Cephei-Sterne. Mit Hilfe der von Shapley geeichten Periode-Leuchtkraft-Beziehung bestimmte er ihre Entfernungen. Diese übertrafen die Ausdehnung der Galaxis um wenigstens eine Größenordnung. Damit war nach 170 Jahren Kants Weltinsel-Hypothese bewiesen.

Gemessen am Zeitraum der menschlichen Existenz, muten uns astronomische Erscheinungen stationär an. So bemerkt Aristoteles: „In der ganzen vergangenen Zeit hat sich, soweit die Erinnerung reicht, der oberste Himmel weder im Ganzen noch in irgendeinem seiner eigentümlichen Teile verändert.“\*\*

Auch die Jahrhunderte währende Entwicklung der Naturwissenschaften seit Galilei und Newton änderte nichts an der tiefen Überzeugung eines statischen Universums. Die im Laufe der Zeit entwickelten Modelle hatten eines gemeinsam: Es waren Modelle, die die Struktur eines stationären Universums beschrieben. Eine Evolution schlossen sie aus.

\* Die Leuchtkraft ist die sekundlich von der gesamten Oberfläche des Objekts abgestrahlte Energie. Ihre Bestimmung setzt die Kenntnis seiner Entfernung voraus. Was man unmittelbar mißt, ist stets die scheinbare Helligkeit.

\*\* Aristoteles, Vom Himmel, von der Seele, von der Dichtkunst. Zürich 1950.

1916 veröffentlichte Albert Einstein die allgemeine Relativitätstheorie, in der er die enge Verknüpfung der Gravitation mit der Struktur von Raum und Zeit deutlich machte. Da es nahelag, diese moderne Gravitationstheorie auf das Universum anzuwenden, untersuchte Einstein, ob die Bewegungsgleichungen seiner Theorie für diesen Fall stationäre Lösungen besitzen. Durchdrungen von der Überzeugung eines statischen Universums, und damit den konservativen Gedankengängen zu Beginn des 20. Jahrhunderts voll verhaftet, änderte Einstein seine Gleichungen durch Einfügen eines zusätzlichen Gliedes, der kosmologischen Konstante.

Zum Ausgang des 20. Jahrhunderts sind wir von der Idee eines sich entwickelnden Universums überzeugt. Wir wissen heute um die Evolution der Sterne, die vergangenen Generationen in ewigem Gleichmaß zu strahlen schienen. Wir können die Expansion des Universums mit den im Laufe der Jahrmilliarden sich wandelnden Materieformen beschreiben. Seit einigen Monaten verfügen wir über neue Beobachtungsdaten, die es wahrscheinlich erscheinen lassen, daß die Expansion des Kosmos sich im Laufe der Zeit beschleunigt und ewig anhält.

Es bedurfte einiger Jahrzehnte intensiven wissenschaftlichen Meinungsstreits bis sich die Überzeugung von der Evolution des Kosmos durchgesetzt hatte.

Edwin Hubble gelang nicht nur die sichere Identifizierung der Spiralnebel als Galaxien ähnlich dem Milchstraßensystem. Er ermittelte auch einen entscheidenden Zusammenhang zwischen der Galaxienbewegung und ihrer Entfernung, der die Evolution des Universums verständlich machte. 1929 veröffentlichte er eine Arbeit mit dem Titel „Eine Beziehung zwischen Entfernung und Radialgeschwindigkeit bei extragalaktischen Nebeln“. Der von ihm entdeckte einfache Zusammenhang zwischen der Fluchtgeschwindigkeit  $v$ , mit der sich Galaxien radial von uns fortbewegen, und ihrer Entfernung  $d$  lautet:

$$v = H \cdot d$$

Den Proportionalitätsfaktor bezeichnet man als Hubble-Parameter oder Hubble-Zahl. Er gibt an, um welchen Betrag die Fluchtgeschwindigkeit wächst, gemessen in Kilometer pro Sekunde [ $\text{km s}^{-1}$ ], bei einer Zunahme der Entfernung der beobachteten Galaxie um ein Megaparsec [Mpc], d. h. 3,26 Millionen Lichtjahre.

Als Hubble dieses einfache Gesetz formulierte, hatte er von nur 24 Galaxien geschätzte Entfernungen aus der Periode von Delta-Cephei-Sternen. Die Werte der Radialgeschwindigkeiten wurden aus der Rotverschiebung der Spektrallinien in den Spektren der Galaxien bestimmt.

Bereits 1888 hatte Hermann Vogel in Potsdam gezeigt, wie man aus den Sternenspektren auf ihren Bewegungsstand schließen kann. Er beobachtete eine Verschiebung der Linien in den Spektren, deren Ursache die Bewegung des emittierenden Sterns ist. Findet die Bewegung vom Beobachter weg statt, so ist die von ihm gemessene Wellenlänge  $\lambda_0$  größer als die Wellenlänge  $\lambda$ , die ein ruhendes Objekt emittieren würde. Das Verhältnis

$$\frac{\lambda_0 - \lambda}{\lambda}$$

bezeichnet man als Rotverschiebung. Bewegen sich Quelle und Beobachter aufeinander zu, findet eine Verschiebung hin zu kürzeren Wellenlängen statt.

Das Licht der Spiralnebel ist eine Überlagerung des Lichts der Milliarden eine Galaxie bildender Sterne. Es ist ein glücklicher Umstand für die Beobachtung, daß alle Sterntypen die Fraunhoferschen H- und K-Linien zeigen, und daß sie deshalb auch im integralen Licht einer Galaxie zu sehen sind.

Beim Vergleich der Positionen der dunklen Fraunhoferschen Linien in den Spektren der Galaxien mit den aus der Periode der Delta-Cephei-Veränderlichen ermittelten Entfernung fand Hubble einen linearen Zusammenhang zwischen der Rotverschiebung und der Entfernung der Galaxien

$$z = H \frac{d}{c}^*$$

Er deutete die Ursache der Rotverschiebung als Doppler-Effekt und erhielt den linearen Zusammenhang zwischen Fluchtgeschwindigkeit und Entfernung. Direkt beobachtbar ist jedoch nur der lineare Zusammenhang zwischen  $z$  und  $d$ .

Das eigentliche Problem bei der Messung von  $H$  ist nicht die Messung der Rotverschiebung, sondern die Entfernungsbestimmung von Galaxien. In Galaxien, deren stellarer Inhalt mit den zur Verfügung stehenden astro-

\*  $c$  bezeichnet die Vacuum-Lichtgeschwindigkeit

nomischen Geräten auflösbar ist, werden geeignete Indikatoren, wie die bereits erwähnten Standardkerzen, die Delta-Cephei-Sterne, aufgesucht und ihre Periodizitäten gemessen.

Die wechselvolle Geschichte der Entfernungsmessungen von Galaxien führte bis in die Mitte der neunziger Jahre zu folgenden Grenzen für die Hubble-Zahl:

$$H = 50 - 100 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$$

Erst dank der neuen, im Laufe der neunziger Jahre zum Einsatz gelangten Teleskope, wurde ein Qualitätssprung in der Messung der Hubble-Zahl erreicht. Als Mittelwert unterschiedlicher Messungen wird heute nachstehender Wert angegeben:  $H = 65 \pm 7 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ .\*

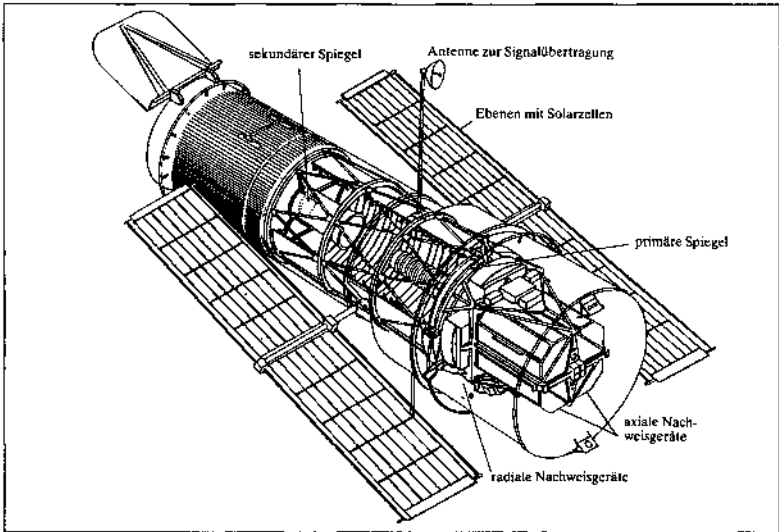


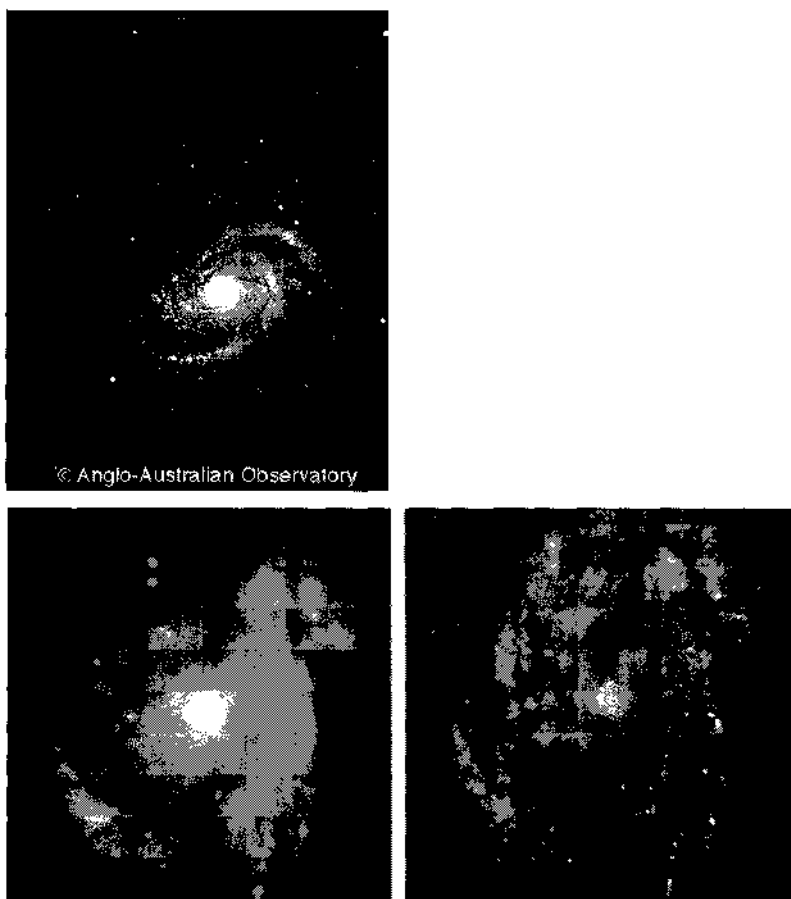
Abb. 2: Das Hubble Weltraum

Den entscheidenden Fortschritt danken wir dem Einsatz des Hubble-Weltraumteleskops, das 1990 auf eine Erdumlaufbahn von rund 600 Kilometern gebracht wurde. Seit seiner Reparatur im All 1993 liefert es hervorragende Beobachtungs- und Meßmöglichkeiten in einem Strahlungsbereich, der

\* Giovanelli, R. Nature 400 (1999), S. 111.



vom ultravioletten bis weit in den infraroten Bereich des Spektrums reicht. Durch den Wegfall der atmosphärischen Turbulenzen wurde es möglich, das Auflösungsvermögen um rund eine Größenordnung gegenüber einem entsprechenden Spiegelteleskop auf der Erde zu erhöhen.



*Abb. 3: Fotos der Galaxie M 100*

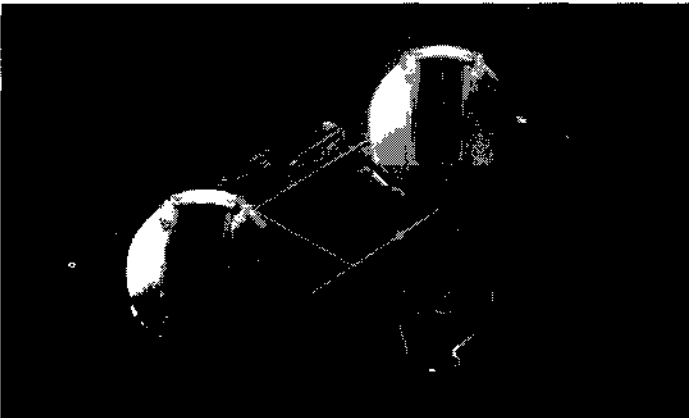
Betrachten wir das Beispiel der Spiralgalaxie M 100 (das hundertste Objekt im Messier-Katalog der nicht stellaren Objekte). Sie liegt im Virgo-Haufen in einer Entfernung von 56 Millionen Lichtjahren. Abb. 3 zeigt eine Aufnah-

me, die vom 4m-Spiegelteleskops des Englisch-Australischen Observatoriums in Siding Spring (Australien) erhalten wurde (oberes Bild). Die unmittelbar nach der Reparatur des Hubble-Teleskops gewonnenen Fotos des Kerns der Galaxie zeigen die unteren beiden Bilder. Der Qualitätssprung ist offensichtlich. Zahlreiche Sterne werden im Zentrum der Galaxie sichtbar.

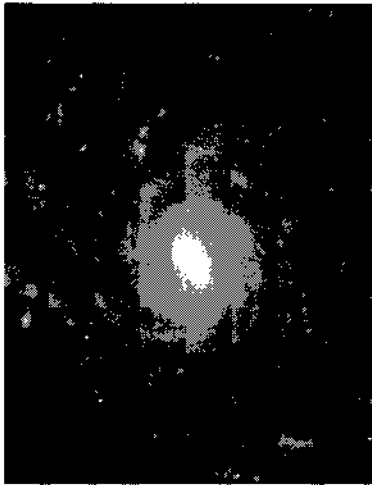
In der Galaxie M 100 und mehreren anderen Galaxien des Virgo-Haufens wurden zahlreiche Delta-Cephei-Sterne mit dem Hubble-Teleskop identifiziert und vermessen. Vor allem diese Messungen führten zu engeren Fehlergrenzen der Hubble-Zahl.

Betrachten wir ein weiteres Beispiel der neuen Generation erdgebundener Teleskope (siehe Abb. 4). In den neunziger Jahren wurden die beiden 10m-Spiegelteleskope in Hawaii in Betrieb genommen. Jeder Spiegel ist aus 36 hexagonalen Segmenten aufgebaut, von denen jedes einen Durchmesser von 1,8 Metern hat. Mittels Rechnersteuerung wird eine nahezu perfekte Reflektionsoberfläche erreicht.

Die Leistungsfähigkeit dieser neuen Keck-Teleskope wird anschaulich in Abb. 5 demonstriert. Sie zeigt eine Aufnahme der Spiralgalaxie NGC 1232, die 65 Millionen Lichtjahren von uns entfernt liegt. Als das Licht emittiert wurde, endete nach dem Einschlag eines gewaltigen Meteoriten auf der Yucatán-Halbinsel das Zeitalter der Dinosaurier und das der Säugetiere begann.



*Abb. 4: Die beiden Kuppeln der 10 Meter Spiegelteleskope auf dem Mauna Kea in Hawaii*



*Abb. 5: Foto der Spiralgalaxie NGC 1232*

Überlieferte Weltbilder dokumentieren den Glauben der Menschen, sich an einem ausgezeichneten, für sie geschaffenen Platz im Universum zu befinden. Über Jahrzehntausende sahen sie sich im Mittelpunkt des Kosmos. Heute wissen wir, daß sich unser Platz im Universum durch nichts gegenüber anderen Orten auszeichnet. Einstein faßte dieses kosmologische Prinzip im Jahre 1931 in die Worte: „Alle Plätze im Universum sind gleich“.

Das kosmologische Prinzip hat einige bemerkenswerte Konsequenzen. Ein irdischer Beobachter, der in beliebige Richtungen des Raumes blickt, nimmt im Umkreis unserer Galaxis, unseres lokalen Haufens bzw. Superhaufens deutlich Inhomogenitäten der Verteilung der sichtbaren Materieformen wahr. Wählt er jedoch einen räumlichen Maßstab, der über die Inhomogenitäten hinausreicht, zeigt sich in allen Richtungen ein ähnliches Bild. Der Raum ist isotrop. Wenn wir keinen ausgezeichneten Standort im Universum einnehmen, muß auch einem Beobachter, der sich an einem beliebigen anderen Standort befindet, der Raum in seiner weiteren Umgebung als isotrop erscheinen. In bestimmten Richtungen schneiden sich die von beiden Beobachtern wahrgenommenen Raumbereiche. Da jeder die gleichen Materieformen wahrnimmt und für beide Isotropie gilt, müssen auch in den sich nicht überschneidenden Raumbereichen gleiche Bedingungen herrschen. Der Raum ist homogen.

Isotropie in Verbindung mit dem kosmologischen Prinzip führt zur Homogenität des Universums. Die astronomischen Beobachtungen der zurückliegenden Jahre widersprechen dem nicht, wenn man den sichtbaren Teil des Universums in Zellen einer Ausdehnung von mehreren hundert Millionen Lichtjahren unterteilt.

Jeder Blick in die Tiefen des Weltalls ist ein Blick zurück in die Vergangenheit des Universums. Physiker und Astronomen gehen davon aus, daß die Naturgesetze in den unserer Beobachtung zugänglichen Zeiträumen keiner Änderung unterlagen.

Grundlage des Versuchs der modellhaften Beschreibung des Universums sind also die Hypothesen:

- In großen Maßstäben ist das Universum isotrop und homogen
- Die physikalischen Naturgesetze sind raum-zeitlich invariant.

Auf der Grundlage der Einsteinschen Gravitationstheorie wurden mathematisch-physikalische Modelle formuliert, die die raum-zeitliche Entwicklung der sich wandelnden Materieformen des Universums beschreiben. Aus einem Vergleich der astronomischen Beobachtungen mit den Modellvorstellungen können wir schließen, daß sich das Universum durch Expansion aus einer heißen und dichten Phase entwickelt hat.

## Die 3K-Hintergrundstrahlung

Die Vorstellung eines sich stetig abkühlenden expandierenden Universums wird durch die Beobachtung der 3K-Hintergrundstrahlung überzeugend gestützt.

Ist die sekundlich von der Flächeneinheit eines Körpers abgestrahlte Energie, seine Wärmestrahlung, gleich der vom Körper aufgenommenen Energie, befinden sich Körper und Umgebung im thermischen Gleichgewicht. Sie haben die gleiche Temperatur.

Für diesen Fall läßt sich die je Raumeinheit enthaltene Energie (bzw. die mittlere Photonenzahl) durch eine Formel beschreiben, in der nur die Temperatur  $T$  der Strahlung und ihre Wellenlänge  $\lambda$  als Veränderliche auftreten. Die Formulierung dieser Strahlungsformel gelang Max Planck im ersten Jahr des 20. Jahrhunderts. In ihr trat erstmals in der Geschichte der Physik das Plancksche Wirkungsquantum auf, eine den Mikrokosmos beherrschende fundamentale Konstante.

Bei einer Temperatur von 5 800 Kelvin, der Oberflächentemperatur der Sonne, liegt das Maximum der Strahlungsenergie bei einer Wellenlänge von  $5 \cdot 10^{-5}$  Zentimetern. Sinkt die Temperatur auf  $-270$  Grad Celsius = 3 Kelvin, liegt das Strahlungsmaximum gemäß der Planckschen Formel bei einer Wellenlänge von rund 2 Millimetern.

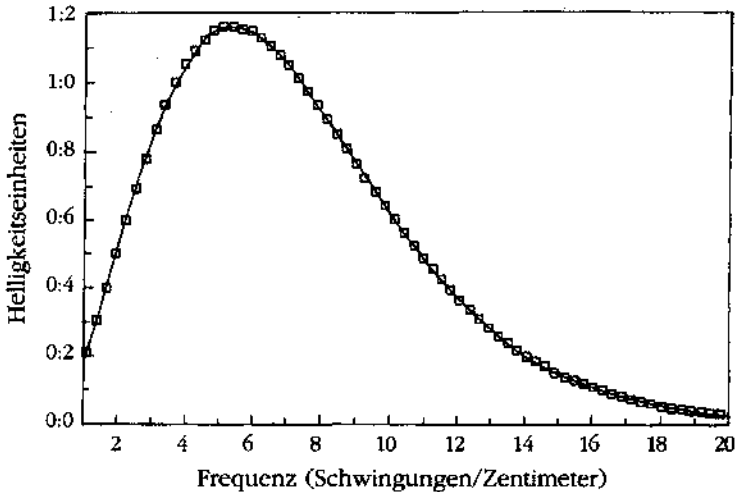


Abb. 6: Die ausgezogene Plancksche Strahlungskurve folgt mit beeindruckender Genauigkeit dem Verlauf der Meßpunkte.

1964 entdeckten Robert Wilson und Arnold Penzias in New Jersey (USA) mit einer Hornantenne eine von der Beobachtungsrichtung im Raum unabhängige Mikrowellenstrahlung bei 7,35 Zentimetern. Sie müßte einer Äquivalenztemperatur von 3,5 Kelvin entsprechen, wenn es sich um einen Meßpunkt auf der Planckschen Strahlungskurve handeln sollte.

Die meisten Messungen der Folgejahre wurden auf der langwelligeren Seite der Strahlungskurve durchgeführt, da die Atmosphäre bei Wellenlängen unterhalb von 2 Millimeter immer undurchlässiger wird. Eine neue Qualität der Messung kosmischer Hintergrundstrahlung wurde mit dem Start des Cosmic Background Explorer (COBE)-Satelliten im November 1989 erreicht. Bereits nach kurzer Betriebsdauer erhielt man Daten, die mit beeindruckender Genauigkeit der Planckschen Strahlungsformel folgten (siehe Abb. 6). Die Äquivalenztemperatur ergibt sich zu  $2,728 \pm 0,002$

Kelvin. Die Messungen bestätigen die Isotropie der Raumes mit Abweichungen von weniger als 0,03 Prozent.

Die Planckschen Strahlungsformel gilt unter Voraussetzung eines thermischen Gleichgewichts zwischen Strahlung und strahlendem Körper. Nur wenn zwischen den Photonen der Strahlung und den Körpern, z. B. den Atomen, sekundlich sehr viele Wechselwirkungen stattfinden, haben Körper und Strahlung die gleiche Temperatur.

Es ist offensichtlich, daß in Gegenwart und „sichtbarer“ Vergangenheit ein thermisches Gleichgewicht zwischen Körpern und Strahlung nicht besteht bzw. bestand. Selbst von kosmischen Quellen, die mehr als 10 Milliarden Lichtjahre entfernt sind, erreicht uns das Licht beinahe unbeeinflußt. Der Bereich des Universums, den die Photonen auf ihrem langen Weg von der Quelle zum Beobachter durchheilen, ist offensichtlich so durchlässig, daß sie weder gestreut noch absorbiert wurden.

Aus der Rotverschiebung schlossen wir auf die Expansion des Universums, einen Prozeß, der mit einer stetigen Reduzierung der Substanzdichte einherging. Also muß in der Vergangenheit das Universum dichter gewesen sein.

Die phänomologische Thermodynamik lehrt uns, daß mit einer größeren Dichte auch stets eine höhere Temperatur verbunden ist. Im frühen Universum gab es eine Periode, in der Dichte und Temperatur sehr große Werte hatten. Zwischen Strahlung und substantiellen Materieformen, wie den Elektronen, bestand ein thermisches Gleichgewicht.

In dieser Phase gab es weder Sterne noch Galaxien. Selbst Elektronen und Atomkerne konnten sich nicht zu stabilen Atomen zusammenfügen. Die den Raum homogen erfüllenden, relativ energetischen Photonen zerschlugen sich bildende Atome sofort wieder. Wegen der riesigen Zahl der sekundlich ablaufenden Stoßprozesse zwischen Photonen und Elektronen bestand ein thermischer Gleichgewichtszustand. Mit fortschreitender Expansion nahmen Dichte und Temperatur und folglich die mittlere Energie der Photonen und der Elektronen allmählich ab. Als die Temperatur schließlich rund 3000 Kelvin erreichte, hatten selbst die wenigen Photonen am kurzwelligen Ende der Planckschen Strahlungskurve nur noch Energien von einigen Elektronenvolt. Sie reichten nicht mehr aus, um Elektronen aus sich bildenden Wasserstoff- und Heliumatomen herauszuschlagen, d. h. sie zu ionisieren. Selbst zur Anregung war diese Photonenenergie nicht mehr

ausreichend. Zur Anregung eines Wasserstoffatoms aus dem Grundzustand sind mindestens 10 Elektronenvolt notwendig.

Unter der Wirkung der elektrischen Anziehung zwischen positiv geladenen Atomkernen und negativ geladenen Elektronen hatten sich in dieser Periode neutrale Atome, überwiegend Wasserstoff, gebildet. Daher waren keine freien Elektronen mehr vorhanden, an denen die Photonen gestreut werden konnten. Strahlung und Substanz hatten sich entkoppelt. Die Photonen konnten sich fortan wechselwirkungsfrei durch das expandierende Universum bewegen. So behielt ihre Intensitätsverteilung die Form der Planckschen Strahlungskurve.

Die Wirkung der Expansion des Universums auf die sich ausbreitenden elektromagnetischen Wellen besteht in einem linearen Anwachsen der Wellenlänge, in einer linearen Rotverschiebung. In der Planckschen Strahlungsformel sind Wellenlänge und Temperatur einander umgekehrt proportional.

$$\frac{\lambda_0}{\lambda} = \frac{T}{T_0}$$

wobei  $T \approx 3000$  Kelvin die Temperatur und  $\lambda$  die Wellenlänge zum Zeitpunkt der Entkopplung und  $T_0 = 2,73$  Kelvin bzw.  $\lambda_0$  ihre gegenwärtigen Werte sind. Im Verhältnis  $T/T_0 \approx 1000$  ändert sich auch die Rotverschiebung. Das früheste Relikt der Entwicklung des Universums, das Astrophysiker bisher entdeckt haben, ist demnach die kosmische Hintergrundstrahlung mit  $z \approx 1000$ .

Verbinden wir die Beobachtung der Galaxienflucht mit Homogenität und Isotropie des Universums, gesichert durch die Hintergrundstrahlung, werden wir zur „Urknall“-Hypothese geführt. Am Anfang der Evolution fand eine Art Explosion statt, die den gesamten Raum erfaßte. Bei der Explosion drängten nicht sich verändernde Materieformen in einen leeren Raum vor, sondern der Raum mit den sich zeitlich wandelnden Materieformen expandierte.

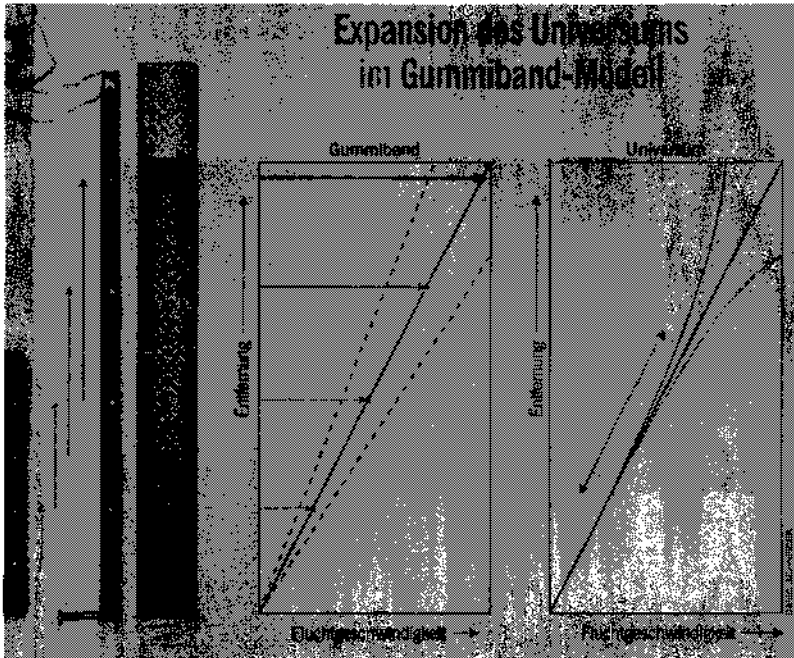


Abb. 7: Veranschaulichung der kosmischen Expansion durch ein Gummiband

Ein homogenes Universum, in dem alle Orte gleichwertig sind, muß in seiner Expansion dem Hubble-Gesetz folgen. Dabei ist zu beachten, daß diese Expansion nicht mehr mit einer Expansion der Galaxien selbst verbunden ist. Sie werden durch die Schwerkraft zusammengehalten. Gleiches gilt für unser Sonnensystem, aber auch für jedes durch elektromagnetische Wechselwirkung zusammengehaltene Atom.

Zur Beschreibung der Expansion wird ein Skalen- oder Meßfaktor  $R$  eingeführt. In einem homogenen und isotropen Universum hat er überall den gleichen, mit der Zeit wachsenden Wert. Entfernungen zwischen Galaxien wachsen proportional zu  $R$ .

Das Hubble-Gesetz besagt, daß das Licht entfernter Galaxien rot verschoben ist, und diese Rotverschiebung mit wachsendem Galaxienabstand linear wächst. Hubble interpretierte seine Beobachtungen als Dopplereffekt. So eingängig das damit verbundene Bild von uns wegirasender Gala-



xien auch ist, es ist falsch. Die Rotverschiebung hat ihre Ursache in der Expansion des Raumes selbst.

Licht werde mit einer Wellenlänge  $\lambda$  von einer weit entfernten Galaxie emittiert. Zum Zeitpunkt der Emission hatte das Universum den Meßfaktor  $R$ . Nachdem es unter Umständen Jahrmilliarden unterwegs war, wird es mit seiner rotverschobenen Wellenlänge  $\lambda_0$  von einem irdischen Beobachter empfangen. Zu diesem Zeitpunkt hat das Universum den Meßfaktor  $R_0$ . Die Wellenlängen nahmen während der Zeit, die das Licht von der Quelle bis zum Empfänger brauchte, im gleichen Verhältnis zu wie die Meßfaktoren.

$$\frac{\lambda_0}{\lambda} = \frac{R_0}{R}$$

Nun ist die Rotverschiebung durch

$$z = \frac{\lambda_0 - \lambda}{\lambda} = \frac{\lambda_0}{\lambda} - 1$$

definiert. Ersetzt man  $\lambda_0/\lambda$  durch  $z+1$ , erhält man:

Wenn also das Universum zwischen Emission und Absorption seine Ausdehnung verdoppelt,  $R_0/R$  also den Wert 2 hat, so zeigt das Licht aller Wellenlängen die Rotverschiebung  $z = 1$ .

Jede Messung der Rotverschiebung einer entfernten Galaxie gestattet uns unmittelbar festzustellen, um das Wievielfache das Universum zwischen Emission und Absorption expandierte. Um aus einer Messung der Rotverschiebung die Entfernung einer Galaxie zu bestimmen, müssen wir die zeitliche Variation von  $H$  bzw. die Wachstumsgeschwindigkeit des Meßfaktors kennen.\* Wir müssen daher theoretische Annahmen über die Geometrie des Universums machen, um aus den gemessenen Rotverschiebungen auf solche Größen wie Entfernungen, Fluchtgeschwindigkeiten oder das Alter des Universums zu schließen.

\* Bisher haben wir die Frage der zeitlichen Konstanz der Hubble-Zahl nicht berührt. Falls es in der Vergangenheit Perioden gab, in denen die Expansion schneller (langsamer) erfolgte, so war die Hubble-Zahl größer (kleiner) als heute. Sollte  $H$  einer zeitliche Veränderung unterliegen, müßten sich mit wachsender Entfernung der Galaxien Abweichungen im linearen Zusammenhang des Hubble-Gesetzes zeigen.

## Das kosmologische Standardmodell

Mit der allgemeinen Relativitätstheorie formulierte Einstein eine schlüssige, durch unterschiedliche Experimente in den Folgejahren bestätigte Theorie des Raumes, der Zeit und der Gravitation. Sie lehrt uns das Gravitationsfeld als eine Krümmung der vierdimensionalen Raum-Zeit zu begreifen. Unter einer Krümmung ist eine Abweichung der Geometrie von der dreidimensionalen Euklidischen zu verstehen.

Die Geometrie des Euklid ist die Geometrie unseres Anschauungsraumes, die Geometrie unserer täglichen Erfahrung. Dem flachen oder Euklidischen Raum entspricht im Zweidimensionalen die Ebene. Ein wohlbekannter Lehrsatz für die Ebene lautet: Die Summe der Innenwinkel eines Dreiecks beträgt  $180^\circ$ .

Um das Jahr 1830 veröffentlichten der russische Mathematiker Nikolai Lobaschewski und, unabhängig von ihm, der ungarische Mathematiker János Bólyai Untersuchungen über die Geometrie eines positiv gekrümmten Raumes. Im Zweidimensionalen entspricht ihm die Oberfläche einer Kugel. Bildet man auf der Kugeloberfläche ein Dreieck, ist die Summe der drei Innenwinkel größer als  $180^\circ$ . 1854 entwickelte der deutsche Mathematiker Bernhard Riemann eine weitere nichteuklidische Geometrie, die Geometrie eines Raumes mit negativer Krümmung. Als zweidimensionales Analogon läßt sich die Oberfläche eines einachsigen Hyperboloids betrachten. Auf ihr ist die Summe der Innenwinkel eines Dreiecks kleiner als  $180^\circ$ .



Abb. 8: Zweidimensionale Analoga zur Illustrierung gekrümmter Räume

Welche dieser Geometrien im Universum gelten, ist kein mathematisches, sondern ein physikalisches Problem. Einsteins allgemeine Relativitätstheorie ist eine Theorie der physikalischen Geometrie. Es ist eine Theorie der vierdimensionalen raum-zeitlichen Welt, in der Massenkonzentrationen eine Krümmung der Raum-Zeit hervorrufen. Die Geometrie des dreidimensionalen Raumes ist nicht mehr Euklidisch und die Zeit in verschiedenen Raumpunkten verlaufen unterschiedlich. Ein Beobachter nimmt die Bewegung von Objekten als Bewegung auf gekrümmten Bahnen im dreidimensionalen Raum mit variierenden Geschwindigkeiten wahr.

Unsere heutigen Vorstellungen über die Evolution des Universums, die durch die Beobachtungen von Galaxienflucht und 2,7 K-Hintergrundstrahlung gestützt werden, beruht auf der Annahme eines homogenen und isotropen Universums.

Für diesen Fall wurde erstmalig von dem sowjetischen Mathematiker und Meteorologen Aleksander Friedman eine Lösung der Einsteinschen Feldgleichungen angegeben. Nach einem Briefwechsel mit Einstein veröffentlichte Friedman in der „Zeitschrift für Physik“ in den Jahren 1922 und 1924 zwei Arbeiten mit den Titeln „Über die Krümmung des Raumes“ und „Über die Möglichkeiten einer Welt mit konstanter negativer Krümmung“. Auf der Grundlage der Einsteinschen Gravitationstheorie wurde erstmals ein mathematisch-physikalisches Modell formuliert. Es beschreibt die Dynamik des Universums mit den sie erfüllenden Materieformen. Wechselnde Materieformen befinden sich nach Friedman nicht in Ruhe, wie es noch Einstein bei seiner Anwendung der Feldgleichungen auf den Kosmos annahm.

Die Annahme eines homogenen und isotropen Universums führt zu einer außerordentlichen Vereinfachung der Feldgleichungen. Die Galaxien werden als Massenpunkte betrachtet. Sie sind in einem Koordinatensystem fixiert, das sich mit der Expansion bewegt. Die Änderungen ihres tatsächlichen gegenseitigen Abstands wird durch den universellen, allein von der Zeit abhängigen Meßfaktor  $R(t)$  beschrieben. Aus den erstmals von Friedman formulierten Feldgleichungen eines expandierenden Modellkosmos folgt seine zeitliche Variation.

Die Lösung der Friedman-Gleichungen für einen homogenen und isotropen Kosmos, in dem der Druck sich vernachlässigen läßt – eine Annahme, die für die Zeiten  $\approx 10^6$  Jahre nach dem Urknall zutrifft – läßt sich wie folgt angeben:

$$H^2 = \left( \frac{\dot{R}(t)}{R(t)} \right)^2 = \frac{8\pi G}{3} \rho(t) + \frac{\Lambda c^2}{3} - \frac{kc^2}{R^2(t)}$$

Dividieren wir beide Seiten der Gleichung durch  $H^2$  und bezeichnen die Gegenwart mit  $t_0$ , so wird:

$$1 = \frac{8\pi G}{3H_0^2} \rho_0(t_0) + \frac{\Lambda c^2}{3H_0^2} - \frac{kc^2}{R_0^2(t_0)H_0^2}$$

Dabei sind  $G$  die Gravitationskonstante,  $\rho_0(t_0)$  die Dichte, also die Masse (bzw. Energie) pro Raumeinheit,  $H_0(t_0)$  die Hubble-Zahl,  $\Lambda$  die von Einstein eingeführte kosmologische Konstante und  $k$  der Krümmungsparameter. Für den Ausdruck  $3H_0^2/8\pi G$  führt man die Abkürzung  $\rho_c$  ein. Man bezeichnet sie als kritische Dichte.

Führt man folgende häufig benutzte Abkürzungen ein:

$$\Omega_m = \frac{\rho_0(t_0)}{\rho_c}; \quad \Omega_\lambda = \frac{\Lambda c^2}{3H_0^2}; \quad \Omega_k = -\frac{kc^2}{R_0^2(t_0)H_0^2}$$

erhält man folgende Beziehung:

$$1 = \Omega_m + \Omega_\lambda + \Omega_k$$

Diese einfache Form der Gleichung enthält drei Parameter:

- die Hubble-Zahl  $H_0(t_0)$ , die die gegenwärtige Expansionsrate beschreibt
- den Dichteparameter  $\Omega_m = \frac{\rho_0(t_0)}{\rho_c}$ , der sowohl die Wirkung der Gravitation

als auch die Geometrie beschreibt.

- für  $\Omega_m=1$  d. h.  $\rho_0=\rho_c$  ist  $k=0$  (flacher Raum)
- für  $\Omega_m>1$  d. h.  $\rho_0>\rho_c$  ist  $k=+1$  (sphärischer Raum)
- für  $\Omega_m<1$  d. h.  $\rho_0<\rho_c$  ist  $k=-1$  (hyperbolischer Raum)

• und schließlich  $\Omega_\lambda$ . Wenn dem Vakuum eine Energie innewohnt, also die kosmologische Konstante von Null verschieden ist, muß auch  $\Omega_\lambda \neq 0$  sein.

Die drei Größen  $H_0$ ,  $\Omega_m$ , und  $\Omega_\lambda$  sind Modellparameter, die Größe, Alter,

Geometrie und Expansionsrate des Universums bestimmen. Diese Parameter sind jedoch nicht berechenbar, da wir die Anfangsbedingungen eines Universums für den Zeitpunkt  $t=0$ , den sogenannten Urknall, nicht angeben können. Wenn wir uns dem Zeitpunkt  $t=0$  nähern, strebt der Meßfaktor  $R(t)$  gegen Null, während Hubble-Zahl und Dichte unendlich groß werden. Der Modellkosmos beginnt mit einer unendlich großen Dichte und Temperatur, einer Singularität, die wir aus den physikalischen Beobachtungen auszuschließen haben.

## Die Nukleonensynthese

Ausgehend vom kosmologischen Prinzip, der Expansion des Universums und dem Nachweis der isotropen Hintergrundstrahlung gewann das Friedmann-Modell wachsende Bedeutung für unser Verständnis der Evolution des Universums. Das kosmologische Standardmodell eines homogenen, isotrop expandierenden Kosmos, der sich aus einer heißen und dichten Frühphase entwickelt hatte, führt auf einfache Zusammenhänge zwischen der Evolutionszeit und den damit verbundenen Werten von Dichte und Temperatur. So ergibt sich die Dichte  $\rho$ , gemessen in Gramm je Kubikzentimeter, als umgekehrt proportional zum Quadrat aus der Evolutionszeit  $t$ , gemessen in Sekunden:

$$\rho \approx \frac{10^6}{t^2}$$

Die Temperatur  $T$ , gemessen in Kelvin, ist umgekehrt proportional zur Quadratwurzel aus der in Sekunden gemessenen Evolutionszeit:

$$T \approx \frac{10^{10}}{\sqrt{t}}$$

Unser experimentell gesichertes Wissen über Elementarteilchen und den zwischen ihnen wirkenden Kräften reicht gegenwärtig bis zu Teilchenenergien von  $10^{11}$  Elektronenvolt. In Kelvin entspricht diese Energie einer Temperatur von  $10^{15}$  Grad. Im Friedmanschen Modellkosmos wurde diese Temperatur rund  $10^{-10}$  Sekunden nach dem Urknall erreicht.

Beim Versuch, die Evolution des Universums zu erkennen und modellhaft abzubilden, müssen wir auf unser Wissen über den Mikrokosmos zu-

rückgreifen. In den zurückliegenden Jahrzehnten entstand dabei eine sich stetig verstärkende Verknüpfung zwischen der Physik des Mikrokosmos und des Makrokosmos.

Der bisher größte Erfolg des Standardmodells ist die Vorhersage von Häufigkeiten der leichten Atomkerne im Kosmos wie Wasserstoff H, schwerer Wasserstoff oder Deuterium D und der Isotope des Heliums.

Etwa eine hunderstel Sekunde nach dem Urknall sollte nach dem Friedman-Modell das plasmaartige Teilchengemisch eine Temperatur von  $10^{11}$  Kelvin entsprechend einer Teilchenenergie von 10 Millionen Elektronenvolt haben. Das Plasma bestand aus Photonen, Leptonen, wie Elektronen ( $e^-$ ), Neutrinos ( $\nu_e$ ) und Antileptonen, wie Positronen ( $e^+$ ) und Antineutrinos ( $\bar{\nu}_e$ ).\* Dabei entfielen auf rund  $10^9$  Photonen nur ein Nukleon, d. h. ein Proton oder ein Neutron. Durch Prozesse wie beispielsweise



fand ein ständiger Austausch zwischen Protonen und Neutronen statt. Im thermischen Gleichgewicht entstanden und vergingen gleich viele Protonen und Neutronen. Eine Vereinigung beider, z. B. zu Deuteronen konnte nur außerordentlich kurzzeitig erfolgen. Jeder gebildete Atomkern wurde genauso schnell wieder zerstört, wie er entstanden war.

Nach einer zehntel Sekunde war die mittlere Energie der Teilchen auf rund 3 Millionen Elektronenvolt gesunken. Die qualitative Zusammensetzung des Universums blieb unverändert. Elektronen, Positronen, Neutrinos, Antineutrinos und Photonen waren jeweils in anähernd gleicher Konzentration vorhanden. Zwischen allen Teilchen herrschte thermisches Gleichgewicht. Da Neutronen jedoch eine etwas größere Ruhemasse besitzen als Protonen, wurde mit sinkender Temperatur die Umwandlung von Neutronen in Protonen wahrscheinlicher als der umgekehrte Prozeß. Entsprechend verschob sich das Verhältnis zwischen Protonen und Neutronen zugunsten ersterer.

Die Geschwindigkeit, mit der die beiden obigen Prozesse ablaufen,

\* Als Leptonen bezeichnet man alle Teilchen, die nur der schwachen Wechselwirkung unterliegen. Zu ihnen zählen die Elektronen, die Myonen, die  $\tau$ -Leptonen, die entsprechenden Neutrinos und die zugehörigen Antiteilchen.

hängt sehr empfindlich von der nach dem Standardmodell berechenbaren zeitlichen Änderung der Temperatur ab. Mit sinkender Temperatur verlangsamt sich drastisch der Ablauf der Reaktion. Unterschreitet die Reaktionsgeschwindigkeit einen Grenzwert, der durch die Expansionsgeschwindigkeit bestimmt wird, so verlieren die beiden Reaktionen effektiv ihre Wirksamkeit. Etwa eine Sekunde nach dem Urknall sind nur noch 24 Prozent aller Nukleonen Neutronen.

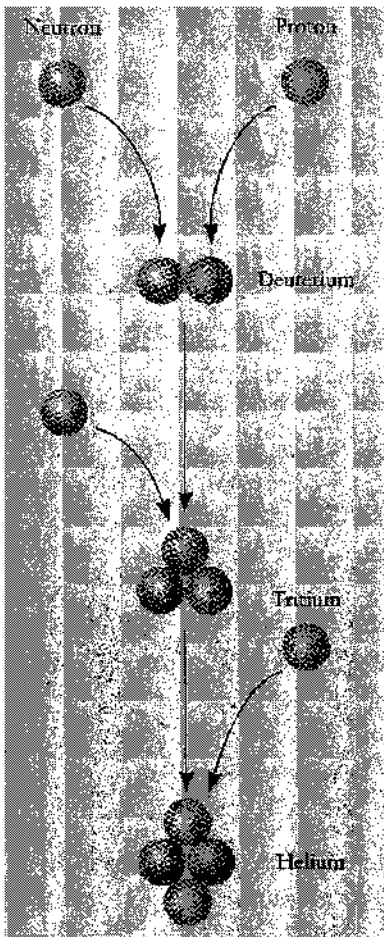
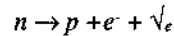


Abb. 9: Die Nukleonensynthese

Der Anteil der Neutronen sinkt jedoch weiter, da freie Neutronen mit einer Halbwertszeit von  $(887 \pm 2)$  Sekunden zerfallen:



Nach etwa vier Minuten waren nur noch 12 Prozent aller Nukleonen Neutronen. Zu dieser Zeit ist die Temperatur auf  $0,9 \cdot 10^9$  Kelvin gesunken. Damit war die mittlere Energie der Photonen so weit gefallen, daß sie nicht mehr ausreichte, um Deuteriumkerne wieder zu zerkleinern, die sich durch Verschmelzung von Neutronen und Protonen ständig bildeten.

Nach Ablauf einer Folge von Fusionsprozessen (siehe Abb. 9) sind alle freien Neutronen verschwunden.

Der Anteil der Neutronen zum Beginn der Synthese bestimmt den Anteil des Heliums. Die Vorhersage des Standardmodells für den Helium-Gewichtsanteil unter allen aus Nukleonen bestehenden Materieformen im Universum beträgt  $(24,0 \pm 0,5)$  Prozent.

Neben dem dominierenden Protonenanteil und dem im  $^4\text{He}$  gebundenen Nukleonen verbleibt auch ein vergleichsweise geringer Gewichtsanteil in Deuterium und  $^3\text{He}$ -Kernen (siehe Abb. 10). Hinzu kommt ein sehr kleiner Anteil an Li-Kernen.

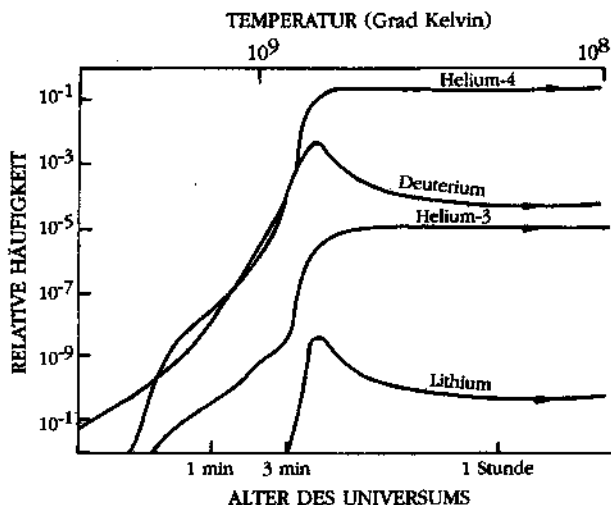


Abb. 10: Erzeugung der leichtesten Elemente aus Protonen und Neutronen in den ersten drei Minuten

Vergleicht man diese Vorhersagen des Standardmodells mit den im Universum gemessenen Gewichtsanteilen von Wasserstoff, Deuterium, den Heliumisotopen und Lithium, findet man eine erstaunlich gute Übereinstimmung.

## Die Inflation

Die korrekte Vorhersage der Häufigkeiten leichter Atomkerne im Kosmos war der größte Erfolg des Urknallmodells. Er stimulierte die Kosmologen, sich stärker mit den Erkenntnissen der Hochenergiephysik zu beschäftigen bzw. die theoretischen Hochenergiephysiker, das frühe Universum als ein



Testfeld ihrer Überlegungen zu betrachten. Auf ihm wurden Energien wirksam, die weit über alles hinausgingen, was jemals ein irdischer Teilchenbeschleuniger erreichen kann.

Bereits zum Ende der sechziger Jahre wurde in der Elementarteilchenphysik eine Theorie formuliert, die elektromagnetische und schwache Wechselwirkungen miteinander vereinte. Sie erfuhr im Jahre 1983 im CERN eine glänzende Bestätigung durch den experimentellen Nachweis zweier Teilchen, die die elektroschwache Theorie vorhergesagt hatte.\*

Seit den siebziger Jahren stand im Mittelpunkt des Interesses der theoretischen Hochenergiephysiker die Suche nach einer einheitlichen Theorie der elektroschwachen und der starken Wechselwirkungen. Die in Aussicht genommenen theoretischen Ansätze sagten eine annähernd gleiche Stärke der elektroschwachen und der starken Kraft voraus, bei Energien von  $10^{15}$  Gigaelektronenvolt, entsprechend einer Temperatur von  $10^{28}$  Kelvin. Diese Temperatur sollte  $10^{-35}$  Sekunden nach dem Urknall, dem scheinbaren Anfang im Universum geherrscht haben.

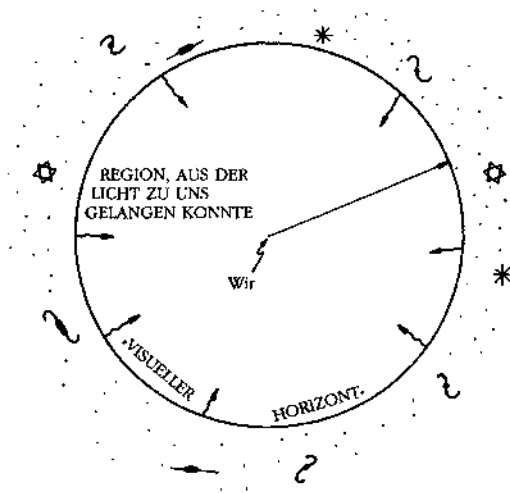
Die theoretischen Ansätze fordern, daß sich alle Teilchen einer einheitlichen Theorie der elektroschwachen und starken Kräfte ineinander umwandeln. Das setzt die Existenz zweier neuer Teilchen sehr großer Masse voraus. Eines dieser Teilchen, das instabile X-Teilchen sollte den Übergang zwischen Teilchen in Antiteilchen im Kosmos erklären. Magnetische Monopole sind eine andere Art schwerer Teilchen. Als stabile Teilchen sollten sie den Kosmos bis in die Gegenwart erfüllen. Trotz jahrelanger Suche konnten die Physiker keinen einzigen magnetischen Monopol entdecken.

Kein bisheriger Versuch, keine große einheitliche Theorie erscheint überzeugend und, was schwerer wiegt, keine der in Verbindung damit vorhergesagten experimentell überprüfbareren Konsequenzen, wie beispielsweise die Instabilität des Protons, konnte nachgewiesen werden.

Ein weiteres Problem, das die Kosmologen beschäftigte, war die Homogenität und Isotropie im Universum, dessen uns sichtbare Ausdehnung weit größer ist als die Distanz, die das Licht seit dem Urknall vor ca. 13 Milliarden Jahren zurücklegen konnte.

---

\* Die Eichbosonen  $W^\pm$  und  $Z^0$ , deren Massen bei 80- bzw. 90fachen der Protonenmasse liegen.



*Abb. 11: Das sichtbare Universum, aus dem seit Beginn der Expansion Licht zu uns gelangen konnte. Der Radius der Kugel beträgt heute ca. 13 Milliarden Lichtjahre*

Beide Probleme, die Allgegenwart der Monopole und die Regelmäßigkeit im Universum, fanden zum Anfang der achtziger Jahre eine Erklärung im Konzept des „inflationären Universums“. Es postuliert eine exponentielle Expansion des Universums im Zeitintervall zwischen  $10^{-35}$  und  $10^{-33}$  Sekunden nach dem Urknall. Eine 100e-fache Vergrößerung bedeutet eine  $e^{100} = 3 \cdot 10^{43}$ fache Vergrößerung des Universums. Seine heutige Größe sollte daher mindestens  $10^{16}$  Lichtjahre betragen. Der sichtbare Teil des Universums hat aber nur eine Ausdehnung von rund  $10^{10}$  Lichtjahren. Das hat zur Folge, daß der vergleichsweise kleine für uns sichtbare Teil des Universums in guter Näherung eine Euklidische Geometrie besitzt, d. h. der Raum flach ist.

Falls die stark beschleunigte Expansion stattgefunden hat, kann unser sichtbares Universum aus einer begrenzten Region hervorgegangen sein. Sie war am Anfang so klein, daß sie nur wenige Monopole enthielt, und das Licht sie durchqueren konnte. Es würde das Fehlen der Monopole und die Homogenität wie auch die Isotropie verständlich machen.

Das für zahlreiche Kosmologen attraktive Bild eines inflationären Uni-

versums bewirkt ein flaches sichtbares Universum. Seine Dichte sollte daher gleich der kritischen Dichte sein.

In den achtziger und neunziger Jahren war der Traum vieler Kosmologen ein Friedman-Universum mit  $\Omega_k=0$  und  $\Omega_m=1$ . Die meßbare Dichte der selbstleuchtenden Materie ist jedoch ca. hundertmal geringer als die kritische Dichte. Nach dem inflationären Modell muß also der weit überwiegender Teil der Dichte in Form kalter Dunkelmaterie vorhanden sein, d. h. als massive, überwiegend exotische Teilchen aus der Frühphase des Universums mit kleinen thermischen Geschwindigkeiten, die nur eine gravitative Wechselwirkung haben.

Die Suche der Hochenergiephysiker und Astronomen nach exotischen Teilchen war bisher erfolglos. Kein Experiment an den neuen Superbeschleunigern konnte Neues über die Standardtheorie hinausweisendes entdecken. Alle Messungen bestätigen mit wachsender Präzision die elektroschwache Theorie und die Theorie der starken Wechselwirkungen, die Quantenchromodynamik.

*Kosmologie in Perioden vor der Nukleonensynthese ist Spekulation. Hier ist es schwer, Fakten von Fiktion und Glaube von Phantasie zu trennen, da alle Schlußfolgerungen noch weit vom Gültigkeitsbereich einer experimentell überprüfbaren Physik entfernt sind.*

Es sind die Beobachtungen der letzten Jahre mit den neuen Hochleistungsteleskopen auf der Erde und im Raum, die uns zu einer kritischen Wertung des bisher Erreichten zwingen.

## Die Dunkelmaterie

Seit Jahrzehnten bemühen sich die Astronomen um die Messung der Massendichte  $\rho_0$  im Universum. Aus dem Verhältnis zur kritischen Dichte  $\rho_c$  erhält man Aufschluß über seine Geometrie. Der Zahlenwert des Dichteparameters  $\Omega_m$  bestimmt das Vorzeichen des Parameters  $k$ , der die Krümmung des Raumes charakterisiert.

Eine erste Näherung erhält man durch Zählung der Galaxien in einem genügend großen Raumbereich, durch Multiplikation der Anzahl mit den Massen und durch Division durch das Volumen. Nimmt man an, daß der überwiegende Teil der Masse in den selbstleuchtenden Materieformen einer

Galaxie vorhanden ist, läßt sich aus ihrer Leuchtkraft ihre Masse bestimmen. Alle Messungen ergaben letztlich, daß weniger als ein Prozent der kritischen Masse in selbstleuchtenden Materieformen vorhanden ist.

Eine weitere Methode der Massenbestimmung ist die Untersuchung des Rotationsverhaltens von Spiralgalaxien. Mit hochauflösenden Teleskopen und leistungsfähigen Spektrographen wurden die Rotationsgeschwindigkeiten zahlreicher Spiralgalaxien durch Messung des Dopplereffekts ermittelt. Alle Messungen zeigen im Zentrum der Galaxie einen steilen Anstieg der Rotationsgeschwindigkeit. Sie fällt zum Rand jedoch nicht ab, sondern verläuft annähernd horizontal weiter. Die Gültigkeit des Gravitationsgesetzes vorausgesetzt, folgt daraus ein lineares Anwachsen der Gesamtmasse einer Spiralgalaxie vom Zentrum zum sichtbaren Rand.

Aufschluß über den Anteil der Dunkelmaterie gibt uns eine andere Methode. Sie beruht auf der Messung der Relativbewegungen einzelner Galaxien bzw. Galaxiengruppen in Haufen. Diese Art der Massenbestimmung setzt ein dynamisches Gleichgewicht zwischen den betrachteten Komponenten im Haufen sowie eine räumliche Verteilung der Dunkelmaterie ähnlich der des jeweils betrachteten Galaxienkomplexes voraus.

*Abb. 12: Der Coma-Haufen aufgenommen im sichtbaren Licht (links) und im Röntgenbereich*

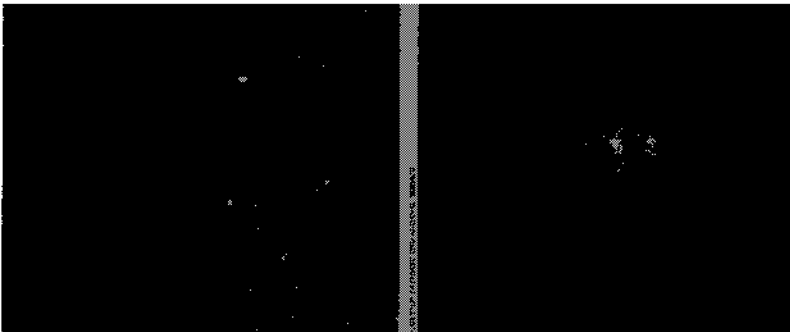


Abb. 12 zeigt eine Fotografie des Coma-Haufens, ein in rund 350 Millionen Lichtjahren von uns entfernter Haufen, der mehr als 1000 Galaxien umfaßt. Während er auf der Fotografie wie einer Ansammlung von Stern-

systemen erscheint, zeigt eine Aufnahme des gleichen Gebiets mit einem Röntgensatelliten eine gewaltige kugelförmige Gaswolke mit einem Durchmesser von rund fünf Millionen Lichtjahren, in die die Galaxien des Haufens eingebettet sind.

Quelle der Röntgenstrahlung ist ein dünnes ca. 25 Millionen Grad heißes Gas, das den Raum des Haufens erfüllt. Da die gemessene Temperatur ein Maß für die gravitative Anziehungskraft des Haufens ist, wenn sich dieser im Gleichgewichtszustand befindet, läßt sich daraus die Masse bestimmen.

Aus dem Rotationsverhalten von Spiralgalaxien und aus der Analyse von Galaxienhaufen ergaben sich einander ähnelnde Werte, die einem Dichteparameter von  $\Omega_m < 0,2$  entsprechen. Vergleicht man diesen Wert mit dem aus selbstleuchtenden Materieformen, überwiegt die Dunkelmaterie im Universum bei weitem.

Eine weitere Methode, die uns Aufschluß über die gesamte Masse gibt, die in Protonen, Neutronen und den aus ihnen gebildeten Atomkernen vorhanden ist, beruht auf einem Vergleich der vorhergesagten Häufigkeiten leichter Atomkerne mit den entsprechenden Beobachtungsdaten.

Wie wir sahen, hängen die genauen Häufigkeitsverhältnisse von Deuterium, Helium und Lithium von der anfänglichen Häufigkeit der Protonen und Neutronen ab, die man häufig als Nukleonen oder Baryonen bezeichnet.

Man bezieht diese auf die Häufigkeit der masselosen Photonen. Dieses als  $h$  bezeichnete Verhältnis bleibt während der Evolution des Universums im wesentlichen konstant. Die gegenwärtige Photonendichte hat aus der Messung der kosmischen Hintergrundstrahlung einen sehr genau bekannten Wert von 411 Photonen pro Kubikzentimeter.

Wäre es möglich, beispielsweise die Dichte der Deuteronen im frühen, noch nicht durch Sternbildung beeinflussten Kosmos zu messen, ließe sich mit ihren bekannten Häufigkeitsverhältnissen zu den anderen leichten Kernen das Verhältnis  $h$  und damit die Baryondichte im Universum ermitteln. Dabei ist es gleichgültig, in welchen Himmelskörpern sich die Baryonen gegenwärtig befinden.

Rund 10 Milliarden Lichtjahre von der Erde entfernt gibt es in vielen Raumbereichen noch ursprüngliche nicht leuchtende Gaswolken. Liegt, von uns aus gesehen, hinter einer solchen Gaswolke ein Quasar, d. h. eine sehr junge Galaxie, in deren Kerngebiet eine gewaltige Strahlung erzeugt

wird, so entsteht beim Durchlaufen des Quasarlichts durch die Gaswolke ein charakteristisches Muster von Absorptionslinien. Aus der Analyse der im Quasarspektrum dunkel erscheinenden Absorptionslinien läßt sich die kosmische Häufigkeit des Deuteriums ermitteln.

Mit dem 10 Meter Keck-Teleskop auf dem Mauna Kea Vulkan wurde erstmals Ende 1993 das hochaufgelöste Spektrum eines fernen Quasars aufgenommen. Aus solchen Messungen erhielt man für den Parameter des Baryon-Photon-Verhältnisses den Wert

$$\eta = (1,5 - 6,3) \cdot 10^{-10}$$

Daraus ergibt sich die gesamte Baryondichte im Universum zu  $\rho_B = (1,0 - 4,3) \cdot 10^{-31}$  Gramm pro Kubikzentimeter. Setzen wir diesen Wert ins Verhältnis zur kritischen Dichte  $\rho_c$ , ergibt sich der Baryonenanteil am Dichteparameter  $\Omega_m$  zu

$$0,012 < \Omega_B < 0,057$$

(Dabei wurde für die Hubble-Zahl der Wert  $H_0 = 65 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$  gewählt)

Wenn man überzeugt davon ist, daß das Universum flach, also  $\Omega_m = 1$  ist, kann man sicher die Suche nach der Dunkelmaterie zur Lebensaufgabe weiterer Wissenschaftlergenerationen gestalten. Man kann jedoch auch nach vielen Jahren intensiver Suche den Fakt akzeptieren, daß  $\rho_0 < \rho_c$  ist.

Alle bisherigen Untersuchungen zusammenfassend, ergibt sich für den Dichteparameter der Wert\*

$$\Omega_m = \rho_0 / \rho_c = 0,23 \pm 0,08.$$

## Die Expansionsbeschleunigung

Die US-Zeitschrift „Science“ erklärte im Dezember 1988 die Entdeckung der Expansionsbeschleunigung des Universums zum „Durchbruch des Jahres“.

Für nahegelegene Standardkerzen, beispielsweise Delta-Cephei-Sterne gilt in guter Näherung  $z = H_0 d$ , wenn die Rotverschiebung  $z \leq 0,1$  ist. Bei großen  $z$ -Werten sollten jedoch Nichtlinearitäten bemerkbar werden, da sich die Expansion des Universums im Verlauf der Jahrmilliarden verzögert oder beschleunigt haben kann. Hinzu kommt eine mögliche Verzerrung der

\* Lineweaver, C. H. Science 248 (1999), S. 1503.

Entfernungsskala durch eine Krümmung der Raum-Zeit.

Die neuen Beobachtungs- und Meßtechniken, die den Astronomen in den neunziger Jahren zur Verfügung stehen, ermöglichten erstmals die Bestimmung der Leuchtkraft an geeigneten Objekten, deren Rotverschiebung zwischen  $z=0,3$  und  $0,9$  liegt.

Dazu waren Standardkerzen erforderlich, die noch in Entfernungen von vier bis neun Milliarden Lichtjahren nachweisbar sind. Als geeignete Standardkerzen erwiesen sich Supernovae des Typs Ia.

Supernovae dieses Typs explodieren nur in Doppelsystemen: Ihr Vorgänger ist ein normaler Stern, ähnlich der Sonne, in dessen Inneren durch Kernfusion Wasserstoff in Helium, Kohlen- und Sauerstoff sowie Neon und andere Elemente umgewandelt wurde. Nach dem Ende dieser Folge von Fusionsprozessen schrumpft der ausgebrannte Kern des Sterns zu einer extrem heißen Kugel von Erdgröße mit einer millionenfachen höheren Dichte als gewöhnliche Materie. Der heiße Zentralkörper bläst die umgebende Gashülle fort und ein kompakter Weißer Zwerg entsteht. Die weit überwiegende Zahl aller Weißen Zwerge wird im Laufe der folgenden Jahrtausende kühler und lichtschwächer.

Befindet sich jedoch in der Nachbarschaft des Weißen Zwergs ein relativ massenarmer Riesenstern, kann von diesem Materie überströmen. Erreicht die Masse des Weißen Zwergs einen kritischen Wert von 1,4 Sonnenmassen, explodiert der Stern, eine Supernova des Typs Ia bildet sich, die letztlich in einem Neutronenstern endet.

Die Leuchtkraft der thermonuklearen Explosion wächst in den ersten drei Wochen, um nach Überschreiten eines Maximums in den folgenden Monaten exponentiell zu fallen. Für kurze Zeit strahlt die Supernova heller als eine Galaxie.

Der Theorie zufolge ist die freigesetzte Energie in allen Typ Ia-Supernovae nahezu gleich, da die Explosion stets bei der kritischen Masse einsetzt. Sie sollten annähernd die gleiche Lichtkurve zeigen (siehe Abb. 13).

Genau Vermessungen benachbarter Ia-Supernovae in den zurückliegenden zehn Jahren erlaubten die Bestimmung der Leuchtkraft bis auf 12 Prozent genau. Damit standen den Astronomen zuverlässige kosmologische Standardkerzen über sehr große Distanzen zur Verfügung. 1997 und 1998 suchten zwei Forschungsgruppen nach Ia-Supernovae mit Rotverschiebungen zwischen  $z=0,3$  und  $0,9$ . Das „high-z-team“, das Brian P.

Schmidt vom australischen Siding Spring Observatory gründete, und das „Supernova Cosmology Project“ unter der Leitung von Saul Perlmutter vom Lawrence Berkeley National Laboratory in Kalifornien. Die beiden unabhängig voneinander arbeitenden Gruppen beobachteten rund 50 weit entfernte Kernexplosionen des gesuchten Typs. Übereinstimmend war der überraschende Befund: Die Helligkeit der Ia-Supernovae lag im Mittel um 25 Prozent unter den erwarteten Werten. Ein Meßresultat, das das kosmologische Standardmodell in Frage stellt.

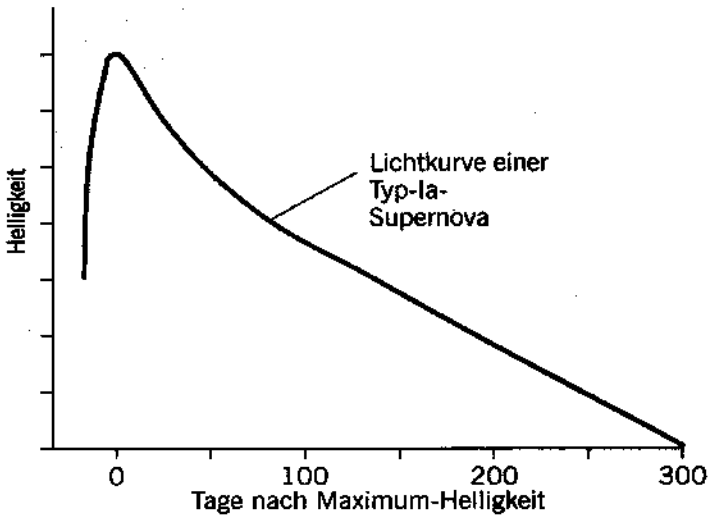


Abb. 13: Helligkeitsänderung der Supernovae des Typs Ia

Bevor die beiden Gruppen dramatische Schlußfolgerungen zogen, überprüften sie andere einfachere Erklärungsmöglichkeiten, beispielsweise die Frage, ob Staub längs des Lichtweges die Strahlung geschwächt haben könnte. Diese und andere Erklärungsmöglichkeiten konnten ausgeschlossen werden.

Als Konsequenz der Beobachtungen bleibt, daß die Struktur des Universums, seine Raum-Zeit, die unerwartet geringe Helligkeit ferner Supernovae bewirkt. Dabei können zwei Eigenschaften von Raum und Zeit wirksam sein:



Erstens könnte der Raum hyperbolisch sein und damit der Krümmungsparameter  $k=-1$  und der Dichteparameter  $\Omega_m < 1$ . Ein Lichtblitz aus der Frühzeit des Universums würde sich auf einer Kugel mit einer größeren Fläche verteilen als im Euklidischen Raum, uns also weniger hell erscheinen.

Zweitens könnte es aber auch sein, daß die Supernovae weiter von uns entfernt sind als es ihre Rotverschiebungen vermuten lassen. Das Licht mußte einen größeren Weg zurücklegen, um uns zu erreichen. Die Expansionsgeschwindigkeit in der Frühzeit des Universums war also kleiner als heute.

Vergleichen wir die Meßdaten mit den Vorhersagen des Friedman-Modells. Abb. 14 zeigt im logarithmischen Maßstab die gemessene Helligkeit jeder Supernova als Funktion ihrer Rotverschiebung.

Die drei ausgezogenen Linien entsprechen folgenden Varianten des Modells:

- Die unterste Linie ist die Vorhersage eines Friedman-Universums mit den Parametern  $\Omega_m = 1$  und  $\Omega_\lambda = \Omega_k = 0$  ( $H_0 = 50 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ ). Die Meßwerte weichen deutlich von dieser Modellvariante ab, die unter Ein-schluß der Inflation von der Mehrzahl der Kosmologen in den zurück-liegenden 20 Jahren favorisiert wurde.
- Die mittlere Linie ist die Vorhersage eines Friedman-Universums mit den Parametern  $\Omega_m = 0,3$ ,  $\Omega_\lambda = 0$  und  $\Omega_k = 2/3$  ( $H_0 = 65 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ ). Selbst wenn man annimmt, daß das Universum nahezu materiefrei ( $\Omega_m = 0$ ) ist, zeigt sich eine kaum bessere Übereinstimmung mit den Meßdaten.
- Die obere Linie ist die Vorhersage eines Friedman-Universums, das sich bei einigen Theoretikern wachsender Beliebtheit erfreut, mit den Para-metern  $\Omega_m = 0,3$ ,  $\Omega_\lambda = 0,7$  und  $\Omega_k = 0$  ( $H_0 = 65 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ ).

Die beste Übereinstimmung mit den Meßdaten zeigt die letzte Modell-variante. Sie erlaubt zwar, an der Inflationshypothese festzuhalten, läßt aber die Frage offen nach der Bedeutung von  $\Omega_\lambda = 0,7$ , d. h. einer von Null ver-schiedenen Einsteinschen kosmologischen Konstanten.

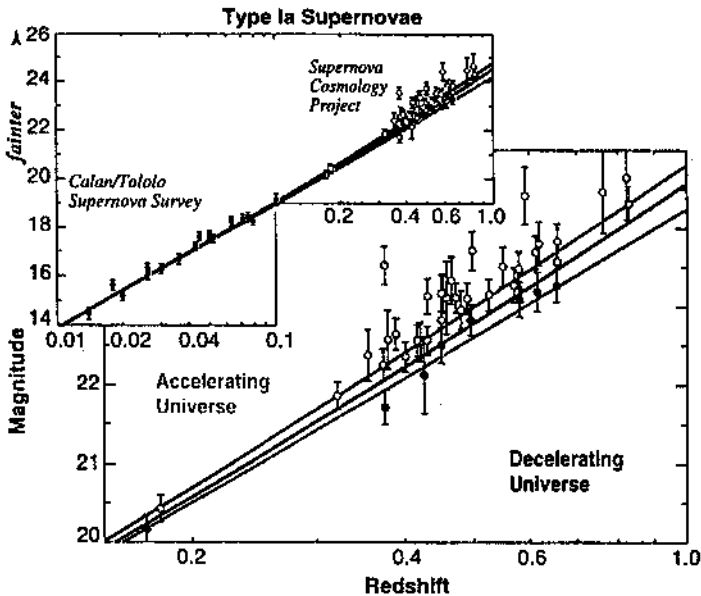


Abb. 14: Die Helligkeit von Typ Ia-Supernovae als Funktion der Rotverschiebung

Im Universum müßte eine Energie wirken, die nicht an Massen gebunden ist und die Expansion des Universums im Laufe der Zeit beschleunigt, also eine das gesamte Universum erfüllende, zeitlich unveränderliche Vakuumenergie, eine Art Antigravitation.

Die Frage nach dieser Vakuumenergie geht an die Teilchenphysiker. Bisherige Berechnungen der Vakuumenergie mittels der Quantenfeldtheorie ergaben einen Wert, der 120 Größenordnungen über dem Wert liegt, den man bei  $\Omega_\Lambda = 0,7$  erwarten sollte.

In einem bemerkenswerten Denkansatz betrachten einige Theoretiker eine zeitlich veränderliche Form der Vakuumenergie.\* Diese dynamische Form einer inhomogenen Dunkelenergie trägt den bezeichnenden Namen „Quintessence“.

\* Caldwell, R. R.; Dave, R.; Steinhardt, P. J. Phys. Rev. Lett. 80 (1998), S. 1582.

Damit schließt sich ein Kreis über mehr als 2000 Jahre. In der Naturphilosophie des Aristoteles erfüllten den irdischen Raum die vier Grundelemente Erde, Wasser, Luft und Feuer, während den himmlischen Raum ein fünftes Grundelement, der Äther, – die Quintessence erfüllte.

Der Rückgriff auf das Ätherbild zeigt deutlich, daß wir trotz aller Fortschritte im 20. Jahrhundert noch weit von einer Theorie des Universums entfernt sind. Alle Versuche, am Friedman-Modell im flachen Raum festzuhalten, erinnern an die Versuche, das Weltbild des Ptolomäus durch zusätzliche Epizyklen zu retten, um besseren Meß- und Beobachtungsdaten zu genügen. Im ersten Jahrzehnt des 21. Jahrhunderts werden wir eine Flut neuer Daten erleben. Die in den neunziger Jahren bereits zum Einsatz gekommenen und die noch in der Entwicklung befindlichen neuen Teleskope werden die Fehlergrenzen der Parameter des Modelluniversums deutlich reduzieren. Ob z. B. der Parameter  $\Omega_0$  von Null verschieden ist, läßt sich erst sicherstellen, wenn eine größere Zahl von Ia-Suopernovae mit Rotverschiebungen oberhalb  $z = 0,9$  vermessen wird.

Eine weitere Frage, auf die wir bisher keine schlüssige Antwort besitzen, ist die nach den winzigen Irregularitäten aus der Frühzeit des Universums, die zu Galaxien, Haufen und Superhaufen führten. 1992 wurden mit Hilfe der COBE-Satelliten sehr kleine winkelabhängige Temperaturanomalien entdeckt. Die bisherigen Messungen reichten jedoch nicht aus, um quantitative Aussagen über die Abweichungen von der Isotropie des Raumes machen zu können. Hinzu kommt eine empfindliche Abhängigkeit der Entwicklung der Strukturen im Universum von der Größe des Dichteparameters. Je größer  $\rho_0$  ist um so schneller wachsen die anfangs vorhandenen Inhomogenitäten.

*Ob eine der Varianten des Modelluniversums die neue Datenflut überleben wird, ist offen. Vielleicht stehen wir vor einem Umbruch der Physik vergleichbar dem am Beginn des 20. Jahrhunderts.*